



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Υπολογισμός υδροδυναμικών παραγώγων  
και προσομοίωση της ελκτικότητας πλοίου**

**Calculation of Hydrodynamic Derivatives  
and Ship's Manoeuvring Simulation**

Συγγραφέας:

**ΙΩΑΝΝΑ Κ. ΙΩΑΝΝΟΥ**

**A.M.: 18393066**

Επιβλέπων Καθηγητής:

Ιωάννης Τίγκας Επίκουρος Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

Αιγάλεω, 2023





**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Διπλωματική εργασία**

**Τίτλος**

«Υπολογισμός υδροδυναμικών παραγώγων και προσομοίωση της ελκτικότητας πλοίου»

**Συγγραφέας**

Ιωάννου Ιωάννα, Α.Μ.: 18393066

**Επιβλέπων**

Ιωάννης Τίγκας Επίκουρος Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

**Ημερομηνία εξέτασης**

21/11/2023

**Εξεταστική Επιτροπή**

Ιωάννης Τίγκας  
Επίκουρος Καθηγητής  
ΠΑ.Δ.Α.

Θωμάς Μαζαράκος  
Επίκουρος Καθηγητής  
ΠΑ.Δ.Α.

Σοφία Πέππα  
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια  
ΠΑ.Δ.Α.

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Ιωάννου Ιωάννα του Κωνσταντίνου, με αριθμό μητρώου 18393066 φοιτήτρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Ναυπηγών Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».

Η Δηλούσα



Ιωάννου Ιωάννα

## Ευχαριστίες

Με την περάτωση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, επιθυμώ να ευχαριστήσω τον Καθηγητή μου Ιωάννη Τίγκα, για την πολύτιμη βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια μελέτης και συγγραφής της εργασίας. Η επίβλεψή του ήταν καταλυτική, επιλύοντας απορίες και καθοδηγώντας με στην εκπόνηση της παρούσας εργασίας, η οποία σηματοδοτεί την ολοκλήρωση του πρώτου κύκλου σπουδών μου. Σε γενικότερο, όμως, επίπεδο, τον ευχαριστώ για τη στάση του απέναντι στους φοιτητές, και παραπάνω σε εμένα, που σε κάθε περίπτωση ακροάζεται τις ανησυχίες και τα άγχη των μαθητών του, κάνοντάς τον πάνω από όλα άνθρωπο και έπειτα καθηγητή.

Επιπλέον, αποτελεί ανάγκη μου να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στο σύνολο του εκπαιδευτικού προσωπικού του ιδρύματος, ενεργού και μη, καθώς όλοι, ανεξαιρέτως, συντέλεσαν στη διαμόρφωση της φοιτητικής μου προσωπικότητας, ώστε να είμαι ικανή και άξια να φέρω εις πέρας τον κύκλο σπουδών της σχολής μας.

Θα αποτελούσε παράληψη η μη αναγνώριση της βοήθειας που έλαβα από το ναυπηγικό γραφείο InterMarinCo O.E., όπου έκανα την πρακτική άσκησή μου. Συγκεκριμένα, ευχαριστώ τον Δημήτριο Χαράλαμπο Παππά, Αναστάσιο Χονδροματίδη, Κωνσταντίνο Σιούτη και Αθηνά Δημητροπούλου για την ενθάρρυνση, στήριξη και συμβουλές τους.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου για την διαμόρφωση των φοιτητικών χρόνων με τρόπο που θα αποτελούν πάντα μια μοναδική και ιδιαίτερος σημαντική εμπειρία και κεφάλαιο της ζωής μου.

Τέλος, το πιο ταπεινό ευχαριστώ ανήκει στην ευρύτερη οικογένειά μου. Η υποστήριξή τους με κάθε εφικτό μέσο ήταν η κινητήριος δύναμη να συνεχίσω να μάχομαι για τους στόχους μου, χωρίς να παρελκύω από τις αρχές και τα πιστεύω μου.

Η διπλωματική μου εργασία αφιερώνεται στον αγαπημένο μου ξάδελφο Σταύρο Ιωάννου για τη μάχη που δίνει.

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία, υπό τον τίτλο «Υπολογισμός υδροδυναμικών παραγώγων και προσομοίωση της ελκτικότητας πλοίου», πραγματεύεται την ελκτικότητα και τα χαρακτηριστικά τα οποία τη διέπουν. Στην έκταση της εργασίας συναντάται μια χρονική καταγραφή ορισμένων μελετών, οι οποίες αφορούν τις κινήσεις του πλοίου και την παρακολούθηση της σταδιακής υιοθέτησης, σχετικών με την ελκτικότητα, κανονισμών. Ακολούθως, το πρώτο μέρος αφορά το αμιγώς θεωρητικό υπόβαθρο του αντικειμένου πραγμάτευσης, στα πλαίσια της γραμμικότητας και μη. Γίνεται εκτενής αναφορά στις εξισώσεις κίνησης των πλοίων, στις δυνάμεις οι οποίες επιδρούν σε αυτό επηρεάζοντας την πορεία και τις ελκτικές του ικανότητες, καθώς και τρόποι επίλυσής τους. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι μέθοδοι υπολογισμού των υδροδυναμικών παραγώγων, αναλύονται οι δοκιμές πλήρους κλίμακας, οι ελιγμοί και σχετικά χαρακτηριστικά. Έπειτα, γίνεται υπολογιστική μοντελοποίηση μέσω κώδικα *Matlab* για την προσομοίωση της ελκτικότητας κατά τον κύκλο στροφής και του οφιοειδούς ελιγμού υπαρκτού πλοίου. Η εργασία ολοκληρώνεται με την αποτύπωση των αποτελεσμάτων και τις προτάσεις για περαιτέρω ενασχόληση με το αντικείμενο μελέτης.

## Abstract

This thesis, held under the title “Calculation of Hydrodynamic Derivatives and Ship’s Manoeuvring Simulation”, deals with manoeuvring performance and the aspects that define it. Along the project, one can trace back to papers which have been published regarding the equations of motion and the evolution of the regulations adopted. Subsequently, the first part of the project concerns the theoretical background both in linear and non terms. Extended references of equations of motions, forces induced affecting manoeuvrability and calculation methods are made. Next, the presentation of the calculating methods of the hydrodynamic derivatives takes place, as well as with the full-scale trials, maneuvers and related subjects. Afterwards, a mathematical model is set up in Matlab with a view to simulating an existing ship’s manoeuvring performance via turning circle and zig zag manoeuvre. At the very end, conclusions and future suggestions will be presented.

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	4
Περίληψη.....	5
Abstract .....	5
Κεφάλαιο 1 .....	8
1. Εισαγωγή .....	8
Κεφάλαιο 2 .....	10
2. Ιστορική αναδρομή.....	10
Κεφάλαιο 3 .....	24
3. Σκοποί.....	24
Κεφάλαιο 4 .....	25
4. Θεωρητικό Υπόβαθρο .....	25
4.1 Εξισώσεις κίνησης.....	25
4.1.1 Σωματοπαγές σύστημα αξόνων.....	25
4.1.2 Κινήσεις πλοίου .....	25
4.2 Γραμμικοποιημένη ανάπτυξη δυνάμεων.....	30
4.2.1 Ανάπτυγμα <i>Taylor</i> .....	30
4.2.2 Θεωρήσεις γραμμικότητας και υδροδυναμικοί παράγωγοι ελικτικότητας..	32
4.2.3 Αδιαστατοποιημένες εκφράσεις μεγεθών .....	34
4.3 Προκύπτουσες δυνάμεις και ευστάθεια κινήσεων.....	35
4.4 Δυνατότητα διατήρησης πορείας και ελιγμοί πλοίου.....	38
4.4.1 Εξισώσεις κίνησης.....	38
4.4.2 Παράμετροι ευστάθειας.....	40
4.4.3 Εξίσωση <i>Nomoto</i> .....	52
4.4.4 Δείκτες πηδαλιουχίας και ικανότητας στροφής .....	59
4.5 Μη γραμμική θεωρία ελικτικότητας .....	60
4.5.1 Ανάπτυγμα <i>Taylor</i> .....	60
4.5.2 Δομοστοιχειωτό μοντέλο .....	62
4.6 Θεωρητική προσέγγιση υδροδυναμικών παραγώγων .....	65
4.7 Περιβαντολλογικές διεγέρσεις.....	72
Κεφάλαιο 5 .....	80
5. Εφαρμογές πηδαλιουχίας .....	80
5.1 Πειραματική προσέγγιση υδροδυναμικών παραγώγων .....	80
5.2 Εμπειρικές σχέσεις Clarke και Inoue .....	87

5.3 Δοκιμές Πηδαλιουχίας Πλήρους Κλίμακας.....	89
5.3.1 Κύκλος στροφής ( <i>Turning Circle</i> ) .....	89
5.3.1.A Οριζόντιο επίπεδο .....	91
5.3.1.B Κλίση ως προς το διαμήκη άξονα.....	98
5.3.1.Γ Κλίση ως προς τον εγκάρσιο άξονα .....	99
5.3.2 Σπειροειδής ελιγμός ( <i>Spiral maneuver</i> ).....	99
5.3.3 Οφιοειδής ελιγμός ( <i>Zig-zag maneuver</i> ) .....	101
5.3.4 Δοκιμή επαναφοράς ( <i>Pullout Test</i> ) .....	103
5.3.5 Ελιγμός σταματήματος ( <i>Stopping Test</i> ).....	104
5.4 Βασικοί ελιγμοί πλοίου.....	106
5.5 Περιορισμένα ύδατα.....	112
5.6 Σχεδιαστικοί Παράμετροι .....	117
6. Μελέτη περίπτωσης.....	124
7. Επίλυση μη γραμμικού μοντέλου σε προγραμματιστικό περιβάλλον .....	127
8. Αποτελέσματα.....	133
9. Συμπεράσματα.....	155
10. Προτάσεις για το μέλλον.....	157
Βιβλιογραφία .....	158



## Κεφάλαιο 1

### 1. Εισαγωγή

Το περιβάλλον του πλοίου, το θαλάσσιο περιβάλλον, χαρακτηρίζεται από την τυχαιότητα που διέπει τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα αλλά και από τα μεγέθη τους. Επομένως, το πλοίο, το οποίο καλείται να ακολουθήσει μια συγκεκριμένη προδιαγεγραμμένη πορεία ώστε να βρει τον προορισμό του, να επαληθεύσει το λόγο ύπαρξής του και να φέρει εις πέρας την αποστολή του, βάλλεται από κύματα, ανέμους και ρεύματα. Επιπρόσθετα, τα πλοία έρχονται αντιμέτωπα με φυσικούς περιορισμούς (περιορισμένα νερά, κανάλια, διώρυγες), προσεγγίσεις σε διαφορετικά λιμάνια και την αλληλεπίδρασή τους με άλλα πλοία.

Η ελικτικότητα (*maneuverability*) ενός σκάφους, προσδιορίζει την ευχέρειά του να αλλάξει την κατεύθυνσή του, να μεταβάλλει την ταχύτητά του και να στρίβει. Η ικανότητα, ωστόσο, της διατήρησης των παραπάνω ή της διόρθωσης αυτών σε περίπτωση εκτροπής από τα επιθυμητά όρια ονομάζεται ελεγχσιμότητα (*controllability*). Τόσο η ελικτικότητα όσο και η ελεγχσιμότητα εξαρτώνται από τον σχεδιασμό της γάστρας, τη διάταξη και τα χαρακτηριστικά του πηδαλίου του, την εκάστοτε κατάσταση λειτουργίας του πλοίου, τις καιρικές συνθήκες, αλλά και από συστήματα ελέγχου που διαθέτει το πλοίο.

Βέβαια είναι μείζονος σημασίας να υπογραμμιστεί το πλαίσιο στο οποίο αναφέρεται κάθε όρος. Η ελικτικότητα και το σύστημα πηδαλιουχίας, ως άμεσα σχετιζόμενο, επικεντρώνονται στις διεγέρσεις προκαλούμενες από την πρόσπτωση νερού στην επιφάνεια του πηδαλίου. Αντίθετα, ο χαρακτηρισμός ενός πλοίου ως αξιόπλοο και η γενικότερη συμπεριφορά του στη θάλασσα σχετίζεται με τις δυνάμεις του ρευστού - θάλασσα- και επιπλέον από τις επιδράσεις των δυνάμεων λόγω χρήσης συστημάτων ελέγχου. Φυσικά, η ελεγχσιμότητα περιλαμβάνει και τις επιδράσεις που δέχεται το πλοίο λόγω των συστημάτων ελέγχου κινήσεων.

Η ασφάλεια της πλεύσης, η βέλτιστη συμπεριφορά χειρισμών και η αποφυγή ατυχημάτων είναι άμεσα συνυφασμένη με την ελικτικότητα και την ελεγχσιμότητα. Το πλοίο είναι αναγκαίο να υπακούει στις επιταγές του καπετάνιου στην προσπάθειά του να ελέγξει τις αποκρίσεις του πλοίου ώστε να μην διακυβευτεί και κινδυνεύσει καμία ζωή, η ακεραιότητα του πλοίου και έπειτα του εμπορεύματος, ταυτόχρονα με τη μη παρέκκλιση της πορείας του.

Για τους παραπάνω λόγους, η γάστρα του πλοίου πρέπει να είναι κατάλληλης μορφής ώστε τα χαρακτηριστικά της να ταιριάζουν με την αποστολή του πλοίου και να προσδίδουν επαρκή επίπεδα ελεγχσιμότητας και ελικτικότητας. Παρόλη τη σωστά και εις βάθος μελετημένη σχεδίαση της γάστρας που απαιτείται, τα συστήματα ελέγχου των

κινήσεων του πλοίου και η ορθή λειτουργία τους αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι για ένα ολοκληρωμένο ναυπήγημα ικανό να ελιχθεί και να ελεγχθεί.

Η μελέτη των ελικτικών ικανοτήτων υπάγεται στη μελέτη και εκτίμηση των υδροδυναμικών δυνάμεων που δημιουργούνται και επιδρούν στο πλοίο. Ημ εμπειρικές σχέσεις, υπολογιστικές μοντελοποιήσεις και πειραματικά μοντέλα επιστρατεύονται για το σκοπό αυτό, όπως και θα αναλυθεί.

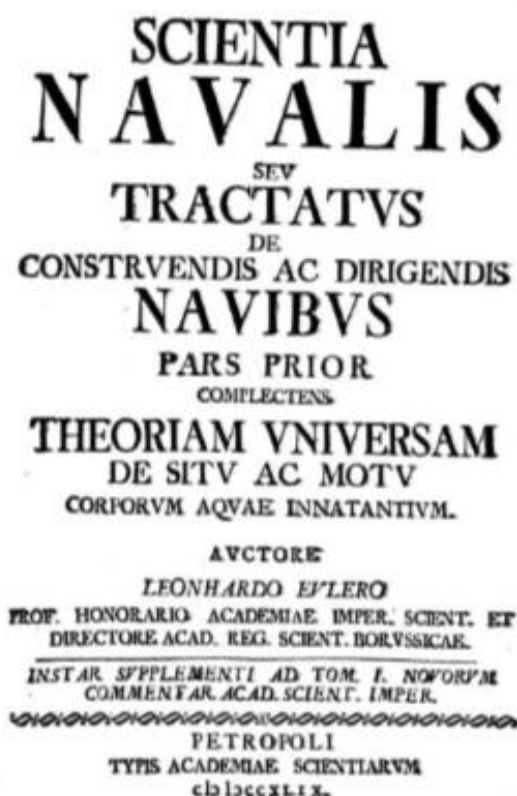
*«Ένα πλοίο που ταξιδεύει είναι στρατός σε μάχη. Η καταιγίδα κρύβεται, αλλά δεν χάνεται. Όλη η θάλασσα είναι μια ενέδρα.»* - Βίκτωρ Ουγκώ, Γάλλος συγγραφέας (1802-1885)

## Κεφάλαιο 2

### 2. Ιστορική αναδρομή

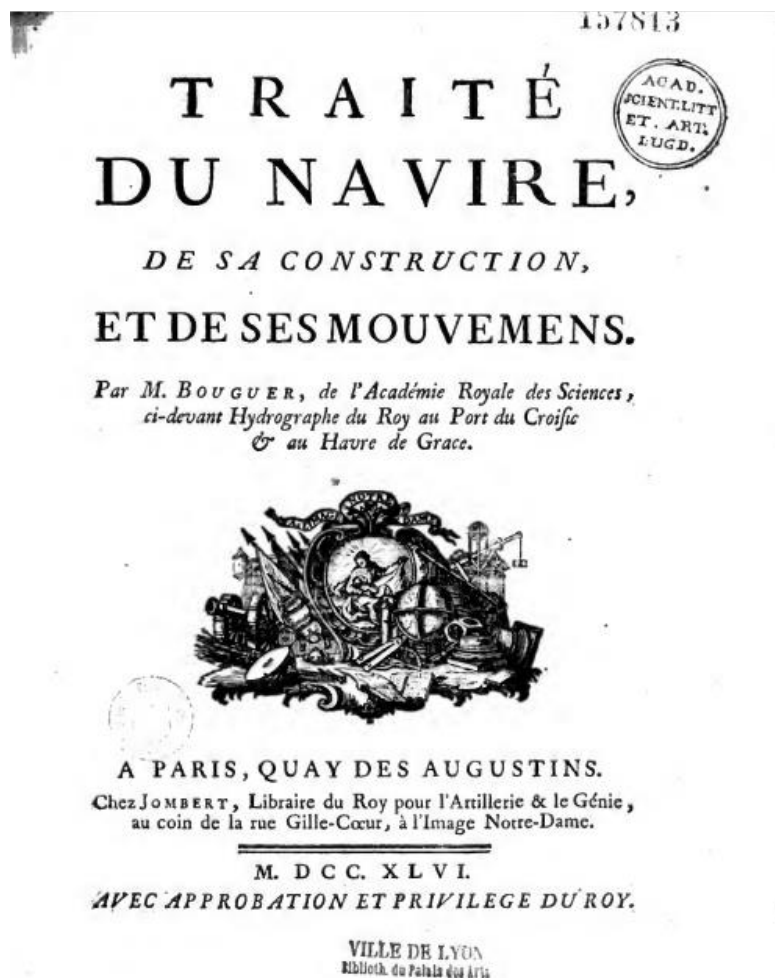
Η ελκτική ικανότητα καθορίζει τις κινήσεις ενός πλοίου στο οριζόντιο επίπεδο. Επομένως, κρίνεται εύλογη μια σύντομη αναδρομή στις μελέτες των κινήσεων των πλοίων, οι οποίες ιχνηλατούνται σε βάθος χρόνου και διαμόρφωσαν τη σύγχρονη έρευνα. Έπειτα, ακολουθεί η ανασκόπηση των καταγεγραμμένων μελετών σχετικά με τη μοντελοποίηση των ελιγμών και τέλος θα παρατεθεί η εξέλιξη των διεθνών προτύπων ελκτικής συμπεριφοράς.

Σχεδόν στα μέσα του δέκατου όγδοου (18<sup>ου</sup>) αιώνα, συγκεκριμένα το 1749, ο *Euler* στο έργο του “*Scientia Navalis*” συμπεριέλαβε την προηγούμενα εκπονημένη μελέτη του για τις κινήσεις του πλοίου σε ήρεμο νερό. Το ίδιο αντικείμενο αφορούσε το βιβλίο του *Bouguer*, 1749, “*Traité du navire, de sa construction, et de ses mouvemens*”, «Πραγματεία για το πλοίο, την κατασκευή και τις κινήσεις του». Λίγο αργότερα, το 1757, ο *Bernoulli*, ο οποίος ήταν ο πρώτος που ασχολήθηκε με τις κινήσεις του πλοίου σε κύματα, βραβεύτηκε από τη Γαλλική Ακαδημία Επιστημών (*Académie des Sciences*) για την μελέτη του στη μείωση των κινήσεων διατοιχισμού (*rolling*) και προνευτασμού (*pitching*).



Εικόνα 1: Εξώφυλλο *Scientia Navalis*, L. Euler [1]

Το 1861 ο *W. Froude* μελέτησε την κίνηση του πλοίου, του οποίου η πλαϊνή πλευρά συναντά τα κύματα (*broadside sailing*). Ο υιός του, *R. E. Froude*, το 1896 μελέτησε την κίνηση του πλοίου σε θάλασσα με ομαλούς και μη κυματισμούς. Αργότερα, το διάστημα 1896-1898 ο *A. Kriloff* εισήγαγε τους έξι βαθμούς ελευθερίας κινήσεων του πλοίου και υπολόγισε τις δυνάμεις των κυμάτων και της επαναφοράς (*wave exciting forces* και *restoring forces*), υπό τους τίτλους “*A New Theory of the Pitching Motion of Ships on Waves and the Stresses Produced by this Motion*”, “*A General Theory of the Oscillations of a Ship on Waves*”. Οι *Barber* και *Ursell* ανέφεραν την ανάλυση των κυμάτων μέσω φασμάτων το 1947. Ενώ το 1953 η φασματική ανάλυση έγινε ευρέως γνωστή στον κλάδο από τους *St. Denis* και *Pierson*, οι οποίοι εστίασαν στη στατιστική περιγραφή των θαλάσσιων κυματισμών και των κινήσεων των πλοίων.



Εικόνα 2: Εξώφυλλο *Traité du navire, de sa construction, et de ses mouvements*, Bouguer [2]

Γενικότερα, η απόκλιση μεταξύ θεωρητικών υπολογισμών και μετρήσεων, κατέδειξε την ανάγκη της κατανόησης και μελέτης ακόμα και των απλών περιπτώσεων. Με αυτό γνώμονα, έγιναν πολλά πειράματα ταλαντώσεων για μετρήσεις σε ήρεμο νερό και για τις δυνάμεις λόγω κυματισμών σε μη ελεύθερα μοντέλα. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων δημιούργησαν πρόσφορο έδαφος για την ανάπτυξη καινούργιων

μαθηματικών μοντέλων αλλά και τη διόρθωση και βελτίωση των ήδη υπαρχόντων. Οι κινήσεις του πλοίου σε κύματα και οι υδροδυναμικές δυνάμεις μελετήθηκαν το 1970 από τον *J. H. Vugts* στην Ολλανδία. Εστιάζοντας σε μελέτες σχετικά με τους ελιγμούς πλοίων, το 1971 ο *Paffett* στοχάζεται σχετικά με την ασφάλεια κατά τους ελιγμούς ενώ γίνεται και συσχέτιση με τον ανθρώπινο και τεχνολογικό παράγοντα. Ένα χρόνο αργότερα (1972), ο *Kenan* μελετά την ελκτικότητα δυο πλοίων συναρτήσει της επίδρασης πηδαλίου και έλικας. Μέθοδοι ελιγμού σταματήματος με χρήση πηδαλίου και έλικας μελετήθηκαν από τους *Jourdain* (1965), *Grossmann* (1971) και *Clarke* (1972). Την ίδια χρονιά (1972) ο *Norrby* εκπόνησε μελέτη για τον ελιγμό του απότομου σταματήματος σε μονέλικά πλοία. Ακόμα, διερευνήθηκε η χρήση πτερυγίων στην περιοχή της πλώρης για την υποβοήθηση του σταματήματος από τους *Jaeger* (1963), *Jaeger* και *Jourdain* (1968). Οι *Clarke* και *Wellman* το 1971 έκαναν λόγο για πτερύγια πρύμνηθεν του μέσου του πλοίου. Ο *M. A. Abkowitz* δημοσίευσε το 1964 τις σημειώσεις του περί υδροδυναμικής, πηδαλιουχίας και ελκτικότητας.

## THE HYDRODYNAMIC FORCES AND SHIP MOTIONS IN WAVES

(DE HYDRODYNAMISCHE KRACHTEN EN  
SCHEEPSBEWEGINGEN IN GOLVEN)

### PROEFSCHRIFT

TER VERKRIJGING VAN DE GRAAD VAN DOCTOR IN DE  
TECHNISCHE WETENSCHAPPEN AAN DE TECHNISCHE  
HOGESCHOOL DELFT, OP GEZAG VAN DE RECTOR  
MAGNIFICUS IR. H. R. VAN NAUTA LEMKE, HOOG-  
LEREER IN DE AFDELING DER ELEKTROTECHNIEK,  
VOOR EEN COMMISSIE UIT DE SENAAT TE VERDEDIGEN  
OP WOENSDAG 14 OKTOBER 1970 TE 16.00 UUR

DOOR

JAN HENDRIK VUGTS

scheepsbouwkundig ingenieur

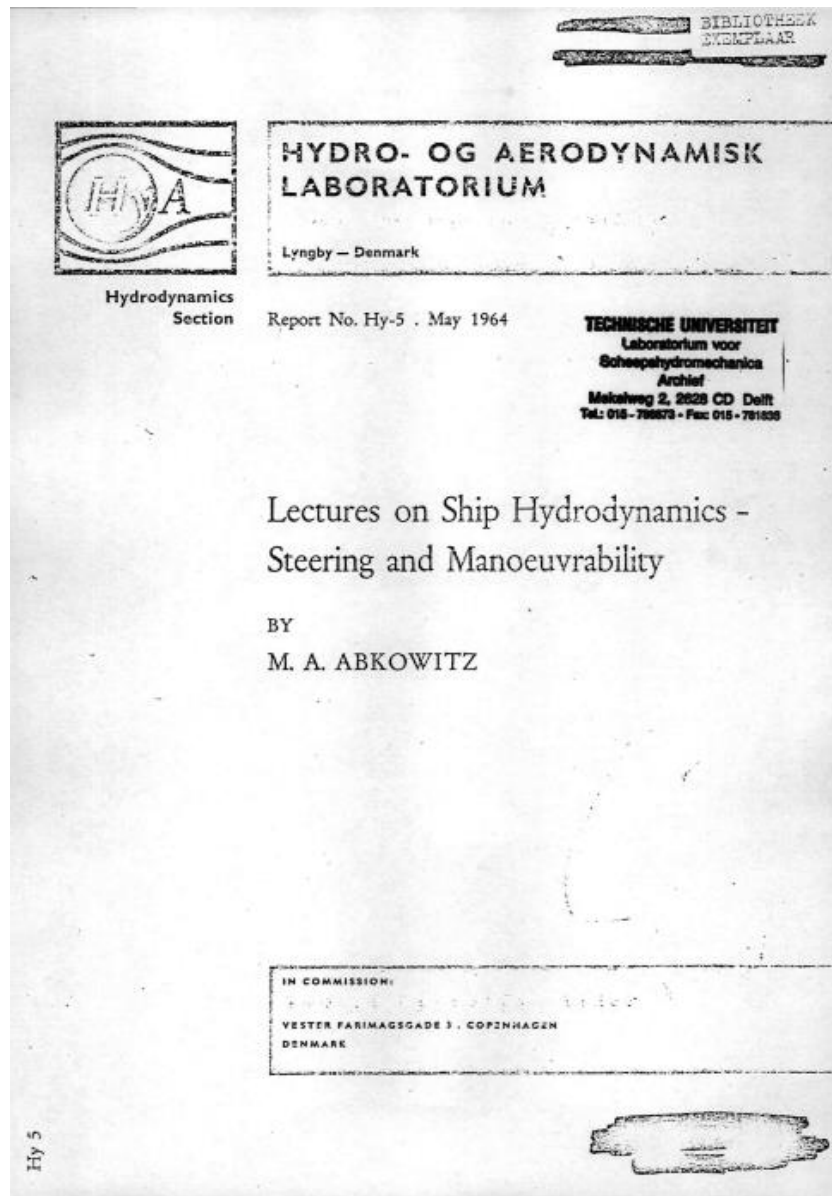
geboren te Haarlem

UITGEVERIJ WALTMAN - DELFT

Εικόνα 3: Εξώφυλλο *The Hydrodynamic Forces and Ship Motions in Waves*, *J. H. Vugts* [3]

Το διάστημα 1976-1980 οι Ιάπωνες ερευνητές της *Mathematical Modeling Group (MMG)* σύστησαν ένα μοντέλο ελκτικής συμπεριφοράς, όπου υπολογίζει ξεχωριστά τους υδροδυναμικούς παράγοντες χωρίς να παραλείπει τη μεταξύ τους εξάρτηση. Το 1981 ο *Inoue* χρησιμοποίησε τα αποτελέσματα πειραμάτων με μοντέλα προσαρτημένα σε περιστρεφόμενο βραχίονα και παρουσίασε ημειμπερικούς τύπους για τον υπολογισμό υδροδυναμικών παραγώγων ως προς την ταχύτητα. Παράλληλα με τον *Inoue*, ο *Clarke* εξάγει σχέσεις για τις υδροδυναμικές παραγώγους ταχύτητας και επιτάχυνσης μέσω πειραμάτων, τις οποίες ελέγχει με τις αντίστοιχες εξαχθείσες από δοκιμές πλήρους κλίμακας του *Nomoto*. Ακόμα, μέσω των παραπάνω τύπων προσπαθεί να συσχετίζει τη γεωμετρία της γάστρας με τα ως τότε πρότυπα ελκτικότητας, παρόλο που δεν ήταν καθολικά αποδεκτά. Εκφράζει τις υδροδυναμικές παραγώγους του πηδαλίου συναρτήσει της επιφάνειας πηδαλίου. Επισημαίνεται πως ο *Clarke* χρησιμοποίησε γραμμικές εξισώσεις κίνησης για τον περιορισμό των συντελεστών στις εξισώσεις, καθιστώντας τις εφαρμόσιμες σε ομαλούς ελιγμούς και μικρές γωνίες εκτροπής πηδαλίου. Ακολούθως, ο *Mikelis*, το 1985, σύστησε ένα μαθηματικό μοντέλο για την εκτίμηση των ελκτικών ικανοτήτων στα αρχικά στάδια της σχεδίασης, εστιάζοντας στις κινήσεις *surge*, *sway*, *yaw* και *roll*. Το μοντέλο λαμβάνει ως δεδομένα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της γάστρας, της έλικας και του πηδαλίου. Το 1990 ο Σπύρου εκπονεί μελέτη για τις ελκτικές ικανότητες πλοίου, κομμάτι της οποίας αφορά τις επιπτώσεις της διαγωγής στην ελκτικότητα. Αργότερα το 1994 ο *Yoshimura* και ο *Yohei* ασχολήθηκαν με τον ελιγμό σταματήματος. Ειδικότερα, δημοσίευσαν μαθηματικά μοντέλα για εκτίμηση του χρόνου και της απόστασης σταματήματος, τα οποία και επαλήθευσε με υπάρχουσες μετρήσεις πλήρους κλίμακας. Ο Σπύρου το 1994 δημοσίευσε μελέτη σχετικά με μια γενική μεθοδολογία για την εκτίμηση των ελκτικών χαρακτηριστικών των πλοίων. Το 1998, ο *Norrbin* δημιούργησε μια σχέση για το μέγιστο μήκος της τροχιάς του ελιγμού σταματήματος, ενώ οι *Sung* και *Rhee*, το 2005, σύστησαν μια νέα μέθοδο για την εκτίμηση του ελιγμού σταματήματος για πετρελαιοκίνητα πλοία με έλικες σταθερού βήματος.

Σημαντικές επιδράσεις στην ελκτικότητα επιφέρει και ο άνεμος με τις δυνάμεις και ροπές που ασκεί στα έξαλα του πλοίου. Ενδεικτικά, ο *Blendermann* μέσα από διαδοχικές του μελέτες την τριετία 1994-1996 παρότρυνε για τη στατιστική ανάλυση του ανέμου. Με αυτήν την τακτική διαμόρφωσε σχέσεις για τους συντελεστές των δυνάμεων λόγω ανέμου όπως επίσης για ροπές *yaw* και *roll* συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης και της προβαλλόμενης επιφάνειας.



Εικόνα 4: Σημειώσεις M. A. Abkowitz, *Lectures on Ship Hydrodynamics- Steering and Manoeuvrability* [4]

Ο Σπύρου το 1995 μελέτησε την ευστάθεια πορείας υπό άνεμο, ενώ το 1997 ο *Shigehiro* και η ομάδα του έκαναν πειράματα με μοντέλα τόσο σε δεξαμενή όσο και σε σήραγγα. Την επόμενη χρονιά (1998) ο *Fujiwara* μεταξύ άλλων χρησιμοποίησαν πειράματα από αεροσήραγγες ώστε να δομήσουν μια καινούργια πρακτική για να υπολογίζονται οι δυνάμεις παραγόμενες από τον άνεμο.

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός – *International Maritime Organization (IMO)* έκδωσε τη Διακήρυξη (*Resolution*) *A.160 (ES.IV)* την 27<sup>η</sup> Νοεμβρίου 1968. Η διακήρυξη υπό τίτλο “*Recommendation on Data Concerning Maneuvring Capabilities and Stopping Distances of Ships*” σύστηνε στις Κυβερνήσεις την ύπαρξη των αναγκαίων πληροφοριών των ελικτικών ικανοτήτων του πλοίου και των αποστάσεων σταματήματος για διάφορα βυθίσματα και ταχύτητα πλεύσης στη γέφυρα.






Εικόνα 5: IMO [5]

Ακολούθησε η Διακήρυξη A.209 (VII) “*Recommendation on Information to be included in the Manoeuvring Booklets*” της 12<sup>η</sup> Οκτωβρίου 1971, η οποία ανακαλούσε την A.160 και στόχευε στην έντονη παρότρυνση για τη θέσπιση συγκεκριμένων περιεχομένων στο εγχειρίδιο ελικτικών ικανοτήτων του πλοίου.

P-1

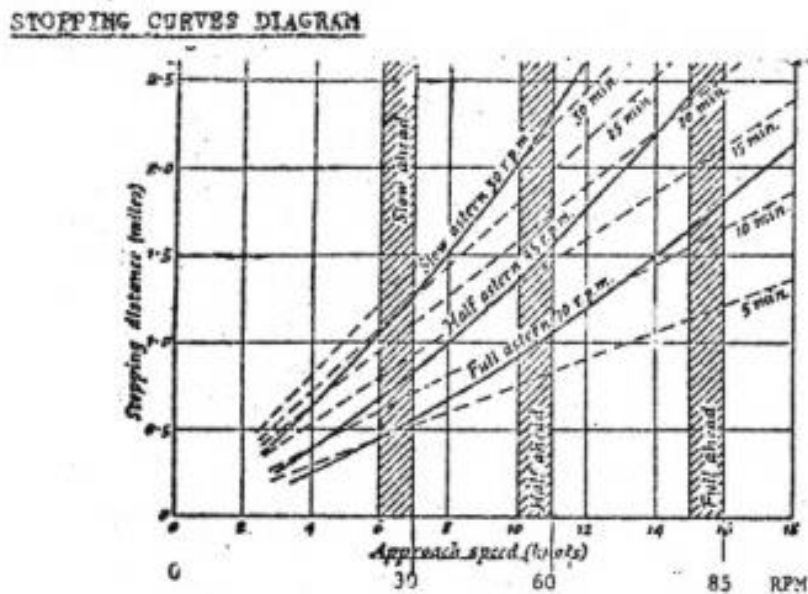
PLAN HISTORY		HAYAMA STAR	
October 4, 2006 Compiled for finished drawing.		H.No. 10432	
<p style="text-align: center;">IMO 9317420</p> <p style="text-align: center;">Manoeuvring Booklet</p> <p style="text-align: center;">FINISHED PLAN</p> <p style="text-align: center;">FILING NO. P-13</p>		SCALE - CLASS NK	
		 OSHIMA SHIPBUILDING CO., LTD. DESIGNING DEPARTMENT	
		DRAWN by S. Miyahara DATE Oct. 4, 2006 CHECKED by O. Sasaki LINE No. PAGE CHIEF of SUBSECTION / S. Qing DWG No. 20066000 CHIEF of SECTION / S. Aoki ASSIST. MANAGER / S. Aoki MANAGER / S. Aoki	
		TOTAL PAGES 27 TOTAL SHEETS 27 (incl. cover)	

This document and/or its contents are the property of Oshima Shipbuilding Co., Ltd. And its reproduction or the use or disclosure of its contents without written permission by Oshima Shipbuilding Co., Ltd. is strictly prohibited.

Εικόνα 6: Εξώφυλλο Manoeuvring Booklet πλοίου μεταφορά χύδην φορτίου Hayama Star [6]



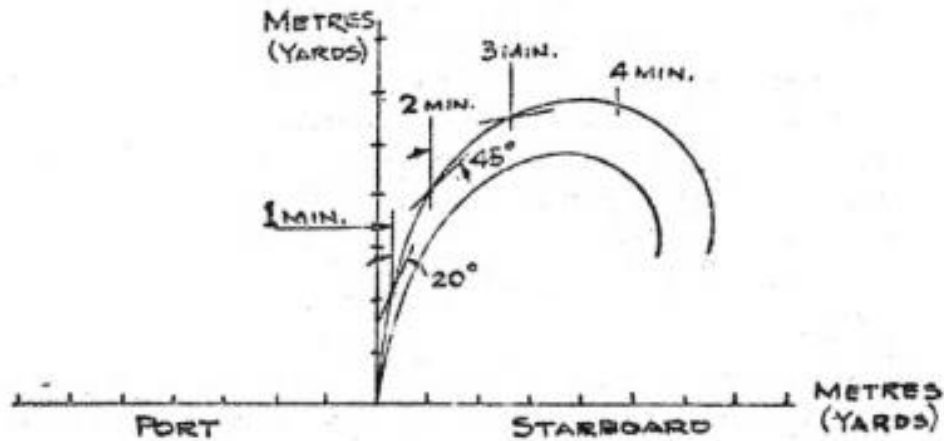
Συγκεκριμένα, το πρώτο μέρος περιλάμβανε πληροφορίες ελικτικότητας και διαγράμματα, κάποια εκ των οποίων αναρτώνται στη γέφυρα.



Εικόνα 7: Ενδεικτικό διάγραμμα καμπυλών αποστάσεων σταματήματος εντός εγχειριδίου, A.209 (VII) 1971 [7]

Οι προαναφερθείσες πληροφορίες αφορούν τις χαμηλότερες σταθερές στροφές της μηχανής για ασφαλή ελεγχόμενη πλεύση σε έμφορτη και ερματισμένη κατάσταση, διαγράμματα αλλαγής κατευθύνσεων, κύκλων στροφής και σχετικών μεγεθών, όπως επίσης τις σημειωμένες αποστάσεις και χρόνους από το σβήσιμο των μηχανών και από την εναλλαγή σε αντίστροφη ανάποδη ώση για κάθε κατάσταση φόρτωσης. Τα παραπάνω αντιστοιχούν σε καθαρή γάστρα υπό καλές καιρικές συνθήκες, σε βαθιά νερά χωρίς ρεύματα.

### TURNING CIRCLE DIAGRAM



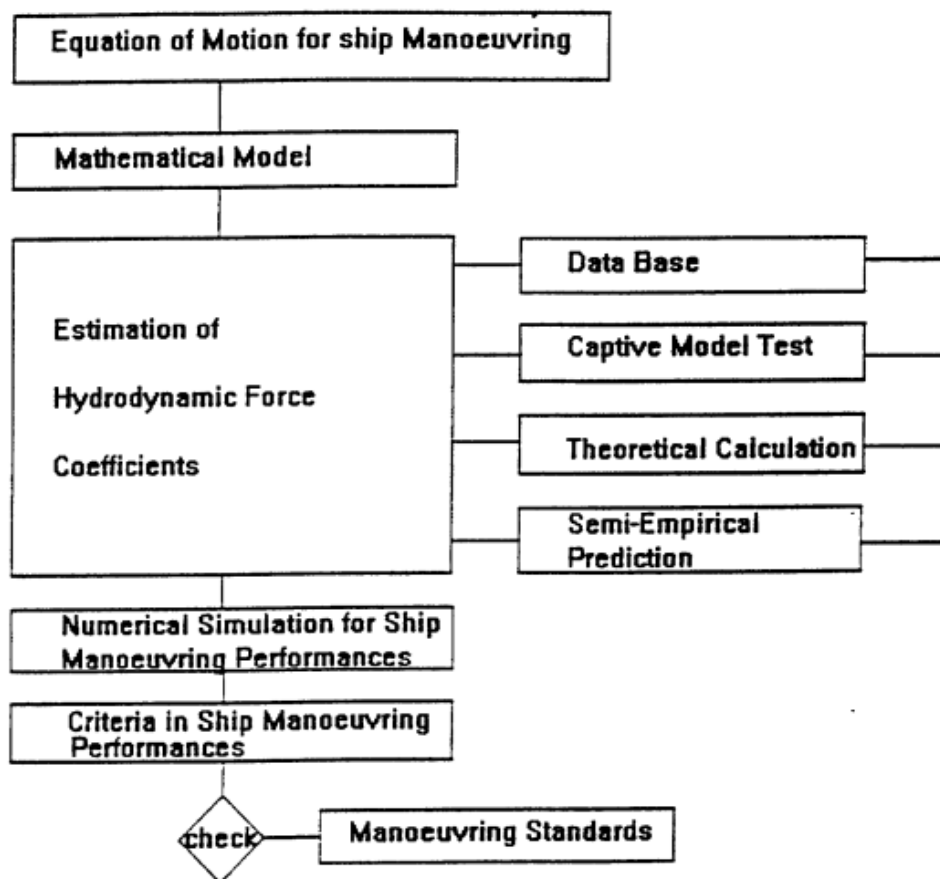
Εικόνα 8: Ενδεικτικό διάγραμμα κύκλου στροφής, A.209 (VII) 1971 [7]

Το δεύτερο μέρος απαρτίζεται από συμπληρωματικές πληροφορίες, οι οποίες αφορούν την ασφαλή πλεύση του πλοίου. Ειδικότερα, περιλαμβάνει μεταξύ άλλων το φαινόμενο καθίζησης (*squat*) και την περιοχή μη ορατότητας στην πλώρη. Έπειτα από ατυχήματα, βυθίσεις πλοίων και τις επακόλουθες συνέπειές τους, έγινε διαχωρισμός των αιτιών πρόκλησης ατυχημάτων. Διαχωρίστηκαν οι παράγοντες που συνεπάγονται περιορισμό των ελκτικών ικανοτήτων (λ.χ. συστήματα πλοίου) από αυτούς οι οποίοι είναι συνυφασμένοι με την ελκτικότητα από τη σχεδίαση του πλοίου. Αργότερα το 1981 συστήθηκαν τα βασικά χαρακτηριστικά ελκτικότητας, δηλαδή η διατήρηση και αλλαγή της πορείας, η στροφή και το σταμάτημα.





*Manoeuvrability*”, όπου απέκτησαν οριστική υπόσταση. Τέλος, οι αντίστοιχες εξηγήσεις των προτύπων δόθηκαν στις 16 Δεκεμβρίου 2002 με την *MSC/Circular.1053* “*Explanatory Notes to the Standards for Ship Manoeuvrability*”.

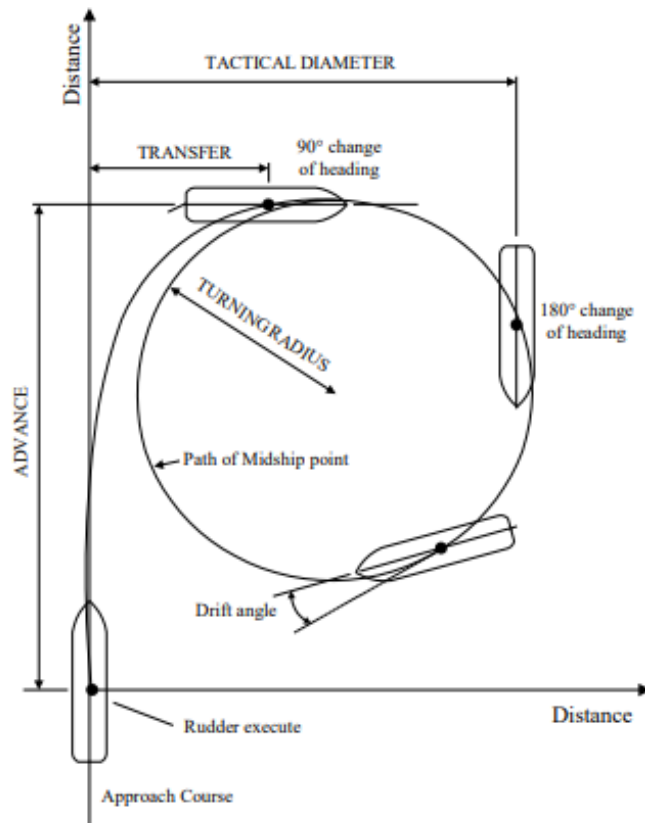


Εικόνα 11: Διάγραμμα ροής για την εκτίμηση της ελκτικότητας σύμωνα με *MSC/Circ.1053* [9]

Εντός αυτού ορίζονται τα χαρακτηριστικά ελκτικότητας ως μετρούμενοι δείκτες της ποιότητας και ικανότητας χειρισμών του πλοίου. Μέσω των προτύπων ελκτικότητας αξιολογούνται η εγγενής δυναμική ευστάθεια, η ικανότητα διατήρησης πορείας, η ικανότητα εναλλαγής πορείας, ο έλεγχος της κίνησης  $yaw$ , η ικανότητα στροφής και η ικανότητα σταματήματος. Η συμμόρφωση με τα πρότυπα γίνεται είτε απευθείας με δοκιμές πλήρους κλίμακας σε έμφορτη κατάσταση, είτε με εκτίμηση τους από υπάρχοντα δεδομένα, πειράματα μοντέλων, αριθμητικές προσομοιώσεις ή συνδυασμός αυτών. Ωστόσο, οποιαδήποτε εκτίμηση της ελκτικότητας πρέπει να επαληθευτεί με δοκιμές πλήρους κλίμακας, όπου σε αυτήν την περίπτωση δεν είναι απαραίτητη η εκτέλεσή τους σε πλήρως έμφορτη κατάσταση. Σε κάθε περίπτωση οι απαιτούμενες δοκιμές είναι:

Πίνακας 1: Απαιτήσεις κριτηρίων ελιγμών IMO

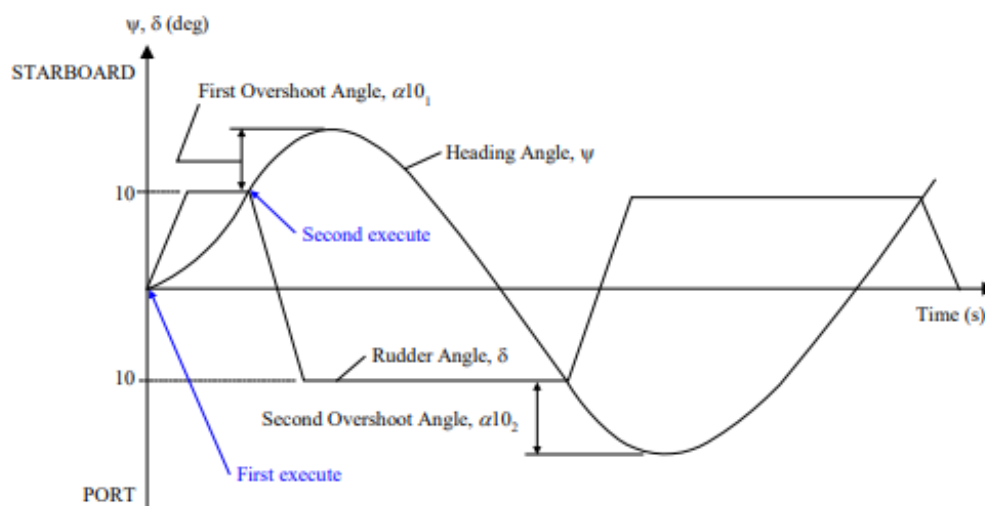
Χαρακτηριστικό Ελικτικότητας	Ελιγμός	Κριτήριο IMO
Ικανότητα Στροφής - Ικανότητα Ομαλής Στροφής	Κύκλος Στροφής	Προχώρηση $\leq 4.5 L$ Τακτική Διάμετρος $\leq 5.0 L$
Ικανότητα Διατήρησης Πορείας - Ικανότητα Εναλλαγής Πορείας - Έλεγχος της Κίνησης Yaw	10/10 Zig-Zag	1 <sup>η</sup> Γωνία Υπέρβασης: $< 10^\circ$ αν $L/U < 10$ s $< 5 + 0.5 L/U^\circ$ αν $10s \leq L/U < 30s$ $< 20^\circ$ αν $L/U \geq 30$ s 2 <sup>η</sup> Γωνία Υπέρβασης: $< 25^\circ$ αν $L/U < 10$ s $< 17.5+0.75 L/U^\circ$ αν $10s \leq L/U < 30s$ $< 40^\circ$ αν $L/U \geq 30$ s
	20/20 Zig-Zag	1 <sup>η</sup> Γωνία Υπέρβασης $\leq 25^\circ$
Ικανότητα Σταματήματος	Σταμάτημα	Track reach $< 15 L$ $< 20 L$ για μεγάλο εκτόπισμα



Εικόνα 12: Μετρούμενα μεγέθη στον Κύκλο Στροφής [10]

Ενώ προτεινόμενες δοκιμές αποτελούν:

- Ευθύς Σπειροειδής ελιγμός (*Direct Spiral Maneuver*)
- Αντίστροφος Σπειροειδής ελιγμός (*Reverse Spiral Maneuver*)
- Δοκιμή επαναφοράς (*Pull out Maneuver*)

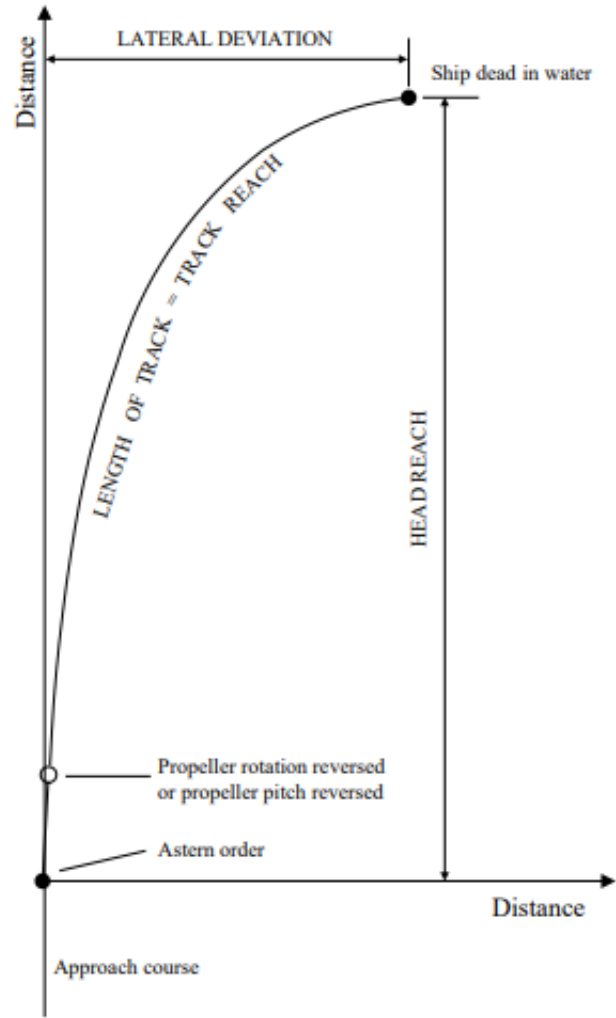


Εικόνα 13: Διάγραμμα ελιγμού 10/10 Zig-Zag [10]

Οι δοκιμές ελικτικότητας εκτελούνται στις ακόλουθες συνθήκες περιβάλλοντος σε ισοβύθιστη κατάσταση πλήρους φόρτωσης (επιτρεπτή απόκλιση βυθίσματος 5%) ή σε κατάσταση ερματισμού. Στην τελευταία συνθήκη πρέπει να υπάρχει η μικρότερη δυνατή διαγωγή και να έχει επιτευχθεί σωστή εμβάπτιση της έλικας. Γενικότερα, προτιμώνται οι καλύτερες δυνατές καιρικές συνθήκες σε προστατευμένες θαλάσσιες περιοχές με ικανοποιητικό βάθος.

Πίνακας 2: Προϋποθέσεις συνθηκών περιβάλλοντος για εκτέλεση δοκιμών

Στοιχείο Περιβάλλοντος	Προϋπόθεση
Βάθος	$> 4 \cdot T$ (βύθισμα)
Άνεμος	$\leq 5$ Beaufort
Κύματα	$\leq 4$ Sea State
Ρεύματα	Χωρίς ή ομοιόμορφα



Εικόνα 14: Μετρούμενα μεγέθη του ελιγμού Σταματήματος [10]



## Κεφάλαιο 3

### 3. Σκοποί

- Διερεύνηση του επιστημονικού αντικειμένου της ελκτικότητας.
- Ιστορική αναδίφηση σχετικά με την ενασχόληση της επιστημονικής κοινότητας με τις κινήσεις του πλοίου.
- Διερεύνηση σχετικά με τη θέσπιση και εξέλιξη των κανονισμών για το αντικείμενο της ελκτικότητας.
- Αναζήτηση πεδίων τα οποία σχετίζονται ή και εξαρτώνται από τις ελκτικές ικανότητες του πλοίου.
- Εξοικείωση και κατανόηση του θεωρητικού υποβάθρου του αντικειμένου, προκειμένου να αποκτηθεί η ικανότητα διαχείρισης και εφαρμογής του.
- Εφαρμογή εμπειρικών τύπων για τον υπολογισμό των υδροδυναμικών παραγώγων υπαρκτού πλοίου.
- Πραγματοποίηση υπολογιστικής μοντελοποίησης σε προγραμματιστικό περιβάλλον.
- Προσοικείωση και χρήση της γλώσσας προγραμματισμού *Matlab* για τη μοντελοποίηση των εξισώσεων κίνησης του πλοίου σε τρεις βαθμούς ελευθερίας.
- Προσομοίωση κύκλου στροφής και οφιοειδούς ελιγμού (ζιγκ ζαγκ) μέσω *Matlab*.
- Εξαγωγή αποτελεσμάτων και κατάληξη σε συμπεράσματα.

## Κεφάλαιο 4

### 4. Θεωρητικό Υπόβαθρο

Στο παρόν κεφάλαιο θα ακολουθήσει η ανάλυση των θεωρητικών χωρίων που εμπίπτουν στο αντικείμενο μελέτης. Οι ακόλουθες ενότητες θα αποτελέσουν βάση για το επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 5), το οποίο θα περικλείει ενότητες εφαρμοσμένης θεωρίας της ελκτικότητας και πηδαλιουχίας.

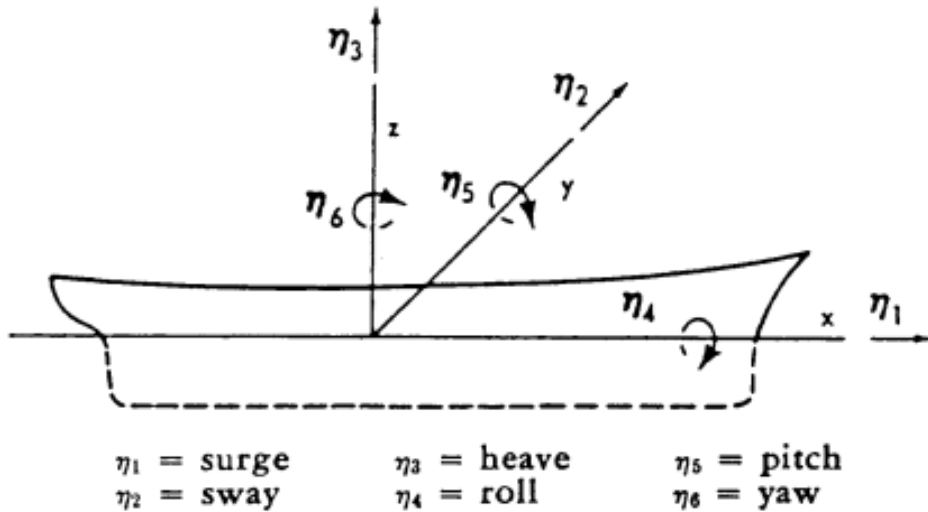
#### 4.1 Εξισώσεις κίνησης

##### 4.1.1 Σωματοπαγές σύστημα αξόνων

Προκειμένου να γίνει η περιγραφή των κινήσεων, προέχει ο ορισμός του συστήματος αξόνων. Η συμμετρία που παρουσιάζουν τα πλοία κατά το διαμήκη άξονα (πλευρές *port* και *starboard* συμμετρικές), κατευθύνει τον ορισμό της αρχής των αξόνων. Η τοποθέτησή της πάνω στον άξονα συμμετρίας και στο κέντρο βάρους συνεπάγεται απλοποίηση των εκφράσεων των δυνάμεων και των κινήσεων του σώματος. Επομένως, ο διαμήκης άξονας  $x'x$  εφάπτεται του άξονα συμμετρίας με θετική κατεύθυνση πλώρα, ο εγκάρσιος άξονας  $y'y$  κάθετος στον άξονα συμμετρίας και θετική κατεύθυνση στην *starboard* πλευρά και ο κάθετος άξονας στην ίσαλο  $z'z$ , κατευθυνόμενος θετικά προς την τρόπιδα. Τα μοναδιαία διανύσματα για κάθε άξονα είναι  $\vec{i}$ ,  $\vec{j}$  και  $\vec{k}$  αντίστοιχα. Το σύστημα που περιεγράφηκε ονομάζεται σωματοπαγές κεντροβαρικό σύστημα αξόνων.

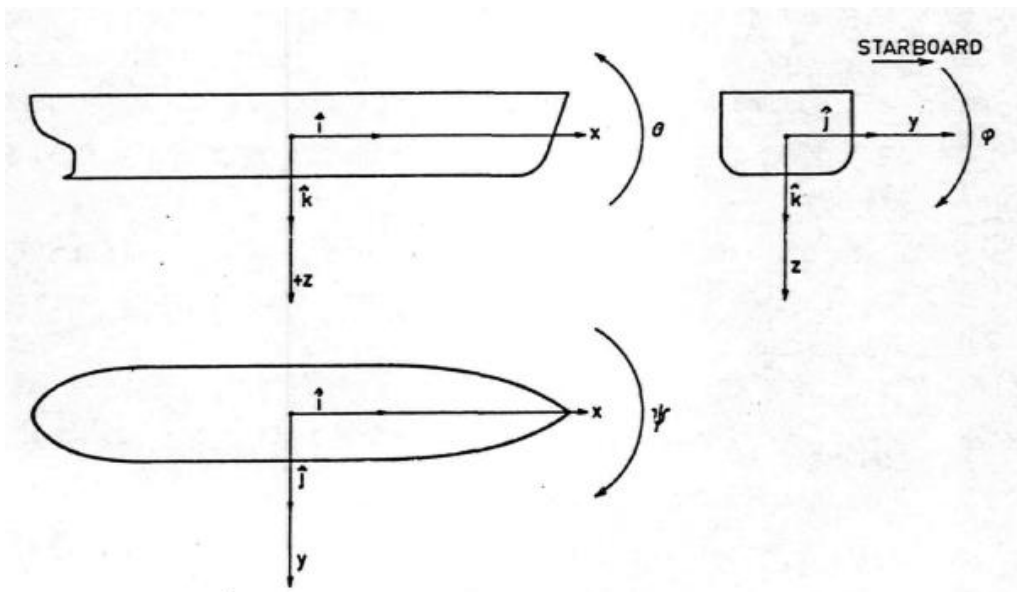
##### 4.1.2 Κινήσεις πλοίου

Οι αποκρίσεις του πλοίου αναλύονται στους έξι βαθμούς ελευθερίας με τρεις γραμμικές ταλαντωτικές συνιστώσες και τρεις περιστροφικές. Οι πρώτες αποτελούνται από τη διαμήκη οριζόντια *surge* ( $n_1$ ), εγκάρσια *sway* ( $n_2$ ) και την κατακόρυφη *heave* ( $n_3$ ) ταλάντωση. Ενώ οι τελευταίες, απαρτίζονται από το διατοιχισμό *roll* ( $n_4$ ), τον προνευτασμό *pitch* ( $n_5$ ) και τη στροφική ταλάντωση *yaw* ( $n_6$ ).



Εικόνα 15: Ανάλυση κινήσεων πλοίου [11]

Στην παρακάτω απεικόνιση των αξόνων, φαίνονται και οι θετικές κατευθύνσεις των περιστροφών με τις αντίστοιχες σχηματιζόμενες γωνίες. Συγκεκριμένα, η γωνία  $\theta$  χαρακτηρίζει την περιστροφική κίνηση *pitch* ( $n_5$ ), η γωνία  $\psi$  την περιστροφική κίνηση *yaw* ( $n_6$ ) και η γωνία  $\phi$  την περιστροφική κίνηση *roll* ( $n_4$ ).



Εικόνα 16: Σωματοπαγές σύστημα αξόνων [4]

Με στόχο την περιγραφή των κινήσεων ενός πλοίου, θεωρείται εύλογο να παρατεθούν ορισμένες βασικές μαθηματικές σχέσεις με φυσική σημασία, ώστε, να γίνει ομαλή η μετάβαση σε αυτές που θα ακολουθήσουν στα επόμενα κεφάλαια.

Ο Θεμελιώδης νόμος της Μηχανικής, ή 2<sup>ος</sup> Νόμος του Νεύτωνα, ορίζει τη σχέση μεταξύ της δύναμης και της επιτάχυνσης, δηλαδή της πρώτης παραγώγου της ταχύτητας ως προς τον χρόνο, με τη δεύτερη να είναι αποτέλεσμα της πρώτης.

$$\vec{F} = \frac{d}{dt}(m\vec{U}) = m \frac{d}{dt}\vec{U} + \vec{U} \frac{d}{dt}m = m \frac{d}{dt}\vec{U} \quad (1)$$

ή

$$\vec{F} = m \dot{\vec{U}} \quad (2)$$

όπου:

$$\vec{U} = \vec{i}u + \vec{j}v + \vec{k}w \quad (3)$$

$\vec{U}$ : το διάνυσμα της ταχύτητας

$u, v, w$ : τα μέτρα των προβολών της ταχύτητας στους αντίστοιχους άξονες

$m$ : η μάζα του πλοίου

$$\dot{\vec{U}} = \frac{d}{dt}\vec{U} \quad (4)$$

Η μάζα του πλοίου θεωρείται αμετάβλητη:

$$\frac{d}{dt}m = 0 \quad (5)$$

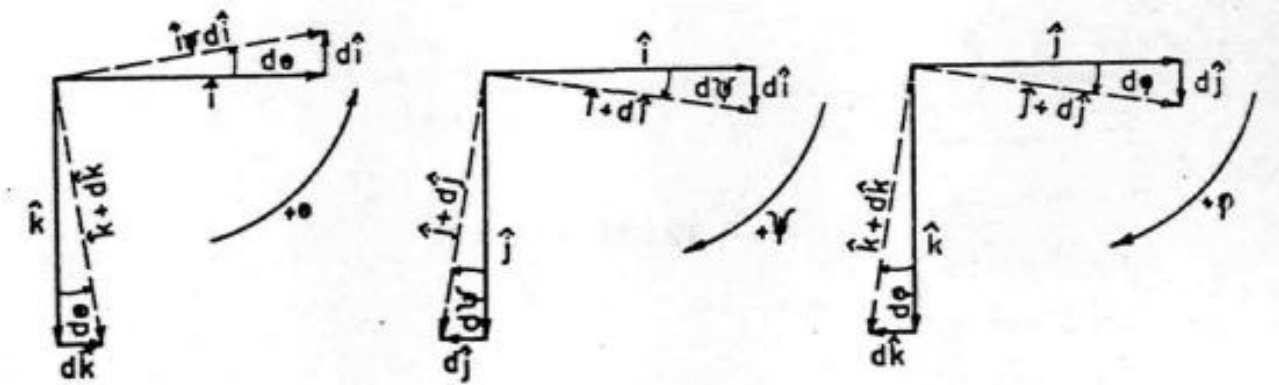
Με αντικατάσταση της σχέσης (3) στη σχέση (1) προκύπτει:

$$\vec{F} = m \frac{d}{dt}(\vec{i}u + \vec{j}v + \vec{k}w) = m(u \frac{d\vec{i}}{dt} + \vec{i} \frac{du}{dt} + v \frac{d\vec{j}}{dt} + \vec{j} \frac{dv}{dt} + w \frac{d\vec{k}}{dt} + \vec{k} \frac{dw}{dt}) \quad (6)$$

Όπως αποτυπώθηκε η παράγωγος της ταχύτητας, έτσι με ανάλογη γραφή παρουσιάζονται οι παράγωγοι των όρων του διανύσματος της ταχύτητας.

$$\frac{du}{dt} = \dot{u}, \quad \frac{dv}{dt} = \dot{v} \text{ και } \frac{dw}{dt} = \dot{w} \quad (7\alpha, 7\beta, 7\gamma)$$

Επίσης, οι παράγωγοι των μοναδιαίων διανυσμάτων έχουν ως φυσική ερμηνεία την εναλλαγή κατεύθυνσης του πλοίου ως προς κάποιο άξονα. Αυτό προκύπτει, αφού, το σύστημα αξόνων βρίσκεται πάνω στο πλοίο και επειδή τα μήκη αυτών των διανυσμάτων είναι αμετάβλητα και ίσα με τη μονάδα, εξού και ορίζονται ως μοναδιαία, ο μόνος τρόπος να μεταβληθούν είναι λόγω περιστροφής.



Εικόνα 17: Μεταβολή μοναδιαίων διανυσμάτων [4]

Κατά αυτόν τον τρόπο προκύπτουν οι ακόλουθοι παράγωγοι ανά περιστροφική κίνηση.

- Άξονάς x: *roll* – περιστροφή κατά  $\varphi$

$$d\vec{i} = 0, \quad d\vec{j} = \vec{k}d\varphi, \quad d\vec{k} = -\vec{j}d\varphi \quad (8\alpha, 8\beta, 8\gamma)$$

- Άξονάς y: *pitch* – περιστροφή κατά  $\theta$

$$d\vec{i} = -\vec{k}d\theta, \quad d\vec{j} = 0, \quad d\vec{k} = \vec{i}d\theta \quad (9\alpha, 9\beta, 9\gamma)$$

- Άξονάς z: *yaw* – περιστροφή κατά  $\psi$

$$d\vec{i} = \vec{j}d\psi, \quad d\vec{j} = -\vec{i}d\psi, \quad d\vec{k} = 0 \quad (10\alpha, 10\beta, 10\gamma)$$

Επομένως, οι μικρές περιστροφές οδηγούν στις συγκεντρωτικές εκφράσεις:

$$\frac{d\vec{i}}{dt} = \vec{i} \cdot 0 + \vec{j} \frac{d\psi}{dt} - \vec{k} \frac{d\theta}{dt} \quad (11)$$

$$\frac{d\vec{j}}{dt} = -\vec{i} \frac{d\psi}{dt} + \vec{j} \cdot 0 + \vec{k} \frac{d\varphi}{dt} \quad (12)$$

$$\frac{d\vec{k}}{dt} = \vec{i} \frac{d\theta}{dt} - \vec{j} \frac{d\varphi}{dt} + \vec{k} \cdot 0 \quad (13)$$

Ορίζεται το διάνυσμα της γωνιακής ταχύτητας:

$$\vec{\Omega} = p\vec{i} + q\vec{j} + r\vec{k} \quad (14)$$

όπου:

$$\frac{d\varphi}{dt} = p, \quad \frac{d\theta}{dt} = q, \quad \frac{d\psi}{dt} = r \quad (15\alpha, 15\beta, 15\gamma)$$

Άρα,

$$\frac{d\vec{i}}{dt} = \vec{i} \cdot 0 + \vec{j} r - \vec{k} q \quad (16)$$

$$\frac{d\vec{j}}{dt} = -\vec{i}r + \vec{j}\cdot 0 + \vec{k}p \quad (17)$$

$$\frac{d\vec{k}}{dt} = \vec{i}q - \vec{j}p + \vec{k}\cdot 0 \quad (18)$$

Με την απόκτηση των τελευταίων σχέσεων (16), (17) και (18) συνεχίζεται η γραφή της (6).

$$\begin{aligned} \vec{F} &= m(u \frac{d\vec{i}}{dt} + \vec{i} \frac{du}{dt} + v \frac{d\vec{j}}{dt} + \vec{j} \frac{dv}{dt} + w \frac{d\vec{k}}{dt} + \vec{k} \frac{dw}{dt}) => \\ \vec{F} &= m(u\vec{j}r - u\vec{k}q + \vec{i}\dot{u} - v\vec{i}r + v\vec{k}p + \vec{j}\dot{v} + w\vec{i}q - w\vec{j}p + \vec{k}\dot{w}) => \\ \vec{F} &= m[\vec{i}\dot{u} + u(\vec{j}r - \vec{k}q) + \vec{j}\dot{v} + v(-\vec{i}r + \vec{k}p) + \vec{k}\dot{w} + w(\vec{i}q - \vec{j}p)] => \\ \vec{F} &= m[\vec{i}(\dot{u} - rv + qw) + \vec{j}(\dot{v} + ru - pw) + \vec{k}(\dot{w} + pv - qu)] => \\ \vec{F} &= F_x\vec{i} + F_y\vec{j} + F_z\vec{k} \quad (19) \end{aligned}$$

όπου:

$$F_x = m(\dot{u} - rv + qw) \quad (20)$$

$$F_y = m(\dot{v} + ru - pw) \quad (21)$$

$$F_z = m(\dot{w} + pv - qu) \quad (22)$$

Ακολουθεί το φυσικό μέγεθος της στροφορμής και συγκεκριμένα του ρυθμού μεταβολής της με συμβολισμό  $\vec{M}$ . Υπενθυμίζεται πως το σύστημα αξόνων είναι κύριο κεντροβαρικό, δηλαδή πρόκειται για τους κύριους άξονες.

$$\vec{M} = \frac{dI\vec{\Omega}}{dt} \quad (23)$$

όπου:

$$I\vec{\Omega} = I_x p\vec{i} + I_y q\vec{j} + I_z r\vec{k} \quad (24)$$

$$\vec{M} = I_x p \frac{d\vec{i}}{dt} + \vec{i} \frac{dI_x p}{dt} + I_y q \frac{d\vec{j}}{dt} + \vec{j} \frac{dI_y q}{dt} + I_z r \frac{d\vec{k}}{dt} + \vec{k} \frac{dI_z r}{dt} \quad (25)$$

$I$  η ροπή αδράνειας

Δεδομένης της υπόθεσης του σταθερού βάρους του πλοίου, της κατανομής του και των σχέσεων (16), (17) και (18):

$$\vec{M} = \vec{i} I_x \dot{p} + I_x p (\vec{j}r - \vec{k}q) + \vec{j} I_y \dot{q} + I_y q (\vec{k}p - \vec{i}r) + \vec{k} I_z \dot{r} + I_z r (\vec{i}q - \vec{j}p) \quad (26)$$

$$\vec{M} = \vec{i}[I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr] + \vec{j}[I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp] + \vec{k}[I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq] \quad (27)$$

$$\vec{M} = M_x \vec{i} + M_y \vec{j} + M_z \vec{k} \quad (28)$$

όπου:

$$M_x = I_x \dot{p} + (I_z - I_y)qr \quad (29)$$

$$M_y = I_y \dot{q} + (I_x - I_z)rp \quad (30)$$

$$M_z = I_z \dot{r} + (I_y - I_x)pq \quad (31)$$

Πρέπει να σημειωθεί πως οι σχέσεις (19) και (28) δεν έχουν περιοριστεί ως προς τη μελέτη μιας κίνησης. Αν, λόγω χάρη, θεωρηθεί πως δεν πραγματοποιείται κίνηση *pitch* και *roll*, η σχέση (28) θα γινόταν:

$$\vec{M} = M_z \vec{k} = I_z \dot{r} \vec{k} \quad (32)$$

Οι αναλυμένες σχέσεις είναι ορισμένες ως προς σύστημα αξόνων με αρχή το κέντρο βάρους, το οποίο συνήθως δεν βρίσκεται στη μέση του μήκους ή σε σημείο με άξονα συμμετρίας. Το δεδομένο αυτό είναι ικανό να περιπλέξει τις εξισώσεις και να αποτελέσει τροχοπέδη στην επίλυσή τους.

## 4.2 Γραμμικοποιημένη ανάπτυξη δυνάμεων

Η μελέτη και διερεύνηση της ελκτικότητας συνεπάγεται ανάλυση των κινήσεων του πλοίου, αποκύημα των ασκούμενων δυνάμεων και ροπών σε αυτό. Οι τελευταίες είναι συναρτήσεις της γεωμετρίας του πλοίου, των χαρακτηριστικών κινήσεων αλλά και των ιδιοτήτων του περιβάλλοντος ρευστού.

Περιορίζοντας τις εκφράσεις τους σε δυνάμεις προερχόμενες αποκλειστικά από τις κινήσεις του πλοίου στο οριζόντιο επίπεδο, σχηματίζονται οι σχέσεις των *surge*, *sway* και *yaw* συναρτήσεις των ακόλουθων παραμέτρων.

$$X = f_1(u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}), Y = f_2(u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}), N = f_3(u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}) \quad (33,34,35)$$

### 4.2.1 Ανάπτυγμα Taylor

Στις περιπτώσεις όπου δεν είναι εφικτή η άμεση εύρεση της λύσης, η προσέγγιση αυτής είναι η επόμενη τακτική κίνηση. Μια μέθοδος προσέγγισης αποτελεί το ανάπτυγμα *Taylor*. Αρκεί η συνάρτηση να είναι συνεχής και παραγωγίσιμη στο διάστημα που επιχειρείται η προσέγγιση. Το ανάπτυγμα *Taylor* συνάρτησης μιας μεταβλητής ορίζεται

ως:

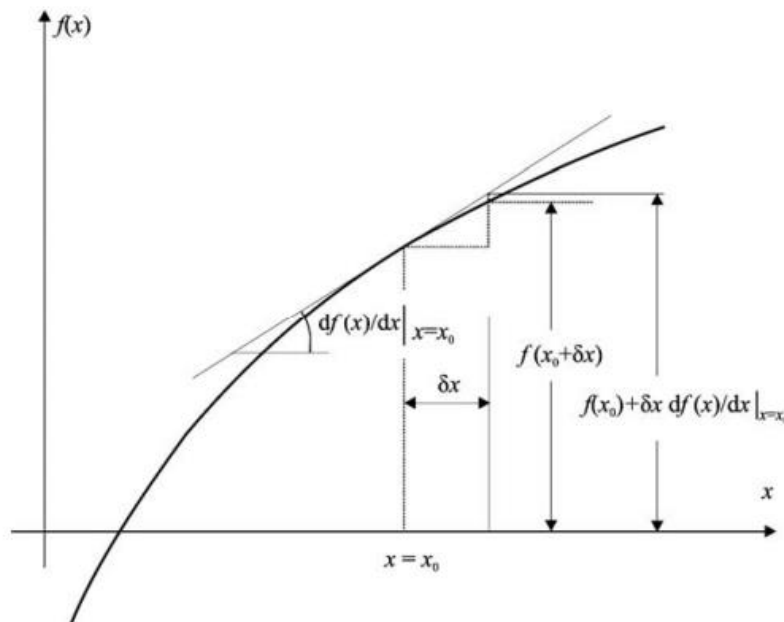
$$f(x) = f(x_0) + \frac{\delta x}{1!} \frac{df(x)}{dx} \Big|_{x=x_0} + \frac{\delta x^2}{2!} \frac{d^2 f(x)}{dx^2} \Big|_{x=x_0} + \frac{\delta x^3}{3!} \frac{d^3 f(x)}{dx^3} \Big|_{x=x_0} + \dots + \frac{\delta x^n}{n!} \frac{d^n f(x)}{dx^n} \Big|_{x=x_0} \quad (36)$$

όπου:

$$\delta x = x - x_0 \quad (37)$$

Εφόσον το βήμα είναι επιλεγμένο ώστε να προκύπτει μικρό  $\delta x$ , οι υψηλότερες σε δυνάμεις ποσότητες είναι πολύ μικρότερες του πρώτου όρου. Επομένως, μπορούν να παραληφθούν οι μεγαλύτεροι όροι και να προκύψει η γραμμικοποιημένη έκφραση της συνάρτησης.

$$f(x) = f(x_0) + \frac{\delta x}{1!} \frac{df(x)}{dx} \Big|_{x=x_0} \quad (38)$$



Εικόνα 18: Ανάπτυγμα Taylor σε συνάρτηση [12]

Αντίστοιχα, η γραμμικοποιημένη συνάρτηση δυο μεταβλητών, με μικρά  $\delta x$  και  $\delta y$ , όπως προηγούμενα, προκύπτει:

$$f(x,y) = f(x_0, y_0) + \frac{\delta x}{1!} \frac{\theta f(x,y)}{\theta x} \Big|_{x=x_0} + \frac{\delta y}{1!} \frac{\theta f(x,y)}{\theta y} \Big|_{y=y_0} \quad (39)$$

όπου:

οι μερικές παράγωγοι ως προς  $x$  και  $y$  αντίστοιχα:

$$\frac{\theta f(x,y)}{\theta x}, \frac{\theta f(x,y)}{\theta y} \quad (40)$$

$$1! = 1$$



Με ορισμένη, πλέον, τη μαθηματική βάση, ακολουθεί η χρήση του γραμμικοποιημένου αναπτύγματος *Taylor* για τις δυνάμεις των *surge*, *sway* και *yaw*.

*Surge*:

$$X = f_1(u_0, v_0, r_0, \dot{u}_0, \dot{v}_0, \dot{r}_0) + \delta u \frac{\theta X}{\theta u} + \delta v \frac{\theta X}{\theta v} + \delta r \frac{\theta X}{\theta r} + \delta \dot{u} \frac{\theta X}{\theta \dot{u}} + \delta \dot{v} \frac{\theta X}{\theta \dot{v}} + \delta \dot{r} \frac{\theta X}{\theta \dot{r}} \quad (41\alpha)$$

*Sway*:

$$Y = f_2(u_0, v_0, r_0, \dot{u}_0, \dot{v}_0, \dot{r}_0) + \delta u \frac{\theta Y}{\theta u} + \delta v \frac{\theta Y}{\theta v} + \delta r \frac{\theta Y}{\theta r} + \delta \dot{u} \frac{\theta Y}{\theta \dot{u}} + \delta \dot{v} \frac{\theta Y}{\theta \dot{v}} + \delta \dot{r} \frac{\theta Y}{\theta \dot{r}} \quad (41\beta)$$

*Yaw*:

$$N = f_3(u_0, v_0, r_0, \dot{u}_0, \dot{v}_0, \dot{r}_0) + \delta u \frac{\theta N}{\theta u} + \delta v \frac{\theta N}{\theta v} + \delta r \frac{\theta N}{\theta r} + \delta \dot{u} \frac{\theta N}{\theta \dot{u}} + \delta \dot{v} \frac{\theta N}{\theta \dot{v}} + \delta \dot{r} \frac{\theta N}{\theta \dot{r}} \quad (41\gamma)$$

#### 4.2.2 Θεωρήσεις γραμμικότητας και υδροδυναμικοί παράγωγοι ελκτικότητας

Επισημαίνεται πως τα μεγέθη με δείκτη «0» αντιστοιχούν στις τιμές στην αρχική κατάσταση ισορροπίας, η οποία είναι η ευθύγραμμη ομαλή κίνηση με πρόσω ταχύτητα. Επομένως, σε αυτήν την αρχική συνθήκη, η δύναμη ως προς τον άξονα *y* ( $f_2$ ) είναι μηδέν, διαφορετικά θα έκτρεπε το πλοίο από ευθεία πορεία του. Ακόμα, όλες οι επιταχύνσεις αλλά και η γωνιακή ταχύτητα έχουν μηδενικές τιμές. Εφόσον, δεν υπάρχει μεταβολή των παραμέτρων που αναφέρονται στον εγκάρσιο άξονα και δεν υπάρχει στροφή, οι μερικοί παράγωγοι ως προς *v*, *r*,  $\dot{v}$ ,  $\dot{r}$  μηδενίζονται.

Δύναμη ως προς τον εγκάρσιο άξονα:

$$f_2=0 \quad (42)$$

Αρχική γωνιακή ταχύτητα:

$$r_0 = 0, \delta r=r \quad (43\alpha), (43\beta)$$

Αρχικές επιταχύνσεις:

$$\dot{u}_0 = \dot{v}_0 = 0, \delta \dot{u} = \dot{u}, \delta \dot{v} = \dot{u} \quad (44\alpha, 44\beta, 44\gamma)$$

Αρχική γωνιακή επιτάχυνση:

$$\dot{r}_0=0 \quad (45)$$

Μερικοί παράγωγοι:

$$\frac{\theta X}{\theta v} = \frac{\theta X}{\theta r} = \frac{\theta X}{\theta \dot{v}} = \frac{\theta X}{\theta \dot{r}} = 0 \quad (46)$$

Επίσης, λόγω της ύπαρξης του διαμήκους επιπέδου συμμετρίας και της προαναφερόμενης ευθύγραμμης πορείας, η ταχύτητα ως προς τον εγκάρσιο άξονα είναι επίσης μηδενική,  $v_0=0$  και άρα,  $\delta v = v$ . Φυσικά, δεν εμφανίζουν όλα τα πλοία απόλυτη

συμμετρία, καθώς, ο τύπος και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της έλικας είναι ικανά να διαταράξουν αυτή τη συνθήκη. Παραβλέποντας, προσωρινά αυτό, η συμμετρική γεωμετρία αποτρέπει τη δημιουργία εγκάρσιων δυνάμεων κατά την ομαλή και επιταχυνόμενη κίνηση πρόσω. Γίνεται η υπόθεση πως η διαμήκης οριζόντια κίνηση (*surge*) δεν παράγει δυνάμεις στην εγκάρσια οριζόντια (*sway*) και στη στροφική οριζόντια (*yaw*) κίνηση:

$$\frac{\theta Y}{\theta u} = \frac{\theta Y}{\theta \dot{u}} = \frac{\theta N}{\theta u} = \frac{\theta N}{\theta \dot{u}} = 0 \quad (47)$$

Επιπρόσθετα, λόγω της μη επιταχυνόμενης κίνησης, η δύναμη της αντίστασης στον άξονα x, εξισορροπείται από την δύναμη πρόωσης της έλικας. Έτσι, προκύπτει:

$$f(u_0) = 0 \quad (48)$$

Συγκεντρωτικά, οι σχέσεις (41α), (41β) και (41γ) απλοποιούνται όπως ακολούθως.

*Surge:*

$$X = \delta u \frac{\theta X}{\theta u} + \dot{u} \frac{\theta X}{\theta \dot{u}} \quad (49\alpha)$$

*Sway:*

$$Y = v \frac{\theta Y}{\theta v} + r \frac{\theta Y}{\theta r} + \dot{v} \frac{\theta Y}{\theta \dot{v}} + \dot{r} \frac{\theta Y}{\theta \dot{r}} \quad (49\beta)$$

*Yaw:*

$$N = v \frac{\theta N}{\theta v} + r \frac{\theta N}{\theta r} + \dot{v} \frac{\theta N}{\theta \dot{v}} + \dot{r} \frac{\theta N}{\theta \dot{r}} \quad (49\gamma)$$

Η γραφή των μερικών παραγώγων αλλάζει μορφή και θα υιοθετηθεί σε όλη την υπόλοιπη έκταση, εκτός διαφορετικής επισήμανσης.

$$X_u = \frac{\theta X}{\theta u}, \quad X_{\dot{u}} = \frac{\theta X}{\theta \dot{u}} \quad (50\alpha), (50\beta)$$

$$Y_v = \frac{\theta Y}{\theta v}, \quad Y_{\dot{v}} = \frac{\theta Y}{\theta \dot{v}}, \quad Y_r = \frac{\theta Y}{\theta r}, \quad Y_{\dot{r}} = \frac{\theta Y}{\theta \dot{r}} \quad (50\gamma), (50\delta), (50\epsilon), (50\sigma\tau)$$

$$N_v = \frac{\theta N}{\theta v}, \quad N_{\dot{v}} = \frac{\theta N}{\theta \dot{v}}, \quad N_r = \frac{\theta N}{\theta r}, \quad N_{\dot{r}} = \frac{\theta N}{\theta \dot{r}} \quad (50\zeta), (50\eta), (50\theta), (50\iota)$$

Τα παραπάνω μεγέθη ονομάζονται υδροδυναμικές παράγωγοι ελκτικότητας.

Με γνώμονα τις παραπάνω σχέσεις, προκύπτουν οι ισοδύναμες αντίστοιχες σχέσεις των (49α), (49β) και (49γ).

*Surge:*

$$X = \delta u X_u + \dot{u} X_{\dot{u}} \quad (51\alpha)$$

Sway:

$$Y = v Y_v + r Y_r + \dot{v} Y_{\dot{v}} + \dot{r} Y_{\dot{r}} \quad (51\beta)$$

Yaw:

$$N = v N_v + r N_r + \dot{v} N_{\dot{v}} + \dot{r} N_{\dot{r}} \quad (51\gamma)$$

### 4.2.3 Αδιαστατοποιημένες εκφράσεις μεγεθών

Αποτελεί κοινή πρακτική, η άντληση πληροφοριών και χαρακτηριστικών άλλων πλοίων, προς εφαρμογή στην εκάστοτε περίπτωση. Ως εκ τούτου, τα δεδομένα οφείλουν να ταιριάζουν στο πλοίο εφαρμογής. Γίνεται αντιληπτή, επομένως, η δυσκολία εύρεσης παρόμοιου σκάφους με υπαρκτά δεδομένα ερευνών και πειραμάτων.

Η διευθέτηση επέρχεται με την αδιαστατοποίηση των ποσοτήτων. Τη μη προσάρτηση, δηλαδή, διαστάσεων και μονάδων στα μεγέθη. Συνεπώς, είναι εφικτή η χρήση δεδομένων από πλοία διαφορετικών διαστάσεων, τα οποία στο τέλος ανάγονται σε διαστατά για τα πλοία εφαρμογής.

Ακολουθούν τα αδιαστατοποιημένα μεγέθη, βάση του μήκους.

Μάζα:

$$m' = \frac{m}{\frac{1}{2}\rho L^3} \quad (52)$$

Ταχύτητα:

$$v' = \frac{v}{U} \quad (53)$$

Επιτάχυνση:

$$\dot{v}' = \frac{\dot{v}L}{U^2} \quad (54)$$

Ροπή αδράνειας περί τον άξονα z:

$$I_z' = \frac{Iz}{\frac{1}{2}\rho L^5} \quad (55)$$

Παράμετρος γωνιακής ταχύτητας ως προς άξονα z:

$$r' = \frac{rL}{U} \quad (56)$$

Παράμετρος γωνιακής επιτάχυνσης ως προς άξονα z:

$$\dot{r}' = \frac{\dot{r}L^2}{U^2} \quad (57)$$

Υδροδυναμικοί συντελεστές:

$$Y_v' = \frac{Y_v}{\frac{1}{2}\rho L^2 U}, \quad Y_{\dot{v}}' = \frac{Y_{\dot{v}}}{\frac{1}{2}\rho L^3} \quad (58\alpha), (58\beta)$$

$$Y_r' = \frac{Y_r}{\frac{1}{2}\rho L^3 U}, \quad Y_{\dot{r}}' = \frac{Y_{\dot{r}}}{\frac{1}{2}\rho L^4} \quad (59\alpha), (59\beta)$$

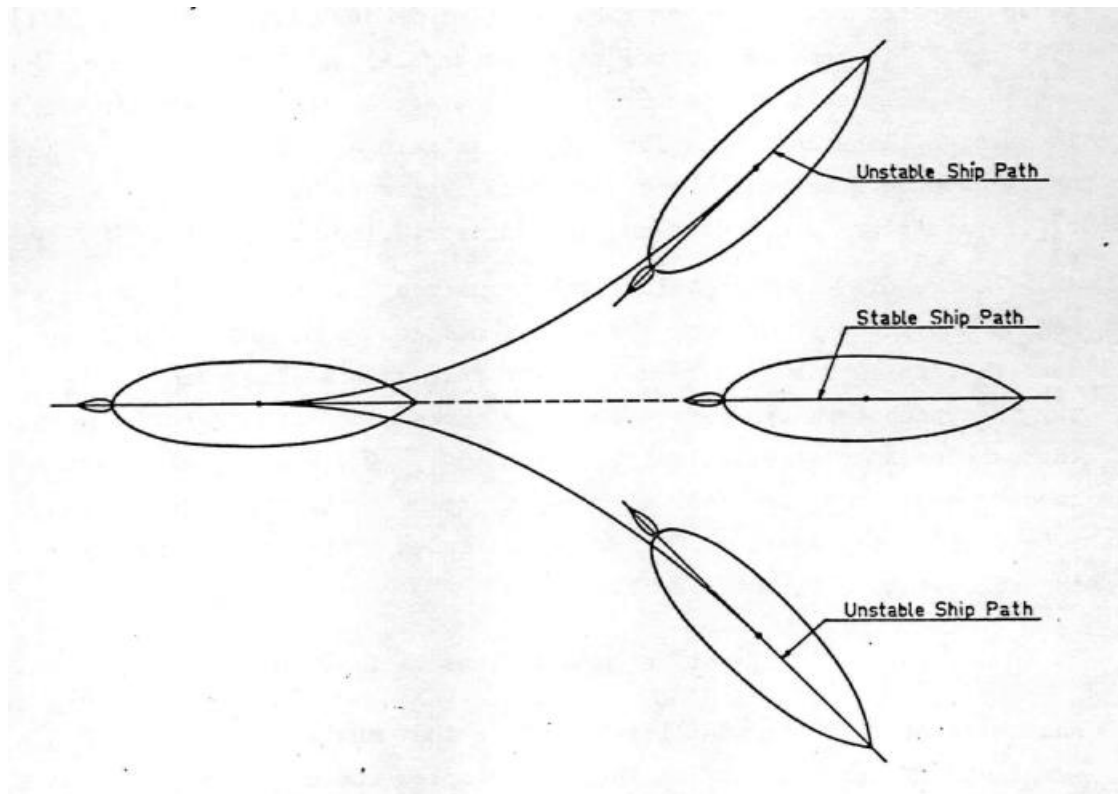
$$N_v' = \frac{N_v}{\frac{1}{2}\rho L^3 U}, \quad N_{\dot{v}}' = \frac{N_{\dot{v}}}{\frac{1}{2}\rho L^4} \quad (60\alpha), (60\beta)$$

$$N_r' = \frac{N_r}{\frac{1}{2}\rho L^4 U}, \quad N_{\dot{r}}' = \frac{N_{\dot{r}}}{\frac{1}{2}\rho L^5} \quad (61\alpha), (61\beta)$$

### 4.3 Προκύπτουσες δυνάμεις και ευστάθεια κινήσεων

Στην προηγούμενη υποενότητα παρατέθηκαν οι εξισώσεις δυνάμεων και ροπών ασκούμενες στο πλοίο. Στο παρόν χωρίο, γίνεται λόγος αρχικά για τη φύση των δυνάμεων και την προέλευσή τους και έπειτα, για τη διατήρηση της κατεύθυνσης του πλοίου.

Κύριο αίτιο παραγωγής δυνάμεων είναι η ταχύτητα του πλοίου και η επιτάχυνσή του, όταν μεταβάλλεται η πρώτη. Ακόμα, η χρήση του πηδαλίου, η λειτουργία της έλικας ή των προωθητήρων (*thrusters*) δημιουργούν σημαντικές δυνάμεις και ροπές. Οι εν λόγω δυνάμεις είναι υδροδυναμικής φύσεως και ασκούνται στη γάστρα του πλοίου επηρεάζοντας τις κινήσεις στο οριζόντιο επίπεδο. Τα αποτελέσματα δεν είναι ανάλογα με τις δυνάμεις που δημιουργούνται όταν το πηδάλιο σχηματίζει γωνία με το διάμηκες επίπεδο. Παράγεται μια δύναμη κάθετα στην επιφάνεια του πηδαλίου, η οποία ως ροπή ωθεί το πλοίο να αλλάξει κατεύθυνση και να προκαλεί περιστροφές περί των αξόνων. Όπως είναι γνωστό, σύμφωνα με τον Α' Νόμο του Νεύτωνα και τον *D' Alembert*, οποιαδήποτε μεταβολή στην κινητική ενέργεια ενός σώματος, συνεπάγεται αντίσταση από το ίδιο (αδράνεια). Επομένως, εφόσον η επιτάχυνση του πλοίου δεν είναι μηδενική, δημιουργούνται αδρανειακές δυνάμεις. Το περιβάλλον επιβάλλει, επίσης, δυνάμεις στο πλοίο. Η προέλευσή τους μπορεί να είναι από τα κύματα, τα ρεύματα ή τον άνεμο. Ο τελευταίος παράγοντας αφορά τα έξαλα του πλοίου και ευθύνεται για σημαντικές δυνάμεις και ροπές που δυσχεραίνουν σε πολλές περιπτώσεις τη λειτουργία του πλοίου. Αντίθετα, αυτές τις δυνάμεις εκμεταλλεύονται τα ιστιοπλοϊκά, μετατρέποντάς τες σε δυνάμεις πρόωσης. Φυσικά, αν το πλοίο δεν είναι αυτοπροωθούμενο αλλά υποβοηθείται από ρυμουλκό, επιβάλλονται επιπλέον εξωτερικές δυνάμεις ρυμούλκησης.

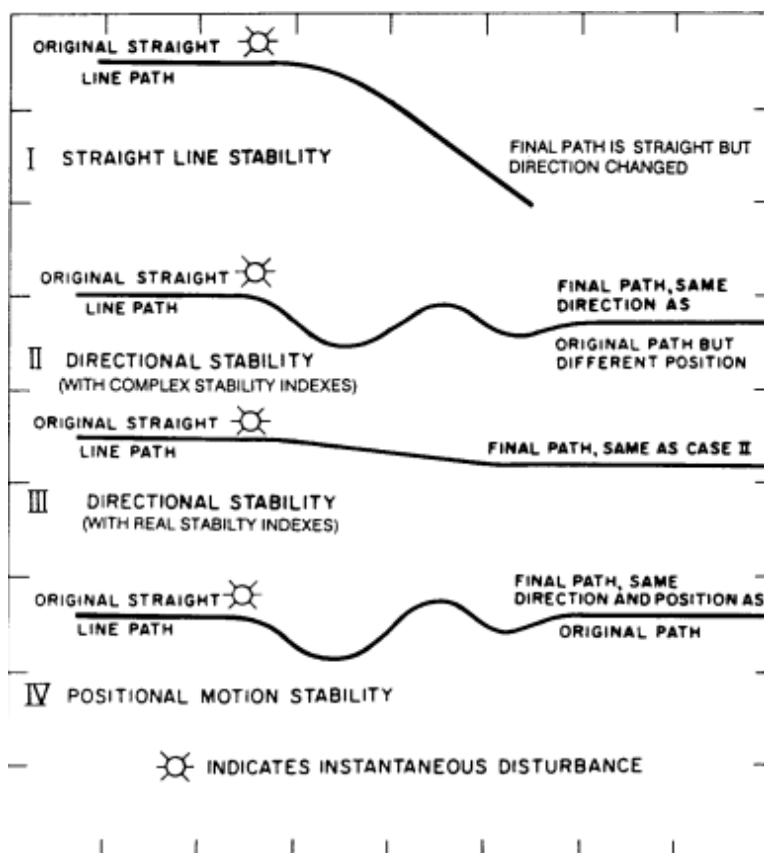


Εικόνα 19: Συμπεριφορά δυναμικά ευσταθούς και ασταθούς πλοίου χωρίς χρήση πηδαλίου [4]

Γενικότερα, η ευστάθεια σε ένα πλοίο αποδίδεται όταν είναι ικανό να επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση, κατάσταση ισορροπίας, μετά τη διακοπή επιβολής μια εξωτερικής δύναμης. Η διέγερση, λοιπόν, στη περίπτωση που ένα πλοίο ταξιδεύει και βρίσκεται σε ευθεία πορεία χωρίς να επιταχύνει, μπορεί να οφείλεται σε μια από τις συνθήκες περιβάλλοντος. Αναλυτικότερα, τα ρεύματα ασκούν δυνάμεις στα ύφαλα του πλοίου, τα κύματα στη γάστρα γενικότερα και ο άνεμος στα έξαλα της γάστρας και τις υπερκατασκευές ή τα πανιά σε ιστιοπλοϊκό σκάφος.

Έστω ότι μελετάται μια από τις παραπάνω συνθήκες για ένα πλοίο, το οποίο ταξιδεύει και βρίσκεται σε ευθεία πορεία χωρίς να επιταχύνει. Μια ενδεχόμενη απόκριση του πλοίου, μετά από μια στιγμιαία διέγερση, είναι η μεταβολή της κατεύθυνσης που είχε, χωρίς να ταλαντωθεί, μη αλλοιώνοντας το ευθύγραμμο της πορείας του. Αυτή η περίπτωση χαρακτηρίζεται από τη δυναμική ευστάθεια. Αντίθετη περίπτωση αποτελεί η ταλαντωτική απόκριση που εμφανίζει ένα πλοίο, το οποίο, όμως, διατηρεί τον προσανατολισμό του όταν αποσβέσει η ταλάντωσή του και επιστρέψει στην ευθύγραμμη πορεία του. Επομένως, χαρακτηρίζεται με ευστάθεια κατεύθυνσης. Ωστόσο, ενδιαφέρον έχει η διαφοροποίηση που μπορεί να προκύψει ανάμεσα σε δυο πλοία της παραπάνω περίπτωσης, όπου μετά τη διέγερση το ένα ταξιδεύει στην ίδια θέση ως προς το εγκάρσιο επίπεδο, ενώ το άλλο όχι. Το πρώτο διακρίνεται επιπρόσθετα από ευστάθεια ως προς τη θέση του. Δεν πρέπει να παραληφθεί και η περίπτωση πλοίου,

το οποίο δεν παρουσίασε ταλάντωση αλλά διατήρησε και την πορεία του και τον προσανατολισμό του με εξαίρεση τη μεταβολή στη θέση του.



Εικόνα 20: Ευστάθεια κινήσεων [11]

Κρίνεται αναγκαία μια πρώτη αναφορά στα συστήματα ελέγχου κίνησης των πλοίων σε σχέση με τις παραπάνω κατηγορίες ευστάθειας. Στα πλαίσια της υδροστατικής ευστάθειας, δεν έχουμε ανάμειξη πηδαλίου. Δεν μπορεί να ειπωθεί το ίδιο για τη δυναμική ευστάθεια. Ένα πλοίο χρειάζεται να αντικρούσει και να ισορροπήσει το ισοζύγιο δυνάμεων λόγω των εξωτερικών διεγέρσεων στις οποίες υπόκειται. Το προτέρημα που έχουν τα συστήματα χειρισμού των κινήσεων ενός πλοίου είναι το γεγονός πως είναι ικανά σε συνδυασμό, φυσικά, με την καλή σχεδίαση του ναυπηγήματος, να του προσδώσουν ευστάθεια έναντι σε δύσκολες καταστάσεις πλου. Με ορισμένη θέση πηδαλίου στο διάμηκες επίπεδο συμμετρίας, ένα σκάφος δύναται διατήρησης μόνο της ευθύγραμμης πορείας του. Ίσως, τα πολεμικά πλοία να παρουσιάζουν την καλύτερη απόκριση χωρίς ενεργητικό πηδάλιο, λόγω των αυστηρών προϋποθέσεων σχεδίασής τους. Πέραν αυτού, η σωστή χρήση της ιστιοφορίας επιφέρει ευεργετικά αποτελέσματα ως προς το χειρισμό της κατεύθυνσης σε τέτοιου τύπου σκάφη. Είναι, όμως, κατανοητή η αναγκαιότητα απόκτησης τόσο ευστάθειας κατεύθυνσης όσο και διατήρησης πορείας. Συνεπώς, η απόδοση επέρχεται με ενεργά πηδάλια και αντίστοιχα συστήματα. Υπογραμμίζεται, ωστόσο, πως η χρήση τέτοιων

συστημάτων δεν αποτελεί πανάκεια. Ορισμένα πλοία είναι ασταθή ως απορία σχεδιαστικών επιλογών. Επομένως, ο έλεγχος των κινήσεων με τέτοια τεχνικά μέσα εμφανίζεται και σε ήρεμες συνθήκες θάλασσας και με καλές γενικότερα συνθήκες περιβάλλοντος. Βέβαια, συναντώνται πλοία όπου, και με τη χρήση αυτών, δεν εμφανίζουν επαρκή ευστάθεια.

Είναι εύλογος, σε αυτό το σημείο, ο στοχασμός για το τρόπο διερεύνησης της ύπαρξης ή μη ευστάθειας και του μεγέθους της, εφόσον υπάρχει. Απάντηση σε αυτό, προσφέρουν οι επιλύσεις των εξισώσεων κίνησης, όπως ακολουθούν σε επόμενη ενότητα.

## 4.4 Δυνατότητα διατήρησης πορείας και ελιγμοί πλοίου

### 4.4.1 Εξισώσεις κίνησης

Στο κεφάλαιο 4.1.2, αναπτύχθηκαν οι εξισώσεις των δυνάμεων και ροπών (20), (21), (22), (29), (30) και (31). Με εστίαση στο οριζόντιο επίπεδο, τις υποθέσεις, όπως έγιναν στην ενότητα 4.2.2 και τις σχέσεις (51α), (51β), (51γ) οι εξισώσεις διαμορφώνονται ξεχωριστά για τις *surge*, *sway* και *yaw*:

$$X = m \dot{u} \quad (62\alpha)$$

$$Y = m (\dot{v} + ru) \quad (62\beta)$$

$$N = I_z \dot{r} \quad (62\gamma)$$

Ακολουθεί η αντικατάσταση των σχέσεων (51α), (52β), (53γ) στις (62α), (62β) και (62γ) αντίστοιχα.

*Surge:*

$$m \dot{u} = \delta u X_u + \dot{u} X_{\dot{u}} \Rightarrow (m - X_{\dot{u}}) \dot{u} - \delta u X_u = 0 \quad (63\alpha)$$

*Sway:*

$$m(\dot{v} + ru) = v Y_v + r Y_r + \dot{v} Y_{\dot{v}} + \dot{r} Y_{\dot{r}} \Rightarrow (m - Y_{\dot{v}}) \dot{v} - v Y_v - \dot{r} Y_{\dot{r}} + (mu - Y_r)r = 0 \quad (63\beta)$$

*Yaw:*

$$I_z \dot{r} = v N_v + r N_r + \dot{v} N_{\dot{v}} + \dot{r} N_{\dot{r}} \Rightarrow -\dot{v} N_{\dot{v}} - v N_v + (I_z - N_{\dot{r}}) \dot{r} - r N_r = 0 \quad (63\gamma)$$

Σχετικά με τη μελέτη της ευθύγραμμης πορείας, το ενδιαφέρον συγκεντρώνεται στις κινήσεις *surge* και *yaw*. Δεδομένης της μη ύπαρξης κάποιας παραμέτρου σχετικά με τις κινήσεις αυτές στην εξίσωση *surge*, γίνεται εστίαση μόνο στις δυο αναφερόμενες. Ακολουθούν οι αδιαστατοποιημένες σχέσεις (63β) και (63γ). Σημειώνεται πως η αδιαστατοποίηση του όρου *u* στην (63β) συνεπάγεται της μονάδας, εξού και δεν

εμφανίζεται παρακάτω, καθώς έχει γίνει θεώρηση ότι ισούται με την πρόσω ταχύτητα  $U$ .

*Sway:*

$$(m' - Y_{\dot{v}}') \dot{v}' - v' Y_v' - \dot{r}' Y_r' + (m' - Y_r') r' = 0 \quad (64\alpha)$$

*Yaw:*

$$- \dot{v}' N_{\dot{v}}' - v' N_v' + (I_z' - N_r') \dot{r}' - r' N_r' = 0 \quad (64\beta)$$

Η μελέτη της εκτροπής από την κατάσταση ισορροπίας -ευθύγραμμη πορεία-, θα χαρακτηρίσει την ευστάθεια του πλοίου στη διατήρησή της χωρίς ενεργό πηδάλιο. Κατόπιν, στο πλαίσιο των μικρών μεταβολών που εξετάζονται, οι ποσότητες  $N_{\dot{v}}'$  και  $Y_r'$  είναι πολύ μικρές, θεωρούνται αμελητέες συγκριτικά και παραλείπονται (Κεφάλαιο 4.4.2 – Διερεύνηση προσήμων όρων).

*Sway:*

$$(m' - Y_{\dot{v}}') \dot{v}' - v' Y_v' + (m' - Y_r') r' = 0 \quad (65\alpha)$$

*Yaw:*

$$- v' N_v' + (I_z' - N_r') \dot{r}' - r' N_r' = 0 \quad (65\beta)$$

Το ευσταθές πλοίο τείνει να επιστρέψει στην αρχική κατάσταση ισορροπίας, μετά την παύση της διέγερσης. Αντίθετα, το ασταθές πλοίο συνεχίζει να παρεκκλίνει προς αναζήτηση μιας άλλης κατάστασης ισορροπίας. Η διερεύνηση, δηλαδή, της ικανότητας ενός πλοίου για τη διατήρηση της ευθείας πορείας του, έγκειται στην επίλυση των παραπάνω εξισώσεων, με δεδομένο το πηδάλιο στο επίπεδο συμμετρίας. Οι λύσεις αποτελούν εκφράσεις της εγκάρσιας συνιστώσας ( $v$ ) της οριζόντιας ταχύτητας και της γωνιακής ταχύτητας ( $r$ ), συναρτήσεως του χρόνου.

Διατηρώντας την αδιάστατη έκφραση γραφής:

$$v' = v_1 e^{\sigma_1 t} + v_2 e^{\sigma_2 t} \quad (66)$$

$$r' = r_1 e^{\sigma_1 t} + r_2 e^{\sigma_2 t} \quad (67)$$

όπου:

$v_1, v_2$  και  $r_1, r_2$  είναι σταθερές ολοκλήρωσης

$\sigma_1, \sigma_2$  είναι ρίζες της δευτεροβάθμιας εξίσωσης

$$AD^2 + BD + \Gamma = 0 \quad (68)$$



όπου:

$D$  ο διαφορικός τελεστής

$$A = (m' - Y_v') (I_z' - N_r') \quad (69)$$

$$B = - (m' - Y_v') N_r' - (I_z' - N_r') Y_v' \quad (70)$$

$$\Gamma = N_r' Y_v' + (m' - Y_r') N_v' \quad (71)$$

#### 4.4.2 Παράμετροι ευστάθειας

Η διατήρηση πορείας επιτυγχάνεται με την απουσία της γωνιακής ταχύτητας  $r$  και της εγκάρσιας συνιστώσας  $v$  της ταχύτητας. Επομένως, ζητούνται οι συνθήκες, οι οποίες τείνουν τις σχέσεις (66) και (67) στο μηδέν. Προκειμένου να επιτευχθεί το ζητούμενο, θα πρέπει οι δυο όροι της σχέσης να έχουν αντίθετες τιμές ή με κατάλληλες τιμές των  $\sigma_1$  και  $\sigma_2$ , να προσεγγίσει μηδενική τιμή. Οι σταθερές ολοκλήρωσης  $r_1$  και  $r_2$ , εξαρτώνται από τις αρχικές συνθήκες και οι ρίζες  $\sigma_1$  και  $\sigma_2$  αποτελούν εκφράσεις υδροδυναμικών παραγώγων. Επομένως, ο χαρακτηρισμός της συμπεριφοράς του πλοίου χαρακτηρίζεται ανάλογα με τις τιμές των  $\sigma_1$  και  $\sigma_2$ . Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε, δεν είναι μονοσήμαντες ποσότητες. Ως εκ τούτου, η ανάλυσή τους θα ορίσει τις παραμέτρους ευστάθειας.

Σε πρώτη ανάλυση, θεωρείται πως οι ποσότητες  $\sigma_1$  και  $\sigma_2$  είναι πραγματικοί αριθμοί. Επομένως, οι σχέσεις (66) και (67) θα προσεγγίσουν το μηδέν για αρνητικές τιμές αυτών. Το παραπάνω συμβαίνει καθώς ο χρόνος  $t$  είναι θετική ποσότητα και κατά συνέπεια, οι εκθετικές συναρτήσεις θα τείνουν ασυμπτωτικά στο μηδέν με αρνητικούς εκθέτες  $\sigma_1$  και  $\sigma_2$ .

Η περίπτωση των  $\sigma_1$  και  $\sigma_2$  να αντιστοιχούν σε μιγαδικούς αριθμούς, οδηγεί και πάλι σε αρνητικές τιμές των πραγματικών μερών. Θετικό πρόσημο του πραγματικού μέρους οδηγεί σε ασταθές σημείο ισορροπίας και από μαθηματική σκοπιά, δεν μηδενίζει τους όρους των σχέσεων. Τα φανταστικά μέρη των εκθετικών ποσοτήτων δεν αποτελούν πρόβλημα, ωστόσο η φυσική τους σημασία είναι η γωνιακή συχνότητα της ταλαντωτικής κίνησης. Το παραπάνω μπορεί να διακριθεί από την εναλλακτική γραφή του εκθετικού όρου, όπως ακολουθεί. Έστω  $\sigma = \alpha + i\beta$  και ο εκθετικός όρος  $e^{(\alpha+i\beta)t}$ . Με ιδιότητες δυνάμεων προκύπτει  $e^{(\alpha+i\beta)t} = e^{\alpha t} e^{i\beta t}$  και με χρήση του τύπου του *Euler*,  $e^{ix} = \cos x + i \sin x$ , καταλήγει στη μορφή  $e^{\alpha t} (\cos \beta t + i \sin \beta t)$ . Τα πρόσημα των κρίσιμων ποσοτήτων για ευσταθή ευθεία πορεία ορίστηκαν, όμως, είναι αναγκαίο να αναζητήσουμε τις συνθήκες, λόγω των οποίων προκύπτουν οι παραπάνω αρνητικές ποσότητες.

Η δευτεροβάθμια εξίσωση (68) μετατρέπεται στη:

$$D^2 + \frac{B}{A}D + \frac{\Gamma}{A} = 0 \quad (72)$$

και οι ρίζες λαμβάνονται με τη βοήθεια της διακρίνουσας ως:

$$\sigma_{1,2} = \frac{-\frac{B}{A} \pm \sqrt{\left(\frac{B}{A}\right)^2 - 4\frac{\Gamma}{A}}}{2} \quad (73)$$

Ακολουθεί ο συλλογισμός δια της εις άτοπον επαγωγής, ώστε να οριστούν οι παράμετροι ευστάθειας.

➤ Έστω:

$$\frac{\Gamma}{A} < 0 \Rightarrow -4\frac{\Gamma}{A} > 0 \Rightarrow \left(\frac{B}{A}\right)^2 - 4\frac{\Gamma}{A} > 0 \quad (74)$$

Η διακρίνουσα, δηλαδή, είναι θετική και οι ρίζες θα είναι πραγματικοί αριθμοί. Ακόμα, με την παραπάνω υπόθεση ισχύει:

$$\left(\frac{B}{A}\right)^2 < \left(\frac{B}{A}\right)^2 - 4\frac{\Gamma}{A} \quad (75)$$

και άρα:

$$\frac{B}{A} < \sqrt{\left(\frac{B}{A}\right)^2 - 4\frac{\Gamma}{A}} \quad (76)$$

ανεξάρτητα του προσήμου του όρου  $\frac{B}{A}$ . Ακολουθώντας, ο αριθμητής της σχέσης (73) και άρα μια από τις δυο ρίζες θα είναι θετική.

Πράγματι με:

$$\frac{B}{A} < 0 \Rightarrow -\frac{B}{A} > 0 \quad (77)$$

και λόγω της (76) προκύπτει:

$$-\frac{B}{A} + \sqrt{\left(\frac{B}{A}\right)^2 - 4\frac{\Gamma}{A}} > 0 \quad (78)$$

δηλαδή θετική ρίζα και δείκτης αστάθειας.

Αντίστοιχα:

$$\frac{B}{A} > 0 \Rightarrow -\frac{B}{A} < 0 \quad (79)$$

και πάλι λόγω της (76) προκύπτει:

$$-\frac{B}{A} + \sqrt{\left(\frac{B}{A}\right)^2 - 4\frac{\Gamma}{A}} > 0 \quad (80)$$

δηλαδή θετική ρίζα και δείκτης αστάθειας. Κατά συνέπεια αναιρείται η αρχική υπόθεση της σχέσης (74) ( $\frac{\Gamma}{A} < 0$ ) και ορίζεται αναγκαία συνθήκη ευστάθειας:

$$\frac{\Gamma}{A} > 0 \quad (81)$$

- Σε συνέχεια της, πλέον, απαιτούμενης σχέσης (81) και σε συνδυασμό με την ισχύ της (74) (θετική διακρίνουσα), προκύπτουν πραγματικές ρίζες.

Έστω:

$$\frac{B}{A} < 0 \Rightarrow -\frac{B}{A} > 0 \quad (82)$$

Όμως:

$$\left(-\frac{B}{A}\right)^2 > \left(-\frac{B}{A}\right)^2 - 4\frac{\Gamma}{A} > 0 \quad (83)$$

αφού η ποσότητα  $-4\frac{\Gamma}{A}$  είναι αρνητική λόγω της (81). Έτσι, προκύπτει με εφαρμογή ριζών και λόγω της (82):

$$-\frac{B}{A} > \sqrt{\left(-\frac{B}{A}\right)^2 - 4\frac{\Gamma}{A}} = \sqrt{\left(\frac{B}{A}\right)^2 - 4\frac{\Gamma}{A}} \quad (84)$$

Άρα και οι δυο ρίζες της σχέσης (73) θα είναι θετικές. Αποτελεί μη θεμιτή συνθήκη, συνεπώς η επιπλέον παράμετρος είναι:

$$\frac{B}{A} > 0 \quad (85)$$

- Δομώντας στα προηγούμενα και στη σχέση (81), απομένει η περίπτωση όπου:

$$\left(\frac{B}{A}\right)^2 < 4\frac{\Gamma}{A} \quad (86)$$

Προκύπτει, δηλαδή, αρνητική διακρίνουσα και κατά συνέπεια οι δυο μιγαδικές συζυγείς λύσεις. Η σχέση (73) μετατρέπεται στη (87):

$$\sigma_{1,2} = \frac{-\frac{B}{A} \pm i \sqrt{\left[\left(\frac{B}{A}\right)^2 - 4\frac{\Gamma}{A}\right]}}{2} \quad (87)$$

Υπενθυμίζεται πως τα πραγματικά μέρη πρέπει να είναι αρνητικά για να

υπάρξει ευστάθεια. Συμπεραίνεται πως η ποσότητα  $-\frac{B}{A}$  πρέπει να έχει αρνητικό πρόσημο, άρα και αυτή η περίπτωση καταλήγει στη σχέση (85).

Συνοψίζοντας, οι προϋποθέσεις ευστάθειας είναι τα θετικά πρόσημα των ποσοτήτων  $\frac{\Gamma}{A}$  και  $\frac{B}{A}$ , σχέσεις (81), (85). Φυσικά, οι ποσότητες είναι εκφράσεις υδροδυναμικών παραγώγων, όπως υπενθυμίζονται οι σχέσεις (69), (70), και (71):

$$A = (m' - Y_{\dot{v}}') (I_z' - N_{\dot{r}}') \quad (69)$$

$$B = - (m' - Y_{\dot{v}}') N_{r'} - (I_z' - N_{\dot{r}}') Y_{v'} \quad (70)$$

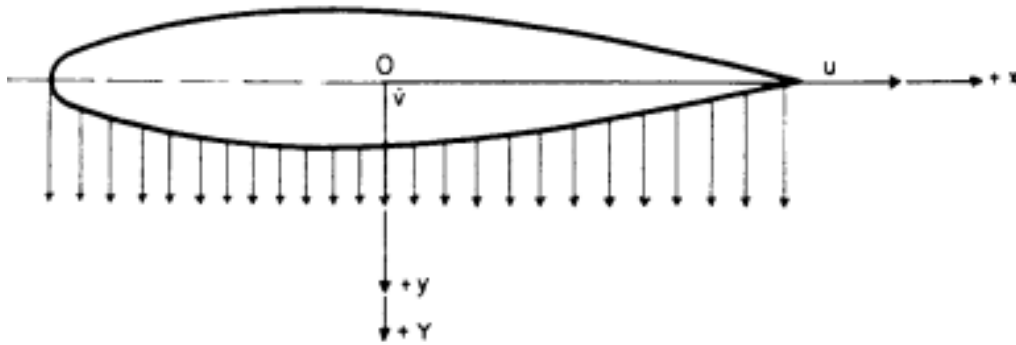
$$\Gamma = N_{r'} Y_{v'} + (m' - Y_{\dot{v}}') N_{v'} \quad (71)$$

Επομένως, ακολουθεί διερεύνηση του προσήμου κάθε όρου.

- ο Συντελεστής A:

Δύναμη  $s_{\text{mag}}$  και ροπή  $y_{\text{aw}}$  υδροδυναμικής αντίδρασης λόγω επιτάχυνσης στην εγκάρσια διεύθυνση,  $Y_{\dot{v}}$  και  $N_{\dot{v}}$

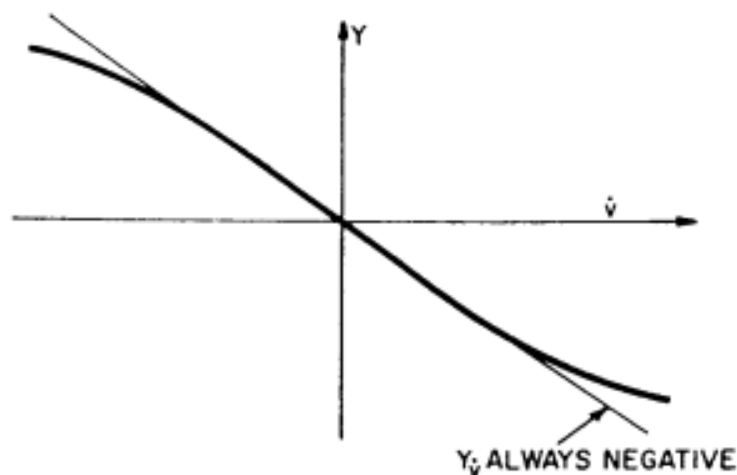
Ο προηγούμενα ορισμένος όρος  $Y_{\dot{v}}$  (Κεφάλαιο 4.4.2), συναντάται στους A και B συντελεστές της δευτεροβάθμιας εξίσωσης (68) και στις (69) και (70). Σκάφος, το οποίο διεγείρεται προκαλώντας θετική επιτάχυνση  $\dot{v}$ , απεικονίζεται στο σχήμα που ακολουθεί. Το σύστημα αξόνων βρίσκεται στο μέσο του μήκους του σκάφους, συνθήκη η οποία υιοθετείται και στις επόμενες σχηματικές αναπαραστάσεις.



Εικόνα 21: Εγκάρσια επιτάχυνση σκάφους [11]

Το σκάφος αλληλεπιδρά με το νερό στη πλευρά της διεύθυνσης της επιτάχυνσης (+ y) και αυτό αντιδρά με δυνάμεις, αδρανειακής φύσης, αντίθετης κατεύθυνσης (- y) στη γάστρα. Επομένως, με θετική επιτάχυνση προκύπτει εγκάρσια δύναμη αρνητικού προσήμου. Αντίστροφα, η επιτάχυνση με αρνητική φορά, δημιουργεί θετική δύναμη. Τα

λεγόμενα διαμορφώνουν τη γραφική αναπαράσταση της επιτάχυνσης με τις υδροδυναμικές αντιδράσεις, της οποίας η κλίση είναι ο όρος  $Y_{\dot{v}}$ .



Εικόνα 22: Απεικόνιση υδροδυναμικής αντίδρασης συναρτήσει της εγκάρσιας επιτάχυνσης [11]

Συμπεραίνεται το αρνητικό πρόσημο του  $Y_{\dot{v}}$ . Φυσικά, η γνώση του μέτρου του όρου είναι, επίσης, αναγκαία. Το μέγεθος, λοιπόν, συγκρίνεται με το εκτόπισμα του σκάφους. Για μακρόστενες γάστρες, δηλαδή για μεγάλους λόγους μήκους προς πλάτος ( $L/B$ ), το μέγεθος είναι σχεδόν ίσο με το εκτόπισμα:

$$Y_{\dot{v}} \approx -m \quad (88)$$

Ενδεικτικά, στον πίνακα 3 που ακολουθεί φαίνονται τα μεγέθη για διαφορετικούς λόγους  $L/B$ , πάντα συναρτήσει του εκτοπίσματος<sup>[11]</sup>.

Πίνακας 3: Τιμές  $Y_{\dot{v}}$  συναρτήσει λόγου  $L/B$

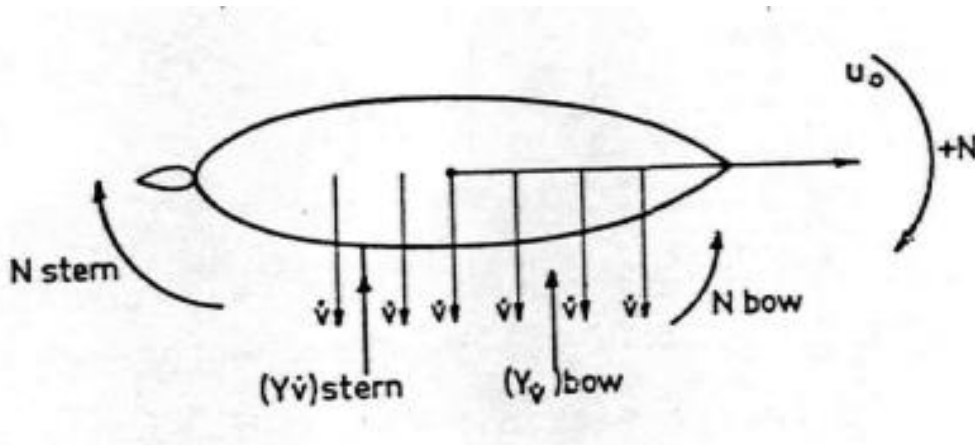
$L/B$	$Y_{\dot{v}}$
5	-0,9 m
8,5	-0,95 m
$\infty$	-1,0 m

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ανατρέχοντας στη σχέση (69), η πρώτη παρένθεση ισούται περίπου με το διπλάσιο του εκτοπίσματος και αποτελεί θετική ποσότητα:

$$(m' - Y_{\dot{v}}') \approx [m' - (-1 m')] \approx 2 m' > 0 \quad (89)$$

Επιπρόσθετα, λόγω της θετικής επιτάχυνσης  $\dot{v}$ , οι, παραπάνω παραγόμενες, υδροδυναμικές αντιδράσεις,  $Y_{\dot{v}}$ , προκαλούν ροπές αντίθετων φορών στην πλώρη και στην πρύμνη, εικόνα 23. Συγκεκριμένα, η θετική εγκάρσια επιτάχυνση συνεπάγεται

θετική ροπή  $\gamma_{aw}$ ,  $N_{\dot{v},stern}$  και αρνητική ροπή  $N_{\dot{v},bow}$ . Επομένως γίνεται αντιληπτό πως το πρόσημο του  $N_{\dot{v}}$  δεν είναι σταθερό. Παρόλο αυτό το γεγονός, η ροπή στην πρύμνη αντικρούεται με αυτή της πλώρης, μειώνοντας, έτσι, το μέτρο του συνολικού  $N_{\dot{v}}$ , ώστε να μην αποτελεί προβληματισμό.

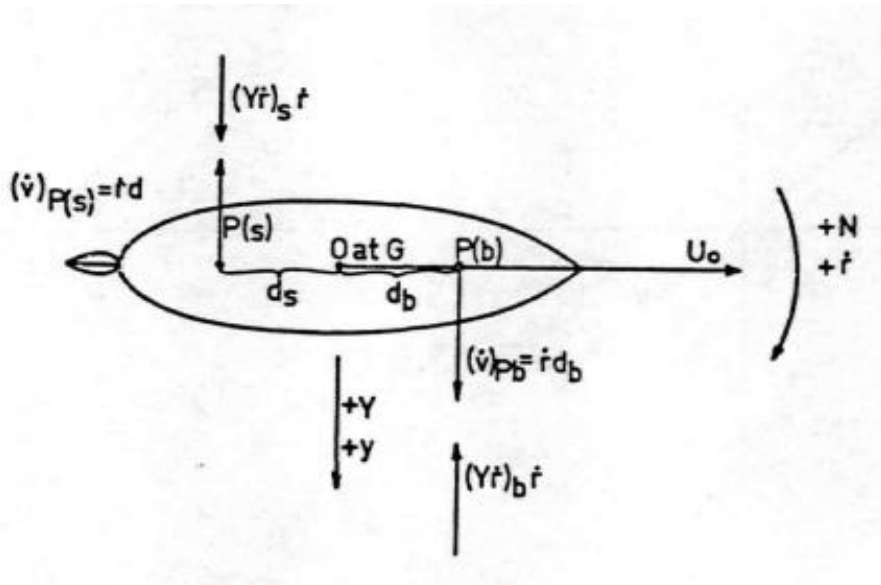


Εικόνα 23: Υδροδυναμικές αντιδράσεις σε σκάφος με επιτάχυνση στην εγκάρσια διεύθυνση [4]

Δύναμη  $\delta_{\text{sway}}$  και ροπή  $\gamma_{aw}$  υδροδυναμικής αντίδρασης λόγω γωνιακής επιτάχυνσης στην κάθετη, z, διεύθυνση,  $Y_r$  και  $N_r$

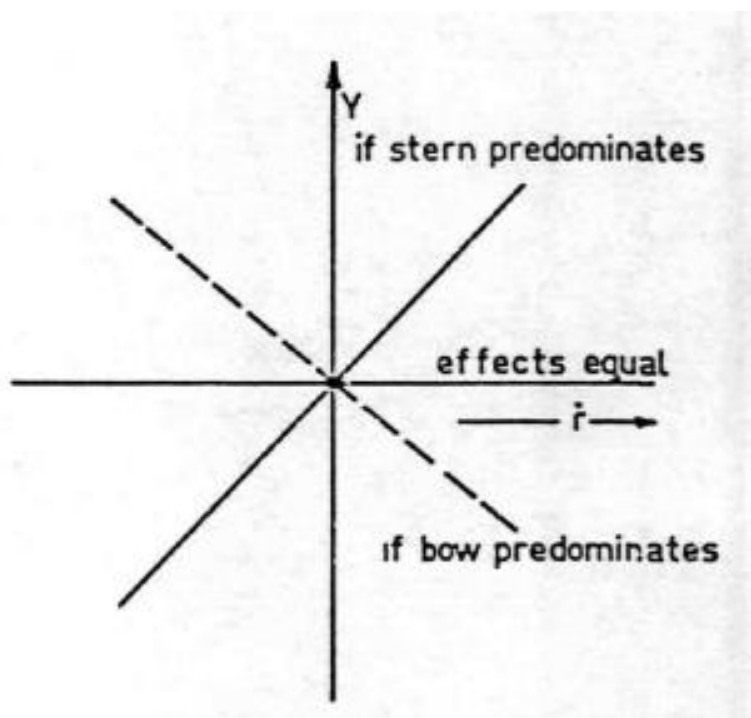
Επίσης, ο όρος συναντάται στους A και B συντελεστές της δευτεροβάθμιας εξίσωσης (68), όπως διακρίνεται στις παραπάνω εξισώσεις (69) και (70).

Στην εικόνα 24, μια γωνιακή επιτάχυνση,  $\dot{r}$ , θετικής φοράς, τείνει να στρίψει το σκάφος στην ίδια κατεύθυνση. Η συνθήκη αυτή, συνεπάγεται εγκάρσια επιτάχυνση της πλώρης προς τη θετική φορά, ενώ αντίθετης φοράς επιτάχυνση στην πρύμνη.



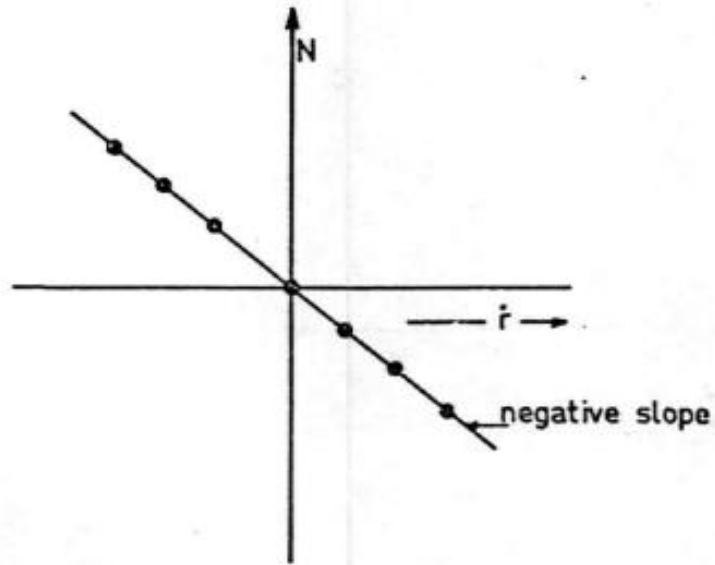
Εικόνα 24: Υδροδυναμικές αντιδράσεις σκάφους με γωνιακή επιτάχυνση [4]

Οι εγκάρσιες επιταχύνσεις  $\dot{v}$ , προκαλούν αντίδραση του ρευστού αντίθετης φοράς. Προκύπτει επομένως, αρνητική εγκάρσια υδροδυναμική αντίδραση λόγω γωνιακής επιτάχυνσης,  $(-Y_{\dot{r}, bow})$ , στην πλώρη και θετικού προσήμου στην πρύμνη  $(+Y_{\dot{r}, stern})$ . Άρα, υπάρχει η τάση αλληλοαναιρέσεως δυνάμεων μεταξύ πρύμνης και πλώρης. Το, μικρού μέτρου, αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης πρύμνης-πλώρης,  $Y_{\dot{r}}$ , είναι θετικό αν υπερτερήσει η πρύμνη, αρνητικό αν κυριαρχήσει η πλώρη και μηδέν αν έχουν ίδιο αντίκτυπο, εικόνα 25.



Εικόνα 25: Πρόσημο υδροδυναμικής αντίδρασης  $Y_{\dot{r}}$  σκάφους συναρτήσει της αλληλεπίδρασης πλώρης-πρύμνης [4]

Ωστόσο, οι αντιδράσεις αυτές (*sway*), δημιουργούν αρνητικές ροπές  $yaw$ ,  $N_{\dot{r}}$ , οι οποίες είναι μεγαλύτερου και υπολογίσιμου μέτρου από τις δυνάμεις στον εγκάρσιο άξονα. Υπενθυμίζεται η σημασία του δείκτη των παραπάνω όρων, η οποία σηματοδοτεί ως προς ποιο μέγεθος μελετάται η μεταβολή (μερική παράγωγος) του όρου. Σε αντίστροφη θεώρηση, μια αρνητική γωνιακή επιτάχυνση,  $\dot{r}$ , θα προκαλούσε θετικές ροπές υδροδυναμικής αντίδρασης  $yaw$ ,  $N_{\dot{r}}$ . Επομένως, η κλίση της συνάρτησης ροπής  $N$  συναρτήσει  $\dot{r}$ , είναι πάντα αρνητική, αφού είναι φθίνουσα συνάρτηση, εικόνα 26.



Εικόνα 26: Αναπαράσταση ροπής συναρτήσει της γωνιακής επιτάχυνσης [4]

Υπολογισμοί φανερώνουν την κλίμακα του μεγέθους της ροπής  $N_{\dot{r}}$  σε συσχετισμό με τη ροπή αδρανείας ως προς τον  $z$  άξονα, όπως ακολουθεί στον πίνακα 4<sup>[11]</sup>.

Πίνακας 4: Τιμές  $N_{\dot{r}}$  συναρτήσει λόγου  $L/B$

$L/B$	$N_{\dot{r}}$
5	$-0,7 I_z$
8,5	$-0,8 I_z$
$\infty$	$-1,0 I_z$

Σύμφωνα με τα παραπάνω και τη σχέση (69), η δεύτερη παρένθεση ισούται περίπου με το 1,8 της ροπής αδρανείας και αποτελεί θετική ποσότητα:

$$(I_z' - N_{\dot{r}}') \approx [I_z' - (-0,8 I_z')] \approx 1,8 I_z' > 0 \quad (90)$$

Εν κατακλείδι, ο συντελεστής  $A$  της δευτεροβάθμιας εξίσωσης και άρα η σχέση (69) αποτελεί θετική ποσότητα λόγω των σχέσεων (89) και (90).

$$A = (m' - Y_{\dot{v}}') (I_z' - N_{\dot{r}}') \approx 2 m' \cdot 1,8 I_z' > 0 \quad (91)$$

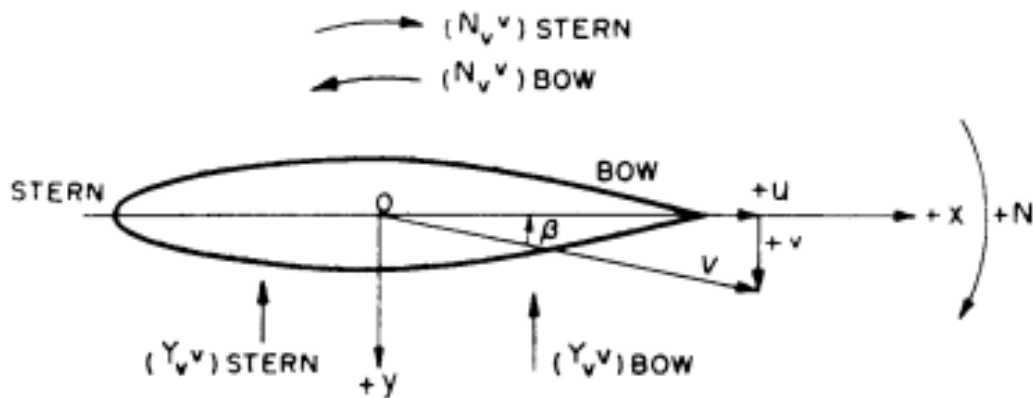


Απόρροια του θετικού προσήμου του συντελεστή A, αποτελεί η καλύτερη στόχευση της διερεύνησης των κριτηρίων ευστάθειας. Οι προϋποθέσεις όριζαν τους λόγους  $\frac{\Gamma}{A}$  και  $\frac{B}{A}$  θετικούς, σχέσεις (81), (85). Λόγω της (91), οι νέες παράμετροι αποτελούν τα θετικά πρόσημα των συντελεστών B και Γ.

- ο Συντελεστής B και Γ:

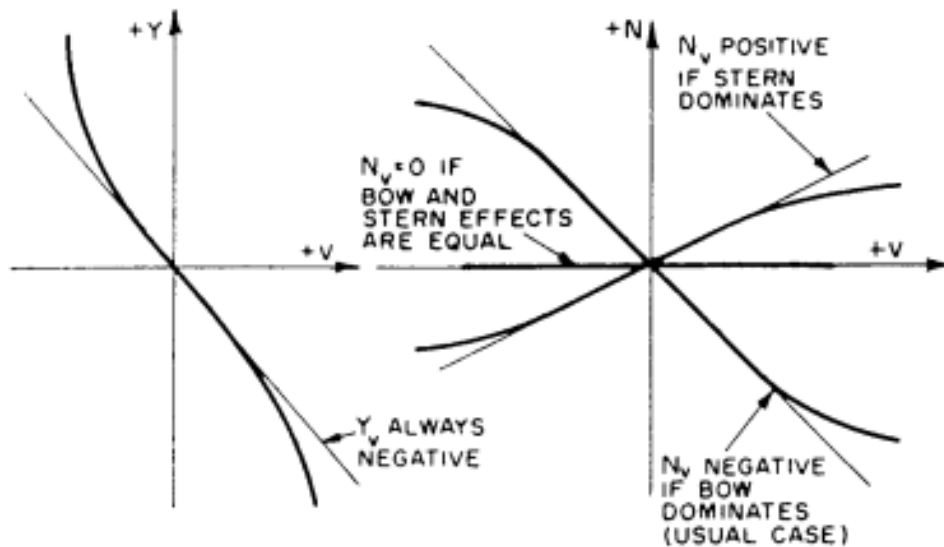
Δύναμη sway και ροπή yaw υδροδυναμικής αντίδρασης λόγω ταχύτητας και στην εγκάρσια διεύθυνση,  $Y_v$  και  $N_v$

Η πλώρη του σκάφους χαράζει πορεία με μη μηδενική γωνία προσβολής λόγω του συνδυασμού οριζόντιας ταχύτητας,  $u$ , και θετικής εγκάρσιας ταχύτητας  $v$ . Η ύπαρξη της δεύτερης προκαλεί δυνάμεις στον εγκάρσιο άξονα,  $Y_v$ , και ροπές  $N_v$ , εικόνα 27.



Εικόνα 27: Σκάφος με οριζόντια και εγκάρσια συνιστώσα ταχύτητας [10]

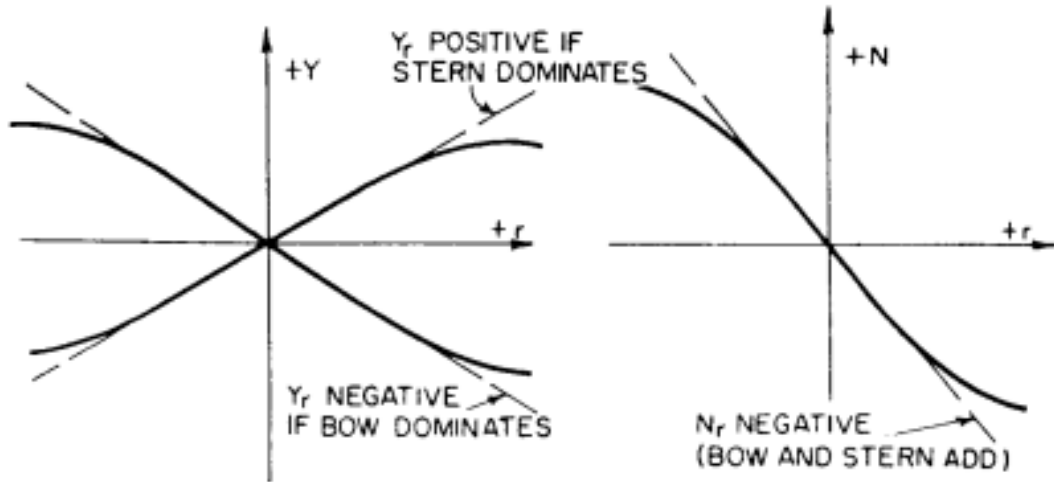
Ειδικότερα, οι δυνάμεις είναι αρνητικές τόσο στην πλώρη όσο και στην πρύμνη, άρα η κλίση της συνάρτησης  $Y=f(v)$  θα είναι αρνητική, ενώ οι αντίστοιχες ροπές διαφέρουν. Στην πλώρη υπάρχει ροπή,  $N_{v,bow}$ , αρνητικής φοράς, σε αντίθεση με της πρύμνης,  $N_{v,stern}$ , η οποία έχει θετική φορά. Παρατηρείται και εδώ η αντίθετη επίδραση πλώρης-πρύμνης. Επομένως, το μέτρο της ροπής yaw, λόγω της εγκάρσιας συνιστώσας της ταχύτητας, είναι μικρό. Ωστόσο το πρόσημό της, όπως εξεξηγήθηκε προηγούμενα, θα είναι θετικό εάν υπερισχύει η πρύμνη, αρνητικό για κυρίαρχη πλώρη και μηδέν για ισοδύναμη επίδραση. Τα παραπάνω αποτυπώνονται στα ακόλουθα σχήματα.



Εικόνα 28: Πρόσημο υδροδυναμικών αντιδράσεων  $Y_v$ ,  $N_v$  σκάφους συναρτήσει της αλληλεπίδρασης πλώρης-πρύμνης [4]

Δύναμη sway και ροπή yaw υδροδυναμικής αντίδρασης λόγω γωνιακής ταχύτητας  $r$ ,  $Y_r$  και  $N_r$

Σε αυτήν την περίπτωση, εκτός από την οριζόντια ταχύτητα  $u$ , το πλοίο έχει και γωνιακή ταχύτητα  $r$ , θετικής κατεύθυνσης. Λόγω της τελευταίας, το σκάφος σχηματίζει γωνία με το διαμήκη άξονα. Ως εκ τούτου, η πλώρη δέχεται αντίθετη, δηλαδή αρνητική, εγκάρσια δύναμη  $Y_r$ , όπως επίσης και αρνητικής κατεύθυνσης ροπή  $N_r$ . Εντούτοις, η πρύμνη, λόγω της γωνίας προσβολής από την αντίθετη πλευρά, δέχεται θετική αντίδραση  $Y_r$  και αρνητική ροπή  $N_r$ . Είναι κατανοητό πως η επίδραση γωνιακής ταχύτητας με αρνητική φορά, θα αντίστρεφε τα πρόσημα, αφού οι γωνίες προσβολής θα άλλαζαν τεταρτημόριο. Συγκεντρωτικά, η ροπή θα είναι θετική για αρνητική γωνιακή ταχύτητα και αρνητική για θετική γωνιακή ταχύτητα. Πρόκειται, δηλαδή, για φθίνουσα συνάρτηση και το ζητούμενο μέγεθος, η κλίση, θα είναι πάντα αρνητική. Το πρόσημο αλλά και το μέγεθος της εγκάρσιας δύναμης  $Y_r$  εξαρτάται από την επικράτηση της πλώρης ή της πρύμνης. Όπως έχει αναλυθεί προηγούμενα, η επικράτηση της πρύμνης επιφέρει θετικό αποτέλεσμα και ούτω καθεξής. Συνεπώς, η σχέση πρύμνης-πλώρης μειώνει το μέτρο της  $Y_r$ , ενώ δεν συμβαίνει το ίδιο με τη ροπή, η οποία διατηρεί σημαντικό μέτρο.



Εικόνα 29: Πρόσημο υδροδυναμικών αντιδράσεων  $Y_r$ ,  $N_r$  σκάφους συναρτήσει της αλληλεπίδρασης πλήρης-πρύμνης [4]

Με αναλυμένες τις υδροδυναμικές παραγώγους ελκτικότητας που συναντώνται στους συντελεστές τις εξίσωσης (68), είναι δυνατός ο προσδιορισμός του προσήμου και για τους συντελεστές B και Γ.

$$B = - (m' - Y_{\dot{v}}') N_r' - (I_z' - N_{\dot{r}}') Y_v' \quad (70)$$

$$\Gamma = N_r' Y_v' + (m' - Y_r') N_v' \quad (71)$$

Στη σχέση (70), ο πρώτος όρος αποκτά θετικό πρόσημο αφού η αλληλουχία προσήμων είναι αρνητικό επί θετική παρένθεση επί αρνητικό όρο:

$$- (m' - Y_{\dot{v}}') N_r' \rightarrow [- \cdot (+) \cdot - = +] \quad (92)$$

Αντίστοιχα, ακολουθεί και η δεύτερη ποσότητα με θετικό πρόσημο:

$$- (I_z' - N_{\dot{r}}') Y_v' \rightarrow [- \cdot (+) \cdot - = +] \quad (93)$$

Επομένως, ο συντελεστής B αποτελεί θετική ποσότητα.

$$B = - (m' - Y_{\dot{v}}') N_r' - (I_z' - N_{\dot{r}}') Y_v' > 0 \quad (94)$$

Απομένει, έτσι, ο συντελεστής Γ, σχέση (71), ως εναπομένον κριτήριο ευστάθειας. Ο πρώτος όρος είναι γινόμενο δυο αρνητικών μεγεθών,  $N_r' Y_v'$ , άρα δεν αποτελεί κώλυμα. Ο δεύτερος όρος, ωστόσο, δεν διατηρεί πάντα πρόσημο. Συγκεκριμένα, η παρένθεση παραμένει θετική, λόγω του μικρού, ανεξαρτήτου προσήμου, μεγέθους του αφαιρέτη, τόσο γενικά όσο και συγκριτικά με το εκτόπισμα του πλοίου  $m$ .

$$(m' - Y_r') > 0 \quad (95)$$

Όμως, ο όρος  $N_v'$ , ο οποίος πολλαπλασιάζεται με την παραπάνω παρένθεση, μεταβάλλει το πρόσημό του ανάλογα με τη περίπτωση σκάφους. Για να προκύψει θετικός συντελεστής  $\Gamma$ , είναι αναγκαίο το θετικό πρόσημο του  $N_v'$ . Διαφορετικά, πρέπει να ισχύει:

$$N_r' Y_v' > - (m' - Y_r') N_v' \Rightarrow N_r' Y_v' > (Y_r' - m') N_v' \quad (96)$$

Η παραπάνω ανίσωση εκφράζεται ισοδύναμα ως μια σύγκριση των δυνάμεων  $sway$  και  $yaw$  ως:

$$\frac{Nr'}{(Y_r' - m')} > \frac{Nv'}{Yv'} \quad (97)$$

Η δυναμική ευστάθεια ευθείας πορείας εξαρτάται από την ισχύ της ανίσωσης (96) ή ισοδύναμα της (97).

Κρίνεται εύλογη η παράθεση ενός συγκεντρωτικού πίνακα προσήμων των υδροδυναμικών παραγώγων ελκτικότητας που αναλύθηκαν σε αυτή την ενότητα.

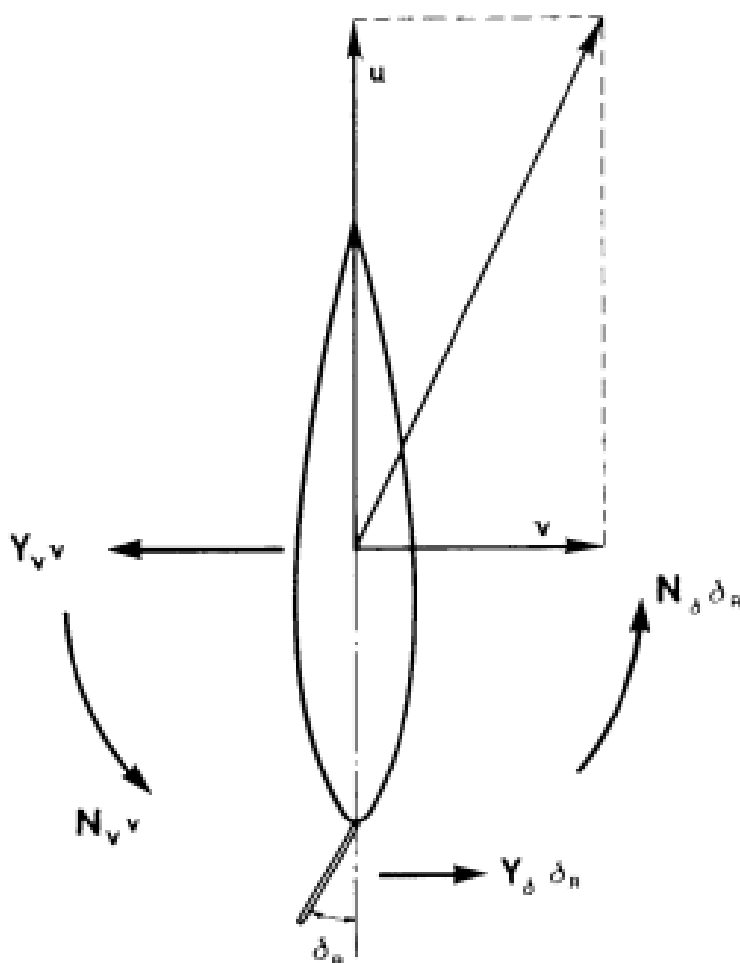
Πίνακας 5: Πρόσημα υδροδυναμικών παραγώγων ελκτικότητας

Υδροδυναμικών παραγώγων ελκτικότητας	Πρόσημο
$Y_v'$	Αρνητικό (-)
$N_v'$	Κατά περίπτωση (+/-)
$Y_r'$	Κατά περίπτωση (+/-)
$N_r'$	Αρνητικό (-)
$Y_{\dot{v}}'$	Αρνητικό (-)
$Y_{\dot{r}}'$	Κατά περίπτωση (+/-)
$N_{\dot{r}}'$	Αρνητικό (-)
$N_{\dot{v}}'$	Κατά περίπτωση (+/-)

Συνολικά, η απόδοση του χαρακτηρισμού δυναμικής αστάθειας σε ένα σκάφος, όπως αναλύθηκε, υπάγεται στις τιμές των ριζών  $\sigma_1$  και  $\sigma_2$ , σχέση (73). Ανάλογα, το στάδιο της μελέτης, οι τιμές προσεγγίζονται ή και υπολογίζονται. Σε πρώιμα επίπεδα σχεδίασης, ο ναυπηγός αντλεί πληροφορίες από παλινδρομήσεις συναρτήσεων των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του σκάφους. Μετέπειτα, δοκιμές και πειράματα προσφέρουν σημαντικά, καταλυτικά δεδομένα, τα οποία αξιοποιούνται από κατάλληλες εξισώσεις και μεθόδους. Φυσικά, μαθηματικά μοντέλα και προσομοιώσεις αποτελούν, πλέον, αναπόσπαστο μέρος μιας ολοκληρωμένης ναυπηγικής μελέτης.

### 4.4.3 Εξίσωση *Nomoto*

Η, ως αυτό το σημείο, ανάλυση των εξισώσεων κίνησης αφορούν μη ενεργό πηδάλιο, με μηδενική γωνία εκτροπής αυτού ( $\delta=0$ ) ως προς το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας. Ωστόσο, η χρήση του πηδαλίου είναι απαραίτητη, όπως έχει προαναφερθεί, για την ελκτικότητα. Εξού, ακολουθούν οι εξισώσεις για *surge* και *yaw*, (65α) και (65β) αντίστοιχα, σε πλήρη μορφή και με προσθήκη των υδροδυναμικών δυνάμεων λόγω της ύπαρξης πηδαλίου και της σχηματιζόμενης με το διάμηκες γωνίας. Αναλυτικότερα, η εκτροπή του πηδαλίου παράγει μια δύναμη ελέγχου  $Y_\delta$  στον  $y$  και μια ροπή  $N_\delta$  περί τον  $z$  άξονα. Επιλέγεται η θετική γωνία εκτροπής πηδαλίου προς την αριστερή πλευρά θεωρώντας την πλώρη (*port*). Η αναπαράσταση της εικόνας 30 οπτικοποιεί τη ροπή, η ύπαρξη της οποίας τείνει το σκάφος να περιστραφεί, σχηματίζοντας μια γωνία προσπτώσεως σχετικά με τη ροή. Η συνθήκη αυτή δημιουργεί υδροδυναμικές δυνάμεις και ροπές επί του σκάφους, η ύπαρξη των οποίων αναπτύσσει τις ελκτικές ικανότητες.



Εικόνα 30: Προκαλούμενη ροπή λόγω της γωνίας εκτροπής του πηδαλίου [11]

Sway:

$$(m' - Y_{\dot{v}}') \dot{v}' - v' Y_v' - \dot{r}' Y_r' + (m' - Y_r') r' = Y_{\delta}' \delta' \quad (98\alpha)$$

Yaw:

$$-\dot{v}' N_{\dot{v}}' - v' N_v' + (I_z' - N_{\dot{r}}') \dot{r}' - r' N_r' = N_{\delta}' \delta' \quad (98\beta)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις θα αποσυζευχθούν μέσω του διαφορικού τελεστή  $D$ .

Yaw:

$$-[N_v' + N_{\dot{v}}' D] v' + [(I_z' - N_{\dot{r}}') D - N_r'] r' = N_{\delta}' \delta' \quad (99\alpha)$$

Sway:

$$[(m' - Y_{\dot{v}}') D - Y_v'] v' + [(m' - Y_r') - Y_r' D] r' = Y_{\delta}' \delta' \quad (99\beta)$$

Ο *Nomoto* (1957) διαμόρφωσε εκ νέου τις εξισώσεις αυτές χρησιμοποιώντας τις ποσότητες  $T$  και  $K$ , αντικαθιστώντας τις εκφράσεις των υδροδυναμικών συντελεστών. Συγκεκριμένα, με τη μέθοδο της αντικατάστασης επιλύονται οι σχέσεις (99α) και (99β), ώστε να προκύψει ξεχωριστή σχέση ως προς την εγκάρσια συνιστώσα της ταχύτητας  $v'$ , σχέση (100), όσο και ως προς το ρυθμό περιστροφής  $r'$ , σχέση (46). Στις προαναφερόμενες σχέσεις εισχωρούν οι δείκτες  $T$  και  $K$ , διαμορφώνοντας τις εξισώσεις *Nomoto*, σχέσεις (44α) και (44β). Αποτελούν εργαλείο μελέτης δυναμικής ευστάθειας και μελέτης ομαλής στροφής.

Yaw:

Επίλυση της (99β) ως προς  $v'$ :

$$v' = \frac{Y_{\delta}' \delta' + [Y_r' D - (m' - Y_r')] r'}{(m' - Y_{\dot{v}}') D - Y_v'} \quad (100)$$

Αντικατάσταση της (100) στη (99α):

$$-[N_v' + N_{\dot{v}}' D] \frac{Y_{\delta}' \delta' + [Y_r' D - (m' - Y_r')] r'}{(m' - Y_{\dot{v}}') D - Y_v'} + [(I_z' - N_{\dot{r}}') D - N_r'] r' = N_{\delta}' \delta' \Rightarrow$$

$$\left[ \frac{(m' - Y_{\dot{v}}')(I_z' - N_{\dot{r}}') - N_{\dot{v}}' Y_r'}{N v' (m' - Y_r') + Y_{\dot{v}}' N r'} \right] D^2 r' +$$

$$\left[ \frac{[N_{\dot{v}}' (m' - Y_r')' - N v' Y_r' - Y_{\dot{v}}' (I_z' - N_{\dot{r}}') - N r' (m' - Y_{\dot{v}}')]}{N v' (m' - Y_r') + Y_{\dot{v}}' N r'} \right] D r' + r' =$$

$$\left[ \frac{N v' Y_{\delta} - Y_{\dot{v}}' N \delta'}{N v' (m' - Y_r') + Y_{\dot{v}}' N r'} \right] \delta' + \left[ \frac{N_{\dot{v}}' Y_{\delta}' + N \delta' (m' - Y_{\dot{v}}')}{N v' (m' - Y_r') + Y_{\dot{v}}' N r'} \right] D \delta' \quad (101)$$

Εξίσωση *Nomoto* αναφορικά με κίνηση yaw:

$$T_1' T_2' \ddot{r}' + (T_1' + T_2') \dot{r}' + r' = K' \delta' + K' T_3' \dot{\delta}' \quad (102\alpha)$$

όπου:

$$T_1' T_2' = \frac{(m' - Y_{\dot{v}}')(I_Z' - N_{\dot{r}}') - N_{\dot{v}}' Y_{\dot{r}}'}{N v' (m' - Y_{\dot{r}}') + Y_{\dot{v}}' N r'} \quad (103\alpha)$$

$$T_1' + T_2' = \frac{[N_{\dot{v}}' (m' - Y_{\dot{r}}')' - N v' Y_{\dot{r}}' - Y_{\dot{v}}' (I_Z' - N_{\dot{r}}') - N r' (m' - Y_{\dot{v}})']}{N v' (m' - Y_{\dot{r}}') + Y_{\dot{v}}' N r'} \quad (103\beta)$$

$$K' = \frac{N v' Y_{\delta} - Y_{\dot{v}}' N \delta'}{N v' (m' - Y_{\dot{r}}') + Y_{\dot{v}}' N r'} \quad (103\gamma)$$

$$T_3' = \frac{N_{\dot{v}}' Y_{\delta}' + N \delta' (m' - Y_{\dot{v}}')}{N v' Y_{\delta} - Y_{\dot{v}}' N \delta'} \quad (103\delta)$$

Όμοια για την κίνηση *Sway* με επίλυση της (99β) ως προς  $r'$ :

$$r' = \frac{N_{\delta}' \delta + [N_{\dot{v}}' + N_{\dot{v}}' D] v'}{(I_Z' - N_{\dot{r}}') D - N_{\dot{r}}'} \quad (104)$$

Λαμβάνεται η εξίσωση *Nomoto* αναφορικά με κίνηση *sway*:

$$T_1' T_2' \ddot{v}' + (T_1' + T_2') \dot{v}' + v' = K_v' \delta + K_v' T_4' \dot{\delta} \quad (102\beta)$$

όπου:

$$T_1' T_2' = \frac{(m' - Y_{\dot{v}}')(I_Z' - N_{\dot{r}}') - N_{\dot{v}}' Y_{\dot{r}}'}{N v' (m' - Y_{\dot{r}}') + Y_{\dot{v}}' N r'} \quad (105\alpha)$$

$$T_1' + T_2' = \frac{[N_{\dot{v}}' (m' - Y_{\dot{r}}')' - N v' Y_{\dot{r}}' - Y_{\dot{v}}' (I_Z' - N_{\dot{r}}') - N r' (m' - Y_{\dot{v}})']}{N v' (m' - Y_{\dot{r}}') + Y_{\dot{v}}' N r'} \quad (105\beta)$$

$$K' = \frac{N r' Y_{\delta}' - (Y_{\dot{r}}' - m') N \delta'}{Y_{\dot{v}}' N r' - N v' (Y_{\dot{r}}' - m')} \quad (105\gamma)$$

$$T_4' = \frac{N_{\dot{r}}' Y_{\delta}' - N_{\delta}' Y_{\dot{r}}'}{N_{\dot{r}}' Y_{\delta}' - N_{\delta}' (Y_{\dot{r}}' - m')} \quad (105\delta)$$

Σημειώνεται πως οι εξισώσεις στα κεφάλαια της εργασίας αναφέρονται σε σύστημα αξόνων του οποίου το κέντρο συμπίπτει με το κέντρο βάρους του σκάφους. Οι σχέσεις (102α) και (102β) είναι επίσης γραμμικές, όπως αυτές από τις οποίες προέκυψαν. Σημειώνεται εκ νέου πως η μελέτη δυναμικής ευστάθειας ευθύγραμμης πορείας αφορά τις αποκρίσεις του πλοίου με το πηδάλιο στο επίπεδο συμμετρίας. Επομένως η γωνία εκτροπής είναι μηδενική,  $\delta=0$ . Ακόμα, η μη κίνηση του πηδαλίου μηδενίζει και την παράγωγο της γωνίας,  $\dot{\delta} = 0$ . Προκύπτουν, λοιπόν, οι ομογενείς εξισώσεις των διαφορικών εξισώσεων (102α) και (102β). Απόρροια αποτελεί η ομοιότητα στη μορφή της λύσης με τις σχέσεις (66), (67).

$$T_1' T_2' \ddot{v}' + (T_1' + T_2') \dot{v}' + v' = 0 \quad (106\alpha)$$

$$T_1' T_2' \ddot{r}' + (T_1' + T_2') \dot{r}' + r' = 0 \quad (106\beta)$$

και

$$v'_{\text{Nomoto}} = v_1 e^{\sigma_1 t} + v_2 e^{\sigma_2 t} \quad (107\alpha)$$

$$r'_{\text{Nomoto}} = r_1 e^{\sigma_1 t} + r_2 e^{\sigma_2 t} \quad (107\beta)$$

Όπως έχει δειχθεί στην προηγούμενη ενότητα, η σύγκλιση στο μηδέν αντιστοιχεί σε ευσταθές σκάφος. Οι τιμές των  $\sigma_1$  και  $\sigma_2$  ορίζονται ως ακολούθως με τη βοήθεια των τύπων *Vieta*.

$$\sigma_1 = -\frac{1}{T_1'} \quad (108\alpha)$$

$$\sigma_2 = -\frac{1}{T_2'} \quad (108\beta)$$

Υπενθυμίζεται η σύγκλιση προκύπτει με αρνητικό πρόσημο των  $\sigma_1$  και  $\sigma_2$ . Άρα, με απλή άλγεβρα ζητείται το γινόμενο του θετικό και το άθροισμα αρνητικό.

$$\left(-\frac{1}{T_1'}\right) \left(-\frac{1}{T_2'}\right) > 0 \text{ και } -\frac{1}{T_1'} - \frac{1}{T_2'} < 0 \quad (109)$$

ή

$$\frac{1}{T_1'} \frac{1}{T_2'} > 0 \text{ και } \frac{T_1' + T_2'}{T_1' T_2'} > 0 \quad (110)$$



Η αντικατάσταση των υδροδυναμικών συντελεστών στις συνθήκες (110) και η ανάλυση των προσήμων των ποσοτήτων, όπως στην ενότητα 4.4.2, καταλήγει και επαληθεύει την κρίσιμη σχέση (96) είτε την ισοδύναμη (97).

Η εξίσωση του *Nomoto* δύναται εφαρμογής σε εξέταση της ικανότητας στροφής, εκτός από την δυνατότητα διατήρησης πορείας, η οποία αναλύθηκε στις προηγούμενες ενότητες.

Η πραγματοποίηση στροφής ή ελικτικής κίνησης προϋποθέτει τη χρήση πηδαλίου, επομένως, η σχηματιζόμενη γωνία,  $\delta$ , μεταξύ πηδαλίου και διαμήκους επιπέδου συμμετρίας σκάφους είναι διάφορη του μηδενός. Ωστόσο, θεωρείται πως η γωνία πηδαλίου είναι μικρή για μη έντονους ελιγμούς. Η εξίσωση *Nomoto*, λοιπόν, συμπεριλαμβάνει και τους όρους στο δεξί μέλος της εξίσωσης:

$$T_1' T_2' \ddot{r}' + (T_1' + T_2') \dot{r}' + r' = K' \delta' + K' T_3' \delta' \quad (102\alpha)$$

Ωστόσο, σε μια πιο προσεγγιστική συνθήκη, κατά την οποία δεν γίνεται συχνή κίνηση του πηδαλίου και απαλειφθεί έτσι η εγκάρσια συνιστώσα της ταχύτητας,  $v$ , προκύπτει η απλουστευμένη μορφή της εξίσωσης (40β) για το *yaw*:

$$-v' N_v' + (I_z' - N_r') \dot{r}' - r' N_r' = N_\delta' \delta' \quad (98\beta) \Rightarrow (I_z' - N_r') \dot{r}' - r' N_r' = N_\delta' \delta' \quad (111)$$

Σημειώνεται πως ο αφαιρετέος όρος  $v' N_v'$  αντιπροσωπεύει μια μικρή ποσότητα, όπως έχει αναλυθεί προηγούμενα στην υποενότητα 4.4.2. Μάλιστα η ελάχιστη τιμή του  $N_v$  προκύπτει για σκάφη με παρόμοια γεωμετρία πρύμνης-πλώρης, καθώς εξουδετερώνει η πρώτη την επίδραση της δεύτερης και αντίστροφα. Είναι προφανές πως η σχέση (111) είναι αποζευγμένη από μεγέθη συναρτήσεως της ταχύτητας *sway*. Παραμένοντας στο ίδιο πλαίσιο γραφής, η εξίσωση *Nomoto*, έπειτα από διαίρεση με τον όρο  $N_r'$ , καταλήγει στη μορφή:

$$T' \dot{r}' + r' = K' \delta \quad (112)$$

όπου:

$$T' = \frac{(I_z' - N_r')}{N_r'} \quad (113\alpha)$$

$$K' = \frac{N_\delta'}{N_r'} \quad (113\beta)$$

Η εξίσωση (112) επιλύεται ως γραμμική διαφορική εξίσωση πρώτης τάξης:

$$r'(t') + p(t')r(t') = q(t') \quad (114)$$

όπου:

$$p(t') = \frac{1}{T'}, \quad q(t') = \frac{K'}{T'} \delta \quad (115\alpha), (115\beta)$$

Γενική της λύση αποτελεί:

$$r(t') = e^{-\int p(t') dt'} \left( c + \int q(t') e^{\int p(t') dt'} dt' \right) \quad (116)$$

Αναλυτικότερα:

$$\begin{aligned} r(t') &= e^{-\int \frac{1}{T'} dt'} \left( c + \int \frac{K'}{T'} \delta e^{\int \frac{1}{T'} dt'} dt' \right) \Rightarrow \\ r(t') &= e^{-\frac{t'}{T'}} \left( c + \int \frac{K'}{T'} \delta e^{\frac{t'}{T'}} dt' \right) \Rightarrow \\ r(t') &= e^{-\frac{t'}{T'}} \left( c + \frac{K'}{T'} \delta \int e^{\frac{t'}{T'}} dt' \right) \Rightarrow \\ r(t') &= e^{-\frac{t'}{T'}} \left( c + \frac{K'}{T'} \delta T' e^{\frac{t'}{T'}} \right) \Rightarrow \\ r(t') &= e^{-\frac{t'}{T'}} \left( c + K' \delta e^{\frac{t'}{T'}} \right) \end{aligned} \quad (117)$$

Όμως τη χρονική στιγμή  $t=0$  θεωρείται πως δεν υπάρχει στροφή και γωνιακή ταχύτητα, άρα  $r=0$ . Αντικαθιστώντας στην τελευταία έκφραση:

$$0 = 1 \left( c + K' \delta \right) \Rightarrow c = - K' \delta \quad (118)$$

Επομένως, η λύση της σχέσης (54) είναι:

$$\begin{aligned} r(t') &= e^{-\frac{t'}{T'}} \left( -K' \delta + K' \delta e^{\frac{t'}{T'}} \right) \Rightarrow \\ r(t') &= -K' \delta e^{-\frac{t'}{T'}} + K' \delta \Rightarrow \\ r(t') &= K' \delta \left( 1 - e^{-\frac{t'}{T'}} \right) \end{aligned} \quad (119)$$

Όπως παρατηρείται ο ρυθμός της ταλαντωτικής κίνησης  $\gamma_{\omega\omega}$  αυξάνεται εκθετικά με το χρόνο, διατηρώντας την εξάρτησή του από το δείκτη πηδαλιουχίας  $T'$  όπου μειώνει το ρυθμό αύξησης. Κατά αυτόν τον τρόπο, προσεγγίζει τη σταθερή τιμή  $K' \delta$ . Ωστόσο, στη μελέτη της ελκτικότητας αλλά και στην εξέταση στροφής, όπου ασχολείται η παρούσα ενότητα, αποτελεί ένα εκ των ζητούμενων, ο υπολογισμός της γωνίας πορείας  $\psi$ . Υπενθυμίζεται πως στην ενότητα 4.1.2 ορίστηκε η συνιστώσα της γωνιακής ταχύτητας ως προς τον  $z$  άξονα ως  $\frac{d\psi}{dt} = r$  ή  $\frac{d\psi}{dt'} = r'$  ().

Από την ισότητα απορρέει:

$$\begin{aligned} \frac{d\psi}{dt'} &= K' \delta \left( 1 - e^{-\frac{t'}{T'}} \right) \Rightarrow \\ \psi &= \int \left[ K' \delta \left( 1 - e^{-\frac{t'}{T'}} \right) \right] dt' \Rightarrow \\ \psi &= K' \delta \int \left( 1 - e^{-\frac{t'}{T'}} \right) dt' \Rightarrow \\ \psi &= K' \delta \left[ t' + T' e^{-\frac{t'}{T'}} + C \right] \end{aligned} \quad (120)$$

Όπως προηγούμενα γίνεται αντικατάσταση για  $t = 0$  και άρα  $\psi = 0$ :

$$0 = K' \delta [ T' + C ] \Rightarrow C = - T' \quad (121)$$

Επαγωγικά, η μεταβολή της γωνίας πορείας του σκάφους στο χρόνο δίνεται από τη σχέση:

$$\psi = K' \delta \left[ t' + T' e^{-\frac{t'}{T'}} - T' \right] \quad (122)$$

ή

$$\psi = K' \delta \left[ t' - T' \left( 1 - e^{-\frac{t'}{T'}} \right) \right] \quad (123)$$

Αντίστοιχα, η γωνία πορείας για την πλήρη εξίσωση *Nomoto*:

$$\psi = K' \delta \left[ t' - (T'_1 + T'_2 - T'_3) + \frac{(T'_1 - T'_3)}{(T'_1 - T'_2)} T'_1 e^{-\frac{t'}{T'_1}} - \frac{(T'_2 - T'_3)}{(T'_1 - T'_2)} T'_2 e^{-\frac{t'}{T'_2}} \right] \quad (124)$$

Η σχέση που συνδέει τη γραμμική *surge* ( $U$ ) με τη γωνιακή ταχύτητα ( $r$ ) προκύπτει από τον ορισμό της μέσης ταχύτητας για μήκος διαδρομής ίσο με την περιφέρεια του κύκλου στροφής, ακτίνας  $R$ , σε χρονικό διάστημα μιας περιόδου  $T$ .

$$U = \frac{S}{t} = \frac{2\pi R}{T} = rR \quad (125)$$

ή

$$U = r \frac{D}{2} \quad (126)$$

Η αδιαστατοποίηση της σχέσης πραγματοποιείται διαιρώντας τη διάμετρο και τη γραμμική ταχύτητα με τους όρους  $L$  και  $U$  αντίστοιχα, όπως συνέβη ανάλογα με τις υδροδυναμικές παραγώγους.

$$\frac{U}{U} = r' \frac{D}{2L} \Rightarrow r' = \frac{2L}{D} \quad \text{ή} \quad r' = \frac{L}{R} \quad (127)$$

Ωστόσο, για μόνιμο κύκλο στροφής (*steady turning*) οι χρονικοί όροι της σχέσης (119) απαλείφονται, αφού τόσο η γραμμική όσο και η γωνιακή ταχύτητα μένουν αμετάβλητες στο χρόνο. Έπειτα από τη σχέση (127) απλοποιείται στη μορφή:

$$R' = K' \delta_o \quad (128)$$

Οι σχέσεις (127) και (128) παράγουν την έκφραση της ακτίνας συναρτήσει του δείκτη πηδαλιουχίας  $K$ :

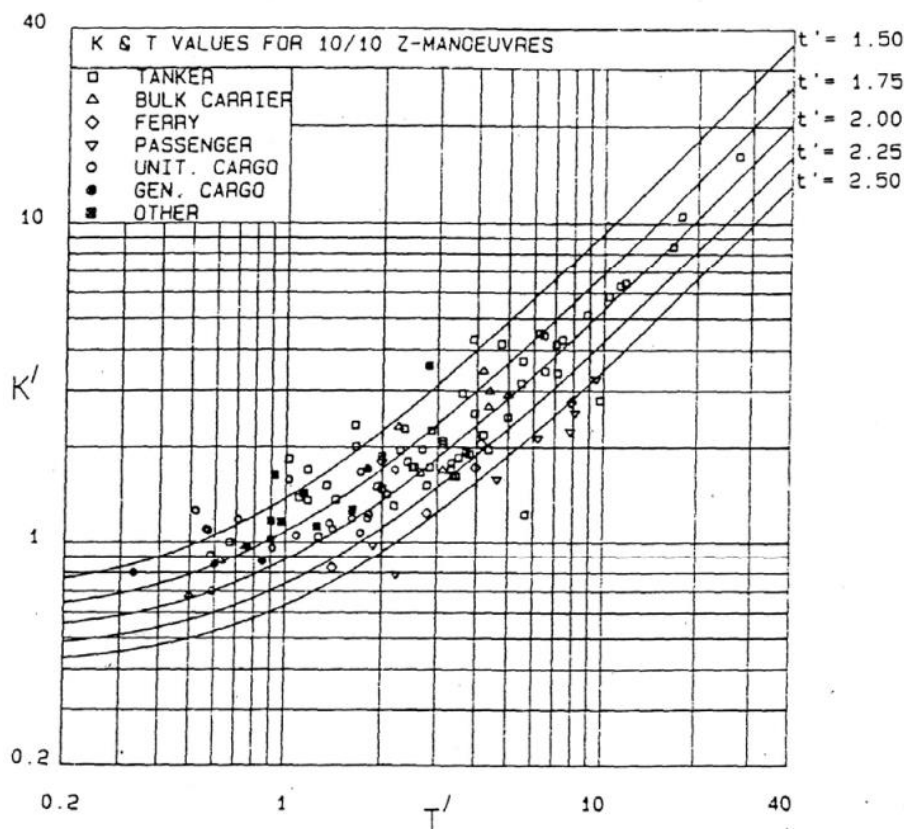
$$R = \frac{L}{K' \delta_o} \quad (129)$$

#### 4.4.4 Δείκτες πηδαλιουχίας και ικανότητας στροφής

Το μέτρο του δείκτη πηδαλιουχίας  $K'$  χαρακτηρίζει την ικανότητα στροφής. Συγκεκριμένα, μεγαλύτερη τιμή του  $K'$  συνεπάγεται μεγαλύτερη ευχέρεια εκτέλεσης κύκλου στροφής. Ταυτόχρονα, για μια ορισμένη ακτίνα στροφής επιτρέπει μικρότερη γωνία πηδαλίου, όπως φαίνεται στη σχέση (129). Στον αντίποδα, μικρότερος δείκτης  $T'$  σηματοδοτεί την αμεσότερη αντίδραση του σκάφους αναφορικά με την εκτροπή του πηδαλίου. Επομένως, συνδέεται με την ικανότητα ελέγχου και την εναλλαγή της πορείας. Συνεπώς, γίνεται αντιληπτό πως οι δείκτες πηδαλιουχίας  $K'$  και  $T'$  είναι συνυφασμένοι με τα μεγέθη του κύκλου στροφής. Μάλιστα στα πλαίσια της γραμμικότητας, η ελικτικότητα ενός σκάφους χαρακτηρίζεται εξ ολοκλήρου από αυτούς. Συναντώνται στις εξισώσεις συνήθως με την αδιάστατη έκφραση τους, η οποία και ακολουθεί:

$$K' = \frac{L}{V} K, T' = \frac{V}{L} T \quad (130)$$

Η εξίσωση *Nomoto* προσφέρεται για το θεωρητικό υπολογισμό των δεικτών πηδαλιουχίας, εφόσον είναι γνωστά τα υπόλοιπα μεγέθη. Οι πειραματικές μετρήσεις των δεικτών λαμβάνονται από τις δοκιμές πηδαλιουχίας ή και από την εκτέλεση ελιγμών από ελεύθερα μοντέλα.



Εικόνα 31: Τιμές δεικτών πηδαλιουχίας  $K$  και  $T$  για διάφορους τύπους πλοίων [44]

Σύμφωνα με τα παραπάνω συμπεραίνεται πως ο λόγος  $\frac{K'}{T'}$  προτιμάται να είναι μεγάλου μέτρου, αφού αποτελεί ένδειξη πλοίου με καλές ελκτικές ικανότητες. Αντίστοιχα, ο δείκτης ικανότητας στροφής  $P$  ή *Norrbin parameter* ορίζεται από το λόγο:

$$P = \frac{K'}{2T'} \quad (131)$$

Συνεπώς, μεγάλος δείκτης  $P$  συνεπάγεται σκάφους καλής ελκτικότητας και ελεγχιμότητας. Ωστόσο αδυνατεί να χαρακτηρίσει την ικανότητα διατήρησης της πορείας ενός σκάφους.

#### 4.5 Μη γραμμική θεωρία ελκτικότητας

Η πλήρης μελέτη της συμπεριφοράς πλοίων δεν μπορεί να καλυφθεί στα πλαίσια της γραμμικότητας. Συγκεκριμένα, τα εδάφια της αστάθειας των σκαφών αδυνατούν να περιγραφούν μέσω αυτής, όπως συμβαίνει και με τις κλειστές, απότομες επιχειρήσεις στροφών που χαρακτηρίζονται από τη μεγάλη εκτροπή του πηδαλίου. Επομένως, καθίσταται αναγκαία η ύπαρξη ικανών εργαλείων να περιγράφουν τις καταστάσεις που δεν εμπίπτουν στη γραμμικότητα.

Το μαθηματικό μοντέλο των εξισώσεων κίνησης στα πλαίσια της μη γραμμικότητας μπορεί να δομηθεί εναλλακτικά ανάλογα με την επιθυμητή προσέγγιση. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα παρατεθούν δυο μοντέλα, τα οποία κατευθύνονται βάση διαφορετικού λογικού σχεδιασμού. Προς εξήγηση του τελευταίου, το πρώτο μοντέλο είναι μια συνέχεια της διατύπωσης των εξισώσεων της γραμμικότητας με την προσθήκη όρων υψωμένων σε μεγαλύτερες δυνάμεις, όρων γωνιών πηδαλίου και συμπερίληψη της εξίσωσης *surge*. Αντίθετα με τη γραμμικότητα, δεν ισχύει η θεώρηση κατά την οποία η ταχύτητα παραμένει σταθερή στη διάρκεια της στροφής. Επομένως, υπάρχει φυσική σημασία στη συμπερίληψή της εξίσωσης του διαμήκους άξονα  $x'x$ . Ακόμα, στη μη γραμμική θεώρηση υπάρχει σύζευξη των κινήσεων. Ενώ τα παραπάνω ισχύουν και για το δεύτερο μοντέλο, η διαφοροποίηση εστιάζεται στη δομοστοιχείωση (*modularity*) που το διέπει. Οι δυνάμεις και οι ροπές εκφράζονται ξεχωριστά για τη γάστρα, το πηδάλιο, την πρόωση και τις λοιπές διεγέρσεις του περιβάλλοντος. Η σκοπιμότητα αυτής της δομής αφορά την ευχέρεια που προσδίδει η ανεξάρτητη κατηγοριοποίηση, αφού ενδεχόμενες τροποποιήσεις δεν απαιτούν ολική αναδιαμόρφωση.

##### 4.5.1 Ανάπτυγμα *Taylor*

Οι μη γραμμικές εξισώσεις για τις εκφράσεις των συνολικών δυνάμεων που ασκούνται στο σκάφος ανά άξονα, υπολογισμένες με αναπτύγματα *Taylor*, και η προσάρτησή τους στις εξισώσεις κίνησης περιλαμβάνουν όρους μέχρι τρίτης τάξης. Η απαλοιφή των

ανώτερων όρων γίνεται αποδεκτή καθώς δεν προσθέτουν σημαντική ακρίβεια στα αποτελέσματα<sup>[11]</sup>.

Εξίσωση κίνησης συναρτήσει των προκυπτουσών δυνάμεων κατά τον διαμήκη άξονα:

$$(m - X_{\dot{u}}) \dot{u} = f_1(u, v, r, \delta_R) \quad (132)$$

Όπου:

$$\begin{aligned} f_1(u, v, r, \delta_R) = & X^0 + X_u \delta u + \frac{1}{2} X_{uu} \delta u^2 + \frac{1}{6} X_{uuu} \delta u^3 + \frac{1}{2} X_{vv} v^2 + \frac{1}{2} X_{rr} r^2 + \frac{1}{2} X_{\delta\delta} \delta_R^2 \\ & + \frac{1}{2} X_{vuu} v^2 \delta u + \frac{1}{2} X_{rru} r^2 \delta u + \frac{1}{2} X_{\delta\delta u} \delta_R^2 \delta u + (X_{vr} + m) vr + X_{v\delta} v \delta_R + X_{r\delta} r \delta_R + X_{vru} vr \delta u \\ & + X_{v\delta u} v \delta_R \delta u + X_{r\delta u} r \delta_R \delta u \end{aligned} \quad (133)$$

Εξίσωση κίνησης συναρτήσει των προκυπτουσών δυνάμεων κατά τον εγκάρσιο άξονα:

$$(m - Y_{\dot{v}}) \dot{v} - \dot{r} Y_{\dot{r}} = f_2(u, v, r, \delta_R) \quad (134)$$

Όπου:

$$\begin{aligned} f_2(u, v, r, \delta_R) = & Y^0 + Y_u^0 \delta u + Y^0_{uu} \delta u^2 + Y_{vV} + \frac{1}{6} Y_{vvv} v^3 + \frac{1}{2} Y_{vrr} vr^2 + \frac{1}{2} Y_{v\delta\delta} v \delta_R^2 + \\ & Y_{vu} v \delta u + \frac{1}{2} Y_{vuu} v \delta u^2 + (Y_r - mu_1) r + \frac{1}{6} Y_{rrr} r^3 + \frac{1}{2} Y_{rvv} r v^2 + \frac{1}{2} Y_{r\delta\delta} r \delta_R^2 + Y_{ru} r \delta u \\ & + \frac{1}{2} Y_{ruu} r \delta u^2 + Y_{\delta\delta} \delta_R + \frac{1}{6} Y_{\delta\delta\delta} \delta_R^3 + \frac{1}{2} Y_{\delta vv} \delta_R v^2 + \frac{1}{2} Y_{\delta rr} \delta_R r^2 + Y_{\delta u} \delta_R \delta u \\ & + \frac{1}{2} Y_{\delta uu} \delta_R \delta u^2 + Y_{vr\delta} vr \delta_R \end{aligned} \quad (135)$$

και  $Y^0$  η προκαλούμενη εγκάρσια δύναμη λόγω της περιστροφής της έλικας (μονέλικα πλοία), εφόσον υπάρχει.

Εξίσωση κίνησης συναρτήσει των προκυπτουσών ροπών περί τον κάθετο άξονα:

$$-N_{\dot{v}} \dot{v} + (I_z - N_{\dot{r}}) \dot{r} = f_3(u, v, r, \delta_R) \quad (136)$$

Όπου:

$$\begin{aligned} f_3(u, v, r, \delta_R) = & N^0 + N_u^0 \delta u + N^0_{uu} \delta u^2 + N_{vV} + \frac{1}{6} N_{vvv} v^3 + \frac{1}{2} N_{vrr} vr^2 + \frac{1}{2} N_{v\delta\delta} v \delta_R^2 + \\ & N_{vu} v \delta u + \frac{1}{2} N_{vuu} v \delta u^2 + N_{rV} + \frac{1}{6} N_{rrr} r^3 + \frac{1}{2} N_{rvv} r v^2 + \frac{1}{2} N_{r\delta\delta} r \delta_R^2 + N_{ru} r \delta u \\ & + \frac{1}{2} N_{ruu} r \delta u^2 + N_{\delta\delta} \delta_R + \frac{1}{6} N_{\delta\delta\delta} \delta_R^3 + \frac{1}{2} N_{\delta vv} \delta_R v^2 + \frac{1}{2} N_{\delta rr} \delta_R r^2 + N_{\delta u} \delta_R \delta u \\ & + \frac{1}{2} N_{\delta uu} \delta_R \delta u^2 + N_{vr\delta} vr \delta_R \end{aligned} \quad (137)$$

και  $N^0$  η προκαλούμενη ροπή από την περιστροφής της έλικας (μονέλικα πλοία), εφόσον υπάρχει.

Επιπρόσθετα, όπως φαίνεται στην παραπάνω τελική μορφή των εξισώσεων κίνησης, δεν υπάρχουν όροι επιταχύνσεων μεγαλύτερης της πρώτης τάξης. Προς υποστήριξη του τελευταίου, ο *Abkowitz*<sup>[4]</sup> διατύπωσε την ασήμαντη αλληλεπίδραση που υπάρχει μεταξύ των μεγεθών αδράνειας και ιξώδους του ρευστού. Ακόμα, η θεωρία μη συνεκτικής ροής

(*potential flow theory*) δίνει γραμμικές εκφράσεις κατά τον υπολογισμό των επιταχύνσεων για βυθισμένα σώματα. Αποτελεί αναγκαία επισήμανση ο λόγος απουσίας ορισμένων όρων συζευγμένων μεγεθών. Στην εξίσωση κίνησης του *surge* (132), οι εν λόγω όροι υψωμένοι σε περιττές δυνάμεις είναι μηδενικοί. Αυτό συμβαίνει λόγω της διαμήκους συμμετρίας των σκαφών όπου ορίζει τη διαμήκη δύναμη άρτια συνάρτηση ως προς την ταχύτητα *sway*  $v$ , το ρυθμό περιστροφής *yaw*  $r$  και τη γωνία πηδαλίου  $\delta_R$ . Αντίθετα, οι συναρτήσεις των συνολικών δυνάμεων για *sway* και *yaw*,  $Y$  και  $N$ , είναι περιττές συναρτήσεις των  $v$ ,  $r$ ,  $\delta_R$ . Επομένως, οι υψωμένοι σε άρτιο εκθέτη όροι απαλείφονται<sup>[11]</sup>.

#### 4.5.2 Δομοστοιχειωτό μοντέλο

Πρόκειται για την ανάπτυξη της υπολογιστικής μεθόδου για τον υπολογισμό των συντελεστών που καθορίζουν τους ελιγμούς ενός πλοίου και την εφαρμογή της στις εξισώσεις κίνησης και άρα στην ελεγχσιμότητά του. Το μοντέλο εμπίπτει στη θεωρία της μη γραμμικότητας υπολογίζοντας τις κινήσεις του πλοίου βάσει τα γνωστά χαρακτηριστικά του στο αρχικό στάδιο σχεδιασμού και τις υδροδυναμικές παραγώγους του.

Η δομοστοιχείωση (*modularity*), όπως προαναφέρθηκε, αφορά την ανεξάρτητη μοντελοποίηση των επιμέρους παραγόντων. Οι εν λόγω όροι αντιστοιχούν στις παραχθείσες υδροδυναμικές δυνάμεις λόγω της κίνησης της γυμνής γάστρας (*Hull*), στις δυνάμεις λόγω της ώσης της έλικας (*Propeller*), στις ασκούμενες στο πλοίο δυνάμεις εξαιτίας του πηδαλίου (*Rudder*) και τις δυνάμεις λόγω του περιβάλλοντος (*Other*). Οι δυνάμεις στη γάστρα είναι συναρτήσεις της ταχύτητας και της επιτάχυνσης και παρουσιάστηκαν στην ακόλουθη μορφή από τον *Mikelis* (1985), ο οποίος στηρίχτηκε στη μοντελοποίηση της Ιαπωνικής Ομάδας Μαθηματικών Μοντελοποιήσεων (*Japanese Manoeuvrability Mathematical Modelling Group – MMG*).

Η μοντελοποίηση των δυνάμεων και ροπών της έλικας και του πηδαλίου βασίστηκε στο έργο του *Kose* (1982), ενώ αντίστοιχη προσέγγιση έχει γίνει από τον *Clarke* (1982).

Δύναμη στη διεύθυνση της κίνησης *Surge*:

$$m(\dot{u} - rv) = X_H + X_P + X_R + X_O \quad (138)$$

όπου:

$$X_H = X_{\dot{u}}\dot{u} - Y_{\dot{v}}vr - Y_r r^2 + X_{vr}vr - R(u) \quad (139\alpha)$$

$R(u)$ : Αντίσταση συναρτήσει της ταχύτητας

$$X_P = (1-t_p)\rho n^2 D^4 K_T \quad (139\beta)$$

$t_p$ : Συντελεστής μείωσης ώσης έλικας

$\rho$ : πυκνότητα ρευστού

$n$ : Ρυθμός περιστροφής έλικας

$D$ : Διάμετρος έλικας

$K_T$ : Συντελεστής ώσης έλικας

$$X_R = -F_N \sin \delta \quad (139\gamma)$$

$$F_N = \frac{1}{2} \rho \frac{6,13\lambda}{\lambda+2,25} A_R U_R^2 \sin \alpha_R \quad (140)$$

$F_N$ : δύναμη κάθετη στο πηδάλιο

$$\lambda = c_r/c_t \quad (141)$$

$\lambda$ : Λόγος σύγκλισης (*taper ratio*) =  $\frac{\text{χορδή άνω επιφανείας πηδαλίου}}{\text{χορδή κάτω επιφανείας πηδαλίου}}$

$A_R$ : Επιφάνεια πηδαλίου

$$U_R = \sqrt{u_R^2 + v_R^2} \quad (142)$$

$U_R$ : Μέση ταχύτητα ροής πρόσπτωσης στο πηδάλιο

$$u_R = u(1 - w_p) \sqrt{1.0 + c_2 g(s)} \quad (143)$$

$u_R$ : διαμήκης συνιστώσα ταχύτητας (*surge*)

$w_p$ : συντελεστής ομόρρου έλικας

$$g(s) = nk(2 - (2 - k)s)s/(1 - s)^2 \quad (144)$$

$$s = 1 - \frac{u(1-w_p)}{nP} \quad (145)$$

$$n = D/H_R \quad (146)$$

$H_R$ : ύψος πηδαλίου

$$k = 0.6 \frac{1-w_p}{1-w_R} \quad (147)$$

$k$ : συντελεστής ταχύτητας ροής

$w_R$ : συντελεστής ομόρρου πηδαλίου

$$v_R = u_R \gamma \beta_R \quad (148)$$

$v_R$ : εγκάρσια συνιστώσα ταχύτητας (*sway*)

$\gamma$ : συντελεστής εξομάλυνσης ροής

$$\beta_R = \beta - \frac{2x_R rL}{L U} \quad (149)$$

$\beta_R$ : γωνία πλαγιολίσθησης πηδαλίου

$$\beta = -\text{ArcSin}(v/U) \quad (150)$$

$\beta$ : γωνία πλαγιολίσθησης

$r$ : γωνιακή ταχύτητα πλοίου

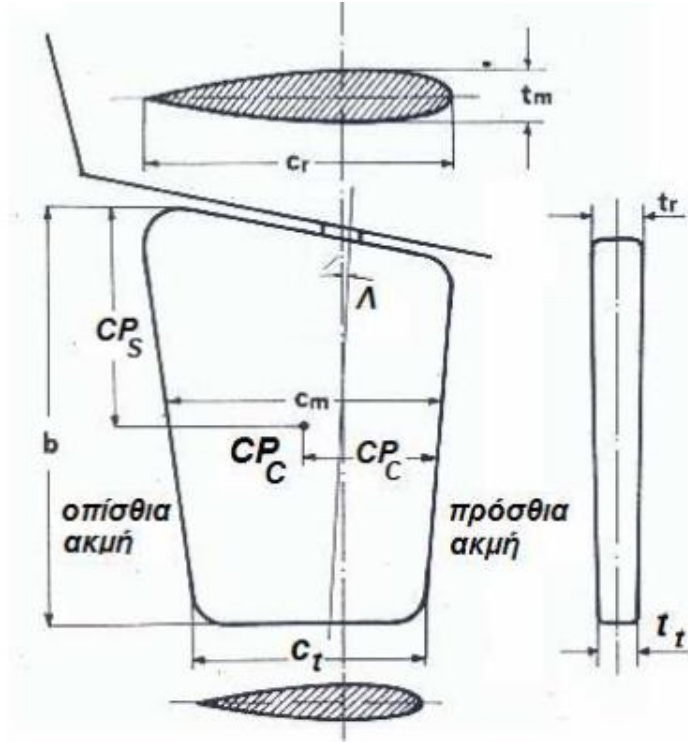


$L$ : μήκος μεταξύ καθέτων πλοίου

$$U = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (151)$$

$U$ : ταχύτητα πλοίου συναρτήσει *surge*, *sway* συνιστωσών

$$\alpha_R = \delta - \tan^{-1}(v_R/u_R) \quad (152)$$



Εικόνα 32: Χαρακτηριστικά μεγέθη πηδαλίου [13]

Δύναμη στη διεύθυνση της κίνησης *Sway*:

$$m (\dot{v} - ru) = Y_H + Y_P + Y_R + Y_O \quad (153)$$

όπου:

$$Y_H = Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_v v U + Y_r r U + Y_{vv} |v| + Y_{vr} |r| + Y_{rr} |r| \quad (154\alpha)$$

$$U = \sqrt{u^2 + v^2} \quad (151)$$

$$Y_P \approx 0 \quad (154\beta)$$

$$Y_R = - (1 + \alpha_H) F_N \sin \delta \quad (154\gamma)$$

$$\alpha_H = \begin{cases} -1.5 \frac{s_0}{H_R} + 1.0, \frac{u(1-w_p)}{nP} > 0.3 \\ \frac{(-1.5 \frac{s_0}{H_R} + 1.0)(u(1-w_p)/nP)}{0.3}, \frac{u(1-w_p)}{nP} < 0.3 \end{cases} \quad (155\alpha), (155\beta)$$

$\alpha_H$ : Συντελεστής αλληλεπίδρασης πηδαλίου – γάστρας

$$s_0 = 0.48D \quad (156)$$

$s_0$ : χώρος ανάμεσα στη πρύμνη και στο πηδάλιο

$H_R$ : ύψος πηδαλίου

$w_p$ : συντελεστής ομόρρου

$n$ : Ρυθμός περιστροφής έλικας

$P$ : Βήμα έλικας

Ροπή στη διεύθυνση της περιστροφής  $Y_{aw}$ :

$$I_{zz} \dot{r} = N_H + N_P + N_R + N_O \quad (157)$$

όπου:

$$N_H = N_r \dot{r} + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{rU} U + N_{vU} U + N_{rr} |r| + N_{rv} \frac{r^2 v}{U} + N_{vv} \frac{v^2 r}{U} \quad (158\alpha)$$

$$N_P \approx 0 \quad (158\beta)$$

$$N_R = - (1 + \alpha_H \frac{x_H}{x_R}) Z_R F_N \sin \delta \quad (158\gamma)$$

$\alpha_H$ : Συντελεστής αλληλεπίδρασης πηδαλίου - γάστρας

$x_R, z_R$ : Διαμήκης και κάθετη απόσταση κέντρου δράσης δύναμης πηδαλίου από άξονες σωματοπαγούς συστήματος

#### 4.6 Θεωρητική προσέγγιση υδροδυναμικών παραγώγων

Σε αυτήν την ενότητα κρίνεται απαραίτητη η παράθεση του θεωρητικού τρόπου υπολογισμού των υδροδυναμικών παραγώγων, αφού αποτελούν μέρος όλων των σχέσεων ελικτικής συμπεριφοράς. Συγκεκριμένα, τα περισσότερα ζητούμενα μεγέθη προϋποθέτουν γνωστές τις τιμές των υδροδυναμικών συντελεστών στις εξισώσεις υπολογισμών τους. Ωστόσο, δεν υπάρχει κάποια πλήρης θεωρητική μέθοδος η οποία να ικανοποιεί τις επιταγές των πραγματικών συνθηκών. Έτσι, ο υπολογισμός τους αποτελεί κράμα θεωρητικών και πειραματικών μεθόδων. Στο Κεφάλαιο 5.2 παρουσιάζεται ο πειραματικός υπολογισμός των υδροδυναμικών παραγώγων, ενώ στο Κεφάλαιο 5.3 παρατίθενται εμπειρικές σχέσεις υπολογισμού.

Ο θεωρητικός προσδιορισμός των υδροδυναμικών παραγώγων χρησιμοποιεί τη γραμμική υπέρθεση των υδροδυναμικών παραγώγων της γυμνής γάστρας και του πηδαλίου. Στην ανάλυση που ακολουθεί ο δείκτης  $h$  αντιστοιχεί στη γάστρα (*hull*), ενώ ο δείκτης  $f$  αντιπροσωπεύει το πηδάλιο – πτερύγιο (*fin*). Επεξηγηματικά, για την εξαρτώμενη από την εγκάρσια ταχύτητα παράγωγο της δύναμης θα ισχύει η σχέση:

$$Y_v' = Y_{v_h}' + Y_{v_f}' \quad (159)$$

Μια ακόμα θεώρηση που λαμβάνει χώρα είναι η θεωρία των λωρίδων (*strip theory*), κατά την οποία το τρισδιάστατο σώμα διαμερίζεται σε λωρίδες, οι οποίες υπάγονται στο δισδιάστατο κόσμο.

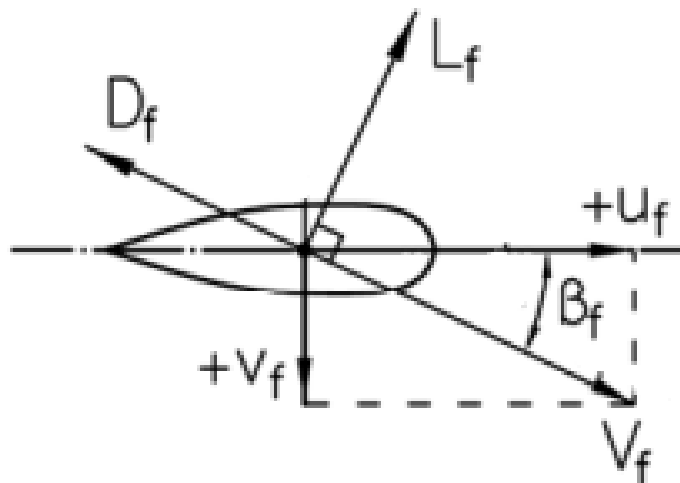
### Πηδάλιο

Στο πλαίσιο όπου το πλοίο κινείται με οριζόντια ταχύτητα  $u$  και έχει αποκτήσει εγκάρσια ταχύτητα  $v$ , αρκετά μικρότερου μέτρου, από κάποια διαταραχή, το προσαρτημένο πηδάλιο θα κινείται με τις ίδιες ταχύτητες. Λόγω της εγκάρσιας συνιστώσας, η γωνία πρόσπτωσης (*angle of attack*) λαμβάνει τιμή  $\beta_f$ . Με την παραπάνω υπόθεση του μέτρου της εγκάρσιας ταχύτητας η γωνία πρόσπτωσης μπορεί να υπολογισθεί:

$$\beta_f = \frac{v_f}{u_f} \quad (160)$$

$$\left(\frac{d\beta}{dv}\right)_f = \frac{1}{u_f} \approx \frac{1}{v} \quad (161)$$

αφού η εγκάρσια ταχύτητα είναι πολύ μικρότερη της οριζόντιας συνιστώσας.



Εικόνα 33: Δυνάμεις και ταχύτητες στο πηδάλιο [4]

Η γωνία πρόσπτωσης, όπως έχει εξηγηθεί, προκαλεί τη δημιουργία εγκάρσιας δύναμης και ροπής:

$$Y_f = L_f \cos\beta_f + D_f \sin\beta_f \quad (162)$$

$$N_f = Y_f x_f \quad (163)$$

όπου:

$x_f$ : η απόσταση του κέντρου πίεσης του πηδαλίου από το κέντρο των αξόνων του πλοίου.

$$L_f = 0.5(C_L)_f \rho A_f V^2 \quad (164)$$

$L_f$ : η δύναμη άνωσης στο πηδάλιο

$$D_f = 0.5(C_D)_f \rho A_f V^2 \quad (165)$$

$D_f$ : η δύναμη αντίστασης στο πηδάλιο

$C_L, C_D$ : αδιάστατοι συντελεστές άνωσης και αντίστασης

$A_f$ : πλευρική επιφάνεια πηδαλίου (επίπεδο  $xz$ )

Η υδροδυναμική αντίδραση λόγω της εγκάρσιας ταχύτητας προκύπτει:

$$Y_{v_f} = - \left| \left( \frac{\partial Y}{\partial v} \right)_f \right| = - \left| \left( \frac{\partial Y}{\partial \beta} \right)_f \left( \frac{d\beta}{dv} \right)_f \right| = - \left| Y_{\beta_f} \left( \frac{d\beta}{dv} \right)_f \right| = - \left| Y_{\beta_f} \frac{1}{u_f} \right| = - \left| Y_{\beta_f} \frac{1}{V} \right| \quad (166)$$

όπου η  $Y_{\beta_f}$  προκύπτει με παραγωγή της σχέσης (162) ως προς  $\beta_f$ :

$$Y_{\beta_f} = L_f \sin\beta_f - \left( \frac{\partial L}{\partial \beta} \right)_f \cos\beta_f - D_f \cos\beta_f - \left( \frac{\partial D}{\partial \beta} \right)_f \sin\beta_f \quad (167)$$

Υπογραμμίζεται το αρνητικό πρόσημο της υδροδυναμικής παραγώγου όπως απεδείχθη σε προηγούμενη ενότητα (Κεφάλαιο 4.4.2).

Αντίστοιχα προκύπτει από τις (164) και (165):

$$\left( \frac{\partial L}{\partial \beta} \right)_f = 0.5 \left( \frac{\partial C_L}{\partial \beta} \right)_f \rho A_f V^2 \quad (168)$$

$$\left( \frac{\partial D}{\partial \beta} \right)_f = 0.5 \left( \frac{\partial C_D}{\partial \beta} \right)_f \rho A_f V^2 \quad (169)$$

Με μηδενική γωνία πρόσπτωσης ( $\beta_f=0$ ) και αντικατάσταση της (168) στη (167):

$$Y_{\beta_f} = - 0.5 \left( \frac{\partial C_L}{\partial \beta} \right)_f \rho A_f V^2 - D_f \quad (170)$$

Έτσι, η υδροδυναμική αντίδραση λόγω της εγκάρσιας ταχύτητας για το πηδάλιο διαμορφώνεται τελικώς από τις σχέσεις (165) και (170) ως:

$$Y_{v_f} = - \left| 0.5 \rho A_f V \left[ \left( \frac{\partial C_L}{\partial \beta} \right)_f + (C_D)_f \right] \right| \quad (171)$$

Ωστόσο ο συντελεστής αντίστασης  $(C_D)_f$  για μηδενική γωνία πρόσπτωσης αποτελεί ουσιαστικά την αντίσταση drag του πηδαλίου, το οποίο βρίσκεται στο επίπεδο συμμετρίας του πλοίου, λόγω της κίνησης του στο ρευστό. Συγκριτικά με το συντελεστή άνωσης αντιπροσωπεύει αρκετά μικρότερη ποσότητα, οπότε μπορεί να παραληφθεί:

$$Y_{v_f} = - \left| 0.5\rho A_f V \left( \frac{\partial C_L}{\partial \beta} \right)_f \right| \quad (172)$$

Η αδιαστατοποίηση της παραπάνω σχέσης επέρχεται έπειτα από διαίρεση με την ποσότητα  $0.5\rho LTV$ . Η διαφοροποίηση με την προηγούμενη αδιαστατοποίηση των υδροδυναμικών συντελεστών είναι η εμφάνιση του όρου βυθίσματος  $T$  λόγω της σημαντικότητά του σε αυτά τα χωρία της εργασίας. Επομένως, προκύπτει:

$$Y'_{v_f} = - \left| A'_f \left( \frac{\partial C_L}{\partial \beta} \right)_f \right| \quad (173)$$

Πλέον η σχέση (163) μπορεί να γραφεί ως:

$$N'_{v_f} = Y'_{v_f} x'_{v_f} \quad (174)$$

Το πρόσημο καθορίζεται από το σημείο εφαρμογής του πηδαλίου στη γάστρα ή του πτερυγίου γενικότερα. Εφόσον γίνεται λόγος για πηδάλιο στην πρύμνη, η ποσότητα  $N'_{v_f}$  θα είναι θετική ως γινόμενων δυο αρνητικών όρων.

Αντίστοιχα ακολουθούν οι υδροδυναμικοί παράγωγοι λόγω γωνιακής ταχύτητας:

$$Y'_{r_f} = Y'_{v_f} x'_{r_f} \quad (175)$$

$$N'_{r_f} = Y'_{v_f} x'^2_{r_f} \quad (176)$$

Για τις υδροδυναμικές παραγώγους λόγω επιταχύνσεων, θεωρείται το πηδάλιο ως έλασμα και χρησιμοποιείται ο τύπος:

$$Y'_{\dot{v}_f} = - \frac{\pi\rho b A_f}{(a_G^2 + 1)^{\frac{1}{2}}} \frac{1}{0.5\rho L^2 T} = - \frac{2\pi b^2 A'_f}{(a_G^2 + 1)^{\frac{1}{2}}} \quad (177)$$

όπου:

$b$ : το άνοιγμα του πτερυγίου

$$a_G = \frac{b^2}{AR} \quad (178)$$

$a_G$ : ο λόγος επιμήκους

Όμοια με προηγούμενα:

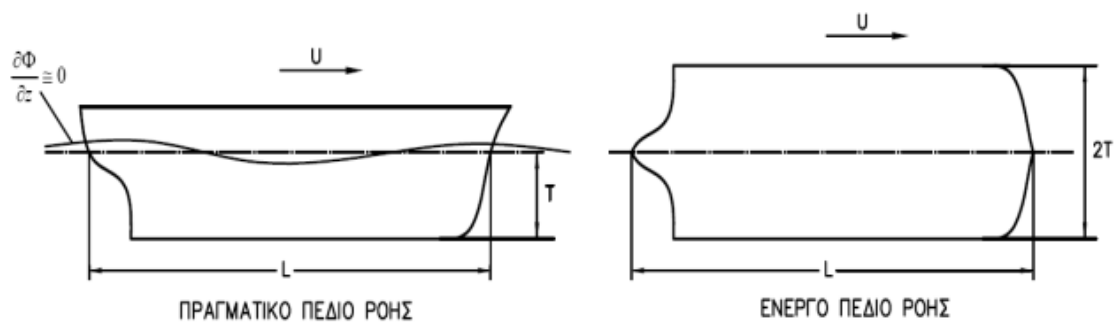
$$N' \dot{v}_f = Y' \dot{v}_f x'_f \quad (179)$$

$$Y' \dot{r}_f = Y' \dot{v}_f x'_f \quad (180)$$

$$N' \dot{r}_f = Y' \dot{v}_f x'^2_f \quad (181)$$

### Γυμνή γάστρα

Η γάστρα του πλοίου χωρίς το πηδάλιο θεωρείται ως ένα μεγάλο πτερύγιο με χορδή το μήκος πλοίου και μικρό λόγο επιμήκους (*aspect ratio, AR*). Για το πλοίο – πτερύγιο ο λόγος επιμήκους είναι  $\frac{T}{L}$ , όμως σύμφωνα με τον Τσάκωνα (1959) ο ενεργός λόγος επιμήκους (*effective aspect ratio*)  $\alpha_e$  είναι  $\frac{2T}{L}$ . Αυτό συμβαίνει λόγω του φαινομένου κατοπτρισμού στο πεδίο ροής. Συγκεκριμένα, σε μικρές ταχύτητες όπου ο αριθμός *Froude* δεν ξεπερνά το 0.25 οι κυματισμοί στην επιφάνεια δεν έχουν υπολογίσιμη επίδραση και το πεδίο ροής που συμβάλει στη μελέτη είναι αυτό που περιβάλλει τη γάστρα και τον κατοπτρισμό της (εικόνα 34).



Εικόνα 34: Φαινόμενο κατοπτρισμού γάστρας [14]

Λόγω της θεώρησης της γάστρας ως πτερύγιο, η σχέση (171) προσαρμόζεται για τη γάστρα ως:

$$Y_{vh} = -0.5\rho A_h V \left[ \left( \frac{\partial C_L}{\partial \beta} \right)_h + (C_D)_h \right] \quad (182)$$

Ο πολύ μικρός λόγος  $\alpha_e$  ( $\alpha_e < 0.2$ ) επιτρέπει τον υπολογισμό της μερικής παράγωγου του συντελεστή άνωσης από τον τύπο του *Jones* ανά *rads* ή μοίρες αντίστοιχα:

$$\left( \frac{\partial C_L}{\partial \beta} \right)_h = 0.5\pi\alpha_e = \frac{\pi T}{L} \quad (183)$$

ή

$$\left( \frac{\partial C_L}{\partial \beta} \right)_h = \frac{\pi T}{57.3L} \quad (184)$$

Με την αντικατάσταση της (183) στη (182) και την αδιαστατοποίηση της τελευταίας με την ποσότητα  $0.5\rho LTV$  αναδιαμορφώνεται ως:

$$Y'_{vh} = -\frac{\pi T}{L} + (C_D)_h \quad (185)$$

Ο *Jacobs* (1964) διαμόρφωσε τη σχέση της υδροδυναμικής παραγώγου  $N'_{vh}$  μέσω της θεωρίας λωρίδων (*strip theory*):

$$N'_{vh} = -(\Delta'_2 - k_1\Delta') + \frac{x_p}{L} Y'_{vh} \quad (186)$$

όπου:

$$\Delta'_2 = \frac{\Delta_2}{0.5\rho L^2 T} = \frac{k_2}{0.5\rho L^2 T} \int_{\text{πλώρη}}^{\text{πρύμνη}} \frac{0.5L\rho}{T} \pi C_s h^2 dx \quad (187)$$

$\Delta'_2$ : η αδιαστατοποιημένη πρόσθετη μάζα στην εγκάρσια διεύθυνση  
με  $k_2$ : ο συντελεστής του Lamb (1945) για την πρόσθετη μάζα στην εγκάρσια διεύθυνση, διάγραμμα εικόνας 36

$C_s$ : συντελεστής δυο διαστάσεων πρόσθετης μάζας κάθε λωρίδας,  
διάγραμμα εικόνας 35

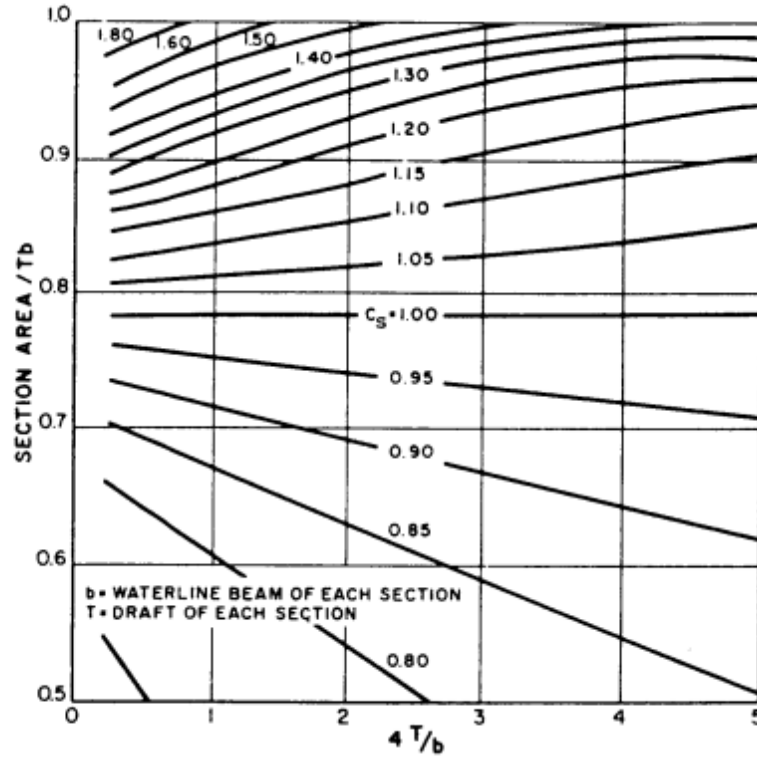
$h$ : βύθισμα νομέα

$k_1\Delta'$ : η αδιαστατοποιημένη πρόσθετη μάζα στην οριζόντια διεύθυνση

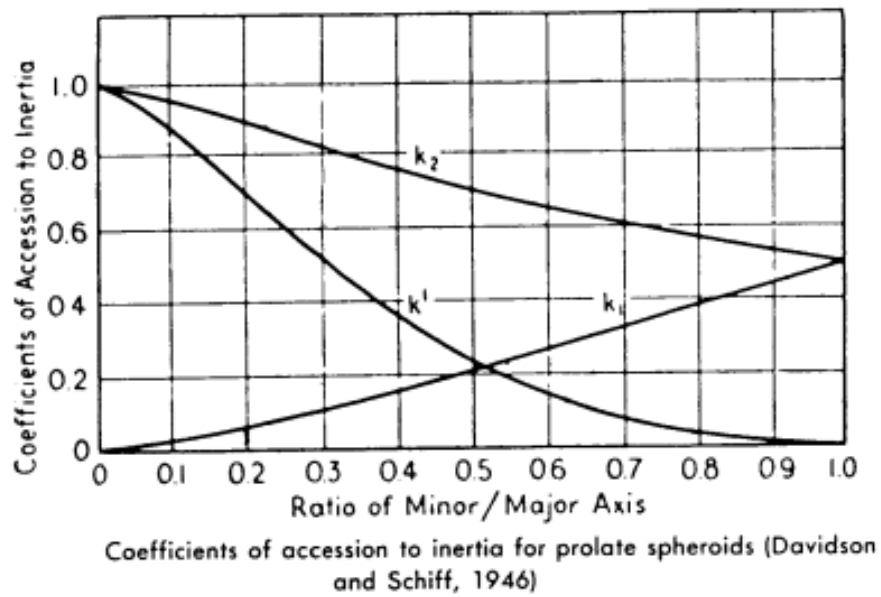
$\Delta'$ : η αδιαστατοποιημένη μάζα του πλοίου

$k_1$ : ο συντελεστής του Lamb (1945) για την πρόσθετη μάζα στην οριζόντια διεύθυνση, διάγραμμα εικόνας 36

$x_p$ : η απόσταση του σημείου εφαρμογής της πλαϊνής δύναμης που δέχεται η γάστρα από το μέσο νομέα



Εικόνα 35: Συντελεστές πρόσθετων μαζών συναρτήσει λόγων πλάτους-βυθίσματος [14]



Εικόνα 36: Συντελεστές πρόσθετης μάζας [14]

Ακολούθως, οι υπόλοιπες υδροδυναμικές παράγωγοι:

$$Y'_{rh} = -k_1 \Delta' + \frac{x_p}{L} Y'_{vh} \quad (188)$$

$$N'_{rh} = -\Delta'_z \frac{\bar{x}}{L} + \left(\frac{x_0}{L}\right)^2 Y'_{vh} \quad (189)$$



όπου:

$$\Delta'_z = \Delta'_2 \frac{k'}{k_2} \quad (190)$$

$\Delta'_z$  είναι ο συντελεστής πρόσθετης μάζας περιστροφής

$k'$  είναι ο συντελεστής του Lamb (1945) για την πρόσθετη μάζα στη περιστροφή

$$\bar{x} = \frac{\int_{\pi\lambda\omega\rho\eta}^{\pi\rho\acute{\upsilon}\mu\nu\eta} C_s h^2 x dx}{\int_{\pi\lambda\omega\rho\eta}^{\pi\rho\acute{\upsilon}\mu\nu\eta} C_s h^2 dx} \quad (191)$$

$x$ : η απόσταση από την αρχή των αξόνων της γάστρας ως την εκάστοτε λωρίδα

$\frac{x_0}{L}$ : ισούται με το μισό του πρισματικού συντελεστή της γάστρας

Ανεξάρτητα του προσήμου του πρώτου όρου της σχέσης (189), το οποίο εξαρτάται από το πρόσημο του  $\bar{x}$ , η υδροδυναμική παράγωγος  $N'_{r_h}$  θα είναι σταθερά αρνητική. Αυτό συμβαίνει καθώς η  $Y'_{v_h}$  είναι μονίμως αρνητική και η ποσότητα  $x_0$ , συνιστώσα συστήματος αξόνων επί γης, είναι μεγαλύτερη από την  $\bar{x}$ .

Σχετικά με τις υδροδυναμικές αντιδράσεις λόγω των επιταχύνσεων:

$$Y'_{v_h} = -\Delta'_2 \quad (192)$$

Η παράγωγος  $N'_{v_h}$  μπορεί να θεωρηθεί μηδέν αφού εξετάζεται η γυμνή γάστρα χωρίς το πηδάλιο που συνεισφέρει σημαντικά. Το ίδιο συμβαίνει με την υδροδυναμική παράγωγο  $Y'_{r_h}$ .

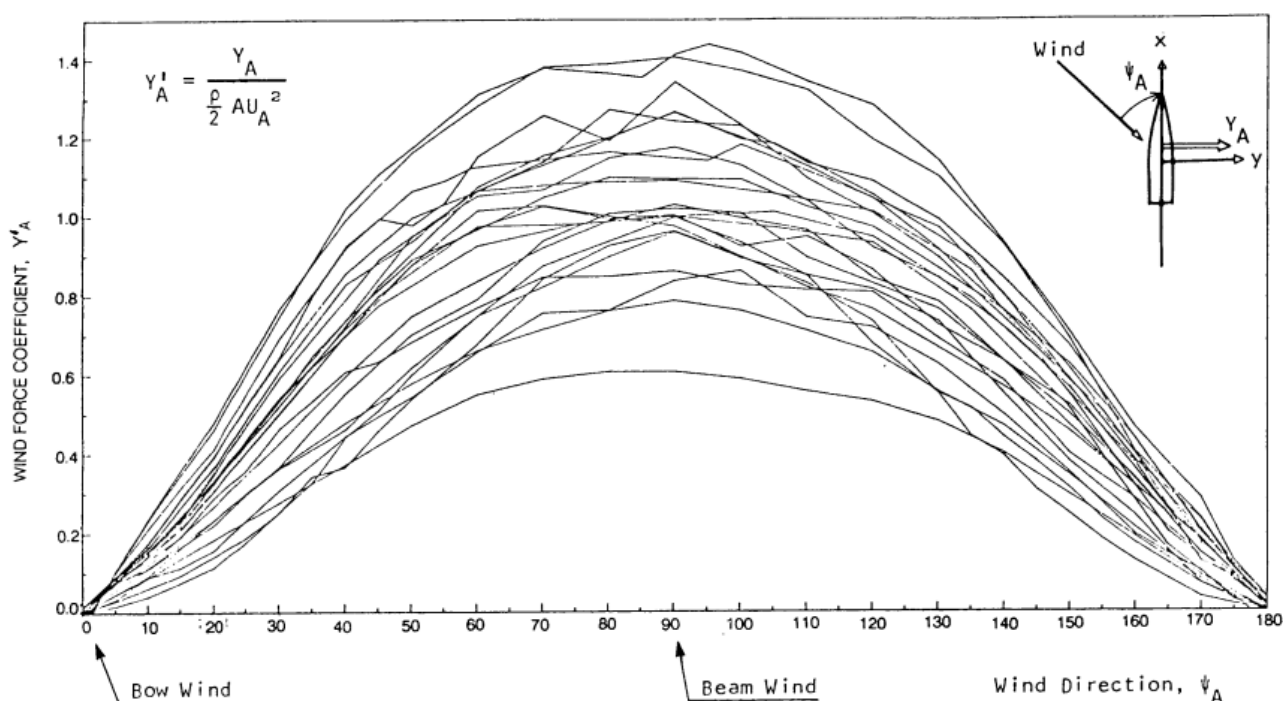
$$N'_{r_h} = -\frac{k'}{0.5\rho L^4 T} \int_{\pi\lambda\omega\rho\eta}^{\pi\rho\acute{\upsilon}\mu\nu\eta} \frac{0.5L\rho}{T} \pi C_s h^2 x^2 dx \quad (193)$$

## 4.7 Περιβαντολλογικές διεγέρσεις

Το περιβάλλον και οι δυνάμεις που επιβάλλει στο πλοίο επιδρούν καταλυτικά σε αυτό. Η ελεγχιμότητα του πλοίου επηρεάζεται από τον άνεμο, τα ρεύματα και τα κύματα τόσο άμεσα όσο και έμμεσα. Η ικανότητα διατήρησης της πορείας μειώνεται ενώ σε περιπτώσεις μπορεί να μην είναι επαρκής. Λοιποί παράγοντες όπως η αντίσταση λόγω κυματισμών αποτελούν έμμεσο τροχοπέδη στον έλεγχο των κινήσεων του πλοίου. Φυσικά, οι δυνάμεις του περιβάλλοντος μπορούν, υπό συνθήκες και μερικώς, να ευνοήσουν την απόδοση κάποιου μεγέθους. Η ιστιοφορία των ιστιοπλοϊκών σκαφών εκμεταλλεύεται τον άνεμο και την κατεύθυνσή του ως μέσο πρόωσης. Οι επιδράσεις των δυνάμεων του περιβάλλοντος είναι υπολογίσιμες σε τέτοιο βαθμό, όπου είναι

αναγκαία η μοντελοποίησή τους προς τον υπολογισμό της επίδρασής τους στην ελεγχιμότητα των πλοίων και διαχείρισής τους.

Ο λόγος της ταχύτητας του ανέμου προς την ταχύτητα του πλοίου αποτελεί δείγμα του μεγέθους της επίδρασης του ανέμου στην ελεγχιμότητα του πλοίου. Μεγάλες τιμές του λόγου ισοδυναμούν μεγαλύτερες επιβαλλόμενες δυνάμεις στο πλοίο. Ωστόσο, ακόμα και μέτριες τιμές του λόγου δυσκολεύουν τη διατήρηση της πορείας, καθιστώντας τη χρήση του πηδαλίου απαραίτητη. Σε περιπτώσεις μεγάλων ταχυτήτων ανέμου, η διατήρηση της πορείας ενδέχεται να είναι εφικτή για μικρό εύρος γωνιών σε σχέση με την κατεύθυνση του ανέμου.



Εικόνα 37: Αδιαστατοποιημένος αεροδυναμικός συντελεστής sway συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου για διάφορα πλοία [37]

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 37, ο αεροδυναμικός συντελεστής πλάγιας δύναμης λαμβάνει μέγιστες τιμές με τον επιβαλλόμενο άνεμο κάθετα στο διαμήκη άξονα του πλοίου. Ακόμα, με αυτήν την κατεύθυνση του ανέμου το μέσο πλάτος του συντελεστή για τα διάφορα πλοία κυμαίνεται περί τη μονάδα.

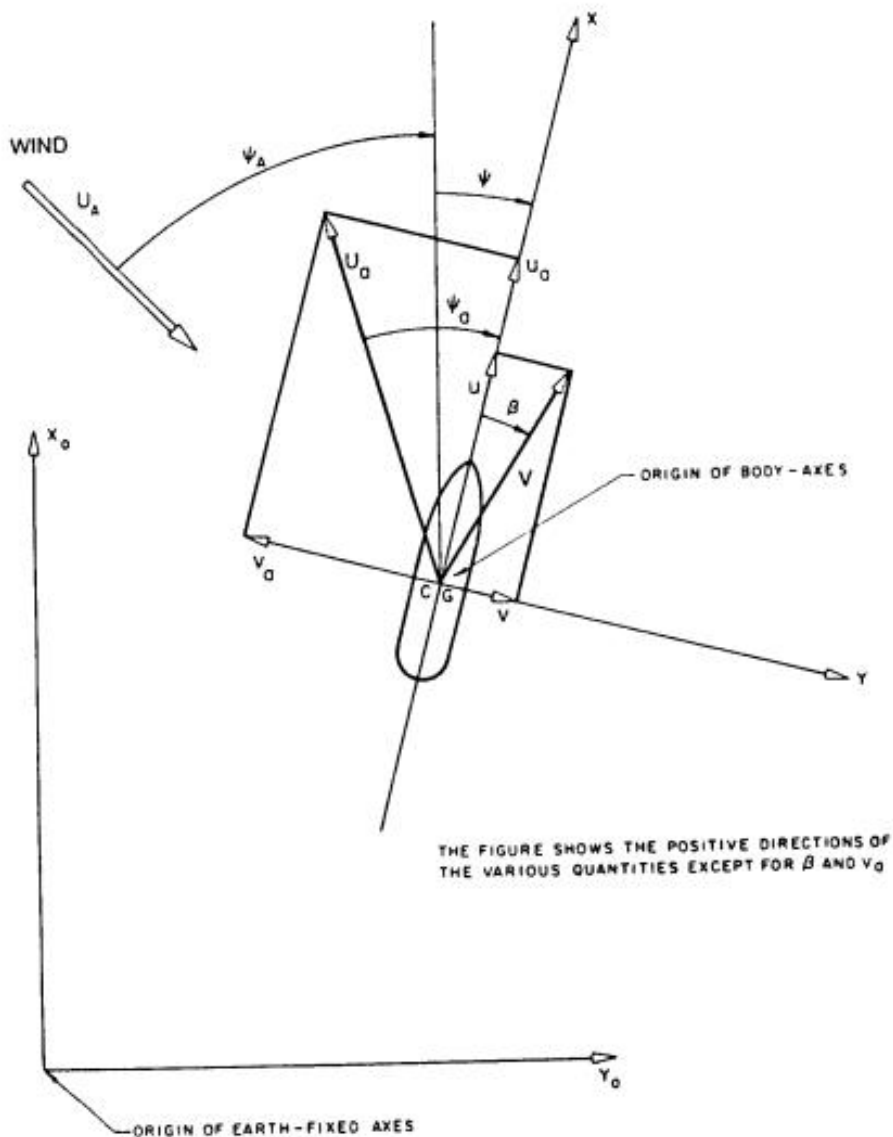
Η κατάλληλη εκτροπή του πηδαλίου τείνει να αντισταθμίσει τις αεροδυναμικές και υδροδυναμικές δυνάμεις και ροπές ώστε να διατηρηθεί η επιθυμητή πορεία. Προκειμένου να υπολογιστεί η κατάλληλη γωνία πλαγιολίσθησης και άρα η γωνία εκτροπής πηδαλίου που θα το επιτύχει, συστήνονται οι αεροδυναμικοί συντελεστές δυνάμεων surge, sway και ροπής yaw μπορούν να προσαρτηθούν στις εξισώσεις κίνησης ( $X_a, Y_a, N_a$ ).

Γωνία εκτροπής πηδαλίου:

$$\delta_R = \frac{N_{\alpha}' Y_{\nu}' - Y_{\alpha}' N_{\nu}'}{N_{\nu}' Y_{\delta}' - Y_{\nu}' N_{\delta}'} \quad (194)$$

Πλαγιολίσθηση:

$$v_e = \frac{Y_{\alpha}' N_{\delta}' - N_{\alpha}' Y_{\delta}'}{N_{\nu}' Y_{\delta}' - Y_{\nu}' N_{\delta}'} \quad (195)$$



Εικόνα 38: Συνιστώσες ταχύτητας πλοίου συναρτήσει της ταχύτητας του ανέμου [11]

Στο παραπάνω σκαρίφημα, εντοπίζονται οι γωνίες και οι ταχύτητες της πρόσω ταχύτητας πλοίου υπό την επίδραση πλάγιου ανέμου. Οι εξισώσεις των συνιστωσών της

ταχύτητας πορείας του πλοίου, αναφορικά με την ταχύτητα ανέμου, για αδρανειακό σύστημα αξόνων είναι:

$$u_a = u + U_a(\cos\psi + \psi) \quad (196)$$

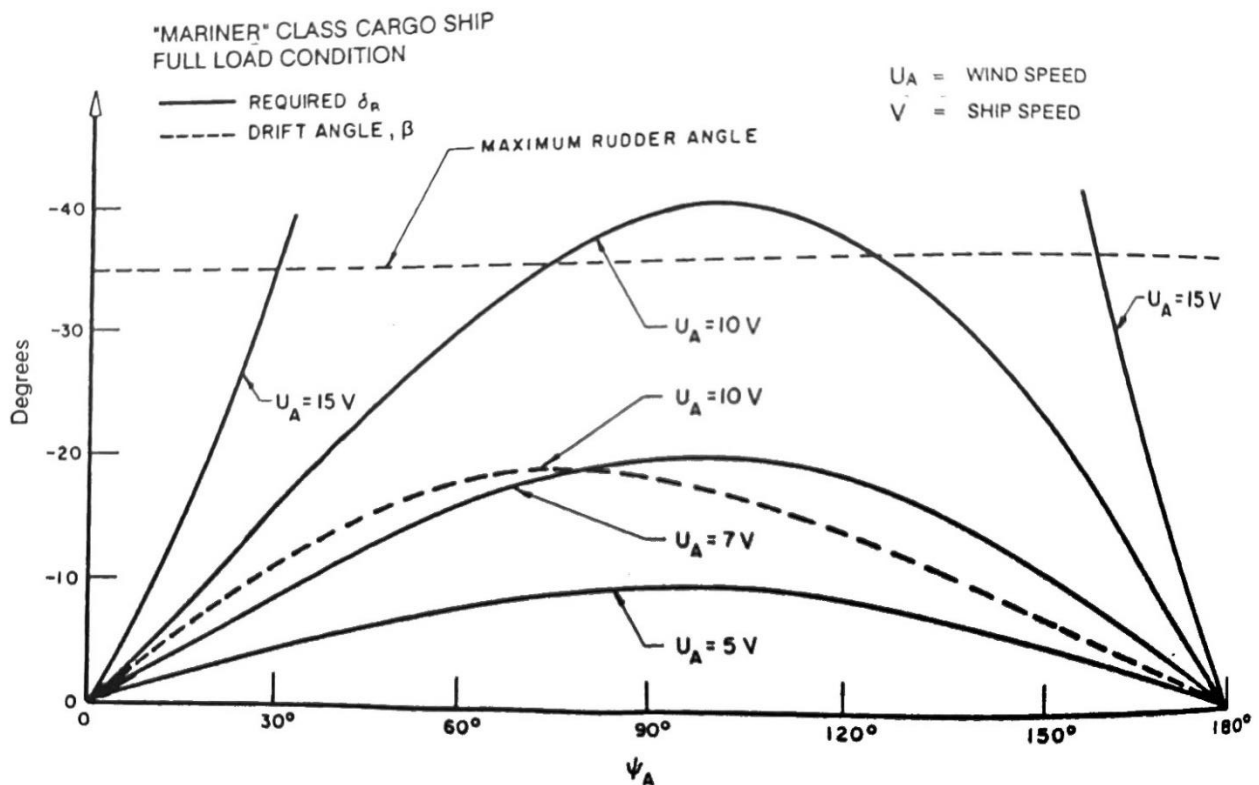
$$v_a = V - U_a(\sin\psi_a + \psi) \quad (197)$$

όπου:

$U_a$ : η ταχύτητα του ανέμου

$\psi_a$ : η γωνία κατεύθυνσης του ανέμου ως προς αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων

$\psi$  γωνία yaw ως προς σωματοπαγές σύστημα αξόνων του πλοίου



Εικόνα 39: Γωνίες εκτροπής πηδαλίου φορτηγού πλοίου συναρτήσει των γωνιών πρόσπτωσης του ανέμου [11]

Το διάγραμμα γωνιών πηδαλίου συναρτήσει της ταχύτητας και κατεύθυνσης του ανέμου του φορτηγού πλοίου *Mariner*, υπογραμμίζει την ανάγκη του βέλτιστου προσανατολισμού του πλοίου ως προς την κατεύθυνση του ανέμου. Συγκεκριμένα, παρατηρείται πως για λόγο ταχυτήτων ανέμου - πλοίου ίσο με 10 και με σχεδόν κάθετη επιβολή ανέμου, η απαιτούμενη γωνία πηδαλίου ξεπερνά την ικανότητα εκτροπής του πλοίου (διακεκομμένη γραμμή - 35 μοίρες). Αντίθετα, με διαφορετική κατεύθυνση του ανέμου η απαιτούμενη γωνία εκτροπής πηδαλίου είναι εφικτή για την ίδια ταχύτητα ανέμου.

Τα ρεύματα, τα οποία επίσης επηρεάζουν την ελκτικότητα και ελεγκτικότητα ενός πλοίου αντιμετωπίζονται με κατάλληλο χειρισμό της σχετική ταχύτητας μεταξύ πλοίου και ρεύματος. Αντίστοιχα με προηγούμενα, οι συνιστώσες της σχετικής ταχύτητας προκύπτουν ως:

$$u = u + U_c(\cos\psi_c + \psi) \quad (198)$$

$$v = v + U_c(\sin\psi_c + \psi) \quad (199)$$

όπου:

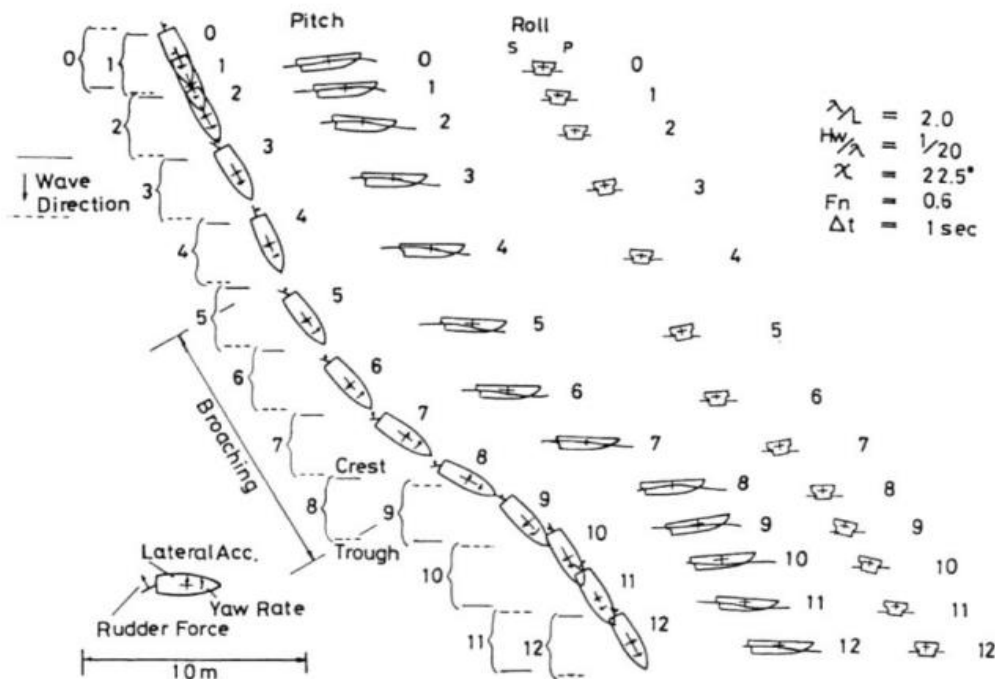
$U_c$  : η ταχύτητα του ρεύματος

$\Psi_c$  : η γωνία κατεύθυνσης του ρεύματος ως προς αδρανειακό σύστημα συντεταγμένων

$\psi$  : η γωνία  $\gamma_{aw}$  ως προς σωματοπαγές σύστημα αξόνων του πλοίου

Οι επιδράσεις των δυνάμεων λόγω ρευμάτων είναι υπολογίσιμες σε περιορισμένα νερά, σε αντίθεση με τα ρεύματα στις ανοικτές θάλασσες, όπου δεν αρκούν για να προκαλέσουν κωλύματα στην ελεγκτικότητα του πλοίου. Στην πρώτη περίπτωση, οι ταχύτητες του πλοίου είναι μικρές και σε συνδυασμό με τη μη σταθερή μορφή των ρευμάτων επηρεάζουν τις κινήσεις του πλοίου. Όπως προαναφέρθηκε, αποτελεί τακτική η μείωση της σχετικής ταχύτητας πλοίου – ρεύματος ώστε να μην δημιουργούνται μεγάλες δυνάμεις στη γάστρα.

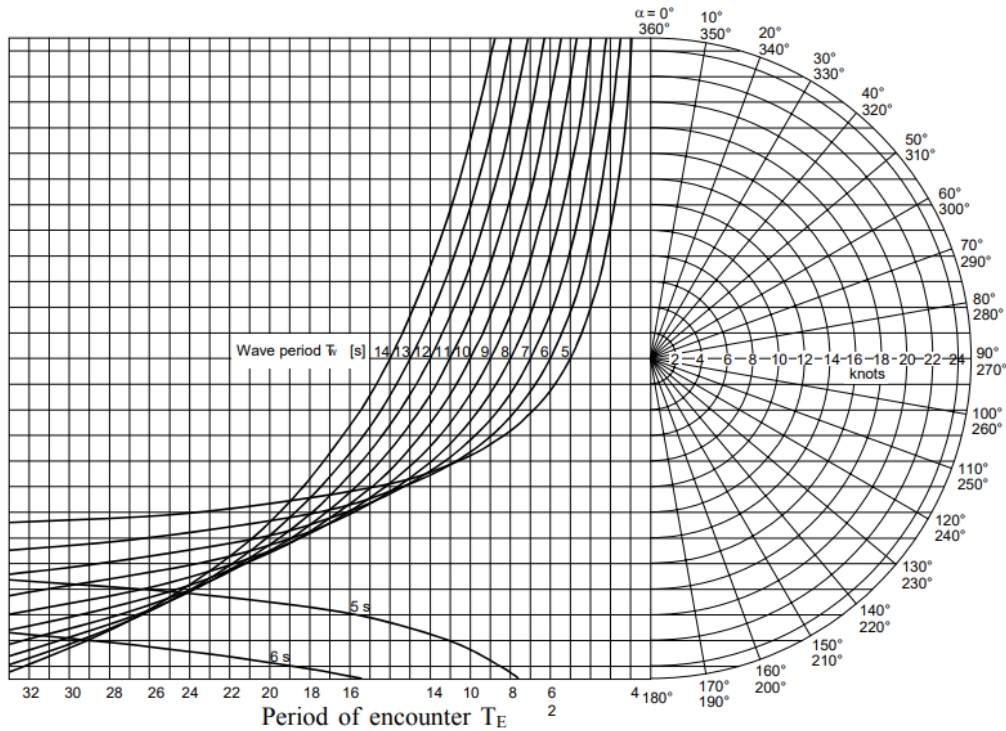
Οι τελευταία διέγερση του περιβάλλοντος στο πλοίο, τα κύματα, έχουν το μεγαλύτερο αντίκτυπο στην ελκτικότητα και στην ευστάθεια πορείας. Αυτό συμβαίνει, καθώς, η ενέργεια και η φύση των κυμάτων προκαλούν ταλαντωτικές κινήσεις και στους έξι βαθμούς ελευθερίας του πλοίου. Το πλοίο υφίσταται υδροδυναμικές δυνάμεις λόγω της στιγμιαίας ύπαρξή του σε κάποιο σημείο του κύματος και λόγω της κίνησής του. Επομένως, δεν είναι εξασφαλισμένο ότι ένα πλοίο θα έχει δυναμική ευστάθεια πορείας κατά τη συνάντησή του με κύματα. Η τελευταία εξαρτάται από τη θέση, τον προσανατολισμό του πλοίου πάνω στο κύμα και την ταχύτητά του, αφού η ταύτισή της με κρίσιμες ταχύτητες εκδηλώνει φαινόμενα *surf riding* και *broaching-to*. Κατά το τελευταίο φαινόμενο, παρουσιάζεται απώλεια κατευθυντικού ελέγχου, το πλοίο πραγματοποιεί απότομη στροφή και τελικώς ανατρέπεται.



Εικόνα 40: Πλοίο υποβαλλόμενο σε broaching-to από ακολουθούντες κυματισμούς. [12]

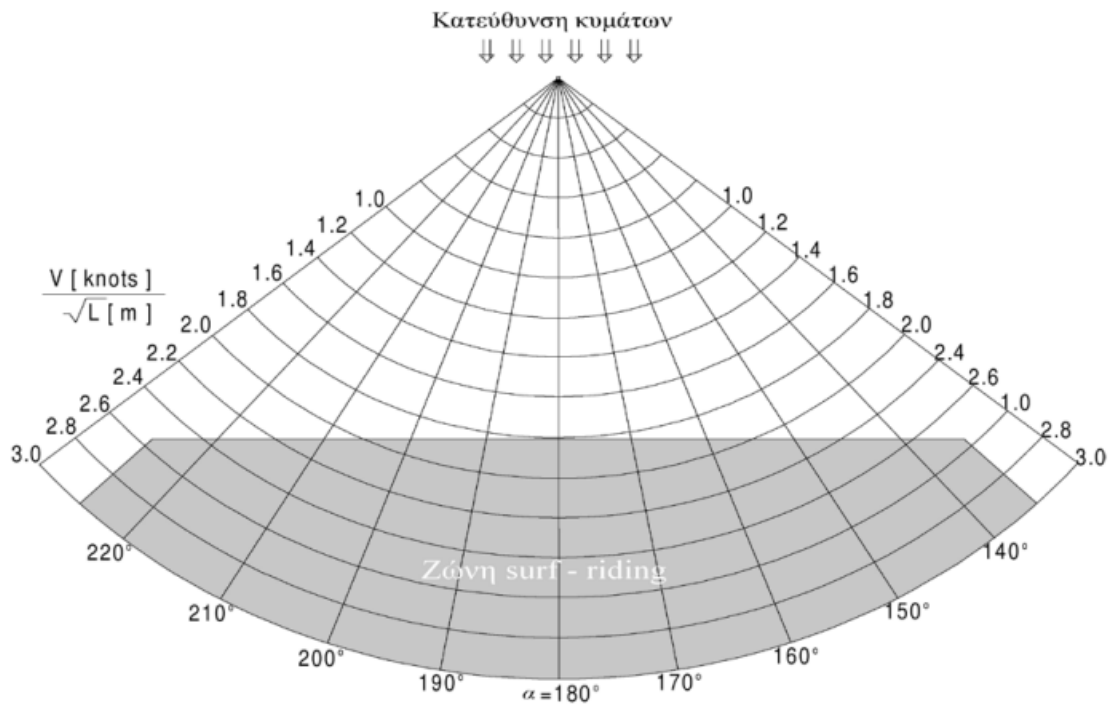
Μια εκ των χειρότερων δυνατών καταστάσεων θάλασσας, αναφορικά με την επικινδυνότητα εκδήλωσης αστάθειας, είναι να παρουσιάζεται το πλοίο στάσιμο πάνω στο κύμα και συγκεκριμένα στην κορυφή, όπου θα μειωθεί η στατική του ευστάθεια. Τέτοια κύματα χαρακτηρίζονται από το μεγάλο μήκος τους, περίπου διπλάσια το μήκος του πλοίου, την παραπλήσια με την ταχύτητα του πλοίου ταχύτητα διάδοσής τους και το συναντούν στην πρύμνη, ακολουθούντες κυματισμοί. Συμπληρωματικά, δεν είναι θεμιτό το πλοίο να βρίσκεται στην κατωφέρεια του κύματος (*surf riding*) και ειδικότερα στην κοιλάδα του κύματος, διότι είναι πιθανό να τεθεί σε κίνηση με την ταχύτητα φάσης του κύματος. Αντίθετα, τα κύματα από την πλώρη διακρίνονται από τη μεγάλη συχνότητα συνάντησης και προκαλούν φαινόμενα συντονισμού στις κινήσεις *heave*, *pitch* και *roll*. Οι εγκάρσιοι κυματισμοί προκαλούν κινήσεις διατοιχισμού (*roll*), μεγάλες εγκάρσιες επιταχύνσεις και ευκολότερη διαβροχή καταστρώματος και απώλεια ευστάθειας.

Ο πλοίαρχος οφείλει να ελέγχει την ταχύτητα μέσω των οργάνων, να προσδιορίζει τη γωνία συνάντησης του πλοίου με τα κύματα, όπως και τα χαρακτηριστικά των ταλαντώσεών τους (μήκος κύματος  $\lambda$ , ύψος κύματος  $h$ , περίοδος  $T$ , περίοδος συνάντησης  $T_e$ ).

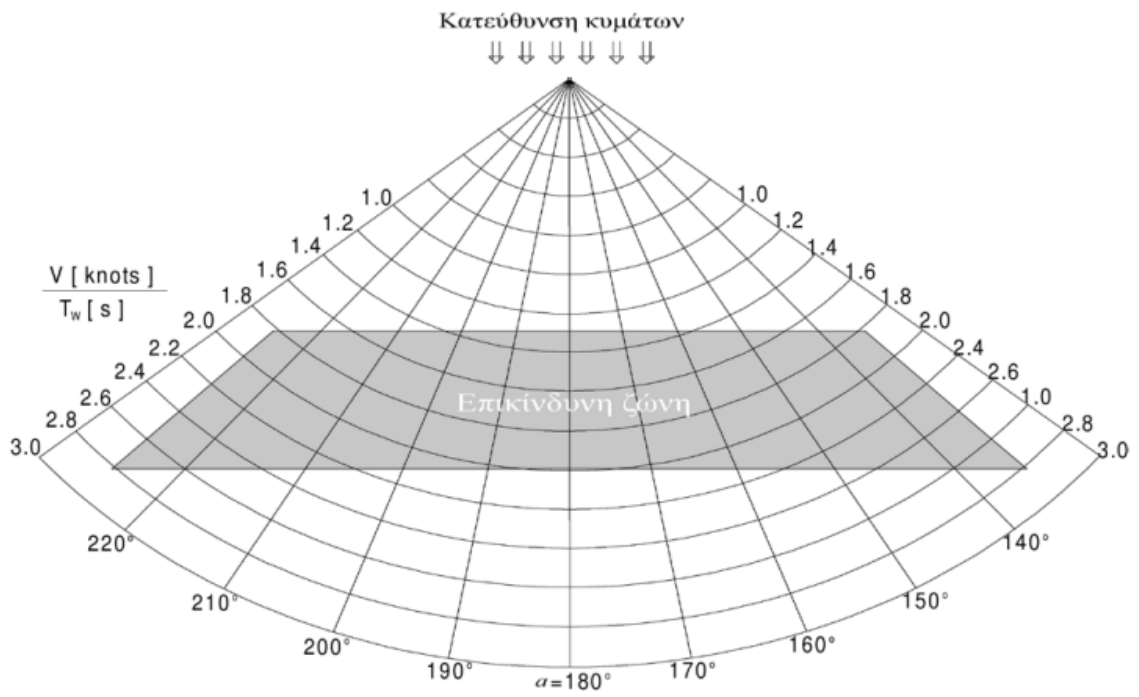


Εικόνα 41: Προσδιορισμός περιόδου συνάντησης  $T_e$  [15]

Τα ακόλουθα διαγράμματα του *IMO* αποτελούν σύμβουλο και οδηγό του πλοίαρχου, τα οποία συνιστούν κατάλληλες ταχύτητες για την αποφυγή επικίνδυνων συνθηκών πλεύσης.



Εικόνα 42: Επικίνδυνη περιοχή για εκδήλωση surf riding σε ακολουθούντες ή πλάγιους κυματισμούς [16]



Εικόνα 43: Επικίνδυνη περιοχή για συνάντηση με διαδοχικά υψηλούς κυματισμούς [16]



## Κεφάλαιο 5

### 5. Εφαρμογές πηδαλιουχίας

Σε αυτό το κεφάλαιο υπάγονται ενότητες που έχουν θεωρητική κα πειραματική υπόσταση ή αποτελούν εφαρμογές του θεωρητικού υποβάθρου. Πρόκειται για πειραματικούς, εμπειρικούς υπολογισμούς μεγεθών, δοκιμές, ελιγμούς, σχεδιαστικά χαρακτηριστικά και βασικές ιδιαιτερότητες κατά τον πλου.

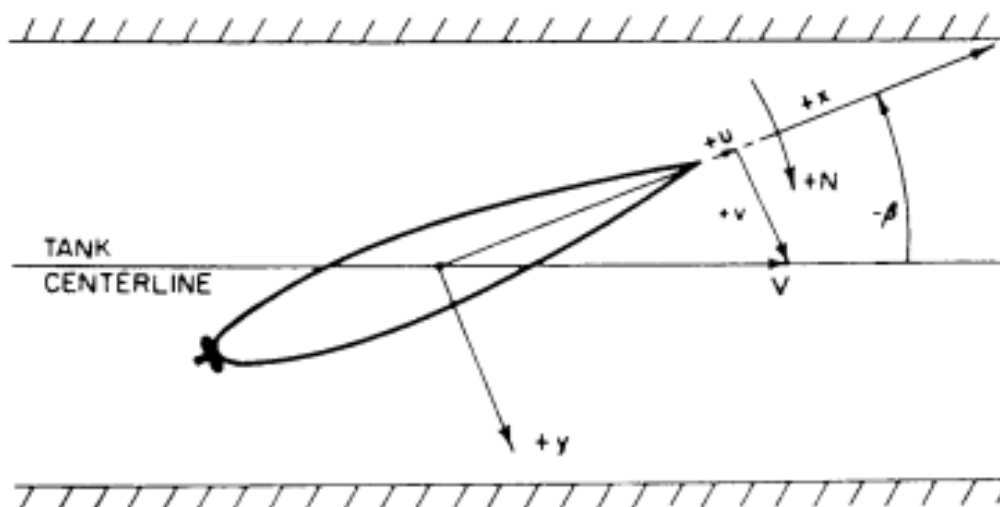
#### 5.1 Πειραματική προσέγγιση υδροδυναμικών παραγώγων

##### I. *Straight-Line Towing Test*

Το πείραμα δεξαμενής κατά το οποίο το μοντέλο του πλοίου μελέτης ρυμουλκείται ευθύγραμμα, είναι ικανό να ορίσει τις υδροδυναμικές παραγώγους  $Y_v$ ,  $N_v$ . Είναι φρόνιμο, το μοντέλο να φέρει πηδάλιο και αυτό να ταυτίζεται με το κέντρο συμμετρίας του μοντέλου. Αναλυτικότερα, όπως ορίζει η ομοιότητα του πλοίου-μοντέλου, το μοντέλο κινείται με ταχύτητα  $V$  βάση των αριθμών *Froude* και σε κατάσταση ερματισμού και βυθίσματος σε ανάλογη αντιστοιχία. Το πείραμα πραγματοποιείται για διαφορετικές γωνίες πλαγιολίσθησης  $\beta$  ώστε να προκύψουν τιμές για την εγκάρσια ταχύτητα του μοντέλου από τη σχέση (200) όπως φαίνεται και στην εικόνα 44:

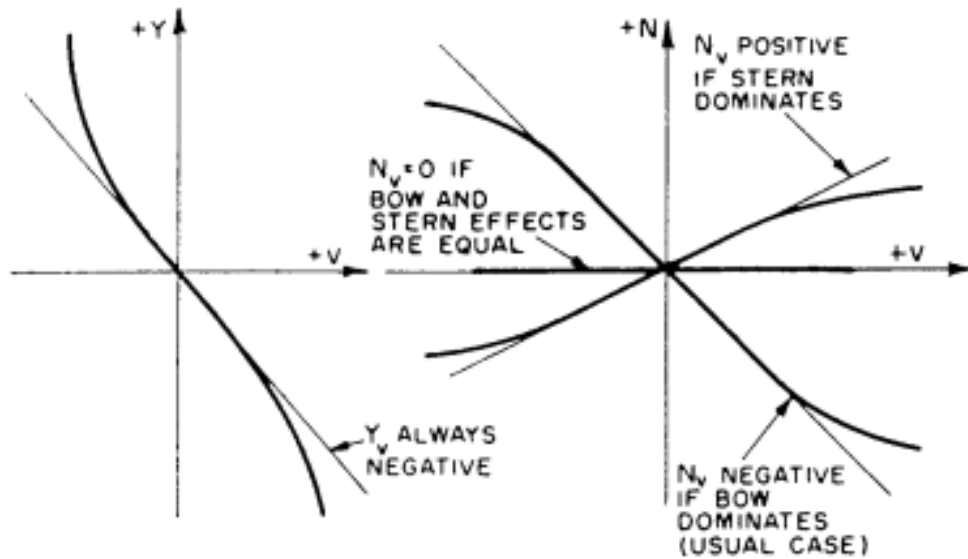
$$v = -V \sin \beta \quad (200)$$

Το αρνητικό πρόσημο οφείλεται στον ορισμό των θετικών κατευθύνσεων που έχουν οριστεί σε προηγούμενη ενότητα.



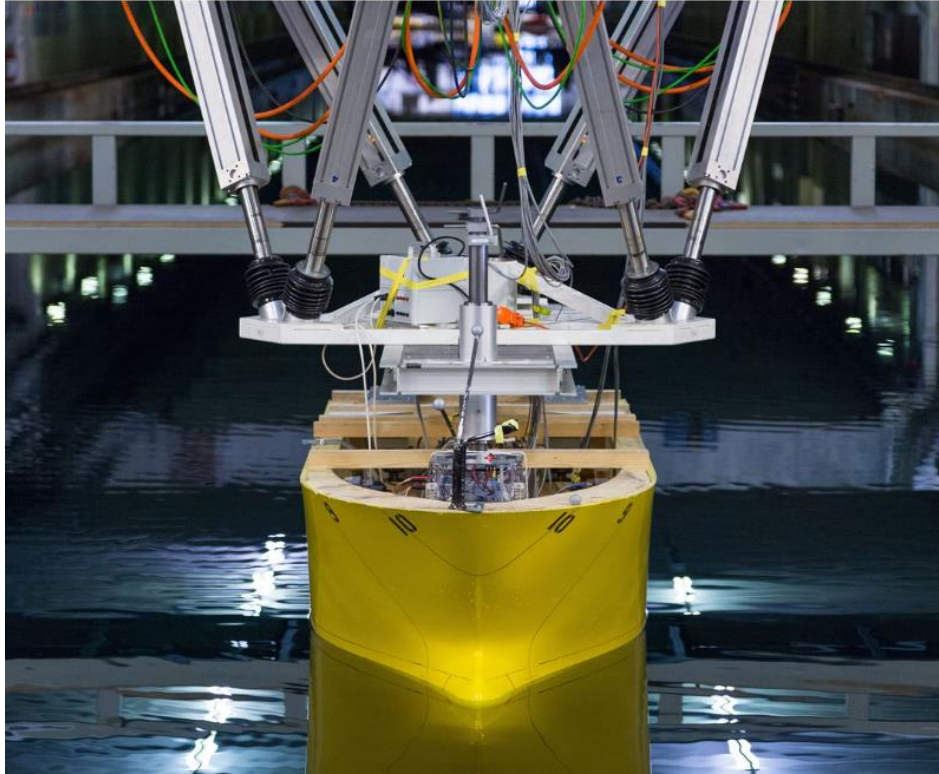
Εικόνα 44: Μοντέλο κατά την ευθύγραμμη ρυμούλκηση με γωνία πρόσπτωσης  $\beta$  [4]

Οι μετρήσεις αφορούν τις τιμές των γωνιών πλαγιολίσθησης, τη δύναμη  $Y$  και ροπή  $N$ . Οι τελευταίες μετρούνται από δυναμόμετρο, το οποίο είναι εγκατεστημένο στο σημείο σύμβασης της αρχής των αξόνων του σκάφους ή στο μέσο νομέα. Δημιουργούνται οι γραφικές παραστάσεις των ευρημάτων συναρτήσει της εγκάρσιας συνιστώσας της ταχύτητας του σκάφους  $v$ , ώστε να ληφθούν οι υδροδυναμικοί παράγωγοι  $Y_v$  και  $N_v$  από τις κλίσεις αυτών (εικόνα 45).



Εικόνα 45: Πρόσημο υδροδυναμικών αντιδράσεων  $Y_v$ ,  $N_v$  σκάφους συναρτήσει της αλληλεπίδρασης πλήρης-πρύμνης [4]

Το ζητούμενο είναι να αναχθούν οι τιμές των παραγώγων για το πραγματικό σκάφος. Προκειμένου να συμβεί αυτό, πρέπει, σε πρώτο βήμα, οι τιμές του μοντέλου να αδιαστατοποιηθούν με τον όρο  $0.5\rho L_m^2 V_m$ , όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα του υγρού της δεξαμενής. Ακολούθως, η διαστατοποίηση θα γίνει με την αντίστροφη διαδικασία, πολλαπλασιάζοντας με τον αντίστοιχο όρο, όμως με τα μεγέθη του σκάφους και την πυκνότητα του θαλασσινού νερού.



Εικόνα 46: Μοντέλο σε δεξαμενή του ερευνητικού οργανισμού SINTEF [17]

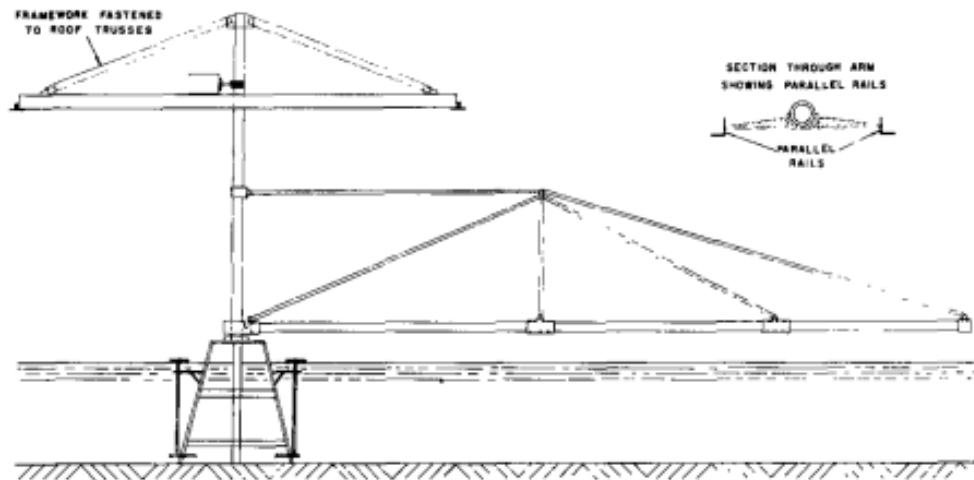
Εφόσον το μοντέλο φέρει πηδάλιο, είναι εφικτή η τροποποίηση τις διαδικασίας ώστε να υπολογιστούν οι υδροδυναμικοί παράγωγοι που εξαρτώνται από την εκτροπή του πηδαλίου,  $Y_\delta$  και  $N_\delta$ . Το μοντέλο ρυμουλκείται χωρίς γωνία πρόσπτωσης και το πηδάλιο τίθεται σε εκτροπή για διάφορες γωνίες. Έτσι, το δυναμόμετρο καταγράφει μια καινούργια σειρά δυνάμεων και ροπών. Σε αυτήν την περίπτωση, οι γραφικές παραστάσεις είναι συναρτήσει της γωνίας εκτροπής πηδαλίου και οι κλίσεις είναι οι υδροδυναμικοί παράγωγοι  $Y_\delta$  και  $N_\delta$ .

Αν το πείραμα πραγματοποιηθεί με γωνία εκτροπής πηδαλίου ταυτόχρονα με γωνία πρόσπτωσης της ροής στο μοντέλο, μπορούν να μελετηθούν οι συζεύξεις των μεγεθών. Ωστόσο, ένα τέτοιο πείραμα αφορά τη μη γραμμική θεωρία.

## II. *Rotating Arm Technique*

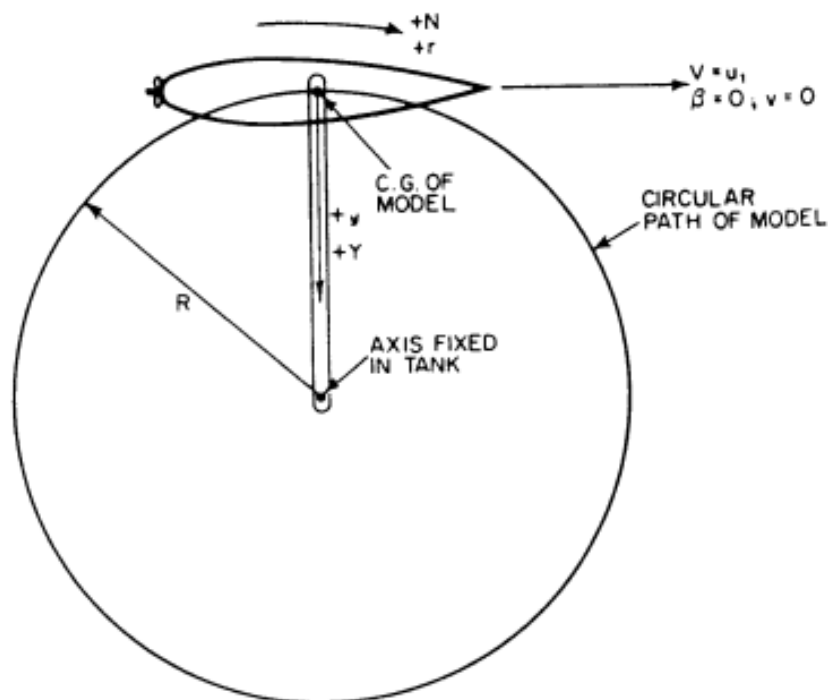
Γίνεται χρήση περιστρεφόμενου βραχίονα, ο οποίος συγκρατεί το μοντέλο στο μέσο του μήκους του και το ρυμουλκεί περιστροφικά. Απαιτείται μεγάλη δεξαμενή ώστε να υπάρχει ικανή διάμετρος για την περιστροφή που αρμόζει στο εκάστοτε μοντέλο. Το μοντέλο δεν έχει εγκάρσια συνιστώσα ταχύτητας, οπότε η διαμήκης συνιστώσα του ισούται με τη σταθερή γραμμική ταχύτητα ( $U=u$ ). Λόγω της περιστροφής αποκτά γωνιακή ταχύτητα  $r$  και προκύπτει η σχέση:

$$r = \frac{u}{R} \quad (201)$$



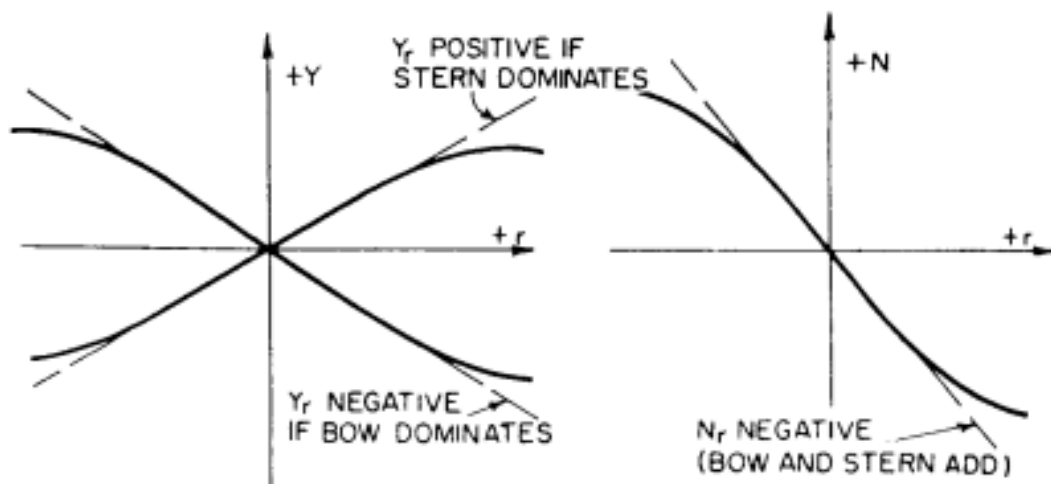
Εικόνα 47: Αποτύπωση μηχανισμού περιστρεφόμενου βραχίονα [18]

Προκειμένου να υπάρξουν μεταβολές στη δύναμη και ροπή, τις οποίες θα μετρήσει το δυναμόμετρο του μοντέλου, πρέπει να υπάρξει μεταβολή στη γωνιακή ταχύτητα. Η γραμμική ταχύτητα όντας σταθερή, καθιστά την μοναδική επιλογή μεταβολής μεγέθους, τη διαφοροποίηση της ακτίνας περιστροφής. Το τελευταίο γίνεται εφικτό με εκτελέσεις διαφορετικών ακτίνων περιστροφής. Συνεπώς, με τις μετρήσεις του δυναμόμετρου, διαμορφώνονται οι γραφικές παραστάσεις της δύναμης και ροπής συναρτήσει της γωνιακής ταχύτητας.



Εικόνα 48: Σκάφος σε εγκατάσταση μηχανισμού περιστρεφόμενου βραχίονα [11]

Οι υδροδυναμικοί παράγωγοι  $Y_r$  και  $N_r$  προκύπτουν από τις κλίσεις των γραφικών παραστάσεων (εικόνα 49).



Εικόνα 49: Πρόσημο υδροδυναμικών αντιδράσεων  $Y_r$ ,  $N_r$  σκάφους συναρτήσει της αλληλεπίδρασης πλώρης-πρύμνης [4]

Ακολουθείται η ίδια διαδικασία για την αναγωγή των αποτελεσμάτων στο πραγματικό σκάφος.

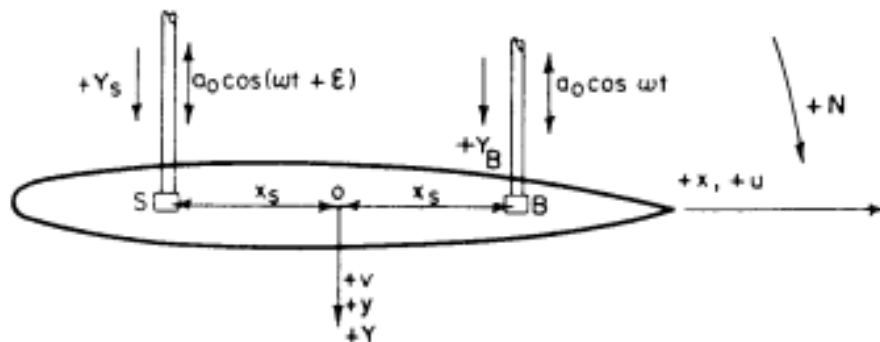
Η μέθοδος μπορεί να παραγάγει και τις παραγώγους  $Y_v$  και  $N_v$  για τιμές γωνιών πλαγιολίσθησης  $\beta$ . Τα διαγράμματά τους θα είναι συναρτήσει των τιμών της γωνιακής ταχύτητας  $r$ . Ωστόσο, οι τιμές που λαμβάνουν με αυτή τη πειραματική μέθοδο δεν ταυτίζονται συνεχώς με τα αντίστοιχα της ευθύγραμμης ρυμούλκησης. Οι δυνατότητες του πειράματος περιστροφής με βραχίονα επεκτείνονται στην εκτέλεση του πειράματος με το μοντέλο υπό κλίση. Συνεπώς, προσφέρεται για μελέτη σύζευξης κινήσεων. Στον αντίποδα, η κατασκευή και η σωστή εκτέλεση του πειράματος προϋποθέτει μεγάλες διαστάσεις δεξαμενής. Σε συνδυασμό με την ιδιαιτερότητα του μηχανισμού, τέτοιες δεξαμενές έχουν μεγάλο κόστος και είναι δυσεύρετες σε παγκόσμια κλίμακα.



Εικόνα 50: Davidson Laboratory, Stevens Institute of Technology Hoboken New Jersey [18]

### III. Planar Motion Mechanism Technique (PMM)

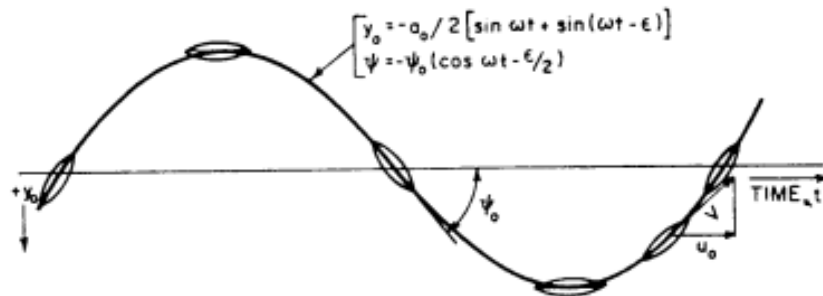
Ο μηχανισμός *PMM* συναντάται στη δεξαμενή πειραμάτων αντίστασης πρόωσης και ευθύγραμμης ρυμούλκησης. Αποτελεί μια οικονομικότερη εναλλακτική του περιστρεφόμενου βραχίονα, η οποία δύναται υπολογισμού των υδροδυναμικών παραγώγων  $Y_v, N_v, Y_r, N_r, Y_{\dot{v}}, N_{\dot{v}}, Y_{\dot{r}}$  και  $N_{\dot{r}}$ . Το μοντέλο κινείται κατά μήκος της δεξαμενής, ενώ ταυτόχρονα ταλαντώνεται εγκάρσια στην πρύμνη και στην πλώρη με το ίδιο πλάτος και συχνότητα από τους ταλαντωτές του μηχανισμού, σχήμα εικόνας (51).



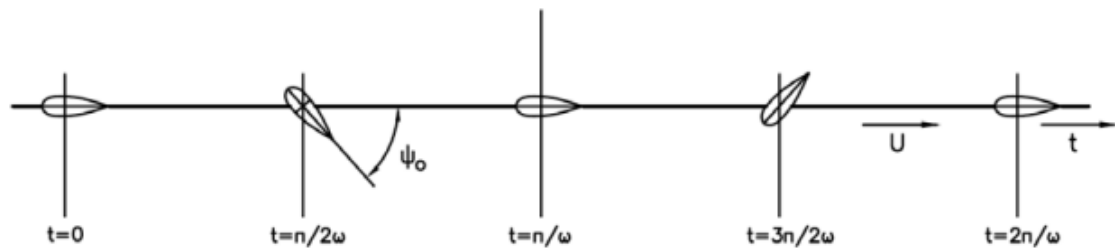
Εικόνα 51: Μηχανισμός *PMM* [11]

Οι ταλαντώσεις θέτουν το μοντέλο σε κίνηση *sway*, κατά την οποία δημιουργούνται δυνάμεις, οι οποίες μετρούνται από τα δυναμόμετρα, τοποθετημένα περί τα σημεία

επαφής των ταλαντωτών με το μοντέλο στη πρύμνη και πλώρη. Συγκεκριμένα για τις παραγώγους  $Y_{\dot{v}}$ ,  $N_{\dot{v}}$ , οι μετρήσεις λαμβάνονται όταν η εγκάρσια συνιστώσα της επιτάχυνσης είναι μέγιστη και η αντίστοιχη ταχύτητα μηδενική. Ανάλογα για τις  $Y_r$ ,  $N_r$  η εγκάρσια και η γωνιακή επιτάχυνση θα είναι μηδέν, όπως επίσης και η εγκάρσια συνιστώσα της ταχύτητας. Τέλος, οι μετρήσεις για τις υδροδυναμικές παραγώγους  $Y_{\dot{r}}$  και  $N_{\dot{r}}$  πρέπει να παρθούν όταν η εγκάρσια και η γωνιακή ταχύτητα και η εγκάρσια συνιστώσα της επιτάχυνσης είναι αντίστοιχα μηδέν.



Εικόνα 52: Κίνηση yaw μοντέλου για υπολογισμό υδροδυναμικών παραγώγων  $Y_r$ ,  $N_r$ ,  $Y_{\dot{r}}$  και  $N_{\dot{r}}$  [11]



Εικόνα 53: Προσανατολισμός μοντέλου κατά την περιστροφική ταλάντωση πειράματος [11]

Τέλος, τα φαινόμενα σύζευξης και μη γραμμικότητας μπορούν να μελετηθούν και με αυτή τη πειραματική μέθοδο.

#### IV. Free Running Model Experiment

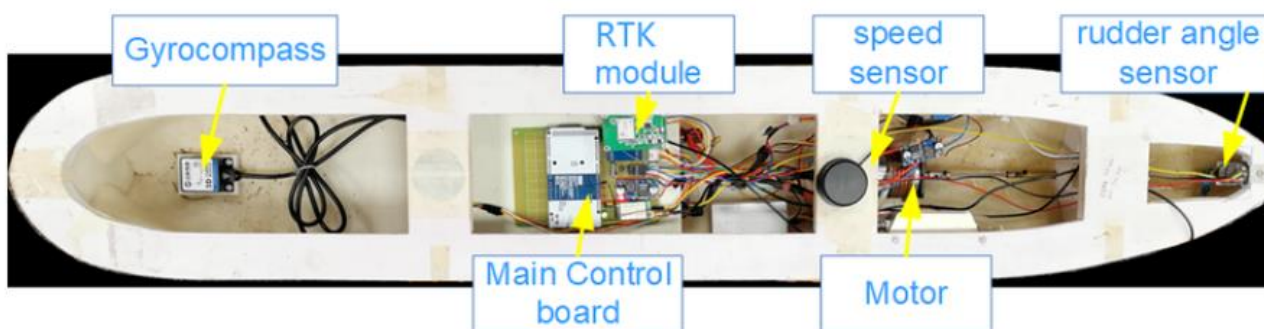
Τα πειράματα με ελεύθερα μοντέλα παίρνουν μέρος σε δεξαμενές ή σε λίμνες και ποτάμια εφόσον οι διαστάσεις της δεξαμενής περιορίζουν το πείραμα. Χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση των πραγματικών ελιγμών του σκάφους και την εκτίμηση των ελικτικών ικανοτήτων του σχεδιασμένου σκάφους. Διαφορετικός στόχος των πειραμάτων με ελεύθερα μοντέλα αποτελεί η καταγραφή των δυνάμεων που ασκούνται στο μοντέλο ώστε να υπολογιστούν οι υδροδυναμικοί παράγωγοι. Η γάστρα των μοντέλων χαρακτηρίζεται από γεωμετρική ομοιότητά του με το πραγματικό σκάφος και φέρει σύστημα αυτοπρόωσης. Επίσης, η σωστή εξαγωγή συμπερασμάτων απαιτεί την προσάρτηση όλων των παρελκομένων του πραγματικού σκάφους στο μοντέλο. Τα ευρήματα αντλούνται από συστήματα καταγραφής συντεταγμένων και μέτρησης



γωνιών συναρτήσει του χρόνου και διαχειρίζονται από αλγόριθμους και προγράμματα προς την εξαγωγή συμπερασμάτων.



Εικόνα 54: Μοντέλο κατά τη διάρκεια ελεύθερου πειράματος [19]



Εικόνα 55: Μοντέλο υπό κλίμακα με ενσωματωμένους αισθητήρες και μηχανισμούς [19]

## 5.2 Εμπειρικές σχέσεις Clarke και Inoue

Τα πειράματα και οι μελέτη των αποτελεσμάτων τους πρόσφεραν το έδαφος για τη δημιουργία εμπειρικών και ημι-εμπειρικών σχέσεων για τον υπολογισμό των υδροδυναμικών παραγώγων. Ωστόσο, τέτοιες σχέσεις εφαρμόζονται με σύνεση και σε αρχικά στάδια της μελέτης και σχεδίασης ενός σκάφους. Αυτό συμβαίνει καθώς δεν υπεισέρχονται σε αυτές λεπτομέρειες της γεωμετρίας του σκάφους, παρά μόνο οι βασικές διαστάσεις. Ως επακόλουθο αυτού, ο υπολογισμός των υδροδυναμικών παραγώγων είναι μια διαδικασία η οποία επαναλαμβάνεται σε διάφορα στάδια της σχεδίασης είτε θεωρητικά είτε πειραματικά (Κεφάλαιο 4.6 και 5.1).



Σε αυτήν την ενότητα επιλέγεται η παράθεση κάποιων εμπειρικών τύπων, συγκεκριμένα του *Clarke* (1982) και του *Inoue* (1981).

Ο *Clarke* παράγαγε τους παρακάτω τύπους μέσω της ανάλυσης παλινδρόμησης (*regression analysis*).

$$Y'_v = -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left[1 + 0.40C_b \frac{B}{T}\right] \quad (202)$$

$$Y'_r = -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left[-\frac{1}{2} + 2.2 \frac{B}{L} - 0.080 \frac{B}{T}\right] \quad (203)$$

$$Y'_{\dot{v}} = -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left[1 + 0.16C_b \frac{B}{T} - 5.1 \left(\frac{B}{L}\right)^2\right] \quad (204)$$

$$Y'_{\dot{r}} = -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left[0.67 \frac{B}{L} - 0.0033 \left(\frac{B}{T}\right)^2\right] \quad (205)$$

$$N'_v = -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left[\frac{1}{2} + 2.4 \frac{T}{L}\right] \quad (206)$$

$$N'_r = -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left[\frac{1}{4} + 0.039 \frac{B}{T} - 0.56 \frac{B}{L}\right] \quad (207)$$

$$N'_{\dot{v}} = -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left[1.1 \frac{B}{L} - 0.041 \frac{B}{T}\right] \quad (208)$$

$$N'_{\dot{r}} = -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left[\frac{1}{12} + 0.017C_b \frac{B}{T} - 0.33 \frac{B}{L}\right] \quad (209)$$

$$Y'_\delta = -\frac{3A_R}{L^2} \quad (210)$$

$$N'_\delta = -\frac{1}{2} Y'_\delta \quad (211)$$

Όπου:

$A_R$ : η επιφάνεια του πηδαλίου

Αντίστοιχα, ο *Inoue* διαμόρφωσε τις σχέσεις των υδροδυναμικών παραγώγων της ταχύτητας και της γωνιακής ταχύτητας.

$$Y'_v = -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left[1 + \frac{1.4}{\pi} C_b \frac{B}{T}\right] \quad (212)$$

$$Y'_r = \frac{1}{2} \pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \quad (213)$$

$$N'_v = -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \frac{2}{\pi} \quad (214)$$

$$N'_r = -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left[\frac{1.04}{\pi} - \frac{4}{\pi} \frac{T}{L}\right] \quad (215)$$

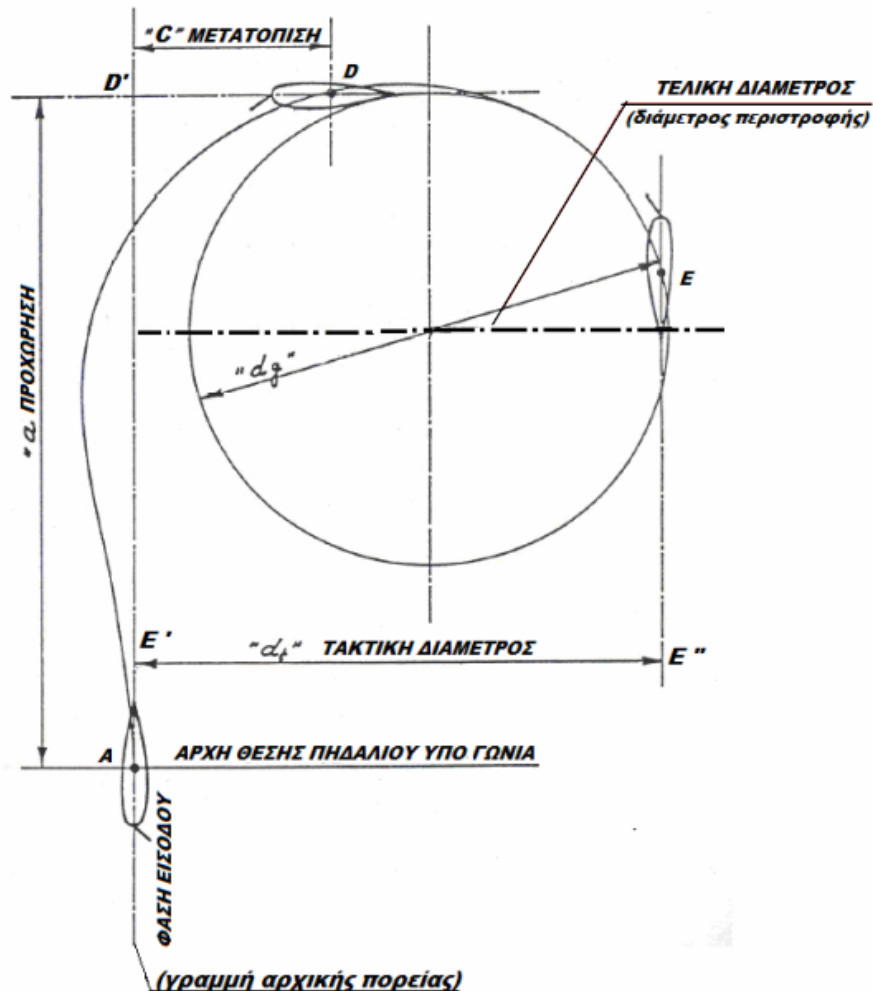
## 5.3 Δοκιμές Πηδαλιουχίας Πλήρους Κλίμακας

Οι μετρήσεις των δοκιμών πηδαλιουχίας πλήρους κλίμακας είναι απαραίτητες για τον προσδιορισμό και τη διερεύνηση των ελκτικών ικανοτήτων ενός σκάφους. Ακόμα, οι δοκιμές πηδαλιουχίας καταδεικνύουν την ύπαρξη ή όχι της ευστάθειας του σκάφους, η οποία είναι εμφανής και στα παραγόμενα διαγράμματα. Μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό πως τέτοιες πληροφορίες δεν δύναται άντλησης από πειράματα μοντέλων και ακριβούς αντιστοίχισης στο πραγματικό σκάφος. Όπως αντίστροφα συμβαίνει με τα πειράματα αντίστασης και προσδιορισμού υδροδυναμικών παραγώγων.

### 5.3.1 Κύκλος στροφής (*Turning Circle*)

Ως κύκλος στροφής αποκαλείται η πορεία του σκάφους όταν το, προηγούμενα ανενεργό, πηδάλιο σχηματίσει και συντηρήσει σταθερή γωνία  $\delta$  μεταξύ του άξονά του και του άξονα συμμετρίας του σκάφους.

Οι δοκιμές του κύκλου στροφής αποσκοπούν στην μέτρηση της ικανότητας στροφής του εκάστοτε σκάφους αλλά και στη γενικότερη μελέτη των αποκρίσεων του πλοίου λόγω της χρήσης του πηδαλίου. Τα λεγόμενα συμπεραίνονται από την μέτρηση των μεγεθών της εικόνας 14: προχώρηση (*advance*), μετατόπιση-μεταφορά (*transfer*), τακτική διάμετρος (*tactical diameter*) και τελική διάμετρο (*steady turning diameter*). Ο κύκλος στροφής εκτελείται για διάφορες τιμές εκτροπής πηδαλίου, τόσο θετικές όσο και αρνητικές, όπως επίσης και για διάφορες ταχύτητες. Τα αποτελέσματα καταγράφονται και αποτελούν αρχείο της γέφυρας, αφού είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με την ελκτική συμπεριφορά του πλοίου και επομένως είναι τα πλέον αναγκαία για την σωστή κυβέρνηση του πλοίου.



Εικόνα 56: Βασικά μεγέθη κύκλου στροφής [13]

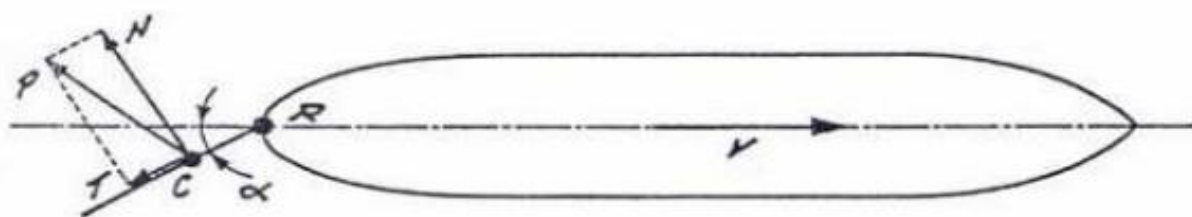
Προτού αρχίσει να διαγράφεται η τροχιά του κύκλου στροφής, είναι επιθυμητό το σκάφος να διατηρεί ευθύγραμμη πορεία ως ότου επιτευχθεί σταθερή ταχύτητα. Η διάρκεια αυτής της διαδικασίας ονομάζεται φάση εισόδου (*approach phase*). Αμέσως μετά, δίνεται η εντολή στο πηδάλιο να τεθεί υπό γωνία και ξενικά ο κύκλος στροφής, ο οποίος αποτελείται από τρεις μεταβατικές φάσεις και τη μόνιμη, τέταρτη φάση. Οι δυο πρώτες φάσεις είναι κλιμακούμενες με την ανάπτυξη επιταχύνσεων, ενώ η τρίτη είναι η φάση που τείνει να επέλθει ισορροπία ως ότου την τέταρτη που χαρακτηρίζεται από την κυκλική κίνηση. Η ανάλυση κάθε φάσης βρίσκεται στην επόμενη υποενότητα, ακολουθώντας την επεξήγηση των προαναφερθέντων μεγεθών.

Η προχώρηση  $a$  (*advance*) είναι η απόσταση του σημείου όπου δόθηκε η εντολή εκτροπής του πηδαλίου ως το ίχνος του κέντρου βάρους του σκάφους στον άξονα που ταυτίζεται με την αρχική ευθύγραμμη πορεία του. Ο άξονας αυτός είναι κατακόρυφος και μπορεί να αποκαλείται άξονας προχωρήσεων. Το σύνολο των τιμών που μπορεί να λάβει είναι πεπερασμένο με μέγιστη τιμή εκείνη που καταγράφεται με το πλοίο στραμμένο στις  $90^\circ$  σε σχέση με την αρχική ευθεία πορεία.

Η μετατόπιση  $s$  (*transfer*) μετριέται στον οριζόντιο άξονα ή άξονα μεταφοράς και αποτελεί την κάθετη απόσταση του κέντρου βάρους από τον άξονα προχωρήσεων. Η τακτική διάμετρος  $D_t$  (*tactical diameter*) είναι το ευθύγραμμο τμήμα με αρχή τη θέση του σκάφους όταν βρίσκεται στις  $180^\circ$  του κύκλου στροφής και πέρας το σημείο τομής με τη νοητή προέκταση της αρχικής ευθύγραμμης πορείας του σκάφους.

Η τελική διάμετρος  $D$  (*steady turning diameter*) είναι η διάμετρος της κυκλικής κίνησης όπου θα πραγματοποιηθεί όταν μηδενιστούν οι επιταχύνσεις. Αξίζει να σημειωθεί πως η τελική διάμετρος είναι μικρότερη της τακτικής αφού λόγω της επίδρασης των δυνάμεων του περιβάλλοντος (άνεμος, κύματα, ρεύματα) και με σταθερή γωνία πηδαλίου, η κίνηση του πλοίου αποκλίνει από σταθερή κυκλική κίνηση χαράσσοντας μια σπείρα.

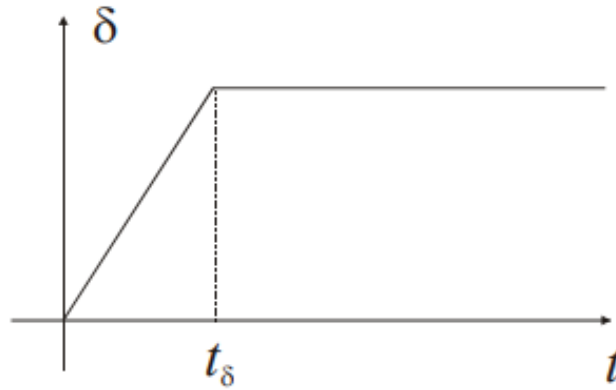
Η εκτροπή του πηδαλίου συνεπάγεται πρόσκρουση με τη ροή του νερού. Η επιφάνεια που έρχεται σε άμεση επαφή με τη ροή δέχεται μια υπερπίεση, ενώ η πίσω όψη δέχεται μια υποπίεση. Η συνισταμένη των δυνάμεων αυτών εφαρμόζεται κάθετα στην επιφάνεια του πηδαλίου με αντίθετη κατεύθυνση της εκτροπής του πηδαλίου, όπως αναμενόμενο. Ακόμα, λόγω της επαφής του νερού με την επιφάνεια του πηδαλίου δημιουργείται και δύναμη τριβής παράλληλα στον άξονα του πηδαλίου. Σημειώνεται πως το μέγεθος της πρώτης δύναμης είναι εμφανώς μεγαλύτερο της δεύτερης. Η συνισταμένη των παραπάνω δυνάμεων ωθεί την επιστροφή του πηδαλίου στην ουδέτερη θέση ( $\delta=0$ ) αλλά σημαντικότερα προκαλεί κινήσεις ως προς τους άξονες του πλοίου.



Εικόνα 57: Εφαρμοζόμενες δυνάμεις στο πηδάλιο [13]

### 5.3.1.A Οριζόντιο επίπεδο

Ορίζεται η πρώτη ( $1^{\eta}$ ) φάση κατά την οποία το πηδάλιο μεταβαίνει από το οριζόντιο επίπεδο συμμετρίας στη θέση επιθυμητής σχηματιζόμενης γωνίας  $\delta$  σε χρόνο  $t_\delta$ .



Εικόνα 58: Χρόνος απόκρισης πηδαλίου [12]

Σε αυτή τη φάση της μικρής διάρκειας, εμφανίζεται και συνεχίζει να επιδρά μέχρι και τη δεύτερη φάση, η δύναμη του πηδαλίου  $Y_{\delta}'\delta$  και η ροπή  $N_{\delta}'\delta$ , οι οποίες προκαλούν επιταχύνσεις στις οποίες ανθίσταται μόνο η αδράνεια του πλοίου. Αυτό συμβαίνει επειδή σε αυτή τη φάση η γωνία πλαγιολίσθησης δεν έχει προλάβει να αναπτυχθεί επαρκώς επομένως ούτε οι, παραγόμενες λόγω αυτής, υδροδυναμικές δυνάμεις. Σε επεξήγηση, η γωνία πλαγιολίσθησης  $\beta$  (*drift*) είναι η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ του διαμήκους άξονα του πλοίου και της εφαπτόμενης του κύκλου που διαγράφει το κέντρο βάρους του πλοίου ή όποιο άλλο σημείο αναφοράς. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η απόκριση κρίνεται από τις επιταχύνσεις που σημειώνουν σημαντικές τιμές έναντι των αμελητέων ποσοτήτων των ταχυτήτων. Συνεπώς, οι εξισώσεις κίνησης διαμορφώνονται ως:

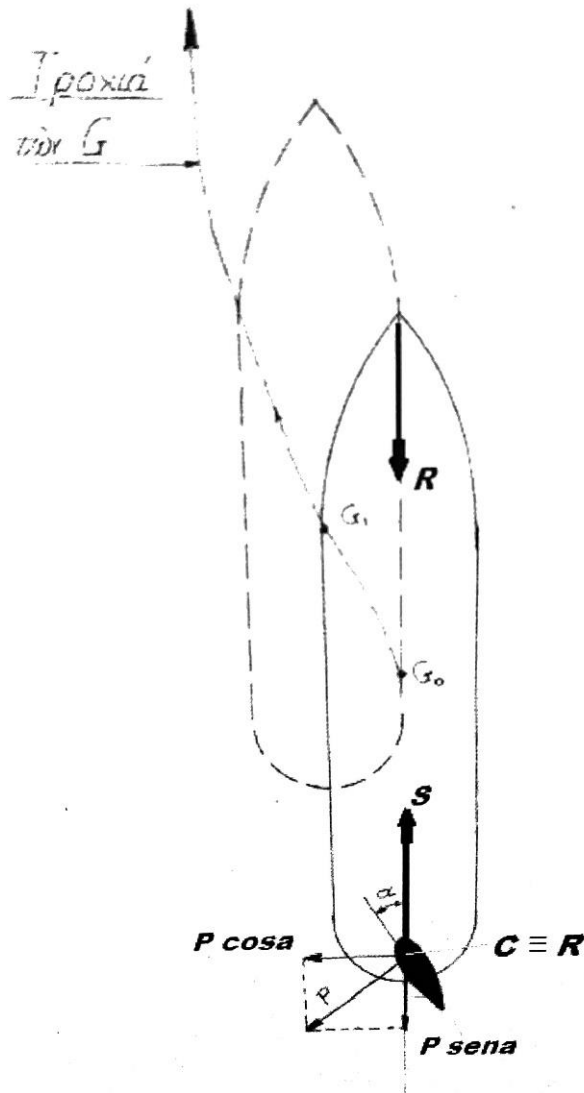
*Sway*:

$$(m' - Y_{\dot{v}}') \dot{v}' - \dot{r}' Y_r' = Y_{\delta}' \delta' \quad (216\alpha)$$

*Yaw*:

$$-\dot{v}' N_{\dot{v}}' + (I_z' - N_{\dot{r}}') \dot{r}' = N_{\delta}' \delta' \quad (216\beta)$$

Η επίδραση της  $Y_{\delta}'\delta$  και η απουσία των λοιπών υδροδυναμικών δυνάμεων φαίνεται στη μικρή πλευρική μετατόπιση προς την αντίθετη κατεύθυνση της επιθυμητής στροφής (μετατόπιση προς *port* για στροφή πηδαλίου προς *starboard*). Η στροφή του πλοίου ξεκινά όταν η ροπή αναπτυχθεί αρκετά ώστε να υπερνικήσει την αδράνεια του πλοίου και την πρόσθετη μάζα του νερού που το περιβάλλει.



Εικόνα 59: Πρώτη φάση κύκλου στροφής: Εκτροπή τηδαλιού για ελιγμό [13]

Η δεύτερη (2<sup>η</sup>) φάση χαρακτηρίζεται από την περιστροφή που αρχίζει να παίρνει μέρος, από την εμφάνιση, δηλαδή, της γωνίας πλαγιολίσθησης (*drift*). Η τιμή της γωνιακής ταχύτητας αυξάνεται όπως και η αντίσταση λόγω της μεγαλύτερης προβαλλόμενης επιφάνειας ενάντια στη ροή κατά τη στροφή. Επιπλέον, η πλευρική μετατόπιση της πρώτης (1<sup>η</sup>) φάσης ελαττώνεται, αφού αναπτύσσεται σημαντικά η δύναμη  $Y_v$ . Η ροπή  $N_v$  εντείνεται και δημιουργείται φυγόκεντρος δύναμη, στην οποία αντιτίθεται η δύναμη  $Y_v$ . Φαίνεται επομένως πως στη δεύτερη (2<sup>η</sup>) και τρίτη (3<sup>η</sup>) φάση, οι ταχύτητες  $v$  και  $v$  αναπτύσσονται και λαμβάνουν υπολογίσιμες τιμές, σε αντίθεση με την πρώτη φάση. Άρα, οι σχέσεις (54α) και (54β) θα λάβουν τις πλήρεις μορφές.

Sway:

$$(m' - Y_{\dot{v}}') \dot{v}' - v' Y_v' - r' Y_r' + (m' - Y_r') r' = Y_{\delta}' \delta' \quad (217\alpha)$$

Yaw:

$$- \dot{v}' N_v' - v' N_v' + (I_z' - N_r') \dot{r}' - r' N_r' = N_\delta' \delta' \quad (217\beta)$$

Πρέπει να υπογραμμιστεί πως ενώ το πλοίο ακολουθεί κυκλική τροχιά, η ροή του νερού αλλάζει και προσπίπτει στην επιφάνεια του πηδαλίου με μικρότερη γωνία με αποτέλεσμα να μειώνεται η δύναμη και η ροπή πηδαλίου.

Η τέταρτη (4<sup>η</sup>) φάση αντιπροσωπεύει την ομαλή κυκλική κίνηση με τελική διάμετρο  $D$ . Η ειδοποιός διαφορά αυτής της φάσης αποτελεί η έναρξη της, η οποία σηματοδοτείται από το μηδενισμό των επιταχύνσεων  $\dot{v}, \dot{r}$  λόγω της ισορροπίας των δυνάμεων και ροπών που επήλθε.

Sway:

$$- v' Y_v' + (m' - Y_r') r' = Y_\delta' \delta \quad (218\alpha)$$

Yaw:

$$- v' N_v' - r' N_r' = N_\delta' \delta \quad (218\beta)$$

Η αδιάστατη γωνιακή ταχύτητα υπενθυμίζεται πως προκύπτει από τη σχέση  $r' = r \frac{L}{V}$ , και η ακτίνα ομαλής κυκλικής κίνησης  $r = \frac{V}{R}$  (125). Επομένως, μπορεί να γραφεί ως:

$$r' = \frac{L}{R} \quad (219)$$

και να αντικατασταθεί στις παραπάνω εξισώσεις. Η διαμόρφωσή τους κατά αυτόν τον τρόπο, δίνει τη δυνατότητα λύσης ως προς την ακτίνα στροφής  $R$  και την ταχύτητα  $v'$ .

Ακτίνα στροφής:

Επίλυση της (218β) ως προς  $v'$ :

$$v' = - \frac{N_\delta' \delta' + N_r' r'}{N_v'} \quad (220)$$

Αντικατάσταση της (220) στη (218α):

$$\begin{aligned} \frac{Y_v' N_\delta' \delta'}{N_v'} + \frac{Y_v' N_r' r'}{N_v'} + (m' - Y_r') r' &= Y_\delta' \delta \Rightarrow \\ r' \left[ \frac{Y_v' N_r'}{N_v'} + (m' - Y_r') \right] &= \delta \left[ Y_\delta' - \frac{Y_v' N_\delta'}{N_v'} \right] \Rightarrow \\ \frac{L}{R} \left[ \frac{Y_v' N_r'}{N_v'} + (m' - Y_r') \right] &= \delta \left[ Y_\delta' - \frac{Y_v' N_\delta'}{N_v'} \right] \Rightarrow \\ R &= \frac{L}{\delta} \left[ \frac{Y_v' N_r' + N_v' (m' - Y_r')}{N_v' Y_\delta' - Y_v' N_\delta'} \right] \end{aligned} \quad (221)$$

Συνεπώς, η ακτίνα του κύκλου στροφής είναι ανάλογη του μήκους πλοίου  $L$  και αντιστρόφως ανάλογη της γωνίας εκτροπής πηδαλίου  $\delta$ . Οι ακτίνες στροφής οι οποίες είναι δυο με τέσσερα μήκη πλοίου μπορούν να εξαχθούν από τη γραμμική θεωρία. Αντίθετα, μικρότερες ακτίνες, δηλαδή κλειστές στροφές, εμπίπτουν στη μη γραμμική θεωρία. Σε κάθε περίπτωση, το ευσταθές πλοίο στρίβει προς την κατεύθυνση της εκτροπής του πηδαλίου. Αυτό σημαίνει πως η ακτίνα λαμβάνει θετικό πρόσημο (δεξιά στροφή- starboard turn) όταν η γωνία εκτροπής  $\delta$  έχει αρνητικό πρόσημο (δεξιά εκτροπή-starboard side). Στον αντίποδα, για το ασταθές πλοίο τα παραπάνω μεγέθη είναι ταυτόσημα, το πλοίο στρίβει αντίθετα με το πηδάλιο.

Ταχύτητα:

Επίλυση της (218α) ως προς  $r'$ :

$$r' = \frac{Y_{\delta}' \delta' + Y_v' v'}{m' - Y_r'} \quad (222)$$

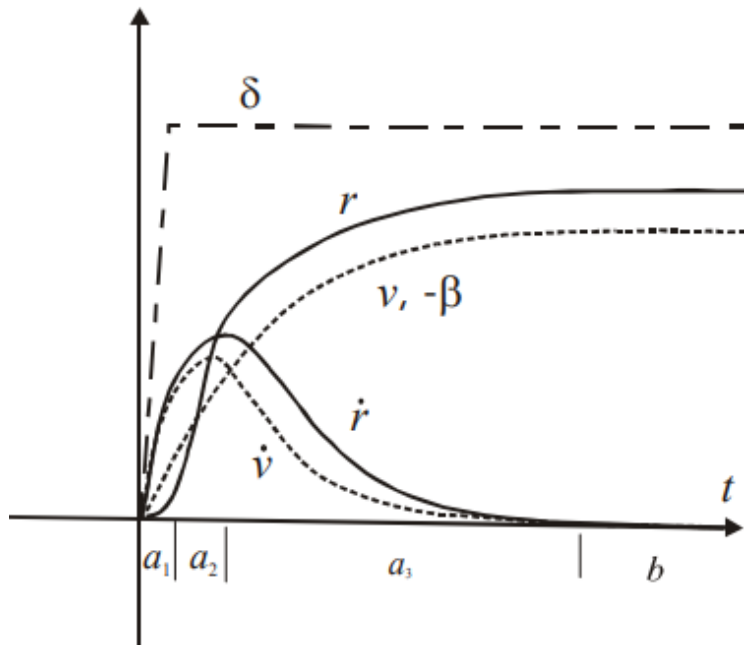
Αντικατάσταση της (222) στη (218β):

$$\begin{aligned} -v' N_v' - \frac{N_r' Y_{\delta}' \delta'}{m' - Y_r'} - \frac{N_r' Y_v' v'}{m' - Y_r'} &= N_{\delta}' \delta \Rightarrow \\ v' \left[ -N_v' - \frac{N_r' Y_v'}{m' - Y_r'} \right] &= \delta \left[ N_{\delta}' + \frac{N_r' Y_{\delta}'}{m' - Y_r'} \right] \Rightarrow \\ v' &= \delta \left[ \frac{N_{\delta}' (m' - Y_r') - N_r' Y_{\delta}'}{N_r' Y_v' - N_v' (m' - Y_r')} \right] \end{aligned} \quad (223)$$

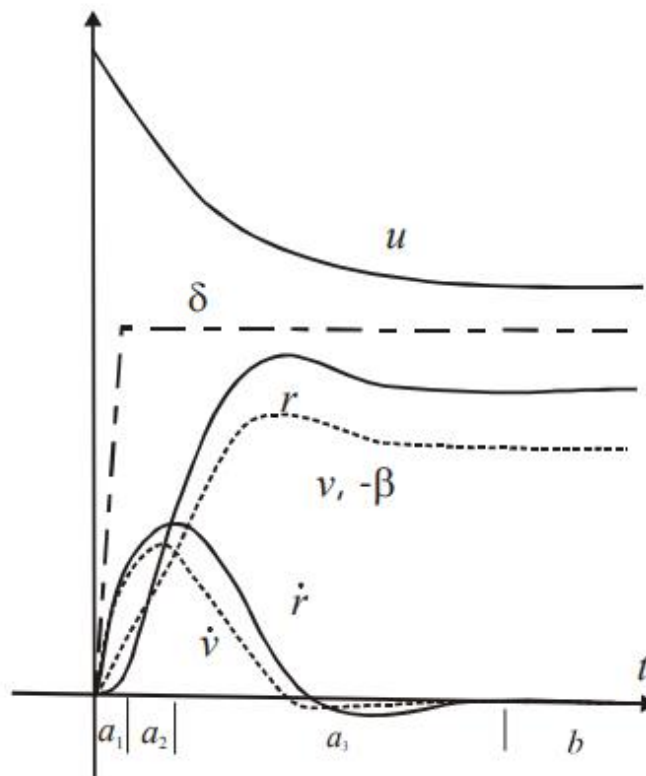
Παρατηρείται πως η εγκάρσια συνιστώσα της ταχύτητας είναι ανάλογη της γωνίας εκτροπής πηδαλίου  $\delta$ .

Επίσης, στα πλαίσια της γραμμικότητας η ταχύτητα πρόωσης παραμένει σταθερή. Εντούτοις, στην πραγματικότητα κατά τη διάρκεια της στροφής η ταχύτητα πρόωσης του πλοίου θα ελαττωθεί λόγω της πλαγιολίσθησης που λαμβάνει χώρα μέχρι να σταθεροποιηθεί στη μόνιμη τέταρτη (4<sup>η</sup>) φάση. Σε αυτή τη φάση, λοιπόν, το πλοίο διατηρεί σταθερά χαρακτηριστικά στροφής, οι ταχύτητες *surge*, *sway*, *yaw* δεν μεταβάλλονται με το χρόνο. Το παραπάνω προϋποθέτει να μην δέχεται το πλοίο επιδράσεις από δυνάμεις του περιβάλλοντος (άνεμος, ρεύματα, κύματα). Ακολουθούν τα διαγράμματα των μεταβαλλόμενων μεγεθών συναρτήσει του χρόνου και ανά φάση. Στο γράφημα της εικόνας 60 φαίνονται οι μεταβολές στα πλαίσια της γραμμικότητας ενώ στο αντίστοιχο της εικόνας 61 ξεπερνά τα όρια της γραμμικής θεωρίας.





Εικόνα 60: Φάσεις κύκλου στροφής υπό γραμμικό πρίσμα [12]



Εικόνα 61: Φάσεις κύκλου στροφής σε μη γραμμικό πλαίσιο [12]

Σημειώνεται πως η φάση  $b$  στη χρονική ιστορία των γραφημάτων αντιστοιχεί στην παραπάνω περιγραφείσα τέταρτη ( $4^{\text{η}}$ ) φάση.

Συγκεντρωτικά, ακολουθεί πίνακας των μεγεθών για κάθε φάση του κύκλου στροφής.

Πίνακας 6: Πίνακας μεγεθών κύκλου στροφής

	ΦΑΣΗ ΕΙΣΟΔΟΥ	ΠΡΩΤΗ ΦΑΣΗ	ΔΕΥΤΕΡΗ ΦΑΣΗ	ΤΡΙΤΗ ΦΑΣΗ
$\delta$	0	$\neq 0$ , const	$\neq 0$ , const	$\neq 0$ , const
$\nu$	0	$\sim 0$	$\neq 0$	$\neq 0$
$r$	0	$\sim 0$	$\neq 0$	$\neq 0$
$\dot{\nu}$	0	$\neq 0$	$\neq 0$	0
$\dot{r}$	0	$\neq 0$	$\neq 0$	0

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει το σημείο του πλοίου στο οποίο ο άξονας συμμετρίας του πλοίου ταυτίζεται με την εφαπτομένη της τροχιάς. Στο σημείο αυτό, δηλαδή, η γωνία πλαγιολίσθησης είναι μηδέν. Αποκαλείται σημείο στροφής ή *pivot point*. Συναντάται πλησίον της πλώρης, όμως δεν είναι σταθερό, μεταβάλλεται με το χρόνο, τη γωνία εκτροπής ηδάλιου και την ταχύτητα. Η σημαντικότητα του σημείου έγκειται στο γεγονός ότι κατά τη διάρκεια της στροφής είναι το μοναδικό σημείο το οποίο βρίσκεται πάνω στην τροχιά. Η πλώρη βρίσκεται εντός του κύκλου και το υπόλοιπο μέρος πρύμνηθεν του σημείου βρίσκεται εκτός της τροχιάς. Επομένως, η θέση αυτή επιλέγεται συχνά για την τοποθέτηση της γέφυρας ώστε ο κυβερνήτης να έχει την βέλτιστη θέση για τους υπολογισμούς των ελιγμών με στόχο την ορθή λήψη αποφάσεων. Σύμφωνα με τον Mendel (1953), η συνήθης θέση του σημείου στροφής βρίσκεται στα  $\frac{1}{5}L$  απόσταση από την πλώρη, ενώ απέχει από το κέντρο βάρους  $x=R\sin\beta$ , όπου R η ακτίνα της κυκλικής κίνησης. Λαμβάνοντας υπόψιν τις εμπειρικές σχέσεις για την γωνία πλαγιολίσθησης συναρτήσει του λόγου μήκους πλοίου προς ακτίνα, είναι δυνατή η έκφραση της απόστασης του σημείου στροφής από το κέντρο βάρους συναρτήσει αυτού του λόγου. Συγκεκριμένα, η γωνία πλαγιολίσθησης λαμβάνει τιμές μεταξύ των σχέσεων:

$$\beta = 18 \frac{L}{R} \quad (224)$$

και

$$\beta = 22.5 \frac{L}{R} + 1.45 \quad (225)$$

Βάση αυτών προκύπτει:

$$x = 0.3L \quad (226)$$

και αντίστοιχα:

$$x = 0.4L \div 0.5L \quad (227)$$

$\div$  : έως (διάστημα τιμών)

### 5.3.1.B Κλίση ως προς το διαμήκη άξονα

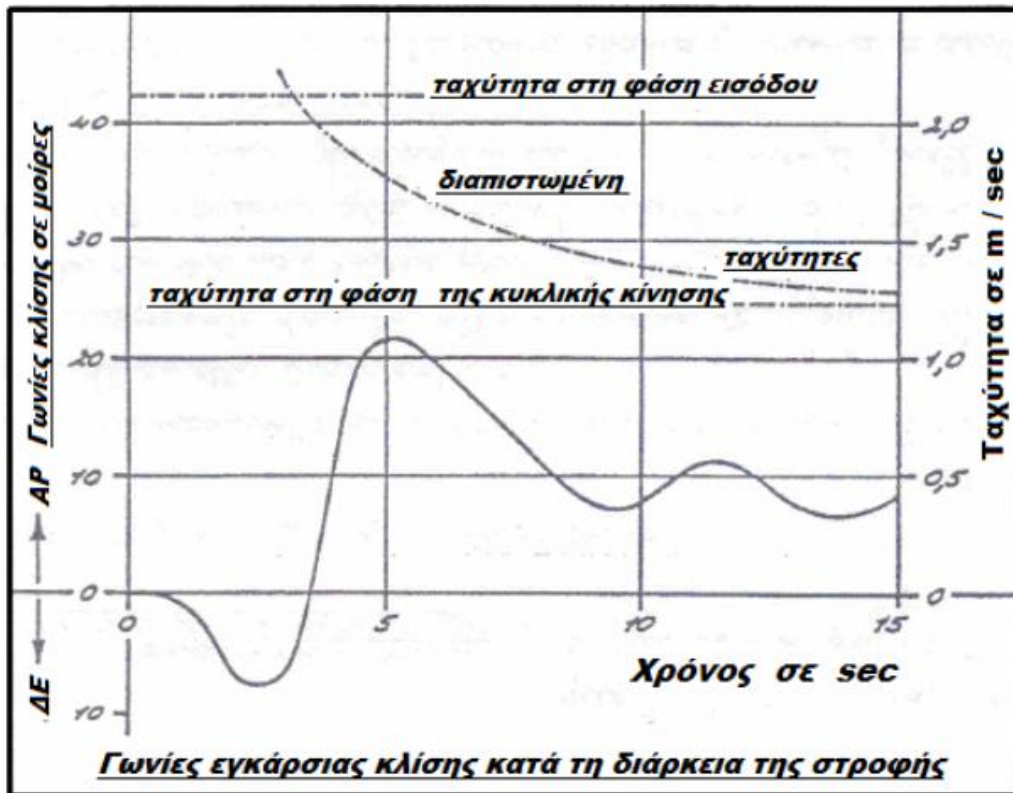
Η εγκάρσια κλίση (*roll*) προκαλείται από τις εγκάρσιες δυνάμεις που επιδρούν στο πλοίο. Το σημείο εφαρμογής τους δεν είναι σταθερό καθ' ύψος, όπως επίσης συμβαίνει με το μέτρο τους ανά τις φάσεις.

Στην πρώτη (1<sup>η</sup>) φάση η εγκάρσια συνιστώσα της δύναμης επί του πηδαλίου και συγκεκριμένα η ροπή αυτής ως προς το κέντρο βάρους, στρέφει το πλοίο προς το εσωτερικό της τροχιάς. Βέβαια, η ροπή επαναφοράς τείνει να αντισταθμίσει την κλίση, η οποία εξασθενεί καθώς μεταβαίνουμε στην επόμενη φάση με την δημιουργία επιπρόσθετων δυνάμεων και την αύξηση της αντίστασης.

Στη δεύτερη (2<sup>η</sup>) φάση όπου ξεκινά η περιστροφή, η αντίσταση υπερνικά την ροπή της δύναμης του πηδαλίου και σε συνδυασμό με την εμφάνιση της φυγόκεντρου δύναμης το πλοίο παίρνει αντίθετη κλίση από αυτή της πρώτης φάσης.

Στην Τρίτη (3<sup>η</sup>) φάση της κυκλικής τροχιάς, η φορά της κλίσης παραμένει ίδια όμως με μικρότερο μέτρο. Αυτό εξηγείται από την ελάττωση της ταχύτητας επομένως και της κεντρομόλου δύναμης και συνεπακόλουθα της φυγόκεντρου. Θα αποτελούσε παράλειψη η μη αναφορά στη επίδραση της περιστροφής της έλικας στην εγκάρσια κλίση του πλοίου εφόσον ο αριθμός ελικών είναι περιττός αριθμός. Σε αυτήν την περίπτωση η περιστροφή της έλικας τείνει να δημιουργήσει αντίθετης φοράς κλίση στο πλοίο.

Στο διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι κλίσεις συναρτήσει του χρόνου, δηλαδή των φάσεων του κύκλου στροφής. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί η μέγιστη γωνία κλίσης παρουσιάζεται στη δεύτερη (2<sup>η</sup>) φάση όπου και γίνεται εναλλαγή της φοράς.



Εικόνα 62: Χρονική ιστορία κλίσεων κύκλου στροφής [13]

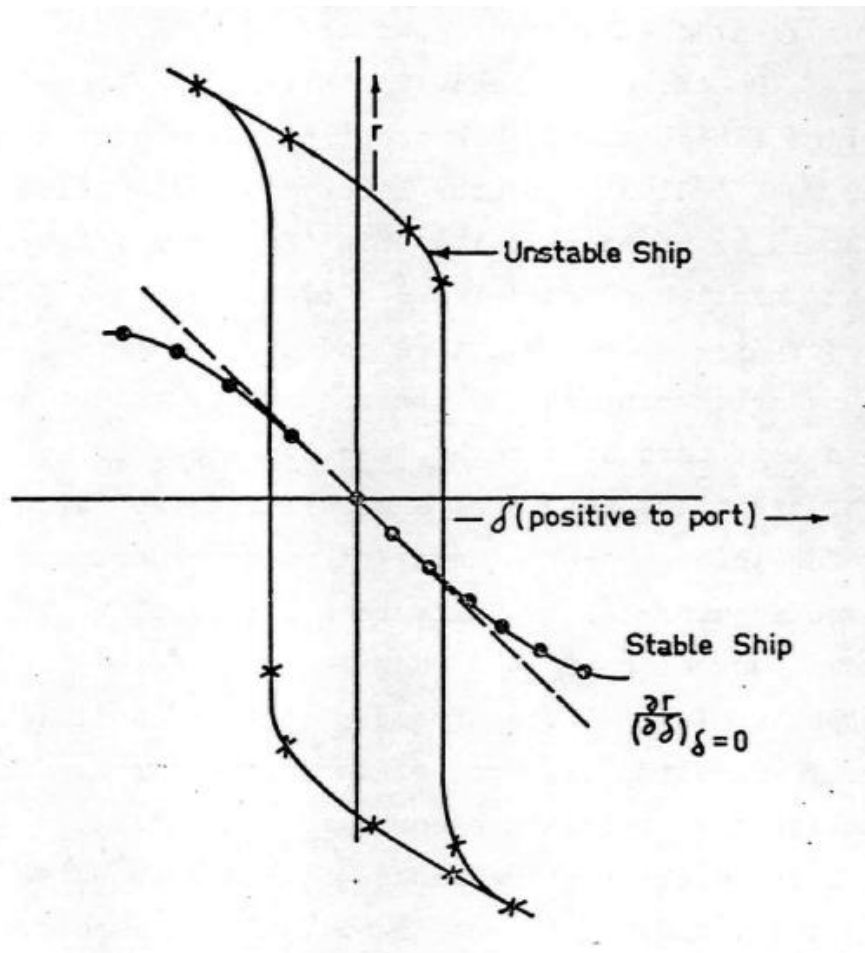
### 5.3.1.Γ Κλίση ως προς τον εγκάρσιο άξονα

Η διαμήκης κλίση, διαγωγή (*trim*), σχετίζεται με τη διαμήκη συνιστώσα της δύναμης επί του πηδαλίου. Η δύναμη αυτή δημιουργεί ροπή ως προς τον εγκάρσιο άξονα με αποτέλεσμα να ωθεί το σκάφος σε έμπλορη διαγωγή. Βέβαια, η ροπή επαναφοράς αντισταθμίζει την κλίση και θεωρείται ανεπαίσθητη. Διαφορετική αποτελεί η περίπτωση των ιστιοπλοϊκών όπου πλέον με ήδη υπάρχουσα κλίση λόγω του ανέμου. Η συμβολή της ροπής λόγω εκτροπής του πηδαλίου είναι ικανή σε περιπτώσεις να προκαλέσει μεγάλη διαγωγή με ανάδυση της πρύμνης. Η πρόνοια τέτοιων μη επιθυμητών καταστάσεων επιτυγχάνεται με σύνδεση του πηδαλίου σε κεκλιμένο αξονικό σύστημα. Η σχεδίαση αυτή αποτρέπει τη δημιουργία ροπής αφού η προέκταση της διαμήκης συνιστώσας της δύναμης επί του πηδαλίου θα διέρχεται από το κέντρο πλευστότητας.

### 5.3.2 Σπειροειδής ελιγμός (*Spiral maneuver*)

Η δοκιμή του σπειροειδούς ελιγμού καθορίζει τη δυναμική ευστάθεια του σκάφους και διαχωρίζεται σε ευθύ ή *Dieudonné* (*Direct Spiral Manoeuvre*) και αντίστροφο ή *Bech* σπειροειδή ελιγμό (*Reverse Spiral Manoeuvre*). Προς επίτευξη αυτού, δίνεται εντολή εκτροπής πηδαλίου στις 25 μοίρες δεξιά (*starboard*) και κρατείτο εκεί ως ότου καταγραφεί η αναπτυχθείσα σταθερή γωνιακή ταχύτητα. Έπειτα, η γωνία μειώνεται στις

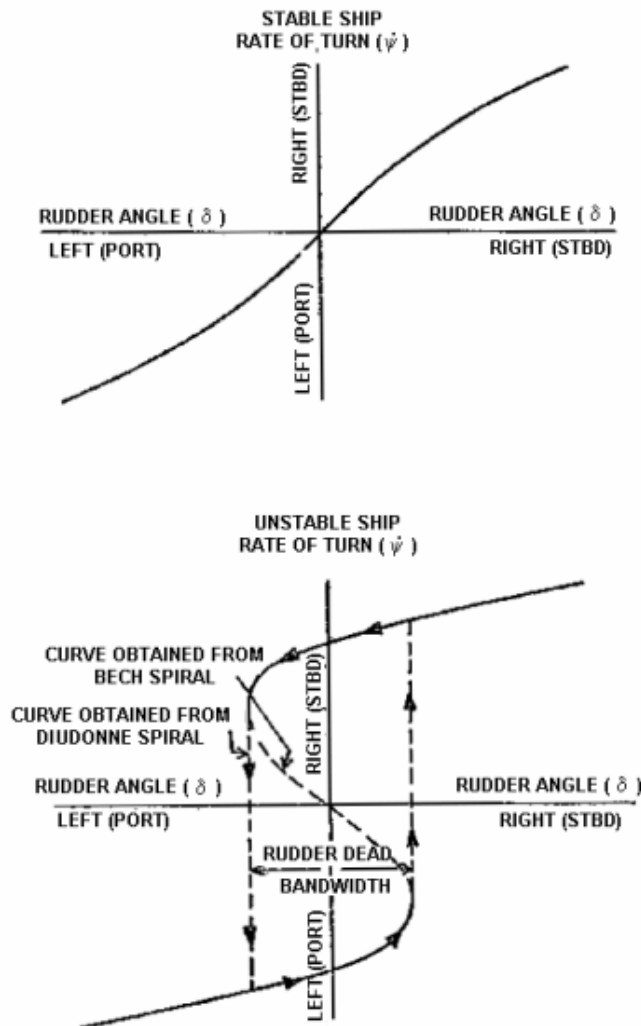
20 μοίρες και ακολουθείται η ίδια διαδικασία με βήμα 5 μοιρών ως την ουδέτερη θέση του πηδαλίου (γωνία εκτροπής 0 μοίρες). Συνεχίζεται ο ελιγμός με αύξηση της γωνίας προς την αριστερή (*port*) πλευρά αντίστοιχα. Ακολουθείται η ίδια αλλά αντίστροφη διεργασία, αντίστροφος σπειροειδής ελιγμός, ξεκινώντας από τις εκτροπές πηδαλίου *port* και καταλήγοντας στις αντίστοιχες *starboard*. Υπογραμμίζεται η ανάγκη για μικρότερο βήμα γωνιών εκτροπής στη ζώνη 5 μοιρών *port* και *starboard*. Με το πέρας της δοκιμής, οι καταγραφές των γωνιακών ταχυτήτων  $r$  μπορούν να παρουσιαστούν σε διάγραμμα συναρτήσεως της γωνίας εκτροπής πηδαλίου  $\delta$ .



Εικόνα 63: Διάγραμμα σπειροειδούς ελιγμού [4]

Το παραπάνω διάγραμμα της εικόνας 63 περιλαμβάνει τα γραφήματα των μετρήσεων ενός ευσταθούς και ενός μη ευσταθούς πλοίου. Παρατηρείται πως για μια γωνία εκτροπής, στο ασταθές πλοίο αντιστοιχούν δύο γωνιακές ταχύτητες. Σημαντικότερης σημασίας αποτελεί το σημείο μηδενικής γωνίας εκτροπής όπου το πλοίο έχει γωνιακή ταχύτητα. Επομένως, το ασταθές πλοίο δεν μπορεί να ακολουθήσει ευθεία πορεία αλλά στρίβει με το πηδάλιο στην ουδέτερη θέση. Χρειάζεται ενεργή πηδαλιούχηση για τη διατήρηση της ευθύγραμμης πορείας. Μεγαλύτερες κλίσεις των καμπυλών συνεπάγεται μεγαλύτερη αστάθεια. Η γραμμική θεωρία μπορεί να αναδείξει την ύπαρξη του βρόγχου αστάθειας

αλλά χρειάζεται η θεωρία μη γραμμικότητας για να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά αυτού. Τα παραπάνω δεν συμβαίνουν για το ευσταθές πλοίο, το οποίο εμπίπτει στα πλαίσια της γραμμικότητας. Γενικότερα, πρόκειται για μια δοκιμή πηδαλιουχίας με μεγάλες απαιτήσεις χώρου και χρόνου.

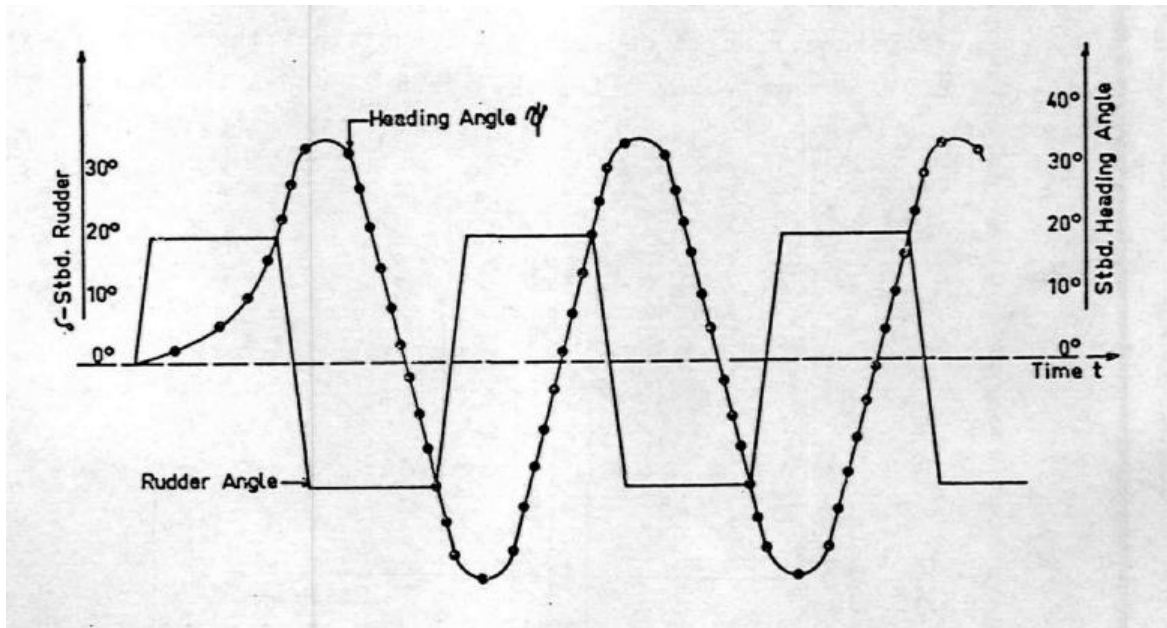


Εικόνα 64: Γραφήματα σπειροειδούς ελιγμού ευσταθούς πλοίου (άνω) και ασταθούς πλοίου (κάτω) [20]

### 5.3.3 Οφιοειδής ελιγμός (*Zig-zag maneuver*)

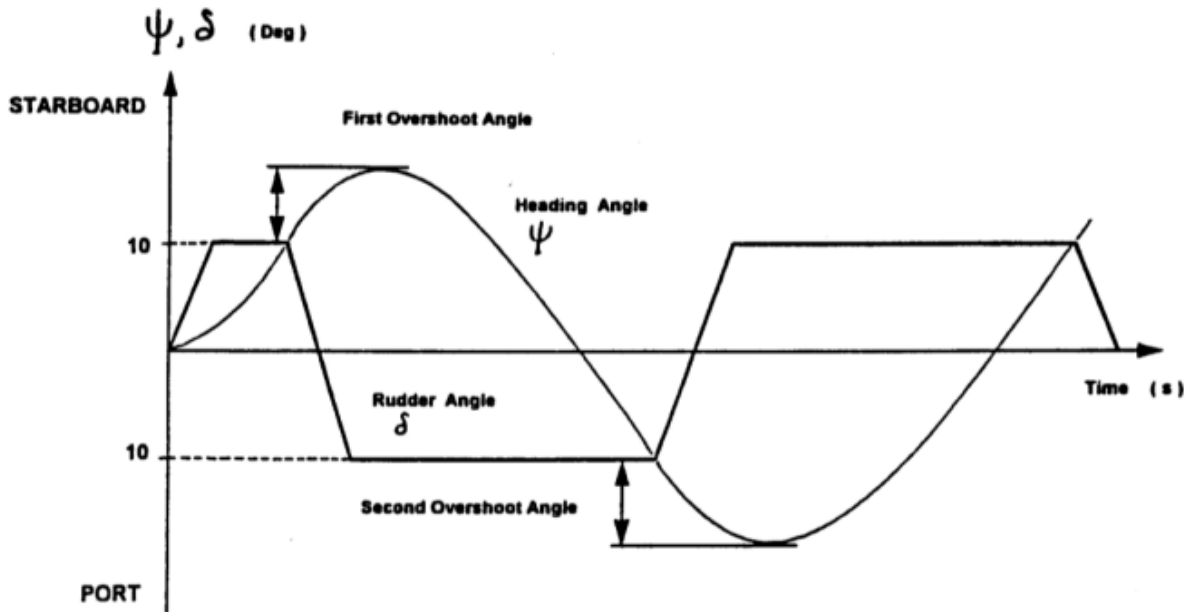
Όπως προδίδει η ονομασία του ελιγμού πρόκειται για κίνηση ζιγκ-ζαγκ κατά την οποία μετρώνται οι γωνίες κατεύθυνσης  $\psi$  (*heading angle*) και εκτροπής πηδαλίου  $\delta$  συναρτήσει του χρόνου. Ενδεδλεχέστερα, ενώ το πλοίο έχει πρόσω ταχύτητα, τίθεται το πηδάλιο υπό γωνία 20 μοιρών *starboard* μέχρι να αποκτηθεί γωνία κατεύθυνσης 20 μοιρών *starboard*. Μόλις επιτευχθεί, γίνεται ακαριαία εκτροπή του πηδαλίου στις 20 μοίρες *port* για να προκύψει γωνία κατεύθυνσης *port* 20 μοιρών. Η διαδικασία

συνεχίζεται για την απόκτηση των επιθυμητών μετρήσεων. Η δοκιμή Z μπορεί να εκτελεστεί και για 10 μοίρες γωνιών εκτροπής πηδαλίου.



Εικόνα 65: Διάγραμμα ελιγμού Z [4]

Ο ελιγμός ζιγκ-ζαγκ χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της δεινότητας ενός πλοίου να ελέγχει και να διορθώνει την επιβολή μια κίνησης με μια μανούβρα. Επομένως, αποτελεί επίσης ένδειξη δυναμικής ευστάθειας και εξ ορισμού ελικτικότητας. Συμπληρωματική χρήση της δοκιμής αποτελεί ο υπολογισμός των δεικτών πηδαλιουχίας  $K$ ,  $T$ . Εφόσον οι γωνίες εκτροπής δεν είναι πολύ μεγάλες, η θεωρία της γραμμικότητας περιγράφει ικανώς τις κινήσεις του πλοίου. Ενδιαφέρον έχει η απόκριση του μη ευσταθούς σκάφους, όπου ενώ η πρώτη μανούβρα πραγματοποιείται γρηγορότερα, λόγω της τάσης του να στρίβει χωρίς ενεργό πηδάλιο, οι υπόλοιπες χρειάζονται παραπάνω χρόνο για την ολοκλήρωσή τους. Άρα, το ασταθές πλοίο εμφανίζει μεγαλύτερες υπερβαίνοντες γωνίες κατεύθυνσης (*overshoot angle*). Η δοκιμή πρέπει να εκτελείται σε ικανό βάθος και υπό ήρεμη θάλασσα, όπως επίσης, το σκάφος να είναι ανεπηρέαστο από περιορισμούς, ισοβύθιστο και με φορτίο.

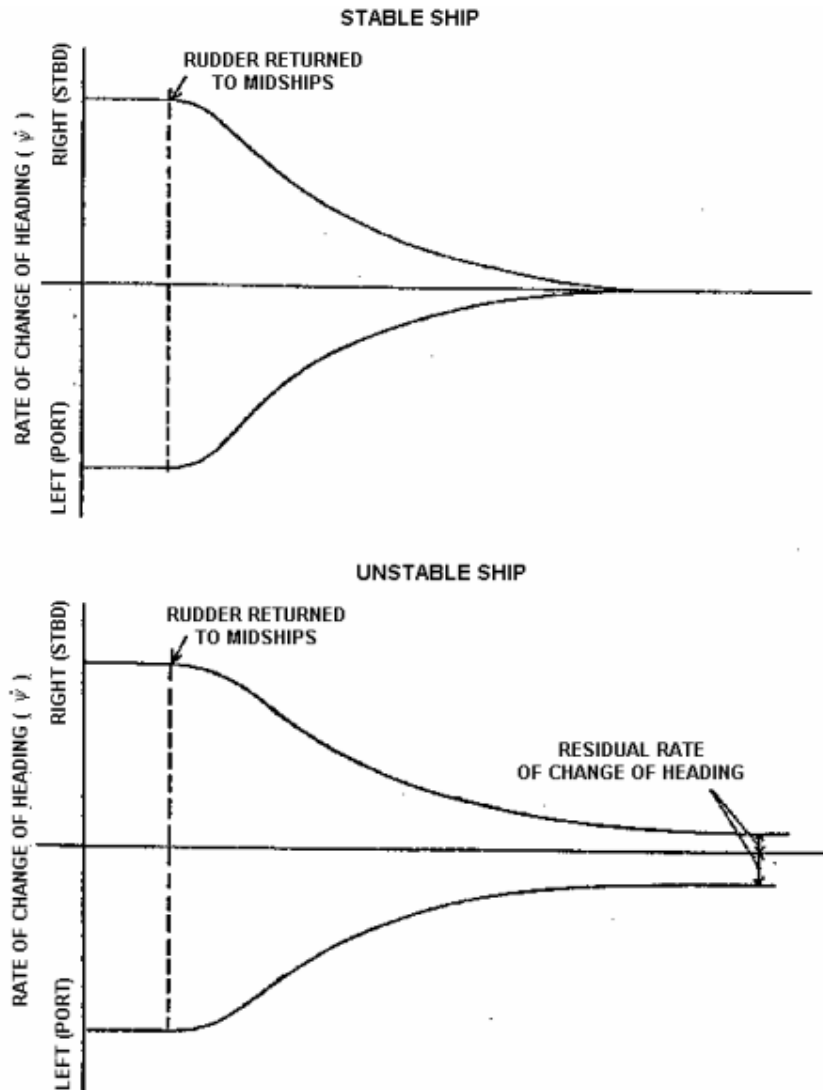


Εικόνα 66: Διάγραμμα δοκιμής Z10/10 με τα βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη [12]

### 5.3.4 Δοκιμή επαναφοράς (*Pullout Test*)

Η δοκιμή επαναφοράς καταδεικνύει την ύπαρξη ή όχι της ικανότητας διατήρησης πορείας ενός σκάφους. Το συμπέρασμα αντλείται από τη συμπεριφορά του πλοίου μετά από την επαναφορά του πηδαλίου στην ουδέτερη θέση. Σε καλύτερη ανάλυση, δίνεται εντολή για γωνία εκτροπής 20 μοιρών και διατήρησή της ως τη δημιουργία σταθερού ρυθμού περιστροφής. Σε εκείνο το σημείο, το πηδάλιο τίθεται στο επίπεδο συμμετρίας του σκάφους. Ο ρυθμός  $\gamma_{\omega}$  του ευσταθούς πλοίου θα φθίνει με το χρόνο και θα εκμηδενιστεί τόσο για εκτροπή του πηδαλίου δεξιά όσο και αριστερά. Αντίθετα, ο ρυθμός  $\gamma_{\omega}$  του ασταθούς πλοίου θα είναι διάφορος του μηδενός. Η δοκιμή εκτελείται για εκτροπή πηδαλίου και από τις δύο πλευρές ώστε να συγκριθούν τα ευρήματα ως προς τη συμμετρία τους.

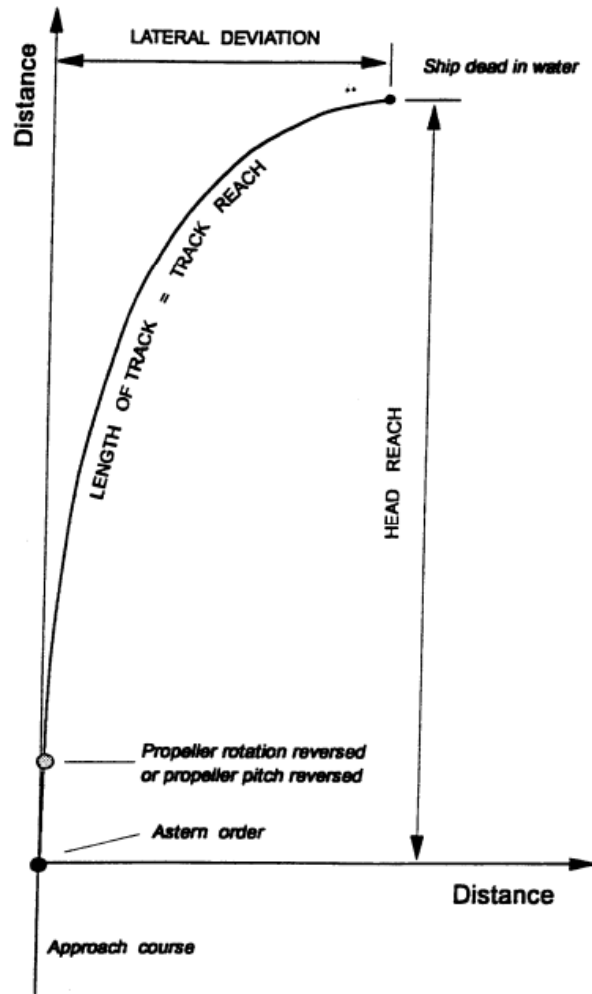




Εικόνα 67: Διάγραμμα ελιγμού επαναφοράς ευσταθούς (άνω) και ασταθούς (κάτω) πλοίου [20]

### 5.3.5 Ελιγμός σταματήματος (*Stopping Test*)

Η δοκιμή του σταματήματος επιχειρείται εφόσον υπάρχει μια σταθερή ταχύτητα, συνηθίζεται να είναι η μέγιστη πρόσω ταχύτητα. Τη στιγμή που επέλθει σταθερή ταχύτητα, επιλέγεται ανάποδη ώση. Στο διάστημα που χρειάζεται για την επίτευξη σταθερών στροφών, όπου και θα μηδενιστεί η ταχύτητα του πλοίου, μετρούνται τα ακόλουθα μεγέθη. Όπως φαίνονται στην κάτωθι εικόνα, αυτά είναι η πλευρική απόκλιση (*lateral deviation*) του πλοίου, το μήκος της τροχιάς που διαγράφει (*track reach*) και την προβολή της τροχιάς στον άξονα της πορείας πριν την έναρξη της δοκιμής (*headreach*).

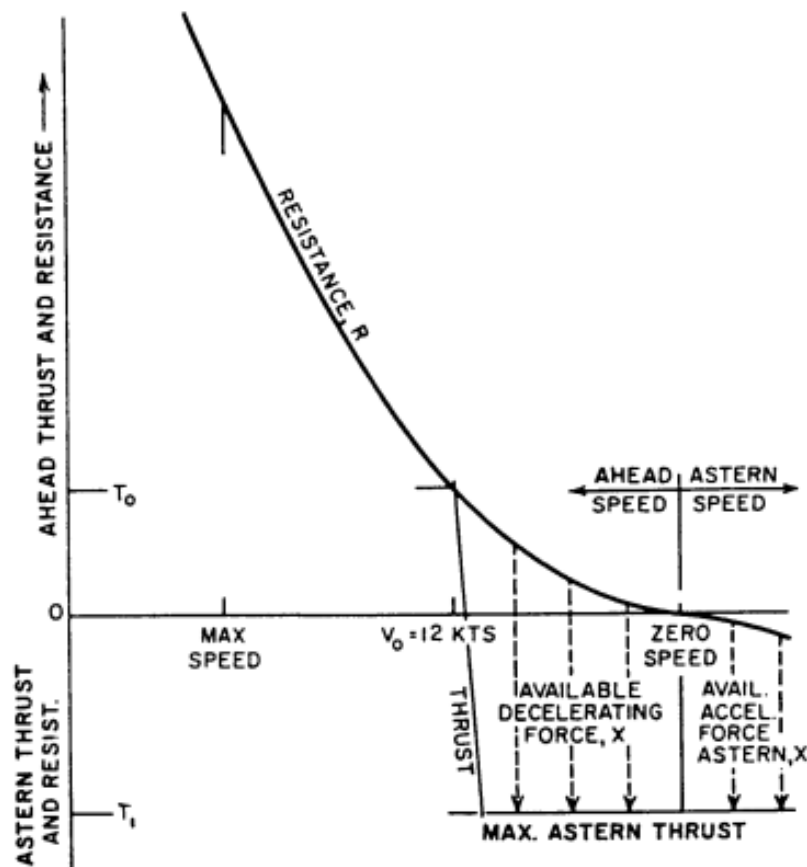


Εικόνα 68: Απεικόνιση ελιγμού σταματήματος και μετρούμενα μεγέθη [20]

Η *ITTC Manoeuvring Committee* ορίζει προτεινόμενες συνθήκες για την ορθή εκτέλεση των δοκιμών. Συνιστάται η περιοχής διεξαγωγής να έχει βάθος κατ' ελάχιστο τέσσερις φορές το μέσο βύθισμα του πλοίου. Τα χαρακτηριστικά του πλοίου αποτελούν κριτήριο για την επιτρεπτή κατάσταση θάλασσας και ανέμου, ωστόσο, σε γενικότερο πλαίσιο επιλέγεται ήρεμη θάλασσα προς καλύτερη εξαγωγή ανεπηρέαστων αποτελεσμάτων. Η ταχύτητα του πλοίου, κατά την προσέγγιση της δοκιμής πηδαλιουχίας, θα πρέπει να είναι τουλάχιστον το 90% της ταχύτητας που σημειώνει το πλοίο για το 85% της μέγιστης αποδιδόμενης ισχύος της μηχανής. Υπογραμμίζεται πως προκειμένου να ξεκινήσει η δοκιμή, θα πρέπει η μηχανή να βρίσκεται σε σταθερή λειτουργία για χρόνο παραπάνω από πέντε λεπτά. Τέλος, η άντληση των αποτελεσμάτων είναι σημαντικό και χρήσιμο να γίνεται για τη χειρότερη δυνατή περίπτωση. Επομένως, προτείνεται οι δοκιμές να πραγματοποιούνται σε ισοβύθιστη κατάσταση πλήρους φόρτωσης. Εναλλακτικά, το βύθισμα να προσεγγίζει όσο το δυνατόν περισσότερο ή και με απόκλιση 5% από αυτό της πλήρους φόρτωσης. Φυσικά, το παραπάνω μπορεί να επιτευχθεί με ερματισμό.

## 5.4 Βασικοί ελιγμοί πλοίου

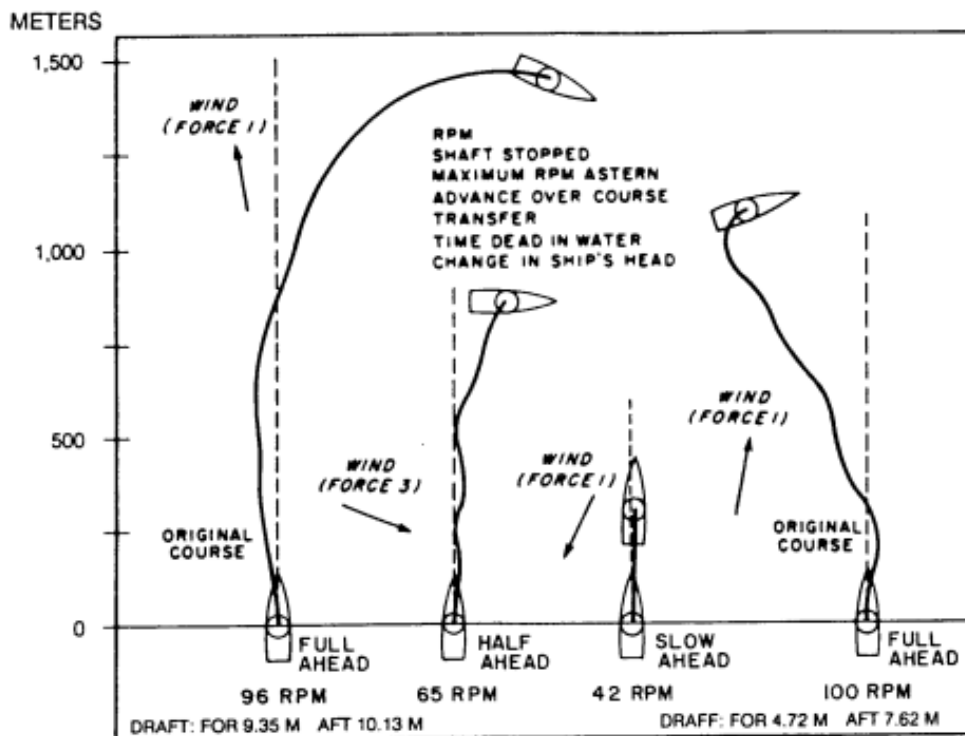
Θα αποτελούσε παράλειψη η μη αναφορά στους βασικούς ελιγμούς που πραγματοποιεί ένα πλοίο σε κάθε διαδρομή του. Οι αναφερόμενοι ελιγμοί είναι η επιτάχυνση (*accelerating*), η ανάποδη κίνηση (*backing*) και το σταμάτημα (*stopping*). Ο πρώτος ελιγμός αφορά το ρυθμό μεταβολής της ταχύτητας του σκάφους είτε έπλεε με σταθερή ταχύτητα, είτε βρισκόταν σε ακινησία, μηδενική ταχύτητα. Για τον υπολογισμό της επιτάχυνσης ενός πλοίου γίνεται η παραδοχή πως οι εναλλαγές στην έλικα και στην ώση είναι ακαριαίες. Επίσης, ο συντελεστής μείωσης ώσης ( $t$ ) θεωρείται σταθερός και όχι μεταβαλλόμενος υπό την εξάρτηση της τιμής της ώσης. Κατά την κίνηση ανάποδα σημειώνεται επιτάχυνση της ανάποδης ώσης από μηδενική αρχική ταχύτητα.



Εικόνα 69: Επιβράδυνση συναρτήσει ώσης και αντίστασης κατά τον ελιγμό σταματήματος [11]

Το σταμάτημα αφορά την αντίστροφη διαδικασία, όπου ζητούμενο αποτελεί η επιβράδυνση του σκάφους ως την ακινητοποίησή του με αναπόδιση. Ο ελιγμός του σταματήματος μπορεί να είναι έντονος στην περίπτωση της μέγιστης πρόσω ταχύτητας (*crash stop*) ή ομαλός όταν επιχειρείται σε πλοίο κινούμενο με ταχύτητα λιμένος (*stop from harbor speed*). Ειδικά κατά την πρώτη περίπτωση εκτέλεσης του ελιγμού, η

ευστάθεια κατεύθυνσης μειώνεται ή και χάνεται, όπως φαίνεται από τις δοκιμές του δεξαμενόπλοιου *Esso Lima* για διάφορες ταχύτητες στην ακόλουθη εικόνα.



LOADED RUNS			BALLAST
FULL SPEED	HALF SPEED	SLOW SPEED	FULL SPEED
96	65	42	100
32 SEC.	25 SEC.	15 SEC.	26 SEC.
60 IN 1 MIN. 37 SEC.	65 IN 1 MIN. 39 SEC.	60 IN 0 MIN. 51 SEC.	62 IN 2 MIN. 11 SEC.
1.463 M	841 M	311 M	1097 M
677 M	114 M	NIL	293 M
8 MIN.	5 MIN. 18 SEC.	2 MIN. 49 SEC.	5 MIN. 15 SEC.
110°	90°	2°	35°

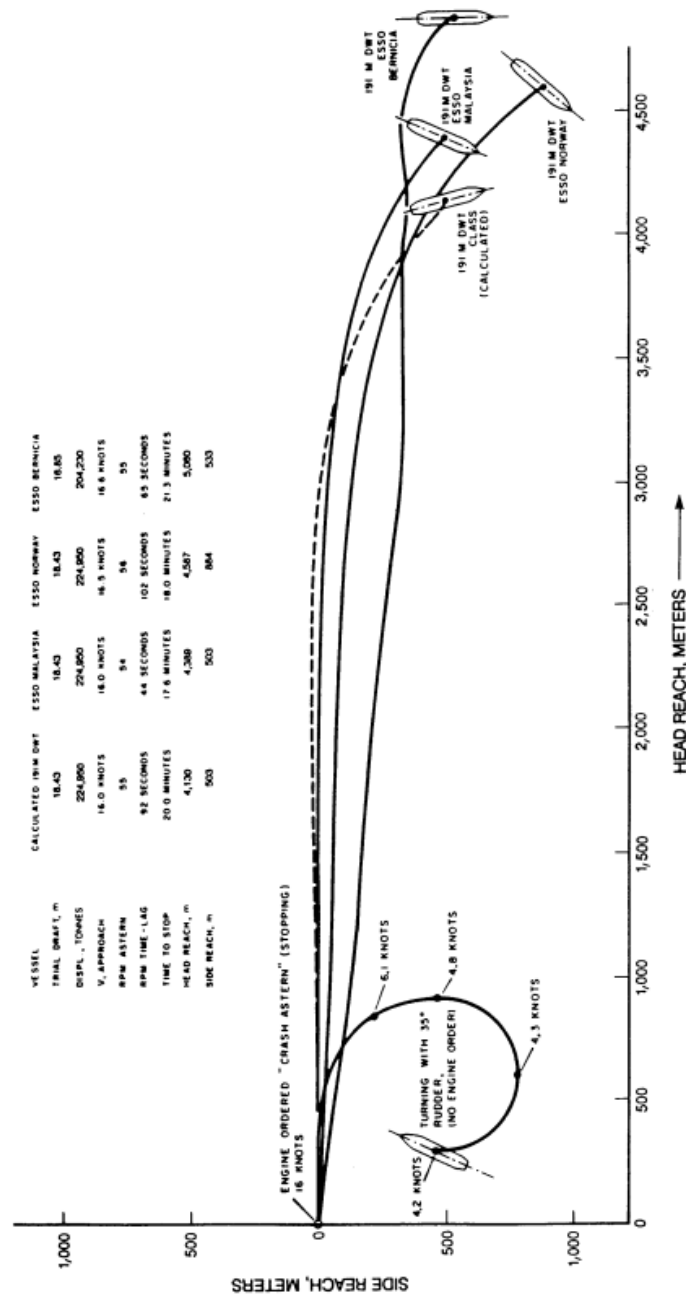
Εικόνα 70: Επιχείρηση ακαριαίου ελιγμού σταματήματος στο tanker *Esso Lima* [11]

Ανάλογα την εκάστοτε περίπτωση μπορεί να επιχειρηθεί χωρίς τη χρήση ανάποδης πρόωσης (*coasting*). Το σταμάτημα επέρχεται με τη σταδιακή μείωση της ισχύος ως το σημείο όπου η έλικα θα περιστρέφεται χωρίς να προσδίδει ώση στο πλοίο. Η απουσία της ωστικής δύναμης συνεπάγεται μοναδική επίδραση πάνω στη γάστρα την αντίστασή της (*hull resistance*). Η, αντίθετης φοράς από την κατεύθυνση του πλοίου, αντίσταση έχει ως αποτέλεσμα τη ζητούμενη επιβράδυνση του πλοίου. Φυσικά, αν η έλικα κλειδώσει, θα υπάρξει επιπρόσθετα επίδραση της αντίστασης της ακινητοποιημένης έλικας και ακολούθως, μικρότερη απόσταση ως το σταμάτημα (*head reach*).

Αναφορικά με την απόσταση *head reach*, γίνεται αντιληπτό πως απαιτείται ικανοποιητικός χώρος, ειδικά για μεγάλες ταχύτητες πλεύσης. Εναλλακτική τακτική σταματήματος αποτελεί ο κύκλος στροφής, καθώς η προχώρηση (*advance*) θα είναι μικρότερου μέτρου από το αντίστοιχο *head reach* του ελιγμού σταματήματος. Επιπρόσθετο πλεονέκτημα του πρώτου αποτελεί η ευχέρεια του ελέγχου της τροχιάς της

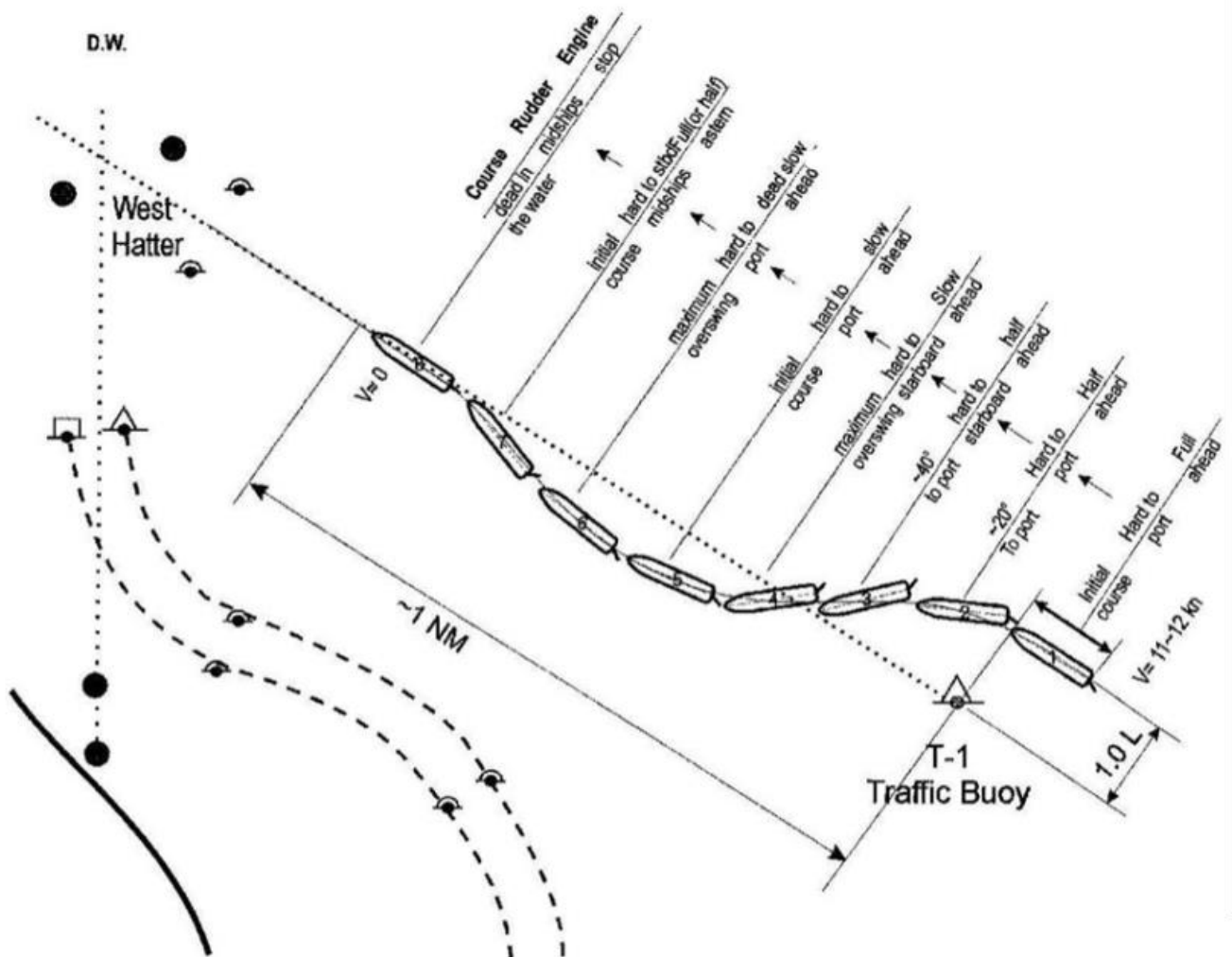
κίνησης, όπου στο δεύτερο καθίσταται απρόβλεπτη. Ωστόσο, δεν σημειώνονται τέτοιες αποκλίσεις για μικρές ταχύτητες (6 κόμβοι) προσέγγισης ώστε να υπάρχει ανάγκη επιλογής του κύκλο στροφής.

Οι ακόλουθες μετρήσεις και αποτυπώσεις των τροχιών από δοκιμές σταματήματος (*crash stop*) για τρία δεξαμενόπλοια (*Esso Malaysia, Esso Norway, Esso Bernicia*), όπως επίσης τα αντίστοιχα μεγέθη από τους υπολογισμούς του σχεδίου δεξαμενόπλοιου Echon (191.000 DWT) για ελιγμό σταματήματος και κύκλο στροφής, επαληθεύουν τα προαναφερόμενα.



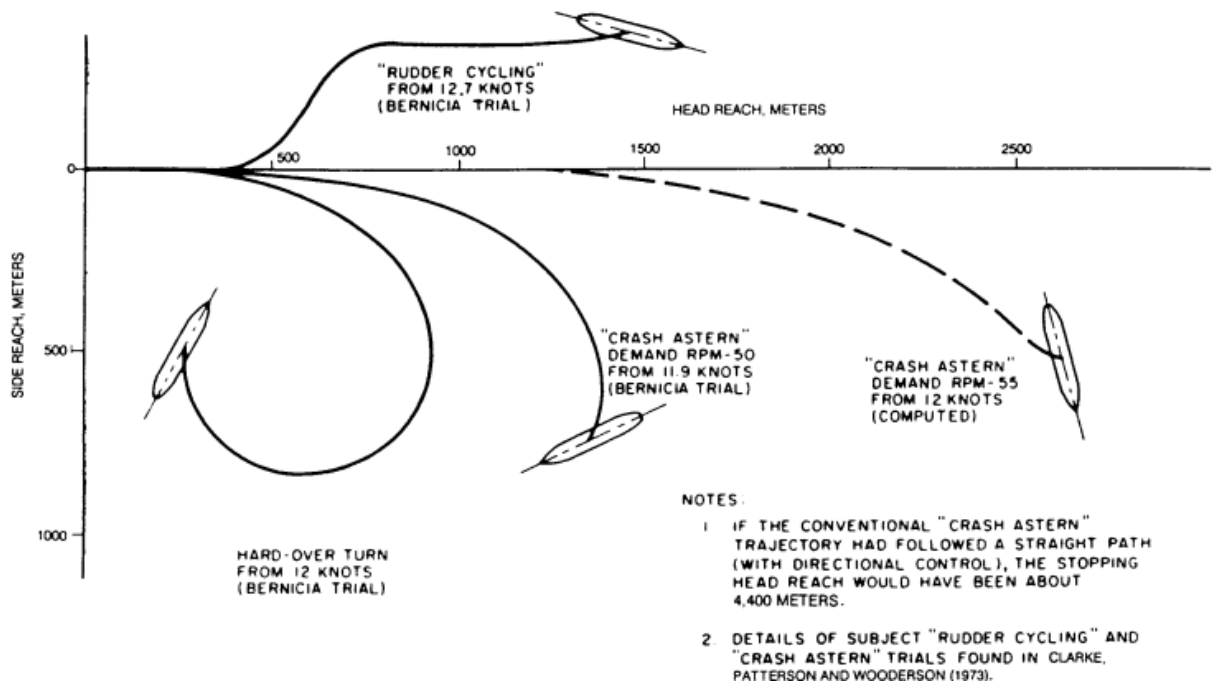
Εικόνα 71: Απεικόνιση αποτελεσμάτων ελιγμών σταματήματος [11]

Διαφορετική εκτέλεση ελιγμού σταματήματος αποτελεί ο ελιγμός *rudder cycling* κατά τον οποίο ο χειρισμός του πηδαλίου με εναλλαγές εκτροπής *port – starboard* συνδράμει, μέσω της αντίστασης επί γάστρας, στην ακινητοποίηση του πλοίου και στη διατήρηση της κατεύθυνσής του. Συγκεκριμένα, ο ελιγμός ξεκινά με ολική εκτροπή πηδαλίου, λόγω χάριν, στην πλευρά *port*. Τη στιγμή που η πορεία σημειώνει 20 μοίρες με το διάμηκες μειώνεται η ισχύς πρόωσης στο ήμισυ ως ότου μετρηθεί γωνία 40 μοιρών και τεθεί το πηδάλιο πλήρως στην έτερη πλευρά. Όταν το πλοίο στρέφεται στην πλευρά *starboard* επιλέγεται χαμηλή πρόωση, μέχρι το πλοίο να επιστρέψει σε πορεία με την αρχική κατεύθυνση, όπου και εκτρέπεται εκ νέου το πηδάλιο στην πλευρά *port*. Αντίστοιχα, όταν το πλοίο στρίβει προς την πλευρά *port* επιλέγεται η μικρότερη δυνατή ισχύς πρόωσης, ενώ, τη στιγμή που το πλοίο βρίσκεται στην αρχική του πορεία το πηδάλιο εκτρέπεται για τελευταία φορά στην *starboard* πλευρά. Το πηδάλιο επιστρέφει στην ουδέτερη θέση και εφαρμόζεται αναπόδιση όταν βρεθεί πάλι στην αρχική του πορεία.

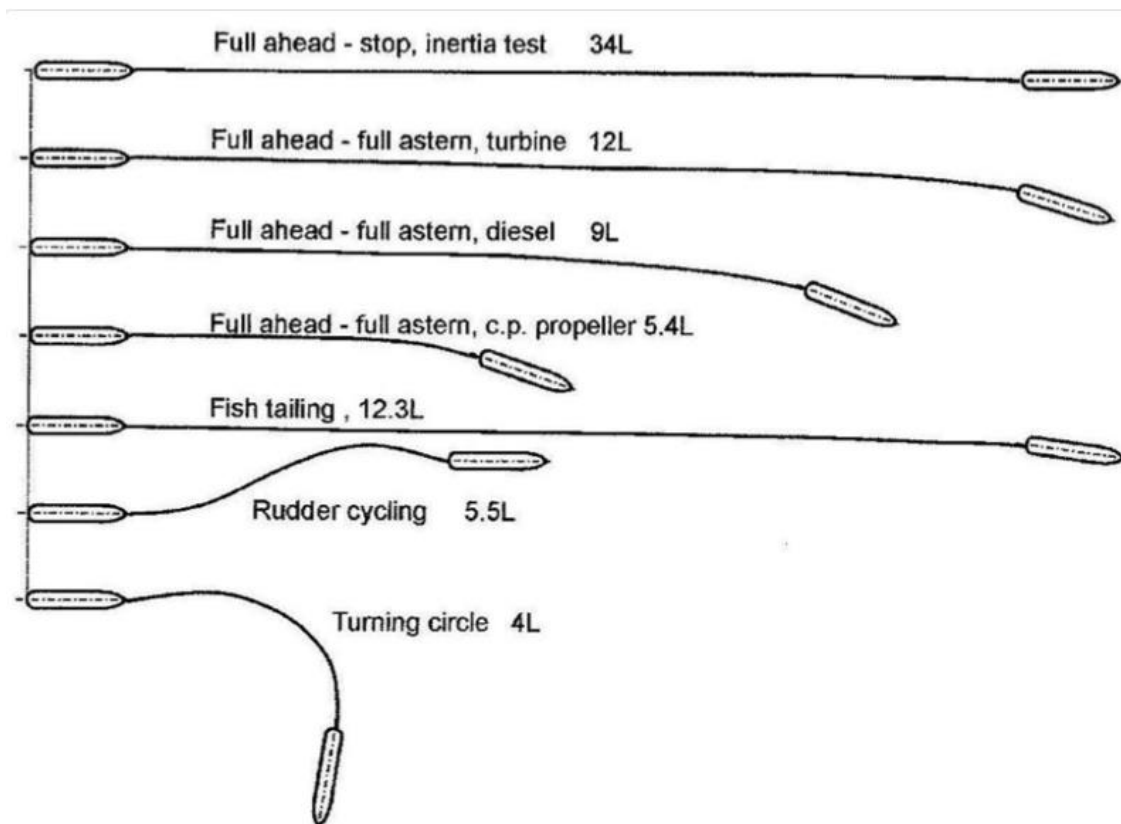


Εικόνα 72: Στάδια ελιγμού *rudder cycling stop* [21]

Οι παρακάτω εικόνες αποτυπώνουν τις αποκλίσεις που έχουν μεταξύ τους οι ελιγμοί σταματήματος αναφορικά με την τροχιά και το μήκος *head reach*.



Εικόνα 73: Σύγκριση μεθόδων ελιγμού σταματήματος από δοκιμές δεξαμενοπλοίου Esso Bernicia με ταχύτητα προσέγγισης περί τους 12 κόμβους [11]



Εικόνα 74: Αποτύπωση της προσομοίωσης εναλλακτικών επιχειρήσεων ελιγμού σταματήματος για ένα *bulk carrier* 32.000 DWT [21]



Σε γενικότερο πλαίσιο, ένα πλοίο προσεγγίζει λιμένες, ρηγά νερά, διαμορφωμένους υδάτινους δρόμους και έρχεται σε αλληλεπίδραση με άλλα πλοία. Επομένως, είναι αντιληπτό πως ο χρόνος και η απόσταση που χρειάζεται ένα σκάφος για να ολοκληρώσει τους αναγκαίους ελιγμούς κατά παραγγελία, αλλά και η επιλογή της βέλτιστης μεθόδου του ελιγμού στην εκάστοτε περίπτωση, αποτελούν υψίστης σημασίας πληροφορίες.

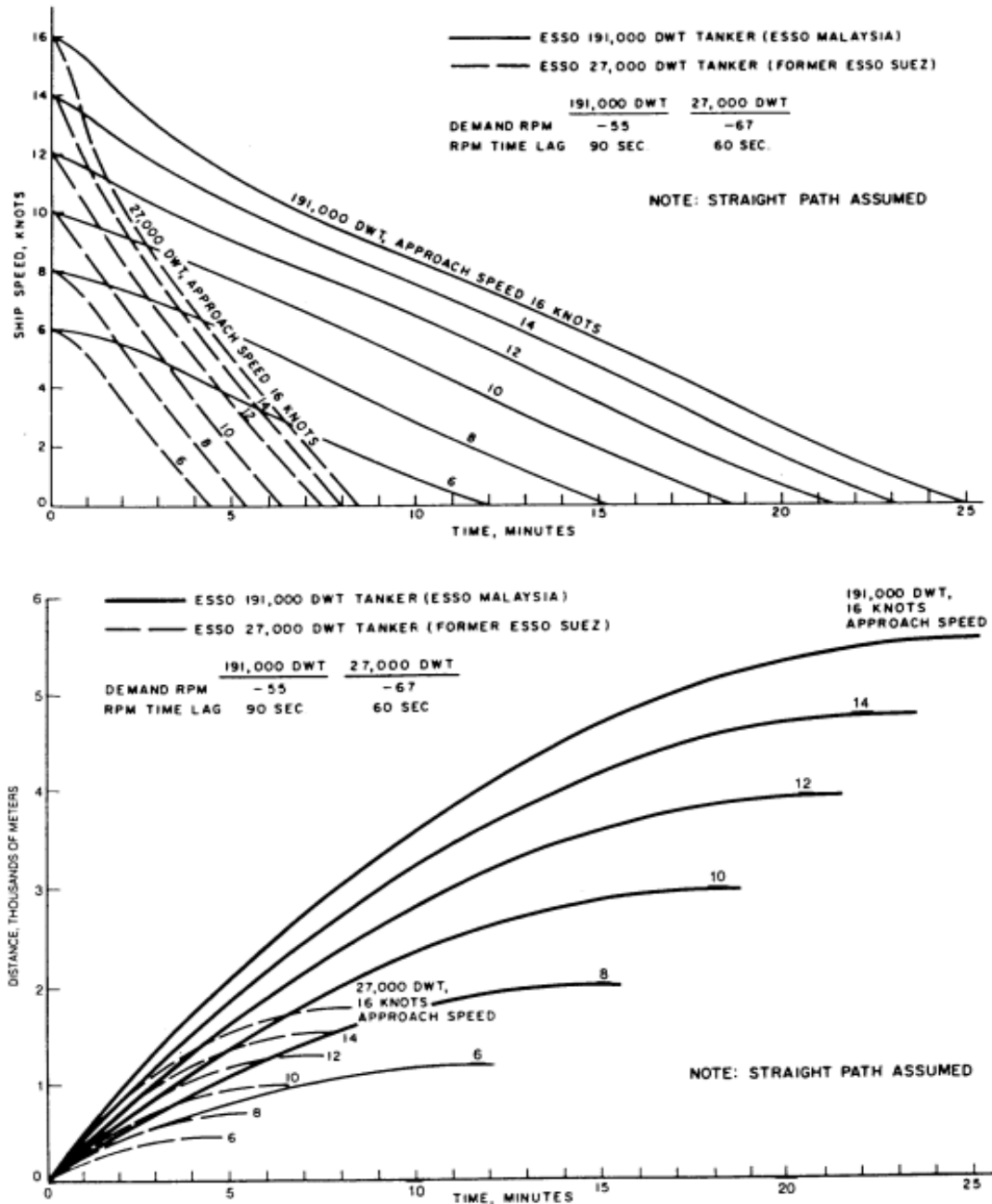
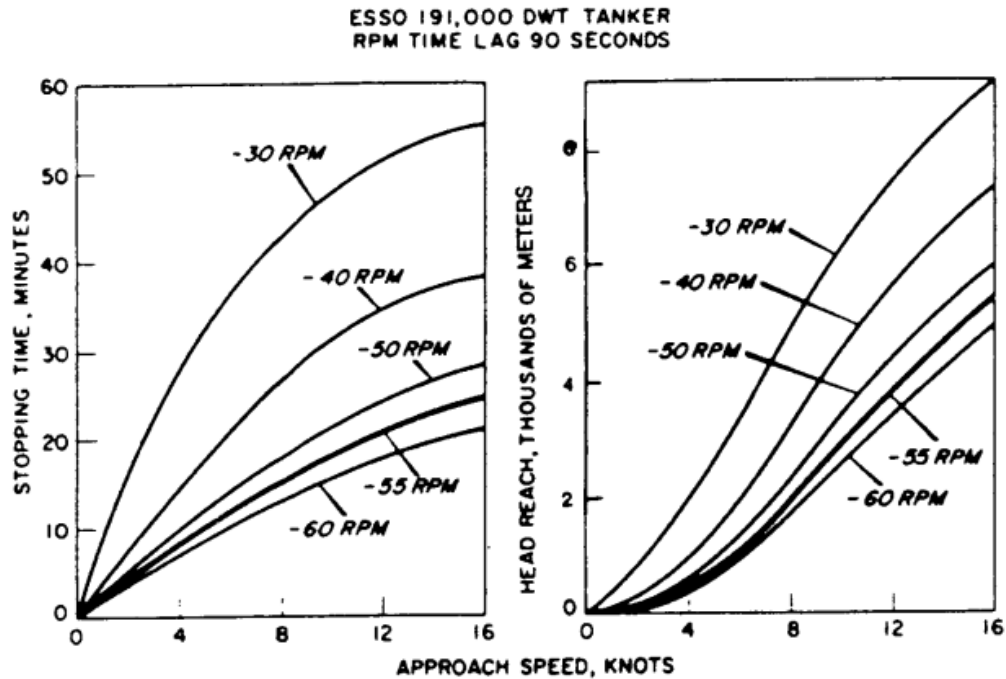


Fig. 69 Effects of ship size and speed; computed time histories of distance during stopping (Crane, 1973)

Εικόνα 75: Ταχύτητα προσέγγισης συναρτήσει του χρόνου ελιγμού σταματήματος για διαφορετικού μεγέθους tanker (άνω), απόσταση σταματήματος συναρτήσει του χρόνου για διαφορετικές ταχύτητες προσέγγισης tanker (κάτω) [11]





Εικόνα 76: Χρόνος σταματήματος συναρτήσει της ταχύτητας προσέγγισης για διάφορες τιμές rpm ανάποδης ώσης tanker [11]

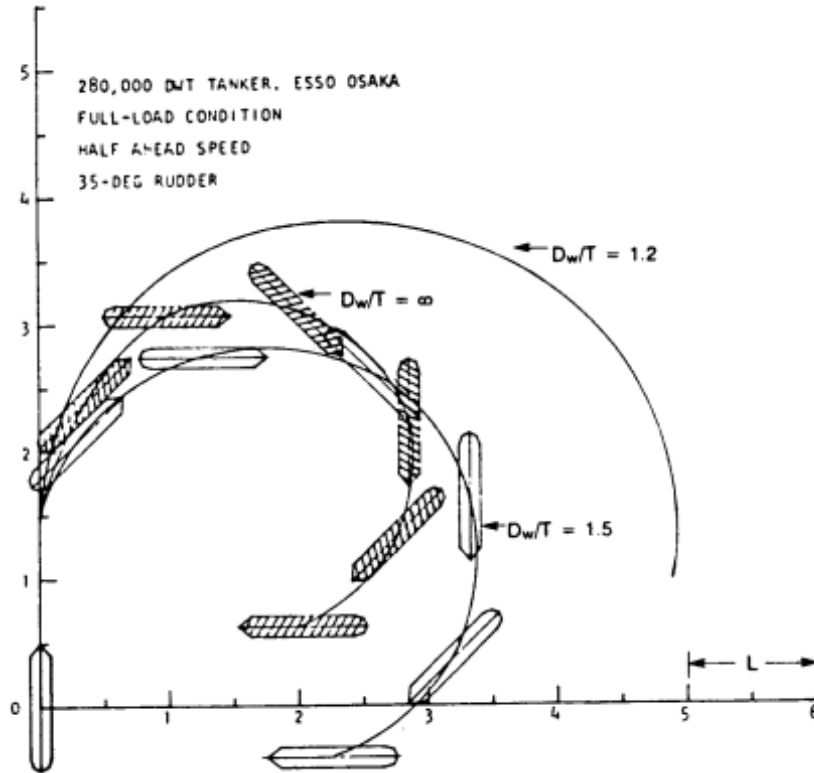
## 5.5 Περιορισμένα ύδατα

Το πλοίο, κατά τον πλου του, συναντά διαφόρων μορφών και χαρακτηριστικών υδάτινα περιβάλλοντα. Όσο αφορά την ελικτικότητα, επηρεάζεται εντόνως σε περιορισμένα νερά. Επιπρόσθετη μέριμνα χρειάζεται στις περιπτώσεις όπου στο πλοίο επιδρούν και οι δυνάμεις του περιβάλλοντος. Επομένως, η μελέτη της συμπεριφοράς του πλοίου σε τέτοιες περιοχές και συνθήκες αποτελεί αναγκαίο στάδιο της σχεδίασης αλλά και της σωστής και ασφαλούς λειτουργίας και διαχείρισης του πλοίου από τον πλοίαρχο.

Ο πλους σε περιορισμένα νερά περιλαμβάνει πλεύση σε ρηγά, αβαθή νερά και ακτές, διελεύσεις από ποτάμια, κανάλια και την αλληλεπίδραση με άλλα πλοία.

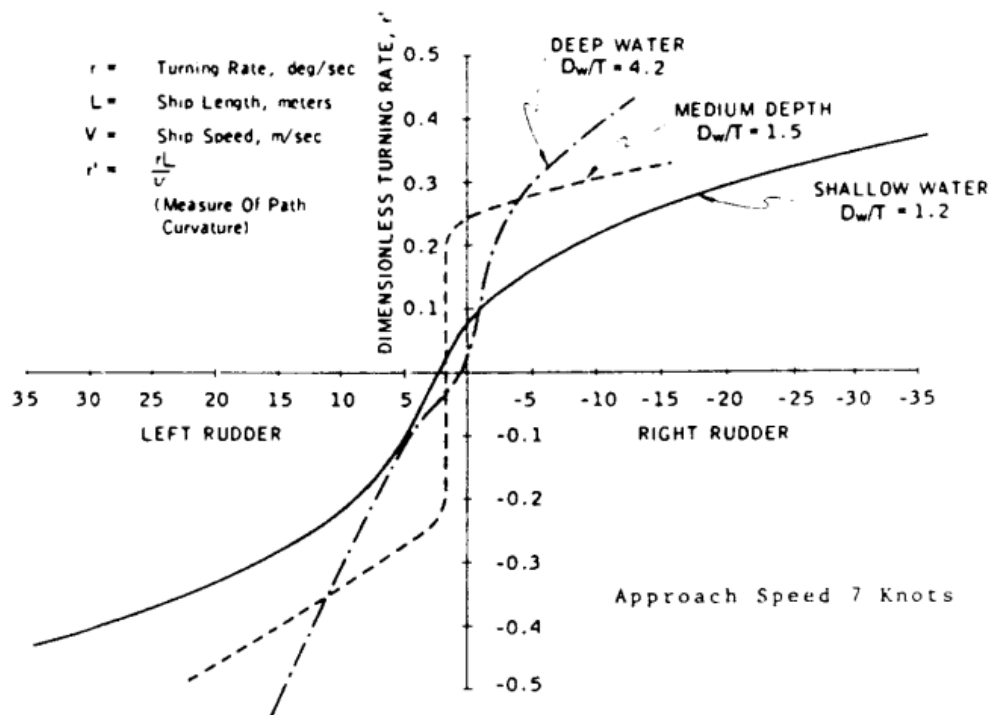
### Ρηγά νερά

Ο ανισομερής βυθός των ακτών ή των ρηχών θαλάσσιων περιοχών είναι υπαίτιος για την δημιουργία και επιβολή μη συμμετρικών υδροδυναμικών δυνάμεων στην γάστρα του πλοίου. Οι δυνάμεις αυτές έλκουν το πλοίο προς την ακτή και δυσχεραίνουν τον έλεγχο της κίνησης και ευστάθειάς του. Πέραν τούτου, το βάθος έχει αντίκτυπο στα χαρακτηριστικά του κύκλου στροφής. Η μείωση του βάθους συνεπάγεται αύξηση της διαμέτρου του κύκλου, όπως καταδεικνύουν τα αποτελέσματα των δοκιμών πλήρους κλίμακας του δεξαμενόπλοιου *Esso Osaka* (280.000 DWT) για διάφορα βάθη, όπως φαίνεται στο σχήμα της εικόνας 77.



Εικόνα 77: Τροχιές κύκλου στροφής πλήρους κλίμακας δεξαμενόπλοιου [12]

Στο ακόλουθο διάγραμμα του σπειροειδούς ελιγμού με ταχύτητα προσέγγισης επτά κόμβων (7 Kn), παρατηρείται πως αρχικά υπάρχει μείωση της ευστάθειας, ενώ με τη μείωση του βάθους αυξάνεται.



Εικόνα 78: Ρυθμός αλλαγής κατεύθυνσης (Turning Rate) [deg/sec] συναρτήσει της γωνίας πηδαλίου [12]

Μια μέθοδος διόρθωσης των υδροδυναμικών παραγώγων ταχύτητας αποτελεί η εισαγωγή του λόγου επιμήκους  $k_e$  για ρηγά νερά, από τους *Hirano, Takashina, Moriya* και *Nakamura* (1985):

$$k_e = \frac{k}{\frac{d}{2H}k + \left(\frac{\pi d}{2H} \cot \frac{\pi d}{2H}\right)^\lambda} \quad (228)$$

όπου:

$d$ : το βύθισμα

$H$ : το βάθος

$$k = \frac{2d}{L} \quad (229)$$

$k$ : ο λόγος επιμήκους

$$\lambda = \begin{cases} 2,3 & \text{για } Y'_v \\ 1,7 & \text{για } N'_v \\ 0,7 & \text{για } Y'_r \text{ και } N'_r \end{cases} \quad (230\alpha), (230\beta), (230\gamma)$$

$\lambda$ : πειραματική σταθερά

Οι διορθωμένες υδροδυναμικές παράγωγοι σε αδιαστατοποιημένη μορφή με χρήση των όρων:

$$\frac{1}{2}\rho L d U^2 \quad (231\alpha)$$

και

$$\frac{1}{2}\rho L^2 d U^2 \quad (231\beta)$$

για τις δυνάμεις και ροπές αντίστοιχα, είναι:

$$Y'_v = -\frac{\pi}{2} k_e - 1,4 C_b \frac{B}{L} \quad (232)$$

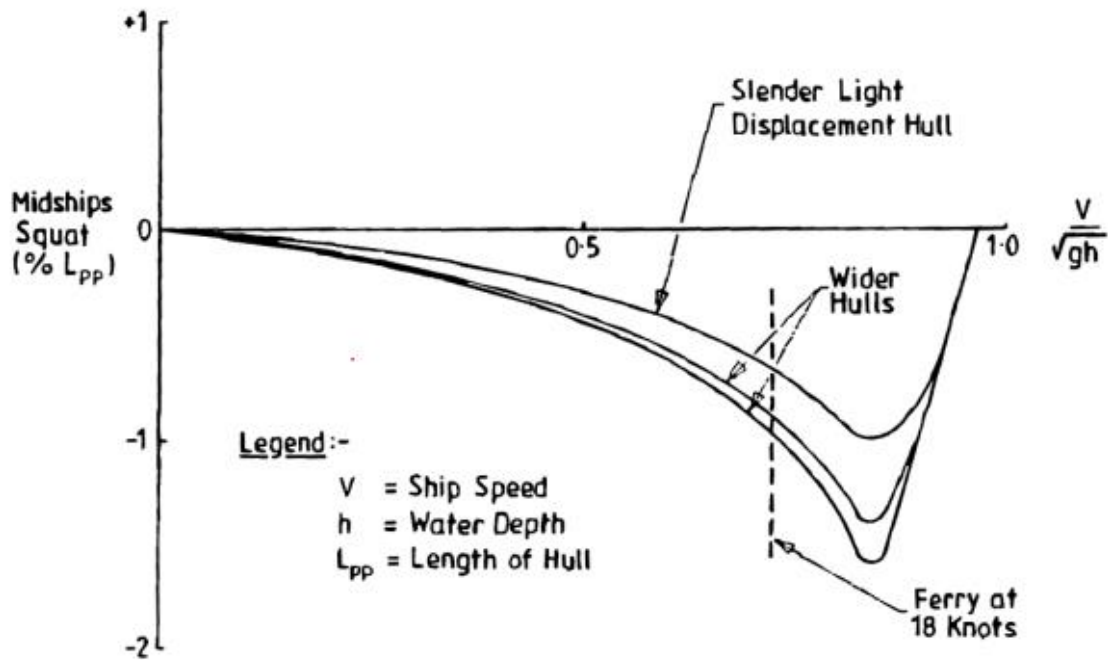
$$N'_v = -k_e \quad (233)$$

$$Y'_r = \frac{\pi}{4} k_e \quad (234)$$

$$N'_r = -0,54 k_e + k_e^2 \quad (235)$$

Θα αποτελούσε παράλειψη η μη αναφορά στο φαινόμενο της καθίζησης (*squat*), το οποίο λαμβάνει μέρος σε ρηγά νερά και στην ακραία εκδήλωσή του καθλώνει την καρίνα του πλοίου στο βυθό. Πρόκειται για την αύξηση του βυθίσματος με ταυτόχρονη

διαγωγή, έχοντας ως αποτέλεσμα την επιρροή πάνω στις ελκτικές ικανότητες του πλοίου και ενδεχομένως την προσάραξη του. Το πλήρωμα μπορεί να αντιληφθεί την εξέλιξη του φαινομένου από την πτώση των στροφών της έλικας και άρα την μείωση της ταχύτητας, όπως επίσης και από τις ταλαντωτικές διεγέρσεις στην γάστρα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα πειραμάτων του *Millward*, προέκυψε το ακόλουθο διάγραμμα για το φαινόμενο squat συναρτήσει του τροποποιημένου για το βάθος αριθμού Froude.



Εικόνα 79: Φαινόμενο squat για μορφές γαστρών συναρτήσει του αριθμού Froude βάθους [12]

Ο ίδιος σύστησε τους παρακάτω τύπους για υπολογισμό της καθίζησης στην πλώρη και στο ήμισυ του μήκους του πλοίου (1990):

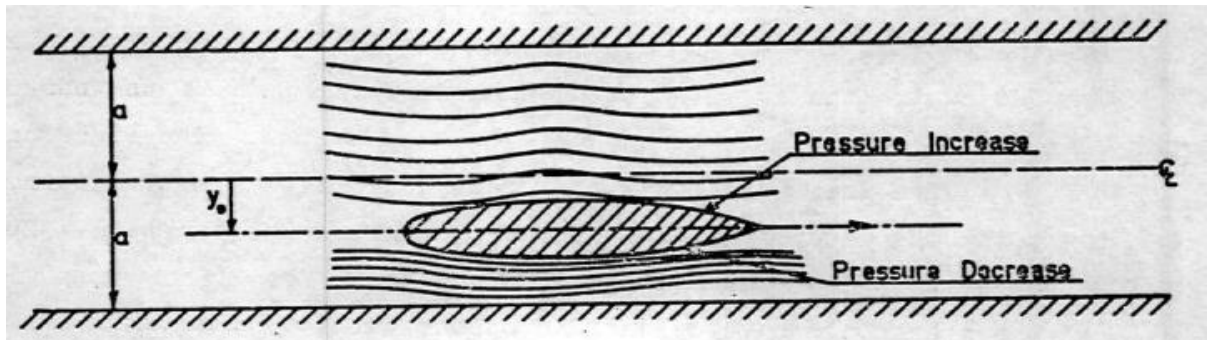
$$S_m = \frac{12.22 c_b \frac{B}{L} - 0.46}{1 - 0.9 F_{nh}} F_{nh}^2 \quad (236)$$

$$S_b = \frac{15.00 c_b \frac{B}{L} - 0.55}{1 - 0.9 F_{nh}} F_{nh}^2 \quad (237)$$

### Κανάλια

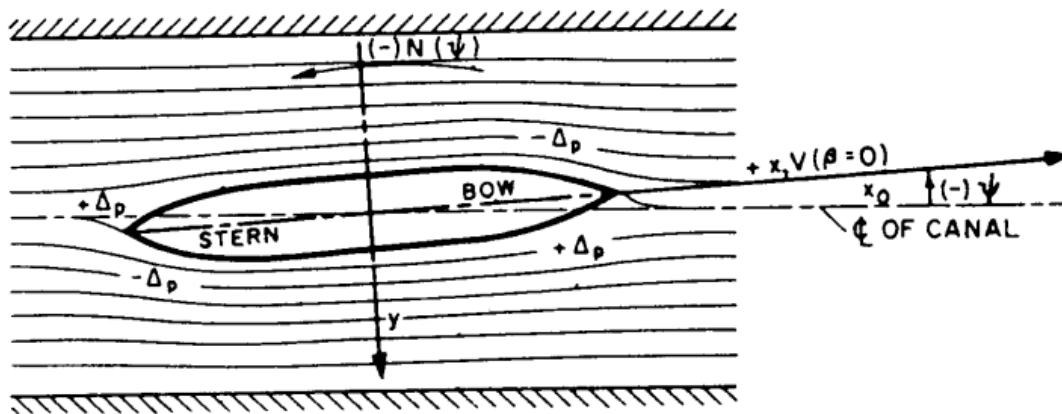
Η πλεύση στα κανάλια επηρεάζει τη ροή του ρευστού σε σχέση με το πλοίο. Εφόσον το κανάλι δεν έχει μεγάλο βάθος, το ρευστό βρίσκει διέξοδο στις πλευρές του πλοίου. Επομένως, οι τελευταίες δέχονται δυνάμεις όπου μεταβάλλουν τις υδροδυναμικές παραγωγούς. Τη δυσμενέστερη περίπτωση αποτελεί εκείνη του ρηχού και στενού καναλιού. Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δίνεται στη συμμετρική πλεύση του σκάφους σε σχέση με τα τοιχώματα του καναλιού, διότι, από τη μηχανική των ρευστών, στη πλευρά

που είναι πιο κοντά στο τοίχωμα του καναλιού θα συναντάται μεγαλύτερη ταχύτητα ρευστού και μικρότερη πίεση.



Εικόνα 80: Σκάφος σε έκκεντρη θέση εντός καναλιού [4]

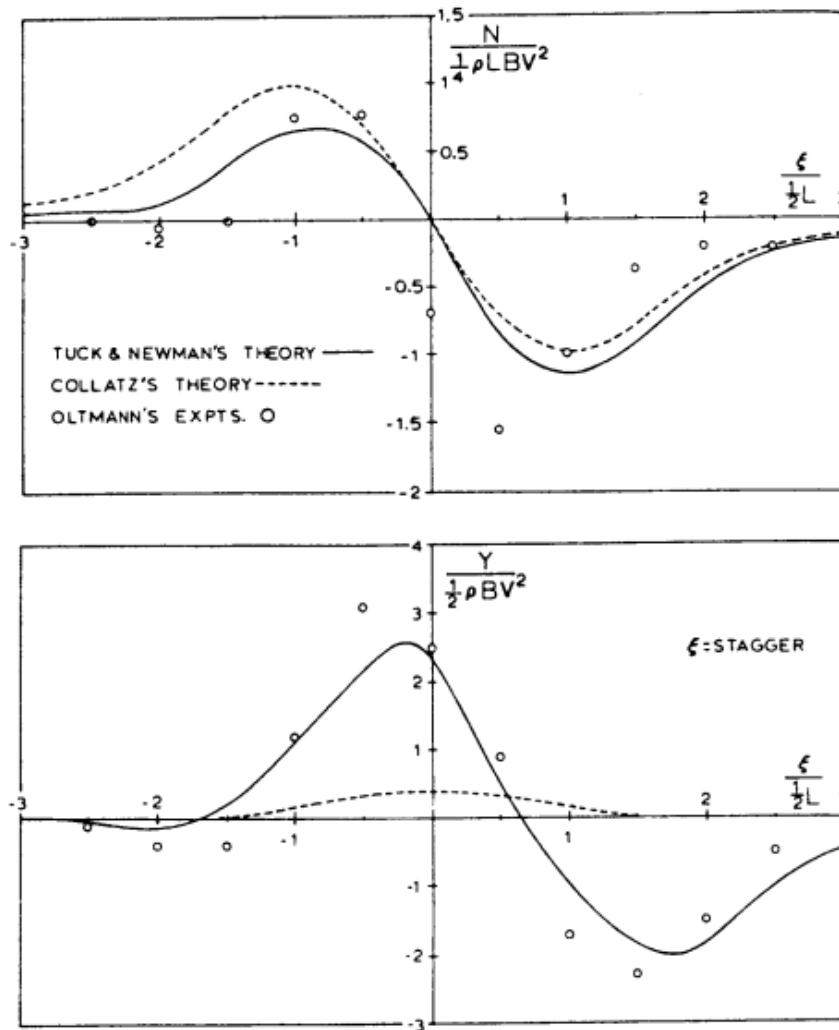
Τα παραπάνω ισοδυναμούν με μια τάση ώθησης του πλοίου προς το κοντινότερο τοίχωμα αλλά και τη στροφή της πλώρης προς το μακρύτερο τοίχωμα. Το ενδεχόμενο ύπαρξης γωνίας μεταξύ του άξονα του καναλιού και του πλοίου δημιουργεί διαφορά πιέσεων στις πλευρές του σκάφους και επακόλουθα μια ροπή προς την πλευρά που της σχηματιζόμενης γωνίας. Επομένως, στην κίνηση εντός καναλιών γίνεται εστίαση στην πλευρική απόσταση του πλοίου από τα τοιχώματα και στη γωνία  $yaw$ .



Εικόνα 81: Επίδραση ασυμμετρίας και στροφή σκάφους εντός καναλιού [4]

### Συνύπαρξη σκαφών

Η συνύπαρξη σκαφών προκαλεί αλληλεπιδράσεις υδροδυναμικής φύσεως. Τέτοιες περιπτώσεις αποτελούν η διέλευση και η αποφυγή ενός πλοίου σε κοντινή απόσταση από ένα έτερο, είτε το δεύτερο είναι σταματημένο είτε κινούμενο. Φυσικά, η επίδραση εξαρτάται από το είδος της κίνησης των πλοίων, από την εγκάρσια απόσταση που τα χωρίζει, από την γωνία  $yaw$  αλλά επιπρόσθετα από τη διαμήκη μεταξύ τους απόσταση και τέλος από τη διαφορά μεγέθους τους.



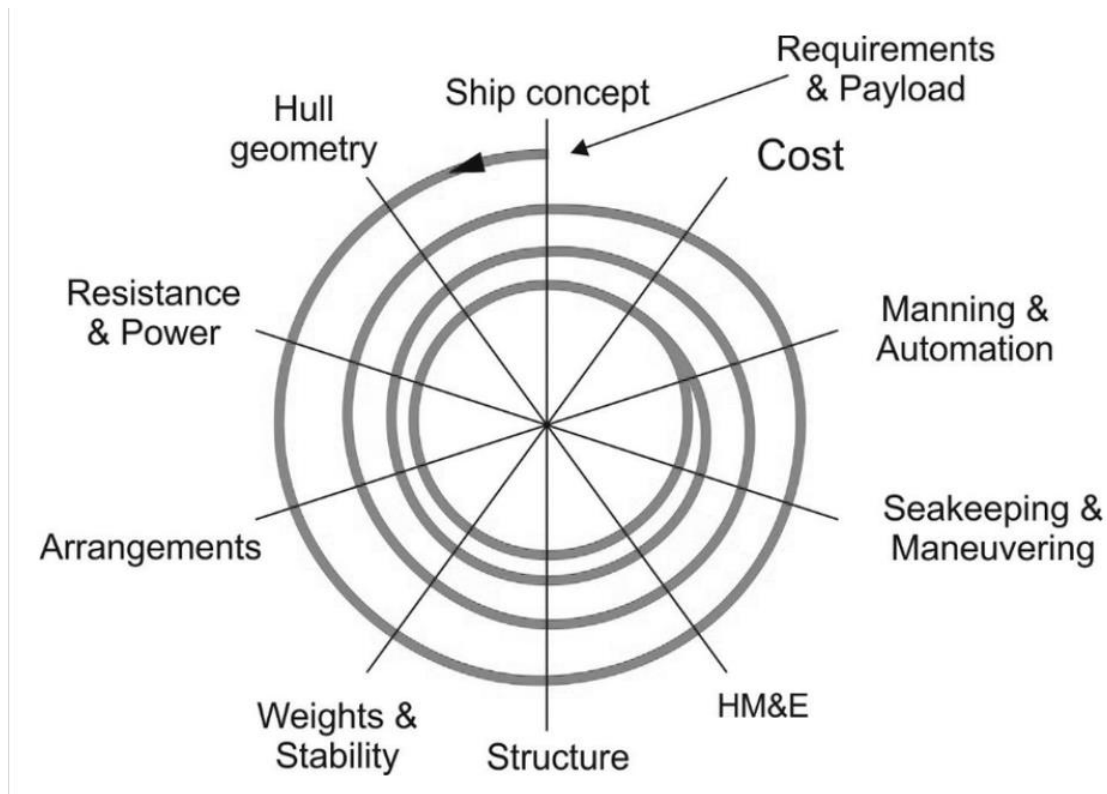
Εικόνα 82: Θεωρητικά και πειραματικά υπολογισμένες δυνάμεις sway και ροπές yaw για δίδυμο πλοία σε παράλληλες ισοταχείς πορείες [11]

Τα παραπάνω διαγράμματα αφορούν τις εγκάρσιες δυνάμεις και ροπές περί το διαμήκη άξονα δυο ίδιων πλοίων, τα οποία διαγράφουν παράλληλες τροχιές με την ίδια πρόσω ταχύτητα, συναρτήσει της μεταξύ τους διαμήκης απόστασης. Η συνεχής και διακεκομμένη γραμμή αφορούν τις τιμές που υπολογίστηκαν μέσω θεωρητικών μεθόδων, εντούτοις, τα κυκλικά στίγματα αποτελούν αποτελέσματα πειραμάτων.

## 5.6 Σχεδιαστικοί Παράμετροι

Οι απαιτήσεις των ελκτικών ικανοτήτων ενός πλοίου καθορίζονται από την κατηγορία πλοίου στην οποία υπάγεται, τις συνθήκες του περιβάλλοντος λειτουργίας, τις επιθυμητές αποδόσεις εντός αυτού και τα αναγκαία μέσα για αυτό. Φυσικά, το πλοίο λειτουργεί σε παραπάνω από ένα περιβάλλοντα κατά τη διαδρομή του. Συνεπακόλουθα, η επιτυχημένη σχεδίαση αποτελεί μια πολυδιάστατη, ελικοειδή και χρονοβόρα διαδικασία. Παράγοντες οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψιν, επιπρόσθετα των βασικών χαρακτηριστικών της γάστρας, είναι τα πηδάλια, άλλες επιφάνειες ελέγχου (πετερύγια-

*fins*, σταθεροποιητές-*stabilizers*, παρατροπίδια-*bilge keel*), συστήματα ελέγχου πλοίου (αυτόματος πιλότος, σύστημα σταθεροποίησης διατοιχισμού κ.ά.), όργανα ναυσιπλοΐας (ραδιοεντοπιστές-*radar*, ηχοεντοπιστικά συστήματα-*sonar*, γυροσκόπια, αισθητήρες) και τα λιμάνια προσέγγισης (διαστάσεις, περιβαντολλογικές συνθήκες, ανάγκη ελιγμών και ρυμούλκησης).



Εικόνα 83: Σπειροειδής προσέγγιση για το σχεδιασμό πλοίου [22]

Αναφορικά με τη διαμόρφωση της πλώρης, λεπτόγραμμες σχεδιάσεις μπορούν να συνεισφέρουν στην ευστάθεια κατεύθυνσης. Στον αντίποδα, λιγότερο λεπτές γραμμές επηρεάζουν τη διαγωγή και το σημείο αποκόλλησης της ροής σε αβαθή νερά.

Αντίστοιχα, μια καλλίγραμμη πρύμνη ευνοεί την ομαλή ροή προς την έλικα και το πηδάλιο ώστε να αποδώσουν σωστά. Λάθος επιλογή γραμμών ισοδυναμεί με μεταβολή του σημείου αποκόλλησης της ροής σε ρηχά νερά. Κατά αυτόν τον τρόπο, βάλλεται η ευστάθεια πορείας. Η διαμόρφωση *skag* της τρόπιδας έχει θετική επίδραση στη δυναμική ευστάθεια. Ακόμα, η ύπαρξη μεγάλης πλευρικής επιφάνειας στο πρυμναίο κομμάτι δυσχεραίνει τον κύκλο στροφής με αποτέλεσμα να διαγράφεται μεγαλύτερη διάμετρος στροφής. Αντίθετο αποτέλεσμα επιφέρει η ύπαρξη κλίσης στο πλοίο κατά την στροφή. Επιπρόσθετα της επίδρασης στη στροφή, η διαμήκης συντεταγμένη του κέντρου της πλευρικής επιφάνειας στην πρύμνη επηρεάζει τη διατήρηση της πορείας

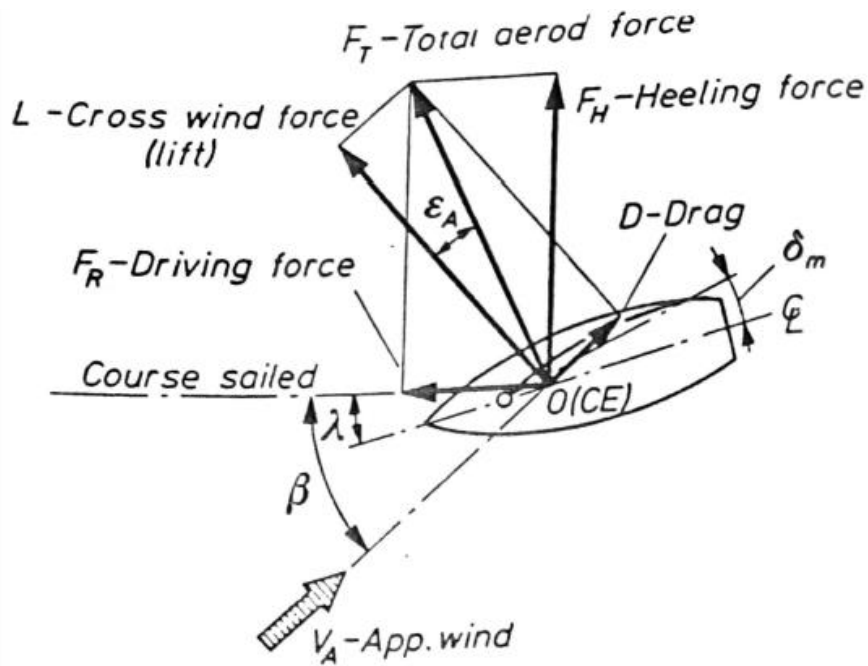
και το μέγεθος των ροπών λόγω ρευμάτων. Ανάλογα, η επιφάνεια των εξάλων αλλά και η ενδεχόμενη διαγωγή επηρεάζουν τη ροπή λόγω ανέμου και τη γωνία πλαγιολίσθησης. Συγκεκριμένα, η πρυμναία διαγωγή τείνει να εξισορροπήσει την αστάθεια πορείας του σκάφους. Γενικότερα, είναι προτιμητέοι μικρότεροι λόγοι πλάτους-μήκους ( $\frac{B}{L}$ ), πλάτους-βυθίσματος ( $\frac{B}{T}$ ) και μικρότερος συντελεστής γάστρας  $C_B$  (*Block coefficient*) για μεγαλύτερη ικανότητα διατήρησης της κατεύθυνσης.

Μεγαλύτερου μεγέθους πηδάλια συνεπάγονται καλύτερη διατήρηση πορείας και απόκριση στη στροφή. Ωστόσο, η κίνηση πηδαλιού μεγάλης επιφάνειας δημιουργεί ροπές διατοιχισμού.

Η επιλογή των χαρακτηριστικών μηχανής στα μηχανοκίνητα σκάφη πρέπει να συνυπολογίζει τις απαιτήσεις των ελιγμών. Όπως φάνηκε στην ανάλυση του ελιγμού σταματήματος, η σωστή διαχείριση της ταχύτητας πρόσω και ανάποδα έχει καθοριστικό ρόλο. Επομένως, ο χρόνος που χρειάζεται μια μηχανή για να ανατρέψει την κίνηση επηρεάζει την ελικτικότητα του πλοίου. Επίσης, η ελάχιστη ταχύτητα την οποία μπορεί να αποδώσει η μηχανή είναι ένα ζητούμενο χαρακτηριστικό.

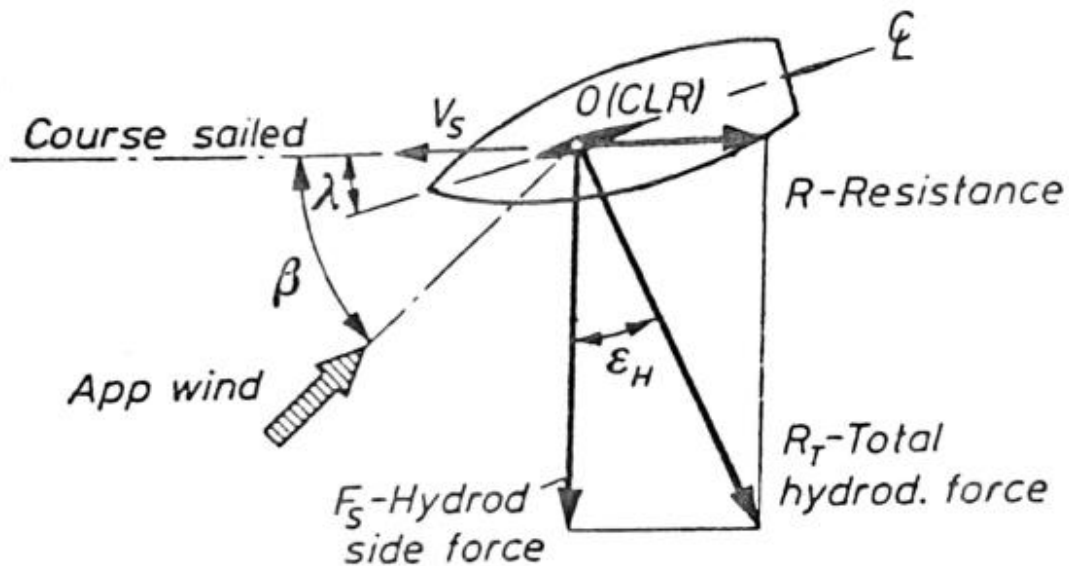
Η απόδοση των ιστιοπλοϊκών σκαφών, όπως παρέθεσε ο *F. W. Lanchester* στο βιβλίο του *Aerodynamics* (1907), αποδίδεται στην υπέρθεση των αποδόσεων της ιστιοφορίας και της γάστρας. Η αντίσταση δεν είναι επαρκής ένδειξη της καλής επίδοσης ενός ιστιοπλοϊκού, αλλά πρέπει να συμμεριστούν και συμπληρωματικοί παράγοντες. Αναφορικά με την ιστιοφορία, το τίμημα της ζητούμενης παραγόμενης δύναμης άνωσης *lift* είναι η οπισθέλκουσα δύναμη *drag*. Η γωνία  $\epsilon_A$ , μεταξύ της δύναμης *lift* και της συνολικής αεροδυναμικής δύναμης  $F_T$ , αποτελεί δείκτης της αεροδυναμικής αποδοτικότητας των πανιών. Καθορίζει την κατεύθυνση της  $F_T$  και το μέτρο της οπισθέλκουσας. Καλύτερη απόδοση σε πορεία κόντρα στον άνεμο επιτυγχάνεται με μείωση της οπισθέλκουσας, διατηρώντας τη δύναμη της άνωσης. Το παραπάνω στρέφει τη συνολική αεροδυναμική δύναμη προς την πλώρη.





Εικόνα 84: Αεροδυναμικές δυνάμεις σε μικρή λέμβο με πανί σε όρτσα πορεία [23]

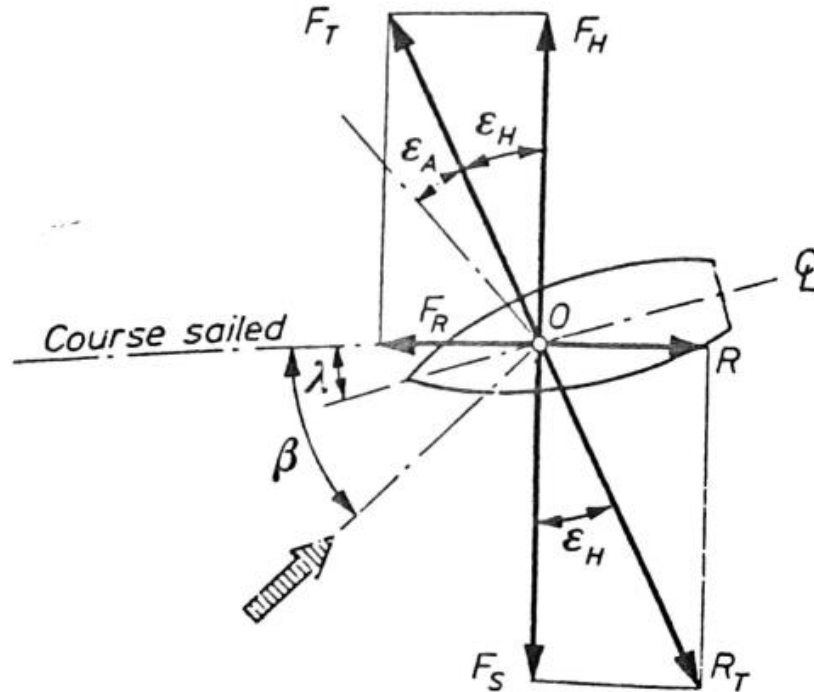
Η γάστρα πρέπει να παράγει υδροδυναμική δύναμη  $F_S$  ίση και αντίθετη με την αεροδυναμική δύναμη αναφορική της κλίσης  $F_H$ . Σημειώνεται πως η αντίσταση  $R$  είναι το άθροισμα της αντίστασης της γυμνής γάστρας και της αντίστοιχης για το πηδάλιο και λοιπά παρελκόμενα.



Εικόνα 85: Υδροδυναμικές δυνάμεις σε μικρή λέμβο με πανί σε όρτσα πορεία [23]

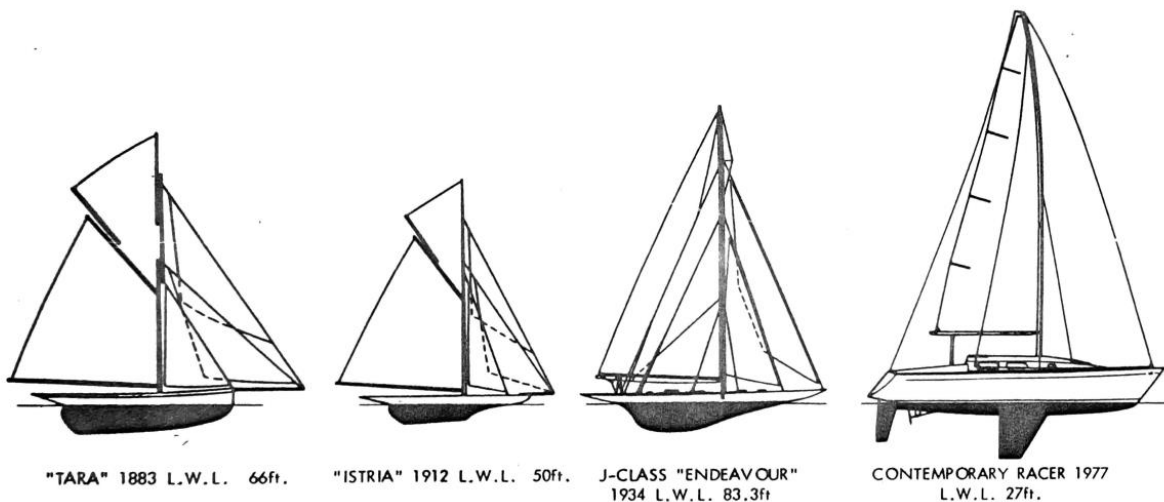
Αντίστοιχα με την ανάλυση δυνάμεων του πανιού, η γωνία  $\epsilon_H$  χαρακτηρίζει τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά της γάστρας. Συγκεκριμένα, αποδοτικότερη γάστρα αποτελεί εκείνη που παράγει την απαραίτητη δύναμη  $F_S$  με την μικρότερη δυνατή αντίσταση. Η αντίσταση μεταβάλλεται με τη γωνία εκπτώσεως της πορείας *leeway*

angle  $\lambda$ . Επομένως, αποτελεί ζητούμενο η μικρή γωνία  $\epsilon_H$  ή ο μεγάλος λόγος  $\frac{F_S}{R}$ . Με εφαρμογή των παραπάνω το σκάφος παρουσιάζει καλύτερη συμπεριφορά σε κόντρα στον άνεμο πορείες.



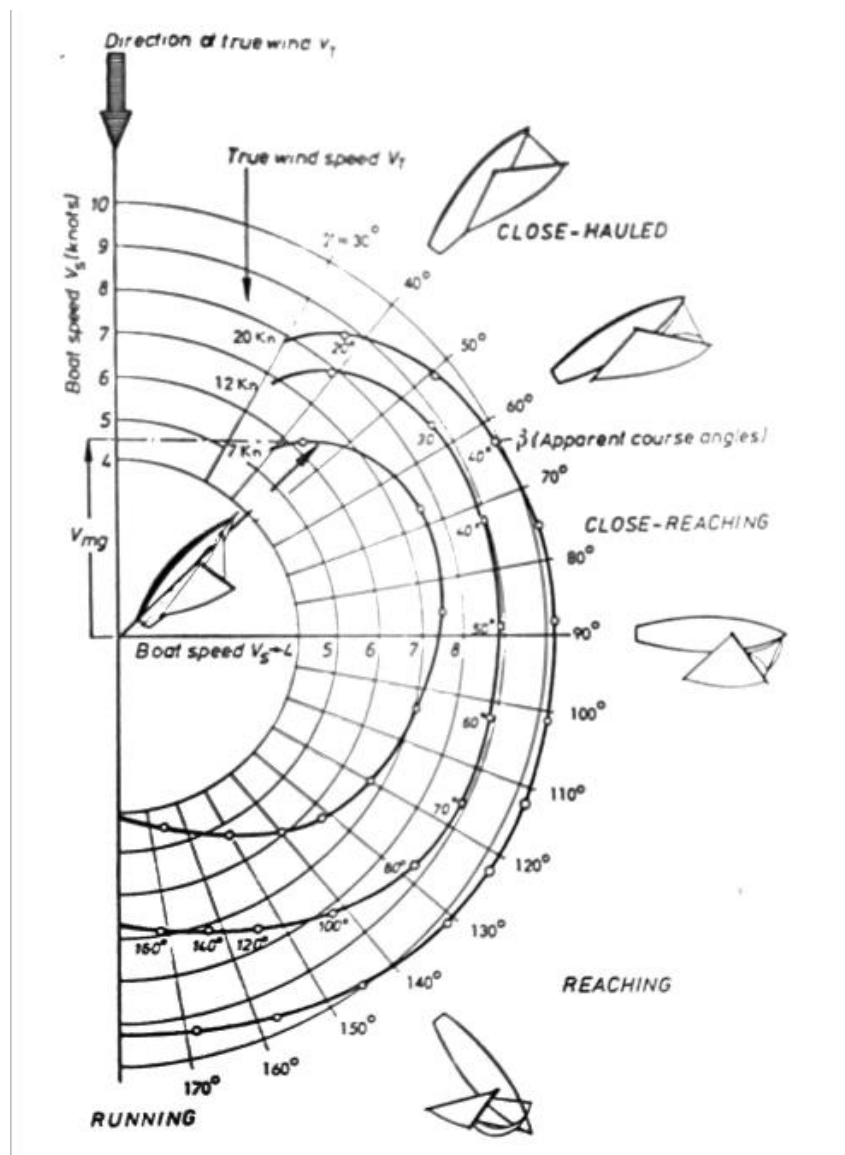
Εικόνα 86: Δυνάμεις σε μικρή λέμβο με πανί σε όρτσα πορεία [23]

Για καλύτερη απόδοση σε πλεύση κόντρα στον άνεμο, προτιμώνται πανιά με μεγαλύτερο λόγο διαστάσεων μήκους – πλάτους. Όπως παρατηρείται στην ακόλουθη εικόνα, η αναγνώριση του πιο πάνω χαρακτηριστικού φαίνεται στην υιοθέτηση διαφορετικού σχεδιασμού ιστιοφορίας αλλά και γάστρας στη γραμμή του χρόνου.



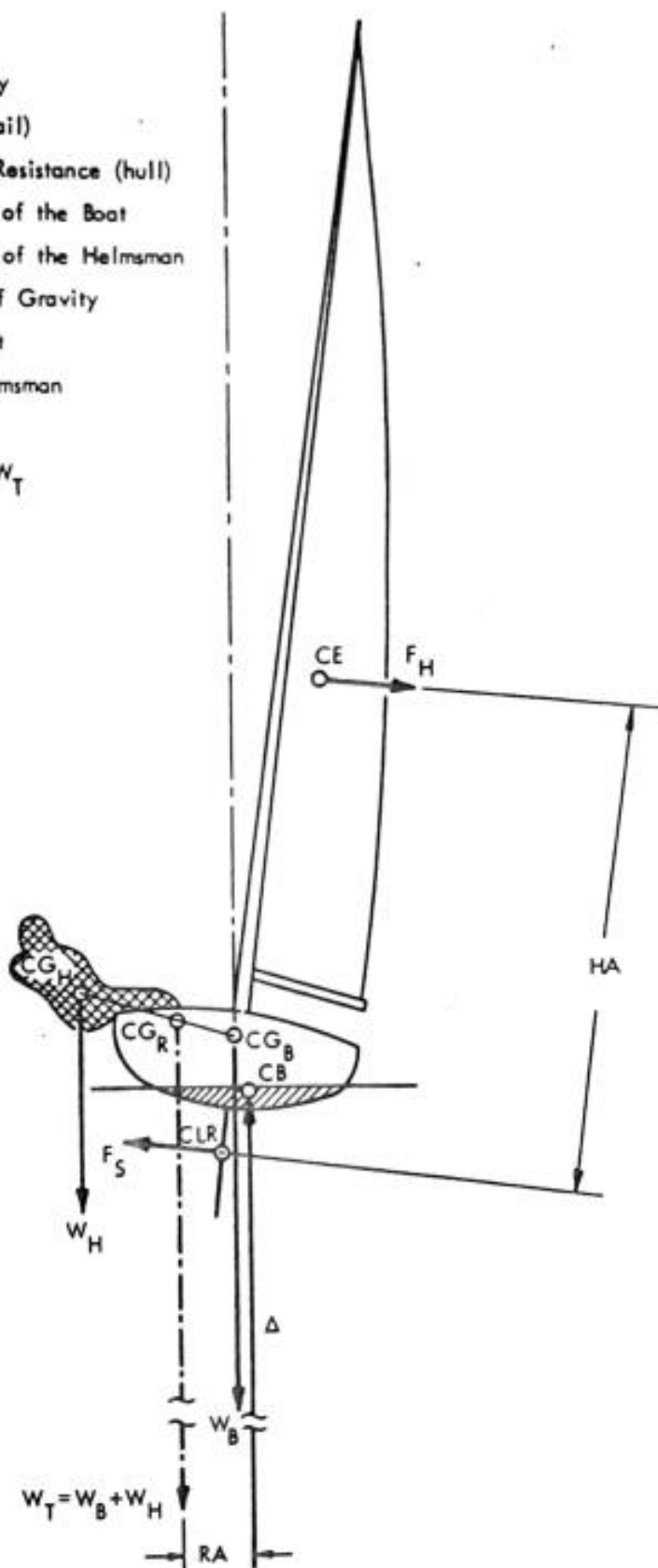
Εικόνα 87: Εξέλιξη σχεδιασμού ιστιοπλοϊκών σκαφών [23]

Η ελκτικότητα και ελεγχιμότητα των ιστιοπλοϊκών σκαφών εξαρτάται από τη ευστάθεια που διαθέτουν. Άρα, η συνολική απόδοση κατακερματίζεται στην αποδοτικότητα του σχεδιασμού της γάστρας, της ιστιοφορίας και της συνολικής ευστάθειας του σκάφους. Ωστόσο, οι απαιτήσεις της ευστάθειας περιορίζουν τη σχεδίαση του ιστιοπλοϊκού, αφού μεγαλύτερη ιστιοφορία ισοδυναμεί μεγαλύτερο βύθισμα γάστρας ώστε να μπορεί την υποστηρίξει. Τα βασικά χαρακτηριστικά τα οποία επηρεάζουν την απόδοση είναι η μορφή και το μέγεθος της γάστρας και των πτερυγίων και πηδαλίων που φέρει. Ακόμα, οι συντελεστές γάστρας, το εκτόπισμα και η βρεχόμενη επιφάνεια είναι εξίσου σημαντικά μεγέθη. Ανάλογα είναι τα ζητούμενα για τα πανιά του σκάφους, όπως το προσήνεμο εμβადόν και ο λόγος διαστάσεων. Συγκεντρωτικά, ο καθορισμός της συμπεριφοράς ενός ιστιοπλοϊκού σκάφους εξαρτάται από το σχεδιασμό του, την ικανότητα του πληρώματος και των συνθηκών περιβάλλοντος πλεύσης.



Εικόνα 88: Πλεύσεις ιστιοπλοϊκού σε σχέση με την κατεύθυνση του ανέμου [23]

- CB Centre of buoyancy
- CE Centre of Effort (sail)
- CLR Centre of Lateral Resistance (hull)
- CG<sub>B</sub> Centre of Gravity of the Boat
- CG<sub>H</sub> Centre of Gravity of the Helmsman
- CG<sub>R</sub> Resulting Centre of Gravity
- W<sub>B</sub> Weight of the Boat
- W<sub>H</sub> Weight of the Helmsman
- W<sub>T</sub> Total Weight
- Δ Displacement  $\Delta = W_T$
- RA Righting Arm
- HA Heeling Arm



Εικόνα 89: Ασκούμενες δυνάμεις και ροπές σε ιστιοπλοϊκό σκάφος [23]

## 6. Μελέτη περίπτωσης

Με ζητούμενο την εφαρμογή του θεωρητικού υποβάθρου της ελκτικότητας και την προσομοίωση του κύκλου στροφής και του Ζιγκ-Ζαγκ ελιγμού, αναζητήθηκε μελέτη περίπτωσης πλοίου. Το υπό διερεύνηση πλοίο είναι ένα χημικό δεξαμενόπλοιο *DWT* 13,000 (*oil chemical tanker*), του οποίου τα στοιχεία παρουσιάζονται ως ακολούθως.



Εικόνα 90: Το υπό μελέτη χημικό δεξαμενόπλοιο

Πρόκειται για τα κύρια χαρακτηριστικά της γάστρας, τα μεγέθη της έλικας και του πηδαλιού. Τα παραπάνω στοιχεία σε συνδυασμό με τις τιμές των υδροδυναμικών παραγώγων του δεξαμενοπλοίου, αποτελούν τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση προς εξαγωγή αποτελεσμάτων.

Πίνακας 7: Χαρακτηριστικά γάστρας (*Hull Particulars*)

Χαρακτηριστικά γάστρας ( <i>Hull Particulars</i> )		
Ολικό μήκος	$L_{OA}$	128.6 m
Μήκος μεταξύ καθέτων	$L_{BP}$	120,4 m
Πλάτος	$B$	20,4 m
Βύθισμα	$T$	8.616 m
Συντελεστής γάστρας	$C_B$	0,794
Συντελεστής μέσης τομής	$C_M$	0.995
Εκτόπισμα	$m$	17.258.000 kg
Διαμήκης απόσταση κ.β. από μέσο μήκος (LCG)	$x_G$	-1.5 m

Κατακόρυφη απόσταση κ.β.	$z_G$	-1,373 m
Ροπή αδράνειας ως προς z	$I_Z$	19.172.616.000 t·m <sup>2</sup>
Ροπή αδράνειας ως προς x	$I_x$	915285060 t·m <sup>2</sup>
Μετακεντρικό ύψος	$GM$	1.533 m
Πολυωνυμικοί Συντελεστές Αντίστασης ( <i>Resistance Polynomial Coefficients</i> )		
-	$R_1$	27051,12871
-	$R_2$	-2584,30523
-	$R_3$	803,29597

Πίνακας 8: Χαρακτηριστικά Έλικας (Propeller)

Χαρακτηριστικά Έλικας		
Διάμετρος	$D$	4.3 m
Βήμα ( <i>Pitch</i> )	$P$	2.654 m
Διαμήκης συντεταγμένη	$x_P$	-58.1
Λόγος εκτεταμένης επιφάνειας ( <i>Blade Area Ration</i> )	$A_E/A_o$	0.60
Λόγος βήμα/διάμετρο	$P/D$	0.617
Συντελεστής μείωσης ώσης	$t_p$	0.242
Συντελεστής ομόρρου	$w_p$	0.357
Στροφές	$n$	167 rpm

Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά Έλικας Πηδαλίου (Rudder)

Χαρακτηριστικά Πηδαλίου		
Επιφάνεια	$A_R$	19.98 m <sup>2</sup>
Χορδή	<i>Chord</i>	3.875 m
Ύψος ( <i>Span</i> )	$H_R$	6.2 m
Λόγος επιμήκους	$A$	1,6
Διαμήκης συντεταγμένη	$x_R$	-60.2 m
Κατακόρυφη συντεταγμένη	$z_R$	3.7 m
Μέγιστη γωνία	$\delta_{max}$	0.610865 rad /35°
Συντελεστής μείωσης ώσης	$t_R$	0.242
Συντελεστής ομόρρου	$w_R$	0.357
Πολυωνυμικοί Συντελεστές Πρόωσης ( <i>Propulsion Polynomial Coefficients</i> )		
-	$c_1$	0.28405
-	$c_2$	-0.29163
-	$c_3$	-0.17710

Πίνακας 10: Υδροδυναμικοί Παράγωγοι Πλοίου (Hydrodynamic Derivatives)

<b>Υδροδυναμικοί Παράγωγοι</b>	
$X_{\dot{u}}$	-1.661.231 kg
$X_{vr}$	-5.253.642,5 kg
$Y_v$	-219.657,25 kg/m
$Y_r$	7.195.345,5 kg
$Y_{vv}$	-257.935,703 kg/m
$Y_{vr}$	-18.476.780 kg
$Y_{rr}$	-312.737.730 kg·m
$Y_{\dot{v}}$	-16.612.310 kg
$Y_{\dot{r}}$	-164.638.800 kg·m
$N_v$	-9.161.398 kg
$N_r$	-437.768.260 kg·m
$N_{\dot{v}}$	-154.730.800 kg·m
$N_{\dot{r}}$	-12.386.990.100 kg·m <sup>2</sup>
$N_{rr}$	-14.591.773.700 kg·m <sup>2</sup>
$N_{vvr}$	-802.250.620 kg·m
$N_{rrv}$	78.774.510.000 kg·m <sup>2</sup>



## 7. Επίλυση μη γραμμικού μοντέλου σε προγραμματιστικό περιβάλλον

Το μη γραμμικό *modular* μοντέλο, το οποίο αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα, εφαρμόστηκε για το δεξαμενόπλοιο (*tanker*) της μελέτης περίπτωσης. Συγκεκριμένα, παράχθηκε κώδικας *Matlab* (*Matrix Laboratory*) για τις εξισώσεις κίνησης του μοντέλου σε τρεις (3) βαθμούς ελευθερίας (*surge/sway/yaw*). Για λόγους πληρότητας, παρατίθεται εκ νέου η αρχική δομή του μοντέλου:

*Surge:*

$$m(\dot{u} - rv) = X_H + X_P + X_R + X_O \quad (138)$$

*Sway:*

$$m(\dot{v} - ru) = Y_H + Y_P + Y_R + Y_O \quad (153)$$

*Yaw:*

$$I_{zz}\dot{r} = N_H + N_P + N_R + N_O \quad (157)$$

Σημειώνεται πως η αρχή των αξόνων βρίσκεται κατά σύμβαση στο κέντρο βάρους του πλοίου.

Η προσομοίωση αφορά ομαλές συνθήκες θάλασσας, χωρίς άνεμο. Επομένως, οι συνιστώσες δυνάμεων και ροπής αναφορικά με τις διεγέρσεις του περιβάλλοντος είναι μηδενικές:

$$X_O, Y_O, N_O = 0 \quad (238)$$

Ακόμα, η ασκούμενη δύναμη στην πλάγια κατεύθυνση (*sway*) και ροπή (*yaw*) λόγω της έλικας θεωρούνται αμελητέες:

$$Y_P, N_P = 0 \quad (239)$$

Συνεπώς, η προκύπτουσα μορφή του μοντέλου, η οποία μεταφέρθηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον είναι:

*Surge:*

$$m(\dot{u} - rv) = X_H + X_P + X_R \quad (138')$$

*Sway:*

$$m(\dot{v} - ru) = Y_H + Y_R \quad (153')$$

*Yaw:*

$$I_{zz}\dot{r} = N_H + N_R \quad (157')$$



$$X_H = X_{\dot{u}} \dot{u} - Y_{\dot{v}} v r - Y_{\dot{r}} r^2 + X_{vr} v r - R(u) \quad (139\alpha)$$

$$Y_H = Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_{vU} v U + Y_{rU} r U + Y_{vv} |v| + Y_{vr} |r| + Y_{rr} |r| \quad (154\alpha)$$

$$N_H = N_{\dot{r}} \dot{r} + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{rU} r U + N_{vU} v U + N_{rr} |r| + N_{rv} \frac{r^2 v}{U} + N_{vr} \frac{v^2 r}{U} \quad (158\alpha)$$

Ορίστηκαν ξεχωριστά οι παράγοντες των δυνάμεων και ροπής λόγω πηδαλίου και έλικας των παραπάνω εξισώσεων όπως παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 4.5.2. Για τον υπολογισμό του συντελεστή ώσης έλικας  $K_T$ , ο οποίος εμπεριέχεται στη δύναμη της έλικας στη διαμήκη διεύθυνση (*surge*)  $X_P$ , χρησιμοποιήθηκε το διάγραμμα της σειράς *Wageningen B* για την έλικα B5-60 με  $P/D=0.617$  του *tanker*. Συγκεκριμένα, θεωρήθηκε η συνάρτηση του  $K_T$  ως ένα πολυώνυμο δευτέρου βαθμού. Προκειμένου να υπολογιστούν οι συντελεστές της συνάρτησης, όπως φαίνονται στον πίνακα δεδομένων του προηγούμενου κεφαλαίου, επιλέχθηκαν τρία σημεία από το διάγραμμα. Κατά αυτόν τον τρόπο, έπειτα από την επίλυση ως προς τους συντελεστές, προκύπτει η πολυωνυμική συνάρτηση:

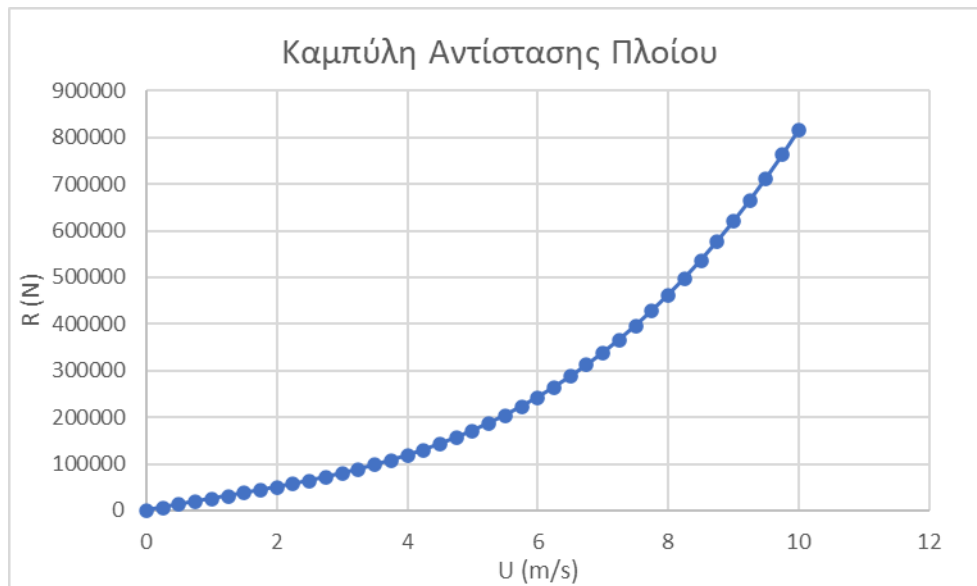
$$K_T = c_1 + c_2 \cdot J + c_3 \cdot J^2 = 0.28405 - 0.29163 \cdot J - 0.17710 \cdot J^2 \quad (240)$$

όπου:

$$J = u(1-w_p)/nD \quad (241)$$

Επισημανση χρειάζεται και ο υπολογισμός της αντίστασης  $R(u)$ , η οποία αποτελεί παράγοντα της δύναμης γάστρας  $X_H$ . Ζεύγη τιμών της ταχύτητας και της αντίστασης εισήχθησαν σε διάγραμμα σε υπολογιστικό φύλλο *excel*, στο οποίο εφαρμόστηκε η γραμμική τάσης. Κατά αυτόν τον τρόπο εξάχθηκε η πολυωνυμική συνάρτηση της αντίστασης:

$$R(u) = 27.051,12871 \cdot u - 2.584,30523 \cdot u^2 + 803,29597 \cdot u^3 \quad (242)$$



Διάγραμμα 1: Καμπύλη αντίστασης πλοίου στο excel

Πρώτο μέλημα κατά τη σύνταξη του κώδικα ήταν η δημιουργία ορισμάτων όλων των παραγόντων κάθε συνάρτησης, ώστε να αναγνωρίζονται από τη γλώσσα προγραμματισμού όταν καλούνται προς υπολογισμό. Στη συνέχεια εκχωρήθηκαν τα δεδομένα (*input*), δηλαδή, τα χαρακτηριστικά της γάστρας, της έλικας του πηδαλίου και τις τιμές των υδροδυναμικών παραγώγων. Σε αυτό το σημείο, ο κώδικας υπολογίζει τις δυνάμεις λόγω πηδαλίου, λόγω έλικας και γάστρας. Ακολούθως, τροποποιήθηκαν οι εξισώσεις κίνησης, ώστε να απομονωθούν τα μεγέθη των παραγώγων στο αριστερό μέλος των εξισώσεων και τα υπόλοιπα μεγέθη στο δεξί μέλος. Δηλαδή έγινε *State Space Representation* των εξισώσεων κίνησης. Πλέον, η μορφή των εξισώσεων επέτρεπε τη χρήση του επιλυτή *ode45*, ο οποίος επιλύει συνήθεις διαφορικές εξισώσεις (*Ordinary Differential Equations*). Ανήκει στους επιλυτές *Runge-Kutta* και συγκεκριμένα περιέχει τη μέθοδο *Dormand-Prince*, η οποία υπολογίζει με ακρίβεια τέταρτης και πέμπτης τάξης λύσεις (*Ordinary Differential Equations45*). Με αυτόν τον τρόπο, προκύπτουν ως παραγόμενα μεγέθη (*output*) οι τιμές των ταχυτήτων στην οριζόντια (*surge*), εγκάρσια (*sway*) διεύθυνση, γωνιακή ταχύτητα (*yaw*), οριζόντιες (*X*) και εγκάρσιες (*Y*) μετατοπίσεις, γωνίες πηδαλίου (*rudder angle*) και κατεύθυνσης πορείας (*heading angle*). Παράλληλα, υπάρχει ένας ελεγκτής (*controller*), ο οποίος περιορίζει τη γωνία πηδαλίου στις  $35^\circ$  δεξιά (*starboard*) και αριστερά (*left*), για την προσομοίωση του κύκλου στροφής. Η ίδια μέγιστη γωνία εκτροπής πηδαλίου ισχύει και για τον οφιοειδή ελιγμό. Επιπρόσθετοι έλεγχοι, σε αυτόν τον ελιγμό, αποτελούν οι βρόγχοι για τη γωνία πορείας. Αυτό συμβαίνει καθώς όταν επιτευχθεί η επιθυμητή γωνία πορείας, γίνεται αλλαγή κατεύθυνσης του πηδαλίου για την καταγραφή της ζιγκ-ζαγκ πορείας. Ο διαχωρισμός περιπτώσεων στους βρόγχους φαίνεται αναλυτικά στο ακόλουθο διάγραμμα ροής για τον 10/10 ζιγκ-ζαγκ ελιγμό. Τέλος, παράγονται τα γραφήματα των

παραγόμενων μεγεθών, όπως ακολουθούν ως αποτελέσματα της προγραμματιστικής διαδικασίας.

Πίνακας 11: Εισακτέα μεγέθη

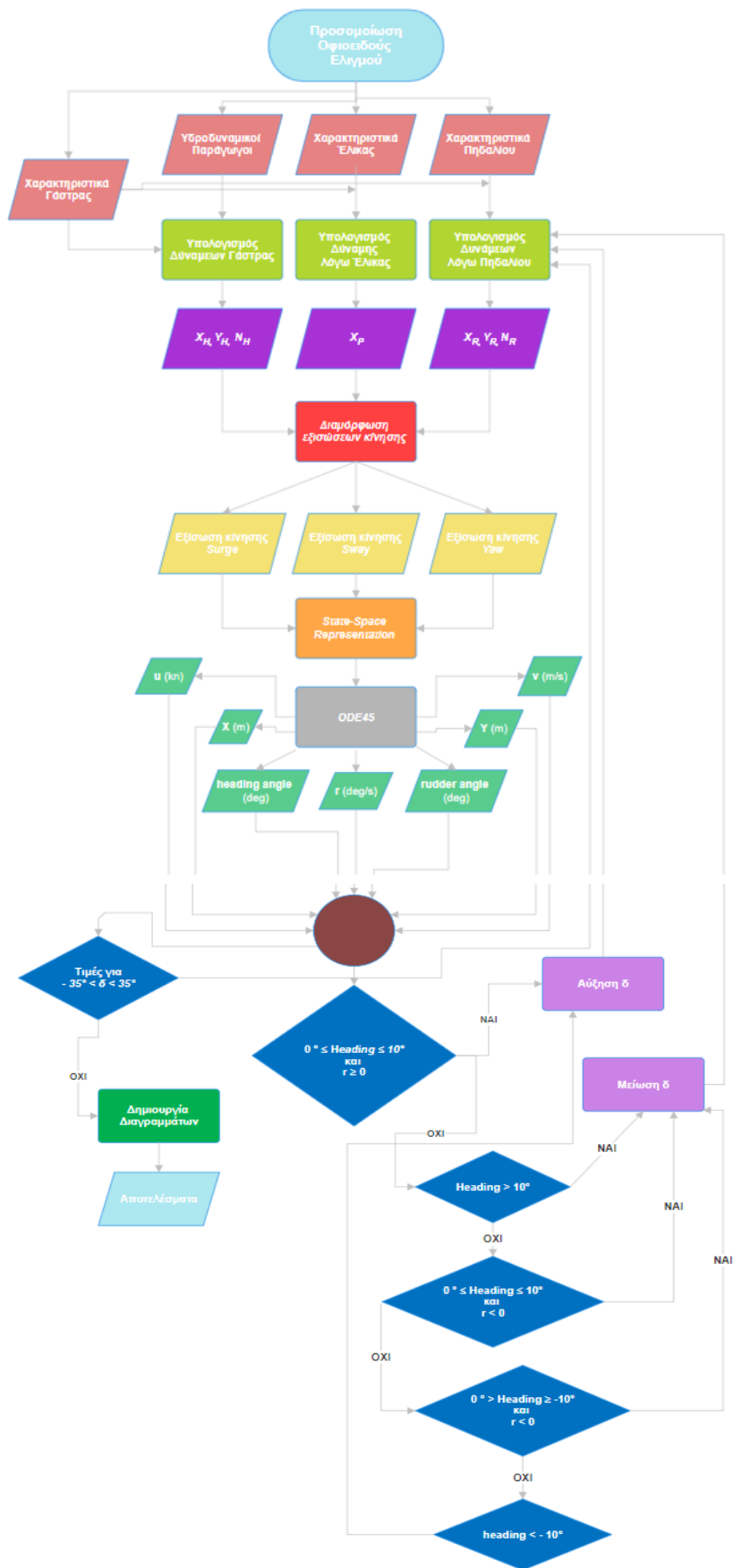
<b>Input</b>
Χαρακτηριστικά Γάστρας
Χαρακτηριστικά Έλικας
Χαρακτηριστικά Πηδαλίου
Υδροδυναμικοί Παράγωγοι

Πίνακας 12: Παραγόμενα προϊόντα

<b>Output</b>
$u = f(t)$
$v = f(t)$
$r = f(t)$
$X = f(t)$
$Y = f(t)$
$Heading\ Angles = f(t)$
$Heading/Rudder\ Angles = f(t)$
$X = f(Y)$



Διάγραμμα ροής (Flowchart) 1: Κύκλος Στροφής



Διάγραμμα ροής (Flowchart) 2: Οφιοειδούς Ελιγμός 10/10

## 8. Αποτελέσματα

### I. Έλεγχος τιμών υδροδυναμικών παραγώγων

Πραγματοποιήθηκε έλεγχος των τιμών των υδροδυναμικών παραγώγων με εφαρμογή των τύπων του *Clarke* (202-211) και *Inoue* (212-215). Η επαλήθευση ήταν εφικτή διότι είναι γνωστά τα βασικά μεγέθη του πλοίου. Στον ακόλουθο πίνακα φαίνονται, στις αντίστοιχες στήλες, τα αδιάστατα αποτελέσματα των σχέσεων του *Clarke*, η διαστατοποιημένη τιμή τους και το σφάλμα αυτών από τις δεδομένες τιμές των υδροδυναμικών παραγώγων.

Πίνακας 13: Επαλήθευση τιμών υδροδυναμικών παραγώγων με τύπους *Clarke*

Υ.Π.	<i>Clarke</i>		
	Αδιάστατα	Διαστατοποιημένα	Απόκλιση (%)
$Y_v$	-0,028186221	-209.403,39	-4,67
$Y_r$	0,005094460	4.556.920,80	-36,67
$N_r$	-0,003981131	-428.752.121,32	-2,06
$N_v$	-0,010807229	-9.666.909,97	5,52
$Y_{\dot{v}}$	-0,018571912	-16.612.307,08	-0,00001758
$Y_{\dot{r}}$	-0,001528735	-164.638.777,03	-0,00001395
$N_{\dot{v}}$	-0,001436736	-154.730.780,50	-0,00001260
$N_{\dot{r}}$	-0,000955299	-12.386.988.783,47	-0,00001063

Τον πίνακα με τα αποτελέσματα κατά *Clarke*, διαδέχεται αντίστοιχος πίνακας για τις υδροδυναμικές παραγώγους σύμφωνα με τον *Inoue*.

Πίνακας 14: Επαλήθευση τιμών υδροδυναμικών παραγώγων με τύπους *Inoue*

Υ.Π.	<i>Inoue</i>		
	Αδιάστατα	Διαστατοποιημένα	Απόκλιση (%)
$Y_v$	-0,0295664158	-219.657,24	-0,000004375
$Y_r$	0,0080441152	7.195.344,87	-0,000008772
$N_r$	-0,0038600073	-415.707.578,63	-5,04
$N_v$	-0,0102420856	-9.161.397,62	-0,000004094

Οι υπολογισμένες τιμές των υδροδυναμικών παραγώγων έχουν μικρή απόκλιση από τις δεδομένες τιμές. Μοναδική περίπτωση μεγάλου σφάλματος προκύπτει για την υδροδυναμική παράγωγο  $Y_r$ , η οποία παρουσιάζεται με τον τύπου του *Clarke*, κάτι που

δεν συμβαίνει με τον τύπο του Inoue, ο οποίος τουναντίον την επαληθεύει. Για λόγους πληρότητας παρατίθενται εκ νέου οι σχέσεις *Clarke* και *Inoue*, καθώς επίσης οι αντίστοιχες σχέσεις για την διαστατοποίησή τους.

Clarke:

$$Y'_v = -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left[1 + 0.40 C_b \frac{B}{T}\right] \quad (202)$$

$$Y'_r = -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left[-\frac{1}{2} + 2.2 \frac{B}{L} - 0.080 \frac{B}{T}\right] \quad (203)$$

$$Y'_{\dot{v}} = -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left[1 + 0.16 C_b \frac{B}{T} - 5.1 \left(\frac{B}{L}\right)^2\right] \quad (204)$$

$$Y'_{\dot{r}} = -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left[0.67 \frac{B}{L} - 0.0033 \left(\frac{B}{T}\right)^2\right] \quad (205)$$

$$N'_v = -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left[\frac{1}{2} + 2.4 \frac{T}{L}\right] \quad (206)$$

$$N'_r = -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left[\frac{1}{4} + 0.039 \frac{B}{T} - 0.56 \frac{B}{L}\right] \quad (207)$$

$$N'_{\dot{v}} = -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left[1.1 \frac{B}{L} - 0.041 \frac{B}{T}\right] \quad (208)$$

$$N'_{\dot{r}} = -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left[\frac{1}{12} + 0.017 C_b \frac{B}{T} - 0.33 \frac{B}{L}\right] \quad (209)$$

$$Y'_\delta = -\frac{3A_R}{L^2} \quad (210)$$

$$N'_\delta = -\frac{1}{2} Y'_\delta \quad (211)$$

Inoue:

$$Y'_v = -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left[1 + \frac{1.4}{\pi} C_b \frac{B}{T}\right] \quad (212)$$

$$Y'_r = \frac{1}{2} \pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \quad (213)$$

$$N'_v = -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \frac{2}{\pi} \quad (214)$$

$$N'_r = -\pi \left(\frac{T}{L}\right)^2 \left[\frac{1.04}{\pi} - \frac{4}{\pi} \frac{T}{L}\right] \quad (215)$$

Διαστατοποίηση:

$$Y_v = 0,5 \rho L^2 Y'_v \quad (243)$$

$$Y_{\dot{v}} = 0,5 \rho L^3 Y'_{\dot{v}} \quad (244)$$

$$Y_r = 0,5 \rho L^3 Y_r' \quad (245)$$

$$Y_{\dot{r}} = 0,5 \rho L^4 Y_{\dot{r}}' \quad (246)$$

$$N_v = 0,5 \rho L^3 N_v' \quad (247)$$

$$N_{\dot{v}} = 0,5 \rho L^4 N_{\dot{v}}' \quad (248)$$

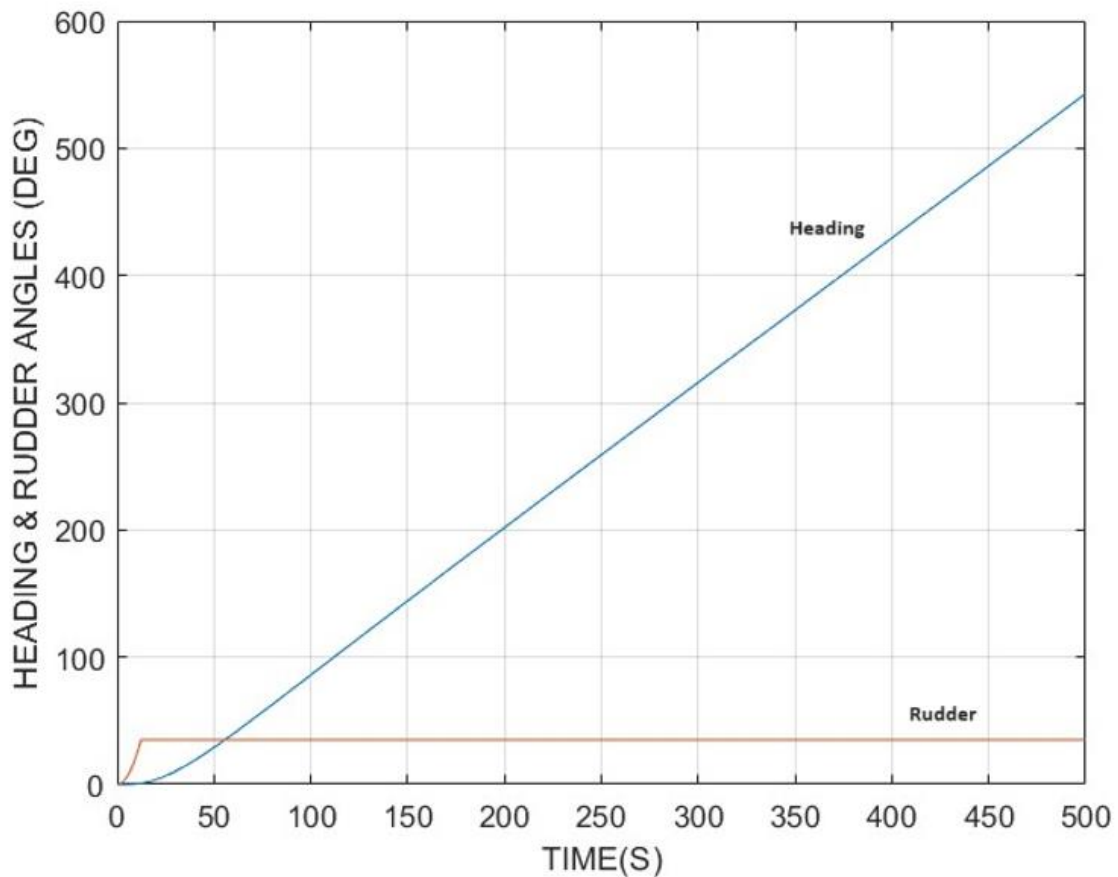
$$N_r = 0,5 \rho L^4 N_r' \quad (249)$$

$$N_{\dot{r}} = 0,5 \rho L^5 N_{\dot{r}}' \quad (250)$$

## II. Κύκλος στροφής

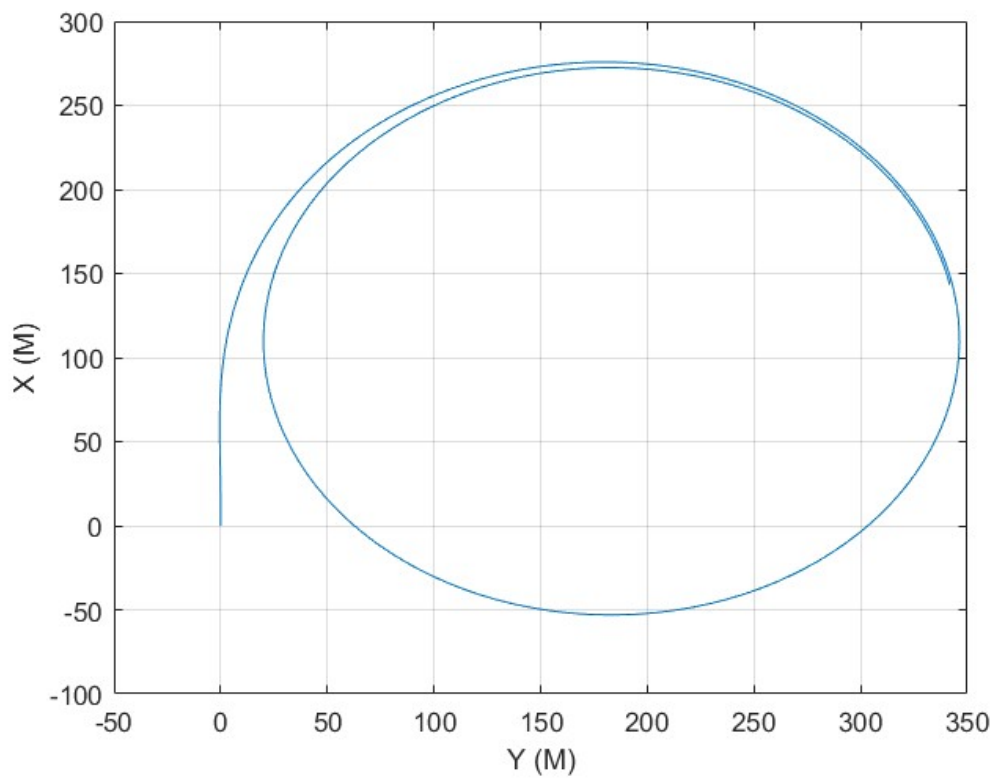
Αφού έγινε επαλήθευση των υδροδυναμικών παραγώγων, το σύνολο των δεδομένων ήταν έτοιμο να εισαχθεί στο προγραμματιστικό περιβάλλον. Πραγματοποιήθηκε κύκλος στροφής με γωνία 0,610865 ακτίνια (*rad*) ή 35° για διάφορες αρχικές συνθήκες ταχύτητας.

- Κύκλος στροφής με αρχική ταχύτητα 5 kn

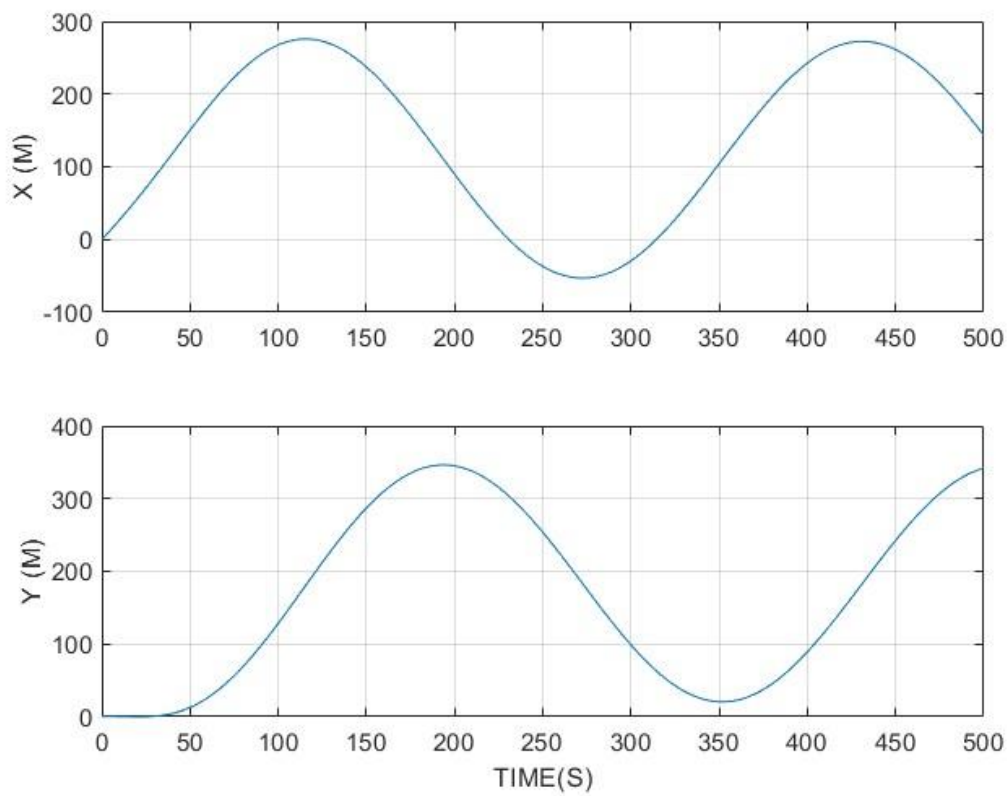


Διάγραμμα 2: Μεταβολή γωνιών πηδαλίου (*rudder*) και πορείας (*heading*)

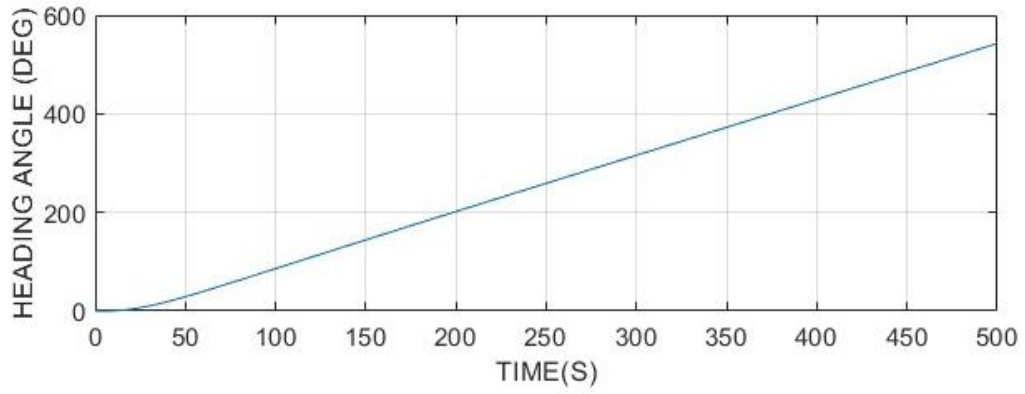




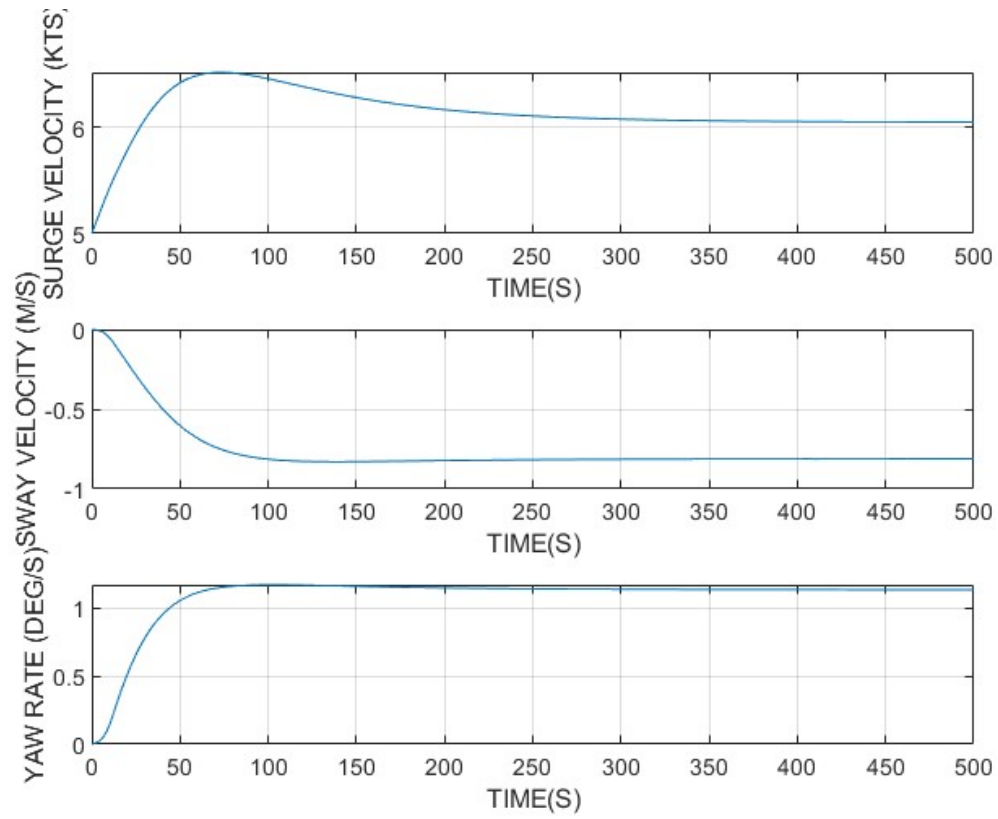
Διάγραμμα 3: Τροχιά κύκλου στροφής 5 kn



Διάγραμμα 4: Μετατόπιση στη διεύθυνση X (surge) και Y (sway)

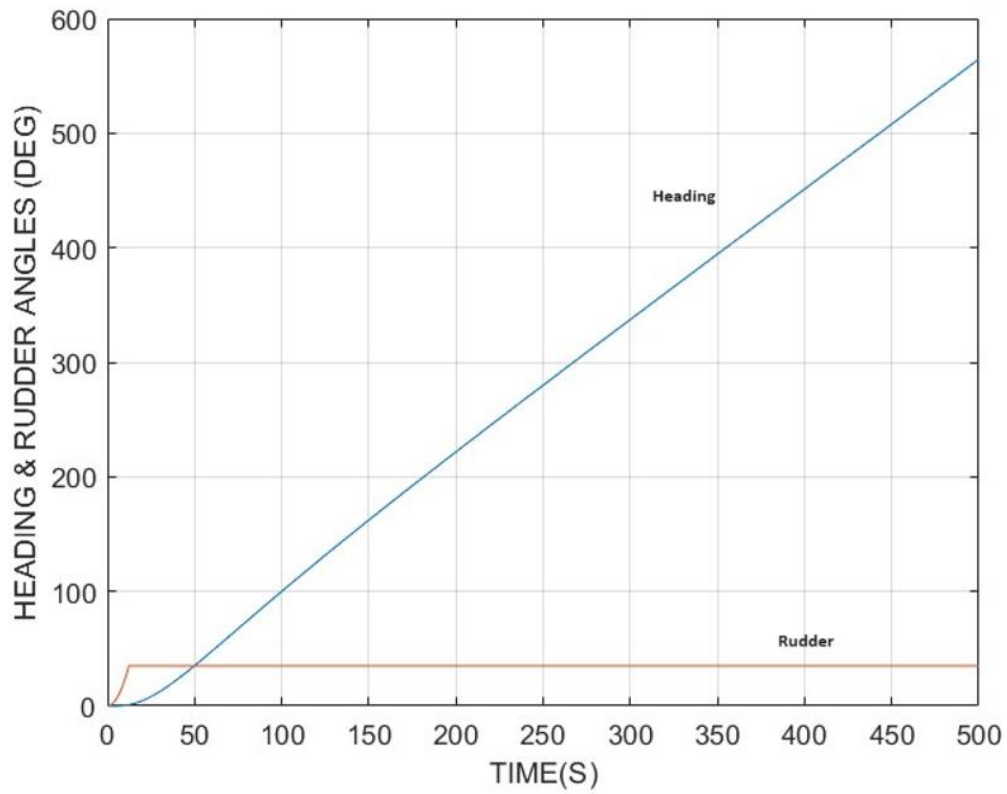


Διάγραμμα 5: Γωνία πορείας (heading)

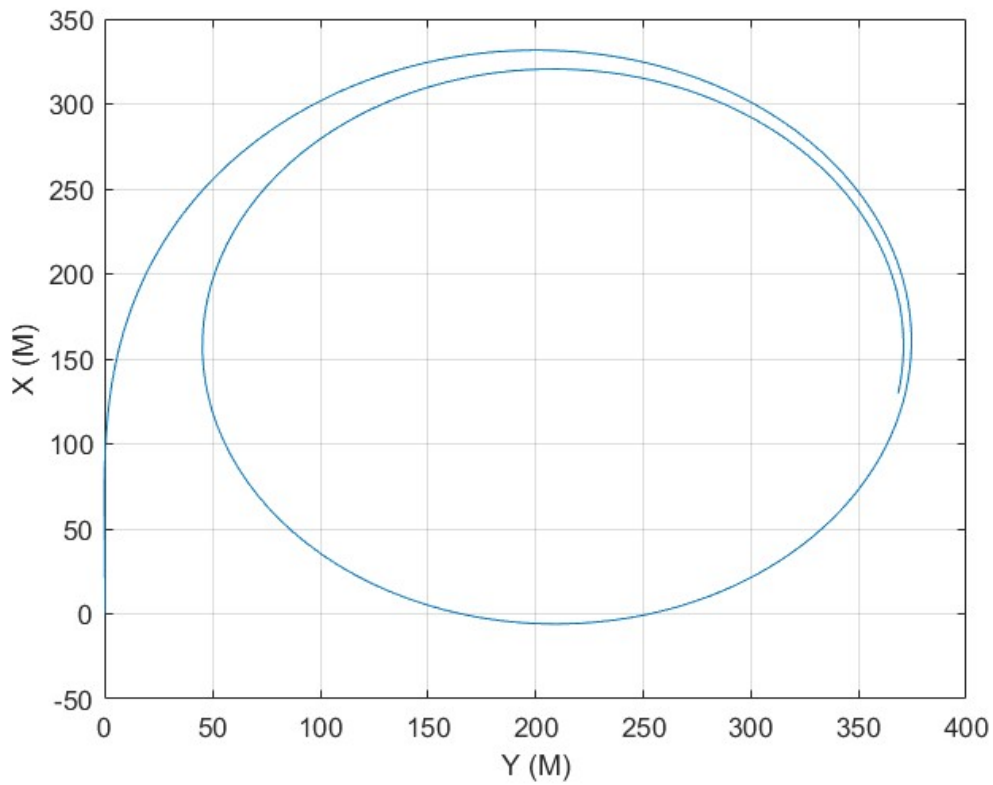


Διάγραμμα 6: Συνιστώσες ταχύτητας στην οριζόντια  $x$  (surge), εγκάρσια  $y$  (sway) διεύθυνση και ρυθμός περιστροφής περί τον κατακόρυφο άξονα  $z$  (yaw)

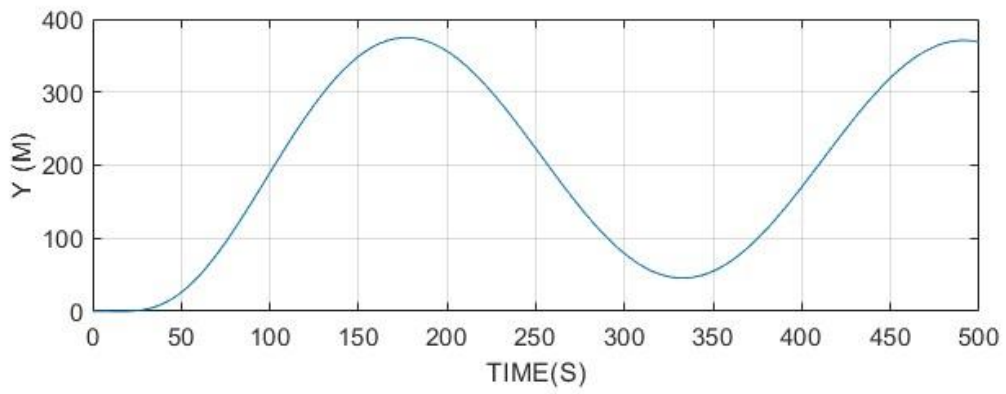
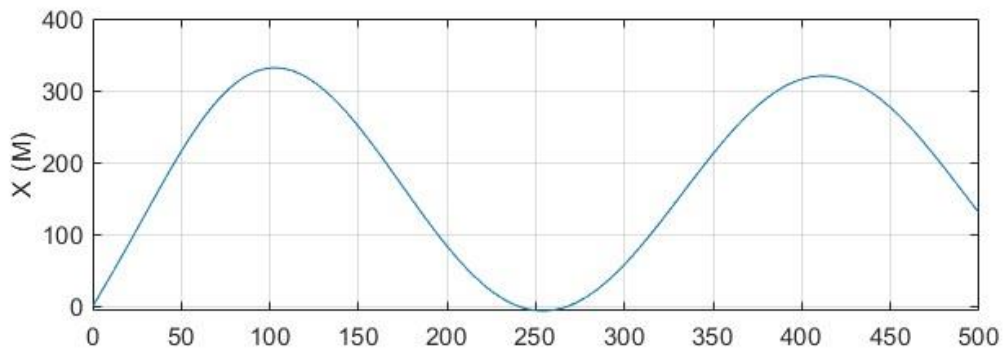
- Κύκλος στροφής με αρχική ταχύτητα 8 kn



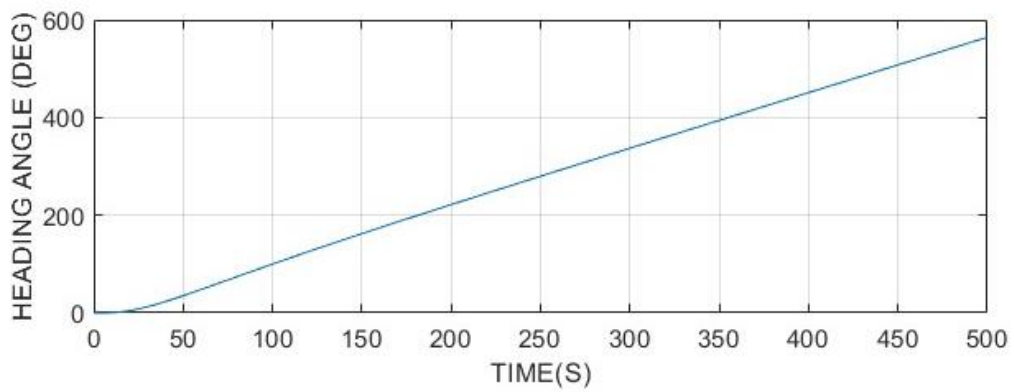
Διάγραμμα 7: Μεταβολή γωνιών πηδαλίου (rudder) και πορείας (heading)



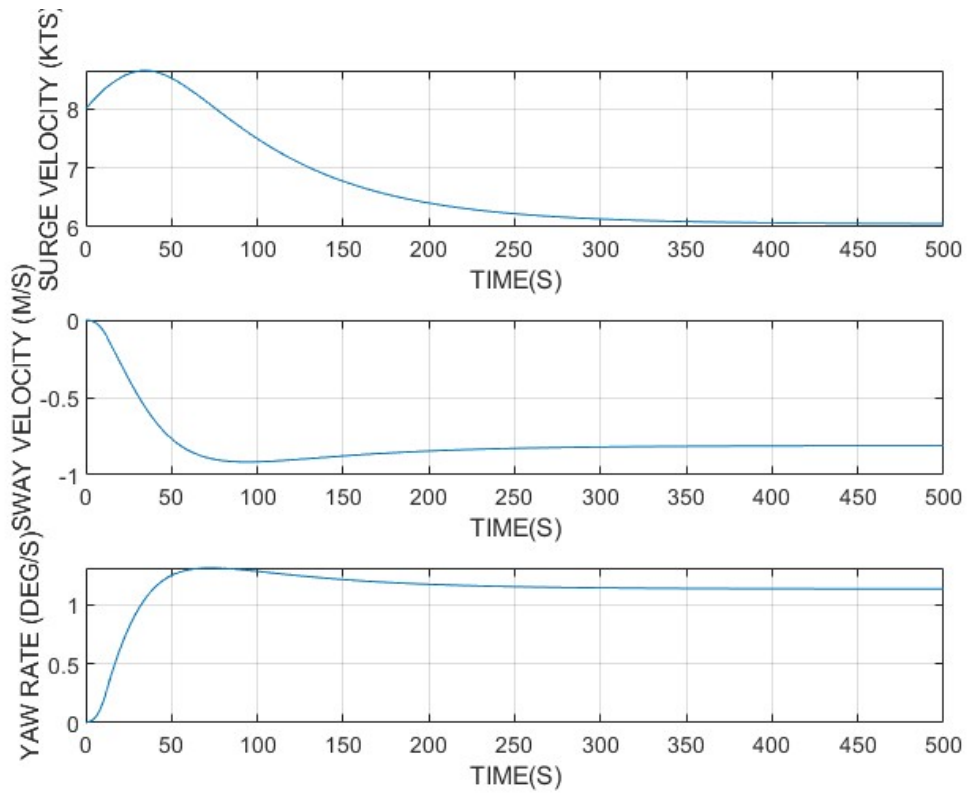
Διάγραμμα 8: Τροχιά κύκλου στροφής 8 kn



Διάγραμμα 9: Μετατόπιση στη διεύθυνση X (surge) και Y (sway)

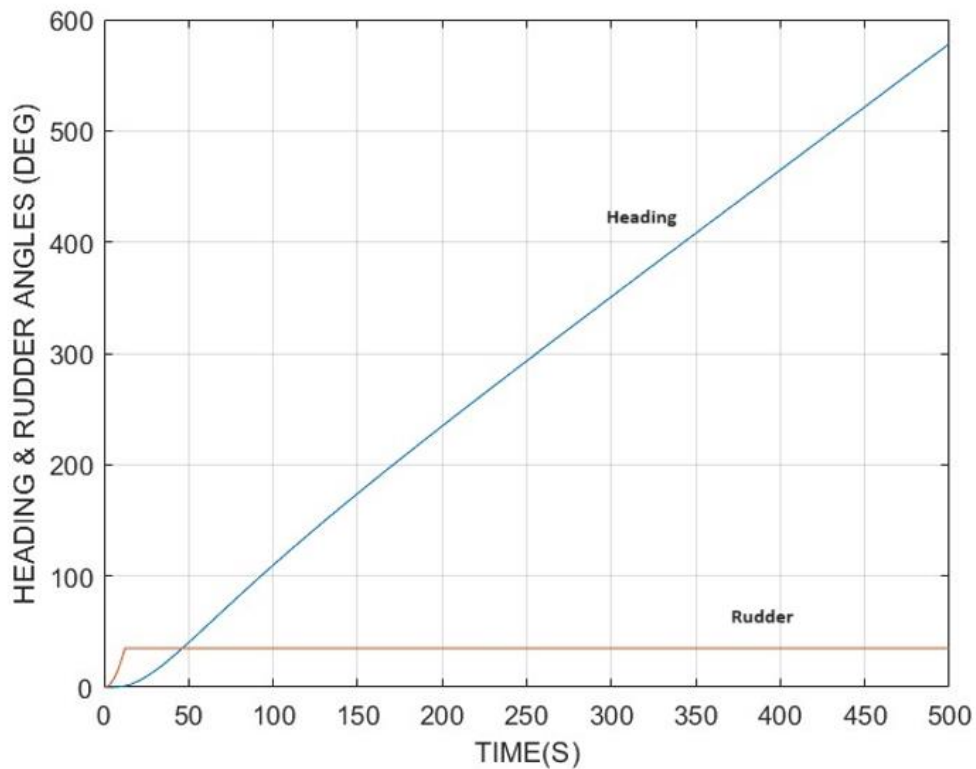


Διάγραμμα 10: Γωνία πορείας (heading)

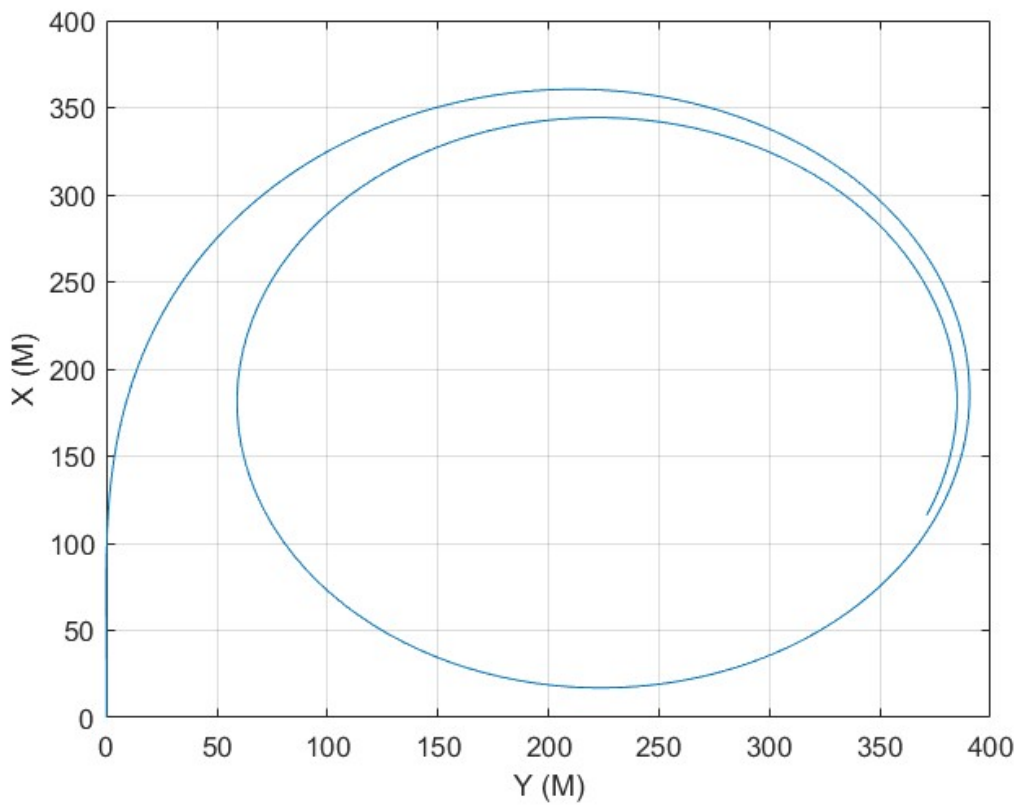


Διάγραμμα 11: Συνιστώσες ταχύτητας στην οριζόντια  $x$  (surge), εγκάρσια  $y$  (sway) διεύθυνση και ρυθμός περιστροφής περί τον κατακόρυφο άξονα  $z$  (yaw)

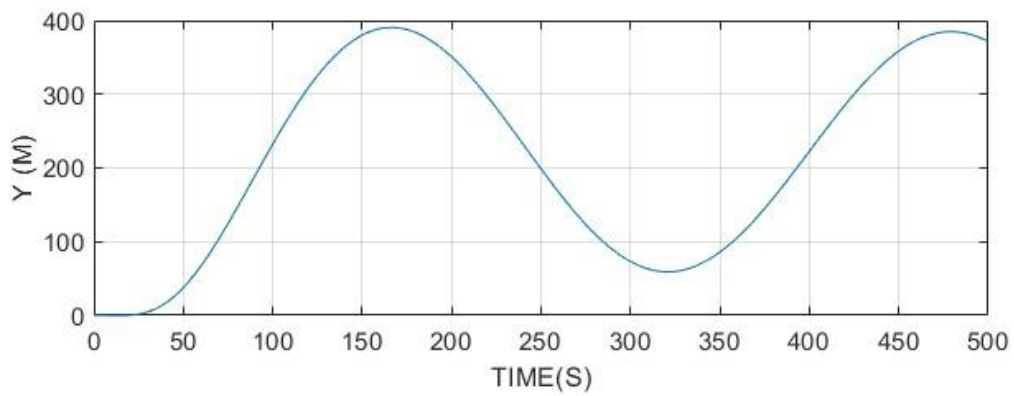
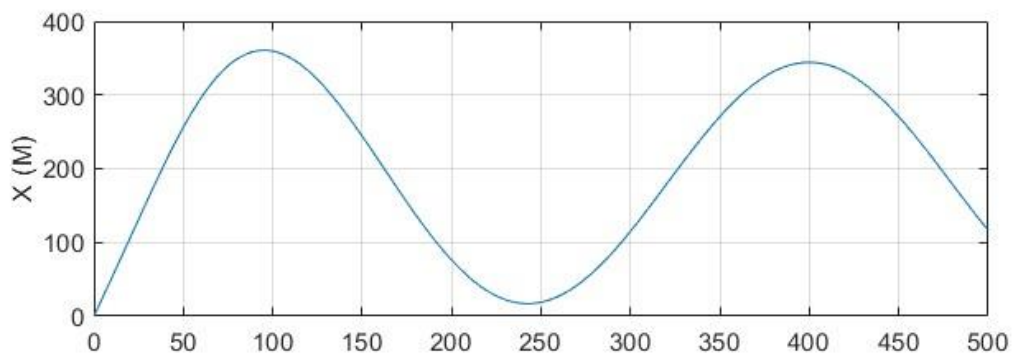
- ο Κύκλος στροφής με αρχική ταχύτητα 10 kn



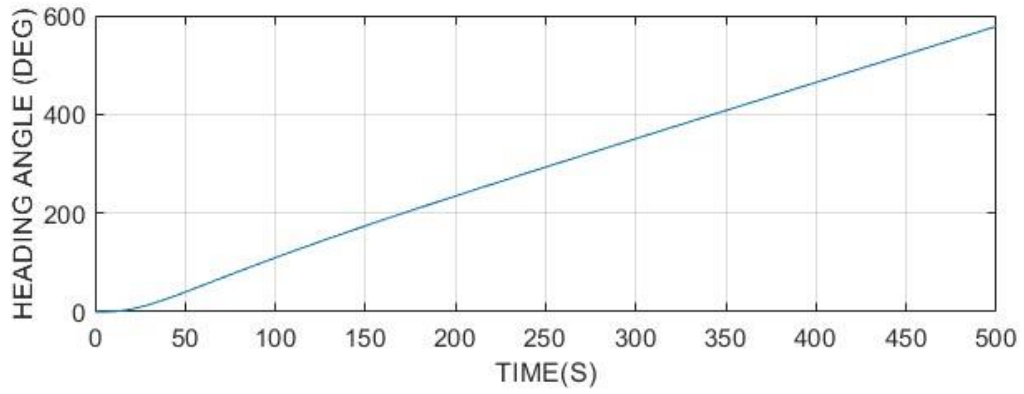
Διάγραμμα 12: Μεταβολή γωνιών πηδαλίου (rudder) και πορείας (heading)



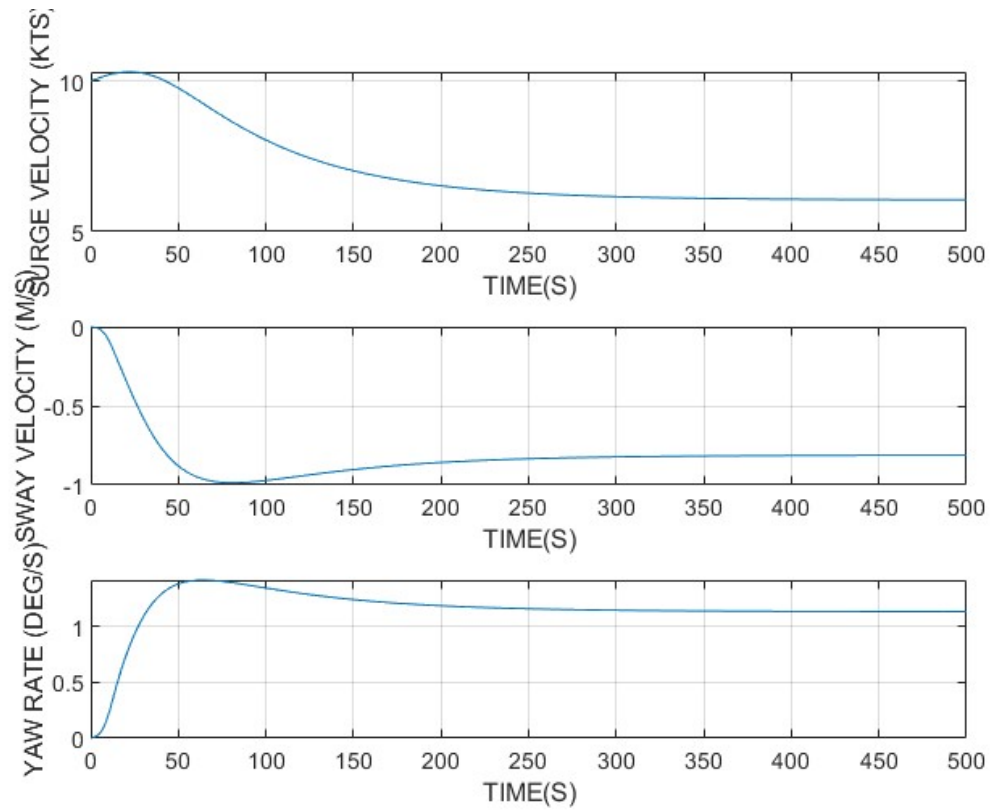
Διάγραμμα 13: Κύκλος στροφής 10 kn



Διάγραμμα 14: Μετατόπιση στη διεύθυνση X (surge) και Y (sway)

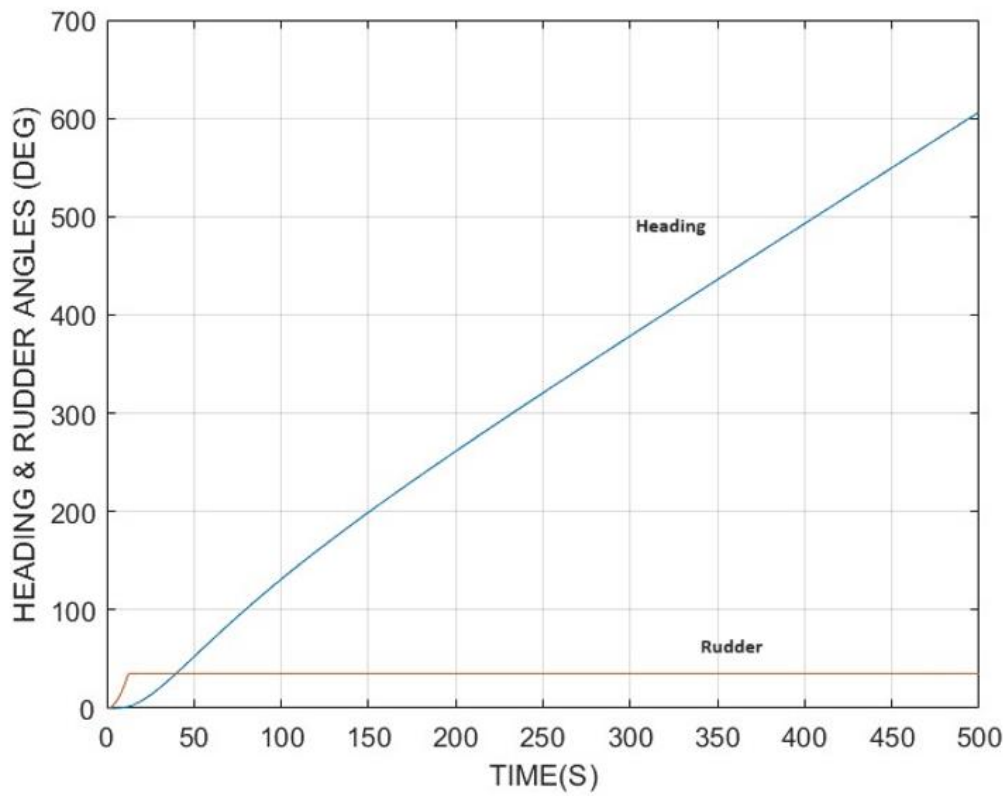


Διάγραμμα 15: Γωνία πορείας (heading)

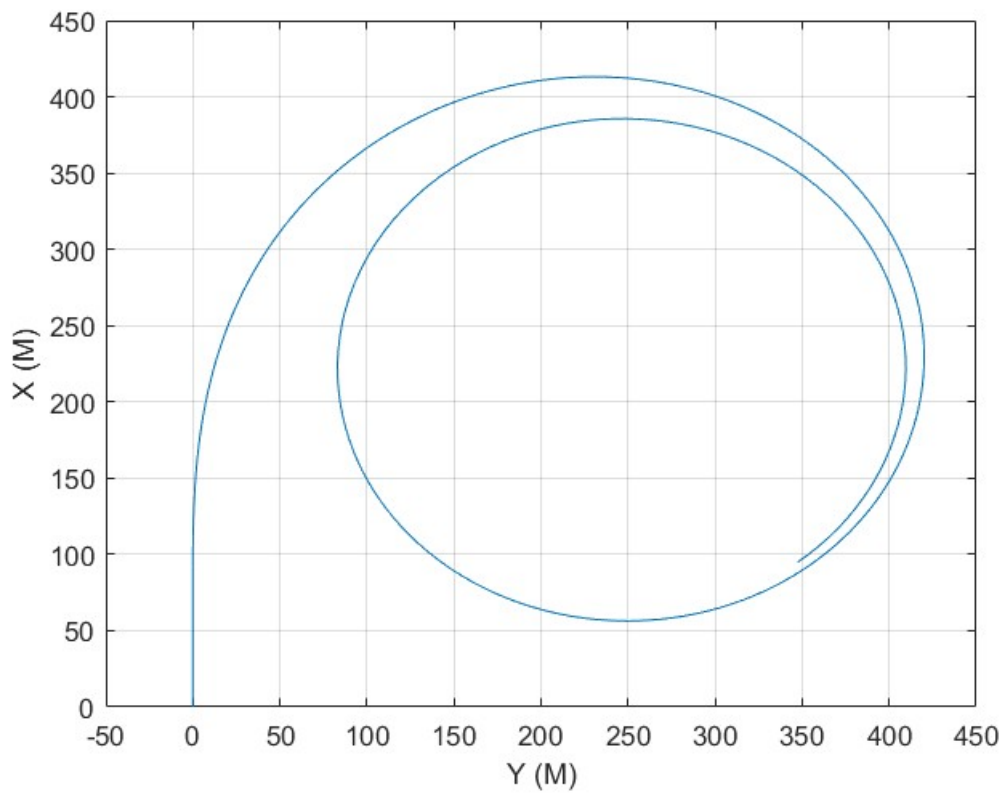


Διάγραμμα 16: Συνιστώσες ταχύτητας στην οριζόντια x (surge), εγκάρσια y (sway) διεύθυνση και ρυθμός περιστροφής περί τον κατακόρυφο άξονα z (yaw)

- Κύκλος στροφής με αρχική ταχύτητα 14,7 kn

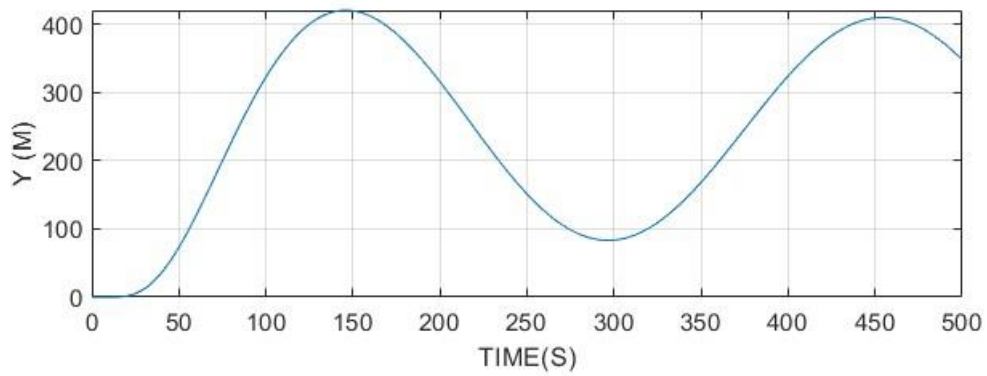
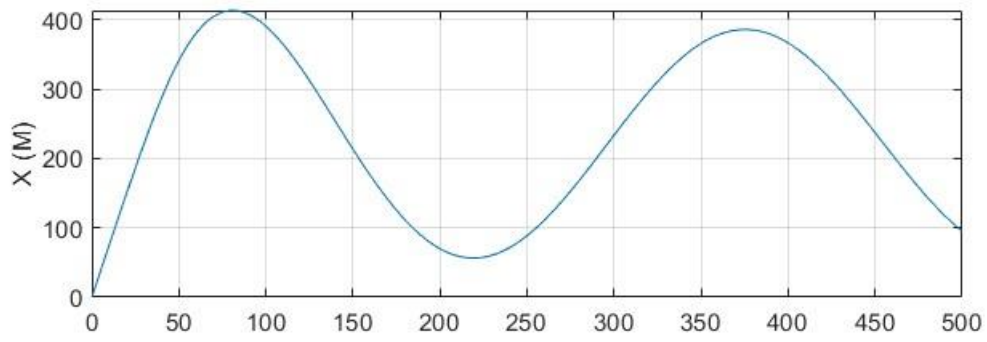


Διάγραμμα 17: Μεταβολή γωνιών ηδαλίου (rudder) και πορείας (heading)

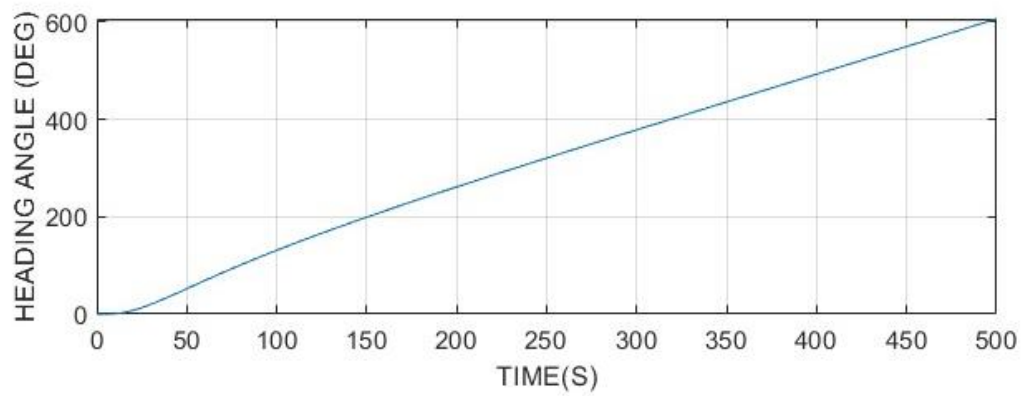


Διάγραμμα 18: Κύκλος στροφής 14,7 kn

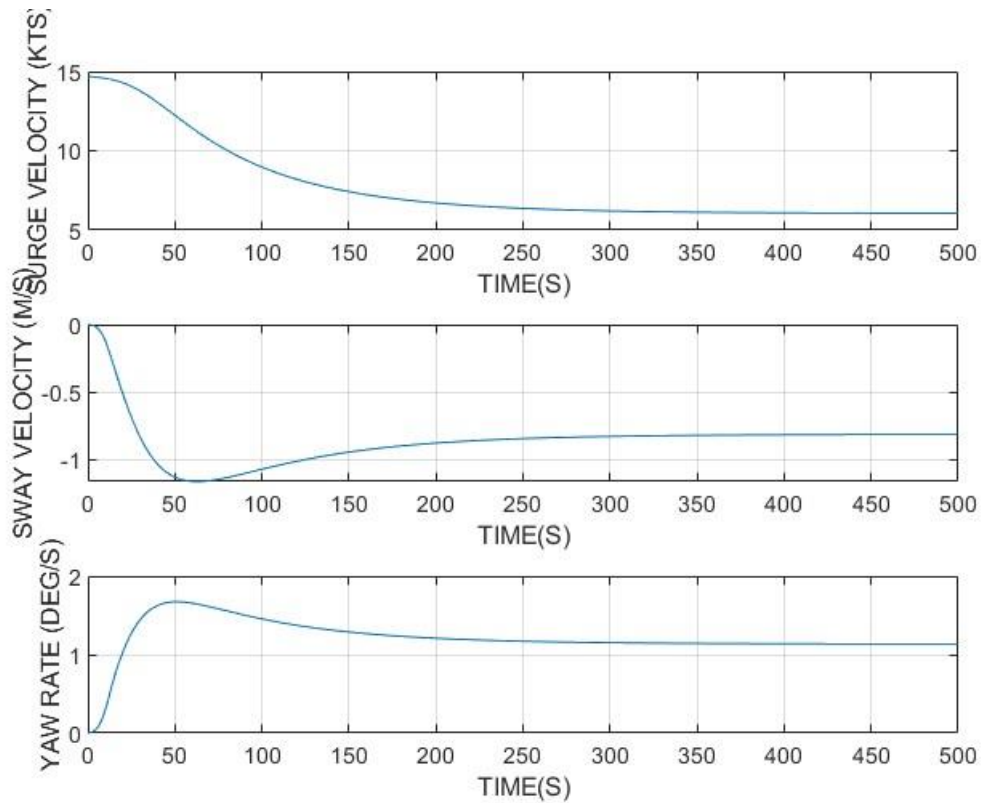




Διάγραμμα 19: Μετατόπιση στη διεύθυνση X (surge) και Y (sway)

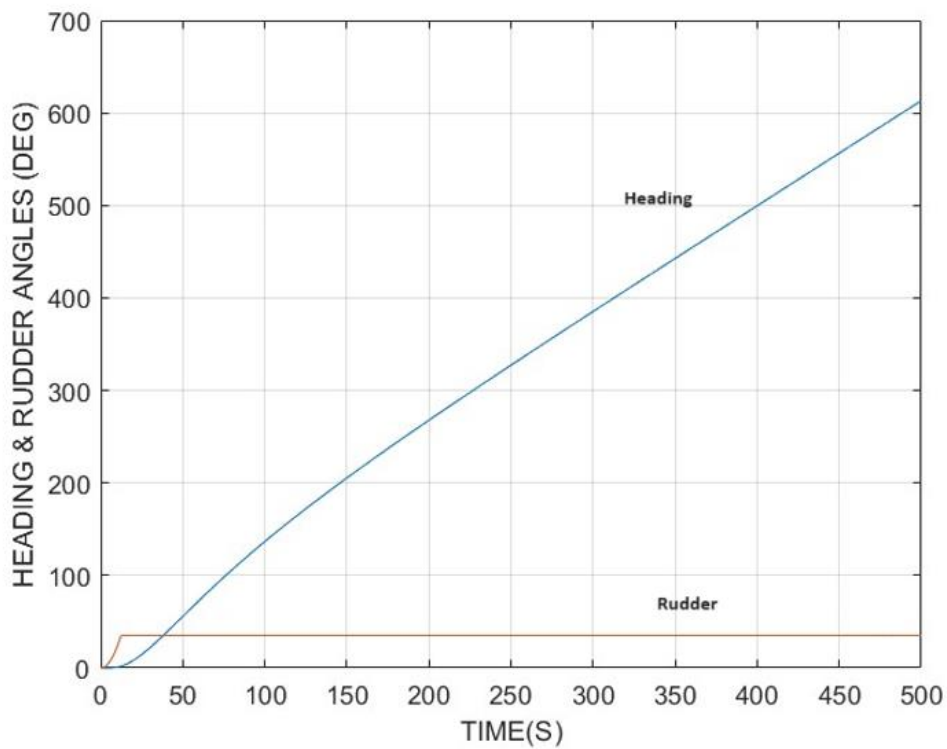


Διάγραμμα 20: Γωνία πορείας (heading)

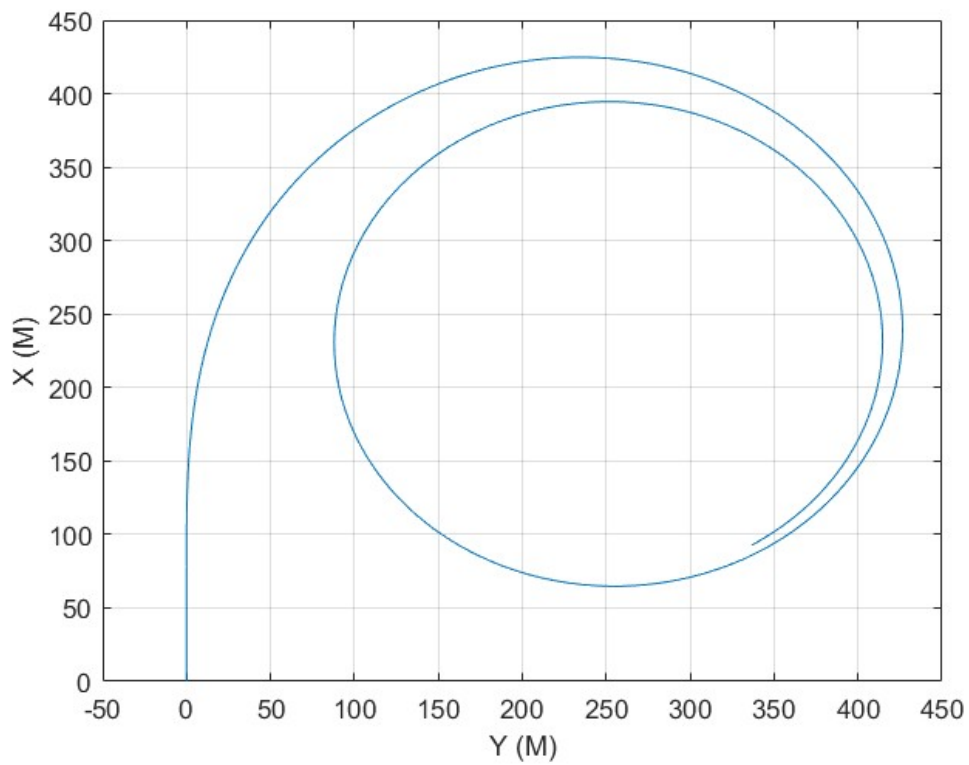


Διάγραμμα 21: Συνιστώσες ταχύτητας στην οριζόντια  $x$  (surge), εγκάρσια  $y$  (sway) διεύθυνση και ρυθμός περιστροφής περί τον κατακόρυφο άξονα  $z$  (yaw)

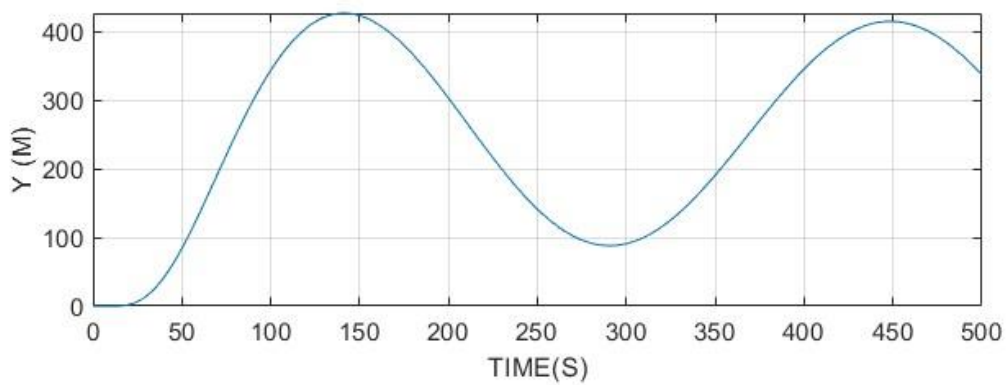
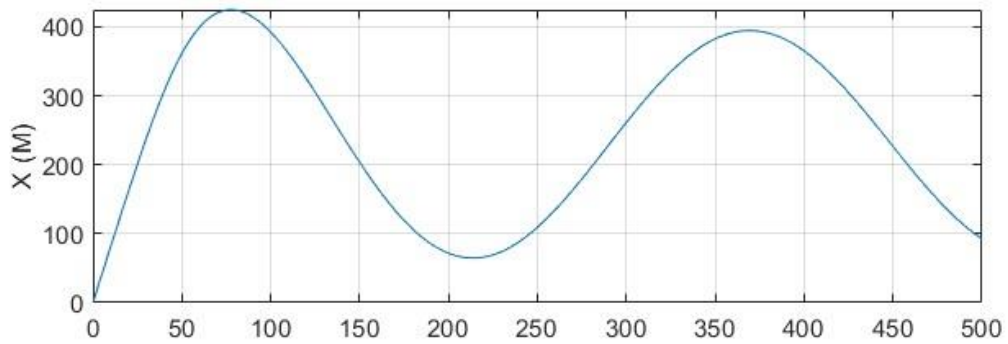
- ο Κύκλος στροφής με αρχική ταχύτητα 16 kn



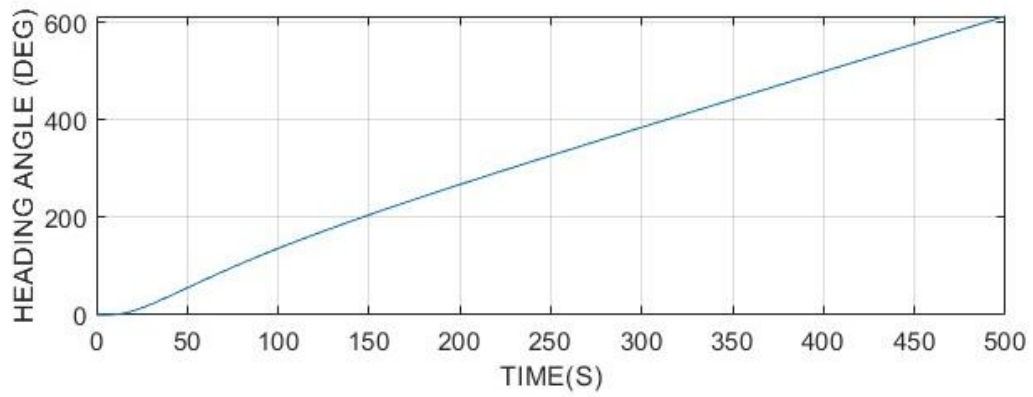
Διάγραμμα 22: Μεταβολή γωνιών ηδάλιου (rudder) και πορείας (heading)



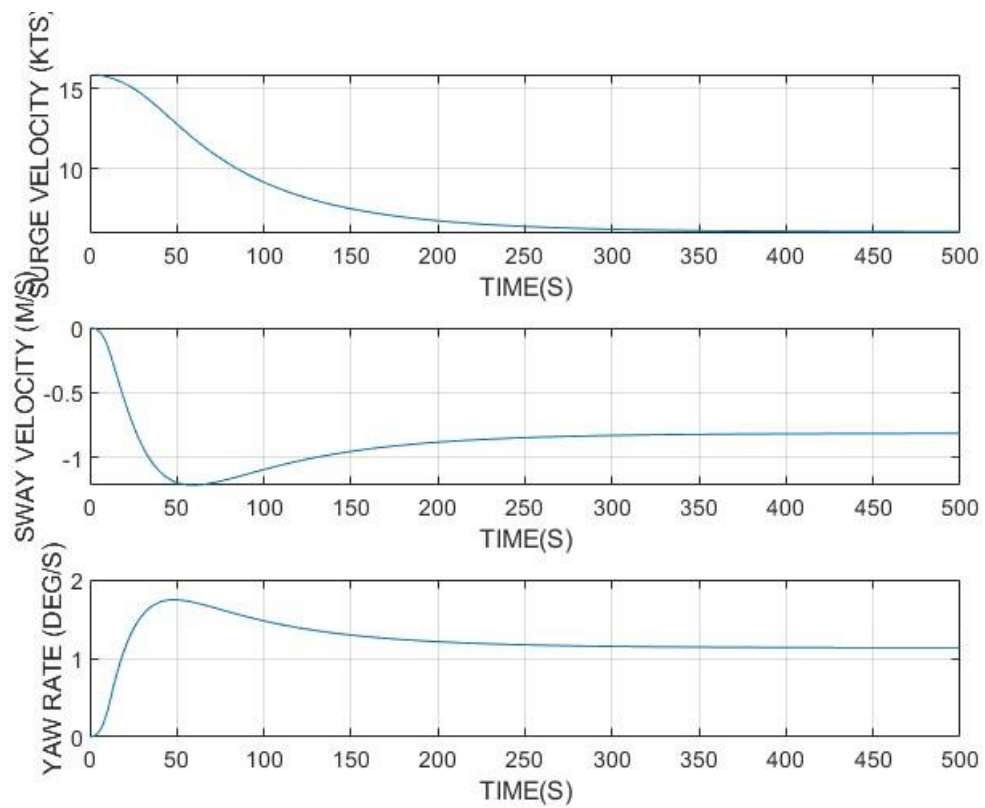
Διάγραμμα 23: Κύκλος στροφής 16 kn



Διάγραμμα 24: Μετατόπιση στη διεύθυνση X (surge) και Y (sway)



Διάγραμμα 25: Γωνία περί τον άξονα x (roll) και γωνία πορείας (heading)

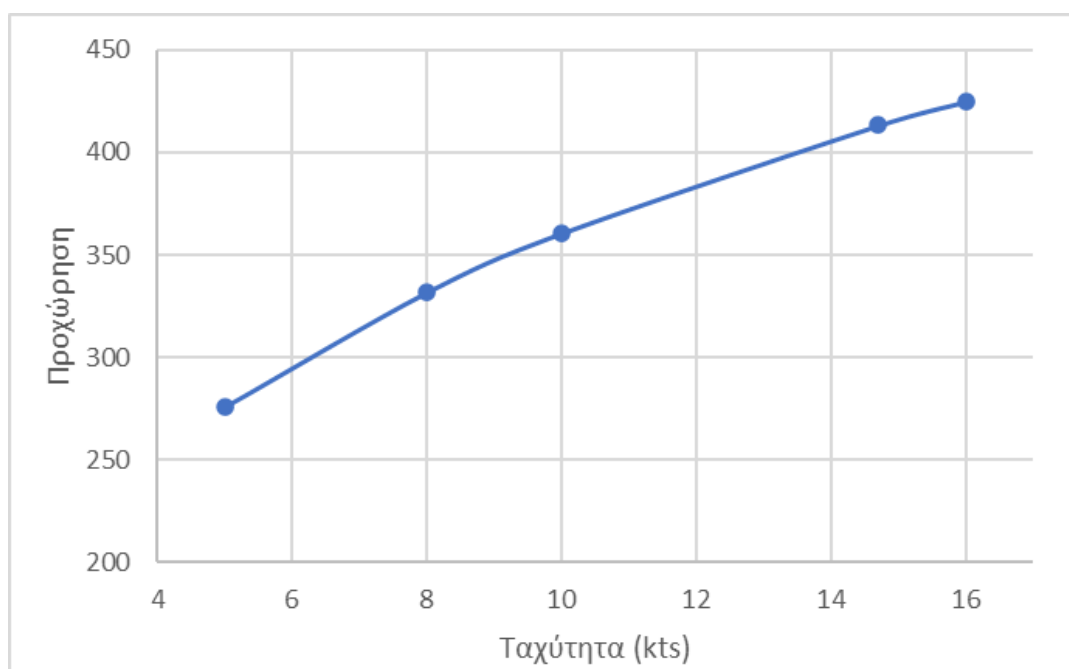


Διάγραμμα 26: Συνιστώσες ταχύτητας στην οριζόντια x (surge), εγκάρσια y (sway) διεύθυνση και ρυθμός περιστροφής περί τον κατακόρυφο άξονα z (yaw)

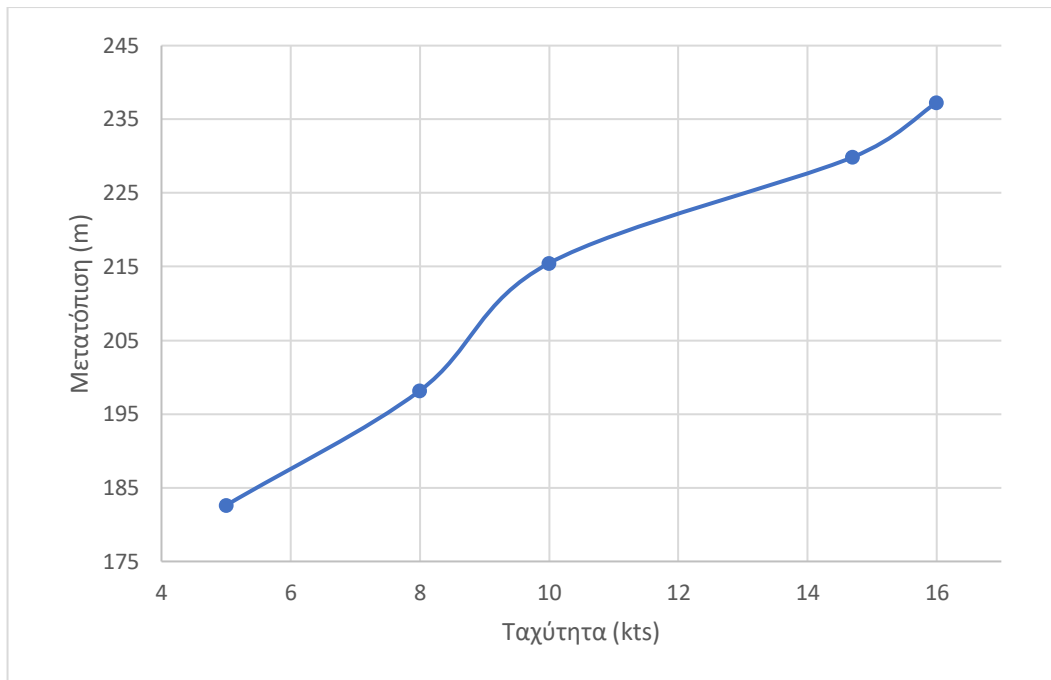
Από τα διαγράμματα της τροχιάς του κύκλου στροφής για κάθε ταχύτητα, αντλήθηκαν οι τιμές της προχώρησης, μετατόπισης και τακτικής διαμέτρου, όπως ορίζει η θεωρία στο Κεφάλαιο 5.3. Με βάση τα κριτήρια του *IMO MSC.137(76)*, η προχώρηση έχει ανώτατο όριο τα  $4,5L$  m και η τακτική διάμετρος τα  $5,0L$  m. Επομένως, οι αντίστοιχες τιμές για το συγκεκριμένο πλοίο δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερες από τις ακόλουθες τιμές: α) προχώρηση =  $541,8$  m β) τακτική διάμετρος =  $602$  m. Οι τιμές που υπολογίστηκαν από τις προσομοιώσεις φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα και στα αντίστοιχα διαγράμματα.

Πίνακας 15: Προχώρηση, μετατόπιση, τακτική διάμετρος για ταχύτητες εκτέλεσης κύκλου στροφής.

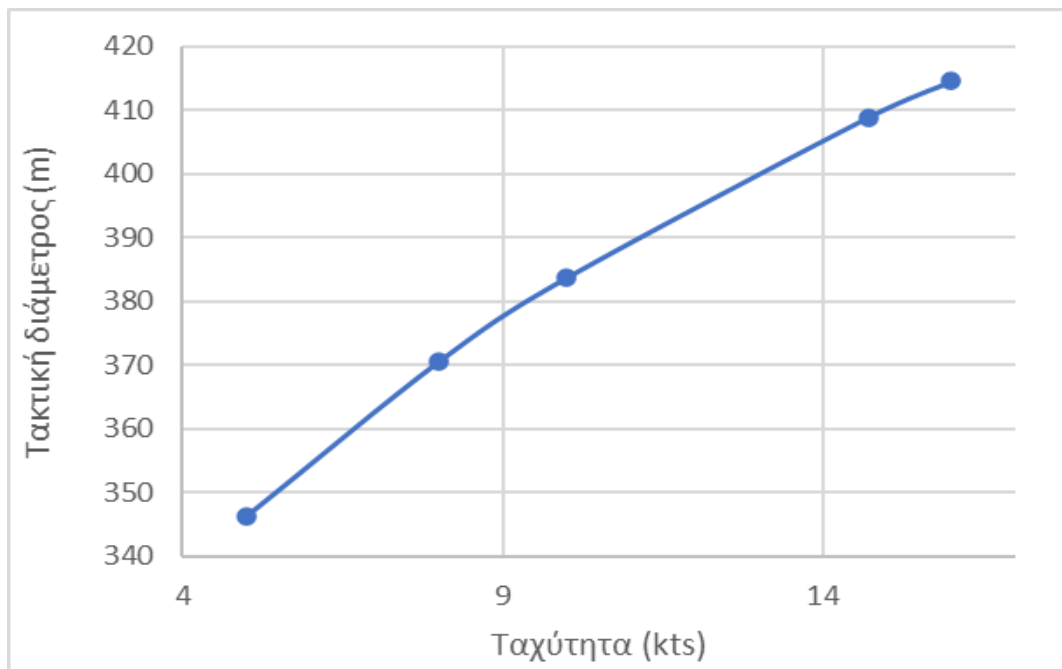
$U(kn)$	Προχώρηση (m)	Μετατόπιση (m)	Τακτική Διάμετρος (m)	Κριτήρια IMO
5	275,741	182,612	346.283	<b>OK</b>
8	331,615	198,177	370.573	<b>OK</b>
10	360,503	215,472	383.757	<b>OK</b>
14,7	413,138	229,863	408.951	<b>OK</b>
16	424,784	237,277	414.626	<b>OK</b>



Διάγραμμα 27: Προχώρηση κύκλου στροφής συναρτήσει ταχύτητας



Διάγραμμα 28: Μετατόπιση κύκλου στροφής συναρτήσει ταχύτητας

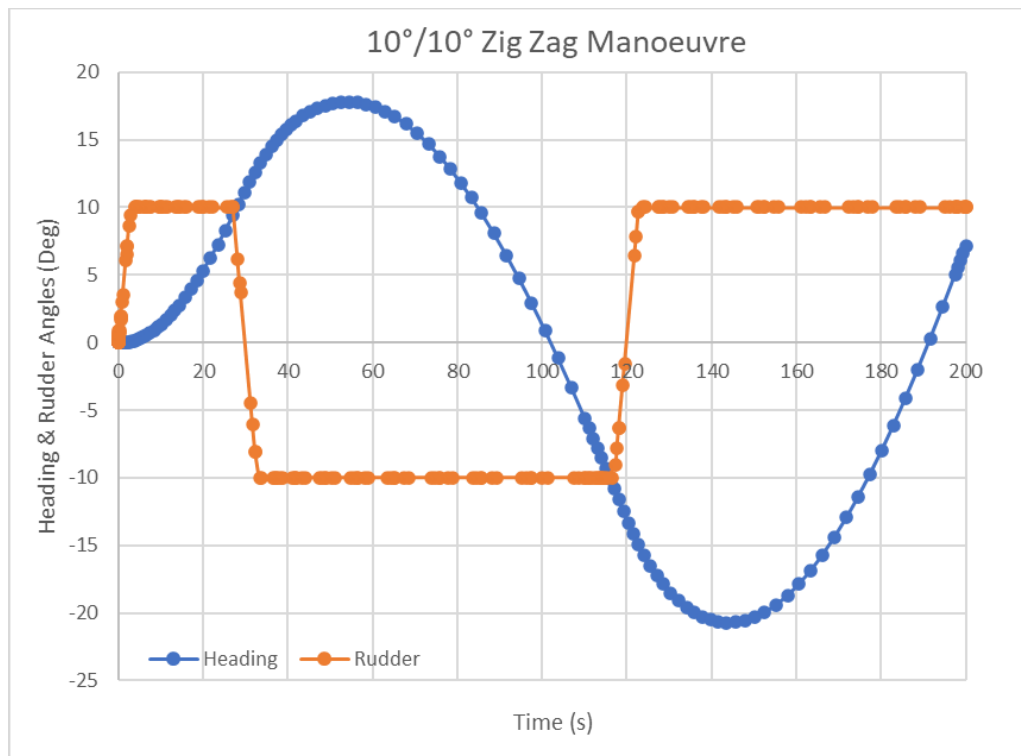


Διάγραμμα 29: Τακτική διάμετρος κύκλου στροφής συναρτήσει ταχύτητας

Συνεπώς, το συγκεκριμένο πλοίο ικανοποιεί τα κριτήρια κύκλου στροφής του *IMO MSC.137(76)*.

### III. Οφιοειδής ελιγμός

- 10°/10° Zig Zag Manoeuvre



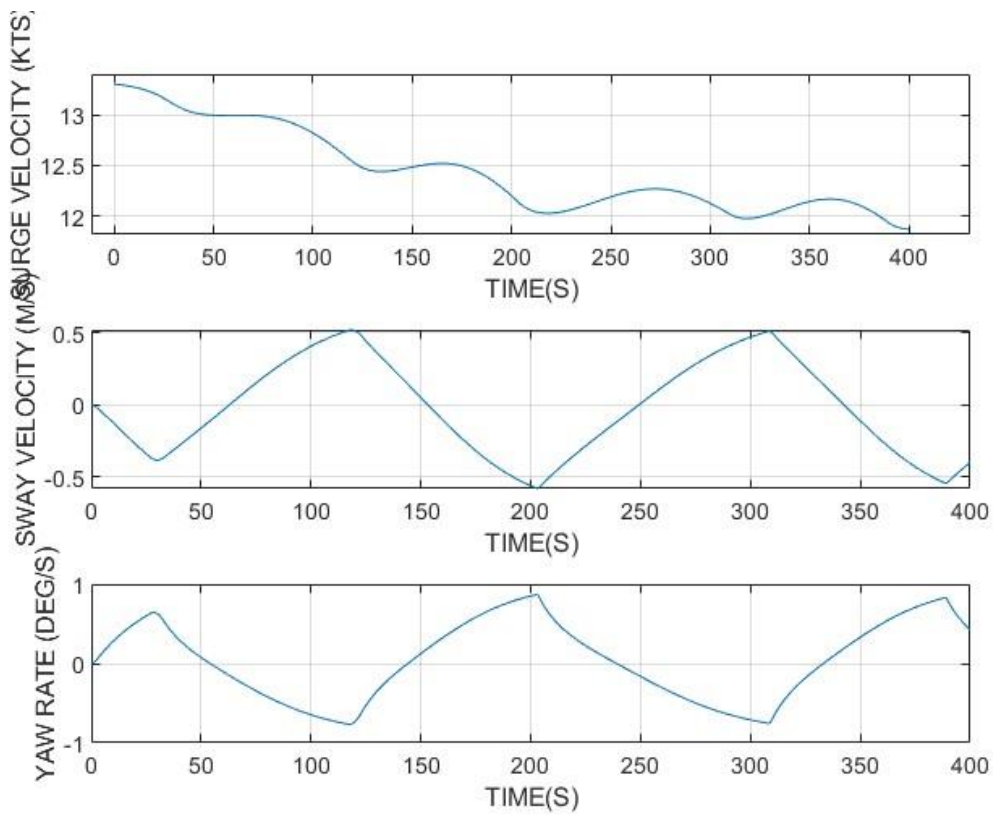
Διάγραμμα 30: Γωνίες πορείας και πηδαλίου συναρτήσει του χρόνου οφιοειδή ελιγμού 10/10

Με βάση τα κριτήρια του *IMO MSC.137(76)*, η 1<sup>η</sup> και 2<sup>η</sup> γωνία υπέρβασης για το συγκεκριμένο πλοίο με λόγο  $L/V = 17,598$  s, δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερες από τις ακόλουθες τιμές: α) 1<sup>η</sup> γωνία υπέρβασης =  $5 + \frac{1}{2}(L/V) = 13,8^\circ$  β) 2<sup>η</sup> γωνία υπέρβασης =  $17,5 + 0,75(L/V) = 30,7^\circ$ .

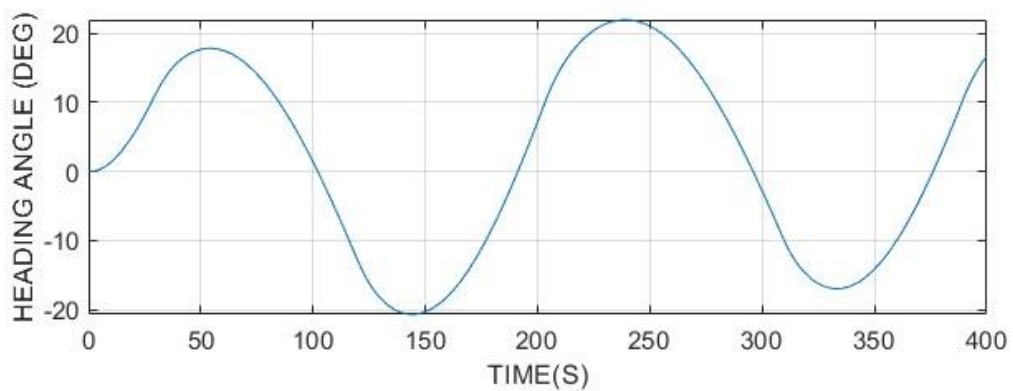
Πίνακας 16: Γωνίες υπέρβασης ελιγμού ζιγκ ζαγκ 10/10

	Γωνία (deg)	Κριτήρια IMO
<b>1<sup>η</sup> Γωνία Υπέρβασης</b>	7,808	<b>OK</b>
<b>2<sup>η</sup> Γωνία Υπέρβασης</b>	10,707	<b>OK</b>

Οι γωνίες υπέρβασης μετρήθηκαν από τα διαγράμματα γωνιών πορείας συναρτήσει του χρόνου. Συγκεκριμένα, αφαιρείται από τη μέγιστη γωνία πορείας η γωνία πηδαλίου του ελιγμού (10 deg), ενώ αντίστοιχα το ίδιο συμβαίνει για την ελάχιστη σε απόλυτη τιμή. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η μέγιστη γωνία πορείας ήταν  $17,808$  deg και η αντίστοιχη  $20,7072$  deg από την άλλη πλευρά εκτροπής του πηδαλίου.

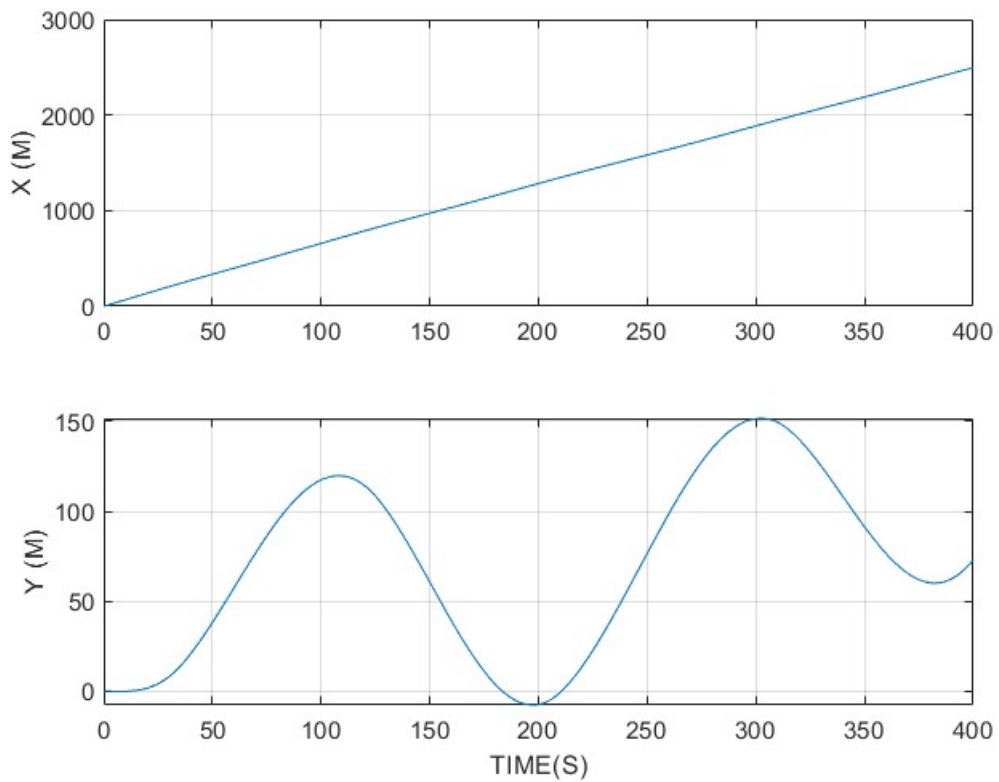


Διάγραμμα 31: Συνιστώσες ταχύτητας στην οριζόντια  $x$  (surge), εγκάρσια  $y$  (sway) διεύθυνση και ρυθμός περιστροφής περί τον κατακόρυφο άξονα  $z$  (yaw)



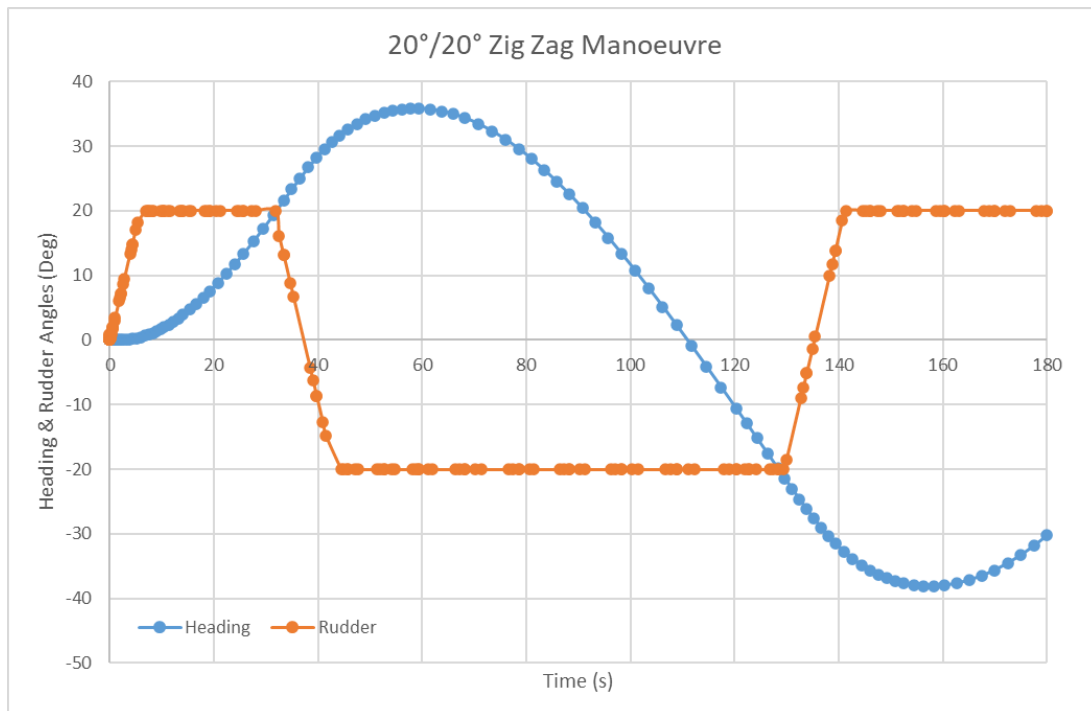
Διάγραμμα 32: Γωνία περί τον άξονα  $x$  (roll) και γωνία πορείας (heading)





Διάγραμμα 33: Μετατόπιση στη διεύθυνση X (surge) και Y (sway)

ο 20°/20° Zig Zag Manoeuvre



Διάγραμμα 34: Γωνίες πορείας και πηδαλίου συναρτήσει του χρόνου οφιοειδή ελιγμού 20/20

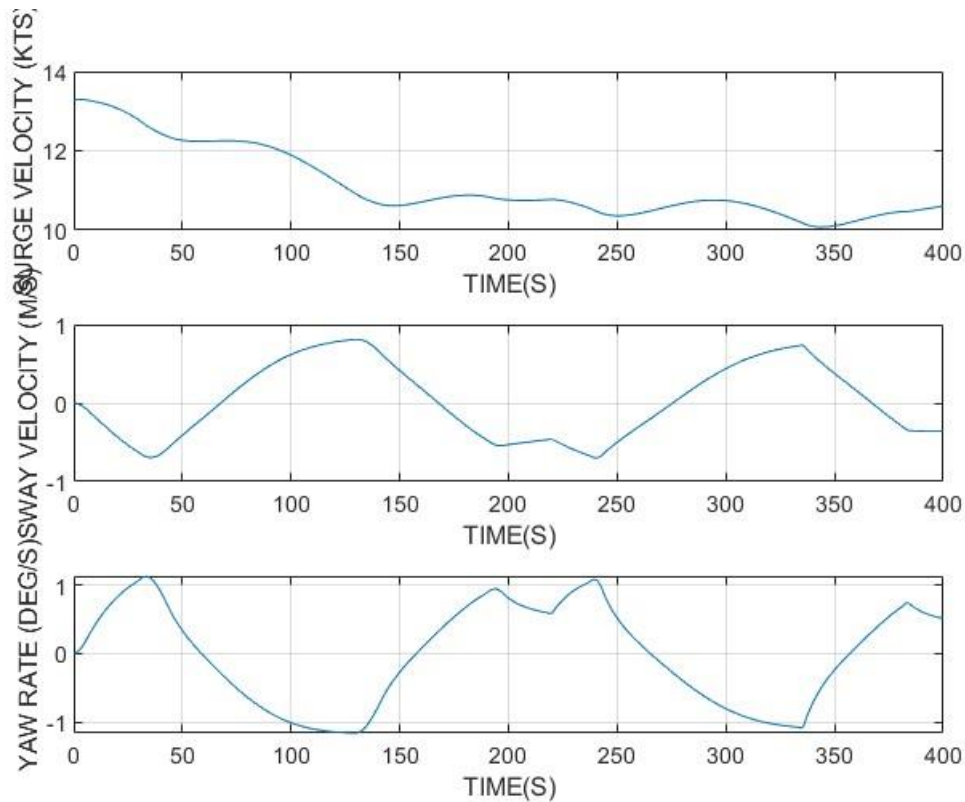
Σύμφωνα με τα κριτήρια του *IMO MSC.137(76)*, η 1<sup>η</sup> γωνία υπέρβασης δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη των 25°.

Πίνακας 17: Γωνίες υπέρβασης ελιγμού ζιγκ ζαγκ 20/20

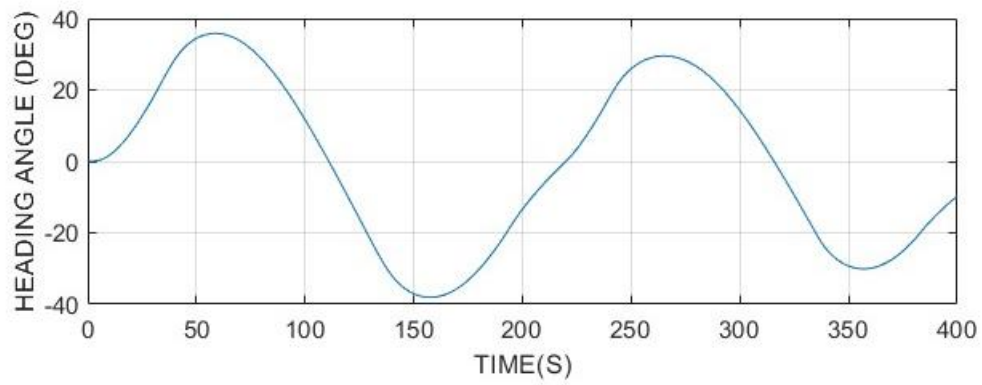
	Γωνία (deg)	Κριτήρια IMO
<b>1<sup>η</sup> Γωνία Υπέρβασης</b>	15,822	<b>OK</b>
<b>2<sup>η</sup> Γωνία Υπέρβασης</b>	18,058	-

Μέγιστη και ελάχιστη γωνία πορείας 35,822 deg και -38,058 deg.

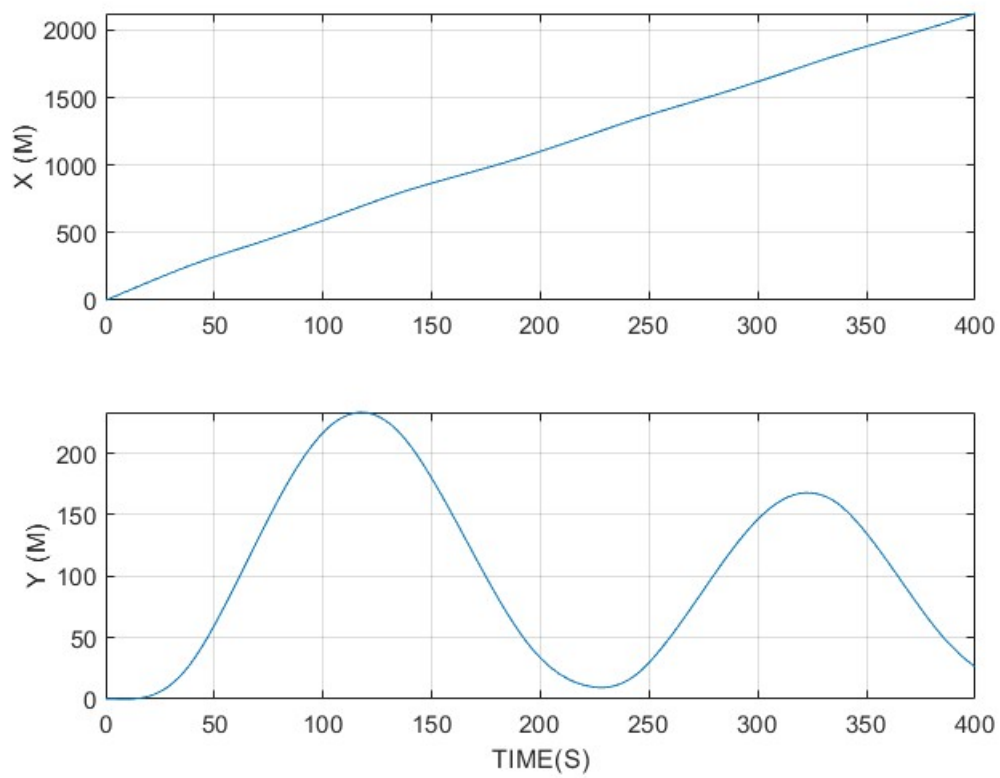
Επομένως, το συγκεκριμένο πλοίο ικανοποιεί τα κριτήρια των γωνιών υπέρβασης του *IMO MSC.137(76)* για του ελιγμούς 10°/10° και 20°/20° zig-zag.



Διάγραμμα 35: Συνιστώσες ταχύτητας στην οριζόντια x (surge), εγκάρσια y (sway) διεύθυνση και ρυθμός περιστροφής περί τον κατακόρυφο άξονα z (yaw)



Διάγραμμα 36: Γωνία περί τον άξονα x (roll) και γωνία πορείας (heading)



Διάγραμμα 37: Μετατόπιση στη διεύθυνση X (surge) και Y (sway)

## 9. Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφιερώθηκε στη θεωρία της ελκτικότητας και του γνωστικού αντικειμένου στο οποίο εμπεριέχεται. Μέσω αυτής παρουσιάστηκαν οι διαφορετικές προσεγγίσεις για τον υπολογισμό των υδροδυναμικών παραγόντων. Ακόμα, επαληθεύτηκαν οι τιμές των υδροδυναμικών παραγώγων του χημικού δεξαμενοπλοίου με εμπειρικές σχέσεις του θεωρητικού υποβάθρου. Στην συνέχεια, παρουσιάστηκε το μη γραμμικό μοντέλο των εξισώσεων κίνησης του πλοίου σε τρεις βαθμούς ελευθερίας (3-DOF), μελετώντας τις κινήσεις κατά το διάμηκες (*surge*), το εγκάρσιο (*sway*) και τη στροφική κίνηση (*yaw*). Χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού και το περιβάλλον *Matlab* για την εφαρμογή και επίλυση του μοντέλου. Η υπολογιστική μοντελοποίηση κατέληξε στην πραγματοποίηση προσομοιώσεων και αποτύπωση της ελκτικότητας του δεδομένου πλοίου, μέσω της εξαγωγής διαγραμμάτων για τους ελιγμούς των προσομοιώσεων.

Συγκεκριμένα, προσομοιώθηκε ο κύκλος στροφής για έξι διαφορετικές τιμές ταχύτητας ως αρχική συνθήκη. Εξάχθηκαν διαγράμματα, των οποίων τα περιεχόμενα μελετήθηκαν και μετρήθηκαν οι τιμές της προχώρησης (*advance*), μετατόπισης-μεταφοράς (*transfer*) και τακτικής διαμέτρου (*tactical diameter*) στο γράφημα της τροχιάς του κύκλου στροφής. Οι τιμές συγκρίθηκαν και αποτυπώθηκαν σε διάγραμμα συναρτήσεων των τιμών ταχυτήτων. Φάνηκε πως όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα, τόσο αυξάνονται οι προαναφερόμενες τιμές. Ένα πλοίο με μεγαλύτερη πρόσω ταχύτητα χρειάζεται μεγαλύτερη απόσταση ως ότου καταφέρει να βρεθεί σε 90° (μοίρες) από την αρχική του κατεύθυνση (προχώρηση) και αυτό συμβαίνει με μεγαλύτερη μετατόπιση. Όπως ήταν αναμενόμενο, επιβεβαιώθηκε η αντίστοιχη θεωρία, αφού το πλοίο σημειώνει μεγαλύτερη διάμετρο περιστροφής για μεγαλύτερη ταχύτητα. Οι προχωρήσεις έχουν αποδεκτές τιμές, αφού δεν υπερβαίνουν το όριο των 4,5L (541,8 m) του κριτηρίου του *IMO MSC.137(76)*. Ανάλογα η τακτική διάμετρος δεν ξεπερνά το 5,0L (602 m), οπότε η ικανότητα στροφής του δεδομένου πλοίου ικανοποιεί τους κανονισμούς. Ακόμα, μέσω των διαγραμμάτων φαίνεται η σταθεροποίηση των ταχυτήτων καθώς ο κύκλος στροφής προσεγγίζει όσο δυνατόν την ιδεατή ομαλή κυκλική κίνηση. Οι ταχύτητες στη διεύθυνση *surge* σταθεροποιούνται στους 6 kn, στη εγκάρσια *sway* διεύθυνση στους 0.81 kn, ενώ ο ρυθμός περιστροφής διατηρείται τελικώς στα 1,13 deg/s.

Επιπρόσθετα, προσομοιώθηκε και ο οφιοειδής ελιγμός, κοινώς ζιγκ-ζαγκ, για εκτροπές πηδαλίου 10° και 20°. Αντίστοιχα διαγράμματα παρουσιάστηκαν και σε αυτή την περίπτωση. Η 1<sup>η</sup> και 2<sup>η</sup> γωνία υπέρβασης υπολογίστηκε από το κοινό διάγραμμα των γωνιών κατεύθυνσης και πηδαλίου συναρτήσεων του χρόνου. Σύμφωνα με το κριτήριο του *IMO MSC.137(76)* για τον 10/10 ζιγκ-ζαγκ ελιγμό, η 1<sup>η</sup> και 2<sup>η</sup> γωνία υπέρβασης για το συγκεκριμένο πλοίο με λόγο  $L/V = 17,598 \text{ s}$  ( $10\text{s} < 17,598 \text{ s} < 30\text{s}$ ), δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερες από τις ακόλουθες τιμές: α) 1<sup>η</sup> γωνία υπέρβασης =  $5 + \frac{1}{2}(L/V) = 13,8^\circ$  β)

2<sup>η</sup> γωνία υπέρβασης =  $17,5 + 0,75(L/V) = 30,7^\circ$ . Η περίπτωση του πλοίου βρίσκεται κάτω από τα ανώτερα όρια και θεωρείται πως υπάρχει ικανότητα διατήρησης και εναλλαγής πορείας. Σχετικά με τον ελιγμό 20°/20° ζιγκ-ζαγκ, η 1<sup>η</sup> γωνία υπέρβασης δεν ξεπερνά τις 25° , επομένως περνά επιτυχώς το κριτήριο του *IMO*. Στη χρονική ιστορία των μεταβολών των ταχυτήτων και του ρυθμού περιστροφής, φαίνεται η μικρότερη ταχύτητα surge στον ελιγμό 20°/20° ζιγκ-ζαγκ. Αντίθετα η ταχύτητα sway έχει μεγαλύτερο μέτρο στον ελιγμό με εκτροπή πηδαλίου 20°, όπως και ο ρυθμός περιστροφής, όμως, με μικρότερη απόκλιση. Επίπτωση της μεγαλύτερης γωνίας εκτροπής πηδαλίου είναι η μικρότερη μετατόπιση στη διαμήκη διεύθυνση  $x$  ( $m$ ). Συγκεκριμένα, στη χρονική στιγμή των 180  $s$ , η διαμήκης μετατόπιση του πλοίου στον 10°/10° ζιγκ-ζαγκ ελιγμό είναι 1158  $m$ , ενώ στον 20°/20° ζιγκ-ζαγκ ελιγμό σημειώνεται απόσταση 1002  $m$ . Όπως λογικό η μετατόπιση κατά το εγκάρσιο είναι μεγαλύτερη στον 20°/20° ζιγκ-ζαγκ ελιγμό.

Επιπρόσθετα, προκειμένου να τεκμηριωθούν οι ελικτικές ικανότητες ενός πλοίου, γίνονται περισσότερες προσομοιώσεις, μελέτες και δοκιμές. Ωστόσο, στα πλαίσια της διπλωματικής έγινε η παραπάνω σύγκριση τιμών με τα κριτήρια του *IMO* με τις δυνατές προσφερόμενες πληροφορίες που εξήχθησαν από τα αποτελέσματα.

## 10. Προτάσεις για το μέλλον

Η θεματολογία αυτής της διπλωματικής εργασίας αφορά ένα πολύ μεγάλο επιστημονικό έδαφος, με μεγάλο όγκο πληροφοριών για μελέτη αλλά και προσφερόμενο χώρο για εις βάθος έρευνα. Συνεπώς, ο ενδιαφερόμενος μπορεί να εξελίξει τα περιεχόμενα και να προσθέσει καινούργια. Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση αποτελούν:

- Σύστημα εξισώσεων έξι βαθμών ελευθερίας (*6-DOF*)
- Προσομοίωση περισσότερων ελιγμών (ελιγμός σταματήματος, σπειροειδής ελιγμός κ.ά.)
- Μοντελοποίηση αυτόματου πιλότου
- Μοντελοποίηση επίδρασης του ανέμου στην ελικτικότητα
- Μοντελοποίηση επίδρασης κυμάτων στην ελικτικότητα
- Προσομοίωση ελιγμών πλοίου σε διαφορετικές καταστάσεις φόρτωσης
- Προσομοίωση ελιγμών πλοίου σε καταστάσεις ερματισμού
- Εφαρμογή και σύγκριση για διαφορετικών μεγεθών πλοία
- Εφαρμογή και σύγκριση για διαφορετικών μεγεθών και χαρακτηριστικών έλικες και πηδάλια
- Ενασχόληση με ειδικά θέματα δυναμικής ευστάθεια (θεώρηση εγκάρσιας κλίσης, ρυμουλκούμενο σκάφος)
- Μελέτη επίδρασης υδροδυναμικής «Μνήμης» στην ελικτική συμπεριφορά

## Βιβλιογραφία

- [1] L. Euler (1749), Scientia Navalis
- [2] M. Bouguer (1749), Traite du Navire de sa construction et de ses mouvemens
- [3] J. H. Vugts, The Hydrodynamic Forces and Ship Motions in Waves
- [4] M.A Abkowitz (1964), Lectures on Ship Hydrodynamics – Steering and Manoeuvrability
- [5] IMO  
<https://www.imo.org/en>
- [6] Scribd: Manoeuvring Booklet  
<https://www.scribd.com/document/406702674/Manoeuvring-Booklet-pdf>  
(13/11/23)
- [7] IMCO (1971): Recommendation on Information to be Included in the Manoeuvring Booklets, Resolution A.209 (VII)
- [8] IMO (1987): Provision and Display of Manoeuvring Information on Board Ships, Resolution A.601(15)
- [9] IMO (2002): Explanatory Notes to the Standards for the Ship Manoeuvrability, MSC/Circ.1053
- [10] ABS (2006), Guide for Vessel Maneuverability
- [11] The Society of Naval Architects and Marine Engineers (1989), Principles of Naval Architecture: Motions in Waves and Controllability, Volume III
- [12] Κωνσταντίνος Σπύρου (2010), Σχεδίαση Πλοίων για Ελκτικότητα και Δυναμική Ευστάθεια ΕΜΠ
- [13] Γεώργιος Κ. Χατζηκωνσταντής (2017), Πηδαλιουχία – Πηδάλια
- [14] Γ.Α. Αθανασούλης, Κ.Α. Μπελιμπασάκης (2012), Δυναμική Πλοίου ΕΜΠ
- [15] IMO (2007) Revised Guidance to the Master for avoiding dangerous situations in adverse weather and sea conditions. Resolution MSC.1/Circ.1228, 11 January, London
- [16] Κωνσταντίνος Σπύρου (2015), Δυναμική Ευστάθεια Πλοίου ΕΜΠ
- [17] Sintef, Towing Tank  
<https://www.sintef.no/en/all-laboratories/towing-tanks/> (13/11/2023)

- [18] The American Society of Mechanical Engineers (1981), An International Historic Mechanical Engineering Landmark – Davidson Laboratory, Stevens Institute of Technology Hoboken New Jersey
- [19] Jiafen Lan, Mao Zheng, Xiumin Chu, Shigan Ding, Parameter Prediction of the Non-Linear Nomoto Model for Different Ship Loading Conditions Using Support Vector Regression
- [20] ITTC – Recommended Procedures, Full Scale Measurements Manoeuvrability Full Scale Manoeuvring Trials Procedure (2002), Revision 01
- [21] Ships Now, Measures and Criteria of Manoeuvrability  
<https://shipsnow.com/wiki/measures-and-criteria-of-manoeuvrability/>  
 (13/11/23)
- [22] Artur Karczewski, Janusz Kozak (2017), Variant Designing in the Preliminary Small Ship Design Process
- [23] C. A. Marchaj, Notes on Design Factors Affecting Sailing Yacht Performance
- [24] IMCO (1968): Recommendation on Data Concerning Manoeuvring Capabilities and Stopping Distances of Ships, Resolution A.160 (ES.IV)
- [25] IMO (1983): Recommendation on Emergency Towing Requirements for Tankers, Resolution 535
- [26] IMO (1993): Interim Standards For Ship Manoeuvrability, Resolution A.751(18)
- [27] IMO (1995): Guidance to the Master for Avoiding Dangerous Situations in Following and Quartering Seas, Resolution MSC/Circ.707
- [28] IMO (2002): Standards for Ship Manoeuvrability, MSC/Circ.137(76)
- [29] D. Clarke (2003), The foundations of Steering and Manoeuvring
- [30] K. Kijima, A. H. Nielsen – ITTC 1996, Manoeuvrability Committee
- [31] The Manoeuvring Committee (2017) – 28<sup>th</sup> ITTC
- [32] The Manoeuvring Committee (2021) – 29<sup>th</sup> ITTC
- [33] T. Fuwa, T. Kashiwadani, Theory, Analysis and Design Methodology for Ship Maneuverability
- [34] Hirano, Takashina, Moriya, Nakamura (1985), An Experimental Study on Maneuvering Hydrodynamic Forces in Shallow Water
- [35] M. Hirano, J. Takashina – ITTC 81, Session on the Motions of the Hull Ship Handling
- [36] Minh-Duc Le, Duc-Hung Nguyen (2000), Estimation of Ship Hydrodynamic Coefficients in Harbor Maneuvers and its Application



- [37] S. Inoue, M. Hirano, K. Kijima, Hydrodynamic Derivatives on Ship Manoeuvring
- [38] Ralph A. Norrby (1972), A Study of Crash Stop Tests with Single Screw Ships
- [39] My Sea Time – Captain Rajeev Jassal (2016): 4 Ship Handling Tricks to Handle Ships in Better Way  
<https://www.myseatime.com/blog/detail/4-ship-handling-tricks-to-handle-ships-in-better-way> (13/11/2023)
- [40] M. Hirano, J. Takashina, Y. Takaishi, T. Saruta (1980): Ship Turning Trajectory in Regular Waves
- [41] B. V. Korvin-Kroukovsky, W. B. Jacobs (1957): Pitching and Heaving Motions of a Ship in Regular Waves
- [42] H. Yasukawa, Y. Yoshimura (2014): Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions
- [43] K. J. Spyrou: A General Model of Ship Manoeuvrability Assessment Based on Decisions' Analysis and Its Practical Application
- [44] Mikelis, N.E., Clarke, A.J.P.S., Roberts, S.J., Jackson, E.H.A.J. (1985): On the Construction of a Versatile Mathematical Model for Marine Simulation.
- [45] C. Chen, L. Zou, Z. Zou, H. Guo (2022): Assessment of CFD-Based Ship Maneuvering Predictions Using Different Propeller Modeling Methods
- [46] P. Kellett, Z. Yuan, A. Incecik, O. Turan, E. Boulougouris, Manoeuvring prediction based on CFD generated derivatives
- [47] S. Burnay, V. Ankudinov (2003): The Prediction of Hydrodynamic Forces on the Hull of a Manoeuvring Ship Based on a Database of Prediction Methods
- [48] Thor I. Fossen (2005), A nonlinear Unified State-Space Model for Ship Maneuvering and Control in a Seaway
- [49] Y. Yoshimura (2005), Mathematical Model for Manoeuvring Ship Motion (MMG Model)
- [50] Yassen Adnan (2018), Mathematical Model of the Manoeuvring Motion of a Ship
- [51] Prof. ir. J. Gerritsma, R. Onnin K, A. Versluis (1981), Geometry, Resistance and Stability of the Delft Systematic Yacht Hull Series
- [52] Οικονόμου, Παπαδόπουλος (2023): Εισαγωγή στον προγραμματισμό
- [53] MathWorks: Help Center  
[https://www.mathworks.com/help/matlab/index.html?s\\_tid=hc\\_panel](https://www.mathworks.com/help/matlab/index.html?s_tid=hc_panel) (15/11/23)