



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**

Τμήμα Μηχανικών Βιομηχανικής  
Σχεδίασης και Παραγωγής

**&**

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΑΙΓΑΙΟΥ**

Τμήμα Ναυτιλίας και  
Επιχειρηματικών Υπηρεσιών



**ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ  
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
«ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ»**

**ΤΙΤΛΟΣ**

*Έλεγχος Εγκάρσιας Πορείας Πλοίου*

**ΤΙΤΛΟΣ ΑΓΓΛΙΚΑ**

*Ship's Control in the Lateral Direction*

**Όνοματεπώνυμο Σπουδαστή:**

*Γεώργιος Κωστάκης (Α.Μ.:8056111)*

**Όνοματεπώνυμο Υπεύθυνου Καθηγητή:**

*Γεώργιος Χαμηλοθώρης*

**ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**ΜΑΡΤΙΟΣ 2023**

---

**Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής**

*Χαμηλοθώρης Γεώργιος*

*Παπουτσιδάκης Μιχαήλ*

*Δρόσος Χρήστος*

---

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Γεώργιος Κωστάκης, του Χρήστου, με αριθμό μητρώου 8056111 φοιτητής του Διδρυματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Νέες Τεχνολογίες στη Ναυτιλία και τις Μεταφορές» του Τμήματος Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών Υπηρεσιών του Πανεπιστημίου Αιγαίου και του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω υπεύθυνα ότι: *«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής 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 αυτές αναφέρονται 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. Παραβίαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου».*

Ο δηλών

Ημερομηνία

Γεώργιος Κωστάκης

10/03/2023



## **Έλεγχος Εγκάρσιας Πορείας Πλοίου**

**Γεώργιος Κωστάκης**

**Μεταπτυχιακή Διατριβή που υποβάλλεται στο καθηγητικό σώμα για την μερική  
εκπλήρωση των υποχρεώσεων απόκτησης του μεταπτυχιακού τίτλου του  
Διϋδραματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Νέες Τεχνολογίες  
στη Ναυτιλία και τις Μεταφορές» του Τμήματος Ναυτιλίας και Επιχειρηματι-  
κών Υπηρεσιών του Πανεπιστημίου Αιγαίου και του Τμήματος Μηχανικών  
Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.**

«Μην κρίνεις αυτούς που δοκιμάζουν  
και αποτυγχάνουν.

Κρίνε μόνο αυτούς που αποτυγχάνουν  
να δοκιμάζουν.»

# Περίληψη

Σ' αυτή την εργασία εξετάζεται το πρόβλημα ελέγχου του πλοίου, ώστε να διατηρεί σταθερή την πορεία του, παρά τις διαταραχές που δέχεται από το θαλάσσιο περιβάλλον (κύματα, άνεμο, ρεύματα).

Ειδικότερα, χρησιμοποιώντας την απλή αλλά διαχρονικά πετυχημένη διάταξη που πρότειναν οι Nomoto et al. (1957) αξιολογείται ένας Αυτόματος Πιλότος (ΑΠ) διατήρησης πορείας, όπου ο ελεγκτής του συστήματος χρησιμοποιεί τη τεχνική του Προβλεπτικού Ελέγχου MPC.

Η σύγκριση με σύστημα που χρησιμοποιεί ελεγκτή τριών όρων αποκαλύπτει την εντυπωσιακή βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς του πλοίου. Ωστόσο, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί Προσαρμοστικός Προβλεπτικός Έλεγχος (Adaptive MPC) προκειμένου να αντισταθμιστούν οι διαταραχές από το θαλάσσιο περιβάλλον, όπως και τυχόν εσωτερικές διαταραχές του συστήματος.

**Λέξεις Κλειδιά:** Αυτόματος Πιλότος Πλοίων, Μοντέλο Nomoto, Έλεγχος PID, Έλεγχος MPC

# Abstract

This MSc Thesis discuss the problem of controlling the ship, in order to maintain its course, despite the disturbances it receives from the marine environment (waves, wind, currents).

In particular, using the simple but permanent successful model that proposed by Nomoto et.al (1957), a course Autopilot is evaluated where the system controller uses the MPC (Model Predictive Control) technique.

The comparison with a system using a PID controller reveals the impressive improvement in the ship's dynamic behavior. However, it is necessary to use Adaptive MPC in order to compensate the disturbances from the marine environment, as well as any internal system disturbances.

**Keywords:** Ship Autopilot, Nomoto model, PID Control, MPC Control

## Ευχαριστίες

Με την υποβολή αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας ολοκληρώνεται ένας ακόμα κύκλος ακαδημαϊκής φοίτησης. Είμαι ιδιαίτερα ευτυχής που μέσω των σπουδών μου γνώρισα και συνδέθηκα με αξιόλογους ανθρώπους.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα Καθηγητή Γεώργιο Χαμηλοθώρη του οποίου η καθοδήγηση κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας ήταν καθοριστική για την πραγμάτωσή της.

Επίσης, ευχαριστώ τους συμφοιτητές και πάνω απ' όλα φίλους Γιώργο Καπνίση και Χαράλαμπο Γεωργαλή με τους οποίους μοιραστήκαμε ανησυχίες / προβληματισμούς κατά τη διάρκεια των σπουδών μας, όπως και για αυτή την εργασία, και ήταν πάντα πρόθυμοι να με στηρίζουν.

Όσον αφορά την γλωσσική επιμέλεια του κειμένου, δεν μπορώ να παραλείψω τις εξαιρετικά σημαντικές παρατηρήσεις και επισημάνσεις της φίλης Αννί Αγγελοπούλου, την οποία ευχαριστώ πολύ.

Η εργασία αυτή είναι αφιερωμένη σε έναν από τους πιο σημαντικούς ανθρώπους της ζωής μου, του οποίου η απουσία θα είναι έκδηλη από δω και πέρα, όμως οι συμβουλές του και η αγάπη του θα με συντροφεύουν πάντα. Στον Ηλία.



# Περιεχόμενα

Περίληψη	v
Ευχαριστίες	vi
Περιεχόμενα	vii
Πίνακας Σχημάτων	viii
Σημειογραφία	ix
1. Εισαγωγή	1
1.1. Ιστορική Επισκόπηση	3
2. Μαθηματική Μοντελοποίηση	6
2.1 Ορισμός Των Κινήσεων	7
2.2 Συστήματα Αναφοράς	9
2.2.1 Γεωκεντρικά Συστήματα Αναφοράς	9
2.2.2 Γεωγραφικά Συστήματα Αναφοράς	10
2.3 Εξισώσεις Κίνησης	11
2.3.1 Davidson, Schiff Model	15
2.3.2 Nomoto et al. Model	16
2.4 Μοντέλα Διαταραχών	22
2.4.1 Κύματα (Waves)	22
2.4.1.1 Regular waves	25
2.4.1.2 Irregular waves	27
2.4.2 Άνεμος (Wind)	32
2.4.3 Ρεύματα (Current)	36
2.5 Μοντελοποίηση Του Πηδαλίου	37
2.6 Πρόβλημα Ελέγχου Εγκάρσιας Πορείας Πλοίου	38
2.6.1 Τεχνικές Ελέγχου	39
2.6.1.1 Έλεγχος PID (Proportional – Integral – Derivative)	39
2.6.1.2 Προβλεπτικός Έλεγχος (Model Predictive Control)	41
3. Προσομοίωση	44
3.1 Επιλογή Μοντέλου Πλοίου	44
3.2 Σενάρια Δοκιμών	46
3.2.1 Ικανότητα Στροφής	46

3.2.2 Οφιοειδής Έλεγχος	48
3.3 Υλοποίηση Προσομοιώσεων	49
4. Συμπεράσματα	61
Βιβλιογραφία	62
Παράρτημα «Α»	65

# Πίνακας Σχημάτων

<b>Σχήμα 1:</b> Ολοκληρωμένο σύστημα ελέγχου κίνησης πλοίου.....	2
<b>Σχήμα 2:</b> Διάγραμμα βαθμίδων του κλειστού βρόχου.....	4
<b>Σχήμα 3:</b> Σύστημα αυτόματου πηδαλίου πλοίου (Minorsky, 1922).....	4
<b>Σχήμα 4:</b> Γενικό μοντέλο αυτόματου πιλότου.....	6
<b>Σχήμα 5:</b> Οι έξι (6) βαθμοί ελευθερίας του πλοίου.....	8
<b>Σχήμα 6:</b> Τα συστήματα αναφοράς $\{n\}$ , $\{i\}$ και $\{e\}$ .....	11
<b>Σχήμα 7:</b> Τα συστήματα αναφοράς $\{b\}$ , $\{e\}$ .....	10
<b>Σχήμα 8:</b> Η κίνηση του πλοίου στο οριζόντιο επίπεδο.....	12
<b>Σχήμα 9:</b> Η επίδραση των $K$ και $T_N$ κατά τη διάρκεια ελέγχων στροφής.....	18
<b>Σχήμα 10:</b> Διαγράμματα Bode του πλοίου τύπου Mariner.....	21
<b>Σχήμα 11:</b> Διαγράμματα Bode του πλοίου τύπου Tanker.....	22
<b>Σχήμα 12α:</b> Αρμονικό κύμα ως συνάρτηση της απόστασης $x$ .....	26
<b>Σχήμα 12β:</b> Αρμονικό κύμα ως συνάρτηση του χρόνου $t$ .....	26
<b>Σχήμα 13:</b> Γωνία συνάντησης των κυμάτων με το πλοίο.....	26
<b>Σχήμα 14:</b> Μοτίβο τυχαίων κυμάτων(Pierson, Neuman and James).....	28
<b>Σχήμα 15:</b> Το ύψος ( $\zeta$ ) των τυχαίων κυματισμών συναρτήσει του χρόνου ( $t$ ).....	26
<b>Σχήμα 16:</b> Ανάλυση καταγραφής των κυμάτων.....	27
<b>Σχήμα 17:</b> Η φασματική πυκνότητα των κυμάτων κατά Pierson – Moskowitz.....	30
<b>Σχήμα 18:</b> Το φάσμα των κυμάτων σύμφωνα με τους Hasselmann et al. (1973).....	32
<b>Σχήμα 19:</b> Το μπλοκ διάγραμμα μηχανισμού οδήγησης του πηδαλίου.....	38
<b>Σχήμα 20:</b> Ελεγκτής PID παράλληλης συνδεσμολογίας.....	40
<b>Σχήμα 21:</b> Υλοποίηση PID ελεγκτή με αναλογικά ηλεκτρονικά κυκλώματα.....	41
<b>Σχήμα 22:</b> Γραφική απεικόνιση του Προβλεπτικού Ελέγχου.....	42
<b>Σχήμα 23:</b> ΑΠ Πλοίου με MPC.....	43
<b>Σχήμα 24:</b> Turning Circle Maneuver.....	46
<b>Σχήμα 25:</b> Turning Circle Maneuver for the Mariner.....	47
<b>Σχήμα 26:</b> Zig-Zag Maneuver.....	48
<b>Σχήμα 27:</b> Zig-Zag Maneuver for the Mariner.....	49

Σημειογραφία<sup>1</sup>

<i>Σύμβ.</i>	<i>Περιγραφή</i>	<i>Σύμβ.</i>	<i>Περιγραφή</i>
$u$	<i>Surge</i> - Γραμμική ταχύτητα στον διαμήκη οριζόντιο άξονα	$N$	Ροπή στον κατακόρυφο άξονα
$v$	<i>Sway</i> - Γραμμική ταχύτητα στον εγκάρσιο οριζόντιο άξονα	$x_0, y_0$	Συντεταγμένες αδρανειακού συστήματος αναφοράς
$w$	<i>Heave</i> - Γραμμική ταχύτητα στον κατακόρυφο άξονα	$\ddot{x}_0, \ddot{y}_0$	Επιταχύνσεις αδρανειακού συστήματος αναφοράς
$p$	<i>Roll</i> - Γωνιακή ταχύτητα στον διαμήκη άξονα	$x, y$	Συντεταγμένες σωματόδετου συστήματος αναφοράς
$q$	<i>Pitch</i> - Περιστροφή στον εγκάρσιο άξονα	$\bar{U}$	Διάνυσμα της στιγμιαίας ταχύτητας
$r$	<i>Yaw</i> - Περιστροφή στον κατακόρυφο άξονα	$I_{zz}$	Αδρανειακή ροπή ως προς τον z-axis
$\varphi$	Γωνία πλοίου διαμήκη οριζόντιο άξονα	$m$	Η μάζα του πλοίου
$\theta$	Γωνία πλοίου εγκάρσιο οριζόντιο άξονα	$CG$	Κέντρο βάρους του πλοίου
$\psi$	Γωνία πλοίου στον κατακόρυφο άξονα	$S(\omega)$	Φάσμα ισχύος
$\delta$	Γωνία πηδαλίου πλοίου	$\omega_p$	Κυκλική συχνότητα κορυφής ενός φάσματος
$\beta$	Γωνία εκπτώσεως (drift angle)	$H_{1/3}$	Η μέση τιμή του 1/3 των μεγαλύτερων υψών κύματος
$\dot{\psi}$	Γωνιακή επιτάχυνση στον κατακόρυφο άξονα	$f$	Συχνότητα κύματος
$X$	Δύναμη στον διαμήκη οριζόντιο άξονα	$\zeta_a$	Πλάτος ταλάντωσης κύματος
$Y$	Δύναμη στον εγκάρσιο οριζόντιο άξονα	$T$	Περίοδος κύματος
$Z$	Δύναμη στον κατακόρυφο άξονα	$\lambda$	Μήκος κύματος
$x$	Μετατόπιση στον διαμήκη άξονα	$k$	Κυματικός αριθμός
$y$	Μετατόπιση στον εγκάρσιο άξονα	$C$	Ταχύτητα κορυφής κύματος
$z$	Μετατόπιση στον κατακόρυφο άξονα	$rms$	root mean square
$K$	Ροπή στον διαμήκη άξονα		
$M$	Ροπή στον εγκάρσιο άξονα		

<sup>1</sup> Η σημειογραφία που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία ακολουθεί ως επί το πλείστον το πρότυπο της SNAME (Society of Naval Architects and Marine Engineers). [1]

“It is a desirable quality for a ship to be well-behaved in steering; to keep her course without difficulty and to change her direction quickly when desired...”

Nomoto et al.,1957

## 1. Εισαγωγή

Η παρούσα διατριβή έχει σαν σκοπό να εξετάσει το πρόβλημα του αυτόματου ελέγχου (control) του πλοίου συναρτήσει των διαταραχών, που προκαλούνται από το θαλάσσιο περιβάλλον (κύματα, άνεμο, ρεύματα κλπ.), ώστε το πλοίο να διατηρεί την τροχιά / πορεία (track / path), όπως χαράχθηκε από τον ναυτιλλόμενο, από ένα σημείο αφετηρίας σε ένα σημείο προορισμού.

Στο **Σχ. 1** παρουσιάζεται ένα ολοκληρωμένο σύστημα ελέγχου κίνησης πλοίου, όπως υποδεικνύεται από τους T. I. Fossen (1994) και T. Perez (2005), και είναι προφανής η πληθώρα των συστημάτων που συνεργάζονται προκειμένου να επιτευχθεί η αξιοπλοΐα του πλοίου στο απρόβλεπτο θαλάσσιο περιβάλλον.

Κατά συνέπεια με τα παραπάνω και λόγω του περιορισμού στο μέγεθος της παρούσας διατριβής, πρόκειται να συζητηθεί το Σύστημα Ελέγχου (Control System) όσον αφορά τους Αυτόματους Πιλότους (ΑΠ)<sup>2</sup> για τη διατήρηση της πορείας (course-keeping). Η κύρια απαίτηση για τη λειτουργία course-keeping είναι να διατηρεί το πλοίο την εγκάρσια κατεύθυνση του όσο πιο κοντά γίνεται στην χαραχθείσα πορεία αλλά με την μικρότερη δυνατή δραστηριότητα του πηδαλίου για την αποφυγή αφενός καταπόνησης του, αφετέρου δημιουργίας επιπλέον ελκτικής δύναμης (drag) από το τελευταίο.

Η προσφορά (contribution) της παρούσας εργασίας συνίσταται στην μελέτη ενός

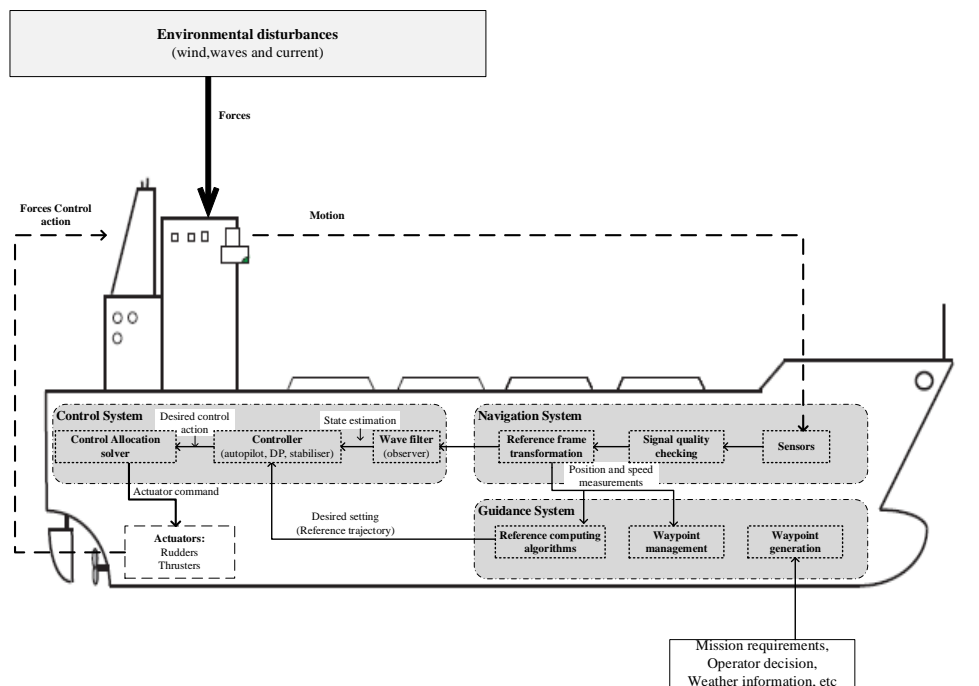
---

<sup>2</sup> Σύμφωνα με το λεξικό (Μπαμπινιώτης,2002) «αυτόματος πιλότος (πλοηγός) είναι το ηλεκτρονικό σύστημα που ελέγχει το όχημα, σύμφωνα με προκαθορισμένη πορεία, χωρίς τη μεσολάβηση φυσικού προσώπου (πιλότου)»

ΑΠ διατήρησης πορείας εμπορικού πλοίου, όπου ο ελεγκτής του συστήματος χρησιμοποιεί τη τεχνική του Προβλεπτικού Ελέγχου (MPC), ενώ οι κρίσιμες παράμετροι του συστήματος είναι η γωνία του πηδαλίου ( $\delta$ ) και η γωνία της εγκάρσιας κατεύθυνσης ( $\psi$ ).

Συγκεκριμένα, και μετά από μια σύντομη ιστορική αναδρομή, στη 2<sup>η</sup> ενότητα θα αναφερθούν τα μαθηματικά μοντέλα, οι παράμετροι του πλοίου και των διαταραχών, που απαιτούνται για την μετέπειτα υλοποίηση πειραμάτων / δοκιμών του ΑΠ. Στη συνέχεια, η 3<sup>η</sup> ενότητα αφορά τα σενάρια των δοκιμών, την προσομοίωση με κατάλληλο λογισμικό και την επιχειρησιακή αξιολόγησή τους. Τέλος, η 4<sup>η</sup> ενότητα αφορά την σύνοψη των αποτελεσμάτων καθώς και προτεινόμενα θέματα περαιτέρω εξέτασης στους ΑΠ.

Οι δοκιμές στην 3<sup>η</sup> ενότητα πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο της προσομοίωσης και συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε το Λογισμικό Simulink<sup>®</sup> (MATLAB<sup>®</sup>)<sup>3</sup> και εργαλεία που παρέχονται μέσω του Marine System Simulator (MSS) των Tristan et al. (2006).



Σχήμα 1: Ολοκληρωμένο σύστημα ελέγχου κίνησης πλοίου. [8]

<sup>3</sup> MATLAB and Simulink are registered trademarks of the MathWorks Inc.

Αξίζει να σημειωθεί πως εφεξής, με τον όρο «Πλοίο»<sup>4</sup> θεωρείται εκείνο το θαλάσσιο όχημα που έχει εκτόπισμα (displacement) πάνω από 500 τόνους, ωθείται από μία ή δύο προπέλες για την επίτευξη πρόσθιας ταχύτητας και κατευθύνεται από ένα ή δύο πηδάλια για τον έλεγχο της στροφής του. Ακόμα, όπου αναφέρονται Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου (ΣΑΕ) νοούνται εκείνα που λαμβάνουν ολόκληρο το πλοίο ως σύστημα και όχι υποσύνολά του.

## 1.1. Ιστορική Επισκόπηση

Από τις αρχές του 1900 κατασκευάζονται ΑΠ πορείας (course-keeping autopilot) των πλοίων, που ακολουθούν τις τεχνολογικές εξελίξεις της επιστήμης των ΣΑΕ.

Σκοπός του εκάστοτε ΑΠ είναι η διατήρηση του πλοίου στην επιθυμητή πορεία, όπως έχει χαραχθεί από τον ναυτιλλόμενο. Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο **Σχ. 2**, ο Ελεγκτής έχοντας ως είσοδο την διαφορά επιθυμητής και αληθής θέσης του πλοίου δίνει εντολή στροφής (κατάλληλη γωνία) στο πηδάλιο προκειμένου το Πλοίο, παρά τις διαταραχές (κύματα, άνεμο κλπ.), να διατηρείται στην χαραχθείσα πορεία.

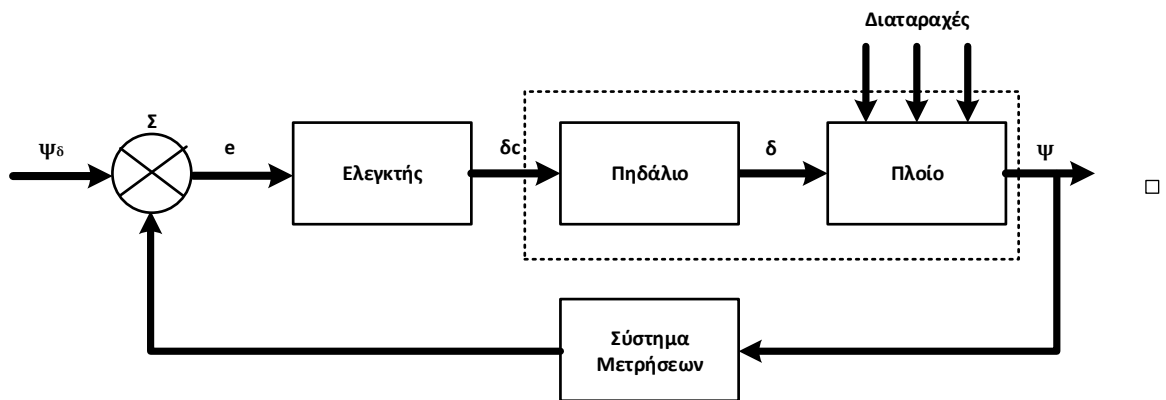
Ιστορικά ο πρώτος ΑΠ δημιουργήθηκε το 1911 από τον Elmer Sperry (1860 – 1930). Πρόκειται για ένα ΣΑΕ κλειστού βρόγχου (closed-loop), όπου με κατάλληλη χρησιμοποίηση της γυροσκοπικής πυξίδας (gyrocompass) πραγματοποιούνταν ο έλεγχος του πηδαλίου του πλοίου. Η συσκευή αυτή είχε την ονομασία «Metal Mike» και συμπεριφερόταν ικανοποιητικά σε διάφορες καταστάσεις θαλάσσης λόγω του βρόγχου ανάδρασης και της προσαρμογής κέρδους. [2]

Η γυροσκοπική πυξίδα είναι αποτέλεσμα της παράλληλης εργασίας τόσο του Dr. H. Anschutz (Γερμανία – 1908) όσο και του E. Sperry (ΗΠΑ – 1911). Αποτελεί εφαρμογή του γυροσκοπίου, το οποίο ανακαλύφθηκε από τον Johann Bohnenberger (1810) και παρουσιάστηκε πειραματικά από τον Foucault (1852). Αξίζει να σημειωθεί πως αφορά μια ιστορική στιγμή για την ναυτιλία, όπου γίνεται η μετάβαση από τα ξύλινα

---

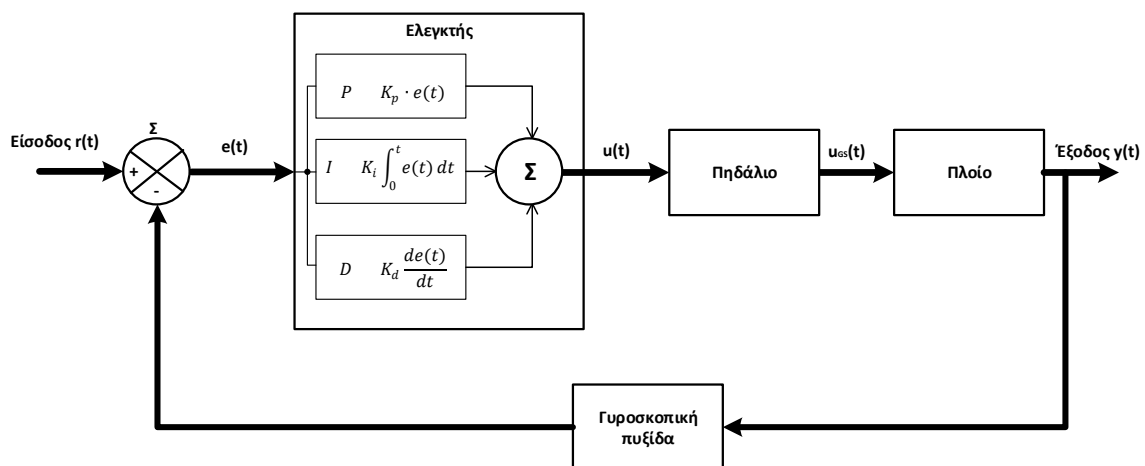
<sup>4</sup> Σύμφωνα με τον Faltisen (2005) τα πλοία κατηγοριοποιούνται αναλόγως του αριθμού Froude  $F_n = \frac{v}{\sqrt{gL}}$  (U: η ταχύτητα του πλοίου, g: η επιτάχυνση της βαρύτητας, L: το μέγιστο μήκος του βυθισμένου τμήματος του πλοίου)

πλοία (ιστιοφόρα) στα σιδερένια ατμόπλοια, η ναυτιλία αναπτύσσεται και απαιτεί αξιόπιστα όργανα πλοήγησης.[3]



Σχήμα 2: Διάγραμμα βαθμίδων του κλειστού βρόχου. [6]

Αργότερα, το 1922 ο Nicolas Minorsky (1885 – 1970), παρατηρώντας τις τρεις διαφορετικές συμπεριφορές με τις οποίες κατεύθυνε το πλοίο ο πηδαλιούχος, χρησιμοποίησε τον ελεγκτή τριών όρων (Proportional-Integral-Derivative ή PID) σε ένα ΣΑΕ θέσης με ανάδραση. Όπως και εκείνο του Sperry ήταν ένα ΣΑΕ μίας εισόδου – μίας εξόδου (SISO), δηλαδή, είχε σαν είσοδο την κατεύθυνση από την γυροσκοπική πυξίδα και παρείχε έξοδο τη γωνία του πηδαλίου. Στο ακόλουθο Σχ. 3 παρουσιάζεται σε απλοποιημένη μορφή το μπλοκ διάγραμμα από το σύστημα αυτόματου πηδαλίου του Minorsky.[4]



Σχήμα 3: Σύστημα αυτόματου πηδαλίου πλοίου (Minorsky, 1922)

Στη συνέχεια οι μοντέρνες τεχνικές αυτομάτου ελέγχου κάθε εποχής εφαρμόζονταν από την ακαδημαϊκή / βιομηχανική κοινότητα για τον έλεγχο κίνησης των



πλοίων. Τέτοιες τεχνικές ελέγχου είναι η LQG – Linear Quadratic Gaussian, η  $H_\infty$ , η Sliding Mode, η Nonlinear Backstepping, καθώς επίσης, πολύ πρόσφατα, η Ασαφής Λογική (Fuzzy Logic) και οι Γενετικοί Αλγόριθμοι.

Επιπροσθέτως, στο πλαίσιο του ελέγχου της κίνησης του πλοίου, αλλά χωρίς να είναι αντικείμενο της εργασίας αυτής, εμπίπτουν και οι κάτωθι τεχνικές:

α) Δυναμική Τοποθέτηση (Dynamic Positioning) πλοίου. Πρόκειται για ανάπτυξη συστημάτων σε πλοία και θαλάσσιες κατασκευές ώστε αυτά να παραμένουν ακινητοποιημένα σε ένα γεωγραφικό σημείο και να μπορούν να διεξάγουν δραστηριότητες όπως υποθαλάσσιες έρευνες για εντοπισμό / εξόρυξη ορυκτών καυσίμων κλπ. Παρόμοια συστήματα είναι και αυτά της αγκίστρωσης σε συγκεκριμένη θέση (Position Mooring).

β) Κίνηση από σημείο σε σημείο (Way-point tracking) όπως και η κίνηση σε μονοπάτι (Path-following). Πρόκειται για αξιοποίηση των συστημάτων GPS (Global Positioning System) και παρόμοιων στους αυτόματους πιλότους, έτσι ώστε το θαλάσσιο όχημα να ακολουθεί ένα αυστηρά χαραγμένο μονοπάτι προκειμένου να επιτυγχάνεται εξοικονόμηση καυσίμων για οικονομικούς και περιβαλλοντικούς λόγους.

Για την υλοποίηση των παραπάνω τεχνικών τοποθετούνται στα πλοία προωθητές (thrusters). Ανάλογα με την περίπτωση βρίσκονται εντός του πλοίου και ονομάζονται lateral thrusters ή πάνω στην καρίνα και ονομάζονται rotational thrusters επειδή έχουν τη δυνατότητα να περιστρέφονται κατά  $360^\circ$ .

## 2. Μαθηματική Μοντελοποίηση

Προκειμένου να μελετηθεί ένας ΑΠ διατήρησης της πορείας απαιτείται προηγουμένως η εξέταση της μαθηματικής μοντελοποίησης της Κινηματικής και Δυναμικής ανάλυσης των κινήσεων του πλοίου. Για τον εν λόγω ΑΠ οι κύριες μεταβλητές του συστήματος είναι η γωνία του πηδαλίου  $\delta$ , η γωνία της πορείας  $\psi$  (heading) και οι διαταραχές που προκαλούνται από θαλάσσιο περιβάλλον. [21]



*Σχήμα 4: Γενικό μοντέλο αυτόματου πιλότου[21]*

Οι θεωρίες που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της κίνησης των πλοίων είναι οι κάτωθι:

### **Seakeeping Theory**

Αφορά τη συμπεριφορά του πλοίου σε θαλάσσιο περιβάλλον με διαταραχές και πως αυτή η συμπεριφορά επηρεάζει το προσωπικό, τα μηχανήματα που βρίσκονται πάνω σε αυτό αλλά και την αποστολή του.

Η θεωρία αυτή αντιλαμβάνεται το πλοίο σαν σύστημα με χαρακτηριστικά γνωρίσματα όπως το μέγεθος / το σχήμα του κύτους κ.α., είσοδος στο σύστημα είναι τα κύματα και έξοδος του συστήματος είναι οι κινήσεις του.

### **Maneuvering Theory**

Αντιθέτως, αφορά τη συμπεριφορά του πλοίου σε ήρεμη θάλασσα και ερμηνεύεται με διάφορες τεχνικές δοκιμών που γίνονται σε πανεπιστημιακά εργαστήρια.

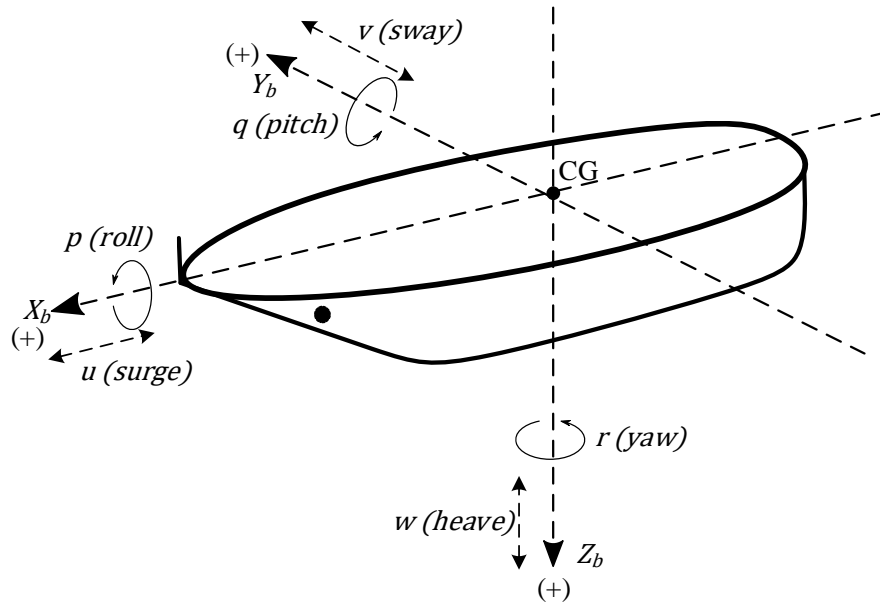
Οι διαφορές που παρουσιάζουν οι δύο θεωρίες απαιτούν τη μελέτη των εξισώσεων του πλοίου σε διαφορετικό σύστημα συντεταγμένων και αναφοράς, τα οποία και θα αναλυθούν στις επόμενες παραγράφους.

## 2.1 Ορισμός των Κινήσεων

Το πλοίο αντιμετωπίζεται ως ένα άκαμπτο σώμα (rigid body) το οποίο έχει έξι (6) βαθμούς ελευθερίας (DoF-Degrees of Freedom), δηλαδή, μπορεί να κινηθεί προς όλες τις κατευθύνσεις του χώρου, όπως το αεροπλάνο ή το υποβρύχιο. Ωστόσο, δεν διαθέτει επιφάνειες ελέγχου για κάθε DoF παρά μόνο ένα πηδάλιο στην πρύμνη του πλοίου και πίσω από την προπέλα που το ωθεί. Έτσι το πλοίο θεωρείται ως υποενεργοποιημένο (underactuated) σύστημα και προφανώς πιο δύσκολο να ελεγχθεί.

Οι τρεις (3) βαθμοί ελευθερίας αφορούν γραμμικές κινήσεις και οι υπόλοιποι τρεις (3) περιστροφικές. Όπως φαίνεται στο **Σχ. 5**, ορίζουμε ένα σύστημα αναφοράς με κέντρο το κέντρο βάρους (CG) του πλοίου, τον άξονα  $x$  με θετική φορά προς την πλώρη του (bow), τον άξονα  $y$  με θετική φορά προς τη δεξιά (starboard) πλευρά του και τον άξονα  $z$  με θετική φορά προς τα κάτω.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η γραμμική κίνηση στον διαμήκη (longitudinal) οριζόντιο άξονα  $x$  συμβολίζεται ως  $u$  (*surge*) και η περιστροφική ως  $p$  (*roll*) ή στα ελληνικά διατοιχισμός. Η γραμμική κίνηση στον εγκάρσιο (lateral) οριζόντιο άξονα  $y$  συμβολίζεται ως  $v$  (*sway*) και η περιστροφική ως  $q$  (*pitch*) ή στα ελληνικά προνευστασμός. Και τέλος, η γραμμική κίνηση στον κατακόρυφο άξονα συμβολίζεται ως  $w$  (*heave*) και η περιστροφική ως  $r$  (*yaw*).



Σχήμα 5: Οι έξι (6) βαθμοί ελευθερίας του πλοίου

Σύμφωνα με τον Fossen (2011) όλα τα παραπάνω συγκεντρώνονται στον ακόλουθο Πίνακα 1:

Πίνακας 1: Παράμετροι κίνησης πλοίου στο σωματόδετο σύστημα αναφοράς

DoF	Ονομασία	Δύναμη / Ροπή	Γραμμική/Γωνιακή ταχύτητα	Θέση / Γωνία
1	Surge	$X$	$u$	$x$
2	Sway	$Y$	$v$	$y$
3	Heave	$Z$	$w$	$z$
4	Roll	$K$	$p$	$\varphi$
5	Pitch	$M$	$q$	$\theta$
6	Yaw	$N$	$r$	$\psi$

Σημειώνεται ότι όσον αφορά το σχεδιασμό ΣΑΕ κλειστού βρόγχου για τα πλοία επιφανείας γίνεται απλοποίηση των κινήσεων σε λιγότερους DoF. Αρχικά ο J. Van Amerongen (1982) αναφέρει ότι για έναν ΑΠ προσαρμοστικού ελέγχου (adaptive con-

trol) αρκούν 3 DoF και συγκεκριμένα οι κινήσεις “surge”, “sway” και “yaw”. Μεταγενέστερα ο Fossen (2011), μεταξύ άλλων, αναφέρει ότι η κίνηση στο οριζόντιο επίπεδο δύναται να αποσυνδεθεί σε διαμήκη (longitudinal) και εγκάρσια (lateral) κίνηση. Διευκρινίζει ακόμα πως το longitudinal μοντέλο αναλύεται σε “surge”, “heave” και “pitch” και το lateral μοντέλο αναλύεται σε “sway”, “roll” και “yaw”. [21], [6]

## 2.2 Συστήματα Αναφοράς

Επιπρόσθετα με τα παραπάνω, για την περιγραφή των κινήσεων του πλοίου απαιτείται ο καθορισμός κατάλληλου συστήματος αναφοράς (reference system). Αυτά κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με το σώμα αναφοράς (πχ γεωκεντρικά, ηλιοκεντρικά κ.α.) ή την γεωγραφική προέλευση πάνω στην επιφάνεια της γης, προσδιοριζόμενη από το γεωγραφικό πλάτος (latitude) και μήκος (longitude).

Ακόμα χωρίζονται σε αδρανειακά και μη αδρανειακά. Στα μεν πρώτα βρίσκουν εφαρμογή οι νόμοι κίνησης του Newton και δεν είναι ούτε περιστρεφόμενα ούτε επιταχυνόμενα, ενώ τα δεύτερα υφίστανται επιτάχυνση αναφορικά με κάποιο αδρανειακό σύστημα. Τα αδρανειακά συστήματα χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της θέσης και του προσανατολισμού του πλοίου, ενώ τα μη αδρανειακά για τον προσδιορισμό γραμμικών και γωνιακών ταχυτήτων.[6]

### 2.2.1 Γεωκεντρικά Συστήματα Αναφοράς

#### **ECI – Earth Centered Inertial {i}**

Όπως συνάγεται από την ονομασία του είναι ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς ορθογώνιων αξόνων με την αρχή τους ( $x_i, y_i, z_i$ ) στο κέντρο της γης, το επίπεδο  $x_i - y_i$  να συμπίπτει με το επίπεδο του ισημερινού και τον άξονα  $z_i$  προεκτεινόμενο προς τον Βόρειο Πόλο. Επίσης, δεν περιστρέφεται μαζί με τη γη γιατί ο άξονας  $x_i$  είναι προσανατολισμένος στα αστέρια.

#### **ECEF – Earth-Centered Earth-Fixed {e}**

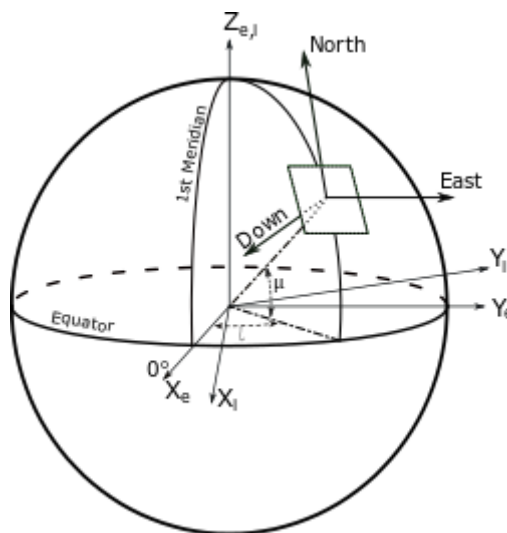
Ομοίως ένα σύστημα ορθογώνιων αξόνων με την αρχή τους ( $x_e, y_e, z_e$ ) στο κέντρο της γης, τον άξονα  $z_e$  προεκτεινόμενο προς τον Βόρειο Πόλο και τον άξονα  $x_e$  να είναι

τοποθετημένος στις  $0^\circ$  γεωγραφικό πλάτος και μήκος. Συνεπώς αυτό το σύστημα ακολουθεί την περιστροφή της γης. Μπορεί να λογιστεί ως αδρανειακό για πλοία που κινούνται με μικρή ταχύτητα ώστε να παραλειφτεί η περιστροφή της γης.

## 2.2.2 Γεωγραφικά Συστήματα Αναφοράς

### NED – North East Down {n}

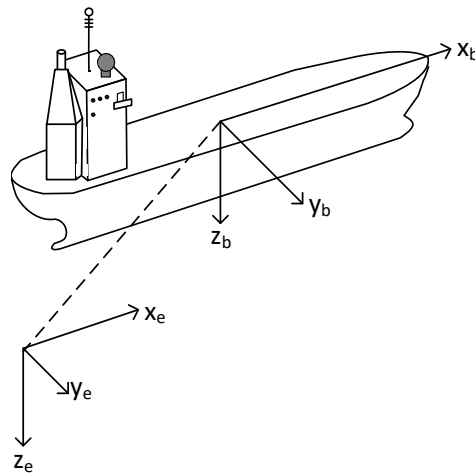
Είναι ακόμα ένα ορθογώνιο σύστημα αναφοράς όπου ο άξονας  $x_n$  έχει προσανατολισμό προς τον βορρά (North), ο άξονας  $y_n$  έχει προσανατολισμό προς την ανατολή (East) και ο άξονας  $z_n$  έχει προσανατολισμό προς τα κάτω (Down). Το επίπεδο  $x_n - y_n$  είναι εφαπτόμενο στην επιφάνεια της γης. Το σύστημα NED είναι σταθερό ως προς το σύστημα ECEF και προσδεμένο πάνω στο πλοίο με το οποίο κινείται μαζί του.



*Σχήμα 6: Τα συστήματα αναφοράς {n}, {i} και {e} [6]*

### BODY {b}

Το σωματόδετο σύστημα αξόνων (BODY axis) είναι επίσης προσδεμένο πάνω στο πλοίο. Το σύστημα αυτό αναπαρίσταται στο Σχ. 5 και ερμηνεύτηκε προηγουμένως. Συμπληρωματικά αναφέρεται ότι οι περιστροφές Roll, Pitch, Yaw καλούνται “Euler angles” και αναπαριστούν τον προσανατολισμό αναφορικά με το σύστημα NED.



*Σχήμα 7: Τα συστήματα αναφοράς {b}, {e}*

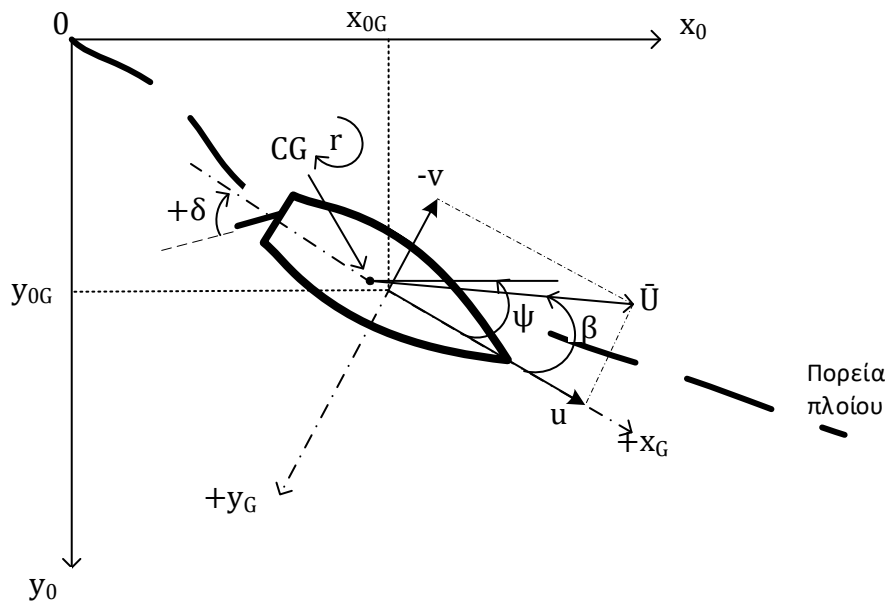
## 2.3 Εξισώσεις Κίνησης

Οι βασικές εξισώσεις κίνησης του πλοίου προκύπτουν από την εφαρμογή των νόμων του Newton σε ένα γεωκεντρικό αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Όπως προαναφέρθηκε για τις περιπτώσεις ΑΠ αρκεί το μοντέλο των 3 DoF (sway, surge και yaw) οπότε από το **Σχ. 8** έπονται οι κάτωθι εξισώσεις κίνησης:

$$X_0 = m\ddot{x}_{0G} \quad (2.1)$$

$$Y_0 = m\ddot{y}_{0G} \quad (2.2)$$

$$N = I_{zz}\ddot{\psi} \quad (2.3)$$



Σχήμα 8: Η κίνηση του πλοίου στο οριζόντιο επίπεδο

Εφαρμόζοντας τις δυνάμεις / ροπές πάνω στο πλοίο (σωματόδετο σύστημα αναφοράς) οι εξισώσεις (2.1), (2.2) και (2.3) μετατρέπονται στις (2.4), (2.5) και (2.6) ως εξής:

Όσον αφορά τις ταχύτητες ισχύει:

$$\dot{x}_{0G} = u \cos \psi + v \sin \psi$$

$$\dot{y}_{0G} = -u \sin \psi + v \cos \psi$$

Από την παράγωγο των ταχυτήτων έχουμε τις επιταχύνσεις:

$$\ddot{x}_{0G} = \dot{u} \cos \psi - \dot{v} \sin \psi + (u \sin \psi - v \cos \psi) \dot{\psi}$$

$$\ddot{y}_{0G} = \dot{u} \sin \psi + \dot{v} \cos \psi + (u \cos \psi + v \sin \psi) \dot{\psi}$$

Αντικαθιστώντας τις επιταχύνσεις στους τύπους (2.1) και (2.2) έχουμε:

$$X_0 = m(\dot{u} \cos \psi + \dot{v} \sin \psi + (-u \sin \psi + v \cos \psi) \dot{\psi})$$

$$Y_0 = m(\dot{u} \sin \psi + \dot{v} \cos \psi + (u \cos \psi + v \sin \psi) \dot{\psi})$$

Ισχύει όμως,

$$X_0 = X \cos \psi - Y \sin \psi$$

$$Y_0 = X \sin \psi + Y \cos \psi$$



Άρα,

$$X = m(\dot{u} - v\dot{\psi})$$

$$Y = m(\dot{v} - u\dot{\psi})$$

Και αντικαθιστώντας  $\dot{\psi}$  με  $r$  προκύπτουν οι εξισώσεις κίνησης στο σωματόδετο σύστημα συντεταγμένων:

$$X = m(\dot{u} - vr) \quad (2.4)$$

$$Y = m(\dot{v} + ur) \quad (2.5)$$

$$N = I_{zz}\dot{r} \quad (2.6)$$

Μετακινώντας το σημείο εφαρμογής των δυνάμεων στο κέντρο βάρους του πλοίου και με την υπόθεση ότι  $w=0$ ,  $p=0$ ,  $q=0$ ,  $y_G=0$ ,  $z_G=0$ , παίρνουμε τις μη-γραμμικές εξισώσεις κίνησης. [15]

$$X = m(\dot{u} - vr - x_G r^2) \quad (2.7)$$

$$Y = m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) \quad (2.8)$$

$$N = I_{zz}\dot{r} + mx_G(\dot{v} + ur) \quad (2.9)$$

Οι  $X$ ,  $Y$  και  $N$  είναι αποτέλεσμα αρκετών παραγόντων, επειδή, αφορούν τις δυνάμεις και ροπές που ασκούνται στο πλοίο κατά τη διάρκεια ελιγμών (maneuver). Αφενός των υδροδυναμικών δυνάμεων, που προκαλούνται στο κύτος του πλοίου από την ίδια του την ταχύτητα / την επιτάχυνση, την στρέψη της προπέλας και την εκτροπή του πηδαλίου. Αφετέρου των περιβαλλοντικών δυνάμεων από κύματα, άνεμο και ρεύματα.

Οι παραπάνω εξισώσεις, αν και περιγράφουν την κίνηση του πλοίου ικανοποιητικά, έχουν ενσωματωμένες αρκετές παραδοχές. Πιο πλήρη περιγραφή των εξισώσεων αυτών δίνει ο Abkowitz (1964) στις διαλέξεις του για την επιρροή της υδροδυναμικής του πλοίου στην πηδαλιούχηση και την ικανότητα ελιγμών.[15]

Στην ανάλυσή του χρησιμοποιεί το ανάπτυγμα Taylor μέχρι 3<sup>ου</sup> βαθμού, η γενική μορφή του οποίου είναι:

$$f(x) = f(x_0) + \sum_{v=1}^{\infty} \frac{(x-x_0)^v}{v!} f^{(v)}(x_0)$$

Και η ανάπτυξη μέχρι 3<sup>ου</sup> βαθμού είναι:

$$f(x) = f(x_0) + (x-x_0) \frac{df(x_0)}{dx} + \frac{(x-x_0)^2}{2!} \frac{d^2f(x_0)}{dx^2} + \frac{(x-x_0)^3}{3!} \frac{d^3f(x_0)}{dx^3}$$

Με αυτό τον τρόπο δίδονται οι εξισώσεις κίνησης ως εξής:

$$\begin{aligned} X = & X_e + X_{\dot{u}}\dot{u} + X_u u + X_{uu}u^2 + X_{uuu}u^3 + X_{vv}v^2 + X_{rr}r^2 + X_{\delta\delta}\delta^2 + \\ & X_{ru}ru + X_{r\delta}r\delta + X_{v\delta}v\delta + X_{vuu}v^2u + X_{rru}r^2u + X_{\delta\delta u}\delta^2u + \\ & X_{rvu}rvu + X_{r\delta u}r\delta u + X_{v\delta u}v\delta u + X_{rv\delta}rv\delta \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} Y = & Y_e + Y_u u + Y_{uu}u^2 + Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_v v + Y_r r + Y_{\delta}\delta + Y_{\delta u}\delta u + \\ & Y_{vu}vu + Y_{ru}ru + Y_{vuu}vu^2 + Y_{ruu}ru^2 + Y_{\delta uu}\delta u^2 + Y_{vvv}v^3 + Y_{rrr}r^3 + \\ & Y_{\delta\delta\delta}\delta^3 + Y_{rr\delta}r^2\delta + Y_{rvv}r^2v + Y_{vvr}v^2r + Y_{vv\delta}v^2\delta + Y_{\delta\delta r}\delta^2r + \\ & Y_{\delta\delta v}\delta^2v \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} N = & N_e + N_u u + N_{uu}u^2 + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_v v + N_r r + N_{\delta}\delta + N_{\delta u}\delta u + \\ & N_{vu}vu + N_{ru}ru + N_{vuu}vu^2 + N_{ruu}ru^2 + N_{\delta uu}\delta u^2 + N_{vvv}v^3 + \\ & N_{rrr}r^3 + N_{\delta\delta\delta}\delta^3 + N_{rr\delta}r^2\delta + N_{rvv}r^2v + N_{vvr}v^2r + N_{vv\delta}v^2\delta + \\ & N_{vr\delta}vr\delta + N_{\delta\delta r}\delta^2r + N_{\delta\delta v}\delta^2v \end{aligned} \quad (2.12)$$

Οι υδροδυναμικοί παράγωγοι ακολουθούν την σημειογραφία ως ακολούθως:

$$F_e = F(x_0), \quad F_{x_i} = \left. \frac{\partial F(x)}{\partial x_i} \right|_{x_0}, \quad F_{x_i x_j} = \left. \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F(x)}{\partial x_i \partial x_j} \right|_{x_0}, \quad F_{x_i x_j x_k} = \left. \frac{1}{6} \frac{\partial^3 F(x)}{\partial x_i \partial x_j \partial x_k} \right|_{x_0}$$

$F \in \{X, Y, N\}$

Για τον υπολογισμό των υδροδυναμικών παραγώγων, που περιέχονται στις παραπάνω εξισώσεις κίνησης, απαιτείται κατασκευή του κάθε πλοίου υπό κλίμακα και δοκιμών του σε κατάλληλες δεξαμενές. Για τα πειράματα χρησιμοποιούνται τεχνικές όπως του περιστρεφόμενου βραχίονα (Rotating-Arm) και του μηχανισμού κίνησης επιπέδου (PMM – Planar Motion Mechanism).

### 2.3.1 Davidson, Schiff Model<sup>5</sup>

Το 1947 προτάθηκε από τους Davidson και Schiff το ομώνυμο μοντέλο και αφορά τη δύναμη  $Y$  και τη ροπή  $N$ , συγκεκριμένα:

$$Y = Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_v v + Y_r r + Y_{\delta}\delta_R \quad (2.13)$$

$$N = N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_v v + N_r r + N_{\delta}\delta_R \quad (2.14)$$

Εξισώνοντας την (2.8) με την (2.13) και την (2.9) με την (2.14) προκύπτουν:

$$m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) = Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_v v + Y_r r + Y_{\delta}\delta_R \quad (2.15)$$

$$I_{zz}\dot{r} + mx_G(\dot{v} + ur) = N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_v v + N_r r + N_{\delta}\delta_R \quad (2.16)$$

Περιγράφοντας στον χώρο κατάστασης, οι (2.15) και (2.16) μετατρέπονται στους πίνακες:

$$\begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} \\ mx_G - N_{\dot{v}} & I_{zz} - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_v & Y_r - mu_0 \\ N_v & N_r - mx_G u_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_{\delta} \\ N_{\delta} \end{bmatrix} \delta_R \quad (2.17)$$

Με διάνυσμα κατάστασης  $\mathcal{V}_r = [v \ r]^T$  και  $u = \delta_R$  τότε:

$$M\dot{\mathcal{V}} + N(u_0)\mathcal{V} = b\delta_R \xrightarrow{x=[v \ r]^T} \dot{x} = Ax + b\delta = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \delta \quad (2.18)$$

Οι σταθερές υπολογίζονται από τους παρακάτω τύπους:

$$\alpha_{11} = \frac{(I_{zz} - N_{\dot{r}})Y_v - (mx_G - Y_{\dot{r}})N_v}{\det(M)}$$

$$\alpha_{12} = \frac{(I_{zz} - N_{\dot{r}})(Y_r - mu_0) - (mx_G - Y_{\dot{r}})(N_r - mx_G u_0)}{\det(M)}$$

$$\alpha_{21} = \frac{(m - Y_{\dot{v}})N_v - (mx_G - N_{\dot{v}})Y_v}{\det(M)}$$

$$\alpha_{22} = \frac{(m - Y_{\dot{v}})(N_r - mx_G u_0) - (mx_G - N_{\dot{v}})(Y_r - mu_0)}{\det(M)}$$

$$b_1 = \frac{(I_{zz} - N_{\dot{r}})Y_{\delta} - (mx_G - Y_{\dot{r}})N_{\delta}}{\det(M)}$$

<sup>5</sup> K. S. M. Davidson and L. I. Schiff, "Turning and Course Keeping Qualities," *Trans. Soc. of Nav. Architects Marine Eng.*, vol. 54, 1946.

$$b_2 = \frac{(m - Y_{\dot{v}})N_{\delta} - (mx_G - N_{\dot{v}})Y_{\delta}}{\det(M)}$$

$\det(M)$  εκφράζει την ορίζουσα του πίνακα M.

Ενδεικτικές τιμές για τις παραπάνω σταθερές παρουσιάστηκαν στη μελέτη των K. J. Åström, C. G. Källström (1976) για διαφόρους τύπους πλοίων ως κάτωθι Πίνακα 2. [25]

**Πίνακας 2:** Τιμές παραμέτρων της εξίσωσης (2.18)

<b>Πλοίο</b>	<b>Ναρκοθηρευτικό</b>	<b>Mariner</b>	<b>Tanker</b> <b>(190000 dwt)</b>
Μήκος L (m)	55	161	305
Ταχύτητα U (m/s)	4.0	7.7	8.2
$\alpha_{11}$	-0.863	-0.693	-0.597
$\alpha_{12}$	-0.482	-0.304	-0.372
$\alpha_{21}$	-5.25	-3.41	-3.66
$\alpha_{22}$	-2.45	-2.17	-1.87
$b_1$	0.175	0.207	0.103
$b_2$	-1.38	-1.63	-0.80

### 2.3.2 Nomoto et al. Model

Οι K. Nomoto, T. Taguchi, K. Honda και S. Hirano (1957) αναπαρέστησαν το πλοίο ως σύστημα με είσοδο τη γωνία του πηδαλίου  $\delta$ , έξοδο την γωνία κατεύθυνσης  $\psi$  ενώ το σύστημα βασίστηκε στις εξισώσεις των Davidson και Schiff. Το μοντέλο αυτό έχει περιορισμούς καθώς θεωρείται η πρόσω ταχύτητα σταθερή, συνεπώς ισχύει για μικρές γωνίες πηδαλίου ( $\delta \leq 5^\circ$ ) και σταθερή πρόωση. [21]

Από τις σχέσεις (2.15) και (2.16) έπεται:

$$T_1 T_2 \ddot{r} + (T_1 + T_2) \dot{r} + r = K\delta + K T_3 \delta \quad (\text{yaw})$$

$$T_1 T_2 \ddot{v} + (T_1 + T_2) \dot{v} + v = K_v \delta + K_v T_4 \delta \quad (\text{sway})$$

Μετασχηματίζοντας με Laplace τις σχέσεις προκύπτει το 2<sup>ης</sup> τάξης μοντέλο Nomoto, ειδικότερα:

$$\frac{r}{\delta}(s) = \frac{K(1 + T_3s)}{(1 + T_1s)(1 + T_2s)} \quad (\text{yaw})$$

$$\frac{v}{\delta}(s) = \frac{K_v(1 + T_4s)}{(1 + T_1s)(1 + T_2s)} \quad (\text{sway})$$

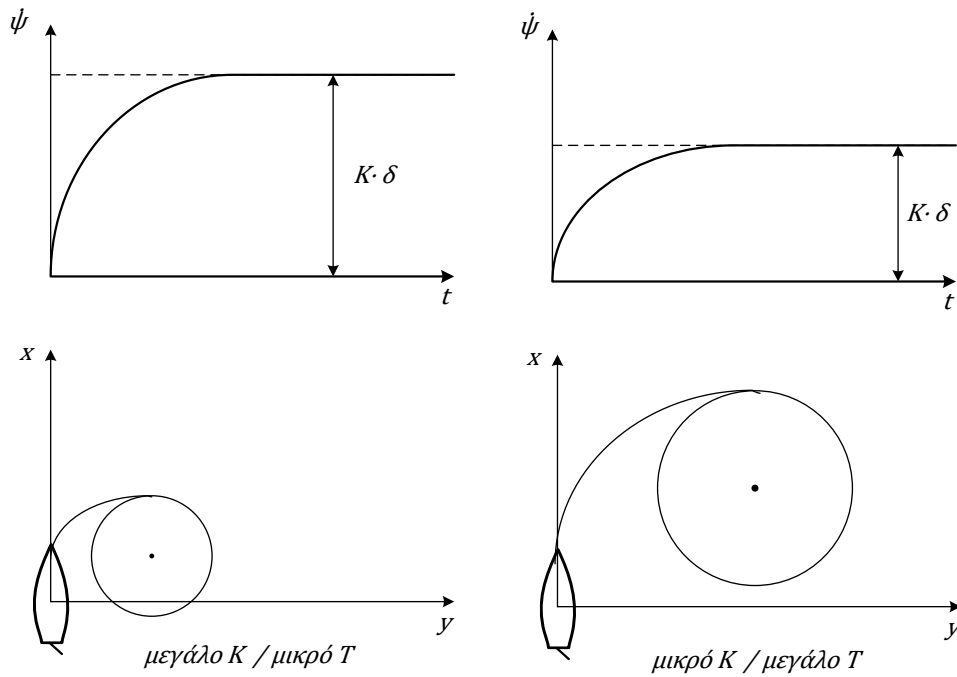
Εάν στη σχέση του yaw ορίσουμε σταθερά  $T_N = T_1 + T_2 - T_3$  τότε προκύπτει το 1<sup>ης</sup> τάξης μοντέλο, ως εξής:

$$\frac{r}{\delta}(s) = \frac{K}{(1 + T_Ns)}$$

Αντικαθιστώντας  $\dot{\psi} = r$  δίδεται η συνάρτηση μεταφοράς, που εφαρμόζεται για εμπορική χρήση στους περισσότερους ΑΠ πλοίων επειδή το μοντέλο είναι απλό και δίνει καλή ακρίβεια της συμπεριφοράς του πλοίου κατά τη διατήρηση της πορείας του. [21],[6]

$$\frac{\psi}{\delta}(s) = \frac{K}{s(1 + T_Ns)} \quad (2.19)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα  $K$  και  $T_N$  ονομάζονται συντελεστές πηδαλιουχίας. Ο μεν πρώτος εκφράζει την ικανότητα στροφής του πλοίου (όσο πιο μεγάλο τόσο πιο μεγάλη η τελική γωνιακή ταχύτητα του πλοίου), ο δε δεύτερος περιγράφει την ταχύτητα απόκρισης στη πηδαλιουχία (όσο πιο μικρή τόσο πιο ταχεία η απόκριση του πλοίου). Οι συντελεστές προκύπτουν από δοκιμές ελιγμών (maneuvering tests).



**Σχήμα 9:** Η επίδραση των  $K$  και  $T_N$  κατά τη διάρκεια ελέγχων στροφής [32]

Ο υπολογισμός των συντελεστών  $K$  και  $T_N$  γίνεται με του ακόλουθους τύπους:

$$K = \frac{n_{11}b_2 - n_{21}b_1}{\det(N)}$$

Όπου:

$$\det(N) = Y_v(N_r - mx_G u) - N_v(Y_r - mu)$$

$$\det(M) = (m - Y_{\dot{v}})(I_z - N_{\dot{r}}) - (mx_G - N_{\dot{v}})(mx_G - Y_{\dot{r}})$$

$$n_{11} = -Y_v$$

$$n_{11} = -N_v$$

$$b_1 = \frac{(I_z - N_{\dot{r}})Y_{\delta} - (mx_G - Y_{\dot{r}})N_{\delta}}{\det(M)}$$

$$b_1 = \frac{(m - Y_{\dot{v}})N_{\delta} - (mx_G - N_{\dot{v}})Y_{\delta}}{\det(M)}$$

Όσον αφορά τη παράσταση στο πεδίο του χρόνου (time-domain) για το 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> τάξης μοντέλο Nomoto έχει ως ακολούθως:

$$T_N \ddot{\psi} + \dot{\psi} = K\delta \quad (2.20)$$

$$T_1 T_2 \psi^{(3)} + (T_1 + T_2) \ddot{\psi} + \dot{\psi} = K(\delta + T_3 \dot{\delta}) \quad (2.21)$$

Ο Fossen (2011) παρουσιάζει χαρακτηριστικά τη διαφορά του 1<sup>ης</sup> από το 2<sup>ης</sup> τάξης μοντέλο Nomoto μέσω της εφαρμογής τους σε δύο πλοία, ένα τύπου mariner και ένα τύπου tanker. Οι παράμετροί τους παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. [6]

**Πίνακας 3:** Παράμετροι 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> τάξης μοντέλου Nomoto

	$L(m)$	$U_0(m/s)$	$V(dwt)$	$K(1/s)$	$T_1(s)$	$T_2(s)$	$T_3(s)$
mariner	161	7.7	16622	0.185	118.0	7.8	18.5
tanker	350	8.1	389100	-0.019	-124.1	16.4	46.0

Ο ακόλουθος κώδικας γραμμένος από τον Fossen στη MATLAB είναι διαθέσιμος μέσω του περιβάλλοντος MSS – Marine Systems Simulator και συνθέτει τη χρονική απόκριση των παραπάνω μοντέλων Nomoto για τα δύο πλοία. [7]

```
% ExNomoto Generates the Nomoto Bode plots of the two ships in Chap-
ter 2

%           See also: nomoto.m

% Author:   Thor I. Fossen
% Date:     19th June 2001
% Revisions:

% Mariner class cargo ship
T1 = 118; T2 = 7.8; T3 = 18.5; K = 0.185;

T = T1+T2-T3;
d1 = [T 1 0];          n1 = K;
d2 = [T1*T2 T1+T2 1 0]; n2 = K*[T3 1];
w=logspace(-4,1,50);
wi = [0.0001 10];
[mag1,phase1] = bode(n1,d1,w);
```

```

[mag2,phase2] = bode(n2,d2,w);

if K < 0    % shift ship phase with 360 deg for course unstable ship
phase1 = phase1-360;
phase2 = phase2-360;
end

clf,subplot(411),semilogx(w,20*log10(mag1),'b'),grid
ylabel('Gain [dB]'),title('Mariner class vessel')
hold on,semilogx(w,20*log10(mag2),'r'),hold off
legend('1st-order model','2nd-order model')
subplot(412),semilogx(w,phase1,'b'),grid
ylabel('Phase [deg]')
hold on,semilogx(w,phase2,'r'),hold off
legend('1st-order model','2nd-order model')

% Oil tanker
T1 = -124.1; T2 = 16.4; T3 = 46.0; K = -0.019;

T = T1+T2-T3;
d1 = [T 1 0];          n1 = K;
d2 = [T1*T2 T1+T2 1 0]; n2 = K*[T3 1];
[mag1,phase1] = bode(n1,d1,w);
[mag2,phase2] = bode(n2,d2,w);

if K < 0    % shift ship phase with 360 deg for course unstable ship
phase1 = phase1-360;
phase2 = phase2-360;

```



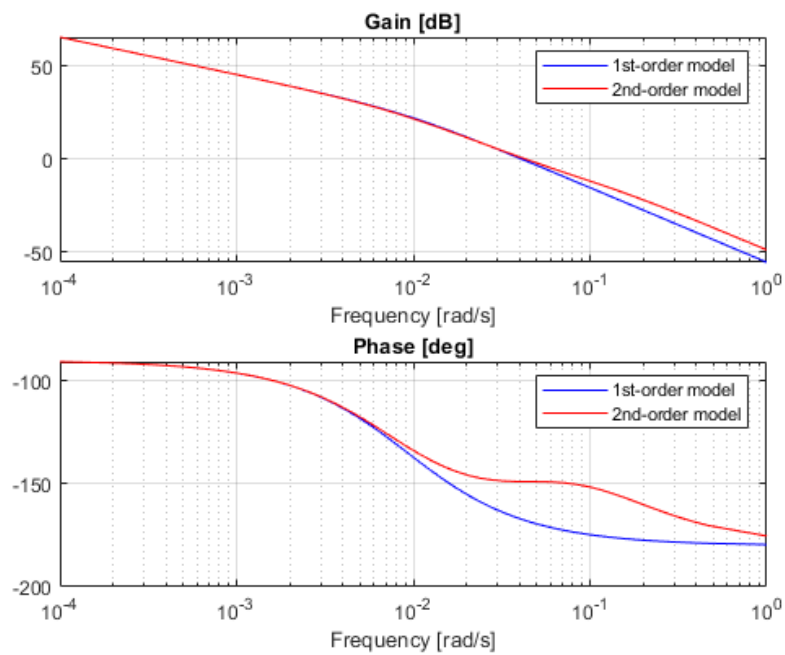
```

end

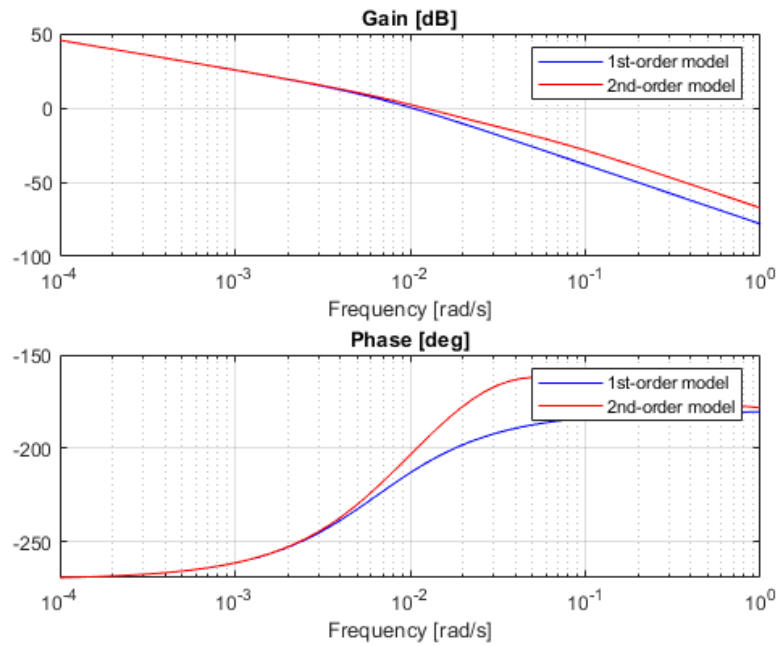
subplot(413),semilogx(w,20*log10(mag1),'b'),grid
ylabel('Gain [dB]'),title('Tanker')
hold on,semilogx(w,20*log10(mag2),'r'),hold off
legend('1st-order model','2nd-order model')

subplot(414),semilogx(w,phase1,'b'),grid
ylabel('Phase [deg]');xlabel('Frequency [rad/s]')
hold on,semilogx(w,phase2,'r'),hold off
legend('1st-order model','2nd-order model')

```



**Σχήμα 10:** Διαγράμματα Bode του πλοίου τύπου *Mariner* (stable ship)



Σχήμα 11: Διαγράμματα Bode του πλοίου τύπου Tanker (unstable ship)

## 2.4 Μοντέλα Διαταραχών

Κατά κύριο λόγο, η κίνηση του πλοίου στην ανοιχτή θάλασσα (deep water) διαταράσσεται από τις περιβαλλοντικές διαταραχές που είναι τα κύματα, ο άνεμος και τα θαλάσσια ρεύματα. Ακόμα, ιδιαίτερες συνθήκες πλεύσης δημιουργούνται ακόμα σε ρηχά ύδατα (swallow water) όπως η κίνηση σε λιμάνια και ποτάμια, σε συνθήκες παραγοποίησης της επιφάνειας της θάλασσας καθώς και της προσέγγισης, ως επί το πλείστον, πολεμικών πλοίων πολύ κοντά το ένα στο άλλο κατά τη διεξαγωγή ασκήσεων. Στον ΑΠ της παρούσας εργασίας συμπεριλαμβάνονται μόνο οι περιβαλλοντικές διαταραχές ήτοι κύματα, άνεμος και θαλάσσια ρεύματα, λόγω της μεγάλης συχνότητας με την οποία εμφανίζονται κατά το μεγαλύτερο μέρος της πλεύσης των πλοίων στην ανοιχτή θάλασσα.

### 2.4.1 Κύματα (Waves)

Από τις πιο σημαντικές διαταραχές στην πλεύση των πλοίων είναι οι δυνάμεις και οι ροπές, που ασκούνται σε αυτά, από την επίδραση των θαλασσίων κυμάτων. Κύρια

αιτία γέννησης των κυμάτων είναι η επίδραση του ανέμου στην επιφάνεια της θάλασσας. Άλλες λιγότερο σημαντικές αιτίες δημιουργίας των κυμάτων είναι η επίδραση της έλξης ουράνιων σωμάτων (Σελήνη), η περιστροφή της γης (επιτάχυνση Coriolis) και σπανιότερα η κατακρήμνιση του βυθού συνέπεια σεισμών (tsunami). [26]

Τα κύματα που δημιουργούνται από τον άνεμο διαδίδονται λόγω της δύναμης της βαρύτητας, γι' αυτό ονομάζονται κύματα βαρύτητας, και το μέγεθός τους εξαρτάται από την ένταση του ανέμου. Επίσης, η παύση του ανέμου δεν επιφέρει και παύση των κυμάτων αλλά αυτά συνεχίζονται για αρκετό διάστημα (swell). Τη σχέση μεταξύ ανέμου και επιφάνειας της θάλασσας τυποποίησε ο ιρλανδός ναύαρχος και υδρογράφος Beaufort (1806) επινοώντας την ομώνυμη εμπειρική κλίμακα η οποία παρουσιάζεται στον Πίνακα 4. Συνοπτικά, τα ανεμογενή κύματα εξαρτώνται από την ταχύτητα / την διάρκεια του ανέμου και την επιφάνεια της θάλασσας στην οποία αναπτύσσονται.

*Πίνακας 4: Η κλίμακα του Beaufort [27]*

<b>Βαθμίδα</b>	<b>Ταχύτητα Ανέμου (Knots)</b>	<b>Περιγραφή Ανέμου</b>	<b>Επίπτωση στην θάλασσα</b>
0	0	Άπνοια	Επίπεδη, κατοπτρική επιφάνεια.
1	1-3	Σχεδόν άπνοια	Κυματισμοί, αλλά χωρίς αφρώδεις κορυφές.
2	4-6	Πολύ ασθενής	Μικρά κύματα.
3	7-10	Ασθενής	Μεγάλες κορυφές κυμάτων, χωρίς να σπάνε.
4	11-16	Σχεδόν μέτριος	Πολλά κύματα, εμφανίζεται αφρός και σταγονίδια νερού, πίτυλος <sup>6</sup> .

<sup>6</sup> «Ο πίτυλος δηλώνει τον κύπο. Σχετίζεται με την απότομη ή ρυθμική κίνηση και το θόρυβο που παράγεται από αυτή. Κυρίως συνδέεται με την ρυθμική κίνηση των κωπηλατών και τον ήχο που παράγεται όταν τα κουπιά χτυπάνε την επιφάνεια του νερού.» <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CE%AF%CF%84%CF%85%CE%BB%CE%BF%CF%82>

5	17-21	Μέτριος	Μέτρια κύματα, με αρκετό αφρός και σταγονίδια νερού.
6	22-27	Ισχυρός	Μεγάλα κύματα αρχίζουν να σχηματίζονται.
7	28-33	Σφοδρός / Σχεδόν Θυελλώδης	Η θάλασσα ογκώνεται (φουσκώνει). Σχηματίζονται ραβδώσεις κατά την διεύθυνση του ανέμου και δημιουργία πιτύλου
8	34-40	Θυελλώδης	Μετρίως υψηλά κύματα μεγάλου μήκους, δημιουργούνται καλά σχηματισμένες ραβδώσεις κατά την διεύθυνση του ανέμου. Δημιουργία αρκετού πιτύλου.
9	41-47	Πολύ Θυελλώδης	Υψηλά κύματα. Πυκνές ραβδώσεις αφρού κατά την διεύθυνση του ανέμου. Οι κορυφές των κυμάτων αρχίζουν να γέρνουν και να κυλίνονται. Ο πίτυλος είναι δυνατόν να επηρεάζει την ορατότητα.
10	48-55	Θύελλα	Πολύ υψηλά κύματα με μακριές προεξάρχουσες ράχες. Η ορατότητα μειώνεται.
11	56-63	Βίαη / Σφοδρή θύελλα	Εξαιρετικά υψηλά ογκώδη κύματα. Ορατότητα περιορισμένη.
12	63	Τυφώνας	Ο αέρας γεμίζει με αφρό και πίτυλο, η θάλασσα κατάλευκη. Ορατότητα πολύ περιορισμένη.

Από μαθηματική άποψη τα κύματα κατηγοριοποιούνται σε απλούς αρμονικούς κυματισμούς (regular waves) και τυχραίους κυματισμούς (irregular waves).

### 2.4.1.1 Regular waves

Στο **Σχ. 11** προβάλλεται ένας αρμονικό κύμα με περίοδο  $T$ , συχνότητα  $f$ , μήκος κύματος  $\lambda$  (είναι η απόσταση από κοιλάδα σε κοιλάδα ή από κορυφή σε κορυφή) ύψος  $H=2\zeta_\alpha$  ( $\zeta_\alpha$  το πλάτος της ταλάντωσης) και κυματαριθμό  $k=2\pi/\lambda$ . Το αρμονικό κύμα δίδεται ως συνάρτηση της απόστασης  $x$  ή του χρόνου  $t$ , ως εξής:

$$\zeta(x) = \zeta_\alpha \cos\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right) \quad (2.22)$$

$$\zeta(t) = \zeta_\alpha \cos(\omega t) \quad (2.23)$$

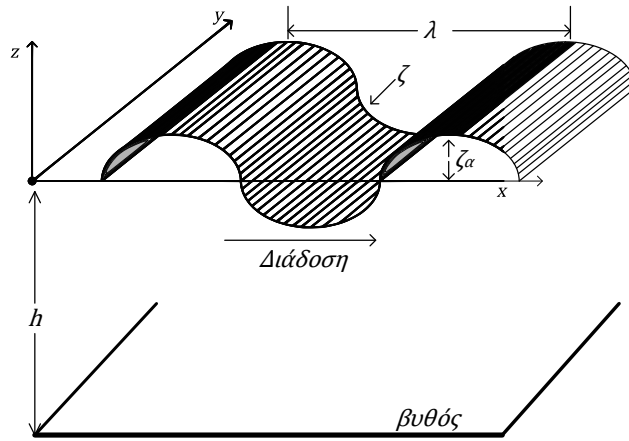
Το παραπάνω ημιτονοειδές<sup>7</sup> κύμα εμφανίζεται συνήθως στη θάλασσα σε χαμηλά πλάτη ( $\zeta$ ).

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \left(\frac{rad}{s}\right) \quad k = \frac{\omega^2}{g} \left(\frac{rad}{m}\right) \quad \lambda = \frac{g}{2\pi} T^2 (m) \quad c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi}} = \frac{\lambda}{T} \left(\frac{m}{sec}\right)$$

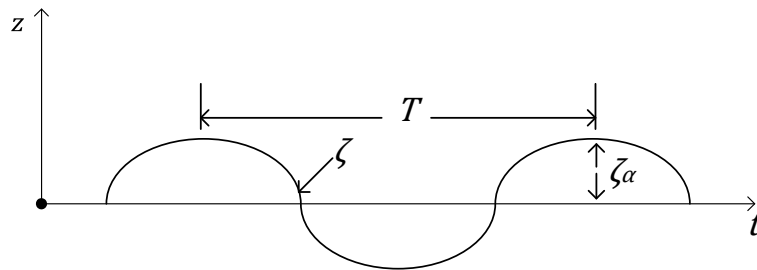
Οι σχέσεις ισχύουν για βαθιά ύδατα, ήτοι  $h \geq \lambda/2$  (**Σχ.12α**) και η επιφάνεια της θάλασσας κατά τους κυματισμούς περιγράφεται τόσο ως προς την απόσταση, όσο και ως προς τον χρόνο, ως εξής:

$$\zeta(x, t) = \zeta_\alpha \cos(kx - \omega t) \quad (2.24)$$

<sup>7</sup> Pierson, Willard J., Jr. and Moskowitz, Lionel A. Proposed Spectral Form for Fully Developed Wind Seas Based on the Similarity Theory of S. A. Kitaigorodskii, Journal of Geophysical Research, Vol. 69, p.5181-5190, 1964.

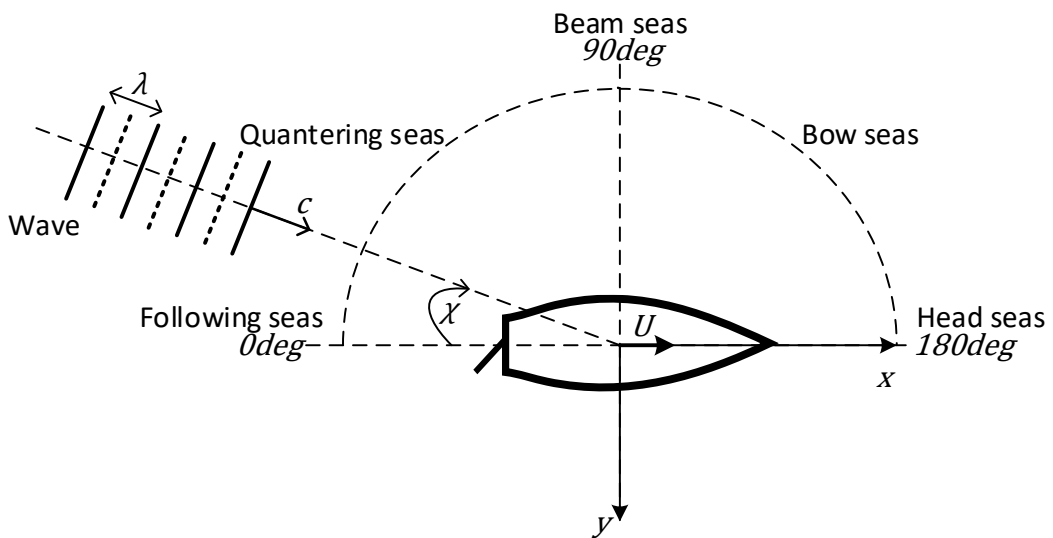


Σχήμα 12α: Αρμονικό κύμα ως συνάρτηση της απόστασης  $x$



Σχήμα 12β: Αρμονικό κύμα ως συνάρτηση του χρόνου  $t$

Αναφορικά με την κατάσταση πλεύσης του πλοίου υπό την επίρεια κυμάτων αυτή προφανώς εξαρτάται από την ταχύτητα πρόωσης  $U$  αλλά και από τη γωνία  $\chi$  (encounter angle) με την οποία προσπίπτουν τα κύματα στο πλοίο.



Σχήμα 13: Γωνία συνάντησης των κυμάτων με το πλοίο.

Ένα ακόμα χρήσιμο μέγεθος στη μελέτη κίνησης του πλοίου είναι η συχνότητα συνάντησης  $\omega_e$  (encounter frequency) που αυτό αντεπεξέρχεται τα κύματα.

$$\omega_e = \omega - \frac{\omega^2 U}{g} \cos(\chi)$$

### 2.4.1.2 Irregular waves

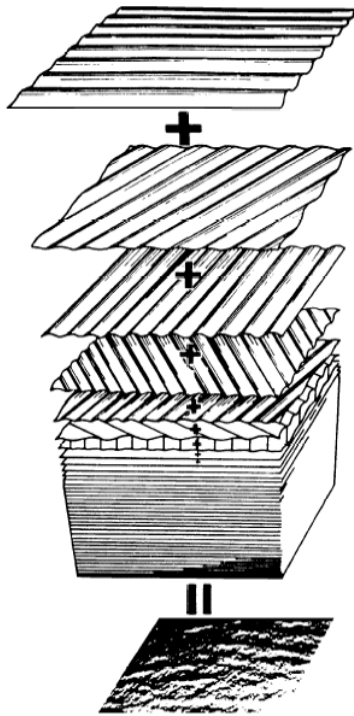
Σε αντίθεση με τα προηγούμενα, το μοτίβο των τυχαίων κυμάτων είναι ιδιαίτερα περίπλοκο. Ωστόσο, απαιτείται η μελέτη των εν λόγω κυματισμών καθώς αποτελεί σημαντική παράμετρο στη κίνηση των πλοίων αλλά και άλλων κατασκευών που αναπτύσσονται στους ωκεανούς.

Ο μόνος τρόπος για να εκφραστεί το παρακάτω (Σχ. 14) περιπλεγμένο μοτίβο είναι στοχαστικά. Για την ανάλυση του χρησιμοποιείται η Αρχή της Υπέρθεσης, δηλαδή, η πρόσθεση απλών αρμονικών κυμάτων, που το καθένα έχει το δικό του ύψος, μήκος, περίοδο και διεύθυνση διάδοσης. Μαθηματικά περιγράφεται ως εξής:

$$\zeta(\xi, t) = \sum_{n=1}^N \zeta_{a_n} \cos(k_n \xi - \omega_n t + \varepsilon_n) \quad (2.25)$$

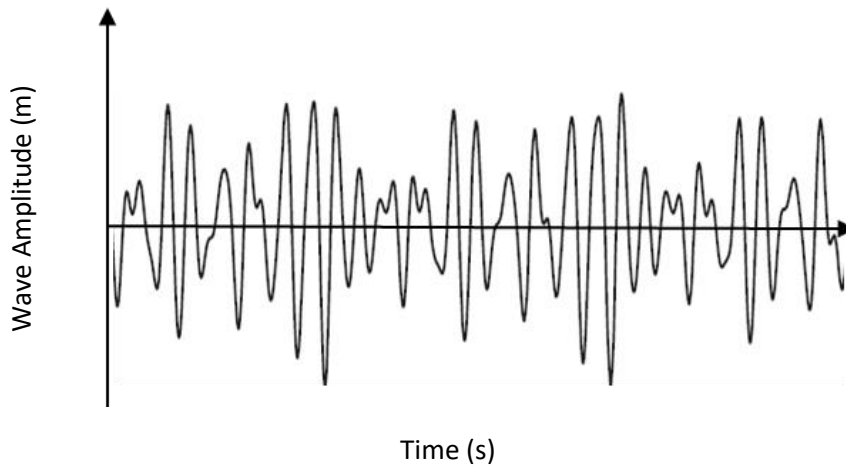
Όπου  $\varepsilon_n$  είναι η φάση της εκάστης συχνότητας και  $\xi$  η παράμετρος σε σχέση με τους άξονες  $x$  και  $y$ :

$$\xi = x \cos \theta + y \sin \theta$$



**Σχήμα 14:** Μοτίβο τυχαίων κυμάτων (Pierson, Neuman and James)

Η στιγμιαία ύψωση των κυμάτων ακολουθεί την κατανομή του Gauss, ενώ τα διάφορα ύψη των κυμάτων μπορούν να υπολογιστούν με ανάλυση Fourier της χρονοσειράς που παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχ. 15.

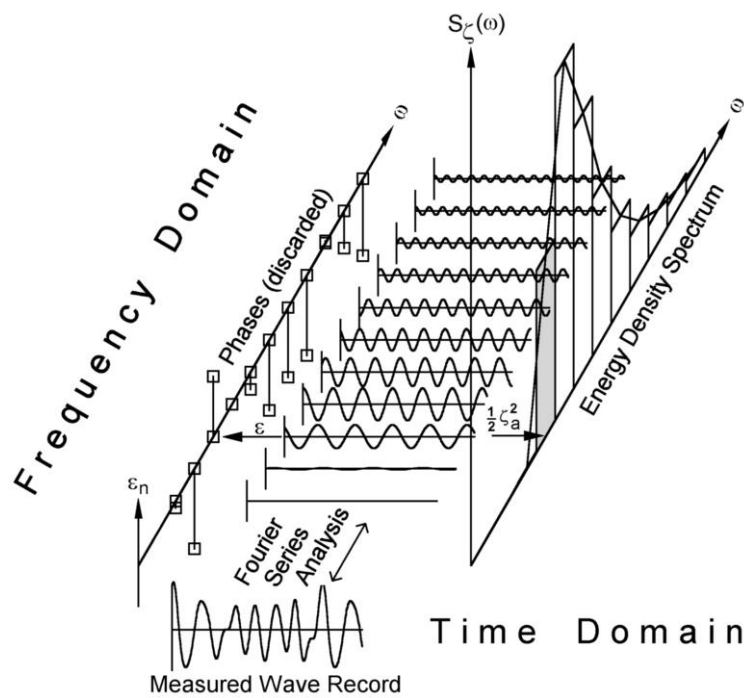


**Σχήμα 15:** Το ύψος ( $\zeta$ ) των τυχαίων κυματισμών συναρτήσει του χρόνου ( $t$ )

Τελικά, η διακύμανση του ύψους  $\zeta_{an}$  εκφράζεται από το φάσμα των κυμάτων (wave spectrum)  $S_{\zeta}(\omega_n)$ , που παρουσιάζεται χαρακτηριστικά στο Σχ.16 και ορίζεται ως ακολούθως:



$$S_{\zeta}(\omega_n) \cdot \Delta\omega = \sum_{\omega_n}^{\omega_n + \Delta\omega} \frac{1}{2} \zeta_{an}^2(\omega)$$



Σχήμα 16: Ανάλυση καταγραφής των κυμάτων [18]

Μία ακόμη παράμετρος στην περιγραφή των κυμάτων είναι το σημαντικό ύψος κυματισμού (significant wave height), που συμβολίζεται  $H_s$  ή  $H_{1/3}$ . Το σημαντικό ύψος  $H_{1/3}$  αντιστοιχεί στον μέσο όρο του 33% των υψηλότερων παρατηρούμενων κυμάτων.

Στην φασματική ανάλυση σημαντικό ρόλο έχουν και οι φασματικές ροπές οι οποίες δίδονται υπό τον εξής γενικό τύπο:

$$m_r = \int_0^{\infty} \omega^r S(\omega) d\omega$$

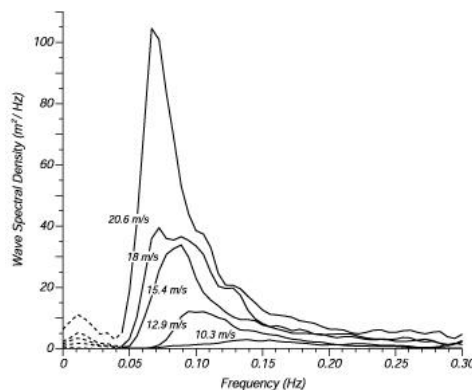
Το  $S(\omega)$  είναι το φάσμα της απόκρισης, ενώ για  $r=0$  προκύπτει η ροπή μηδενικής τάξης  $m_0$  που είναι και η μέση τετραγωνική τιμή (rms). Το σημαντικό ύψος  $H_{1/3}$  και η ροπή μηδενικής τάξης  $m_0$  συνδέονται με την ακόλουθη σχέση:

$$H_{1/3} = 4\sqrt{m_0}$$

Από την μικρή αναφορά που έγινε στην ανάλυση των τυχαίων κυματισμών διαπιστώνεται ότι για την περιγραφή της θαλάσσιας διαταραχής απαιτούνται μετρήσεις στο πεδίο και σε δύσκολες καιρικές συνθήκες, ως εκ τούτου δημιουργήθηκαν μαθηματικά μοντέλα φασμάτων με σκοπό την πρόβλεψη των ανεμογενών κυματισμών. Τα πιο συχνά εφαρμοζόμενα για βαθιά νερά και σε δριμύτατες συνθήκες είναι το Pierson-Moskowitz και το JONSWAP.

### Pierson-Moskowitz Wave Spectrum

Οι Pierson – Moskowitz δημοσίευσαν την εργασία τους για τους θαλάσσιους κυματισμούς το 1964. Η μελέτη αυτή αφορούσε μετρήσεις που έγιναν από βρετανικά μετεωρολογικά πλοία στον βόρειο Ατλαντικό σε «πλήρως ανεπτυγμένες θάλασσες», ήτοι κυματισμούς που προκαλούνται από δυνατούς ανέμους σε μία περιοχή εκατοντάδων μιλίων για αρκετές ημέρες. Στο **Σχ.17** παριστάνεται γραφικά η σχέση της φασματικής πυκνότητας των κυμάτων σε σχέση με την συχνότητά τους.



**Σχήμα 17:** Η φασματική πυκνότητα των κυμάτων κατά Pierson – Moskowitz <sup>8</sup>

(Πηγή: [https://wikiwaves.org/Ocean-Wave\\_Spectra](https://wikiwaves.org/Ocean-Wave_Spectra))

Η μαθηματική περιγραφή του φάσματος κατά Pierson – Moskowitz βασίστηκε σε ένα προγενέστερο φάσμα (Phillips) που δίδεται στη σχέση (2.26).

$$S(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f^5} \quad (2.26)$$

$$\alpha = 8.1 \times 10^{-3} \text{ (σταθερά του Phillips)}$$

<sup>8</sup> Moskowitz L. Estimates of the power spectrums for fully developed seas for wind speeds of 20 to 40 knots, Journal of Geophysical Research, Vol. 69 (24), p.5161–5179, 1964.

g η επιτάχυνση της βαρύτητας

Πολλαπλασιάζοντας την σχέση (2.26) με τον όρο  $\exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{f}{f_0}\right)^{-4}\right]$ , όπου  $f_0$  η συχνότητα που αντιστοιχεί στην μέγιστη ενέργεια, έχουμε την εξίσωση που αποτελεί και το Φάσμα Pierson – Moskowitz:

$$S(f) = \frac{ag^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp\left[-1,25\left(\frac{f}{f_0}\right)^{-4}\right] \quad (2.27)$$

Αναλόγως η φασματική πυκνότητα  $S(\omega)$  είναι:

$$S(\omega) = ag^2 \omega^{-5} \exp\left[-1,25\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-4}\right] \quad (2.28)$$

Όπου  $\omega_0 = g/U_{19.5}$  ( $U_{19.5}$  είναι η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος των 19.5m από την επιφάνεια της θάλασσας).

Η διασπορά (ροπή μηδενικής τάξης) δίδεται ως:

$$\sigma^2 = m_0 = \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega$$

Αυτό το μοντέλο έχει ως προϋποθέσεις αφενός ότι εφαρμόζεται σε πλήρως αναπτυγμένη θάλασσα (fully developed sea) – η περιοχή μελέτης και η διάρκεια πνοής ανέμου είναι άπειρα – αφετέρου ότι η διεύθυνση και η ταχύτητα του ανέμου, που προκαλεί τους κυματισμούς, είναι σταθερή για πολλές ώρες πριν την όποια καταγραφή. Το φάσμα αυτό χρησιμοποιείται στη σχεδίαση κατασκευών σε βαθιά ύδατα.

### **JONSWAP Wave Spectrum<sup>9</sup>**

#### **Joint North Sea Wave Observation Project – JONSWAP:**

Το συγκεκριμένο μοντέλο θεωρείται συνέχεια του Pierson – Moskowitz αλλά για τις μερικά αναπτυγμένες θάλασσες, δηλαδή, τους κυματισμούς που προκαλούνται από άνεμο για μικρό διάστημα και δεν έχει επέλθει κατάσταση ισορροπίας. Προέκυψε από

<sup>9</sup> Hasselmann K., T.P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D.E. Cartwright, K. Enke, J.A. Ewing, H. Gienapp, D.E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Mller, D.J. Olbers, K. Richter, W. Sell, and H. Walden. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift Reihe, A(8) (Nr. 12), p.95, 1973.

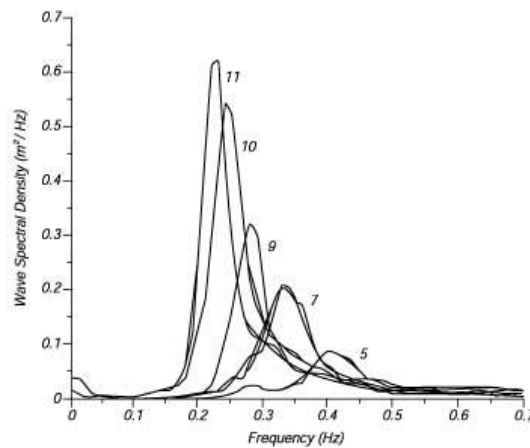
την ανάλυση των στοιχείων που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια του εν λόγω project από τους Hasselmann et al. (1973).

Η μαθηματική περιγραφή προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του φάσματος Pierson – Moskowitz με ένα παράγοντα  $\gamma^r$  ως εξής:

$$S_j(\omega) = ag^2\omega^{-5} \exp\left[-1,25\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-4}\right] \gamma^r \quad (2.29)$$

$$r = \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2\omega_p^2}\right]$$

Όπου τα  $\gamma$  και  $\sigma$  ονομάζονται παράμετρος κορυφής και σχήματος αντίστοιχα.



**Σχήμα 18:** Το φάσμα των κυμάτων σύμφωνα με τους Hasselmann et al. (1973)

(Πηγή: [https://wikiwaves.org/Ocean-Wave\\_Spectra](https://wikiwaves.org/Ocean-Wave_Spectra))

## 2.4.2 Άνεμος (Wind)

Η επόμενη σημαντική διαταραχή που δύναται να επηρεάσει την πλεύση του πλοίου είναι ο Άνεμος. Οι δυνάμεις στους άξονες X, Y και η ροπή N, που ασκούνται στο πλοίο από την επίδραση του ανέμου μελετήθηκαν από τον Isherwood<sup>10</sup> (1972) και παρατίθεται παρακάτω:

$$X_{wind} = \frac{1}{2} C_X \rho V^2 A_T \quad (2.30)$$

<sup>10</sup> R. M. Isherwood, Wind Resistance of Merchant Ships. The Royal Institution of Naval Architects. 1972

$$Y_{wind} = \frac{1}{2} C_Y \rho V^2 A_L \quad (2.31)$$

$$N_{wind} = \frac{1}{2} C_N \rho V^2 A_L L \quad (2.32)$$

Όπου:

$\rho$  (Kg/m<sup>3</sup>) είναι η πυκνότητα του ατμοσφαιρικού αέρα,

$V$  (knots) είναι η σχετική ταχύτητα του αέρα,

$A_T$  (m<sup>2</sup>) είναι η εγκάρσια ή (transverse) επιφάνεια του πλοίου εκτεθειμένη στον άνεμο.

$A_L$  (m<sup>2</sup>) είναι η πλευρική (lateral) επιφάνεια του πλοίου εκτεθειμένη στον άνεμο.

$L$  (m) είναι το μήκος του πλοίου.

Οι γεωμετρικοί παράμετροι  $C_X$ ,  $C_Y$  και  $C_N$  έχουν την ακόλουθη μορφή:

$$C_X = A_0 + A_1 \frac{2A_L}{L^2} + A_2 \frac{2A_T}{B^2} + A_3 \frac{L}{B} + A_4 \frac{S}{L} + A_5 \frac{C}{L} + A_6 M$$

$$C_Y = B_0 + B_1 \frac{2A_L}{L^2} + B_2 \frac{2A_T}{B^2} + B_3 \frac{L}{B} + B_4 \frac{S_P}{L} + B_5 \frac{C}{L} + B_6 \frac{A_{SS}}{A_L}$$

$$C_N = C_0 + C_1 \frac{2A_L}{L^2} + C_2 \frac{2A_T}{B^2} + C_3 \frac{L}{B} + C_4 \frac{S_P}{L} + C_5 \frac{C}{L}$$

$S$  (m) είναι η περίμετρος πλευρικής επιφάνειας του πλοίου εκτεθειμένη στους ανέμους.

$B$  είναι το πλάτος του πλοίου.

$M$  αριθμός τμημάτων που συνθέτουν την πλευρική επιφάνεια.

$C$  (m) είναι η απόσταση του κέντρου κάθε τμήματος από το κέντρο βάρους του πλοίου.

$A_{SS}$  (m<sup>2</sup>) είναι η εκτεθειμένη στον άνεμο επιφάνεια της υπερκατασκευής του πλοίου.

$\gamma_R^\circ$  σχετική γωνία που σχηματίζεται μεταξύ ανέμου και της πλεύσης του πλοίου.

*Πίνακας 5: Εμπρός και πίσω συνιστώσα της δύναμης του ανέμου*

$\gamma_R^\circ$	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	S.E.
0	2.152	-5.00	0.243	-0.164	-	-	-	0.086
10	1.714	-3.33	0.145	-0.121	-	-	-	0.104
20	1.818	-3.97	0.211	-0.143	-	-	0.033	0.096
30	1.965	-4.81	0.243	-0.154	-	-	0.041	0.117
40	2.333	-5.99	0.189	-0.190	-	-	0.042	0.115
50	1.726	-6.54	-	-0.173	0.348	-	0.048	0.109
60	0.913	-4.68	-	-0.104	0.482	-	0.052	0.082
70	0.457	-2.88	-	-0.068	0.346	-	0.043	0.077
80	0.341	-0.91	-	-0.031	-	-	0.032	0.090
90	0.355	-	-	-	-0.247	-	0.018	0.094
100	0.601	-	-	-	-0.372	-	-0.020	0.096
110	0.651	1.29	-	-	-0.582	-	-0.031	0.090
120	0.564	2.54	-	-	-0.748	-	-0.024	0.100
130	-0.142	3.58	-	0.047	-0.700	-	-0.028	0.105
140	-0.677	3.64	-	0.069	-0.529	-	-0.032	0.123
150	0.723	3.14	-	0.064	-0.475	-	-0.032	0.128
160	-2.148	2.56	-	0.081	-	1.27	-0.027	0.123
170	-2.707	3.97	-0.175	0.126	-	1.81	-	0.115
180	-2.529	3.76	-0.174	0.128	-	1.55	-	0.112
							Mean Standard Error	0.103

*Πίνακας 6: Πλευρική συνιστώσα της δύναμης του ανέμου*

$\gamma_R^\circ$	$B_0$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$	$B_6$	S.E.
10	0.096	0.22	-	-	-	-	-	0.015
20	0.176	0.71	-	-	-	-	-	0.023
30	0.225	1.38	-	0.023	-	-0.29	-	0.030
40	0.329	1.82	-	0.043	-	-0.59	-	0.054
50	0.096	0.22	0.121	-	-	-	-	0.055
60	1.163	0.96	0.101	-	-0.177	-0.88	-	0.049
70	0.916	0.53	0.069	-	-	-0.65	-	0.047
80	0.844	0.55	0.082	-	-	-0.54	-	0.046
90	0.889	-	0.138	-	-	-0.66	-	0.051
100	0.799	-	0.155	-	-	-0.55	-	0.050
110	0.797	-	0.151	-	-	-0.55	-	0.049
120	0.996	-	0.184	-	-0.212	-0.66	0.34	0.047
130	1.014	-	0.191	-	-0.280	-0.69	0.44	0.051
140	0.784	-	0.166	-	-0.209	-0.53	0.38	0.060
150	0.536	-	0.176	-0.029	-0.163	-	0.27	0.055
160	0.251	-	0.106	-0.022	-	-	-	0.036
170	0.125	-	0.046	-0.012	-	-	-	0.22
							Mean Standard Error	0.044

**Πίνακας 7:** Ροπή που προκαλείται στον άξονα Z από τον άνεμο

$\gamma_R^\circ$	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	S.E.
10	0.0596	0.061	-	-	-	-0.074	0.0048
20	0.1106	0.204	-	-	-	-0.170	0.0074
30	0.2258	0.245	-	-	-	-0.380	0.0105
40	0.2017	0.457	-	0.0067	-	-0.472	0.0137
50	0.1759	0.573	-	0.0118	-	-0.523	0.0149
60	0.1925	0.480	-	0.0115	-	-0.546	0.0133
70	0.2133	0.315	-	0.0081	-	-0.523	0.0125
80	0.1827	0.254	-	0.0053	-	-0.443	0.0123
90	0.2627	-	-	-	-	-0.508	0.0141
100	0.2102	-	-0.0195	-	0.0335	-0.492	0.0146
110	0.1567	-	-0.0258	-	0.0497	-0.457	0.0163
120	0.0801	-	-0.0311	-	0.0740	-0.396	0.0179
130	-0.0189	-	-0.0488	0.0101	0.1128	-0.420	0.0166
140	0.0256	-	-0.0422	0.0100	0.0889	-0.463	0.0162
150	0.0552	-	-0.0381	0.0109	0.0689	-0.476	0.0141
160	0.0881	-	-0.0306	0.0091	0.0366	-0.415	0.0105
170	0.0851	-	-0.0122	0.0025	-	-0.220	0.0057
Mean Standard Error							0.0127

### 2.4.3 Ρεύματα (Current)

Τα θαλάσσια Ρεύματα κατηγοριοποιούνται σε επιφανειακά, τα οποία εξαρτώνται από τον άνεμο, και σε βαθιά, τα οποία εξαρτώνται από την διαφορετική πυκνότητα ή/και θερμοκρασία του θαλάσσιου νερού. Εντοπίζονται σε περιορισμένα ύδατα όπως είναι είσοδοι σε λιμάνια και ποτάμια καθώς επίσης και στην ανοιχτή θάλασσα.



Οι ναυτικοί γνώριζαν την ύπαρξή τους από πολύ παλιά και τα εκμεταλλεύονται στην ναυσιπλοΐα για να διατηρούν την ταχύτητα του πλοίου τους. Ωστόσο, μικρή επίδραση έχουν στην κίνηση του πλοίου όσον αφορά την κατεύθυνσή του επί της χαρταχθείσας πορείας ενώ σε σπάνιες περιπτώσεις δύναται να επιφέρουν διατοιχισμό (Van Amerongen, Land, 1979).

Η μαθηματική περιγραφή των θαλασσιών ρευμάτων δίδεται (Fossen (1994), Vukic et al. (1998)) ως μοντέλο 2-διαστάσεων με παραμέτρους την μέση ταχύτητα  $V_c$  και την κατεύθυνση  $\gamma_c$  ως ακολούθως:

$$u_c = V_c \cos(\gamma_c - \psi) \quad (2.33)$$

$$v_c = V_c \sin(\gamma_c - \psi) \quad (2.34)$$

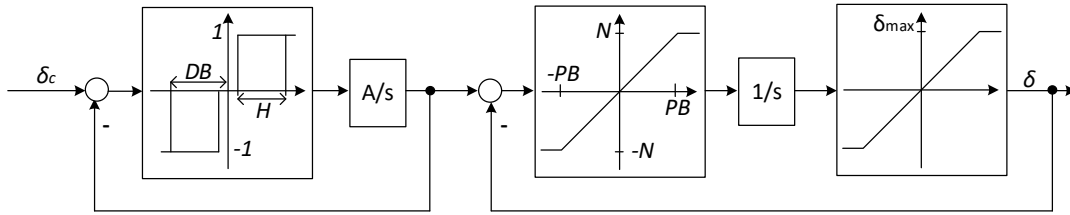
Η μέση ταχύτητα των θαλασσιών ρευμάτων  $V_c$  που χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις με υπολογιστή δύναται να παραχθεί με την 1<sup>η</sup>ς τάξης μέθοδο των Gauss-Markov, όπου προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{dV_c(t)}{dt} + \mu V_c(t) = \omega(t) \quad \mu\epsilon \quad V_{min} \leq V_c(t) \leq V_{max} \quad (2.35)$$

Όπου  $\omega(t)$  είναι ο μηδενικός μέρος όρος της Γκαουσιανής συχνότητας λευκού θορύβου και  $\mu$  είναι μία σταθερά.

## 2.5 Μοντελοποίηση του Πηδαλίου

Το σύστημα διεύθυνσης του πλοίου αποτελείται από το τιμόνι (οιακοστρόφιο), που θα μεταβιβάσει ένα ηλεκτρικό σήμα από τη γέφυρα (διαμέρισμα πηδαλιούχησης) στο μηχανοστάσιο του πηδαλίου, τον ηλεκτρο-υδραυλικό μηχανισμό οδήγησης του πηδαλίου και το ίδιο το πηδάλιο (rudder). Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά τόσο του πηδαλίου (rudder) όσο και των λοιπών μηχανισμών, επιφέρουν σημαντική επίδραση στην ευελιξία του πλοίου και για αυτό το λόγο περιλαμβάνονται στην εργασία.



**Σχήμα 19:** Το μπλοκ διάγραμμα μηχανισμού οδήγησης του πηδαλίου [34]

Το σύστημα ελέγχου του πηδαλίου εξασφαλίζει ότι η επιθυμητή γωνία πηδαλίου ( $\delta$ ) είναι παραπλήσια με το σήμα ( $\delta_c$ ) από τον ΑΠ (βλ. **Σχ. 2**). Έτσι, για την μελέτη των ΑΠ είναι επαρκές το μοντέλο που πρότειναν οι J. Velagic et al. (2003) [34] και παρουσιάζεται στο **Σχ. 19**. Είναι ένα μη γραμμικό σύστημα με δύο σημαντικούς παράγοντες, ήτοι τη μέγιστη γωνία πηδαλίου (maximum rudder angle) και τον ρυθμό πηδαλίου (rudder rate).

Για την πλειοψηφία των πλοίων η μέγιστη γωνία πηδαλίου ( $\delta_{max}$ ) λαμβάνει τιμές  $\pm 35^\circ$  και ο ρυθμός πηδαλίου  $2 \frac{1}{3}^\circ/\text{sec} \leq \dot{\delta}_{max} \leq 7^\circ/\text{sec}$ . Οι τιμές των παραμέτρων [34] του συστήματος που παρουσιάστηκε στο **Σχ. 19** είναι οι ακόλουθες:

$$A = 4, \quad DB = 1, \quad H = 0.8, \quad PB = 7, \quad N = 5, \quad \delta_{max} = 35$$

## 2.6 Πρόβλημα Ελέγχου Εγκάρσιας Πορείας Πλοίου

Ο έλεγχος της εγκάρσιας πορείας του πλοίου αφορά την κατεύθυνσή του (heading) και την δυνατότητα στροφής του (turning), οπότε είναι αναγκαίο να πληροί τα εξής κριτήρια [30]:

α. Οι αλλαγές στην προκαθορισμένη πορεία του πλοίου απαιτείται να γίνονται ταχύτατα και με ακρίβεια. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό όταν οι ελιγμοί αλλαγής πορείας γίνονται σε περιορισμένα ύδατα (πχ λιμάνια) ή σε περιοχές με αυξημένη κίνηση.

β. Η πηδαλιούχηση οφείλει να διατηρεί το πλοίο στην πορεία του με τις λιγότερες διορθωτικές κινήσεις στο πηδάλιο. Πρόκειται για την αντιμετώπιση της περιστροφής του Πλοίου κατά τον άξονα Z (yaw effects) προκειμένου να εξοικονομείται

ενέργεια και να αποφεύγεται η άσκοπη καταπόνηση των μηχανημάτων που απαρτίζουν το σύστημα του πηδαλίου.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί για τη σχεδίαση του συγκεκριμένου ελέγχου δεν χρειάζεται η ανάλυση των κινήσεων του πλοίου και στους 6 DoF, επειδή η κίνησή του περιορίζεται σε συγκεκριμένες διαστάσεις, συνεπώς προτείνεται (J. Van Amerongen, 1982) ένα μοντέλο 3 DoF που περιλαμβάνει την γραμμική κίνηση στον άξονα  $y$  (sway), την γραμμική κίνηση στον άξονα  $x$  (surge) και την περιστροφική κίνηση στον άξονα  $z$  (yaw).

Επιπλέον, ο έλεγχος οφείλει να αντιμετωπίσει τις διαταραχές που εκδηλώνονται από το περιβάλλον στο οποίο κινείται το πλοίο, ήτοι κύματα, άνεμο και ρεύματα, όπως αναδείχθηκε στην προηγούμενη ενότητα η επιρροή τους στην κίνηση του πλοίου.

## 2.6.1 Τεχνικές Ελέγχου

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστεί η τεχνική ελέγχου που θα χρησιμοποιηθεί στον ΑΠ. Αρχικά συζητείται ο έλεγχος Τριών Όρων (PID) επειδή είναι η πιο συνηθισμένη τεχνική ελέγχου. Ωστόσο, η ρύθμιση των παραμέτρων των ελεγκτών PID στους ΑΠ είναι ιδιαίτερα δύσκολη λόγω του μεγάλου αριθμού πιθανών συνδυασμών ρυθμίσεων και της έλλειψης σαφών σχέσεων μεταξύ των τιμών τους και των επιχειρησιακών απαιτήσεων ή των περιβαλλοντικών διαταραχών.

Προκειμένου να υλοποιηθούν αξιόπιστοι ΑΠ έχουν προταθεί διάφορες τεχνικές βελτιστοποίησης της ρύθμισης των παραμέτρων των ελεγκτών PID, όπως η χρήση γενετικών αλγορίθμων, ασαφής λογική κ.α. που όμως δεν έχουν βρει πρακτική εφαρμογή. Έτσι, στην παρούσα εργασία προτείνεται η αντικατάσταση του ελεγκτή PID από έναν έτερο στον οποίο θα υλοποιείται η τεχνική του Προβλεπτικού ελέγχου (Model Predictive Control – MPC).

### 2.6.1.1 Έλεγχος PID (Proportional – Integral – Derivative)

Όπως προαναφέρθηκε, από τους πρώτους ελεγκτές που χρησιμοποιήθηκαν στους ΑΠ είναι ο Αναλογικός – Ολοκληρωτικός – Διαφορικός (PID) ελεγκτής. Θεωρείται κλασσικός αφού έχει επικρατήσει στον έλεγχο των περισσότερων διεργασιών. Κύρια

χαρακτηριστικά του είναι η απλότητα στον σχεδιασμό, η ευρωστία και το χαμηλό κόστος. Η δυσκολία που παρουσιάζει αφορά στη ρύθμιση των παραμέτρων του, όμως έχουν αναπτυχθεί διαφορές μέθοδοι για την αντιμετώπισή της.

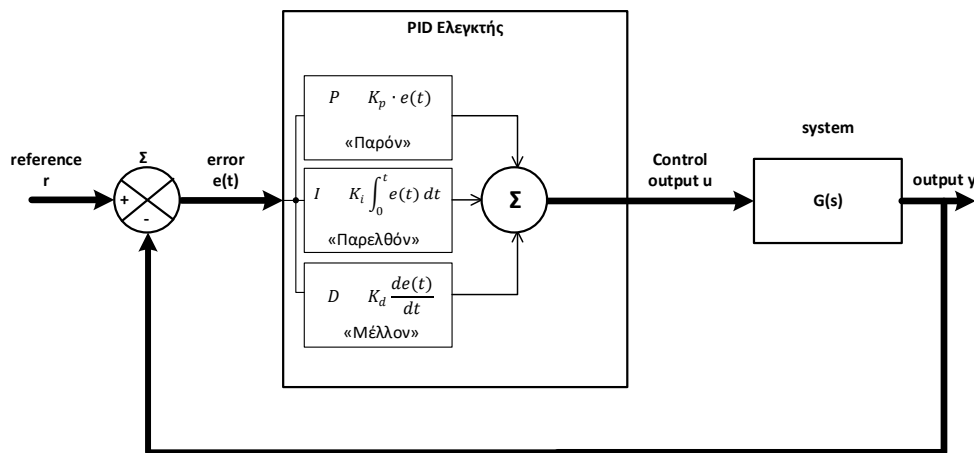
Η μαθηματική μορφή ενός PID ελεγκτή ορίζεται ως εξής:

$$u(t) = k_c e(t) + \frac{k_c}{T_i} \int_0^t e(t) dt + k_c T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.36)$$

Και η συνάρτηση μεταφοράς της (2.36) είναι:

$$G_c(s) = k_c \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.37)$$

Το  $k_c$  είναι το αναλογικό κέρδος,  $T_i$  είναι ο χρόνος ολοκλήρωσης και ο  $T_d$  είναι ο χρόνος διαφορίσης. Η πρακτική σημασία του PID ελεγκτή είναι μέσω του αθροίσματος των τριών όρων να ελέγξουμε το παρελθόν (παράγοντας I), το παρόν (παράγοντας P) και το μέλλον (παράγοντας D) μιας διεργασίας προκειμένου να πετύχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Στο **Σχ. 20** παρουσιάζεται ένας ελεγκτής PID παράλληλης συνδεσμολογίας.



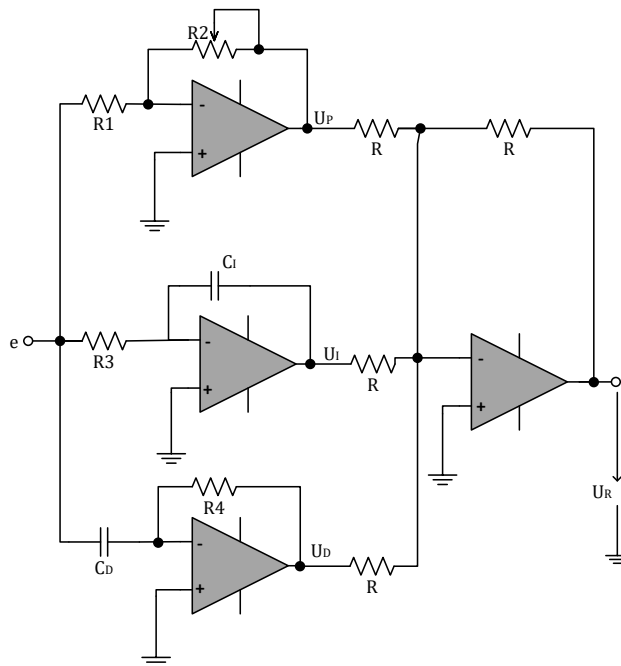
**Σχήμα 20:** Ελεγκτής PID παράλληλης συνδεσμολογίας

Η υλοποίηση του παραπάνω ελεγκτή με αναλογικά ηλεκτρονικά κυκλώματα παρουσιάζεται στο **Σχ. 21**. Ωστόσο, η μορφή αυτή εμφανίζει ευαισθησία στα εξής:

- α. Στον θόρυβο μέτρησης, που προκαλείται από το περιβάλλον, από τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα με τα οποία υλοποιείται και κατασκευαστικά ελαττώματα του ελεγκτή.

- β. Στην αλλαγή του σήματος αναφοράς (derivative kick).
- γ. Στον κορεσμό του σήματος εισόδου (integral windup).
- δ. Κατά την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του ελεγκτή (bumpless function).

Για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών γίνεται προσπάθεια να λαμβάνονται υπόψη κατάλληλες τεχνικές κατά τη σχεδίαση και υλοποίηση του ελεγκτή.



*Σχήμα 21: Υλοποίηση PID ελεγκτή με αναλογικά ηλεκτρονικά κυκλώματα*

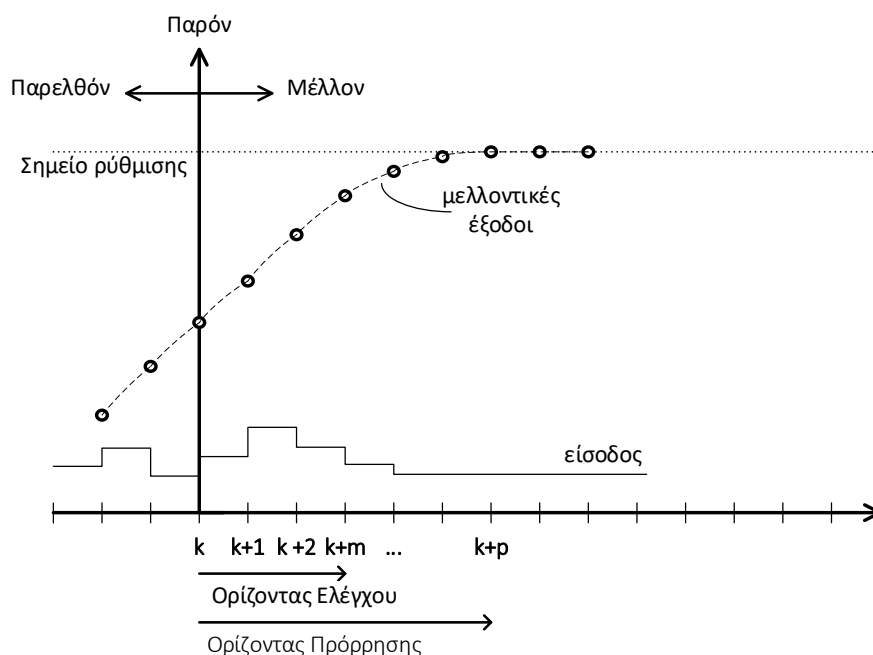
### 2.6.1.2 Προβλεπτικός Έλεγχος (Model Predictive Control - MPC)

Είναι κοινώς παραδεκτό ότι η παραμετροποίηση των ελεγκτών PID είναι πολύ δύσκολη στους ΑΠ πλοίων και όταν υπάρχουν διαταραχές από το περιβάλλον προτιμάται η χειροκίνητη πηδαλιούχηση. Έτσι, διάφορες μοντέρνες τεχνικές ελέγχου προτείνονται, μία εκ των οποίων είναι και ο Προβλεπτικός Έλεγχος.

Ο Προβλεπτικός Έλεγχος είναι μια προχωρημένη μέθοδος ελέγχου, που χρησιμοποιείται σχετικά πρόσφατα, από το 1980. Η μέθοδος αυτή είναι ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης για τον έλεγχο συστημάτων με ανάδραση, όπου βάσει ενός μοντέλου

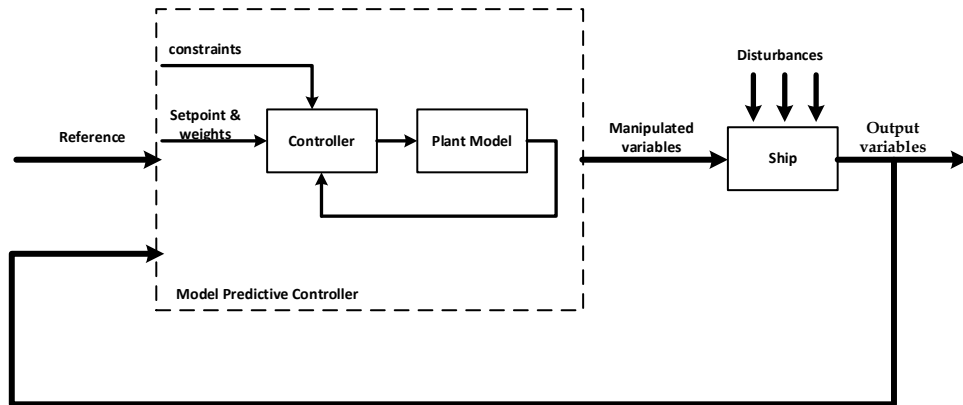
προβλέπονται οι μελλοντικές εξόδους του συστήματος, προκειμένου να πετύχουμε τον βέλτιστο έλεγχο. Στο Σχ. 22 παριστάνεται γραφικά η μέθοδος του MPC.

Τα κύρια χαρακτηριστικά του, για τα οποία χρησιμοποιείται εκτενώς σε πολλές βιομηχανικές διεργασίες στην αεροδιαστημική, την αυτοκινητοβιομηχανία, στις χημικές βιομηχανίες κ.α, είναι ότι μπορεί να χειριστεί με ευκολία συστήματα πολλών εισόδων με πολλές εξόδους (Multi Input – Multi Output, MIMO), που πιθανόν να έχουν αλληλεπιδράσεις μεταξύ των εισόδων – εξόδων. Ακόμα, μπορούν να τοποθετηθούν διάφορα κριτήρια επίδοσης στα εν λόγω συστήματα και διαθέτει τη δυνατότητα επαναρύθμισης. Ωστόσο, απαιτεί για την υλοποίησή του υπολογιστικά συστήματα με ισχυρό, γρήγορο επεξεργαστή και μεγάλη μνήμη, επειδή λύνει το πρόβλημα βελτιστοποίησης κατά τη διάρκεια κάθε βήματος της διεργασίας προς έλεγχο.



Σχήμα 22: Γραφική απεικόνιση του Προβλεπτικού Ελέγχου.

Στο Σχ. 23 αναπαρίσταται ο προτεινόμενος ΑΠ διατήρησης πορείας του πλοίου με προβλεπτικό έλεγχο. Αναλυτικότερα η λειτουργία του θα παρουσιαστεί στην παρακάτω ενότητα της προσομοίωσης.



Σχήμα 23: ΑΠ Πλοίου με MPC

### 3. Προσομοίωση

Σε αυτή την ενότητα θα εξεταστεί ο ΑΠ με την μέθοδο της προσομοίωσης κάνοντας χρήση κατάλληλου λογισμικού (MATLAB/Simulink®). Για να εκτιμηθεί η απόδοση του προτεινόμενου ΑΠ είναι απαραίτητο να εκτελεστούν δοκιμές σε περιβάλλον προσομοίωσης καθότι αυτό είναι βολικό αφενός επειδή δεν διατίθενται κατάλληλες υποδομές για πειραματικές μετρήσεις, αφετέρου προσφέρει η εν λόγω μέθοδος οικονομία σε χρόνο και πόρους.

Σημειώνεται ότι, αρκετοί ερευνητές έχουν διαπιστώσει συμφωνία των αποτελεσμάτων προσομοίωσης, που προσφέρουν τα σύγχρονα λογισμικά, με τις δοκιμές των πραγματικών πλοίων.

Το Simulink® είναι ένα εξαιρετικό λογισμικό που επιτρέπει στον μηχανικό να μοντελοποιεί, προσομοιώνει και να αναλύει διαφόρους τύπους δυναμικών συστημάτων (ηλεκτρικά, μηχανικά και υδραυλικά) με εύκολο τρόπο. Επίσης είναι ισχυρό εργαλείο και χρησιμοποιείται παγκοσμίως από τους μηχανικούς, επειδή διαθέτει μία εκτενής και επεκτάσιμη βιβλιοθήκη με έτοιμα προς χρήση μπλοκ με τα οποία μπορούν εύκολα να δημιουργηθούν γραφικά πολύπλοκα συστήματα (Model-Based Design).

#### 3.1 Επιλογή Μοντέλου Πλοίου

Για τις δοκιμές προσομοίωσης επιλέχθηκε εμπορικό πλοίο χύδην φορτίου (Mariner class), παρόμοιο με της ακόλουθης **Εικ. 1**, όπως αυτό μελετήθηκε από τους K. J. Åström, C. G. Källström (1976) και Fossen (2011) και με τις τιμές των παραμέτρων του να παρουσιάζονται στους **Πίνακες 2** και **3** της παραπάνω ενότητας (2.3).

Στην προσομοίωση του συστήματος κλειστού βρόγχου του εν λόγω πλοίου, τα βασικά στοιχεία του οποίου παρουσιάζονται στον **Πίνακα 8**, χρησιμοποιείται η εξίσωση Nomoto για το μοντέλο του πλοίου και ελεγκτής MPC.

Η αναπαράσταση του συγκεκριμένου πλοίου ως συνάρτηση μεταφοράς και σύμφωνα με το 2<sup>ης</sup> τάξης μοντέλο Nomoto είναι γνωστή και περιγράφεται από την ακόλουθη σχέση προκειμένου όμως να συμπεριληφθεί η μοντελοποίηση και αναπαράσταση του πηδαλίου για το εν λόγω πλοίο ως συνάρτηση μεταφοράς κρίθηκε σκόπιμο



να γίνει προσέγγιση του συστήματος με τη μέθοδο του «μαύρου κουτιού» (Black Box). Με τη μέθοδο αυτή θα γίνει αναγνώριση του συστήματος (system identification) εφαρμόζοντας κατάλληλο σήμα στην είσοδο του και παρακολουθώντας την απόκριση του συστήματος στην έξοδό του.

Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για μαθηματική μοντελοποίηση του συστήματος με την προσέγγιση του «μαύρου κουτιού» είναι το Matlab System Identification Toolbox. Η εφαρμογή System Identification Toolbox παρέχει τη δυνατότητα για δημιουργία μαθηματικών μοντέλων δυναμικών συστημάτων από μετρούμενα δεδομένα εισόδου-εξόδου.

**Πίνακας 8:** Βασικά στοιχεία του πλοίου κλάσης Mariner

Στοιχείο	Σύμβολο	Τιμή
Συνολικό μήκος	$L_{oa}$	171.80m
Μήκος μεταξύ καθέτων	$L_{pp}$	160.93m
Μέγιστο πλάτος	$B$	23.17m
Βύθισμα	$T$	8.23 m
Εκτόπισμα	$\nabla$	18.541,0 m <sup>3</sup>
Ταχύτητα	$u_0$	15 knots



**Εικόνα 1:** Εμπορικό πλοίο (Mariner) χύδην φορτίου ([www.marinetraffic.com](http://www.marinetraffic.com))

## 3.2 Σενάρια Δοκιμών

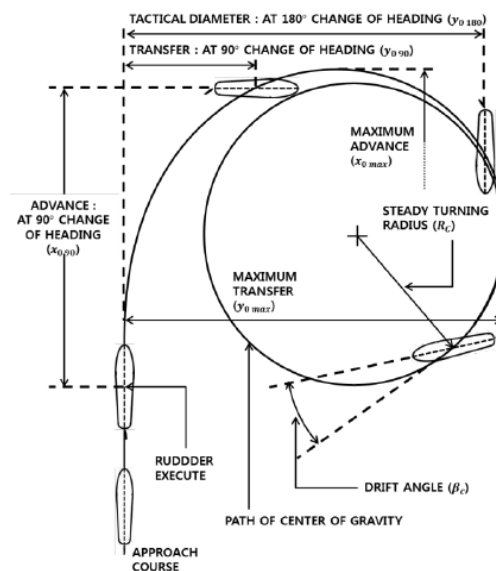
Η ικανότητα ελιγμών (Manoeuvrability) του Πλοίου ορίζεται ως η εγγενής ικανότητα του να αλλάζει την πορεία του. Για την εξέταση αυτής της ικανότητάς του έχουν επινοηθεί διαφορετικά σενάρια δοκιμών, αναλόγως το είδος κίνησης που επιθυμούμε να διερευνηθεί. Στην παρούσα εργασία τα σενάρια που πραγματοποιήθηκαν είναι σύμφωνα με τις οδηγίες και κατευθύνσεις του 27<sup>ου</sup> συνεδρίου του International Towing Tank Conference (ITTC)<sup>11</sup> και την κανονιστική οδηγία MSC.137(76) του IMO.

### 3.2.1 Ικανότητα στροφής (Turning Circle Maneuver)

Σύμφωνα με την κανονιστική οδηγία MSC.137(76) από 4 Δεκεμβρίου 2002 του IMO ο ελιγμός «Turning Circle» ορίζεται ως εξής:

« Είναι ο ελιγμός που πραγματοποιείται τόσο προς τα δεξιά όσο και προς τα αριστερά με γωνία πηδαλίου 35° ή τη μέγιστη επιτρεπόμενη γωνία πηδαλίου στην ταχύτητα δοκιμής, μετά από σταθερή προσέγγιση με μηδενικό ρυθμό εκτροπής.»

Ουσιαστικά είναι ένας κύκλος τουλάχιστον 540° με συγκεκριμένη (πχ 35°) γωνία πηδαλίου και χωρίς να αλλάζει η αρχική ταχύτητα του πλοίου.



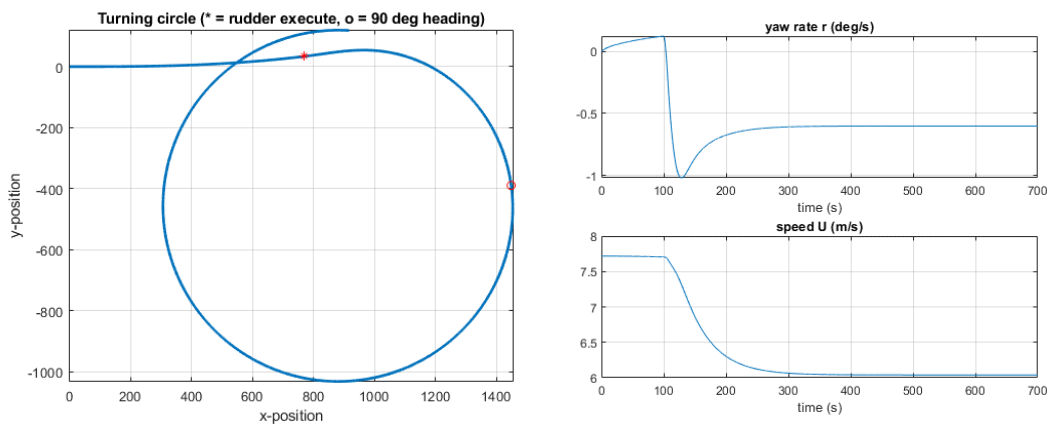
Σχήμα 24: Turning Circle Maneuver [33]

<sup>11</sup> ITTC Quality System Manual Recommended Procedures and Guidelines (2017) «Full Scale Manoeuvring Trials» [33]

Τα κριτήρια που θα πρέπει να πληρούνται κατά τη διάρκεια του συγκεκριμένου ελιγμού είναι πρώτον η φάση Προχώρησης (Advance) να μην ξεπερνά κατά  $4^{1/2}$  φορές το μήκος του πλοίου ( $L_{pp}$ ) και δεύτερον η Τακτική Διάμετρος (Tactical Diameter) να μην ξεπερνά κατά 5 φορές το μήκος του πλοίου.

Για το εμπορικό πλοίο τύπου Mariner η προσομοίωση<sup>12</sup> δίνει τα ακόλουθα στοιχεία:

Rudder execute (x-coordinate):	769 m
Steady turning radius:	576 m
Maximum transfer:	1032 m
Maximum advance:	684 m
Transfer at 90 (deg) heading:	389 m
Advance at 90 (deg) heading:	679 m
Tactical diameter at 180 (deg) heading	1027 m



**Σχήμα 25:** *Turning Circle Maneuver for the Mariner*

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η φάση Προχώρησης είναι 684m εντός των ορίων (max 724,5m) που καθορίζει το κριτήριο, αλλά η Τακτική Διάμετρος είναι 1027m εκτός ορίων (max 805m).

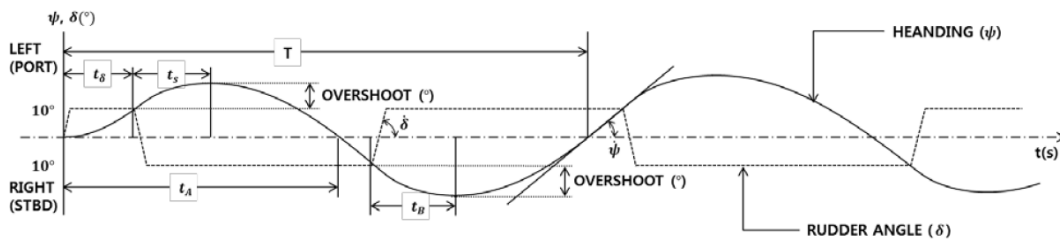
<sup>12</sup> Έγινε στο περιβάλλον του MATLAB με κώδικες από το *Marine Systems Simulator (MSS)*[7]

### 3.2.2 Οφιοειδής ελιγμός (Zig-Zag Maneuver)

Σύμφωνα με την κανονιστική οδηγία MSC.137(76) από 4 Δεκεμβρίου 2002 του IMO ο ελιγμός «Zig-Zag Maneuver» ορίζεται ως εξής:

«Ο οφιοειδής ελιγμός επιτυγχάνεται με την αντιστροφή του πηδαλίου εναλλάξ κατά μοίρες ‘ $\delta$ ’ προς κάθε πλευρά με απόκλιση  $\psi$  από την αρχική πορεία. Μετά από μια σταθερή προσέγγιση το πηδάλιο τοποθετείται προς τα δεξιά (πρώτη εκτέλεση). Όταν η κατεύθυνση είναι  $\psi$  μοίρες από την αρχική πορεία, το πηδάλιο αντιστρέφεται προς την ίδια γωνία προς τα αριστερά (δεύτερη εκτέλεση).»

Η παραπάνω διαδικασία εκτελείται τουλάχιστον τρεις φορές προκειμένου να δημιουργηθεί ένα ιστορικό της γωνίας του πηδαλίου  $\delta(t)$  και της γωνίας στροφής (heading) του πλοίου  $\psi(t)$ , το οποίο συμβολίζεται ως  $\delta/\psi$  και αναπαρίσταται στο Σχ.25. Συνήθως χρησιμοποιούνται οι τιμές 10/10 και 20/20.



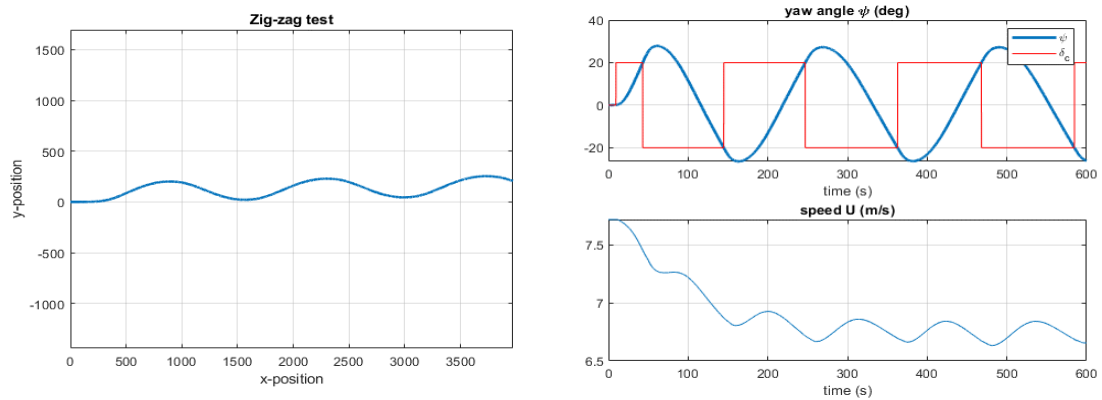
Σχήμα.26: Zig-Zag Maneuver [33]

Τα κριτήρια που θα πρέπει να πληρούνται κατά τη διάρκεια του οφιοειδή ελιγμού και συγκεκριμένα για τιμές 10/10 είναι τα εξής:

α. Η τιμή κατά την πρώτη φορά εκτέλεσης του ελιγμού να μην ξεπερνά τις  $(5+0,5(L/V))$  μοίρες εάν  $L/V$  είναι μεταξύ 10sec και 30sec, όπου  $L$  το μήκος του πλοίου σε m και  $V$  η ταχύτητά του σε m/sec.

β. Η τιμή κατά την δεύτερη φορά εκτέλεσης του ελιγμού να μην ξεπερνά τις  $(17,5+0,75(L/V))$  μοίρες εάν  $L/V$  είναι μεταξύ 10sec και 30sec

Για το εμπορικό πλοίο τύπου Mariner η προσομοίωση<sup>13</sup> δίδει τα ακόλουθα αποτελέσματα:



Σχήμα27: Zig-Zag Maneuver for the Mariner

### 3.3 Υλοποίηση Προσομοιώσεων

Για την υλοποίηση των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο μοντέλο από την βιβλιοθήκη Marine Systems Simulator (MSS<sup>14</sup>). Σε αυτήν περιλαμβάνονται μοντέλα πλοίων, υποβρύχιων οχημάτων, μη επανδρωμένων οχημάτων επιφανείας (θαλάσσης) και επιπλεόντων κατασκευών. Επίσης, η βιβλιοθήκη περιλαμβάνει βαθμίδες (blocks) για καθοδήγηση, πλοήγηση και έλεγχο των μοντέλων με σκοπό την προσομοίωση πραγματικού χρόνου.

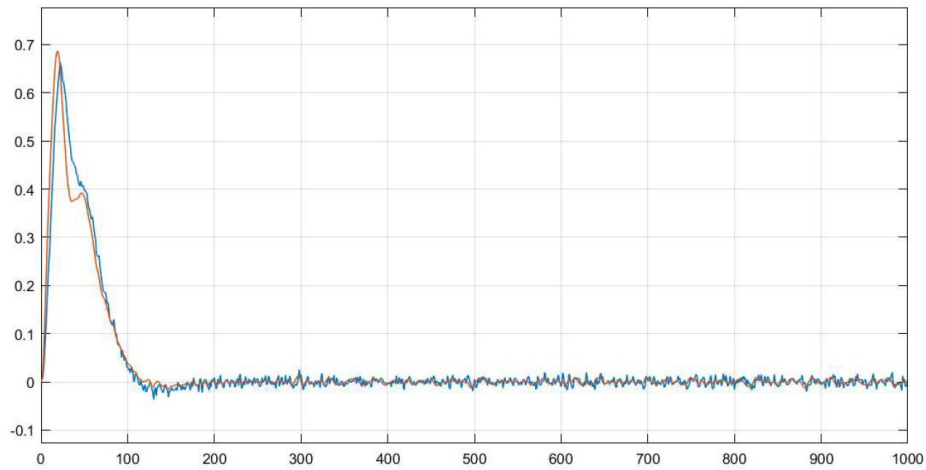
Το υπόψη μοντέλο (**M1**) – της κάτωθι **Εικ. 2** έχει σχεδιαστεί από τον καθηγητή Thor I. Fossen. Είναι ένα κλειστό ΣΑΕ για τον έλεγχο της πορείας του πλοίου. Ο έλεγχος υλοποιείται με ένα ελεγκτή PID ενώ για την μέτρηση χρησιμοποιείται γυροπυξίδα. Για είσοδο λαμβάνει την γωνία ( $\delta$ ) του πηδαλίου (οιακοστρόφειο) και σαν έξοδο εξάγει την γωνία κατεύθυνσης του πλοίου ( $\psi$ ). Η μόνη διαταραχή που επιδρά στο σύστημα είναι αυτή των κυμάτων η οποία επηρεάζει την κατεύθυνση του πλοίου δηλαδή τη γωνία  $\psi$ .

<sup>13</sup> Έγινε στο περιβάλλον του MATLAB® με κώδικες από το *Marine Systems Simulator (MSS)*[7]

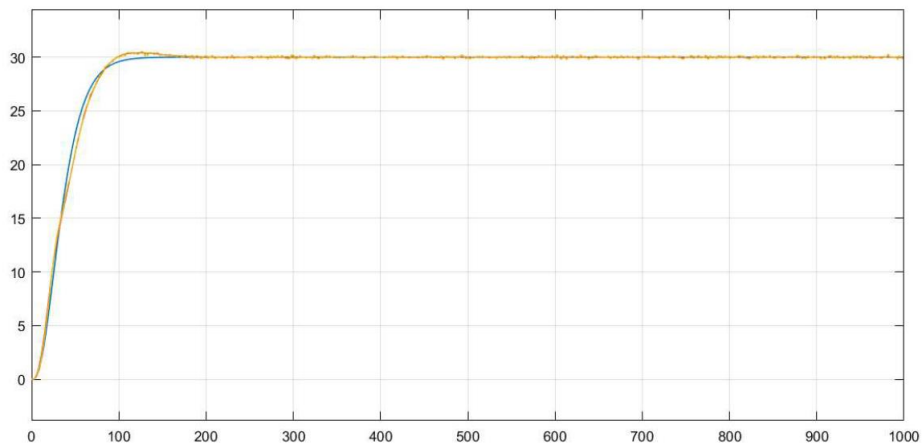
<sup>14</sup> T. I. Fossen and T. Perez (2004). *Marine Systems Simulator (MSS)*

URL: <https://github.com/cybergalactic/MSS>

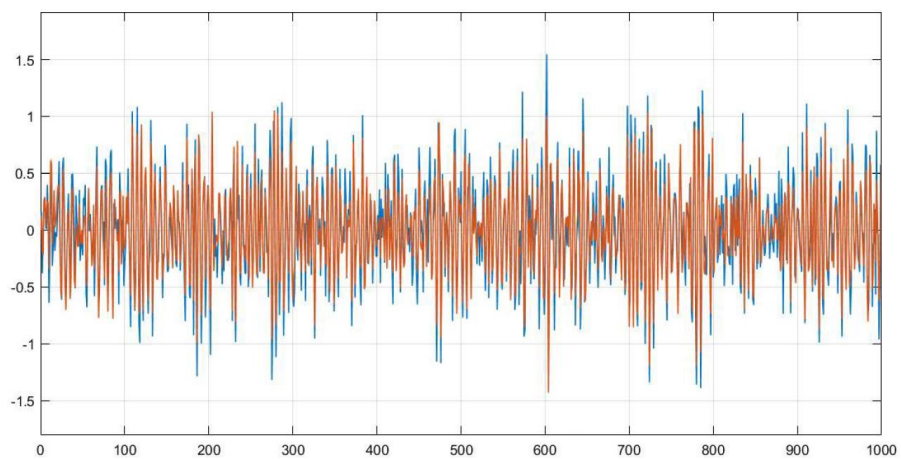




*Εικόνα 5: Απόκριση του πηδαλίου*

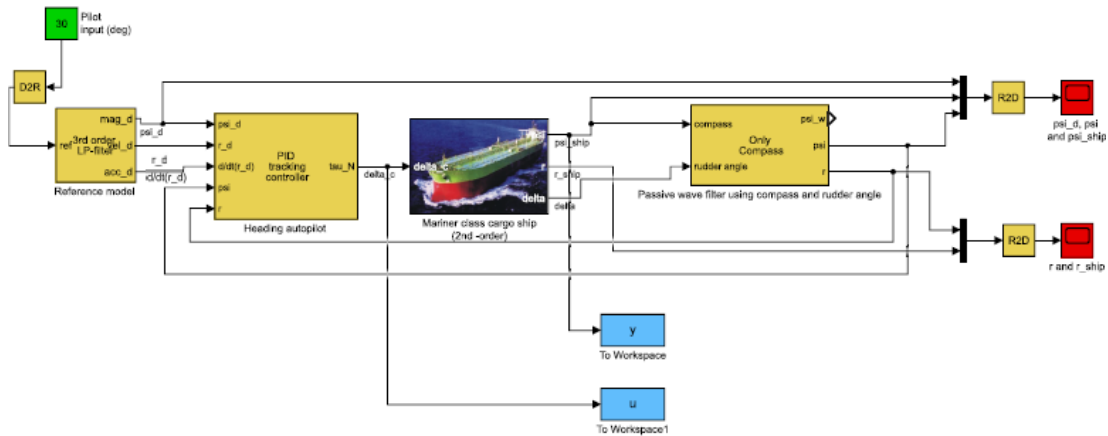


*Εικόνα 6: Απόκριση του πλοίου*



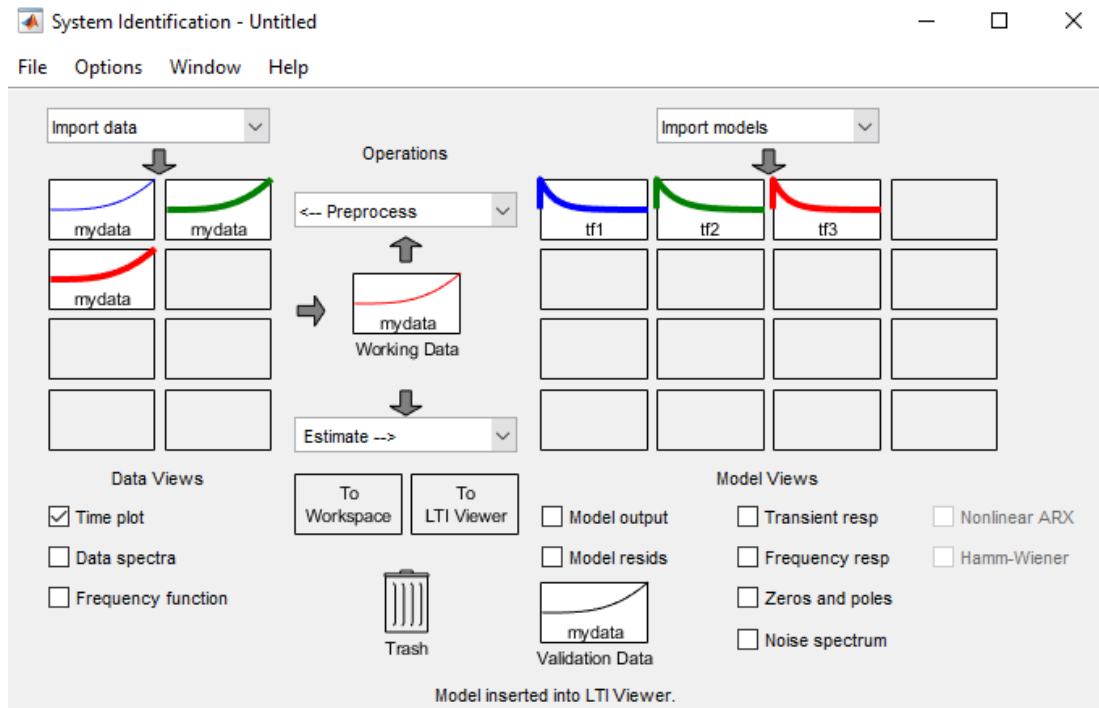
*Εικόνα 7: Απόκριση των κυμάτων*

Απλοποιώντας το **M1**, δηλαδή αφαιρώντας τη διαταραχή των κυμάτων, προκύπτει το ακόλουθο μοντέλο **M1b** από το οποίο λαμβάνουμε τα δεδομένα εισόδου  $u$  και εξόδου  $y$  του συστήματος.



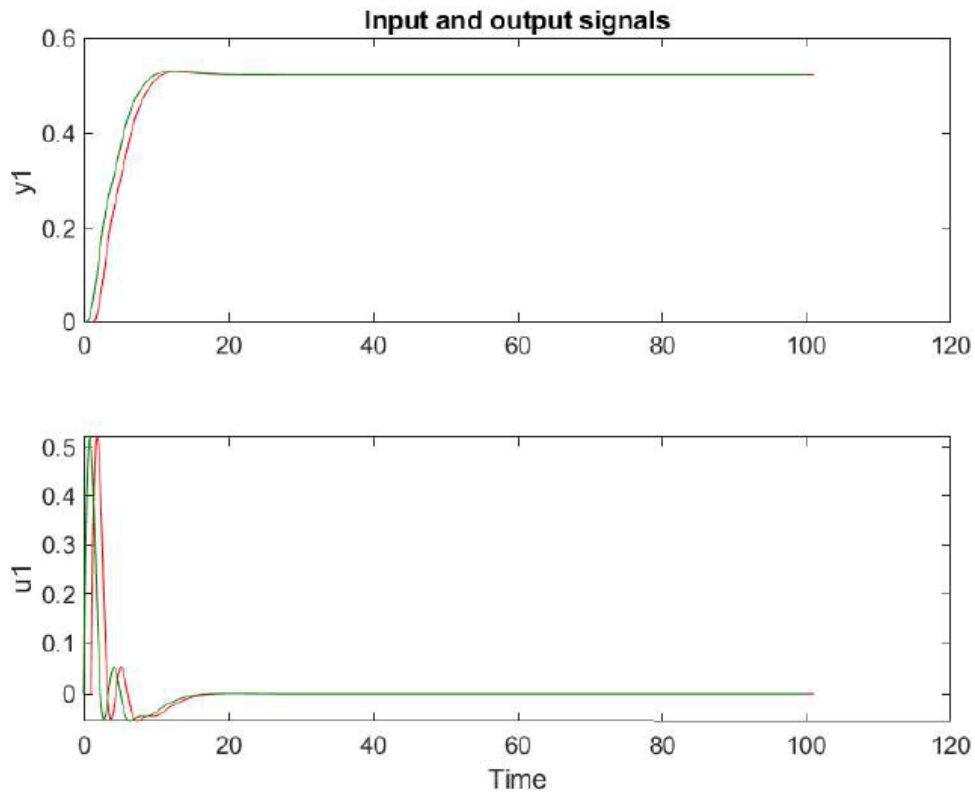
Εικόνα 8: Μοντέλο αναγνώρισης

Με την εντολή «systemIdentification» στη MATLAB καλούμε το System Identification Toolbox (Εικ. 9) στο οποίο εισάγονται τα δεδομένα  $u - y$ . Η γραφική απεικόνιση των δεδομένων που συλλέχθηκαν εμφανίζεται στην Εικ. 10 και 11.

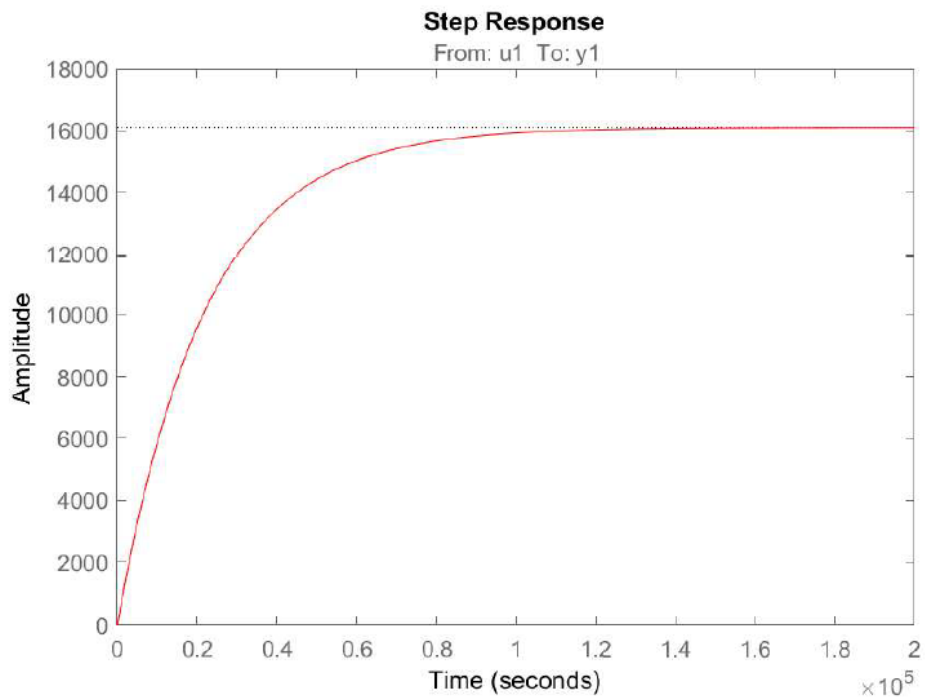


Εικόνα 9: System Identification Toolbox





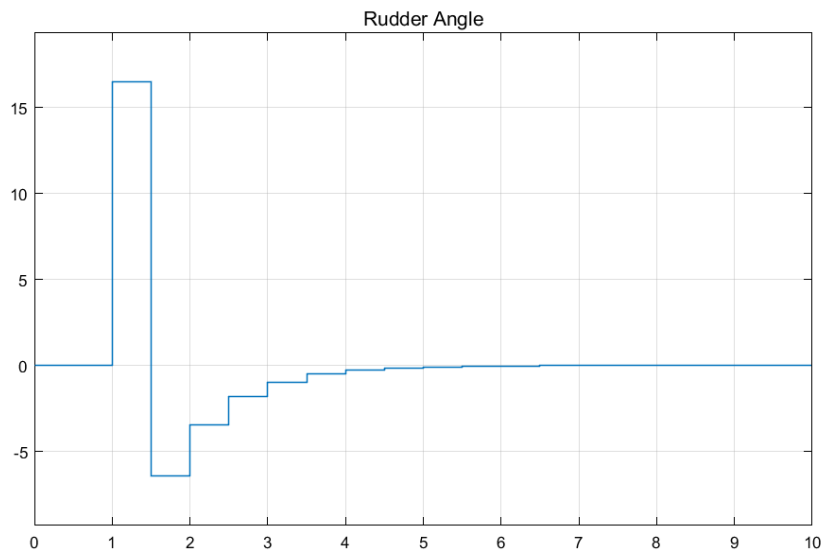
*Εικόνα 10: Σήματα εισόδου - εξόδου*



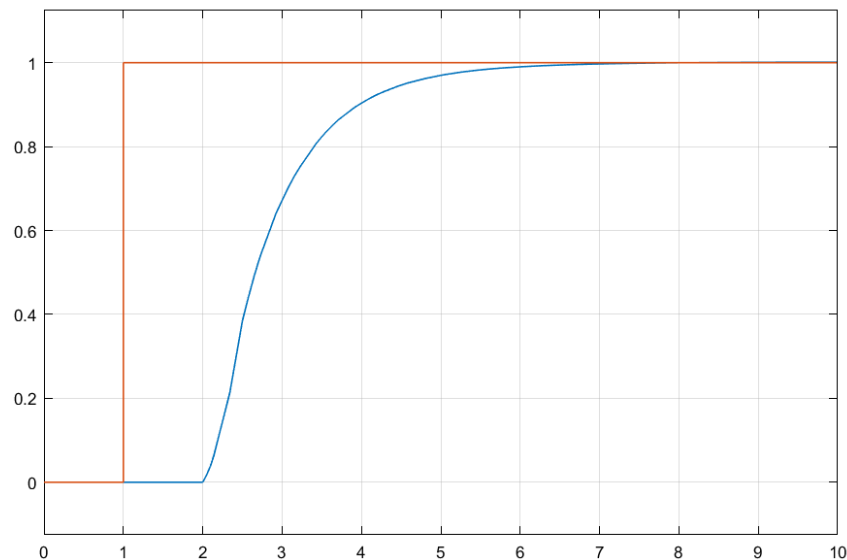
*Εικόνα 11: Βηματική απόκριση εισόδου - εξόδου*



ελεγχόμενου συστήματος δηλαδή την γωνία της κατεύθυνσης ( $\psi$ ) σε συνδυασμό με τη βηματική συνάρτηση αναφοράς.



**Εικόνα 13:** Σήμα εξόδου

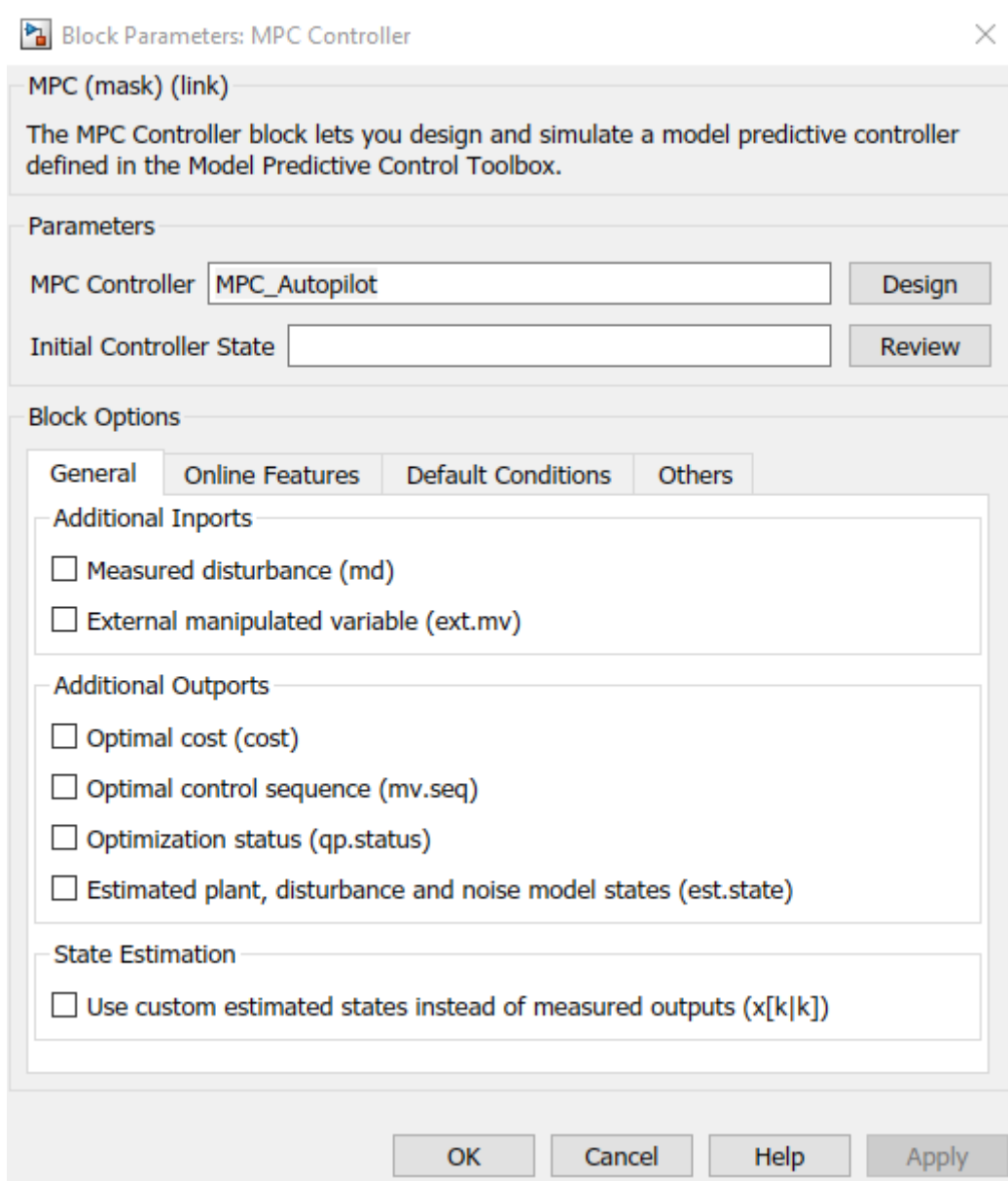


**Εικόνα 14:** Σήματα εισόδου και αναφοράς

Η βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς σε σχέση με τη χρήση PID ελεγκτή είναι εντυπωσιακή. Σημειώνεται ότι για την επιλογή του οριζοντα πρόβλεψης / οριζοντα ελέγχου ακολουθήθηκε ο εμπειρικός κανόνα όπου ο οριζοντας ελέγχου είναι το 20% του οριζοντα πρόβλεψης.

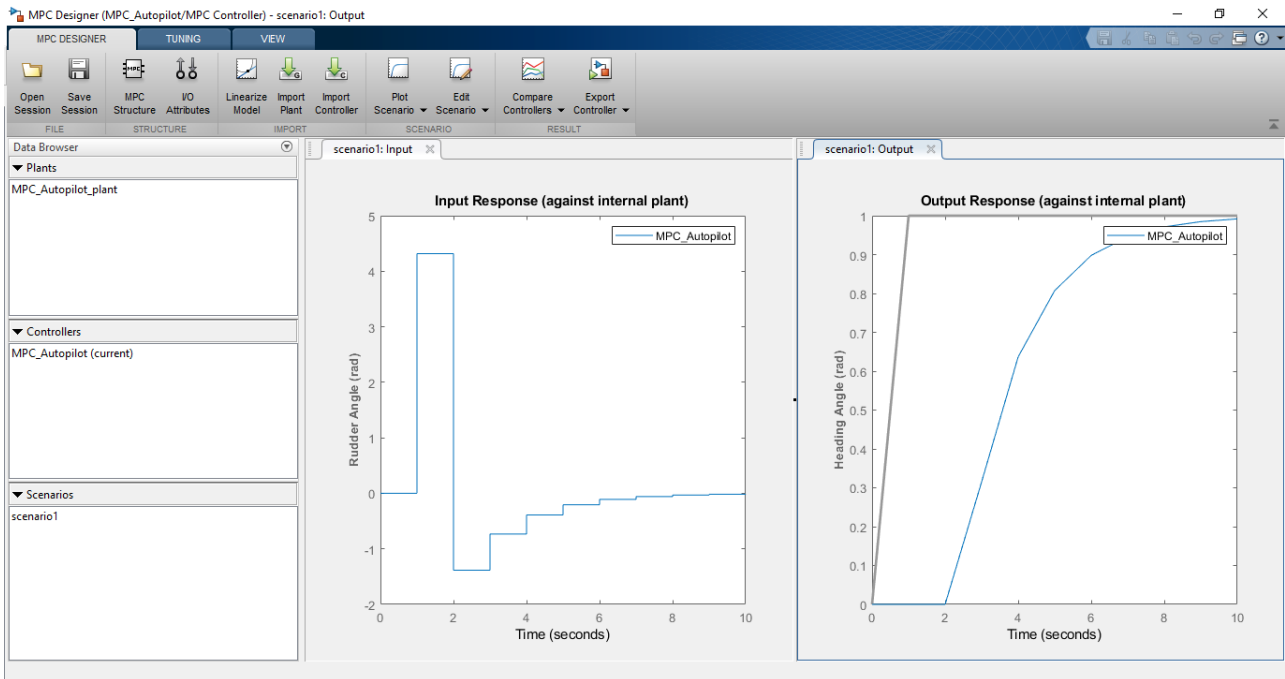
Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιήθηκε ο `mpcDesigner` (toolbox του MATLAB) τόσο για την παραμετροποίηση του ελεγκτή, όσο και για εισαγωγή διαταραχών στην είσοδο και έξοδο του συστήματος. Οι διαταραχές αυτές προσομοιώνουν σφάλμα στην μέτρηση της γωνίας κατεύθυνσης και εσφαλμένη γωνία πηδαλίου κατά την αντιμετώπιση θαλάσσιων διαταραχών.

Για να καλέσουμε το `mpcDesigner` κάνουμε διπλό κλικ στο μπλοκ του MPC Controller και επιλέγουμε Design στο παράθυρο της **Εικ.15**, διαφορετικά το πληκτρολογούμε σαν εντολή στο Command Window του MATLAB.

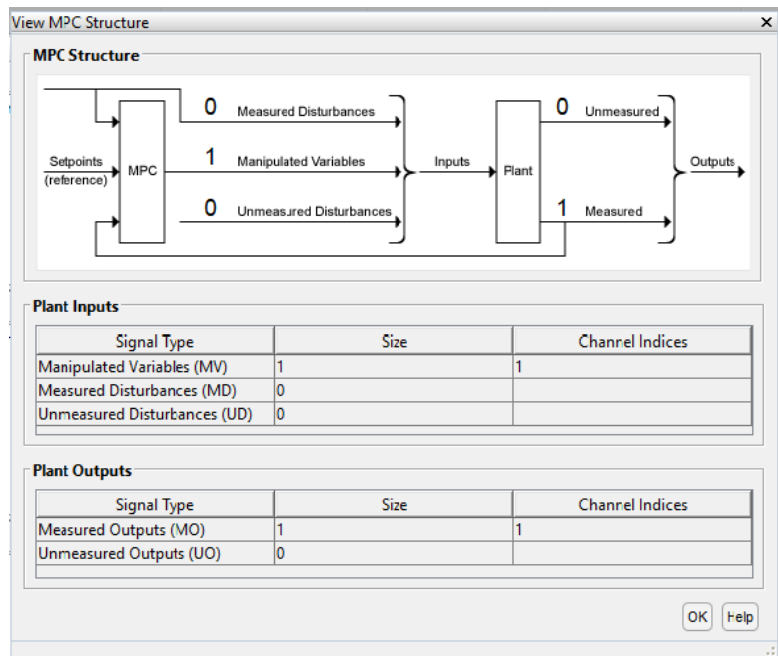


**Εικόνα 15**

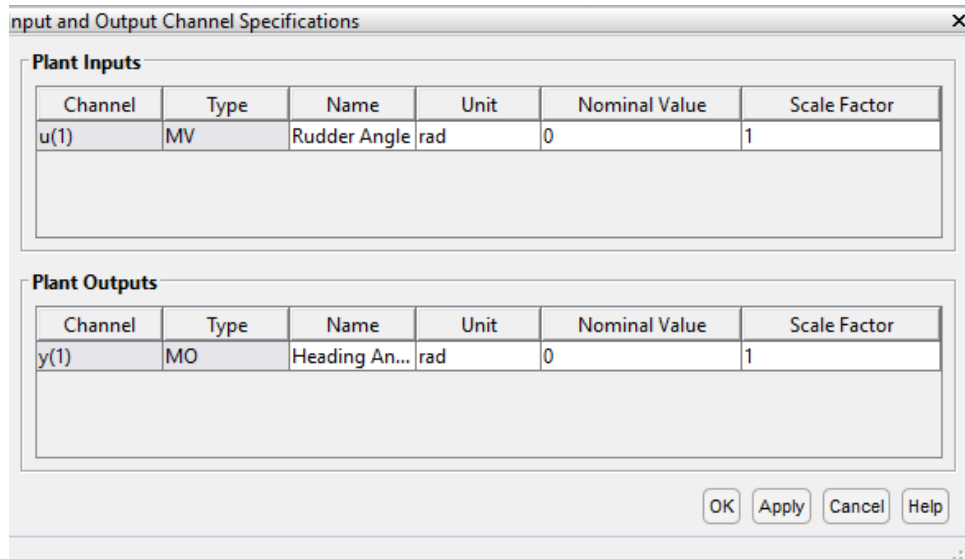
Προκύπτει το ακόλουθο παράθυρο:



Με το μενού MPC Structure έχουμε τη δυνατότητα να ορίσουμε τις εισόδους και εξόδους και τυχόν διαταραχές ( μετρήσιμες ή μη) αφενός για τον ελεγκτή, αφετέρου για το σύστημα.

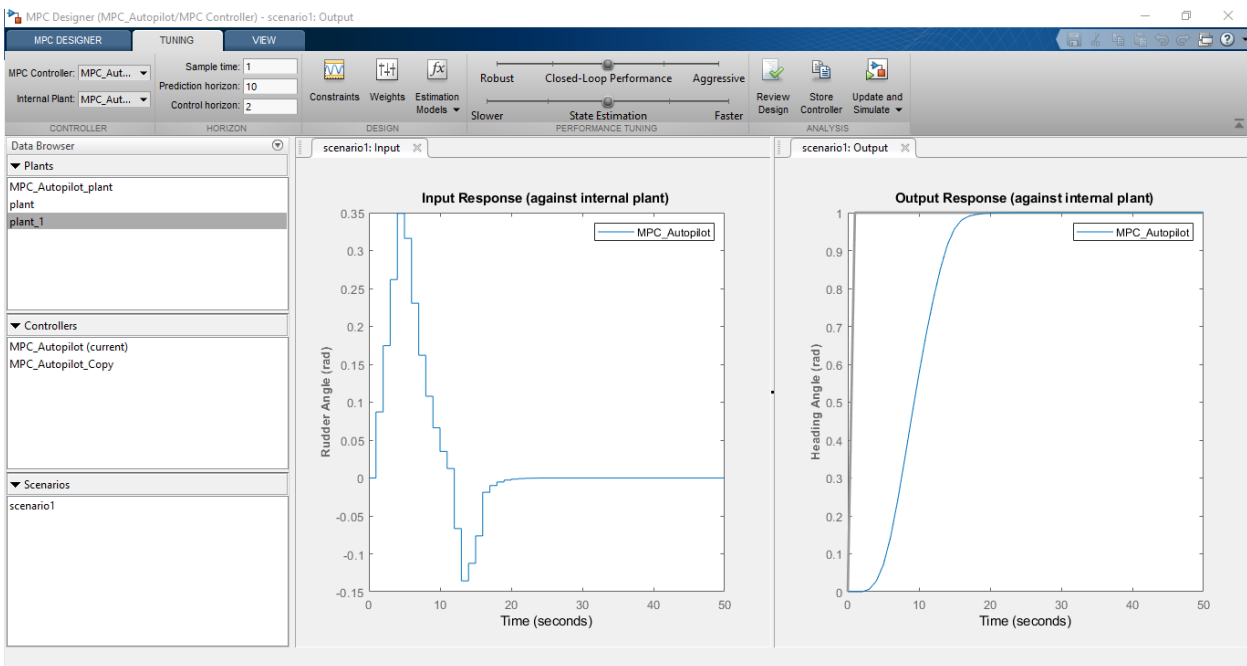


Από το επόμενο μενού I/O Attributes μπορούμε να ονοματίσουμε, δώσουμε μονάδες μέτρησης για τις προηγούμενες εξόδους και εισόδους.

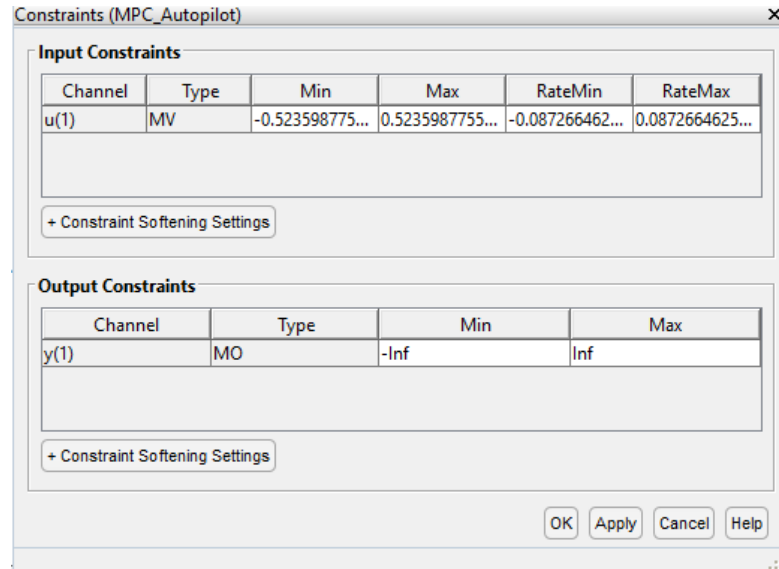


Επιλέγοντας την καρτέλα TUNING μας παρέχονται επιπλέον δυνατότητες. Δύναται να τροποποιηθούν προκειμένου να πετύχουμε βέλτιστα αποτελέσματα του ελέγχου τα ακόλουθα:

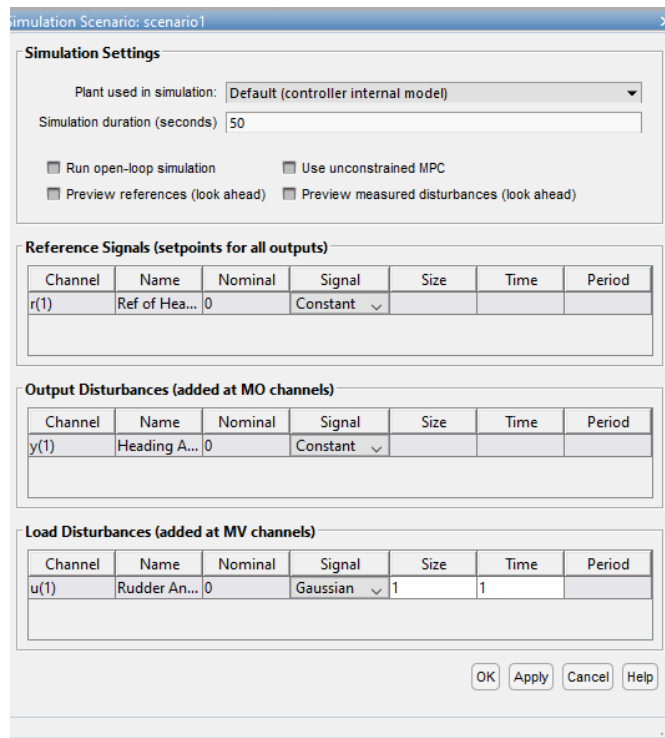
- Χρόνος δειγματοληψίας,
- Ορίζοντας Πρόβλεψης / Ελέγχου,
- Περιορισμοί / Βάρη που αφορούν τις παραμέτρους εισόδων/εξόδων.
- Εκτιμήσεις του μοντέλου κατά την επίδραση διαταραχών και
- Δύο ολισθητές (slider) για ρύθμιση της απόδοσης



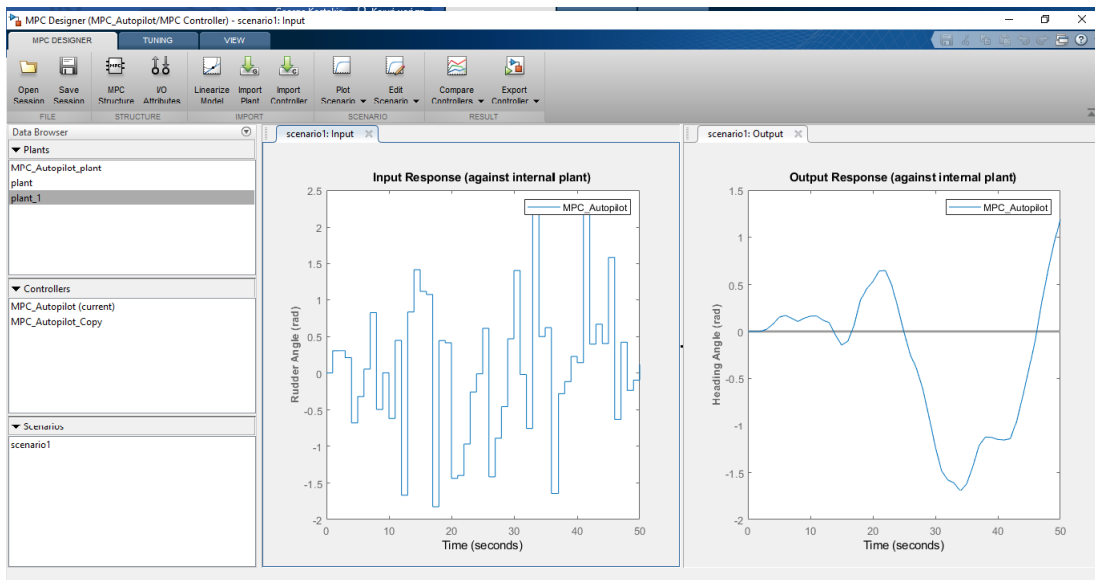
Στο μενού Constraints μπορούμε να ορίσουμε τους περιορισμούς του πηδαλίου οι οποίοι είναι για το συγκεκριμένο πλοίο γωνία  $\delta_{max} = \pm 35^\circ$  και ρυθμός στροφής  $-5^\circ/\text{sec} \leq \dot{\delta}_{max} \leq 5^\circ/\text{sec}$ .



Ενδιαφέρον παρουσιάζει η χρήση του μενού Edit Scenario της καρτέλα MPC DESIGNER με το οποίο τροποποιείται το σήμα αναφοράς (πχ Step, Ramp, Sine κλπ) αλλά και να προστεθούν σήματα διαταραχών στις εισόδους / εξόδους.



Επιλέχθηκε Γκαουσιανός θόρυβος προκειμένου να προσομοιάσει εσφαλμένη γωνία πηδαλίου κατά την αντιμετώπιση θαλάσσιων διαταραχών, το αποτέλεσμα παρά τις οποιεσδήποτε προσπάθειες ρύθμισης, ήταν η αδυναμία του συγκεκριμένου ελεγκτή να αντισταθμίσει αυτές τις διαταραχές. Το αποτέλεσμα φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Η συμπεριφορά αυτή από τον ελεγκτή ήταν αναμενόμενη διότι η διαδικασία ελέγχου, όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα (2.6.1.2), περιλαμβάνει ένα εσωτερικό μοντέλο του συστήματος το οποίο είναι σταθερό. Σε αυτό το σημείο είναι μονόδρομος η επιλογή ενός Adaptive MPC Controller ο οποίος μπορεί να αλλάζει το μοντέλο του συστήματος κατά τη διάρκεια του χρόνου και εφόσον οι καταστάσεις λειτουργίας μεταβάλλονται. Έτσι γίνονται πιο ακριβείς προβλέψεις των καινούργιων καταστάσεων.

Η συγκεκριμένη εργασία δύναται να αποτελέσει αντικείμενο περαιτέρω έρευνας.



## 4. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε ένας ΑΠ διατήρησης της πορείας (course-keeping) ενός Πλοίου όπου εξετάστηκε ή εφαρμογή του Προβλεπτικού Ελέγχου (MPC)

Το πλοίο που χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές προσομοίωσης ήταν ένα εμπορικό πλοίο μεταφοράς χύδην φορτίου (Mariner) για το οποίο υπάρχει μεγάλη διαθεσιμότητα σε δεδομένα δοκιμών στην βιβλιογραφία, στο παρελθόν χρησιμοποιήθηκε εκτενώς για ερευνητικούς σκοπούς.

Όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα (2.3), δηλαδή περιγράφοντας το εν λόγω πλοίο με την συνάρτηση μεταφοράς του 2ης τάξης μοντέλου Nomoto, διαπιστώθηκε ότι είναι ευσταθές ως σύστημα, ωστόσο δεν αποτελεί πλέον σημείο αναφοράς (benchmark) επειδή κατά πρώτον δεν πληροί τα κριτήρια του IMO όπως επιβεβαιώθηκε με τις δοκιμές ελιγμών της ενότητας (3.3) και κατά δεύτερον ήταν ένα παλιό και μη τυπικό σκαρί βάσει του οποίου κατασκευάστηκαν μόνο τέσσερα πλοία.

Στο μοντέλο της προσομοίωσης διαπιστώθηκε η εντυπωσιακή βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς σε σχέση με τον ελεγκτή PID. Όμως δεν χρησιμοποιήθηκαν διαταραχές που με μεγάλη πιθανότητα θα επηρέαζαν αρνητικά την πορεία του πλοίου.

Για την αντιστάθμιση των διαταραχών, που επηρεάζουν τα πλοία είτε αυτές αφορούν το θαλάσσιο περιβάλλον (κύματα, άνεμος και θαλάσσια ρεύματα) είτε αφορούν το ίδιο το σύστημα, για παράδειγμα αλλαγές στην ταχύτητα του πλοίου, απαιτείται η κατασκευή μοντέλου με χρήση Adaptive MPC ελεγκτή.

Συναφώς, εκτιμάται ως ιδιαίτερα χρήσιμο για περαιτέρω έρευνα και μελέτη η κατασκευή Αυτόματου Πιλότου Πλοίου ελέγχου της εγκάρσιας κατεύθυνσης του πλοίου με αξιοποίηση Adaptive MPC ελεγκτή. Επίσης το συγκεκριμένο μοντέλο πλοίου (mariner) εκτιμάται παρωχημένο και δύναται να αντικατασταθεί από νεότερα πλοία που χρησιμοποιεί ο ITTC ως benchmark.

# Βιβλιογραφία

- [1] **SNAME** (1950). “[\*Nomenclature for Treating the Motion of a Submerged Body Through a Fluid\*](#)”. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, Technical and Research Bulletin No. 1-5, April 1950, pp. 1-15.
- [2] **Thor I. Fossen.** (2000). “[\*A Survey on Nonlinear Ship Control: From Theory to Practice.\*](#)” IFAC. Aalborg,.
- [3] **Αθανάσιος Η. Παλληκάρης, Γεώργιος Θ. Κατσούλης, Δημήτριος Α. Δαλακλής.** (2016) “[\*Ναυτικά Ηλεκτρονικά Όργανα και Συστήματα Ηλεκτρονικού Χάρτη ECDIS\*](#)”. Ίδρυμα Ευγενίδου. Αθήνα.
- [4] **Stuart Bennet.** “[\*Nicolas Minorsky and the Automatic Steering of Ships. Control Systems Magazine\*](#)”. IEEE 1984
- [5] **Thor I. Fossen & Ola-Erik Fjellstad** (1995). “[\*Nonlinear modelling of marine vehicles in 6 degrees of freedom, Mathematical Modelling Of Systems\*](#)”, 1:1, 17-27, DOI: 10.1080/13873959508837004
- [6] **Thor I. Fossen.** (2011) “[\*Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control, First Edition.\*](#)” John Wiley & Sons Ltd.. ISBN: 978-1-119-99149-6
- [7] **Thor I. Fossen and Tristan Perez** (2004). *Marine Systems Simulator (MSS)*. URL: <https://github.com/cybergalactic/MSS>
- [8] **Tristan Perez.** (2005). “[\*Ship Motion Control Course Keeping and Roll Stabilization Using Rudder and Fins.\*](#)” Springer. Trondheim,.
- [9] **Γεώργιος Σύρκος.** (2011) “*Εισαγωγή στη Σχεδίαση Συστημάτων Ελέγχου με το MATLAB*”. Σύγχρονη Εκδοτική. Αθήνα,.
- [10] **Adrian Biran, Moshe Breiner.** “*MATLAB 5 για Μηχανικούς*”. Εκδόσεις Τζιόλα. Θεσσαλονίκη, 1999.
- [11] **K. Nomoto, T. Taguchi, K. Honda, S. Hirano.** (1957). [\*On the Steering Qualities of Ships\*](#). Int. Shipbuild Prog. 4,.

- [12] **Michael Triantafyllou.** 2.154 “*Maneuvering and Control of Surface and Underwater Vehicles*” (13.49). Fall 2004. Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare, <https://ocw.mit.edu>. License: [Creative Commons BY-NC-SA](#).
- [13] **Ioannis G. Tigkas.** (2009). “[Nonlinear Dynamic Analysis of the Course Instability of Ships in Wind and Waves](#)”. PhD Thesis – NTUA, Αθήνα
- [14] **Tristan Perez, Thor I. Fossen.** (2007) “*Kinematic Models for Manoeuvring and Seakeeping of Marine Vessels.*” Modeling, Identification and Control, Vol. 28, No. 1, , pp. 19–30
- [15] **Martin A. Abkowitz.** “[Lectures on Ship Hydrodynamics – Steering and Manoeuvrability.](#)” Lyngby/Denmark 1964.
- [16] **Κων. Σπύρου.** “[Δυναμική Ευστάθεια Πλοίου.](#)” [www.kallipos.gr](http://www.kallipos.gr) . Αθήνα 2015
- [17] **Γεώργιος Τζαπίρας.** “[Υδροδυναμική και Ευστάθεια Πλοίου.](#)” [www.kallipos.gr](http://www.kallipos.gr) . Αθήνα 2015.
- [18] **J.M.J. Journée, W.W. Massie.** (2001). “[OFFSHORE HYDROMECHANICS.](#)” Delft University of Technology.
- [19] **Γ. Α. Αθανασούλης, Κ. Α. Μπελιμπασάκης.** (2012). “*Δυναμική Πλοίου.*” Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών. Αθήνα.
- [20] **Αναστάσιος Πουλιέζος.** (2015). “*Σύγχρονη Θεωρία Ελέγχου.*”. [www.kallipos.gr](http://www.kallipos.gr). Αθήνα.
- [21] **Job Van Amerongen.** (1982). “*Adaptive Steering of Ships – A Model-Reference Approach to Improved Manoeuvring and Economical Course Keeping.*” Delft University of Technology.
- [22] **ITTC – International Towing Tank Conference.** (2005). Dictionary of Ship Hydrodynamics.
- [23] **Σπύρος Α. Πακτίτης.** (2003)“*Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου.*” Εκδόσεις ΙΩΝ. Αθήνα.

- 
- [24] **Παντελής Β. Μαλατέστας.** (2004). “*Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου*”. Εκδόσεις Τζιόλα. Θεσσαλονίκη.
- [25] **K. J. Åström, C. G. Källström.** (1976). “*Identification of Ship Steering Dynamics.*” Automatica, Vol.12, pp.9-22 Pergamon Press.
- [26] **Γεώργιος Παπαλάμπρου, Νίκος Πλανάκης.** (2017). “*Ειδικά Συστήματα Ελέγχου Πλοίου*”. ΕΜΠ. Αθήνα.
- [27] **Γ. Σ. Τριανταφύλλου.** (2018). “*Θεωρία Θαλασσίων Κυματισμών*”. ΕΜΠ. Αθήνα,.
- [28] **Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία.** [http://www.hnms.gr/emv/el/navigation/naftilia\\_beaufort](http://www.hnms.gr/emv/el/navigation/naftilia_beaufort)
- [29] **R. M. Isherwood.** (1972). “*Wind Resistance of Merchant Ships*”. The Royal Institution of Naval Architects..
- [30] **The Specialist Committee on Waves.** (2002). Final Report and Recommendations to the 23rd ITTC,.
- [31] **Miroslaw Tomera.** “*Ant colony optimization algorithm applied to ship steering control*”. 18th International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems - KES2014
- [32] **J.M.J. Journée, J. Pinkster.** (2002). “*Introduction in Ship Hydromechanics.*” Delft University of Technology.
- [33] **ITTC – International Towing Tank Conference,** (2002). ITTC Recommended Procedures 7.5-04-02-01
- [34] **J. Velagic, Z. Vukic, E. Omerdic.** (2003). “*Adaptive fuzzy ship autopilot for track-keeping*”. Control Engineering Practice 11 pg 433-443, Pergamon Press
- [35] **Ru-Yi Ren, Zao-Jian Zou, Yi-Dong Wang, Xue-Gang Wang.** (2018). “*Adaptive Nomoto model used in the path following problem of ships*”. Journal of Marine Science and Technology.

# Παράρτημα «Α»

Στον ακόλουθο πίνακα εξηγούνται πολύ περιληπτικά χρήσιμοι όροι που χρησιμοποιούνται στη μελέτη κίνησης των θαλάσσιων οχημάτων και κατασκευών.

## **B**

Beam Waves

Πρωραία Κύματα

Broaching-to

Δυναμικός τρόπος ανατροπής του πλοίου, που συμβαίνει όταν αυτό συναντήσει υψηλούς πλαγίως ακολουθούντες κυματισμούς.

## **C**

Course-changing

Κατάσταση πηδαλιούχησης όπου γίνεται αλλαγή της κατεύθυνσης με σταθερή γωνία στροφής και χωρίς να ξεπερνιέται η επιθυμητή κατεύθυνση.

Course-keeping

Διατήρηση της χαραχθείσας πορείας.

Course-keeping (autopilot)

Αυτόματος πιλότος διατήρησης πορείας:

## **D**

Developing Sea

Ανεπτυγμένη θάλασσα, δηλαδή, κυματισμούς που προκαλούνται από τον άνεμο για μικρό χρονικό διάστημα.

## **E**

Encounter Angle

Γωνία συνάντησης: η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της κατεύθυνσης των κυμάτων και της κατεύθυνσης του πλοίου.

Encounter Frequency

Συχνότητα συνάντησης

## **F**

Fetch	Μήκος ανάπτυξης κυματισμού
Fully Developed Sea	Πλήρως ανεπτυγμένη θάλασσα, δηλαδή, οι κυματισμοί προκαλούνται μετά από θεωρητικά άπειρη διάρκεια πνοής του ανέμου σε απείρως μεγάλη επιφάνεια της θάλασσας.
<b>G</b>	
GPS	Global Positioning System. Αμερικανικό σύστημα που βασίζεται σε ένα πλέγμα 24 δορυφόρων με σκοπό τον εντοπισμό/ενημέρωση του χρήστη για την γεωγραφική του θέση στον παγκόσμιο χάρτη.
<b>H</b>	
<b>L</b>	
LQG	Liner Quadratic Gaussian. Από τους θεμελιώδεις τρόπους επίλυσης προβλημάτων στη θεωρία του Βέλτιστου Ελέγχου.
<b>M</b>	
Maneuvering	Η ικανότητα του πλοίου στους ελιγμούς.
MMG: Mathematical Modeling Group	Την περίοδο 1976-1980 μία Ιαπωνική ερευνητική ομάδα, που ονομάστηκε “Mathematical Modeling Group” (MMG), πρότεινε μία νέα ιδέα για τη μαθηματική μοντελοποίηση της ελκτικής συμπεριφοράς του πλοίου. Το μοντέλο τους αποτελείται από ανεξάρτητη μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών της γάστρας, της έλικας και του πηδαλίου λαμβάνοντας όμως υπόψη τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους.

## **N**

Nonlinear control

Μη γραμμικός έλεγχος

## **P**

PID

Proportional-Integral-Derivative ή ελεγκτής τριών όρων. Από τους πιο ευρέως χρησιμοποιούμενους ελεγκτές στην βιομηχανία λόγω της απλότητας, της ευρωστίας και του χαμηλού κόστους του.

## **S**

Seakeeping

Η ικανότητα του πλοίου να αντέχει σε ταραχώδεις θάλασσες.

Seaway

Θαλάσσια οδός ή θαλασσοταραχή / τρικυμία

Surf-riding

Είναι το φαινόμενο κατά το οποίο το πλοίο εξαναγκάζεται να κινηθεί με την ταχύτητα φάσης του κύματος. Συμβαίνει όταν το μήκος του πλοίου είναι μικρότερο από το μήκος του κύματος.

Swell

Αποθαλασσία ή βουβός κυματισμός, πρόκειται για μακρά κύματα που συναντιούνται μακριά από την περιοχή γένεσής τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ο κυματισμός στην παραλία ακόμα και όταν δεν πνέει άνεμος.