



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

Διπλωματική Εργασία

*Εκτίμηση Ελικτικών Χαρακτηριστικών Πλοίων με
Συστημικές Μεθόδους*

ΒΕΝΕΤΙΑ ΛΑΖΑΡΑΤΟΥ

A.M. 08107605

Επιβλέπων Καθηγητής: Γ. Ι. Γρηγορόπουλος

Μέλη Επιτροπής: Κ. Σπύρου, Γ.Δ. Τζαμπίρας

Αθήνα, Ιανουάριος 2013

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	2
1 Εισαγωγή.....	4
2 Μαθηματικό Μοντέλο του Πλοίου.....	5
2.1 Συστήματα Συντεταγμένων.....	5
2.2 Εξισώσεις Κίνησης.....	7
2.3 Υδροδυναμικές Δυνάμεις και Ροπές.....	7
2.3.1 Μοντέλο Δυνάμεων και Ροπών του Abkowitz.....	8
2.3.2 Μοντέλο Δυνάμεων και Ροπών MMG.....	10
3 Προσδιορισμός Υδροδυναμικών Παραγώγων.....	13
3.1 Αναλυτικές Μέθοδοι.....	13
3.2 Πειραματικές Μεθοδολογίες.....	13
3.2.1 Δοκιμές σε Μοντέλα.....	13
3.2.1.1 Πείραμα Ευθύγραμμης Ρυμούλκησης (Straight Line Towing Experiment)	13
3.2.1.2 Πείραμα Περιστροφικής Ρυμούλκησης (Rotating Arm Mechanism)	16
3.2.1.3 Πείραμα Ταλαντωτικής Ρυμούλκησης με Μηχανισμό Επιπέδου Κινήσεως (Planar Motion Mechanism)	18
3.2.1.4 Πειράματα με Ελεύθερα Μοντέλα (Free Model Experiment)	22
3.2.1.4.1 Χρήση των Αποτελεσμάτων των Πειραμάτων σε Προγράμματα Πρόβλεψης και Προσομοίωσης (System Identification and Simulation).....	22
3.2.1.4.2 Αξιοποίηση της Βάσης Δεδομένων του Συμποσίου SIMMAN 2008.....	22
3.2.1.5 Προβλήματα λόγω Επιδράσεων Κλίμακας.....	31
3.2.2 Δοκιμές σε Πλοία και Μεγάλα Πρότυπα.....	32
3.2.2.1 Κυκλικός Ελιγμός (Circle or Turning Maneuver).....	32
3.2.2.2 Οφιοειδής Ελιγμός (Zig-Zag Maneuver).....	34
3.2.2.3 Σπειροειδής και Αντίστροφος Σπειροειδής Ελιγμός (Spiral and Reverse-Spiral Maneuver).....	35
3.3 Εμπειρικές Σχέσεις.....	38
3.3.1 Εμπειρικές Σχέσεις του Clarke (1982).....	38
3.4 Μέθοδοι Προσομοίωσης.....	38
3.4.1 Συστημικές Μέθοδοι.....	38
3.4.1.1 Μοντέλο Προσομοίωσης της Συμπεριφοράς Πλοίου σε Ελιγμούς (System Identification).....	38
3.4.1.1.1 Η Έννοια της Εκτίμησης των Παραμέτρων Προσομοίωσης (System Identification).....	38
3.4.1.1.2 Σύντομη Βιβλιογραφική Επισκόπηση.....	39
3.4.2 Μέθοδοι Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (CFD).....	40
4 Εφαρμογές της Συστημικής Προσέγγισης στην Ελικτικότητα.....	41
4.1 Εκτίμηση Παραμέτρων Συμπεριφοράς με τη Βοήθεια Extended Φίλτρων Kalman.....	41
4.1.1 Κώδικας Υλοποίησης της Μεθόδου.....	43
4.1.1.1 Δεδομένα Εισόδου-Εξόδου.....	43
4.1.1.2 Σημαντικές Υπορουτίνες του Κώδικα.....	43
4.2 Νευρωνικά Δίκτυα.....	48
4.2.1 Συνοπτική Αναφορά στο Θεωρητικό Υπόβαθρο των Νευρωνικών Δικτύων.....	48
4.2.2 Εφαρμογές των Νευρωνικών Δικτύων στην Ελικτικότητα.....	50
4.2.3 Διαδικασία Επίλυσης.....	51
4.2.4 Αποτελέσματα.....	52
4.2.4.1 Νευρωνικό Δίκτυο #1 (NN_1).....	52
4.2.4.2 Νευρωνικό Δίκτυο #2 (NN_2).....	60

4.3 Αριθμητική Επίλυση των Εξισώσεων MMG με Χρήση Πειραματικών Δεδομένων.....	69
4.3.1 Διαδικασία Επίλυσης.....	69
4.3.2 Αποτελέσματα.....	71
5 Βιβλιογραφία.....	74
5.1 Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία.....	74
5.2 Ελληνική Βιβλιογραφία.....	75
6 Παράρτημα Α.....	76
7 Παράρτημα Β.....	78
8 Παράρτημα Γ.....	82

1 Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες, το ενδιαφέρον για τα ελκτικά χαρακτηριστικά των πλοίων γίνεται ολοένα και πιο έντονο. Το γεγονός αυτό αντικατοπτρίζεται στην υιοθέτηση το 2002 του Resolution MSC137(76) από το Διεθνές Οργανισμό Ναυτιλίας (IMO), που θεσπίζει κριτήρια για την ελάχιστη απαιτούμενη ελκτική ικανότητα των πλοίων. Από έρευνες για τα αίτια ναυτικών ατυχημάτων, προέκυψε το συμπέρασμα ότι πολλά ατυχήματα πλοίων σχετίζονται με κακές ελκτικές ικανότητες (Viviani et al 2007). Θεωρήθηκε ότι οι ελλείψεις αυτές ικανότητες ίσως να οφείλονταν στη γενική τάση που επικρατούσε κατά τη σχεδίαση, η ελκτικότητα να θεωρείται δευτερεύον ζήτημα. Πλέον, η συμμόρφωση με τους κανονισμούς του IMO για την ελκτικότητα μπορεί να αποδειχθεί με δύο τρόπους:

- Δοκιμές σε μοντέλα ή/και προσομοιώσεις υπολογιστικές κατά τη φάση της σχεδίασης, με δοκιμές για επιβεβαίωση στο πλοίο (full scale trials) όταν κατασκευαστεί. Το πλοίο θεωρείται ότι συμμορφώνεται με τους κανονισμούς ανεξάρτητα από τα αποτελέσματα των full scale trials, εφόσον η προσπάθειες πρόβλεψης των ελκτικών ικανοτήτων κατά τη σχεδίαση θεωρούνται ικανοποιητικές και η πραγματικές ικανότητες του πλοίου δεν απέχουν πολύ από τις προβλέψεις.
- Δοκιμές στο πλοίο (full scale sea trials).

Για τους λόγους αυτούς, έχει μεγάλη σημασία να αναπτυχθούν αξιόπιστα εργαλεία και μεθοδολογίες πρόβλεψης των ελκτικών ικανοτήτων πλοίων, και μόνο για την αποφυγή του κόστους και του χρόνου που σχετίζεται με τις δοκιμές μοντέλων ή, στη χειρότερη των περιπτώσεων, με πιθανές μετασκευές στο πλοίο μετά τις δοκιμές στη θάλασσα.

Στην παρούσα εργασία, εξετάζουμε και εφαρμόζουμε κάποιες μεθόδους πρόβλεψης των ελκτικών χαρακτηριστικών του πλοίου. Η επιτυχημένη εκτίμηση των ελκτικών ικανοτήτων συνδέεται άμεσα με την ακρίβεια υπολογισμού των υδροδυναμικών παραγώγων του πλοίου, καθώς αυτές είναι που χρησιμοποιούνται στα μαθηματικά μοντέλα πρόβλεψης των κινήσεων του. Οι υδροδυναμικές παράγωγοι ενός πλοίου εξαρτώνται από τη γεωμετρία της γάστρας του και αποτελούν την υδροδυναμική του ταυτότητα. Εμφανίζονται ως συντελεστές στις εξισώσεις κίνησης του πλοίου, και εφόσον προσδιοριστούν για το πλοίο, μπορεί να προσομοιωθεί η κίνησή του. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, με τη χρήση δεδομένων από πειράματα με μοντέλα, θα εκτιμηθούν οι ελκτικές ικανότητες πλοίου με συστημικές μεθόδους.

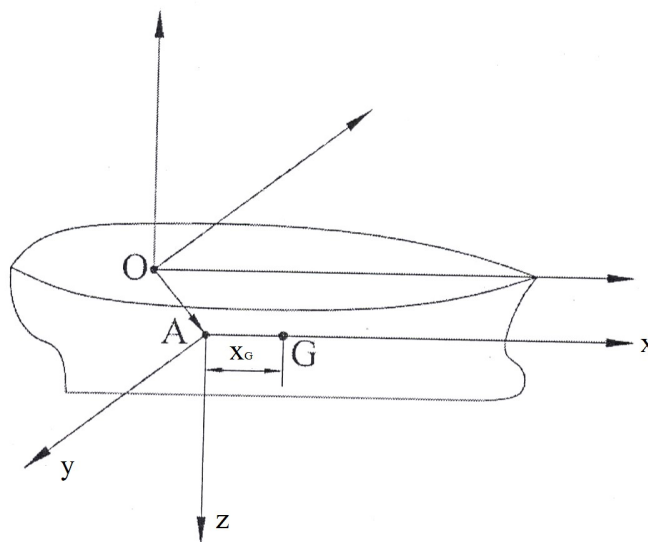
2 Μαθηματικό Μοντέλο του Πλοίου

Πριν μπορέσουμε να αναπτύξουμε την όποια προσομοίωση της κίνησης του πλοίου, θα πρέπει να έχουμε το κατάλληλο μαθηματικό μοντέλο στο οποίο να βασιστούμε. Στην μελέτη της δυναμικής απόκρισης ενός επιπλέοντος σώματος στη θάλασσα, το πρώτο βήμα είναι η κατάστρωση των εξισώσεων κίνησής του. Στο εδάφιο αυτό, θα ορίσουμε το σύστημα συντεταγμένων που θα χρησιμοποιηθεί και θα διατυπώσουμε τις εξισώσεις κίνησης του πλοίου.

2.1 Συστήματα Συντεταγμένων

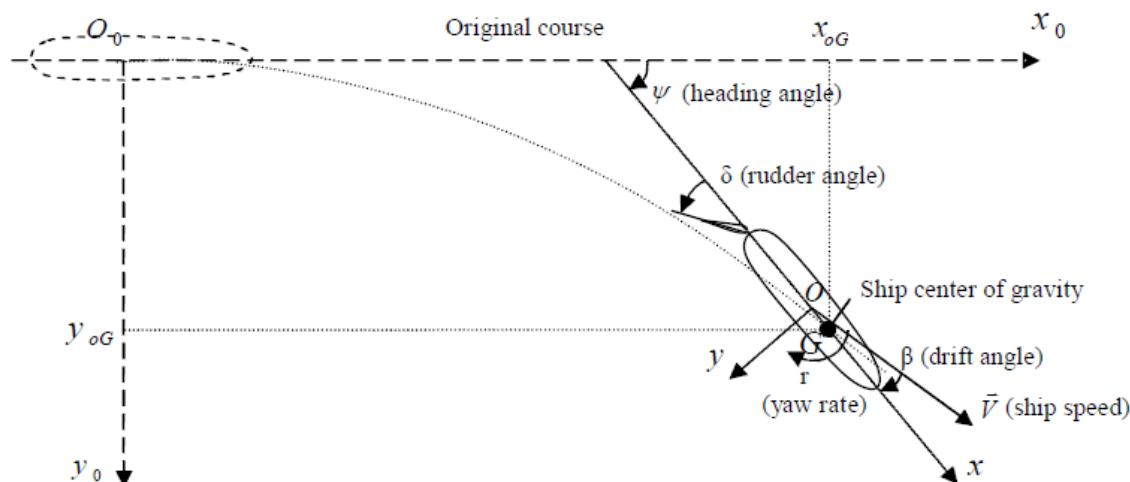
Για τη μελέτη της ελκτικότητας πλοίου χρησιμοποιούνται δύο δεξιόστροφα συστήματα συντεταγμένων, ένα σωματοπαγές και ένα γεωπαγές. Το σωματοπαγές σύστημα είναι προσδεδεμένο στο ίδιο το πλοίο και κινείται μαζί του, ακολουθώντας όλες τις μετατοπίσεις και περιστροφές του. Το γεωπαγές σύστημα είναι σταθερά συνδεδεμένο με το στερεό φλοιό της γης. Τα δύο συστήματα συντεταγμένων φαίνονται στο Σχήμα 2.2.

Όταν το επιπλέον σώμα έχει κάποιο επίπεδο συμμετρίας, προσπαθούμε να τοποθετήσουμε τους άξονες του συστήματος συντεταγμένων έτσι ώστε να συμπίπτουν με αυτό. Τα συμβατικά πλοία συνήθως διαθέτουν κεντρικό διάμηκες επίπεδο συμμετρίας. Άρα, τοποθετούμε την αρχή (A) των συντεταγμένων επάνω στο διάμηκες επίπεδο συμμετρίας, στη μέση τομή του πλοίου και στο επίπεδο της ισάλου. Ο x-άξονας τοποθετείται επί το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας και έχει θετική φορά προς τη πλώρη του πλοίου. Ο y-άξονας βρίσκεται επί την επιφάνεια της ισάλου με θετική φορά προς τα δεξιά (starboard). Ενώ ο z-άξονας είναι κάθετος στους άλλους δύο άξονες με θετική φορά προς τα κάτω. Το σωματοπαγές σύστημα συντεταγμένων φαίνεται στο Σχήμα 2.1 που ακολουθεί.



Σχήμα 2.1: Το Σωματοπαγές Σύστημα Συντεταγμένων του Πλοίου

Όταν χαράσσεται η τροχιά του, η θέση του πλοίου (x_0, y_0) δίνεται σύμφωνα με ένα γεωπαγές σύστημα συντεταγμένων. Ο άξονας x_0 βρίσκεται επί το επίπεδο της επιφάνειας της ισάλου και έχει τη διεύθυνση της αρχικής κατεύθυνσης του πλοίου. Ο άξονας y_0 τοποθετείται στο ίδιο επίπεδο και είναι κάθετος στον x_0 . Όσο για τις γωνίες, η θετική φορά θεωρείται η ωρολογιακή.



Σχήμα 2.2: Συστήματα Συντεταγμένων στην Ελκτικότητα Πλοίου

Στη μελέτη της πηδαλιουχίας επικρατεί παραδοσιακά μια συγκεκριμένη ορολογία για τις μετατοπίσεις, ταχύτητες, δυνάμεις και ροπές. Για λόγους αναφοράς, παρατίθεται ο ακόλουθος πίνακας στον οποίο δίνονται οι συμβολισμοί που θα χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για τα μεγέθη αυτά.

Πίνακας 2.1: Ονοματολογία Κινηματικών Μεγεθών στη Πηδαλιουχία

Άξονες Συντεταγμένων	Ax	Ay	Az
Μετατοπίσεις	x	y	z
Περιστροφές	φ	θ	ψ
Γραμμικές Ταχύτητες	u	v	w
Γωνιακές Ταχύτητες	p	q	r
Δυνάμεις	X	Y	Z
Ροπές	K	M	N

2.2 Εξισώσεις Κίνησης

Ένα ελεύθερο στερεό σώμα που επιπλέει έχει έξι βαθμούς ελευθερίας. Σε κάθε άξονα, αντιστοιχούν μία μετατόπιση και μία περιστροφή. Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στην ανάπτυξη ενός συστήματος έξι εξισώσεων για να περιγράψουμε τη κίνηση του σώματος.

Ωστόσο, από τις έξι εξισώσεις κίνησης του πλοίου, αυτές που μας ενδιαφέρουν για τη μελέτη της ευστάθειας και της πηδαλιουχίας είναι αυτές που περιγράφουν τη κίνηση του στο οριζόντιο επίπεδο. Επίσης, θεωρούμε ότι οι μόνες μη-μηδενικές διαταραχές θα είναι αυτές που σχετίζονται με τη κίνηση του πλοίου στο οριζόντιο επίπεδο. Συνεπώς, βασισμένα στα παραπάνω, μπορεί να γίνει αποσύζευξη των εξισώσεων που διέπουν τη κίνηση του πλοίου στο οριζόντιο επίπεδο από τις υπόλοιπες. Τελικά, καταλήγουμε στο ακόλουθο σύστημα τριών γραμμικών διαφορικών εξισώσεων:

$$X = m(\dot{u} - rv - x_G r^2) \quad (2.1)$$

$$Y = m(\dot{v} + ru + x_G \dot{r}) \quad (2.2)$$

$$N = I_z \dot{r} + mx_G(\dot{v} + ru) \quad (2.3)$$

2.3 Υδροδυναμικές Δυνάμεις και Ροπές

Στη τελική μορφή των εξισώσεων κίνησης του πλοίου με τρεις βαθμούς ελευθερίας, οι όροι X, Y, και N αντιπροσωπεύουν δυνάμεις και ροπή που ασκούνται στο πλοίο. Η μεταβλητή X αντιπροσωπεύει την εξωτερική δύναμη που ασκείται κατά τον άξονα x, η Y τη δύναμη κατά τον y, και η N την ροπή γύρω από τον άξονα z. Στις τρεις φορτίσεις συνυπολογίζονται οι υδροδυναμικές δυνάμεις που ασκούνται στο πλοίο σε ήρεμο νερό, καθώς και οι επιπλέον φορτίσεις σε κάθε διεύθυνση εξαιτίας περιβαλλοντικών παραγόντων όπως ο ανέμος, οι κυματισμοί και τα θαλάσσια ρεύματα, μεταξύ άλλων.

Λόγω της περιπλοκότητας της ροής του ρευστού γύρω από τη γάστρα του πλοίου, είναι εξαιρετικά δύσκολο να εκφραστούν οι υδροδυναμικές φορτίσεις σε κλειστή μορφή. Συνεπώς, διαδεδομένη τακτική είναι να προσεγγίζονται από ορισμένα μαθηματικά μοντέλα.

Σήμερα, είναι δύο τα επικρατέστερα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για να εκφράσουν τις φορτίσεις αυτές στις εξισώσεις κίνησης του πλοίου. Το πρώτο μοντέλο υδροδυναμικών δυνάμεων αναπτύχθηκε από το 1964 από τον Καθηγητή M. Abkowitz του MIT, ενώ το δεύτερο εισήχθη από το Maneuvering Mathematical Modeling Group (MMG) της Ιαπωνίας το 1976.

2.3.1 Μοντέλο Δυνάμεων και Ροπών του Abkowitz

Σύμφωνα με το μοντέλο του Abkowitz, οι φορτίσεις X, Y και N εκφράζονται ως σειρές Taylor συναρτήσει κινηματικών μεγεθών, με μορφή:

$$X = X(u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, \delta) \quad (2.4)$$

$$Y = Y(u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, \delta) \quad (2.5)$$

$$N = N(u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, \delta) \quad (2.6)$$

Εάν αναπτύξουμε τις φορτίσεις σε σειρές Taylor γύρω από μία αρχική κατάσταση ομαλής ευθύγραμμης κίνησης με σταθερή ταχύτητα $u_0 = U$, τότε καταλήγουμε στις εκφράσεις:

$$\begin{aligned} X = & X_0 + \frac{\partial X}{\partial u}(u-U) + \frac{\partial X}{\partial v}v + \frac{\partial X}{\partial r}r + \frac{\partial X}{\partial \dot{u}}\dot{u} + \frac{\partial X}{\partial \dot{v}}\dot{v} + \frac{\partial X}{\partial \dot{r}}\dot{r} + \frac{\partial X}{\partial \delta}\delta \\ & + \frac{1}{2!} \left[\frac{\partial}{\partial u}(u-U) + \frac{\partial}{\partial v}v + \frac{\partial}{\partial r}r + \frac{\partial}{\partial \dot{u}}\dot{u} + \frac{\partial}{\partial \delta}\delta \right]^2 X + \dots \\ & + \frac{1}{n!} \left[\frac{\partial}{\partial u}(u-U) + \frac{\partial}{\partial v}v + \frac{\partial}{\partial r}r + \frac{\partial}{\partial \dot{u}}\dot{u} + \frac{\partial}{\partial \delta}\delta \right]^n X \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned}
Y = & Y_0 + \frac{\partial Y}{\partial u}(u-U) + \frac{\partial Y}{\partial v}v + \frac{\partial Y}{\partial r}r + \frac{\partial Y}{\partial \dot{u}}\dot{u} + \frac{\partial Y}{\partial \dot{v}}\dot{v} + \frac{\partial Y}{\partial \dot{r}}\dot{r} + \frac{\partial Y}{\partial \delta}\delta \\
& + \frac{1}{2!} \left[\frac{\partial}{\partial u}(u-U) + \frac{\partial}{\partial v}v + \frac{\partial}{\partial r}r + \frac{\partial}{\partial \dot{u}}\dot{u} + \frac{\partial}{\partial \delta}\delta \right]^2 Y + \dots \\
& + \frac{1}{n!} \left[\frac{\partial}{\partial u}(u-U) + \frac{\partial}{\partial v}v + \frac{\partial}{\partial r}r + \frac{\partial}{\partial \dot{u}}\dot{u} + \frac{\partial}{\partial \delta}\delta \right]^n Y
\end{aligned} \tag{2.8}$$

$$\begin{aligned}
N = & N_0 + \frac{\partial N}{\partial u}(u-U) + \frac{\partial N}{\partial v}v + \frac{\partial N}{\partial r}r + \frac{\partial N}{\partial \dot{u}}\dot{u} + \frac{\partial N}{\partial \dot{v}}\dot{v} + \frac{\partial N}{\partial \dot{r}}\dot{r} + \frac{\partial N}{\partial \delta}\delta \\
& + \frac{1}{2!} \left[\frac{\partial}{\partial u}(u-U) + \frac{\partial}{\partial v}v + \frac{\partial}{\partial r}r + \frac{\partial}{\partial \dot{u}}\dot{u} + \frac{\partial}{\partial \delta}\delta \right]^2 N + \dots \\
& + \frac{1}{n!} \left[\frac{\partial}{\partial u}(u-U) + \frac{\partial}{\partial v}v + \frac{\partial}{\partial r}r + \frac{\partial}{\partial \dot{u}}\dot{u} + \frac{\partial}{\partial \delta}\delta \right]^n N
\end{aligned} \tag{2.9}$$

όπου X_0, Y_0, N_0 είναι οι υδροδυναμικές φορτίσεις που αντιστοιχούν στην κατάσταση αναφοράς.

Οι μερικές παράγωγοι στις εξισώσεις (2.7) - (2.9) ονομάζονται υδροδυναμικές παράγωγοι της εξεταζόμενης γάστρας, και εξαρτώνται από τη γεωμετρία της. Καθώς μοντελοποιούν την υδροδυναμική συμπεριφορά της γάστρας, μπορούν να θεωρηθούν και ως η υδροδυναμική της ταυτότητα. Για ευκολία, συνήθως γράφονται:

$$\frac{\partial X}{\partial u} = X_u \tag{2.10}$$

Προσεγγίζοντας τις υδροδυναμικές παραγώγους με πεπερασμένες διαφορές, γίνεται πιο ξεκάθαρη η φυσική τους έννοια. Για παράδειγμα, για το X_u , γράφουμε

$$X_u = \frac{\partial X}{\partial u} \approx \frac{X - X_0}{\delta u} = \frac{\delta X}{\delta u} \tag{2.11}$$

όπου δu είναι μια μικρή διαταραχή ως προς την κατάσταση αναφοράς ($u_0 = U$) της ταχύτητας στον άξονα x , και δX η αντίστοιχη μεταβολή που προκαλείται στη δύναμη X αποκλειστικά και μόνο λόγω της μεταβολής δu .

Οι εξισώσεις των υδροδυναμικών φορτίσεων (2.7) - (2.9) ονομάζονται μοντέλο Abkowitz ή μοντέλο whole ship. Στη συνέχεια, λαμβάνοντας υπόψιν κάποιες απλουστευτικές παραδοχές, μπορούμε να απλοποιήσουμε περαιτέρω τις εκφράσεις αυτές.

Οι απλοποιητικές παραδοχές είναι:

- Αγνοούμε όρους μεγαλύτερους από τρίτης τάξεως.
- Θεωρούμε ότι οι όροι με επιταχύνσεις είναι πολύ μικρότεροι από του όρους με ταχύτητες, και συνεπώς αγνοούμε τους όρους επιταχύνσεων δεύτερης και ανώτερης τάξης.
- Υποθέτουμε συμμετρία κατά το διάμηκες κεντρικό επίπεδο του πλοίου.

Ύστερα από αυτές τις απλοποιήσεις, καταλήγουμε στις ακόλουθες τρεις εξισώσεις για τις φορτίσεις στο πλοίο:

$$\begin{aligned}
X &= X_0 + X_{\dot{u}} \dot{u} + X_u \Delta u + \frac{1}{2} X_{uu} (\Delta u)^2 + \frac{1}{6} X_{uuu} (\Delta u)^3 \\
&+ \frac{1}{2} X_{vv} v^2 + \frac{1}{2} X_{rr} r^2 + \frac{1}{2} X_{\delta\delta} \delta^2 + \frac{1}{2} X_{vuu} v^2 \Delta u \\
&+ \frac{1}{2} X_{rvu} r^2 \Delta u + \frac{1}{2} X_{\delta\delta u} \delta^2 \Delta u + X_{vr} vr + X_{v\delta} v\delta \\
&+ X_{r\delta} r\delta + X_{rvu} vr \Delta u + X_{v\delta u} v\delta \Delta u + X_{r\delta u} r\delta \Delta u
\end{aligned} \tag{2.12}$$

$$\begin{aligned}
Y &= Y_0 + Y_{0u} \Delta u + \frac{1}{2} Y_{0uu} (\Delta u)^2 + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_v v + Y_r r \\
&+ Y_{\delta} \delta + \frac{1}{6} Y_{vvv} v^3 + \frac{1}{6} Y_{rrr} r^3 + \frac{1}{6} Y_{\delta\delta\delta} \delta^3 + \frac{1}{2} Y_{rr\delta} r^2 \delta + \frac{1}{2} Y_{\delta\delta r} \delta^2 r \\
&+ \frac{1}{2} Y_{vvr} v^2 r + \frac{1}{2} Y_{\delta\delta v} \delta^2 v + \frac{1}{2} Y_{vv\delta} v^2 \delta + Y_{rvv} r^2 v + Y_{rv\delta} rv\delta + Y_{vu} v \Delta u \\
&+ \frac{1}{2} Y_{vuu} v (\Delta u)^2 + Y_{ru} r \Delta u + \frac{1}{2} Y_{ruu} r (\Delta u)^2 + Y_{\delta u} \delta (\Delta u) + Y_{\delta uu} \delta (\Delta u)^2
\end{aligned} \tag{2.13}$$

$$\begin{aligned}
N &= N_0 + N_{0u} \Delta u + \frac{1}{2} N_{0uu} (\Delta u)^2 + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\dot{r}} \dot{r} + N_v v + N_r r \\
&+ N_{\delta} \delta + \frac{1}{6} N_{vvv} v^3 + \frac{1}{6} N_{rrr} r^3 + \frac{1}{6} N_{\delta\delta\delta} \delta^3 + \frac{1}{2} N_{rr\delta} r^2 \delta + \frac{1}{2} N_{\delta\delta r} \delta^2 r + \frac{1}{2} N_{vvr} v^2 r \\
&+ \frac{1}{2} N_{\delta\delta v} \delta^2 v + \frac{1}{2} N_{vv\delta} v^2 \delta + \frac{1}{2} N_{rvv} r^2 v + N_{rv\delta} rv\delta + N_{vu} v \Delta u + \frac{1}{2} N_{vuu} v (\Delta u)^2 \\
&+ N_{ru} r \Delta u + \frac{1}{2} N_{ruu} r (\Delta u)^2 + N_{\delta u} \delta \Delta u + \frac{1}{2} N_{\delta uu} \delta (\Delta u)^2
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Περαιτέρω απλοποίηση των εξισώσεων (2.12) - (2.14) μπορεί να γίνει αγνοώντας τους όρους εκείνους που έχουν αμελητέα επίδραση στη δυναμική του πλοίου και που δεν επηρεάζουν συνολικά τη δομή του μοντέλου (Brinati 1977).

Συνεπώς, η τελική μορφή των εκφράσεων των υδροδυναμικών φορτίσεων που θα χρησιμοποιηθεί στα πλαίσια της εργασίας αυτής είναι:

$$\begin{aligned}
X &= X_{\dot{u}} \dot{u} + X_u \Delta u + \frac{1}{2} X_{uu} (\Delta u)^2 + \frac{1}{6} X_{uuu} (\Delta u)^3 + \frac{1}{2} X_{vv} v^2 \\
&+ \frac{1}{2} X_{rr} r^2 + \frac{1}{2} X_{\delta\delta} \delta^2 + \frac{1}{2} X_{\delta\delta u} \delta^2 \Delta u + X_{vr} vr + X_{v\delta} v\delta
\end{aligned} \tag{2.15}$$

$$\begin{aligned}
Y &= Y_0 + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_v v + Y_r r + Y_{\delta} \delta + \frac{1}{6} Y_{vvv} v^3 + \frac{1}{6} Y_{\delta\delta\delta} \delta^3 \\
&+ \frac{1}{2} Y_{vvr} v^2 r + \frac{1}{2} Y_{\delta\delta v} \delta^2 v + \frac{1}{2} Y_{vv\delta} v^2 \delta + Y_{rvv} r^2 v + Y_{\delta u} \delta (\Delta u)
\end{aligned} \tag{2.16}$$

$$\begin{aligned}
N = & N_0 + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\dot{r}} \dot{r} + N_v v + N_r r + N_{\delta} \delta + \frac{1}{6} N_{vvv} v^3 + \frac{1}{6} N_{\delta\delta\delta} \delta^3 \\
& + \frac{1}{2} N_{vvr} v^2 r + \frac{1}{2} N_{\delta\delta v} \delta^2 v + \frac{1}{2} N_{v\delta} v^2 \delta + \frac{1}{2} N_{rvr} r^2 v + N_{\delta u} \delta (\Delta u)
\end{aligned} \tag{2.17}$$

2.3.2 Μοντέλο Δυνάμεων και Ροπών MMG

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε από την Ιαπωνική ερευνητική ομάδα (MMG) χωρίζει τις υδροδυναμικές φορτίσεις σε κάθε κατεύθυνση σε τρεις συνιστώσες: φορτίσεις που δρουν στη γάστρα, φορτίσεις που δρουν στο πηδάλιο και φορτίσεις που δρουν στη προπέλα. Οι εξισώσεις των φορτίσεων παίρνουν λοιπόν τις μορφές:

$$X = X_H + X_R + X_P \tag{2.18}$$

$$Y = Y_H + Y_R + Y_P \tag{2.19}$$

$$N = N_H + N_R + N_P \tag{2.20}$$

όπου οι δείκτες “H”, “R”, και “P” δηλώνουν τη γάστρα (hull), το πηδάλιο (rudder) και τη προπέλα (Propeller), αντιστοίχως.

Η έμφαση του μοντέλου είναι στην παράσταση των υδροδυναμικών φορτίσεων με απλό τρόπο που να λαμβάνει υπόψιν τη φυσική του προβλήματος. Αρχικά, το μοντέλο MMG αναπτύχθηκε για μονέλικα πλοία με ένα πηδάλιο. Ωστόσο, σταδιακά πραγματοποιείται έρευνα με στόχο την επέκτασή του και σε άλλες σχεδιάσεις.

Ο ακριβής τρόπος έκφρασης των συνιστωσών των φορτίσεων στις εξισώσεις (2.18) - (2.20) διαφέρει κάπως ανάλογα με την εφαρμογή τους. Η βασικές εκφράσεις των συνιστωσών για μονέλικα πλοία με ένα πηδάλιο είναι:

Φορτίσεις στη Γάστρα

$$X_H = X_{\dot{u}} \dot{u} + X_{vv} v^2 + X_{vr} vr + X_{rr} r^2 + X(u) \tag{2.21}$$

$$Y_H = Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_v v + Y_{v|v} v|v| + Y_r r + Y_{r|r} r|r| + Y_{vvr} vr^2 + Y_{vvr} v^2 r \tag{2.22}$$

$$N_H = N_{\dot{v}} \dot{v} + N_{\dot{r}} \dot{r} + N_v v + N_{v|v} v|v| + N_r r + N_{r|r} r|r| + N_{vvr} vr^2 + N_{vvr} v^2 r \tag{2.23}$$

Όπου X(u) η αντίσταση του πλοίου όπως αυτή υπολογίζεται από το πείραμα αντίστασης.

Φορτίσεις στο Πηδάλιο

$$X_R = -(1 - t_R) F_N \sin \delta \tag{2.24}$$

$$Y_R = (1 + a_H) F_N \cos \delta \tag{2.25}$$

$$N_R = (x_R + a_H x_H) F_N \cos \delta \quad (2.26)$$

Όπου:	$F_N = U_R A_R f_a \sin \alpha_R$	κάθετη δύναμη στην επιφάνεια του πηδαλίου
	$U_R = \sqrt{(u_R^2 + v_R^2)}$	ταχύτητα εισροής ρευστού στο πηδάλιο
	$\alpha_R = \delta - \tan^{-1} \left(\frac{v_R}{U_R} \right)$	πραγματική γωνία εισροής ρευστού
	u_R	πλευρική ταχύτητα εισροής ρευστού
	v_R	αξονική ταχύτητα εισροής ρευστού
	a_H	ποσοστό επιπλέον πλευρικής δύναμης
	x_H	απόσταση μεταξύ κέντρου βάρους του πλοίου και κέντρου της επιπλέον πλευρικής δύναμης
	x_R	διαμήκης απόσταση μεταξύ κέντρου βάρους του πλοίου και κέντρου πλευρικής δύναμης
	δ	γωνία πηδαλίου

Μερικά από τα παραπάνω μεγέθη αναλύονται περαιτέρω ως εξής:

$$u_R = \varepsilon u_P \sqrt{\eta \left(1 + \kappa \left(\sqrt{\left(1 + \frac{8K_T(J_P)}{\pi J_P^2} \right) - 1} \right) \right)^2 + (1 - \eta)}$$

όπου:	η	= propeller diameter / rudder height
	κ	συντελεστής αλληλεπίδρασης προπέλας-γάστρας

Φορτίσεις στη Προπέλα

$$X_P = (1 - t_p) \rho n^2 D_p^4 K_T(J_P) \quad (2.27)$$

Όπου:	$J_P = \frac{u(1 - w_p)}{n D_p}$	συντελεστής προχώρησης της προπέλας
	n	στροφές ανά δευτερόλεπτο της προπέλας
	D_p	διάμετρος της προπέλας
	K_T	συντελεστής ώσης της προπέλας
	t_p	συντελεστής μείωσης ώσης
	w_p	πραγματικό ποσοστό ομόρρου

$$Y_P = 0 \quad (2.28)$$

$$N_P = 0 \quad (2.29)$$

3 Προσδιορισμός Υδροδυναμικών Παραγώγων

3.1 Αναλυτικές Μέθοδοι

Ο αναλυτικός υπολογισμός των υδροδυναμικών παραγώγων του πλοίου και των παρελκόμενων του συνεπάγεται την εύρεση των υδροδυναμικών φορτίσεων που δρουν στο σύστημα για κάθε κίνησή του. Τα μεγέθη αυτά μπορούν να προσδιοριστούν από την επίλυση του υδροδυναμικού προβλήματος, δηλαδή με τη μελέτη της ροής γύρω από τη γάστρα και των δυνάμεων που αναπτύσσονται σε αυτήν και τις επιφάνειες ελέγχου του πλοίου κατά την πλεύση του. Το τελευταίο πραγματοποιείται με χρήση της θεωρίας των ανωστικών ροών.

Η αναλυτική επίλυση τέτοιων προβλημάτων είναι περίπλοκη, και δεν πραγματοποιείται συνήθως σε πλήρεις τύπους γαστρών. Κατά τη φάση της σχεδίασης του πλοίου, γίνεται βάσει απλούστερων θεωρήσεων, όπως με τη θεωρία λωρίδων σε συνδυασμό με την παραδοχή της γραμμικής υπέρθεσης των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών των διαφόρων στοιχείων του συστήματος (γάστρα, πηδάλιο, κ.α.). Σύμφωνα με τη τελευταία, ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις για τις υδροδυναμικές παραγώγους πλοίου και πηδαλίου:

$$Y_v' = (Y_v')_h + (Y_v')_f, \quad N_v' = (N_v')_h + (N_v')_f \quad (3.1)$$

$$Y_r' = (Y_r')_h + (Y_r')_f, \quad N_r' = (N_r')_h + (N_r')_f \quad (3.2)$$

$$Y_{\dot{v}}' = (Y_{\dot{v}}')_h + (Y_{\dot{v}}')_f, \quad N_{\dot{v}}' = (N_{\dot{v}}')_h + (N_{\dot{v}}')_f \quad (3.3)$$

$$Y_r' = (Y_r')_h + (Y_r')_f, \quad N_r' = (N_r')_h + (N_r')_f \quad (3.4)$$

όπου με δείκτη “h” συμβολίζουμε τις παραγώγους της καθαρής γάστρας και με “f” της παραγώγους του πηδαλίου για μηδενική γωνία εκτροπής. Με βάση την προηγούμενη θεώρηση, υπολογίζονται οι υδροδυναμικές φορτίσεις στο πλοίο μέσω του υπολογισμού τους σε απλούστερα δισδιάστατα σώματα ή διατομές.

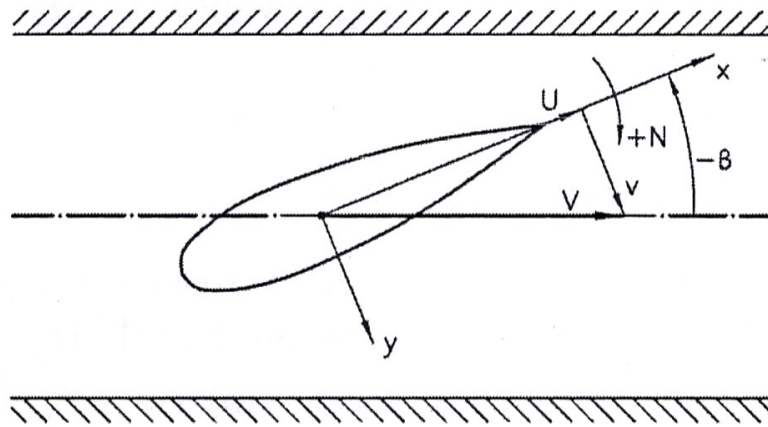
3.2 Πειραματικές Μεθοδολογίες

Άλλος ένας τρόπος για να εκτιμηθούν οι υδροδυναμικές παράγωγοι ενός πλοίου είναι μέσω πειραματικών μεθοδολογιών. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί οι ακόλουθες δοκιμές, οι οποίες εφαρμόζονται σε μοντέλα, μεγάλα πρότυπα και πλοία.

3.2.1 Δοκιμές σε Μοντέλα

3.2.1.1 Πείραμα Ευθύγραμμης Ρυμούλκησης (Straight Line Towing Experiment)

Για να εκτιμηθούν οι υδροδυναμικές παράγωγοι Y_v και N_v ενός πλοίου, σε συγκεκριμένο βύθισμα και διαγωγή, εκτελείται πείραμα σε μοντέλο του πλοίου υπό κλίμακα, ερματισμένο σε γεωμετρικά ανάλογο βύθισμα και διαγωγή. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, το μοντέλο ρυμουλκείται σε μακρόστενη δεξαμενή σε διάφορες γωνίες πρόσπτωσης, β , της ροής ως προς τον άξονα x του μοντέλου και σε σταθερή ταχύτητα, $V = V_m$ (Σχήμα 3.1).



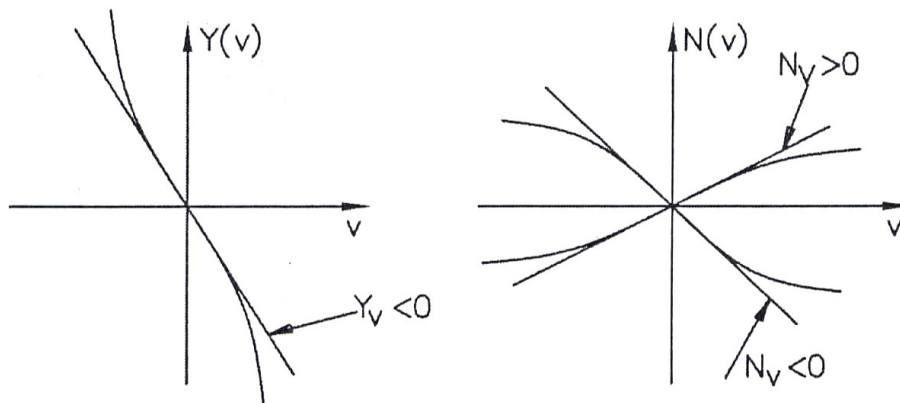
Σχήμα 3.1: Πείραμα Ευθύγραμμης Ρυμούλκησης

Η ταχύτητα με την οποία ρυμουλκείται προκύπτει από την ισότητα των αριθμών Froude μεταξύ πλοίου και μοντέλου. Για μικρές γωνίες β , οι ακόλουθες σχέσεις δίνουν την πρόσω, U , και εγκάρσια, v , ταχύτητα του μοντέλου:

$$U = V \cos \beta \approx V \quad (3.5)$$

$$v = -V \sin \beta \approx -V\beta \approx -U\beta \quad (3.6)$$

Όσο γίνεται το πείραμα, ένα δυναμόμετρο μετράει τη δύναμη Y και τη ροπή N που ασκούνται στο μοντέλο σε κάθε γωνία β . Έπειτα, χαράσσονται τα διαγράμματα $Y-v$ και $N-v$ (Σχήμα 3.2) χρησιμοποιώντας τις μετρήσεις από το πείραμα.



Σχήμα 3.2: Διαγράμματα $Y-v$ και $N-v$ του Πειράματος Ευθύγραμμης Ρυμούλκησης

Οι κλίσεις των καμπυλών, μετρούμενες στο σημείο $v=0$, δίνουν τις τιμές των υδροδυναμικών παραγώγων Y_v και N_v του μοντέλου. Οι τιμές αυτές αδιαστατοποιούνται χρησιμοποιώντας το μήκος, L_m , και τη ταχύτητα, V_m , του μοντέλου και τη πυκνότητα του νερού της δεξαμενής, ρ_m , ως εξής:

$$Y_v' = \frac{Y_v}{\frac{1}{2} \rho_m L_m^2 V_m^2} \quad (3.7)$$

$$N_v' = \frac{N_v}{\frac{1}{2} \rho_m L_m^3 V_m} \quad (3.8)$$

Τελικά, οι διαστατές τιμές των παραγώγων αυτών προκύπτει πολλαπλασιάζοντας τις ανωτέρω αδιάστατες τιμές με τα μεγέθη του κανονικού πλοίου:

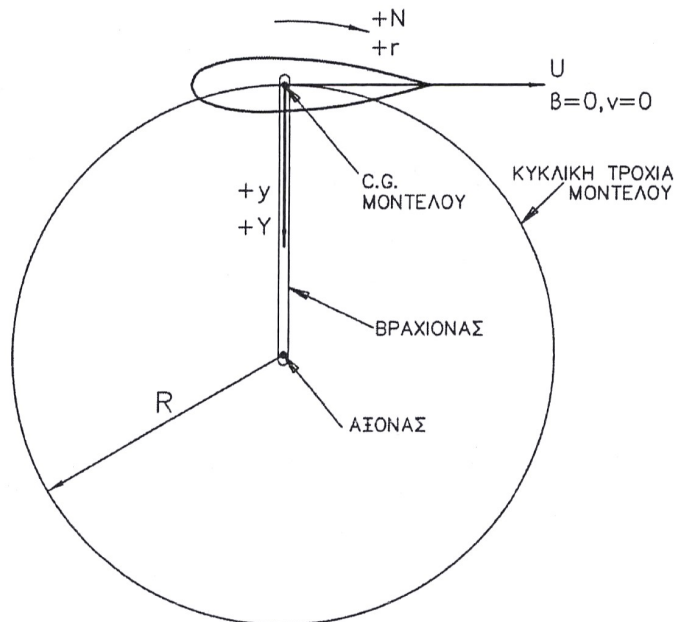
$$Y_v = Y_v' \cdot \frac{1}{2} \rho_s L_s^2 V_s \quad (3.9)$$

$$N_v = N_v' \cdot \frac{1}{2} \rho_s L_s^3 V_s \quad (3.10)$$

3.2.1.2 Πείραμα Περιστροφικής Ρυμούλκησης (Rotating Arm Mechanism)

Για να μετρηθούν οι υδροδυναμικές παράγωγοι Y_r και N_r σε μοντέλο υπό κλίμακα, χρειάζεται να ρυμουλκήσουμε το μοντέλο σε σταθερή ταχύτητα επιβάλλοντας διάφορες γωνιακές ταχύτητες, r , και μετρώντας τις αναπτυσσόμενες φορτίσεις Y και N σε κάθε r . Η πραγματοποίηση του πειράματος απαιτεί την ύπαρξη ειδικά σχεδιασμένης δεξαμενής (Σχήμα 3.3) καθώς και ειδικού “βραχίονα” περιστροφής. Το μοντέλο στερεώνεται στην άκρη του βραχίονα ο οποίος περιστρέφεται περί το άλλο άκρο του με σταθερή γωνιακή ταχύτητα r .

Όπως και στο προηγούμενο πείραμα, το μοντέλο πρέπει να είναι ερματισμένο ώστε να πλέει στο κατάλληλο βύθισμα και διαγωγή. Επίσης, το πηδάλιο θα πρέπει να βρίσκεται σε μηδενική γωνία εκτροπής και η έλικα του μοντέλου, εφόσον υπάρχει, να λειτουργεί στο σημείο που αντιστοιχεί στο σημείο πρόωσης του πλοίου.



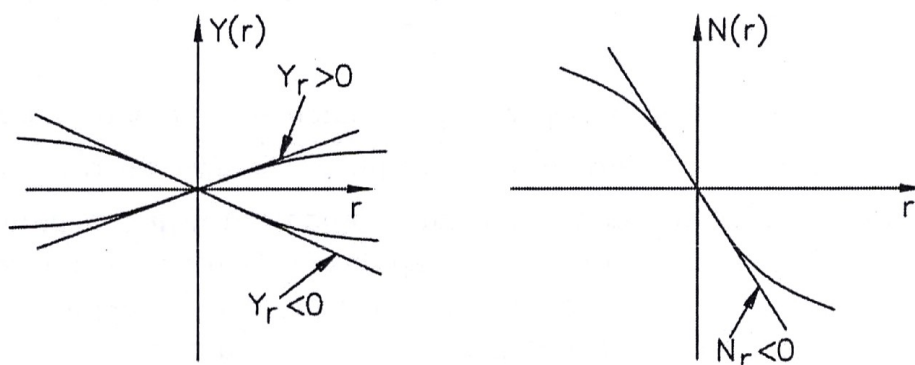
Σχήμα 3.3: Πείραμα Περιστροφικής Ρυμούλκησης

Η διαφοροποίηση των γωνιακών ταχυτήτων επιτυγχάνεται με μεταβολή της ακτίνας, R , του κύκλου στροφής, όπως άλλωστε προκύπτει και από τη σχέση $U = rR$ για σταθερή ταχύτητα, U . Κατά τη διάρκεια του πειράματος μετρούνται τα ακόλουθα μεγέθη για σταθερή ταχύτητα και

διάφορες γωνιακές ταχύτητες:

- F_n – η δύναμη που είναι απαραίτητη για τη συγκράτηση του μοντέλου και ασκείται κατά τη διεύθυνση της ακτίνας στροφής
- G_z – η ροπή περί των κατακόρυφο άξονα ως προς το κέντρο βάρους του μοντέλου
- Y και N

Όπως και στο πείραμα ευθύγραμμης ρυμούλκησης, χαράσσονται τα διαγράμματα $Y-r$ και $N-r$ και οι υδροδυναμικές παράγωγοι εκτιμούνται από τις κλίσεις των καμπυλών στο $r = 0$. Με το πείραμα περιστροφικής ρυμούλκησης μπορούν να εκτιμηθούν και οι παράγωγοι Y_v και N_v . Το τελευταίο επιτυγχάνεται ρυμουλκώνοντας το μοντέλο σε διάφορες γωνίες β για κάθε r , και όχι μόνο για $\beta=0$. Έπειτα, χαράσσονται σε διάγραμμα οι τιμές των Y_v και N_v για κάθε r και υπολογίζονται οι τιμές των παραγώγων για $r=0$.



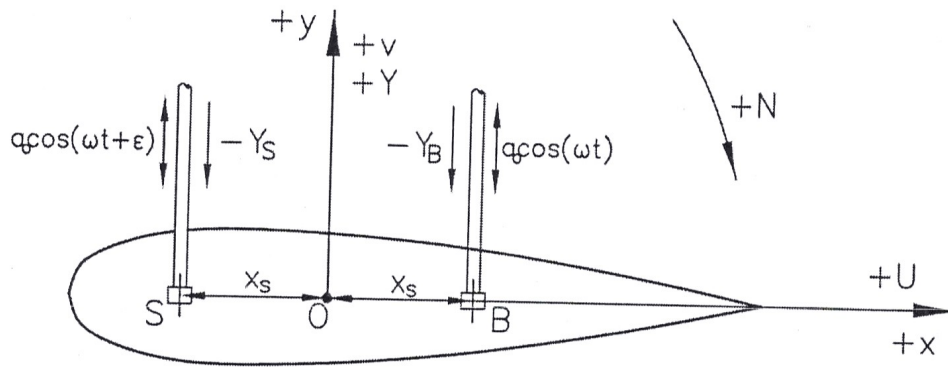
Σχήμα 3.4: Καμπύλες $Y-r$ και $N-r$ του Πειράματος Περιστροφικής Ρυμούλκησης

Η μέθοδος έχει κάποια μειονεκτήματα, όπως ότι απαιτεί μια εξειδικευμένη μορφή δεξαμενής πειραμάτων. Επίσης, το μοντέλο πρέπει να επιταχυνθεί και οι μετρήσεις να ολοκληρωθούν πριν ολοκληρωθεί η πρώτη περιστροφή. Αλλιώς, το μοντέλο θα περνάει από τα ίδια του τα απόνερα με αποτέλεσμα να πρέπει να διορθωθεί η ταχύτητα για το φαινόμενο. Τέλος, για να εκτιμηθούν οι υδροδυναμικές παράγωγοι, απαιτείται αρκετή πληροφορία για μικρές τιμές του r (κοντά στο $r=0$). Συνεπώς, οδηγούμαστε σε μεγάλες τιμές ακτίνας στροφής ή λόγου ακτίνας στροφής ως προς μήκος μοντέλου. Άρα, για μεγάλα μοντέλα απαιτείται αναλόγως μεγάλη δεξαμενή πειραμάτων.

3.2.1.3 Πείραμα Ταλαντωτικής Ρυμούλκησης με Μηχανισμό Επιπέδου Κινήσεως (Planar Motion Mechanism)

Το κύριο πλεονέκτημα της μεθοδολογίας αυτής είναι ότι μειώνει τη δαπάνη που επιφέρουν τα πειράματα με περιστρεφόμενο βραχίονα, καθώς μπορεί να υλοποιηθεί σε μια κοινή μακρόστενη δεξαμενή ρυμούλκησης. Μέσω του πειράματος δύναται να εκτιμηθούν οι τιμές των υδροδυναμικών παραγώγων $Y_v, N_v, Y_r, N_r, Y_v, N_v, Y_r, N_r$.

Ο μηχανισμός επιπέδου κινήσεως απαρτίζεται από δύο ταλαντωτές οι οποίοι παράγουν εγκάρσιες ταλαντώσεις στη πλώρη και στη πρύμνη αντιστοίχως. Ταυτόχρονα, το μοντέλο ρυμουλκείται στη δεξαμενή με σταθερή ταχύτητα U . Στο Σχήμα 3.5 που ακολουθεί, φαίνονται τα παραπάνω, καθώς και κάποια μεγέθη που θα εξηγηθούν στη συνέχεια.



Σχήμα 3.5: Πείραμα Ταλαντωτικής Ρυμούλκησης με Μηχανισμό Επιπέδου Κινήσεως

Το σημείο B (bow) κοντά στην πλώρη και σε απόσταση d μπροστά από την αρχή, O, ταλαντώνεται εγκάρσιως με μικρό πλάτος a_0 και γωνιακή συχνότητα ω . Η αρχή των αξόνων συνήθως λαμβάνεται στο μέσο νομέα του μοντέλου. Το σημείο S (stern) κοντά στη πρύμνη και σε απόσταση x_s πίσω από την αρχή των αξόνων, επίσης ταλαντώνεται εγκάρσιως με το ίδιο πλάτος και την ίδια γωνιακή συχνότητα. Θεωρούμε μια διαφορά φάσεων ταλάντωσης μεταξύ των σημείων B και S και την ονομάζουμε ϵ . Η εγκάρσια μετατόπιση των σημείων B και S που επιβάλλεται από τη ταλαντωτική κίνηση των βραχιόνων δίδεται από τις σχέσεις:

$$y_S = a_0 \cos(\omega t + \epsilon) \quad (3.11)$$

$$y_B = a_0 \cos(\omega t) \quad (3.12)$$

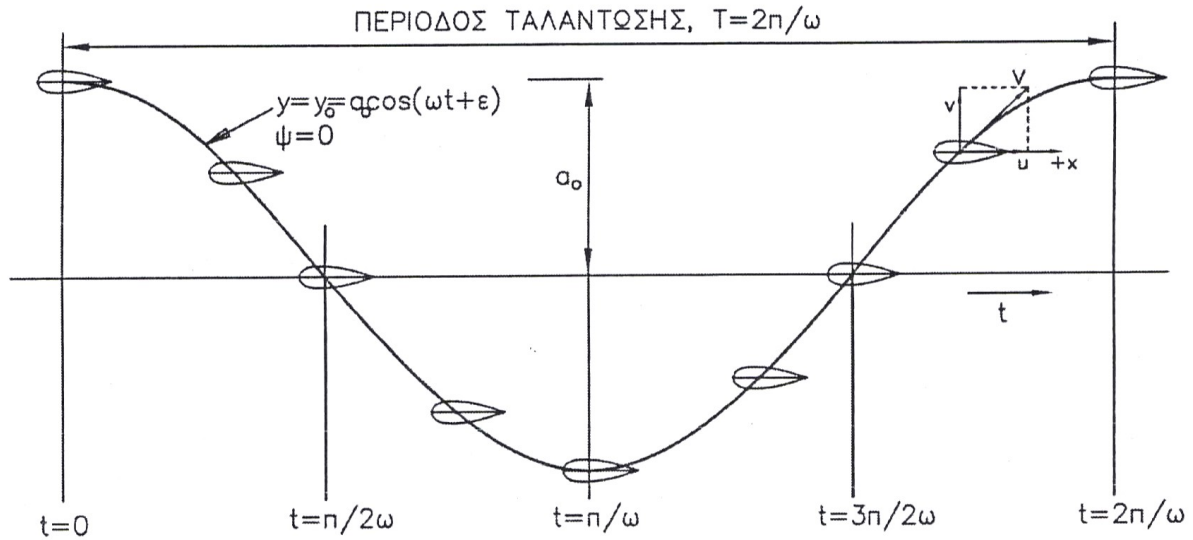
Για μηδενική διαφορά φάσης ταλάντωσης ($\epsilon = 0$), ισχύει:

$$y_S = y_B = y = a_0 \cos(\omega t) \quad (3.13)$$

$$\dot{y} = \dot{v} = -a_0 \omega \sin(\omega t) = a_0 \omega \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) \quad (3.14)$$

$$\ddot{y} = \ddot{v} = -a_0 \omega^2 \cos(\omega t) = a_0 \omega^2 \cos(\omega t + \pi) \quad (3.15)$$

Στην τελευταία περίπτωση, το μοντέλο εκτελεί τη πορεία που φαίνεται στο Σχήμα 3.6 που ακολουθεί:



Σχήμα 3.6: Πορεία του Μοντέλου σε Εγκάρσια Ταλαντωτική Κίνηση Χωρίς Περιστροφή (Πείραμα Ταλαντωτικής Ρυμούλκησης)

Οι εξισώσεις κίνησης του μοντέλου είναι:

$$m \dot{v}(t) = \Delta Y(t) - Y_S(t) - Y_B(t) \quad (3.16)$$

$$m \xi_G \dot{v}(t) = x_S(Y_B(t) - Y_S(t)) + \Delta N(t) \quad (3.17)$$

Οι δυνάμεις $Y_S(t)$ και $Y_B(t)$ μετρούνται κατά τη διάρκεια του πειράματος με δυναμόμετρα. Γνωρίζοντας τη κίνηση του μοντέλο και με γνωστές τις τιμές των δυνάμεων, μπορούμε να υπολογίσουμε τις υδροδυναμικές αντιδράσεις $\Delta Y(t)$, $\Delta N(t)$. Το μοντέλο υποβάλλεται σε εγκάρσια αρμονική ταλάντωση χωρίς περιστροφή και στην περίπτωση αυτή οι υδροδυναμικές φορτίσεις μπορούν να αναπτυχθούν ως εξής:

$$\Delta Y(t) = Y_v v(t) + Y_{\dot{v}} \dot{v}(t) + Y_{\ddot{v}} \ddot{v}(t) + Y_{\overset{\cdot\cdot\cdot}{v}} \overset{\cdot\cdot\cdot}{v}(t) + \dots \quad (3.18)$$

$$\Delta N(t) = N_v v(t) + N_{\dot{v}} \dot{v}(t) + N_{\ddot{v}} \ddot{v}(t) + N_{\overset{\cdot\cdot\cdot}{v}} \overset{\cdot\cdot\cdot}{v}(t) + \dots \quad (3.19)$$

όπου θεωρούμε τους υδροδυναμικούς συντελεστές ανεξάρτητους του χρόνου. Δεδομένου ότι:

$$v(t) = \dot{y}(t) \quad (3.20)$$

$$\dot{v}(t) = \ddot{y}(t) = -\omega^2 y(t) \quad (3.21)$$

$$\ddot{v}(t) = \overset{\cdot\cdot\cdot}{y}(t) = -\omega^2 \dot{y}(t) \quad (3.22)$$

$$\overset{\cdot\cdot\cdot}{v}(t) = (-\omega^2)^2 y(t) \quad (3.23)$$

μπορούμε να μετασχηματίσουμε τις σχέσεις (3.18) και (3.19) ως εξής:

$$\Delta Y(t) = (Y_v - \omega^2 Y_{\ddot{v}} + \dots) v(t) + (Y_{\dot{v}} - \omega^2 Y_{\overset{\cdot\cdot\cdot}{v}} + \dots) \dot{v}(t) + \dots \quad (3.24)$$

$$\Delta N(t) = (N_v - \omega^2 N_{\ddot{v}} + \dots) v(t) + (N_{\dot{v}} - \omega^2 N_{\overset{\cdot\cdot\cdot}{v}} + \dots) \dot{v}(t) + \dots \quad (3.25)$$

Καθώς η γωνιακή συχνότητα ω της εγκάρσιας ταλάντωσης του μοντέλου είναι σχετικά μικρή, μπορούμε να υποθέσουμε ότι ισχύει:

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} (Y_v - \omega^2 Y_{\dot{v}} + \dots) = Y_v \quad (3.26)$$

Εισάγοντας αυτή την απλούστευση στις σχέσεις (3.24), (3.25) παίρνουμε:

$$\Delta Y(t) = Y_v v(t) + Y_{\dot{v}} \dot{v}(t) + \dots \quad (3.27)$$

$$\Delta N(t) = N_v v(t) + N_{\dot{v}} \dot{v}(t) + \dots \quad (3.28)$$

Ορίζουμε τώρα το t_{in} ως τη χρονική στιγμή για την οποία ισχύει $v(t_{in}) = 0$ και το t_{out} ως τη χρονική στιγμή όπου ισχύει $\dot{v}(t_{out}) = 0$, δηλαδή:

$$v(t_{in}) = -\alpha_0 \omega \sin(\omega t_{in}) = 0 \Rightarrow \omega t_{in} = k\pi \Rightarrow t_{in} = k \frac{T}{2}, \quad k=1, 2, \dots \quad (3.29)$$

$$\dot{v}(t_{out}) = -\alpha_0 \omega^2 \cos(\omega t_{out}) = 0 \Rightarrow \omega t_{out} = k\pi + \frac{\pi}{2} \Rightarrow t_{out} = \left(k + \frac{1}{2}\right) \frac{T}{2}, \quad k=1, 2, \dots \quad (3.30)$$

όπου με T συμβολίζουμε τη περίοδο της εγκάρσιας ταλάντωσης του μοντέλου. Τελικά, από τις σχέσεις (3.27) και (3.28), σε συνδυασμό με τις εξισώσεις κίνησης (3.16) και (3.17), καταλήγουμε στις ακόλουθες εκφράσεις για τις υδροδυναμικές παραγώγους:

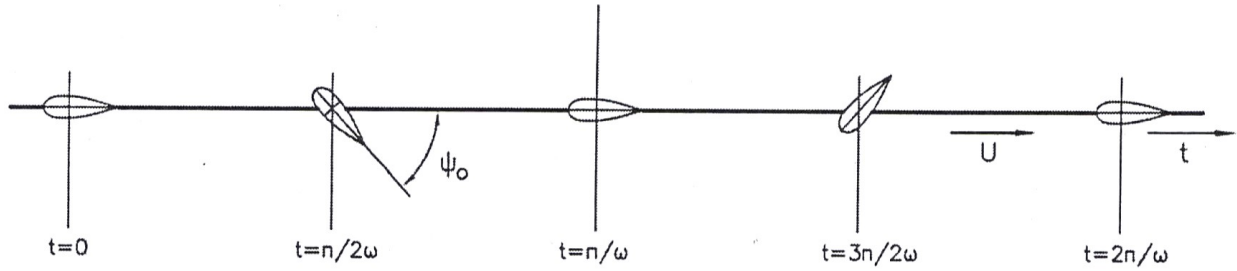
$$Y_v = \frac{Y_B(t_{out}) + Y_S(t_{out})}{-\alpha_0 \omega} \quad (3.31)$$

$$N_v = \frac{[Y_B(t_{out}) + Y_S(t_{out})] x_S}{-\alpha_0 \omega} \quad (3.32)$$

$$Y_{\dot{v}} - m = \frac{Y_B(t_{in}) + Y_S(t_{in})}{-\omega^2 \alpha_0} \quad (3.33)$$

$$N_{\dot{v}} - m \zeta_G = \frac{[Y_B(t_{in}) + Y_S(t_{in})] x_S}{-\omega^2 \alpha_0} \quad (3.34)$$

Στη συνέχεια, για να εκτιμηθούν οι παράγωγοι Y_r και N_r , το μοντέλο θα κινείται ώστε $r \neq 0$. Οι μετρήσεις λαμβάνονται όταν $\dot{r} = 0, v = 0$ και $\dot{v} = 0$. Ομοίως, θα πρέπει για την εύρεση των $Y_{\dot{r}}$ και $N_{\dot{r}}$, να κινείται το μοντέλο ώστε $\dot{r} \neq 0$, και οι μετρήσεις να ληφθούν όταν $r = 0, v = 0$ και $\dot{v} = 0$. Προκειμένου να πετύχουμε επιβολή γωνιακής ταχύτητας και επιτάχυνσης στο μοντέλο με $v = \dot{v} = 0$, αυτό θα πρέπει να ρυμουλκηθεί με τον τρόπο που φαίνεται στο Σχήμα 3.7.



Σχήμα 3.7: Πορεία του Μοντέλου στην Περίπτωση Περιστροφικής Ταλάντωσης (Πείραμα Ταλαντωτικής Ρυμούλκησης)

Οι εξισώσεις κίνησης του μοντέλου στη περίπτωση αυτή θα είναι:

$$mUr(t) + m\xi_G \dot{r}(t) = \Delta Y(t) - Y_S(t) - Y_B(t) \quad (3.35)$$

$$m\xi_G Ur(t) + I_z \dot{r}(t) = x_S(Y_B(t) - Y_S(t)) + \Delta N(t) \quad (3.36)$$

Όπου, όπως και προηγουμένως τα Y_B και Y_S είναι οι μετρήσεις των δυναμομέτρων. Για να παράγουμε την απαραίτητη μορφή κίνησης (Σχήμα 3.7) απαιτείται να υπάρχει διαφορά φάσης ίση με 180° μεταξύ πρωραίου και πρυμναίου ταλαντωτή. Τότε, $v = \frac{1}{2}(y_B + y_S) = 0$ και:

$$\psi(t) = \frac{y_B(t)}{L_m/2} = -\psi_0 \cos(\omega t), \quad \psi_0 = \frac{-2\alpha_0}{L_m} \quad (3.37)$$

$$r(t) = \dot{\psi}(t) = \psi_0 \omega \sin(\omega t) \quad (3.38)$$

$$\dot{r}(t) = \ddot{\psi}(t) = \psi_0 \omega^2 \cos(\omega t) = -\omega^2 \psi(t) \quad (3.39)$$

$$\ddot{r}(t) = \ddot{\psi}(t) = -\omega^2 \dot{\psi}(t) \quad (3.40)$$

$$\ddot{\ddot{r}}(t) = (-\omega^2)^2 \psi(t) \quad (3.41)$$

Τελικά, ακολουθώντας την ίδια λογική με τη περίπτωση των παραγώγων $Y_v, N_v, Y_{\dot{v}}, N_{\dot{v}}$, καταλήγουμε στις ακόλουθες σχέσεις:

$$Y_r - mu = \frac{Y_B(t_{out}) + Y_S(t_{out})}{\psi_0 \omega} \quad (3.42)$$

$$N_r - m\xi_G u = \frac{[Y_B(t_{out}) + Y_S(t_{out})] x_S}{\psi_0 \omega} \quad (3.43)$$

$$Y_{\dot{r}} - m\xi_G = \frac{Y_B(t_{in}) + Y_S(t_{in})}{\psi_0 \omega^2} \quad (3.44)$$

$$N_{\dot{r}} - I_z = \frac{[Y_B(t_{in}) + Y_S(t_{in})] x_S}{\psi_0 \omega^2} \quad (3.45)$$

Τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας δύνανται να έχουν επηρεαστεί από τα κύματα συχνότητας ω που παράγουν οι ταλαντωτικές κινήσεις του μηχανισμού, τα οποία αλλοιώνουν τα αποτελέσματα. Το πρόβλημα αυτό ελέγχεται εφόσον γίνουν πειράματα σε διάφορες μικρές συχνότητες ταλάντωσης, οπότε επιβεβαιώνεται ότι οι παράγωγοι είναι ανεξάρτητοι από την συχνότητα στις συνθήκες του πειράματος.

3.2.1.4 Πειράματα με Ελεύθερα Μοντέλα (Free Model Experiment)

Τα πειράματα αυτά λαμβάνουν χώρα σε τετράγωνες δεξαμενές ή λίμνες. Τα μοντέλα είναι τηλεχειριζόμενα ή έχουν πιλότο και οι ελιγμοί που εκτελούνται κατά τη διάρκεια των πειραμάτων είναι παρόμοιοι με αυτούς που γίνονται στα πλοία κανονικού μεγέθους. Τα δεδομένα από τέτοια πειράματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε προγράμματα εξομοίωσης της κίνησης του πλοίου, όπως άλλωστε γίνεται και στη παρούσα εργασία.

Εφόσον περιγράφονται στο εδάφιο 3.2.2, δεν θα επεκταθούμε περαιτέρω σε λεπτομέρειες των ελιγμών εκείνων που πραγματοποιούνται στα μοντέλα αυτά και στα πλοία κανονικού μεγέθους.

3.2.1.4.1 Χρήση των Αποτελεσμάτων των Πειραμάτων σε Προγράμματα Πρόβλεψης και Προσομοίωσης (System Identification and Simulation)

Τα πειράματα σε ελεύθερα μοντέλα είναι ιδιαίτερος χρήσιμα ως πηγή δεδομένων για τα προγράμματα πρόβλεψης και προσομοίωσης καθώς το μοντέλο εκτελεί τους ίδιους ελιγμούς που εκτελεί το πλοίο. Συνεπώς, ένα μοντέλο προσομοίωσης που έχει δημιουργηθεί για δεδομένα τέτοιων ελιγμών σε μοντέλο θα μπορεί κάλλιστα να αξιοποιηθεί σε ίδιου τύπου δεδομένα στο πλοίο. Βέβαια, πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν και οι επιδράσεις κλίμακας σε κάθε περίπτωση τέτοιας μεταφοράς, όπως εξηγείται λεπτομερέστερα στο εδάφιο 3.2.1.5.

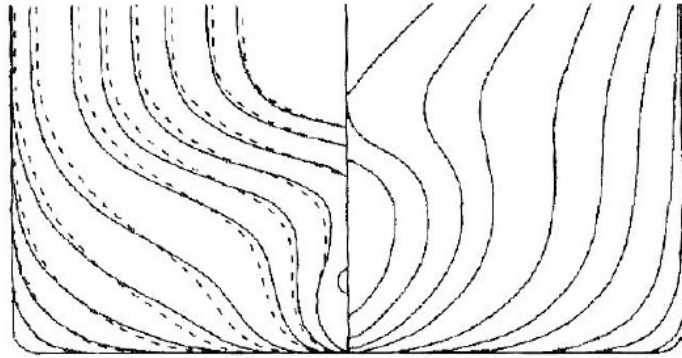
3.2.1.4.2 Αξιοποίηση της Βάσης Δεδομένων του Συμποσίου SIMMAN 2008

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία προήλθαν από το συνέδριο SIMMAN 2008, το οποίο πραγματοποιήθηκε στη Δανία τον Απρίλιο του 2008. Σκοπός του συνεδρίου ήταν να γίνει σύγκριση σε παγκόσμιο επίπεδο των διαφόρων μεθοδολογιών πρόβλεψης και προσομοίωσης των ελκτικών ικανοτήτων πλοίων. Συμπεριλήφθηκαν στο συνέδριο συστημικές καθώς και CFD μεθοδολογίες πρόβλεψης, ενώ μελετήθηκαν τέσσερα μοντέλα πλοίων: δύο δεξαμενόπλοια (KVLCC1&2), ένα container ship (KCS) και ένα καταδρομικό (5415).

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα από τα μοντέλα δεξαμενόπλοιων (KVLCC1&2). Στα Σχήματα 3.8 - 3.10 που ακολουθούν, φαίνεται η μορφή της γάστρας του KVLCC1. Στο Σχήμα 3.9, φαίνονται και οι νομείς του KVLCC2 με διακεκομμένες γραμμές. Οι κυριότερη διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων είναι στη μορφή των γραμμών της πρύμνης. Ενώ στη πρύμνη το KVLCC1 έχει νομείς με σχήμα-V, η αντίστοιχοι νομείς του KVLCC2 έχουν περισσότερο σχήμα-U.



Σχήμα 3.8: Profile View του KVLCC1 (SIMMAN Proceedings)



Σχήμα 3.9: Body Plan του KVLCC1 (SIMMAN Proceedings)

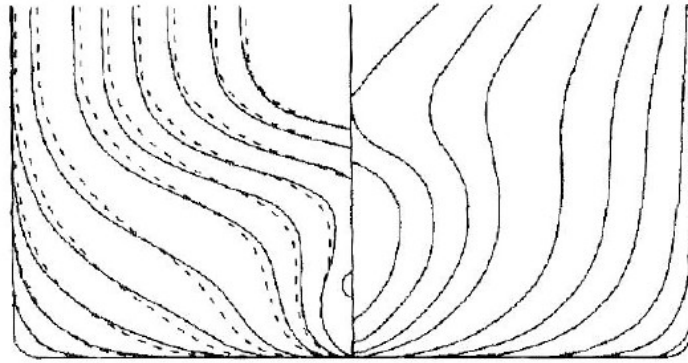


Σχήμα 3.10: Πρυμναία Περιοχή του Κατασκευασμένου Μοντέλου KVLCC1

Στα Σχήματα 3.11 - 3.13, φαίνεται αντίστοιχα η μορφή της γάστρας του KVLCC2. Στο Σχήμα 3.12, φαίνονται και οι νομείς του KVLCC2 με διακεκομμένες γραμμές.



Σχήμα 3.11: Profile View του KVLCC2



Σχήμα 3.12: Body Plan του KVLCC2



Σχήμα 3.13: Πρυμναία Περιοχή του Κατασκευασμένου Μοντέλου KVLCC2

Για τις ανάγκες του συνεδρίου, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές στα μοντέλα των πλοίων που αναφέρθηκαν και τα αποτελέσματα των δοκιμών μοιράστηκαν με όλους τους συμμετέχοντες. Οι δοκιμές συμπεριλάμβαναν πειράματα περιστροφικής ρυμούλκησης, πειράματα ταλαντωτικής ρυμούλκησης με μηχανισμό επιπέδου κινήσεως και πειράματα με ελεύθερα μοντέλα.

Στις μεθοδολογίες πρόβλεψης της εργασίας αυτής, χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά τα αποτελέσματα των πειραμάτων με ελεύθερα μοντέλα. Στα πειράματα αυτά, εκτελέστηκαν ελιγμοί που προσομοιάζουν αυτούς του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO), όπως οφιοειδείς και κυκλικοί ελιγμοί. Αξιοποιήσαμε τα αποτελέσματα των πειραμάτων δύο οργανισμών στην παρούσα εργασία: του Hamburgische Schiffbau-Versuchsanstalt (HSVA) της Γερμανίας και του Maritime Research Institute Netherlands (MARIN) της Ολλανδίας.

Στους Πίνακες 3.1 και που ακολουθούν δίνονται οι κύριες διαστάσεις και συντελεστές μορφής των μοντέλων KVLCC1 και KVLCC2.

Πίνακας 3.1: Κύρια Χαρακτηριστικά του KVLCC1 (SIMMAN 2008)

Model built by	not built	INSEAN	MOERI	NMRI
Tested at	n.a.	INSEAN (PMM) HSVA (free) CTO (free) MARIN (free)	MOERI (PMM)	NMRI (CMT)
Scale	1.000	45.714	58.000	110.000
Main particulars				
Lpp (m)	320.0	7.0000	5.5172	2.9091
Lwl (m)	325.5	7.1204	5.6121	2.9591
Bwl (m)	58.0	1.2688	1.0000	0.5273
D (m)	30.0	0.6563	0.5172	0.2727
T (m)	20.8	0.4550	0.3586	0.1891
Displacement (m ³)	312738	3.2737	1.6029	0.2350
S w/o rudder (m ²)	27320	13.0732	8.1213	2.2579
CB	0.8101	0.8101	0.8101	0.8101
CM	0.9980	0.9980	0.9980	0.9980
LCB (%), fwd+	3.48	3.48	3.48	3.48
Rudder				
Type	Horn	Horn	Horn	Horn
S of rudder (m ²)	273.3	0.1308	0.0812	0.0226
Lat. area (m ²)	136.7	0.0654	0.0406	0.0113
Turn rate (deg/s)	2.34	15.8	17.8	24.5
Propeller				
Type	FP	FP	FP	FP
No. of blades	4	4	4	4
D (m)	9.86	0.204	0.170	0.090
P/D (0.7R)	0.721	0.808	0.721	0.721
Ae/A0	0.431	0.448	0.431	0.431
Rotation	Right hand	Right hand	Right hand	Right hand
Hub ratio	0.155	0.165	0.155	0.155
Appendages				
Bilge keels	None	None	None	None
Test condition				
T (m)	20.8	0.455	0.359	0.189
Disp. (m ³)	312738	3.274	1.603	0.235
S (m ²) incl. rudder	27593	13.204	8.203	2.280
LCG (m)	11.1	0.244	0.192	0.101
GM (m)	5.71	0.125	0.098	0.052
ixx/B	0.40	0.40	0.40	0.40
izz/Lpp	0.25	0.25	0.25	0.25
Service speed				
U (m/s, full scale: kn)	15.5	1.179	1.047	0.760
Fn	0.142	0.142	0.142	0.142

Πίνακας 3.2: Κύρια Χαρακτηριστικά του KVLCC2 (SIMMAN 2008)

Model built by	not built	INSEAN	MOERI	NMRI
Tested at	n.a.	INSEAN (PMM) HSVA (free) CTO (free) MARIN (free)	MOERI (PMM)	NMRI (CMT)
Scale	1.000	45.714	58.000	110.000
Main particulars				
Lpp (m)	320.0	7.0000	5.5172	2.9091
Lwl (m)	325.5	7.1204	5.6121	2.9591
Bwl (m)	58.0	1.2688	1.0000	0.5273
D (m)	30.0	0.6563	0.5172	0.2727
T (m)	20.8	0.4550	0.3586	0.1891
Displacement (m ³)	312622	3.2724	1.6023	0.2349
S w/o rudder (m ²)	27194	13.0129	8.0838	2.2475
CB	0.8098	0.8098	0.8098	0.8098
CM	0.9980	0.9980	0.9980	0.9980
LCB (%), fwd+	3.48	3.48	3.48	3.48
Rudder				
Type	Horn	Horn	Horn	Horn
S of rudder (m ²)	273.3	0.1308	0.0812	0.0226
Lat. area (m ²)	136.7	0.0654	0.0406	0.0113
Turn rate (deg/s)	2.34	15.8	17.8	24.5
Propeller				
Type	FP	FP	FP	FP
No. of blades	4	4	4	4
D (m)	9.86	0.204	0.170	0.090
P/D (0.7R)	0.721	0.808	0.721	0.721
Ae/A0	0.431	0.448	0.431	0.431
Rotation	Right hand	Right hand	Right hand	Right hand
Hub ratio	0.155	0.165	0.155	0.155
Test condition				
T (m)	20.8	0.455	0.359	0.189
Disp. (m ³)	312622	3.272	1.602	0.235
S (m ²) incl. rudder	27467	13.144	8.165	2.270
LCG (m)	11.1	0.244	0.192	0.101
GM (m)	5.71	0.125	0.098	0.052
ixx/B	0.40	0.40	0.40	0.40
izz/Lpp	0.25	0.25	0.25	0.25
Service speed				
U (m/s, full scale: kn)	15.5	1.179	1.047	0.760
Fn	0.142	0.142	0.142	0.142

3.2.1.5 Προβλήματα λόγω Επιδράσεων Κλίμακας

Καθώς το μοντέλο του πλοίου που μελετάται στη δεξαμενή είναι αρκετά μικρότερο από το ίδιο το πλοίο, είναι πολύ πιθανό να υπάρχουν επιδράσεις κλίμακας στον υπολογισμό των υδροδυναμικών παραγώγων του. Το μοντέλο έχει ίδιο αριθμό Froude με το πλοίο, αλλά διαφορετικό αριθμό Reynolds. Η διαφορά στην τιμή του αριθμού Reynolds επηρεάζει τη μορφή του οριακού στρώματος ροής γύρω από το μοντέλο. Άρα, υπάρχει η πιθανότητα εμφάνισης επιδράσεων κλίμακας εάν χρησιμοποιηθούν απευθείας οι τιμές των υδροδυναμικών παραγώγων

του μοντέλου σε προσομοίωση της κίνησης του πλοίου.

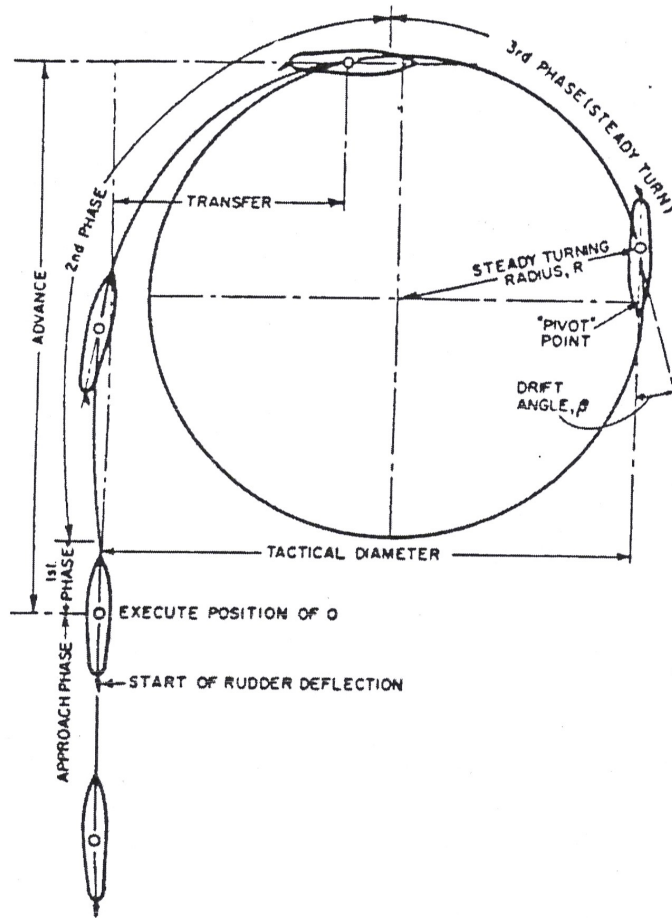
Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, δεν υπήρχε η δυνατότητα να δοκιμάσουμε τα μοντέλα προσομοίωσης μας σε δεδομένα πλοίου κανονικού μεγέθους. Συνεπώς, δεν μπορούμε να βγάλουμε κάποιο συμπέρασμα για τις πιθανές επιδράσεις κλίμακας που δύνανται να εμφανιστούν σε τέτοια περίπτωση.

3.2.2 Δοκιμές σε Πλοία και Μεγάλα Πρότυπα

Σε αντίθεση με τις άλλες μεθοδολογίες προσδιορισμού των υδροδυναμικών παραγώγων του πλοίου, οι δοκιμές σε πλοία κανονικού μεγέθους γίνονται με σκοπό τον έλεγχο των πραγματικών ελκτικών ικανοτήτων και της ευστάθειας κατευθύνσεως τους. Δηλαδή, βασικός στόχος των δοκιμών είναι η επιβεβαίωση των εκτιμήσεων της αρχικής σχεδίασης για τις τιμές των παραγώγων, και όχι η πρόβλεψη τους. Ο έλεγχος γίνεται με τη βοήθεια ορισμένων δοκιμών, οι σημαντικότερες από τις οποίες περιγράφονται στο παρόν εδάφιο.

3.2.2.1 Κυκλικός Ελιγμός (Circle or Turning Maneuver)

Ο κυκλικός ελιγμός είναι μια από της πιο διαδεδομένες δοκιμές πηδαλιουχίας και δίδει σημαντικά στοιχεία για την ικανότητα στροφής του πλοίου. Πραγματοποιείται σε ήρεμη θάλασσα, χωρίς τη παρουσία ανέμων και θαλάσσιων ρευμάτων. Αρχικά, το πλοίο πλέει σε ευθεία πορεία και με σταθερή ταχύτητα. Στη συνέχεια, με σταθερή παροχή καυσίμου, εκτρέπεται το πηδάλιο σε σταθερή γωνία, δ_R . Εξετάζουμε τη πορεία του πλοίου από την αρχική κατεύθυνση ευθείας πορείας ($\psi = 0$) έως γωνία στροφής πηδαλίου $\psi = 360^\circ$. Η δοκιμή γίνεται για διάφορες παροχές καυσίμου και τιμές του δ_R . Το πλοίο ακολουθεί τη τροχιά του Σχήματος 3.14.



Σχήμα 3.14: Κυκλικός Ελιγμός

Στο Σχήμα 3.14 φαίνονται επίσης κάποιοι χαρακτηριστικοί παράμετροι του ελιγμού:

- Τακτική Διάμετρος (Tactical Diameter) – η απόσταση του πλοίου από την αρχική (ευθεία) πορεία, όταν αυτό έχει στραφεί κατά 180° .
- Προχώρηση (Advance) – η απόσταση του πλοίου, κατά τη διεύθυνση της αρχικής πορείας, από το σημείο εκκίνησης του ελιγμού και του σημείου στο οποίο η γωνία στροφής του πλοίου είναι 90° . Ως σημείο εκκίνησης του ελιγμού θεωρούμε τη θέση όπου έγινε η στροφή του πηδαλιού.
- Μετατόπιση (Transfer) – η απόσταση του πλοίου από την αρχική ευθεία πορεία όταν αυτό έχει στραφεί κατά 90° .
- Ακτίνα Στροφής (Steady Turning Radius) – η ακτίνα της σταθερής κυκλικής τροχιάς, επί της οποίας κινείται το πλοίο, μετά την απόσβεση των μεταβατικών φαινομένων.

Κατά τη διάρκεια του ελιγμού μετρώνται και τα ακόλουθα μεγέθη ενδιαφέροντος:

- Ταχύτητα Πρόωσης
- Γωνία Εκτροπής του Πλοίου (Drift Angle) – η γωνία μεταξύ του διαμήκους άξονα του πλοίου και της ολικής ταχύτητας του.

- Γωνία Εγκάρσιας Κλίσης του Πλοίου (Heel Angle).

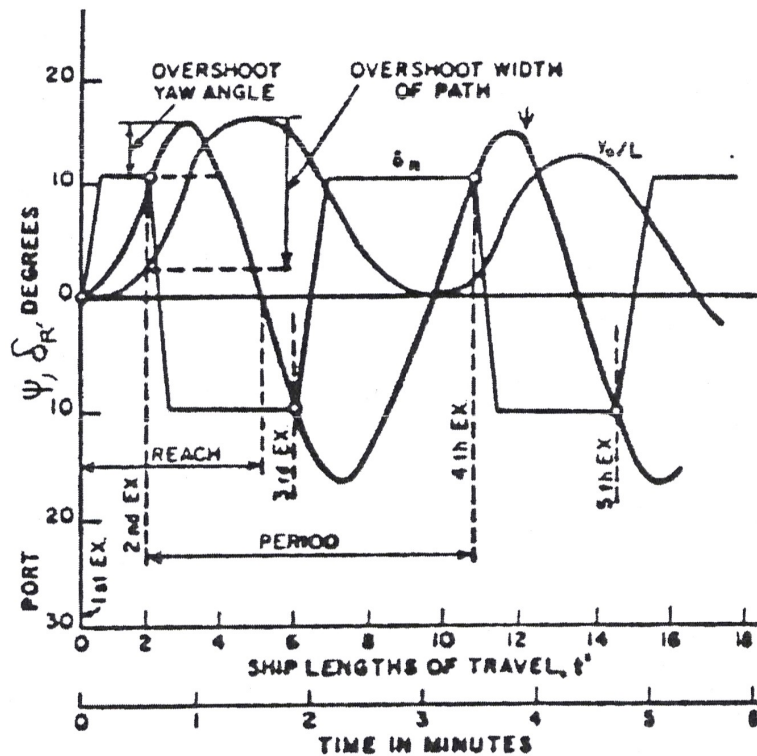
Για την περαιτέρω ανάλυσή του, ο κυκλικός ελιγμός χωρίζεται σε τρεις φάσεις. Η *πρώτη φάση* αρχίζει τη στιγμή της εκτροπής του πηδαλίου και ολοκληρώνεται όταν σταθεροποιηθεί το πηδάλιο στη γωνία δ_R . Κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης, η πλευρική ταχύτητα, v , και η γωνιακή ταχύτητα, r , θεωρούνται μηδενικές καθώς δεν έχει περάσει αρκετός χρόνος για να αναπτυχθούν. Συνεπώς, κατά τη φάση αυτή, χρησιμοποιούνται τροποποιημένες οι εξισώσεις κίνησης (2.1)-(2.3) με $v=0$ και $r=0$. Η *δεύτερη φάση* του ελιγμού περιλαμβάνει το μη-μόνιμο φαινόμενο, το οποίο έπειτα από μια βαθμιαία απόσβεση μας οδηγεί στο μόνιμο φαινόμενο. Κατά τη φάση αυτή, χρησιμοποιούνται χωρίς τροποποιήσεις οι πλήρεις εξισώσεις κίνησης. Η *τρίτη φάση* του ελιγμού μας ενδιαφέρει περισσότερο για τη μελέτη της πηδαλιουχίας του πλοίου. Στη μόνιμη κίνηση, δεν έχουμε πλευρική και γωνιακή επιτάχυνση, δηλαδή $\dot{v}=0, \dot{r}=0$, και άρα οι εξισώσεις κίνηση που διέπουν αυτή τη φάση είναι αναλόγως τροποποιημένες.

Τα αποτελέσματα του κυκλικού ελιγμού συνδυάζονται με αυτά των υπολοίπων ελιγμών ώστε να προκύψει το διάγραμμα $\delta - r$, το οποίο χαρακτηρίζει την ευστάθεια κατευθύνσεως και τις ελκτικές ικανότητες του πλοίου.

3.2.2.2 Οφιοειδής Ελιγμός (Zig-Zag Maneuver)

Ο ελιγμός αυτός είναι πολύ χρήσιμος και ταυτόχρονα πραγματοποιείται με μεγάλη ευκολία. Απαιτούνται για την εκτέλεσή του ένα χρονόμετρο και μια γυροσκοπική πυξίδα. Στην αρχή του ελιγμού, το πλοίο πλέει σε ευθεία πορεία και με σταθερή ταχύτητα (σταθερή παροχή καυσίμου). Στη συνέχεια, εκτρέπεται το πηδάλιο δεξιά στη γωνία $\delta = \delta_0$ όσο το δυνατόν πιο γρήγορα και ομαλά. Διατηρείται σταθερή η θέση του πηδαλίου, μέχρις ότου η γωνία στροφής του πλοίου, ψ , να λάβει κάποια προκαθορισμένη τιμή, $\psi = \psi_0$. Τότε, το πηδάλιο στρέφεται αριστερά σε γωνία $\delta = \delta_0$, και πάλι με τρόπο όσο γίνεται πιο γρήγορο και ομαλό. Διατηρείται αυτή η γωνία πηδαλίου μέχρι να στραφεί το πλοίο κατά γωνία $\psi = \psi_0$ προς την αντίθετη φορά, οπότε και πάλι η εκτροπή του πηδαλίου αντιστρέφεται κατά τον ίδιο τρόπο.

Επαναλαμβάνεται η όλη διαδικασία τέσσερις με πέντε φορές, επιτυγχάνοντας μια σταθερή περιοδική κίνηση. Καταγράφεται η χρονική ιστορία της γωνίας εκτροπής του πηδαλίου, $\delta = \delta(t)$, και της γωνίας στροφής του πλοίου, $\psi = \psi(t)$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.15.



Σχήμα 3.15: Οφιοειδής Ελιγμός

Κατά τη περιοδική κίνηση του πλοίου, μετρούνται οι παράμετροι του ελιγμού:

- Γωνία Υπέρβασης (Overshoot Angle) – η γωνία πέρα της δ_0 κατά την οποία συνεχίζει το πλοίο παρά την αναστροφή του ηδάλιου, πριν αλλάξει κατεύθυνση. Δηλαδή, γωνία υπέρβασης = $\psi_{\max} - \delta_0$.
- Περίοδος (Period) – ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών στιγμών t_k ($k = 1, 2$) στις οποίες ισχύει $\psi(t_k) = \delta_0 > 0$.
- Χρόνος Υπέρβασης (Time to Overshoot) – ο χρόνος που περνάει μέχρις ότου η γωνία στροφής του πλοίου γίνει ίση με τη γωνία εκτροπής του ηδάλιου, δ_0 , για πρώτη φορά. Άρα, ο χρόνος υπέρβασης ταυτίζεται με τον χρόνο, t_{over} , από την αρχή του ελιγμού μέχρι τη πρώτη φορά που θα ισχύει $\psi(t_{\text{over}}) = \delta_0$.

Ο κλασικό οφιοειδής ελιγμός γίνεται για $\delta_0 = \psi_0$. Δηλαδή, το ηδάλιο αντιστρέφεται τη στιγμή κατά την οποία η γωνία στροφής του πλοίου γίνει ίδια με τη γωνία εκτροπής του ηδάλιου. Οι συνηθέστερες γωνίες στροφής είναι είτε 20° , είτε 10° , και ο ελιγμός παίρνει το αντίστοιχο όνομα. Ο τροποποιημένος οφιοειδής ελιγμός πραγματοποιείται με $\psi < \delta$. Για ευσταθή πλοία, ο οφιοειδής ελιγμός μπορεί να μελετηθεί με τις γραμμικές εξισώσεις κίνησης.

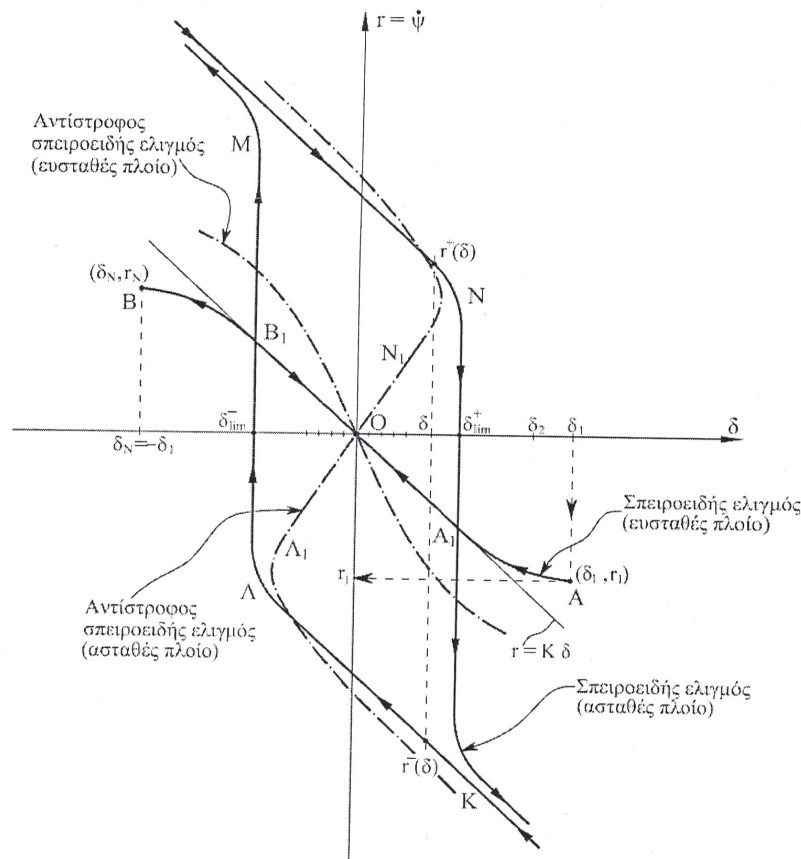
3.2.2.3 Σπειροειδής και Αντίστροφος Σπειροειδής Ελιγμός (Spiral and Reverse-Spiral Maneuver)

Ο σπειροειδής ελιγμός εκτελείται συνήθως για το έλεγχο της ευστάθειας κατευθύνσεως του πλοίου. Αρχικά, το πλοίο βρίσκεται σε ευθεία πορεία με σταθερή, προκαθορισμένη ταχύτητα U . Καθ'όλη τη διάρκεια του ελιγμού, η παροχή καυσίμου διατηρείται σταθερή. Στη συνέχεια, το ηδάλιο στρέφεται απότομα (προς τα αριστερά) σε κάποια μεγάλη γωνία, $\delta = \delta_1$, και διατηρείται

στη θέση αυτή μέχρις ότου αποκατασταθεί σταθερή τιμή της γωνιακής ταχύτητας του πλοίου, $r=r_1$. Το ζεύγος τιμών (δ_1, r_1) σημειώνεται σε διάγραμμα με άξονες (δ, r) , όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.16. Συνήθως, θεωρείται θετική η εκτροπή του πηδαλίου προς τα αριστερά.

Έπειτα, ελαττώνεται η γωνία εκτροπής του πηδαλίου κατά κάποια μικρή γωνία $\Delta\delta$ (όπως 5°), και επαναλαμβάνονται τα προηγούμενα βήματα. Προκύπτει έτσι νέο ζεύγος τιμών, $(\delta_2 = \delta_1 - \Delta\delta, r_2)$, το οποίο σημειώνεται στο ίδιο διάγραμμα όπως πριν (Σχήμα 3.16).

Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για μικρότερες γωνίες εκτροπής του πηδαλίου $\delta_3, \delta_4, \dots$ έως την γωνία $\delta_N = -\delta_1$, και σημειώνονται τα λαμβανόμενα ζεύγη τιμών (δ, r) στο διάγραμμα.



Σχήμα 3.16: Σπειροειδής και Αντίστροφο Σπειροειδής Ελιγμός για Ευσταθές και Ασταθές Πλοίο

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται από την αρχή, αρχίζοντας τώρα με δεξιά στροφή του πηδαλίου κατά γωνία $\delta=\delta_1' = -\delta_1$, και προχωρώντας με αντίστοιχα βήματα όπως πριν για γωνίες $(\delta_1' = \delta_N, \delta_2' = \delta_{N-1}, \dots, \delta_N' = \delta_1)$. Όπως και πριν, σε κάθε γωνία εκτροπής μετράται η αντίστοιχη τιμή τη γωνιακής επιτάχυνσης του πλοίου και τα ζεύγη σημειώνονται στο ίδιο διάγραμμα (Σχήμα 3.16). Η τελική μορφή του διαγράμματος (δ, r) εξαρτάται από το πόσο ευσταθές ή όχι είναι το πλοίο. Συνήθως, όταν ο σπειροειδής ελιγμός πραγματοποιηθεί σε διάφορες ταχύτητες, U , τα αποτελέσματα είναι παρόμοια.

Ένα μειονέκτημα της δοκιμής είναι ότι σε μεγάλα πλοία, απαιτείται υπερβολικός χρόνος μέχρι να φτάσει το πλοίο σε σταθερή τιμή της γωνιακής ταχύτητας, r . Αυτό έχει ως συνέπεια να απαιτείται μεγάλη θαλάσσια έκταση για την εκτέλεση του ελιγμού. Επίσης, τα αποτελέσματα

του ελιγμού είναι πολύ ευαίσθητα σε εξωτερικές διεγέρσεις. Τα μειονεκτήματα αυτά οδήγησαν στην υιοθέτηση του αντίστροφου σπειροειδούς ελιγμού.

Ο αντίστροφος σπειροειδής ελιγμός αποτελεί εναλλακτικό τρόπο προσδιορισμού του διαγράμματος $r - \delta$. Αρχικά, πηδαλιουχείται το πλοίο έτσι ώστε να πετυχαίνει μια προαποφασισμένη τιμή γωνιακής ταχύτητας, $r = r_n$. Απαιτούνται οι ενδείξεις δύο οργάνων για την επιτυχία του ελιγμού, ενός μετρητού γωνίας εκτροπής του πηδαλίου και ενός γυροσκοπικού μηχανισμού μέτρησης γωνιακής ταχύτητας. Η σύγκλιση στη τιμή $r = r_n$ γίνεται με διαρκείς μικρές εκτροπές του πηδαλίου στο εύρος $2-4^\circ$. Από τη μέση τιμή των ταλαντευόμενων ποσοτήτων $\delta(t)$ και $r(t)$, προκύπτει τελικά το σημείο του διαγράμματος (δ_n, r_n) . Όπως φαίνεται, κάθε σημείο του διαγράμματος $\delta - r$ κατασκευάζεται ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα. Συνεπώς, μπορούμε να βρίσκουμε τα σημεία (δ_n, r_n) με οποιαδήποτε σειρά.

Κατά κανόνα, ο χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση του αντιστρόχου σπειροειδούς ελιγμού είναι πολύ μικρότερος από τον αντίστοιχο χρόνο για τον ευθύ σπειροειδή ελιγμό. Συχνά, οι δύο ελιγμοί συνδυάζονται ώστε τμήμα της καμπύλης $\delta - r$ να λαμβάνεται από τον αντίστροφο και η υπόλοιπη να λαμβάνεται από τον ευθύ.

3.3 Εμπειρικές Σχέσεις

Από την συγκέντρωση και ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων των υδροδυναμικών παραγώγων μοντέλων, δίνεται η δυνατότητα παραγωγής ορισμένων εμπειρικών ή ημιεμπειρικών σχέσεων για την εκτίμηση τους στα πλοία. Τέτοιου είδους σχέσεις συνήθως χρησιμοποιούνται μόνο κατά την προκαταρκτική σχεδίαση των πλοίων, καθώς αποδεικνύεται ότι οι εκτιμώμενες τιμές των υδροδυναμικών παραγώγων εμπεριέχουν μεγάλα σφάλματα.

3.3.1 Εμπειρικές Σχέσεις του Clarke (1982)

Ο Clarke χρησιμοποίησε τη μέθοδο της πολλαπλής παλινδρόμησης (multiple regression) ώστε να διαμορφώσει τέτοιου είδους εμπειρικών σχέσεων από τα αποτελέσματα πειραμάτων με περιστρεφόμενο βραχίονα και με μηχανισμό επιπέδου κινήσεως. Στις σχέσεις του Clarke, εκτιμούνται οι αδιάστατες τιμές κάποιων βασικών υδροδυναμικών παραγώγων συναρτήσει των κυρίων διαστάσεων και συντελεστών μορφής του πλοίου.

Παρακάτω, αναφέρουμε ενδεικτικά μερικές από τις σχέσεις αυτές:

$$\frac{-Y_v'}{\pi(T/L)^2} = 1 + 0.40 C_B \frac{B}{T} \quad (3.46)$$

$$\frac{-Y_r'}{\pi(T/L)^2} = -\frac{1}{2} + 2.2 \frac{B}{L} - 0.080 \frac{B}{T} \quad (3.47)$$

$$\frac{-N_v'}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{2} + 2.4 \frac{T}{L} \quad (3.48)$$

$$\frac{-N_r'}{\pi(T/L)^2} = \frac{1}{4} + 0.039 \frac{B}{T} - 0.56 \frac{B}{L} \quad (3.49)$$

Αντίστοιχες εκφράσεις δίνονται και για τις παραγώγους $Y_{\dot{v}}, N_{\dot{v}}, Y_{\dot{r}}, N_{\dot{r}}$

3.4 Μέθοδοι Προσομοίωσης

3.4.1 Συστημικές Μέθοδοι

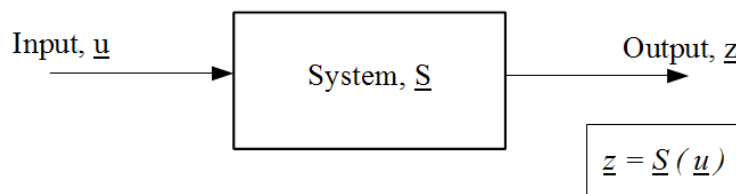
3.4.1.1 Μοντέλο Προσομοίωσης της Συμπεριφοράς Πλοίου σε Ελιγμούς (System Identification)

3.4.1.1.1 Η Έννοια της Εκτίμησης των Παραμέτρων Προσομοίωσης (System Identification)

Κατά τη διαδικασία ανάπτυξης ενός μοντέλου για την προσομοίωση ενός συστήματος, το πρώτο βήμα είναι η διαμόρφωση των εξισώσεων που θα περιγράφουν το σύστημα. Οι εξισώσεις αυτές χρησιμοποιούν ένα σύνολο μετρούμενων μεταβλητών, καθώς και κάποιες παραμέτρους ή συντελεστές που θα συνδέουν τις μετρούμενες μεταβλητές μεταξύ τους σε μορφή εξισώσεων. Στα παρακάτω, θα χρησιμοποιούμε τον όρο *μεταβλητές* για να αναφερθούμε στις μετρούμενες μεταβλητές του συστήματος και τον όρο *παραμέτρους* για να αναφερθούμε στους καθορισμένους παραμέτρους ή συντελεστές που συνδέουν τις μεταβλητές.

Δεδομένης αυτής της διαδικασίας, δύνανται να αναπτυχθούν μοντέλα με διαφορετικά επίπεδα πολυπλοκότητας και δομή εξισώσεων. Τα τελευταία χαρακτηριστικά θα εξαρτηθούν σε κάθε περίπτωση από τη διαθεσιμότητα και τη φύση των μεταβλητών του μοντέλου. Από τις μεταβλητές που συμπεριλαμβάνονται στο μοντέλο, καθορίζονται μονοσήμαντα και οι παράμετροι του μοντέλου. Όμως, οι τιμές των παραμέτρων είναι άγνωστες και πρέπει να υπολογιστούν από τη θεωρία, από δοκιμές σε μοντέλα ή με κάποια άλλη μέθοδο. Μία από αυτές τις άλλες μεθόδους είναι το system identification (SI).

Το SI είναι ο καθορισμός ενός συνόλου παραμέτρων του μαθηματικού μοντέλου ενός δυναμικού συστήματος δεδομένης μορφής χρησιμοποιώντας μετρήσεις από τη συμπεριφορά του πραγματικού συστήματος. Με λίγα λόγια, θεωρώντας το σύστημά μας σαν ένα “μαύρο κουτί” (Σχήμα 3.17) για το οποίο γνωρίζουμε τις τιμές των εισόδων και εξόδων, το SI θα μας βοηθήσει να εντοπίσουμε τη μορφή του μοντέλου στο εσωτερικό του κουτιού. Ο τελικός στόχος του SI είναι να είναι κατασκευάσουμε ένα μοντέλο το οποίο είναι μαθηματικά ισοδύναμο με το πραγματικό σύστημα.



Σχήμα 3.17: Το Σύστημα ως "Μαύρο Κουτί"

Στην μελέτη της ελκτικότητας, το δυναμικό σύστημα που μας ενδιαφέρει είναι το πλοίο και η κίνηση του ανάλογα με τις εξωτερικές διεγέρσεις που θα του εφαρμοστούν. Οι εξισώσεις κίνησης του πλοίου είναι το μαθηματικό μοντέλο προς αναγνώριση (identification) και τα στοιχεία από πειράματα με ελεύθερα μοντέλα ή δοκιμές σε πλοία χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου και εξόδου. Πιο συγκεκριμένα, στο σύστημα αυτό, ο στόχος μας είναι να

εκτιμήσουμε τις τιμές των υδροδυναμικών παραγώγων του πλοίου, οι οποίες είναι οι χαρακτηριστικές παράμετροι των εξισώσεων κίνησης του.

3.4.1.1.2 Σύντομη Βιβλιογραφική Επισκόπηση

Στο τομέα της ελκτικότητας πλοίου, η χρήση του system identification είναι ευρέως διαδεδομένη. Έχουν χρησιμοποιηθεί πληθώρα μεθόδων με επαναληπτική διαδικασία, όπως model reference method (Hayes 1971), maximum likelihood method (Astrom & Kallstrom 1976), extended φίλτρα Kalman (Hwang 1980, Abkowitz 1980), recursive prediction error method (Zhou 1987), καθώς και least square estimation (Rhee et al 1998). Η χρήση των extended φίλτρων Kalman είναι ίσως η πιο διαδεδομένη, και θα εξεταστεί εφαρμογή της μεθόδου στο εδάφιο 4.1.

Επίσης, πιο πρόσφατα, έχουν προταθεί διάφορες καινούργιες προσεγγίσεις, όπως είναι η χρήση νευρωνικών δικτύων (Mahfouz & Haddara 2003, Hess et al 2008). Στην παρούσα εργασία, στο εδάφιο 4.2, γίνεται χρήση των νευρωνικών δικτύων για την εκτίμηση των ελκτικών χαρακτηριστικών μοντέλων δεξαμενόπλοιων.

3.4.2 Μέθοδοι Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής (CFD)

Η υπολογιστική ρευστομηχανική (CFD) χρησιμοποιείται περισσότερο σε εφαρμογές προσομοίωσης της ροής του νερού γύρω από το πλοίο και στην διερεύνηση των υδροδυναμικών φορτίσεων στη γάστρα και στα παρελκόμενα του πλοίου. Δεν έχει γίνει ακόμα χρήση της μεθόδου για απευθείας εύρεση (identification) των υδροδυναμικών παραγώγων πλοίου. Θα ήταν ωστόσο αρκετά χρήσιμο να γινόταν system identification με δεδομένα από προσομοίωση CFD, καθώς δεν θα υπήρχε η ανάγκη για δεδομένα από δοκιμές σε μοντέλα. Θα μπορούσαν να παραχθούν δεδομένα στον αριθμό Reynolds του πλοίου (απαλείφοντας πιθανές επιδράσεις κλίμακας) και για διαφορές περιβαλλοντικές συνθήκες.

4 Εφαρμογές της Συστημικής Προσέγγισης στην Ελκτικότητα

4.1 Εκτίμηση Παραμέτρων Συμπεριφοράς με τη Βοήθεια Extended Φίλτρων Kalman

Μία από τις σημαντικότερες τεχνικές εκτίμησης των παραμέτρων του μοντέλου του πλοίου στην ελκτικότητα χρησιμοποιεί το Extended Φίλτρο Kalman (Extended Kalman Filter, EKF). Στις περισσότερες μεθοδολογίες τέτοιου είδους, η εκτιμώμενες τιμές των μεταβλητών κατάστασης συγκρίνονται με τις μετρούμενες τιμές των ίδιων μεταβλητών, με το σφάλμα της εκτίμησης να προκύπτει ως η διαφορά των δύο. Οι τιμές των παραμέτρων ενημερώνονται όσο ολοκληρώνεται η ανάλυση των δεδομένων μέσω ενός αλγορίθμου που τείνει να μειώσει τη συνάρτηση σφάλματος. Τελικά, επιθυμούμε να εντοπίσουμε το σύνολο των παραμέτρων που θα ελαχιστοποιήσουν τη συνάρτηση σφάλματος, και άρα θα κάνουν καλή εκτίμηση της κατάστασης του συστήματος σε σχέση με τη πραγματική συμπεριφορά του.

Στο system identification με Extended Φίλτρο Kalman, οι υδροδυναμικές παράγωγοι αντιμετωπίζονται ως επιπλέον μεταβλητές κατάστασης, οι οποίες όμως θα πρέπει να είναι σταθερές στο χρόνο. Το Extended Φίλτρο Kalman προορίζεται για δυναμικά συστήματα που περιγράφονται από μη-γραμμικές εξισώσεις.

Η μορφή της εξίσωσης κατάστασης (state equation) του συστήματος είναι:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}, \mathbf{w}, t) \quad (4.1)$$

Όπου: \mathbf{x} διάνυσμα κατάστασης των επιλεγμένων μεταβλητών, ορισμένο στο χρόνο και με γνωστές τιμές στην αρχική στιγμή,
 $\dot{\mathbf{x}}$ παράγωγος πρώτης τάξεως στο χρόνο του διανύσματος κατάστασης, με γνωστές τιμές στην αρχική στιγμή,
 \mathbf{u} διάνυσμα ελέγχου, είσοδοι του συστήματος, με γνωστές τιμές για όλο το χρονικό διάστημα,
 \mathbf{p} διάνυσμα των άγνωστων παραμέτρων του μοντέλου, μπορεί να εκτιμηθεί στην αρχική κατάσταση,
 \mathbf{w} διάνυσμα θορύβου του συστήματος,
 t χρονική παράμετρος, βαθμωτό μέγεθος,
 \mathbf{f} διάνυσμα των συναρτήσεων, ορίζει τη δυναμική του προβλήματος.

Παρατηρώντας το πραγματικό σύστημα για δεδομένο χρονικό διάστημα και συγκρίνοντάς το με τη προσομοίωση του μοντέλου για ίδιο διάστημα, μπορούμε να εκτιμήσουμε την αποτελεσματικότητα του μοντέλου. Η μορφή της εξίσωσης της μέτρησης είναι:

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}, \mathbf{v}, t) \quad (4.2)$$

Όπου: \mathbf{z} διάνυσμα μέτρησης επιλεγμένων παραμέτρων, γνωστό στο χρόνο,
 \mathbf{v} διάνυσμα θορύβου της μέτρησης,
 \mathbf{h} διάνυσμα των συναρτήσεων της μέτρησης, η δομή του ορίζεται από το μοντέλο.

Για να αξιολογηθεί η ακρίβεια του μοντέλου, πρέπει να οριστεί κάποιος στόχος για το μοντέλο ή κάποια αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση. Η αντικειμενική συνάρτηση θα βελτιστοποιείται σε κάθε βήμα, λαμβάνοντας τη καλύτερη εκτίμηση για τις

άγνωστες παραμέτρους από το προηγούμενο βήμα. Η αντικειμενική συνάρτηση (ή συνάρτηση κόστους) ορίζεται ως:

$$C = C(\underline{z}, \underline{z}_m) \quad (4.3)$$

Παρακάτω δίνονται τα βήματα υπολογισμού του Extended Φίλτρου Kalman, όπως αυτά αναλύονται στη διατριβή του Szeto (1977).

Βήμα 1 Συλλέγονται ή παράγονται δεδομένα με θόρυβο, \underline{z} , και οι μεταβλητές εισόδου του προβλήματος, \underline{u} .

$$\dot{\underline{x}} = \underline{f}(\underline{x}, t) + \underline{w} \quad (4.4)$$

$$\underline{z} = H \underline{x} + \underline{v} \quad (4.5)$$

όπου H το μητρώο με τις συναρτήσεις της μέτρησης.

Βήμα 2 (Propagation) Διαδίδεται η εκτιμώμενη κατάσταση $\hat{\underline{x}}$ στο χρόνο t_n .

$$\hat{\underline{x}} = \underline{f}(\hat{\underline{x}}, t) \quad (4.6)$$

$$\underline{z}_m = H \hat{\underline{x}} \quad (4.7)$$

Βήμα 3 Διαδίδεται το μητρώο της συνδιακύμανσης του σφάλματος (error covariance matrix), E, στο χρόνο t_n .

$$\dot{E} = FE + EF^T + Q \quad (4.8)$$

όπου: $Q = Cov[\underline{w}_n \underline{w}_n^T]$ είναι η συνδιακύμανση (covariance) του θορύβου του συστήματος, \underline{w}

$$F = \frac{\partial \underline{f}(\hat{\underline{x}}, t)}{\partial \hat{\underline{x}}}$$

$$E = Cov[\underline{e} \underline{e}^T] \quad \text{για } \underline{e} = \hat{\underline{x}} - \underline{x} \text{ και } E(t_0) = Cov[\underline{x}_0 \underline{x}_0^T]$$

Βήμα 4 Υπολογίζεται το μητρώο gain, K, του μητρώου του φίλτρου Kalman στο χρόνο t_n .

$$K = EH^T (EH^T + R)^{-1} \quad (4.9)$$

όπου: $R = Cov[\underline{v}_n \underline{v}_n^T]$ είναι η συνδιακύμανση του θορύβου μέτρησης του συστήματος, \underline{v}

Βήμα 5 (Update) Ενημερώνεται η τιμή του $\hat{\underline{x}}$ σε $\hat{\underline{x}}'$ στο χρόνο t_n .

$$\hat{\underline{x}}' = \hat{\underline{x}} + K(\underline{z}_n - \underline{z}_m), \quad \text{όπου } \underline{z}_n = \underline{z}(t_n) \quad (4.10)$$

Βήμα 6 Ενημερώνεται η τιμή του E σε E' στο χρόνο t_n .

$$E' = E - KHE \quad (4.11)$$

Βήμα 7 Η τιμές των \hat{x}' και E' ορίζονται ως αρχικές τιμές για τις συναρτήσεις διάδοσης (propagation equations) στο χρόνο t_n .

$$\hat{x}(t_n) = \hat{x}'(t_n) \quad (4.12)$$

$$E(t_n) = E'(t_n) \quad (4.13)$$

Επιστρέφοντας στο Βήμα 2, η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου ολοκληρωθεί το φιλτράρισμα.

4.1.1 Κώδικας Υλοποίησης της Μεθόδου

Στη συνέχεια, θα παρουσιάσουμε τα βασικά στοιχεία του κώδικα σε γλώσσα Fortran από τον Szeto (1977) στο οποίο υλοποιείται το Extended Φίλτρο Kalman. Δίνεται επίσης το διάγραμμα της ροής (flow chart) του main προγράμματος στο Σχήμα 4.1, ενώ κάποια επιπλέον διαγράμματα ροής των υπορουτίνων δίνονται στο Παράρτημα #.

4.1.1.1 Δεδομένα Εισόδου-Εξόδου

- Δεδομένα Εισόδου – Στα κυριότερα δεδομένα εισόδου του προγράμματος συμπεριλαμβάνονται: οι πραγματικές τιμές των αδιάστατων υδροδυναμικών παραγώγων του πλοίου, η πρόσω ταχύτητα του πλοίου, ορισμένες παραμέτρους και περιορισμούς για τον ελιγμό που θα εκτελείται, το μήκος του πλοίου, οι αρχικές εκτιμήσεις των αδιάστατων υδροδυναμικών παραγώγων προς αναγνώριση (identification), οι αρχικές εκτιμήσεις της συνδιακύμανσης των υδροδυναμικών παραγώγων, και στοιχεία για το θόρυβο που θα επιβληθεί στα δεδομένα.

Το συγκεκριμένο πρόγραμμα εκτελείται για ένα VLCC, με σκοπό να εκτιμήσει τέσσερις υδροδυναμικές παραγώγους.

- Δεδομένα Εξόδου - Καταρχάς, το πρόγραμμα εξάγει τα διαγράμματα των μεταβλητών κατάστασης από τις προσομοιάσεις των δοκιμών στη θάλασσα (noisy sea trial data), δηλαδή των $u, v, r, x, y, \psi, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}$. Επίσης, εξάγονται διαγράμματα με τις χρονικές ιστορίες των φιλτραρισμένων τιμών των μεταβλητών κατάστασης και των αντίστοιχων υδροδυναμικών παραγώγων. Τελός, γίνεται εκτύπωση των τελικών εκτιμήσεων των τιμών των υδροδυναμικών παραγώγων.

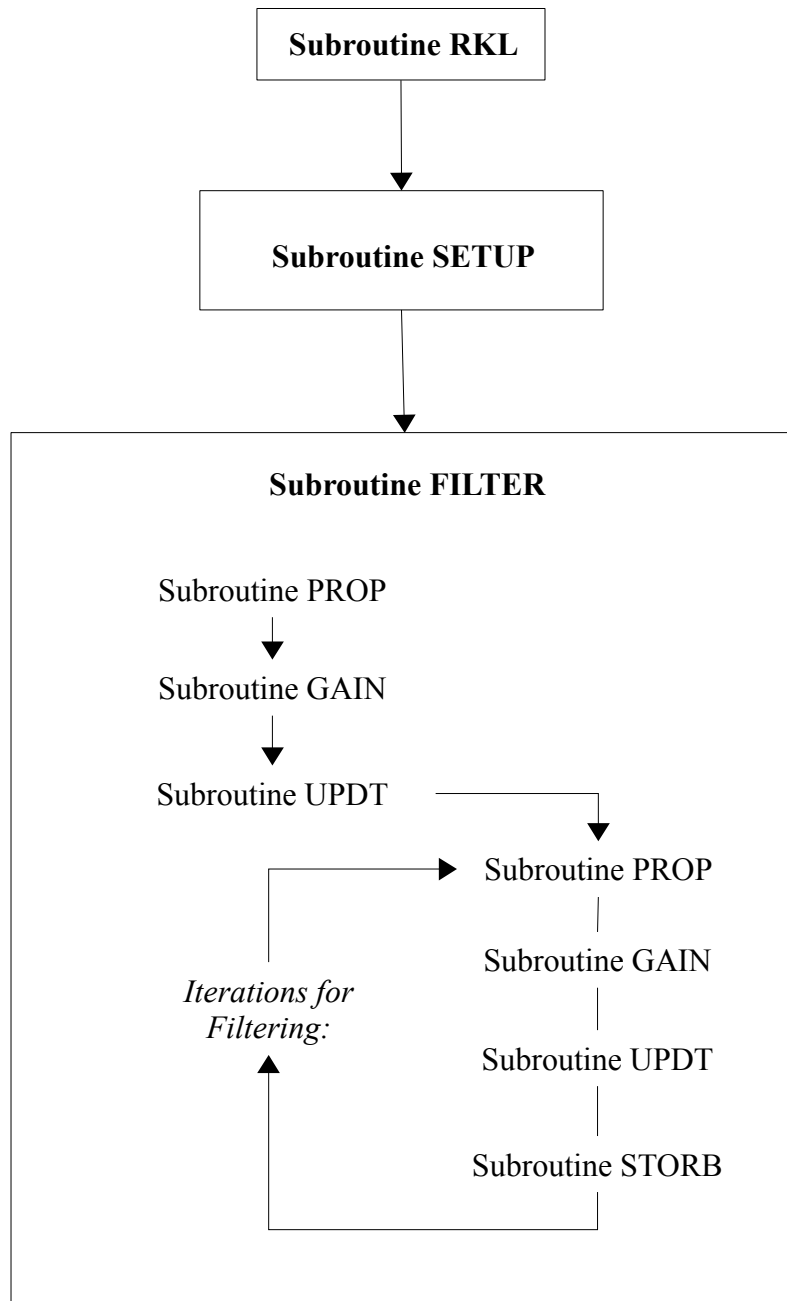
4.1.1.2 Σημαντικές Υπορουτίνες του Κώδικα

- Υπορουτίνα RKL – Η βασική λειτουργία της υπορουτίνας είναι να παράγει δεδομένα τα οποία να προσομοιάζουν τα πραγματικά δεδομένα από δοκιμές στη θάλασσα. Αντιστοιχεί στο Βήμα 1 παραπάνω. Για γνωστές τιμές των υδροδυναμικών παραγώγων, γίνεται αριθμητική επίλυση των εξισώσεων κίνησης του πλοίου με χρήση της μεθόδου Runge-Kutta.

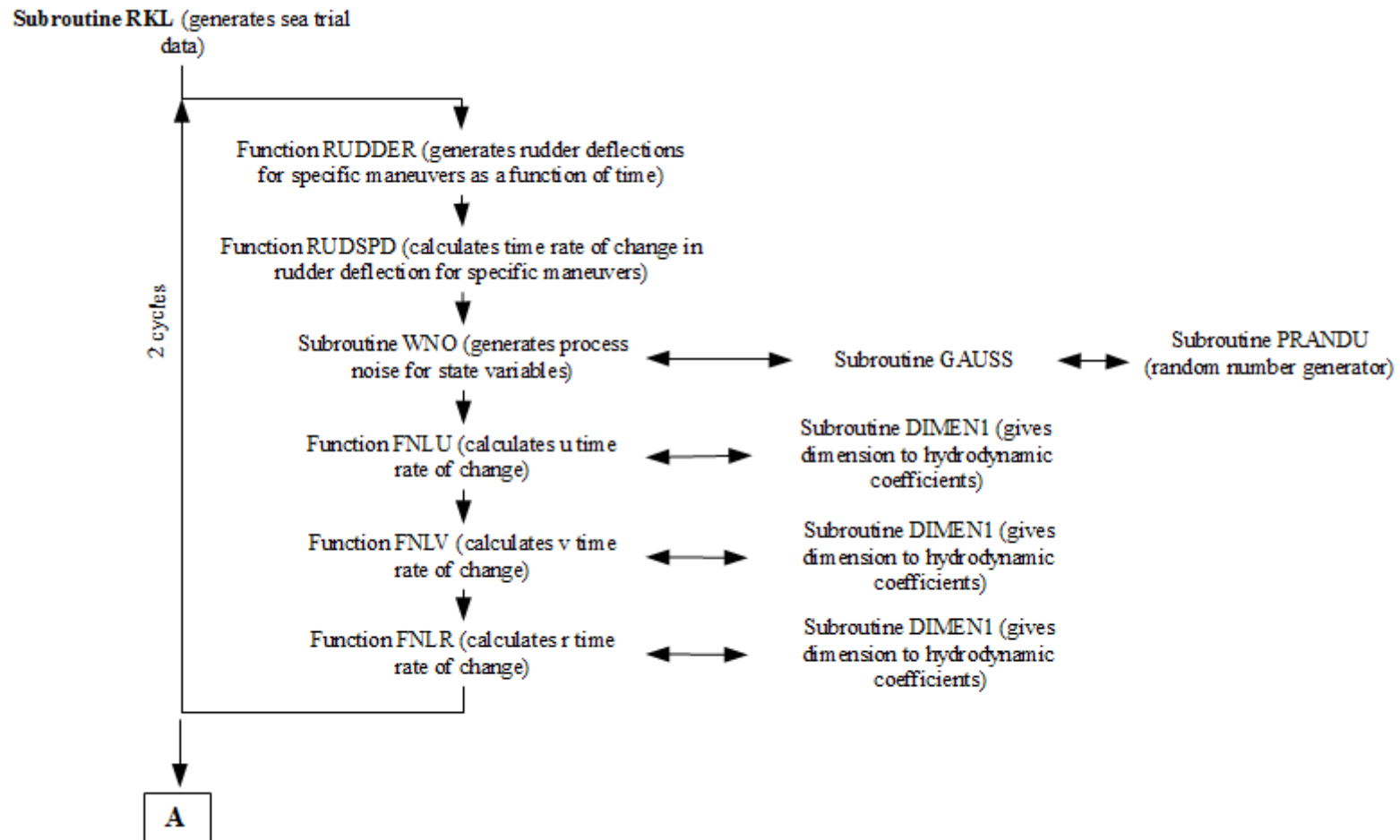
Έπειτα, προστίθενται οι θόρυβοι συστήματος και μετρήσεως. Και στις δύο περιπτώσεις, ο θόρυβος καθορίζεται από μια υπορουτίνα που παράγει λευκό θόρυβο (Gaussian white noise generator) μέσω ενός κώδικα παραγωγής τυχαίων αριθμών (random number generator). Τα δεδομένα εξόδου της υπορουτίνας θα εισαχθούν στην υπορουτίνα FILTER για να πραγματοποιηθεί η διαδικασία απαλοιφής του θορύβου (φιλτράρισμα).

- Υπορουτίνα FILTER – Η υπορουτίνα αυτή υλοποιεί το σημαντικότερο τμήμα του αλγορίθμου του extended φίλτρου Kalman. Αντιστοιχεί στα Βήματα 2-7 παραπάνω. Με τη σειρά της, αποτελείται από τρεις υπορουτίνες, τις PROP, GAIN, και UPDT.

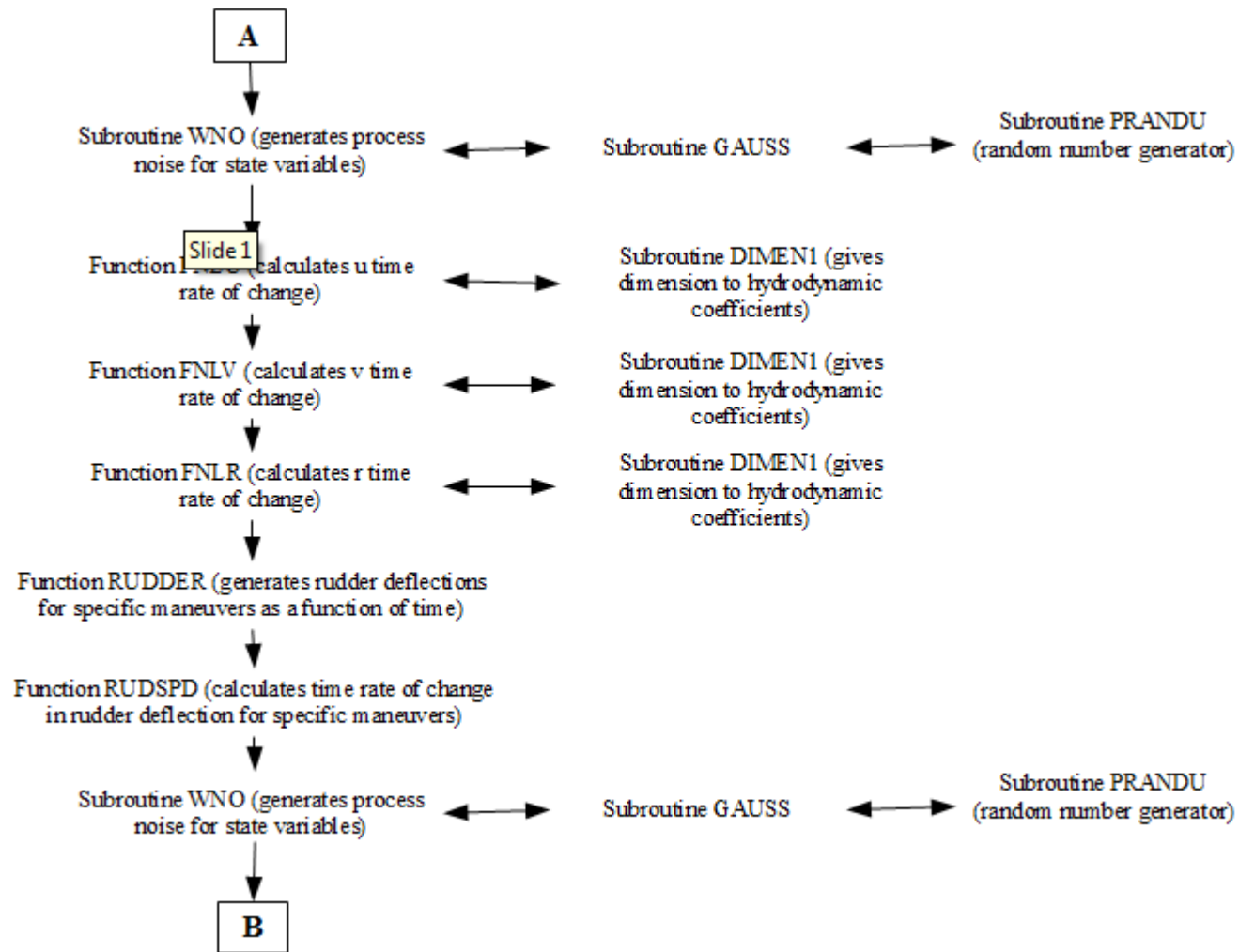
Η υπορουτίνα PROP εκτελεί τα Βήματα 2 και 3. Διαδίδει το διάνυσμα της εκτιμώμενης κατάστασης και του μητρώου συνδιακύμανσης στο χρόνο. Η υπορουτίνα GAIN ακολουθεί την PROP, και αντιστοιχεί στο Βήμα 4. Κατά τη διάρκεια της υπορουτίνας, εκτιμάται το μητρώο gain του μητρώου του φίλτρου. Για δεδομένο μητρώο gain, η υπορουτίνα UPDT εκτιμά τις βέλτιστες τιμές των μεταβλητών κατάστασης καθώς και τους παραμέτρους προς αναγνώριση (identification).



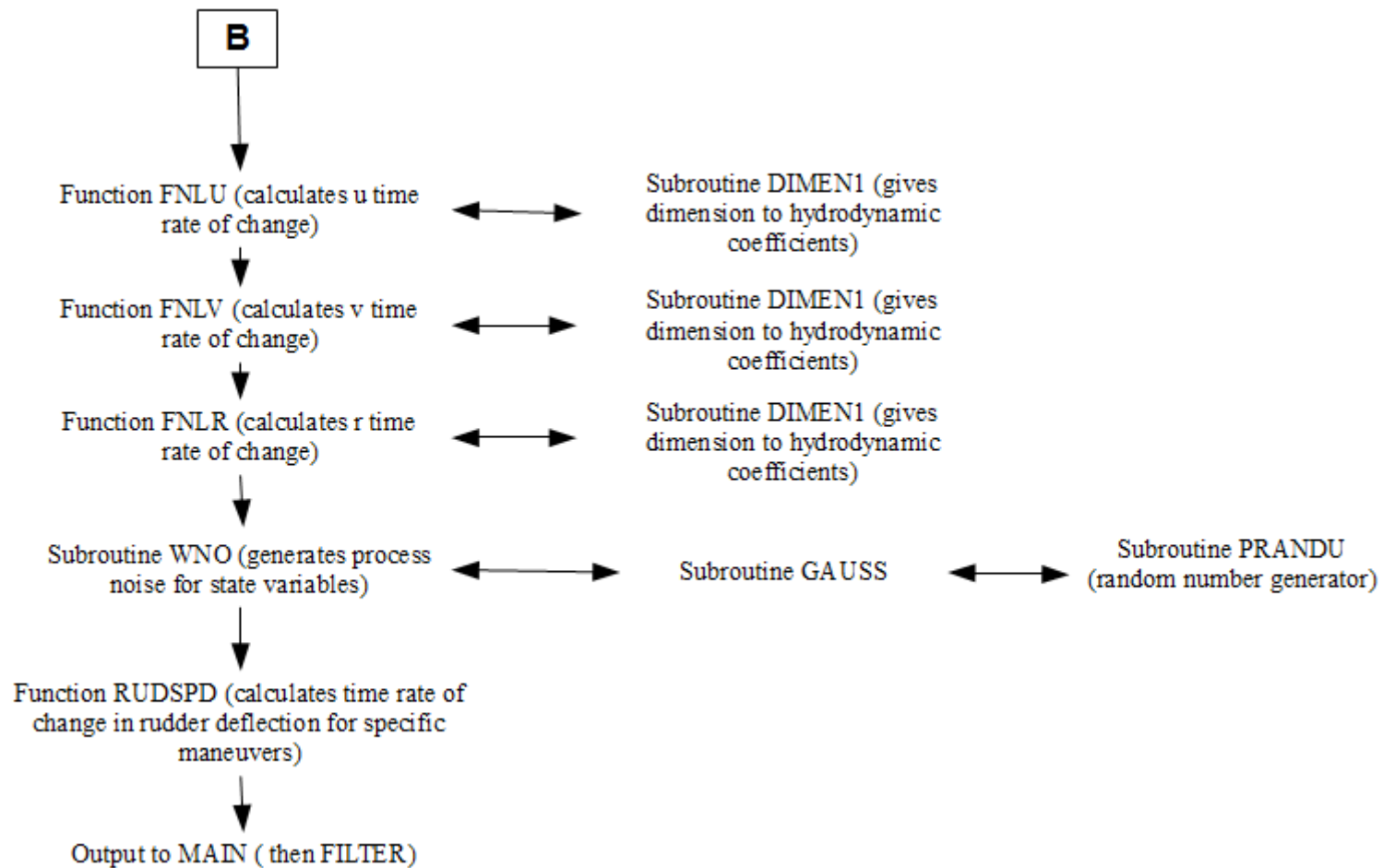
Σχήμα 4.1: Διάγραμμα Ροής του Κώδικα του Szeto (1977)



Σχήμα 4.2: Διάγραμμα Ροής της Υπορουτίνας RKL



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα Ροής της Υπορουτίνας RKL (Συνέχεια)



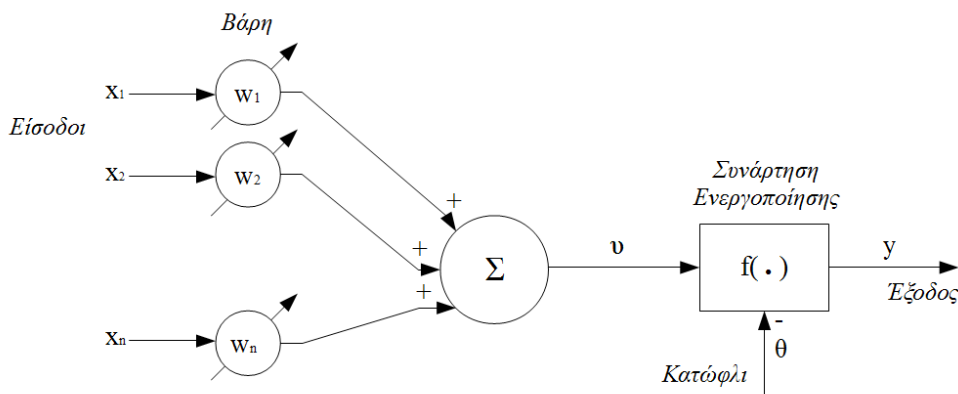
Σχήμα 4.4: Διάγραμμα Ροής της Υπορουτίνας RKL (Συνέχεια)

4.2 Νευρωνικά Δίκτυα

4.2.1 Συνοπτική Αναφορά στο Θεωρητικό Υπόβαθρο των Νευρωνικών Δικτύων

Μία από τις πιο πρόσφατες μεθοδολογίες για την εύρεση των υδροδυναμικών παραγώγων του πλοίου με system identification χρησιμοποιεί τα νευρωνικά δίκτυα για τη διαδικασία εκτίμησης των απαιτούμενων παραμέτρων. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι ένα μαθηματικό μοντέλο που έχει προκύψει από τα αντίστοιχα βιολογικά νευρωνικά δίκτυα του ανθρώπινου σώματος. Τα πρώτα αποτελούνται από ένα σύνολο νευρώνων που δέχονται, επεξεργάζονται και προωθούν σήματα στους επόμενους νευρώνες. Ένα νευρωνικό δίκτυο μπορεί να αποτελείται από οποιοδήποτε αριθμό νευρώνων, που δύνανται να δουλεύουν και παράλληλα για την πραγματοποίηση σύνθετων υπολογισμών.

Η δομή των νευρώνων στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα προσομοιάζει αυτή των βιολογικών. Ο τεχνητός νευρώνας αποτελείται από τα στοιχεία που φαίνονται στο Σχήμα 4.5. Ο νευρώνας λαμβάνει εξωτερικές πληροφορίες μέσω ενός συνόλου εισόδων. Κάθε σήμα εισόδου πολλαπλασιάζεται με μια τιμή βάρους και στη συνέχεια όλα τα σήματα αθροίζονται σε κόμβο άθροισης. Το σήμα εξόδου από το κόμβο άθροισης τροφοδοτείται σε μια συνάρτηση ενεργοποίησης, πριν καταλήξει στην έξοδο του νευρώνα. Η συνάρτηση ενεργοποίησης κανονικοποιεί το σήμα εξόδου ώστε το πλάτος του να μην ξεπερνάει κάποια δεδομένη τιμή. Από το σήμα εξόδου του κόμβου άθροισης αφαιρείται η τιμή του κατωφλίου, υποβιβάζοντας το καθαρό σήμα που μπαίνει στη συνάρτηση ενεργοποίησης.



Σχήμα 4.5: Δομή Τεχνητού Νευρώνα

Όπως προκύπτει και από το Σχήμα 4.5, ο τεχνητός νευρώνας περιγράφεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$v = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i$$

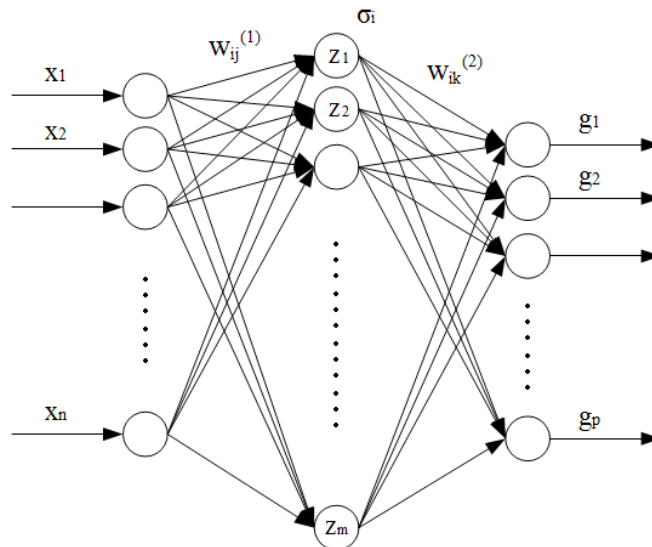
$$y = f(v - \theta), \theta > 0$$

όπου x_i ($i=1, 2, \dots, n$) είναι τα σήματα εισόδου του νευρώνα, w_i ($i=1, 2, \dots, n$) είναι τα βάρη του νευρώνα, v είναι η είσοδος της συνάρτησης ενεργοποίησης, f είναι η συνάρτηση ενεργοποίησης, θ είναι η τιμή του κατωφλίου και y είναι το σήμα εξόδου του νευρώνα.

Τα βάρη του νευρώνα παίρνουν τιμές μέσω μιας διαδικασίας εκπαίδευσης η οποία γίνεται με στόχο

την ελαχιστοποίηση κάποιας προκαθορισμένης συνάρτησης κόστους ή σφάλματος. Τα βάρη ανανεώνονται σε κάθε βήμα της διαδικασίας. Όταν προσδιοριστούν, οι βέλτιστες τιμές των βαρών αποθηκεύονται για χρήση κατά την εκτέλεση της διαδικασίας για την οποία χρησιμοποιείται το νευρωνικό δίκτυο.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, δύνανται να συνδυαστούν πολλοί νευρώνες μαζί και να εργάζονται παράλληλα για την πραγματοποίηση σύνθετων υπολογισμών. Επιπροσθέτως, υπάρχει η δυνατότητα να συνδυάζονται πολλά στρώματα νευρώνων σε ένα δίκτυο. Στο ακόλουθο σχήμα, φαίνεται τεχνητό νευρωνικό δίκτυο με 1 ενδιάμεσο (κρυφό) στρώμα.



Σχήμα 4.6: Πολυστρωματικό Νευρωνικό Δίκτυο

Όπως προκύπτει και από το Σχήμα 4.6, το πολυστρωματικό νευρωνικό δίκτυο περιγράφεται από τις ακόλουθες εξισώσεις. Η πρώτη εξίσωση συνδέει τους νευρώνες εισόδου με τους νευρώνες στο ενδιάμεσο ή κρυφό στρώμα.

$$z_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot x_j \quad \text{για } (i = 1, 2, \dots, m), (j = 1, 2, \dots, n)$$

Η δεύτερη διαμορφώνει τη πληροφορία από τους νευρώνες του κρυφού στρώματος μέσω της συνάρτησης ενεργοποίησης.

$$\sigma_i = f(z_i) \quad \text{για } (i = 1, 2, \dots, m)$$

Τέλος, η τρίτη εξίσωση περιγράφει τους νευρώνες εξόδου.

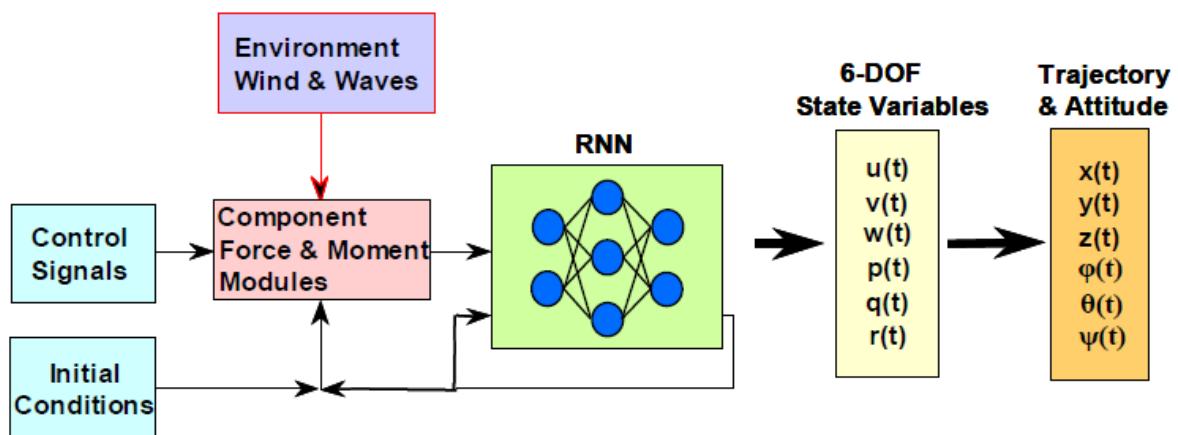
$$g_k = \sum_{i=1}^m w_{ik} \cdot \sigma_i \quad \text{για } (i = 1, 2, \dots, m) \text{ και } (k = 1, 2, \dots, p)$$

Όπου n ο συνολικός αριθμός εισόδων του δικτύου, m ο συνολικός αριθμός νευρώνων στο κρυφό επίπεδο και p ο συνολικός αριθμός εξόδων του δικτύου.

4.2.2 Εφαρμογές των Νευρωνικών Δικτύων στην Ελκτικότητα

Στις εφαρμογές των νευρωνικών δικτύων στην ελκτικότητα, συνηθίζεται να χρησιμοποιούνται τα πολυστρωματικά δίκτυα πρόσω- ή ανατροφοδότησης. Τα νευρωνικά δίκτυα καλούνται ανατροφοδότησης όταν το σήμα εξόδου τροφοδοτείται πάλι στην είσοδο του δικτύου. Αλλιώς ονομάζονται νευρωνικά δίκτυα προσωτροφοδότησης.

Στον τομέα της ελκτικότητας, τα νευρωνικά δίκτυα έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές πρόβλεψης και προσομοίωσης των ελκτικών χαρακτηριστικών του πλοίου. Στο άρθρο του Hess et al (2008), οι συγγραφείς έχουν εκπαιδεύσει ένα νευρωνικό δίκτυο ανατροφοδότησης με ένα σύνολο ελιγμών από δοκιμές σε μοντέλο καταδρομικού. Έπειτα, χρησιμοποιείται το εκπαιδευμένο δίκτυο για την πρόβλεψη της κίνησης του σκάφους σε καινούργιους ελιγμούς, που δεν είχαν συμπεριληφθεί στην εκπαίδευση του. Οι υδροδυναμικές φορτίσεις στο πλοίο λαμβάνονται ως είσοδοι του δικτύου, ενώ ως έξοδοι (targets) λαμβάνονται οι κινήσεις του. Η δομή του δικτύου των Hess et al φαίνεται στο Σχήμα 4.7 που ακολουθεί.



Σχήμα 4.7: Δομή του Νευρωνικού Δικτύου των Hess et al (Hess et al 2008)

Άλλη μια εφαρμογή των νευρωνικών δικτύων στην ελκτικότητα αναδεικνύεται στο άρθρο των Rajesh et al (2010). Οι συγγραφείς αναπτύσσουν τέσσερα μοντέλα νευρωνικών δικτύων. Όλα τα μοντέλα προκύπτουν από το σύστημα μη-γραμμικών εξισώσεων κίνησης του πλοίου στο οριζόντιο επίπεδο. Κάθε μοντέλο αποτελείται από τρεις μη-γραμμικές εξισώσεις κίνησης (g_i), με τους μη-γραμμικούς όρους της εξίσωσης να έχουν ομαδοποιηθεί στη μία πλευρά της. Στη διαμόρφωση των μοντέλων γίνεται προσπάθεια ελαχιστοποίησης του πλήθους των υδροδυναμικών παραγώγων που θα πρέπει να είναι γνωστοί εκ των προτέρων για να μπορεί αυτό να χρησιμοποιηθεί για system identification. Στον Πίνακα 4.1, δίνονται τα πλήθη των παραγώγων που θα πρέπει να είναι γνωστοί ώστε να γίνει χρήση του εκάστοτε μοντέλου.

Το νευρωνικό δίκτυο που κατασκευάζεται για κάθε μοντέλο έχει τις εισόδους: $u(t)$, $v(t)$, $r(t)$, $\delta(t)$ και μοναδιαίο bias. Οι έξοδοι (targets) είναι οι μη-γραμμικές εξισώσεις g_1 , g_2 , g_3 . Αφού εκπαιδευτούν τα τέσσερα μοντέλα με πειραματικά δεδομένα από οφιοειδείς και σπειροειδείς ελιγμούς, δοκιμάζονται στην πρόβλεψη καινούργιων ελιγμών. Σκοπός της έρευνας είναι να βρεθεί το μοντέλο εκείνο που παράγει τα ακριβέστερα αποτελέσματα κάνοντας χρήση του μικρότερου πλήθους γνωστών υδροδυναμικών παραγώγων.

Πίνακας 4.1: Πλήθος Γνωστών Υδροδυναμικών Παραγώγων σε Κάθε Μοντέλο των Rajesh et al

Μοντέλο	Πλήθος Γνωστών Υδροδυναμικών Παραγώγων
1	13
2	12
3	5
4	3

4.2.3 Διαδικασία Επίλυσης

Με τη χρήση νευρωνικών δικτύων, αναπτύξαμε μοντέλο προσομοίωσης της κίνησης του πλοίου βασισμένο στη φυσική του προβλήματος της ελκτικότητας.

Το νευρωνικό δίκτυο δημιουργήθηκε σε περιβάλλον MATLAB με τη βοήθεια του εργαλείου Neural Network Toolbox. Κατασκευάστηκε νευρωνικό δίκτυο με ένα κρυμμένο επίπεδο (hidden layer) και τρεις νευρώνες στο επίπεδο αυτό. Δοκιμάστηκαν και παραλλαγές αυτού με παραπάνω νευρώνες, με εμφανώς χειρότερη ακρίβεια στην εκτίμηση των αποτελεσμάτων. Ο κώδικας για τη κατασκευή του δικτύου και την εκπαίδευση του δίνεται στο Παράρτημα Α, ενώ ο κώδικας για την προσομοίωση με χρήση του δικτύου δίνεται στο Παράρτημα Β.

Στόχος μας ήταν, για δεδομένο ελιγμό και ταχύτητα του πλοίου, να προβλέπονται οι κινήσεις του πλοίου στο οριζόντιο επίπεδο. Συνεπώς, ως εισόδους του δικτύου ορίσαμε τη χρονική ιστορία της γωνίας πηδαλίου και της πρόσω ταχύτητας, ενώ ως εξόδους του δικτύου και στόχους (targets), ορίσαμε τις υπόλοιπες ταχύτητες και επιταχύνσεις, καθώς και τη θέση του πλοίου. Οι εισόδοι και εξόδοι του νευρωνικού μας συνοψίζονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Στοιχεία Εισόδου-Εξόδου Νευρωνικού Δικτύου

Είσοδοι (Inputs)	Έξοδοι (Outputs/Targets)
$\delta(t)$	$x(t)$
$u(t)$	$y(t)$
	$\psi(t)$
	$v(t)$
	$r(t)$

Αρχικά, κατά τη φάση της εκπαίδευσης, το δίκτυο τροφοδοτήθηκε με δεδομένα από τα πειράματα με ελεύθερα μοντέλα του SIMMAN. Τα διαθέσιμα δεδομένα από SIMMAN ήταν αποκλειστικά οφιοειδείς (ZZ) και κυκλικοί (TC) ελιγμοί διαφόρων γωνιών. Λόγω περιορισμένου πλήθους πειραματικών δεδομένων από τις δοκιμές μοντέλων του SIMMAN, η εκπαίδευση του δικτύου ολοκληρώθηκε με λίγους ελιγμούς (Πίνακας 4.3).

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, δοκιμάστηκαν νευρωνικά δίκτυα με τις ακόλουθες ομάδες ελιγμών εκπαίδευσης:

Πίνακας 4.3: Δεδομένα Εκπαίδευσης των Νευρωνικών Δικτύων

Όνομα Νευρωνικού Δικτύου	Δεδομένα Εκπαίδευσης
1	ZZ (10°-10°), TC(35°)
2	ZZ (10°-10°), TC(35°), TC(-35°)

Αφότου έγινε η εκπαίδευση του εκάστοτε δικτύου, έπειτα δοκιμάστηκε το κάθε δίκτυο με νέα, “ξένα” δεδομένα, με τα οποία δεν είχε εκπαιδευτεί, για να ελεγχθεί η επιτυχία της προσομοίωσης. Για να γίνει με μεγαλύτερη ευκολία η σύγκριση των αποτελεσμάτων, υπολογίστηκαν για κάθε ελιγμό οι χαρακτηριστικοί του παράμετροι.

4.2.4 Αποτελέσματα

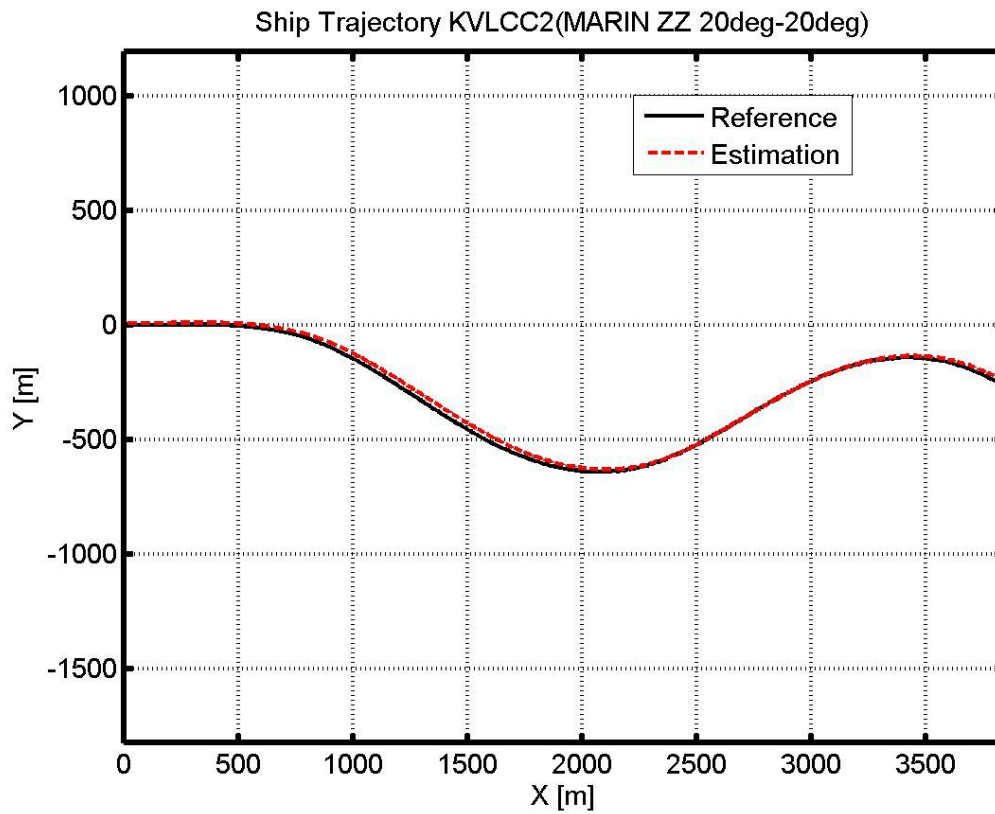
Στο εδάφιο αυτό, θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν για την εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου για πρόβλεψη ελικτικών χαρακτηριστικών πλοίου. Όλα τα νευρωνικά δίκτυα που περιγράφονται στη συνέχεια εκπαιδεύτηκαν με δεδομένα από δοκιμές μοντέλων για το δεξαμενόπλοιο KVLCC2.

Σε κάθε δίκτυο, αφού ολοκληρώθηκε η εκπαίδευση, δοκιμάστηκε πρώτα σε δεδομένα με τα οποία είχε εκπαιδευτεί, και έπειτα σε δεδομένα τα οποία του ήταν άγνωστα (δηλαδή, δεδομένα με τα οποία δεν είχε εκπαιδευτεί). Σε κάθε περίπτωση, τα δεδομένα εκπαίδευσης ήταν του MARIN, ενώ στη συνέχεια, σαν άγνωστα δεδομένα δοκιμάστηκαν ορισμένοι ελιγμοί του HSVA. Το τελευταίο έγινε διότι μόνο τα αποτελέσματα του MARIN συμπεριλάμβαναν οφιοειδείς και κυκλικούς ελιγμούς. Αντιθέτως, το HSVA είχε δεδομένα μόνο για κλασσικούς και τροποποιημένους οφιοειδείς ελιγμούς. Τέλος, ενώ είχε εκπαιδευτεί με δεδομένα του KVLCC2, κάθε δίκτυο δοκιμάστηκε και σε δεδομένα του παρόμοιου μοντέλου KVLCC1, ώστε να έχουμε μια πρώτη ένδειξη της αποτελεσματικότητας του σε ομάδες παρόμοιων πλοίων.

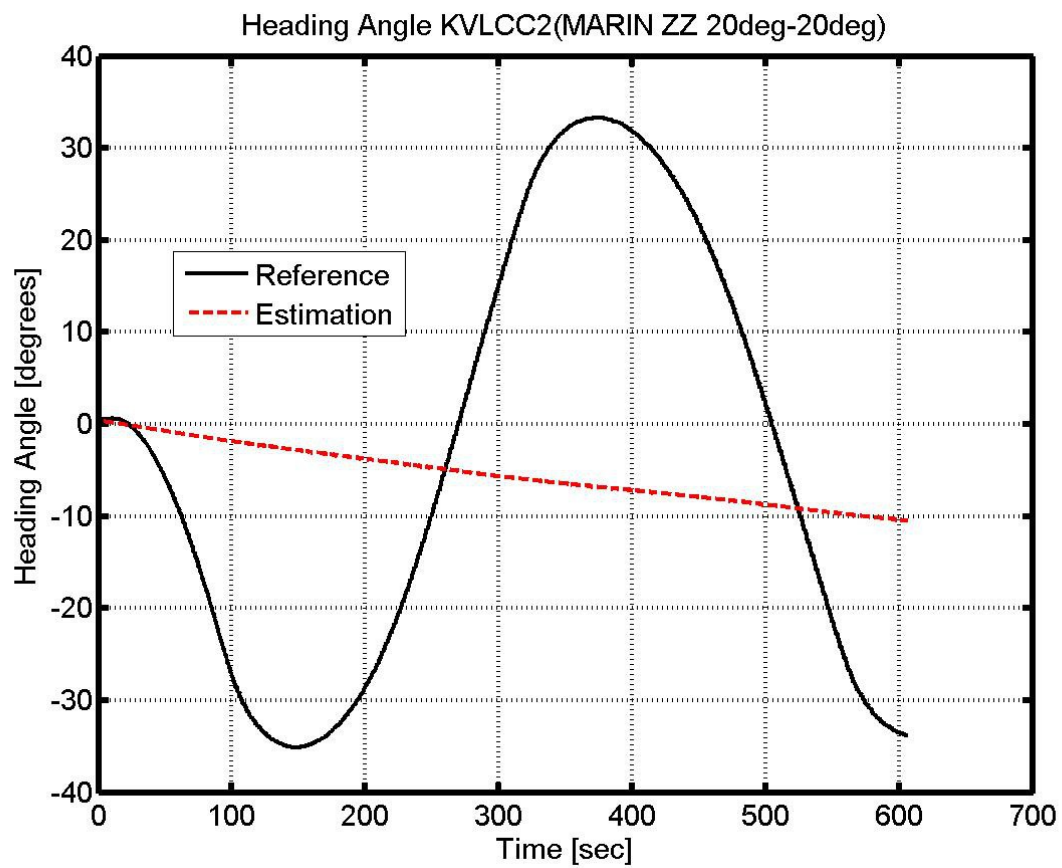
4.2.4.1 Νευρωνικό Δίκτυο #1 (NN_1)

Το νευρωνικό δίκτυο εκπαιδεύτηκε με έναν οφιοειδή ελιγμό (ZZ 10°-10°) και έναν κυκλικό ελιγμό (TC 35°) από τα πειραματικά δεδομένα του MARIN. Έπειτα, χρησιμοποιήθηκε το δίκτυο για να προβλέψει τη κίνηση του πλοίου σε ελιγμούς με τους οποίους δεν είχε εκπαιδευτεί. Στα Σχήματα 4.8 - 4.11, φαίνονται όπως προέκυψαν από το εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο για οφιοειδή ελιγμό (MARIN ZZ 20°-20°):

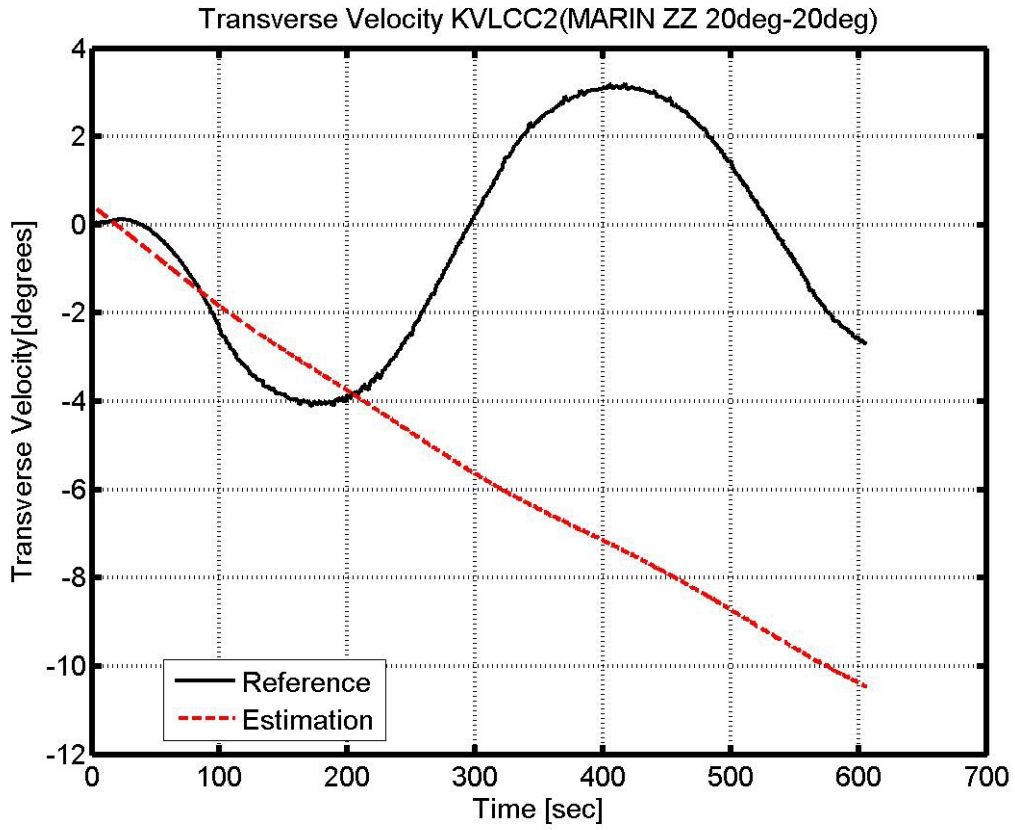
- η προβλεπόμενη πορεία του πλοίου (x, y)
- οι εκτιμώμενες χρονικές ιστορίες των μεταβλητών ψ , v , και r



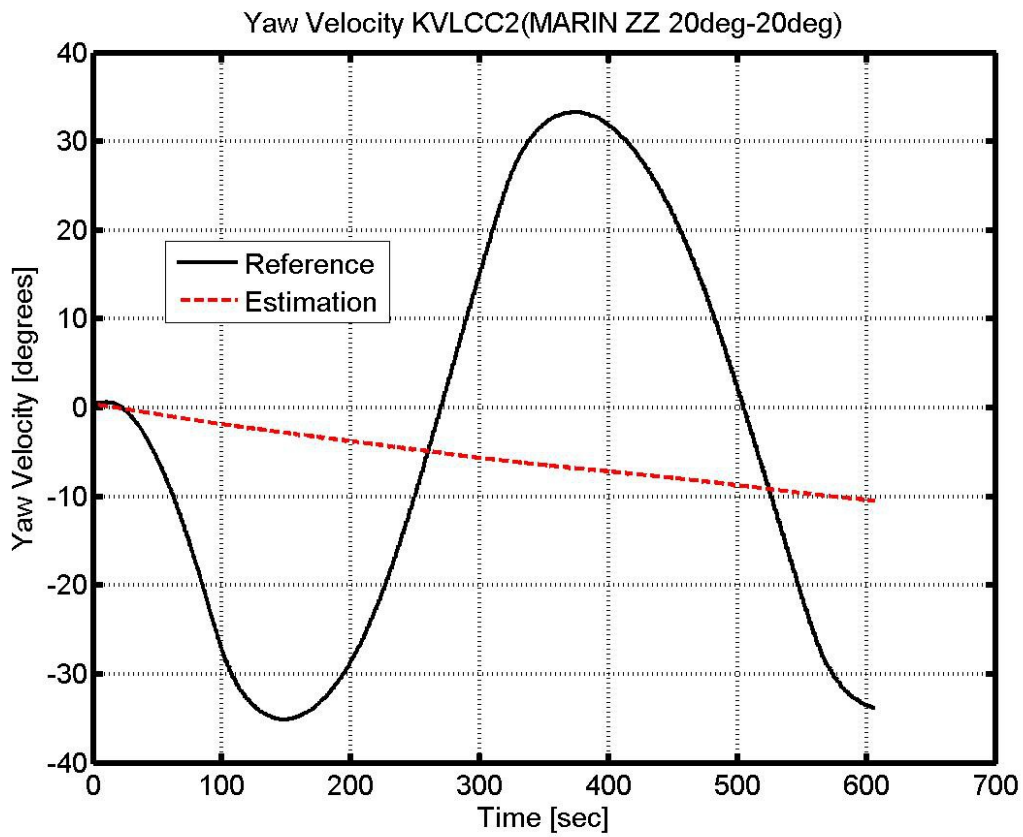
Σχήμα 4.8: Προβλεπόμενη Πορεία Μοντέλου KVLCC2 (ZZ 20deg-20deg)



Σχήμα 4.9: Εκτιμώμενη Γωνία $\psi(t)$ του KVLCC2 (ZZ 20deg-20deg)



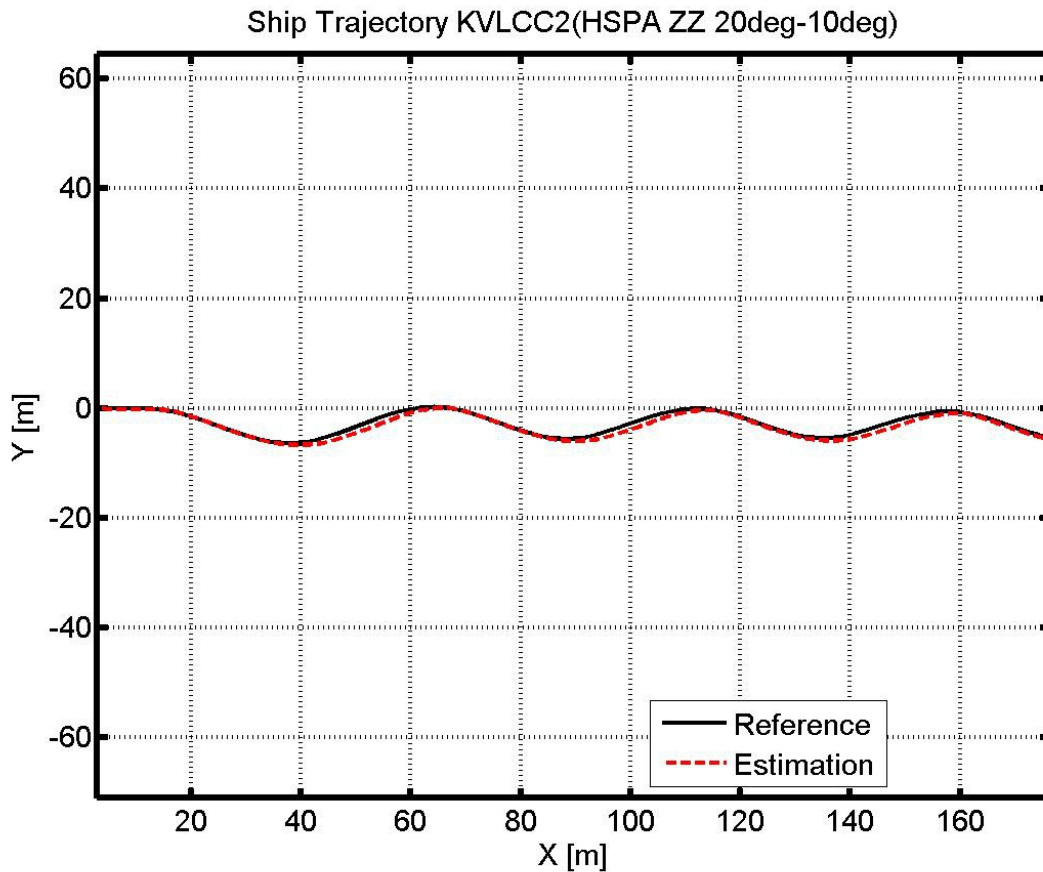
Σχήμα 4.10: Εκτιμώμενη Εγκάρσια Ταχύτητα του KVLCC2 (ZZ 20deg-20deg)



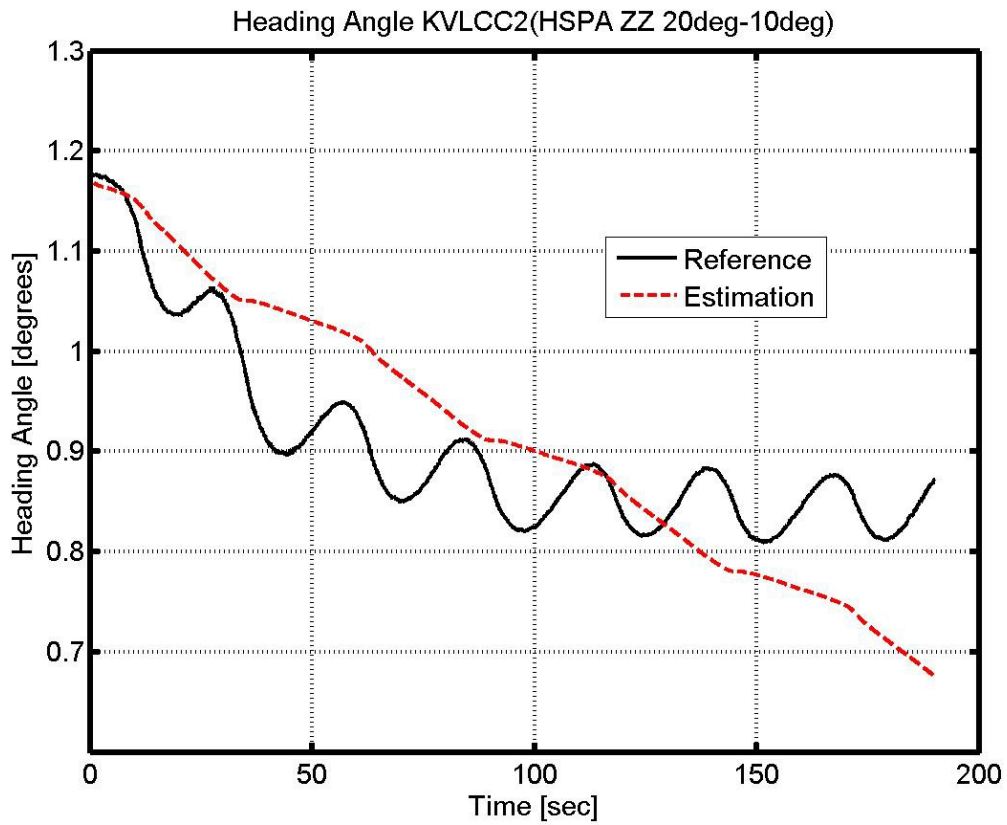
Σχήμα 4.11: Εκτιμώμενη Ταχύτητα Yaw του KVLCC2 (ZZ 20deg-20deg)

Από τα σχήματα φαίνεται ότι το νευρωνικό πέτυχε αρκετά ακριβή αποτελέσματα μόνο στη περίπτωση της πορείας του πλοίου. Το δίκτυο δεν κατάφερε να εκτιμήσει ικανοποιητικά τις υπόλοιπες μεταβλητές. Πρέπει να ληφθεί υπόψιν και το γεγονός ότι πραγματοποιήθηκε η εκπαίδευση με πολύ μικρό πλήθος δεδομένων.

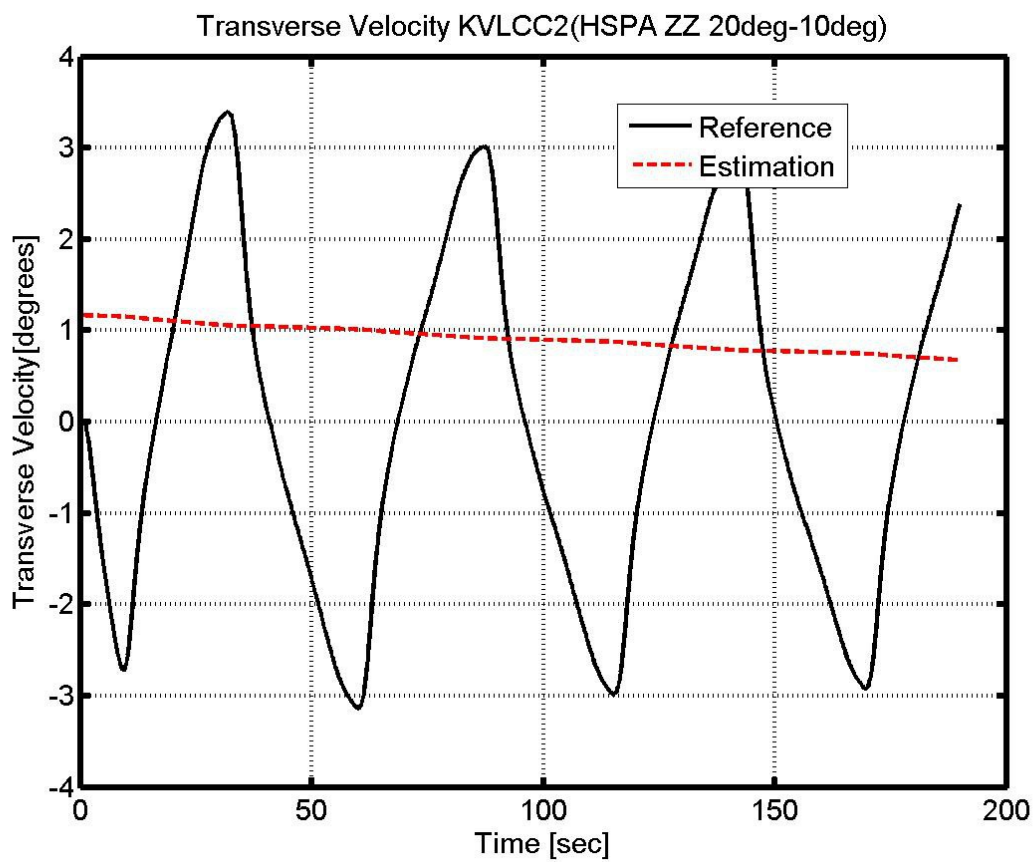
Στη συνέχεια, δοκιμάστηκε το δίκτυο στην πρόβλεψη ενός τροποποιημένου οφιοειδούς ελιγμού (HSVA ZZ 20°-10°). Στα Σχήματα 4.12 - 4.15, φαίνονται όπως προέκυψαν από το εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο η προβλεπόμενη πορεία του πλοίου (x, y) καθώς και οι εκτιμώμενες χρονικές ιστορίες των μεταβλητών ψ , v , και r .



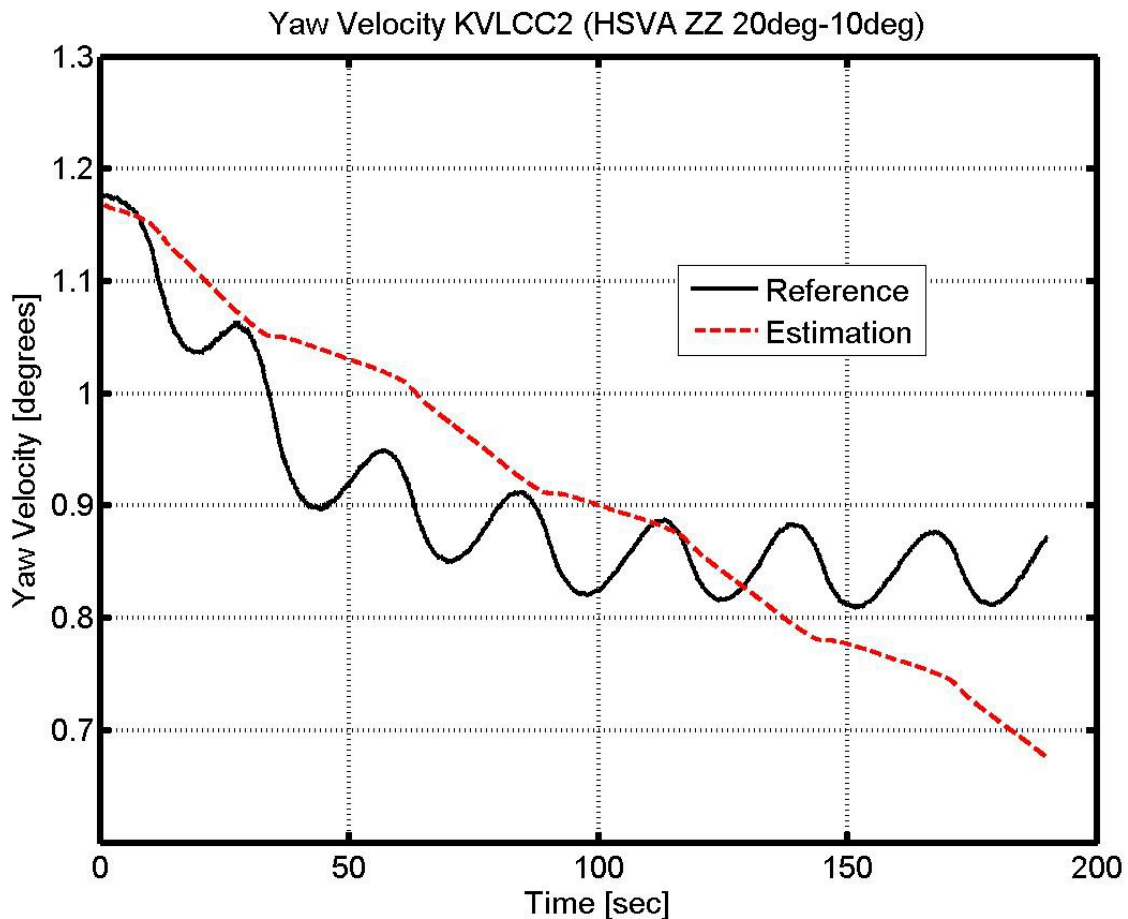
Σχήμα 4.12: Προβλεπόμενη Πορεία Μοντέλου KVLCC2 (ZZ 20deg-10deg)



Σχήμα 4.13: Εκτιμώμενη Γωνία $\psi(t)$ του KVLCC2 (ZZ 20deg-10deg)



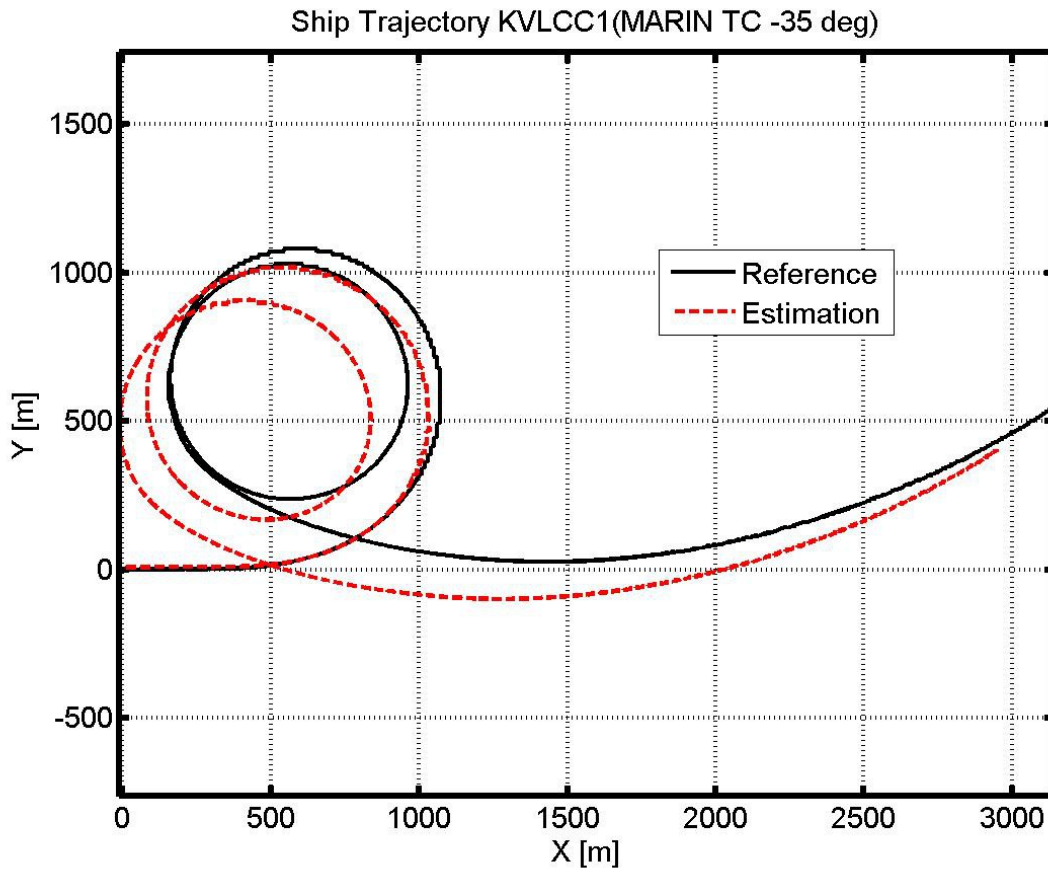
Σχήμα 4.14: Εκτιμώμενη Εγκάρσια Ταχύτητα του KVLCC2 (ZZ 20deg-10deg)



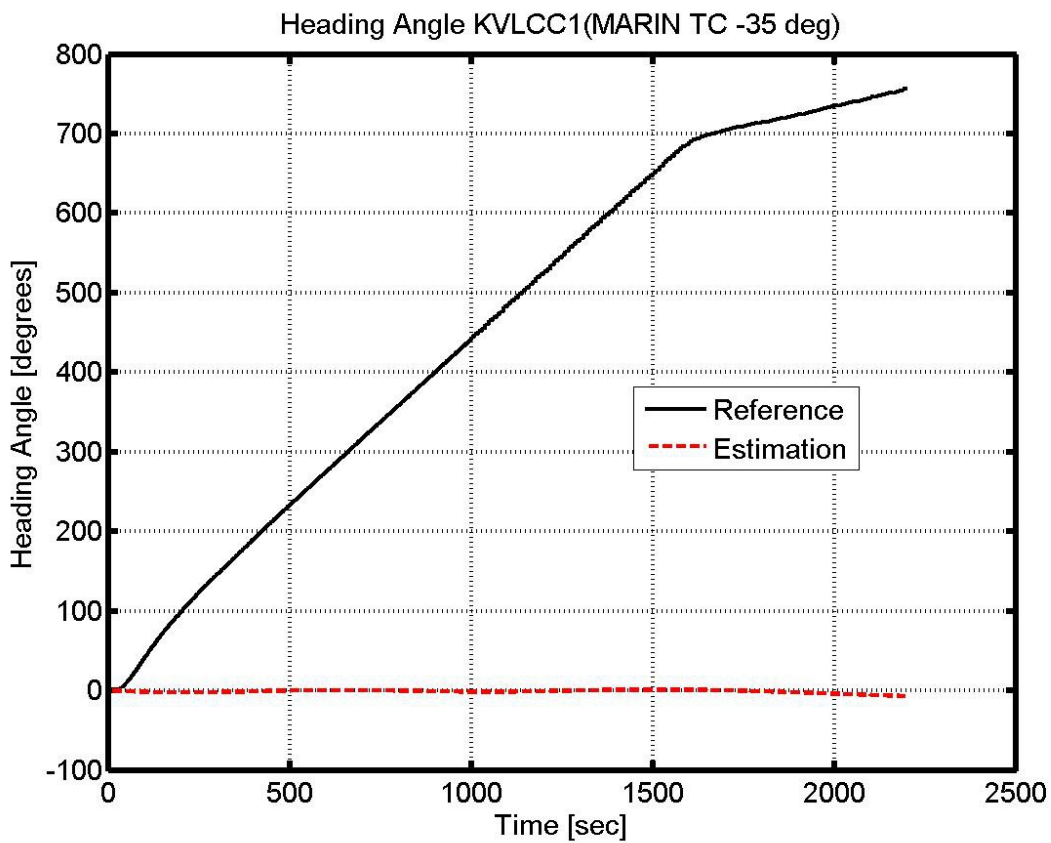
Σχήμα 4.15: Εκτιμώμενη Ταχύτητα Yaw του KVLCC2 (ZZ 20deg-10deg)

Από τα σχήματα φαίνεται ότι και πάλι, η εκτίμηση της πορείας του πλοίου είναι η πιο ακριβής. Για αυτό τον ελιγμό, οι μεταβλητές ψ και r εκτιμώνται λίγο καλύτερα από τη προηγούμενη περίπτωση, ενώ και πάλι η μεταβλητή v δεν έχει προσεγγιστεί καλά.

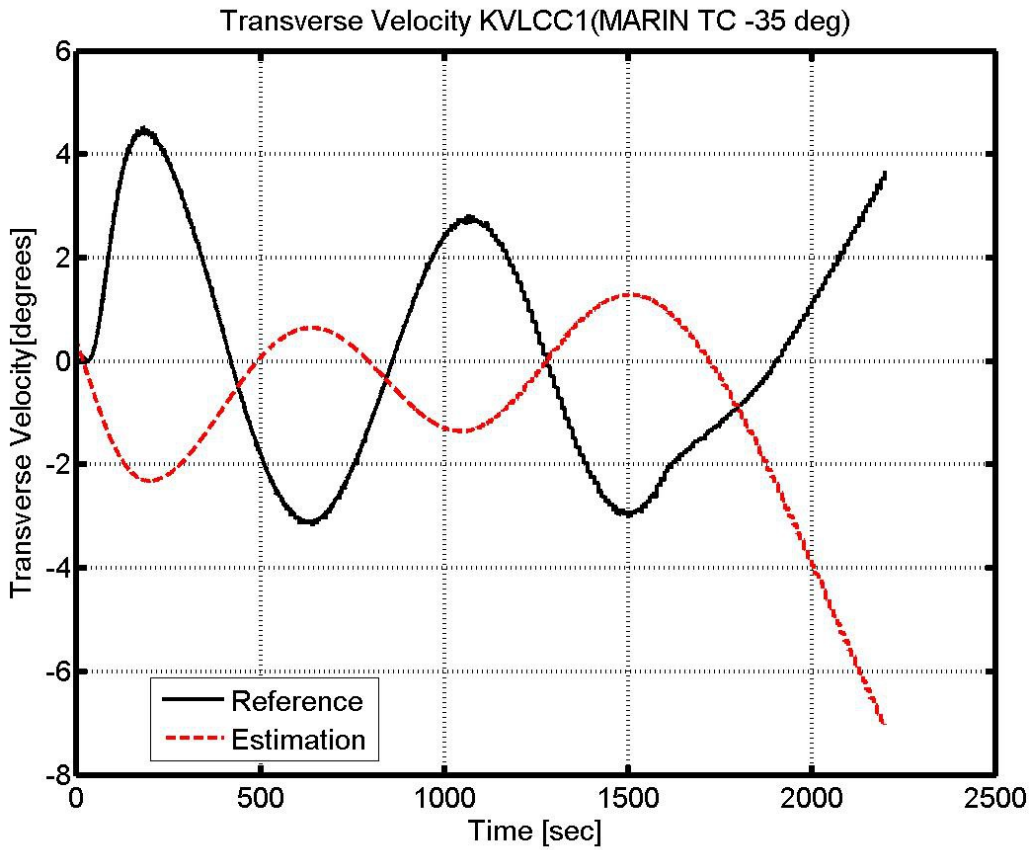
Τέλος, δοκιμάστηκε το δίκτυο στην πρόβλεψη ενός κυκλικού ελιγμού (MARIN TC -35°) για το άλλο μοντέλο δεξαμενόπλοιου, το KVLCC1. Στα Σχήματα 4.16 - 4.19, φαίνονται όπως προέκυψαν από το εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο η προβλεπόμενη πορεία του πλοίου (x, y) καθώς και οι εκτιμώμενες χρονικές ιστορίες των μεταβλητών ψ , v , και r .



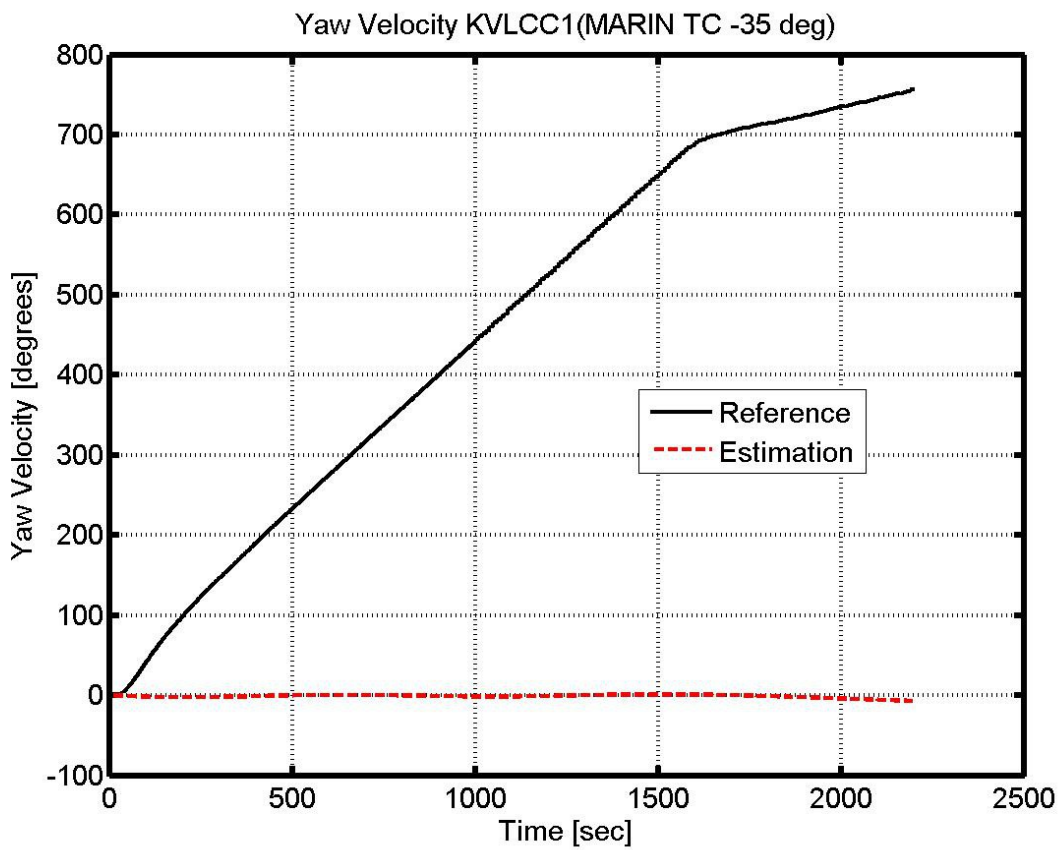
Σχήμα 4.16: Προβλεπόμενη Πορεία Μοντέλου KVLCC1 (TC -35 deg)



Σχήμα 4.17: Εκτιμώμενη Γωνία $\psi(t)$ του KVLCC1 (TC -35 deg)



Σχήμα 4.18: Εκτιμώμενη Εγκάρσια Ταχύτητα του KVLCC2 (TC -35 deg)



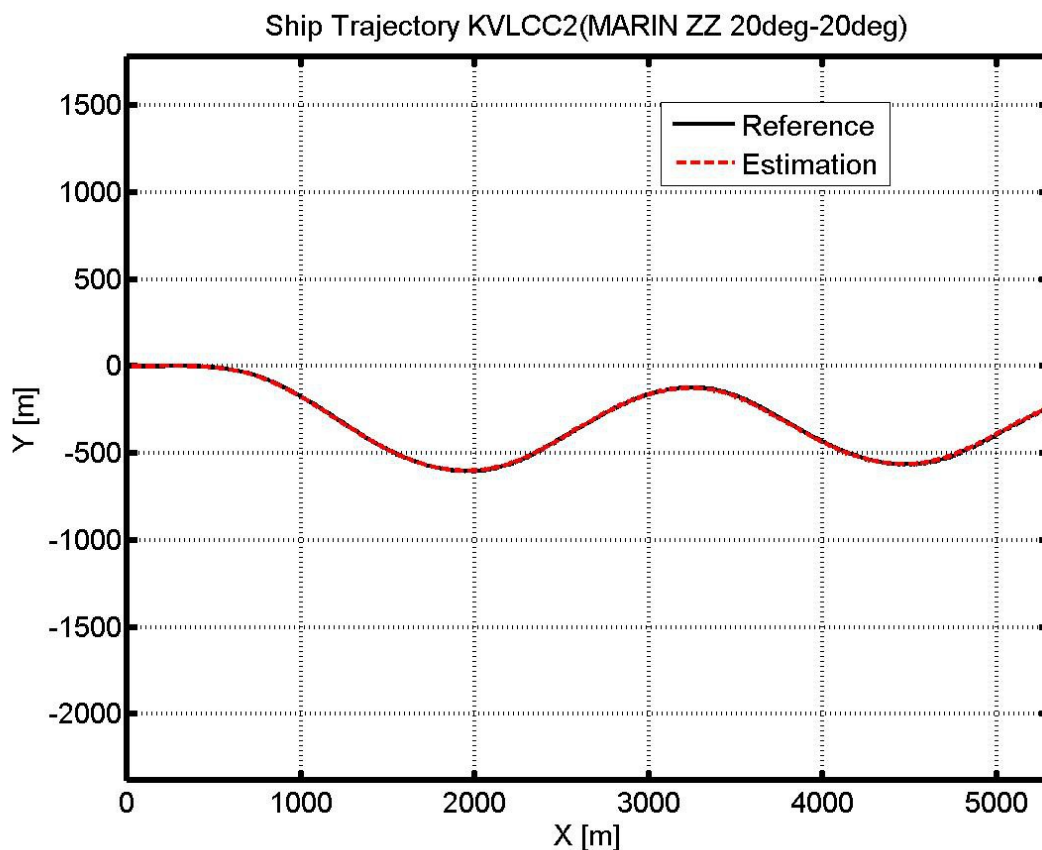
Σχήμα 4.19: Εκτιμώμενη Ταχύτητα Yaw του KVLCC2 (TC -35)

Βλέπουμε από τα προηγούμενα σχήματα ότι το νευρωνικό που εκπαιδεύτηκε με δεδομένα του KVLCC2, προσεγγίζει με αρκετή ακρίβεια την πορεία του KVLCC1. Το γεγονός ότι οι γάστρες των δύο μοντέλων είναι αρκετά παρόμοιες δίνει μια εξήγηση για το φαινόμενο αυτό. Για άλλη μια φορά, φαίνεται ότι δεν γίνεται καλή εκτίμηση των υπολοίπων μεταβλητών.

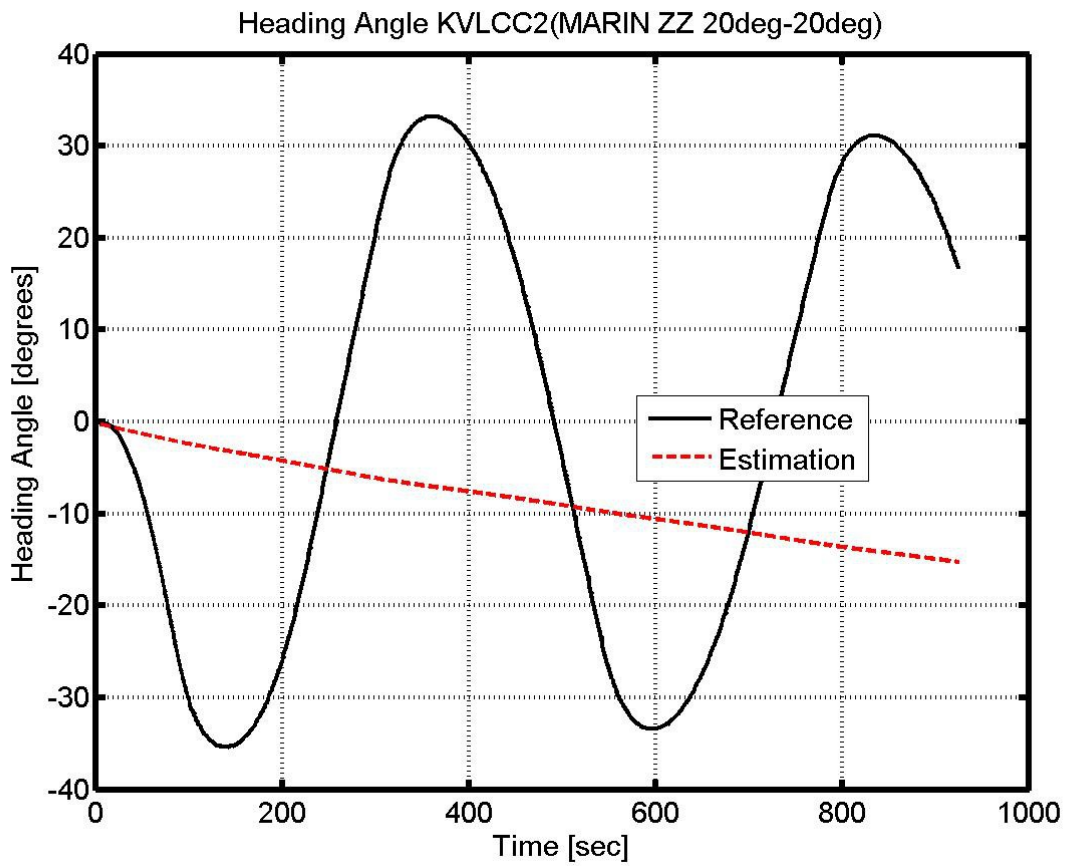
4.2.4.2 Νευρωνικό Δίκτυο #2 (NN_2)

Το νευρωνικό δίκτυο εκπαιδεύτηκε με έναν οφιοειδή ελιγμό (ZZ 10°-10°) και δύο κυκλικούς ελιγμούς (TC 35°, TC -35°) από τα πειραματικά δεδομένα του MARIN. Έπειτα, χρησιμοποιήθηκε το δίκτυο για να προβλέψει τη κίνηση του πλοίου σε ελιγμούς με τους οποίους δεν είχε εκπαιδευτεί. Στα Σχήματα 4.20 - 4.23, φαίνονται όπως προέκυψαν από το εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο για οφιοειδή ελιγμό (MARIN ZZ 20°-20°):

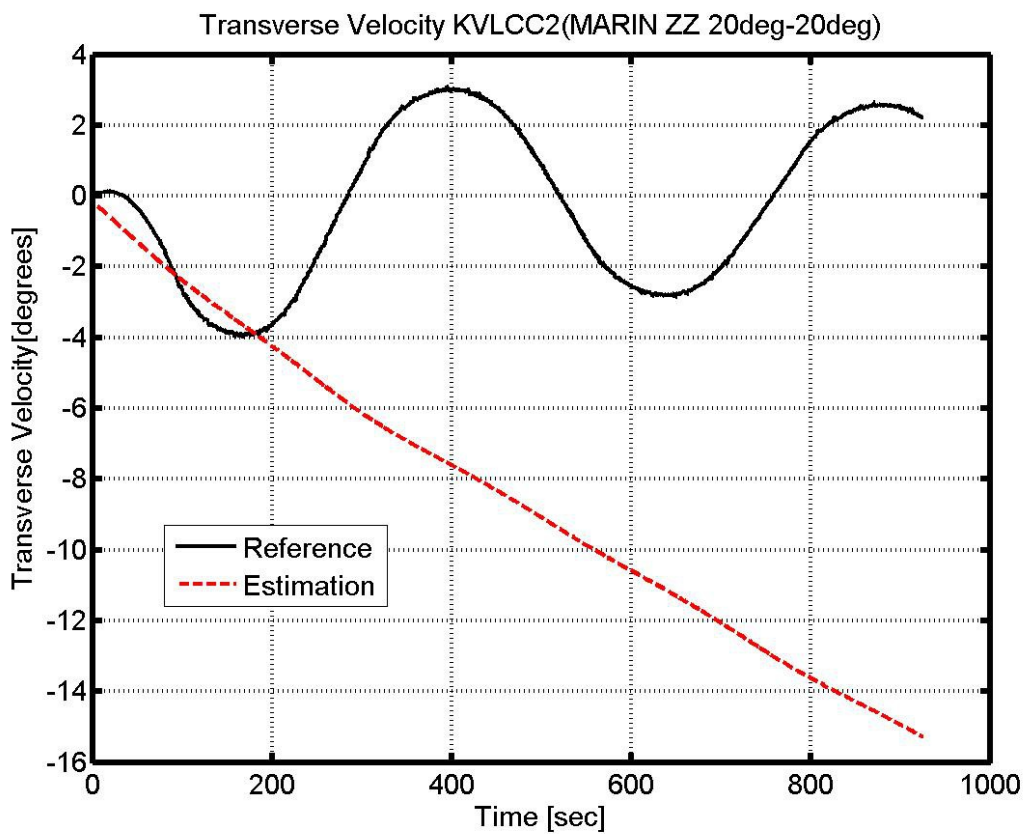
- η προβλεπόμενη πορεία του πλοίου (x, y)
- οι εκτιμώμενες χρονικές ιστορίες των μεταβλητών ψ , v , και r



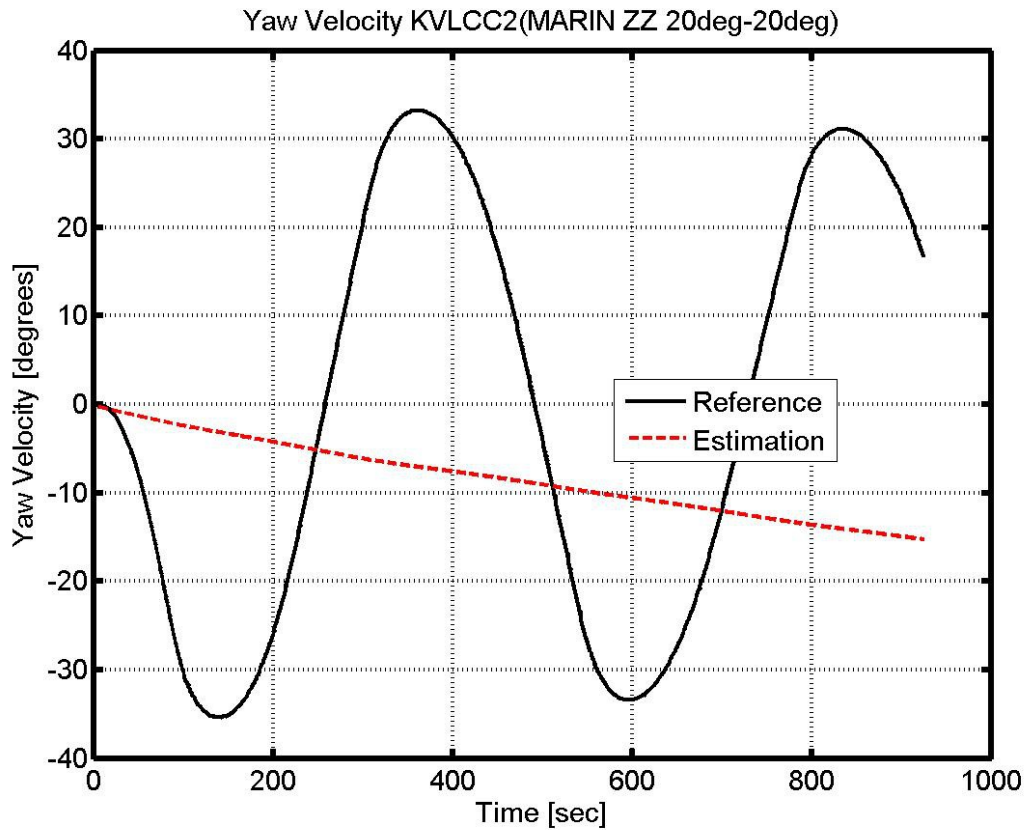
Σχήμα 4.20: Προβλεπόμενη Πορεία Μοντέλου KVLCC2 (ZZ 20deg-20deg)



Σχήμα 4.21: Εκτιμώμενη Γωνία $\psi(t)$ του KVLCC2 (ZZ 20deg-20deg)



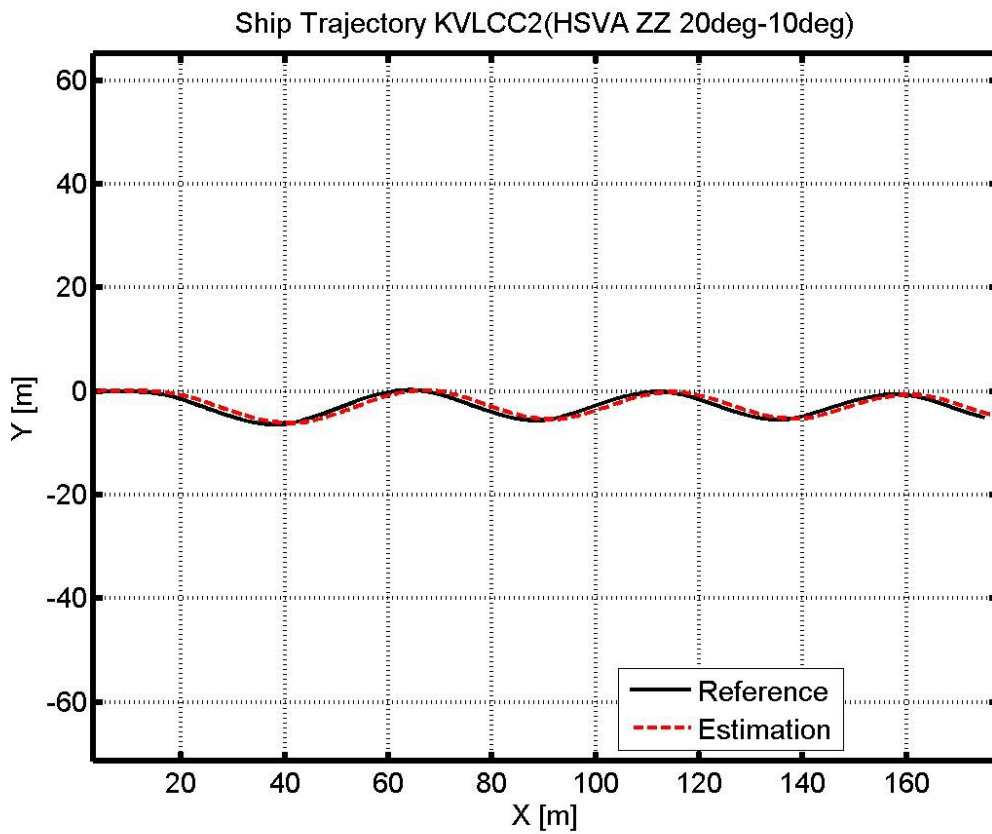
Σχήμα 4.22: Εκτιμώμενη Εγκάρσια Ταχύτητα του KVLCC2 (ZZ 20deg-20deg)



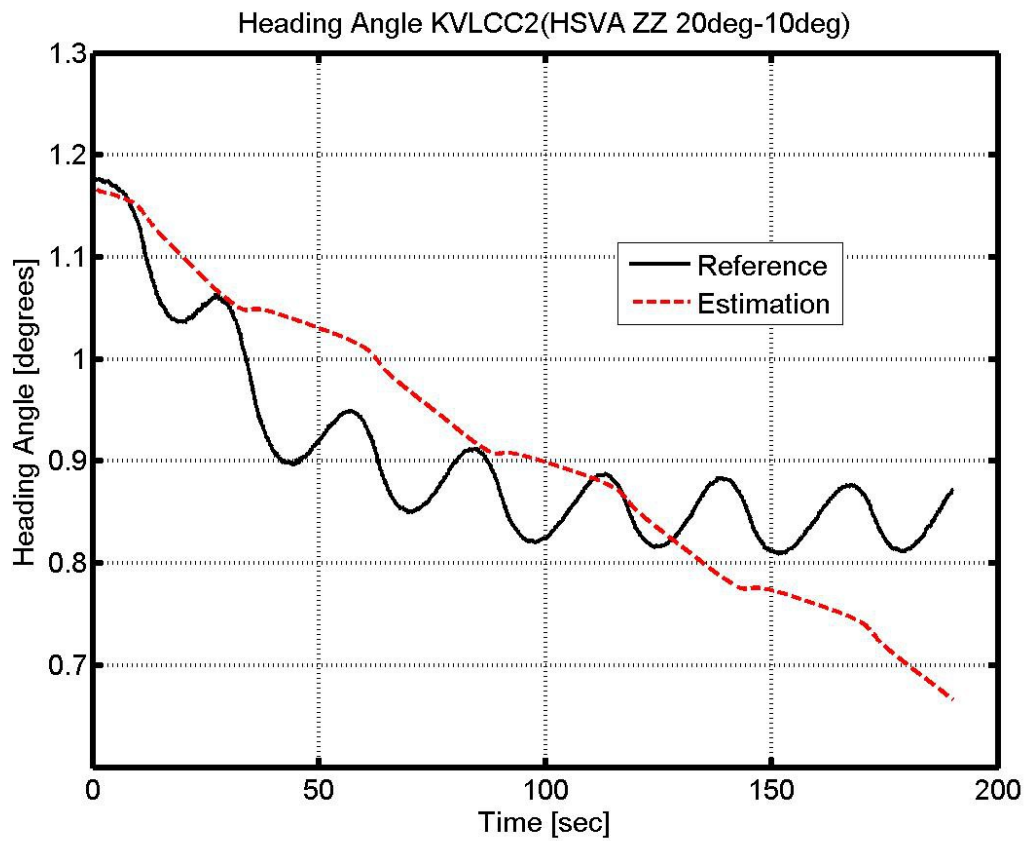
Σχήμα 4.23: Εκτιμώμενη Ταχύτητα Yaw του KVLCC2 (ZZ 20deg-20deg)

Όπως και με το προηγούμενο νευρωνικό δίκτυο, η πρόβλεψη της πορείας είναι πολύ καλή, ωστόσο ούτε και αυτό το δίκτυο φαίνεται να προσεγγίζει καλά τις υπόλοιπες μεταβλητές. Η μικρή αύξηση του πλήθους των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε στην εκπαίδευση του νευρωνικού δεν φαίνεται να προκάλεσε μεγάλη διαφορά στην συμπεριφορά του.

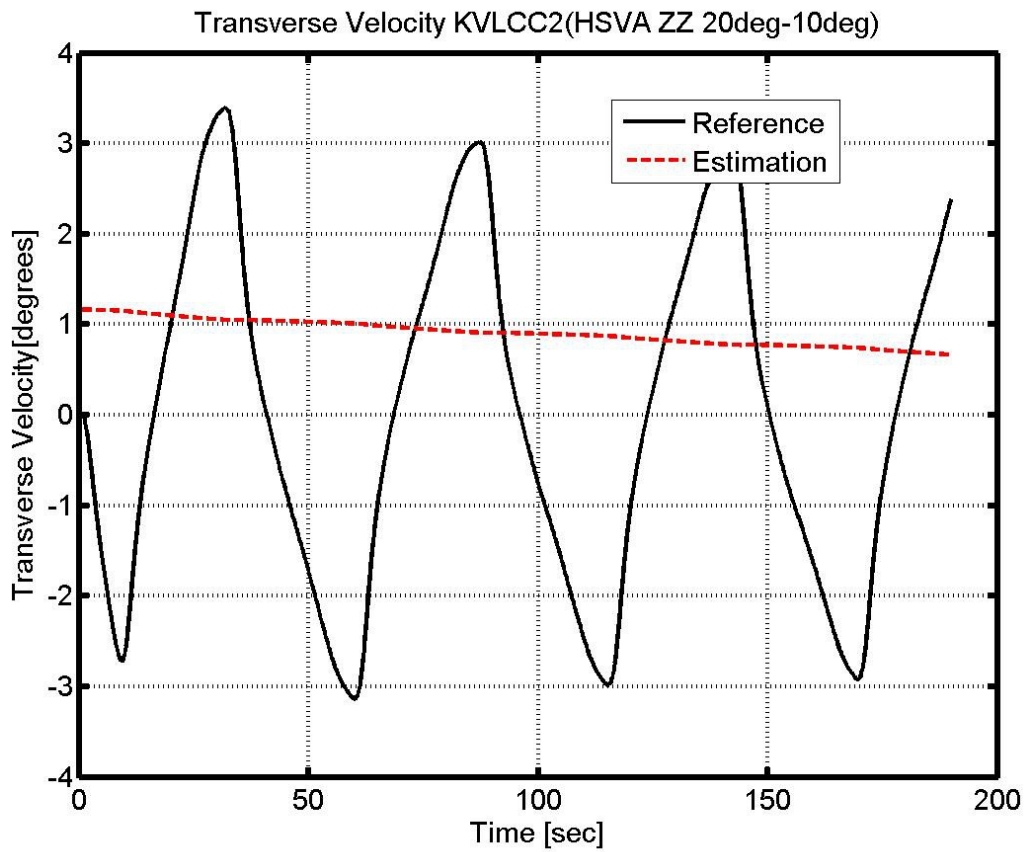
Στη συνέχεια, δοκιμάστηκε το δίκτυο στην πρόβλεψη ενός τροποποιημένου οφιοειδούς ελιγμού (HSVA ZZ 20°-10°). Στα Σχήματα 4.24 - 4.27, φαίνονται όπως προέκυψαν από το εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο η προβλεπόμενη πορεία του πλοίου (x, y) καθώς και οι εκτιμώμενες χρονικές ιστορίες των μεταβλητών ψ , v , και r .



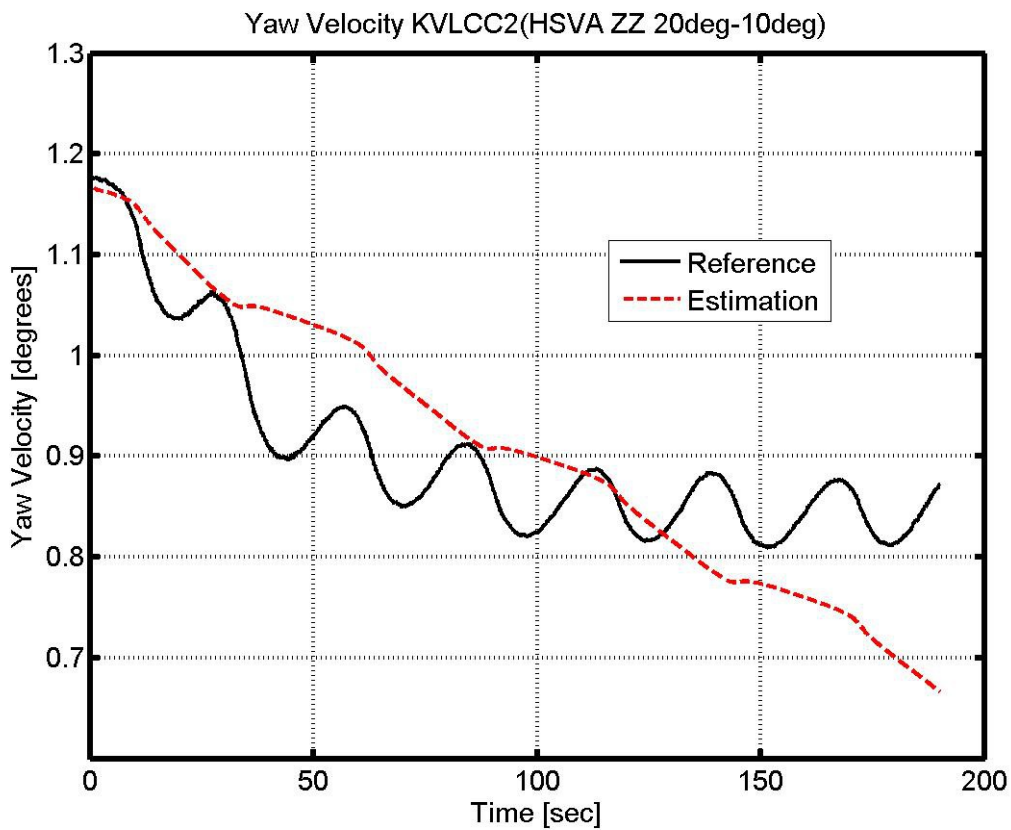
Σχήμα 4.24: Προβλεπόμενη Πορεία Μοντέλου KVLCC2 (ZZ 20deg-10deg)



Σχήμα 4.25: Εκτιμώμενη Γωνία $\psi(t)$ του KVLCC2 (ZZ 20deg-10deg)



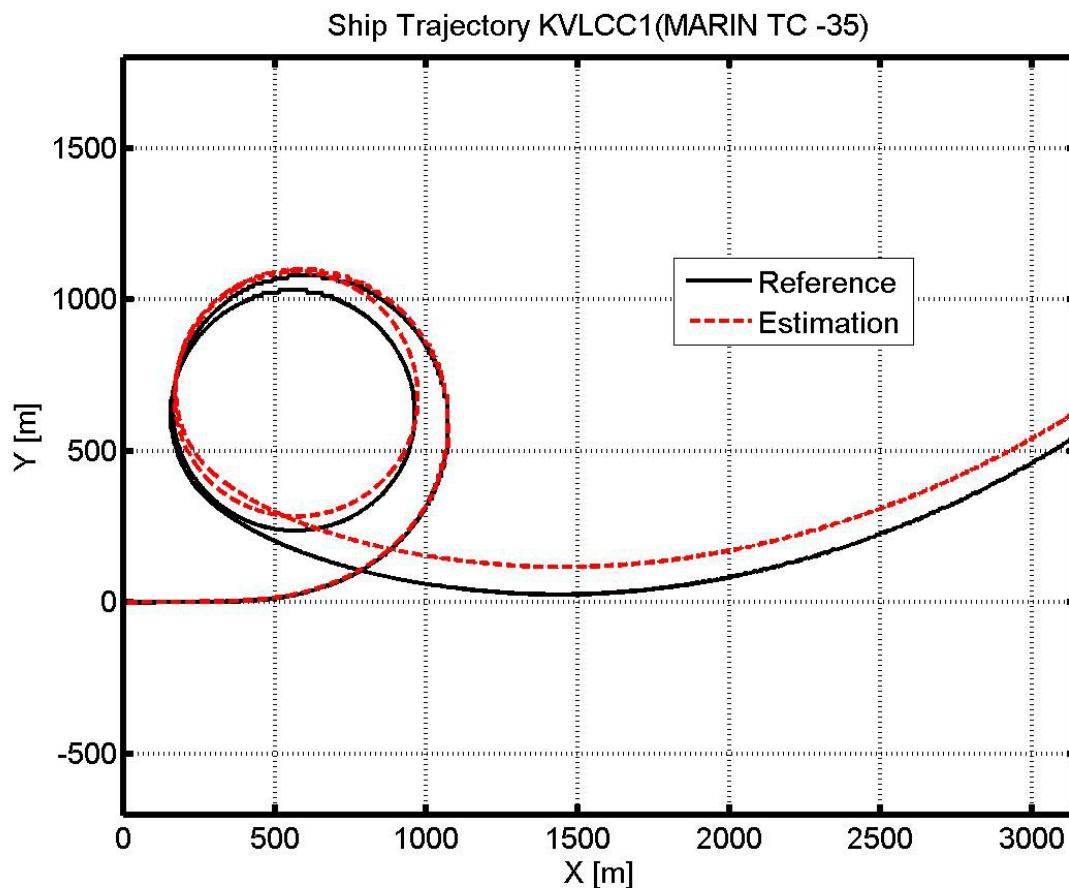
Σχήμα 4.26: Εκτιμώμενη Εγκάρσια Ταχύτητα του KVLCC2 (ZZ 20deg-10deg)



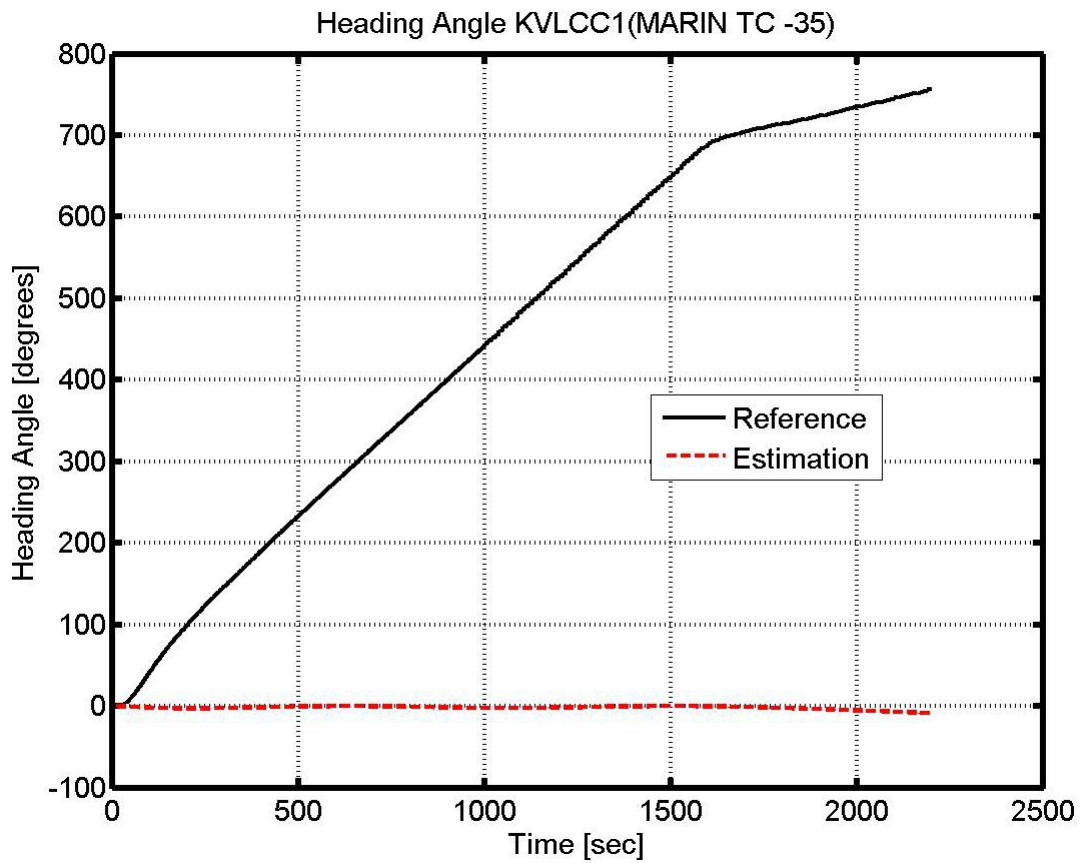
Σχήμα 4.27: Εκτιμώμενη Ταχύτητα Yaw του KVLCC2 (ZZ 20deg-10deg)

Όπως και στο προηγούμενο νευρωνικό δίκτυο, βλέπουμε ότι τα αποτελέσματα πρόβλεψης για το συγκεκριμένο ελιγμό είναι λίγο καλύτερα από αυτά του προηγούμενου, με εξαίρεση βεβαίως την ταχύτητα v .

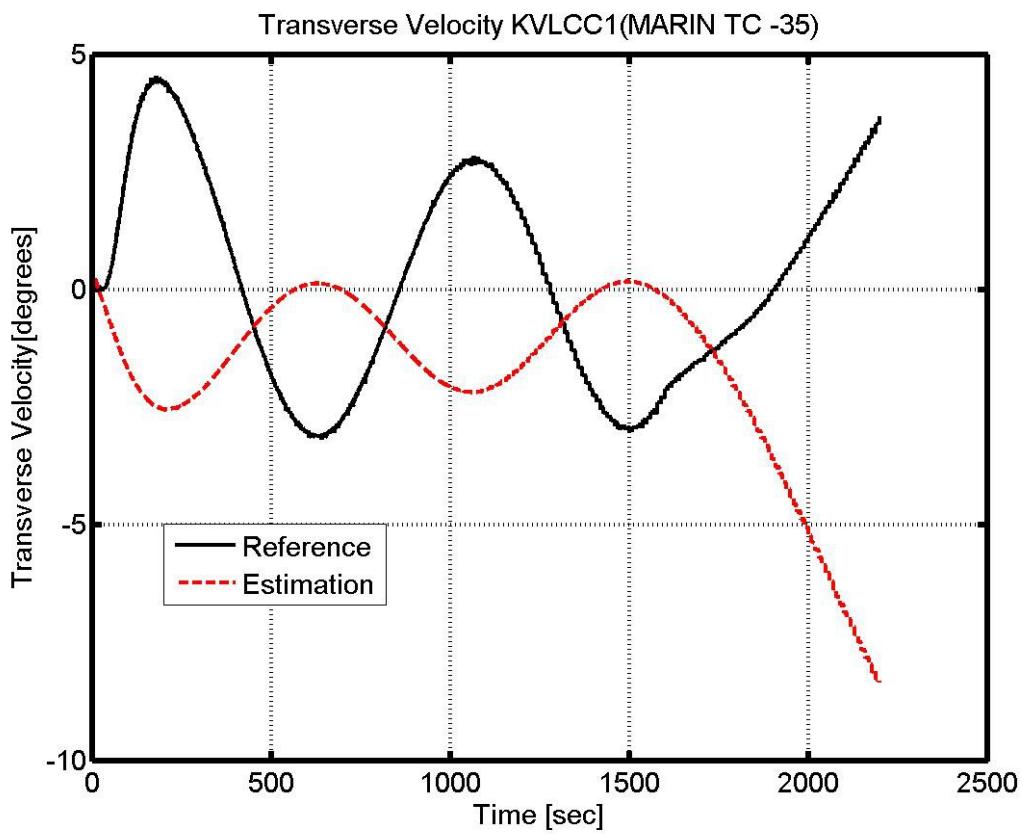
Τέλος, δοκιμάστηκε το δίκτυο στην πρόβλεψη ενός κυκλικού ελιγμού (MARIN TC -35°) για το άλλο μοντέλο δεξαμενόπλοιου, το KVLCC1. Στα Σχήματα 4.28 - 4.31, φαίνονται όπως προέκυψαν από το εκπαιδευμένο νευρωνικό δίκτυο η προβλεπόμενη πορεία του πλοίου (x, y) καθώς και οι εκτιμώμενες χρονικές ιστορίες των μεταβλητών ψ , v , και r .



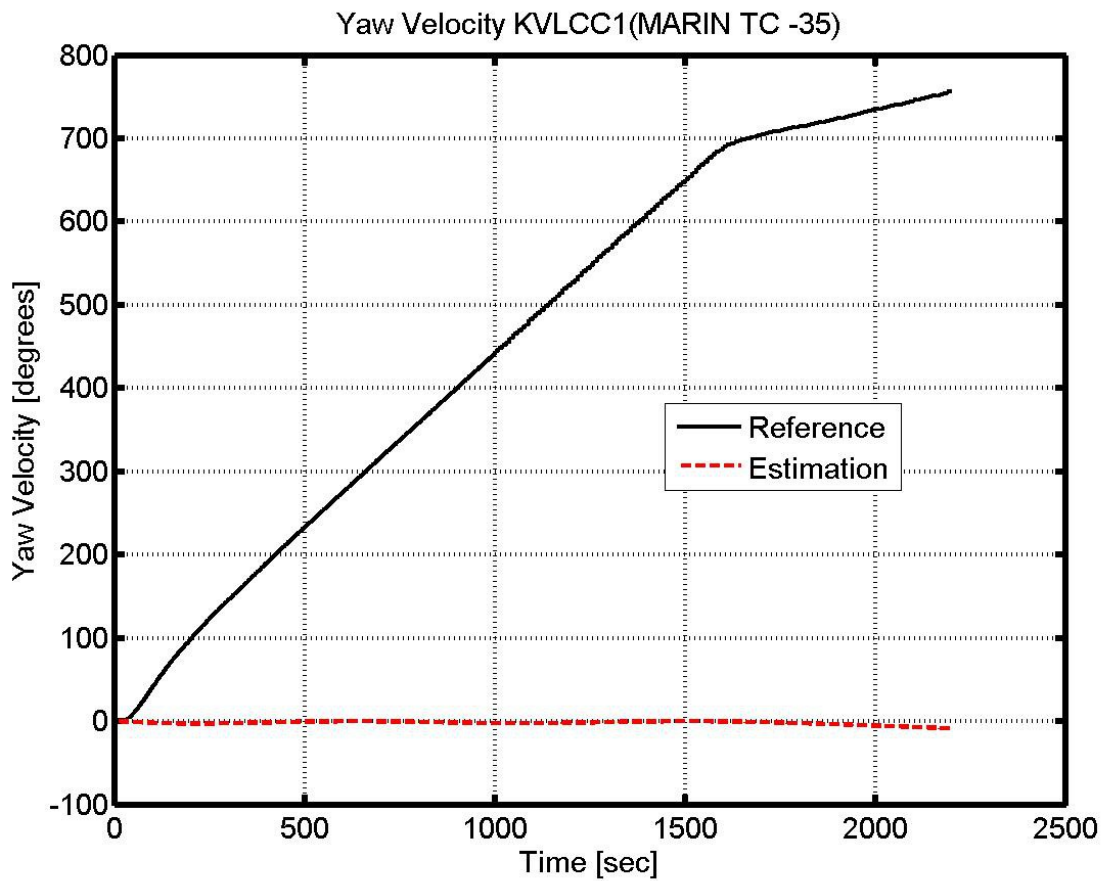
Σχήμα 4.28: Προβλεπόμενη Πορεία Μοντέλου KVLCC1 (TC -35 deg)



Σχήμα 4.29: Εκτιμώμενη Γωνία $\psi(t)$ του KVLCC1 (TC -35 deg)

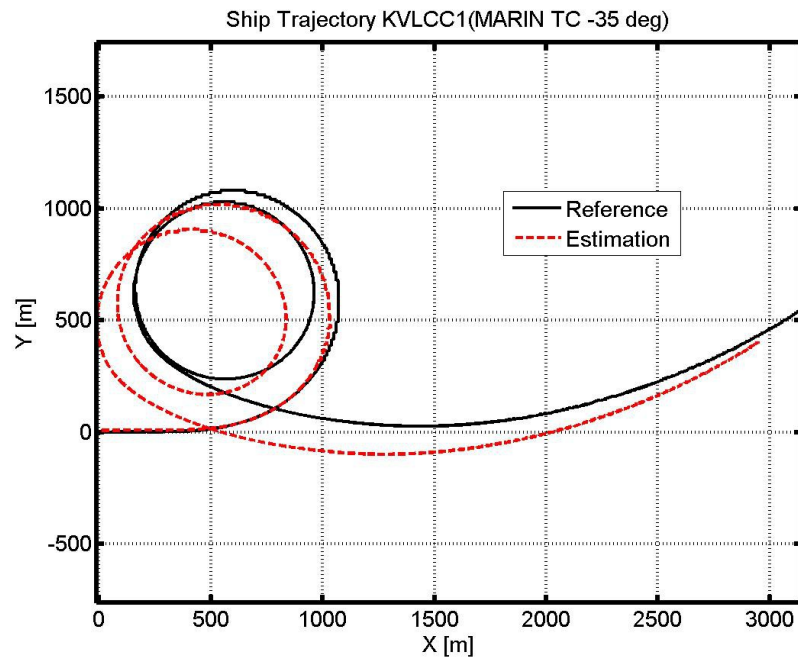


Σχήμα 4.30: Εκτιμώμενη Εγκάρσια Ταχύτητα του KVLCC2 (TC -35 deg)

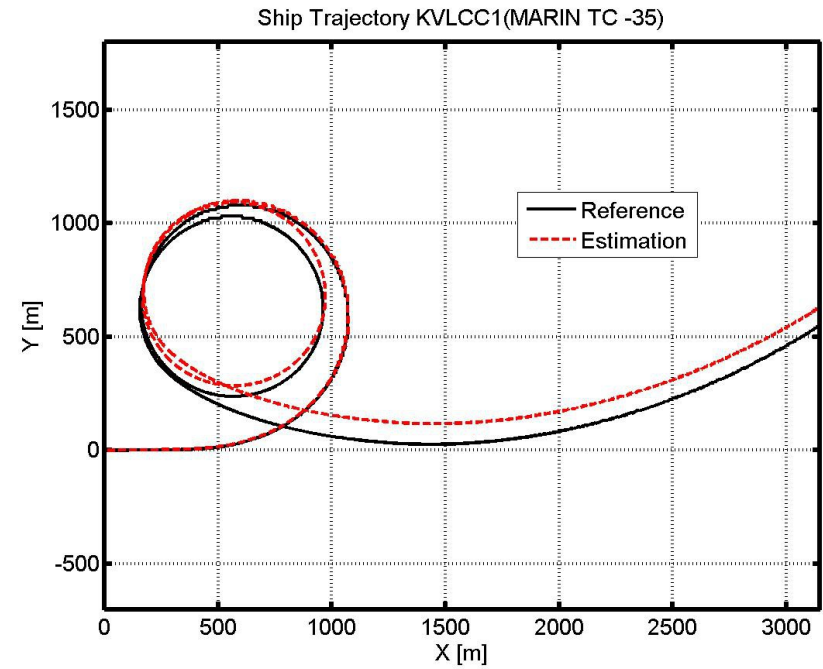


Σχήμα 4.31: Εκτιμώμενη Ταχύτητα Yaw του KVLCC1 (TC -35 deg)

Η πρόβλεψη του νευρωνικού δικτύου για τη πορεία του πλοίου είναι καλύτερη από αυτή του πρώτου δικτύου. Αυτό ίσως οφείλεται στην παραπάνω εκπαίδευση που έλαβε το δεύτερο νευρωνικό δίκτυο χάρη στα επιπλέον δεδομένα της δεύτερης δοκιμής κυκλικού ελιγμού. Για ευκολία σύγκρισης, ακολουθώς παρατίθενται ξανά τα δύο διαγράμματα πορείας:



Σχήμα 4.33: Προβλεπόμενη Πορεία Μοντέλου (Νευρωνικό Δίκτυο #1)



Σχήμα 4.32: Προβλεπόμενη Πορεία Μοντέλου (Νευρωνικό Δίκτυο #2)

4.3 Αριθμητική Επίλυση των Εξισώσεων MMG με Χρήση Πειραματικών Δεδομένων

Δημιουργήθηκε κώδικας σε MATLAB με στόχο την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων κίνησης του πλοίου για το μοντέλο δυνάμεων και ροπών του MMG. Η δομή του μοντέλου υδροδυναμικών φορτίσεων του MMG αναπτύχθηκε στο εδάφιο 2.3.2. Στη συνέχεια, περιγράφεται η διαδικασία επίλυσης που ακολουθείται από τον κώδικα προγραμματισμού. Ο κώδικας δίνεται στο Παράρτημα Γ για λόγους αναφοράς.

4.3.1 Διαδικασία Επίλυσης

Ξεκινώντας από τις εξισώσεις κίνησης (2.1) - (2.3) με μοντέλο υδροδυναμικών φορτίσεων MMG, στόχος ήταν η εύρεση των υδροδυναμικών παραγώγων του πλοίου. Το αρχικό σύστημα εξισώσεων είναι λοιπόν:

$$X_{\dot{u}}\dot{u} + X_{vv}v^2 + X_{vr}vr + X_{rr}r^2 = m(\dot{u} - vr - x_G r^2) - X_P - X_R - X(u) \quad (4.14)$$

$$Y_{\dot{v}}\dot{v} + Y_{\dot{r}}\dot{r} + Y_v v + Y_{v|v}|v| + Y_r r + Y_{r|r}|r| + Y_{vrr}vr^2 + Y_{vvr}v^2 r = m(\dot{v} + ur + x_G \dot{r}) - Y_P - Y_R \quad (4.15)$$

$$N_{\dot{v}}\dot{v} + N_{\dot{r}}\dot{r} + N_v v + N_{v|v}|v| + N_r r + N_{r|r}|r| + N_{vrr}vr^2 + N_{vvr}v^2 r = I_{zz}\dot{r} + mx_G(\dot{v} + ur) - N_P - N_R \quad (4.16)$$

Το σύστημα διαθέτει παραπάνω αγνώστους από ότι εξισώσεις, και για την επίλυσή του θα πρέπει να εκμεταλλευτούμε το γεγονός ότι γνωρίζουμε τις χρονικές ιστορίες των μεταβλητών $u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}$ και δ . Γράφουμε το σύστημα των εξισώσεων (4.14) - (4.16), ως ακολούθως, όπου ο δείκτης $i = 1, 2, \dots, n$ δηλώνει τις τιμές των αναφερόμενων μεταβλητών σε κάθε χρονικό βήμα.

Από την εξίσωση (4.14), παράγουμε τέσσερις εξισώσεις, η κάθε μία με διαφορετικές τιμές των μεταβλητών (για $i, i+1, i+2, i+3$). Συνεπώς, γράφοντας το σύστημα των τεσσάρων αυτών εξισώσεων σε μορφή πινάκων, καταλήγουμε στους ακόλουθους πίνακες.

$$A_{1,i} = \begin{bmatrix} \dot{u}_i & v_i^2 & v_i \cdot r_i & r_i^2 \\ \dot{u}_{i+1} & v_{i+1}^2 & v_{i+1} \cdot r_{i+1} & r_{i+1}^2 \\ \dot{u}_{i+2} & v_{i+2}^2 & v_{i+2} \cdot r_{i+2} & r_{i+2}^2 \\ \dot{u}_{i+3} & v_{i+3}^2 & v_{i+3} \cdot r_{i+3} & r_{i+3}^2 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

$$B_{1,i} = \begin{bmatrix} m(\dot{u}_i - v_i \cdot r_i - x_G r_i^2) - X_{P,i} - X_{R,i} - X_i(u) \\ m(\dot{u}_{i+1} - v_{i+1} \cdot r_{i+1} - x_G r_{i+1}^2) - X_{P,i+1} - X_{R,i+1} - X_{i+1}(u) \\ m(\dot{u}_{i+2} - v_{i+2} \cdot r_{i+2} - x_G r_{i+2}^2) - X_{P,i+2} - X_{R,i+2} - X_{i+2}(u) \\ m(\dot{u}_{i+3} - v_{i+3} \cdot r_{i+3} - x_G r_{i+3}^2) - X_{P,i+3} - X_{R,i+3} - X_{i+3}(u) \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Και άρα το σύστημα έχει τη μορφή:

$$A_{1,i} \cdot \begin{bmatrix} X_{\dot{u}} \\ X_{v\dot{v}} \\ X_{v\dot{r}} \\ X_{r\dot{r}} \end{bmatrix} = B_{1,i} \quad (4.19)$$

Και λύνεται:

$$\begin{bmatrix} X_{\dot{u}} \\ X_{v\dot{v}} \\ X_{v\dot{r}} \\ X_{r\dot{r}} \end{bmatrix} = (A_{1,i})^{-1} \cdot B_{1,i} \quad (4.20)$$

Από την εξίσωση (4.15), θα εκτιμηθούν οι παράμετροι: $Y_{\dot{v}}, Y_{\dot{r}}, Y_v, Y_{v|v|}$

Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία όπως προηγουμένως, και καταλήγουμε στους πίνακες:

$$A_{2,i} = \begin{bmatrix} \dot{v}_i & \dot{r}_i & v_i & v_i|v_i| & r_i & r_i|r_i| & v_i \cdot r_i^2 & v_i^2 r_i \\ v_{i+1} \dot{v}_i & r_{i+1} \dot{r}_i & v_{i+1} & v_{i+1}|v_{i+1}| & r_{i+1} & r_{i+1}|r_{i+1}| & v_{i+1} \cdot r_{i+1}^2 & v_{i+1}^2 r_{i+1} \\ v_{i+2} \dot{v}_i & r_{i+2} \dot{r}_i & v_{i+2} & v_{i+2}|v_{i+2}| & r_{i+2} & r_{i+2}|r_{i+2}| & v_{i+2} \cdot r_{i+2}^2 & v_{i+2}^2 r_{i+2} \\ v_{i+3} \dot{v}_i & r_{i+3} \dot{r}_i & v_{i+3} & v_{i+3}|v_{i+3}| & r_{i+3} & r_{i+3}|r_{i+3}| & v_{i+3} \cdot r_{i+3}^2 & v_{i+3}^2 r_{i+3} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$$B_{2,i} = \begin{bmatrix} m(\dot{v}_i + u_i \cdot r_i + x_G \dot{r}_i) - Y_{P,i} - Y_{R,i} \\ m(v_{i+1} \dot{v}_i + u_{i+1} \cdot r_{i+1} + x_G r_{i+1} \dot{r}_i) - Y_{P,i+1} - Y_{R,i+1} \\ m(v_{i+2} \dot{v}_i + u_{i+2} \cdot r_{i+2} + x_G r_{i+2} \dot{r}_i) - Y_{P,i+2} - Y_{R,i+2} \\ m(v_{i+3} \dot{v}_i + u_{i+3} \cdot r_{i+3} + x_G r_{i+3} \dot{r}_i) - Y_{P,i+3} - Y_{R,i+3} \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

Και άρα το σύστημα έχει τη μορφή και λύση που ακολουθεί:

$$A_{2,i} \cdot \begin{bmatrix} Y_{\dot{v}} \\ Y_{\dot{r}} \\ Y_v \\ Y_{v|v|} \end{bmatrix} = B_{2,i} \Rightarrow \begin{bmatrix} Y_{\dot{v}} \\ Y_{\dot{r}} \\ Y_v \\ Y_{v|v|} \end{bmatrix} = (A_{2,i})^{-1} \cdot B_{2,i} \quad (4.23)$$

Από την εξίσωση (4.16), θα εκτιμηθούν οι παράμετροι: $N_{\dot{v}}, N_{\dot{r}}, N_v, N_{v|v|}$

Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία όπως προηγουμένως, και καταλήγουμε στους πίνακες:

$$A_{3,i} = \begin{bmatrix} \dot{v}_i & \dot{r}_i & v_i & v_i|v_i| & r_i & r_i|r_i| & v_i \cdot r_i^2 & v_i^2 r_i \\ \dot{v}_{i+1} & \dot{r}_{i+1} & v_{i+1} & v_{i+1}|v_{i+1}| & r_{i+1} & r_{i+1}|r_{i+1}| & v_{i+1} \cdot r_{i+1}^2 & v_{i+1}^2 r_{i+1} \\ \dot{v}_{i+2} & \dot{r}_{i+2} & v_{i+2} & v_{i+2}|v_{i+2}| & r_{i+2} & r_{i+2}|r_{i+2}| & v_{i+2} \cdot r_{i+2}^2 & v_{i+2}^2 r_{i+2} \\ \dot{v}_{i+3} & \dot{r}_{i+3} & v_{i+3} & v_{i+3}|v_{i+3}| & r_{i+3} & r_{i+3}|r_{i+3}| & v_{i+3} \cdot r_{i+3}^2 & v_{i+3}^2 r_{i+3} \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

$$B_{3,i} = \begin{bmatrix} I_{zz} \dot{r}_i + mx_G (\dot{v}_i + u_i \cdot r_i) - N_{P,i} - N_{R,i} \\ I_{zz} \dot{r}_{i+1} + mx_G (\dot{v}_{i+1} + u_{i+1} \cdot r_{i+1}) - N_{P,i+1} - N_{R,i+1} \\ I_{zz} \dot{r}_{i+2} + mx_G (\dot{v}_{i+2} + u_{i+2} \cdot r_{i+2}) - N_{P,i+2} - N_{R,i+2} \\ I_{zz} \dot{r}_{i+3} + mx_G (\dot{v}_{i+3} + u_{i+3} \cdot r_{i+3}) - N_{P,i+3} - N_{R,i+3} \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

Και άρα το σύστημα έχει τη μορφή και λύση που ακολουθεί:

$$A_{3,i} \cdot \begin{bmatrix} N_{\dot{v}} \\ N_{\dot{r}} \\ N_v \\ N_{v|v|} \end{bmatrix} = B_{3,i} \Rightarrow \begin{bmatrix} N_{\dot{v}} \\ N_{\dot{r}} \\ N_v \\ N_{v|v|} \end{bmatrix} = (A_{3,i})^{-1} \cdot B_{3,i} \quad (4.26)$$

Λύνουμε το ανωτέρω σύστημα ως προς τα διανύσματα των υδροδυναμικών παραγώγων σε όλο το χρονικό διάστημα του πειράματος. Οι τιμές των τριών διανυσμάτων συγκλίνουν στην τελική τιμή των υδροδυναμικών παραγώγων.

4.3.2 Αποτελέσματα

Ο κώδικας που περιγράφεται στο παραπάνω εδάφιο υλοποιήθηκε για το μοντέλο δεξαμενόπλοιου KVLCC2. Οι χρονικές ιστορίες των απαραίτητων μεταβλητών κίνησης προέκυψαν από τα αποτελέσματα των πειραμάτων με ελεύθερα μοντέλα που δίδονται από το SIMMAN. Στην παρούσα εργασία, τα πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν είναι από τροποποιημένο οφιοειδή ελιγμό (HSVA ZZ 20deg-10deg). Θεωρητικά, εφόσον οι υδροδυναμικές παράγωγοι εξαρτώνται μόνο από τη γεωμετρία της γάστρα, θα πρέπει να συγκλίνουν οι τιμές τους ανεξάρτητα από τον ελιγμό που χρησιμοποιείται.

Στις εκφράσεις των υδροδυναμικών φορτίσεων πηδαλίου (Εξ. 2.24-2.26) και προπέλας (Εξ. 2.27-2.29) κατά MMG, είναι απαραίτητη η γνώση ορισμένων χαρακτηριστικών μεγεθών πηδαλίου και προπέλας, καθώς και αρκετών συντελεστών αλληλεπίδρασής τους με τη γάστρα. Μερικά από τα μεγέθη αυτά, όπως οι κύριες διαστάσεις και συντελεστές μορφής του πλοίου, της προπέλας ή του πηδαλίου, δίνονται στον Πίνακα 3.2 του εδαφίου 3.2.1.4.2. Οι υπόλοιποι συντελεστές είτε υπολογίζονται από εμπειρικές σχέσεις, είτε λαμβάνονται ίδια με δεδομένες τιμές από δημοσιεύσεις του SIMMAN Proceedings (Sano and Yusukawa 2008).

Για λόγους αναφοράς, οι τιμές των μεγεθών όπως χρησιμοποιήθηκαν στον κώδικα δίνονται στον Πίνακα 4.4 που ακολουθεί.

Πίνακας 4.4: Τιμές Χαρακτηριστικών Μεγεθών και Συντελεστών Αλληλεπίδρασης Παρελκόμενων-Γάστρας για Φορτίσεις κατά MMG

Μέγεθος	Τιμή
Συντελεστής Ολικής Αντίστασης, C_T	$4.11 \cdot 10^{-3}$
Ποσοστό μείωσης ώσης της προπέλας, t_p	0.2549
Πραγματικό ποσοστό ομόρρου της προπέλας, w_p	0.3674
Συντελεστής ώσης της προπέλας, K_T	$-0.139 J_p^2 - 0.275 J_p + 0.293$
Ποσοστό αύξησης πλευρικής δύναμης στη γάστρα λόγω πηδαλιουχίας, a_H	$-0.502 J_p^2 + 1.022 J_p + 0.183 J_p$
Λόγος διαμέτρου προπέλας προς ύψος πηδαλίου, η	0.6238
Ποσοστό ομόρρου στο πηδάλιο προς ποσοστό ομόρρου στη προπέλα, ε	0.8
Ρυθμός επιτάχυνσης της ροής στο πηδάλιο εξαιτίας της προπέλας, k_x	0.6
Λόγος επιμηκούς του πηδαλίου, A	1.84
Κλίση του συντελεστή άνωσης του πηδαλίου, f_a	$\frac{6.13 A}{2.25 + A}$
Διαμήκης απόσταση μεταξύ του κέντρου βάρους του πλοίου και του κέντρου της πλευρικής δύναμης στο πηδάλιο, x_R	$-0.5 \cdot L$
Διαμήκης απόσταση μεταξύ κέντρου βάρους τους πλοίου και του κέντρου της επιπλέον πλευρικής δύναμης στο πηδάλιο, x_H	$-0.343 \cdot L$
Συντελεστής πρόσθετης αντίστασης πηδαλίου, t_R	0.163
Πραγματική γωνία εισροής ρευστού στο πηδάλιο, a_R	$\frac{5}{7} \delta(t)$

Στον Πίνακα 4.5, συγκρίνουμε τις τιμές των υδροδυναμικών παραγώγων που υπολογίστηκαν με εκτιμήσεις των ιδίων παραγώγων από τα Proceedings του συνεδρίου SIMMAN. Για κάθε παράμετρο, υπολογίζεται μια τιμή σφάλματος, E, που εκφράζει την απόκλισή του από τις τιμές από το SIMMAN, δηλαδή:

$$E[\%D] = \frac{D-S}{D} \times 100 \quad (4.27)$$

όπου D η τιμή της παραμέτρου που δίνεται από SIMMAN και που θεωρείται τιμή αναφοράς, και S η τιμή που εκτιμήθηκε από των κώδικά μας.

Πίνακας 4.5: Σύγκριση Αποτελεσμάτων του Κώδικα με Τιμές Αναφοράς από το SIMMAN

Παράμετρος	Αδιάστατη Τιμή Αναφοράς (D) (Sun Young and Yeon Gyu 2008)	Αδιάστατη Μορφή Υπολογισμένης Τιμής (S)	Διαστατή Μορφή Υπολογισμένης Τιμής (S')	Σφάλμα (E)
X_{ii}	-0.000954	1.957136e-002	3.206571e+008	2151.51
X_{vv}	0.001688	-5.825006e+011	-9.071081e+004	3.45E+016
X_{vr}	0.013821	-6.571641e+017	-3.198060e+008	4.75E+021
X_{rr}	0.001219	-2.307385e+021	-3.508995e+009	1.89E+026
$Y_{\dot{v}}$	-0.015104	1.963708e-002	3.217340e+008	230.01
$Y_{\dot{r}}$	-0.001428	2.729071e-002	3.565064e+009	2011.11
Y_v	-0.016190	-2.646783e-002	-1.080491e+007	-63.48
$Y_{v v }$	-0.030441	8.915129e-002	4.564546e+006	392.87
$N_{\dot{v}}$	-0.000785	2.179918e-001	3.571578e+009	27869.66
$N_{\dot{r}}$	-0.000800	1.415881e-005	7.423295e+007	101.77
N_v	-0.008754	9.456329e-004	1.235308e+008	110.8
$N_{v v }$	0.001250	-3.161867e-004	-5.180403e+006	125.29

Με μια πρώτη ματιά φαίνονται πολύ μεγάλες οι αποκλίσεις των τιμών των (D) και (S). Ωστόσο, οι τιμές των (D) δεν είναι ακριβώς δεδομένα αναφοράς, καθώς προέρχονται από μια δημοσίευση των Proceedings του SIMMAN και έχουν υπολογιστεί επίσης με προσεγγιστική μεθοδολογία. Επίσης, η δημοσίευση έχει πραγματοποιηθεί με δεδομένα από διαφορετικού είδους ελιγμών (περιστροφική ρυμούλκηση) από αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία (ελεύθερα μοντέλα), και έχει γίνει με μοντέλο υπό διαφορετική κλίμακα. Πιθανώς λοιπόν να εμφανίζονται και επιδράσεις κλίμακας. Τέλος, οι συντελεστές αλληλεπίδρασης γάστρας-προπέλλας και γάστρας-πηδαλίου λήφθηκαν ίδιες με της δημοσίευσης στα πλαίσια της εργασίας αυτής, ενώ πιο σωστό θα ήταν να έχουν εκτιμηθεί πειραματικά υπό τις συνθήκες της δικής μας περίπτωσης.

5 Βιβλιογραφία

5.1 Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

Abkowitz, M.A., 1964, *Lectures on Ship Hydrodynamics – Steering and Maneuverability*, Report No. Hy-5, Hydrodynamics Department, Hydro-og Aerodynamisk Laboratorium, Lyngby, Denmark.

Abkowitz, M.A., 1980, “Measurement of Hydrodynamic Characteristics from Ship Maneuvering Trials by System Identification”, *SNAME Transactions*, Vol. 88, pp 283-318.

Beale et al, 2010, *Neural Network Toolbox™ 7 User's Guide*, The MathWorks, Inc.

Brinati, H. L., 1973, “System Identification Applied to Maneuvering Trials”, MIT Engineers Thesis, Department of Ocean Engineering.

Fossen, T.I., 1994, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons.

Furukawa, Y. et al, “The Prediction of Maneuverability of KVLCC1 and KVLCC2”, SIMMAN 2008, Copenhagen.

Grigoropoulos, G.J. and Theodossiou, D.K.N. , “Harmonizing SEEMP with Effective Vessel Operation”, Athens.

Hayes, M.N., 1971, “Parametric Identification of Nonlinear Stochastic System Applied to Ocean Vehicle Dynamics”, Ph.D Thesis, Department of Ocean Engineering, M.I.T., Cambridge, Mass.

Hess, D., Faller, W. and Lee, J., 2008, “Realtime nonlinear simulation of manoeuvres for US Navy Combatant DTMB 5415”, SIMMAN 2008, Copenhagen.

Martins, P.T. and Lobo, V., “Estimating Maneuvering and Seakeeping Characteristics with Neural Networks”, *OCEANS 2007 – Europe Proceedings*.

Rajesh, G. et al, 2010, “System Identification for Nonlinear Maneuvering of Ships Using Neural Network”, *Journal of Ship Research*, Vol. 54, No.1, pp 1-14.

Ribeiro, M.I., 2004, “Kalman and Extended Kalman Filters: Concept, Derivation and Properties”, Institute for Systems and Robotics, Lisboa, Portugal.

Sano, M. and Yasukawa, H., 2008, “Maneuvering Motions of KVLCC1 and KVLCC2 using MMG model”. SIMMAN 2008, Copenhagen.

Spiegel, M.R., 1975, *Schaum's Outline of Theory and Problems of Probability and Statistics*, McGraw-Hill, New York.

Stern, F. et al, 2011, “Experience from SIMMAN 2008 – The First Workshop on Verification and Validation of Ship Maneuvering Simulation Methods”, *Journal of Ship Research*, Vol. 55, No. 2, pp 135-147.

Sun Young, K. and Yeon Gyu, K., 2008, “Prediction of Maneuvering Performance for KVLCC1 &

KVLCC2 Based on PMM Data”, SIMMAN 2008, Copenhagen.

Szeto, F.F., 1977, “System Identification from Ship Maneuvers in Ocean Currents”, Engineer Thesis, Dept. of Ocean Engineering, M.I.T., Cambridge, Mass.

Viviani, M. et al, 2007, “Identification of Hydrodynamic Coefficients from Standard Maneuvers for a Series of Twin-Screw Ships”, ICMRT, Ischia, Naples, Italy.

Yoshimura, Y., Ueno, M. and Tsukada, Y., 2008, “Analysis of Steady Hydrodynamic Force Components and Prediction of Maneuvering Ship Motion with KVLCC1, KVLCC2, and KCS”, SIMMAN 2008, Copenhagen.

Zaojian, Z., 2006, *Lecture Notes on Ship Maneuvering and Seakeeping*, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University.

5.2 Ελληνική Βιβλιογραφία

Σημειώσεις Μαθήματος, *Δυναμική Πλοίου και Εργαστήριο (Τεύχος Α - Δυναμική Συμπεριφορά Πλοίου σε Κυματισμούς)*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2008.

Σημειώσεις Μαθήματος, *Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου*, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα 2008.

Τζαφέστα, Σ., 2002, *Εισαγωγή στην Τεχνητή Νοημοσύνη και τα Έμπειρα Συστήματα*, Τόμος Α', 3η έκδοση.

6 Παράρτημα Α

```
% Neural Network Training
%*****%
% USER INPUT

% Maneuvers to use for training
train_data =...
{'MARIN_FREE_KVLCC2_tc_-35_m.dat'
'MARIN_FREE_KVLCC2_zz_10_m.dat';
'MARIN_FREE_KVLCC2_tc_35_m.dat';}

% Network Characteristics
delay = 1;
hidden_neurons = 3;
%*****%
%
% Create a Nonlinear Autoregressive Network with External Input
inputDelays = 1:delay;
feedbackDelays = 1:delay;
hiddenLayerSize = hidden_neurons;
net = narxnet(inputDelays,feedbackDelays,hiddenLayerSize);

% View the Network (optional)
view(net);

for ii = 1:1:length(train_data)

% Prepare Training Data
a=importdata(train_data{ii});
data = a.data;

time = data(:,1);
x_position = data(:,2);
y_position = data(:,3);
heel_angle = data(:,4);
heading_angle = data(:,5);
long_velocity = data(:,6);
transv_velocity = data(:,7);
roll_velocity = data(:,8);
yaw_velocity = data(:,9);
delta = data(:,10);
rpm = data(:,11);

input = [delta,long_velocity];
target = [x_position,y_position,transv_velocity,heading_angle,yaw_velocity];

% Preparation of Input and Target Variables

inputSeries = tonndata(input,false,false);
targetSeries = tonndata(target,false,false);

% Prepare the Data for Training and Simulation
% The function PREPARETS prepares timeseries data for a particular network,
% shifting time by the minimum amount to fill input states and layer states.
% Using PREPARETS allows you to keep your original time series data unchanged,
while
% easily customizing it for networks with differing numbers of delays, with
% open loop or closed loop feedback modes.

% Prepare Data for this particular Network
```

```

[inputs,inputStates,layerStates,targets] = preparets(net,inputSeries,
{ },targetSeries);

% Setup Division of Data for Training, Validation, Testing
net.divideParam.trainRatio = 70/100;
net.divideParam.valRatio = 15/100;
net.divideParam.testRatio = 15/100;

% Train the Network
[net,tr] = train(net,inputs,targets,inputStates,layerStates);

% Test the Network (optional)
outputs = net(inputs,inputStates,layerStates);
errors = gsubtract(targets,outputs);
performance = perform(net,targets,outputs)

% Plots
% Uncomment these lines to enable various plots.
%figure, plotperform(tr)
%figure, plottrainstate(tr)
%figure, plotregression(targets,outputs)
%figure, plotresponse(targets,outputs)
%figure, ploterrcorr(errors)
%figure, plotinerrcorr(inputs,errors)

% Clear Variables for next Training Session
clear a;
clear data;
clear time;
clear x_position;
clear y_position;
clear heel_angle;
clear heading_angle;
clear long_velocity;
clear transv_velocity;
clear roll_velocity;
clear yaw_velocity;
clear delta;
clear rpm;
clear input;
clear target;
clear inputSeries;
clear targetSeries;
clear inputs;

% Message to the User
clck = clock;
str1 = sprintf('Training No. %d Completed at %d:%d',ii,clck(4),clck(5));
disp(str1);
end
% Save the trained Network
save 'NN_3.mat' net

```

7 Παράρτημα Β

```
% Neural Network Simulation and Plotting
%*****%
% USER INPUT

% Maneuver to use for Simulation
sim_maneuver = 'MARIN_FREE_KVLCC1_tc_-35_m.dat';

%*****%
load NN_3.mat;
%
% Prepare Simulation Data
a = importdata(sim_maneuver);
data = a.data;

% MARIN data
time = data(:,1);
x_position = data(:,2);
y_position = data(:,3);
heel_angle = data(:,4);
heading_angle = data(:,5);
long_velocity = data(:,6);
transv_velocity = data(:,7);
roll_velocity = data(:,8);
yaw_velocity = data(:,9);
delta = data(:,10);
rpm = data(:,11);

%HSVA data
% time = data(:,1);
% x_position = data(:,2);
% y_position = data(:,3);
% heel_angle = data(:,4);
% heading_angle = data(:,5);
% long_velocity = data(:,6);
% transv_velocity = data(:,7);
% %roll_velocity = data(:,8); (Not Observed.)
% yaw_velocity = data(:,8);
% delta = data(:,9);
% rpm = data(:,10);

input = [delta, long_velocity];
target = [x_position,y_position,heading_angle,transv_velocity,yaw_velocity];

% Preparation of Input and Target Variables

inputSeries = tonndata(input,false,false);
targetSeries = tonndata(target,false,false);

[inputs_run,inputStates,layerStates,targets] = preparets(net,inputSeries,
 {},targetSeries);

% Simulate The Maneuver
output = net(inputs_run);

% Post Processing
output_m = cell2mat(output);
output_m_t = output_m';

x_estim = output_m_t(:,1);
```

```

y_estim = output_m_t(:,2);
head_ang_estim = output_m_t(:,3);
transv_vel_estim = output_m_t(:,4);
yaw_vel_estim = output_m_t(:,5);

for ii=1:1:length(x_estim)
time_wdelay(ii) = time(ii);
end

% Calculation of Estimated Data Shift
x_shift = x_estim(1)-x_position(1);
y_shift = y_estim(1)-y_position(1);
head_ang_shift = head_ang_estim(1)-heading_angle(1);
transv_vel_shift = transv_vel_estim(1)-transv_velocity(1);
yaw_vel_shift = yaw_vel_estim(1)-yaw_velocity(1);

% Shift Heading Angle Data
jj=1;
for jj=1:1:length(x_estim)
    x_estim_sh(jj) = x_estim(jj)-x_shift;
    y_estim_sh(jj) = y_estim(jj)-y_shift;
    head_ang_estim_sh(jj) = head_ang_estim(jj)-head_ang_shift;
end

%Shift Transverse Velocity Data
jj=1;
for jj=1:1:length(x_estim)
    x_estim_sh(jj) = x_estim(jj)-x_shift;
    y_estim_sh(jj) = y_estim(jj)-y_shift;
    transv_vel_sh(jj) = transv_vel_estim(jj)-transv_vel_shift;
end

%Shift Yaw Velocity Data
jj=1;
for jj=1:1:length(x_estim)
    x_estim_sh(jj) = x_estim(jj)-x_shift;
    y_estim_sh(jj) = y_estim(jj)-y_shift;
    yaw_vel_sh(jj) = yaw_vel_estim(jj)-yaw_vel_shift;
end

% Turning Circle Parameters
%-----
ii=1;
jj=1;
kk=1;
for ii = 1:1:length(time)
if (abs(heading_angle(ii))==180)
tt=time(ii);
tact_diameter_1(jj)=sqrt((x_position(ii)-x_position(1))^2 + (y_position(ii)-
y_position(1))^2);
x_tact_1(jj)=x_position(ii);
y_tact_1(jj)=y_position(ii);
jj=jj+1;
end
if (abs(heading_angle(ii))==90)
tt(kk)=time(ii);
x_advance_1(kk)=x_position(ii);
y_advance_1(kk)=y_position(ii);
advance_1(kk)=abs(x_position(ii)-x_position(1));
transfer_1(kk)=abs(y_position(ii)-y_position(1));
kk=kk+1;

```

```

end
end

% ii=1;
% jj=1;
% kk=1;
% for ii = 1:1:length(x_estim)
% if (abs(head_ang_estim_sh(ii))==180)
% tt=time(ii);
% tact_diameter_2(jj)=sqrt((x_estim_sh(ii)-x_estim_sh(1))^2 + (y_estim_sh(ii)-
y_estim_sh(1))^2);
% x_tact_2(jj)=x_estim_sh(ii);
% y_tact_2(jj)=y_estim_sh(ii);
% jj=jj+1;
% end
% if (abs(head_ang_estim_sh(ii))==90)
% tt(kk)=time(ii);
% x_advance_2(kk)=x_estim_sh(ii);
% y_advance_2(kk)=y_estim_sh(ii);
% advance_2(kk)=abs(x_estim_sh(ii)-x_estim_sh(1));
% transfer_2(kk)=abs(y_estim_sh(ii)-y_estim_sh(1));
% kk=kk+1;
% end
% end
%
%
%
% % Printout of Data to Text File
% fid = fopen('Turning Circle Parameters.txt','a');
% fprintf(fid,'Turning Circle Parameters for Maneuver: MARIN_FREE_KVLCC2_tc_-
35_m.dat\n');
% fprintf(fid,'Tactical Diameter (Reference) = %d m \n',tact_diameter_1(1));
% fprintf(fid,'Tactical Diameter (Estimate) = %d m \n',tact_diameter_2(1));
% fprintf(fid,'Advance (Reference) = %d m \n',advance_1(1));
% fprintf(fid,'Advance (Estimate) = %d m \n',advance_2(1));
% fprintf(fid,'Transfer (Reference)= %d m \n\n',transfer_1(1));
% fprintf(fid,'Transfer (Estimate) = %d m \n\n',transfer_2(1));
% fclose(fid);
%-----

% Plotting
%*****%
% set(0,'defaultaxesfontsize',14);
% set(0,'defaulttextfontsize',12);

%Trajectory Plot
figure
plot(x_position,y_position,'black','linewidth',2); hold on;
%plot(x_estim,y_estim,'green','linewidth',2); hold on;
plot(x_estim_sh,y_estim_sh,'red','linewidth',2,'linestyle','--'); hold on;
grid
set(gca,'LineWidth',3)
title('Ship Trajectory KVLCC1 (MARIN TC -35)')
xlabel('X [m]')
ylabel('Y [m]')
legend('Reference','Estimation','Location','Best')
axis equal
saveas(gcf,'Traj_21','jpg')

%Heading Angle Plot

```



```

figure
plot(time,heading_angle,'black','linewidth',2); hold on;
%plot(time_wdelay,head_ang_estim,'green','linewidth',2); hold on;
plot(time_wdelay,head_ang_estim_sh,'red','linewidth',2,'linestyle','--');
grid
set(gca,'LineWidth',3)
title('Heading Angle KVLCC1(MARIN TC -35)')
xlabel('Time [sec]')
ylabel('Heading Angle [degrees]')
legend('Reference','Estimation','Location','Best')
%axis equal
saveas(gcf,'HA_21','jpg')

%Transverse Velocity Plot
figure
plot(time,transv_velocity,'black','linewidth',2); hold on;
%plot(time_wdelay,head_ang_estim,'green','linewidth',2); hold on;
plot(time_wdelay,head_ang_estim_sh,'red','linewidth',2,'linestyle','--');
grid
set(gca,'LineWidth',3)
title('Transverse Velocity KVLCC1(MARIN TC -35)')
xlabel('Time [sec]')
ylabel('Transverse Velocity[degrees]')
legend('Reference','Estimation','Location','Best')
%axis equal
saveas(gcf,'V_21','jpg')

%Yaw Velocity Plot
figure
plot(time,heading_angle,'black','linewidth',2); hold on;
%plot(time_wdelay,head_ang_estim,'green','linewidth',2); hold on;
plot(time_wdelay,head_ang_estim_sh,'red','linewidth',2,'linestyle','--');
grid
set(gca,'LineWidth',3)
title('Yaw Velocity KVLCC1(MARIN TC -35)')
xlabel('Time [sec]')
ylabel('Yaw Velocity [degrees]')
legend('Reference','Estimation','Location','Best')
%axis equal
saveas(gcf,'R_21','jpg')

clear all

```

8 Παράρτημα Γ

```
% System Identification with MMG Model
% USER INPUT
%*****
% Maneuver to use for Simulation
sim_maneuver = 'HSVA_CPMC_KVLCC2_Z_20_10_P.dat';
strtxt = 'HSVA_CPMC_KVLCC2_Z_20_10_P.dat';
%*****

% Prepare Simulation Data
a = importdata(sim_maneuver);
data = a.data;

% MARIN data
% time = data(:,1);
% x_position = data(:,2);
% y_position = data(:,3);
% heel_angle = data(:,4);
% heading_angle = data(:,5);
% long_velocity = data(:,6);
% transv_velocity = data(:,7);
% roll_velocity = data(:,8);
% yaw_velocity = data(:,9);
% delta = data(:,10);
% rpm = data(:,11);

% HSVA data
time = data(:,1);
x_position = data(:,2);
y_position = data(:,3);
heel_angle = data(:,4);
heading_angle = data(:,5);
long_velocity = data(:,6);
transv_velocity = data(:,7);
%roll_velocity = data(:,8); (Not Observed.)
yaw_velocity = data(:,8);
delta = data(:,9);
rpm = data(:,10);

u = long_velocity;
v = transv_velocity;
r = yaw_velocity;

% Drift Angle Calculation
mm=1;
for ii=1:1:length(time)
drift_angle(mm) = radtodeg(-atan(transv_velocity(ii)/long_velocity(ii)));
mm=mm+1;
end

% Ship Characteristics - KVLCC2 (from HSVA Model Test Report)
%*****
% Freshwater Density [kg/m^3], Length [m], Draught [m], Nominal Speed [m/s]
dens=1000;%[kg/m^3]
L=320;%[m]
T=20.8;%[m]
U=15.5*0.5144;%[m/s]
S=27467;%[m^2] Wetted Surface Area
C_T = 4.11*(10^-3); % From NMRI data, for KVLCC2
```

```

% Mass [kg]
m = 320556450;% calculated as Volume*1025

% Center of Gravity [m] (assumed x_G=LCG=LCB)
x_G =11.1;

% Moment of Inertia [kg*m^2]
Izz = 0.25*L;

% Ship Resistance, X(u)
X_res =0.5*dens*C_T*S*U^2;

% Block Coefficient
%C_B = 0.8101; %KVLCC1
C_B = 0.8098; %KVLCC2

% Propeller & Rudder Characteristics
%*****
% Propeller Diameter [m]
D = 9.86;
% Rudder Height [m]
%H_R = 15.73; %check!

% Initial Estimates of Hydrodynamic Coefficients
%*****
x_udt = zeros(1,length(time));
x_vv = zeros(1,length(time));
x_vr = zeros(1,length(time));
x_rr = zeros(1,length(time));

y_vdt =zeros(1,length(time));
y_rdt =zeros(1,length(time));
y_v =zeros(1,length(time));
y_vv =zeros(1,length(time));
y_r =zeros(1,length(time));
y_rr =zeros(1,length(time));
y_vrr =zeros(1,length(time));
y_vvr =zeros(1,length(time));

n_vdt =zeros(1,length(time));
n_rdt =zeros(1,length(time));
n_v =zeros(1,length(time));
n_vv =zeros(1,length(time));
n_r =zeros(1,length(time));
n_rr =zeros(1,length(time));
n_vrr =zeros(1,length(time));
n_vvr =zeros(1,length(time));

% Calculation of Accelerations
%*****
jj=1;
udt = zeros(1,length(time));
vdt = zeros(1,length(time));
rdt = zeros(1,length(time));

for ii=2:1:length(time)-1
udt(jj) = 0.5*((long_velocity(ii)-long_velocity(ii-1))/(time(ii)-time(ii-1))+
(long_velocity(ii+1)-long_velocity(ii))/(time(ii+1)-time(ii)));
vdt(jj) = 0.5*((transv_velocity(ii)-transv_velocity(ii-1))/(time(ii)-time(ii-1))
+(transv_velocity(ii+1)-transv_velocity(ii))/(time(ii+1)-time(ii)));

```

```

rdt(jj) = 0.5*((yaw_velocity(ii)-yaw_velocity(ii-1))/(time(ii)-time(ii-1))+
(yaw_velocity(ii+1)-yaw_velocity(ii))/(time(ii+1)-time(ii)));
jj=jj+1;
end

% Propeller Forces
%*****
% for ii=1:1:length(time)
% r_nd(ii)=r(ii)*(L/U);
% end

t_P = 0.5*C_B - 0.15; %(Danckwardt for cargo ships)

% t_P=1-0.816; % p.54 SIMMAN Proc, Part E
% drift_angle=0;
% x_P_nd=-0.480;
% for ii=1:1:length(time)
%     if((drift_angle-x_P_nd*r_nd(ii))>=0)
%         tau = 2.303;
%         C_P = -0.814;
%     elseif ((drift_angle-x_P_nd*r_nd(ii))<0)
%         tau = 2.369;
%         C_P = -1.312;
%     end
% end

% Propeller Revolutions per Second
n=zeros(1,length(rpm));
for ii=1:1:length(time)
n(ii) = rpm(ii)/60;
end

% Effective Wake Fraction
w_P = 0.75*C_B-0.24; % (Kruger 1976 for cargo ships), emperical, p. 296 R&P

ii=1;
jj=1;
for ii=1:1:length(time)
J_P(jj) = (u(ii)*(1-w_P))/(n(ii)*D);
K_T(jj) = -0.139*J_P(ii)^2-0.275*J_P(ii)+0.293;% p.54 SIMMAN Proc, Part E
X_P(jj) = (1-t_P)*dens*(n(ii)^2)*(D^4)*K_T(ii)*J_P(ii);
a_H(jj) = -0.502*J_P(ii)^2+1.022*J_P(ii)+0.183*J_P(ii);%p. 54, KVLCC2, increase
ratio of lateral hull force induced by steering
jj=jj+1;
end
Y_P = 0;
N_P = 0;

% Rudder Forces and Moment
%*****
eet = 0.6238;% for KVLCC2 from MOERI
epsilon = 0.8; %p.54 SIMMAN Proc, Part E
kx = 0.6; %p.54 SIMMAN Proc, Part E
asp_ratio = 1.84;%p.52
A_R = 136.7; %[m^2]
f_a = (6.13*asp_ratio)/(2.25+asp_ratio); %p.54
%f_a = 2.7578; % assumed same as NMRI (check!)
x_R = -0.5*L;%p.52, Location of Rudder
%x_H = -121.6;% Location of Additional Lateral Hull Force due to Steering
x_H = -0.343*L;%p.54
t_R = 1-0.837; %p.54, assumed same as NMRI (check!)

```

```

ii=1;
jj=1;
for ii=1:1:length(time)
u_P(jj) = u(ii)*(1-w_P);
term_1(jj) =sqrt(1+(8*K_T(ii))/(pi()*J_P(ii)^2)-1);
u_R(jj) = epsilon*u_P(ii)*sqrt(eet*(1+(kx/epsilon)*term_1(jj))^2+(1-eet));
alpha_R(jj) = (5/7)*delta(ii); %assumed 5/7 of ?!
v_R(jj) = (delta(ii)-alpha_R(ii))*u_R(ii);% from eq.(9), p.54 SIMMAN Proc
U_R(jj) = sqrt(u_R(ii)^2+v_R(ii)^2); %Inflow Velocity to the Rudder
%F_N_nd(jj)=(A_R/L^2)*f_a*(U_R(ii)^2)/(U^2)*sin(alpha_R(ii));%Rudder Normal
Force
F_N(jj) = 0.5*dens*A_R*f_a*U_R(ii)^2*sin(alpha_R(ii));
jj=jj+1;
end

ii=1;
jj=1;
for ii=1:1:length(time)
X_R(jj)=- (1-t_R)*F_N(ii)*sin(delta(ii));
Y_R(jj)=- (1+a_H(ii))*F_N(ii)*cos(delta(ii));
N_R(jj)=- (x_R+a_H(ii))*x_H)*F_N(ii)*cos(delta(ii));
jj=jj+1;
end

% Update of Hydrodynamic Coefficients
%*****
% Matrix Ai (coefficients from left-side of equation i=1,2,3)
% Matrix Bi (coefficients from right-side of equation i=1,2,3)
kk=1;
for ii=1:1:length(time)-3
A1 = [udt(ii) v(ii)^2 v(ii)*r(ii) r(ii)^2;...
      udt(ii+1) v(ii+1)^2 v(ii+1)*r(ii+1) r(ii+1)^2;...
      udt(ii+2) v(ii+2)^2 v(ii+2)*r(ii+2) r(ii+2)^2;...
      udt(ii+3) v(ii+3)^2 v(ii+3)*r(ii+3) r(ii+3)^2];

B1 = [m*(udt(ii)-v(ii)*r(ii)-x_G*r(ii)^2)-X_P(ii)-X_R(ii)-X_res;...
      m*(udt(ii+1)-v(ii+1)*r(ii+1)-x_G*r(ii+1)^2)-X_P(ii+1)-X_R(ii+1)-X_res;...
      m*(udt(ii+2)-v(ii+2)*r(ii+2)-x_G*r(ii+2)^2)-X_P(ii+2)-X_R(ii+2)-X_res;...
      m*(udt(ii+3)-v(ii+3)*r(ii+3)-x_G*r(ii+3)^2)-X_P(ii+3)-X_R(ii+3)-X_res];

% Matrix X_updt(updated hydrodynamic coefficients of equation 1)
% X_updt = inv(A1)*B1;
X_updt= A1\B1;
x_udt(kk)=X_updt(1);
x_vv(kk) = X_updt(2);
x_vr(kk) = X_updt(3);
x_rr(kk) = X_updt(4);

%Non-dimensional Values
x_udt_ND(kk) = x_udt(kk)/(0.5*dens*L^3);
x_vv_ND(kk) = x_vv(kk)/(U/(0.5*dens*L^2));
x_vr_ND(kk) = x_vr(kk)/(U/(0.5*dens*L^3));
x_rr_ND(kk) = x_rr(kk)/(U/(0.5*dens*L^4));

A2 = [vdt(ii) rdt(ii) v(ii) v(ii)*abs(v(ii)) r(ii) r(ii)*abs(r(ii))
      v(ii)*r(ii)^2 (v(ii)^2)*r(ii);...
      vdt(ii+1) rdt(ii+1) v(ii+1) v(ii+1)*abs(v(ii+1)) r(ii+1)
      r(ii+1)*abs(r(ii+1)) v(ii+1)*r(ii+1)^2 (v(ii+1)^2)*r(ii+1);...

```

```

    vdt(ii+2) rdt(ii+2) v(ii+2) v(ii+2)*abs(v(ii+2)) r(ii+2)
r(ii+2)*abs(r(ii+2)) v(ii+2)*r(ii+2)^2 (v(ii+2)^2)*r(ii+2);...
    vdt(ii+3) rdt(ii+3) v(ii+3) v(ii+3)*abs(v(ii+3)) r(ii+3)
r(ii+3)*abs(r(ii+3)) v(ii+3)*r(ii+3)^2 (v(ii+3)^2)*r(ii+3)];
%    vdt(ii+4) rdt(ii+4) v(ii+4) r(ii+4) v(ii+4)*abs(v(ii+4))
r(ii+4)*abs(r(ii+4)) v(ii+4)*r(ii+4)^2 (v(ii+4)^2)*r(ii+4);...
%    vdt(ii+5) rdt(ii+5) v(ii+5) r(ii+5) v(ii+5)*abs(v(ii+5))
r(ii+5)*abs(r(ii+5)) v(ii+5)*r(ii+5)^2 (v(ii+5)^2)*r(ii+5);...
%    vdt(ii+6) rdt(ii+6) v(ii+6) r(ii+6) v(ii+6)*abs(v(ii+6))
r(ii+6)*abs(r(ii+6)) v(ii+6)*r(ii+6)^2 (v(ii+6)^2)*r(ii+6);...
%    vdt(ii+7) rdt(ii+7) v(ii+7) r(ii+7) v(ii+7)*abs(v(ii+7))
r(ii+7)*abs(r(ii+7)) v(ii+7)*r(ii+7)^2 (v(ii+7)^2)*r(ii+7)];

B2 = [m*(vdt(ii)+u(ii)*r(ii)+x_G*rdt(ii))-Y_P-Y_R(ii);...
      m*(vdt(ii+1)+u(ii+1)*r(ii+1)+x_G*rdt(ii+1))-Y_P-Y_R(ii+1);...
      m*(vdt(ii+2)+u(ii+2)*r(ii+2)+x_G*rdt(ii+2))-Y_P-Y_R(ii+2);...
      m*(vdt(ii+3)+u(ii+3)*r(ii+3)+x_G*rdt(ii+3))-Y_P-Y_R(ii+3)];

% Matrix Y_updt (updated hydrodynamic coefficients of equation 2)
% Y_updt = inv(A2)*B2;
Y_updt = A2\B2;
y_vdt(kk) = Y_updt(1);
y_rdt(kk) = Y_updt(2);
y_v(kk) = Y_updt(3);
y_vv(kk) = Y_updt(4);
y_r(kk) = Y_updt(5);
y_rr(kk) = Y_updt(6);
y_vrr(kk) = Y_updt(7);
y_vvr(kk) = Y_updt(8);

%Non-dimensional Values
y_v_ND(kk) = y_v(kk) / (0.5*dens*L^2*U);
y_vdt_ND(kk) = y_vdt(kk) / (0.5*dens*L^3);
y_rdt_ND(kk) = y_rdt(kk) / (0.5*dens*L^3*U);
y_vv_ND(kk) = y_vv(kk) / (0.5*dens*L^2);

A3 = [vdt(ii) rdt(ii) v(ii) v(ii)*abs(v(ii)) r(ii) r(ii)*abs(r(ii))
v(ii)*r(ii)^2 (v(ii)^2)*r(ii);...
      vdt(ii+1) rdt(ii+1) v(ii+1) v(ii+1)*abs(v(ii+1)) r(ii+1)
r(ii+1)*abs(r(ii+1)) v(ii+1)*r(ii+1)^2 (v(ii+1)^2)*r(ii+1);...
      vdt(ii+2) rdt(ii+2) v(ii+2) v(ii+2)*abs(v(ii+2)) r(ii+2)
r(ii+2)*abs(r(ii+2)) v(ii+2)*r(ii+2)^2 (v(ii+2)^2)*r(ii+2);...
      vdt(ii+3) rdt(ii+3) v(ii+3) v(ii+3)*abs(v(ii+3)) r(ii+3)
r(ii+3)*abs(r(ii+3)) v(ii+3)*r(ii+3)^2 (v(ii+3)^2)*r(ii+3)];

B3 = [Izz*rdt(ii)+m*x_G*(vdt(ii)+u(ii)*r(ii))-N_P-N_R(ii);...
      Izz*rdt(ii+1)+m*x_G*(vdt(ii+1)+u(ii+1)*r(ii+1))-N_P-N_R(ii+1);...
      Izz*rdt(ii+2)+m*x_G*(vdt(ii+2)+u(ii+2)*r(ii+2))-N_P-N_R(ii+2);...
      Izz*rdt(ii+3)+m*x_G*(vdt(ii+3)+u(ii+3)*r(ii+3))-N_P-N_R(ii+3)];

% Matrix N_updt (updated hydrodynamic coefficients of equation 3)
% N_updt = inv(A3)*B3
N_updt = A3\B3;
n_vdt(kk) = N_updt(1);
n_rdt(kk) = N_updt(2);
n_v(kk) = N_updt(3);
n_vv(kk) = N_updt(4);
n_r(kk) = N_updt(5);
n_rr(kk) = N_updt(6);

```

```

n_vrr(kk)=N_updt(7);
n_vvr(kk)=N_updt(8);

%Non-dimensional Values
n_v_ND(kk)=n_v(kk)/(0.5*dens*L^3*U);
n_vdt_ND(kk)=n_vdt(kk)/(0.5*dens*L^3);
n_vv_ND(kk)=n_vv(kk)/(0.5*dens*L^3);
n_rdt_ND(kk)=n_rdt(kk)/(0.5*dens*L^4);

kk=kk+1;
end

% Plotting
%*****
figure
plot(time,udt,'black','linewidth',2); hold on;
plot(time,vdt,'red','linewidth',2); hold on;
plot(time,rdt,'blue','linewidth',2);
grid
set(gca,'LineWidth',3)
title('Ship Accelerations')
xlabel('Time [sec]')
ylabel('Acceleration[m/s^2]')
legend('udt','vdt','rdt','Location','Best')
%saveas(gcf,'Ship Trajectory_8','jpg')

figure
plot(time,x_udt,'black','linewidth',2);
grid
title('x_{udt}')
xlabel('Time [sec]')
ylabel('x_{udt}')

% Printout of Results to File
%*****
fid = fopen('Results of MMG Code.txt','a');
fprintf(fid,'Results for Maneuver: %s\n',strtxt);
fprintf(fid,'X_udt = %d\n',x_udt(length(x_udt)-3));
fprintf(fid,'X_vv = %d\n',x_vv(length(x_udt)-3));
fprintf(fid,'X_vr = %d\n',x_vr(length(x_udt)-3));
fprintf(fid,'X_rr = %d\n\n',x_rr(length(x_udt)-3));

fprintf(fid,'Y_vdt = %d\n',y_vdt(length(x_udt)-3));
fprintf(fid,'Y_rdt = %d\n',y_rdt(length(x_udt)-3));
fprintf(fid,'Y_v = %d\n',y_v(length(x_udt)-3));
fprintf(fid,'Y_r = %d\n',y_r(length(x_udt)-3));
fprintf(fid,'Y_vv = %d\n',y_vv(length(x_udt)-3));
fprintf(fid,'Y_rr = %d\n',y_rr(length(x_udt)-3));
fprintf(fid,'Y_vrr = %d\n',y_vrr(length(x_udt)-3));
fprintf(fid,'Y_vvr = %d\n\n',y_vvr(length(x_udt)-3));

fprintf(fid,'N_vdt = %d\n',n_vdt(length(x_udt)-3));
fprintf(fid,'N_rdt = %d\n',n_rdt(length(x_udt)-3));
fprintf(fid,'N_v = %d\n',n_v(length(x_udt)-3));
fprintf(fid,'N_r = %d\n\n',n_r(length(x_udt)-3));
fprintf(fid,'N_vv = %d\n',n_vv(length(x_udt)-3));
fprintf(fid,'N_rr = %d\n',n_rr(length(x_udt)-3));
fprintf(fid,'N_vrr = %d\n',n_vrr(length(x_udt)-3));
fprintf(fid,'N_vvr = %d\n\n\n',n_vvr(length(x_udt)-3));

%Non-Dimensional Results

```

```
fprintf(fid, 'Non-D X_udt = %d\n', x_udt_ND(length(x_udt)-3));
fprintf(fid, 'Non-D X_vv = %d\n', x_vv_ND(length(x_udt)-3));
fprintf(fid, 'Non-D X_vr = %d\n', x_vr_ND(length(x_udt)-3));
fprintf(fid, 'Non-D X_rr = %d\n\n', x_rr_ND(length(x_udt)-3));

fprintf(fid, 'Non-D Y_v = %d\n', y_v_ND(length(x_udt)-3));
fprintf(fid, 'Non-D Y_vdt = %d\n', y_vdt_ND(length(x_udt)-3));
fprintf(fid, 'Non-D Y_vv = %d\n', y_vv_ND(length(x_udt)-3));
fprintf(fid, 'Non-D Y_rdt = %d\n\n', y_rdt_ND(length(x_udt)-3));

fprintf(fid, 'Non-D N_vdt = %d\n', n_vdt_ND(length(x_udt)-3));
fprintf(fid, 'Non-D N_rdt = %d\n', n_rdt_ND(length(x_udt)-3));
fprintf(fid, 'Non-D N_v = %d\n', n_v_ND(length(x_udt)-3));
fprintf(fid, 'Non-D N_vv = %d\n', n_vv_ND(length(x_udt)-3));
```