



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ
ΕΛΙΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΠΛΟΙΟΥ

ΕΛΕΝΗ ΓΚΟΛΦΗ / 08104044

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ : ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΣΠΥΡΟΥ

ΑΘΗΝΑ 2013

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή	3
2. Στόχοι.....	5
3. Ιστορική ανασκόπηση.....	6
4. Μαθηματικά μοντέλα.....	18
5. Αποτελέσματα.....	42
6. Συμπεράσματα	81
7. Αναφορές/ Βιβλιογραφία	83
8. Παραρτήματα.....	87

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κ.Σπύρου για τη συνεχή υποστήριξη και ενθάρρυνση που μου προσέφερε σε όλο το διάστημα που διήρκεσε η εργασία καθώς και για τις γνώσεις που απέκτησα στον τομέα της ελκτικότητας πλοίου.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ν.Θεμελή για την καθοριστική συμβολή του στην εκμάθηση του λογισμικού Mathematica και στην επίλυση των προβλημάτων που παρουσιάστηκαν κατά τη χρήση του λογισμικού για τη δημιουργία των υπολογιστικών προγραμμάτων.

Επίσης ευχαριστώ τον κ. Ι.Τίγκα για τις πολύτιμες οδηγίες του και για την παροχή των υπολογιστικών προγραμμάτων Matlab στα οποία βασίστηκαν οι υπολογισμοί για την επίδραση του ανέμου στην ελκτικότητα του πλοίου.

Τέλος ευχαριστώ για τη βοήθειά του τον κ. Ε.Αγγέλου.

1. Εισαγωγή

Η ελικτικότητα ενός πλοίου είναι ένα θεμελιώδες χαρακτηριστικό που επηρεάζει την ασφάλεια της πλεύσης. Τα πλοία ταξιδεύουν από έναν προορισμό σε έναν άλλο ακολουθώντας συγκεκριμένη θαλάσσια διαδρομή. Για να γίνει αυτό με ασφάλεια πρέπει να διαθέτουν επαρκή ελεγχιμότητα ώστε να ανταποκρίνονται στις εντολές που δέχονται. Κατά τη διάρκεια του ταξιδιού συναντούν συχνά φυσικούς περιορισμούς και επιπλέον υπάρχει η ανάγκη να κινηθούν με συγκεκριμένο τρόπο κατά την είσοδο-έξοδο αλλά και κατά την παραμονή τους στους λιμένες. Επομένως είναι αναγκαίο στοιχείο της σχεδίασης να μπορούν να είναι ελέγξιμα. Αυτός είναι από τους κύριους λόγους για τους οποίους εξετάζονται οι ελικτικές δυνατότητες. Είναι σαφές πως η έρευνα για την βελτιστοποίηση και την πρόβλεψη της ελεγχιμότητας πλοίου είναι πάντα ένα επίκαιρο θέμα. Επιπλέον τα τελευταία χρόνια υπάρχουν δύο ζητήματα που αυξάνουν το ενδιαφέρον για τη μελέτη της ελικτικής συμπεριφοράς.

Το πρώτο ζήτημα είναι η υιοθέτηση από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (International Maritime Organization-IMO) του δείκτη EEDI (Energy Efficiency Design Index) ο οποίος θα εφαρμοστεί στα πλοία συμβολαίου ναυπήγησης από 1^{ης} Ιανουαρίου 2013 με στόχο τον έλεγχο των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂ emissions). Για να ικανοποιούν το συγκεκριμένο κανονισμό πολλά πλοία σχεδιάζονται με μικρότερες μηχανές ή επιλέγουν πλεύση με μειωμένη ταχύτητα και τίθεται το ερώτημα κατά πόσο αυτή η πτώση στις ταχύτητες πλεύσης επηρεάζει την ελικτικότητα σε δύσκολες καιρικές συνθήκες και κατά συνέπεια και την ασφάλεια του πλοίου. Για το λόγο αυτό έχει καταβληθεί προσπάθεια από την Επιτροπή Προστασίας Θαλασσιού Περιβάλλοντος (MEPC) του IMO ν' αναπτυχθούν κριτήρια βάσει των οποίων θα υπολογίζεται η ελάχιστη επιτρεπτή ιπποδύναμη για ασφαλή πλεύση σε άσχημο καιρό.

Το δεύτερο ζήτημα είναι το όλο και αυξανόμενο φαινόμενο της θαλάσσιας πειρατείας. Γίνονται πολλές συζητήσεις για την αντιμετώπιση της και ανάμεσα στα μέτρα που έχουν ληφθεί είναι η έκδοση οδηγιών προς τους πλοιοκτήτες, τους διαχειριστές και τους πλοίαρχους γνωστές ως Best Management Practices (BMP). Αυτές οι οδηγίες αφορούν τις ενέργειες που πρέπει να γίνουν πριν και αφού μπει το πλοίο σε γεωγραφική περιοχή αυξημένου κινδύνου ώστε να αποτραπεί μία ενδεχόμενη πειρατεία. Υπάρχει οδηγία με την οποία συνιστάται στον Πλοίαρχο, προκειμένου να αποφευχθεί επικείμενη επιβίβαση των πειρατών στο πλοίο, να επιχειρεί συνεχή και μικρά ζιγκ-ζαγκ, χωρίς όμως αυτοί οι ελιγμοί να προκαλούν σημαντική μείωση στην ταχύτητα του πλοίου. Επιπλέον συνιστάται ο Πλοίαρχος να είναι πλήρως εξοικειωμένος με τον χειρισμό και τα ελικτικά χαρακτηριστικά του πλοίου και δεν θα πρέπει να περιμένει μέχρι να δεχτούν επίθεση για να εξετάσει τις ελικτικές δυνατότητες του πλοίου.

Από όλα τα παραπάνω γίνεται κατανοητό γιατί αξίζει να μελετηθούν οι ελικτικές δυνατότητες ενός πλοίου. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται χρήση μαθηματικών μοντέλων σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για την πρόβλεψη της ελικτικής συμπεριφοράς πλοίων και την αξιολόγησή της συγκρινόμενη με τα ισχύοντα πρότυπα ελικτικών ικανοτήτων (MSC137(76)). Η αριθμητική προσομοίωση, χρησιμοποιώντας ένα μαθηματικό μοντέλο, είναι μία χρήσιμη μέθοδος για το προσδιορισμό της ελικτικής συμπεριφοράς τόσο κατά το στάδιο της σχεδίασης του πλοίου όσο και μετά την κατασκευή του, αφού δεν είναι πάντα εφικτή η πραγματοποίηση δοκιμών πλήρους κλίμακας.

Στα πλαίσια της εργασίας μελετήθηκε αρχικά η συμπεριφορά ενός δυναμικά ευσταθούς, ως προς την ικανότητα διατήρησης πορείας, πλοίου σε όλους τους ελιγμούς που απαιτούν οι ισχύοντες κανονισμοί. Μετά εξετάστηκαν οι ελκτικές δυνατότητες ενός VLCC και η επίδραση της διαγωγής σε αυτές. Οι μελέτες αυτές βασίστηκαν σε κώδικες (υπολογιστικά προγράμματα) που αναπτύχθηκαν στη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας στο περιβάλλον λογισμικού *Wolfram Mathematica*. Στη συνέχεια για το υπό μελέτη πλοίο επεκτάθηκε ο κώδικας ώστε να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του ανέμου στην περίπτωση που αυτό εκτελεί ελιγμό σταματήματος. Επιπλέον εξετάστηκε, με τον ίδιο κώδικα, ο ελιγμός σταματήματος για ένα δεύτερο δεξαμενόπλοιο και εξετάστηκαν και οι υπόλοιποι ελιγμοί υπό την επίδραση ανέμου, χρησιμοποιώντας κατάλληλα τροποποιημένο κώδικα σε περιβάλλον *MATLAB*, ο οποίος είχε αρχικά αναπτυχθεί από τους Spyrou & Tigkas (2007, 2008).

2. Στόχοι

Κύριος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η δημιουργία σειράς υπολογιστικών προγραμμάτων τα οποία θα αποτελούν ένα χρήσιμο εργαλείο για τη μελέτη των ελικτικών ικανοτήτων όπως αυτές εξετάζονται από τα κριτήρια του IMO (MSC137(76)). Τα υπολογιστικά προγράμματα αυτά πρέπει να δίνουν τη δυνατότητα να εξετάζεται άμεσα κατά πόσο ένα πλοίο ικανοποιεί τους κανονισμούς, συμπεριλαμβανομένης της ικανότητας σταματήματος. Επιπλέον, πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα να αξιολογείται η ελικτική συμπεριφορά του πλοίου σε περιπτώσεις διαφορετικής φόρτωσης που έχει επίπτωση στο βύθισμα και στη διαγωγή. Η μελέτη πρέπει να μπορεί να καλύψει τόσο τα δυναμικά ευσταθή όσο και τα δυναμικά ασταθή πλοία. Διαφοροποιήσεις σε επιλογές που αφορούν το πηδάλιο πρέπει να γίνονται αντιληπτές από τον κώδικα.

Άλλος στόχος της εργασίας είναι να χρησιμοποιήσουμε τα προγράμματα που θα δημιουργηθούν ώστε να μελετηθεί η ελικτική συμπεριφορά πλοίων υπό την επίδραση περιβαλλοντικών επιδράσεων και να διερευνηθεί αν μπορούν να προκύψουν κάποια νέα, χρήσιμα συμπεράσματα. Ειδικότερα, θα γίνει προσπάθεια επέκτασης των υπολογιστικών προγραμμάτων ώστε να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση του ανέμου στους ελιγμούς και να διαπιστωθεί αν η εφαρμογή των κριτηρίων που εφαρμόζονται για την ήρεμη κατάσταση συνεχίζει να έχει νόημα για την περίπτωση αυτή.

3. Ιστορική ανασκόπηση

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια ιστορική ανασκόπηση σχετικά με μελέτες που έχουν γίνει για τη μοντελοποίηση των ελιγμών που εκτελεί ένα πλοίο. Επιπλέον θα γίνει αναφορά στα ισχύοντα πρότυπα ελικτικών ικανοτήτων όπως αυτά ορίζονται από τον IMO.

Χαρακτηριστικές μελέτες μοντελοποίησης ελιγμών

Σε μια χρονική περίοδο που δεν υπήρχαν κοινώς αποδεκτά πρότυπα ελικτικότητας ο **Clarke** (1982) μελετά την εφαρμογή κριτηρίων ελικτικότητας στη σχεδίαση της γάστρας χρησιμοποιώντας γραμμική θεώρηση. Οι εξισώσεις κίνησης που εφαρμόζει στο μαθηματικό του μοντέλο είναι οι δευτεροτάξιες εξισώσεις του Nomoto αναφορικά με το yaw και το sway.

Εξετάζει διάφορες μεθόδους για τον υπολογισμό των υδροδυναμικών παραγώγων της ταχύτητας και της επιτάχυνσης, ώστε να μπορούν να υπολογιστούν γνωρίζοντας τη γεωμετρία της γάστρας και να μην απαιτείται η εκτέλεση πειραμάτων, τα οποία είναι δαπανηρά και χρονοβόρα. Ανάμεσα στις μεθόδους είναι και αυτή του **Inoue** (1981), η οποία έχει προκύψει από δοκιμές μοντέλων προσαρμοσμένων σε φορείο με περιστρεφόμενο βραχίονα. Οι ημιεμπειρικοί τύποι του Inoue αφορούν τις υδροδυναμικές παραγώγους της ταχύτητας και επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα να εφαρμοστούν, με κατάλληλη διόρθωση, σε περιπτώσεις που το πλοίο εμφανίζει διαγωγή.

Στη συνέχεια της μελέτης του, σχετικά με τις υδροδυναμικές παραγώγους, ο Clarke εφαρμόζει τη μέθοδο της παλινδρομικής ανάλυσης σε αποτελέσματα πειραμάτων με περιστρεφόμενο βραχίονα και με μηχανισμό επίπεδης κίνησης. Με τη μέθοδο αυτή παράγει τύπους υπολογισμού των υδροδυναμικών συντελεστών της ταχύτητας και της επιτάχυνσης. Για να εκτιμήσει την εγκυρότητα τους κάνει σύγκριση με δεδομένα από δοκιμές πλήρους κλίμακας τις οποίες πραγματοποίησε ο Nomoto. Γενικά φαίνεται να υπάρχει καλή συμφωνία ανάμεσα στα θεωρητικά και τα πειραματικά αποτελέσματα. Τυχόν αποκλίσεις δικαιολογούνται από το γεγονός ότι ο Clarke χρησιμοποίησε γραμμική ανάλυση, σύμφωνα με την οποία η ταχύτητα σε surge παραμένει σταθερή, ενώ στην πραγματικότητα εμφανίζει πτώση.

Αφού λοιπόν προέκυψαν ικανοποιητικά αποτελέσματα, θα χρησιμοποιήσει τους τύπους για να εξετάσει την επίδραση της γεωμετρίας της γάστρας σε τρία απλά κριτήρια ελικτικότητας. Το πρώτο κριτήριο αξιολογεί την ικανότητα στροφής του πλοίου με χρήση ενός δείκτη. Το δεύτερο κριτήριο αφορά τη δυναμική ευστάθεια του πλοίου, ενώ το τρίτο κριτήριο την ενεργητική πηδαλιούχηση.

Για τον υπολογισμό των υδροδυναμικών παραγώγων του πηδαλίου εφαρμόζει εξισώσεις που λαμβάνουν υπόψη την επιφάνεια του πηδαλίου αλλά για την κλίση της καμπύλης άνωσης του πηδαλίου και τον λόγο της ταχύτητας του ρευστού προς την ταχύτητα του πλοίου χρησιμοποιεί μία προσεγγιστική τιμή.

Οι τεχνικές που χρησιμοποίησε ο Clarke βασίζονται σε γραμμικές εξισώσεις κίνησης και ισχύουν μόνο για ελιγμούς που δεν είναι έντονοι και που προκύπτουν από μικρές γωνίες πηδαλίου. Αναγνωρίζει ότι η σωστή μαθηματική μοντελοποίηση της ελικτικής συμπεριφοράς του πλοίου απαιτεί πολύπλοκες μη γραμμικές εξισώσεις, όμως έτσι αυξάνεται ο αριθμός των συντελεστών στις εξισώσεις. Θεωρεί ότι ο εμπειρικός προσδιορισμός των συντελεστών αυτών, σε πρώιμο στάδιο σχεδίασης, είναι αδύνατος χωρίς την πραγματοποίηση δοκιμών με μοντέλα. Με αυτήν την

προσέγγιση δικαιολογεί την χρήση της γραμμικής θεωρίας. Υποστηρίζει ότι είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθούν περισσότερες δοκιμές ελικτικότητας με μοντέλα ώστε αυτές να παρέχουν πιο ακριβείς εμπειρικές εκτιμήσεις των παραγώγων και όχι να πραγματοποιούνται ως απαραίτητο κομμάτι της αρχικής σχεδίασης.

Την περίοδο 1976-1980 μία Ιαπωνική ερευνητική ομάδα, που ονομάστηκε “Mathematical Modeling Group” (MMG), πρότεινε μία νέα ιδέα για τη μαθηματική μοντελοποίηση της ελικτικής συμπεριφοράς του πλοίου. Το μοντέλο τους αποτελείται από ανεξάρτητη μοντελοποίηση των χαρακτηριστικών της γάστρας, της έλικας και του πηδαλίου λαμβάνοντας όμως υπόψη τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους.(Yoshimura (2005))

Ο Mikelis (1985), παρακινούμενος από την διεθνή προσπάθεια θέσπισης κανονισμών αξιολόγησης των ελικτικών ικανοτήτων του πλοίου από τα αρχικά στάδια της σχεδίασης, παρουσιάζει ένα ολοκληρωμένο μαθηματικό μοντέλο πρόβλεψης. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο έχοντας ως δεδομένα τη γεωμετρία της γάστρας, της έλικας και του πηδαλίου μπορούν να υπολογιστούν εύκολα μέσω υπολογιστικού προγράμματος η αντίσταση, η πρόωση και υδροδυναμικά στοιχεία τα οποία είναι απαραίτητα για την προσομοίωση της ελικτικής συμπεριφοράς. Το μοντέλο περιλαμβάνει τις κινήσεις του πλοίου σε surge, sway, yaw και roll, αν και είναι πολύ συνηθισμένο στις μελέτες ελικτικότητας αργών ογκωδών πλοίων να παραλείπεται η επίδραση του roll.

Σε παλαιότερες μελέτες ο υπολογισμός των υδροδυναμικών δυνάμεων και ροπών της γάστρας περιοριζόταν σε εξισώσεις με μόνο γραμμικούς όρους. Αυτό δημιουργούσε εξισώσεις όπου η κίνηση σε surge ήταν αποσύζευγμένη από αυτές του sway και του yaw και είχε ως αποτέλεσμα ανεπαρκείς προβλέψεις. Στην εργασία του Mikelis οι γραμμικοί όροι δεν παραλείπονται και έτσι τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι πιο κοντά στα πραγματικά.

Σχετικά με τις υδροδυναμικές παραγώγους της ταχύτητας, οι οποίες εμφανίζονται στις εξισώσεις των δυνάμεων τις γάστρας, χρησιμοποιούνται για τις γραμμικές παραγώγους οι εκφράσεις του Clarke (1982) και για τις μη γραμμικές παραγώγους οι εκφράσεις του Inoue (1981). Επίσης ο υπολογισμός της αντίστασης γίνεται κατά Holtrop & Mennen. Για τον υπολογισμό των συντελεστών ώσης και ροπής της έλικας χρησιμοποιούνται οι πολυωνυμικές συναρτήσεις της σειράς Wageningen B. Τέλος για τη μοντελοποίηση του πηδαλίου ακολουθείται η ιαπωνική προσέγγιση.

Για να αξιολογήσει την αξιοπιστία του μοντέλου του ο Mikelis χρησιμοποίησε ως μέτρο σύγκρισης τα αποτελέσματα των δοκιμών πλήρους κλίμακας για το δεξαμενόπλοιο ESSO OSAKA, που πραγματοποιήθηκαν το 1977 και δημοσιεύτηκαν το 1979. Τα αποτελέσματα των δοκιμών ήταν πλήρη και καλά τεκμηρωμένα και για αυτό το λόγο επιλέχθηκαν από τον Mikelis όπως και από πολλούς ερευνητές αργότερα. Η σύγκριση ανάμεσα στα υπολογιστικά αποτελέσματα και τις μετρήσεις πλήρους κλίμακας έγινε για δύο είδη ελιγμών, τον κύκλο στροφής (με γωνία πηδαλίου 35°) και το zig-zag (10°/10°, 20°/20°) και έδειξε ικανοποιητική συμφωνία.

Ο Spyrou (1990), στη μελέτη του σχετικά με την αξιολόγηση της ελικτικότητας πλοίου, επιλέγει να χρησιμοποιήσει για τη μοντελοποίηση των δυνάμεων του πηδαλίου μοντελοποίηση που βασίζεται σε αυτήν που πρότεινε η ιαπωνική ομάδα (MMG). Επιπλέον σε αυτή τη μελέτη γίνεται αναφορά στην επίδραση της διαγωγής στην ελικτική συμπεριφορά. Αναφέρονται για τις

υδροδυναμικές παραγώγους οι τύποι του Inoue (1981), οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη τη διαγωγή του πλοίου καθώς και οι αντίστοιχοι τύποι που προτάθηκαν από τους Fedyaevsky and Sobolev (1964). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι συγκεκριμένοι τύποι του Inoue για τις υδροδυναμικές παραγώγους δημοσιεύτηκαν πρώτη φορά το 1978.

Πρότυπα ελικτικών ικανοτήτων

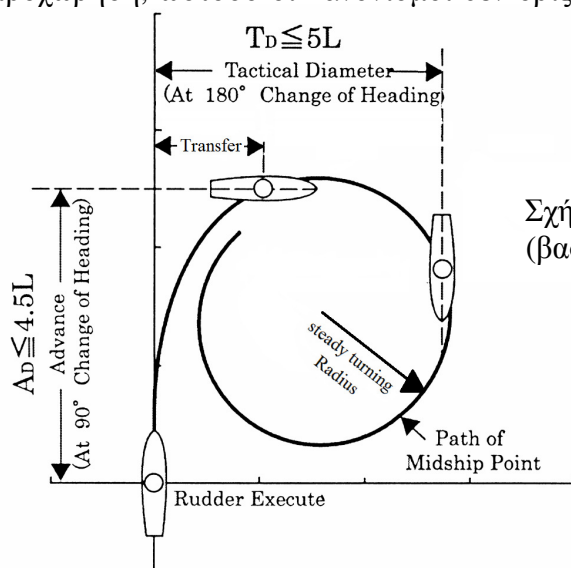
Παρόλο που οι ελικτικές ικανότητες απασχόλησαν την επιτροπή ασφαλείας του IMO από την ίδρυσή της (1968) μόλις το 1993 υιοθετήθηκαν πρότυπα ελικτικής συμπεριφοράς (Διακήρυξη A.751(18)). Σκοπός των προτύπων ήταν η ασφάλεια της ναυσιπλοΐας και η ενίσχυση της προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος, με άλλα λόγια σκοπός τους ήταν η πρόληψη θαλάσσιων ατυχημάτων. Η ισχύς τους ήταν προσωρινή και το 2002 μετά από μια σειρά συζητήσεων και μελετών δέχτηκαν μικρές τροποποιήσεις και οριστικοποιήθηκαν (Διακήρυξη MSC 137(76)).

Ακολουθεί σύντομη παρουσίαση των κριτηρίων της Διακήρυξη MSC 137(76) που ισχύουν μέχρι σήμερα και εντοπισμός των διαφορών της από τα κριτήρια της Διακήρυξης A.751(18). Στη συνέχεια αναφέρονται κάποιες προτάσεις στις οποίες στηρίχτηκαν αυτές οι τροποποιήσεις της Διακήρυξης A.751(18).

Οι δοκιμές που πρέπει να εκτελούνται σύμφωνα με τα πρότυπα είναι ο κύκλος στροφής, το zig-zag και ο ελιγμός σταματήματος.

Για την εκτέλεση του **κύκλου στροφής (turning circle)** εφαρμόζεται η ακόλουθη διαδικασία : σε πλοίο το οποίο ταξιδεύει σε ευθεία πορεία με σταθερή ταχύτητα εφαρμόζεται εκτροπή του πηδαλίου από μηδενική γωνία στις 35° ή στη μέγιστη επιτρεπόμενη. Η εκτροπή διατηρείται όσο χρονικό διάστημα απαιτείται για να πραγματοποιηθεί ο κύκλος και να μετρηθούν τα απαιτούμενα μεγέθη.

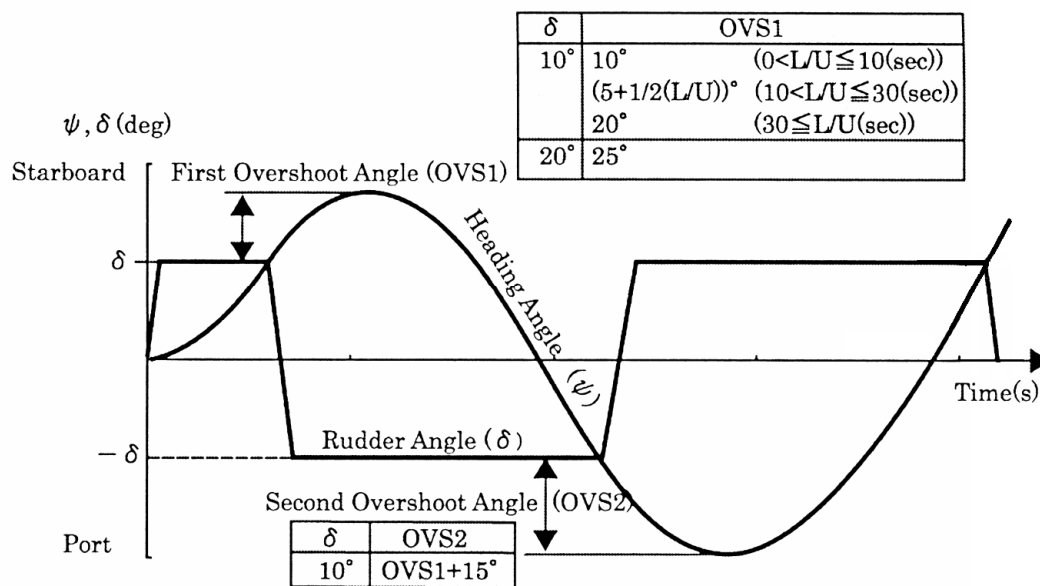
Τα μεγέθη που αξιολογούνται είναι η προχώρηση (advance) και η τακτική διάμετρος (tactical diameter). Προχώρηση ονομάζεται η απόσταση που ταξιδεύει το πλοίο, μετρούμενη από το μέσο του, στην κατεύθυνση της αρχικής του πορείας από τη στιγμή που δίνεται η εντολή για εκτροπή του πηδαλίου μέχρι η γωνία πορείας του πλοίου να γίνει 90°. Τακτική διάμετρος ονομάζεται η απόσταση που ταξιδεύει το πλοίο, μετρούμενη από το μέσο του, από τη στιγμή που δίνεται η εντολή για εκτροπή του πηδαλίου μέχρι η γωνία πορείας του πλοίου να γίνει 180°. Μετρείται κάθετα στην κατεύθυνση της αρχικής πορείας του πλοίου. Σύμφωνα με τα πρότυπα η προχώρηση δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 4.5 μήκη πλοίου (L) και η τακτική διάμετρος τα 5 μήκη πλοίου (L). Δύο ακόμα ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά είναι η διάμετρος του τελικού κύκλου στροφής (steady turning radius) και η μεταφορά (transfer), η οποία είναι η κάθετη απόσταση από την αρχική πορεία του πλοίου και μετρείται την ίδια χρονική στιγμή με την προχώρηση, ωστόσο οι κανονισμοί δεν ορίζουν κάποια απαίτηση για αυτά τα μεγέθη.



Σχήμα 1: Ικανότητα στροφής (βασισμένο σε Kijima, 2002)

Η ικανότητα ανακοπής στροφής και διατήρησης πορείας αξιολογείται με τη δοκιμή zig-zag. Σε πλοίο το οποίο ταξιδεύει αρχικά σε ευθεία πορεία, με σταθερή ταχύτητα, εφαρμόζεται εκτροπή του πηδαλίου από μηδενική γωνία στις δ° (συνήθως 10° ή 20°). Διατηρείται σταθερή η εκτροπή του πηδαλίου μέχρι η γωνία πορείας του πλοίου να γίνει δ° , τότε στρέφεται το πηδάλιο στις $-\delta^\circ$ από την αρχική πορεία. Διατηρώντας σταθερή τη γωνία πηδαλίου στις $-\delta^\circ$, το πλοίο θα συνεχίσει να στρέφεται στην αρχική πορεία με επιβραδυνόμενο ρυθμό στροφής. Στη συνέχεια ανταποκρινόμενο στο πηδάλιο το πλοίο θα στραφεί αντίθετα. Όταν το πλοίο αποκτήσει γωνία πορείας $-\delta^\circ$ από την αρχική, το πηδάλιο θα στραφεί ξανά στις δ° .

Σύμφωνα με τα πρότυπα η δοκιμή πραγματοποιείται για γωνία 10° οπότε και πρόκειται για δοκιμή $10^\circ/10^\circ$ zig-zag και για γωνία 20° οπότε και πρόκειται για δοκιμή $20^\circ/20^\circ$ zig-zag. Τα μεγέθη που μετρώνται είναι η πρώτη και η δεύτερη γωνία υπέρβασης (first & second overshoot angles). Ως γωνία υπέρβασης ορίζεται η διαφορά της μέγιστης γωνίας πορείας του πλοίου (ψ_{max}) από τη γωνία του πηδαλίου (δ°) όπως φαίνεται και στο Σχήμα. Επιπλέον στο Σχήμα 2 φαίνονται και οι απαιτήσεις του αρχικού κανονισμού (1993) ενώ στον Πίνακα 1 φαίνονται οι ισχύουσες απαιτήσεις.

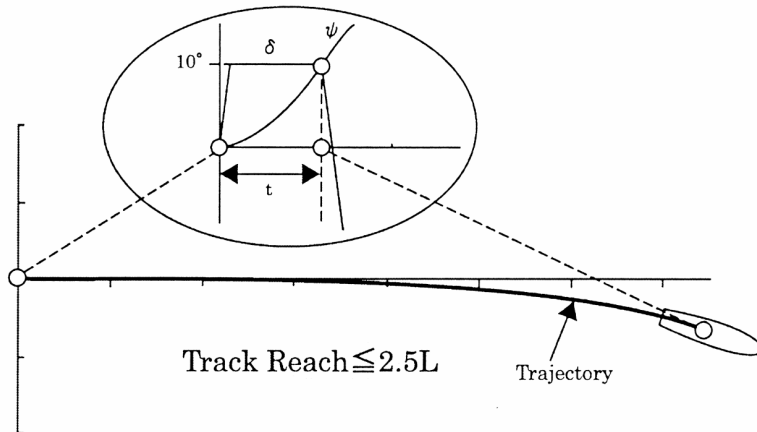


Σχήμα 2: Δοκιμή zig-zag (βασισμένο σε Kijima, 2002), (γωνίες υπέρβασης σύμφωνα με τη Διακήρυξη A.751(18))

Πίνακας 1: Γωνίες υπέρβασης σύμφωνα με τη Διακήρυξη MSC 137(76)

δ	OVS1	OVS2
10°	$< 10^\circ$ ($0s < L/U < 10s$)	$< 25^\circ$ ($0s < L/U < 10s$)
	$< 5^\circ + 0.5 L/U$ ($^\circ$) ($10s \leq L/U < 30s$)	$< 17.5^\circ + 0.75 L/U$ ($^\circ$) ($10s \leq L/U < 30s$)
	$< 20^\circ$ ($30s \leq L/U$)	$< 40^\circ$ ($30s \leq L/U$)
20°	$< 25^\circ$	

Η **ικανότητα στροφής στο αρχικό στάδιο** ελέγχεται με έναν ελιγμό ο οποίος μπορεί να θεωρηθεί ότι ανήκει είτε στη κατηγορία του κύκλου στροφής είτε στην κατηγορία του ελιγμού zig-zag. Σε πλοίο το οποίο ταξιδεύει σε ευθεία πορεία με σταθερή ταχύτητα εφαρμόζεται εκτροπή του πηδαλίου από μηδενική γωνία στις 10° και μετράται ο χρόνος και η απόσταση-τροχιά που ταξιδεύει το πλοίο (track reach) έως τη στιγμή που η γωνία πορείας του γίνει 10° . Το κριτήριο ορίζει ότι το πλοίο θα πρέπει να έχει ταξιδέψει μέχρι 2.5 μήκη πλοίου (L), από την αρχή του ελιγμού μέχρι να αποκτήσει γωνία πορείας 10° .

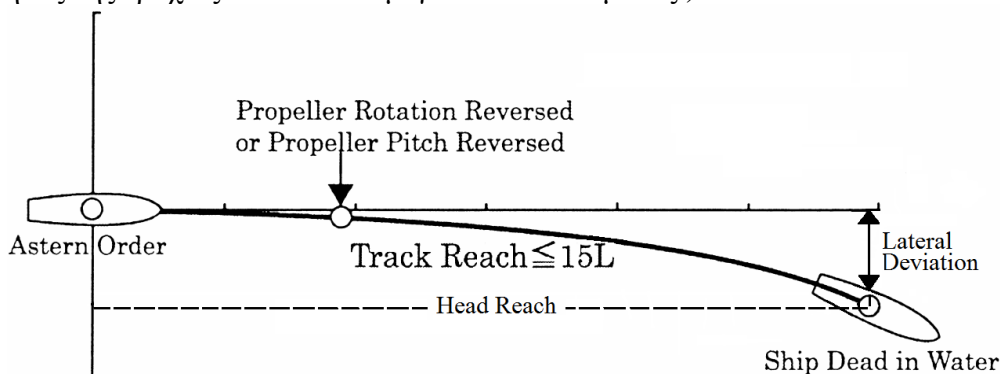


Σχήμα 3: Ικανότητα στροφής στο αρχικό στάδιο (Kijima, 2002)

Ο **ελιγμός σταματήματος** (crash-stop ή crash-astern) είναι κυρίως ένας έλεγχος της λειτουργίας της μηχανής και της αντιστροφής της έλικας. Εκτελείται από μέγιστη αρχική ταχύτητα επιβάλλοντας μέγιστη ανάποδη ώση και ολοκληρώνεται όταν το πλοίο ακινητοποιηθεί.

Τα μεγέθη που μετρώνται είναι το μήκος της τροχιάς (track reach) και ο χρόνος μέχρι το πλοίο να σταματήσει. Επίσης αξιόλογο μέγεθος είναι η πλευρική απόκλιση (lateral deviation) αλλά είναι πολύ ευαίσθητο στην επίδραση το ανέμου.

Το μήκος τροχιάς στον συγκεκριμένο ελιγμό δεν πρέπει να ξεπερνά τα 15 μήκη πλοίου (L). Ωστόσο αυτή η τιμή μπορεί να τροποποιηθεί από την Αρχή, σε περιπτώσεις πλοίων μεγάλου εκτοπίσματος, αλλά δε μπορεί σε καμία περίπτωση να ξεπερνάει τα 20 μήκη πλοίου. (Στα πρότυπα του 1993 δεν υπήρχε ο περιορισμός των 20 μηκών πλοίου, αναφερόταν μόνο ότι ήταν αρμοδιότητα της Αρχής να αξιολογήσει το μήκος της τροχιάς των πλοίων μεγάλου εκτοπίσματος.)



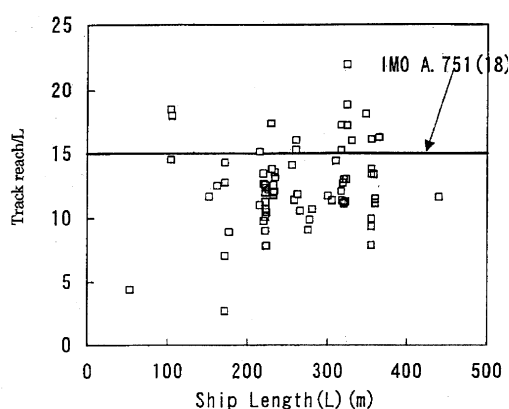
Σχήμα 4 : Απόσταση Σταματήματος (βασισμένο σε Kijima, 2002)

Μετά την υιοθέτηση των προσωρινών προτύπων ελικτικής συμπεριφοράς (Διακήρυξη Α.751(18)) ακολούθησε μία σειρά μελετών που αφορούσε τη σύγκριση της συμπεριφοράς των υπαρχόντων πλοίων με αυτή που όριζαν τα πρότυπα. Κυριότερες είναι η προσπάθειες από την ιαπωνική και από την κορεατική πλευρά.

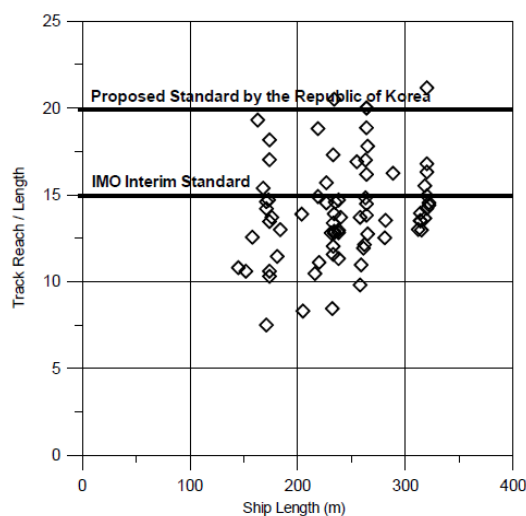
Η **Ιαπωνία** το 1998 υπέβαλε στον IMO πρόταση (MSC 70/20/6) για αναθεώρηση των προτύπων. Η πρόταση βασιζόταν σε δοκιμές πλήρους κλίμακας για περισσότερα από 200 πλοία. Σύμφωνα με την μελέτη αυτή, πλοία με καλή ελικτική συμπεριφορά δεν ικανοποιούσαν τα πρότυπα. Η ιαπωνική ομάδα εστίασε στα κριτήρια της δεύτερης γωνίας υπέρβασης σε δοκιμή 10°/10° και της πρώτης γωνίας υπέρβασης σε δοκιμή 20°/20° zig-zag, γιατί θεωρούσαν πως δεν είχαν εξεταστεί πλήρως από πειραματική και θεωρητική σκοπιά. Αμφισβήτησαν την αξιοπιστία των συγκεκριμένων κριτηρίων γιατί σε ορισμένες περιπτώσεις εμφάνιζαν πλοία με καλή ελικτική συμπεριφορά ως πλοία περιορισμένης ελικτικότητας. Σύμφωνα με τις δοκιμές ένας σημαντικός αριθμός πλοίων που δεν ικανοποιούσαν τα δύο υπό αμφισβήτηση κριτήρια κατάφερε να ικανοποιήσει την πρώτη γωνία υπέρβασης σε δοκιμή 10°/10°.

Ένα άλλο κριτήριο που έκριναν ότι έπρεπε να βελτιωθεί ήταν η ικανότητα σταματήματος, αφού πολλά πλοία μεγαλύτερα των 200 μέτρων δεν ικανοποιούσαν την απαίτηση (Σχήμα 5). Πρότειναν να τροποποιηθεί το κριτήριο λαμβάνοντας υπόψη μελέτες που περιλαμβάνουν παραμέτρους όπως το εκτόπισμα και η ιπποδύναμη του πλοίου.

Η **Κορέα** υπέβαλε το 2001 την πρόταση της (DE 45/3) στον IMO. Για τη μελέτη τους εξέτασαν την ελικτική συμπεριφορά 75 πλοίων. Υποστήριξαν την άποψη ότι το κριτήριο για το μήκος σταματήματος και το κριτήριο για την δεύτερη γωνία υπέρβασης σε δοκιμή 10°/10° ήταν τα πιο αυστηρά. Πρότειναν να τροποποιηθεί το κριτήριο σταματήματος από τα 15 μήκη πλοίου στα 20 (Σχήμα 6). Θεώρησαν πως τα κριτήρια για την πρώτη και τη δεύτερη γωνία υπέρβασης στον ελιγμό 10°/10° ήταν καλοί δείκτες της ικανότητας ανακοπής στροφής και διατήρησης πορείας, και πως το κριτήριο για ελιγμό 20°/20° ήταν πλεονάζον. Ωστόσο πρότειναν να αλλάξουν οι τιμές των κριτηρίων της δοκιμής 10°/10° και θεώρησαν πως η κατηγοριοποίηση των τιμών για αυτά τα κριτήρια με βάση το λόγο μήκους προς ταχύτητα του πλοίου (L/V) δεν ήταν τεκμηριωμένη.



Σχήμα 5: Αποτελέσματα δοκιμών σταματήματος από θαλάσσιες δοκιμές, (Ιαπωνία)/(MSC 70/20/6)



Σχήμα 6: Αποτελέσματα δοκιμών σταματήματος από θαλάσσιες δοκιμές, (Κορέα)/(DE 45/3)

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι σε κατάσταση ανάγκης, προκειμένου να αποφευχθεί σύγκρουση, σπάνια εφαρμόζεται ο ελιγμός σταματήματος. Εφόσον υπάρχει διαθέσιμος χώρος στρέφεται το πηδάλιου σε μέγιστη γωνία και εκτελείται στροφή, αφού στην περίπτωση αυτή η απόσταση που διανύει το πλοίο στην κατεύθυνση της αρχικής πορείας είναι πολύ μικρότερη από αυτήν που διανύει με τον ελιγμό σταματήματος. Ωστόσο η δοκιμή σταματήματος είναι ένας καθιερωμένος έλεγχος της λειτουργίας της μηχανής και τα αποτελέσματα είναι χρήσιμα ως σχετικό μέτρο της ικανότητας σταματήματος.

Ο **Norrbin** (1998) μελέτησε τη διαδικασία σταματήματος βασιζόμενος και σε πειραματικά δεδομένα από πειράματα σε μοντέλα και από δοκιμές πλήρους κλίμακας και παρουσίασε ένα τύπο υπολογισμού του μέγιστου μήκους τροχιάς σταματήματος.

Ο **Yoshimura** (1994) παρουσίασε ένα μαθηματικό μοντέλο για την πρόβλεψη της απόστασης και του χρόνου σταματήματος και επιβεβαίωσε την αξιοπιστία του χρησιμοποιώντας αποτελέσματα από δοκιμές πλήρους κλίμακας. Επίσης παρατήρησε ότι η αδιάστατη απόσταση και ο αδιάστατος χρόνος σταματήματος είναι σχεδόν ανάλογα του λόγου του εκτοπίσματος του πλοίου προς την ισχύ της κύριας μηχανής και του τετραγώνου της αρχικής ταχύτητας του πλοίου. Τέλος, σχολίασε την αυστηρότητα του κανονισμού (Διακήρυξη A.751(18)) για το μήκος σταματήματος των μεγάλων πλοίων, όπως τα VLCC, και τόνισε πως το κριτήριο αυτό πρέπει να επανεξεταστεί.

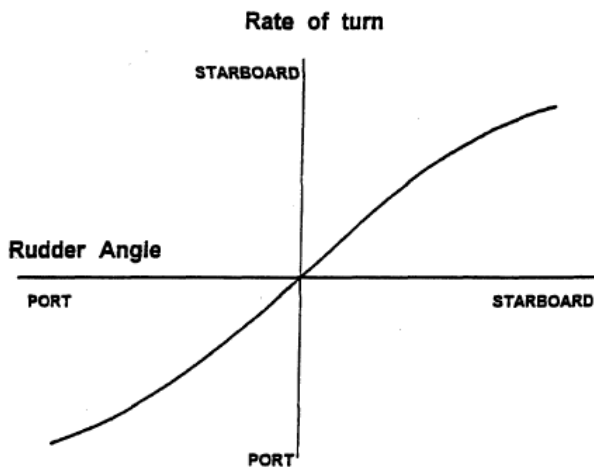
Οι **Clarke and Wellman** (1971) θεώρησαν πως κατά τη διάρκεια του σταματήματος το πλοίο παραμένει στην αρχική του πορεία και επομένως μοντελοποίησαν μόνο την εξίσωση του surge. Η υπόθεση αυτή είναι συνήθης στο στάδιο της αρχικής σχεδίασης. Επίσης θεώρησαν πως η ώση της έλικας αλλάζει γραμμικά από την πρόσω στην όπισθεν, κατά το σύντομο χρονικό διάστημα που απαιτείται για την αντιστροφή της, και στη συνέχεια παραμένει σταθερή μέχρι το πλοίο να σταματήσει. Η υπόθεση αυτή είναι έγκυρη για πλοία που κινούνται με ατμοστρόβιλο (όπως τα πλοία εκείνης της εποχής). Το 2002 ο **IMO** πρότεινε μια διαδικασία για τον υπολογισμό των μεγεθών της δοκιμής σταματήματος (Παράρτημα 3, MSC/Circ.1053) βασισμένη στη μελέτη των Clarke και Wellman.

Οι **Sung and Rhee** (2005), στα πλαίσια των μελετών της Κορέας για την αναθεώρηση των κανονισμών του IMO, πρότειναν μια νέα μέθοδο για την πρόβλεψη του ελιγμού σταματήματος για πλοία που κινούνται με μηχανή diesel και διαθέτουν έλικα σταθερού βήματος. Η πρότασή τους βασίστηκε σε μετρήσεις δοκιμών πλήρους κλίμακας και μοντελοποίησαν μόνο την εξίσωση του surge. Τροποποίησαν το συμβατικό μοντέλο αντιστροφής της ώσης, το οποίο είναι κατάλληλο για ατμοκίνητα πλοία, και παρήγαγαν νέους τύπους πρόβλεψης της ικανότητας σταματήματος.

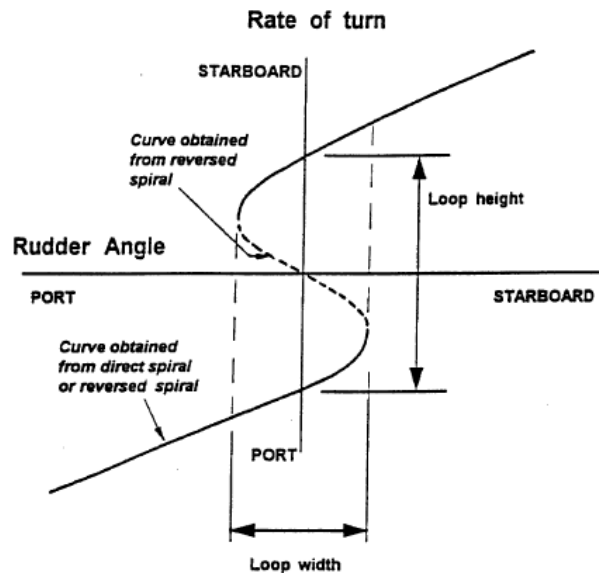
Σε περίπτωση που οι ελιγμοί τους οποίους ορίζουν τα πρότυπα δείξουν δυναμική αστάθεια θα πρέπει να διεξαχθούν συμπληρωματικοί ελιγμοί για να προσδιοριστεί ο βαθμός της αστάθειας. Τέτοιοι ελιγμοί είναι ο σπειροειδής ελιγμός και η δοκιμή επαναφοράς. Στην παρούσα εργασία θα γίνει αναφορά μόνο στον σπειροειδή ελιγμό. Υπάρχουν δύο είδη σπειροειδή ελιγμού ο ευθύς (direct spiral) και ο αντίστροφος (reversed spiral).

Στον ευθύ σπειροειδή ελιγμό προσδιορίζονται οι ρυθμοί περιστροφής που αντιστοιχούν σε διάφορες γωνίες πηδαλίου, για ένα διάστημα τιμών από $-\delta_{max}$ έως δ_{max} . Με αυτή τη δοκιμή μπορεί να προσδιοριστεί αν το πλοίο εμφανίζει δυναμική αστάθεια και το εύρος αυτής. Το μειονέκτημα της δοκιμής αυτής είναι ότι απαιτεί πολύ χρόνο, ειδικά για μεγάλα και αργοκίνητα πλοία, και είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στην επίδραση των καιρικών συνθηκών.

Στον αντίστροφο σπειροειδή ελιγμό μετράται η γωνία πηδαλίου που απαιτείται για να επιτευχθεί καθένας από διάφορους ρυθμούς περιστροφής. Η συγκεκριμένη δοκιμή απαιτεί λιγότερο χρόνο από τον ευθύ σπειροειδή ελιγμό και επιπλέον παρέχει τις τιμές της ασταθούς περιοχής.

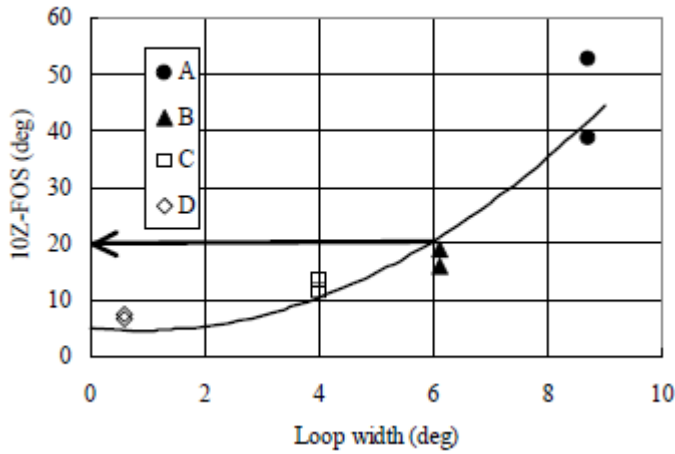


Σχήμα 7: Σπειροειδής καμπύλη για δυναμικά ευσταθές πλοίο (σύμφωνα με MSC/Circ.1053)

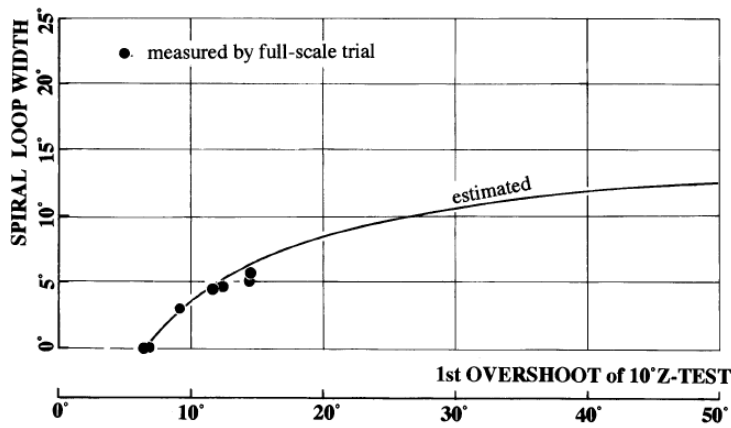


Σχήμα 8: Σπειροειδής καμπύλη για δυναμικά ασταθές πλοίο (σύμφωνα με MSC/Circ.1053)

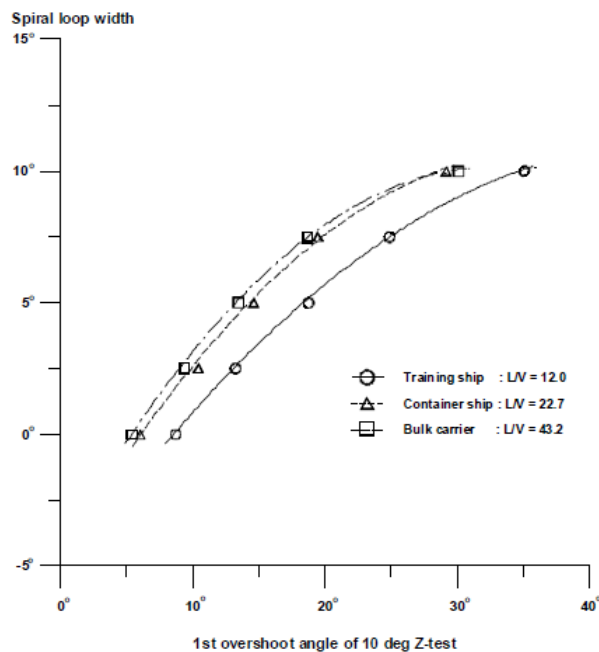
Εκτός από τις χρονικές δυσκολίες που εμφανίζει ο σπειροειδής ελιγμός, ένας άλλος λόγος που δικαιολογεί το ότι δεν είναι υποχρεωτική δοκιμή για την μέτρηση της ελκτικότητας είναι το ότι το εύρος της περιοχής αστάθειας σχετίζεται με τη γωνία υπέρβασης σε ελιγμό ζιγκ-ζαγκ. Δηλαδή η δοκιμή ζιγκ-ζαγκ καλύπτει κατά ένα μέρος τη σπειροειδή δοκιμή. Χαρακτηριστικά διαγράμματα έχουν παραχθεί από ιάπωνες (IMO DE 45/3/1), (Yoshimura et al., 2002) και κορεάτες ερευνητές (IMO DE 45/3).



Σχήμα 9: Σχέση εύρους ευστάθειας και πρώτης γωνίας υπέρβασης σε δοκιμή 10°/10°, (Ιαπωνία)/(DE 45/3/1)



Σχήμα 10: Σχέση εύρους ευστάθειας και πρώτης γωνίας υπέρβασης σε δοκιμή 10°/10°, (Yoshimura et al., 2002)



Σχήμα 11: Σχέση εύρους ευστάθειας και πρώτης γωνίας υπέρβασης σε δοκιμή 10°/10°, (Κορέα)/(DE 45/3)

Σύμφωνα με τον κανονισμό όλες οι δοκιμές πρέπει να πραγματοποιούνται :

- 1) σε βαθιά νερά, χωρίς φυσικούς περιορισμούς,
- 2) σε ήρεμο περιβάλλον (απουσία ρευμάτων και ανέμου),
- 3) σε κατάσταση πλήρους φόρτωσης, χωρίς διαγωγή,
- 4) με σταθερή ταχύτητα δοκιμών.

Πιο συγκεκριμένα το βάθος του νερού πρέπει να είναι περισσότερο από 4 φορές το μέσο βύθισμα του πλοίου. Ο άνεμος δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 5 Beaufort, τα κύματα να μην ξεπερνούν την κατάσταση θάλασσας 4, και τα ρεύματα, αν υπάρχουν, να είναι ομοιόμορφα. Σε περίπτωση που οι περιβαλλοντικές συνθήκες είναι διαφορετικές, θα πρέπει τα αποτελέσματα των δοκιμών να διορθώνονται κατάλληλα.

Παρόλο που απαίτηση των κανονισμών για την ταχύτητα του ανέμου είναι μέχρι 5 Beaufort ο νηογνώμονας ABS (2006) προτείνει η τιμή αυτή να μην ξεπερνάει τα 3 Beaufort ενώ η ITTC (2002b) θεωρεί πως ορισμένα πλοία πρέπει να εκτελούν τις δοκιμές ελικτικότητας σε συνθήκες ανέμου έως 2 Beaufort.

Όταν ο λόγος της ταχύτητας του ανέμου προς την ταχύτητα του πλοίου είναι μεγάλος τότε ο άνεμος επιδρά σημαντικά στην ευστάθεια πορείας και στην ελικτικότητα του πλοίου. Επιπλέον μπορεί να προκαλέσει πρόσθετη αντίσταση στην πρόσω κίνηση του πλοίου με συνέπεια να απαιτείται μεγαλύτερη ισχύς για να επιτευχθεί συγκεκριμένη ταχύτητα. Διάφοροι ερευνητές έχουν ασχοληθεί με τον υπολογισμό των δυνάμεων και των ροπών που προκαλούνται λόγω του ανέμου. Οι εκτιμήσεις βασίζονται σε πειραματικά αποτελέσματα από δοκιμές σε αεροδυναμικές σήραγγες λόγω της περιπλοκότητας των προφίλ των πλοίων πάνω από τη ίσαλο επιφάνεια.

Ο **Blendermann** (1995,1996) πρότεινε έναν εμπειρικό τρόπο εκτίμησης της επίδρασης του ανέμου στο πλοίο σε ομοιόμορφη και σε μη ομοιόμορφη ροή βασισμένο σε πειράματα αεροσήραγγας.

Ο **Spyrou** (1995) ερεύνησε την ευστάθεια πορείας υπό την επίδραση σταθερού ανέμου.

Οι **Shigehiro et al.** (1997) πραγματοποίησαν πειράματα με μοντέλα σε αεροδυναμική σήραγγα και σε κυκλική δεξαμενή και μελέτησαν την ευστάθεια πορείας ενός ειδικού τύπου πλοίου παρουσία ανέμου.

Οι **Yamano and Saito** (1997) ανέπτυξαν μία πρακτική μέθοδο εκτίμησης των δυνάμεων του ανέμου.

Οι **Fujiwara et al.** (1998,2001,2005) πρότειναν νέα μέθοδο για τον υπολογισμό των δυνάμεων του ανέμου, βασισμένη σε γραμμική παλινδρομική ανάλυση δεδομένων από πειράματα σε αεροσήραγγες.

Οι **Rytkönen et al.** (2000) προσδιόρισαν τα όρια ελέγχου σε άνεμο (wind limits) για μεγάλο κρουαζιερόπλοιο. Πραγματοποίησαν πειράματα σε αεροσήραγγα για τον προσδιορισμό των δυνάμεων του ανέμου ώστε να χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια σε πρόγραμμα προσομοίωσης (ship handling simulation).

Οι **Funaji et al.** (2003) πραγματοποίησαν αριθμητική προσομοίωση του κύκλου στροφής και του ελιγμού ζιγκ-ζαγκ για να εκτιμήσουν την επίδραση του ανέμου και των κυμάτων στην ελικτική συμπεριφορά. Ερεύνησαν τη συμπεριφορά ενός Container και ενός VLCC. Για τον υπολογισμό των δυνάμεων του ανέμου χρησιμοποίησαν τη μέθοδο του Fujiwara (1998). Οι **Kijima et al.** (2006a,2006b) συνέχισαν την έρευνα για την επίδραση του ανέμου στους δύο προαναφερθέντες ελιγμούς.

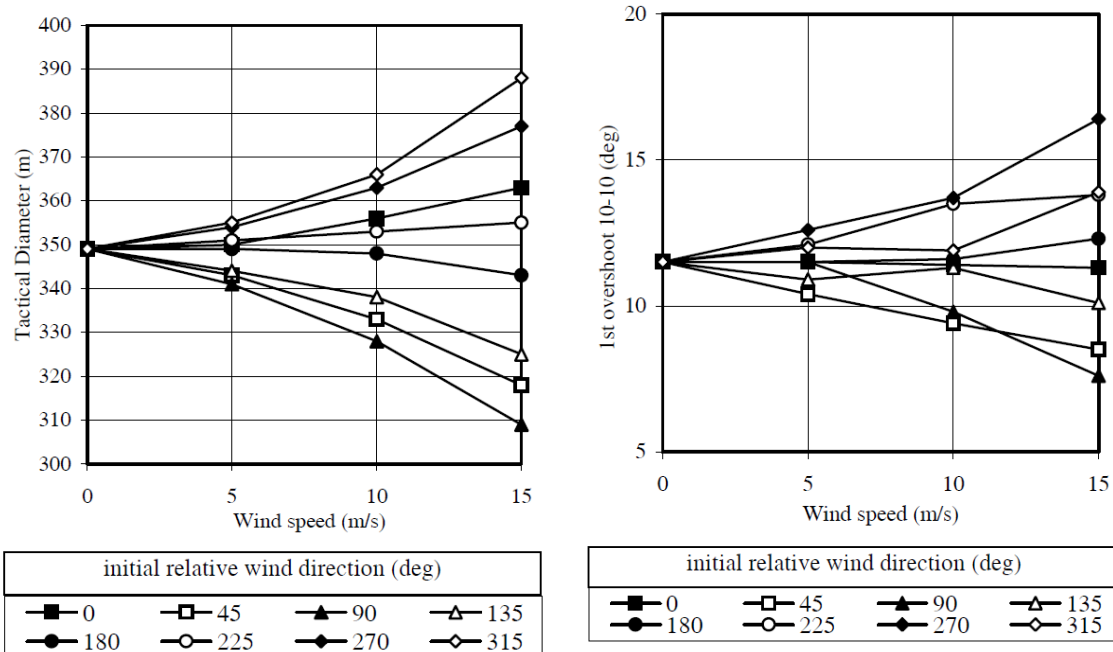
Οι **Yasukawa and Kose** (2003) παρουσίασαν μια πρακτική μέθοδο προσομοίωσης για την πρόβλεψη του ελιγμού σταματήματος υπό την επίδραση

ανέμου και κυμάτων και την εφάρμοσαν για ένα VLCC. Για τον υπολογισμό των συντελεστών του ανέμου χρησιμοποίησαν τα διαγράμματα του Fujiwara (1998).

Οι **Yabuki et al.** (2006) μελέτησαν την επίδραση του ανέμου στον ελιγμό σταματήματος πραγματοποιώντας πειράματα πλήρους κλίμακας σε πλοίο με έλικα σταθερού βήματος και σε όμοιο πλοίο με έλικα μεταβλητού βήματος. Παρατηρήθηκε πως το πλοίο με έλικα μεταβλητού βήματος είχε μικρότερο χρόνο σταματήματος και μεγαλύτερη πλευρική απόκλιση. Επιπλέον δημιούργησαν μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης για να διερευνήσουν την επίδραση του ανέμου στον ελιγμό σταματήματος πλοίων με έλικα μεταβλητού βήματος.

Οι **Spyrou et al.** (2005,2007,2008) εξέτασαν την ευστάθεια πορείας ενός Ro-Pax στο οποίο επιδρά άνεμος. Η μελέτη έγινε με τεχνικές continuation και οι δυνάμεις λόγω ανέμου υπολογίστηκαν αρχικά με το μοντέλο του Aage (1971) και στη συνέχεια με το μοντέλο του Blendermann (1995,1996), το οποίο θεωρήθηκε πιο ακριβές. Προσδιορίστηκαν τα όρια ελέγχου σε άνεμο για το υπό μελέτη πλοίο και παρήγαγαν διάγραμμα το οποίο δείχνει τη γωνία πηδαλίου που μπορεί να εφαρμοστεί για ασφαλή πλεύση ανάλογα με την ταχύτητα του πλοίου και την ταχύτητα και κατεύθυνση του ανέμου.

Από την πλευρά της **ITTC** πραγματοποιήθηκαν, στα πλαίσια του “23rd International Towing Tank Conference” (2002a) κάποιες προσομοιώσεις των ελιγμών του IMO σε διάφορες καταστάσεις ανέμου για ένα container feeder. Ενδεικτικά παρατίθενται τα ακόλουθα διαγράμματα (Σχήμα 12, Σχήμα 13).



Σχήμα 12: Τακτική διάμετρος ως συνάρτηση της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου για φορτωμένο μοντέλο container feeder, (ITTC).

Σχήμα 13: Πρώτη γωνία υπέρβασης σε ελιγμό ζιγκ-ζαγκ 10°-10° ως συνάρτηση της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου για φορτωμένο μοντέλο container feeder, (ITTC).

Τα τελευταία χρόνια παράλληλα με τη χρήση των καθιερωμένων πειραματικών και ημιεμπειρικών μοντέλων παρατηρείται σημαντική αύξηση της χρήσης τεχνικών CFD (Computational Fluid Dynamics) για την εκτίμηση των υδροδυναμικών δυνάμεων. Χρήση CFD έχει γίνει τόσο για τον υπολογισμό των υδροδυναμικών παραγώγων, ενδεικτικά αναφέρονται οι μελέτες των Ishiguro and Ohmori (2003), Yamasaki (2001), όσο και για τον υπολογισμό των δυνάμεων του πηδαλίου όπως των Tanaka and Kimura (2003). Επιπλέον υπάρχουν μελέτες που περιγράφουν μοντέλα που αφορούν τον ελιγμό σταματήματος όπως αυτές των Jakobsen et al. (2000), Senda and Kobayashi (2000).

Πιο πρόσφατη είναι η μελέτη των Araki et al. (2012) στην οποία γίνεται υπολογισμός των υδροδυναμικών συντελεστών και των συντελεστών του πηδαλίου μέσω CFD προσομοίωσης του κύκλου στροφής και του ελιγμού ζιγκ-ζαγκ. Στη συνέχεια οι συντελεστές χρησιμοποιούνται σε μαθηματικό μοντέλο ελικτικότητας και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με δοκιμές EFD (Experimental Fluid Dynamics). Από τη σύγκριση προκύπτει ότι η χρήση παραγώγων που έχουν υπολογιστεί με τεχνικές CFD δίνει αποτελέσματα πιο κοντά σε αυτά των δοκιμών EFD, σε σύγκριση με χρήση παραγώγων που προέκυψαν από πειράματα με δεσμευμένα μοντέλα ή εμπειρικούς τύπους. Κατά συνέπεια οι Araki et al. θεωρούν ότι η χρήση CFD, για τον προσδιορισμό των υδροδυναμικών παραγώγων, θα μπορούσε να αντικαταστήσει τα πειράματα με δεσμευμένα μοντέλα.

4. Μαθηματικά μοντέλα.

ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Στο γραμμικό μοντέλο γίνεται παραδοχή σταθερής πρόσω ταχύτητας του πλοίου (*surge*). Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο το μοντέλο αυτό δεν εφαρμόζεται για απότομες στροφές και μεγάλες γωνίες πηδαλίου. Επιπλέον καλύπτει τη συμπεριφορά μόνο των δυναμικά ευσταθών πλοίων. Οι διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν την κίνηση του πλοίου κατά τις διευθύνσεις του yaw και του $sway$ είναι οι ακόλουθες εξισώσεις **Nomoto**:

$$T_1' T_2' \ddot{r}' + (T_1' + T_2') \dot{r}' + r' = K' \delta + K' T_3' \delta' \quad (1)$$

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

Επιλύοντας τις εξισώσεις (1) υπολογίζονται η γωνιακή ταχύτητα r και η ταχύτητα $sway$ v , και ολοκληρώνοντας τη γωνιακή ταχύτητα υπολογίζεται η γωνία πορείας ψ .

Οι εκφράσεις των συντελεστών πηδαλιουχίας υπολογίζονται συναρτήσει των υδροδυναμικών παραγώγων:

$$\begin{aligned} T_1' \cdot T_2' &= \frac{(Y_v' - m')(N_r' - I_z') - (Y_r' - m'x_G')(N_v' - m'x_G')}{Y_v'(N_r' - m'x_G') - N_v'(Y_r' - m')} \\ T_1' + T_2' &= \frac{(Y_v' - m')(N_r' - m'x_G') + (N_r' - I_z')Y_v' - (Y_r' - m'x_G')N_v' - (N_v' - m'x_G')(Y_r' - m')}{Y_v'(N_r' - m'x_G') - N_v'(Y_r' - m')} \\ K' &= \frac{N_v'Y_\delta' - Y_v'N_\delta'}{Y_v'(N_r' - m'x_G') - N_v'(Y_r' - m')} \\ T_3' &= \frac{(N_v' - m'x_G')Y_\delta' - (Y_v' - m')N_\delta'}{N_v'Y_\delta' - Y_v'N_\delta'} \\ K_v' &= \frac{(N_r' - m'x_G')Y_\delta' - (Y_r' - m')N_\delta'}{Y_v'(N_r' - m'x_G') - N_v'(Y_r' - m')} \\ T_4' &= \frac{Y_\delta'(N_r' - I_z') - N_\delta'(Y_r' - m'x_G')}{Y_\delta'(N_r' - m'x_G') - N_\delta'(Y_r' - m')} \end{aligned} \quad (2)$$

Οι υπολογισμοί που πραγματοποιήθηκαν στην εργασία έγιναν ως προς σύστημα αξόνων η αρχή του οποίου συμπίπτει με το κέντρο βάρους του πλοίου, δηλαδή θεωρήθηκε $x_G' = 0$.

Η μάζα του πλοίου m αδιαστατοποιείται διαιρώντας με $0.5 \cdot p \cdot L^3$.

Η ροπή αδράνειας ως προς z υπολογίζεται ως ακολούθως : $I_z = m \cdot (0.25 \cdot L)^2$ και αδιαστατοποιείται διαιρώντας με $0.5 \cdot p \cdot L^5$. Όπου L : το μήκος μεταξύ καθέτων του πλοίου.

Ο υπολογισμός των υδροδυναμικών παραγώγων, ταχύτητας και επιτάχυνσης, γίνεται με τη χρήση των τύπων του **Clarke**, οι οποίοι έχουν προκύψει από ανάλυση παλινδρόμησης.

$$\begin{aligned}
 Y'_v &= -\pi \left(\frac{T}{L} \right)^2 \left[1 + 0.16 C_b \frac{B}{T} - 5.1 \left(\frac{B}{L} \right)^2 \right] & , & \quad Y'_v = -\pi \left(\frac{T}{L} \right)^2 \left[1 + 0.40 C_b \frac{B}{T} \right] \\
 Y'_r &= -\pi \left(\frac{T}{L} \right)^2 \left[0.67 \frac{B}{L} - 0.0033 \left(\frac{B}{T} \right)^2 \right] & , & \quad Y'_r = -\pi \left(\frac{T}{L} \right)^2 \left[-\frac{1}{2} + 2.2 \frac{B}{L} - 0.080 \frac{B}{T} \right] \\
 N'_v &= -\pi \left(\frac{T}{L} \right)^2 \left[1.1 \frac{B}{L} - 0.041 \frac{B}{T} \right] & , & \quad N'_v = -\pi \left(\frac{T}{L} \right)^2 \left[\frac{1}{2} + 2.4 \frac{T}{L} \right] \\
 N'_r &= -\pi \left(\frac{T}{L} \right)^2 \left[\frac{1}{12} + 0.017 C_b \frac{B}{T} - 0.33 \frac{B}{L} \right] & , & \quad N'_r = -\pi \left(\frac{T}{L} \right)^2 \left[\frac{1}{4} + 0.039 \frac{B}{T} - 0.56 \frac{B}{L} \right]
 \end{aligned} \tag{3}$$

Επίσης οι υδροδυναμικοί συντελεστές της ταχύτητας υπολογίζονται και από τους εμπειρικούς τύπους του **Inoue**.

$$\begin{aligned}
 Y'_v &= -\pi \left(\frac{T}{L} \right)^2 \left[1 + \frac{1.4}{\pi} C_b \frac{B}{T} \right] & , & \quad N'_v = -\pi \left(\frac{T}{L} \right)^2 \left[\frac{2.0}{\pi} \right] \\
 Y'_r &= -\pi \left(\frac{T}{L} \right)^2 \left(-\frac{1}{2} \right) & , & \quad N'_r = -\pi \left(\frac{T}{L} \right)^2 \left[\frac{1.04}{\pi} - \frac{4.0 T}{\pi L} \right]
 \end{aligned} \tag{4}$$

Ο υπολογισμός των υδροδυναμικών παραγώγων του **πηδαλίου** γίνεται με τους προσεγγιστικούς τύπους που χρησιμοποίησε ο Clarke.

$$Y'_\delta = -\frac{3A_R}{L^2} \quad , \quad N'_\delta = -\frac{1}{2} Y'_\delta \tag{5}$$

όπου : A_R : η επιφάνεια του πηδαλίου.

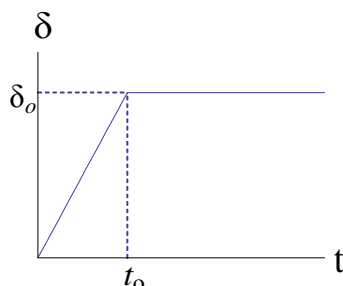
L : το μήκος μεταξύ καθέτων του πλοίου.

B : το πλάτος του πλοίου.

T : το βύθισμα του πλοίου.

C_b : ο συντελεστής γάστρας του πλοίου.

Η απόκριση του πηδαλίου θεωρείται ότι ακολουθεί γραμμική μεταβολή, κατά το χρονικό διάστημα (t_o) που απαιτείται για να επιτευχθεί η επιθυμητή γωνία πηδαλίου (δ_o).



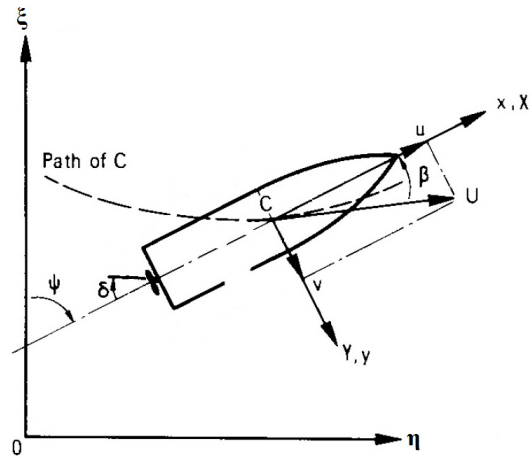
Σχήμα 14: Γραμμική απόκριση πηδαλίου.

Για το ακόλουθο αδρανειακό σύστημα αξόνων (Σχήμα 15) η **θέση του πλοίου** μπορεί να υπολογιστεί ολοκληρώνοντας τις ταχύτητες στις διευθύνσεις surge και sway.

Θέση του πλοίου:

$$\xi = \xi_0 + \int_0^t (u \cdot \cos \psi - v \cdot \sin \psi) d\tau \quad (6)$$

$$\eta = \eta_0 + \int_0^t (u \cdot \sin \psi + v \cdot \cos \psi) d\tau$$



Σχήμα 15, (βασισμένο σε Mikelis, 1985)

Στη γραμμική μοντελοποίηση ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι ακόλουθες σταθερές:

$$\bullet K' = \frac{N'_v Y'_\delta - Y'_v N'_\delta}{Y'_v (N'_r - m' x'_G) - N'_v (Y'_r - m')} \quad (7)$$

Η σταθερά K' σχετίζεται με την ικανότητα στροφής, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της τόσο μεγαλύτερη είναι η τελική γωνιακή ταχύτητα που αποκτά το πλοίο.

$$\bullet T' = T'_1 + T'_2 - T'_3 \quad (8)$$

Σε ευσταθή πλοία η σταθερά T' είναι θετική. Όσο μικρότερη είναι η τιμή της τόσο ταχύτερη είναι η απόκριση του πλοίου

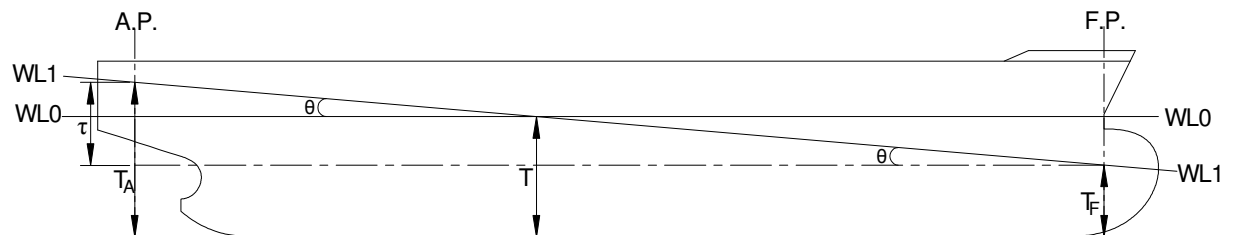
$$\bullet Y'_v (N'_r - m' x'_G) - N'_v (Y'_r - m') \quad (9)$$

Θετική τιμή χαρακτηρίζει δυναμικά ευσταθές πλοίο.

Διαγωγή (Trim)

Ως διαγωγή “ τ ” ορίζεται η διαφορά ανάμεσα στα βυθίσματα πλώρας (T_F) και πρύμνης (T_A). Θετική θεωρείται η *έμπρυμνη* διαγωγή, δηλαδή όταν το βύθισμα στην πρύμνη είναι μεγαλύτερο από αυτό της πλώρης. ($\tau = T_A - T_F$). Η γωνία διαμήκουσ κλίσης (θ) του πλοίου συνδέεται με την διαγωγή (τ) με τον ακόλουθο τύπο:

$$\tan \theta = \frac{T_A - T_F}{L_{BP}}. \text{ Για μικρές γωνίες κλίσης ισχύει: } \theta \approx \tan \theta = \frac{T_A - T_F}{L_{BP}} \quad (10)$$



Σχήμα 16: Ορισμός διαγωγής.

Σε περίπτωση που το πλοίο εμφανίζει διαγωγή “ τ ” οι υδροδυναμικές παράγωγοι της ταχύτητας διορθώνονται κατάλληλα. Οι διορθώσεις υπολογίζονται με δύο τρόπους, σύμφωνα με τους τύπους του Inoue (1978) και σύμφωνα με τους τύπους των Fedyaevsky and Sobolev (1964).

Inoue:

$$\begin{aligned} Y'_v(\tau) &= Y'_v(0) \left[1.0 + \frac{2}{3} \frac{\tau}{T} \right] & Y'_r(\tau) &= Y'_r(0) \left[1.0 + 0.8 \frac{\tau}{T} \right] \\ N'_v(\tau) &= N'_v(0) \left[1.0 - 0.27 \frac{\tau}{T} \frac{Y'_v(0)}{N'_v(0)} \right] & N'_r(\tau) &= N'_r(0) \left[1.0 + 0.3 \frac{\tau}{T} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

Fedyaevsky and Sobolev:

$$\begin{aligned} Y'_v(\tau) &= Y'_v(0) \left[1.0 + \left(\frac{\tau}{T} \right) + \left(\frac{\tau}{2T} \right)^2 \right] & Y'_r(\tau) &= Y'_r(0) \left[1.0 + \left(\frac{\tau}{T} \right) + \left(\frac{\tau}{2T} \right)^2 \right] \\ N'_v(\tau) &= N'_v(0) \left[1.0 - \left(\frac{\tau}{2T} \right) - 0.333 \left(\frac{\tau}{2T} \right)^2 \right] & N'_r(\tau) &= N'_r(0) \left[1.0 + 0.333 \frac{\tau}{T} + \left(\frac{\tau}{2T} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (12)$$

Όπου : $Y'_v(0), N'_v(0), Y'_r(0), N'_r(0)$ είναι οι παράγωγοι για ισοβύθιστο πλοίο.

Ακολουθεί πίνακας με τα στοιχεία του δυναμικά ευσταθούς πλοίου για το οποίο εφαρμόστηκε το γραμμικό μοντέλο.

Πίνακας 2 : **Στοιχεία πλοίου**

Μήκος μεταξύ καθέτων	L	172 m
Πλάτος	B	25 m
Βύθισμα στο midship	T	6.2 m
Εκτόπισμα	m	13663.3 t
Ταχύτητα πλοίου	U	15 kn
Συντελεστής γάστρας	C_b	0.5
Επιφάνεια πηδαλίου	A_R	30 m ²
Μέγιστη γωνία περιστροφής πηδαλίου	δ_{max}	35°
Ταχύτητα περιστροφής πηδαλίου	r_R	2.33° /s

ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Για τη μη γραμμική θεώρηση θεωρούμε ότι η απώλεια ταχύτητας κατά τη διάρκεια των ελιγμών δεν είναι αμελητέα, επομένως στις εξισώσεις κίνησης θα συμπεριληφθεί και αυτή του surge. Θα ακολουθηθεί το μοντέλο του Mikelis (1985), αλλά δεν θα συμπεριληφθεί η επίδραση του roll, που όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο συχνά στις μελέτες ελκτικότητας παραλείπεται όταν το πλοίο δεν αποκτά σοβαρή εγκάρσια κλίση κατά τη στροφή. Το μαθηματικό του μοντέλο είναι “modular” αφού οι δυνάμεις και οι ροπές της γάστρας (H), του πηδαλίου (R), της έλικας (P) και των άλλων επιδράσεων (O) μοντελοποιούνται ξεχωριστά, χωρίς βέβαια να αμελούνται οι μεταξύ τους επιδράσεις.

$$\text{Surge : } m(\dot{u} - r \cdot v - x_G \cdot r^2) = X_H + X_P + X_R + X_O$$

$$\text{Sway : } m(\dot{v} + r \cdot u + x_G \cdot \dot{r}) = Y_H + Y_P + Y_R + Y_O \quad (13)$$

$$\text{Yaw : } I_Z \dot{r} + m x_G (\dot{v} + r \cdot u) = N_H + N_P + N_R + N_O$$

όπου:

m = η μάζα του πλοίου.

u = η ταχύτητα surge.

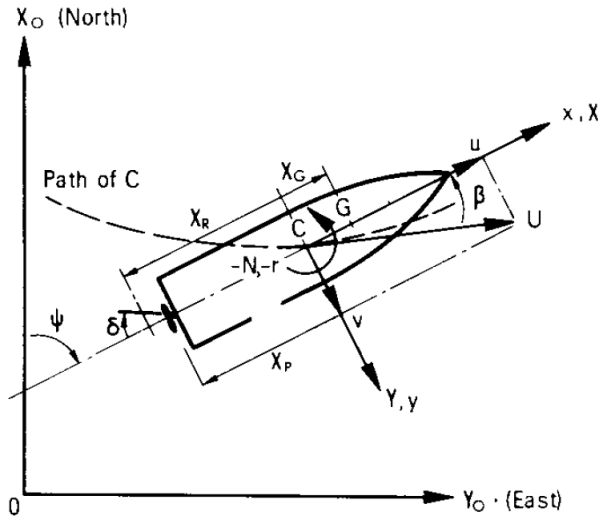
v = η ταχύτητα sway.

r = γωνιακή ταχύτητα του πλοίου.

$\dot{}$ = η παράγωγος ενός μεγέθους ως προς το χρόνο.

I_Z = ροπή αδράνειας ως προς z .

x_G = το κέντρο βάρους του πλοίου.



Σχήμα 17, (Mikelis, 1985)

Οι ροπές και οι δυνάμεις στη **γάστρα** υπολογίζονται ως ακολούθως:

$$X_H = X_{\dot{u}} \dot{u} - Y_{\dot{v}} v r - \frac{u}{|u|} Y_r r^2 + X_{vr} v r - X(u)$$

$$Y_H = Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_v v U + \frac{u}{|u|} Y_r r U + Y_{vv} v |v| + Y_{vr} v |r| + \frac{u}{|u|} Y_{rr} r |r| \quad (14)$$

$$N_H = N_{\dot{r}} \dot{r} + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_r r U + \frac{u}{|u|} N_v v U + N_{rr} r |r| + \frac{u}{|u|} N_{rv} \frac{rv}{U} + N_{vvr} \frac{vvr}{U}$$

όπου: $U = \sqrt{u^2 + v^2}$

$X(u)$: η αντίσταση ως συνάρτηση της ταχύτητας u

$X_{\dot{u}}, X_{vr}, Y_{\dot{v}}, Y_{\dot{r}}, Y_v, Y_r, Y_{vv}, Y_{vr}, Y_{rr}$: οι υδροδυναμικοί συντελεστές των δυνάμεων

$N_{\dot{v}}, N_{\dot{r}}, N_v, N_r, N_{rr}, N_{vvr}, N_{rvr}$: οι υδροδυναμικοί συντελεστές των ροπών που επιδρούν στη γάστρα

Για τον υπολογισμό των δυνάμεων της έλικας :

$$\begin{aligned} X_p &= (1-t_p)pn^2D^4K_T \\ Y_p &= 0 \\ N_p &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

όπου:

t_p = ποσοστό μείωσης ώσης.

p = η πυκνότητα του νερού.

n = στροφές της έλικας.

D = διάμετρος της έλικας.

K_T = συντελεστής ώσης της έλικας.

Στο μη γραμμικό μοντέλο, για τις δυνάμεις και τις ροπές του **πηδαλίου** εξετάστηκαν δύο προσεγγίσεις. Αρχικά χρησιμοποιήθηκε η προσέγγιση του Clarke (1982) και στη συνέχεια εφαρμόστηκε προσέγγιση που βασίζεται στο μοντέλο MMG σύμφωνα με Spyrou (1990), Yoshimura (2005) και Principles of Naval Architecture (1989).

I. Μοντελοποίηση πηδαλίου σύμφωνα με Clarke

$$\begin{aligned} X_R &= 0 \\ Y_R &= Y_\delta \cdot U^2 \cdot \delta \\ N_R &= N_\delta \cdot U^2 \cdot \delta \end{aligned} \quad (16)$$

όπου:

$$Y_\delta = \frac{1}{2} p L^2 Y'_\delta \quad (17)$$

$$N_\delta = \frac{1}{2} p L^3 N'_\delta$$

Τα Y'_δ, N'_δ υπολογίζονται από τη σχέση (5).

II. Μοντελοποίηση πηδαλίου βασισμένη στο μοντέλο MMG

$$\begin{aligned} X_R &= -(1-t_R)F_N \sin \delta \\ Y_R &= -(1+a_H)F_N \cos \delta \\ N_R &= -(1+a_H(x_H / x_R))x_R F_N \cos \delta \end{aligned} \quad (18)$$

όπου:

$$a_H = \begin{cases} -1.5s_0 / H_R + 1.0, & u(1-w_p)/(nP) > 0.3 \\ (-1.5s_0 / H_R + 1.0)(u(1-w_p)/(nP))/0.3, & u(1-w_p)/(nP) < 0.3 \end{cases}$$

$$s_0 = 0.48D$$

$$F_N = 0.5pA_R U_R^2 f(\Lambda) \sin a_R$$

$$f(\Lambda) = 6.13\Lambda / (\Lambda + 2.25)$$

$$x_H = x_R$$

$$w_R / w_{R0} = w_p / w_{p0} = \exp(K_1 \beta_p^2)$$

$$t_R / t_{R0} = t_p / t_{p0} = \exp(K_1 \beta_p^2)$$

$$K_1 = -4$$

$$U_R = (u_R^2 + v_R^2)^{1/2}$$

$$u_R = u(1-w_p)[1.0 + c_2 \cdot g(s)]^{1/2} \quad (19)$$

$$v_R = u_R \cdot \gamma \cdot \beta_R$$

$$c_2 = 1$$

$$\gamma = 0.3$$

$$s = 1 - u(1-w_p)/(nP)$$

$$g(s) = \eta \cdot k [2 - (2-k)s] s / (1-s)^2$$

$$\eta = D / H_R$$

$$k = 0.6(1-w_p)/(1-w_R)$$

$$a_R = \delta - \tan^{-1} \left(\frac{v_R}{u_R} \right)$$

$$\beta_p = \beta - x'_p \cdot r' = \beta - (x_p / L)(rL / U)$$

$$\beta_R = \beta - 2x'_R \cdot r' = \beta - (2x_R / L)(rL / U)$$

$$\beta = -\text{ArcSin} \left(\frac{v}{U} \right)$$

$$U = \sqrt{u^2 + v^2}$$

Ονομαστική περιγραφή των μεγεθών του μοντέλου:

t_R = ποσοστό μείωσης ώσης πηδαλίου

F_N = η δύναμη που επιδρά κάθετα στο πηδάλιο

δ = η γωνία πηδαλίου

a_H = συντελεστής αλληλεπίδρασης πηδαλίου-γάστρας

x_R = του κέντρου άνωσης του πηδαλίου

x_p = διαμήκης απόσταση έλικας

H_R = ύψος του πηδαλίου

s_0 = το διάκενο ανάμεσα στο πηδάλιο και την πρύμνη

u = η ταχύτητα surge του πλοίου

P = το βήμα της έλικας
 ρ = η πυκνότητα του νερού
 A_R = επιφάνεια του πηδαλίου
 U_R = μέση ταχύτητα ροής που προσπίπτει στο πηδάλιο
 α_R = γωνία πρόσπτωσης της ροής στο πηδάλιο
 $f(\Lambda)$ = ο συντελεστής κάθετης δύναμης σε ελεύθερη ροή
 Λ = λόγος επιμήκους του πηδαλίου
 w_R = ποσοστό ομόρρου πηδαλίου
 w_P = ποσοστό ομόρρου έλικας
 t_P = ποσοστό μείωσης ώσης έλικας
 t_R = ποσοστό μείωσης ώσης πηδαλίου
 u_R = surge συνιστώσα ταχύτητας ροής πρόσπτωσης στο πηδάλιο
 v_R = sway συνιστώσα ταχύτητας ροής πρόσπτωσης στο πηδάλιο
 γ = συντελεστής εξομάλυνσης της ροής
 β = γωνία πλαγιολίσθησης πλοίου
 β_P = γωνία πλαγιολίσθησης έλικας
 β_R = γωνία πλαγιολίσθησης πηδαλίου
 n = στροφές της έλικας
 k = συντελεστής αύξησης ταχύτητας ροής λόγω ομόρρου έλικας
 v = η ταχύτητα sway του πλοίου
 U = πρόσω ταχύτητα του πλοίου
 r = γωνιακή ταχύτητα του πλοίου
 L = το μήκος μεταξύ καθέτων του πλοίου

Το μη γραμμικό μοντέλο εφαρμόστηκε για **δεξαμενόπλοιο (VLCC)** τα στοιχεία του οποίου λήφθηκαν από το πρόγραμμα Multi-Ship Manoeuvring Simulator του Lloyd's Register (Mikelis, 1985).

Πίνακας 3 : **Στοιχεία δεξαμενοπλοίου (VLCC)**

Κύρια μεγέθη γάστρας		
Μήκος μεταξύ καθέτων	L	329.41 m
Πλάτος	B	62.25 m
Βύθισμα στο midship	T	19.03 m
Συντελεστής γάστρας	C_b	0.875
Συντελεστής μέσης τομής	C_M	0.994
Συντελεστής ισάλου επιφάνειας	C_{WL}	0.820
Απόσταση LCG από midship	LCG	16.47 m
Εκτόπισμα	m	350000.06 t
Πλευρική προβεβλημένη επιφάνεια	A_y	3549 m ²
Εμπρόσθια προβεβλημένη επιφάνεια	A_x	1340 m ²
Ροπή αδράνειας ως προς z	I_z	3009086200 t·m ²
Κύρια μεγέθη έλικας		
Αριθμός πτερυγίων	z	5
Βήμα	P	8.017 m
Διάμετρος	D	9.836 m
Λόγος βήματος προς διάμετρο	P/D	0.815
Λόγος εκτεταμένης επιφάνειας	A_E/A_O	0.60
Ποσοστό μείωσης ώσης	t_P	0.235
Ποσοστό ομόρρου	w	0.48
Διαμήκης θέση έλικας (από midship)	x_P	-156.40 m
Στροφές στο MCR	n	74.9 RPM
Κύρια μεγέθη πηδαλίου		
Ύψος	span	10.962 m
Χορδή	chord	10.824 m
Επιφάνεια	A_R	118.35 m ²
Λόγος επιμήκους	Λ	1.0127
Διαμήκης θέση πηδαλίου (από midship)	x_R	-164.76 m
Μέγιστη γωνία περιστροφής	δ_{max}	35°
Ταχύτητα περιστροφής	Γ_R	2.33°/s

Η ταχύτητα περιστροφής του πηδαλίου (2.33°/s) ικανοποιεί την απαίτηση του Reg.29/ SOLAS 2009 σύμφωνα με την οποία η ελάχιστη ταχύτητα περιστροφής πρέπει να είναι 2.32°/s.

Οι υδροδυναμικές παράγωγοι που θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση έχουν υπολογιστεί από το πρόγραμμα του Lloyd's :

$$\begin{array}{ll}
 X_{\dot{u}} = -24508794 \text{ kg} & N_r = -17099805700 \text{ kg} \cdot \text{m} \\
 Y_{\dot{v}} = -245087936 \text{ kg} & X_{vr} = -65101484 \text{ kg} \\
 Y_{\dot{r}} = -5777923100 \text{ kg} \cdot \text{m} & Y_{vv} = -541515.31 \text{ kg} / \text{m} \\
 N_{\dot{v}} = -4667771900 \text{ kg} \cdot \text{m} & Y_{vr} = -399489920 \text{ kg} \\
 N_{\dot{r}} = -1451453710000 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 & Y_{rr} = -6214805500 \text{ kg} \cdot \text{m} \\
 Y_v = -1326925.12 \text{ kg} / \text{m} & N_{rr} = -1297276990000 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \\
 Y_r = 96053400 \text{ kg} & N_{vvr} = -67030983000 \text{ kg} \cdot \text{m} \\
 N_v = -122298992 \text{ kg} & N_{rvr} = 6291904800000 \text{ kg} \cdot \text{m}^2
 \end{array}$$

Για να ελεγχθούν οι ανωτέρω τιμές πραγματοποιήθηκε υπολογισμός των παραγώγων $Y_{\dot{v}}, Y_{\dot{r}}, N_{\dot{v}}, N_{\dot{r}}, Y_v, Y_r, N_v, N_r$ χρησιμοποιώντας τους τύπους (3) του Clarke και επιπλέον υπολογισμός των Y_v, Y_r, N_v, N_r με τους τύπους (4) του Inoue. Επειδή οι τύποι (3), (4) δίνουν αδιάστατες τιμές για τις παραγώγους έγινε διαστατοποίηση με τους τύπους (20) που ακολουθούν.

$$\begin{array}{lll}
 Y_{\dot{v}} = Y'_{\dot{v}} \cdot \frac{1}{2} \cdot p \cdot L^3 & , & N_{\dot{r}} = N'_{\dot{r}} \cdot \frac{1}{2} \cdot p \cdot L^5 & , & N_v = N'_v \cdot \frac{1}{2} \cdot p \cdot L^3 \\
 Y_{\dot{r}} = Y'_{\dot{r}} \cdot \frac{1}{2} \cdot p \cdot L^4 & , & Y_v = Y'_v \cdot \frac{1}{2} \cdot p \cdot L^2 & , & N_r = N'_r \cdot \frac{1}{2} \cdot p \cdot L^4 \\
 N_{\dot{v}} = N'_{\dot{v}} \cdot \frac{1}{2} \cdot p \cdot L^4 & , & Y_r = Y'_r \cdot \frac{1}{2} \cdot p \cdot L^3 & & (20)
 \end{array}$$

Ολοκληρώνοντας τη σειρά των υπολογισμών προέκυψαν οι τιμές που ακολουθούν, οι οποίες είναι πολύ κοντινές σε αυτές που δίνει το πρόγραμμα.

<u>Clarke</u>	<u>Inoue</u>
$Y_v = -1.25063 \cdot 10^6$	$Y_v = -1.32679 \cdot 10^6$
$N_v = -1.22665 \cdot 10^8$	$N_v = -1.22275 \cdot 10^8$
$Y_r = 6.64462 \cdot 10^7$	$Y_r = 9.60347 \cdot 10^7$
$N_r = -1.71935 \cdot 10^{10}$	$N_r = -1.62911 \cdot 10^{10}$
$Y_{\dot{v}} = -2.45049 \cdot 10^8$	
$N_{\dot{v}} = -4.66641 \cdot 10^9$	
$Y_{\dot{r}} = -5.7766 \cdot 10^9$	
$N_{\dot{r}} = -1.45121 \cdot 10^{12}$	

Από το πρόγραμμα του Lloyd's δίνονται τα ακόλουθα στοιχεία για την αντίσταση του πλοίου:

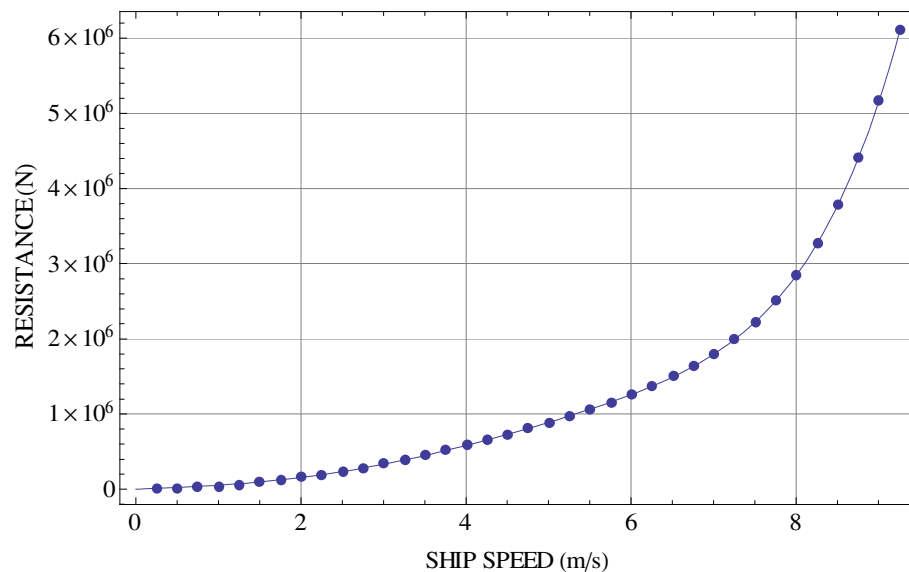
Πίνακας 4

Vs(knots)	Vs(m/s)	R(KN)
0.49	0.25	3.25
0.97	0.50	11.83
1.46	0.75	25.26
1.94	1.00	43.30
2.43	1.25	65.80
2.92	1.50	92.62
3.4	1.75	123.68
3.89	2.00	158.90
4.37	2.25	198.19
4.86	2.50	241.49
5.35	2.75	288.76
5.83	3.00	339.93
6.32	3.25	394.95
6.8	3.50	453.78
7.29	3.75	516.38
7.78	4.00	582.71
8.26	4.25	652.75
8.75	4.50	726.50
9.23	4.75	804.02
9.72	5.00	885.45
10.21	5.25	971.08
10.69	5.50	1061.47
11.18	5.75	1157.50
11.66	6.00	1260.61
12.15	6.25	1372.87
12.64	6.50	1497.28
13.12	6.75	1639.14
13.61	7.00	1803.43
14.09	7.25	1996.65
14.58	7.50	2227.59
15.06	7.75	2507.07
15.55	8.00	2848.13
16.04	8.25	3266.17
16.52	8.50	3779.13
17.01	8.75	4407.56
17.49	9.00	5174.73
17.98	9.25	6106.62

Για τον υπολογισμό της καμπύλης αντίστασης θα γίνει παρεμβολή στα ζεύγη σημείων-(ταχύτητα, αντίσταση). Με το Mathematica, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων, θα υπολογιστούν οι συντελεστές πολυωνύμου το οποίο παρεμβάλλει τη λίστα των σημείων. Με τον τρόπο που μόλις περιγράφηκε προκύπτει η ακόλουθη πολυωνυμική συνάρτηση:

$$X(u) = R = 46095.4 \cdot u + 8679.62 \cdot u^3 - 185.328 \cdot u^5 + 1.95384 \cdot u^7 \quad (21)$$

Στο διάγραμμα που ακολουθεί εμφανίζεται με κουκκίδα κάθε ζεύγος ταχύτητας- αντίστασης σύμφωνα με τα στοιχεία από πρόγραμμα του Lloyd's και επιπλέον έχει σχεδιαστεί η καμπύλη που υπολογίστηκε ώστε να τα παρεμβάλει.



Σχήμα 18 :Καμπύλη αντίστασης VLCC.

Ο συντελεστής ώσης της έλικας (K_T) υπολογίζεται θεωρώντας τον ως πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού:

$$K_T = c_0 + c_1 J_P + c_2 J_P^2 \quad (22)$$

όπου : $J_P = \frac{u(1-w)}{n \cdot D}$, ο συντελεστής προχώρησης της έλικας.

(τα μεγέθη w, n, D υπάρχουν στον Πίνακα 3.)

Για την έλικα B5-60, με $P/D = 0.815$, χρησιμοποιώντας για τους συντελεστές ώσης τα αποτελέσματα της σειράς Wageningen B, επιλέγονται τρία σημεία (J_P, K_T). Τα σημεία (0.0 , 0.36) , (0.4 , 0.23) , (0.8 , 0.004) αντικαθίστανται στην εξίσωση (22) και επιλύοντας ως προς τις σταθερές c_0, c_1, c_2 προκύπτει:

$$K_T = 0.36 - 0.25 J_P - 0.1875 J_P^2 \quad (23)$$

Διαγωγή(Trim)

Σε περίπτωση που το πλοίο εμφανίζει διαγωγή “ τ ” οι υδροδυναμικές παράγωγοι της ταχύτητας διορθώνονται με τους τύπους που χρησιμοποιήθηκαν και στο γραμμικό μοντέλο. Δηλαδή είτε με τους τύπους (11) του Inoue (1978) ή με τους τύπους (12) των Fedyaevsky and Sobolev (1964).

Το μόνο σημείο που απαιτεί κάποια προσοχή από την πλευρά του μελετητή είναι όταν εισαχθούν οι παράγωγοι του ισοβύθιστου πλοίου στους τύπους (11), (12) να είναι σε αδιαστατοποιημένη μορφή. Στη συνέχεια αφού υπολογιστούν οι παράγωγοι $Y'_v(\tau), Y'_r(\tau), N'_v(\tau), N'_r(\tau)$ από τους τύπους (10), (11) θα πρέπει να διαστατοποιηθούν για να εφαρμοστούν στο γραμμικό μοντέλο. Οι αδιαστατοποιήσεις γίνονται με τους τύπους (20)

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΕΛΙΓΜΟΥ ΣΤΑΜΑΤΗΜΑΤΟΣ

Για την πρόβλεψη των μεγεθών του ελιγμού σταματήματος θα χρησιμοποιηθεί μοντελοποίηση που βασίζεται στην πρόταση των **Clarke and Wellman** (1971), την οποία υιοθέτησε και ο IMO.

Στη συγκεκριμένη μοντελοποίηση θεωρείται πως το πλοίο παραμένει στην αρχική του πορεία κατά τη διάρκεια του ελιγμού. Στην πραγματικότητα σπάνια συμβαίνει κάτι τέτοιο, συνήθως το πλοίο αποκλίνει από την αρχική πορεία με αποτέλεσμα η θεωρητική απόσταση σταματήματος να μειώνεται.

Μοντέλο βασισμένο στην μελέτη των Clarke and Wellman

Η διαφορική εξίσωση που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την κίνηση σε surge είναι η ακόλουθη :

$$(m + m_x)\dot{U} = T[n, U] - R[U] \quad (24)$$

όπου:

m = η μάζα του πλοίου.

m_x = η πρόσθετη μάζα σε surge, θεωρείται 8% της μάζας m .

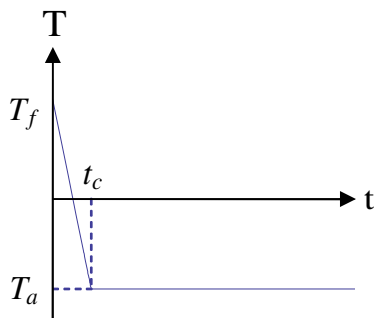
U = η ταχύτητα σε surge.

T = η συνάρτηση της ώσης.

R = η συνάρτηση της αντίστασης.

n = οι στροφές της έλικας στο RPM.

Η ώση θεωρείται πως μεταβάλλεται γραμμικά από πρόσω (T_f) σε όπισθεν, για χρονικό διάστημα t_c , μέχρι να αποκτήσει μία τιμή (T_a) την οποία διατηρεί μέχρι να ακινητοποιηθεί το πλοίο.



Σχήμα 19: Γραμμική μεταβολή ώσης.

Επιλύοντας την εξίσωση (24) προκύπτει η συνάρτηση της ταχύτητας, από την οποία μπορούν να υπολογιστούν ο χρόνος σταματήματος (t_s) και το μήκος της τροχιάς σταματήματος (S). Δηλαδή υπολογίζεται η χρονική στιγμή στην οποία μηδενίζεται η ταχύτητα του πλοίου και το μήκος της απόστασης που έχει διανύσει μέχρι τότε.

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΑΝΕΜΟΥ ΣΤΗΝ ΕΛΙΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

Οι δυνάμεις που ασκούνται στο πλοίο λόγω ανέμου θα υπολογιστούν με το μοντέλο του **Blendermann** (1995,1996).

Οι ροπές και οι δυνάμεις του ανέμου εκφράζονται σε αδιάστατη μορφή μέσω των συντελεστών διαμήκου δύναμης, πλευρικής δύναμης, ροπής yaw και μέσω του συντελεστή ροπής διατοιχισμού:

$$CX_{AF} = \frac{X}{q \cdot A_F}, \quad CY = \frac{Y}{q \cdot A_L}, \quad CN = \frac{N}{q \cdot A_L \cdot L_{OA}}, \quad CK = \frac{K}{q \cdot A_L \cdot \bar{H}} \quad (25)$$

όπου:

$$q = \frac{\rho_{air}}{2} \cdot u_w^2 = \text{η δυναμική πίεση του ανέμου}$$

$$\rho_{air} \approx 1.25 \text{ kg / m}^3 = \text{η πυκνότητα του αέρα}$$

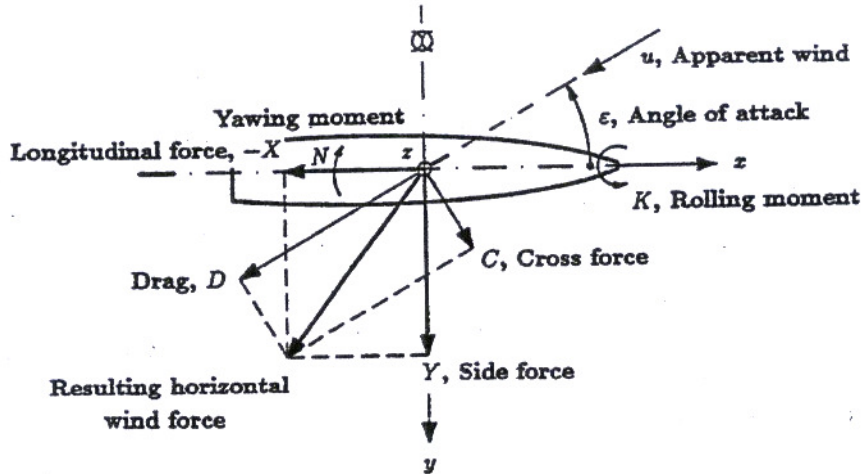
$$u_w = \text{η ταχύτητα του ανέμου σε (m/s)}$$

$$A_F = \text{το εμβαδόν της προβολής της εμπρόσθιας επιφάνειας του πλοίου}$$

$$A_L = \text{το εμβαδόν της προβολής της πλευρικής επιφάνειας του πλοίου}$$

$$\bar{H} = A_L / L_{OA} = \text{το μέσο ύψος του πλοίου}$$

$$L_{OA} = \text{το ολικό μήκος του πλοίου}$$



Σχήμα 20: Σύστημα συντεταγμένων, (Blendermann, 1996)

Οι συντελεστές CX_{AF} , CY , CN , CK που έχουν προκύψει από τα πειράματα στην αεροσήραγγα μπορούν να εφαρμοστούν και στο πραγματικό πλοίο, επειδή η ροή του αέρα γύρω από το μοντέλο εμφανίζει ίδια σημεία διαχωρισμού με το πραγματικό πλοίο. Οι ροπές και οι δυνάμεις του ανέμου στο πραγματικό πλοίο υπολογίζονται με τις εξής εξισώσεις:

$$\begin{aligned} X_W &= CX_{AF} \cdot q_{ref} \cdot A_F \\ Y_W &= CY \cdot q_{ref} \cdot A_L \\ N_W &= CN \cdot q_{ref} \cdot A_L \cdot L_{OA} \\ K_W &= CK \cdot q_{ref} \cdot A_L \cdot \bar{H} \cdot \cos^2 \varphi \end{aligned} \quad (26)$$

όπου:

$$q_{ref} = k_q \cdot \bar{q}_H + (1 - k_q) \cdot q_H$$

$$\bar{q}_H = \frac{n}{n+2} \cdot \left(\frac{\bar{H}}{h} \right)^n \cdot q_h = \eta \text{ μέση δυναμική πίεση μέχρι το μέσο ύψος του πλοίου}$$

$$q_H = \frac{n+2}{n} \bar{q}_H = \eta \text{ δυναμική πίεση στο μέσο ύψος του πλοίου}$$

$$k_q = \begin{cases} 0 & (\text{για } X_w \text{ και } K_w) \\ 0.74 & (\text{για } Y_w \text{ και } N_w) \end{cases}$$

$n = 10$ = σταθερά που αντιστοιχεί στην επιφάνεια της θάλασσας

$h = 10m$ = ύψος αναφοράς του εκθετικού νόμου

$\bar{H} = A_L / L_{OA}$ = το μέσο ύψος του πλοίου

$$q_h = \frac{P_{air}}{2} \cdot U_w^2 = \eta \text{ δυναμική πίεση του ανέμου}$$

φ = η γωνία διατοιχισμού

U_w = η ταχύτητα του ανέμου στο ύψος $h = 10m$ σε (m/s)

L_{OA} = το ολικό μήκος του πλοίου, (λόγω έλλειψης στοιχείων, για τους υπολογισμούς της παρούσας εργασίας που αφορούν το δεξαμενόπλοιο VLCC χρησιμοποιήθηκε το μήκος μεταξύ καθέτων αντί του ολικού).

Όπως έχει αναφερθεί και στην εισαγωγή της διπλωματικής εργασίας αρχικός στόχος ήταν η επέκταση του κώδικα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας ώστε να εξετάζονται όλα τα είδη ελιγμών παρουσία ανέμου. Η ανάπτυξη αυτή έγινε βασιζόμενοι στις μελέτες των Srygou & Tigkas (2007, 2008) αλλά παρουσιάστηκαν κάποια σφάλματα στον κώδικα που μας ανάγκασαν να περιοριστούμε στην επίδραση ανέμου μόνο στον ελιγμό σταματήματος. Επειδή υπήρχε μεγάλο ενδιαφέρον για την επίδραση του ανέμου και στους υπόλοιπους ελιγμούς, και χρονικά δεν υπήρχε το περιθώριο να επανεξεταστούν οι κώδικες που είχαμε αναπτύξει, αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθούν οι κώδικες που είχαν χρησιμοποιηθεί και στο παρελθόν από τους μελετητές Srygou & Tigkas (2007, 2008). Οι κώδικες αυτοί έχουν μικρές διαφορές με αυτούς που αναπτύχθηκαν για την παρούσα εργασία, οι οποίες εντοπίζονται κυρίως στη μοντελοποίηση του πηδαλίου και την μη παράλειψη της επίδρασης του roll. Για περισσότερες λεπτομέρειες παραπέμπουμε στη σχετική βιβλιογραφία.

Οι συντελεστές CX_{AF} , CY , CN , CK προέρχονται από την εργασία του Blendermann (1996) :

• Για το πρώτο δεξαμενόπλοιο (VLCC) επιλέχθηκε το μοντέλο πλοίου με το κωδικό όνομα *TAN0201BN* (Σχήμα 27) γιατί τα χαρακτηριστικά του παρουσιάζουν μεγάλη ομοιότητα με τα χαρακτηριστικά του πλοίου που μελετάται στην παρούσα εργασία, (Πίνακας 5). Επιπλέον το υπό μελέτη δεξαμενόπλοιο έχει συμμετρικές υπερκατασκευές κατά το διαμήκη άξονα όπως και το μοντέλο *TAN0201BN*.

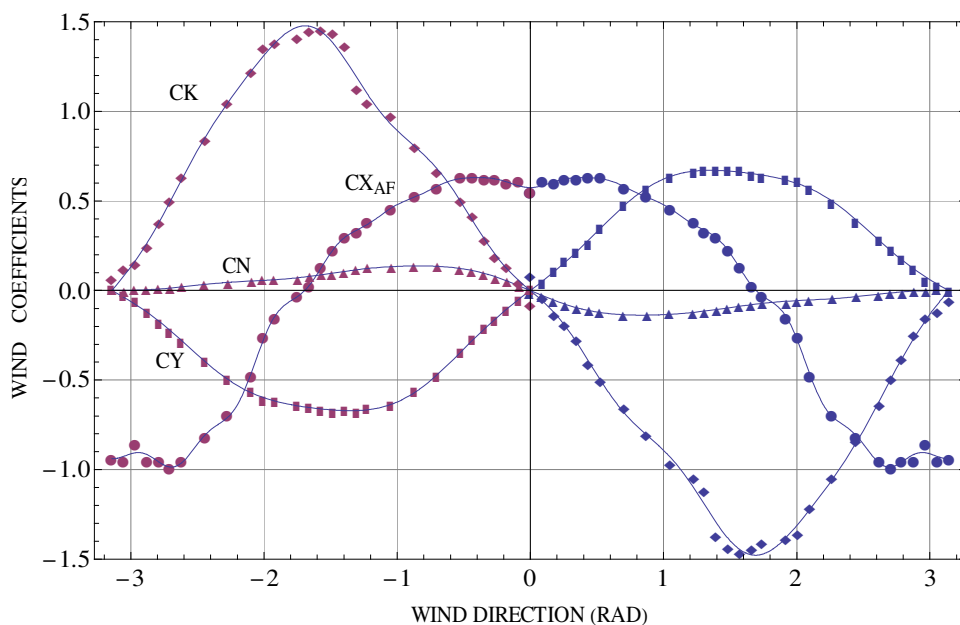
Πίνακας 5:		<i>TAN0201BN</i>	Δεξαμενόπλοιο
Μήκος μεταξύ καθέτων	L_{BP}	336.00 m	329.41 m
Πλάτος	B	55.40 m	62.25 m
Πλευρική προβεβλημένη επιφάνεια	A_L	3401.47 m ²	3549.00 m ²
Εμπρόσθια προβεβλημένη επιφάνεια	A_F	1131.79m ²	1340.00 m ²

● Για το δεύτερο δεξαμενόπλοιο που έχει μικρότερες διαστάσεις επιλέχθηκε επίσης το μοντέλο πλοίου με το κωδικό όνομα *TAN0201BN* (Σχήμα 27) για την κατάσταση πλήρους φόρτωσης και το μοντέλο πλοίου με το κωδικό όνομα *TAN0202BN* (Σχήμα 28) για την κατάσταση ερματισμού. Τα μοντέλα αυτά αντιστοιχούν σε μεγαλύτερων διαστάσεων δεξαμενόπλοια αλλά επιλέχθηκαν πρώτον γιατί οι συντελεστές του ανέμου δίνονται σε αδιάστατη μορφή και δεύτερον γιατί ποιοτικά η μορφή των υπερκατασκευών τους μοιάζει με αυτή του υπό μελέτη πλοίου.

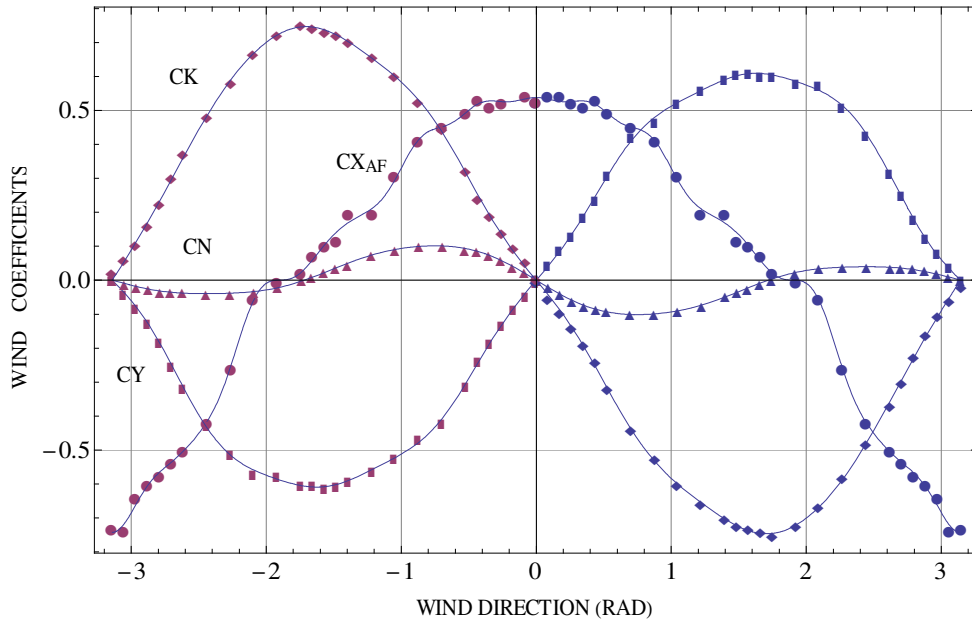
Οι συντελεστές του ανέμου δίνονται σε πινακοποιημένη μορφή. Αρχικά θα πρέπει να διορθωθούν οι συντελεστές CX οι οποίοι αναφέρονται στην επιφάνεια A_L . Με την ακόλουθη διόρθωση λαμβάνονται οι συντελεστές CX_{AF} που αντιστοιχούν στην επιφάνεια A_F : $CX_{AF} = (A_L / A_F) \cdot CX$.

Για να μπορέσουν οι συντελεστές να χρησιμοποιηθούν στις εξισώσεις κίνησης θα μετασχηματιστούν κατάλληλα και θα προσεγγιστούν με *σειρές Fourier* όπως προτείνεται από Spyrou et al. (2007,2008). Ο μετασχηματισμός πραγματοποιείται για να προκύψουν συντελεστές για εύρος γωνιών ανέμου από -180° έως $+180^\circ$ και με μηδενική γωνία πρόσπτωσης του ανέμου όταν ο άνεμος είναι ακολουθών (following wind).

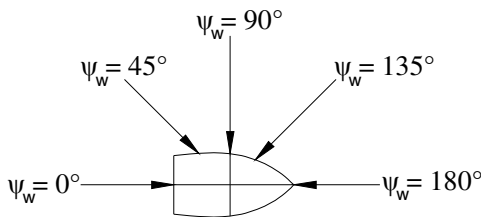
Στα διαγράμματα που ακολουθούν (Σχήμα 21, Σχήμα 22) εμφανίζονται με κουκκίδες οι τιμές των μετασχηματισμένων συντελεστών σύμφωνα με τα στοιχεία από τον Blendermann και επιπλέον έχουν σχεδιαστεί οι καμπύλες που υπολογίστηκαν ώστε να τα παρεμβάλουν. Όπως φαίνεται η προσέγγιση με σειρές Fourier είναι εξαιρετικά ικανοποιητική.



Σχήμα 21: Μετασχηματισμένοι συντελεστές ανέμου για μορφή πλοίου αναφοράς *TAN0201BN* και η προσέγγιση τους με σειρές Fourier.



Σχήμα 22: Μετασχηματισμένοι συντελεστές ανέμου για *TAN0202BN* και η προσέγγιση τους με σειρές Fourier.



Σχήμα 23: Ορισμός γωνίας πρόσπτωσης ανέμου.

Ο υπολογισμός της U_{RW} , δηλαδή της **σχετικής ταχύτητας ανέμου** που βλέπει το πλοίο (φαινόμενος άνεμος), γίνεται από τις συνιστώσες της κατά τις διευθύνσεις u (U_{RW1}) και v (U_{RW2}).

$$\text{Ισχύει } U_{RW} = \sqrt{U_{RW1}^2 + U_{RW2}^2} \quad (27)$$

όπου:

$$U_{RW1} = U_w \cdot \cos(\psi_w - \psi) - u$$

$$U_{RW2} = U_w \cdot \cos(\psi_w - \psi) - v$$

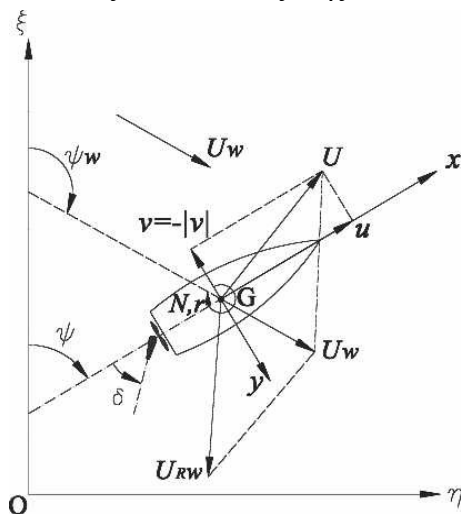
ψ_w = γωνία πρόσπτωσης του ανέμου

u = η ταχύτητα του πλοίου σε surge

v = η ταχύτητα του πλοίου σε sway

U_w = η ταχύτητα του ανέμου στο

ύψος $h = 10m$ σε (m/s)



Σχήμα 24, (Spyrou et al., 2007)

Στην εργασία του Blendermann (1995) δίνεται η σχέση ανάμεσα στην ταχύτητα του ανέμου και την κλίμακα Beaufort:

$$U_w = 0.836 \frac{m}{s} \cdot (Bft)^{3/2} = \text{μέση ταχύτητα ανέμου σε ύψος 10 m} \quad (28)$$

Στην παρούσα διπλωματική εξετάστηκαν δύο ταχύτητες ανέμου. Η ταχύτητα 26 m/s (≈ 10 Beaufort) η οποία είναι η ταχύτητα που χρησιμοποιείται και στο Κριτήριο Καιρού (IMO's weather criterion). Και η ταχύτητα 19 m/s (≈ 8 Beaufort).

Πρέπει να αναφερθεί ότι στη μοντελοποίηση που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης δεν περιλαμβάνονται οι φορτίσεις από τους κυματισμούς τους οποίους προκαλεί ο άνεμος.

Ελιγμός Σταματήματος υπό την επίδραση ανέμου

Στον ελιγμό σταματήματος έχει αναφερθεί στο αντίστοιχο κεφάλαιο που έχει προηγηθεί ότι υιοθετείται η μελέτη των Clarke and Wellman. Σύμφωνα με αυτή τη μελέτη γίνεται η παραδοχή ότι κατά το σταμάτημα το πλοίο κινείται μόνο κατά την κατεύθυνση surge. Επομένως για την επίδραση ανέμου στη δοκιμή σταματήματος μπορούν να εξεταστούν μόνο οι γωνίες ανέμου 0° και 180° . Στην εξίσωση που περιγράφει το σταμάτημα (24) προστίθεται ο όρος που αφορά την επίδραση του ανέμου και προκύπτει:

$$(m + m_x)\dot{U} = T[n, U] - R[U] + X_w \quad (29)$$

Ακολουθούν τα στοιχεία του δεύτερου δεξαμενοπλοίου για τις δύο καταστάσεις φόρτωσης που μελετήθηκαν.

Πλήρης Φόρτωση

Πίνακας 6 : Στοιχεία δεξαμενοπλοίου (μικρότερων διαστάσεων) σε πλήρη φόρτωση

Κύρια μεγέθη γάστρας		
Ολικό Μήκος	L_{OA}	128.6 m
Μήκος μεταξύ καθέτων	L_{BP}	120.4 m
Πλάτος	B	20.40 m
Βύθισμα στο midship	T	8.616 m
Συντελεστής γάστρας	C_b	0.794
Συντελεστής μέσης τομής	C_M	0.995
Απόσταση LCG από midship	LCG	-1.5 m
Κατακόρυφη θέση κέντρου βάρους	Z_G	-1.373 m
Εκτόπισμα	m	17258.000 t
Πλευρική προβεβλημένη επιφάνεια	A_y	593.32 m ²
Εμπρόσθια προβεβλημένη επιφάνεια	A_x	198.64 m ²
Ροπή αδράνειας ως προς z	I_z	19172616000 t·m ²
Ροπή αδράνειας ως προς x	I_x	915285060 t·m ²
Μετακεντρικό ύψος	GM	1.533 m
Κύρια μεγέθη έλικας		
Βήμα	P	2.654 m
Διάμετρος	D	4.3 m
Λόγος βήματος προς διάμετρο	P/D	0.617
Λόγος εκτεταμένης επιφάνειας	A_E/A_O	0.60
Ποσοστό μείωσης ώσης	t_p	0.242
Ποσοστό ομόρρου	w	0.357
Διαμήκης θέση έλικας (από midship)	x_p	-58.10 m
Στροφές στο MCR	n	167 RPM
Κύρια μεγέθη πηδαλίου		
Ύψος	span	6.2 m
Χορδή	chord	3.875 m
Επιφάνεια	A_R	19.98 m ²
Λόγος επιμήκους	Λ	1.6
Διαμήκης θέση πηδαλίου (από midship)	x_R	-60.2 m
Μέγιστη γωνία περιστροφής	δ_{max}	35°
Ταχύτητα περιστροφής	r_R	2.4074°/s

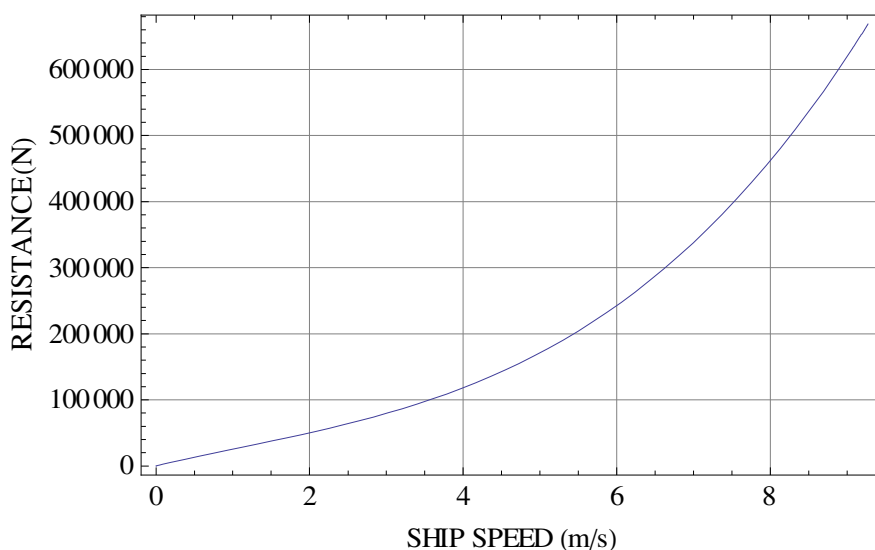
Η ταχύτητα περιστροφής του πηδαλίου (2.4074°/s) ικανοποιεί την απαίτηση του Reg.29/ SOLAS 2009 σύμφωνα με την οποία η ελάχιστη ταχύτητα περιστροφής πρέπει να είναι 2.32°/s.

Οι υδροδυναμικές παράγωγοι που θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση:

$X_{\dot{u}} = -1661231 \text{ kg}$	$N_r = -437768260 \text{ kg} \cdot \text{m}$
$Y_{\dot{v}} = -16612310 \text{ kg}$	$X_{vr} = -5253642.5 \text{ kg}$
$Y_{\dot{r}} = -164638800 \text{ kg} \cdot \text{m}$	$Y_{vv} = -257935.703 \text{ kg} / \text{m}$
$N_{\dot{v}} = -154730800 \text{ kg} \cdot \text{m}$	$Y_{vr} = -18476780 \text{ kg}$
$N_{\dot{r}} = -12386990100 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$Y_{rr} = -312737730 \text{ kg} \cdot \text{m}$
$Y_v = -219657.25 \text{ kg} / \text{m}$	$N_{rr} = -14591773700 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
$Y_r = 7195345.5 \text{ kg}$	$N_{vvr} = -802250620 \text{ kg} \cdot \text{m}$
$N_v = -9161398 \text{ kg}$	$N_{rrv} = 78774510000 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
$N_\phi = -486481.31 \text{ kg}$	$K_\phi = -351304860 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$
$N_{v\phi} = -15720959 \text{ kg}$	$K_p = -118852256 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}$
$N_{r\phi} = 1033133060 \text{ kg} \cdot \text{m}$	$K_{\dot{p}} = -101340120 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Η καμπύλη της αντίστασης του πλοίου δίνεται από την ακόλουθη πολυωνυμική συνάρτηση:

$$X(u) = R = 27051.12871 \cdot u - 2584.30523 \cdot u^2 + 803.29597 \cdot u^3 \quad (30)$$



Σχήμα 25: Καμπύλη αντίστασης στην πλήρη φόρτωση.

Ο συντελεστής ώσης της έλικας (K_T) υπολογίζεται θεωρώντας τον ως πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού:

$$K_T = c_0 + c_1 J_P + c_2 J_P^2 \quad (31)$$

όπου : $c_0 = 0.28405$

$c_1 = -0.29163$

$c_2 = -0.17710$

$J_P = \frac{u(1-w)}{n \cdot D}$, ο συντελεστής προχώρησης της έλικας.

(τα μεγέθη w, n, D υπάρχουν στον Πίνακα 6.)

Ερματισμός

Πίνακας 7 : Στοιχεία δεξαμενοπλοίου (μικρότερων διαστάσεων) σε ερματισμό

Κύρια μεγέθη γάστρας		
Ολικό Μήκος	L_{OA}	128.6 m
Μήκος μεταξύ καθέτων	L_{BP}	120.4 m
Πλάτος	B	20.40 m
Βύθισμα στο midship	T	5.418 m
Συντελεστής γάστρας	C_b	0.75
Συντελεστής μέσης τομής	C_M	0.992
Απόσταση LCG από midship	LCG	-1.898 m
Κατακόρυφη θέση κέντρου βάρους	Z_G	0.886 m
Εκτόπισμα	m	10232.191 t
Πλευρική προβεβλημένη επιφάνεια	A_y	1004.58 m ²
Εμπρόσθια προβεβλημένη επιφάνεια	A_x	263.88 m ²
Ροπή αδράνειας ως προς z	I_z	11388210000 t·m ²
Ροπή αδράνειας ως προς x	I_x	543663810 t·m ²
Μετακεντρικό ύψος	GM	2.67 m
Κύρια μεγέθη έλικας		
Βήμα	P	2.654 m
Διάμετρος	D	4.3 m
Λόγος βήματος προς διάμετρο	P/D	0.617
Λόγος εκτεταμένης επιφάνειας	A_F/A_O	0.60
Ποσοστό μείωσης ώσης	t_p	0.247
Ποσοστό ομόρρου	w	0.412
Διαμήκης θέση έλικας (από midship)	x_P	-58.10 m
Στροφές στο MCR	n	167 RPM
Κύρια μεγέθη πηδαλίου		
Ύψος	span	5.418 m
Χορδή	chord	3.798 m
Επιφάνεια	A_R	16.95 m ²
Λόγος επιμήκους	Λ	1.443
Διαμήκης θέση πηδαλίου (από midship)	x_R	-60.2 m
Μέγιστη γωνία περιστροφής	δ_{max}	35°
Ταχύτητα περιστροφής	r_R	2.4074° /s

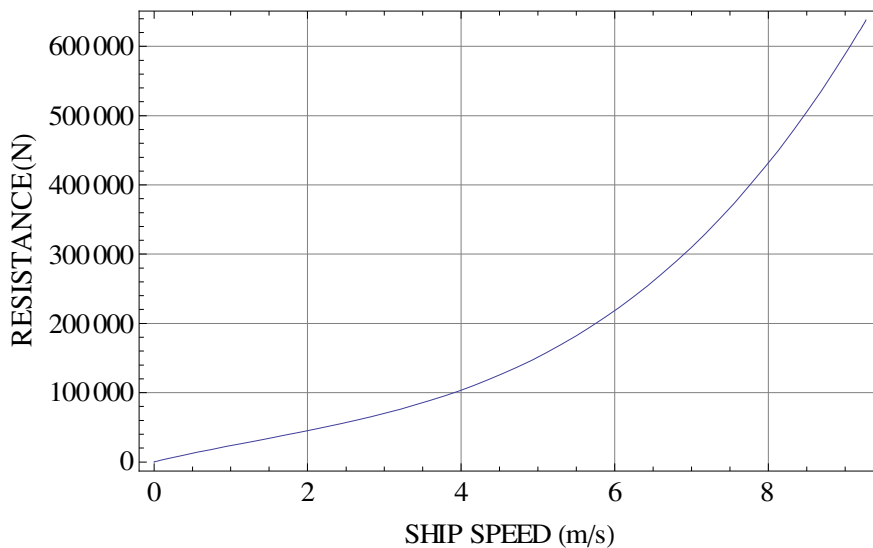
Η ταχύτητα περιστροφής του πηδαλίου (2.4074°/s) ικανοποιεί την απαίτηση του Reg.29/ SOLAS 2009 σύμφωνα με την οποία η ελάχιστη ταχύτητα περιστροφής πρέπει να είναι 2.32°/s.

Οι υδροδυναμικές παράγωγοι που θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση:

$X_{\dot{u}} = -742842.69 \text{ kg}$	$N_r = -196276112 \text{ kg} \cdot \text{m}$
$Y_{\dot{v}} = -7428427 \text{ kg}$	$X_{vr} = -2553521.8 \text{ kg}$
$Y_{\dot{r}} = -45724200 \text{ kg} \cdot \text{m}$	$Y_{vv} = -117484.898 \text{ kg} / \text{m}$
$N_{\dot{v}} = -21927298 \text{ kg} \cdot \text{m}$	$Y_{vr} = -13128437 \text{ kg}$
$N_{\dot{r}} = -6221919200 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$Y_{rr} = -150078960 \text{ kg} \cdot \text{m}$
$Y_v = -106740.508 \text{ kg} / \text{m}$	$N_{rr} = -10969591800 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
$Y_r = 2845236 \text{ kg}$	$N_{vvr} = -420396450 \text{ kg} \cdot \text{m}$
$N_v = -3622667 \text{ kg}$	$N_{rrv} = 14261189600 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
$N_\phi = -305914.09 \text{ kg}$	$K_\phi = -208669136 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2$
$N_{v\phi} = -6216496.5 \text{ kg}$	$K_p = -70596232 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}$
$N_{r\phi} = 463211620 \text{ kg} \cdot \text{m}$	$K_{\dot{p}} = -63056188 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Η καμπύλη της αντίστασης του πλοίου δίνεται από την ακόλουθη πολυωνυμική συνάρτηση:

$$X(u) = R = 26306.06759 \cdot u - 3635.36046 \cdot u^2 + 886.80369 \cdot u^3 \quad (32)$$



Σχήμα 26: Καμπύλη αντίστασης σε ερματισμό.

Ο συντελεστής ώσης της έλικας (K_T) υπολογίζεται θεωρώντας τον ως πολυώνυμο 2^{ου} βαθμού:

$$K_T = c_0 + c_1 J_P + c_2 J_P^2 \quad (33)$$

όπου : $c_0 = 0.28405$

$$c_1 = -0.29163$$

$$c_2 = -0.17710$$

$$J_P = \frac{u(1-w)}{n \cdot D}, \text{ ο συντελεστής προχώρησης της έλικας.}$$

(τα μεγέθη w, n, D υπάρχουν στον Πίνακα 7.)

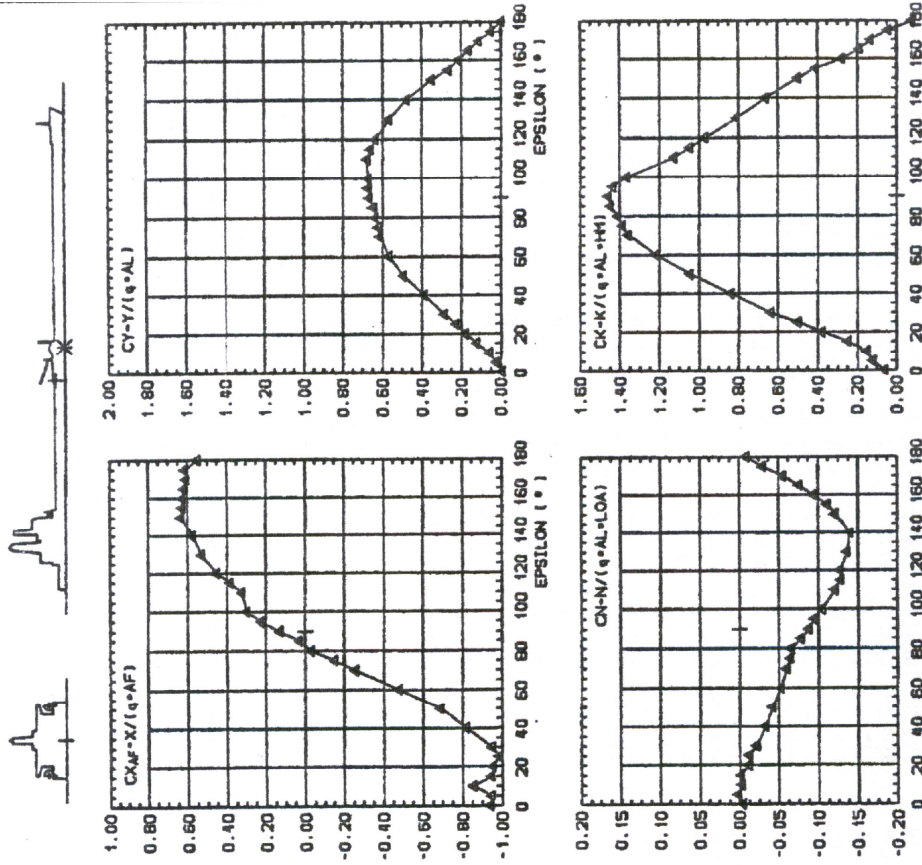
CODE NO.: TAN0201BN

OBJECT: TANKER

WIND-LOAD COEFFICIENTS

REFERENCE AREA [m²): 3401.47 AL
 REFERENCE LENGTH OF CN [m]: 351.40 LOA
 REFERENCE LENGTH OF CK [m]: 9.68 AL/LOA

EPS [DEG.]	CD	CC	CX	CY	CN	CK
0.0	0.316	-0.007	-0.313	-0.007	-0.005	0.060
5.0	0.316	-0.007	-0.315	0.023	0.002	0.121
10.0	0.290	0.002	-0.285	0.057	-0.003	0.150
15.0	0.333	0.033	-0.315	0.121	-0.002	0.247
20.0	0.356	0.056	-0.318	0.179	-0.012	0.378
25.0	0.391	0.061	-0.328	0.227	-0.012	0.499
30.0	0.413	0.088	-0.316	0.285	-0.022	0.635
40.0	0.456	0.119	-0.273	0.388	-0.033	0.838
50.0	0.522	0.138	-0.230	0.493	-0.042	1.046
60.0	0.567	0.143	-0.160	0.567	-0.053	1.216
70.0	0.603	0.127	-0.086	0.611	-0.060	1.357
75.0	0.610	0.109	-0.051	0.620	-0.065	1.386
80.0	0.625	0.097	-0.011	0.634	-0.066	1.410
85.0	0.637	0.066	0.010	0.645	-0.078	1.449
90.0	0.665	0.042	0.043	0.666	-0.088	1.459
95.0	0.673	0.016	0.075	0.672	-0.095	1.436
100.0	0.672	-0.019	0.099	0.671	-0.105	1.365
110.0	0.674	-0.129	0.108	0.675	-0.120	1.125
115.0	0.654	-0.164	0.127	0.660	-0.128	1.048
120.0	0.627	-0.188	0.150	0.636	-0.127	0.970
130.0	0.551	-0.228	0.176	0.567	-0.136	0.807
140.0	0.456	-0.241	0.191	0.478	-0.140	0.662
150.0	0.360	-0.196	0.211	0.349	-0.121	0.501
155.0	0.302	-0.153	0.209	0.267	-0.111	0.411
160.0	0.270	-0.129	0.208	0.212	-0.094	0.279
165.0	0.241	-0.105	0.206	0.163	-0.076	0.191
170.0	0.218	-0.074	0.202	0.109	-0.056	0.133
175.0	0.208	-0.034	0.204	0.049	-0.030	0.043
180.0	0.186	0.000	0.183	-0.005	-0.009	-0.080



SL (m) 24.45
 SH (m) 6.83
 MH (m) 9.68
 TV (m) 23.50
 TH (m) 23.60

LPP (m) 336.00
 LOA (m) 351.40
 BVL (m) 55.40
 AL (m) 3401.47
 AF (m²) 1131.78

Scale 1:250 Heel 0.0° Re number 2.68E+06 Uniform flow
 EPSILON = 0°, Head wind q = rho*U²/2 Dynamic head
 CN relative to M, CK relative to VL

Code No.
TAN0201BN

TANKER

Institut fuer
Schiffbau
Universitaet Hamburg

Σχήμα 27, (Blendermann, 1996)

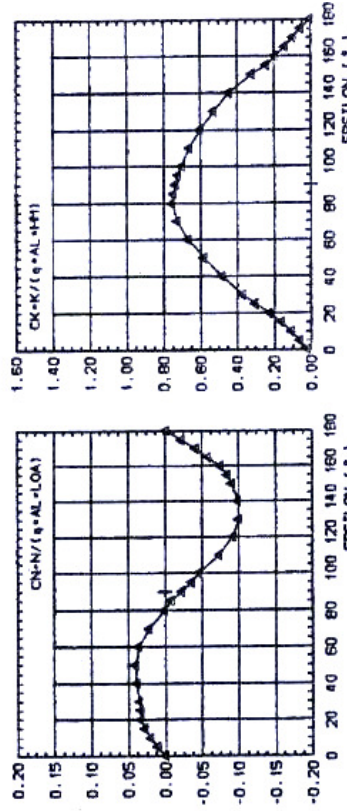
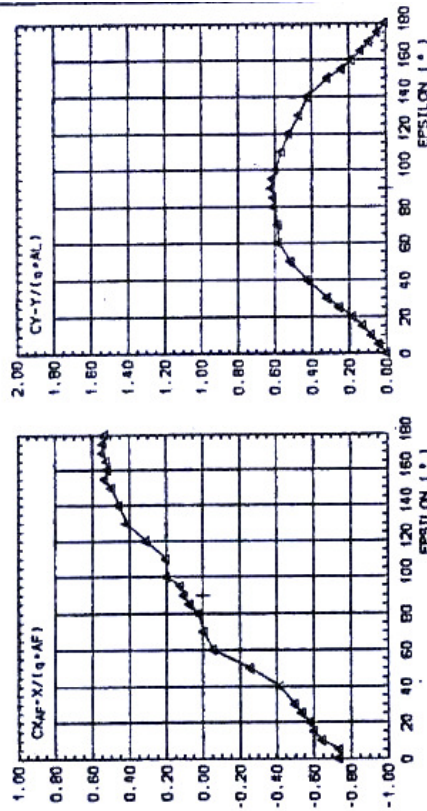
OBJECT: TANKER

CODE NO.: TAN0202BN

WIND-LOAD COEFFICIENTS

REFERENCE AREA [m**2]: 7839.63 AL
 REFERENCE LENGTH OF CN [m]: 351.40 LOA
 REFERENCE LENGTH OF CK [m]: 22.31 AL/LOA

EPS [DEG.]	CD	CC	CK	CY	CN	CK
0.0	0.169	0.000	-0.169	0.000	-0.0002	0.018
5.0	0.173	0.023	-0.170	0.038	0.0106	0.062
10.0	0.159	0.051	-0.148	0.078	0.0199	0.107
15.0	0.167	0.086	-0.139	0.126	0.0275	0.160
20.0	0.187	0.123	-0.133	0.179	0.0333	0.224
25.0	0.218	0.175	-0.123	0.251	0.0335	0.301
30.0	0.256	0.214	-0.115	0.314	0.0348	0.369
40.0	0.347	0.262	-0.097	0.424	0.0391	0.482
50.0	0.430	0.282	-0.060	0.511	0.0403	0.580
60.0	0.504	0.275	-0.013	0.574	0.0358	0.666
70.0	0.545	0.196	-0.001	0.579	0.0216	0.724
80.0	0.591	0.109	0.005	0.601	0.0007	0.754
85.0	0.599	0.069	0.016	0.603	-0.0083	0.744
90.0	0.610	0.023	0.023	0.610	-0.0229	0.733
95.0	0.608	-0.025	0.027	0.608	-0.0363	0.720
100.0	0.590	-0.058	0.045	0.591	-0.0460	0.701
110.0	0.542	-0.148	0.045	0.561	-0.0740	0.659
120.0	0.487	-0.199	0.070	0.521	-0.0922	0.602
130.0	0.417	-0.227	0.094	0.466	-0.1007	0.526
140.0	0.351	-0.255	0.104	0.421	-0.0990	0.444
150.0	0.254	-0.214	0.113	0.313	-0.0909	0.319
155.0	0.211	-0.163	0.122	0.237	-0.0848	0.241
160.0	0.174	-0.133	0.118	0.184	-0.0755	0.190
165.0	0.150	-0.097	0.120	0.132	-0.0584	0.139
170.0	0.138	-0.065	0.125	0.088	-0.0419	0.095
175.0	0.128	-0.035	0.124	0.046	-0.0227	0.055
180.0	0.121	-0.005	0.121	0.005	-0.0016	0.003



LPP (a) 336.00 SL (a) -8.32
 LOA (a) 351.40 SH (a) 12.34
 BML (a) 55.40 H+H (a) 22.31
 AL (m²) 7839.63 TV (a) 8.25
 AF (m²) 1803.63 TH (a) 13.00

Scale 1:250 Heel 0.0° Ra number 2.0ME+05 Uniform flow
 EPSILON = 0°, Head wind q = ρU²/2 Dynamic head
 CN relative to M, CK relative to VL

Code No. TAN0202BN TANKER Institut fuer Schiffbau
 Universitaet Hamburg

Σχήμα 28, (Blendermann, 1996)

5. Αποτελέσματα

ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Για το πλοίο του **πίνακα 2** υπολογίστηκαν οι υδροδυναμικοί συντελεστές της ταχύτητας, της επιτάχυνσης και του πηδαλίου με βάση τους τύπους του *Clarke*. Πραγματοποιήθηκε κύκλος στροφής για μέγιστη γωνία πηδαλίου 35° (0.61082 rad), ελιγμός για την αρχική ικανότητα στροφής για γωνία πηδαλίου 10° (0.17452 rad) και τέλος οι δύο ελιγμοί ζιγκ-ζαγκ για γωνία πηδαλίου 10° (0.17452 rad) και 20° (0.34904 rad) αντίστοιχα. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν οι ίδιοι ελιγμοί με τη διαφορά ότι οι υδροδυναμικοί συντελεστές της ταχύτητας υπολογίστηκαν με τους τύπους του *Inoue*.

Οι υδροδυναμικές παράγωγοι που υπολογίστηκαν για να χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση:

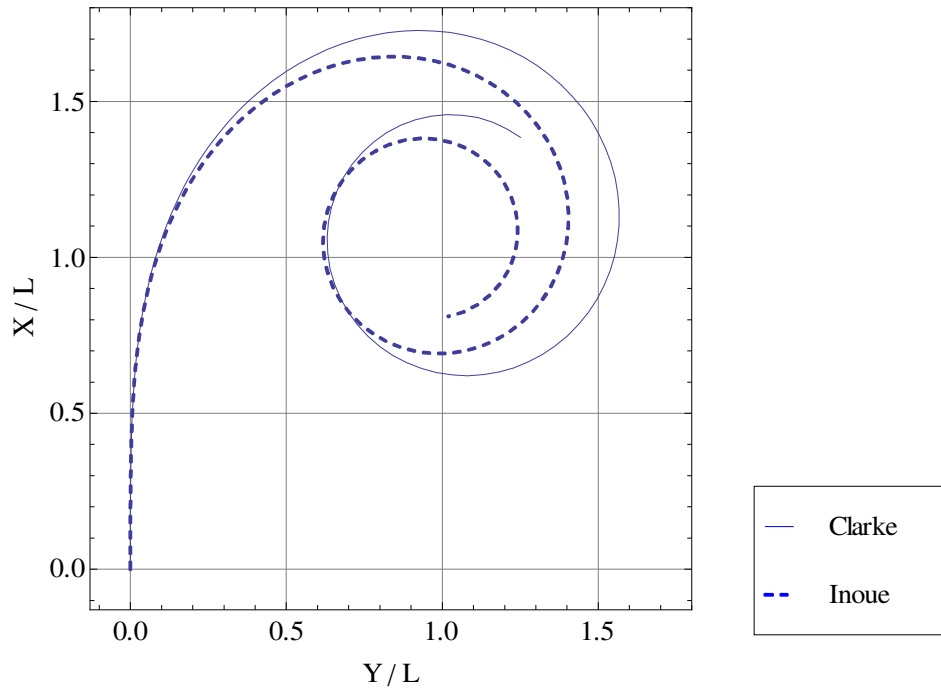
<i>Clarke</i>	<i>Inoue</i>
$Y'_v = -0.004959$	—
$N'_v = 0.0000222016$	—
$Y'_r = -0.000178502$	—
$N'_r = -0.000284283$	—
$Y'_v = -0.00737399$	$Y'_v = -0.00774955$
$N'_v = -0.00239416$	$N'_v = -0.0025987$
$Y'_r = 0.0020525$	$Y'_r = 0.00204102$
$N'_r = -0.00133018$	$N'_r = -0.00116398$
$Y'_\delta = -0.003042184$	—
$N'_\delta = 0.00152109$	

Επιπλέον υπολογίστηκαν από τους τύπους (7), (8), (9) οι σταθερές K' , T' και ο δείκτης δυναμικής ευστάθειας.

<i>Clarke</i>	<i>Inoue</i>
$K' = 8.49013$	$K' = 27.7817$
$T' = 7.29729$	$T' = 22.0952$
δείκτης = $2.179 \cdot 10^{-6}$	δείκτης = $7.08866 \cdot 10^{-7}$

➤ **Κύκλος στροφής** (με μέγιστη γωνία πηδαλιού, 35°)

Σχεδιάστηκαν στο ίδιο διάγραμμα οι δύο τροχιές που προέκυψαν για τους διαφορετικούς υδροδυναμικούς συντελεστές ταχύτητας.



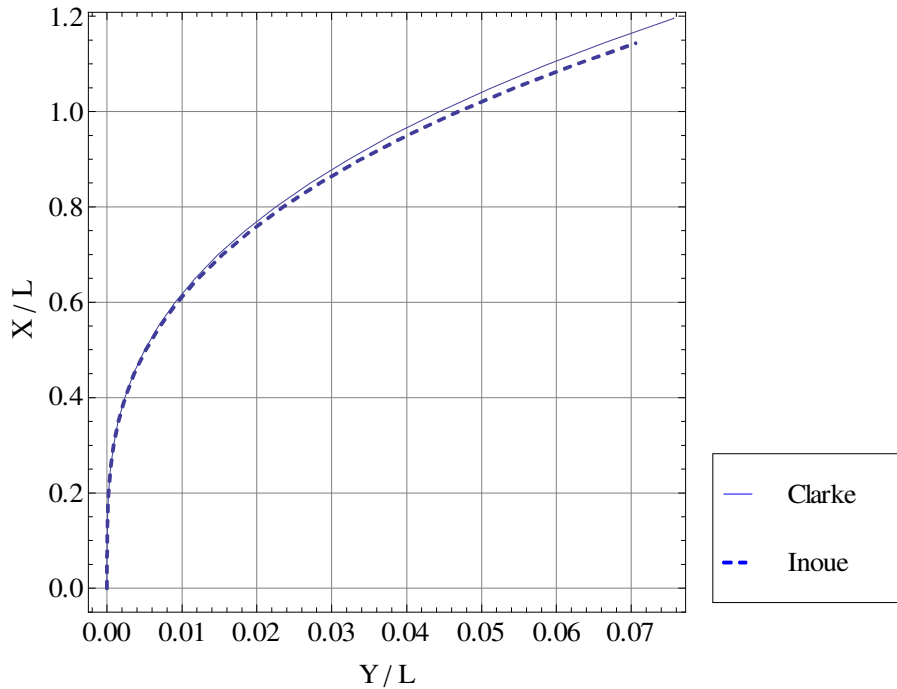
Σχήμα 29

	<i>Clarke</i>			<i>Inoue</i>		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Προχώρηση	296.887	1.72609	50.0944	282.481	1.64233	47.0537
Μεταφορά	167.498	0.973826	50.0944	152.290	0.885409	47.0537
Τακτική διάμετρος	269.212	1.56519	71.7580	241.286	1.40283	65.9363

Η προχώρηση και η τακτική διάμετρος ικανοποιούν τα πρότυπα του IMO.

➤ Αρχική ικανότητα στροφής (γωνία πηδαλίου 10°)

Σχεδιάστηκαν στο ίδιο διάγραμμα οι δύο τροχιές που προέκυψαν για τους διαφορετικούς υδροδυναμικούς συντελεστές ταχύτητας.



Σχήμα 30

	<i>Clarke</i>			<i>Inoue</i>		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Μήκος Τροχιάς	206.415	1.20009	26.72	197.291	1.14704	25.5389

Το μήκος τροχιάς ικανοποιεί τα πρότυπα του IMO.

Το αδιάστατο μήκος τροχιάς ισούται με τον αδιαστατοποιημένο χρόνο διότι στη γραμμική μοντελοποίηση θεωρείται πως παραμένει σταθερή η ταχύτητα surge.

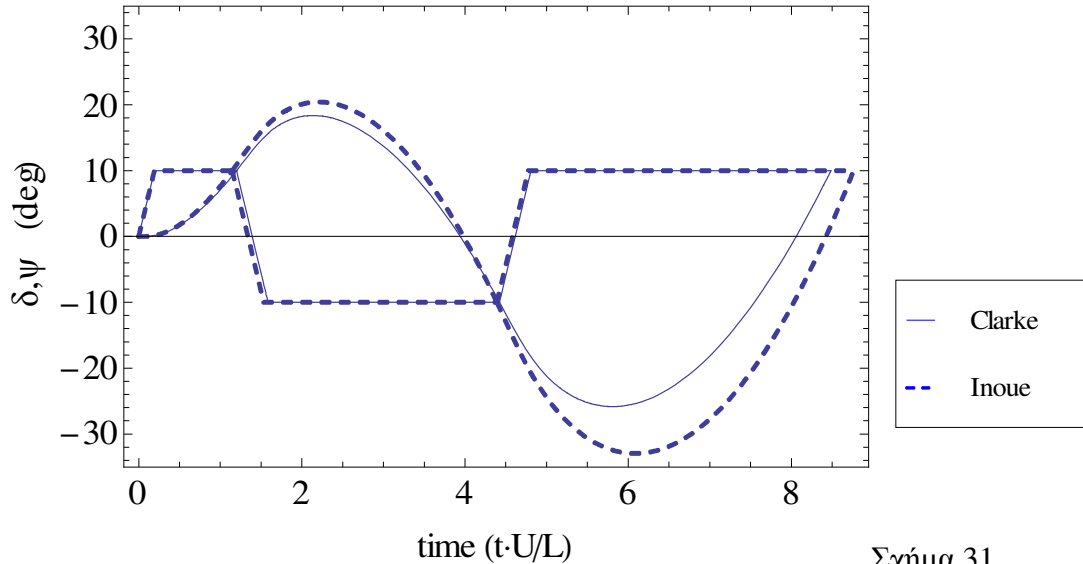
$$t' = t(s) \cdot \frac{U(m/s)}{L(m)} = \frac{track\ reach(m)}{L(m)} = track\ reach'$$

$$t'_{Clarke} = 26.72 \cdot \frac{15 \cdot 0.515}{172} = 1.20 = track\ reach'_{Clarke}$$

$$t'_{Inoue} = 25.5389 \cdot \frac{15 \cdot 0.515}{172} = 1.147 = track\ reach'_{Inoue}$$

➤ **Zig-zag 10°**

Σχεδιάστηκαν στο ίδιο διάγραμμα οι δύο αποκρίσεις της γωνίας πορείας του πλοίου (ψ), συναρτήσει του αδιάστατου χρόνου, που προέκυψαν για τους διαφορετικούς υδροδυναμικούς συντελεστές ταχύτητας. Επιπλέον έχουν σχεδιαστεί και οι αποκρίσεις του πηδαλίου (δ).

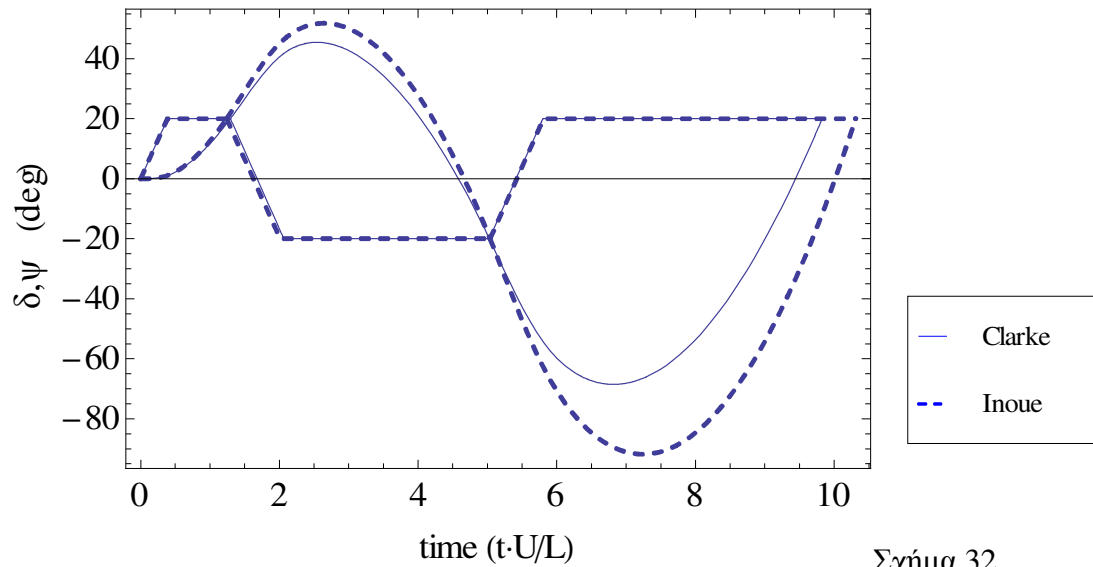


Σχήμα 31

	<i>Clarke</i>	<i>Inoue</i>
	degrees (°)	degrees (°)
1 ^η γωνία υπέρβασης	8.36855	10.4255
2 ^η γωνία υπέρβασης	15.8383	22.9624

Για το συγκεκριμένο πλοίο ο λόγος L/U ισούται με 22.2913 s. Επομένως θα πρέπει η πρώτη γωνία υπέρβασης να είναι μικρότερη από $5+0.5 \cdot L/U=16.1457^\circ$ και η δεύτερη γωνία υπέρβασης να είναι μικρότερη από $17.5+0.75 \cdot L/U=34.2185^\circ$. Ικανοποιούνται όλες οι απαιτήσεις.

➤ **Zig-zag 20°**



Σχήμα 32

	<i>Clarke</i>	<i>Inoue</i>
	degrees (°)	degrees (°)
1 ^η γωνία υπέρβασης	25.4446	31.8106

Η γωνία υπέρβασης δεν θα έπρεπε να είναι μεγαλύτερη από 25° για να ικανοποιεί τα πρότυπα του IMO.

Και στις δύο περιπτώσεις δεν ικανοποιείται η απαίτηση (στην πρώτη περίπτωση οριακά).

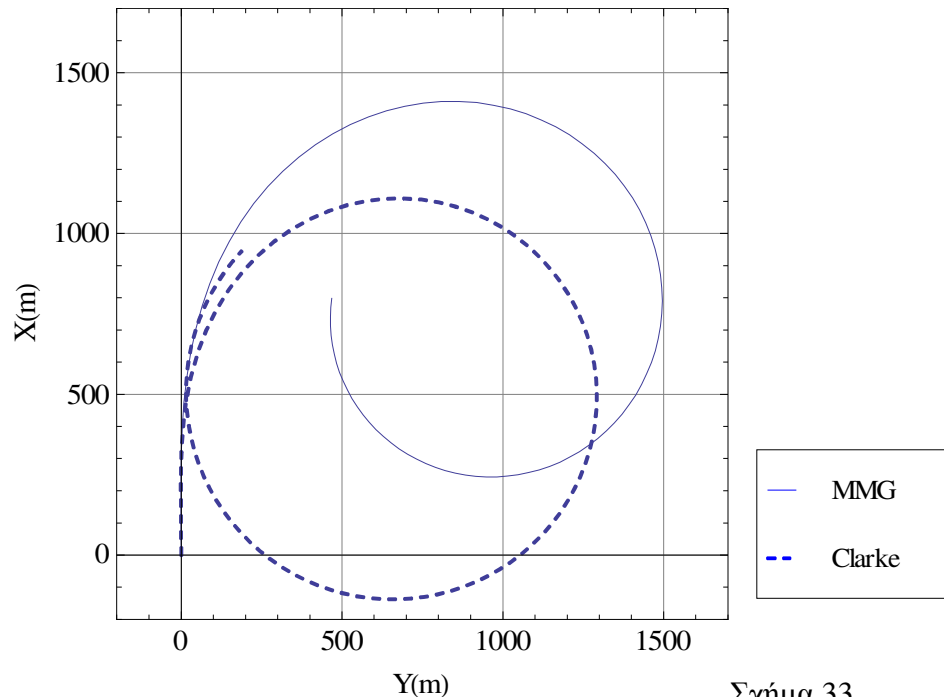
ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Για το δεξαμενόπλοιο (VLCC) εφαρμόστηκε το μοντέλο του Mikelis (1985) όπως έχει περιγραφεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Αρχικά το πηδάλιο μοντελοποιήθηκε με την προσέγγιση του Clarke. Πραγματοποιήθηκε κύκλος στροφής για μέγιστη γωνία πηδαλίου 35° (0.61082 rad), ελιγμός για την αρχική ικανότητα στροφής για γωνία πηδαλίου 10° (0.17452 rad) και τέλος οι δύο ελιγμοί ζιγκ-ζαγκ για γωνία πηδαλίου 10° (0.17452 rad) και 20° (0.34904 rad) αντίστοιχα. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν οι ίδιοι ελιγμοί αλλάζοντας τη μοντελοποίηση του πηδαλίου με προσέγγιση που βασίζεται στο μοντέλο MMG.

Σε όλους τους ελιγμούς θεωρήθηκε πως το πλοίο κινείται με αρχική ταχύτητα surge 8 m/s (15.55 kn) που αντιστοιχεί σε στροφές έλικας 74.9 RPM.

➤ Κύκλος στροφής (με μέγιστη γωνία πηδαλίου, 35°)

Σχεδιάστηκαν στο ίδιο διάγραμμα οι δύο τροχιές που προέκυψαν για τις διαφορετικές μοντελοποιήσεις των δυνάμεων και των ροπών του πηδαλίου.



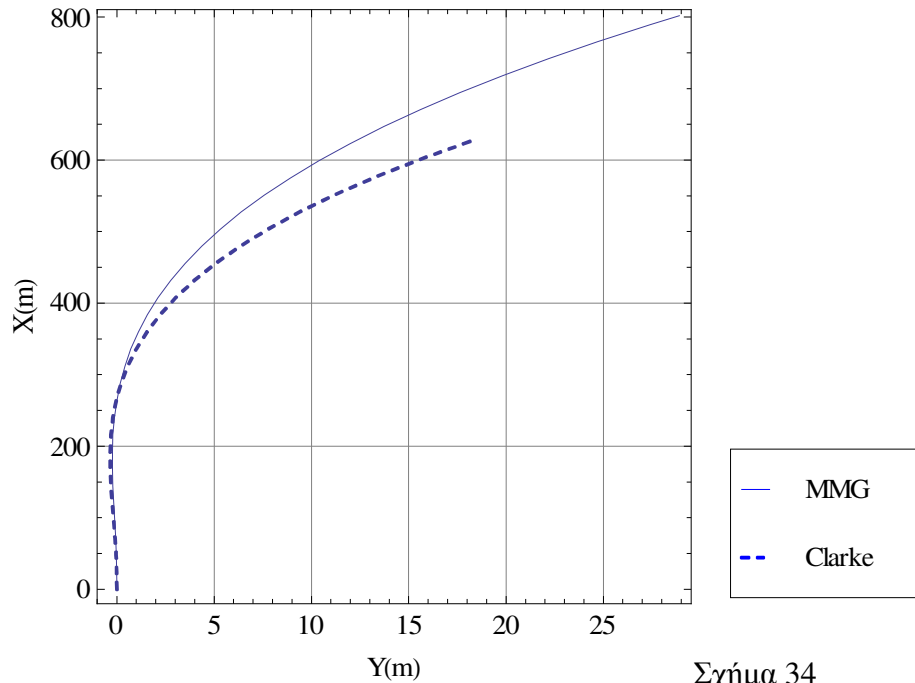
Σχήμα 33

	Clarke			MMG		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Προχώρηση	1087.840	3.30238	179.543	1392.580	4.22751	237.228
Μεταφορά	514.186	1.56093	179.543	679.785	2.06364	237.228
Τακτική διάμετρος	1271.030	3.8585	366.921	1473.160	4.47212	439.826

Η προχώρηση και η τακτική διάμετρος ικανοποιούν τα πρότυπα του IMO.

➤ Αρχική ικανότητα στροφής (γωνία πηδαλίου, 10°)

Σχεδιάστηκαν στο ίδιο διάγραμμα οι δύο τροχιές που προέκυψαν για τις διαφορετικές μοντελοποιήσεις των δυνάμεων και των ροπών του πηδαλίου.

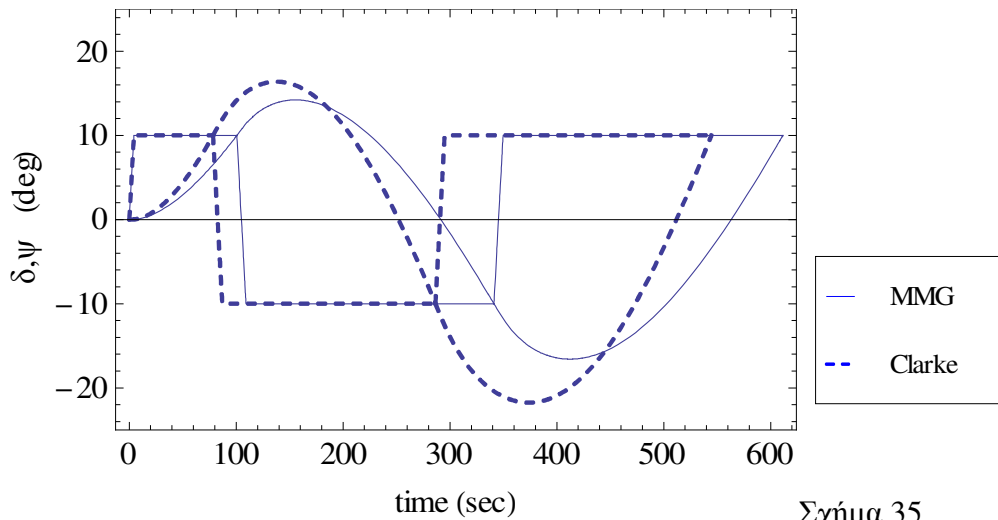


Σχήμα 34

	<i>Clarke</i>			<i>MMG</i>		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Μήκος Τροχιάς	626.692	1.90247	78.3777	803.151	2.43815	100.6

Το μήκος τροχιάς ικανοποιεί τα πρότυπα του IMO.

➤ **Zig-zag 10°/10°**

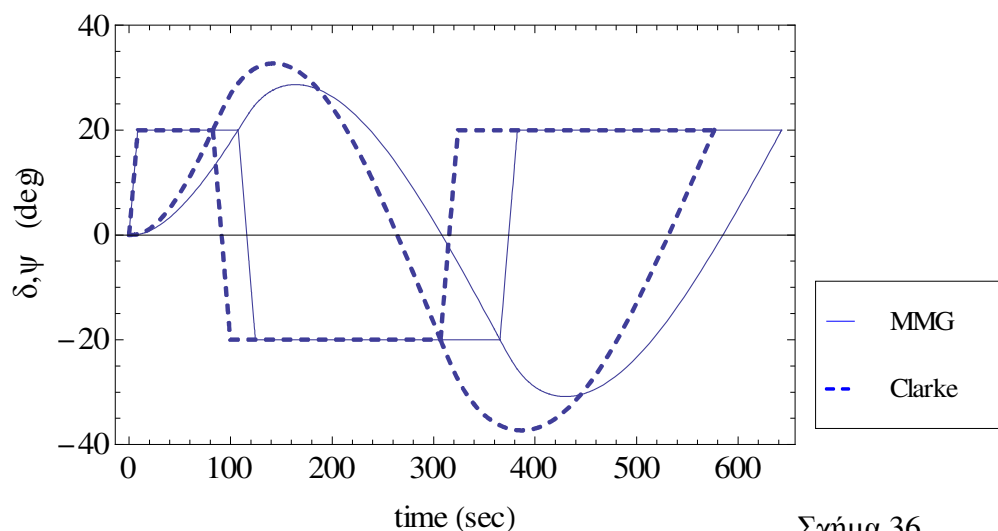


Σχήμα 35

	<i>Clarke</i>	<i>MMG</i>
	degrees (°)	degrees (°)
1 ^η γωνία υπέρβασης	6.38799	4.219
2 ^η γωνία υπέρβασης	11.7543	6.58582

Για το συγκεκριμένο πλοίο ο λόγος L/U ισούται με 40.9815 s. Επομένως θα πρέπει η πρώτη γωνία υπέρβασης να είναι μικρότερη από 20° και η δεύτερη γωνία υπέρβασης να είναι μικρότερη από 40°. Ικανοποιούνται όλες οι απαιτήσεις.

➤ **Zig-zag 20°/20°**



Σχήμα 36

	<i>Clarke</i>	<i>MMG</i>
	degrees (°)	degrees (°)
1 ^η γωνία υπέρβασης	12.7272	8.6844

Η γωνία υπέρβασης ικανοποιεί τα πρότυπα του IMO.

Διαγωγή

Για το **δεξαμενόπλοιο (VLCC)** εξετάστηκε η επίδραση της διαγωγής σε όλους τους ελιγμούς (κύκλος στροφής, αρχική ικανότητα στροφής, ζιγκ-ζαγκ 10°/10°, ζιγκ-ζαγκ 20°/20°). Εφαρμόστηκε το μη γραμμικό μοντέλο με μοντελοποίηση πηδαλίου που βασίζεται στο μοντέλο MMG.

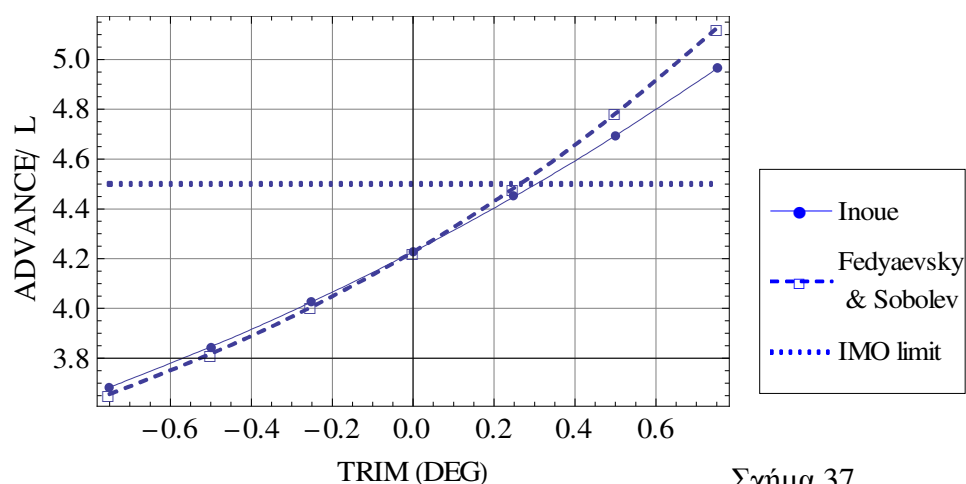
Οι υδροδυναμικές παράγωγοι της ταχύτητας διορθώθηκαν με δύο τρόπους, σύμφωνα με τους τύπους του Inoue (1978) και σύμφωνα με τους τύπους των Fedyaevsky and Sobolev (1964). Τα αποτελέσματα από αυτούς τους δύο τρόπους σχεδιάστηκαν στα ίδια διαγράμματα για καλύτερη σύγκριση.

Όπως έχει επισημανθεί και στο Κεφάλαιο 4, θετική θεωρείται η έμπρυσμη διαγωγή. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για τις ακόλουθες διαμήκειες κλίσεις :

θ (Deg)	-0.75	-0.5	-0.25	0	0.25	0.5	0.75
τ (m)	-4.31165	-2.87443	-1.43722	0	1.43722	2.87443	4.31165

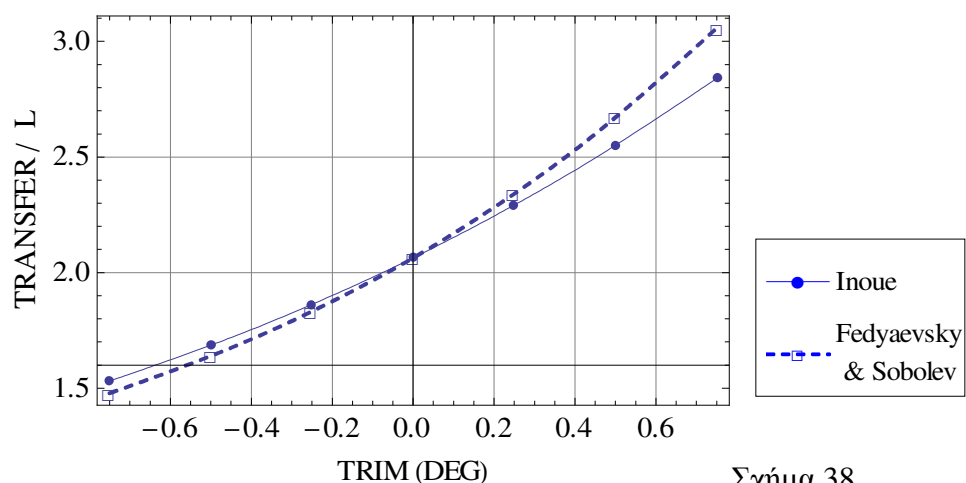
➤ Κύκλος στροφής (με μέγιστη γωνία πηδαλίου, 35°)

Προχώρηση



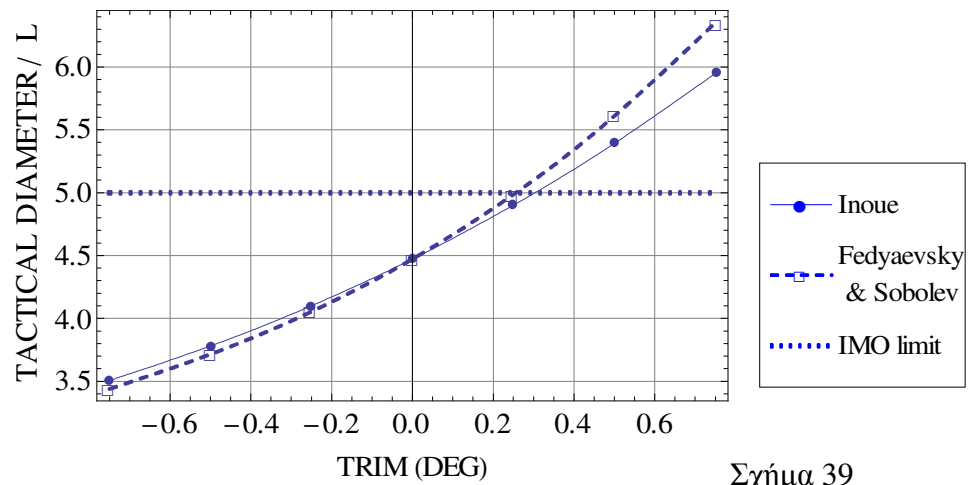
Σχήμα 37

Μεταφορά



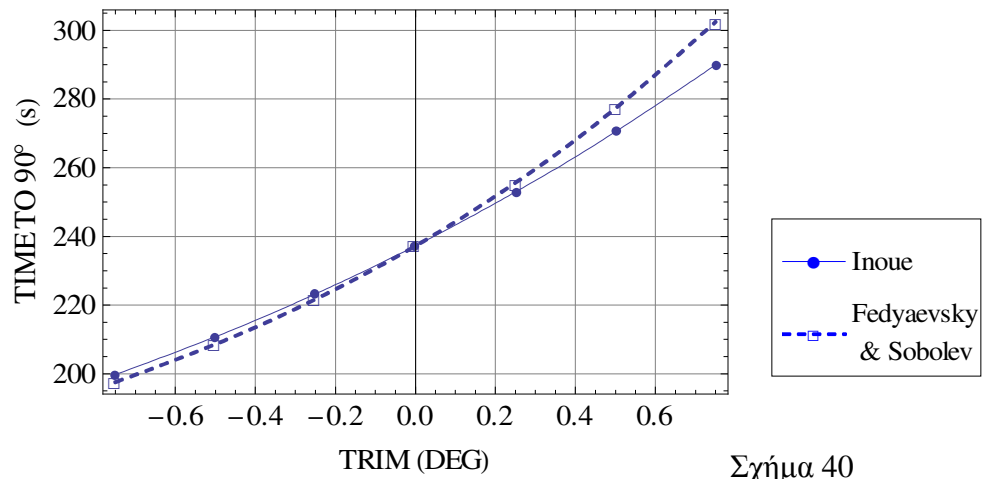
Σχήμα 38

Τακτική διάμετρος



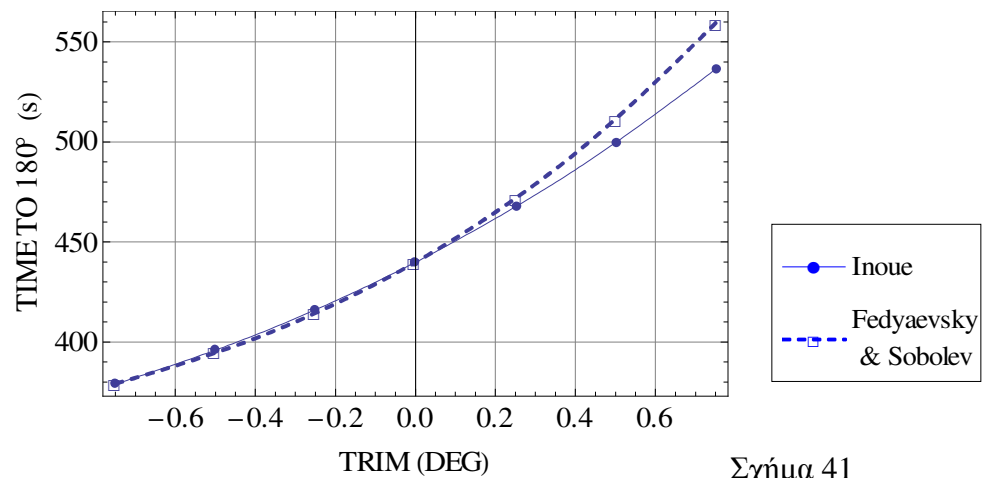
Σχήμα 39

Χρόνος μέχρι να στραφεί το πλοίο κατά 90°



Σχήμα 40

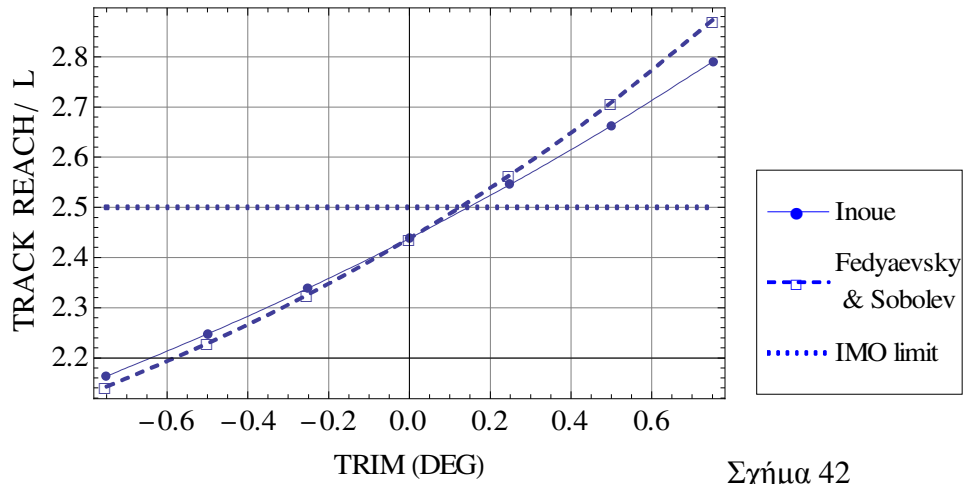
Χρόνος μέχρι να στραφεί το πλοίο κατά 180°



Σχήμα 41

➤ Αρχική ικανότητα στροφής (γωνία πηδαλίου, 10°)

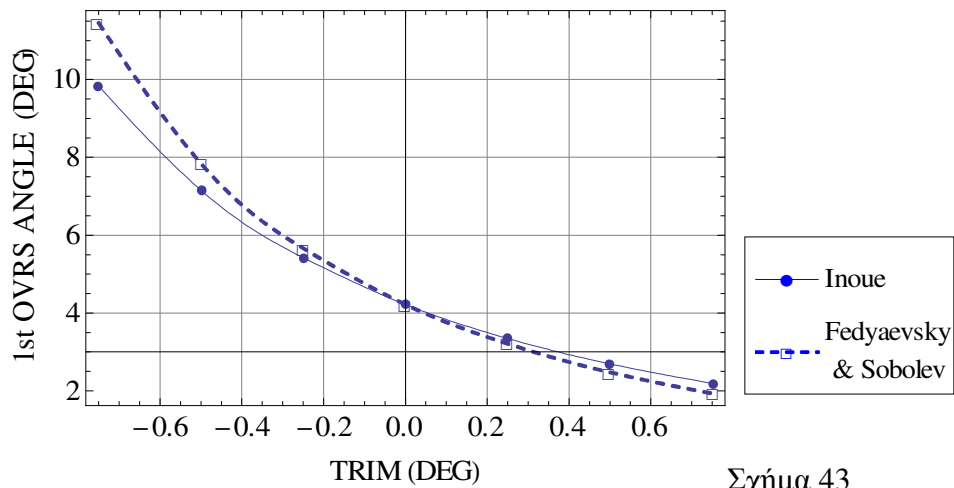
Μήκος τροχιάς



Σχήμα 42

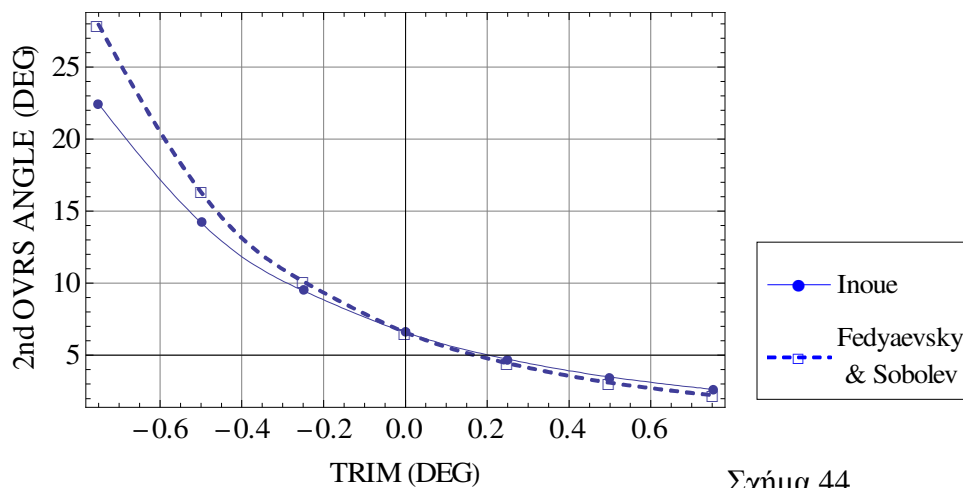
➤ Zig-zag 10°/10°

1^η γωνία υπέρβασης



Σχήμα 43

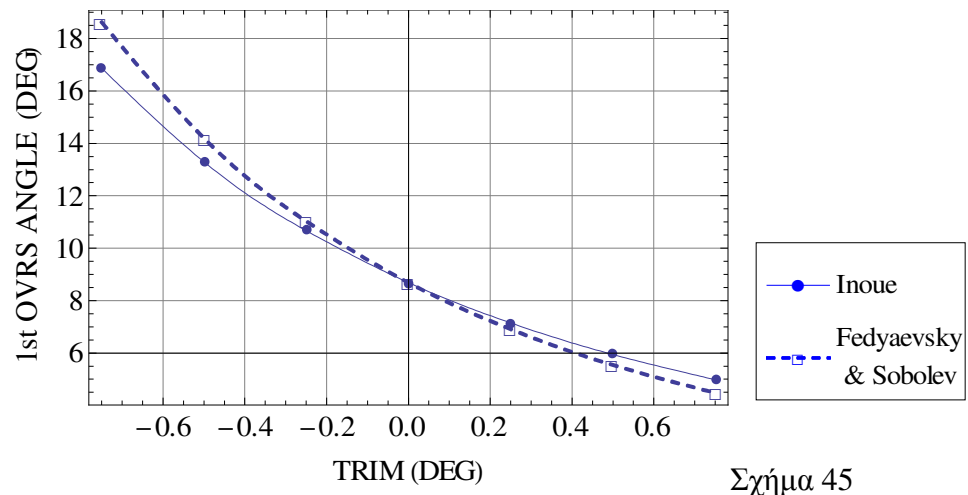
2^η γωνία υπέρβασης



Σχήμα 44

Zig-zag 20°/20°

1^η γωνία υπέρβασης

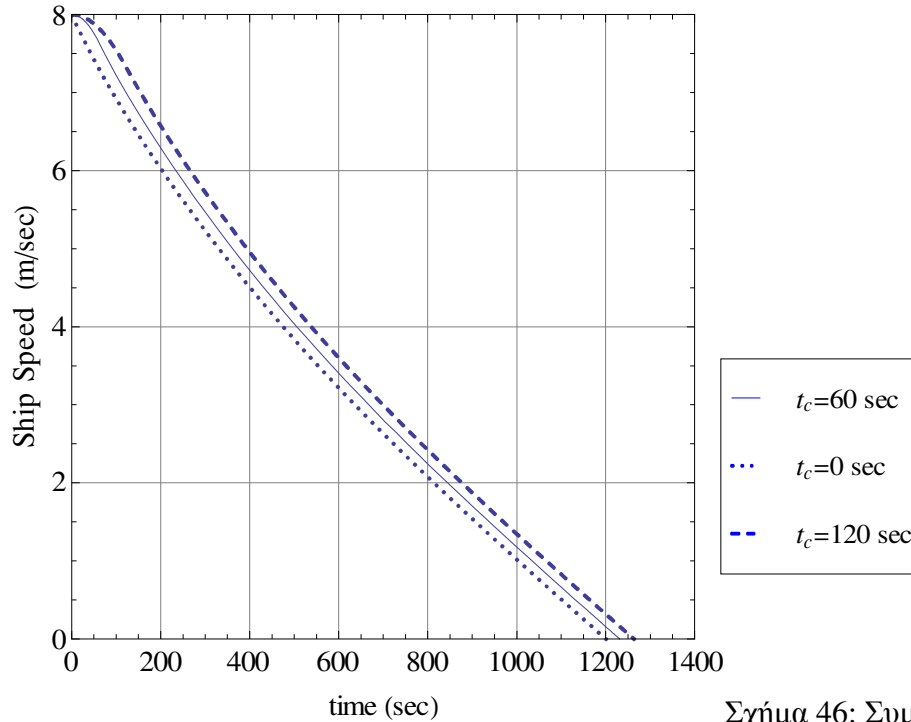


Σχήμα 45

ΕΛΙΓΜΟΣ ΣΤΑΜΑΤΗΜΑΤΟΣ

Για τη δοκιμή σταματήματος θεωρείται πως το δεξαμενόπλοιο (VLCC) έχει πρόσω ταχύτητα 8 m/s (15.55 kn) που αντιστοιχεί σε 74.9 RPM ενώ η όπισθεν ταχύτητα είναι 7.13 m/s που αντιστοιχεί σε 61.79 RPM (82.5% των πρόσω στροφών).

Ακολουθεί διάγραμμα της μεταβολή της ταχύτητας του πλοίου συναρτήσει του χρόνου για τρεις ελιγμούς σταματήματος που διαφέρουν ως προς το χρονικό διάστημα αντιστροφής της ώσης (t_c). Το χρονικό διάστημα των 60 sec προτείνεται από τον IMO.



Σχήμα 46: Συμπεριφορά σταματήματος VLCC.

	$t_c=0 \text{ sec}$		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Μήκος σταματήματος	4145.12	12.5835	1200.40

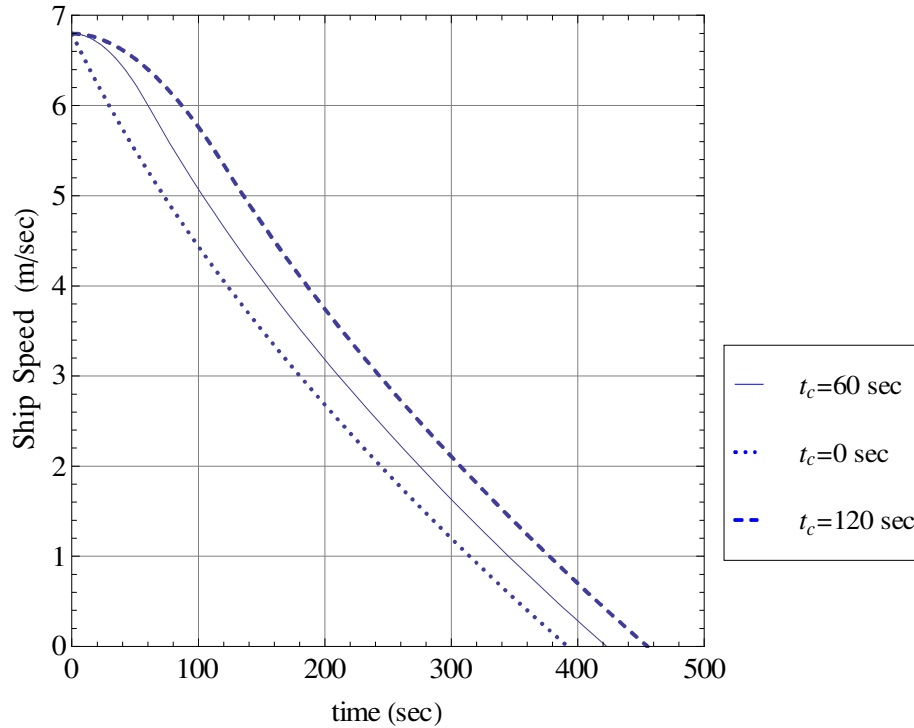
	$t_c=60 \text{ sec}$		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Μήκος σταματήματος	4390.97	13.3298	1231.36

	$t_c=120 \text{ sec}$		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Μήκος σταματήματος	4641.07	14.089	1263.30

Αντίστοιχη μελέτη έχει γίνει για ένα VLCC από τους Yasukawa and Kose (2003) και τα αποτελέσματα είναι πολύ κοντινά με αυτά της παρούσας εργασίας. Για $t_c=0 \text{ sec}$, 60 sec , 120 sec το μήκος σταματήματος είναι 12.2 μήκη πλοίου, 13.1 μήκη πλοίου, 13.9 μήκη πλοίου αντίστοιχα και οι χρόνοι είναι πολύ κοντά στα 1200 sec.

Για το δεξαμενόπλοιο (μικρότερων διαστάσεων) θα εξεταστεί το σταμάτημα σε κατάσταση πλήρους φόρτωσης και σε κατάσταση ερματισμού.

Για το σταμάτημα σε κατάσταση **πλήρους φόρτωσης** θεωρείται πως το δεξαμενόπλοιο έχει πρόσω ταχύτητα 6.797 m/s (13.2 kn) που αντιστοιχεί σε 167 RPM ενώ η όπισθεν ταχύτητα είναι 5.81 m/s που αντιστοιχεί σε 141.95 RPM (85% των πρόσω στροφών).



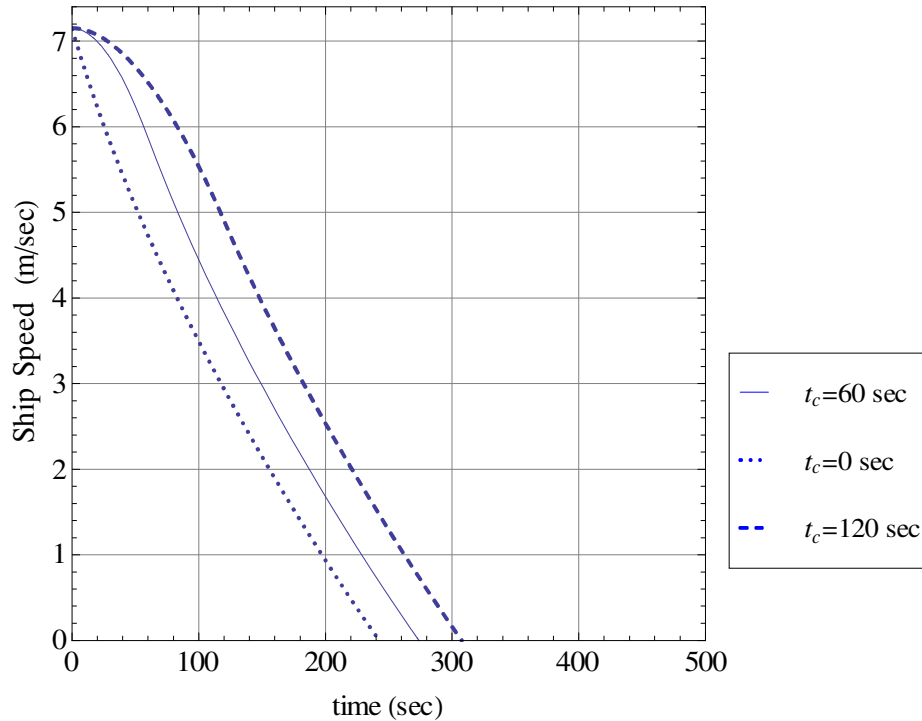
Σχήμα 47: Συμπεριφορά σταματήματος μικρότερου δεξαμενοπλοίου σε κατάσταση πλήρους φόρτωσης.

	$t_c=0 \text{ sec}$		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Μήκος σταματήματος	1153.17	9.57779	392.105

	$t_c=60 \text{ sec}$		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Μήκος σταματήματος	1358.11	11.28	422.899

	$t_c=120 \text{ sec}$		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Μήκος σταματήματος	1564.27	12.9923	455.14

Για το σταμάτημα σε **κατάσταση ερματισμού** θεωρείται πως το δεξαμενόπλοιο έχει πρόσω ταχύτητα 7.151 m/s (13.9 kn) που αντιστοιχεί σε 167 RPM ενώ η όπισθεν ταχύτητα είναι 6.174 m/s που αντιστοιχεί σε 141.95 RPM (85% των πρόσω στροφών).



Σχήμα 48: Συμπεριφορά σταματήματος μικρότερου δεξαμενοπλοίου σε κατάσταση ερματισμού.

	$t_c=0$ sec		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Μήκος σταματήματος	751.899	6.24501	242.46

	$t_c=60$ sec		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Μήκος σταματήματος	968.766	8.04623	273.839

	$t_c=120$ sec		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Μήκος σταματήματος	1187.86	9.86598	307.56

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΝΕΜΟΥ ΣΤΗΝ ΕΛΙΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

Ελιγμός Σταματήματος υπό την επίδραση ανέμου

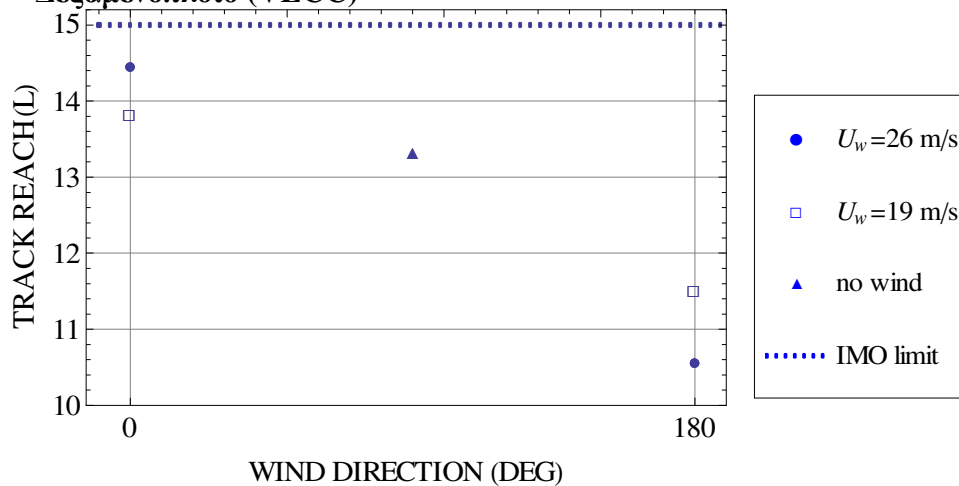
Μελετήθηκε ο ελιγμός σταματήματος για δύο ταχύτητες ανέμου, 26 m/s και 19 m/s. Για κάθε ταχύτητα ανέμου εξετάστηκε μετωπικός ($\Psi_w = 180^\circ$) και ακοιλουθών ($\Psi_w = 0^\circ$) άνεμος.

Οι αρχικές συνθήκες για την πρόσω και την όπισθεν ταχύτητα του πλοίου είναι ίδιες με αυτές που εφαρμόστηκαν στο σταμάτημα χωρίς άνεμο. Ως χρονικό διάστημα αντιστροφής της ώσης (t_c) θεωρήθηκε αυτό των 60 sec.

Για τις δύο ταχύτητες ανέμου δημιουργήθηκε διάγραμμα της μεταβολής της ταχύτητας του πλοίου συναρτήσει του χρόνου και στο ίδιο διάγραμμα σχεδιάστηκε η καμπύλη για σταμάτημα απουσία ανέμου.

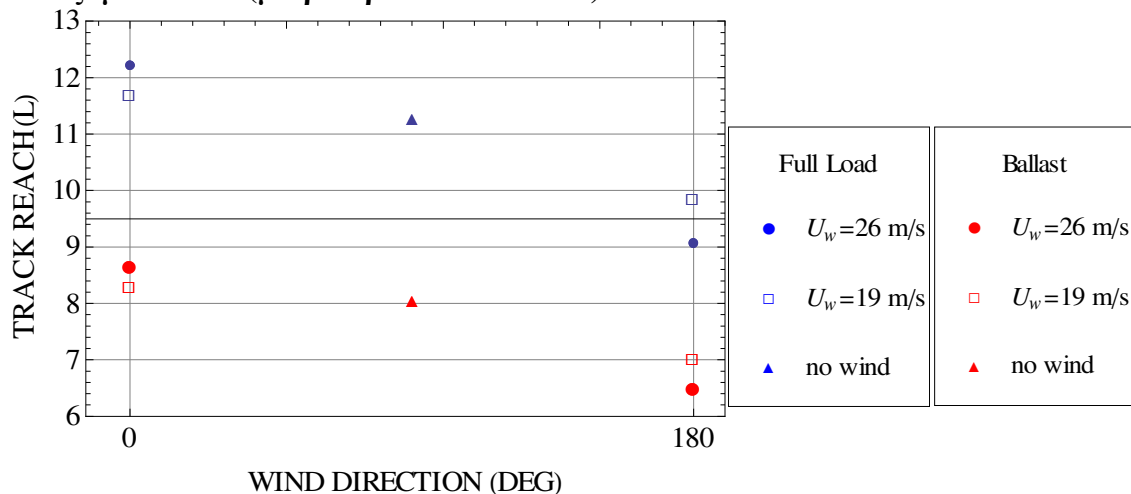
Επίσης δημιουργήθηκε, για κάθε ένα από τα δύο πλοία που εξετάσαμε, συγκεντρωτικό διάγραμμα με τα μήκη σταματήματος συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου. Το διάγραμμα περιλαμβάνει τις τιμές για τις δύο ταχύτητες ανέμου που εξετάστηκαν και την τιμή για τη δοκιμή απουσία ανέμου.

• Δεξαμενόπλοιο (VLCC)



Σχήμα 49: Συγκεντρωτικό διάγραμμα για VLCC, μήκη σταματήματος συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου.

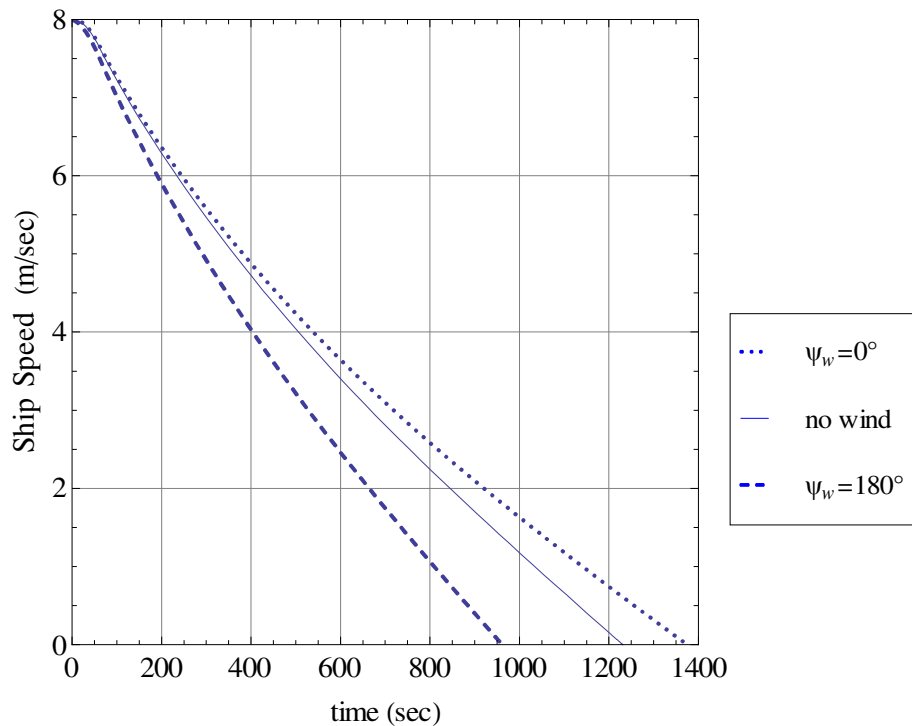
• Δεξαμενόπλοιο (μικρότερων διαστάσεων)



Σχήμα 50: Συγκεντρωτικό διάγραμμα για μικρότερο δεξαμενόπλοιο, μήκη σταματήματος συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης του ανέμου. (για δύο καταστάσεις φόρτωσης, πλήρη φόρτωση και ερματισμό)

Δεξαμενόπλοιο (VLCC)

➤ $U_w = 26 \text{ m/s}$



Σχήμα 51 : Συμπεριφορά σταματήματος VLCC σε άνεμο 26 m/s.

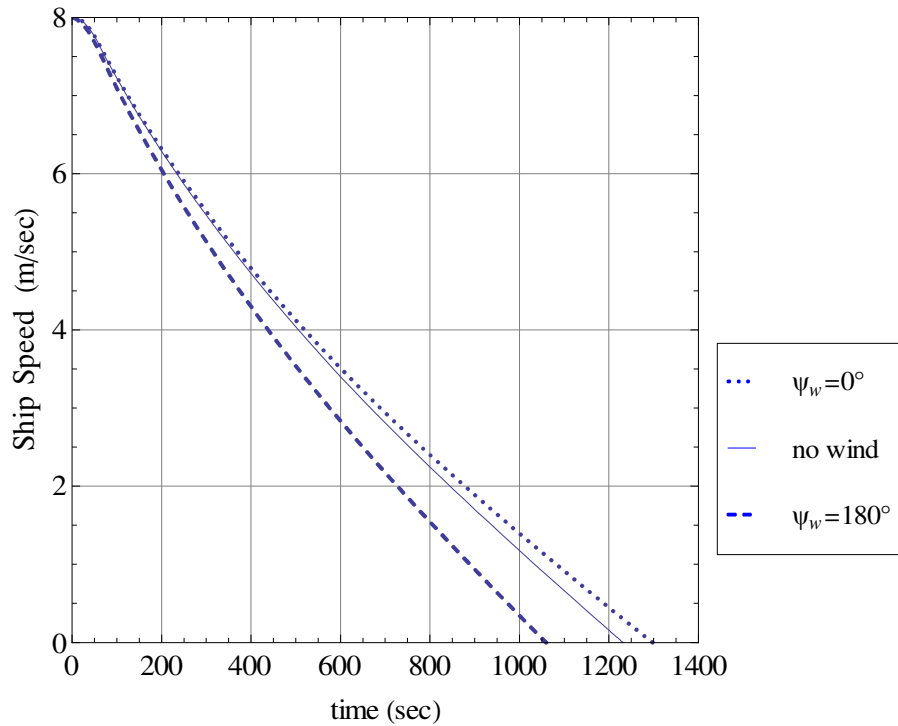
$U_w = 26 \text{ m/s}$	$\psi_w = 0^\circ$		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Μήκος σταματήματος	4763.11	14.4595	1375.32

	<i>no wind</i>		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Μήκος σταματήματος	4390.97	13.3298	1231.36

$U_w = 26 \text{ m/s}$	$\psi_w = 180^\circ$		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Μήκος σταματήματος	3473.03	10.5432	961.946

Δεξαμενόπλοιο (VLCC)

➤ $U_w = 19 \text{ m/s}$



Σχήμα 52 : Συμπεριφορά σταματήματος VLCC σε άνεμο 19 m/s.

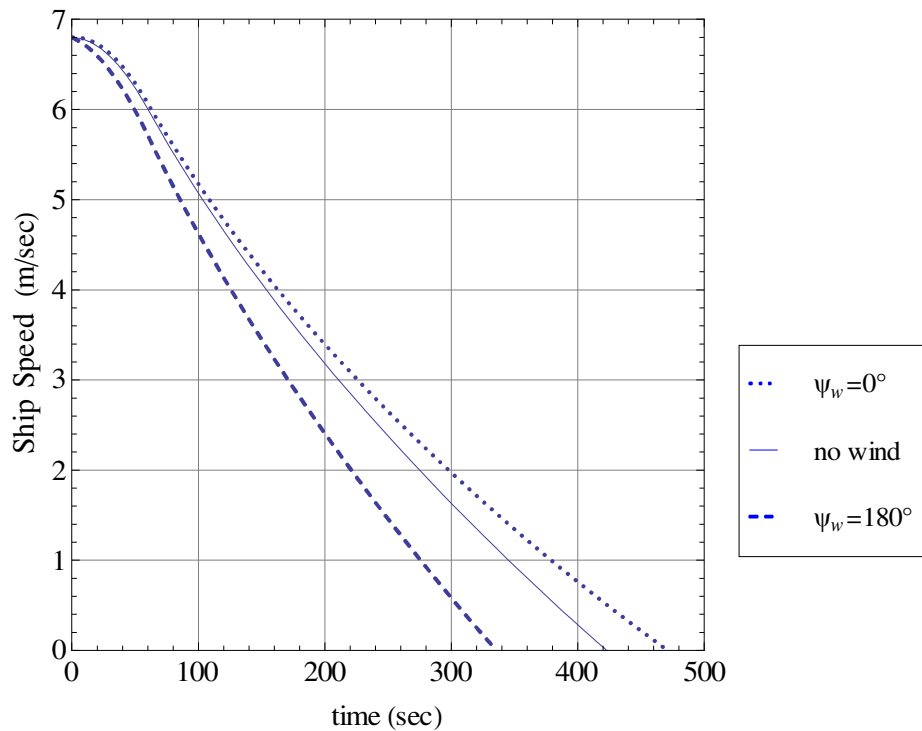
$U_w = 19 \text{ m/s}$	$\psi_w = 0^\circ$		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Μήκος σταματήματος	4553.2	13.8223	1297.14

	<i>no wind</i>		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Μήκος σταματήματος	4390.97	13.3298	1231.36

$U_w = 19 \text{ m/s}$	$\psi_w = 180^\circ$		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Μήκος σταματήματος	3792.37	11.5126	1059.46

Δεξαμενόπλοιο (μικρότερων διαστάσεων) σε πλήρη φόρτωση

➤ $U_w = 26 \text{ m/s}$



Σχήμα 53 : Συμπεριφορά σταματήματος μικρότερου δεξαμενοπλοίου σε άνεμο 26 m/s.

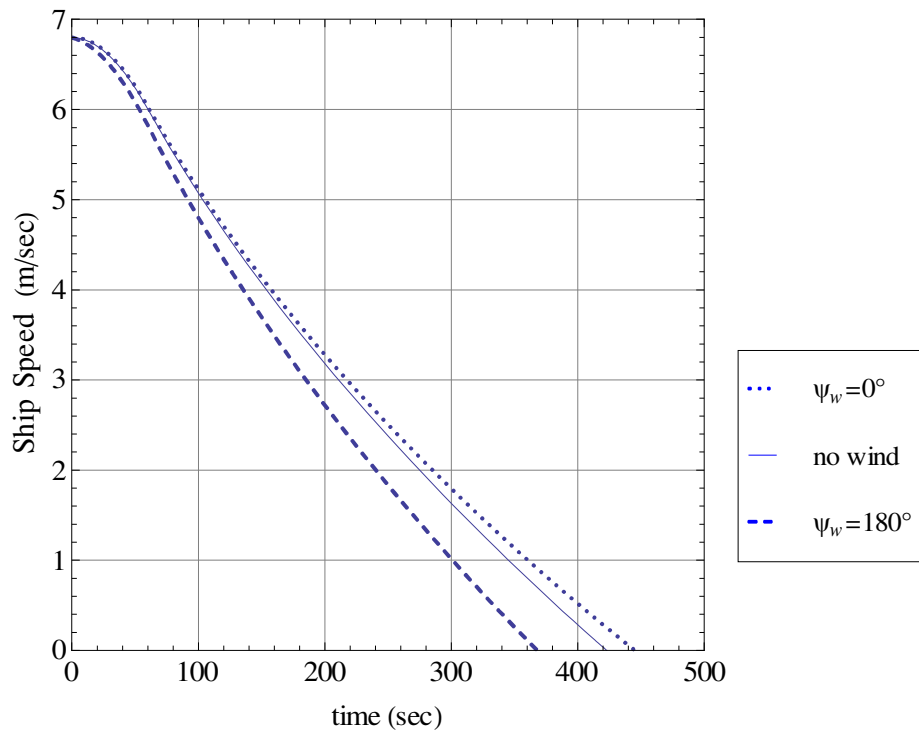
$U_w = 26 \text{ m/s}$	$\psi_w = 0^\circ$		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Μήκος σταματήματος	1470.22	12.2111	471.245

	<i>no wind</i>		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Μήκος σταματήματος	1358.11	11.28	422.899

$U_w = 26 \text{ m/s}$	$\psi_w = 180^\circ$		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Μήκος σταματήματος	1093.27	9.0803	335.736

Δεξαμενόπλοιο (μικρότερων διαστάσεων) σε πλήρη φόρτωση

➤ $U_w = 19 \text{ m/s}$



Σχήμα 54 : Συμπεριφορά σταματήματος μικρότερου δεξαμενοπλοίου σε άνεμο 19 m/s.

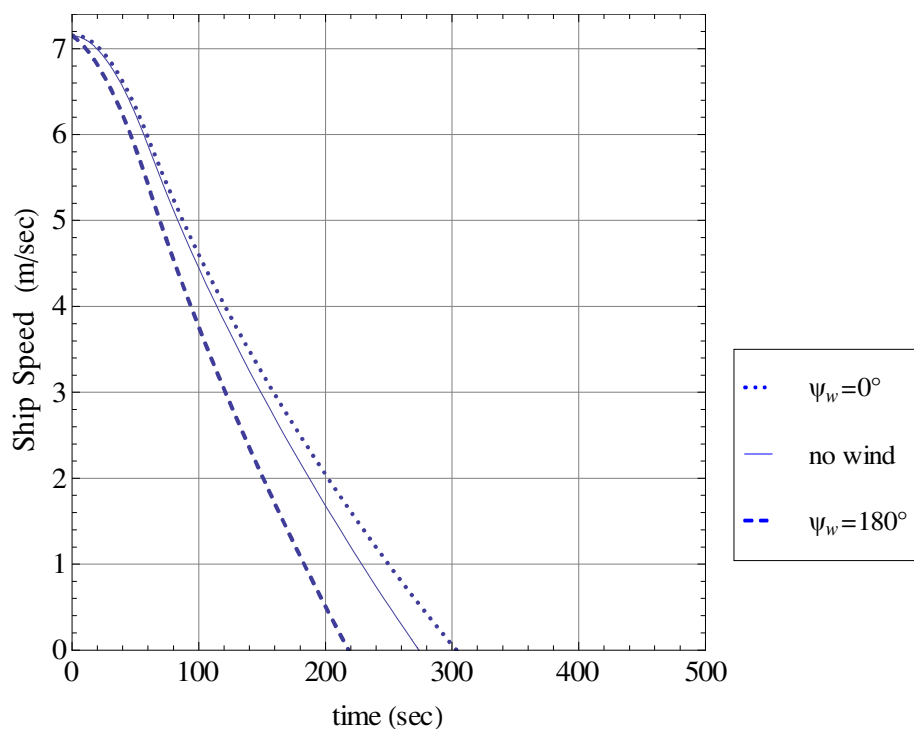
$U_w = 19 \text{ m/s}$	$\psi_w = 0^\circ$		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Μήκος σταματήματος	1407.91	11.6936	445.271

	<i>no wind</i>		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Μήκος σταματήματος	1358.11	11.28	422.899

$U_w = 19 \text{ m/s}$	$\psi_w = 180^\circ$		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Μήκος σταματήματος	1187.92	9.86646	367.975

Δεξαμενόπλοιο (μικρότερων διαστάσεων) σε κατάσταση ερματισμού

➤ $U_w = 26 \text{ m/s}$



Σχήμα 55 : Συμπεριφορά σταματήματος μικρότερου δεξαμενοπλοίου σε άνεμο 26 m/s.

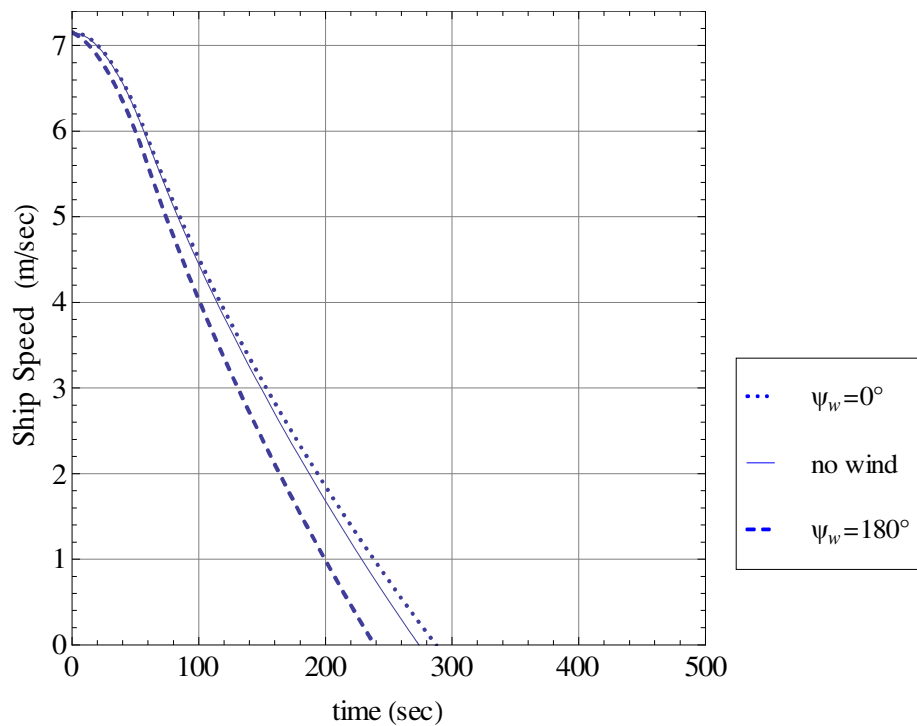
$U_w = 26 \text{ m/s}$	$\psi_w = 0^\circ$		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Μήκος σταματήματος	1043.21	8.66455	303.355

	<i>no wind</i>		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Μήκος σταματήματος	968.766	8.04623	273.839

$U_w = 26 \text{ m/s}$	$\psi_w = 180^\circ$		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Μήκος σταματήματος	781.276	6.48901	218.289

Δεξαμενόπλοιο (μικρότερων διαστάσεων) σε κατάσταση ερματισμού

➤ $U_w = 19 \text{ m/s}$



Σχήμα 56 : Συμπεριφορά σταματήματος μικρότερου δεξαμενοπλοίου σε άνεμο 19 m/s.

$U_w = 19 \text{ m/s}$	$\psi_w = 0^\circ$		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Μήκος σταματήματος	1001.46	8.31778	287.425

	<i>no wind</i>		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Μήκος σταματήματος	968.766	8.04623	273.839

$U_w = 19 \text{ m/s}$	$\psi_w = 180^\circ$		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Μήκος σταματήματος	847.7	7.0407	238.697

Επίδραση του ανέμου στην ικανότητα στροφής και στη διατήρηση πορείας

Μελετήθηκαν δύο ταχύτητες ανέμου, 26 m/s και 19 m/s, και για κάθε μία από αυτές εξετάστηκαν οι ακόλουθες γωνίες πρόσπτωσης ανέμου (Ψ_w) : 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, -45°, -90°, -135°.

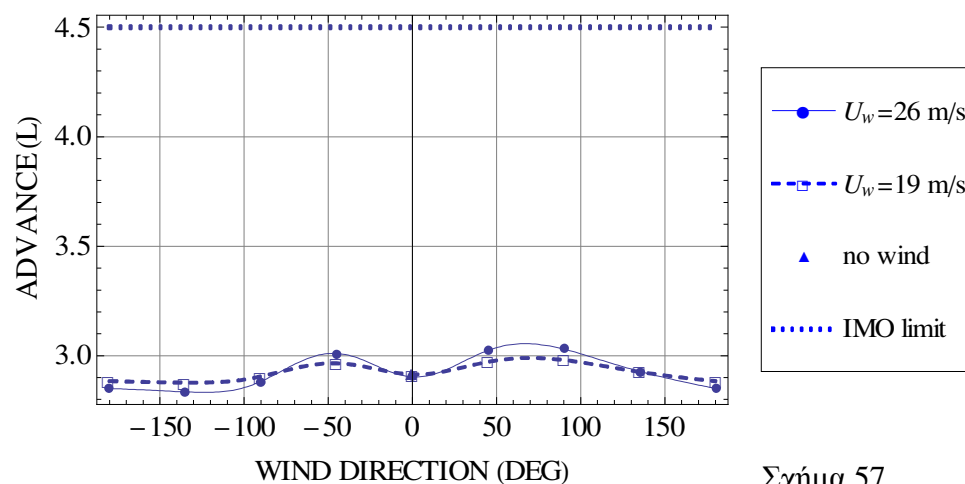
Για το δεξαμενόπλοιο (μικρότερων διαστάσεων) σε πλήρη φόρτωση εξετάστηκε η επίδραση του ανέμου στον κύκλο στροφής. Για το ίδιο πλοίο σε κατάσταση ερματισμού εξετάστηκε η επίδραση του ανέμου στον κύκλο στροφής, στο ζιγκ-ζαγκ 10°/10° και στο ζιγκ-ζαγκ 20°/20° και επιπλέον εξετάστηκαν οι ίδιοι ελιγμοί για μικρότερη ταχύτητα πλοίου.

Δεξαμενόπλοιο (μικρότερων διαστάσεων) σε πλήρη φόρτωση

Σε όλους τους ελιγμούς θεωρήθηκε πως το πλοίο κινείται με αρχική ταχύτητα surge 13.3 kn (6.8 m/s) που αντιστοιχεί σε στροφές έλικας 167 RPM.

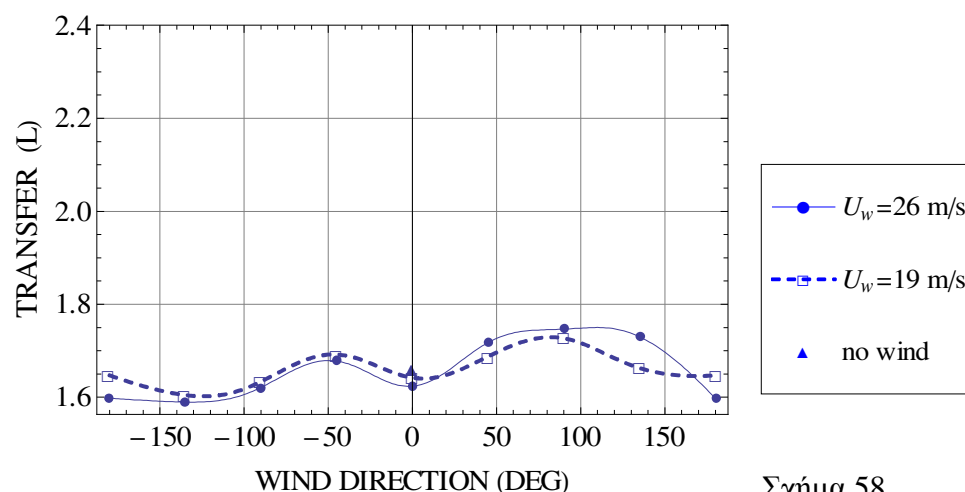
- **Κύκλος στροφής** (με μέγιστη γωνία πηδαλίου, 35°)

Προχώρηση



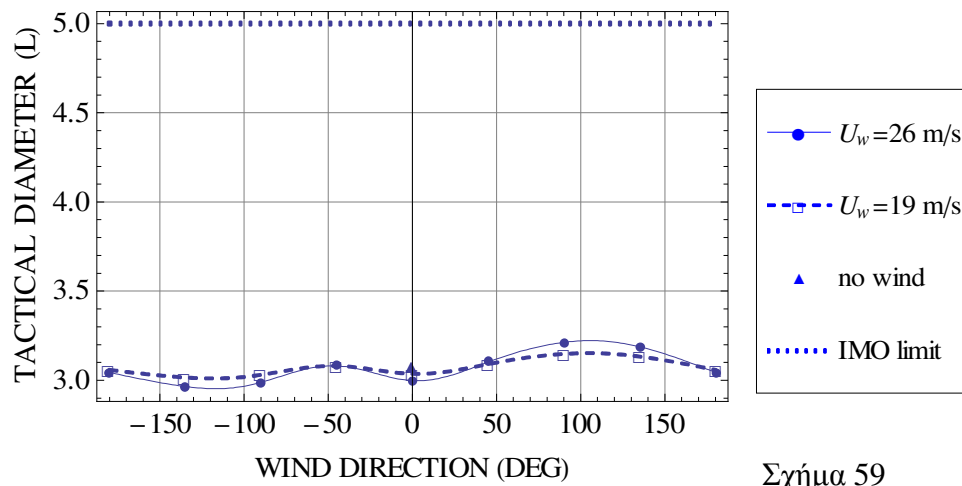
Σχήμα 57

Μεταφορά



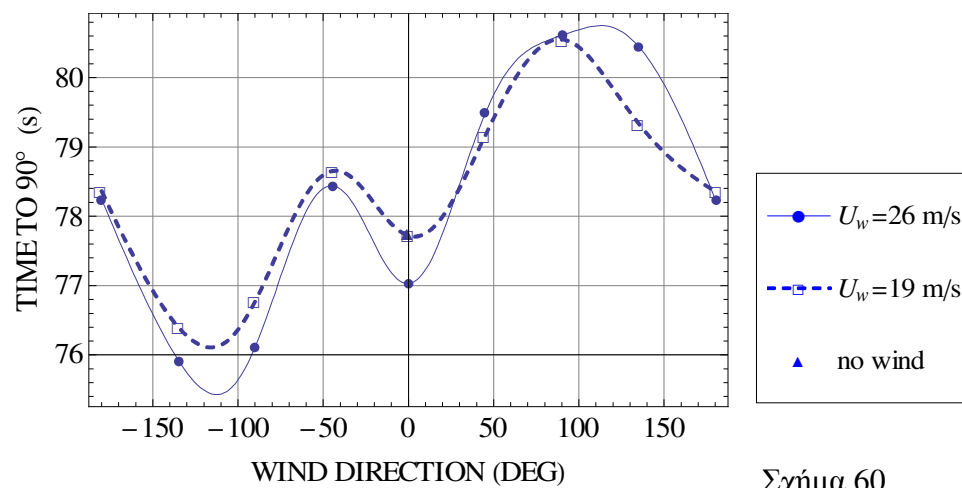
Σχήμα 58

Γακτική διάμετρος



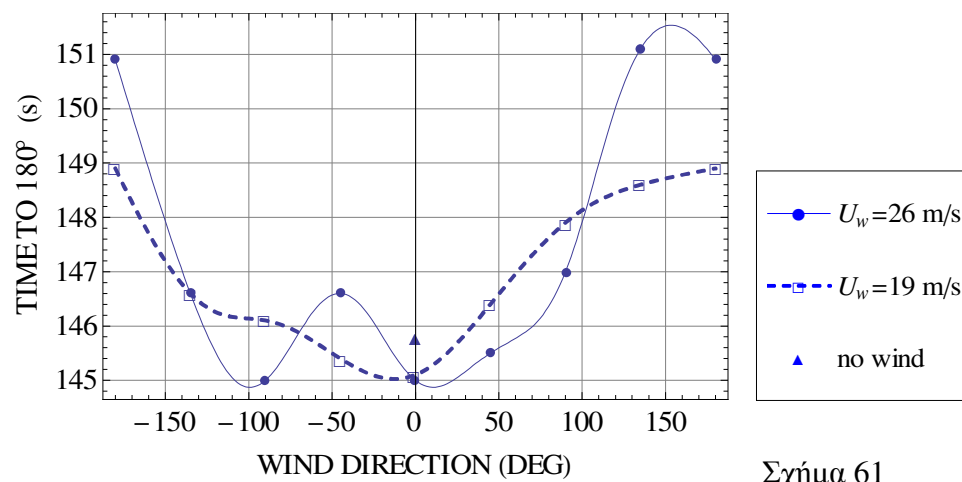
Σχήμα 59

Χρόνος μέχρι να στραφεί το πλοίο κατά 90°



Σχήμα 60

Χρόνος μέχρι να στραφεί το πλοίο κατά 180°



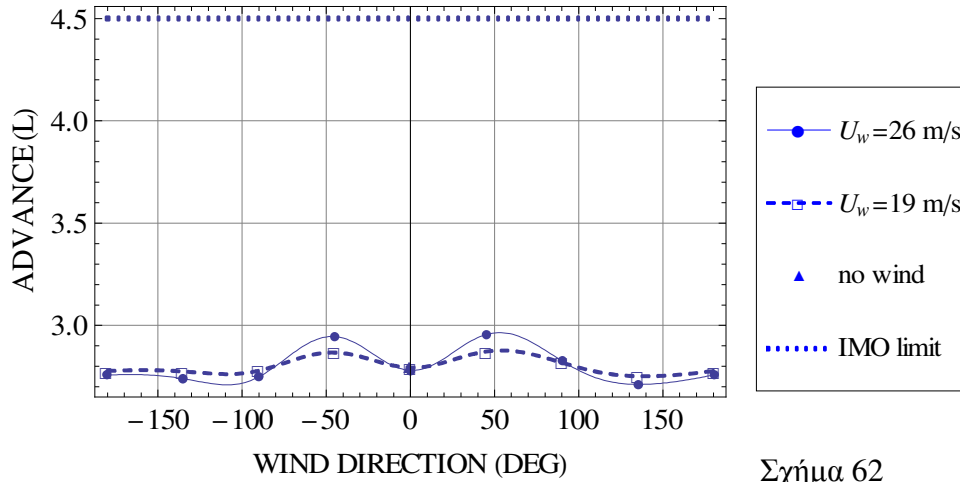
Σχήμα 61

Δεξαμενόπλοιο (μικρότερων διαστάσεων) σε κατάσταση ερματισμού

Σε όλους τους ελιγμούς θεωρήθηκε πως το πλοίο κινείται με αρχική ταχύτητα surge 13.9 kn (7.151 m/s) που αντιστοιχεί σε στροφές έλικας 167 RPM.

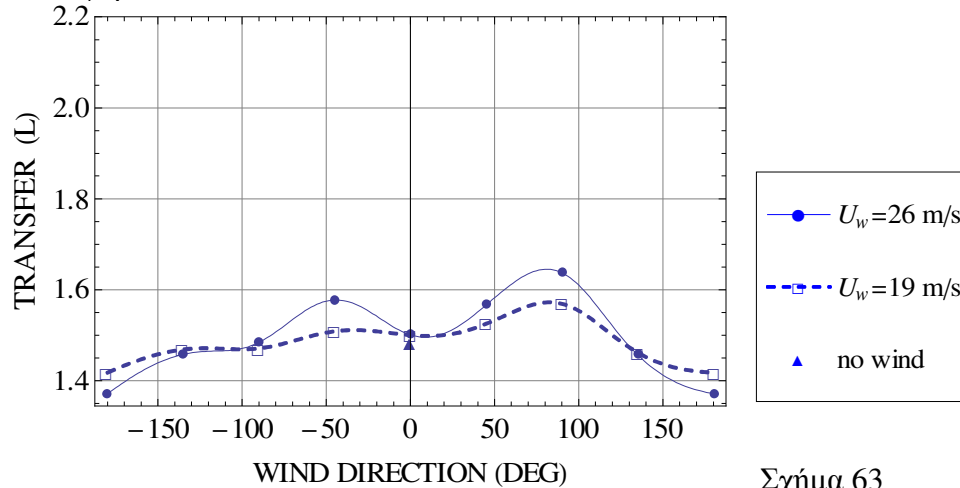
➤ **Κύκλος στροφής** (με μέγιστη γωνία πηδαλιού, 35°)

Προχώρηση



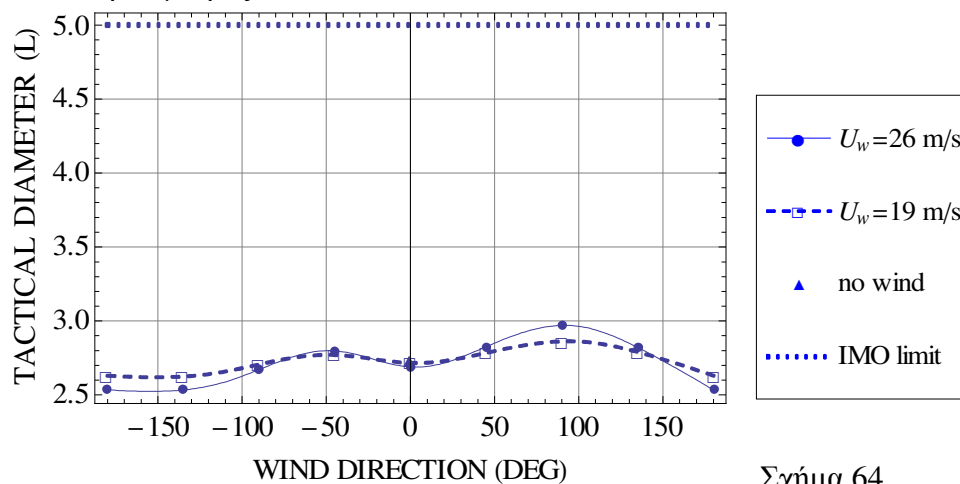
Σχήμα 62

Μεταφορά



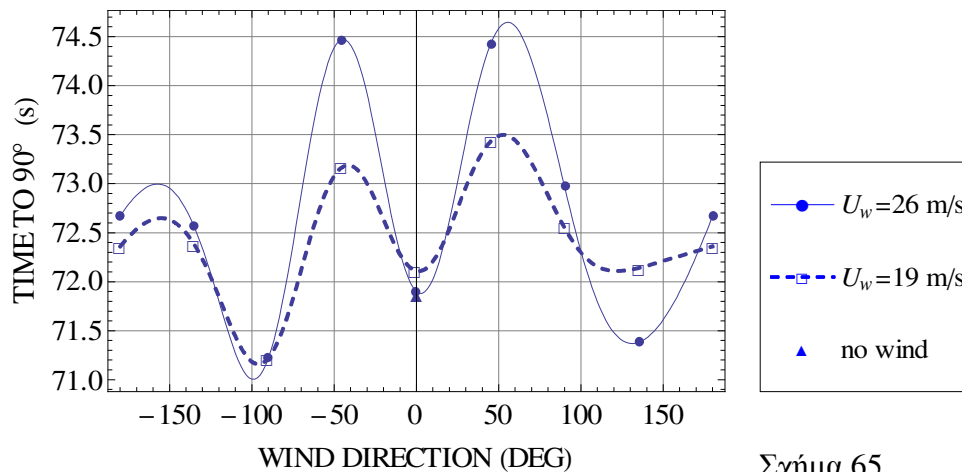
Σχήμα 63

Τακτική διάμετρος



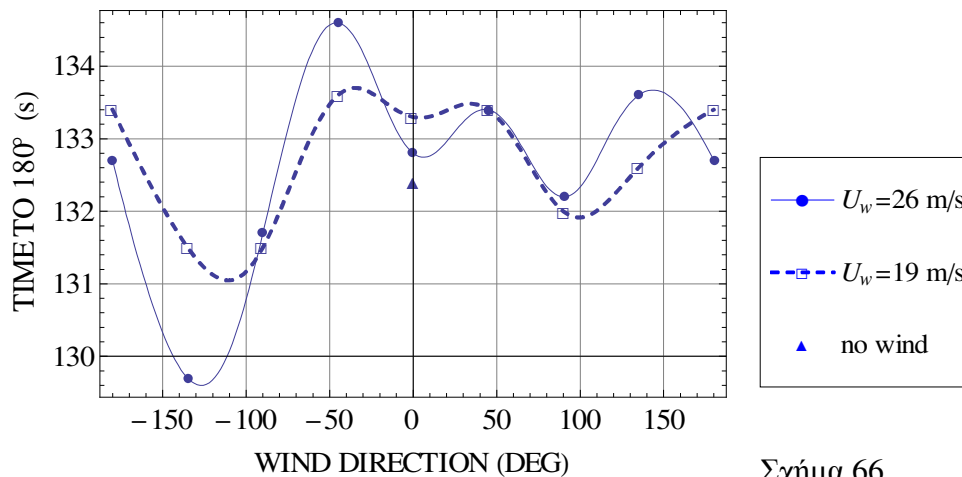
Σχήμα 64

Χρόνος μέχρι να στραφεί το πλοίο κατά 90°



Σχήμα 65

Χρόνος μέχρι να στραφεί το πλοίο κατά 180°

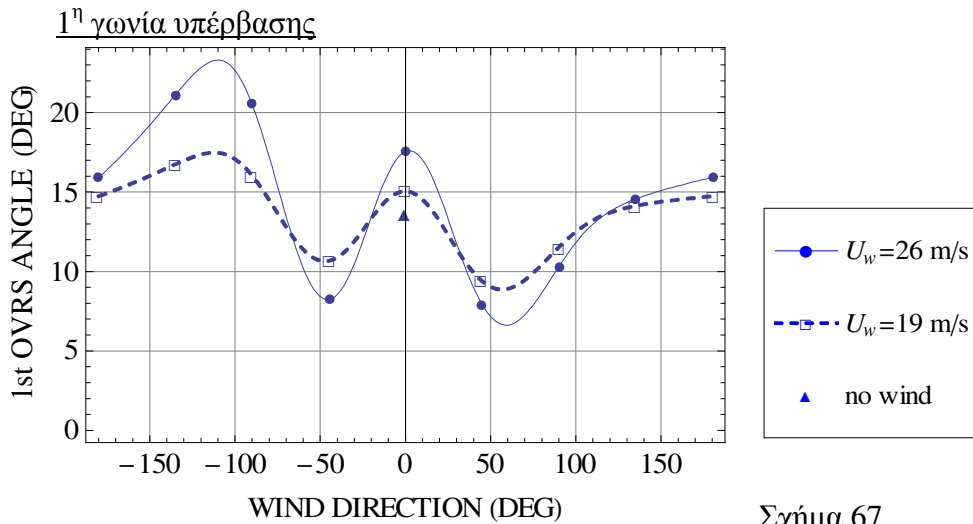


Σχήμα 66

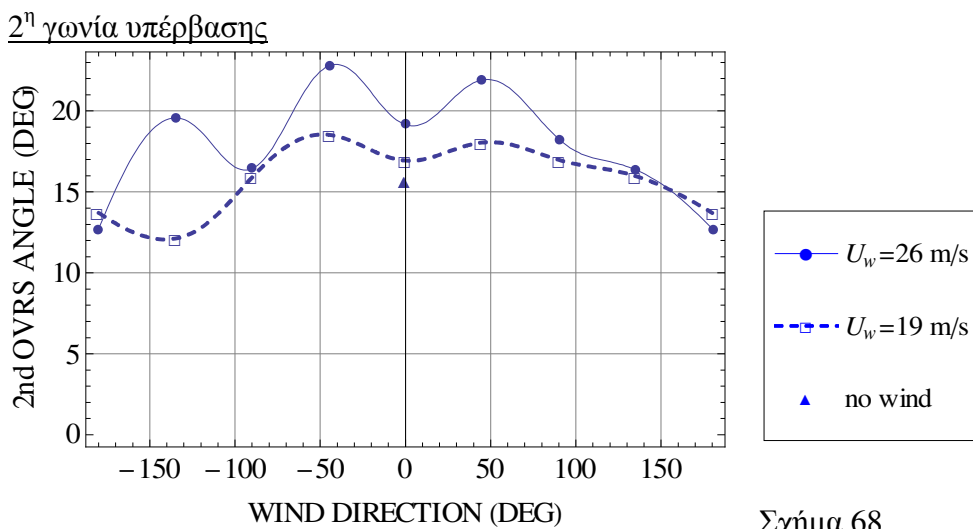
➤ **Zig-zag 10°/10°**

Για τη συγκεκριμένη πλεύση ο λόγος L/U ισούται με 16.8388 s. Επομένως σε ήρεμες συνθήκες θα πρέπει η πρώτη γωνία υπέρβασης να είναι μικρότερη από 13.4194 s και η δεύτερη γωνία υπέρβασης να είναι μικρότερη από 30.1291 s.

Για ταχύτητα ανέμου 26 m/s και γωνίες πρόσπτωσης 45°, 180°, -45° το πλοίο εμφανίζει ασταθή συμπεριφορά στο οριζόντιο επίπεδο, δηλαδή για μια ελάχιστα διαφορετική αρχική συνθήκη εκτελεί πολύ διαφορετικό ελιγμό.



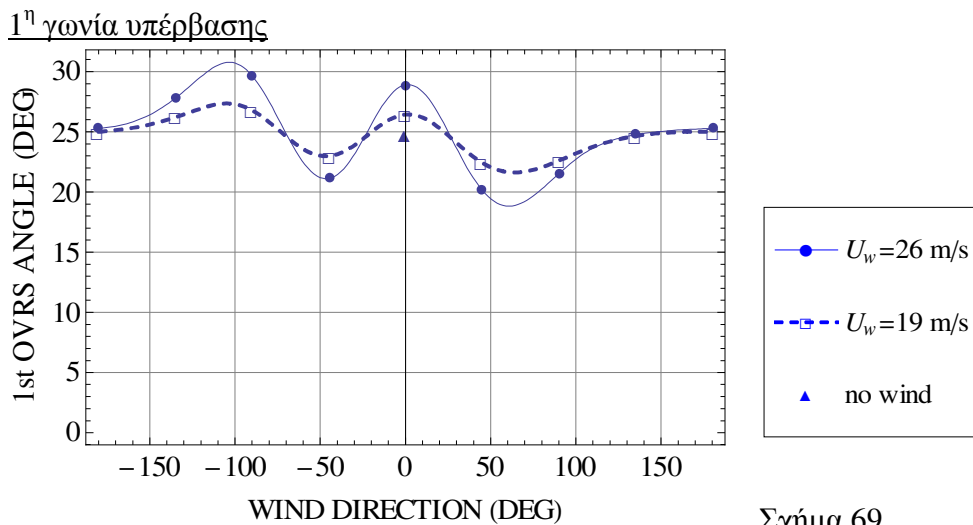
Σχήμα 67



Σχήμα 68

➤ **Zig-zag 20°/20°**

Για ταχύτητα ανέμου 26 m/s και γωνίες πρόσπτωσης 45°, 180°, -45° το πλοίο εμφανίζει ασταθή συμπεριφορά στο οριζόντιο επίπεδο.



Σχήμα 69

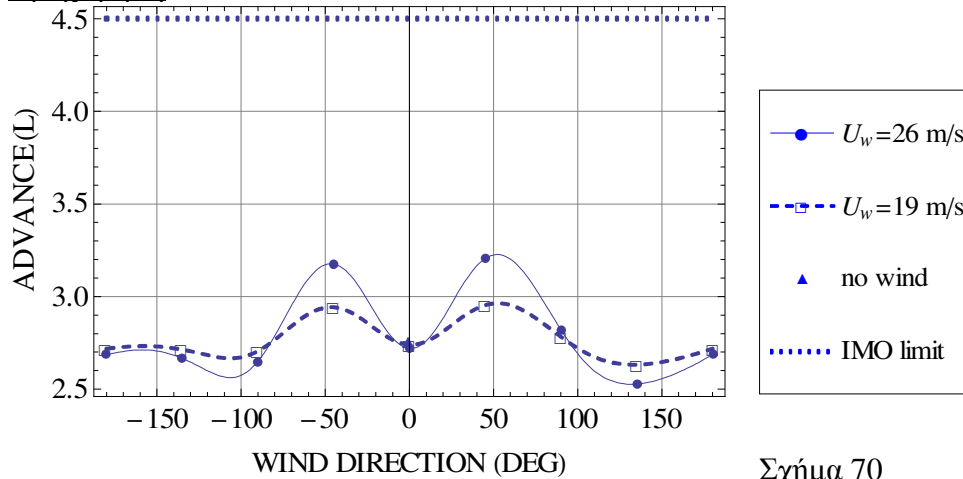
Η γωνία υπέρβασης σύμφωνα με τον IMO δεν πρέπει να υπερβαίνει τις 25°, σε ήρεμες συνθήκες.

Δεξαμενόπλοιο (μικρότερων διαστάσεων) σε κατάσταση ερματισμού με μειωμένη ταχύτητα

Σε όλους τους ελιγμούς θεωρήθηκε πως το πλοίο κινείται με αρχική ταχύτητα surge 9 kn (4.629 m/s) που αντιστοιχεί σε στροφές έλικας 167 RPM.

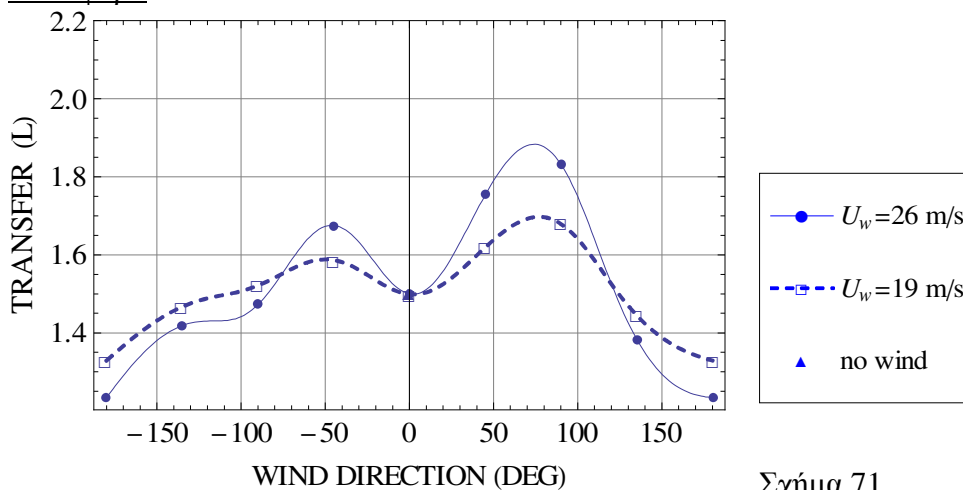
➤ **Κύκλος στροφής** (με μέγιστη γωνία πηδαλίου, 35°)

Προχώρηση



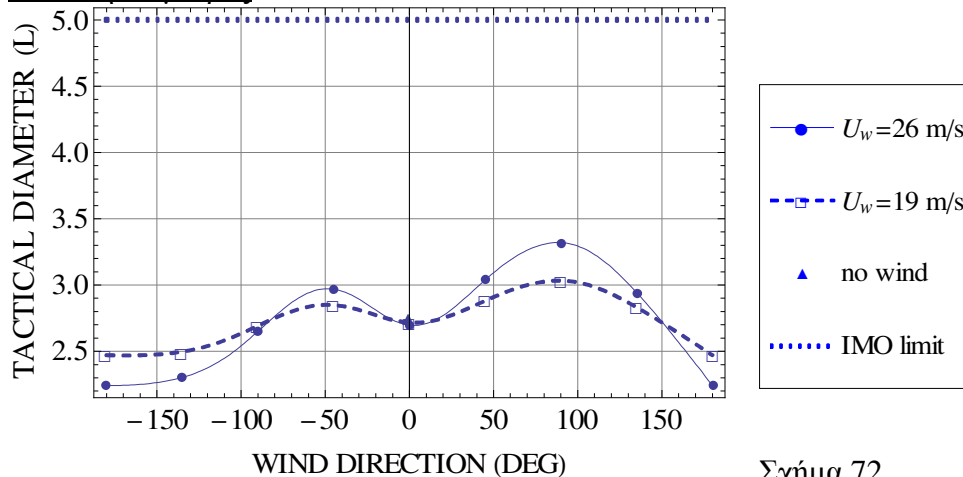
Σχήμα 70

Μεταφορά



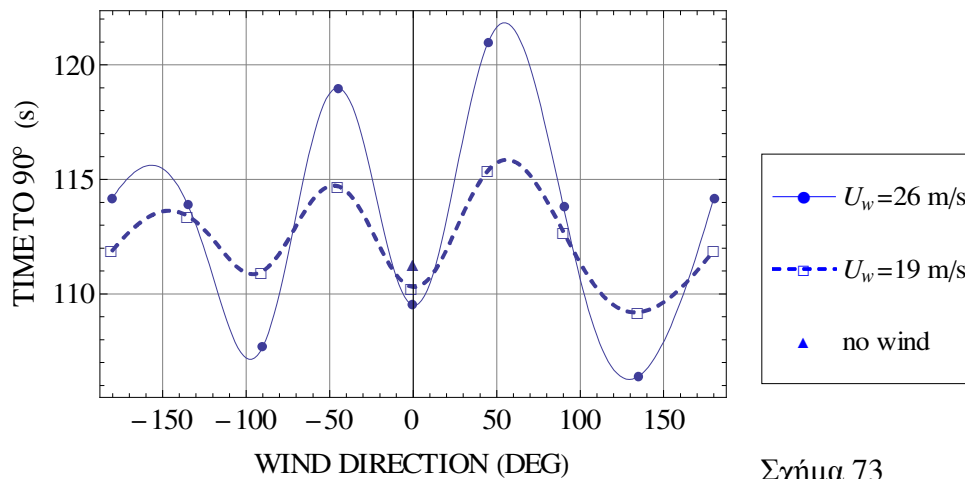
Σχήμα 71

Τακτική διάμετρος



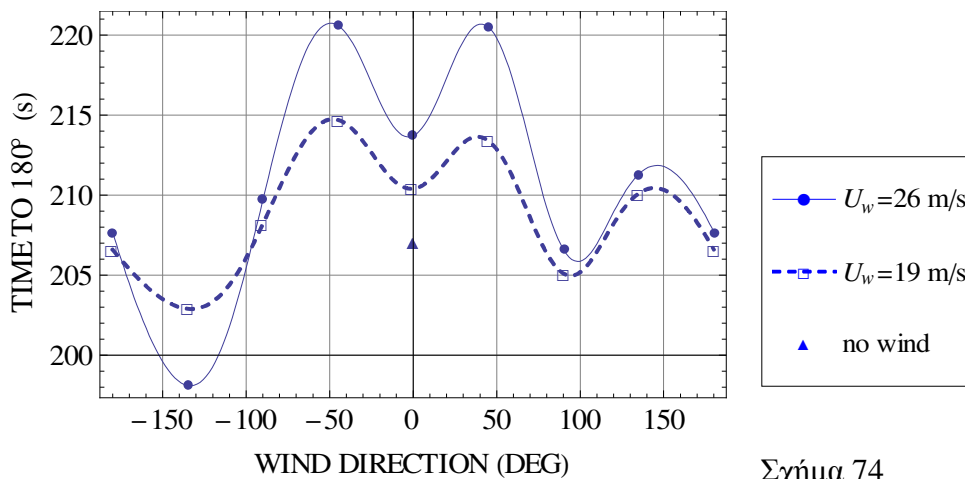
Σχήμα 72

Χρόνος μέχρι να στραφεί το πλοίο κατά 90°



Σχήμα 73

Χρόνος μέχρι να στραφεί το πλοίο κατά 180°



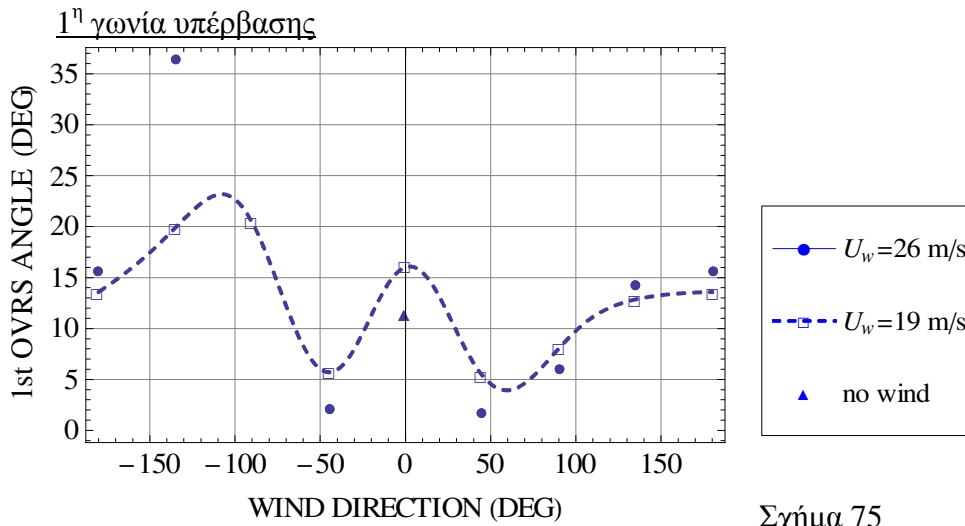
Σχήμα 74

➤ Zig-zag 10°/10°

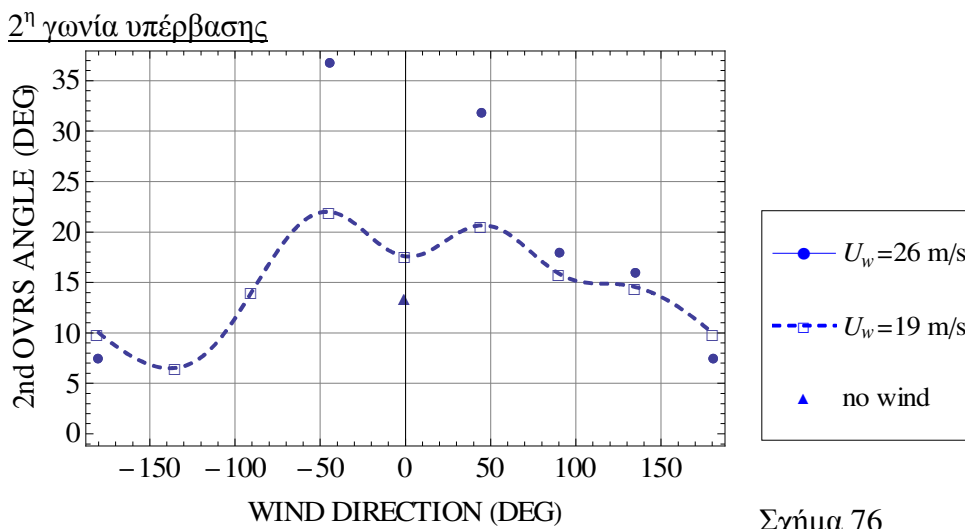
Για τη συγκεκριμένη πλεύση ο λόγος L/U ισούται με 26.0066 s. Επομένως σε ήρεμες συνθήκες θα πρέπει η πρώτη γωνία υπέρβασης να είναι μικρότερη από 18.0033 s και η δεύτερη γωνία υπέρβασης να είναι μικρότερη από 37.0049 s.

Για ταχύτητα ανέμου 19 m/s και 26 m/s και γωνίες πρόσπτωσης 45°, 180°, -45° το πλοίο εμφανίζει ασταθή συμπεριφορά στο οριζόντιο επίπεδο.

Για ταχύτητα ανέμου 26 m/s και γωνίες πρόσπτωσης 0° και -90° το πλοίο δεν πραγματοποιεί τον ελιγμό, επομένως προκύπτει ζήτημα ελεγχιμότητας.



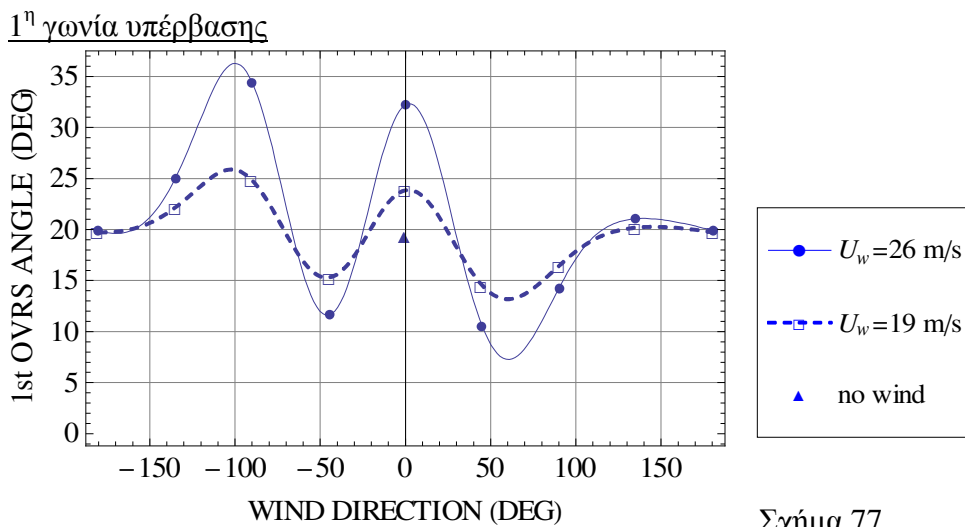
Σχήμα 75



Σχήμα 76

➤ **Zig-zag 20°/20°**

Για ταχύτητα ανέμου 19 m/s και 26 m/s και γωνίες πρόσπτωσης 45°, 180°, -45° το το πλοίο εμφανίζει ασταθή συμπεριφορά στο οριζόντιο επίπεδο.



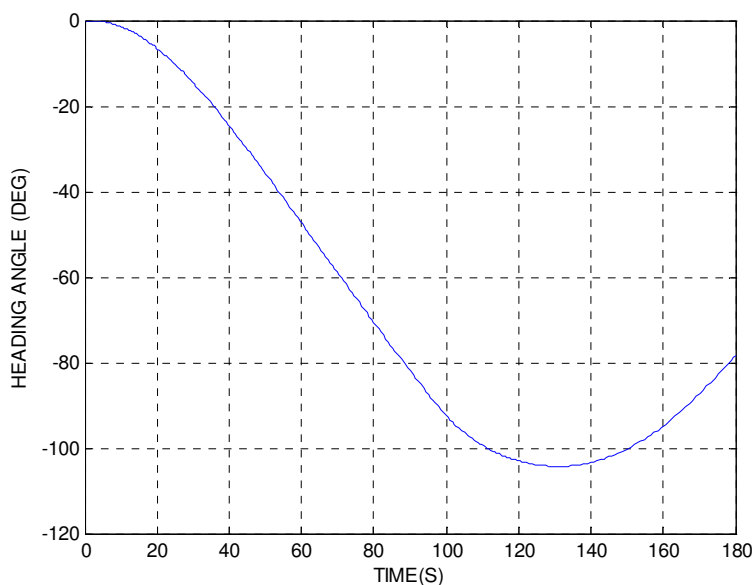
Σχήμα 77

Ασταθής συμπεριφορά στο οριζόντιο επίπεδο.

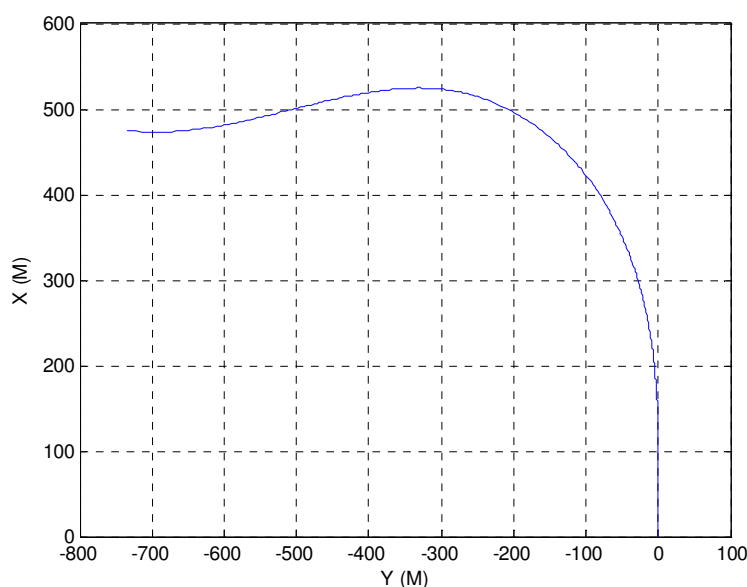
Παρατηρήθηκε ότι σε ορισμένες περιπτώσεις για μηδενικές αρχικές συνθήκες το πλοίο δεν εκτελούσε τον ελιγμό με τον αναμενόμενο τρόπο. Έγινε δοκιμή να μεταβληθεί ελάχιστα η αρχική συνθήκη για την ταχύτητα περιστροφής “r” και το πλοίο παρουσίασε πολύ διαφορετική ελκτική συμπεριφορά. Παρατίθενται δύο τέτοια παραδείγματα για τα οποία παρουσιάζονται διαγράμματα με τη γωνία πορείας συναρτήσει του χρόνου και με την τροχιά που ακολουθεί το πλοίο.

Για το δεξαμενόπλοιο (μικρότερων διαστάσεων) σε κατάσταση ερματισμού, ταχύτητα ανέμου 26 m/s και γωνία πρόσπτωσης 45° γίνεται δοκιμή για τον ελιγμό zig-zag 10°/10°.

Με αρχική ταχύτητα περιστροφής του πλοίου μηδενική, $r = 0 \text{ deg/s}$.

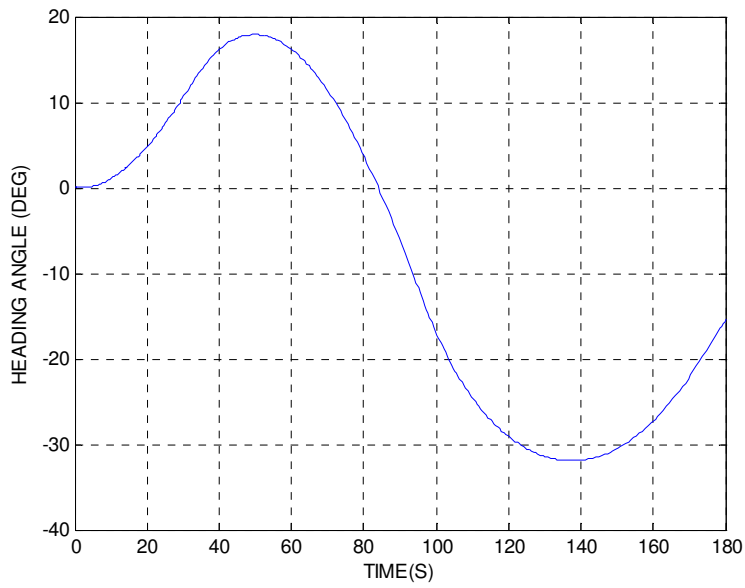


Σχήμα 78

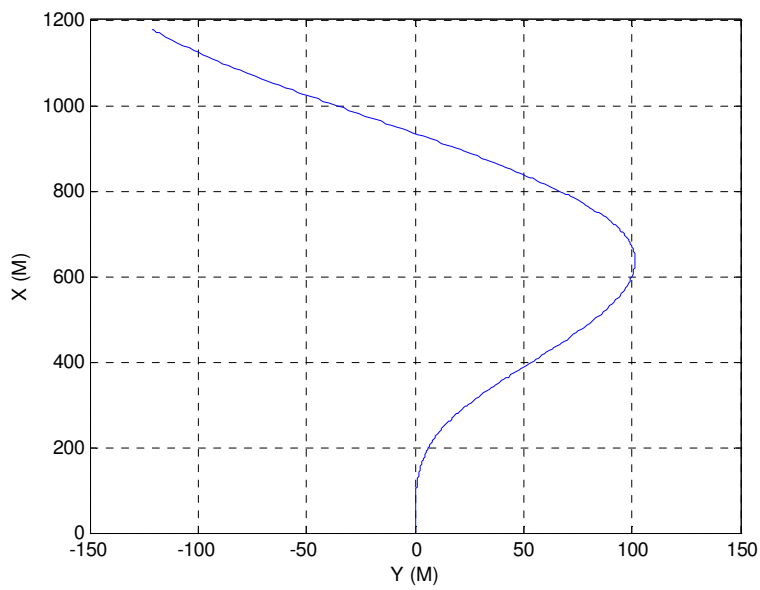


Σχήμα 79

Με αρχική ταχύτητα περιστροφής του πλοίου $r = 0.00001 \text{ deg/s}$.



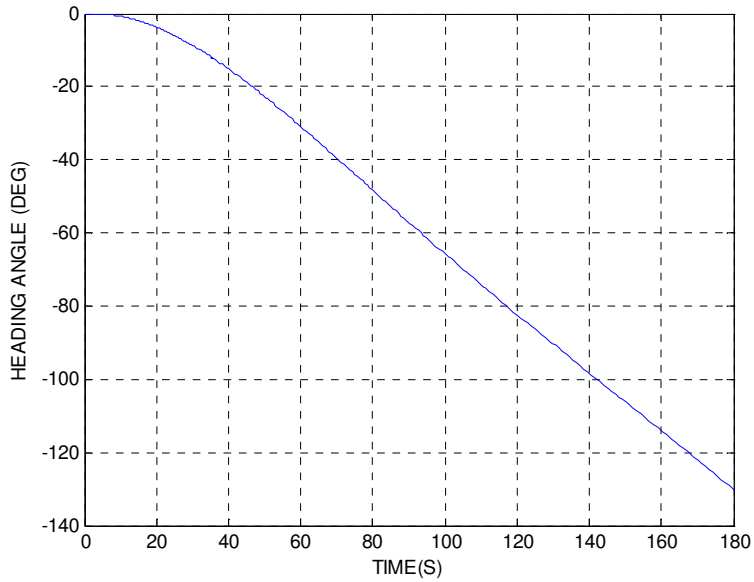
Σχήμα 80



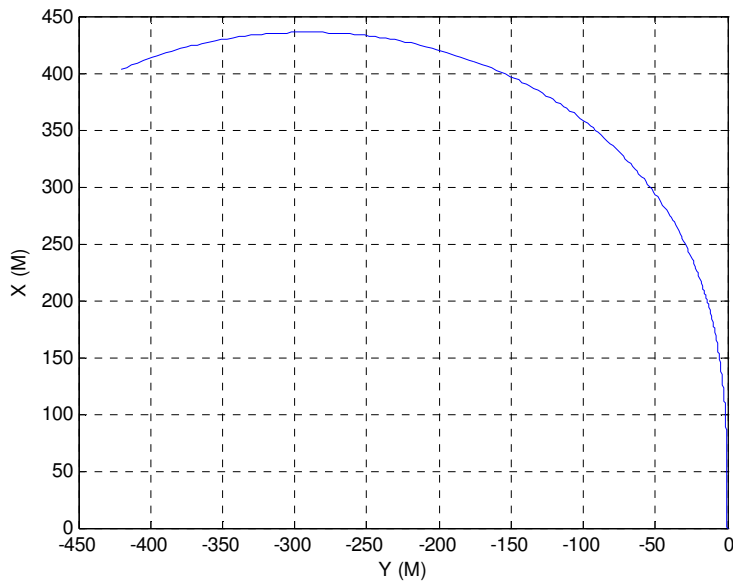
Σχήμα 81

Για το δεξαμενόπλοιο (μικρότερων διαστάσεων) σε κατάσταση ερματισμού με μειωμένη ταχύτητα, ταχύτητα ανέμου 19 m/s και γωνία πρόσπτωσης 180° γίνεται δοκιμή για τον ελιγμό zig-zag 20°/20° με αρχική ταχύτητα περιστροφής του πλοίου μηδενική.

Με αρχική ταχύτητα περιστροφής του πλοίου μηδενική, $r = 0 \text{ deg/s}$.

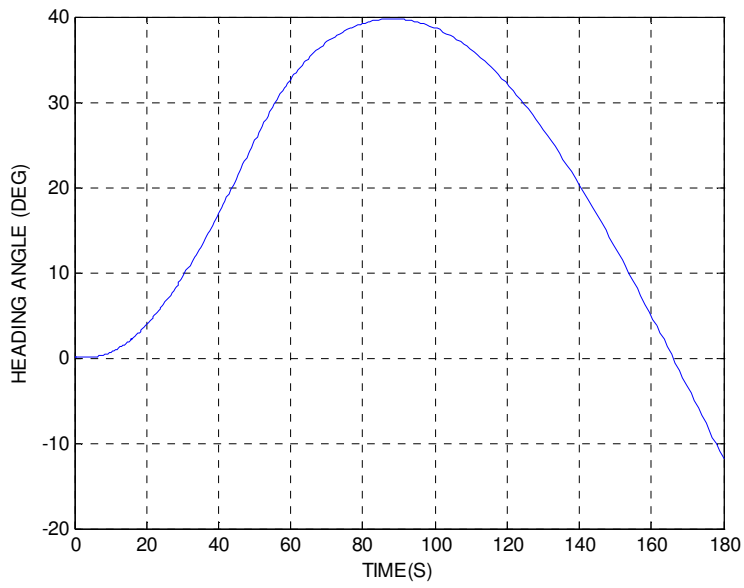


Σχήμα 82

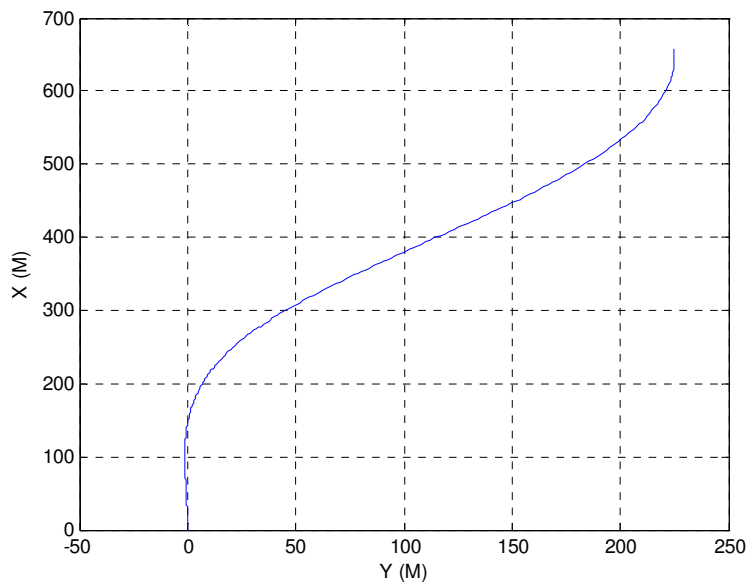


Σχήμα 83

Με αρχική ταχύτητα περιστροφής του πλοίου $r = 0.00001 \text{ deg/s}$.



Σχήμα 84

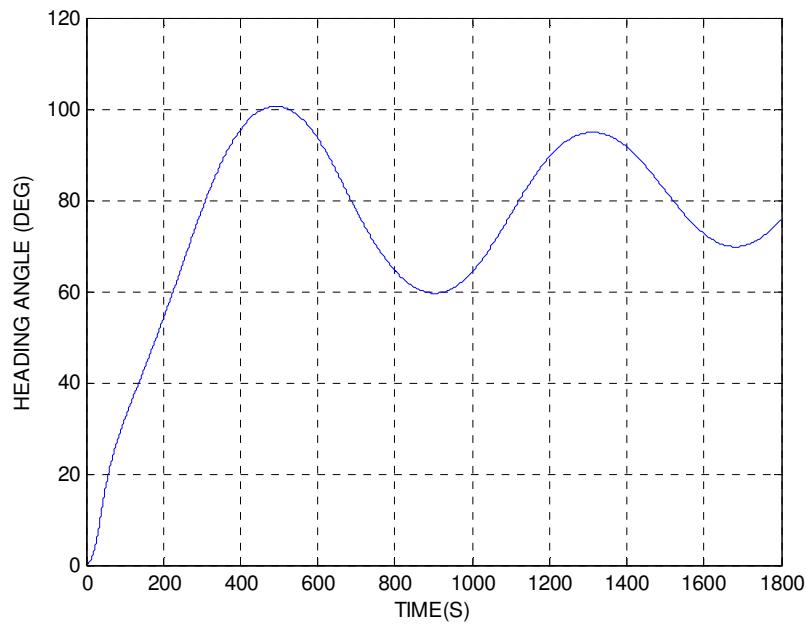


Σχήμα 85

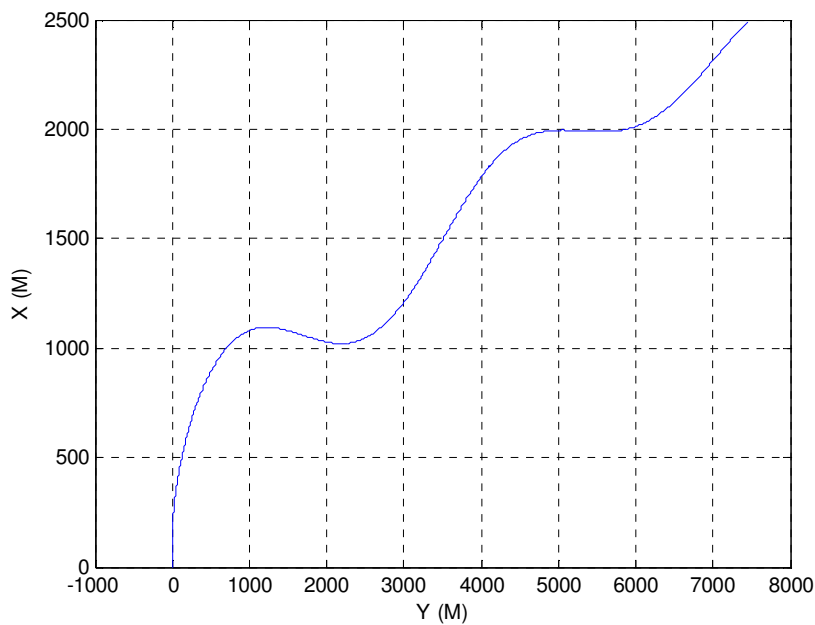
Ζήτημα ελεξιμότητας

Το δεξαμενόπλοιο (μικρότερων διαστάσεων) σε κατάσταση ερματισμού με μειωμένη ταχύτητα υπό την επίδραση ανέμου ταχύτητας **26 m/s** δεν πραγματοποιεί τον ελιγμό zig-zag $10^\circ/10^\circ$ για γωνίες πρόσπτωσης 0° και -90° .

➤ $\Psi_w = 0^\circ$

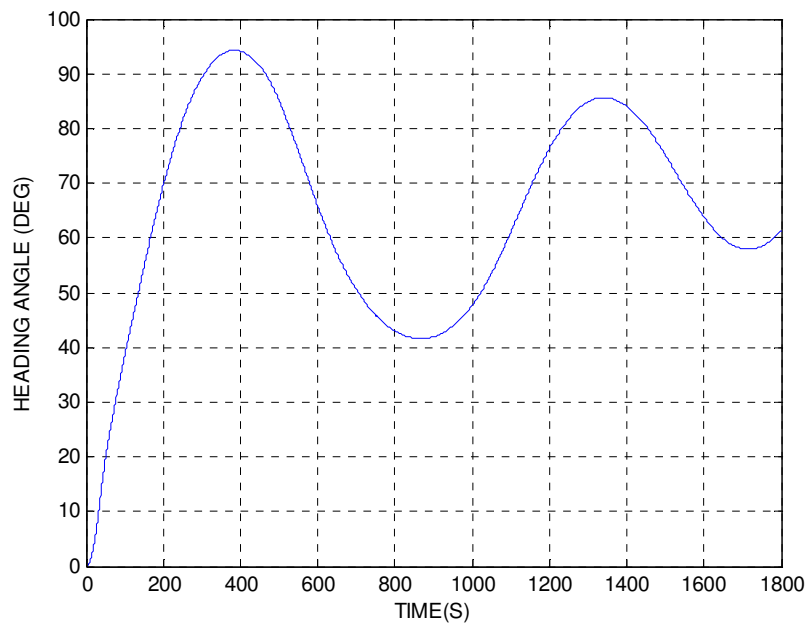


Σχήμα 86

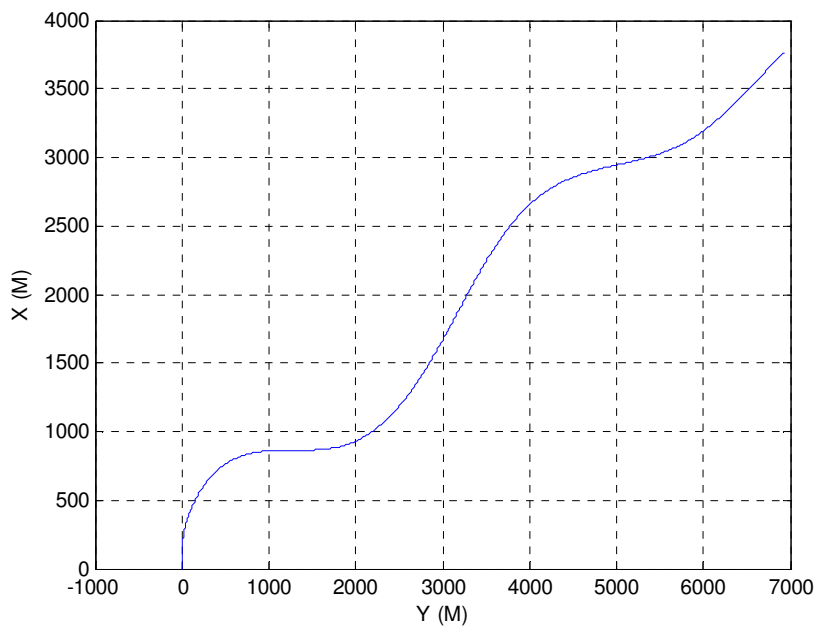


Σχήμα 87

➤ $\Psi_w = -90^\circ$



Σχήμα 88



Σχήμα 89

Πριν εξετάσουμε την επίδραση του ανέμου στο δεξαμενόπλοιο (VLCC) έγινε μία σύγκριση ανάμεσα στα αποτελέσματα του κώδικα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας αυτής και στα αποτελέσματα από τον κώδικα της μελέτης των Spyrou & Tigkas (2007, 2008) για τους ελιγμούς απουσία ανέμου. Η σύγκριση έγινε για τα αποτελέσματα του μη γραμμικού κώδικα και για τη μοντελοποίηση του πηδαλιού που βασίζεται στο μοντέλο MMG.

➤ **Κύκλος στροφής** (με μέγιστη γωνία πηδαλιού, 35°)

	Διπλωματική εργασία Γκόλφη			Spyrou & Tigkas		
	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)	μέτρα (m)	μήκη πλοίου	χρόνος (s)
Προχώρηση	1392.580	4.22751	237.228	1197.0	3.633769	228.6
Μεταφορά	679.785	2.06364	237.228	684.3	2.077350	228.6
Τακτική διάμετρος	1473.160	4.47212	439.826	1234.0	3.746091	423.9

➤ **Zig-zag 10°/10°**

	Διπλ.εργασία Γκόλφη	Spyrou & Tigkas
	degrees (°)	degrees (°)
1 ^η γωνία υπέρβασης	4.219	8.27
2 ^η γωνία υπέρβασης	6.58582	8.42

➤ **Zig-zag 20°/20°**

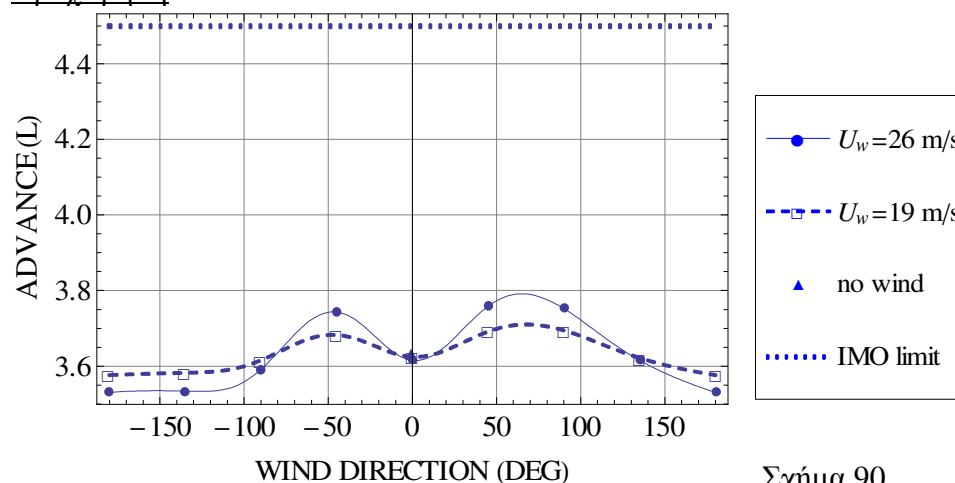
	Διπλ.εργασία Γκόλφη	Spyrou & Tigkas
	degrees (°)	degrees (°)
1 ^η γωνία υπέρβασης	8.6844	13.15

Στη συνέχεια εξετάστηκε η επίδραση του ανέμου στον κύκλο στροφής. Μελετήθηκαν δύο ταχύτητες ανέμου, 26 m/s και 19 m/s, και για κάθε μία από αυτές εξετάστηκαν οι ακόλουθες γωνίες πρόσπτωσης ανέμου (Ψ_w) : 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, -45°, -90°, -135°.

Θεωρήθηκε πως το πλοίο κινείται με αρχική ταχύτητα surge 8 m/s (15.55 kn) που αντιστοιχεί σε στροφές έλικας 74.9 RPM.

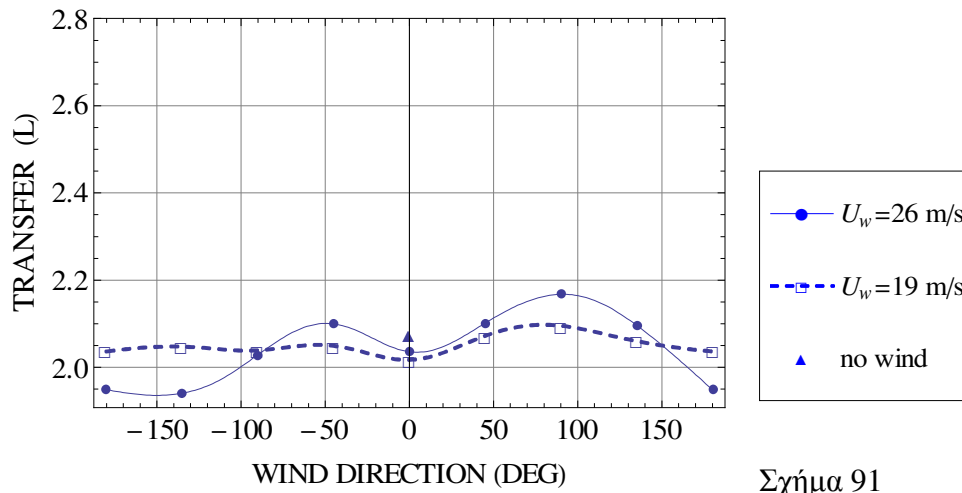
➤ **Κύκλος στροφής** (με μέγιστη γωνία πηδαλιού, 35°)

Προχώρηση



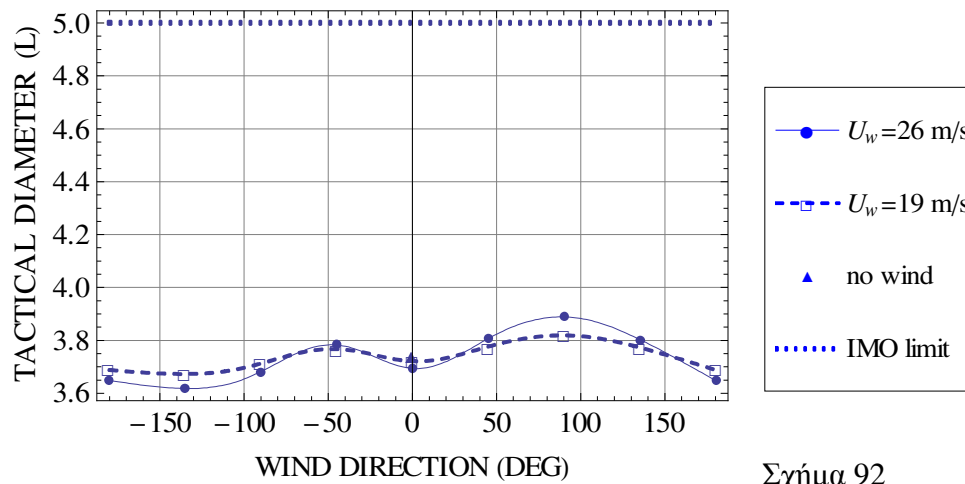
Σχήμα 90

Μεταφορά



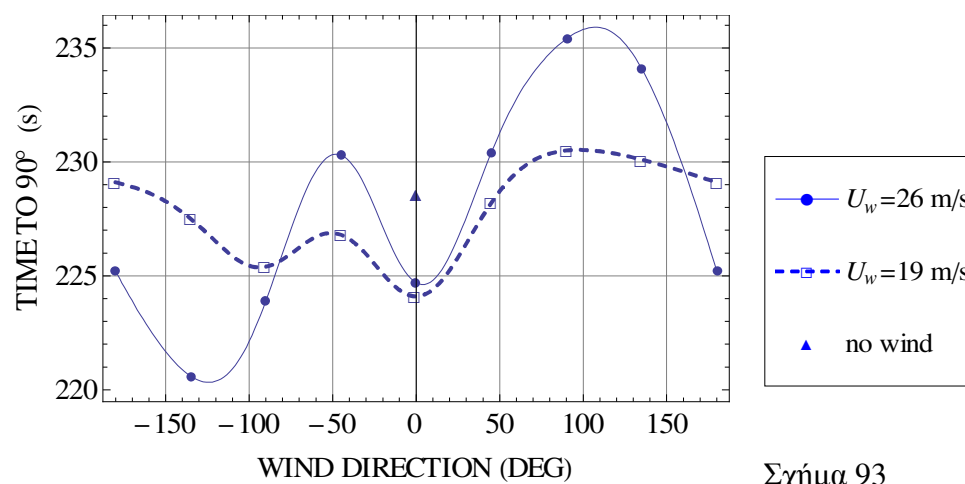
Σχήμα 91

Τακτική διάμετρος



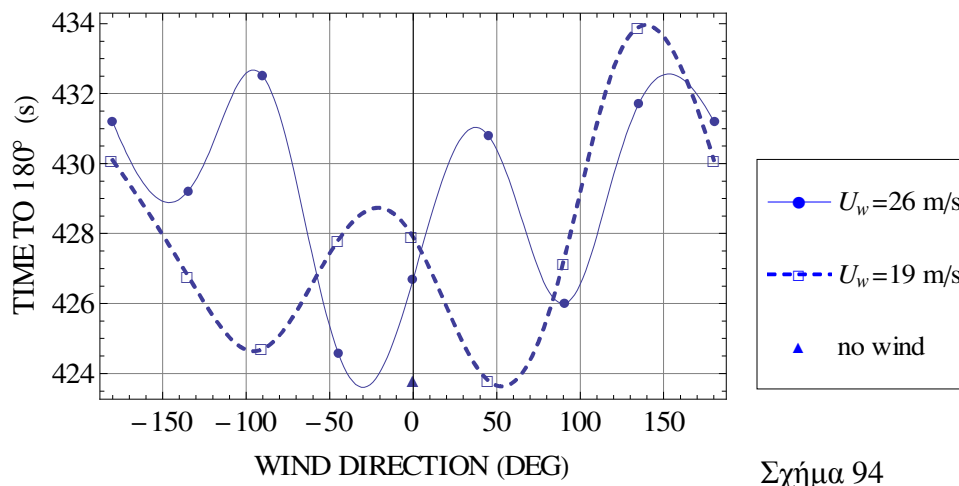
Σχήμα 92

Χρόνος μέχρι να στραφεί το πλοίο κατά 90°



Σχήμα 93

Χρόνος μέχρι να στραφεί το πλοίο κατά 180°



Σχήμα 94

6. Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής αναπτύχθηκε σειρά υπολογιστικών προγραμμάτων για την μελέτη των ελκτικών ικανοτήτων όπως αυτές προσδιορίζονται από τα πρότυπα του IMO (MSC137(76)). Αφού προηγήθηκε ιστορική ανασκόπηση του πλαισίου στο οποίο αναπτύχθηκαν τα πρότυπα και των σημαντικότερων ερευνών που σχετίζονται με αυτά ακολούθησε αναλυτική περιγραφή των μοντέλων τα οποία κρίθηκαν ως πιο κατάλληλα για να χρησιμοποιηθούν για την πραγμάτωση των στόχων της παρούσας εργασίας.

Αρχικά εξετάζεται ένα δυναμικά ευσταθές πλοίο. Με τη χρήση των τύπων του Inoue προκύπτει μικρότερος κύκλος στροφής και ο ελιγμός εκτελείται ελάχιστα πιο γρήγορα σε σχέση με τη μοντελοποίηση που χρησιμοποιεί τους τύπους του Clarke. Ποσοτικά όμως οι διαφορές είναι μικρές οπότε μπορούμε να συμπεράνουμε ότι εφαρμόζοντας το μοντέλο με τους τύπους του Inoue προκύπτει ελάχιστα καλύτερη ικανότητα στροφής για το πλοίο. Ίδια συμπεριφορά εμφανίζεται και στον ελιγμό που εξετάζει την αρχική ικανότητα στροφής.

Σχετικά με την δοκιμή zig-zag το μοντέλο με τους τύπους του Inoue δίνει μεγαλύτερες γωνίες υπέρβασης και κατά συνέπεια χειρότερη ικανότητα ανακοπής στροφής και διατήρησης πορείας. Επίσης σημαντική παρατήρηση είναι ότι στη δοκιμή zig-zag 20° και οι δύο μοντελοποιήσεις εμφανίζουν αποτελέσματα που δεν ικανοποιούν τους κανονισμούς αλλά για το μοντέλο του Clarke η απόκλιση από το όριο του IMO είναι οριακή. Αυτή η οριακή απόκλιση δημιουργεί τον προβληματισμό πως υπάρχει το ενδεχόμενο για κάποιο πλοίο να προκύπτει ικανοποίηση των κανονισμών από το ένα μοντέλο ενώ από το άλλο μη ικανοποίηση.

Στη συνέχεια εξετάζεται ένα VLCC χρησιμοποιώντας μη γραμμικό μοντέλο. Ερευνήθηκαν δύο τρόποι για τον υπολογισμό των επιδράσεων του πηδαλίου. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν με την εμπειρική μοντελοποίηση για το πηδάλιο παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές από αυτά των προσομοιώσεων της αναλυτικής μοντελοποίησης του πηδαλίου. Οι διαφορές αυτές είναι εμφανείς σε όλους τους ελιγμούς κάτι που ήταν αναμενόμενο.

Από την μελέτη που έγινε για την επίδραση της διαγωγής στην ελκτική συμπεριφορά προέκυψε πως τα αποτελέσματα από τους δύο τρόπους (Inoue (1978), Fedyaevsky and Sobolev (1964)) δεν παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις. Ποιοτικά η συμπεριφορά του πλοίου είναι αυτή που περιμέναμε. Η έμπρυμη διαγωγή χειροτερεύει την ικανότητα στροφής, έτσι το πλοίο διαγράφει μεγαλύτερο κύκλο στροφής και καθυστερεί χρονικά να εκτελέσει τον ελιγμό. Ωστόσο η έμπρυμη διαγωγή βελτιώνει την ικανότητα διατήρησης πορείας, έτσι το πλοίο εμφανίζει μικρότερες γωνίες υπέρβασης. Η αντίθετη συμπεριφορά εμφανίζεται στην έμπρομη διαγωγή.

Στον ελιγμό σταματήματος έγινε μία μελέτη για το πώς επηρεάζει τον ελιγμό ο χρόνος αντιστροφής της ώσης. Η πρόβλεψη για το VLCC συγκρίθηκε με αυτή της μελέτης των Yasukawa and Kose (2003) και τα αποτελέσματα κρίθηκαν πολύ ικανοποιητικά. Επιπλέον για το μικρότερο δεξαμενόπλοιο συγκρίνοντας την ικανότητα σταματήματος ανάμεσα στις δύο καταστάσεις φόρτωσης (πλήρης φόρτωση, ερματισμός) παρατηρείται το πλοίο να σταματά στην κατάσταση ερματισμού περίπου 3 μήκη πλοίου λιγότερα από την κατάσταση πλήρους φόρτωσης. Τέλος σαν γενική παρατήρηση το μικρότερο δεξαμενόπλοιο σταματά πιο γρήγορα και εμφανίζει μικρότερο μήκος τροχιάς από το VLCC.

Οι προσομοιώσεις που έγιναν για τη μελέτη της επίδρασης του ανέμου έδειξαν ότι η επίδραση στον κύκλο στροφής δεν είναι πολύ έντονη στα πρώτα στάδια του κύκλου στα οποία γίνονται και οι μετρήσεις για τα μεγέθη των κανονισμών. Τα πλοία που εξετάστηκαν συνεχίζουν να ικανοποιούν τις απαιτήσεις των κανονισμών. Η επίδραση του ανέμου στους ελιγμούς zig-zag είναι πιο έντονη και μάλιστα σε μεγάλη ταχύτητα ανέμου για συγκεκριμένες κατευθύνσεις του παρουσιάζεται ζήτημα ελεγχιμότητας αφού το πλοίο αδυνατεί να εκτελέσει τον ελιγμό.

7. Αναφορές/ Βιβλιογραφία

Aage, C. (1971) ‘Wind Coefficients for Nine Ship Models’, Hydro-og Aerodynamisk Laboratorium Report No.A-3, Denmark.

ABS (2006) “Guide for Vessel Maneuverability”.

Araki, M.; Sadat-Hosseini, H.; Sanada, Y.; Umeda, N. and Stern, F., (2012), “Study of System-based Mathematical Model Using System Identification Technique with Experimental, CFD, and System-Based Free Running Trials in Following Waves”, Proceedings of the 11th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, Athens, Greece, pp. 171-185.

Blendermann, W. (1995) “Estimation of Wind Loads on Ships in Wind with a Strong Gradient”, OMAE, Offshore Technology, Vol.I, pp.271-277.

Blendermann, W. (1996) “Wind Loading of Ships-Collected Data from Wind Tunnel Tests in Uniform Flow”, Report No.574, University of Hamburg, Shipbuilding Institute, Hamburg, Germany.

Clarke, D.; and Wellman, F. (1971) “The Stopping of Large Tankers and the Feasibility of Using Auxiliary Braking Devices”, Trans. of RINA, Vol. 113, pp. 139-166.

Clarke, D.; Gedling, P. and Hine, G. (1982) “The Application of Manoeuvring Criteria in Hull Design Using Linear Theory”, Trans. RINA, 125, pp. 45-68.

Fedyayevsky, K.K. and Sobolev, G.V. (1964) “Control and Stability in Ship Design”, US Department of Commerce Translation, Washington, DC.

Fujiwara, T.; Ueno, M. and Nimura, T. (1998) “Estimation of Wind Forces and Moments acting on Ships”, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 183, pp. 77-90.

Fujiwara, T.; Ueno, M. and Nimura, T. (2001) “An Estimation Method of Wind Forces and Moments acting on Ships”, Proceeding of Mini Symposium on Prediction of Ship Manoeuvring Performance, Vol. 183, pp. 83-92.

Fujiwara, T.; Ueno, M. and Ikeda, Y. (2005) “A New Estimation Method of Wind Forces and Moments acting on Ships on the basis of Physical Component Models”, Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, Vol. 2, pp. 243-255.

Funaji, S.; Kijima, K. and Furukawa, Y. (2003) “Ship Manoeuvring Performance under the Influence of External Disturbances”, Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects, Vol. 106, pp. 47-56.

IMO (1993) Resolution A.751(18), “Interim Standards for Ship Manoeuvrability”.

IMO (1998) MSC.70/20/6, “Revision of Interim Standards for Ship Manoeuvrability”, Submitted by Japan.

IMO (2001) DE 45/3, “Revision of Interim Standards for Ship Manoeuvrability”, Submitted by the Republic of Korea.

IMO (2002) DE 45/3/1, “Revision of Interim Standards for Ship Manoeuvrability”, Submitted by Japan.

IMO (2002) Resolution MSC.137(76), “Standards for Ship Manoeuvrability”.

IMO (2002) MSC/Circ.1053, “Explanatory Notes to the Standards for Ship Manoeuvrability”.

Inoue, S. and Kijima, K. (1978) “The Hydrodynamics Derivatives on Ship Manoeuvrability in the Trimmed Condition”, Proceedings of the 15th ITTC – Volume II, pp.87-92.

Ishiguro, T. and Ohmori, T. (2003), “Optimized Hull Form design at Initial Design Stage Considering Manoeuvrability, Propulsive performance and Seakeeping performance”, Proc. of MARSIM’03, pp RC-22.

ITTC (1999) The Manoeuvring Committee, Final Report and Recommendations to the 22nd ITTC.

ITTC (2002a) The Manoeuvring Committee, Final Report and Recommendations to the 23rd ITTC, Proceedings of the 23rd ITTC – Volume I.

ITTC (2002b) “ITTC-Recommended Procedures/ Full Scale Measurements Manoeuvrability Full Scale Manoeuvring Trials Procedure”, 7.5-04/ 02-01, Revision 01, Revised by Manoeuvring Committee of 23rd ITTC.

ITTC (2005) The Manoeuvring Committee, Final Report and Recommendations to the 24nd ITTC, Proceedings of the 24rd ITTC – Volume I.

ITTC (2008) The Manoeuvring Committee, Final Report and Recommendations to the 25nd ITTC, Proceedings of the 25rd ITTC – Volume I.

Jakobsen, B.K.; Mazurkiewicz, J. and Ankudinov, V., (2000), “Improved Ship Manoeuvring Assessment Based on Integration of Advanced Modeling Technique”, International Workshop on Ship Manoeuvrability at the Hamburg Ship Model Basin, Hamburg, Germany.

Kijima, K. (2002) “On Some Problems in the Interim Standards of Ship Manoeuvrability in IMO”, Group Discussion B2: IMO Standards and ITTC, Proceedings of the 23rd ITTC – Volume III.

Kijima, K.; Furukawa, Y. et al. (2006a) “The Valuation for External Disturbances on Ship Maneuverability”, Proc. of MCMC’2006, Lisbon, Portugal.

Kijima, K.; Furukawa, Y.; Yano, K. and Aoki, I. (2006b) “The Valuation for External Disturbance on Ship Maneuverability”, MCMC 2006.

Mikelis, N. (1985) “A Procedure For The Prediction Of Ship Manoeuvring Response For Initial Design”, Computer Applications in the Automation of Shipyard Operation and Ship Design V, Elsevier Science Publishers B.V.(North-Holland), pp. 437-446.

Norbbin, N.H. (1998) “On the Stopping of Ships, Including the Proposal for a New Standard for the Crash-Stop-Astern Capabilities.”, Proceedings. International Conference on Ship motions and Manoeuvrability, London, paper No.12.

Oosterveld, M.W.C. and Van Oossanen, P. (1975) “Further Computer-Analyzed Data of The Wageningen B-Screw Series”, ISP, Vol.22.

Principles of Naval Architecture (1989), Volume III - Motions in Waves and Controllability, Second Revision, editor Edward V. Lewis, Published by the Society of Naval Architects and Marine Engineers.

Rytkönen, J; Happonen, K. and Larjo, K. (2000) “Simulated manoeuvres of the passenger cruise liner .Voyager of the Seas. in port and approaching fairways.”, International Conference on Ship and Shipping Research, NAV 2000, P. 9.6.

Senda, S. and Kobayashi, H. (2000), “On the Standard Deceleration of Ship Speed by Human Control”, International Conference on Marine Simulation and Ship Manoeuvring, Orlando, FL, USA.

Shigehiro, R.; Ueda, K.; Arii, T.; Nakayama, H. (1997) “Course Stability of the High-Speed-Towed Fish Preserve with Wind Effect”, Journal of the Kansai Society of Naval Architects, Japan, No. 228, pp. 167-174.

Spyrou, K. (1990) “A New Approach For Assessing Ship Manoeuvrability Based on Dynamical System’s Theory”, Phd Thesis, Univ. of Strathclyde, Dept. of Ship and Marine Technology.

Spyrou, K. (1995) “Yaw Stability of Ships in Steady Wind”, Ship Technology Research, Vol. 42, No. 1, pp. 21-30.

Spyrou, K.; Chatzis, A.; Tigkas, I.; Eleftheriadis, G. (2005) “Limits of Controllability of a Ro-Pax in wind”, 16th International Conference on Hydrodynamics in Ship Design/ 3rd International Symposium on Ship Manoeuvring, pp. 184-196.

Spyrou, K.; Tigkas, I.; Chatzis, A. (2007) “Dynamics of a Ship Steering in Wind Revisited”, Journal of Ship Research, Vol. 51, No. 2, pp. 160-173.

Spyrou, K.; Tigkas, I. (2008) “Nonlinear Dynamics of Ship Steering Behaviour Under Environmental Excitations”, IUTAM Symposium on Fluid-Structure Interaction in Ocean Engineering, pp. 261-272.

Yabuki, H.; Yoshimura, Y.; Ishiguro, T.; Ueno, M. (2006) “Turning Motion of a Ship with single CPP and single Rudder During Stopping Maneuver Under Windy Condition”, MARCIM 2006, M-6-1 to M-6-8.

Tanaka, S. and Kimura, K. (2003), “A Numerical Study on Hydrodynamic Interaction Among Oblique Ship Hull, Propeller and Rudder”, MARSIM’03, Kanazawa, Japan, pp RC-21.

Yamano, T.; Saito, Y. (1997) “An Estimation Method of Wind Forces Acting on Ships” (in Japanese), Journal of the Kansai Society of Naval Architects, Japan, No. 228, pp. 91-100.

Yamasaki et al. (2001), “Application of CFD to the Study of Ship Manoeuvrability on Initial Stage of Hull Design”, Journal of Society of Naval Architects of Japan, 189, pp 55-62.

Yasukawa, H. and Kose, K. (2003) “Simulation of Stopping Maneuver of a Tanker in Wind and Waves”, Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects, Vol. 106, pp. 57-68.

Yoshimura, Y. (1994) “Studies on the Stopping Ability of a Manoeuvring Standard”, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 176, pp. 259-265.

Yoshimura, Y.; Kose, K.; Hiraguchi, T. (2000) “Criteria for Yaw-checking and Course-keeping Abilities in IMO’s Interim Standards for Ship Manoeuvrability”, MARSIM Conference Proceedings, pp.389-400.

Yoshimura, Y. (2005) “Mathematical Model for Manoeuvring Ship Motion (MMG Model)”, Workshop on Mathematical Models for Operations involving Ship-Ship Interaction, Tokyo.

Sung, YJ. and Rhee, K. (2005) “New Prediction Method on the Stopping Ability of Diesel Ships With Fixed Pitch Propeller, Int. Shipbuild. Progr., 52, no.2, pp.113-128.

Ελευθεριάδης, Γ. (2005) “Ελεγχιμότητα Πλοίου υπό την Επίδραση Ισχυρών Ανέμων”, Διπλωματική Εργασία, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Θεμελής, Ν. (2009) “Σημειώσεις για το πρόγραμμα Mathematica”, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Σπύρου, Κ. (2008) “Σχεδίαση Πλοίων Για Ελικτικότητα Και Δυναμική Ευστάθεια” , Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Τραχανάς, Σ. (2004) “Mathematica και Εφαρμογές”, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.

8.Παραρτήματα

I. Προσέγγιση συντελεστών ανέμου με σειρές Fourier.

Κάθε περιοδική συνάρτηση $f(x)$ μπορεί να αναπτυχθεί σε μια σειρά όπως η ακόλουθη, γνωστή ως σειρά Fourier:

$$f(x) = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i \cos(ix) + \sum_{i=1}^n b_i \sin(ix)$$

Συντελεστές Fourier για το δεξαμενόπλοιο TAN0201BN

CX_{AF}	CY	CN	CK
$a_{0X} = -0.0522688$	-	-	-
$a_{1X} = 0.85048$	$b_{1Y} = 0.672832$	$b_{1N} = -0.106916$	$b_{1K} = -1.28965$
$a_{2X} = -0.159392$	$b_{2Y} = 0.0376467$	$b_{2N} = -0.0527238$	$b_{2K} = 0.121469$
$a_{3X} = -0.047374$	$b_{3Y} = -0.0122412$	$b_{3N} = -0.0184282$	$b_{3K} = 0.109553$
$a_{4X} = 0.0501445$	$b_{4Y} = -0.0000461439$	$b_{4N} = -0.00645129$	$b_{4K} = -0.0509027$
$a_{5X} = -0.0476723$	$b_{5Y} = -0.0263138$	$b_{5N} = 0.000531573$	$b_{5K} = -0.00981225$
$a_{6X} = 0.00461792$	$b_{6Y} = 0.000409019$	$b_{6N} = -0.00425858$	$b_{6K} = 0.0156005$
$a_{7X} = -0.00511321$	$b_{7Y} = -0.00220851$	-	$b_{7K} = 0.0360692$
$a_{8X} = -0.0124607$			
$a_{9X} = -0.00314323$			
$a_{10X} = 0.0117094$			
$a_{11X} = -0.00938952$			
$a_{12X} = -0.0130729$			
$a_{13X} = 0.0220869$			
$a_{14X} = -0.0116101$			
$a_{15X} = -0.0030207$			

Συντελεστές Fourier για το δεξαμενόπλοιο *TAN0202BN*

CX_{AF}	CY	CN	CK
$a_{0X} = 0.0353094$	-	-	-
$a_{1X} = 0.564102$	$b_{1Y} = 0.617782$	$b_{1N} = -0.0329362$	$b_{1K} = -0.724416$
$a_{2X} = -0.0939369$	$b_{2Y} = -0.0123922$	$b_{2N} = -0.0736273$	$b_{2K} = 0.031493$
$a_{3X} = 0.0653276$	$b_{3Y} = 0.00304988$	$b_{3N} = -0.0109292$	$b_{3K} = 0.0205422$
$a_{4X} = -0.0236047$	$b_{4Y} = 0.00843007$	$b_{4N} = -0.00217669$	$b_{4K} = -0.00745763$
$a_{5X} = -0.0224235$	$b_{5Y} = -0.0201241$	$b_{5N} = -0.000285929$	$b_{5K} = 0.0141148$
$a_{6X} = 0.00707935$	$b_{6Y} = 0.0031587$	$b_{6N} = -0.00347361$	$b_{6K} = 0.00657102$
$a_{7X} = 0.0070473$	$b_{7Y} = -0.0133838$	-	$b_{7K} = 0.00643597$
$a_{8X} = -0.0134779$			
$a_{9X} = 0.0231243$			
$a_{10X} = -0.0146132$			
$a_{11X} = -0.0085307$			
$a_{12X} = 0.00203404$			
$a_{13X} = 0.00509859$			
$a_{14X} = -0.00102841$			
$a_{15X} = 0.00652759$			