



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΣΕ ΗΡΕΜΟ ΝΕΡΟ ΚΑΙ ΠΡΟΣΘΕΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΣΕ
ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ**

Φοιτητής:

Σπυρόπουλος Δημήτριος (Α.Μ. 08110051)

Επιβλέπων Καθηγητής :

Γεώργιος Τζαμπίρας

ΑΘΗΝΑ 2018

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διπλωματική εργασία με τίτλο εκπονήθηκε κατά τη διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους 2017-2018, στο πλαίσιο του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Από τη θέση μου θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή της διπλωματικής μου, κ. Γ. Τζαμπίρα, για την επίβλεψη και την καθοδήγησή του καθ' όλη την διάρκεια της διπλωματική εργασίας.

Θα ήθελα επιπλέον να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους Ι. Τραχανά (ΕΤΕΠ), Δ. Λιαροκάπη (ΕΤΕΠ) και Φ. Κασάπη (ΕΕΔΙΠ) για την διεκπόνηση των πειραματικών μετρήσεων, τον Γ. Μυλωνά (Προτυποποιό, ΙΔΑΧ) για την κατασκευή του μοντέλου και τον Δ. Τριπερίνα Διπλ. Ναυπηγό Μηχ. Μηχανικό (ΙΔΑΧ) για την καθοδήγηση και ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	3
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	6
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο	
1. 1 Συνιστώσες αντίστασης.....	8
1.1. 2 Υπόλοιπη αντίσταση (R_R).....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο	
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΥΣΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ.....	13
2.1 Εισαγωγή	13
2.2 Πειραματική Διάταξη	14
2.2.1 Δεξαμενή Πειραμάτων	14
2.2.2 Δυναμόμετρο -Αισθητήρες.....	15
2.2.3 Κυματιστήρας	17
2.2.4 Μοντέλα πειραμάτων	17
2.3 Προετοιμασία πειραμάτων	18
2.3.1 Έρευση χαρακτηριστικών του μοντέλου με $C_b=0.7$	18
2.3.2 Χάραξη της ισάλου γραμμής	20
2.3.3 Ερματισμός μοντέλων	21
2.3.3 Βαθμονόμηση των οργάνων	23
2.4 Υπολογισμός νέου βυθίσματος και εκτοπίσματος για τα πειράματα αντίστασης σε ήρεμο νερό	28
2.5 Εκτέλεση του πειράματος	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο	
ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	30
3.1 Μέτρήσεις σε ήρεμο νερό.....	30
3.2 Μέτρήσεις σε αρμονικούς κυματισμούς	30
3.1.1 Υπολογισμός πρόσθετης αντίστασης	31
3.1.2 Υπολογισμός RMS τιμών.....	31
3.1.3 Υπολογισμός RAO τιμών.....	31
3.3 Περιγραφή αριθμητικής διαδικασίας του προγράμματος	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο	
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ.....	33
4.1 Πειράματα σε ήρεμο νερό.....	33
4.1.1 Πειραματικά αποτελέσματα σε ήρεμο νερό.....	33
4.1.2 Αριθμητικά αποτελέσματα προγράμματος για το μοντέλο με $C_b=0.7$	41
4.2 Πειράματα σε αρμονικούς ημιτονικούς κυματισμούς	41

4.2.1 Πρόσθετη αντίσταση κυματισμών.....	42
4.2.2 RAO ανύψωσης κέντρου βάρους και προνευτασμού.....	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο	
ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	49
5.1 Πειράματα σε ήρεμο νερό	49
5.2 Πειράματα σε αρμονικούς ημιτονικούς κυματισμούς	49
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε όλα τα σώματα τα οποία κινούνται μέσα σε ρευστά, όπως για παράδειγμα στο νερό, στην βρεχόμενη επιφάνειά τους ασκούνται δυνάμεις αντίστασης. Για ένα πλοίο το οποίο σε όλη την διάρκεια λειτουργίας του θα βρίσκεται στο θαλάσσιο περιβάλλον, η μελέτη αυτών των δυνάμεων είναι ίσως το βασικότερο ζήτημα που πρέπει να μελετηθεί. Πληθώρα θεμάτων που απασχολούν τον αρχικό σχεδιασμό του, όπως η μορφή της γάστρας του, το κόστος κατασκευής της, το ωφέλιμο φορτίο, η επιλογή μηχανής και έλικα πρόωσης εξαρτώνται από αυτήν. Επίσης, η αντίσταση του πλοίου επηρεάζει, όπως για παράδειγμα το λειτουργικό κόστος. Στην σημερινή εποχή όπου το κόστος κίνησης ολοένα και αυξάνεται, το ζήτημα αυτό αποκτά όλο και μεγαλύτερη βαρύτητα. Οι απαιτούμενοι ναύλοι, σε μεγάλο βαθμό, διαμορφώνονται από τα λειτουργικά έξοδα του πλοίου. Το πλοίο, ως μια ειδική κατασκευή σχεδιασμένη για να κινείται με ασφάλεια στο νερό, χρησιμοποιείται από τον άνθρωπο για ποικίλες χρήσεις από τα αρχαία χρόνια. Η αποτελεσματική κίνηση στο νερό αποτελεί τον βασικό και διαχρονικό στόχο για έναν σχεδιαστή από τα πρώτα αξιόπλοια σκάφη που κατασκευάστηκαν έως και τα σκάφη της σύγχρονης εποχής που σχετίζονται άμεσα με τη ραγδαία εξέλιξη της τεχνολογίας.

Ένας από τους παράγοντες που λαμβάνεται υπόψη κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού των πλοίων είναι η υδροδυναμική τους συμπεριφορά. Επομένως, για να επιτευχθεί ο ανωτέρω στόχος, απαιτείται η μελέτη της αντίστασης των πλοίων στο νερό, η οποία εν συνεχεία μπορεί να μετατραπεί σε ισχύ πρόωσης.

Η αντίσταση του πλοίου οφείλεται σε απώλειες ενέργειας λόγω της επαφής του με το περιβάλλον ρευστό, καθιστώντας τη μελέτη της ένα περίπλοκο φαινόμενο. Αναλυτικότερα, η αντίσταση διαχωρίζεται σε επιμέρους συνιστώσες, με σκοπό να απλουστευθεί η μελέτη της. Οι κυριότερες από τις συνιστώσες αυτές είναι η αντίσταση τριβής, η αντίσταση κυματισμού και η αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας.

Οι περισσότερες μελέτες, σε ό, τι αφορά την υδροδυναμική συμπεριφορά ενός πλοίου, επικεντρώνονται στον υπολογισμό της αντίστασης της γάστρας σε ήρεμο νερό. Μπορεί, όμως, η θεώρηση αυτή να αντικατοπτρίσει τις πραγματικές συνθήκες θάλασσας στις οποίες το πλοίο έχει σχεδιασθεί να ανταποκρίνεται;

Είναι γνωστό ότι το πλοίο κινούμενο στο νερό παράγει κυματισμούς. Οι κυματισμοί αυτοί οφείλονται σε δύο λόγους: στη διαταραχή του ήρεμου νερού λόγω της ταχύτητας του πλοίου με την οποία κινείται σε αυτό και αφετέρου στις κινήσεις του πλοίου λόγω των προσπιπτόντων κυματισμών. Είναι προφανές, επομένως, ότι η αντίσταση του πλοίου στους κυματισμούς είναι σαφώς μεγαλύτερη από την αντίστοιχη σε ήρεμο νερό.

Ο υπολογισμός της πρόσθετης αντίστασης στους κυματισμούς μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας είτε πειραματικές είτε αριθμητικές μεθόδους.

Εστιάζοντας στις πειραματικές μεθόδους, ο απλούστερος και αμεσότερος τρόπος υπολογισμού της πρόσθετης αντίστασης πραγματοποιείται μέσω πειραμάτων κατά τη διάρκεια των οποίων γίνεται προσομοίωση τυχαίων κυματισμών. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή θεωρείται εν γένει επισφαλής, ενώ η χρήση της αφορά σε

περιορισμένο εύρος τυχαίων κυματισμών. Αντίθετα, οι μετρήσεις σε ημιτονικούς κυματισμούς παρέχουν ακριβέστερα αποτελέσματα τα οποία είναι εφικτό να χρησιμοποιηθούν για τη σύνθεση τυχαίων κυματισμών μεγαλύτερου εύρους.

Στην παρούσα διπλωματική έγινε πειραματική και αριθμητική διερεύνηση της αντίστασης δύο μοντέλων σειράς 60, με συντελεστή γάστρας (C_b) 0.6 και 0.7, σε ήρεμο νερό, αλλά και σε ημιτονικούς κυματισμούς. Επίσης έγινε και πειραματική διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς των δύο αυτών μοντέλων. Για την επίτευξη των παραπάνω πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε 2 καταστάσεις φόρτωσης για την αντίσταση σε ήρεμο νερό και σε 1 κατάσταση φόρτωσης για τη δυναμική συμπεριφορά. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν στην πειραματική δεξαμενή του εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ).

Για την αριθμητική διερεύνηση της αντίστασης σε ήρεμο νερό, για το μοντέλο με $C_b=0.7$ σε δύο ταχύτητες (εκτός από τις πειραματικές μετρήσεις), χρησιμοποιήθηκε και το πρόγραμμα *santorn*, γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού Fortran, το οποίο έχει αναπτυχθεί στο Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ) από τον Καθηγητή κ. Γεώργιο Τζαμπίρα.

Στο 1^ο κεφάλαιο αναλύεται ένα θεωρητικό υπόβαθρο της αντίστασης και γίνεται περιγραφή των συνιστωσών αντίστασης των πλοίων.

Στο 2^ο κεφάλαιο περιγράφεται η πειραματική εγκατάσταση, τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν, αλλά και η πειραματική διαδικασία. Επίσης στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι ταχύτητες με τους αντίστοιχους αριθμούς Froude των μοντέλων και στον Πίνακα 3 τα υδροστατικά μεγέθη αυτών.

Στο 3^ο κεφάλαιο περιγράφεται το θεωρητικό υπόβαθρο που χρησιμοποιήθηκε για των προσδιορισμό της αντίστασης, σε ήρεμο νερό και κυματισμούς, καθώς και για τον υπολογισμό της ανύψωσης του κέντρου βάρους και του προνευτασμού και τα αντίστοιχα RAO αυτών.

Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μετρήσεις των πειραμάτων και η ανάλυση αυτών, για τα πειράματα σε ήρεμο νερό και σε αρμονικούς ημιτονικούς κυματισμούς. Επίσης, στον Πίνακα 8 παρατίθενται τα αποτελέσματα του προγράμματος ... για την αντίσταση σε ήρεμο νερό του μοντέλου με $C_b=0.7$ και η σύγκριση αυτών με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξήχθησαν για τη σύγκριση της αντίστασης σε ήρεμο νερό και δυναμική συμπεριφορά των δύο μοντέλων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

1. 1 Συνιστώσες αντίστασης

Η αντίσταση του πλοίου οφείλεται σε απώλειες ενέργειας λόγω επαφής της επιφάνειάς του με το περιβάλλον ρευστό. Κατά την κίνησή του στο νερό, σε κάθε σημείο στην βρεχόμενη επιφάνειά του, αναπτύσσονται υδροδυναμικές πιέσεις και τάσεις. Οι πιέσεις και τάσεις αυτές μπορούν να αναλυθούν σε εφαπτομενικές τάσεις, δηλαδή εκείνες που δρουν εφαπτομενικά επί της βρεχόμενης επιφάνειας του σώματος και σε ορθές πιέσεις, οι οποίες αντίστοιχα δρουν κάθετα στην επιφάνεια του σώματος. Η ολοκλήρωση των εφαπτομενικών τάσεων γύρω από την βρεχόμενη επιφάνεια οδηγεί σε μια οριζόντια συνιστώσα η οποία λέγεται αντίσταση τριβής (R_F). Η ολοκλήρωση των ορθών πιέσεων οδηγεί σε μια οριζόντια συνιστώσα η οποία ονομάζεται υπόλοιπη αντίσταση (R_R).

Το άθροισμα της αντίστασης τριβής και της υπόλοιπης αντίστασης ονομάζεται ολική αντίσταση. Σημαντικό είναι επίσης να αναφέρουμε ότι σε περίπτωση που η γάστρα δεν έχει παρελκόμενα τότε η αντίστασή της καλείται αντίσταση γυμνής γάστρας (bare hull) ή ρυμούλκησης (towing). Στην ειδική περίπτωση γυμνής γάστρας με έλικα, καλείται αντίσταση πρόωσης και η αντίστασή της είναι λίγο προσαυξημένη σε σχέση με την προηγούμενη, λόγω των αλληλεπιδράσεων μεταξύ τους.

Η ολική αντίσταση ενός πλοίου κινούμενου στην επιφάνεια ήρεμου νερού προκύπτει ως εξής:

$$R_T = R_F + R_R$$

ή

$$R_T = C_T * \rho * V^2 * S / 2$$

Όπου:

C_T : αδιάστατος συντελεστής ολικής αντίστασης

V [m/s] : η ταχύτητα του σκάφους

S [m²] : η βρεχόμενη επιφάνεια του σκάφους

ρ [kr*sec²/m⁴] : η πυκνότητα του νερού

Ο αριθμός Reynolds, από φυσικής απόψεως, αντιπροσωπεύει το λόγο των δυνάμεων αδράνειας προς τις συνεκτικές δυνάμεις. Ορίζεται ως:

$$R_n = \frac{V * L}{\nu}$$

Ο αριθμός Froude είναι ο λόγος των αδρανειακών δυνάμεων προς τις βαρυτικές και σχετίζεται με τη δημιουργία κυματισμών. Ορίζεται ως:

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{g * L_{WL}}}$$

Όπου:

- L_{WL} [m] : μήκος ισάλου του πλοίου [m]
- v [m²/s] : κινηματικό ιξώδες νερού
- g [m/s²] : επιτάχυνση της βαρύτητας

1.1. 1 Αντίσταση τριβής

Η αντίσταση τριβής, όπως έχουμε αναφέρει, είναι αποτέλεσμα της κίνησης ενός σώματος σε ένα ρευστό. Στην περίπτωση ιδανικού μη συνεκτικού ρευστού, είναι μηδέν. Σε αντίθετη περίπτωση (συνεκτικό ρευστό) ισούται με την ολοκλήρωση των επαπτομενικών τάσεων περί την βρεχόμενη επιφάνεια του σώματος. Κατά την κίνηση του σκάφους, τα υλικά σημεία του ρευστού τα οποία έρχονται σε άμεση επαφή με την επιφάνεια του σώματος έχουν ίδια ταχύτητα με το κινούμενο σώμα, ενώ σε απόσταση μακριά από το σώμα είναι ανεπηρέαστα. Προκύπτει επομένως σημαντική πτώση της ταχύτητας του ρευστού προχωρώντας από το σώμα προς τα πλάγια. Οι πιο σημαντικές αλλαγές ταχύτητας παρουσιάζονται κοντά στο σώμα, στο λεγόμενο οριακό στρώμα (boundary layer). Το οριακό στρώμα στην περιοχή της πλήρης είναι λεπτόγραμμο και γίνεται βαθμιαία παχύτερο όσο κινούμαστε προς την πρύμνη του (Σχήμα 1).

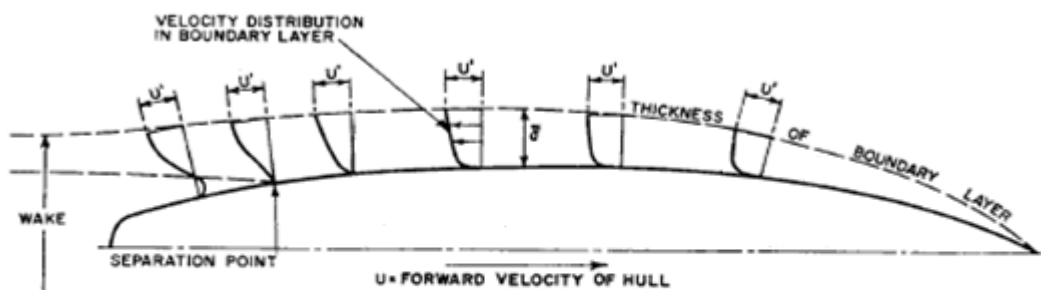


Fig. 26 Schematic diagram of boundary-layer flow

U' = Velocity at any point on hull in potential flow without viscosity
The velocity in boundary layer approaches U' asymptotically, and the thickness of layer, δ , is usually measured to the point where the velocity is $0.99 U'$.

Σχήμα 1-Ροή γύρω από γάστρα, οριακό στρώμα, αποκόλληση, αναστροφή ροής στην περιοχή της αποκόλλησης

Ο Froude πειραματικά έδειξε ότι η αντίσταση τριβής ενός πλοίου αντιστοιχεί περίπου με την αντίσταση μιας επίπεδης πλάκας με την ίδια βρεχόμενη επιφάνεια S . Η International Towing Tank Conference (ITTC), στην σύνοδό της στην Μαδρίτη το 1957, διατύπωσε έναν κοινά αποδεκτό αδιάστατο συντελεστή υπολογισμού της αντίστασης τριβής:

$$C_F = \frac{0.075}{(\log_{10} Rn - 2)^2}, \quad \text{όπου } Rn: \quad \text{αριθμός Reynolds}$$

Με βάση τον παραπάνω συντελεστή, η αντίσταση τριβής υπολογίζεται ως:

$$R_F = \frac{C_F * \rho * V^2 * S}{2}$$

Όπου:

C_F : αδιάστατος συντελεστής αντίστασης τριβής

V [m/s] : η ταχύτητα του πλοίου

S [m²] : η βρεχόμενη επιφάνεια του πλοίου

ρ [kr*sec²/m⁴] : η πυκνότητα του νερού

1.1. 2 Υπόλοιπη αντίσταση (R_R)

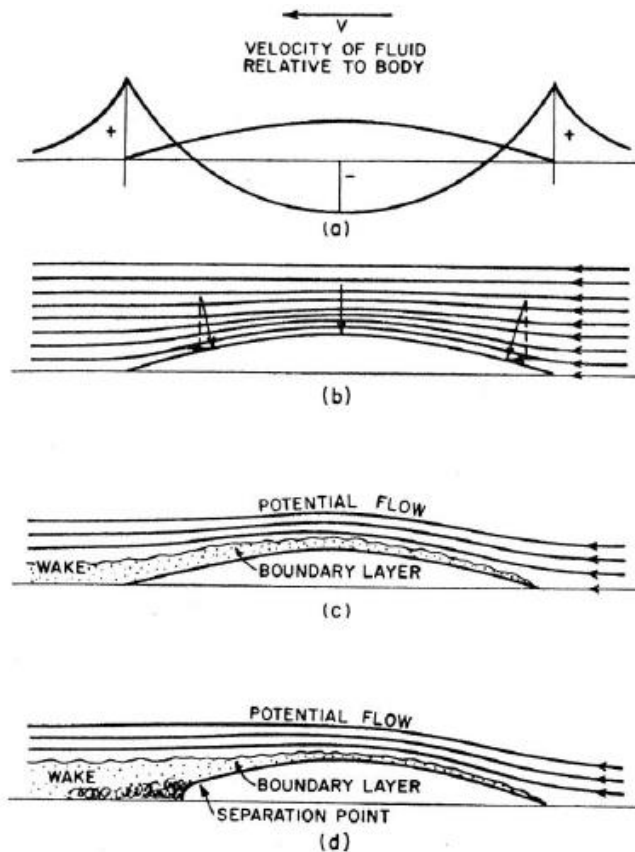
Οι κύριες συνιστώσες της υπόλοιπης αντίστασης είναι η αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας (R_{PV}) και η αντίσταση κυματισμού (R_W).

1.1.2. 1 Αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας (R_{PV})

Η αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας οφείλεται στην αλλαγή κατανομής της πίεσης στο βυθισμένο τμήμα της γάστρας λόγω της ύπαρξης συνεκτικότητας.

Ένα σώμα βρίσκεται κάτω από την ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας και κινείται με σταθερή ταχύτητα σε ιδανικό (μη συνεκτικό) ρευστό. Η κατανομή πίεσης για σταθερή ταχύτητα, σύμφωνα με την εξίσωση Bernoulli, θα είναι υψηλότερη στην πρύμνη και στην πλώρη και χαμηλότερη στην μέση του πλοίου (Σχήμα 2a). Αφού το σώμα βρίσκεται πλήρως βυθισμένο, δεν υπάρχει δημιουργία κυματισμών και η αντίστοιχη συνιστώσα είναι μηδέν(παράδοξο d' Alembert, Σχήμα 2b).

Σε πραγματικά υγρά η κατανομή πίεσης δεν είναι ομοιόμορφη και ιδιαίτερα στην περιοχή της πρύμνης η ισορροπία διαταράσσεται. Η ύπαρξη συνεκτικότητας επομένως οδηγεί στην ανάπτυξη αντίστασης πίεσης λόγω συνεκτικότητας (Σχήμα 2c). Σε σημεία στα οποία η γεωμετρία του σώματος αλλάζει απότομα ή είναι παχύγγραμο στο πίσω μέρος, η ροή του νερού μπορεί να αποκολληθεί (Σχήμα 2d). Αυτή η περίπτωση οδηγεί σε περαιτέρω αύξηση της αντίστασης.

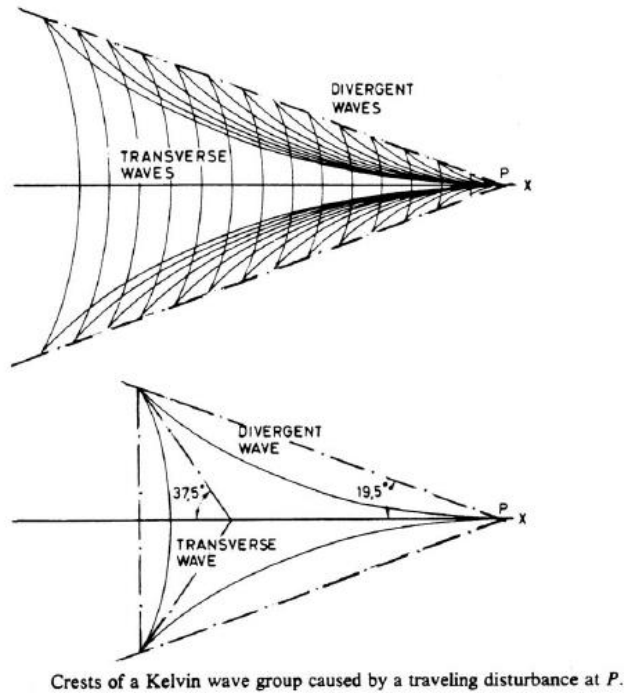


Παραδείγματα ροών γύρω από ένα σώμα βυθισμένο σε άπειρο ρευστό.

Σχήμα 2

1.1.2.2 Αντίσταση Κυματισμού (R_w)

Ένα σώμα το οποίο κινείται στην ελεύθερη επιφάνεια ενός ρευστού προκαλεί διαταραχή στην επιφάνειά του, δημιουργώντας κύματα. Η αντίσταση κυματισμού μπορεί να θεωρηθεί ότι ισούται με την ενέργεια που απορροφούν τα δημιουργούμενα κύματα. Η πρώτη θεωρητική προσπάθεια μελέτης του φαινομένου έγινε από τον Lord Kelvin τον 19^ο αιώνα. Σύμφωνα με τον Lord Kelvin, οι κυματισμοί ενός πλοίου μπορούν να περιγραφούν θεωρώντας ότι ένα κινούμενο σώμα έχει ένα μοναδικό σημείο πίεσης που κινείται με ταχύτητα ίδια με αυτή του πλοίου. Δημιουργείται έτσι ένα σύστημα εγκαρσίων κυματισμών (transverse) μαζί με μια σειρά αποκλινόντων κυματισμών (divergent) που απλώνονται πίσω από το σημείο πίεσης. Ο συνολικός σχηματισμός κυμάτων βρίσκεται ως επί το πλείστον μέσα σε δύο ευθείες γραμμές που ξεκινούν από το σημείο πίεσης και σχηματίζουν γωνίες περίπου 19.5 μοιρών ως προς τη διεύθυνση της κίνησης (Σχήμα 3).



Σχήμα 3

Ο ακριβής υπολογισμός της αντίστασης κυματισμού δεν είναι εύκολος. Τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει αξιόλογες προσπάθειες υπολογισμού της με την βοήθεια της χρήσης ηλεκτρονικού υπολογιστή και ειδικών προγραμμάτων. Τα αποτελέσματά τους, αν και μπορεί να διαφέρουν από τα πραγματικά μεγέθη, είναι πολύ χρήσιμα κατά την διαδικασία αρχικής σχεδίασης ενός πλοίου. Προσφέρουν στον μελετητή ένα μέτρο σύγκρισης της αντίστασης, δίνοντάς του την δυνατότητα βελτιστοποίησης της μορφής της γάστρας. Τέλος, αναφέρουμε ότι η χρήση πρωαίου βολβού και πρυμναίου επιδρά πολλές φορές θετικά στην μείωση της αντίστασης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΥΣΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό της αντίστασης και της δυναμικής συμπεριφοράς σε ημιτονικούς κυματισμούς των δύο μοντέλων. Οι πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στην ειδική δεξαμενή που διαθέτει το εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ). Αρχικά πραγματοποιήθηκαν πειράματα αντίστασης σε ήρεμο νερό και στα δύο μοντέλα και στη συνέχεια τα πειράματα σε ημιτονικούς κυματισμούς. Τα πειράματα αντίστασης σε ήρεμο νερό έγιναν σε 2 βυθίσματα, και για τα 2 μοντέλα, σε ένα εύρος ταχυτήτων από 0,492m/s έως 1,914m/s, που αντιστοιχεί σε αριθμούς Froude 0.089-0.356). Τα πειράματα δυναμικής συμπεριφοράς έγιναν σε 2 ταχύτητες και 9 διαφορετικά πλάτοι και συχνότητες. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται στην πρώτη στήλη οι ταχύτητες [m/s] των μοντέλων σε ήρεμο νερό, και δεύτερη στήλη, Τρίτη τέταρτη και πέμπτη στήλη οι ταχύτητες σε αριθμούς Froude για τα 2 βυθίσματα. Οι αριθμοί Froude υπολογίστηκαν με βάση το μήκος ισάλου των δύο μοντέλων. Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα πλάτοι (cm) και αντίστοιχες συχνότητες [Hz] για τις 2 ταχύτητες ($V_1=1,367\text{m/s}$, $V_2=1,804\text{m/s}$ και αριθμούς Froude 0.250 και 0.330 αντίστοιχα).

Πίνακας 1- Υπό μελέτη ταχύτητες μοντέλων και αριθμούς Froude

Ταχύτητα [m/s]	Αριθμός Froude $C_b=0.7$, $T=0.163\text{m}$	Αριθμός Froude $C_b=0.7$, $T=0.1267\text{m}$	Αριθμός Froude $C_b=0.6$, $T=0.163\text{m}$	Αριθμός Froude $C_b=0.6$, $T=0.1267\text{m}$
0.492	0.089	0.090	0.091	0.092
0.711	0.129	0.130	0.131	0.132
0.930	0.169	0.170	0.172	0.173
1.039	0.188	0.190	0.192	0.193
1.148	0.208	0.210	0.212	0.214
1.258	0.228	0.230	0.232	0.234
1.367	0.248	0.250	0.252	0.254
1.476	0.268	0.270	0.272	0.275
1.586	0.288	0.290	0.293	0.295
1.695	0.307	0.310	0.313	0.316
1.804	0.327	0.330	0.333	0.336
1.914	0.347	0.350	0.353	0.356

Πίνακας 2- Συχνότητες και πλάτη κυματισμών

Συχνότητα f [Hz]	Πλάτος A (cm)
0.3	5
0.4	5
0.5	5
0.6	4
0.7	4
0.8	4
0.9	3
1.0	3
1.1	2

2.2 Πειραματική Διάταξη

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε ο εξειδικευμένος εξοπλισμός που διαθέτει το εργαστήριο. Πρόκειται κυρίως για: α) την δεξαμενή πειραμάτων και το φορείο, β) το δυναμόμετρο και τους αισθητήρες, γ) ο κυματιστήρας και δ) τα μοντέλα πειραμάτων.

2.2.1 Δεξαμενή Πειραμάτων

Η δεξαμενή πειραμάτων έχει ωφέλιμο μήκος 91 m, πλάτος 4.56 m και 3 m βάθος. Διαθέτει κινούμενο φορείο τοποθετημένο σε ράγες, ικανό για ρυμούλκηση μοντέλων πλοίων μέχρι και 5.2 m/sec. Πάνω στο φορείο τοποθετείται όλος ο αναγκαίος εξοπλισμός που απαιτείται όσον αφορά υπολογιστές και άλλα μετρητικά όργανα. Επίσης, υπάρχει χώρος παρακολούθησης των πειραμάτων παρέχοντας οπτική επαφή του μοντέλου από όλες τις μεριές. Στο πίσω μέρος του φορείου υπάρχει μηχανισμός, ο οποίος αποτελείται από μεταλλική επίπεδη επιφάνεια σε γωνία σε σχέση με την επιφάνεια του νερού (σιδερώστρα) και η οποία, μετά το τέλος του εκάστοτε πειράματος και μέχρι την επιστροφή του φορείου στην θέση εκκίνησης, κατεβαίνει μέχρι την επιφάνεια του νερού με σκοπό την απόσβεση των πρυμναίων κυματισμών που δημιουργούνται από ανάκλασή τους στα τοιχώματα της δεξαμενής (Εικόνα 1).

Στο απέναντι άκρο υπάρχει κατάλληλα διαμορφωμένη κεκλιμένη ακτή μήκους 11.1m για την απορρόφηση των κυματισμών και τον περιορισμό των ανακλάσεων (αποσβεστήρας).



Εικόνα 1 - Πειραματική δεξαμενή ΕΝΘΥ ΕΜΠ

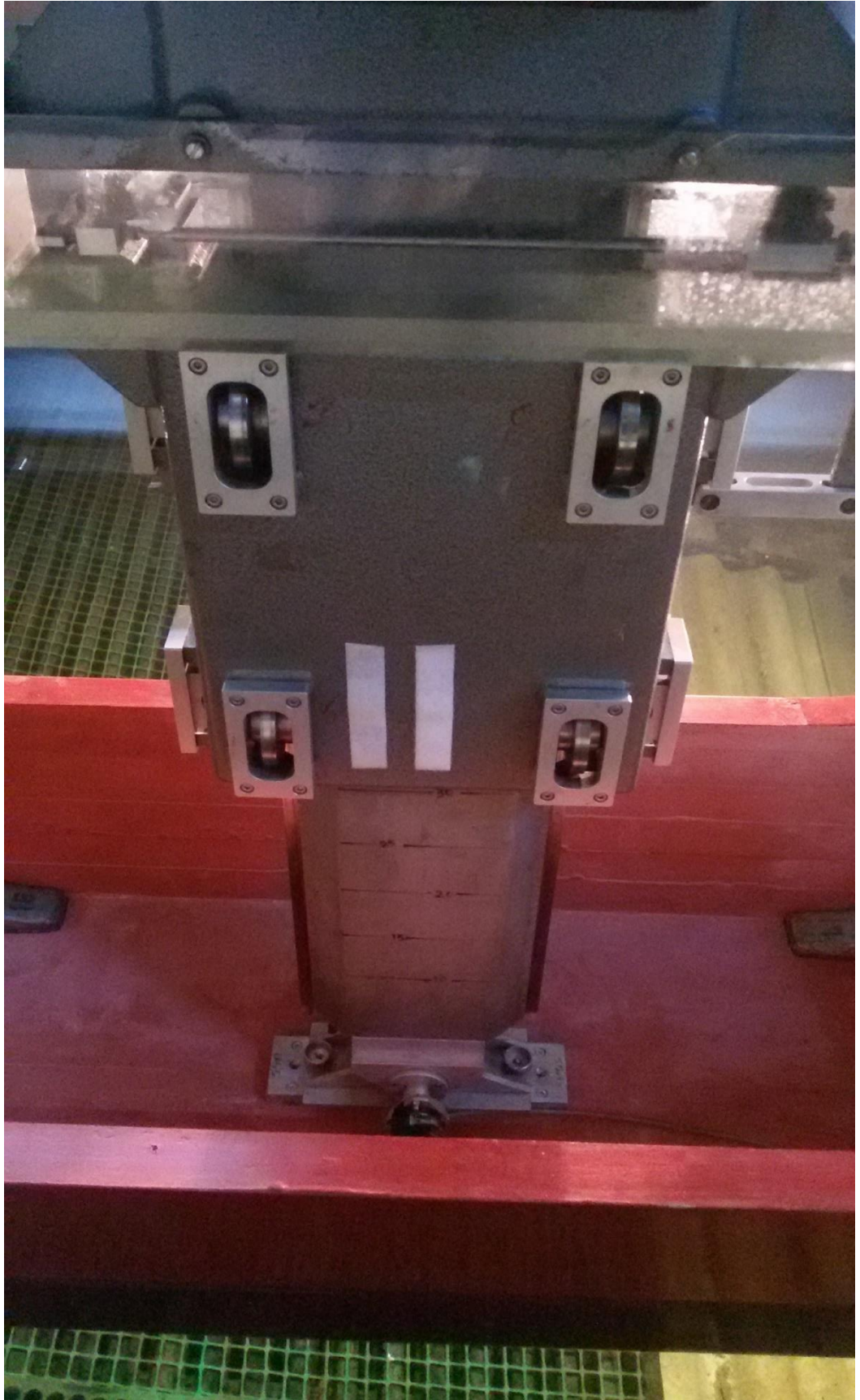
2.2.2 Δυναμόμετρο -Αισθητήρες

Το δυναμόμετρο (Εικόνα 2) είναι απαραίτητο για την διεξαγωγή των πειραμάτων. Βρίσκεται πακτωμένο πάνω στο φορείο και είναι υπεύθυνο για την μέτρηση της απόκρισης του μοντέλου στις διάφορες κινήσεις και την μέτρηση της αντίστασής του. Συγκεκριμένα, αποτελείται από μια γέφυρα Wheatstone για την μέτρηση της αντίστασης, ένα ποτενσιόμετρο για τη μέτρηση του προνευτασμού (pitch) και ένα πηνίο για την μέτρηση των κάθετων κινήσεων (heave).

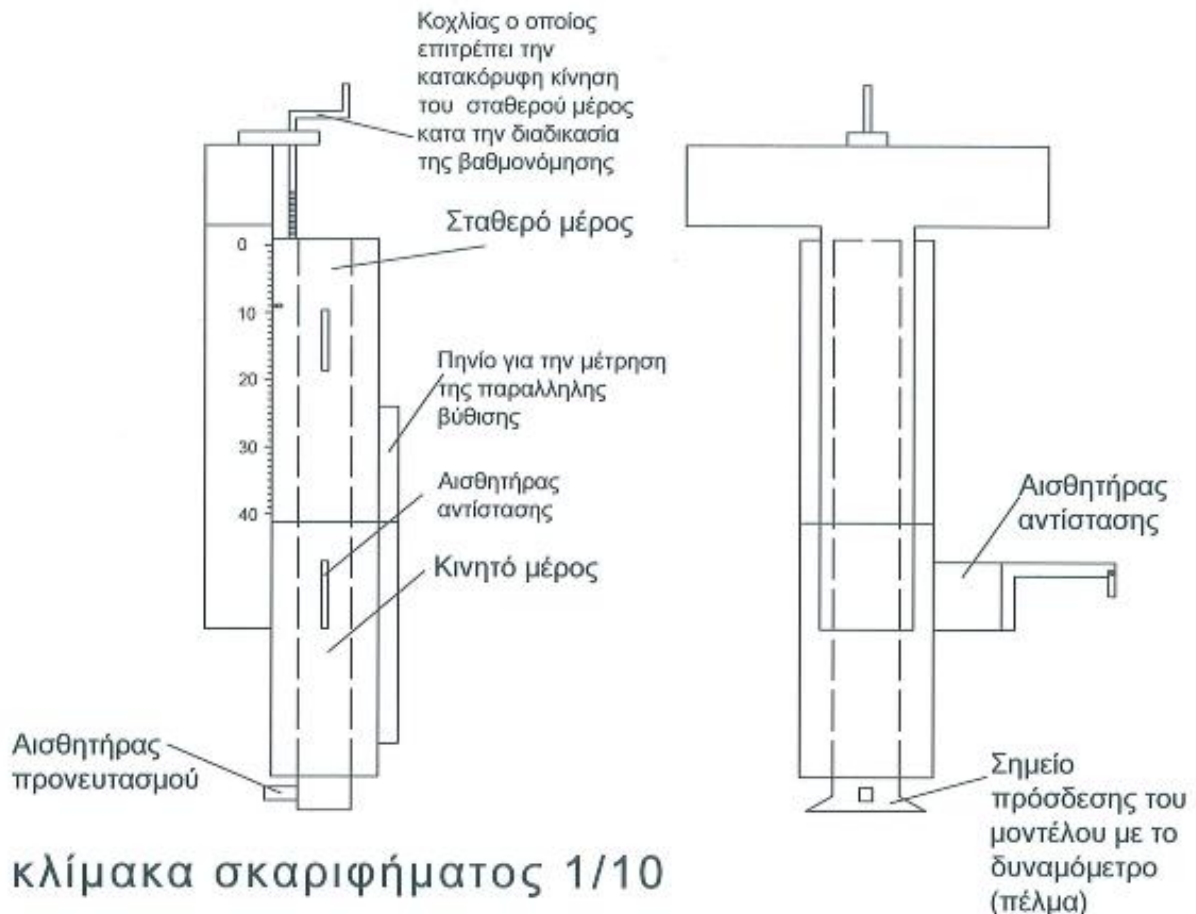
Το δυναμόμετρο αποτελείται από δύο μέρη: Ένα σταθερό κατά την διάρκεια των πειραμάτων και ένα κινητό, το οποίο μπορεί να εκτελεί απειροστά μικρές κινήσεις ως προς τον διαμήκη άξονα της δεξαμενής. Μέσω αυτών των πολύ μικρών κινήσεων η γέφυρα Wheatstone μετράει την αντίσταση. Το βάρος φόρτισης του οργάνου πάνω στο μοντέλο είναι 7,360 kg.

Το σταθερό μέρος του οργάνου έχει την δυνατότητα, μέσω ενός κοχλίου στο πάνω μέρος του, να μετακινείται κατακόρυφα. Αυτό είναι απαραίτητο κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης όπως θα εξηγηθεί στην συνέχεια.

Στο κέντρο των δύο αυτών μερών υπάρχει εσοχή, στην οποία άξονας, ο οποίος στο κάτω του μέρος είναι προσδεμένος στο μοντέλο, έχει την δυνατότητα να ακολουθεί τις κινήσεις του μοντέλου στην κατακόρυφη διεύθυνση (heave). Οι αποκρίσεις των κινήσεων αυτών καταγράφονται μέσω ενός πηνίου. Το σημείο πρόσδεσης του μοντέλου με το δυναμόμετρο είναι ικανό να κινείται ανάλογα με τον προνευτασμό του μοντέλου (pitch). Οι αποκρίσεις αυτές μετρούνται με ιδικό ποτενσιόμετρο.



Εικόνα 2-Δυναμόμετρο πειραμάτων



κλίμακα σκαριφήματος 1/10

Σχήμα 4-Σκαρίφημα δυναμόμετρου με τους αισθητήρες (πλάγια όψη αριστερά, μπροστά όψη δεξιά)

2.2.3 Κυματιστήρας

Στο ένα άκρο της δεξαμενής υπάρχει εγκατάσταση αναπαραγωγής αρμονικών και τυχαίων κυματισμών (κυματιστήρας). Αποτελείται από πτερύγιο (flap type) ανοξείδωτου χάλυβα πλάτους 4.56 m και ύψους 2m, εδρασμένο σε βάθρο χάλυβα ύψους 1.30 m από τον πυθμένα της δεξαμενής. Το πτερύγιο κινείται μέσω υδραυλικού συστήματος ισχύος 15KW. Το νερό αντλείται από την πίσω μεριά του πτερυγίου πριν και κατά τη διάρκεια της λειτουργίας.

2.2.4 Μοντέλα πειραμάτων

Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν μοντέλα σειράς 60 με $C_b=0.7$ (219-18) και $C_b=0.6$, τα οποία κατασκευάστηκαν στο προτυποποιείο του εργαστηρίου. Το υλικό κατασκευής του ήταν το ξύλο και τα χρώματά τους κόκκινο και κίτρινο αντίστοιχα.

Τα χαρακτηριστικά τους παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες. Για τα χαρακτηριστικά του μοντέλου 219-18 χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Rhinoceros 5. Με αυτό τον τρόπο ήταν δυνατή η έρευνα των υδροστατικών μεγεθών και για τα 2 διαφορετικά εκτοπίσματα. Για το κίτρινο μοντέλο ήταν γνωστά τα υδροστατικά του στοιχεία για το ένα βύθισμα. Επειδή δεν ήταν άμεσα διαθέσιμοι οι νομείς του

μοντέλου, το δεύτερο βύθισμα και εκτόπισμα υπολογίστηκε με τρόπο που παρουσιάζεται σε παρακάτω παράγραφο. Το βύθισμα, και τα υδροστατικά μεγέθη αυτού, επαληθεύτηκαν αργότερα με το πρόγραμμα Rhinoceros 5. Σημειώνεται ότι τα μεγέθη έχουν μετρηθεί από την πλήρη προς την πρύμνη των μοντέλων.

Πίνακας 3-Χαρακτηριστικά στις υπό μελέτη καταστάσεις φόρτωσης των μοντέλων

Cb	Lwl(m)	T(m)	Trim(m)	Disp(kg)	LCB(m)	Sw(m ²)	Bwl(m)	LCF(m)
0.7	3.099	0.163	0	163.3	1.581	1.869	0.469	1.650
0.7	2.992	0.1267	0	123.3	1.567	1.620	0.469	1.602
0.6	3.048	0.163	0	120	1.447	1.579	0.406	1.516
0.6	2.941	0.1267	0	89.75	1.431	1.221	0.406	1.466

Το μοντέλα δεν φέρουν παρελκόμενα, διαθέτουν οδηγό στο πρόσθιο τμήμα του και ορθογώνια πλάκα στο εσωτερικό της γάστρας του, στην οποία προσδένει η υπόλοιπη κατασκευή, όπως θα περιγραφεί στην συνέχεια. Στο πρόσθιο τμήμα έχουν διεγέρτες τύρβης με την μορφή μικρού σύρματος προκειμένου να γίνεται όσο το δυνατόν καλύτερη προσομοίωση της φυσικής του κλίμακας.

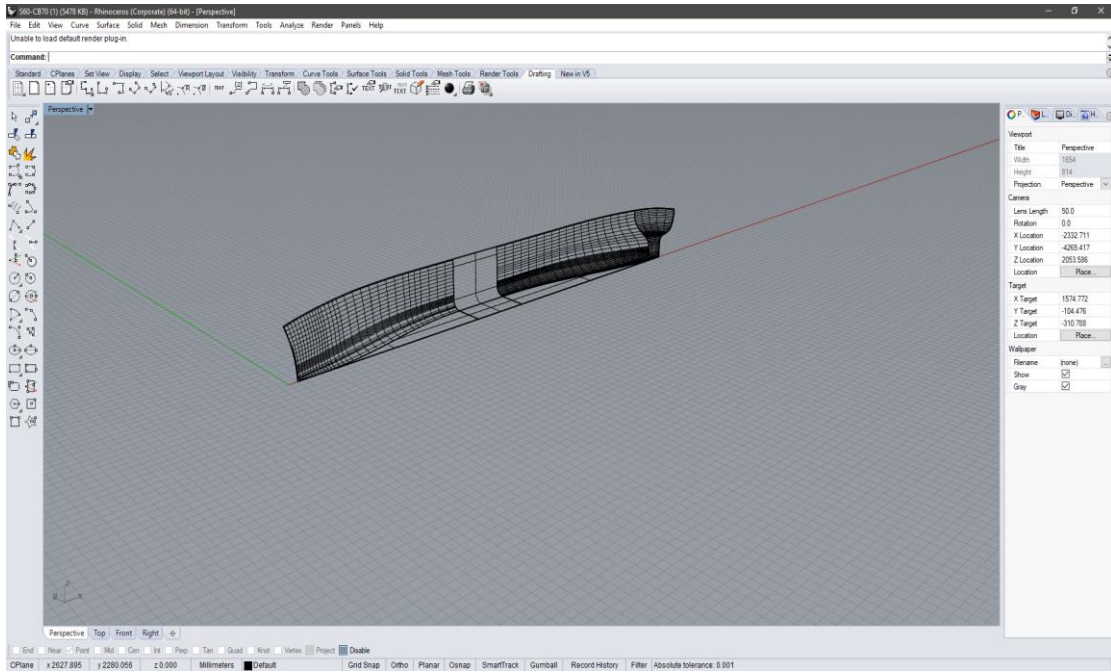
2.3 Προετοιμασία πειραμάτων

Πριν αρχίσει η πειραματική διαδικασία είναι απαραίτητο να γίνει προετοιμασία της πειραματικής διαδικασίας. Περιληπτικά περιλαμβάνει την χάραξη της ισάλου γραμμής του πρώτου βυθίσματος ($T=0,163m$), την βαθμονόμηση των οργάνων, την έρευση της ροπής αδρανείας και την τοποθέτηση του μοντέλων στην πειραματική δεξαμενή.

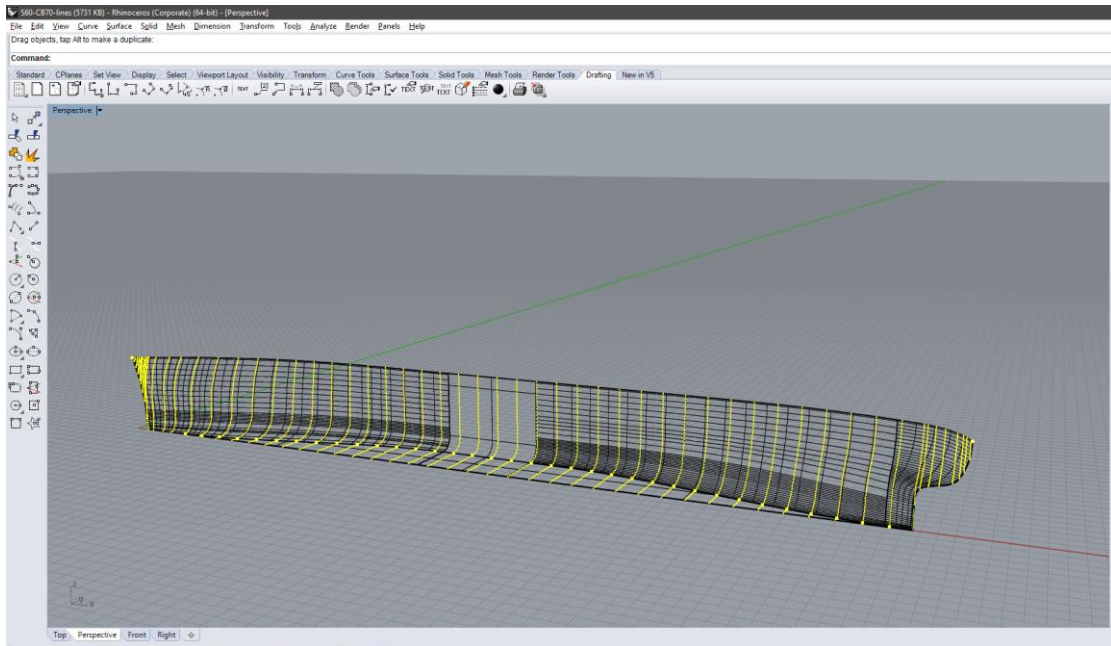
2.3.1 Έρευση χαρακτηριστικών του μοντέλου με $C_b=0.7$

Όπως προαναφέρθηκε το μοντέλο με $C_b=0.6$ ήταν έτοιμο για την μία κατάσταση φόρτωσης, καθώς έχει χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν για διάφορα πειράματα. Μάλιστα το βύθισμα αυτό ήταν και το βύθισμα αναφοράς για το δεύτερο μοντέλο. Για αυτό το μοντέλο ήταν διαθέσιμη η επιφάνεια της γάστρας στο πρόγραμμα Rhinoceros 5 (Εικόνα 3). Έπειτα επιλέγοντας την επιφάνεια αυτή και χρησιμοποιώντας την εντολή hydrostatics, με το κατάλληλο βύθισμα, το πρόγραμμα επιστρέφει τα ζητούμενα υδροστατικά. Για την προετοιμασία του μοντέλου, τα απαιτούμενα υδροστατικά μεγέθη ήταν το εκτόπισμα και η διαμήκης θέση του κέντρου άντωσης (LCB).

Επίσης από το ίδιο αρχείο εξήχθησαν και τα κατάλληλα σημεία (points) της επιφάνειας, για το προγράμματος Santorn. Αρχικά επιλέγοντας την επιφάνεια χρησιμοποιήθηκε η εντολή Contour, προκειμένου να χωριστεί η επιφάνεια σε νομείς (sections)(Εικόνα 4). Στη συνέχεια με την εντολή Section προστέθηκαν επιπλέον νομείς σε περιοχές που υπήρχε απαίτηση για περισσότερη λεπτομέρεια. Οι νομείς αναλύθηκαν, σε τουλάχιστον 40 ο κάθε ένας, σημεία με την εντολή Divide, και τα σημεία πρώτου γίνονται export σε αρχείο txt, ομαδοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας την εντολή Point Cloud. Τέλος τα σημεία διαμορφώθηκαν σε κατάλληλη μορφή για την εισαγωγή τους στο πρόγραμμα.



Εικόνα 3-Απεικόνιση μοντέλου $C_b=0.7$ στο πρόγραμμα Rhinoceros 5



Εικόνα 4-Sections του μοντέλου $C_b=0.7$

2.3.2 Χάραξη της ισάλου γραμμής

Η χάραξη της ισάλου γραμμής είναι μια διαδικασία η οποία γίνεται μια φορά, πριν την έναρξη των πειραμάτων και απαιτεί μεγάλη προσοχή. Σκοπός είναι να χαραχτούν στην γάστρα του μοντέλου τα βυθίσματα στα οποία θα γίνει η πειραματική διερεύνηση. Η χάραξη των ισάλων γίνεται σε τρία μέρη του πλοίου: στην πλώρη, στην μέση του μοντέλου και στην πρύμνη. Με βάση αυτές τις γραμμές, όταν μπει το μοντέλο στο νερό ελέγχεται αν τελικά το μοντέλο έχει το απαραίτητο εκτόπισμα και διαγωγή. Οι γραμμές αυτές θα πρέπει να εφάπτονται με την επιφάνεια του νερού. Εφόσον η ισάλος γραμμή δεν εφάπτεται με την επιφάνεια του νερού, σημαίνει ότι το μοντέλο μας έχει λάθος εκτόπισμα από το ζητούμενο ή λάθος διαγωγή. Η διαδικασία αυτή έγινε μόνο για το μοντέλο με $C_b=0.7$ καθώς το μοντέλο με $C_b=0.6$ ήταν ήδη έτοιμο για την μία κατάσταση φόρτωσης.

Στο πείραμά μας οι γάστρες είναι ισοβύθιστες ($trim=0$ m) και έχουν μηδενικό διατοιχισμό ($roll$). Η χάραξη της ισάλου έγινε στο προτυποποιείο της σχολής και χρησιμοποιήθηκε ειδικό όργανο χάραξης ισάλων (Εικόνα 6). Αρχικά η γάστρα γυρίστηκε ανάποδα και η ακίδα του οργάνου τοποθετήθηκε στον πυθμένα της γάστρας. Στην συνέχεια ακολούθησε μηδενισμός του οργάνου και η ακίδα κατέβηκε μηχανικά μέχρις ότου η ηλεκτρονική ένδειξη του οργάνου να δείξει το απαιτούμενο βύθισμα. Η ακίδα του οργάνου, τέλος, τοποθετήθηκε πάνω στην γάστρα, στα σημεία της πρύμνης, της πλώρης και στη μέση του μοντέλου και χαράχτηκε ένα ευθύγραμμο τμήμα σε κάθε μέρος της (Εικόνα 5).



Εικόνα 5-Ισαλοι μοντέλου στο πρυμναίο τμήμα



Εικόνα 6-Όργανο χάραξης ισάλων

2.3.3 Ερματισμός μοντέλων

Από τα υδροστατικά στοιχεία, προκύπτει το απαιτούμενο εκτόπισμα της πρώτης κατάστασης φόρτωσης. Με τη βοήθεια της ηλεκτρονικής ζυγαριάς του εργαστηρίου μετρήθηκε το βάρος του άφορτου σκάφους, και στη συνέχεια, υπολογίστηκε από τη διαφορά του εκτοπίσματος, αλλά και του βάρους του δυναμόμετρου τον ακριβή αριθμό των κιλών που απαιτούνταν να προστεθούν κάθε φορά για να επιτευχθεί το αντίστοιχο εκτόπισμα (Εικόνα 7).

Τα πρόσθετα βάρη τοποθετούνταν αρχικά συμμετρικά ως προς το LCB του μοντέλου προκειμένου να αποφευχθεί ενδεχόμενη εγκάρσια κλίση του αλλά και για να επιτευχθεί η κατανομή εκείνη η οποία θα αντιστοιχεί σε ακτίνα αδρανείας ίση περίπου με $r_{zz} = 0.25L_{WL}$. Σε αντίθετη περίπτωση, τα βάρη μετακινούνταν με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτευχθούν οι δύο αυτοί παράμετροι.

Επίσης, στις καταστάσεις φόρτωσης το μοντέλο έπρεπε να πλέει ισοβύθιστο. Για αυτό το λόγο, πραγματοποιούνταν επιπρόσθετος έλεγχος μέσω του αισθητήρα μέτρησης του προνευτασμού. Ο έλεγχος αυτός γινόταν στη θέση εκκίνησης του φορείου ενώ το νερό στην πειραματική δεξαμενή ήταν ήρεμο. Η ένδειξη της γωνίας διαγωγής έπρεπε να ήταν μηδενική. Σε αντίθετη περίπτωση, πραγματοποιούνταν μετακίνηση των βαρών και πάλι συμμετρικά έως ότου η ένδειξη είναι η επιθυμητή.



Εικόνα 7-Ερματισμός μοντέλου

2.3.3 Βαθμονόμηση των οργάνων

Πριν την εκτέλεση των πειραμάτων, τα όργανα που θα χρησιμοποιηθούν θα πρέπει να είναι βαθμονομημένα. Τα όργανα αντιλαμβάνονται τις φυσικές μεταβολές ως μεταβολές ρεύματος και για αυτό τον λόγο μετράνε σε Volts. Προκειμένου τα Volts να μετατραπούν σε μονάδες S.I. πρέπει να προσδιοριστεί η καμπύλη βαθμονόμησης. Για να γίνει αυτή η αντιστοιχία των μονάδων, τα όργανα μετρούν γνωστά εκ των προτέρων πρότυπα μεγέθη και στην συνέχεια από τις τιμές αυτές προσδιορίζεται η καμπύλη, η οποία είναι της μορφής $Y = aX + b$. Η χρήση αυτής της εξίσωσης μπορεί να γίνει με δύο τρόπους.

Σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο αγνοούμε τον παράγοντα b . Αυτό γίνεται στην περίπτωση που πριν από κάθε μέτρηση έχουμε κάνει και μια μέτρηση σε κατάσταση ηρεμίας. Έτσι στο X βάζουμε την διαφορά της μέτρησης που πήραμε από την κατάσταση ηρεμίας και παίρνουμε στο Y την μέτρηση στο S.I. Μπορούμε να πούμε δηλαδή ότι ο παράγοντας b είναι η ευαισθησία του οργάνου (offset), η οποία έχει συνυπολογιστεί αφού έχει γίνει μέτρηση στην κατάσταση ισορροπίας.

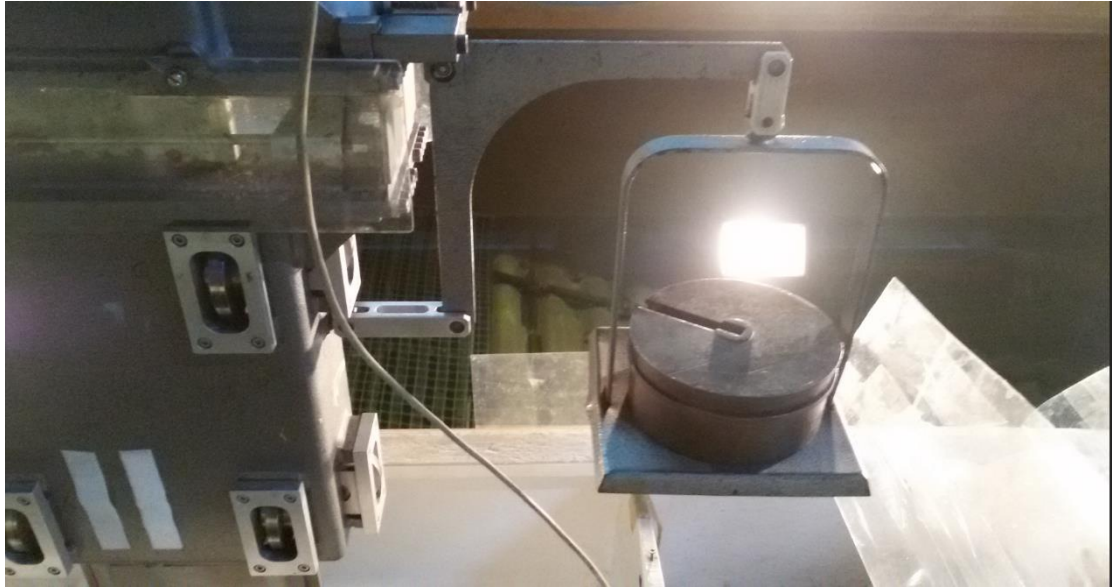
Σύμφωνα με τον δεύτερο τρόπο και εφόσον δεν έχουμε πάρει μέτρηση στην κατάσταση ηρεμίας, βάζουμε στον X την τιμή που πήραμε και όπως και στην προηγούμενη περίπτωση παίρνουμε στον Y την μέτρηση στο S.I.

Στα πειράματα που έγιναν πριν από κάθε μέτρηση παίρνονταν μέτρηση στην κατάσταση ηρεμίας, οπότε η χρήση της εξίσωσης γίνονταν σύμφωνα με τον πρώτο τρόπο. Στα πειράματα που έγιναν για τη δυναμική συμπεριφορά έγινε διόρθωση μέσης τιμής για περισσότερη ακρίβεια.

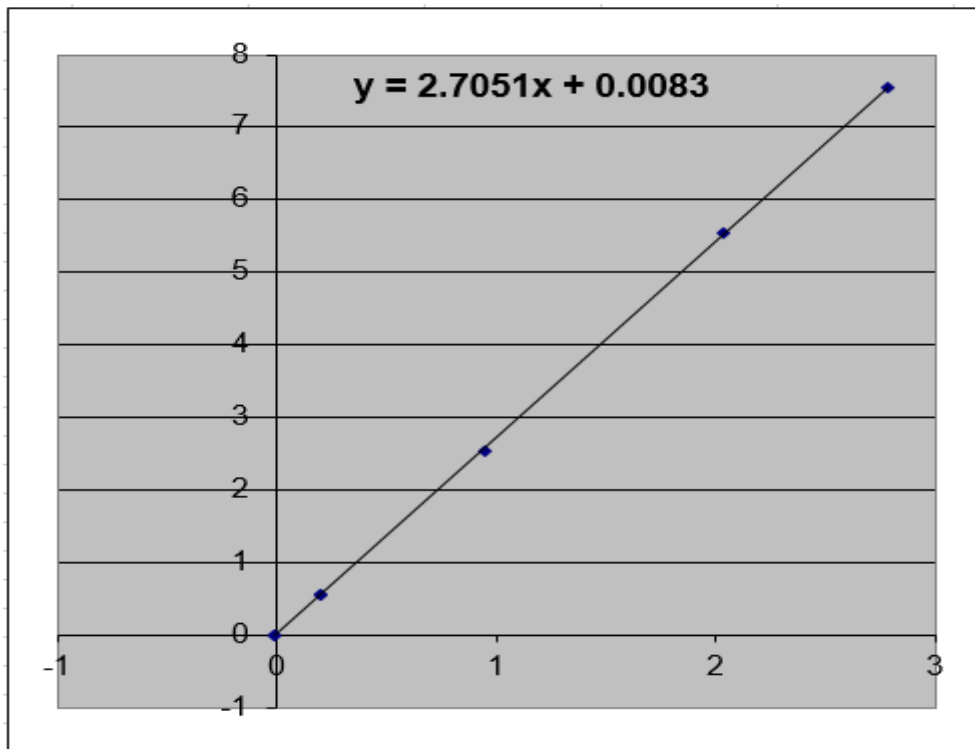
Στο παρόν πείραμα είχαμε αισθητήρες που μετρούσαν: την αντίσταση του μοντέλου (resistance), την ανύψωση του κέντρου μάζας του (heave), τον προνευτασμό του (pitch) και το ύψος κύματος (wave probe).

2.3.3.1 Βαθμονόμηση αισθητήρα αντίστασης

Η βαθμονόμηση του αισθητήρα της αντίστασης έγινε τοποθετώντας πρότυπα βάρη στον πρόβολο του δυναμόμετρου, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 8. Αρχικά παίρνονταν μια μέτρηση χωρίς κανένα βάρος. Ακολούθως τοποθετούνταν η ζυγαριά βάρους 0.54 kg και στην συνέχεια τα βάρη των 2,5,7 kg συν το βάρος της ζυγαριάς. Τέλος, παίρνονταν εκ νέου μια μέτρηση μόνο με την ζυγαριά και μια χωρίς κανένα βάρος. Με τις παραπάνω μετρήσεις προσδιοριζόταν η συνάρτηση μεταφοράς (Διάγραμμα 1). Η βαθμονόμηση της αντίστασης γινόταν κάθε φορά πριν την έναρξη των πειραμάτων.



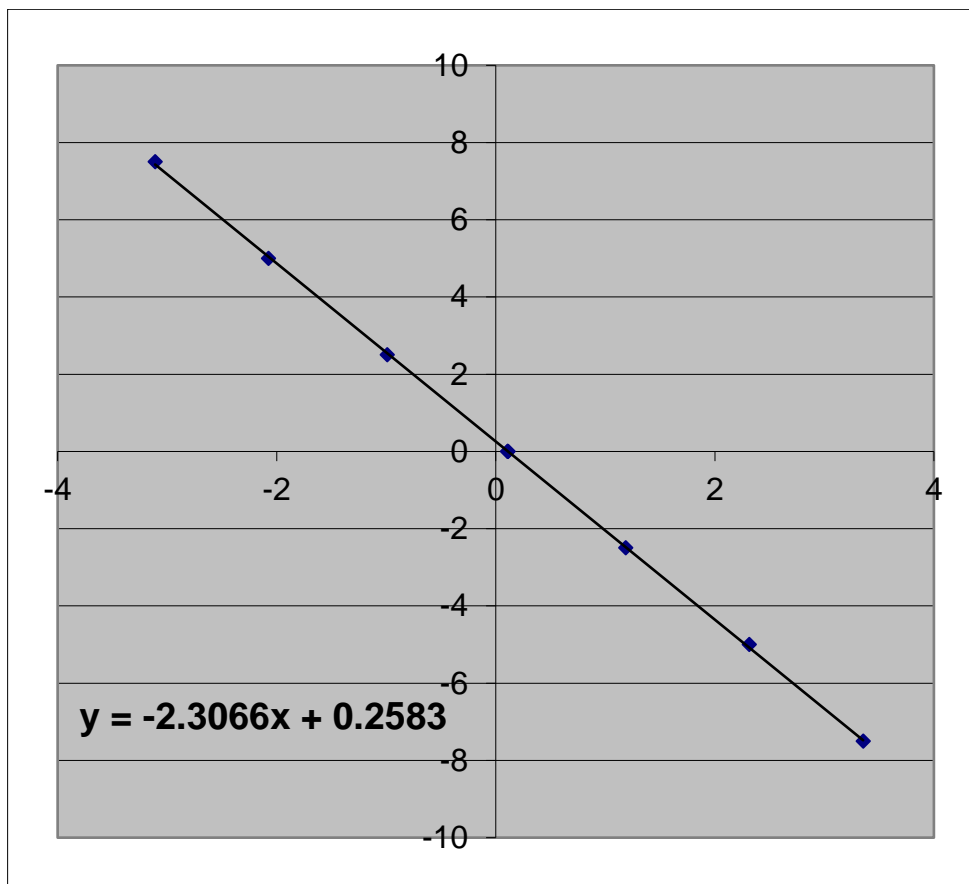
Εικόνα 8-Βαθμονόμηση του αισθητήρα της αντίστασης



Διάγραμμα 1-Βαθμονόμηση Resistance

2.3.3.2 Βαθμονόμηση των αισθητήρων προνευτασμού (pitch)

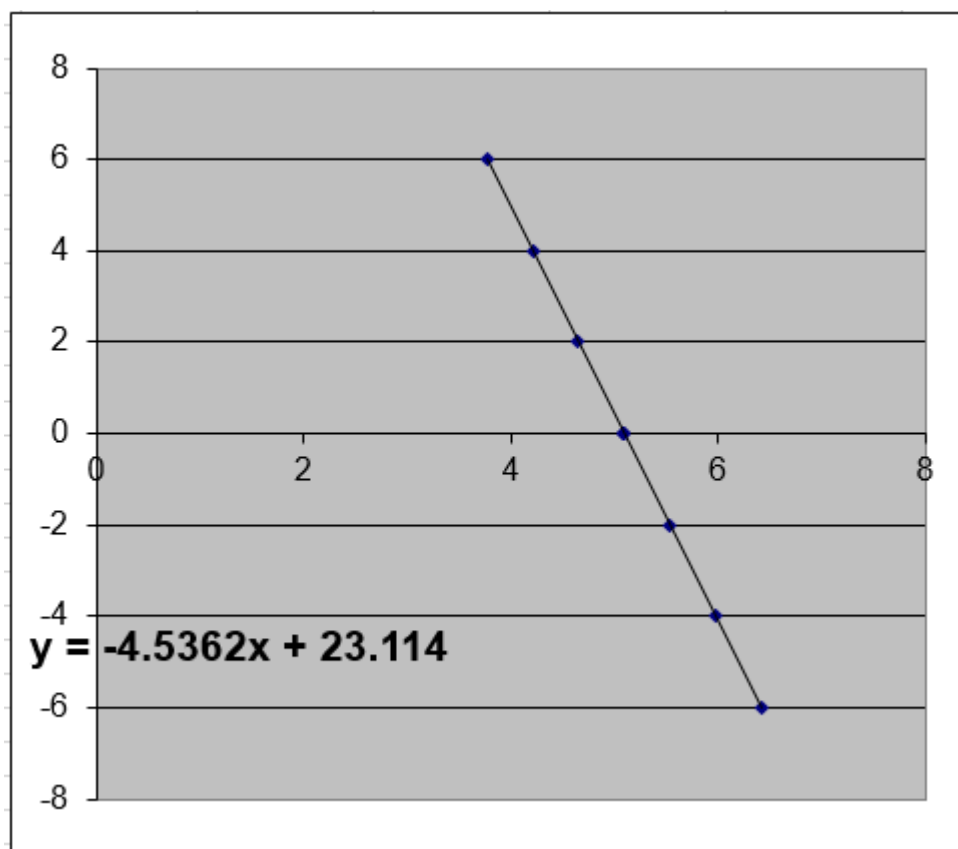
Το δυναμόμετρο, ανυψώνονταν στον αέρα με τη βοήθεια γερανού προκειμένου να υπάρχει εύκολη πρόσβαση στο κάτω τμήμα του, μέσω του οποίου γίνεται και η βαθμονόμηση. Στη συνέχεια μετακινούταν προς τα κάτω το πόδι του δυναμομέτρου, ώστε να ακουμπάει πάνω στην ειδική κατασκευή που έχει τοποθετηθεί για την πρόσδεση του δυναμομέτρου με το μοντέλο. Ανάμεσα τους τοποθετούνταν σφήνες διαφορετικών γωνιών, οπότε για διάφορες τιμές των γωνιών των σφηνών λαμβάνονταν μετρήσεις από το όργανο. Το αποτέλεσμα των μετρήσεων ήταν γραμμικό (Διάγραμμα 2).



Διάγραμμα 2-Βαθμονόμηση Pitch

2.3.3.3 Βαθμονόμηση αισθητήρα ανύψωσης κέντρου βάρους (heave)

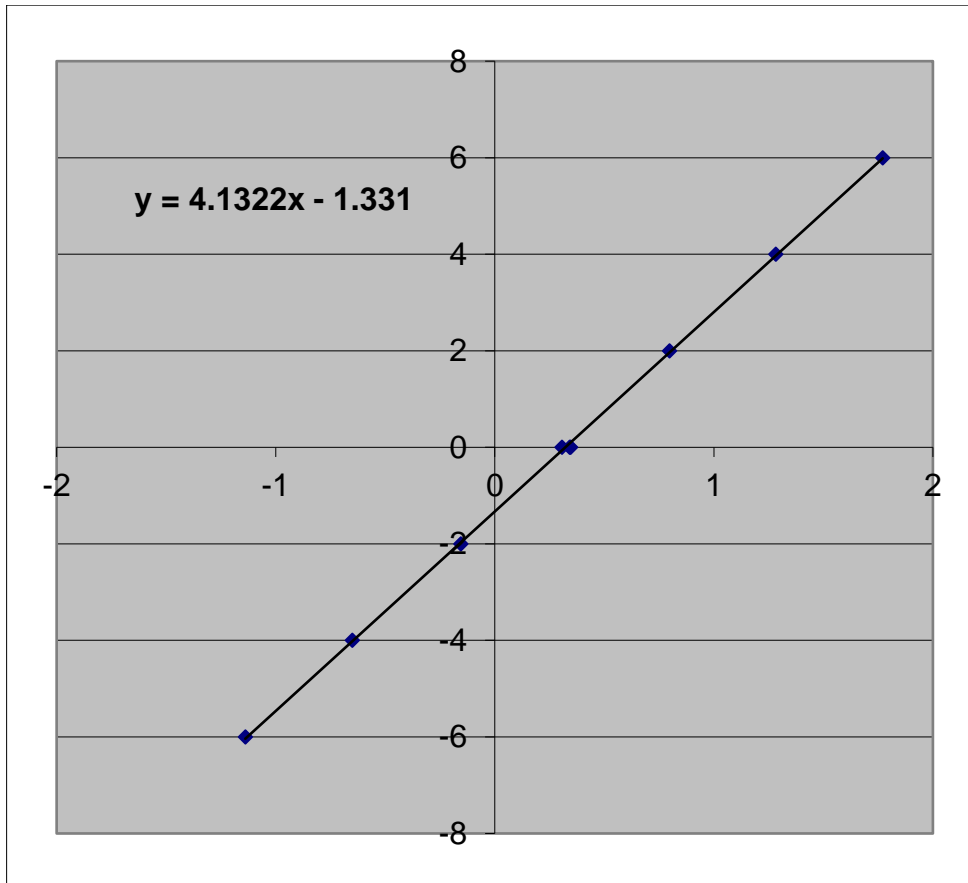
Για το σκοπό αυτό, το δυναμόμετρο δένεται στο μοντέλο. Στη συνέχεια, με σημείο αναφοράς το ύψος στο οποίο έχει δεθεί στο μοντέλο, το στέλεχος του δυναμομέτρου μετακινούνται κατακόρυφα πάνω και κάτω λαμβάνοντας μετρήσεις για τις διάφορες ανυψώσεις και βυθίσεις του στελέχους. Από τις διαδοχικές αυτές μετακινήσεις, κατασκευάζεται η συνάρτηση μεταφοράς, το αποτέλεσμα της οποίας ήταν γραμμικό (Διάγραμμα 3). Η συνάρτηση μεταφοράς του pitch και του heave παραμένουν σταθερές εφόσον δεν μετακινηθεί η κατακόρυφη θέση του ποδιού του δυναμομέτρου, είτε χειροκίνητα είτε λόγω μεταβολής του ύψους του νερού της δεξαμενής. Επομένως η διαδικασία βαθμονόμησης του heave και του pitch πραγματοποιήθηκε μία μόνο φορά.



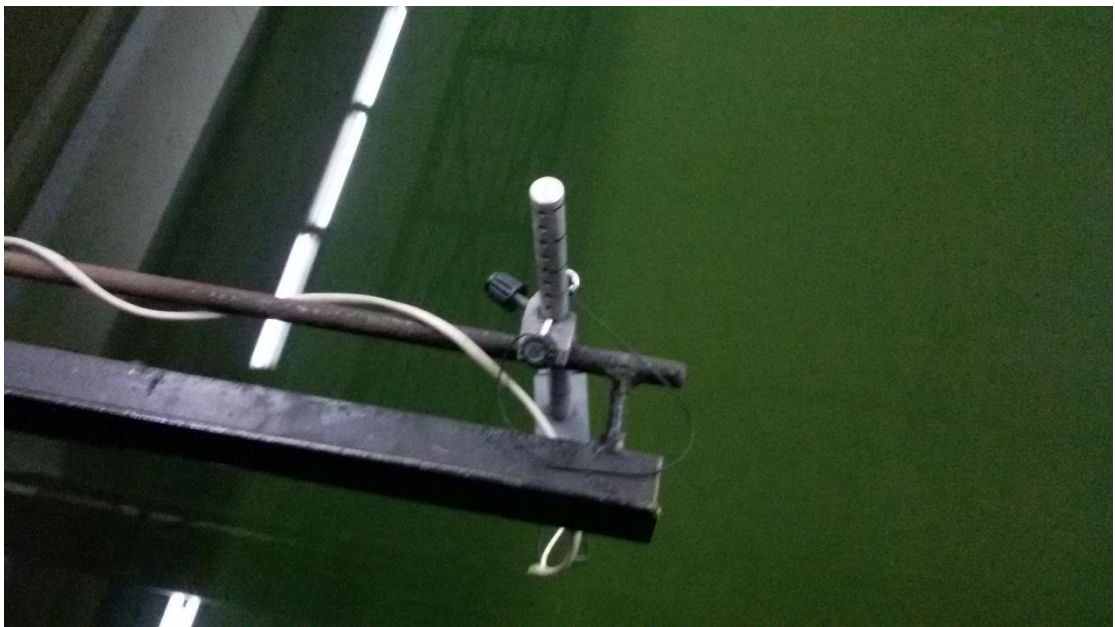
Διάγραμμα 3-Βαθμονόμηση Heave

2.3.3.4 Βαθμονόμηση αισθητήρα κυματισμών (wave probe)

Το wave probe (Εικόνα 9) βαθμονομούταν πριν την έναρξη των πειραμάτων. Έχοντας στη διάθεσή του οπές κατά μήκος του η απόσταση των οποίων αντιστοιχεί στα 2cm, μετακινούνταν κατακόρυφα προς τα πάνω και προς τα κάτω, ενώ το νερό της πειραματικής δεξαμενής ήταν ήρεμο. Από τις διαδοχικές αυτές μετακινήσεις, λαμβάνονταν μετρήσεις προκειμένου να κατασκευαστεί η συνάρτηση μεταφοράς, το αποτέλεσμα της οποίας ήταν γραμμικό (Διάγραμμα 4).



Διάγραμμα 4-Βαθμονόμηση wave probe



Εικόνα 9-Βαθμονόμηση του αισθητήρα κυματισμών

2.4 Υπολογισμός νέου βυθίσματος και εκτοπίσματος για τα πειράματα αντίστασης σε ήρεμο νερό

Όπως προαναφέρθηκε πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε δύο βυθίσματα για την αντίσταση σε ήρεμο νερό. Το δεύτερο βύθισμα ($T=0.1257\text{m}$) προέκυψε μέσω του εκτοπίσματος του μοντέλου $C_b=0.7$, ακολουθώντας την παρακάτω διαδικασία. Το αρχικό εκτόπισμα για το παραπάνω μοντέλο ήταν $\Delta=163.3\text{ kg}$. Από αυτό αφαιρέθηκαν 40 kg , συμμετρικά ως προς το LCB ώστε να μην αλλάξει η διαγωγή και η ροπή αδρανείας του. Η νέα διαγωγή επιβεβαιώνεται και από τον αισθητήρα του προνευτασμού. Στη συνέχεια, από το πρόγραμμα Rhinoceros βρέθηκε το βύθισμα για το εκτόπισμα αυτό. Υπολογίζεται λοιπόν η διαφορά των δύο βυθισμάτων ΔT , και μέσω της συνάρτησης μεταφοράς υπολογίζεται η τιμή του νέου βυθίσματος σε Volts για το μοντέλο με $C_b=0.6$.

$$\Delta T = \alpha \cdot (X_{01}^{C_b=0.6} + X_{02}^{C_b=0.6}), \text{ in cm}$$

όπου α η παράμετρος της συνάρτησης μεταφοράς

$X_{01}^{C_b=0.6}$ σήμα σε κατάσταση ηρεμίας για $T_1=0.163\text{m}$

$X_{02}^{C_b=0.6}$ σήμα σε κατάσταση ηρεμίας για T_2

2.5 Εκτέλεση του πειράματος

Μετά το τέλος των παραπάνω διαδικασιών και αφού το μοντέλο τοποθετήθηκε στο δυναμόμετρο, πριν αρχίσει η πειραματική διαδικασία για κάθε υπό μελέτη βύθισμα, γινόταν αρχικά έλεγχος των ισάλων του μοντέλου. Κοιτώντας την ίσαλο από την εξωτερική μεριά της δεξαμενής έπρεπε και στα τρία σημεία του πλοίου (πρύμνη, πλώρη, μέση του μοντέλου) η ίσαλος γραμμή να εφάπτεται με την επιφάνεια του νερού. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, τα βάρη από την γάστρα του μοντέλου ανακατανέμονταν σε αυτήν. Αν έπειτα από την παραπάνω διαδικασία παρατηρούνταν περαιτέρω απόκλιση, τότε το μοντέλο έβγαινε από την δεξαμενή και ζυγίζονταν ξανά ώστε να επιβεβαιωθεί το βάρος του.

Μετά την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας και πριν αρχίσει η μέτρηση της αντίστασης του μοντέλου σε ήρεμο νερό παίρνοταν μια μέτρηση στην κατάσταση ηρεμίας για κάθε υπό μελέτη ταχύτητα. Στην συνέχεια το φορείο επιτάχυνε και αφού η ταχύτητα του μοντέλου είχε σταθεροποιηθεί, γίνονταν η καταγραφή των μετρούμενων μεγεθών. Καθώς το ωφέλιμο μήκος της δεξαμενής είναι 91 m , ο επιτρεπόμενος χρόνος καταγραφής ήταν ανάλογος με την ταχύτητα του μοντέλου. Έτσι για μικρές ταχύτητες η διάρκεια της μέτρησης ήταν 35 sec , ενώ όσο η ταχύτητα μεγάλωνε ο χρόνος αυτός μειωνόταν μέχρι την ταχύτητα των $1,914\text{ m/s}$ όπου ο αντίστοιχος χρόνος ήταν 15 sec .

Στο τέλος κάθε μέτρησης η μεταλλική επιφάνεια στο πίσω μέρος του φορείου (σιδερώστρα) κατέβαινε, ώστε η απόσβεση των δημιουργούμενων κυματισμών να γίνει όσο το δυνατόν γρηγορότερα. Η διαδικασία αυτή ήταν απαραίτητη ιδίως στις υψηλές ταχύτητες στις οποίες το ύψος των κυματισμών ήταν ιδιαίτερα μεγάλο. Ανάμεσα στα "τρεξίματα" υπήρχε εύλογο χρονικό διάστημα αναμονής μέχρις ότου η επιφάνεια του νερού να είναι απόλυτα ήρεμη. Να αναφέρουμε ότι στις δύο διαμήκη

άκρες τις δεξαμενής είχαν τοποθετηθεί πλωτήρες, οι οποίοι βοηθούσαν στην απόσβεση των κυματισμών. Ο χρόνος ηρεμίας διέφερε ανάλογα με την ταχύτητα σε ένα εύρος που κυμαίνεται μεταξύ 8 και 12 λεπτά. Στα πειράματα με αρμονικούς κυματισμούς υπάρχουν κάποιοι διαφορετικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Αυτοί ήταν η διάρκεια των μετρήσεων (25 sec), ο χρόνος αναμονής (20-25 λεπτά) και η αφαίρεση των πλωτήρων. Επίσης με χρήση κατάλληλου λογισμικού, δίδεται στον κυματιστήρα εντολή να παράγει αρμονικό κυματισμό, στον οποίο πραγματοποιείται μέτρηση της αντίστασης, προνευτασμού και ανύψωσης του κέντρου βάρους του ρυμουλκούμενου προτύπου, με σταθερή ταχύτητα του φορείου.



Εικόνα 10-Πειραματικό μοντέλο $C_b=0.7$ σε δοκιμή αντίστασης, κατάσταση $\Delta=163.3$ kg, $T=0.163$ m

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

3.1 Μέτρήσεις σε ήρεμο νερό

Αρχικά πραγματοποιούταν μία μηδενική μέτρηση και στη συνέχεια εισερχόταν στον υπολογιστή η ζητούμενη ταχύτητα, προκειμένου να αρχίσει το πείραμα. Η καταγραφή των τιμών πραγματοποιούταν από τη στιγμή που το φορέιο αποκτούσε τη ζητούμενη ταχύτητα έως και την ακινητοποίησή του. Στη συνέχεια καταγράφονταν οι τιμές της αντίστασης, ανύψωσης κέντρου βάρους και προνευτασμού, οι οποίες είναι σταθερές, και αφαιρούνται από αυτές οι τιμές σε κατάσταση ηρεμίας.

$$X = \alpha(X(V) - X(0))$$

Όπου, α η παράμετρος της συνάρτησης μεταφοράς

$X(V)$ η τιμή της μέτρηση για την αντίστοιχη ταχύτητα

$X(0)$ η τιμή της μέτρησης σε κατάσταση ηρεμίας για την αντίστοιχη ταχύτητα

3.2 Μέτρήσεις σε αρμονικούς κυματισμούς

Η καταγραφή των τιμών πραγματοποιούταν από τη στιγμή που το μοντέλο αποκτούσε τη ζητούσα ταχύτητα έως και λίγο πριν την ακινητοποίησή του. Δεδομένου ότι το φαινόμενο είναι περιοδικό, η τιμή της αντίστασης πρέπει να υπολογιστεί σε ακέραιο αριθμό περιόδων. Με χρήση κατάλληλου λογισμικού, έχοντας ως δεδομένα το μήκος του μοντέλου, τη συχνότητα του αρμονικού κυματισμού αλλά και την ταχύτητα του φορείου, υπολογίζεται η περίοδος συνάντησης του μοντέλου σε σχέση με το προσπίπτον κύμα.

Κατόπιν, με δεδομένη τη συχνότητα δειγματοληψίας από το μετρητικό του φορείου, είναι εφικτό να υπολογιστεί πόσα δείγματα (samples) αντιστοιχούν σε μία περίοδο. Έτσι, η αντίσταση στα αρμονικά κύματα υπολογίζεται με τη χρήση του παρακάτω τύπου:

$$R_w = \frac{\sum(R(t) - R_{mean})}{kT_e}$$

Όπου, $k=1,2,3...$ και T_e είναι η περίοδος συνάντησης.

3.2.1 Υπολογισμός πρόσθετης αντίστασης

Η τιμή της πρόσθετης αντίστασης προκύπτει αφαιρώντας την τιμή της αντίστασης στο ήρεμο νερό από την τιμή της ολικής αντίστασης.

$$R_{aw} = R_w - R_{sw}$$

3.2.2 Υπολογισμός RMS (root mean square) τιμών

Για τον υπολογισμό των τιμών RAO (response amplitude operator) του heave και του pitch, δηλαδή των αποκρίσεων των μοντέλων στους αρμονικούς κυματισμούς, απαιτείται ο υπολογισμός των τιμών RMS του heave, pitch και wave. Οι τιμές αυτές υπολογίζονται με την παρακάτω διαδικασία:

Διόρθωση μέσης τιμής: $X = X(t) - X_{mean}$

Τύπος RMS:
$$RMSX = \frac{\sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}}{N}$$

3.2.3 Υπολογισμός RAO (response amplitude operator) τιμών

Για τον υπολογισμό των RAO του heave και του pitch χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τύποι:

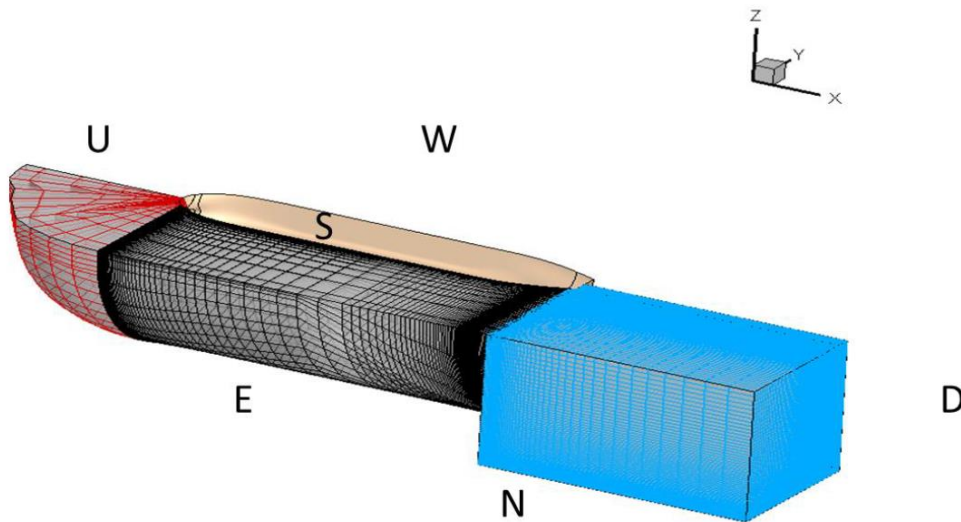
$$RAO_{heave} = \frac{RMS_{heave}}{RMS_{wave}}$$

$$RAO_{pitch} = \frac{RMS_{pitch} \cdot 10^{-2} L_{wl}}{RMS_{wave}} \cdot \frac{360}{2\pi}$$

3.3 Περιγραφή αριθμητικής διαδικασίας του προγράμματος

Το μοντέλο τύρβης που χρησιμοποιήθηκε ήταν το K-ω SST. Το μοντέλο αυτό υπολογίζει τη ροή μέσα στο οριακό στρώμα με το μοντέλο K-ω, ενώ εκτός από το οριακό στρώμα χρησιμοποιεί το μοντέλο K-e. Αυτό συμβαίνει διότι το μοντελό K-ω παρέχει καλύτερα αποτελέσματα εντός του οριακού στρώματος, ενώ το K-e εκτός. Το πλέγμα δημιουργήθηκε με τη μέθοδο του σύμμορφου μετασχηματισμού HO, όπως φαίνεται στην για την περιοχή E και χρησιμοποιήθηκαν 6 εκατομμύρια κόμβοι συνολικά.

Για να περιγραφεί η τυρβώδης ροή γύρω από το υπό εξέταση μοντέλο, χρησιμοποιείται η μέθοδος πεπερασμένων όγκων. Το πεδίο υπολογισμών καλύπτεται από ένα τρισδιάστατο πλέγμα το οποίο είναι ορθογώνιο καμπυλόγραμμο κατά τη διεύθυνση των εγκάρσιων νομέων και μη ορθογώνιο κατά την τρίτη διεύθυνση χ_1 , η οποία είναι παράλληλη του άξονα συμμετρίας. Σε κάθε εγκάρσιο νομέα ορίζεται ένα τοπικό ορθογώνιο καμπυλόγραμμο σύστημα συντεταγμένων (χ_1, χ_2, χ_3), όπου χ_2 και χ_3 είναι γραμμές του πλέγματος παράλληλες στο περίγραμμα του νομέα. Αντίστοιχα ορίζονται οι μέσες τιμές των ταχυτήτων u_1, u_2, u_3 στις διευθύνσεις χ_1, χ_2, χ_3 . Η παραγωγή του ορθογώνιου πλέγματος σε έναν εγκάρσιο νομέα επιτυγχάνεται με την εφαρμογή μίας συμπαγούς τεχνικής σάρωσης. Η παρούσα μέθοδος λύνει τις RANS εξισώσεις μαζί με την ελεύθερη επιφάνεια.



Εικόνα 11-Διαμήκης απεικόνιση του αριθμητικού πλέγματος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

4.1 Πειράματα σε ήρεμο νερό

4.1.1 Πειραματικά αποτελέσματα σε ήρεμο νερό

Όπως προαναφέρθηκε στα πειράματα σε ήρεμο νερό πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε δύο διαφορετικά βυθίσματα, ίδια και για τα 2 μοντέλα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων καθώς και η ανάλυση αυτών.

Πίνακας 4-Μετρήσεις σε ήρεμο νερό $C_b=0.7$, $T=0.163m$

Vm (m/sec)	Res (Volts)	Rm (kp)	Pitch (volts)	Pitch (deg)	Heave (Volts)	Heave (m)
0.000	-0.0100	-	0.1070	-	6.9040	-
0.492	0.0340	0.119	0.1040	0.007	6.9090	-0.023
0.000	-0.0080	-	0.1030	-	6.9080	-
0.711	0.0800	0.239	0.0950	0.018	6.9310	-0.104
0.000	-0.0070	-	0.0980	-	6.9090	-
0.930	0.1420	0.404	0.0840	0.032	6.9620	-0.240
0.000	-0.0070	-	0.1010	-	6.9090	-
1.039	0.1800	0.508	0.0750	0.060	6.9800	-0.322
0.000	-0.0070	-	0.0980	-	6.9060	-
1.148	0.2240	0.627	0.0660	0.074	7.0040	-0.445
0.000	-0.0070	-	0.0980	-	6.9080	-
1.258	0.2750	0.765	0.0570	0.095	7.0310	-0.558
0.000	-0.0060	-	0.0980	-	6.9090	-
1.367	0.3430	0.947	0.0430	0.127	7.0620	-0.694
0.000	-0.0060	-	0.0990	-	6.9100	-
1.476	0.4720	1.297	0.0370	0.143	7.0990	-0.857
0.000	-0.0060	-	0.0980	-	6.9100	-
1.586	0.7380	2.020	0.0590	0.090	7.1450	-1.066
0.000	-0.0060	-	0.0980	-	6.9130	-
1.695	1.0140	2.769	0.0880	0.023	7.1890	-1.252
0.000	-0.0070	-	0.0970	-	6.913	-
1.804	1.2000	3.276	0.0800	0.039	7.2250	-1.415
0.000	-0.0070	-	0.0970	-	6.9150	-
1.914	1.3290	3.626	0.0610	0.083	7.2650	-1.588

Πίνακας 5-Μετρήσεις σε ήρεμο νερό $C_b=0.7$, $T=0.1267m$

Vm (m/sec)	Res (Volts)	Rm (kp)	Pitch (volts)	Pitch (deg)	Heave (Volts)	Heave (m)
0.000	-0.0140	-	0.0960	-	5.0980	-
0.492	0.0270	0.111	0.1000	-0.009	5.1010	-0.014
0.000	-0.0130	-	0.0970	-	5.1010	-
0.711	0.0630	0.206	0.0970	0.000	5.1200	-0.086
0.000	-0.0140	-	0.0980	-	5.1020	-
0.930	0.1170	0.355	0.0900	0.018	5.1490	-0.213
0.000	-0.0110	-	0.0970	-	5.1030	-
1.039	0.1510	0.439	0.0860	0.025	5.1670	-0.290
0.000	-0.0110	-	0.1010	-	5.1030	-
1.148	0.1900	0.544	0.0790	0.051	5.1890	-0.390
0.000	-0.0110	-	0.0970	-	5.1030	-
1.258	0.2350	0.666	0.0720	0.058	5.2140	-0.504
0.000	-0.0110	-	0.0980	-	5.1030	-
1.367	0.2910	0.818	0.0620	0.083	5.2440	-0.640
0.000	-0.0120	-	0.0980	-	5.1030	-
1.476	0.3980	1.111	0.0640	0.078	5.2800	-0.803
0.000	-0.0120	-	0.0940	-	5.1020	-
1.586	0.5990	1.655	0.0860	0.018	5.3210	-0.993
0.000	-0.0120	-	0.0980	-	5.1030	-
1.695	0.8090	2.224	0.0930	0.012	5.3560	-1.148
0.000	-0.0110	-	0.0980	-	5.103	-
1.804	0.9430	2.584	0.0770	0.048	5.3880	-1.293
0.000	-0.0140	-	0.0990	-	5.102	-
1.914	1.0430	2.863	0.0780	0.048	5.4260	-1.470

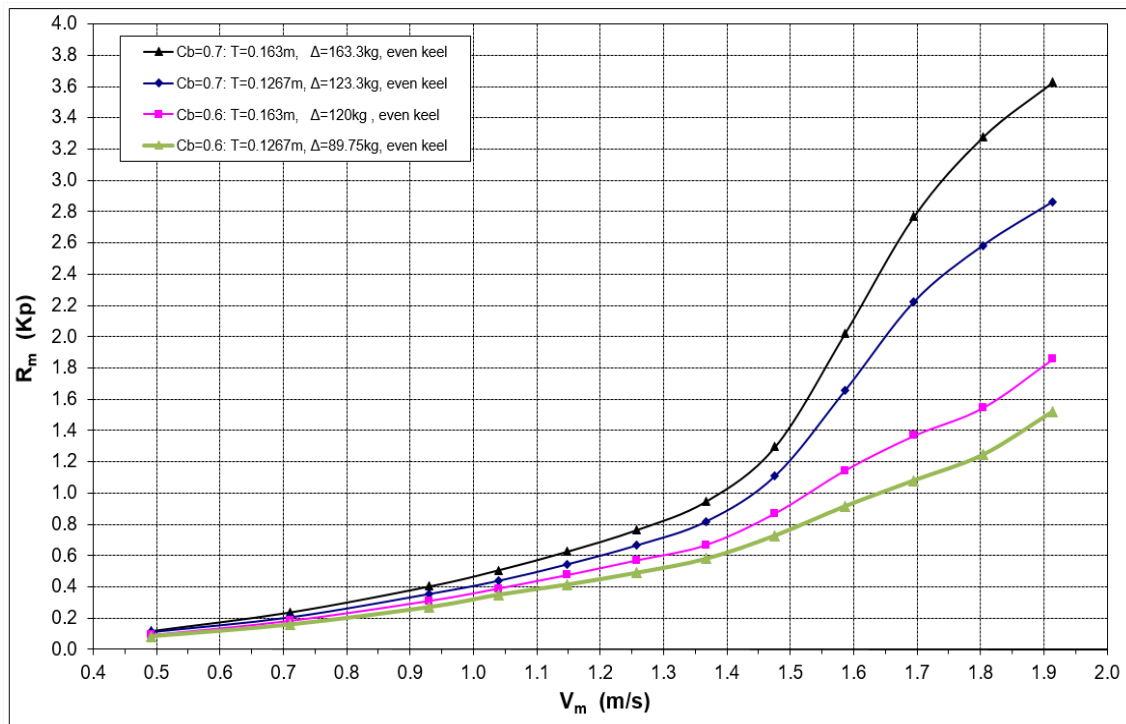
Πίνακας 6-Μετρήσεις σε ήρεμο νερό $C_b=0.6$, $T=0.163m$

Vm (m/sec)	Res (Volts)	Rm (kp)	Pitch (volts)	Pitch (deg)	Heave (Volts)	Heave (m)
0.000	-0.0180	-	0.0330	-	6.0780	-
0.492	0.0160	0.092	0.0370	0.009	6.0760	0.009
0.000	-0.0150	-	0.0340	-	6.0790	-
0.711	0.0530	0.184	0.0320	-0.005	6.0970	-0.082
0.000	-0.0150	-	0.0340	-	6.0840	-
0.930	0.1000	0.311	0.0240	-0.023	6.1240	-0.181
0.000	-0.0150	-	0.0390	-	6.0840	-
1.039	0.1290	0.390	0.0180	-0.048	6.1430	-0.268
0.000	-0.0140	-	0.0390	-	6.0840	-
1.148	0.1620	0.477	0.0120	-0.062	6.1610	-0.349
0.000	-0.0140	-	0.0380	-	6.0850	-
1.258	0.1970	0.571	0.0050	-0.076	6.1850	-0.454
0.000	-0.0120	-	0.0340	-	6.0850	-
1.367	0.2350	0.669	-0.0030	-0.085	6.2120	-0.576
0.000	-0.0140	-	0.0390	-	6.0840	-
1.476	0.3080	0.872	-0.0010	-0.092	6.2420	-0.717
0.000	-0.0150	-	0.0340	-	6.0840	-
1.586	0.4080	1.145	0.0090	-0.058	6.2750	-0.866
0.000	-0.0150	-	0.0380	-	6.0840	-
1.695	0.4900	1.367	0.0020	-0.083	6.3050	-1.003
0.000	-0.0150	-	0.0340	-	6.082	-
1.804	0.5560	1.546	-0.0140	-0.111	6.3350	-1.148
0.000	-0.0180	-	0.0330	-	6.078	-
1.914	0.6680	1.857	0.0030	-0.069	6.3840	-1.388

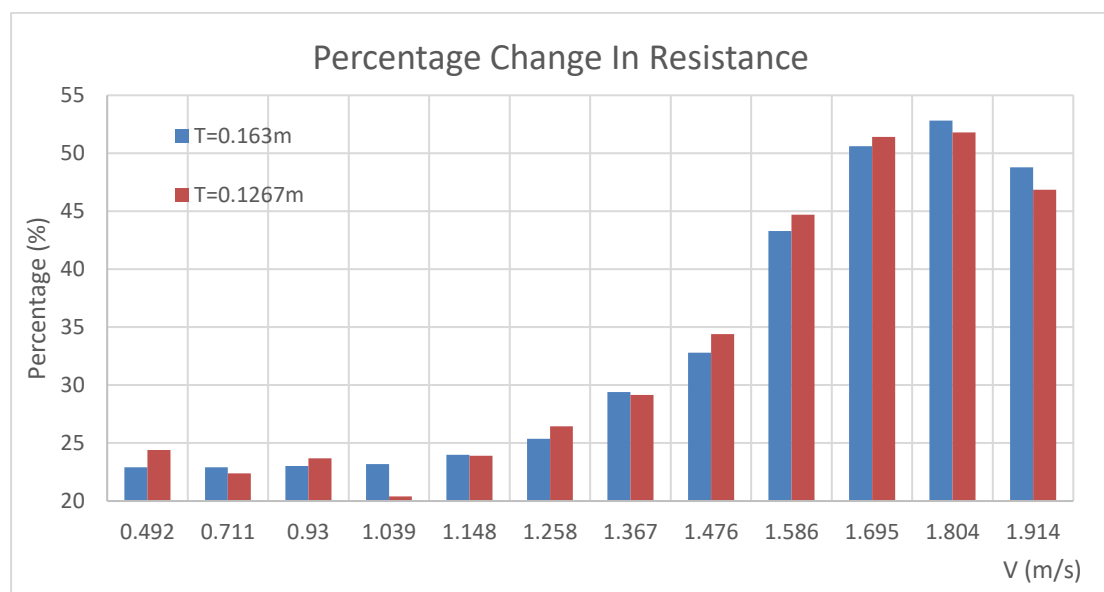
Πίνακας 7-Μετρήσεις σε ήρεμο νερό $C_b=0.6$, $T=0.1267m$

Vm (m/sec)	Res (Volts)	Rm (kp)	Pitch (volts)	Pitch (deg)	Heave (Volts)	Heave (m)
0.000	-0.0050	-	-0.0170	-	5.2930	-
0.492	0.0260	0.084	-0.0140	0.007	5.2910	0.009
0.000	-0.0040	-	-0.0240	-	5.2940	-
0.711	0.0550	0.160	-0.0150	0.021	5.3080	-0.064
0.000	-0.0030	-	-0.0200	-	5.2940	-
0.930	0.0970	0.271	-0.0200	0.000	5.3340	-0.181
0.000	-0.0090	-	-0.0190	-	5.2940	-
1.039	0.1200	0.349	-0.0250	-0.014	5.3480	-0.245
0.000	-0.0020	-	-0.0190	-	5.2950	-
1.148	0.1510	0.414	-0.0270	-0.018	5.3670	-0.327
0.000	-0.0010	-	-0.0190	-	5.2970	-
1.258	0.1800	0.490	-0.0300	-0.025	5.3880	-0.413
0.000	0.0000	-	-0.0240	-	5.2950	-
1.367	0.2140	0.580	-0.0340	-0.023	5.4120	-0.531
0.000	-0.0020	-	-0.0200	-	5.2930	-
1.476	0.2670	0.729	-0.0290	-0.021	5.4400	-0.667
0.000	-0.0030	-	-0.0190	-	5.2960	-
1.586	0.3350	0.915	-0.0250	-0.014	5.4690	-0.785
0.000	-0.0040	-	-0.0210	-	5.2970	-
1.695	0.3950	1.081	-0.0330	-0.028	5.5000	-0.921
0.000	-0.0040	-	-0.0200	-	5.296	-
1.804	0.4560	1.246	-0.0330	-0.030	5.5390	-1.102
0.000	-0.0050	-	-0.0140	-	5.293	-
1.914	0.5570	1.522	0.0060	0.046	5.5860	-1.329

Από τις παραπάνω μετρήσεις προκύπτουν τα αντίστοιχα διαγράμματα. Στο Διάγραμμα 5 παρουσιάζεται η αντίσταση σε ήρεμο νερό των δύο μοντέλων, συναρτήσει της ταχύτητας, ενώ στο Διάγραμμα 6 η ποσοστιαία διαφορά της αντίστασης μεταξύ των δύο μοντέλων.

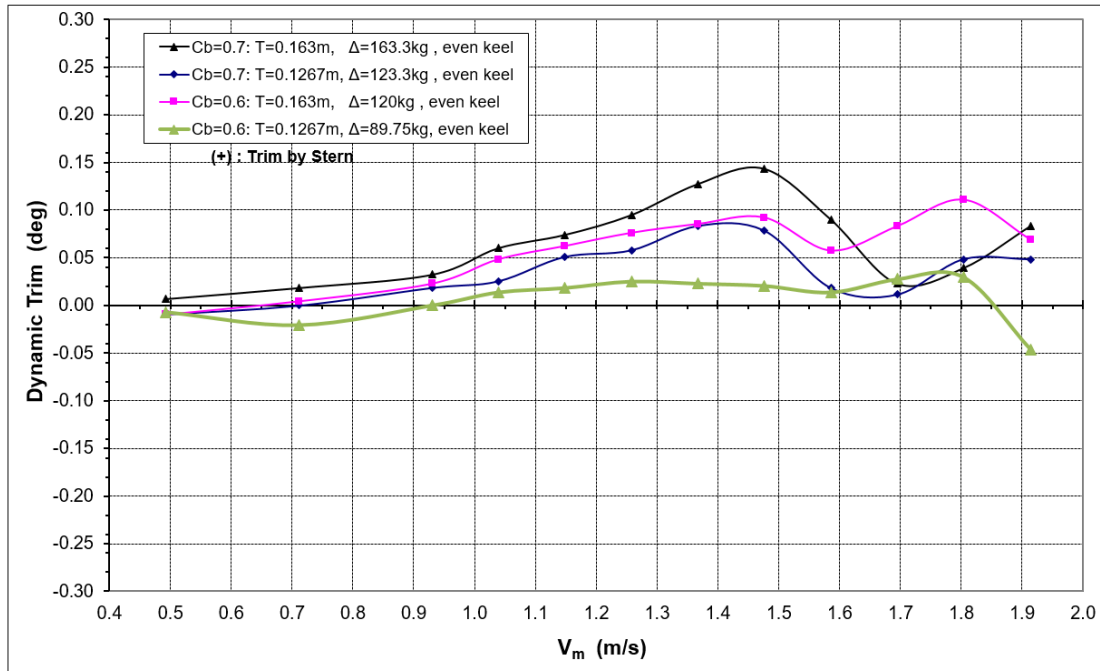


Διάγραμμα 5-Αντίσταση συναρτήσει της ταχύτητας

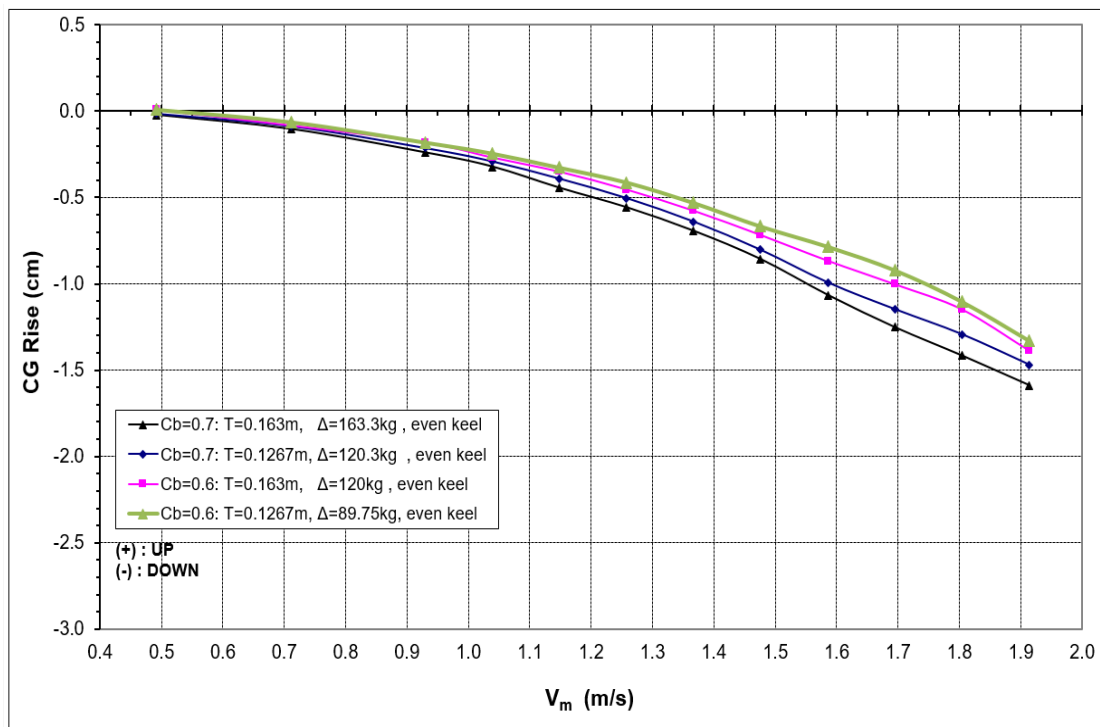


Διάγραμμα 6-Ποσοστιαία διαφορά της αντίστασης των δύο μοντέλων για τις δύο καταστάσεις φόρτωσης

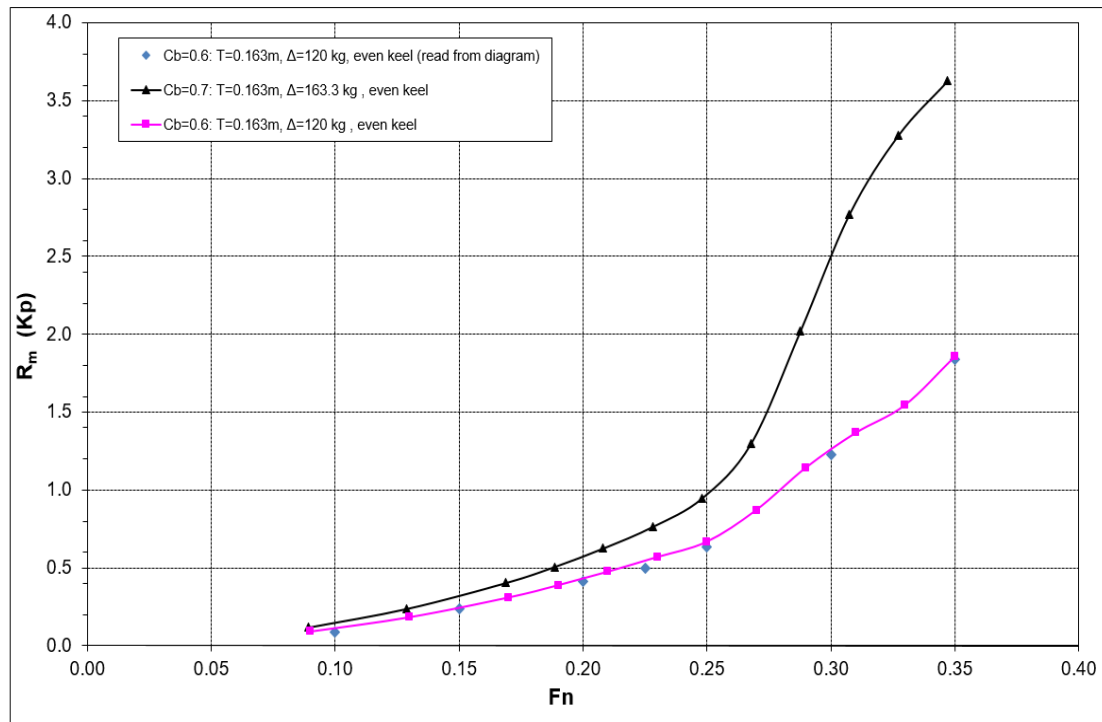
Στο Διάγραμμα 7 παρουσιάζεται η μεταβολή του προνευτασμού των δύο μοντέλων, ενώ στο Διάγραμμα 8 η μεταβολή της ανύψωσης του κέντρου βάρους των μοντέλων. Από τα διαγράμματα φαίνεται τα μοντέλα να έχουν ίδια συμπεριφορά ανύψωσης κέντρου βάρους, ενώ παρουσιάζουν κάποιες διαφορές στον προνευτασμό. Οι διαφορές αυτές είναι της τάξεως της 0.15 της μοίρας, οπότε θεωρούνται αμελητέες.



Διάγραμμα 7-Προνευτασμός συναρτήσει της ταχύτητας



Διάγραμμα 8-Ανύψωση κέντρου βάρους συναρτήσει της ταχύτητας



Διάγραμμα 9-Αντίσταση συναρτήσει του αριθμού Froude

Στο Διάγραμμα 9 παρατηρείται η αντίσταση σε ήρεμο νερό συναρτήσει του αριθμού Froude για βύθισμα $T=0.163\text{m}$, και για τα δύο μοντέλα. Επίσης έχει προσθεθεί και η αντίσταση σε ήρεμο νερό για το μοντέλο $C_b=0.6$, όπως μετρήθηκε στη διδακτορική διατριβή του κ. Γαροφαλλίδη (Experimental and numerical Investigation of the flow around a Ship model at Various Froude Numbers). Παρατηρείται ότι οι μετρήσεις παρουσιάζουν μικρές αποκλίσεις, οπότε συμπεραίνεται ότι υπάρχει μεγάλη ακρίβεια αποτελεσμάτων.

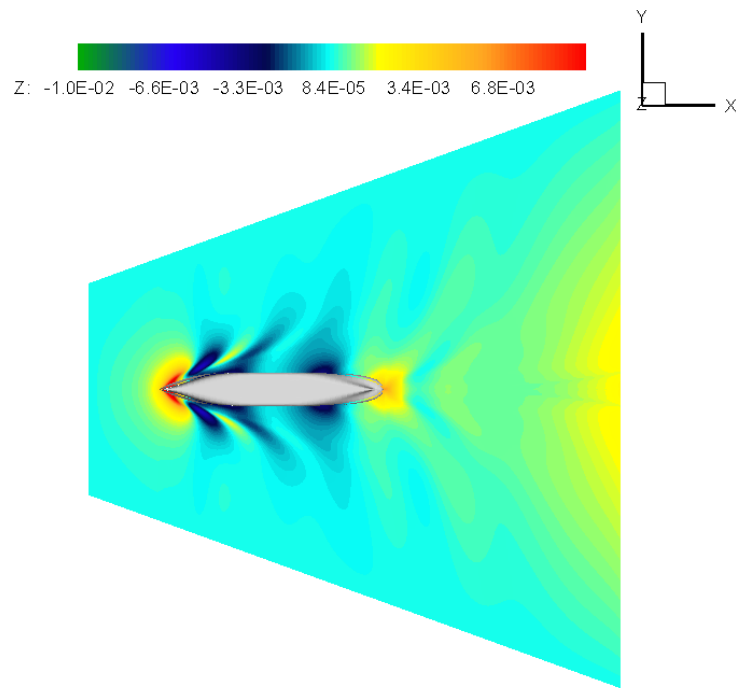
4.1.2 Αριθμητικά αποτελέσματα προγράμματος για το μοντέλο με $C_b=0.7$

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα του προγράμματος για την αντίσταση σε ήρεμο νερό του μοντέλου με $C_b=0.7$. Τα αποτελέσματα αφορούν δύο ταχύτητες. Η διερεύνηση της αντίστασης μέσω του προγράμματος πραγματοποιήθηκε μετά από τα πειράματα της αντίστασης σε ήρεμο νερό, οπότε ήταν γνωστή και η παράλληλη βύθιση για την κάθε ταχύτητα.

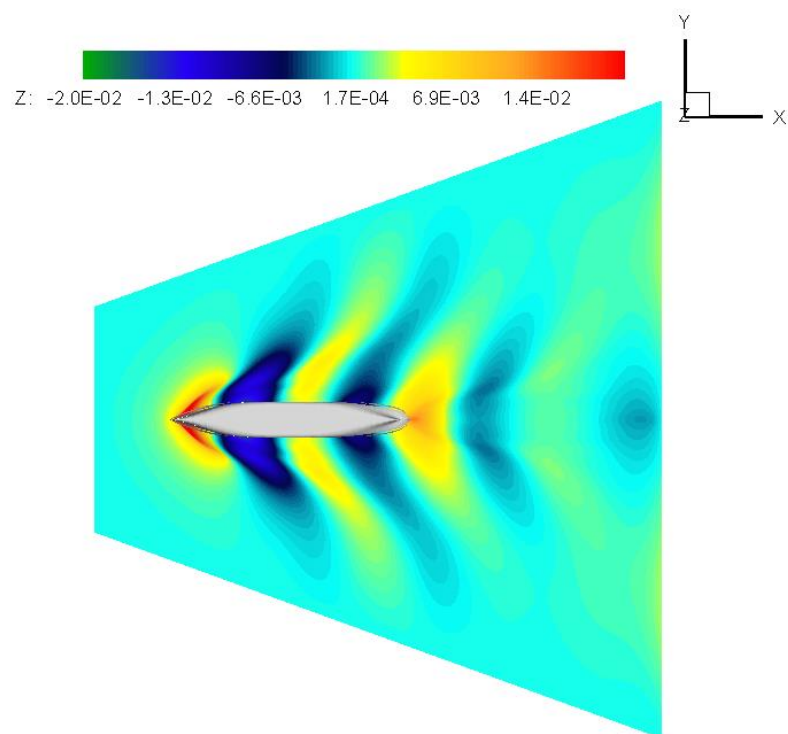
Πίνακας 8-Αποτελέσματα προγράμματος

F_n	$V(\text{m/s})$	Re	$R(\text{Nt})$	$R(\text{kp})$	C_f	C_p	$C_{f\text{ITC}}$
0.205	1.148	$3.03 \cdot 10^6$	6.449	0.6576	$3.83 \cdot 10^{-3}$	$1.327 \cdot 10^{-3}$	$3.732 \cdot 10^{-3}$
0.284	1.586	$4.10 \cdot 10^6$	20.074	2.046	$3.625 \cdot 10^{-3}$	$4.628 \cdot 10^{-3}$	$3.510 \cdot 10^{-3}$

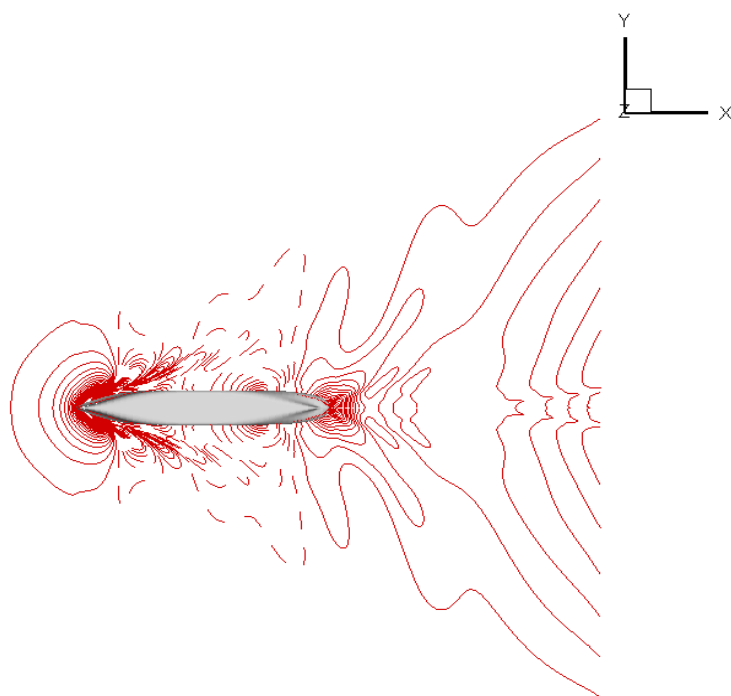
Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4, η παράλληλη βύθιση, για τους αριθμούς Froude 0.205 και 0.284, μετρήθηκε ίση με -0.445cm και -1.066cm αντίστοιχα.



Εικόνα 12- Απεικόνιση του μοντέλου $C_b=0.7$ σε αριθμό froude 0.205



Εικόνα 13-Απεικόνιση του μοντέλου $C_b=0.7$ σε αριθμό froude 0.284



Εικόνα 14-Απεικόνιση των κυματισμών

Στις εικόνες Εικόνα 12- Απεικόνιση του μοντέλου $C_b=0.7$ σε αριθμό froude 0.205 και 13 φαίνονται οι κυματισμοί που σχηματίζει το μοντέλο. Παρατηρείται ότι οι κυματισμοί σε μεγαλύτερο αριθμό Froude είναι πιο έντονοι, κατί το οποίο είναι αναμενόμενο.

4.2 Πειράματα σε αρμονικούς ημιτονικούς κυματισμούς

Για την μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε 2 ταχύτητες και 9 διαφορετικά πλάτη και συχνότητες για το κάθε μοντέλο (Πίνακας 9). Το βύθισμα που επιλέχθηκε ήταν ίσο με $T=0.163\text{m}$ και οι ταχύτητες $V_1=1.367\text{m/s}$ και $V_2=1.804\text{m/s}$.

Στόχος αυτού του κομματιού της διπλωματικής ήταν η μελέτης της συμπεριφοράς των δύο μοντέλων σε έντονους κυματισμούς. Για αυτό το λόγο δοκιμάστηκαν διάφορα πλάτη προκειμένου να βρεθούν τα μέγιστα επιτρεπόμενα (Πίνακας 9), σύμφωνα με την κατασκευή του μοντέλου με $C_b=0.7$.

Στα πειράματα που ακολούθησαν για το δεύτερο μοντέλο παρουσιάστηκαν ορισμένα προβλήματα λόγω απουσίας προστέγου στην κατασκευή του. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τη βύθιση της πλώρης σε καποιές συχνότητες και πλάτη. Πιο συγκεκριμένα απορρίφθηκε η μέτρηση της συχνότητας 0.5 για την ταχύτητα 1.804m/s , διότι βυθιζόταν ολόκληρη η πλώρη. Επίσης στη συχνότητα 0.6 με ταχύτητα 1.367 m/s , αλλά και στη συχνότητα 0.7 με ταχύτητα 1.804 m/s , παρουσιάστηκε μια μικρή βύθιση της πλώρης. Επομένως έγινε μια εκτίμηση της ολικής αντίστασης, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 10 και στο Διάγραμμα 11.

Πίνακας 9-Συχνότητες και πλάτη κυματισμών

Συχνότητα f [Hz]	Πλάτος A (cm)
0.3	5
0.4	5
0.5	5
0.6	4
0.7	4
0.8	4
0.9	3
1.0	3
1.1	2

4.2.1 Πρόσθετη αντίσταση κυματισμών

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτολέσματα των μετρήσεων, καθώς και τα διαγράμματα της ολικής αντίστασης και της πρόσθετης αντίστασης λόγω κυματισμών.

Πίνακας 10-Ολική αντίσταση και πρόσθετη αντίσταση κυματισμών, $C_b=0.7$, $f_n=0.248$, $T=0.163m$

$C_b=0.7$	$V=1.367m/s$	$R_{cw}=0.947 kp$
f [Hz]	Res [Kp]	Raw [Kp]
0.3	1.014311	0.067311
0.4	0.96566	0.01866
0.5	1.140109	0.193109
0.6	2.105812	1.158812
0.7	1.620996	0.673996
0.8	1.219279	0.272279
0.9	1.051746	0.104746
1.0	1.064338	0.117338
1.1	0.987376	0.040376

Πίνακας 11-Ολική αντίσταση και πρόσθετη αντίσταση κυματισμών, $C_b=0.7$, $f_n=0.327$, $T=0.163m$

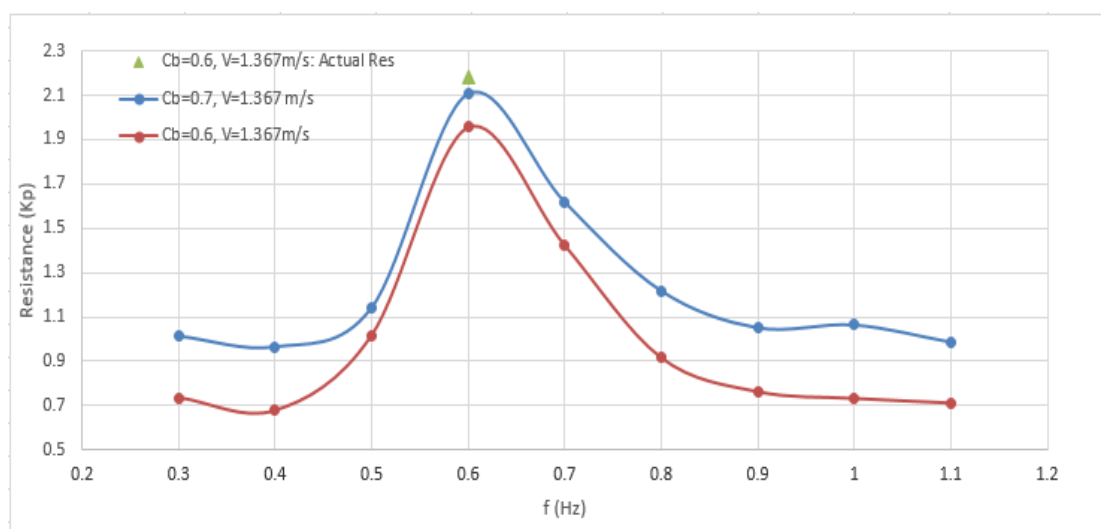
$C_b=0.7$	$V=1.804m/s$	$R_{cw}=3.276 kp$
f [Hz]	Res [Kp]	Raw [Kp]
0.3	3.359977	0.083977
0.4	3.381677	0.105677
0.5	3.708677	0.432677
0.6	4.149834	0.873834
0.7	3.618997	0.342997
0.8	3.367833	0.091833
0.9	3.271328	-0.00467
1	3.336522	0.060522
1.1	3.31426	0.03826

Πίνακας 12-Ολική αντίσταση και πρόσθετη αντίσταση κυματισμών, $C_b=0.6$, $f_n=0.250$, $T=0.163m$

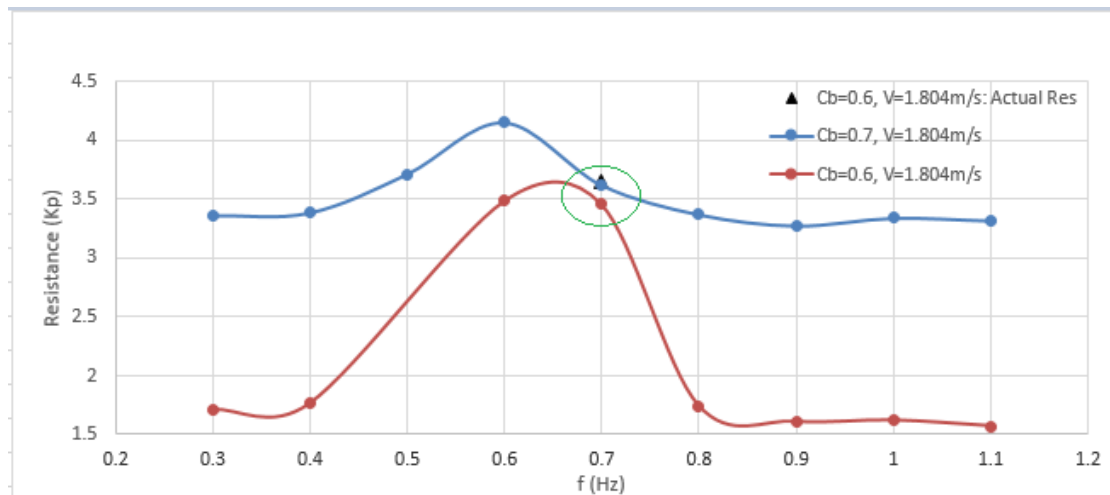
$C_b=0.6$	$V=1.367m/s$	$R_{cw}=0.669 kp$
f [Hz]	Res [Kp]	Raw [Kp]
0.3	0.736055	0.067055
0.4	0.677422	0.008422
0.5	1.014741	0.345741
0.6	1.956156	1.287156
0.7	1.427083	0.758083
0.8	0.917153	0.248153
0.9	0.762557	0.093557
1	0.731948	0.062948
1.1	0.711181	0.042181

Πίνακας 13-Ολική αντίσταση και πρόσθετη αντίσταση κυματισμών, $C_b=0.6$, $f_n=0.330$, $T=0.163m$

$C_b=0.6$	$V=1.804m/s$	$R_{cw}=1.546 kp$
f [Hz]	Res [Kp]	Raw [Kp]
0.3	1.71	0.164
0.4	1.76	0.214
0.5	-	-
0.6	3.480152	1.934152
0.7	3.455617	1.909617
0.8	1.743891	0.197891
0.9	1.608197	0.062197
1	1.619739	0.073739
1.1	1.570455	0.024455

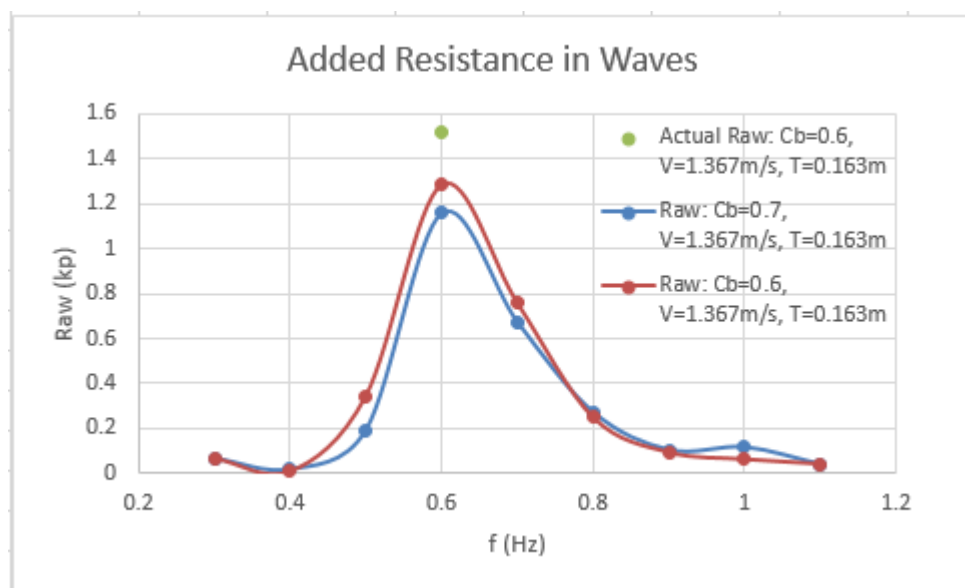


Διάγραμμα 10-Ολική αντίσταση συναρτήσει της συχνότητας, $V=1.367 m/s$

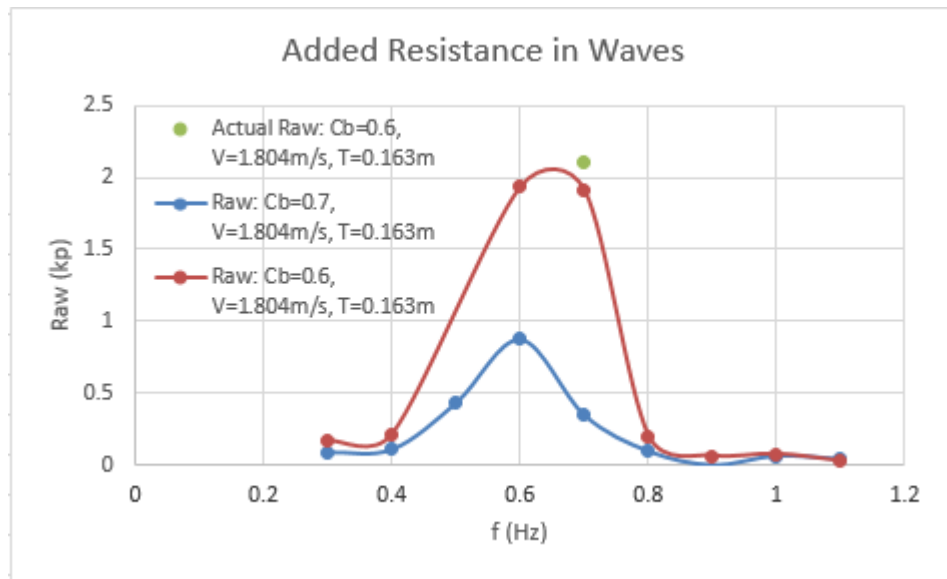


Διάγραμμα 11-Ολική αντίσταση συναρτήσει της συχνότητας, $V=1.804 \text{ m/s}$

Στα διαγράμματα Διάγραμμα 10 και Διάγραμμα 11 φαίνεται η ολική αντίστασης σε κυματισμούς, μαζί με την εκτίμηση για τις συχνότητες που αναφέρθηκαν. Ακόμα παρακάτω παρουσιάζεται η πρόσθετη αντίσταση σε κυματισμούς, μαζί με τη σχετική εκτίμηση (Διάγραμμα 12, Διάγραμμα 13).



Διάγραμμα 12-Πρόσθετη αντίσταση λόγω κυματισμών συναρτήσει της συχνότητας, $V=1.367 \text{ m/s}$



Διάγραμμα 13- Πρόσθετη αντίσταση λόγω κυματισμών συναρτήσει της συχνότητας, $V=1.804 \text{ m/s}$

4.2.1 RAO ανύψωσης κέντρου βάρους και προνευτασμού

Όπως αναφέρθηκε, πραγματοποιήθηκε και μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς των δύο μοντέλων. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων παρατίθενται στους παρακάτω πίνακες και τα σχετικά διαγράμματα.

Cb= 0.7
 Lwl= 3.099 m
 V= 1.367 m/s

Πίνακας 14-RMS τιμές και RAO του Heave και Pitch, Cb=0.7, V=1.367 m/s

f [Hz]	RMS_Wave	RMS_Heave	RMS_Pitch	RAO_Heave	RAO_Pitch
0.3	5.01323036	5.23387519	1.509423395	1.044012506	0.534610672
0.4	5.11612054	5.4154194	2.330603275	1.058501134	0.808857082
0.5	4.99640487	5.32395085	4.060626988	1.065556332	1.443044361
0.6	3.83563135	5.97815456	4.056172593	1.558584235	1.877689489
0.7	4.19378557	2.24680188	2.065213528	0.535745533	0.874385504
0.8	4.25366043	0.27789192	0.599012049	0.065330067	0.250044295
0.9	2.88122842	0.24313106	0.112404856	0.084384514	0.069271022
1	2.54262586	0.17406557	0.068777543	0.068458979	0.048029538
1.1	0.99815259	0.09933711	0.070427314	0.099520963	0.125281918

Cb= 0.7
 Lwl= 3.099 m
 V= 1.804 m/s

Πίνακας 15-RMS τιμές και RAO του Heave και Pitch, Cb=0.7, V=1.804 m/s

f [Hz]	Wave	RMSHeave	RMSPitch	RAOHeave	RAOPitch
0.3	5.36370607	5.70104891	1.289605695	1.06289361	0.426909855
0.4	5.33975133	6.23461008	2.2857899	1.167584348	0.760080315
0.5	5.13817894	6.7765495	4.479113804	1.318862107	1.547843618
0.6	3.69918363	6.37682003	3.389515693	1.723845221	1.626956596
0.7	3.68186103	1.4463011	1.338066728	0.392817951	0.645289485
0.8	3.77024356	0.28842842	0.287263259	0.076501269	0.135286632
0.9	2.36099111	0.28282608	0.149387618	0.119791253	0.112347771
1	2.23252647	0.20812044	0.059031677	0.093221937	0.046949688
1.1	1.15689789	0.17498119	0.123686446	0.151250332	0.189832816

Cb= 0.6
 Lwl= 3.048 m
 V= 1.367 m/s

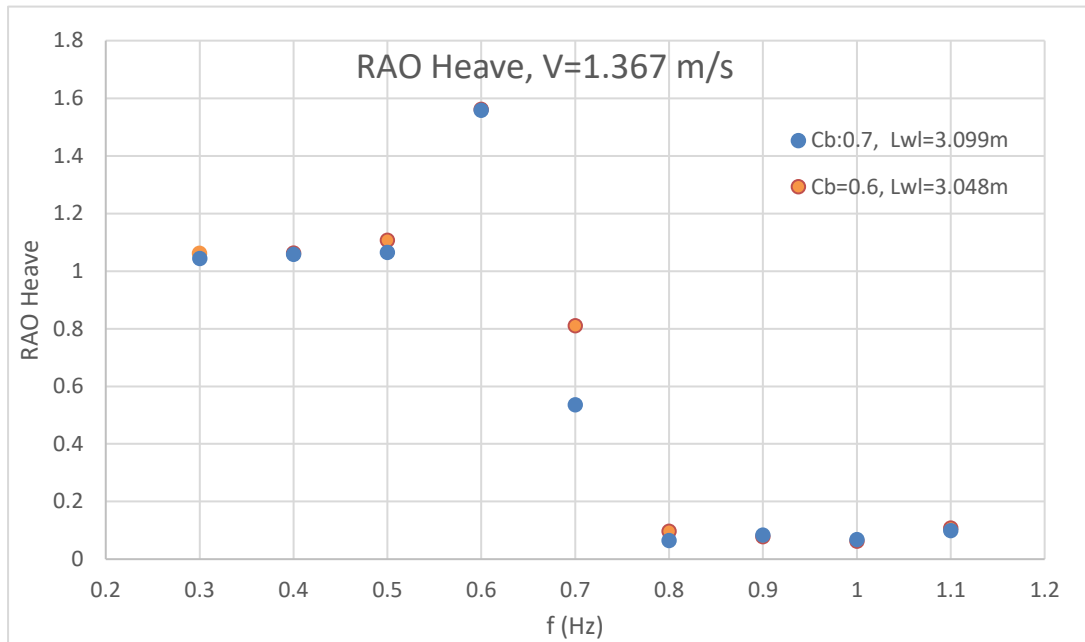
Πίνακας 16-RMS τιμές και RAO του Heave και Pitch, Cb=0.6, V=1.367 m/s

f [Hz]	Wave	RMSHeave	RMSPitch	RAOHeave	RAOPitch
0.3	5.30979078	5.63512872	1.620384378	1.06127133	0.532939897
0.4	5.34081525	5.67476615	2.522185027	1.062528075	0.824720867
0.5	5.29593292	5.86402235	4.626604045	1.107269	1.525658921
0.6	3.82805103	5.97990917	3.75617482	1.562128906	1.713585085
0.7	4.12588557	3.34276221	2.245845869	0.810192661	0.950605591
0.8	4.17301038	0.40730313	0.837003247	0.09760415	0.350279945
0.9	2.51524551	0.19576838	0.146885496	0.077832712	0.10198496
1	2.69041318	0.16897823	0.06334238	0.062807539	0.041116202
1.1	1.2121296	0.13073156	0.042957867	0.107852792	0.061891533

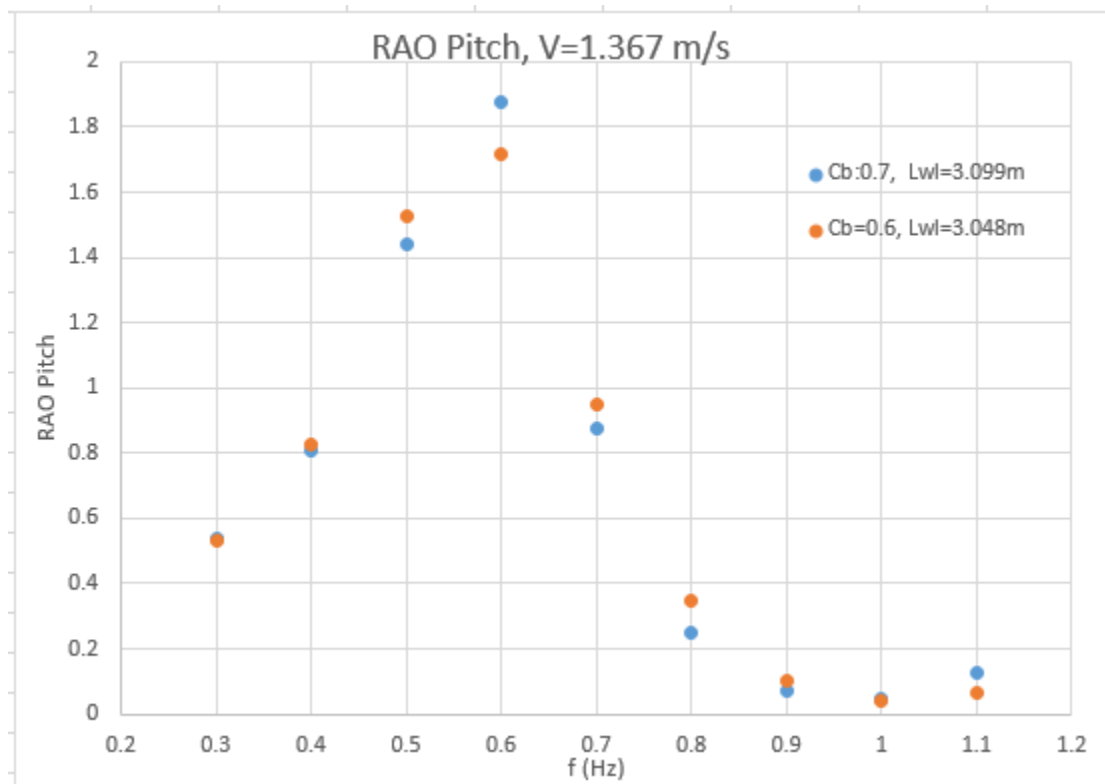
Cb= 0.6
 Lwl= 3.048 m
 V= 1.804 m/s

Πίνακας 17-RMS τιμές και RAO του Heave και Pitch, Cb=0.6, V=1.804 m/s

f [Hz]	Wave	RMSHeave	RMSPitch	RAOHeave	RAOPitch
0.3	5.33144857	5.78494987	1.43880211	1.085061555	0.471295656
0.4	5.4052675	5.95967706	2.547514704	1.102568384	0.823070626
0.5	-	-	-	-	-
0.6	3.90905622	6.41840982	2.536093514	1.641933361	1.133002691
0.7	3.9119171	6.45037515	2.524207272	1.648903844	1.12686779
0.8	4.18786917	0.35954856	0.521248108	0.085854774	0.217364682
0.9	2.50862153	0.20697138	0.315858149	0.082504028	0.219884459
1	2.58209309	0.12576238	0.071744227	0.048705597	0.048523561
1.1	1.26337499	0.12021956	0.035816419	0.09515746	0.049509379

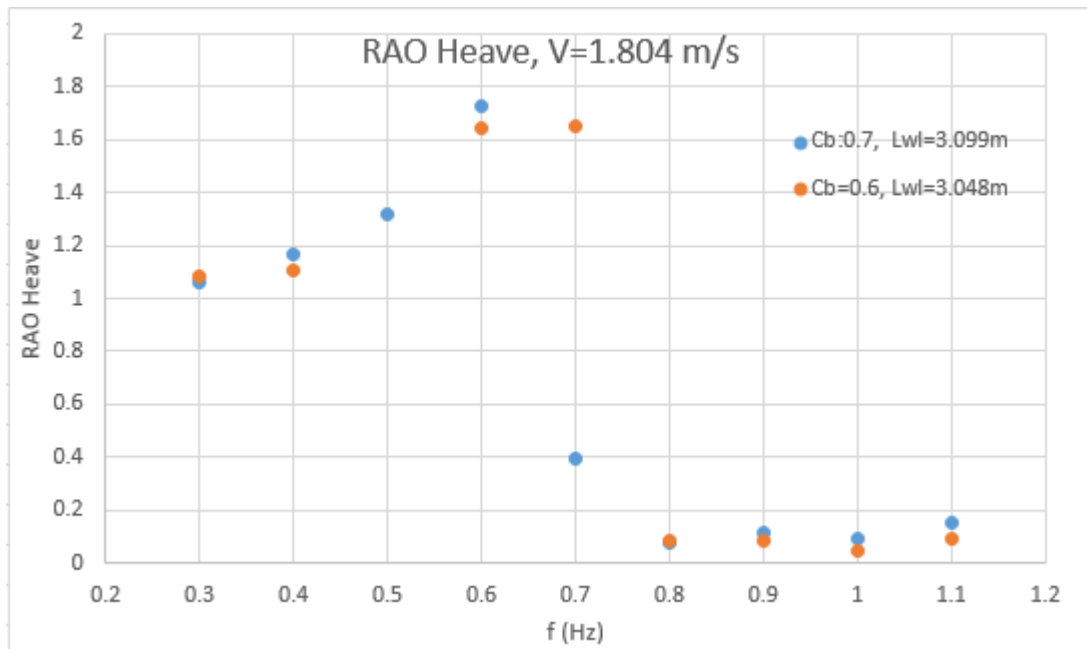


Διάγραμμα 14-RAO του Heave συναρτήσει της συχνότητας, V=1.367 m/s

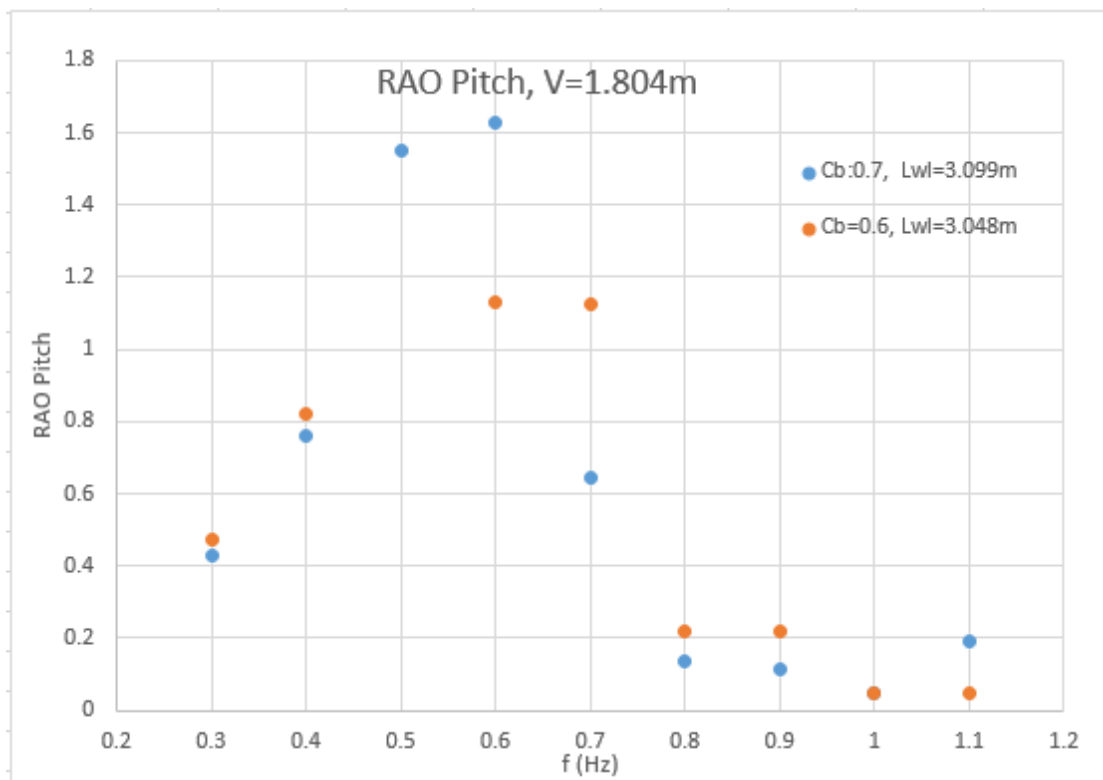


Διάγραμμα 15-RAO του Pitch συναρτήσει της συχνότητας, V=1.367 m/s

Πρώτα παρουσιάζονται στα Διάγραμμα 14 και Διάγραμμα 15 οι αποκρίσεις της ανύψωσης του κέντρου βάρους και του προνευτασμού αντίστοιχα για την ταχύτητα 1.367m/s, ενώ στα Διάγραμμα 16 και Διάγραμμα 17 οι αποκρίσεις αποκρίσεις της ανύψωσης του κέντρου βάρους και του προνευτασμού για την ταχύτητα 1.804m/s.



Διάγραμμα 16-RAO του Heave συναρτήσει της συχνότητας, $V=1.804$ m/s



Διάγραμμα 17-RAO του Pitch συναρτήσει της συχνότητας, $V=1.804$ m/s

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1 Πειράματα σε ήρεμο νερό

- Συγκρίνοντας τις μετρούμενες πειραματικές τιμές του μοντέλου με $C_b=0.7$ με αυτές του προγράμματος, παρατηρείται διαφορά στην αντίσταση τάξεως του 4.7%, για αριθμό Froude 0.205 και ταχύτητα $v=1.148$ m/s, και 1.3%, για αριθμό Froude 0.284 και ταχύτητα $v=1.584$ m/s.
- Όπως ήταν αναμενόμενο η αντίσταση σε ήρεμο νερό του μοντέλου με $C_b=0.7$ είναι μεγαλύτερη από αυτή του $C_b=0.6$ και στις δύο καταστάσεις φόρτωσης. Στο Διάγραμμα 5, η αντίσταση φαίνεται να αυξάνεται με μικρό ρυθμό μέχρι την ταχύτητα $V=1.258$ m/s ($f_n=0.228$ και 0.230 αντίστοιχα). Σε μεγαλύτερους αριθμούς Froude, ο ρυθμός αύξησης της αντίστασης ανεβαίνει.
- Στις χαμηλές ταχύτητες, έως την ταχύτητα των 1.258 m/s, η αντίσταση των δύο μοντέλων φαίνεται να ακολουθεί παρόμοιο ρυθμό αύξησης, ενώ σε μεγαλύτερες ταχύτητες ο ρυθμός αύξησης της αντίστασης του μοντέλου με $C_b=0.7$ ανεβαίνει σημαντικά.
- Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η ποσοστιαία διαφορά της αντίστασης, όπως αναπαρίσταται στο Διάγραμμα 6. Πιο συγκεκριμένα η ποσοστιαία διαφορά μένει σταθερά κάτω από το 25% στις περιοχές με $f_n=0.089-0.210$. Μετά όμως η διαφορά αυτή εκτοξεύεται έως το 51.41% στις περιοχές με $f_n=0.210-0.330$.

5.2 Πειράματα σε αρμονικούς ημιτονικούς κυματισμούς

- Στο Διάγραμμα 10 και Διάγραμμα 11, παρατηρείται η συνολική αντίσταση του μοντέλου με $C_b=0.7$ είναι μεγαλύτερη από αυτή του 0.6. Όπως φαίνεται και στα δύο διαγράμματα έχει γίνει εκτίμηση της αντίστασης για τις συχνότητες 0.6 ($v=1.367$ m/s) και 0.7 ($v=1.804$ m/s), διότι υπήρχε διαβροχή του καταστρώματος λόγω απουσίας υπερκατασκευής.
- Στο Διάγραμμα 12 και Διάγραμμα 13 παρουσιάζεται η πρόσθετη αντίσταση λόγω κυματισμών. Η πρόσθετη αντίσταση του μοντέλου με $C_b=0.6$ είναι οριακά μεγαλύτερη από αυτή του 0.7, εκτός από τις συχνότητες 0.6 και 0.7 για την ταχύτητα 1.804 m/s. Στις δύο αυτές συχνότητες, όμως, υπήρχε έντονη διαβροχή του καταστρώματος. Για αυτό το λόγο, προτείνεται η κατασκευή προστέγου στο μοντέλο αυτό και η επανάληψη των πειραμάτων για αυτά τα πλάτη κυμάτων και συχνότητες, προκειμένου να διερευνηθεί η πραγματική συμπεριφορά του μοντέλου.
- Από τα Διαγράμματα Διάγραμμα 14 Διάγραμμα 15, Διάγραμμα 16 και Διάγραμμα 17 παρατηρείται ότι τα δύο μοντέλα παρουσιάζουν παρόμοιες αποκρίσεις χαμηλές και υψηλές συχνότητες. Στις μεσαίες συχνότητες 0.5-0.7 οι αποκρίσεις είναι μεγαλύτερες, το οποίο είναι αναμενόμενο.

Γενικά παρατηρείται ότι η αύξηση της αντίστασης σε ήρεμο νερό είναι ανάλογη της ταχύτητας υπηρεσίας. Πιο συγκεκριμένα η διαφορά της αντίστασης των δύο μοντέλων κυμαίνεται στο 25% έως την ταχύτητα 1.148 m/s και φτάνει και έως το 51.41% σε υψηλότερες ταχύτητες. Όποτε είναι δυνατό, λαμβάνοντας υπόψη το δρομολόγιο του πλοίου και την τιμή του καυσίμου, να γίνει ένας χοντρικός υπολογισμός του παραπάνω κόστους λειτουργίας. Όσον αναφορά την πρόσθετη αντίσταση λόγω κυματισμών, το μοντέλο με $C_b=0.6$ παρουσίασε οριακά μεγαλύτερη τιμή, οπότε δε θα υπάρξει σημαντική αύξηση του κόστους. Παράλληλα είναι γνωστό ότι η αύξηση της μεταφορικής ικανότητας των δύο πλοίων είναι περίπου 25%, οπότε μπορεί να εξαχθεί ένα συμπέρασμα για το ποιο πλοίο συμφέρει τον πλοιοκτήτη καλύτερα. Τέλος, για τις αποκρίσεις στις χαμηλές και υψηλές συχνότητες υπάρχει κοντινή συμπεριφορά, ενώ παρατηρούνται κάποιες διαφορές στις μεσαίες συχνότητες (0.5-0.7).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Γ. Κ. Πολίτης, "Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου", Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- 2) Θ.Α. Λουκάκης, Γ.Ι. Γρηγορόπουλος, "Υδροδυναμική Σχεδίαση Μικρών Σκαφών", Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- 3) Ν. Βασιλειάδης, "Πειραματική και Αριθμητική Διερεύνηση Αντίστασης Πλοίων Τύπου Semi-Swath", Αθήνα 2010 (Επιβλέπων: Γ. Γρηγορόπουλος)
- 4) Σ. Τσαγκάρης, "Μηχανική των ρευστών", Εκδόσεις Συμεών
- 5) Γ. Δ. Τζαμπίρας, "Υπολογιστική Ρευστομηχανική", Εκδόσεις Συμεών
- 6) Ι. Γ. Τσάμη, "Πειράματα πρόσθετης αντίστασης κυματισμών σε πρότυπα πλοίων", Αθήνα 2013 (Επιβλέπων: Γ. Τζαμπίρας)
- 7) Η. Παντελεάκος, "Υπολογιστική μελέτη αντίστασης και αυτοπρόωσης δεξαμενοπλοίου", Αθήνα 2017 (Επιβλέπων: Γ. Τζαμπίρας)
- 8) Walter H. Michel, "Sea Spectra Simplified", 1968
- 9) Γ. Γαροφαλλίδης "Experimental and numerical Investigation of the flow around a Ship model at Various Froude Numbers"