

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών

Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής



Διπλωματική Εργασία:

«Πειραματική διερεύνηση της επίδρασης του πηδαλίου στο αυτοπροωθούμενο πλοίο»

Κουκουτός Νικόλαος

Επιβλέπων:

Γ. Τζαμπίρας, Καθηγητής ΕΜΠ

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε το ακαδημαϊκό έτος 2017-2018, όντας μέρος ευρύτερης διερεύνησης της επίδρασης του πηδαλίου στο αυτοπροωθούμενο πλοίο. Σε αυτά τα πλαίσια, εκτελέστηκαν στην δεξαμενή του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής πειράματα αντίστασης ρυμουλκούμενου μοντέλου, έλικας σε ελεύθερη ροή, αυτοπρώωσης μοντέλου, καθώς και μέτρησης ύψους της ελεύθερης επιφάνειας (wave cuts). Όλα τα παραπάνω πραγματοποιήθηκαν τόσο με, καθώς και χωρίς πηδάλιο, ώστε να αναδειχθούν και να εξηγηθούν οι διαφορές μεταξύ των δύο ομάδων αποτελεσμάτων.

Για τη βοήθεια τους στην εκπόνηση αυτής της εργασίας, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους:

-Γ. Τζαμπίρα, Καθηγητή Ε.Μ.Π, για την συμβολή και ματιά του στην φυσική ανάλυση των πειραμάτων

-Ε. Παπακωνσταντίνου, Ε.Τ.Ε.Π. Ε.Μ.Π, για την βοήθειά του στην επεξεργασία και κατανόηση των πειραματικών δεδομένων

-Δ. Λιαροκάπη, Ε.Τ.Ε.Π. Ε.Μ.Π, για την υποστήριξη και υπομονή του καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας

-Γ. Τραχανά, τεχνικό Ε.Ν.Θ.Υ. του Ε.Μ.Π., για την καθημερινή, πολύωρη βοήθεια του κατά την εκτέλεση των πειραμάτων

-Φ. Κασάπη, τεχνικό Ε.Ν.Θ.Υ. του Ε.Μ.Π., για την συμμετοχή του στα πειράματα

-Γ. Μυλωνά, ξυλουργό Ε.Ν.Θ.Υ. του Ε.Μ.Π., για την καθοδήγηση και βοήθεια στην επισκευή του μοντέλου, και για την διάθεσή του να μεταδώσει γνώσεις, ακόμα και αν δεν είναι μέρος των υποχρεώσεων του.

Περιεχόμενα

1. <u>Εισαγωγή</u>	3
2. <u>Θεωρητικό Μέρος</u>	5
2.1. <u>Γενικά</u>	5
2.2. <u>Ομοιότητα-αδιάστατοι συντελεστές</u>	5
2.3. <u>Αντίσταση ρυμουλκούμενου πλοίου</u>	6
2.3.1. <u>Η υπόθεση Froude</u>	7
2.4. <u>Έλικα σε ελεύθερη ροή</u>	8
2.5. <u>Αυτοπροωθούμενο πλοίο</u>	9
2.6. <u>Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας</u>	11
3. <u>Πειραματικό Μέρος</u>	12
3.1. <u>Γενικά</u>	12
3.2. <u>Το μοντέλο</u>	12
3.3. <u>Επισκευή-Προετοιμασία</u>	14
3.4. <u>Αντίσταση</u>	16
3.5. <u>Έλικα σε ελεύθερη ροή</u>	19
3.6. <u>Το αυτοπροωθούμενο πλοίο</u>	20
3.7. <u>Ύψος ελεύθερης επιφάνειας.</u>	25
4. <u>Ανάλυση-Συμπεράσματα</u>	26
4.1. <u>Παρατηρήσεις</u>	26
4.2. <u>Ανάλυση</u>	26
4.3. <u>Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα</u>	28
5. <u>Παράρτημα</u>	29
5.1. <u>Αντίσταση</u>	26
5.2. <u>Ελεύθερη Ροή</u>	36
5.3.1. <u>Αυτοπρόωση Fn 0.25</u>	38
5.3.2. <u>Αυτοπρόωση Fn 0.32</u>	44
5.4. <u>Wave Cuts</u>	52
6. <u>Βιβλιογραφία</u>	54

1. Εισαγωγή

Εκκίνηση για την εξερεύνηση της επίδρασης του πηδαλίου στην αυτοπρόωση αποτέλεσε η διδακτορική διατριβή «Calculation of the Hydrodynamic Resistance of Appendages on Conventional Vessels» [1] (Στυλιανός Π. Πολύζος, Μάρτιος 2017). Κατά την εκπόνηση της, υπολογίστηκε αύξηση της ώσης που αποδίδει η προπέλα, της τάξης του 4%, μετά την προσθήκη του πηδαλίου στην γάστρα, ενώ για δεδομένη ώση, σημειώθηκε στους υπολογισμούς αλλαγή του ποσοστού ομόρρου της τάξης του 12%. Φαινομενικά παράδοξο, το στοιχείο αυτό, ανάμεσα σε άλλα, στάθηκε αφορμή για την περαιτέρω διερεύνηση της αλλαγής στην ροή που επιφέρεται λόγω του πηδαλίου. Στα πλαίσια αυτά εκκινήθηκε ένας κύκλος πειραμάτων στην πειραματική δεξαμενή του Εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, με σκοπό την επαλήθευση και εξακρίβωση, με πειραματικά αυτή τη φορά μέσα, των αποτελεσμάτων των υπολογιστικών μεθόδων.

Η ροή στην, και γύρω από την, πρύμνη της γάστρας αποτελεί βασικό στοιχείο που καθορίζει τόσο τη συμπεριφορά όσο και την αντίσταση του πλοίου. Σαν φαινόμενο επηρεάζεται από πληθώρα φυσικών και γεωμετρικών χαρακτηριστικών της γάστρας και της πλεύσης αυτής, ενώ για την δημιουργία μίας σαφούς εικόνας, απαιτείται και η μελέτη της αλληλεπίδρασης των στοιχείων αυτών, καθώς η ταχύτητα ρευστού γύρω από στερεό σώμα αποτελεί εξόχως μη γραμμικό πρόβλημα. Προσπάθειες για την ανάπτυξη υπολογιστικών μεθόδων (Computational Fluid Dynamics, CFD) έχουν αποδώσει ήδη καρπούς, προσφέροντας σημαντικά αποτελέσματα σε ότι αφορά την διερεύνηση των φαινομένων της ροής τόσο στην ναυπηγική όσο και την αεροναυπηγική έρευνα αλλά και στην πρακτική εφαρμογή, χρησιμοποιώντας μεθόδους αριθμητικής επίλυσης όπως οι μέθοδοι πεπερασμένων όγκων και στοιχείων. Η επαλήθευση μέσω των πειραματικών μεθόδων αποτελεί όμως ακόμα απαραίτητο στοιχείο για την ισχυροποίηση των επιχειρημάτων που παράγονται, καθ' ότι η αξία της πειραματικής μεθόδου έχει, σε αντίθεση με την υπολογιστική, επαληθευτεί πέραν του απαραίτητου κατά το πέρασμα των δεκαετιών.

2. Θεωρητικό Μέρος

2.1. Γενικά

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μία συνοπτική προσέγγιση του θεωρητικού πλαισίου με βάση το οποίο διεξάχθηκαν τα πειράματα. Παρουσιάζονται οι έννοιες της ομοιότητας, των αδιάστατων συντελεστών, τα βασικά μεγέθη που χαρακτηρίζουν τα επί μέρους τμήματα του προβλήματος και οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα.

2.2. Ομοιότητα – Αδιάστατοι Συντελεστές

Η εκτέλεση οποιωνδήποτε πειραμάτων υπό κλίμακα βασίζεται πάντα στην υπόθεση ότι τα αποτελέσματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή συμπερασμάτων για το φυσικό μέγεθος των υπό εξέταση αντικειμένων. Για το σκοπό αυτό, απαιτείται διερεύνηση της φυσικής ομοιότητας του ζεύγους πραγματικού και υπό κλίμακα αντικείμενου, όπου φυσική ομοιότητα η αντιστοιχία αναλογιών των χαρακτηριστικών φυσικών μεγεθών ενός προβλήματος με την αναλογία των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του εν λόγω ζεύγους.

Με μαθηματικούς όρους, αυτό σημαίνει την ύπαρξη και δυνατότητα εύρεσης αμφιμονοσήμαντων συναρτήσεων $f_X(\lambda)$, όπου λ ο λόγος κάποιου χαρακτηριστικού μεγέθους του φυσικού αντικείμενου προς το αντίστοιχο του μοντέλου, τέτοιας ώστε

$$X_{model} F_X(\lambda) = X_{item}$$

, όπου X οποιοδήποτε υπό εξέταση φυσικό μέγεθος

Για να εξετάσει κανείς από αυτήν την σκοπιά το πρόβλημα του αυτοπροωθούμενου πλοίου, ξεκινά μελετώντας τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν την συμπεριφορά του. Αυτά μπορούν, για χάρη ευκολίας, να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: τα γεωμετρικά μεγέθη (μήκη, επιφάνειες, όγκοι) και τα φυσικά μεγέθη (ταχύτητες, δυνάμεις, ισχύες κ.ο.κ.). Σαν χαρακτηριστική διάσταση ορίζεται το μήκος της γάστρας L .

Για τα γεωμετρικά μεγέθη, μπορεί εύκολα να δειχθεί η ύπαρξη κλίμακας λόγου λ , λ^2 και λ^3 για τα μήκη, τις επιφάνειες και τους όγκους αντίστοιχα. Ήτοι, για L μήκος S επιφάνεια και V όγκο, ισχύουν

- $L_{ship} = L_{model} * \lambda$
- $S_{ship} = S_{model} * \lambda^2$
- $V_{ship} = V_{model} * \lambda^3$

Σε ότι αφορά τα υπόλοιπα, η επίτευξη πλήρους ομοιότητας είναι ανέφικτη, καθώς εξαρτώνται από μεγέθη για τα οποία είναι αδύνατο να υπάρξει αναλογία της πειραματικής διάταξης με τον φυσικό κόσμο. Παραδειγματικά αναφέρεται η συνεκτικότητα του ρευστού στο οποίο επιπλέει το μοντέλο (ν), όπου θα απαιτούνταν υπερβολικά αραιά ρευστά για την διατήρηση της αντιστοιχίας.

Για την υπερπήδηση του προβλήματος, δημιουργείται μία σειρά αδιάστατων συντελεστών, με βάση μία μήτρα διαστατικά ανεξάρτητων μεταβλητών. Για όσα από τα μεγέθη που προκύπτουν δεν υπάρχει αναλογία, χρησιμοποιούνται απλοποιητικές παραδοχές, εμπειρικοί τύποι αναγωγής τους στο φυσικό αντικείμενο και άλλες προσεγγιστικές μέθοδοι.

Για την παραπάνω διαδικασία ανάλυσης, έχει καθιερωθεί η χρήση των συντελεστών Reynolds ($Re = \frac{VL}{\nu}$) και Froude ($Fn = \frac{V}{\sqrt{gL}}$), στους οποίους αξίζει να σταθούμε. Ο πρώτος χαρακτηρίζει κυρίως τις επιδράσεις της τριβής στο πλοίο, ενώ ο δεύτερος εκφράζει μεταξύ άλλων την επίδραση των κυματισμών. Στα πλαίσια του προβλήματος του αυτοπροωθούμενου πλοίου, θα έλεγε κανείς ότι οι δύο αυτοί συντελεστές συνδέουν τα επί μέρους προβλήματα μεταξύ τους. Η διατήρηση και των δύο ταυτόχρονα στα ίδια επίπεδα σε μοντέλο και φυσικό μέγεθος είναι συνήθως, όπως θα δειχθεί παρακάτω, αδύνατη.

Ας σημειωθεί εδώ ότι η παρούσα εργασία δεν επιδιώκει να ανάγει τα αποτελέσματα σε κάποιο φυσικό, «πραγματικού» μέγεθος αντικείμενο. Παρ' όλα αυτά, απαιτείται να αποδειχθεί η ισχύς των μεθόδων που ακολουθήθηκαν, προς επικύρωση της χρησιμότητας των παραγόμενων δεδομένων, επικύρωση δηλαδή της ίδιας της μοντελοποιημένης πειραματικής διαδικασίας.

2.3. Αντίσταση ρυμουλκούμενου πλοίου

Η αντίσταση ρυμουλκούμενου πλοίου διαφέρει από αυτήν του αυτοπροωθούμενου, καθώς στο δεύτερο η έλικα (το τυπικό μέσο πρόωσης) επηρεάζει την ροή γύρω από το πλοίο, και επομένως τις δυνάμεις τις οποίες αυτό δέχεται.

Στην περίπτωση ρυμούλκησης, οι δυνάμεις που δέχεται το πλοίο μπορούν να αναλυθούν σε τρεις κύριες συνιστώσες:

- Την αντίσταση τριβής R_f , η οποία καταναλώνει έργο λόγω της συνεκτικότητας του υγρού (νερό) κατά την σχετική κίνηση του με το πλοίο.
- Την αντίσταση μορφής R_{form} , η οποία αφορά τις διαφορές των κατανομών των κάθετων πιέσεων και εφαπτομενικών τάσεων εντός του νερού, συγκριτικά με επίπεδη πλάκα ίσης επιφάνειας.
- Την αντίσταση κυματισμών R_w , η οποία εκφράζει την αντίσταση που προκαλείται από την διατάραξη της ελεύθερης επιφάνειας.

Οι δύο τελευταίοι όροι, R_{form} και R_w , συνήθως συνοψίζονται σαν υπόλοιπη αντίσταση R_r .

Αναλύοντας το πρόβλημα, εντοπίζουμε πέντε ακόμα φυσικά μεγέθη που σχετίζονται με την αντίσταση (η οποία είναι και το ζητούμενο), με βάση τα παραπάνω:

- Την επιτάχυνση της βαρύτητας g
- Την κινηματική συνεκτικότητα ν
- Την πυκνότητα του ρευστού ρ
- Το μήκος L και
- Την ταχύτητα V

Η αντίσταση R μπορεί να αναπαρασταθεί σαν συνάρτηση των παραπάνω ($R=f(g,\nu,\rho,L,V)$). Χρησιμοποιώντας το Θεώρημα Π στα 6 παραπάνω διαστατά μεγέθη, και επιλέγοντας σαν διαστατικά ανεξάρτητη ομάδα τα $\{\rho, V, L\}$, προκύπτουν τρεις αδιάστατοι συντελεστές:

- Ο αριθμός Reynolds $Re = \frac{VL}{\nu}$
- Ο αριθμός Froude $Fn = \frac{V}{\sqrt{gL}}$
- Και ο συντελεστής αντίστασης πλοίου $C_t = \frac{R}{\frac{1}{2}\rho S V^2}$,

που μπορεί να εκφραστεί και σαν $C_t(Re, Fn)$. Συμπεραίνουμε έτσι, ότι η ταυτόχρονη διατήρηση των Re και Fn στις ίδιες τιμές κατά την μοντελοποίηση σε κλίμακα θα σημαίνει και διατήρηση του συντελεστή αντίστασης.

2.3.1. Η υπόθεση Froude

Η διατήρηση ίδιων συντελεστών Reynolds και Froude εκφράζεται μαθηματικά σαν

$$\bullet \quad Re_s = Re_m \Leftrightarrow \frac{V_s L_s}{\nu_s} = \frac{V_m L_m}{\nu_m} \quad (1)$$

$$\bullet \quad Fn_s = Fn_m \Leftrightarrow \frac{V_s}{\sqrt{gL_s}} = \frac{V_m}{\sqrt{gL_m}} \quad (2)$$

όπου s και m οι δείκτες για το πλοίο και το μοντέλο αντίστοιχα.

Εύκολα φαίνεται ότι οι σχέσεις (1) και (2) είναι αδύνατον να ισχύουν ταυτόχρονα εντός πρακτικών ορίων, καθώς τα g και ν παραμένουν πρακτικά σταθερά, ενώ εάν αντικαταστήσουμε

τον λόγο $\lambda = \frac{L_s}{L_m}$, προκύπτει

$$(1) \Rightarrow \frac{V_m}{V_s} = \lambda \quad (3)$$

$$(2) \Rightarrow \frac{V_m}{V_s} = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \quad (4)$$

Το οποίο είναι εμφανώς αντιφατικό για τιμές λ διάφορες του 1, το οποίο αποτελεί την εκφυλισμένη περίπτωση.

Είναι επίσης φανερό ότι, από τις σχέσεις (3) και (4), πιο εύκολα επιτεύξιμη είναι η σχέση (4), καθώς η (3) απαιτεί πολύ μεγάλες ταχύτητες μοντέλου.

Από τα παραπάνω καταλήγουμε στην εξίσωση των αριθμών Froude για την επίτευξη μερικής ομοιότητας του προβλήματος. Με βάση τον διαχωρισμό που έγινε παραπάνω στους τύπους αντίστασης και την διαστατική ανάλυση που παρουσιάστηκε, μπορούμε να γράψουμε την αντίσταση (και αντίστοιχα τους συντελεστές αντίστασης) σαν:

$$R_t(Re, Fn) = R_f(Re) + R_w(Fn) + R_{Form}(Re, Fn) \quad (5)$$

$$= R_f(Re) + R_r(Re, Fn) \quad (6)$$

$$C_t(Re, Fn) = C_f(Re) + C_r(Re, Fn) \quad (7)$$

Ο συντελεστής αντίστασης τριβής μπορεί να υπολογιστεί με ικανοποιητική ακρίβεια, με πιο διαδεδομένη μέθοδο την χρήση της καμπύλης ITTC(International Towing Tank Conference), που τον θέτει σαν

$$C_f = \frac{0.075}{(\log_{10}(Re) - 2)^2}$$

Η υπόθεση του Froude έγκειται στην παραδοχή ότι η υπόλοιπη αντίσταση R_r καθορίζεται κυρίως από τον αριθμό Froude, και, ως εκ τούτου, η επίδραση του αριθμού Reynolds είναι αμελητέα και μπορεί να παραληφθεί. Έτσι η (6) γράφεται:

$$C_t = C_f(Re) + C_r(Fn),$$

Και καθώς το Fn παραμένει σταθερό, το ίδιο συμβαίνει και για τον συντελεστή αντίστασης, καταστρώντας έτσι το πρόβλημα πειραματικά επιλύσιμο.

Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιήθηκε παραλλαγή της παραπάνω μεθόδου, η οποία συμπεριλαμβάνει και έναν διορθωτικό συντελεστή, ονομαζόμενο στο εξής συντελεστής συσχέτισης Ca , ο οποίος έχει την τιμή 0.0004 και καλύπτει με μεγαλύτερη ακρίβεια τις απλοποιητικές παραδοχές που περιγράφηκαν.

2.4. Έλिका σε ελεύθερη ροή

Ένα ακόμα μέρος της διερεύνησης της συμπεριφορά του αυτοπροωθούμενου πλοίου είναι ο καθορισμός των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τον προωστήριο μηχανισμό του, την έλικα. Σε μία προσπάθεια αποσύζευξης του προβλήματος σε επιμέρους ζητήματα η έλικα μελετάται χωρίς την επίδραση της γάστρας, σε αντιστοιχία με το ρυμουλκούμενο πλοίο, το οποίο μελετά την γάστρα χωρίς την επίδραση της έλικας.

Ακολουθώντας όμοια λογική με την παραπάνω διαδικασία, εντοπίζουμε τα διαστατά μεγέθη που περιγράφουν την έλικα και την κίνηση της, ξεκινώντας με τις ανεξάρτητες μεταβλητές του συστήματος:

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της. Σε αυτά ανήκουν ο αριθμός των πτερυγίων z , η διάμετρος της D , το βήμα της έλικας P ο λόγος εκτεταμένης επιφάνειας AE/A_0 , όπου AE το εκτεταμένο εμβαδόν της έλικας και A_0 το εμβαδόν του δίσκου με διάμετρο D .

- Οι στροφές της έλικας n
- Η ταχύτητα προχώρησης της έλικας V
- Η πυκνότητα και η κινηματική συνεκτικότητα του νερού, ρ και ν αντίστοιχα
- Η επιτάχυνση της βαρύτητας g

Η παράμετρος επιφανειακής τάσης σ και οι πιέσεις ατμόσφαιρας p_a και ατμοποίησης p_v συνήθως συμπεριλαμβάνονται σαν κριτήρια για την σπηλαίωση, η οποία δεν θα απασχολήσει στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Σε αυτά προστίθενται, σαν εξαρτημένες μεταβλητές, οι παραγόμενες από την έλικα ροπή Q και ώση T .

Προχωρώντας με την διαστατική ανάλυση, επιλέγεται μία μήτρα τρίτου βαθμού $\{\rho, n, D\}$, και προκύπτουν συντελεστές για τα παραπάνω μεγέθη, οι εξής:

- Οι συντελεστές ροπής και ώσης $k_Q = \frac{Q}{\rho n^2 D^5}$ και $k_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$ αντίστοιχα
- Ο συντελεστής προχώρησης $J = \frac{V}{nD}$
- Οι αριθμοί Reynolds και Froude, αδιαστατοποιημένοι σαν $Re = \frac{nD^2}{\nu}$ και $Fn = n\sqrt{\frac{D}{g}}$

Από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, προκύπτει ο λόγος βήματος P/D , ενώ ο λόγος εκτεταμένης επιφάνειας και ο αριθμός πτερυγίων είναι αδιάστατα ούτως ή άλλως, και άρα παραμένουν ως έχουν.

Σημειώνεται εδώ, ότι ο αριθμός Reynolds είναι διαφορετικός ανάλογα με την απόσταση από το κέντρο της έλικας στην οποία μετράται. Συμβατικά επιλέγεται το 70% της ακτίνας της έλικας σαν σημείο μέτρησης.

Ο συντελεστής προχώρησης J εκφράζει τις γωνίες πρόσπτωσης του νερού, έτσι όπως θα τις αντιλαμβανόταν ένας παρατηρητής επί της έλικας, και μπορεί να αντιστοιχηθεί μονοσήμαντα με τους συντελεστές προχώρησης και ώσης.

Στα παραπάνω προστίθεται ο «βαθμός απόδοσης έλικας σε ελεύθερη ροή» η_0 , ο οποίος εξ ορισμού ισούται με τον λόγο ωφέλιμης ισχύος προς την ισχύ που δαπανάται, και μπορεί να γραφτεί σαν

$$\eta_0 = \frac{JK_T}{2\pi K_Q} = \frac{VT}{\omega Q}$$

, όπου ω η ταχύτητα γωνιακής περιστροφής.

Τα παραπάνω εξαγόμενα μεγέθη (T, Q, η_0) εκφράζονται συνήθως συναρτήσει του συντελεστή προχώρησης στο διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας, για έναν ή περισσότερους λόγους βήματος.

Για την εξασφάλιση της ομοιότητας κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων, λαμβάνεται ίσος ο συντελεστής προχώρησης, με τη συνθήκη

$$J_s = J_m \Leftrightarrow \frac{V_s}{n_s D_s} = \frac{V_m}{n_m D_m}$$

Η επίδραση της ελεύθερης επιφάνειας αποσοβείται κατά το δυνατόν βυθίζοντας την έλικα σε κάποιο ικανοποιητικό βάθος, και έτσι ο συντελεστής Froude αμελείται κατά την μοντελοποίηση, ενώ για την εξασφάλιση τυρβώδους ροής απαιτούνται αριθμοί Reynolds της τάξης του $5 \cdot 10^5$ τουλάχιστον. Αυτό οδηγεί στην απαίτηση το μοντέλο της έλικας να λειτουργεί σε πολύ υψηλότερες στροφές του πραγματικού.

2.5. Το αυτοπροωθούμενο πλοίο

Το πρόβλημα του αυτοπροωθούμενου πλοίου αποτελεί την σύζευξη των δύο προηγούμενων, και στόχος του είναι η εύρεση του σημείου αυτοπρόωσης (Self-Propulsion Point, SPP), η εξακρίβωση δηλαδή των στροφών έλικας για τις οποίες η παραγόμενη ώση ισούται με την αντίσταση του πλοίου, για δεδομένο αριθμό Froude. Για την ανάλυση του εν λόγω σημείου, χρειάζεται να εισαχθούν μερικές νέες έννοιες.

Ξεκινά κανείς διαπιστώνοντας ότι η αντίσταση ρυμουλκούμενου πλοίου (έστω R_0) είναι εν γένει μικρότερη της ώσης T που παράγεται από την έλικα στο σημείο αυτοπρόωσης. Όπως εξηγήθηκε στο τμήμα της αντίστασης ρυμούλκησης, η αντίσταση εξαρτάται από τις πιέσεις που ασκούνται στο πλοίο, καθώς και από την τριβή που προκαλεί η κίνηση του νερού γύρω από τη γάστρα. Η λειτουργία της έλικας αλλάζει το πεδίο δυνάμεων γύρω από το πλοίο, και άρα την ροή, μειώνοντας τις πιέσεις στην πρύμνη και αυξάνοντας την ταχύτητα του νερού, και κατά συνέπεια την αντίσταση τριβής. Όλα τα παραπάνω συντελούν στην αύξηση της αντίστασης, δηλαδή ισχύει $R = T > R_0$. Για την ποσοτικοποίηση του φαινομένου αυτού, έχει οριστεί το ποσοστό μείωσης ώσης t σαν:

$$1 - t = \frac{R_0}{T}$$

Με τιμές συνήθως γύρω από το 0.2

Εξετάζοντας στη συνέχεια την κίνηση του ρευστού γύρω από τη γάστρα, είναι σαφές ότι η ταχύτητα του νερού δεν είναι ομοιόμορφη. Αν θεωρήσουμε την κίνηση πλοίου με ταχύτητα V σε ήρεμο νερό, αυτή δημιουργεί κίνηση στο νερό, λόγω τριβής και συνεκτικότητας, ενώ και η ίδια η λειτουργία της έλικας στηρίζεται στην επιτάχυνση του νερού για την παραγωγή ώσης. Έτσι, η ταχύτητα πλοίου-νερού πίσω από την πρύμνη διαφέρει σημαντικά από την ταχύτητα V , με την έλικα να «βλέπει» μία ταχύτητα V_0 , η οποία είναι μικρότερη της V , και ορίζει, σε αντιστοιχία με την προηγούμενη παράγραφο, το ποσοστό ομόρρου w , σαν

$$1 - w = \frac{V_0}{V},$$

με τις τιμές του να κινούνται συνήθως στην περιοχή $[0.05, 0.4]$

Οι 2 αυτές μετρικές χρησιμεύουν στην παρουσίαση της επίδρασης της αυτοπρώωσης επί του ρυμουλκούμενου πλοίου, ενώ συνδέουν με το πρόβλημα εν τέλει και την λειτουργία της έλικας σε ελεύθερη ροή.

Στα πλαίσια της διαστατικής ανάλυσης, κινούμαστε όμοια με τις προηγούμενες παραγράφους, εντοπίζοντας σαν ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος τα

$L, D, n, g, v, \rho, \rho_a - \rho_v$

Και σαν εξαρτημένες τα V, Q, T .

Οι αδιάστατοι συντελεστές προκύπτουν μέσω της μήτρας $\{\rho, n, D\}$, κάτι που είναι ισοδύναμο με την μήτρα $\{\rho, V, L\}$, εφόσον ισχύει η ισότητα των συντελεστών προχώρησης. Προκύπτουν έτσι οι συντελεστές ροπής kQ , ώσης kT , προχώρησης J (βλέπε έλικα σε ελεύθερη ροή), οι αριθμοί Froude και Reynolds, και ο συντελεστής ολικής αντίστασης C_t (βλέπε πειράματα αντίστασης). Για την επίτευξη μερικής ομοιότητας στο πρόβλημα, διατηρείται, κατά τα γνωστά, η ισότητα του αριθμού Froude, οδηγώντας μας στη σχέση:

$$Fn_s = Fn_m \Leftrightarrow \frac{V_s}{V_m} = \sqrt{\lambda}, \text{ όπου } \lambda \text{ ο λόγος μηκών των δύο.}$$

Στην παρούσα εργασία θα αγνοηθεί η μέθοδος εκτίμησης του σημείου αυτοπρώωσης πραγματικού μεγέθους πλοίου, και θα επικεντρωθούμε στην ανάλυση των αποτελεσμάτων επί του ίδιου του μοντέλου.

Για την εύρεση του ίδιου του σημείου αυτοπρώωσης, χαράσσεται η καμπύλη της δύναμης ρυμούλκησης (DF) συναρτήσεως των στροφών. Μετράται δηλαδή η δύναμη που απαιτείται να ασκηθεί από εξωτερικό παράγοντα στο μοντέλο για να φτάσει αυτό στην υπό εξέταση ταχύτητα. Το σημείο αυτοπρώωσης βρίσκεται εξ ορισμού εκεί, όπου η δύναμη αυτή μηδενίζεται, εκεί δηλαδή όπου η ώση της έλικας ισούται με την αντίσταση του πλοίου.

Συνδέοντας το V_0 με την ταχύτητα προχώρησης του διαγράμματος της έλικας σε ελεύθερη ροή, μπορούμε να ορίσουμε και τις αντίστοιχες ροπές και ώσεις Q_0, T_0 , όπως αυτές προκύπτουν από το διάγραμμα. Δημιουργούμε έτσι μία αντιστοιχία της έλικας σε ελεύθερη ροή με την έλικα η οποία βρίσκεται στα απόνερα του πλοίου, αλλά για τον υπολογισμό των παραπάνω απαιτείται τουλάχιστον ένα ακόμα γνωστό μέγεθος εντός του συστήματος μας. Η παραδοχή η οποία επιλέγεται συνήθως είναι αυτή της εξίσωσης της ώσης, η υπόθεση δηλαδή ότι $T=T_0$. Με βάση αυτό, μπορεί κανείς στην συνέχεια να εκτιμήσει τα J, Q_0 μέσω των διαγραμμάτων ελεύθερης ροής, ενώ η τιμή της αντίστασης ρυμούλκησης είναι γνωστή και αυτή μέσω των προηγούμενων πειραμάτων, επιτρέποντας έτσι τον υπολογισμό των t, w .

Τελευταίο βήμα αποτελεί η εκτίμηση του επίπεδου της ισχύος που παρέχεται από το σύστημα πρώωσης, καθώς και η σχετική αποδοτικότητα του συστήματος, στα διάφορα σημεία μετάδοσης. Δηλαδή, εκτιμώνται

- η ισχύς ώσης που αποδίδει η έλικα ($THP_0 = TV_0$)

- η αντίστοιχη ροπή ($DHP_0 = 2\pi n Q_0$),
- η ισχύς ρυμούλκησης ($EHP = R_0 V$)

ενώ, ανάλογα την χρησιμοποιούμενη διάταξη, γνωστή μπορεί να είναι και η ισχύς που παράγει η προωστήρια εγκατάσταση SHP

και διάφοροι συντελεστές απόδοσης, συγκεκριμένα

- «βαθμός απόδοσης έλικας-πλοίου» $\eta_D = \frac{EHP}{DHP}$
 - η «απόδοση έλικας σε ελεύθερη ροή» $\eta_0 = \frac{THP_0}{DHP_0}$
 - ο «βαθμός απόδοσης γάστρας» $\eta_H = \frac{1-t}{1-w}$
 - ο «βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής» $\eta_R = \frac{Q_0}{Q}$
 - ο «βαθμός απόδοσης έλικας πίσω από το πλοίο» $\eta_B = \frac{THP_0}{DHP}$
 - ο «βαθμός απόδοσης άξονα» $\eta_S = \frac{DHP}{SHP}$
 - ο «συντελεστής πρόωσης», ο συνολικός δηλαδή βαθμός απόδοσης της εγκατάστασης
- $$P.C. = \frac{EHP}{SHP} = \eta_H \eta_0 \eta_R \eta_S$$

2.6. Ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας (wave cuts)

Η διαταραχή της ελεύθερης επιφάνειας προσφέρει στοιχεία στον υπολογισμό της υπόλοιπης αντίστασης του πλοίου, καθότι περιέχει πληροφορία για την ισχύ των παραγόμενων κυματισμών. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος wave cuts για την μέτρηση των κυματισμών, η οποία έγκειται στην τοποθέτηση σταθερών μετρητών (wave probes) γύρω από την διαδρομή του μοντέλου, σε διαφορετικές αποστάσεις από την γάστρα, ώστε να μπορεί να ελεγχθεί και η διάδοση του κυματισμού, εκτός από το ύψος.

3. Πειραματικό Μέρος

3.1. Γενικά

Τα όργανα σε κάθε πείραμα βαθμονομούνταν καθημερινά πριν την αρχή των πειραμάτων, ώστε να καθοριστούν οι συναρτήσεις μεταφοράς με την καλύτερη δυνατή ακρίβεια. Καθημερινά μετρούνταν επίσης η θερμοκρασία του νερού, με χρήση θερμομέτρου υδραργύρου, για τον καθορισμό της κινηματικής συνεκτικότητας του.

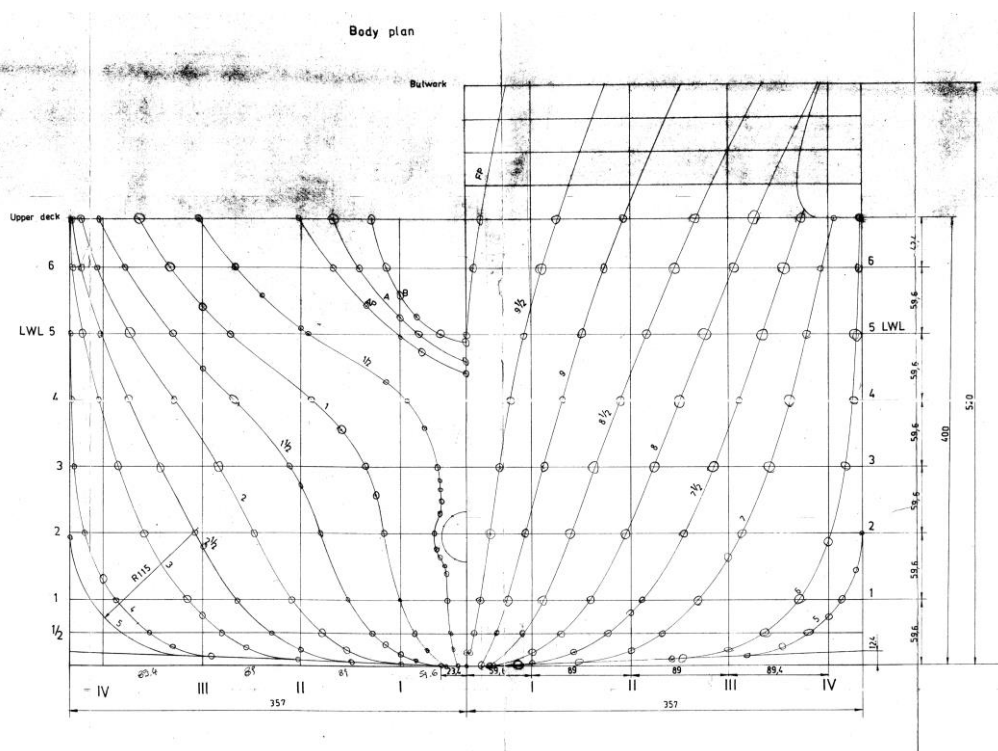
Στην έξοδο των ηλεκτρικών οργάνων τοποθετήθηκαν βαθυπερατά φίλτρα, ώστε να μειωθεί η επίδραση του θορύβου στα δεδομένα.

Στα πλαίσια της εργασίας κατασκευάστηκε και τρισδιάστατο ηλεκτρονικό σχέδιο του μοντέλου με βάση τα υπάρχοντα σχέδια και μετρήσεις της γάστρας. Αυτό δημιουργήθηκε για την διασταύρωση των στοιχείων με την χρήση προγραμμάτων CFD, με την προοπτική περαιτέρω έρευνας.

Όλοι οι πίνακες, τα διαγράμματα και σχετικά στοιχεία παρατίθενται συγκεντρωτικά στο παράρτημα, προς διευκόλυνση αναδρομής στα δεδομένα σε περαιτέρω διερεύνηση.

3.2. Το Μοντέλο

Για τις ανάγκες των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο ν. 001 του εργαστηρίου Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής, το οποίο είναι υπό κλίμακα ανακατασκευή πλοίου τύπου tanker, κατασκευασμένο από αλληπάλληλες στρώσεις ξύλου, συνδεδεμένες με υποξική ρητίνη. Ακολουθούν αναλυτικά τα χαρακτηριστικά της γάστρας και της έλικας, καθώς και ένας συγκεντρωτικός κατάλογος των οργάνων μέτρησης που χρησιμοποιήθηκαν.



Σχήμα 4.2.1: Γραμμές του μοντέλου ν001 του ΕΝΘΥ

Μήκος μεταξύ καθέτων, m	Lpp	5
Μήκος στην ίσαλο σχεδίασης, m	Lwl	5.139
Πλάτος, m	B	0.714
Βύθισμα, m	T	0.298
Κοίλο, m	D	0.4
Εκτόπισμα, m ³	V	0.612
Βρεχόμενη επιφάνεια στο βύθισμα σχεδίασης, m ²	S	4.492
Κυβικός συντελεστής	Cb	0.575
Πρισματικός συντελεστής	Cp	0.601
Συντελεστής μέσης τομής	Cm	0.956
Συντελεστής ίσαλου επιφάνειας	Cwl	0.756
Ακτίνα bilge, m		0.115
Σιμότητα, m		0.012
Σημείο εκκίνησης σιμότητας, m		0.023
Κλίμακα	λ	1:30
Υλικό κατασκευής		Ξύλο
Βάρος γάστρας, kg		169

Πίνακας 4.2.1: στοιχεία μοντέλου v001 ENΘΥ

Διάμετρος, m	D	0.21335
Λόγος βήματος (σταθερός)	P/D	0.9375
Λόγος ανηγμένης επιφάνειας	AE/A0	0.65
Αριθμός πτερυγίων	Z	6
Γωνία πρόσπτωσης πτερυγίου, μοίρες	Θ	10
Τύπος πτερυγίων		M.A.U.
Κατεύθυνση περιστροφής		Ωρολογιακά

Πίνακας 4.2.2: στοιχεία έλικας μοντέλου

Δυναμόμετρο αντίστασης	Kempf & Remmers R47
Δυναμόμετρο ροπής και ώσης	Kempf & Remmers H29
στροφόμετρο laser	HHT13, OMEGA Engineering
Μετρητές ύψους επιφάνειας	Churchill Control wave monitor

Πίνακας 4.2.3: όργανα μέτρησης

3.3. Επισκευή-Προετοιμασία

Πριν την εκκίνηση των πειραμάτων, πραγματοποιήθηκαν εργασίες επισκευής και συντήρησης στο μοντέλο, ενώ ολοκληρώθηκε και η κανονική προετοιμασία του για την τοποθέτηση του στην πιπίνα.

Συγκεκριμένα, η χρόνια χρήση είχε καταστρέψει σημαντικό μέρος της εξωτερικής επιφάνειας, με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν ρωγμές στο χρώμα και να εισχωρήσει νερό στο ξύλο. Για να επιδιορθωθεί, χρειαζόταν να αφαιρεθούν τα κατεστραμμένα τμήματα της γάστρας και να ξαναγεμισούν τα κενά, ώστε να αποκατασταθεί η λεία και σωστά σχηματισμένη εξωτερική επιφάνεια. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε πολυεστερικός στόκος, ενώ στη συνέχεια το μοντέλο ξαναβάφτηκε, χρησιμοποιώντας βαφή δύο στρώσεων: Ένα παχύτερο, μαλακό συγκριτικά στρώμα για βάση και προστασία από την υγρασία (αστάρι) και ένα λεπτότερο, λείο και σκληρότερο στρώμα για να δημιουργηθεί καλή εξωτερική επιφάνεια. Τέλος, σημειώθηκαν οι νομείς επί της γάστρας, καθώς και η ίσαλος πλευσης η οποία χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα.



Εικόνα 4.3.1: Το μοντέλο μετά τις επισκευές. Διακρίνονται η ίσαλος και οι νομείς.

Μετά το πέρας των επισκευών, έγινε η προετοιμασία του μοντέλου για τις πειραματικές διαδικασίες, τοποθετώντας εντός του τα απαραίτητα για την διεξαγωγή τους. Τα βήματα για αυτό ήταν τα εξής:

Εγκαταστάθηκε εντός της γάστρας σύστημα πρόωσης (ηλεκτρικός κινητήρας -άξονας) σε κατάλληλο σημείο, ευθυγραμμισμένο έτσι ώστε να μην υπάρχουν υπερβολικές διαταραχές κατά την περιστροφή του άξονα.



Εικόνα 4.3.2: Ευθυγράμμιση του δυναμόμετρου ροπής-ώσης με χρήση δέσμης λέιζερ.

Τοποθετήθηκε φρένο πάνω στο σκάφος το οποίο απέτρεπε την ελεύθερη κίνηση του, ώστε να παραλαμβάνει τις δυνάμεις κατά την επιτάχυνση και επιβράδυνση του μοντέλου στα πειράματα. Ο λόγος για αυτό είναι το μεγάλο εκτόπισμα του μοντέλου στην ίσαλο πλευσης (612kg), που οδηγεί σε δυνάμεις κατά την επιτάχυνση πολύ μεγαλύτερες των προδιαγραφών

των οργάνων μέτρησης. Το φρένο αυτό απομπλεκόταν για να γίνουν οι μετρήσεις, μετά την ανάπτυξη πλήρους ταχύτητας.

Για την μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής του άξονα κατά την διάρκεια των πειραμάτων αυτοπρόωσης, χρησιμοποιήθηκε οπτικός μετρητής (στροφόμετρο Laser, τύπου HHT13, OMEGA Engineering), ο οποίος ανιχνεύει την αντανάκλαση της δέσμης επί ειδικού ανακλαστήρα, που τοποθετείται στον άξονα. Ο αισθητήρας του εν λόγω οργάνου τοποθετήθηκε επάνω στο φρένο, σημείο από το οποίο υπάρχει καλή οπτική επαφή με τον άξονα.

Τέλος, προστέθηκαν βάρη αρκετά ώστε το συνολικό βάρος του μοντέλου να γίνει ίσο με το εκτόπισμα της ίσαλου πλευσης και κατανεμήθηκαν έτσι ώστε να πλέει ισοβύθιστο. Για το πρώτο συνυπολογίστηκαν τα βάρη των κινητήρων, των οργάνων καθώς και του πέλματος του βραχίονα που συνδέει το φορείο με το μοντέλο. Το δεύτερο επιτεύχθηκε τοποθετώντας το μοντέλο στην πισίνα και μετακινώντας βάρη έως ότου ευθυγραμμιστούν με την επιφάνεια του νερού τα σημάδια της ισάλου πάνω στη γάστρα.

3.4. Πείραμα Αντίστασης

Κατά τα πειράματα ρυμούλκησης του μοντέλου, μετρήθηκαν αντίσταση, γωνία διαγωγής (pitch) και βύθισμα (heave), για αριθμούς Froude από 0.16 έως 0.33, μετρούμενα στο βραχίονα σύνδεσης του φορείου με το μοντέλο, όπου και ήταν τοποθετημένα τα όργανα.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε δυναμόμετρο Kempf & Remmers, τύπου R47.

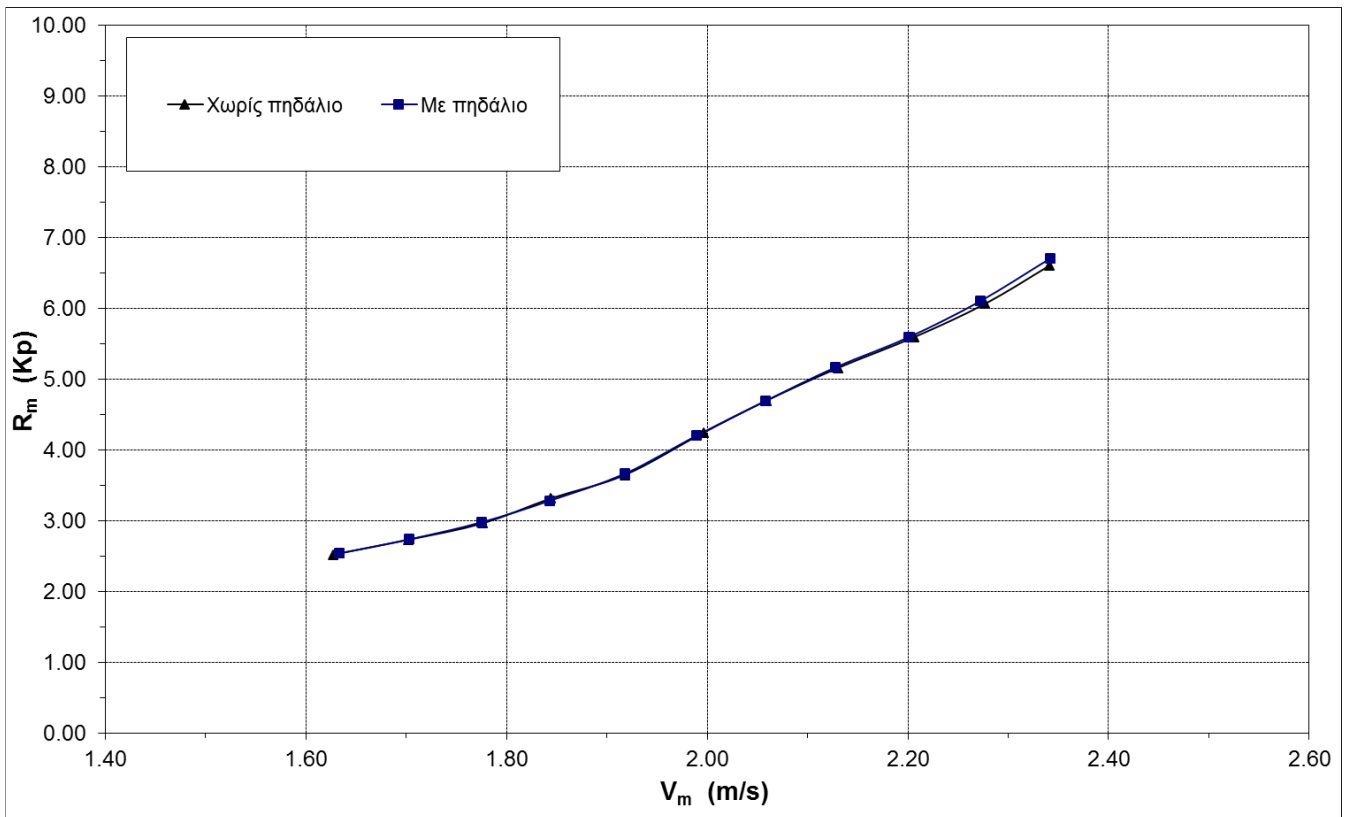
Στην αρχή κάθε ημέρας πειραμάτων γινόταν εκ νέου βαθμονόμηση των οργάνων και διόρθωση των συναρτήσεων μεταφοράς.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων αντίστασης επιβεβαιώθηκαν από πειραματικά δεδομένα προερχόμενα από εργαστήρια φοιτητών την περίοδο 2009-2011 στο εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής, καθώς και αναφορές πειραματικών αποτελεσμάτων από το «Bulgarian Ship Hydrodynamics Centre» στη Βάρνα, Βουλγαρία, όπου και κατασκευάστηκε το μοντέλο.

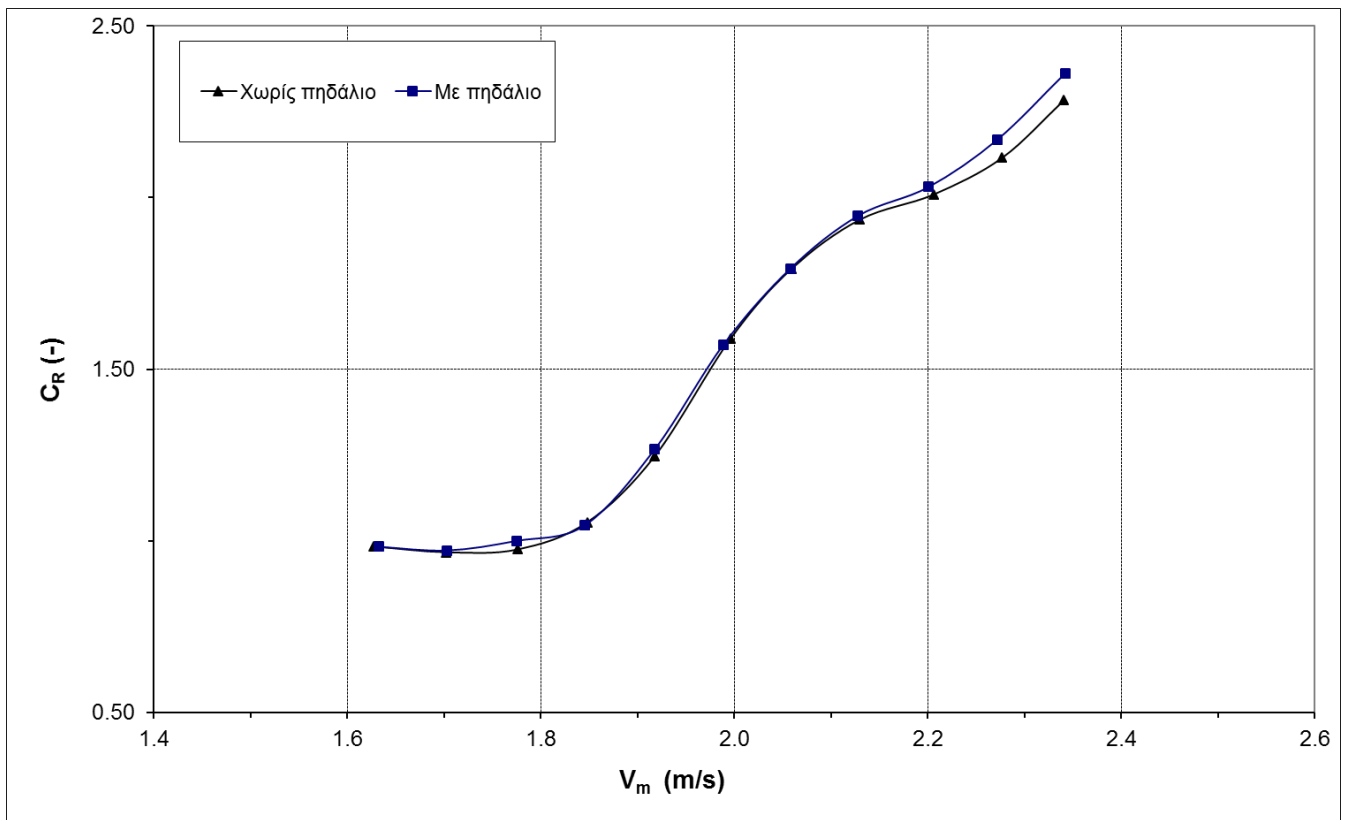
Παρατηρήθηκε, ότι μεταξύ αντίστασης γάστρας χωρίς και με πηδάλιο, υπάρχει αμελητέα διαφορά μεταξύ των 2 (της τάξης του 0,2%), για μικρές τιμές του αριθμού Froude, ενώ φτάνει το 1,5% για Froude 0,33. Η διαφορά γίνεται εντονότερη εάν κοιτάξει κανείς μόνο την υπόλοιπη αντίσταση, όπου έχουμε διαφορές 1,5% και 3,4% για αντίστοιχους αριθμούς Froude.



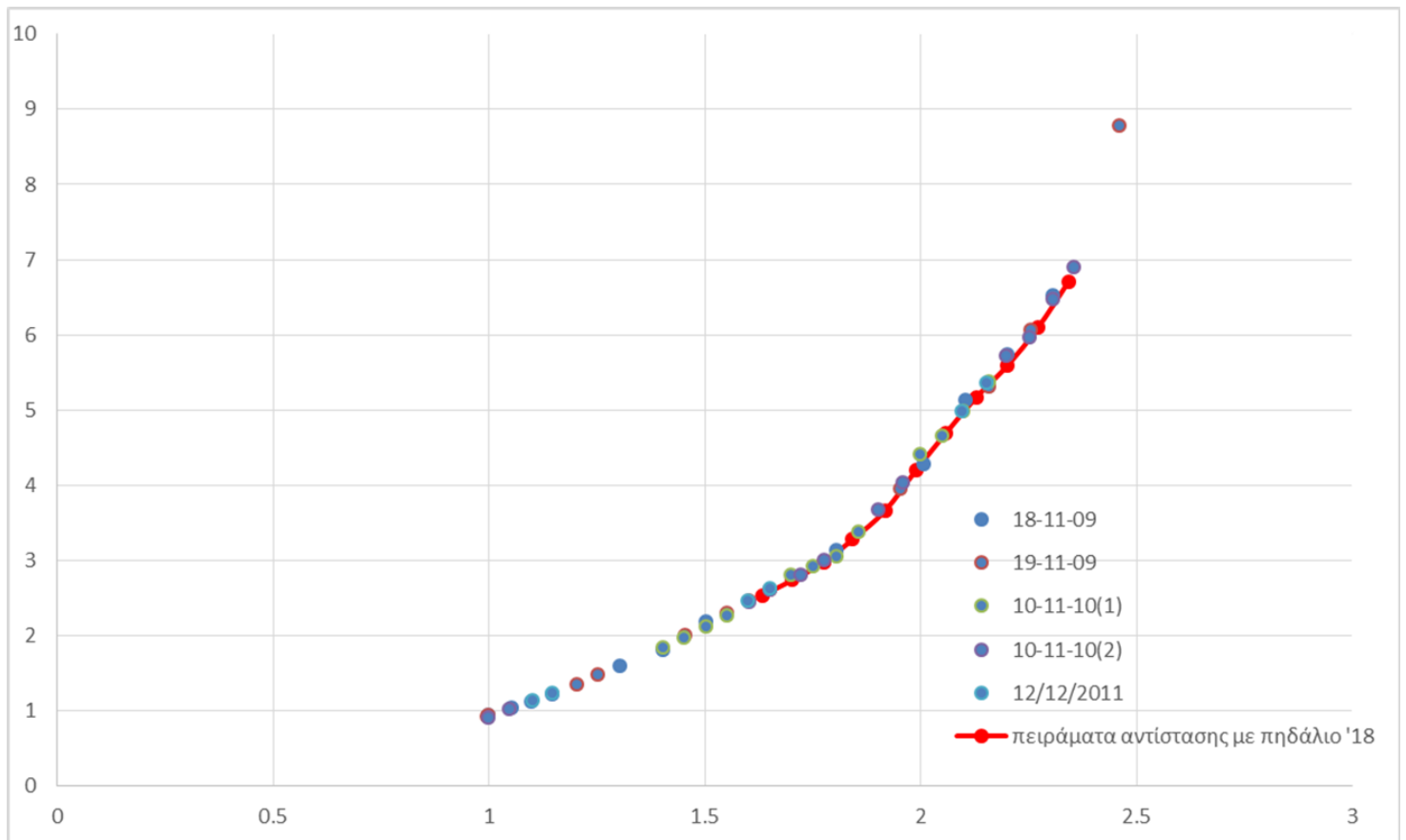
Εικόνα 4.4.1: Πειράματα αντίστασης. Στα δεξιά το δυναμόμετρο αντίστασης στο φορείο της δεξαμενής



Σχήμα 4.4.1: Αντίσταση μοντέλου



Σχήμα 4.4.2: Συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης μοντέλου

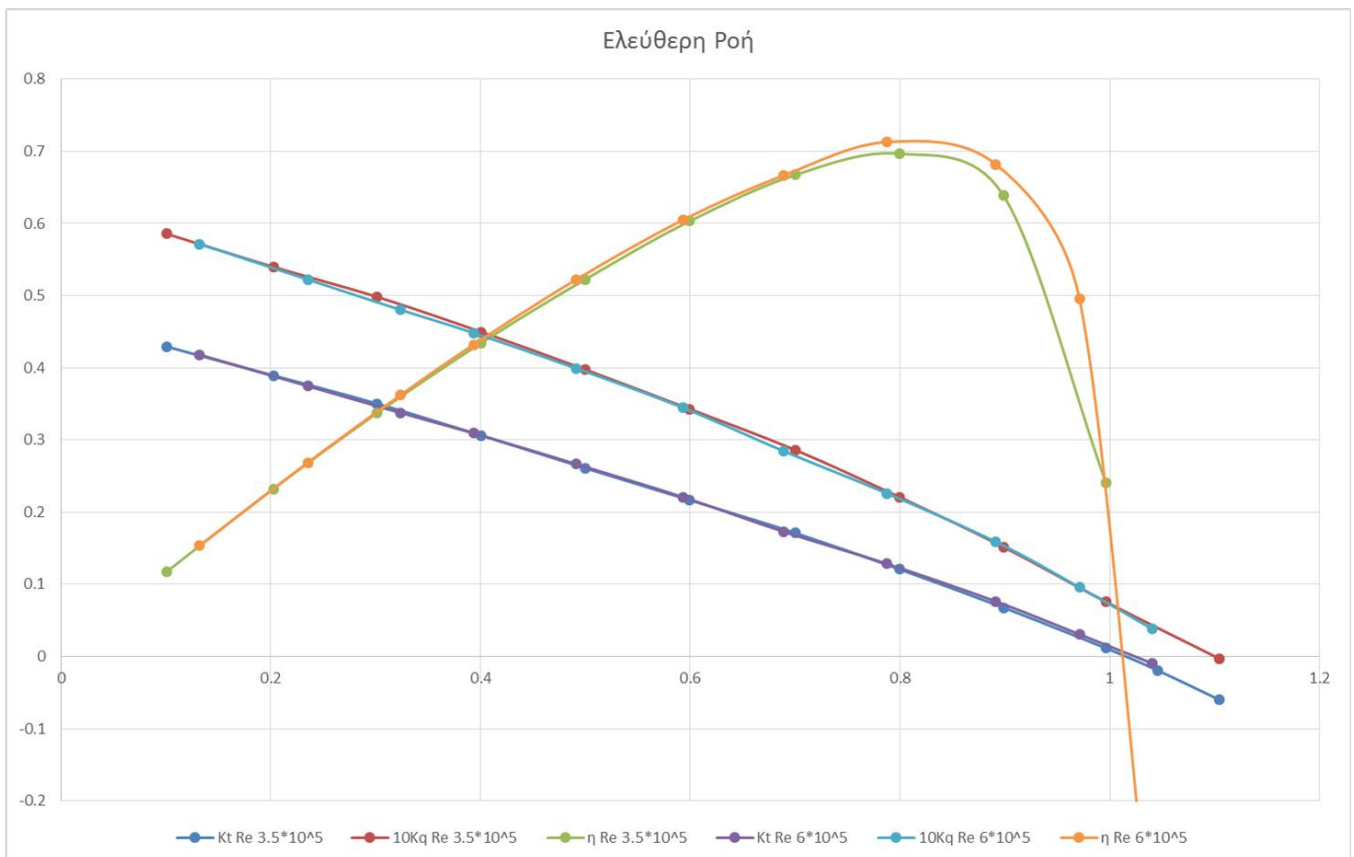


Σχήμα 4.4.3: Σύγκριση με παλαιότερα πειράματα αντίστασης (με πηδάλιο)

3.5 Έλικα σε ελεύθερη ροή

Τα πειράματα της έλικας σε ελεύθερη ροή εκτελέστηκαν για συντελεστή προχώρησης J από 0.1 έως 1.1, σε ολόκληρο δηλαδή το εύρος όπου έχει νόημα η εξέταση. Έγιναν δοκιμές για διάφορους αριθμούς Reynolds, αλλάζοντας κατάλληλα, τις στροφές και την ταχύτητα προχώρησης της έλικας, και επιβεβαιώθηκε πειραματικά η διαφορά στους συντελεστές ώσης και ροπής ανάμεσα σε χαμηλές και υψηλές τιμές του Reynolds.

Για την μέτρηση των μεγεθών, τοποθετήθηκε στο φορείο και βαθμονομήθηκε δυναμόμετρο ροπής και ώσης, τύπου Kempf & Remmers H29, ενώ οι στροφές και η ταχύτητα προχώρησης του φορείου ήταν γνωστές, καθ' ότι αποτελούν τις ανεξάρτητες μεταβλητές που καθορίζονται από το πείραμα, με τις υπόλοιπες (γεωμετρικά χαρακτηριστικά) να μπορούν να θεωρηθούν σταθερές εντός των πλαισίων του πειράματος.



Εικόνα 4.5.1: Διάγραμμα ελεύθερης ροής

3.6 Αυτοπρόωση πλοίου

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων αυτοπρόωσης, εξετάστηκε η συμπεριφορά του μοντέλου για δύο τιμές του αριθμού Froude:

- 0,25, σαν μία τιμή με σχετικά χαμηλή αντίσταση, επιλέχθηκε σαν ένα ρεαλιστικό σημείο για την αυτοπρόωση ενός πραγματικού πλοίου
- 0,32, σαν μία τιμή που βρίσκεται καθαρά μετά την περιοχή ραγδαίας αύξησης της υπόλοιπης αντίστασης (βλέπε πειράματα αντίστασης). Αυτή επιλέχθηκε ώστε να δημιουργηθεί μία σαφής εικόνα της επίδρασης των υψηλότερων ταχυτήτων στην διαφορά της αντίστασης λόγω του πηδαλίου.

Για την κίνηση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε ηλεκτροκινητήρας σε συνδυασμό με το ίδιο το φορείο. Έτσι, το DF (βλέπε θεωρητικό μέρος) μετρούνταν σαν η δύναμη που εφαρμόζει το φορείο στο μοντέλο, έτσι ώστε αυτό να κινείται με την καθορισμένη ταχύτητα, ενώ ο ηλεκτροκινητήρας παρείχε την ισχύ στην έλικα, δημιουργώντας έτσι την προς αναζήτηση ροπή και ώση.

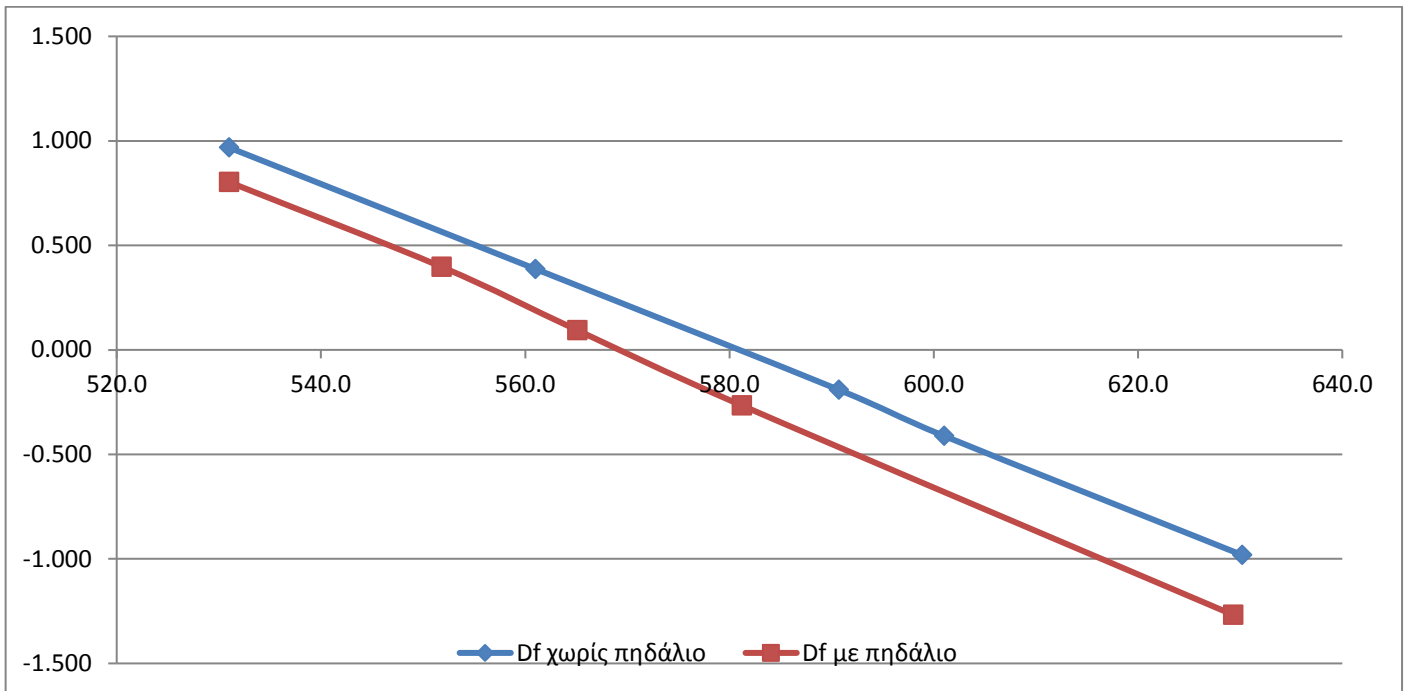
Για τις απαραίτητες μετρήσεις του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν:

- Δυναμόμετρο στον βραχίονα σύνδεσης του φορείου με το μοντέλο καθώς και όργανα μέτρησης βυθίσματος (heave) και γωνίας διαγωγής (pitch) (βλέπε πείραμα αντίστασης), ώστε να καθορίζεται το Df.
- Δυναμόμετρο ροπής και ώσης στον άξονα της έλικας, το οποίο βαθμονομήθηκε για δύναμη έως 25kg και ροπή έως 100kg*cm.
- στροφόμετρο οπτικού τύπου (laser)

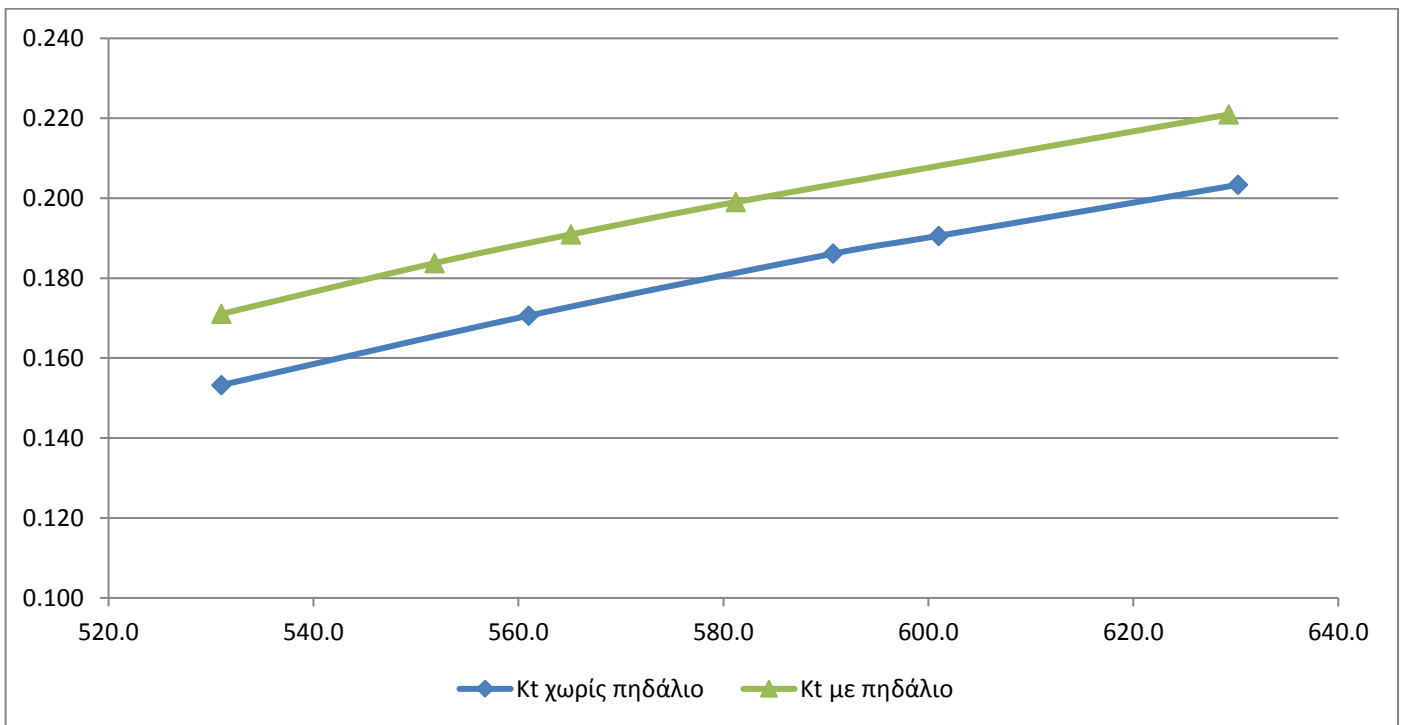


Εικόνα 4: Βαθμονόμηση δυναμόμετρου ροπής-ώσης.

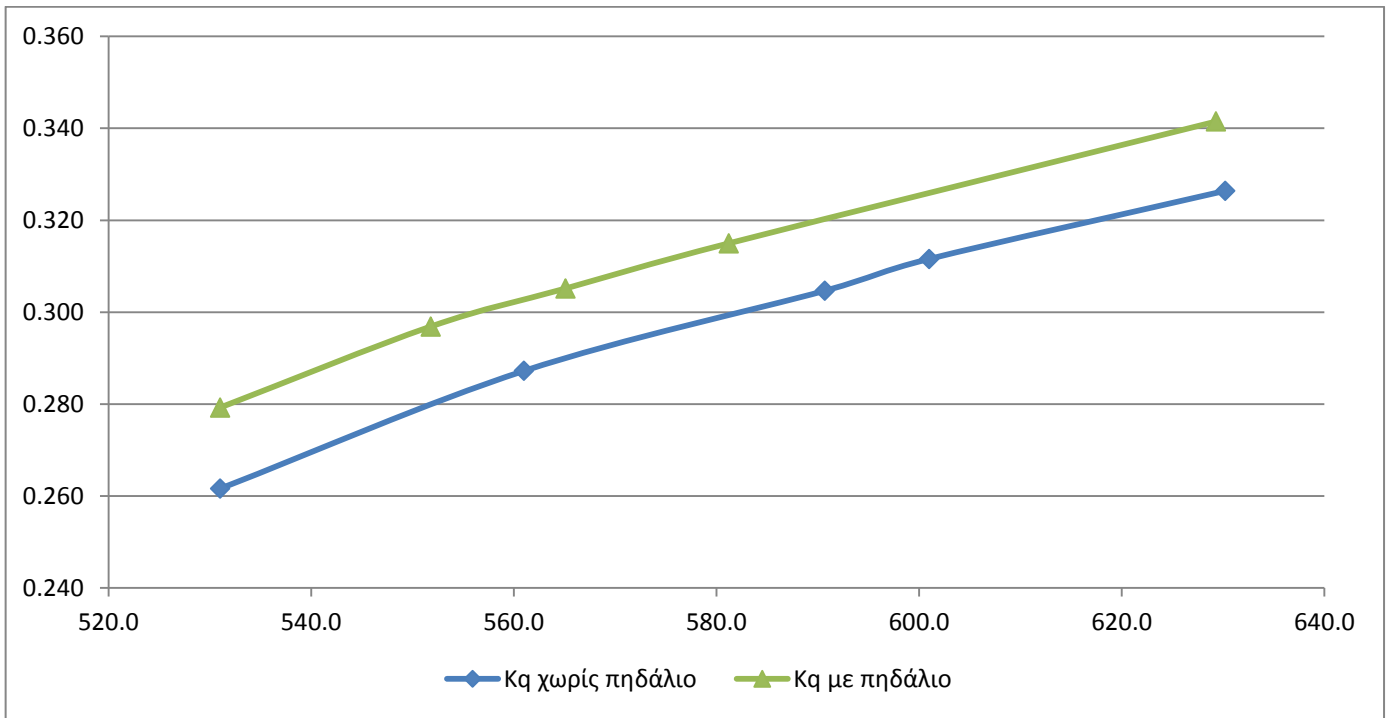
Ενδιαφέρον προκαλεί στα αποτελέσματα η διαπίστωση ότι το σημείο αυτοπρόωσης του μοντέλου μοιάζει να μειώνεται, με την προσθήκη του πηδαλίου. Αντίθετα, οι συντελεστές ροπής και ώσης είναι υψηλότεροι.



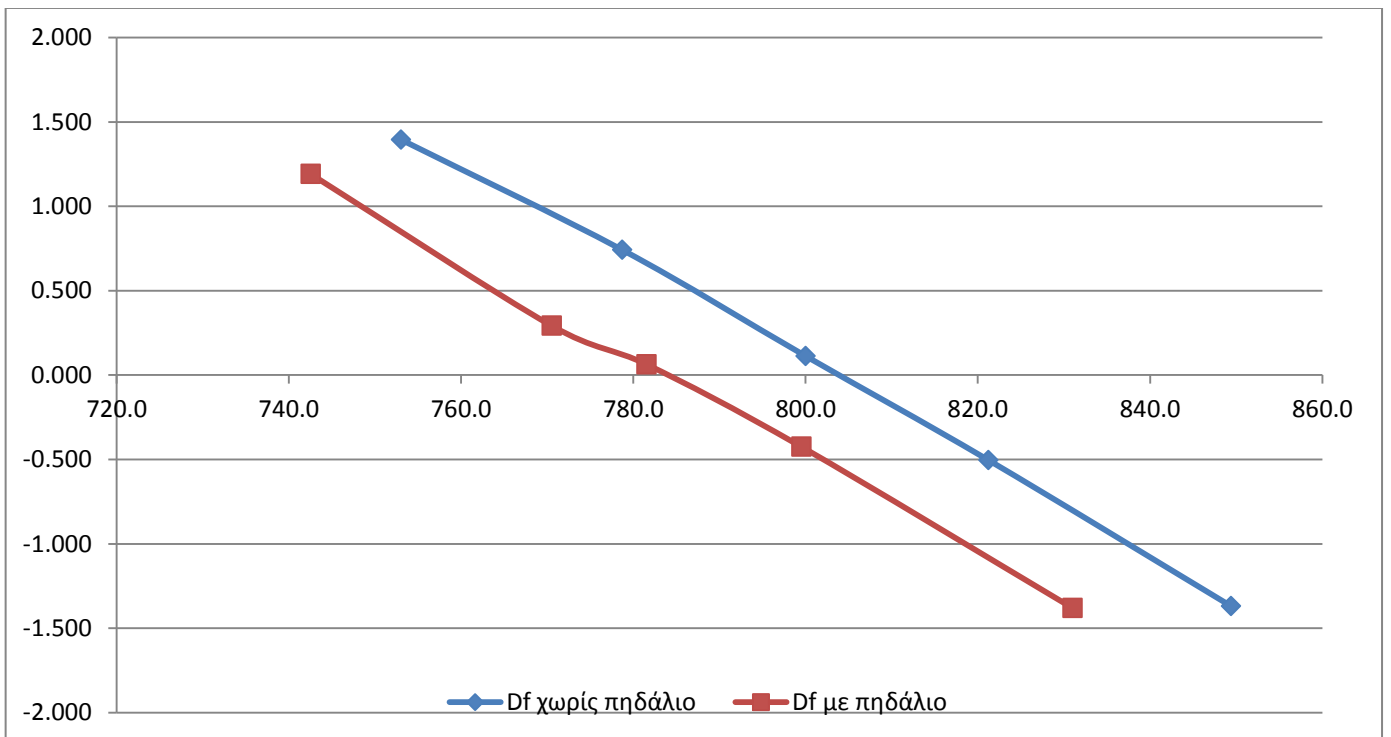
Σχήμα 4.6.1: Δύναμη στον βραχίονα του φορείου, $Fn=0.25$



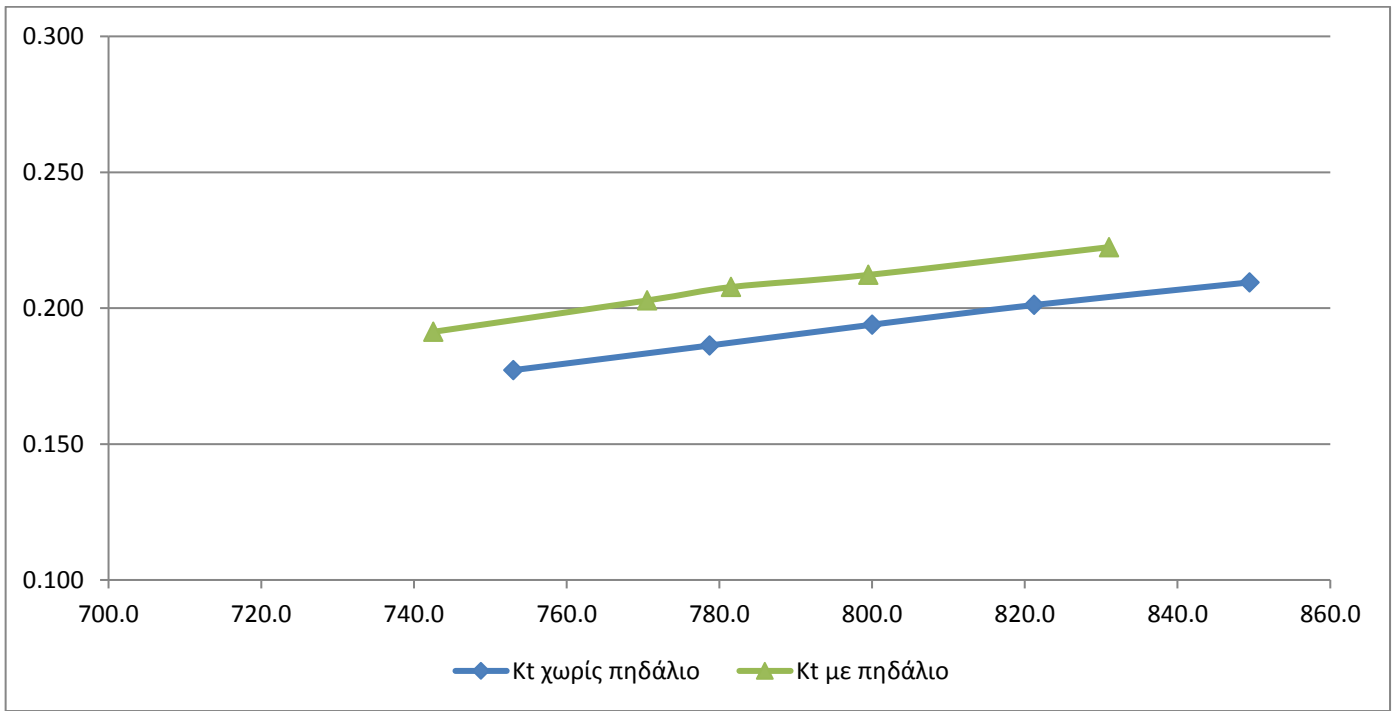
Σχήμα 4.6.2: συντελεστής ώσης κατά την αυτοπρόωση, $Fn=0.25$



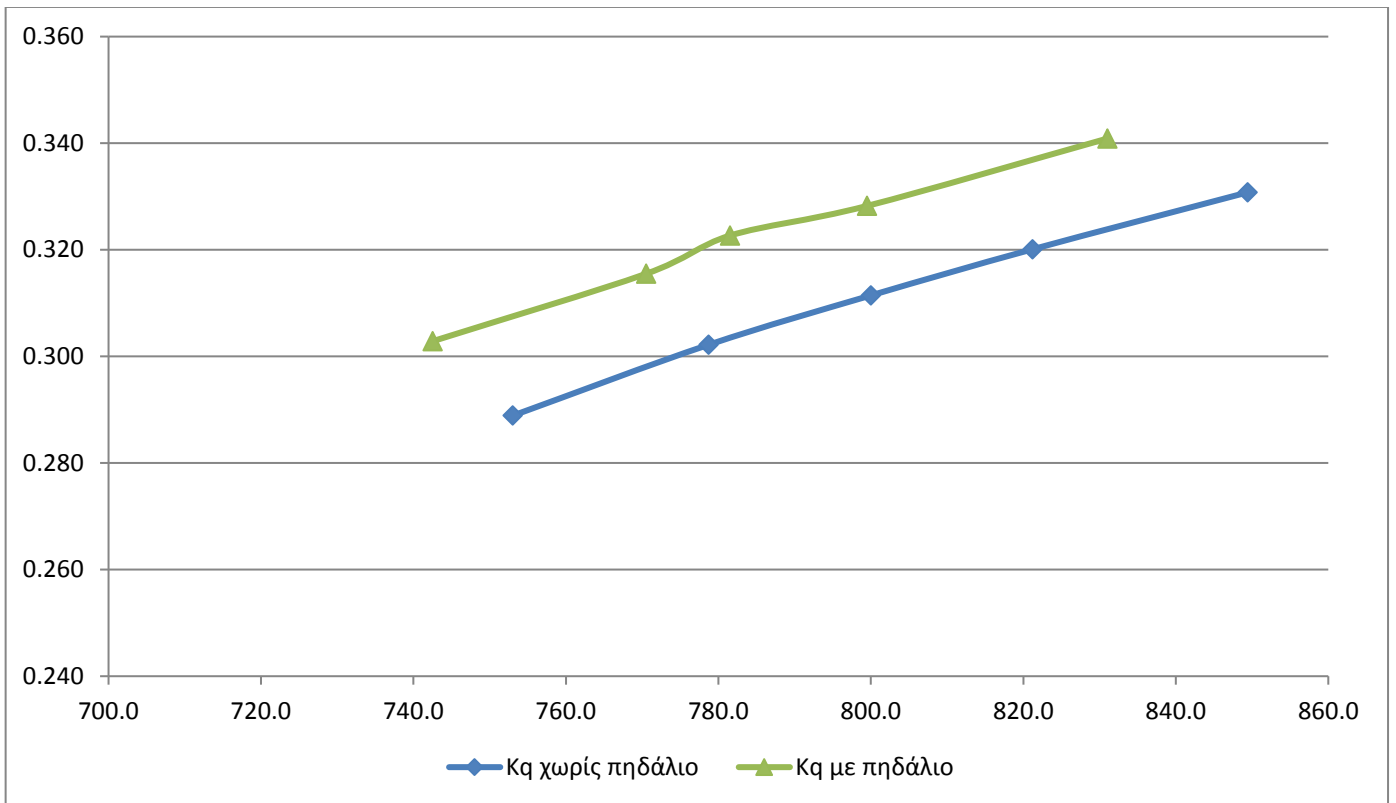
Σχήμα 4.6.3: συντελεστής ροπής κατά την αυτοπρόωση, $F_n=0,25$



Σχήμα 4.6.4: Δύναμη στον βραχίονα του φορείου, $F_n=0.32$



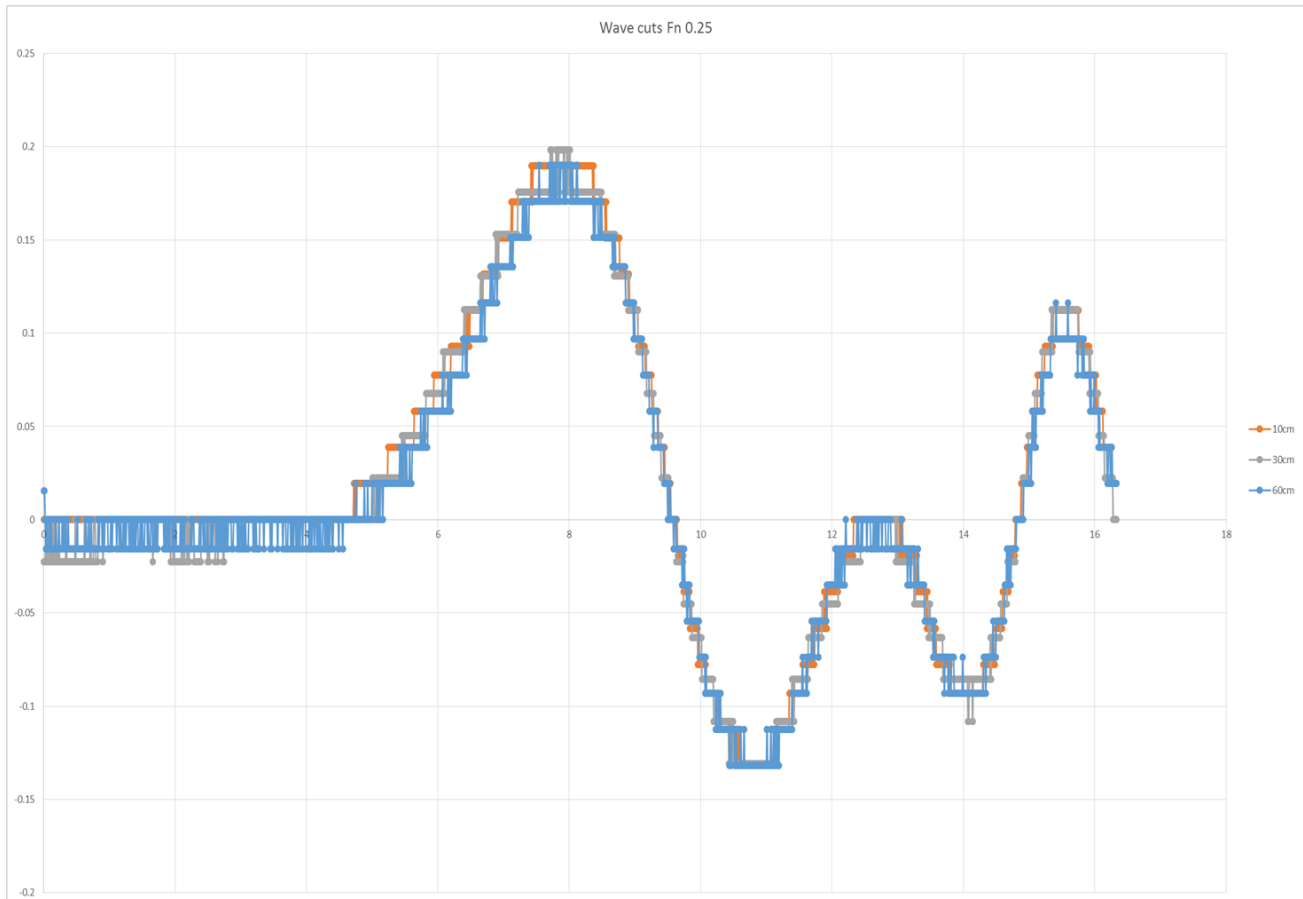
Σχήμα 4.6.5: συντελεστής ώσης κατά την αυτοπρόωση, $Fn=0.32$



Σχήμα 4.6.6: συντελεστής ροπής κατά την αυτοπρόωση, $Fn=0,32$

3.7 Ύψος ελεύθερης επιφάνειας

Για την μέτρηση του ύψους κυματισμών, χρησιμοποιήθηκαν ανιχνευτές στάθμης αντίστασης συνδεδεμένοι σε όργανο μέτρησης (Churchill Control wave monitor), τοποθετημένοι πάνω σε πρόβολο, εγκατεστημένο στην πισίνα, καταγράφοντας τρία διαφορετικά σημεία, σε απόσταση 100, 300 και 600mm από το μέγιστο ημιπλάτος της γάστρας. Έτσι καταστάθηκε δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων και για την διάδοση του κύματος, πέρα από την ανάπτυξη του στο πεδίο του χρόνου. Τα αποτελέσματα στοχεύουν κυρίως στην συμβολή στις υπολογιστικές μεθόδους και δεν θα αναλυθούν περαιτέρω στα πλαίσια αυτής της εργασίας.



Εικόνα 4.7.1: Wave Cuts, $Fn=0.25$

4. Ανάλυση-Συμπεράσματα

4.1 Παρατηρήσεις

Τα αποτελέσματα που παράχθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων παρουσιάζουν ενδιαφέρον σε αρκετά σημεία. Παρατίθεται καταρχήν μία συνοπτική παρουσίαση των στοιχείων αυτών, τα οποία θεωρήθηκαν σημαντικά και στη συνέχεια θα συζητηθεί η φυσική τους σημασία.

Παρατηρήθηκε λοιπόν ότι:

- Η επίδραση του πηδαλίου στην αντίσταση ρυμουλκούμενου πλοίου φαίνεται να αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας, και επομένως του αριθμού Froude, ενώ η διαφορά που επιφέρει το πηδάλιο είναι εντονότερη (σε ποσοστό) εάν κανείς μελετήσει μόνο την υπόλοιπη αντίσταση, αγνοώντας την αντίσταση τριβής (1,6% για την ολική αντίσταση έναντι 3,4% για τον συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης, για Froude ίσο με 0,33).
- Η αύξηση της ώσης για το αυτοπροωθούμενο πλοίο μετά την προσθήκη του πηδαλίου κυμαίνεται σε υψηλότερα επίπεδα με την αύξηση της αντίστασης για το ρυμουλκούμενο πλοίο, της τάξης του 10% (διαφορά 10-11% για Froude 0,25 και 9-10% για 0,32)
- Το σημείο αυτοπρόωσης βρίσκεται σε χαμηλότερες στροφές, μετά την προσθήκη του πηδαλίου, για δεδομένη ταχύτητα (διαφορά της τάξης του 1,9% για αριθμό Froude 0.25 και 2,9% για Froude 0.32), ενώ οι συντελεστές ροπής και ώσης αυξάνονται (διαφορά 5,1% και 6,6% για την ροπή και ώση αντίστοιχα σε Froude 0.25, ενώ για Froude 0.32 τα ίδια νούμερα είναι 4% και 6,2%)
- Τα ποσοστά ομόρρου και μείωσης ώσης παρουσιάζουν σημαντικές αλλαγές με την προσθήκη του πηδαλίου, εμφανίζοντας, για το ομόρρου, αύξηση της τάξης του 12% και 25% για αριθμό Froude 0,25 και 0,32 αντίστοιχα. Το ποσοστό μείωσης ώσης, αντίθετα, μοιάζει να αυξάνεται κατά 7% για Froude 0,25 και να μειώνεται κατά 4% για Froude 0,32
- Η απαιτούμενη ισχύς για την αυτοπρόωση του πλοίου παραμένει, σε κάθε περίπτωση, μεγαλύτερη μετά την προσθήκη του πηδαλίου στη γάστρα.
- Ο συντελεστής απόδοσης σχετικής περιστροφής έλικας αυξάνεται στην κατάσταση με πηδάλιο.

4.2 Ανάλυση

Ξεκινώντας με την επίδραση του πηδαλίου στην αντίσταση ρυμούλκησης του πλοίου, είναι σαφές ότι η επιφάνεια του, και άρα και η αντίσταση επίπεδης πλάκας (τριβής) που προκαλεί, είναι τάξεις μεγέθους μικρότερη από αυτήν της γάστρας. Αντίθετα, η συγκριτικά μεγαλύτερη αύξηση του συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης υποδηλώνει ότι η ροή γύρω από την πρύμνη επηρεάζεται σημαντικά από το πηδάλιο. Για μικρούς αριθμούς Froude, η επίδραση είναι σχετικά μικρή έως αμελητέα (στην περιοχή 0-1% για Froude μικρότερους του 0,3), κάτι που υποδεικνύει την αντίσταση κυματισμών σαν πρωταρχικό παράγοντα που επηρεάζεται από το πηδάλιο.

Η παραπάνω υπόθεση συμβαδίζει με την δεύτερη παρατήρηση. Η προσθήκη της περιστρεφόμενης έλικας στο αυτοπροωθούμενο πλοίο σημαίνει εντονότερες ροές γύρω από την πρύμνη ακόμα και σε χαμηλές ταχύτητες μοντέλου, κάτι που θα αύξανε την αντίσταση

λόγω του πηδαλίου, εάν είναι οι αλλαγές στην ροή που αυτό προκαλεί ο κυρίαρχος παράγοντας αύξησης των απαιτήσεων σε ώση.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον προκαλεί η αλλαγή προς λιγότερες στροφές του σημείου αυτοπρώωσης, μετά την προσθήκη του πηδαλίου. Όπως σημειώθηκε παραπάνω, η απαιτούμενη ώση για δεδομένη ταχύτητα φαίνεται μεγαλύτερη στην γάστρα με πηδάλιο, παρά σε αυτήν χωρίς. Λιγότερες στροφές για μεγαλύτερη ώση θα σήμαινε μεγαλύτερη απόδοση της έλικας παρά την διατάραξη της ροής που δημιουργεί το πηδάλιο, ή ίσως ακριβώς λόγω αυτής. Το φαινομενικό παράδοξο αυτό μπορεί να εξηγηθεί, αν αναρωτηθούμε ποια η επίδραση της ταχύτητας του νερού στην απόδοση της έλικας. Μεγαλύτερη σχετική ταχύτητα μεταξύ των δύο σημαίνει μικρότερη απόδοση έλικας, καθώς η ισχύς που αποδίδει αυτή στο νερό μειώνεται, όταν το υγρό κινείται ήδη με μεγαλύτερη ταχύτητα προς την κατεύθυνση στην οποία αυτή το προωθεί. Ανάποδα, εάν το πηδάλιο αυξάνει τον ομόρρο του πλοίου, μειώνοντας την σχετική ταχύτητα έλικας-νερού, αυτό σημαίνει αύξηση της απόδοσης της έλικας, ακόμα και αν συνολικά η απαίτηση ισχύος για δεδομένη ταχύτητα είναι μεγαλύτερη, κάτι που είναι λογικό όταν προστίθεται ένα στοιχείο το οποίο διαταράσσει περαιτέρω τη ροή γύρω από την πρύμνη. Οι παρατηρήσεις αυτές συμβαδίζουν με την κίνηση του βαθμού απόδοσης σχετικής περιστροφής η_R , αν και η αξιοπιστία της συγκεκριμένης μετρικής είναι αμφίβολη.

Μελετώντας την θέση του πηδαλίου και την ροή τριγύρω από αυτό, μπορούμε να πούμε ότι η σχετική ταχύτητα πηδαλίου-νερού καθορίζεται από δύο βασικές συνιστώσες: την ταχύτητα $V=V_s(1-w)$ του ομόρρου του πλοίου και την ταχύτητα V_p που προσδίδει στο νερό η έλικα (Οι παραπάνω ταχύτητες αποτελούν στατιστικούς μέσους όρους, καθώς βρισκόμαστε σε πεδίο αποκολλημένης ροής και άρα η κίνηση ενός σημείου στο υγρό δεν θα υπακούει απαραίτητα στις επιβολές των παραπάνω παραμέτρων). Οι ταχύτητες αυτές, θα δημιουργούν τάσεις αντίστασης στο πηδάλιο. Κατ' αναλογία με την ανάλυση που έγινε για την αντίσταση πλοίου, θα θεωρήσουμε συνιστώσες αντίστασης λόγω τριβής και μορφής. Οι δυνάμεις αυτές θα έχουν και οι δύο φορά προς την πρύμνη του πλοίου, και λόγω συνεκτικότητας του ρευστού θα δημιουργούν ένα πεδίο δυνάμεων γύρω από το πηδάλιο, πάντα προς εκείνη την κατεύθυνση. Η αύξηση της πίεσης στην περιοχή αυτή θα μειώνει την ταχύτητα του ρευστού, δημιουργώντας έτσι τις συνθήκες για την αύξηση του βαθμού απόδοσης, όπως περιγράφεται παραπάνω.

Μια άλλη πιθανή συνιστώσα του προβλήματος είναι η επιρροή του σώματος του πηδαλίου στις λεγόμενες γραμμές ροής πίσω από τη γάστρα. Η λειτουργία της έλικας δημιουργεί πίσω από το πλοίο μία περιστροφική κίνηση του νερού, η οποία διασπάται από την ύπαρξη ενός στέρεου σώματος. Εάν η διάσπαση αυτή στρέφει τα διανύσματα των ταχυτήτων προς την αντίθετη κατεύθυνση της κίνησης του πλοίου, η ενέργεια η οποία εναποτίθεται στο νερό μέσω της έλικας θα αξιοποιείται καλύτερα για την πρόωση του πλοίου, παρουσιάζοντας έτσι αύξηση της απόδοσης.

Τα παραπάνω παρατίθενται όχι σαν εξακριβωμένες θεωρίες, αλλά σαν εικασίες με βάση τα αποτελέσματα, όπως αυτά παρουσιάζονται παραπάνω.

Σε ότι αφορά τον βαθμό απόδοσης σχετικής περιστροφής και το ποσοστό μείωσης ώσης, περαιτέρω διερεύνηση είναι απαραίτητη πριν μπορέσει κανείς να αποφανθεί για τις επιδράσεις του πηδαλίου επ' αυτών. Αυτό επειδή οι διακυμάνσεις στα αποτελέσματα (τόσο της παρούσας εργασίας όσο και των πειραμάτων που χρησιμοποιήθηκαν ως σημείο αναφοράς) είναι τόσο μεγάλες, ώστε αυτά δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα χωρίς την απαραίτητη ανάλυση του εύρους σφάλματος και την επανάληψη προς εξακρίβωση και επιβεβαίωση των μεγεθών που προκύπτουν.

4.3 Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Βασιζόμενοι στα αποτελέσματα τόσο της παρούσας εργασίας, όσο και των παρατηρήσεων που προέκυψαν στην ανάπτυξη των υπολογιστικών εργαλείων (CFD) αλλά και διπλωματικών εργασιών που έγιναν παράλληλα με την παρούσα, μπορούμε να θεωρήσουμε με μία σχετική ασφάλεια την πραγματικότητα των παρατηρήσεων μας. Προκύπτει επομένως η ανάγκη διασαφήνισης και εξακρίβωσης τους, καθώς και ανάδειξης των σημείων που δεν καλύπτονται ικανοποιητικά με τα στοιχεία που αυτή τη στιγμή βρίσκονται στα χέρια μας.

Προϋπόθεση για την ισχυροποίηση και επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων είναι η επανάληψη, ιδανικά σε διαφορετικές εγκαταστάσεις από αυτές στις οποίες διεξήχθησαν τα τωρινά πειράματα, ώστε να απομακρυνθεί η πιθανότητα λάθους λόγω εσφαλμένης εργαστηριακής πρακτικής. Το παραπάνω βέβαια αποτελεί και πάγια πρακτική της επιστημονικής κοινότητας και μεθόδου, επομένως δε θα αναλυθεί περαιτέρω.

Στοιχείο το οποίο εκλείπει από την εργασία αυτή, λόγω του περιορισμένου της χαρακτήρα, είναι ο καθορισμός του σφάλματος των διαδικασιών και της ακρίβειας των μετρήσεων (uncertainty analysis). Μετρικές όπως οι διάφοροι συντελεστές απόδοσης της έλικας και το ποσοστό μείωσης ώσης δεν μπορούν να θεωρηθούν πλήρως εξερευνημένες, καθ' ότι είναι υπερβολικά ευαίσθητες σε υπερβολικά πολλούς συντελεστές, για να αρκούν οι επαναλήψεις που πραγματοποιήθηκαν εδώ για την εξακρίβωση τους. Ένα σύνολο παραμέτρων που θα περιλάμβανε περισσότερες μεταβλητές υπόψιν του, όπως π.χ. την απόσταση έλικας-πηδαλίου, θα καθόριζε με πιο αυστηρό τρόπο την όλη διαδικασία και θα μπορούσε ίσως να αποδώσει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Ένα πεδίο το οποίο δεν εξερευνήθηκε καθόλου ήταν επίσης η επίδραση της γωνίας και της μορφής του πηδαλίου στα παραπάνω μετρούμενα μεγέθη. Ένα πηδάλιο υπό γωνία όχι μόνο δημιουργεί περαιτέρω διαταραχές στη ροή του νερού γύρω από την πρύμνη, αλλά προκαλεί και ασύμμετρες φορτίσεις και πιέσεις σε αυτήν, κάτι που σίγουρα επηρεάζει τον ομόρρου και άλλα βασικά χαρακτηριστικά του αυτοπροωθούμενου πλοίου.

Η μορφή του πηδαλίου φαίνεται εύλογο να αποτελεί παράγοντα στις μεταβολές της αντίστασης. Όπως περιγράφηκε παραπάνω, η προσθήκη του πηδαλίου φαίνεται να έχει μεγάλη επίδραση στην μορφή της ροής πίσω από την γάστρα, και το σχήμα και μέγεθος του είναι άμεσα συνδεδεμένα με την αντίσταση που αυτό θα προβάλλει, καθώς και την αλλαγή στις ταχύτητες και κατευθύνσεις του νερού γύρω από αυτό. Η επανάληψη των πειραμάτων με διάφορα πηδάλια θα επέτρεπε ενδεχομένως την αποσύζευξη των διαφόρων συνιστωσών αντίστασης, και η παρατήρηση και μέτρηση της ροής γύρω από αυτό, μπορεί να δώσει περισσότερες πληροφορίες για την δεύτερη υπόθεση που παρουσιάστηκε στο τμήμα της ανάλυσης, αυτήν της επιρροής λόγω αλλαγής των γραμμών ροής.

5. Παράρτημα

5.1 Αντίσταση

Χωρίς πηδάλιο

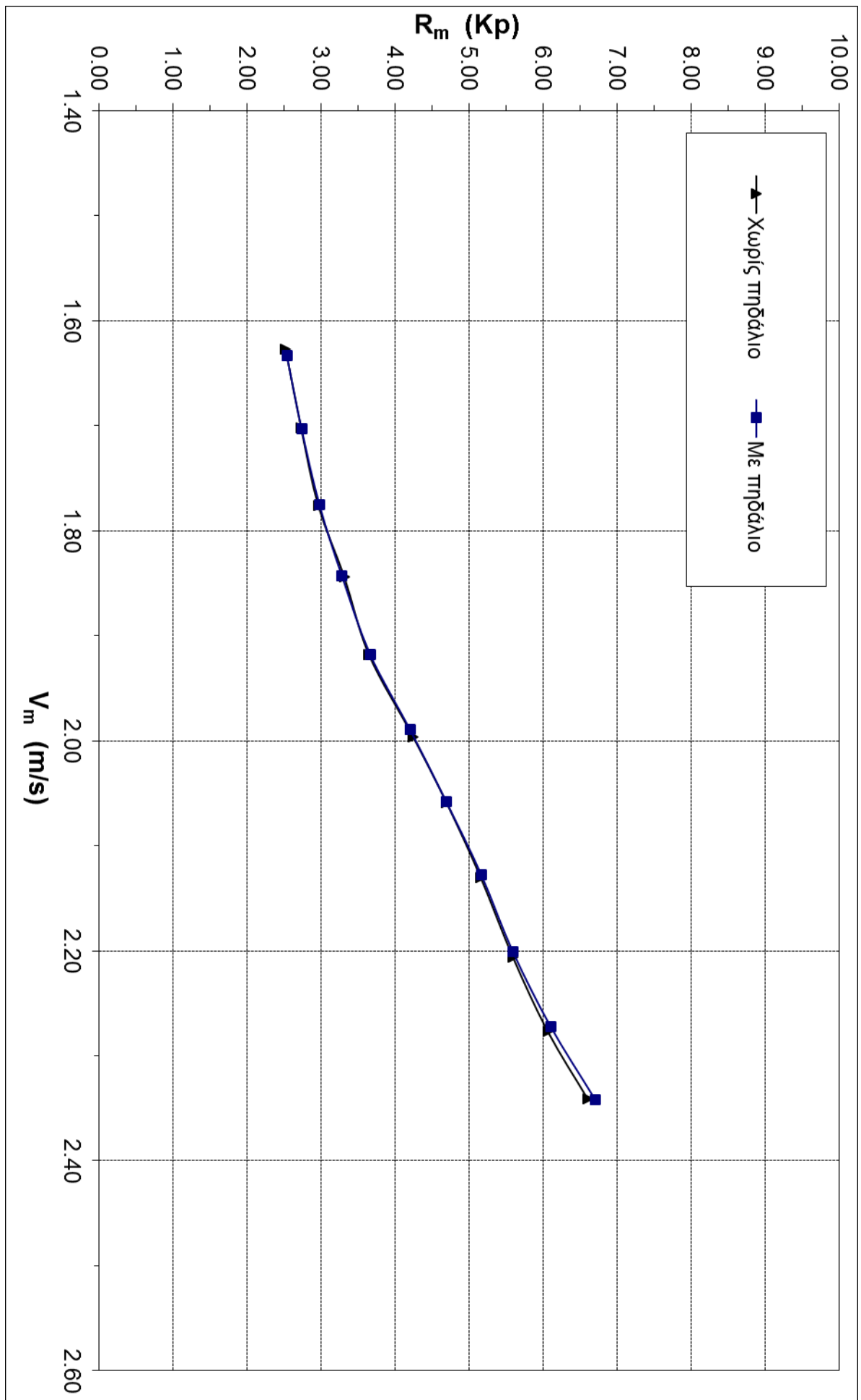
Vm	Rm	pitch	heave	Cr
m/s	kp	deg	cm	
1.627	2.521	0.025	-0.981	0.984
1.702	2.731	0.035	-1.067	0.967
1.776	2.962	0.032	-1.168	0.975
1.844	3.314	0.030	-1.282	1.054
1.918	3.648	0.016	-1.455	1.247
1.996	4.242	-0.002	-1.587	1.588
2.059	4.696	-0.014	-1.692	1.792
2.130	5.156	-0.021	-1.847	1.936
2.206	5.591	-0.025	-2.016	2.009
2.277	6.064	-0.028	-2.135	2.116
2.341	6.602	-0.041	-2.349	2.284

Με πηδάλιο

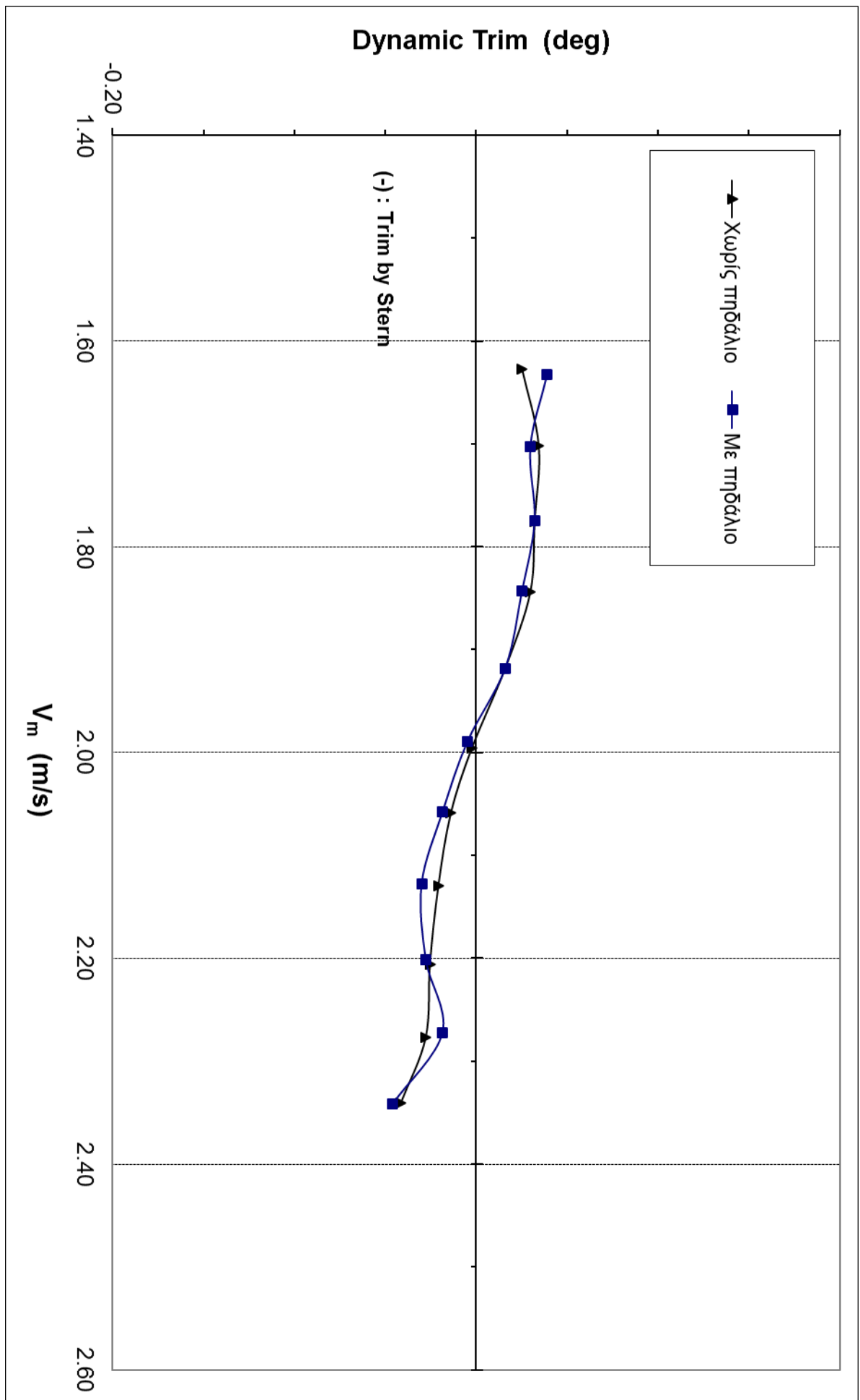
Vmr	Rmr	pitch	heave	Crr
m/s	kp	deg	cm	
1.633	2.538	-0.039	-0.976	0.983
1.703	2.737	-0.030	-1.076	0.972
1.775	2.977	-0.032	-1.186	0.99
1.843	3.282	-0.025	-1.263	1.046
1.918	3.665	-0.016	-1.419	1.267
1.989	4.200	0.005	-1.564	1.572
2.058	4.692	0.018	-1.697	1.793
2.128	5.168	0.030	-1.852	1.947
2.201	5.592	0.028	-2.011	2.031
2.272	6.101	0.018	-2.162	2.169
2.342	6.706	0.046	-2.313	2.362

Συγκριτικά

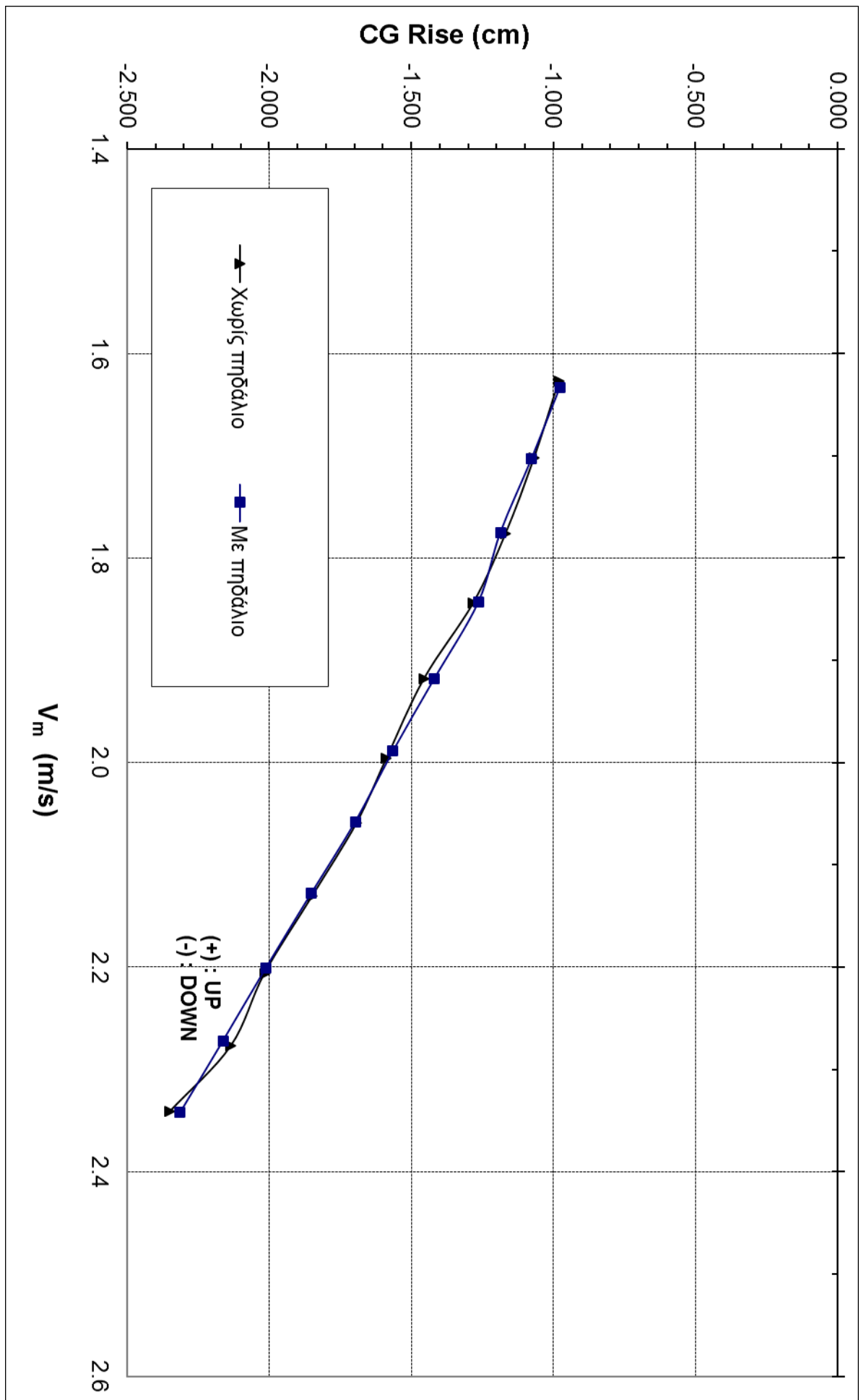
Rmr/Rm	Crr/Cr	
1.005	0.999	
1.002	1.005	
1.005	1.015	
0.997	0.994	
1.005	1.016	
0.994	0.993	
0.999	1.000	
1.000	1.006	
1.000	1.011	
1.006	1.025	
1.016	1.034	



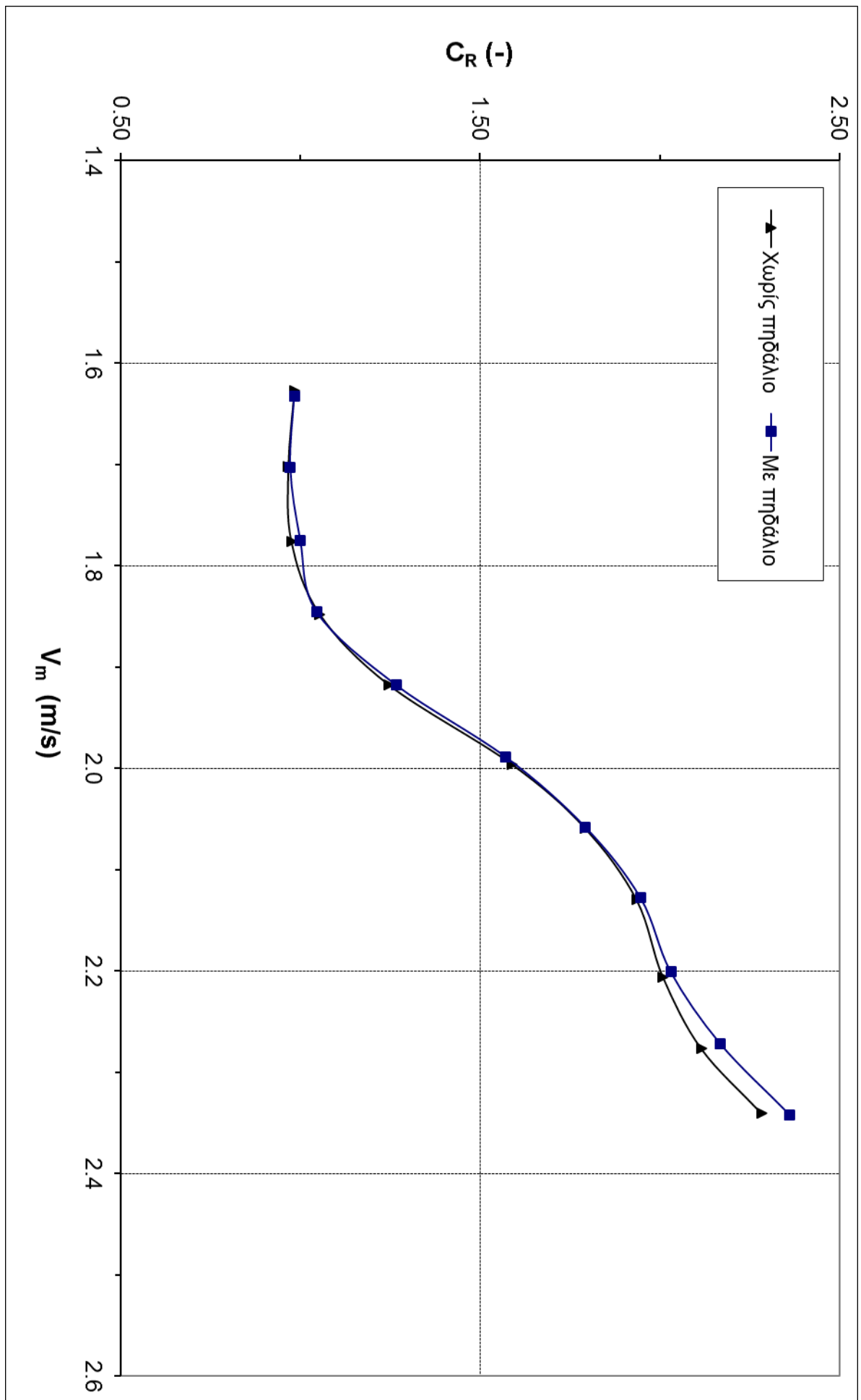
Σχήμα 1: Αντίσταση μοντέλου



Σχήμα 2: διαγωγή μοντέλου κατά τα πειράματα αντίστασης



Σχήμα 3: Βύθιση μοντέλου κατά τα πειράματα αντίστασης

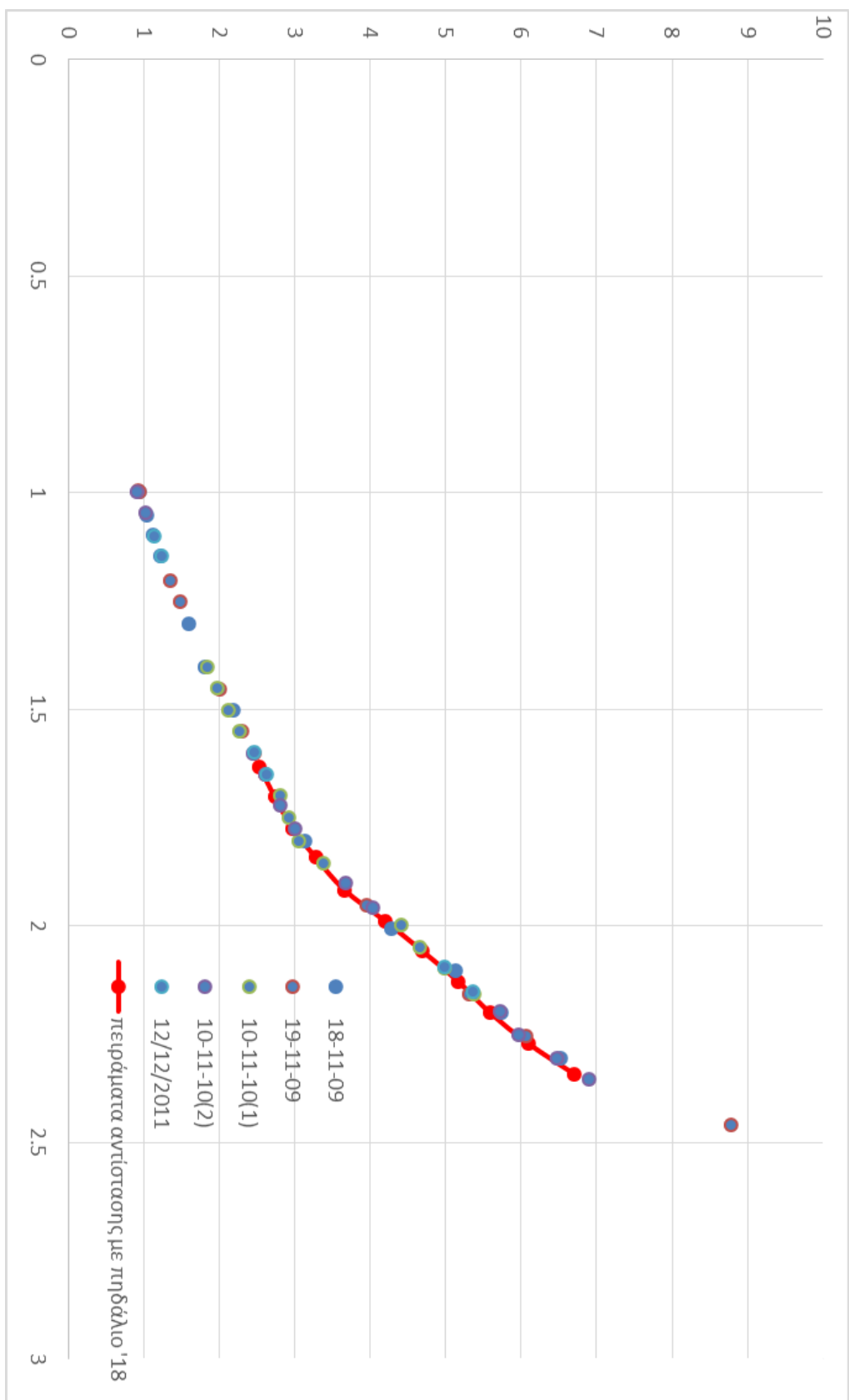


Σχήμα 4: Συντελεστής υπόλοιπης αντίστασης

5.1.1. Παλαιότερα πειράματα αντίστασης

18/11/2009		19/11/2009		10/11/2010 (1)	
Vm	Res	Vm	Res	Vm	Res
m/s	kp	m/s	kp	m/s	kp
0.998	0.944	1.203	1.353	1.403	1.851
1.302	1.593	1.453	2.012	1.700	2.814
2.305	6.521	1.954	3.952	1.998	4.419
1.052	1.038	1.253	1.487	1.450	1.981
1.404	1.805	1.550	2.301	1.750	2.922
2.201	5.733	2.254	6.071	2.050	4.657
1.098	1.121	0.996	0.930	1.502	2.116
1.503	2.183	1.603	2.470	1.804	3.062
2.104	5.127	2.157	5.310	2.098	4.995
1.146	1.223	0.999	0.946	1.551	2.277
1.804	3.145	1.652	2.615	1.855	3.380
2.007	4.287	2.459	8.793	2.159	5.387
Temperature	18.3	Temperature	18.3	Temperature	18.8

10/11/2010 (2)		12/12/2011		13/12/2011	
Vm	Res	Vm	Res	Vm	Res
m/s	kp	m/s	kp	m/s	kp
1.603	2.446	1.100	1.140	1.403	1.343
1.901	3.676	1.599	2.474	1.700	2.798
2.199	5.725	2.096	4.988	1.998	5.588
1.651	2.610	1.146	1.233	1.450	1.457
1.958	4.043	1.650	2.628	1.750	2.994
2.252	5.976	2.152	5.357	2.050	6.029
0.997	0.918			1.502	1.577
1.723	2.806			1.804	2.708
2.306	6.484			2.301	6.427
1.048	1.021			1.348	1.720
1.775	3.009			1.851	3.342
2.355	6.905			2.350	6.849
Temperature	18.8	Temperature	14.7	Temperature	14.6



Σχήμα 5: Σύγκριση με παλαιότερα πειράματα αντίστασης

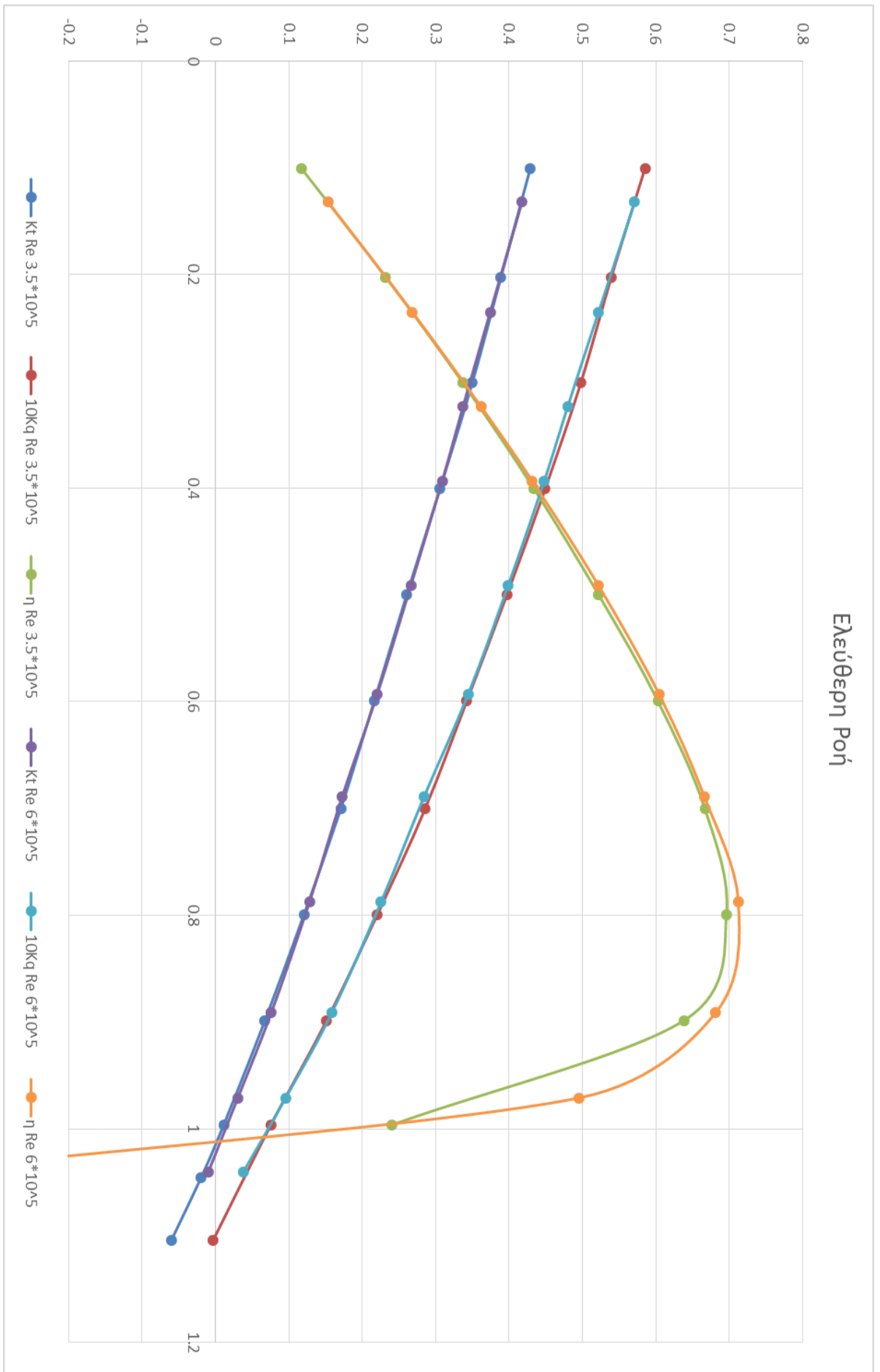
5.2 Έλικα σε ελεύθερη ροή

Reynolds τάξης 350000

Va[m/s]	N[rpm]	T[kp]	Q[kp*cm]	N[rps]	Re 0.7	J	Kt	10Kq	no
0.402	1125.6	31.90627	92.83509	18.76	477395.7	0.100439	0.429446	0.585668	0.117273
0.708	984	22.1059	65.39443	16.4	419392.1	0.202347	0.38933	0.539832	0.232379
0.905	844.2	14.63743	44.41823	14.07	362640.1	0.301482	0.350247	0.498171	0.337519
1.102	773.4	10.74382	33.65522	12.89	335813.3	0.400715	0.306303	0.44973	0.434585
1.303	733.2	8.22794	26.74091	12.22	322659	0.499782	0.261004	0.397593	0.522431
1.702	798.6	8.103858	27.35736	13.31	357102.8	0.599362	0.216687	0.342865	0.60317
2.004	804.6	6.495067	23.15879	13.41	366518.1	0.700449	0.17109	0.285932	0.667386
2.101	739.2	3.876502	15.11153	12.32	343573.3	0.799324	0.120981	0.221051	0.696606
2.199	688.2	1.882628	8.99694	11.47	326964.4	0.898606	0.067785	0.151835	0.63881
2.296	648	0.282394	3.981979	10.8	315050.4	0.99645	0.011468	0.075798	0.240074
2.397	644.4	-0.47494	-0.16661	10.74	317139.5	1.046095	-0.0195	-0.00321	10.13066
2.501	636.6	-1.42909	-1.33288	10.61	317965.1	1.104856	-0.06013	-0.02629	4.024444

Reynolds τάξης 600000

Va[m/s]	N[rpm]	T[kp]	Q[kp*cm]	N[rps]	Re 0.7	J	Kt	10Kq	no
0.56	1191	34.76444	101.4488	19.85	505730.2	0.132231	0.417938	0.571651	0.153942
1.008	1206	31.96617	95.05101	20.1	515173.3	0.235056	0.374797	0.52236	0.268558
1.467	1276.2	32.26568	97.9167	21.27	549374.1	0.323273	0.337834	0.480537	0.361899
1.923	1374.6	34.25955	105.964	22.91	596329.6	0.393425	0.309193	0.448243	0.432134
2.622	1500	35.1538	112.3285	25	659307.8	0.491587	0.266434	0.399039	0.522655
3.411	1616.4	33.81029	112.6284	26.94	722059.3	0.59346	0.220674	0.344554	0.605237
4.302	1755.6	31.23879	109.7127	29.26	797982	0.689134	0.17284	0.28452	0.666613
4.305	1537.2	17.80367	66.82727	25.62	712704.4	0.787592	0.128484	0.226048	0.712837
4.305	1358.4	8.266448	36.70418	22.64	644295.5	0.891259	0.076395	0.158989	0.681931
4.295	1243.8	2.789712	18.56035	20.73	601045.3	0.971116	0.030751	0.095894	0.495881
4.2935	1160.4	-0.75433	6.427814	19.34	570302.5	1.040549	-0.00955	0.038155	-0.41485
4.59	1327.2	3.260369	21.20945	22.12	641574.8	0.972601	0.031564	0.096242	0.507932



Σχήμα 6: Γράφημα ελεύθερης ροής

5.3.1 Αυτοπρόωση, Fn0.25

Χωρίς πηδάλιο

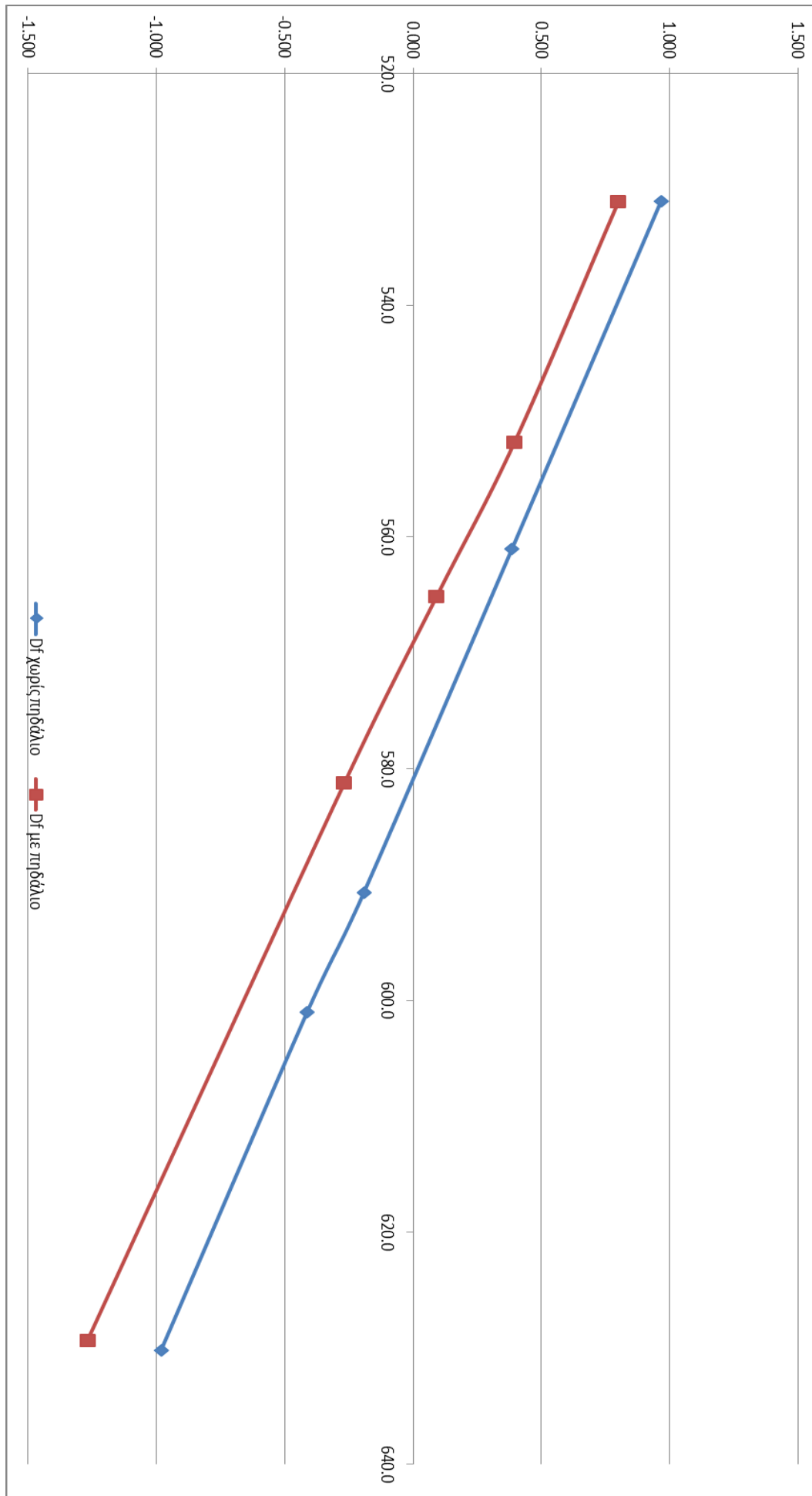
RPM	DF	Thrust	Torque	pitch	heave
531.0	0.968	2.541	9.261	-0.025	-1.218
561.0	0.387	3.158	11.349	-0.028	-1.195
590.7	-0.191	3.819	13.346	-0.041	-1.222
601.0	-0.411	4.048	14.130	-0.039	-1.213
630.2	-0.982	4.749	16.274	-0.044	-1.204

Vsp	nsp	Tsp	Kt	Kq	J
1.775	581.000	3.603	0.182	0.029602	0.670812
R0	Q0	V0	t	w	
2.950	0.125455	1.385857	0.181	0.219236	
EHP	THP0	DHP0	DHP		
5.23625	4.993373	7.632943	7.723347		
nR	n0	nh			
0.988295	0.654187	1.04864			

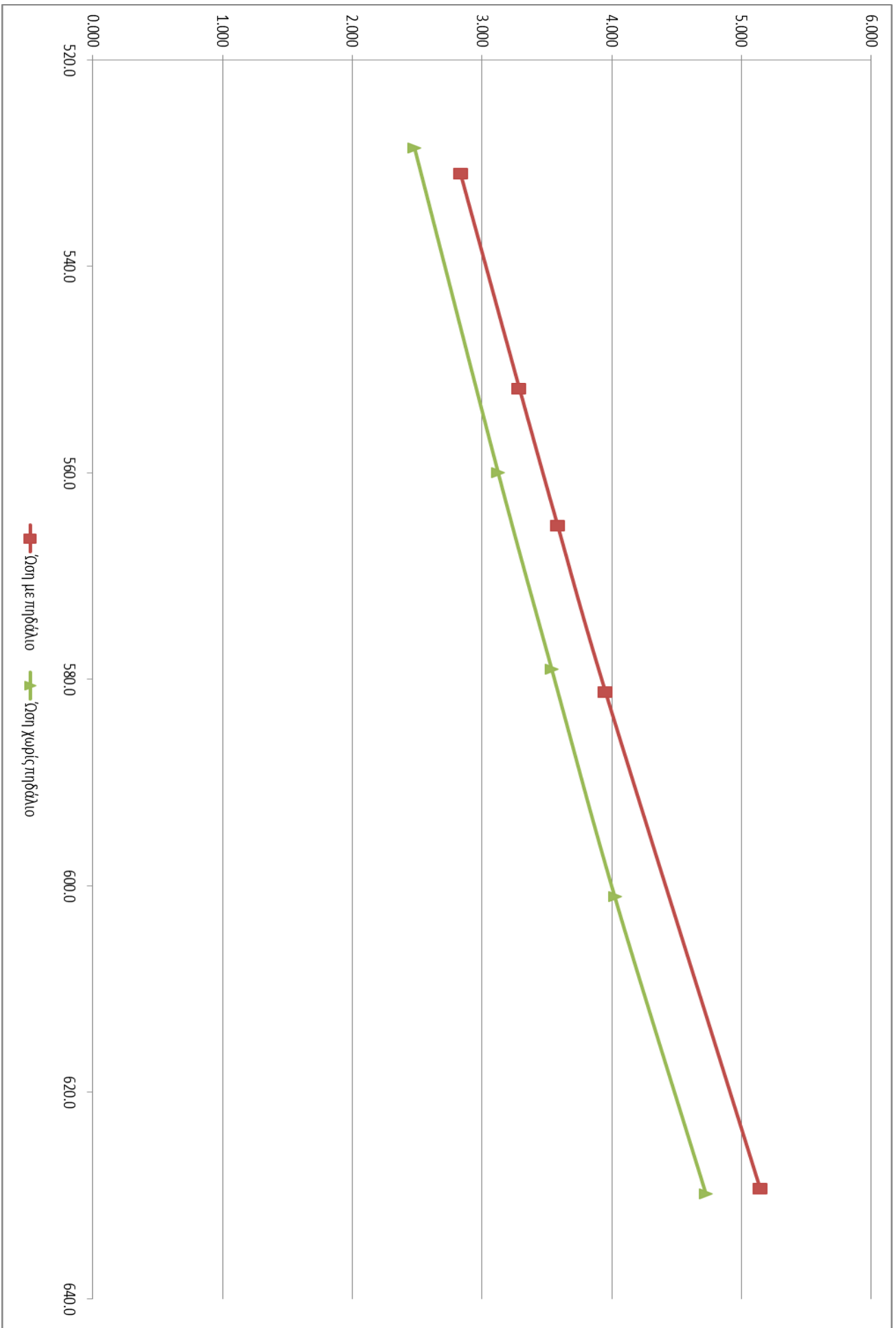
Με πηδάλιο

RPM	DF	Thrust	Torque	pitch	heave
531.0	0.803	2.836	9.885	-0.016	-1.213
551.8	0.397	3.290	11.349	-0.025	-1.186
565.1	0.094	3.585	12.234	-0.032	-1.200
581.2	-0.266	3.953	13.358	-0.037	-1.149
629.3	-1.267	5.146	16.978	-0.041	-1.227

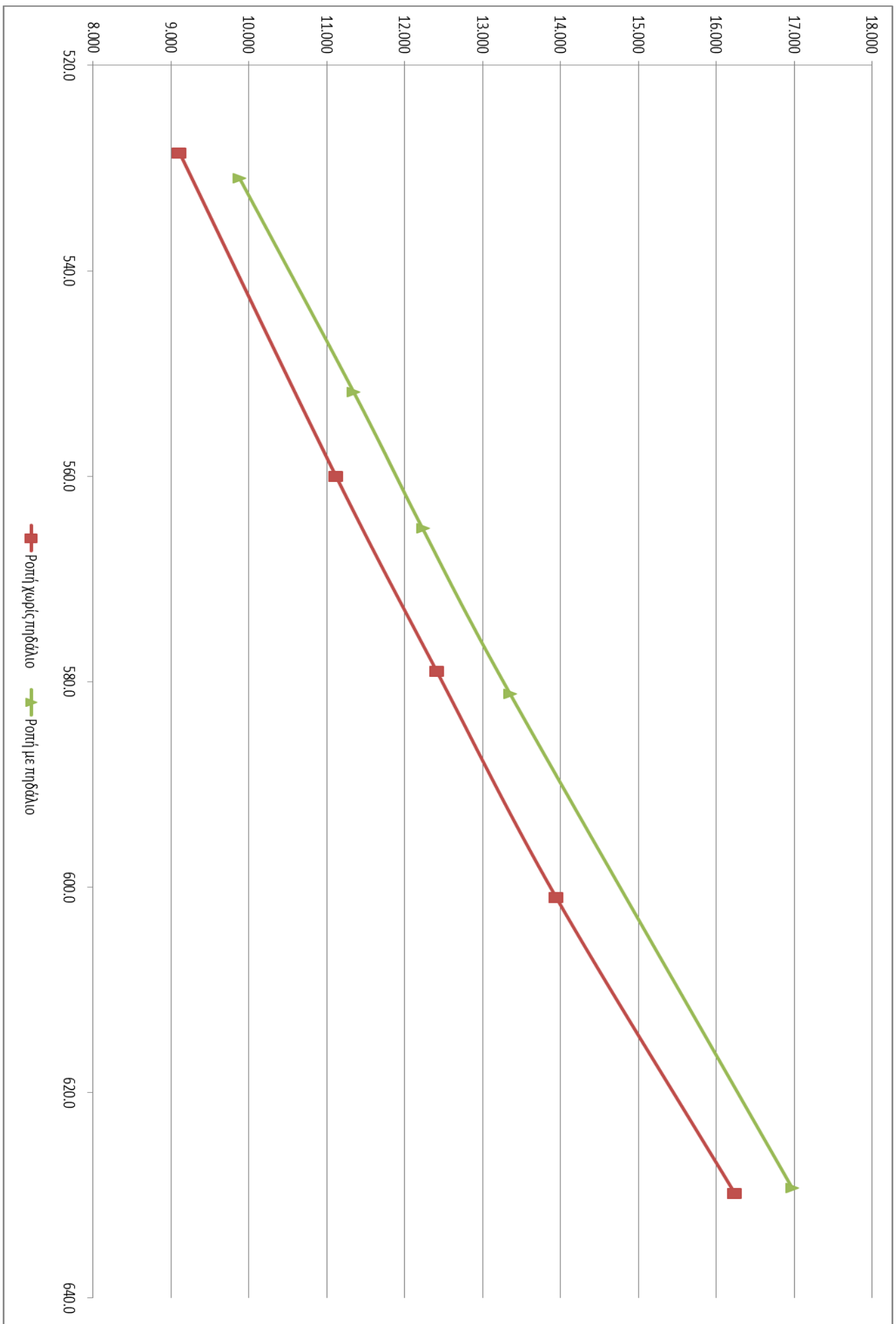
Vsp	nsp	Tsp	Kt	Kq	J
1.775	570.000	3.697	0.194	0.031108	0.646811
R0	Q0	V0	t	w	
2.977	0.126893	1.336272	0.195	0.247171	
EHP	THP0	DHP0	DHP		
5.284175	4.940766	7.574257	7.50675		
nR	n0	nh			
1.008993	0.65231	1.069505			



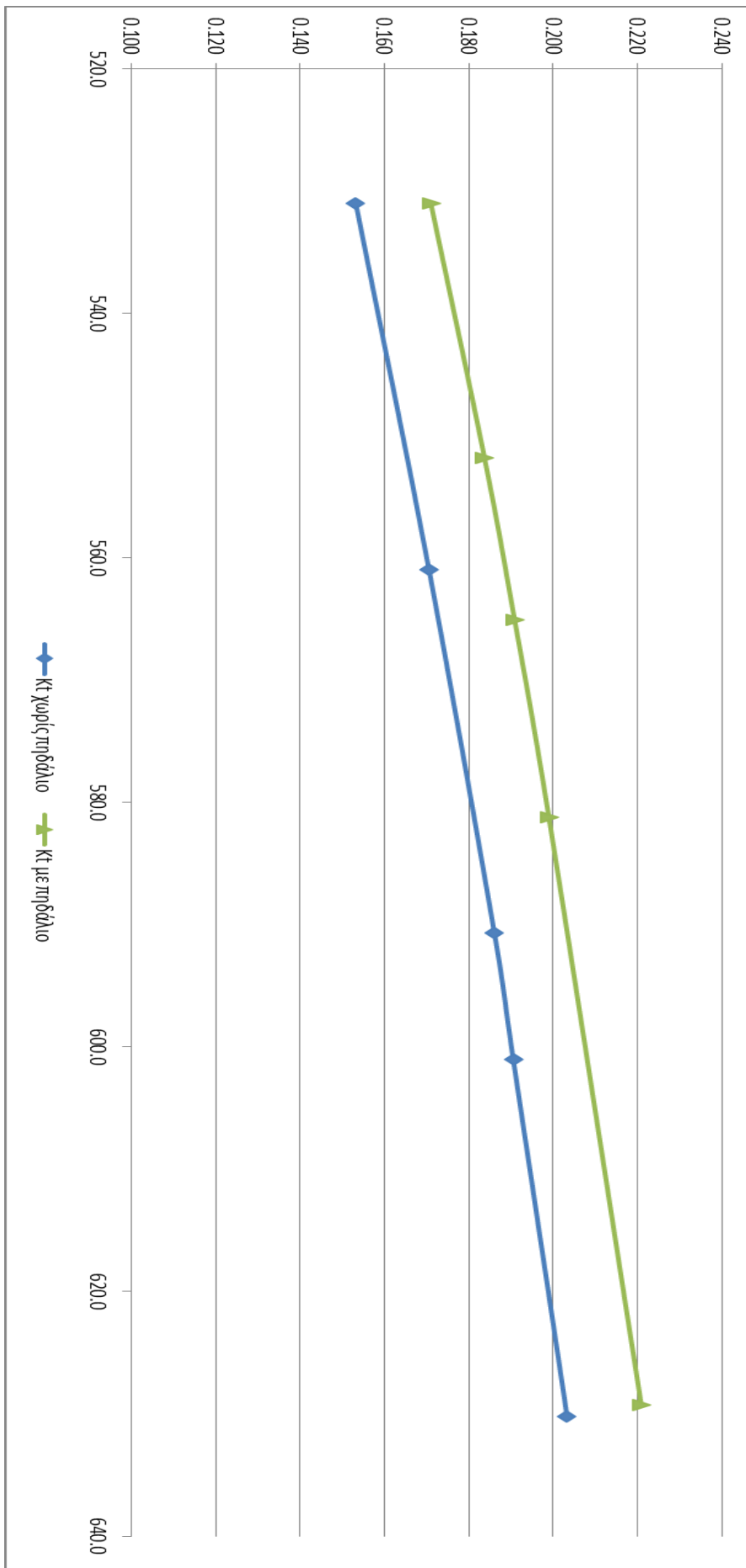
Σχήμα 7: Μέτρηση δύναμης στο φορείο κατά την αυτοπρόωση, $F_n 0.25$



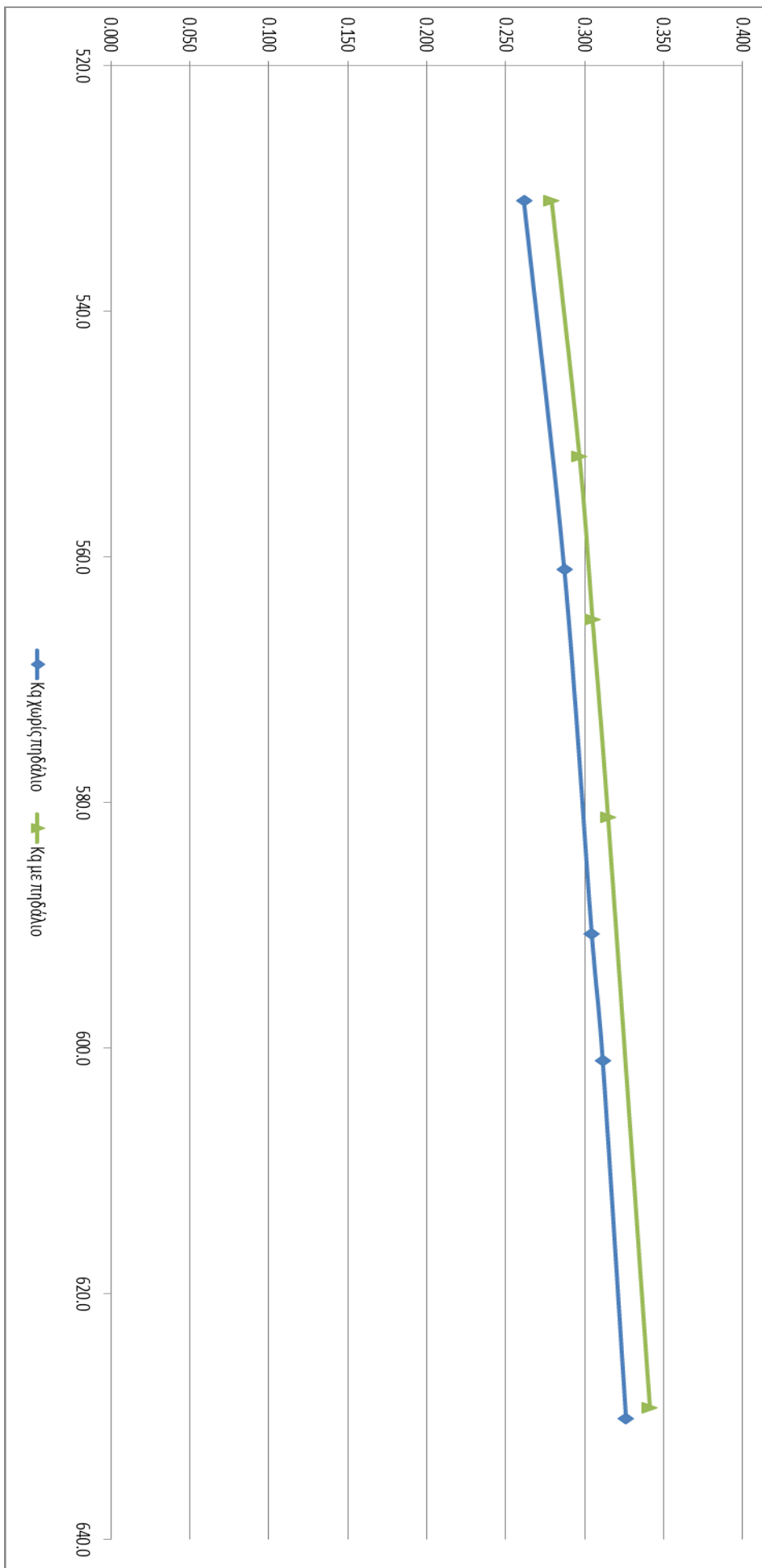
Σχήμα 8: Ώση κατά την αυτοπρόωση, $F_n 0.25$



Σχήμα 9: Ροπή κατά την αυτοπρόωση, Fn 0.25



Σχήμα 10: Συντελεστής ώσης, πειράματα αυτοπρώσης, $F_n 0.25$



Σχήμα 11: Συντελεστής Ροπής, πειράματα αυτοπρόωσης, $F_n 0.25$

5.3.2. Αυτοπρόωση Fn0.32

Χωρίς πηδάλιο

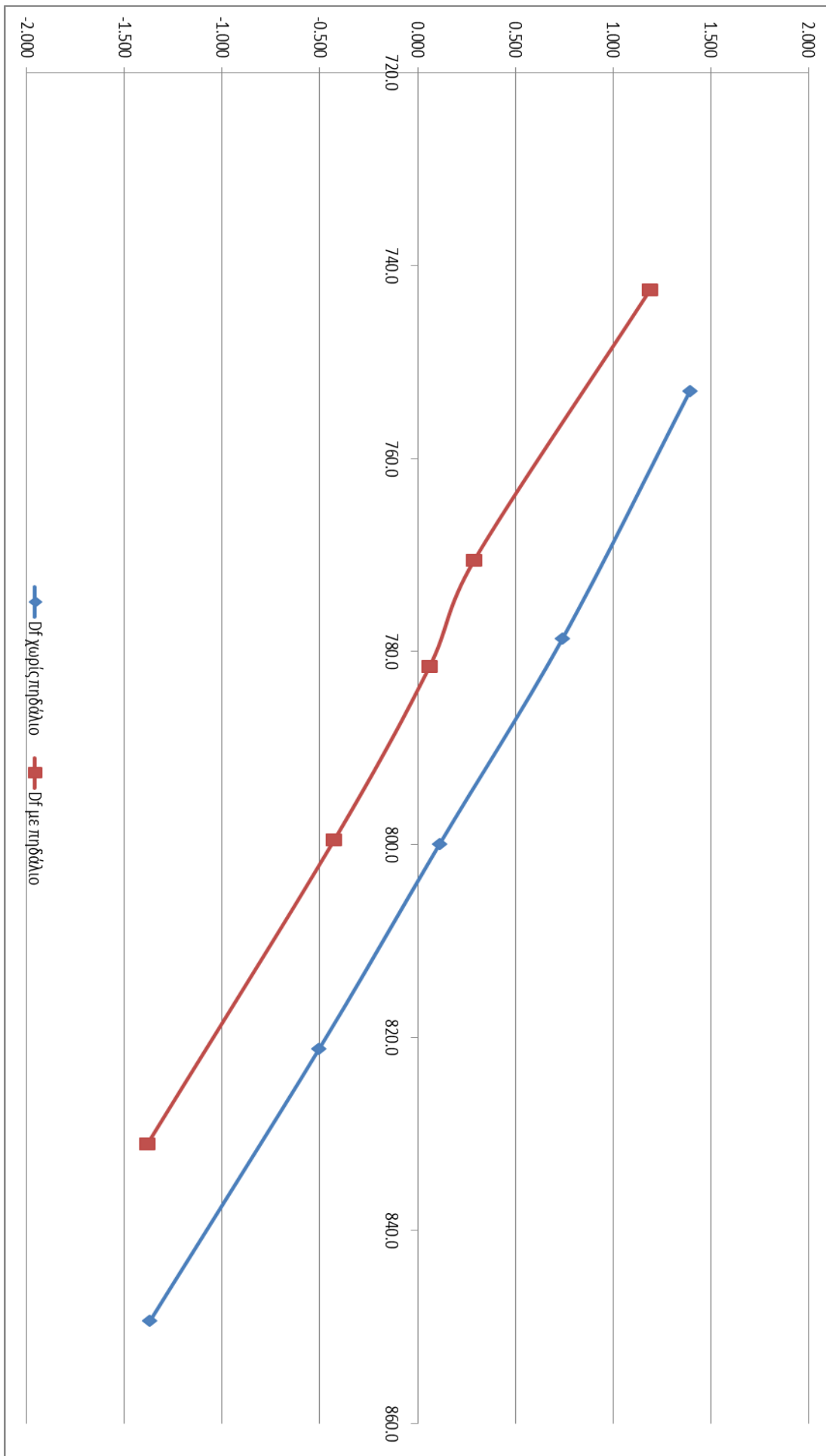
RPM	DF	Thrust	Torque	pitch	heave
753.0	1.396	5.908	20.564	0.062	-2.276
778.7	0.742	6.642	23.004	0.081	-2.358
800.0	0.113	7.299	25.025	0.053	-2.303
821.2	-0.503	7.977	27.101	0.055	-2.203
849.4	-1.369	8.888	29.961	0.041	-2.230

Vsp	nsp(RPM)	Tsp	Kt	Kq	J	w	t
2.27	805.000	7.459	0.196	0.03135	0.64281	0.18942	0.193
R0	Q0	V0					
6.017	0.2551343	1.8400					
EHP	THP0	DHP0	DHP				
13.6585	13.724153	21.5076	21.50846				
nR	n0	nh					
0.99996	0.6381051	0.99522					

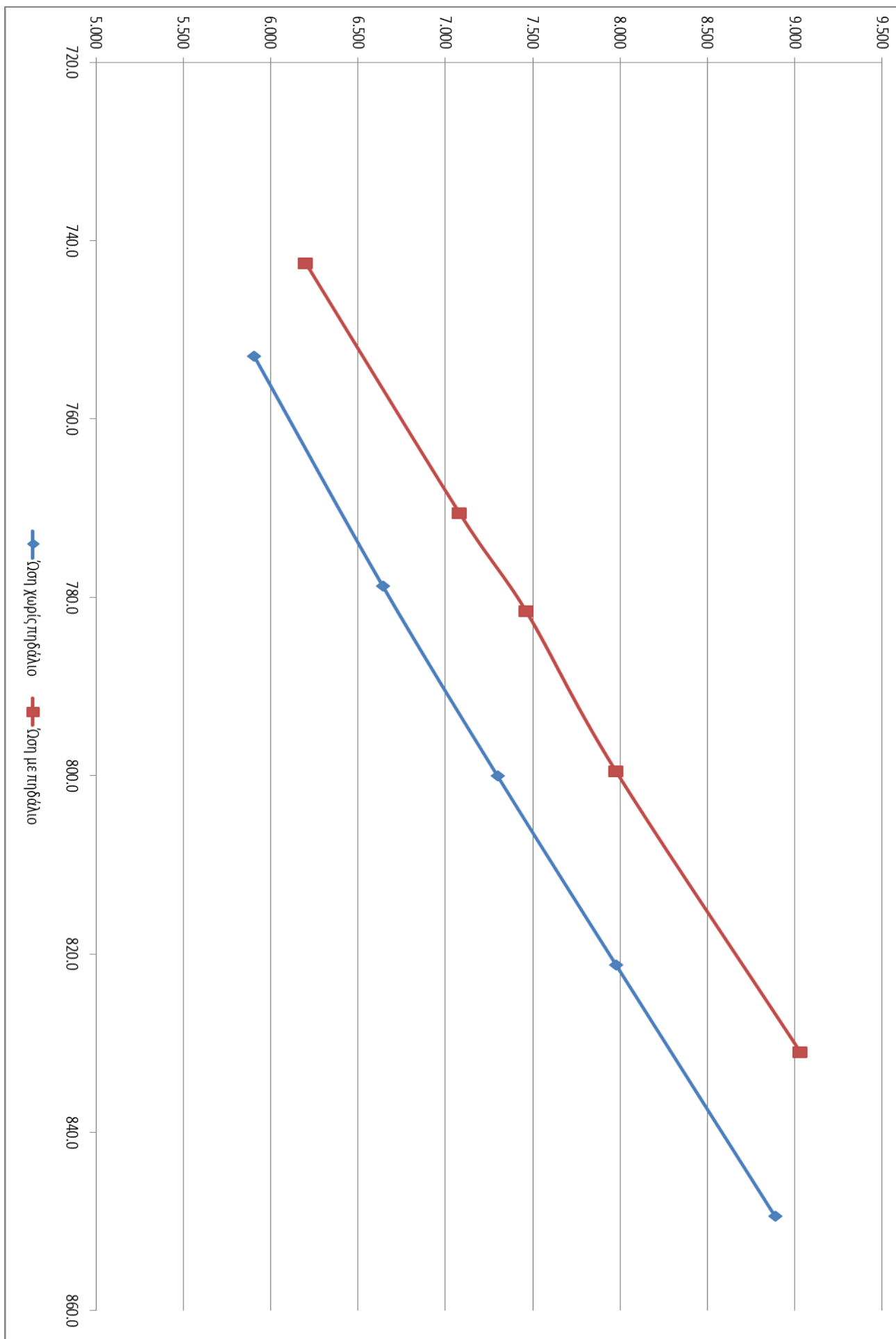
Με πηδάλιο

RPM	DF	Thrust	Torque	pitch	heave
742.5	1.192	6.201	20.962	0.044	-2.262
770.5	0.293	7.080	23.515	0.051	-2.180
781.5	0.019	7.402	24.525	0.053	-2.253
799.5	-0.424	7.977	26.341	0.053	-2.253
831.0	-1.380	9.033	29.553	0.041	-2.303

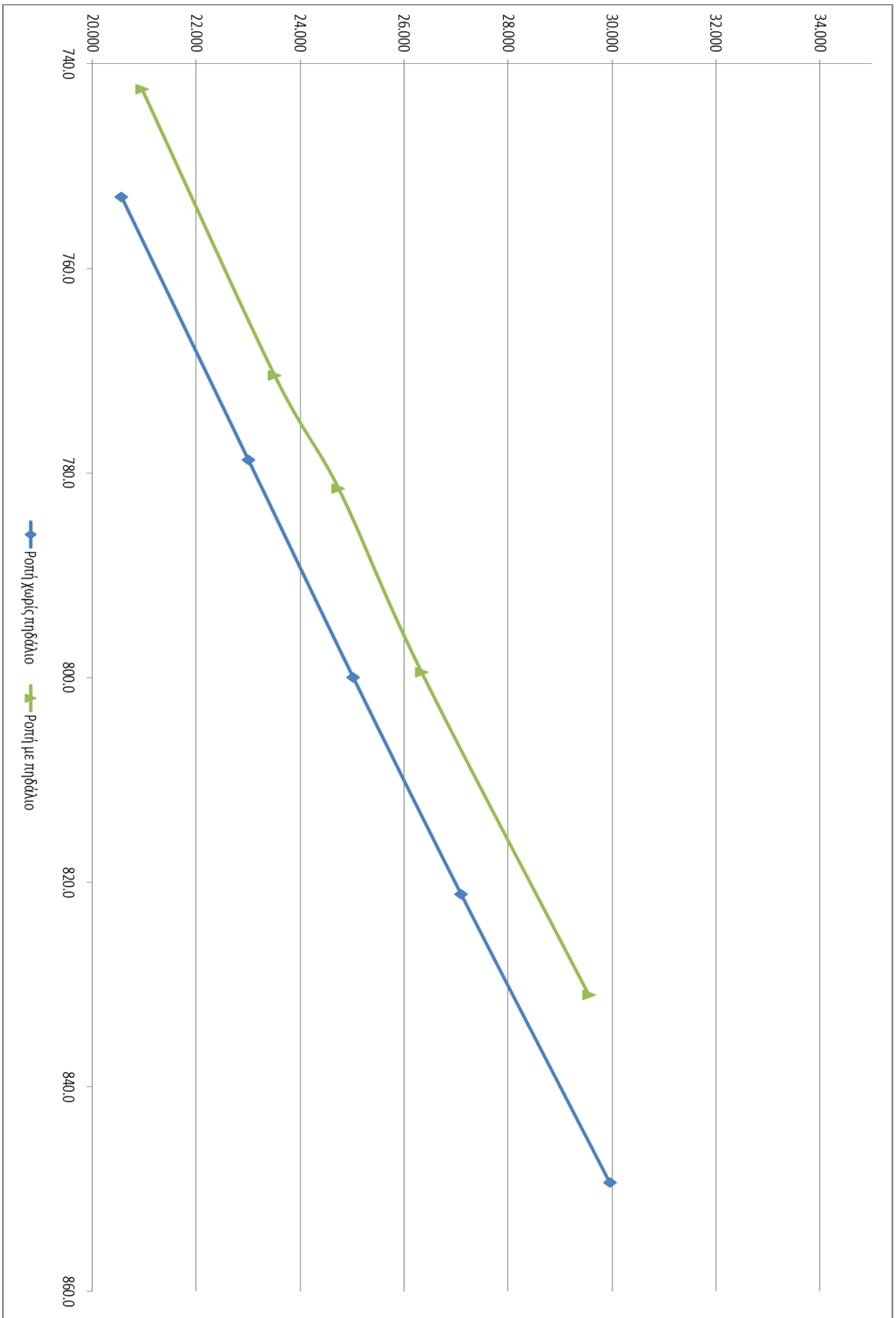
Vsp	nsp	Tsp	Kt	Kq	J	w	t
2.27	782.000	7.476	0.208	0.03261	0.62281	0.23708	0.18593
R0	Q0	V0					
6.086	0.250	1.732					
EHP	THP0	DHP0	DHP				
13.81522	12.947	20.505	20.297				
nR	n0	nh					
1.010275	0.6314042	1.0670429					



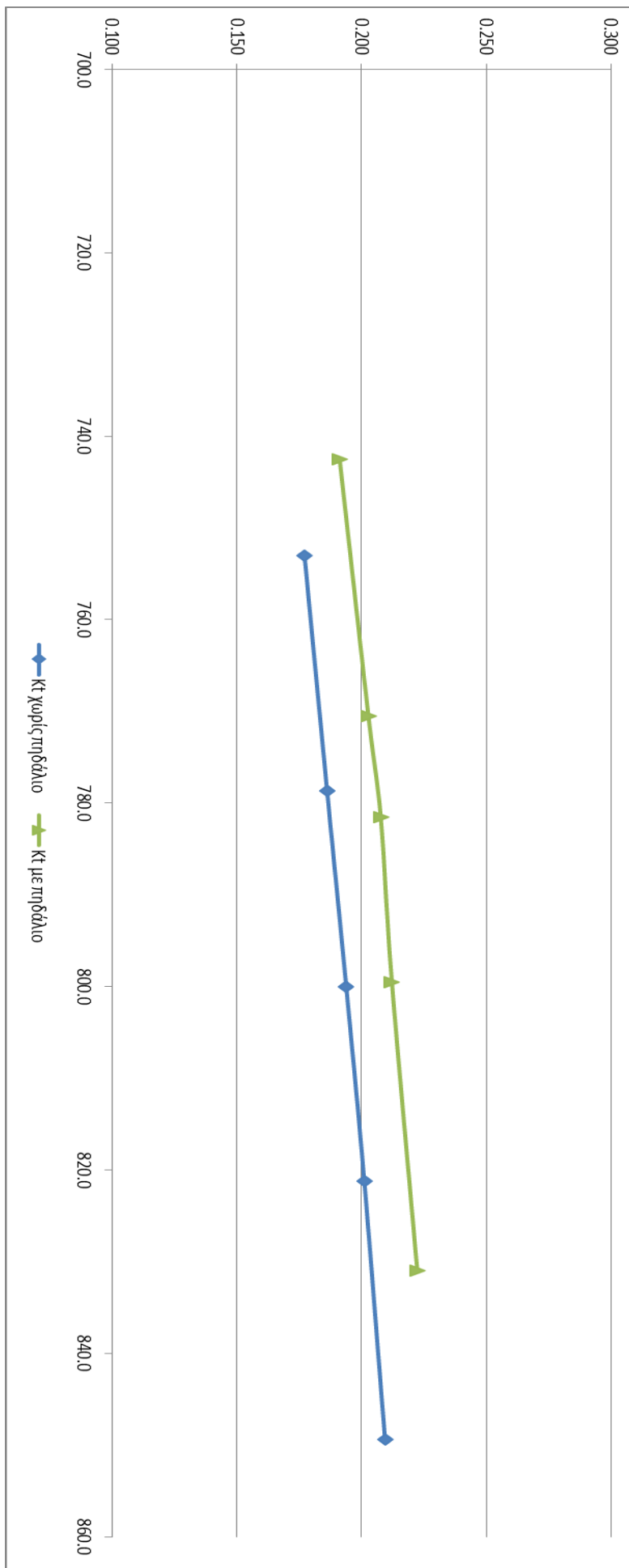
Σχήμα 12: Μέτρηση δύναμης στο φορείο κατά την αυτοπρόωση, $F_n 0.32$



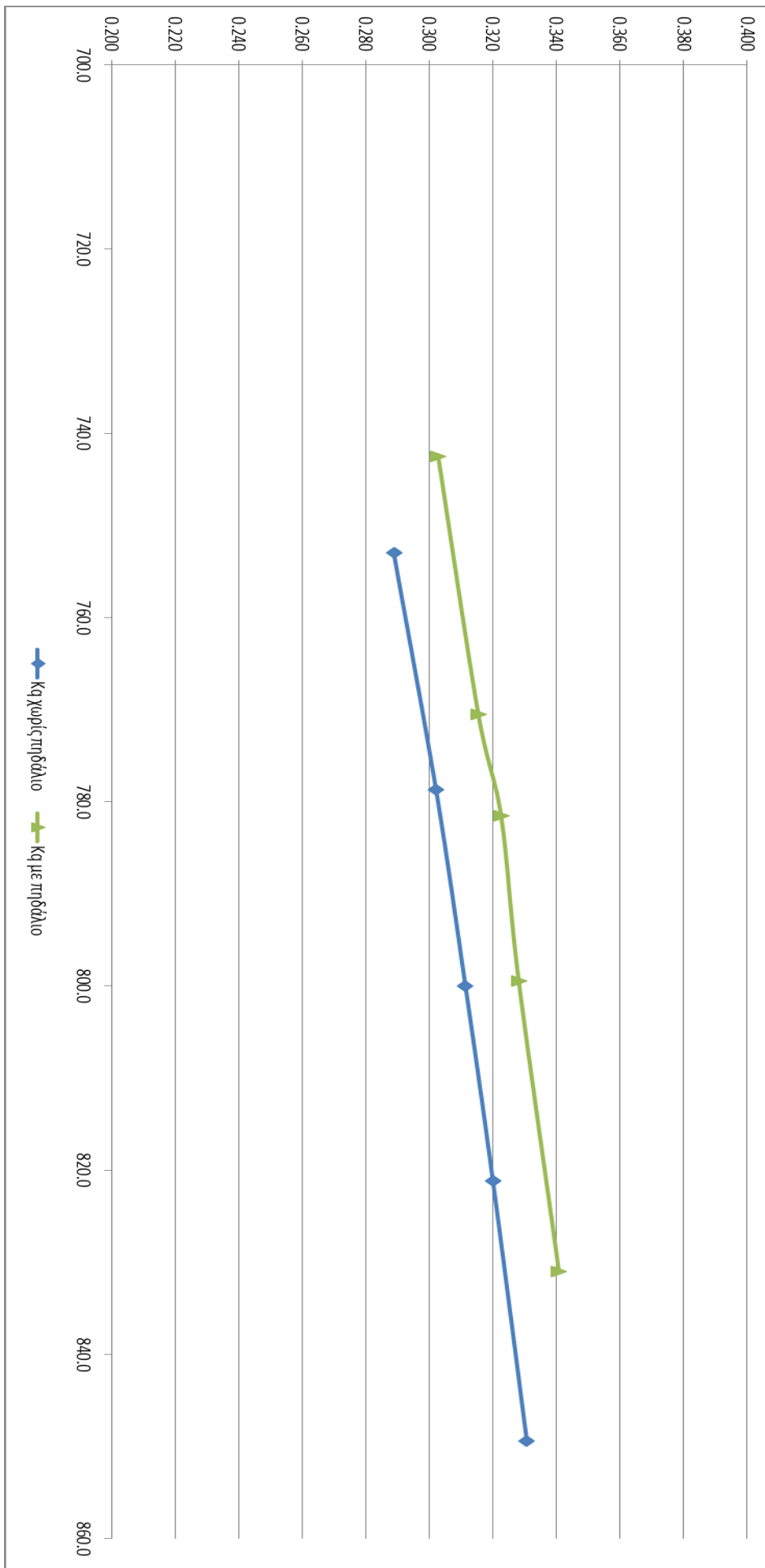
Σχήμα 13: Ώση κατά την αυτοπρόωση, $F_n 0.32$



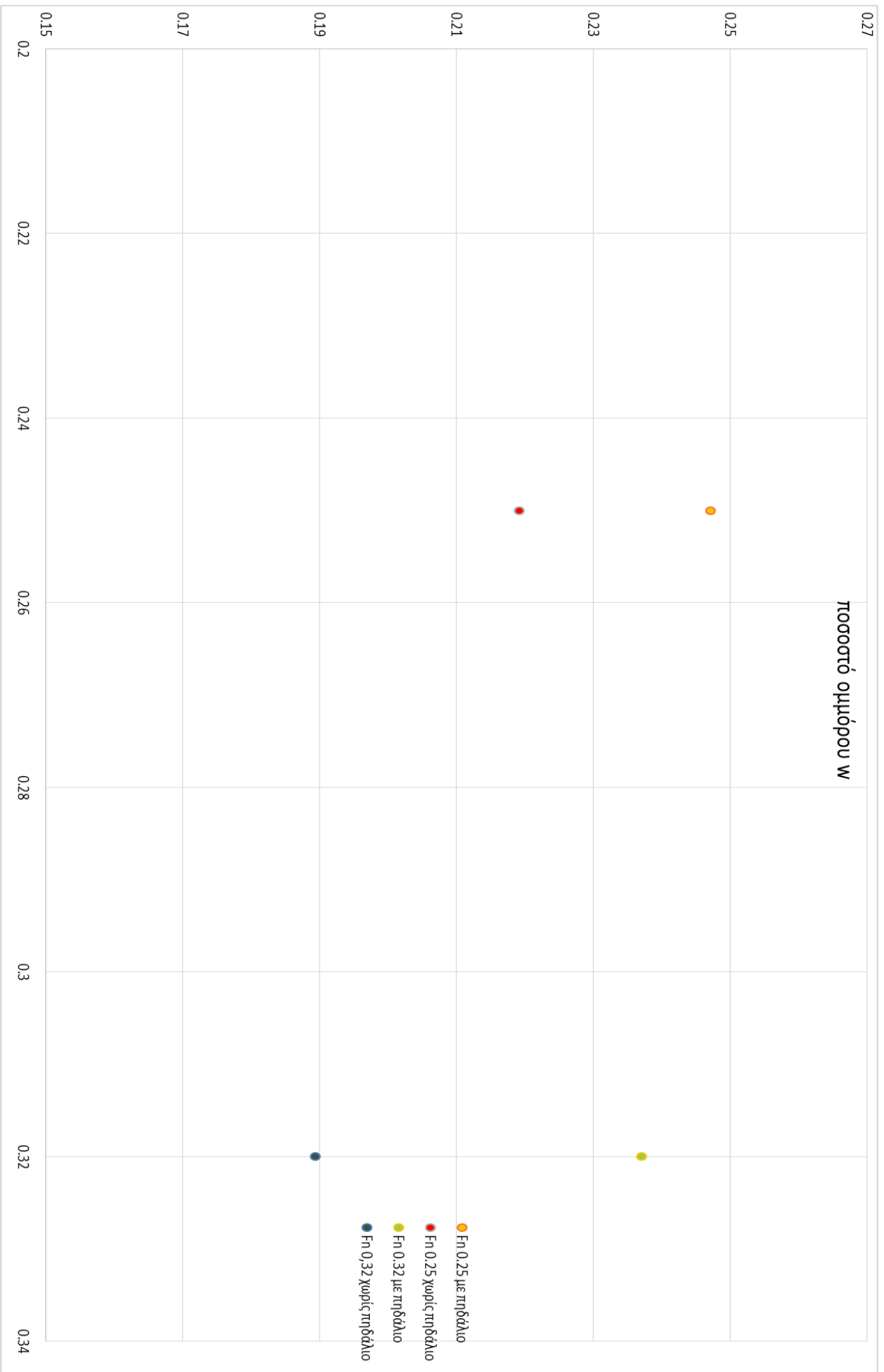
Σχήμα 14: Ροπή κατά την αυτοπρόωση, $F_n 0.32$



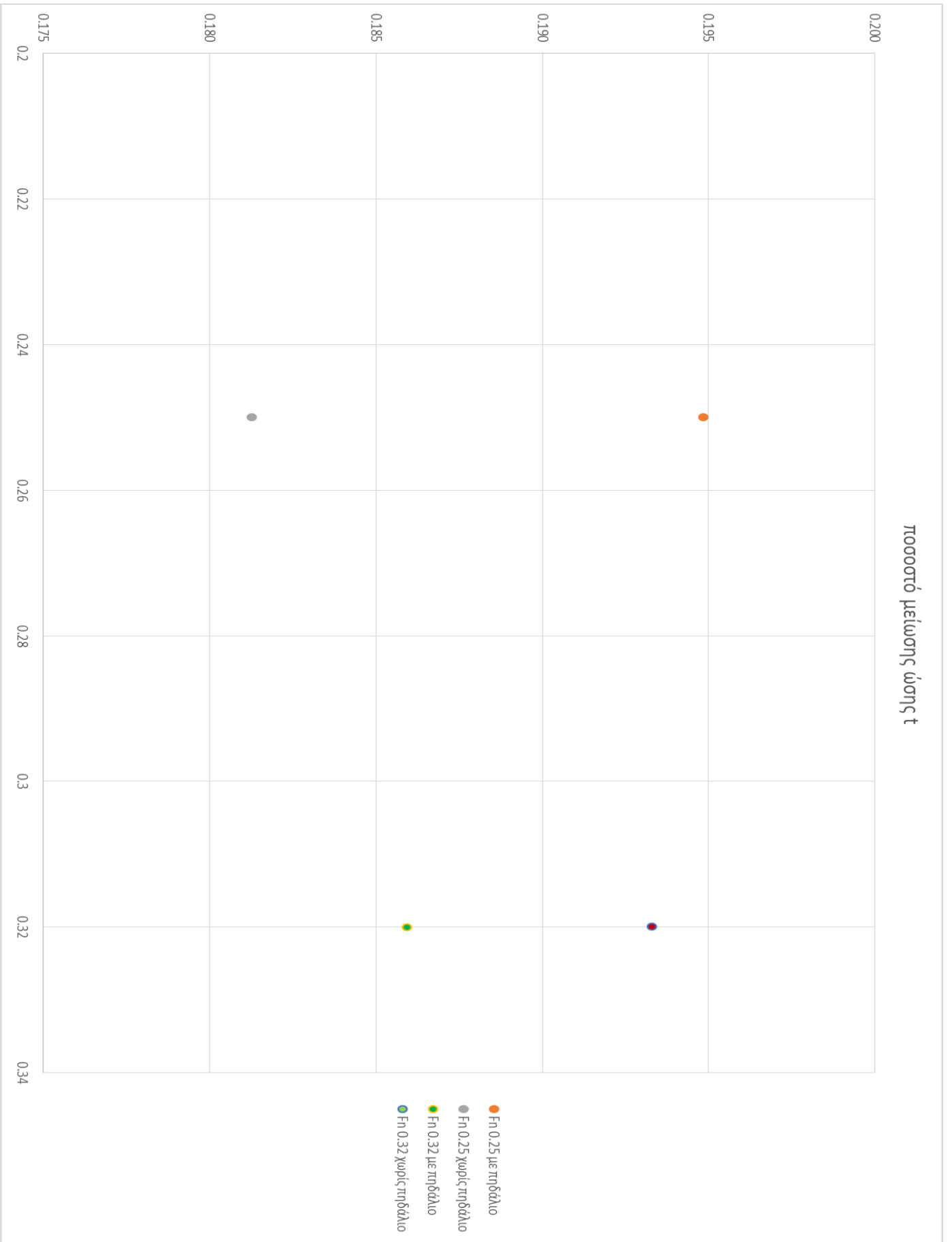
Σχήμα 15: συντελεστής ώσης, πειράματα αυτοπρόωσης, F_n 0.32



Σχήμα 16: Συντελεστής ροπής, πειράματα αυτοπρόωσης, Fn 0.32

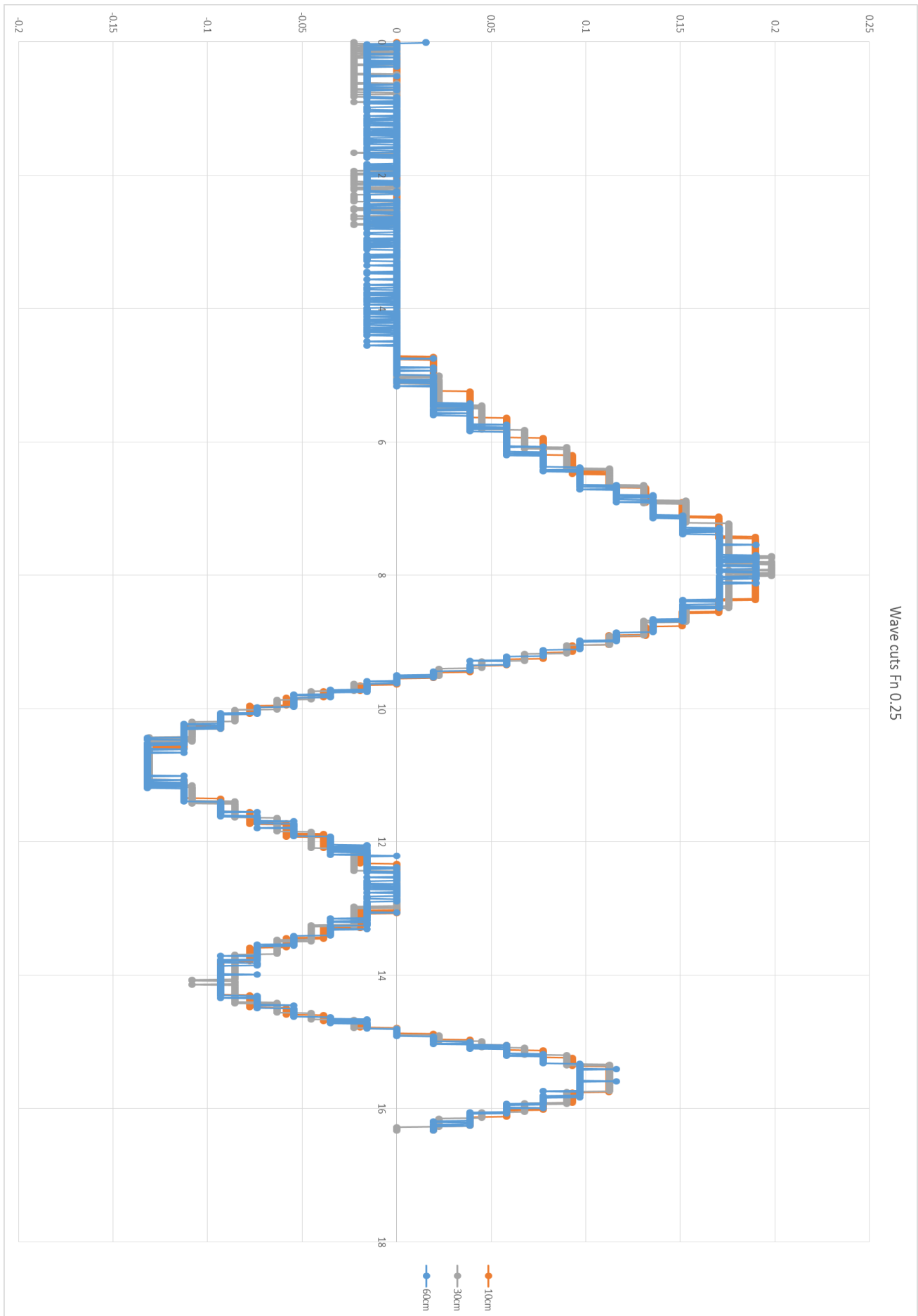


Σχήμα 17: ποσοστό ομόρφου

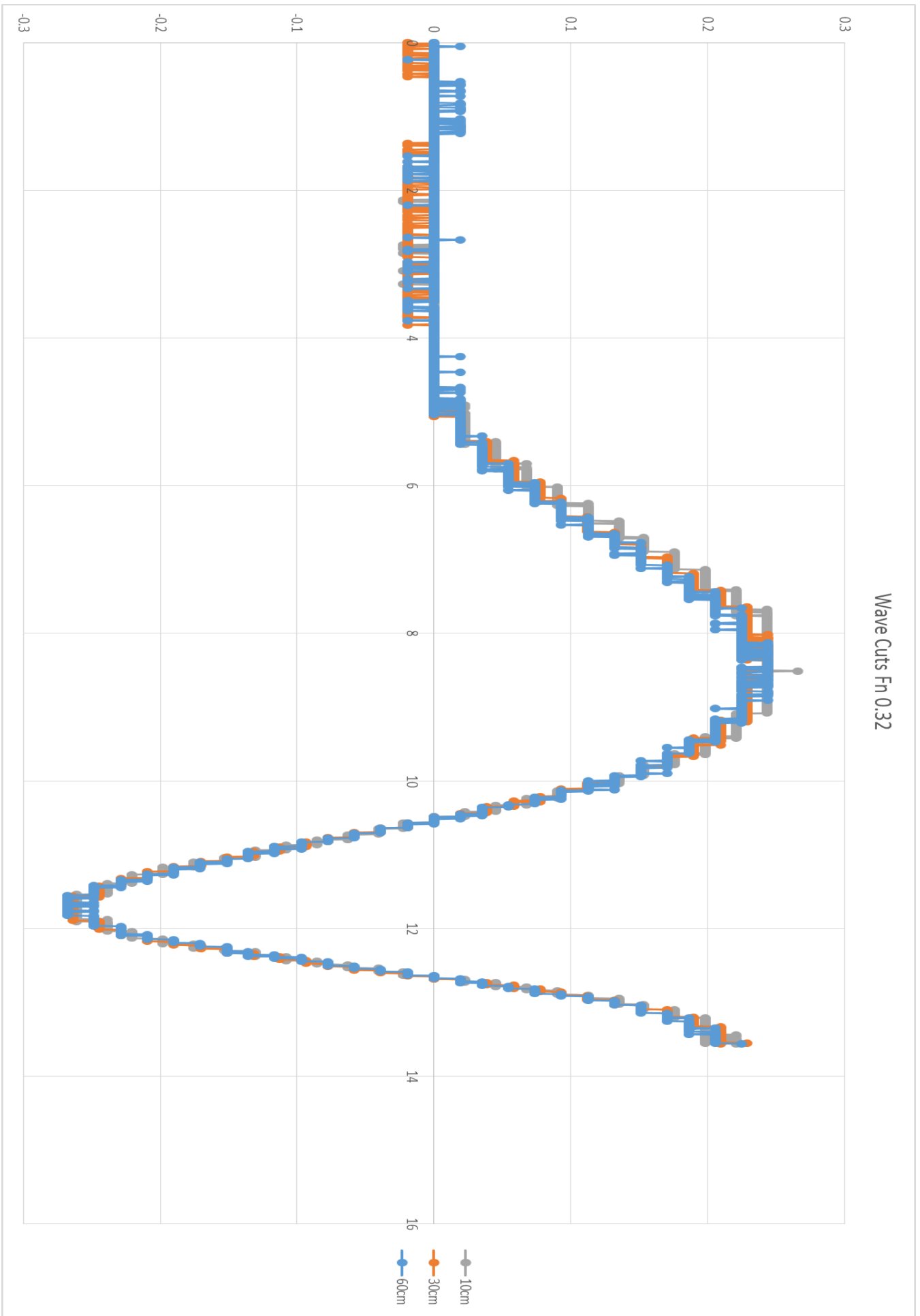


Σχήμα 18: ποσοστό μείωσης ώσης

5.4. Wave Cuts



Σχήμα 19: ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας, Fn 0.25



Σχήμα 20: ανύψωση ελεύθερης επιφάνειας, F_n 0.32

6. Βιβλιογραφία

- [1] «Calculation of the Hydrodynamic Resistance of Appendages on Conventional Vessels» (Στυλιανός Π. Πολύζος, Μάρτιος 2017)
- [2] «Experimental and Numerical Investigation of the Flow around a Ship model at Various Froude Numbers» (Δ. Γαρουφαλλίδης, Ιούνιος 1996)