



Ειδικές Ναυπηγικές Κατασκευές και Ιστιοφόρα σκάφη

Διδάσκουσα:

Καθηγήτρια Εφαρμογών Σ. Πέππα

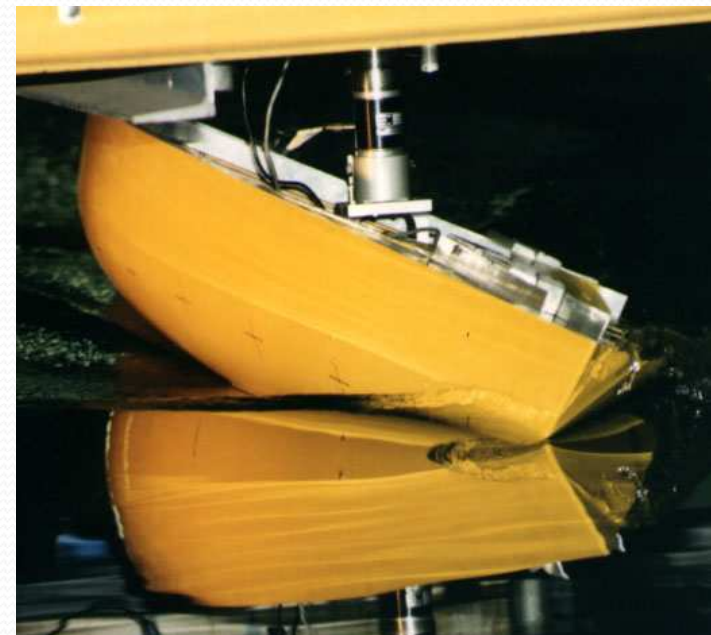
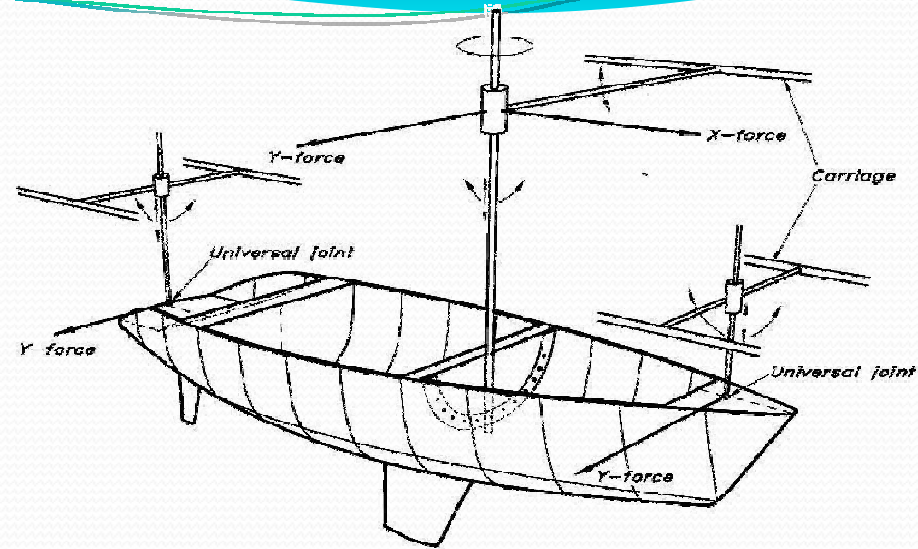
Αντίσταση Ιστιοπλοϊκού Σκάφους

Ορισμός

- Αντίσταση της γάστρας ορίζεται εκείνη η συνιστώσα της συνολικής υδροδυναμικής δύναμης που ασκείται από το νερό σε οριζόντιο επίπεδο και κατά τη διεύθυνση της κίνησης.
- Αν και η εκτίμησή της είναι ακόμα αντικείμενο έντονης μελέτης, προτείνεται η ανάλυσή της σε επιμέρους συνιστώσες.
- Το πρώτο επίπεδο ανάλυσης διαχωρίζει την αντίσταση:
 - σε αντίσταση όρθιας θέσης (upright resistance)
 - σε πρόσθετη αντίσταση λόγω εγκάρσιας κλίσης, και
 - σε πρόσθετη αντίσταση λόγω κυματισμών (added wave resistance).

Αιτία

- Ο διαχωρισμός αυτός έχει το μεγάλο πλεονέκτημα ότι η εκτίμηση της αντίστασης στην κεκλιμένη κατάσταση προκύπτει από την αντίσταση όρθιας θέσης, κατάσταση η οποία προσομοιώνεται πειραματικά εύκολα και κυρίως με ακρίβεια.

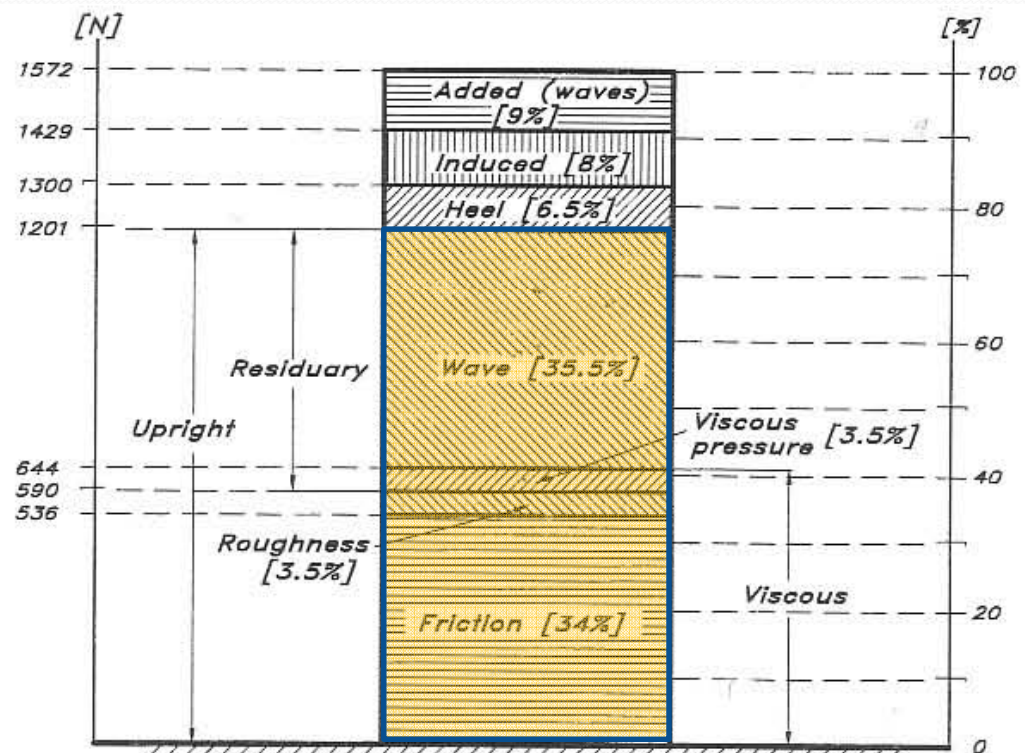


ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ

- Η αντίσταση όρθιας θέσης προκύπτει από τις δύο γνωστές βασικές συνιστώσες, την αντίσταση λόγω **συνεκτικότητας** (viscous resistance) και την αντίσταση λόγω **κυματισμού** (wave resistance).
- Η αντίσταση λόγω συνεκτικότητας μπορεί να αναλυθεί περαιτέρω:
 - σε αντίσταση λόγω τριβής (frictional resistance),
 - σε αντίσταση λόγω τραχύτητας της επιφάνειας (roughness resistance), και
 - σε αντίσταση λόγω κατανομής πίεσης (viscous pressure resistance)

ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ

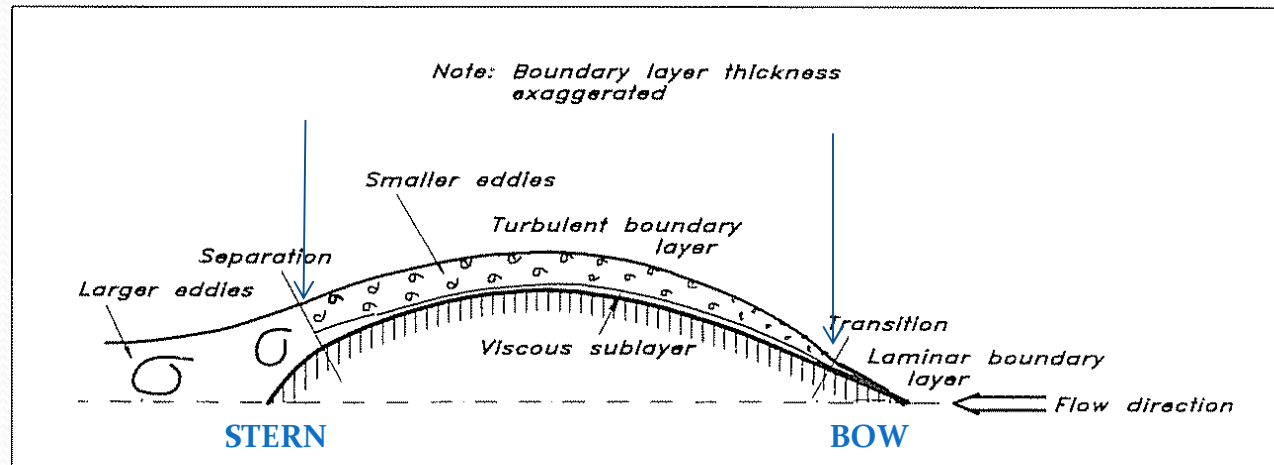
- Στην κεκλιμένη κατάσταση έχουμε δύο ακόμα συνιστώσες αντίστασης:
 - αντίσταση λόγω εγκάρσιας κλίσης (heel resistance) και
 - επαγόμενη αντίσταση (induced resistance).
- Στο σχήμα φαίνεται μια τυπική κατανομή των συνιστωσών αυτών στην ολική αντίσταση ενός ιστιοπλοϊκού σκάφους 40 ft, σε πλεύση όρτσα με 6.8 κόμβους ($F_n=0.35$) υπό καλές καιρικές συνθήκες στη Βόρεια Θάλασσα.



- αντίσταση όρθιας θέσης (upright resistance)
- πρόσθετη αντίσταση λόγω εγκάρσιας κλίσης, και
- επαγόμενη αντίσταση (induced resistance)
- πρόσθετη αντίσταση λόγω κυματισμών (added wave resistance).

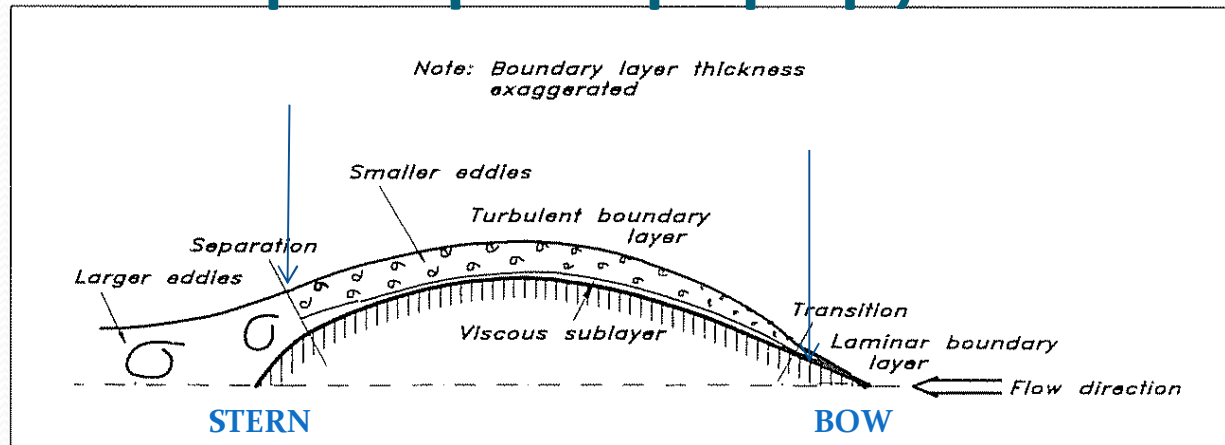
Αντίσταση λόγω συνεκτικότητας:

Αντίσταση λόγω τριβής



- Το σχήμα δείχνει τη ροή γύρω από τη γάστρα από την πλώρη προς την πρύμνη.
- Καθώς τα σωματίδια του ρευστού κατά την διεύθυνση της κίνησης τους προσκρούουν πάνω στην επιφάνεια της γάστρας, χάνουν τη μακροσκοπική τους ταχύτητα και επιβραδύνονται, με αποτέλεσμα να σχηματίζεται ένα λεπτό στρώμα ρευστού κοντά στο στερεό όριο, το οριακό στρώμα (boundary layer). Η ταχύτητα του ρευστού πάνω στην επιφάνεια του κυλίνδρου είναι μηδενική, έτσι ώστε να ικανοποιείται η αρχή της μη ολίσθησης.
- Τα σωματίδια που διαφεύγουν από την περιοχή του στερεού τοιχώματος επανεισέρχονται στην κύρια ροή και προσκρούουν στα σωματίδια που διέρχονται με την ταχύτητα της ροής, με αποτέλεσμα να επιταχύνονται. Έτσι, η ταχύτητα του ρευστού αυξάνεται όσο απομακρυνόμαστε από την επιφάνεια της γάστρας μέχρι την αποκατάσταση της σε μια τιμή που επιβάλλει η λύση του πεδίου ροής.

Αντίσταση λόγω συνεκτικότητας: Αντίσταση λόγω τριβής

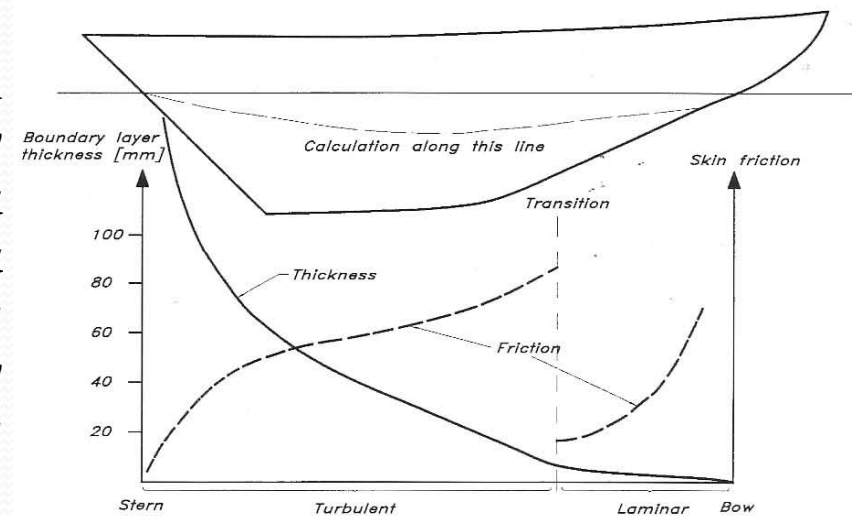


- Μέσα στο οριακό στρώμα, η ορμή της ροής είναι αρκετά χαμηλή, δεδομένου ότι επιδέχεται ισχυρή αντίσταση λόγω συνεκτικότητας.
- Εάν η επιβαλλόμενη πίεση κατά την κατεύθυνση της ροής είναι αύξουσα, τα μόρια του ρευστού κοντά στην επιφάνεια που έχουν μικρή κινητική ενέργεια θα μπορούσαν να σταματήσουν ή να αντιστραφούν, αναγκάζοντας τα γειτονικά μόρια να απομακρυνθούν από την επιφάνεια. Έτσι μπορεί να δημιουργηθεί μια περιοχή ανακυκλοφορίας, η οποία μπορεί να συνοδεύεται πολύ γρήγορα και από πλήρη αντιστροφή της φοράς της ροής στην περιοχή κοντά στην επιφάνεια του σώματος, με αποτέλεσμα την αποκόλληση της ροής από το στερεό τοίχωμα.
- Για τιμές του αριθμού Reynolds, $Re \approx 5 \times 10^5 \div 5 \times 10^6$, αλλάζει η φύση της ροής στο οριακό στρώμα καθώς γίνεται πλέον τυρβώδες το οριακό στρώμα.

Αντίσταση λόγω συνεκτικότητας:

Αντίσταση λόγω τριβής

- Οι σύγχρονες γάστρες των ιστιοπλοϊκών σκαφών είναι πολύ εξελιγμένες → ο υπολογισμός της αντίστασης τριβής δεν είναι τετριμμένος.
- Για παράδειγμα, επειδή τα ιστιοπλοϊκά είναι μικρά σκάφη και επειδή οι γραμμές στην πλώρη τους είναι περίπου ευθείες, ένα σημαντικό μέρος της πλώρης τους μπορεί να βρίσκεται σε στρωτή ροή (αφού οι απότομες μεταβολές στη μορφή μπορεί να προκαλέσουν αποκόλληση της ροής και τυρβώδεις ροές ακόμα και σε μικρές ταχύτητες).
- Αυτό είναι πολύ ενδιαφέρον και ο σχεδιαστής πρέπει να προσπαθεί να επεκτείνει το μέρος της γάστρας που βρίσκεται σε στρωτή ροή, γιατί έτσι μειώνεται σημαντικά η αντίσταση λόγω τριβής.

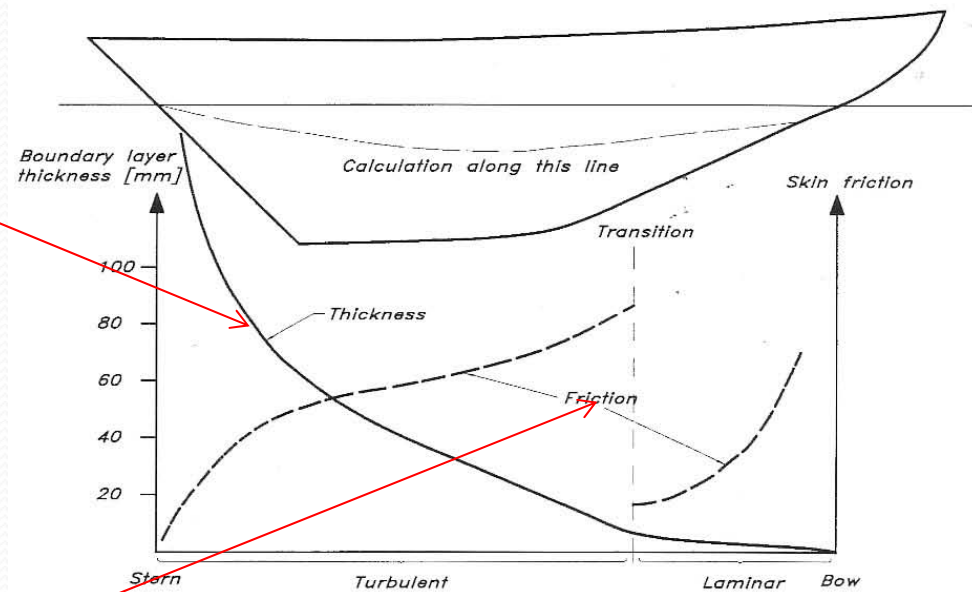


Αντίσταση λόγω συνεκτικότητας:

Αντίσταση λόγω τριβής

Ιστιοπλοϊκό 7.6 m - οι γραμμές στην πλώρη είναι περίπου ευθείες. Παρατηρούμε από την πλώρη προς την πρύμνη:

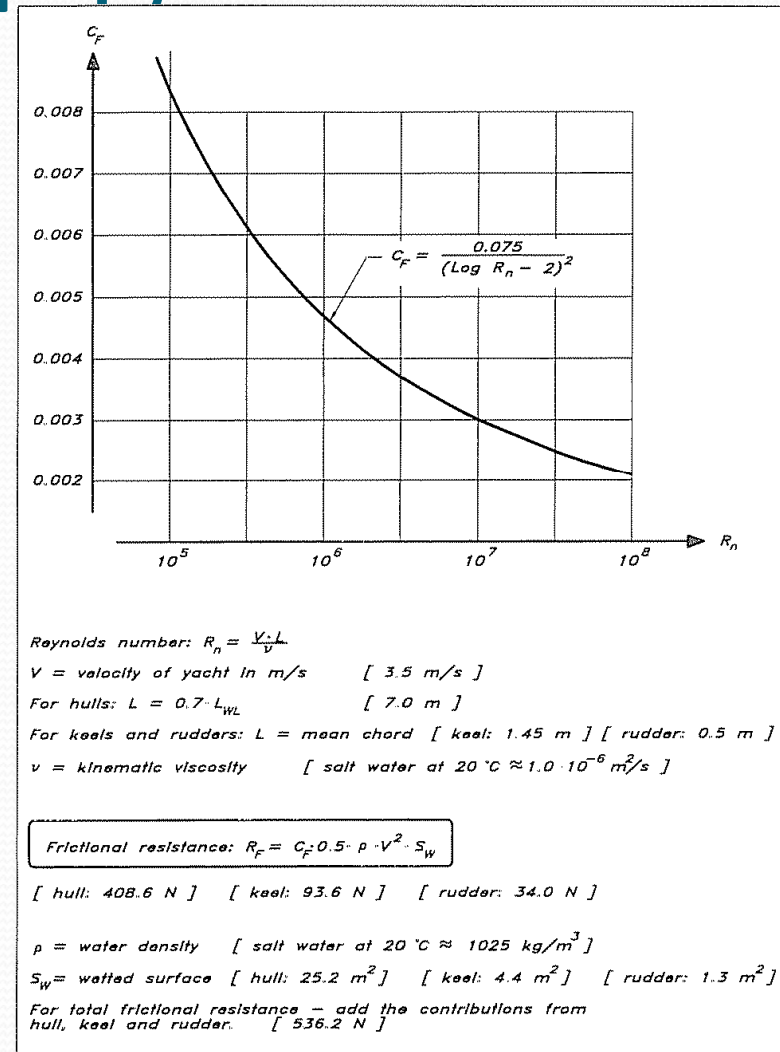
- Το πάχος του οριακού στρώματος αυξάνει αργά στο πεδίο όπου η ροή είναι στρωτή ενώ αυξάνεται ταχύτερα μετά το μεταβατικό σημείο όπου η ροή γίνεται τυρβώδης ειδικά κοντά στην πρύμνη
- Η τριβή μειώνεται σημαντικά μέχρι το μεταβατικό σημείο όπου αυξάνεται απότομα. Στη συνέχεια μειώνεται μέχρι το μηδέν στην πρύμνη



Αντίσταση λόγω συνεκτικότητας:

Αντίσταση λόγω τριβής

- Σε πρώτη προσέγγιση, για τον υπολογισμό της αντίστασης τριβής μπορεί να χρησιμοποιηθεί η καμπύλη της ITTC.
- Μερικοί σχεδιαστές, χωρίς πάντα επαρκή τεκμηρίωση, προτείνουν παραλλαγές της μεθόδου.
- Έτσι, οι Larsson & Eliasson, στο βιβλίο τους 'Principles of Yacht Design' (1996), υπολογίζουν τον αριθμό Re με το 70% του μήκους της ισάλου.



Αντίσταση λόγω συνεκτικότητας:

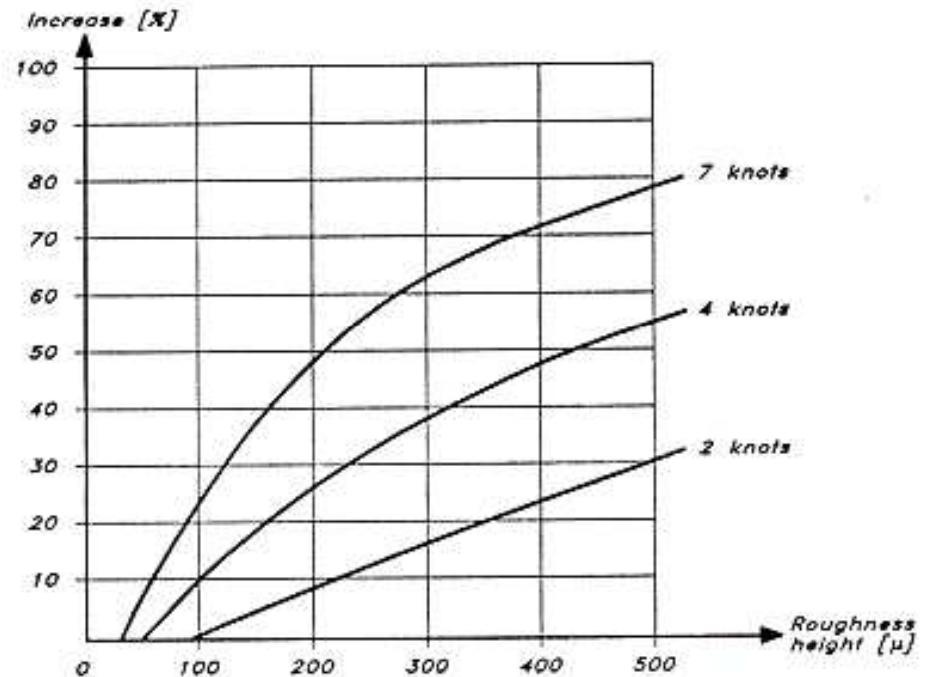
Αντίσταση λόγω τραχύτητας

- Η αντίσταση λόγω τραχύτητας της βρεχόμενης επιφάνειας δεν ενδιαφέρει άμεσα τον σχεδιαστή, δεδομένου ότι εξαρτάται από την ποιότητα της εξωτερικής επιφάνειας της γάστρας.
- Ωστόσο, για τον ορθό σχεδιασμό του σκάφους θα πρέπει να προβλεφθεί η χρήση και η συντήρηση του σκάφους για να εκτιμηθεί ακριβέστερα και αυτή η συνιστώσα της αντίστασης.
- Από πειράματα έχει βρεθεί ότι αν οι παράγοντες τραχύτητας είναι μικρότεροι από τάξη μεγέθους 0.1 mm , τότε δεν δημιουργούν πρόσθετη αντίσταση.
- Αν όμως είναι μεγαλύτεροι, τότε η αντίσταση που δημιουργούν εξαρτάται από το μέγεθός τους και από την ταχύτητα του σκάφους.
- Στα αγωνιστικά σκάφη, όπου η συντήρησή τους είναι προσεκτική, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η τραχύτητα περιορίζεται κάτω από την κρίσιμη τιμή και δεν παράγει αντίσταση.
- Για τα σκάφη αναψυχής όμως πρέπει να εκτιμάται.

Αντίσταση λόγω συνεκτικότητας:

Αντίσταση λόγω τραχύτητας

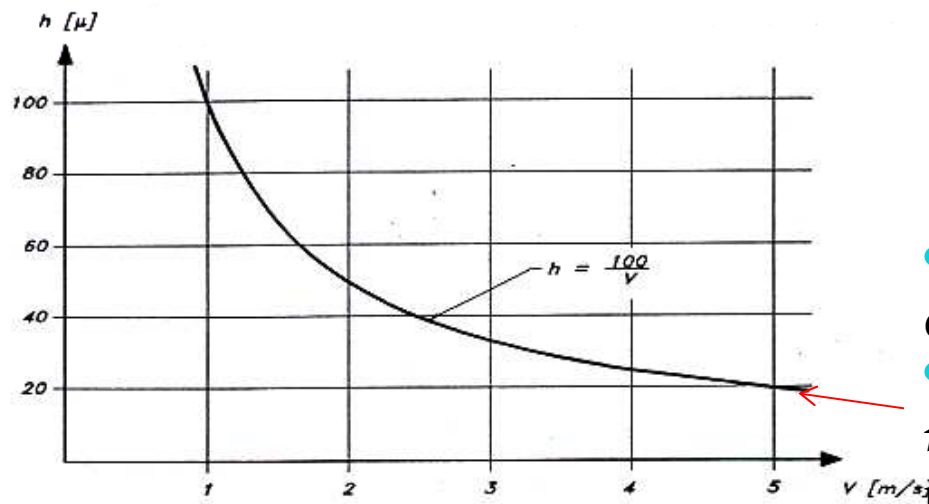
- Για το σκοπό αυτό υπάρχουν διαγράμματα, τα οποία συνήθως για συγκεκριμένη τραχύτητα και ταχύτητα δίνουν την επί τις εκατό αύξηση της αντίστασης λόγω συνεκτικότητας.
- Παρατηρούμε ότι η αντίσταση αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ταχύτητα
- Στην περίπτωση που η γάστρα έχει ρυπανθεί (fouling), η αντίσταση λόγω συνεκτικότητας μπορεί να διπλασιαστεί ή ακόμα και να τριπλασιαστεί.



Αντίσταση λόγω συνεκτικότητας:

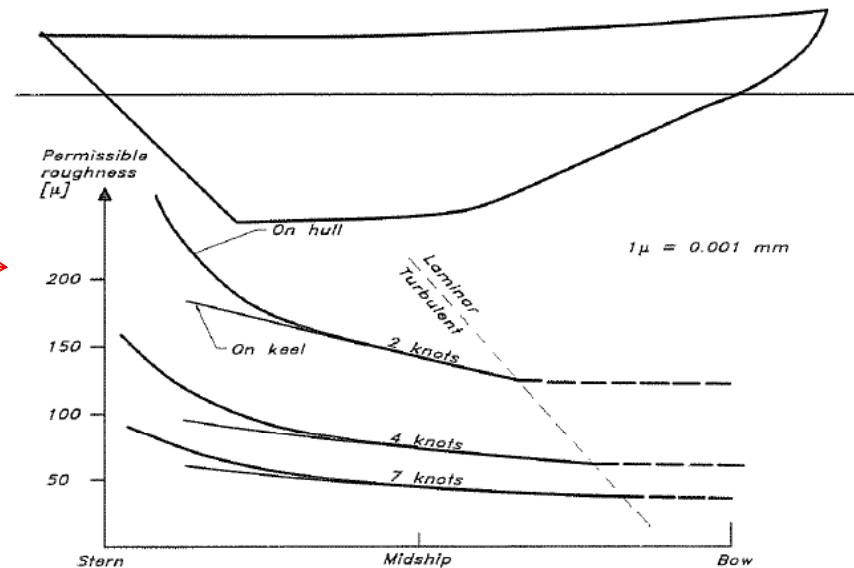
Αντίσταση λόγω τραχύτητας

- Η επιτρεπόμενη τραχύτητα στην πλώρη είναι μικρότερη από αυτή στην πρύμνη.



h : Permissible roughness in microns (μ)
 v : Speed in m/s

Επιτρεπόμενη τραχύτητα ώστε να η αντίστοιχη συνιστώσα της αντίστασης να είναι μηδενική (τα αποτελέσματα σε επίπεδη πλάκα)



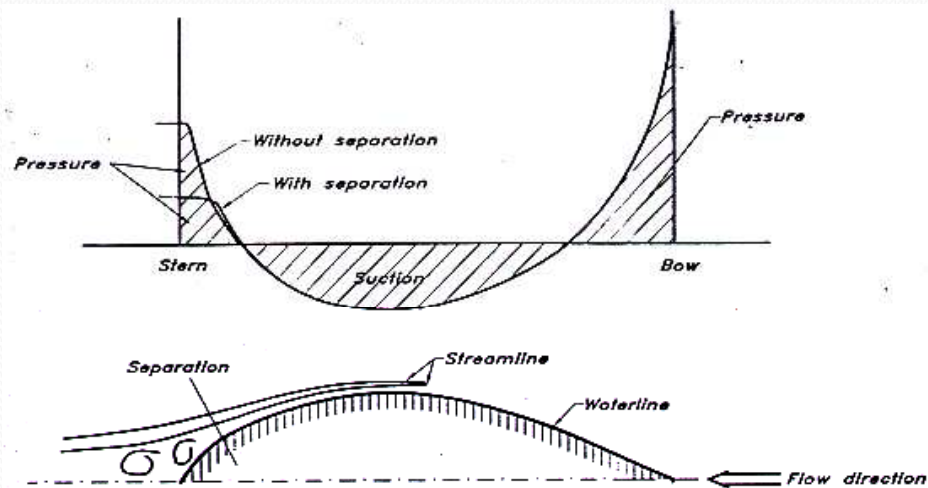
- Η επιτρεπόμενη τραχύτητα είναι αντιστρόφως ανάλογη της ταχύτητας
- Αν μελετηθεί το οριακό στρώμα στην πλώρη για διάφορες ταχύτητες μπορεί να καταρτιστεί εύκολα ένα διάγραμμα για την επιτρεπόμενη τραχύτητα, υπό την συνθήκη να μην έχουμε αντίσταση λόγω τραχύτητας.

Αντίσταση λόγω συνεκτικότητας:

Αντίσταση κατανομής των πιέσεων

- Αν δεν υπήρχε το οριακό στρώμα, τότε η υπερπίεση στη πρύμνη και στη πλώρη θα ήταν ίση με την υποπίεση στο μέσον της γάστρας.
- Η ύπαρξη του μεταβάλλει την κατανομή αυτή και επειδή είναι παχύτερο στην πρύμνη, η πίεση στην περιοχή αυτή επηρεάζεται περισσότερο.
- Τελικά είναι αναπόφευκτο να έχουμε απώλεια πίεσης στην πρύμνη, γεγονός που εντείνεται περισσότερο σε περίπτωση που έχουμε και αποκόλληση
- Για τη μείωση της αντίστασης αυτής, που για ένα ιστιοπλοϊκό μπορεί να είναι της τάξεως του 5-10% της αντίστασης τριβής, πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην κλίση των γραμμών της πρύμνης

Κατανομή της πίεσης στην ίσαλο ιστιοπλοϊκού σκάφους

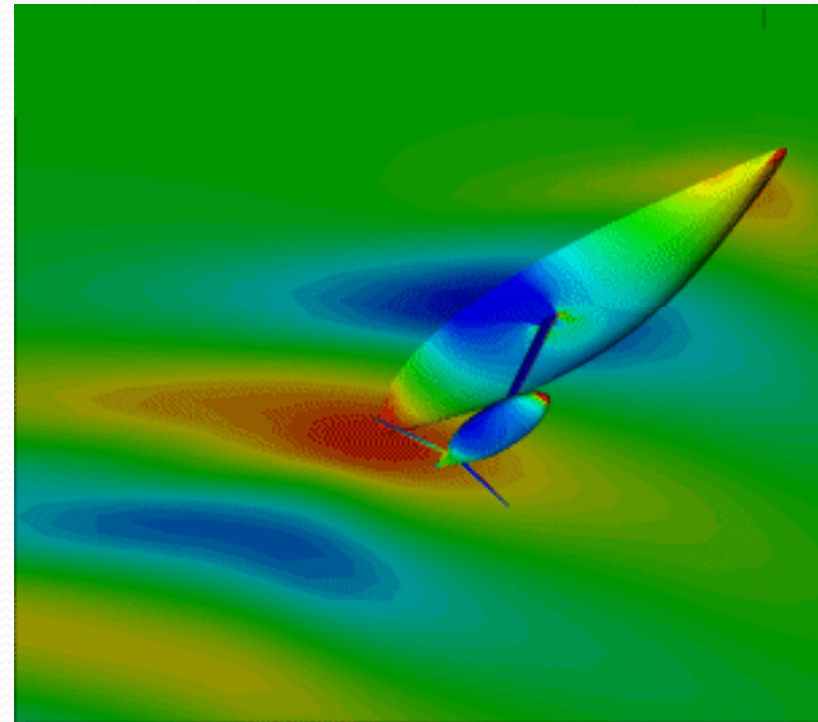


- Μάλιστα θα πρέπει να δοθεί περισσότερη προσοχή στις διαγώνιες αντί των ίσαλων, διότι αυτές προσεγγίζουν καλύτερα τις γραμμές ροής.

Αντίσταση λόγω συνεκτικότητας:

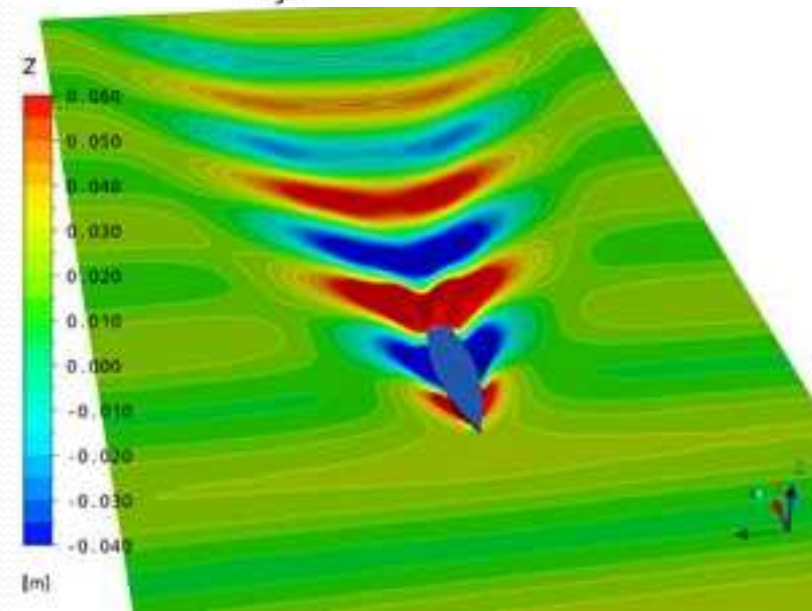
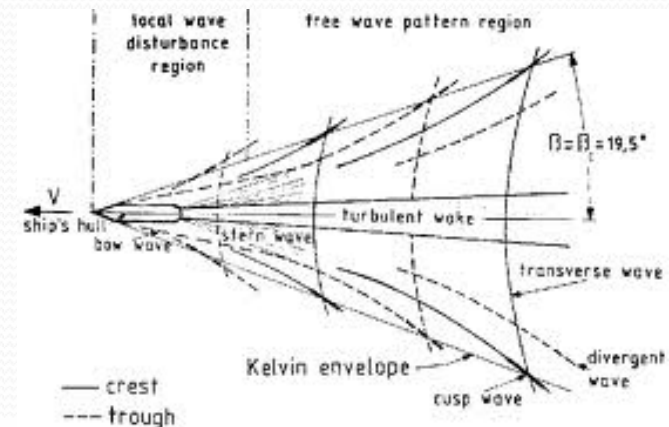
Αντίσταση λόγω κατανομής των πιέσεων

- Η αντίσταση λόγω κατανομής της πίεσης, όπως και η αντίσταση λόγω κυματισμού, εξαρτώνται κυρίως από το σχήμα της γάστρας και παραδοσιακά συνηθίζεται να υπολογίζονται μαζί
- Το άθροισμά τους ονομάζεται υπόλοιπη αντίσταση (residuary resistance) και ο υπολογισμός τους βασίζεται σε πειραματικά δεδομένα



Αντίσταση λόγω κυματισμού

- Το σύστημα κυματισμών που δημιουργεί η γάστρα των ιστιοπλοϊκών σκαφών είναι όμοιο με αυτό των συμβατικών σκαφών (κύματα Kelvin).
- Αν όμως περιοριστούμε τοπικά (σε μήκος μερικές φορές το μήκος της ισάλου) στο σύστημα κυματισμών μπορούμε να κάνουμε τις εξής παρατηρήσεις:
 1. οι γάστρες των ιστιοπλοϊκών παράγουν μια τέτοια κατανομή πίεσης, ώστε η υπερπίεση στην πλώρη και στην πρύμνη να είναι οι κυρίαρχες διαταραχές της πίεσης κατά μήκος της γάστρας. Επομένως μπορούμε να θεωρήσουμε ότι υπάρχουν μόνο δύο συστήματα κυματισμού → το σύστημα κυματισμού της **πλώρης** & το αντίστοιχο της **πρύμνης**.



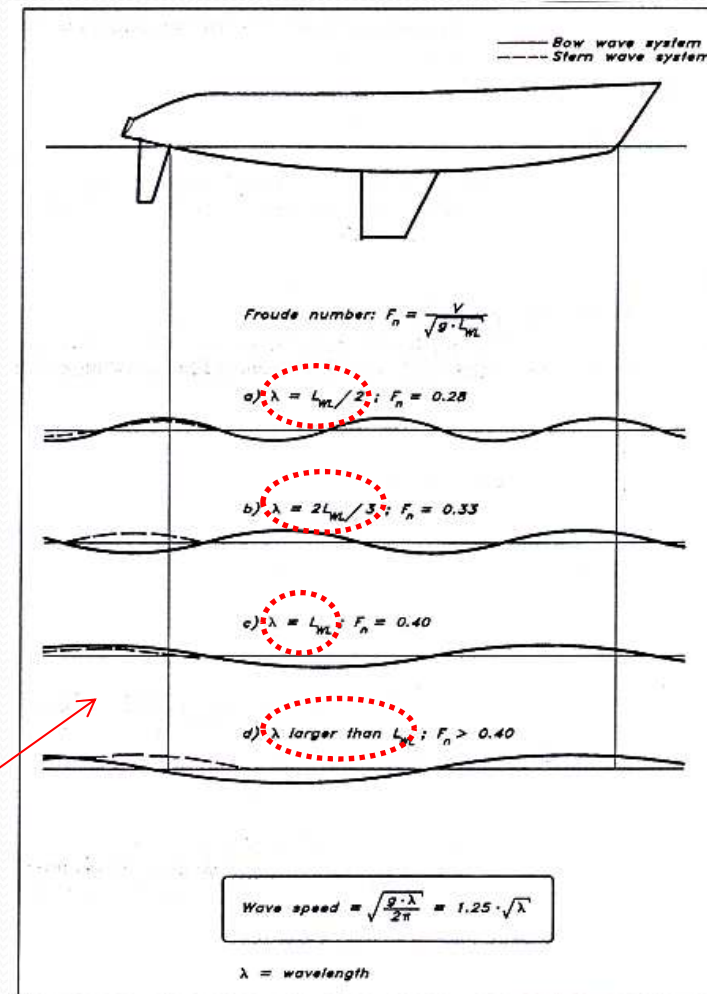
Αντίσταση λόγω κυματισμού

2. Η ταχύτητα αυτών των κυματισμών είναι η ταχύτητα του σκάφους, συνεπώς το μήκος τους είναι ίδιο και εξαρτάται από την ταχύτητα με τη γνωστή σχέση:

Ταχύτητα κύματος:

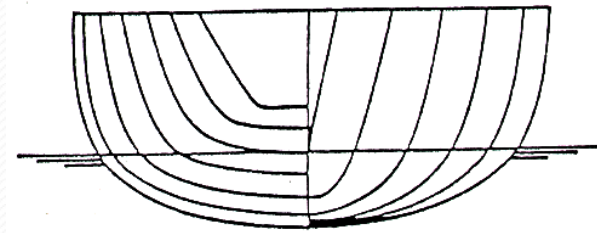
$$\left. \begin{aligned} V &= \sqrt{\frac{g \cdot \lambda}{2\pi}} \Leftrightarrow \lambda = \frac{V^2 \cdot 2\pi}{g} \\ F_n &= \frac{V}{\sqrt{g \cdot L_{WL}}} \Leftrightarrow L_{WL} = \frac{V^2}{F_n^2 \cdot g} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{\lambda}{L_{WL}} = \frac{2\pi}{F_n^2}$$

- Όταν τα δύο αυτά συστήματα υπερτεθούν στην πρύμνη, ανάλογα με τη φάση τους, θα ενισχυθούν ή θα αποσβεστούν.
- Αυτό εξαρτάται από τη σχέση του μήκους των κυματισμών λ με το μήκος της ισάλου L_{WL}



Υπόλοιπη αντίσταση

- Η υπόλοιπη αντίσταση (αντίσταση κυματισμών και αντίσταση λόγω κατανομής πίεσης) υπολογίζεται κατά τα γνωστά από πειραματικές μετρήσεις σε πρότυπα παρόμοιας γεωμετρίας.
 - Στα ιστιοπλοϊκά έχουν γίνει εκτεταμένα πειράματα στο πανεπιστήμιο του Delft της Ολλανδίας.
 - Συγκεκριμένα έχουν γίνει πειράματα σε δύο πατρικά σκάφη και σε συνολικά 50 μοντέλα.
 - Οι παράμετροι που διερευνήθηκαν είναι οι:
 - L_{WL}/B_{WL} ,
 - B_{WL}/T_C ,
 - C_p ,
 - LCB και
 - $L_{WL}/\nabla_C^{1/3}$
- Τα T_C και $\nabla_C^{1/3}$ αναφέρονται στο βύθισμα και στον όγκο μέχρι την ίσαλο.



PARENT MODEL (NO. 23 - 39)

Υπόλοιπη αντίσταση

- Από τα διαγράμματα υπόλοιπης αντίστασης που καταρτίστηκαν με αυτά τα πειράματα προκύπτει η εξής ενδιαφέρουσα παρατήρηση:
 - Για συγκεκριμένο αριθμό Froude, η υπόλοιπη αντίσταση είναι ανάλογη του εκτοπίσματος με σχετικά μικρή επίδραση από το σχήμα της γάστρας
 - Τα αμέσως επόμενα σημαντικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την υπόλοιπη αντίσταση είναι ο πρισματικός συντελεστής και η διαμήκης θέση του κέντρου άνωσης
 - Από τις στατιστικές σχέσεις που παρήχθησαν με επεξεργασία των πειραμάτων μπορεί να γίνει εύκολα βελτιστοποίηση των συντελεστών αυτών για μια συγκεκριμένη περιοχή ταχυτήτων

Αντίσταση λόγω εγκάρσιας κλίσης

- Κανονικά θα μπορούσε να μελετηθεί η γάστρα σε εγκάρσια κλίση και να υπολογιστούν από την αρχή όλες οι συνιστώσες αντίστασης για τις οποίες έγινε λόγος προηγουμένως.
- Υπάρχει όμως η δυνατότητα να προσεγγίσουμε ικανοποιητικά τη συνολική αντίσταση σε κεκλιμένη θέση προσθέτοντας στην αντίσταση όρθιας θέσης μια διορθωτική συνιστώσα.
- Η διορθωτική αυτή συνιστώσα υπολογίζεται από εμπειρικούς τύπους.

- Το πανεπιστήμιο του Delft στην Ολλανδία προτείνει την παρακάτω σχέση:

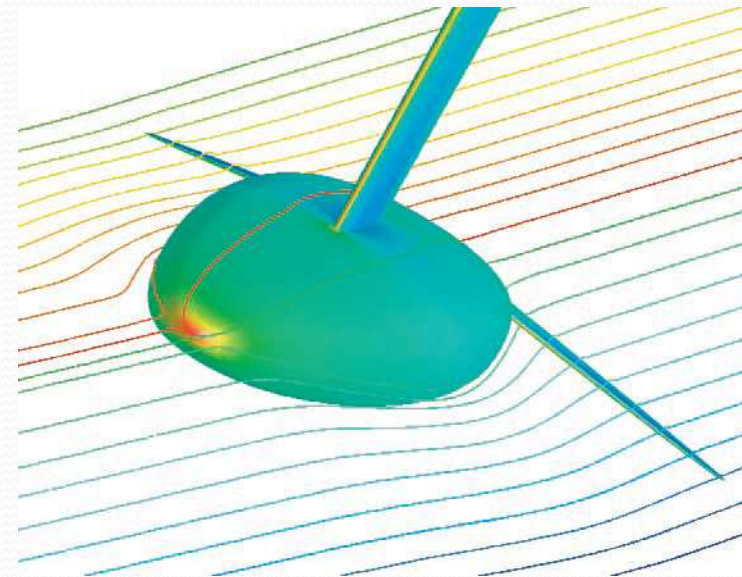
$$R_H = \rho/2 V^2 S_W C_H \Phi n^2$$

όπου :

- $C_H = [6.747 (T_C/T) + 2.517 (B_{WL}/T_C) + 3.710 (B_{WL}/T_C)(T_C/T)]10^3$
- $V =$ η ταχύτητα του σκάφους
- $S_W =$ η βρεχόμενη επιφάνεια στην όρθια κατάσταση
- $\Phi =$ η γωνία εγκάρσιας κλίσης

Επαγόμενη αντίσταση

- Η επαγόμενη αντίσταση είναι το κομμάτι της αντίστασης που προέρχεται από τις υδροτομές της γάστρας, την καρίνα και το πηδάλιο, λόγω της γωνίας απόκλισης.
- Η αντίσταση αυτή συνδέεται άμεσα με την επιλογή και σχεδίαση της καρίνας και του πηδαλίου και θα μελετηθεί στο αντίστοιχο εδάφιο.



Πρόσθετη αντίσταση κυματισμών

- Η μελέτη ενός σκάφους σε κυματισμούς είναι γενικά ένα δύσκολο πρόβλημα
- Όπως σε όλα τα σκάφη, έτσι και στα ιστιοπλοϊκά, η αντίσταση σε κυματισμούς εξαρτάται κυρίως από τις κινήσεις του σκάφους στις συγκεκριμένες καταστάσεις θάλασσας.
- Οι πιο σημαντικές κινήσεις, όσον αφορά την αντίσταση, είναι η κατακόρυφη κίνηση (heave), ο προνευστασμός (pitch) και ο διατοιχισμός (η εγκάρσια ταλάντωση - roll).
- Ειδικά στα ιστιοπλοϊκά σκάφη, η εγκάρσια ταλάντωση είναι μικρότερης σημασίας από τις άλλες κινήσεις και επειδή η βασική πηγή αντίστασης είναι οι υδροτομές της καρίνας και του πηδαλίου, λαμβάνεται υπόψη μόνο κατά το σχεδιασμό των παρελκομένων.
- Οι άλλες δύο κινήσεις είναι συνήθως στενά συνδεδεμένες μεταξύ τους και ο συνδυασμός τους παράγει ένα σημαντικό σύστημα κυματισμών.
- Οι κύριοι παράγοντες από τους οποίους εξαρτώνται οι κινήσεις αυτές είναι η κατανομή του βάρους στα άκρα του σκάφους και η απόσβεση αυτών των κινήσεων που εξασφαλίζουν οι ναυπηγικές γραμμές του σκάφους.