



Ειδικές Ναυπηγικές Κατασκευές και Ιστιοφόρα σκάφη

Διδάσκουσα:

Σ. Κ. Πέππα, Καθηγήτρια Εφαρμογών

Η πλεύση του ιστιοπλοϊκού

Γενικά

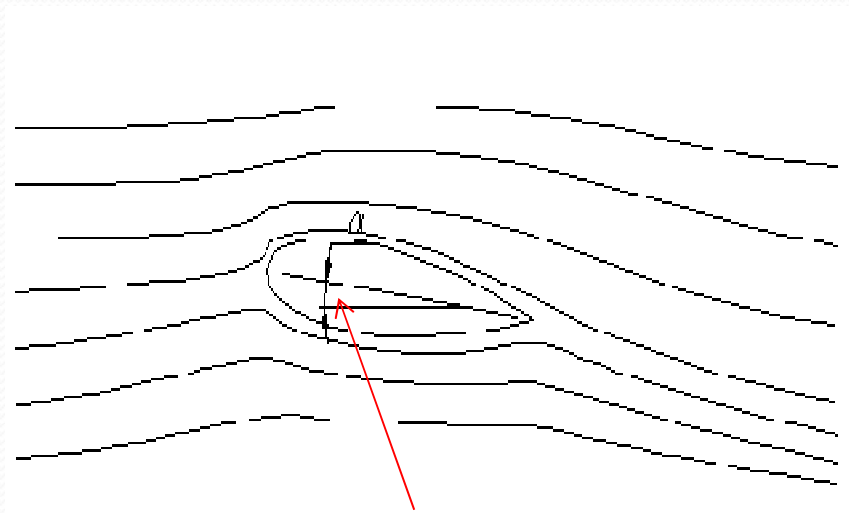
- Βασική προϋπόθεση για την κατανόηση της ιδιόμορφης πλεύσης των ιστιοπλοϊκών είναι η γνώση του τρόπου δημιουργίας των δυνάμεων που ασκούνται στο σκάφος από τον αέρα και τη θάλασσα και των μεταξύ των αλληλεπιδράσεων μέσω των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του σκάφους και του εξοπλισμού του.
- Η πηγή ενέργειας των Ιστιοπλοϊκών είναι ο άνεμος και συγκεκριμένα η κινητική του ενέργεια.
- Όμως τα χαρακτηριστικά του ανέμου (διεύθυνση και ένταση) δεν συμβαδίζουν πάντα με τις επιθυμίες του κυβερνήτη.
- Όταν συμβαίνει αυτό, τα ιστιοπλοϊκά, αφού παραλάβουν τη δύναμη από τον αέρα με τα πανιά τους, πρέπει να τη μετατρέψουν σε χρήσιμη προωστήρια ώθηση.

Αρχή λειτουργίας

- Τα πανιά, αφού στηριχτούν κατάλληλα, ανάλογα με την κατεύθυνση και ένταση του αέρα, παράγουν αεροδυναμική δύναμη.
- Συγχρόνως η συνολική κατάσταση και γεωμετρία της γάστρας (καρίνα, τιμόνι, κατανομή βάρους, κτλ) αντιδρά και με τη θέση και κίνησή της στο νερό παράγει υδροδυναμική δύναμη.
- Ο συνδυασμός των δυνάμεων αυτών καθορίζει την κίνηση του σκάφους.

Εισαγωγή στην αερο- υδροδυναμική θεωρία

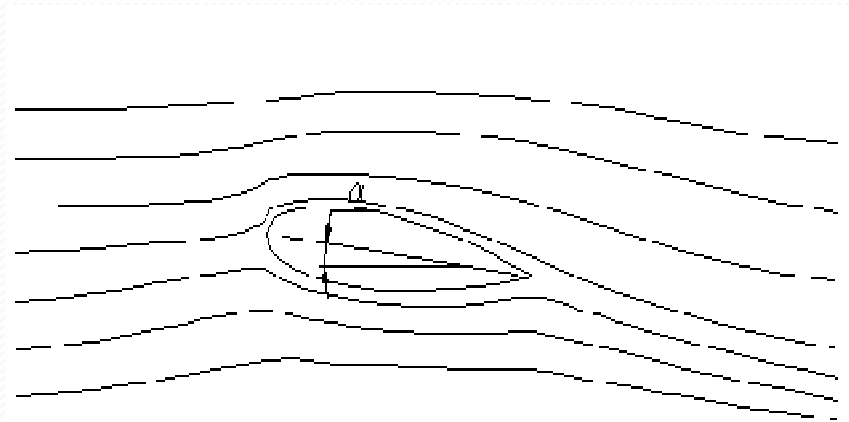
- Θα εξετάσουμε την περίπτωση που ένα πτερύγιο κινείται μέσα σε ένα ρευστό, περίπτωση η οποία είναι ταυτόσημη με αυτή στην οποία ένα ρευστό κινείται γύρω από ένα πτερύγιο.
- Θα ονομάσουμε ταχύτητα της ροής την ταχύτητα του πτερυγίου και γωνία πρόσπτωσης, τη γωνία της ταχύτητας της ροής με το κεντρικό άξονα του πτερυγίου.
- Χωρίς την παρουσία του πτερυγίου, η ροή του ρευστού θα ήταν ομοιόμορφη.



Γωνία πρόσπτωσης, α , σε μια αεροτομή ονομάζεται η γωνία της ταχύτητας του ρευστού στο άπειρο με τον άξονα της αεροτομής.

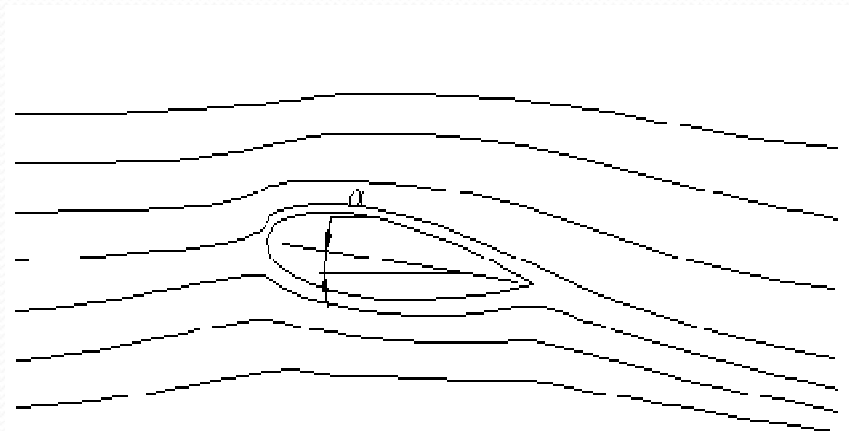
Εισαγωγή στην αερο- υδροδυναμική θεωρία

- Η παρουσία του πτερυγίου όμως, επηρεάζει τοπικά τη ροή, όπως φαίνεται στο επόμενο σχήμα με αποτέλεσμα να χωρίζεται η ροή του ρευστού σε δύο επιμέρους ροές:
 - σε αυτή που κατευθύνεται πάνω από το πτερύγιο και
 - σε αυτή που κατευθύνεται κάτω από αυτό.
- Επίσης η ροή που περνάει από πάνω από το πτερύγιο έχει τοπικά μεγαλύτερη ταχύτητα από την αντίστοιχη ροή που περνάει από κάτω από το πτερύγιο και έτσι δημιουργείται μεταξύ της πάνω και της κάτω επιφάνειας του πτερυγίου διαφορά πίεσης.



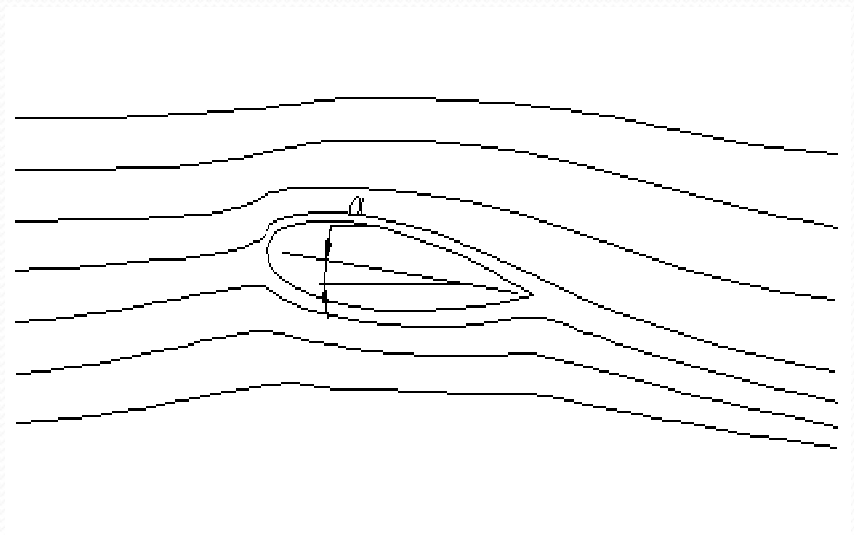
Εισαγωγή στην αερο- υδροδυναμική θεωρία

- Το αποτέλεσμα αυτής της επίδρασης είναι να ασκούνται δυνάμεις, τόσο στο πτερύγιο, όσο και στα μόρια του ρευστού.
- Η συνολική δύναμη που ασκείται στο πτερύγιο μπορεί να αναλυθεί σε δύο κύριες συνιστώσες:
 - Την αντίσταση, που έχει την κατεύθυνση του ρευστού και
 - την δυναμική άνωση, που έχει κατεύθυνση κάθετη στην κατεύθυνση του ρευστού.



Εισαγωγή στην αερο- υδροδυναμική θεωρία

- Η δυναμική άνωση, είναι πάρα πολύ σημαντική δύναμη και σε αυτή στηρίζεται η ικανότητα των ιστιοπλοϊκών να κινούνται αντίθετα στον άνεμο.
- Η έντασή της εξαρτάται άμεσα από την γωνία πρόσπτωσης, με την οποία έχει γραμμική σχέση, αρκεί να μην παρουσιαστεί αποκόλληση της ροής.
- Όταν παρουσιάζεται αποκόλληση της ροής από την πτέρυγα, έχουμε δημιουργία στροβίλων και τοπική μείωση της ταχύτητας του ρευστού, γεγονός που οδηγεί σε άμεση αύξηση της στατικής πίεσης στην περιοχή της αποκόλλησης.
- Επειδή η δυναμική άνωση, δημιουργείται από την διαφορά πίεσης μεταξύ της πάνω και κάτω επιφάνειας της πτέρυγας είναι φανερό, ότι όταν έχουμε αποκόλληση, η δυναμική άνωση μειώνεται κατακόρυφα

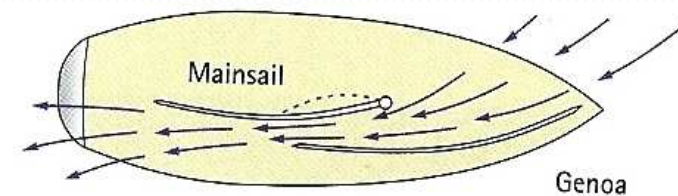
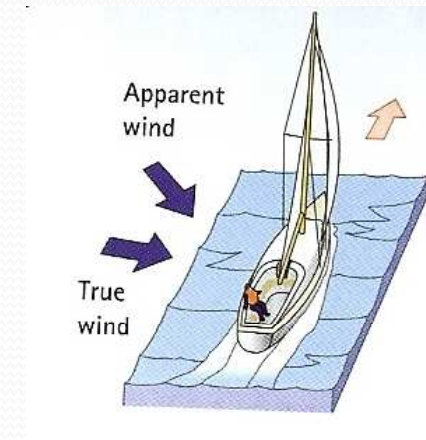


Εισαγωγή στην αερο- υδροδυναμική θεωρία

- Το φαινόμενο της αποκόλλησης της ροής παρουσιάζεται όταν η γωνία πρόσπτωσης είναι πολύ μεγάλη ή όταν η ταχύτητα αυξηθεί πολύ.
- Τα μόρια του ρευστού, έχουν την τάση να μην αφήνουν κενό χώρο μέσα στη μάζα του ρευστού.
- Αυτό σημαίνει ότι όταν ένα σώμα κινείται μέσα σε ρευστό, τα μόρια του ρευστού, τείνουν να ακολουθούν την επιφάνεια του σώματος.
- Όταν παρατηρείται το φαινόμενο της αποκόλλησης της ροής, σημαίνει ότι οι αδρανειακές δυνάμεις των μορίων του ρευστού, είναι αρκετά μεγάλες, δεν αφήνουν το μόρια να παρακολουθήσουν την επιφάνεια του κινούμενου σώματος και αποκολλούνται.
- Αυτό συμβαίνει είτε όταν η ταχύτητα του σώματος είναι πολύ μεγάλη είτε όταν το σχήμα του είναι τέτοιο που να απαιτεί μεγάλες επιταχύνσεις από τα μόρια του ρευστού, για να παρακολουθήσουν την επιφάνειά του.
- Σε μια πτέρυγα, η τελευταία περίπτωση παρουσιάζεται σε μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης.

Εισαγωγή στην αερο- υδροδυναμική θεωρία

- Τόσο τα πανιά, όσο και η γάστρα λειτουργούν ως πτέρυγες που κινούνται με κάποια γωνία πρόσπτωσης μέσα σε ρευστό. Τα πανιά μάλιστα, έχουν σχήμα λεπτών αεροτομών, το οποίο είναι ιδιαίτερα αποδοτικό στη δημιουργία δυναμικής άνωσης.
- Στα πανιά, το ρευστό, μέσα στο οποίο κινούνται, είναι ο άνεμος και η ταχύτητα της ροής είναι η σχετική ταχύτητα του αέρα ως προς το σκάφος.
- Στη γάστρα, το ρευστό μέσα στο οποίο κινείται, είναι η θάλασσα και η ταχύτητα του ρευστού είναι η σχετική ταχύτητα του νερού ως προς το σκάφος, δηλαδή η αντίθετη της ταχύτητας του σκάφους.



Η γεωμετρία της πλεύσης των ιστιοπλοϊκών

Πλεύση όρτσα

- Η μεγάλη αρετή της ιστιοπλοΐας είναι η πλεύση αντίθετη στον άνεμο.
- Η δυνατότητα αυτής της πλεύσης, έδωσε στο ιστιοφόρο τη δυνατότητα να πλέει προς τον προορισμό του, ασχέτως της κατεύθυνσης του ανέμου.
- Αυτό ήταν πάρα πολύ σημαντικό και μόνο μετά την ανακάλυψή αυτής της πλεύσης, μπόρεσε η ναυσιπλοΐα να ξεφύγει από την κωπήλατη πρόωση, ενώ αύξησε την επιχειρησιακή δυνατότητα των σκαφών κατακόρυφα.
- Μελετώντας την αεροδυναμική θεωρία, αμέσως μπορούμε να βγάλουμε το συμπέρασμα ότι είναι αδύνατο η δύναμη πρόωσης των πανιών από μόνη της να κινήσει το σκάφος σε κατεύθυνση αντίθετα στον άνεμο.
- Όμως, ο κατάλληλος συνδυασμός των δυνάμεων από τα πανιά και από τη γάστρα μπορεί να κινήσει το ιστιοπλοϊκό σε διάφορες γωνίες σε σχέση με την κατεύθυνση του ανέμου, από παράλληλα με τον αέρα έως και με κάποια γωνία της τάξεως των 40 μοιρών αντίθετα στον αέρα.

Πλεύση όρτσα

- Για να επιτευχθεί η κίνηση αντίθετα στον άνεμο, θα πρέπει το σκάφος και τα πανιά, δηλαδή η αεροδυναμική και υδροδυναμική δύναμη σε σχέση με τον άνεμο, να συνδυαστούν κατάλληλα γεωμετρικά.
- Πρέπει επίσης να διευκρινιστεί, ότι η μελέτη του προβλήματος σε κατάσταση ισορροπίας, όπου το σκάφος εκτελεί ευθύγραμμη ομαλή κίνηση, είναι από μόνη της αρκετά πολύπλοκη με αποτέλεσμα να υπάρχουν ελάχιστες αναφορές στη βιβλιογραφία για τις μεταβατικές καταστάσεις.
- Τέλος η εξέταση του φαινομένου μπορεί να γίνει σε διάφορα επίπεδα λεπτομέρειας ανάλογα με τις παραδοχές που θα γίνουν αρχικά

Βασικές Παραδοχές

Παραδοχή 1 (Π1)

- Η μελέτη θα γίνει για την κατάσταση ισορροπίας σε ήρεμο νερό και σταθερές καιρικές συνθήκες.
- Η παραδοχή αυτή είναι πολύ σημαντική δεδομένου ότι αυτό δεν ισχύει σχεδόν ποτέ στην πραγματικότητα, δεδομένου ότι το ήρεμο νερό συνήθως προϋποθέτει στην ανοιχτή θάλασσα την απουσία του ανέμου.
- Στην πραγματικότητα σταθερό άνεμο περιμένουμε συνήθως σε μεγάλες εντάσεις ανέμου, στις οποίες δεν μπορούμε να ελπίζουμε σε ήρεμο νερό.
- Παρόλα αυτά, η παραδοχή οδηγεί σε άριστη κατανόηση και ποιοτικής προσέγγισης του προβλήματος της πλεύσης των ιστιοπλοϊκών, ενώ η ποσοτική προσέγγιση της μπορεί εύκολα να πραγματοποιηθεί εκ' των υστέρων με διορθωτικούς μηχανισμούς, παρόμοιους με αυτούς που έχουν ήδη αναπτυχθεί στα συμβατικά σκάφη.

Βασικές Παραδοχές

Παραδοχή 2 (Π2)

- Θα αμελήσουμε την διαγωγή του σκάφους.
- Σε πρώτη προσέγγιση, η ελάχιστη αναμενόμενη διαγωγή σε πλεύσεις αντίθετα στον άνεμο και η μέγιστη αναμενόμενη διαγωγή των περίπου 2 ή 2.5 μοιρών στις υπόλοιπες, αυξάνει δυσανάλογα περισσότερο την πολυπλοκότητα του προβλήματος σε σχέση με την επίδρασή της στη γεωμετρική ανάλυση

Βασικές Παραδοχές

Παραδοχή 3 (Π3)

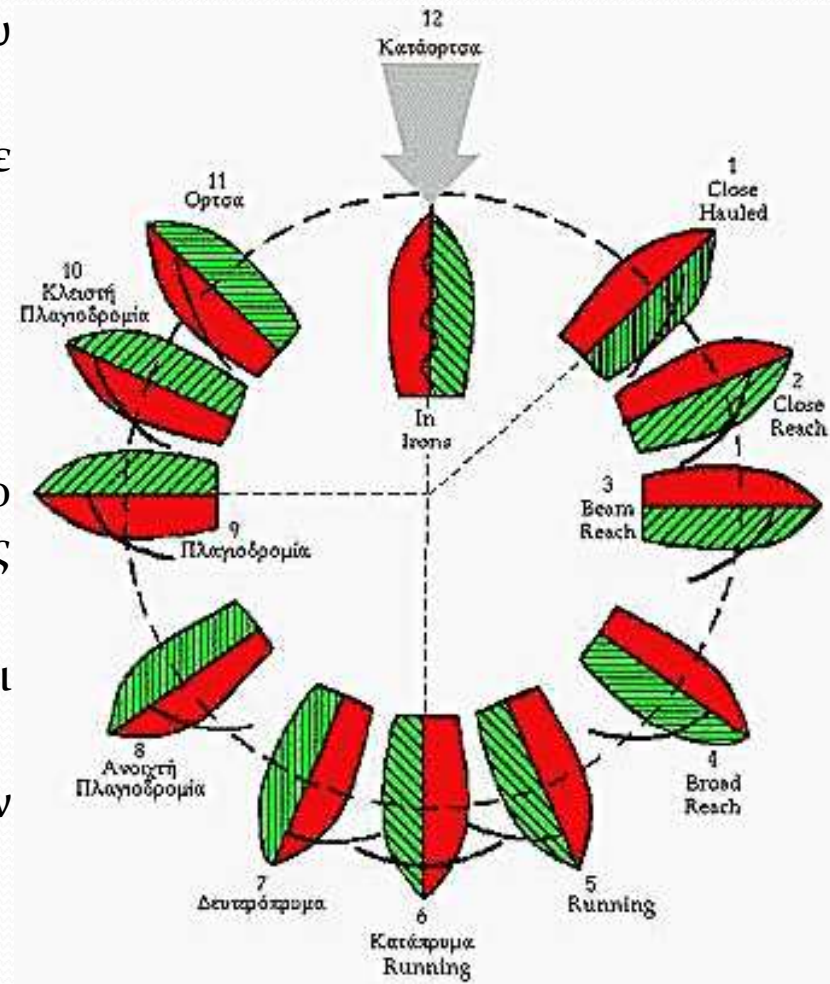
- Τέλος υποθέτουμε ότι οι δυνάμεις από τα πανιά και τη γάστρα δεν έχουν συνιστώσα κατά τον άξονα z του σκάφους όπως θα τον ορίσουμε παρακάτω.
- Στην παραδοχή αυτή εμπεριέχεται και η υπόθεση ότι το κατάρτι είναι παράλληλο με τον άξονα των z , αν και αυτό δεν είναι απολύτως ακριβές, δεδομένου, ότι συχνά το κατάρτι δεν είναι κάθετο στο επίπεδο xy και επιπροσθέτως έχει κυρτότητα που εξαρτάται από την πλεύση και τον άνεμο.
- Αυτή η παραδοχή απλοποιεί σημαντικά την ανάλυση που θα ακολουθήσει, χωρίς ωστόσο να εισάγει σημαντικό σφάλμα

Συστήματα Αναφοράς

- Ορίζονται δύο όμοια δεξιόστροφα καρτεσιανά συστήματα αναφοράς: ένα δεμένο στο σκάφος και ένα δεμένο στο χώρο.
- **Σωματόδετο Σύστημα Αναφοράς**
 - Το σωματόδετο σύστημα συντεταγμένων xyz κινείται με την (σταθερή) ταχύτητα του σκάφους και ορίζεται ως εξής:
 - Ο άξονας των x έχει τη διεύθυνση του άξονα συμμετρίας του σκάφους και φορά από την πρύμνη προς την πλώρη.
 - Οι άξονες των y και z έχουν συνήθως την κατεύθυνση που ορίζεται στο σχέδιο εγκαρσίων τομών (bodyplan) του σκάφους, ενώ το κέντρο των αξόνων μπορεί να ληφθεί αυθαίρετα.
- **Χωρόδετο Σύστημα Αναφοράς**
 - Το χωρόδετο σύστημα συντεταγμένων XYZ ορίζεται ως εξής:
 - Ο άξονας των X έχει την κατεύθυνση της (ευθύγραμμης) τροχιάς του σκάφους.
 - Ο άξονας των Z έχει κατακόρυφη διεύθυνση με φορά προς τα πάνω. Η διεύθυνση του άξονα των Y προκύπτει, η φορά του είναι όμοια με αυτή του y , όταν το σκάφος δεν έχει εγκάρσια κλίση, και το κέντρο των αξόνων μπορεί να ληφθεί αυθαίρετα.

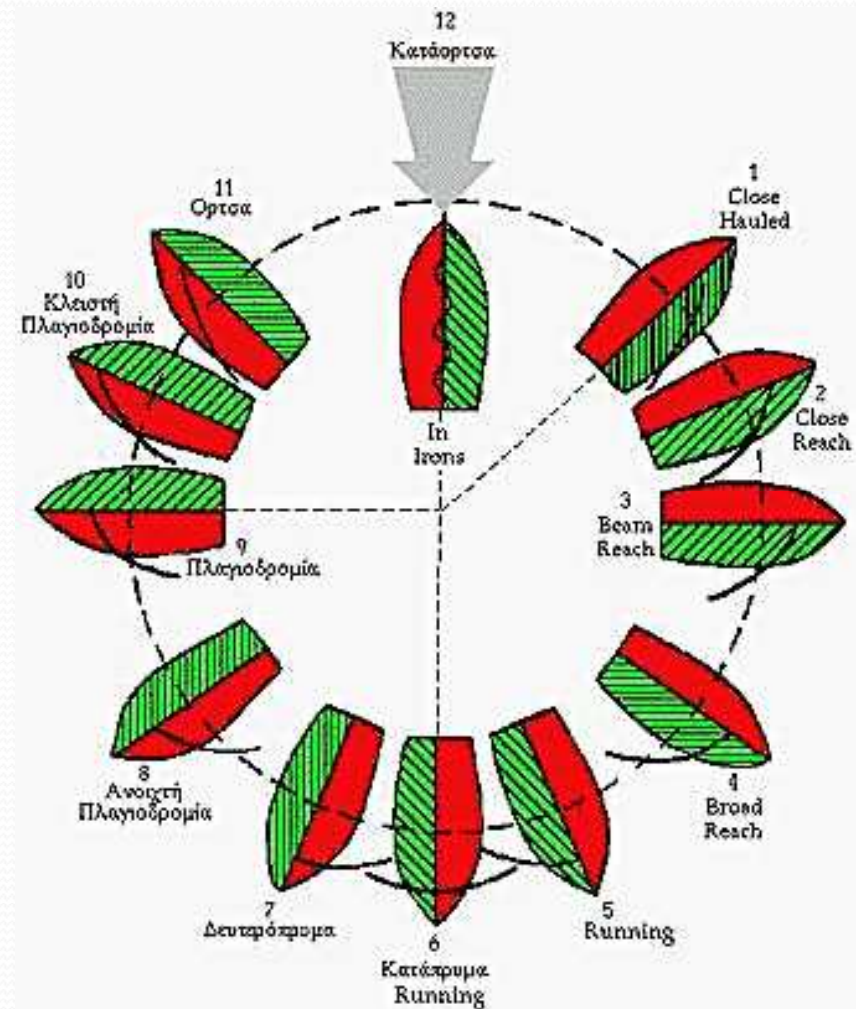
Πλεύση

- Πλεύση είναι η κατεύθυνση κίνησης του σκάφους σε σχέση με τον άνεμο.
- Όλες οι δυνατές πλεύσεις ομαδοποιούνται σε τρεις κύριες κατηγορίες:
 - την πλαγιοδρομία,
 - τα όρτσα και
 - τα πρίμα.
- Επίσης μπορούμε να ορίσουμε και δύο ενδιάμεσες κατηγορίες, τις οποίες τις ονομάζουμε:
 - ανοιχτή πλαγιοδρομία, μεταξύ πρίμα και πλαγιοδρομίας, και
 - κλειστή πλαγιοδρομία, ανάμεσα στην πλαγιοδρομία και τα όρτσα.



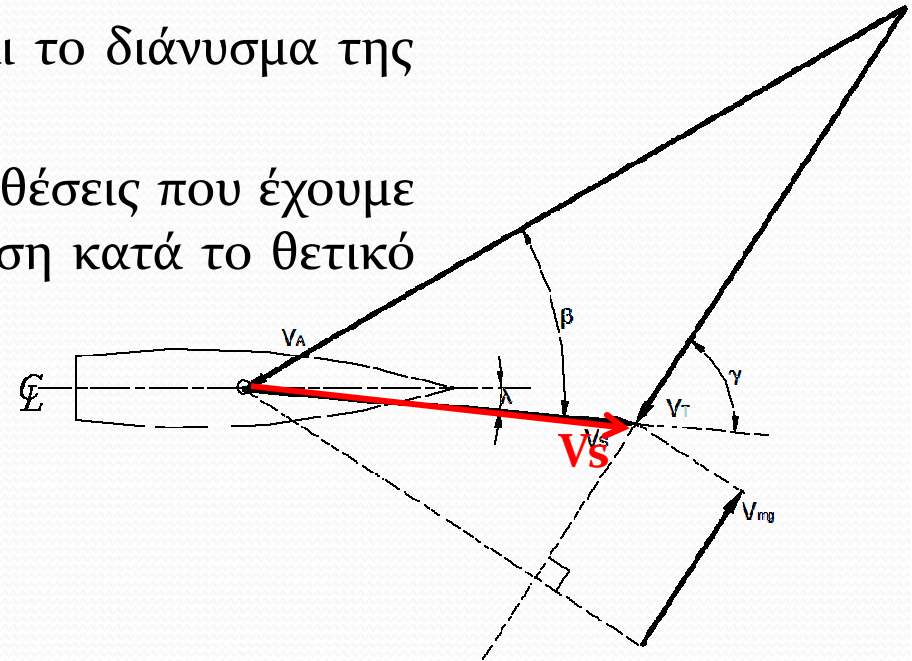
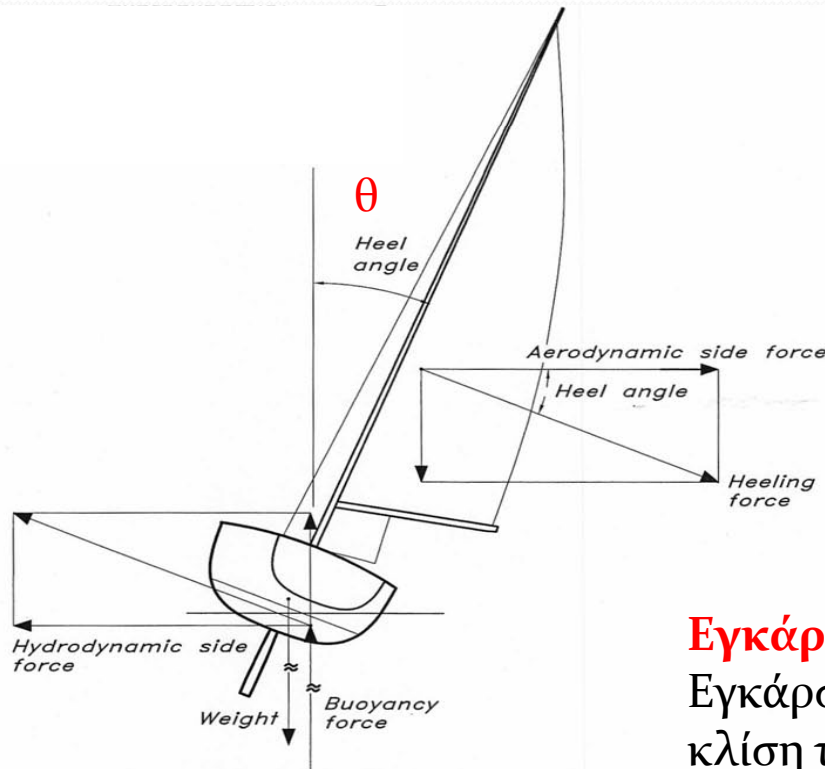
Πλεύση

- Ο ορισμός αυτών των κατηγοριών γίνεται ως εξής:
 - Η πλεύση **κάθετα** με την ταχύτητα του ανέμου ονομάζεται **πλαγιοδρομία**.
 - Οι πλεύσεις **με φορά προς την κατεύθυνση του ανέμου** ονομάζονται **ανοιχτές** και ειδικά αυτές που έχουν γενικά την κατεύθυνση του ανέμου ονομάζονται **πρίμα**.
 - Αντίστοιχα οι πλεύσεις **με φορά αντίθετη με την κατεύθυνση του ανέμου** ονομάζονται **κλειστές** και ειδικά αυτές που έχουν κατεύθυνση κοντά σε αυτή με τη μικρότερη δυνατή γωνία **αντίθετα** από την κατεύθυνση του ανέμου ονομάζονται **όρτσα** (**εγγυτάτη, Close Hauled**)



Ταχύτητα-Εγκάρσια κλίση

- Ταχύτητα του σκάφους, V_S , ονομάζεται το διάνυσμα της ταχύτητας του σκάφους.
- Το διάνυσμα αυτό, σύμφωνα με τις υποθέσεις που έχουμε κάνει, είναι σταθερό και έχει κατεύθυνση κατά το θετικό ημι-άξονα του X.

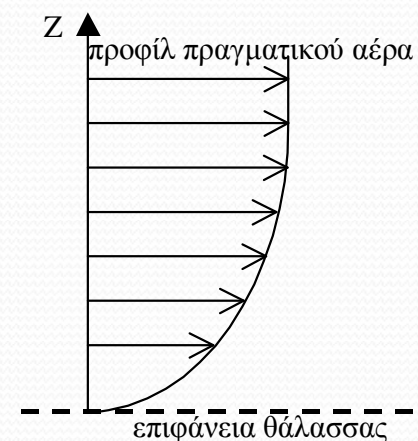
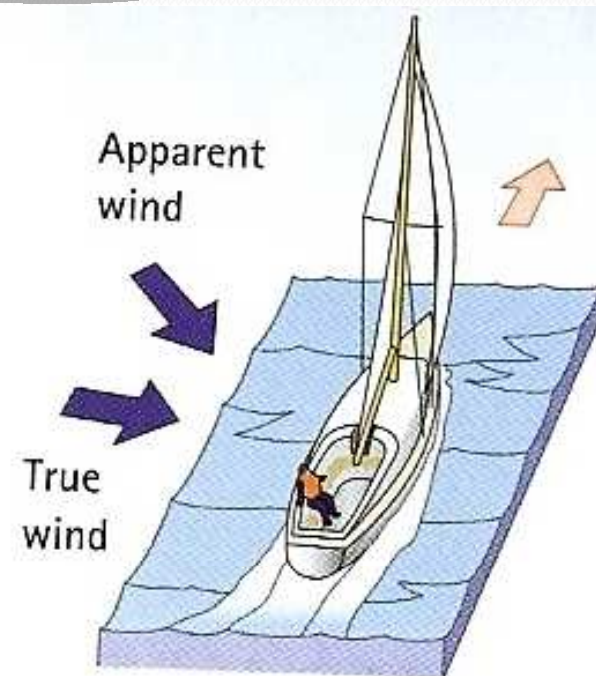


Εγκάρσια Κλίση

Εγκάρσια κλίση, θ , συμβολίζεται η εγκάρσια κλίση του σκάφους.

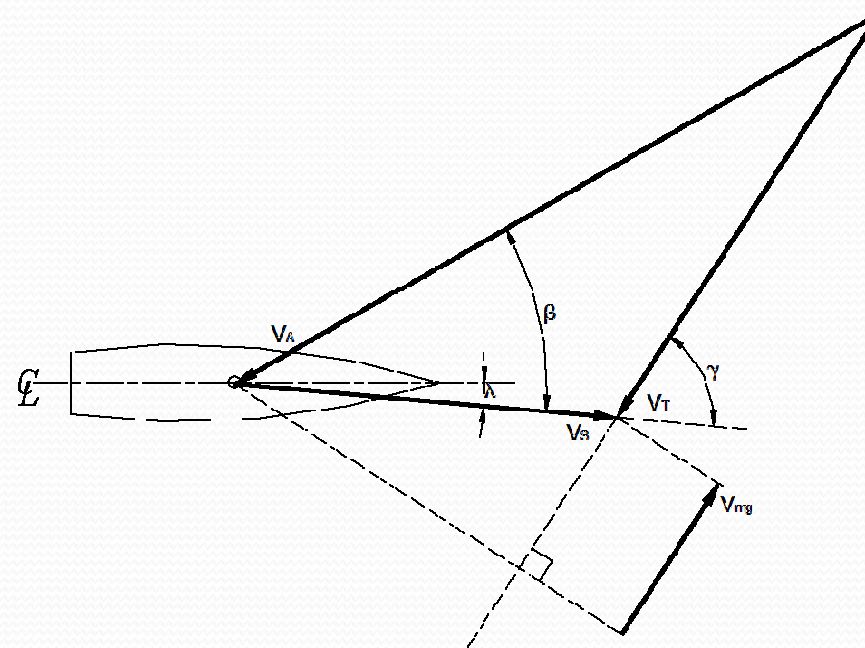
Άνεμος

- Στη συνέχεια θα προχωρήσουμε στις υποθέσεις για τον αέρα. Μας ενδιαφέρουν δύο κυρίως έννοιες:
 - **Ο απόλυτος ή πραγματικός αέρας (true wind)** και
 - **Ο σχετικός ως προς το σκάφος (apparent wind)**.
- Παρόλο που για να απλοποιήσουμε το πρόβλημα θα θεωρήσουμε ότι ο πραγματικός αέρας έχει ιδανικά σταθερή ταχύτητα και διεύθυνση σε σχέση με το χρόνο, δεν πρέπει να ξεχάσουμε εντελώς την ύπαρξη του οριακού στρώματος.
- Το οριακό στρώμα είναι υπεύθυνο για το χαρακτηριστικό προφίλ του μέτρου της ταχύτητας του αέρα συναρτήσει του ύψους από τη θάλασσα, το πάχος του οποίου συνήθως είναι αρκετά μέτρα.



Άνεμος

- Για το λόγο αυτό ο σχετικός άνεμος ως προς το σκάφος έχει ένα αντίστοιχο προφίλ στο μέτρο της ταχύτητάς του, αλλά συγχρόνως και μια αντίστοιχη στροφή στη διεύθυνσή του, ανάλογη με το μέτρο του πραγματικού αέρα στο συγκεκριμένο ύψος.
- Ωστόσο είναι αναγκαίο να οριστούν συμβατικά ονομαστικά μεγέθη, που έχουν σχέση με το πως μετριέται ο πραγματικός άνεμος και το πως μοντελοποιείται η παραγωγή της αεροδυναμικής δύναμης από τα πανιά.



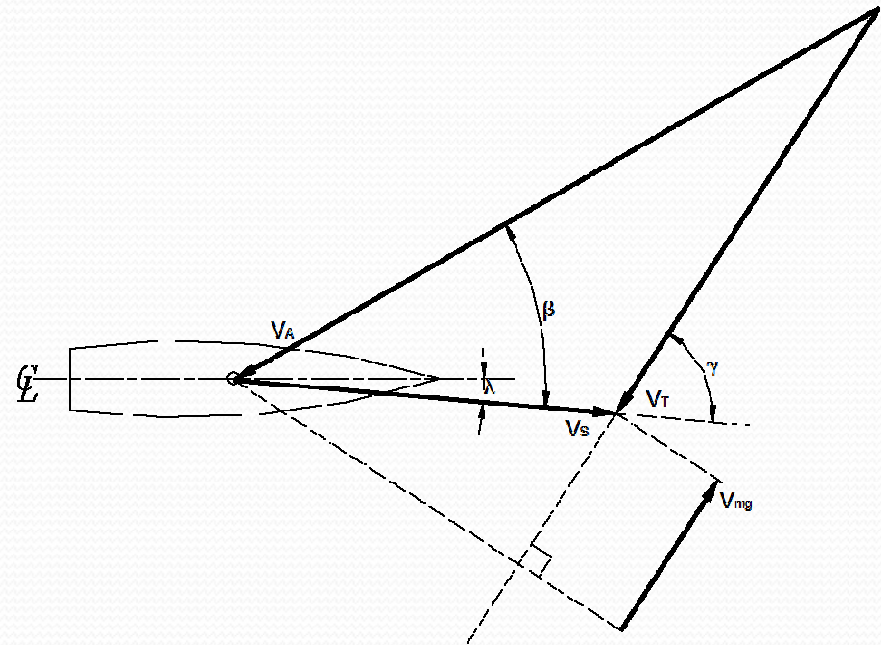
Άνεμος

Ταχύτητα Πραγματικού Αέρα

- **Ταχύτητα πραγματικού αέρα, V_T** , ονομάζεται το ονομαστικό διάνυσμα της ταχύτητας του πραγματικού αέρα.

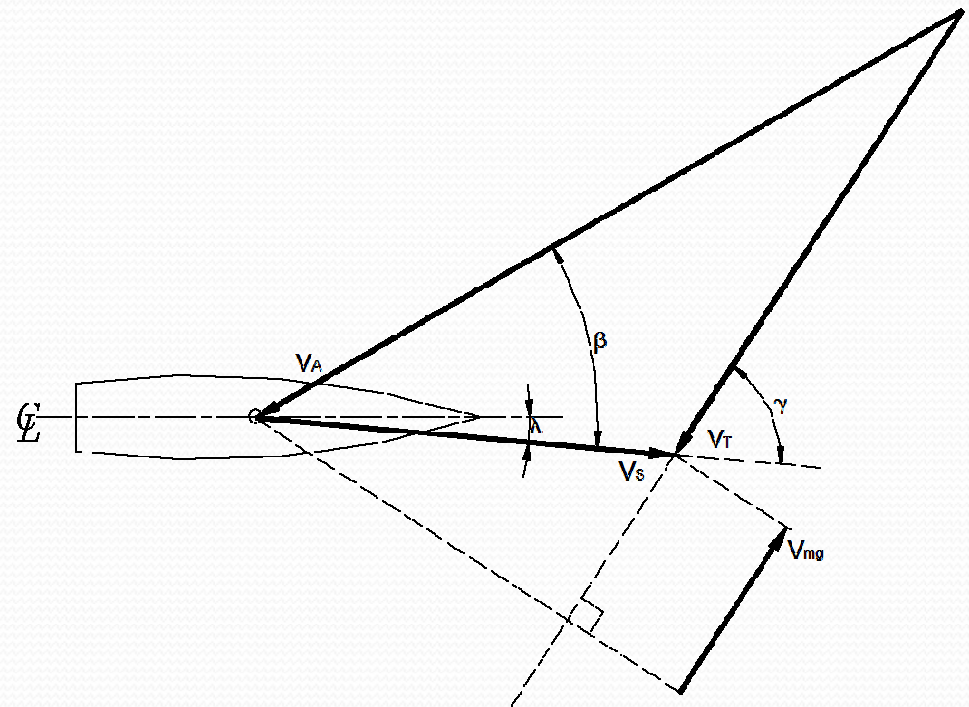
Ταχύτητα Φαινόμενου Αέρα

- **Ταχύτητα φαινόμενου αέρα, V_A** , ονομάζεται η σχετική ταχύτητα του πραγματικού αέρα ως προς το σκάφος.
- Αυτό σημαίνει, ότι είναι το διάνυσμα του πραγματικού αέρα όπως αυτό μετασχηματίζεται στο σωματόδετο σύστημα συντεταγμένων με βάση το διάνυσμα της ταχύτητας του σκάφους, V_S
- Η φαινόμενη διεύθυνση αέρα και ο φαινόμενος άνεμος αναφέρονται στο διάνυσμα V_A
- **Ταχύτητα αντίθετη στη διεύθυνση του ανέμου, V_{mg}** , ορίζεται ως η συνιστώσα της ταχύτητας του σκάφους στη διεύθυνση της ταχύτητας του πραγματικού ανέμου V_T



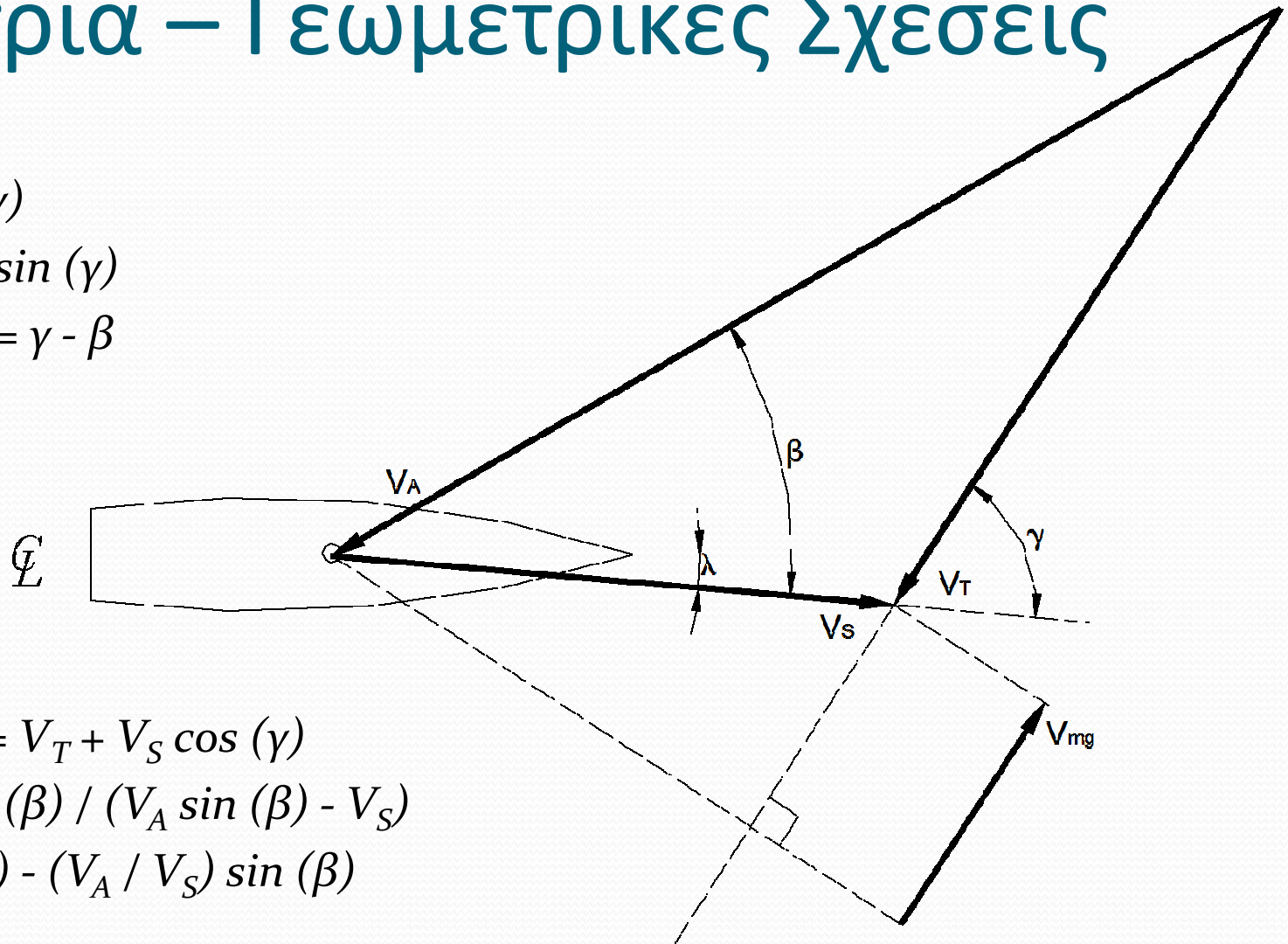
Γεωμετρία – Γεωμετρικές Σχέσεις

- **Γωνία πλεύσης, β** , ονομάζουμε τη γωνία του φαινόμενου αέρα με την απόλυτη ταχύτητα του σκάφους.
- **Γωνία απόκλισης, λ** , είναι η γωνία που σχηματίζει ο άξονας συμμετρίας του σκάφους με τη διεύθυνση της απόλυτης ταχύτητάς του. Στα ιστιοπλοϊκά η γωνία αυτή είναι κατά κανόνα μη μηδενική.
- Η γωνία, τέλος, μεταξύ της διεύθυνσης πλεύσης και του πραγματικού αέρα συμβολίζεται με το σύμβολο γ .



Γεωμετρία – Γεωμετρικές Σχέσεις

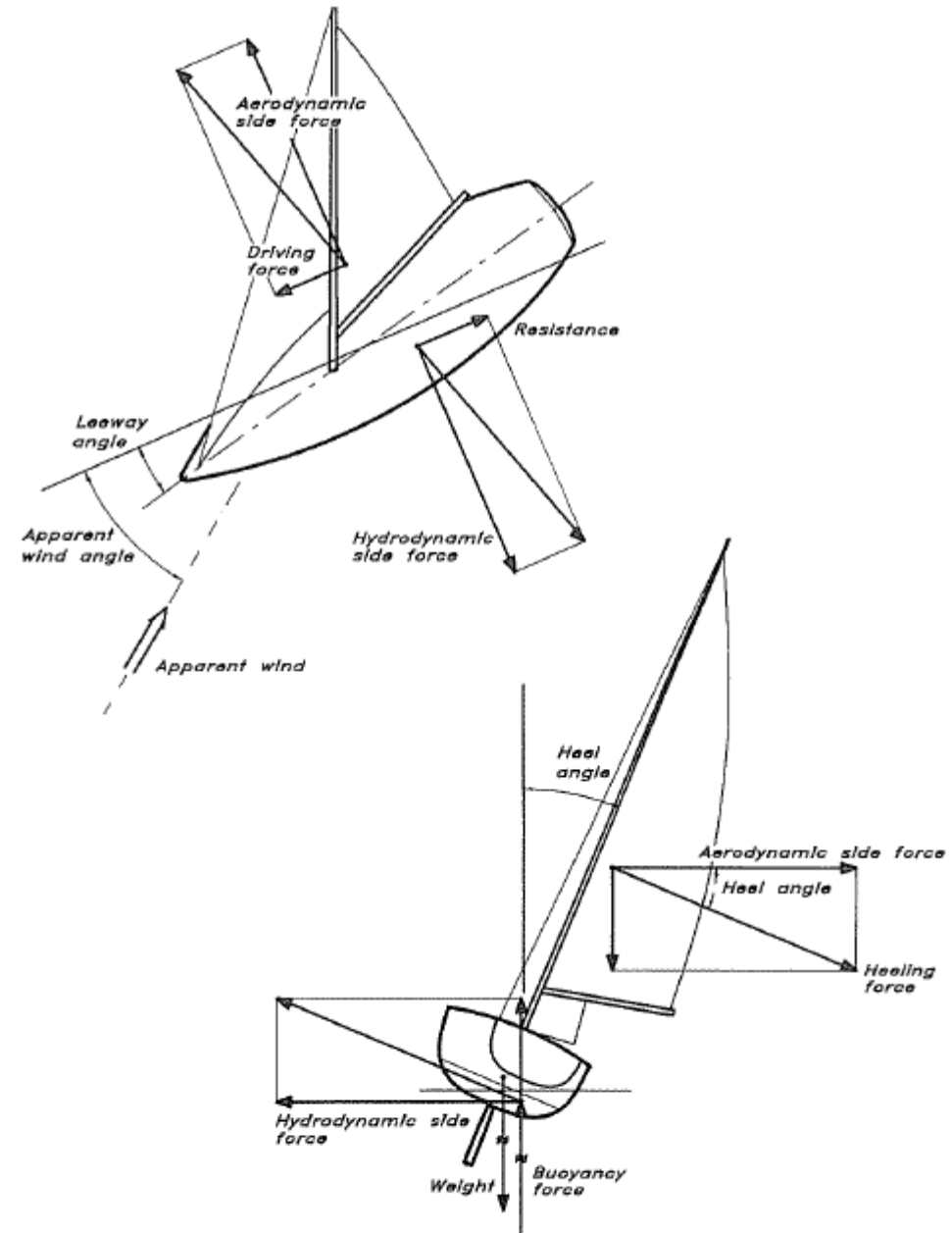
- $V_{mg} = V_S \cos(\gamma)$
- $V_A \sin(\beta) = V_T \sin(\gamma)$
- γωνία $(V_T V_A) = \gamma - \beta$



- $V_A \cos(\beta - \gamma) = V_T + V_S \cos(\gamma)$
- $\tan(\gamma) = V_A \sin(\beta) / (V_A \sin(\beta) - V_S)$
 $= \tan(\beta) - (V_A / V_S) \sin(\beta)$

Δυνάμεις

- Υδροστατικές & Υδροδυναμικές δυνάμεις που ενεργούν στα ύφαλα της γάστρας
- Αεροδυναμικές δυνάμεις που ενεργούν στην ιστιοφορία

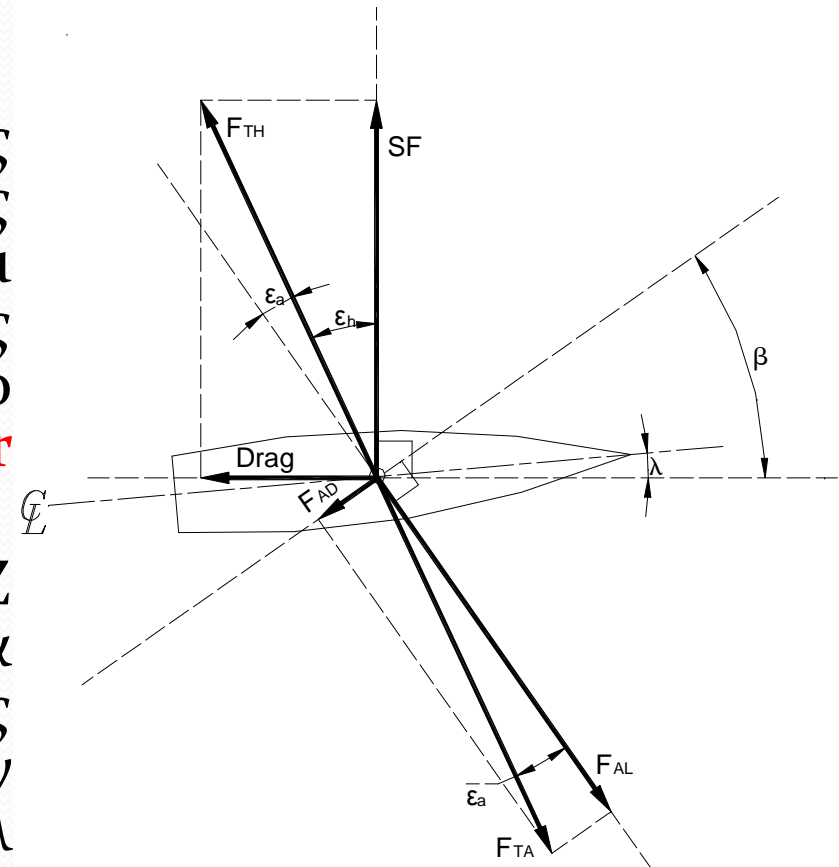


Δυνάμεις

Υδροδυναμική δύναμη

Κέντρο Πλάγιας Δύναμης

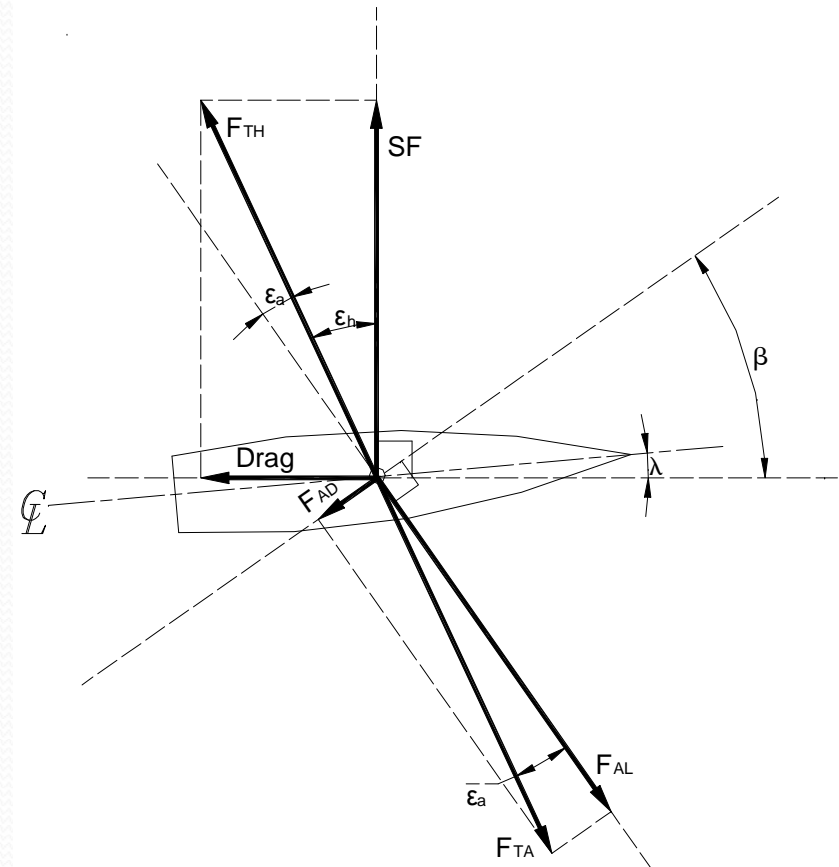
- Το σημείο εφαρμογής της συνολικής υδροδυναμικής δύναμης θεωρείται ότι βρίσκεται κάπου στο πάνω μέρος της καρίνας, στο λεγόμενο κέντρο πλάγιας δύναμης, **CLR (Center of Lateral Resistance)**.
- Η συνιστώσα της στο επίπεδο YZ θεωρείται κάθετη στον άξονα πλάτους της υδροτομής της καρίνας, δηλαδή στον άξονα των z, δεδομένου και ότι η γωνία λ είναι μικρή



Δυνάμεις

Υδροδυναμική Δύναμη

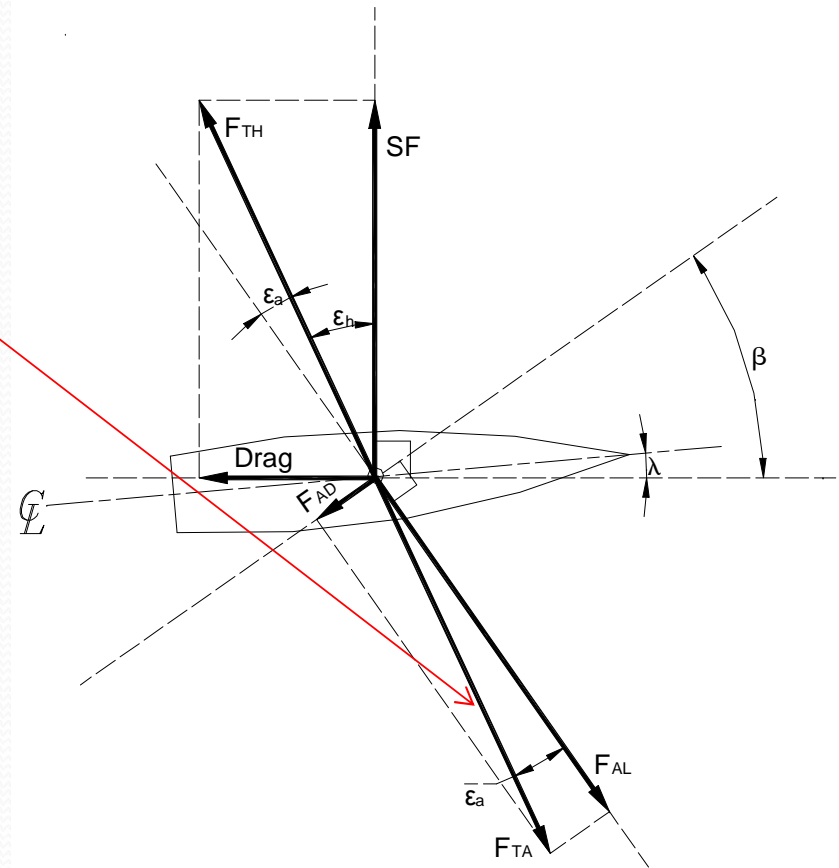
- Συνολική υδροδυναμική δύναμη, F_{TH} (Total Hydrodynamic), ονομάζεται η συνολική δύναμη από τη γάστρα και τα παρελκόμενα, συνήθως καρίνα και πηδάλια.
- Αναλύεται:
 - στην κάθετη ως προς την ταχύτητα του σκάφους και του κατακόρυφου άξονα Z, πλάγια δύναμη, SF,
 - στην αντίθετη ως προς την κίνηση του σκάφους, αντίσταση, Drag, και
 - στην κατακόρυφη F_{HZ} .
- Η πλάγια δύναμη είναι αυτή που μετράμε στο δυναμόμετρο, το επίπεδο της οποίας είναι κάθετο στην κατακόρυφο, όπως θα αναλύσουμε σε επόμενο κεφάλαιο που αφορά την πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς των ιστιοπλοϊκών



Δυνάμεις

Αεροδυναμική δύναμη

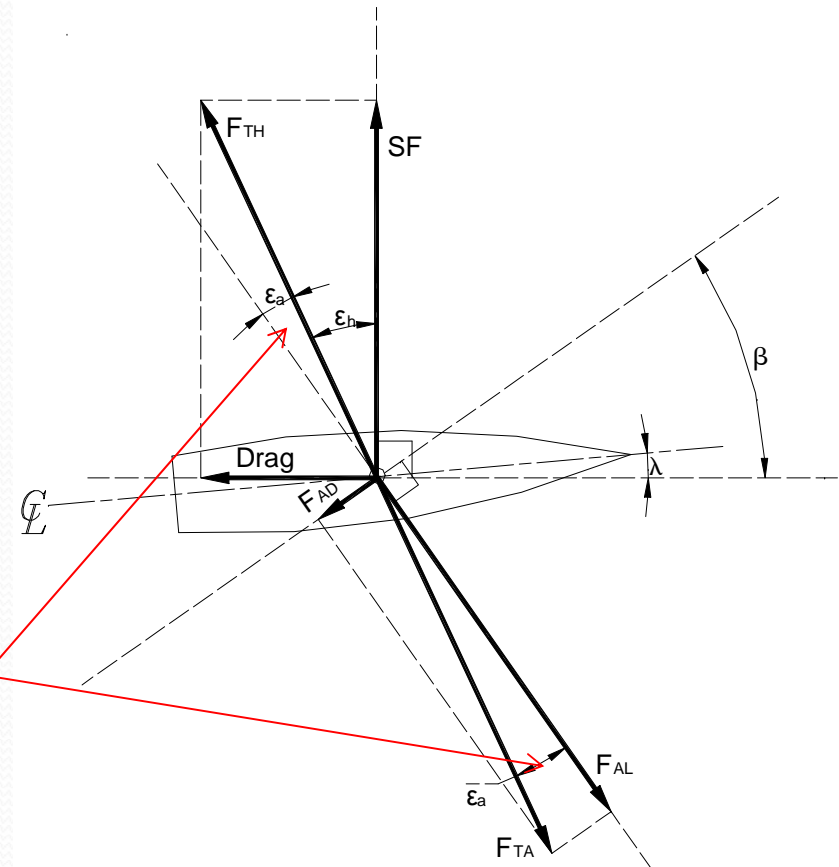
- Συνολική αεροδυναμική δύναμη, F_{TA} , ονομάζεται η συνολική δύναμη που προέρχεται από τα πανιά.
- Αναλύεται στην **παράλληλη** ως προς την **ταχύτητα** του **φαινομένου** **αέρα**, αεροδυναμική αντίσταση των πανιών, F_{AD} , που σύμφωνα με τις προηγούμενες παραδοχές βρίσκεται **στο επίπεδο XY**, και **στην κάθετη στην κατεύθυνση του φαινομένου ανέμου** και **του άξονα των z**, αεροδυναμική άνωση των πανιών, F_{AL} .
- Εναλλακτικά αναλύεται και στην αεροδυναμική δύναμη πρόωσης κατά τον άξονα των X, F_{AX} , στην πλάγια δύναμη των πανιών κατά τον άξονα των Y, F_{AY} , και στην κατακόρυφη, F_{AZ} .
- Η κατακόρυφη συνιστώσα ονομάζεται χαμένο έρμα (loose ballast).



Δυνάμεις

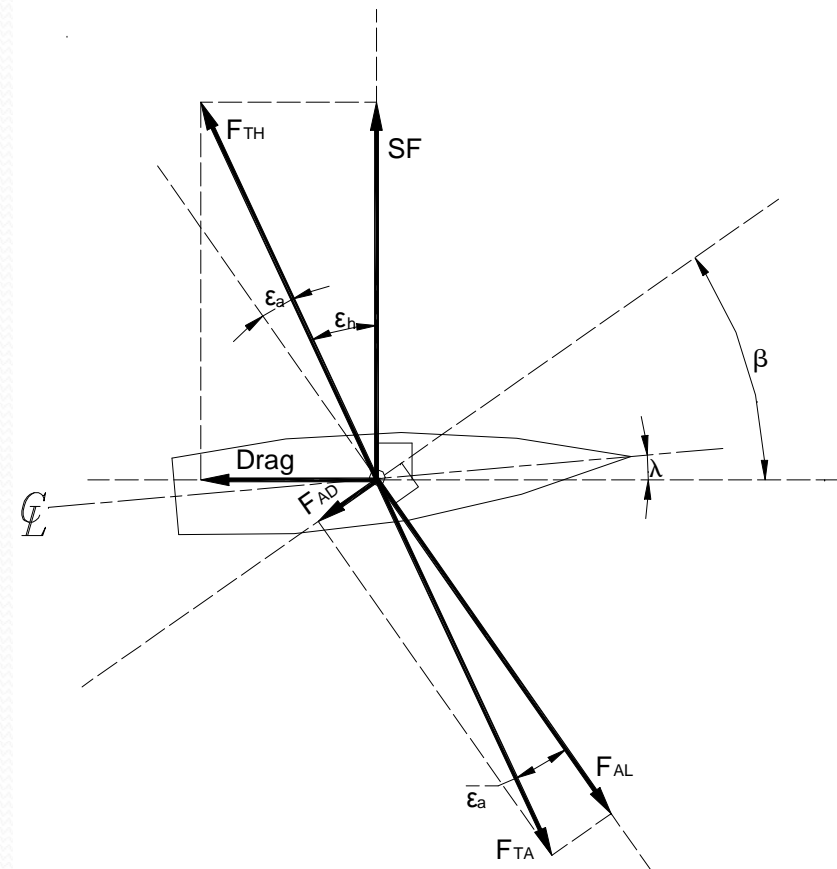
Αεροδυναμική δύναμη

- Το σημείο εφαρμογής της συνολικής αεροδυναμικής δύναμης βρίσκεται στο λεγόμενο **κέντρο αεροδυναμικής πρόωσης**, **CE (Centre of Effort)**.
- Θεωρητικά η καθ' ύψος απόσταση του CE προσεγγίζεται σε απόσταση από το κατάστρωμα μήκους περίπου ενός τρίτου του ύψους του καταρτιού.
- Επίσης θεωρητικά, αλλά και πρακτικά με αρκετά καλή προσέγγιση, η διεύθυνση της συνιστώσα της στο επίπεδο YZ, F_{AYZ} , θεωρείται κάθετη στο κατάρτι, δηλαδή στον z.
- Αεροδυναμική γωνία απόδοσης, ϵ_a , ονομάζεται η κυρτή γωνία της F_{AL} με την F_{TA} .



Ισορροπία Δυνάμεων & ροπών

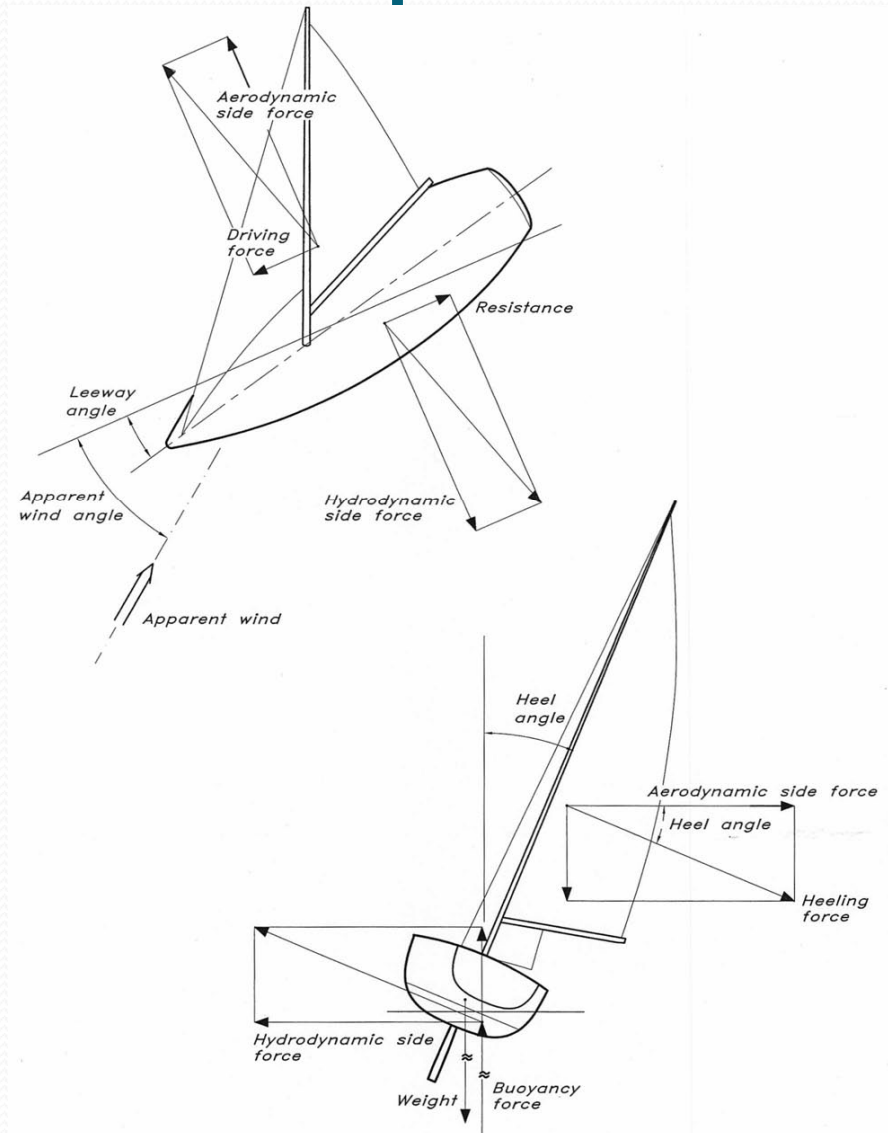
- Η ισορροπία δυνάμεων και ροπών ισοδυναμεί με κίνηση σταθερής ταχύτητας.
- Η πλεύση των ιστιοπλοϊκών εξαρτάται από τις συνεχείς μικρές ή μεγάλες μεταβολές του ανέμου.
- Οι μεταβατικές καταστάσεις που απέχουν αισθητά από την κατάσταση ισορροπίας και που θα είχαν ίσως νόημα να μελετηθούν, όπως η εκκίνηση, οι σημαντικές αλλαγές στην ιστιοφορία, οι στροφές και οι απότομες αλλαγές του ανέμου, είναι εξειδικευμένες περιπτώσεις μεγάλης πολυπλοκότητας που ξεφεύγουν από τους σκοπούς των σημειώσεων και δεν θα ασχοληθούμε προς το παρόν με αυτές.
- Οι καταστάσεις ισορροπίας είναι αυτές που κρίνουν ουσιαστικά το ιστιοπλοϊκό και μόνο σε πολύ εξεζητημένες σχεδιάσεις θα χρειαστεί να λάβουμε υπ' όψη μας την μεταξύ αυτών, μικρής διάρκειας, μεταβατικές καταστάσεις.



Ισορροπία Δυνάμεων & ροπών

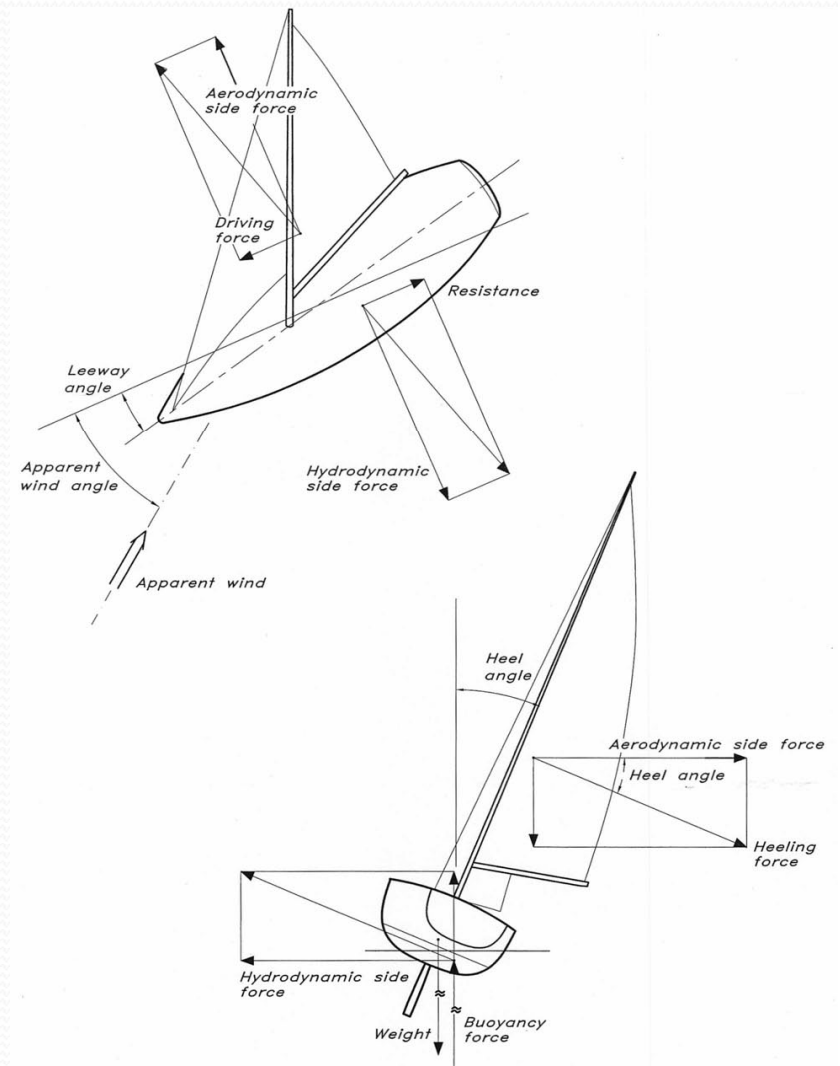
Οι δυνάμεις που ασκούνται κατά την πλεύση του ιστιοπλοϊκού είναι οι εξής:

- η συνολική αεροδυναμική δύναμη που προέρχεται από τα πανιά,
- η συνολική υδροδυναμική δύναμη που προέρχεται από τη γάστρα και τα παρελκόμενα,
- το συνολικό βάρος του ιστιοπλοϊκού και του πληρώματος και
- η κατανεμημένη δύναμη άνωσης από τη θάλασσα.



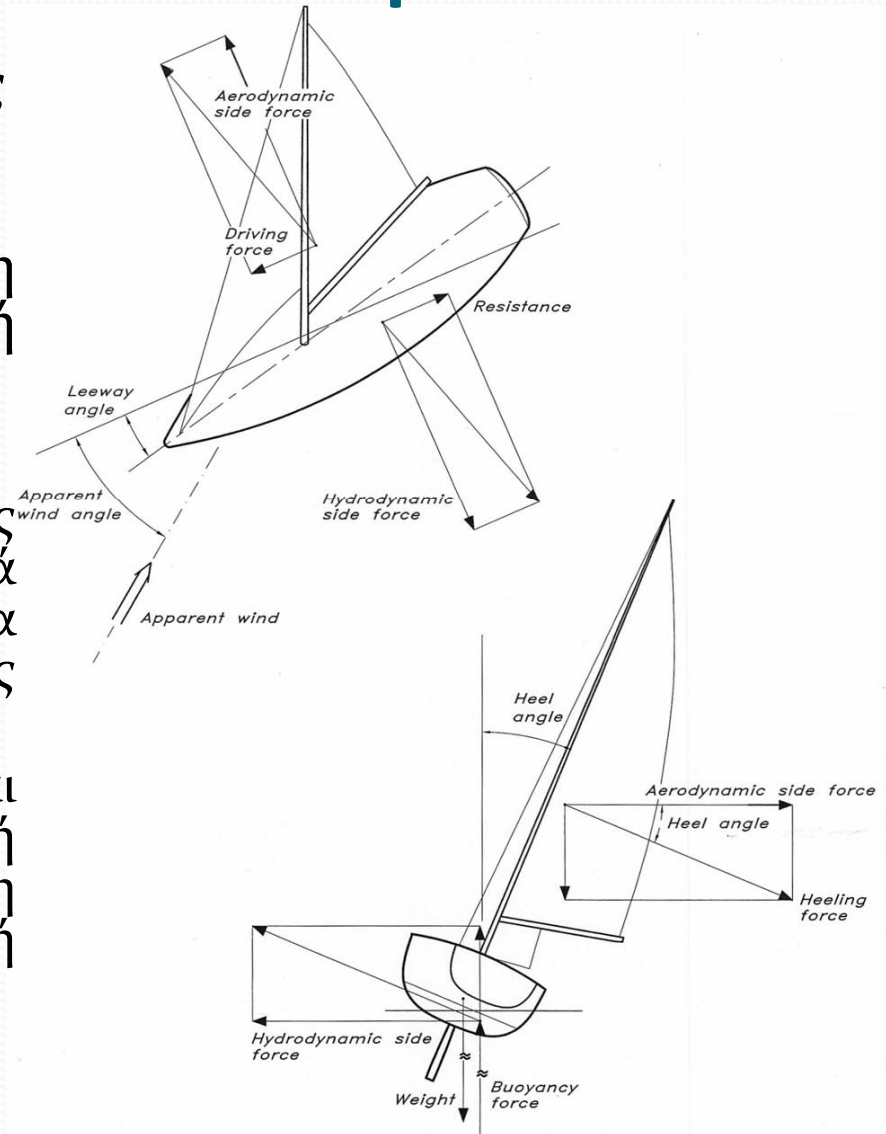
Ισορροπία Δυνάμεων & ροπών

- Στο βαθμό που θεωρούμε σταθερή την ταχύτητα του ιστιοπλοϊκού, θεωρούμε και το άθροισμα όλων αυτών των δυνάμεων και όλων των αντίστοιχων ροπών περί τυχαίου σημείου μηδενικά.
- Το γεγονός αυτό, οδηγεί στη διατύπωση μαθηματικών σχέσεων μεταξύ των διαφόρων μεγεθών που ορίστηκαν προηγουμένως, οι οποίες μας βοηθούν να ορίσουμε και να μελετήσουμε την κίνηση των ιστιοπλοϊκών σκαφών.



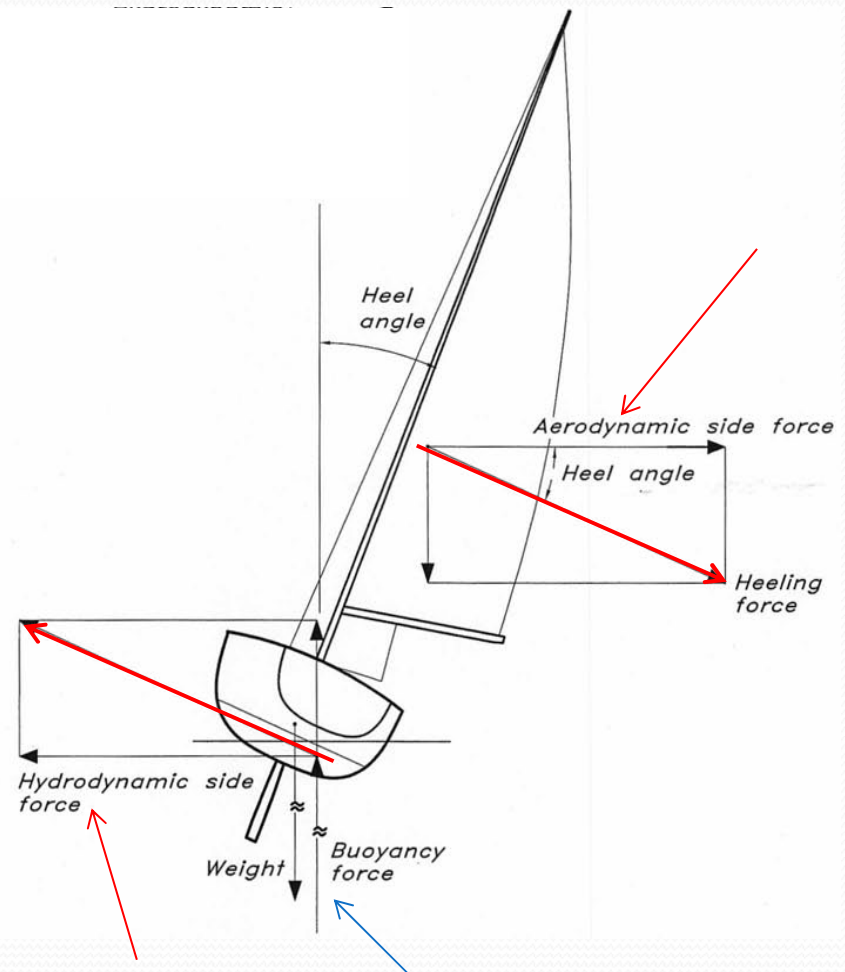
Ισορροπία Δυνάμεων & ροπών

- Βέβαια η γεωμετρία του προβλήματος έχει άμεση σχέση με την πλεύση του ιστιοπλοϊκού.
- Κατά κύριο λόγο όμως, εξετάζεται η πλεύση αντίθετα στον άνεμο, δηλαδή τα όρτσα.
- Αυτό γίνεται για δύο κυρίως λόγους:
 - οι άλλες πλεύσεις έχουν μικρές διαφορές από τα συμβατικά προβλήματα πρόωσης και μπορούν να αντιμετωπιστούν και με τις παραδοσιακές μεθόδους.
 - καθώς η πλεύση αυτή στηρίζεται κυρίως στην αερο-υδροδυναμική θεωρία, παρουσιάζει ιδιαίτερη πολυπλοκότητα και χρειάζεται ειδική προσέγγιση.



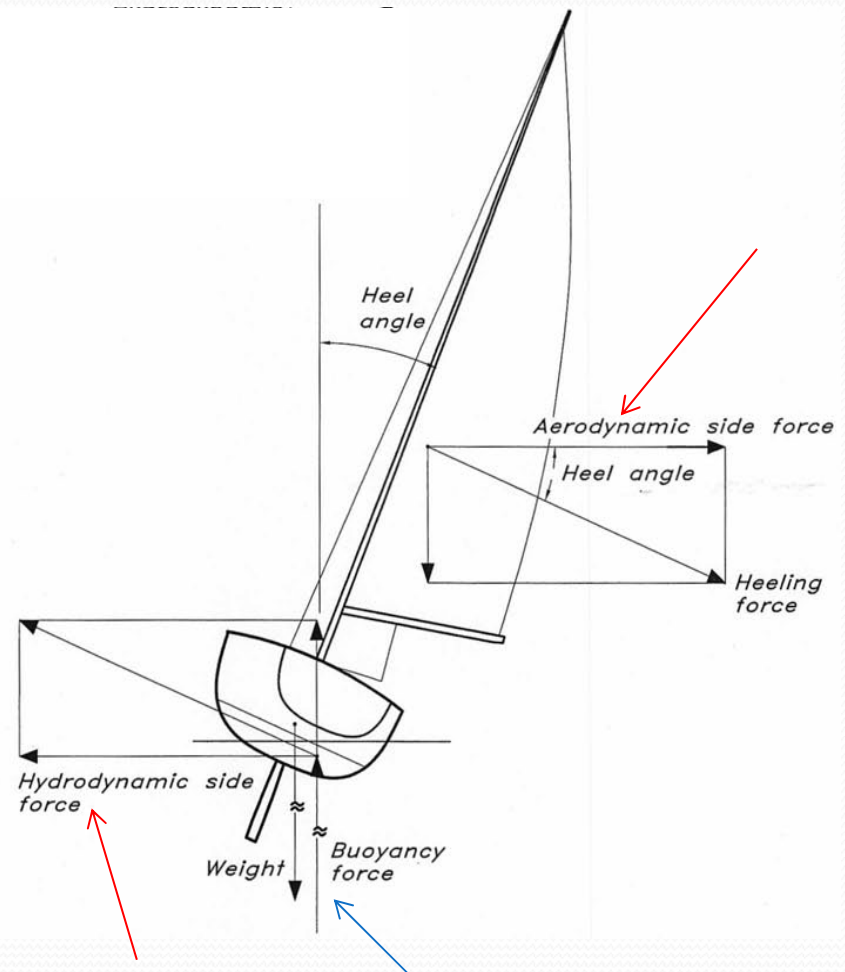
Ισορροπία Δυνάμεων & ροπών

- Ισορροπία στο Επίπεδο YZ
- Στο επίπεδο YZ η **συνιστώσες της υδροδυναμικής και αεροδυναμικής δύναμης** έχουν οριστεί, σύμφωνα με τις προηγούμενες απλουστεύσεις του γενικού προβλήματος, **κάθεται με τον άξονα των z**, και άρα **παράλληλες** μεταξύ τους.
- Δεδομένου επίσης, ότι **το βάρος και η άνωση είναι κατακόρυφες**, για να έχουμε ισορροπία, δηλαδή μηδενική συνισταμένη όλων των δυνάμεων, απαιτείται το άθροισμα των συνιστωσών τους στον άξονα των Y να είναι μηδενικό. Έτσι τελικά προκύπτει ότι:
- Στο επίπεδο YZ η συνιστώσα της υδροδυναμικής δύναμης είναι αντίθετη με την αντίστοιχη συνιστώσα της αεροδυναμικής δύναμης.



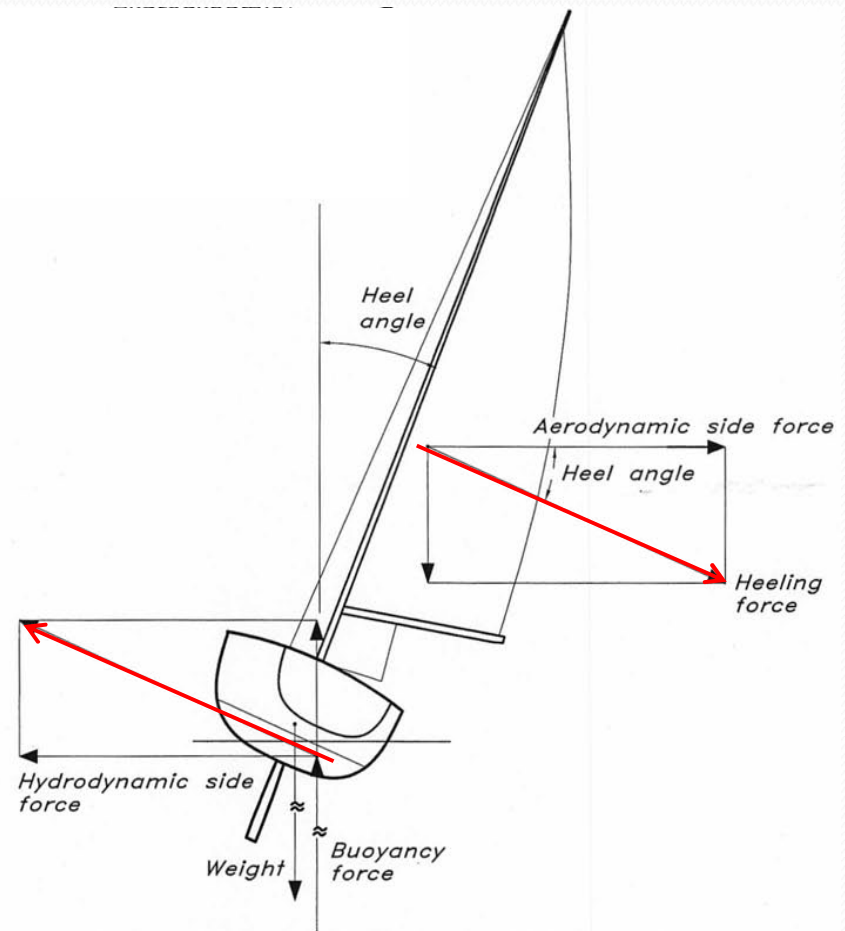
Ισορροπία Δυνάμεων & ροπών

- Αξίζει να σημειωθεί εδώ, ότι η παραδοχή της καθετότητας της υδροδυναμικής και αεροδυναμικής δύναμης στον άξονα των z, αποκλείει την οποιαδήποτε δυναμική αλλαγή στο βύθισμα του σκάφους, αφού το βάρος του σκάφους και η κατανεμημένη δύναμη της άνωσης είναι αντίθετες.
- Στην πραγματικότητα, αυτό δεν είναι απολύτως σωστό, ωστόσο, μπορεί να θεωρηθεί στην παρούσα ανάλυση ικανοποιητικά ακριβές.



Ισορροπία Δυνάμεων & ροπών

- Για τη συνολική ροπή περί τον άξονα των X διατυπώνεται η πρόταση, ότι για τη συγκεκριμένη γωνία εγκάρσιας κλίσης, η ροπή επαναφοράς, RM (Righting Moment) είναι ίση με τη ροπή από το ζεύγος των προαναφερθέντων δυνάμεων, αγνοώντας την επίδραση της κίνησης του σκάφους στην υδροστατική συμπεριφορά της γάστρας.
- Ας σημειώσουμε βέβαια ότι στην προαναφερθείσα ροπή επαναφοράς λαμβάνεται υπ' όψη η πραγματική κατάσταση του σκάφους ανά περίπτωση, συμπεριλαμβάνεται δηλαδή και η πιθανή παρουσία κινητού έρματος και η θέση του πληρώματος.



Ισορροπία Δυνάμεων & ροπών

- Η πλάγια αεροδυναμική συνιστώσας στον άξονα Y

$$SF = F_{AY} = F_H \cos(\theta)$$

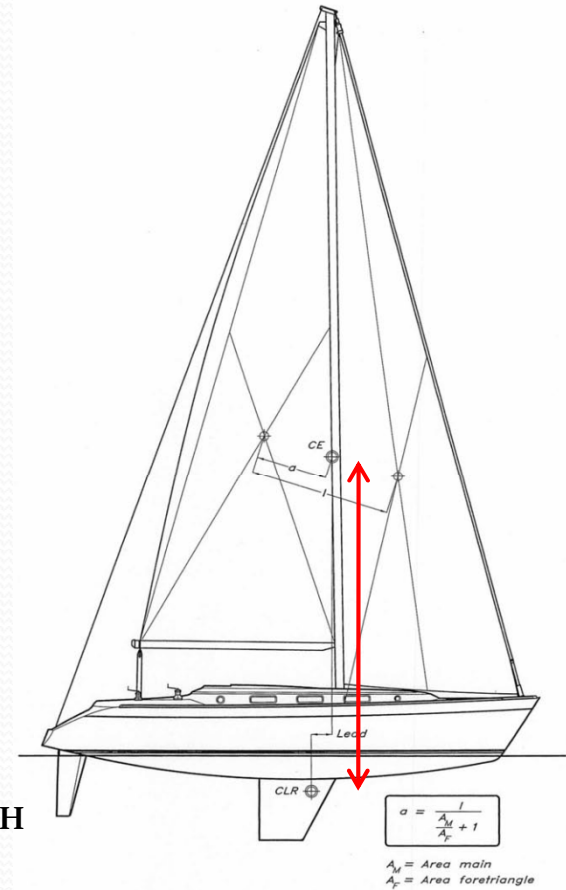
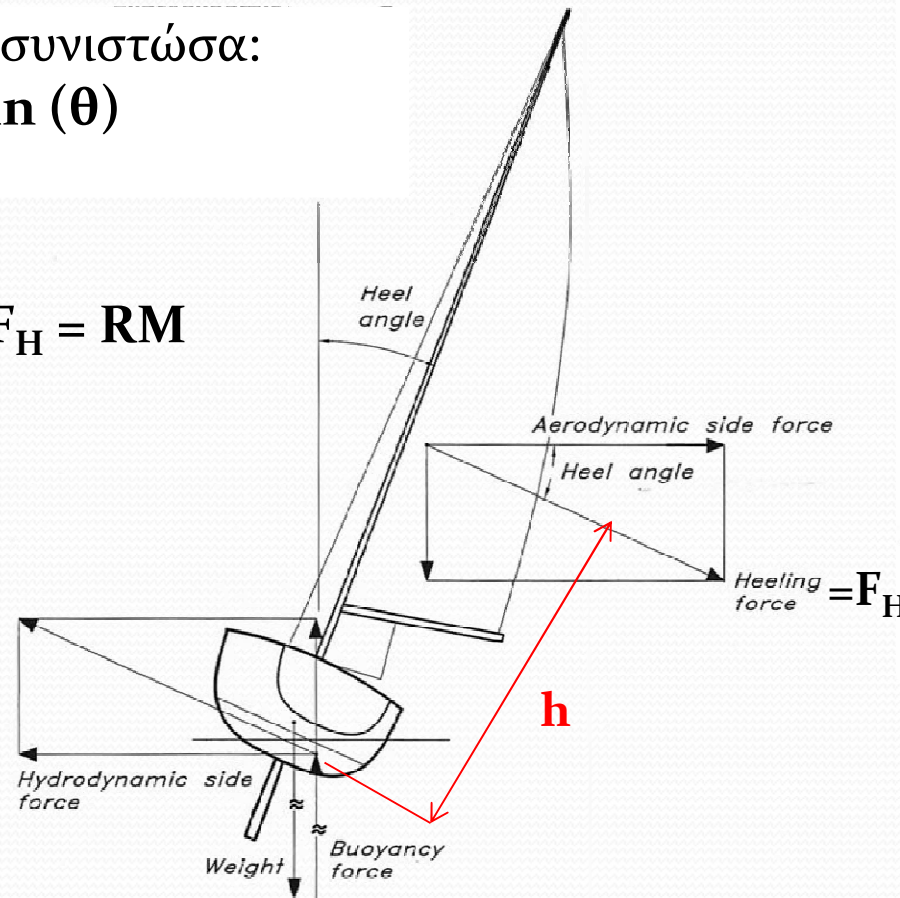
- Η κατακόρυφη συνιστώσα:

$$F_{HZ} = F_{AZ} = F_H \sin(\theta)$$

- Άρα:

$$(\underbrace{CLR_z - CE_z}_h) \cdot F_H = RM$$

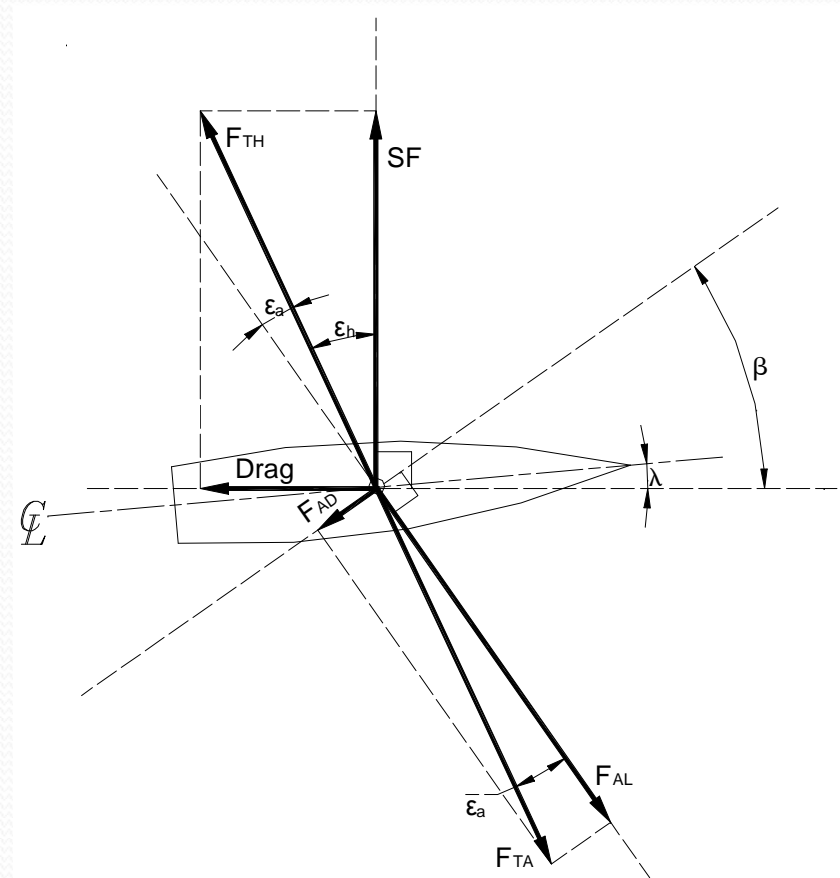
h



Ισορροπία Δυνάμεων & ροπών

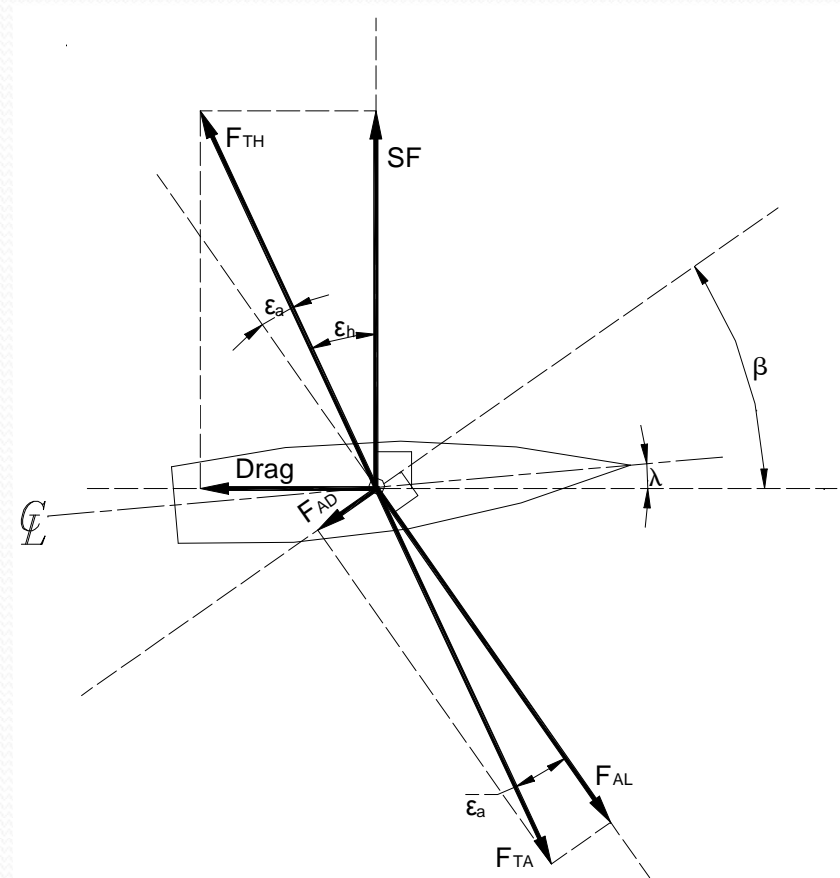
Ισορροπία στο Επίπεδο XY

- Το βάρος και η συνισταμένη δύναμη της άνωσης είναι κατακόρυφες → η συνιστώσα της υδροδυναμικής δύναμης και η αντίστοιχη συνιστώσα της αεροδυναμικής δύναμης είναι οι μόνες δυνάμεις σε αυτό το επίπεδο.
- Συνεπώς οι δυνάμεις αυτές θα πρέπει, αφενός για να έχουμε ισορροπία δυνάμεων, να είναι αντίθετες, αφετέρου για να έχουμε ισορροπία ροπών περί τον άξονα των Z, να είναι και συγγραμμικές, και ακόμα πιο συγκεκριμένα επάνω στην ευθεία που ενώνει τις προβολές των CLR και CE στο επίπεδο XY.



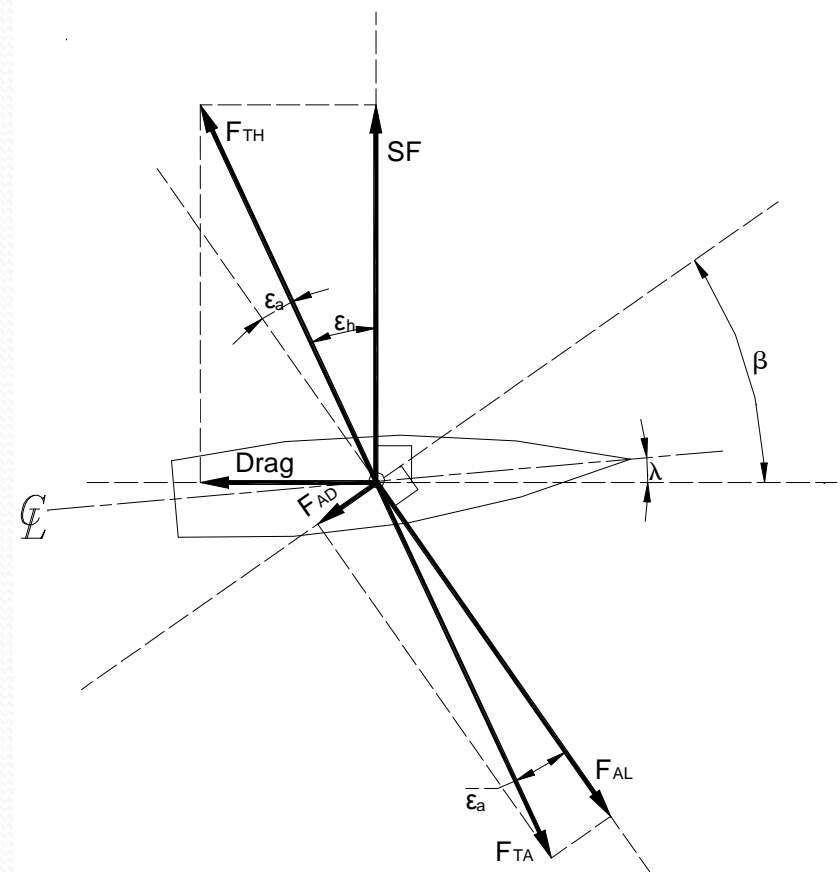
Ισορροπία Δυνάμεων & ροπών

- Στην κατάσταση ισορροπίας ισχύει η σχέση:
 $\epsilon_a + \epsilon_h = \beta$
- Η γωνία ϵ_a είναι ένα αντικειμενικό μέτρο της απόδοσης των πανιών γιατί μας δίνει τη σχέση της πλάγιας δύναμης με την αντίσταση που παράγουν συνολικά τα πανιά.
- Όμοια και η γωνία ϵ_h είναι το αντικειμενικό μέτρο της απόδοσης της γάστρας με τα παρελκόμενα.
- Ακριβώς αντίστοιχα η γωνία β είναι δίνει τη σχέση της πορείας του σκάφους με την κατεύθυνση του φαινόμενου ανέμου.
- Η παραπάνω σχέση είναι πολύ σημαντική γιατί διατυπώνει την πρόταση, ότι: η απόδοση του σκάφους είναι το άθροισμα της απόδοσης της γάστρας με τα παρελκόμενα και της απόδοσης της ιστιοφορίας



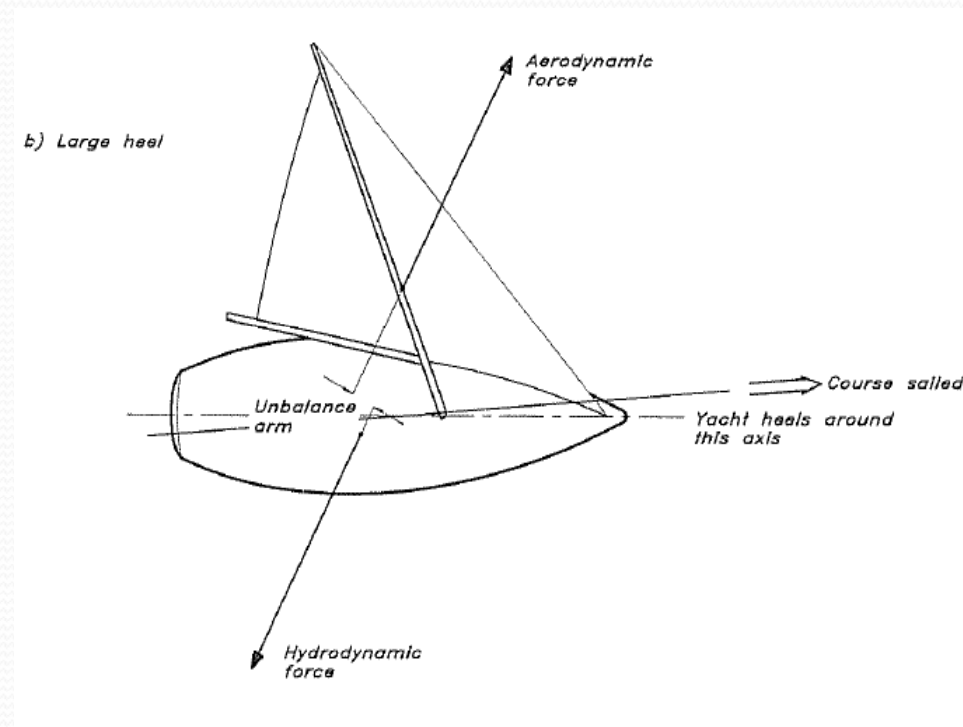
Ισορροπία Δυνάμεων & ροπών

- Οι γωνίες αυτές εξαρτώνται άμεσα από την ταχύτητα του ανέμου και γενικά αυξάνονται όταν ο άνεμος αυξάνει.
- Η βελτιστοποίηση της απόδοσης των πανιών και της γάστρας με τα παρελκόμενα έχει άμεση σχέση με τις αναμενόμενες καταστάσεις ανέμου.
- Το σκάφος που επιτυγχάνει ελάχιστη γωνία β στις μικρές ταχύτητες ανέμου, αλλά πολύ μεγάλη υπό τις συνηθισμένες συνθήκες, δεν μπορεί να νικήσει.
- Για συγκεκριμένες συνθήκες αέρα, η βελτιστοποίηση του σκάφους μπορεί να γίνει εναλλακτικά:
 - ή με κριτήριο τη γωνία β ,
 - ή με κριτήριο την ταχύτητα V_{mg} , μια που πρακτικώς, η ταχύτητα αντίθετα στον άνεμο είναι συνάρτηση μόνο της ταχύτητας του πραγματικού ανέμου και της γωνίας β



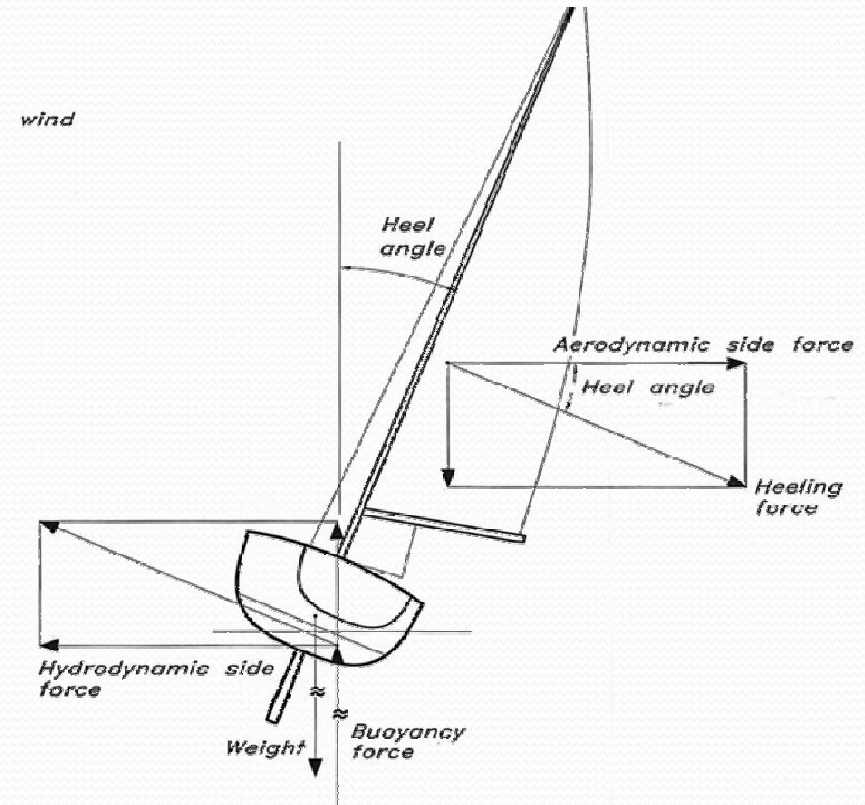
Ισορροπία Δυνάμεων & ροπών

- Και στο επίπεδο ΧΖ η συνιστώσες της υδροδυναμικής και αεροδυναμικής δύναμης πρέπει να είναι αντίθετες.
- Αυτό προκύπτει επειδή οι συνιστώσες τους ως προς τους δύο άξονες είναι αντίθετες.



Ισορροπία Δυνάμεων & ροπών

- Το βάρος και η συνισταμένη της άνωσης είναι κατακόρυφες, όπως ήδη έχουμε αναφέρει αρκετές φορές, συμπεραίνουμε ότι οι συνιστώσες της αεροδυναμικής και της υδροδυναμικής δύναμης κατά τον άξονα X πρέπει να είναι αντίθετες.
- Επίσης, βάση του ισολογισμού στο επίπεδο YZ, και οι συνιστώσες κατά τον άξονα των Z είναι αντίθετες.



Ισορροπία Δυνάμεων & ροπών

- Για τη συνολική ροπή περί τον άξονα των Υ που προέρχεται από το ζεύγος της αεροδυναμικής και υδροδυναμικής δύναμης, αντισταθμίζεται πλήρως από τη δυναμική ροπή διαγωγής και με τη μετακίνηση του πληρώματος.
- Αυτό, όπως αναφέραμε προηγουμένως δεν ισχύει πλήρως, αλλά δεν εισάγει σημαντικό σφάλμα στα αποτελέσματα που μας ενδιαφέρουν.
- Πάντως στο μέλλον ίσως να έχει νόημα η διερεύνηση της επίδρασης της στην αντίσταση του σκάφους και στη γωνία πρόσπτωσης των παρελκομένων.



Ισορροπία Δυνάμεων & ροπών

- Στην περίπτωση αυτή βέβαια, θα πρέπει να ληφθούν υπ' όψη και κάποιοι άλλοι παράγοντες, όπως το πλήρωμα, το οποίο με τη θέση του, τουλάχιστον στις μικρές ταχύτητες, μπορεί να επιδράσει στη διαγωγή.
- Ακόμα στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι: Στις κλειστές πλεύσεις, όπου η ταχύτητες είναι σχετικά μικρές, δεν αναμένονται σημαντικές γωνίες διαγωγής.
- Αντίθετα στα πρίμα, όταν ο αριθμός Froude ξεπεράσει το 0.5 και αρχίσουν να εμφανίζονται φαινόμενα υδροολίσθησης (πλαναρίσματος), η γάστρα τείνει να σηκώσει και την πλώρη του και να τη βγάλει από το νερό.
- Όμως η μεγάλη ροπή της αεροδυναμικής δύναμης πρόωσης, συγκρατεί την πλώρη μέσα στο νερό και τη διαγωγή σε μεγέθη κοντά στις 2 μοίρες.



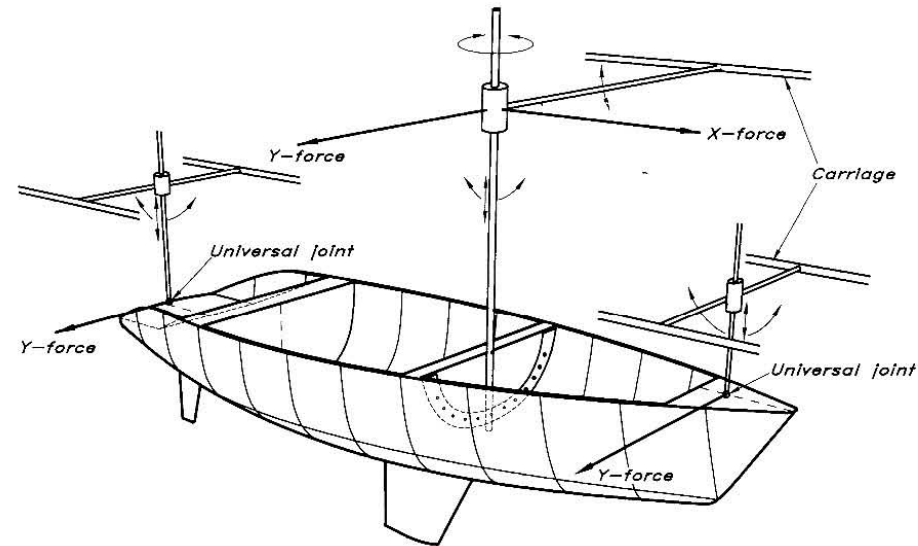
Αντίσταση Ιστιοπλοϊκού Σκάφους

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.

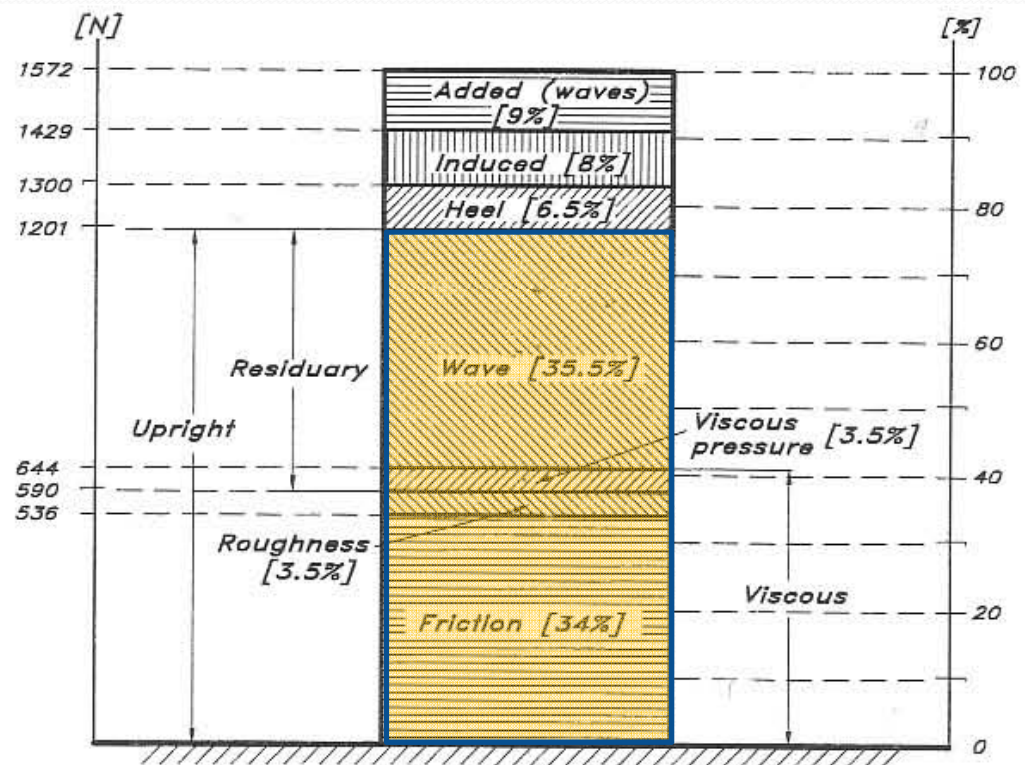


ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ

- 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)

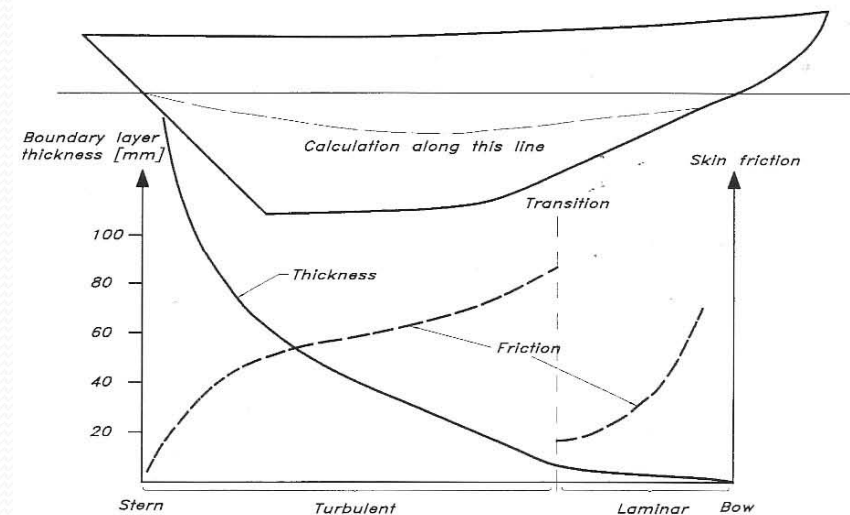
ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ

- 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 ποδών, σε πλεύση όρτσα με 6.8 κόμβους ($F_n=0.35$) υπό καλές καιρικές συνθήκες στη Βόρεια Θάλασσα.



Αντίσταση λόγω τριβής

- Οι σύγχρονες γάστρες των ιστιοπλοϊκών σκαφών είναι πολύ εξελιγμένες. Ακόμα και 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.
- 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.
- 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 και Eliasson, στο βιβλίο τους 'Principles of Yacht Design' (1996), υπολογίζουν τον αριθμό Re με το 70% του μήκους της ισάλου.





Σας ευχαριστώ για την προσοχή σας

Ισορροπία Δυνάμεων & ροπών

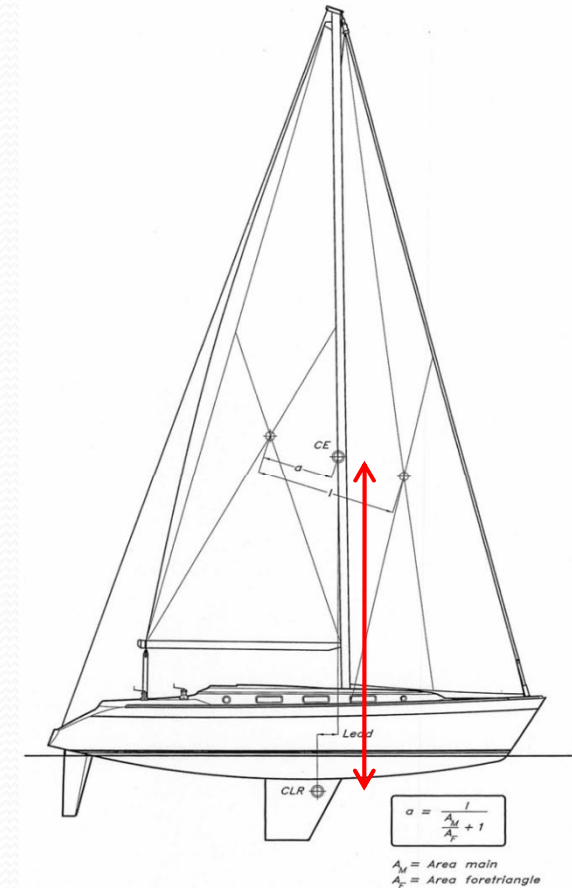
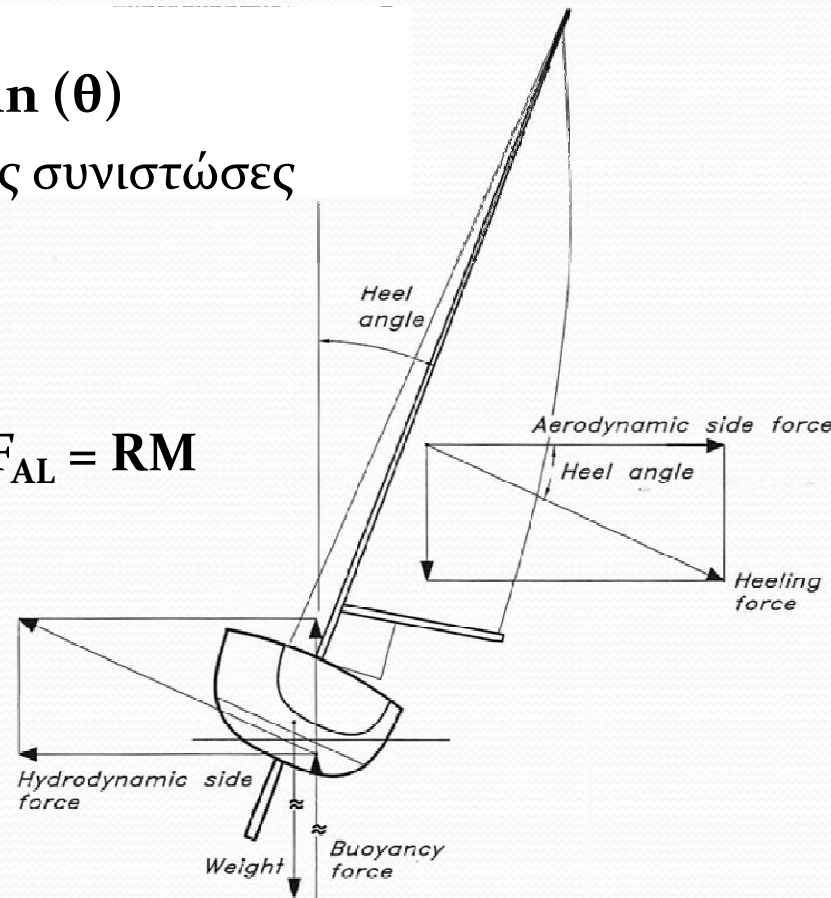
- Η πλάγια δύναμη SF (υδροδυναμική συνιστώσα) είναι ίση με την οριζόντια προβολή της αεροδυναμικής συνιστώσας στον άξονα Y

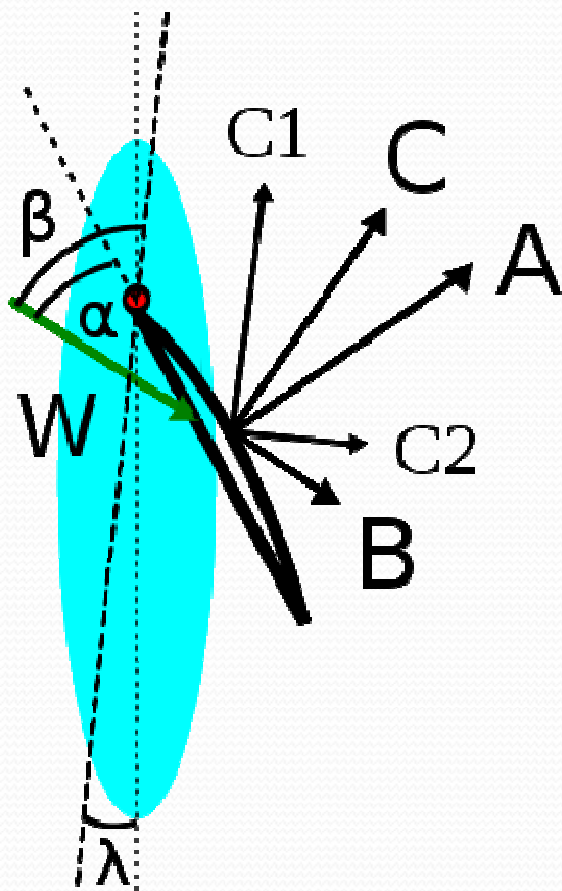
$$SF = F_{AY} = F_{AL} \sin(\theta)$$

- Οι κατακόρυφες συνιστώσες επίσης:

$$F_{HZ} = F_{AZ}$$

- Άρα:
- $$(CLR_z - CE_z) \cdot F_{AL} = RM$$





Decomposition of force on sailing upwind: Apparent wind (W) at incidence, (α) and angle to course sailed (β). Aerodynamic force (A). Lift (C), perpendicular to flow. Drag (B), parallel to flow. C_1 is portion of lift propelling the boat and C_2 the portion causing heeling and leeway (λ). Drag (B) will also contribute to heeling, leeway and reduce propulsion.