



# Ειδικές Ναυπηγικές Κατασκευές και Ιστιοφόρα σκάφη

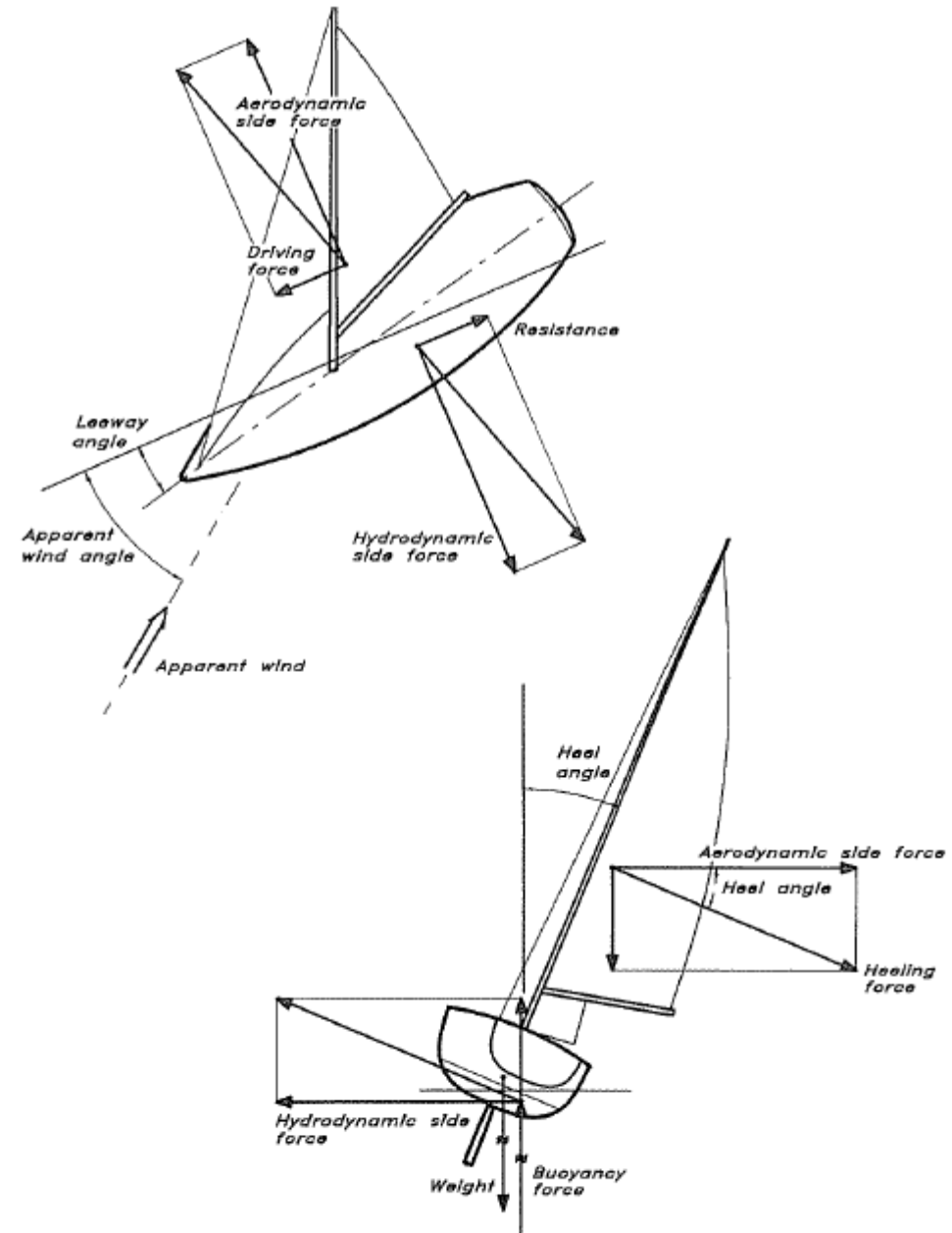
Διδάσκουσα:

Καθηγήτρια Εφαρμογών Σ. Πέππα

Πλεύση Ιστιοπλοϊκού  
Σκάφους –  
Αναπτυσσόμενες Δυνάμεις

# Δυνάμεις

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

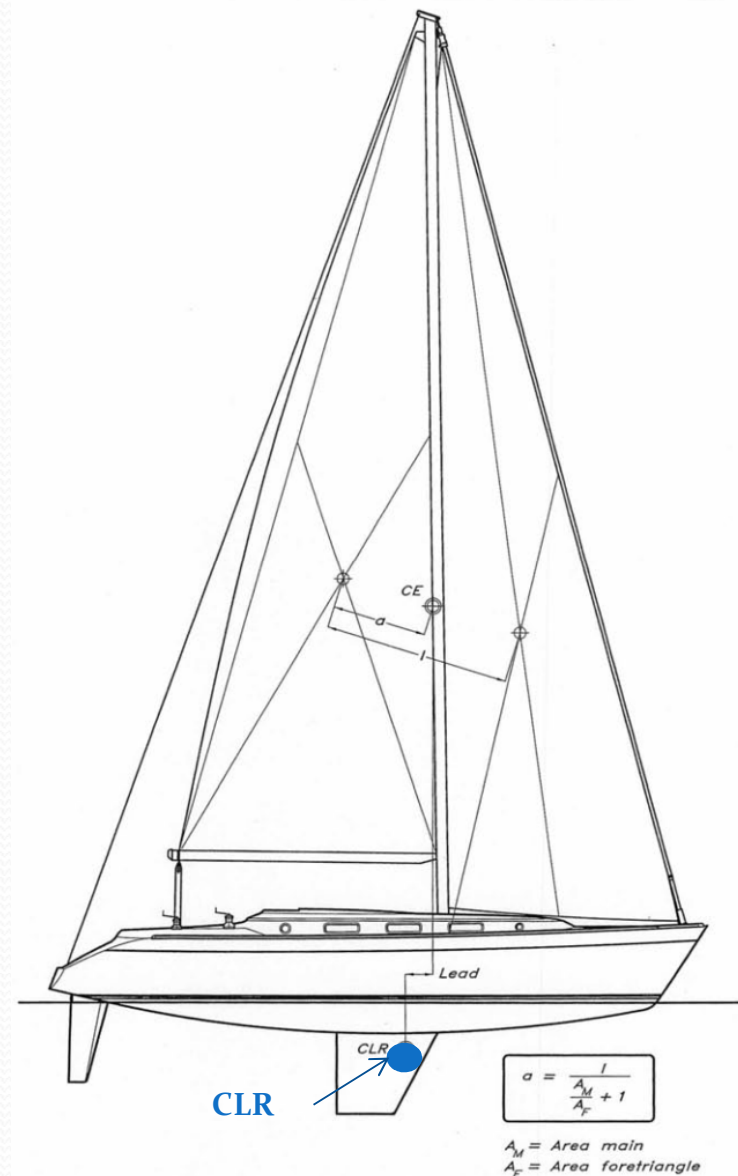


# Δυνάμεις

## Υδροδυναμική δύναμη

### Κέντρο Πλάγιας Δύναμης

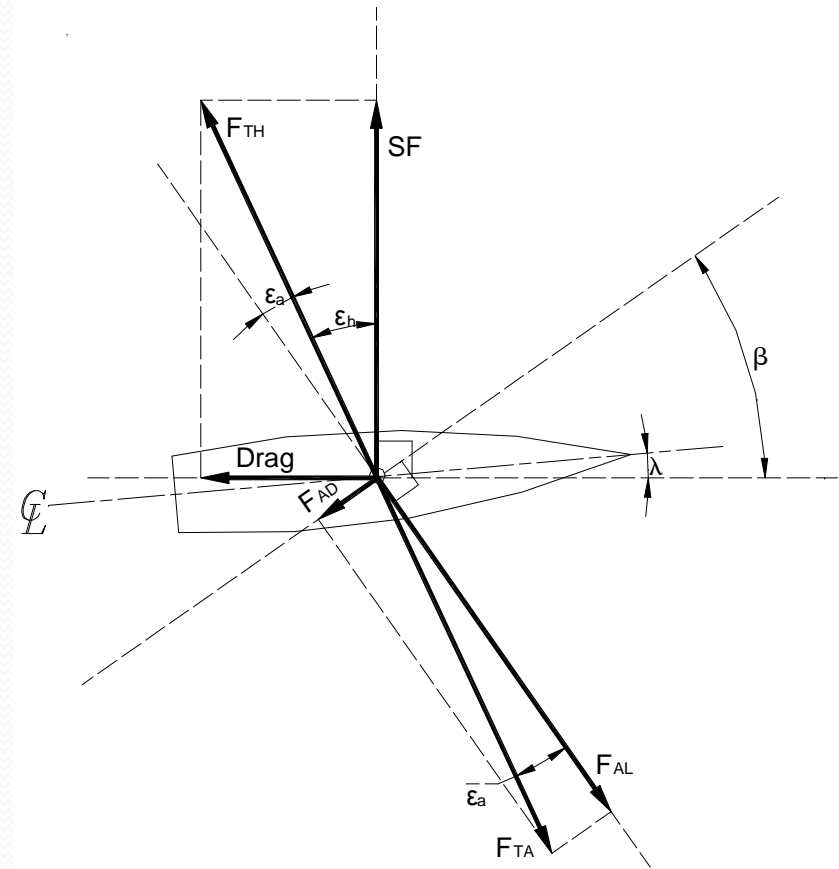
- Το σημείο εφαρμογής της συνολικής υδροδυναμικής δύναμης θεωρείται ότι βρίσκεται κάπου στο πάνω μέρος της καρίνας, στο λεγόμενο κέντρο πλάγιας δύναμης, **CLR (Center of Lateral Resistance)**.
- Η συνιστώσα της στο επίπεδο YZ θεωρείται κάθετη στον άξονα πλάτους της υδροτομής της καρίνας, δηλαδή στον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



# Δυνάμεις

## Υδροδυναμική Δύναμη

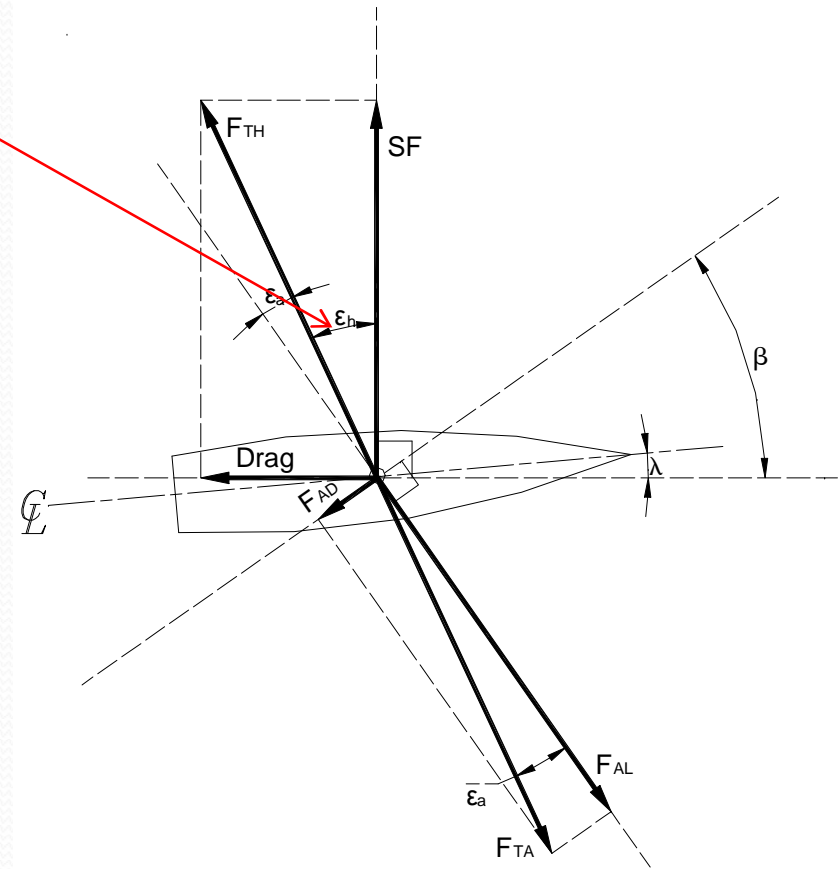
- Συνολική υδροδυναμική δύναμη,  $F_{TH}$  (Total Hydrodynamic), ονομάζεται η συνολική δύναμη από τη γάστρα και τα παρελκόμενα, συνήθως καρίνα και πηδάλια.
- Αναλύεται:
  - στην κάθετη ως προς την ταχύτητα του σκάφους και του κατακόρυφου άξονα Z, πλάγια δύναμη, **SF**,
  - στην αντίθετη ως προς την κίνηση 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

## Υδροδυναμική Δύναμη

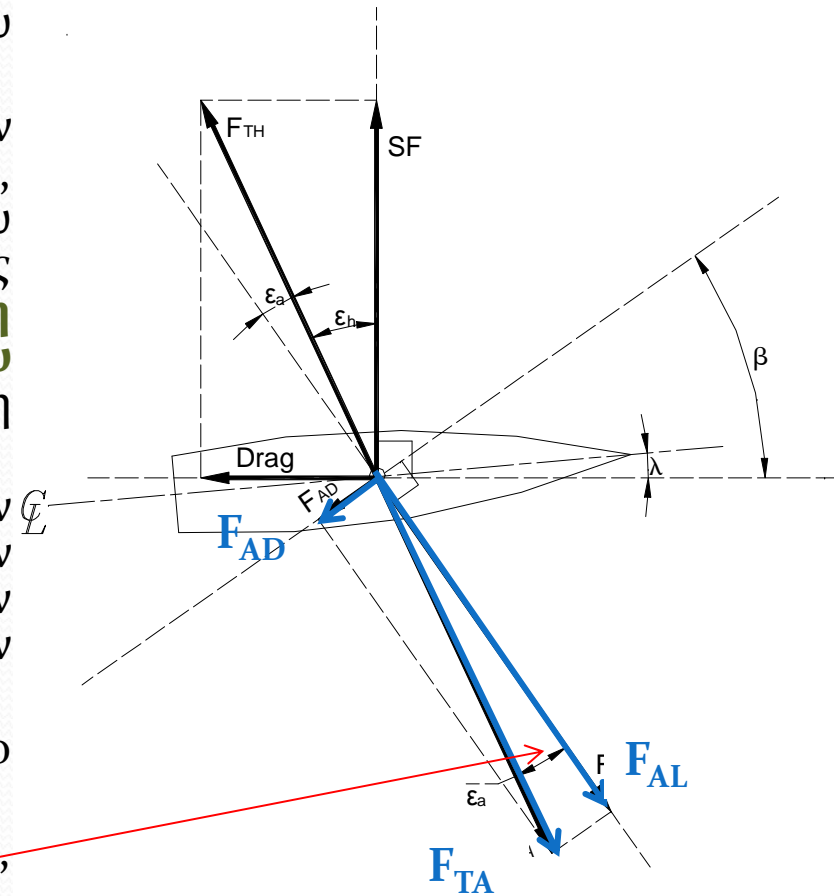
- Υδροδυναμική γωνία απόδοσης,  $\epsilon_h$ , ονομάζεται η κυρτή γωνία της SF με την  $F_{TH}$ .
- Όσο αφορά την υδροδυναμική δύναμη θα πρέπει να τονιστεί ότι σ' αυτήν συμπεριλαμβάνεται και η δύναμη λόγω δημιουργίας κυματισμών από την κίνηση του σκάφους που έχει την αντίθετη κατεύθυνση της κίνησης.
- Το γεγονός αυτό σημαίνει, ότι η ελάχιστη γωνία  $\epsilon_h$  που μπορεί κατά κανόνα να επιτευχθεί, είναι μεγάλη σε σχέση με την αναμενόμενη από μία απλή αεροτομή και είναι σίγουρα μεγαλύτερη από την αντίστοιχη γωνία για την αεροδυναμική δύναμη που θα οριστεί παρακάτω.



# 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 **φαινόμενου αέρα**, αεροδυναμική αντίσταση των πανιών,  $F_{AD}$ , που σύμφωνα με τις προηγούμενες παραδοχές βρίσκεται **στο επίπεδο XY**, και **στην κάθετη στην κατεύθυνση του φαινόμενου 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).
- Αεροδυναμική γωνία απόδοσης,  $\epsilon_a$ , ονομάζεται η κυρτή γωνία της  $F_{AL}$  με την  $F_{TA}$ .



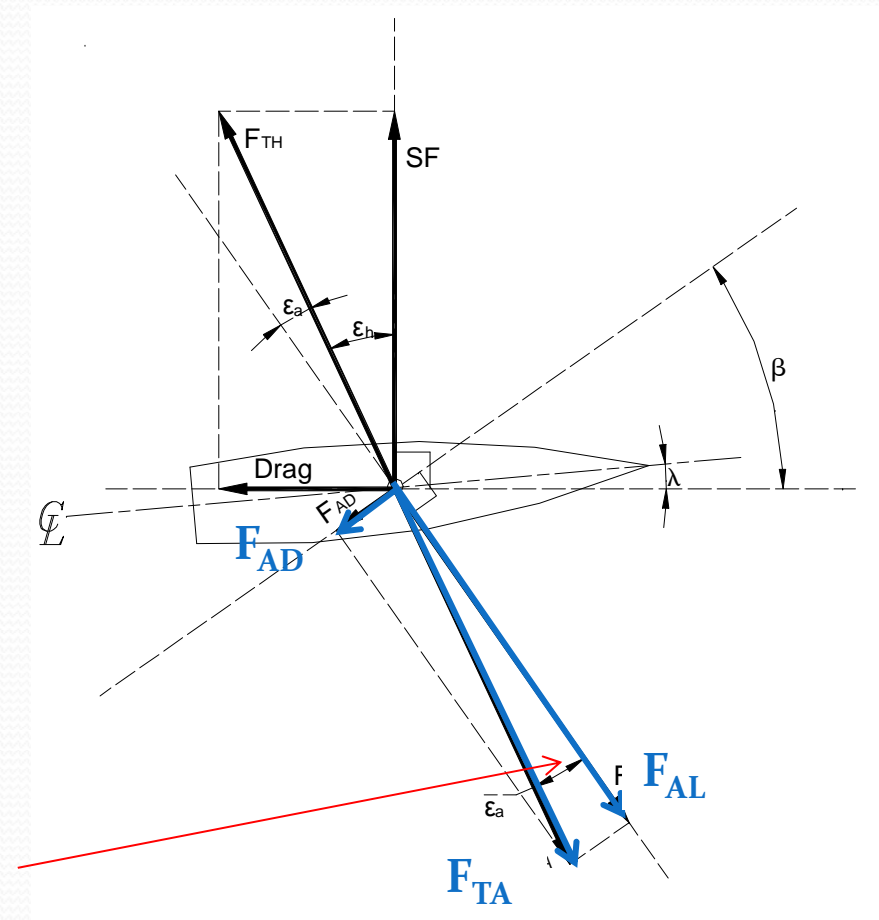
# Δυνάμεις

## Άσκηση:

Υπολογίστε τις  $F_{AL,1}$ ,  $F_{TA,1}$ ,  $F_{AL,2}$ ,  $F_{TA,2}$  για δύο σκάφη 1 & 2.

Δίδονται:

- $V_A = 10 \text{ kn}$
- $\epsilon_{a,1} = 18^\circ$
- $\epsilon_{a,2} = 28^\circ$
- $C_{T,1} = 1,38$
- $C_{T,2} = 1,28$
- $\rho = 104.61 \text{ kp}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$
- $S_A = 9,2903 \text{ m}^2$





# Δυνάμεις

## Άσκηση:

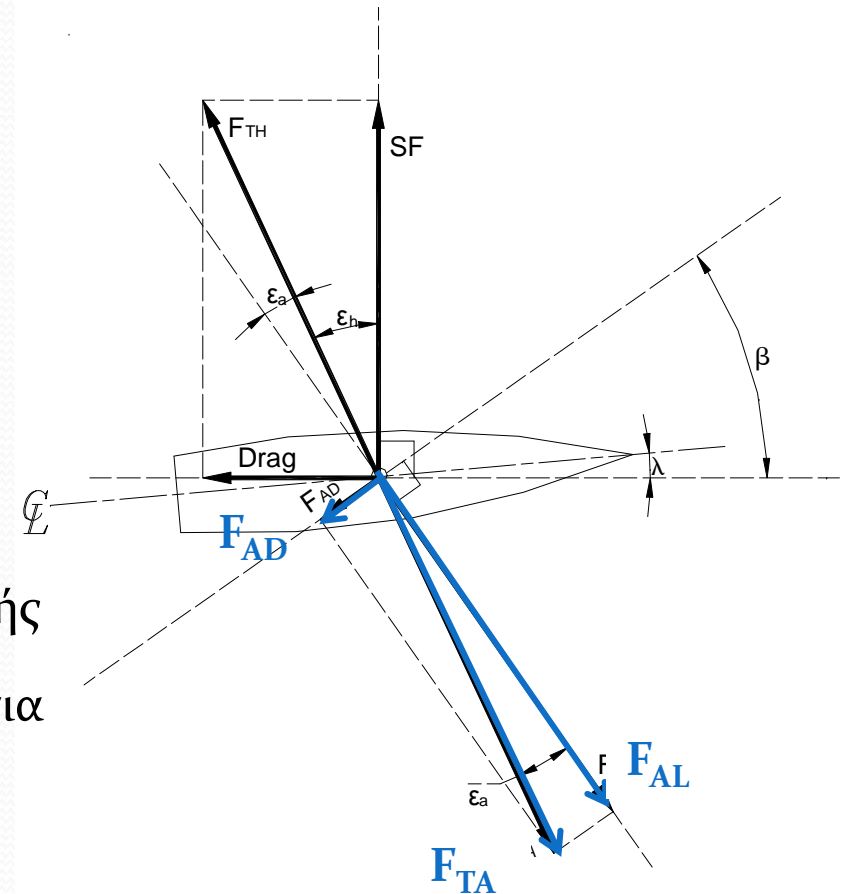
**Σκάφος 1:**  $F_{TA} = 0.5 \cdot \rho \cdot V_A^2 \cdot S_A \cdot C_T =$   
 $= 0.5 \cdot 104.61 \text{ kp} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4 \cdot (5,145 \text{ m/s})^2 \cdot 9,2903 \text{ m}^2$   
 $\cdot 1,38 \rightarrow F_{TA} = 17751 \text{ Kp}$

$F_{AL} = F_{TA} \cdot \cos 18^\circ = 17751 \cdot 0,951 = 16881 \text{ Kp}$

**Σκάφος 2:**  $F_{TA} = 0.5 \cdot \rho \cdot V_A^2 \cdot S_A \cdot C_T =$   
 $= 0.5 \cdot 104.61 \text{ kp} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4 \cdot (5,145 \text{ m/s})^2 \cdot 9,2903 \text{ m}^2$   
 $\cdot 1,28 \rightarrow F_{TA} = 16464,69 \text{ Kp}$

$F_{AL} = F_{TA} \cdot \cos 28^\circ = 16464,69 \cdot 0,883 = 14538,33 \text{ Kp}$

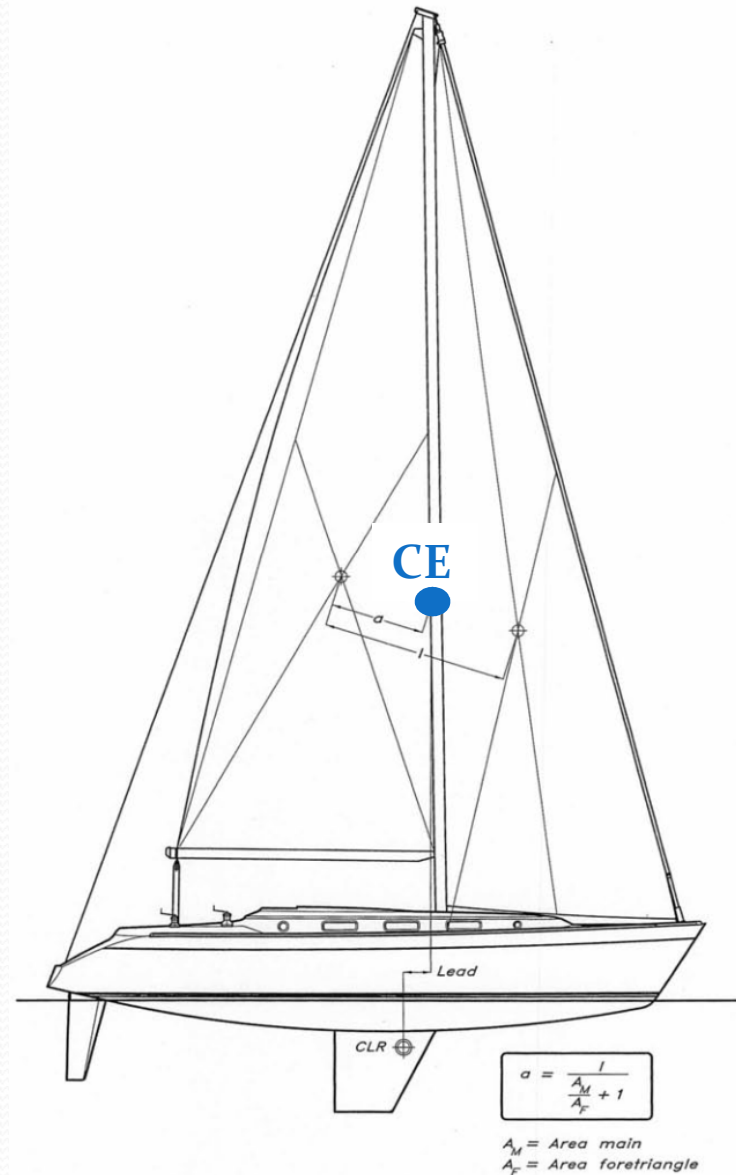
Η διατήρηση της σωστής γωνίας αεροδυναμικής απόδοσης στο πανί είναι σημαντικός παράγοντας για τη βελτιστοποίηση αφού π.χ. για αύξηση της γωνίας κατά  $10^\circ \rightarrow$  μείωση της αεροδυναμικής άνωσης των πανιών  $F_{AL}$  κατά **13,8%**.



# 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.



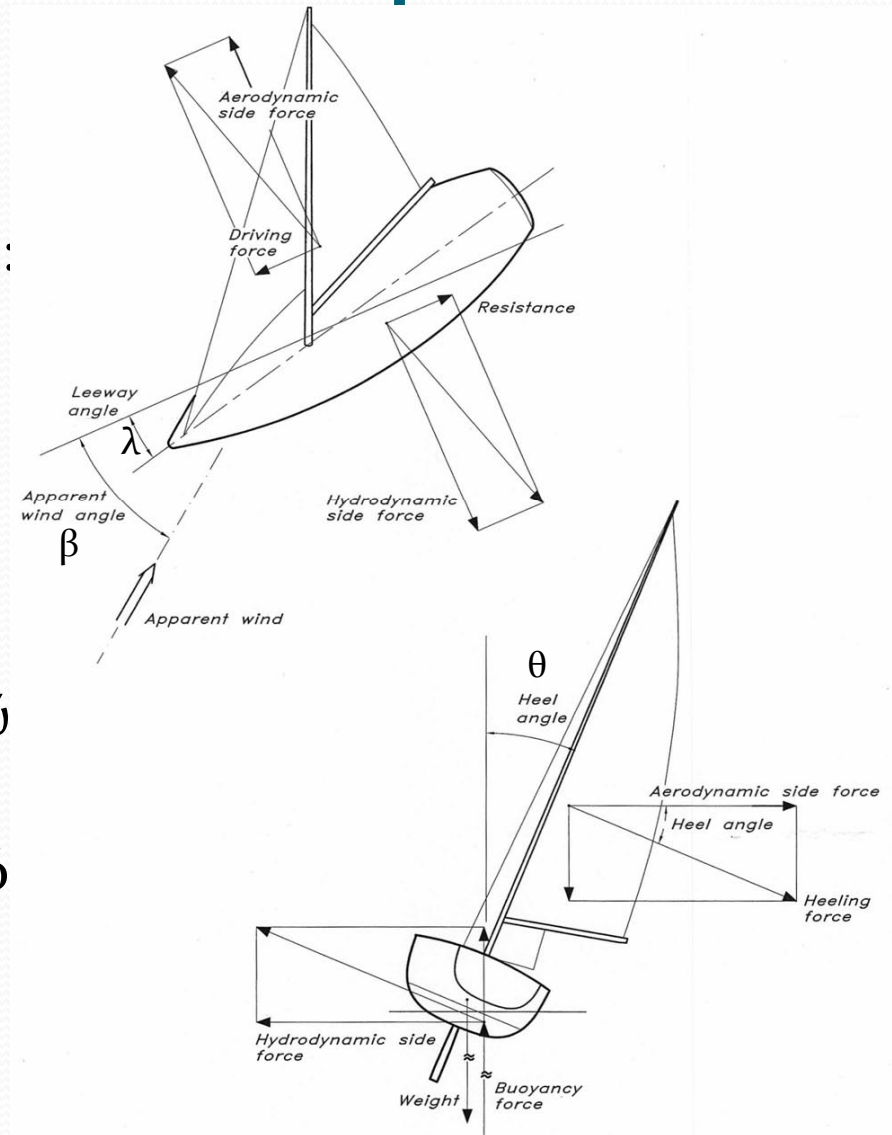
# Ισορροπία Δυνάμεων & ροπών

- 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 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

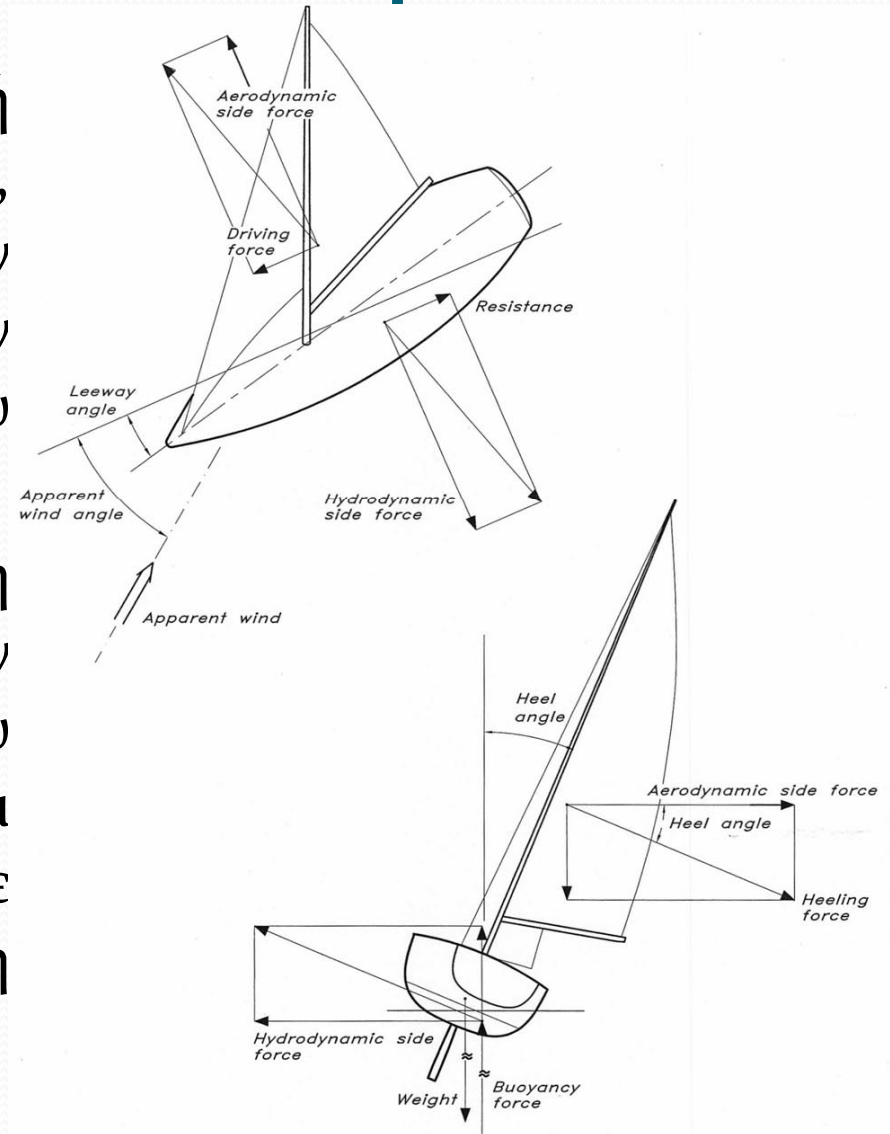
Οι δυνάμεις που ασκούνται κατά την πλεύση του ιστιοπλοϊκού είναι οι εξής:

- 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.



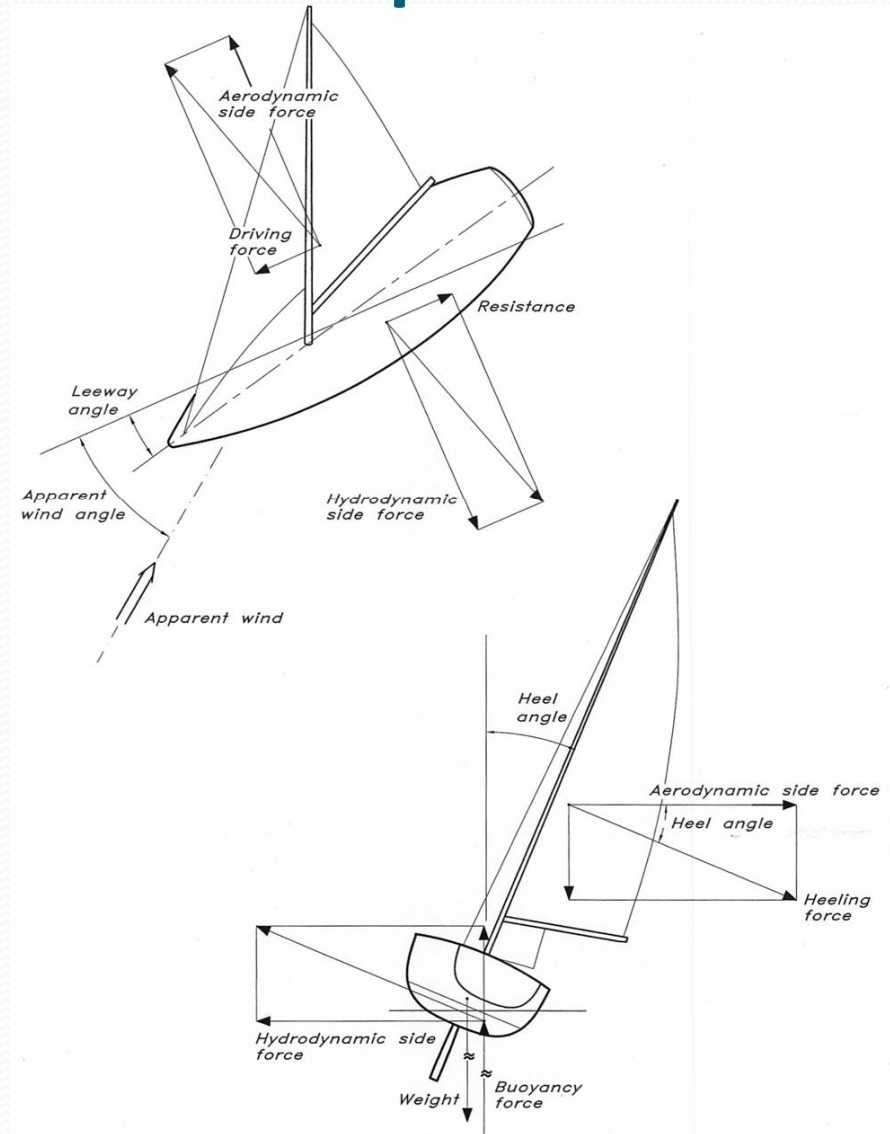
# Ισορροπία Δυνάμεων & ροπών

- 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.



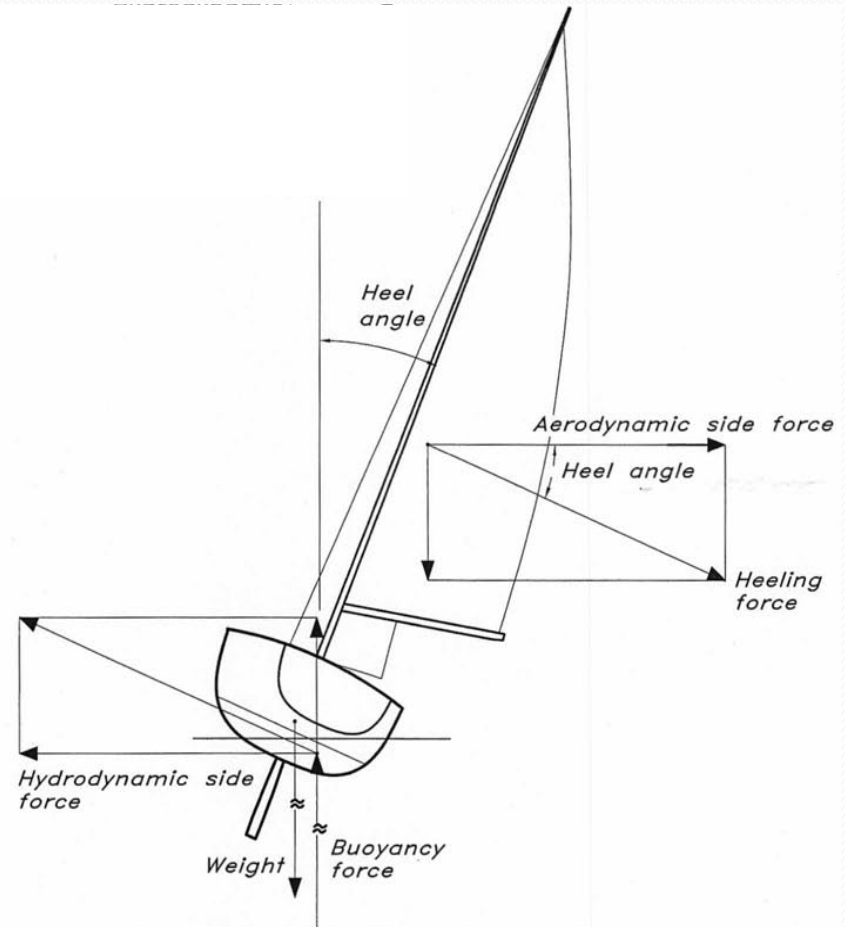
# Ισορροπία Δυνάμεων & ροπών

- 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.
  - η πλεύση αυτή στηρίζεται κυρίως στην αερο-υδροδυναμική θεωρία, → παρουσιάζει ιδιαίτερη πολυπλοκότητα και χρειάζεται ειδική προσέγγιση.



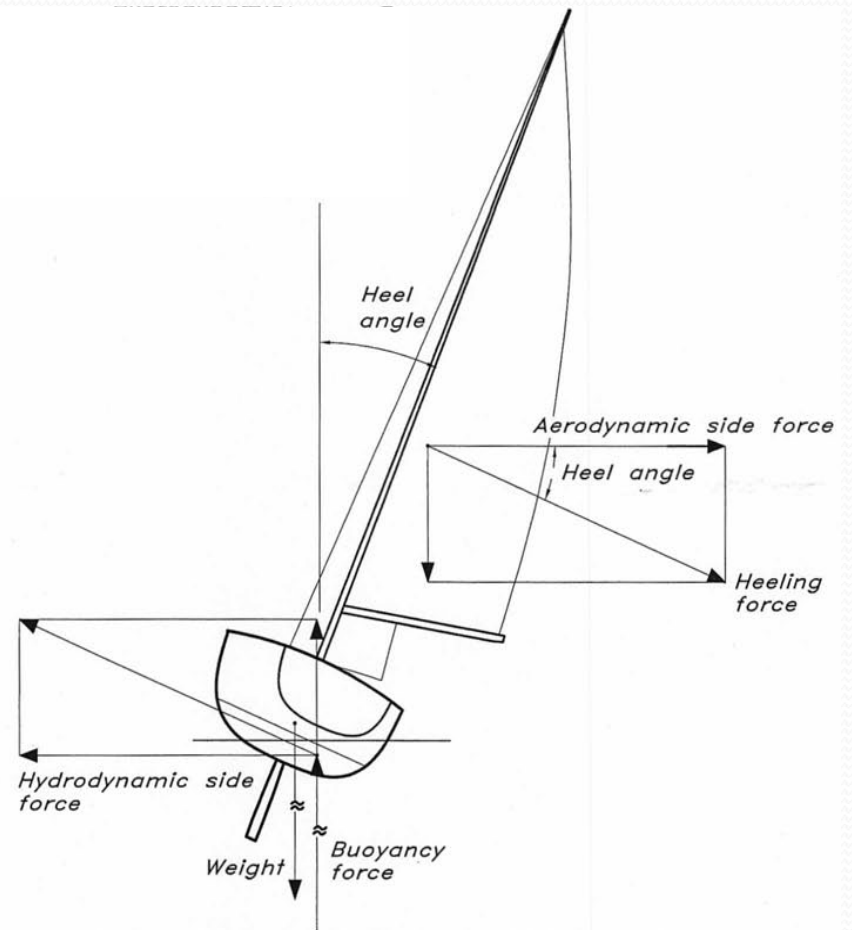
# Ισορροπία Δυνάμεων & ροπών

- 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

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

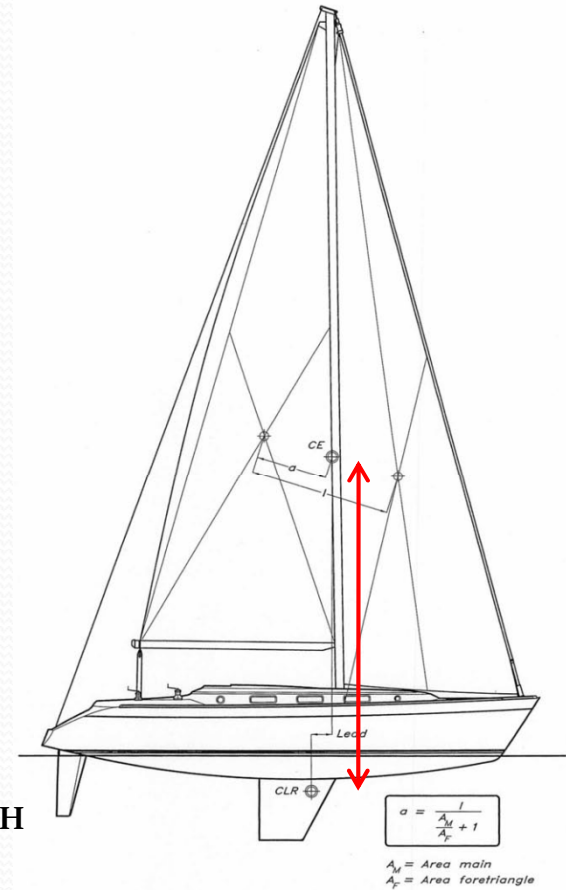
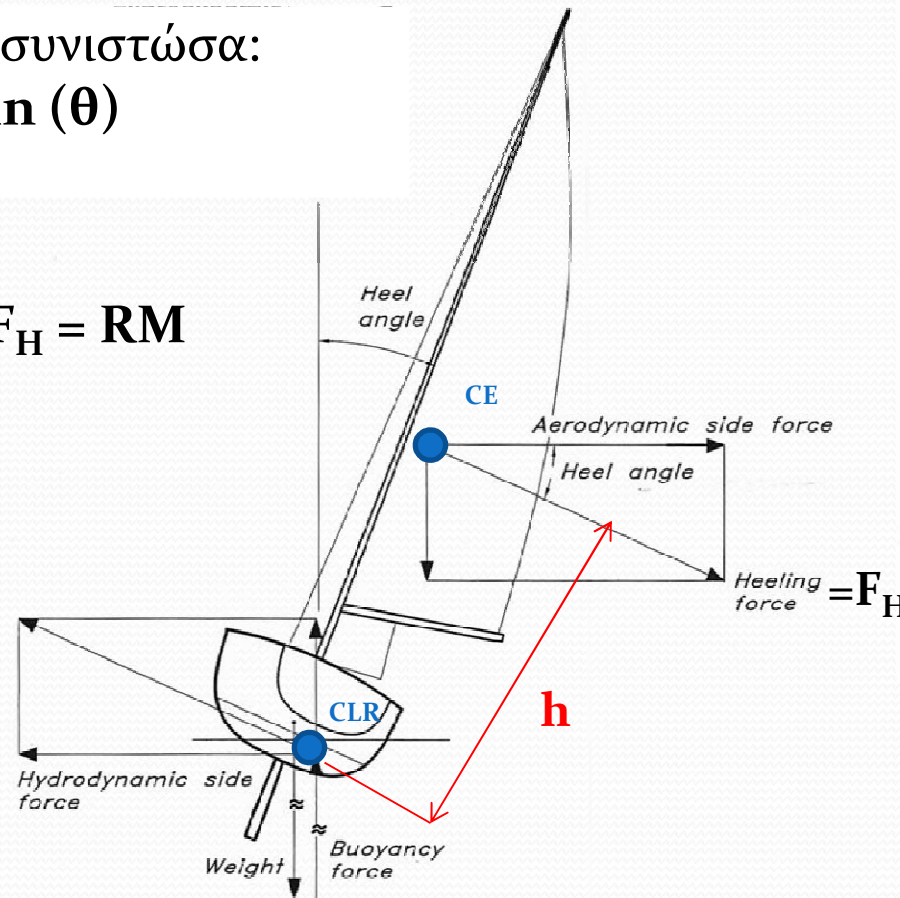
- Η κατακόρυφη συνιστώσα:

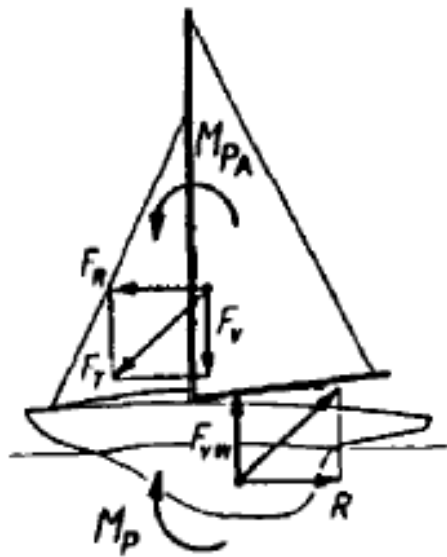
$$F_{HZ} = F_{AZ} = F_H \sin(\theta)$$

- Άρα:

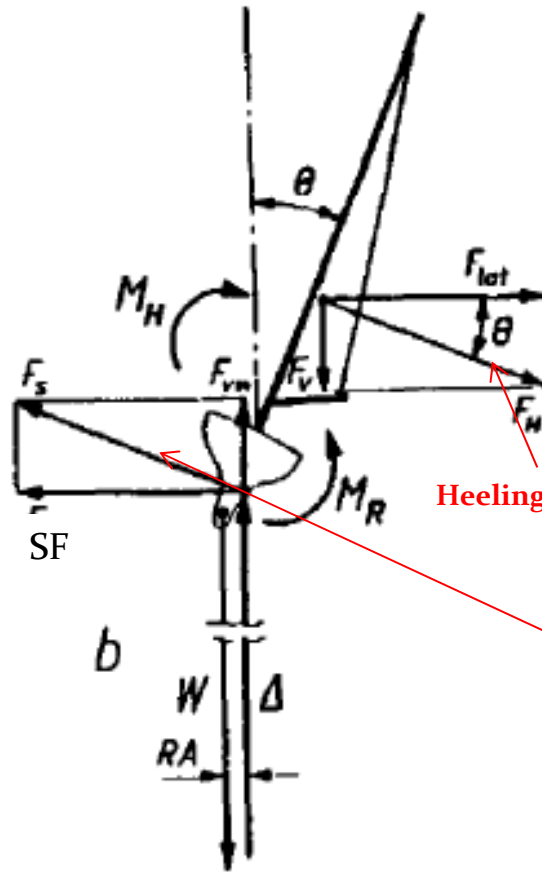
$$(\underbrace{CLR_z - CE_z}_h) \cdot F_H = RM$$

**h**





a



b

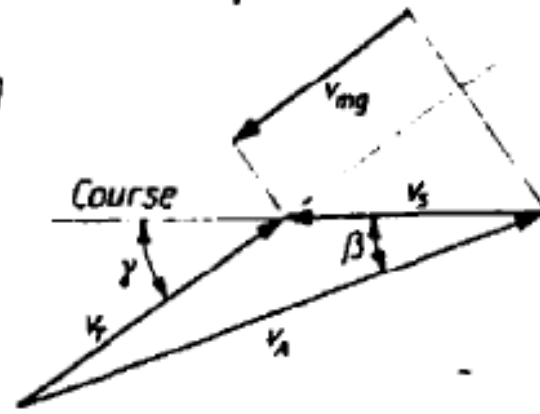
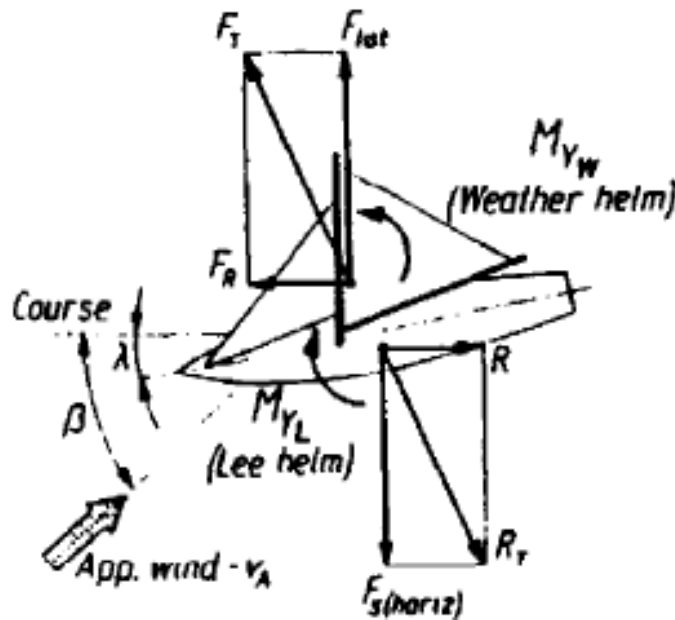
Heeling force

$$\vec{F}_{TA} = (\vec{F}_{R,x\text{-axis}}, \vec{F}_{lat,y\text{-axis}}, \vec{F}_{V,z\text{-axis}})$$

$$\vec{R}_{TH} = (\vec{R}_{x\text{-axis}}, SF_{y\text{-axis}}, \vec{F}_{VW,z\text{-axis}})$$

$$\vec{F}_H = \vec{F}_{lat,y\text{-axis}} + \vec{F}_{V,z\text{-axis}}$$

$$\vec{F}_S = SF_{y\text{-axis}} + \vec{F}_{VW,z\text{-axis}}$$



Απλοποιώντας το πρόβλημα αμελώντας τις ροπές στο XZ  $M_p$  και  $M_{pa}$  και στο XY εξετάζουμε μόνο τις ροπές στο επίπεδο YZ:

$$\bullet (CLR_z - CE_z) \cdot F_H = RM$$

Επίσης

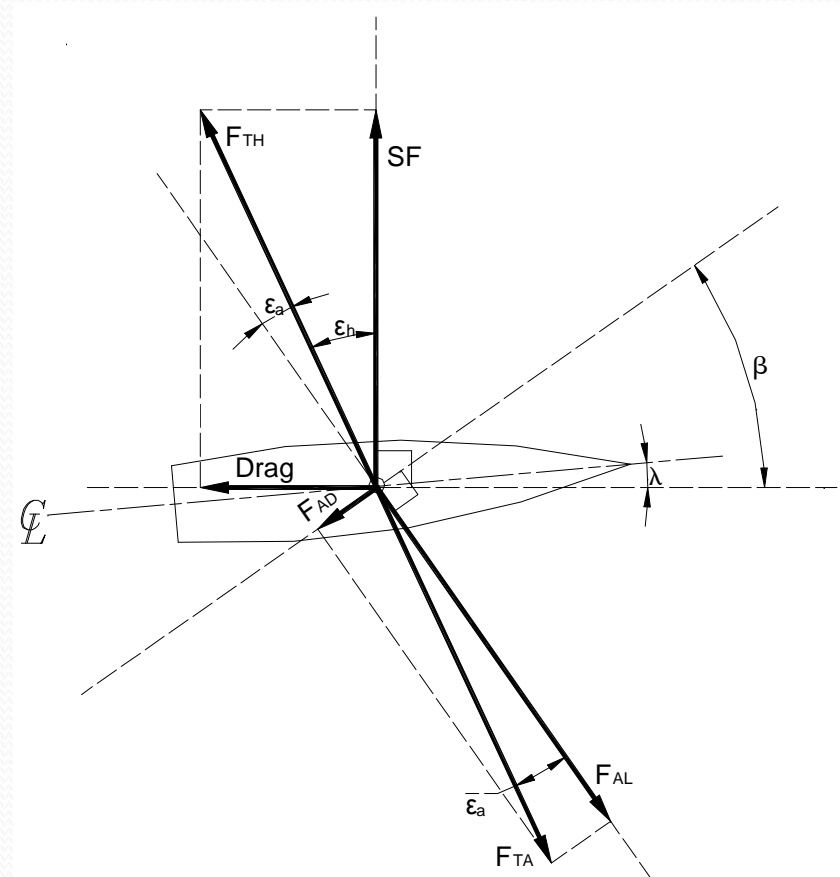
$$\bullet F_{lat, A, y\text{-axis}} = SF_{H, y\text{-axis}}$$

$$\bullet F_{R, A, x\text{-axis}} = R_{H, x\text{-axis}}$$

# Ισορροπία Δυνάμεων & ροπών

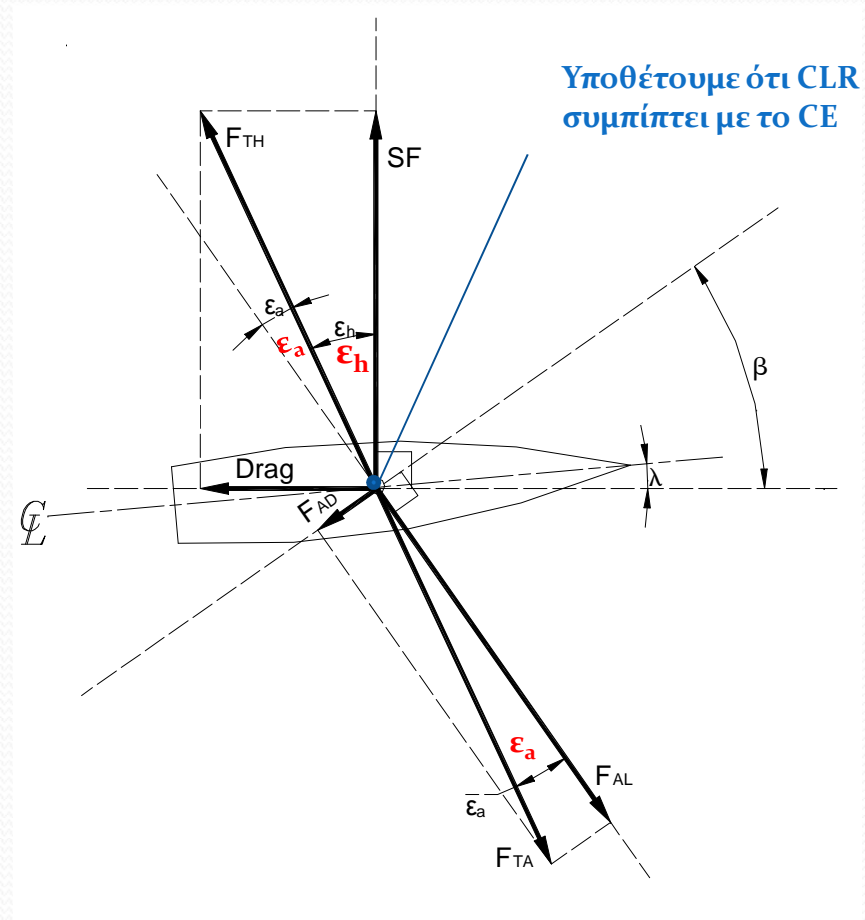
## Ισορροπία στο Επίπεδο ΧΥ

- Το βάρος και η συνισταμένη δύναμη της άνωσης είναι κατακόρυφες, οδηγεί στο συμπέρασμα, ότι 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 Ζ, να είναι και συγγραμικές, και ακόμα πιο συγκεκριμένα επάνω στην ευθεία που ενώνει τις προβολές των CLR και CE στο επίπεδο ΧΥ.



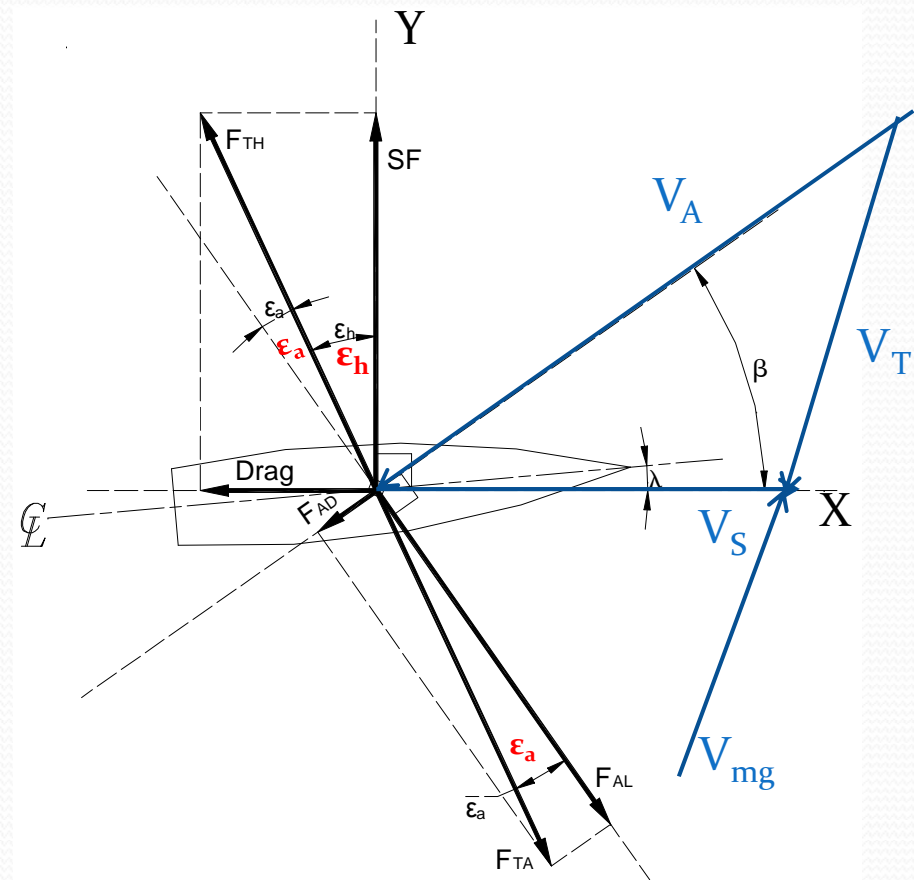
# Ισορροπία Δυνάμεων & ροπών

- Στην κατάσταση ισορροπίας ισχύει η σχέση:  
 $\epsilon_a + \epsilon_h = \beta$
- Η γωνία  $\epsilon_a$  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  $\epsilon_h$  είναι το αντικειμενικό μέτρο της απόδοσης της γάστρας με τα παρελκόμενα.
- Ακριβώς αντίστοιχα η γωνία  $\beta$  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



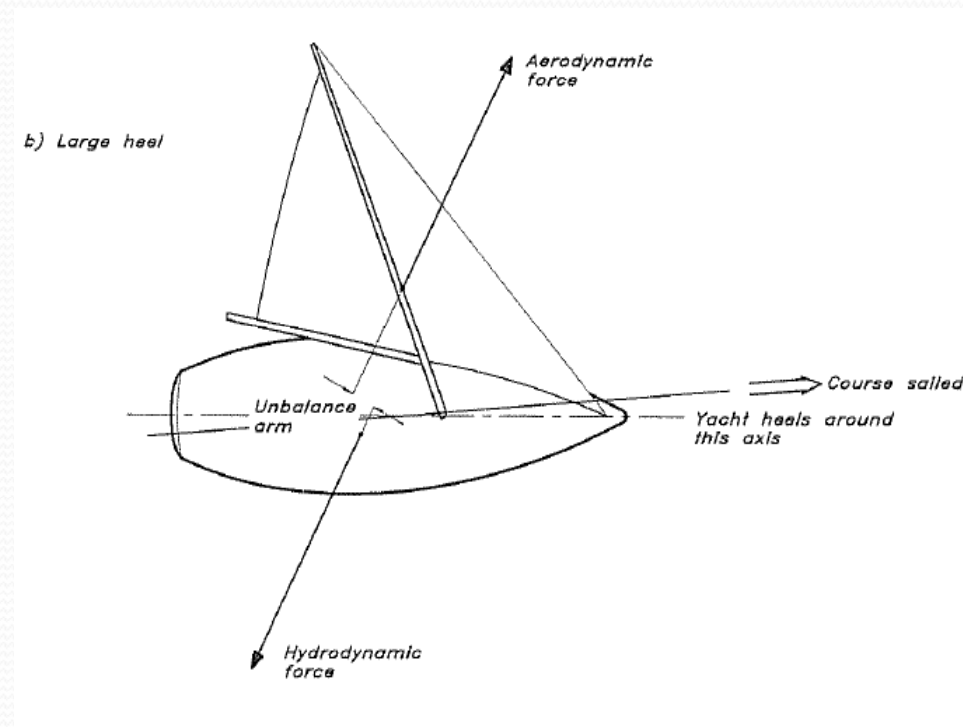
# Ισορροπία Δυνάμεων & ροπών

- Οι γωνίες  $\epsilon_a$ ,  $\epsilon_h$  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.
- Για συγκεκριμένες συνθήκες αέρα, η βελτιστοποίηση του σκάφους μπορεί να γίνει εναλλακτικά:
  - ή με κριτήριο τη γωνία  $\beta$ ,
  - 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  $\beta$



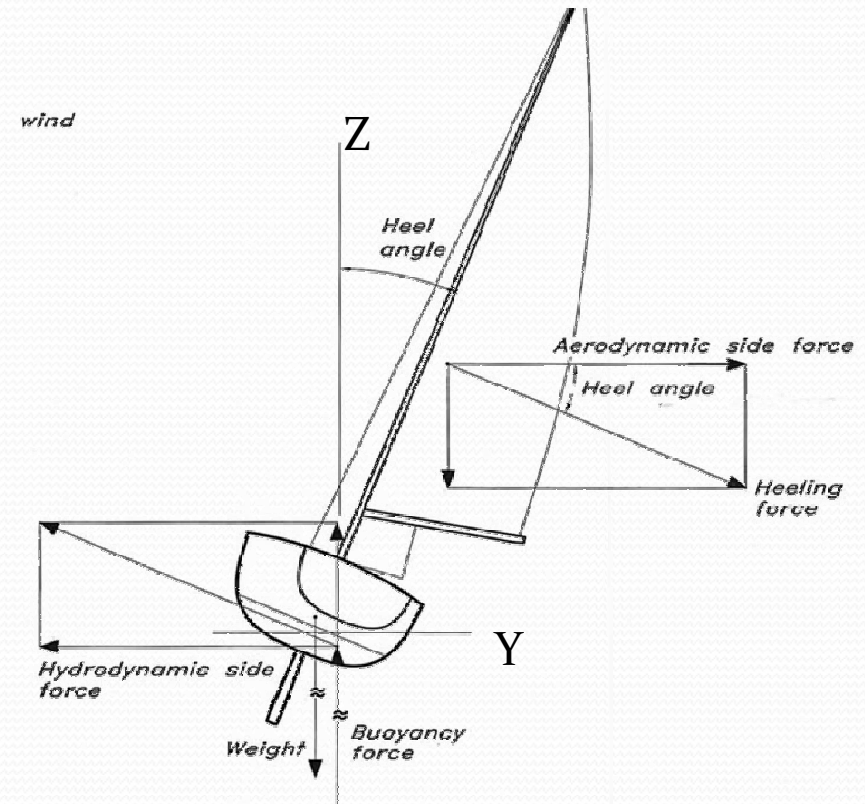
# Ισορροπία Δυνάμεων & ροπών

- 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 ή 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.

