



Ειδικές Ναυπηγικές Κατασκευές και Ιστιοφόρα σκάφη

Διδάσκουσα:

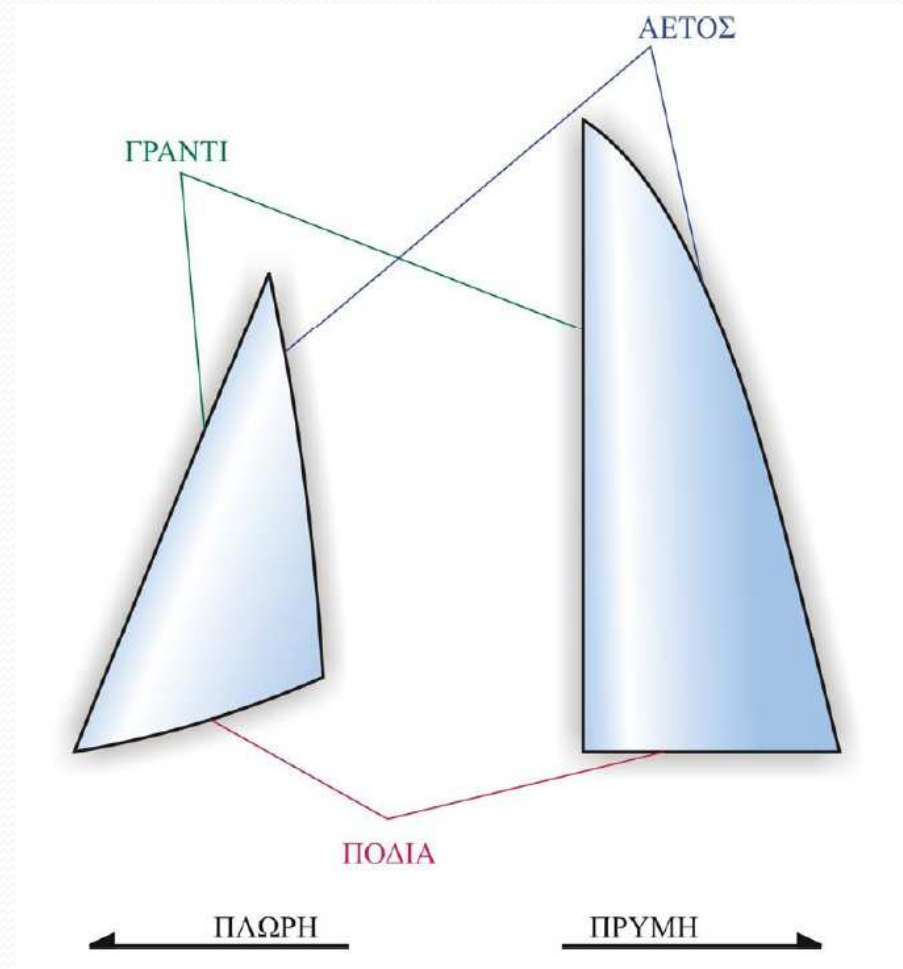
Σ. Κ. Πέππα, Καθηγήτρια Εφαρμογών

Σχεδίαση της Ιστιοφορίας



Πανιά

- Η προραία πλευρά του πανιού είναι το Γραντί και η πρυμναία ο Αετός



Συλλογή πανιών

Η κλασσική συλλογή πανιών για ένα σκάφος που δεν έχει ρόδες για το τύλιγμα των πλωριών πανιών αποτελείται από:

- Μια σειρά πλωριών πανιών
- Μια μαΐστρα
- Ένα μπαλόνη
- Μια μαΐστρα θύελλας
- Και ένα φλόκο θύελλας

ΣΥΛΛΟΓΗ ΠΑΝΙΩΝ ▷

Η κλασσική συλλογή πανιών για ένα σκάφος που δεν έχει ρόδες για το τύλιγμα των πλωριών πανιών αποικείται από μια σειρά πλωριών πανιών, μια μαΐστρα, ένα μπαλόνη, μια μαΐστρα θυέλλας κι ένα φλόκο θυέλλας.

Μαΐστρα (πορτοκαλί)
Πρέπει να είναι αρκετά γερή για να αντέχει σε όλες τις εντάσεις ανέμου

Τζένουα (ροζ)
Για ασθενείς ως μέτριους ανέμους

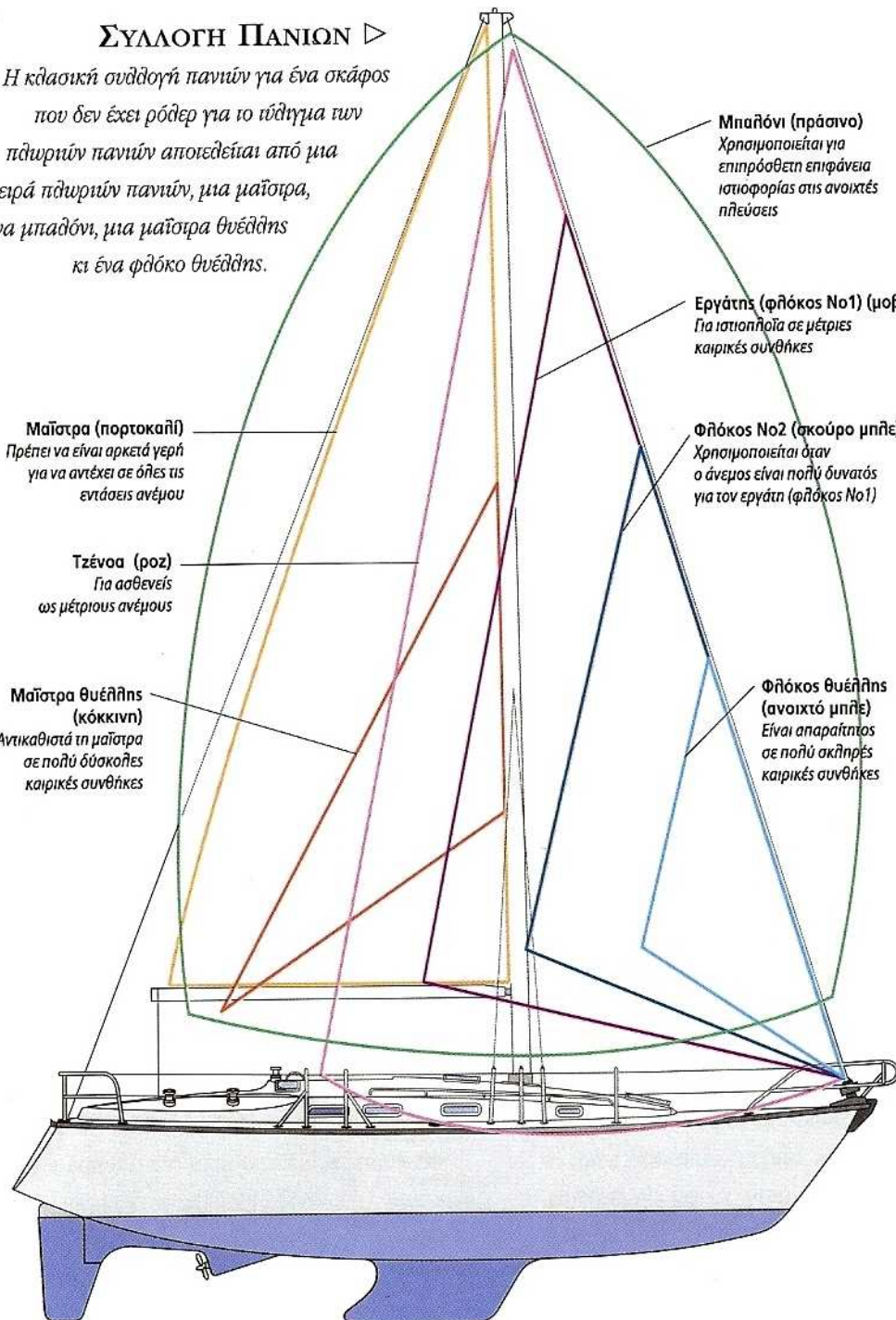
Μαΐστρα θυέλλας (κόκκινη)
Αντικαθιστά τη μαΐστρα σε πολύ δύσκολες καιρικές συνθήκες

Μπαλόνη (πράσινο)
Χρησιμοποιείται για επιπρόσθετη επιφάνεια ιστιοφορίας στις ανοικτές πλεύσεις

Εργάτης (φλόκος Νο1) (μοβ)
Για ιστιοπλοία σε μέτριες καιρικές συνθήκες

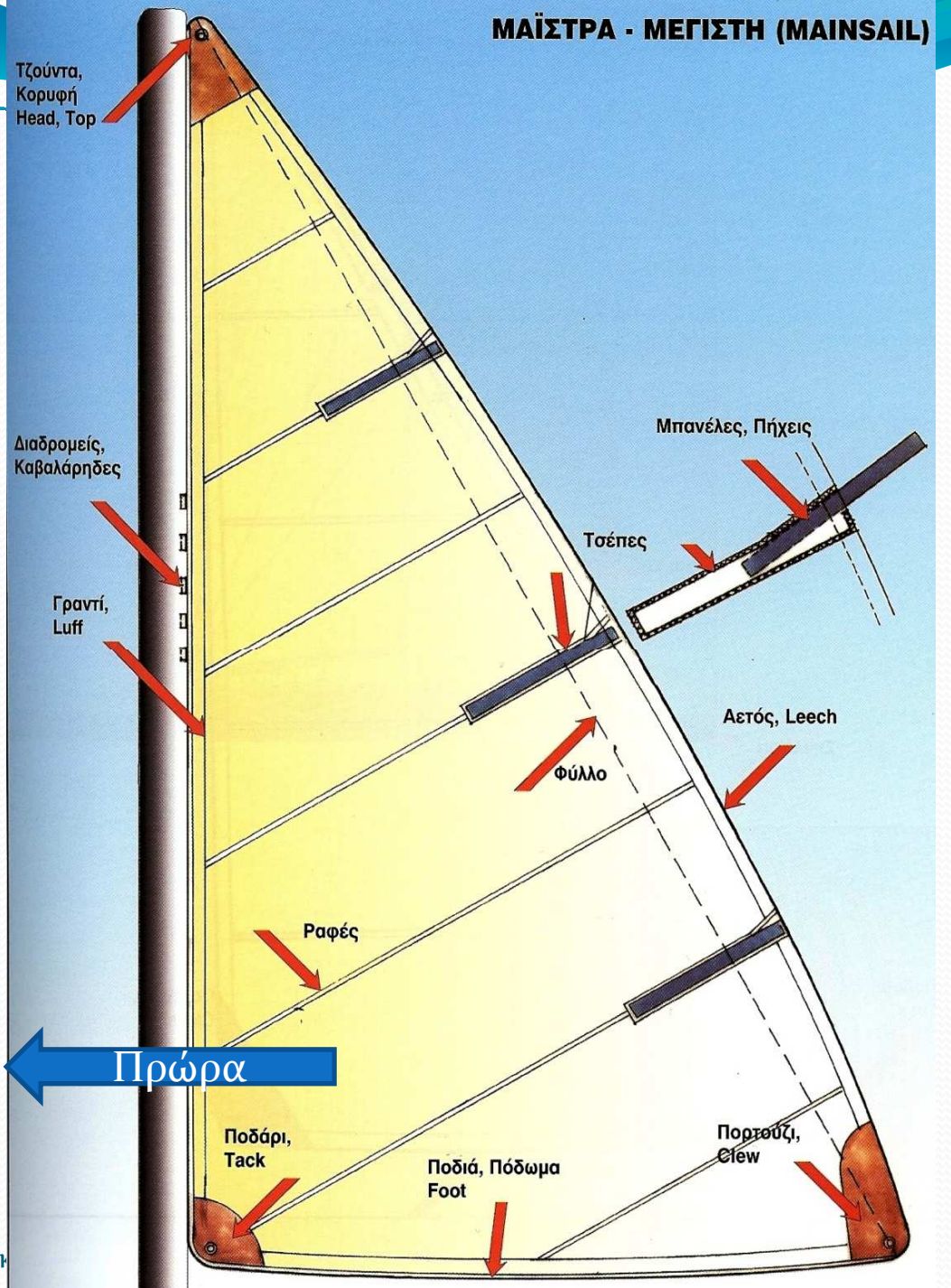
Φλόκος Νο2 (ακούρο μπλε)
Χρησιμοποιείται όταν ο άνεμος είναι πολύ δυνατός για τον εργάτη (φλόκος Νο1)

Φλόκος θυέλλας (ανοικτό μπλε)
Είναι απαραίτητος σε πολύ σκληρές καιρικές συνθήκες



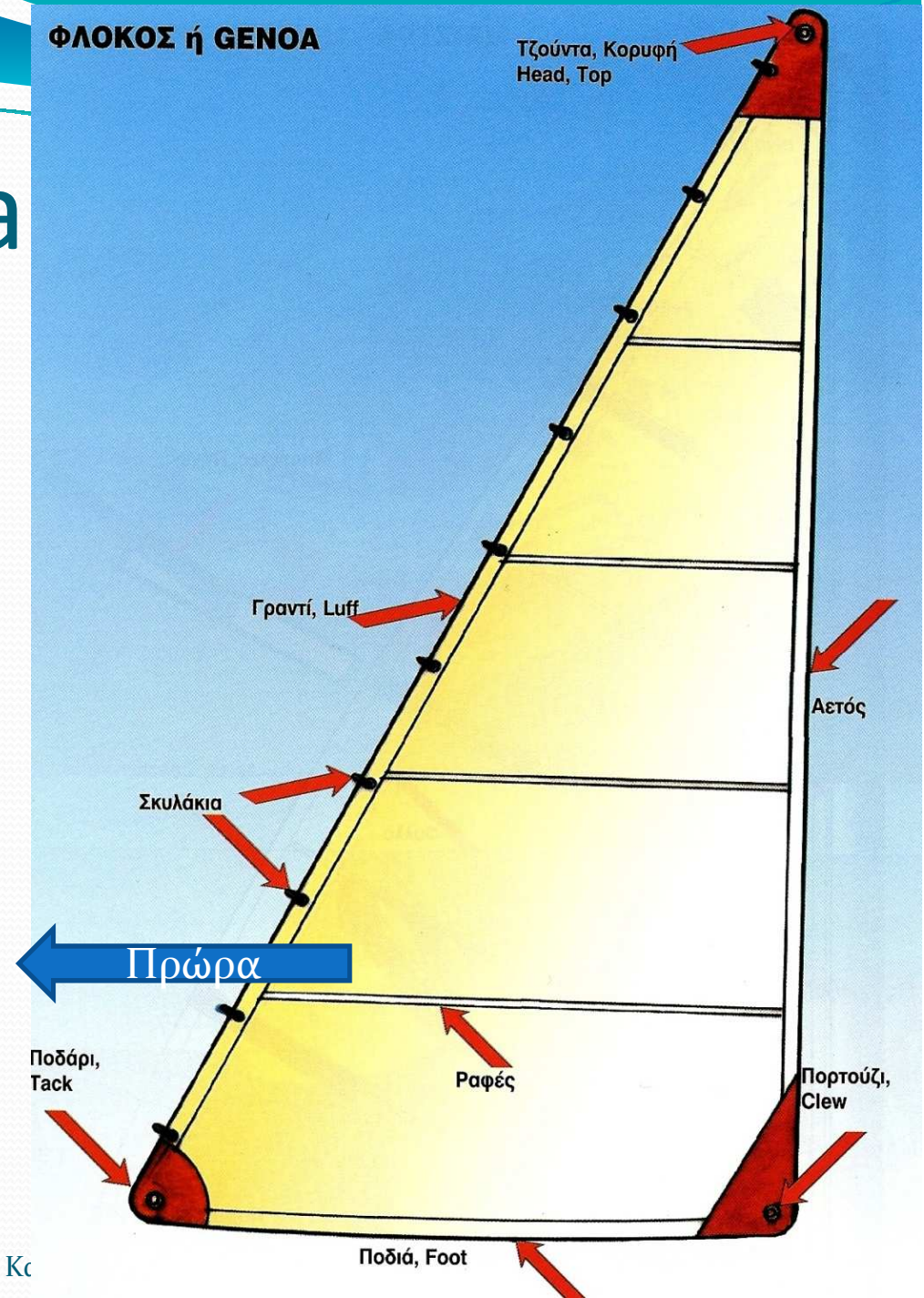
Μαΐστρα

ΜΑΪΣΤΡΑ - ΜΕΓΙΣΤΗ (MAINSAIL)



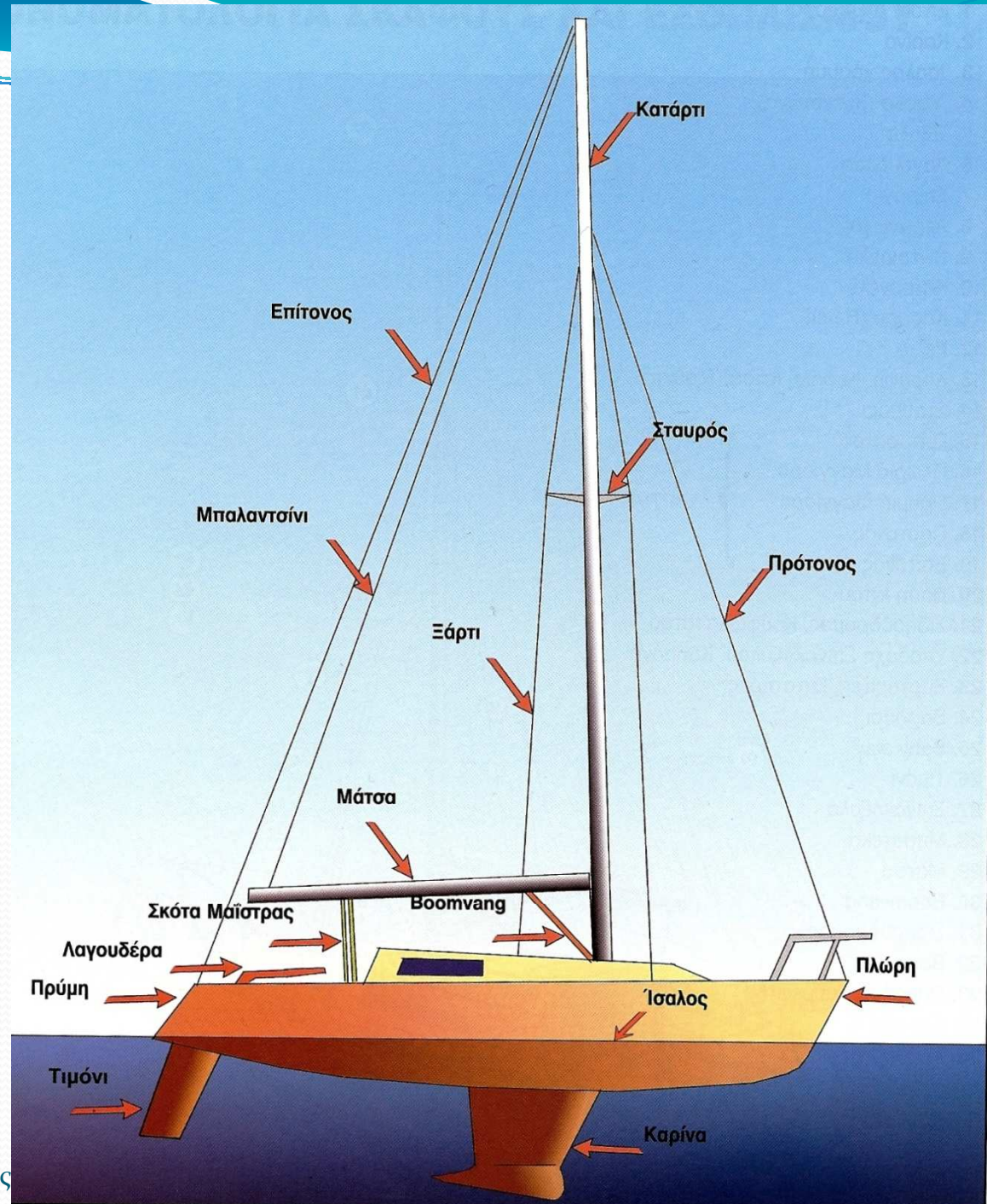
Φλόκος ή Γενοα

ΦΛΟΚΟΣ ή ΓΕΝΟΑ



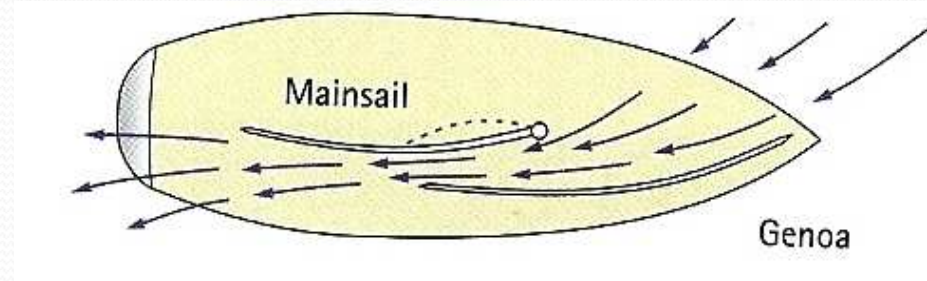
Εξαρτισμός

- Κατάρτι
- Σταυρός
- Μάτσα
- Επίτονος
- Μπαλαντσίνι
- Πρότονος
- Ξάρτι
- Βοοmvang
- Σκότα Μαΐστρας



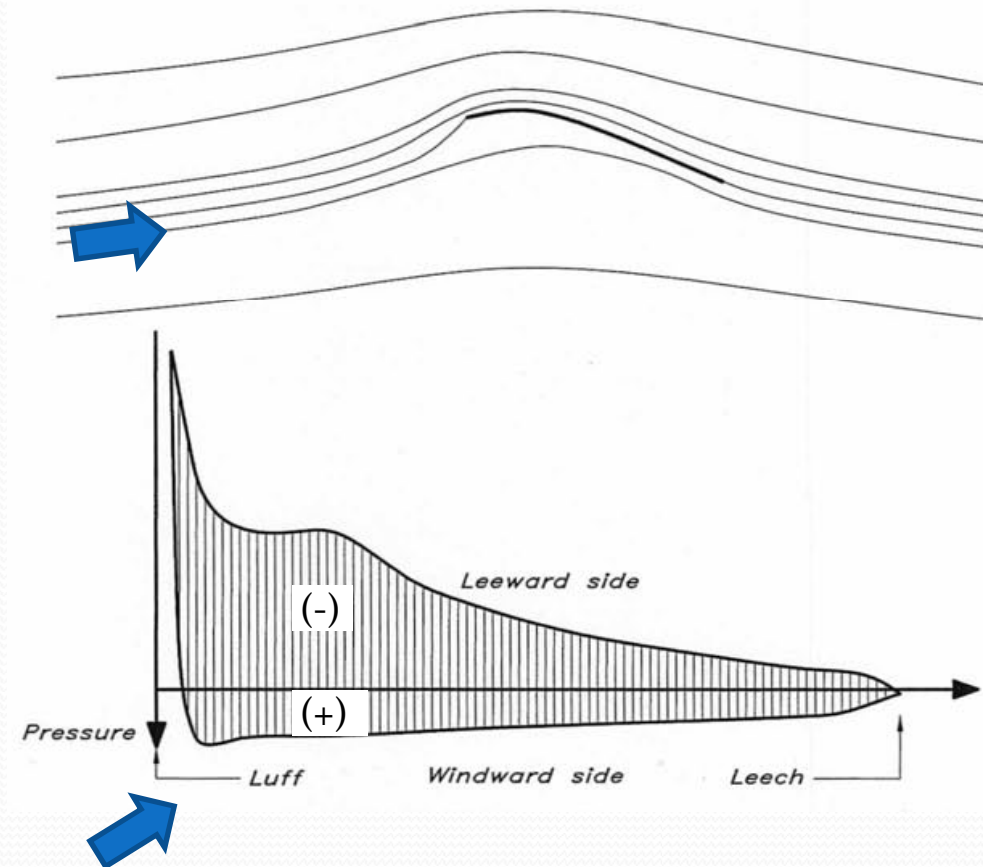
Αρχή λειτουργίας

- Όπως τα παρελκόμενα της γάστρας, η ιστιοφορία των ιστιοπλοϊκών σκαφών συμπεριφέρεται σαν μια αεροτομή, η οποία όμως:
 - έχει πολύ μικρό πάχος και έντονη κυρτότητα (camber)
 - πρέπει να λειτουργεί κοντά στο μέγιστο της ανωστικής δύναμης
 - έχει μεταβαλλόμενη γεωμετρία
 - λειτουργεί σε ροή διαταραγμένη από την παρουσία του ιστού και των υπόλοιπων πανιών



Ροή γύρω από το πανί

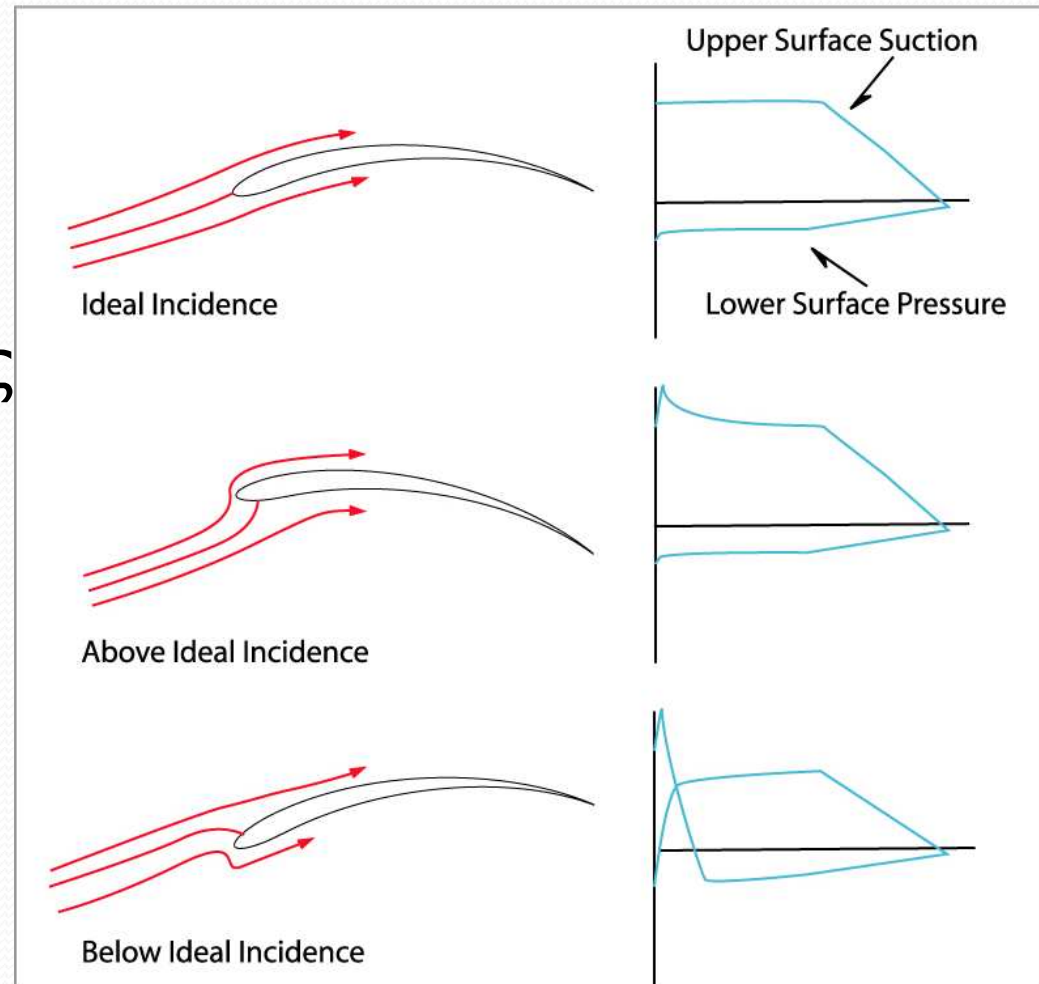
- Στο σχήμα φαίνεται η ροή γύρω από ένα απλό πανί και η κατανομή πιέσεων στις δύο πλευρές του
- Αμελείται η επίδραση του ιστού



Κατανομή πίεσης

Η κατανομή της πίεσης επηρεάζεται από:

- Το σχήμα της γραμμής κυρτότητας (camber line)
- Την κατανομή του πάχους κατά μήκος της χορδής
- Την γωνία πρόσπτωσης



Η επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης

- Η ροή γύρω από αεροτομή για διαφορετικές γωνίες πρόσπτωσης
- Όσο μεγαλώνει η γωνία οι γραμμές ροής έρχονται πιο κοντά μεταξύ τους

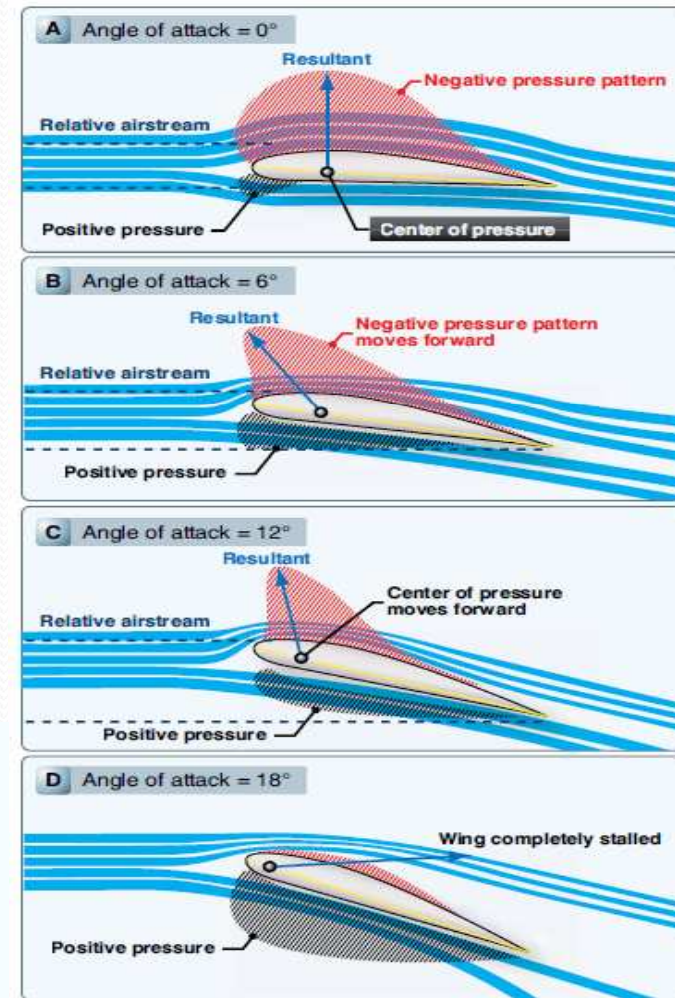
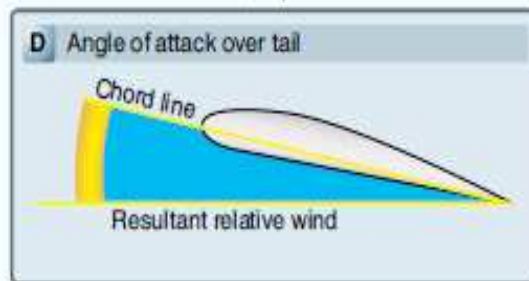
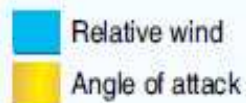
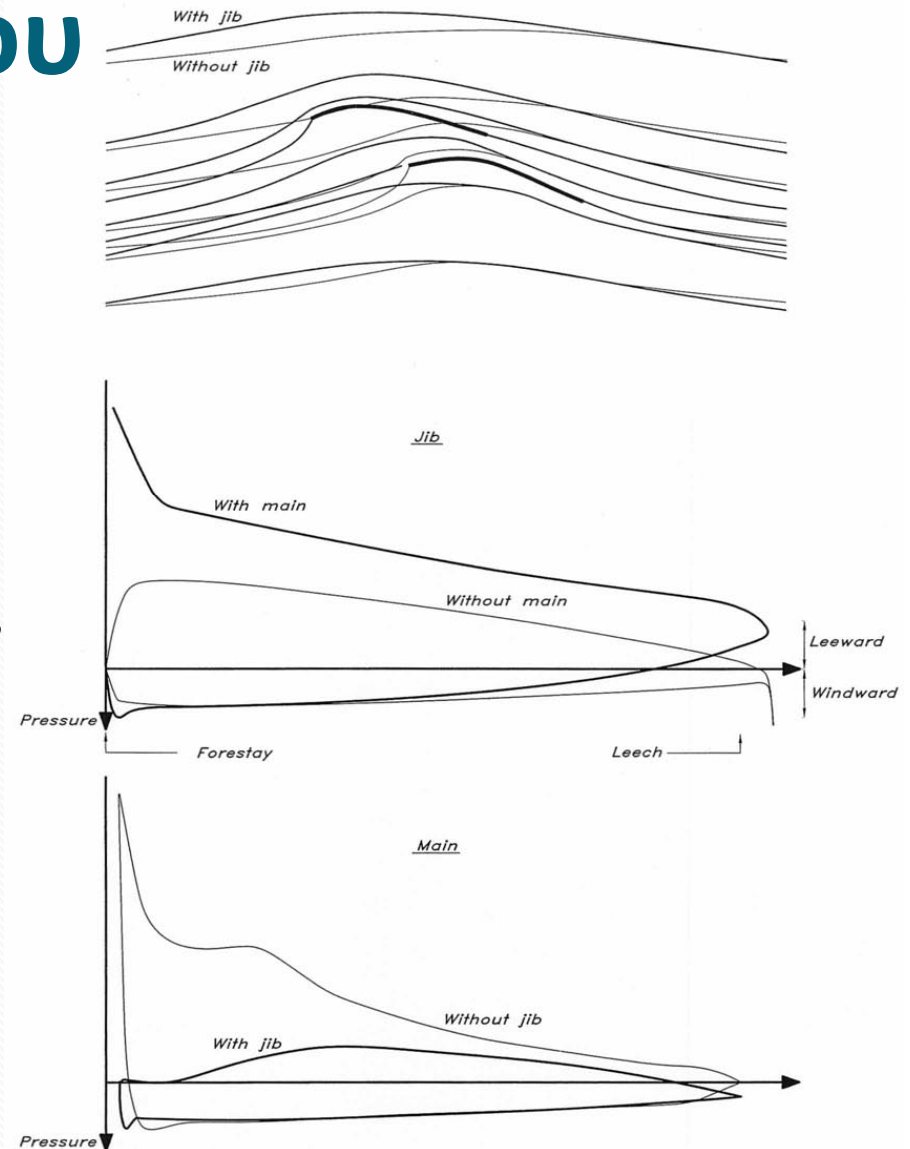


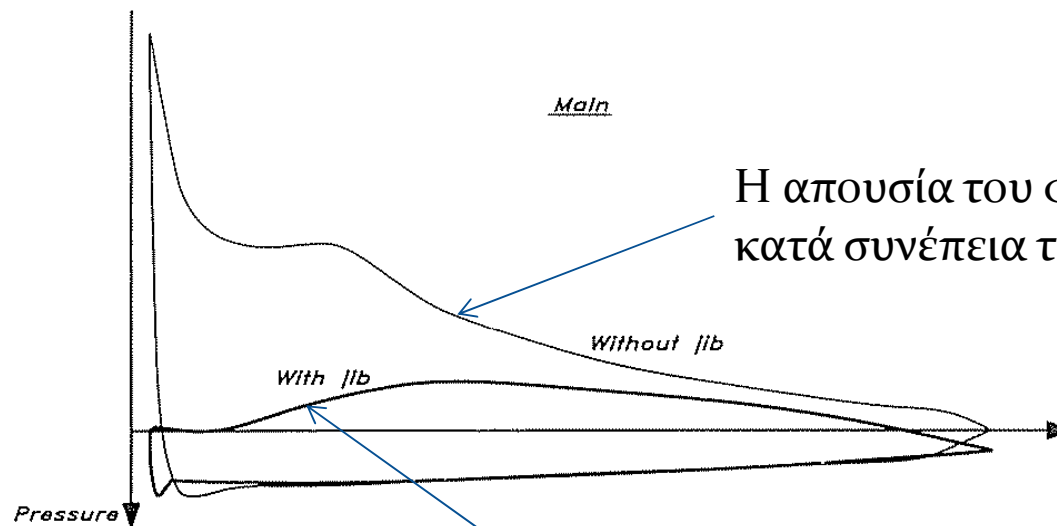
Figure 2-6. Effect on increasing angle of attack.

Ροή γύρω από συνδυασμό μεγίστης και φλόκου

- Στο σχήμα δίνονται τα αντίστοιχα στοιχεία για την περίπτωση συνδυασμού δύο πανιών (μεγίστη, φλόκος).
- Αμελείται η επίδραση του ιστού.
- Οι γραμμές ροής έχουν μεγαλύτερη κλίση όταν υπάρχει ο φλόκος που σημαίνει ότι ο αέρας πέφτει στη μεγίστη με μικρότερη γωνία (γωνία πρόσπτωσης) όταν υπάρχει και ο φλόκος.
- Το αντίθετο ισχύει για το φλόκο.
- Επομένως, ο συνδυασμός των δύο πανιών υπερφορτίζει το φλόκο και αποφορτίζει τη μεγίστη



Ροή γύρω από συνδυασμό μεγίστης και φλόκου



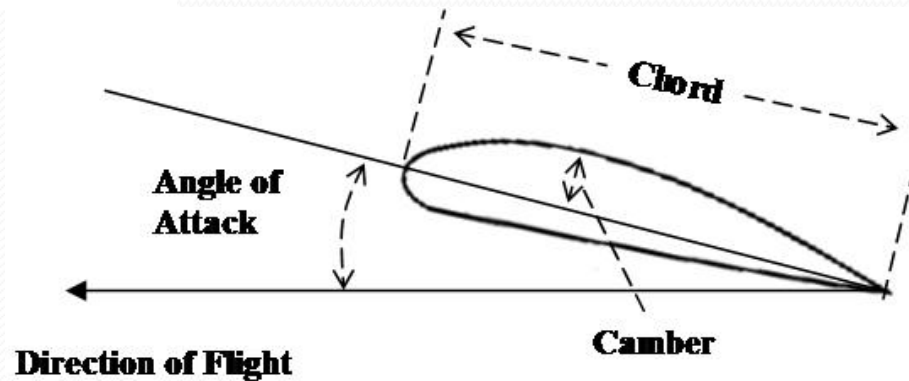
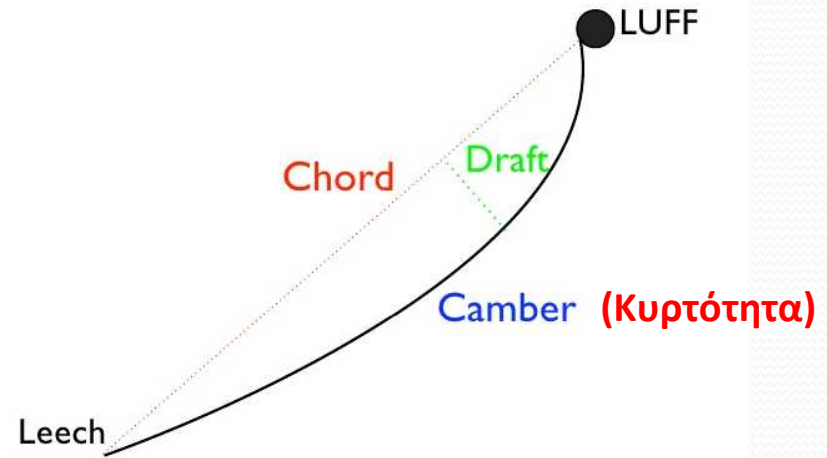
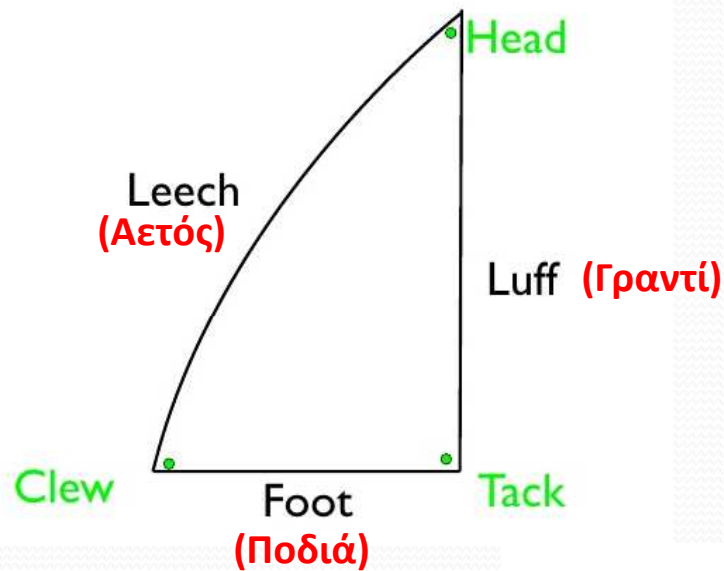
Η απουσία του φλόκου αυξάνει την υποπίεση και κατά συνέπεια την ασκούμενη δύναμη

Όταν υπάρχει ο και φλόκος η υποπίεση στην μπροστινή πλευρά σχεδόν μηδενίζεται → μειώνεται και η συνολική δύναμη

Πανιά-Τρισδιάστατες αεροτομές

- Τα πανιά συμπεριφέρονται σαν τρισδιάστατες αεροτομές
- Λόγω της διαφοράς πίεσης στην αεροτομή έχουμε κίνηση ρευστού από την πλευρά της υψηλής πίεση στη χαμηλή & δημιουργία δινών
- Έτσι η ανωστική δύναμη μηδενίζεται στην άνω και την κάτω πλευρά όπου και δημιουργούνται δίνες με συνέπεια την αύξηση της επαγόμενης αντίστασης (induced drag).
- Όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος του πανιού τόσο μικρότερη είναι η επαγόμενη αντίσταση.

Πανιά-Τρισδιάστατες αεροτομές

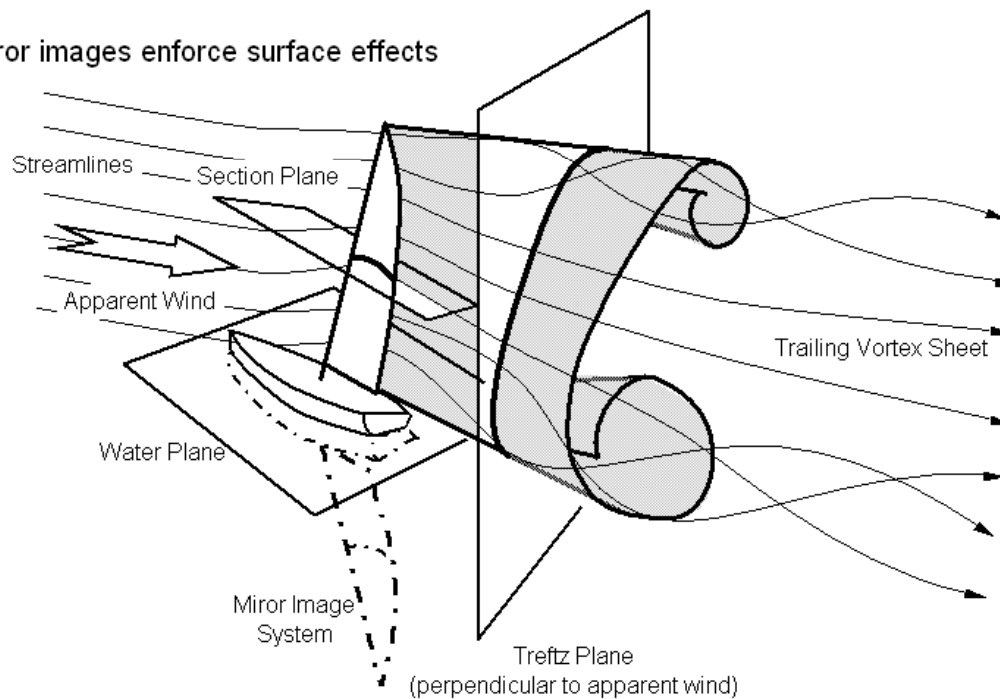


Πανιά-Τρισδιάστατες αεροτομές

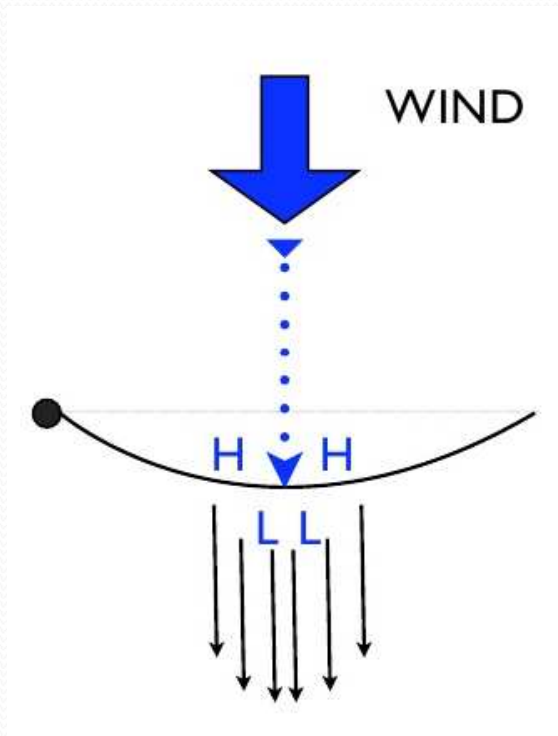
Three-dimensional Flow About Sail Rig Reduced to Two Two-dimensional Problems

- Flow around airfoil section
- Pattern of trailing vortices in downstream Trefftz Plane

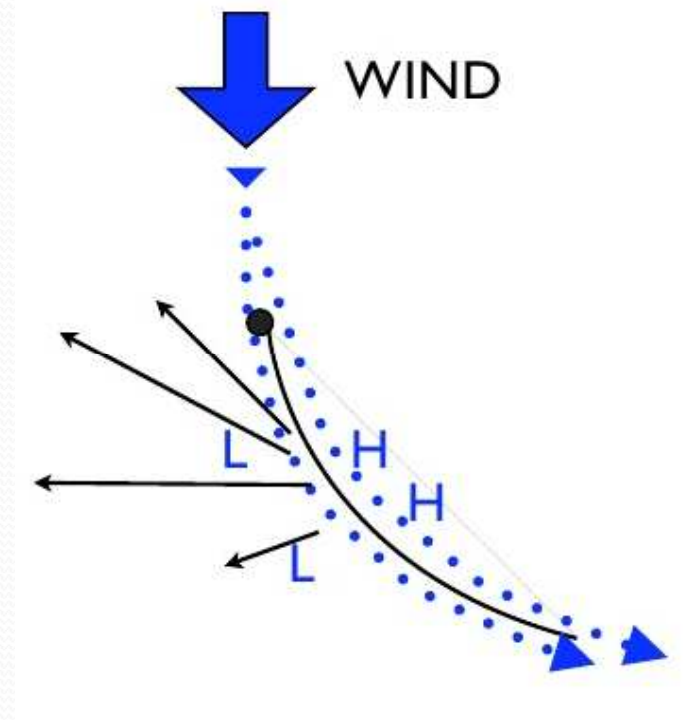
Mirror images enforce surface effects



Πανιά-Τρισδιάστατες αεροτομές

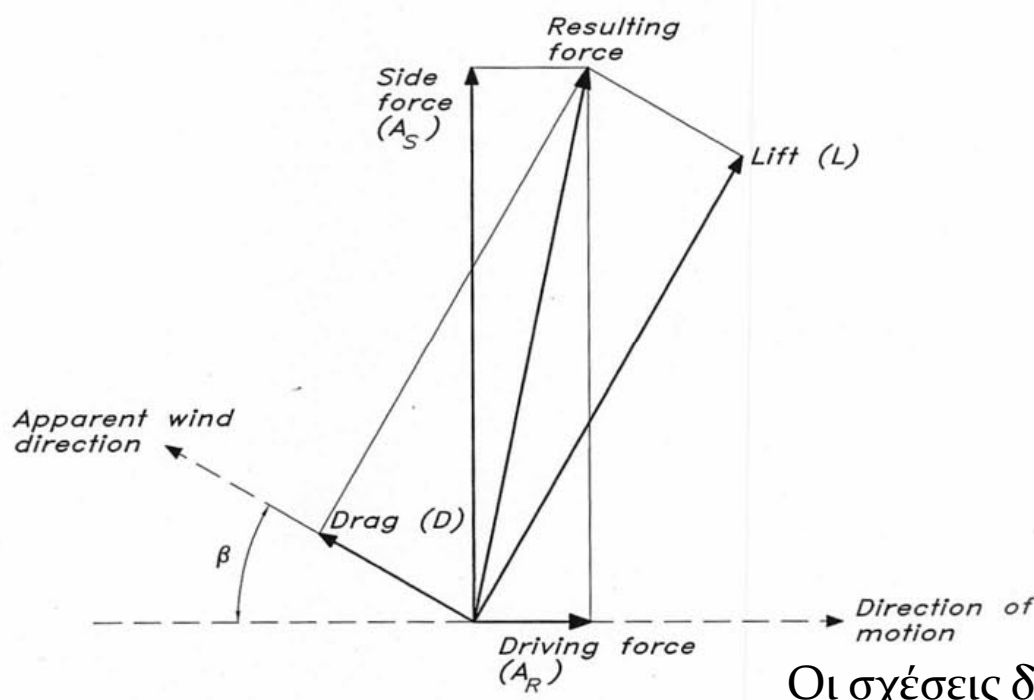


- Το πανί → εμπόδιο στο αέρα
- Πιο πολύ αέρας → πιο μεγάλη δύναμη
- Πιο μεγάλη επιφάνεια → πιο μεγάλη δύναμη



- Ο αέρας πνέει και από τις δύο πλευρές
- Ο αέρας στην εξωτερική πλευρά → πιο μεγάλη ταχύτητα εξαιτίας της κυρτότητας → δημιουργείται πλευρική & αξονική δύναμη

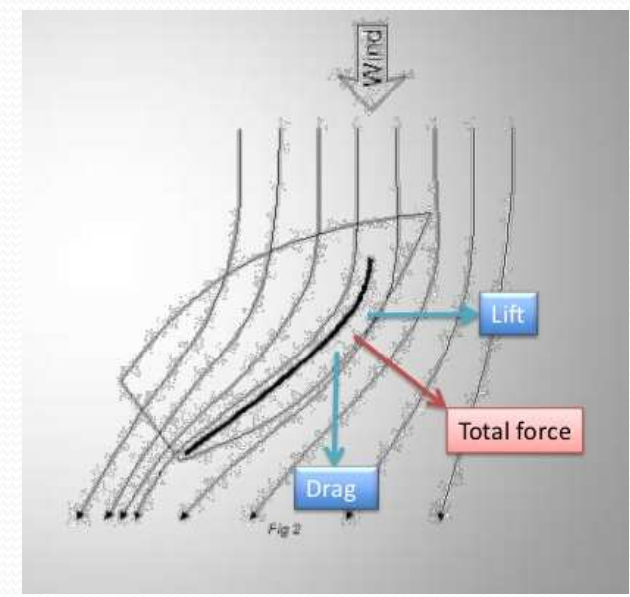
Δυνάμεις που ασκούνται στα πανιά



$$A_S = L \cdot \cos(\beta) + D \cdot \sin(\beta)$$

$$A_R = L \cdot \sin(\beta) - D \cdot \cos(\beta)$$

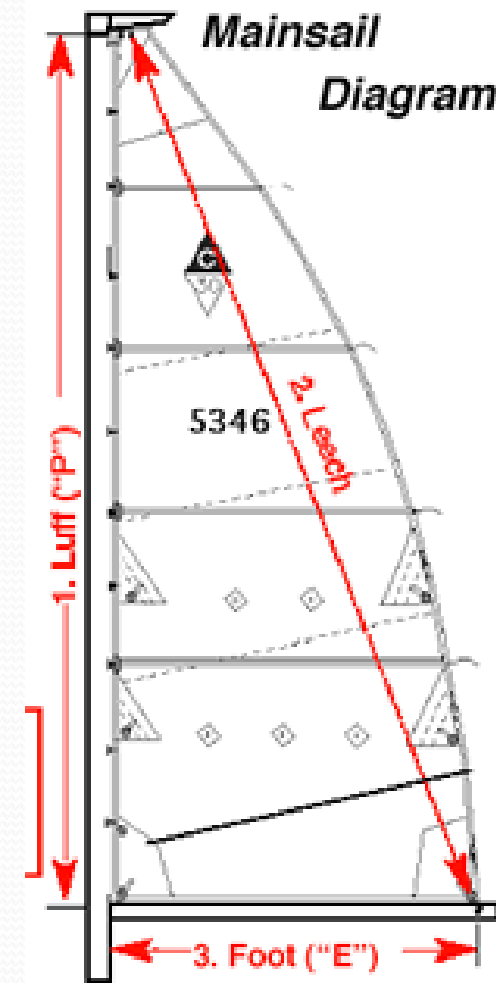
Οι σχέσεις δίνουν πως συνδέονται οι δυνάμεις άνωσης (L) και αντίστασης (D) με τις πλάγιες δυνάμεις (Side force) & αεροδυναμική δύναμη πρόωσης κατά τον άξονα κίνησης (Driving force)



Λόγος επιμήκους

- Στη κορυφή του πανιού και στην βάση του (στη μάτσα) η άνωση (lift) μηδενίζεται και εμφανίζονται δίνες (vortices) που αυξάνουν την αντίσταση (drag)
- Όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος του πανιού τόσο μικρότερη είναι η επίδραση των δινών
- Όπως και στην καρίνα, ο σημαντικότερος παράγοντας είναι ο λόγος επιμήκους (aspect ratio)
- Ορίζεται ως το μήκος από το γραντί (luff length) προς το $\frac{1}{2}$ του μήκους της ποδιάς (foot length)
- Σε ορισμένες βιβλιογραφικές αναφορές χρησιμοποιείται ολόκληρο το μήκος της ποδιάς οπότε το AR είναι το μισό

Μαΐστρα- Μεγίστη

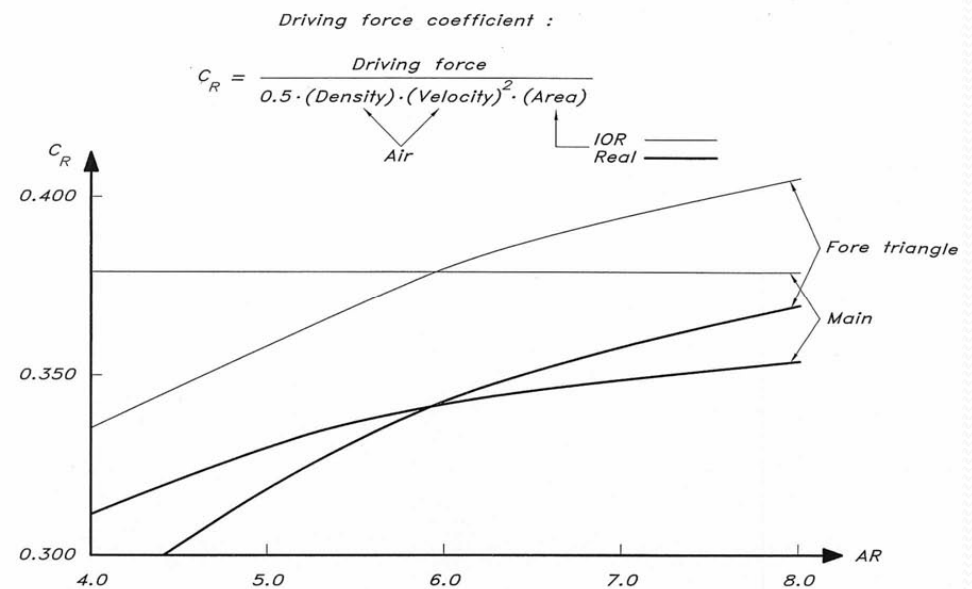


Επίδραση του λόγου επιμήκους

- Ο καθ. J. H. Milgram στο Massachusetts Institute of Technology (MIT) έκανε μια πολύ ενδιαφέρουσα συστηματική διερεύνηση
- Για μια δεδομένη ιστιοφορία μετέβαλε συστηματικά τους λόγους επιμήκους της μαϊστρας και των πρωραίων τριγωνικών πανιών μεταβάλλοντας το μήκος της ποδιάς
- Οι υπολογισμοί έγιναν για πλεύση όρτσα και η υπολογιζόμενη δύναμη αναλύθηκε σε δύο συνιστώσες
 - Στη αεροδυναμική δύναμη πρόωσης (driving force, R) και
 - Στην πλευρική δύναμη (side force S)
- Τα αποτελέσματά του εμφανίζονται με την μορφή διαγραμμάτων με τη βοήθεια συντελεστών C_R και C_S αντίστοιχα
- Για τον υπολογισμό της βρεχόμενης επιφάνειας χρησιμοποιήθηκε α) η πραγματική επιφάνεια β) η επιφάνεια υπολογισμένη βάσει του IMS (International Measurement System)

Επίδραση του λόγου επιμήκους

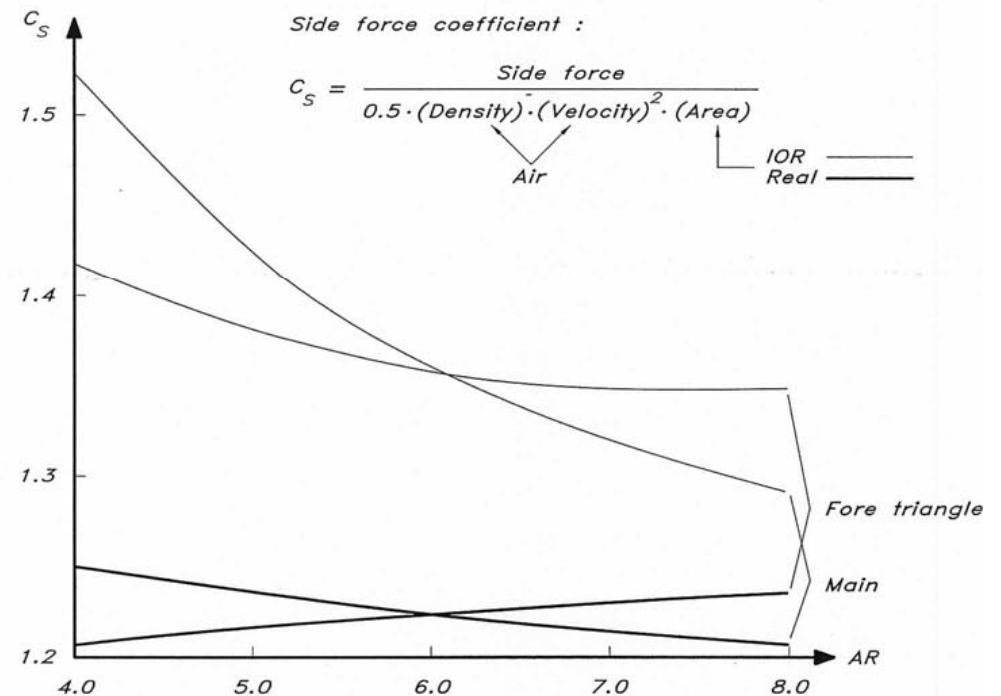
- Στο σχήμα δίνεται η επίδραση του λόγου επιμήκους των πανιών στην αεροδυναμική δύναμη πρόωσης για διάφορους λόγους επιμήκους, σύμφωνα με υπολογισμούς το Milgram (1971) στο MIT.
- Τα γραφήματα για τα πρωραία πανιά ελήφθησαν κρατώντας το λόγο επιμήκους της μεγίστης σταθερό (AR=6)
- Τα γραφήματα της μεγίστης ελήφθησαν για λόγο επιμήκους σταθερό (AR=6) στα πρωραία πανιά



Η αεροδυναμική δύναμη πρόωσης (driving force) αυξάνει με την αύξηση του AR

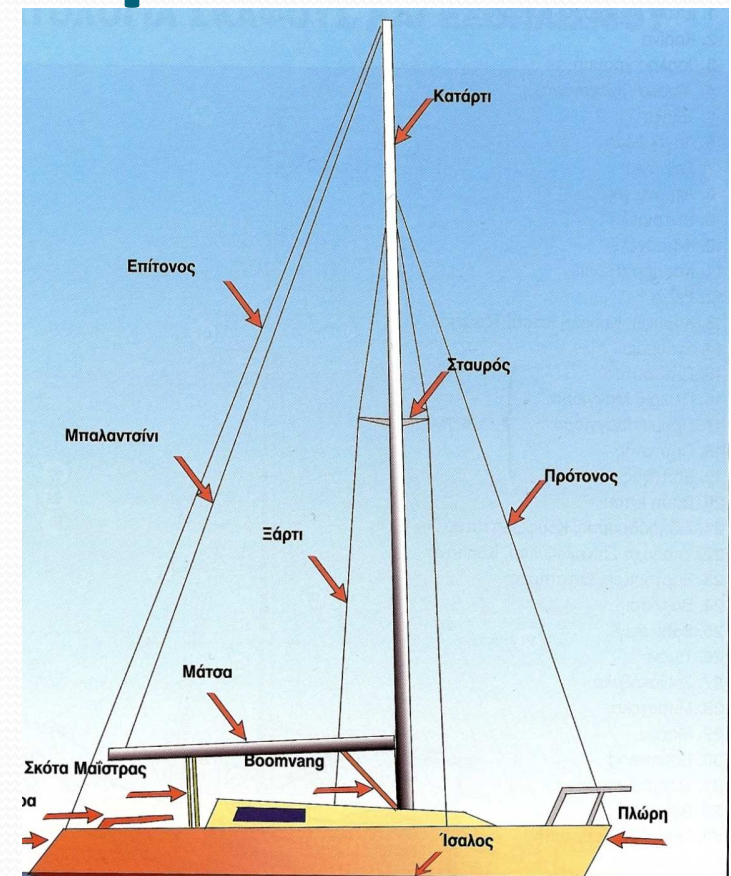
Επίδραση του λόγου επιμήκους

- Στο σχήμα δίνεται η επίδραση του λόγου επιμήκους του πανιού στην πλευρική δύναμη στα πανιά για διάφορους λόγους επιμήκους, σύμφωνα με υπολογισμούς το Milgram (1971) στο MIT.
- Η πλευρική δύναμη μειώνεται όταν αυξάνεται το AR (όταν το εμβαδόν υπολογίζεται βάσει του IOR)



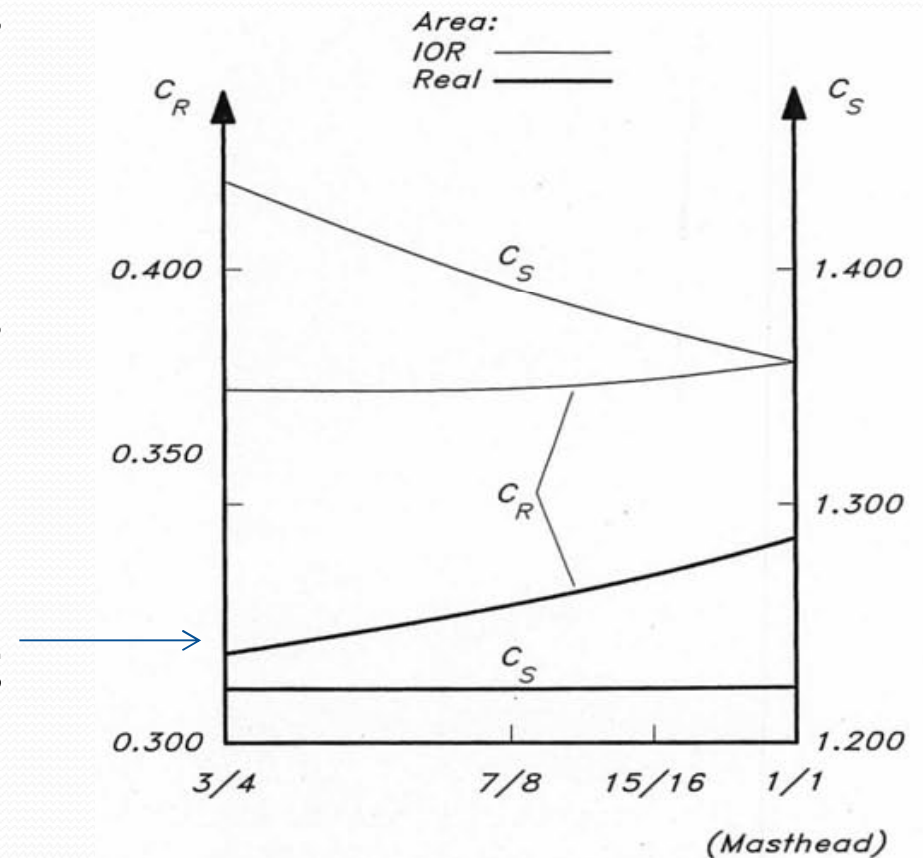
Επίδραση κατακόρυφης θέσης του άνω άκρου του πρωρ. πανιού

- Ο καθ. Milgram διερεύνησε επίσης την επίδραση του ύψους στο οποίο ξεκινά ο πρότονος (forestay) από το κατάρτι (mast)



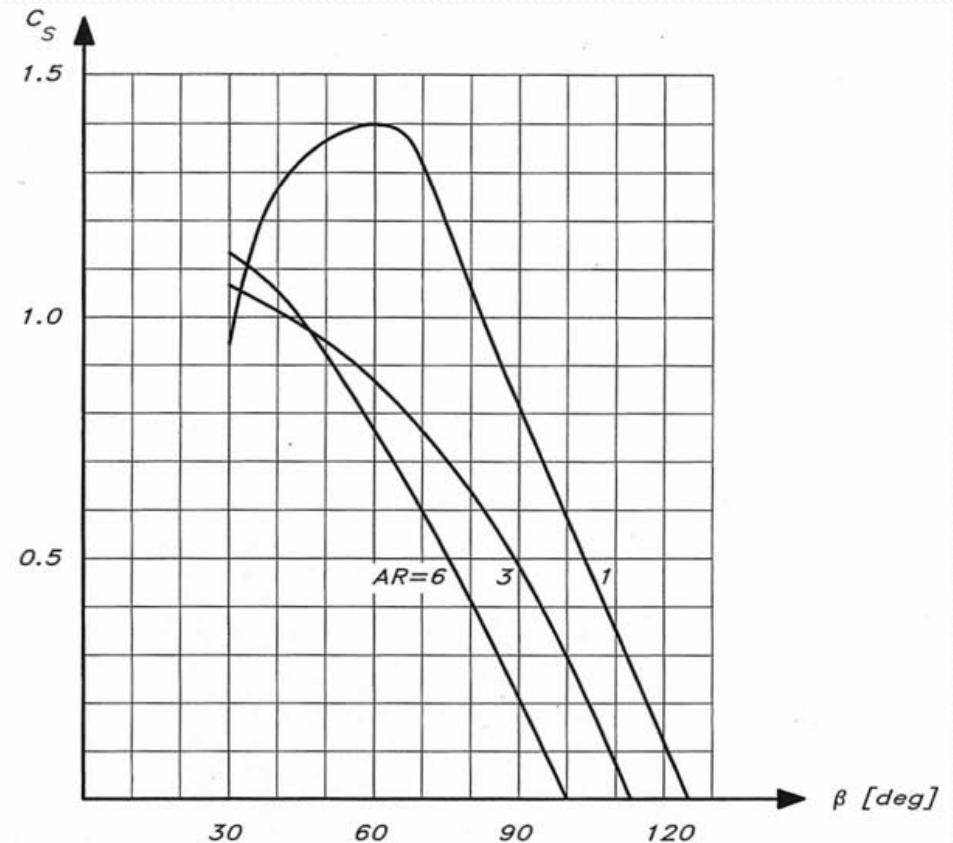
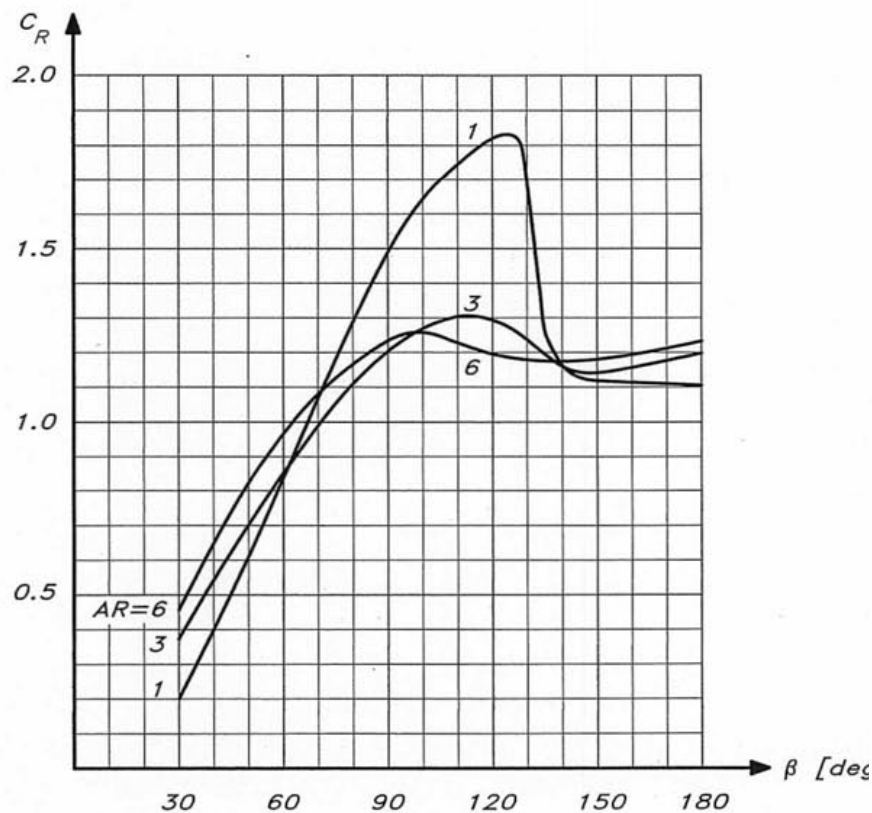
Επίδραση κατακόρυφης θέσης του άνω άκρου του φλόκου

- Μελετήθηκαν 4 διαφορετικές περιπτώσεις με τον πρότονο να ξεκινά από σημείο που βρισκόταν στα $3/4$, $7/8$, $15/16$ και στην κορυφή του καταρτιού
- Είναι προφανές ότι η αεροδυναμική δύναμη πρόωσης (driving force, C_R) είναι μεγαλύτερη όταν το πρωραίο πανί βρίσκεται ψηλότερα, ενώ η πλευρική δύναμη είναι σταθερή (για την πραγματική επιφάνεια, real sail)
- Για τον υπολογισμό της επιφάνειας με βάση το IOR, η επίδραση στο C_R είναι μικρή ενώ μειώνεται το C_S όταν το πρωραίο πανί βρίσκεται ψηλότερα

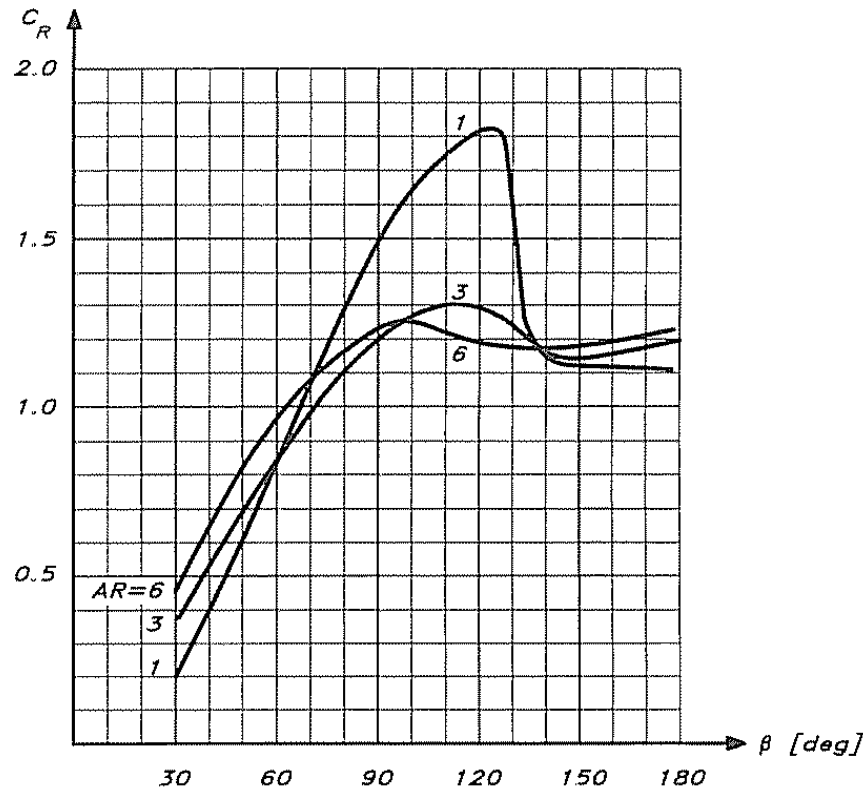


Επίδραση του AR στην προωστήρια και πλευρική δύναμη

Πειράματα του Marchaj σε αεροσήραγγα για 3 AR= 1, 3, 6

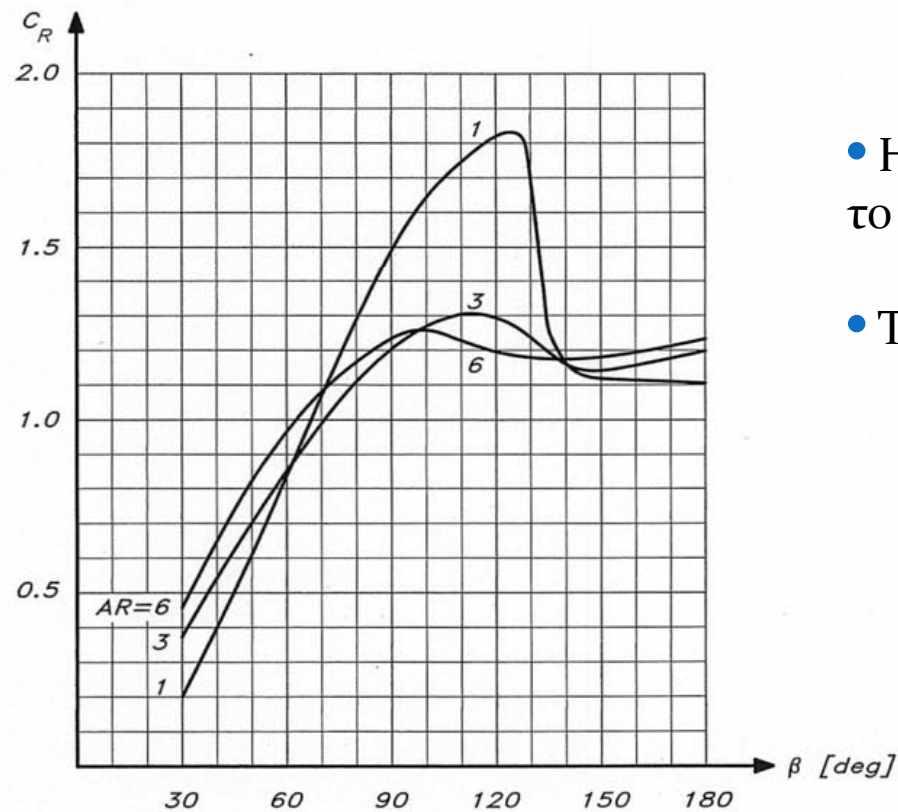


Επίδραση του AR στην προωστήρια δύναμη



- Κοντά στις 30° το υψηλό AR αναπτύσσει σχεδόν διπλάσια C_R σε σχέση με το τετράγωνο πανί $AR=1$.
- Αντίθετα σε μεγάλες γωνίες γύρω στο 120° το τετράγωνο πανί είναι ανώτερο και αναπτύσσει 50% περισσότερη ώση από το στενό πανί.

Επίδραση του AR στην πλευρική δύναμη



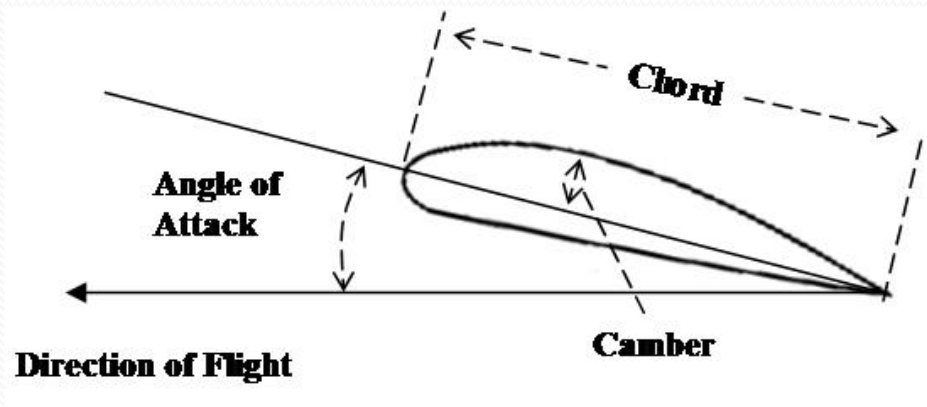
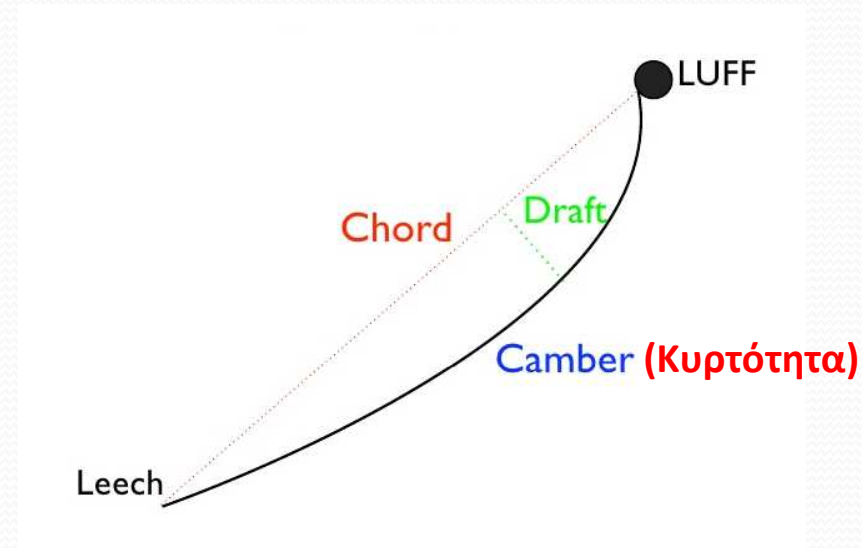
- Η πλευρική δύναμη αυξάνεται ανάλογα με το AR στις 30° .
- Το αντίθετο συμβαίνει στις 45° .

Συμπέρασμα

- Τα αποτελέσματα των παραπάνω σχημάτων οδηγούν στο συμπέρασμα ότι ενδείκνυται η χρήση πανιών με μεγάλο κατά το δυνατόν λόγο επιμήκους.
- Αυτό το συμπέρασμα δεν είναι πάντοτε αληθές, καθότι σε μια πραγματική κατάσταση πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι παρακάτω παράγοντες:
 - οι πλεύσεις που είναι διαφορετικές από την όρτσα. Σύμφωνα με τον Marchaj σε πλεύσεις δευτερόπρυμα, ο μικρός λόγος επιμήκους είναι ευνοϊκός.
 - η επίδραση του ιστού στην ροή της μεγίστης. Η παρουσία του ιστού μειώνει τη θετική επίδραση του λόγου επιμήκους. Ας σημειωθεί ότι η αύξηση του λόγου επιμήκους, για δεδομένη επιφάνεια πανιού, οδηγεί σε ιστό μεγαλύτερης διαμέτρου.
 - η αύξηση της ροπής εγκάρσιας κλίσης με την αύξηση του λόγου επιμήκους. Η αύξηση αυτή εξαρτάται επίσης από την ένταση του ανέμου και την ευστάθεια του σκάφους.

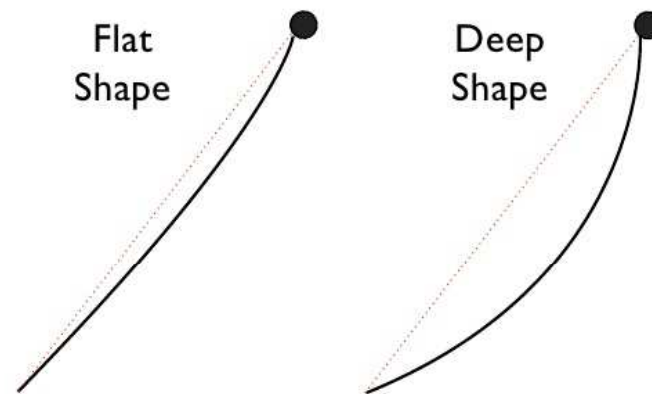
Η κυρτότητα

- Δεδομένου ότι το πανί είναι πτερύγιο σχεδόν μηδενικού πάχους, η κυρτότητά του αποτελεί το μοναδικό χαρακτηριστικό της τομής



Η κυρτότητα

- Το πανί με μεγάλη κυρτότητα είναι πιο αποδοτικό αλλά δημιουργεί μεγαλύτερη αντίσταση.
- Ένα πανί με μικρή κυρτότητα έχει μικρότερη αντίσταση αλλά δημιουργεί λιγότερη ανωστική δύναμη σε ήπιους ανέμους.
- Μεγάλη κυρτότητα → σε ήπιους ανέμους & μικρή κυρτότητα σε ισχυρούς ανέμους

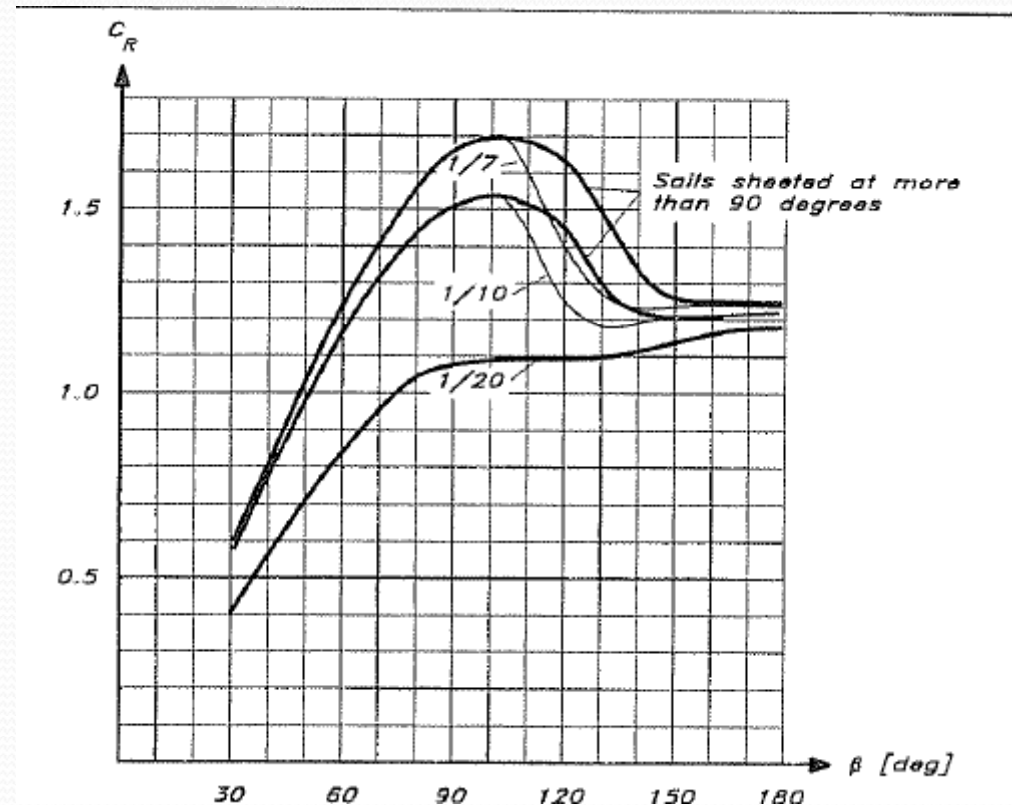


Horizontal Profile:

A deeper sail is more powerful but will also generate more drag. A flat sail has less drag, but generates less power in lighter winds. Deeper sails for light air and flatter sails for heavier air.

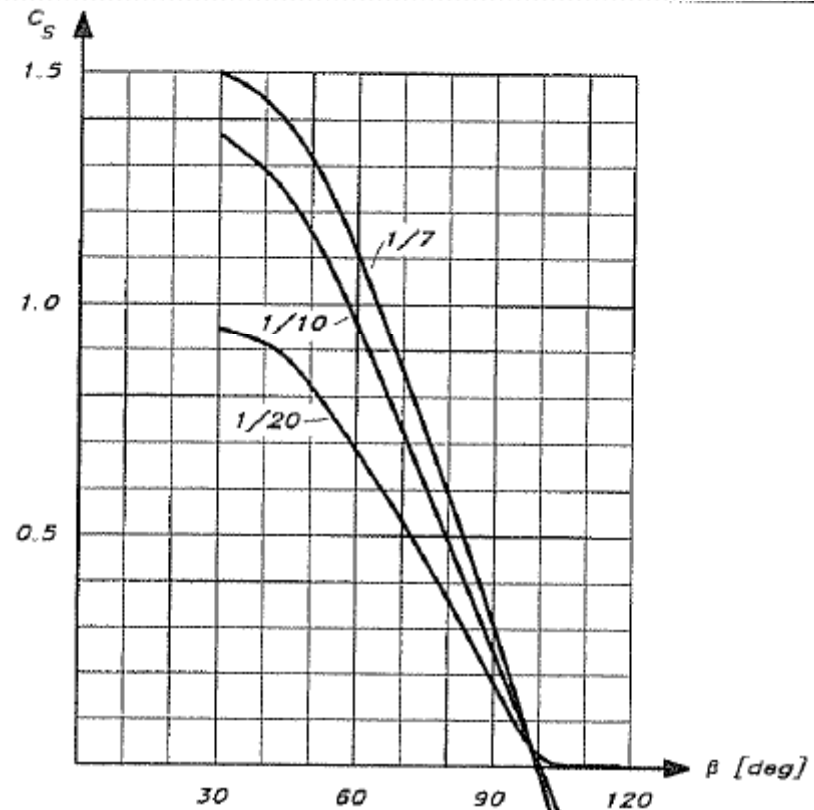
Επίδραση κυρτότητας στην προωστήρια δύναμη

- Η επίδραση της κυρτότητας στην προωστήρια για τρεις κυρτότητες: $1/7$, $1/10$ & $1/20$ του μήκους της χορδής
- Υπάρχει μεγάλη διαφορά ανάμεσα $1/10$ & $1/20$.
- Στις 30° υπάρχει πολύ μικρή διαφορά για $1/7$ & $1/10$ ενώ το $1/20$ διαφέρει.



Επίδραση κυρτότητας στην πλευρική δύναμη

- Η επίδραση της κυρτότητας στην πλευρική δύναμη
- Στις 30° υπάρχει διαφορά για 1/7 & 1/10 & 1/20 ενώ για μεγαλύτερες γωνίες η διαφορά μικραίνει

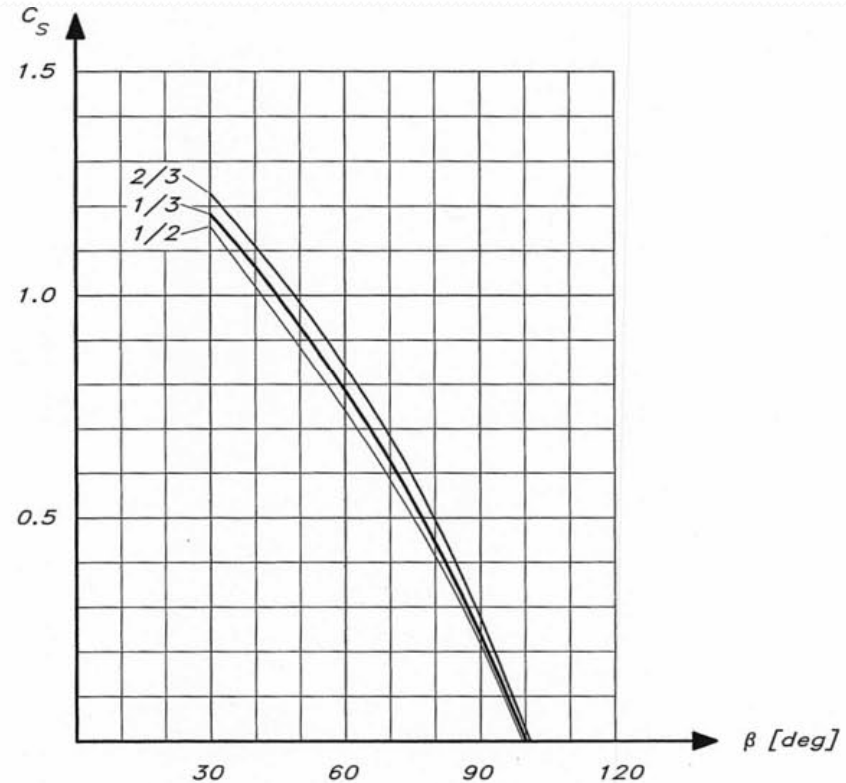
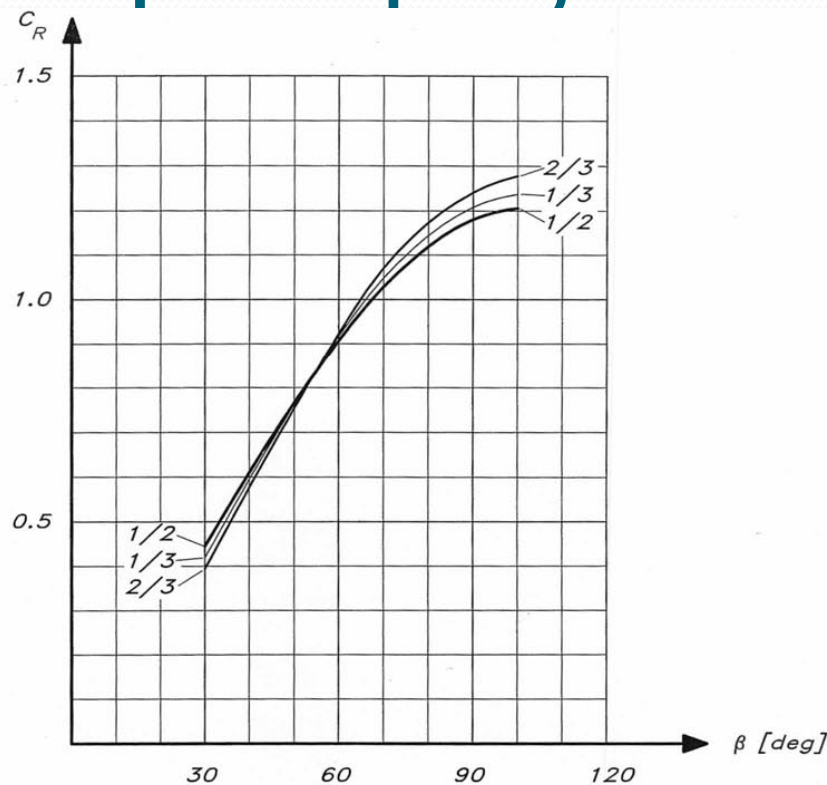


Επίδραση κυρτότητας

Η εκτιμώμενη επίδραση της κυρτότητας στην προωστήρια και την πλευρική δύναμη με βάσει τα διαγράμματα:

- Η επιλογή του καλύτερου πανιού είναι δύσκολη δεδομένου ότι εξαρτάται από την ικανότητα της γάστρας να αντισταθμίσει την πλευρική δύναμη χωρίς μεγάλη επαγόμενη αντίσταση

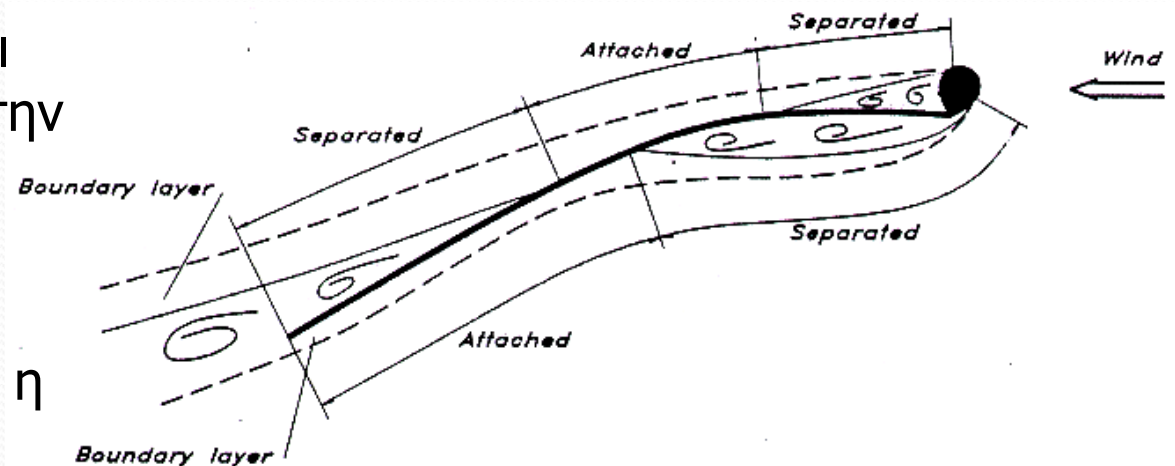
Επίδραση της θέσης της κυρτότητας



Η επίδραση της θέσης της κυρτότητας είναι μικρότερη από την επίδραση του μέγεθος της κυρτότητας στη σχεδίαση των πανιών.

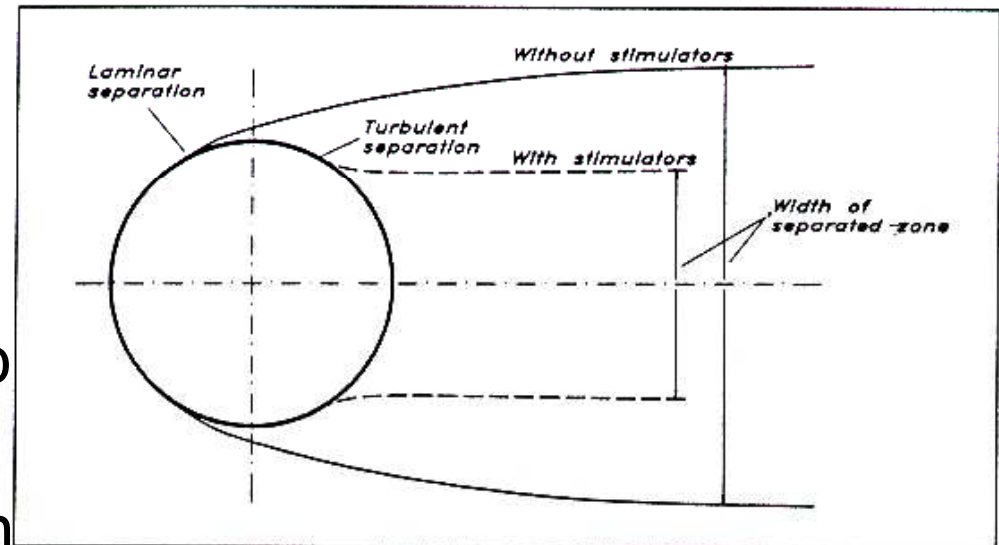
Η επίδραση του ιστού

- Η ροή γύρω από ένα πανί παρουσία ιστού φαίνεται στο σχήμα
- Ο ιστός προκαλεί αποκόλληση της ροής με συνέπεια τη μείωση της προωστήριας και της πλευρικής δύναμης και την αύξηση της αντίστασης.
- Για τον προσδιορισμό του φαινομένου απαιτείται περιστροφή του ιστού ώστε η επαφή πανιού-ιστού να γίνει ομαλή.



Η επίδραση του ιστού

- Επίσης η αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας του ιστού ή η προσθήκη διεγερτών τύρβης οδηγεί σε τυρβώδη ροή στον ιστό και, συνεπώς σε περιορισμό της ζώνης αποκόλλησης πίσω από τον ιστό
- Επιπλέον, συνιστάται η χρήση πιο υδροδυναμικών (streamlined) τομών ιστού από τον κύλινδρο .



Επίδραση των διεγερτών τύρβης στη ροή γύρω από κύλινδρο

Υπολογισμός της αεροδυναμικής των πανιών

- Ο Hazen (1980) πρότεινε ένα μοντέλο για την περιγραφή της αεροδυναμικής των πανιών.
- Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται με μικρές τροποποιήσεις σε πολλά προγράμματα VPP.
- Ο Hazen προδιαγράφει τους συντελεστές ιστιοφορίας σε πέντε γωνίες πλεύσης: 27° , 50° , 80° , 100° και 180° .

Μοντέλο Hazen

- Οι συντελεστές αυτοί δίνουν τιμές για το φλόκο (jib), τη μεγίστη (main), το μπαλόκι (spinnaker), τη μετζάνα (mizzen) και κόντρα μετζάνα (mizzen staysail)
- Η συνολική αντίσταση προσδιορίζεται με πολλαπλασιασμό της επιφάνειας του κάθε πανιού επί τον αντίστοιχο συντελεστή, άθροιση για όλα τα πανιά και διαίρεση διά της ονομαστικής επιφάνειας των πανιών.
- Η επιφάνεια αυτή είναι το άθροισμα των επιφανειών του φλόκου, της μεγίστης και της μετζάνας, θεωρώντας ότι τα πανιά αυτά είναι τριγωνικά

Συντελεστές Hazen

Sail coefficients, lift

Angle	Μεγίστη <i>Main</i>	Φλώκος <i>Jib</i>	Μπαλόκι <i>Spinnaker</i>	Μετζάνα <i>Mizzen</i>	Βελαστράλι (αράπης) <i>Mizz. stays</i>
27	1.5	1.5	0.0	1.3	0.0
50	1.5	0.5	1.5	1.4	0.75
80	0.95	0.3	1.0	1.0	1.0
100	0.85	0.0	0.85	0.8	0.8
180	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Sail coefficients, viscous drag

Angle	<i>Main</i>	<i>Jib</i>	<i>Spinnaker</i>	<i>Mizzen</i>	<i>Mizz. stays</i>
27	0.02	0.02	0.0	0.02	0.0
50	0.15	0.25	0.25	0.15	0.1
80	0.8	0.15	0.9	0.75	0.75
100	1.0	0.0	1.2	1.0	1.0
180	0.9	0.0	0.66	0.8	0.0

Sail area and height of centre of effort above sheer

<u>Area</u>	<u>Centre of effort</u>
Main: $A_M = 0.5 \cdot P \cdot E$	$CE_M = 0.39 \cdot P + BAD$
Jib: $A_J = 0.5 \cdot \sqrt{I^2 + J^2} \cdot LPG$	$CE_J = 0.39 \cdot I$
Spinnaker: $A_S = 1.15 \cdot SL \cdot J$	$CE_S = 0.59 \cdot I$
Mizzen: $A_Y = 0.5 \cdot PY \cdot EY$	$CE_Y = 0.39 \cdot PY + BADY$
Mizzen staysail: $A_{YS} = 0.5 \cdot YSD \cdot (YSMG + YSF)$	$CE_{YS} = 0.39 \cdot PY + BADY$
Foretriangle: $A_F = 0.5 \cdot I \cdot J$	

Nominal area

$$A_N = A_F + A_M + A_Y$$

Lift

$$C_L = \frac{C_{LM} \cdot A_M + C_{LJ} \cdot A_J + C_{LS} \cdot A_S + C_{LY} \cdot A_Y + C_{LYS} \cdot A_{YS}}{A_N}$$

Viscous/parasitic drag

$$C_{DP} = \frac{C_{DPM} \cdot A_M + C_{DPJ} \cdot A_J + C_{DPS} \cdot A_S + C_{DPY} \cdot A_Y + C_{DPYS} \cdot A_{YS}}{A_N}$$

Induced drag

$$C_{DI} = C_L^2 \cdot \left(\frac{1}{\pi \cdot AR} + 0.005 \right) \begin{cases} \text{close hauled: } AR = \frac{(1.1 \cdot (EHM + FA))^2}{A_N} \\ \text{other courses: } AR = \frac{(1.1 \cdot EHM)^2}{A_N} \end{cases}$$

Drag of mast and topsides

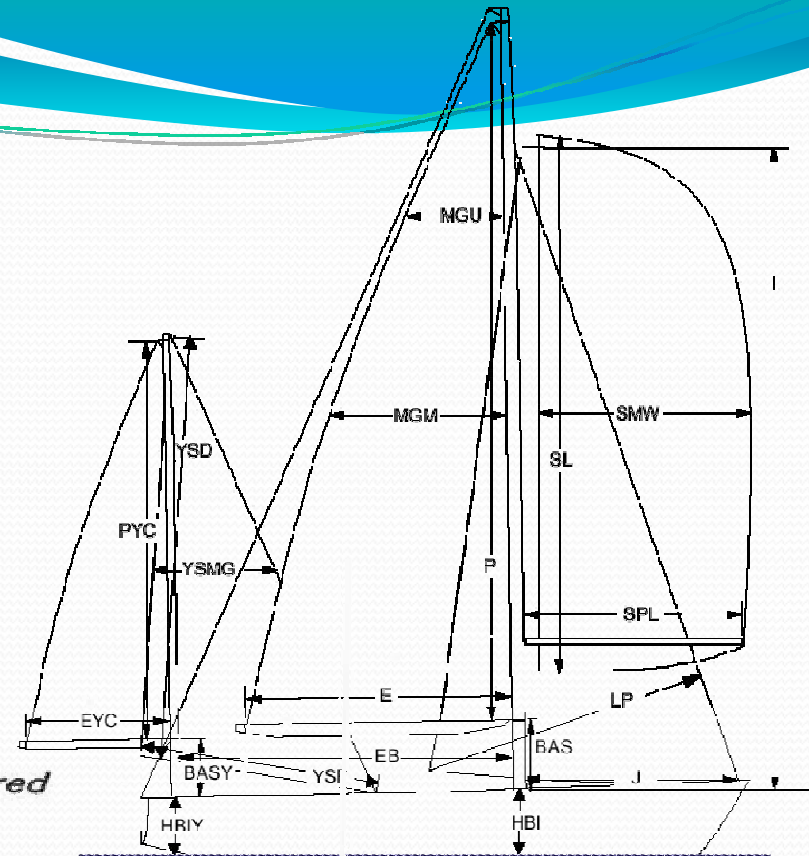
$$C_{DO} = 1.13 \cdot \frac{(BMAX \cdot FA) + (EHM \cdot EMDC)}{A_N}$$

Total drag

$$C_D = C_{DP} + C_{DI} + C_{D0}$$

Flattening: Multiply C_L by flat factor F

Reefing: Multiply C_L and C_{DP} by reef factor R squared
Multiply height of CE by R



Standard IOR notation:

P : Mainsail hoist

E : Foot of mainsail

I : Height of foretriangle

J : Base of foretriangle

LPG : Perpendicular of longest jib

SL : Spinnaker leech length

PY : Mizzen hoist

EY : Foot of mizzen

YSD : Mizzen staysail depth

$YSMG$: Mizzen staysail mid-girth

YSF : Mizzen staysail foot

$BMAX$: Max beam of yacht

FA : Average freeboard

EHM : Mast height above sheer

$EMDC$: Average mast diameter

BAD : Height of main boom above sheer

$BADY$: Height of mizzen boom above sheer

Newer additions:

Full length battens: Increase lift of main by 15% for angles up to 60 degrees

Blanketing and fractional rig exposed mast correction, see paper by C.L Poor on IMS.

2/6/2013

Ειδικές Ναυπηγικές Κατασκευές και Ιστιοφόρα Σκάφη

42