



# Ειδικές Ναυπηγικές Κατασκευές και Ιστιοφόρα σκάφη

Διδάσκουσα:

Σ. Πέππα, Καθηγήτρια Εφαρμογών

# Σχεδίαση Ιστιοπλοϊκού σκάφους

# Σχεδίαση παρελκομένων

- Τα βασικά παρελκόμενα ενός ιστιοπλοϊκού σκάφους είναι:
  - η καρίνα και
  - το/τα πηδάλια.
- Η χρησιμότητα της καρίνας και του πηδαλίου είναι να παράγουν πλάγιες δυνάμεις
- Επειδή θα πρέπει να λειτουργούν το ίδιο καλά και από τις δύο πλευρές, είναι σχεδόν πάντα συμμετρικές υδροτομές
- Η ροή γύρω από αυτές τις υδροτομές είναι ροή ασυμπίεστου ρευστού
- Οι βασικές αρχές που διέπουν τις υδροτομές, έχουν μελετηθεί εδώ και χρόνια, στα πλαίσια της αεροδυναμικής των αεροπλάνων
- Βέβαια, στις ταχύτητες που τρέχουν στις μέρες μας τα αεροπλάνα (πάνω από 100 Km/h), ο αέρας συμπεριφέρεται ως συμπιεστό ρευστό.
- Όμως όταν τέθηκαν οι βασικές αρχές τα αεροπλάνα δεν πετούσαν τόσο γρήγορα και γι' αυτό μελετήθηκε σε βάθος και η περίπτωση μη συμπιεστού ρευστού.

# Σχεδίαση παρελκομένων

- Οι βασικές διαστάσεις που χαρακτηρίζουν μια υδροτομή σχήματος τραπεζίου ορίζονται στο σχήμα:

- Ο λόγος βάθους προς τη μέση χορδή είναι ο λόγος επιμήκους AR:

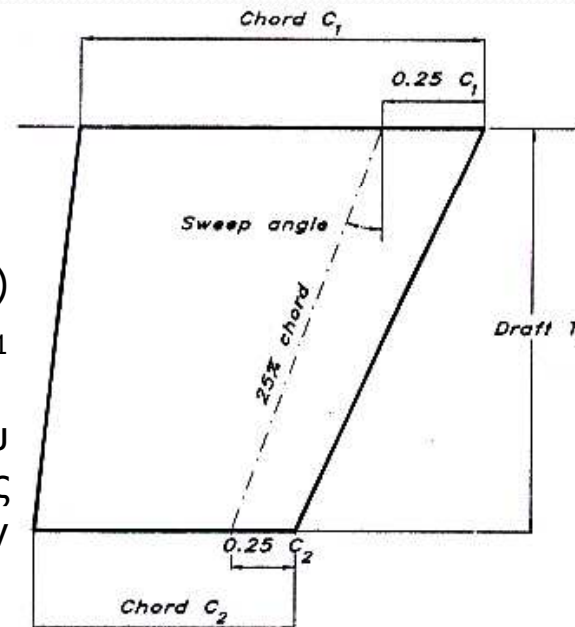
$$AR = \frac{T_K}{\bar{C}}$$

- η μέση χορδή:  $\bar{C} = \frac{C_1 + C_2}{2}$

- ο λόγος των χορδών ακροπερυγίου ( $C_2$ ) και βάσης ( $C_1$ ): taper ratio,  $TR = C_2 / C_1$  και

- η γωνία κλίσης του γεωμετρικού τόπου των σημείων που απέχουν 25% της εκάστοτε χορδής ως προς την κατακόρυφο (sweep angle,  $s$ )

- Η κατάλληλη επιλογή αυτών των βασικών διαστάσεων, καθορίζει την απόδοση και γενικά τα χαρακτηριστικά της υδροτομής.



$$\text{Aspect ratio: } AR = \frac{T_K}{\bar{C}}$$

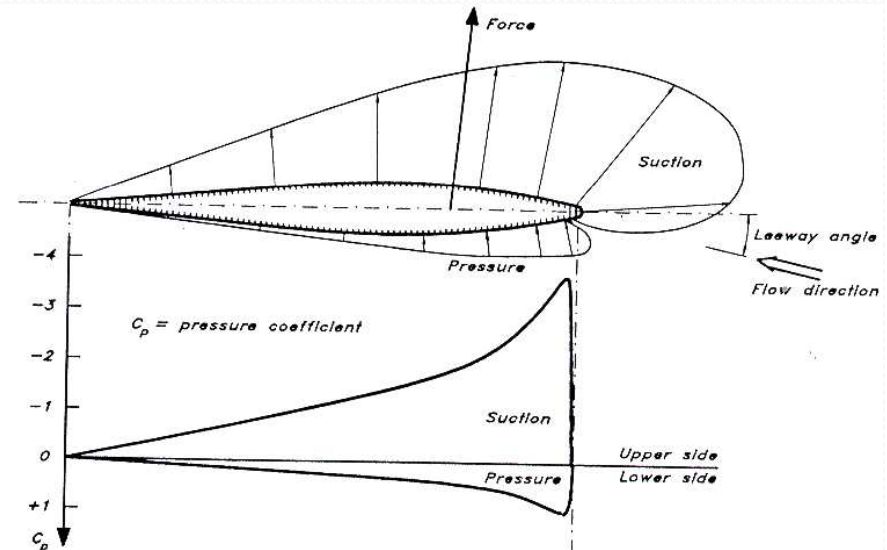
$$\bar{C} = \frac{C_1 + C_2}{2}$$

$$\text{Taper ratio} = \frac{C_2}{C_1}$$

Sweep angle defined by 25% chord

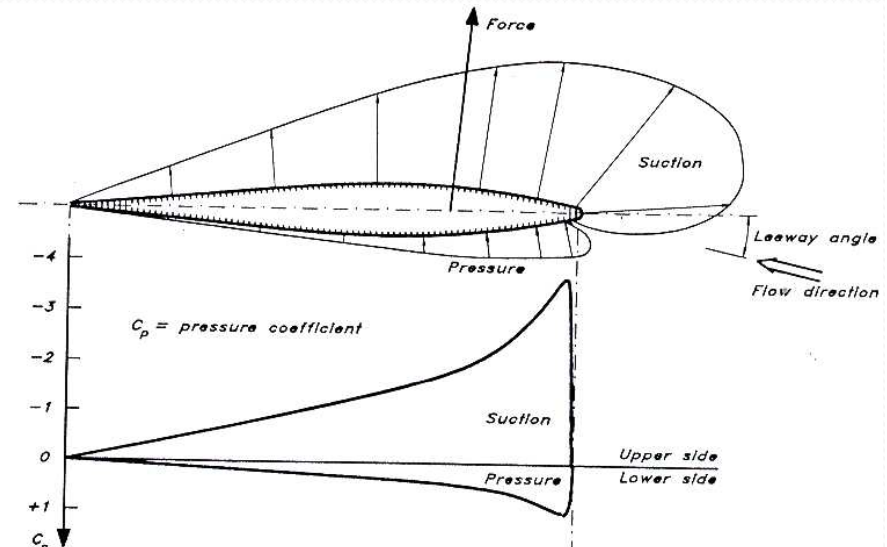
# Σχεδίαση παρελκομένων

- Αν θεωρήσουμε μια υδροτομή απείρου μήκους σε ροή ασυμπίεστου ρευστού ταχύτητας  $V$ , (2D πρόβλημα), τότε για μη-μηδενική γωνία πρόσπτωσης, εμφανίζεται ισχυρή ασυμμετρία στη ροή, με αποτέλεσμα τη δημιουργία πίεσης και υποπίεσης, όπως φαίνεται στο σχήμα.
- Για να γίνουν στη συνέχεια μερικές σημαντικές ποιοτικές παρατηρήσεις, θα ορίσουμε δύο πλευρές στην επιφάνεια της υδροτομής που θα χωρίζονται μεταξύ τους με το σημείο ανακοπής στην είσοδο της ροής και το σημείο εκφυγής της υδροτομής.
- Η πλευρά που περιέχει την ακμή πρόσπτωσης της υδροτομής είναι η πίσω πλευρά και η άλλη η εμπρόσθια.
- Στο σχήμα, φαίνεται καθαρά και ένα διάγραμμα πίεσης και υποπίεσης για κάθε πλευρά.



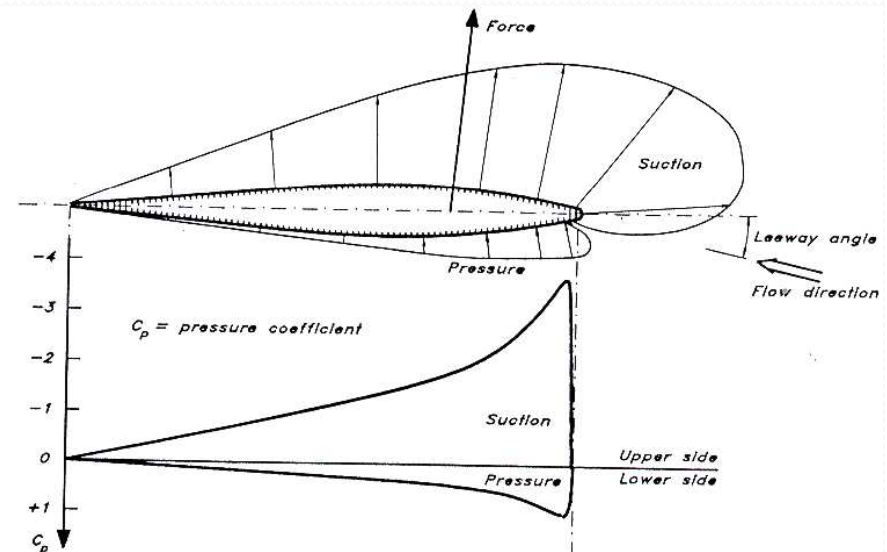
# Σχεδίαση παρελκομένων

- Οι γραμμές ροής περνάνε από την πίσω πλευρά σε σχέση με αυτές που περνάνε από την εμπρόσθια, έχουν πολύ μεγάλη καμπυλότητα και το ρευστό αναπτύσσει πάνω σε αυτές μεγάλη ταχύτητα
- Το αποτέλεσμα είναι ότι στην πίσω πλευρά αναπτύσσεται υποπίεση ενώ στην μπροστινή πίεση
- Μάλιστα η υποπίεση στην πίσω πλευρά είναι κατ' απόλυτη τιμή πολύ μεγαλύτερη από την πίεση της εμπρόσθιας



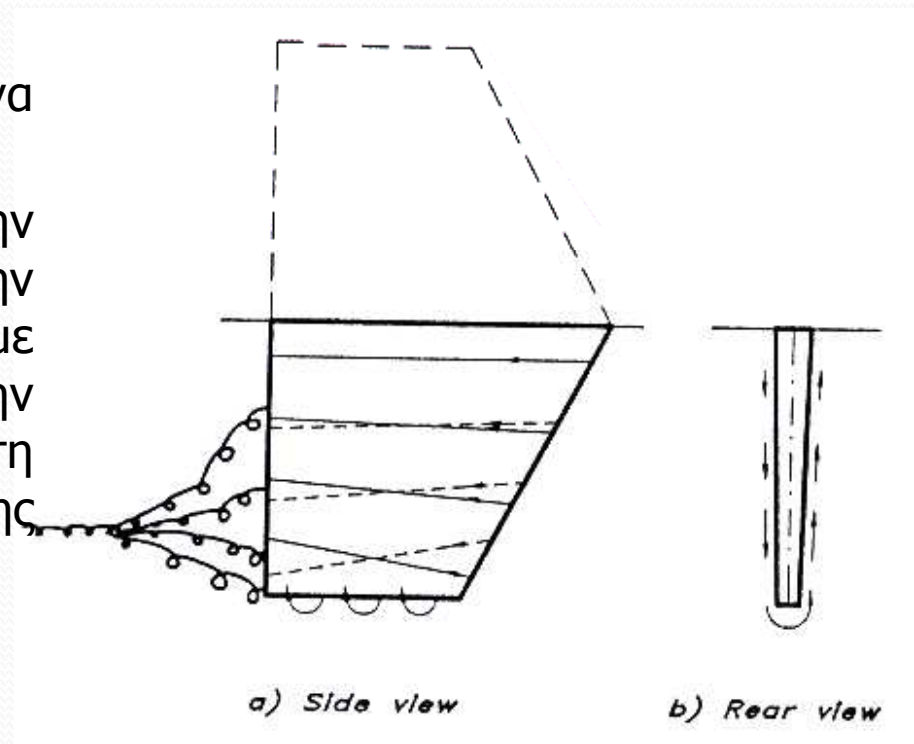
# Σχεδίαση παρελκομένων

- Η συνολική δύναμη που αναπτύσσεται τελικά στην υδροτομή έχει διεύθυνση πλάγια ως προς τη διεύθυνση της ροής, το δε σημείο εφαρμογής της βρίσκεται περίπου σε απόσταση ενός τετάρτου της χορδής της από τη μύτη της
- Ειδικά στις συμμετρικές υδροτομές για το διδιάστατο πρόβλημα, αν δεν λάβουμε υπόψιν τις δυνάμεις συνεκτικότητας, η συνολική δύναμη είναι κάθετη στην ταχύτητα της αδιατάρακτης ροής
- Το αντικείμενο του σχεδιαστή είναι να προσπαθήσει να κάνει την πραγματική συνολική δύναμη όσο το δυνατόν πιο κάθετη στη ροή



# Σχεδίαση παρελκομένων

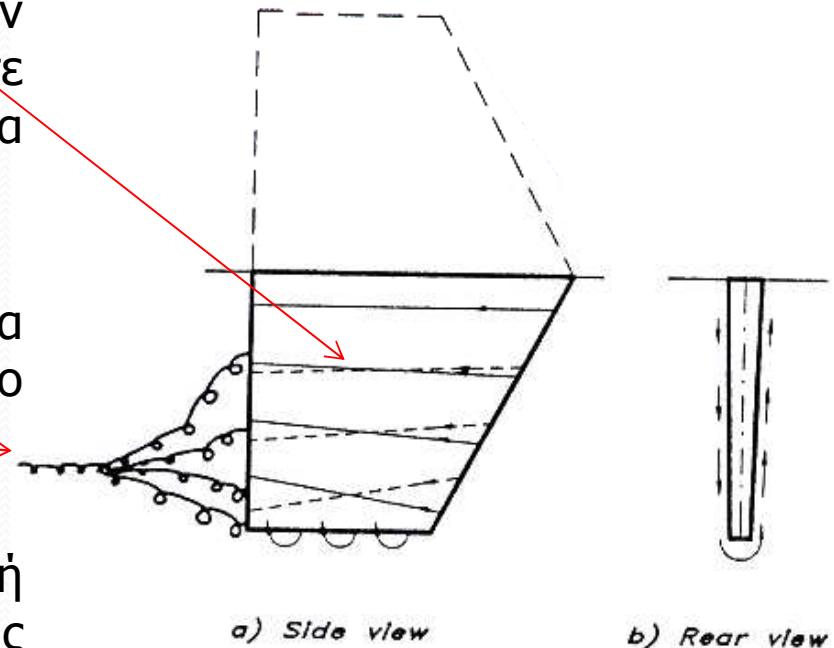
- Ας περάσουμε στο τρισδιάστατο πρόβλημα, αντί για υδροτομή απείρου μήκους, θεωρούμε μια πραγματική υδροτομή μέσα σε ροή ασυμπίεστου ρευστού
- Στην περίπτωση αυτή, παρουσιάζεται ένα πολύ ενδιαφέρον φαινόμενο
- Επειδή στη μία πλευρά της υδροτομής, την πίσω, δημιουργείται υποπίεση ενώ στην εμπρόσθια δημιουργείται πίεση, έχουμε κίνηση του ρευστού, από την μπροστά στην πίσω πλευρά (από την υψηλή πίεση στη χαμηλή) μέσω της κάτω ακμής της υδροτομής





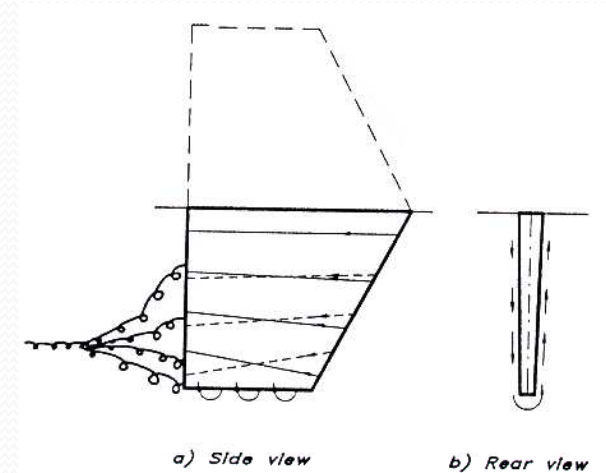
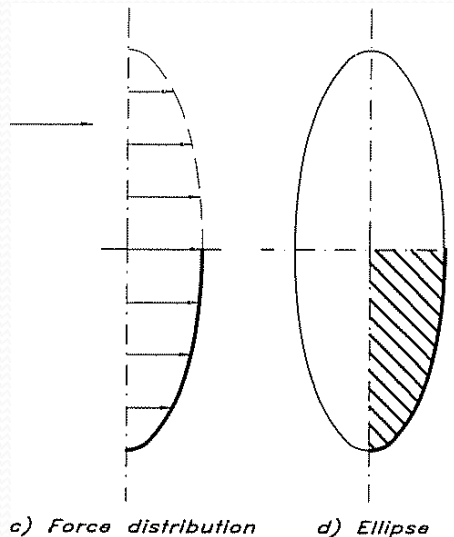
# Σχεδίαση παρελκομένων

- Η κίνηση αυτή δημιουργεί έντονους στροβιλισμούς στην ακμή εκφυγής της υδροτομής, επειδή οι γραμμές ροής που διέρχονται εκατέρωθεν του σημείου ανακοπής, τείνουν να ξανασυναντηθούν στην ακμή εκφυγής, ενώ βρίσκονται πλέον σε διαφορετικά εγκάρσια στην υδροτομή επίπεδα με διαφορετικές κατευθύνσεις
- Οι στροβιλισμοί αυτοί στη συνέχεια συγκλίνουν και ενώνονται σε ένα μεγάλο στρόβιλο (δίνη) λίγο πίσω από την υδροτομή
- Η ενέργεια από τη δίνη (περιστροφική ενέργεια) αποτελεί τη συνιστώσα της αντίστασης γνωστή ως επαγόμενη αντίσταση (induced resistance)



# Σχεδίαση παρελκομένων

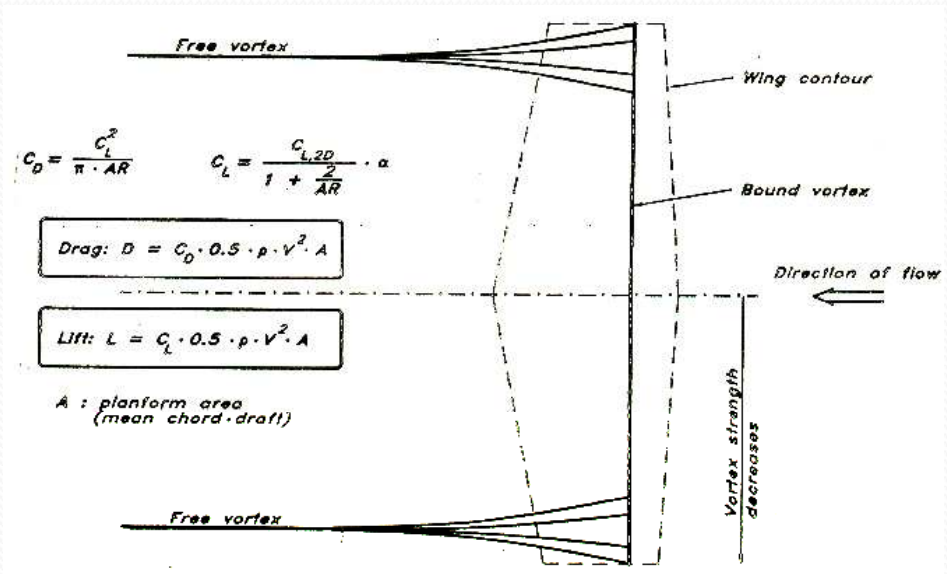
- Η κατανομή της συνολικής δύναμης κατά μήκος της υδροτομής εξαρτάται από το σχήμα της. Πάντως στην αρχή της είναι μηδέν, ενώ στη ρίζα της, εκεί δηλαδή που ενώνεται με τη γάστρα είναι μέγιστη



- Η βέλτιστη κατανομή της αντίστασης είναι ελλειπτική γιατί οδηγεί σε ελάχιστη επαγόμενη αντίσταση
- Ο απλούστερος τρόπος να επιτύχεις ελλειπτική κατανομή της αντίστασης είναι το σχήμα της υδροτομής να είναι ελλειψοειδές

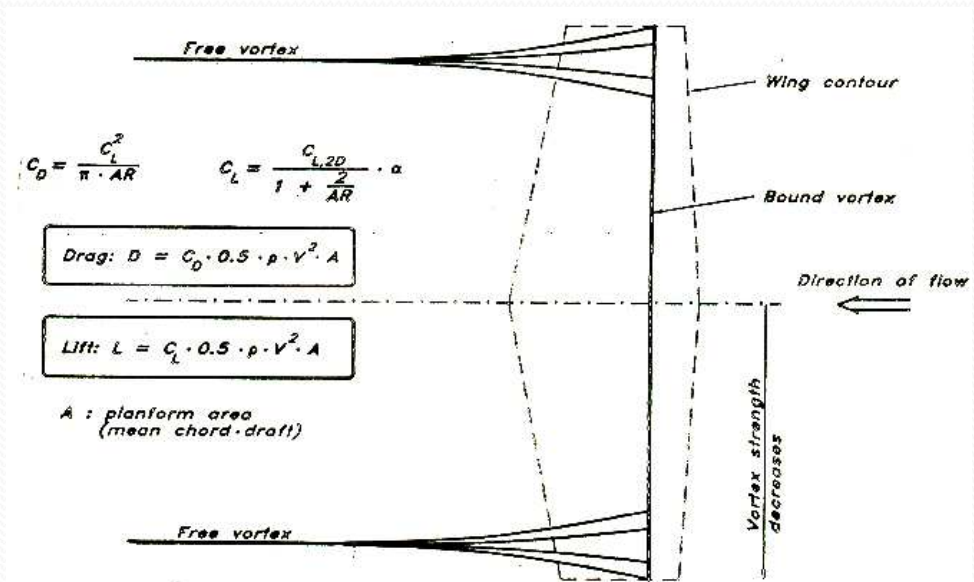
# Σχεδίαση παρελκομένων

- Το σχήμα φαίνεται πως υπολογίζονται οι δυνάμεις (Lift – Drag) σε μια υδροτομή σύμφωνα με τη θεωρία, για ελλειπτική κατανομή της συνολικής δύναμης.
- Στο σχήμα αυτό η γάστρα, η οποία μπορεί να θεωρηθεί σε πρώτη προσέγγιση ως επίπεδη πλάκα. Η θεώρηση της γάστρας στο σημείο αυτό ως επίπεδη πλάκας είναι ικανοποιητική ιδιαίτερα στα μοντέρνας σχεδίασης, μικρού βυθίσματος ιστιοπλοϊκά.
- Η υδροτομή απεικονίζεται με διακεκομμένη γραμμή και συνοδεύεται από τις δίνες
- Το μέγεθος  $C_{L,2D}$  είναι ο συντελεστής άνωσης (lifting coefficient) για τη διδιάστατη περίπτωση.
- Η τιμή του για ένα συμμετρικό νομέα σε ατριβές ρευστό υπολογίζεται θεωρητικά σε  $\pi^2/90=0.11$ .



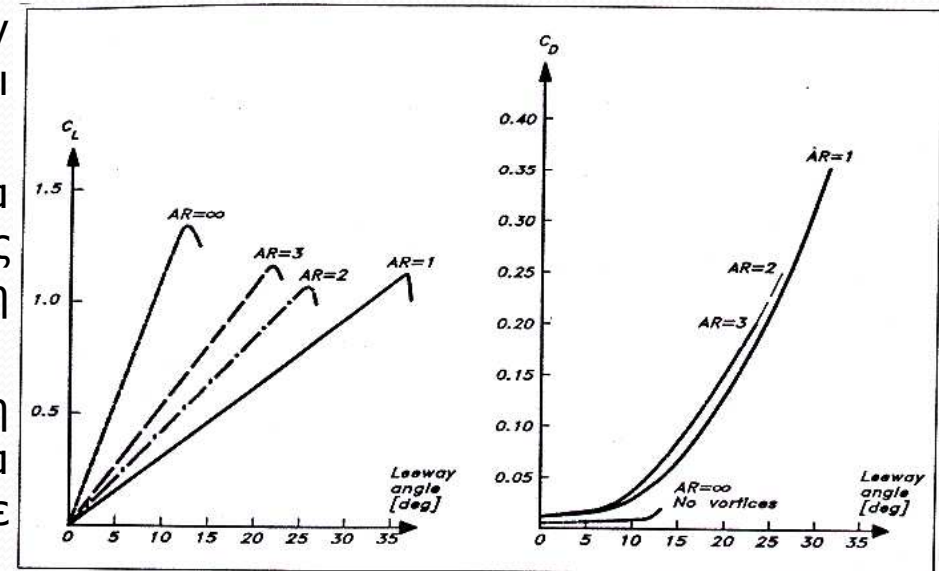
# Σχεδίαση παρελκομένων

- Για πραγματικό, συνεκτικό ρευστό η τιμή του συντελεστή άνωσης  $C_{L,2D}$  είναι λίγο μικρότερη και η τιμή 0.10 θεωρείται ικανοποιητική προσέγγιση για όλες τις συμμετρικές υδροτομές.
- Επίσης, σε περίπτωση μη-ελλειπτικής κατανομής της συνολικής δύναμης, θα πρέπει για τον υπολογισμό του συντελεστή  $C_L$  να αντικατασταθεί ο λόγος επιμήκους AR (aspect ratio) με τον ενεργό λόγο επιμήκους (effective aspect ratio), ο οποίος είναι λίγο μικρότερος.
- Όμως η διαφορά είναι αρκετά μικρή ώστε στην πράξη οι υπολογισμοί να γίνονται σε όλες τις περιπτώσεις με τον πραγματικό λόγο επιμήκους (actual aspect ratio) AR.



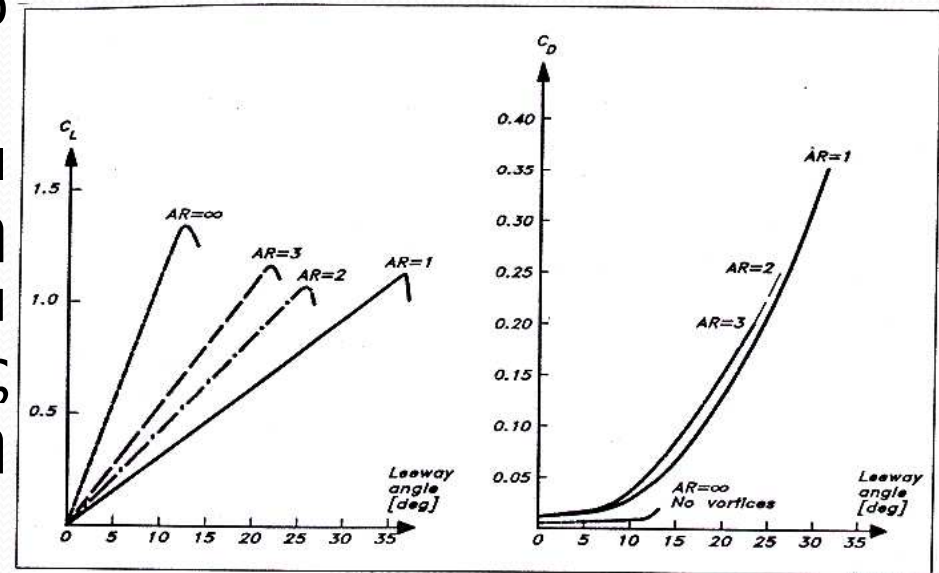
# Σχεδίαση παρελκομένων

- Η πιο σημαντική παράμετρος σχεδίασης είναι ο λόγος επιμήκους AR (ο λόγος βάθους προς τη μέση χορδή)
- Όπως φαίνεται και στα επόμενα διαγράμματα, τα οποία βασίζονται σε πειράματα αεροτομών σε αεροσήραγγα, ο λόγος αυτός παίζει καθοριστικό ρόλο στο συντελεστή  $C_L$ .
- Τα άμεσα συμπεράσματα από τα διαγράμματα αυτά είναι: Όσο πιο μεγάλος είναι ο λόγος επιμήκους τόσο πιο αποδοτική είναι η υδροτομή σε πλάγια δύναμη (Lift).
- Ο δε συντελεστής  $C_D$ , για συγκεκριμένη γωνία πρόσπτωσης, μεταβάλλεται ελάχιστα όταν ο λόγος επιμήκους βρίσκεται μέσα σε ρεαλιστικά όρια.



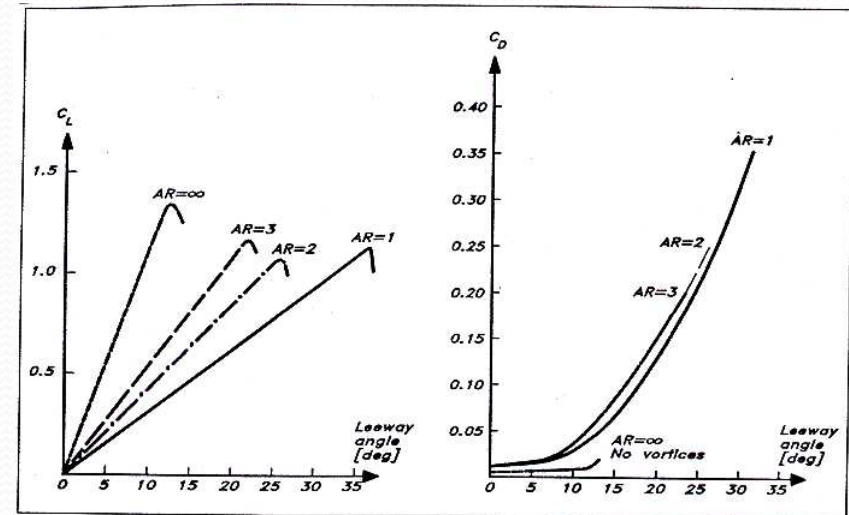
# Σχεδίαση παρελκομένων

- Τα συμπεράσματα αυτά είναι σημαντικά όμως για τις ανάγκες της σχεδίασης θα πρέπει να δούμε τα διαγράμματα αυτά και από διαφορετική σκοπιά.
- Δηλαδή αυτό που μας ενδιαφέρει άμεσα, είναι να διαλέξουμε εκείνη την υδροτομή που για συγκεκριμένες ανάγκες πλάγιας δύναμης (Lift) έχει ελάχιστη δύναμη αντίστασης (Drag).
- Αυτό σημαίνει ότι για το συγκεκριμένο  $C_L$ , διαλέγουμε το AR που δίνει το ελάχιστο  $C_D$ .



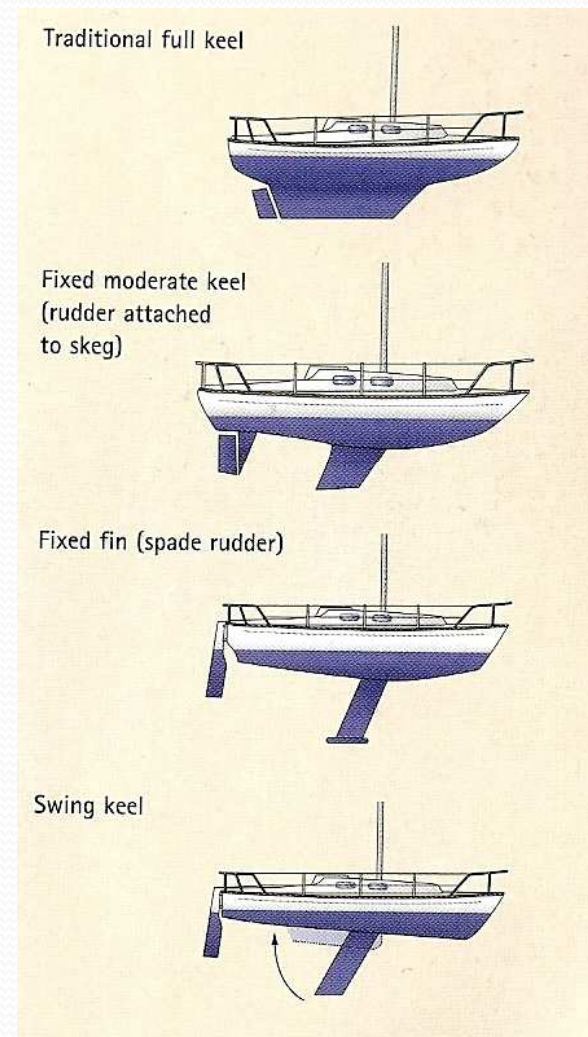
# Σχεδίαση παρελκομένων

- Από το συγκεκριμένο διάγραμμα του συντελεστή βλέπουμε την επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης στην αντίσταση και ανάλογα με τους υπόλοιπους περιορισμούς του προβλήματος σχεδίασης, διαλέγουμε το AR έτσι ώστε να βρίσκεται η υδροτομή σε αποδεκτές, όσον αφορά την αντίσταση, γωνίες πρόσπτωσης.
- Για καρίνες ιστιοπλοϊκών, ο λόγος επιμήκους βρίσκεται συνήθως κοντά στο 3.



# Σχεδίαση παρελκομένων

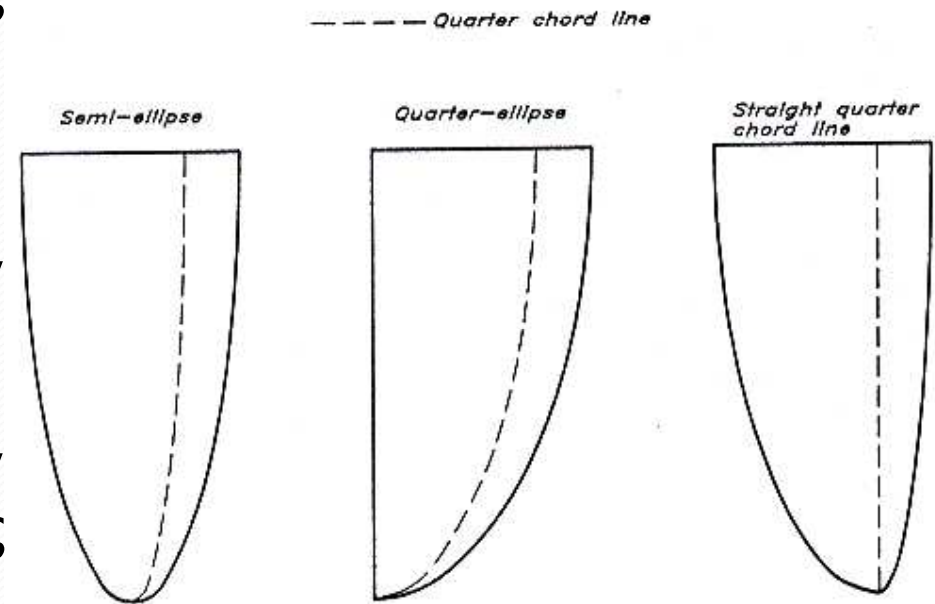
- Αξίζει να γίνει εδώ μια παρατήρηση για τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των παλαιότερων ιστιοπλοϊκών επιμήκους καρίνας (long keel) και των σύγχρονων με καρίνα τύπου πτερυγίου (fin keel).
- Τα long keels έχουν  $AR < 1$ . Τα fin keels έχουν  $AR > 3$  → καλύτερη απόδοση
- Ενώ fin keels είναι σαφώς πιο αποδοτικά από long keels, έχοντας μάλιστα πολύ μικρότερη επιφάνεια καρίνας, έχουν και κάποια μειονεκτήματα που συνδέονται με το διατοιχισμό (roll).
- Επίσης ένα άλλο μειονέκτημα των fin keels παρατηρείται σε χαμηλές ταχύτητες (για παράδειγμα εκκίνηση αγώνα). Από τον τύπο υπολογισμού της πλάγιας δύναμης μια και τα fin keels έχουν μικρότερη επιφάνεια θα δίνουν και μεγαλύτερη πλάγια δύναμη. Παρόλα αυτά η μέγιστη πλάγια δύναμη (Lift) είναι περίπου ίδια για όλα τα AR και επιτυγχάνεται πιο γρήγορα στα fin keel yachts όταν πέφτει η ταχύτητα εάν απαιτείται πλάγια δύναμη.





# Σχεδίαση παρελκομένων

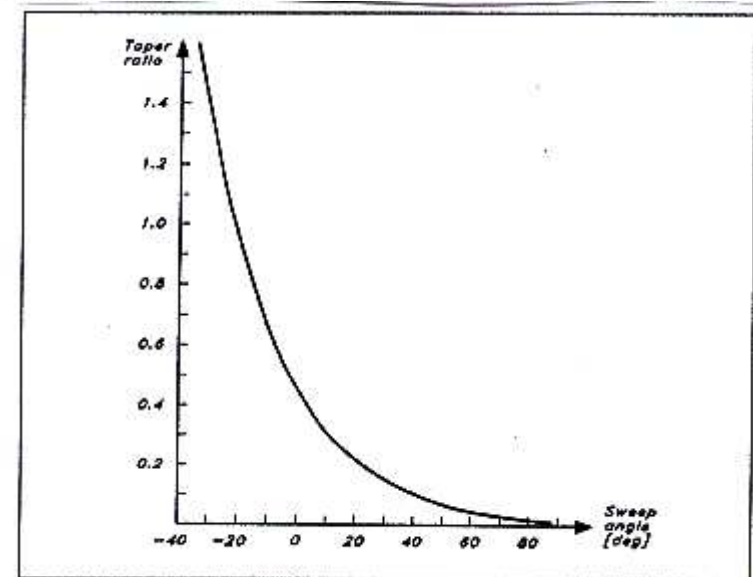
- Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η πιο αποδοτική κατανομή της πλάγιας δύναμης πάνω στην καρίνα είναι η ελλειπτική.
- Δυστυχώς όμως, η μορφή αυτή των υδροτομών έχει πολλά λειτουργικά και κατασκευαστικά μειονεκτήματα, με αποτέλεσμα να μην χρησιμοποιείται για τη σχεδίαση της καρίνας.



Ελλειψοειδείς καρίνες

# Σχεδίαση παρελκομένων

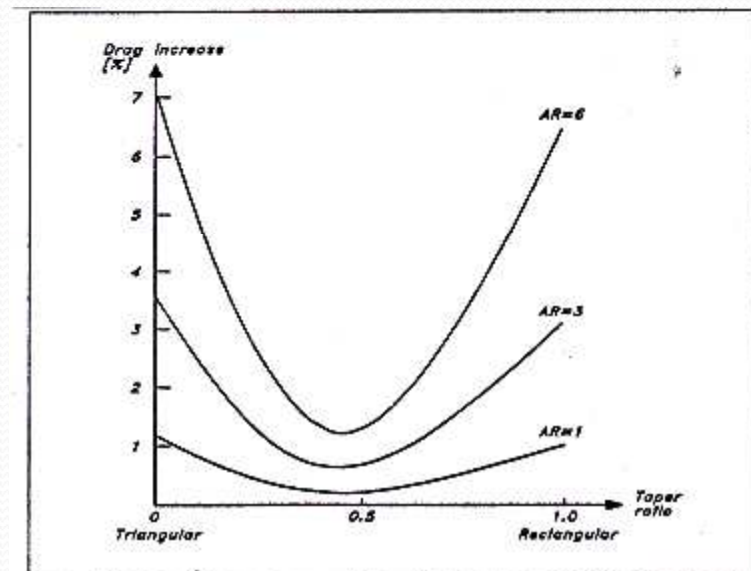
- Παρόλα αυτά, μια τραπεζοειδής καρίνα μπορεί να παράγει πλάγια δύναμη με σχεδόν ελλειψοειδή κατανομή αν ο συντελεστής taper ratio και η γωνία  $s$  (sweep angle) έχουν τη σχέση που φαίνεται στο διάγραμμα
- Στο σημείο αυτό θα πρέπει να έχουμε πάντα υπ' όψη μας ότι ένας πολύ μικρός συντελεστής TR (taper ratio) οδηγεί σε καρίνα με σχετικά υψηλό κέντρο βάρους, γεγονός που επιδρά αρνητικά στην ευστάθεια.
- Γενικά δεν συνιστώνται  $TR < 0.2$  ενώ πολύ σχεδιαστές χρησιμοποιούν  $0.4 < TR < 0.6$  για λόγους ευστάθειας.



Βέλτιστη σχέση γωνίας  $s$  (sweep angle) και λόγου TR (taper ratio).

# Σχεδίαση παρελκομένων

- Σε περίπτωση που ο σχεδιαστής αναγκάζεται να μην ακολουθήσει τη σχέση του συντελεστή TR και της γωνίας  $s$  που δόθηκε προηγουμένως, μπορεί να υπολογιστεί από τη θεωρία, το ποσοστό αύξησης της αντίστασης, λόγω μη-ελλειπτικής κατανομής της πλάγιας δύναμης στην υδροτομή.
- Στο σχήμα δίνεται ένα παράδειγμα για μια μη ελλειπτική κατανομή της αντίστασης για μηδενική γωνία  $s$ . Ο κάθετος άξονας δίνει το ποσοστό αύξησης της αντίστασης για τραπεζοειδή καρίνα σε σύγκριση με την ελλειπτική.
- Η αντίσταση εξαρτάται από το AR. Για ίση keels με  $AR < 1$  πολύ μικρή αύξηση της αντίστασης παρατηρείται



Αύξηση της επαγόμενης αντίστασης λόγω μη-βέλτιστου λόγου TR

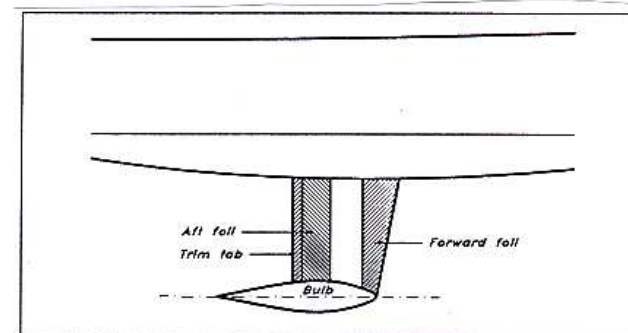
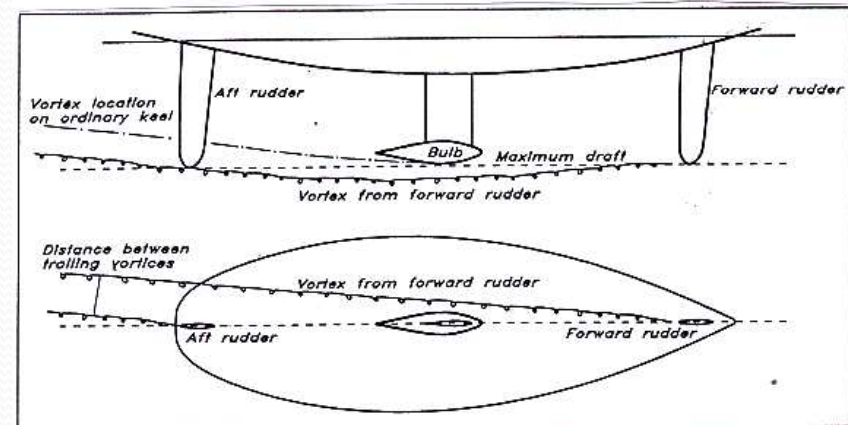
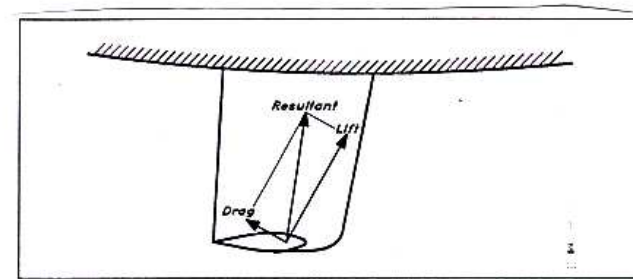
# Σχεδίαση παρελκομένων

- Ο σχεδιασμός της καρίνας και του πηδαλίου είναι πρωτεύοντος σημασίας στα ιστιοπλοϊκά.
- Οι βασικές απαιτήσεις για τις καρίνες είναι δύο:
  - Παραγωγή της απαιτούμενης πλάγιας δύναμης με τη μικρότερη δυνατή αντίσταση &
  - βελτίωση της ευστάθειας φέροντας μεγάλο βάρος χαμηλά
- Στην προσπάθεια να σχεδιαστούν αποδοτικές καρίνες, έχουν κατά καιρούς μελετηθεί λεπτομερώς και εφαρμοσθεί διάφορες λύσεις.
- Ιδιαίτερη βοήθεια σε αυτό προσφέρουν στις μέρες μας οι ταχύτατοι υπολογιστές και τα εξελιγμένα προγράμματα CFD (Computational Fluid Dynamics).

# Εναλλακτικές σχεδιάσεις καρίνας

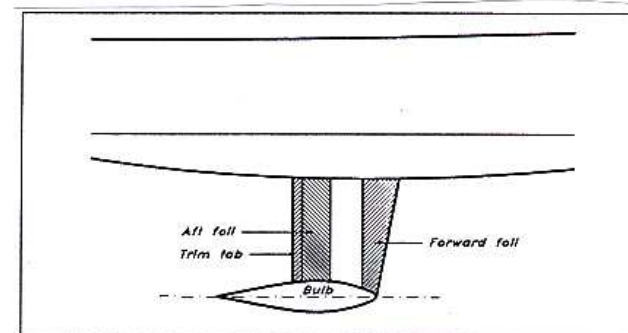
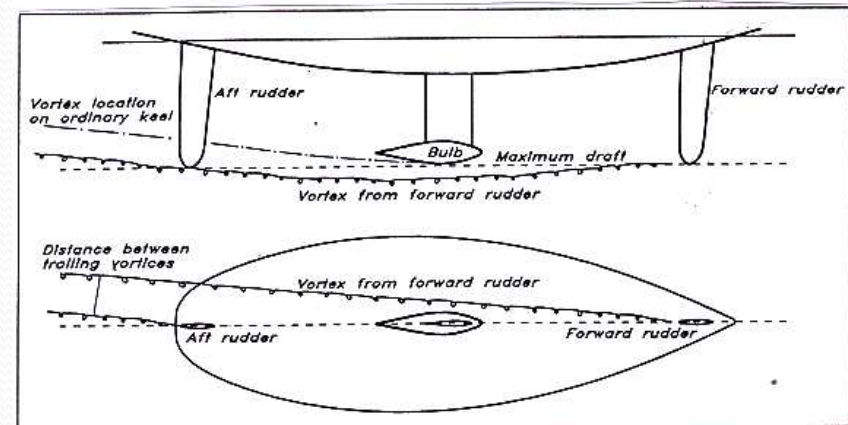
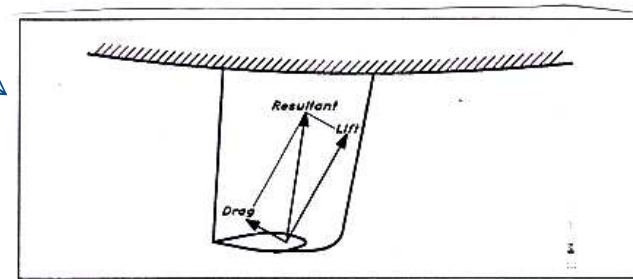
- Η πρόσθεση βολβού στο τέλος της καρίνας για μείωση του KG.
- Η τοποθέτηση πτερυγίων στην καρίνα για την αύξηση του ενεργού λόγου επιμήκους χωρίς την αύξηση του βυθίσματος.
- Η χρήση συντελεστού TR μεγαλύτερου της μονάδας, σε συνδυασμό με πτερύγια για καλύτερη απόδοση της καρίνας (Australia II).
- Η χρήση δύο μεγάλων πηδαλίων, ενός στην πλώρη και ενός στην πρύμνη για την παραγωγή της πλάγιας δύναμης, και απλή στήριξη του απαιτούμενου για την ευστάθεια βάρους σε ένα βολβό σε κάθετη απόσταση από τη γάστρα (America's Cup 1987, USA).
- Στήριξη του βολβού σε δύο λεπτές υδροτομές
- Χρήση trim tabs στις υδροτομές της καρίνα

Ειδικές Ναυπηγικές Κατασκευές και I

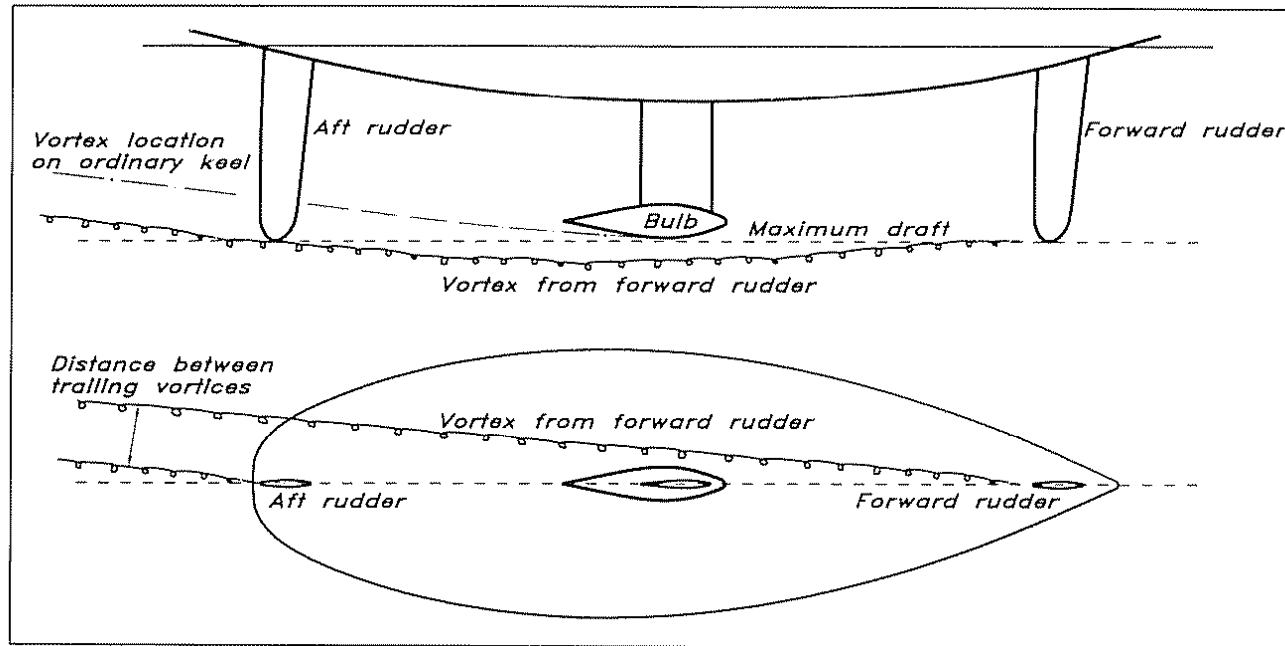


# Εναλλακτικές σχεδιάσεις καρίνας

- Η τοποθέτηση πτερυγίων στην καρίνα για την αύξηση του ενεργού λόγου επιμήκους χωρίς την αύξηση του βυθίσματος.
- Η χρήση συντελεστού TR μεγαλύτερου της μονάδας, σε συνδυασμό με πτερύγια για καλύτερη απόδοση της καρίνας (Australia II).
- Η χρήση δύο μεγάλων πηδαλίων, ενός στην πλώρη και ενός στην πρύμνη για την παραγωγή της πλάγιας δύναμης, και απλή στήριξη του απαιτούμενου για την ευστάθεια βάρους σε ένα βολβό σε κάθετη απόσταση από τη γάστρα (America's Cup 1987, USA).
- Δύο λεπτές υδροτομές σε σειρά που συνδέονται με βολβό ή πτερύγιο
- Χρήση trim tabs στις υδροτομές της καρίνα

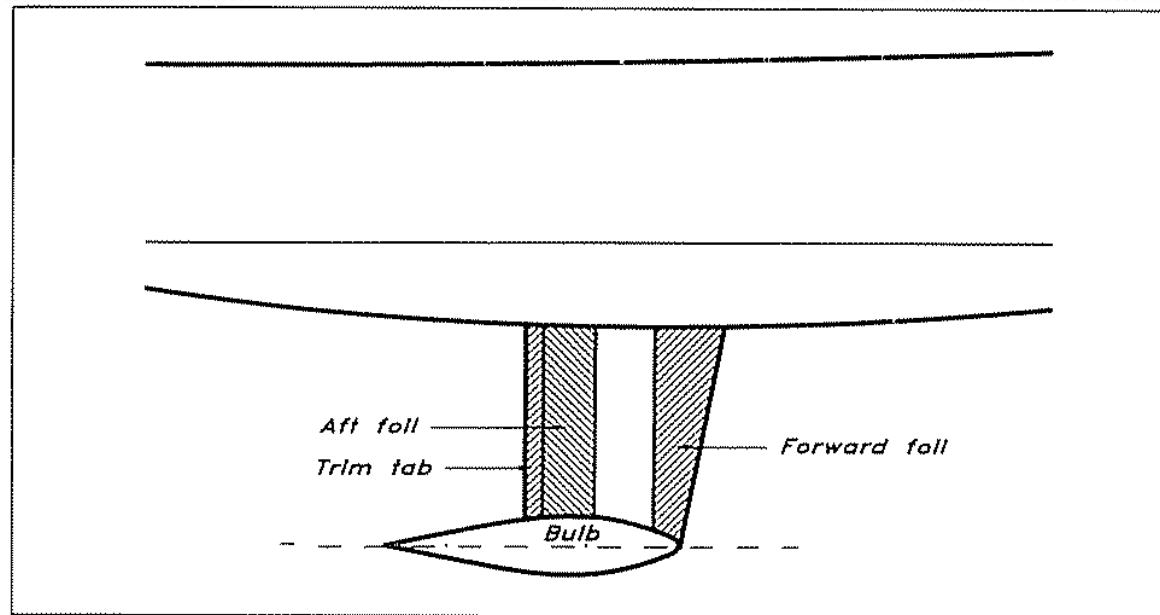


# Εναλλακτικές σχεδιάσεις καρίνας



Η χρήση δύο μεγάλων πηδαλίων, ενός στην πλώρη και ενός στην πρύμνη για την παραγωγή της πλάγιας δύναμης, και απλή στήριξη του απαιτούμενου για την ευστάθεια βάρους σε ένα βολβό σε κάθετη απόσταση από τη γάστρα (America's Cup 1987, USA).

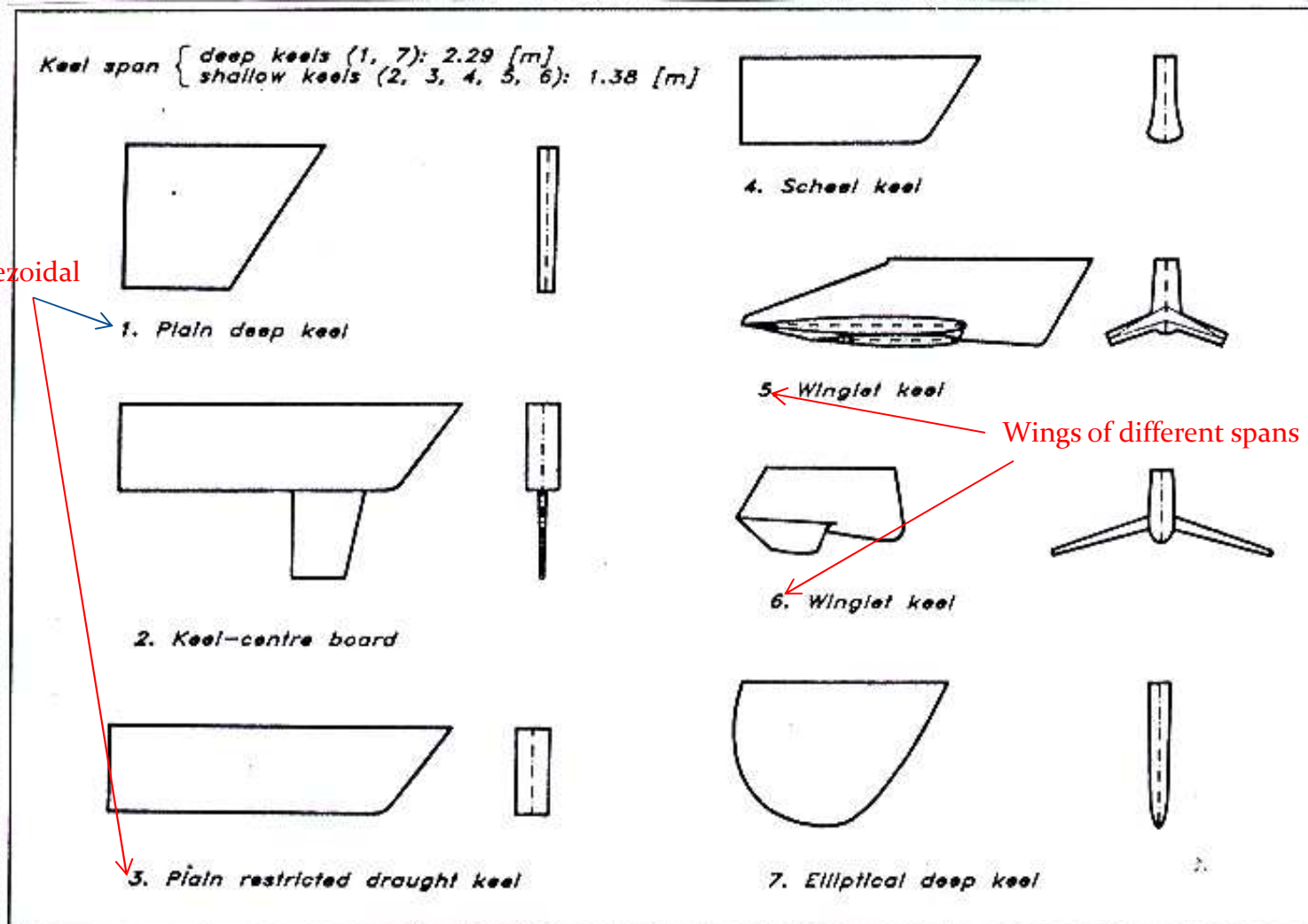
# Εναλλακτικές σχεδιάσεις καρίνας



Δύο λεπτές υδροτομές σε σειρά που συνδέονται με βολβό ή πτερύγιο και χρήση trim tab στην πρυμναία υδροτομή  
(Tandem keel with trimmed tab)



# Σχεδίαση παρελκομένων



Διάφορες μορφές καρινών που έχουν χρησιμοποιηθεί.

# Σχεδίαση παρελκομένων

- Το ακριβές σχήμα της υδροτομής δεν είναι τόσο σημαντικό όσο το προφίλ της.
- Ωστόσο, τις περισσότερες φορές οι κανονισμοί δίνουν πολύ συγκεκριμένους περιορισμούς για τη μορφή της καρίνας και του πηδαλίου.
- Έτσι αξίζει να μελετηθεί το σχήμα των νομέων της υδροτομής με σκοπό τη βελτίωση της απόδοσής της.
- Και πάλι όμως δεν συνηθίζεται να σχεδιάζεται μια υδροτομή από την αρχή, αλλά χρησιμοποιούνται έτοιμες σειρές.
- Μόνο πολύ έμπειροι ερευνητές στον τομέα των δυναμικών ροών μπορούν να σχεδιάσουν μια αποδοτική υδροτομή από την αρχή.
- Ευτυχώς υπάρχουν αρκετές σειρές υδροτομών και αεροτομών, που μπορούμε να διαλέξουμε αυτή που ταιριάζει σχεδόν ακριβώς στις εκάστοτε ανάγκες μας

# Σχεδίαση παρελκομένων

- Για την επιλογή υδροτομής θα πρέπει να μελετήσουμε την κατανομή των συντελεστών πλάγιας δύναμης και αντίστασης κατά μήκος του νομέα της υδροτομής.
- Επίσης καλό θα είναι να έχουμε στο μυαλό μας ότι η ελάχιστη πίεση (ή αλλιώς η μέγιστη υποπίεση), δεν θα πρέπει να βρίσκονται πολύ μπροστά.
- Λίγο μετά από αυτό το σημείο εμφανίζεται η μεταβατική περιοχή και η στρωτή ροή γίνεται τυρβώδης.
- Τέλος, θα πρέπει να έχουμε υπόψη μας ότι οι λεπτές υδροτομές δεν μπορούν να δουλέψουν σε πολύ μεγάλες γωνίες πρόσπτωσης, όπως οι περισσότερο παχιές, όμως σε μικρές γωνίες πρόσπτωσης είναι σαφώς πιο αποτελεσματικές.

# Σχεδίαση παρελκομένων

- Φυσικά η επιλογή υδροτομής για καρίνα και για πηδάλιο θα πρέπει να γίνεται χωριστά, μια που τα δύο αυτά είδη παρελκομένων επιτελούν εντελώς διαφορετική εργασία.
- Η καρίνα βρίσκεται συνήθως σε μικρές γωνίες πρόσπτωσης, η δε αντίσταση που παράγει σε αυτή την κατάσταση είναι πολύ σημαντικές.
- Αντίθετα το πηδάλιο, αν και συμμετέχει στην παραγωγή της πλάγιας δύναμης, έχει σαν κύριο στόχο να παρέχει την απαραίτητη ροπή, ώστε το σκάφος να μπορεί να κυβερνηθεί.
- Συνεπώς για το πηδάλιο ο κύριος στόχος είναι η μέγιστη απαιτούμενη πλάγια δύναμη
- Τέλος, από τη βιβλιογραφία μπορούμε να προτείνουμε για την καρίνα υδροτομές τύπου NACA 63 με λόγο πάχους 12-15% ή NACA 65 με λόγο πάχους 15-18%
- Αντίστοιχα για πηδάλια προτείνεται NACA 63 ή και NACA τεσσάρων ψηφίων για βαρύτερα σκάφη. Ο λόγος πάχους είναι καλό να βρίσκεται στην περιοχή 12-15%