

# ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



## ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗ

Στοιχεία Μελέτης και Σχεδίασης Αερόστρωμων  
Σκαφών (Air Cushion Vehicles)



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Χ. ΣΕΠΕΝΤΖΗΣ**

**Σεπτέμβριος 2008**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ :  
Κ.ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΖΑΡΑΦΩΝΙΤΗΣ**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1- Ιστορική αναδρομή

- 1.1 Η αρχαιότερη εθνική οδός
- 1.2 Το υδάτινο φράγμα
- 1.3 1700 - 1900: Η γένεση των Air Cushion Vehicles
- 1.4 1900 - 1950: Η εξέλιξη των Air Cushion Vehicles
- 1.5 1950 - 1964: Η γέννηση της βιομηχανίας των αερόστρωμνων οχημάτων (hovercrafts)
- 1.6 Η ανάπτυξη της βαριάς βιομηχανίας hovercraft

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2- Θεωρία ACV

- 2.1 Θεωρία Στρώματος Αέρα
  - 2.1.1 Εκθετική θεωρία
  - 2.1.2 Θεωρία θαλάμου κενού (plenum chamber)
  - 2.1.3 Η θεωρία του A.A.West ή απλού τοιχώματος (single wall)
- 2.2 Πειραματικές προσεγγίσεις του φαινομένου
- 2.3 Στατική ισορροπία ACV πάνω στην επιφάνεια της θάλασσας.
- 2.4 Η μέθοδος του συντελεστή ροής
- 2.5 Το Φαινόμενο Άντλησης Κυμάτων (Wave Pumping Effect)
  - 2.5.1 Πρώτος τρόπος λειτουργίας
  - 2.5.2 Δεύτερος τρόπος λειτουργίας - σταθερός όγκος μαξιλαριών
  - 2.5.3 Τρίτος τρόπος λειτουργίας - συνδυασμός πρώτου και δεύτερου τρόπου

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3- Αντίσταση ACV

#### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- 3.1 Η αντίσταση κυματισμού λόγω του θαλάμου αέρα ( $R_w$ )
- 3.2 Αεροδυναμική αντίσταση λόγω μορφής

- 3.3 Αεροδυναμική αντίσταση λόγω μεταβολής της ορμής
- 3.4 Αντίσταση λόγω μεταβολής της ορμής του αέρα από τη διαρροή του από τα πλωραία και πρυμναία διάκενα της φούστας ( $R_a''$ )
- 3.5 Η αντίσταση της φούστας
  - 3.5.1 Αντίσταση τριβής της φούστας
  - 3.5.2 Αντίσταση πίεσης της φούστας
  - 3.5.3 Υπολογισμός της συνολικής αντίστασης της φούστας
- 3.6 Προβλήματα-Δυσκολίες Των Αερόστρωμνων Σκαφών στη Φάση της Απογείωσης
- 3.7 Η Επίδραση Διαφόρων Παραγόντων στην Αντίσταση των Αερόστρωμνων
  - 3.7.1 Επίδραση της θέσης του LCG
  - 3.7.2 Επίδραση του ποσοστού ροής αέρα
  - 3.7.3 Επίδραση της διαμόρφωσης της φούστας

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4- Ευστάθεια

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- 4.1 Εγκάρσια Ευστάθεια
  - 4.1.1 Διαμερισματοποίηση Hovercraft
  - 4.1.2 Συστήματα Ανύψωσης της Φούστας
  - 4.1.3 Χαρακτηριστική Καμπύλη Ευστάθειας
  - 4.1.4 Παράγοντες που έχουν επιπτώσεις στην εγκάρσια ευστάθεια
    - 4.1.4.1 Επίδραση της επιφάνειας στήριξης
    - 4.1.4.2 Εγκάρσια ευστάθεια ενός ACV χωρίς διαμερισματοποίηση
    - 4.1.4.3 Επίδραση του διακένου ( $h_{eg}$ ) της φούστας ευσταθείας
    - 4.1.4.4 Επίδραση του κατακόρυφου κέντρου βάρους (VCG)
    - 4.1.4.5 Επίδραση του ποσοστού ροής των ανεμιστήρων
  - 4.2 Δυναμική Ευστάθεια, το Φαινόμενο Plough-In, και ανατροπή ενός Αερόστρωμνου
    - 4.2.1 Εισαγωγή
    - 4.2.2 Ανατροπή ACV σε Χαμηλές Ταχύτητες

- 4.2.3 Ανατροπή ACV σε Υψηλές Ταχύτητες
- 4.2.4 Κυριότεροι λόγοι των φαινομένων plough-in και της ανατροπής
- 4.3 Πειραματική Μέθοδος Υπολογισμού της Εγκάρσιας Ευστάθειας

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5- Σύστημα Φούστας ACV

- 5.1 Σχεδίαση των Φουστών ενός Αερόστρωμνου

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

- 5.2 Διατάξεις Φούστας
- 5.3 Σύγκριση των Διαφόρων Τύπων Φούστας
  - 5.3.1 Φούστα Τύπου Bag-Finger
  - 5.3.2 Φούστα Τύπου Bag And Pericell
  - 5.3.3 Φούστα Τύπου Ανοιχτού Βρόχου
  - 5.3.4 Φούστα Τύπου Εκτεταμένων Τμημάτων
- 5.4 Το Φαινόμενο της Αναπήδησης (Bounce)
- 5.5 Φούστες Καταστολής Ψεκασμού

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6- Η Ανάπτυξη της Τεχνολογίας Σχεδίασης των ACV στις Προηγμένες Χώρες

- 6.1 Κίνα
  - 6.1.1 Βελτιστοποίηση της γενικότερης απόδοσης του σκάφους
  - 6.1.2 Σύστημα φουστών απόκρισης
  - 6.1.3 Σύστημα ανύψωσης
  - 6.1.4 Σύστημα παροχής αέρα προς τον προωστήρα
  - 6.1.5 Εγκάρσια και διαμήκης ευστάθεια
- 6.2 Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής
  - 6.2.1 Σύστημα φούστας
  - 6.2.2 Ανεμιστήρες ανυψώσεως
  - 6.2.3 Κατευθυντικά προωστήρια σκεύη
  - 6.2.4 Συστήματα υποβοήθησης ελιγμών (bow thrusters)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7- Βασικές σχεδιαστικές αρχές

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. A.H.Nikseresht, M.M. Alishahi, H.Emdad, Modeling flow around an ACV using volume of fluid interface tracking with Lagrangian propagation, International Conference on Fast Sea Transportation FAST 2005, June 2005, St.Petersburg, Russia
2. Ali Dehghanian, Kambiz Alempour, Hamid Javadi, Advantage and Adaptation of Iranian Fastferry (hovercraft) in Persian Gulf Island (Kish-Charak Port), International Conference on Fast Sea Transportation FAST 2005, June 2005, St.Petersburg, Russia
3. David R. Lavis and Brian G. Forstell, Air Cushion Vehicle (ACV) Developments In The U.S., International Conference on Fast Sea Transportation FAST 2005, June 2005, St. Petersburg, Russia
4. David R.Lavis, History of Hovercraft – Pioneering Vessels and People, U.S. Hovercraft Society
5. Faltinsen, Hydrodynamics of High Speed Marine Vehicles, Cambridge University Press, 1990
6. John L.Allison, Ship Design and Construction, Volume II, Chapter 47
7. Leslie Herbert Hayward, The History of Air Cushion Vehicles, Kalerghi-McLeavy Publications, 1963.
8. Liang Yun, Alan Bliault, Theory and Design of Air Cushion Craft, Arnold publishers, 2000
9. Peter J.Mantle, Air Cushion Craft Development, University Press of the Pasific, Hawaii, 2000
10. Tao Ma, Shihai Lv, Chunguang Liu, Chengjie Wu, The Development of ACV Technology in China, Ninth International Conference on Fast Sea Transportation FAST 2007, Shanghai, China, September 2007
11. You-Sheng Wu, Qi-Jun Ni, Wei-Zhen Ge, Advances in Technology of High Performance Ships in China, Ninth International Conference on Fast Sea Transportation FAST 2007, Shanghai, China, September 2007
12. Zongke Zhang, Pingping Tao, Tao Ma, Experimental and Theoretical Study of the Roll Stability of Hovercraft Moving at Yaw, Ninth International Conference on Fast Sea Transportation FAST 2007, Shanghai, China, September 2007

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1-Ιστορική αναδρομή**

### **1.1 Η αρχαιότερη εθνική οδός**

Η ανάπτυξη του παγκόσμιου πολιτισμού συνέβη από μια άποψη λόγω της θάλασσας και των ποταμών. Από την αρχή της ανθρώπινης ιστορίας, η δυνατότητα μεταφοράς ανθρώπων και εμπορευμάτων μέσω του νερού, έχει ονομάσει τη θάλασσα την αρχαιότερη εθνική οδό μας.

Χωρίς ένα μέσο για την μεταφορά αγαθών μέσω της θάλασσας, οι αρχαίοι ναυτικοί δεν θα μπορούσαν να εξερευνήσουν τον κόσμο ή να ανταλλάσουν αγαθά. Οι πολιτισμοί που τελειοποίησαν την κατασκευή και πλεύση σκαφών ευημέρησαν ως κέντρα του εμπορίου, του πολιτισμού και της δύναμης, και δεν είναι τυχαίο ότι οι πρώτες πόλεις βρέθηκαν πλησίον θαλάσσιων ακτών. Τα πλεονεκτήματα της μεταφοράς διαμέσω του ύδατος σε σύγκριση με την αντίστοιχη επίγεια μεταφορά ήταν τόσο προφανή ακόμη και για τους πρώιμους πολιτισμούς με αποτέλεσμα ένα από τα πρώτα επιτεύγματα της εφαρμοσμένης μηχανικής για την ανθρωπότητα να είναι η κατασκευή καναλιών.

Το 1775 ο Adam Smith, ένας από τους πρώτους οικονομολόγους, αναγνώρισε τη σημασία της μεταφοράς μέσω του ύδατος στο επαναστατικό του βιβλίο *"Μια έρευνα στη φύση και τις αιτίες της ευημερίας των Εθνών"* (*An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*). Στην ανάλυση του γιατί μερικά έθνη είναι πιο ανεπτυγμένα από άλλα, ο Smith εξέτασε τα πλεονεκτήματα της μεταφοράς μέσω του ύδατος σε σύγκριση με την επίγεια μεταφορά - ένα σκάφος με πλήρωμα έξι έως οκτώ άτομα μπόρεσε να μεταφέρει την ίδια τουλάχιστον ποσότητα αγαθών με 50 βαγόνια εμπορευμάτων που υποστηρίζονταν από εκατοντάδες ατόμων και 400 αλόγα - και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η επικοινωνία μέσω του ύδατος ήταν πάντοτε η λιγότερο ακριβή μορφή μεταφοράς. Η

μεταφορά αγαθών μέσω του ύδατος απαιτεί λιγότερο εργατικό δυναμικό από το χερσαίο ταξίδι και μπορεί να μεταφέρει σε μεγάλες αποστάσεις περισσότερα και βαρύτερα φορτία από ότι τα βαγόνια εμπορευμάτων, τα ζώα ή τα πιο πρόσφατα οχήματα επίγειων μεταφορών.

## **1.2 Το υδάτινο φράγμα**

Καθ' όλη τη διάρκεια της ιστορίας, η ανθρωπότητα είναι προσηλωμένη στην εύρεση τρόπων μεταφοράς όλο και μεγαλύτερων φορτίων και στην αύξηση της ταχύτητας μετακίνησής τους. Από την πρώτη τους εφαρμογή, τα επίγεια και τα εναέρια μέσα μεταφοράς έχουν αυξήσει την ταχύτητά τους με συνεχή και εντυπωσιακό τρόπο. Κάτι αντίστοιχο δεν έχει συμβεί με τα σκάφη που ταξιδεύουν στο νερό, επειδή πρέπει να αντιμετωπίσουν την ισχυρή αντίσταση του ύδατος - το υδάτινο φράγμα.

Ένας παράγοντας που δημιουργεί το υδάτινο φράγμα είναι η πυκνότητα του νερού, η οποία είναι 815 φορές μεγαλύτερη από την πυκνότητα του αέρα. Όσο ένα σκάφος αυξάνει την ταχύτητά του, η αντίσταση του νερού αυξάνει εκθετικά, προκαλώντας τεράστιες απαιτήσεις ισχύος για μικρό κέρδος στην ταχύτητα.

Μια μέθοδος για την περιγραφή της μεταφορικής αποδοτικότητας είναι η μετακίνηση ενός συγκεκριμένου φορτίου για μια συγκεκριμένη απόσταση μέσα σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Η ταχύτητα ισούται με την απόσταση διαιρούμενη με το χρόνο επομένως, η μεταφορική αποδοτικότητα είναι η μετακίνηση ενός συγκεκριμένου φορτίου επί την ταχύτητα με την οποία αυτό μπορεί να κινηθεί.

Όταν ένα φορτίο κινείται μέσω του νερού, οι διάφορες αντιστάσεις αυξάνονται ανάλογα με την ταχύτητα, και η απαιτούμενη ενέργεια για την συνεχή αύξηση της ταχύτητας μεταβάλλεται εκθετικά με συντελεστή μεταξύ 3-3.5!



Ένας άλλος τρόπος να εξεταστεί αυτό το πρόβλημα είναι ο λόγος *lift-to-drag* (L/D). Το φορτίο πρέπει να επιπλεύσει ή να ανυψωθεί από το νερό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση αντίστασης όταν ξεκινά η κίνηση. Μια βάρκα έχει λόγο L/D περίπου δέκα φορές μικρότερο από μια χαλύβδινη ρόδα που κινείται σε μια χαλύβδινη ράγα. Ο μόνος τρόπος να βελτιωθεί ο λόγος L/D της βάρκας είναι να ανυψωθεί η γάστρα και το φορτίο της εντελώς πάνω από το νερό, το οποίο θα έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του κυματισμού και της αντίστασης του σκάφους.

Σε μια διαχρονική προσπάθεια για την αντιμετώπιση του υδάτινου φράγματος, για τη βελτίωση του λόγου L/D και τη μείωση της αντίστασης του νερού, έχουν εφευρεθεί πολλά οχήματα, ειδικά κατά τη διάρκεια των τελευταίων τριών αιώνων. Είναι αρκετά παλαιά η ιδέα της παροχής αέρα κάτω από τη γάστρα ενός σκάφους προκειμένου να μειωθεί η αντίσταση, αλλά οι προφανείς και απλές προσεγγίσεις αυτής της ιδέας δεν λειτουργούν, γιατί ολόκληρη η γάστρα πρέπει να ανυψωθεί από την επιφάνεια. Η πλειοψηφία των σύγχρονων εφευρέσεων είναι βασισμένη σε αυτή την ιδέα. Από αυτές ξεχωρίζουν τα υδροπλάνα, τα υδροπτέρυγα και τα Air Cushion Vehicles ή ACVs. (Τα αερόστρωμα είναι ένας τύπος ACV). Μεταξύ αυτών, τα αερόστρωμα έχουν τον βέλτιστο λόγο L/D από οποιοδήποτε όχημα που κινείται μέσα στο νερό για ταχύτητες άνω των 35 mph.

### **1.3 1700 - 1900: Η γένεση των Air Cushion Vehicles**

Όταν αναφερόμαστε σε ιπτάμενες μηχανές, εύκολα συμπεραίνουμε ότι οι ρίζες τους βρίσκονται στην αρχαία Ελλάδα. Αυτό όμως δεν ισχύει και για τα ACV. Το πρώτο καταγεγραμμένο σχέδιο για ένα τέτοιο όχημα ήταν το 1716 από τον Emanuel Swedenborg, ένα Σουηδό σχεδιαστή, φιλόσοφο και θεολόγο. Το σχέδιο του Swedenborg δημοσιεύτηκε στην τέταρτη έκδοση του πρώτου επιστημονικού περιοδικού της Σουηδίας, *Daedulus Hyperboreus*, και

είναι η πρώτη λεπτομερής τεχνική περιγραφή μιας ιπτάμενης μηχανής οποιουδήποτε τύπου.

Η πλατφόρμα του Swedenborg, η οποία ήταν ουσιαστικά ένα κυκλικό αεροσκάφος, παρέπεμπε σε μια βάρκα γυρισμένη ανάποδα με ένα πιλοτήριο στο κέντρο ή ένα "ιπτάμενο δίσκο". Η συσκευή του απαιτούσε τον πιλότο να χρησιμοποιεί ένα σετ ιδιόμορφων κουπιών για να ωθεί αέρα κάτω από το όχημα προκειμένου να ανυψωθεί η γάστρα του σκάφους έξω από το νερό. Δυστυχώς δεν κατασκευάστηκε ποτέ κάποιο λειτουργικό μοντέλο αυτού του σχεδίου, επειδή ο Swedenborg σύντομα συνειδητοποίησε ότι ένας άνθρωπος δεν θα μπορούσε να παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια για να ανυψώσει τη βάρκα. Το σχέδιό του απαιτούσε μια πηγή ενέργειας πολύ μεγαλύτερη από όλες όσες ήταν διαθέσιμες εκείνη την περίοδο. Όπως ακριβώς συνέβη και με άλλες μορφές μεταφοράς, η πρόοδος έπρεπε να περιμένει μέχρι την ανάπτυξη μιας ελαφριάς μηχανής η οποία συνέβη το δέκατο ένατο αιώνα.

Το 1865, ο William Froude του Βρετανικού Ναυαρχείου έστειλε μια επιστολή στον B.J. Tideman, ο οποίος ήταν ο επικεφαλής του κατασκευαστικού τομέα του Βασιλικού Ολλανδικού Ναυτικού, και του πρότεινε την αρχή της λίπανσης μέσω αέρα (air lubrication). Η επιστολή βρίσκεται στην έκθεση του David Taylor Model Basin στην Ουάσιγκτον και εμφανίζεται επίσης στη σελίδα 109 του βιβλίου του J.Scott Russell, *The Modern System of Naval Architecture*, 1865, Vol. I.

Στα μέσα της δεκαετίας του 1870, ο Βρετανός μηχανικός Sir John Thornycroft κατασκεύασε διάφορα μοντέλα *μηχανών επίγειας επίδρασης* (*ground effect machines*) βασισμένα στη θεωρία του ότι ένα σύστημα προσκεφάλων αέρα θα μείωνε την αντίσταση του ύδατος στις βάρκες και τα σκάφη. Η θεωρία του ήταν ότι εάν σχεδιαστεί η γάστρα ενός σκάφους με ένα κοίλο πυθμένα στον οποίο θα μπορούσε να διατηρηθεί ένα στρώμα αέρα μεταξύ της γάστρας και του ύδατος, αυτό θα δημιουργούσε σημαντικά μικρότερη αντίσταση. Πήρε αρκετά διπλώματα ευρεσιτεχνίας που αναφέρονται

σε γάστρες της ανωτέρω θεωρίας μέχρι το 1877. Η μηχανή εσωτερικής καύσεως δεν είχε εφευρεθεί ακόμα, εντούτοις, η απαιτούμενη τεχνολογία για την τροφοδότηση των εφευρέσεων του δεν υπήρχε ακόμα. Επιπλέον, κανένας δεν είχε ανακαλύψει ακόμα κάποια πρακτική λύση στο πρόβλημα για το πώς να κρατήσει "παγιδευμένο" ένα στρώμα αέρα κάτω από ένα σκάφος.

Το 1876, ο John B. Ward από το Σαν Φρανσίσκο των ΗΠΑ, πρότεινε μια πλατφόρμα αλουμινίου με περιστροφικούς ανεμιστήρες για να οδηγούν τον αέρα κάτω και προς τα πίσω, αλλά για την ώθηση της συσκευής χρησιμοποιούνταν τροχοί οι οποίοι θα ωθούσαν τη συσκευή εμπρός. Για τις "εναέριες μηχανές του" έλαβε τα αμερικανικά διπλώματα ευρεσιτεχνίας 185465 και 195860.

Το πρώτο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για τη χρήση του αέρα ως μέσου ανύψωσης στη Μεγάλη Βρετανία απονεμήθηκε σε έναν άλλο Σουηδό μηχανικό, τον Gustaf de Laval, το 1882 αλλά επειδή η μέθοδος για τη διατήρηση του στρώματος αέρα δεν είχε ακόμα επιλυθεί, ο de Laval δεν ήταν επιτυχής στα πειράματά του. Το βρετανικό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας 5841 αναφέρεται σε ένα σκάφος κατασκευασμένο με βάση τις ιδέες του de Laval. Οι πληροφορίες για αυτό το σκάφος μπορούν να βρεθούν στις σελίδες 33-34 του βιβλίου *Speed and Power of Ships* του Ναυάρχου D.W. Taylor, που δημοσιεύτηκε το 1933.

Το 1888, το αμερικανικό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας 624271 δόθηκε στον James Walker από το Τέξας ο οποίος κατασκεύασε κανάλια/οδηγούς αέρα κατά μήκος του κάτω μέρους των βαρκών τα οποία και αναπλήρωναν τον αέρα που διέφευγε. Το αμερικανικό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας 608757, που έλαβε το 1897 ο Culbertson, περιλαμβάνει μια ιδέα που οδήγησε στην πρώτη πρόταση για οχήματα προσκεφάλων αέρα πλευρικών τοιχωμάτων (sidewall air cushion vehicles).

Η χρήση αέρα ως μέσο λίπανσης έχει βρεί αρκετές εφαρμογές στο βιομηχανικό τομέα, συμπεριλαμβανομένων των σιδηροδρόμων. Η έννοια ενός "σιδηρόδρομου ολίσθησης", ένα τραίνο που ολίσθαινε με

τη βοήθεια μικρών "μαξιλαριών αιωρήσεως" χρησιμοποιώντας νερό υπό πίεση, προτάθηκε αρχικά το 1868 από το Γάλλο μηχανικό Louis Girard. Ένα λειτουργικό μοντέλο χρησιμοποιήθηκε το 1886 σε μία διαδρομή 900 μιλίων στο πάρκο LeJouchere. Αφότου σκοτώθηκε ο Girard στο γαλλογερμανικό πόλεμο, ένας από τους βοηθούς του, ο M. Barre, βελτίωσε τις ιδέες του Girard και κατασκεύασε έναν σιδηρόδρομο ολίσθησης στο Crystal Palace του Λονδίνου το 1891. Ο τοπικός τύπος *ανακοίνωσε* την εφεύρεση ως *"μια θαυμάσια εφεύρεση... μια εξαιρετικά μοναδική επινόηση η οποία δίνει τη δυνατότητα στα τραίνα να λειτουργήσουν με τη βοήθεια του νερού με μια ταχύτητα που έως τώρα δεν έχει τίποτα ανάλογο ... γεγονός που μπορεί να επισκιάσει τις ηλεκτρικές μηχανές."*

#### **1.4 1900 - 1950: Η εξέλιξη των Air Cushion Vehicles**

Τα πειράματα με αερόστρωμα οχήματα άρχισαν εντεταμένα μετά την εύρεση κατάλληλης πηγής ενέργειας μετά από την ανάπτυξη του αεροπλάνου. Δεδομένου ότι το αεροπλάνο εξελίχθηκε ως βιώσιμο όχημα μετά από τη διάσημη πτήση των αδελφών Wright το 1903, περισσότερη προσοχή δόθηκε στο γεγονός ότι παρατηρήθηκε αυξημένη ανύψωση (lift) κατά την πτήση ενός αεροπλάνου κοντά στο έδαφος ή το νερό, δημιουργώντας ένα στρώμα αέρα. Αυτό έγινε γνωστό ως *επίγεια επίδραση (ground effect)*.

Συνειδητοποιώντας ότι ο αέρας υπό πίεση αντιδρά με την επιφάνεια του ύδατος και επιτρέπει σε ένα σκάφος να πλανάει πάνω στο νερό, οι ναυπηγοί κατοχύρωσαν διάφορα σχέδια για να επιλύσουν το πρόβλημα της αντίστασης του νερού, την υδροδυναμική έλξη (drag). **Ανεμιστήρες** οι οποίοι βρίσκονται πάνω στο σκάφος παρέχουν αέρα σε ένα θάλαμο στο κάτω μέρος, με αποτέλεσμα να παρεμβάλλεται αέρας μεταξύ της γάστρας και του νερού και να ανυψώνεται το σκάφος από το νερό.

Ο Πρώτος Παγκόσμιος πόλεμος έφερε την ανάπτυξη του αεροπλάνου ως στρατιωτικό όπλο που, στη συνέχεια, ενθάρρυνε το τεχνολογικό ενδιαφέρον και οι επιστήμονες άρχισαν εντατικά να ερευνούν την "επίγεια επίδραση".

Οι διάφορες μορφές σκαφών προσκέφαλων αέρα άρχισαν να εξελίσσονται αφότου παρουσιάστηκε το πρώτο λειτουργικό μοντέλο το 1916. Εκείνη την περίοδο, ο Dagobert Muller von Thomamhul, ένας Αυστριακός μηχανικός, σχεδίασε και κατασκεύασε ένα αερόστρωμνο τορπιλοφόρο σκάφος για το αυστριακό ναυτικό, το οποίο χρησιμοποιούσε ανεμιστήρες που παρείχαν αέρα κάτω από τη γάστρα για να διαμορφώσουν ένα στρώμα αέρα. Περαιτέρω ανάπτυξη δεν επιτεύχθηκε όταν ο Πρώτος Παγκόσμιος πόλεμος κατέστρεψε το Αυστριακό Ναυτικό.

Κατά τη διάρκεια της ίδιας χρονικής περιόδου, υπήρξαν διάφοροι παραγωγικοί εφευρέτες αερο-λιπαινόμενων σκαφών. Ο F.W. Schweder έλαβε το βρετανικό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας 4131 το 1906 στο οποίο πρότεινε βελτιώσεις πάνω στις ιδέες του de Laval. Το 1907 ο Joseph Clark έλαβε το αμερικανικό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας 989834 για ένα αεροπορικό όχημα. Ο Γάλλος Charles Theryc πρότεινε ακόμα μια έννοια για σιδηρόδρομους μεταξύ των ετών 1902 και 1915, για την οποία έλαβε το βρετανικό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας 5569. Αυτά τα τραίνα ολίσθαιναν πάνω σε στρώμα αέρα και προκάλεσαν την έκδοση πολλών διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας που εξέτασαν συστήματα στεγανοποίησης του αέρα στα άκρα. Δύο τέτοια παραδείγματα είναι το αμερικανικό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας 1152451 και το βρετανικό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας 9011 το οποίο εκδόθηκε το 1915. Ένας άλλος Γάλλος εφευρέτης, ο M.A. Gambin, έλαβε το βρετανικό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας 188648 το 1921 για ένα αερόστρωμνο όχημα πλευρικών τοιχωμάτων.

Ο James Porter, ένας Βρετανός μηχανικός, έλαβε μια σειρά διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας που χρονολογούνται από το 1908, συμπεριλαμβανομένου του βρετανικού διπλώματος ευρεσιτεχνίας 21216 και του αμερικανικού διπλώματος ευρεσιτεχνίας 1016359. Το

1913, ο Porter πρότεινε μια μηχανή βασισμένη σε ένα σύστημα παροχής αέρα δακτυλιοειδούς τύπου, και έλαβε το βρετανικό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας 975 το 1914, το οποίο παρουσιάζει ένα δακτυλιοειδή αγωγό αέρα αρκετά όμοιο με αντίστοιχους αερόστρωμνων σκαφών σύγχρονης σχεδίασης.

Επίσης το 1908, ένας Αμερικανός, ο Charles Worthington, πρότεινε ένα όχημα που στηριζόταν στον αέρα αλλά ολίσθαινε σε έναν αγωγό. Μια παρόμοια πρόταση έγινε το 1913 από τον επίσης Αμερικανό A.F. Eells. Άλλοι εφευρέτες αερόστρωμνων οχημάτων στις Ηνωμένες Πολιτείες ήταν ο F.G. Trask από τη Βόρειο Ντακότα, ο οποίος σχεδίασε έναν σιδηρόδρομο ολίσθησης το 1922 με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας, ο V.F. Casey από τη Μινεάπολη της Μινεσότα και ο Douglas Kent Warner από την Φλώριδα.

Το 1925, ο Casey έλαβε το αμερικάνικο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας 1621625 για την εισαγωγή στη σχεδίαση του συστήματος επανακυκλοφορίας αέρα. Το σχέδιό του ήταν ένα σκάφος με χαρακτηριστικό επίπεδο πυθμένα και μια σειρά διαμήκων καναλιών αέρα ανοικτών στο κάτω μέρος από το οποίο ο αέρας θα μπορούσε να επανακυκλοφορεί.

Ο Warner, ο προϊστάμενος των ερευνητικών εργαστηρίων Warner στη Φλώριδα, διεξήγαγε ιδιαίτερη έρευνα για την ανάπτυξη των αερόστρωμνων σκαφών στη δεκαετία του '20 και απέκτησε πολλά αμερικανικά διπλώματα ευρεσιτεχνίας (1819216 ,2277620 και 2365676). Για να απλοποιήσει τα σχέδιά του, τα οποία προφανώς υπέφεραν από το φαινόμενο wave rumping , ενσωμάτωσε στις μηχανές του "πλευρικά φτερά" (ram wings). Το 1929, ο Warner κέρδισε πολλούς αγώνες ταχύτητας σκαφών στο Κοννέκτικατ με σκάφη παγιδευμένου στρώματος (φυσαλίδας) αέρα. Τα σκάφη του Warner αποτέλεσαν ουσιαστικά τη γένεση του σύγχρονου σκάφους επίδρασης επιφάνειας (SES).

Ο A.U. Alcock, ένας ηλεκτρολόγος μηχανικός από το Περθ της Αυστραλίας, κατασκεύασε ένα λειτουργικό μοντέλο αερόστρωμνου σκάφους, το οποίο παρουσιάστηκε στον Τύπο και σε κυβερνητικούς

αξιωματούχους το 1912 και για το οποίο έλαβε το αυστραλιανό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας 14309. Αργότερα παρουσίασε και άλλα αντίστοιχα μοντέλα στην αίθουσα παγοδρομίας του Cricklewood το 1939.

Το 1927, ο Κ.Ε. Τσιολκονski, ένας αξιόλογος Ρώσος επιστήμονας, ανέπτυξε αυτό που σήμερα ονομάζεται "τραίνο αιωρήσεως" (hovertrain). Ο Τ.Ι. Κααριο από τη Φινλανδία μελέτησε και κατασκεύασε μια μηχανή επίγειας επίδρασης (ground effect machine) το 1935, και έλαβε τα φινλανδικά διπλώματα ευρεσιτεχνίας 18630 και 26122. Άλλοι εφευρέτες αερολιπαινόμενων σκαφών κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου ήταν ο Δανός J.C. Hansen - Euehammer, ο Βρετανός Henry Clay και ο C.J. Lake από τις Ηνωμένες Πολιτείες. Περισσότερα από 100 διπλώματα ευρεσιτεχνίας απονεμείθηκαν πάνω σε αυτό το ζήτημα μέχρι το 1962.

Αργότερα, αφότου άρχισαν οι πτήσεις βαρέων σκαφών, παρατηρήθηκε ότι κατά τη διάρκεια της πτήσης πλησίον της επιφάνειας, απαιτείται λιγότερη ενέργεια για να παραμείνει το σκάφος στον αέρα. Αυτό έγινε γνωστό ως "φαινόμενο επίγειας επίδρασης" (ground effect phenomenon). Η επίγεια επίδραση εξαρτάται άμεσα από το πλάτος του φτερού. Προκειμένου να εκμεταλλευτεί το σκάφος την επίγεια επίδραση, θα πρέπει να πετάξει επάνω από το έδαφος σε ένα ύψος μικρότερο από το πλάτος του φτερού.

Το γερμανικό σκάφος Dornier DO-X το πρωσπήριο σκεύος του οποίου περιείχε δώδεκα μηχανές, απέδειξε τη θεωρία της επίγειας επίδρασης το 1929 διασχίζοντας τον Ατλαντικό Ωκεανό πετώντας εξ ολοκλήρου σε χαμηλό ύψος κοντά στο νερό. Με αυτόν τον τρόπο, η κατανάλωση καυσίμων των αεροσκαφών μειώθηκε. Κατά τη διάρκεια του Β' Παγκόσμιου πολέμου, τα αεροσκάφη πετούσαν αξιοποιώντας την επίγεια επίδραση προκειμένου να επεκταθεί το εύρος και η διάρκεια της πτήσης αναγνώρισης.

Ο Αμερικανός πιλότος Charles Lindbergh φέρεται να έχει πετάξει με τη βοήθεια της επίγειας επίδρασης προκειμένου να εξοικονομήσει

καύσιμα κατά τη διάρκεια της ιστορικής υπερατλαντικής πτήσης του το 1927. Η πρόκληση του να πετάξει κατά μήκος των κορυφών των κυμάτων χωρίς αμφιβολία θα τον βοήθησε να αποφύγει την πλήξη κατά τη διάρκεια του μεγάλου ταξιδιού του!

Αυτές και άλλες αρχές εγκαθίδρυσαν τα θεμέλια για τις διάφορες μορφές αερόστρωμνων οχημάτων που εμφανίστηκαν αργότερα στη σύγχρονη σκηνή. Μέχρι τη δεκαετία του 1950, εντούτοις, δεν είχε βρεθεί κάποια αξιόλογη λύση για το πρόβλημα που ταλάνισε όλες τις προηγούμενες απόπειρες: πώς να διατηρηθεί το στρώμα του αέρα κάτω από το σκάφος.

### **1.5 1950 - 1964: Η γέννηση της βιομηχανίας αερόστρωμνων οχημάτων (hovercrafts)**

Η επιτυχής χρήση της επίγειας επίδρασης στον Β΄ Παγκόσμιο πόλεμο ενέπνευσε Βρετανούς, Αμερικανούς, Ρώσους και Ελβετούς μηχανικούς για να ερευνήσουν εντατικά και να αναπτύξουν καινοτόμους τρόπους εφαρμογής της. Τα πολλά μοντέλα που προέκυψαν πριν από τη δεκαετία του '50 αναπτύχθηκαν ως ιπτάμενα σκάφη παρά ως αληθινά αερόστρωμνα, και ήταν γνωστά ως *μηχανές επίγειας επίδρασης (ground effect machines)*. Οι όροι *αερόστρωμνο όχημα* και *hovercraft* δεν χρησιμοποιήθηκαν μέχρι τη δύση της δεκαετίας του '50.

Η πρακτική ανάπτυξη του σημερινού αερόστρωμνου σκάφους άρχισε στα μέσα της δεκαετίας του '50 στη Μεγάλη Βρετανία, όταν ο Christopher Cockerell, ο οποίος θεωρείται και ο εφευρέτης του hovercraft, άρχισε να ερευνά τη χρήση του αέρα ως λιπαντικό μέσο για να μειώσει την υδροδυναμική έλξη (drag). Ο Cockerell ήταν ένας λαμπρός ραδιο-μηχανικός, συνταξιούχος του στρατού που διατηρούσε ένα ναυπηγείο μικρών σκαφών στο Norfolk.

Κατά τη διάρκεια της ζωής του, στον Cockerell χορηγήθηκαν περισσότερα από 70 διπλώματα ευρεσιτεχνίας για τις εφευρέσεις του, οι περισσότερες από τις οποίες σχετίζονται με το hovercraft.



Η θεωρία του Sir Christopher Cockerell ήταν ότι εάν αντί του κενού θαλάμου (plenum chamber) - ένα ανοικτό στο κάτω μέρος κενό κιβώτιο όπως είχε επινοήσει ο Thornycroft - μπορούσε να υπάρξει παροχή αέρα σε μια στενή περιφερειακή σήραγγα στην κάτω πλευρά του σκάφους, ο παρεχόμενος αέρας θα έρεε προς το κέντρο, και το δημιουργούμενο στρώμα θα ήταν πολύ πιο αποτελεσματικό. Με αυτό το τρόπο η πίεση του αέρα θα αυξανόταν τόσο ώστε να εξισωθεί με το βάρος του σκάφους και, δεδομένου ότι ο αέρας θα παγιδευόταν, η πίεση θα ανύψωνε το σκάφος πάνω από την επιφάνεια.

Ο Cockerell εξέτασε τη θεωρία του με ένα πρότυπο δοκιμής που αποτελείτο από δύο κενά δοχεία κονσέρβας, ένα βιομηχανικό ανεμιστήρα αέρα και μία ζυγαριά κουζίνας. Με την τοποθέτηση μιας κονσέρβας από γατοτροφή μέσα σε μία κονσέρβα από καφέ, παρέχοντας ταυτόχρονα αέρα στον ενδιάμεσο χώρο μεταξύ των δύο δοχείων, απέδειξε ότι ήταν δυνατό να αυξηθεί η απόσταση μεταξύ των κουτιών (ύψος αιώρησης) και να κατασκευαστεί ένα όχημα που θα μπορούσε να ταξιδέψει πάνω σε ένα στρώμα αέρα.



Σχήμα 1: Η εφεύρεση του

### *Cockerell*

Αρχικά, ο Cockerell είχε μιμηθεί προηγούμενα σχέδια που χρησιμοποιούσαν ανεμιστήρες για την παροχή αέρα από το κατάστρωμα στον κενό θάλαμο, που σήμαινε ότι ο αέρας έπρεπε να παρέχεται αδιάλειπτα προκειμένου να αντικαθιστά συνεχώς την αντίστοιχη ποσότητα που διέφευγε. Επινόησε έπειτα ένα νέο σύστημα: κατέστησε τη γάστρα του σκάφους κοίλη και τοποθέτησε οδηγούς αέρα υπό γωνία από την περιφέρεια προς το κέντρο του σκάφους για να δημιουργήσει ένα συνεχές ρεύμα αέρα. Με αυτό το τρόπο έλυσε αποτελεσματικά το πρόβλημα της διαφυγής του αέρα από το κάτω μέρος του σκάφους, κράτησε την πίεση του σταθερή και αύξησε το ύψος αιωρήσεως.

Το 1955, ο Cockerell κατασκεύασε ένα λειτουργικό μοντέλο και απέκτησε το βρετανικό δίπλωμα ευρεσιτεχνίας 854211 για ένα όχημα

που δεν ήταν "ούτε ένα αεροπλάνο, ούτε βάρκα, ούτε τροχοφόρο σκάφος εδάφους." Ο Cockerell περιέγραψε την εφεύρεσή του ως "μια πολύ ακριβή ρόδα αυτοκινήτου με μια μόνιμη οπή." Το ονόμασε *hovercraft*, το οποίο καταχώρησε ως εμπορικό όνομα, και έτσι δεν ήταν διαθέσιμο για γενική χρήση μέχρι αργότερα όταν έδωσε γενναιόδωρα το όνομα στο δημόσιο τομέα.

Αυτό το πρότυπο, που συνδύασε το δακτυλιοειδές σύστημα με περιφερειακούς οδηγούς αέρα με το αντίστοιχο που έκανε χρήση γωνιακών οδηγών αέρα, οδήγησε στη γέννηση της βιομηχανίας αερόστρωμνων οχημάτων/*hovercrafts*. Στις προσπάθειές του να μετατρέψει την εφεύρεσή του σε εμπορικό προϊόν, ο Cockerell παρουσίασε την εφεύρεσή του στους Βρετανούς αξιωματούχους το 1956, οι οποίοι το ταξινόμησαν αμέσως ως "μυστικό", σταματώντας ουσιαστικά την εμπορική εκμετάλλευση για το επόμενο έτος.

Στο άκουσμα των νέων ότι άλλες χώρες προσπαθούσαν με εντατικούς ρυθμούς να εξελίξουν το *hovercraft*, η βρετανική κυβέρνηση συνειδητοποίησε ότι η Μεγάλη Βρετανία θα θυσίαζε τη θέση της ως παγκόσμιου ηγέτη σε αυτήν την νέα τεχνολογία εάν δεν συνέχιζε την ανάπτυξή της. Έτσι έδωσε στον Cockerell την άδεια να προσεγγίσει την εθνική εταιρία ερευνητικής ανάπτυξης (NRDC), μια χρηματοδοτούμενη από την κυβέρνηση εταιρεία που θα μπορούσε να υποστηρίξει την περαιτέρω ανάπτυξη του *hovercraft* εάν αυτό ελευθερωνόταν από το "μυστικό κατάλογο".

Το 1958, η εφεύρεση του Cockerell αφαιρέθηκε από το "μυστικό κατάλογο", επιτρέποντας την ανάπτυξη του hovercraft για εμπορική χρήση. Το μόνο που απέμενε ήταν η κατάδειξη της αξίας του hovercraft στο στρατιωτικό τομέα. Η NRDC συμβλήθηκε έπειτα με το



τμήμα Saunders-Roe της επιχείρησης αεροσκαφών Westland για να κατασκευάσει ένα πραγματικού μεγέθους hovercraft από την ιδέα του Cockerell, το οποίο ονομάστηκε το Saunders Roe Nautical One (SR N1).

*Σχήμα 2: Οι πρώτες δοκιμές εν πλώ*

Στις 25 Ιουλίου του 1959 - πενήντα έτη από την ημέρα που ο Louis Bleriot έκανε το πρώτο πέρασμα του στενού του Ντόβερ με αεροπλάνο, το SR N1, διέσχισε το αγγλικό κανάλι από το Calais της Γαλλίας στο Ντόβερ της Αγγλίας. Ο Παγκόσμιος Τύπος θαύμασε αυτή τη νέα εφεύρεση, η οποία απέσπασε την προσοχή όλων.

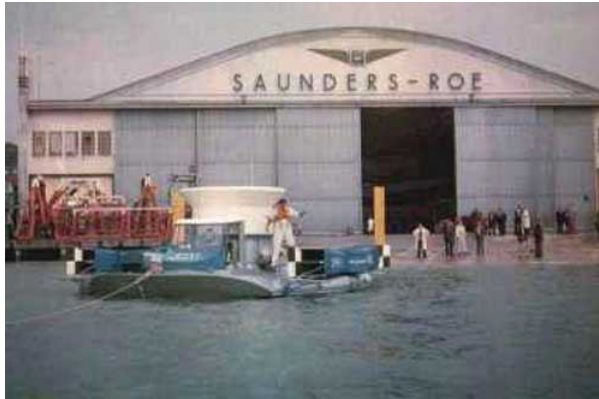
Το SR N1 έφερε μόνο τρεις επιβάτες. Ο Cockerell ταξίδεψε ως κινητό έρμα, ο Πλοίαρχος Peter Lamb πιλόταρε το σκάφος και ο John



Charlin ήταν ο μηχανικός και το πρόσθετο κινητό έρμα. Παραδόξως, ένας ακόμη μηχανικός απέτυχε να ξυπνήσει εγκαίρως και δεν συμμετείχε στο επίτευγμα. Ο John Charlin ζει ακόμα και κατοικεί στη Βιρτζίνια των ΗΠΑ.

*Σχήμα 3: Το SR N1 πριν τη μετασκευή*

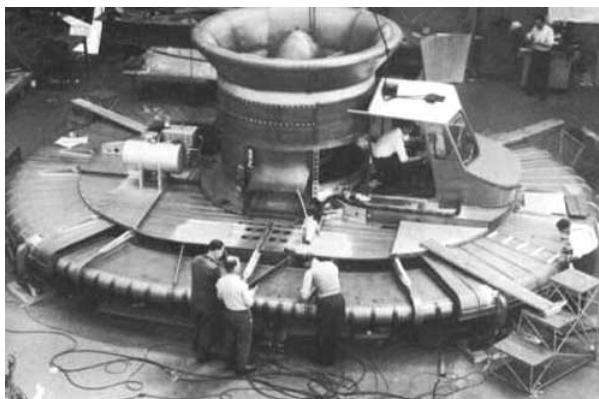
Λόγω του χαμηλού ύψους αιωρήσεως (1ft), το SR N1 υπέφερε από την επίδραση του κυματισμού. Ένας άλλος Βρετανός εφευρέτης, ο C.H. Latimer-Needham, είχε παρακολουθήσει τις καινοτομίες του



Cockerell και συνειδητοποίησε ότι το πρόβλημα του κυματισμού θα μπορούσε να επιλυθεί με μία "φούστα" από λάστιχο η οποία θα περικλείει το στρώμα του αέρα, μια "εύκαμπτη φούστα".

*Σχήμα 4: Το SR N1 στο νερό*

Η εισαγωγή της εύκαμπτης φούστας στα hovercraft ήταν μια κρίσιμη και σημαντική ανακάλυψη. Το SR.N.1 (χωρίς εύκαμπτη φούστα) του



1959 μπορούσε μόνο να επιχειρήσει σε μικρό ύψος κύματος και σε χαμηλές ταχύτητες. Αφότου εγκαταστάθηκε στο SR N1 μια εύκαμπτη φούστα 4 ποδιών το 1962, μπορούσε να

*Σχήμα 5: Η μετασκευή του SRN1*

αντιμετωπίσει άνετα τα κύματα ύψους 6-7 ποδιών, να διασχίζει ελώδεις περιοχές και να υπερκερνά εμπόδια με ύψος άνω των 3 ποδιών . Επιπλέον, το SR N1 μπορούσε τώρα να επιχειρήσει με βάρος διπλάσιο από το αρχικό του χωρίς καμία αύξηση στην ισχύ των ανεμιστήρων αιωρήσεως . Μόλις μια δεκαετία μετά από την εισαγωγή του hovercraft από τον Cockerell, οι απόγονοί του, πενήντα φορές βαρύτεροι και τρεις φορές ταχύτεροι, θα μετέφεραν το ένα τρίτο του συνόλου των επιβατών και των αυτοκινήτων από το αγγλικό κανάλι και για χρονικό διάστημα περίπου τριάντα ετών.



*Σχήμα 6: Το SRN1 δεν επιχειρούσε μόνο σε νερό...*

## **1.6 Η ανάπτυξη της βαριάς βιομηχανίας hovercraft**

Με την εισαγωγή της εύκαμπτης φούστας, το όχημα προσκεφάλων αέρα όπου εφαρμόστηκε αρχικά αυτή η νέα και συναρπαστική εφεύρεση, παρουσίασε πολύ γρήγορη ανάπτυξη. Η εμφάνιση της εύκαμπτης φούστας προώθησε την τεχνολογία των hovercraft και την πρακτική χρήση τους, και καθόρισε επίσης τη διαφορά μεταξύ hovercraft και όλων των άλλων τύπων οχημάτων προσκέφαλων αέρα. Η εύκαμπτη φούστα ενθάρρυνε την έναρξη της βιομηχανίας οχημάτων προσκέφαλων αέρα παγκοσμίως, από την εισαγωγή των πορθμείων επιβατών/αυτοκινήτων 300-τόνων που μεταφέρουν περισσότερους από δύο εκατομμύρια επιβάτες ετησίως, μέχρι την κατασκευή των ογκωδών hoverbarges, και των αμφίβιων οχημάτων επιθέσεως (LCAC).

Τον Οκτώβριο του 2000, η πριγκίπισσα Margaret και η πριγκίπισσα Anne, δύο από τα παγκοσμίως μεγαλύτερα hovercrafts, αποσύρθηκαν μετά από τριάντα έτη μεταφοράς δεκάδων εκατομμυρίων επιβατών πέρα από το αγγλικό κανάλι. Η πριγκίπισσα Margaret εμφανίστηκε στην ταινία του James Bond, "Τα διαμάντια είναι για πάντα". Και οι δύο πριγκίπισσες βρίσκονται τώρα στο βρετανικό μουσείο του Gosport, στη Μεγάλη Βρετανία.



*Σχήμα 7: Πλήρωση της φούστας του SRN3*



*Σχήμα 8: Το SRN2 εν πλώ*

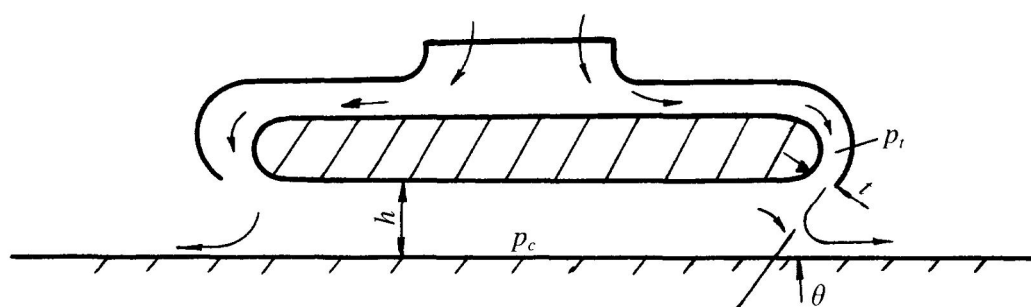
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2- Θεωρία ACV

### 2.1 Θεωρία Στρώματος Αέρα

Για την κατανόηση της λειτουργίας των αερόστρωμων σκαφών δημιουργήθηκαν αρκετές θεωρίες, ορισμένες εκ των οποίων, αν και σήμερα θεωρούνται παρωχημένες, χρησιμοποιούνται για την αρχική ανάπτυξη σύγχρονων ACV's.

#### 2.1.1 Εκθετική θεωρία

Η εκθετική θεωρία για τη λειτουργία του στρώματος αέρα πάνω σε σταθερή επιφάνεια αναπτύχθηκε από τον κ. Stanton-Jones του BHC (British Hovercraft Corporation), ο οποίος διαπίστωσε ότι η ταχύτητα εξόδου του αέρα από ένα περιφερειακό ακροφύσιο δεν έχει σταθερή κατανομή. Συγκεκριμένα, σε ένα αερόστρωμο, θεώρησε την πίεση του αέρα στην πλευρά του ακροφυσίου που βρίσκεται προς την ατμόσφαιρα, ίση με την ατμοσφαιρική πίεση και την πίεση που βρίσκεται στην εσωτερική πλευρά του ακροφυσίου ίση με την  $P_c$ . Έτσι, προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις για την πίεση του ανεμιστήρα αιωρήσεως και την παροχή του αέρα, οι οποίες έδωσαν αποτελέσματα που βρίσκονται αρκετά κοντά στις πειραματικές διαδικασίες.



Σχήμα 9: Ο θάλαμος αέρα ενός ACV



$$x = (1 + \cos\theta)t/h$$

$$Q = [2/\rho_a] \{l_j h \rho_t^{0.5} [1 - (1 - \rho_c/\rho_t)^{0.5}]/(1 + \cos\theta)\}$$

Όπου  $l_j$  το μήκος του ακροφυσίου

### 2.1.2 Θεωρία θαλάμου κενού (plenum chamber)

Η θεωρία αυτή υποθέτει ότι ο αέρας είναι ασυμπίεστο και χωρίς τριβές ρευστό. Ο αέρας εισέρχεται μέσω οχετών σε ένα κεντρικό θάλαμο και συγκρατείται μέσω πλευρικών τοιχωμάτων. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ένα στρώμα αέρα που μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει σταθερή κατανομή πίεσης καθ' όλη την έκταση του. Ως εκ τούτου, προκύπτει η παρακάτω σχέση για την παροχή του αέρα κατά μήκος της περιφέρειας του σκάφους:

$$Q = \sqrt{[2\rho_c/\rho_a] \Phi l_j \mu(j) h(j) dj}$$

Όπου:

$\mu(j)$ : Συντελεστής κατάθλιψης λόγω των περιφερειακών στεγανοποιητικών (0,5-1,0)

$h(j)$ : Διάκενο κατά μήκος της περιφέρειας του σκάφους

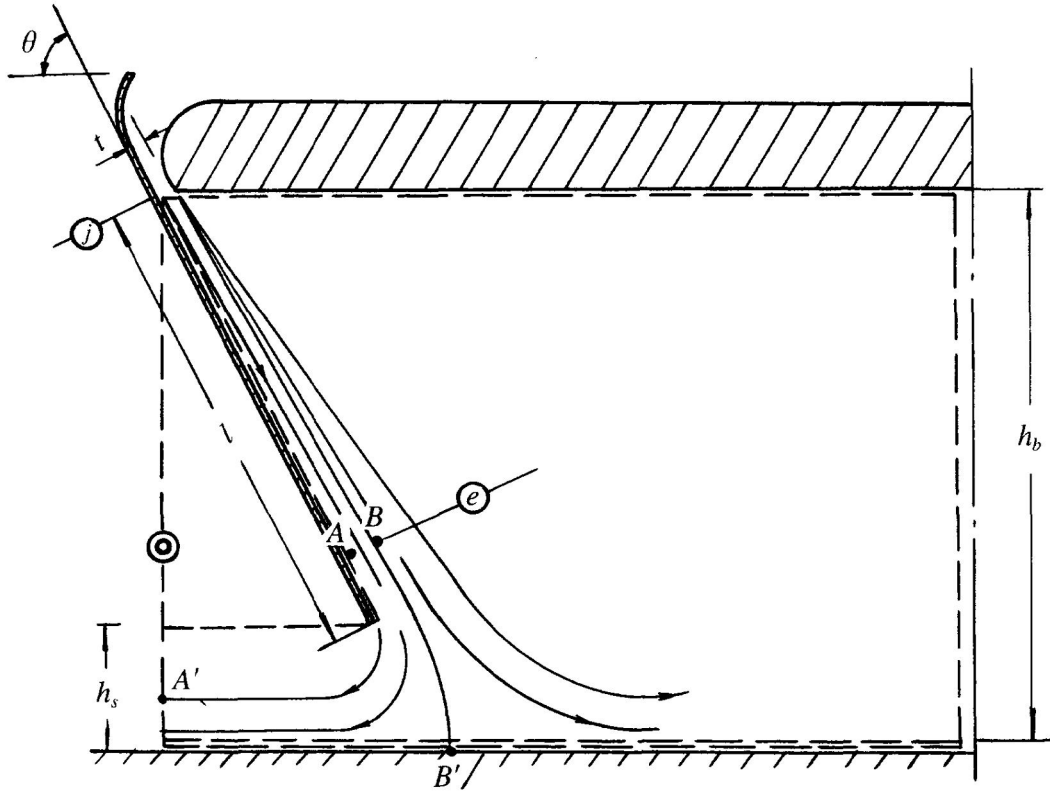
### 2.1.3 Η θεωρία του A.A. West ή απλού τοιχώματος (single wall)

Στα σύγχρονα ACV/SES χρησιμοποιούνται ελαστικές φούστες για τη συγκράτηση του αέρα στο θάλαμο. Ο A.A. West υπέθεσε ότι η ροή συγκρατείται στην εσωτερική επιφάνεια της φούστας και έκανε τις ακόλουθες παραδοχές:

- α) Η κατανομή της πίεσης στο ακροφύσιο είναι σταθερή.
- β) Στο σχήμα 10, το σημείο B' είναι σημείο αποχωρισμού της ροής. Έτσι, έχουμε τη δημιουργία δύο περιοχών, όπου στη μία η

ροή συγκρατείται στο εσωτερικό του θαλάμου και στην άλλη η ροή διαφεύγει προς το περιβάλλον.

γ) Η στατική πίεση στο ακροφύσιο είναι επίσης σταθερή. (Σημείο j)



Σχήμα 10 : Οι γραμμές ροής από τη θεωρία του A.A WEST

Η ορμή της ροής του αέρα προς το θάλαμο ανά μονάδα μήκους του ακροφυσίου είναι:

$$M_j = \rho_a V_j^2 t$$

Από την εξίσωση του Bernoulli, το άθροισμα της στατικής και της δυναμικής (κινηματικής) πίεσης του αέρα στο ακροφύσιο είναι:

$$p_t = p_c + 0.5\rho_a V_j^2$$

Έτσι προκύπτει:

$$M_j = 2(p_t - p_c)t$$

όπου

$V_j$ : Ταχύτητα της ροής στο ακροφύσιο

$t$ : Το πάχος της ροής

$P_c$ : Η πίεση του θαλάμου

$P_t$ : Συνολική πίεση της ροής στο ακροφύσιο

Επίσης θεώρησε ότι η ροή ανά μονάδα μήκους πάνω στις γραμμές ροής AA' και BB' παραμένει σταθερή και ότι η στατική πίεση κατά μήκος του εσωτερικού της φούστας είναι αμετάβλητη, καταλήγοντας- με τη βοήθεια της εξίσωσης του Νεύτωνα- στον παρακάτω τύπο:

$$M_j (\cos \theta + M_e/M_j) = (p_c - p_0)h_s$$

Βασιζόμενος στην κατανομή της ταχύτητας κατά Mayer και στη θεωρία του πάχους οριακού στρώματος διδιάστατης τυρβώδους ροής, κατέληξε στο λόγο των ορμών της ροής για τις περιοχές e και o του σχ. 10

$$M_e/M_j = 2.75 (lt)^{-0.45} = 2.75 ((h_b - h_s)/(t \sin \theta))^{-0.45}$$

Η ισχύς ανυψώσεως ανά μονάδα επιφάνειας προκύπτει:

$$N[\rho_a/(p_c - p_0)^3]^{0.5} = (2^{0.5} t/h_s)[1 + \{h_s/[2t \cos \theta + 2.75 ((h_b - h_s)/t \sin \theta)^{-0.45}]\}]^{0.5} \\ \times \{h_s/[2t \cos \theta + 2.75 ((h_b - h_s)/t \sin \theta)^{-0.45}]\}^{0.5}$$

## 2.2 Πειραματικές προσεγγίσεις του φαινομένου

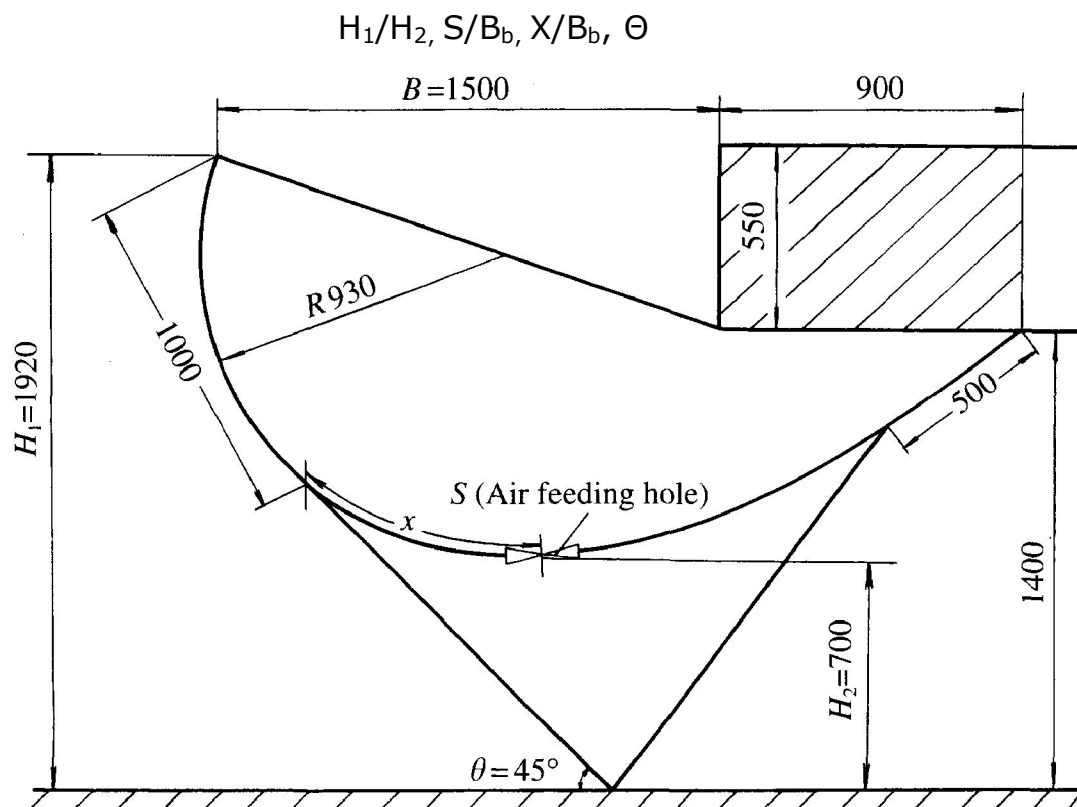
Οι θεωρίες που παρουσιάστηκαν για την πρόβλεψη της στατικής συμπεριφοράς ενός αερόστρωμνου πάνω από το έδαφος έχουν σοβαρά μειονεκτήματα, ορισμένα από τα οποία είναι τα ακόλουθα:

A) Η θεωρία που βασίζεται σε λεπτά ακροφύσια είναι ακριβής για μεγάλα ύψη αιωρήσεως. Σε αντίστοιχα μικρά, υπάρχει ανομοιομορφία στη ροή λόγω της μικρής απόστασης με το έδαφος.

B) Σε καμία από τις ανωτέρω μεθόδους ο αέρας δεν θεωρήθηκε ως πραγματικό (συνεκτικό) ρευστό, λόγω της δυσκολίας πρόβλεψης της τυρβώδους συμπεριφοράς της ροής.

Για τους ανωτέρω λόγους, θεωρήθηκε απαραίτητη η πειραματική προσέγγιση της συμπεριφοράς του αερόστρωμνου και εταιρείες όπως η MARIC κατασκεύασαν πρότυπα μοντέλα.

Επομένως, για μία φούστα τύπου bag and finger μελετήθηκαν οι διαστάσεις που εμφανίζονται και στο σχήμα 11:



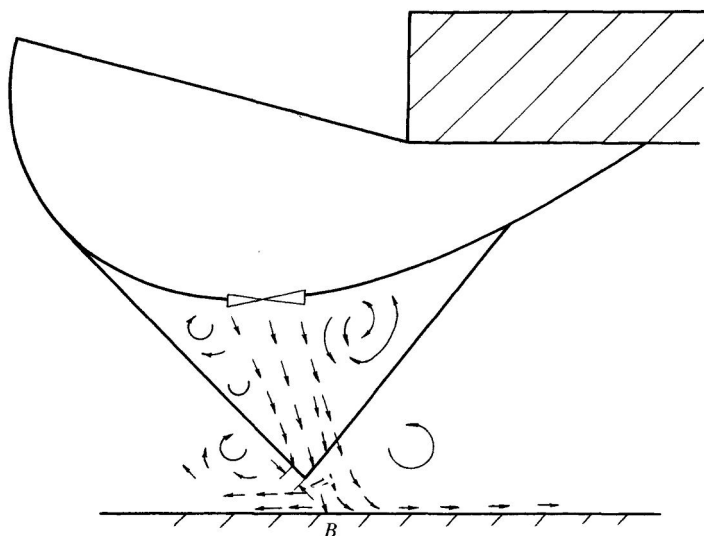
Σχήμα 11: Διαστάσεις φούστας τύπου Bag-finger

Καταρχάς, η επίδραση του λόγου  $H_1/H_2$  στην στατική συμπεριφορά του μοντέλου ήταν ιδιαίτερα μικρή, άρα θεωρήθηκε αμελητέα. Λόγω σφαλμάτων απλοποίησης, σημειώνεται ότι οι τιμές που προέκυψαν θεωρήθηκε ορθό να αξιολογηθούν μόνο ποιοτικά και όχι ποσοτικά.

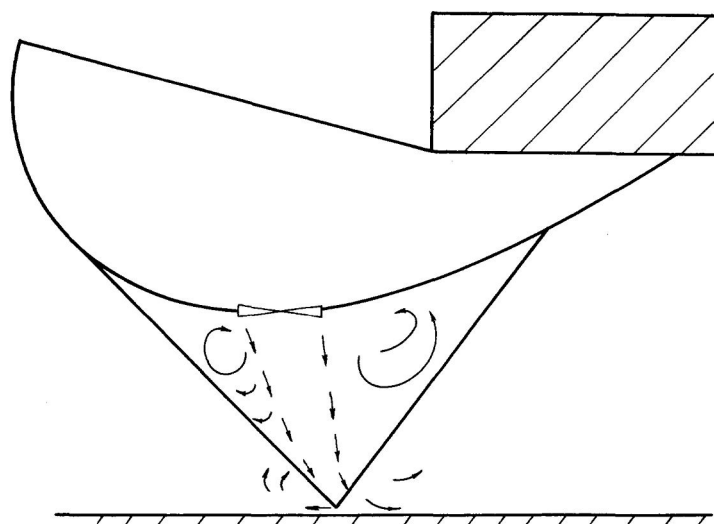
-Ανάλυση των γραμμών ροής

Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται το διάγραμμα των γραμμών ροής για διαφορετικά ύψη αιωρήσεως. Στο σχήμα 12 το σημείο B είναι σημείο αποχωρισμού της ροής. Βρίσκεται κοντά στο έδαφος

και η θέση του (μέσα ή έξω από τη γωνία της φούστας) εξαρτάται από την πίεση  $P_c$  και την γεωμετρία του στοιχείου.



Σχήμα 12 : Ροή αέρα σε μεγάλο διάκενο

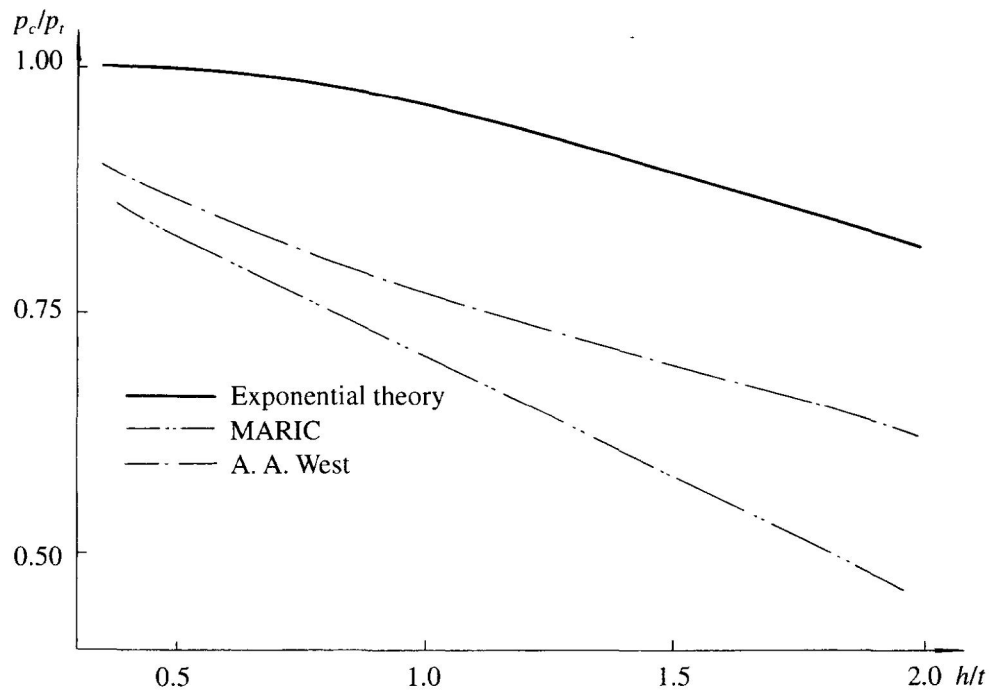


Σχήμα 13 : Ροή αέρα σε μικρό διάκενο

Επίσης, παρατηρούμε ότι η θέση των οπών για τα ακροφύσια επηρεάζει τη ροή, επομένως και τη συμπεριφορά/απόδοσή της. Γι' αυτό το λόγο, υφίσταται η ανάγκη εύρεσης του βέλτιστου λόγου  $X/B$ . Πειραματικά, βρέθηκε ότι η βέλτιστη περιοχή τιμών είναι  $(X/B)_{opt}=0,48-0,54$ . Στο κάτω όριο, παρατηρείται αύξηση των εσωτερικών απωλειών της ροής, λόγω φαινομένων αναστροφής της.

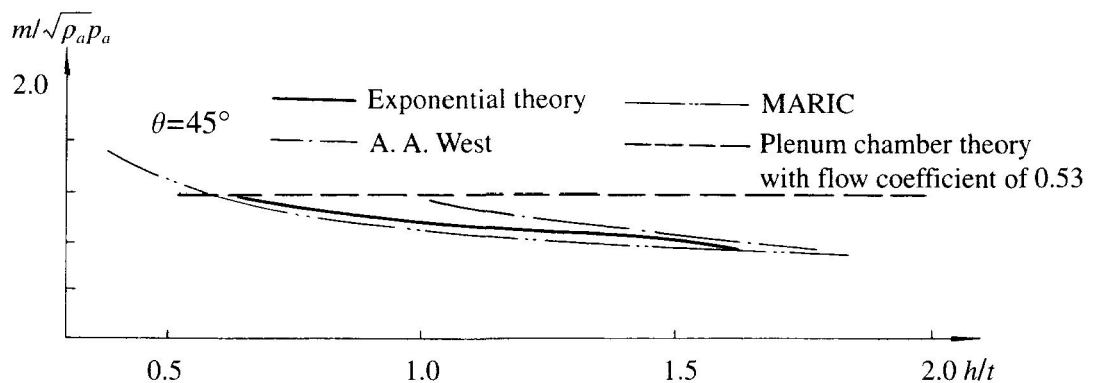
Συγκρίνοντας τις μεθόδους προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

A) Ο λόγος  $P_c/P_t$  για διάφορα ύψη αιωρήσεως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 14 : Σύγκριση των αποτελεσμάτων των θεωριών (1)

B) Ο συντελεστής ροής για μικρά σχετικά ύψη αιωρήσεως ( $h/t$ ) είναι περίπου ίδιος για όλες τις θεωρίες (Σχ. 15)



Σχήμα 15: Σύγκριση των θεωριών (2)

Γ) Το υλικό κατασκευής της φούστας έχει μικρή επίδραση στην στατική συμπεριφορά των αερόστρωμνων.

Δ) Ο αριθμός  $Re$  επηρεάζει ιδιαίτερα τη συμπεριφορά της φούστας. Από τη μελέτη μιας μικρής πειραματικής κατασκευής

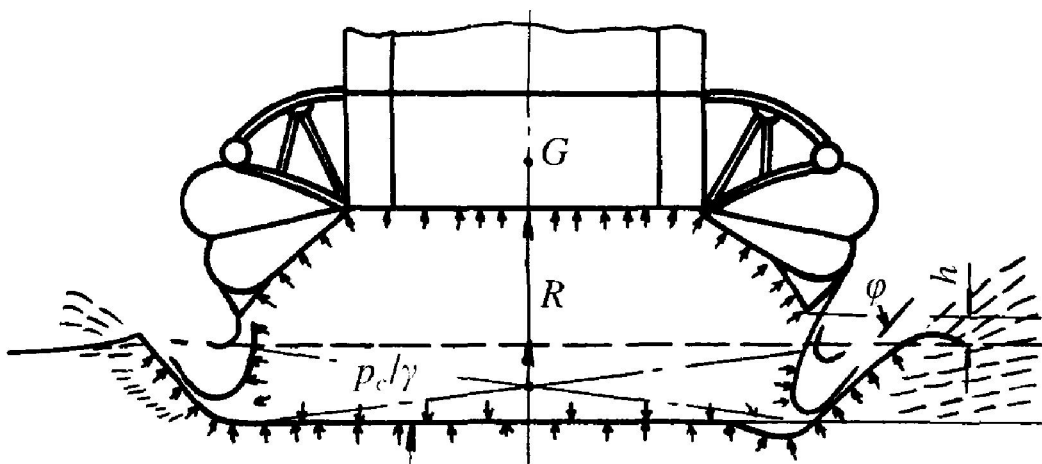
όπου  $Re = 1,1 - 2,4 \times 10^4$  διαπιστώθηκαν ιδιαίτερα σημαντικές αποκλίσεις σε μεγέθη όπως  $P_c$ ,  $m$ ,  $P_t$ . Αυτό φαίνεται λογικό, γιατί για να ληφθεί υπ' όψιν η τυρβώδης ροή του αέρα πρέπει  $Re > 10^5$ . Για την ελαχιστοποίηση τέτοιων λαθών μπορούμε να αυξήσουμε τις στροφές του ανεμιστήρα, οπότε θα αυξηθεί το διάκενο αιωρήσεως και η ταχύτητα της ροής.

### 2.3 Στατική ισορροπία ACV πάνω στην επιφάνεια της θάλασσας.

Θεωρώντας ένα ACV που αιωρείται πάνω στην επιφάνεια του νερού (σχ. 16) αντιλαμβανόμαστε ότι, το ύψος αιωρήσεως ουσιαστικά είναι η απόσταση μεταξύ του κάτω άκρου της φούστας και της επιφάνειας του νερού σε ηρεμία. Επίσης η άνωση του σκάφους θα είναι:

$$W = p_c S_c$$

$$S_c = l_c B_c$$



Σχήμα 16: Στατική αιώρηση αερόστρωμνου πάνω σε νερό

Στη συνέχεια, αξίζει να σημειωθεί ο μηχανισμός σύμφωνα με τον οποίο το σκάφος από θέση εκτοπίσματος περνά σε θέση αιωρήσεως πάνω από το νερό.

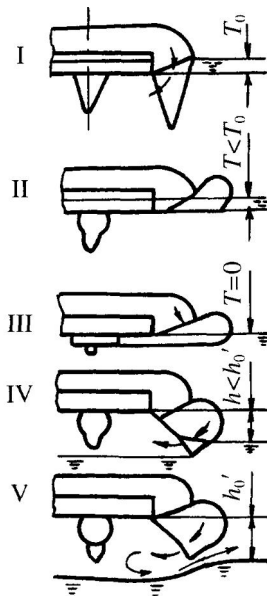
Θέση I. Το σκάφος επιπλέει στο νερό σε βύθισμα  $T_0$ .

Θέση II. Οι ανεμιστήρες ανυψώσεως λειτουργούν σε χαμηλές στροφές, το σκάφος ισορροπεί σε  $T < T_0$  στηριζόμενο κατά ένα μέρος στην δύναμη ανυψώσεως λόγω του στρώματος αέρα.

Θέση III. Αυξάνεται η ταχύτητα των ανεμιστήρων, το σκάφος περνά σε  $T=0$ , οπότε το βάρος του στηρίζεται εξ ολοκλήρου στο στρώμα αέρα.

Θέση IV. Περαιτέρω αύξηση των στροφών των ανεμιστήρων, θα κρατήσει σταθερή την πίεση  $P_c$ , ενώ αυξάνεται η παροχή της ροής του αέρα και η φούστα ανυψώνεται. Εμφανίζεται διάκενο  $h$  μικρότερο από το υπολογισθέν ύψος αιωρήσεως  $h_0'$ .

Θέση V. Το σκάφος ισορροπεί με ύψος αιωρήσεως  $h_0'$  και έχουμε σημαντικό μέρος του αέρα που διαφεύγει από την φούστα.



Σχήμα 17 : Φάσεις ισορροπίας αερόστρωμνου

## 2.4 Η μέθοδος του συντελεστή ροής

Μελετώντας προσεκτικά τη σχεδίαση της φούστας ενός ACV, παρατηρούμε ότι υψηλότερη πίεση στη φούστα επιτυγχάνεται από τη χρήση μεγαλύτερου αριθμού μικρών οπών παροχής αέρα προς το θάλαμο.



Αυτό το σχέδιο βελτιώνει την αντοχή της φούστας μειώνοντας τη συγκέντρωση τάσεων και επομένως την πιθανότητα να αστοχήσει η φούστα λόγω κοπώσεως κατά τη λειτουργία.

Επιπλέον, η συμπεριφορά κατά την απογείωση και η ικανότητα εκκαθάρισης εμποδίων βελτιώνεται, επομένως μπορούμε εύκολα να συμπεράνουμε ότι η χρήση σύνθετων μαθηματικών τύπων για τον υπολογισμό της ροής του αέρα κατά το στάδιο της απογείωσης δεν είναι πλέον απαραίτητη. Έτσι, χρησιμοποιούμε τον συντελεστή ροής ως παράγοντα πρόβλεψης της στατικής απόδοσης ενός ACV.

Η σχέση για το  $Q$  μπορεί να γραφτεί:

$$Q = \overline{Q} S_c \sqrt{(2p_c/\rho_a)}$$

Γενικά, παίρνουμε τις τιμές του  $\overline{Q}$  :

$$\overline{Q} = 0,015 - 0,050 \text{ για ACV}$$

Η τιμή του  $Q$  εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες απόδοσης:

1. Αντίσταση του σκάφους σε ήρεμο νερό
2. Δυνατότητα απογείωσης
3. Ικανότητα πλεύσης
4. Διαμήκης/εγκάρσια ευστάθεια του σκάφους
5. Αντίσταση σε φαινόμενα plough-in

Το ανωτέρω εύρος τιμών είναι μάλλον μεγάλο κατά τη σχεδίαση ενός μεγάλου ACV και έτσι είναι καλύτερα ο σχεδιαστής να ξεκινήσει από την χαμηλότερη τιμή (κατάλληλη για την πλεύση σε ήρεμο νερό) και στη συνέχεια να αξιολογήσει την πρόσθετη/επιπλέον ροή η οποία απαιτείται για τα ανωτέρω στοιχεία 2 έως 5.

Σαν εναλλακτική λύση, ιδιαίτερα για τα αμφίβια ACVs, χρησιμοποιείται συχνά το διάκενο/ελευθερία της φούστας ενός σκάφους που αιωρείται σε μια άκαμπτη επιφάνεια ως παράγοντας για να χαρακτηριστεί η δυνατότητα αιώρησης του και συμπερασματικά για τη σχεδίαση του συστήματος των ανεμιστήρων, λόγω της ευκολίας μέτρησής του.

Χαρακτηριστικά, για τα μικρά αμφίβια σκάφη χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση :

$$Q \cong 2.12hL\sqrt{p_c}$$

Αυτό αφορά την απαιτούμενη ροή στην περιοχή διαφυγής και οδηγεί σε ένα μικρό διάκενο αέρα.

## **2.5 Το Φαινόμενο Άντλησης Κυμάτων (Wave Pumping Effect)**

Εδώ εισάγουμε μια έννοια, την άντληση κυμάτων, η οποία εξετάζει την ακραία συμπεριφορά αιώρησης του σκάφους σε κυματισμό. Θεωρούμε ένα αερόστρωμνο το οποίο βρίσκεται πάνω σε ημιτονοειδές κύμα. Υποθέτουμε ότι το ποσοστό εισροής αέρα στο θάλαμο του σκάφους παραμένει σταθερό, ίσο με το αντίστοιχο όταν το σκάφος αιωρείται στατικά. Κατά συνέπεια η ροή του αέρα προς το θάλαμο θα αλλάζει ανάλογα με τον όγκο που καταλαμβάνεται από το κύμα το οποίο περνά από το σκάφος στη μονάδα του χρόνου.

Επομένως, η πίεση του θαλάμου θα αυξομειώνεται λόγω της διακύμανσης στην εκροή του αέρα από το θάλαμο (με την προϋπόθεση ότι ο αέρας έχει σταθερό ποσοστό εισροής και είναι ασυμπίεστος). Το φαινόμενο που παρατηρείται από την διακύμανση της πίεσης του θαλάμου ονομάζεται "wave pumping".

Στην πραγματικότητα μπορούμε να υποθέσουμε ότι ένα ACV μπορεί να επιχειρήσει με έναν από τους τρεις τρόπους που περιγράφονται παρακάτω:

### 2.5.1 Πρώτος τρόπος λειτουργίας

Ο πρώτος τρόπος λειτουργίας προϋποθέτει ότι η πίεση του αέρα και η κάθετη θέση του υγρού καταστρώματος παραμένουν σταθερά, επομένως και η κάθετη επιτάχυνση θα είναι σταθερή. Αυτή είναι και η ιδανική κατάσταση λειτουργίας του σκάφους για τον σχεδιαστή. Εντούτοις, ο χειριστής πρέπει να ρυθμίσει την ισχύ των ανεμιστήρων και το ποσοστό εισροής του αέρα για να κρατήσει την πίεση του θαλάμου σταθερή. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας απαιτεί και το μεγαλύτερο όγκο του αέρα. Θεωρούμε ότι το ACV κινείται πάνω σε απότομα κύματα μικρού ύψους. Καθώς οι κορυφές των κυμάτων περνούν η πίεση του θαλάμου αυξάνεται, και όταν μια κοιλία κύματος περνά, αυξάνεται το διάκενο αέρα κάτω από τη φούστα και η πίεση του θαλάμου μειώνεται. Το αποτέλεσμα είναι μια συνεχής και γρήγορη ταλάντωση στους ανεμιστήρες η οποία γίνεται αισθητή στους χειριστές με τη μορφή κραδασμών. Εάν η ισχύς των ανεμιστήρων δεν αυξηθεί, η αντίσταση της φούστας θα αυξηθεί, η ταχύτητα του σκάφους θα μειωθεί και αρκετά συχνά το σκάφος θα πλέει με έμπλωρη διαγωγή η οποία με τη σειρά της μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενο plough-in.

Σε μικρές καταστάσεις θαλάσσης μπορούν να προκληθούν μικρές δονήσεις, οι οποίες είναι παρόμοιες με την οδήγηση ενός αυτοκινήτου σε πέτρινο δρόμο (cobblestone), ως εκ τούτου το φαινόμενο καλείται "cobblestoning". Συνήθως αυτό εμφανίζεται σε σκάφη που έχουν μεγάλο ποσοστό ροής αέρα.

Οι μελετητές καταφεύγουν συνήθως σε απλούς τύπους για τον υπολογισμό της πρόσθετης ισχύος των ανεμιστήρων για την αντιμετώπιση του ανωτέρω φαινομένου, όπως ο παρακάτω:

$$(dV/dt)_{\max} = -B_c H v \sin \alpha_r = -B_c H v \sin \alpha_r$$

όπου:

$dV/dt$  η μεταβολή του όγκου του ύδατος μεταξύ πλήρης και  
 πρύμνης στη μονάδα του χρόνου

$v$  η σχετική ταχύτητα του σκάφους ως προς τα κύματα

$H$  το ύψος των κυμάτων

$B_c$  το πλάτος του θαλάμου

$a_r$  ο μέγιστος στιγμιαίος ρυθμός άντλησης του κυματισμού (wave  
 rumping)

### **2.5.2 Δεύτερος τρόπος λειτουργίας - σταθερός όγκος μαξιλαριών**

Εάν το ποσοστό ροής αέρα και ο όγκος του θαλάμου είναι σταθερά,  
 κρατώντας την ισχύ των ανεμιστήρων στο ελάχιστο, η άντληση των  
 κυμάτων θα προκαλέσει κάθετη επιτάχυνση στο σκάφος. Κατά  
 συνέπεια η μέγιστη κάθετη επιτάχυνση που μπορεί να παρατηρηθεί  
 υπολογίζεται ως εξής:

$$(d_z^2/d_r^2)_{\max} = [\pi v^2] / [10 \times l_c]$$

Αυτός ο υπολογισμός είναι κατά προσέγγιση, επειδή έχουν γίνει  
 αρκετές υποθέσεις. Ειδικότερα, δεν έχουν ληφθεί υπόψη οι κινήσεις  
 ανύψωσης και διατοιχισμού του σκάφους στα κύματα και της  
 διαρροής του αέρα από τις πλευρές του θαλάμου, επομένως ο  
 υπολογισμός είναι πολύ απλός και δεν καταδεικνύει την ποιότητα  
 πλεύσης του σκάφους. Εντούτοις, δείχνει την επιτάχυνση που θα  
 εμφανιστεί εάν το σκάφος ακολουθήσει το προφίλ του κύματος,  
 όπου δεν υφίσταται επιπλέον ισχύς στους ανεμιστήρες ή εισροή αέρα  
 στο θάλαμο. Για να μειωθεί αυτό, είναι απαραίτητο η φούστα να  
 αποκριθεί στα κύματα, κάτι που θα επιτρέψει στη συνέχεια την  
 εξάντληση του αέρα από το θάλαμο. Είναι λοιπόν ιδιαίτερα κρίσιμο  
 για τους σχεδιαστές να υπολογίσουν το απόθεμα της ισχύος των  
 ανεμιστήρων που απαιτείται για την εξάλειψη των ακραίων κινήσεων  
 ενός σκάφους που επιχειρεί σε θάλασσες με μεγάλο ύψος κύματος.

### **2.5.3 Τρίτος τρόπος λειτουργίας - συνδυασμός πρώτου και δευτέρου τρόπου**

Η πίεση, ο όγκος του θαλάμου, και το ύψος του υγρού καταστρώματος από την επιφάνεια του νερού αλλάζουν ταυτόχρονα, δηλαδή έχουμε συνδυασμό και των δύο προηγούμενων κινήσεων. Στην πράξη, αυτός είναι ο τρόπος με τον οποίο τα ACVs λειτουργούν.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3- Αντίσταση ACV

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα ACVs και τα SES δημιουργούν δυνάμεις έλξης (αντίστασης) καθώς κινούνται πάνω από την επιφάνεια του νερού. Οι μελετητές έχουν αναπτύξει διάφορες μεθόδους για την πρόβλεψη των δυνάμεων έλξης ενός ACV, η μεθοδολογία μίας εξ αυτών περιγράφεται ως κάτωθι:

Καταρχήν λαμβάνουμε τη συνολική αντίσταση από δοκιμές ενός προτύπου (μοντέλου) σε μια δεξαμενή. Υπολογίζουμε μερικές άλλες κύριες συνιστώσες της αντίστασης με τη βοήθεια αξιόπιστων και πρακτικών μεθόδων, π.χ. με τη βοήθεια της αναλογικής θεωρίας του Reynolds για την πρόβλεψη της αεροδυναμικής αντίστασης σε σήραγγες αέρα. Στη συνέχεια η υπόλοιπη αντίσταση μπορεί να καθοριστεί με την αφαίρεση των επιμέρους συνιστωσών από τη συνολική αντίσταση που υπολογίσθηκε με τις δοκιμές του μοντέλου. Γενικά, η συνολική αντίσταση ενός αερόστρωμνου σκάφους μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$R_{acv} = R_w + R_a + R_m + R_{sk} + R_{a''}$$

όπου:

$R_{acv}$  : η συνολική αντίσταση

$R_w$  : η αντίσταση κυματισμού λόγω του θαλάμου αέρα

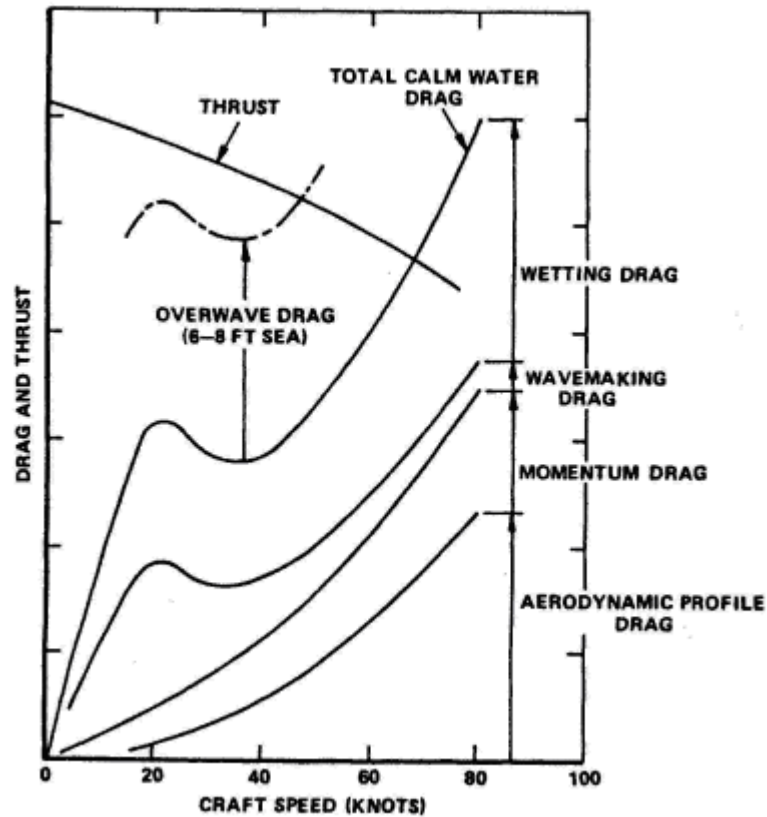
$R_a$  : η αεροδυναμική αντίσταση

$R_m$  : η αεροδυναμική αντίσταση λόγω μεταβολής της ορμής

$R_{sk}$  : η αντίσταση λόγω της φούστας

$R_{a''}$  : η αντίσταση λόγω της διαφοράς στη διαρροή του αέρα από το πλωριό και το πρυμνιό μέρος της φούστας

Παρακάτω φαίνεται ένα ποσοτικό διάγραμμα των συνιστωσών της αντίστασης ενός ACV .



Σχήμα 18: Ανάλυση της αντίστασης αερόστρωμνου σε συνιστώσες

### 3.1 Η αντίσταση κυματισμού λόγω του θαλάμου αέρα ( $R_w$ )

Η αντίσταση κυματισμού που παράγεται από μια κατανομή πίεσης είναι ένα κλασικό ζήτημα της υδροδυναμικής, από το γεγονός ότι η γάστρα ενός σκάφους αντιπροσωπεύεται γενικά από μια επιφάνεια η οποία έχει την ιδιότητα να δημιουργεί θετική πίεση στην πλώρη και αρνητική στην πρύμνη. Το ισοδύναμο πρόβλημα για ένα hovercraft εξετάστηκε από τους Newman και Poole, οι οποίοι παρήγαγαν μια μέθοδο υπολογισμού για την αντίσταση λόγω κυματισμού. Απλοποίησαν το προσκέφαλο αέρα σε μια ισοδύναμη ορθογώνια

επιφάνεια με μια ομοιόμορφη κατανομή πίεσης και υπολόγισαν την αντίσταση κυματισμού με τον κάτωθι τύπο:

$$R_w = C_w \left[ \frac{P_c^2 \cdot B_c}{(\rho_w \cdot g)} \right]$$

όπου:

$$C_w = f(F_r \text{ and } l_c/B_c)$$

και  $R_w$  είναι η αντίσταση κυματισμού,  $P_c$  η πίεση του θαλάμου,  $B_c$  το πλάτος του θαλάμου,  $L_c$  το μήκος του θαλάμου,  $\rho_w$  η πυκνότητα του νερού,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας και  $C_w$  ο συντελεστής αντίστασης κυματισμού ο οποίος εξαρτάται από τον αριθμό  $Fr$  και το λόγο του μήκους προς το πλάτος του θαλάμου.

Παρατηρούμε ότι η αντίσταση λόγω κυματισμού είναι ανάλογη του τετραγώνου της πίεσης  $P_c$  και του πλάτους του θαλάμου. Έτσι, η αντίσταση μπορεί να μειωθεί αυξάνοντας το μήκος του σκάφους, όπως επιτυχημένα έγινε στην περίπτωση της επιμήκυνσης του SR-N6 από τους Βρετανούς. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι σημαντικό ρόλο κατέχει και ο λόγος του μήκους του θαλάμου προς το πλάτος του ( $L_c/B_c$ ).

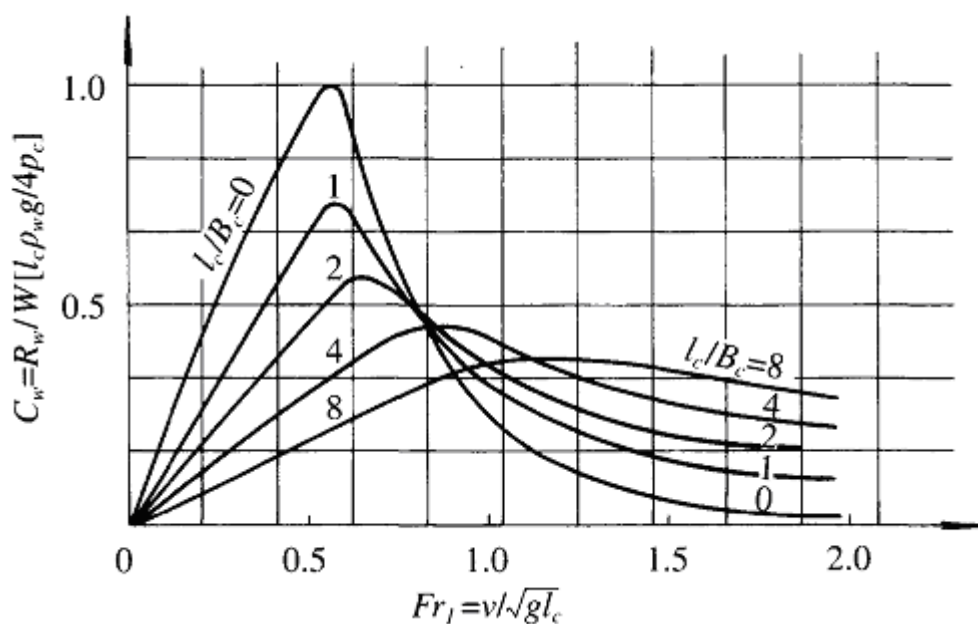
Πέραν των ανωτέρω κατά καιρούς έχουν χρησιμοποιηθεί διάφοροι τύποι για τον υπολογισμό της αντίστασης κυματισμού, όπως ο παρακάτω:

$$R_w = C_w(4p_c W)/(\rho_w g L_c)$$

Λόγω της ευκολίας στην εφαρμογή της ανωτέρω μεθόδου, ο οργανισμός MARIC χρησιμοποίησε αρκετά συχνά τους τύπους των Newman και Poole διαπιστώνοντας ότι ο κυματισμός που δημιουργείται στην πλώρη αλληλεπιδρά με τον αντίστοιχο της πρύμνης. Το φαινόμενο αυτό είναι αρκετά εντονότερο όσο μειώνεται



ο λόγος του μήκους προς το πλάτος του θαλάμου και προκαλεί μία σειρά από κορυφές και κοιλίες στο διάγραμμα της αντίστασης όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



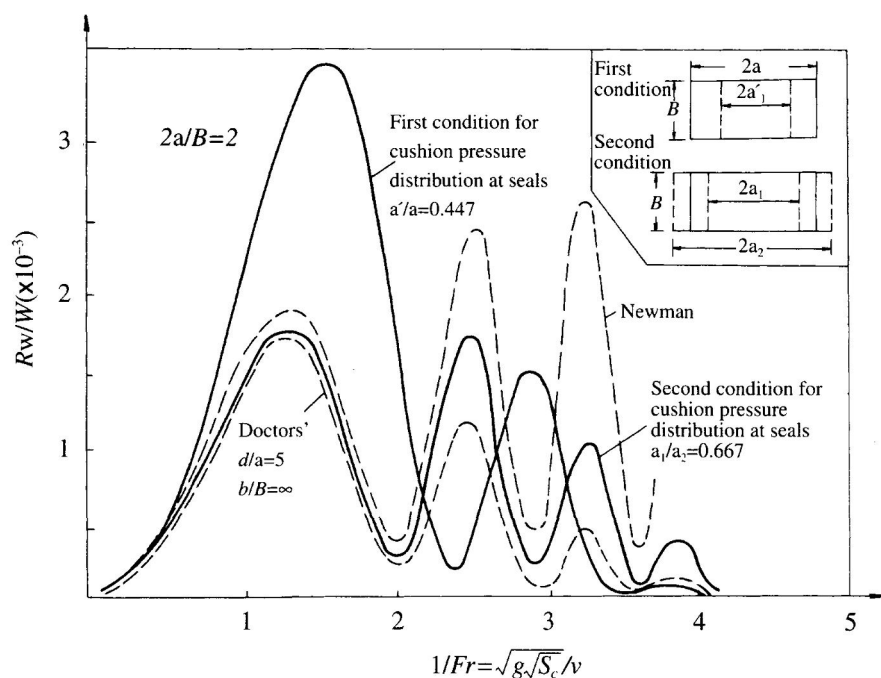
Σχήμα 19 : Διάγραμμα του συντελεστή αντίστασης κυματισμού συναρτήσει του αριθμού  $Fr$ .

Οι πειραματικές εφαρμογές της θεωρίας απέδειξαν ότι υπάρχει συμφωνία στην περιοχή των υψηλών ταχυτήτων, δεν συμβαίνει το ίδιο όμως στις χαμηλές ταχύτητες. Αυτή η διαφορά εξηγείται από το γεγονός ότι σε μικρούς αριθμούς  $Fr$  κάνουν την εμφάνισή τους μη γραμμικά φαινόμενα και από το ότι στην πραγματικότητα η κατανομή της πίεσης με τη μορφή που θεωρήθηκε απλά δεν είναι δυνατό να υπάρξει και αυτό γιατί δεν υφίσταται απότομη ασυνεχής αλλαγή της πίεσης στα άκρα του σκάφους όπως περιγράφεται στη θεωρία, αλλά η πίεση μειώνεται σταδιακά (όπως π.χ. η συνάρτηση της υπερβολικής εφαπτομένης) μέχρι την ατμοσφαιρική. Ο Doctors και ο Tatinclaux πραγματοποίησαν μελέτες της κατανομής πίεσης με διάφορους κανόνες για να υπερνικηθεί αυτό το πρόβλημα. Ο Doctors υπέθεσε ότι η κατανομή της πίεσης διαμορφώνει μια υπερβολική εφαπτομένη, ενώ ο Tatinclaux υπέθεσε μια γραμμική κατανομή. Τα αποτελέσματα

κατέδειξαν ότι και οι δύο μέθοδοι συμφωνούν αρκετά καλά με τα αποτελέσματα υπολογισμού με τη μέθοδο Newman στη περιοχή υψηλών ταχυτήτων και δεν παρήγαγαν αιχμηρές κορυφές και κοιλίες στην καμπύλη αντίστασης στην περιοχή χαμηλών ταχυτήτων.

Επιπλέον, ο Tatinclaux μελέτησε δύο περαιτέρω συνδυασμούς κατανομής πίεσης, δηλ. γραμμική κατανομή στην πλώρη και στην πρύμνη και ξαφνική αλλαγή σε δύο πλευρές (παρόμοιες με το SES), καθώς επίσης και γραμμική κατανομή σε δύο πλευρές και ξαφνική αλλαγή στην πλώρη και στην πρύμνη.

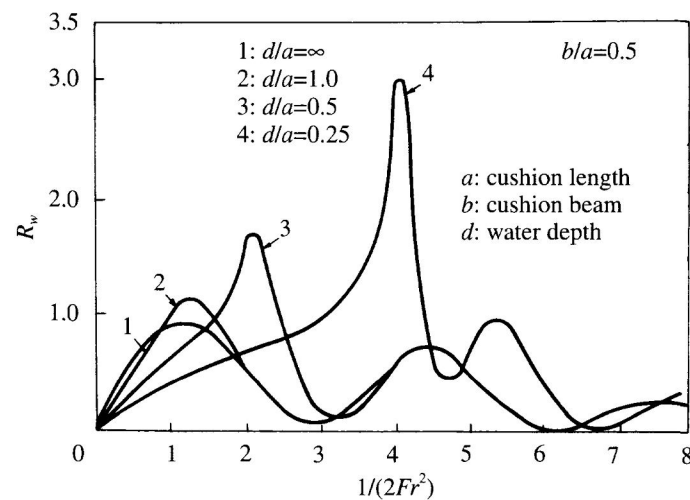
Αποδεικνύεται ότι η πρώτη περίπτωση επηρέασε την αντίσταση κυματισμού εντυπωσιακά, ενώ η τελευταία όχι. Για αυτόν τον λόγο είναι σαφές ότι η αντίσταση κυματισμού παράγεται κυρίως από την πλώρη και την πρύμνη (φαινόμενο ανάλογο με τη δημιουργία αντίστοιχων κυματισμών σε ένα συμβατικό σκάφος).



Σχήμα 20: Σύγκριση της θεωρητικής επαγόμενης αντίστασης κυματισμού με τα πειραματικά αποτελέσματα.

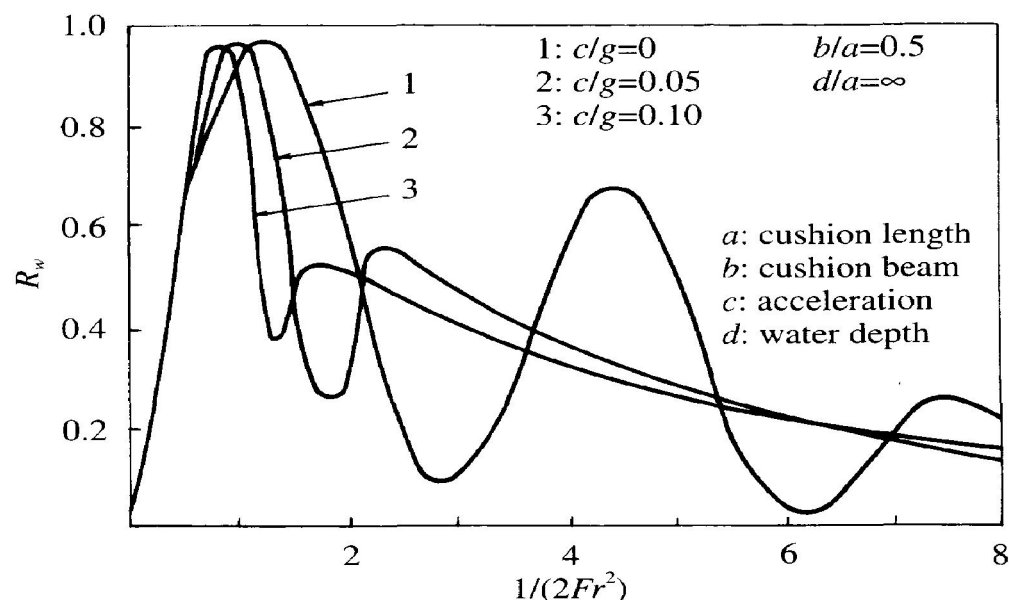
Αξίζει να σημειωθεί ότι θεωρητικοί υπολογισμοί έδειξαν ότι ενδεχόμενη αύξηση του βάθους του νερού συνεπάγεται και μείωση στην αντίσταση κυματισμού. Αυτός είναι και ο λόγος που σε σκάφη

οριακής σχεδίασης οι χειριστές προτιμούν ρηχά νερά για να περνούν την περιοχή hump speed.



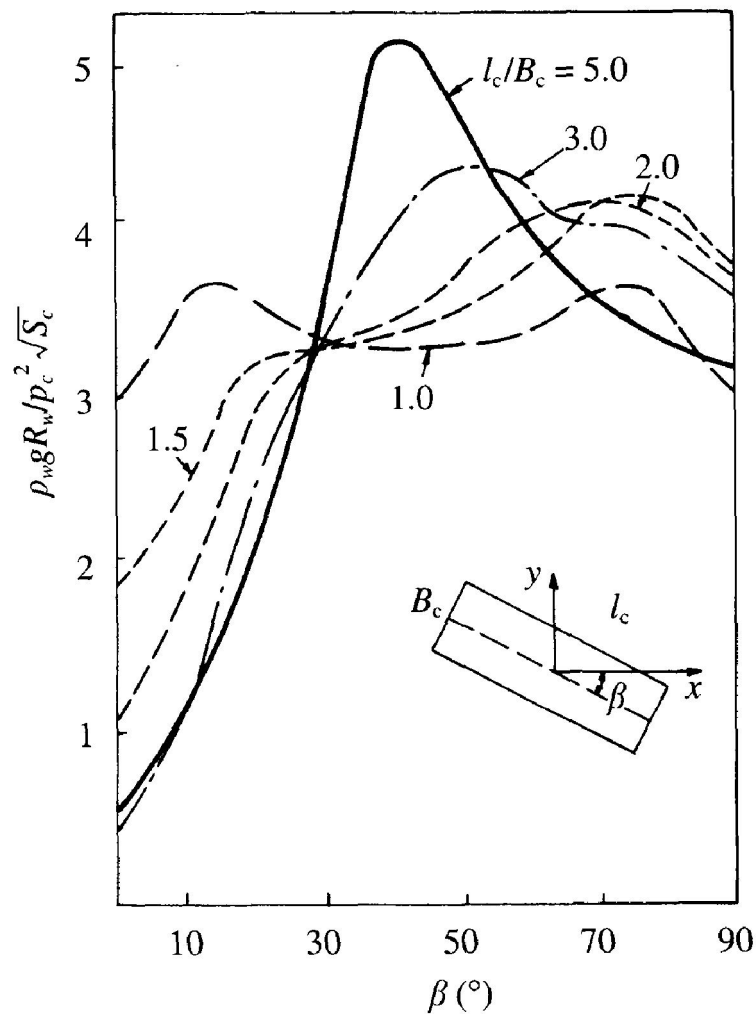
Σχήμα 21: Επίδραση του βάθους του νερού στην επαγόμενη αντίσταση κυματισμού

Επίσης ο Tatinclaux απέδειξε ότι εφόσον το σκάφος περνά από την ανωτέρω περιοχή με σταθερή επιτάχυνση και σε μικρό βάθος, οι απότομες κορυφές και κοιλιές στο διάγραμμα της αντίστασης κυματισμού θα αμβλύνονταν. Ένα τυπικό διάγραμμα φαίνεται παρακάτω:



Σχήμα 22: Σχέση της επαγόμενης αντίστασης κυματισμού με την επιτάχυνση του σκάφους

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίπτωση ενός ACV που ταξιδεύει με πλευρικό άνεμο όπου θα έχει πιθανώς δυσκολία στην αύξηση της ταχύτητας πάνω από τη hump speed και στον εν γένει χειρισμό του σκάφους. Οι χειριστές σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να φέρουν το σκάφος παράλληλα με τον άνεμο, να υπερβούν τη hump speed και εν συνεχεία να φέρουν το σκάφος στην επιθυμητή πορεία. Η αντίσταση κυματισμού ενός αερόστρωμνου που κινείται σε διάφορες γωνίες ως προς το γαω φαίνεται στο κάτωθι σχήμα:



Σχήμα 23: Μεταβολή της αντίστασης κυματισμού για διάφορες γωνίες γαω.

Δεν είναι δύσκολο να παρατηρήσει κανείς ότι στην ανωτέρω περίπτωση η αντίσταση κυματισμού είναι αρκετές φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη όταν το σκάφος ταξιδεύει σε ευθεία πορεία.

### 3.2 Αεροδυναμική αντίσταση λόγω μορφής

Η αεροδυναμική αντίσταση λόγω μορφής ενός ACV δίνεται κατ' αναλογία με τα συμβατικά σκάφη από τον κάτωθι τύπο:

$$R_a = C_a \frac{\rho_a}{2} \cdot S_a v^2$$

Όπου:  $R_a$  η αεροδυναμική αντίσταση λόγω μορφής

$C_a$  ο συντελεστής της αεροδυναμικής αντίστασης

$S_a$  η κάθετα προβαλλόμενη επιφάνεια του σκάφους που βρίσκεται πάνω από την ίσαλο

$V$  η ταχύτητα του σκάφους

Ο συντελεστής της αεροδυναμικής αντίστασης λόγω μορφής εξαρτάται άμεσα από τη σχεδίαση του σκάφους. Οι τιμές που συνήθως λαμβάνει είναι από 0.4-0.6 με ακραίες τιμές 0.3 για πολύ καλές σχεδιάσεις και 0.75 για μικρής ποιότητας σχεδιάσεις. Ο υπολογισμός του γίνεται με τη βοήθεια αεροδυναμικών τούνελ. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται κάποια παραδείγματα σκαφών και οι αντίστοιχοι συντελεστές τους:

Item	Craft name	Craft type	$C_a$
1	SR.N2	ACV	0.25
2	SR.N4	ACV	0.30
3	SR.N5	ACV	0.38
4	SKMR.1	ACV	0.398
5	SK-5	ACV	0.28
6	JEFF(B)	ACV	0.495
7	<i>Voyageur</i>	ACV	0.75
8	N500	ACV	0.30

*Πίνακας 1: Αεροδυναμικοί συντελεστές αντίστασης λόγω μορφής διαφόρων σκαφών*

Η αεροδυναμική αντίσταση λόγω μορφής κατέχει σημαντικό ποσοστό της συνολικής αντίστασης καθόσον τα αερόστρωμα σκάφη είναι σχεδιασμένα να επιχειρούν σε μεγάλες ταχύτητες. Για παράδειγμα, για το 711-A που κατασκευάστηκε στην Κίνα, η αεροδυναμική αντίσταση λόγω μορφής κατέχει το 30% της συνολικής αντίστασης στην ταχύτητα των 85 km/h.

### 3.3 Η αεροδυναμική αντίσταση λόγω μεταβολής της ορμής

Λόγω της συνεχούς διαρροής του αέρα από τη φούστα προς το περιβάλλον, πρέπει απαραίτητα αυτός να αντικαθίσταται από ίσης μάζας αέρα για να μπορέσει να διατηρηθεί η πίεση στο θάλαμο. Κατά συνέπεια, η μάζα του αέρα που εγκλωβίζεται στο "μαξιλάρι" θα επιταχυνθεί στην ταχύτητα του σκάφους. Η αντίσταση λόγω της μεταβολής της ορμής σε αυτή τη μάζα του αέρα καλείται αεροδυναμική αντίσταση ορμής και υπολογίζεται από τον τύπο:

$$R_m = Q\rho_a v$$

Όπου:

$R_m$  η αεροδυναμική αντίσταση λόγω μεταβολής της ορμής

$Q$  η παροχή του αέρα

$\rho_a$  η πυκνότητα του αέρα

$v$  η ταχύτητα του σκάφους

### 3.4 Αντίσταση λόγω μεταβολής της ορμής του αέρα (από τη διαρροή του) από τα πλωραία και πρυμναία διάκενα της φούστας ( $R_{a''}$ )

Σύμφωνα με τη θεωρία της ορμής, αυτή η αντίσταση μπορεί να γραφεί ως:

$$R_{a''} = \rho_a (\phi h_1 B_c P - \phi h_2 B_c P) P \approx W a''$$

Όπου:

$\phi$  συντελεστής διαρροής αέρα (συνήθως 0.5-0.6)

$h_1$  το πλωραίο διάκενο της φούστας

$h_2$  το πρυμναίο διάκενο της φούστας

$$\rho = \sqrt{2\rho_c/\rho_a}$$

$\alpha''$  η γωνία μεταξύ της ισάλου και της νοητής ευθείας που ενώνει τα κάτω άκρα του πλωραίου και πρυμναίου τμήματος της φούστας

Η αντίσταση  $R_{a''}$  εξαρτάται από το λόγο του μήκους προς το πλάτος του σκάφους, από τον αριθμό Fr, από το λόγο πίεσης προς το μήκος του θαλάμου αέρα (παράγοντες που επηρεάζουν το προφίλ της ισάλου), τη θέση του κέντρου βάρους (που επηρεάζει το trim του σκάφους), και από το πλωραίο και πρυμναίο διάκενο της φούστας με το νερό.

Για τη μείωση της αντίστασης οι χειριστές μπορεί να αυξήσουν το πρυμναίο διάκενο, οπότε η  $R_{a''}$  μπορεί να γίνει μικρότερη του μηδενός. Οι σχεδιαστές των αερόστρωμνων σκαφών κατ'έκτιμηση λαμβάνουν τη γωνία  $\alpha'' = 0.25-0.5^\circ$ , η οποία παρ' όλα αυτά μπορεί να υπολογισθεί με τη βοήθεια προτύπων.

Στο σχήμα 24 η ευθεία AB ενώνει το πλωραίο με το πρυμναίο άκρο της φούστας, και  $\psi'$  είναι η γωνία μεταξύ του επιπέδου της θάλασσας και της AB. Η γωνία της εσωτερικής επιφάνειας του κύματος παριστάνεται ως  $\alpha'$  και  $R_w$  είναι η αντίσταση κυματισμού.

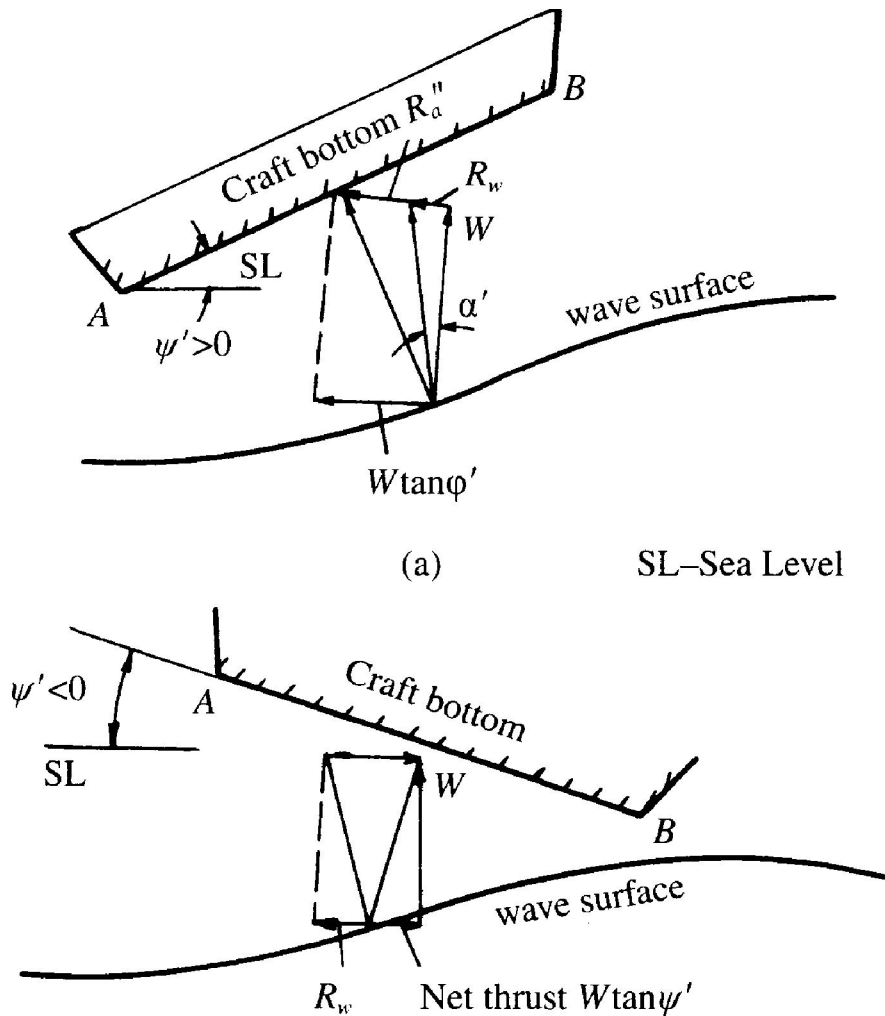
- Όταν  $\psi' < 0$  το σκάφος έχει διαγωγή έμπρυμνη και θα ισχύει:

$$R_{a''} = W \tan \psi' - R_w$$

- Όταν  $\psi' > 0$  το σκάφος έχει διαγωγή έμπλωρη και θα ισχύει:

$$R_{a''} = -W \tan \psi' - R_w < 0$$

Που σημαίνει ότι η  $R_{a''}$  γίνεται ωστική.



Σχήμα 24 : Αντίσταση λόγω μεταβολής της ορμής του αέρα που διαφεύγει από το θάλαμο.

### 3.5 Η αντίσταση της φούστας

Η σύνθεση της αντίστασης της φούστας μπορεί να υπολογισθεί με τον κάτωθι τύπο:

$$R_{sk} = R_{sf} + R_{sp} + R_{ss} + R_{si}$$

όπου  $R_{sk}$  είναι η συνολική αντίσταση της φούστας,  $R_{sf}$  η τριβή της φούστας με το νερό,  $R_{sp}$  η αντίσταση λόγω της πίεσης της φούστας,  $R_{ss}$  η αντίσταση λόγω του αφρού (spray) της φούστας και  $R_{si}$  η αντίσταση αδράνειας της φούστας ( $R_{si}$  είναι η επαγόμενη αντίσταση κυματισμού που προκαλείται από την υψηλής συχνότητας ταλάντωση της φούστας). Για αυτόν τον λόγο, αυτή η αντίσταση



είναι ανάλογη της μάζας της φούστας, και καλείται αντίσταση αδρανείας. Η αντίσταση  $R_{sp}$  είναι το αποτέλεσμα της πίεσης του θαλάμου αέρα και των εσωτερικών φορτίων που δημιουργούνται από την παραμόρφωση του μέρους της φούστας που βρίσκεται επάνω από τη στάθμη της θάλασσας και εξισορροπεί την πίεση του νερού που επενεργεί στο μέρος της φούστας που βρίσκεται κάτω από τη στάθμη της θάλασσας.

Η αντίσταση της φούστας δεν εξαρτάται μόνο από το ποσοστό της φούστας που είναι βυθισμένο, αλλά και από το υλικό που αυτή είναι κατασκευασμένη. Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο η πρόβλεψή της είναι ιδιαίτερα δύσκολη με τη βοήθεια θεωρητικών μεθόδων και συνήθως προτιμούνται πειραματικά μοντέλα.

Όσον αφορά τα ACV, η τριβή της φούστας με την επιφάνεια του νερού είναι μία μεγάλη συνιστώσα της συνολικής αντίστασης, εξ αιτίας της υψηλής πυκνότητας του ύδατος (800 φορές μεγαλύτερη από αυτή του αέρα). Το μεγαλύτερο ποσοστό της φούστας βρίσκεται σε μικρή επαφή με το νερό, ενώ το πρυμναίο τμήμα μπορεί να προκαλέσει ένα αρκετά μεγάλο ποσό αντίστασης "εκσκαφής" σε χαμηλές ταχύτητες (ιδιαίτερα κάτω από την hump speed ή  $Fr < 0.75$ ). Από αυτό το φαινόμενο μπορεί να προκληθεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό πρόβλημα κατά την διέλευση από την hump speed όταν η γεωμετρία της φούστας είναι δυσμενής. Πάνω από την hump speed το πρυμναίο τρίτο της φούστας είναι το σημαντικότερο τμήμα για τον καθορισμό της αντίστασης της φούστας. Μερικές φορές η αντίσταση της φούστας θα αυξηθεί σημαντικά σε περίπτωση πλεύσης με μη μηδενικό trim, όταν είτε το πλωραίο τμήμα έρχεται σε επαφή με το νερό (LCG ΠΡ) είτε οι άκρες του πρυμναίου τμήματος της φούστας έρχονται σε επαφή με το νερό προκαλώντας το φαινόμενο της "εκσκαφής" του ύδατος (water scooping) (LCG ΠΜ). Αξίζει να σημειωθεί ότι η αντίσταση της φούστας κατέχει αρκετά σημαντικό ποσοστό της συνολικής αντίστασης του σκάφους που μπορεί να φθάσει και το 55%.

Οι συνιστώσες της αντίστασης της φούστας είναι δύσκολο να προσεγγιστούν με υπολογιστικές μεθόδους. Γί'αυτὸν ακριβῶς το λόγο ἔχουν αναπτυχθεῖ ορισμένοι εμπειρικοί τύποι:

$$R_{sk} = R_{sk1} + R_{sk2}$$

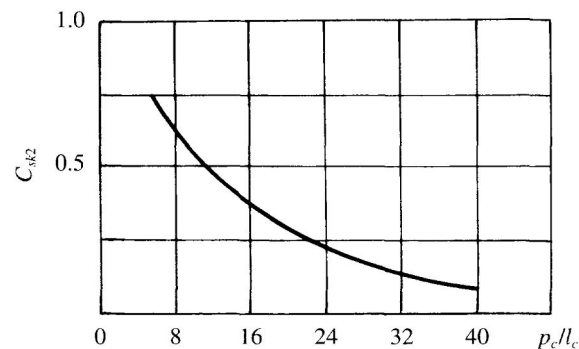
$$R_{sk1} = C_{sk1} \times 10^{-6} (h/l_j)^{-0.34} l_j S_c^{0.5} q_w$$

$$R_{sk2} = C_{sk2} R_w$$

$$C_{sk2} = \{[2.8167 (p_c/l_c)^{-0.259}] - 1\}$$

ὅπου  $R_{sk}$  εἶναι ἡ συνολικὴ ἀντίσταση τῆς φούστας,  $R_{sk1}$  ἡ ἀντίσταση τοῦ βρεχόμενου μέρους τῆς φούστας,  $R_{sk2}$  ἡ επαγόμενη ἀντίσταση κυματισμοῦ λόγω τῆς φούστας,  $h$  ἡ μέση τιμὴ τοῦ διακένου τῆς φούστας με τὸ νερὸ ὅπου  $h = S_j/l_j$  σε συνθήκες στατικῆς αἰώρησης (τὸ  $S_j$  ἀναφέρεται στὴν ἐπιφάνεια ἀπὸ τὴν ὁποία διαρρέει ὁ ἀέρας ἀπὸ τὴ φούστα),  $l_j$  τὸ μῆκος τῆς περιφέρειας τῆς φούστας,  $R_w$  ἡ ἀντίσταση κυματισμοῦ λόγω τοῦ θαλάμου ἀέρα,  $S_c$  ἡ ἐπιφάνεια τοῦ ἀνωτέρω θαλάμου,  $q_w$  ὁ ὑδροδυναμικὸς ὅρος λόγω τῆς ταχύτητας τοῦ

σκάφους,  $C_{sk1} = 2.5 - 3.5$  ὁ συντελεστὴς τῆς ὑδροδυναμικῆς ἀντίστασης καὶ  $C_{sk2}$  ὁ συντελεστὴς τῆς επαγόμενης ἀντίστασης κυματισμοῦ λόγω τῆς φούστας ὁ ὁποῖος προκύπτει ἀπὸ τὸ διπλανὸ διάγραμμα:



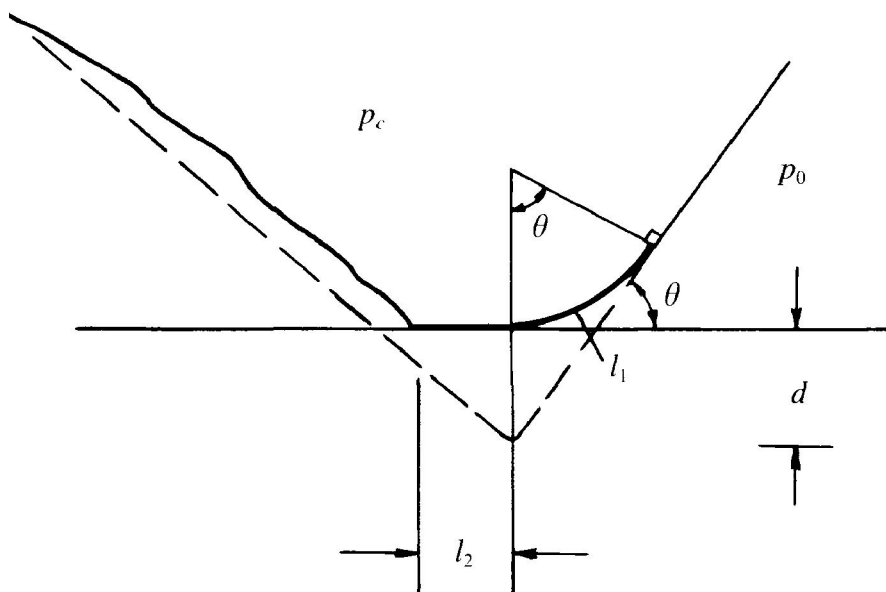
Σχῆμα 25 : Συντελεστὴς τῆς επαγόμενης ἀντίστασης κυματισμοῦ

### 3.5.1 Αντίσταση τριβής της φούστας

Για τη μελέτη αυτής της συνιστώσας θα αναλύσουμε τον τύπο φούστας bag-finger προκειμένου να γίνει κατανοητή η δύναμη που ασκείται στις φούστες λόγω τριβής με το νερό. Υποθέτουμε ότι το ύφασμα της φούστας είναι τέλεια εύκαμπτο. Αυτό σημαίνει ότι το ύφασμα της φούστας έχει τη δυνατότητα να παραμορφωθεί και να γίνει επίπεδο και παράλληλο με την επιφάνεια του νερού. Η παραμόρφωση αυτή δίνεται από τον κάτωθι τύπο:

$$L_1 + L_2 = [d + R(1 - \cos \theta) / \sin \theta]$$

όπου το  $L_1$  είναι το μήκος του τόξου της φούστας που βρίσκεται σε επαφή με την επιφάνεια του νερού  $L_2$  το μέρος της φούστας που είναι στο ίδιο επίπεδο με την επιφάνεια του ύδατος,  $R$  η ακτίνα της κυρτότητας λόγω της κάμψης της φούστας,  $d$  η βύθιση της φούστας και  $\theta$  η γωνία απόκλισης της φούστας.



Σχήμα 26: Παραμόρφωση της φούστας λόγω της επαφής της με το νερό

Η τριβή της φούστας ισορροπεί με τις τάσεις στο ύφασμά της, η οποία μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$D = (p_c - p_0)R = p_c R = R_{sf}$$

όπου το  $D$  είναι η τάση του υφάσματος της φούστας ανά μονάδα πλάτους,  $P_c$  η πίεση του θαλάμου,  $P_0$  η ατμοσφαιρική πίεση που θεωρείται ίση με μηδέν και  $R_{sf}$  η τριβή της φούστας με το νερό ανά μονάδα πλάτους.

Στην περίπτωση του υπολογισμού της τριβής στο πρυμναίο τμήμα της φούστας, ο προσδιορισμός της είναι στην πραγματικότητα ιδιαίτερα πολύπλοκος λόγω του μεγάλου ψεκασμού (spray).

### 3.5.2 Αντίσταση πίεσης της φούστας

Ο τύπος υπολογισμού αυτής της συνιστώσας είναι :

$$R_{sp} = (p_c - p_0)d = p_c d$$

### 3.5.3 Υπολογισμός της συνολικής αντίστασης της φούστας

Έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι για τον υπολογισμό της συνολικής αντίστασης της φούστας ενός αερόστρωμνου. Μία σύγκριση τριών εξ αυτών παρατίθεται στον ακόλουθο πίνακα:

Drag components	Method 1 Estimation	Method 2 Conversion from model tests	Method 3 Interpretative
Aerodynamic profile drag		$R_a = 0.5 \rho_a C_a S_a v^2$	
Aerodynamic momentum drag		$R_m = \rho_a Q v$	
Momentum drag due to differential leakage from bow and stern skirts		$R_w = C_w p_c^2 B_c I (\rho_w g)$	$C_w$ can be obtained from Figs 3.2 and 3.3
Wave-making drag	$R_{a'} = W a''$	$R_{a'}$ is included in $R_r$	$R_{a'} = W a''$
Skirt drag or residual drag	$R_s = (0.5 \sim 0.7) (R_a + R_m + R_w + R_{a'})$	$R_r = (R_{tm} - R_{am} - R_{mm} - R_{wm}) (W/W_m)$	$R_{sk} = C_{sk1} \times 10^{-6} (h/l_j)^{-0.34} l_j q_w S_c^{0.5} + \{ [2.8167 (p_c/l_c)^{-0.259}] - 1 \} R_w$ $C_{sk1} = 1.35 + 0.112 P_c/l_c$
Total drag	$R_T = K_T (R_a + R_m + R_w + R_{a'})$ where $K_T = 1.5 \sim 1.7$	$R_T = R_a + R_m + R_w + R_r$	$R_T = K'_T (R_a + R_m + R_w + R_{a'} + R'_{sk})$
Remarks	See Note 1	See Note 1	See Note 2

Note 1: In methods 1 and 3  $a''$  denotes the angle between the inner water surface and the line linking the lower tips of bow and stern skirts.

Note 2: In method 3, normally  $K'_T = 1.15-1.25$ , but where a large amount of references and experimental data are available, then  $K'_T$  may be reduced to 1.0-1.1.

#### Πίνακας 2 : Μέθοδοι υπολογισμού της αντίστασης ενός ACV

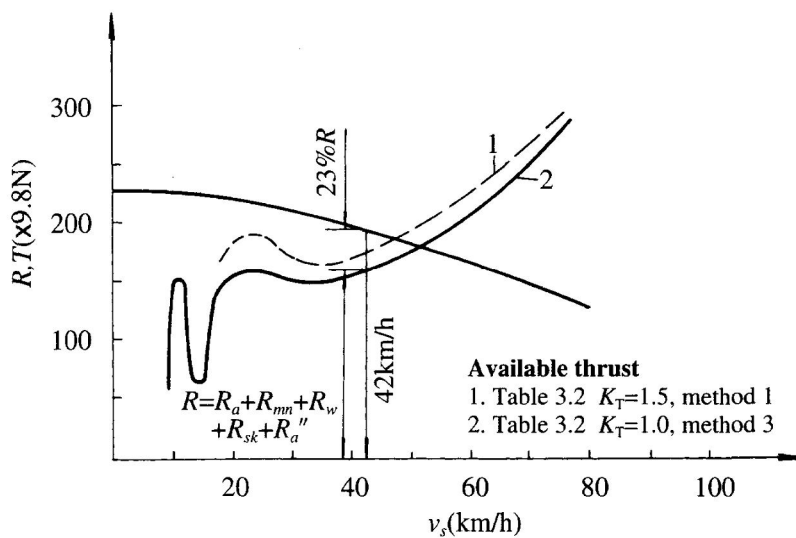
##### Παρατηρήσεις

- Η μέθοδος 1 περιέχει αρκετές παραδοχές γι'αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατά το αρχικό στάδιο σχεδίασης. Η μέθοδος 3 είναι ακριβέστερη από τη Νο1, παρόλα αυτά όμως δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί πέραν του αρχικού σταδίου σχεδίασης.
- Η μέθοδος 2, είναι κατάλληλη για τα στάδια λεπτομερούς σχεδίασης.
- Η αντίσταση των εξαρτημάτων που βρίσκονται πάνω από την ίσαλο (πηδάλια αέρα, κάθετα και οριζόντια πτερύγια,)

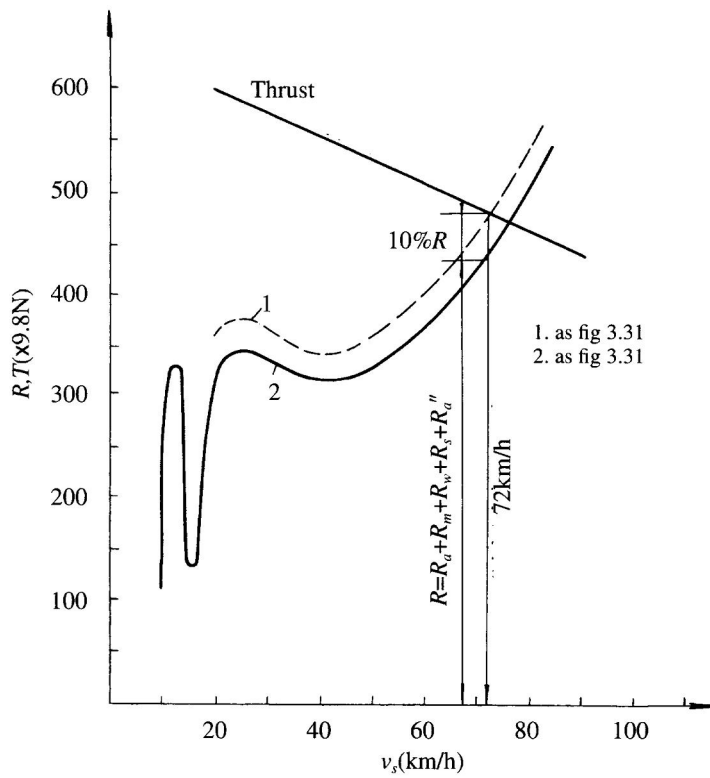
συμπεριλαμβάνεται στην αντίσταση λόγω μορφής του σκάφους.

- Σε αναλογία με τα συμβατικά σκάφη, ισχύει η μέθοδος του Froude για τον υπολογισμό της αντίστασης του σκάφους από πειραματικές μετρήσεις με μοντέλα.

Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνεται η συνολική αντίσταση της φούστας για τα κινέζικα μοντέλα 7202 και 711-11A. Αξίζει να σημειωθεί ότι χρησιμοποιώντας τη μέθοδο 1 και για μεγάλες τιμές του συντελεστή  $K_T$  τα αποτελέσματα της μεθόδου προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις πειραματικές μετρήσεις.

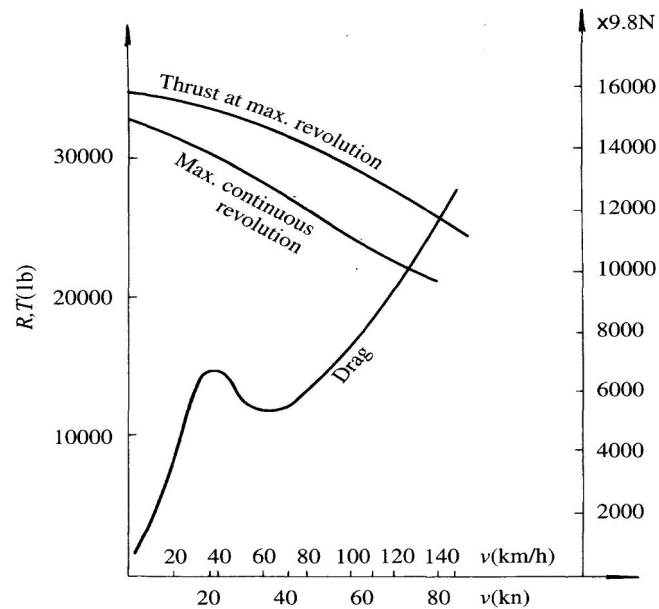


Σχήμα 27: Σύγκριση της συνολικής αντίστασης (θεωρία-πειραματικές μετρήσεις) για το μοντέλο 7202.



Σχήμα 28: Σύγκριση της συνολικής αντίστασης (θεωρία-πειραματικές μετρήσεις) για το μοντέλο 711 IIA.

Μια χαρακτηριστική καμπύλη αντίστασης για το βρετανικό SR N4 φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



### 3.6 Προβλήματα-Δυσκολίες Των Αερόστρωμων Σκαφών στη Φάση της Απογείωσης

Η ικανότητα επιτάχυνσης ενός ACV μέσω της hump speed είναι ένα πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό σχεδιασμού. Οι σχεδιαστές και οι χρήστες ανησυχούν επομένως συχνά για την ικανότητα "απογείωσης" ενός αερόστρωμνου που επιχειρεί πάνω από το νερό, επειδή η hump speed είναι περίπου στο ένα τρίτο με το ένα πέμπτο της ταχύτητας σχεδίασης. Hump speed καλείται η τιμή της ταχύτητας του σκάφους όπου παρατηρείται η μέγιστη τιμή της επαγόμενης αντίστασης κυματισμού. Το σκάφος κινείται αρκετά γρήγορα, αλλά όχι τόσο ώστε να ανυψωθεί πάνω από το νερό. Όταν υπερβαίνει αυτήν την ταχύτητα, το εκτόπισμα του σκάφους μειώνεται (λόγω της αιώρησής του) επομένως η αντίστασή του μειώνεται. Ένα παράδειγμα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Μετάβαση από τη hump speed για το U22

Ορισμένα χαρακτηριστικά αυτής της απογείωσης παρουσιάζονται εδώ καθώς και μερικά σχόλια για τη βελτιστοποίηση των σκαφών

πάνω σε αυτό το θέμα.

Όταν η ταχύτητα του σκάφους αυξάνεται σε  $Fr$  περίπου 0,38 το σκάφος βρίσκεται μεταξύ των δύο κορυφών του κύματος. Το μέσον λοιπόν του σκάφους βρίσκεται στο κοίλο του κύματος και παρατηρείται μεγάλη εκροή αέρα από το θάλαμο. Στη συνέχεια μειώνεται το κενό αέρα κάτω από την πλώρη και την πρύμνη, το οποίο θα οδηγούσε σε επαφή του σκάφους με την επιφάνεια του νερού σε αυτά τα σημεία και θα εμφανιστεί μια νέα πηγή αντίστασης που θα ενεργήσει στο σκάφος. Στην περίπτωση κακής σχεδίασης της φούστας ή των στεγανοποιητικών, η μέγιστη αντίσταση μπορεί να παρουσιαστεί σε αριθμούς  $Fr$  μεγαλύτερους από 0,38 (φθάνουν και σε 0,56 που είναι το σημείο της κύριας αντίστασης hump speed). Επιπρόσθετα, η εγκάρσια ευστάθεια θα μειωθεί σημαντικά. Το σκάφος θα τείνει να λειτουργήσει με έμπλωρη διαγωγή όταν το



πρυμνιό μέρος της φούστας είναι άκαμπτο και το πλωριό μέρος εύκαμπτο. Το σκάφος θα αποκτήσει μεγάλη γωνία παρέκλισης ( $\gamma$ ) και ο χειριστής του θα είναι υποχρεωμένος να χρησιμοποιεί το πηδάλιο συχνότερα. Επίσης, θα παρατηρηθεί αρκετά μεγάλο ποσό ψεκασμού από το μέσον του πλοίου ο οποίος θα παρεμποδίζει την ορατότητα του οδηγού, και θα καθιστά το χειρισμό του σκάφους ακόμα δυσκολότερο.

Η λειτουργία θα γινόταν πιθανώς πολύ περίπλοκη εάν η θάλασσα ήταν κυματώδης. Τέτοια φαινόμενα είναι χαρακτηριστικά γνωρίσματα ενός σκάφους που αποτυγχάνει να επιταχύνει επιτυχώς μέσω της δευτερεύουσας hump speed.

Εάν το σκάφος μπορεί ή όχι να περάσει από τη hump speed εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως τα χαρακτηριστικά της φούστας, την αναλογία μήκους-πίεσης του θαλάμου αέρα, την εγκάρσια ευστάθεια και το σωστό χειρισμό του σκάφους.

Από την οπτική μεριά της αντίστασης του σκάφους, οι παράγοντες που επηρεάζουν την απογείωση (take-off) μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

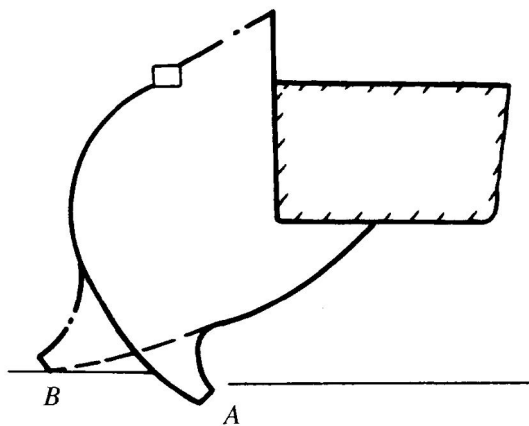
- Το πλάτος της μέγιστης αντίστασης, ειδικά στη δευτερεύουσα hump speed ( $Fr = 0.38$ ), η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού λόγω της φούστας στη δευτερεύουσα hump speed και η ευελιξία των φουστών να αποκρίνονται στα κύματα χωρίς φαινόμενα εκσκαφής.
- Η ικανότητα του σκάφους να έχει σταθερότητα στην δοθείσα πορεία (course stability) και καλή εγκάρσια ευστάθεια κατά τη διάρκεια της απογείωσης από την hump speed.

Δεν είναι δύσκολο να βελτιωθεί η δυνατότητα επιτυχούς διέλευσης μέσω της hump speed εάν οι ανωτέρω παράγοντες ληφθούν υπόψη κατά τη σχεδίαση. Σύμφωνα με την ερευνητική εμπειρία του οργανισμού MARIC, παρακάτω παρατίθενται μερικά παραδείγματα για την επεξήγηση αυτών των παραγόντων.

1. Το μοντέλο ACV 711, το πρώτο κινεζικό αμφίβιο hovercraft δοκιμής, δυσκολεύτηκε ιδιαίτερα κατά τη διάβαση μέσω της hump

speed το 1965. Το σκάφος, που ζυγίζει 4t, είχε εξοπλιστεί με σύστημα πρόωσης ισχύος 191 kW και έλαβε ώθηση 5000N κατά τη διάρκεια της απογείωσης. Αυτό σήμανε ότι η αναλογία ώθησης/άνωσης ήταν περίπου 1/8. Έτσι, παρατηρήθηκε εκσκαφή ύδατος από το πρυμνίο τμήμα του σκάφους με αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγάλης αντίστασης. Μετά από ένα χρόνο, ο MARIC τοποθέτησε μια βαλβίδα ελέγχου στον αεραγωγό για να ρυθμίσει την επιχειρησιακή συμπεριφορά του σκάφους προκειμένου να μειωθεί η αντίσταση από την επαφή του ύδατος με τη φούστα. Το σκάφος πέρασε επιτυχώς από την hump speed.

2. Στη συνέχεια, στο μοντέλο 711 τοποθετήθηκε μια εύκαμπτη φούστα. Η ικανότητα απογείωσης του σκάφους βελτιώθηκε σημαντικά λόγω της διεύρυνσης της περιοχής του θαλάμου αέρα, η οποία μείωσε την πίεση του θαλάμου και το λόγο πίεσης-μήκους θαλάμου, και επίσης λόγω της δυνατότητας της εύκαμπτης φούστας να αποκρίνεται καλά στον κυματισμό. Η αντίσταση κυματισμού στη δευτερεύουσα hump speed μειώθηκε από τις ίδιες τροποποιήσεις.



3. Το τροποποιημένο μοντέλο 711 με τις εύκαμπτες φούστες βρέθηκε περιστασιακά να αντιμετωπίζει δυσκολίες στη

διάβαση από την hump speed.

Σχήμα 29: Εκσκαφή ύδατος λόγω της μορφής της φούστας

Η φούστα στο πρυμνίο τμήμα κατά τη διάρκεια της απογείωσης έλαβε μια μορφή που επέτρεπε την εκσκαφή ύδατος (σχήμα 29). Μία σημαντική "καινοτομία" συνέβη όταν αυτό το τμήμα της φούστας έσπασε (αστόχησε) και πήρε το σχήμα που φαίνεται στο σχέδιο 29 (σημείο B).

### 3.7 Η Επίδραση Διαφόρων Παραγόντων στην Αντίσταση των Αερόστρωμων

Η επίδραση διάφορων παραγόντων σχεδίασης ενός αερόστρωμνου σκάφους στην απόδοσή του μπορεί να συνοψιστεί ως ακολούθως:

#### 3.7.1 Επίδραση της θέσης του LCG

Η επίδραση της θέσης του LCG στην αντίσταση του σκάφους, κυρίως στην αντίσταση της φούστας, είναι σημαντική. Μια μικρή αλλαγή στο LCG θα οδηγήσει άμεσα σε διαφοροποίηση της αντίστασης λόγω της επίδρασής του στη σχετική θέση της φούστας και του νερού (πιθανότητα επαφής) ειδικά στο εμπρός και το πίσω τμήμα της φούστας.

Ο οργανισμός MARIC προτείνει ότι το LCG ενός αερόστρωμνου πρέπει να κυμαίνεται στο παρακάτω εύρος:

$$(X_g - X_c)/L_c \approx -(0 \sim 0.5)\% \text{ [aft of CG.]}$$

όπου  $X_g$  είναι το LCG μετρημένο από την πρύμνη,  $X_c$  το διαμήκες κέντρο πλευστότητας μετρημένο από την πρύμνη και  $L_c$  το μήκος του θαλάμου αέρα.

#### 3.7.2 Επίδραση του ποσοστού ροής αέρα

Το μέγεθος του συντελεστή ροής αέρα  $Q$  δεν έχει σημαντικές επιπτώσεις στην απογείωση του hovercraft (εκτός από πάρα πολύ μικρές τιμές του  $Q$ ) όταν η φούστα είναι προσεκτικά σχεδιασμένη, λόγω της καλής απόκρισης των εύκαμπτων φουστών στον κυματισμό.

Εντούτοις, η αντίσταση του σκάφους σε ταχύτητες μετα-hump speed εξαρτάται πολύ από το  $Q$ . Επομένως, η σημασία του ποσοστού ροής αέρα σύγχρονων ACV είναι μάλλον μεγαλύτερη από παλιότερες σχεδιάσεις γιατί αυτές απαιτούσαν υψηλά ποσοστά ροής αέρα για να επιτύχουν μεγάλα διάκενα στη φούστα και να αποφύγουν πιθανή αύξηση της αντίστασης από την επαφή της φούστας με το

νερό. Τώρα, αυτό φαίνεται περιττό λόγω των ευεργετικών ιδιοτήτων της εύκαμπτης φούστας.

Η ροή αέρα έχει επιπτώσεις στην αντίσταση ψεκασμού (spray) για την περιοχή μετα-hump speed επειδή ένα μεγάλο ποσοστό ροής αέρα θα λειτουργήσει ως λιπαντικό μέσο.

Στην περίπτωση που το  $Q$  είναι τόσο μικρό ώστε να προκληθεί σημαντική βύθιση της φούστας, η συμπεριφορά του σκάφους κατά την απογείωση θα επιδεινωθεί. Παραδείγματος χάριν, ένα κινέζικο αερόστρωμνο με πάρα πολύ μικρή ροή αέρα στο θάλαμο, μπορούσε να διατρέξει πέρα από την hump speed σε ήρεμο νερό, αλλά δεν μπορούσε να απογειωθεί ακόμα και σε συνθήκες μικρού κυματισμού. Η συμπεριφορά του σκάφους κατά την απογείωση βελτιώθηκε με την αύξηση της ισχύος των ανεμιστήρων κατά 15%.

### 3.7.3 Επίδραση της διαμόρφωσης της φούστας

Η διαμόρφωση της φούστας επηρεάζει σημαντικά την αντίσταση του σκάφους και για αυτό το λόγο στις σύγχρονες σχεδιάσεις προτιμάται η φούστα να έχει εύκαμπτο χαρακτήρα. Ο πίνακας 3 καταδεικνύει ότι ο συντελεστής αντίστασης για τις φούστες γαλλικών ACVs έχει βελτιωθεί ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια.

Time interval	Craft model	Skirt drag coefficient
June 1968–June 1969	N102	0.36–0.42
Sept. 1967–March 1969	N300-02A	0.16–0.22
March 1969–June 1970	N102C	0.26–0.32
July 1970–June 1971	N102L	0.26–0.32
June 1973–Feb 1975	N300-02B	0.05–0.12
1973–1976	N500 (model)	0.05–0.07

*Πίνακας 3: Εξέλιξη του συντελεστή αντίστασης*

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4-Ευστάθεια

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα hovercraft είναι μάλλον διαφορετικά από τα συμβατικά σκάφη δεδομένου ότι λειτουργούν σε διάφορες καταστάσεις:

1. Επιπλέουν στηριζόμενα εξ' ολοκλήρου στη γάστρα τους όπως μια βάρκα
2. Σε κατάσταση ημιαιωρήσεως όπως σκάφη εκτοπίσματος κάτω από την hump speed
3. Σε κατάσταση αιωρήσεως στην επιφάνεια του νερού πάνω από την hump speed
4. Να επιχειρούν σε διαφορετικές συνθήκες όπως σε πάγο,σε χιόνι, σε έλη,κλπ...

Επιπλέον, η μετάβαση μεταξύ των καταστάσεων 2 και 3 δημιουργεί σημαντικές εγκάρσιες κλίσεις καθώς και δυναμικά φορτία στο σύστημα της φούστας που καθιστούν το σκάφος λιγότερο σταθερό. Η ασφαλής λειτουργία του σκάφους σε κυματισμό ενώ αυτό βρίσκεται στην κατάσταση 3 επίσης απαιτεί προσοχή στην επίδραση της φούστας στην ευστάθεια του σκάφους.

Δεν είναι λίγα τα παραδείγματα που αποδεικνύουν τα όσα αναφέρθηκαν ανωτέρω. Το σοβαρότερο ίσως από αυτά ατύχημα συνέβη στο hovercraft επιβατών Hovertravel, SR N6-012, που λειτουργούσε μεταξύ του Πόρτσμουθ και του Ryde στη Νήσο Wight τον Μάρτιο του 1972. Το αποτέλεσμα της συνδυασμένης δράσης του αέρα και των κυμάτων σε μία ξαφνική θύελλα, οδήγησε στο θάνατο πέντε επιβατών.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα διερευνήσουμε πολλά προβλήματα που μπορούν να οδηγήσουν στην ανατροπή του hovercraft λόγω της δυναμικής αστάθειας.

Ένα hovercraft απαιτεί έναν ελάχιστο θετικό μοχλοβραχίονα ευστάθειας κατά το pitch και το roll είτε αυτό επιπλέει ή αιωρείται στατικά είτε κινείται. Όταν βρίσκεται σε κίνηση, πρέπει να υπάρχει ευστάθεια κατά το yaw και ικανοποιητική ροπή επαναφοράς για την

σταθεροποίηση των δυναμικών φορτίων. Μερικοί απλοί κανόνες ευστάθειας δίνονται παρακάτω:

Στατική ευστάθεια

Pitch:  $h/L_c > 0.05P_c$  (μέτρα)

Roll:  $h/B_c > 0.08P_c$

Δυναμική ευστάθεια

Pitch:  $h/L_c > 0.05P_c$

Roll:  $h/B_c > 0.08P_c$

Yaw:  $h/L_c > 0.02P_c$

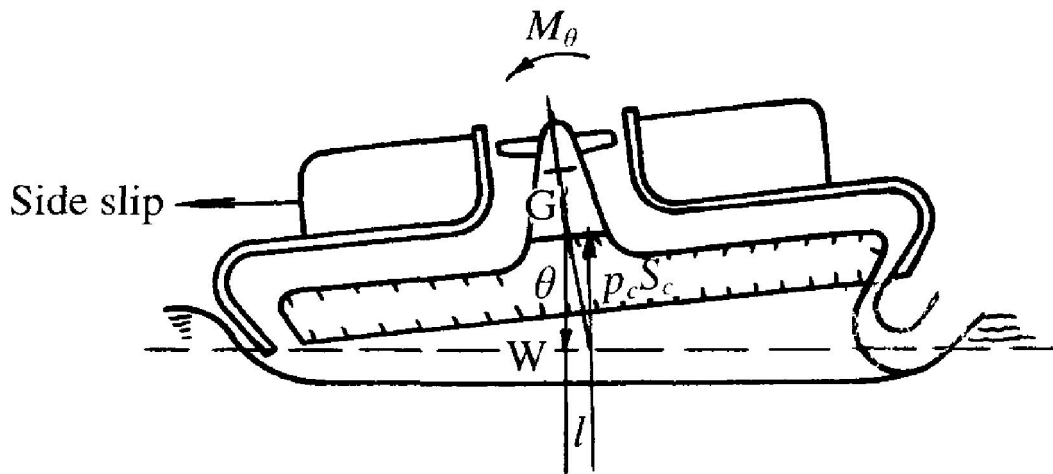
Σημείωση: Η τιμή του  $P_c$  μετριέται σε μέτρα μανομετρικού ύψους στήλης νερού. Η δυναμική ευστάθεια μετριέται στην ταχύτητα σχεδίασης του σκάφους.

#### 4.1 Εγκάρσια Ευστάθεια

Ένα ACV δεν έχει καμία φυσική ροπή επαναφοράς από το θάλαμο αέρα όταν αποκτά κλίση σε κατάσταση αιωρήσεως. Όταν ένα αερόστρωμνο σκάφος στο οποίο δεν υφίσταται διαμερισματοποίηση του θαλάμου αέρα, αποκτά κλίση λόγω πιθανής μετακίνησης φορτίου, δημιουργείται ροπή ανατροπής χωρίς παράλληλη εμφάνιση ροπής επαναφοράς γιατί η πίεση του αέρα στο θάλαμο θεωρείται σταθερή καθόλο το μήκος του (σχήμα 30).

Η γεωμετρία της φούστας και ιδιαίτερα ο λόγος  $P_i/P_c$  έχουν σημαντική επιρροή στη ροπή επαναφοράς για ένα αερόστρωμνο. Όταν το σκάφος επιχειρεί σε ταχύτητες κάτω από την hump speed, η ακαμψία της φούστας θα αλληλεπιδράσει με τον όγκο του εντοπιζόμενου ύδατος στην πλευρά του σκάφους που κατεβαίνει δημιουργώντας ροπή επαναφοράς. Σε ταχύτητες πάνω από την hump speed, η επιφάνεια της φούστας πλανάρει στο νερό και η

δύναμη που δημιουργείται περιορίζεται σε τιμή λόγω του υλικού κατασκευής της φούστας.

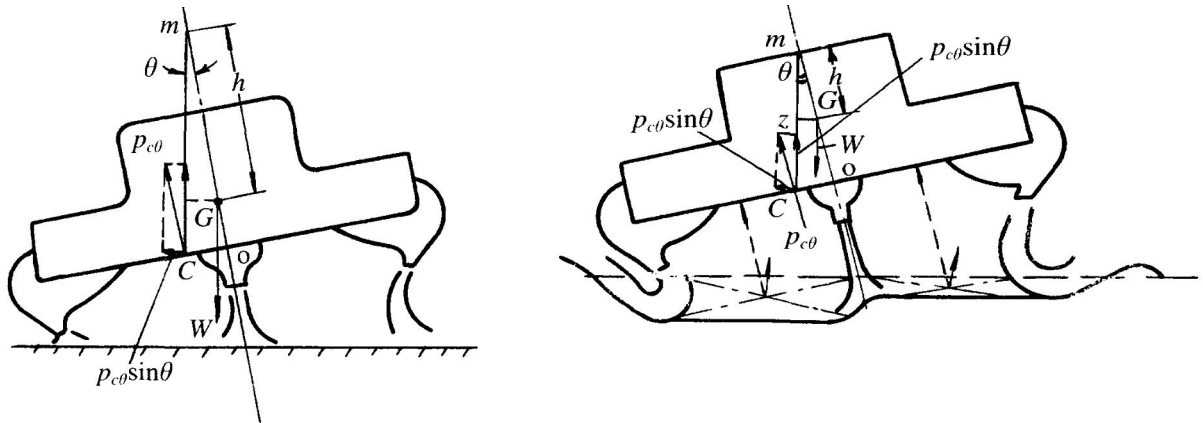


Σχήμα 30: Εγκάρσια κλίση σκάφους χωρίς διαμερισματοποίηση

#### 4.1.1 Διαμερισματοποίηση Hovercraft

Στην περίπτωση όπου ένα ACV χωρισμένο σε δύο διαμερίσματα κατά το διάμηκες αποκτήσει εγκάρσια κλίση θα παρατηρηθεί μείωση της πίεσης στο θάλαμο αέρα της πλευράς που ανεβαίνει λόγω της μεγάλης διαφυγής αέρα από αυτή και αύξηση της πίεσης του αέρα στο θάλαμο που κατεβαίνει λόγω μειωμένης ροής. Έτσι, η διαφορά μεταξύ των δύο πιέσεων θα δημιουργήσει ροπή επαναφοράς μετακινώντας ταυτόχρονα το κέντρο της πίεσης προς τα κάτω (σχήμα 31)

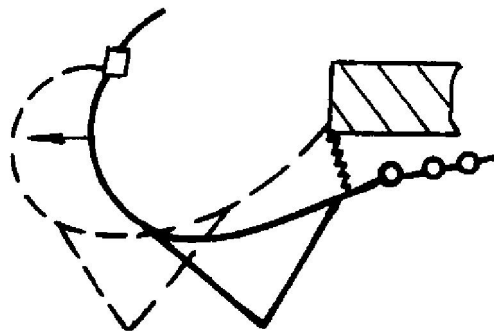
Εν τω μεταξύ, η εγκάρσια συνιστώσα  $P_{ce} \sin \theta$  της συνισταμένης πίεσης των θαλάμων  $P_{ce}$  θα οδηγήσει επίσης σε παρέκκλιση του σκάφους. Για αυτόν τον λόγο, γενικότερα στην περίπτωση που ένα αερόστρωμνο αποκτήσει εγκάρσια κλίση, παρατηρείται ταυτόχρονη κίνηση παρέκκλισης του σκάφους. Το ίδιο ακριβώς φαινόμενο εμφανίζεται όταν το σκάφος κινείται πάνω σε νερό (σχέδιο 31). Παρατηρούμε ότι η επιφάνεια του νερού σε κάθε διαμέρισμα δεν είναι στο ίδιο επίπεδο. Ο όγκος του εκτοπιζόμενου νερού είναι ίσος με την άνωση που προκαλείται από την πίεση του αέρα σε κάθε θάλαμο.



Σχήμα 31: Εγκάρσια κλίση αερόστρωμνου σε άκαμπτη επιφάνεια και πάνω σε νερό

#### 4.1.2 Συστήματα Ανύψωσης της Φούστας

Η αρχή λειτουργίας των συστημάτων ανύψωσης της φούστας αναπτύχθηκε από την εταιρεία Hovercraft Development Limited στο Ηνωμένο Βασίλειο. Η φούστα μπορεί να μετατοπιστεί στην εγκάρσια κατεύθυνση αλλάζοντας το κέντρο της πίεσης και δημιουργώντας ροπή επαναφοράς. Τέτοια συστήματα έχουν εφαρμοστεί κυρίως για την υποβοήθηση των χειρισμών ενός αερόστρωμνου σε στροφή. Η φούστα ανασηκώνεται στην πλευρά του σκάφους που βρίσκεται στην εσωτερική και μειώνεται έτσι η παρέκλιση του.

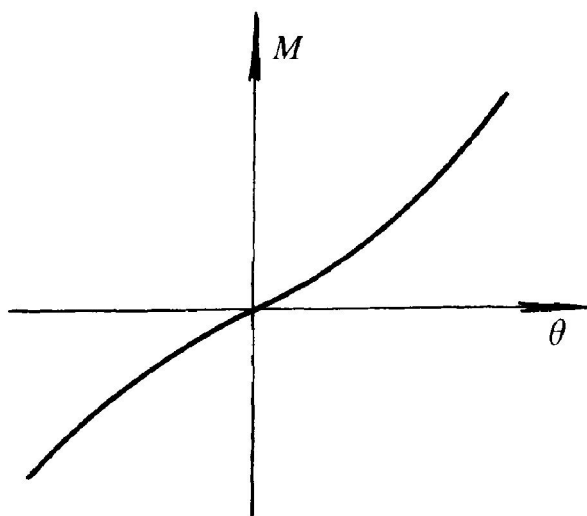


Σχήμα 32: Σύστημα ανύψωσης της φούστας



### 4.1.3 Χαρακτηριστική Καμπύλη Ευστάθειας

Στο σχήμα 33 παρουσιάζεται μια χαρακτηριστική καμπύλη στατικής εγκάρσιας ευστάθειας ενός ACV που αιωρείται σε μια άκαμπτη επιφάνεια. Μπορεί να φανεί ότι η καμπύλη είναι μη γραμμική στις μεγαλύτερες γωνίες κλίσης γεγονός που οφείλεται σε μη γραμμικούς παράγοντες των χαρακτηριστικών των ανεμιστήρων και της παραμόρφωσης της φούστας.



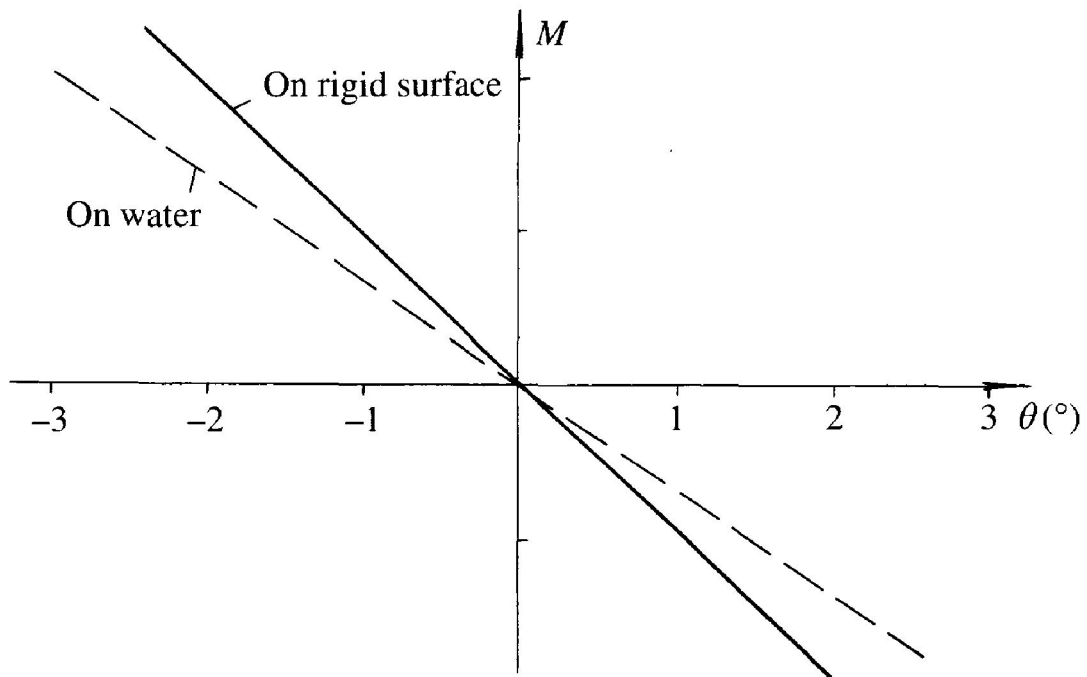
Σχήμα 33: Χαρακτηριστική καμπύλη ευστάθειας αερόστρωμνου

### 4.1.4 Παράγοντες που έχουν επιπτώσεις στην εγκάρσια ευστάθεια

#### 4.1.4.1 Επίδραση της επιφάνειας στήριξης

Το σχήμα 34 δείχνει ότι η στατική εγκάρσια ευστάθεια ενός μοντέλου ACV με διαμερισματοποίηση στο θάλαμο αέρα τύπου + που αιωρείται σε υδάτινη επιφάνεια είναι χειρότερη από την αντίστοιχη όταν αυτό αιωρείται σε άκαμπτη επιφάνεια. Αυτό οφείλεται στην παραμόρφωση της επιφάνειας του νερού. Γενικά η στατική εγκάρσια ευστάθεια στο

νερό είναι περίπου 70-80% της αντίστοιχης σε άκαμπτη επιφάνεια ανεξαρτήτως του τύπου της διαμερισματοποίησης.



Σχήμα 34: Επίδραση της επιφάνειας στήριξης στην ευστάθεια ενός ACV

#### 4.1.4.2 Εγκάρσια ευστάθεια ενός ACV χωρίς διαμερισματοποίηση

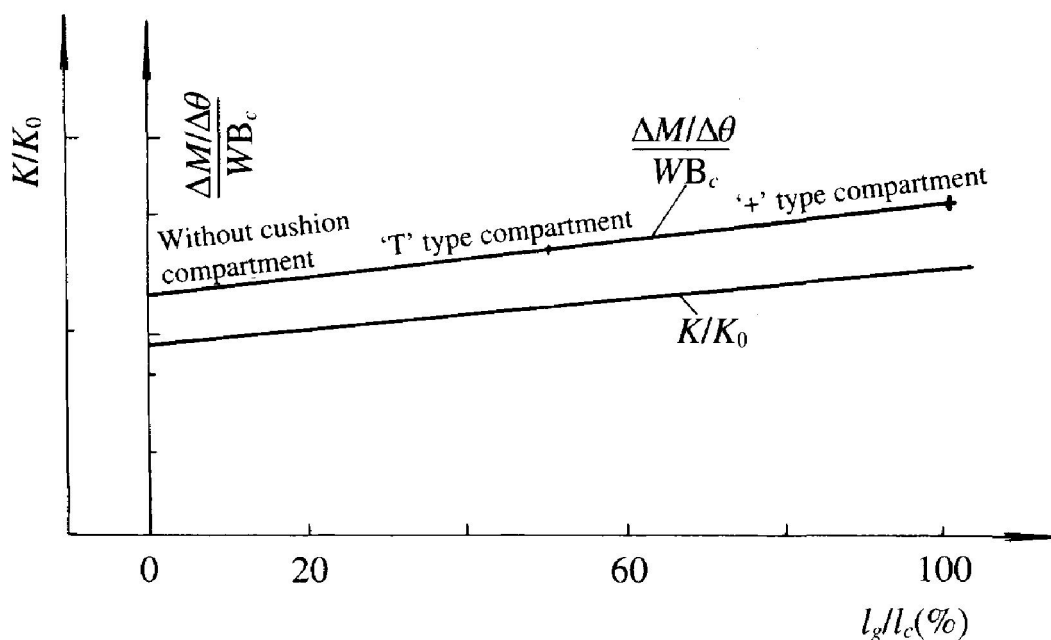
Το σχήμα 35 παρουσιάζει την επίδραση τριών τύπων διαμερισματοποίησης του θαλάμου αέρα στην στατική εγκάρσια ευστάθεια, στο οποίο το  $L_g$  είναι το μήκος της διαμήκουσ φούστας ευσταθείας (αρχή της μέτρησης η πρύμνη) και επομένως,  $L_g/L_c = 0$  δείχνει θάλαμο αέρα χωρίς διαμερισματοποίηση, το  $L_g/L_c = 0,6$  δείχνει διαίρεση σε διαμερίσματα του τύπου  $\tau$ , και  $L_g/L_c = 1,0$  δείχνει διαίρεση σε διαμερίσματα τύπου  $+$ .

Στο σχήμα 35 το  $\Delta\theta$  είναι η γωνία κλίσης,  $\Delta M$  η ροπή επαναφοράς,  $h$  το αρχικό εγκάρσιο μετακεντρικό ύψος,  $W$  το βάρος του σκάφους

και  $B_c$  το πλάτος του θαλάμου αέρα. Το  $K/K_0$  (στο σχήμα 35) παρουσιάζει την επίδραση του βάθους της φούστας ευσταθείας στην εγκάρσια ευστάθεια. Μπορεί να φανεί ότι η ευστάθεια ενς ACV χωρίς διαμερισματοποίηση θα είναι μικρότερη περίπου κατά 40% από την αντίστοιχη στην περίπτωση σκάφους με διαμερισματοποίηση τύπου +.

Πειραματικές μετρήσεις κατέδειξαν ότι η εγκάρσια ευστάθεια μειώνεται στο 59% σε περίπτωση αφαίρεσης της διαμήκουσ φούστας ευσταθείας και η διαμήκης ευστάθεια μειώνεται στο 68% στην περίπτωση της αφαίρεσης της εγκάρσιας φούστας ευσταθείας.

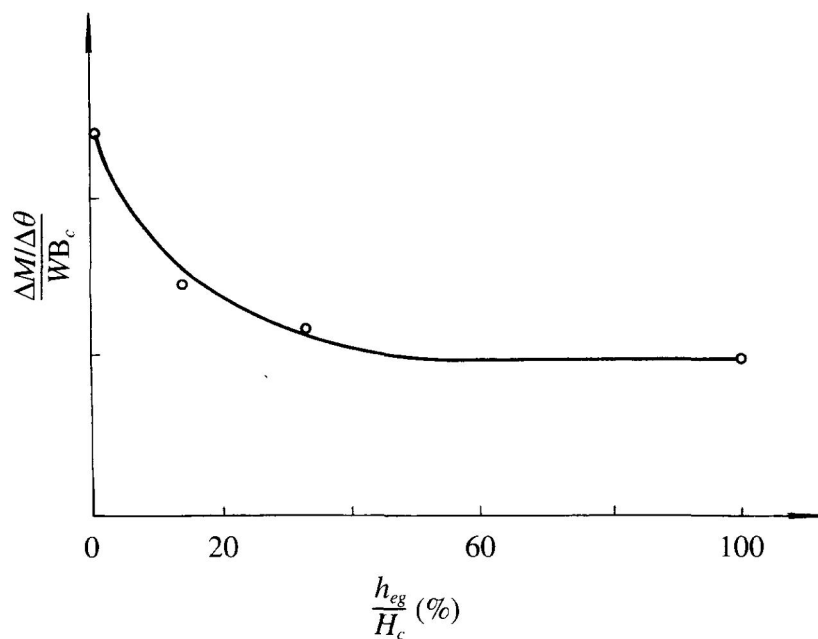
Είναι σαφές ότι η διαμερισματοποίηση μπορεί να ωφελήσει σημαντικά το σκάφος όσον αφορά την ευστάθεια, παρόλα αυτά η τοποθέτηση φουστών ευσταθείας σημαίνει ταυτόχρονα και επιπτώσεις στον τομέα της συντήρησης λόγω της δυσκολίας πρόσβασης στον χώρο που βρίσκονται.



Σχήμα 35: Επίδραση της διαμερισματοποίησης στην ευστάθεια

#### 4.1.4.3 Επίδραση του διακένου ( $h_{eg}$ ) της φούστας ευσταθείας

Το διάκενο της διαμήκουσ φούστας ευσταθείας έχει σημαντική επίδραση στην εγκάρσια ευστάθεια. Στο σχήμα 36 φαίνεται ότι η αποδοτικότητα της διαμερισματοποίησης του θαλάμου αέρα θα μειωθεί όταν το διάκενο  $h_{eg}$  αυξηθεί πάνω από 30% του συνολικού ύψους του θαλάμου αέρα στο CG. Γενικά, το  $h_{eg}$  είναι ίσο με το 10-20% του ύψους του θαλάμου στο CG, και οι φούστες ευσταθείας τύπου + είναι πιο ευαίσθητες από τις αντίστοιχες τύπου T.



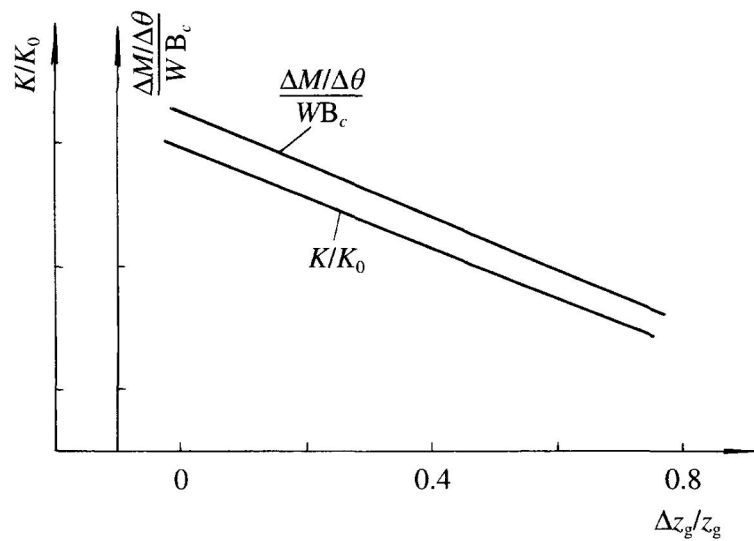
Σχήμα 36: Επίδραση του διακένου της φούστας

#### 4.1.4.4 Επίδραση του κατακόρυφου κέντρου βάρους (VCG)

Στο σχήμα 37 φαίνεται ότι το VCG συσχετίζεται άμεσα με το ύψος της φούστας, επομένως ο μελετητής πρέπει να κάνει έναν προσεκτικό

έλεγχο της εγκάρσιας ευσταθείας κατά τη φάση της σχεδίασης του ύψους της φούστας. Εάν προτιμήσει φούστες με μεγάλο ύψος -ίσως λόγω των απαιτήσεων εκκαθάρισης εμποδίων- θα πρέπει να λάβει

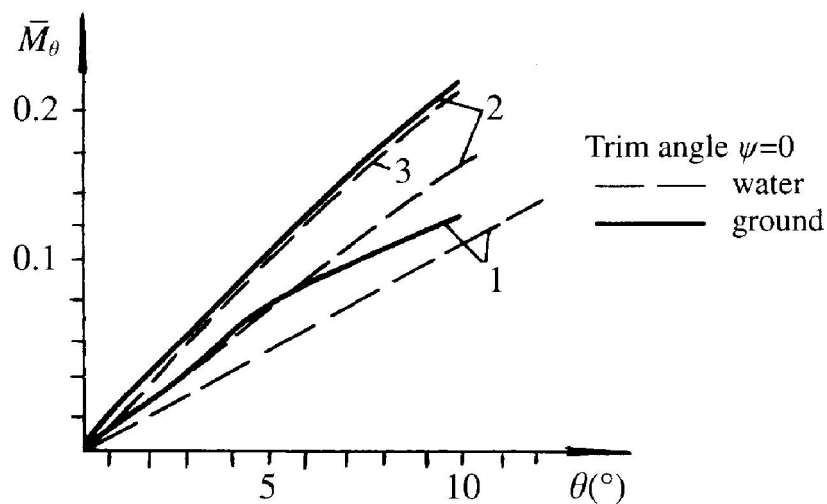
υπόψη του ότι θα απαιτηθούν ειδικά μέτρα για την εξασφάλιση ικανοποιητικής ευστάθειας.



Σχήμα 37: Επίδραση του κατακόρυφου κέντρου βάρους

#### 4.1.4.5 Επίδραση του ποσοστού ροής των ανεμιστήρων

Στο σχήμα 38 φαίνεται ότι η εγκάρσια ευστάθεια ενός αερόστρωμνου είναι ανάλογη με το ποσοστό ροής των ανεμιστήρων, (στα SES συμβαίνει το αντίθετο).



Σχήμα 38: Επίδραση του ποσοστού ροής των ανεμιστήρων

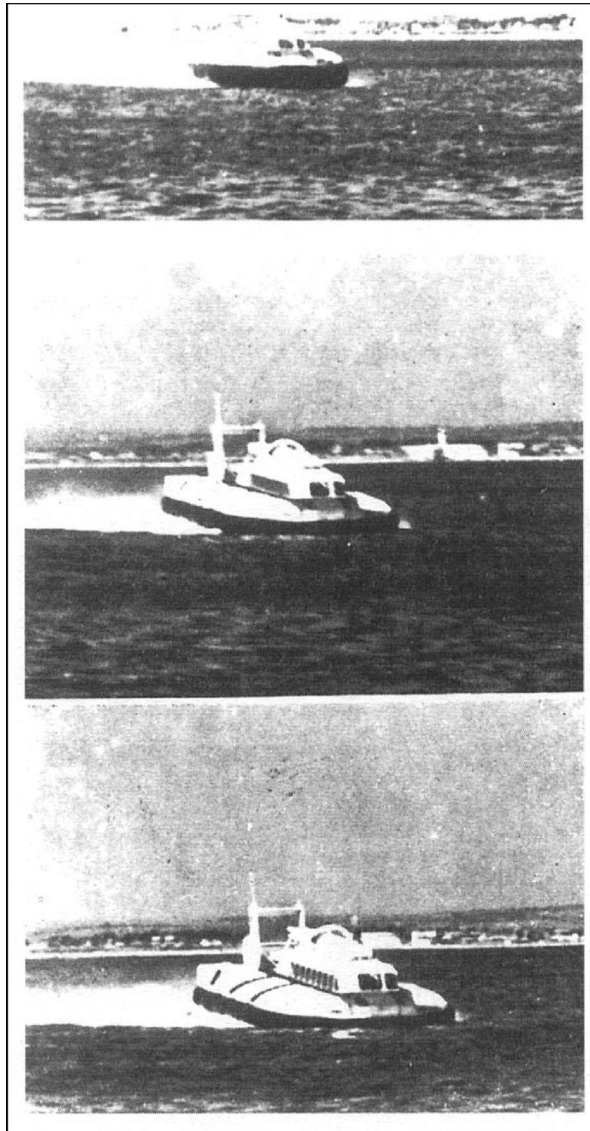
## **4.2 Δυναμική Ευστάθεια, το Φαινόμενο Plough-In, και ανατροπή ενός Αερόστρωμνου**

### **4.2.1 Εισαγωγή**

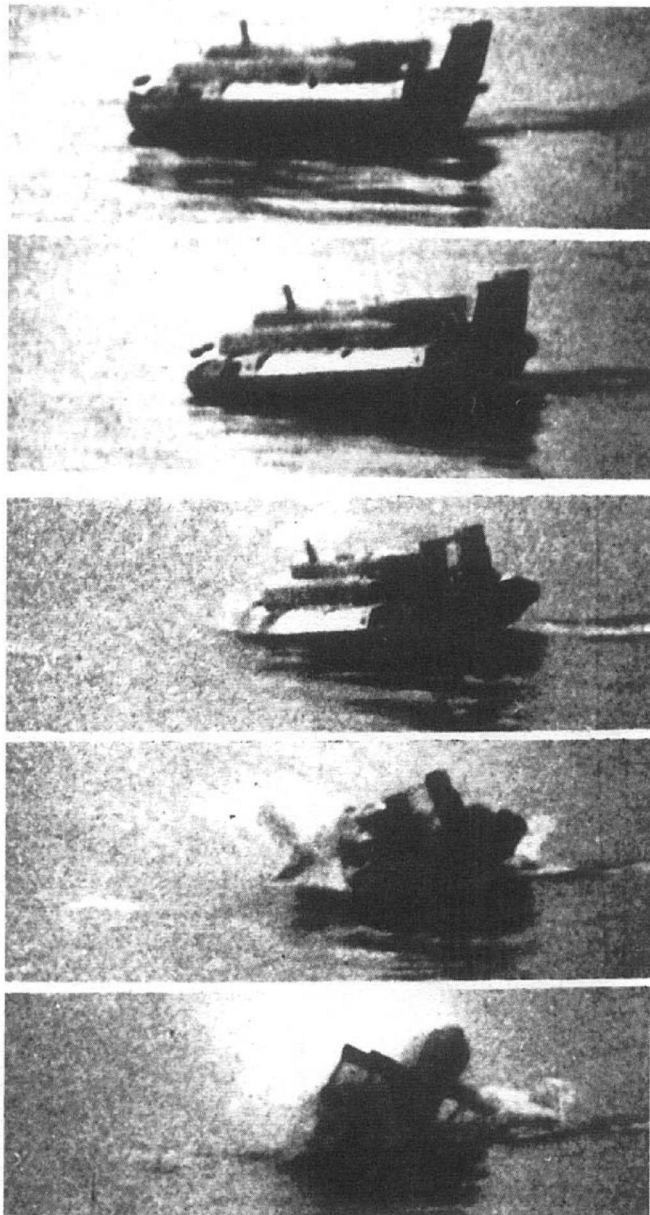
Κατά τα πρώτα χρόνια ανάπτυξης των hovercrafts παρατηρήθηκε ότι αυτά είχαν πολύ περιορισμένη ευστάθεια. Η κατάσταση βελτιώθηκε μόλις εισήχθησαν οι εύκαμπτες φούστες. Κατά τη λειτουργία ενός σκάφους πάνω από το νερό, οι δυνάμεις που επάγονται από τη διαβροχή του κάτω μέρους της φούστας προκαλούν σημαντικές αλλαγές στη διαγωγή. Παλαιότερα, η σχεδίαση της φούστας ήταν τέτοια που αυτές οι αλλαγές της διαγωγής προκαλούσαν μείωση της ροπής επαναφοράς. Ο χειριστής έπρεπε να ενεργήσει έτσι ώστε να επαναφέρει το σκάφος στη σωστή διαγωγή, διαφορετικά θα οδηγούταν αρχικά σε plough-in και στη συνέχεια σε πιθανή ανατροπή.

Δυστυχώς έχουν παρατηρηθεί διάφορα τέτοια ατυχήματα. Για παράδειγμα ένα πειραματικό αερόστρωμνο τύπου 711 Κινέζικης προέλευσης, ανετράπη κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής τον Μάιο του 1966. Το σκάφος ταξίδευε με ταχύτητα 50 km/h και έπρεπε να κάνει μια ξαφνική στροφή προκειμένου να αποφύγει τη σύγκρουση με μια μικρή βάρκα. Όταν έκανε τη στροφή, το σκάφος παρέκκλινε από την πορεία του, πήρε κλίση και τελικά ανετράπη.

Συνήθως, η διαδικασία που οδηγεί σε ανατροπή είναι η ακόλουθη: η πλώρη πέφτει προς τα κάτω, το σκάφος παρεκκλίνει της πορείας του, παίρνει κλίση, plough-in και τελικά ανατρέπεται. Το σχήμα 39 παρουσιάζει το φαινόμενο plough-in του βρετανικού ACV SR N6 και το σχήμα 40 παρουσιάζει το plough-in που οδήγησε σε ανατροπή ενός μοντέλου ACV .



*Σχήμα 39: Το φαινόμενο plough-in του Βρετανικού SR N6 κατά τις δοκιμές*



*Σχήμα 40: Ανατροπή αερόστρωμνου*



Η ακούσια πλευρική πλεύση (drift) μπορεί να προκαλέσει δραματική αύξηση της αντίστασης του σκάφους, λόγω της επαφής των πλευρών της φούστας με το νερό. Για την αντιμετώπιση του ανωτέρω φαινομένου είναι δραστική η μετατόπιση του κέντρου βάρους (CG) αντίθετα από την πλευρά της πλεύσης. Από αυτή την άποψη, η παροχή των ανεμιστήρων ή οι μηχανισμοί ανύψωσης της φούστας του σκάφους μπορούν να είναι πολύ σημαντικοί παράγοντες για τη διατήρηση της δυναμικής ευστάθειας. Βέβαια, οι απαιτούμενες μετατοπίσεις του CG είναι πάρα πολύ μεγάλες και το χρονικό διάστημα που θα πρέπει να συμβούν πολύ μικρό ιδιαίτερα για μεγαλύτερα σκάφη, τα οποία θα στηριχθούν περισσότερο στη διαμερισματοποίηση του θαλάμου αέρα για την εξασφάλιση ευστάθειας.

Η αυξανόμενη υδροδυναμική δύναμη (και ροπή) που οφείλεται στην επαφή της εύκαμπτης φούστας με την επιφάνεια του ύδατος είναι ο κύριος λόγος που οδηγεί στο φαινόμενο plough-in.

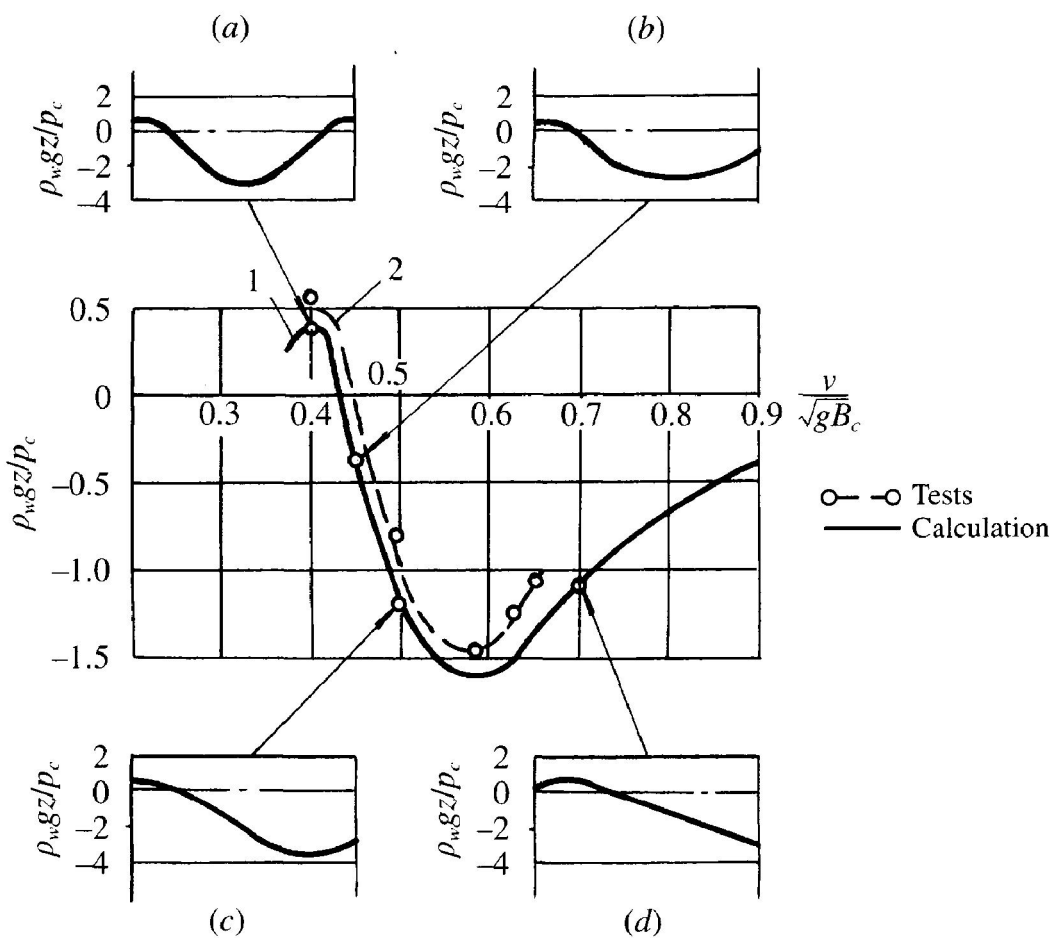
Πριν από την ανάπτυξη της γεωμετρίας της φούστας, το φαινόμενο plough-in μπορούσε να αποφευχθεί μόνο μέσω της ικανότητας των χειριστών. Κατά συνέπεια μπορεί να φανεί ότι είναι πολύ σημαντικό να μελετηθεί η λογική του plough-in και του φαινομένου της ανατροπής.

#### **4.2.2 Ανατροπή ACV σε Χαμηλές Ταχύτητες**

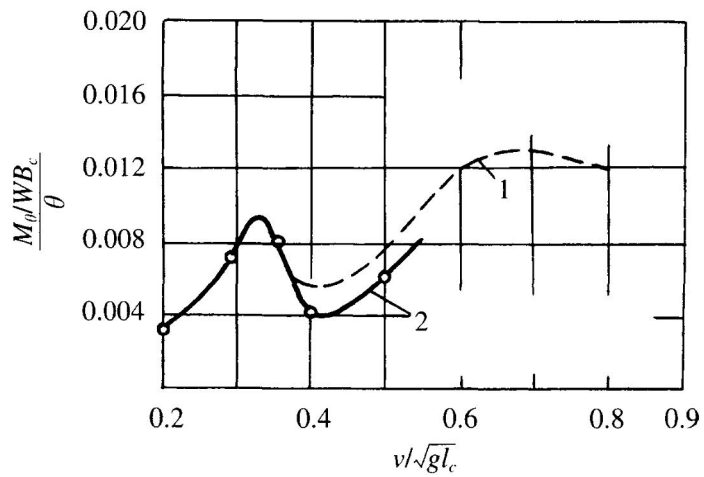
Η επιφάνεια του νερού κάτω από το σκάφος κατά τη διάρκεια της απογείωσης παραμορφώνεται αρκετά με αποτέλεσμα τη μείωση της αποτελεσματικότητας της φούστας όσον αφορά την ευστάθεια. Το σχήμα 41 παρουσιάζει την εσωτερική επιφάνεια του ύδατος ενός μοντέλου ACV σε συνάρτηση με τον αριθμό Fr. Από το γράφημα μπορεί να φανεί ότι το κοίλο του κύματος είναι αρκετά μεγάλο στην περιοχή  $Fr = 0.5-0.7$ , το οποίο έχει καταστρεπτική επίδραση στην εγκάρσια ευστάθεια του σκάφους.

Το σχήμα 42 παρουσιάζει τα αποτελέσματα μιας έρευνας από τον W.A. Crago, ο οποίος διαπίστωσε ότι η εγκάρσια ευστάθεια επιδεινώθηκε εντυπωσιακά σε  $Fr=0.33-0.56$ . Το σχήμα 43 δείχνει ότι η ροπή ανατροπής και η γωνία κλίσης αυξάνονται σε  $Fr=0.4$  και το σκάφος θα οδηγηθεί σε ανατροπή όταν η τιμή της ροπής θα υπερβεί το μέγεθος  $M_{\theta}/(WB_c)=0.022$ .

Γι' αυτόν ακριβώς το λόγο, οι χειριστές πρέπει να είναι αρκετά προσεκτικοί κατά τη φάση της ανύψωσης του σκάφους από το νερό ιδιαίτερα όταν αυτή κρατά μεγάλο χρονικό διάστημα (σε σκάφη που είναι εξοπλισμένα με ανεμιστήρες μικρής ισχύος).

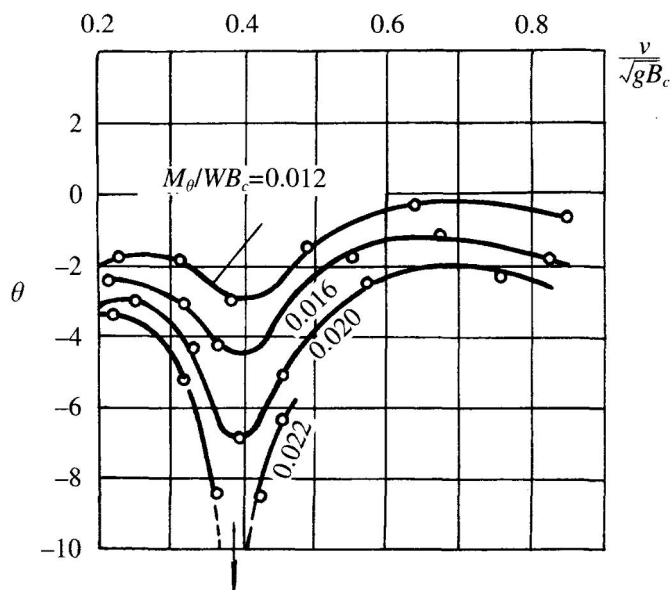


Σχήμα 41: Εσωτερική επιφάνεια του ύδατος ενός μοντέλου ACV σε συνάρτηση με τον αριθμό  $Fr$



Σχήμα 42: Μεταβολή της εγκάρσιας ευστάθειας σε συνάρτηση με τον αριθμό  $Fr$ .

- 1- Υπολογισμός μέσω της κλίσης του σκάφους (*trim*)
- 2- Υπολογισμός μέσω δισδιάστατης κατανομής πίεσης



Σχήμα 43: Πειραματικά αποτελέσματα της γωνίας κλίσης του σκάφους σε συνάρτηση με την ταχύτητα

### 4.2.3 Ανατροπή ACV σε Υψηλές Ταχύτητες

Τα ACVs έχουν μεγάλες πιθανότητες για να οδηγηθούν σε αστάθεια όταν ταξιδεύουν σε υψηλές ταχύτητες. Αυτό συμβαίνει συχνά λόγω τυχούσας έμπλορης διαγωγής οπότε η πλώρη του σκάφους θα κατέβει με τις συνέπειες που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Οι σχεδιαστές χρησιμοποιούν τις περιπτώσεις του plough-in και του έμπλωρου προνευστασμού χωρίς σαφή διάκριση μεταξύ τους. Το plough-in σημαίνει ότι το σκάφος λαμβάνει τόσο μεγάλη γωνία προνευστασμού ώστε η διαβροχή του πλωριού τμήματος της φούστας αυξάνεται δραματικά, το διάκενο φούστας-νερού σε αυτήν την περιοχή μηδενίζεται και δημιουργούνται μεγάλες τοπικές δυνάμεις αντίστασης. Ο έμπλωρος προνευστασμός είναι μία κατάσταση όπου το πλωριό τμήμα της φούστας είναι ακόμα "αερολιπαινόμενο" (το διάκενο μειώνεται χωρίς να μηδενίζεται).

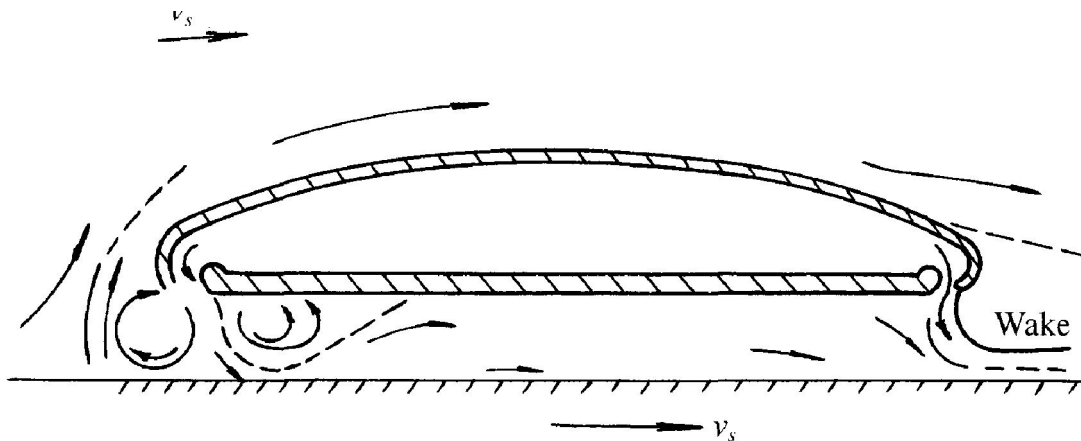
### 4.2.4 Κυριότεροι λόγοι των φαινομένων plough-in και της ανατροπής

Ο κάτωθι πίνακας παρουσιάζει τα κυριότερα στοιχεία που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια δοκιμών plough-in ενός μοντέλου σκάφους.

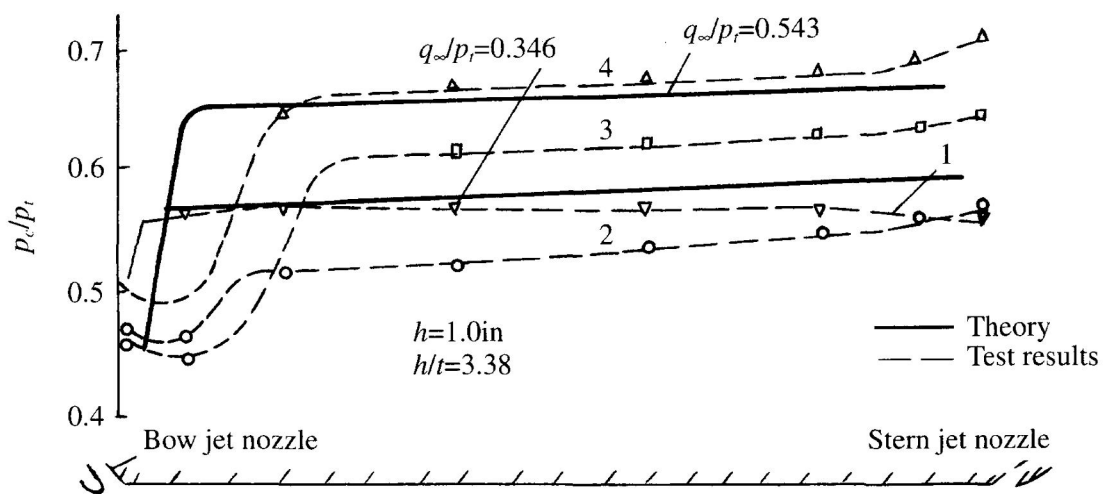
Time (s)	Trim angle	Bow cushion pressure	Stern cushion pressure	Situation
1 – start	1.78	1160	1130	Normal travel
2	1.08	1200	1100	Finger contacts water surface
2.5	0.90	1180	1100	Light tuck-under
3	0.62	1150	1100	Moderate tuck-under
3.5	0.03	1050	1040	Serious tuck-under
4	-0.05	900	950	Tuck-under unstable
4.5	-1.16	250	630	Plough-in begins
5	-3.94	-1200	350	Bow structure touches
5.5	-1.14	-1000	600	Recovery of skirt
9 – end	+1.60	1200	1130	Normal trim

1. Όσο η ταχύτητα του σκάφους αυξάνεται, το ρεύμα του αέρα εμποδίζει την εκροή του αέρα από το θάλαμο (σχήμα 44). Κατά συνέπεια εμφανίζεται διασταύρωση ροών στο θάλαμο, η οποία θα

αυξηθεί λόγω του οριακού στρώματος στο θάλαμο. Έτσι, όπως φαίνεται στο σχήμα 45, η πίεση του πλωραίου μέρος του θαλάμου θα μειωθεί ενώ η αντίστοιχη στο πρυμναίο θα αυξηθεί καθώς το σκάφος επιταχύνεται το οποίο θα οδηγήσει στη μετατόπιση του κέντρου της πίεσης προς τα πρύμα. Αυτό είναι το εσωτερικό αίτιο του plough-in.



Σχήμα 44: Γραμμές ροής του αέρα ενός αερόστρωμνου

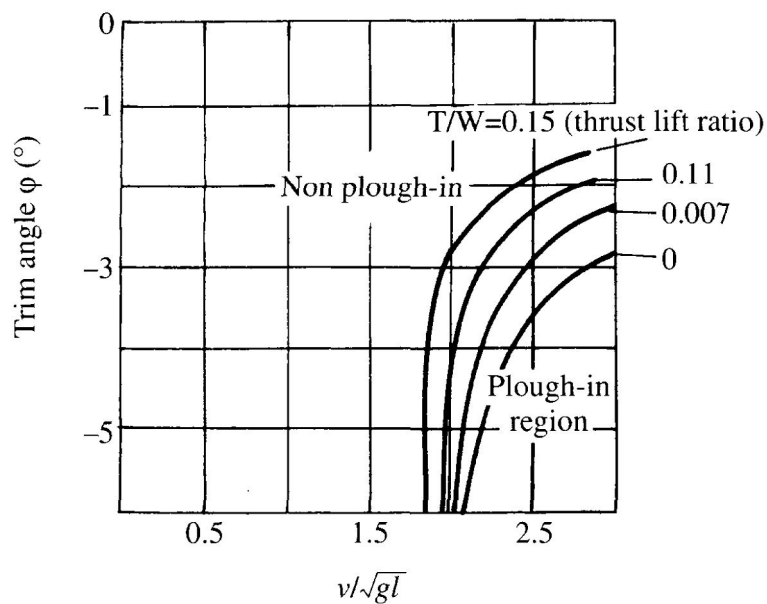


Σχήμα 45: Κατανομή της πίεσης του θαλάμου αέρα σε συνάρτηση με την ταχύτητα του σκάφους

1:  $q_{\infty}/p_t = 0$ , 2:  $q_{\infty}/p_t = 0.346$ , 3:  $q_{\infty}/p_t = 0.543$ , 4:  $q_{\infty}/p_t = 0.743$

2. Επίσης, από τη στιγμή που οι ωθητήρες του σκάφους τοποθετούνται στο ανώτερο κατάστρωμα, η γραμμή ώσης βρίσκεται πολύ ψηλότερα από την επιφάνεια στήριξης, επομένως η ροπή ανατροπής λόγω της ώσης αυξάνεται ανάλογα με την

ταχύτητα, και θα ενισχυθεί στην περίπτωση που το σκάφος ταξιδεύει κόντρα στον καιρό. Κατά συνέπεια εμφανίζεται ροπή που προκαλεί έμπλωρη διαγωγή, η οποία θεωρείται το εξωτερικό αίτιο του plough-in. Το σχήμα 46 παρουσιάζει πειραματικά αποτελέσματα μοντέλων που κινούνται χωρίς παρασύρουσα κίνηση (drift), στα οποία ο όρος  $T/W_n$  δείχνει την αναλογία ώσης/ανύψωσης. Εμφανέστατα, η περιοχή του plough-in αυξάνεται κατ'αναλογία με την αύξηση του λόγου ώσης/ανύψωσης.



Σχήμα 46: Όρια plough-in σε σχέση με τον αριθμό  $Fr$ , τη γωνία κλίσης και το λόγο ώσης/ανύψωσης

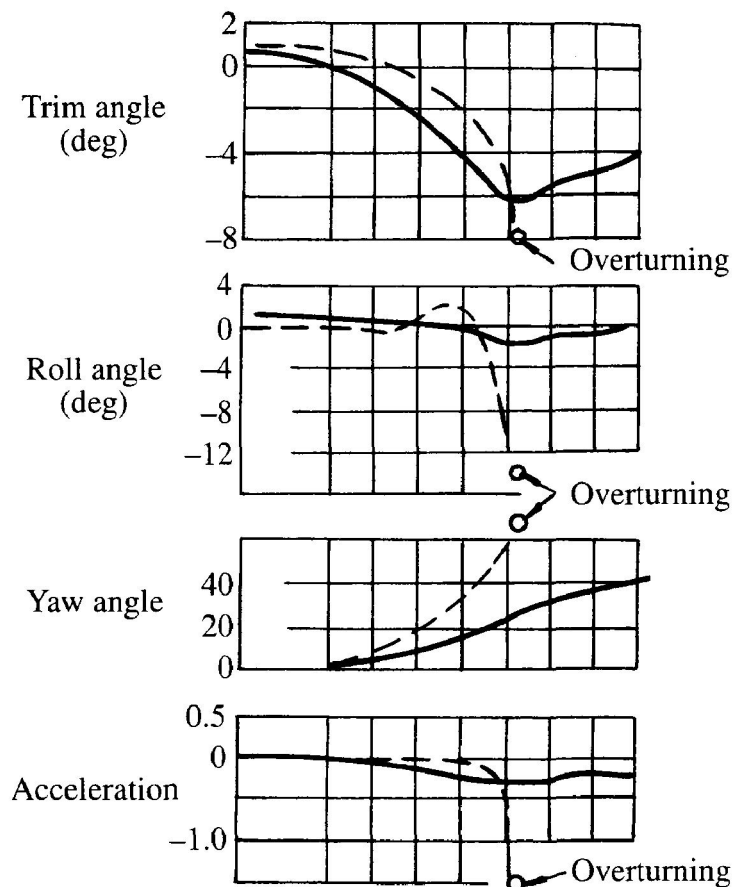
4. Στην περίπτωση όπου το plough-in εμφανίζεται με παρασύρουσα κίνηση, το αποτέλεσμα αυτής της ταυτόχρονης δράσης μπορεί να οδηγήσει στην ανατροπή του σκάφους. Όταν το σκάφος πλέει σε μεγάλες ταχύτητες, το φαινόμενο plough-in θα προκαλέσει μεγάλη γωνία κλίσης και η τελική ανατροπή είναι σχεδόν αναπόφευκτη. Ο πίνακας 4 παρουσιάζει το εύρος της ταχύτητας που είναι πιθανό να προκαλέσει plough-in και ανατροπή. Φαίνεται ότι το plough-in μπορεί να εμφανιστεί στην περίπτωση  $Fr < 0,7$ , και αυτό να οδηγήσει στην ανατροπή εάν η γωνία κλίσης πάρει τιμές μεγαλύτερες από  $50^\circ$ .

Items	High speed	Moderate speed	Low speed
Froude number $Fn_B$	1.7 or more	0.5–1.7	0.4 or less
Plough-in start	Probable	Impossible*	Impossible
Overtuning	Probable in the case of drifting angle larger than $50^\circ$	Low probability	Probable according to motion records

\* It is very difficult to overturn the ACV, but plough-in might be initiated in this speed range in the case of plough-in of craft at high speed and dropping down to this speed range.

#### Πίνακας 4: Εύρος ταχυτήτων που πιθανό να προκληθεί plough-in

Το σχήμα 47 παρουσιάζει τη σχέση μεταξύ της ανατροπής του σκάφους και της γωνίας του drift, στο οποίο η συνεχής γραμμή δείχνει τη θέση του σκάφους κατά τη διάρκεια της στροφής χρησιμοποιώντας αεροπηδάλια στην αρχή της στροφής και έπειτα το πηδάλιο μένει στην κεντρική θέση (μέσον). Η γωνία της κλίσης παραμένει σταθερή. Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει τη θέση του σκάφους κατά τη διάρκεια της στροφής έχοντας το πηδάλιο υπό σταθερή γωνία από αρχή έως το τέλος της στροφής. Σε αυτήν την περίπτωση το σκάφος ανατρέπεται σε γωνία περίπου  $70^\circ$ .



Σχήμα 47: Επίδραση των γωνιών κλίσης στην ευστάθεια

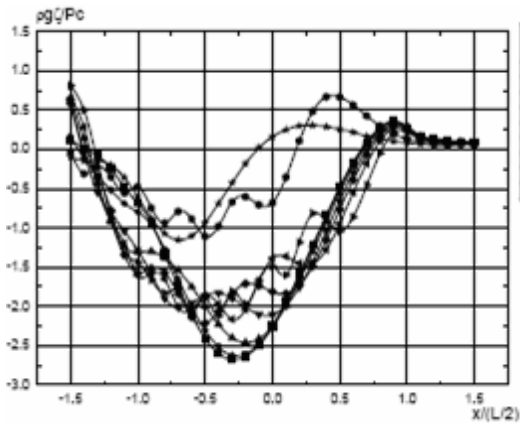
### 4.3 Πειραματική Μέθοδος Υπολογισμού της Εγκάρσιας Ευστάθειας

Ο κυματισμός που προκαλείται λόγω της κίνησης ενός αερόστρωμνου πάνω από το νερό έχει μεγάλη επίδραση στην ευστάθεια του σκάφους ως προς το διατοιχισμό. Πολλές θεωρίες έχουν αναπτυχθεί για τη διερεύνηση του ανωτέρω φαινομένου, όπως η θεωρία του γραμμικού κύματος η οποία αναπτύχθηκε από τον W.A.Crago. Σε αυτήν την παράγραφο παρατίθεται μία μέθοδος υπολογισμού για τη σχέση της ευστάθειας ως προς την κίνηση του διατοιχισμού με τον αριθμό Froude. Η μέθοδος αυτή δείχνει ότι η εγκάρσια ευστάθεια του σκάφους είναι ιδιαίτερα μειωμένη όταν το σκάφος κινείται σε πλευρικούς κυματισμούς με χαμηλή ταχύτητα ( $Fr=0.4$ ).

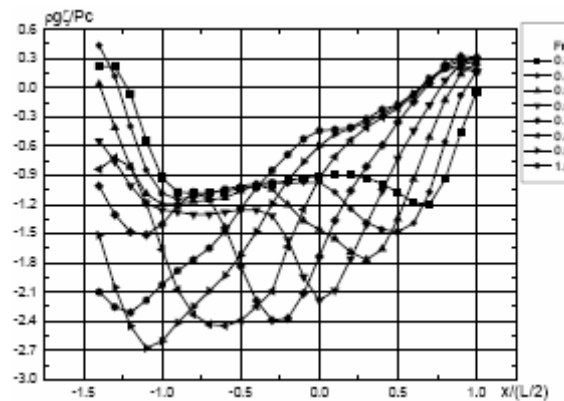
Εάν υποθέσουμε ότι η επίδραση της επαφής της φούστας με το νερό είναι αμελητέα, το υδροδυναμικό ισοδύναμο της κίνησης ενός αερόστρωμνου πάνω σε νερό μπορεί να θεωρηθεί σαν την κίνηση μιας κατανομής πίεσης. Η εφαρμογή της θεωρίας του W.A.Crago περιορίζει το πρόβλημα στον προσδιορισμό της πιθανής διαταραχής της ταχύτητας της ανωτέρω κατανομής. Αξιοσημείωτη είναι η διαχρονική προσπάθεια διαφόρων μελετητών για την πειραματική απεικόνιση αυτής της κατανομής όπως οι Newman και Poole, Huang Wong, Tatinclaux, Yeung, Zilman. Ο τελευταίος το 2006 εισήγαγε ένα πρωτοποριακό μαθηματικό μοντέλο και υπολόγισε τα φορτία του κυματισμού στο σκάφος που προκαλούσε η κίνηση μιας σταθερής κατανομής πίεσης η οποία κινείτο πάνω από το νερό με γωνία ως προς το  $\gamma aw$ .

Το σχήμα 48 παρουσιάζει την ανύψωση του κυματισμού στην centerline ενός ACV. Το σχήμα 49 παρουσιάζει τα προφίλ του κυματισμού στην centerline ενός αερόστρωμνου που επιταχύνεται.

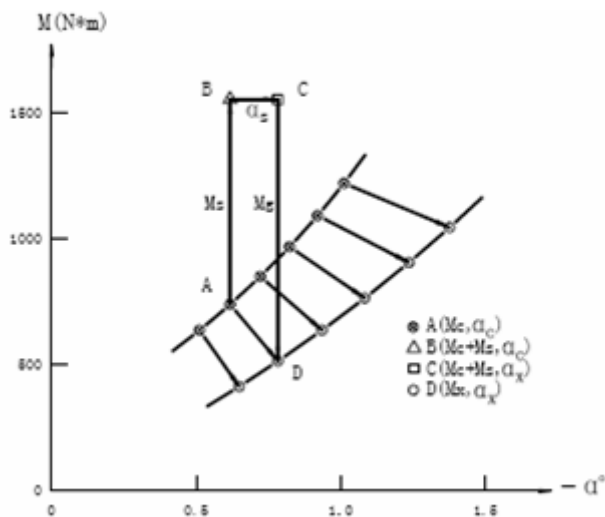




Σχήμα 48: Ελεύθερη ανύψωση του κύματος στη centerline του ACV για  $Fr=0.5$



Σχήμα 49: Ελεύθερη ανύψωση του κύματος σε αερόστρωμνο που επιταχύνεται

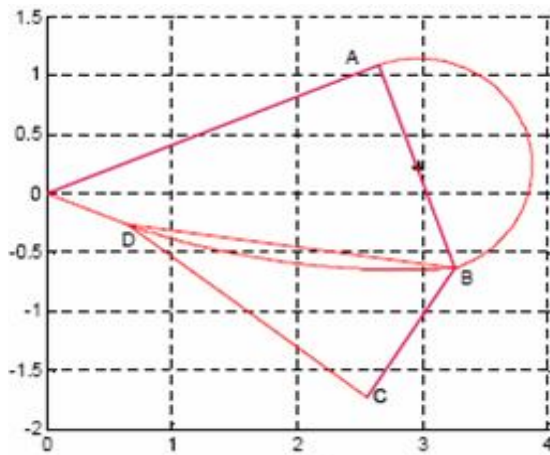


Σχήμα 50: Διαδικασία υπολογισμού της εγκάρσιας ευστάθειας ενός ACV

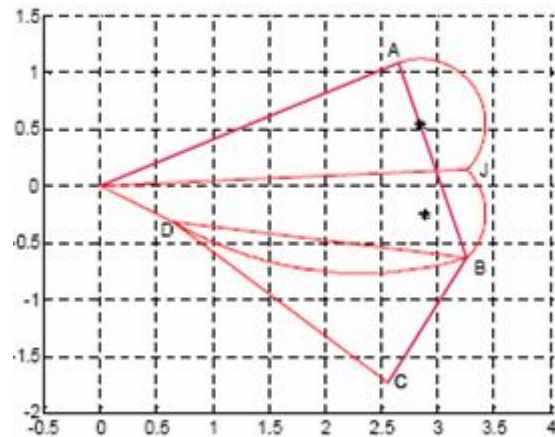
Το σημείο A είναι το αρχικό σημείο στην καμπύλη ευστάθειας με συντεταγμένες  $(M_x, \alpha_x)$ . Προσθέτοντας τη ροπή λόγω της οριζόντιας παραμόρφωσης της φούστας που έρχεται σε επαφή με το έδαφος ( $M_s$ ) προκύπτει το σημείο B. Στη συνέχεια αυξάνουμε τη γωνία κλίσης λόγω της κατακόρυφης παραμόρφωσης της φούστας ( $\alpha_s$ ) και προκύπτει το σημείο C. Ακολουθώντας αφαιρούμε τη ροπή επαναφοράς λόγω της βαρύτητας (αδράνειας) ( $M_g$ ) και φθάνουμε στο σημείο

Το σχήμα 50 παρουσιάζει τη μέθοδο υπολογισμού της εγκάρσιας ευστάθειας ενός ACV. Παρατηρούμε ότι στο σχήμα είναι σημειωμένα τέσσερα σημεία τα οποία καταδεικνύουν τη ροπή ( $M_x$ ) και τη γωνία ( $\alpha_x$ ) του διατοιχισμού του σκάφους.

D.Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να υπολογίσουμε τη μεταβολή της ροπής διατοιχισμού με τη γωνία κλίσης.



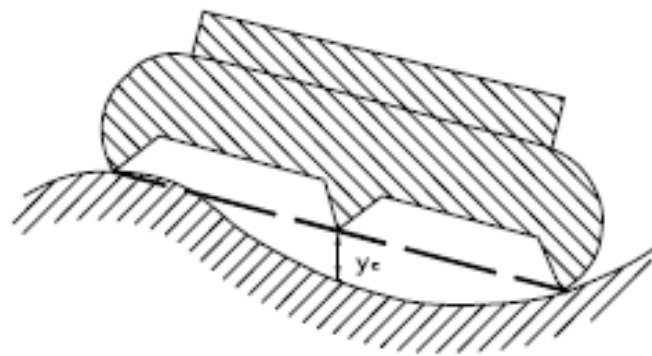
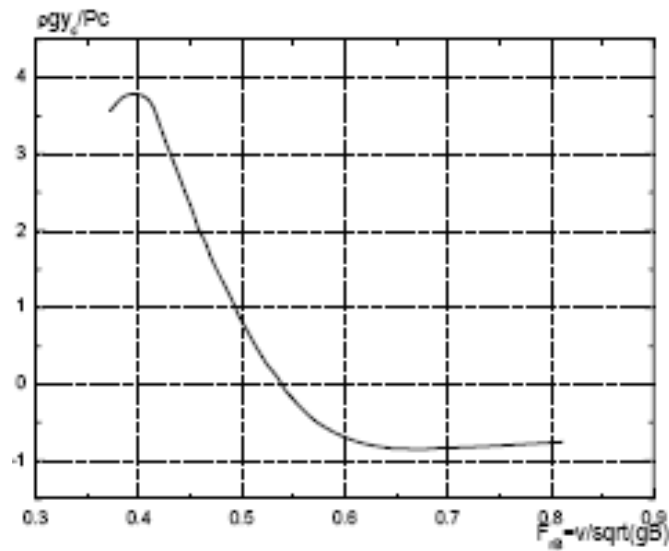
Σχήμα 51: Φούστα τύπου *bag-finger*



Σχήμα 52 :Φούστα τύπου *bibag-finger*

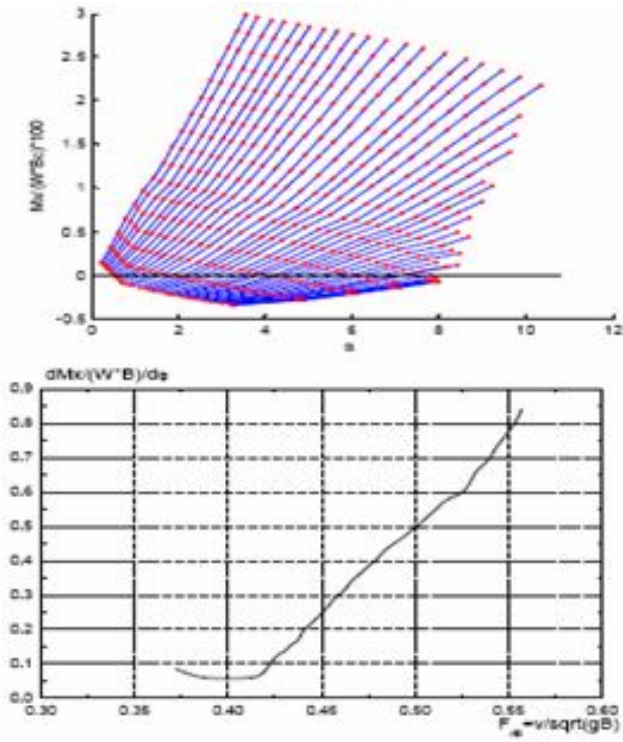
Τα σχήματα 51 και 52 παρουσιάζει δύο τύπους φούστας ,τη φούστα τύπου *bag-finger* και τη φούστα τύπου *bibag-finger* (διπλή τσάντα).Η μέθοδος που αναπτύχθηκε εφαρμόζεται και για τους δύο τύπους , με κατάλληλη διαμόρφωση των οριακών συνθηκών.

Το αδιάστατο διάκενο της φούστας στη *centerline* φαίνεται στο σχήμα 53.

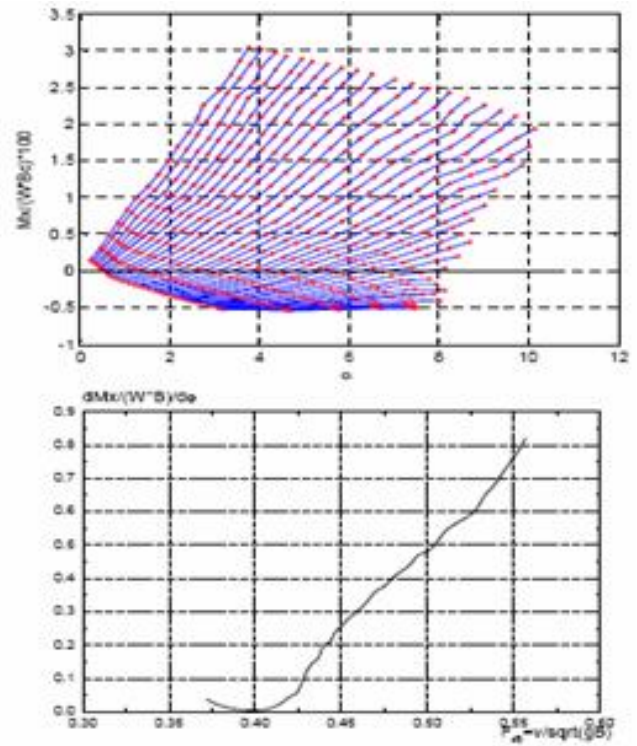


*Σχήμα 53: Μεταβολή του διακένου αιώρησης συναρτήσει του αριθμού  $Fr$*

Τα σχήματα 54 και 55 παρουσιάζουν την εγκάρσια ευστάθεια του σκάφους για τους δύο τύπους φούστας όταν αυτό κινείται σε πλευρικούς κυματισμούς, όπου παρατηρούμε την ελάχιστη τιμή της για  $Fr=0.4$



Σχήμα 54: Μεταβολή της εγκάρσιας ευστάθειας συναρτήσει του αριθμού  $Fr$  για φούστα τύπου *bag-finger*



Σχήμα 55: Μεταβολή της εγκάρσιας ευστάθειας συναρτήσει του αριθμού  $Fr$  για φούστα τύπου *bibag-finger*

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5- Σύστημα Φούστας ACV**

### **5.1 Σχεδίαση των Φουστών ενός Αερόστρωμνου**

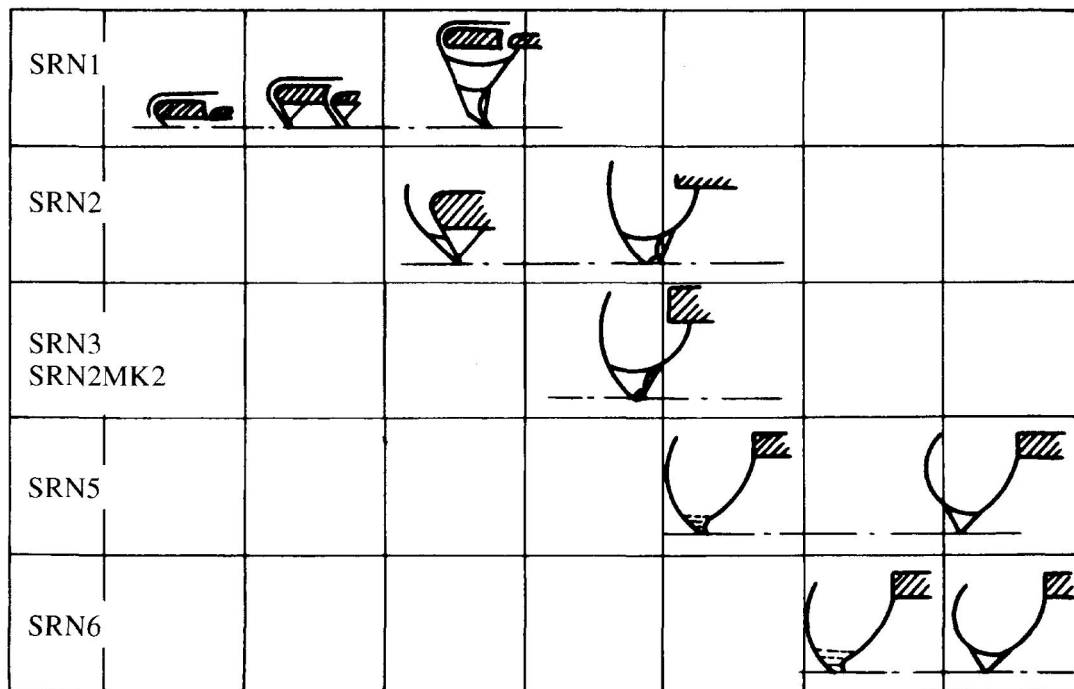
#### **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Στα πρώτα στάδια της ανάπτυξης των ACV, πριν η εύκαμπτη φούστα θεωρηθεί απαραίτητη, χρησιμοποιούνταν ισχυροί ανεμιστήρες για να μπορέσει το σκάφος να αποκτήσει ένα διάκενο της τάξης των 50-150 χιλ.

Τα σκάφη αυτά είχαν ικανοποιητική αμφίβια ικανότητα και κάθετη εκκαθάριση εμποδίων, αλλά αντιμετώπισαν προβλήματα σε περιπτώσεις όπου το έδαφος είχε ανωμαλίες (π.χ. κοιλότητες στο έδαφος, βράχοι). Αρκετά συχνά η γάστρα τους συγκρουόταν με το έδαφος. Για αυτό το λόγο, θα μπορούσαν μόνο να λειτουργήσουν σε αρκετά ομαλό έδαφος, ή σε ήρεμο νερό. Αυτά τα αεριωθούμενα σκάφη φαίνονταν αρκετά εντυπωσιακά, και παρέπεμπαν σε "ιπτάμενους δίσκους" καθώς εμφανίζονταν κυριολεκτικά "να αιωρούνται". Το σκάφος για να αιωρείται απαιτούσε υψηλά επίπεδα ισχύος και ήταν πολύ "ευαίσθητο" στον έλεγχο. Ένας λογικός τρόπος να αυξηθεί το ύψος εκκαθάρισης εμποδίων του σκάφους, προκειμένου να βελτιωθεί η ευστάθειά του ήταν η κατασκευή και τοποθέτηση εύκαμπτων μεμβρανών περιφερειακά σε κάθε προστόμιο αέρα. Αυτή ήταν πράγματι η μέθοδος που υιοθετείται αρχικά στην εταιρεία Saunders Roe στη Μεγάλη Βρετανία.

Το 1958 ο C. H. Latimer Needham επινόησε την έννοια της εύκαμπτης φούστας η οποία τοποθετήθηκε το 1960 στο SR N1 με δραστικά αποτελέσματα όσον αφορά τη βελτίωση της εκκαθάρισης εμποδίων. Ουσιαστικά αυτή η εφεύρεση έδωσε στο αερόστρωμνο πραγματικές αμφίβιες ικανότητες. Αργότερα σε αυτή την εφεύρεση προστέθηκε μια διογκωμένη εύκαμπτη μεμβράνη (φούστα) γύρω από το σκάφος προκειμένου η κατανομή του αέρα να γίνει

ομοιόμορφη. Στο σχήμα 56 φαίνεται η χρονική εξέλιξη των ποδιών από το πρώτο μοντέλο μέχρι την τύπου bag and finger φούστα του SRN6.



Σχήμα 56: Εξέλιξη των τύπων φούστας

Τα πλεονεκτήματα των εύκαμπτων φουστών μπορούν να περιγραφούν ως εξής:

1. Σημαντική μείωση της απαιτούμενης ισχύος των ανεμιστήρων
2. Αύξηση του ύψους εκκαθάρισης εμποδίων
3. Μειωμένη αντίσταση σε ήρεμο νερό, ιδιαίτερα στην hump ταχύτητα
4. Βελτιωμένη ικανότητα ελιγμών μέσω συστημάτων ανύψωσης και μετατόπισης της φούστας
5. Βελτιωμένη πλοϊμότητα σε ακολουθούντες κυματισμούς (ιδιαίτερα για σχέδια τρίτης γενιάς όπως οι φούστες χαμηλής πίεσης)
6. Βελτιωμένες δυνατότητες συντήρησης, δεδομένου ότι οι εύκαμπτες φούστες μπορούν να εξαρμωθούν και να αντικατασταθούν εύκολα.

Δεν είναι παράλογο να ισχυριστεί κανείς ότι η φούστα για το hovercraft είναι εξίσου σημαντική όσο και τα ελαστικά για ένα αυτοκίνητο.

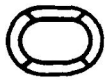





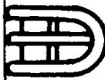

Η εξέλιξη των εύκαμπτων φουστών βελτίωσε βαθμιαία την εκκαθάριση εμποδίων του σκάφους χωρίς να είναι απαραίτητη η ύπαρξη μεγάλου κενού αέρα κάτω από τις φούστες επειδή η στατική και δυναμική παραμόρφωσή τους πάνω από τις ανωμαλίες των επιφανειών τους επέτρεπε να διατηρούν ένα ικανοποιητικό διάκενο αέρα και να ελαχιστοποιήσουν την αντίσταση καθώς το hovercraft υπερπηδούσε τα φυσικά εμπόδια με ευκολία.

Το 1962 ο Dennis Bliss του Hovercraft Development Ltd με τη συνδρομή του Sir Christopher Cockerell, εφεύρε την φούστα τμημάτων (segmented skirt). Με αυτόν τον τρόπο, μείωσε σημαντικά τις δυνάμεις αντίστασης λόγω της ιδιότητας των τμημάτων να παραμορφώνονται ξεχωριστά πάνω από κάθε ανώμαλη επιφάνεια. Έτσι, το διάκενο αέρα κάτω από τη φούστα και η απαιτούμενη ισχύς των ανεμιστήρων μειώθηκε ακόμα περισσότερο. Δεν ήταν πλέον απαραίτητο να χρησιμοποιούνται περιφερειακά προστόμια αέρα προκειμένου να διατηρηθεί το ορατό κενό αέρα κάτω από τη φούστα ούτε και οι υψηλές πιέσεις στο ανώτερο τμήμα της φούστας.

Με το πέρασμα του χρόνου οι σχεδιαστές πειραματίζονταν με ολοένα και χαμηλότερες υπερπιέσεις στο θάλαμο αέρα κάτω από τη γάστρα του σκάφους, για να μπορέσουν να εξοικονομήσουν περαιτέρω ισχύ από τους ανεμιστήρες. Διαπιστώθηκε ότι όταν ο λόγος  $p_j/p_c$  λάμβανε τιμές κάτω από 1.2 το ανώτερο μέρος της φούστας αποκρινόταν καλύτερα στις ανομοιομορφίες των επιφανειών, προσδίδοντας στους επιβάτες του σκάφους μεγαλύτερη άνεση. Ήταν η αρχή της τεχνολογίας των "φουστών απόκρισης", η οποία από τότε αναπτύσσεται συνεχώς στην Κίνα, όπως και στη Μεγάλη Βρετανία.

## 5.2 Διατάξεις Φούστας

Στο παρόν κεφάλαιο θα μελετήσουμε την εξέλιξη των φουστών κινέζικης και βρετανικής κατασκευής, λόγω του ότι οι περισσότεροι από τους τύπους φουστών που εγκαθίστανται παγκοσμίως σε ACVs είναι μέχρι και σήμερα παρόμοιοι με αυτούς.

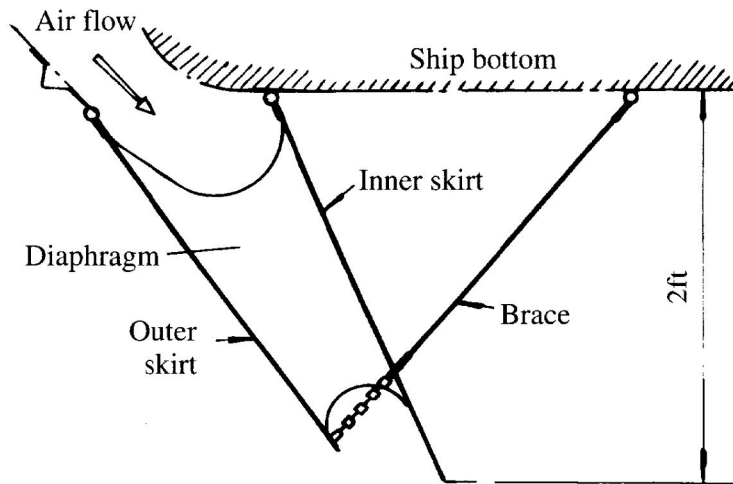
SRN1						
SRN2 SRN2MK2						Forward ↗
SRN3 SRN2MK						
SRN5						
SRN6						

Σχήμα 57 : Διατάξεις φούστας-διαμερισματοποίησης αερόστρωμων

Αρχικά η εύκαμπτη φούστα εμφανίστηκε ως ένας τρόπος επέκτασης των ακροφυσίων. Η φούστα του σκάφους SR N1 παρουσιάζεται στο σχήμα 57. Η αντίσταση του σκάφους και η αστάθειά του στην hump ταχύτητα δεν ήταν ικανοποιητική σε αυτές τις πρώτες σχεδιάσεις. Αυτός ο τύπος φούστας ήταν επίσης εγκατεστημένος στο

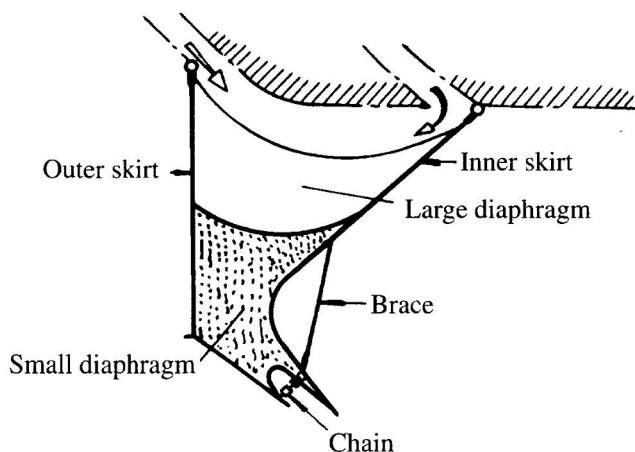


κινεζικής σχεδίασης ACV 711-1 το 1965.



Σχήμα 58: Φούστα με διάταξη εύκαμπτου προφυσίου

Το σχήμα 59 παρουσιάζει την πρωτότυπη σχεδίαση της φούστας τύπου bag, η οποία αναπτύχθηκε από την ιδέα του προεκτεταμένου ακροφυσίου αέρα και αύξησε την πίεση στην φούστα σε σύγκριση με την πίεση του θαλάμου αέρα, προκειμένου να διαμορφωθεί σταθερή γεωμετρία. Αυτός ο τύπος φούστας εφαρμόστηκε με επιτυχία σε διάφορους τύπους βρετανικών ACVs όπως τα SR N2, SR N5, SR N3 και SR N6. Τα μειονεκτήματα αυτής της σχεδίασης είναι ότι τα

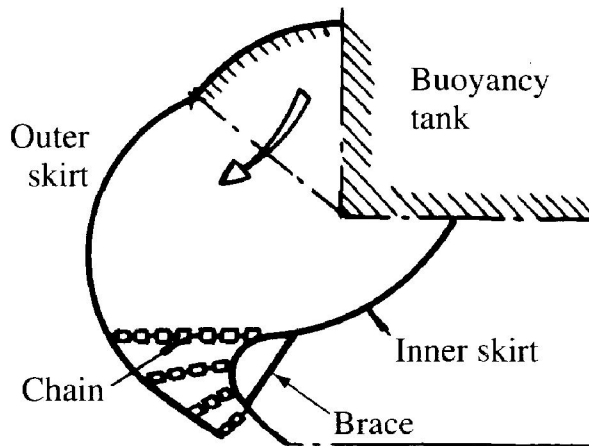


ακροφύσια αέρα φθείρονται εύκολα από την τριβή ενώ η επισκευή και η αντικατάστασή τους είναι ιδιαίτερα δύσκολη και ότι η αντίσταση του σκάφους είναι αυξημένη κατά πολύ.

Σχήμα 59: Αρχική σχεδίαση φούστας με προφύσιο

Προκειμένου να επιτευχθεί η διαμόρφωση των ακροφυσίων, οι σχεδιαστές χρησιμοποίησαν αρχικά αλυσίδες για να ενώσουν το

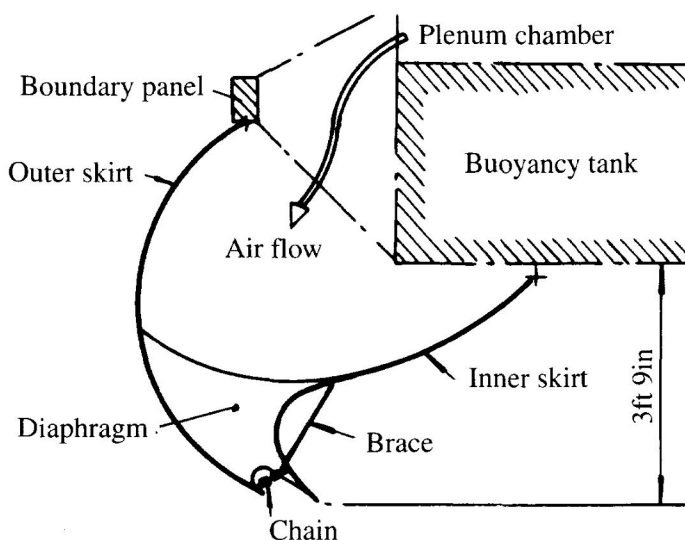
εξωτερικό με το εσωτερικό τμήμα του υφάσματος της φούσας (σχήμα 60), όμως λόγω της συγκέντρωσης τάσεων στις ενώσεις σε αυτήν την περιοχή, το ύφασμα της φούσας κατά τη διάρκεια των δοκιμών αστοχούσε και κατά συνέπεια ήταν αναγκαία η επιδιόρθωσή του σχεδόν μετά από κάθε δοκιμή.



Σχήμα 60 : Χρήση της αλυσίδας σε φούσα

Το όριο ζωής αυτής της φούσας ήταν περίπου 3 ώρες, ειδικά στην γωνία της πρύμνης.

Αργότερα, χρησιμοποιήθηκαν τα διαφράγματα υφασμάτων στη θέση των αλυσίδων του σχήματος 61. Αυτή η ιδέα αποδείχθηκε καλύτερη.



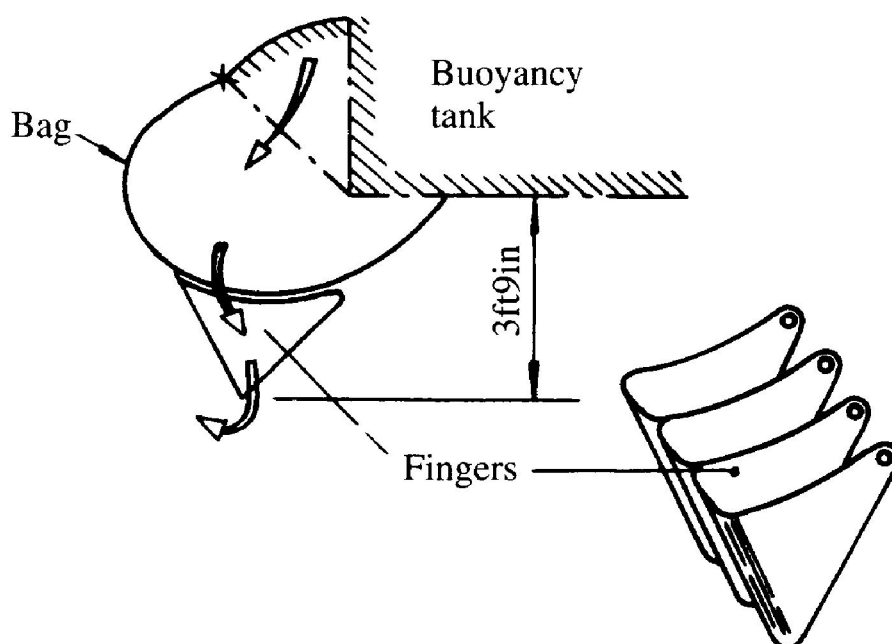
Σχήμα 61: Σύνδεση φούσας με εύκαμπτο διάφραγμα

Το σχήμα 62 παρουσιάζει ένα τμήμα μιας φούσας τύπου τσάντας-δάχτυλων (bag-finger), η οποία έχει εφαρμοστεί παγκοσμίως σε ACVs. Αυτός ο τύπος δεν απαιτούσε ακροφύσια στη βάση της

φούστας και επιτύγχανε διάκενο αιώρησης παρόμοιο με των πρώτων σχεδιάσεων.

Εντούτοις, μια σειρά άλλων πλεονεκτημάτων προέκυψαν, όπως:

- Απλή δομή, εύκολη κατασκευή και χαμηλότερο κόστος
- Ευκολότερη συντήρηση, ειδικά για τα σκάφη που πραγματοποιούσαν σταθερά δρομολόγια, όπως τα SR N6, N4, κ.λπ., τα οποία έπρεπε να έχουν μεγάλο χρόνο μεταξύ των επισκευών/επιθεωρήσεων (mean time between overhaul) και μικρό χρονικό διάστημα για επισκευή της φούστας.
- Αυξημένο ύψος εκκαθάρισης εμποδίων

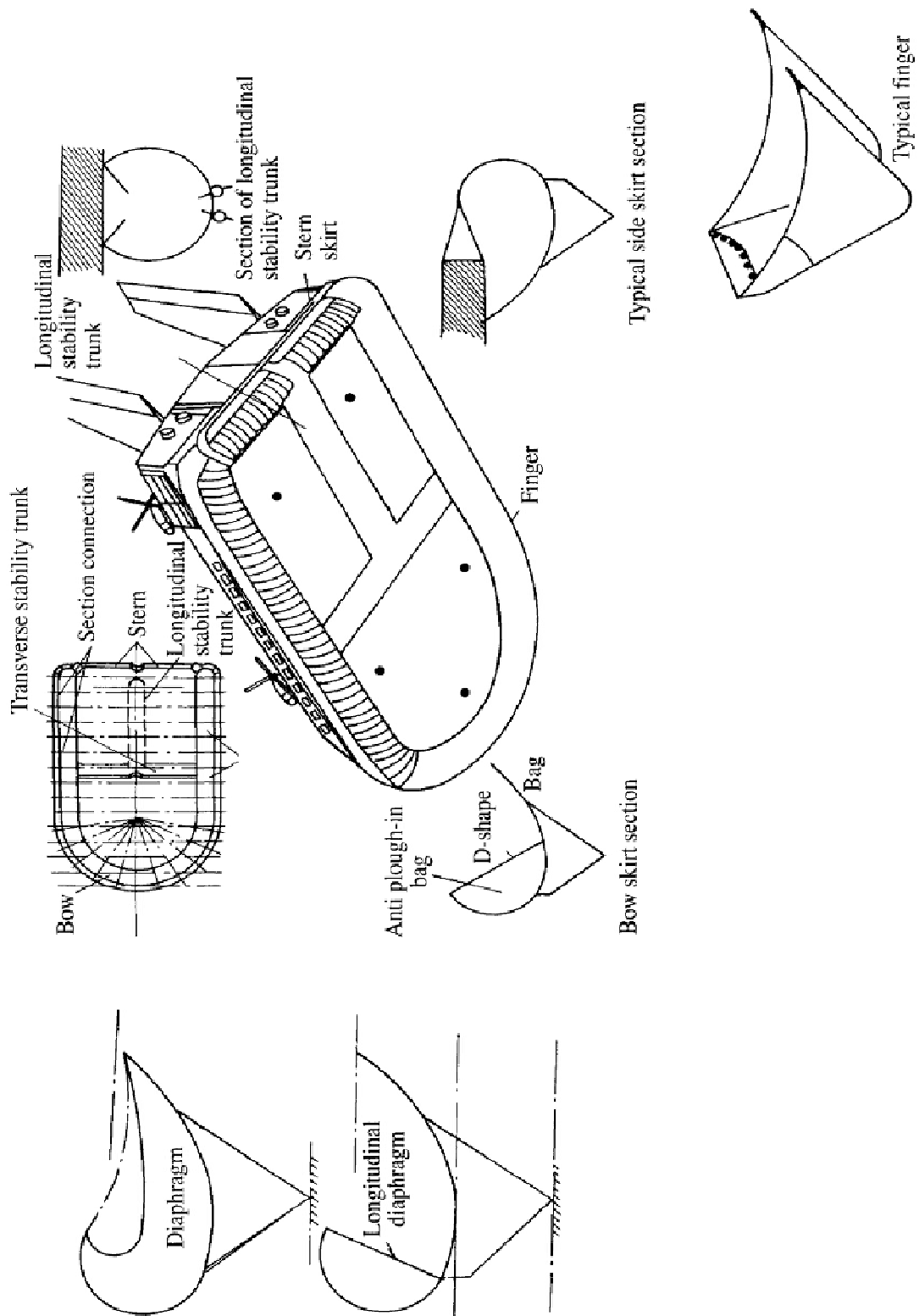


Σχήμα 62: Διάταξη φούστας με δάχτυλα (*fingers*)

Το σχήμα 63 παρουσιάζει τη διάταξη της φούστας του βρετανικού ACV SR N4. Χρησιμοποιήθηκαν εγκάρσια διαφράγματα στο πλωραίο τμήμα της φούστας προκειμένου να διαμορφωθεί ένα σχήμα D για να αποτραπεί η περίπτωση plough-in του σκάφους και να ελεγχθεί κατά το δυνατό η κίνηση αναπήδησης της φούστας.

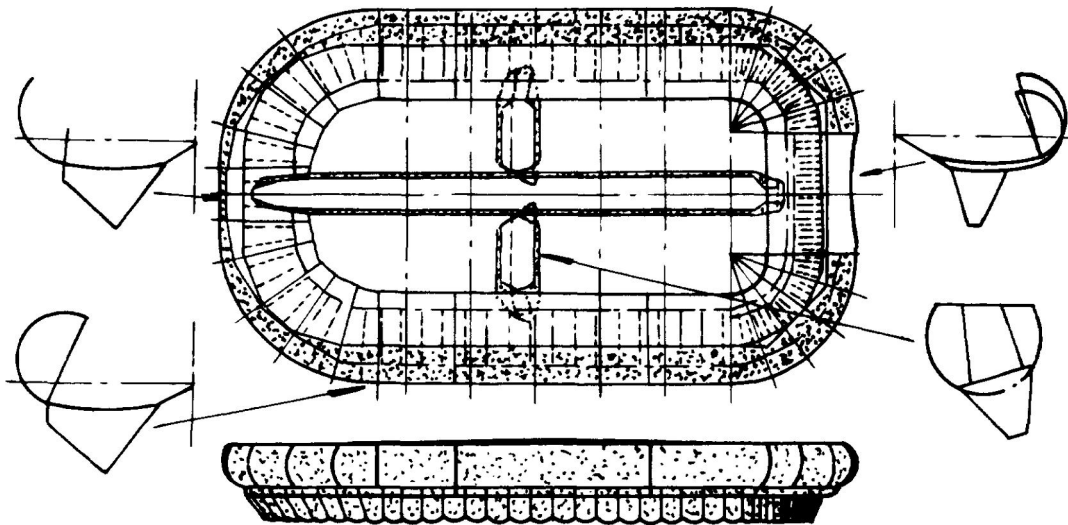
Στο SR N4 εγκαταστάθηκαν ποδιές (*aprons*) στη θέση των δάχτυλων της φούστας για να διευκολυνθεί η αποσύνδεση/σύνδεση των δάχτυλων. Οι ποδιές αυτές είχαν το θετικό ότι παρεμπόδιζαν τον

ψεκασμό (spray) του νερού προς τις υπερκατασκευές διευκολύνοντας την ορατότητα του χειριστή.



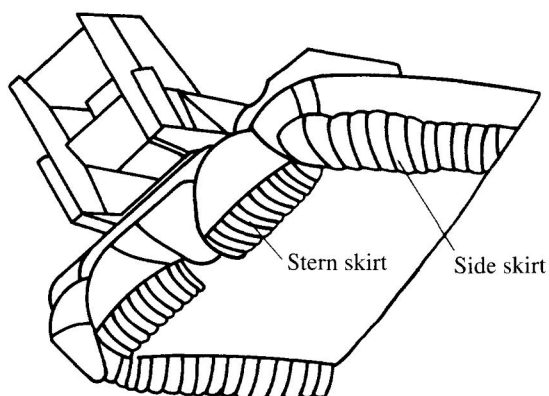
Σχήμα 63: Η φούστα του SR N4

Το σχήμα 64 παρουσιάζει τη διάταξη της φούστας του βρετανικού ACV BH.7. Φαίνεται ότι στο πλωραίο τμήμα και στην πλευρά χρησιμοποιήθηκε ο τύπος bag-finger ενώ στο πρυμναίο τμήμα και στο εσωτερικό του θαλάμου αέρα χρησιμοποιήθηκε φούστα κωνικού τύπου. Το δυσκολότερο τμήμα όσον αφορά τη σχεδίαση είναι οι πρυμναίες γωνίες, καθόσον σε αυτά τα σημεία είναι πιθανότερη η εμφάνιση του φαινομένου εκσκαφής (scooping) ειδικά σε χαμηλές ταχύτητες στην κατάσταση εκτοπίσματος.



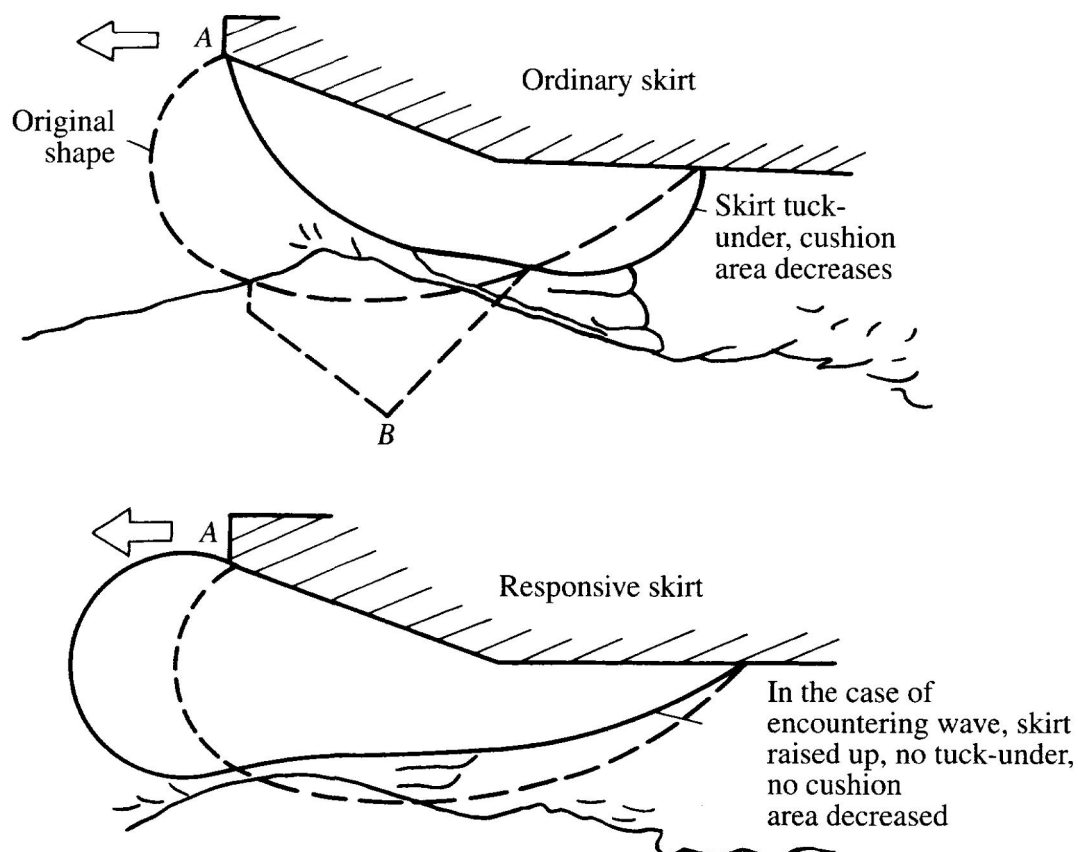
Σχήμα 64: Η διάταξη της φούστας του ACV BH.7

Προκειμένου να λυθεί αυτό το πρόβλημα, χρησιμοποιήθηκαν μικρές κωνικές κυψέλες σαν σημεία μετάβασης/σύνδεσης της πλευράς με το πρυμναίο τμήμα της φούστας όπως φαίνεται στο σχήμα 65.



Σχήμα 65: Διάταξη πρυμναίου τμήματος φούστας του SR N6

Το σχήμα 66 παρουσιάζει την παραμόρφωση μιας συνηθισμένης φούστας τύπου bag-finger και μιας φούστας απόκρισης (responsive) σε κυματισμό. Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει την αρχική μορφή της φούστας, ενώ η συνεχής γραμμή δείχνει την παραμόρφωση της φούστας. Όσον αφορά τη bag-finger φούστα, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα το σκάφος να αντιμετωπίσει φαινόμενα plough-in ενώ για τη φούστα απόκρισης αυτή η πιθανότητα είναι αρκετά μικρότερη.



Σχήμα 66: Σύγκριση της παραμόρφωσης μεταξύ "απαντητικής" και φούστας συμβατικής σχεδίασης

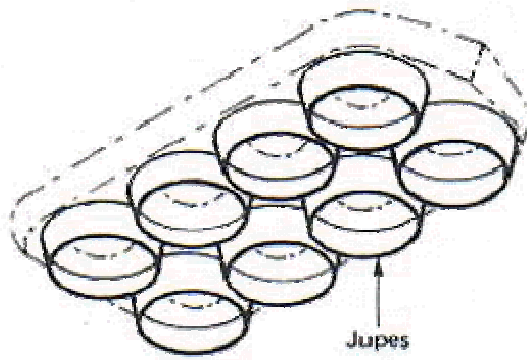
Στη Γαλλία, αναπτύχθηκε ένας εναλλακτικός τύπος φουστών, αποκαλούμενος jure, που εφευρέθηκε από τον Jean Bertin. Το jure είναι ένας κώνος υφάσματος με μια γωνία 5-10 μοιρών ως προς την κατακόρυφο. Όταν διογκώνεται από τον αέρα μετατρέπεται σε ένα σχετικά δύσκαμπτο "μαξιλάρι" μέχρι το σημείο όπου το κάτω μέρος της αρχίζει να τσαλακώνεται. Αυτός ο τύπος σχεδίασης είχε εφαρμοστεί στη σειρά σκαφών Sedam. Η ιδιαίτερα υψηλή

διαμερισματοποίηση του θαλάμου αέρα λόγω των jupes παρείχε θαυμάσια ευστάθεια. Αυτός ο τύπος φούστας δεν ανταποκρίνεται τόσο καλά σε κυματισμό όσο η φούστα τύπου bag-finger και δίνει έτσι μάλλον υψηλότερη αντίσταση, με συνέπεια την απαίτηση μεγαλύτερης εγκατεστημένης ισχύος. Επίσης λόγω φαινομένου εκσκαφής του νερού στο πρυμναίο μέρος των jupes μειώνονται σημαντικά τα περιθώρια επιτάχυνσης του σκάφους κατά τη διέλευση από την hump speed. Αποτέλεσμα των ανωτέρω είναι αυτός ο τύπος σχεδίασης να εκτοπιστεί από την φούστα τύπου bag-finger. Βέβαια, θα ήταν δυνατό ο τύπος να είναι άκρως ανταγωνιστικός μέσω της ρύθμισης της ροής του αέρα σε κάθε κυψέλη, εντούτοις θα προκαλείτο σημαντική φθορά σε αυτήν την περιοχή - μεγαλύτερη απ'ό,τι για μια φούστα τύπου bag-finger.

Στην προσπάθεια εξέλιξης των jupes κατασκευάστηκε ένας τύπος φούστας με περιφερειακές κυψέλες που τοποθετήθηκε στο σκάφος JEFF-A με εντυπωσιακά αποτελέσματα, ιδιαίτερα σε ότι αφορά την ευστάθεια, βελτιώνοντας ταυτόχρονα τις δυνατότητες συντήρησης, καθόσον δεν ήταν αναγκαία η τοποθέτηση εσωτερικής φούστας ευσταθείας.

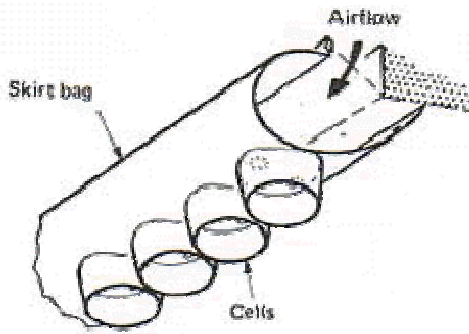
### **5.3 Σύγκριση των Διαφόρων Τύπων Φούστας**

Παρακολουθώντας την ανάπτυξη των διαφόρων τύπων φούστας προκύπτει το ερώτημα για την ύπαρξη ή όχι ενός ενιαίου βέλτιστου τύπου για όλα τα ACVs, ή εάν ο σχεδιαστής πρέπει να συνδυάσει διάφορα επιμέρους χαρακτηριστικά κατά τη σχεδίαση του σκάφους ανάλογα της επιχειρησιακής του απασχόλησης. Η ακόλουθη επισκόπηση των σύγχρονων τύπων φούστας κρίνεται απαραίτητη για την κατανόηση του ανωτέρω προβλήματος.

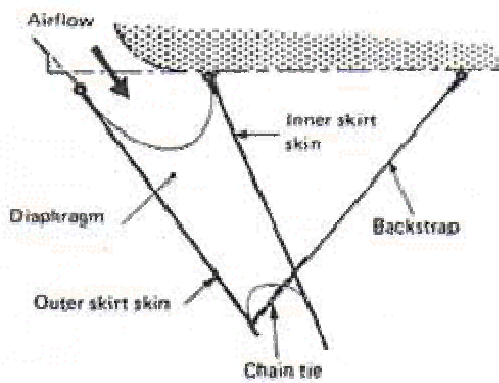


**Bertin Skirt**

used on:  
 Sedam N.101  
 Sedam N.102  
 Sedam N.300  
 Sedam N.500  
 Be11 Carabao  
 Aerojet Manta

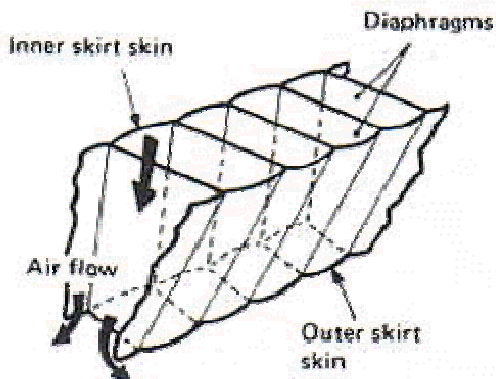


**Peri-Cell Skirt**



**Trunked Skirt**

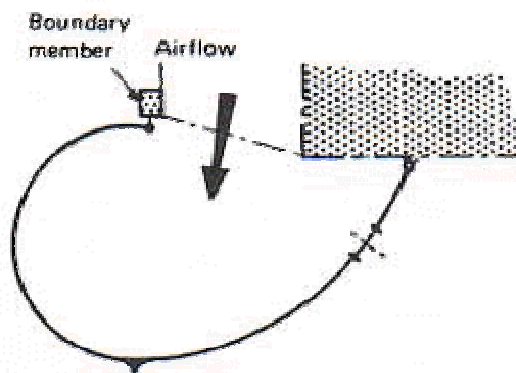
used on:  
 SR.N1  
 SR.N2



**Convoluted Skirt**

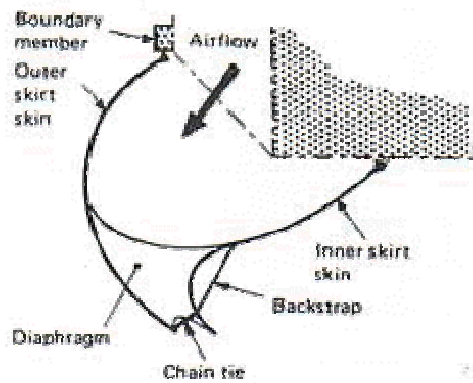
used on:  
 Vickers





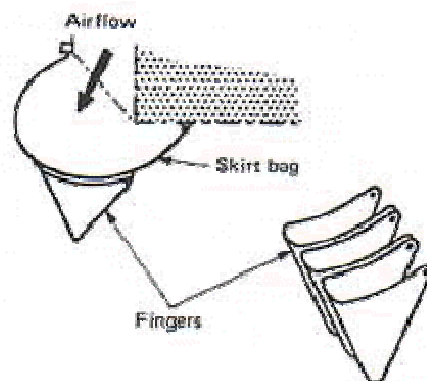
### Loop / Bag Skirt

used on racing hovercraft  
for higher speeds



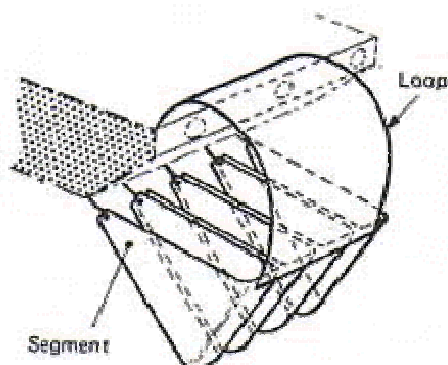
### Jetted Skirt

used on:  
SR.N2  
SR.N3  
SR.N5  
SR.N6



### Bag & Finger Skirt

used on:  
SR.N3  
SR.N4  
SR.N4 Mk.2  
SR.N5s  
SR.N6s  
BH.7



### Segmented Skirt

used on:  
HD2  
VT1  
EM2

### 5.3.1 Φούστα Τύπου Bag-Finger

Αυτό είναι ο κυριότερος τύπος φούστας για τα εμπορικά ACVs σήμερα. Το δάχτυλο (finger) έχει βάθος μεταξύ 50 και 80% του ύψους του θαλάμου αέρα κάτω από τη γάστρα, εξαρτώμενο από την πίεση του αέρα στο θάλαμο. Προκειμένου να επιτευχθούν χαμηλές πιέσεις στο θάλαμο ( $1.05-1.2P_c$ ), απαιτείται η τοποθέτηση εγκάρσιας φούστας ευσταθείας ιδιαίτερα για τα μεγαλύτερα σκάφη. Το πλάτος του δάχτυλου είναι μεταξύ 40 και 50% του βάθους του.

Η εταιρεία BHC έχει καινοτομήσει εισάγοντας τη βολβοειδή φούστα για το πλωραίο τμήμα του σκάφους. Η γεωμετρία της είναι τέτοια που κατά τη διάρκεια της κίνησης της πλώρης προς τα κάτω, η φούστα ανυψώνεται διατηρώντας την ακαμψία της, αποτρέποντας την προς τα πίσω μετακίνηση του κέντρου πίεσεως στο θάλαμο αέρα.

Ακόμη μία κατασκευαστική αρχή της BHC είναι η χρήση εκλεπτυσμένης γεωμετρίας, ούτως ώστε το πρυμναίο διάκενο της γάστρας να είναι μικρότερο απ' ό,τι το πλωραίο, που προσδίνει στο σκάφος διαγωγή περίπου 2. Έχει παρατηρηθεί ότι τα αερόστρωμα φαίνεται να έχουν καλύτερη δυναμική ευστάθεια όταν η διαγωγή λαμβάνει τιμές μεταξύ 1 και 2. Αυτό το βέλτιστο μπορεί να διατηρηθεί από την κατάλληλη μορφοποίηση της φούστας στη φάση της σχεδίασης και την ελαχιστοποίηση της ροής του αέρα στο θάλαμο.

### 5.3.2 Φούστα Τύπου Bag And Pericell

Αυτή η μορφή φούστας είναι παρόμοια σε γεωμετρία με τη φούστα τύπου jure. Έχει παραπλήσια ακαμψία με την ισοδύναμη φούστα τύπου bag-finger (με εγκάρσια και διαμήκη τμήματα φούστας ευσταθείας). Η πίεση του θαλάμου απαιτείται να είναι υψηλή, περίπου  $1.4-1.8P_c$ , που την καθιστά λιγότερο κατάλληλη για τα επιβατικά σκάφη.

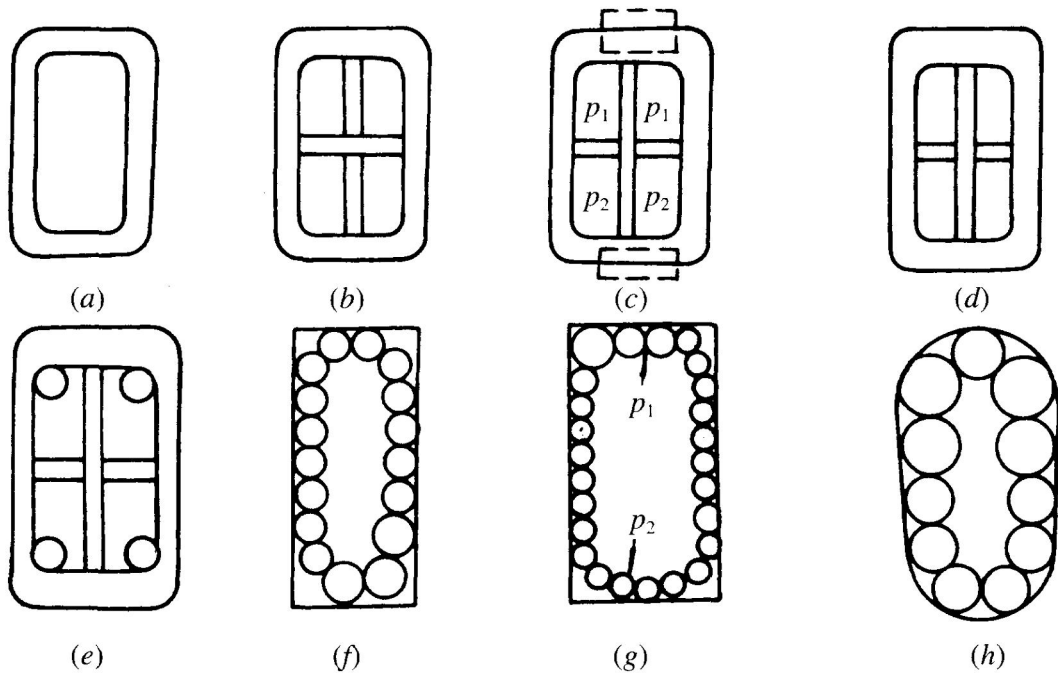
### 5.3.3 Φούστα Τύπου Ανοιχτού Βρόχου

Αυτή η φούστα χρησιμοποιείται σε μικρότερα σκάφη, γενικά κάτω των 5t. Η πίεση του αέρα στο βρόχο είναι ίση με του θαλάμου ( $P_c$ ) κάτι που την καθιστά την αποδοτικότερη μορφή φούστας. Η γεωμετρία του βρόχου ποικίλει για να επιτευχθεί η κατάλληλη απόκριση σε κυματισμό και αρκετά συχνά τοποθετούνται μηχανισμοί ανύψωσης της φούστας προκειμένου να βελτιωθεί η δυνατότητα ελιγμών. Στην περιοχή της πλώρης, η κουπαστή προεξέχει από την εξωτερική γραμμή της φούστας κατά 20-40% του ύψους της.

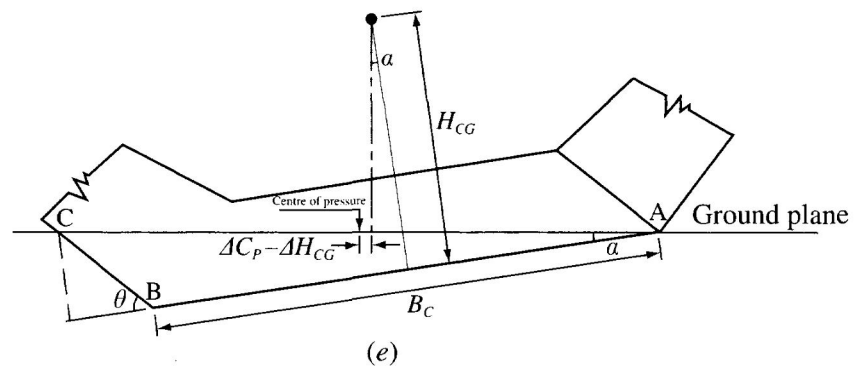
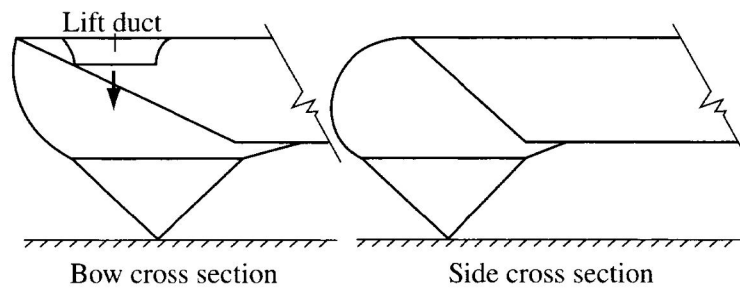
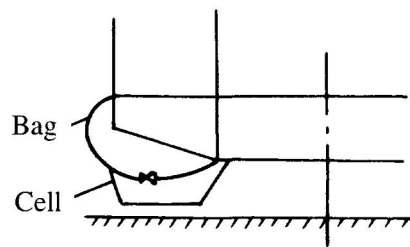
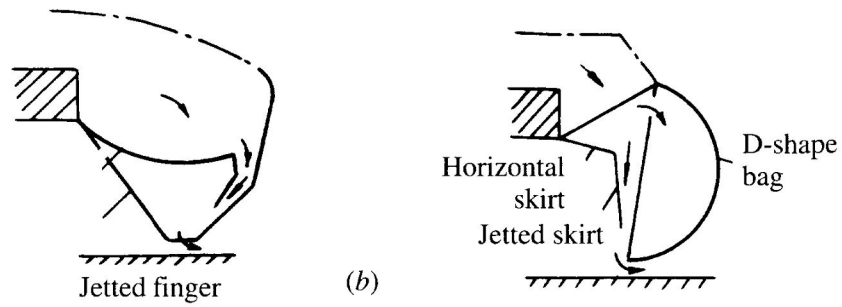
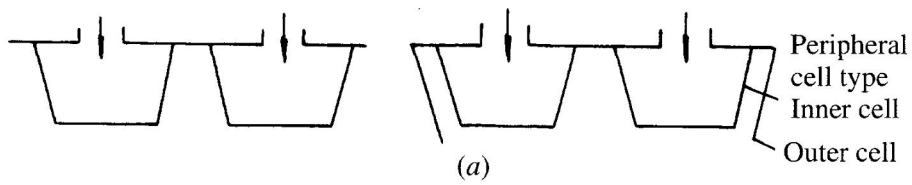
### 5.3.4 Φούστα Τύπου Εκτεταμένων Τμημάτων

Αυτό είναι ένα σχετικά δύσκαμπτο σύστημα φούστας με μικρή εφαρμογή σε σκάφη αναψυχής εκτοπίσματος 200-2000 kg. Συνήθως δεν αποκρίνεται καλά σε κυματισμό και υστερεί στον τομέα της εκκαθάρισης εμποδίων. Το πλάτος των τμημάτων της φούστας ακολουθεί τον ίδιο κανόνα με τη φούστα τύπου βρόχου, εκτός από το ότι το ύψος της φθάνει στη σύνδεση της κουπαστής και το πλάτος της κυμαίνεται στο 20-25% του συνολικού βάθους. Δεδομένου ότι τα τμήματα καταλαμβάνουν το 80-90% του βάθους της γάστρας, υπάρχει μια αρκετά μεγάλη περιοχή ( $\Delta$ ) μεταξύ των τμημάτων από την οποία παρατηρείται διαφυγή αέρα. Για αυτό το λόγο απαιτείται υψηλή διαθέσιμη ισχύς στους ανεμιστήρες. Αυτό δεν είναι σημαντικό πρόβλημα για ένα σκάφος αναψυχής, το οποίο δεν είναι απαραίτητο να καλύψει τις απαιτήσεις αποδοτικότητας ενός εμπορικού σκάφους. Το σχήμα 67 παρουσιάζει διάφορες κατόψεις φουστών. Στο σχήμα (a) ο θάλαμος αέρα (μαξιλάρι) είναι μονοκύτταρος, τα σχέδια (b) και (d) είναι παραλλαγές της φούστας με τις εσωτερικές καρίνες, τα σχέδια (e), (h) παρουσιάζουν παραλλαγές φούστας jure ή pericell. Το σχέδιο (e) συνδυάζει την φούστα bag and pericell με εσωτερικές καρίνες, ενώ στα σχέδια (f) και (h) παρατηρείται μία κατανομή των κυψελών περιφερειακά της γάστρας για να επιτευχθεί ένα πιο δύσκαμπτο μαξιλάρι. Η τρέχουσα πρακτική στη σχεδίαση είναι να

χρησιμοποιείται όσο το δυνατό χαμηλότερος λόγος  $P_i/P_c$  ευνοώντας τα σχέδια (a) και (d) για τη βελτιστοποίηση της αντίστασης και της πλοϊμότητας του σκάφους.



Σχήμα 67: Τύποι διατάξεων φούστας



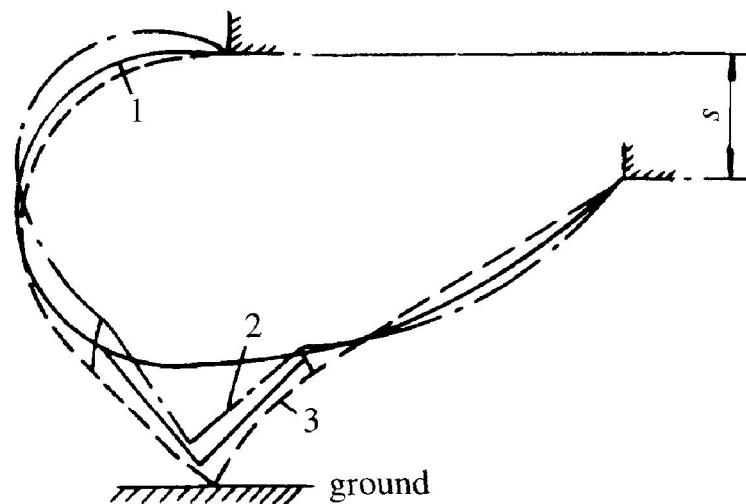
Ένας συγκριτικός πίνακας των τριών κυριότερων τύπων φούστας φαίνεται παρακάτω:

	Bag	Segment	Jupe
Cost	low	high	low
Labor	low	high	medium
<b><u>Drag</u></b>			
Smooth water	same	same	same
Rough water	high	low	very high
Mud	high	low	low
Grass	high	low	medium high
Ice	same	same	same
Smooth snow	medium	low	low
Rough snow	high	low	medium
Reparability	hard	easy	hard
Life	good	moderate	good
Durability	good	poor	moderate
Stability	good	poor	Excellent
Plough in	same	same	same
Roll ability for turning	slight	excellent	none
Dust and spray	poor	good	poor
Colors available	limited	unlimited	limited
Ease of attachment	moderate	easy	moderate hard
Weight of skirt	low	moderate	low
Hump performance	moderate	good	poor moderate
High speed	good	moderate	moderate
Bulkiness	poor	poor	good
Appearance	moderate	good	moderate
Bounce	poor	good	good
Performance when damaged	moderate	good	poor
Potential for development	good	good	good
Obstacle capability	poor	good	poor
Complexity	low	high	moderate

#### 5.4 Το Φαινόμενο της Αναπήδησης (Bounce)

Το φαινόμενο της αναπήδησης (bounce) είναι μια δόνηση χαμηλής συχνότητας της φούστας, η οποία εμφανίζεται περιστασιακά όταν ένα ACV αιωρείται στατικά ή ταξιδεύει σε χαμηλές ταχύτητες. Έχει παρατηρηθεί σε κινέζικα ACVs όπως τα μοντέλα 711-IIA, 716A και 71611, και σε διάφορα άλλα από την Μεγάλη Βρετανία και τις Ηνωμένες Πολιτείες.

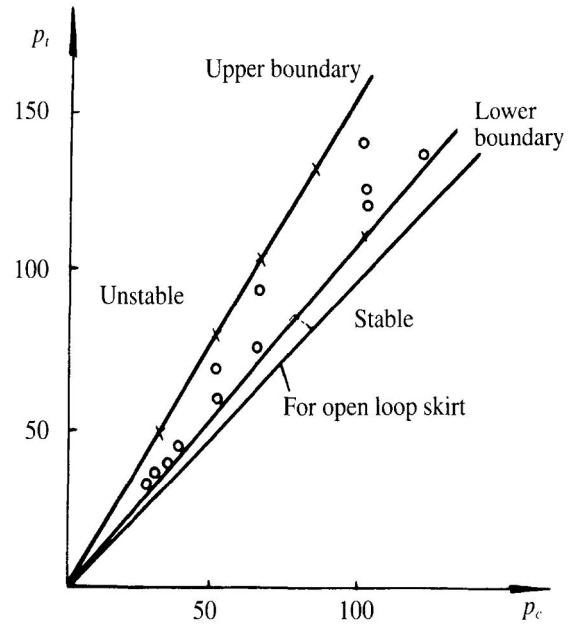
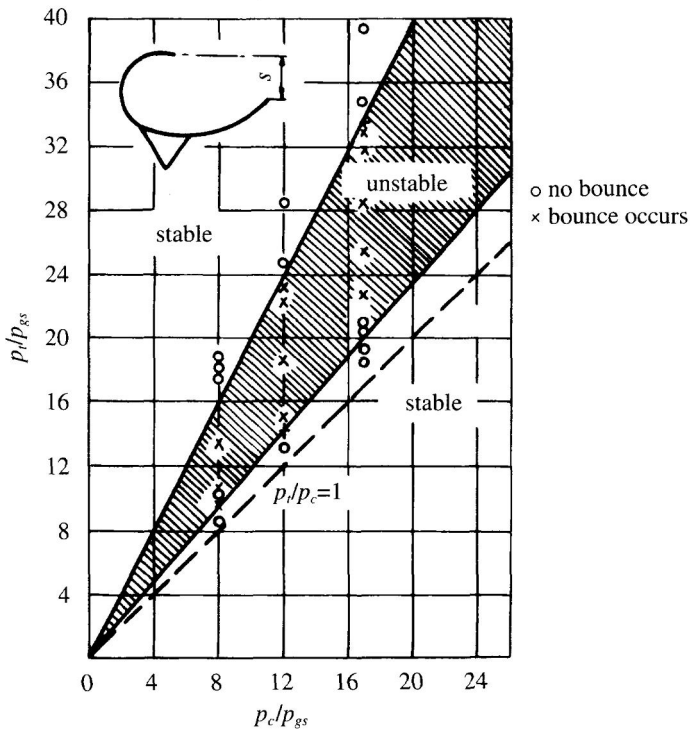
Κατά τη διάρκεια της αναπήδησης, η φούστα δονείται με μεγάλο πλάτος, το οποίο είναι αρκετές φορές μεγαλύτερο από το διάκενο αέρα κάτω από τη φούστα (βλ. το σχήμα 68), προκαλώντας κατά συνέπεια δόνηση στη γάστρα κατά την κίνηση ανύψωσης (heave), η οποία είναι επιβλαβής στον εξοπλισμό και στις μηχανές και προκαλεί δυσφορία στο πλήρωμα.



Σχήμα 68: Φάσεις του φαινομένου της αναπήδησης

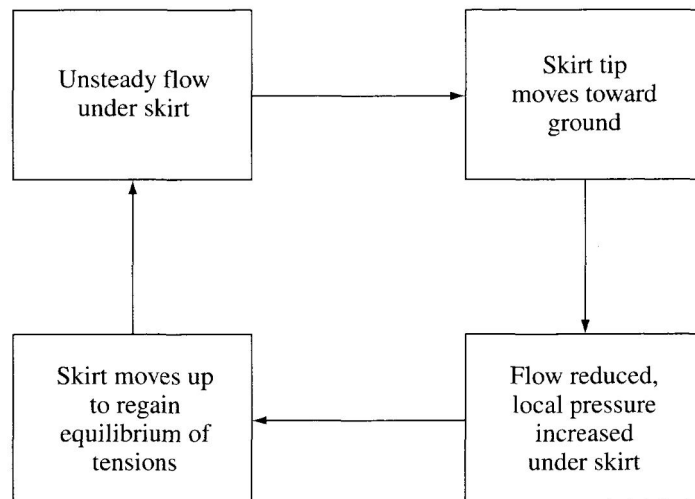
Τα τελευταία χρόνια, λόγω της ανάπτυξης της χαμηλής πίεσης φούστας απόκρισης, η πιθανότητα εμφάνισης φαινομένων αναπήδησης έχει αυξηθεί.

Ιδιαίτερα σημαντική απαίτηση για το σχεδιαστή αποτελεί η έρευνα των αιτιών της αναπήδησης και η ανάπτυξη μεθόδων για την πρόληψή της. Το σχήμα 69 παρουσιάζει το εύρος της δόνησης για τη φούστα τύπου bag-finger και τη φούστα τύπου ανοικτού βρόχου. Παρατηρούμε ότι προκύπτουν σχεδόν τα ίδια αποτελέσματα.



Σχήμα 69: Περιοχή αναπήδησης

Παρόλο που η θεωρία για το φαινόμενο της αναπήδησης δεν έχει μελετηθεί πλήρως, μπορεί να δοθεί μία απλή εξήγηση όπως φαίνεται στο σχήμα 70.



Σχήμα 70: Block διάγραμμα του φαινομένου της αναπήδησης

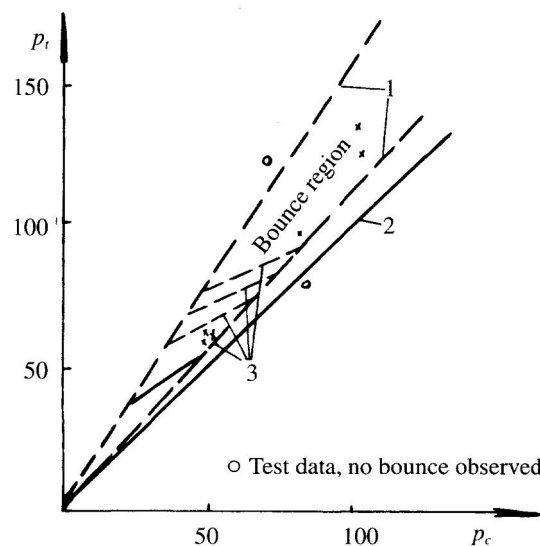
Μια φούστα τύπου βρόχου ή τύπου bag-finger με μεγάλη ακτίνα έχει πολύ μικρή απόσβεση, ιδιαίτερα για κινήσεις μικρού πλάτους, λόγω των μικρών μεταβολών της ακτίνας της φούστας. Όταν ένα τμήμα της φούστας σημαντικού μήκους βρίσκεται πάνω από μια επίπεδη επιφάνεια, αποκτά την ιδιότητα να κινείται ως μονάδα (ανεξάρτητα)



και μια μικρή διαταραχή στη ροή του αέρα στο θάλαμο θα έχει ως αποτέλεσμα να αρχίσει μια προς τα κάτω κίνηση της φούστας προκειμένου να σφραγιστεί ο θάλαμος. Η τοπική πίεση του αέρα αυξάνεται, αναγκάζοντας τη γεωμετρία της φούστας να μεταβληθεί και να ανυψωθεί. Ο αέρας απελευθερώνεται ξανά κάτω από τη φούστα, η στατική πίεση μειώνεται και το φαινόμενο επαναλαμβάνεται διαδοχικά. Η περίοδος της ταλάντωσης είναι η φυσική περίοδος της επανάληψης του φαινομένου για το σύνολο των τμημάτων της φούστας.

Για την παρεμπόδιση της αναπήδησης έχουν αναπτυχθεί ορισμένες μέθοδοι όπως οι παρακάτω:

1. Εισαγωγή διαφραγμάτων αντι-αναπήδησης στη φούστα για να αυξηθεί η απόσβεσή της, η μορφή των οποίων είναι παρόμοια με φούστα τύπου D (σχήμα 71).



Σχήμα 71 : Αύξηση της απόσβεσης της φούστας με χρήση διαφραγμάτων αντι-αναπήδησης 1-Περιοχή αναπήδησης 2-Φούστα ανοιχτού βρόχου 3-Χρήση διαφραγμάτων

Αυτή η μέθοδος έχει δώσει αρκετά καλά αποτελέσματα για την επίλυση των προβλημάτων αναπήδησης που έχουν προκύψει στα κινέζικα ACV 716-II και 711-IID.

2. Μεταβολή του μήκους της εσωτερικής και της εξωτερικής τσάντας (bag) της φούστας προκειμένου να μεταβληθεί και η στατική παραμόρφωση της φούστας και η φυσική συχνότητα της κατακόρυφης δόνησης.

3. Τοποθέτηση βάρους (μικροί σάκοι άμμου ή κάτι παρόμοιο) στο εξωτερικό τμήμα της φούστας. Η μέθοδος αυτή απαιτείται γενικά μόνο στο κεντρικό τμήμα της φούστας.

Η μάζα που απαιτείται είναι σχετικά μικρή, λόγω του μεγάλου μοχλοβραχίονα περιστροφής της φούστας.

## **5.5 Φούστες Καταστολής Ψεκασμού**

Ο υψηλής ταχύτητας αέρας που διαφεύγει από το θάλαμο ενός ACV παρασύρει το νερό διαμορφώνοντας μια "κουρτίνα ψεκασμού". Όσο μεγαλύτερη η πίεση του θαλάμου αέρα τόσο μεγαλύτερη η ποσότητα του νερού της κουρτίνας. Όταν το σκάφος κινείται πάνω από σταθερό έδαφος, ο αέρας του θαλάμου δημιουργεί μια "κουρτίνα σκόνης" η οποία είναι ορατή σε μεγάλη απόσταση.

Η "κουρτίνα ψεκασμού" θα επανέλθει προς την επιφάνεια του ACV και μπορεί έπειτα να εισαχθεί στις εισαγωγές των μηχανών εάν αυτές δεν προστατεύονται από φίλτρα. Σε ψυχρά κλίματα, ο ψεκασμός του νερού θα σχηματίσει μια πάχνη πάγου πάνω στο σκάφος, προσθέτοντας βάρος σε αυτό. Αυτός ο πάγος είναι ιδιαίτερα επικίνδυνος διότι λόγω των αυξημένων κραδασμών που προκαλούνται είτε από το θάλαμο αέρα είτε από τις μηχανές, μπορεί να σπάσει σε κομμάτια τα οποία εάν φθάσουν στις μηχανές ή τους ανεμιστήρες θα προκαλέσουν καταστροφή.



Για την πρόληψη των ανωτέρω καταστάσεων είναι δυνατή η τοποθέτηση "ποδιάς καταστολής" (suppression apron) στο

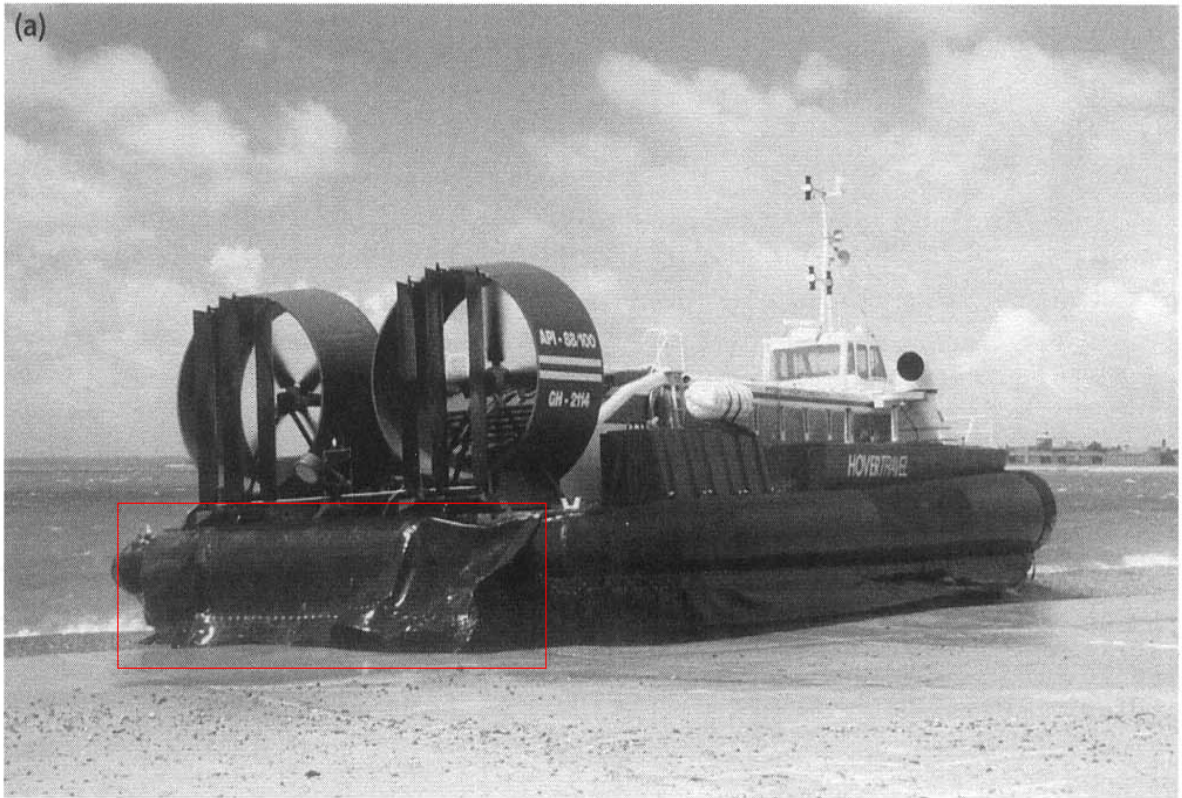
πλωραίο τμήμα της φούστας η οποία είναι πολύ αποτελεσματική στη μείωση του ψεκασμού σε ένα αποδεκτό επίπεδο.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι ποδιών καταστολής ψεκασμού. Ο απλούστερος αποτελείται από ένα κομμάτι υφάσματος που



τοποθετείται πάνω από το τμήμα της φούστας και φθάνει περίπου στο μισό του μήκους των δαχτύλων της φούστας. Μία πιο σύνθετη σχεδίαση αποτελείται από τμήματα που μοιάζουν με δόντια και είναι ενωμένα μεταξύ τους. Ο αέρας για την πλήρωση των ποδιών παρέχεται από το θάλαμο αέρα του σκάφους.

(a)



(b)



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6- Η Ανάπτυξη της Τεχνολογίας Σχεδίασης των ACV στις Προηγμένες Χώρες

### 6.1 Κίνα

Ο οργανισμός MARIC (Marine Design and Research Institute of China) ο οποίος ασχολείται με την ανάπτυξη της τεχνολογίας αερόστρωμνων σκαφών περισσότερο από 40 χρόνια έχει να επιδείξει σημαντική πρόοδο σε διάφορους σχεδιαστικούς τομείς ιδιαίτερα κατά τα τελευταία 10 έτη όπως:

- Βελτιστοποίηση της γενικότερης απόδοσης του σκάφους
- Σύστημα φουστών απόκρισης
- Σύστημα ανύψωσης
- Σύστημα παροχής αέρα προς τον προωστήρα
- Εγκάρσια και διαμήκης ευστάθεια

#### 6.1.1 Βελτιστοποίηση της γενικότερης απόδοσης του σκάφους

Η μεταφορική ικανότητα ενός αερόστρωμνου  $\eta_t$  δεν εξαρτάται μόνο από το συντελεστή αντίστασης  $r_d$  και την απόδοση του προωστηρίου σκεύους  $\eta_p$ , αλλά επίσης από το συντελεστή παροχής αέρα  $Q_c$ , την απόδοση της αιώρησης  $\eta_L$  και το λόγο δυναμικής πίεσης (για τον οποίο θα αναφερθούμε παρακάτω):

$$k = \frac{\frac{1}{2} \rho V^2}{P_c}$$

Όπου ο λόγος απόδοσης του φορτίου

$$r_w = \frac{W_e}{W}$$

είναι το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης της σχεδίασης της γάστρας και ο παρονομαστής είναι ο ισοδύναμος λόγος της αντίστασης του σκάφους όσον αφορά την ανύψωση προς την ισχύ των

ανεμιστήρων. Έτσι, η μεταφορική ικανότητα του σκάφους μπορεί να γραφεί συναρτήσει των παρακάτω μεγεθών:

$$\frac{\eta_t}{\eta_w} = f \left( r_{LB}, \bar{P}_c, \bar{Q}_c, r_P, \frac{h_w}{h_c + h_f}, k, \frac{S_x}{S_c}, \frac{A_P}{S_c}, r_q, \frac{A_f}{S_c}, k_f \right)$$

Όπου :

Ο λόγος μήκους προς πλάτος του θαλάμου αέρα  $r_{LB}$

Ο λόγος πίεσης του θαλάμου αέρα  $P_c$

Ο λόγος πίεσης  $r_P = \frac{P_f}{P_c}$

Το ύψος κύματος προς το συνολικό ύψος της φούστας  $\frac{h_w}{h_c + h_f}$

Ο λόγος της εμπρόσθιας επιφάνειας του σκάφους  $\frac{S_x}{S_c}$

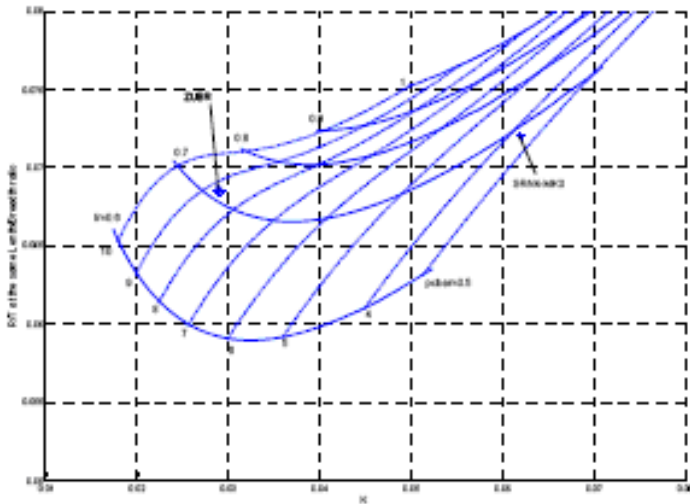
Ο λόγος της επιφάνειας της έλικας  $\frac{A_P}{S_c}$

Ο ολικός λόγος παροχής αέρα  $r_q = \frac{Q_f}{Q_c}$

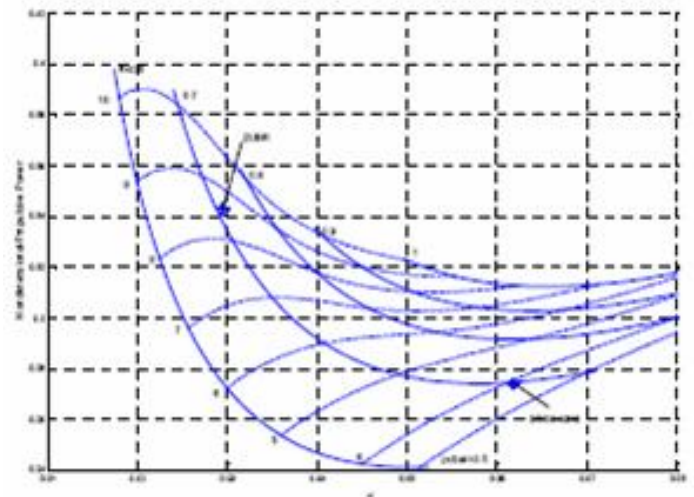
Ο λόγος της επιφάνειας του ανεμιστήρα  $\frac{A_f}{S_c}$

Ο λόγος της ταχύτητας του αέρα από τον ανεμιστήρα  $k_f = \frac{1}{2} \frac{\rho u_f^2}{P_c}$

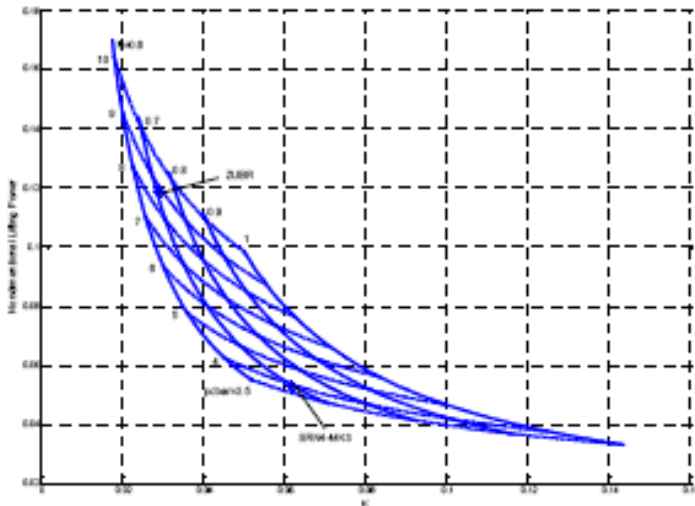
Με βάση την ανωτέρω μέθοδο εκτελέστηκε μία σύγκριση μεταξύ δύο από τα μεγαλύτερα σύγχρονα ACV, το ZUBR και το SRN4-MK3. Στο διάγραμμα 72 φαίνεται η αδιάστατη αντίσταση του κάθε σκάφους σε ύψος κύματος 2 μέτρων, στο 73 η αδιάστατη ισχύς πρόωσης, στο 74 η αδιάστατη ισχύς ανύψωσης και στο 75 η μεταφορική ικανότητα. Παρατηρούμε ότι η μεταφορική ικανότητα του SRN4-MK3 είναι 1.4 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του ZUBR.



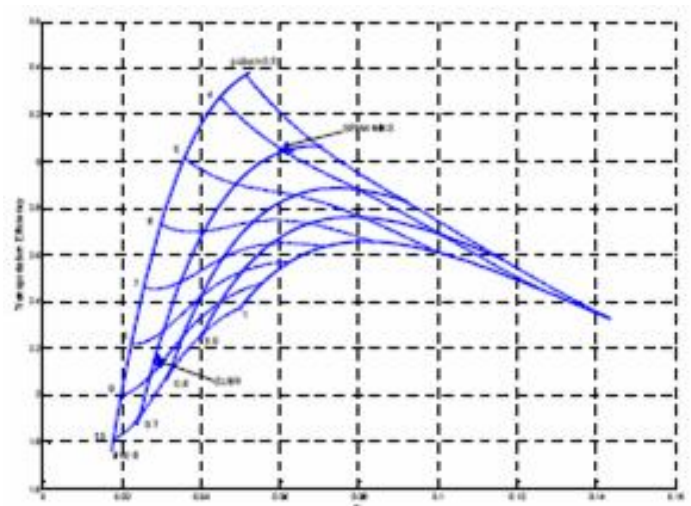
Σχήμα 72: Αδιάστατη αντίσταση hovercraft για ύψος κύματος 2m



Σχήμα 73: Αδιάστατη ισχύς πρόωσης



Σχήμα 74: Αδιάστατη ισχύς ανύψωσης

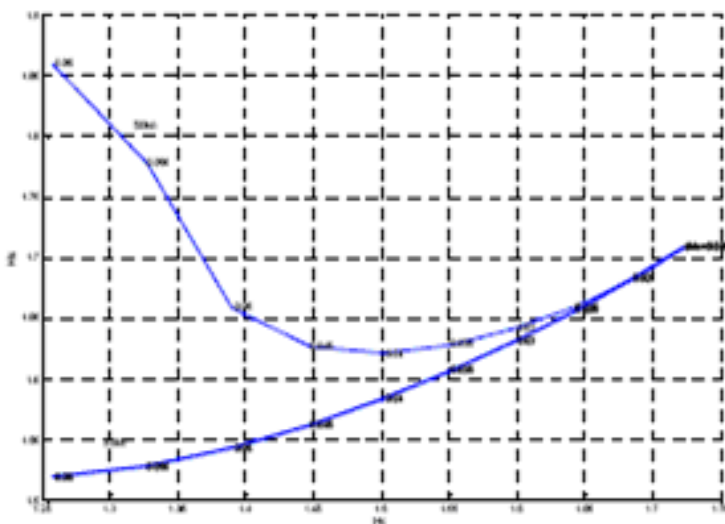


Σχήμα 75: Μεταφορική ικανότητα

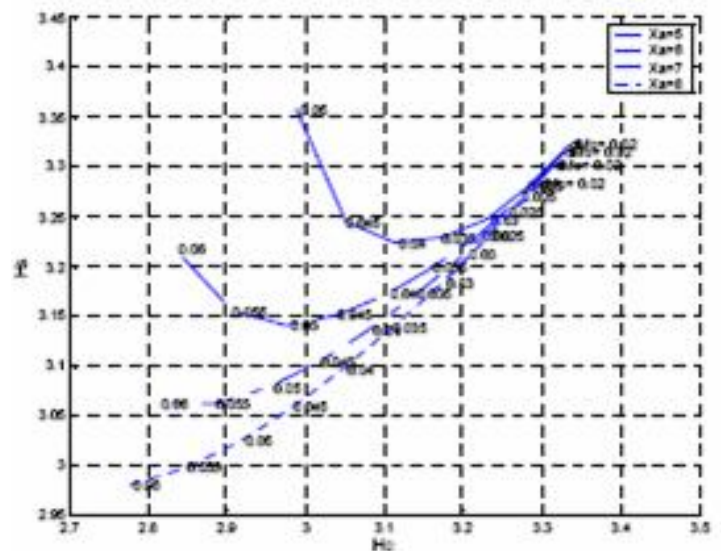
### 6.1.2. Σύστημα φουστών απόκρισης

Η απαίτηση σχεδίασης της κατανομής της απόκρισης της φούστας σε όλο το μήκος του σκάφους καθορίζει τον τύπο της σε κάθε σημείο. Το πλωραίο τμήμα της φούστας θα πρέπει να ικανοποιεί την απαίτηση να μη διπλώνει προς το εσωτερικό του σκάφους σε μεγάλες ταχύτητες και να αποκρίνεται ικανοποιητικά σε ακολουθούντες κυματισμούς. Έτσι, επιλέγουμε φούστα τύπου bag-finger με υψηλό λόγο πλάτους-ύψους.

Στο σχήμα 76 φαίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες απόκρισης των φουστών σε ταχύτητα 30kn και 50kn αντίστοιχα, από το οποίο μπορεί να φανεί ότι η απόκριση στην ταχύτητα των 30kn=0.45, ενώ η απόκριση στην ταχύτητα των 50kn είναι αρχικά θετική, κατόπιν μειώνεται βαθμιαία μέχρι που γίνεται αρνητική και έπειτα παρατηρείται το φαινόμενο tuck-under. Το σχέδιο 77 παρουσιάζει την επίδραση του λόγου πλάτους-ύψους της φούστας στην απόκρισή της, από το οποίο μπορεί να φανεί ότι όσο μικρότερος είναι ο λόγος, τόσο πιο εύκολα η φούστα διπλώνει προς το εσωτερικό του σκάφους. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι δυσμενές στην αντίσταση κυματισμού του σκάφους ιδιαίτερα σε υψηλές ταχύτητες. Το σχέδιο 78 είναι ένα χαρακτηριστικό σχέδιο της φούστας ενός αερόστρωμνου σύμφωνα με τις οδηγίες που εκφράστηκαν ανωτέρω.

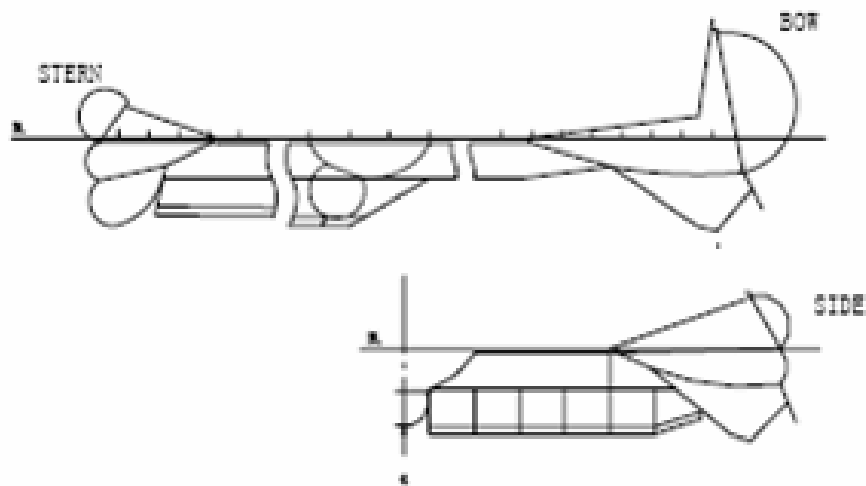


Σχήμα 76: Απόκριση φούστας



Σχήμα 77: Επίδραση του λόγου πλάτους-ύψους της φούστας στην απόκριση της

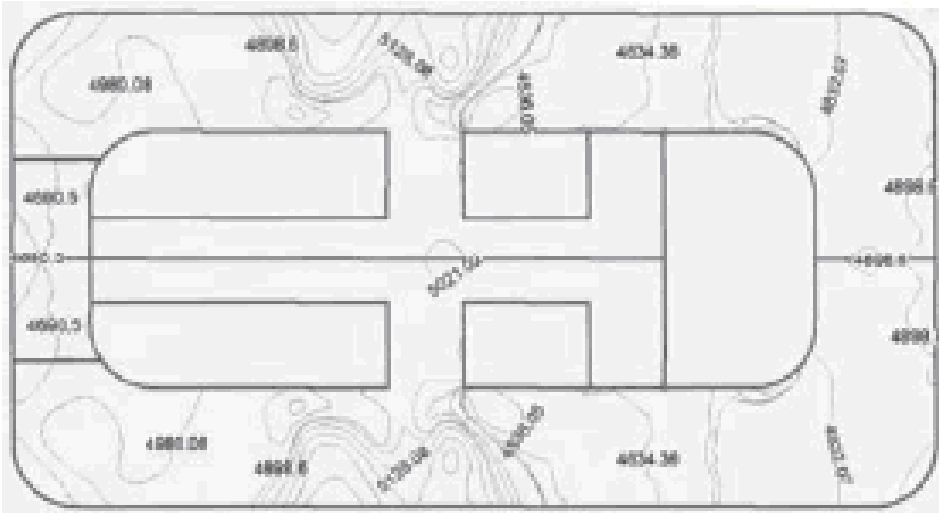




Σχήμα 78:Τυπική διάταξη φούστας κατά μήκος αερόστρωμνου

### 6.1.3 Σύστημα ανύψωσης

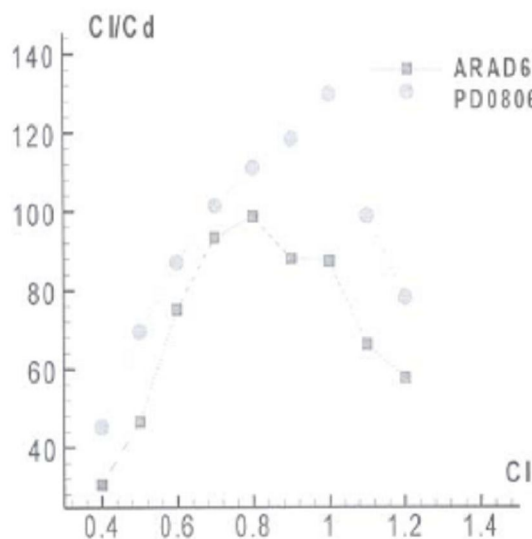
Η κατανομή της πίεσης και της ροής του αέρα στο σύστημα ανύψωσης του σκάφους από την εξαγωγή των ανεμιστήρων μέχρι την περιφέρεια της φούστας, δεν μπορεί να είναι σταθερή λόγω της θέσης των ανεμιστήρων. Συχνά παρατηρούμε χαμηλές πιέσεις στην πλώρη, γεγονός που δίνει στο σκάφος μικρή αντίσταση σε φαινόμενα plough-in. Για την επίλυση του ανωτέρω προβλήματος, έχουν αναπτυχθεί αρκετά υπολογιστικά προγράμματα όπως το FLUENT το οποίο χρησιμοποιείται για αριθμητική διαμόρφωση της τρισδιάστατης ροής του αέρα στη φούστα. Επίσης η τοποθέτηση οδηγητικών πτερυγίων στην έξοδο των ανεμιστήρων και η ρύθμιση της διαμέτρου των οπών παροχής αέρα προς το θάλαμο, μπορεί να βελτιώσει τη συμπεριφορά της ροής του αέρα. Το σχέδιο 79 παρουσιάζει την κατανομή της πίεσης στην περιφέρεια της φούστας μετά την εφαρμογή μεθόδων βελτιστοποίησης.



Σχήμα 79:Κατανομή πιέσεων κατά μήκος του θαλάμου αέρα

#### 6.1.4 Σύστημα παροχής αέρα προς τον προωστήρα

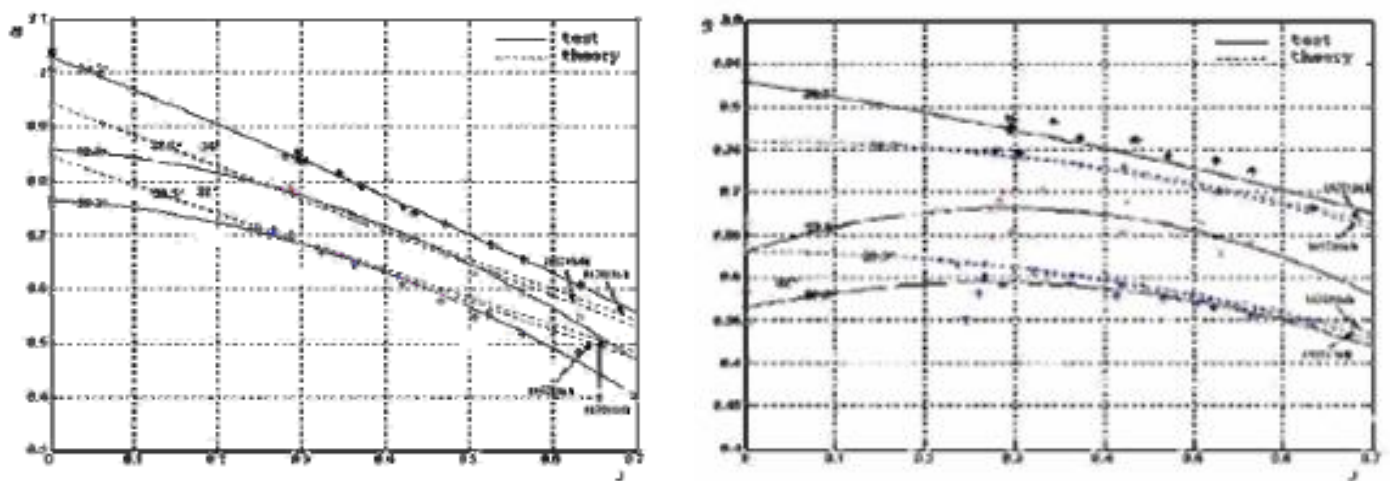
Λόγω των υψηλών φορτίσεων που παρατηρούνται στους έλικες των αερόστρωμνων σκαφών ο σχεδιαστής πρέπει να βελτιώσει όσο το δυνατό περισσότερο το λόγο ανύψωσης-αντίστασης (lift-drag) της έλικας. Προκειμένου να γίνει αυτό, σχεδιάστηκε μια σειρά φύλλου αλουμινίου ARAD αντί της αρχικής σειράς φύλλων αλουμινίου NACA



που χρησιμοποιούταν σε αεροσκάφη, αλλά ο λόγος L/D παρέμενε χαμηλότερος από 100. Ο MARIC σε συνεργασία με το North-West Industry University προέβη σε μία εργασία βελτιστοποίησης των φύλλων αλουμινίου με χρήση σήραγγας αέρα. Έτσι, προέκυψε το PD0806, το οποίο έχει μέγιστη

Σχήμα 80 :Σύγκριση του ARAD6 με το PD0806

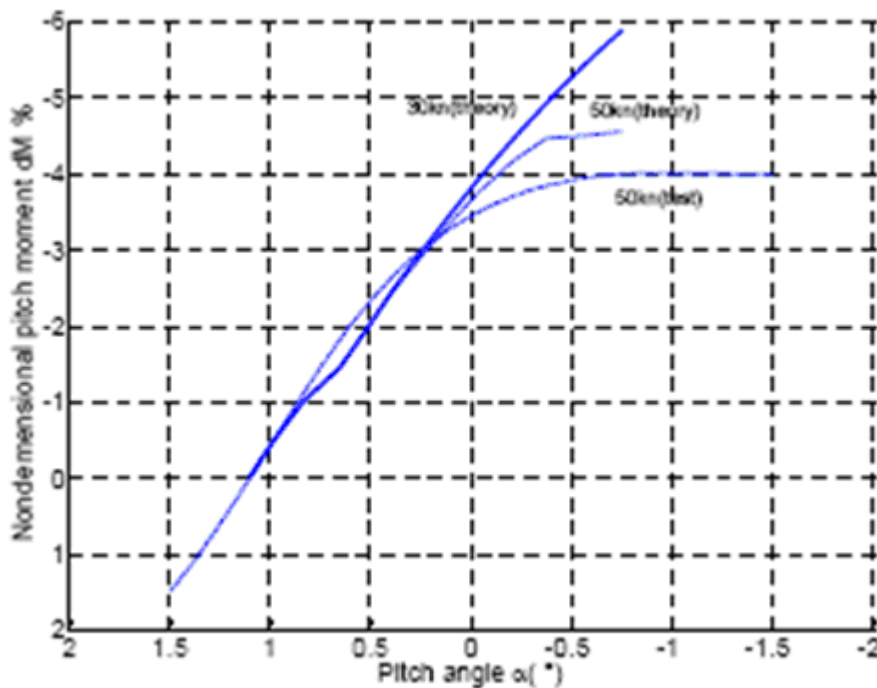
αναλογία  $L/D$  άνω του 120. Το σχήμα 80 παρουσιάζει μια σύγκριση μεταξύ του χαρακτηριστικού νέου φύλλου αλουμινίου και του ARAD6. Ακόμη, ο MARIC εφάρμοσε την ιδέα τοποθέτησης οδηγητικών πτερυγίων για τη μέγιστη εκμετάλλευση της ροής του αέρα προς τον προωστήρα. Στο σχήμα 81 φαίνονται οι καμπύλες των συντελεστών ισχύος και ώσης ελίκων υψηλών φορτίσεων.



Σχήμα 81: Συντελεστής ώσης και συντελεστής ισχύος για έλικες υψηλής φόρτισης

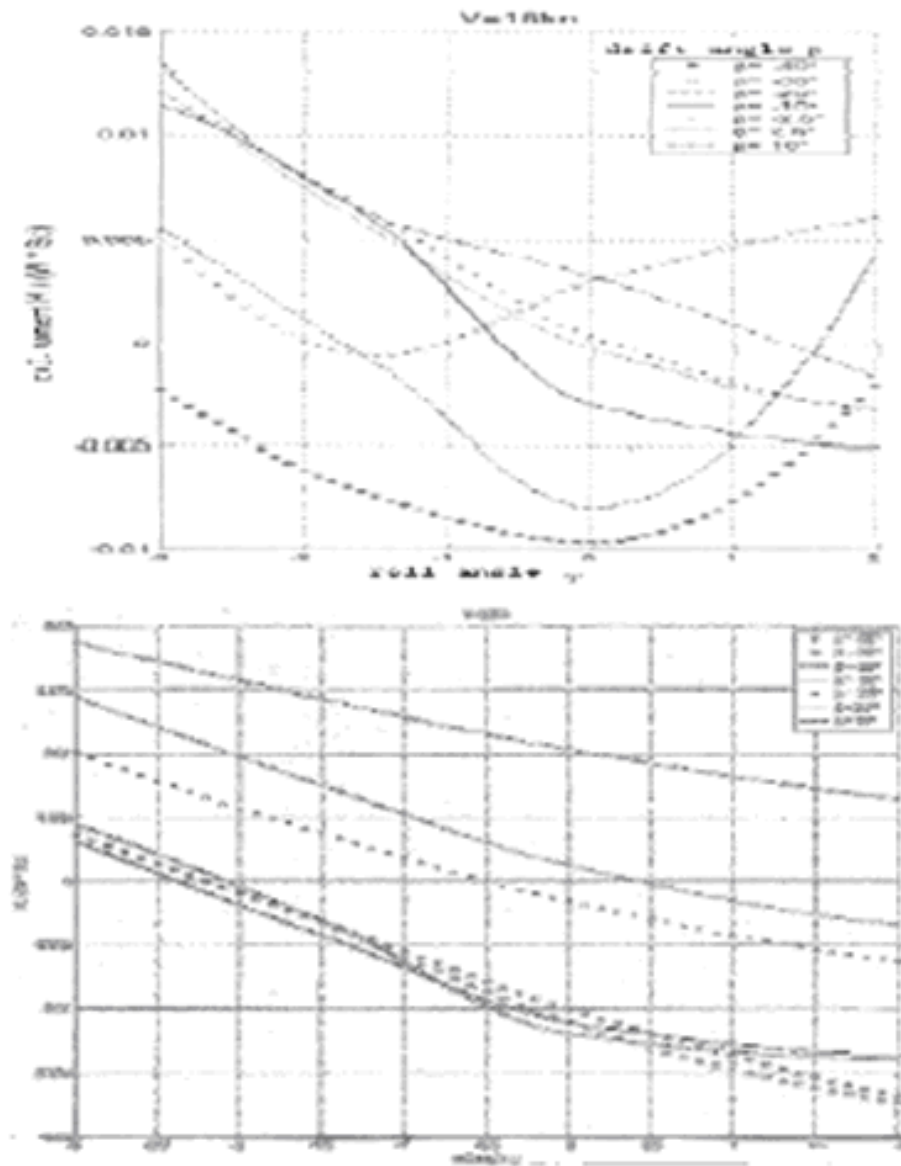
### 6.1.5 Εγκάρσια και διαμήκης ευστάθεια

Για την ευστάθεια των αερόστρωμνων σκαφών ως προς το διάμηκες, σημαντικό πρόβλημα αποτελεί το φαινόμενο rought-in, το οποίο συνήθως παρατηρείται όταν το σκάφος πλέει σε ακολουθούντες κυματισμούς με υψηλές ταχύτητες (άνω των 50kn). Με τη λήψη κατάλληλων διορθωτικών μέτρων, προέκυψε το διαγράμμα 82, στο οποίο φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη ευσταθείας για διάφορες γωνίες προνευστασμού.



Σχήμα 82: Ακαμψία του προνευστασμού

Η εγκάρσια ευστάθεια θα μεταβάλλεται σε συνάρτηση με την εγκάρσια ταχύτητα που οφείλεται κυρίως στη μεταβολή του διάκενου αέρα κάτω από τη φούστα και την πίεση του θαλάμου. Η εγκάρσια ευστάθεια θα μηδενιστεί ή θα λάβει και αρνητικές τιμές στην περιοχή  $Fr=0.4$ . Στο σχήμα 83 φαίνονται οι καμπύλες ευσταθείας για διάφορες γωνίες παρέκκλισης (drift angles) σε ταχύτητες 16kn και 28kn.



Σχήμα 83: Ακαμψία του διατοιχισμού σε ταχύτητες 16 και 28 kn

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται η σχεδιαστική εξέλιξη των αερόστρωμνων στην Κίνα κατά τα έτη 1989-1994:

1	Types	7212	722 II	724	7218	7226	HT-903
2	Year of delivery	1989	1990	1994	1995	1996	1994
3	Full Displacement (t)	10.5	78	6.35	31	17	40
4	Length (m)	14.1	31.2	13	22.1	18.6	24.35
5	Beam Overall (m)	6.1	15.7	5.3	9.44	7.6	8.8
6	Overall Height (m)	2.7	10.7	3.7		4.6	9.5
7	Engine	BF12L913C		BF12L913L	BF12L513FC	BF12L413F	BF12L413FC
8	Total Power (kW)	410	2×1985	280	1109	560	4×360
9	Propulsive Device	Ducted Air Propellers	Ducted Air Propellers	Ducted Air Propellers	Ducted Air Propellers	Ducted Air Propellers	Ducted Air Propellers
10	Hull Material	Aluminum	Aluminum	Aluminum	Aluminum	Aluminum	Aluminum
11	Passangers	33	150	10	70	40~50	100
12	Cruising Speed (kn)	32	47	40	38	32	35
13	Cruising Range (nm)	120	200	100	140	120	150
14	Operation Area	Coast Zone	Coast Zone	Coast Zone	Coast Zone	Coast Zone	Coast Zone
15	Designer	MARIC	MARIC	MARIC	MARIC	MARIC	CASTC
16	Builder	Dongfeng Shipyard	Dagu Shipyard	Dagu Shipyard	Dongfeng Shipyard	Tongfeng Shipyard	Tiantong High Speed Ship Company
17	Operation Course	Zhengzhou	Military	Zhanjiang	Hainan	Qinhai Island	Shanghai—Chongming/Cixi



Fig. 18: Air-cushion vehicles designed and built in China

- (a) 716II Passenger ship (21t, 70pasgs, 67km/h, Alum., 1986)
- (b) 7212 Passenger ship (10.5t, 33pasgs, 54km/h, Alum., 1987)
- (c) 7218 Passenger ship (30t, 70pasgs, 70km/h, Alum., 1995)
- (d) 7246 Passenger ship (24.6t, 65pasgs, 65km/h, Alum., 2000)
- (e) 4010 Passenger ship (29.8t, 80pasgs, 80km/h, Alum., 2002)
- (f) 7301 Amphibious Hoverbarge (80t, payload 35t, 18km/h, steel, 1987)

## 6.2 Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής

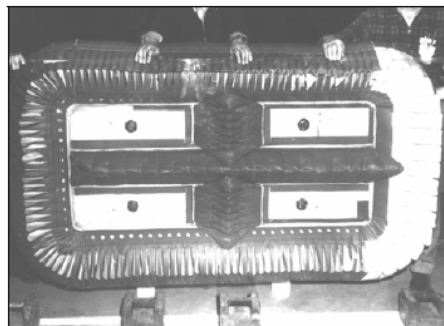
Οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής συμμετέχουν ενεργά στην ανάπτυξη και εξέλιξη των αερόστρωμων σκαφών τα τελευταία 28 έτη. Ειδικότερα, ο οργανισμός CDI Marine Systems Development Division (CDIM-SDD) -πρώην Band, Lavis and Associates-, έχει κάνει σημαντική πρόοδο στην αριθμητική ανάλυση και με τη χρήση προγραμμάτων CAD (Computer Aided Drafting) ιδιαίτερα τα τελευταία 10 έτη έχει βελτιώσει τα ακόλουθα συστήματα:

- Σύστημα φούστας
- Ανεμιστήρες ανυψώσεως
- Έλικες πρόωσης κατευθυντικής ροής
- Συστήματα υποβοήθησης ελιγμών (bow thrusters)

Η συνολική πρόοδος των ανωτέρω συστημάτων έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση των ACVs στους τομείς της αξιοπιστίας, της ικανότητας χειρισμών και της συμπεριφοράς σε κυματισμούς.

### 6.2.1 Σύστημα φούστας

Τα περισσότερα σκάφη όπως το SRN4 Mk III, το AP 1-88 και το ρώσικης κατασκευής Zubr είναι εξοπλισμένα με συμβατικά συστήματα φούστας τύπου bag-finger. Ο τύπος αυτός με ρίζες από την Αγγλία του 1960 φαίνεται στο σχήμα 84. Παρατηρούμε την εφαρμογή εγκάρσιας και διαμήκουσ φούστας ευσταθείας, η οποία διαιρεί το θάλαμο αέρα σε τέσσερα υπομήματα.



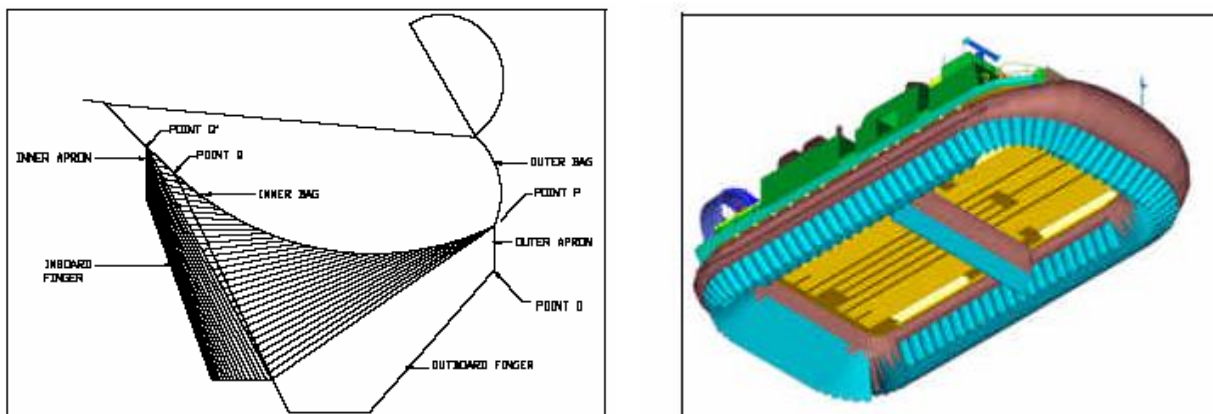
Σχήμα 84: Τυπική διάταξη φούστας τύπου bag-finger

Με την πάροδο των χρόνων, διαπιστώθηκε ότι η ανωτέρω διάταξη είχε ιδιαίτερες δυσκολίες όσον αφορά τον τομέα της συντήρησης,

γεγονός που οδήγησε στην αφαίρεση του ημίσειου πλωραίου διαμήκους τμήματος της φούστας ευσταθείας. Το 1995, το Ναυτικό των ΗΠΑ κλήθηκε να υπερκεράσει τις δυσκολίες μίας αποστολής ναρκαλιείας με αερόστρωμα σκάφη. Η συγκεκριμένη αποστολή απαιτούσε το σκάφος να μπορεί να αιωρείται σε ύψος 2.4 μέτρων με μηδενική ταχύτητα. Ουσιαστικά η επιχειρησιακή απαίτηση ήταν η αύξηση του βάθους του θαλάμου αέρα στα 2.1m από τα 1.5m που παρείχε η συμβατική φούστα. Επιπρόσθετα, εξετάστηκε η δυνατότητα βελτίωσης της αξιοπιστίας του συστήματος προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η συντήρηση της φούστας.

Αποτέλεσμα της έρευνας ήταν η δημιουργία της πρώτης γενεάς Φούστας Βάθους (Deep skirt) η οποία και είναι εγκατεστημένη σε όλα τα σύγχρονα αερόστρωμα των ΗΠΑ.

Η συγκεκριμένη φούστα αποτελείται από διπλή εξωτερική τσάντα (bag), συνεχόμενα πλευρικά

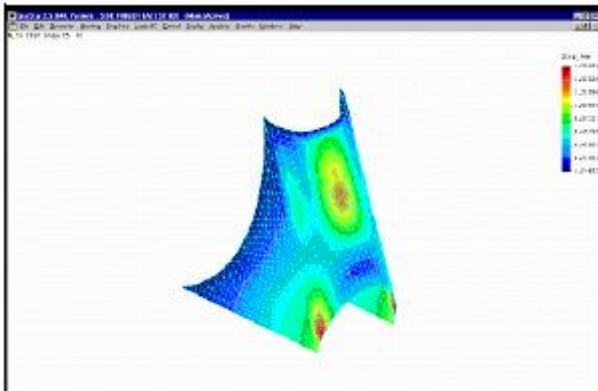


Σχήμα 85: Διάταξη της φούστας βάθους

δάχτυλα (fingers) για τη βελτίωση της εγκάρσιας ευστάθειας και ένα εγκάρσιο χώρισμα του θαλάμου αέρα για τη βελτίωση της διαμήκουσ ευστάθειας και τη μείωση του ποσοστού διαρροής αέρα από το θάλαμο όταν το σκάφος πλέει σε κυματισμό. Η διάταξη που περιγράφηκε ανωτέρω φαίνεται στο σχήμα 85.

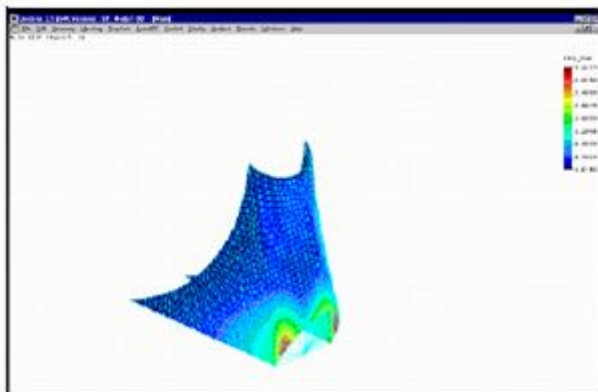


Η επιχειρησιακή εμπειρία έδειξε ότι η χρήση αυτού του νέου τύπου φούστας μείωσε την αντίσταση του σκάφους, βελτίωσε τη συμπεριφορά του σε κυματισμό, αύξησε την ικανότητα φόρτωσης και ελαχιστοποίησε τις απαιτήσεις συντήρησής του.



*Σχήμα 86: Κατανομή τάσεων σε φούστα πρώτης γενιάς*

Η δεύτερης γενιάς Φούστα Βάθους αναπτύχθηκε για το Φιλανδικό πολεμικό ACV T-2000. Η εξέλιξη αυτής της φούστας επετεύχθη με χρήση εξελιγμένων προγραμμάτων απεικόνισης τρισδιάστατων μοντέλων, τα οποία οδήγησαν σε σχεδιάσεις με ελάχιστη συγκέντρωση τάσεων στα άκρα της φούστας, τα οποία σε προηγούμενους τύπους



*Σχήμα 86: Κατανομή τάσεων σε φούστα δεύτερης γενιάς*

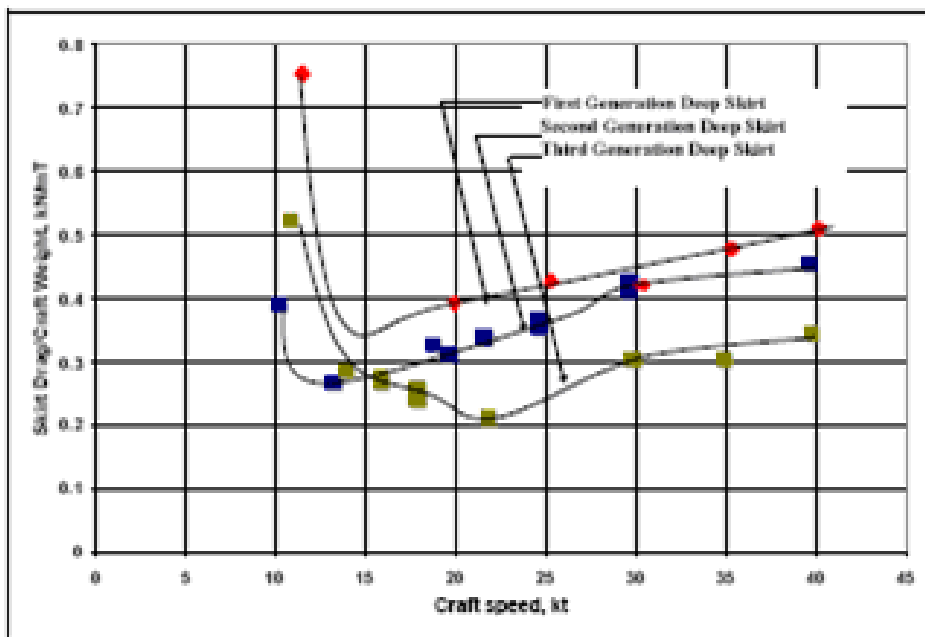
καταπονούνταν υπερβολικά.

Η σύγκριση των δύο τελευταίων τύπων φούστας φαίνεται στα σχήματα 85 και 86 τα οποία προέκυψαν με τη βοήθεια της μεθόδου πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Analysis).

Παρατηρούμε την αυξημένη παραμόρφωση του εμπρόσθιου τμήματος του δάχτυλου της φούστας πρώτης γενιάς. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η εξελιγμένη φούστα δεύτερης

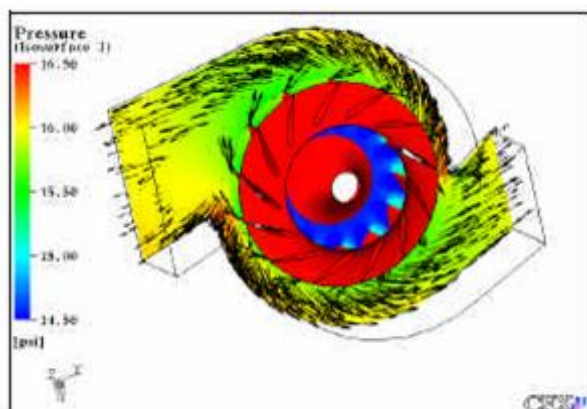
γενιάς λειτούργησε δοκιμαστικά για περισσότερο από 400 ώρες χωρίς την ανάγκη συντήρησης.

Στις μέρες μας, βρίσκεται σε εξέλιξη η φούστα τρίτης γενιάς για την οποία έχουν εκτελεστεί δοκιμές με πρότυπα από όπου προέκυψε και το σχήμα 87 που συγκρίνει την αντίσταση των τριών γενεών φούστας. Αποτέλεσμα των αναφερθέντων είναι το γεγονός ότι η εξέλιξη της φούστας στις ΗΠΑ οδήγησε στην τελική μείωση της αντίστασης κατά 25%.



Σχήμα 87: Σύγκριση αντίστασης της φούστας

### 6.2.2 Ανεμιστήρες ανυψώσεως

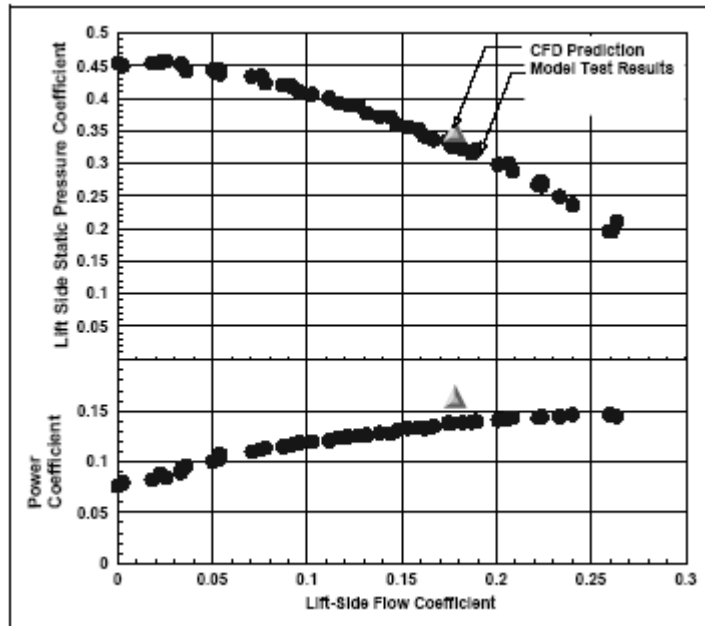


Οι αυξημένες απαιτήσεις των ACV στον τομέα των ανεμιστήρων ανυψώσεως οδήγησε τους σχεδιαστές στη χρήση ανεμιστήρων με όσο το δυνατό σταθερή (επίπεδη)

Σχήμα 88:Ανάλυση CFD

χαρακτηριστική καμπύλη ροής όπως τους HEBA-A ΚΑΙ HEBA-B(High Efficiency Backwards-inclined Airfoil fans), οι οποίοι και εφαρμόστηκαν για πάνω από 40 χρόνια.

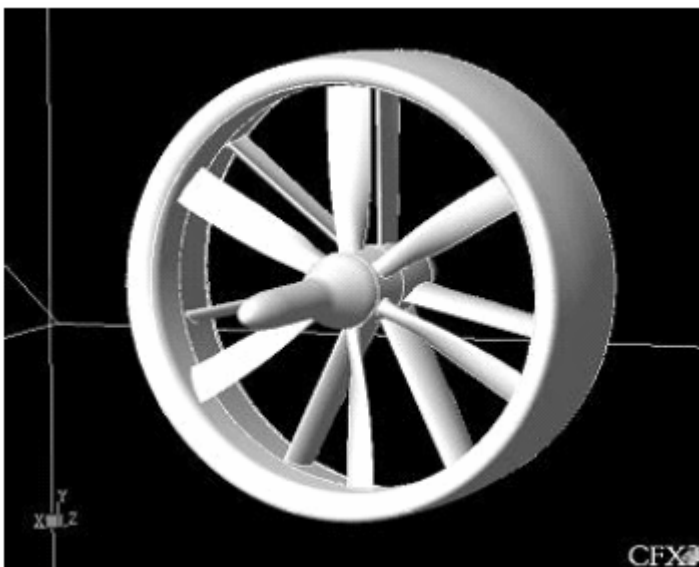
Ο οργανισμός CDIM-SDD εφάρμοσε υπολογιστικά προγράμματα CFD (Computational Fluid Analysis) όπως τον κώδικα ANSYS CFX 5.6 ο οποίος δίνει τη δυνατότητα εφαρμογής πολλαπλών στρεφόμενων πλαισίων σε κάθε ανάλυση. Με αυτό τον τρόπο δόθηκε το πλεονέκτημα της μείωσης του όγκου του πλαισίου του ανεμιστήρα χωρίς επιπτώσεις στην απόδοση του συστήματος. Ένα παράδειγμα τέτοιας ανάλυσης φαίνεται στο σχήμα 88.Εφαρμογή της μεθόδου σε μοντέλα έδωσε το σχήμα 89, όπου φαίνεται η πολύ καλή προσέγγιση της θεωρητικής μεθόδου με τα πειραματικά αποτελέσματα.



Σχήμα 89: Σύγκριση προβλέψεων CFD με πειραματικά αποτελέσματα

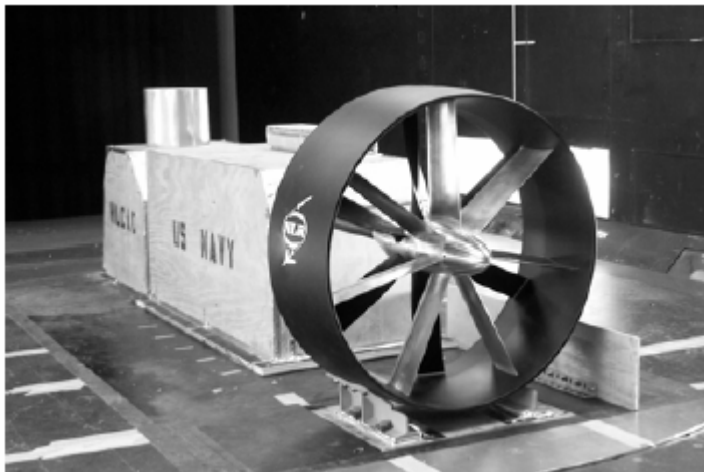
### 6.2.3 Κατευθυντικά προωστήρια σκεύη

Τα σύγχρονα αερόστρωμα βασίζονται σε έλικες κατευθυντικής ροής για την πρόωση τους, γεγονός που μειώνει την απόδοση του συστήματος πρόωσης. Ο CDIM-SDD κατάφερε να εξελίξει έναν ήδη υπάρχων τύπο έλικας και κατέστησε δυνατό να απορροφήσει έως και 50% μεγαλύτερη ισχύ σε σύγκριση με συμβατικούς τύπους σχεδίασης.



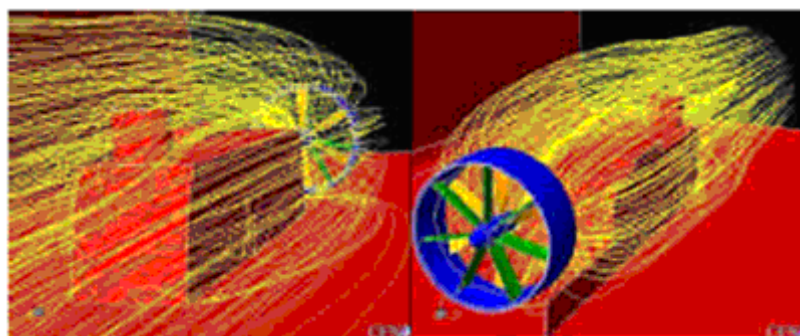
Σχήμα 90: Η έλικα των 6 κινητών και των 7 στατών πτερυγίων

Για μία ακόμη φορά χρησιμοποίησε προγράμματα υπολογιστικής ρευστομηχανικής (ANSYS CFX 5.6) και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι ο προτιμώμενος προωστήρας είναι μία κατευθυντική έλικα 6 κινητών και 7 αεροδυναμικών στατών πτερυγίων, όπως φαίνεται στο σχήμα 90. Πειραματική εφαρμογή της θεωρίας εκτελέστηκε σε αεροδυναμική σήραγγα στο Πανεπιστήμιο του Maryland με μοντέλο κλίμακας 1/6 (σχ.91).

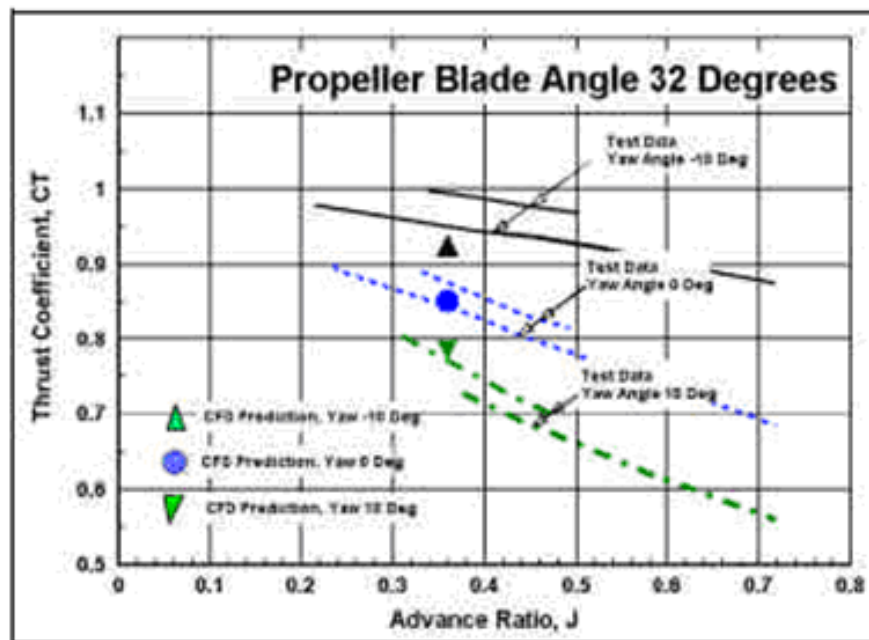


Σχήμα 91: Το μοντέλο κλίμακας 1/6

Ακόμη, έγινε απεικόνιση της ροής του αέρα στην έλικα με την εφαρμογή κατάλληλου πλέγματος από το πρόγραμμα TurboGrid 1.06. Το σχήμα 92 απεικονίζει τις γραμμές ροής του αέρα στην έλικα. Μία σύγκριση της θεωρίας με την πειραματική προσέγγιση φαίνεται στο διάγραμμα 93. Φαίνεται ότι η πρόβλεψη με την εφαρμογή CFD αναλύσεων έχει απόκλιση από τα μετρηθέντα στοιχεία της τάξης του 4%. Η μέγιστη απόκλιση παρατηρείται σε γωνία  $10^0$  ως προς το  $\gamma\alpha\omega$ , όπου δυσχεραίνει η ροή προς τον προωστήρα.



Σχήμα 92: Η ροή του αέρα από την έλικα



Σχήμα 93 : Η μετρηθείσα ώση σε σύγκριση με τις CFD προβλέψεις

#### 6.2.4 Συστήματα υποβοήθησης ελιγμών (bow thrusters)

Αρκετά σύγχρονα ACVs χρησιμοποιούν συστήματα υποβοήθησης ελιγμών όπως πλωραίους προωθητές (bow thrusters) για να αυξήσουν την ώση του σκάφους και την πλοική τους ικανότητα. Ένας χαρακτηριστικός τύπος τέτοιας συσκευής παρουσιάζεται στο σχήμα 94, στο οποίο φαίνεται το αερόστρωμο της Καναδικής ακτοφυλακής AP.1-88.



*Σχήμα 94: Τα bow thrusters του AP1-88*

Αυτά τα συστήματα ακροφυσίων αποβάλλουν αέρα υψηλής ταχύτητας ο οποίος παρέχεται από ανεμιστήρες. Τα ακροφύσια μπορούν συνήθως να περιστραφούν ως προς την κατακόρυφο και έτσι είναι δυνατή η παραγωγή διαμήκους και πλευρικής ώσης ανάλογα με τη γωνία περιστροφής τους.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό γνώρισμα των ακροφυσίων φαίνεται στο σχήμα 94 και είναι το ύψος τους, το οποίο μπορεί να φθάσει μέχρι και τα δύο μέτρα από την κατάθλιψη των ανεμιστήρων.



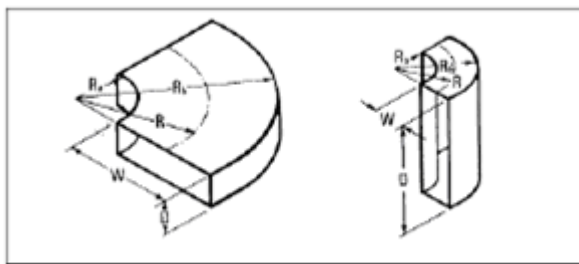
*Σχήμα 95: Ο προωθητής χαμηλού προφίλ του T-2000*

Όταν οι τεχνικοί του CDIM-SDD ασχολήθηκαν με την ανάπτυξη της σχεδίασης του φινλανδικού πολεμικού σκάφους T-2000, βρέθηκαν αντιμέτωποι με την πρόκληση

της μείωσης του ύψους όλων των συστημάτων που βρίσκονταν στο εξωτερικό του σκάφους. Αυτή η απαίτηση οδήγησε στην ανάπτυξη του χαμηλού προφίλ πλωραίου προωθητή που απεικονίζεται στο σχήμα 95.

Επίσης στο σχήμα 95 φαίνεται και η διάταξη του συστήματος, που αποτελείται από ένα περιστρεφόμενο ακροφύσιο που εδράζεται πάνω σε ένα θάλαμο συλλογής αέρα, ο οποίος με τη σειρά του τοποθετείται πάνω από τον ανεμιστήρα. Το ανώτατο σημείο του bow thruster του T-2000 είναι μόνο 780 χιλ. πάνω από το επίπεδο του κυρίου καταστρώματος.

Το σχήμα 96 απεικονίζει διαγραμματικά τη γεωμετρία ενός συμβατικού και ενός χαμηλού προφίλ προωθητή αέρα.



Σχήμα 96: Η γεωμετρία ενός συμβατικού και ενός χαμηλού προφίλ προωθητή αέρα

Παράμετροι όπως η αναλογία καμπυλών ( $R_a/R_b$ ) και ο λόγος των ακτίνων ( $R/W$ ) επηρεάζουν σημαντικά τις απώλειες τριβής που προκαλούνται από τα ακροφύσια. Γενικά, όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές των ανωτέρω λόγων τόσο ελαχιστοποιούνται οι απώλειες λόγω των ακροφυσίων. Ο προωθητής χαμηλού προφίλ προσφέρει

μεγαλύτερη αναλογία καμπυλών και μεγαλύτερο λόγο ακτίνων από τους συμβατικούς προωθητές, όπως φαίνεται και στο σχήμα 97 .

	Conventional Nozzle	T-2000 Low-Profile Nozzle
Curve Ratio ( $R_a/R_b$ )	0.09	0.22
Radius Ratio ( $R/W$ )	0.73	0.85

Σχήμα 97: Σύγκριση της γεωμετρίας των προωθητών



Επίσης η νέα αυτή σχεδίαση έχει ιδιαίτερα μικρότερη ενεργό επιφάνεια (Radar Cross Section ή RCS), γεγονός που αποδίδει δυνατότητα κάλυψης από εχθρικά ραντάρ εντοπισμού.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7- Βασικές σχεδιαστικές αρχές

Κατά τα τελευταία 30 χρόνια έχουν εκτελεστεί πολλές σχεδιαστικές μελέτες στον τομέα των αερόστρωμων σκαφών. Ταυτόχρονα, η εξέλιξη των ηλεκτρονικών προγραμμάτων όπως το ANSYS CFX και της υπολογιστικής ισχύος των επεξεργαστών έχει βοηθήσει σημαντικά την ανάπτυξη των σχεδιάσεων των ACVs. Αυτά τα προγράμματα συνήθως χρησιμοποιούν μεθόδους παραμετρικής ανάλυσης για την εύρεση της βέλτιστης λύσης ανάλογα με τις απαιτήσεις του σχεδιαστή. Τα αποτελέσματα μπορούν να περιορίσουν την αόριστη αρχικά επιλογή των διαστάσεων, του τύπου της γάστρας, του εκτοπίσματος του σκάφους σε ένα διακριτό αριθμό συνδυασμών. Επίσης είναι σε θέση να πραγματοποιήσουν και περαιτέρω ανάλυση των σχεδιάσεων που τελικά θα επιλεγούν με βάση προηγούμενα μοντέλα (όμοια πλοία). Ο κάτωθι πίνακας αποδίδει τα βήματα που εκτελούνται από ένα τέτοιο πρόγραμμα σχεδίασης αερόστρωμων σκαφών.

### INPUTS

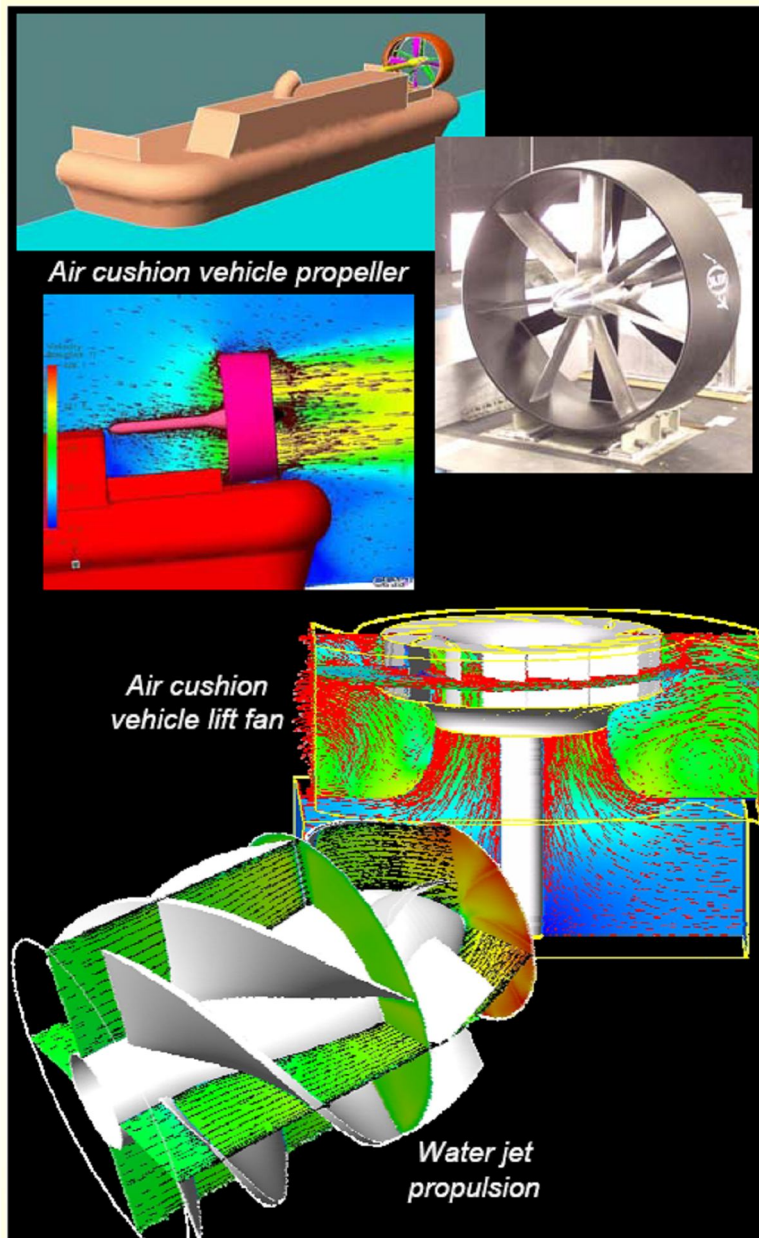
- requirements (payload, range and speed),
- environment (sea states, wind speed, temperature), and
- designer choices (ACV or SES, engine type, propulsor type, materials, range of parameters)

### PROGRAM INITIALIZATION

- choose cushion length, cushion beam and gross weight,
- calculate resistance, powering, lift airflow, etc.,
- design subsystems (structure, propulsion, etc.),
- calculate weight,
- compute payload,
- compare actual payload with derived payload,
- iterate until closed solution is reached, and
- repeat with new cushion length and beam.

### ANALYSIS

- elect optimum solution (minimum weight, cost or power),
- define optimum design in detail,
- define performance curves, and
- prepare data for electronic transfer to CAD system.



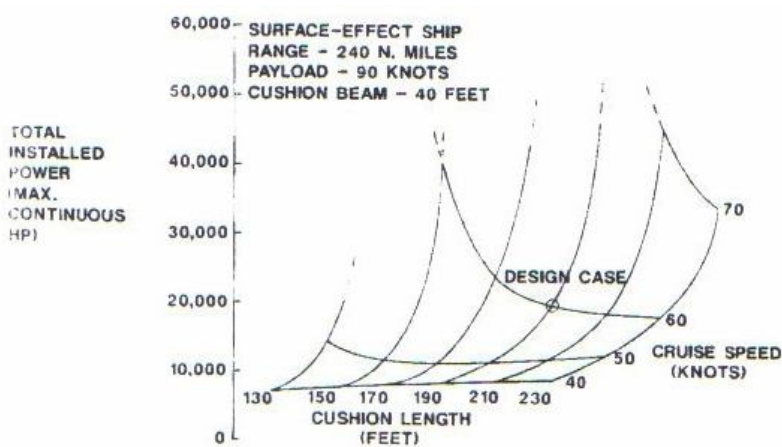
Σχήμα 98: Παρουσίαση του ANSYS CFX

Ένα παράδειγμα σχεδίασης ενός ACV/SES φαίνεται παρακάτω:  
Οι απαιτήσεις του ιδιοκτήτη βρίσκονται στον πίνακα 5. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη χρήση κατάλληλου προγράμματος φαίνονται στα σχήματα 99 έως 103.

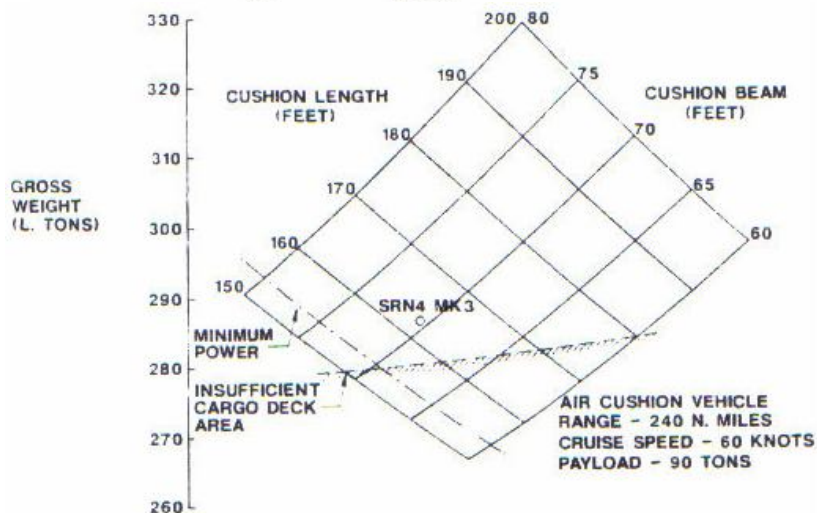
### Πίνακας 5

Payload:	90 tons
Payload Deck Space:	
Automobiles:	6 500 ft <sup>2</sup>
Passengers:	300
Design Cruise Speed:	60 knots
Range:	240 nautical miles
Engine Type:	gas turbines
Propulsion System:	4 air screws for ACV 2 waterjets for SES
Hull Material:	light alloy
Skirt Type:	bag and finger

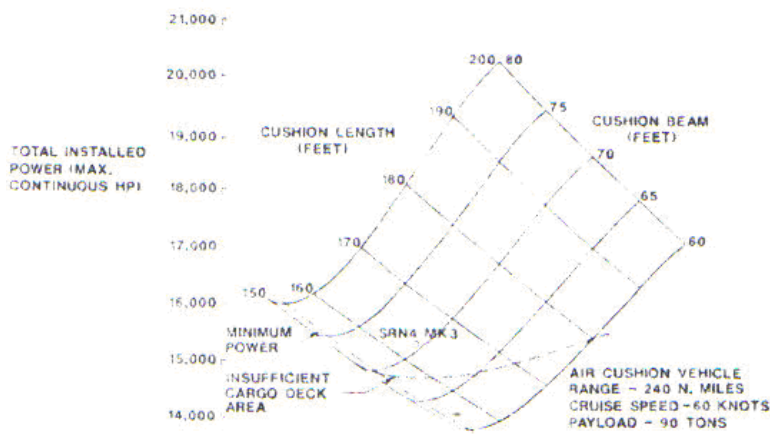
Απαιτήσεις πλοιοκτήτη



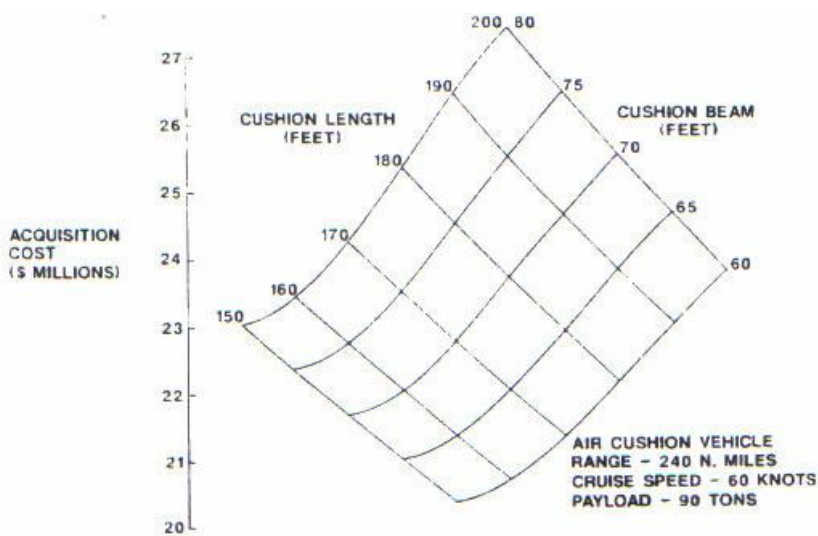
Σχήμα 99: Μεταβολή της εγκατεστημένης ισχύος σε συνάρτηση με το μήκος του θαλάμου αέρα και την ταχύτητα του σκάφους



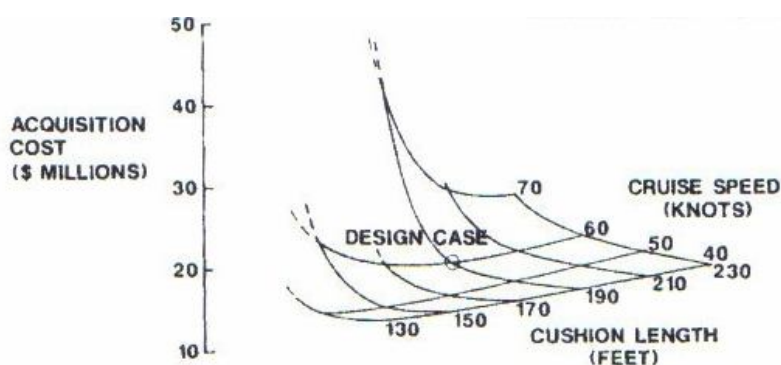
Σχήμα 100: Μεταβολή του Gross weight με το μήκος και το πλάτος του θαλάμου αέρα



Σχήμα 101: Μεταβολή της εγκατεστημένης ισχύος σε συνάρτηση με το μήκος και το πλάτος του θαλάμου αέρα και την ταχύτητα του σκάφους

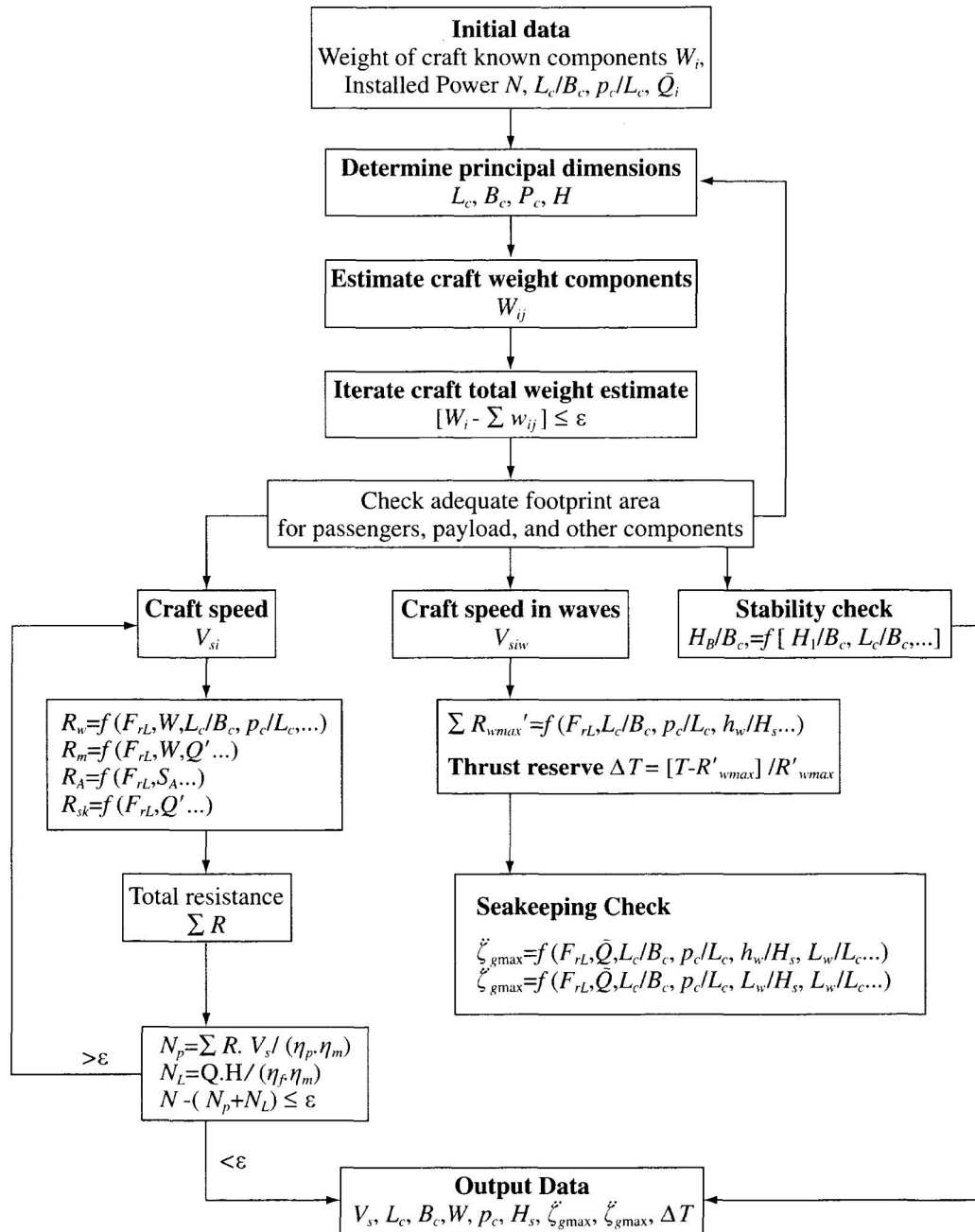


Σχήμα 102: Μεταβολή του κόστους πρόσκτησης σε συνάρτηση με το μήκος και το πλάτος του θαλάμου αέρα



Σχήμα 103: Μεταβολή του κόστους πρόσκτησης σε συνάρτηση με το μήκος του θαλάμου αέρα και την επιχειρησιακή ταχύτητα του σκάφους

Ένα μπλοκ-διάγραμμα για την αρχική επιλογή των κύριων διαστάσεων και των βαρών ενός ACV, το οποίο χρησιμοποιείται από σύγχρονους μελετητές φαίνεται στο κάτωθι σχήμα:

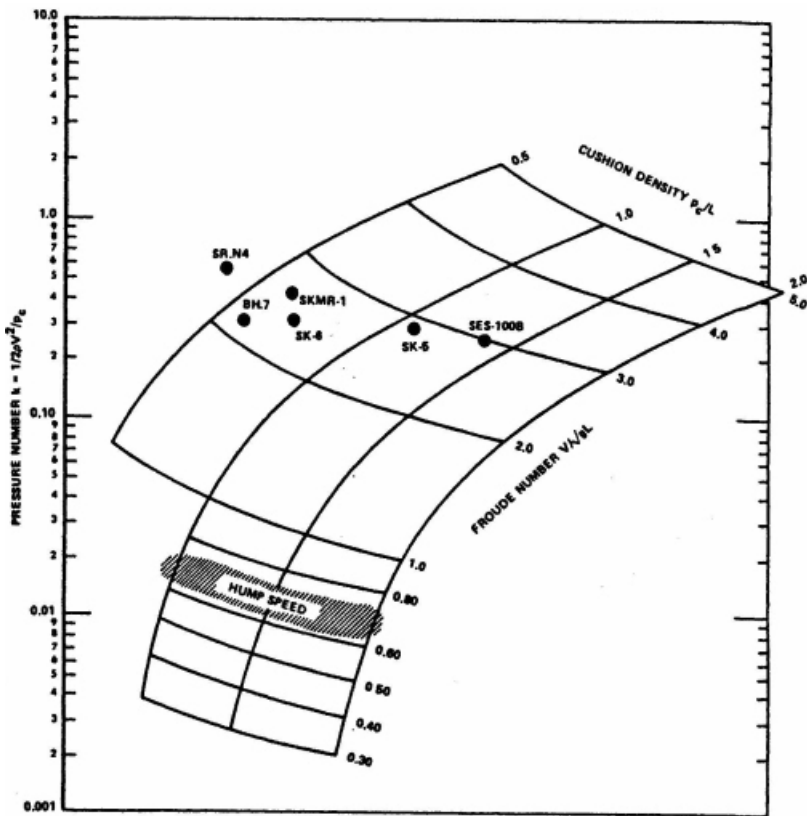


Παραδείγματα επιλογής κυρίων διαστάσεων και άλλων παραμέτρων σκαφών που έχουν ήδη κατασκευαστεί φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Name	Country	Weight (t)	Length (m)	Beam (m)	L/B	$\rho_c$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_c/L$ (kg/m <sup>2</sup> )	$S_c$ (m <sup>2</sup> )	$\alpha/\rho_c$	Power (shp)	Speed (knots)	$M_t = W/VP$
1	UK	300	56.4	23.2	2.43	257	4.56	1168	0.272	18 000	65	7.43
2	France	265	50.0	23.0	2.17	315	6.3	840	0.257	17 000	70	7.48
3	Russia	260	47.8	17.5	2.73	360	7.53	725	0.225	26 000	70	4.80
4	UK	200	39.7	23.2	1.71	257	6.47	780	0.315	17 000	70	5.65
5	UK	180	39.7	23.2	1.71	230	5.79	780	0.351	17 000	70	5.08
6	USA	157	28.0	13.4	2.09	469	16.75	335	0.127	22 500	60	2.87
7	USA	150	24.2	13.1	1.86	484	19.84	310	0.131	22 500	62	2.84
8	UK	100	30.2	13.3	2.27	305	10.10	328	0.229	7 600	63	5.87
9	Russia	90	23.3	10.2	2.27	390	16.81	230	0.128	7 200	55	4.72
10	UK	55	23.1	11.2	2.04	268	11.60	205	0.208	3 800	58	5.76
11	USA	52	23.0	10.9	2.30	267	11.61	195	0.155	3 600	50	4.95
12	UK	50	23.1	11.3	2.04	244	10.56	205	0.244	3 800	60	5.42
13	Japan	50	25.1	11.1	2.26	217	8.65	230	0.322	4 400	65	5.07
14	Canada	35	20.0	10.0	2.00	213	10.65	166	0.171	2 600	47	4.39
15	UK	29	21.5	10.1	2.13	200	9.30	145	0.250	1 500	55	7.29
16	France	27	24.0	10.5	2.29	169	7.04	160	0.367	3 000	62	3.83
17	Russia	27	21.3	7.3	2.92	193	9.06	140	0.214	2 340	50	3.95
18	UK	25	18.4	9.3	1.98	185	10.05	135	0.322	2 500	60	4.12
19	Japan	19.3	17.6	7.6	2.32	186	10.60	104	0.240	1 050	52	6.56
20	Canada	19	16.5	6.7	2.16	193	11.70	90	0.220	1 700	50	3.89
21	UK	17	17.1	6.6	2.59	155	9.06	110	0.267	1 125	50	5.18
22	Japan	16.3	15.4	7.6	2.03	185	12.10	88	0.270	1 050	55	5.86
23	Canada	14.7	13.2	6.7	1.97	193	14.62	76.3	0.214	1 700	50	2.97
24	UK	10	14.8	6.6	2.47	128	8.65	78	0.350	900	52	3.96
25	UK	6.7	11.8	6.6	1.97	129	10.93	52	0.462	900	60	3.06
26	UK	3.1	8.0	4.4	1.82	110	13.75	28.3	0.265	200	42	4.46
27	UK	1.8	5.9	4.4	1.34	90	15.25	20	0.372	200	45	2.80
28a	UK	1.9	7.2	2.8	2.57	101	14.03	18.8	0.120	250	27	1.41
28b	UK	1.675	7.2	2.8	2.57	89	12.36	18.8	0.164	250	30	1.37
28c	UK	1.45	7.2	2.8	2.57	77	10.69	18.8	0.225	250	32	1.29
28d	UK	1.225	7.2	2.8	2.57	65	9.03	18.8	0.363	260	38	1.27

Σε αυτό το σημείο αξίζει να γίνει μία αναφορά για μία σημαντική παράμετρο σχεδίασης, τον αριθμό πίεσεως  $k$ . Για σκάφη συμβατικής σχεδίασης, η κίνησή τους χαρακτηρίζεται απλά από τον αριθμό  $Fr$ . Τα αερόστρωμα όμως, επιχειρούν τον περισσότερο χρόνο πάνω από το νερό, σε κατάσταση αιωρήσεως. Έτσι, εισάγεται μία επιπλέον παράμετρος, η δυναμική πίεση του αέρα, η οποία εξαρτάται από την ταχύτητα του σκάφους. Ορίζεται λοιπόν ο αριθμός πίεσεως  $k$  που συνδυάζει τις δύο ανωτέρω επιδράσεις:

$$k = \frac{1/2\rho v^2}{P_c}$$



Σχήμα 104: Επιχειρησιακή ταχύτητα αερόστρωμνου

Ο αριθμός πίεσεως κατηγοριοποιεί τα αερόστρωμα σκάφη ως εξής:

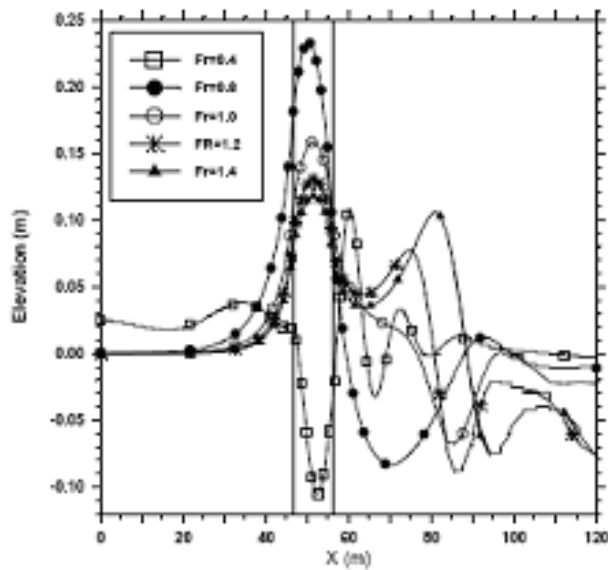
Για μικρές τιμές του ( $k < 0.1$ ), στο σκάφος κυριαρχεί η υδροδυναμική επίδραση, ενώ η αεροδυναμική επίδραση είναι πολύ μικρή. Για μεγάλες τιμές του ( $k > 1$ ),

κυριαρχεί η

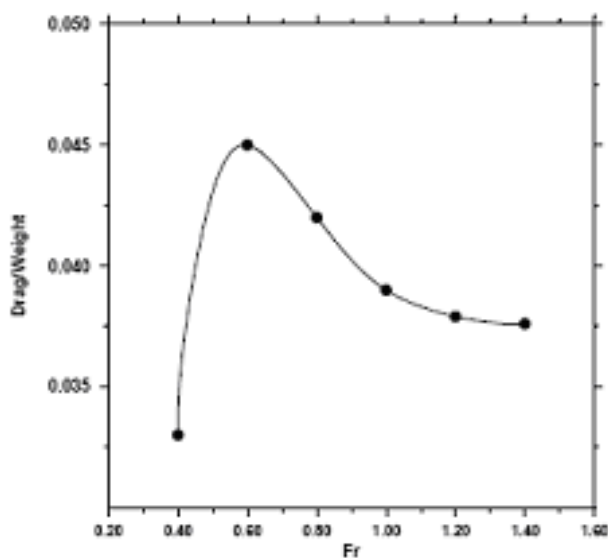
αεροδυναμική επίδραση και η σχεδίαση μορφοποιείται κατάλληλα. Τα σημεία σχεδίασης ορισμένων σκαφών φαίνονται στο ακόλουθο διάγραμμα, από το οποίο παρατηρούμε ότι τα περισσότερα σκάφη έχουν σχεδιαστεί ώστε να επιχειρούν σε μία περιοχή του αριθμού  $k$  από 0.2 έως 0.6 και σε ταχύτητες 2 με 3 φορές την hump speed.



Επιπλέον, χρήση μελετών παραμετροποίησης με τη βοήθεια προγραμμάτων υπολογιστικής ρευστομηχανικής αποδίδουν σε ικανοποιητικό βαθμό τη ροή του αέρα γύρω από τα επιλεγμένα μοντέλα. Έτσι προκύπτουν χρήσιμα συμπεράσματα μέχρι την τελική επιλογή. Ένα παράδειγμα αποτελεί η μελέτη με τη βοήθεια της μεθόδου Lagrange, η οποία έδωσε τα αποτελέσματα που φαίνονται στα σχήματα 105 και 106, όπου και παρατηρούμε την επίδραση του αριθμού  $Fr$  στην ανύψωση του κύματος κατά μήκος του σκάφους και στο λόγο αντίστασης/βάρους του.

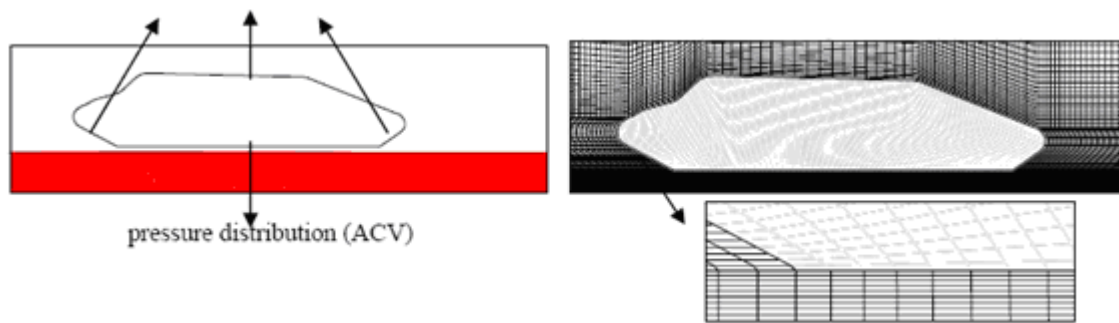


Σχήμα 105: Η επίδραση του αριθμού  $Fr$  στην ανύψωση του κύματος



Σχήμα 106: Λόγος αντίστασης/βάρους σε συνάρτηση με τον αριθμό  $Fr$

Το πλέγμα και οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για την απεικόνιση των τιμών της ροής του αέρα φαίνεται στο σχήμα 107.



*Σχήμα 107 : Οριακές συνθήκες και χρησιμοποιούμενο πλέγμα*