



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Δ.Π.Μ.Σ. «Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία
κι Επιστήμη»

Διπλωματική Εργασία

«Δυνατότητες της παραμετρικής μοντελοποίησης για τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης πλοίων»

Επιμέλεια : Μακρής Δημήτριος

Επίβλεψη : Γρηγορόπουλος Γρηγόρης, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα 2012

Πρόλογος

Το παρόν κείμενο αποτελεί τη διπλωματική μου εργασία στα πλαίσια τη διετούς φοίτησης μου στο Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία κι Επιστήμη», της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Κατά τη διάρκεια φοίτησης μου απέκτησα χρήσιμες κι ενδιαφέρουσες γνώσεις σε άγνωστες σε μένα, μέχρι πριν, θεματικές ενότητες που άπτονται της Ναυτικής Επιστήμης. Καθοριστική συμμετοχή στην διαδικασία αποκόμισης γνώσεων κι εμπειριών, είχαν οι Καθηγητές και το επιστημονικό προσωπικό των σχολών, Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, Μηχανολόγων Μηχανικών, Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών και της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, που συνέβαλαν στην υλοποίηση των παραδόσεων κι εργαστηριακών ασκήσεων, τους οποίους ευχαριστώ θερμά.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στον επιβλέποντα, Καθηγητή ΕΜΠ, Γρηγόρη Γρηγορόπουλο για τη συμβολή, καθοδήγηση και υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας Διπλωματικής, καθώς και για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με μια ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα επιστημονική ενότητα.

Μακρής Δημήτριος

Αθήνα, Οκτώβριος 2012

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	1
Εισαγωγή.....	5
Κεφάλαιο 1. Θεωρητική προσέγγιση της αντίστασης πλοίου	7
Η αντίσταση κατά τη διαδικασία σχεδίασης πλοίων	7
Ορισμός της αντίστασης	7
Κεφάλαιο 2. Μελέτη της συμπεριφοράς πλοίου σε κυματισμούς	15
Γενικά στοιχεία δυναμικής συμπεριφοράς πλοίου σε κυματισμούς	15
Η θεωρία του Frank.....	19
Κεφάλαιο 3. Γενετικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης	23
Γενικά στοιχεία γενετικών αλγορίθμων	23
Ο αλγόριθμος NSGA-II.....	25
Κεφάλαιο 4. Χαρακτηριστικά σχεδίασης μονόγαστρων ταχύπλοων σκαφών.....	31
Υδροδυναμικά στοιχεία σχεδίασης ταχύπλοων σκαφών	31
Η συστηματική σειρά ΕΜΠ	41
Κεφάλαιο 5. Παραμετρική μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση.....	45
Παραμετρική σχεδίαση	45
Παραγωγή γεωμετριών.....	51
Υπολογισμός τιμών των κριτηρίων βελτιστοποίησης και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από γενετικό αλγόριθμο.....	58
Κεφάλαιο 6. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	65
Βελτιστοποίηση πατρικής γάστρας με αμετάβλητες τις κύριες διαστάσεις.....	65
Βελτιστοποίηση πατρικής γάστρας σε δύο στάδια	76
Συμπεράσματα.....	99
Βιβλιογραφία.....	103

Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παραμετρική σχεδίαση και βελτιστοποίηση της γεωμετρίας της γάστρας ενός ταχυπλόου σκάφους από πλευράς ελάχιστης αντίστασης αλλά και συμπεριφοράς σε κυματισμούς. Η γάστρα του σκάφους αυτού προέρχεται από τη συστηματική σειρά ΕΜΠ που σχεδιάστηκε, κατασκευάστηκε και εξετάστηκε στην πειραματική δεξαμενή του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, από το εργαστήριο ναυτικής και θαλάσσιας υδροδυναμικής. Εκτενέστερη αναφορά σε αυτή τη σειρά θα πραγματοποιηθεί στα κεφάλαια που ακολουθούν.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως η βέλτιστη γεωμετρία ενός σκάφους εξαρτάται από πολυάριθμους παράγοντες και η εύρεση της αποτελεί ένα εξαιρετικά πολύπλοκο πρόβλημα που απαιτεί ακριβή αποτύπωση όλων των παραμέτρων που επηρεάζονται από τη γεωμετρία, αφορούν το σύνολο της λειτουργησιμότητας ενός σκάφους και πολλές φορές δεν είναι γνωστές στα πρώτα στάδια της μελέτης και σχεδίασης του. Μερικές από τις παραμέτρους αυτές, που πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν είναι :

- Η ικανοποίηση των απαιτήσεων του πλοιοκτήτη
- Η ικανοποίηση των κανονισμών των νηογνομόνων
- Η εγκάρσια ευστάθεια
- Η ελαχιστοποίηση της ολικής αντίστασης στην υπηρεσιακή ταχύτητα
- Η δημιουργία ομόρρου που να εξασφαλίζει καλό βαθμό απόδοσης της έλικας
- Η καλή συμπεριφορά σε κυματισμούς
- Η ευστάθεια πορείας και η ικανότητα πηδαλιουχίας
- Η βέλτιστη οικονομική εκμετάλλευση των εσωτερικών χώρων
- Η εξασφάλιση επαρκούς αντοχής
- Η ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής
- Η ελαχιστοποίηση του απαιτούμενου ναύλου
- Η εξασφάλιση αποπεράτωσης της επιθυμητής διαδρομής (διέλευση από διώρυγες και εύκολη πρόσβαση σε πιθανώς μικρούς λιμένες)

Γίνεται λοιπόν σαφές πως η ολική βελτιστοποίηση της σχεδίασης ενός σκάφους αποτελεί μια διαδικασία κατά την οποία πρέπει να προσδιοριστούν παράμετροι με αντικρουόμενες μεταξύ τους, επιπτώσεις στην λειτουργησιμότητα του πλοίου, πολλές από τις οποίες είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν ώστε να μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση μεταξύ τους.

Στα πλαίσια του παρόντος θα εξεταστούν δύο βασικά κριτήρια, που επηρεάζουν άμεσα τόσο την οικονομική αποδοτικότητα όσο και την αξιοπλοΐα του εξεταζόμενου σκάφους. Αυτά, όπως προαναφέρθηκε, αφορούν στην αντίσταση που θα παρουσιάζει το σκάφος κατά την πλεύση του και στη συμπεριφορά του σε κυματισμούς, ενώ οι αλγεβρικές τιμές ποσοτικοποίησης τους είναι το μέγιστο ύψος των παραγόμενων κυματισμών και η επιτάχυνση της πλώρης λόγω αλληλεπίδρασης του σκάφους, με τυχαίους κυματισμούς, αντίστοιχα. Ανάμεσα στις δύο αλγεβρικές τιμές δεν μπορεί να τεθεί κοινή βάση ποσοτικοποίησης και σύγκρισης, κι επομένως η αξιολόγηση της σχετικής σημαντικότητας του ενός κριτηρίου ως προς το άλλο είναι αδύνατον να πραγματοποιηθεί άμεσα. Κατά συνέπεια η εύρεση της βέλτιστης λύσης θα αποτελέσει αντικείμενο μελέτης, με συγκεκριμένα κριτήρια που θα αναλυθούν εκτενώς στο κεφάλαιο συμπερασμάτων.

Η αρχική γεωμετρία θα αποτελέσει την πρώτη προσέγγιση της σχεδίασης που θα μελετηθεί και πηγάζει από την πατρική σχεδίαση της συστηματικής σειράς ΕΜΠ. Μεταβλητές των οποίων οι τιμές θα διακυμανθούν θα αποτελέσουν τόσο οι κύριες διαστάσεις όσο και λεπτομερή χαρακτηριστικά της γεωμετρίας. Οι παράμετροι που θα μεταβληθούν αποτελούν ένα σύνολο επιλεγμένων, που προφανώς επηρεάζουν άμεσα τη συμπεριφορά του σκάφους όσον αφορά τα κριτήρια που προαναφέρθηκαν.

Κεφάλαιο 1. Θεωρητική προσέγγιση της αντίστασης πλοίου

Η αντίσταση κατά τη διαδικασία σχεδίασης πλοίων

Η σχεδίαση ενός πλοίου αποτελεί μια διαδικασία διαδοχικών υπολογισμών και προσεγγίσεων μέχρις ότου καταλήξουμε σε μια ασφαλώς αποδεκτή αλλά και βέλτιστη σχεδίαση με γνώμονα πάντα τις απαιτήσεις του πλοιοκτήτη αλλά και την τήρηση των κανονισμών του νηογνώμονα. Πρόκειται λοιπόν για μια επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία οι πρώτες επαναλήψεις αφορούν την προμελέτη ή προκαταρκτική σχεδίαση και κατά τις οποίες γίνεται μια προεκτίμηση των χαρακτηριστικών του πλοίου μέχρι να καταλήξουμε στη λεπτομερή σχεδίαση όπου όλα τα χαρακτηριστικά και οι διαστάσεις του πλοίου είναι σαφώς ορισμένα.

Ο υπολογισμός της αντίστασης που θα παρουσιάσει το σκάφος είναι εξέχουσας σημασίας κατά τη διαδικασία μελέτης και σχεδίασης του πλοίου και αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα επιλογής προωστήριας εγκατάστασης. Γίνεται λοιπόν σαφές πως από τον ακριβή υπολογισμό αλλά και την ελαχιστοποίηση της αντίστασης εξαρτώνται σημαντικά ζητήματα που άπτονται της οικονομικής αποδοτικότητας του πλοίου, όπως ενδεικτικά το μέγεθος και άρα το κόστος της προωστήριας εγκατάστασης, η κατανάλωση καυσίμου, και τα χαρακτηριστικά της προπέλας.

Ορισμός της αντίστασης

Κάθε σώμα που κινείται μέσα σε χώρο μη μηδενικής πυκνότητας παρουσιάζει αντίσταση στην κίνηση του. Προκειμένου να κινηθεί το πλοίο με σταθερή ταχύτητα θα πρέπει να του ασκηθεί ώση T , μέσω οποιασδήποτε μορφής προωστήριου μέσου. Η ώση αυτή θα προκαλέσει αύξηση της ταχύτητας v , μέχρι την τιμή αυτής, στην οποία η οριζόντια συνιστώσα της αντίστασης $R(v)$ θα είναι ίση με την οριζόντια συνιστώσα της ώσης.

Τα πλήρως βυθισμένα σώματα όπως τα υποβρύχια, παρουσιάζουν αντίσταση που σχετίζεται αποκλειστικά με φαινόμενα συνεκτικότητας. Τα συνεκτικά φαινόμενα εκτός από την προφανή αντίσταση τριβής, αφορούν και αντίσταση που πηγάζει από μεταβολές του πεδίου πιέσεων στον ομόρου του σκάφους και οφείλονται στη συνεκτικότητα του νερού. Στην περίπτωση των πλοίων όμως εκτός από τα φαινόμενα συνεκτικότητας, σημαντικότερη συμμετοχή στην ολική αντίσταση, έχει και η αλληλεπίδραση του σκάφους με την ελεύθερη επιφάνεια μέσω των κάθετων πιέσεων σε αυτή από το νερό. Αυτή η αλληλεπίδραση προκαλεί τη συνεχόμενη δημιουργία κυματισμών καθώς το πλοίο ταξιδεύει, με επερχόμενη μια συνιστώσα της συνολικής αντίστασης που ονομάζεται αντίσταση κυματισμού. Οι συνιστώσες

της αντίστασης που σχετίζονται με φαινόμενα συνεκτικότητας και φαινόμενα αλληλεπίδρασης της γάστρας με την ελεύθερη επιφάνεια, αποτελούν τις κύριες συνιστώσες της συνολικής αντίστασης.

Αρχικά θα πρέπει να γίνει μια αναφορά στις βασικές αρχές του φυσικού φαινομένου της αντίστασης και των ιδιοτήτων των συνιστωσών της. Το φαινόμενο της αντίστασης από φυσική σκοπιά συνιστάται από την κατανομή των εφαπτομενικών και κάθετων στοιχειωδών δυνάμεων στα ύφαλα του σκάφους. Η προβολή και σύνθεση στη διεύθυνση της κίνησης, των ολοκληρωμάτων των δυνάμεων αυτών στο σύνολο της βρεχόμενης επιφάνειας αποτελεί τη συνολική αντίσταση. Οι βασικές λοιπόν κατηγορίες της αντίστασης του σκάφους είναι δύο¹ :

- Αντίσταση τριβής
- Αντίσταση πίεσης

Για την κατάρτιση και μελέτη του φαινομένου της αντίστασης είναι ιδιαίτερα χρήσιμη η θεωρία της διαστατικής ανάλυσης σύμφωνα με την οποία οποιοδήποτε φυσικό φαινόμενο μπορεί να εκφραστεί υπό αδιάστατη μορφή, με χρήση τριών θεμελιωδών μεγεθών που είναι η μάζα, το μήκος και ο χρόνος. Με χρήση λοιπόν της διαστατικής ανάλυσης αποδεικνύεται πως η αντίσταση ενός σκάφους εξαρτάται από δύο αδιάστατες παραμέτρους – τους αριθμούς Reynolds και Froude των οποίων δίνεται ο ορισμός στη συνέχεια.

$$Re = \frac{UL}{\nu}$$

$$Fn = \frac{U}{\sqrt{gL}}$$

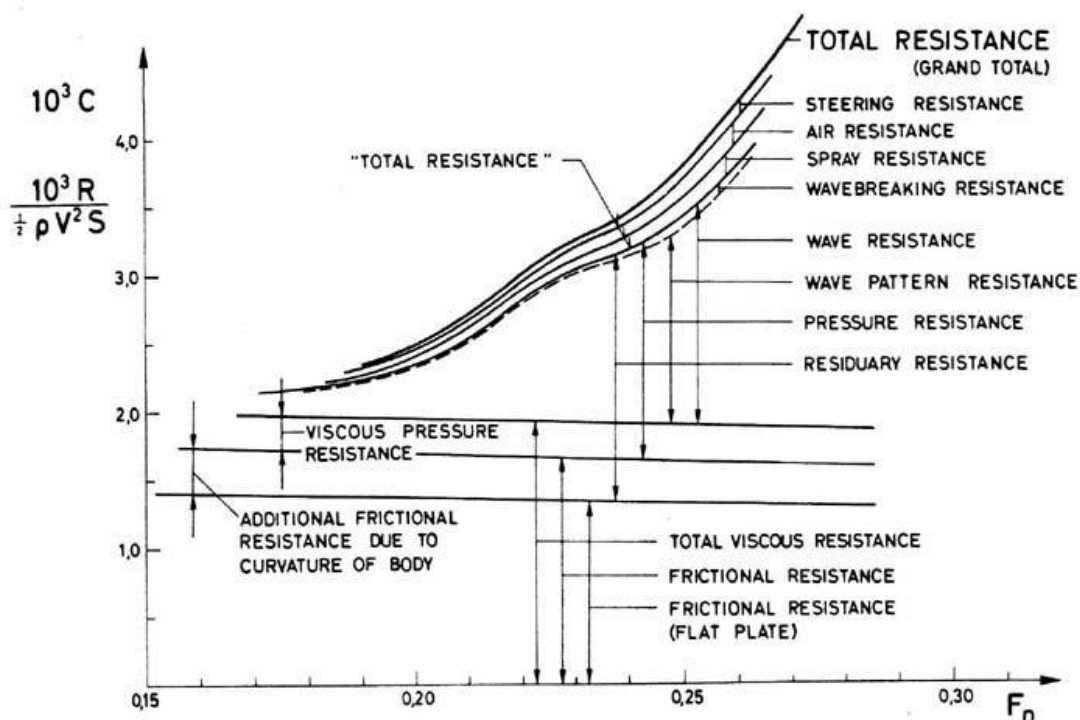
όπου U είναι η ταχύτητα με την οποία κινείται το σκάφος, L το μήκος της ισάλου του, ν η κινηματική συνεκτικότητα και g η επιτάχυνση της βαρύτητας. Συνεπώς ο αριθμός Reynolds εκφράζει τον λόγο αδρανειακών και συνεκτικών δυνάμεων ενώ ο Froude αδρανειακών και βαρυτικών. Ως εκ τούτου η μεν αντίσταση τριβής εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds ενώ η αντίσταση πίεσης από τον αριθμό Froude. Η θεώρηση αυτή δεν είναι απόλυτα ακριβής καθώς υπάρχει αλληλοσυσχέτιση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την πλευση του σκάφους ωστόσο καταδεικνύει την κύρια εξάρτηση των συνιστωσών της αντίστασης από τους παραπάνω αδιάστατους αριθμούς.

¹ Γ.Κ. Πολίτη, Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. «Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου», Αθήνα, 2011

Για τη μελέτη κι εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός πλεούμενου από πλευράς αντίστασης, γίνεται περεταίρω διαχωρισμός αυτής σε επιμέρους κατηγορίες οι οποίες εξαρτώνται από φαινόμενα συνεκτικότητας, μεταβολής της κατανομής των πιέσεων (που οφείλονται στη συνεκτικότητα) και αλληλεπίδρασης με την ελεύθερη επιφάνεια. Θα πρέπει να τονιστεί πως ακόμα και μετά τον διαχωρισμό σε κατηγορίες, δεν άπτονται όλες αυτές οι συνιστώσες αποκλειστικά φαινομένων αντίστασης τριβής ή πίεσης, καθώς και πάλι υπάρχουν περιπτώσεις που υπάρχει συσχέτιση και με τις δύο κατηγορίες του φυσικού προβλήματος. Αν και γενικά η αντίσταση αποτελεί ένα συνολικό φαινόμενο η διάσπαση του σε απλούστερα, και υπό την αυθαίρετη παραδοχή της ανεξαρτησίας μεταξύ τους, διευκολύνει πολύ τη μελέτη και την προσέγγιση της συμπεριφοράς που θα παρουσιάσει το σκάφος κατά την πλεύση του. Η συνολική λοιπόν, αντίσταση αναλύεται στις ακόλουθες επιμέρους συνιστώσες κάτι που φαίνεται και σχηματικά στη συνέχεια ²:

- Αντίσταση τριβής επίπεδης πλάκας
- Αντίσταση τριβής λόγω καμπυλότητας
- Αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας
- Αντίσταση κυματισμού
- Αντίσταση θραύσης κύματος
- Αντίσταση λόγω δημιουργίας αφρού
- Αντίσταση ανέμου
- Αντίσταση ελιγμών

² Γ.Κ. Πολίτη, Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. «Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου», Αθήνα, 2011



Εικόνα 1.1 Η εξάρτηση των συνιστωσών της αντίστασης από τον αριθμό Froude. Πηγή : Γ.Κ. Πολίτη, Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. «Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου», Αθήνα, 2011

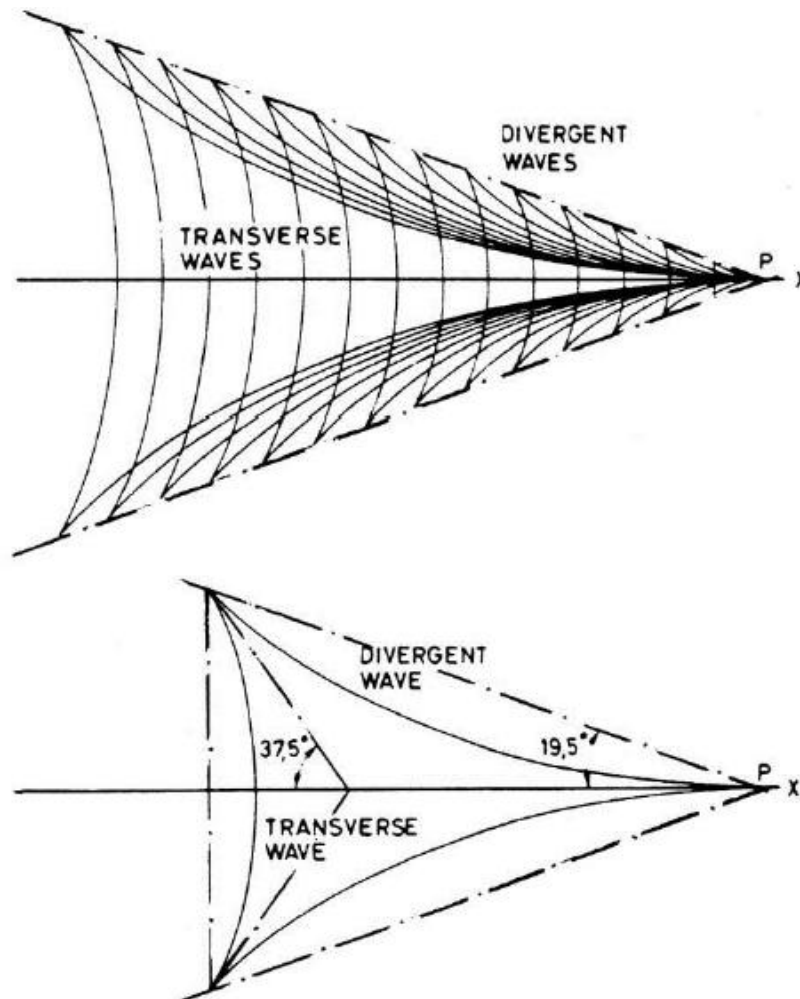
Στο σχήμα εκτός από το διαχωρισμό της συνολικής αντίστασης σε επιμέρους συνιστώσες φαίνεται και η εξάρτηση καθεμίας από τον αριθμό Froude. Συγκεκριμένα βλέπουμε πως οι συνιστώσες που σχετίζονται με συνεκτικά φαινόμενα δεν εξαρτώνται από τον αριθμό Froude και παραμένουν σταθερές, σε αντίθεση με την αντίσταση κυματισμού και τις υπόλοιπες αντιστάσεις. Στην πραγματικότητα οι αντιστάσεις συνεκτικότητας εξαρτώνται από τον αριθμό Froude, καθώς οι παραγόμενοι κυματισμοί μεταβάλλουν τη βρεχόμενη επιφάνεια και επηρεάζουν την ταχύτητα του ρευστού και το οριακό στρώμα, κοντά στην ίσαλο. Η αντίσταση κυματισμού με τη σειρά της δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τον αριθμό Froude καθώς το οριακό στρώμα μεταβάλλει τις κάθετες πιέσεις στη γάστρα με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η παραγωγή των κυματισμών.

Η αντίσταση τριβής επίπεδης πλάκας αποτελεί προσέγγιση της αντίστασης τριβή του σκάφους με θεώρηση επίπεδης πλάκας, που κινείται σε ρευστό με τον ίδιο αριθμό Reynolds με το σκάφος. Η αντίσταση τριβής λόγω καμπυλότητας περιλαμβάνει την συνιστώσα της αντίστασης που οφείλεται στη διαφορετική γεωμετρία μεταξύ επίπεδης πλάκας και γάστρας. Η καμπυλότητα της γάστρας προκαλεί αύξηση της ταχύτητας του ρευστού στο μέσο του σκάφους, με αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης τριβής καθώς ως γνωστόν, η αντίσταση τριβής εξαρτάται άμεσα από την ταχύτητα. Η αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας είναι

αντίσταση που οφείλεται στη μεταβολή του πεδίου πιέσεων πρύμνηθεν, και πηγάζει όμως από φαινόμενα συνεκτικότητας. Συγκεκριμένα η επέκταση του οριακού στρώματος πίσω από το σώμα, η αποκόλληση της ροής και η δημιουργία δρόμου δινών αποτελούν φαινόμενα που οφείλονται σε συνεκτικά φαινόμενα, καθώς δεν υφίστανται σε ιδανικό ρευστό. Αποτέλεσμα αυτών των φαινομένων είναι η μείωση του πεδίου πιέσεων στην πρύμνη. Η μειωμένη πίεση στην πρύμνη και συγκεκριμένα των προβεβλημένων, στη διεύθυνση της κίνησης, διανυσμάτων των στοιχειωδών πιέσεων, σε σχέση με αυτών της πλήρους δημιουργεί αύξηση της αντίστασης πίεσης. Οι τρεις πρώτες συνιστώσες αντίστασης αποτελούν την αντίσταση συνεκτικότητας ενώ η αντίσταση τριβής λόγω καμπυλότητας και η αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας, την αντίσταση λόγω μορφής.

Η αντίσταση κυματισμού οφείλεται στην συνεχώς αποδιδόμενη ενέργεια του σκάφους στο νερό, μέσω της συνεχούς παραγωγής κυματισμών. Οι κυματισμοί ως γνωστών είναι μεταδιδόμενη ενέργεια και η παραγωγή τους, εκτός από την ταχύτητα, εξαρτάται σημαντικά, από τη γεωμετρία και το εκτόπισμα. Η αντίσταση κυματισμού αποτελεί κυρίαρχη συνιστώσα αντίστασης σε μεγάλες ταχύτητες και κατ' επέκταση θα μας απασχολήσει ιδιαίτερα στην περίπτωση μας όπου μελετούμε ταχύπλοο σκάφος. Το σύνολο των, παραγόμενων από το σκάφος, κυματισμών αποτελείται τόσο από εγκάρσιους που κινούνται με την ταχύτητα του σκάφους, όσο και από αποκλίνοντες κυματισμούς που ταξιδεύουν υπό γωνία πίσω από αυτό. Η πρώτη θεωρητική προσέγγιση του συστήματος κυματισμών που παράγει το σκάφος έγινε από τον Lord Kelvin στα τέλη του 19^{ου} αιώνα³. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το σύστημα των δύο αυτών κατηγοριών κυματισμών που παράγεται από ένα κινούμενο σημείο πίεσης.

³ Γ.Κ. Πολίτη, Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. «Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου», Αθήνα, 2011



Εικόνα 1.2 Το σύστημα κυματισμών του Kelvin. Πηγή : Γ.Κ. Πολίτη, Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. «Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου», Αθήνα, 2011

Η θεώρηση του σκάφους ως ενός σημείου πίεσης, προκειμένου για την απλοποίηση του προβλήματος, αποτελεί μια παραδοχή που ισχύει μακριά από το σώμα και ως εκ τούτου οι λεπτομέρειες της γεωμετρίας του σκάφους έχουν επιρροή μεγαλύτερης τάξης στο φαινόμενο και μπορούν να αμεληθούν⁴. Οι αποκλίνοντες κυματισμοί εκτείνονται εντός των ευθειών που σχηματίζουν γωνία περίπου $19,5^\circ$ από τη διεύθυνση κίνησης ενώ οι εγκάρσιοι σχηματίζουν γωνία με την ίδια ευθεία περίπου $37,5^\circ$. Τα δύο συστήματα κυματισμών κινούνται με την ταχύτητα του σκάφους ενώ αν αυτή παραμένει σταθερή η παραγωγή τους είναι συνεχής και μόνιμη και τα συστήματα αυτά φαίνονται ακίνητα σε παρατηρητή που βρίσκεται πάνω στο σκάφος.

Η αντίσταση θραύσης κύματος, αποτελεί αντίσταση δημιουργούμενη από την παρουσία στην πορεία του σκάφους, ανεμογενών κυματισμών και δεν σχετίζονται με αυτούς που παράγονται

⁴ Γ.Κ. Πολίτη, Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. «Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου», Αθήνα, 2011

από το ίδιο το πλοίο. Η αντίσταση θραύσης κύματος οφείλεται στην πρόσκρουση θαλάσσιων κυματισμών πάνω στο πλοίο και στις προκαλούμενες σε αυτό κινήσεις heave, pitch και roll κατά κύριο λόγο. Οι κινήσεις αυτές δυσχεραίνουν την κίνηση του και αποτιμώνται ως μια πρόσθετη αντίσταση. Η αντίσταση δημιουργίας αφρού αφορά ενέργεια που αποδίδεται στη θάλασσα από την κίνηση του σκάφους και τη θραύση του ρευστού που δεν μεταδίδεται τελικά ως κύμα. Η αντίσταση ανέμου αφορά προφανώς τα έξαλα του σκάφους και την αντίσταση που αυτά παρουσιάζουν στον αέρα. Αυτή η αντίσταση είναι μη μηδενική ακόμα και σε άπνοια λόγω της ίδιας της κίνησης του σκάφους και άρα της σχετικής, ως προς τον ακίνητο περιβάλλοντα αέρα, ταχύτητας του. Τέλος έχουμε την αντίσταση ελιγμών η οποία δημιουργείται λόγω της απόκλισης του σκάφους από τη βέλτιστη πορεία, που είναι η ευθύγραμμη, καθώς και από τις συνιστώσες των παραγόμενων δυνάμεων στα παρελκόμενα πηδαλιουχίας, που έχουν διεύθυνση παράλληλη στην κίνηση.

Στην συγκεκριμένη μελέτη θα υπολογιστεί και στη συνέχεια θα γίνει βελτιστοποίηση με γνώμονα την αντίσταση γυμνής γάστρας ή αλλιώς αντίσταση ρυμούλκησης. Είναι σημαντικό να τονιστεί πως στην αντίσταση αυτή δεν περιλαμβάνεται η αντίσταση παρελκόμενων και η αντίσταση λόγω της παρουσίας του προωστήριου συστήματος και της αλληλεπίδρασης του με τη γάστρα, καθώς σε αυτή την περίπτωση θα αναφερόμασταν στην αντίσταση αυτοπροωθούμενου σκάφους. Οι δύο αντιστάσεις δεν διαφέρουν ιδιαίτερα μεταξύ τους και η βελτιστοποίηση της γυμνής γάστρας μας δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για την ελαχιστοποίηση της συνολικής αντίστασης.

Το πλήρες φαινόμενο της αντίστασης και ο προσδιορισμός της, όπως και κάθε πρόβλημα ρευστομηχανικής, θα μπορούσε να επιτευχθεί με την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes οι οποίες περιγράφουν τη ροή πραγματικού ρευστού και φαίνονται στη συνέχεια :

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

Η επίλυση των εξισώσεων αυτών είναι ιδιαίτερος δύσκολη, πραγματοποιείται μόνο με αριθμητικές μεθόδους και σε κάποιες περιπτώσεις είναι αδύνατη ακόμα και αριθμητικά. Οι πιο δημοφιλείς αριθμητικές μέθοδοι που ακολουθούνται για την επίλυση των πεδιακών

εξισώσεων είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Methods – FEM), των πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference Method – FDM) και των όγκων ελέγχου (Finite Volume Method – FVM) που είναι βασικά μεθοδολογία πεπερασμένων διαφορών⁵. Η εφαρμογή αυτών των μεθόδων απαιτεί τη χρησιμοποίηση αριθμητικών πλεγμάτων (numerical grids-meshes) για την παραγωγή των οποίων έχουν επίσης αναπτυχθεί πολλές και διαφορετικές μεθοδολογίες⁶. Εάν το ρευστό θεωρηθεί ατριβές (μη συνεκτικό), και αστρόβιλο, οι εξισώσεις Navier-Stokes εκφυλλίζονται στις εξισώσεις Euler και Bernoulli. Οι εξισώσεις Euler και Bernoulli είναι ισοδύναμες και γι αυτό το λόγο παρουσιάζεται μόνο η εξίσωση Bernoulli μη μόνιμης ροής :

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{p}{\rho} + gz = \frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} V^2 + \frac{p}{\rho} + gz = C(t)$$

Αμελώντας λοιπόν φαινόμενα συνεκτικότητας μπορούμε να μελετήσουμε ένα φαινόμενο με χρήση της θεωρίας δυναμικού που είναι αρκετά απλούστερη. Μια τέτοια περίπτωση αποτελεί και η μελέτη της αντίστασης κυματισμού του ταχύπλοου σκάφους που εξετάζεται στα πλαίσια του παρόντος. Όπως έχει προαναφερθεί η αντίσταση κυματισμού εξαρτάται (κατά προσέγγιση) μόνο από τον αριθμό Froude, αποτελεί αντίσταση πίεσης και κατ' επέκταση μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας τη θεωρία δυναμικού. Επίσης αποτελεί σημαντική συνιστώσα αντίστασης σε μεγάλες ταχύτητες όπως συμβαίνει στην περίπτωση του σκάφους που εξετάζεται, όπου ο αριθμός Froude κυμαίνεται από τιμές 0,6 ως 1,1. Στα πλαίσια λοιπόν αυτής της θεώρησης θα αμεληθούν η αντίσταση μορφής και η αντίσταση τριβής επίπεδης πλάκας. Η αντίσταση τριβής επίπεδης πλάκας μπορεί να υπολογιστεί πολύ εύκολα χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες σχέσεις δεδομένου του αριθμού Reynolds στον οποίο κινείται το σκάφος. Ωστόσο όσο αυθαίρετη είναι η παράλειψη φαινομένων συνεκτικότητας, τόσο αυθαίρετη είναι και η συμμετοχή ενός μόνο μέρους αυτών, κατά τη διαδικασία επίλυσης του προβλήματος. Συνεπώς σε κάθε περίπτωση και για όλες τις ταχύτητες που θα εξεταστούν κριτήριο βελτιστοποίησης θα αποτελέσει μόνο η αντίσταση κυματισμού.

⁵ Γεωργίου Τζαμπίρα, Καθηγητή ΕΜΠ, «Αριθμητικές προσομοιώσεις Υδροδυναμικών Ροών», Αθήνα 1998

⁶ Γεωργίου Τζαμπίρα, Καθηγητή ΕΜΠ, «Αριθμητικές προσομοιώσεις Υδροδυναμικών Ροών», Αθήνα 1998

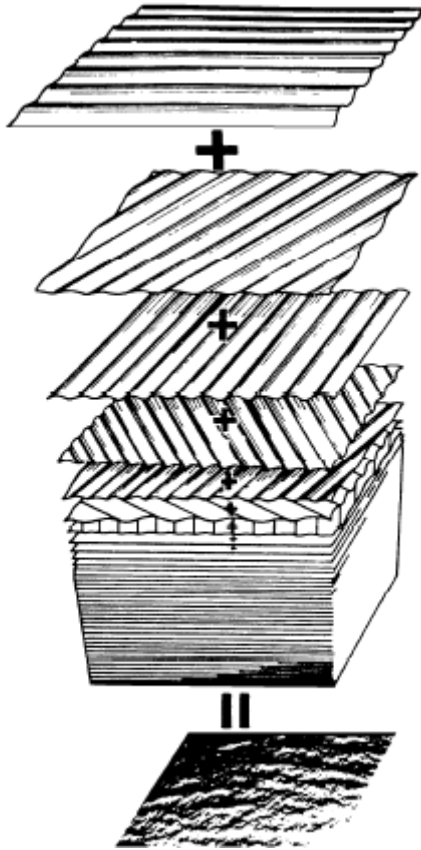
Κεφάλαιο 2. Μελέτη της συμπεριφοράς πλοίου σε κυματισμούς

Γενικά στοιχεία δυναμικής συμπεριφοράς πλοίου σε κυματισμούς

Κατά την πλεύση σκαφών σημαντική παράμετρος της οικονομικής αποδοτικότητας αλλά και της αξιοπλοΐας του, αποτελεί η απόκριση κατά την αλληλεπίδραση του με τους θαλάσσιους κυματισμούς. Κατά την ανάλυση και μελέτη τέτοιων φαινομένων γίνονται ορισμένες απλουστευτικές παραδοχές. Το περιρρέον υγρό θεωρείται ατριβές και ασυμπίεστο ενώ η κίνηση του αστρόβιλη, άκυκλη και μικρού πλάτους. Στα πλαίσια αυτά μπορούμε να εξετάσουμε τα προβλήματα συμπεριφοράς του σκάφους με χρήση των αρχών της θεωρίας δυναμικού που διέπεται από πολύ απλούστερες εξισώσεις σε σχέση με τις εξισώσεις Navier-Stokes⁷. Σε αντίθεση με την περίπτωση της αντίστασης, η αλληλεπίδραση του σκάφους με τους κυματισμούς εξαρτάται ασθενώς από συνεκτικά φαινόμενα και κατ' επέκταση η χρήση της θεωρίας δυναμικού εισάγει μικρότερο σφάλμα στους υπολογισμούς. Η ακρίβεια σε αυτή την περίπτωση είναι ικανοποιητική για όλες τις κινήσεις του σκάφους εκτός από την κίνηση roll κατά την οποία δυνάμεις συνεκτικότητας έχουν σημαντική επίδραση. Για την κατανόηση της αλληλεπίδρασης του σώματος με τους κυματισμούς θα πρέπει να αναφερθούν περιληπτικά ορισμένες αρχές που διέπουν την φύση των κυματισμών.

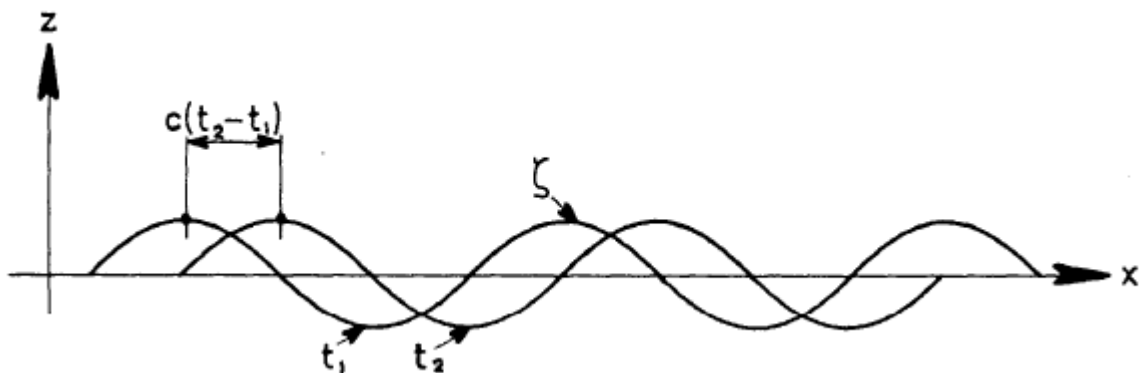
Οι θαλάσσιοι κυματισμοί μπορούν να θεωρηθούν ως μια τυχαία σύνθεση πολλών αρμονικών κυματισμών κάθε ένας από τους οποίους έχει συγκεκριμένη συχνότητα, συγκεκριμένο πλάτος και συγκεκριμένη κατεύθυνση μετάδοσης. Αυτή η θεώρηση είναι ιδιαίτερος χρήσιμη καθώς μας επιτρέπει να μελετούμε καταγραφές τυχαίων κυματισμών από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο των συχνοτήτων μέσω κατάλληλου μετασχηματισμού Fourier. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται αυτή η υπόθεση.

⁷ Γ. Α. Αθανασούλη, «Δυναμική Πλοίου κι Εργαστήριο», Αθήνα 2008



Εικόνα 2.1 Τυχαίος κυματισμός ως υπέρθεση απλών αρμονικών κυματισμών. Πηγή : TU Delft, «Introduction in Ship Hydromechanics», 2002

Ένας απλός αρμονικός κυματισμός είναι συνάρτηση τόσο του χρόνου όσο και του χώρου. Η περίπτωση του προφίλ ενός τέτοιου κυματισμού φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 2.2 Αρμονικός κυματισμός. Πηγή : TU Delft, «Introduction in Ship Hydromechanics», 2002

Στην περίπτωση των αρμονικών κυματισμών η ανύψωση της επιφάνειας της θάλασσας μπορεί να εκφραστεί μέσω μιας συνάρτησης δυναμικού. Το δυναμικό είναι απλώς μια βαθμωτή συνάρτηση πολλών μεταβλητών της οποίας η μερική παράγωγος ως προς κάποια

διεύθυνση δίνει την ταχύτητα του ρευστού προς αυτή τη διεύθυνση. Στη γενική περίπτωση ισχύει⁸ :

$$\Phi_w(x, z, t) = P(z)\sin(kx - \omega t)$$

όπου $P(z)$ αποτελεί συνάρτηση της απομάκρυνσης, ω την κυκλική συχνότητα και k τον κυματικό αριθμό.

$$k = \frac{\omega^2}{g}$$

Για βαθύ νερό η συνάρτηση δυναμικού λαμβάνει την ακόλουθη μορφή.

$$\Phi_w(x, z, t) = \frac{\zeta_a g}{\omega} e^{kz} \sin(kx - \omega t)$$

όπου ζ_a είναι το πλάτος την απομάκρυνσης κατά την ταλαντωτική κίνηση, η οποία συμπίπτει με το πλάτος του κύματος για αρμονικό κυματισμό. Το δυναμικό αυτό αφορά τον αδιατάρακτο κυματισμό και ως εκ τούτου δεν σχετίζεται με την παρουσία πλωτού σώματος.

Κατά την κίνηση ενός σώματος σε κυματισμένη θάλασσα έχουμε συνολικά τρία δυναμικά κυματισμών τα οποία είναι τα ακόλουθα :

- Δυναμικό προσπίπτοντος κυματισμού Φ_w
- Δυναμικό περίθλασης Φ_d
- Δυναμικό ακτινοβολίας Φ_r

Το δυναμικό προσπίπτοντος κυματισμού περιγράφηκε νωρίτερα και αφορά τον αδιατάρακτο κυματισμό. Το δυναμικό περίθλασης προκύπτει από το αποτέλεσμα της πρόσκρουσης κυματισμών στο στερεό σύνορο του σκάφους. Στην περίπτωση που το μήκος κύματος είναι συγκρίσιμο με το μήκος του πλοίου όπως συνήθως συμβαίνει, το αποτέλεσμα είναι διαφορετικό από την περίπτωση της ανάκλασης η οποία υφίσταται μόνο σε περιπτώσεις όπου το μήκος κύματος είναι αρκετά μικρότερο από το μήκος του σκάφους. Τέλος το δυναμικό ακτινοβολίας αφορά τους παραγόμενους κυματισμούς λόγω των ταλαντωτικών κινήσεων του σκάφους μέσα στο νερό. Σημειώνεται πως στη μέχρι τώρα θεώρηση και ανάλυση το σκάφος έχει μηδενική ταχύτητα.

Στα πλαίσια την γραμμικής θεώρησης του προβλήματος συμπεριφοράς του σκάφους (γραμμικοποίησης εξισώσεων που διέπουν τη συμπεριφορά της ελεύθερης επιφάνειας) το

⁸ TU Delft, «Introduction in Ship Hydromechanics», 2002

συνολικό δυναμικό της επιφάνειας της θάλασσας προκύπτει από την γραμμική υπέρθεση των τριών παραπάνω δυναμικών. Έτσι :

$$\Phi(x, y, z; t) = \Phi_w + \Phi_r + \Phi_d$$

Το συνολικό αυτό δυναμικό πρέπει να πληροί ορισμένες συνθήκες που παρουσιάζονται στη συνέχεια.

1. Εξίσωση της συνέχειας ή εξίσωση Laplace

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0$$

2. Συνοριακή συνθήκη μη εισχώρησης στον πυθμένα

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right|_{z=-h} = 0$$

3. Συνοριακή συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0, \quad z = 0$$

4. Κινηματική οριακή συνθήκη στο στερεό σύνορο του σώματος

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = u_n(x, y, z; t) = \sum_{j=1}^6 u_j \cdot f_j(x, y, z)$$

Όπου f_j είναι τα συνημίτονα κατεύθυνσης για κάθε μια από τις κινήσεις στους 6 βαθμούς ελευθερίας

5. Συνθήκη ακτινοβολίας

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \Phi = 0$$

Κάτι που σημαίνει πως η ακτινοβολούμενοι κυματισμοί αποσβένονται σε άπειρη απόσταση από το σώμα

6. Συμμετρική και αντισυμμετρική συνθήκη

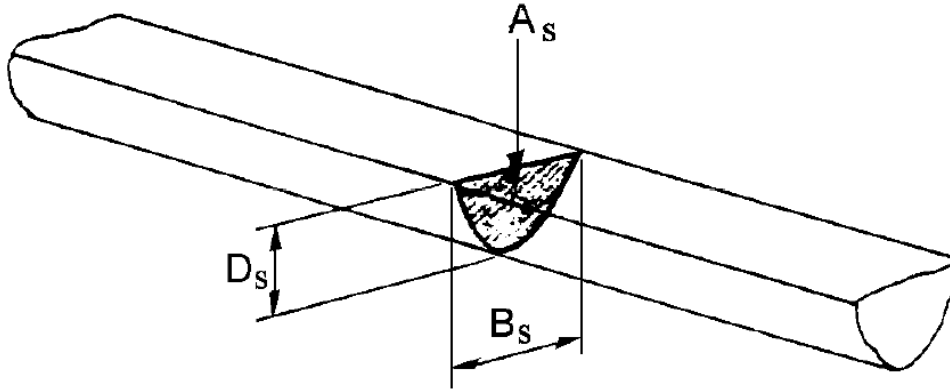
$$\Phi_2(-y, z) = -\Phi_2(y, z), \quad \text{sway}$$

$$\Phi_3(-y, z) = \Phi_3(y, z), \quad \text{heave}$$

$$\Phi_4(-y, z) = -\Phi_4(y, z), \quad \text{roll}$$

Με συναρτήσεις δυναμικού μπορούν να παρασταθούν πολλά πεδιακά μεγέθη που χρησιμοποιούνται στη μελέτη της συμπεριφοράς ενός σκάφους σε κυματισμούς όπως για παράδειγμα, της ταχύτητας του στερεού συνόρου. Αυτή η αναπαράσταση είναι ιδιαίτερος

χρήσιμη στη μελέτη της συμπεριφοράς του σκάφους, στα πλαίσια της θεωρίας λωρίδων για τον υπολογισμό μεγεθών που αφορούν εγκάρσιες τομές κατά μήκος του σκάφους. Η φιλοσοφία της θεωρίας λωρίδων φαίνεται σχηματικά στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 2.3 Σχηματική απεικόνιση θεωρίας λωρίδων. Πηγή : TU Delft, «Offshore Hydromechanics», 2001

Σύμφωνα με αυτή το τρισδιάστατο πρόβλημα του προσδιορισμού των αποκρίσεων του σκάφους επιλύεται με κατά μήκος ολοκλήρωση των αποκρίσεων στις εγκάρσιες τομές του. Κατ' αυτή την έννοια το τρισδιάστατο πρόβλημα ανάγεται σε επιμέρους απλούστερα δισδιάστατα. Για την επίλυση των δισδιάστατων προβλημάτων χρησιμοποιείται η θεωρία του Frank⁹ που περιγράφεται στις επόμενες παραγράφους.

Η θεωρία του Frank¹⁰

Στη θεωρία του Frank οι εγκάρσιες τομές του σκάφους μετασχηματίζονται σε μη κυκλικής διατομής κυλίνδρους με χρήση σύμμορφου μετασχηματισμού. Το σύστημα συντεταγμένων κείται στα εγκάρσια επίπεδα με τον άξονα x εφαπτόμενο στην ίσαλο και τον y κάθετο σε αυτή και με τα θετικά προς τα πάνω. Το σύνορο της επιφάνειας C_0 , του νομέα βρίσκεται στο ημιεπίπεδο των αρνητικών τεταγμένων και ο άξονας y αποτελεί άξονα συμμετρίας του.

Όπως και στην περίπτωση του δυναμικού του προσπίπτοντος κυματισμού που περιγράφηκε νωρίτερα, το ρευστό θεωρείται ασυμπίεστο, μη συνεκτικό, αστρόβιλο ενώ οι επιφανειακές τάσεις αμελούνται. Οι απομακρύνσεις και οι ταχύτητες θεωρούνται αρκετά μικρές ώστε να ληφθούν υπόψη μόνο οι γραμμικοί όροι της συνθήκης ελεύθερης επιφάνειας, της κινηματικής συνθήκης στο σύνορο του νομέα και η εξίσωση Bernoulli. Το δυναμικό ταχύτητας λοιπόν

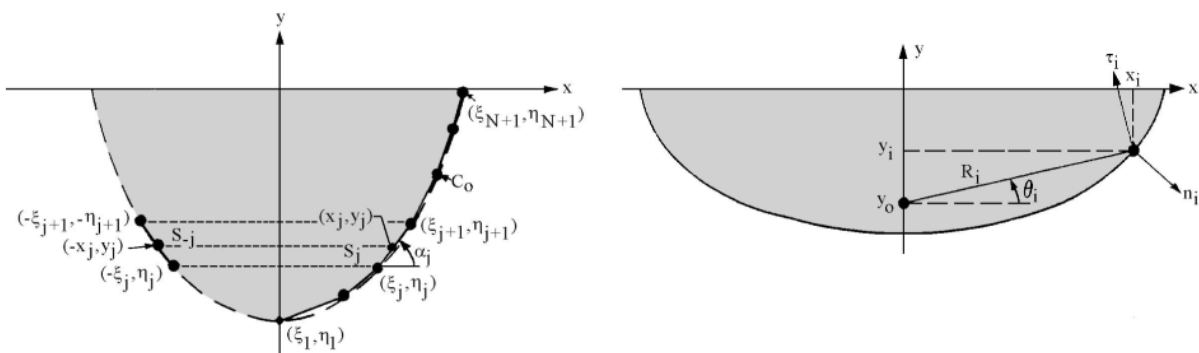
⁹ Frank, 1967

¹⁰ TU Delft, «Offshore Hydromechanics», 2001

προκύπτει όπως φαίνεται στη συνέχεια στα πλαίσια της θεώρησης χρονικά αρμονικού προβλήματος συμπεριφοράς, με συγκεκριμένη συχνότητα ω .

$$\Phi^{(m)}(x, y, t) = \text{Re}\{\phi^{(m)}(x, y) \cdot e^{-i\omega t}\}$$

Σε αυτή την εξίσωση οι δείκτες (m) λαμβάνουν τιμές 2,3 και 4 για κινήσεις στους αντίστοιχους βαθμούς ελευθερίας. Το μέγεθος $\phi^{(m)}(x, y)$ αναπαριστά το μιγαδικό πλάτος της ταχύτητας εξαρτώμενο από τη θέση και καλείται αλλιώς παραστατικός μιγάδας της ποσότητας $\Phi^{(m)}(x, y, t)$. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το σύστημα συντεταγμένων και τα σημεία κατά μήκος του στερεού συνόρου που χρησιμοποιήθηκαν από τον Frank.



Εικόνα 2.4 Εγκάρσια τομή γάστρας όπως χρησιμοποιείται στη θεωρία του Frank. Πηγή : TU Delft, «Offshore Hydromechanics», 2001

Όπως και στην περίπτωση του δυναμικού ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας πρέπει να πληρούνται οι συνθήκες που φαίνονται στη συνέχεια για το δισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται στη θεωρία του Frank.

1. Εξίσωση της συνέχειας ή εξίσωση Laplace

$$\nabla^2 \Phi^{(m)} = \frac{\partial^2 \Phi^{(m)}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi^{(m)}}{\partial y^2} = 0$$

2. Συνοριακή συνθήκη μη εισχώρησης στον πυθμένα

$$\lim_{y \rightarrow -\infty} |\nabla \Phi^{(m)}| = 0$$

3. Συνοριακή συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας

$$\frac{\partial^2 \Phi^{(m)}}{\partial t^2} + g \frac{\partial \Phi^{(m)}}{\partial y} = 0, \quad y = 0, \text{ εκτός συνόρου νομέα}$$

4. Κινηματική οριακή συνθήκη στο στερεό σύνορο του σώματος

$$\vec{n} \cdot \overline{\nabla \Phi^{(m)}} = v_n$$

5. Συνθήκη ακτινοβολίας

Σε μεγάλη απόσταση από τον κύλινδρο πρέπει να έχει μορφή αρμονικού προοδευτικού κυματισμού βαρύτητας

6. Συμμετρική και αντισυμμετρική συνθήκη

$$\Phi^{(2)}(-x, y) = -\Phi^{(2)}(x, y) , \quad \text{sway}$$

$$\Phi^{(3)}(-x, y) = \Phi^{(3)}(x, y) , \quad \text{heave}$$

$$\Phi^{(4)}(-x, y) = -\Phi^{(4)}(x, y) , \quad \text{roll}$$

Μια συνάρτηση δυναμικού που πληροί και τις 6 προαναφερθείσες συνθήκες που προτάθηκε από τον Frank το 1967, βασίζεται στη κατανομή παλλόμενων σημειακών πηγών στο σύνορο του νομέα. Βασιζόμενος σε προγενέστερες εργασίες των Wehausen και Laitone¹¹, εισήγαγε μια έκφραση του μιγαδικού δυναμικού σε μια θέση z , λόγω σημειακής πηγής σε μια θέση ζ , στο κάτω μισό του επιπέδου xy που φαίνεται στη συνέχεια :

$$G^*(z, \zeta, t) = \frac{1}{2\pi} \left\{ \ln(z - \zeta) - \log(z - \bar{\zeta}) + 2PV \int_0^\infty \frac{e^{-ik(z-\bar{\zeta})}}{v-k} dk - i \right\} \cos \omega t - \{e^{-iv(z-\bar{\zeta})}\} \sin \omega t$$

$$z = x + iy , \quad \zeta = \xi + i\eta , \quad \bar{\zeta} = \xi - i\eta , \quad v = \frac{\omega^2}{g}$$

Ο μιγαδικός ζ αφορά το κάτω μισό του επιπέδου xy ενώ ο συζυγής του το άνω μισό. Με χρήση της εξίσωσης αυτής το πραγματικό μέρος της συνάρτησης δυναμικού σημειακής πηγής δίνεται από τη σχέση :

$$H(x, y, \xi, \eta; t) = \mathcal{Re}\{G^*(z, \zeta, t)\}$$

Το χωρικά και χρονικά εξαρτώμενο δυναμικό της πηγής μπορεί να εκφραστεί σαν ένα γινόμενο ενός χωρικά εξαρτώμενου δυναμικού και μιας χρονικά εξαρτώμενης, ταλαντωτικής κίνησης όπως φαίνεται στη συνέχεια.

$$G^*(z, \zeta, t) = G(z, \zeta) \cdot e^{-i\omega t}$$

Σε αυτή την εξίσωση το χωρικά εξαρτώμενο δυναμικό δίνεται από την ακόλουθη σχέση :

$$G(z, \zeta) = \frac{1}{2\pi} \mathcal{Re} \left\{ \log(z - \zeta) - \log(z - \bar{\zeta}) + 2PV \int_0^\infty \frac{e^{-ik(z-\bar{\zeta})}}{v-k} dk - i \right\} - i \mathcal{Re}\{e^{-iv(z-\bar{\zeta})}\}$$

¹¹ 1960

Κατά συνέπεια μπορούν να εξαχθούν δύο εκφράσεις του δυναμικού σημειακής πηγής :

$$H(x, y, \xi, \eta; t) = \text{Re}\{G(z, \zeta) \cdot e^{-i\omega t}\}$$

$$H\left(x, y, \xi, \eta; t - \frac{\pi}{2\omega}\right) = \text{Re}\{i \cdot G(z, \zeta) \cdot e^{-i\omega t}\}$$

Υπό την υπόθεση γραμμικότητας η υπέρθεση των δύο τελευταίων εξισώσεων δίνει την τελική μορφή του δυναμικού ταχύτητας :

$$\Phi^{(m)}(x, y, t) = \text{Re} \left\{ \int_{C_0} Q(s) \cdot G(z, \zeta) \cdot e^{-i\omega t} ds \right\}$$

Όπου C_0 είναι το σύνορο του βυθισμένου νομέα στη μέση θέση ισορροπίας του και $Q(s)$ είναι η ένταση της σημειακής πηγής ως συνάρτηση της επικαμπύλιας θέσης της πάνω στον νομέα. Με προσδιορισμένο το δυναμικό ταχύτητας μπορεί να βρεθεί η πίεση σε τυχούσα θέση (x_i, y_i) με χρήση της γραμμικοποιημένης εξίσωσης Bernoulli.

$$P^{(m)}(x_i, y_i, \omega, t) = -\rho \frac{\partial \Phi^{(m)}(x_i, y_i, \omega, t)}{\partial t} = P_a^{(m)}(x_i, y_i, \omega) \cos \omega t + P_u^{(m)}(x_i, y_i, \omega) \sin \omega t$$

Με χρήση της πίεσης μπορούν να βρεθούν οι υδροδυναμικοί αδρανειακοί συντελεστές και συντελεστές απόσβεσης που δίνονται από τις επόμενες σχέσεις :

$$M^{(m)}(\omega) = 2 \sum_{j=1}^N P_a^{(m)}(x_j, y_j, \omega) n_j^{(m)} |s_j|$$

$$N^{(m)}(\omega) = 2 \sum_{j=1}^N P_u^{(m)}(x_j, y_j, \omega) n_j^{(m)} |s_j|$$

Τέλος με ολοκλήρωση (αριθμητική) των πιέσεων πάνω στο σύνορο των νομέων και στη συνέχεια σε ολόκληρη της επιφάνεια της γάστρας, μπορούν να βρεθούν οι ασκούμενες δυνάμεις και ροπές και τελικά οι μετατοπίσεις, ταχύτητες κι επιταχύνσεις του σκάφους.

Κεφάλαιο 3. Γενετικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης

Γενικά στοιχεία γενετικών αλγορίθμων

Οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν ευρεία εφαρμογή σε προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Διαχρονικά έχουν προταθεί πολλοί τέτοιοι αλγόριθμοι καθώς και παραλλαγές τους με αποτέλεσμα να υπάρχει ένα σημαντικό πλήθος που χρησιμοποιούνται κατά περίπτωση και ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη. Σκοπός των αλγορίθμων αυτών είναι η εύρεση των βέλτιστων λύσεων σε μη γραμμικά προβλήματα, λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβλητές, τις αντικειμενικές συναρτήσεις και τους περιορισμούς που τίθενται από τον χρήστη και προσδιορίζουν τη φύση του προβλήματος που καλείται να επιλύσει. Σε περιπτώσεις προβλημάτων με μία αντικειμενική συνάρτηση η βέλτιστη λύση είναι μόνο μία. Αντίθετα όταν έχουμε περισσότερα από ένα κριτήρια βελτιστοποίησης οι βέλτιστες λύσεις είναι περισσότερες, υπό την έννοια ότι καμία από αυτές δεν μπορεί να θεωρηθεί καλύτερη από τις άλλες.

Οι βέλτιστες λύσεις υφίστανται όταν καμία από τις υπόλοιπες δεν έχει όλες τις αντικειμενικές της συναρτήσεις μεγαλύτερες ή μικρότερες από αυτές, σε προβλήματα μεγιστοποίησης ή ελαχιστοποίησης αντίστοιχα. Το πλήθος των βέλτιστων λύσεων αποκτά γεωμετρική υπόσταση αν εξετάσουμε τις ιδιότητες τους σε σύστημα συνταγμένων με άξονες τις αντικειμενικές συναρτήσεις τους. Το σύνολο των βέλτιστων λύσεων μπορεί να αποτελεί τα διακριτά σημεία που παρεμβάλλει μια καμπύλη σε ένα επίπεδο ή μια επιφάνεια στο χώρο όταν έχουμε 2 και 3 αντικειμενικές συναρτήσεις αντίστοιχα. Η γεωμετρική αυτή αναπαράσταση επιτυγχάνεται όπως είναι προφανές για μέγιστο αριθμό συναρτήσεων ίσο με 3, ωστόσο βελτιστοποίηση με χρήση γενετικών αλγορίθμων πραγματοποιείται για οποιονδήποτε τέτοιο αριθμό.

Η έννοια των «ισοδύναμα βέλτιστων» λύσεων προκύπτει από την αδυναμία σύγκρισης διαφορετικών κριτηρίων βελτιστοποίησης. Στην περίπτωση μας κριτήρια βελτιστοποίησης θα αποτελέσουν η αντίσταση κυματισμού, και η επιτάχυνση της πλώρης κατά την αλληλεπίδραση του σκάφους με κύματα συχνότητας που προκαλούν τη μέγιστη απόκριση. Αυτά τα κριτήρια αν και εκφράζονται με αλγεβρικές τιμές δεν μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους κυρίως επειδή αποτελούν μεγέθη που εκφράζουν διαφορετικά φαινόμενα και δευτερευόντως επειδή δεν είναι ίδιας σημαντικότητας η ελαχιστοποίησή τους. Η επιλογή μιας

ή περισσότερων λύσεων από τις παραχθείσες, αποτελεί αντικείμενο της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων που θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο.

Οι λειτουργία των γενετικών αλγορίθμων παρουσιάζει ομοιότητες με τη διαδικασία της πραγματικής φυσικής εξέλιξη των γενεών και ακριβώς εκεί οφείλουν και το όνομα τους. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται κάποιες αρχικές σχεδιάσεις (γονείς) από τις οποίες παράγονται νέες (απόγονοι) με χρήση των διαδικασιών της διασταύρωσης των χαρακτηριστικών των γονέων και της μετάλλαξης και των χαρακτηριστικών των ίδιων των απογόνων. Το σημαντικότερο όμως χαρακτηριστικό αυτής της διαδικασίας είναι πως οι γονείς που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των απογόνων αποτελούν επιλεγμένες σχεδιάσεις με επιθυμητά στοιχεία. Αν μια πατρική σχεδίαση είναι καλύτερη από μια άλλη, έχει περισσότερες πιθανότητες να επιλεγεί για την παραγωγή νέων σχεδιάσεων. Αυτό το πλεονέκτημα των γενετικών αλγορίθμων καθιστά δυνατή την εύρεση συνεχώς καλύτερων γεωμετριών μέχρι να τερματιστεί η διαδικασία και να καταλήξουμε στις βέλτιστες λύσεις.

Οι δύο λοιπόν βασικές ομοιότητες των γενετικών αλγορίθμων με τις διαδικασίες εξέλιξης είναι η εισαγωγή ενός παράγοντα τυχαιότητας στην παραγωγή απογόνων και η επιβίωση των ισχυρότερων μελών ενός είδους. Για παράδειγμα αν ένα θηλαστικό έχει χαρακτηριστικά που του επιτρέπουν να ξεφεύγει από τους θηρευτές του ευκολότερα από ένα άλλο, τότε έχει περισσότερες πιθανότητες επιβίωσης από αυτό και άρα περισσότερες πιθανότητες να αναπαραχθεί και οι απόγονοι του να έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με εκείνο. Η διαδικασία της διασταύρωσης των χαρακτηριστικών των γονέων για την παραγωγή των απογόνων, είναι αυτή που διαφοροποιεί τους απογόνους τους, από οποιονδήποτε από τους δύο γονείς. Κατ' επέκταση ακόμα και χωρίς μετάλλαξη οι απόγονοι μπορεί να έχουν καλύτερα χαρακτηριστικά από κάθε γονέα. Αυτό επιτυγχάνεται αν ένας απόγονος λάβει από κάθε γονέα μόνο τα χαρακτηριστικά που είναι καλύτερα από του άλλου, κάτι που φυσικά συμβαίνει τυχαία. Η μετάλλαξη των χαρακτηριστικών ενός απογόνου μπορεί με τη σειρά της, να βελτιώσει περαιτέρω τα χαρακτηριστικά που έχει λάβει από τους γονείς, κάτι που επίσης συμβαίνει τυχαία. Στην περίπτωση των γενετικών αλγορίθμων η τυχαιότητα εισάγεται με τις διαδικασίες διασταύρωσης και μετάλλαξης να πραγματοποιούνται συναρτήσει κάποιας προτεθειμένης πιθανότητας εμφάνισης τους. Αν υπήρχε η δυνατότητα να επιλεγούν τα θηλαστικά με τα καλύτερα χαρακτηριστικά τόσο από τους γονείς όσο και από τους απογόνους τους και αυτά να αποτελούν ένα νέο και το μοναδικό σύνολο που θα παράγει τις νέες γενιές, τότε θα λαμβάναμε συνεχώς σίγουρα καλύτερους απογόνους. Αν και στη φύση

κάτι τέτοιο είναι ουτοπικό, στην περίπτωση των γενετικών αλγορίθμων αποτελεί την αρχή λειτουργίας τους.

Τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά των γονέων, αποτελούν στην περίπτωση ενός αλγορίθμου τις μεταβλητές σχεδίασης που εξετάζονται. Στην περίπτωση βελτιστοποίησης της γάστρας αφορούν μεταβλητές εντός ενός εύρους τιμών που μπορεί να χαρακτηρίζουν γωνίες χαρακτηριστικών καμπυλών του σκάφους, κύριες διαστάσεις, αδιάστατους συντελεστές και γενικώς οποιοδήποτε στοιχείο του πλοίου πιθανόν επηρεάζει τα κριτήρια βελτιστοποίησης. Τα κριτήρια βελτιστοποίησης, καλούνται αλλιώς στη γενική περίπτωση αλγορίθμων, αντικειμενικές συναρτήσεις. Αποτελούν τα προκύπτοντα αποτελέσματα ενός προβλήματος τα οποία επιθυμείται να ελαχιστοποιηθούν ή μεγιστοποιηθούν. Στην περίπτωση που εξετάζεται στα πλαίσια του παρόντος, και δεδομένων των δύο κριτηρίων βελτιστοποίησης, έχουμε προφανώς πρόβλημα ελαχιστοποίησης.

Ο αλγόριθμος NSGA-II¹²

Για την εύρεση των βέλτιστων λύσεων θα χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος NSGA-II (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II) που αποτελεί βελτιωμένη έκδοση του ομώνυμου προγενέστερου του. Η ονομασία του προέρχεται από τον τρόπο με τον οποίο κατατάσσονται οι σχεδιάσεις μιας γενιάς και των απογόνων της προκειμένου να παραχθεί η επόμενη, όπως θα φανεί και από την επεξήγηση της λειτουργίας του στη συνέχεια. Η διαδικασία εύρεσης των βέλτιστων λύσεων συνοψίζεται στα επόμενα βήματα :

1. Παραγωγή ενός πληθυσμού από σχεδιάσεις (γεωμετρίες)
2. Παραγωγή ενός ισάριθμου πληθυσμού από απογόνους των αρχικών
3. Κατάταξη του συνόλου των σχεδιάσεων (γονέων και απογόνων) σε επίπεδα σύμφωνα με την υπεροχή τους σε σχέση με τις υπόλοιπες
4. Κατάταξη των σχεδιάσεων κάθε επιπέδου κατά φθίνουσα σειρά απόστασης από τις γειτονικές τους
5. Παραγωγή μια νέας γενιάς σχεδιάσεων ισάριθμων με τον αρχικό πληθυσμό με βάση την κατάταξη τους
6. Επανάληψη των βημάτων 2 ως 5

Οι κατατάξεις των σχεδιάσεων ανάλογα με την υπεροχή τους ως προς άλλες και της απόστασης τους από γειτονικές τους, αφορά το επίπεδο με άξονες τις τιμές των

¹² Kalyanmoy Deb, Sameer Agarwal, T. Meyarivan, «A fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm : NSGA-II», 2002

αντικειμενικών συναρτήσεων. Αν συμβολίσουμε με x_i τι μεταβλητές απόφασης αριθμού n και με $f_j(x_i)$ τις αντικειμενικές συναρτήσεις αριθμού m , το πρόβλημα ελαχιστοποίησης που καλούμαστε να επιλύσουμε είναι το εξής :

$$\text{Minimize } F(\mathbf{X}) = \{f_j(x_i)\}, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, m$$

Αν λάβουμε δύο σχεδιάσεις p και q με διανύσματα μεταβλητών απόφασης \mathbf{X}_1 και \mathbf{X}_2 τότε η πρώτη σχεδίαση υπερέρχει της δεύτερης ($p < q$) αν ισχύουν οι δύο επόμενες συνθήκες :

- $f_j(\mathbf{X}_1) \leq f_j(\mathbf{X}_2), \forall j \in \{1, \dots, n\}$
- $\exists f_k(\mathbf{X}_1) < f_k(\mathbf{X}_2), k \in \{1, \dots, n\}$

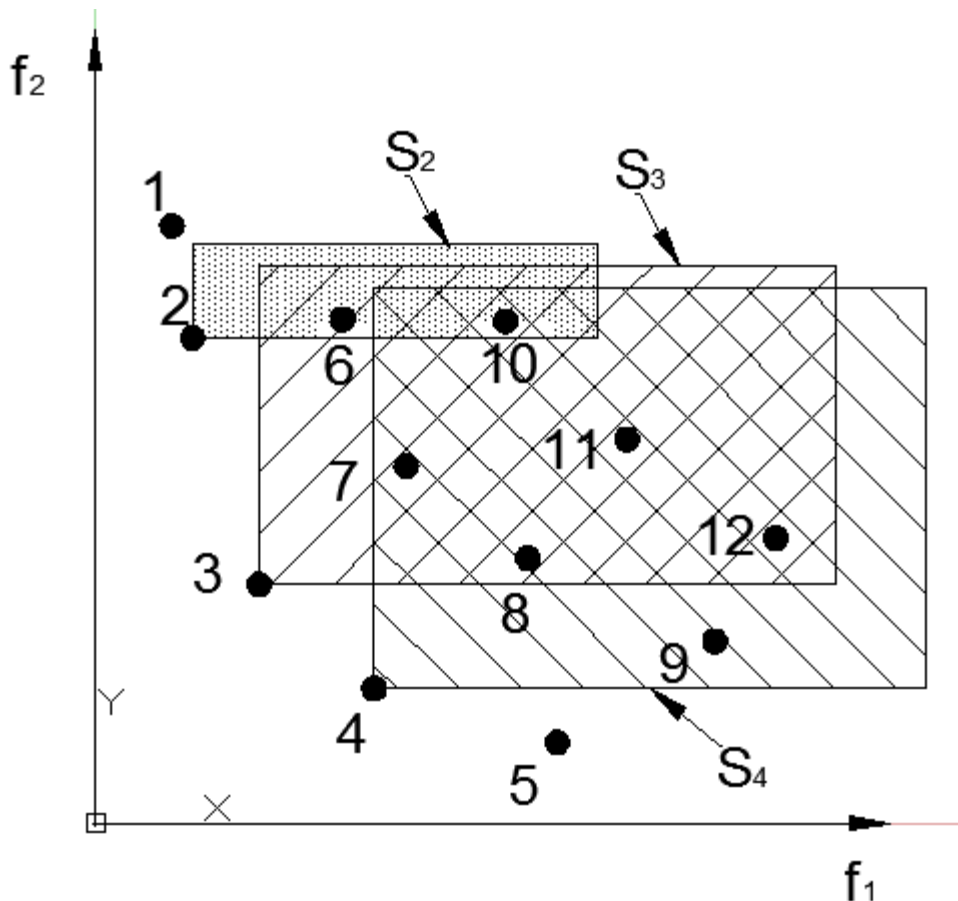
Απαιτείται δηλαδή να υπάρχει τουλάχιστον μια αντικειμενική συνάρτηση με μικρότερη τιμή και όσον αφορά τις υπόλοιπες αντικειμενικές συναρτήσεις οι δύο σχεδιάσεις να είναι τουλάχιστον ισοδύναμες. Η διαδικασία κατάταξης των σχεδιάσεων σε επίπεδα (\mathcal{F}_i) γίνεται με διαδοχικούς ελέγχους των παραχθέντων γεωμετριών ξεκινώντας από αυτές από τις οποίες δεν υπερέρχει καμία άλλη. Αυτές οι σχεδιάσεις αποτελούν το πρώτο επίπεδο. Για κάθε μια από τις επόμενες σχεδιάσεις ελέγχεται ο αριθμός των σχεδιάσεων που υπερέρχει των πρώτων και αν αυτός ο αριθμός είναι 1 αποτελούν μέλη του επόμενου επιπέδου. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να εξεταστούν όλες οι γεωμετρίες που έχουν παραχθεί στην παρούσα επανάληψη. Η διαδικασία κατάταξης σε επίπεδα φαίνεται σε μορφή ψευδοκώδικα στη συνέχεια.

```

 $\forall p \in P$ 
 $S_p = \emptyset$ 
 $n_p = 0$ 
 $\forall q \in P$ 
  If ( $p < q$ ) then
     $S_p = S_p \cup \{p\}$ 
  else if ( $q < p$ ) then
     $n_p = n_p + 1$ 
If  $n_p = 0$  then
   $p_{rank} = 1$ 
   $\mathcal{F}_1 = \mathcal{F}_1 \cup \{p\}$ 
 $i = 1$ 
while  $\mathcal{F}_i \neq \emptyset$ 
   $Q \neq \emptyset$ 
   $\forall p \in \mathcal{F}_i$ 
     $\forall q \in S_p$ 
       $n_q = n_q - 1$ 
      If  $n_q = 0$  then
         $q_{rank} = i + 1$ 
         $Q = Q \cup \{q\}$ 
   $i = i + 1$ 
 $\mathcal{F}_i = Q$ 

```

Στην παραπάνω αλληλουχία ενεργειών τα μεγέθη p και q αντιστοιχούν σε μέλη των παραγόμενων πληθυσμών κάθε επανάληψης, S_p είναι το σύνολο των λύσεων από τις οποίες υπερέχει η λύση p και n_p εκφράζει τον αριθμό των λύσεων που υπερέχουν της λύσης p . Το μέγεθος \mathcal{F}_i είναι το σύνολο των λύσεων που ανήκουν στο επίπεδο i , ενώ με p_{rank} συμβολίζεται ο βαθμός της λύσης p , που αντιστοιχεί στο επίπεδο στο οποίο ανήκει. Η χρησιμότητα του βαθμού της κάθε λύσης έγκειται στην κατάταξη που θα γίνει στη συνέχεια. Το μέγεθος Q αποτελεί το σύνολο των λύσεων στο οποίο προσωρινά αποθηκεύονται τα μέλη κάθε επιπέδου \mathcal{F}_i , $i \geq 2$. Για την αποσαφήνιση της διαδικασίας κατάταξης σε επίπεδα θα παρατεθεί ένα σχήμα στο οποίο φαίνονται διάφορες λύσεις, και η συσχέτιση τους με τις υπόλοιπες. Επειδή το σχήμα κείται σε επίπεδο, αναφερόμαστε σε περίπτωση με δύο αντικειμενικές συναρτήσεις. Προκειμένου να περιγραφούν προβλήματα με τρεις θα πρέπει να καταφύγουμε σε τρισδιάστατο σχήμα.



Εικόνα 3.1 Παραγόμενες λύσεις στο επίπεδο των αντικειμενικών συναρτήσεων

Στο σχήμα φαίνονται 12 πιθανές λύσεις σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης. Έχουν επιλεγεί ενδεικτικά τρεις και τα χωρία S_i που ορίζονται περιλαμβάνουν το σύνολο των υπόλοιπων λύσεων από τις οποίες υπερέχουν. Το σύνολο των λύσεων S_3 αφορά τις λύσεις από τις οποίες

υπερέχει η λύση 3, δηλαδή τις λύσεις 6,7,10,11 και 12 εφόσον όλες έχουν τουλάχιστον μία μεγαλύτερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης από την 3 και καμία μικρότερη. Αντίστοιχα ορίζονται και τα σύνολα S_2 και S_4 . Οι λύσεις 1 ως 5 ανήκουν στο πρώτο επίπεδο καθώς καμία άλλη λύση δεν μπορεί να χαρακτηριστεί υπερέχουσα αυτών. Όταν εξεταστεί η λύση 2 κι ελεγχθούν οι λύσεις 6 και 10 από τις οποίες υπερέχει, θα βρεθεί ότι από τη λύση 6 υπερέχει μόνο η λύση 2 και κατ' επέκταση η 6, θα τεθεί στο δεύτερο επίπεδο και δεν θα επανελεγχθεί κατά την επανάληψη του πρώτου επιπέδου. Αντίθετα όταν ελεγχθεί η λύση 10 θα βρεθεί ότι υπερέχουν αυτής τόσο η λύση 2 όσο και η λύση 6 κι επομένως η 10 δεν θα τεθεί στο δεύτερο επίπεδο και θα επανεξεταστεί στον έλεγχο των λύσεων του δεύτερου επιπέδου.

Όταν εξεταστούν οι λύσεις από τις οποίες υπερέχει η λύση 3, θα ελεγχθούν όλες όσες ανήκουν στο σύνολο S_3 εκτός από την 6 που όπως προαναφέρθηκε δεν θα επανεξεταστεί στο επαναληπτικό βήμα του πρώτου επιπέδου. Σημειώνεται πως η αρίθμηση είναι ενδεικτική και η σειρά με την οποία θα ελεγχθούν οι διαθέσιμες λύσεις κάθε επιπέδου είναι αόριστη και δεν έχει καμία επίπτωση στη διαδικασία και το αποτέλεσμα της κατάταξης. Συνεπώς η μη επανεξέταση μιας λύσης προϋποθέτει να έχει ήδη καταταγεί σε ένα επίπεδο. Με την ίδια διαδικασία ελέγχονται όλες οι λύσεις και κατατάσσονται σε ανάλογο επίπεδο.

Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία κατάταξης των λύσεων σε επίπεδα γίνεται κατάταξη των λύσεων κάθε επιπέδου ανάλογα με την απόσταση τους από τις υπόλοιπες λύσεις και συγκεκριμένα με φθίνουσα σειρά. Σκοπός της δεύτερης αυτής κατάταξης είναι η επιδίωξη μεγάλου εύρους λύσεων στο επίπεδο των αντικειμενικών συναρτήσεων. Αυτή είναι και η πρώτη διαφορά του αλγορίθμου NSGA II από τον προγενέστερο του, NSGA στον οποίο το εύρος καθοριζόταν από μια τιμή διασποράς που δινόταν από τον χρήστη. Η διαδικασία κατάταξης των λύσεων με βάση αυτό το κριτήριο φαίνεται υπό μορφή ψευδοκώδικα στη συνέχεια :

$$\begin{aligned}
 &k = |I| \\
 &\forall i, \text{ set } I[i]_{\text{distance}} = 0 \\
 &\forall \text{ objective } m \\
 &I = \text{sort}(I, m) \\
 &I[1]_{\text{distance}} = I[k]_{\text{distance}} = \infty \\
 &\text{for } i=2 \text{ to } (k-1) \\
 &I[i]_{\text{distance}} = I[i]_{\text{distance}} + \frac{I[i+1]_m - I[i-1]_m}{f_m^{\max} - f_m^{\min}}
 \end{aligned}$$

Η διαδικασία της ταξινόμησης αυτής επαναλαμβάνεται ισάριθμες φορές με το πλήθος των αντικειμενικών συναρτήσεων. Για κάθε επανάληψη υπολογίζεται η απόσταση κάθε λύσης από τις γειτονικές της, αφού ταξινομηθούν όλες σύμφωνα με την τιμή κάθε αντικειμενικής

συνάρτησης. Η συνολική τιμή της απόστασης κάθε λύσης είναι το άθροισμα που προκύπτει από τις τιμές κάθε βήματος που αφορά μια αντικειμενική συνάρτηση. Οι αποστάσεις αυτές, όπως είναι αναμενόμενο προστίθενται σε αδιάστατη μορφή ώστε να υπάρχει ισοκατανομή της συμμετοχής κάθε μιας στο συνολικό άθροισμα.

Με βάση τις δύο κατατάξεις που προαναφέρθηκαν προκύπτει και η τελική διαδικασία κατάταξης των λύσεων με την προτεραιότητα να δίνεται στην κατάταξη σε επίπεδα. Μια λύση i είναι καλύτερη από μια λύση j ($i <_n j$) αν ισχύει η ακόλουθη συνθήκη :

$$\{(i_{rank} < j_{rank}) \text{ or } [(i_{rank} = j_{rank}) \text{ and } (i_{distance} > j_{distance})]\}$$

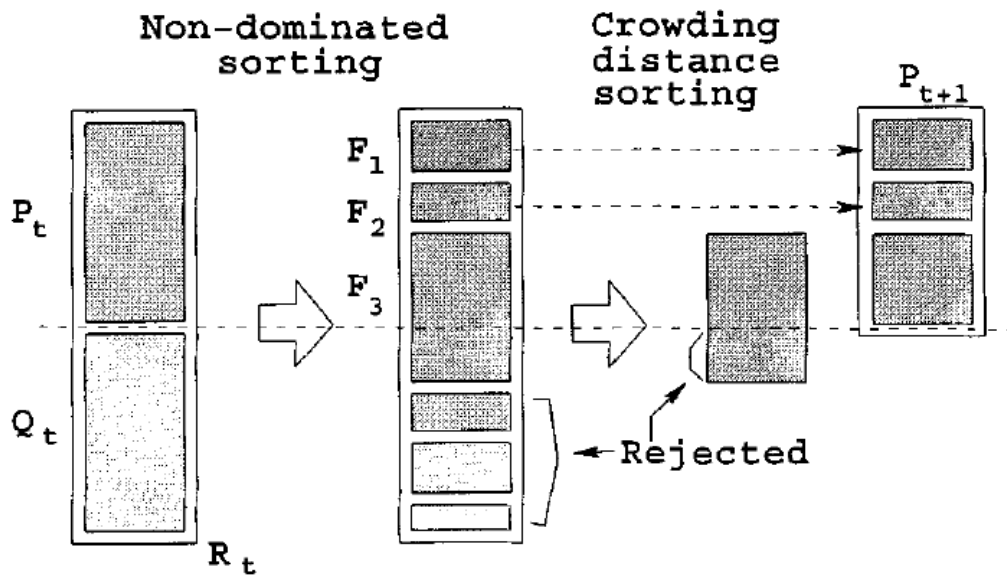
Κατά συνέπεια οι λύσεις ενός πληθυσμού κατατάσσονται αρχικά σε επίπεδα και στη συνέχεια οι λύσεις κάθε επιπέδου κατατάσσονται ανάλογα με την διασπορά των γειτονικών τους λύσεων. Η συνολική διαδικασία μιας επανάληψης t του αλγορίθμου φαίνεται στη συνέχεια σε μορφή ψευδοκώδικα.

```

 $R_t = P_t \cup Q_t$ 
 $\mathcal{F} = \text{fast} - \text{non} - \text{dominated} - \text{sort}(R_t)$ 
 $P_{t+1} = \emptyset$  and  $i = 1$ 
until  $|P_{t+1}| + |\mathcal{F}_i| \leq N$ 
  crowding distance assignment( $\mathcal{F}_i$ )
   $P_{t+1} = P_{t+1} \cup \mathcal{F}_i$ 
   $i = i + 1$ 
sort( $\mathcal{F}_i, <_n$ )
 $P_{t+1} = P_{t+1} \cup \mathcal{F}_i[1:(N - |P_{t+1}|)]$ 
 $Q_{t+1} = \text{make new population}(P_{t+1})$ 
 $t = t + 1$ 

```

Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι πως για το τελευταίο επίπεδο της κατάταξης γίνεται επιλογή τέτοιου αριθμού λύσεων ώστε το σύνολο της κάθε νέας γενιάς να είναι ακριβώς ίσο με ένα αριθμό που αποτελεί και τον αριθμό των λύσεων της πρώτης γενιάς. Οι υπόλοιπες λύσεις απορρίπτονται καθώς είναι υποδεέστερες αυτών που διατηρήθηκαν. Αξίζει επίσης να σημειωθεί πως η διασφάλιση ότι διατηρούνται σε κάθε βήμα οι καλύτερες σχεδιάσεις από το σύνολο ενός πληθυσμού γονέων και απογόνων είναι ακόμα μια διαφοροποίηση του αλγορίθμου αυτού από τον NSGA. Η συνολική διαδικασία ενός επαναληπτικού βήματος φαίνεται και στο επόμενο σχήμα.



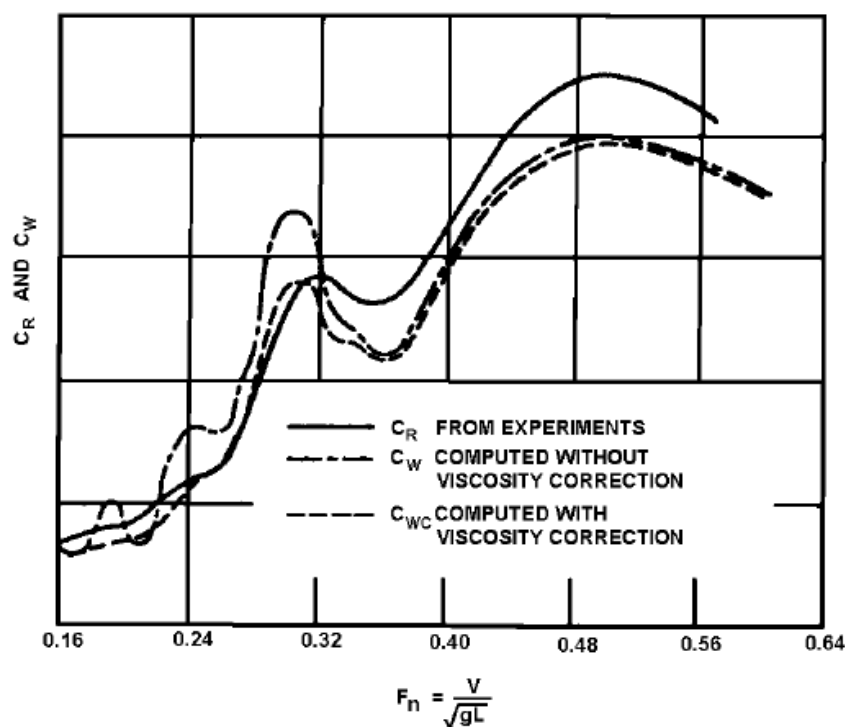
Εικόνα 3.2 Διαδικασία παραγωγής νέας γενιάς. Πηγή : Kalyanmoy Deb, Sameer Agarwal, T. Meyarivan, «A fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm : NSGA-II», 2002

Κεφάλαιο 4. Χαρακτηριστικά σχεδίασης μονόγαστρων ταχύπλων σκαφών

Υδροδυναμικά στοιχεία σχεδίασης ταχύπλων σκαφών

Κατά τη μελέτη και σχεδίαση ενός σκάφους πρωταρχικό ρόλο στη γεωμετρία του παίζει η ταχύτητα στην οποία επιθυμείται να πλεύσει και συγκεκριμένα ο αριθμός Froude ο οποίος εκτός από την ταχύτητα, εξαρτάται και από το μήκος της ισάλου του. Με βάση αυτόν τον αριθμό καθορίζεται ο τύπος του σκάφους και ακολούθως η μορφή των νομέων του.

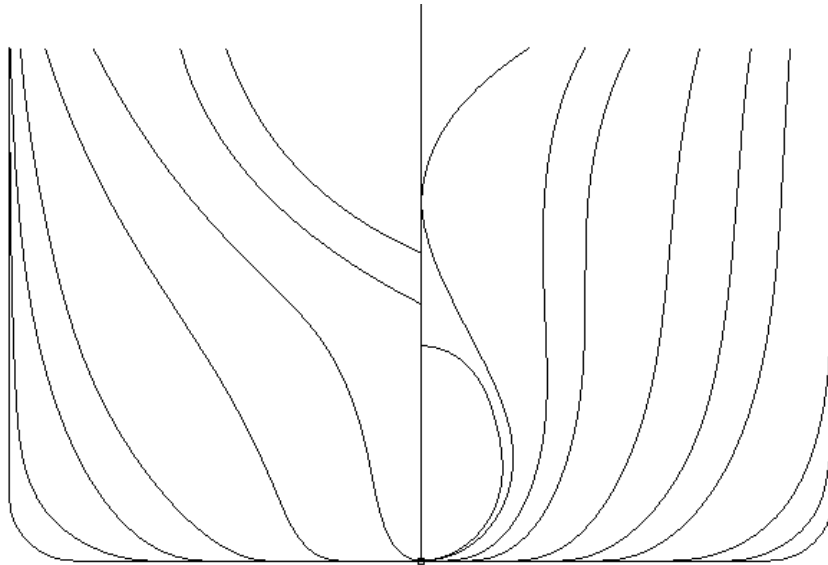
Η περιοχή ταχυτήτων σε αριθμό Froude κοντά στο 0,5 αποτελεί περιοχή με μέγιστο συντελεστή αντίστασης κυματισμού. Σε εκείνο το σημείο το μήκος κύματος των παραγόμενων κυματισμών είναι συγκρίσιμο με το μήκος του πλοίου και κατ' επέκταση έχουμε μέγιστο πλάτος του κυματισμού που προκύπτει από την υπέρθεση του κύματος που παράγεται από την πλώρη με αυτό που παράγεται στην πρύμνη. Εκτός από σημείο στο οποίο δεν λειτουργεί κανένα σκάφος αποτελεί και χαρακτηριστικό διαχωριστικό σημείο των τύπων των διαφόρων σκαφών. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η εξάρτηση του συντελεστή αντίστασης κυματισμού από τον αριθμό Froude.



Εικόνα 4.1 Εξάρτηση συντελεστή αντίστασης κυματισμού από τον αριθμό Froude. Πηγή : Γ. Ζαραφωνίτη, Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ. «Μελέτη και Σχεδίαση Πλοίων Νέας Τεχνολογίας»

Στην παραπάνω εικόνα, βλέπουμε εκτός από την τελευταία κορυφή στην περιοχή Froude 0,5 και μια δεύτερη κορυφή στην περιοχή του 0,32. Θα πρέπει λοιπόν να δοθεί προσοχή ακόμα και σε μικρές ταχύτητες, και συγκεκριμένα σε εκείνη την περιοχή καθώς για ένα μικρό εύρος αριθμών Froude αποτελεί τοπικό μέγιστο και θα πρέπει να αποφεύγεται.

Στην περίπτωση πλοίων εκτοπίσματος η μέγιστη ταχύτητα στην οποία μπορούν να πλεύσουν περιορίζεται σε αριθμούς Froude μικρότερους από 0,5. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν δεξαμενόπλοια, φορτηγά, containerships, ΕΓ/ΟΓ και άλλες ειδικές κατηγορίες πλοίων. Σε αυτήν την κατάσταση πλεύσης το βύθισμα διατηρείται περίπου σταθερό¹³ σε όλες τις ενδιάμεσες ταχύτητες μέχρι την υπηρεσιακή. Οι δυνάμεις που δέχονται τα πλοία εκτοπίσματος είναι κατά κύριο λόγο υδροστατικές. Η μορφή των νομέων χαρακτηρίζεται από κυρτές καμπύλες χωρίς απότομες μεταβολές της γεωμετρίας τους σε όλο το μήκος του σκάφους. Στην πλήρη συνήθως έχουμε βολβό για τη βελτίωση της αντίστασης κυματισμού. Η μορφή του βυθισμένου μέρους της γάστρας έχει ομαλή μεταβολή της γεωμετρίας στο πρυμναίο τμήμα καθώς μεταβαίνουμε από το μέσον όπου έχουμε μέγιστο πλάτος μέχρι την προπέλα. Αυτό συμβαίνει προκειμένου να περιοριστεί η αποκόλληση της ροής πρύμνηθεν που αυξάνει την αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας. Μια τυπική μορφή νομέων πλοίου εκτοπίσματος φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 4.2 Νομείς πλοίου εκτοπίσματος

Στην κατηγορία των πλοίων εκτοπίσματος κατατάσσονται και κάποια μεγάλα σκάφη αναψυχής τα οποία έχουν διαφορετική σχεδίαση αλλά διατηρούν χαρακτηριστικά όπως ο

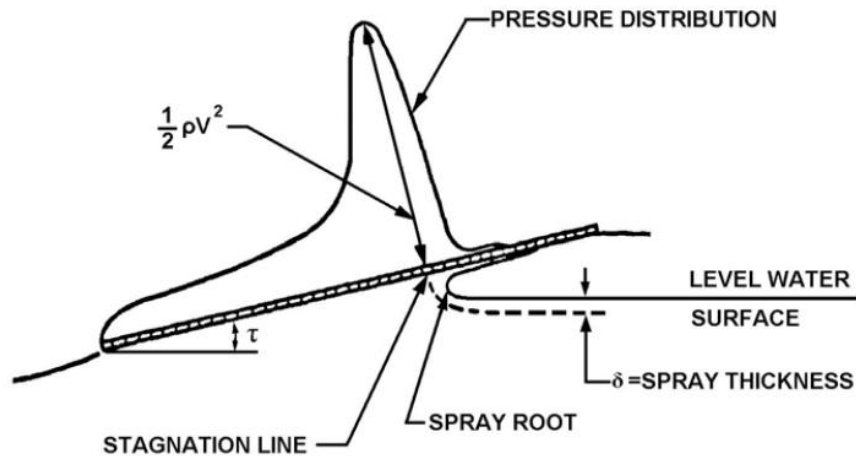
¹³ Στην πραγματικότητα υπάρχει μια μικρή αύξηση του βυθίσματος λόγω του φαινομένου Bernoulli

βολβός και οι κυρτοί νομείς στο μεγαλύτερο μέρος των υφάλων. Μια τέτοια περίπτωση φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί. Σε αυτή φαίνεται επίσης και η προραία πτερωτή ελέγχου (bow thruster) για την εκτέλεση ελιγμών σε μικρές ή μηδενικές ταχύτητες όπου, τα πηδάλια αναπτύσσουν μικρές ή μηδενικές ανωστικές δυνάμεις αντίστοιχα.



Εικόνα 4.3 Σκάφος αναψυχής με βολβό. Πηγή : www.yachtforums.com

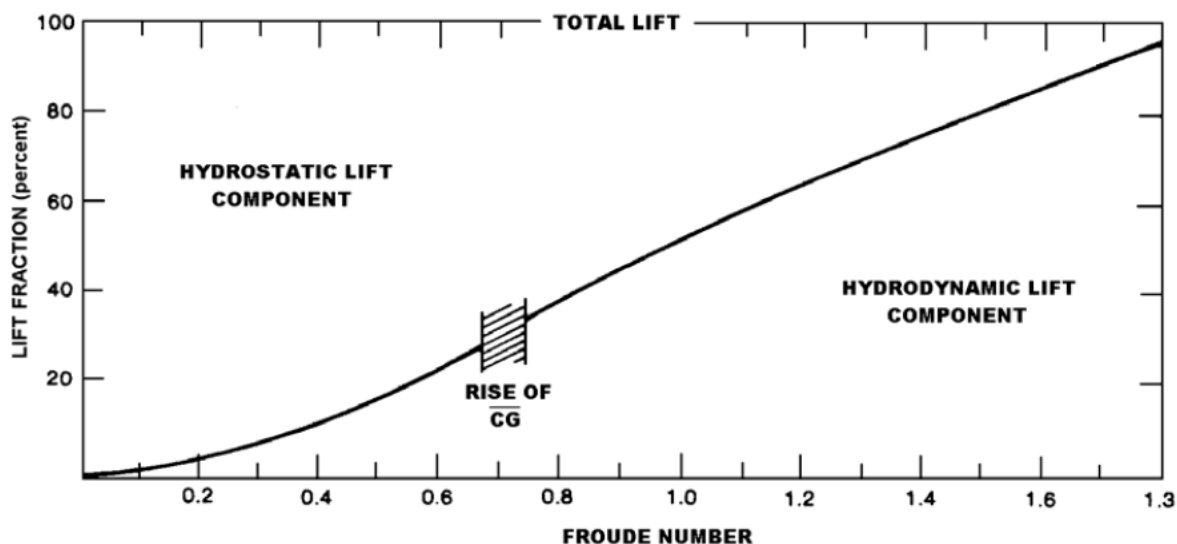
Όταν επιθυμείται η πλεύση σε μεγαλύτερες ταχύτητες ($Froude > 0.6$) η μορφή της γάστρας διαφοροποιείται σημαντικά καθώς αλλάζει η αλληλεπίδραση του κινούμενου σκάφους με το νερό. Σημαντική παράμετρο αποτελεί η ανάπτυξη υδροδυναμικών δυνάμεων σε ένα σώμα που κινείται με ταχύτητα μέσα σε ρευστό. Οι δυνάμεις αυτές είναι υπαρκτές ακόμα και σε μικρές ταχύτητες στις οποίες κινούνται τα πλοία εκτοπίσματος, ωστόσο για μεγαλύτερες ταχύτητες αποτελούν υπολογίσιμο ποσοστό των συνολικών δυνάμεων με αποτέλεσμα να μπορούμε να τις εκμεταλλευτούμε προς όφελος μας. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται και ακολούθως περιγράφεται η κατανομή των υδροδυναμικών πιέσεων σε επίπεδη πλάκα που ολισθαίνει στην επιφάνεια του νερού υπό γωνία διαγωγής τ .



Εικόνα 4.4 Κατανομή υδροδυναμικών πιέσεων σε ολισθαίνουσα επίπεδη πλάκα. Πηγή : Θ.Α. Λουκάκη ομότιμου καθηγητή ΕΜΠ, Γρ. Γρηγορόπουλου Καθηγητή ΕΜΠ «Υδροδυναμική Σχεδίαση Μικρών Σκαφών», Αθήνα, 1996

Διακρίνουμε πως η προσπίπτουσα ροή χωρίζεται σε δύο τμήματα εκ των οποίων το πρώτο ακολουθεί τη γεωμετρία και αποχωρίζεται από την πλάκα στο πίσω μέρος της ενώ το δεύτερο αναστρέφεται και ακολουθεί για ένα μικρό τμήμα τη γεωμετρία κατά την κατεύθυνση της κίνησης ενώ στη συνέχεια αποκολλάται και γίνεται αφρός. Το διαχωριστικό σημείο αυτών των δύο τμημάτων ονομάζεται σημείο ανακοπής καθώς εκεί η ταχύτητα μηδενίζεται, οπότε όπως προκύπτει από την απλοποιημένη εξίσωση Bernoulli η πίεση είναι μέγιστη και ίση με την ανηγμένη στον όγκο ρευστού κινητική ενέργεια. Το πάχος του στρώματος αφρού ορίζεται από την απόσταση της γραμμής ροής που καταλήγει στο σημείο ανακοπής με την ελεύθερη επιφάνεια.

Όπως προαναφέρθηκε οι υδροδυναμικές δυνάμεις αποτελούν υπολογίσιμο ποσοστό των συνολικών δυνάμεων σε μεγαλύτερες ταχύτητες. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται η σχετική συμμετοχή υδροστατικών και υδροδυναμικών δυνάμεων που αναπτύσσονται σε ένα σκάφος συναρτήσει του αριθμού Froude.

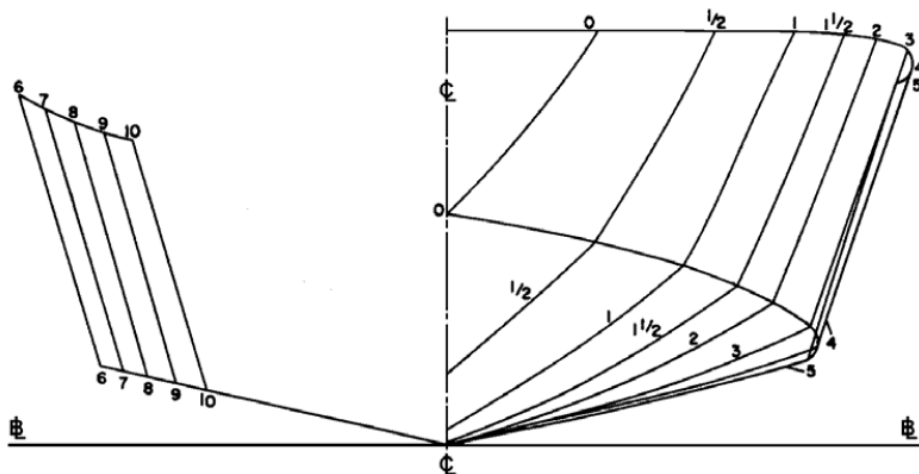


Εικόνα 4.5 Σχετική συμμετοχή υδροστατικών και υδροδυναμικών δυνάμεων συναρτήσει του αριθμού Froude. Πηγή : Θ.Α. Λουκάκη ομότιμου καθηγητή ΕΜΠ, Γρ. Γρηγορόπουλου Καθηγητή ΕΜΠ «Υδροδυναμική Σχεδίαση Μικρών Σκαφών», Αθήνα, 1996

Στην παραπάνω εικόνα σημειώνεται και η περιοχή στην οποία παρατηρείται η εκκίνηση ανύψωσης του σκάφους λόγω επίδρασης των υδροδυναμικών δυνάμεων σε αριθμό Froude περί την τιμή 0,7. Ο λόγος που αυτό δε συμβαίνει σε μικρότερες ταχύτητες είναι το φαινόμενο Bernoulli σύμφωνα με το οποίο έχουμε μείωση των υδροστατικών δυνάμεων στη γάστρα λόγω ανάπτυξης ταχύτητας ρευστού στο οριακό στρώμα και συνεπαγόμενης μείωσης της τιμής των κάθετων πιέσεων. Στην περιοχή του Froude 0,7 οι υδροδυναμικές δυνάμεις εξισώνονται με αυτήν την απώλεια των υδροστατικών.

Για μεγέθη ταχυτήτων μεγαλύτερων από Froude 0,6 έχουμε τις περιοχές προ-ολίσθησης και ολίσθησης, με ασαφή τα διαχωριστικά όρια μεταξύ τους. Στην περιοχή προ-ολίσθησης έχουμε σαφώς ανάπτυξη υπολογίσιμων υδροδυναμικών δυνάμεων ωστόσο οι υδροστατικές εξακολουθούν να αποτελούν σημαντικό ποσοστό των συνολικών. Τα πλοία που ταξιδεύουν σε ταχύτητες ως Froude 1, ονομάζονται πλοία ημικτοπίσματος και αποτελούν ενδιάμεση επιλογή των πλοίων εκτοπίσματος και των ολισθακάτων. Μια τυπική μορφή γραμμών γάστρας ολισθακάτου φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί και ανήκει στη συστηματική σειρά 62¹⁴.

¹⁴ Clement & Blount, 1963



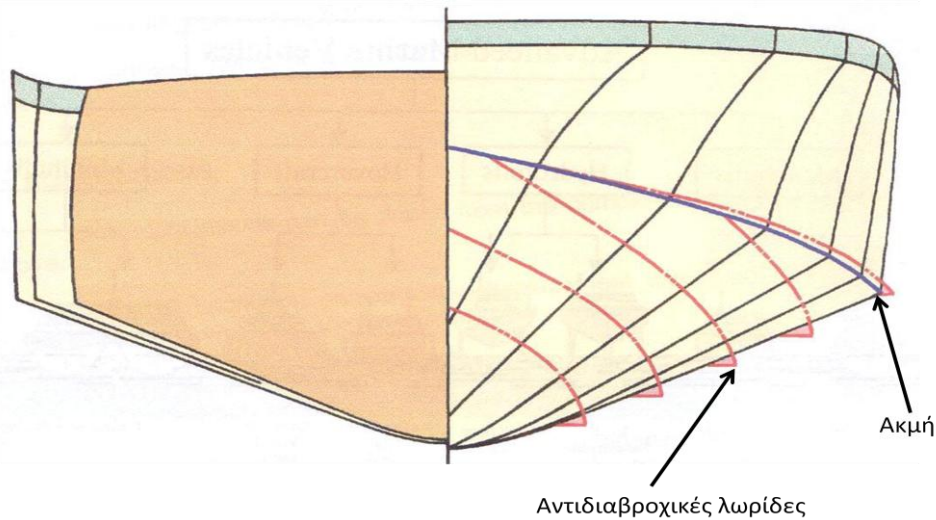
Εικόνα 4.6 Τυπικό σχέδιο γραμμών γάστρας ολισθακάτου. Πηγή : «Θ.Α. Λουκάκη ομότιμου καθηγητή ΕΜΠ, Γρ. Γρηγορόπουλου Καθηγητή ΕΜΠ «Υδροδυναμική Σχεδίαση Μικρών Σκαφών», Αθήνα, 1996»

Όπως φαίνεται και από την σύγκριση με τους νομείς των σκαφών εκτοπίσματος, η μορφή των νομέων ταχυπλόων σκαφών αποτελούν τελείως διαφορετικές σχεδιάσεις. Βασική παράμετρος που οδηγεί σε αυτές τις διαφορές αποτελεί η αυξημένη συμμετοχή των υδροδυναμικών δυνάμεων που ασκούνται στη γάστρα, και γενικά η διαφοροποίηση της αλληλεπίδρασης του σκάφους με το περιρρέον ρευστό. Στην περίπτωση πλοίων εκτοπίσματος οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις αποτελούνται, στην πλειοψηφία τους, από υδροστατικές ενώ η αλληλεπίδραση με το ρευστό αφορά ως επί το πλείστον, τους δημιουργούμενους από το σκάφος κυματισμούς, τα συνεκτικά φαινόμενα και τον τρόπο που αυτά επηρεάζουν την αντίσταση του πλοίου.

Στην περίπτωση ταχυπλόων σε κατάσταση ολίσθησης, οι κυριότερα αναπτυσσόμενες δυνάμεις είναι υδροδυναμικές ενώ η συμμετοχή των υδροστατικών στις συνολικές είναι μικρότερη. Προκειμένου να αναπτυχθούν επαρκείς υδροδυναμικές δυνάμεις στη γάστρα των ταχυπλόων απαιτούνται ευθύγραμμοι νομείς στην πρύμνη ώστε η κάθετη συνιστώσα των παραγόμενων δυνάμεων να είναι κατά το δυνατόν η μέγιστη. Ωστόσο οι πρυμναίοι νομείς δεν μπορεί να είναι οριζόντιοι καθώς δημιουργούνται προβλήματα στην συμπεριφορά του σκάφους σε κυματισμούς. Συνεπώς η επιλογή της γωνίας ανύψωσης πυθμένα τόσο στην πρύμνη όσο και σε ολόκληρο το μήκος του σκάφους αποτελούν αντικείμενο μελέτης.

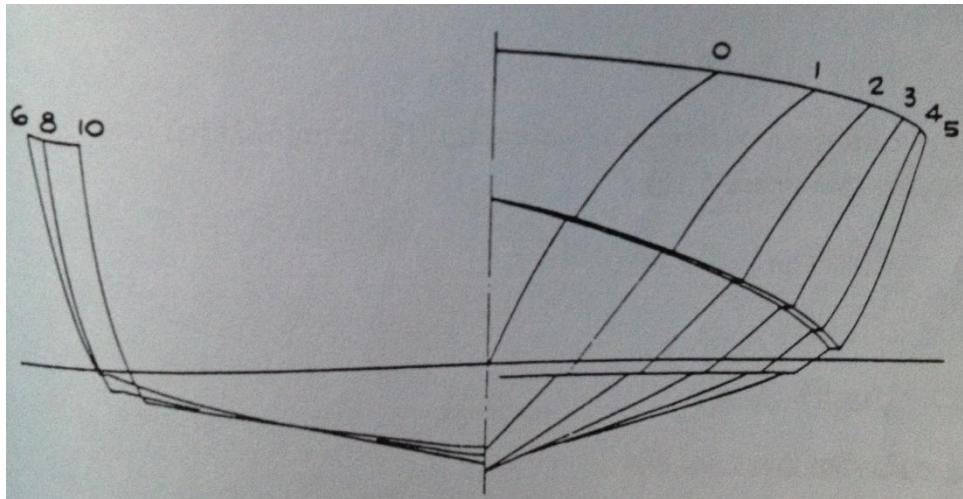
Κατά την επιτάχυνση μιας ολισθακάτου και μετά από κάποια ταχύτητα έχουμε, όπως προαναφέρθηκε, σταδιακή ανύψωση του σκάφους. Αυτή η ανύψωση οδηγεί σε μειωμένο εκτόπισμα κατά την πλεύση ενώ έχουμε κι έντονα φαινόμενα διαβροχής τμήματος της γάστρας που δεν βρίσκεται σε άμεση επαφή με το νερό. Για τον περιορισμό της διαβροχής

της επιφάνειας της γάστρας χρησιμοποιούνται αντιδιαβρωχικές λωρίδες (spray rails) και ακμές (chines). Τα στοιχεία αυτά φαίνονται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 4.7 Υδροδυναμικά προσαρτήματα γάστρας ολισθακάτου . Πηγή : Γ.Κ. Πολίτη, Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. «Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου», Αθήνα, 2011

Αν και φαινομενικά έχουν τον ίδιο σκοπό περιορισμού της βρεχόμενης επιφάνειας υπάρχει μια σημαντική διαφορά μεταξύ των ακμών και των αντιδιαβρωχικών λωρίδων. Οι πρώτες δρουν στο σημείο τομής της ισάλου με την πλευρική επιφάνεια του σκάφους ενώ οι τελευταίες απομακρύνουν από την κάτω επιφάνεια του σκάφους ροή που προκύπτει από την αναστροφή της ροής μπροστά από το σημείο ανακοπής. Λόγω της μη μηδενικής γωνίας ανύψωσης πυθμένα, η ροή του αναστρεφόμενου ρευστού κατευθύνεται υπό κάποια γωνία ως προς τη διαμήκη διεύθυνση και περιορίζεται εντός της επιφάνειας που ορίζεται μεταξύ δύο ομόλογων αντιδιαβρωχικών λωρίδων περί το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας. Όσον αφορά τις ακμές, για τον περιορισμό της διαβροχής στα πλευρικά τοιχώματα του σκάφους υπάρχει ειδική διαμόρφωση με διακριτή μετάβαση ανάμεσα στις δύο επιφάνειες εκατέρωθεν της ακμής. Αυτή η διαμόρφωση φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.

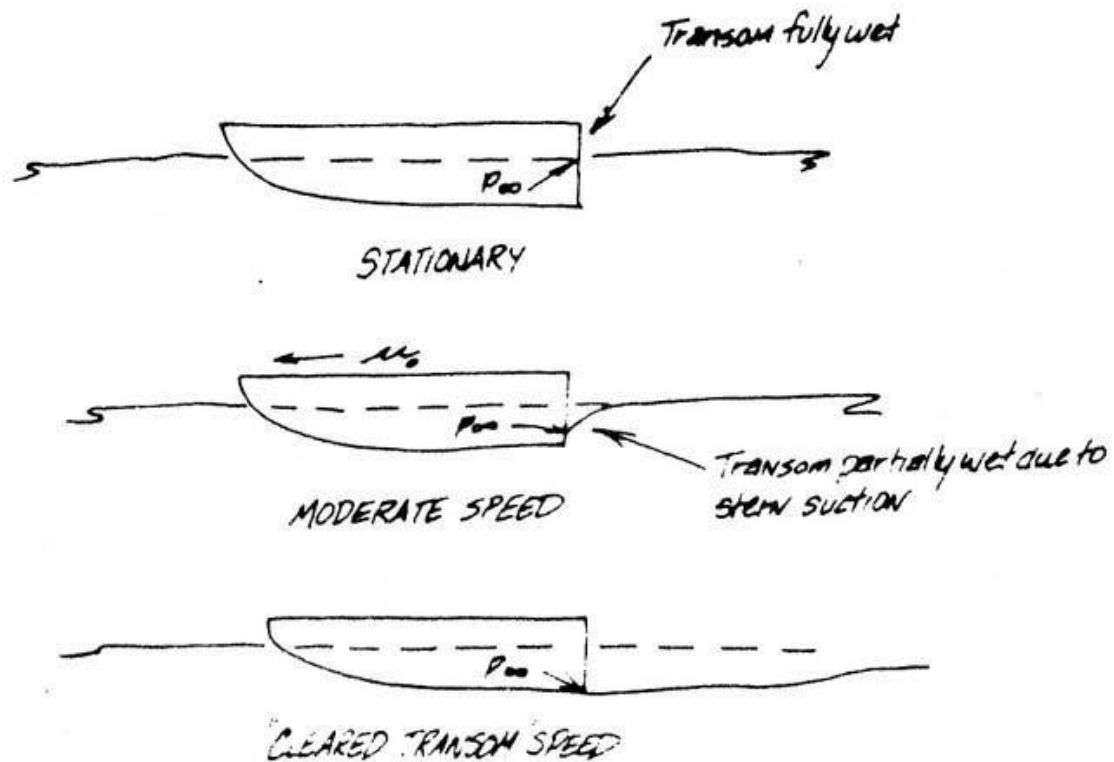


Εικόνα 4.8 Ενδεικτική μορφή ακμής για αποφυγή διαβροχής των εξάλων. Πηγή : Θ.Α. Λουκάκη ομότιμου καθηγητή ΕΜΠ, Γρ. Γρηγορόπουλου Καθηγητή ΕΜΠ, «Υδροδυναμική Σχεδίαση Μικρών Σκαφών», Αθήνα, 1996

Μια ακόμα λειτουργία των αντιδιαβροχικών λωρίδων και των ακμών είναι η παροχή επιπλέον υδροδυναμικής άνωσης καθώς η γωνία της επιφάνειας τους που έρχεται σε επαφή με το νερό έχει αρκετά μικρότερη τιμή σε σχέση με την αντίστοιχη της γυμνής γάστρας σε περίπτωση που τα προσαρτήματα αυτά απουσίαζαν. Κατά συνέπεια η παρουσία τους αυξάνει τις κάθετες συνιστώσες των ασκούμενων πιέσεων στην επιφάνεια τους.

Σε κατάσταση ολίσθησης, εκτός από τα φαινόμενα της ανύψωσης του σκάφους και της διαβροχής της επιφάνειας του, έχουμε επίσης και ανάπτυξη δυναμικής διαγωγής. Η διαγωγή αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι η συνισταμένη των υδροδυναμικών δυνάμεων δεν δρα στην ίδια διαμήκη θέση του κέντρου βάρους, και μάλιστα το σημείο αυτό διαφέρει για τις διάφορες τιμές της ταχύτητας. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι το σημείο εφαρμογής της συνισταμένης των υδροδυναμικών πιέσεων είναι άμεσα συναρτημένο με την βρεχόμενη επιφάνεια η οποία μεταβάλλεται μαζί με το εκτόπισμα λόγω της προαναφερθείσας ανύψωσης του σκάφους και της διαφοροποίησης των ισάλων επιφανειών για τις διάφορες τιμές της διαγωγής και του βυθίσματος. Οι τιμές της διαγωγής επιθυμείται να είναι μικρές και προκειμένου να περιοριστούν σε μεγάλες ταχύτητες, χρησιμοποιούνται πρυμναίες σφήνες ή υδραυλικά μετακινούμενα περύγια. Τα προσαρτήματα αυτά τοποθετούνται κάτω από τη γάστρα στην περιοχή του καθρέφτη και αναπτύσσουν άνωση η οποία δημιουργεί αντίθετη ροπή από τις υδροδυναμικές δυνάμεις με αποτέλεσμα να περιορίζεται η διαγωγή.

Σε μεγάλες ταχύτητες παρουσιάζεται επίσης το φαινόμενο της δυναμικής αναρρόφησης στην περιοχή του καθρέφτη μέσω της ολοκληρωτικής αποκόλλησης της ροής. Το φαινόμενο αυτό φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



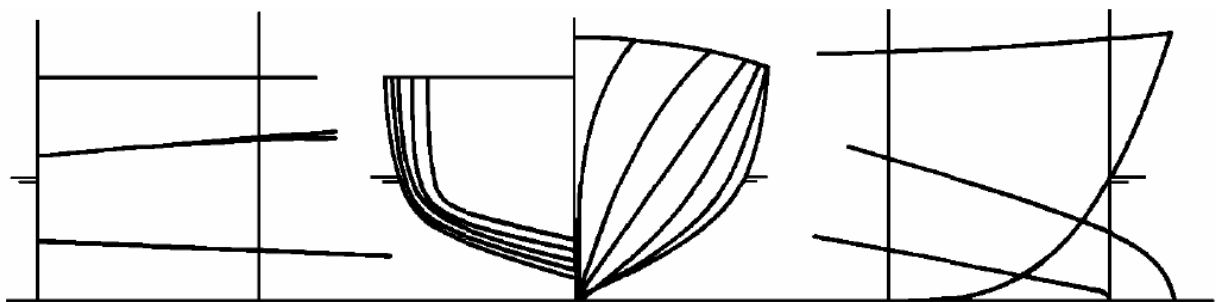
Εικόνα 4.9 Το φαινόμενο της δυναμικής αναρρόφησης. Πηγή : Γ.Κ. Πολίτη, Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. «Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου», Αθήνα, 2011

Ο καθρέφτης σχετίζεται άμεσα με αυτό το φαινόμενο καθώς η κύρια λειτουργία του είναι να προκαλεί αυτή την αποκόλληση. Στην περίπτωση των πλοίων εκτοπίσματος, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η αποκόλληση της ροής στην πρύμνη προκαλεί αύξηση της αντίστασης πίεσης λόγω συνεκτικότητας και γι αυτό η μορφή των υφάλων στην πρύμνη είναι τέτοια ώστε κατά το δυνατόν η ροή να ακολουθεί τη γεωμετρία. Αντίθετα στην περίπτωση πλεύσης ολισθακάτων σε χαμηλές ταχύτητες ο καθρέφτης αποτελεί τη χειρίστη δυνατή γεωμετρία αφού όταν είναι βυθισμένος δημιουργεί τύρβεις που ελαχιστοποιούν την πίεση στην πρύμνη και μεγιστοποίηση της αντίστασης πίεσης λόγω συνεκτικότητας. Αυτό όμως συμβαίνει για ένα μικρό μόνο χρονικό διάστημα επιτάχυνσης τους. Οι ολισθακάτατοι είναι σχεδιασμένες για μεγάλες ταχύτητες όπου το φαινόμενο της δυναμικής αναρρόφησης απομακρύνει από την πρύμνη, όγκο ρευστού που παρασύρεται από το σκάφος σε χαμηλότερες ταχύτητες και δρα ως πρόσθετη μάζα, με αποτέλεσμα η ολοκληρωτική αποκόλληση να μειώνει την αντίσταση.

Γενικά λοιπόν χαρακτηριστικά των ολισθακάτων αποτελούν η πρύμνη καθρέφτη, και σημαντική διαφοροποίηση τόσο των νομέων όσο και της γωνίας ανύψωσης πυθμένα κατά μήκος του σκάφους. Οι νομείς της πρύμνης είναι ευθύγραμμοι ώστε να επιτυγχάνεται η

μέγιστη κάθετη συνιστώσα υδροδυναμικών δυνάμεων ενώ η γωνία ανύψωσης πυθμένα μπορεί να είναι σταθερή γι αυτό το τμήμα, ή να μεταβάλλεται. Αν μεταβάλλεται, το κέντρο περιστροφής των νομέων καθώς κινούμαστε κατά το διάμηκες, μπορεί να βρίσκεται είτε στην τρόπιδα είτε σε κάποιο σημείο κοντά σε αυτή. Η μορφή των νομέων πρώραθεν διαφέρει σημαντικά καθώς η γεωμετρική διαμόρφωση τους δεν είναι πουθενά ευθύγραμμη, ενώ σημαντική επίσης διαφορά με της περιοχή της πρύμνης, είναι η ταχεία αύξηση της γωνίας ανύψωσης πυθμένα καθώς πλησιάζουμε στην πλώρη. Η μορφή των προραίων νομέων μπορεί να είναι κυρτή ή κοίλη και η κυρτότητα τους να διαφέρει κατά μήκος του νομέα. Η κάθε μια μορφή έχει συγκεκριμένα πλεονεκτήματα έναντι της άλλης. Σημαντικό πλεονέκτημα των κυρτών νομέων είναι ο περιορισμός της μεταβολής της διαγωγής κατά την πλευση λόγω αυξημένου προραίου εκτοπίσματος σε περίπτωση βύθισης τους, σε σχέση με κοίλους νομείς. Οι κοίλοι προραίοι νομείς προσδίδουν καλύτερη συμπεριφορά σε κυματισμούς λόγω μειωμένης σφυρόκρουσης της πλώρης. Σημαντικό μειονέκτημα τους είναι ότι δεν προσφέρουν άντωση με αποτέλεσμα οι κινήσεις να έχουν μεγαλύτερο πλάτος. Κατά συνέπεια απαιτείται μελέτη προκειμένου να καθοριστεί η βέλτιστη μορφή των νομέων τόσο κατά το διάμηκες όσο και καθ' ύψος.

Η κατηγορία των σκαφών ημικτοπίσματος που αναφέρθηκε νωρίτερα αποτελεί ενδιάμεση σχεδίαση των σκαφών εκτοπίσματος και των ολισθακάτων και παρουσιάζουν ομοιότητες και με τις δύο αυτές σχεδιάσεις αλλά πολύ περισσότερο με τις ολισθακάτους. Μια τυπική μορφή νομέων σκάφους αυτού του είδους φαίνεται στη συνέχεια και ανήκει στη συστηματική σειρά NPL με χαρακτηριστικό τον στρογγυλό πυθμένα.



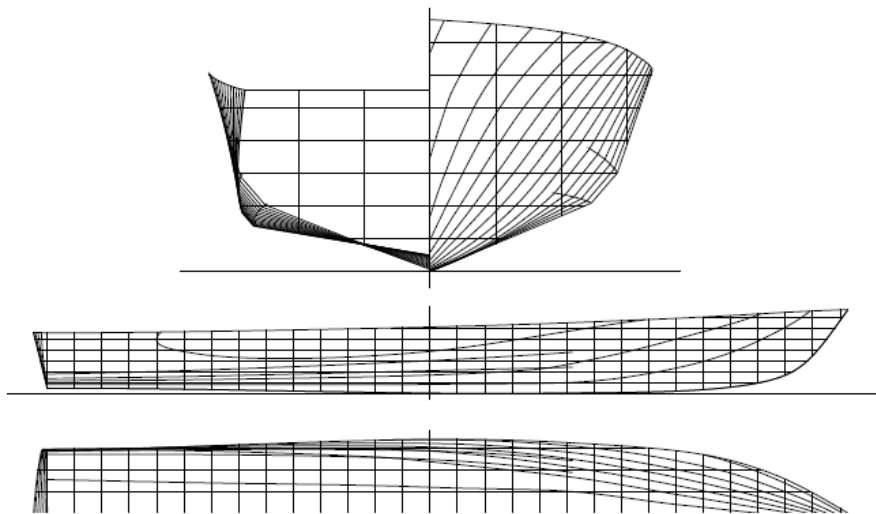
Εικόνα 4.10 Συστηματική σειρά NPL. Πηγή : Γ. Ζαραφωνίτη, Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ. «Μελέτη και Σχεδίαση Πλοίων Νέας Τεχνολογίας»

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται χαρακτηριστικά η μετάβαση από τους κοίλους νομείς της πλώρης σε κυρτούς καθώς κινούμαστε προς την πρύμνη. Στην συγκεκριμένη σειρά δεν έχουμε ευθύγραμμους νομείς στην πρύμνη έχουμε όμως πρύμνη καθρέφτη όπως στις ολισθακάτους.

Οι ταχύτητες στις οποίες κινούνται τα σκάφη ημικτοπίσματος κυμαίνεται μεταξύ αριθμού Froude 0,4 και 1. Στις ταχύτητες αυτές έχουμε σημαντικές υδροδυναμικές δυνάμεις αλλά δεν επαρκούν για την σημαντική ανύψωση του σκάφους, την μείωση του εκτοπίσματος και την ολίσθηση. Στην κατηγορία αυτή ανήκει και η συστηματική σειρά ΕΜΠ που περιγράφεται στη συνέχεια.

Η συστηματική σειρά ΕΜΠ

Το σκάφος που θα μελετηθεί στα πλαίσια του παρόντος αποτελεί γάστρα της συστηματικής σειράς ταχυπλών σκαφών του ΕΜΠ. Κύρια χαρακτηριστικά των γραμμών των σκαφών αυτών είναι πως έχει δύο ακμές που αποτελεί και την ουσιαστικότερη διαφοροποίηση του από άλλες συστηματικές σειρές, κοίλες πλευρές στην πλώρη, πλατύ καθρέφτη και μεταβλητή γωνία ανύψωσης πυθμένα¹⁵. Η σειρά είναι κατάλληλη για την προκαταρκτική σχεδίαση μονόγαστρων σκαφών που λειτουργούν ως εμπορικά ή πολεμικά ταχύπλοα στις περιοχές ολίσθησης και προ-ολίσθησης. Εμπορικά σκάφη αυτής της σειράς είναι ενδεικτικά τα επιβατηγά, ΕΓ/ΟΓ, κρουαζιερόπλοια και σκάφη αναψυχής¹⁶. Η μορφή των γραμμών αυτής της σειράς φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.

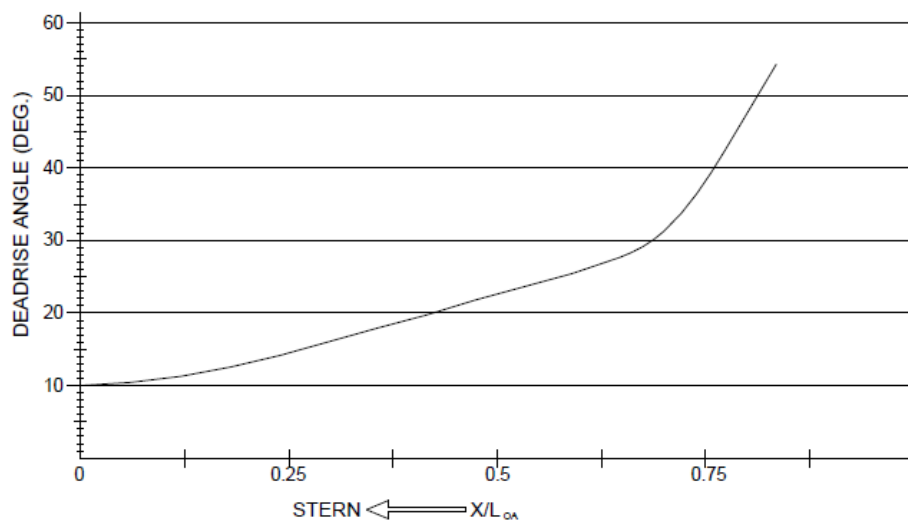


Εικόνα 4.11 Γραμμές Συστηματικής Σειράς ΕΜΠ. Πηγή : Γρ. Γρηγορόπουλου, Καθηγητή ΕΜΠ, Θ. Λουκάκη, Ομότιμου Καθηγητή ΕΜΠ , «Συστηματική Σειρά ΕΜΠ, Περιγραφή και Αποτελέσματα» , Αθήνα 2002

¹⁵ Γρ. Γρηγορόπουλου, Καθηγητή ΕΜΠ, Θ. Λουκάκη, Ομότιμου Καθηγητή ΕΜΠ , «Συστηματική Σειρά ΕΜΠ, Περιγραφή και Αποτελέσματα» , Αθήνα 2002

¹⁶ Γρ. Γρηγορόπουλου, Καθηγητή ΕΜΠ, Θ. Λουκάκη, Ομότιμου Καθηγητή ΕΜΠ , «Συστηματική Σειρά ΕΜΠ, Περιγραφή και Αποτελέσματα» , Αθήνα 2002

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε τα χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν προηγούμενα. Αρχικά μπορούμε να παρατηρήσουμε τους κοίλους νομείς στην πλώρα, τη σταδιακή μετάβαση σε κυρτούς στο διάστημα μέχρι το μέσον του σκάφους και τελικά τη διαμόρφωση σε ευθύγραμμους στην πρύμνη. Οι ακμές εκτείνονται περίπου στο 70% του μήκους του σκάφους, κάτι που κρίνεται επαρκές καθώς σε κατάσταση ολίσθησης αφενός μειώνεται το μήκος ισάλου λόγω ανύψωσης του σκάφους και αφετέρου δημιουργείται έμπρυσμη δυναμική διαγωγή που απομακρύνει το πρωαίο μέρος της γάστρας από την επιφάνεια της θάλασσας. Κατά συνέπεια δεν απαιτείται εκτενέστερη προέκταση των ακμών πλώραθεν, καθώς δεν θα μπορούσαν να είναι λειτουργικές. Άλλη παρατήρηση που μπορεί να γίνει αφορά το πλάτος ισάλου στο πρυμναίο τμήμα που παραμένει περίπου σταθερό και ίσο με το μέγιστο στο μέσο του σκάφους και οδηγεί στον πλατύ καθρέπτη που περιγράφηκε νωρίτερα. Αντίθετα το πλάτος του καταστρώματος μεταβάλλεται μέσω της μεταβολής της γωνίας flare στο κατάστρωμα. Τέλος πρέπει να σημειωθεί πως η γωνία ανύψωσης πυθμένα είναι αύξουσα κατά μήκος με τιμές που ξεκινούν από τις 10° στην πρύμνη και καταλήγουν ως και τις 70° στην πλώρη. Η γωνία ανύψωσης πυθμένα συναρτήσεως του αδιάστατου μήκους φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.12 Γωνία ανύψωσης πυθμένα συναρτήσεως του αδιάστατου μήκους. Πηγή : Γρ. Γρηγορόπουλου, Καθηγητή ΕΜΠ, Θ. Λουκάκη, Ομότιμου Καθηγητή ΕΜΠ , «Συστηματική Σειρά ΕΜΠ, Περιγραφή και Αποτελέσματα» , Αθήνα 2002

Η ταχεία και συνεχής αύξηση της γωνίας ανύψωσης πυθμένα παρουσιάζει ομοιότητες με την κατηγορία των ολισθακάτων ενώ η ομαλή μορφή των νομέων πλώραθεν θυμίζει τη γεωμετρία των πλοίων εκτοπίσματος. Η διαμόρφωση της πρύμνης καθρέπτη αποτελεί χαρακτηριστικό σχεδίασης ολισθακάτων, και παρότι οι ταχύτητες είναι μικρότερες το

φαινόμενο της δυναμικής αναρρόφησης υφίσταται με τα θετικά αποτελέσματα που περιγράφηκαν νωρίτερα. Το φαινόμενο αυτό επιτυγχάνεται μέσω της επιλογής της βύθισης του καθρέφτη που επιτρέπει κάτι τέτοιο στην ταχύτητα πλευσης.

Η συστηματική σειρά ΕΜΠ αποτελείται από 5 πρότυπα σκάφη με χαρακτηριστικό της κάθε μιας ένα λόγο κυρίων διαστάσεων L/B . Στην παρούσα μελέτη θα γίνει βελτιστοποίηση για δύο περιπτώσεις. Ενώ στην πρώτη οι κύριες διαστάσεις θα διατηρηθούν αμετάβλητες, στη δεύτερη θα βελτιστοποιηθεί ένα μοντέλο του οποίου οι γραμμές προέρχονται από τη συστηματική σειρά ΕΜΠ, αλλά οι κύριες διαστάσεις του θα αποτελέσουν μεταβλητές σχεδίασης. Κατά συνέπεια παρότι το μοντέλο αυτό προέρχεται από αυτή τη σειρά η βέλτιστη γεωμετρία δεν θα ταυτίζεται με κανένα από τα μοντέλα της εκτός αν αυτό συμβεί τυχαία. Το μοντέλο της σειράς από το οποίο θα ληφθούν οι βασικές γραμμές σχεδίασης είναι το πατρικό με λόγο κυρίων διαστάσεων $L/B = 5,5$. Οι κύριες διαστάσεις του φαίνονται στη συνέχεια.

$$L_{OA}(\text{ολικό μήκος}) = 3,82 \text{ m}$$

$$L_{WL}(\text{μήκος ισάλου}) = 3,497 \text{ m}$$

$$B(\text{μέγιστο πλάτος}) = 0,695 \text{ m}$$

$$T(\text{μέσο βύθισμα}) = 0,097 \text{ m}$$

$$\frac{L}{B} = 5,496$$

Το σκάφος που θα μοντελοποιηθεί είναι κλίμακας 30:1 ως προς το μοντέλο και άρα έχει τις ακόλουθες διαστάσεις :

$$L_{OA}(\text{ολικό μήκος}) = 114,6 \text{ m}$$

$$L_{WL}(\text{μήκος ισάλου}) = 104,9 \text{ m}$$

$$B(\text{μέγιστο πλάτος}) = 20,85 \text{ m}$$

$$T(\text{μέσο βύθισμα}) = 2,91 \text{ m}$$

$$\frac{L}{B} = 5,496$$

Κεφάλαιο 5. Παραμετρική μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση

Στο κεφάλαιο αυτό θα πραγματοποιηθεί η περιγραφή της διαδικασίας μοντελοποίησης και βελτιστοποίησης της γάστρας της συστηματικής σειράς ΕΜΠ. Η παραμετρική μοντελοποίηση αφορά εξ' ορισμού μια διαδικασία σχεδίασης κατά την οποία τα χαρακτηριστικά μεγέθη της γάστρας αντί να εισαχθούν ως σταθερά, τίθενται ως παράμετροι που μπορούν να μεταβάλλονται μεταξύ ενός εύρους τιμών, το οποίο καθορίζεται από γεωμετρικούς κατά κανόνα περιορισμούς. Σκοπός είναι η εύρεση της γεωμετρίας εκείνης που χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο συγκεκριμένων τιμών παραμέτρων και αποτελεί τη βέλτιστη μεταξύ των υπολοίπων. Σημειώνεται πως το ολικό βέλτιστο σύνολο δεν προκύπτει κατ' ανάγκη από τον συνδυασμό των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων κατά την αναζήτηση της βέλτιστης τιμής τους μεμονωμένα.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης απαιτεί πρωτίστως την παραμετρική σχεδίαση μιας γεωμετρίας αλλά και τον προσδιορισμό και αξιολόγηση συγκεκριμένων κριτηρίων που επιθυμείται να ελαχιστοποιηθούν και βάσει των οποίων θα γίνει η βελτιστοποίηση. Τα βήματα μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης φαίνονται στη συνέχεια :

1. Παραμετρική σχεδίαση της γάστρας
2. Διακύμανση των μεταβλητών και παραγωγή διαφορετικών γεωμετριών
3. Υπολογισμός των τιμών των κριτηρίων βελτιστοποίησης
4. Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από γενετικό αλγόριθμο
5. Παραγωγή νέων σχεδιάσεων
6. Επανάληψη των βημάτων 3 ως 5

Το κάθε ένα από αυτά τα βήματα πραγματοποιείται από ένα ή περισσότερα λογισμικά που θα περιγραφούν στη συνέχεια.

Παραμετρική σχεδίαση

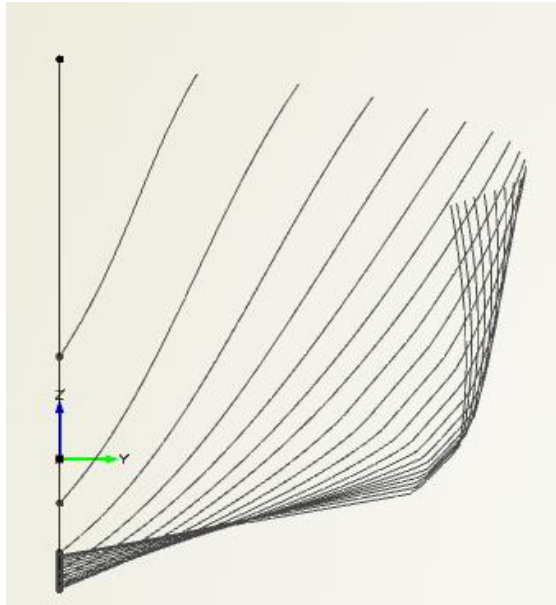
Η παραμετρική σχεδίαση της αρχικής γάστρας έγινε με χρήση του λογισμικού Friendship Framework¹⁷. Η σχεδίαση ξεκινά με δημιουργία βασικών καμπυλών που περιγράφουν είτε πραγματικές καμπύλες της γάστρας είτε συναρτήσεις των οποίων η τεταγμένες δίνουν τιμές μεταβλητών και παραμέτρων του σκάφους κατά οποιαδήποτε διεύθυνση. Ενώ η χρησιμότητα των πρώτων είναι προφανής, οι καμπύλες που αναπαριστούν τη γραφική απεικόνιση

¹⁷ Friendship Systems

συναρτήσεων, χρησιμεύουν στην διασφάλιση συνέχειας των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του σκάφους που δεν είναι δυνατόν να οριστούν σε άπειρα σημεία και κατ' επέκταση θα πρέπει να λαμβάνουν τιμές από σημεία συνεχών και ομαλών καμπυλών.

Σε ένα παραμετρικά σχεδιασμένο σκάφος, οι καμπύλες που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο και προσδιορίζουν τα γεωμετρικά του χαρακτηριστικά προσδιορίζονται είτε από τιμές παραμέτρων είτε από τιμές μεταβλητών σχεδίασης ή από κάποιες σταθερές τιμές. Παράμετροι ονομάζονται όλα τα μεγέθη που δεν έχουν σταθερή τιμή και μπορεί να είναι συντεταγμένες σημείων, σημεία ελέγχου καμπυλών, κύριες διαστάσεις, εμβαδά επιφανειών, γωνίες, αδιάστατοι συντελεστές, σημεία τομής γεωμετρικών οντοτήτων κλπ. Οι παράμετροι μπορεί να είναι ανεξάρτητες ή εξαρτημένες ανάλογα με το αν η τιμή τους επηρεάζεται ή όχι, από άλλες παραμέτρους, μεταβλητές σχεδίασης και σταθερά μεγέθη. Η τιμή των εξαρτημένων παραμέτρων μεταβάλλεται όταν μεταβάλλεται μια ή περισσότερες τιμές παραμέτρων ή μεταβλητών σχεδίασης από τις οποίες εξαρτάται. Μεταβλητές σχεδίασης μπορεί να αποτελούν μόνο ανεξάρτητες παράμετροι, ενώ η υπόσταση, η τιμή και το εύρος μεταβολής τους καθορίζεται από τον χρήστη. Όλες οι μεταβλητές σχεδίασης μπορούν να αποτελούν παραμέτρους και σίγουρα ανεξάρτητες, αλλά το αντίστροφο δεν ισχύει. Επίσης όλες οι ανεξάρτητες παράμετροι που δεν θα τεθούν ως μεταβλητές σχεδίασης, θα λειτουργήσουν ως σταθερά μεγέθη εφόσον δεν εξαρτώνται από άλλες παραμέτρους. Η χρησιμότητα των μεταβλητών σχεδίασης έγκειται στην δυνατότητα που δίνουν στον χρήστη, να προσδιορίζει ένα άπειρο σύνολο δυνατών γεωμετριών που απαρτίζεται από οποιονδήποτε συνδυασμό μεταβλητών σχεδίασης εντός ενός συνεχούς διαστήματος πραγματικών αριθμών για κάθε μία. Το εύρος διαστήματος των μεταβλητών σχεδίασης θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να συντίθενται εφικτές γεωμετρίες για οποιονδήποτε συνδυασμό τους. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι ενώ για το εύρος διαστήματος μεταβολής μιας μεταβλητής μπορεί να παράγονται εφικτές σχεδιάσεις, μπορεί να μην ισχύει το ίδιο για το ίδιο διάστημα αυτής της μεταβλητής αν έχουμε ταυτόχρονη μεταβολή και άλλων μεταβλητών σχεδίασης.

Στην επόμενη εικόνα φαίνονται οι γραμμές των εγκαρσίων τομών του παραμετρικά σχεδιασμένου σκάφους όπως έχουν διαμορφωθεί στο περιβάλλον του Framework.



Εικόνα 5.1 Εγκάρσιες τομές παραμετρικά σχεδιασμένης γάστρας στο περιβάλλον Framework

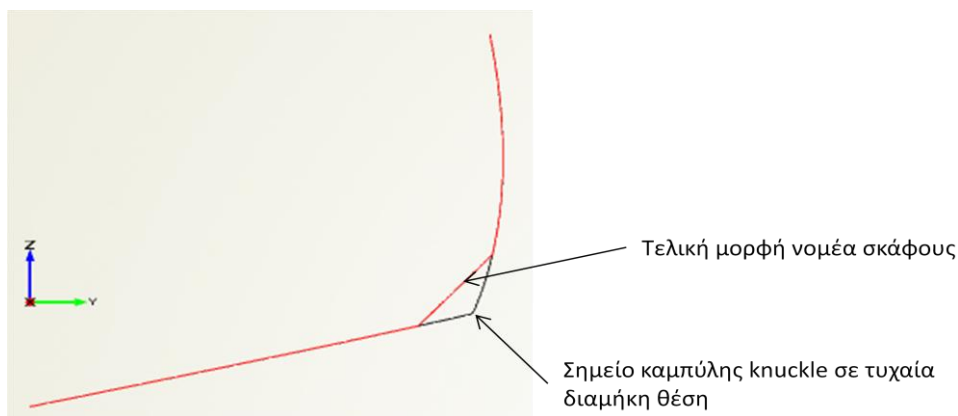
Στη συνέχεια θα πρέπει να προσδιοριστεί το σύστημα συντεταγμένων σύμφωνα με τον οποίο έχουν προσδιοριστεί όλα τα χαρακτηριστικά του σκάφους. Η αρχή των αξόνων βρίσκεται στο μέσον της εγκάρσιας τομής στη διαμήκη θέση του καθρέφτη, και στο ύψος της ισάλου. Ο άξονας x εκτείνεται προς την πλώρη και κείται στο διάμηκες επίπεδο συμμετρίας. Ο άξονας y εκτείνεται κατά το πλάτος και κείται πάνω στο επίπεδο της ισάλου και όπως προκύπτει από αυτά ο άξονας z εκτείνεται κάθετα στην ισάλο, κείται στο εγκάρσιο επίπεδο στη διαμήκη θέση του καθρέφτη και με φορά προς τα πάνω.

Οι καμπύλες που αποτελούν ή προσδιορίζουν τμήμα της γεωμετρίας του σκάφους αναφέρονται επιγραμματικά στη συνέχεια και ακολούθως θα αναλυθούν.

- Καμπύλη sheer
- Καμπύλη deck
- Καμπύλη CPC (Center Plane Curve)
- Καμπύλες knuckle

Οι παραπάνω καμπύλες έχουν πραγματική γεωμετρική υπόσταση με εξαίρεση την τελευταία η οποία αν και δεν ανήκει σε κάποιο σημείο της γάστρας ορίζει τη θέση και τη διεύθυνση χαρακτηριστικών σημείων αυτής και αυτός είναι ο λόγος που τίθεται σε αυτή την κατηγορία. Οι καμπύλες αυτές μπορεί να είναι ενιαίες ή να ορίζονται από τμήματα κατά μήκος στους κοινούς κόμβους των οποίων έχει τεθεί απαίτηση συνέχειας εφαπτομενικού διανύσματος (συνέχεια C^1).

Αρχικά η καμπύλη sheer αποτελεί την διαμήκη ανύψωση του περιγράμματος του καταστρώματος. Ορίζει δηλαδή αποκλειστικά και μόνο την κατηγμένη z κάθε σημείου αυτής της καμπύλης. Η καμπύλη deck ορίζει την εγκάρσια θέση του περιγράμματος αυτού και ως εκ τούτου οι δύο αυτές καμπύλες μαζί ορίζουν την θέση του περιγράμματος του καταστρώματος στο χώρο. Η καμπύλη CPC αποτελεί την τομή της γάστρας με το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας. Ορίζεται τμηματικά από τρεις καμπύλες ώστε η πρώτη να αφορά την τρόπιδα μέχρι ένα χαρακτηριστικό σημείο, η δεύτερη από αυτό το σημείο μέχρι την προραία κάθετο και η τρίτη τα ύφαλα μέχρι την πλώρη. Το χαρακτηριστικό αυτό σημείο αποτελεί μέσο προσδιορισμού του βυθίσματος όπως θα εξηγηθεί κι αργότερα. Οι καμπύλες knuckle αποτελούνται από τέσσερις καμπύλες, δύο από τις οποίες δίνουν την τεταγμένη και κατηγμένη του σημείου τομής των προεκτάσεων των καμπυλών εκατέρωθεν του ευθύγραμμου τμήματος που ενώνει τις δύο ακμές, κατά τη διαμήκη διεύθυνση και μέχρι το σημείο στο οποίο οι δύο ακμές ενώνονται. Οι άλλες δύο είναι συμπληρωματικές καμπύλες που ορίζονται προκειμένου να δοθεί η τιμή της γωνίας των δύο νοητών προεκτάσεων στο σημείο τομής τους. Ως εκ τούτου στο νοητό σημείο τομής έχουμε γεωμετρική συνέχεια μηδενικής τάξης (C^0) και η καμπύλη knuckle αποτελεί το γεωμετρικό τόπο των σημείων αυτών κατά μήκος του σκάφους. Για να κατανοηθεί καλύτερα καμπύλη knuckle παρατίθεται ένα σχήμα.



Εικόνα 5.2 Προσδιορισμός της καμπύλης knuckle

Η γωνία και η θέση του ευθυγράμμου τμήματος που ενώνει τις ακμές και αποτελεί τμήμα της τελικής μορφής του νομέα ορίζεται από τις καμπύλες bevel που ανήκουν στην κατηγορία των συναρτήσεων και θα επεξηγηθούν στη συνέχεια.

Οι καμπύλες που έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα αποτελούν καμπύλες splines οι οποίες ορίζονται από τις συντεταγμένες των ακραίων σημείων τους και τη γωνία της εφαπτομένης στα ακραία αυτά σημεία με έναν από τους δύο άξονες που ορίζουν το επίπεδο στο οποίο

κείνται αυτές οι καμπύλες. Οι καμπύλες splines είναι εξαιρετικά χρήσιμες λόγω της ευκολίας χρήσης τους σε περιπτώσεις που δεν είναι γνωστά κι ενδεχομένως δεν ενδιαφέρει να προσδιοριστούν σημεία ελέγχου όπως συμβαίνει με τις καμπύλες B-splines και NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines). Επιπρόσθετες απαιτήσεις του σχεδιαστή για αυτές τις καμπύλες που μπορούν να ορισθούν, είναι το εμβαδό επιφανείας μεταξύ της καμπύλης και ενός εκ των δύο αξόνων του επιπέδου στο οποίο βρίσκονται καθώς και το γεωμετρικό κέντρο αυτής της επιφάνειας που προκύπτει από το θεώρημα των πρώτων ροπών. Το εμβαδό επιφανείας είναι αρκετά χρήσιμο καθώς μπορεί να μεταβάλει την καμπύλη, διατηρώντας τη συνέχεια πρώτης τάξης κατά μήκος της (C^1) με συνέπεια την ομαλή μεταβολή παραμέτρων και γεωμετρικών μεγεθών που εξαρτώνται από αυτή.

Οι σημαντικότερες από τις καμπύλες που ορίζουν τα υπόλοιπα στοιχεία του σκάφους είναι οι ακόλουθες :

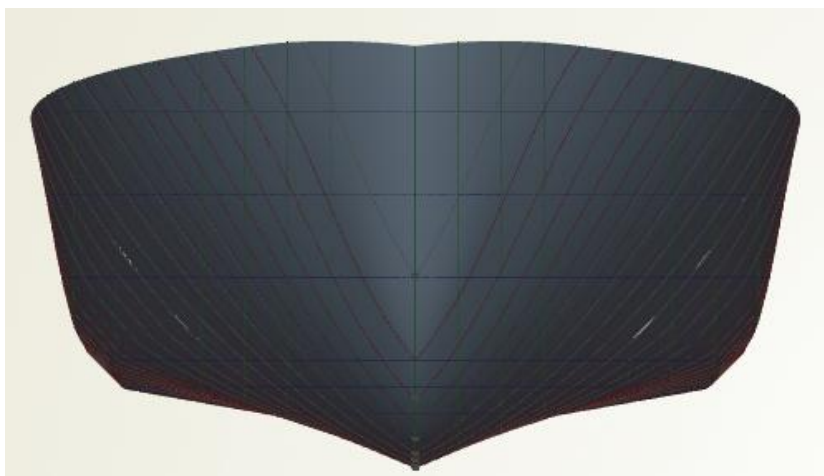
- Καμπύλη forX
- Καμπύλες bevel
- Καμπύλη tanAtCPC
- Καμπύλη tanAtDeck

Η καμπύλη forX αποτελεί την απλούστερη από τις παραπάνω καθώς είναι μια ευθεία που κείται στο επίπεδο xy και έχει κλίση 45° . Κατά συνέπεια η τεταγμένη της είναι ίση σε κάθε σημείο με την τετμημένη της, με αποτέλεσμα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απόδοση τιμών της διαμήκουσ θέσης σε άλλες συναρτήσεις που μεταβάλλονται κατά μήκος. Η αξία της προκύπτει αποκλειστικά από τις απαιτήσεις λειτουργίας του λογισμικού. Οι καμπύλες bevel είναι δύο και ορίζουν την κλίση του ευθυγράμμου τμήματος που ενώνει τις ακμές και την απόσταση των σημείων της καμπύλης knuckle από το σημείο της κάθετης προβολής των σημείων αυτών στο εύγραμμο τμήμα που ενώνει τις ακμές. Οι καμπύλες tanAtCPC και tanAtDeck ορίζουν τις γωνίες των επαπτόμενων των νομέων στα σημεία τομής με τις καμπύλες CPC και deck αντίστοιχα.

Αφού οριστούν όλες οι παραπάνω καμπύλες, χρησιμοποιούνται από συναρτήσεις ορισμού (feature definitions) οι οποίες μπορούν να κατασκευάσουν νομείς σε οποιαδήποτε διαμήκη θέση κατά μήκος τμημάτων του σκάφους όπου οι νομείς ορίζονται από το ίδιο σύνολο παραμέτρων. Για παράδειγμα το τμήμα του σκάφους μέχρι το σημείο στο οποίο εκτείνονται οι ακμές θα οριστεί με διαφορετική συνάρτηση από το προωαίο τμήμα. Για τον προσδιορισμό του συνόλου των νομέων απαιτούνται τρεις συνολικά τέτοιες συναρτήσεις. Η πρώτη αφορά

το πυρναίο τμήμα και μέχρι το σημείο όπου οι δύο ακμές ενώνονται, η δεύτερη το τμήμα μέχρι την προραία κάθετο και τέλος η τρίτη τα έξαλλα μέχρι την πλώρη.

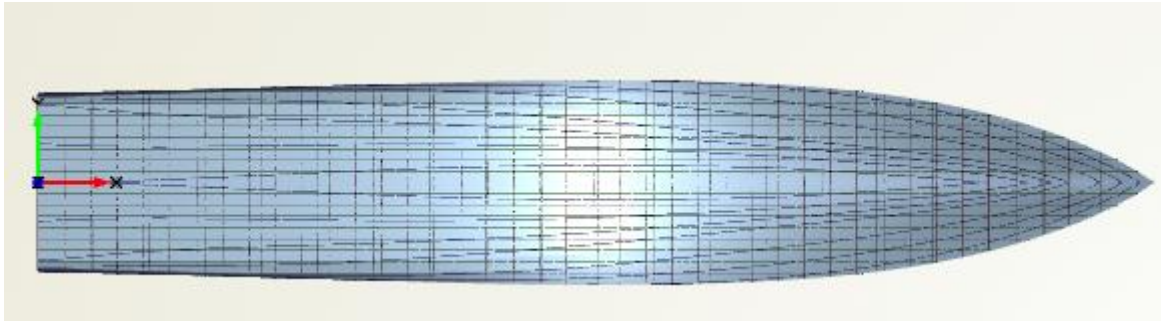
Οι συναρτήσεις αυτές χρησιμοποιούνται από άλλες συναρτήσεις κατασκευής καμπυλών στις οποίες ορίζονται τα διαστήματα στα οποία επιθυμείται να εκτείνονται οι επιφάνειες που αποτελούν τη διαμήκη ολοκλήρωση των καμπυλών αυτών. Στην προκειμένη περίπτωση οι επιφάνειες που ορίζουν τη γάστρα είναι κατά μία περισσότερες από τις συναρτήσεις. Ο λόγος είναι πως προστέθηκε μια επιφάνεια μεταξύ του σημείου συνένωσης των ακμών και του πυρναίου τμήματος επιφανείας, προκειμένου να εξασφαλιστεί ομαλότητα στην συνολική επιφάνεια. Ο ρόλος δηλαδή αυτής της επιφάνειας είναι να παρέχει συνέχεια μεταξύ των επιφανειών του πυρναίου και προραίου τμήματος. Όπως μπορεί να φανεί και από το σχέδιο εγκάρσιων τομών της συστηματικής σειράς ΕΜΠ, η απόσταση των ακμών είναι φθίνουσα συνάρτηση της διαμήκου θέσης ωστόσο δεν τέμνονται σε κανένα σημείο και κατ' επέκταση η πρόσθετη επιφάνεια δεν δημιουργεί κάποιο σφάλμα. Η επιφάνεια αυτή έχει ακριβώς αυτά τα χαρακτηριστικά που τις επιτρέπουν να εξασφαλίζει συνέχεια εκατέρωθεν αυτής και δεν προσδιορίζεται από καμπύλες όπως οι υπόλοιπες. Η συνολική επιφάνεια που προκύπτει φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικόνα 5.3.α Προβολή yz της επιφάνειας της γάστρας



Εικόνα 5.3.β Προβολή xz της επιφάνειας της γάστρας



Εικόνα 5.3.γ Προβολή xy της επιφάνειας της γάστρας

Επιπλέον επιφάνειες αποτελούν το κατάστρωμα και ο καθρέφτης που ορίζονται από την ολοκλήρωση κατά τον άξονα x και z αντίστοιχα απλών ευθυγράμμων τμημάτων των οποίων τα άκρα κινούνται στις ακμές των συνοριακών επιφανειών για κάθε περίπτωση.

Η γεωμετρία του σκάφους που παρουσιάστηκε παραπάνω είναι κατασκευασμένη εξ' ολοκλήρου παραμετρικά. Αυτό σημαίνει πως κάθε μια από τις επιφάνειες που απαρτίζουν το σκάφος είναι συνάρτηση εξαρτημένων κι ανεξάρτητων παραμέτρων, μεταβλητών σχεδίασης και σταθερών μεγεθών, μέσω μιας πολυκλαδικής αλυσιδωτής σχέσης. Εξαιτίας αυτών των πολύπλοκων συνδέσεων είναι αδύνατον να καταγραφούν όλες οι αλληλοσυσχετίσεις των στοιχείων που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή της τελικής γεωμετρίας.

Παραγωγή γεωμετριών

Η παραγωγή των γεωμετριών πραγματοποιείται από τον γενετικό αλγόριθμο μέσω της διακύμανσης των μεταβλητών. Η διακύμανση των μεταβλητών πραγματοποιείται μέσω στοχαστικών διαδικασιών καθώς οι βέλτιστες τιμές τους είναι άγνωστες πριν την αξιολόγηση των κριτηρίων βελτιστοποίησης. Όσον αφορά τη παραγωγή της πρώτης γενιάς η διακύμανση των μεταβλητών είναι τυχαία και δεν βασίζεται σε κάποιον κανόνα. Για όλες τις επόμενες γενιές οι γεωμετρίες παράγονται μέσω των διαδικασιών της διασταύρωσης και της μετάλλαξης που αναλύθηκαν εκτενώς στο κεφάλαιο που γίνεται η περιγραφή της λειτουργίας του γενετικού αλγορίθμου. Οι παράμετροι που θα αποτελέσουν μεταβλητές σχεδίασης θα επιλεγούν ανάλογα με τις εκάστοτε απαιτήσεις.

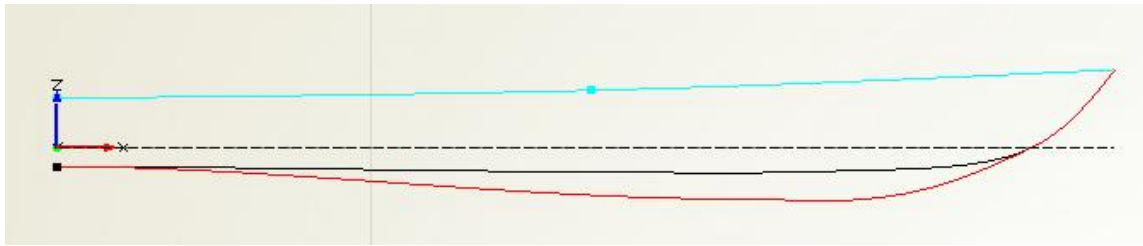
Βελτιστοποίηση θα πραγματοποιηθεί για δύο περιπτώσεις εκ των οποίων η μια θα είναι δύο σταδίων. Στο πρώτο στάδιο θα τεθούν ως μεταβλητές σχεδίασης, οι κύριες διαστάσεις εκτός από το κοίλο το οποίο δεν επηρεάζει άμεσα την πλεύση. Η επιρροή του άπτεται κυρίως του βάρους του σκάφους ωστόσο στα πλαίσια του παρόντος εξετάζεται η υδροδυναμική της γάστρας όπου το βάρος σχετίζεται με το γεωμετρικό εκτόπισμα, που μεταβάλλεται αποκλειστικά και μόνο από την επιρροή των κυρίων διαστάσεων στον όγκο των υφάλων. Η

συμμετοχή μιας ενδεχόμενης διαφοροποίησης του κοίλου στην υδροδυναμική συμπεριφορά του σκάφους περιορίζεται στην μεταβολή των καμπυλών spline των οποίων ακραία σημεία βρίσκονται στο κατάστρωμα, λόγω της καθ' ύψος μετακίνησης του τελευταίου. Το δεύτερο σημείο των καμπυλών αυτών βρίσκεται πάνω στην καμπύλη knuckle κι επομένως ακόμα και αυτή η αμελητέα επιρροή αφορά μόνο ένα μικρό τμήμα, λίγων πρυμναίων νομέων. Συνεπώς η επιρροή του κοίλου στην πλευση του σκάφους είναι ανάξια λόγου στην παρούσα μελέτη. Στο πρώτο λοιπόν στάδιο βελτιστοποίησης οι μεταβλητές σχεδίασης είναι αυτές που φαίνονται στη συνέχεια.

- Μήκος μεταξύ καθέτων ή μήκος ισάλου (L_{BP} ή L_{WL})
- Μέγιστο πλάτος (B)
- Μέγιστο βύθισμα (T)

Το μήκος μεταξύ καθέτων αποτελεί εκ' κατασκευής, παράμετρο που μεταβάλλει το μήκος ισάλου καθώς μετακινεί το σημείο της προραίας καθέτου. Η δεύτερη μεταβλητή σχεδίασης είναι στην πραγματικότητα το μέγιστο πλάτος του σκάφους στο ύψος του καταστρώματος. Ωστόσο η εγκάρσια διάσταση που καθορίζει την υδροδυναμική συμπεριφορά του σκάφους είναι το πλάτος ισάλου το οποίο όμως επηρεάζεται έμμεσα από το πλάτος του σκάφους στο ύψος του καταστρώματος. Στην πραγματικότητα το πλάτος ισάλου δεν μπορεί να αποτελέσει μεταβλητή σχεδίασης καθώς εκτός του γεγονότος ότι διαφέρει σημαντικά κατά το διάμηκες, περεταίρω διαφοροποίηση του επέρχεται με τη μεταβολή του βυθίσματος και της δυναμικής διαγωγής λόγω μεταβολής της ταχύτητας. Κατά συνέπεια δεν υπάρχει και δεν μπορεί να οριστεί, συγκεκριμένη παράμετρος επιρροής του, πολλώ δε μάλλον ανεξάρτητη.

Το βύθισμα αποτελεί μεταβλητή που ορίζεται διαφορετικά από τις συνήθεις περιπτώσεις. Στις συμβατικές γάστρες τα διαφορετικά βυθίσματα αποτελούν παράλληλα επίπεδα που τέμνουν μια, κατά τα άλλα, αμετάβλητη γεωμετρία. Στην περίπτωση του ταχυπλόου που εξετάζεται το βύθισμα αποτελεί τη μέγιστη απόσταση της τρόπιδας από μια αμετάβλητη ίσαλο. Στην πραγματικότητα δηλαδή μεταβάλλοντας το βύθισμα, μεταβάλλεται η κατηγμένη του σημείου μεταξύ του πρώτου και δεύτερου τμήματος (σημείο μεγίστου βυθίσματος), της καμπύλης που προκύπτει από το σημείο τομής της γάστρας με το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας (δηλαδή της καμπύλης Center Plane Curve). Για την αποσαφήνιση της ιδιαιτερότητας αυτής παρατίθεται ένα σχήμα και στη συνέχεια θα εξηγηθεί ο λόγος που έχει επιλεγεί αυτός ο ιδιαίτερος γεωμετρικός προσδιορισμός.



Εικόνα 5.4 Διαμήκης τομή γεωμετριών διαφορετικού βυθίσματος

Στην παραπάνω εικόνα βλέπουμε πως το βύθισμα καθορίζει μόνο τη γεωμετρία και όχι την ίσαλο η οποία φαίνεται με διακεκομμένη γραμμή και παραμένει σταθερή και για τις δύο περιπτώσεις. Φαίνεται επίσης πως το σημείο της προαίας καθέτου και το βύθισμα στον καθρέφτη παραμένουν σταθερά και ανεξάρτητα του βυθίσματος που τίθεται ως μεταβλητή σχεδίασης. Σημειώνεται επίσης πως σε αυτή την περίπτωση το βύθισμα του καθρέφτη αποτελεί ξεχωριστή και ανεξάρτητη παράμετρο. Το σημείο στην προαία κάθετο αποτελεί εξ' ορισμού σημείο με μηδενικό βύθισμα. Στην πραγματικότητα δηλαδή, ορίζεται το σημείο από αυτή την ιδιότητα και όχι το βύθισμα του σκάφους από αυτό το σημείο. Κατά την γεωμετρική αναπαράσταση στο λογισμικό Friendship Framework, το σημείο αυτό έχει συντεταγμένες στις τρεις διαστάσεις και η καθ' ύψος θέση του αποτελεί σταθερό αριθμό. Κατά συνέπεια η καμπύλη της τομής του σκάφους με το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας, αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα στο οποίο έχουμε συνύπαρξη παραμέτρων, μεταβλητών σχεδίασης και σταθερών τιμών που αναφέρθηκε νωρίτερα ότι αποτελούν τα τρία χαρακτηριστικά στα οποία κατ' αρχήν βασίζεται η σχεδίαση της γάστρας.

Σε συμβατικά σκάφη εκτοπίσματος η τρόπιδα είναι εν γένει ευθύγραμμη ή με πολύ μικρές μεταβολές της γωνίας της σε όλο το μήκος. Επιπρόσθετα η σημαντική διαφοροποίηση της μορφής της τρόπιδας κατά μήκος μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην εσωτερική διάταξη που είναι κρίσιμη για το φορτίο. Εν αντιθέσει στα ταχύπλοα σκάφη η διαμήκης μορφή της τρόπιδας, και ότι εξαρτάται από αυτή, επηρεάζει άμεσα την υδροδυναμική συμπεριφορά κατά την πλεύση και κυρίως τις αναπτυσσόμενες υδροδυναμικές δυνάμεις. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος για τον οποίο έχουν οριστεί διαφορετικές παράμετροι που δίνουν το βύθισμα σε δύο σημεία κατά μήκος. Επιπλέον το βύθισμα στον καθρέφτη σχετίζεται με το φαινόμενο της δυναμικής αναρρόφησης που όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο έχει άμεση επιρροή στην αντίσταση.

Όπως προαναφέρθηκε οι γραμμές της αρχικής σχεδίασης ανήκουν στην πατρική της συστηματικής σειράς ΕΜΠ με λόγο $L/B = 5,5$. Επισημαίνεται πως στον λόγο αυτό το μήκος αντιστοιχεί στο ολικό μήκος και όχι στο μήκος ισάλου. Οι κύριες διαστάσεις της αρχικής

γεωμετρίας έχουν προαναφερθεί και το εύρος μεταβολής τους θα είναι περίπου $\pm 5\%$ των αρχικών. Σε αυτό το εύρος αφενός προκύπτουν εφικτές γεωμετρίες και αφετέρου όλες έχουν λόγους L/B εντός των ακραίων αντίστοιχων τιμών της συστηματικής σειράς. Στον επόμενο πίνακα φαίνονται οι αρχικές τιμές και το εύρος των κυρίων διαστάσεων για το πρώτο στάδιο βελτιστοποίησης.

	Αρχική τιμή	Κατώτατο όριο	Ανώτατο όριο
Μήκος ισάλου	104,9	94,4	115,39
Πλάτος	20,85	18,765	22,935
Βύθισμα	2,91	2,619	3,2

Πίνακας 5.1 Αρχικές τιμές κι εύρος των μεταβλητών σχεδίασης πρώτου σταδίου

Το εύρος των μεταβλητών σχεδίασης εξασφαλίζει πως θα έχουμε εφικτές σχεδιάσεις όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα. Παρότι όλες οι γεωμετρίες θα έχουν αποδεκτές διαστάσεις μπορεί να έχουν εκτόπισμα που τις καθιστά ανόμοιες με τις υπόλοιπες. Κατά συνέπεια η οποία σύγκριση απαιτείται να γίνει αποκλειστικά μεταξύ γεωμετρικά παραπλήσιων σχεδιάσεων. Συνεπώς θα τεθεί κι ένας περιορισμός που θα αφορά την ποσοστιαία μεταβολή του εκτοπίσματος ως προς αυτό της πατρικής γεωμετρίας και συγκεκριμένα θα απαιτείται να είναι μικρότερο από 5%. Όσες γεωμετρίες δεν πληρούν αυτή την απαίτηση απορρίπτονται και δεν εξετάζεται η συσχέτιση τους με τις υπόλοιπες όσον αφορά τα δύο κριτήρια βελτιστοποίησης.

Το δεύτερο στάδιο βελτιστοποίησης θα πραγματοποιηθεί για δύο περιπτώσεις με ίδιες όμως μεταβλητές σχεδίασης. Στην πρώτη θα εξεταστεί η βελτιστοποίηση της πατρικής γάστρας ως προς διαφορετικές και πιο λεπτομερείς μεταβλητές σχεδίασης ενώ στη δεύτερη θα χρησιμοποιηθεί η βέλτιστη γεωμετρία του πρώτου σταδίου με τις βέλτιστες μεταβλητές σχεδίασης αυτού, να αποτελούν πλέον σταθερά μεγέθη. Η βελτιστοποίηση με γνώμονα τις κύριες διαστάσεις είναι στην πραγματικότητα προσπάθεια εύρεσης μιας καλής σχεδίασης από άποψη γενικών χαρακτηριστικών. Στο δεύτερο στάδιο οι μεταβλητές σχεδίασης θα αποτελέσουν γεωμετρικά στοιχεία της γάστρας των οποίων η διακύμανση προκαλεί μικρομεταβολές της γεωμετρίας, όπως χαρακτηριστικές γωνίες και σχεδιαστικές λεπτομέρειες. Συγκεκριμένα οι μεταβλητές των οποίων η βέλτιστη τιμή θα αναζητηθεί είναι οι εξής :

- Γωνία επαφτομένης της γάστρας στην προωαία κάθετο
- Απόσταση μεταξύ των ακμών
- Γωνία ανύψωσης πυθμένα στο προωαίο τμήμα (deadrise angle)

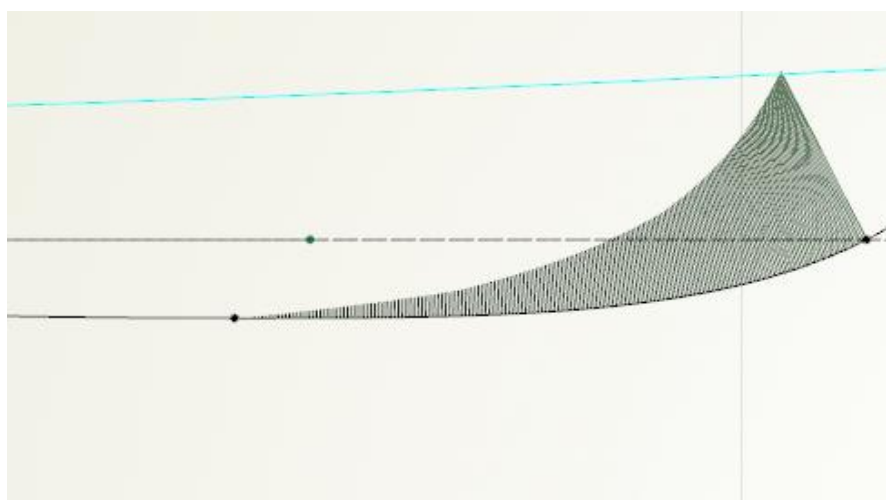
- Γωνία εφαπτομένης στο κατάστρωμα στο επίπεδο yz (flare at deck)
- Διαμήκης θέση σημείου μεγίστου βυθίσματος
- Βύθισμα στον καθρέφτη
- Εμβαδό επιφανείας καταστρώματος στο προωαίο τμήμα

Η γωνία της εφαπτομένης της γάστρας στην προωαία κάθετο επηρεάζεται μέσω της τεταγμένης του σημείου της καμπύλης που δίνει τη γωνία της εφαπτομένης της γάστρας με το εγκάρσιο επίπεδο, στο σημείο τομής της με το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας και στο σημείο τομής της καμπύλης αυτής με την ίσαλο. Η απόσταση μεταξύ των ακμών επηρεάζεται από την απόσταση του σημείου knuckle από την προβολή του στο ευθύγραμμο τμήμα μεταξύ των ακμών και συγκεκριμένα στη θέση του καθρέφτη. Η διαμήκης κατανομή της προαναφερθείσας απόστασης ορίζεται από μια φθίνουσα γραμμική συνάρτηση που μηδενίζει την τιμή της σε μήκος περίπου 74% του μήκους ισάλου. Κατά συνέπεια ενώ ο ρυθμός μεταβολής της απόστασης αυτής δεν θα αποτελέσει μεταβλητή, θα διαφοροποιηθεί μέσω της διακύμανσης της αλγεβρικής τιμής της στον καθρέφτη. Η γωνίας ανύψωσης πυθμένα είναι στην πραγματικότητα η γωνία της εφαπτομένης της γάστρας στο σημείο τομής της με το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας. Για τον ορισμό αυτής της γωνίας χρησιμοποιούνται δύο καμπύλες spline των οποίων το σημείο συνένωσης βρίσκεται περίπου στο 60% του μήκους μεταξύ καθέτων. Η τιμή της μεταβάλλεται θέτοντας ως μεταβλητή το εμβαδό επιφανείας της προωαίας καμπύλης με τον άξονα y. Αυτό έχει σαν συνέπεια την ομαλή μεταβολή της γωνίας ανύψωσης πυθμένα σε όλο το μήκος που ορίζεται από τα δύο ακραία σημεία της καμπύλης αυτής. Αντίστοιχη είναι και η διαδικασία μεταβολής της γωνίας της εφαπτομένης στη γάστρα στο ύψος του καταστρώματος. Οι δύο τελευταίες γωνίες επηρεάζουν από κοινού την προωαία κατανομή του εμβαδού εγκαρσίων τομών, δηλαδή την προωαία κατανομή εκτοπίσματος. Αντίστοιχη μεταβολή προκαλεί και η διακύμανση της διαμήκους θέσης του σημείου μεγίστου βυθίσματος. Το βύθισμα στον καθρέφτη θα μεταβληθεί μόνο κατά την άνω διεύθυνση καθώς η περαιτέρω βύθιση θα προκαλέσει αύξησης της αντίστασης. Η τελευταία από τις μεταβλητές που αναφέρθηκαν, επηρεάζει το εμβαδό επιφανείας μεταξύ της καμπύλης του καταστρώματος και της προβολής του άξονα x, στο επίπεδο που κείται αυτή η καμπύλη. Στον επόμενο πίνακα φαίνονται οι αρχικές τιμές και το εύρος των μεταβλητών σχεδίασης ενώ ακολούθως θα σχολιαστεί η διακύμανση τους.

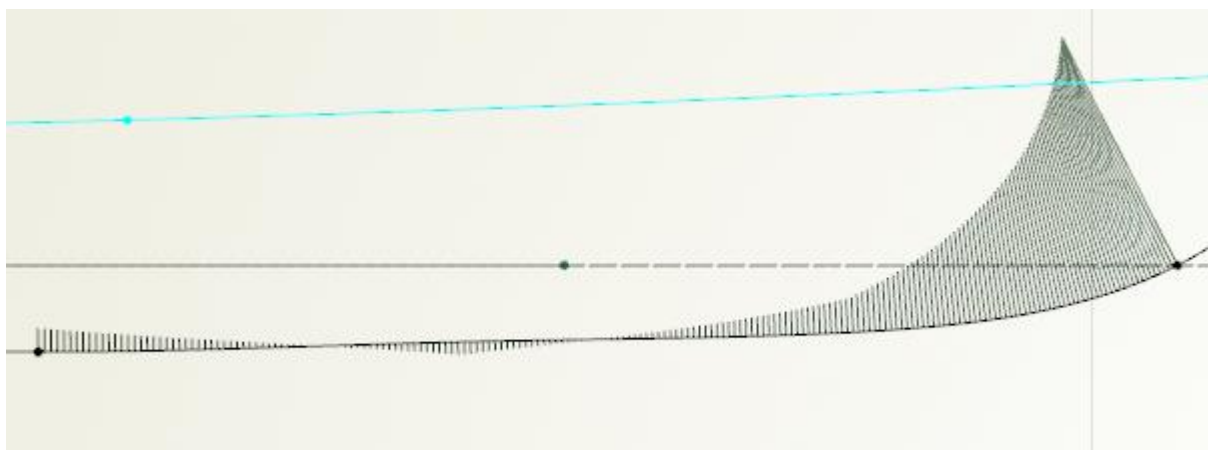
	Αρχική τιμή	Κατώτατο όριο	Ανώτατο όριο
Γωνία εφαπτομένης της γάστρας στην πρωραία κάθετο (°)	80	70	80
Απόσταση μεταξύ των ακμών (m)	0,48	0,336	0,624
Γωνία ανύψωσης πυθμένα (-)	0,8019	0,762	0,842
Γωνία εφαπτομένης στο κατάστρωμα (-)	0,8867	0,842	0,92
Διαμήκης θέση μεγίστου βυθίσματος (-)	0,7	0,7	0,76
Βύθισμα στον καθρέφτη (m)	2,25	2,138	2,25
Εμβαδό επιφανείας καταστρώματος στο πρωραίο τμήμα (m ²)	462,11	439	485,22

Πίνακας 5.2 Αρχικές τιμές κι εύρος των μεταβλητών σχεδίασης δεύτερου σταδίου

Το εύρος μεταβολής της γωνίας εισόδου στην πρωραία κάθετο ορίζεται σε -10° της αρχικής και οι μονάδες δίνονται σε μοίρες. Η απόσταση μεταξύ των ακμών καθορίζεται έμμεσα όπως προαναφέρθηκε, από το μήκος της προβολής του σημείου knuckle, το οποίο δίνεται σε μέτρα και το εύρος του ορίζεται σε ποσοστό $\pm 30\%$ του αρχικού. Η γωνία ανύψωσης πυθμένα δίνεται υπό αδιάστατη μορφή καθώς καθορίζεται από λόγο εμβαδού επιφανειών με εύρος που τίθεται σε ποσοστό $\pm 5\%$ του αρχικού, ενώ τα ίδια στοιχεία ορίζουν και την περίπτωση της γωνίας της εφαπτομένης στο κατάστρωμα. Η τιμή της διαμήκους θέσης του σημείου καθορισμού του βυθίσματος ορίζεται ως ποσοστό του μήκους ισάλου ενώ περιορίζεται σε ένα εύρος μικρότερο του $+9\%$, προκειμένου να έχουμε αποδεκτές μεταβολές της καμπυλότητας της Center Plane Curve. Στις επόμενες εικόνες φαίνεται το αποτέλεσμα αποδεκτών και μη, μεταβολών της θέσης αυτού του σημείου.



Εικόνα 5.5.α Ομαλή μεταβολή καμπυλότητας της καμπύλης CPC, για θέση σημείου μεγίστου βυθίσματος σε απόσταση 70% του μήκους ισάλου.



Εικόνα 5.5.β Αλλαγή καμπυλότητας της καμπύλης CPC, για θέση σημείου μεγίστου βυθίσματος πρύμνηθεν του 70% του μήκους ισάλου.

Το βύθισμα στον καθρέφτη δίνεται σε μέτρα και όπως αναφέρθηκε προηγούμενα η μοναδική μεταβολή που θα υποστεί, θα είναι μείωση καθώς σε αντίθετη περίπτωση θα έχουμε αύξηση της αντίστασης. Σημειώνεται πως το βύθισμα στον καθρέφτη επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το εκτόπισμα αφενός διότι καθορίζει σημαντικό μέρος από το πρυμναίο βύθισμα, και αφετέρου διότι εκεί έχουμε μεγάλο πλάτος ισάλου. Για τον περιορισμό των μεταβολών αυτών, ποσοστό μεταβολής του επιλέγεται ένα εύρος $\pm 5\%$ του αρχικού. Το εμβαδό της προωραίας επιφάνειας καταστρώματος επηρεάζει τα ύφαλα καθώς μεταβάλλει την άνω καμπύλη των νομέων στην πλώρα.

Όπως και στο πρώτο στάδιο βελτιστοποίησης θα έχουμε ορισμένους περιορισμούς προκειμένου οι παραγόμενες γεωμετρίες να αποτελούν σχεδιάσεις εντός ενός συγκεκριμένου εύρους όγκου εκτοπίσματος. Επειδή η διακύμανση των νέων μεταβλητών σχεδίασης προκαλεί μικρότερες μεταβολές στον όγκο των υφάλων, στο δεύτερο στάδιο βελτιστοποίησης θα έχουμε ένα περιορισμό διαφοράς εκτοπίσματος σε σχέση με την πατρική σχεδίαση της τάξης του 2,5%. Επιπλέον τίθεται κι ένας περιορισμός στη γωνία δυναμικής διαγωγής προκειμένου αυτή να μη ξεπερνά τις 2° . Σε ένα σκάφος της τάξης των 100 μέτρων μια μεταβολή της διαγωγής κατά 3° θα προκαλούσε εν προκειμένω (υπό την λανθασμένη απλουστευτική υπόθεση περιστροφής περί το μέσο νομέα) μια βύθιση της πρύμνης μεγαλύτερη από 2,5 μέτρα.

Τόσο το πρώτο όσο και το δεύτερο στάδιο βελτιστοποίησης θα πραγματοποιηθούν για 3 διαφορετικές ταχύτητες προκειμένου να έχουμε ένα ευρύτερο διάστημα πιθανών ταχυτήτων πλεύσης. Οι τρεις αυτές ταχύτητες είναι οι επόμενες :

- $Fn = 0.34$

- $Fn = 0.68$
- $Fn = 1.02$

Ο αριθμός Froude όπως έχει αναφερθεί νωρίτερα εξαρτάται τόσο από την ταχύτητα όσο και από το μήκος ισάλου του σκάφους. Κατ' επέκταση ενώ στο δεύτερο στάδιο βελτιστοποίησης αυτός ο αριθμός θα είναι σταθερός για όλες τις παραγόμενες γεωμετρίες, στο πρώτο θα διαφέρει εφόσον το μήκος ισάλου αποτελεί μεταβλητή σχεδίασης. Σε αυτή λοιπόν την περίπτωση η ταχύτητα πλεύσης, που θα είναι σταθερή για όλες τις γεωμετρίες, θα καθοριστεί από τον αριθμό Froude της αρχικής γεωμετρίας. Στην συνέχεια θα γίνει περιγραφή της διαδικασίας αξιολόγησης των γεωμετριών η οποία πραγματοποιείται με χρήση προγραμμάτων που έχουν δημιουργηθεί σε γλώσσα Fortran 77 και 95.

Υπολογισμός τιμών των κριτηρίων βελτιστοποίησης και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από γενετικό αλγόριθμο

Για τον υπολογισμό των τιμών των κριτηρίων βελτιστοποίησης είναι απαραίτητη η εξαγωγή δύο αρχείων από το Framework. Το πρώτο περιλαμβάνει τους νομείς κατά τη διαμήκη διεύθυνση μέσω πολλαπλών σημείων που παρεμβάλλει ο κάθε νομέας ενώ το δεύτερο περιλαμβάνει υδροστατικά στοιχεία της κάθε γεωμετρίας που παράγεται. Η διαδικασία υπολογισμού των τιμών των κριτηρίων ολοκληρώνεται με την εκτέλεση 7 συνολικά εκτελέσιμων αρχείων τα οποία φαίνονται στη συνέχεια με την ίδια σειρά που εκτελούνται.

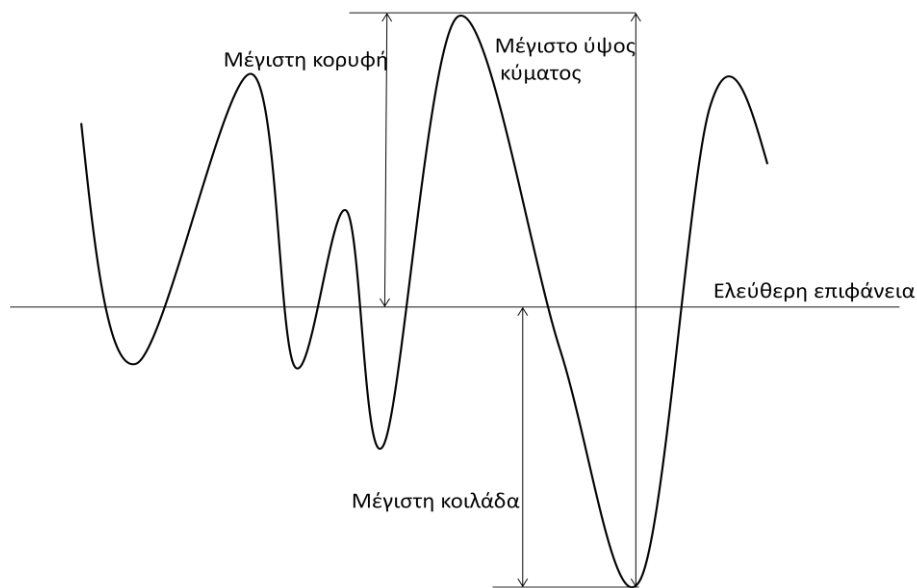
- Sections.exe
- SHF2PLN1H.exe
- Iterative.exe (SWAN)
- wavecut.exe
- SHF2FRKH.exe
- FrankH.exe
- rao_trim.exe

Το πρόγραμμα Sections.exe λαμβάνει το αρχείο που περιγράφει τη γεωμετρία της γάστρας και το μετατρέπει σε μορφή που να μπορεί να διαβαστεί από το επόμενο πρόγραμμα. Το πρόγραμμα SHF2PLN1H.exe μετατρέπει το τροποποιημένο αρχείο της γεωμετρίας σε κατάλληλη μορφή ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το πρόγραμμα SWAN¹⁸. Το πρόγραμμα SWAN εκτελείται επανειλημμένα μέσω του προγράμματος Iterative.exe μέχρις

¹⁸ Boston Marine Consulting Inc., 2001

ότου βρεθεί το βύθισμα και η διαγωγή που θα αποκτήσει το σκάφος στη συγκεκριμένη ταχύτητα που εξετάζεται.

Το βύθισμα στην προκειμένη περίπτωση αφορά το οριζόντιο επίπεδο τομής του σκάφους με την ελεύθερη επιφάνεια και δεν σχετίζεται με μεταβολή της γεωμετρίας όπως συνέβαινε στην περίπτωση της παραμετρικής μοντελοποίησης που περιγράφηκε νωρίτερα. Μετά την εύρεση του βυθίσματος και της διαγωγής του σκάφους στην ταχύτητα πλεύσης το πρόγραμμα SWAN εκτελείται για τελευταία φορά και παράγει διάφορα αρχεία. Ένα από αυτά τα αρχεία περιγράφει το πλέγμα που δημιουργείται στην επιφάνεια της εκάστοτε γεωμετρίας και στο πεδίο που βρίσκεται στο επίπεδο της ισάλου και γύρω από το σκάφος ενώ ένα δεύτερο αποτυπώνει επιπρόσθετα την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας λόγω της κίνησης του σκάφους. Στην ουσία δηλαδή μας δίνει το σύστημα των παραγόμενων κυματισμών. Από αυτό ακριβώς το αρχείο μπορεί να εκτιμηθεί αν ένα σκάφος έχει μεγαλύτερη αντίσταση κυματισμού από ένα άλλο. Η μέθοδος σύγκρισης δύο γεωμετριών ως προς την αντίσταση κυματισμών αφορά στην εύρεση του μέγιστου ύψους κύματος από το συνολικό πεδίο κυματισμών που η κάθε μια παράγει. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται αυτός ο ορισμός για ένα σύστημα μη αρμονικών κυματισμών.



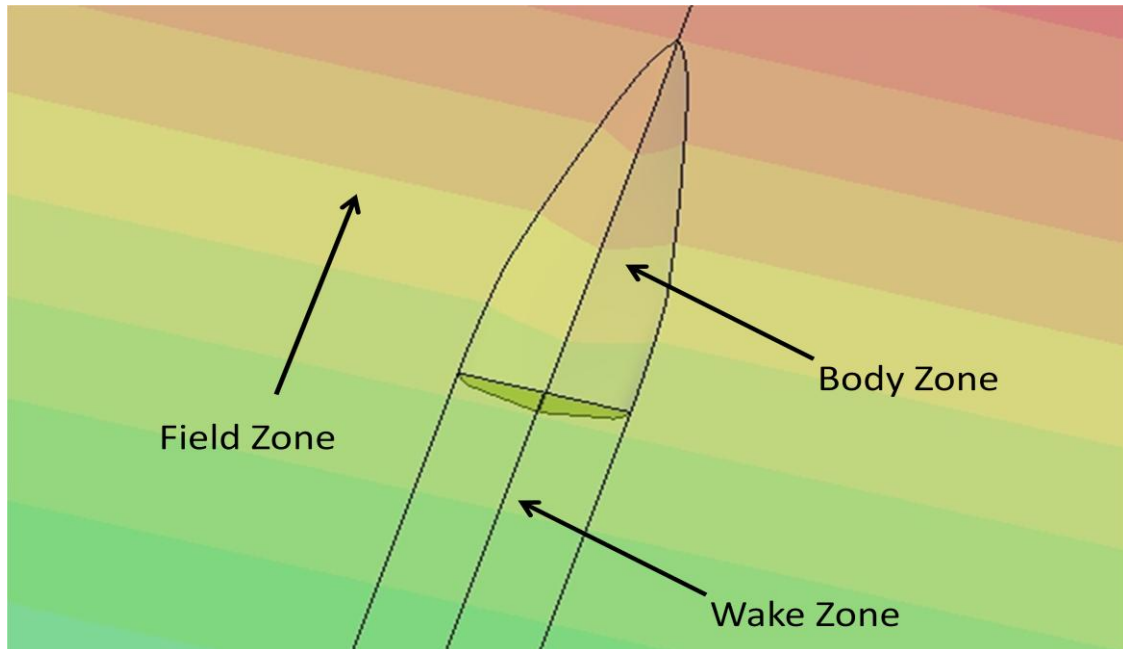
Εικόνα 5.6 Αλλαγή καμπυλότητας της καμπύλης CPC, για θέση σημείου μεγίστου βυθίσματος πρύμνηθεν του 70% του μήκους ισάλου.

Για την αποσαφήνιση της μεθόδου θα πρέπει πρώτα να επεξηγηθεί η μορφή του αναλυόμενου πεδίου που χωρίζεται σε ζώνες και οι οποίες αναφέρονται στη συνέχεια :

- Ζώνη στερεού συνόρου (Body zone)

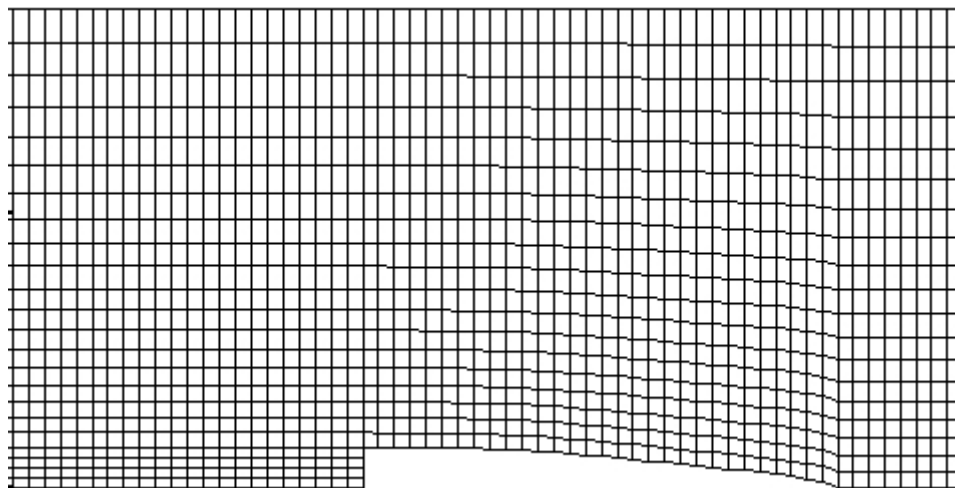
- Ζώνη πεδίου (Field zone)
- Ζώνη ομόρρου (Wake zone)

Οι ζώνες αυτές φαίνονται στη επόμενη εικόνα και στη συνέχεια περιγράφεται η χρησιμότητα κάθε μιας.



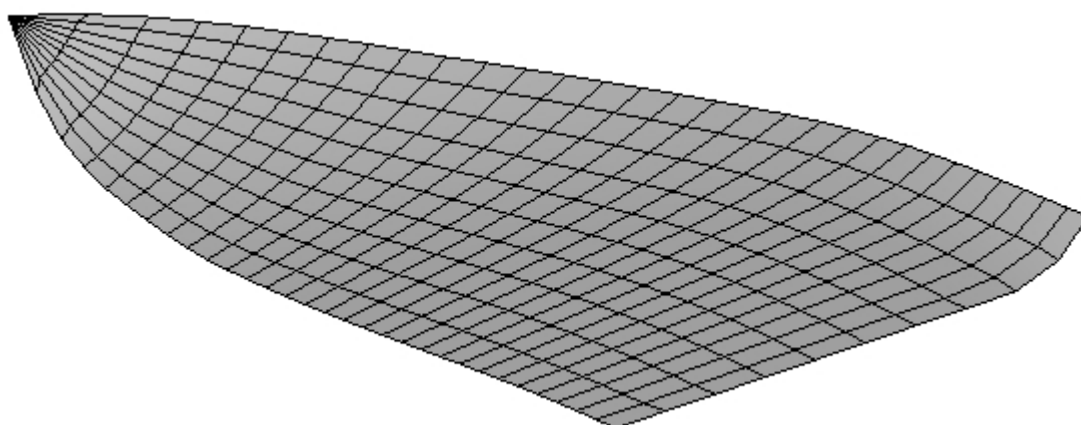
Εικόνα 5.7 Ζώνες υπολογισμού ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας

Η ζώνη του στερεού συνόρου είναι η πλέον αδιάφορη καθώς η καθ' ύψος θέση της επιφάνειας του ρευστού ταυτίζεται με την αντίστοιχη θέση της γεωμετρίας. Προφανώς η ζώνη στερεού συνόρου αφορά μόνο τα ύφαλα του σκάφους. Η ζώνη του πεδίου αφορά στην πραγματικότητα όλη την ελεύθερη επιφάνεια εκτός από τη ζώνη ομόρρου η οποία εκτείνεται σε όλο το πλάτος του καθρέφτη και μέχρι το σύνορο του συνολικού πεδίου. Για κάθε μια ζώνη κατασκευάζεται ένα πλέγμα στους κόμβους του οποίου γίνονται οι απαραίτητοι υπολογισμοί. Το πλέγμα στη ζώνη πεδίου είναι μη – ορθογώνιο τύπου H και κατ' επέκταση αποτελείται από γραμμές ροής που ακολουθούν τη γεωμετρία του σκάφους και από παράλληλες γραμμές κάθετες στο επίπεδο συμμετρίας. Στη ζώνη ομόρρου έχουμε ορθογώνιο τύπου H που σημαίνει ότι όλες οι γραμμές είναι παράλληλες για κάθε μια διεύθυνση. Τα δύο αυτά πλέγματα φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 5.8α Υπολογιστικό πλέγμα ζωνών πεδίου και ομόρρου.

Το υπολογιστικό πλέγμα στο στερεό σύνορο ακολουθεί τις γραμμές της γεωμετρίας κατά το διάμηκες και είναι αυτό που φαίνεται στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 5.8.β Υπολογιστικό πλέγμα ζώνης στερεού συνόρου.

Το σύστημα των παραγόμενων κυματισμών αφορά όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο τους εγκάρσιους και του ακολουθούντες. Προκειμένου να εκτιμήσουμε την αντίσταση κυματισμού θα αναζητήσουμε το μέγιστο ύψος κύματος εξετάζοντας αποκλειστικά τους αποκλίνοντες καθώς αυτοί αποτελούν το κύριο σύστημα μέσω του οποίου διαδίδεται ενέργεια στην ελεύθερη επιφάνεια της θάλασσας. Συγκεκριμένα θα αναζητηθεί η μέγιστη κορυφή κι ελάχιστη κοιλάδα κατά μήκος μιας διαμήκουσ τομής της ελεύθερης επιφάνειας σε απόσταση 25% του μήκουσ ισάλου. Επειδή όπως περιγράφηκε το υπολογιστικό πλέγμα είναι πεπερασμένο και οι υπολογισμοί αφορούν τους κόμβους, στην εν λόγω απόσταση γίνεται γραμμική παρεμβολή μεταξύ των γραμμών πλέγματος που βρίσκονται

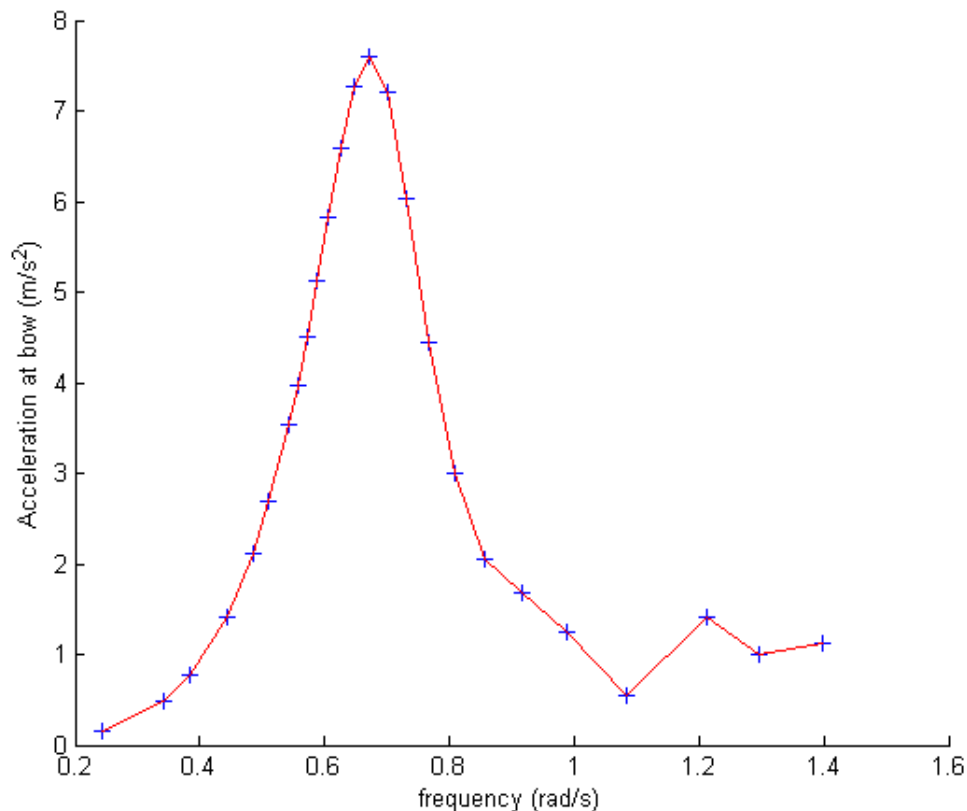
εκατέρωθεν της νοητής γραμμής που ακολουθεί τη γεωμετρία στο επίπεδο της ισάλου. Η απόσταση αυτή θεωρείται επαρκής για την αποτίμηση του μέγιστου ύψους κύματος ενώ το γεγονός ότι αποτελεί στην πραγματικότητα παραμετρική απόσταση, αφού είναι συνάρτηση του μήκους ισάλου, καθιστά εφικτή τη σύγκριση πεδίων κυματισμού που παράγονται από σκάφη διαφορετικών διαστάσεων. Καθώς απομακρυνόμαστε από το σκάφος οι παραγόμενοι κυματισμοί εξασθενούν και κατ' επέκταση η αναζήτηση υψηλότερων υψών κύματος σε αυτές τις περιοχές δεν είναι απαραίτητη. Θα πρέπει όμως να σημειωθεί πως εκτός από την υπόλοιπη ζώνη πεδίου, απορρίπτεται από την αναζήτηση και η ζώνη ομόρρου καθώς έχει κάποιες ιδιαιτερότητες που δικαιολογούν αυτή την πρακτική.

Όπως έχει εξηγηθεί προηγούμενα κατά την πλευση σκαφών με καθρέφτη εμφανίζεται στην πρύμνη το φαινόμενο της δυναμικής αναρρόφησης. Κατά συνέπεια στην περιοχή του καθρέφτη έχουμε μια περιοχή που η επιφάνεια του ρευστού υφίσταται καθίζηση ίση με την τιμή του βύθισματος σε εκείνο το σημείο. Η τιμή αυτή μάλιστα στην πλειοψηφία των περιπτώσεων είναι διαφορετική από το βύθισμα του ακίνητου σκάφους καθώς κατά την πλευση έχουμε ανύψωση της γάστρας κι έμπρυσμη διαγωγή. Συνεπώς σε αυτή την περιοχή έχουμε μια κοιλάδα η οποία όμως δεν αποτελεί τμήμα του συστήματος κυματισμών και κατ' επέκταση δεν πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν κατά τη διαδικασία αναζήτησης του μέγιστου ύψους κύματος. Η περιοχή της δυναμικής αναρρόφησης περιορίζεται αποκλειστικά στη ζώνη ομόρρου. Όσον αφορά τις κορυφές των κυμάτων, σε μεγάλες ταχύτητες συναντώνται σε αποκλίνοντα κύματα ευρείας έκτασης. Σε μικρές ταχύτητες υψηλές κορυφές συναντώνται και πίσω από το πεδίο δυναμικής αναρρόφησης σε μια περιοχή όπου οι αποκλίνοντες κι εγκάρσιοι κυματισμοί συνορεύουν και δεν υπάρχουν σαφή διαχωριστικά όρια μεταξύ τους. Κατά συνέπεια δεν είναι δυνατόν να απομονωθεί σε όλες τις περιπτώσεις μια μέγιστη κορυφή που ανήκει σε αποκλίνοντα κυματισμό. Στην υπόλοιπη ζώνη ομόρρου έχουμε αποκλειστικά εγκάρσιους κυματισμούς που δεν συμπεριλαμβάνονται στη διερεύνηση για λόγους που εξηγήθηκαν παραπάνω. Η διαδικασία εύρεσης του μέγιστου ύψους κύματος επιτυγχάνεται μέσω του προγράμματος wavecut.exe.

Το πρόγραμμα SHF2FRKH.exe μετατρέπει το αρχείο που εξάγεται από το πρόγραμμα Sections.exe σε μορφή που να μπορεί να διαβαστεί από το πρόγραμμα FrankH.exe που έχει δημιουργηθεί από τον Τομέα Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής ΕΜΠ¹⁹. Το πρόγραμμα αυτό υπολογίζει με χρήση της θεωρίας λωρίδων τις αποκρίσεις τους σκάφους σε τυχαίους κυματισμούς. Αυτό που χρησιμοποιείται στα πλαίσια του παρόντος είναι οι τιμές

¹⁹ Γρηγορόπουλος Γρηγόρης, Καθηγητής ΕΜΠ

του RAO των επιταχύνσεων της πλώρης σε προνευτασμό. Το τελευταίο πρόγραμμα είναι το rao_trim.exe και εκτελεί δύο λειτουργίες. Η πρώτη είναι να απομονώνει τη μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης στην πλώρη σε κίνηση pitch. Ενδεικτικά παρατίθεται ένα διάγραμμα με τις τιμές των διαστατών RAO της επιτάχυνσης στην πλώρη συναρτήσει της συχνότητας κυμάτων, όπως αυτές διαμορφώνονται από το πρόγραμμα FrankH για την ταχύτητα πλεύσης σε αριθμό Froude 0,68.



Διάγραμμα 5.1 Φάσμα επιτάχυνσης της πλώρης συναρτήσει της συχνότητας

Η τιμή αυτή αποτελεί το δεύτερο κριτήριο βελτιστοποίησης που αφορά την απόκριση του σκάφους σε κυματισμούς. Η δεύτερη λειτουργία του τελευταίου προγράμματος είναι να απομονώνει την τιμή της δυναμικής διαγωγής που θα αναπτύξει το σκάφος στην συγκεκριμένη ταχύτητα. Αυτή η τιμή είναι χρήσιμη για τον περιορισμό που, όπως προαναφέρθηκε, θα τεθεί και αφορά τη μέγιστη τιμή της η οποία δεν θα πρέπει να ξεπερνά τις 2°.

Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων γίνεται, όπως έχει προαναφερθεί, με χρήση του αλγορίθμου NSGA-II. Η λειτουργία του αναλύεται πλήρως στο κεφάλαιο 3 και κατ' επέκταση η οποία περεταίρω αναφορά είναι περιττή. Αξίζει όμως να σημειωθεί πως ο χρήστης καλείται να εισάγει παραμέτρους όπως ο αριθμός των γενεών, το πλήθος των μελών

κάθε πληθυσμού και οι πιθανότητες διασταύρωσης και μετάλλαξης για την παραγωγή των απογόνων. Αν και δεν υπάρχει γενικός κανόνας προσδιορισμού των μεγεθών αυτών, μπορούμε να οδηγηθούμε σε ενδεικτικές τιμές.

Αρχικά το πλήθος των μελών κάθε πληθυσμού πρέπει να είναι πολλαπλάσιο του 4, κάτι που προκύπτει από τις απαιτήσεις λειτουργίας του αλγορίθμου. Ο αριθμός των γενεών που θα παραχθούν μπορεί να είναι οποιοσδήποτε αριθμός. Ανώτατο όριο δεν ορίζεται ενώ και για τους δύο αριθμούς ισχύει η συνθήκη πως όσο μεγαλύτερο είναι αυτό το πλήθος τόσο καλύτερες γεωμετρίες θα λάβουμε. Υπάρχουν όμως κάποια ανώτατα όρια πέρα από τα οποία δεν έχει ιδιαίτερο νόημα η αναζήτηση λύσεων καθώς οι ήδη παραχθείσες κρίνονται ικανοποιητικές. Δεδομένου πως σημαντική επίσης παράμετρος στην αναζήτηση των τιμών αυτών είναι το υπολογιστικό κόστος καλούμαστε να προσδιορίσουμε ένα άνω όριο που μας δίνει ικανοποιητικές λύσεις. Τα δύο πρώτα μεγέθη λοιπόν μπορούν να προσδιοριστούν εμπειρικά με τη διαδοχική αξιολόγηση των παραγόμενων αποτελεσμάτων. Ενδεικτικές λοιπόν τιμές αποτελούν 40 γενιές με 32 μέλη. Αυτό απαιτεί να παραχθούν και να εξεταστούν συνολικά 1280 γεωμετρίες.

Για τις τιμές των πιθανοτήτων μετάλλαξης και διασταύρωσης επίσης δεν υπάρχει γενικός κανόνας. Δεδομένου όμως ότι οι παραχθείσες γεωμετρίες και ειδικά σε προχωρημένα βήματα του αλγορίθμου αποτελούν ικανοποιητικές λύσεις η πιθανότητα διασταύρωσης επιθυμείται να είναι υψηλή. Αντίθετα επειδή η μετάλλαξη προσδίδει χαρακτηριστικά σε έναν απόγονο που δεν εξαρτώνται από τις παραχθείσες γεωμετρίες αλλά αποτελούν τυχαίο γεγονός, επιθυμείται να είναι χαμηλή. Με βάση αυτά τα δεδομένα επιλέγονται πιθανότητες διασταύρωσης και μετάλλαξης 0,9 και 0,04 αντίστοιχα. Αυτή η σχετικά αυθαίρετη επιλογή, δεν επηρεάζει τόσο τις βέλτιστες λύσεις όσο την ταχύτητα εύρεσης τους. Κατά συνέπεια, κι εφόσον όπως προαναφέρθηκε επιλέγεται αρκούντως μεγάλος αριθμός γενεών και πληθυσμών, τα δεδομένα αυτά επαρκούν για την μελέτη που τελείται στα πλαίσια του παρόντος.

Κεφάλαιο 6. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Σε αυτό το κεφάλαιο θα εξετάσουμε τα παραγόμενα από τους υπολογισμούς αποτελέσματα για κάθε μια από τις τρεις ταχύτητες. Η αξιολόγηση περιλαμβάνει τόσο την εκτίμηση της ποιότητας των γεωμετριών όσο και την αποτύπωση και αξιολόγηση των διαφορών με τις υπόλοιπες. Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο η βελτιστοποίηση αφορά 3 ταχύτητες.

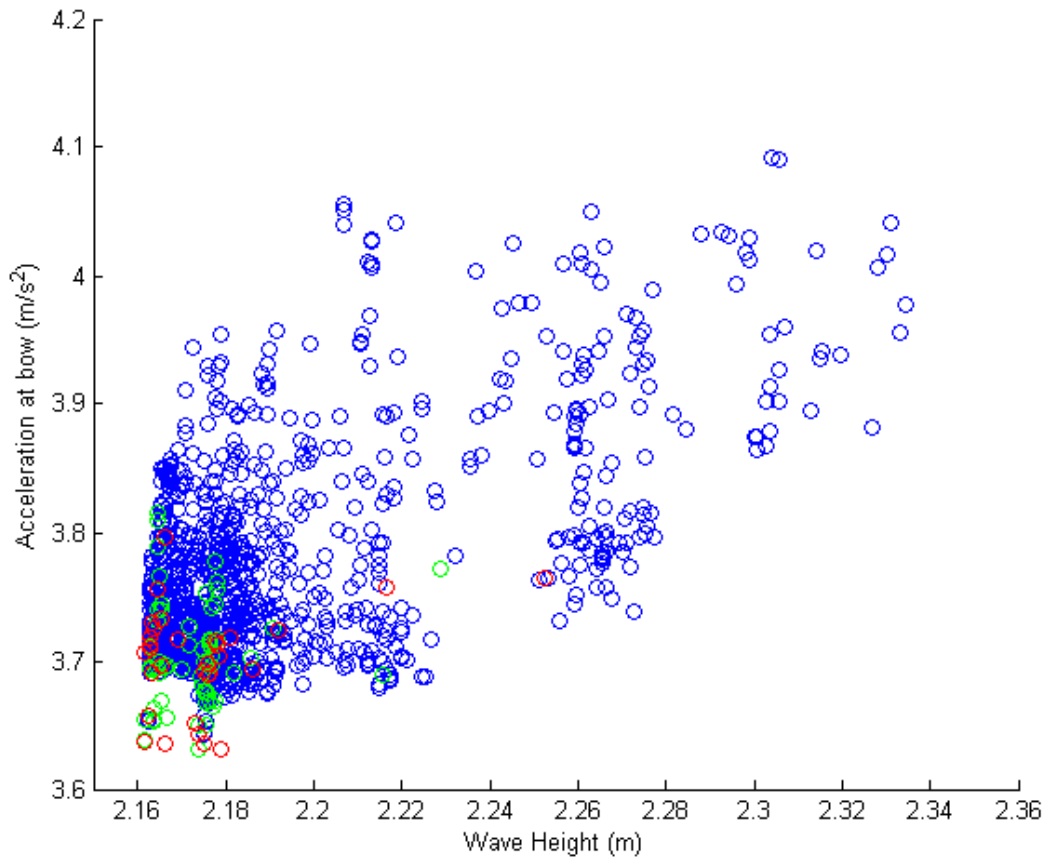
Κάθε σκάφος σχεδιάζεται προκειμένου να μπορεί να πλεύσει αποδοτικά σε ένα εύρος ταχυτήτων ωστόσο με βέλτιστο τρόπο θα πλέει μόνο σε μια που αποτελεί και την ταχύτητα υπηρεσίας του. Κατά συνέπεια είναι αναμενόμενο να λάβουμε διαφορετικές βέλτιστες σχεδιάσεις για κάθε μία από τις τρεις ταχύτητες. Με αυτό το δεδομένο η όποια σύγκριση θα αφορά σχεδιάσεις που πλέουν μόνο στην ίδια ταχύτητα καθώς η σύγκριση γεωμετριών που πλέουν σε διαφορετικές είναι ανούσια. Επισημαίνεται ότι για την περίπτωση μας που έχουμε σκάφος ημικτοπίσματος η ταχύτητα υπηρεσίας είναι σε Froude 0.68. Οι άλλες δύο περιπτώσεις που θα εξεταστούν αποτελούν τις ακραίες τιμές ταχυτήτων στις οποίες μπορεί να πλεύσει το σκάφος δεδομένου του τύπου του. Για κάθε μια ταχύτητα που εξετάστηκε θα παρουσιαστούν και σχολιαστούν, τα αποτελέσματα των δύο περιπτώσεων βελτιστοποίησης που πραγματοποιήθηκαν.

Βελτιστοποίηση πατρικής γάστρας με αμετάβλητες τις κύριες διαστάσεις

Σε αυτή την περίπτωση οι κύριες διαστάσεις διατηρούνται αμετάβλητες και οι μεταβλητές σχεδίασης αποτελούν αυτές του δεύτερου σταδίου όπως αναφέρθηκε προηγούμενα.

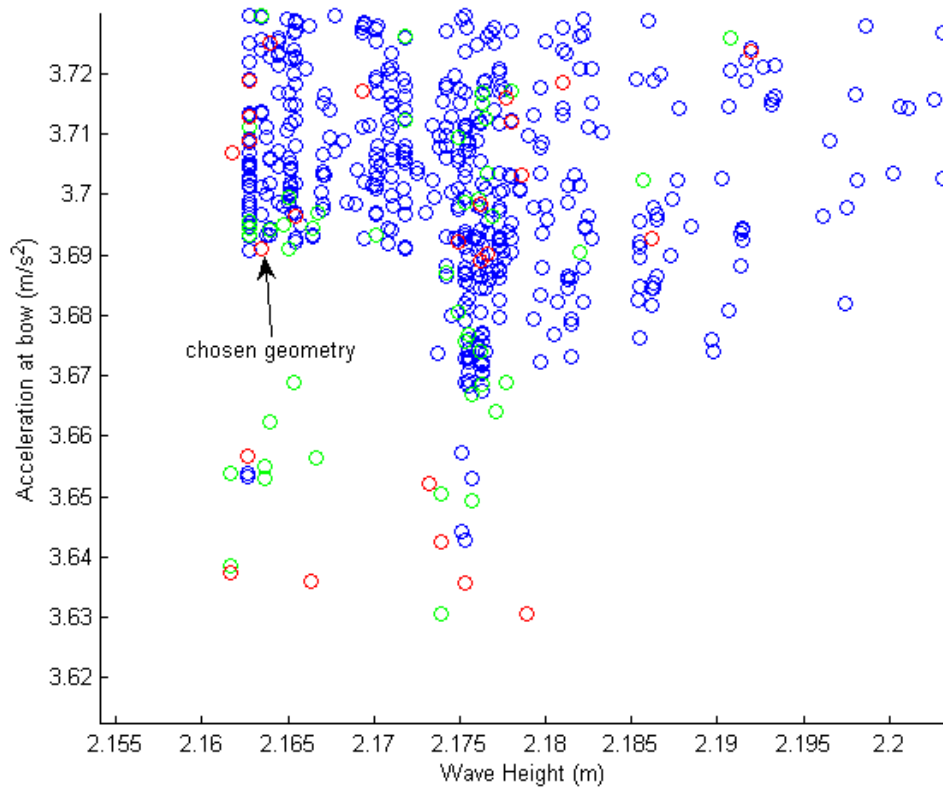
Ταχύτητα σε αριθμό Froude 0,34

Με δεδομένο πως το μήκος ισάλου αποτελεί σταθερό μέγεθος, ο αριθμός Froude είναι σταθερός για όλα τα παραγόμενα μοντέλα ενώ η ταχύτητα πλεύσης είναι $V = 10,905 \text{ m/s}$ ή $21,2 \text{ kn}$. Από τα αποτελέσματα προκύπτει αρχικά ένα διάγραμμα με άξονες τα δύο κριτήρια βελτιστοποίησης στο οποίο παρουσιάζονται όλες οι αποδεκτές γεωμετρίες, το οποίο και φαίνεται στη συνέχεια. Τα επόμενα διαγράμματα δημιουργήθηκαν στο περιβάλλον MATLAB.



Διάγραμμα 6.1.α Κατανομή γεωμετριών. Μέγιστο ύψος κύματος - Επιτάχυνση στην πλώρη

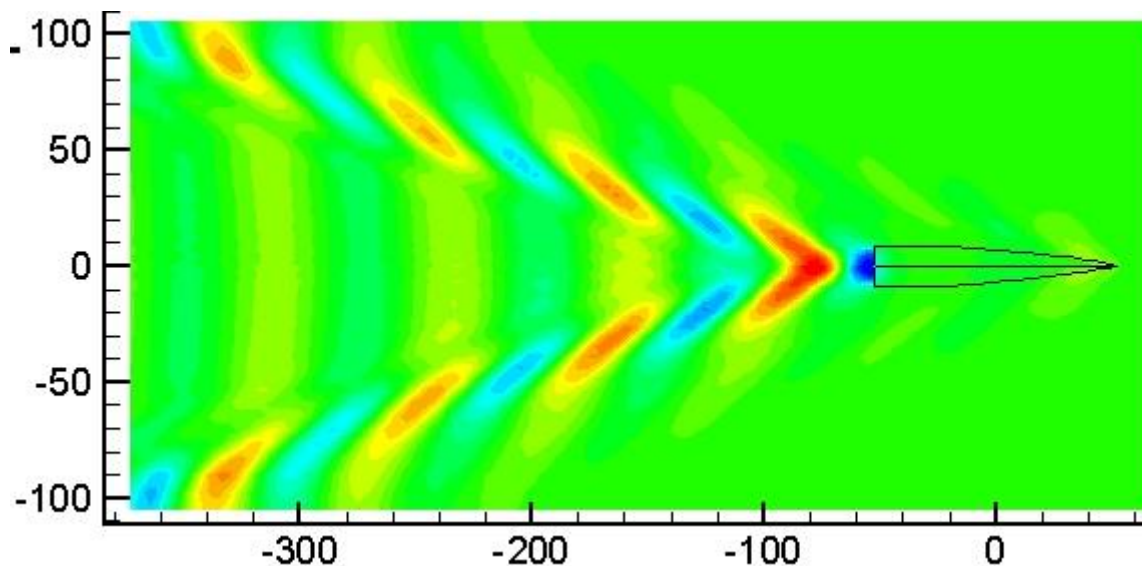
Για λόγους ευκρίνειας θα παρατεθεί κι ένα διάγραμμα με εστίαση στην περιοχή ενδιαφέροντος. Σε αυτή φαίνεται επίσης και η γεωμετρία που θα επιλεγεί για τη σύγκριση με την πατρική σχεδίαση. Η επιλογή της εκάστοτε γεωμετρίας τελείται με έναν επαυξημένο συντελεστή βαρύτητας για την αντίσταση κυματισμού έναντι της συμπεριφοράς σε κυματισμούς ενώ λαμβάνονται υπ' όψιν και πρόσθετες παράμετροι όπως θα φανεί και στη συνέχεια.



Διάγραμμα 6.1.β Κατανομή γεωμετριών. Μέγιστο ύψος κύματος - Επιτάχυνση στην πλώρη

Στα παραπάνω διαγράμματα φαίνονται με κόκκινο χρώμα οι γεωμετρίες της τελευταίας γενιάς, με πράσινο οι δύο προηγούμενες της τελευταίας και με μπλε όλες οι υπόλοιπες. Παρατηρούμε πως κατά τόπους ορίζεται μια ασυνεχής συνοριακή καμπύλη των βέλτιστων σχεδιάσεων ενώ όπως αναμενόταν δεν υπάρχει κάποια αυστηρά καλύτερη γεωμετρία από τις υπόλοιπες. Σημειώνεται επίσης πως η διασπορά στη περιοχή χαμηλών τιμών των κριτηρίων βελτιστοποίησης οφείλεται στο γεγονός ότι δεν παρίστανται μόνο παραδεκτές σχεδιάσεις ενώ σε αυτές δεν περιλαμβάνονται, γεωμετρίες με παραβιασμένους τυχόν προτεθειμένους περιορισμούς. Συγκεκριμένα έχουμε και κάποιες περιπτώσεις όπου από συνδυασμό αποδεκτών τιμών μεταβλητών σχεδίασης προκύπτουν απαράδεκτες σχεδιάσεις. Αυτός ο κίνδυνος έχει επισημανθεί και νωρίτερα και στην προκειμένη περίπτωση αποτελεί και την αιτία που δεν επιλέγονται οι γεωμετρίες που φαινομενικά είναι αυστηρά καλύτερες από την επιλεγείσα.

Στη συνέχεια θα παρουσιαστεί μια εικόνα στην οποία φαίνεται το πεδίο των παραγόμενων κυματισμών. Σε αυτή το πεδίο είναι χωρισμένο σε δύο τμήματα, με το άνω μισό να παρουσιάζει το πεδίο κυματισμών της επιλεγείσας βελτιστοποιημένης γάστρας που φαίνεται και στο τελευταίο διάγραμμα και το κάτω αυτό που παράγεται από την αρχική γεωμετρία. Η εικόνα αυτή παράχθηκε με χρήση του προγράμματος Tecplot 360 2008.



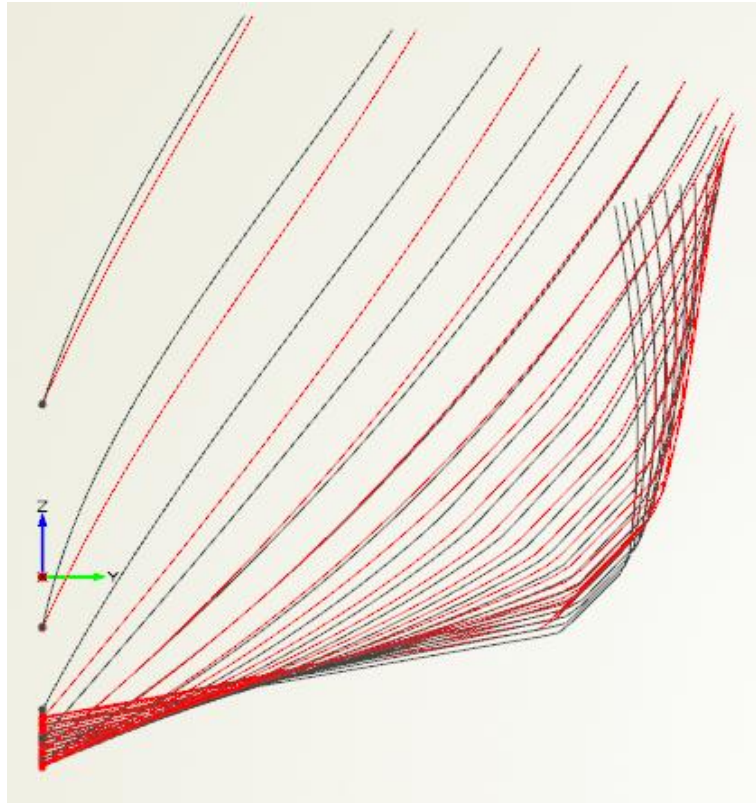
Εικόνα 6.1 Πεδίο παραγόμενων κυματισμών σκάφους σε ταχύτητα πλεύσης $V = 10,905 \text{ m/s}$

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται πως το πεδίο κυματισμών της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας είναι ασθενέστερο από αυτό της πατρικής. Οι διαφορές εντοπίζονται τόσο στις κορυφές όσο και στις κοιλάδες οι οποίες φαίνονται με ερυθρές και κυανές αποχρώσεις αντίστοιχα. Στη συνέχεια θα παρατεθεί ένας πίνακας με τις τιμές των μεταβλητών σχεδίασης πατρικής και βελτιστοποιημένης γάστρας.

	Πατρική γεωμετρία	Βελτιστοποιημένη γεωμετρία
Γωνία εφαπτομένης της γάστρας στην προωαία κάθετο ($^{\circ}$)	80	70,029
Απόσταση μεταξύ των ακμών (m)	0,48	0,615
Γωνία ανύψωσης πυθμένα (-)	0,8019	0,763
Γωνία εφαπτομένης στο κατάστρωμα (-)	0,8867	0,916
Διαμήκης θέση μεγίστου βυθίσματος (-)	0,7	0,76
Βύθισμα στον καθρέφτη (m)	2,25	2,138
Εμβαδό επιφανείας καταστρώματος στο προωαίο τμήμα (m^2)	462,11	484,95

Πίνακας 6.1 Τιμές μεταβλητών σχεδίασης πατρικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας

Ακολούθως έχουμε το συγκριτικό σχέδιο εγκάρσιων τομών πατρικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας.

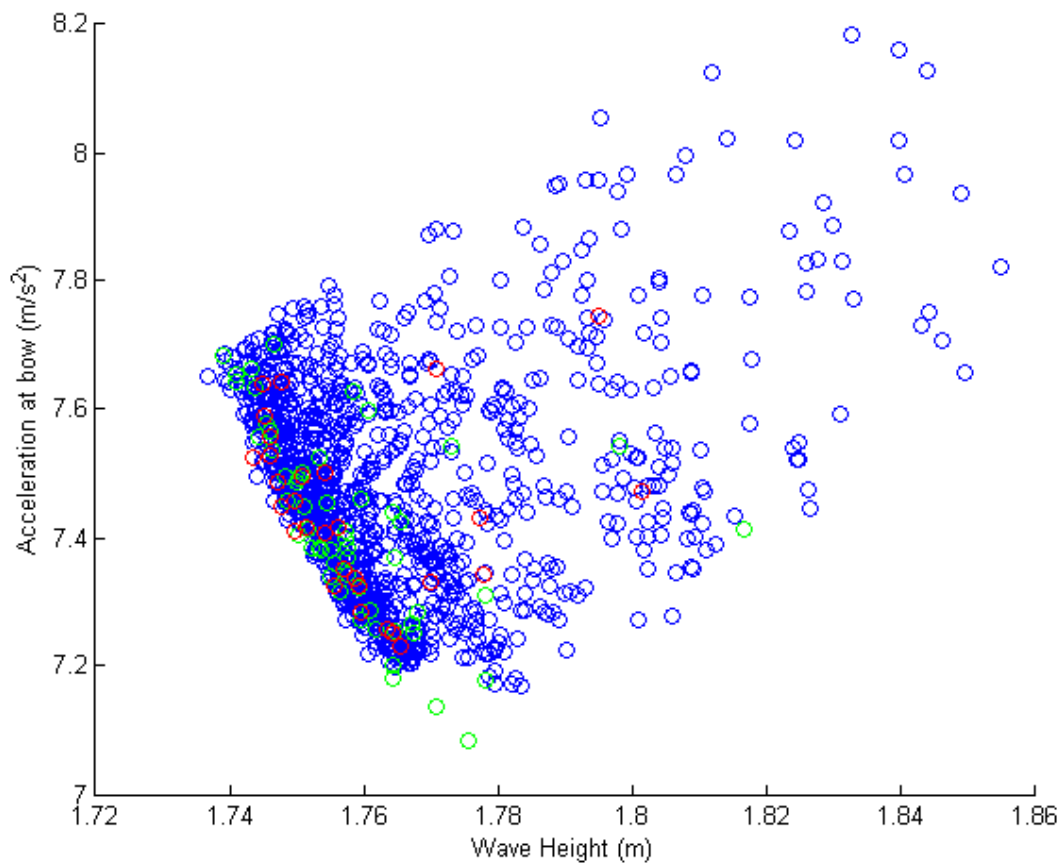


Εικόνα 6.2 Εγκάρσιες τομές πατρικής και βελτιστοποιημένης γάστρας

Στην τελευταία εικόνα φαίνονται με μαύρο οι εγκάρσιες τομές της πατρικής σχεδίασης και με κόκκινο αυτές της βελτιστοποιημένης, ενώ είναι εμφανείς οι μεταβολές της γεωμετρίας λόγω διαφορετικών μεταβλητών σχεδίασης μεταξύ των δύο. Οι κυριότερες μεταβολές εντοπίζονται στην περιοχή της πλώρης καθώς έχουμε περισσότερες μεταβλητές επιρροής της συγκεκριμένης περιοχής σε σχέση με οποιοδήποτε άλλο σημείο του σκάφους. Το εκτόπισμα της βελτιστοποιημένης σχεδίασης είναι κατά 0,68% μεγαλύτερο από της πατρικής άρα πρακτικά αρκετά κοντά στις πατρικής. Όσον αφορά την αντίσταση κυματισμού το βελτιστοποιημένο σκάφος έχει 13,53 % μικρότερη αντίσταση ενώ η τιμή της επιτάχυνσης της πλώρης για το ίδιο σκάφος, είναι κατά 10,4 % μικρότερη από της πατρικής.

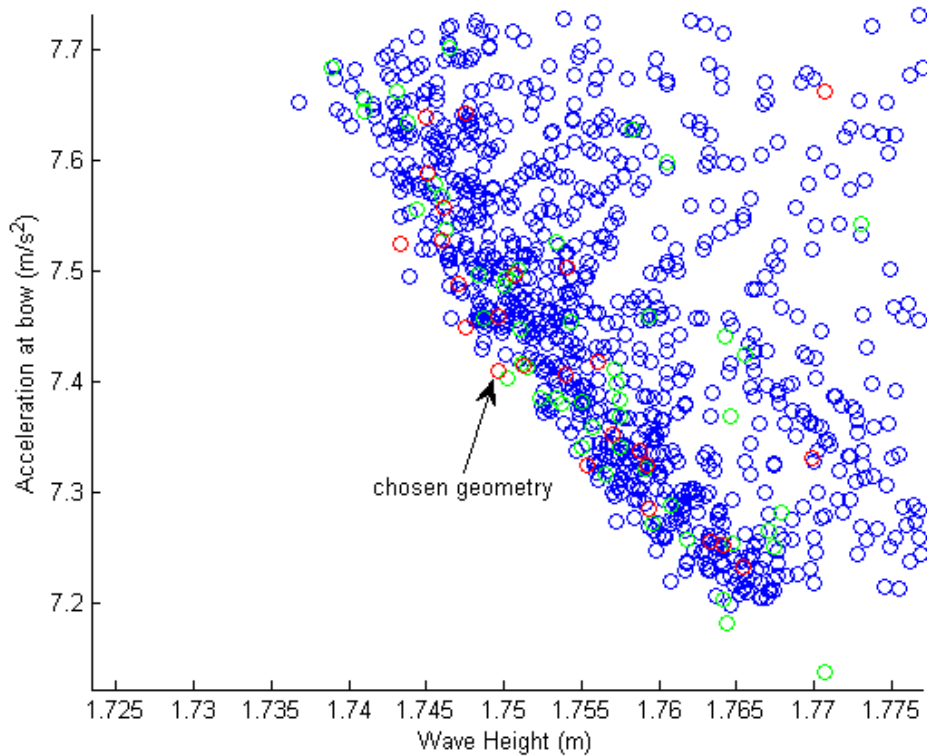
Ταχύτητα σε αριθμό Froude 0,68

Γι αυτόν τον αριθμό Froude έχουμε ταχύτητα πλεύσης $V = 21,81 \text{ m/s}$ ή $42,4 \text{ kn}$. Στη συνέχεια φαίνονται οι παραχθείσες γεωμετρίες στο επίπεδο των κριτηρίων βελτιστοποίησης. Σημειώνεται πως οι μη αποδεκτές γεωμετρίες (με εκτός ορίων εκτόπισμα και δυναμική διαγωγή) έχουν απορριφθεί και δεν παρουσιάζονται.



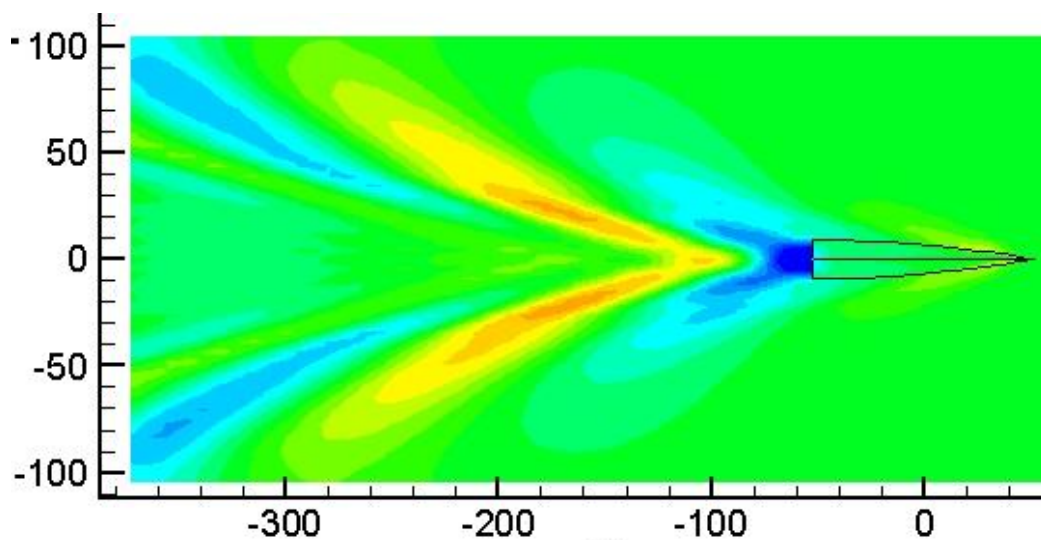
Διάγραμμα 6.2.α Κατανομή γεωμετριών. Μέγιστο ύψος κύματος – Επιτάχυνση στην πλώρη

Θα παρατεθεί και πάλι ένα ακόμα διάγραμμα με εστίαση στην περιοχή ελάχιστων τιμών των κριτηρίων βελτιστοποίησης.



Διάγραμμα 6.2.β Κατανομή γεωμετριών. Μέγιστο ύψος κύματος - Επιτάχυνση στην πλώρη

Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε μια κλασική εικόνα συνοριακής καμπύλης βελτίστων σχεδιάσεων. Η επιλογή γίνεται με γνώμονα την στάθμιση μεταξύ των δύο κριτηρίων βελτιστοποίησης. Στην προκειμένη επιλέγεται η σχεδίαση που ανήκει στην τελευταία γενιά ενώ λαμβάνεται υπόψη και η διαφορά εκτοπίσματος από την πατρική. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το πεδίο των παραγόμενων κυματισμών από την πατρική και βελτιστοποιημένη γεωμετρία.



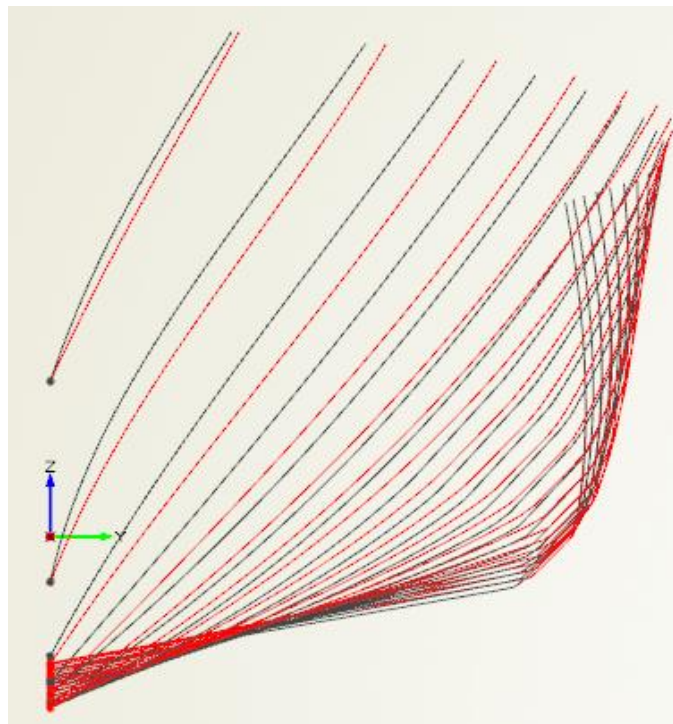
Εικόνα 6.3 Πεδίο παραγόμενων κυματισμών σκάφους σε ταχύτητα πλεύσης $V = 21,81 \text{ m/s}$

Στην παραπάνω εικόνα έχουμε εμφανώς μειωμένες κορυφές και κοιλάδες τόσο από άποψη έκτασης όσο και από πλευράς μεγίστων τιμών για την περίπτωση της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας. Ακολούθως έχουμε τον πίνακα των τιμών των μεταβλητών σχεδίασης.

	Πατρική γεωμετρία	Βελτιστοποιημένη γεωμετρία
Γωνία εφαπτομένης της γάστρας στην προωαία κάθετο (°)	80	70,8
Απόσταση μεταξύ των ακμών (m)	0,48	0,338
Γωνία ανύψωσης πυθμένα (-)	0,8019	0,822
Γωνία εφαπτομένης στο κατάστρωμα (-)	0,8867	0,919
Διαμήκης θέση μεγίστου βυθίσματος (-)	0,7	0,758
Βύθισμα στον καθρέφτη (m)	2,25	2,138
Εμβαδό επιφανείας καταστρώματος στο προωαίο τμήμα (m ²)	462,11	484,27

Πίνακας 6.2 Τιμές μεταβλητών σχεδίασης πατρικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας

Η παρατήρηση που έχει να γίνει είναι ότι κάποιες από τις μεταβλητές της βελτιστοποιημένης σχεδίασης τείνουν σε παραπλήσιες τιμές με την περίπτωση της μικρής ταχύτητας. Όσον αφορά όμως την απόσταση μεταξύ των ακμών και τη γωνία ανύψωσης πυθμένα παρατηρούμε πως ενώ στη μικρή ταχύτητα έχουμε αύξηση και μείωση αντίστοιχα σε σχέση με την πατρική, σε αυτή την ταχύτητα έχουμε αντίστροφη τάση. Στη συνέχεια φαίνεται το συγκριτικό σχήμα εγκαρσίων τομών.



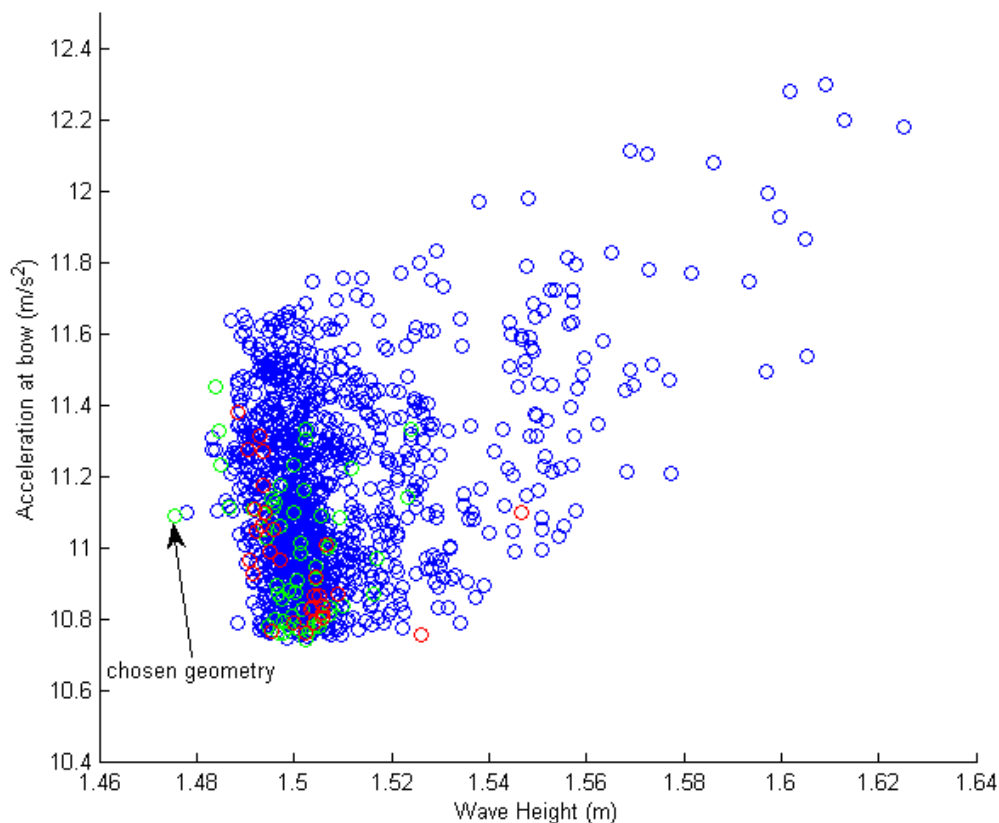
Εικόνα 6.4 Εγκάρσιες τομές πατρικής και βελτιστοποιημένης γάστρας

Στο παραπάνω σχήμα είναι εμφανής η επιρροή της αύξησης του εμβαδού καταστρώματος στην πλώρη και η ελαφρά κύρτωση των προωαίων νομέων με αυξητική τάση καθώς κινούμαστε προς την πρύμνη. Διακρίνεται επίσης η μείωση της απόστασης των ακμών.

Το εκτόπισμα της βελτιστοποιημένης σχεδίασης είναι κατά 0,64 % μικρότερο από της πατρικής που αποτελεί αποδεκτή τιμή ομοιότητας κατά τη σύγκριση των δύο. Το βελτιστοποιημένο σκάφος σε αυτή την ταχύτητα, έχει 8,9 % μικρότερη αντίσταση κυματισμού από την πατρική. Όσον αφορά τη συμπεριφορά σε κυματισμούς το βελτιστοποιημένο σκάφος έχει 8,14% μικρότερη επιτάχυνση στην πλώρη.

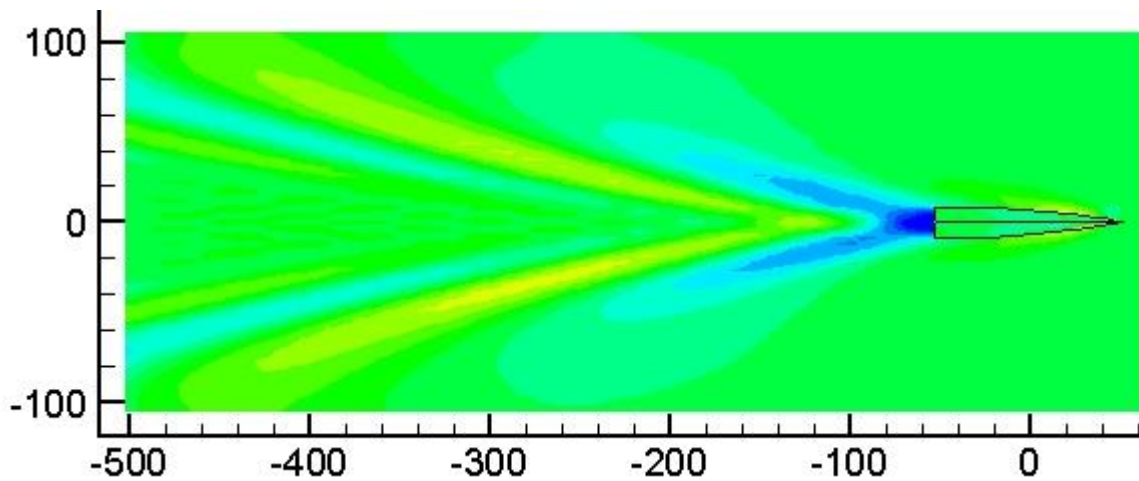
Ταχύτητα σε αριθμό Froude 1,02

Αυτός ο αριθμός Froude αποτελεί και το άνω όριο πλεύσης σκαφών ημιεκτοπίσματος όπως είναι αυτό που μελετάται. Η ταχύτητα πλεύσης γι αυτόν τον αριθμό είναι $V = 32,715 \text{ m/s}$ ή $63,6 \text{ kn}$. Θα πρέπει να σημειωθεί πως τα αποτελέσματα σε αυτό το πεδίο ταχυτήτων θα πρέπει να τεθούν υπό εξέταση καθώς τα φαινόμενα συνεκτικότητας έχουν μη αμελητέα επίδραση που δεν λαμβάνεται υπ' όψη στα πλαίσια της μελέτης με χρήση της δυναμικής θεωρίας. Οι παραχθείσες γεωμετρίες φαίνονται στο επόμενο διάγραμμα το οποίο δεν χρειάζεται περαιτέρω εστίαση καθώς η επιλεγείσα γεωμετρία είναι ήδη εμφανής.



Διάγραμμα 6.3 Κατανομή γεωμετριών. Μέγιστο ύψος κύματος – Επιτάχυνση στην πλώρη

Η επιλογή της συγκεκριμένης γεωμετρίας δεν είναι ιδιαίτερα προφανής καθώς έχει αρκετά αυξημένη τιμή επιτάχυνσης στην πλώρη σε σχέση με άλλες. Όπως φαίνεται και από το σχήμα για μικρότερες τιμές αυτού του κριτηρίου θα έπρεπε να κινηθούμε σε αισθητά μεγαλύτερες τιμές αντίστασης καθώς έχουμε μια σημαντική ασυνέχεια του διαγράμματος στην κρίσιμη περιοχή. Κατά συνέπεια η επιλογή κυμαίνεται μεταξύ ακραίων περιπτώσεων στην περιοχή βελτίστων. Υπενθυμίζεται πως η αντίσταση κυματισμού έχει έναν αυξημένο συντελεστή βαρύτητας στη μελέτη που τελείται ενώ η ταύτιση του εκτοπίσματος της σημειούμενης γεωμετρίας με την πατρική αποτέλεσε συνυπολογιζόμενο παράγοντα στην επιλογή της. Στη συνέχεια ακολουθεί το πεδίο των παραγόμενων κυματισμών από την πατρική και βελτιστοποιημένη σχεδίαση.



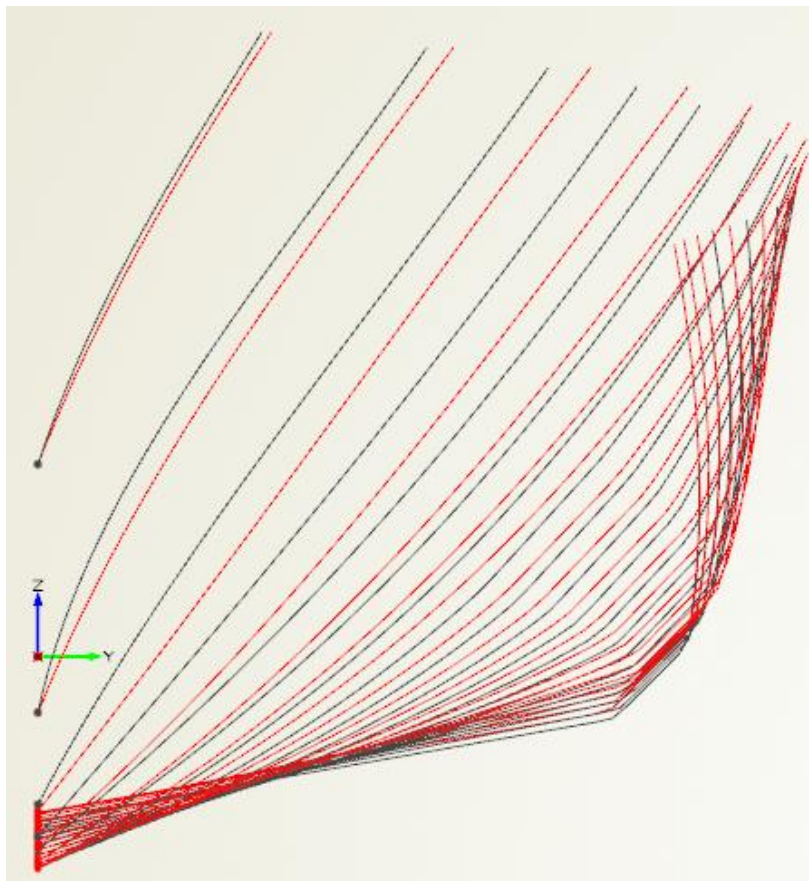
Εικόνα 6.5 Πεδίο παραγόμενων κυματισμών σκάφους σε ταχύτητα πλεύσης $V = 32,715 \text{ m/s}$

Σε αυτή την ταχύτητα έχουμε έναν μεγάλο εύρους αποκλίνοντα κυματισμό με αντίστοιχη μορφή κοιλάδων. Η σημαντική διαφορά μεταξύ των δύο σχεδιάσεων διαφαίνεται στην περιοχή των μέγιστων τιμών κορυφής και συγκεκριμένα στο εύρος των υψηλών τιμών που στην πραγματικότητα απουσιάζουν τελείως στην περίπτωση της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας. Επιμέρους διαφορές εντοπίζονται και στις κοιλάδες ωστόσο είναι πιο δυσδιάκριτες. Ακολουθώς έχουμε τον πίνακα των τιμών των μεταβλητών σχεδίασης.

	Πατρική γεωμετρία	Βελτιστοποιημένη γεωμετρία
Γωνία εφαπτομένης της γάστρας στην προωραία κάθετο (°)	80	72,129
Απόσταση μεταξύ των ακμών (m)	0,48	0,524
Γωνία ανύψωσης πυθμένα (-)	0,8019	0,765
Γωνία εφαπτομένης στο κατάστρωμα (-)	0,8867	0,871
Διαμήκης θέση μεγίστου βυθίσματος (-)	0,7	0,745
Βύθισμα στον καθρέφτη (m)	2,25	2,14
Εμβαδό επιφάνειας καταστρώματος στο προωραίο τμήμα (m ²)	462,11	484,91

Πίνακας 6.3 Τιμές μεταβλητών σχεδίασης πατρικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας

Σε αυτή την περίπτωση έχουμε αντίστοιχες τάσεις με τη μικρή ταχύτητα με εξαίρεση τη γωνία εφαπτομένης στο κατάστρωμα όπου έχουμε ελαφρά μείωση έναντι αύξησης στην πρώτη περίπτωση. Στη συνέχεια φαίνονται οι εγκάρσιες τομές του σκάφους και οι εμφανείς διαφοροποιήσεις της γεωμετρίας που προκάλεσε η μεταβολή των παραμέτρων σχεδίασης.



Εικόνα 6.6 Εγκάρσιες τομές πατρικής και βελτιστοποιημένης γάστρας

Το εκτόπισμα της βελτιστοποιημένης σχεδίασης είναι κατά 0,035% μικρότερο από της πατρικής κάτι που σημαίνει πως πρακτικά έχουμε απόλυτη ταύτιση εκτοπίσματος μεταξύ των δύο σχεδιάσεων. Το βελτιστοποιημένο σκάφος σε αυτή την ταχύτητα, έχει 2,68 % μικρότερη

αντίσταση κυματισμού από την πατρική. Σε αυτή δηλαδή την ταχύτητα τα περιθώρια βελτίωσης αποδεικνύονται μικρότερα από των άλλων δύο ταχυτήτων. Όσον αφορά τη συμπεριφορά σε κυματισμούς το βελτιστοποιημένο σκάφος έχει 8,25 % μικρότερη επιτάχυνση στην πλώρη.

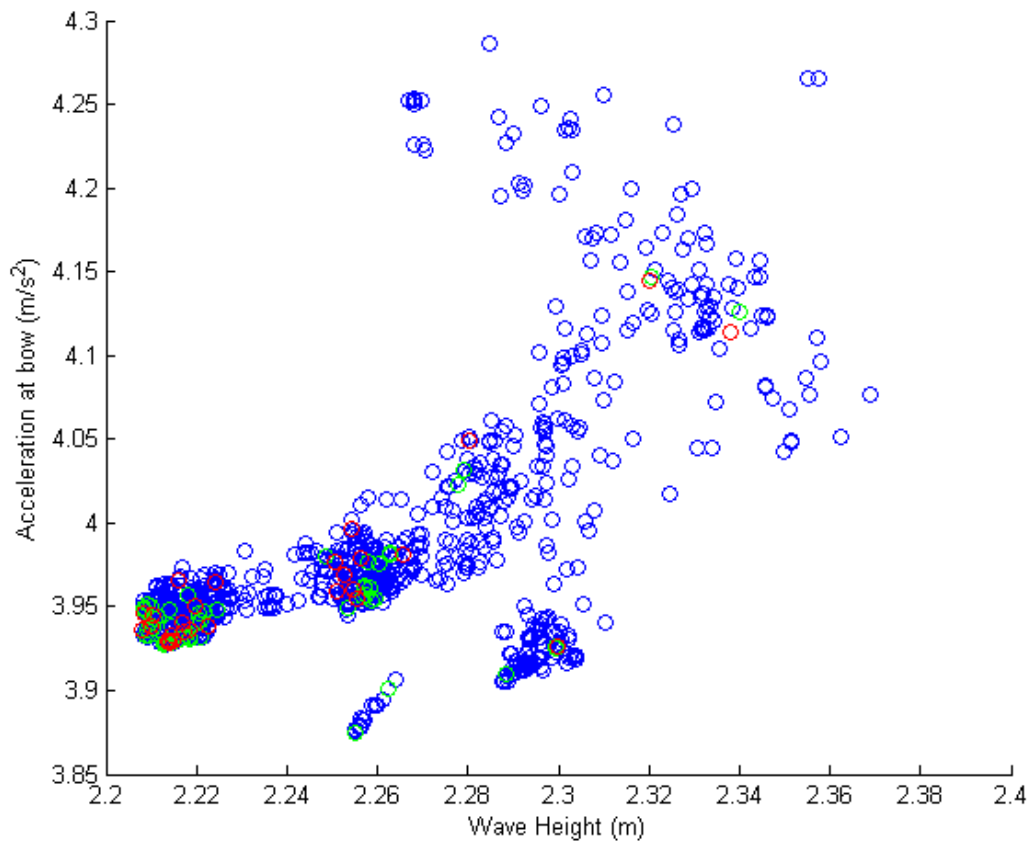
Βελτιστοποίηση πατρικής γάστρας σε δύο στάδια

Σε αυτή την περίπτωση, όπως περιγράφηκε νωρίτερα, έχουμε βελτιστοποίηση δύο σταδίων για τρεις ταχύτητες. Για κάθε μια ταχύτητα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από κάθε στάδιο και στο τέλος θα γίνει σύγκριση της πατρικής γεωμετρίας με την τελικά βέλτιστη σχεδίαση.

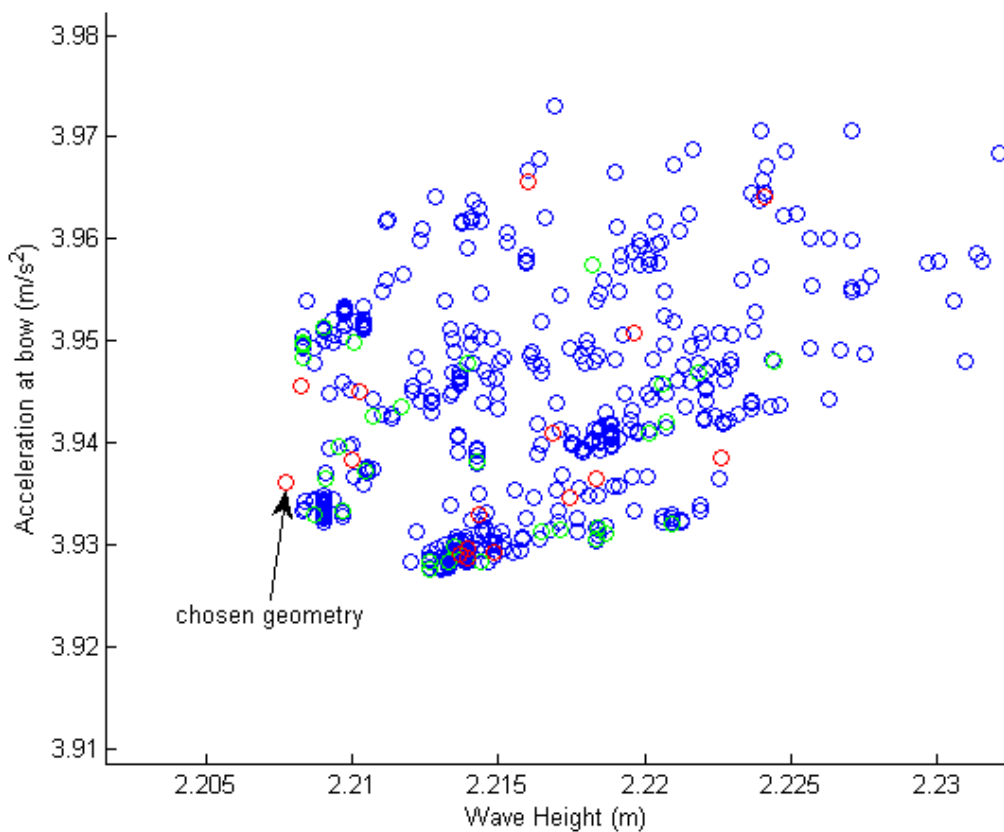
1^ο στάδιο σε αριθμό Froude 0,34

Σε αυτή την ταχύτητα από το πρώτο στάδιο βελτιστοποίησης λαμβάνουμε ένα σύνολο γεωμετριών με συγκεκριμένες τιμές μεταβλητών και κριτηρίων βελτιστοποίησης. Υπενθυμίζεται πως σε αυτό το στάδιο βελτιστοποίησης οι μεταβλητές σχεδίασης είναι το μήκος ισάλου, το μέγιστο πλάτος και το βύθισμα. Ο αριθμός Froude 0,34 αφορά την αρχική γεωμετρία και άρα θα έχουμε σταθερή ταχύτητα για όλα τα μοντέλα $V = 10,905 \text{ m/s}$.

Στη συνέχεια έχουμε το διάγραμμα με άξονες τα δύο κριτήρια βελτιστοποίησης στο οποίο φαίνονται οι παραχθείσες και αποδεκτές γεωμετρίες καθώς και το ίδιο διάγραμμα με εστίαση στην περιοχή χαμηλών τιμών των κριτηρίων βελτιστοποίησης όπου φαίνεται και η επιλεγείσα γεωμετρία.

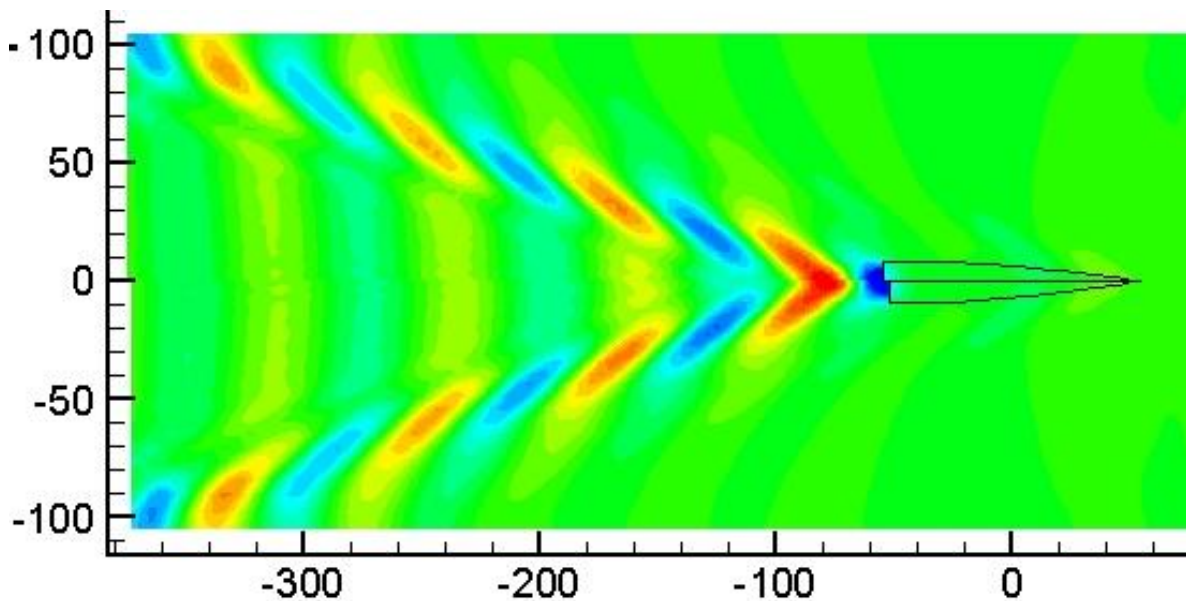


Διάγραμμα 6.4.α Κατανομή γεωμετριών. Μέγιστο ύψος κύματος – Επιτάχυνση στην πλώρη



Διάγραμμα 6.4.β Κατανομή γεωμετριών. Μέγιστο ύψος κύματος – Επιτάχυνση στην πλώρη

Όπως και σε προηγούμενες περιπτώσεις βαρύτητα δίνεται στην αντίσταση κυματισμού. Στην προκειμένη έχουμε ένα νέφος από σχεδιάσεις σε μια περιοχή καλών χαρακτηριστικών από τις οποίες επιλέγεται αυτή με την ελάχιστη αντίσταση. Το κόστος επιλογής για το δεύτερο κριτήριο είναι μικρό κι έτσι η επιλογή είναι σχετικά εύκολη και η γεωμετρία ανήκει στην τελευταία γενιά όπως φαίνεται και στην προηγούμενη εικόνα. Στη συνέχεια φαίνεται το πεδίο των παραγόμενων κυματισμών από πατρική και βελτιστοποιημένη σχεδίαση.



Εικόνα 6.7 Πεδίο παραγόμενων κυματισμών σκάφους σε ταχύτητα πλεύσης $V = 10,905 \text{ m/s}$

Οι διαφορές μεταξύ των δύο πεδίων είναι δυσδιάκριτες κι αφορούν κυρίως το εύρος των περιοχών μεγίστων τιμών τόσο για τις κορυφές όσο και για τις κοιλάδες. Ακολούθως φαίνεται ο πίνακας με τις κύριες διαστάσεις της αρχικής και της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας.

	Πατρική γεωμετρία	Βελτιστοποιημένη γεωμετρία
Μήκος ισάλου	104,9	109,366
Πλάτος	20,85	20,016
Βύθισμα	2,91	3,034

Πίνακας 6.4 Τιμές μεταβλητών σχεδίασης πατρικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας

Η παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι πως έχουμε αύξηση του μήκους και μείωση του πλάτους, κάτι που είναι αναμενόμενο καθώς ένα λεπτόγραμμα σκάφος παρουσιάζει γενικώς καλύτερα χαρακτηριστικά αντίστασης. Τα αποτελέσματα πιθανώς θα διέφεραν αν δεύτερο κριτήριο αποτελούσε η συμπεριφορά σε πλάγιους κυματισμούς και όχι μετωπικούς που έχουμε στην προκειμένη. Ο λόγος είναι πως το αυξημένο πλάτος προσδίδει καλύτερη

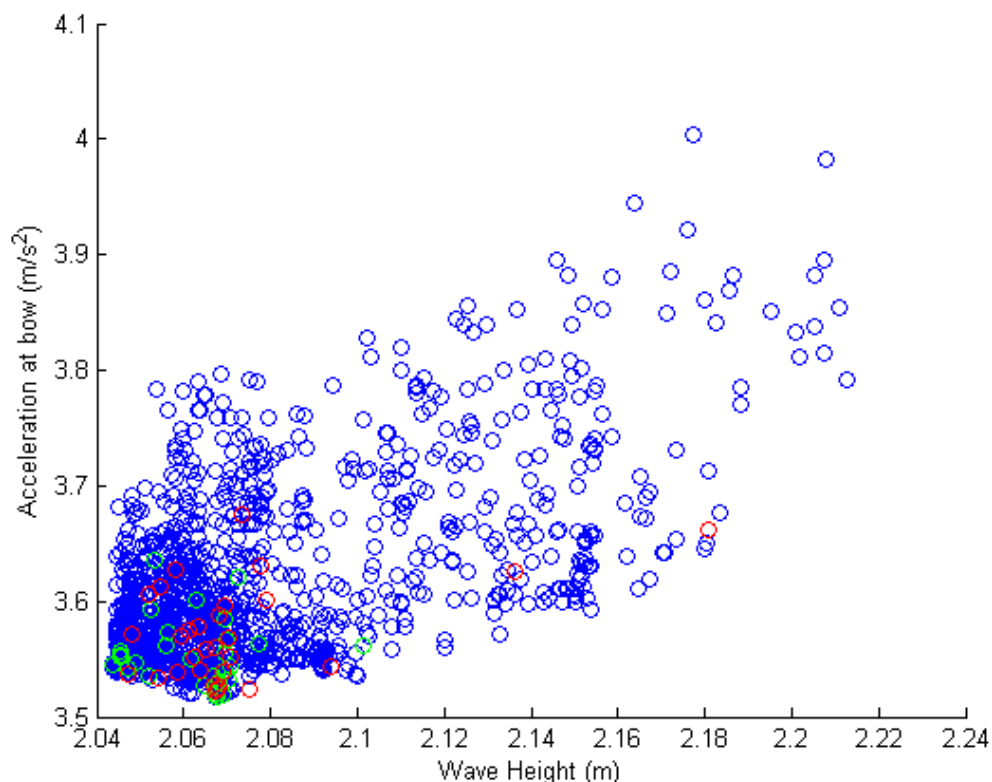
εγκάρσια ευστάθεια. Δεδομένου ότι έχουμε διαφορετικό μήκος ισάλου έχουμε και διαφορετικό αριθμό Froude για τη βελτιστοποιημένη γεωμετρία ο οποίος φαίνεται στη συνέχεια.

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{gL}} = \frac{10,905 \frac{m}{s}}{\sqrt{9,80665 \frac{m}{s^2} \cdot 109,366 m}} = 0,333$$

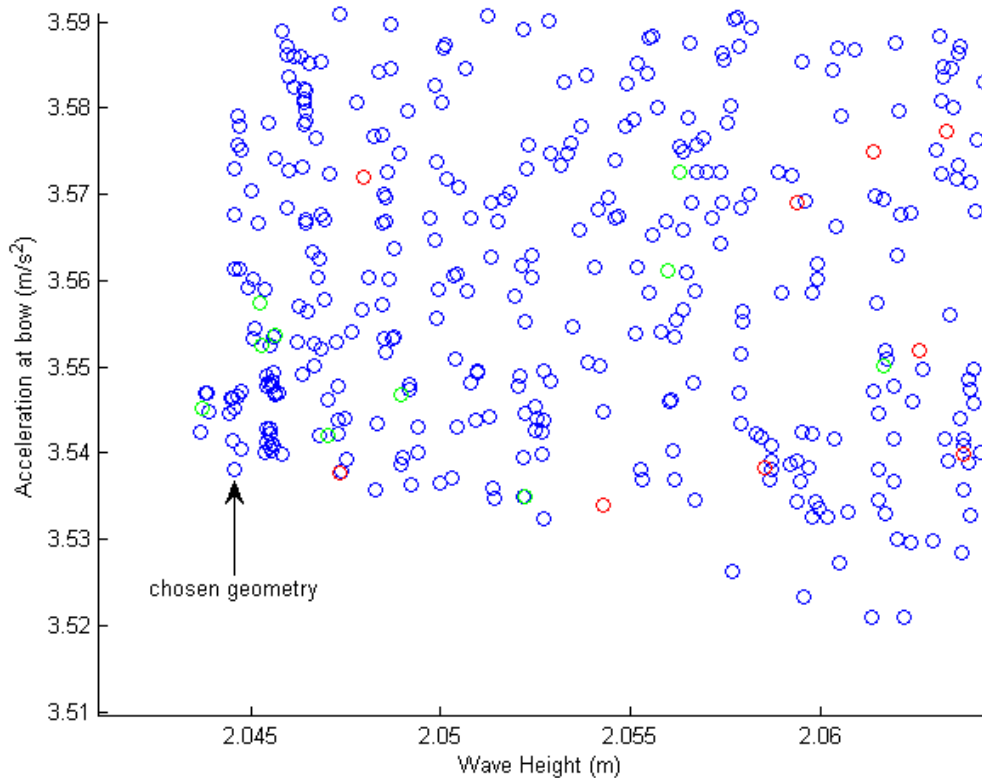
Το εκτόπισμα της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας είναι κατά 4,98% μεγαλύτερο από της πατρικής κάτι που είναι οριακά αποδεκτό στα πλαίσια της βελτιστοποίησης με μεταβολή των κυρίων διαστάσεων. Τα αποτελέσματα αντίστασης κυματισμού και επιτάχυνσης στην πλώρη θα σχολιαστούν συγκεντρωτικά, μετά το δεύτερο στάδιο βελτιστοποίησης.

2^ο στάδιο σε αριθμό Froude 0,333

Σε αυτό το στάδιο οι κύριες διαστάσεις διατηρούνται σταθερές και ίσες με αυτές της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας όπως προαναφέρθηκε. Έτσι προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα των παραγόμενων γεωμετριών και το αντίστοιχο με εστίαση στην περιοχή ενδιαφέροντος.

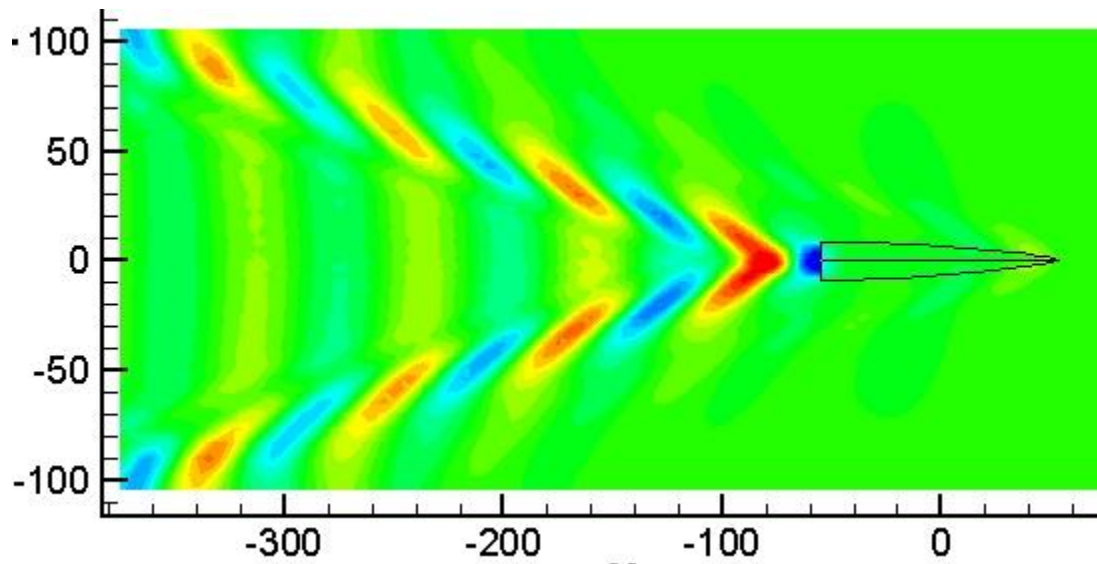


Διάγραμμα 6.5.α Κατανομή γεωμετριών. Μέγιστο ύψος κύματος – Επιτάχυνση στην πλώρη



Διάγραμμα 6.5.β Κατανομή γεωμετριών. Μέγιστο ύψος κύματος - Επιτάχυνση στην πλώρη

Η επιλογή της γεωμετρίας που φαίνεται παραπάνω είναι από τις σχετικά ασφαλείς καθώς ανήκει σε μια μικρή ομάδα ξεχωριστών σχεδιάσεων. Επιπλέον η συγκεκριμένη γεωμετρία έχει εκτόπισμα κοντά σε αυτό της αρχικής κάτι που επίσης αποτέλεσε κριτήριο στην επιλογή. Η συγκεκριμένη είναι από τις περιπτώσεις που κατ' εξαίρεση έχουμε απότομη μεταβολή της καμπυλότητας της συνοριακής καμπύλης βελτιστών κοντά στην αρχή των αξόνων. Αυτή η ιδιόμορφη διάταξη μας δίνει την ευχέρεια της εύκολης επιλογής καθώς υπάρχουν γεωμετρίες που μπορούν να θεωρηθούν καλύτερες από άλλες όπως κι εν προκειμένω η επιλεγείσα. Τονίζεται όμως ότι δεν μπορεί να θεωρηθεί αυστηρά καλύτερη από όλες τις υπόλοιπες υπό την μαθηματική έννοια που ορίστηκε στο κεφάλαιο περιγραφής των γενετικών αλγορίθμων, καθώς υπάρχουν, όπως φαίνεται, και γεωμετρίες με μικρότερη τιμή ενός εκ των δύο κριτηρίων βελτιστοποίησης. Η έννοια των καλύτερων χαρακτηριστικών αφορά στην πραγματικότητα τη μικρότερη ακτινική απόσταση από την αρχή των αξόνων, υπό την προϋπόθεση ότι οι αλγεβρικές τιμές των δύο κριτηρίων βελτιστοποίησης προστίθενται αδιάστατα. Αυτό μας εξασφαλίζει απλώς, μια καλή στάθμιση μεταξύ των δύο κριτηρίων και όχι την καθολική υπεροχή της επιλεγείσας έναντι των υπολοίπων. Στη συνέχεια φαίνεται το πεδίο των παραγόμενων κυματισμών.



Εικόνα 6.8 Πεδίο παραγόμενων κυματισμών σκάφους σε ταχύτητα πλεύσης $V = 10,905 \text{ m/s}$

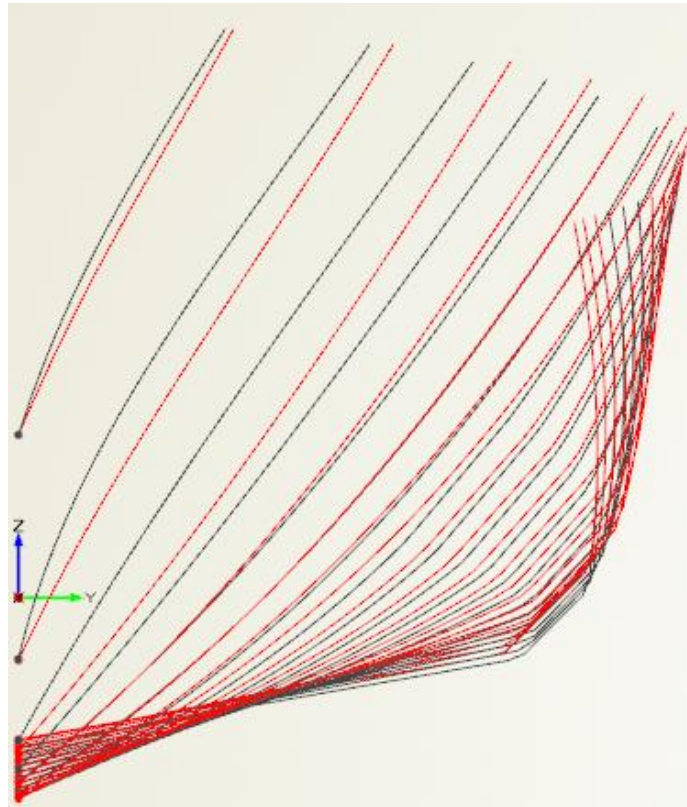
Από την παραπάνω εικόνα έχουμε εντοπισμένες διαφορές των μεγίστων τιμών καθώς κι ανάμεσα στα εύρη αυτών των περιοχών, σε όλες τις κορυφές και κοιλάδες του συστήματος αποκλιόντων κυματισμών. Τονίζεται ότι το πεδίο των παραγόμενων κυματισμών της αρχικής γεωμετρίας αφορά τη βέλτιστη σχεδίαση του πρώτου σταδίου βελτιστοποίησης και όχι την πατρική, κι επομένως όποια βελτίωση διαφαίνεται, αφορά αποκλειστικά και μόνο το δεύτερο στάδιο και όχι τη συνολική διαδικασία. Οι αρχικές και τελικές τιμές των μεταβλητών σχεδίασης φαίνονται στη συνέχεια.

	Πατρική γεωμετρία	Βελτιστοποιημένη γεωμετρία
Γωνία εφαπτομένης της γάστρας στην προωαία κάθετο ($^{\circ}$)	80	70,025
Απόσταση μεταξύ των ακμών (m)	0,48	0,621
Γωνία ανύψωσης πυθμένα (-)	0,8019	0,7623
Γωνία εφαπτομένης στο κατάστρωμα (-)	0,8867	0,9174
Διαμήκης θέση μεγίστου βυθίσματος (-)	0,7	0,7595
Βύθισμα στον καθρέφτη (m)	2,25	2,138
Εμβαδό επιφάνειας καταστρώματος στο προωαίο τμήμα (m^2)	462,11	484,783

Πίνακας 6.5 Τιμές μεταβλητών σχεδίασης πατρικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας

Η ενδιαφέρουσα παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι πως οι μεταβολές των μεταβλητών σχεδίασης είναι απολύτως ανάλογες με τις αντίστοιχες στην περίπτωση βελτιστοποίησης της πατρικής σχεδίασης. Αυτό είναι κάτι αναμενόμενο καθώς στο δεύτερο στάδιο αλλάζουν παράμετροι που δεν σχετίζονται άμεσα με τις απόλυτες τιμές των κυρίων διαστάσεων οι οποίες μάλιστα έχουν διάστημα μεταβολής στο πρώτο στάδιο της τάξης του 5 %.

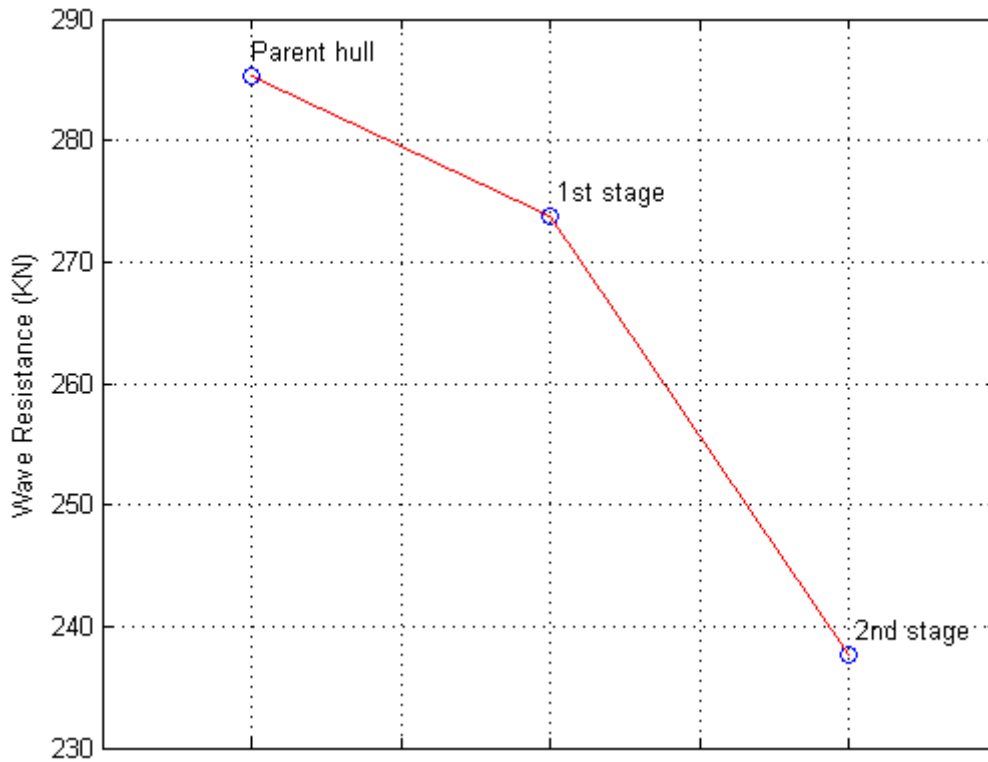
Το σχέδιο εγκάρσιων τομών που φαίνεται στη συνέχεια αφορά την τελικά βέλτιστη γεωμετρία και την πατρική, παραλείποντας έτσι την ενδιάμεση από το πρώτο στάδιο βελτιστοποίησης. Η ενδιάμεση γεωμετρία έχει διαφορετικές μόνο τις κύριες διαστάσεις κι επομένως η όποια διαφορά φανεί στο σχέδιο εγκάρσιων τομών αφορά την διαφορετική θέση και όχι την ίδια τη μορφή των νομέων. Αυτός είναι και ο λόγος που παραλείπεται η παράθεση συγκριτικού σχήματος εγκάρσιων τομών αυτή της γάστρας.



Εικόνα 6.9 Εγκάρσιες τομές πατρικής και βελτιστοποιημένης γάστρας

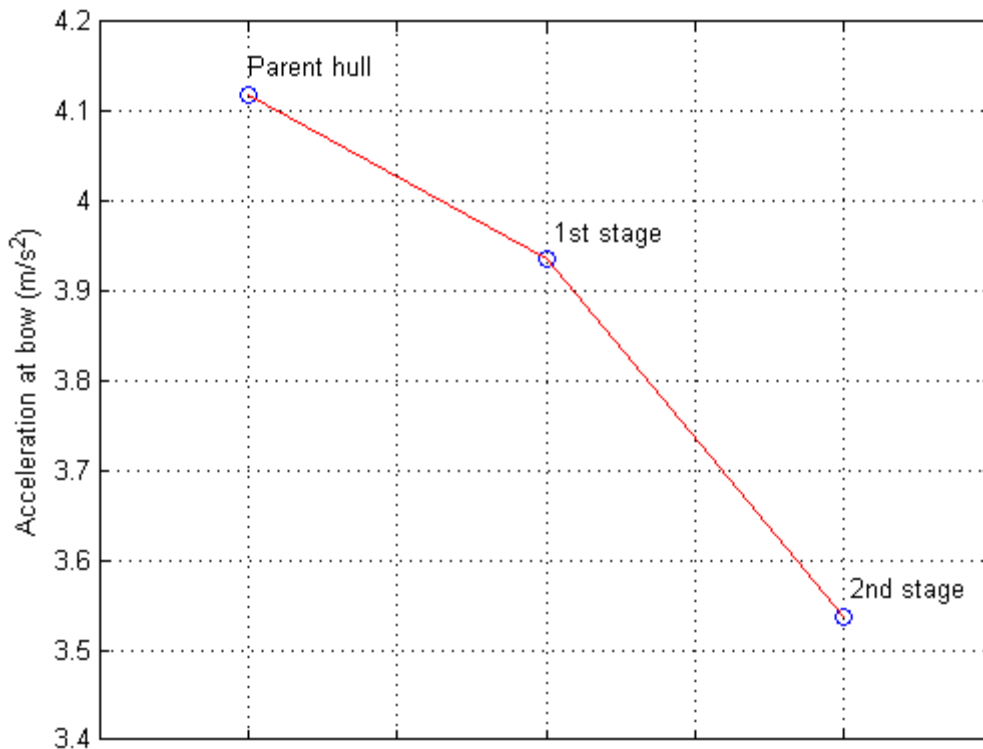
Το εκτόπισμα της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας του δευτέρου σταδίου είναι κατά 0,79 % μεγαλύτερο από της βέλτιστης του πρώτου σταδίου. Αυτό σημαίνει πως έχουμε μια σχετικά καλή προσέγγιση των βελτιστοποιημένων του πρώτου και δευτέρου σταδίου γεωμετριών.

Τέλος παρατίθενται δύο διαγράμματα στα οποία φαίνονται η αντίσταση κυματισμού και η επιτάχυνση της πλήρης, κάθε σχεδίασης καθώς και η βελτίωση από κάθε στάδιο. Αρχικά φαίνεται αυτό που αφορά την αντίσταση κυματισμού.



Διάγραμμα 6.6 Βελτιστοποίηση αντίστασης κυματισμού για ταχύτητα $V = 10,905 \text{ m/s}$

Παρατηρώντας το παραπάνω διάγραμμα αρχικά βλέπουμε πως η συνολική βελτίωση της αντίστασης κυματισμού είναι της τάξης του 16,68 %. Η δεύτερη παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι πως από το δεύτερο στάδιο έχουμε μεγαλύτερη μείωση της αντίστασης σε σχέση με το πρώτο, κάτι που είναι εμφανές από την κλίση του δεύτερου τμήματος της καμπύλης δεδομένου πως το οριζόντιο διάστημα είναι ίδιο και για τα δύο τμήματα της. Στη συνέχεια φαίνεται το διάγραμμα που αφορά την επιτάχυνση στην πλώρη.

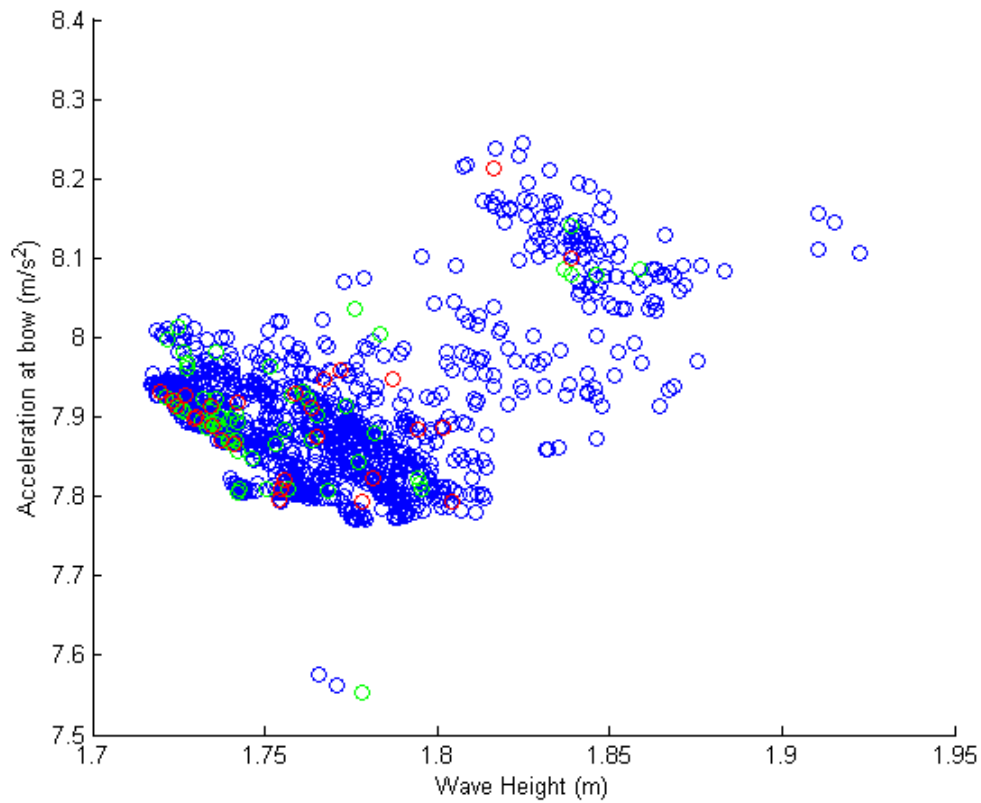


Διάγραμμα 6.7 Βελτιστοποίηση συμπεριφοράς σε κυματισμούς για ταχύτητα $V = 10,905 \text{ m/s}$

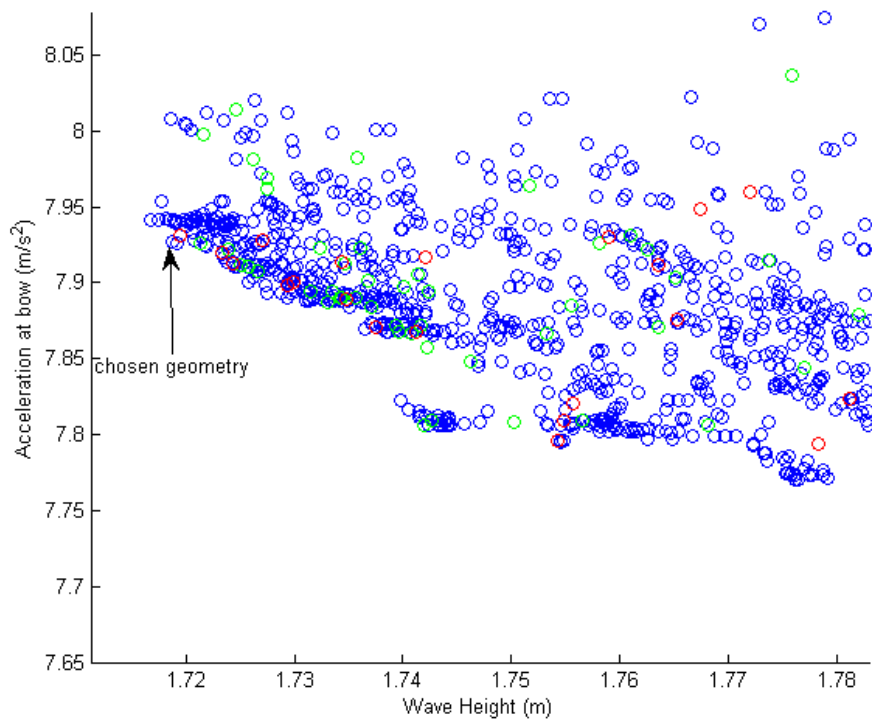
Αρχικά φαίνεται πως η συνολική μείωση της επιτάχυνσης στην πλώρη είναι 14,11 %. Βλέπουμε επίσης πως η συνεισφορά του πρώτου σταδίου είναι μικρότερη από του δευτέρου στην συνολική μείωση όπως ακριβώς συνέβη και με την περίπτωση της αντίστασης κυματισμού.

1^ο στάδιο σε αριθμό Froude 0,68

Αρχικά φαίνεται η κατανομή των γεωμετριών στο επίπεδο των κριτηρίων βελτιστοποίησης και ακολούθως το ίδιο διάγραμμα με εστίαση στην περιοχή ενδιαφέροντος.



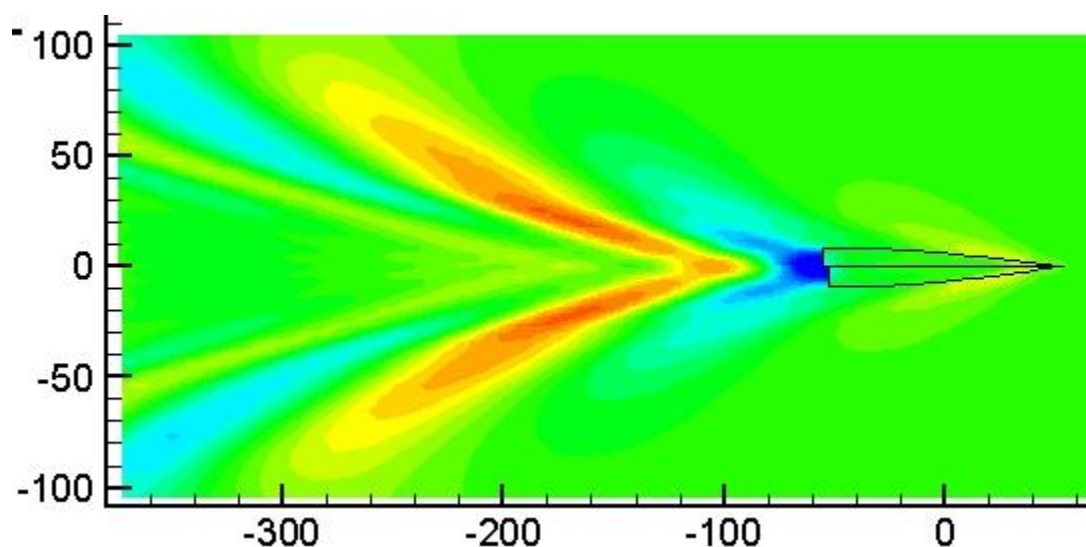
Διάγραμμα 6.8.α Κατανομή γεωμετριών. Μέγιστο ύψος κύματος – Επιτάχυνση στην πλώρη



Διάγραμμα 6.8.β Κατανομή γεωμετριών. Μέγιστο ύψος κύματος – Επιτάχυνση στην πλώρη

Στη συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε μία κεκλιμένη συνοριακή καμπύλη στην οποία διαφαίνονται γεωμετρίες των τελευταίων γενεών ωστόσο ούτε από αυτές ούτε από τις

υπόλοιπες έχουμε κάποια με ξεκάθαρη υπεροχή. Η επιλογή έγινε με γνώμονα κυρίως την αντίσταση κυματισμού μετά από σύγκριση των χαρακτηριστικών της επιλεγείσας με κάποιες γειτονικές της. Μια από αυτές ανήκει στην τελευταία γενιά κι έχει παραπλήσια χαρακτηριστικά, ωστόσο τοποθετείται σε δυσμενέστερη θέση στο διάγραμμα και φαίνεται πάνω δεξιά από την επιλεγείσα και κοντά σε αυτή. Παρότι όσον αφορά τα δύο κριτήρια βελτιστοποίησης η γεωμετρία της τελευταίας γενιάς είναι χειρότερη, από πλευράς συνολικής αντίστασης κυματισμού έχει μικρότερη τιμή. Πρακτικά οι δύο γεωμετρίες είναι ισοδύναμες και οι διαφορές των τιμών των χαρακτηριστικών τους αμελητέες. Προκειμένου να δοθεί μια τάξη μεγέθους αναφέρεται πως το μέγιστο ύψος κύματος που παράγεται από αυτή της τελευταίας γενιάς είναι κατά 0,058% μεγαλύτερο ενώ η συνολική αντίσταση κυματισμού της κατά 0,34% μικρότερη. Σημειώνεται επίσης πως αυτό το φαινόμενο δεν είναι συχνό και μπορεί να προκύψει σε εξαιρετικές περιπτώσεις και μόνο σε παραπλήσιες γεωμετρίες. Αυτή λοιπόν η ασυμφωνία σε καμία περίπτωση δεν καθιστά μη αποδεκτή την επιλεγείσα μέθοδο εκτίμησης της αντίστασης. Σημειώνεται επίσης πως ο λόγος που έχει χρησιμοποιηθεί σαν κριτήριο, το μέγιστο ύψος κύματος και όχι η τιμή της αντίστασης κυματισμού, είναι πως αυτή υπολογίζεται αμελώντας, όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα, τα συνεκτικά φαινόμενα που έχουν κάποια επιρροή στην συνολική συμπεριφορά όσον αφορά της αντίστασης. Συνεπώς και στις δύο περιπτώσεις έχουμε στην πραγματικότητα εκτίμηση του φαινομένου της αντίστασης κι επομένως καμία από τις δύο δεν μπορεί να χαρακτηριστεί οδηγός στην εξαγωγή συμπερασμάτων ακριβείας. Στη συνέχεια φαίνεται το παραγόμενο πεδίο κυματισμών.



Εικόνα 6.10 Πεδίο παραγόμενων κυματισμών σκάφους σε ταχύτητα πλεύσης $V = 21,81 \text{ m/s}$

Στο πεδίο κυματισμών εντοπίζουμε μικρότερες μέγιστες τιμές για τη βελτιστοποιημένη, τόσο στην κορυφή όσο και στην κοιλάδα του αποκλίνοντος κυματισμού. Οι διαφορές είναι

δυσδιάκριτες ωστόσο υπαρκτές ενώ οι βελτιώσεις θα παρατεθούν και σχολιαστούν συγκεντρωτικά μετά το δεύτερο στάδιο βελτιστοποίησης. Ακολούθως φαίνεται ο πίνακας με τις αρχικές και τελικές κύριες διαστάσεις.

	Πατρική γεωμετρία	Βελτιστοποιημένη γεωμετρία
Μήκος ισάλου	104,9	109,581
Πλάτος	20,85	19,975
Βύθισμα	2,91	2,794

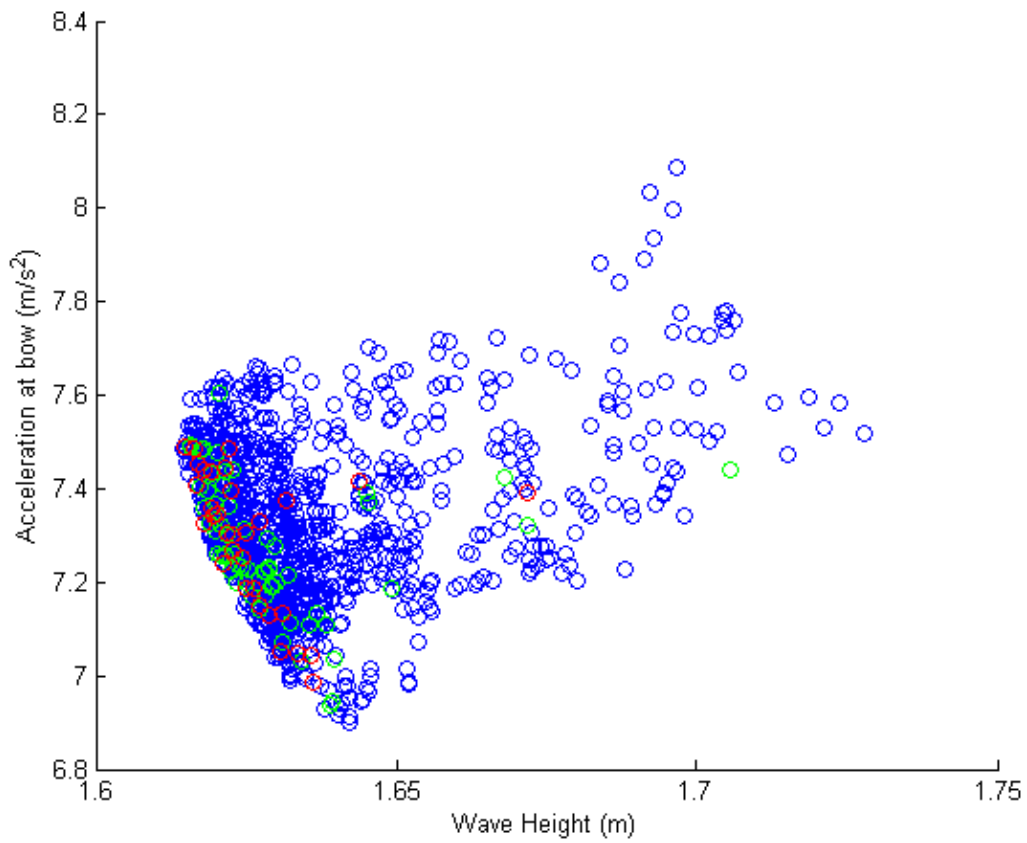
Πίνακας 6.6 Τιμές μεταβλητών σχεδίασης πατρικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας

Στο παραπάνω πίνακα έχουμε και πάλι τις αναμενόμενες μεταβολές καθώς το βελτιστοποιημένο είναι πιο λεπτόγραμμο από το πατρικό. Αυτή η γεωμετρική μεταβολή είναι σταθερή απεριόριστα και τα όρια ανοχής της επηρεάζονται από άλλες απαιτήσεις όπως η επαρκής ευστάθεια που είναι αύξουσα συνάρτηση του πλάτους και η επιθυμητή διαμόρφωση των εσωτερικών χώρων. Το εκτόπισμα της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας είναι κατά 1,96 % μικρότερο από της πατρικής ενώ για τη δεδομένη ταχύτητα αυτή πλέει σε αριθμό Froude :

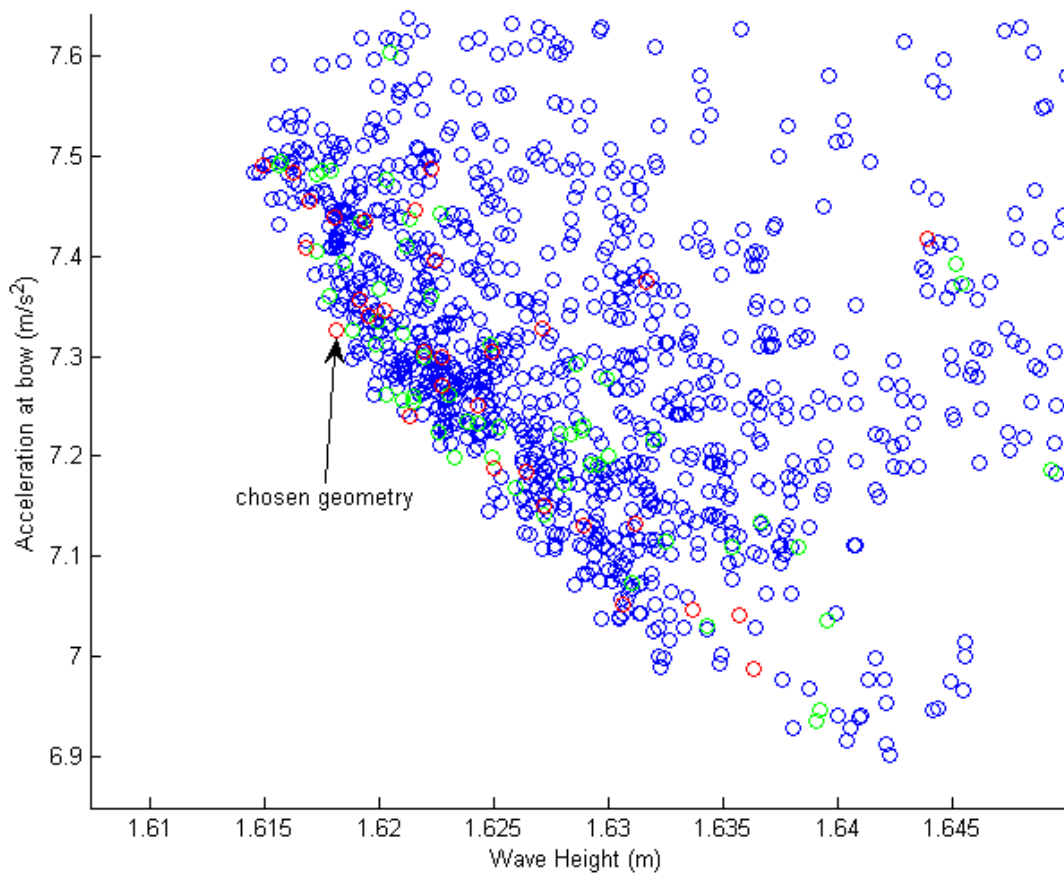
$$Fn = \frac{V}{\sqrt{gL}} = \frac{21,81 \frac{m}{s}}{\sqrt{9,80665 \frac{m}{s^2} \cdot 109,581 m}} = 0,665$$

2^ο στάδιο σε αριθμό Froude 0,665

Όπως και πριν σε αυτό το στάδιο οι κύριες διαστάσεις διατηρούνται σταθερές και ίσες με αυτές της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας. Στη συνέχεια φαίνεται το διάγραμμα των παραγόμενων γεωμετριών και το αντίστοιχο με εστίαση.

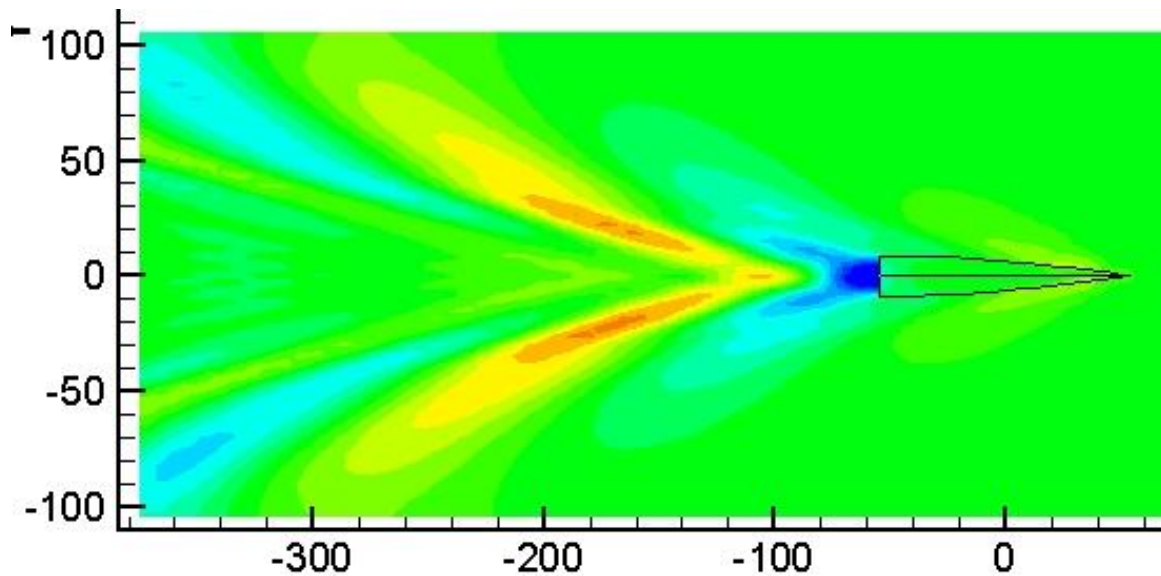


Διάγραμμα 6.9.α Κατανομή γεωμετριών. Μέγιστο ύψος κύματος - Επιτάχυνση στην πλώρη



Διάγραμμα 6.9.β Κατανομή γεωμετριών. Μέγιστο ύψος κύματος - Επιτάχυνση στην πλώρη

Σε αυτή την περίπτωση έχουμε, όπως και σε προηγούμενο διάγραμμα, μια τυπική μορφή συνοριακής καμπύλης βελτιστών που δεν μας επιτρέπει να ξεχωρίσουμε μια γεωμετρία. Κατά συνέπεια για την επιλογή της σχεδίασης που φαίνεται στην παραπάνω εικόνα λήφθηκαν υπ' όψιν πρωτίστως η αντίσταση κυματισμού, και στη συνέχεια η τιμή της επιτάχυνσης στην πλώρη καθώς και η διαφορά εκτοπίσματος από τη βελτιστοποιημένη του πρώτου σταδίου που στην προκειμένη περίπτωση είναι η αρχική του δευτέρου. Στη συνέχεια φαίνεται το πεδίο των παραγόμενων κυματισμών.



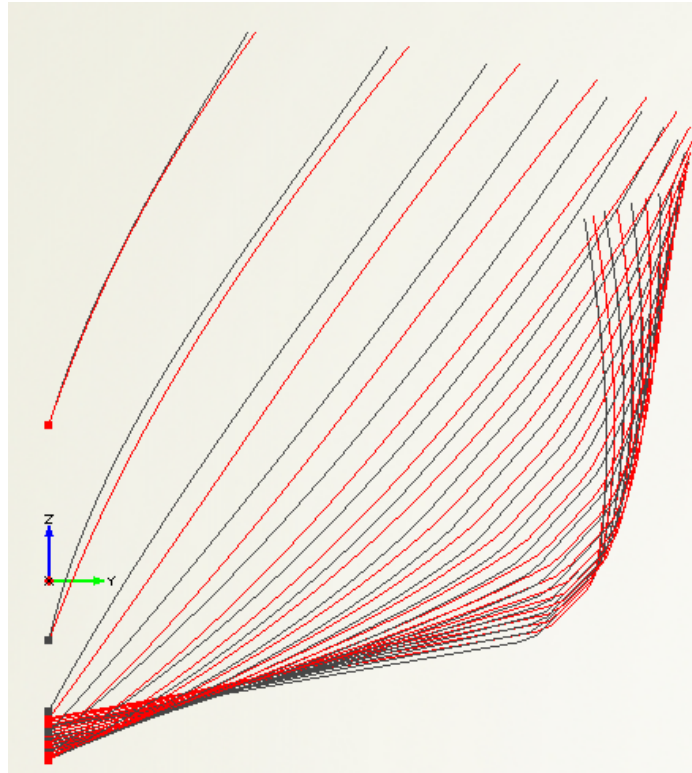
Εικόνα 6.11 Πεδίο παραγόμενων κυματισμών σκάφους σε ταχύτητα πλεύσης $V = 21,81 \text{ m/s}$

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται όπως και πριν η βέλτιστη του πρώτου και η βέλτιστη του δευτέρου σταδίου κι επομένως δεν έχουμε καμία σύγκριση με την πατρική παρά μόνο τα αποτελέσματα του δευτέρου σταδίου βελτιστοποίησης. Οι βελτιώσεις είναι εμφανείς τόσο στις μέγιστες τιμές κορυφών και κοιλάδων όσο και στην έκταση των ισοϋψών περιοχών. Στη συνέχεια φαίνεται ο πίνακας με τις τιμές των μεταβλητών σχεδίασης της βελτιστοποιημένης και της πατρικής σχεδίασης. Υπενθυμίζεται πως στο πρώτο στάδιο δεν μεταβάλλονται αυτές οι μεταβλητές κι επομένως οι τιμές της αρχικής και της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας του πρώτου σταδίου είναι οι ίδιες.

	Πατρική γεωμετρία	Βελτιστοποιημένη γεωμετρία
Γωνία εφαπτομένης της γάστρας στην προωραία κάθετο (°)	80	75,186
Απόσταση μεταξύ των ακμών (m)	0,48	0,34
Γωνία ανύψωσης πυθμένα (-)	0,8019	0,7664
Γωνία εφαπτομένης στο κατάστρωμα (-)	0,8867	0,8465
Διαμήκης θέση μεγίστου βυθίσματος (-)	0,7	0,76
Βύθισμα στον καθρέφτη (m)	2,25	2,139
Εμβαδό επιφάνειας καταστρώματος στο προωραίο τμήμα (m ²)	462,11	482,7

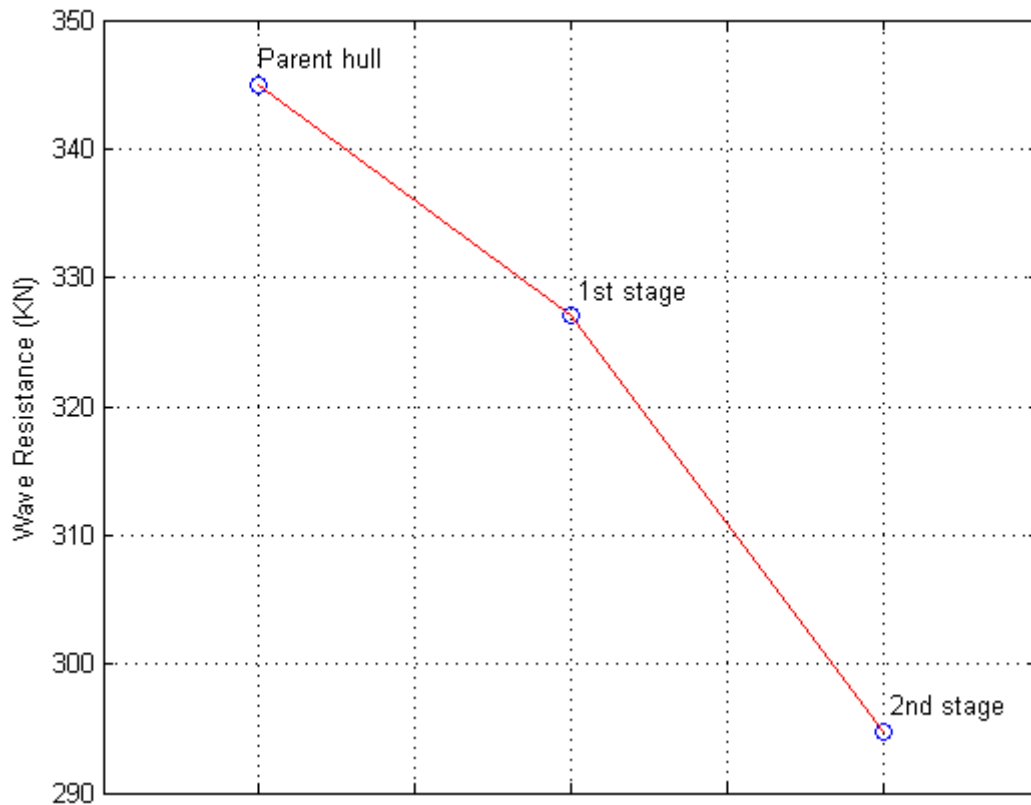
Πίνακας 6.7 Τιμές μεταβλητών σχεδίασης πατρικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας

Οι μεταβολές των τιμών των μεταβλητών γι' αυτή την ταχύτητα είναι ανάλογες της αντίστοιχης βελτιστοποίησης της πατρικής γάστρας με εξαίρεση τις περιπτώσεις των γωνιών ανύψωσης πυθμένα κι εφαπτομένης καταστρώματος. Θα πρέπει όμως να σημειωθεί πως οι δύο αυτές μεταβολές έχουν αντικρουόμενη συμβολή στο εμβαδό των προωραίων εγκαρσίων τομών και άρα η διαφοροποίηση σε σχέση με τη βελτιστοποιημένη γάστρα της πρώτης περίπτωσης, είναι μικρότερη από την περίπτωση που η μεταβολή της μιας από τις δύο μεταβλητές ταυτιζόταν. Ακολούθως φαίνεται το σχέδιο εγκαρσίων τομών πατρικής και τελικά βέλτιστης σχεδίασης.



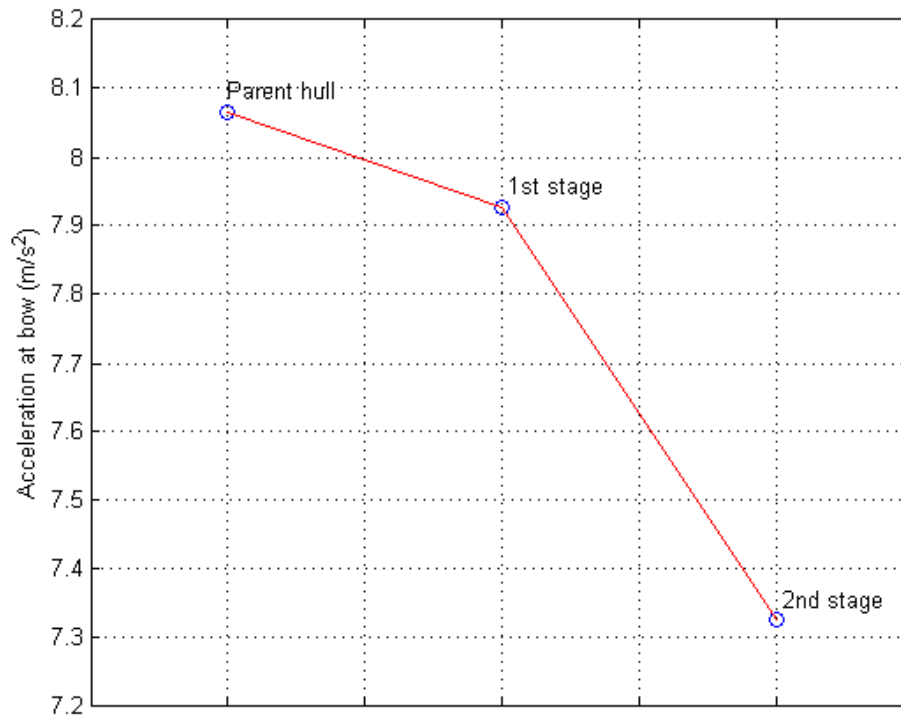
Εικόνα 6.12 Εγκάρσιες τομές πατρικής και βελτιστοποιημένης γάστρας

Το εκτόπισμα της βέλτιστης γεωμετρίας του δευτέρου σταδίου είναι κατά 0,7 % μικρότερο από τη βέλτιστη του πρώτου σταδίου κάτι που σημαίνει πως η διαφορά είναι σχετικά μικρή. Στη συνέχεια φαίνεται το διάγραμμα βελτίωσης της αντίστασης κυματισμού.



Διάγραμμα 6.10 Βελτιστοποίηση αντίστασης κυματισμού για ταχύτητα $V = 21,81 \text{ m/s}$

Αρχικά, όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα, έχουμε συνολική μείωση της αντίστασης κυματισμού και από τα δύο στάδια 14,58 %. Και πάλι η συνεισφορά του δευτέρου σταδίου στη συνολική μείωση είναι μεγαλύτερη από του πρώτου αν και αυτή τη φορά η διαφορά είναι μικρότερη. Στη συνέχεια φαίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα που αφορά την συμπεριφορά του σκάφους σε κυματισμούς.

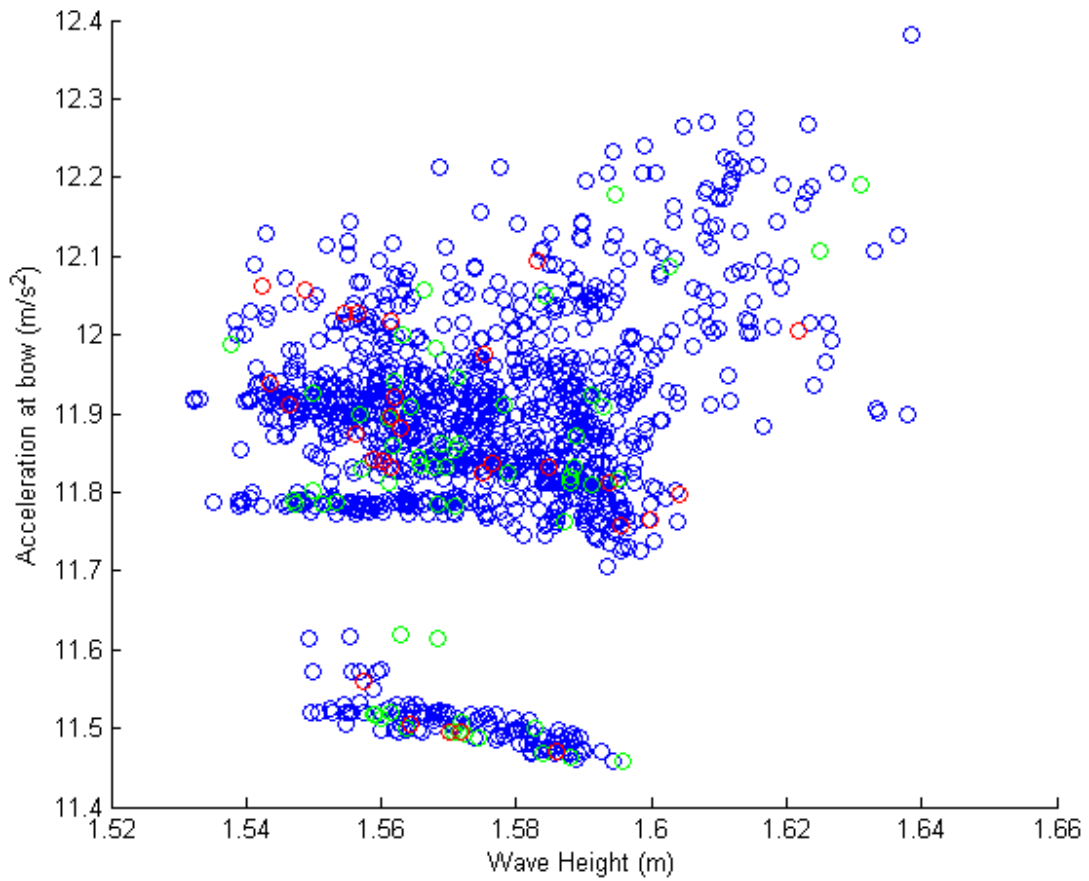


Διάγραμμα 6.11 Βελτιστοποίηση συμπεριφοράς σε κυματισμούς για ταχύτητα $V = 21,81 \text{ m/s}$

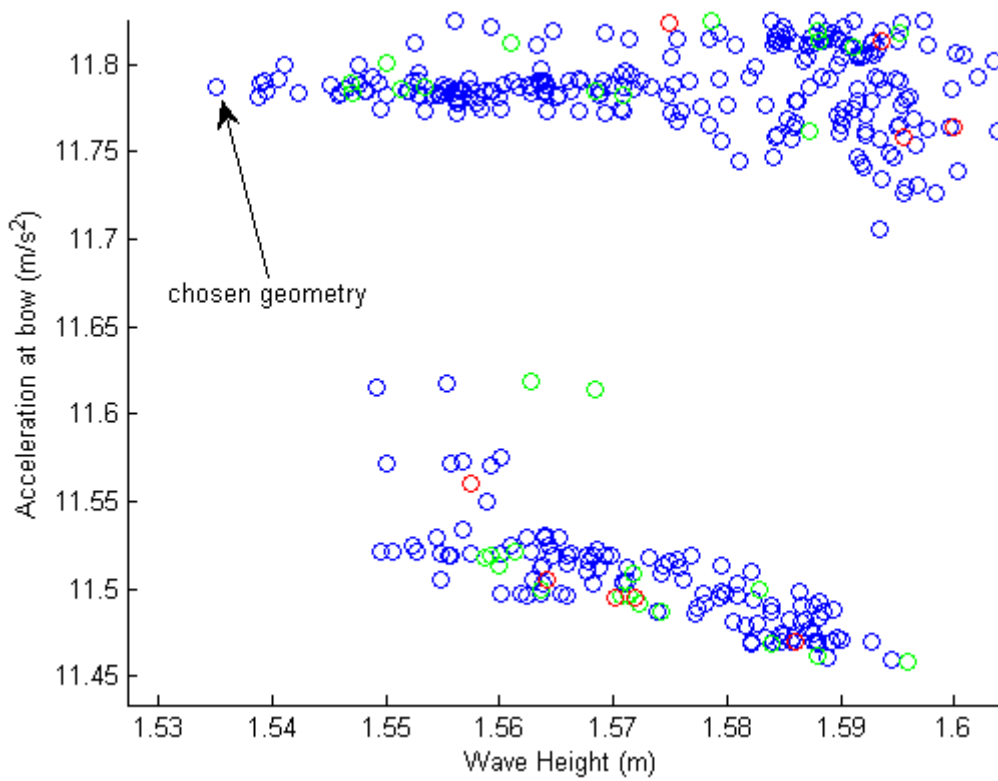
Η συνολική μείωση της τιμής του RAO της επιτάχυνσης στην πλώρη είναι 9,17 %. Και σε αυτή την περίπτωση η συνεισφορά του δευτέρου σταδίου στη συνολική μείωση είναι μεγαλύτερη από του πρώτου.

1^ο στάδιο σε αριθμό Froude 1,02

Αρχικά φαίνονται τα διαγράμματα κατανομής των γεωμετριών.

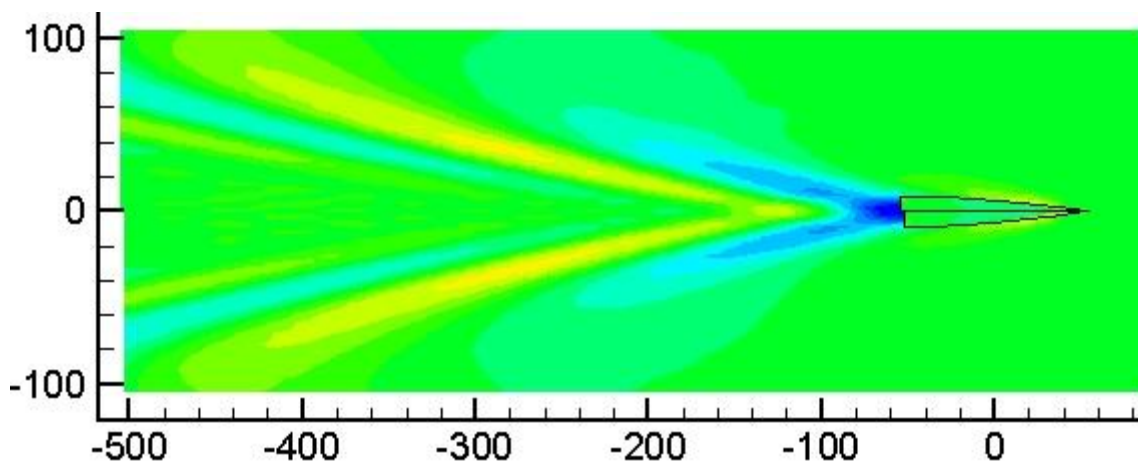


Διάγραμμα 6.12.α Κατανομή γεωμετριών. Μέγιστο ύψος κύματος - Επιτάχυνση στην πλώρη



Διάγραμμα 6.12.β Κατανομή γεωμετριών. Μέγιστο ύψος κύματος - Επιτάχυνση στην πλώρη

Εδώ έχουμε μια οριζόντια μορφή της συνοριακής καμπύλης βελτιστών και η επιλογή της γεωμετρίας είναι σχετικά προφανής. Η περιοχή ασυνέχειας δημιουργεί το πρόβλημα επιλογής ακραίων περιπτώσεων καθώς δεν μπορεί να επιλεγεί μια γεωμετρία με σταθμισμένες τιμές κριτηρίων βελτιστοποίησης. Υπό αυτή την έννοια η επιλογή τελικά καθίσταται εύκολη υπόθεση καθώς όπως έχει γίνει και νωρίτερα θα δοθεί βάση στην αντίσταση κυματισμού. Πριν την τελική επιλογή γεωμετρίας εξετάστηκαν και ορισμένες της ομάδας που φαίνεται, με μικρές τιμές επιτάχυνσης της πλώρης, ωστόσο αποτελούν μη αποδεκτές σχεδιάσεις από πλευράς γεωμετρικών χαρακτηριστικών. Στην προκειμένη περίπτωση δηλαδή οι γεωμετρίες με καλή συμπεριφορά σε κυματισμούς και ταυτόχρονα αποδεκτή τιμή αντίστασης που φαίνονται στο αριστερό άκρο της ομάδας γεωμετριών χαμηλά, δεν αποτελούν πιθανή εναλλακτική επιλογή. Στη συνέχεια φαίνεται το πεδίο των παραγόμενων κυματισμών.



Εικόνα 6.13 Πεδίο παραγόμενων κυματισμών σκάφους σε ταχύτητα πλεύσης $V = 32,715 \text{ m/s}$

Όπως φαίνεται και στην παραπάνω εικόνα οι διαφορές είναι μικρές και εντοπίζονται στο εύρος των μεγίστων κορυφών των αποκλινόντων κυματισμών. Οι τιμές των μεταβλητών σχεδίασης φαίνονται στον επόμενο πίνακα.

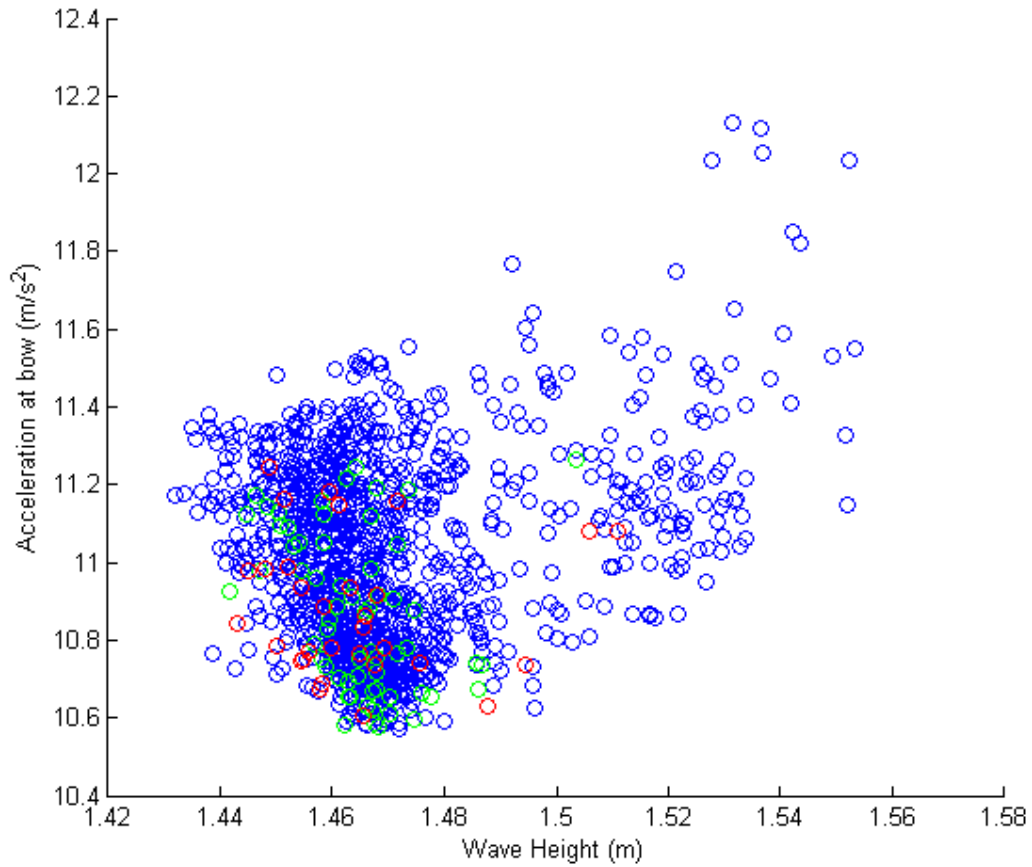
	Πατρική γεωμετρία	Βελτιστοποιημένη γεωμετρία
Μήκος ισάλου	104,9	109,547
Πλάτος	20,85	20,456
Βύθισμα	2,91	2,963

Πίνακας 6.8 Τιμές μεταβλητών σχεδίασης πατρικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας

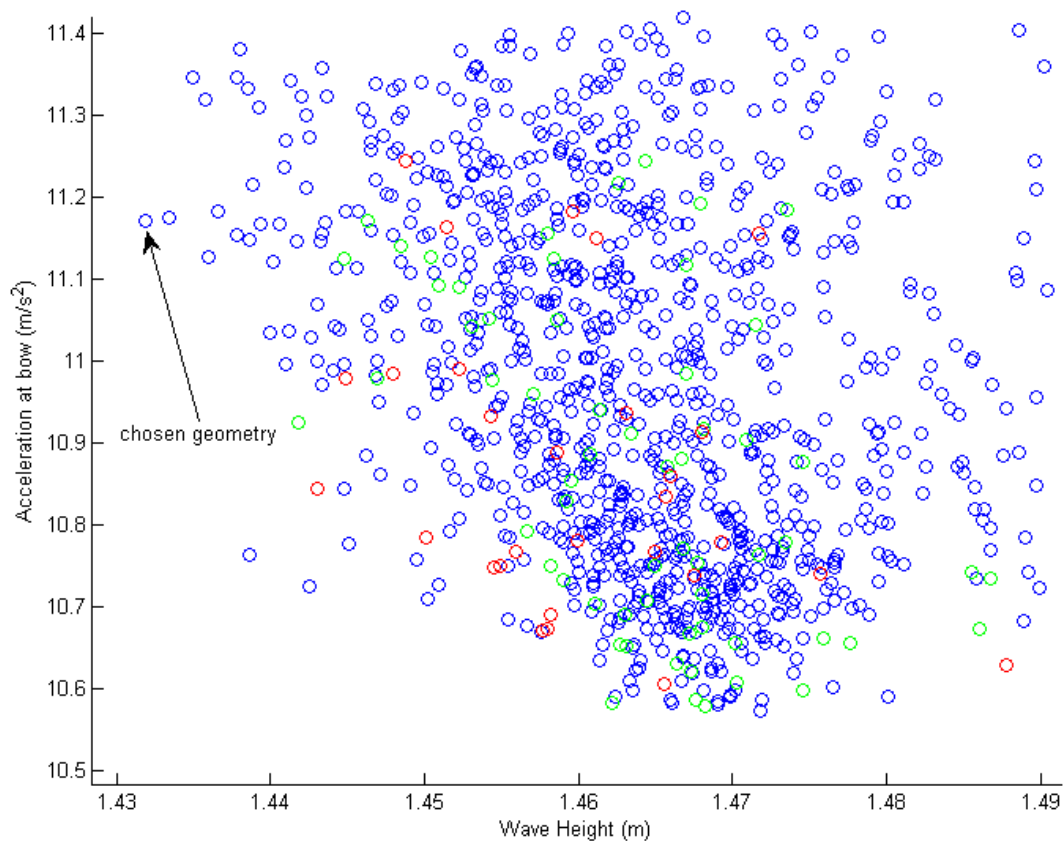
Κατά τα γνωστά το βελτιστοποιημένο σκάφος είναι πιο λεπτόγραμμο από το πατρικό όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα. Το εκτόπισμα της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας είναι κατά 3,59 % μεγαλύτερο από της πατρικής ενώ για τη δεδομένη ταχύτητα πλέει σε αριθμό Froude :

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{gL}} = \frac{32,715 \frac{m}{s}}{\sqrt{9,80665 \frac{m}{s^2} \cdot 109,547 m}} = 0,998$$

2^ο στάδιο σε αριθμό Froude 0,998

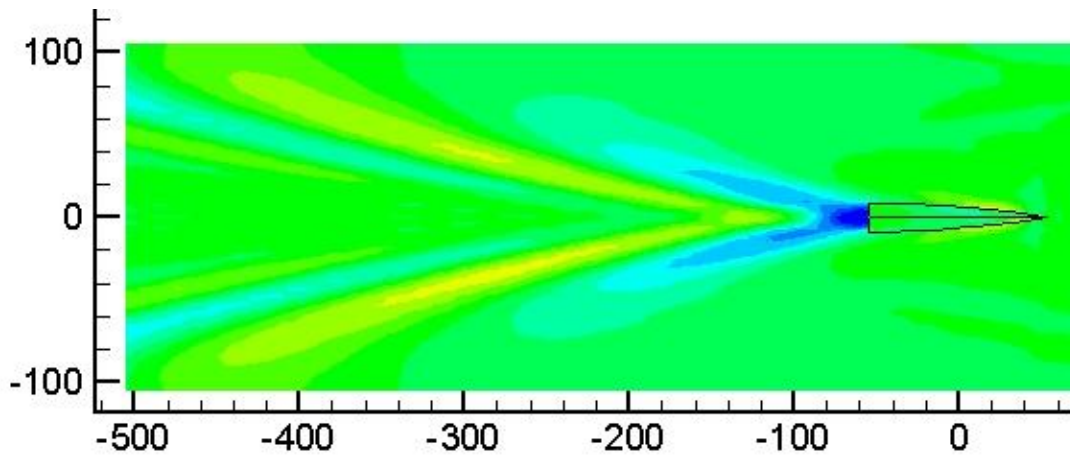


Διάγραμμα 6.13.α Κατανομή γεωμετριών. Μέγιστο ύψος κύματος – Επιτάχυνση στην πλώρη



Διάγραμμα 6.13.β Κατανομή γεωμετριών. Μέγιστο ύψος κύματος - Επιτάχυνση στην πλώρη

Εδώ έχουμε μια σχετική διασπορά γεωμετριών στην περιοχή βελτίστων που μας οδηγεί σε διαλογή μεταξύ περιορισμένου αριθμού γεωμετριών. Η τελική επιλογή της γεωμετρίας που φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα έγινε μετά την εξέταση και σύγκριση των χαρακτηριστικών της με εξίσου καλές σχεδιάσεις. Για παράδειγμα εξετάστηκε και η σχεδίαση που φαίνεται κάτω από την επιλεγείσα και φαινομενικά έχει μια καλύτερη συσχέτιση κριτηρίων βελτιστοποίησης από αυτή. Ο λόγος που απορρίφθηκε είναι πως έχει ανεπαρκώς μικρότερη αντίσταση κυματισμού από την αρχική, κριτήριο που εξ' αρχής έχει μεγαλύτερη βαρύτητα. Ο λόγος που απαιτείται να επιλεγεί ένα από τα δύο κριτήρια ως προτιμητέο είναι ακριβώς αυτές οι περιπτώσεις όπου η επιλογή της βέλτιστης γεωμετρίας δεν είναι προφανής. Στη συνέχεια φαίνεται το παραγόμενο πεδίο κυματισμών από κάθε σχεδίαση.



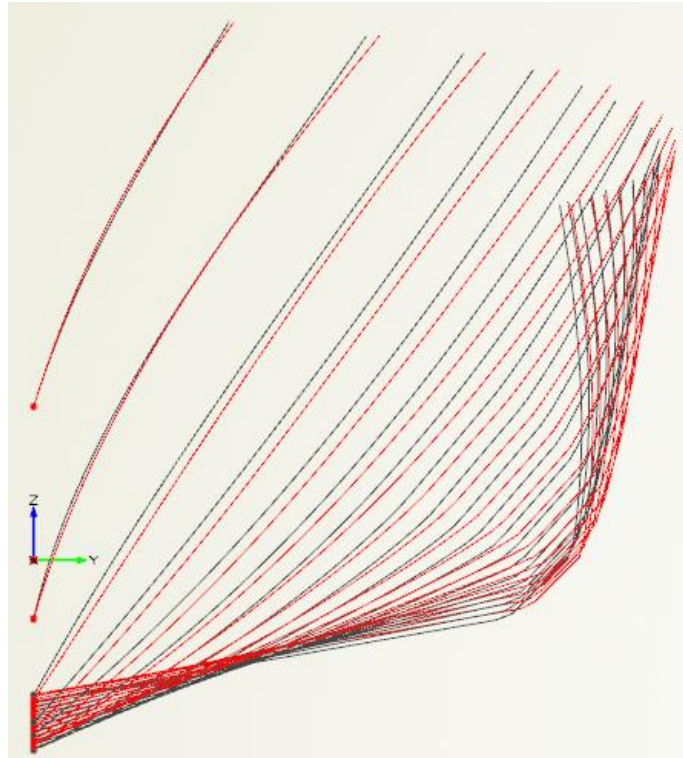
Εικόνα 6.14 Πεδίο παραγόμενων κυματισμών σκάφους σε ταχύτητα πλεύσης $V = 32,715 \text{ m/s}$

Στην παραπάνω εικόνα η βελτίωση της αντίστασης είναι εμφανής τόσο στην περιοχή κορυφής όσο και στην κοιλάδα κοντά στην πρύμνη. Ακολούθως φαίνεται ο πίνακας των τιμών των μεταβλητών σχεδίασης.

	Πατρική γεωμετρία	Βελτιστοποιημένη γεωμετρία
Γωνία εφαπτομένης της γάστρας στην προωαία κάθετο ($^{\circ}$)	80	78,88
Απόσταση μεταξύ των ακμών (m)	0,48	0,388
Γωνία ανύψωσης πυθμένα (-)	0,8019	0,772
Γωνία εφαπτομένης στο κατάστρωμα (-)	0,8867	0,844
Διαμήκης θέση μεγίστου βυθίσματος (-)	0,7	0,752
Βύθισμα στον καθρέφτη (m)	2,25	2,141
Εμβαδό επιφανείας καταστρώματος στο προωαίο τμήμα (m^2)	462,11	480,81

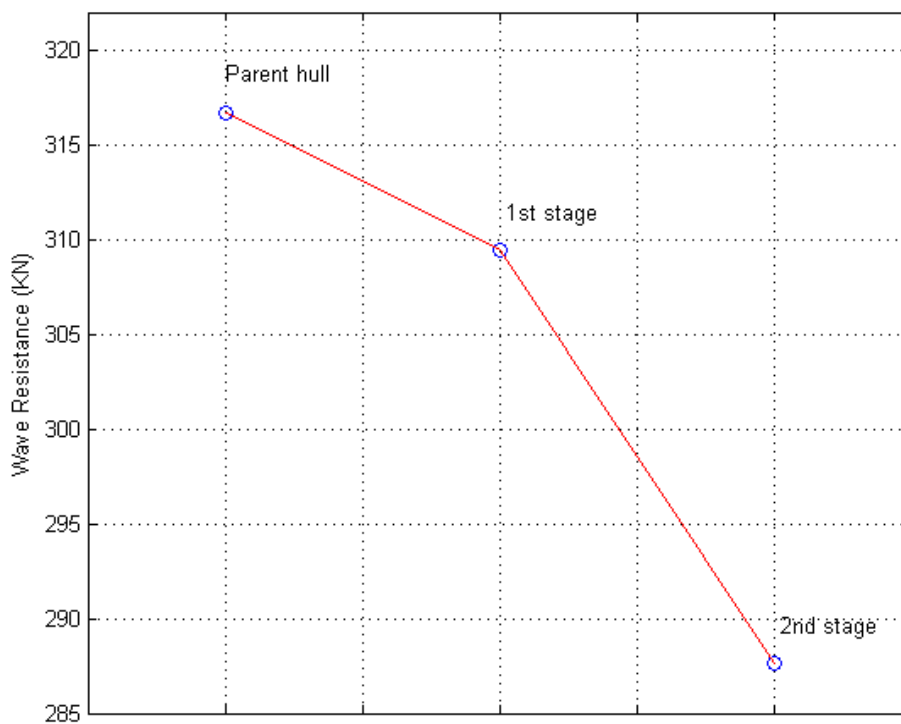
Πίνακας 6.9 Τιμές μεταβλητών σχεδίασης πατρικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας

Σε αυτή την περίπτωση έχουμε αντίστοιχες μεταβολές των μεταβλητών σχεδίασης με την περίπτωση της βελτιστοποίησης της πατρικής γεωμετρίας με εξαίρεση το μήκος μεταξύ των ακμών όπου έχουμε μείωση έναντι αύξησης στην περίπτωση βελτιστοποίησης της πατρικής γεωμετρίας. Διαφορά εντοπίζεται επίσης στη γωνία της γάστρας στην προωαία κάθετο όπου έχουμε μείωση μικρότερη κλίμακας σε σχέση με την πρώτη περίπτωση βελτιστοποίησης. Γενικώς δηλαδή μπορεί να μην έχουμε ταύτιση των μεταβολών αλλά έχουμε μια αντίστοιχη τάση για τις περισσότερες από τις μεταβλητές σχεδίασης. Υπενθυμίζεται επίσης πως τα αποτελέσματα αυτής της ταχύτητας πρέπει να αντιμετωπίζονται με κάποια επιφύλαξη. Στη συνέχεια φαίνεται το σχέδιο εγκαρσίων τομών αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας.



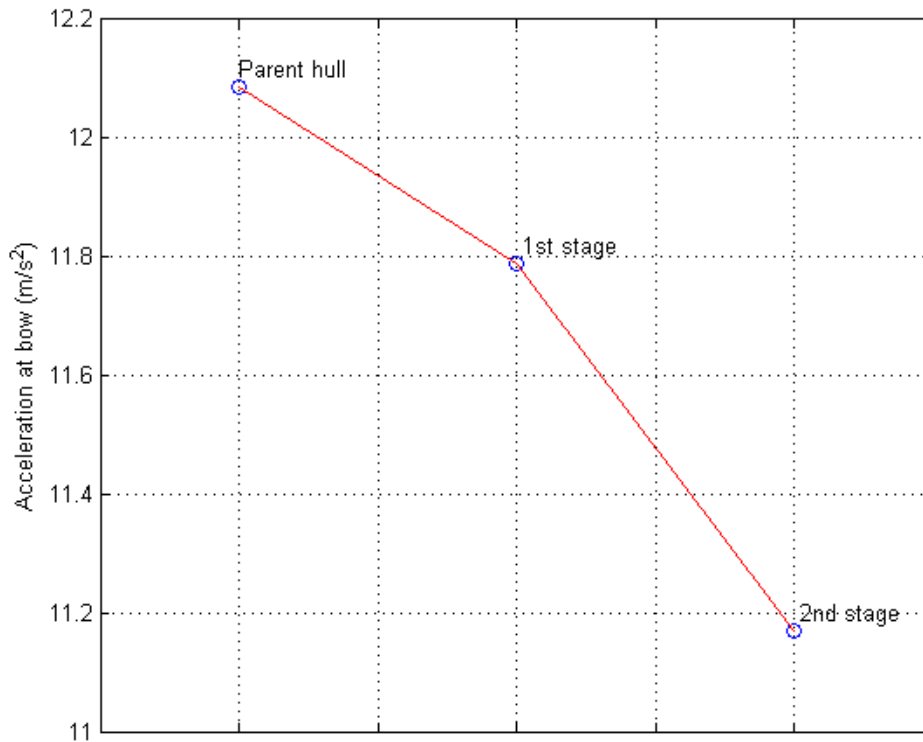
Εικόνα 6.15 Εγκάρσιες τομές πατρικής και βελτιστοποιημένης γάστρας

Το εκτόπισμα της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας είναι μικρότερο κατά ποσοστό 1,68%. Στη συνέχεια φαίνεται το διάγραμμα βελτίωσης της αντίστασης κυματισμού.



Διάγραμμα 6.14 Βελτιστοποίηση αντίστασης κυματισμού για ταχύτητα $V = 32,715 \text{ m/s}$

Όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα η συνεισφορά του δευτέρου σταδίου είναι και πάλι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτή του πρώτου. Η συνολική μείωση της αντίστασης κυματισμού είναι 9,19 %. Στη συνέχεια φαίνεται το αντίστοιχο διάγραμμα της επιτάχυνσης της πλώρης.



Διάγραμμα 6.15 Βελτιστοποίηση συμπεριφοράς σε κυματισμούς για ταχύτητα $V = 32,715 \text{ m/s}$

Τέλος και σε αυτή την περίπτωση, μεγαλύτερη συνεισφορά στη συνολική μείωση της τιμής του RAO της επιτάχυνσης της πλώρης έχουμε από το δεύτερο στάδιο βελτιστοποίησης. Η συνολική μείωση αυτής της τιμής είναι 7,59 % μεταξύ πατρικής και τελικά βέλτιστης γεωμετρίας.

Συμπεράσματα

Στην παρούσα μελέτη πραγματοποιήθηκε προσπάθεια βελτιστοποίησης των χαρακτηριστικών αντίστασης κυματισμού και συμπεριφοράς σε κυματισμούς ενός σκάφους ημικτοπίσματος δεδομένων των γραμμών σχεδίασης της πατρικής γεωμετρίας της συστηματικής σειράς ΕΜΠ διπλής ακμής. Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε για δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη είχαμε μεταβολή λεπτομερών χαρακτηριστικών της γάστρας με λόγους διαστάσεων σταθερούς και ίδιους με του πατρικού μοντέλου, ενώ στην δεύτερη εξετάστηκε σε πρώτο στάδιο η βελτιστοποίηση με μεταβλητές τις κύριες διαστάσεις και σε

επόμενο στάδιο η βελτιστοποίηση με μεταβλητές σχεδίασης τις ίδιες της πρώτης περίπτωσης και αρχική γεωμετρία τη βέλτιστη του πρώτου σταδίου.

Στα πλαίσια αυτά χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 10 μεταβλητές σχεδίασης με διαστήματα διακύμανσης που ποικίλουν ανά περίπτωση κι επιλέχθηκαν λαμβάνοντας υπ' όψιν την παραγωγή εφικτών γεωμετριών, την επαρκή διαφοροποίηση των διαφόρων σχεδιάσεων και την εξέταση και σύγκριση σκαφών παραπλήσιου εκτοπίσματος. Οι μεταβλητές σχεδίασης και τα εύρη διακύμανσης τους φαίνονται συγκεντρωτικά ακολούθως.

		Αρχικές τιμές	Εύρη μεταβολής
1	Μήκος ισάλου	104,9	± 5 %
2	Πλάτος	20,85	± 5 %
3	Βύθισμα	2,91	± 5 %
4	Γωνία εφαπτομένης της γάστρας στην προωαία κάθετο (°)	80	-12 %
5	Απόσταση μεταξύ των ακμών (m)	0,48	± 30 %
6	Γωνία ανύψωσης πυθμένα (-)	0,8019	± 5 %
7	Γωνία εφαπτομένης στο κατάστρωμα (-)	0,8867	± 5 %
8	Διαμήκης θέση μεγίστου βυθίσματος (-)	0,7	+ 9 %
9	Βύθισμα στον καθρέφτη (m)	2,25	- 5 %
10	Εμβαδό επιφανείας καταστρώματος στο προωαίο τμήμα (m ²)	462,11	± 5 %

Πίνακας 6.10 Αρχικές τιμές κι εύρη μεταβλητών σχεδίασης

Οι επτά τελευταίες μεταβλητές σχεδίασης αφορούν τόσο τη βελτιστοποίηση της πρώτης περίπτωσης όσο και το δεύτερο στάδιο της δεύτερης, ενώ οι τρεις πρώτες το πρώτο στάδιο της δεύτερης περίπτωσης. Συνολικά παρήχθησαν κι εξετάστηκαν 11.520 γεωμετρίες εκ των οποίων πολλές απορρίφθηκαν είτε λόγω παραβίασης περιορισμών που τέθηκαν για λόγους που έχουν επεξηγηθεί, είτε λόγω γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους, που δεν ήταν αποδεκτά. Από τις υπόλοιπες που θεωρήθηκαν κατ' αρχήν αποδεκτές επιλέχθηκαν κατά περίπτωση και με συγκεκριμένα κριτήρια, γεωμετρίες που είχαν καλά χαρακτηριστικά συμπεριφοράς κατά την πλεύση.

Τα κριτήρια με βάση τα οποία έγινε η βελτιστοποίηση ήταν η αντίσταση κυματισμού και η επιτάχυνση στην πλώρη κατά την πλεύση σε τυχαίους κυματισμούς. Η αντίσταση κυματισμού εκτιμήθηκε αναλύοντας το πεδίο των παραγόμενων κυματισμών και συγκεκριμένα συγκρίνοντας το μέγιστο ύψος των αποκλινόντων κυματισμών σε μια διαμήκη τομή σε εγκάρσια απόσταση που είναι συνάρτηση του μήκους ισάλου κάθε σκάφους. Η επιτάχυνση στην πλώρη υπολογίστηκε με χρήση της θεωρίας λωρίδων επιλύοντας το δυσδιάστατο πρόβλημα με χρήση της θεωρίας του Frank. Από τις τιμές του RAO της

επιτάχυνσης στην πλήρη απομονώθηκε η μέγιστη τιμή επιτάχυνσης που προκαλείται από κυματισμό συγκεκριμένης συχνότητας και αυτή αποτέλεσε την αλγεβρική τιμή του δευτέρου κριτηρίου. Από τα δύο αυτά κριτήρια θεωρήθηκε υψηλότερης σημασίας η αντίσταση κυματισμού καθώς αποτελεί παράγοντα του οποίου μικρομεταβολές επηρεάζουν άμεσα την οικονομική αποδοτικότητα του σκάφους σε αντίθεση με την συμπεριφορά του σκάφους σε κυματισμούς. Σε περιπτώσεις που υπήρχε η ευχέρεια επιλογής μεταξύ πολυάριθμων γεωμετριών επιδιώχθηκε μια σταθμισμένη αναλογία μεταξύ των δύο αυτών κριτηρίων. Υπήρξαν όμως και περιπτώσεις όπου, λόγω διασποράς των λύσεων δεν υπήρχε επαρκής αριθμός πιθανών σχεδιάσεων και η τελική επιλογή θα οδηγούσε αναπόφευκτα σε κάποιο μη αμελητέο κόστος για ένα από τα δύο κριτήρια. Σε αυτές λοιπόν τις περιπτώσεις, η επιλογή της σχεδίασης ήταν στην πραγματικότητα προσπάθεια εύρεσης της γεωμετρίας με την ελάχιστη αντίσταση που θα εξασφάλιζε ταυτόχρονα μια καλή συμπεριφορά σε κυματισμούς.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα παρατηρήθηκε πως η βελτιστοποίηση με διακύμανση των κυρίων διαστάσεων έδωσε μικρότερα περιθώρια βελτίωσης των δύο κριτηρίων, σε σχέση με τη βελτιστοποίηση με γνώμονα τις υπόλοιπες μεταβλητές. Αυτό δεν είναι κάτι προφανές καθώς οι κύριες διαστάσεις προκαλούν αρκετά μεγαλύτερες μεταβολές στη γεωμετρία σε σχέση με τις υπόλοιπες. Σημαντική όμως παρατήρηση που πρέπει να γίνει είναι πως εκτός από το βύθισμα στον καθρέφτη και την απόσταση μεταξύ των ακμών, όλες οι υπόλοιπες μεταβλητές του δευτέρου σταδίου επηρεάζουν σημαντικά το εκτόπισμα στο προωαίο τμήμα της γάστρας που είναι καθοριστικό τόσο στον καθορισμό της συμπεριφοράς του σκάφους σε κυματισμούς όσο και στην αναπτυσσόμενη αντίσταση. Σχετικά με τα τις επιτευχθείσες βελτιώσεις τα αποτελέσματα κρίνονται αρκετά ικανοποιητικά καθώς έχουμε σημαντικά ποσοστά μείωσης και για τα δύο κριτήρια. Τα ποσοστά αυτά φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

	Μείωση αντίστασης κυματισμού (%)	Μείωση τιμής RAO επιτάχυνσης στην πλήρη (%)
Βελτιστοποίηση πατρικής γάστρας		
Froude number : 0,34	13,53	10,4
Froude number : 0,68	8,9	8,14
Froude number : 1,02	2,25	8,25
Βελτιστοποίηση δύο σταδίων		
Froude number : 0,34	16,68	14,11
Froude number : 0,68	14,58	9,17
Froude number : 1,02	9,19	7,59

Πίνακας 6.11 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα βελτιστοποίησης

Θα πρέπει τέλος να σημειωθεί πως η δυναμική συμπεριφορά του σκάφους και πρωτίστως η αντίσταση που αυτό θα παρουσιάσει είναι φαινόμενα άμεσα συναρτημένα με τη συνεκτικότητα η οποία παραλείπεται στα πλαίσια της δυναμικής θεωρίας που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη. Τα ρευστομηχανικά αυτά φαινόμενα είναι ενιαία κι ενέργειες όπως η διάσπαση τους σε απλούστερα και η επακόλουθη παράλειψη ορισμένων από αυτά, είναι μια βολική μεν αλλά αυθαίρετη διαδικασία που αναπόφευκτά εισάγει σφάλματα. Η παρουσία τέτοιων σφαλμάτων μπορεί να είναι αποδεκτή, και η μελέτη που τελείται υπό την αποδοχή της ύπαρξής τους, έγκυρη και χρήσιμη, εφόσον πληρείται μια βασική προϋπόθεση. Η διάσταση από το πραγματικό φαινόμενο και οι περιορισμοί που τίθενται επακολούθως λόγω της παρουσίας των παραδοχών, θα πρέπει να είναι γνωστές παράμετροι στον μηχανικό, ούτως ώστε να μπορεί να αξιολογεί ανά περίπτωση αν αυτή η απόκλιση είναι για εκείνον αποδεκτή στα πλαίσια της εκάστοτε μελέτης του.

Βιβλιογραφία

1. A.F. Molland, J.F. Wellicome, P.R. Couser, «Resistance experiments on a systematic series of high speed displacement catamaran forms : variation of length displacement ratio and breadth-draught ratio», 1995
2. Ahmad F. Mohamad Ayob, Tapabrata Ray, Warren Smith, «A Hydrodynamic Preliminary Design Optimization Framework for High Speed Planning Craft»
3. Aravind Seshardi, «A Fast Elitist Multi-Objective Genetic Algorithm: NSGA-II»
4. Daehwan Park, FRIENDSHIP SYSTEMS, «Shape Optimization Using FRIENDSHIP-Framework and STAR-CCM+», Presentation, May 2012, Potsdam, Germany
5. Frank Manual
6. Friendship Systems, Friendship Framework User's Guide, 2012
7. G.J. Grigoropoulos, T. A. Loukakis, Resistance and Seakeeping Characteristics of a Systematic Series in the Pre-planing Condition
8. Gregory Grigoropoulos, Theano Perdikari, Varvara Asouti, Kyriakos Giannakoglou, MDO of Hull Forms Using Low-Cost Evolutionary Algorithms, 2011
9. Gregory J. Grigoropoulos, Dimitra P. Damala, «Dynamic Performance of the NTUA Double-Chine Series Hull Forms in Random Waves», 2011
10. Kalyanmoy Deb, Sameer Agarwal, T. Meyarivan, «A fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm : NSGA-II», 2002
11. Ma. Guadalupe Castillio Tapia, Carlos A. Coello Coello, «Applications of Multi-Objective Evolutionary Algorithms in Economics and Finance : A Survey»
12. P. K. Kundu, I.M. Cohen, «Fluid Mechanics» 4th Edition, 2010
13. Swan 1 Manual, 2001
14. TU Delft, «Introduction in Ship Hydromechanics», 2002
15. TU Delft, «Offshore Hydromechanics», 2001
16. Γ. Α. Αθανασούλη, «Δυναμική Πλοίου κι Εργαστήριο», Αθήνα 2008
17. Γ. Ζαραφωνίτη, Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ. «Μελέτη και Σχεδίαση Πλοίων Νέας Τεχνολογίας»
18. Γ.Κ. Πολίτη, Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. «Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου», Αθήνα, 2011
19. Γεωργίου Τζαμπίρα, Καθηγητή ΕΜΠ, «Αριθμητικές Προσομοιώσεις Υδροδυναμικών Ροών», Αθήνα 1998

20. Γεωργίου Τζαμπίρα, Καθηγητή ΕΜΠ, «Σημειώσεις CFD Revol»
21. Γρ. Γρηγορόπουλου, Καθηγητή ΕΜΠ, Θ. Λουκάκη, Ομότιμου Καθηγητή ΕΜΠ , «Συστηματική Σειρά ΕΜΠ, Περιγραφή και Αποτελέσματα» , Αθήνα 2002
22. Θ.Α. Λουκάκη ομότιμου καθηγητή ΕΜΠ, Γρ. Γρηγορόπουλου Καθηγητή ΕΜΠ «Υδροδυναμική Σχεδίαση Μικρών Σκαφών», Αθήνα, 1996
23. Σ. Τσαγγάρης, «Μηχανική των Ρευστών», Εκδόσεις Συμεών 2005