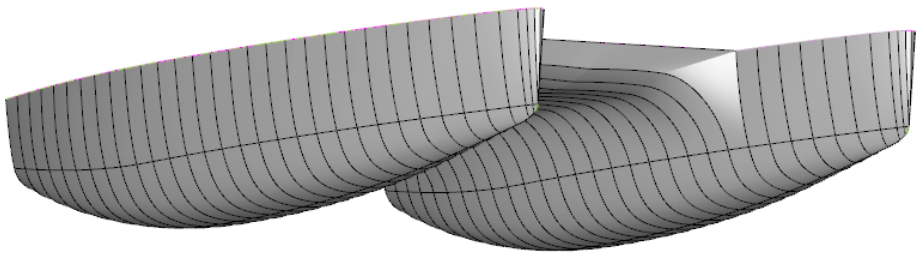
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών

Διπλωματική Εργασία

«Παραμετρική μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση της αντίστασης κυματισμού δίγαστρου ιστιοπλοϊκού»



Καββάς Γεώργιος

Επίβλεψη : Γρηγορόπουλος Γρηγόρης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Πρόλογος

Η παρούσα Διπλωματική εργασία οδήγησε στην αποφοίτησή μου από την σχολή των Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Εκπονήθηκε στον τομέα Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Γ. Γρηγορόπουλου.

Αντικείμενο της εργασίας είναι η παραμετρική μοντελοποίηση γάστρας και βελτιστοποίηση της αντίστασης κυματισμού ενός δίγαστρου ιστιοπλοϊκού σκάφους. Κατά τη διάρκεια της μελέτης, αποκόμισα πολύτιμες γνώσεις στον τομέα της υδροδυναμικής συμπεριφοράς, της παραμετρικής σχεδίασης καθώς και των πολύ χρήσιμων προγραμμάτων CAESES & SHIPFLOW που υποστηρίζουν την ανάλυσή τους. Σε συνδυασμό με τα υπόλοιπα που διδάχτηκα κατά το σύνολο της φοίτησης μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο θεωρώ πως θα αποτελέσουν ένα χρήσιμο υπόβαθρο κατά τη διάρκεια της επαγγελματικής μου καριέρας.

Η ενασχόληση μου με τη Ναυπηγική, δημιούργησε νέους επιστημονικούς ορίζοντες διευρύνοντας τις γνώσεις μου για τα πλοία και την αγάπη μου για την θάλασσα. Έτσι οι πρακτικές μου γνώσεις, προερχόμενες από την αγωνιστική ιστιοπλοΐα, εμπλουτίστηκαν από τη συγκεκριμένη σχολή. Με αφορμή λοιπόν την συγγραφή του προλόγου θα ήθελα να εκφράσω την βαθύτατη ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένειά μου διότι εκείνοι ευθύνονται για την γνωριμία μου με την ιστιοπλοΐα και την θάλασσα.

Θα ήθελα ακολούθως να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή Γρηγόρη Γρηγορόπουλο για την καθοδήγηση και την πολύτιμες συμβουλές του καθ’ όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες απευθύνω στον καθηγητή κ. Ζαραφωνίτη και στην κ. Κανελλοπούλου για την συνεισφορά στην επίλυση των απορριών μου σχετικά με το λογισμικό του Shipflow. Ακόμη θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Παπατζανάκη για την άμεση ανταπόκριση του σε θέματα που προέκυψαν στον υπολογιστή του εργαστηρίου καθώς και σε όλους τους καθηγητές της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον φίλο και συνάδελφο Χρήστο Μπακιρτζόγλου για την καθοδήγησή μου στα πρώτα βήματα εξοικίωσης με το λογισμικό Caeses καθώς και στον συμφοιτητή μου Χάρη Τσουμπρή για την παραγωγική μας συνεργασία.

Περιεχόμενα

Πρόλογος 3
Εισαγωγή 5
Κεφάλαιο 1. Χαρακτηριστικά σχεδίασης δίγαστρου ιστιοπλοϊκού σκάφους 7
Διαστασιολόγηση γάστρας (canoe body) 7
Αδιάστατοι συντελεστές γάστρας 8
Κατάσταση πλήρους φόρτωσης 8
Ολικό πλάτος του σκάφους 9
Παράγοντας μεγέθους (EU size factor) 10
Εκτίμηση κόστους 11
Κεφάλαιο 2. Παραμετρική μοντελοποίηση της γάστρας 12
Γενικά στοιχεία 12
Βασικές καμπύλες 13
Τροποποίηση της γάστρας 16
Κεφάλαιο 3. Προσομοίωση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς του σκάφους 18
Συνιστώσες Αντίστασης 18
Αντίσταση Κυματισμού 19
Υπολογιστική μέθοδος 24
Εντολές – Εργαλεία του Shipflow 26
Μοντελοποίηση πλέγματος 28
Περιορισμοί της υπολογιστικής μεθόδου 30
Κεφάλαιο 4. Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης 32
Το γενετικό πρόβλημα βελτιστοποίησης σχεδιασμού σκάφους 32
Μορφή του προβλήματος γενετικής βελτιστοποίησης 32
Ο Αλγόριθμος NSGA II 33
Κεφάλαιο 5. Βελτιστοποίηση σχεδίασης του δίγαστρου ιστιοπλοϊκού σκάφους στην αντίσταση κυματισμού 39
Γενική Μεθοδολογία (guidelines MARIN) 39
Μεθοδολογία δίγαστρου ιστιοπλοϊκού σκάφους 47
Κεφάλαιο 6. Αποτελέσματα και συμπεράσματα 50
Επίδραση των παραμέτρων στην χαμηλή ταχύτητα 50
Επίδραση των παραμέτρων στην υψηλή ταχύτητα 58
Βελτιστοποίηση στην ταχύτητα V=8 [kn] 66
Βελτιστοποίηση στην ταχύτητα V=12 [kn] 73
Σύνοψη και Συμπεράσματα 76
Παράρτημα 81
Ανάλυση Βαρών του πατρικού σκάφους 81
Μεταβλητές σχεδίασης αρχικής γεωμετρίας 82
Νομείς αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας 83
Κώδικας του Shipflow 84
Λίστα σχημάτων 85
Λίστα διαγραμμάτων 86
Λίστα πινάκων 87
Βιβλιογραφία 88

Εισαγωγή

Ενώ οι βελτιστοποιήσεις γαστρών είναι συνηθισμένες για τα μεγάλα εμπορικά πλοία, η σχεδίαση χρησιμοποιώντας υπολογιστικά προγράμματα για ιστιοφόρα σκάφη και μικρά μηχανοκίνητα σκάφη περιορίζεται συνήθως σε μελέτες πολλών εκατομμυρίων δολαρίων όπως αυτές που διεξάγονται στους αγώνες America's Cup. Το κόστος θεωρείται απαγορευτικό και δεν υπάρχουν κίνητρα στον κλάδο των σκαφών αναψυχής. Ωστόσο, οι πρόσφατες εξελίξεις στον παραμετρικό σχεδιασμό του πλοίου και τα νέα υπολογιστικά πακέτα έχουν αλλάξει το πεδίο ανταγωνισμού. Επίσης η ταχεία πρόοδος στην τεχνολογία των υπολογιστών έχει αυξήσει το ενδιαφέρον για μαθηματικά μοντέλα και αλγόριθμους που εκφράζουν τη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Οι πιο γνωστοί αλγόριθμοι αυτής της κατηγορίας περιλαμβάνουν εξελικτικό προγραμματισμό, γενετικούς αλγορίθμους, νευρωνικά δίκτυα κ.α.

Η σχεδίαση ενός ιστιοπλοϊκού σκάφους αναψυχής, αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία κατά την οποία λαμβάνονται υπόψη ένα σύνολο παραμέτρων που αφορούν κυρίως την εμφάνιση, την αξιοπλοΐα, την ασφάλεια, την απόδοση και την επίτευξη του στόχου για τον οποίο προορίζεται. Μια αποτελεσματική σχεδίαση θα πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις των νηογνωμόνων που αφορούν την ασφάλεια και τις απαιτήσεις του πλοιοκτήτη που αφορούν κυρίως τους άνετους χώρους ενδιαίτησης χωρίς όμως να επηρεάζεται πολύ η απόδοση του σκάφους. Προκειμένου να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις του πλοιοκτήτη, θα πρέπει να κατευθυνθούμε σε ογκώδεις γάστρες γεγονός το οποίο επιδρά άμεσα στην υδροδυναμική απόδοση που εξετάζεται στα πλαίσια του παρόντος.

Σε αυτή την εργασία παρουσιάζεται η ανάλυση βελτιστοποίησης ενός υπάρχον δίγαστρου ιστιοπλοϊκού σκάφους ως προς την αντίσταση κυματισμού. Πρόκειται για γάστρα τύπου U χωρίς διαμορφώσεις (chines) και η οποία μορφή θα διατηρηθεί στην παρούσα μελέτη. Προκειμένου να μοντελοποιηθεί η δοθείσα μορφή γάστρας παραμετρικά γίνεται χρήση του λογισμικού CAESES-Friendship Framework, ώστε να βρεθούν μεταβλητές σχεδίασης που επηρεάζουν στο μέγιστο βαθμό την υδροδυναμική της απόδοση και πιο συγκεκριμένα την αντίσταση κυματισμού. Κατά τη διαδικασία σχεδίασης θα επιδιωχθεί η μέγιστη δυνατή ταύτιση της προκύπτουσας παραμετρικής μορφής με την αρχική. Από τη διακύμανση του συνόλου των μεταβλητών σχεδίασης θα προκύψουν νέες γάστρες των οποίων οι επιδόσεις θα αξιολογηθούν ώστε να καταλήξουμε σε μια μορφή γάστρας με καλύτερες επιδόσεις από την αρχική. Η αξιολόγηση της συσχέτισης μεταξύ των τιμών των μεταβλητών σχεδίασης και των υδροδυναμικών επιδόσεων της εκάστοτε μορφής θα υλοποιηθεί με χρήση ενός γενετικού αλγορίθμου. Προκειμένου η σύγκριση μεταξύ των βελτιστοποιημένων γεωμετριών και της πατρικής μορφής γάστρας να είναι έγκυρη θα τεθούν περιορισμοί στο ποσοστό μεταβολής των τιμών εκτοπίσματος.

Η υδροδυναμική αξιολόγηση των παραχθέντων γαστρών συνίσταται στην συμπεριφορά τους κατά την πλεύση σε ήρεμο νερό. Οι υπολογισμοί θα υλοποιηθούν σε δύο ταχύτητες V=8 [kn]

και V=12 [kn], οι οποίες αντιστοιχούν στην κατάσταση πλεύσης μόνο με τους κινητήρες και στην δεύτερη ταχύτητα έχουμε και την βοήθεια των ιστίων.

Όσον αφορά την πλεύση σε ήρεμο νερό θα γίνει υπολογισμός και προσπάθεια ελαχιστοποίησης της αντίστασης κυματισμού. Η προσομοίωση της πλεύσης θα υλοποιηθεί με χρήση του λογισμικού SHIPFLOW, το οποίο χρησιμοποιεί την τεχνική ολοκλήρωσης των πιέσεων στο στερεό σύνορο και την ελεύθερη επιφάνεια στα πλαίσια της δυναμικής θεωρίας. Η ελαχιστοποίηση της αντίστασης κυματισμού θα επιδιωχθεί σε δύο διαφορετικές διαδικασίες βελτιστοποίησης, αφενός με αξιολόγηση αυτής καθαυτής της τιμής της κι αφετέρου με την ανάλυση του πεδίου των παραγόμενων κυματισμών.

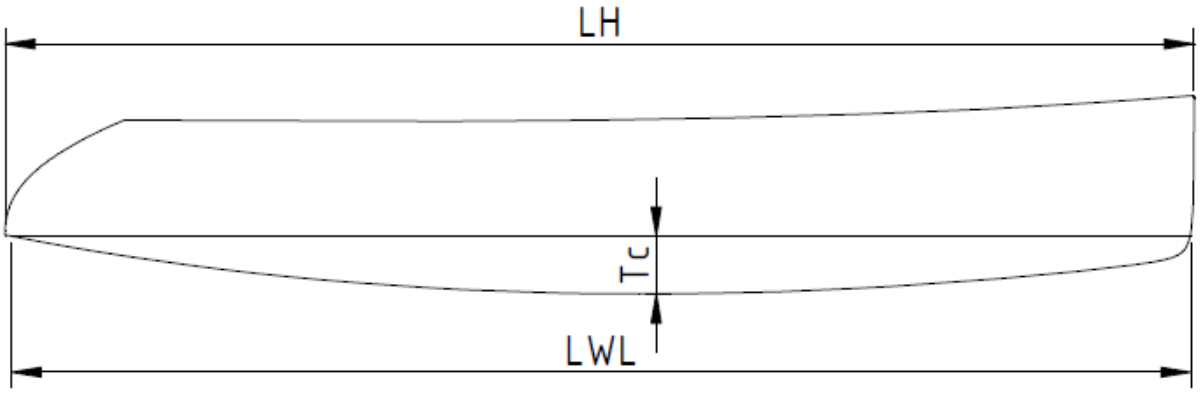
Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθούν κάποιες απλοποιήσεις που έγιναν στην παρούσα εργασία κυρίως λόγο της έκτασης – χρόνου της μελέτης που θα χρειαζόταν. Αρχικά παραλήφθηκε η καρίνα του σκάφους, γεγονός το οποίο δεν θα άλλαζε αρκετά τα αποτελέσματα, αφού η καρίνα είναι σχετικά μακριά από την ελεύθερη επιφάνεια οπότε δεν συντελεί σε μεγάλο ποσοστό στην αντίσταση κυματισμού. Ακόμη αγνοήθηκε η γωνία εγκάρσιας κλίσης, δεδομένου ότι τα δίγαστρα ιστιοπλοϊκά αναψυχής έχουν πολύ μεγάλο μετακεντρικό ύψος με αποτέλεσμα να μην ξεπερνάνε συνήθως της πέντε μοίρες. Τέλος θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί και ανάλυση των ταχυτήτων και επιταχύνσεων πάνω στην γάστρα σε καταστάσεις κυματισμών (seakeeping), αλλά στα ιστιοπλοϊκά σκάφη τα ιστία αποσκοπούν και στον σκοπό αυτό λειτουργώντας σαν αποσβεστήρες ταλάντωσης (damper).

Κεφάλαιο 1. Χαρακτηριστικά σχεδίασης δίγαστρου ιστιοπλοϊκού σκάφους

Διαστασιολόγηση γάστρας (canoe body)

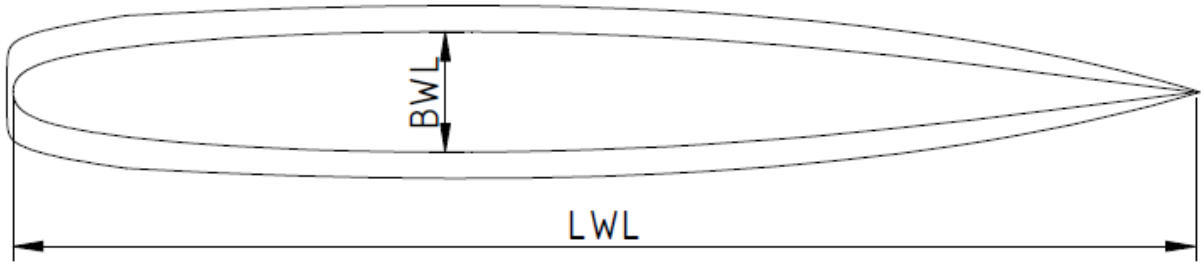
Είναι προφανές πως οι κύριες διαστάσεις (μήκος, βύθισμα, πλάτος και εκτόπισμα) λαμβάνονται κατά την πλήρη φόρτωση του σκάφους. Γενικά στα σκάφη διακρίνονται δύο μήκη, το ολικό μήκος της γάστρας L_H και το μήκος της ισάλου πλεύσης L_{WL}. Από αυτά συνήθως χρησιμοποιείται το δεύτερο διότι είναι ένα μέγεθος που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση της γάστρας. Είναι γνωστό πως γάστρες με μεγαλύτερο μήκος ισάλου μπορούν να αναπτύξουν υψηλότερες ταχύτητες. Ως αναφορά το ολικό μήκος, είναι εκείνο βάσει του οποίου γίνεται η κατάταξη στην κλάση.

Το βύθισμα της γάστρας T_C επιλέγεται σύμφωνα με τον λόγο πλάτους προς βύθισμα (BTR) ο οποίος επηρεάζει την αντίσταση του σκάφους ως ακολούθως. Με τιμές του BTR κοντά στο 2 παρουσιάζεται ελαχιστοποίηση της αντίστασης τριβής ενώ για ακόμα χαμηλότερες τιμές έχουμε και ελαχιστοποίηση της αντίστασης κυματισμού. Για πρακτικούς λόγους παρουσιάζονται και τιμές μεγαλύτερες του 2, με σκοπό την αύξηση της μεταφορικής ικανότητας. Τυπικές τιμές κυμαίνονται από 1.5 μέχρι 2.8. Ο λόγος BTR επιδρά στην εκτίμηση του εκτοπίσματος.



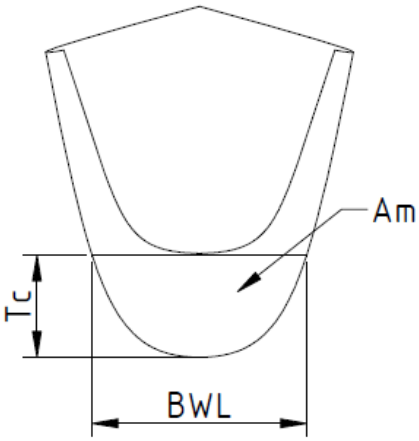
Σχήμα 1. 1: Ορισμός μηκών γάστρας και βυθίσματος.

Ακολούθως, το πλάτος ισάλου της γάστρας B_{WL} θεωρείται η διάσταση με τη σημαντικότερη επίδραση στην αντίσταση κυματισμού. Κατά την προμελέτη για την επιλογή του πλάτους χρησιμοποιείται ο λόγος του μήκους προς το πλάτος. (LBR Length/beam ratio). Αργόπλοα και με μεγάλο εκτόπισμα σκάφη έχουν μικρό LBR ενώ σε γρήγορα αγωνιστικά σκάφη επιλέγεται μεγάλος ο λόγος LBR. Ο λόγος αυτός παίζει καθοριστικό ρόλο στην εκτίμηση του εκτοπίσματος του σκάφους καθώς όσο ο λόγος μειώνεται αυξάνεται η μεταφορική ικανότητα. Τυπικές τιμές του LBR για σκάφη αναψυχής είναι μεταξύ 9 και 12. Τέλος το πλάτος της ισάλου της γάστρας θα πρέπει να ξεπερνάει το 1m ώστε να μην εμφανιστούν δυσκολίες στην κατασκευή της ενδιαίτησης του σκάφους.



Σχήμα 1. 2: Ορισμός ισάλου δίγαστρου σκάφους

Αδιάστατοι συντελεστές γάστρας



Ο συντελεστής μέσης τομής C_m εξαρτάται από την μορφή της μέσης τομής. Νομείς με βαθύ V λαμβάνουν τιμές C_m που ισούνται με 0.5, ενώ νομείς με ελλειψοειδής μορφή λαμβάνουν C_m ίσο με 0.785. Γενικά ισχύει πως η σχέση μεταξύ του συντελεστή μέσης τομής και του εκτοπίσματος είναι γραμμική. Ο συντελεστής μέσης τομής ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$C_m = \frac{A_m}{T_C * B_{WL}}$$

Όπου A_m : είναι η επιφάνεια της μέσης τομής

Ο πρισματικός συντελεστής έχει επιρροή στην αντίσταση του σκάφους. Λαμβάνει τιμές ανάμεσα στο 0.55 και 0.64. Η σχέση υπολογισμού του φαίνεται παρακάτω:

$$C_p = \frac{\Delta}{A_m * L_{WL}}$$

Όπου Δ : Το εκτόπισμα της γάστρας

Ο συντελεστής επιφάνειας ισάλου ο οποίος λαμβάνει τιμές ανάμεσα σε 0.69 – 0.72 ορίζεται από την σχέση :

$$C_w = \frac{A_w}{B_{WL} * L_{WL}}$$

Όπου A_w : η επιφάνεια της ισάλου

Κατάσταση πλήρους φόρτωσης

Γνωρίζοντας τις κύριες διαστάσεις της γάστρας καθίσταται εφικτός ο υπολογισμός του εκτοπίσματος (πλήρης φόρτωσης), χρησιμοποιώντας την παρακάτω σχέση, για δυο γάστρες και πυκνότητα του θαλασσινού νερού σε [kg/m^3].

$$\Delta_{LDC} = 2 * 1025 * B_{WL} * L_{WL} * T_c * C_p * C_m$$

Ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της τιμής του παραπάνω εκτοπίσματος είναι ο λόγος μήκους/εκτόπισμα (LDR).

$$LDR = L_{WL} * \sqrt[3]{\frac{1025}{\Delta_{LDC}}}$$

Χαμηλές τιμές κοντά στο 5 περιγράφουν σκάφος με μεγάλο εκτόπισμα κατασκευασμένο από εξ ολοκλήρου από στρώσεις υαλοβάμβακα (laminates). Τιμές κοντά στο 6 περιγράφουν δίγαστρα σκάφη με μοντέρνες μεθόδους κατασκευής (π.χ. sandwich). Σε δίγαστρα σκάφη αναψυχής συνδυάζοντας και καλές επιδόσεις οι τιμές του λόγου LDR κυμαίνονται από 6 έως 7.

Ένα σημαντικό μέγεθος το οποίο ελέγχεται μετά την κατασκευή του πρωτότυπου σκάφους, εάν πρόκειται για γραμμή παραγωγής, είναι το εκτόπισμα του άφορτου σκάφους, το οποίο εκτιμάται από την σχέση :

$$m_{LCC} = 0.7 * m_{LDC}$$

Το εκτόπισμα μερικής φόρτωσης χρησιμοποιείται συνήθως για τους υπολογισμούς ευστάθειας και απόδοσης.

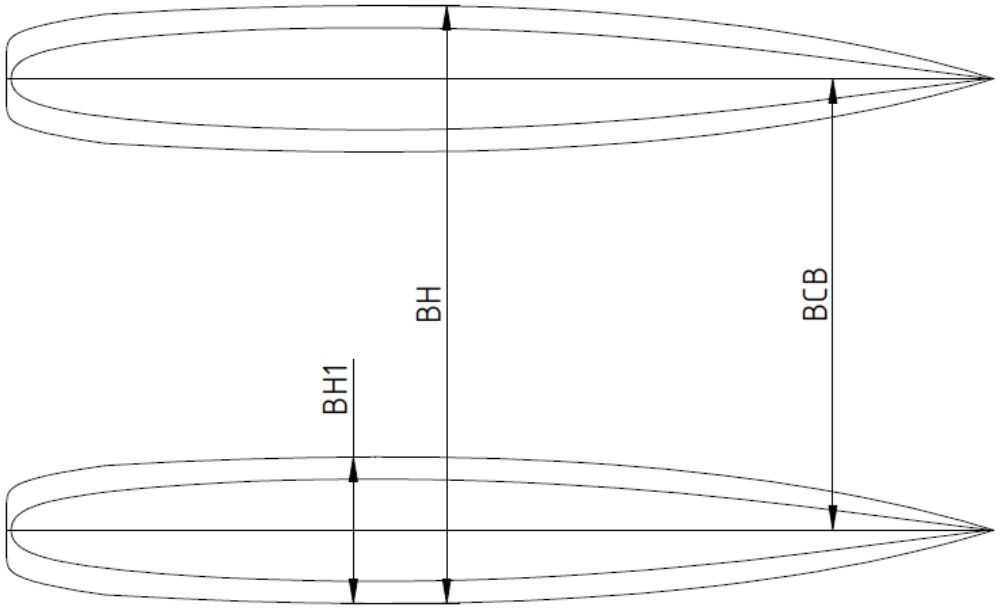
$$m_{MOC} = 0.8 * m_{LDC}$$

Ολικό πλάτος του σκάφους

Το πλάτος του σκάφους είναι ένα πολύ καθοριστικό μέγεθος για τον συγκεκριμένο τύπο σκαφών. Η διάσταση αυτή επιδρά στο εγκάρσιο μετακεντρικό ύψος, το οποίο στα δίγαστρα ιστιοπλοϊκά επιλέγεται ίσο με το διάμηκες μετακεντρικό ύψος. Κάνοντας το σκάφος πιο στενό, δεν θα υπάρχει αρκετή ευστάθεια κατά την ιστιοφορία. Από την άλλη, ένα σκάφος με μεγάλο πλάτος, θα παρουσιάζει έντονες κινήσεις προνευτασμού και διατοιχισμού.

Ορίζεται επίσης το πλάτος μεταξύ των κέντρων της κάθε γάστρας B_{CB} καθώς και τον λόγο μήκους/πλάτους του σκάφους (LBRC) ο οποίος λαμβάνεται ίσος με :

$$LBRC = \frac{L_H}{B_{CB}}$$



Σχήμα 1. 3: Ορισμός πλατών του δίγαστρου σκάφους

Αξίζει να σημειωθεί πως πλατύτερες κατασκευές οδηγούν σε πιο βαριά σκάφη, ενώ στενότερες κατασκευές υποχρεωτικά θα εξοπλιστούν με μικρότερα πανιά.

Ακολουθούν δυο σχέσεις εκτίμησης του ύψους από το κέντρο άντωσης έως το μετάκεντρο κατά το εγκάρσιο και διάμηκες επίπεδο αντίστοιχα.

$$BM_T = 2 * \left[\frac{{B_{WL}}^3 * L_{WL} * {C_w}^2}{12} + L_{WL} * B_{WL} * C_w * (0.5 * B_{CB})^2\right] * \frac{1025}{\Delta_{LDC}}$$

$$BM_L = \frac{2 * 0.92 * {L_{WL}}^3 * B_{WL} * {C_w}^2}{12} * \frac{1025}{\Delta_{LDC}}$$

Χαμηλές τιμές του BM_L προκύπτουν γάστρες με ευαίσθητες κινήσεις προνευτασμού ακόμα και σε ήρεμη θάλασσα (hobby-horsing).

Τέλος στο σχήμα 3 μένει να οριστεί το μέγεθος B_{H1}, το οποίο είναι το μέγιστο πλάτος κάθε γάστρας και θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από το πλάτος ισάλου της γάστρας. (π.χ. B_{H1}=1.4*B_{WL}). Σε περίπτωση που η γάστρα πάνω από την ίσαλο δεν είναι συμμετρική, τότε το μέγεθος αυτό ορίζεται ως το άθροισμα των ημιπλάτων. Σύμφωνα με τα παραπάνω, το μέγιστο πλάτος του δίγαστρου σκάφους λαμβάνει την τιμή :

$$B_H = B_{H1} + B_{CB}$$

Παράγοντας μεγέθους (EU size factor)

Ο παράγοντας μεγέθους ενός δίγαστρου σκάφους ορίζεται από την ακόλουθη σχέση :

$$SF = 1.75 * \Delta_{MOC} * \sqrt{L_H * B_{CB}}$$

Με τον λόγο μήκους/πλάτος (LBRC) να κυμαίνεται μεταξύ 2.2 και 3.2, το σκάφος κατηγοριοποιείται σε τύπου A αν ο SF>40000 και τύπου B αν SF>15000.

Εκτίμηση κόστους

Παρουσιάζονται δυο εμπειρικές σχέσεις που υπολογίζουν το κόστος των υλικών για την κατασκευή του σκάφους και τις εργατικές ώρες που απαιτούνται για την ολοκλήρωση του σκάφους.

$$Euros = 4 * LDR * \Delta_{LCC}$$

$$Hours = \frac{LDR}{6} * \Delta_{LCC}$$

Ο λόγος LDR περιλαμβάνεται στις παραπάνω εξισώσεις αφού εκφράζει τον τρόπο κατασκευής της γάστρας όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Όσο ο λόγος αυτός αυξάνεται πέρα από 5 σημαίνει πως έχουμε νέες μεθόδους κατασκευής με ακριβότερα υλικά. Ως αναφορά το εκτόπισμα του σκάφους έχει μια αναλογική σχέση με το κόστος του σκάφους.

Κεφάλαιο 2. Παραμετρική μοντελοποίηση της γάστρας

Γενικά στοιχεία

Το λογισμικό που έχει επιλεγεί για όλη τη διαδικασία παραμετρικής μοντελοποίησης, υδροδυναμικής αξιολόγησης και βελτιστοποίησης του δίγαστρου σκάφους είναι το CAESES. Αρχικά εισήχθη στο λογισμικό η μορφή των νομέων της πατρικής γάστρας σε μορφή αρχείου .iges. Σκοπός της παραγράφου είναι να προσεγγιστεί σε ικανοποιητικό βαθμό η πατρική γάστρα, ώστε οι συγκρίσεις των γαστρών, που θα γίνονται κατά την βελτιστοποίηση της γάστρας, να είναι πλησιέστερες στην πραγματικότητα. Προκειμένου να παραχθούν γάστρες με καλύτερη υδροδυναμική απόδοση, θα τροποποιηθούν γεωμετρικές παράμετροι που επηρεάζουν τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά του σκάφους.

Η παραμετρική σχεδίαση της γάστρας δεν χωρίστηκε σε διαφορετικές περιοχές, διότι η γεωμετρία της γάστρας είναι απλή. Παρατηρώντας την πλώρη του σκάφους δεν υπάρχει βολβοειδής μορφή, ενώ οι πρυμναίοι νομείς δεν αλλάζουν πρόσημο καμπυλότητας, οπότε δεν είναι αναγκαίος ο διαχωρισμός της γάστρας σε περιοχές. Η συνολική επιφάνεια της γάστρας αποτελείται κυρίως από επιφάνειες τύπου lofted οι οποίες ορίζονται ανάμεσα σε δύο καμπύλες νομέων και συχνά οι ελεύθερες πλευρές τους οροθετούνται από άλλες καμπύλες. Γενικά ισχύει πως όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των επιφανειών αυτών, τόσο πιο ομαλές είναι οι μεταβολές του γάστρας.

Για τη διαδικασία σχεδιασμού χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι τύποι καμπυλών όπως οι f-splines, interpolation curves, 3d curves, poly-curves, image και projection curves. Η επιλογή του τύπου της κάθε καμπύλης έγινε λαμβάνοντας υπόψιν την λειτουργία – χρήση της. Στις περισσότερες περιπτώσεις, επιλέγονται οι καμπύλες f-spline, όπου κατασκευάζονται απλώς εισάγοντας το επίπεδο στο οποίο βρίσκονται, τα αρχικά και τα τελικά σημεία τους και τις τιμές των εφαπτομένων αντίστοιχα. Επίσης είναι εφικτός ο έλεγχος της επιφάνειας γύρω από έναν συγκεκριμένο άξονα που ορίζεται από τον χρήστη, λειτουργία η οποία δεν συνίσταται κατά την βελτιστοποίηση. Η δημιουργία των επιφανειών του σκάφους επιτεύχθηκε με τη χρήση καμπυλών f-spline για το τμήμα των νομέων κάτω και πάνω από την ίσαλο γραμμή. Οι καμπύλες παρεμβολής (interpolation curve) χρησιμοποιήθηκαν ως επί το πλείστον για την κατασκευή βοηθητικών καμπυλών, οι οποίες προέρχονται από σημεία (π.χ. σημεία των νομέων που τέμνονται με το οριζόντιο επίπεδο της ισάλου. Μια poly-curve χρησιμοποιείται για να συνδέσει δύο ή περισσότερες καμπύλες, εξασφαλίζοντας συνέχεια C^1 με επιβολή ισότητας του εφαπτόμενου διανύσματος στους κοινούς κόμβους των διαφόρων τμημάτων των καμπυλών.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η γεωμετρική αναπαράσταση των διαφόρων καμπυλών απαιτεί ορισμένες τιμές εισόδου. Αυτές οι τιμές μπορεί να είναι παράμετροι, μεταβλητές σχεδιασμού ή σταθεροί αριθμοί, ανάλογα με το τι αντιπροσωπεύουν. Οι παράμετροι μπορεί να είναι είτε εξαρτημένες είτε ανεξάρτητες τιμές. Αντίθετα, οι μεταβλητές σχεδιασμού αποτελούν ανεξάρτητες μεταβλητές και χρησιμοποιούνται κατά την βελτιστοποίηση. Μια αρχική τιμή και ένα εύρος διακύμανσης σύμφωνα με την εκτίμηση του χρήστη οδηγεί στη δημιουργία ποικίλων

μορφών γάστρες. Στην παρούσα μελέτη, έχουν επιλεγεί οκτώ μεταβλητές σχεδίασης που αφορούν κυρίως την πρύμνη από την περιοχή του μέγιστου πλάτους και πίσω. Η περιοχή αυτή είναι εκείνη που ευθύνεται κατά κύριο λόγο για την αντίσταση κυματισμού.

Για την κατασκευή των καμπυλών καθίσταται αναγκαία μια προμελέτη των παραμέτρων που θα αναλυθούν ώστε να γίνει η κατάλληλη επιλογή των τύπων των καμπυλών. Για την επεξήγηση της διαδικασίας ακολουθεί ο διαχωρισμός των παραμέτρων του κύριου-πρωραίου τμήματος της γάστρας και του τμήματος της πρύμνης.

Βασικές καμπύλες

Η παραμετρική σχεδίαση της αρχικής γεωμετρίας στηρίχθηκε αρχικά στις κύριες καμπύλες του προφίλ, της ισάλου πλεύσης και του περιγράμματος του καταστρώματος.

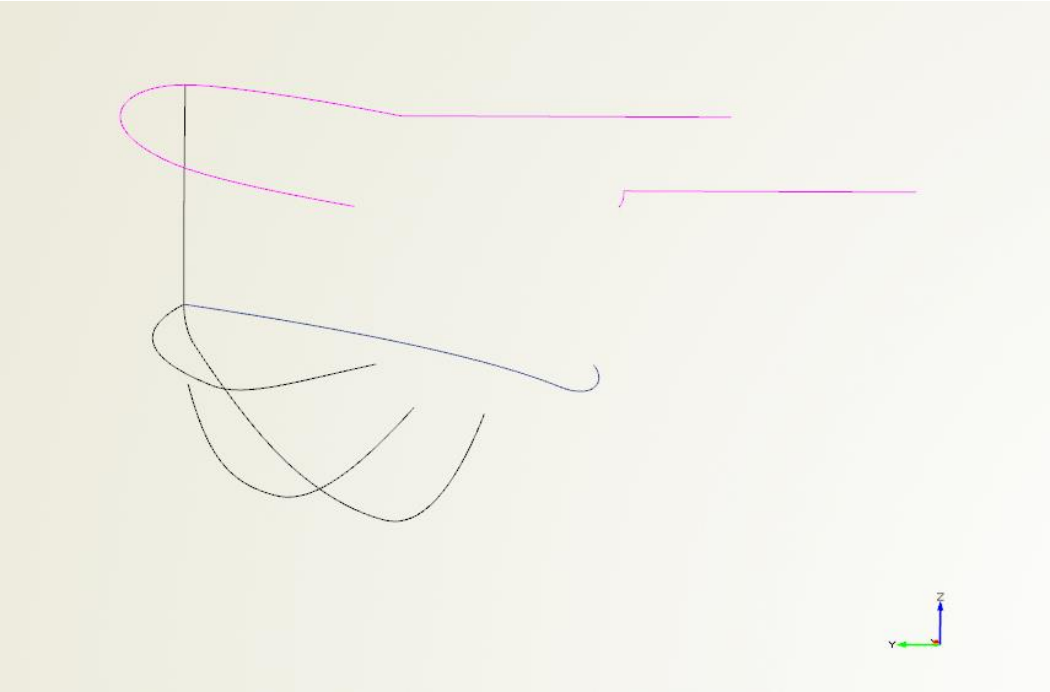
Το προφίλ της γάστρας διατηρήθηκε ως το δυνατόν στην αρχική του μορφή με καθοριστική παράμετρο το ολικό μήκος. Το προφίλ είναι μια καμπύλη poly-curve η οποία αποτελείται από τρεις καμπύλες f-spline για την καλύτερη προσέγγιση της αρχικής γεωμετρίας. Για την κάθε καμπύλη έχουν οριστεί σταθερές τιμές εφαπτομένων στα άκρα τους μέχρι να προσεγγιστεί η αρχική καμπύλη του προφίλ. Το πρώτο σημείο του προφίλ στην πρύμνη έχει παραμετρικοποιηθεί ώστε να μπορεί να μεταβληθεί το ύψος του καθρέφτη.

Η παραμετρική ίσαλος της γάστρας χωρίστηκε σε δυο τμήματα, το πρωραίο τμήμα και το πρυμναίο τμήμα. Το σημείο τομής τους είναι στο μέγιστο πλάτος της γάστρας το οποίο αποτελεί και παράμετρο σχεδίασης. Επίσης σε αυτό το σημείο παράμετρο αποτελεί και η διαμήκη θέση που βρίσκεται το μέγιστο πλάτος, η οποία καθορίζει την διανομή του εκτοπίσματος κατά το διάμηκες της γάστρας. Το πρωραίο τμήμα της ισάλου είναι απλούστερο, αφού αναπαρίσταται από μια καμπύλη f-spline στο επίπεδο xy και στο ύψος του βυθίσματος, με κύρια παράμετρο την γωνία εισόδου (angle of attack). Ως αναφορά το τμήμα της ισάλου πίσω από το μέγιστο πλάτος, παράχθηκε από μια τρισδιάστατη καμπύλη. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται εφικτή η μεταβολή των εξαρτώμενων καμπυλών των νομέων, όταν τίθενται διαφορετικές τιμές για το πλάτος του καθρέφτη. Η τρισδιάστατη αυτή καμπύλη έχει σαν ορίσματα δυο καμπύλες f-spline όπου τοποθετούνται η μια στο επίπεδο xy και η άλλη στο επίπεδο xz. Για την προσέγγιση της καμπύλης του επιπέδου xy χρησιμοποιήθηκε μια καμπύλη παρεμβολής, η οποία λάμβανε τις συντεταγμένες y από τα σημεία τομής της f-spline του επιπέδου xz με τους νομείς της πατρικής γάστρας. Για την καλύτερη κατανόηση της σχεδίασης της ισάλου που μεταβάλει την γεωμετρία του σκάφους αναπαρίσταται στο ακόλουθο σχήμα.

Σχήμα 2. 1: Αναπαράσταση παραμετρικής ισάλου με τις βοηθητικές καμπύλες f-spline

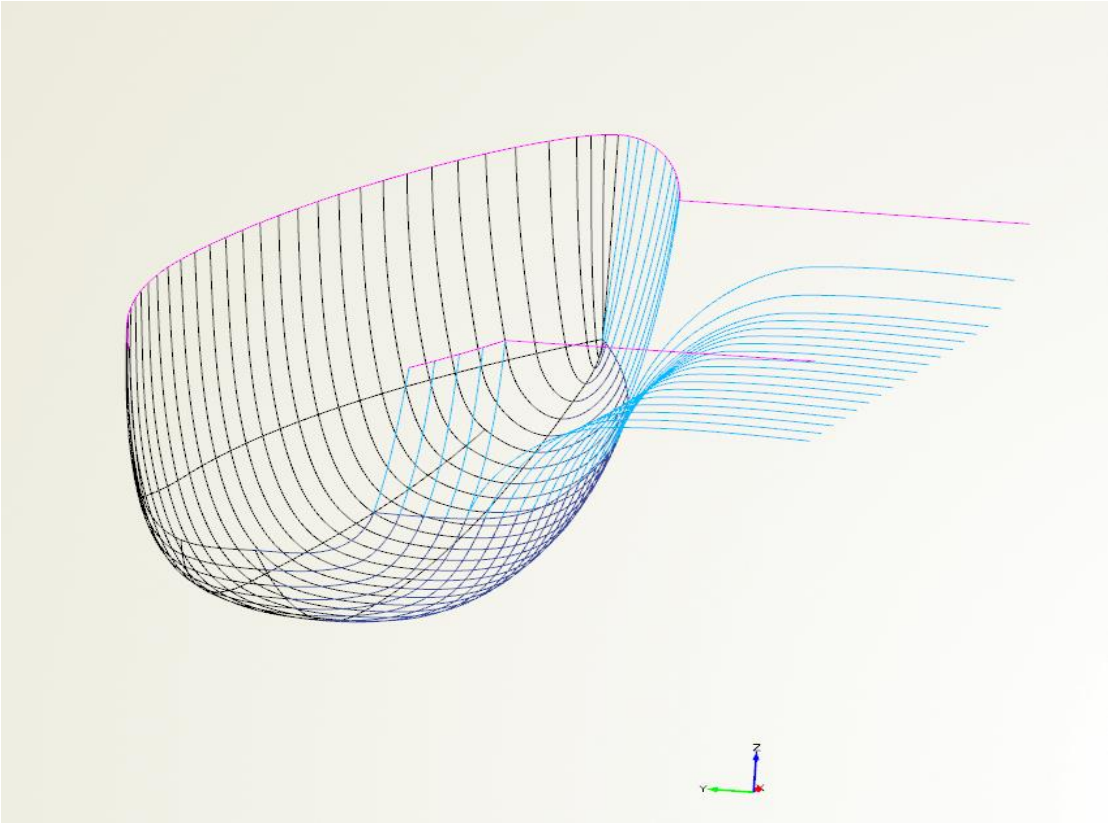
Το κατάστρωμα του σκάφους δεν παίζει κάποιο σημαντικό ρόλο κατά τον υπολογισμό της αντίστασης κυματισμού. Για τον λόγο αυτό παραμετρικοποιήθηκε με απλό τρόπο ώστε να ακολουθεί τις μεταβολές τις υπόλοιπης γεωμετρίας. Για παράδειγμα αυξάνοντας το μέγιστο πλάτος της γάστρας θα πρέπει να αυξηθεί ανάλογα και το μέγιστο πλάτος στο ύψος του καταστρώματος ώστε το τμήμα των νομέων ανάμεσά τους να μην αλλάζει πρόσημο καμπυλότητας.

Η δεύτερη τρισδιάστατη ίσαλος προστέθηκε στον σχεδιασμό αφού πρώτα παρατηρήθηκε πως η πατρική γάστρα δεν μπορούσε να προσεγγιστεί με νομείς (καμπύλες f-spline) που συνέδεαν το προφίλ με την ίσαλο πλεύσης, διότι η καμπυλότητα μεταβαλλόταν λίγο απότομα. Τοποθετώντας την συγκεκριμένη τρισδιάστατη καμπύλη η περιοχή των νομέων χωρίστηκε σε δυο κομμάτια προσεγγίζοντας έτσι με μεγάλη ακρίβεια την αρχική γεωμετρία. Η κατασκευή της έγινε όμοια με ην καμπύλη του πρυμναίου τμήματος της παραμετρικής ισάλου. Αξίζει να σημειωθεί πως η καμπύλη αυτή δεν εκτείνεται καθ’ όλο το μήκος της γάστρας, αλλά από την πρύμνη έως τον έκτο νομέα πριν την πλώρη. Σημειώνοντας επίσης πως οι πρωραίοι νομείς μπορούν να προσεγγιστούν χρησιμοποιώντας μόνο μια καμπύλη f-spline. Η συγκεκριμένη καμπύλη καθώς και όλες οι παραπάνω καμπύλες παρουσιάζονται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 2. 3: Καμπύλες του προφίλ, παραμετρικής ισάλου, δευτερεύουσας ισάλου και του καταστρώματος

Τέλος οι **νομείς της γάστρας** κατασκευάστηκαν με βάσει όλες τις παραπάνω καμπύλες αποτελούμενοι από τμηματικές καμπύλες f-spline. Στα σημεία τομής των καμπυλών η γωνία εφαπτομένης της μιας καμπύλης τίθεται σαν όρισμα στην επόμενη καμπύλη για την εξασφάλιση της συνέχειας. Ακολουθεί σχήμα στο οποίο παρουσιάζονται όλες οι βασικές καμπύλες της γάστρας.



Σχήμα 2. 2: Βασικές καμπύλες παραμετρικού μοντέλου

Τροποποίηση της γάστρας

Στο πλαίσιο αυτής της μελέτης βελτιστοποίησης χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος NSGA II, οποίος αναλύεται σε άλλο κεφάλαιο. Η δημιουργία των διαφορετικών γαστρών επιτυγχάνεται μεταβάλλοντας επιλεγμένες μεταβλητές σχεδιασμού. Στην περίπτωση που εξετάζουμε ο μοναδικός στόχος μας είναι η ελαχιστοποίηση της αντίστασης κυματισμού, επομένως χρησιμοποιείται μια μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση.

Ο αλγόριθμος NSGA II αποτελεί ένα εργαλείο βελτιστοποίησης που έχει ήδη ενσωματωθεί στο λογισμικό CAESES. Εκτός από την αποτελεσματικότητά του, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος επιλέγεται επίσης λόγω της ελάχιστης απαιτούμενης εισόδου του. Ο πληθυσμός και το μέγεθος της γενιάς είναι οι βασικές απαιτούμενες ρυθμίσεις. Όσον αφορά το πρώτο, πρέπει να είναι εφικτό από 4 σύμφωνα με τις απαιτήσεις του συστήματος, διαφορετικά αλλάζει εσωτερικά. Οι επιλεγμένες τιμές αυτών των ρυθμίσεων, για την διαδικασία βελτιστοποίησης, είναι 16 και 25 αντίστοιχα, οδηγώντας σε αριθμό 400 παραλλαγών γάστρας. Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας ο κύριος στόχος είναι να δοθούν ορισμένα θεμελιώδη συμπεράσματα βασισμένα στις τάσεις των αποτελεσμάτων, επομένως 400 παραλλαγές γάστρας είναι επαρκής αριθμός. Επίσης το μικρό εύρος διακύμανσης των μεταβλητών σχεδιασμού, λόγω των περιορισμών των γεωμετρικών περιορισμών του σκάφους για επαρκής χώρους ενδιαίτησης, μας οδηγεί σε σχετικά μικρό αριθμό πληθυσμού. Με εννιά μεταβλητές σχεδιασμού που αφορούν την γάστρα του σκάφους, η σύγκλιση μεταξύ των τιμών των μεταβλητών σχεδιασμού των βέλτιστων λύσεων επιτυγχάνεται μέσα σε 400 παραλλαγές σκάφους. Οι πιθανότητες μετάλλαξης και διασταύρωσης που επιλέγονται και για τα τρία σχήματα είναι 0,01 και 0,9 αντίστοιχα, όπως προτείνεται στο CAESES. Μια άλλη ρύθμιση που απαιτείται ως είσοδος είναι ο ορισμός των αντικειμενικών συναρτήσεων και των περιορισμών που ορίζει ο χρήστης.

Ο αλγόριθμος NSGA II απαιτεί από τον χρήστη να δώσει τα άνω και κάτω όρια των παραμέτρων σχεδίασης. Ο βασικός στόχος είναι να δημιουργηθούν γάστρες που σχηματίζουν μια λογική γεωμετρία με εξομαλυμένες γραμμές. Φυσικά αυτό δεν μπορεί να ελεγχθεί χειροκίνητα για όλο το φάσμα των μεταβλητών σχεδιασμού και τους πιθανούς συνδυασμούς τους. Ωστόσο, ελέγχθηκαν, οι παραγόμενες γάστρες λαμβάνοντας συνδυασμούς των ανωτέρων και κατωτέρων τιμών, τους από την άποψη των παραγόμενων γραμμών των νομέων. Παρόλο που ο έλεγχος των γραμμών της γάστρας που προκύπτουν για τα ανώτερα και κατώτερα όρια μπορεί να αντιμετωπιστεί, ο συνδυασμός αυτών είναι αδύνατος και μπορεί να οδηγήσει σε μη αποδεκτά σχήματα. Μια κοινώς διαδεδομένη τεχνική είναι η δοκιμή αρχικά με ένα μικρό εύρος διακύμανσης, ελέγχοντας τόσο τα υδροστατικά αποτελέσματα όσο και τις τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων - περιορισμών και στη συνέχεια αποφασίζοντας αν θα αυξηθεί ή θα μειωθεί το εύρος.

Η τροποποίηση των γαστρών κατά την διαδικασία βελτιστοποίησης είναι αποτέλεσμα διαφόρων συνδυασμών των εννιά παραμέτρων σχεδιασμού του σκάφους. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τις ανώτερες και κατώτερες τιμές αυτών των παραμέτρων σχεδιασμού.

Πίνακας 2. 1: Εύρος μεταβλητών σχεδίασης

No	Μεταβλητές Σχεδίασης	Περιγραφή	Μονάδες	Χαμηλότερη Τιμή	Αρχική Τιμή	Υψηλότερη Τιμή
1	Length_tot_ft	Το ολικό μήκος της γάστρας	ft	50	52	54
2	B_tot_half	Η y συντεταγμένη στο σημείο του μέγιστου πλάτους πάνω στην ίσαλο πλεύσης	m	3.9	4.1168	4.4
3	x_maxB	Η x συντεταγμένη στο σημείο του μέγιστου πλάτους πάνω στην ίσαλο πλεύσης	m	4	4.52	5.2
4	Draft	Το βύθισμα της γάστρας	m	1.35	1.41	1.47
5	CL	Η απόσταση του προφίλ της γάστρας από το μέσο του σκάφους	m	2.8	3.0061	3.5
6	AoA	Η γωνία πρόσπτωσης στην πλώρη	deg	346	348	349
7	y_trans_factor	Συντελεστής μεταβολής κατά y του πρώτου σημείου της παραμετρικής ισάλου σε σχέση με το y του μέγιστου πλάτους	m	0.87	0.898756	0.9
8	z_trans1	Κατακόρυφη απόσταση του πυθμένα του καθρέφτη	m	1.42	1.489	1.51
9	z_trans2	Κατακόρυφη απόσταση του πρώτου σημείου της παραμετρικής ισάλου	m	1.76	1.8	1.95

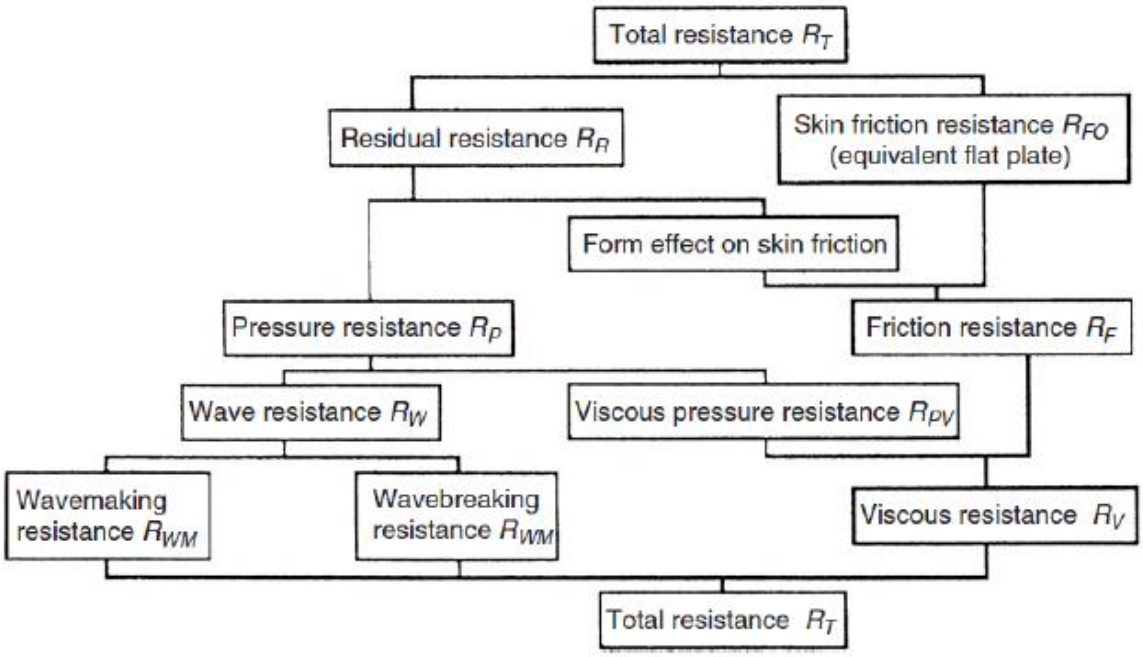
Οι παραπάνω τιμές επιλέχθηκαν σύμφωνα με τους γεωμετρικούς περιορισμούς που αφορούν κατά κύριο λόγο τους χώρους ενδιαίτησης. Γενικά όσο μεγαλύτερους χώρους παρέχει η σχεδίαση τόσο πιο ικανοποιημένος θα είναι και ο πλοιοκτήτης.

Κεφάλαιο 3. Προσομοίωση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς του σκάφους

Για την βελτιστοποίηση της γάστρας, πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις στο λογισμικό Shipflow, με σκοπό την σύγκριση διαφόρων λύσεων υπό το υδροδυναμικό πρίσμα. Οι προσομοιώσεις αυτές γίνονται ούτος ώστε να γίνει ανάλυση των επιπτώσεων, των διαφόρων παραμέτρων, στην απόδοση της γάστρας. Οι παράμετροι αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η απόδοση των γαστρών θα εκτιμηθούν σύμφωνα με την αντίσταση κυματισμού. Στην επόμενη παράγραφο θα γίνει αναφορά στις συνιστώσες της αντίστασης για μια πιο ολοκληρωμένη αποτύπωση.

Συνιστώσες Αντίστασης

Η αντίσταση της γάστρας που πλέει, ακόμη και σε ήρεμο νερό είναι ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο φαινόμενο. Η ολική αντίσταση R_T ορίζεται ως η δύναμη που απαιτείται ώστε το σκάφος να αναπτύξει μια συγκεκριμένη ταχύτητα. Η δύναμη αυτή είναι η προβολή, στην διεύθυνση της κίνησης, της συνισταμένης των δυνάμεων που οφείλονται, στις κάθετες δυνάμεις-πίεση (viscous pressure), των εφαπτόμενων δυνάμεων λόγω συνεκτικότητας (viscous) [17]. Στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζονται όλες οι κατηγοριοποιήσεις της αντίστασης.



Σχήμα 3. 1: Κύριες συνιστώσες αντίστασης

Ο πιο διαδεδομένος τρόπος διαχωρισμού είναι σε αντίσταση τριβής R_{FO} και την υπόλοιπη αντίσταση R_R, η οποία περιλαμβάνει συνιστώσες που σχετίζονται με την μορφή της γάστρας και την αντίσταση των παραγόμενων κυματισμών. Επίσης, μπορεί να γίνει ο διαχωρισμός

σύμφωνα με τα φυσικά φαινόμενα, σε συνεκτική αντίσταση R_V και αντίσταση κυματισμού R_W. Περεταίρω, η συνεκτική αντίσταση αποτελείται από τις συνιστώσες της τριβής και της πίεσης.

Στην παρούσα έκθεση είναι πιο χρήσιμος ο διαχωρισμός των συνιστωσών σύμφωνα με τα φυσικά φαινόμενα, όπως φαίνεται στην συνέχεια :

- **Αντίσταση κυματισμού**
- **Αντίσταση τριβής**
- **Αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας**

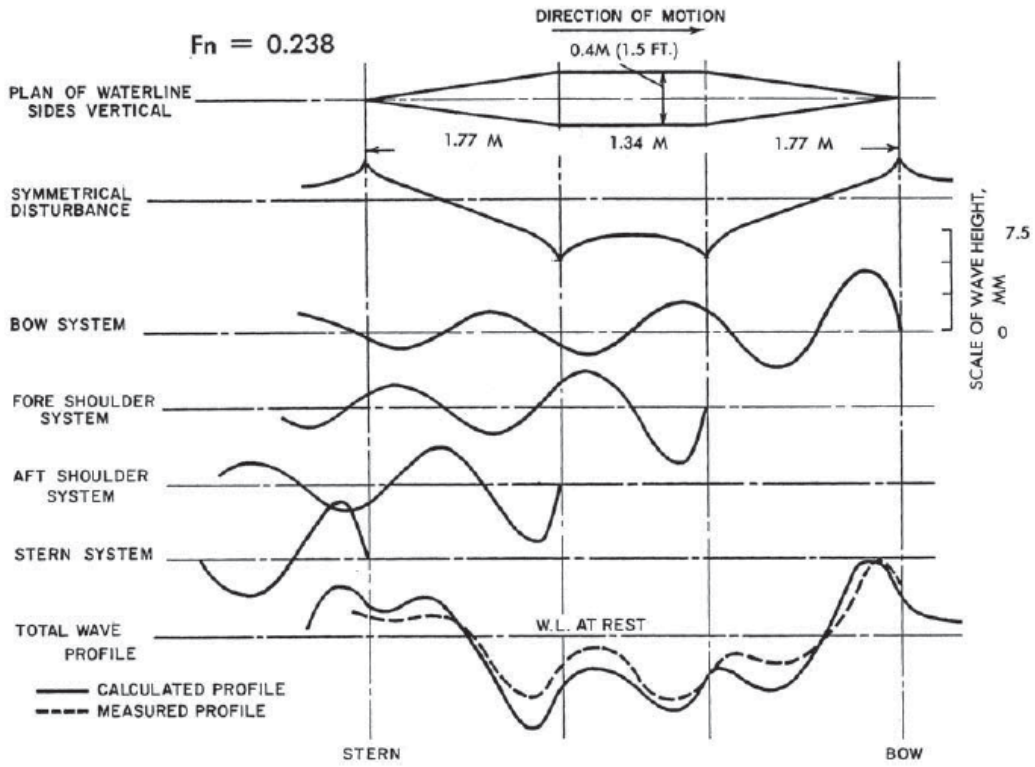
Η αντίσταση κύματος εξαρτάται από την απώλεια ενέργειας λόγω της παραγωγής κύματος του πλοίου ως μερικώς βυθισμένο σώμα που διαταράσσει την ελεύθερη επιφάνεια ενός υγρού, δημιουργώντας έτσι κύματα λόγω της απομάκρυνσης των σωματιδίων του νερού από τη θέση ισορροπίας τους. Ως αναφορά την αντίσταση τριβής, παρουσιάζεται όταν οι τάσεις μεταξύ των τμημάτων του ρευστού κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες. Αυτές οι τεταμένες τάσεις εμφανίζονται στην περιοχή κοντά στον τοίχο, εντός του οριακού στρώματος.

Αντίσταση Κυματισμού

Η κατανομή της πίεσης γύρω από ένα πλοίο, σύμφωνα με την βιβλιογραφία, μεγιστοποιείται στην πλώρη. Ο υδροδυναμικός συντελεστής πίεσης C_p επιτυγχάνει τη μέγιστη τιμή του 1,0 στα σημεία ανακοπής (μπορεί να υπάρχουν περισσότερα από ένα) και είναι θετικός κατά το μεγαλύτερο μέρος του περιγράμματος της πλώρης. Ανάλογα με τον τύπο της πρύμνης, συχνά παρουσιάζονται και εκεί υψηλές τιμές του συντελεστή. Μεταξύ των περιοχών υψηλής πίεσης, υπάρχουν συνήθως δύο ελάχιστα, που σχετίζονται με την πρωραία και πρυμναία διαμόρφωση που ενώνει την πλώρη και την πρύμνη αντίστοιχα. Για γάστρες που δεν έχουν αυτές τις περίπλοκες διαμορφώσεις, όπως ένα ιστιοπλοϊκό σκάφος, υπάρχει μόνο ένα ελάχιστο και συνήθως είναι πολύ ρηχό [1].

Δεδομένου ότι τα κύματα επιφάνειας μπορούν να θεωρηθούν ότι παράγονται από διαταραχές της πίεσης, τα κυριότερα συστήματα κύματος γύρω από ένα πλοίο παράγονται από τις υψηλές πιέσεις στη πλώρη και την πρύμνη και τις χαμηλές πιέσεις στις ενδιάμεσες διαμορφώσεις. Οι πρώτοι δύο θα παράγουν κύματα ξεκινώντας από μια κορυφή, ενώ τα δύο τελευταία θα παράγουν κύματα ξεκινώντας με μια κοιλάδα.

Τα συστήματα κυματισμών που προέρχονται από διαφορετικά σημεία της γάστρας μπορούν να περιέχουν εγκάρσιους και αποκλίνοντες κυματισμούς με εν μέρει επικαλυπτόμενες, σφήνες Kelvin. Ωστόσο, προς το παρόν θεωρούμε το προφίλ του κύματος κατά μήκος της γάστρας και της κεντρικής γραμμής, που κυριαρχείται από τα εγκάρσια κύματα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2, το κύμα του προφίλ κατά μήκος της γάστρας περιέχει πέντε συνιστώσες:



Σχήμα 3. 2: Αλληλεπίδραση συστημάτων κυματισμών

1. Τοπική διαταραχή της επιφάνειας, με θετικές κορυφές στο πλώρη και την πρύμνη και αρνητικές κορυφές στις διαμορφώσεις. Σε αυτό το παράδειγμα, έχει συμμετρική κατανομή, καθώς η μορφή της γάστρας είναι συμμετρική. Αυτή η διαταραχή αποσβένει γρήγορα μπροστά και πίσω από τη γάστρα. Επομένως κανένα κύμα δεν ακολουθεί πίσω και κατά συνέπεια δεν εκπέμπεται ενέργεια. Αυτή η διαταραχή ονομάζεται επίσης τοπική διαταραχή, ή αλλιώς κύμα Bernoulli.
2. Το σύστημα κύματος της πλώρης, ξεκινώντας από μια κορυφή
3. Το κύμα της μπροστινής διαμόρφωσης, ξεκινώντας από μια κοιλάδα
4. Το κύμα της πίσω διαμόρφωσης, ξεκινώντας επίσης από μια κοιλάδα
5. Το σύστημα κυμάτων της πρύμνης, ξεκινώντας από μια κορυφή.

Το προφίλ του κύματος κατά μήκος του σκάφους προσεγγίστηκε στη συνέχεια από το άθροισμα αυτών των πέντε συστημάτων.

Για μορφές γάστρας με πιο λείες γραμμές ισάλων χωρίς αλλαγές καμπυλότητας, το πρότυπο των κυμάτων μπορεί ακόμα να θεωρηθεί ότι αποτελείται από αυτά τα πέντε συστήματα - μια τοπική διαταραχή κατά μήκος της γάστρας και τέσσερα συστήματα κυμάτων λόγω της παρουσία της ελεύθερης επιφάνειας. Η εμφάνιση των κυματισμών, που προκύπτουν από τις διαμορφώσεις, και ο τύπος των πρυμναίων κυμάτων εξαρτάται από τη μορφή της γάστρας. Αυτά τα συστήματα κυματισμών δεν συνδέονται πλέον με καθορισμένα σημεία, επειδή η

αλλαγή της κλίσης είναι πλέον ομαλή και κατανέμεται σε ολόκληρη την έκταση της ροής. Ακόμα κι έτσι, για μια δεδομένη μορφή γάστρας, η αλληλεπίδραση των συστημάτων καθορίζεται μοναδικά από τον αριθμό Froude.

Αξίζει να αναφερθεί ότι η ύπαρξη αλληλεπιδράσεων αυτού του είδους ήταν γνωστή στους ναυπηγούς εδώ και πολλά χρόνια. Ο Froude το απέδειξε, τοποθετώντας διάφορα μοντέλα σχεδιασμένα με την ίδια πλώρη και πρύμνη, διαφοροποιώντας τα μήκη του παράλληλου τμήματος.

Όταν το σώμα ταξιδεύει κοντά ή πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια, δημιουργείται μια κυματομορφή και η κατανομή της πίεσης πάνω στην γάστρα τροποποιείται. Η προκύπτουσα διαμήκης δύναμη είναι η αντίσταση κυματισμού:

$$R_w = -\iint p * n_x * dS$$

όπου S είναι η βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας μέχρι την πραγματική ίσαλο, n_x είναι η διαμήκης συνιστώσα του κάθετου διανύσματος στην επιφάνεια της γάστρας, και p είναι η πίεση, συμπεριλαμβανομένων τόσο των υδροστατικών όσο και των υδροδυναμικών συνιστωσών. (Υποθέτουμε ότι υπάρχει ιδανικό ρευστό ώστε οι αλλαγές της πίεσης που προκαλούνται από τα φαινόμενα συνεκτικότητας θα πρέπει να συμπεριλαμβάνονται στην αντίσταση πίεσης λόγο συνεκτικότητας και όχι στην αντίσταση κυματισμού).

Αυτή η αντίσταση πίεσης πρέπει να είναι τέτοιου μεγέθους ώστε η ενέργεια που καταναλώνεται για τη μετακίνηση του σκάφους, να είναι ίση με την ενέργεια που είναι απαραίτητη για τη διατήρηση του κυματικού συστήματος. Η κυματομορφή που παράγεται από το πλοίο περιέχει κυματική ενέργεια που ακτινοβολείται έξω και πίσω από το σκάφος. Επομένως, για συγκεκριμένη περίπτωση, η ίδια ροή ενέργειας πρέπει να παρέχεται από το πλοίο, ως αντίσταση κυματισμού επί την ταχύτητα. Μπορούμε να αντλήσουμε αυτή την ροή ενέργειας από την απεικόνιση της ελεύθερης επιφάνειας των απομακρυσμένων κυματισμών, που είναι εγγενής στο φάσμα κυμάτων των πλοίων. Από αυτό, βρέθηκε η ακόλουθη έκφραση για την αντίσταση κυματισμού. [2] :

$$R_w = \frac{1}{2} * \pi * \rho * V^2 * \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} (A(\theta)^2 + B(\theta)^2) * \cos^3\theta * d\theta$$

Αυτή η έκφραση ως μια απλή ολοκλήρωση πάνω στην επιφάνεια του φάσματος των κυματισμών, δείχνει σαφώς ότι η αντίσταση κυματισμού εξαρτάται από το τετράγωνο του πλάτους του κύματος και ότι τα κύματα του μακρινού πεδίου δεν έχει καμία επίδραση στην αντίσταση. Επίσης, υπάρχει ένας συντελεστής βάρους $\cos^3$, που σημαίνει ότι τα εγκάρσια κύματα είναι πολύ πιο σημαντικά για την αντίσταση κυματισμού από τα αποκλίνοντα κύματα, ένα σημαντικό χαρακτηριστικό για το σχεδιασμό της γάστρας του πλοίου. Η μείωση του πλάτους των απομακρυσμένων εγκάρσιων κυμάτων (π.χ. με βελτιστοποίηση της αλληλεπίδρασης των κυμάτων) έχει άμεσο όφελος για την αντίσταση.

Είναι σημαντικό να συνειδητοποιήσουμε ότι μια μελέτη της απομακρυσμένης κυματομορφής και της ακτινοβολούμενης κυματικής ενέργειας, καθώς και η πίεση (σε ιδανικό ρευστό) ολοκληρωμένη πάνω από στην γάστρα, είναι δύο τρόποι να αντιληφθούμε την ίδια ποσότητα και όχι δύο συνιστώσες αντίστασης.

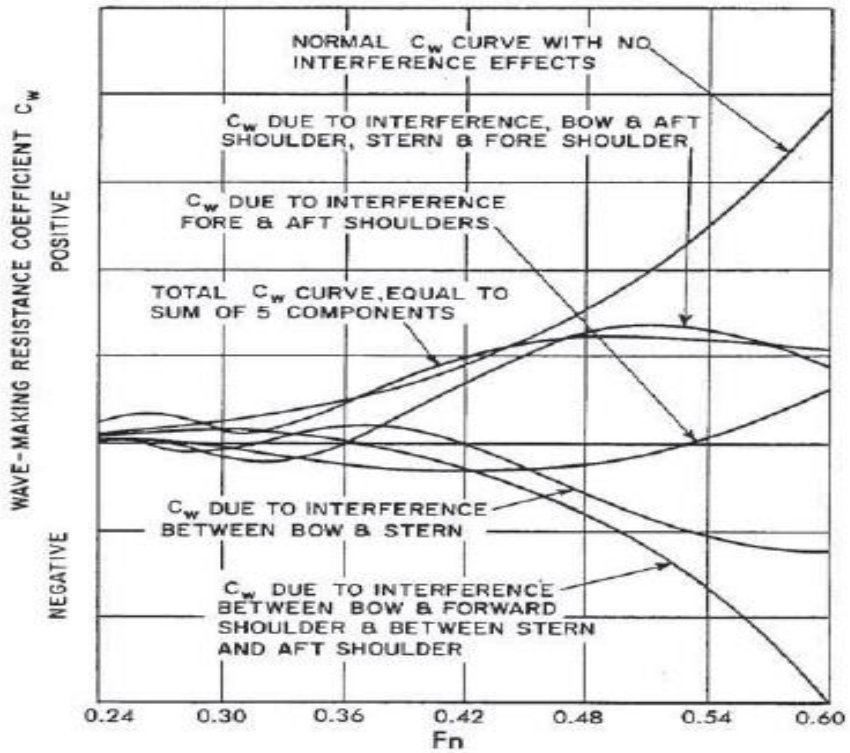
Όπως αναφέρθηκε η ενέργεια του κύματος είναι ανάλογη με το τετράγωνο του πλάτος κύματος, γεγονός το οποίο ακολουθεί και η αντίσταση κυματισμού. Λόγω αυτής της τετραγωνικής εξάρτησης, προφανώς η υπέρθεση των διαφορετικών συστημάτων των κυμάτων δεν μπορεί να ισχύει και για τις συνιστώσες της αντίστασής τους. Συνεπώς, η αλληλεπίδραση μεταξύ των κυμάτων παίζει σημαντικό ρόλο. Αλληλεπίδραση με αρνητικό όφελος παρουσιάζεται όταν τα συστήματα κυματισμών ενισχύουν το ένα τον άλλο, με αποτέλεσμα να οδηγούμαστε σε υψηλή αντίσταση κυματισμού, ενώ στην αντίθετη περίπτωση που το ένα εξουδετερώνει το άλλο αντιστοιχεί χαμηλότερη αντίσταση κυματισμού. Η εξάρτηση της αλληλεπίδρασης του κύματος από τον αριθμό Froude προκαλεί μια μεταβολή της αντίστασης κυματισμούς με τον Fn.

Καθώς η ταχύτητα μεταβάλλεται, θα υπάρχουν σειρές ταχυτήτων όπου οι κορυφές των δύο συστημάτων ενισχύονται μεταξύ τους και άλλες σειρές ταχυτήτων στις οποίες οι κορυφές και οι κοιλότητες τείνουν να ακυρώσουν η μία την άλλη. Ο αριθμός Froude στον οποίο θα παρουσιαστεί μια συγκεκριμένη αλληλεπίδραση εξαρτάται σημαντικά από τη μορφή της γάστρας. Είναι καλή πρακτική σχεδιασμού να διασφαλίζεται, όποτε είναι δυνατόν, ότι σε συνθήκες λειτουργίας το πλοίο λειτουργεί με ευνοϊκή ταχύτητα. Η εξάρτηση αυτών των κορυφών και των κοιλάδων από τον αριθμό Froude αντιπροσωπεύει τη στενή σχέση μεταξύ οικονομικής ταχύτητας και μήκους του πλοίου.

Για να λάβουμε κάποιες πληροφορίες σχετικά με τη θέση των κορυφών και των κοιλάδων, εξετάζουμε πάλι την σφηνοειδής γάστρα ξανά. Γι' αυτήν, βρέθηκε ότι ο συντελεστής αντίστασης κυματισμού είναι της μορφής :

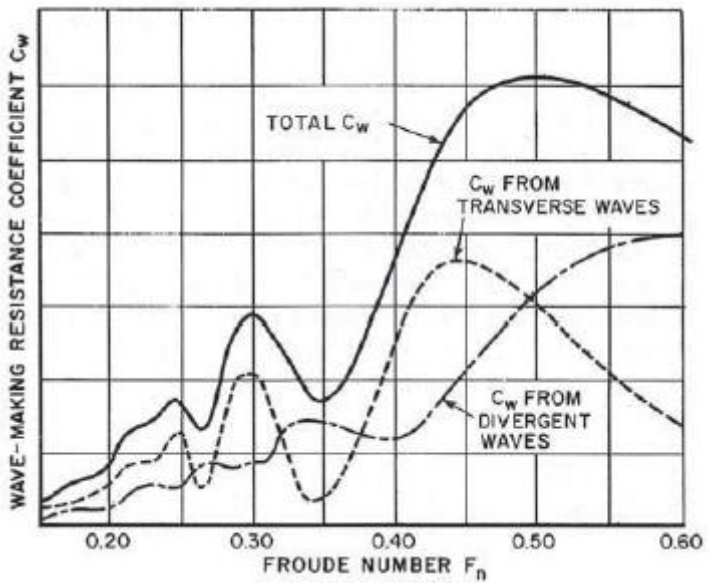
$$C_w = \frac{R_w}{\frac{1}{2} * \rho * V^2 * S} = V^4 * (\sigma\tau\alpha\theta\varepsilon\rho\acute{o}\varsigma\ \acute{o}\rho o\varsigma + 4\varepsilon\iota\varsigma\ \mu\varepsilon\tau\alpha\beta\lambda\eta\tau o\acute{\upsilon}\varsigma\ \acute{o}\rho o\upsilon\varsigma)$$

Οι μεταβλητοί όροι προκαλούνται από την αλληλεπίδραση μεταξύ διαφορετικών συστημάτων κυματισμού, όπως φαίνεται στο σχήμα παρακάτω. Αυξάνοντας τον Fn πέρα από περίπου 0,48 τα περισσότερα συστήματα κυματισμών εξουδετερώνουν τελικά το ένα το άλλο, πράγμα που αντιφάσκει με την σταθερή αύξηση του C_W. Σε ακόμη υψηλότερες ταχύτητες το μήκος του εγκάρσιου κύματος είναι ουσιαστικά μεγαλύτερο από το μήκος του πλοίου και η επίδραση της αλληλεπίδρασης στα εγκάρσια κύματα εξαφανίζεται. Όσο υψηλότερος είναι ο αριθμός Froude σε αυτήν την περίπτωση, τόσο χαμηλότερη είναι η τιμή του C_W.



Σχήμα 3. 3: Συστήματα κυματισμών γάστρας

Ο Wigley πραγματοποίησε επίσης υπολογισμούς για να δείξει τις διάφορες συνεισφορές στην αντίσταση των παραγόμενων εγκάρσιων και αποκλινόντων συστημάτων [3]. Μέχρι έναν αριθμό Froude 0,4, τα εγκάρσια κύματα είναι κυρίως υπεύθυνα για τις θέσεις των κορυφών και κοιλάδων όπως υποθέσαμε προηγουμένως. Πάνω από αυτή την ταχύτητα, η συμβολή των αποκλινόντων κυματισμών καθίσταται ολοένα και πιο σημαντική και η αλληλεπίδραση των εγκάρσιων κυμάτων από μόνη της δεν θα καθορίσει σωστά τη θέση των κορυφών, ιδιαίτερα του τελευταίου στο Fn 0.5. Το παραπάνω πόρισμα φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Σχήμα 3. 4: Αλληλεπίδραση εγκάρσιων και αποκλινόντων κυματισμών

Η μελέτη του Wigley ήταν αρκετά απλοποιημένη ως αναφορά την μορφή της γάστρας, στην εστίαση της αλληλεπίδρασης των εγκάρσιων κυμάτων και από τις απλοποιήσεις στη θεωρητική μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε. Για ένα οπουδήποτε πλοίο, ένας εμπειρικός τρόπος για τον προσδιορισμό της θέσης των κορυφών και των κοιλάδων είναι η χρήση της λεγόμενης μεθόδου z. Η μέθοδος θεωρεί μόνο δύο από τα συστήματα κυματισμών: το σύστημα κύματος της πλώρης (ξεκινώντας από μια κορυφή) και το σύστημα των κυμάτων της διαμόρφωσης στην πρύμνη (ξεκινώντας από μια κοιλάδα). Η απόσταση μεταξύ των δύο ονομάζεται wave-making length, z. Η κορυφή του κύματος συμβαίνει όταν $z = (2k + 1) * \lambda/2$ και κοιλάδα όταν $z = k$, όπου λ είναι το πλάτος μήκος κύματος και $k = 0, 1, 2, \ldots$. Με βάση τον Baker και τον Kent [4] πρότειναν ένα τύπο για το z, κατάλληλο για k 1, 2 και 3:

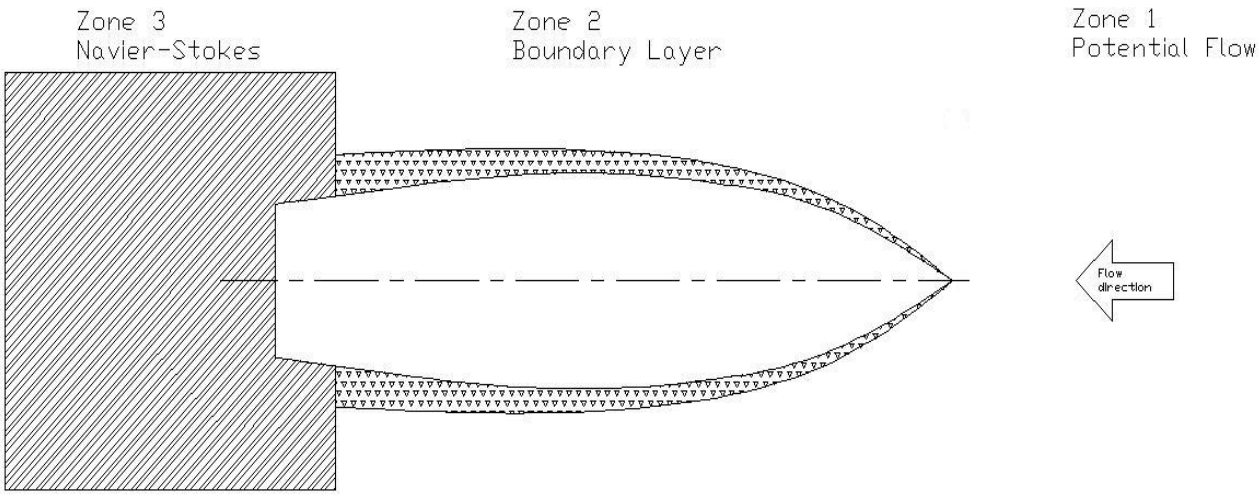
$$z = C_p * L + \frac{1}{4} * \lambda$$

όπου C_P είναι ο πρισματικός συντελεστής της γάστρας. Χρησιμοποιώντας τη σχέση διασποράς για τα εγκάρσια κύματα, οι αριθμοί Froude που αντιστοιχούν σε μια κορυφή υπολογίζονται από την σχέση:

$$Fn = \sqrt{\frac{C_p}{2\pi * \left(k + \frac{1}{4}\right)}}$$

Υπολογιστική μέθοδος

Το CFD (Computational Fluid Dynamics) λογισμικό Shipflow δημιουργήθηκε από τους Flowtech International AB και Chalmers University of Technology. Το λογισμικό αυτό χρησιμοποιεί τρεις διαφορετικές μεθόδους για τον υπολογισμό της αντίστασης του σκάφους. Η μέθοδος χρησιμοποιώντας την θεωρία δυναμικού, την θεωρία του οριακού στρώματος και την θεωρία RANS (Reynolds Average Navier-Stokes equations). Η κάθε μέθοδος αναφέρεται σε συγκεκριμένη περιοχή της ροής όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3. 5: Μέθοδοι υπολογισμών του Shipflow

Ο υπολογισμός θα μπορούσε να γίνει επιλύοντας τις εξισώσεις RANS σε όλη την ροή, αλλά αυτά θα απαιτούσε πολύ μεγάλη μνήμη υπολογιστή και χρόνο ώστε να έχουμε ακριβή αποτελέσματα. Για τον λόγω αυτό το Shipflow εφαρμόζει μια απλοποιημένη ροή. Η υπόθεση είναι πως η αντίσταση κυματισμού εξαρτάται από μια διαδικασία που λαμβάνει χώρα μακριά από την γάστρα, ενώ η αντίσταση λόγω συνεκτικότητας δεν επηρεάζεται από την αντίσταση των δημιουργούμενων κυματισμών αλλά από την ροή κοντά στον οριακό στρώμα της γάστρας.

Επομένως, η κυματογέννεση μπορεί να μοντελοποιηθεί από την θεωρία δυναμικού, όπως επίσης και η περιοχή μακριά από την γάστρα. Κοντά στην γάστρα και πίσω από τον καθρέφτη, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν άλλες μέθοδοι. Η μέθοδος του οριακού στρώματος στην δεύτερη ζώνη, λαμβάνει την πίεση στο οριακό στρώμα σταθερή. Ο τομέας του οριακού στρώματος είναι πολύ λεπτός οπότε αυτή η υπόθεση είναι πολύ κοντά στην πραγματικότητα. Η μέθοδος αυτή απλοποιεί τους υπολογισμούς συγκρινόμενη με την μέθοδο RANS. Έτσι γίνεται ευκολότερος ο υπολογισμός τις συνεκτικής αντίστασης στην δεύτερη περιοχή. Η ροή στην τρίτη περιοχή είναι τυρβώδης και άρα παρουσιάζει δυσκολία στην μοντελοποίησή της. Για τον λόγω αυτό επιλέγεται η μέθοδος RANS για τον υπολογισμό της αντίστασης στην περιοχή αυτή. Η μέθοδος αυτή δεν αποτελεί κώδικα ελεύθερης επιφάνειας. Η μορφή της ελεύθερης επιφάνειας υπολογίζεται μέσω ενός κώδικα πλέγματος, και έπειτα η ροή κάτω από την επιφάνεια υπολογίζεται μέσω του RANS. Με τον τρόπο αυτό, όλα τα μέρη τις γάστρας που είναι κάτω από την επιφάνεια λαμβάνονται υπόψιν ακόμη και μετά τον υπολογισμό της κυματομορφής.

Στο πρόγραμμα Shipflow όλα τα δεδομένα είναι αδιάστατα. Το μήκος της ισάλου L_{wl} είναι το μέγεθος με το οποίο γίνεται η αδιαστατοποίηση. Επομένως το μήκος του σκάφους θα είναι κοντά στην μονάδα, το εκτόπισμά του θα είναι όσο και του πραγματικού διαιρούμενο με L^3_{wl} κ.λπ.

Για τον υπολογισμό της αντίστασης κυματισμού, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της δυναμικής ροής. Η αντίσταση λόγω συνεκτικότητας στον ομόρου δεν είναι τόσο σημαντική, για το εύρος των ταχυτήτων που εξετάζουμε. Η μέθοδος της δυναμικής ροής δεν μπορεί να συμπεριλάβει τα κύματα που σπάνε (breaking waves). Έτσι αν κάποιος θελήσει να λάβει πιο ακριβή αποτελέσματα για την αντίσταση, θα πρέπει να επιλέξει άλλη μέθοδο (Volume of Fluid or Level Set Techniques), η οποία είναι ακόμα σε ερευνητικό επίπεδο. Μια άλλη λύση για την απόκτηση των αποτελεσμάτων είναι η επιλογή ενός «χοντρού» πλέγματος. Το πλέγμα αυτό επιτρέπει την συλλογή αποτελεσμάτων για την γάστρα διότι εξομαλύνει το σύστημα κυματισμού. Με αυτόν τον τρόπο, μειώνεται το πλάτος του κύματος το οποίο μπορεί να επηρεάσει με την σειρά του το μήκος του κύματος και την κατεύθυνσή του. Το φαινόμενό αυτό είναι γνωστό με την ονομασία «αριθμητική διασπορά» και οδηγεί σε μη ακριβή αποτελέσματα.

Οι καλές γάστρες θα παράξουν μικρότερα κύματα κα πιθανών κύματα που δεν διαλύονται, και έτσι οι υπολογισμοί για τις γάστρες αυτές θα μπορούν να υποστηριχθούν από ένα αραιό πλέγμα. Τα αποτελέσματα αυτά είναι πιο ακριβή και επίσης λαμβάνονται τιμές υψηλότερες σε σύγκριση με το πυκνό πλέγμα.

Το λογισμικό του Shipflow έχει την ικανότητα να κάνει υπολογισμούς αντίστασης κυματισμού με γραμμικές ή μη γραμμικές μεθόδους. Η γραμμική μέθοδος είναι πιο γρήγορη (περίπου 5sec) και μπορεί να επιλύσει τα περισσότερα προβλήματα, ενώ η μη γραμμική μέθοδος θα χρειαστεί πολλές επαναλήψεις (περίπου 30 επαναλήψεις σε 10min) και μπορεί τα αποτελέσματά τους να αποκλίνουν. Η γραμμική λύση είναι αρκετά ακριβής για αργόπλοα πλοία καθώς και για ταχύπλοα με στενή γραμμή. Το δίγαστρο σκάφος το οποίο μελετάται είναι σχετικά αργό όταν ταξιδεύει μόνο με την μηχανή, αλλά επίσης μπορεί να αναπτύξει ταχύτητα μέχρι Fn=0,6. Η γραμμές της κάθε γάστρας είναι λεπτόγραμμες (B/L>7), οπότε η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη στην περίπτωσή μας. Όμως στην γραμμική μέθοδο το πεδίο φράσετε από την αδιατάρακτη ελεύθερη επιφάνεια και οτιδήποτε πάνω από αυτήν αγνοείται [1]. Παρόλα αυτά οι γάστρες οι οποίες θα επιλεχθούν θα έχουν μόνο μικρές διαφορές στην πρύμνη, μερικές θα έχουν στεγνό καθρέφτη ενώ άλλες βυθιζόμενο.

Καθώς τα πλοία κινούνται πρώσο, η ροή θα ακολουθήσει την γάστρα και έτσι μετά από κάποια συγκεκριμένη ταχύτητα, ο βυθισμένος καθρέφτης εξέλθει από το νερό. Δυστυχώς το λογισμικό του Shipflow δεν μπορεί να διακρίνει αν ο καθρέφτης είναι ακόμα βυθιζόμενος. Για την παρούσα εργασία θεωρείται πως στην ταχύτητα υπηρεσίας, ο καθρέφτης έχει αποκολληθεί από το νερό. Αυτή η υπόθεση είναι λογική αφού στην ταχύτητα αυτή (Fn>0,4) έχουμε στεγνό καθρέφτη.

Εντολές – Εργαλεία του Shipflow

Σε αυτό το κεφάλαιο αναφέρονται περιγραφικά όλες οι λειτουργίες που μπορεί να εκτελέσει το λογισμικό του Shipflow, παρόλο που χρησιμοποιήθηκαν μερικές από αυτές.

XFLOW

Καθορίζει της φυσικές ιδιότητες του περιβάλλοντος όπως το υγρό που θα πλέει το σκάφος καθώς και άλλα χαρακτηριστικά όπως η αρχική θέση η ταχύτητα του σκάφους.

XMESH

Η εντολή αυτή χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της ολικής επιφάνειας, κατασκευάζοντας τα πλέγματα της γάστρας και της ελεύθερης επιφάνειας με σκοπό να χρησιμοποιηθούν στο πρόγραμμα επίλυσης του δυναμικού XPAN. Σε περίπτωση που εκτελούνται μη γραμμικές μέθοδοι υπολογισμού η εντολή XMESH καλείται σε κάθε επανάληψη κατά την επίλυση του προβλήματος. Το XMESH εκτελείται επίσης όταν λαμβάνεται υπόψιν η διαγωγή και η επιπλέον βύθιση λόγο της κίνησης της γάστρας στο νερό.

XPAN

Η εντολή XPAN υπολογίζει τη ροή δυναμικού γύρω από το μοντέλο και την ελεύθερη επιφάνεια, τα οποία αποτελούνται από τετράπλευρα πάνελ που το καθένα περιέχει πηγές Rankine. Το XPAN μπορεί να λειτουργεί υπό γραμμικές ή μη γραμμικές οριακές συνθήκες ελεύθερης επιφάνειας. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν από το XPAN εμφανίζονται από τον επεξεργαστή και αναφέρονται στα αρχεία εξόδου. Τα αποτελέσματα περιλαμβάνουν τον συντελεστή αντίστασης κυματισμού (C_W), το συντελεστή αντίστασης κυματισμού μέσω της

ανάλυσης των wave-cuts (C_{WTWC}), την κυματομορφή, την αναπαράσταση των πιέσεων και των ταχυτήτων. Το αποτέλεσμα από το XPAN αποθηκεύεται σε ένα αρχείο δεδομένων που απαιτείται για την εκτέλεση του XBOUND.

XBOUND

Η συγκεκριμένη εντολή XBOUND ασχολείται με το λεπτό στροβιλώδες οριακό στρώμα που περιβάλλει τη γάστρα. Χρησιμοποιώντας ενσωματωμένες εξισώσεις ορμής, το SHIPFLOW παρέχει το συντελεστή αντίστασης τριβής (C_F), το πάχος οριακού στρώματος δ, καθώς και άλλες παραμέτρους που σχετίζονται με το οριακό στρώμα. Το XBOUND δημιουργεί ένα αρχείο βάσης δεδομένων που απαιτείται για την εκτέλεση του XCHAP.

XGRID

Το XGRID δημιουργεί το πλέγμα που χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς συνεκτικότητας στο XCHAP. Με το XGRID είναι δυνατό να δημιουργηθούν πλέγματα για πλοία ή υποβρύχια με διπλή τρόπιδα και βολβοειδή πλώρη. Ωστόσο, τα παρελκόμενα δεν είναι δυνατό να χειριστούν με το XGRID.

XVISC

Αυτή η ενότητα επιλύει τις εξισώσεις Navier-Stokes. Το XVISC παρέχει τον συντελεστή αντίστασης πίεσης λόγω συνεκτικότητας (C_{VP}) και ως εκ τούτου μπορεί να εκτιμηθεί η συνολική αντίσταση C_T. Το XVISC μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να διερευνήσει τον ομόρου και άλλες τιμές όπως αξονικές, ακτινικές και εφαπτόμενες ταχύτητες σε διάφορα επίπεδα προς την πρύμνη.

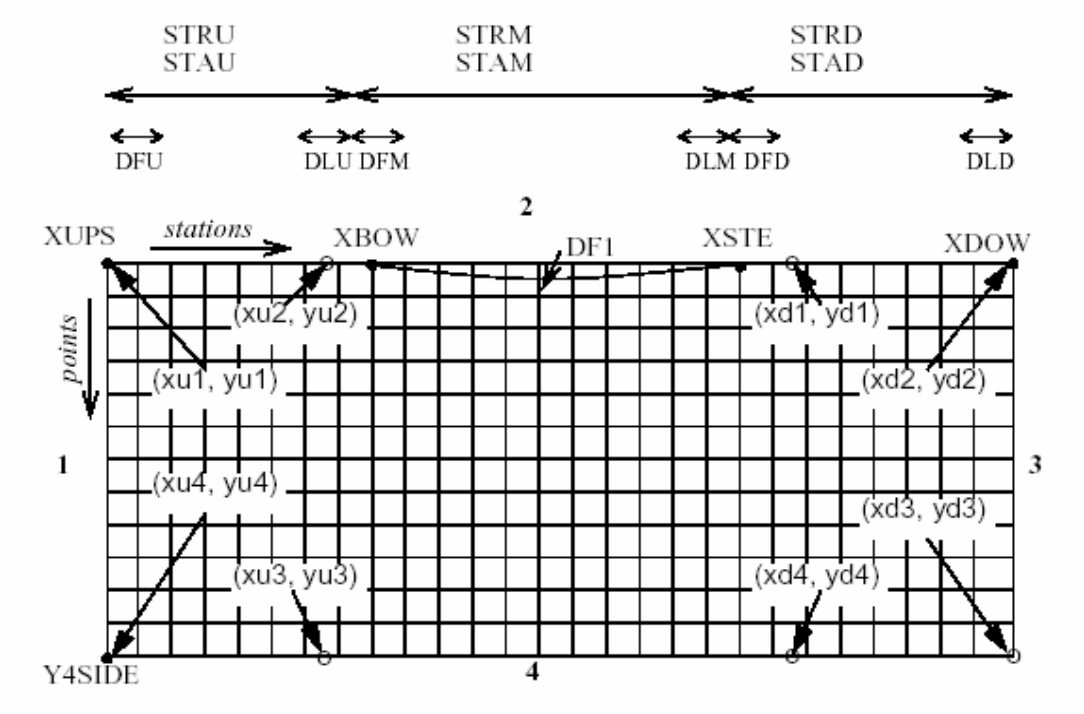
XCHAP

Το XCHAP είναι μια εντολή που χρησιμοποιεί ένα από τα διάφορα διαθέσιμα μοντέλα στροβιλισμού (EASM, k-ω BSL, k-ω SST). Το XCHAP χρησιμοποιεί το πλέγμα που παράγεται από το XGRID, αλλά είναι επίσης δυνατή η εισαγωγή πλεγμάτων που έχουν δημιουργηθεί από άλλο λογισμικό. Με τη χρήση αυτής της εντολής είναι δυνατός ο καθορισμός της μέσης ταχύτητας, της πίεσης και των μεγεθών που σχετίζονται με την τυρβώδη ροή. Η συνολική αντίσταση μπορεί να υπολογιστεί συνδυάζοντας τα αποτελέσματα από τα XPAN, XBOUND και XCHAP.

Μοντελοποίηση πλέγματος

Πριν προχωρήσουμε στις προσομοιώσεις των γαστρών, είναι πολύ σημαντικό να αναλυθεί το μοντέλο του πλέγματος. Αυτός είναι και ο στόχος της παραγράφου. Το πλέγμα στο Shipflow κατασκευάζεται όπως περιγράφεται στο ακόλουθο σχήμα.

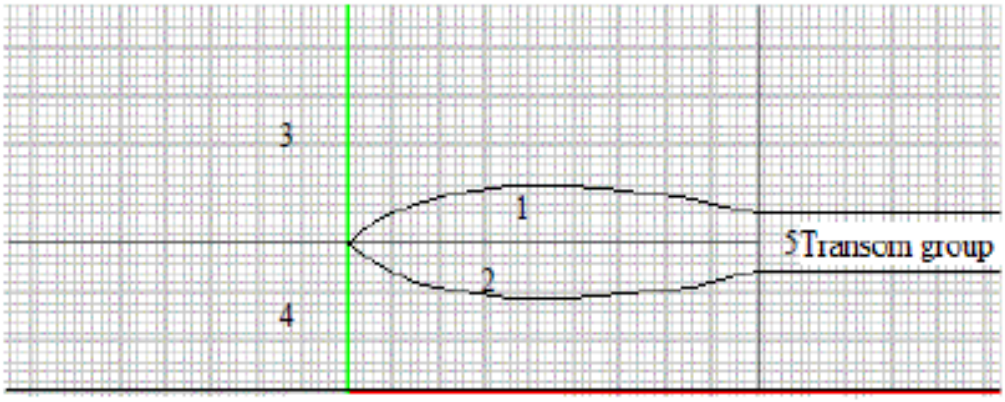
Τα σημεία που βρίσκονται κατά το διάμηκες καλούνται νομείς και εκείνα που είναι κατά το



Σχήμα 3. 6: Ορισμοί μεγεθών πλέγματος του Shipflow

πλάτος της γάστρας ορίζονται ως σημεία. Όπως φαίνεται και στο παραπάνω σχήμα η γάστρα τοποθετείται ανάμεσα στο XBOW και στο XSTE. Το XUPS δηλώνει το μπροστινότερο σημείο στο πλέγμα ενώ το XDOW είναι το μακρύτερο από την πρύμνη. Επίσης το STAU είναι ο αριθμός το νομέων ανάμεσα στο XUPS και την πλώρη, το STAM είναι ο αριθμός των νομέων κατά μήκος του πλοίου και το STAD είναι ο αριθμός των νομέων ανάμεσα στον καθρέφτη και το XDOW.

Λόγω του ότι δεν θα γίνει προσομοίωση με εγκάρσια κλίση, το μοντέλο θα είναι συμμετρικό ως προς τον διαμήκη άξονα της γάστρας. Έτσι μοντελοποιούμε την μισή γάστρα και την άλλη μισή την κατασκευάζουμε χρησιμοποιώντας την εντολή mirror. Υπάρχουν διάφορα τμήματα που απαρτίζουν το πλέγμα, ένα για την γάστρα και 3 ή 4 για την ελεύθερη επιφάνεια. Η ελεύθερη επιφάνεια αποτελείται από τρία τμήματα: ένα μπροστά από την γάστρα, ένα κατά μήκος της γάστρας και ένα πίσω από την γάστρα. Για σκάφη με πρύμνη καθρέφτη, θα πρέπει να προστεθεί πλέγμα πίσω από την πρύμνη. Σε αυτήν την περίπτωση δίγαστρου σκάφους, χρειάζεται να τοποθετηθεί το πλέγμα ώστε να παραχθούν αξιόπιστα αποτελέσματα.



Σχήμα 3. 7: Ζώνες πλέγματος

Το **πλέγμα της γάστρας** αποτυπώνεται στις περιοχές 1 και 2 στο παραπάνω διάγραμμα. Η δεύτερη ζώνη είναι η κατοπτρική της πρώτης. Όταν χρησιμοποιείται η γραμμική μέθοδος, ένας τρόπος για να εντοπιστεί το σφάλμα που οφείλεται στο μοντέλο του πλοίου είναι γίνει ένας αρχικός υπολογισμός χωρίς την ελεύθερη επιφάνεια. Η αντίσταση που προκύπτει με τον τρόπο αυτό θα πρέπει να είναι μηδέν. Το λογισμικό Shipflow υπολογίζει τον συντελεστή Cxpi ολοκληρώνοντας την πίεσης γύρω από το πλοίο. Όμως, το Shipflow συνήθως δίνει μια θετική τιμή η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως το σφάλμα. Με την μη γραμμική μέθοδο, το πλέγμα στο πλοίο θα αλλάξει σε κάθε επανάληψη, ακολουθώντας το ύψος κύματος, έτσι ώστε η προηγούμενη προσέγγιση να μην είναι πια έγκυρη. Ωστόσο, αυτό δίνει μια προσέγγιση του σφάλματος και όσο μικρότερο θα είναι το σφάλμα που οφείλεται στο πλέγμα του πλοίου για τον γραμμικό υπολογισμό, τόσο μικρότερο θα είναι το σφάλμα για τον μη γραμμικό υπολογισμό. Το σφάλμα υπολογίζεται από το ποσοστό του Cxpi σε σύγκριση με το Cw που υπολογίζεται με τη γραμμική μέθοδο.

Οι υπολογισμοί δείχνουν ότι δεν υπάρχουν μεγάλες διαφορές, εάν το πλέγμα του πλοίου αποτελείται από 30 νομείς και 7 σημεία ή αν αποτελείται από 30 νομείς και 15 σημεία. Από την άλλη πλευρά, ο απαιτούμενος χρόνος υπολογισμού είναι σχεδόν διαιρεμένος κατά δύο. Έτσι το επιλεγμένο πλέγμα είναι 30 με 7.

Το **πλέγμα της ελεύθερης επιφάνειας** αποτυπώνεται στις περιοχές 3, 4 και 5. Στο εγχειρίδιο του Shipflow [5], συνιστάται να υπάρχουν περίπου 25 νομείς στο πλέγμα της ελεύθερης επιφάνειας ανά κύμα. Στην παρούσα περίπτωση Fn = 0.4, θα υπάρχει ένα κύμα κατά μήκος του κύτους και απαιτείται τουλάχιστον ένα κύμα μετά το πλοίο για είναι εφικτός ο υπολογισμός την αντίστασης κυματισμού. Μπροστά από το πλοίο, συνίσταται ο αριθμός των νομέων να είναι το ήμισυ του αριθμού των νομέων που βρίσκονται κατά μήκος του πλοίου. Διαφορετικά δίκτυα έχουν δοκιμαστεί με μη γραμμική μέθοδο και το σφάλμα βασίζεται στη σύγκριση της αντίστασης κυματισμού του λεπτού πλέγματος που δοκιμάστηκε:

$$Error = \frac{(C_W(finest_grid) - C_W)}{C_W(finest_grid)}$$

Για την μοντελοποίηση των τιμών STAU, STAM και STAD πραγματοποιήθηκε η εξής διαδικασία:

$$STAU = floor\left(\frac{25}{4*\pi*Fn^2}\right) \qquad STAM = round\left(\frac{panels}{\lambda}\right) \qquad STAD = round\left(\frac{(XDOW-1)*panels}{\lambda}\right)$$

Όπου, $\lambda = \mu\acute{\eta}\kappa o\varsigma\ \tau o\upsilon\ \kappa\acute{\upsilon}\mu\alpha\tau o\varsigma = \ 2 * \pi * Fn^2$

Αρχικά γίνεται μια σειρά υπολογισμών για να βρεθεί το σωστό μήκος του πλέγματος πίσω από το πλοίο και το κατάλληλο πλάτος του πλέγματος, δηλαδή το XDOW και το Y4SIDE αντίστοιχα. Αυτοί οι υπολογισμοί γίνονται με το λεπτό πλέγμα:

Free point	STAU	STAM	STAD	Transom point
15	17	32	47	5

Το καλύτερο πλέγμα φαίνεται να είναι γύρω από το XDOW = 2,5 και το Y4SIDE = 2. το λεπτότερο πλέγμα δεν δίνει σημαντική μείωση στο σφάλμα, αλλά το πυκνότερο αυξάνει το σφάλμα. Στη συνέχεια, αυτή η μελέτη βελτιώνεται με την αλλαγή του αριθμού σταθμών ταυτόχρονα με την αλλαγή του XDOW και του Y4SIDE.

Στη συνέχεια μελετήθηκε ο αριθμός των σημείων για την εσωτερική περιοχή ελεύθερης επιφάνειας (δηλαδή η ζώνη 4 στο Σχήμα 3.7). Αυτό το πλέγμα είναι αρκετά προβληματικό: στη μελέτη, η απόσταση μεταξύ των γαστρών ($b = B_{CL}/2$) θα αλλάξει και για λόγους εγκαταστάσεων, θα ήταν καλό να έχουμε τον ίδιο αριθμό σημείων για όλους τους υπολογισμούς. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο πρέπει να ληφθεί υπόψη η απόσταση b. Η μελέτη συμβουλεύει 9 βαθμούς για b= 0,35. αλλά όταν η απόσταση b μεγαλώσει, αυτή η μελέτη μπορεί να είναι λανθασμένη. Για αυτό το λόγω έγινε μια άλλη μελέτη με b= 0,5.

Για b = 0,35 αντιστοιχούν 9 σημεία αλλά για b = 0,5, απαιτούνται 12 σημεία. Έτσι θα ληφθούν 12 σημεία. Στην πραγματικότητα, κατά τον υπολογισμό, καμία από τις γάστρες δεν έχουν υπολογιστεί με πλέγμα ελεύθερων επιφανειών καθρέφτη αποτελούμενο από 12 σημεία, επειδή οι υπολογισμοί αυτοί δεν συγκλίνουν. Το πιο προβληματικό πλέγμα είναι αυτό του καθρέφτη (ζώνη 5 στο Σχήμα 3.7), επειδή είναι το σημείο όπου τα θραυσμένα κύματα εμφανίζονται. Έτσι, για ορισμένες γάστρες, το πλέγμα πρέπει να είναι πυκνό για να επιτευχθεί ένα συγκλίνον αποτέλεσμα.

Τέλος η τιμή του Cw συγκλίνει όταν ο αριθμός των σημείων είναι 10 για b = 0,35 και 12 για b= 0,5. Επιπλέον, βάσει του εγχειριδίου του Shipflow [5], ο Cw αυξάνεται με τη βελτίωση του πλέγματος.

Περιορισμοί της υπολογιστικής μεθόδου

Το πλάτος του κύματος της πρύμνη μπορεί να υπερεκτιμηθεί, οπότε η πρόβλεψη της αντίστασης κυματισμού μπορεί να είναι ανακριβής ποσοτικά. Ωστόσο, η σύγκριση της αντίστασης κυματισμού μεταξύ των διαφόρων γαστρών θα προβλεφθεί σωστά, δηλαδή η κατάταξη θα είναι ακριβής.

Η περιοχή των θραυσμένων κυμάτων οφείλεται σε μια ασταθή διαδικασία, η οποία εξαρτάται από παράγοντες που δεν περιλαμβάνονται στη μέθοδο δυναμικού. Αν το φαινόμενο της θραύσης του κύματος είναι σημαντικό, η λύση μπορεί να είναι διαφορετική, αλλά αν η λύση συγκλίνει, δεν θα υπάρχουν ενδείξεις σχετικά με το εάν τα κύματα θα σπάσουν ή όχι. Αυτό θα προκαλέσει κάποια προβλήματα αργότερα. Ακόμα, εάν η λύση συγκλίνει το υπολογιζόμενο κύμα είναι γενικά μια καλή πρόβλεψη ακόμα κι αν τα κύματα θραύσης δεν λαμβάνονται υπόψη.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η γάστρα με πρύμνη καθρέφτη, θεωρείται ότι ολισθαίνει και ότι ο καθρέφτης έχει αποκολληθεί. Αυτό σημαίνει ότι οι χαμηλές ταχύτητες δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν.

Κεφάλαιο 4. Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης

Το γενετικό πρόβλημα βελτιστοποίησης σχεδιασμού σκάφους

Η βελτιστοποίηση είναι μια διαδικασία λήψης απόφασης, όπου υπάρχουν διάφορες εναλλακτικές επιλογές, από τις οποίες πρέπει να επιλεχθεί η καλύτερη, με βάσει κάποιο κριτήριο. Χωρίς βέβαια να αγνοούνται οι περιορισμοί που τίθενται από το περιβάλλον [6].

Αναλύοντας περισσότερο την διαδικασία λήψης απόφασης, κατά την οποία πρέπει να καταλήξουμε σε μια επιλογή ανάμεσα στις διάφορες εναλλακτικές σχεδιάσεις. Οι σχεδιάσεις αυτές είναι άλλες περισσότερο και άλλες λιγότερο αποδεκτές λύσεις για το συγκεκριμένο πρόβλημα, με ανάλογες συνέπειες. Ο στόχος της διαδικασίας λήψης απόφασης είναι η μεγιστοποίηση των θετικών συνεπειών και η ελαχιστοποίηση των αρνητικών. Καθώς οι συνέπειες σχετίζονται άμεσα με την λήψη απόφασης, είναι λογικό να χρησιμοποιούνται ως παράμετροι της απόδοσης . Έτσι το πρόβλημα της λήψης απόφασης ανάγεται στην διερεύνηση των παραμέτρων αυτών, όλων των εναλλακτικών σχεδιάσεων. Με λίγα λόγια, λογική απόφαση περιλαμβάνει την κατάλληλη επιλογή-λύση, διαθέτοντας πολλαπλές παραμέτρους απόδοσης και διάφορα κριτήρια [8].

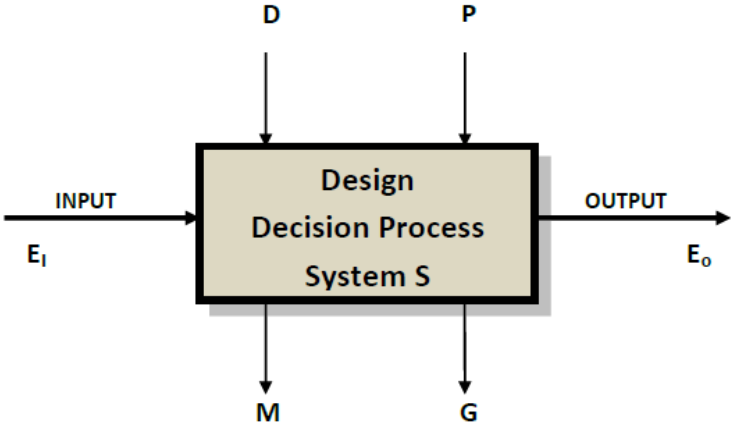
Η σχεδίαση των πλοίων αποτελεί τυπικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, στο οποίο εμπλέκονται πολλαπλές και συχνά αντιφατικές αντικειμενικές συναρτήσεις και περιορισμοί. Με ένα σύστημα τόσο περίπλοκο, αποτελούμενο από πολλά υποσυστήματα που είναι πολύπλοκα από μόνα τους, ο ναυπηγός πρέπει να ικανοποιήσει μια πληθώρα απαιτήσεων όπως τις ανάγκες του ιδιοκτήτη και επιθυμίες, εφικτότητα κατασκευής στο ναυπηγείο, απαιτήσεις της τεχνολογικής προόδου, περιβαλλοντικές εκτιμήσεις.

Η επίλυση μόνο των απαιτήσεων των υποσυστημάτων συχνά δεν οδηγεί σε ιδανικό αποτέλεσμα. Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των υποσυστημάτων πρέπει να αναλυθούν, οδηγώντας σε ένα πλοίο σχεδιασμό που είναι πραγματικά ένα πρόβλημα με πολλά κριτήρια λήψης απόφασης. Αυτές οι μέθοδοι MCDM μπορεί να διαφέρουν σε πολυπλοκότητα που εξαρτάται όχι μόνο από την ποσότητα των παραμέτρων που αναλύονται, αλλά και από το πόσες από τις αλληλεπιδράσεις τους έχουν μελετηθεί. Επιπλέον, υποκειμενικά γίνεται αναγκαίος ο καθορισμός των κριτηρίων που ξεχωρίζουν πάνω από τα άλλα. Η κατάταξη των κριτηρίων αυτών γίνεται βάσει της κάθε μεθόδου μεμονωμένα [7]. Έτσι, η δυσκολία βρίσκεται στην διατύπωση της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών. Για το λόγο αυτό, η βασική απαίτηση, όταν αντιμετωπίζεται το γενικό πρόβλημα βελτιστοποίησης του πλοίου, είναι ότι το σχεδιαστής θα πρέπει να έχει μια εικόνα του στόχου του, αυτό που πραγματικά θέλει να επιτύχει [9].

Μορφή του προβλήματος γενετικής βελτιστοποίησης

Η μορφή των προβλημάτων βελτιστοποίησης είναι μια εννοιολογική διαδικασία μοντελοποίησης, ο οποία ακολουθεί ορισμένες τυποποιημένες διαδικασίες και έχει ως αποτέλεσμα τον καθορισμό συγκεκριμένου προβλήματος, προσαρμοσμένο για εκάστοτε εφαρμογή, π.χ. στο σχεδιασμό [6].

Το γενικό πρόβλημα βελτιστοποίησης και τα βασικά του στοιχεία μπορούν να οριστούν αποτυπώνοντάς τα σε ένα διάγραμμα ροών ως εξής (Σχήμα 4.1):



Σχήμα 4. 1: Σύστημα βελτιστοποίησης

Είσοδος E_I: Προκαθορισμένα δεδομένα για παράδειγμα, απαιτήσεις του ιδιοκτήτη (χωρητικότητα, ταχύτητα υπηρεσίας κ.λπ.).

Έξοδος E_0: Αποτέλεσμα των υπολογισμών του συστήματος για δεδομένη είσοδο (βέλτιστη λύση με βάση το κριτήριο)

Μεταβλητές σχεδίασης D: Ελεύθερα μεγέθη του προβλήματος βελτιστοποίησης τα οποία ελέγχονται από τον σχεδιαστή), για παράδειγμα, τις κύριες διαστάσεις του πλοίου.

Παράμετροι σχεδίασης P: Περιοριστικά μεγέθη τα οποία δεν ελέγχονται από τον σχεδιαστή (εξωγενείς επιρροές, περιορισμοί του λογισμικού, πλευρικές συνθήκες).

Ποσοτικές συναρτήσεις M: Μέτρηση των απαραίτητων μεγεθών, έκφραση του κριτηρίου αξιολόγησης, αντικειμενική συνάρτηση (M (D, P)).

Περιορισμοί G: Οριακές συνθήκες τύπου ισότητας ή ανισότητας, συναρτήσει των μεταβλητών και παραμέτρων σχεδίασης (G (D, P)).

Ο Αλγόριθμος NSGA II

Ο αλγόριθμος NSGA-II (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II) αποτελεί αυτόν που θα χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση των επιδόσεων των διαφορετικών μορφών γάστρας. Η ονομασία του προέρχεται αφενός από τις ομοιότητες του με τη διαδικασία της πραγματικής φυσικής εξέλιξη των γενεών κι αφετέρου από τον τρόπο με τον οποίο κατατάσσονται οι σχεδιάσεις μιας γενιάς και των απογόνων της προκειμένου να παραχθεί η επόμενη [10].

Στη φύση τα χαρακτηριστικά των ειδών προκύπτουν από διασταύρωση των χαρακτηριστικών των γονέων τους και μετάλλαξης αυτών που τελικά θα αποκτήσουν. Τα χαρακτηριστικά αυτά αποτελούν το σύνολο των βιολογικών και πνευματικών ιδιοτήτων κάθε μέλους και καθορίζουν τις πιθανότητες επιβίωσης του. Η διαρκής κι επαναλαμβανόμενη παραγωγή απογόνων από τα μέλη που τελικά επιβίωσαν οδηγεί στη σταδιακή εξάλειψη μελών με χαρακτηριστικά που δεν τους επιτρέπουν να επιβιώσουν. 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 κι αναπαραγωγής με αποτέλεσμα οι απόγονοι του να έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με εκείνο.

Η διασταύρωση των χαρακτηριστικών των γονέων κατά την αναπαραγωγή καθιστά τους απόγονους τους διαφορετικούς από κάθε έναν γονέα. Αν τα χαρακτηριστικά που θα αποκτήσει ο απόγονος από κάθε γονέα είναι καλύτερα από του άλλου, θα αποτελεί μέλος με περισσότερες πιθανότητες επιβίωσης και από τους δύο γονείς του. Η μετάλλαξη των χαρακτηριστικών ενός απογόνου μπορεί με τη σειρά της, να βελτιώσει περεταίρω τα χαρακτηριστικά που έχει λάβει από τους δύο γονείς. Κατά την εξέλιξη των γενεών οι διαδικασίες μετάλλαξης και διασταύρωσης συμβαίνουν τυχαία και καθιστούν εφικτή την παραγωγή ειδών που έχουν συνεχώς καλύτερα χαρακτηριστικά με αποτέλεσμα τη διαρκή βελτίωση των ειδών.

Ο αλγόριθμος NSGA-II χρησιμοποιεί αυτήν ακριβώς τη λογική προκειμένου να βρεθούν μέλη που έχουν καλύτερα χαρακτηριστικά από άλλα. Συγκεκριμένα οι δύο βασικές ομοιότητες του με την φυσική εξέλιξη είναι η χρήση των διαδικασιών διασταύρωσης και μετάλλαξης και η επιβίωση των ισχυρότερων μελών ενός είδους. Η τυχαιότητα που διέπει τη διασταύρωση και μετάλλαξη στη φύση, διασφαλίζεται μέσω του προσδιορισμού αντίστοιχων πιθανοτήτων να συμβούν. Η επιβίωση του ισχυρότερου αντιστοιχεί στη διαδικασία κατάταξης των λύσεων. Τα χαρακτηριστικά των μελών μιας γενιάς είναι το σύνολο των μεταβλητών σχεδίασης ενώ η επιβιωσιμότητα αφορά την απόδοση με βάση τις αντικειμενικές συναρτήσεις που έχουν επιλεγεί. Η λειτουργία του αλγορίθμου αυτού συνοψίζεται στα επόμενα βήματα :

1. Παραγωγή ενός πληθυσμού από εναλλακτικές 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 γεωμετριών κάθε επιπέδου κατά φθίνουσα σειρά απόστασης από τις γειτονικές τους
5. Παραγωγή μια νέας γενιάς ισάριθμων με τον αρχικό πληθυσμό εναλλακτικών λύσεων, 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 την απόσταση από γειτονικές τους αφορά το επίπεδο με άξονες τις τιμές των 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 :

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

Αν λάβουμε δύο σχεδιάσεις p και q με διανύσματα μεταβλητών απόφασης $\boldsymbol{X_1}$ και $\boldsymbol{X_2}$ τότε η πρώτη σχεδίαση υπερέχει της δεύτερης ($p \prec q$) αν ισχύουν οι δύο επόμενες συνθήκες :

$f_j(\boldsymbol{X_1}) \leq f_j(\boldsymbol{X_2})$, $\forall\ j \in \{1,\ldots,n\}$

$\exists\ f_k(\boldsymbol{X_1}) < f_k(\boldsymbol{X_2})$, $k \in \{1,\ldots,n\}$

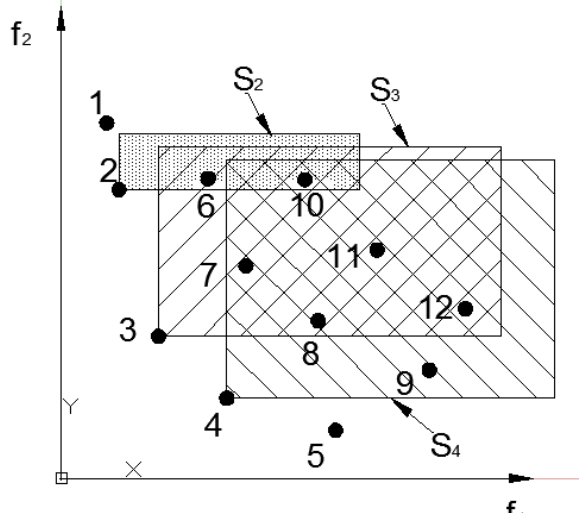
Απαιτείται δηλαδή να υπάρχει τουλάχιστον μια αντικειμενική συνάρτηση με μικρότερη τιμή και όσον αφορά τις υπόλοιπες οι δύο σχεδιάσεις να είναι τουλάχιστον ισοδύναμες.

Η διαδικασία κατάταξης των σχεδιάσεων σε επίπεδα ($\mathcal{F}_i$), γίνεται με διαδοχικούς ελέγχους των παραχθέντων γεωμετριών ξεκινώντας από αυτές από τις οποίες δεν υπερέχει καμία άλλη και οι οποίες αποτελούν το πρώτο επίπεδο. Στη συνέχεια γίνεται έλεγχος του αριθμού των σχεδιάσεων που υπερέχουν κάθε εξεταζόμενης και αν αυτές είναι λιγότερες από δύο, η εξεταζόμενη αποτελεί μέλος του επόμενου επιπέδου. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να εξεταστούν όλες οι γεωμετρίες που έχουν παραχθεί στην παρούσα επανάληψη. Η διαδικασία κατάταξης φαίνεται σε μορφή ψευδοκώδικα στη συνέχεια :

```
∀ p∈P
 Sp=∅
 np=0
 ∀ q∈P
   If (p≺q) then
     Sp=Sp∪{p}
   Else if (q≺p) then
     np=np+1
If np=0 then
 prank=1
 F1=F1∪{p}
  i=1
While Fi≠∅
Q≠0
∀ p∈Fi
  ∀ q∈Sp
    nq=nq−1
    If nq=0 then
      qrank=i+1
      Q=Q∪{q}
    i=i+1
   Fi=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 με n_p εκφράζεται ο αριθμός 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. Ο βαθμός κάθε λύσης χρησιμοποιείται στην κατάταξη που θα γίνει στη συνέχεια. Το μέγεθος Q αποτελεί το σύνολο των λύσεων στο οποίο προσωρινά αποθηκεύονται τα μέλη κάθε επιπέδου $\mathcal{F}_i$,$i \geq 2$. Στο σχήμα

4.2 φαίνονται 12 πιθανές λύσεις σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης με δύο αντικειμενικές συναρτήσεις f_1 και f_2, όπως αυτό που εξετάζεται στην παρούσα εργασία.



Σχήμα 4. 2: Παραγόμενες λύσεις στο επίπεδο των αντικειμενικών συναρτήσεων

Στο παραπάνω σχήμα έχουν επιλεγεί οι εναλλακτικές λύσεις 2,3 και 4 κι έχουν δημιουργηθεί τα αντίστοιχα χωρία S_i που περιέχουν το σύνολο των λύσεων από τις οποίες κάθε μία από αυτές τις τρεις υπερέχει. Για παράδειγμα η λύση 3 υπερέχει των λύσεων 6,7,10,11 και 12 που περιέχονται στο χωρίο S_3. 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 θα επανεξεταστεί στον έλεγχο των λύσεων του δευτέρου 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 ήδη κατατάχθηκε στο προηγούμενο επαναληπτικό βήμα. Η παράληψη εξέτασης μιας λύσης προϋποθέτει να έχει ήδη καταταγεί σε ένα επίπεδο. Με την ίδια διαδικασία ελέγχονται όλες οι λύσεις και κατατάσσονται σε κάποιο επίπεδο. Σημειώνεται πως η αρίθμηση είναι ενδεικτική και η σειρά με την οποία θα ελεγχθούν οι διαθέσιμες λύσεις κάθε επιπέδου δεν έχει καμία επίπτωση στη διαδικασία και το αποτέλεσμα της κατάταξης.

Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία κατάταξης σε επίπεδα γίνεται εκ νέου κατάταξη των λύσεων κάθε επιπέδου με φθίνουσα σειρά της απόστασης τους από τις υπόλοιπες. Σκοπός της δεύτερης αυτής κατάταξης είναι η επιδίωξη μεγάλου εύρους λύσεων στο επίπεδο των αντικειμενικών συναρτήσεων. Η διαδικασία κατάταξης των λύσεων με βάση αυτό το κριτήριο φαίνεται στη συνέχεια :

$k=|I|$
$\forall\ i,set$
$I[i]_{distance}=0$
$\forall\ objective\ m$

$I{=}sort(I,m)$
$I[1]_{distance}{=}I[k]_{distance}{=}\infty$
For i=2 to (k-1)

$$I[i]_{distance} = I[i]_{distance} + \frac{I[i+1]_m - I[i-1]}{{f_m}^{max} - {f_m}^{min}}$$

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε αντικειμενική συνάρτηση. Η απόσταση κάθε λύσης είναι το άθροισμα των επιμέρους αδιαστατοποιημένων τιμών απόστασης για κάθε αντικειμενική συνάρτηση.

Στη συνέχεια έχουμε μια τελική διαδικασία κατάταξης λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των άλλων δύο, με την προτεραιότητα να δίνεται στην κατάταξη σε επίπεδα. Κατά τη διαδικασία αυτή μια λύση i είναι καλύτερη από μια λύση j ($i{\prec_n}j$) αν ισχύει η ακόλουθη συνθήκη :

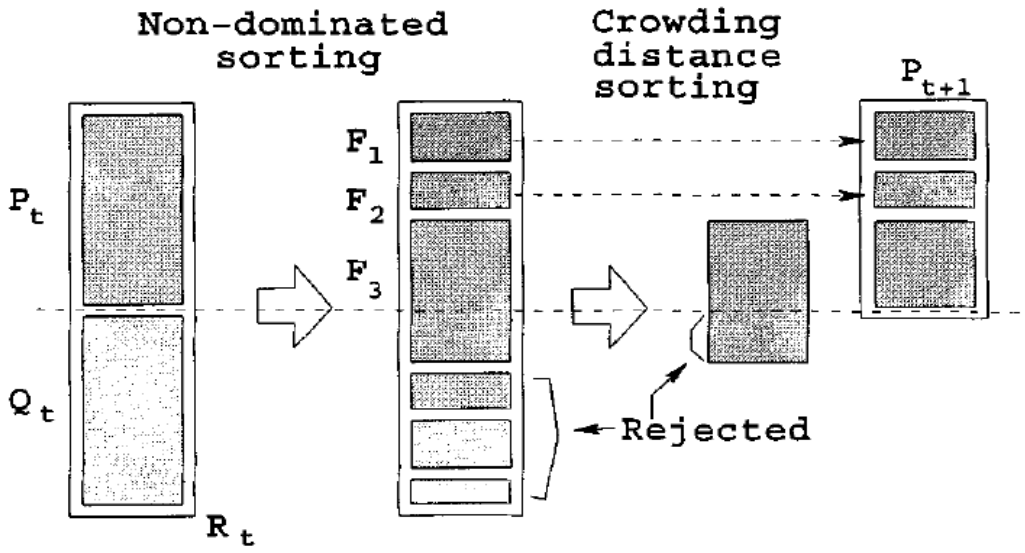
$$\{(i_{rank} < j_{rank})\ or\ [(i_{rank} = j_{rank})\ and\ (i_{distance} > j_{distance})]\}$$

Η συνολική διαδικασία μιας επανάληψης t του αλγορίθμου φαίνεται στη συνέχεια σε μορφή ψευδοκώδικα.

$Rt = Pt \cup Qt$
$\mathcal{F} = fast - non - dominated - sort\ (Rt)$
$Pt + 1 = \emptyset\ and\ i = 1$
$Until\ |Pt + 1| + |\mathcal{F}i| \leq N$
$Crowding\ distance\ assignment\ (\mathcal{F}i)$
$Pt + 1 = Pt + 1 \cup \mathcal{F}i$
$i = i + 1$
$Sort\ (\mathcal{F}i, \prec n)$
$Pt + 1 = Pt + 1 \cup \mathcal{F}i[1{:}\,(N - |Pt + 1|)]$
$Qt + 1 = make\ new\ population\ (Pt + 1)$
$t = t + 1$

Μετά την ολοκλήρωση της τελευταίας κατάταξης τα μέλη της γενιάς χωρίζονται σε δύο ισάριθμες ομάδες εκ των οποίων η πρώτη περιλαμβάνει όλες τις λύσεις που υπερέχουν σε σχέση με τα αυτές της δεύτερης. Η δεύτερη ομάδα απορρίπτεται και τα μέλη της πρώτης αποτελούν τους γονείς από τους οποίους παράγεται ένα σύνολο απογόνων που αποτελούν τα μέλη της επόμενης γενιάς. Για την παραγωγή κάθε απογόνου χρησιμοποιούνται τα χαρακτηριστικά δύο γονέων που υπόκεινται στη διαδικασία της διασταύρωσης. Ο αριθμός των απογόνων είναι διπλάσιος από τον πληθυσμό των γονέων που έχουν «επιβιώσει» κι επομένως η νέα γενιά έχει ισάριθμα μέλη με την προηγούμενη. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται με

αποτέλεσμα να λαμβάνουμε συνεχώς αποδοτικότερες λύσεις. Η συνολική διαδικασία ενός επαναληπτικού βήματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. [3]



Σχήμα 4. 3: Διαδικασία παραγωγής νέας γενιάς στον αλγόριθμο NSGA-II

Για τη διαδικασία βελτιστοποίησης της υδροδυναμικής συμπεριφοράς του πλοίου που εξετάζεται με χρήση του αλγορίθμου NSGA-II, απαιτούνται δεδομένα που καθορίζουν την αποδοτικότητα αλλά και την έκταση διερεύνησης του προβλήματος.

Αρχικά πρέπει να προσδιοριστούν ο αριθμός των γενεών και το πλήθος των μελών τους. Αυτά τα δύο δεδομένα επηρεάζουν την έκταση των εξεταζόμενων περιπτώσεων αλλά και την αποτελεσματικότητα της εξελικτικής διαδικασίας. Η αποτελεσματικότητα αυτή εξαρτάται τόσο από το εύρος των γενεών προκειμένου να υπάρχει πληθώρα διαφορετικών μελών όσο και από τον αριθμό γενεών ώστε η εξέλιξη να έχει ένα εκτενές διάστημα διαμόρφωσης των πληθυσμών. Τα δύο τελευταία δεδομένα που πρέπει να οριστούν είναι οι πιθανότητες διασταύρωσης και μετάλλαξης που επηρεάζουν τη διαδικασία αναπαραγωγής και διαμόρφωσης των χαρακτηριστικών των απογόνων.

Κεφάλαιο 5. Βελτιστοποίηση σχεδίασης του δίγαστρου ιστιοπλοϊκού σκάφους στην αντίσταση κυματισμού

Η κυματομορφή και η αντίσταση κυματισμού ενός σκάφους εξαρτώνται κυρίως από τις σχεδιαστικές λεπτομέρειες της γάστρας. Αυτό καθιστά τον σχεδιασμό ένα κρίσιμο ζήτημα, αλλά παρέχει επίσης την ευκαιρία για ουσιαστικές βελτιώσεις χωρίς να παραβιάζονται οι πρακτικοί περιορισμοί. Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιάσουμε κάποιες συγκεκριμένες προτάσεις ως αναφορά την μορφή της γάστρας αλλά πρώτα προτείνουμε και επιδεικνύουμε μια μεθοδολογία για την ελαχιστοποίηση της αντίστασης των παραγόμενων κυματισμών που μπορεί να εφαρμοστεί γενικότερα.

Γενική Μεθοδολογία (guidelines MARIN)

Αυτή η μεθοδολογία προέκυψε από την πρακτική εφαρμογή των υπολογισμών της ροής του δυναμικού της ελεύθερης επιφάνειας κατά την σχεδίαση πλοίων στο MARIN από το 1987 [1]. Παρέχει γενικές, ποιοτικές γνώσεις βασιζόμενες στη θεωρία κυματισμού των πλοίων και την κατανόηση της σχέσης μεταξύ της μορφής της γάστρας και της κυματομορφής. Αυτό συνήθως επιτρέπει την απευθείας βελτίωση της γάστρας και όχι απλώς μια προσέγγιση δοκιμής και σφάλματος. Ακόμη και για τη συστηματική διαφοροποίηση ή βελτιστοποίηση της γάστρας, αυτή η κατανόηση είναι πολύ αποτελεσματική για να αποφασιστούν οι μεταβλητές σχεδιασμού που πρέπει να διερευνηθούν και για να αξιολογηθούν οι τα αποτελέσματα [11]. Η προκύπτουσα διαδικασία έχει αποδειχθεί επιτυχής και συχνά οδηγεί σε ουσιαστική μείωση των παραγόμενων κυματισμών.

Η διαδικασία ξεκινά με δεδομένη την μορφή του κύματος για μια αρχική γάστρα και παρέχει κατευθυντήριες γραμμές για την ανάλυση αυτού του κύματος και τις πιθανές επιλογές για την βελτίωσή του διαφοροποιώντας την μορφή της γάστρας. Αυτή η αρχική κυματομορφή μπορεί να είναι αποτέλεσμα από μετρήσεις με πειράματα, μέσω τις παρατήρησης και από υπολογιστικές μεθόδους όπως για παράδειγμα αυτή που βασίζεται στην θεωρία δυναμικού. Είναι γνωστό πως η απόκτηση της κατανομής υδροδυναμικής πίεσης, η οποία είναι συνήθως διαθέσιμη μόνο από τις υπολογιστικές μεθόδους, βοηθά σημαντικά στην ανάλυση.

Στα παραδείγματα που δόθηκαν, χρησιμοποιήθηκαν υπολογισμοί ροής δυναμικού πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια. Αυτές παρέχουν μια γενικά ακριβή πρόβλεψη της κυματομορφής, εκτός από μερικές περιπτώσεις των πρυμναίων κυματισμών, αλλά δεν παρέχουν πάντα ακριβείς προβλέψεις της αντίστασης κυματισμού. Η απερίσκεπτη χρήση τέτοιων κωδικών σε μια μελέτη για την ελαχιστοποίηση της αντίστασης κυματισμού μπορεί να φαίνεται ριψοκίνδυνη. Από την άλλη πλευρά, με επαρκή προσοχή, αυτοί οι υπολογισμοί δίνουν καλές προβλέψεις της επίδρασης των παραμέτρων σχεδίασης της γάστρας, στο πεδίο ροής και στην μορφή του κυματισμού. Η ανάλυσης που προτείνετε βασίζεται στο προβλεπόμενο πεδίο ροής και της κυματομορφής, και όχι μόνο στην υπολογιζόμενη αντίσταση κυματισμού. Επομένως αποφεύγεται με αυτόν τον τρόπο, το αποτέλεσμα να επηρεάζεται σημαντικά από τις ελλείψεις

στη μέθοδο υπολογισμού που χρησιμοποιείται. Επιπλέον, το πεδίο ροής και η κυματομορφή παρέχουν σαφέστερες ενδείξεις σχετικά με τον τρόπο βελτίωσης της μορφής της γάστρας.

Χρησιμοποιώντας το υπολογιζόμενο πεδίο ροής και την μορφή του κύματος για την επιλογή των πιθανών τροποποιήσεων της μορφής της γάστρας είναι μια προσέγγιση που απαιτεί κάποιες οδηγίες και εμπειρία. Οι επιλογές και οι γνώσεις που χρησιμοποιούμε βασίζονται στο θεωρητικό υπόβαθρο που σχετίζεται με τους παραγόμενους κυματισμούς των πλοίων στο. Αυτό μας προτρέπει στην κατανόηση των κύριων αρχών, αλλά η εύρεση των ορθότερων τιμών και ο σωστός συμβιβασμός εξαρτάται πολύ από την εμπειρία. Αυτό που συζητήθηκε αφορά μόνο ορισμένες πτυχές, αλλά καταδεικνύει την προσέγγιση και τις δυνατότητές της.

Η βασική διαδικασία

Θεωρώντας ότι διαθέτουμε την υπολογισμένη μορφή του κύματος και το πεδίο ροής για μια γάστρα, σε μια δεδομένη ταχύτητα και το ερώτημα είναι εάν και πώς μπορεί να μειωθεί η αντίσταση κυματισμού με αλλαγές στην μορφής του γάστρας.

Από έναν υπολογισμό του δυναμικού της ροής πάνω της ελεύθερης επιφάνειας, η αντίσταση κυματισμού μπορεί να βρεθεί με την ολοκλήρωση των δυνάμεων πίεσης πάνω στη γάστρα. Θα μπορούσαμε να υποθέσουμε ότι η κατανομή της πίεσης πάνω στην γάστρα θα μας προϊδεάσει ήδη πώς μπορεί να μειωθεί η αντίσταση κυματισμού (π.χ., μειώνοντας την πίεση στο πρωραίο τμήμα, αυξάνοντάς την στο πρυμναίο τμήμα). Ωστόσο, η σχέση μεταξύ κατανομής πίεσης και αντίστασης κυματισμού είναι δύσκολο να προβλεφθεί. Η κατανομή πίεσης στην γάστρα σε ροή δυναμικού χωρίς την ελεύθερη επιφάνεια συχνά φαίνεται πολύ παρόμοια, αλλά στην πραγματικότητα δίνει μηδενική αντίσταση (το παράδοξο του d'Alembert). Επομένως, η μείωση της αντίστασης με απλό χειρισμό της κατανομής της πίεσης είναι σπάνια εφικτή.

Επομένως, η προσέγγιση στηρίζεται στη μελέτη της σχέσης μεταξύ της κυματομορφής και της αντίστασης κυματισμού. Είναι γνωστό ότι σε επαρκή απόσταση από τη γάστρα του πλοίου, το κύμα μπορεί να θεωρηθεί ως υπέρθεση γραμμικών κυματισμών, που προέρχονται από διαφορετικά μέρη της γάστρας, οι οποίοι πολλαπλασιάζονται σε διάφορες κατευθύνσεις και παρεμβάλλονται. Αυτή η απλούστευση βασίζεται στη γραμμικότητα του συστήματος (Εξίσωση Laplace + γραμμική συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας) που ικανοποιείται σε κύματα με μικρό πλάτος. Για μεγαλύτερα πλάτη κύματος, η εγκυρότητα της προσέγγισης θα είναι κάπως μικρότερη, αλλά εξακολουθεί να παρέχει ουσιαστικές λύσεις στο πρόβλημα. Ένα κάπως πιο τολμηρό βήμα είναι να χρησιμοποιηθεί η ίδια ανάλυση αλλά σχετικά πιο κοντά στη γάστρα του πλοίου, όπου υπάρχει μια διαταραχή που μερικές φορές επηρεάζει την ανάλυση. Πρέπει να ληφθούν υπόψη οι πιθανές αποκλίσεις που προκύπτουν από αυτό.

Στην βιβλιογραφία, δόθηκε μια έκφραση για την αντίσταση κυματισμού χρησιμοποιώντας μεγέθη των απομακρυσμένων κυμάτων:

$$R_w = \frac{1}{2} * \pi * \rho * V^2 * \int_{-\pi/2}^{\pi/2} [A(\theta)^2 + B(\theta)^2] * \cos^3\theta \, d\theta$$

όπου το $[A(\theta)^2 + B(\theta)^2]$ είναι το πλάτος στο τετράγωνο ενός στοιχείου του κύματος που διαδίδεται σε κατεύθυνση που σχηματίζει γωνία θ με την πορεία του πλοίου. Τα στοιχεία των απομακρυσμένων κυματισμών, προκύπτουν από τα κύματα που παράγονται από διάφορα μέρη της γάστρας (πλώρη, διαμορφώσεις, κλπ.) που διαδίδονται μακριά από την γάστρα και αλληλοεπιδρούν. Επομένως, για να μειωθεί η αντίσταση κυματισμού πρέπει να μειωθούν τα πλάτη των κυμάτων εκεί που παράγονται και να βελτιωθεί η αλληλεπίδραση μεταξύ των συστημάτων των κυμάτων που παράγονται από διάφορα μέρη της γάστρας, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το πλάτος τους στο μακρινό πεδίο.

Συνεπώς, η κύρια ενότητα που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η απομακρυσμένη κυματομορφή, η οποία σχετίζεται άμεσα με την αντίσταση κυματισμού. Αυτό μπορεί να έχει τη μορφή, για παράδειγμα, μιας οπτικής αναπαράστασης της κυματομορφής, μιας ή περισσοτέρων διαμήκων τομών του κύματος ή ενός φάσματος του κύματος που υποδεικνύει την κατανομή της ενέργειας των κυμάτων στις κατευθύνσεις διάδοσης κύματος. Η "μακρινή περιοχή" δεν σημαίνει απαραίτητα μεγάλη απόσταση, αλλά αρκετά μακριά για να διακρίνει κανείς ξεχωριστά στοιχεία κύματος, τις κατευθύνσεις και τα πλάτη τους, έξω από την άμεση γειτονιά της γάστρας (στην πράξη, από 0,2 - 0,5*L_{pp} μακριά από την κεντρική γραμμή) . Αυτή η θεώρηση απαιτεί επίσης ότι μια υπολογιστική μέθοδος προβλέπει την μορφή του κύματος σε κάποια απόσταση από τη γάστρα με επαρκή ακρίβεια.

Η ανάλυση δεν πρέπει γενικά να βασίζεται μόνο στο προφίλ των κυμάτων κατά μήκος της γάστρας. Δεν υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ της μορφής του κύματος κατά μήκος της ισάλου γραμμής και ενός απομακρυσμένου κύματος ή της αντίστασης κυματισμού. Επίσης το προφίλ κύματος της γάστρας επηρεάζεται έντονα από τις τοπικές διαταραχές που δεν έχουν νόημα στην μελέτη της αντίσταση κυματισμού. Η κύρια χρήση του προφίλ κύματος της γάστρας είναι ότι μπορεί να βοηθήσει στην ταυτοποίηση της θέσης όπου παράγονται τα κύματα που παρατηρούνται στο μακρινό πεδίο.

Η μελέτη που πρέπει να ακολουθηθεί για να αναλυθεί και να βελτιωθεί η μορφή του κύματος χρησιμοποιώντας τους υπολογισμούς είναι:

- Μελέτη της μορφής του κύματος και εκτίμηση των στοιχείων που κυριαρχούν στην αντίσταση. θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι τα εγκάρσια κύματα συμβάλλουν περισσότερο στην αντίσταση κυματισμού από τα αποκλίνοντα κύματα του ίδιου πλάτους. Τέλος, η κλίση του κύματος δεν τόσο κρίσιμη παράμετρος, όσο το πλάτος και η κατεύθυνση (ή το μήκος κύματος).
- Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών μορφής της γάστρας που παράγουν αυτά τα κύματα και προσαρμογή αυτών των χαρακτηριστικών ώστε να μειωθούν τα πλάτη των κυμάτων και να βελτιωθούν οι αλληλεπιδράσεις τους.

- Διεξαγωγή υπολογισμού της μορφής του κύματος για τη τροποποιημένη γάστρα και έλεγχος των αποτελεσμάτων. Αν κριθεί αναγκαίο, επαναλαμβάνετε η διαδικασία για περαιτέρω βελτιστοποίηση ή για άλλες παραμέτρους της γάστρας.

Το δεύτερο στάδιο της μελέτης απαιτείται κατανόηση της περίπλοκης σχέσης μεταξύ της μορφής της γάστρας και της δημιουργίας των κυμάτων. Γενικά αυτή η σύνδεση δεν είναι εύκολο να γίνει αντιληπτή. Σε πρακτικές εφαρμογές έχει βρεθεί χρήσιμο να εφαρμοστεί μια ανάλυση δύο βημάτων για να γίνει αυτή η εμβάθυνση:

1. Εξέταση της σχέσης της μορφής της γάστρας με την κατανομή της υδροδυναμικής πίεσης.
2. Εξέταση της σχέσης της κατανομής της πίεσης με την παραγωγή του κύματος.

Αξίζει να σημειωθεί ότι αν θεωρούσαμε τα παραπάνω ως αυστηρά ξεχωριστά υπολογιστικά βήματα, το πρώτο βήμα θα απαιτούσε τον υπολογισμό της κατανομής της πίεσης στην επιφάνεια του ήρεμου νερού της ροής, αναφερόμενη στο ολικό σώμα και όχι μόνο στο συμμετρικό του. Ενώ το δεύτερο βήμα θα απαιτούσε τον υπολογισμό της μορφής του κύματος που δημιουργήθηκε από αυτή την κατανομή πίεσης. Ωστόσο, ακολουθούμε μια τέτοια διαδικασία εν μέρη, μόνο για να κατανοήσουμε τους μηχανισμούς της και συχνά χρησιμοποιούμε τις κατανομές πίεσης από τους υπολογισμούς της μεθόδου του δυναμικού ροής της ελεύθερης επιφάνειας και για το βήμα 1.

Έτσι οδηγούμαστε στη γενική διαδικασία, η οποία είναι μια τυποποίηση της μελέτης που αναπτύχθηκε στο MARIN βάσει πολλών πρακτικών σχεδίων γάστρας χρησιμοποιώντας υπολογισμούς ροής δυναμικού ελεύθερης επιφάνειας. Οι επόμενες δύο υποενότητες εξετάζουν τα δύο βήματα, και στη συνέχεια έγινε η διεξαγωγή των υποθέσεων και των περιορισμών της μελέτης.

Βήμα 1ο

Η ποσότητα που πρέπει λαμβάνεται υπόψη είναι ο συντελεστής υδροδυναμικής πίεσης:

$$C_{Phd} = \frac{p + \rho * g * z}{\frac{1}{2} * \rho * {U_\infty}^2} = 1 - \frac{u^2 + v^2 + w^2}{{U_\infty}^2}$$

Θα πρέπει να γίνει ανάλυση της κατανομής του C_P πάνω από την επιφάνεια της γάστρας και, ως εκ τούτου, πάνω από την επιφάνεια του ήρεμου νερού. Αυτή η κατανομή πίεσης καθορίζεται από τη μορφή της γάστρας και από παραμέτρους όπως η ταχύτητα του πλοίου, το βάθος του νερού κλπ. Με ικανοποιητική ακρίβεια μπορεί να προσεγγιστεί από την πίεση της ροής δυναμικού γύρω από τη γάστρα, αλλά στην πρύμνη είναι πιθανό να προκύψουν διαφοροποιήσεις λόγω του οριακού στρώματος και του ομόρου.

Γενικά, η σχέση μεταξύ της μορφής της γάστρας και της κατανομής της πίεσης μπορεί να συνοψιστεί με τις ακόλουθες κατευθυντήριες γραμμές:

Υψηλές πιέσεις εμφανίζονται:

- **Κοντά σε σημεία ανακοπής:** Ακριβώς πάνω σε ένα σημείο ανακοπής, όπως συμβαίνει στην πλώρη της γάστρας, ο συντελεστής της πίεσης ισούται με $C_P=1$, η οποία τιμή είναι μέγιστη για την ομαλή ροή. Σε μια περιοχή γύρω από ένα τέτοιο σημείο, η πίεση θα είναι σχετικά μεγαλύτερη. Κανονικά η αυξημένη αυτή πίεση εμφανίζεται και στην πρύμνη, αλλά αυτό εξαρτάται από τον τύπο της πρύμνης και τα φαινόμενα συνεκτικότητας, τα οποία συντελούν στην μείωσή της.
- **Στις κοίλες γραμμές ροής:** Όπου η ροή διέρχεται από ένα τμήμα της επιφάνειας του σκάφους που είναι κοίλο προς την κατεύθυνση των γραμμών ροής, η φυγόκεντρος επιτάχυνση που επενεργεί στα σωματίδια του ρευστού πρέπει να εξισορροπείται με αύξηση της πίεσης προς το τοίχωμα. Κατά συνέπεια, να αυξάνεται η πίεση στην επιφάνεια της γάστρας.
- **Σε γραμμές ροής μεγάλων κλίσεων:** Μια μεγάλη κλίση στην γεωμετρία της γάστρας, σε σχέση με τη διαμήκη κατεύθυνση, θα έχει συχνά μια κάπως αυξημένη πίεση (λόγω της καμπυλότητας της ροής από την γάστρα).
- **Στην κορυφή κύματος:** Εάν ένα σύστημα κυματισμού παράγεται σε κάποιο σημείο, το κύμα που ταξιδεύει προς τα πίσω θα προκαλέσει εναλλασσόμενες υψηλές και χαμηλές πιέσεις στη γάστρα, κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια. Επομένως, οι πιέσεις αυτές είναι το αποτέλεσμα των κυμάτων, όχι η αιτία παραγωγής κυμάτων, και δεν σχετίζονται με την τοπική μορφή της γάστρας. Σε αποτελέσματα ροής του συνολικού σώματος αυτό δεν συμβαίνει.

Χαμηλές πιέσεις εμφανίζονται:

- **Στις κυρτές γραμμές ροής:** Προκαλείται από τον ίδιο μηχανισμό όπως περιγράφηκε παραπάνω. Η φυγόκεντρος επιτάχυνση κατευθύνεται προς τα έξω και η πίεση μειώνεται προς τη γάστρα.
- **Επίδραση του εκτοπίσματος:** Η παρουσία της γάστρας προκαλεί μια επιτάχυνση της ροής του ρευστού δίπλα του, οδηγώντας σε μια ελαφρά υποπίεση. Σε άπειρο νερό αυτό είναι ένα αδύναμο φαινόμενο αλλά σε περιορισμένο βάθος νερού είναι πολύ ισχυρότερο.
- **Στην κοιλάδα του κύματος:** Και πάλι προέρχεται ως αποτέλεσμα των κυμάτων που δημιουργούνται κάποιο σημείο της γάστρας.

Η αιτία αυτού του πεδίου πίεσης που παράγει τους κυματισμούς είναι η κατανομή της πίεσης κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια. Εάν η πίεση στην επιφάνεια του αδιατάρακτου νερού

αποκλίνει από το μηδέν κοντά στο σκάφος, θα παρουσιαστεί κίνηση της επιφάνειας του νερού, με τρόπο που θα αναφερθεί στο δεύτερο βήμα.

Πρέπει λοιπόν να συσχετίσουμε την κατανομή της πίεσης της γάστρας με την προκύπτουσα κατανομή της πίεσης στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού. Σαφώς, οι μεταβολές πίεσης της γάστρας κοντά στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού έχουν μεγαλύτερη επίδραση από αυτές που βρίσκονται μακριά από την επιφάνεια του νερού. Επίσης, η κατανομή της πίεσης στην επιφάνεια του νερού προκαλείται από τις μεταβολές της πίεσης της γάστρας κοντά στην ίσαλο πλεύσης και από τις μεταβολές πίεσης μεγαλύτερης κλίμακας παρόλο που βρίσκονται μακρύτερα κάτω από την επιφάνεια του νερού. Οι μεταβολές της πίεσης στην επιφάνεια του νερού με κλίμακες μικρού μήκους μπορούν να δημιουργηθούν από τα χαρακτηριστικά μορφής κοντά στην επιφάνεια του νερού.

Βήμα 2ο

Η κατανομή της πίεσης στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού (ή μάλλον της παραγώγου της κατά τη κατεύθυνση της ροής) σε ροή γύρω από την ολική γάστρα (όχι μόνο την συμμετρική), θεωρείται η αιτία της δημιουργίας των κυμάτων. Ο σκοπός του δεύτερου βήματος είναι να κατανοήσει κανείς ποιοτικά τη σχέση μεταξύ αυτής της κατανομής πίεσης και του ύψους, του μήκους και της κατεύθυνσης των παραγόμενων κυμάτων. Για λόγους απλότητας, θεωρείται η επίδραση της κατανομής της πίεσης σε απομόνωση (δηλαδή, απουσία του πλοίου).

Η δυναμική συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας οδηγεί σε μια έκφραση για την ανύψωσή της, χρησιμοποιώντας τον συντελεστή υδροδυναμικής πίεσης:

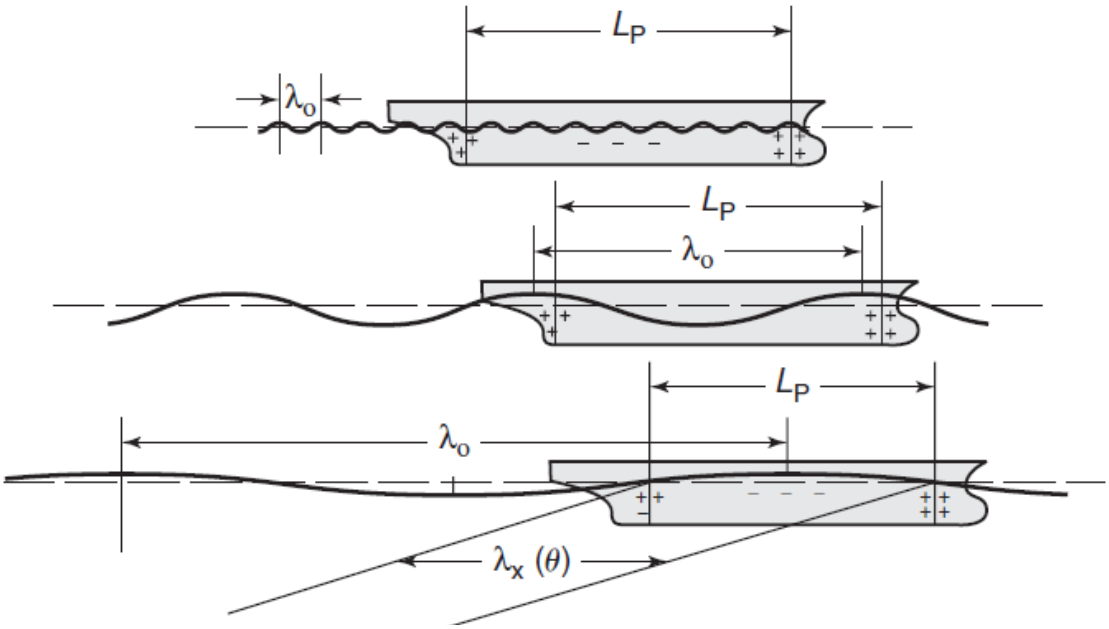
$$\zeta = \frac{1}{2} Fn^2 * L * C_p$$

Επομένως, εάν το C_p είναι υψηλό σε ένα μέρος της γάστρας ακριβώς κάτω από την επιφάνεια του νερού, αυτό θα δημιουργήσει μια τοπική κορυφή συν ένα σύστημα κυματισμών. Παρομοίως, η χαμηλή πίεση θα δημιουργήσει μια τοπική κοιλάδα συν ένα σύστημα κυμάτων.

Μία τοπική πίεση στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού (π.χ. στο ακραίο σημείο της πλώρης ή σε μια απότομη κυρτή γραμμή της ισάλου) θα παράγει ένα πλήρες σύστημα κύματος Kelvin που αποτελείται από κύματα που διαδίδονται προς όλες τις κατευθύνσεις. Ωστόσο, μια ομαλή μορφή γάστρας προκαλεί μια ομαλή κατανομή της πίεσης και μια σχεδόν ίση πίεση στην περιοχή θα ακύρωνε μερικά από αυτά τα κύματα και θα ενίσχυε κάποια άλλα. Επομένως, μια ομαλή κατανομή της πίεσης δεν παράγει το ίδιο πλήρες σχέδιο Kelvin, αλλά παράγει μερικά προτιμώμενα μέρη και πολύ λιγότερα από τα άλλα. Έτσι, τίθεται το ερώτημα: ποια στοιχεία κύματος θα είναι σημαντικά και ποια όχι;

Η απάντηση στο παραπάνω ερώτημα, μπορεί να διατυπωθεί με τη ακόλουθη πρόταση: «**Ένα κύμα συγκεκριμένου μήκους παράγεται αποτελεσματικότερα από μια μεταβολή της πιέσεως συγκρίσιμου μήκους και σχήματος» [1]**. Για την κατανόηση αυτού, ας υποθέσουμε ότι η πίεση σε ένα τμήμα της επιφάνειας του σκάφους έχει μια περισσότερο ή λιγότερο

ημιτονοειδή διακύμανση με μήκος L_P. Ένα παράδειγμα που απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα είναι το σύνηθες σχέδιο πίεσης της γάστρας πλοίου, με υψηλή πίεση στη πλώρη, χαμηλότερη πίεση κατά το μήκος της και συχνά μια αυξημένη πίεση στην πρύμνη. Αυτή η κατανομής της πίεσης έχει τυπικό μήκος $L_P \approx L$.



Σχήμα 5. 1: Κατανομή πίεσης και παραγωγή κυματισμού ανάλογα με τον αριθμό Fn

Όπως γνωρίζουμε, για μια ταχύτητα V του πλοίου, το μήκος του κύματος για ένα ομαλό σύστημα κυμάτων δίνεται από την σχέση:

$$\lambda = 2 * \pi * \frac{V^2}{g} * \cos^2\theta = \lambda_0 * \cos^2\theta$$

καθώς και το επικαμπύλιο μήκος του κύματος κατά το διάμηκες λαμβάνεται από την σχέση:

$$\lambda_x = 2 * \pi * \frac{V^2}{g} * \cos\theta = \lambda_0 * \cos\theta$$

Επομένως, τα μήκη κύματος μεταβάλλονται μεταξύ 0 και λ_0 ανάλογα με τη γωνία θ.

Το πάνω σκίτσο στο σχήμα δείχνει την περίπτωση ενός χαμηλού αριθμού Froude, στον οποίο $\lambda_0 \ll L_P$. Η έκταση της κατανομής πίεσης είναι πολύ μεγαλύτερη από το μήκος οποιουδήποτε κύματος (ανεξάρτητα από την γωνία θ), επομένως κάθε περιοχή υψηλής ή χαμηλής πίεσης θα επενεργούσε εξίσου το ίδιο σε κορυφές και κοιλάδες γεγονός μη ευνοϊκό για να δημιουργηθεί κύμα. Συνεπώς, η κατανομή πίεσης στο πλοίο δεν θα παράγει κύματα σε αυτή τη χαμηλή ταχύτητα αλλά οι τοπικές μεταβολές πίεσης (π.χ. γύρω από την πλώρη και το σώμα) μπορεί να ταιριάζουν καλύτερα με τα κύματα που προκύπτουν και είναι πιο σημαντικές σε χαμηλούς αριθμούς Fn.

Το μεσαίο σκίτσο του σχήματος απεικονίζει την κατάσταση στην οποία το μήκος κύματος είναι περίπου $\lambda_0 = L_P$. Η υψηλότερη πίεση στην πλώρη, η χαμηλότερη πίεση κατά μήκος της γάστρας και η υψηλή πίεση στην πρύμνη, συντελούν για να δημιουργήσουν ένα σημαντικό εγκάρσιο κύμα.

Τέλος, σε υψηλούς αριθμούς Froude όταν $\lambda_0 = L_P$, η διακύμανση της πίεσης εμφανίζεται σε ένα μικρό μόνο τμήμα του μήκους του εγκάρσιου κύματος. Οι θετικές και οι αρνητικές πιέσεις ακυρώνονται αποτελεσματικά κατά μήκους του εγκάρσιου κύματος και ως αποτέλεσμα αυτής της μεταβολής της πίεσης, δεν δημιουργείται εγκάρσιο κύμα (δεν έχει συγκρίσιμο μήκος). Ωστόσο, υπάρχει μια τιμή της γωνίας θ για την οποία $\lambda_0 \approx L_P$, και τα κύματα με αυτή τη γωνία παράγονται αρκετά αποτελεσματικά από την μεταβολή της πίεσης.

Μια παρόμοια σκέψη ισχύει και για τις τοπικές μεταβολές πίεσης. Η κατευθυντήρια γραμμή παρέχει μια γενική κατανόηση της δημιουργίας των κυμάτων που είναι χρήσιμη για την πρόβλεψη και την εξήγηση των κυματομορφών των πλοίων.

Παρατηρούμε ότι αυτή η πρόταση σχετικά με τη σχέση μεταξύ της κατανομής πίεσης της ελεύθερης επιφάνειας και της κυματομορφής της είναι μια ερμηνεία της θεωρητικής έκφρασης σύμφωνα με τη γραμμική θεωρία [12]. Αυτό δείχνει ότι το πλάτος των κυμάτων στην παραγόμενη κατεύθυνση θ είναι ανάλογο του δισδιάστατου μετασχηματισμού Fourier της διαμήκους κατανομής πίεσης στη συχνότητα του κύματος.

$$\sec^3\theta * \iint \frac{\vartheta p}{\vartheta x} * exp\left[i * \frac{g * (x * \cos\theta + y * \sin\theta)}{V^2 * \cos^2\theta}\right] dx\, dy$$

Απλοποιήσεις και Περιορισμοί

Η παραπάνω διαδικασία δύο βημάτων που συσχετίζει την κυματομορφή με τη μορφή της γάστρας είναι μια ουσιαστική απλοποίηση του συνολικού προβλήματος. Αυτό διευκολύνει την κατανόηση, αλλά μπορεί κανείς να αμφισβητήσει την εγκυρότητα. Ο στόχος της παραγράφου θα είναι να αξιολογήσουμε τις απλοποιήσεις αυτές. Μια πιο ολοκληρωμένη συζήτηση και επικύρωση παρέχεται από τον Raven [13].

Μια πρώτη θεώρηση είναι ότι προσπαθούμε να εξηγήσουμε την κατανομή πίεσης της γάστρας μόνο από τη μορφή της τοπικής γάστρας. Αλλά η κατανομή πίεσης που χρησιμοποιούμε είναι εκείνη που βρίσκεται από τον υπολογισμό ροής δυναμικού ελευθέρων επιφανειών και η παραγωγή κυμάτων αλλάζει κάπως την κατανομή. Όπως αποδείχθηκε, η επίδραση της παραγωγής κυμάτων στην κατανομή πίεσης είναι μάλλον περιορισμένη για τις συνήθεις ταχύτητες. Στην ανάλυση, έχουμε κατά νου ότι η ελεύθερη επιφάνεια αυξάνει τα ακρότατα της πίεσης, τα μετατοπίζει ελαφρώς προς την πρύμνη και δημιουργεί διακυμάνσεις πίεσης που προκαλούνται από τα κύματα που δημιουργούνται. Για να αποσαφηνιστεί η ανάλυση, θα μπορούσε κανείς να χρησιμοποιήσει μια κατανομή πίεσης του ολικού σώματος, αλλά αυτό θα εμφάνιζε άλλες αποκλίσεις σε ορισμένες περιπτώσεις.

Μια δεύτερη θεώρηση είναι πως η ανάλυση των κυμάτων που παράγονται από την κατανομή πίεσης αγνοεί εντελώς την οριακή συνθήκη στην επιφάνεια της γάστρας και αγνοεί το γεγονός

ότι τα κύματα διαδίδονται πάνω από το καμπύλο πεδίο ροής με μεταβλητή ταχύτητα γύρω από τη γάστρα, η οποία επηρεάζει ελαφρώς τα πλάτη και τις θέσεις του κύματος. Ωστόσο, αυτές οι προσεγγίσεις δικαιολογούνται εφόσον επιδιώκουμε μόνο μια ποιοτική κατανόηση και χρησιμοποιούμε μια πιο ολοκληρωμένη μέθοδο για την ποσοτική πρόβλεψη του κυματομορφής.

Στη μελέτη του Raven [13] καταδεικνύεται ότι η αποσύνθεση σε δύο στάδια και οι απλουστεύσεις που εφαρμόζονται σε κάθε μία αντιστοιχούν στενά με τις πρώιμες γραμμικοποιημένες μεθόδους για πλοία σε χαμηλές ταχύτητες (βλ. Ενότητα 9.6.4), όπως αυτή των Baba και Takekuma [14]. Επίσης, για να απεικονιστεί η εγκυρότητα της διαδικασίας, ορισμένοι υπολογισμοί παρουσιάζονται με ένα αυστηρό υπολογιστικό ισοδύναμο. Πρώτα προσδιορίζεται η κατανομή πίεσης $p\,(x, y)$ στην ελεύθερη επιφάνεια του νερού σε μια καθολική ροή γύρω από την γάστρα. Έπειτα υπολογίζεται η μορφή του κύματος που παράγεται από την πίεση $-p\,(x, y)$, η οποία επενεργεί στην επιφάνεια του νερού (παραλείποντας τη γάστρα). Στο παράδειγμα του Raven δείχνεται ότι αυτό η μορφή του κύματος συχνά συμφωνεί στενά με αυτό του ίδιου του πλοίου. Για άλλες περιπτώσεις, ιδίως με έντονες διαφορές μεταξύ της καθολικής ροής και του δυναμικού της ελεύθερης επιφάνειας, παρατηρούνται μεγαλύτερες διαφορές, αλλά υποστηρίζεται η χρησιμότητα της διαδικασίας για την γενική κατανόηση των φαινομένων.

Οι απλοποιήσεις που αναλύθηκαν παραπάνω και οι κατευθυντήριες γραμμές που δίνονται μας επιτρέπουν να προβλέψουμε τι είδους κατανομή πίεσης θα έχει μια δεδομένη μορφή γάστρας, ποιες πτυχές αυτής της κατανομής πίεσης θα παράξουν τελικά τα κύματα σε δεδομένες ταχύτητες και αντίστροφα.

Μεθοδολογία δίγαστρου ιστιοπλοϊκού σκάφους

Συχνά εμφανίζεται το πρόβλημα της θραύσης των πρυμναίων κυμάτων. Ένα θραυσμένο κύμα καταναλώνει περισσότερη ενέργεια από ένα κανονικό, πράγμα που σημαίνει ότι ένα σκάφος που ακολουθείται από τέτοιους κυματισμούς δεν είναι αποδοτικό. Η πρώτη ιδέα για την επίλυση αυτού του προβλήματος, είναι η αλλαγή των παραμέτρων του πρυμναίου μέρους της γάστρας. Επίσης η επόμενη ιδέα, σύμφωνα με την βιβλιογραφία είναι να αλλάξει η θέση του LCB για να διαπιστωθεί εάν μπορεί να μειωθεί η διαγωγή σε συγκεκριμένη ταχύτητα.

Η παρούσα μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας γάστρες με μορφή νομέων τύπου U. Οι οποίες χαρακτηρίζονται από λεπτόγραμμο πρωραίο τμήμα, η μέγιστη εγκάρσια τομή να βρίσκεται λίγο πίσω από το μέσο του σκάφους και πρύμνη καθρέφτη. Ο καθρέφτης είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε ο ιδιοκτήτης να μπορεί να τον αξιοποιήσει για να κολυμπήσει. Επίσης ο καθρέφτης δεν θα πρέπει να είναι πολύ μικρός διότι, στα δίγαστρα ιστιοπλοϊκά σκάφη, εκεί τοποθετείται η κύρια μηχανή της κάθε γάστρας.

Αφού κατασκευάστηκε το μοντέλο εκτελέσθηκαν ορισμένες προσομοιώσεις αλλάζοντας μεμονωμένα ορισμένες παραμέτρους ώστε να ελεγχθεί η επιρροή τους στην αντίσταση

κυματισμού σε κάθε ταχύτητα. Σε αυτό το στάδιο πραγματοποιήθηκαν έξη προσομοιώσεις συμπεριλαμβάνοντας:

1) Παράμετροι σχεδίασης που σχετίζονται με το πλάτος της γάστρας.
    - Τιμή του μέγιστου πλάτους
    - Απόσταση μεταξύ των γαστρών
2) Παράμετροι σχεδίασης που σχετίζονται με τον καθρέφτη της γάστρας.
    - Το πλάτος του καθρέφτη
    - Το βύθισμα του καθρέφτη στο προφίλ της γάστρας
    - Το βύθισμα του καθρέφτη στο μέγιστο πλάτος του
3) Παράμετροι σχεδίασης που επηρεάζουν την διαμήκη θέση του όγκου της γάστρας.
    - Διαμήκης θέση του μέγιστου πλάτους
    - Γωνία πρόσπτωσης στην ίσαλο πλεύσης.

Το εύρος τιμών του αριθμού Fn για σκάφη ημιεκτοπίσματος είναι 0,4 <Fn <0,6 [1]. Τυπικές γάστρες της κατηγορίας αυτής έχουν βυθισμένο καθρέφτη σε μηδενική ταχύτητα. Ένας βυθισμένος καθρέφτης έχει το ακόλουθο πλεονέκτημα: Μόλις το πλοίο φτάσει σε μια κρίσιμη ταχύτητα (γενικά γύρω από Fn = 0,4), έχουμε αποκόλληση της ροής, το νερό ακολουθεί την καμπυλότητα του σκάφους μέχρι το πρύμνη. Η καμπύλη που περιγράφεται από το νερό αντικατοπτρίζει το ίδιο το πλοίο. Αυτό σημαίνει ότι το μήκος ισάλου πλεύσης γίνεται φανερά μεγαλύτερο και αυτό θα μειώσει την αντίσταση κυματισμού που θα επιτρέψει στο πλοίο να πάει πιο γρήγορα. Έτσι, όσο πιο βαθύς είναι ο καθρέφτης, τόσο πιο μεγαλύτερη είναι η τιμή της ισάλου πλεύσης.

Τα δίγαστρα σκάφη μπορούν να πλεονεκτούν έναντι στα μονόγαστρα δημιουργώντας μια καλή αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο κυμάτων της πλώρης. Αυτή η αλληλεπίδραση θα εξαρτηθεί προφανώς από το σχήμα των γαστρών και από την απόσταση μεταξύ τους. Φαίνεται ότι οι προηγούμενες μελέτες [15] δεν βρήκαν κάποια βέλτιστη τιμή για την απόσταση μεταξύ γαστρών με νομείς τύπου U γύρω από το Fn = 0,5. Για τον λόγο αυτό, θα πραγματοποιηθούν προσομοιώσεις λαμβάνοντας ως μεταβλητή την απόσταση αυτή, για να δούμε πώς επιδρούν στην απόδοση των δίγαστρων σκαφών.

Ακολούθως εκτελέστηκαν οι προσομοιώσεις μεταβάλλοντας όλες τις παραμέτρους ώστε να βρεθεί η βέλτιστη δυνατή μορφή της γάστρας που θα ελαχιστοποιήσει την αντίσταση κυματισμού. Σε αυτό το στάδιο έγιναν επίσης 3 διαφορετικές εκτελέσεις που συμπεριλαμβάνουν:

1) Όλες τις παραμέτρους σχεδίασης εκτός από το μήκος της γάστρας σε ταχύτητα $V = 8\ [kn]$ που αντιστοιχεί σε αριθμό $Fn = 0.33$
2) Όλες τις παραμέτρους σχεδίασης σε ταχύτητα $V = 8\ [kn]$ που αντιστοιχεί σε αριθμό $Fn = 0.33$

3) Όλες τις παραμέτρους σχεδίασης σε ταχύτητα $V = 12\ [kn]$ που αντιστοιχεί σε αριθμό $Fn = 0.5$

Έπειτα για την σύγκριση των βελτιστοποιημένων γαστρών που προκύπτουν από τις δυο τελευταίες προσομοιώσεις, έγινε εκτέλεση του κώδικα Shipflow για ταχύτητες από 7-12 kn. Αυτό πραγματοποιήθηκε με σκοπό την γραφική απεικόνιση της αντίστασης κυματισμού σε συνάρτηση με την ταχύτητα για την κάθε γάστρα.

Κεφάλαιο 6. Αποτελέσματα και συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα διαγράμματα που απεικονίζουν την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας (στο επίπεδο xy) καθώς και τομές της κυματομορφής στο επίπεδο xz (wave cuts) οι οποίες απέχουν από την γάστρα κατά συγκεκριμένο ποσοστό, σε σχέση με το μήκος της γάστρας. Έπειτα για κάθε περίπτωση θα γίνει σχολιασμός των αποτελεσμάτων και θα δοθούν προτάσεις για την βέλτιστη μορφή δίγαστρου ιστιοπλοϊκού.

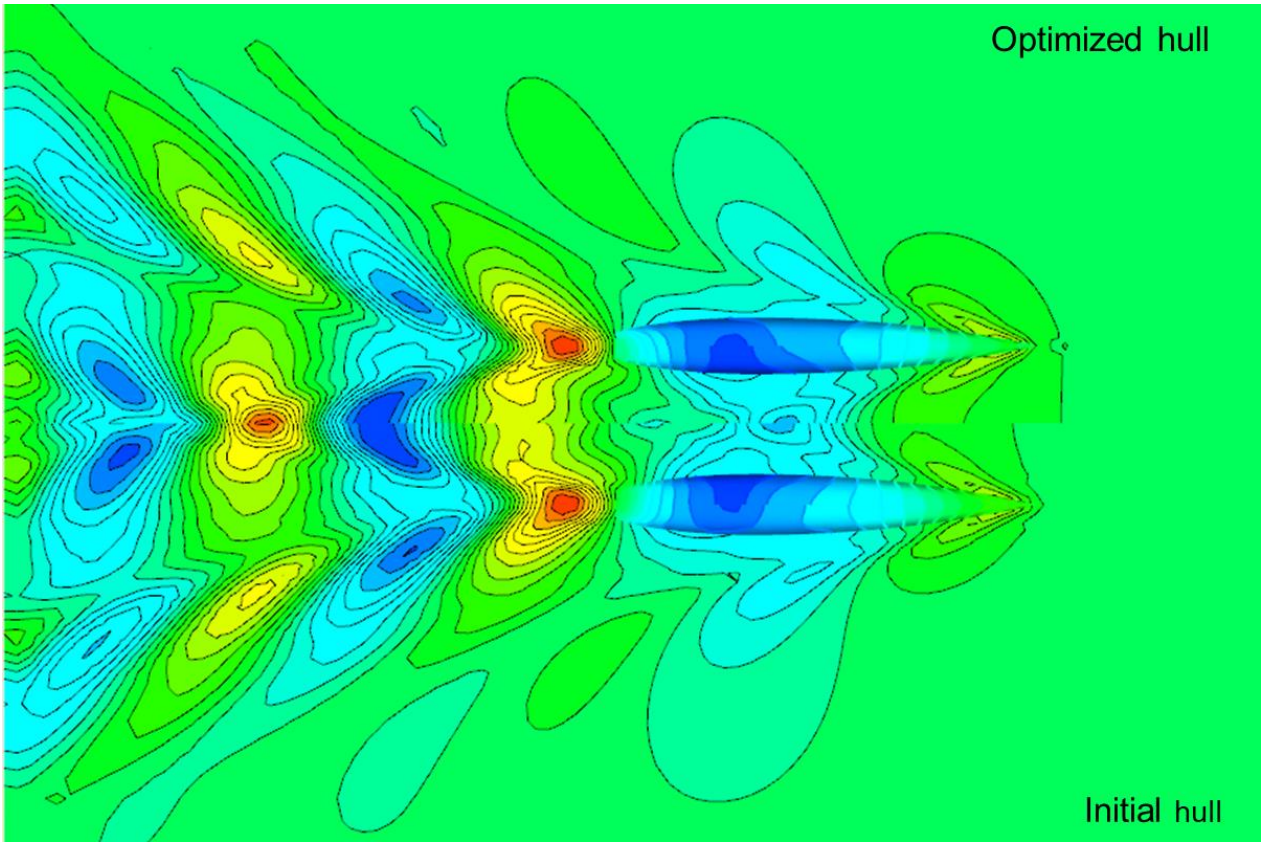
Μια παρατήρηση που μπορεί να γίνει εξ' αρχής είναι πως όλες οι γεωμετρίες αποτελούν μέλη προχωρημένων γενεών. Το γεγονός αυτό επικυρώνει την αποτελεσματικότητα της εξελικτικής διαδικασίας του αλγορίθμου ανεξάρτητα από τον βαθμό επιτυχίας επιλογής αντικειμενικών συναρτήσεων ο οποίος και σχετίζεται με υδροδυναμικά στοιχεία και όχι με τη διαδικασία αξιολόγησης των κριτηρίων που έχουν τεθεί.

Επίδραση των παραμέτρων στην χαμηλή ταχύτητα

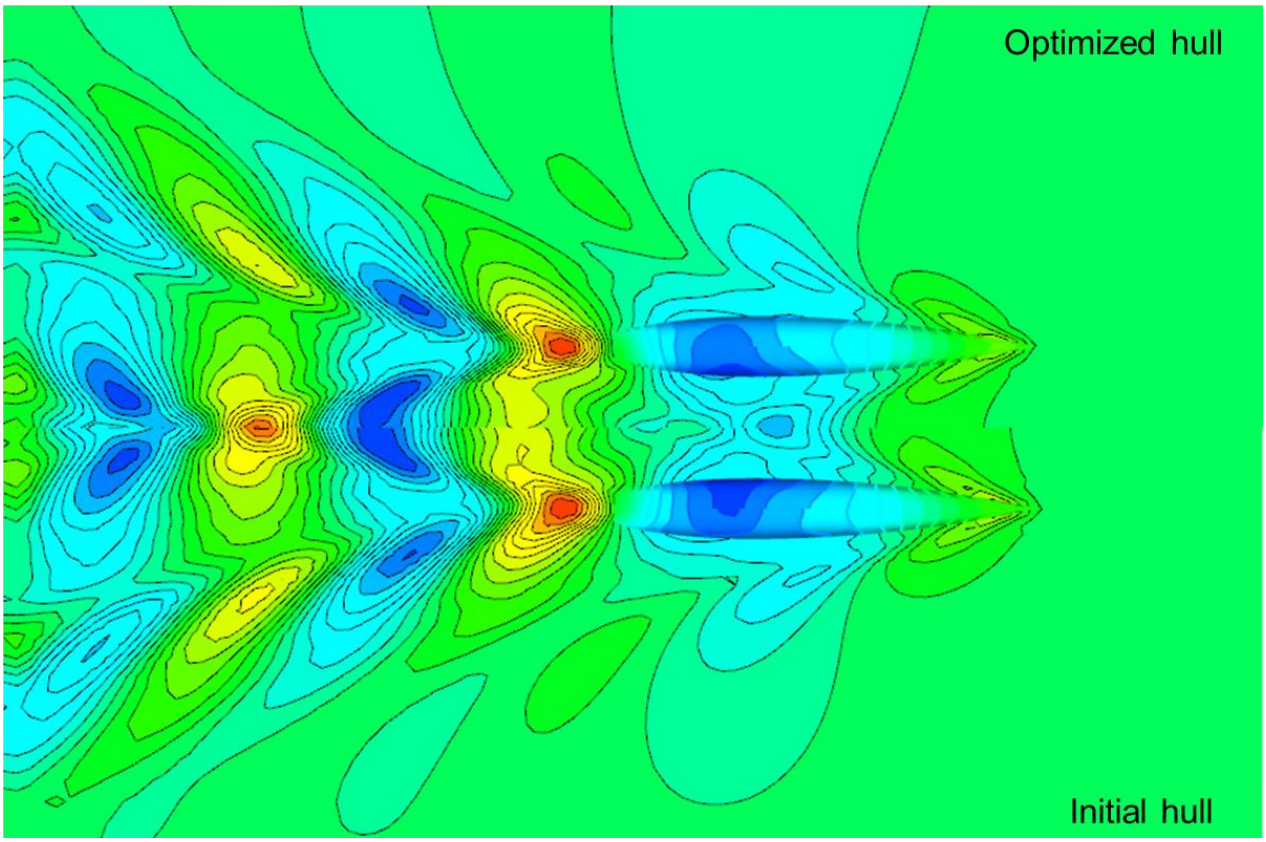
Η βελτιστοποίηση αυτή, όπως και όλες που ακολουθούν, πραγματοποιήθηκε με αντικειμενικές συναρτήσεις την ελαχιστοποίηση της αντίστασης κυματισμού. Κατά τη διαδικασία εύρεσης της επίδρασης των παραμέτρων, σε κάθε βελτιστοποίηση εξετάστηκαν 160 διαφορετικές μορφές γάστρας (generations=10 x population=16). Αριθμός αρκετός δεδομένου ότι σε κάθε προσομοίωση έχουμε μικρό αριθμό παραμέτρων. Για την εκτενέστερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων έχουν ληφθεί διαμήκης τομές της κυματομορφής σε αποστάσεις $y/L=0.3$, $y/L=0.5$ και $y/L=0.8$.

Προτού να εμβαθύνουμε περισσότερο στην ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν, αξίζει να επισημάνουμε πως η πιο αξιόπιστη τιμή της αδιαστατοποιημένης απόστασης είναι αυτή των $y/L=0.5$. Πιο συγκεκριμένα, αυτό οφείλεται αφενός στις τοπικές διαταραχές τις ροής κοντά στην επιφάνεια της γάστρας και αφετέρου στο γεγονός ότι μακριά από τη γάστρα η κυματομορφή αποσβένει αισθητά.

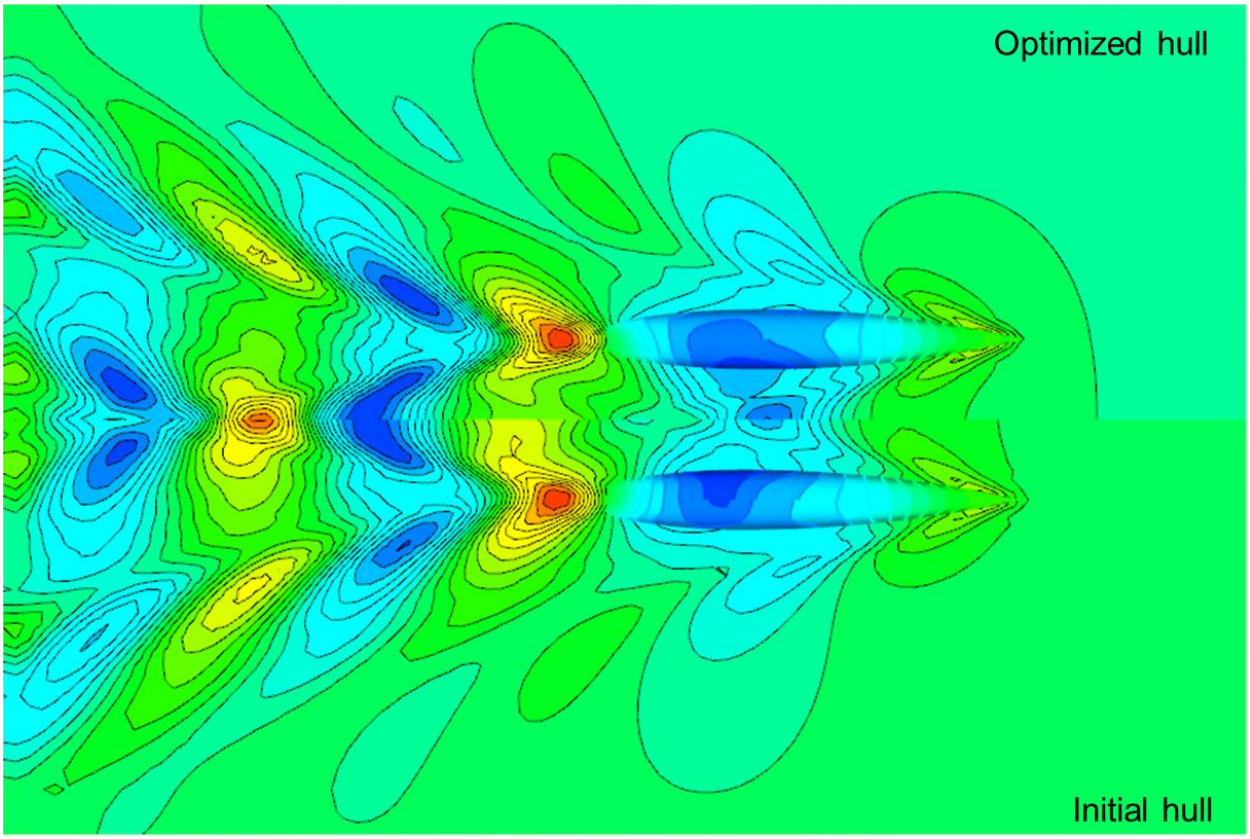
Ακολουθεί πρώτα η παράθεση των σχημάτων και τα διαγραμμάτων της κυματομορφής που προέκυψαν από τις εκτελέσεις (1,2,3) του αλγόριθμου βελτιστοποίησης και στην συνέχεια ο σχολιασμός τους.



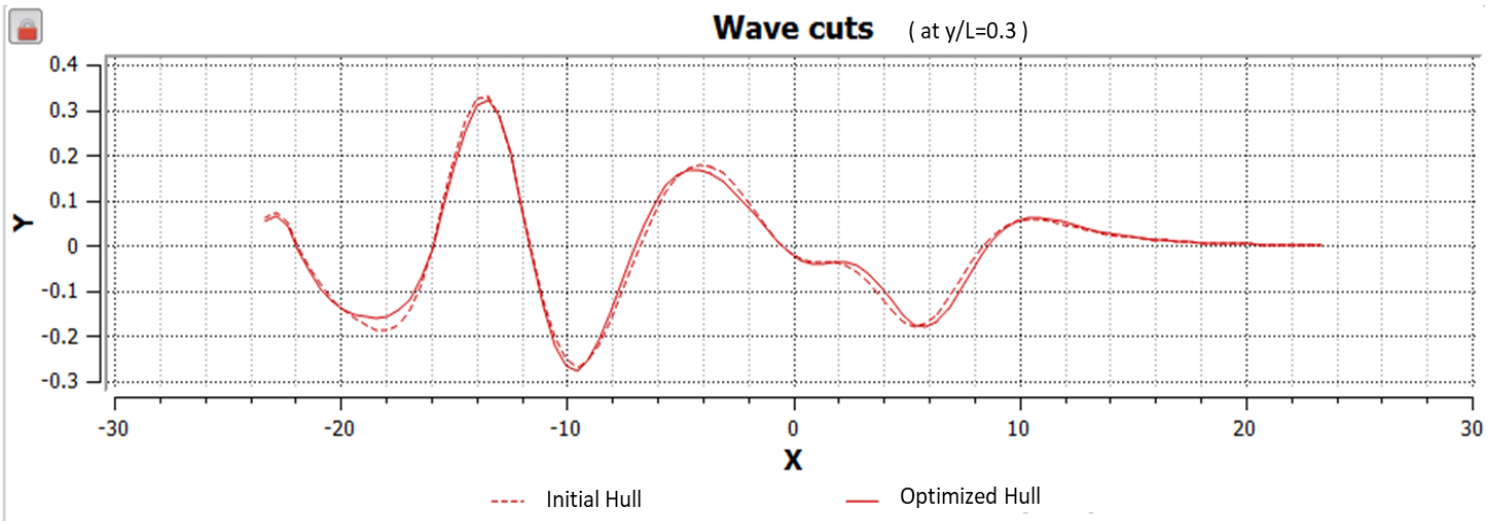
Σχήμα 6. 1: Πεδίο παραγόμενων κυματισμών αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας από την πρώτη διαδικασία βελτιστοποίησης



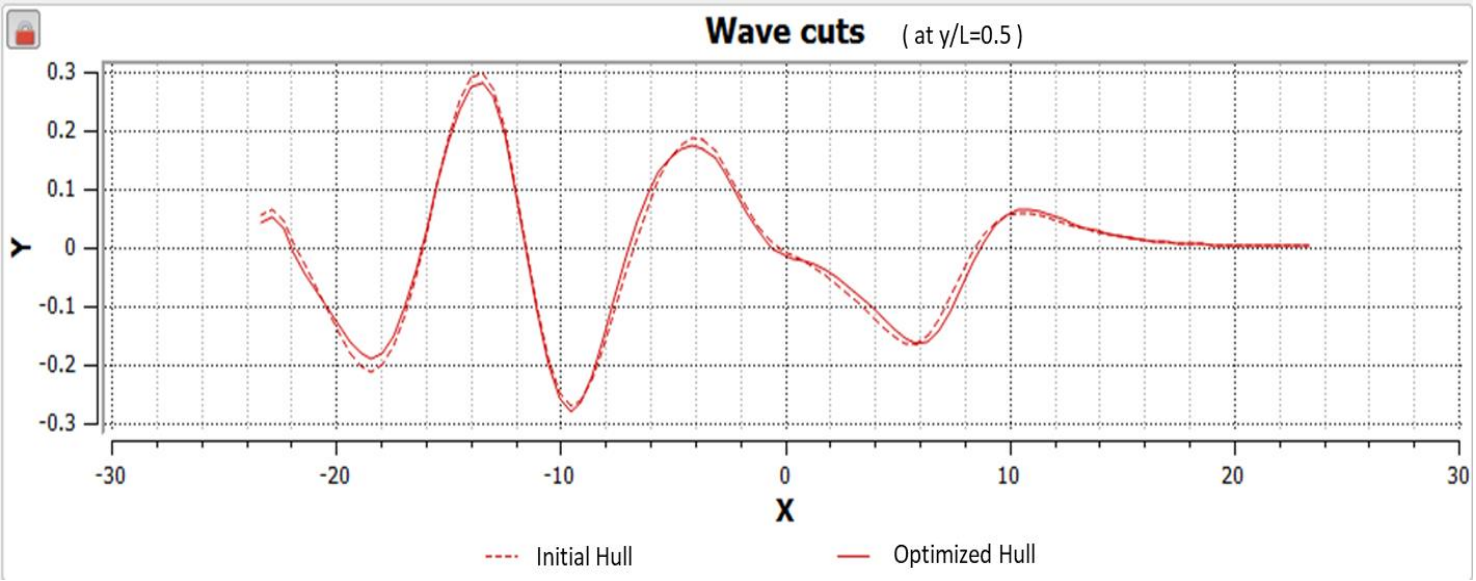
Σχήμα 6. 2: Πεδίο παραγόμενων κυματισμών αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας από την δεύτερη διαδικασία βελτιστοποίησης



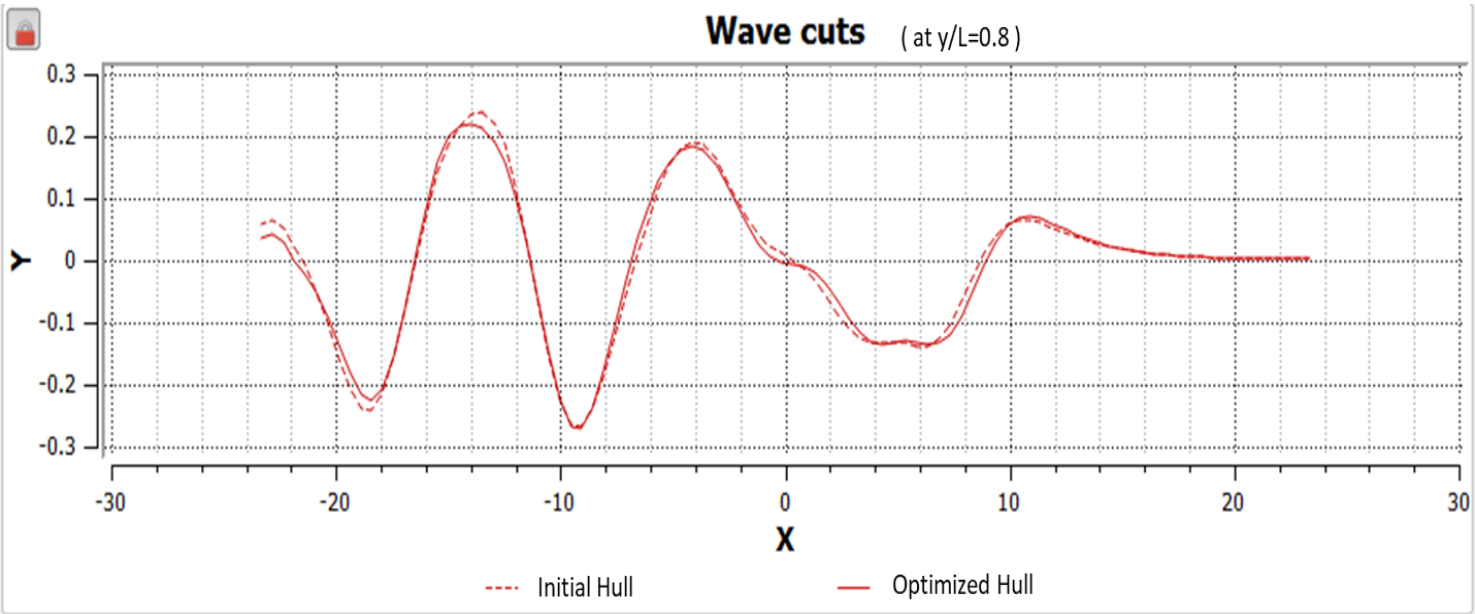
Σχήμα 6. 3: Πεδίο παραγόμενων κυματισμών αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας από την τρίτη διαδικασία βελτιστοποίησης



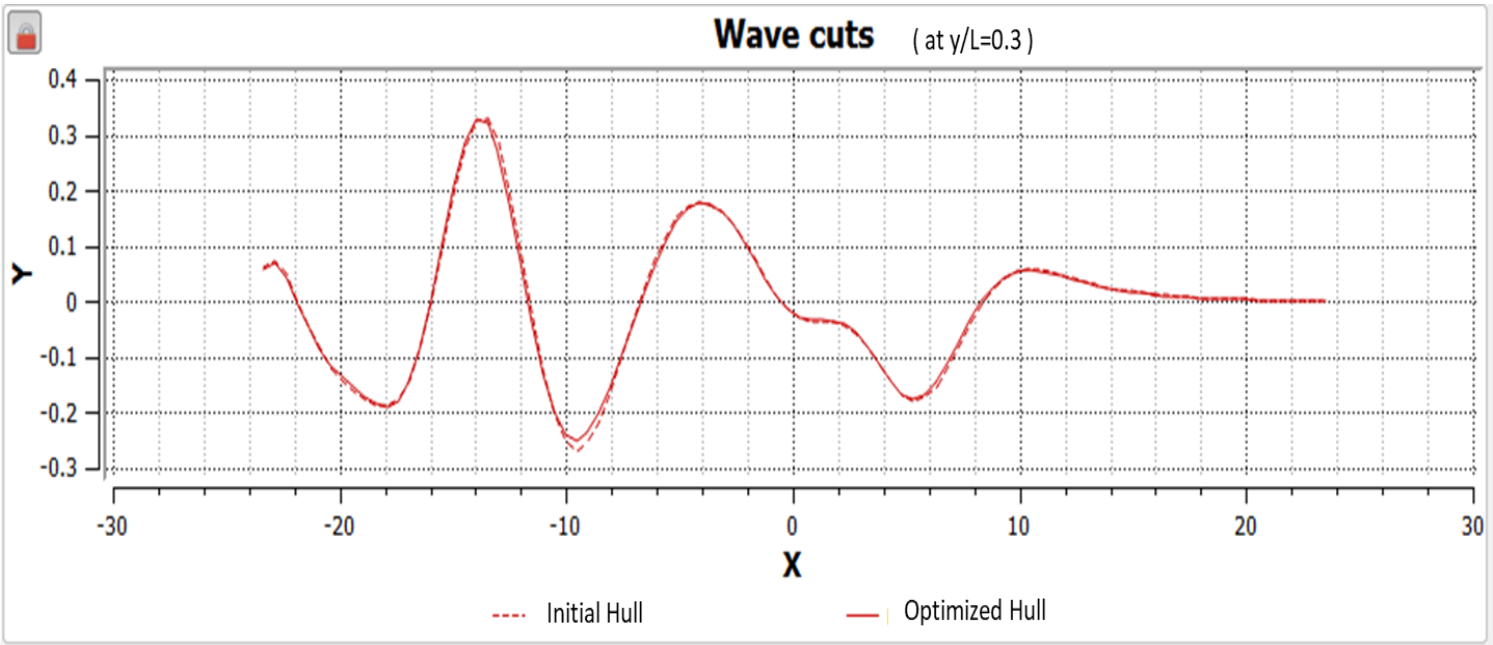
Διάγραμμα 6. 1: Διαμήκης τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση y/L=0.3 για την πρώτη προσομοίωση



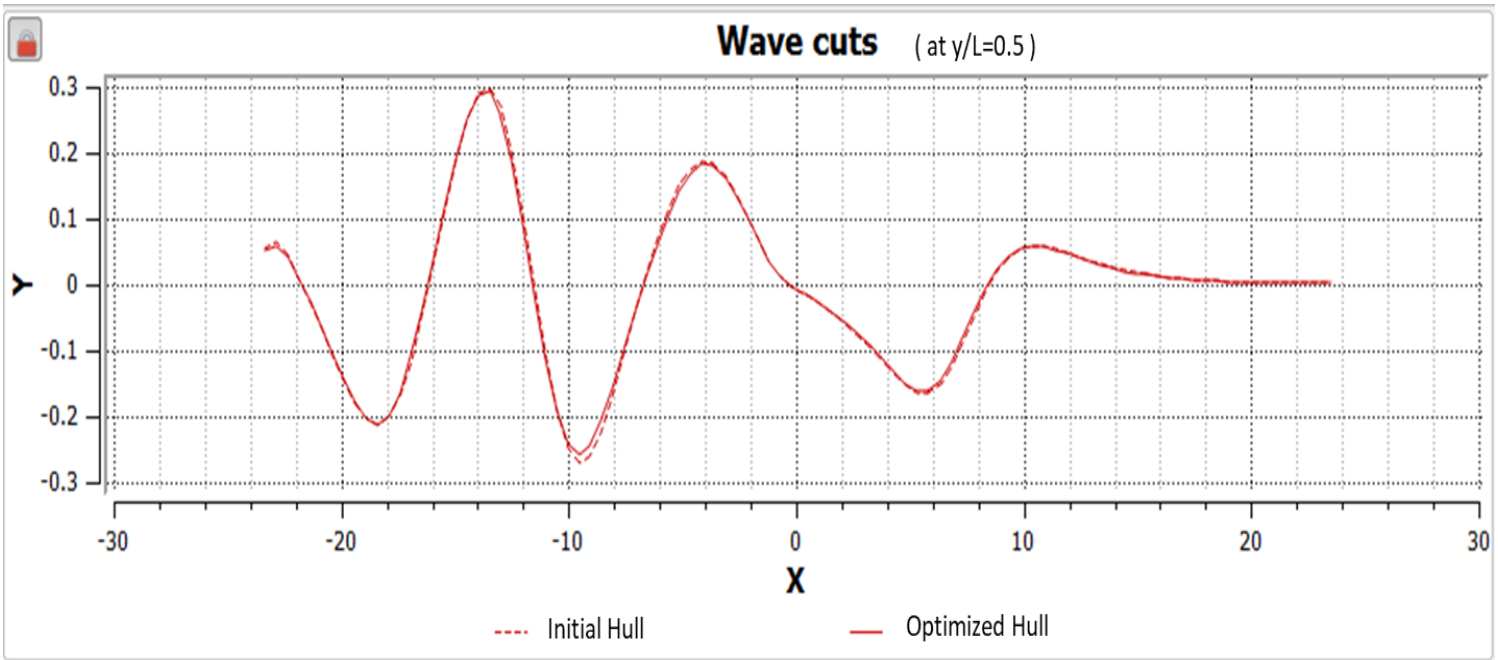
Διάγραμμα 6. 2: Διαμήκης τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση y/L=0.5 για την πρώτη προσομοίωση



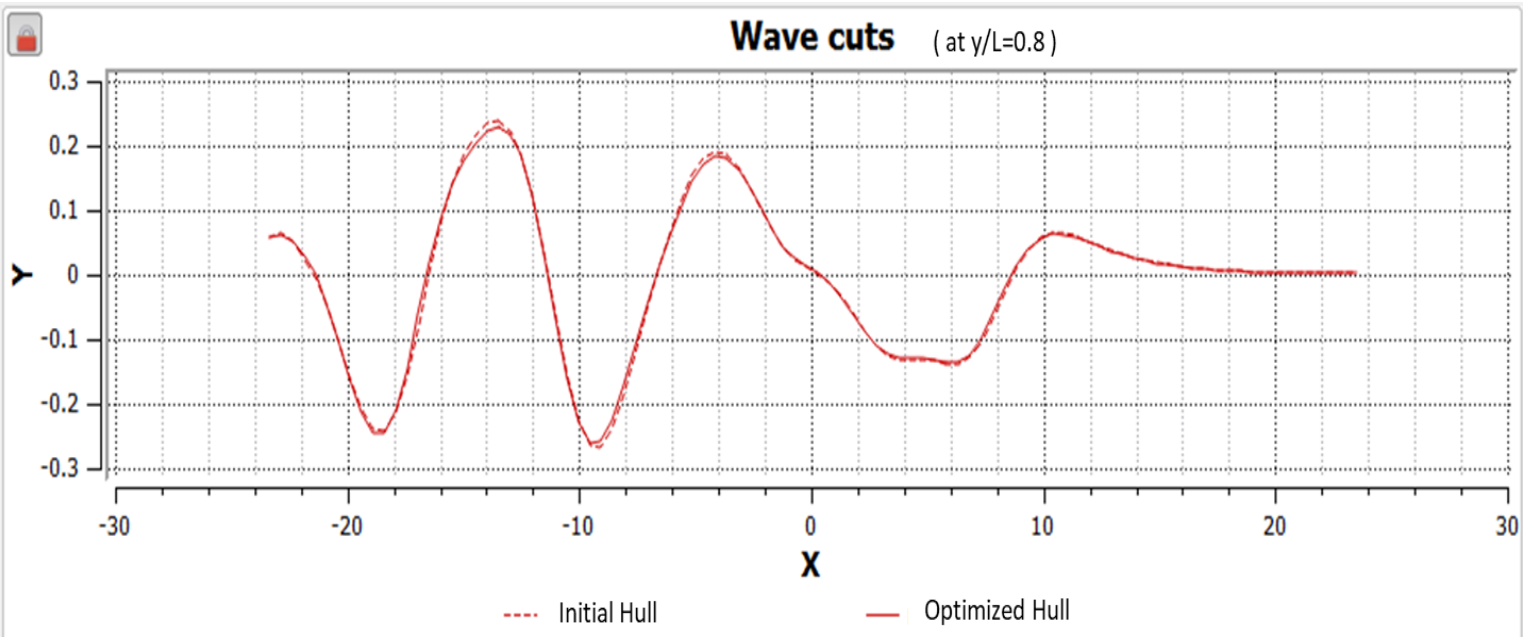
Διάγραμμα 6. 3: Διαμήκης τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση y/L=0.8 για την πρώτη προσομοίωση



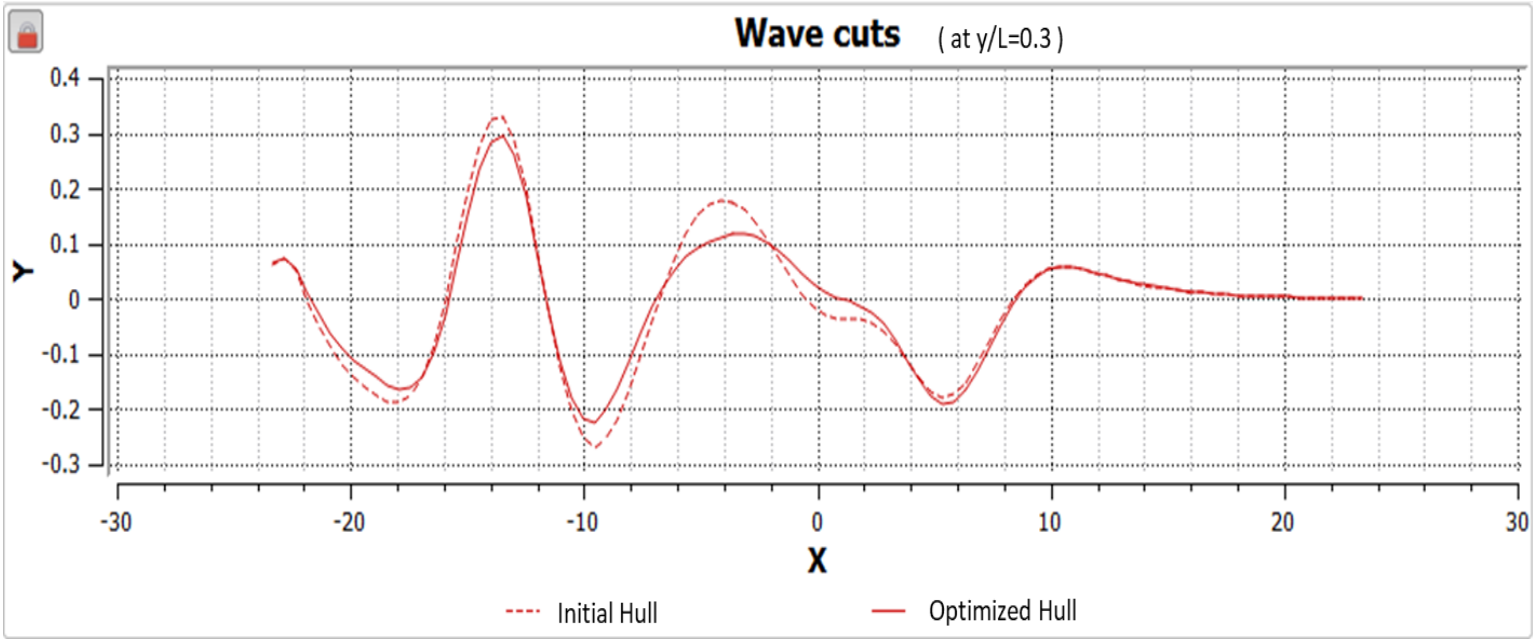
Διάγραμμα 6. 4: Διαμήκης τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση y/L=0.3 για την δεύτερη προσομοίωση



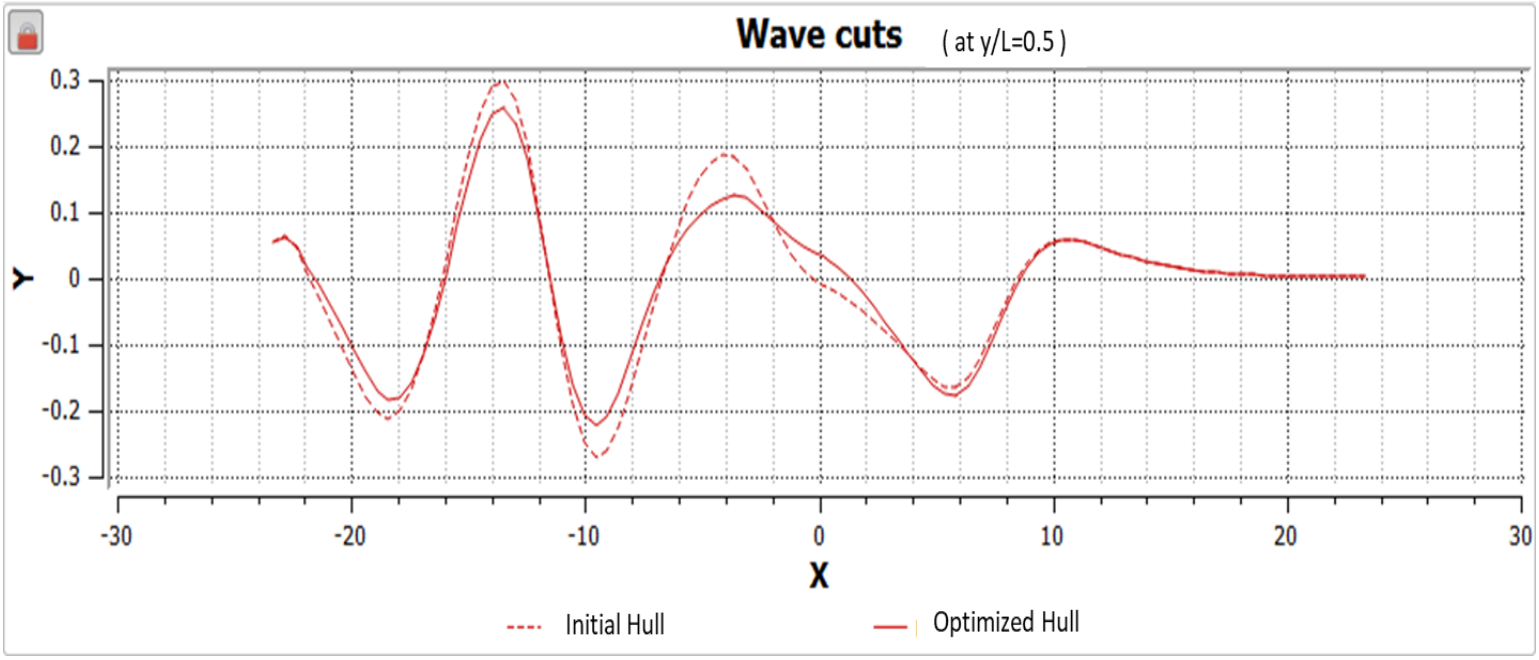
Διάγραμμα 6. 5: Διαμήκης τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση y/L=0.5 για την δεύτερη προσομοίωση



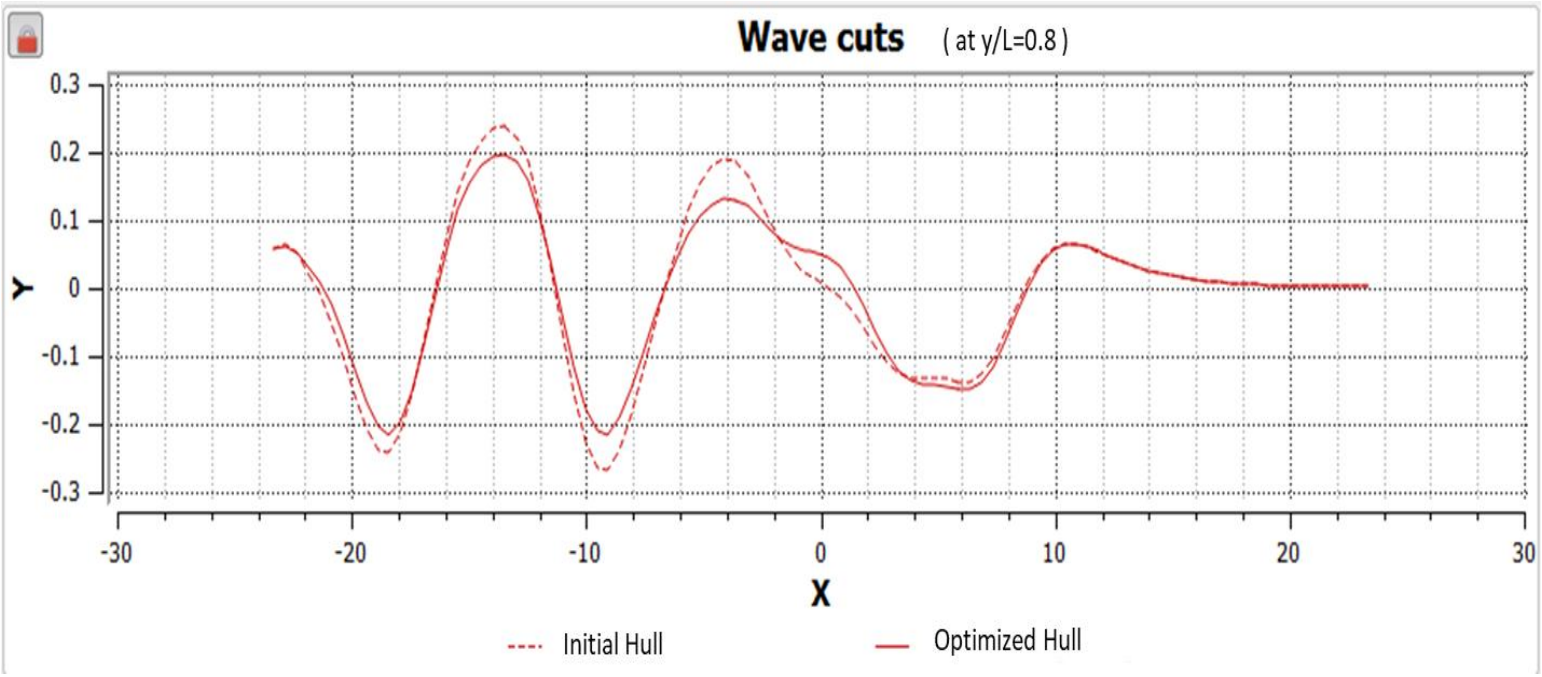
Διάγραμμα 6. 6: Διαμήκης τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση y/L=0.8 για την δεύτερη προσομοίωση



Διάγραμμα 6. 7: Διαμήκης τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση y/L=0.3 για την τρίτη προσομοίωση



Διάγραμμα 6. 8: Διαμήκης τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση y/L=0.5 για την τρίτη προσομοίωση



Διάγραμμα 6. 9: Διαμήκης τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση y/L=0.8 για την τρίτη προσομοίωση

Από τα παραπάνω (σχήμα 6.3, διαγράμματα 6.7-6.8-6.9) το ποιο εμφανές συμπέρασμα είναι πως η κατανομή του εκτοπίσματος της γάστρας κατά το διάμηκες, δηλαδή το μέγεθος LCB (διάμηκες κέντρο άντωσης) αποτελεί την πιο σημαντική παράμετρο στην επίδραση κυματισμού. Στο παραμετρικό μοντέλο της παρούσας εργασίας, το μέγεθος του LCB ελέγχεται κυρίως από τις παραμέτρους: α) διαμήκης θέση του μέγιστου πλάτους της γάστρας στην ίσαλο πλεύσης και β) από την γωνία πρόσπτωσης (εφαπτομένης) της καμπύλης της ισάλου πλεύσης. Το πόρισμά αυτό είναι ορθό δεδομένης της εκτενής ανάλυσης της γενικής μεθοδολογίας μείωσης της αντίστασης κυματισμού που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 5.

Ως αναφορά την παράμετρο του μέγιστου πλάτους (σχήμα 6.1, διαγράμματα 6.1-6.2-6.3), επιδρά θετικά στο απομακρυσμένο τμήμα της κυματομορφής με αποτέλεσμα το κύμα να αποσβένει ταχύτερα. Επίσης παρατηρούμε πως το κύμα, κατά την διαμόρφωσή του (από την πλώρη έως x=10) είναι μεγαλύτερο από την πατρική γάστρα καθώς και στην περιοχή του μέγιστου πλάτους η κοιλάδα του κύματος. Παρόλα αυτά η ανύψωση της πρώτης κορυφής του κύματος πίσω από την πρύμνη μειώνεται αισθητά.

Επιπλέον, η επίδραση των παραμέτρων που σχετίζονται με την μορφή του καθρέφτη (σχήμα 6.2, διαγράμματα 6.4-6.5-6.6) στην ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας είναι ως επί το πλείστον ανύπαρκτη. Αυτό όμως δεν σημαίνει πως θα πρέπει να τις αφαιρέσουμε από την διαδικασία βελτιστοποίησης λόγω της πιθανής αλληλεπίδρασής τους με τις υπόλοιπες παραμέτρους σχεδίασης.

Για λόγους πληρότητας, ακολουθούν πίνακες που περιλαμβάνουν τις τελικές τιμές των μεταβλητών σχεδίασης μετά την διαδικασία βελτιστοποίησης.

Πίνακας 6. 1: Τιμές των μεταβλητών σχεδίασης από την 1η,2η,3η βελτιστοποίηση

Μεταβλητή Σχεδίασης	NSGA2_1	NSGA2_2	NSGA2_3
Ολικό μήκος [ft]	52	52	52
Πλάτος γάστρας [m]	**2.06**	2.2	2.2
Απόσταση μεταξύ γαστρών [m]	**2.85**	3.00	3.00
Βύθισμα [m]	1.45	1.39	1.39
Πλάτος του καθρέφτη [m]	0.69	**0.64**	0.69
Ύψος του καθρέφτη στο επίπεδο του πυθμένα της γάστρας [m]	1.489	**1.42**	1.489
Ύψος του καθρέφτη στην ίσαλο πλεύσης [m]	1.8	**1.78**	1.8
Γωνία πρόσπτωσης της ισάλου [deg]	12	12	**13.3**
Διαμήκης θέση του μέγιστου πλάτους της γάστρας [m]	4.52	4.52	**5.40**

Πίνακας 6. 2: Αποτελέσματα αντίστασης κυματισμού των διαδικασιών 1,2,3

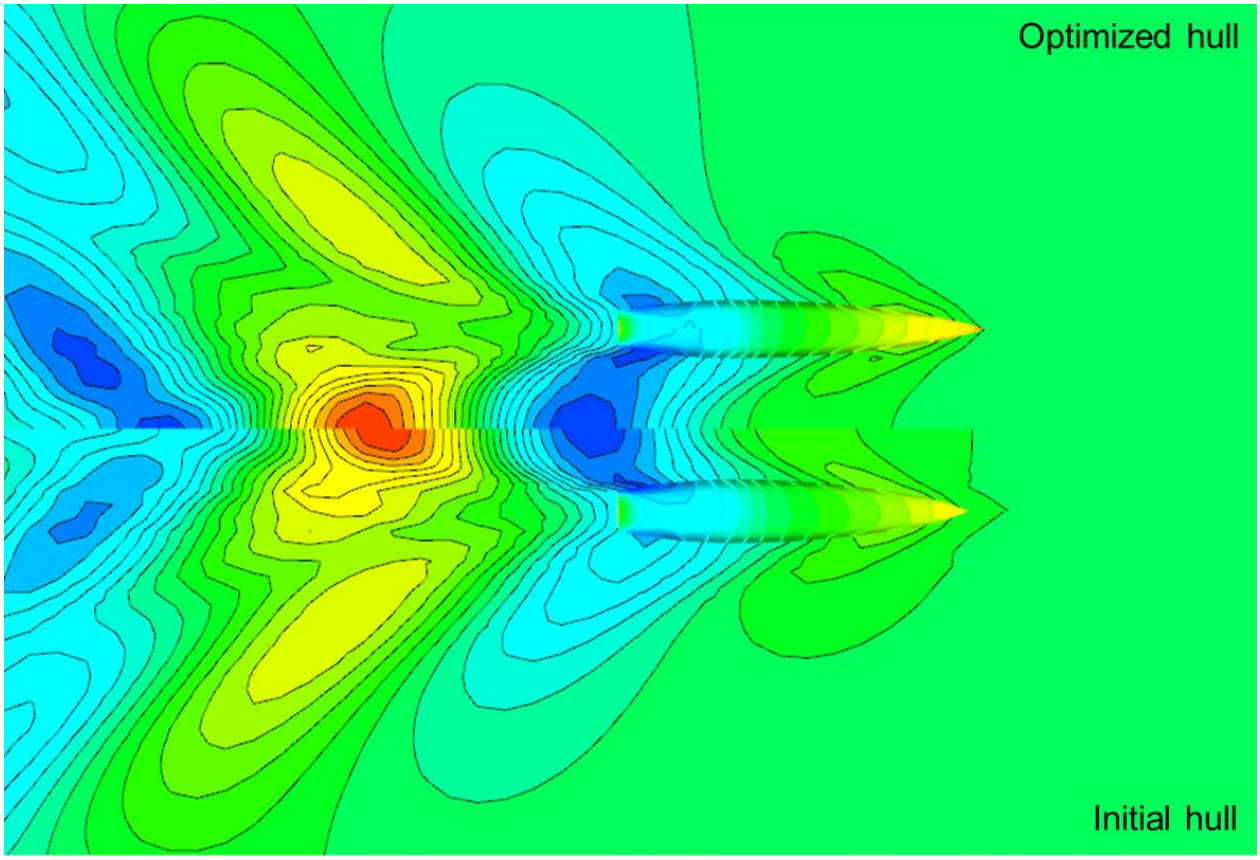
Μέγεθος	NSGA2_1	NSGA2_2	NSGA2_3
Εκτόπισμα [t]	27.35	26.77	27.25
Ποσοστό μεταβολής εκτοπίσματος [%]	1.68	3.76	3.05
Αντίσταση κυματισμού [kN]	2.027	2.131	1.790
Ποσοστό μείωσης αντίστασης κυματισμού [%]	8.1	3.4	18.9

Επίδραση των παραμέτρων στην υψηλή ταχύτητα

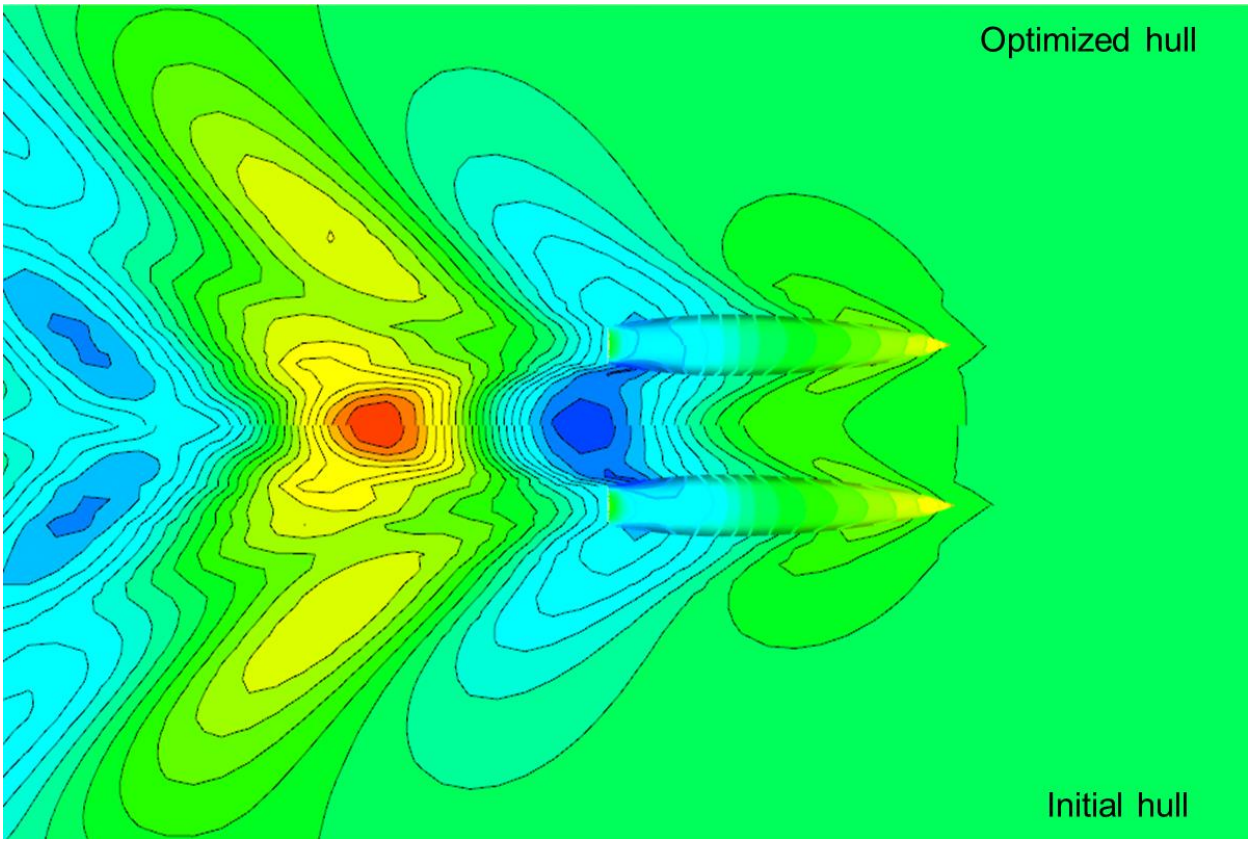
Η βελτιστοποίηση αυτή, όμοια με την προηγούμενη παράγραφο, πραγματοποιήθηκε με αντικειμενικές συναρτήσεις την ελαχιστοποίηση της αντίστασης κυματισμού επιλέγοντας μεμονωμένα ορισμένες παραμέτρους. Κατά τη διαδικασία εύρεσης της επίδρασης των παραμέτρων, σε κάθε βελτιστοποίηση εξετάστηκαν 160 διαφορετικές μορφές γάστρας (generations=10 x population=16). Αριθμός αρκετός δεδομένου ότι σε κάθε προσομοίωση έχουμε μικρό αριθμό παραμέτρων.

Προτού να εμβαθύνουμε περισσότερο στην ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν, αξίζει να επισημάνουμε πως η πιο αξιόπιστη τιμή της αδιαστατοποιημένης απόστασης είναι αυτή των y/L=0.5. Πιο συγκεκριμένα, αυτό οφείλεται αφενός στις τοπικές διαταραχές τις ροής κοντά στην επιφάνεια της γάστρας και αφετέρου στο γεγονός ότι μακριά από τη γάστρα η κυματομορφή αποσβένει αισθητά.

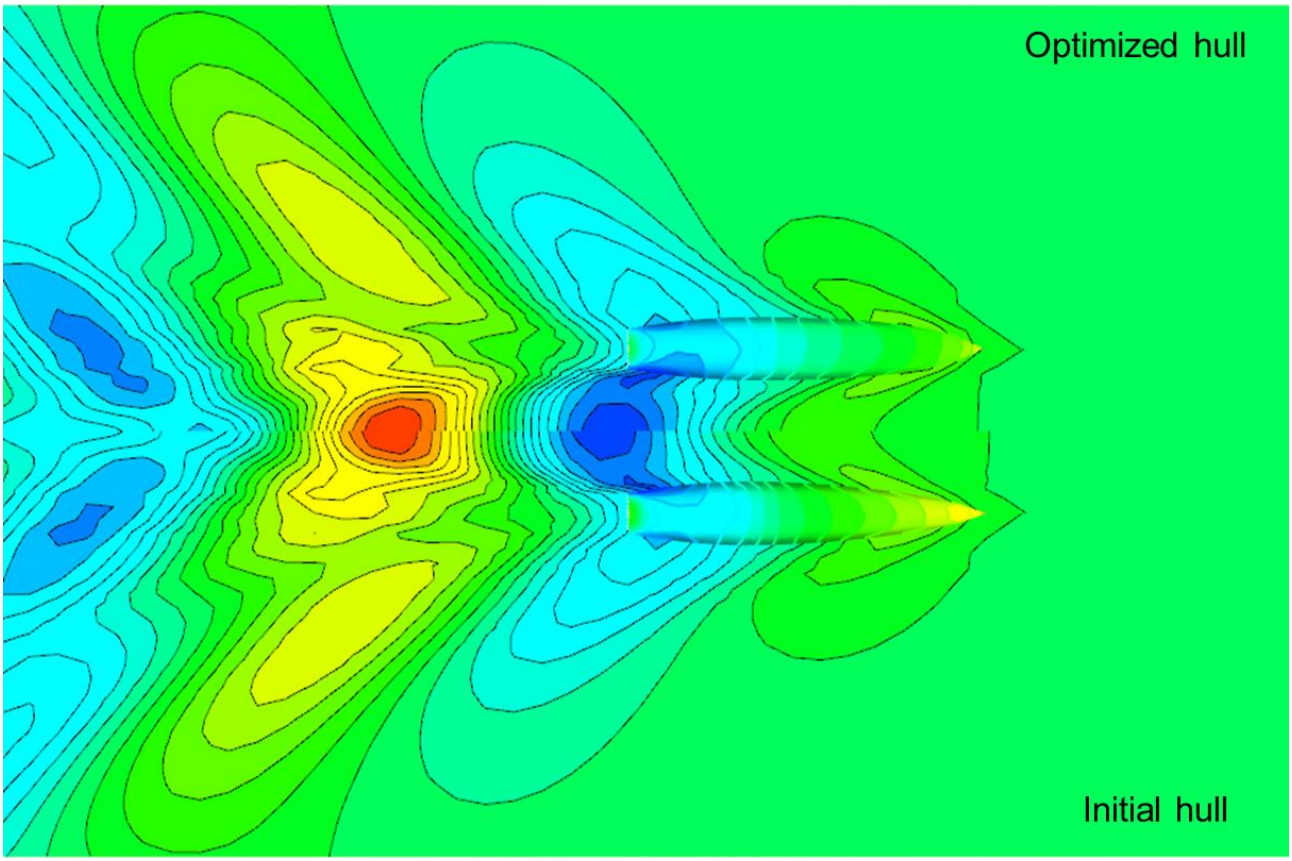
Ακολουθεί πρώτα η παράθεση των σχημάτων και τα διαγραμμάτων της κυματομορφής που προέκυψαν από τις εκτελέσεις (4,5,6) του αλγόριθμου βελτιστοποίησης και στην συνέχεια ο σχολιασμός τους.



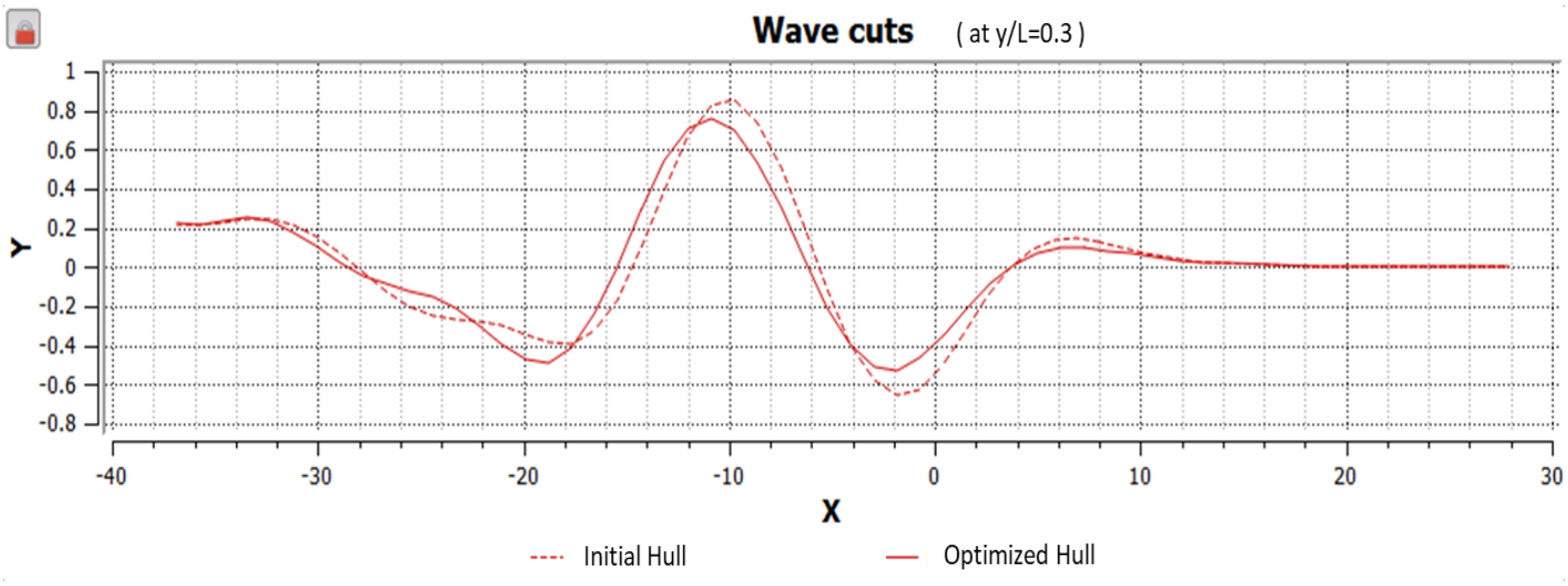
Σχήμα 6. 4: Πεδίο παραγόμενων κυματισμών αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας από την τέταρτη διαδικασία βελτιστοποίησης



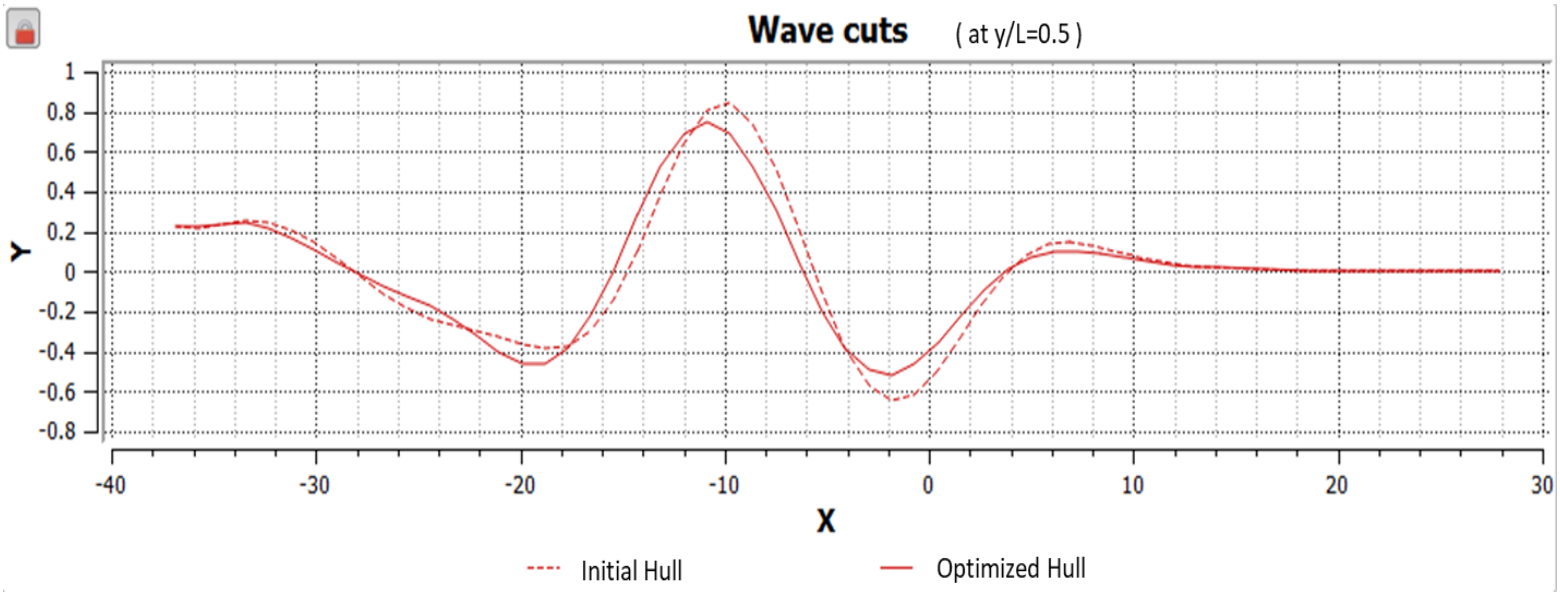
Σχήμα 6. 5: Πεδίο παραγόμενων κυματισμών αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας από την πέμπτη διαδικασία βελτιστοποίησης



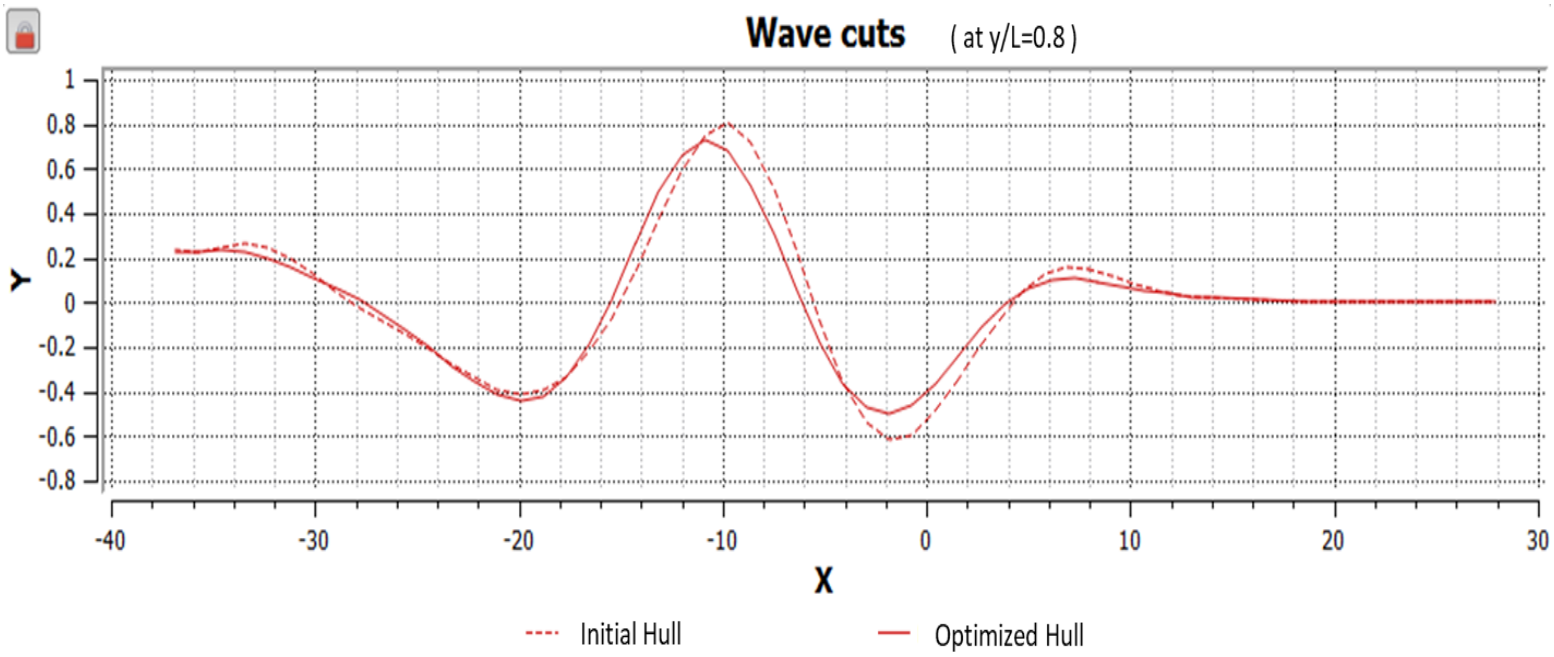
Σχήμα 6. 6: Πεδίο παραγόμενων κυματισμών αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας από την έκτη διαδικασία βελτιστοποίησης



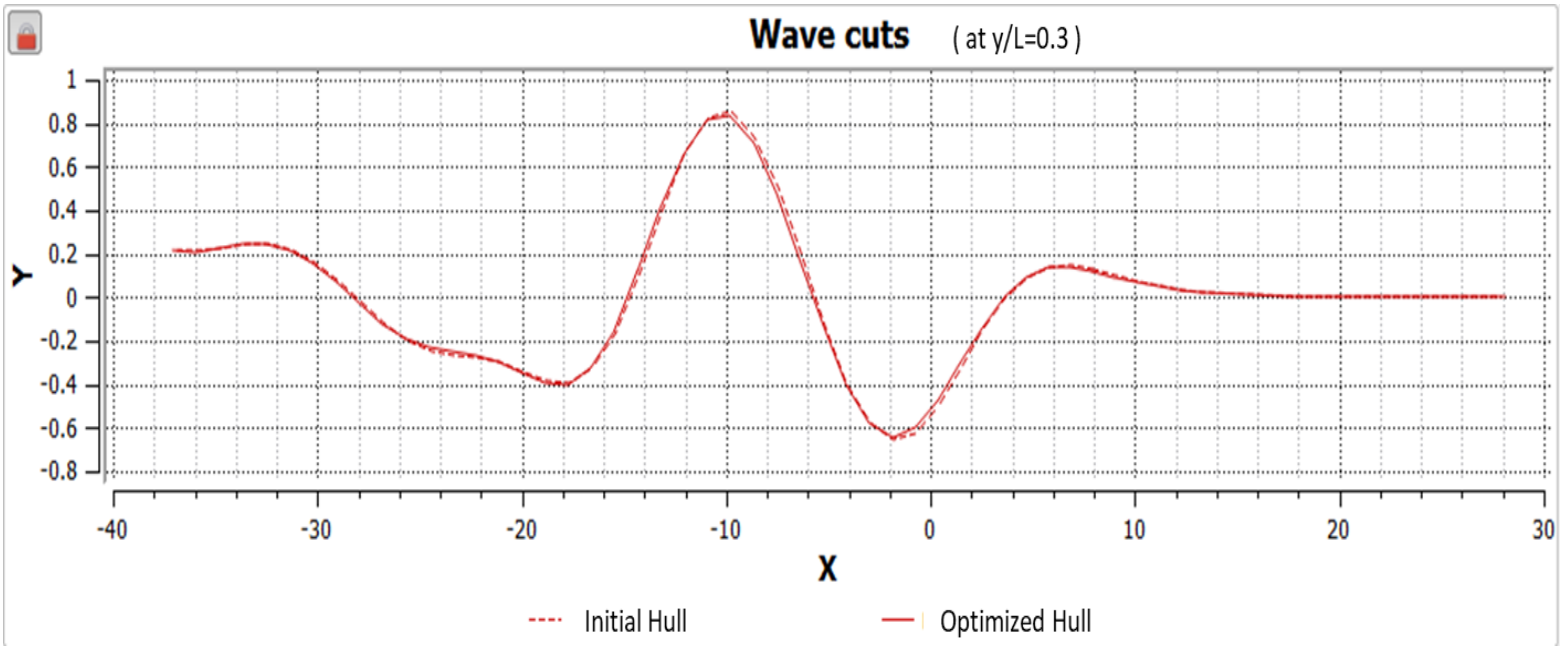
Διάγραμμα 6. 10: Διαμήκης τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση y/L=0.3 για την τέταρτη προσομοίωση



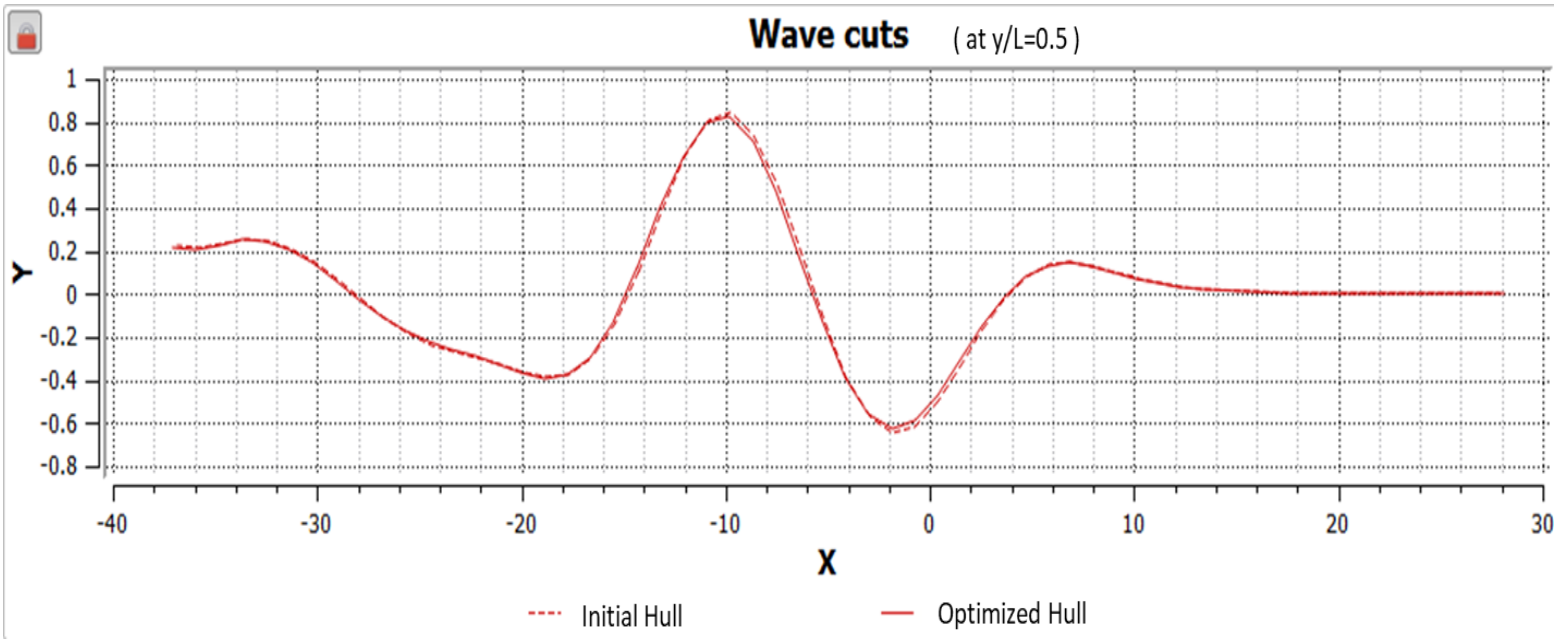
Διάγραμμα 6. 11: Διαμήκης τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση y/L=0.5 για την τέταρτη προσομοίωση



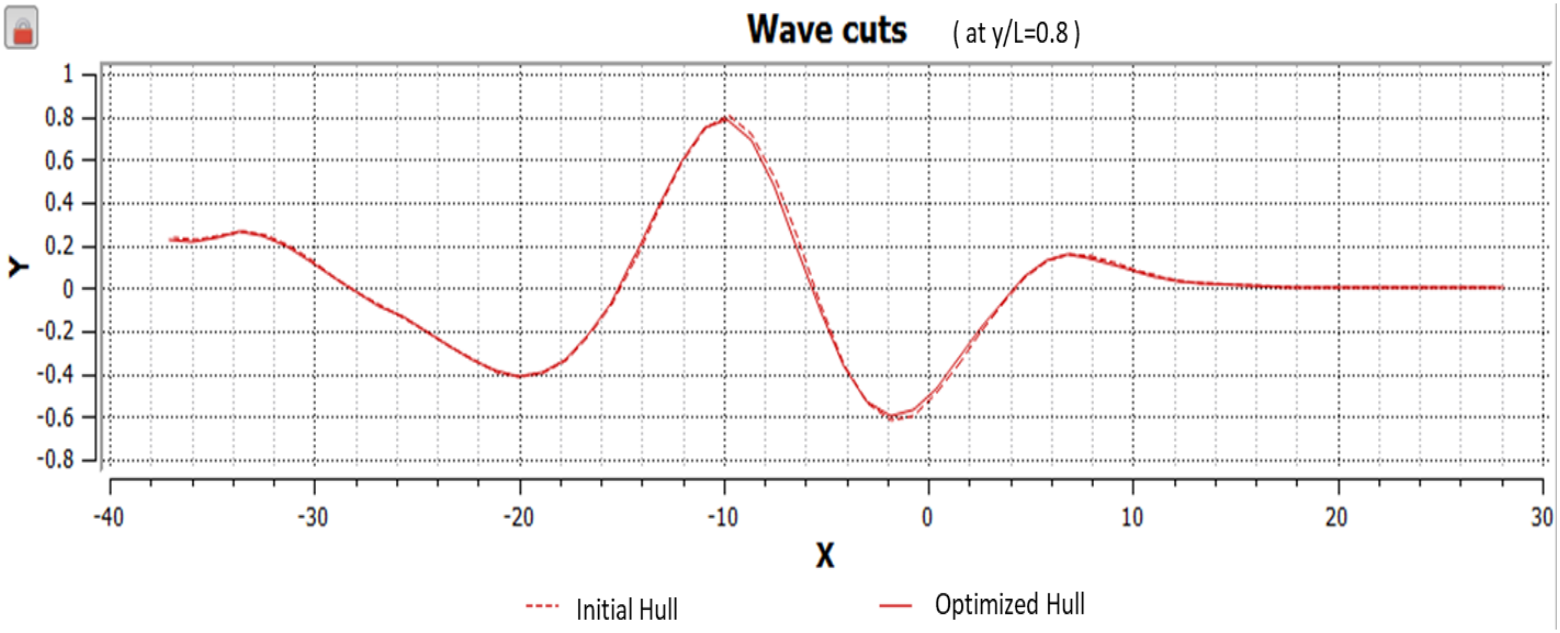
Διάγραμμα 6. 12: Διαμήκης τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση y/L=0.8 για την τέταρτη προσομοίωση



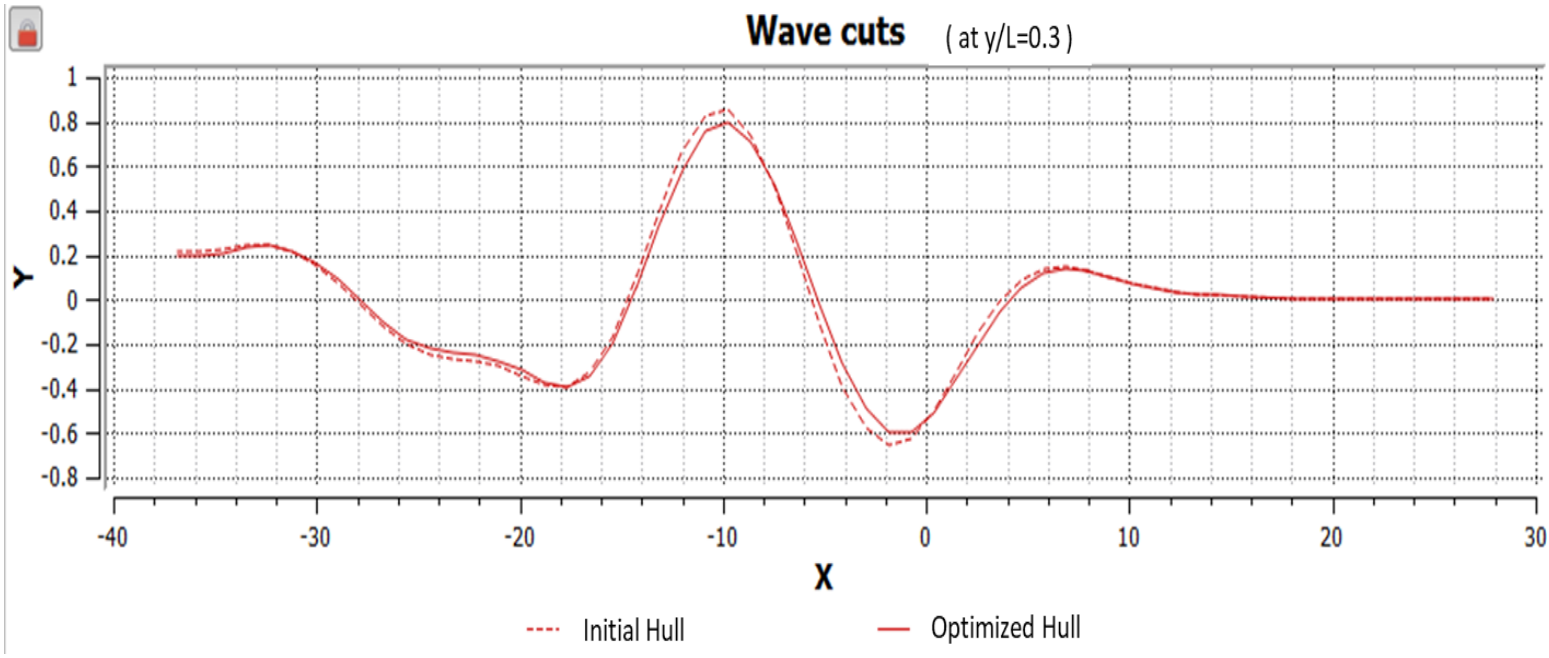
Διάγραμμα 6. 13: Διαμήκης τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση y/L=0.3 για την πέμπτη προσομοίωση



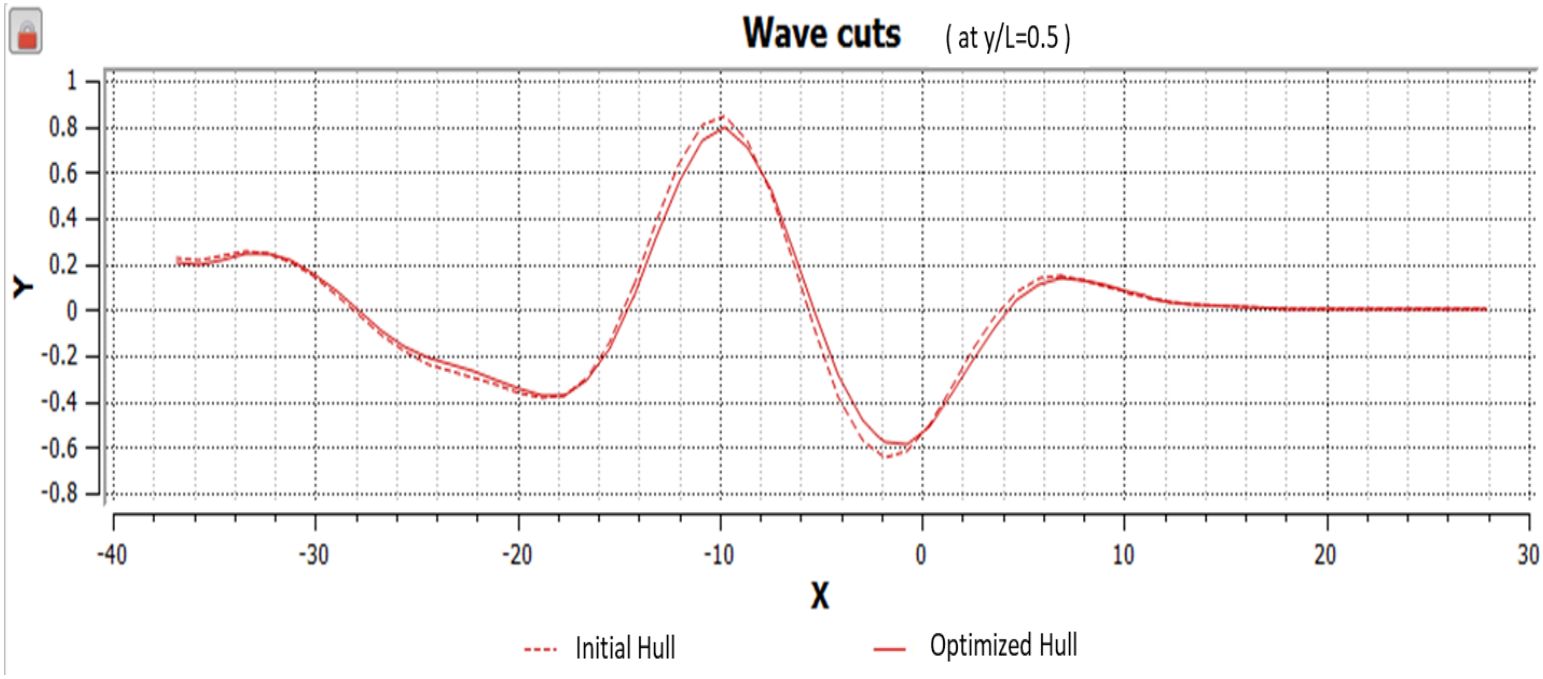
Διάγραμμα 6. 14: Διαμήκης τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση y/L=0.5 για την πέμπτη προσομοίωση



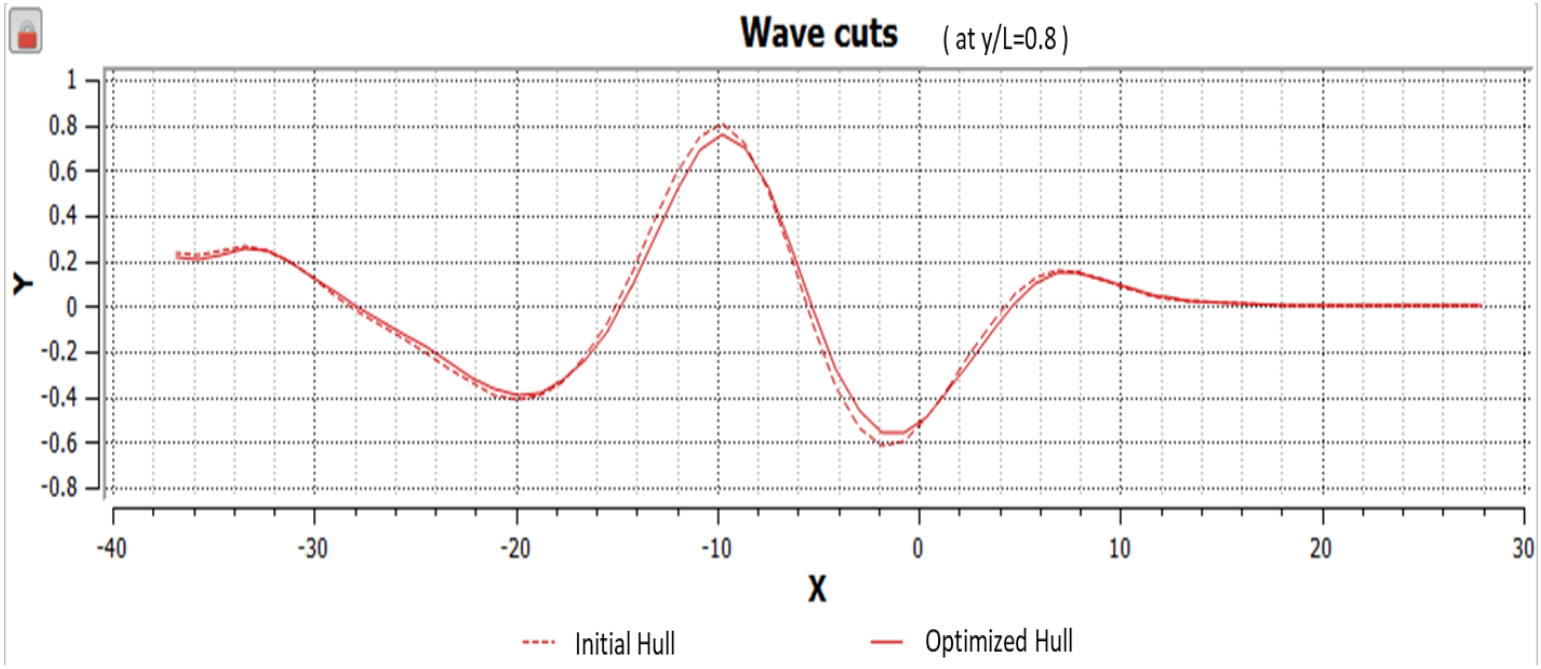
Διάγραμμα 6. 15: Διαμήκης τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση y/L=0.8 για την πέμπτη προσομοίωση



Διάγραμμα 6. 16: Διαμήκης τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση y/L=0.3 για την έκτη προσομοίωση



Διάγραμμα 6. 17: Διαμήκης τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση y/L=0.5 για την έκτη προσομοίωση



Διάγραμμα 6. 18: Διαμήκης τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση y/L=0.8 για την έκτη προσομοίωση

Αρχικά, η επίδραση των παραμέτρων που σχετίζονται με την μορφή του καθρέφτη (σχήμα 6.5, διαγράμματα 6.13-6.14-6.15) στην ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας είναι ως επί το πλείστον ανύπαρκτη. Όμοια με την περίπτωση της χαμηλής ταχύτητας τις παραμέτρους αυτές δεν θα τις αφαιρέσουμε από την διαδικασία βελτιστοποίησης λόγω της πιθανής αλληλεπίδρασής τους με τις υπόλοιπες παραμέτρους σχεδίασης.

Από τα παραπάνω (σχήμα 6.6, διαγράμματα 6.16-6.17-6.18) παρατηρείται πως η κατανομή του εκτοπίσματος της γάστρας κατά το διάμηκες, δηλαδή το μέγεθος LCB (διάμηκες κέντρο άντωσης) πλέον δεν αποτελεί την πιο σημαντική παράμετρο στην επίδραση κυματισμού. Επιπλέον από τα (σχήμα 6.4, διαγράμματα 6.10-6.11-6.12) είναι φανερό πως η παράμετροι του μέγιστου πλάτους και της απόστασης μεταξύ των γαστρών, επιδρά σε σημαντικό βαθμό στη κυματομορφή. Η πιο σημαντική παρατήρηση που μπορούμε να κάνουμε είναι πως η τέταρτη βελτιστοποίηση μετατοπίζει τα ακρότατα της κυματομορφής προς τα πίσω καθώς επίσης μειώνει και τα πλάτη τους. Αντίθετα η έκτη βελτιστοποίηση (LCB) επιδρά μόνο στα πλάτη των ακροτάτων της κυματομορφής.

Για λόγους πληρότητας, ακολουθούν πίνακες που περιλαμβάνουν τις τελικές τιμές των μεταβλητών σχεδίασης μετά την διαδικασία βελτιστοποίησης.

Πίνακας 6. 3: Τιμές των μεταβλητών σχεδίασης από την 4η,5η,6η βελτιστοποίηση

Μεταβλητή Σχεδίασης	NSGA2_1	NSGA2_2	NSGA2_3
Ολικό μήκος [ft]	52	52	52
Πλάτος γάστρας [m]	**2.02**	2.2	2. 2
Απόσταση μεταξύ γαστρών [m]	**3.64**	3.00	3.00
Βύθισμα [m]	1.45	1.39	1.36
Πλάτος του καθρέφτη [m]	0.69	**0.679**	0.69
Ύψος του καθρέφτη στο επίπεδο του πυθμένα της γάστρας [m]	1.489	**1.38**	1.489
Ύψος του καθρέφτη στην ίσαλο πλεύσης [m]	1.8	**1.77**	1.8
Γωνία πρόσπτωσης της ισάλου [deg]	12	12	**18**
Διαμήκης θέση του μέγιστου πλάτους της γάστρας [m]	4.52	4.52	**5.23**

Πίνακας 6. 4: Αποτελέσματα αντίστασης κυματισμού των διαδικασιών 4,5,6

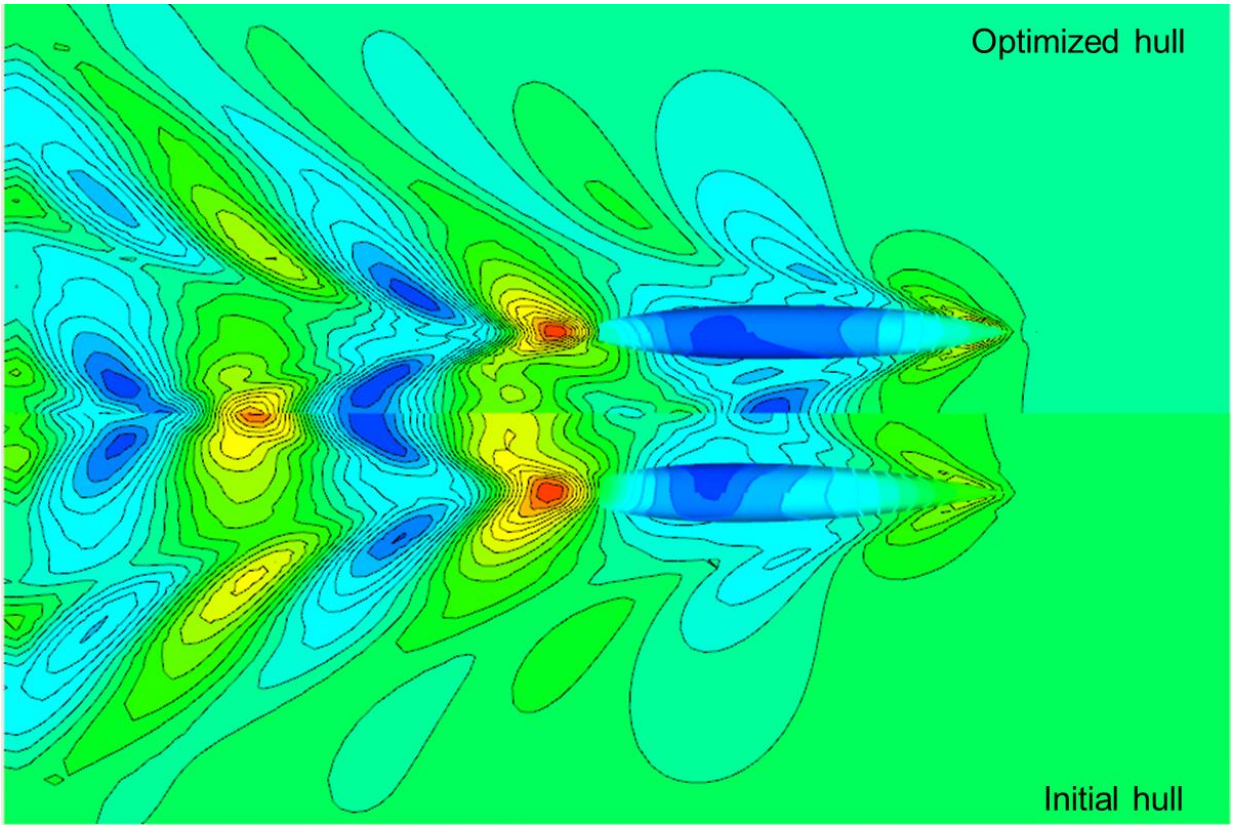
Μέγεθος	NSGA2_1	NSGA2_2	NSGA2_3
Εκτόπισμα [t]	27.35	26.77	27.25
Ποσοστό μεταβολής εκτοπίσματος [%]	3.54	3.66	3.82
Αντίσταση κυματισμού [kN]	12.559	14.356	13.280
Ποσοστό μείωσης αντίστασης κυματισμού [%]	15.3	3.1	10.4

Βελτιστοποίηση στην ταχύτητα V=8 [kn]

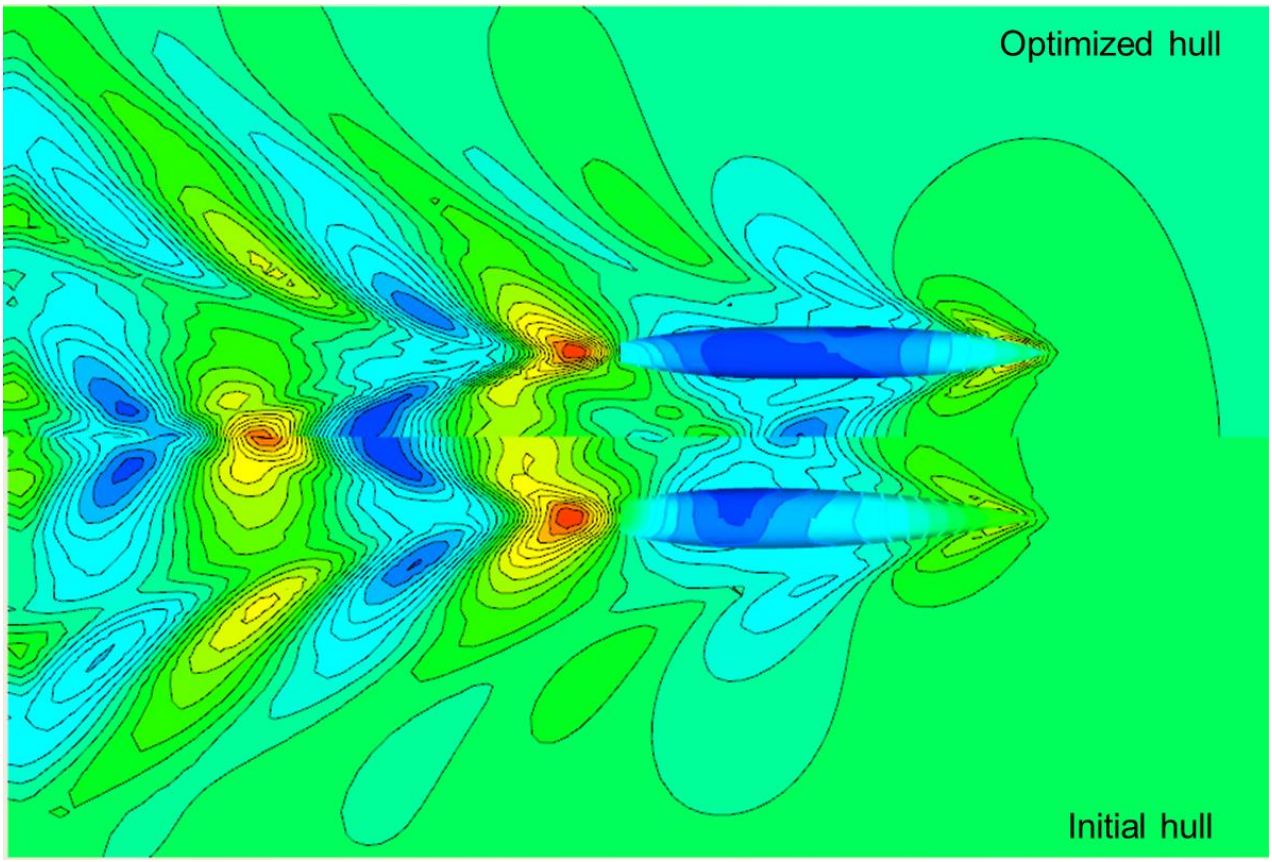
Στις διαδικασίες βελτιστοποίησης που ακολουθούν για την εύρεσης των μεταβλητών σχεδίασης, εξετάστηκαν 400 διαφορετικές μορφές γάστρας (generations=25 x population=16). Αριθμός αρκετός δεδομένου ότι έχουμε μικρό αριθμό παραμέτρων και μια αντικειμενική συνάρτηση.

Πρόκειται για την ταχύτητα πλεύσης του σκάφος, που επιτυγχάνεται μόνο με τις κύριες μηχανές. Ο κυβερνήτης επιλέγει να ταξιδέψει σε αυτήν ταχύτητα εάν η διεύθυνση και η ένταση του αέρα δεν είναι ευνοϊκή. Χαρακτηριστική περίπτωση αποτελεί η διεύθυνση του ανέμου που σχηματίζει γωνία με την επιθυμητή πορεία, μικρότερη των 30 μοιρών.

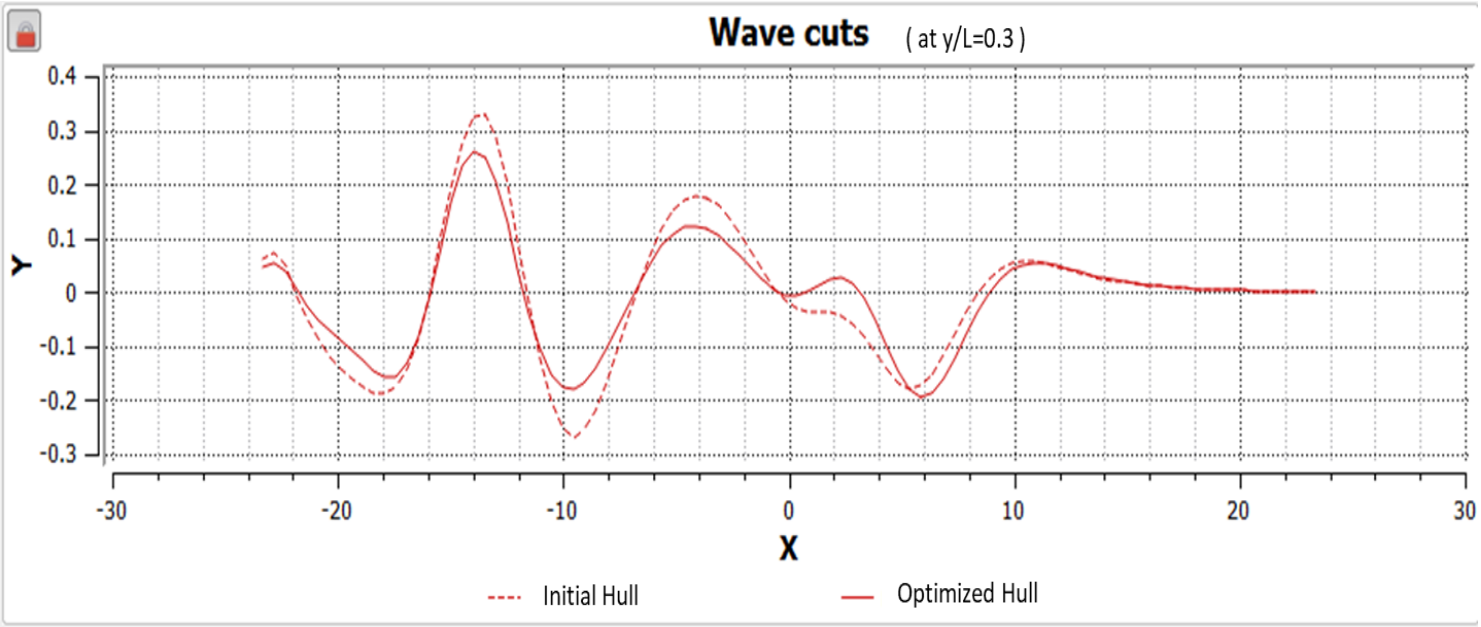
Παρακάτω, παρουσιάζονται τα σχετικά διαγράμματα και πίνακες από τα αποτελέσματα των δυο διαδικασιών βελτιστοποίησης της αντίστασης κυματισμού για την συγκεκριμένη ταχύτητα. Στην πρώτη διαδικασία αναφέρεται πως έχουν επιλεχθεί όλες οι μεταβλητές σχεδίασης εκτός του ολικού μήκους του σκάφους, με σκοπό να ελεγχθεί η επιρροή του μήκους την αντίσταση κυματισμού.



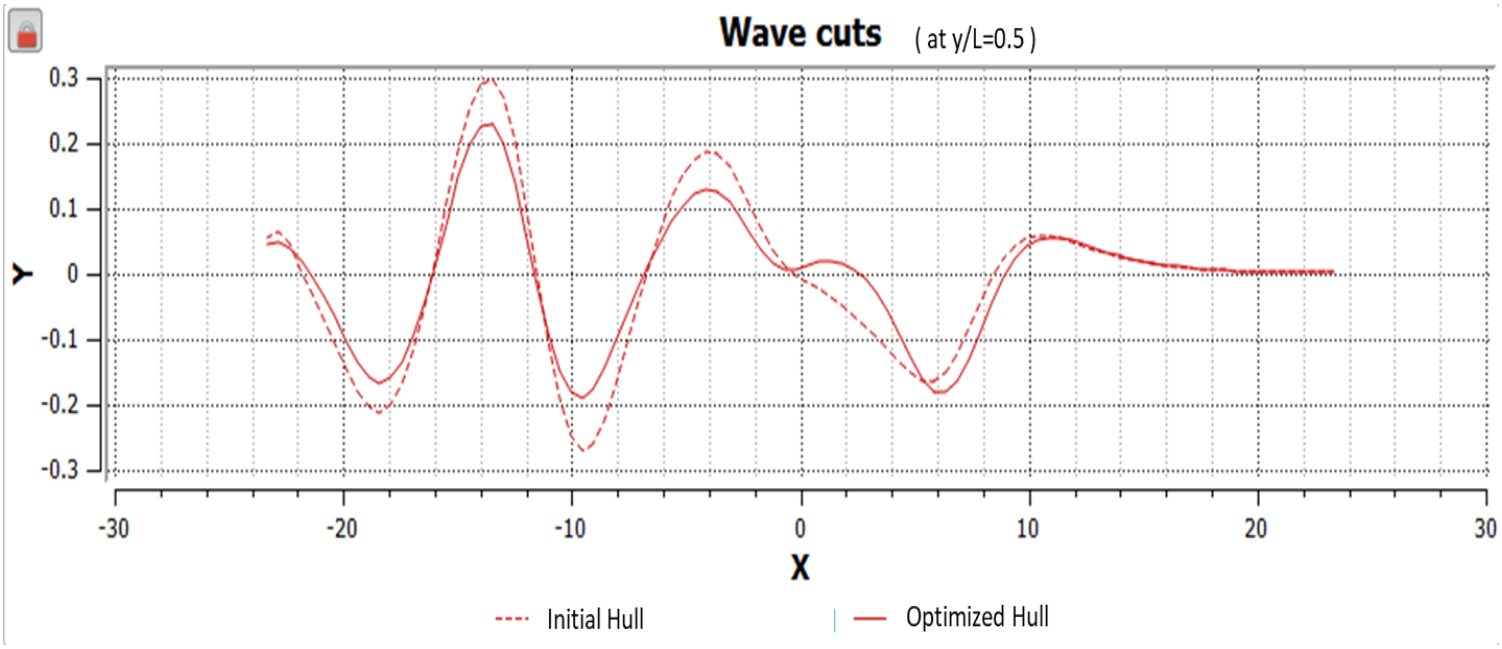
Σχήμα 6. 7: Πεδίο παραγόμενων κυματισμών αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας από την έβδομη διαδικασία βελτιστοποίησης



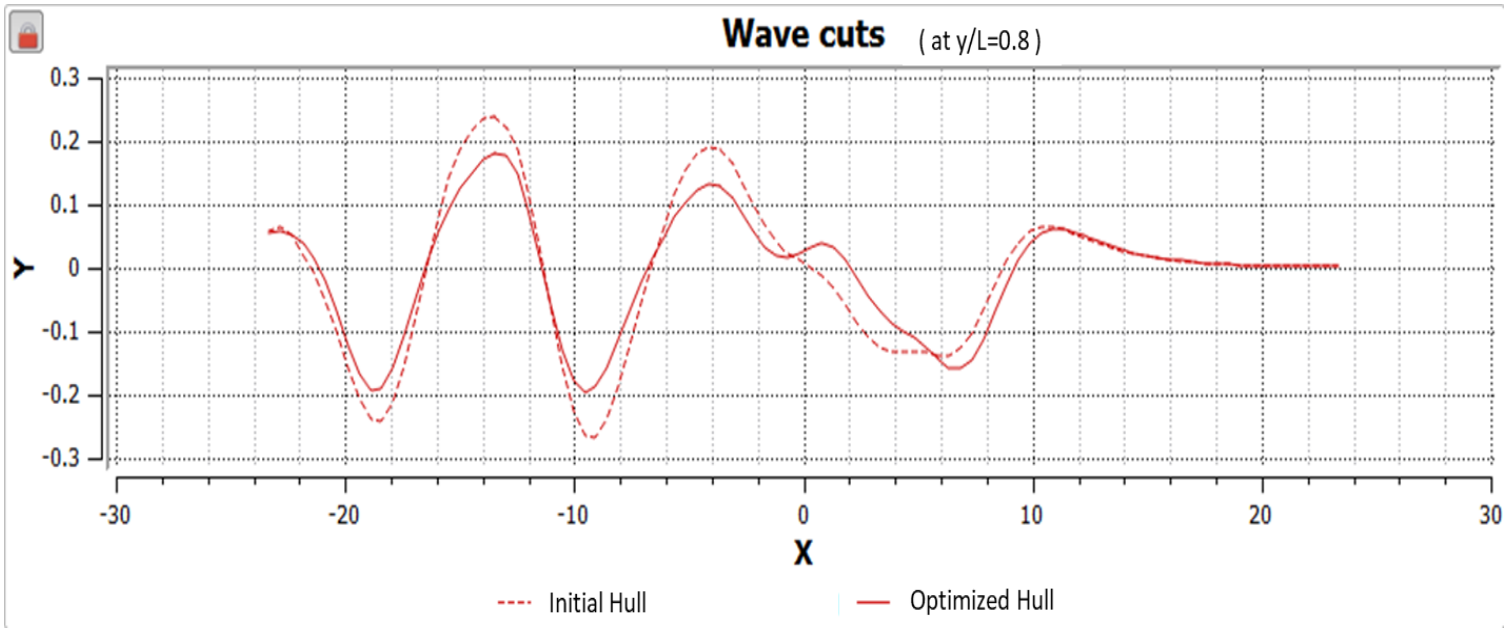
Σχήμα 6. 8: Πεδίο παραγόμενων κυματισμών αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας από την όγδοη διαδικασία βελτιστοποίησης



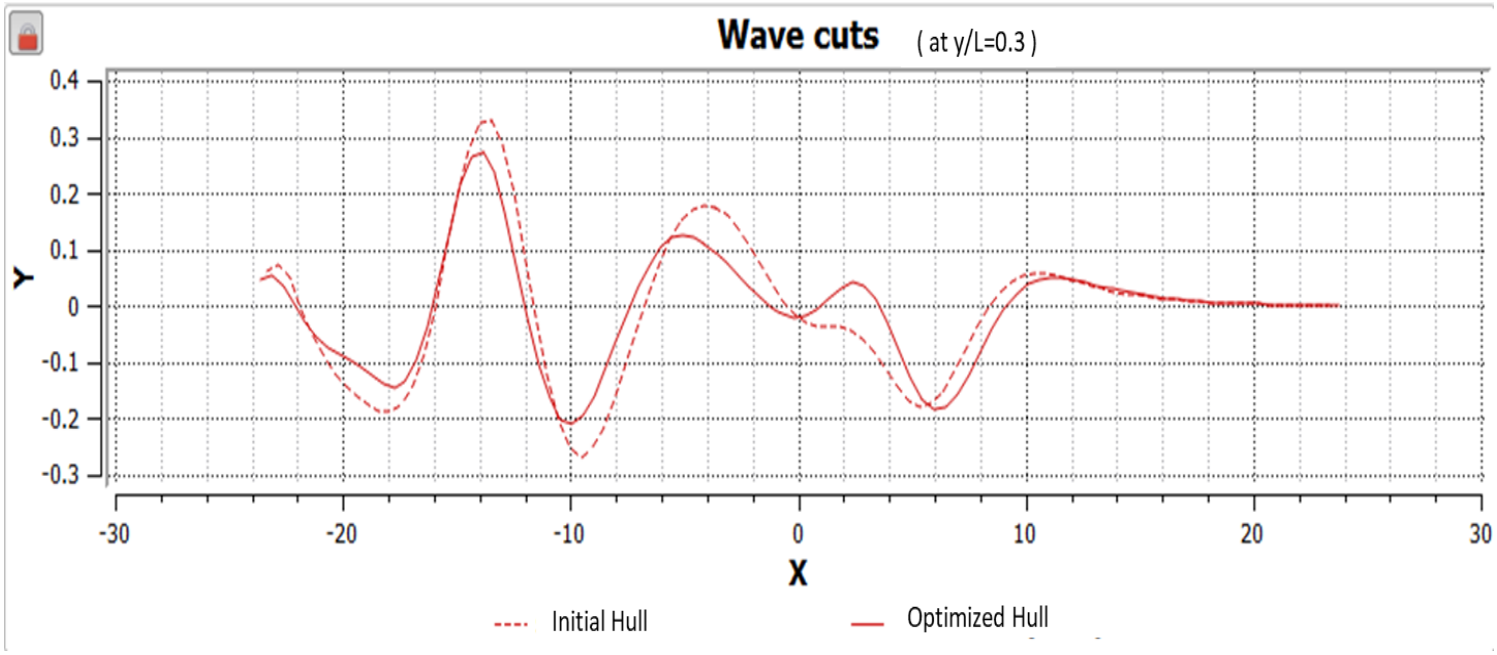
Διάγραμμα 6. 19: Διαμήκης τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση y/L=0.3 για την έβδομη προσομοίωση



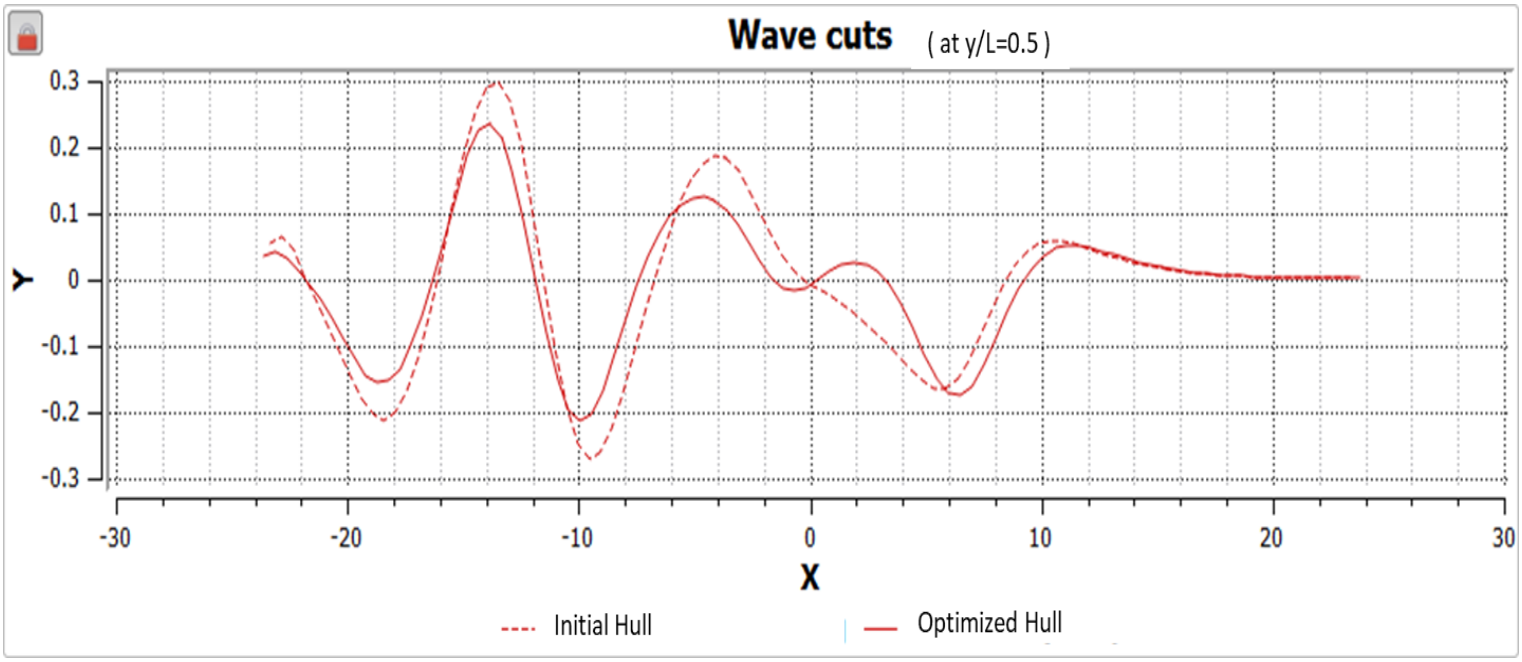
Διάγραμμα 6. 20: Διαμήκης τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση y/L=0.5 για την έβδομη προσομοίωση



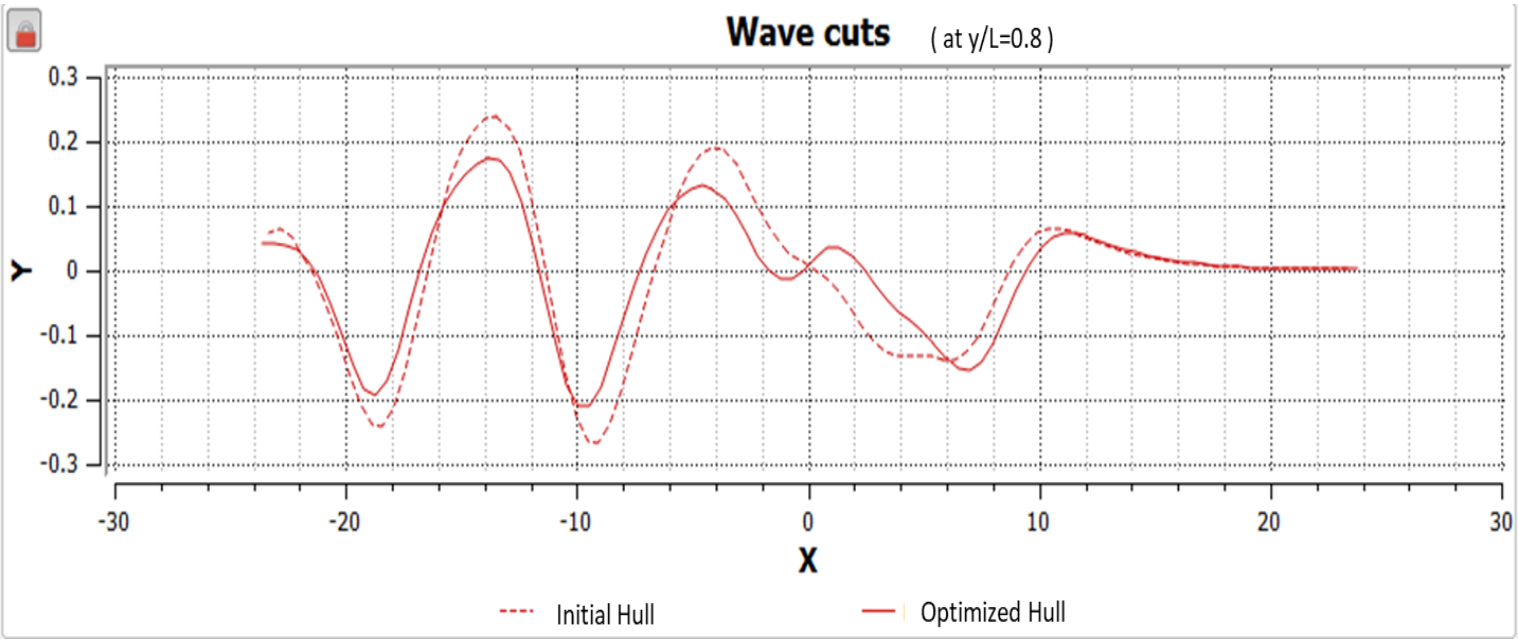
Διάγραμμα 6. 21: Διαμήκης τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση y/L=0.8 για την έβδομη προσομοίωση



Διάγραμμα 6. 22: Διαμήκης τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση y/L=0.3 για την όγδοη προσομοίωση



Διάγραμμα 6. 23: Διαμήκης τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση y/L=0.5 για την όγδοη προσομοίωση



Διάγραμμα 6. 24: Διαμήκης τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση y/L=0.8 για την όγδοη προσομοίωση

Ξεκινώντας την ανάλυση των παραπάνω διαγραμμάτων (6.19 & 6.23), αξίζει να επισημανθεί η επίδραση του μήκους της γάστρας, στην διαδικασία της βελτιστοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρούμε πως στην περιοχή από x=0 και πρύμνηθεν δεν υπάρχει κάποια αλλοίωση της μορφής του κύματος συγκρίνοντας τα διαγράμματα, αλλά μία μικρή μετατόπιση της κυματομορφής προς τα πίσω.

Εν συνεχεία, συγκρίνοντας την ολική εικόνα της βελτιστοποίησης για την συγκεκριμένη ταχύτητα, διαπιστώνουμε μεγάλες μεταβολές της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας της κυματομορφής στο τμήμα που βρίσκεται σχετικά κοντά στην γάστρα. Αντιθέτως στο τμήμα του κύματος που βρίσκεται μακριά από την γάστρα (πίσω από x=-20 m), δεν παρουσιάζεται μεγάλη απόκλιση των δύο κυματομορφών. Δηλαδή η απόσβεση του κύματος παρουσιάζει κοντινά ακρότατα με αυτά της αρχικής μορφής.

Επιπλέον στην βελτιστοποιημένη μορφή (διάγραμμα 6.23) γάστρας μπορούμε να διακρίνουμε την γέννηση ενός νέου κύματος στην περιοχή του μεσαίου και πρυμναίου τμήματός της (με x=0 έως x=5). Το κύμα αυτό φαίνεται να αλληλοεπιδρά με άλλα συστήματα με αποτέλεσμα αργότερα η συμβολή τους να μειώνει τελικά την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας.

Μια ακόμα σημαντική παρατήρηση προκύπτει από τα σχήματα (6.7 & 6.8) και αφορά την κατανομή της πίεσης πάνω στην επιφάνεια της γάστρας. Εύκολα διακρίνεται πως η χαμηλή πίεση (μπλε χρώμα) πάνω στην γάστρα κατανέμεται πιο ομοιόμορφα και σε μεγαλύτερη έκταση από εκείνη της αρχικής γεωμετρίας. Η αρχική μορφή γάστρας παρουσιάζει τις ελάχιστες τιμές της πίεσης στο πρυμναίο και εσωτερικό τμήμα της γάστρας.

Επίσης από τα ίδια σχήματα, καθίσταται εμφανές μια συρρίκνωση της περιοχής που απεικονίζει τις κορυφές της κυματομορφής καθώς επίσης και των υπόλοιπων περιοχών αλλά σε μικρότερο βαθμό. Ακόμη μια λιγότερο εμφανή διαφοροποίηση των δυο σχημάτων, είναι πως ο σχηματισμός Kelvin του κύματος της βελτιστοποιημένης γάστρας παρουσιάζει μικρότερο άνοιγμα. Αυτό οφείλεται στην πιο υδροδυναμική μορφή της γάστρας, που τείνει προς αυτήν της πτερυγοτομής, όπου η γεωμετρία του άκρου εκφυγής (πρύμνη) είναι πιο λεπτόγραμμη.

Για λόγους πληρότητας, ακολουθούν πίνακες που περιλαμβάνουν τις τελικές τιμές των μεταβλητών σχεδίασης μετά την διαδικασία βελτιστοποίησης.

Πίνακας 6. 5: Μεταβλητές σχεδίασης της έβδομης διαδικασίας βελτιστοποίησης

Μεταβλητή Σχεδίασης	Τελική τιμή
Ολικό μήκος [ft]	52
Πλάτος γάστρας [m]	2.02
Απόσταση μεταξύ γαστρών [m]	3.07
Βύθισμα [m]	1.43
Πλάτος του καθρέφτη [m]	0.51

Ύψος του καθρέφτη στο επίπεδο του πυθμένα της γάστρας [m]	1.49
Ύψος του καθρέφτη στην ίσαλο πλεύσης [m]	1.88
Γωνία πρόσπτωσης της ισάλου [deg]	18.5
Διαμήκης θέση του μέγιστου πλάτους της γάστρας [m]	5.17

Πίνακας 6. 6: Μεταβλητές σχεδίασης της όγδοης διαδικασίας βελτιστοποίησης

Μεταβλητή Σχεδίασης	Τελική τιμή
Ολικό μήκος [ft]	53
Πλάτος γάστρας [m]	1.94
Απόσταση μεταξύ γαστρών [m]	3.11
Βύθισμα [m]	1.44
Πλάτος του καθρέφτη [m]	0.49
Ύψος του καθρέφτη στο επίπεδο του πυθμένα της γάστρας [m]	1.46
Ύψος του καθρέφτη στην ίσαλο πλεύσης [m]	1.81
Γωνία πρόσπτωσης της ισάλου [deg]	17.8
Διαμήκης θέση του μέγιστου πλάτους της γάστρας [m]	5.19

Ακολουθεί πίνακας ο οποίος συμπεριλαμβάνει τα αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης της αντίστασης κυματισμού.

Πίνακας 6. 7: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για την ταχύτητα των 8 kn

Μέγεθος	Αρχική γεωμετρία	Βελτιστοποιημένη γεωμετρία (εκτός του μήκους)	Βελτιστοποιημένη γεωμετρία
Εκτόπισμα [t]	27.80	27.12	27.25
Ποσοστό μεταβολής εκτοπίσματος [%]	-	2.52	2.05
Αντίσταση κυματισμού [kN]	2.221	1.616	1.536
Ποσοστό μείωσης αντίστασης κυματισμού [%]	-	27.2	30.8

Υπό το πρίσμα της γεωμετρίας της γάστρας παρατηρούμε πως στην 8η διαδικασία βελτίωσης (συμπεριλαμβάνοντας και το μήκος) έχουμε μια μεταβολή των παραμέτρων που εν τέλη οδηγούν σε γάστρα με μεγαλύτερο εκτόπισμα. Αυτό καθίσταται εφικτό, αφού αυξάνοντας το

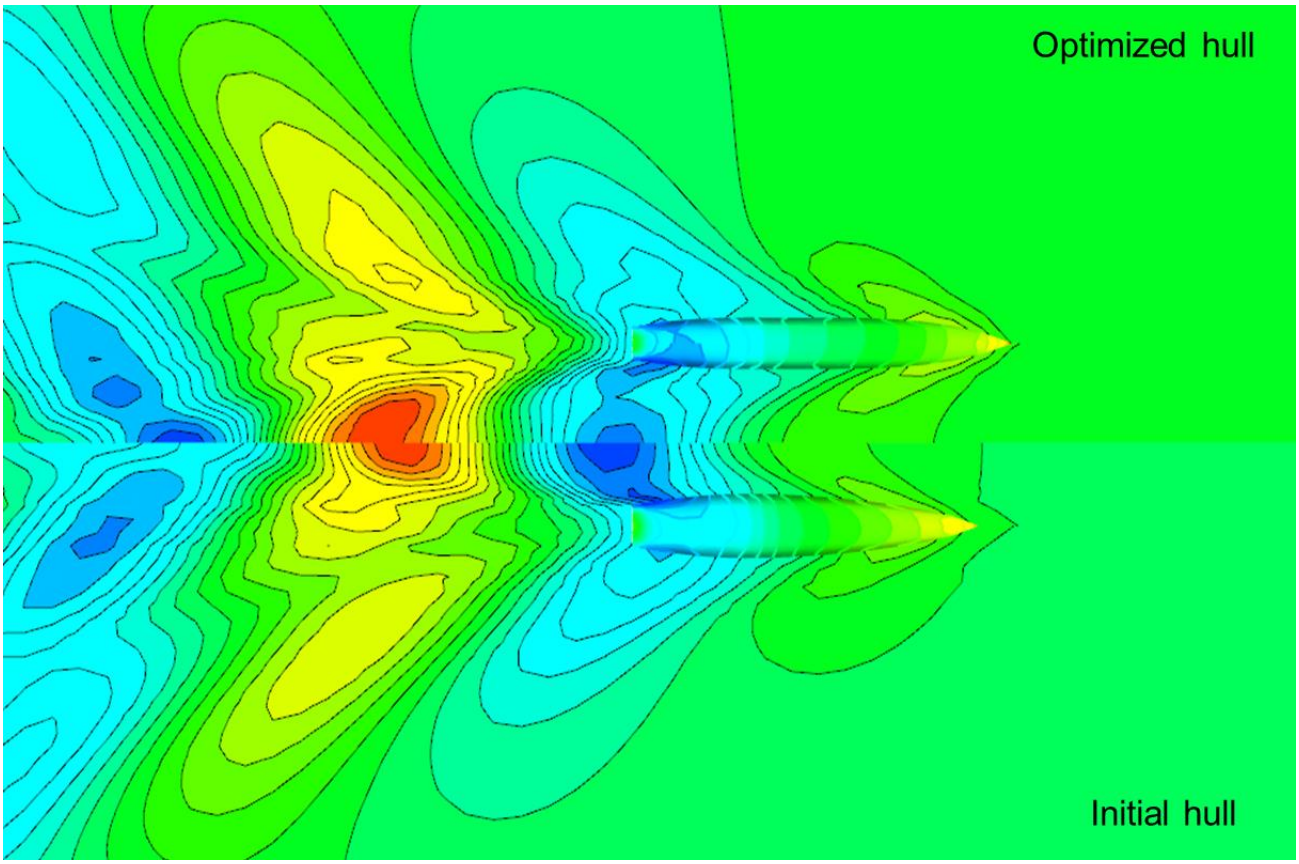
μήκος και το εκτόπισμα της γάστρας ταυτόχρονα, δεν οδηγούμαστε τελικά σε μεγάλες διαφοροποιήσεις στην μορφή της γεωμετρίας.

Βελτιστοποίηση στην ταχύτητα V=12 [kn]

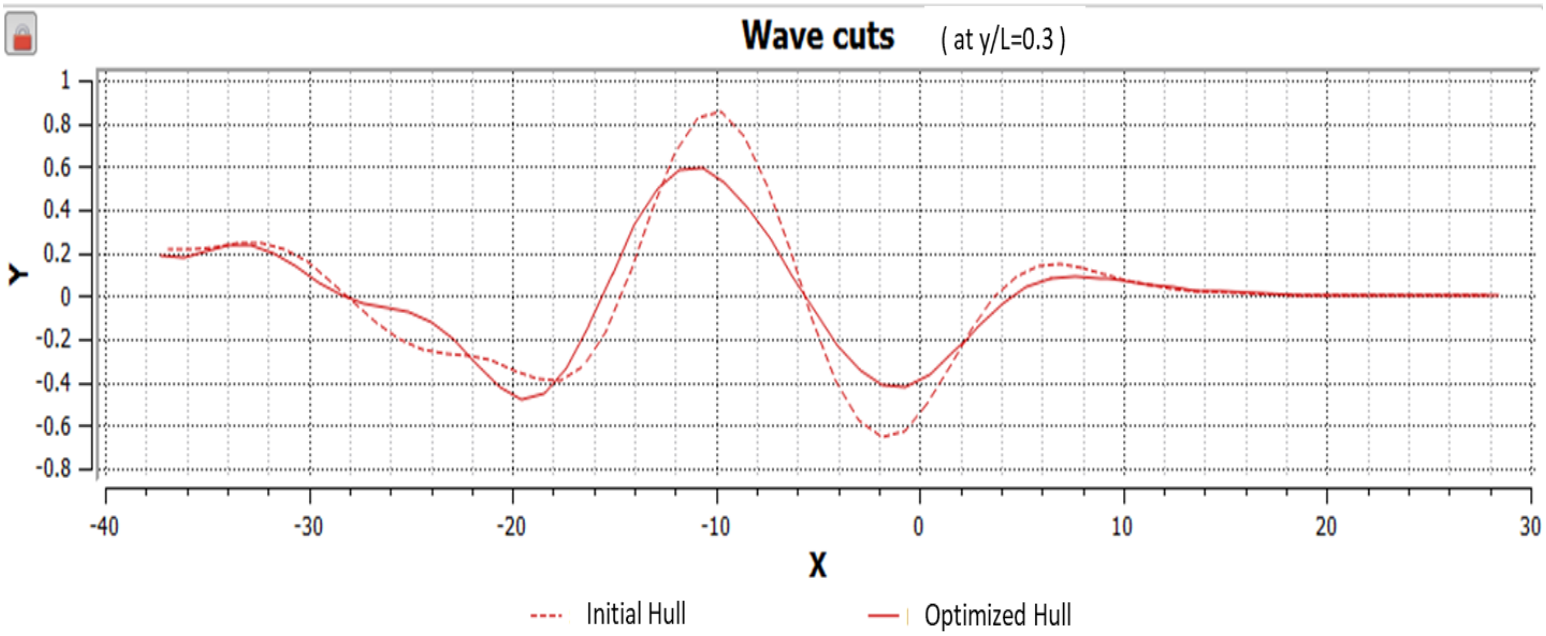
Στις διαδικασίες βελτιστοποίησης που ακολουθούν για την εύρεσης των μεταβλητών σχεδίασης, εξετάστηκαν 400 διαφορετικές μορφές γάστρας (generations=25 x population=16). Αριθμός αρκετός δεδομένου ότι έχουμε μικρό αριθμό παραμέτρων και μια αντικειμενική συνάρτηση.

Πρόκειται για την ταχύτητα πλεύσης του σκάφος, που επιτυγχάνεται με συνδυασμό των κύριων μηχανών και των ιστίων. Κατά την πλεύση αυτή, οι κύριες μηχανές συντελούν στην διατήρηση της ταχύτητας σε μια τιμή, ενώ τα πανιά είναι εκείνα που θα δώσουν την παραπάνω ώση ώστε το σκάφος να αναπτύξει την επιθυμητή ταχύτητα.

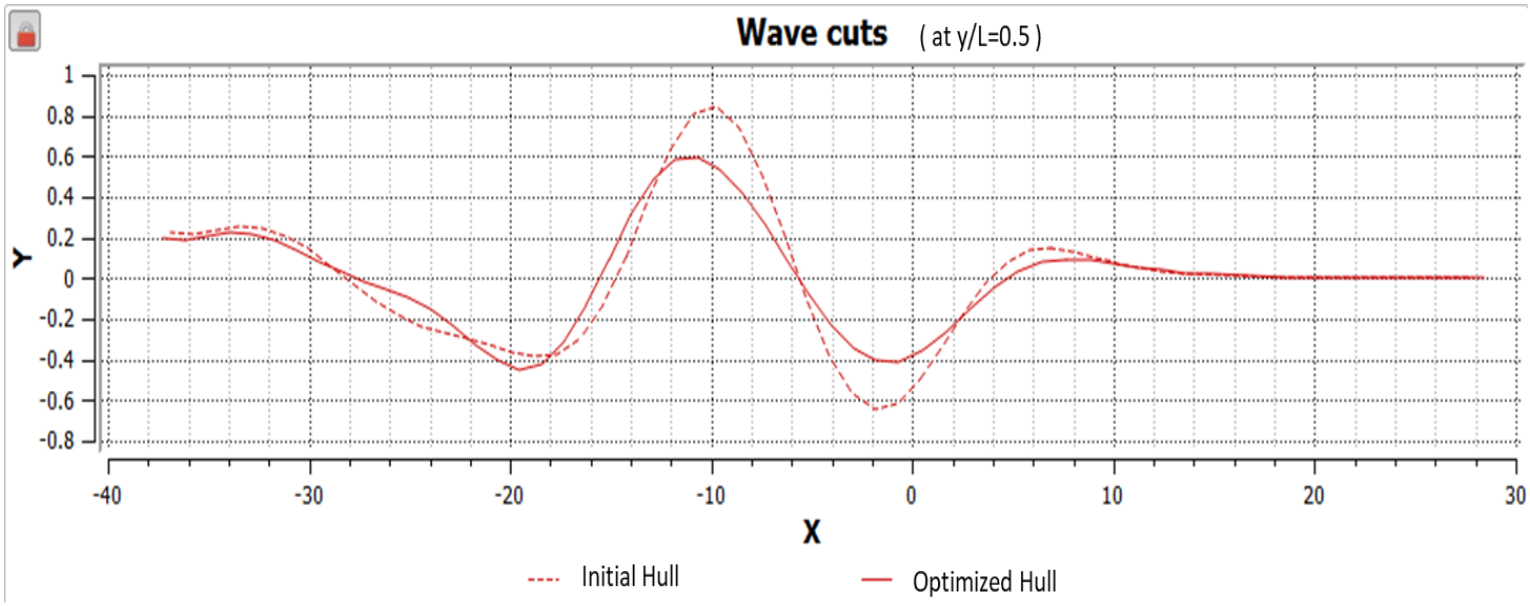
Παρακάτω, παρουσιάζονται τα σχετικά διαγράμματα και πίνακες από τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης της αντίστασης κυματισμού για την συγκεκριμένη ταχύτητα.



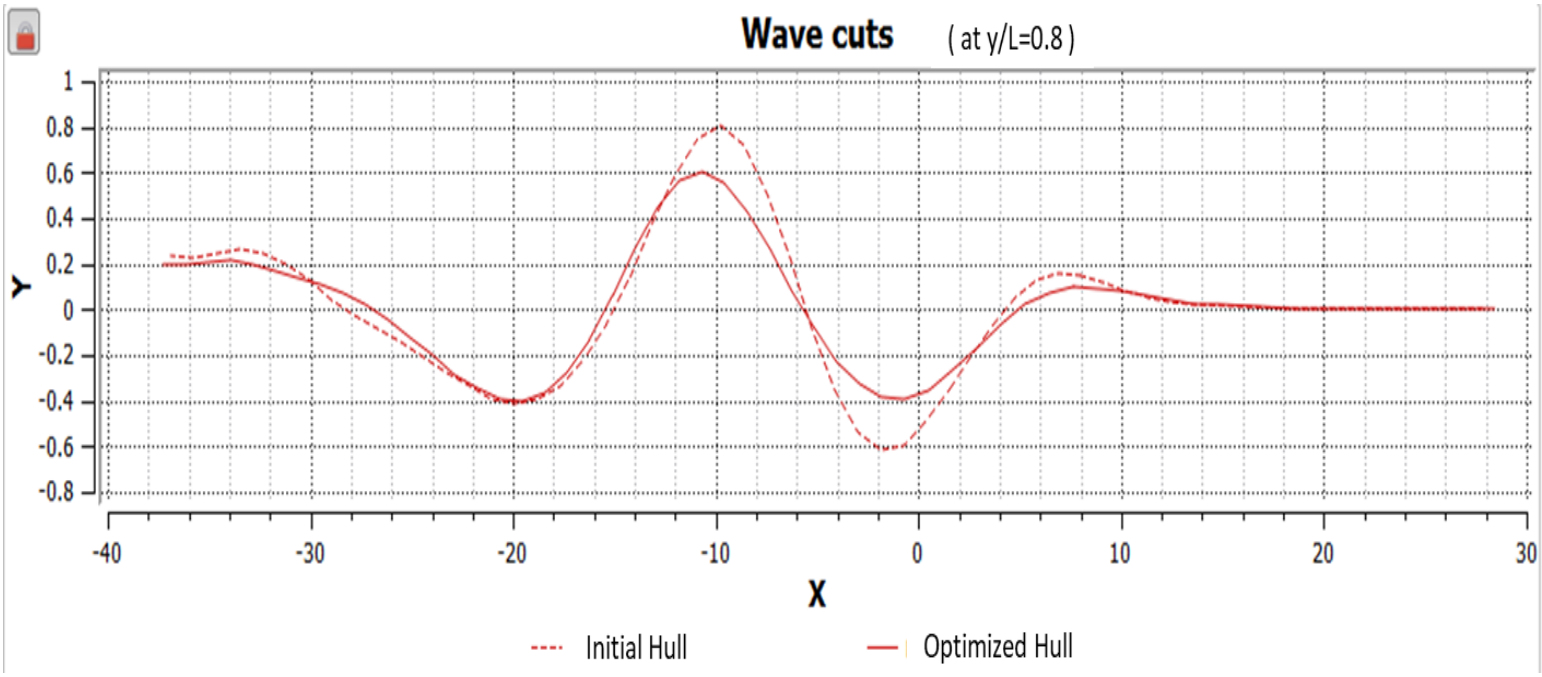
Σχήμα 6. 9: Πεδίο παραγόμενων κυματισμών αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας από την ένατη διαδικασία βελτιστοποίησης



Διάγραμμα 6. 25: Διαμήκης τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση y/L=0.3 για την ένατη προσομοίωση



Διάγραμμα 6. 26: Διαμήκης τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση y/L=0.5 για την ένατη προσομοίωση



Διάγραμμα 6. 27: Διαμήκης τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση y/L=0.8 για την ένατη προσομοίωση

Στην συγκεκριμένη ταχύτητα η διαφοροποίηση της κυματομορφής είναι πιο εμφανής, παρατηρώντας το σχήμα 6.6. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζεται μεγάλη μείωση της συμβολής των κυμάτων ανάμεσα στις δύο γάστρες (μέσο του σκάφους) στην περιοχή της πρύμνης.

Επιπροσθέτως, συγκρίνοντας την ολική εικόνα της βελτιστοποίησης όμοια με την χαμηλή ταχύτητα, διαπιστώνουμε μεγάλες μεταβολές της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας της κυματομορφής στο τμήμα που βρίσκεται σχετικά κοντά στην γάστρα. Αντιθέτως στο τμήμα του κύματος που βρίσκεται μακριά από την γάστρα (πίσω από x=-20 m), δεν παρουσιάζεται μεγάλη απόκλιση των δύο κυματομορφών. Δηλαδή η απόσβεση του κύματος τείνει με αυτή της αρχικής μορφής.

Για λόγους πληρότητας, ακολουθούν πίνακες που περιλαμβάνουν τις τελικές τιμές των μεταβλητών σχεδίασης μετά την διαδικασία βελτιστοποίησης.

Πίνακας 6. 8: Μεταβλητές σχεδίασης της ένατη διαδικασίας βελτιστοποίησης

Μεταβλητή Σχεδίασης	Τελική τιμή
Ολικό μήκος [ft]	53
Πλάτος γάστρας [m]	1.3
Απόσταση μεταξύ γαστρών [m]	3.85
Βύθισμα [m]	1.429
Πλάτος του καθρέφτη [m]	0.32
Ύψος του καθρέφτη στο επίπεδο του πυθμένα της γάστρας [m]	1.37

Ύψος του καθρέφτη στην ίσαλο πλεύσης [m]	1.823
Γωνία πρόσπτωσης της ισάλου [deg]	19
Διαμήκης θέση του μέγιστου πλάτους της γάστρας [m]	4.70

Ακολουθεί πίνακας ο οποίος συμπεριλαμβάνει τα αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης της αντίστασης κυματισμού.

Πίνακας 6. 9: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για την ταχύτητα των 12 kn

Μέγεθος	Αρχική γεωμετρία	Βελτιστοποιημένη γεωμετρία
Εκτόπισμα [t]	27.80	26.98
Ποσοστό μεταβολής εκτοπίσματος [%]	-	2.99
Αντίσταση κυματισμού [kN]	14.822	9.843
Ποσοστό μείωσης αντίστασης κυματισμού [%]	-	33.6

Υπό το πρίσμα της γεωμετρίας της γάστρας παρατηρούμε πως στη συγκεκριμένη διαδικασία έχουμε μια μεταβολή των παραμέτρων που εν τέλη οδηγούν σε γάστρα με μικρότερο εκτόπισμα από αυτό της πέμπτης προσομοίωσης στην χαμηλή ταχύτητα. Αυτό οφείλεται κυρίως στην διαφοροποίηση της τιμής του βυθίσματος.

Σύνοψη και Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία έγινε μελέτη αντίστασης κυματισμού ενός δίγαστρου ιστιοπλοϊκού σκάφους σε ήρεμο νερό. Σκοπός της υδροδυναμικής μελέτης αποτέλεσε η προσπάθεια ελαχιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης της αντίστασης κυματισμού. Η συνάρτηση αυτή προέρχεται από τον τύπο του συντελεστή αντίστασης κυματισμού που αναφέρεται στο 3^{ο} κεφάλαιο.

Αρχικά σχεδιάστηκε παραμετρικά η αρχική γάστρα ώστε ένας αριθμός μεταβλητών σχεδίασης, που επιδρούν στο μέγιστο δυνατό βαθμό την γεωμετρία της, να επηρεάζουν άμεσα την υδροδυναμική της επίδοση. Κατά την επιλογή των μεταβλητών αυτών έγιναν ορισμένες απλοποιήσεις, δεδομένης της πολυπλοκότητας του συστήματος, μέσω της αποσύζευξης της επίδρασης των παρελκόμενων. Η παραμετρική σχεδίαση υλοποιήθηκε στο λογισμικό CAESES-Friendship Framework, χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό των σχεδιαστικών εργαλείων του που αναφέρθηκαν στο σχετικό κεφάλαιο. Από την τυχαία διακύμανση των μεταβλητών σχεδίασης μέσω του αλγόριθμου NSGA2 προκύπτουν διαφορετικές μορφές γάστρας προκειμένου να αναζητηθεί η μορφή εκείνη που θα παρουσιάσει την ελάχιστη αντίσταση κυματισμού.

Για τις ανάγκες της βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα SHIPFLOW για την εκτίμηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς των γεωμετριών και πιο συγκεκριμένα της

αντίστασης κυματισμού σε ήρεμο νερό. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε δύο φορές με διαφορετική ταχύτητα πλεύσης, μία στους 8 και μια στους 12 κόμβους.

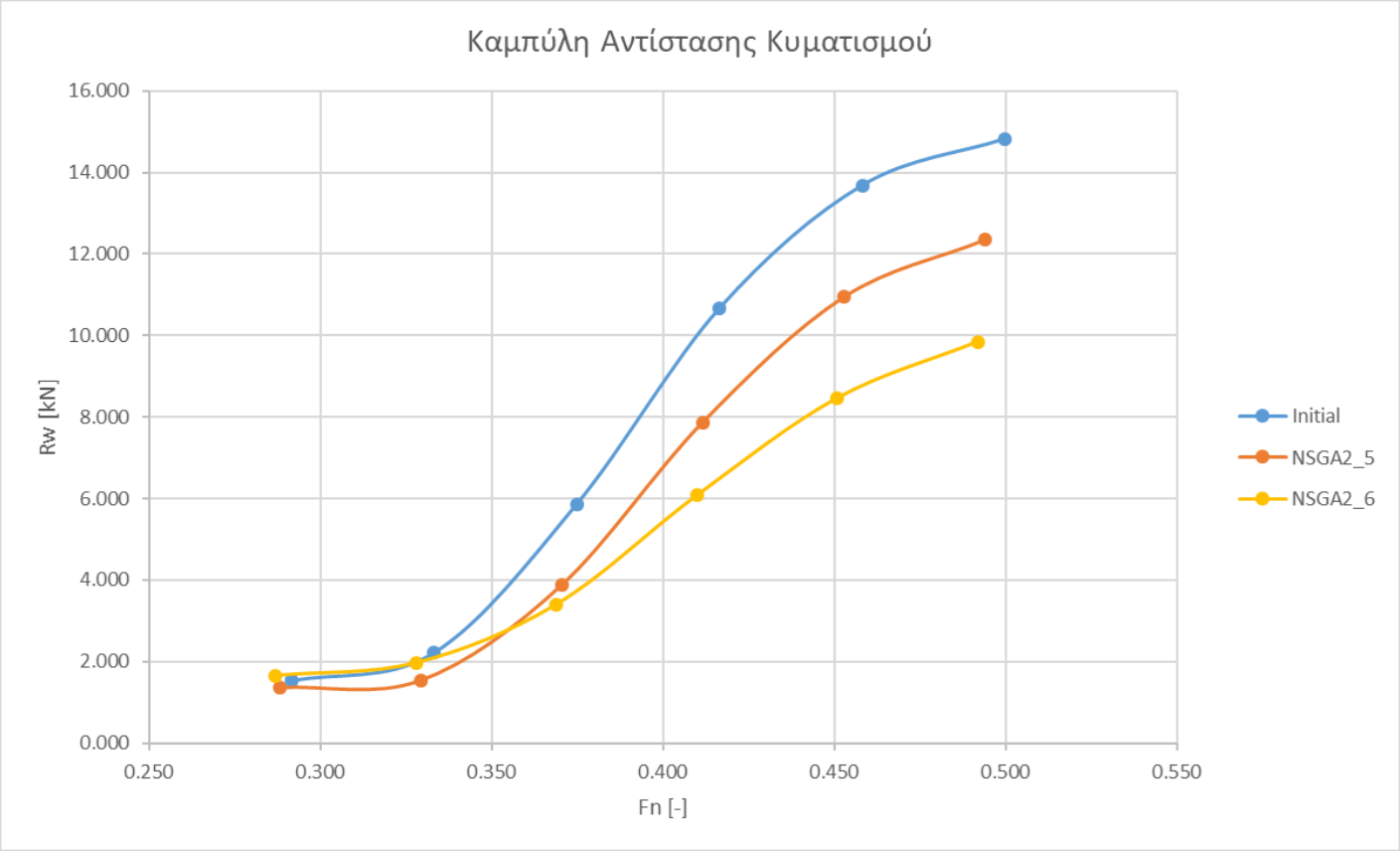
Από τις δύο διαδικασίες βελτιστοποίησης, για κάθε μια ταχύτητα, επιλέχθηκε μια μορφή γάστρας με καλύτερα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά σε σχέση με την αρχική γεωμετρία. Για την πρώτη ταχύτητα, η γεωμετρία αυτή είχε 30.8% μικρότερη αντίσταση κυματισμού και 2.05% μικρότερο εκτόπισμα, ενώ για την δεύτερη ταχύτητα προέκυψε γεωμετρία με 33.6% μικρότερη αντίσταση κυματισμού και 2.99% μικρότερο εκτόπισμα συγκρίνοντας πάντα με την πατρική γάστρα.

Προς σύγκριση των δυο βελτιστοποιημένων γαστρών που προέκυψαν από τις διαφορετικές ταχύτητες πλεύσης, εκτελέστηκαν προσομοιώσεις στο λογισμικό SHIPFLOW για ένα εύρος ταχυτήτων από 7-12kn. Από αυτές προέκυψε η χαρακτηριστική καμπύλη αντίστασης κυματισμού για κάθε μοντέλο ως συνάρτηση του αδιάστατου αριθμού Froude. Επισημαίνεται πως για κάποια δεδομένη ταχύτητα ο αριθμός Fn θα διαφέρει ανάμεσα στις γάστρες που εξετάζουμε διότι έχουμε μικρές διαφοροποιήσεις στο μήκος της ισάλου που λαμβάνεται στον υπολογισμό τους αδιάστατου αριθμού. Ακολουθεί το διάγραμμα της αντίστασης κυματισμού των δυο βελτιστοποιημένων γαστρών (NSGA2_8 = 8kn & NSGA2_9 = 12kn) καθώς και της αρχικής γεωμετρίας.

Για λόγους πληρότητας, ακολουθούν πίνακες που περιλαμβάνουν τις τιμές του γραφήματος.

Πίνακας 6. 10: Τιμές αντίστασης κυματισμού αρχικής γάστρας και βελτιστοποιημένων γεωμετριών

Καμπύλη Αντίστασης Κυματισμού							
	V [kn]	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
	Fn	0.292	0.333	0.375	0.417	0.458	0.500
Rw [kN]	**Initial**	1.530	2.221	5.870	10.673	13.684	14.822
	Fn	0.288	0.329	0.370	0.412	0.453	0.494
	NSGA2_5	1.364	1.536	3.874	7.867	10.941	12.345
	Fn	0.287	0.328	0.369	0.410	0.451	0.492
	NSGA2_6	1.663	1.977	3.408	6.079	8.464	9.843



Διάγραμμα 6. 28: Σύγκριση της αντίστασης κυματισμού αρχικής γάστρας και βελτιστοποιημένων γεωμετριών

Καταλήγοντας, σύμφωνα με όλα τα παραπάνω αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν, μπορούμε να συνοψίσουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Για την χαμηλή ταχύτητα, οι παράμετροι που επιδρούν περισσότερο στην μείωση της αντίστασης κυματισμού είναι εκείνοι που σχετίζονται με την διαμήκη κατανομή του εκτοπίσματος, δηλαδή το LCB. Στη συγκεκριμένη παραμετρική μοντελοποίηση αναφερόμαστε στα μεγέθη: α) διαμήκης θέση του μέγιστου πλάτους της γάστρας στην ίσαλο πλεύσης και β) από την γωνία πρόσπτωσης (εφαπτομένης) της καμπύλης της ισάλου πλεύσης. Τα αποτελέσματα σε αυτήν την ταχύτητα έδειξαν πως η βέλτιστη λύση παρουσιάζεται μετατοπίζοντας την τιμή του μέγιστου πλάτους αρκετά πιο μπροστά από την πατρική γάστρα καθώς και αυξάνοντας την πληρότητα του πρωραίου τμήματος μέσω της δεύτερης παραμέτρου. Με τον τρόπο αυτό βρίσκεται η βέλτιστη τιμή της διαγωγής, η οποία στην ταχύτητα αυτή (περιοχή του hump) είναι σημαντική.
2. Αντίθετα στην δεύτερη ταχύτητα το LCB δεν αποτελεί την κύρια παράμετρο. Καθώς αυξάνεται η ταχύτητα, είναι γνωστό πως η διαγωγή μετά από μια τιμή αρχίζει να μειώνεται. Το γεγονός αυτό οδήγησε την βέλτιστη τιμή της διαμήκους απόστασης του μέγιστου πλάτους για την ταχύτητα των 12 kn, σε χαμηλότερη τιμή από την πρώτη

βελτιστοποίηση αλλά και πάλι μεγαλύτερη από εκείνη της αρχικής σχεδίασης. Σημειώνεται πως και σε αυτήν την περίπτωση η γωνία πρόσπτωσης λαμβάνει τιμή που οδηγεί σε μια πιο ογκώδης πλώρη.

3. Η παράμετρος της απόστασης μεταξύ των γαστρών δεν συνεισφέρει στην μείωση της αντίστασης κυματισμού για την ταχύτητα των 8 kn. Αντιθέτως για την υψηλή ταχύτητα παρατηρούμε ότι η απόσταση αυτή τείνει να μεγαλώσει, αυξάνοντας έτσι τον χρόνο που χρειάζονται τα κύματα από της δύο γάστρες να συναντηθούν. Έτσι η συμβολή των κυμάτων πραγματοποιείται λίγο πιο πίσω σε σχέση με το πατρικό σκάφος. Επιλέγοντας όμως μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των γαστρών θα πρέπει να γίνεται μια εκτενέστερη μελέτη αντοχής των σύνθετων υλικών της γάστρας διότι θα προκύψουν μεγαλύτερες ροπές.
4. Ως αναφορά την παράμετρο του ύψους του καθρέφτη στο επίπεδο του πυθμένα της γάστρας, η τιμή του διατηρείται σχεδόν σταθερή για την χαμηλή ταχύτητα. Όμως για την ταχύτητα των 12 kn η τιμή που οδηγεί στη βελτιστοποιημένη γάστρα είναι αρκετά μικρότερη. Δηλαδή το βύθισμα της πρύμνης αυξάνεται. Με τον τρόπο αυτό σε αυξημένους αριθμούς Fn, έχουμε πιο αποτελεσματική αποκόλληση της ροής στον καθρέφτη. Επίσης παρατηρώντας την κατανομή τις πίεσης στο πρυμναίο τμήμα της γάστρας, διακρίνουμε την μείωσή της καθώς και μια ομαλότερη – ευρεία κατανομή της πίεσης. Γεγονός που οφείλεται στην μείωση της καμπυλότητας των γραμμών της γάστρας ανάμεσα στο μεσαίο και πρυμναίο τμήμα της.
5. Σχετικά με το πλάτος του καθρέφτη παρατηρείται γενικά μια μείωσή του και στις δυο ταχύτητες, καταλήγοντας σε γάστρες με γραμμές ροής που κλείνουν προς την πρύμνη. Η συγκεκριμένη μορφή επιδρά στα κύματα που παράγονται στην πρύμνη μειώνοντας την έκτασή τους και το πλάτος τους.
6. Οι αυξημένες γωνίες πρόσπτωσης που έχουμε και στις δυο διαδικασίες βελτιστοποίησης μπορεί να δικαιολογηθεί αντιστοιχώντας την με την επίδραση μιας βολβοειδή πλώρης. Παρατηρούμε πως το κύμα της πλώρης και στις δύο ταχύτητες είναι πιο μεγάλο το οποίο αργότερα εξουδετερώνεται με άλλο σύστημα κυματισμού. Στην πρώτη ταχύτητα το κύμα αλληλοεπιδρά με άλλα πιο απομακρυσμένα συστήματα κύματος, ενώ στην δεύτερη ταχύτητα το κύμα της πλώρης εξουδετερώνεται γρηγορότερα κοντά στην πρυμναία περιοχή ανάμεσα στις γάστρες.

Είναι πλέον ολοφάνερο πως η ταχύτητα πλεύσης του ιστιοπλοϊκού δίγαστρου σκάφους, θα μπορούσε να πει κανείς ότι αποτελεί την πιο σημαντική παράμετρος που πρέπει να ληφθεί

υπόψιν. Επομένως η επιλογή των μεταβλητών σχεδίασης ενός τέτοιου σκάφους θα μπορούσε να αφεθεί στην κρίση του πλοιοκτήτη, ανάλογα με την χρήση που προορίζεται το σκάφος.

Τα περισσότερα σκάφη αυτής της κατηγορίας προορίζονται για ενοικιαζόμενα σκάφη αναψυχής και δεδομένου ότι οι περισσότεροι ενοικιαστές δεν γνωρίζουν την τέχνη της ιστιοπλοΐας ή δεν θέλουν να φέρουν το σκάφος σε ακραίες καταστάσεις, το μεγαλύτερο ποσοστό που θα ταξιδεύουν θα είναι στην χαμηλή ταχύτητα.

Από μια άλλη σκοπιά, εάν το σκάφος προορίζεται για ιδιωτική χρήση, όπου ο πλοιοκτήτης είναι διατεθειμένος να ρισκάρει τον εξοπλισμό του λίγο παραπάνω, τότε θα μπορούσε να επιλεγεί η βελτιστοποιημένη γάστρα της ταχύτητας των 12 kn. Η απόφαση αυτή όμως θα πρέπει να γίνει με προσοχή διότι μπορεί ο τόπος προορισμού λειτουργίας του σκάφους να μην έχει ευνοϊκούς ανέμους, το οποίο μπορεί πλέον να ελεγχθεί από τα διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία.

Είναι προφανές πως δεν αναφερόμαστε σε σκάφη μαζικής παραγωγής διότι αυτό δεν θα συνέφερε οικονομικά το ναυπηγείο. Σε περίπτωση που υπήρχε η δυνατότητα ο πλοιοκτήτης να επιλέγει τις μεταβλητές σχεδίασης, αυτό θα σήμαινε πως το ναυπηγείο θα έπρεπε να κατασκευάζει ξεχωριστό καλούπι για κάθε σκάφος.

Παράρτημα

Ανάλυση Βαρών του πατρικού σκάφους

Στην παρούσα εργασία, η ανάλυση βαρών εκπονήθηκε με σκοπό την εύρεση του βυθίσματος σχεδίασης του σκάφους. Αυτό επιτεύχθηκε δοκιμάζοντας τιμές βυθίσματος έως ότου το εκτόπισμα του μοντέλου που σχεδιάστηκε να προκύψει πολύ κοντά στην τιμή του εκτοπίσματος που παρουσιάζεται παρακάτω σύμφωνα με τα σχετικά ISO.

Πίνακας 7. 1: Βάρος άφορτου σκάφους κατά ISO 12217 & ISO 866

Light Displacement ISO 12217 & ISO 866		
Component	Value	Unit
Structural elements	14.72	[t]
Hull	11.72	[t]
Keel	3.00	[t]
Interior layout		
Isolating	1400.00	[kg]
Furniture	4200.00	[kg]
comfort equipment		
mattresses	120	[kg]
cushions	84	[kg]
cockpit table	200	[kg]
Engines		
2 main engines	450	[kg]
1 generator	404	[kg]
1 watermaker	100	[kg]
Batteries	240	[kg]
Electronics	100	[kg]
Deck equipment		
gangway+ladder	175	[kg]
winches	74	[kg]
anchor's chain and anchors	303.5	[kg]
mast		[kg]
boom	440	[kg]
sails	320	[kg]
sheets	4.75	[kg]
halyalds	63.7	[kg]
SUMMARY	**8.68**	**[t]**
Dry Weight	**23.4**	**[t]**

Πίνακας 7. 2: Ολικό – Μέγιστο βάρος του σκάφους κατά ISO 14946

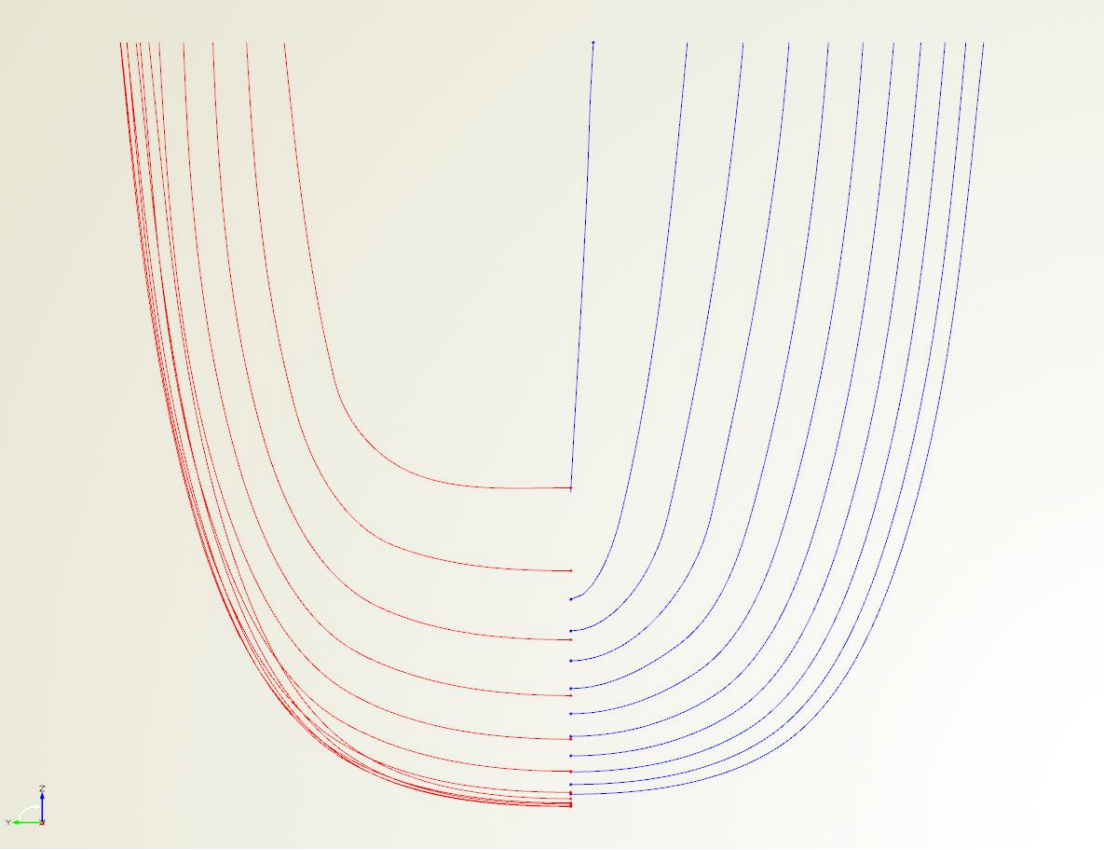
Maximum Displacement ISO 14946		
Component	Value	Unit
Max persons	900	[kg]
Extra equipment	600	[kg]
Personal equipment	360	[kg]
Provisioning	200	[kg]
Tanks full		
fuel	850	[kg]
water	1000	[kg]
grey - waste	359	[kg]
Liferaft	150	[kg]
SUMMARY	4.42	[t]
Max Weight	**27.819**	**[t]**
Volume	**27.14**	**[m^3]**

Μεταβλητές σχεδίασης αρχικής γεωμετρίας

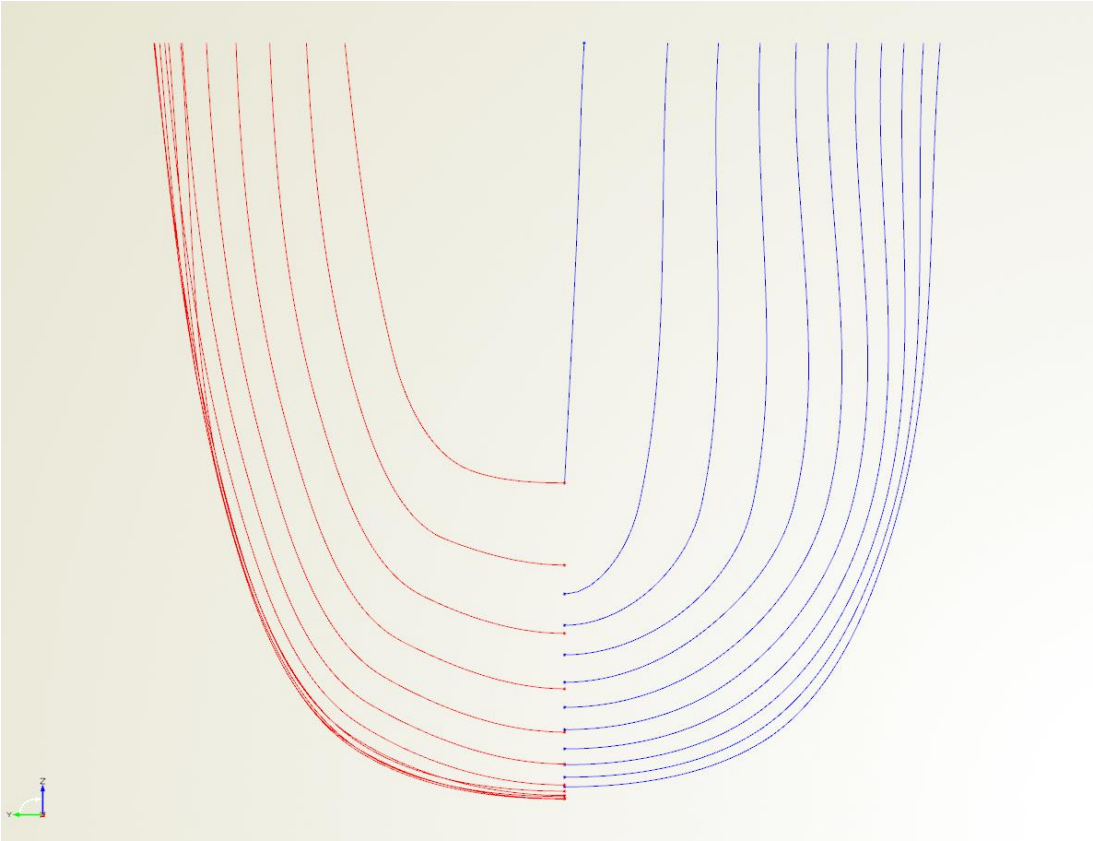
Πίνακας 7. 3: Μεταβλητές σχεδίασης αρχικής γεωμετρίας

Μεταβλητή Σχεδίασης	Πατρική γάστρα
Ολικό μήκος [ft]	52
Πλάτος γάστρας [m]	4.1168
Απόσταση μεταξύ γαστρών [m]	3.006
Βύθισμα [m]	1.41
Συντελεστής που αφορά το πλάτος του καθρέφτη [m]	0.8988
Ύψος του καθρέφτη στο επίπεδο του πυθμένα της γάστρας [m]	1.489
Ύψος του καθρέφτη στην ίσαλο πλεύσης [m]	1.8
Γωνία πρόσπτωσης της ισάλου [deg]	348
Διαμήκης θέση του μέγιστου πλάτους της γάστρας [m]	4.52

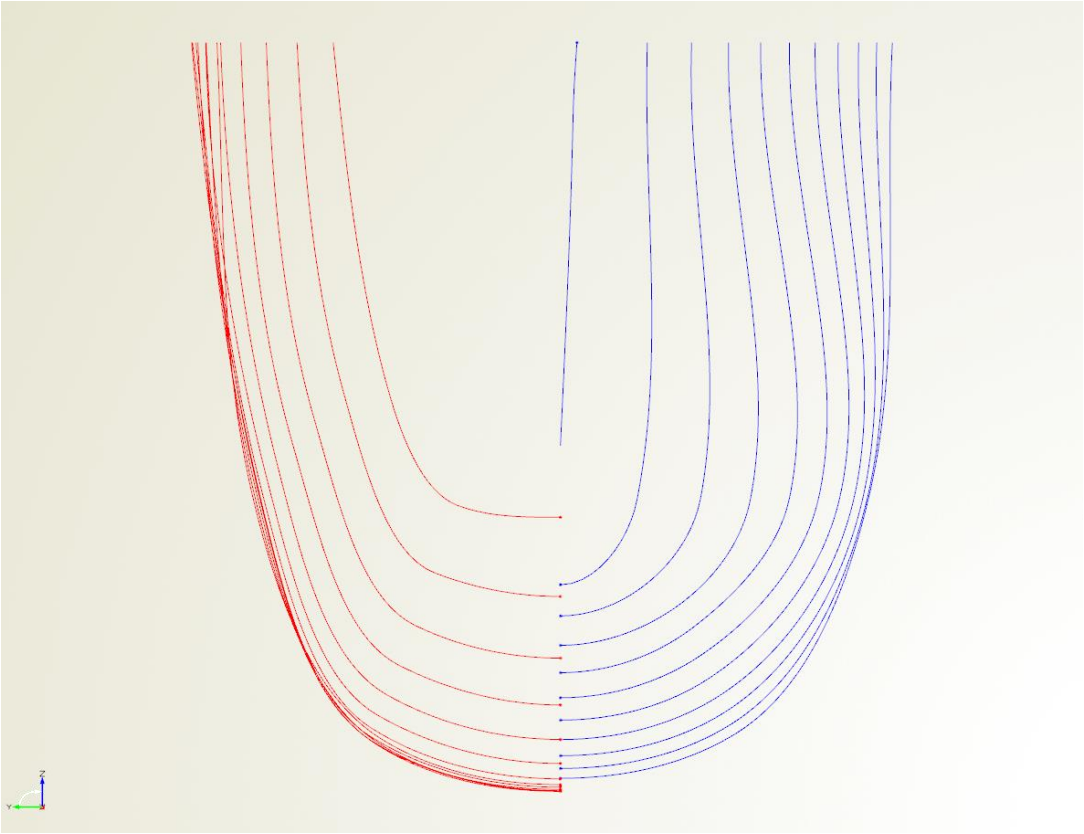
Νομείς αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας



Σχήμα 7. 1: Μορφή των νομέων αρχικής γεωμετρίας



Σχήμα 7. 2: Μορφή νομέων βελτιστοποιημένης γεωμετρίας στην ταχύτητα των 8 kn



Σχήμα 7. 3: Μορφή νομέων βελτιστοποιημένης γεωμετρίας στην ταχύτητα των 12 kn

Κώδικας του Shipflow

```
xflow
   title( title = "SailingCat" )
   program( xmesh, xpan )
   vship( vm_s = 4.1155552 )
   hull( cata )
   offset( file = |Projectone|shipflow|offsets|cathull.exportSHF("cathull"),
   lpp = 15.54871383, zori = 1.41, ztemp = 0.12 )
end

xmesh
   body( grno = 1, twoint, offsetg = "OffsetGroup", ytra = 0, station = 35,
   point = 8, expanel = 2, str2 = 5, df2 = 0.02, dl2 = 0.02 )
   body( grno = 2, twoint, offsetg = "Offsetgroup", ytra = 6.0122, ymir,
   station = 35, point = 8, expanel = 2, str2 = 5, df2 = 0.02, dl2 = 0.02 )
   free( grno = 3, point = 10, ibd4 = [2], y2side = 0, xups = -0.5,
   xdow = 2.5, stau = 17, stam = 32, stad = 47 )
   free( grno = 4, point = 25, str1 = 2, df1 = 0.016, ibd2 = [1], y4side = -1,
   xups = -0.5, xdow = 2.5, stau = 17, stam = 32, stad = 47 )
   transom( grno = 5, point = 4, ibd1 = [1,2], stad = 47 )
end

xpan
   control( free, linear )
   iterati( maxit = 20 )
   parall( nthread = 6 )
end
```

Λίστα σχημάτων

Σχημα 1. 1: Ορισμος μηκων γαστρας και βυθισματος. 7
Σχημα 1. 2: Ορισμος ισαλου διγαστρου σκαφους 8
Σχημα 1. 3: Ορισμος πλατων του διγαστρου σκαφους 10

Σχημα 2. 1: Αναπαρασταση παραμετρικης ισαλου με τις βοηθητικες καμπυλες f-spline 14
Σχημα 2. 2: Καμπυλες του προφιλ, παραμετρικης ισαλου, δευτερευουσας ισαλου και του καταστρωματος 15
Σχημα 2. 3: Βασικες καμπυλες παραμετρικου μοντελου 15

Σχημα 3. 1: Κυριες συνιστωσες αντιστασης 18
Σχημα 3. 2: Αλληλεπιδραση συστηματων κυματισμων 20
Σχημα 3. 3: Συστηματα κυματισμων γαστρας 23
Σχημα 3. 4: Αλληλεπιδραση εγκαρσιων και αποκλινοντων κυματισμων 23
Σχημα 3. 5: Μεθοδοι υπολογισμων του Shipflow 24
Σχημα 3. 6: Ορισμοι μεγεθων πλεγματος του Shipflow 28
Σχημα 3. 7: Ζωνες πλεγματος 29

Σχημα 4. 1: Συστημα βελτιστοποιησης 33
Σχημα 4. 2: Παραγομενες λυσεις στο επιπεδο των αντικειμενικων συναρτησεων 36
Σχημα 4. 3: Διαδικασια παραγωγης νεας γενιας στον αλγοριθμο NSGA-II 38

Σχημα 5. 1: Κατανομη πιεσης και παραγωγη κυματισμου αναλογα με τον αριθμο Fn 45

Σχημα 6. 1: Πεδιο παραγομενων κυματισμων αρχικης και βελτιστοποιημενης γεωμετριας απο την πρωτη διαδικασια βελτιστοποιησης 51
Σχημα 6. 2: Πεδιο παραγομενων κυματισμων αρχικης και βελτιστοποιημενης γεωμετριας απο την δευτερη διαδικασια βελτιστοποιησης 51
Σχημα 6. 3: Πεδιο παραγομενων κυματισμων αρχικης και βελτιστοποιημενης γεωμετριας απο την τριτη διαδικασια βελτιστοποιησης 52
Σχημα 6. 4: Πεδιο παραγομενων κυματισμων αρχικης και βελτιστοποιημενης γεωμετριας απο την τεταρτη διαδικασια βελτιστοποιησης 59
Σχημα 6. 5: Πεδιο παραγομενων κυματισμων αρχικης και βελτιστοποιημενης γεωμετριας απο την πεμπτη διαδικασια βελτιστοποιησης 59
Σχημα 6. 6: Πεδιο παραγομενων κυματισμων αρχικης και βελτιστοποιημενης γεωμετριας απο την εκτη διαδικασια βελτιστοποιησης 60
Σχημα 6. 7: Πεδιο παραγομενων κυματισμων αρχικης και βελτιστοποιημενης γεωμετριας απο την εβδομη διαδικασια βελτιστοποιησης 67
Σχημα 6. 8: Πεδιο παραγομενων κυματισμων αρχικης και βελτιστοποιημενης γεωμετριας απο την ογδοη διαδικασια βελτιστοποιησης 67
Σχημα 6. 9: Πεδιο παραγομενων κυματισμων αρχικης και βελτιστοποιημενης γεωμετριας απο την ενατη διαδικασια βελτιστοποιησης 73

ΣΧΗΜΑ 7. 1: ΜΟΡΦΗ ΤΩΝ ΝΟΜΕΩΝ ΑΡΧΙΚΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ 83
ΣΧΗΜΑ 7. 2: ΜΟΡΦΗ ΝΟΜΕΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΩΝ 8 ΚΝ 83
ΣΧΗΜΑ 7. 3: ΜΟΡΦΗ ΝΟΜΕΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΩΝ 12 ΚΝ 84

Λίστα διαγραμμάτων

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. 1: ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΤΟΜΕΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ Y/L=0.3 ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΩΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 52
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. 2: ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΤΟΜΕΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ Y/L=0.5 ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΩΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 53
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. 3: ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΤΟΜΕΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ Y/L=0.8 ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΩΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 53
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. 4: ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΤΟΜΕΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ Y/L=0.3 ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΕΥΤΕΡΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 54
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. 5: ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΤΟΜΕΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ Y/L=0.5 ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΕΥΤΕΡΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 54
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. 6: ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΤΟΜΕΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ Y/L=0.8 ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΕΥΤΕΡΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 55
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. 7: ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΤΟΜΕΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ Y/L=0.3 ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΡΙΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 55
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. 8: ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΤΟΜΕΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ Y/L=0.5 ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΡΙΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 56
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. 9: ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΤΟΜΕΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ Y/L=0.8 ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΡΙΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 56
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. 10: ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΤΟΜΕΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ Y/L=0.3 ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΕΤΑΡΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 60
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. 11: ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΤΟΜΕΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ Y/L=0.5 ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΕΤΑΡΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 61
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. 12: ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΤΟΜΕΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ Y/L=0.8 ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΕΤΑΡΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 61
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. 13: ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΤΟΜΕΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ Y/L=0.3 ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΜΠΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 62
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. 14: ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΤΟΜΕΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ Y/L=0.5 ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΜΠΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 62
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. 15: ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΤΟΜΕΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ Y/L=0.8 ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΜΠΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 63
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. 16: ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΤΟΜΕΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ Y/L=0.3 ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 63
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. 17: ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΤΟΜΕΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ Y/L=0.5 ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 64
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. 18: ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΤΟΜΕΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ Y/L=0.8 ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 64
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. 19: ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΤΟΜΕΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ Y/L=0.3 ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΒΔΟΜΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 68

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. 20: ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΤΟΜΕΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ Y/L=0.5 ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΒΔΟΜΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 68
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. 21: ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΤΟΜΕΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ Y/L=0.8 ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΒΔΟΜΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 69
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. 22: ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΤΟΜΕΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ Y/L=0.3 ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΓΔΟΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 69
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. 23: ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΤΟΜΕΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ Y/L=0.5 ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΓΔΟΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 70
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. 24: ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΤΟΜΕΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ Y/L=0.8 ΓΙΑ ΤΗΝ ΟΓΔΟΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 70
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. 25: ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΤΟΜΕΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ Y/L=0.3 ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΑΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 74
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. 26: ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΤΟΜΕΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ Y/L=0.5 ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΑΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 74
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. 27: ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΤΟΜΕΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΕ ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΑΠΟΣΤΑΣΗ Y/L=0.8 ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΝΑΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 75
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6. 28: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ ΑΡΧΙΚΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΓΕΩΜΕΤΡΙΩΝ 78

Λίστα πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 2. 1: ΕΥΡΟΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ 16

ΠΙΝΑΚΑΣ 6. 1: ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ 1^{Η},2^{Η},3^{Η} ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ 57
ΠΙΝΑΚΑΣ 6. 2: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ 1,2,3 57
ΠΙΝΑΚΑΣ 6. 3: ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ 4^{Η},5^{Η},6^{Η} ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ 65
ΠΙΝΑΚΑΣ 6. 4: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ 4,5,6 66
ΠΙΝΑΚΑΣ 6. 5: ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΤΗΣ ΕΒΔΟΜΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ 71
ΠΙΝΑΚΑΣ 6. 6: ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΤΗΣ ΟΓΔΟΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ 72
ΠΙΝΑΚΑΣ 6. 7: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΩΝ 8 ΚΝ 72
ΠΙΝΑΚΑΣ 6. 8: ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΤΗΣ ΕΝΑΤΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ 75
ΠΙΝΑΚΑΣ 6. 9: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΤΩΝ 12 ΚΝ 76
ΠΙΝΑΚΑΣ 6. 10: ΤΙΜΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ ΑΡΧΙΚΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΓΕΩΜΕΤΡΙΩΝ 77

ΠΙΝΑΚΑΣ 7. 1: ΒΑΡΟΣ ΑΦΟΡΤΟΥ ΣΚΑΦΟΥΣ ΚΑΤΑ ISO 12217 & ISO 866 81
ΠΙΝΑΚΑΣ 7. 2: ΟΛΙΚΟ – ΜΕΓΙΣΤΟ ΒΑΡΟΣ ΤΟΥ ΣΚΑΦΟΥΣ ΚΑΤΑ ISO 14946 82
ΠΙΝΑΚΑΣ 7. 3: ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ 82

Βιβλιογραφία

1. Principles of Yacht Design, Lars Larsson and Hoyte C. Raven: Ship Resistance and Flow
2. Havelock, T. H. (1934). Wave patterns and wave resistance. Transactions of the Institute of Naval Architects
3. Wigley, C. (1942). Calculated and measured wave-making resistance for a series of forms defined algebraically, the prismatic coefficient and angle of entrance being varied independently. Transactions of the Institute of Naval Architects
4. Baker, G. S., & Kent, J. L. (1919). Speed, dimensions and form of cargo vessels. Journal of the American Society for Naval Engineers
5. Shipflow User Manual, Flowtech International AB
6. Nowacki, H.: Design Synthesis and Optimization-An Historical Perspective, OPTIMISTIC Optimization in Marine Design, Berlin, Germany,2003
7. Sen, P.; Yang, J.: Multiple-Criteria Decision Support in Engineering Design, Springer-Verlag, London 1998
8. Papanikolaou A.: Holistic ship design optimization. Computer-Aided Design, 2009.
9. V. Bertram.: Practical Ship Hydrodynamics. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2000.
10. Kalyanmoy Deb, Sameer Agarwal, T. Meyarivan, «A fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm : NSGA-II», 2002
11. Hunt, S., & Zondervan, G. J. D. (2007). Use of CFD in the optimisation of a naval support ship, UK.
12. Wehausen, J. V., & Laitone, E. V. (1960). Surface waves. In Encyclopedia of Physics Berlin, Germany.
13. Raven, H. C. (2010). Validation of an approach to analyse and understand ship wave making. Journal of Marine Science and Technology.
14. Baba, E., & Takekuma, K. (1975). A study on free-surface flow around bow of slowly moving full forms. Journal of the Society of Naval Architects of Japan.
15. Multi-Hull Ships, Victor A. Dubrovsky and Anatoly Lyakhovitsky: Technical approach of multi-hull design
16. Γρηγορόπουλου Γρ., Λουκάκη Θ., (2002) Συστηματική Σειρά ΕΜΠ, Περιγραφή και Αποτελέσματα, Αθήνα.
17. Πολίτη Γ.Κ., (2011), Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου, Αθήνα.
18. Ζαραφωνίτη Γ., Μελέτη και Σχεδίαση Πλοίων Νέας Τεχνολογίας.
19. Λουκάκη Θ.Α., Γρηγορόπουλου Γρ., (1996) Υδροδυναμική Σχεδίαση Μικρών Σκαφών, Αθήνα.
20. Μακρής Δ. (2015), Παραμετρική μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς ταχύπλοου Ε/Γ-Ο/Γ, Διπλωματική Εργασία.
21. Τσαγγάρης Σ., (2005) Μηχανική των Ρευστών, Εκδόσεις Συμεών.