



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων

Μηχανικών

Διπλωματική Εργασία

«Παραμετρική μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς ταχύπλοου Ε/Γ-Ο/Γ»

Επιμέλεια : Μακρής Δημήτριος

Επίβλεψη : Γρηγορόπουλος Γρηγόρης, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα 2015

Πρόλογος

Το παρόν αποτελεί τη διπλωματική μου εργασία της οποίας το αντικείμενο εμπίπτει στην επιστημονική ενότητα του τομέα Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής ΕΜΠ και οδηγεί στη αποφοίτησή μου από το προπτυχιακό τμήμα της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ. Το πτυχίο αυτό αποτελεί το τρίτο στην σταδιοδρομία μου έχοντας ήδη λάβει προπτυχιακό τίτλο σπουδών από τη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ και μεταπτυχιακό τίτλο σπουδών από τη Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.

Η ενασχόληση μου με τη Ναυπηγική αποτελεί μια επιλογή που πρωτογενώς υποκινήθηκε από τον πατέρα μου Ανδρέα Μακρή, καθώς ανέκαθεν αναγνώριζε το ενδιαφέρον που διέπει το συγκεκριμένο επιστημονικό πεδίο. Με αφορμή λοιπόν την συγγραφή του προλόγου θα ήθελα να του εκφράσω την βαθύτατη ευγνωμοσύνη μου για τη συνεισφορά του στη λήψη μιας από τις σημαντικότερες αποφάσεις της ζωής μου.

Κατά τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας αποκόμισα πολύτιμες γνώσεις, τόσο στον τομέα της υδροδυναμικής όσο και σε αυτούς της σχεδίασης και του προγραμματισμού. Οι γνώσεις αυτές συμπληρώνουν τις υπόλοιπες που απέκτησα κατά το σύνολο της φοίτησης μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και θα αποτελέσουν ένα χρήσιμο υπόβαθρο κατά τη διάρκεια της επαγγελματικής μου καριέρας.

Αισθάνομαι ιδιαίτερα ευγνώμων και θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου σε όλους τους Καθηγητές της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών για όσα μου δίδαξαν και κυρίως για τη συνεισφορά τους στην καλλιέργεια του τρόπου σκέψης μου. Ιδιαίτερες ευχαριστίες απευθύνω στον επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας, Γρηγόρη Γρηγορόπουλο, Καθηγητή ΕΜΠ, για τη στήριξη, την καθοδήγηση και την πολύτιμη συνεισφορά του καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας.

Η εργασία αυτή είναι αφιερωμένη στους γονείς μου Ανδρέα κι Ευαγγελία, για όλα όσα μου έχουν προσφέρει προκειμένου να καθίσταται εφικτή η καθημερινή μου προσπάθεια να τους κάνω να αισθάνονται περήφανοι.

Μακρής Δημήτριος
Αθήνα, Μάρτιος 2015

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	1
Εισαγωγή.....	5
Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή στη βελτιστοποίηση σχεδίασης πλοίων.....	7
1.1 Γενικά στοιχεία σχεδίασης πλοίων.....	7
1.2 Παραμετρική σχεδίαση.....	11
1.3 Αξιολόγηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς πλοίων.....	13
1.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων από αλγορίθμους.....	15
1.5 Η ενοποιημένη διαδικασία βελτιστοποίησης της υδροδυναμικής συμπεριφοράς πλοίων.....	17
Κεφάλαιο 2. Παραμετρική μοντελοποίηση της γάστρας πλοίων.....	21
2.1 Γενικά στοιχεία παραμετρικής σχεδίασης.....	21
2.2 Ιδιότητες καμπυλών NURBS και B-Splines.....	22
2.3 Παρεμβολή καμπυλών με χρήση NURBS και B-Splines.....	25
2.4 Απαιτήσεις συνέχειας μεταξύ δύο καμπυλών B-Splines.....	30
2.5 Βελτιστοποίηση της ακρίβειας παρεμβολής καμπυλών με χρήση πολυωνυμικών καμπυλών B-Splines.....	34
2.6 Παραμετρική σχεδίαση αρχικής γεωμετρίας ταχύπλοου Ε/Γ - Ο/Γ.....	38
2.7 Τροποποίηση πρυμναίων νομέων.....	44
Κεφάλαιο 3. Προσομοίωση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς ενός πλοίου.....	49
3.1 Θεωρητική προσέγγιση της αντίστασης.....	49
3.2 Εκτίμηση της αντίστασης πλοίου με την τρισδιάστατη θεωρία δυναμικού.....	53
3.3 Εκτίμηση της αντίστασης πλοίου με χρήση της συνεκτικής θεωρίας.....	58
3.4 Μελέτη της συμπεριφοράς πλοίου σε κυματισμούς.....	64
Κεφάλαιο 4. Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης.....	71
4.1 Γενικά στοιχεία αλγορίθμων.....	71
4.2 Ο αλγόριθμος MOSA.....	71

4.3 Ο αλγόριθμος NSGA-II.....	77
Κεφάλαιο 5. Βελτιστοποίηση σχεδίασης Ε-Γ/Ο-Γ	83
5.1 Γενικά στοιχεία διαδικασίας βελτιστοποίησης.....	83
5.2 Χαρακτηριστικά γεωμετρικής αναπαράστασης.....	84
5.3 Χαρακτηριστικά υδροδυναμικής αξιολόγησης	87
5.4 Επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης	91
Κεφάλαιο 6. Αποτελέσματα και συμπεράσματα	95
6.1 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης με βάση το μέγιστο ύψος κύματος.....	95
6.2 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης με βάση την αντίσταση κυματισμού.....	108
6.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων με τη βοήθεια του STAR CCM+	123
6.4 Σύνοψη και Συμπεράσματα.....	138
Παράρτημα Α – Λογισμικά και γλώσσες προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκαν .	142
Παράρτημα Β – Συγκεντρωτική λίστα σχημάτων	143
Βιβλιογραφία	151

Εισαγωγή

Αντικείμενο της παρούσης διπλωματικής εργασίας αποτελεί η βελτιστοποίηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς ενός ταχέως επιβατηγού/οχηματαγωγού πλοίου εκτοπίσματος. Η υδροδυναμική συμπεριφορά επηρεάζει ουσιαστικά τα χαρακτηριστικά λειτουργίας ενός πλοίου απευθείας αλλά και μέσω άλλων αντικειμένων της βελτιστοποίησης της σχεδίασης όπως η μεταφορική ικανότητα, ο υπολογισμός αντοχής, οι ταλαντώσεις, η ασφάλεια κλπ., που συνολικά απαρτίζουν τη μελέτη και σχεδίαση ενός πλοίου.

Η σχεδίαση ενός πλοίου αποτελεί μια χρονοβόρα και πολύπλοκη διαδικασία κατά την οποία λαμβάνονται υπόψη ένα σύνολο παραμέτρων που αφορούν κυρίως την αξιοπιστία, την αξιοπλοΐα, την ασφάλεια, την απόδοση και την επίτευξη του στόχου για τον οποίο προορίζεται. Μια αποτελεσματική σχεδίαση θα πρέπει να ικανοποιεί όλες τις απαιτήσεις των διεθνών κανονισμών που αφορούν την ασφάλεια, τις απαιτήσεις του πλοιοκτήτη καθώς και να είναι κατά το δυνατόν αποδοτικότερη οικονομικά. Η οικονομική αποτελεσματικότητα του πλοίου σχετίζεται άμεσα με την κατανάλωση καυσίμου η οποία είναι άμεσα συναρτημένη με την υδροδυναμική απόδοση που εξετάζεται στα πλαίσια του παρόντος.

Η μελέτη αυτή αφορά στις γραμμές ενός υφιστάμενου πλοίου κι εκτός της υδροδυναμικής του αξιολόγησης θα επιδιωχθεί και η βελτιστοποίηση του. Προκειμένου να καταστεί αυτό εφικτό η δοθείσα μορφή γάστρας θα μοντελοποιηθεί παραμετρικά με χρήση του λογισμικού CAESES-Friendship Framework, ώστε ένας περιορισμένος αριθμός μεταβλητών σχεδίασης να επηρεάζει στο μέγιστο βαθμό τα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την υδροδυναμική της απόδοση. Κατά τη διαδικασία σχεδίασης θα επιδιωχθεί η μέγιστη δυνατή ταύτιση της προκύπτουσας παραμετρικής μορφής με την αρχική η οποία αποτελεί προϊόν συμβατικής σχεδίασης. Από τη διακύμανση του συνόλου των μεταβλητών σχεδίασης θα προκύψουν οι εναλλακτικές γεωμετρίες των οποίων οι επιδόσεις θα αξιολογηθούν ώστε να καταλήξουμε σε ένα σύνολο διαφορετικών μορφών 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 γίνει υπό καθεστώς ομοιότητας των γενικών χαρακτηριστικών τους θα τεθούν περιορισμοί στο εύρος μεταβολής των τιμών εκτοπίσματος και διαμήκους θέσης του κέντρου άντωσης. Κάθε γεωμετρία που παραβιάζει τους εν λόγω περιορισμούς θα απορρίπτεται και ο συνδυασμός των τιμών των μεταβλητών σχεδίασης που τη

διαμορφώνουν θα θεωρείται πως συνιστά अपαράδεκτο σύνολο που θα αποφεύγεται στις μεταγενέστερες σχεδιάσεις.

Η υδροδυναμική αξιολόγηση των παραχθέντων γεωμετριών συνίσταται στην συμπεριφορά τους κατά την πλεύση τόσο σε ήρεμο νερό όσο και σε κυματισμούς. Όλοι οι υπολογισμοί θα υλοποιηθούν στην υπηρεσιακή ταχύτητα του πλοίου ($Fr=0.348$) κατά την πλεύση του σε θαλασσινό νερό πυκνότητας $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$.

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 SWAN 2, 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 συσχέτιση της αντίστασης με το πεδίο των παραγόμενων κυματισμών.

Η αξιολόγηση της συμπεριφοράς του πλοίου σε κυματισμούς θα υλοποιηθεί με χρήση του λογισμικού SPP-86 που χρησιμοποιεί τη θεωρία λωρίδων προκειμένου να υπολογίσει τις αποκρίσεις του πλοίου κατά την αλληλεπίδραση του με αυτούς. Στην περίπτωση μας θα εκτιμηθεί η επαγόμενη επιτάχυνση στην πλώρη κατά την πλεύση σε αρμονικούς κυματισμούς διαφόρων συχνοτήτων προκειμένου να βρεθεί η σχετική καμπύλη RAO. Το μέγεθος που θα αποτελέσει αντικείμενο ελαχιστοποίησης θα είναι η μέγιστη τιμή αυτής της καμπύλης.

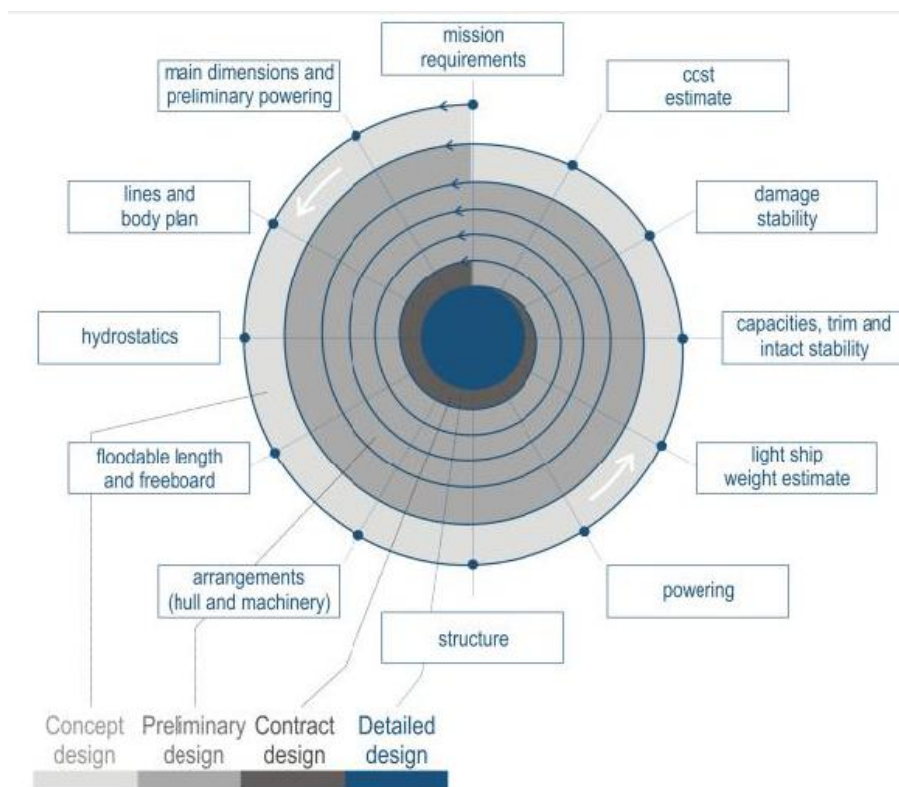
Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης θα ελεγχθούν ως προς την εγκυρότητα τους με χρήση του λογισμικού STAR CCM+ το οποίο προσομοιώνει υδροδυναμικά φαινόμενα επιλύοντας τις εξισώσεις Navier-Stokes. Η ροή θα προσομοιωθεί τόσο ως τυρβώδης όσο και ως μη συνεκτική προκειμένου να υπάρχει μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης.

Ο καθορισμός του εύρους της έρευνας και των υπολογισμών που θα γίνουν, αποσκοπεί στην εκτενέστερη δυνατή διερεύνηση του αντικειμένου που μελετάται καθώς και στην ασφαλέστερη δυνατή εξαγωγή συμπερασμάτων.

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή στη βελτιστοποίηση σχεδίασης πλοίων

1.1 Γενικά στοιχεία σχεδίασης πλοίων

Η μελέτη και σχεδίαση ενός πλοίου είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που απαιτεί δαπάνη σημαντικού αριθμού ανθρωποωρών κι εκτελείται επαναληπτικά, ξεκινώντας από το στάδιο της μελέτης σκοπιμότητας και καταλήγοντας στη λεπτομερή σχεδίαση όπου όλα τα χαρακτηριστικά του πλοίου είναι σαφώς ορισμένα. Σε κάθε στάδιο οι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπ' όψη είναι πολυάριθμες και σε πολλές περιπτώσεις αντικρουόμενης επίδρασης. Μερικές από αυτές τις παραμέτρους είναι οι απαιτήσεις του πλοιοκτήτη, οι διεθνείς κανονισμοί, η ασφαλής πλεύση αλλά και η βέλτιστη κατά το δυνατόν απόδοση τόσο σε τεχνικό όσο και σε οικονομικό επίπεδο. Η παραδοσιακή διαδικασία μελέτης και σχεδίασης αποτυπώνεται σε μια σπειροειδή επαναληπτική διαδικασία όπως φαίνεται στο σχήμα 1¹. Σε αυτό παρουσιάζονται τα διάφορα στάδια της σχεδίασης ως στρώματα από διαδοχικές σπείρες που εκτελούνται με φορά από την περιφέρεια προς το κέντρο. Σε κάθε σπείρα εκτελείται ένα σύνολο διαδοχικών υπολογισμών από τους οποίους προκύπτουν τα χαρακτηριστικά της σχεδίασης.

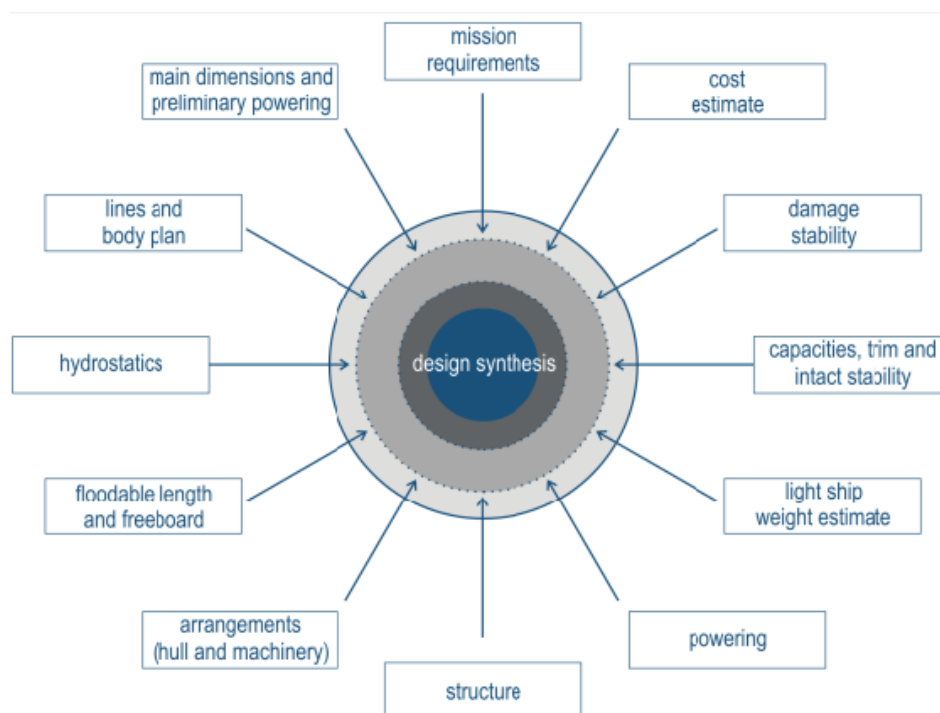


Σχήμα 1. Η σπειροειδής διαδικασία σχεδίασης πλοίων

¹ Papanikolaou et al., «Integrated Design and Multiobjective Optimization Approach to Ship Design»

Η διαδικασία σχεδίασης που αποτυπώνεται στην σχήμα 1 αποτελεί μια περίπτωση μελέτης όπου κάθε επιμέρους εργασία υπολογισμού εκτελείται μεμονωμένα κατά την διεκπεραίωση του αντίστοιχου σταδίου χωρίς να λαμβάνονται υπόψη τυχόν απαιτήσεις κάποιας επόμενης. Το αποτέλεσμα αυτής της μεμονωμένης προσέγγισης είναι η πιθανότητα εμφάνισης περιορισμών σε κάποιο στάδιο που επηρεάζουν τα προκύπτοντα αποτελέσματα κάποιου άλλου. Σε κάθε σπείρα λαμβάνονται υπόψη όλοι οι περιορισμοί και οι ανάγκες προσαρμογής που έχουν προκύψει από τις προηγούμενες και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά σχεδίασης αναπροσδιορίζονται ώστε να καλύπτουν όλες τις σχετικές απαιτήσεις. Η τελική σχεδίαση προκύπτει όταν το σύνολο των χαρακτηριστικών του πλοίου δεν χρήζουν διόρθωσης.

Μια πιο σύγχρονη μορφή της διαδικασίας σχεδίασης πλοίων παρουσιάζεται στην σχήμα 2². Σε αυτό φαίνεται ότι κάθε στάδιο εξετάζεται σε συνάρτηση με τα υπόλοιπα από τα οποία επηρεάζεται, σε μια διαδραστική και συγκεντρωτικά διαχειρίσιμη διαδικασία. Η συγκεκριμένη μέθοδος σχεδίασης υιοθετεί τη σύνθεση τεχνοοικονομικών βάσεων δεδομένων, αλγορίθμων αξιολόγησης και βελτιστοποίησης, σύγχρονων σχεδιαστικών εργαλείων, και συστημάτων ανταλλαγής πληροφοριών, με αποτέλεσμα την ενίσχυση της αποδοτικότητας της διαδικασίας μελέτης πλοίου.



Σχήμα 2. Η εννοποιημένη διαδικασία σχεδίασης πλοίων

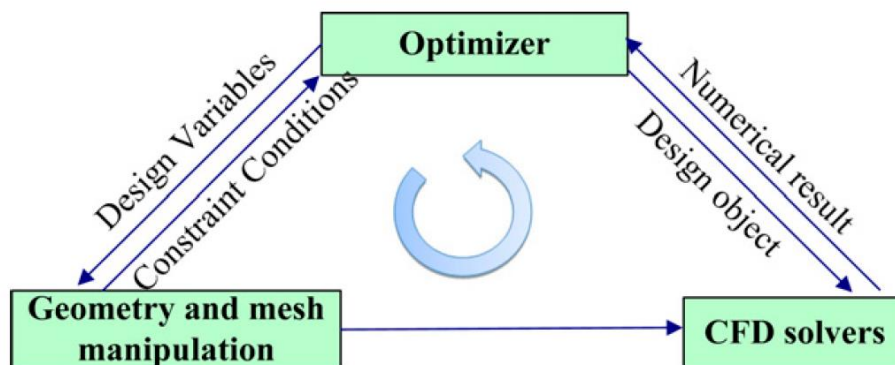
² Papanikolaou et al., «Integrated Design and Multiobjective Optimization Approach to Ship Design»

Η διαδικασία μελέτης και σχεδίασης που παρουσιάζεται στο σχήμα 2 στην πραγματικότητα αποτελεί προσπάθεια βελτιστοποίησης της παραδοσιακής διαδικασίας σχεδίασης ούτως ώστε να απαιτεί τους ελάχιστους δυνατούς πόρους παράγοντας ταυτόχρονα καλύτερες σχεδιάσεις. Η ίδια ακριβώς λογική βελτιστοποίησης εφαρμόζεται ευρέως και στα επιμέρους στάδια σχεδίασης. Τυπικά παραδείγματα, αλλά όχι τα μοναδικά, αποτελούν η απόδοση της προωστήριας εγκατάστασης, η υδροδυναμική συμπεριφορά της γάστρας, και η διαμόρφωση της γενικής διάταξης για τη μεγιστοποίηση του εκμεταλλεύσιμου όγκου.

Τα τελευταία χρόνια, η βελτιστοποίηση της σχεδίασης πλοίων έχει αποκτήσει εξέχουσα σημασία καθώς έχουν αναβαθμιστεί οι απαιτήσεις, ο παγκόσμιος ανταγωνισμός και οι διεθνείς κανονισμοί με αποτέλεσμα να αναζητούνται συνεχώς αποδοτικότερα συστήματα. Η βελτιστοποίηση ως ορισμός, αποτελεί τη διαδικασία βελτίωσης της απόδοσης ενός συστήματος ανεξάρτητα από τον τρόπο με τον οποίο αυτό επιδιώκεται. Σε πρωτογενές επίπεδο αποτελεί τη σκοπιμότητα ακόμα και μιας τυχαίας διερεύνησης μεταξύ ολιγάριθμων επιλογών. Ωστόσο πλέον έχει εξελιχθεί σε μια σύνθετη διαδικασία που συνδυάζει ποικίλα και πολύπλοκα μαθηματικά μοντέλα με μεθόδους αξιολόγησης της επίδοσης, με απώτερο στόχο την παρεμβατική βελτίωση της σχεδίασης σε όλα τα στάδια στα οποία αυτό είναι εφικτό. Συνήθως συνίσταται στην συγκριτική αξιολόγηση πολλών διαφορετικών εναλλακτικών σχεδιάσεων ώστε να επιλεγεί τελικά η αποδοτικότερη λύση, με γνώμονα συγκεκριμένα κριτήρια. Η διερεύνηση μεταξύ των πιθανών εναλλακτικών επιλογών τελείται εντός προκαθορισμένων ορίων και με βάση περιορισμούς και προϋποθέσεις που απαιτείται να πληρούνται. Η διακύμανση των χαρακτηριστικών του συστήματος που εξετάζεται πραγματοποιείται μέσω ενός συνόλου μεταβλητών που λαμβάνουν τιμές εντός ενός εύρους, με στόχο την εύρεση της τιμής που δίνει την καλύτερη επίδοση με βάση τα κριτήρια που έχουν επιλεγεί.

Στην συγκεκριμένη εργασία αντικείμενο αποτελεί η βελτιστοποίηση της σχεδίασης των γραμμών της γάστρας (Lines and Body Plan των σχημάτων 1 και 2) ενός ταχύπλουου Ε/Γ-Ο/Γ στην υπηρεσιακή του ταχύτητα. Κριτήρια βελτιστοποίησης θα αποτελέσουν η υδροδυναμική του συμπεριφορά σε ήρεμο νερό και σε κυματισμούς. Παραδοσιακά η εκτίμηση της υδροδυναμικής απόδοσης πλοίων με βάση αυτά τα δύο κριτήρια βασιζόταν σε πειραματικές προσομοιώσεις σε δεξαμενές με χρήση προτύπων πλοίων κατασκευασμένων υπό κλίμακα. Τα πειράματα αποτελούν και σήμερα την πλέον αξιόπιστη λύση για τη μελέτη υδροδυναμικών φαινομένων και την πρόβλεψη της υδροδυναμικής συμπεριφοράς πλοίων σε πραγματικές συνθήκες.

Ωστόσο, η εξέλιξη των σχεδιαστικών εργαλείων με χρήση υπολογιστή (Computer Aided Design - CAD), των μεθόδων υπολογιστικής υδροδυναμικής (Computational Fluid Dynamics - CFD) καθώς και των αλγορίθμων αξιολόγησης και βελτιστοποίησης, σε συνδυασμό με την ραγδαία ανάπτυξη της υπολογιστικής ισχύος έχουν εισαγάγει νέες μεθόδους σχεδίασης κι αξιολόγησης της επίδοσης πλοίων τα τελευταία χρόνια. Το αποτέλεσμα αυτών των εξελίξεων αποτελεί η ενσωμάτωση στη συμβατική σχεδίαση, της σχεδίασης που είναι βασισμένη στην προσομοίωση (Simulation Based Design - SBD), καθώς πλέον καθίσταται δυνατή η αξιολόγηση της απόδοσης ενός πλοίου με χρήση υπολογιστικών εργαλείων, πριν αυτό κατασκευαστεί και διαπιστωθεί η συμπεριφορά του στις δοκιμές μετά την καθέλκυση. Η σχεδίαση με βάση την προσομοίωση συνιστά τον συνδυασμό τριών βασικών στοιχείων που είναι η παραγωγή διαφορετικών γεωμετριών, η εκτίμηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς από προγράμματα και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από εργαλεία βελτιστοποίησης. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 3³, στο οποίο φαίνεται τόσο η ανάλυση της βελτιστοποίησης σχεδίασης σε επιμέρους τμήματα όσο και η αλληλεπίδραση μεταξύ τους.



Σχήμα 3. Η επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών πλοίων

Όπως είναι προφανές η αποδοτικότητα της διαδικασίας βελτιστοποίησης εξαρτάται άμεσα από την επιλογή της κατάλληλης δομής σε κάθε ένα από τα τρία τμήματα της αλλά και από τον τρόπο που αυτά επικοινωνούν. Ο τρόπος εφαρμογής του ενοποιημένου αυτού σχήματος έχει παρουσιαστεί σε πολλές παραλλαγές και αποτελεί αντικείμενο εκτενούς έρευνας σε παγκόσμιο επίπεδο. Στα πλαίσια του παρόντος χρησιμοποιείται μια τεχνική που αποτελεί την εξέλιξη της μακροχρόνιας επιστημονικής δραστηριότητας του

³ Li et al., «Bow and Stern Shape Integrated Optimization for a Full Ship by a Simulation-Based Design Technique», Journal of Ship Research, Vol. 58, No. 2, pp 83-96

επιβλέποντος. Κάθε τμήμα της ενοποιημένης αυτής διαδικασίας θα αναλυθεί στα επόμενα κεφάλαια.

1.2 Παραμετρική σχεδίαση

Για την παραγωγή γεωμετριών απαιτείται η χρήση ενός εργαλείου παραμετρικής σχεδίασης στο οποίο κατασκευάζεται μια γεωμετρία ώστε ορισμένα τμήματα της να αποτελούν συνάρτηση μιας ή περισσότερων μεταβλητών. Οι μεταβλητές αυτές μπορεί να επηρεάζουν κύριες διαστάσεις (global design variables) ή τοπικά τμήματα (local design variables) του πλοίου. Η επιλογή των μεταβλητών σχεδίασης εξαρτάται άμεσα από τα κριτήρια βελτιστοποίησης που έχουν επιλεγεί ώστε να προκαλούν σχεδιαστικές αλλαγές που έχουν άμεση σχέση με τις επιδόσεις του πλοίου ως προς αυτά τα κριτήρια.

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε κατά το στάδιο της σχεδίασης είτε για την βελτίωση της απόδοσης ενός υπάρχοντος πλοίου. Ένα κοινό στοιχείο και των δύο περιπτώσεων αποτελεί η απαίτηση διατήρησης μιας αρχικής μορφής γραμμών πλοίου ενώ ταυτόχρονα να καθίσταται δυνατή η μεταβολή των σχεδιαστικών χαρακτηριστικών του. Αυτό σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να είναι δύσκολο ή και αδύνατο. Ο γενικός κανόνας είναι ότι η μια απαίτηση θέτει περιορισμούς στην άλλη κι ο καλύτερος τρόπος αντιμετώπισης του συνολικού προβλήματος παραμετρικής μοντελοποίησης είναι ο συνδυασμός των δύο απαιτήσεων με ανά περίπτωση αξιολόγηση της σχετικής σημαντικότητας κάθε μίας.

Για τις ανάγκες του παρόντος η παραμετρική μοντελοποίηση μιας αρχικής δοθείσας γεωμετρίας πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού CAESSES – Friendship Framework⁴ που παρέχεται από την εταιρία Friendship Systems. Η συγκεκριμένη έκδοση αποτελεί την εξέλιξη του Friendship-Modeller που παρουσιάστηκε από τον Harries το 1998 κι αποτελεί το αποτέλεσμα μιας εκτεταμένης έρευνας στην Πολυτεχνική Σχολή του Βερολίνου σχετικά με την παραμετρική αναπαράσταση γεωμετρικών μορφών πλοίων. Το Friendship-Modeller εφαρμόζει μια τεχνική σχεδίασης βασισμένη στην παραμετρική μοντελοποίηση καμπυλών. Ωστόσο οι διαθέσιμες εναλλακτικές μορφές γάστρας και μεταβλητές σχεδίασης, είναι συγκεκριμένες με αποτέλεσμα οι επιλογές του σχεδιαστή να είναι περιορισμένες. Από την άλλη μεριά, το CAESSES – Friendship Framework επιτρέπει την εξ' αρχής δημιουργία μορφών πλοίων καθώς και τον καθορισμό των μεταβλητών σχεδίασης κατά βούληση. Αποτελεί ένα εξαιρετικά χρήσιμο λογισμικό που παρέχει τα βασικά εργαλεία ώστε να χρησιμοποιηθούν κατά την απόλυτη κρίση του

⁴ <https://www.caeses.com/>

σχεδιαστή προκειμένου να παράγει μια σχεδίαση που καλύπτει τις ανάγκες της μελέτης που πραγματοποιεί.

Το βασικότερο στοιχείο κατά την παραμετρική σχεδίαση είναι ο εξ' αρχής προσδιορισμός του συνόλου των μεταβλητών σχεδίασης που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό προκειμένου να είναι σαφώς προκαθορισμένες ούτως ώστε η συνολική διαδικασία της σχεδίασης να βασισθεί σε συγκεκριμένα δεδομένα που συχνά θέτουν περιορισμούς και μειώνουν σημαντικά τις διαθέσιμες εναλλακτικές επιλογές διαμόρφωσης της γάστρας. Σε πολλές περιπτώσεις η απαίτηση δημιουργίας ορισμένων μεταβλητών σχεδίασης μπορεί ακόμα και να μεταβάλει την σειρά με την οποία δημιουργούνται τα τμήματα της γεωμετρίας ενός πλοίου.

Συνήθως η παραμετροποίηση μιας γεωμετρίας ξεκινά όπως και στη συμβατική σχεδίαση με τον προσδιορισμό των κυρίων καμπυλών, όπως το flat of Bottom (FOB), το flat of Side (FOS), τη συνοριακή καμπύλη του καταστρώματος (Deck) και τη τομή της γάστρας με το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας (Center Plane Curve - CPC). Στη συνέχεια προσδιορίζεται η μορφή των νομέων και της ισάλου επιφανείας, ενώ τελικά σχεδιάζονται ειδικά τμήματα του πλοίου όπως ο βολβός.

Οι επιλεγείσες μεταβλητές σχεδίασης μπορεί να επηρεάζουν γεωμετρικά χαρακτηριστικά οποιουδήποτε από τα παραπάνω τμήματα. Δεδομένου ότι η συνολική γεωμετρία αποτελεί το συνδυασμό επιμέρους σχεδιαστικών στοιχείων που εξαρτώνται από τα προαναφερθέντα τμήματα, είναι απαραίτητη η δημιουργία παραμέτρων που εξαρτώνται σε δεύτερο και κατώτερο επίπεδο από τις επιλεγμένες μεταβλητές σχεδίασης, ώστε η μορφή γάστρας συνολικά, να παραμένει ομαλή σε όλο το εύρος μεταβολής τους. Σε αντίθεση με τις μεταβλητές σχεδίασης οι παράμετροι μπορούν να εξαρτώνται και από άλλες παραμέτρους. Για παράδειγμα εφόσον έχει τεθεί ως μεταβλητή σχεδίασης το μέγιστο πλάτος του FOB, τότε θα πρέπει να δημιουργηθούν παράμετροι που επηρεάζουν τα ακραία σημεία όλων των νομέων που έχουν κάποιο κοινό σημείο με αυτό. Επιπρόσθετα και προκειμένου να παραμένει ομαλή η μορφή αυτών των νομέων σε ενδεχομένη μεταβολή της εν λόγω μεταβλητής σχεδίασης, θα πρέπει να υπάρχουν επιπρόσθετες παράμετροι που θα εξασφαλίζουν αυτή την απαίτηση. Η ίδια τεχνική θα πρέπει να εφαρμοστεί σε όλες τις ανάλογες περιπτώσεις.

Η διαδικασία της παραμετρικής σχεδίασης προφανώς έχει πολλούς διαφορετικούς τρόπους να υλοποιηθεί. Η καταλληλότερη για κάθε περίπτωση προκύπτει από την αλληλουχία εξάρτησης των γεωμετρικών τμημάτων του πλοίου κάτι που πρωτογενώς προκύπτει από τις μεταβλητές σχεδίασης που έχουν επιλεγεί. Κατά συνέπεια γεωμετρικά

στοιχεία που εξαρτώνται άμεσα από μεταβλητές σχεδίασης αποτελούν την κορυφή της πυραμίδας εξάρτησης και τα υπόλοιπα που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της σχεδίασης, έπονται χρονικά κι εξαρτώνται από αυτά. Η παραμετρική σχεδίαση ολοκληρώνεται με την αποτύπωση ολόκληρης της μορφής της γάστρας με επιφάνειες που προκύπτουν από παρεμβολή καμπυλών.

1.3 Αξιολόγηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς πλοίων

Η ανάγκη προσομοίωσης υδροδυναμικών φαινομένων προκύπτει από το γεγονός πως η διεξαγωγή πειραμάτων με πρότυπα έχει υπολογίσιμο κόστος κι επομένως είναι πρακτικά εφικτή μόνο για λίγες εναλλακτικές μορφές γάστρας. Αντίθετα η προσομοίωση σε έναν υπολογιστή αποτελεί διαδικασία της οποίας το κόστος εν γένει είναι πολύ μικρότερο και ειδικά σε περιπτώσεις όπου εξετάζεται ένας μεγάλος αριθμός γεωμετριών.

Η αξιολόγηση της υδροδυναμικής απόδοσης του πλοίου που εξετάζεται αφορά δύο επιλεγέντα κριτήρια. Το πρώτο είναι η αντίσταση κατά την πλεύση του σε ήρεμο νερό ενώ το δεύτερο την απόκριση του σε κυματισμούς και συγκεκριμένα την κίνηση προνευτασμού. Η αντίσταση εν γένει αντιμετωπίζεται ως σημαντικότερη καθώς επηρεάζει άμεσα την κατανάλωση καυσίμου κι επομένως την οικονομική αποδοτικότητα του πλοίου. Ωστόσο, σημαντικός παράγοντας είναι και οι κινήσεις του σε κυματισμούς καθώς καθορίζουν τη γενικότερη συμπεριφορά του σε συνθήκες που πολύ συχνά αντιμετωπίζει.

Η υδροδυναμική αξιολόγηση που θα πραγματοποιηθεί στην παρούσα εργασία υλοποιείται τόσο με χρήση της δυναμικής θεωρίας όσο και της συνεκτικής. Όπως σε κάθε διαδικασία μοντελοποίησης φυσικών φαινομένων, η εκτίμηση της αντίστασης και των κινήσεων του πλοίου που εξετάζεται υπόκειται σε κάποια περιθώρια απόκλισης από τα αντίστοιχα πραγματικά μεγέθη. Το εύρος αυτής της απόκλισης εξαρτάται από το επιστημονικό υπόβαθρο της θεωρίας που περιγράφει το εκάστοτε πρόβλημα.

Με χρήση της συνεκτικής θεωρίας μπορεί να προσομοιωθεί το πλήρες αδιάσπαστο φαινόμενο αλληλεπίδρασης στερεών σωμάτων με ρευστά. Η διακριτοποίηση του χωρίου υπολογισμού πραγματοποιείται από όγκους ελέγχου με επίλυση των εξισώσεων που διέπουν τη ροή μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση. Δεδομένου ότι τα σημεία υπολογισμού εκτείνονται στον τρισδιάστατο χώρο ο αριθμός των εξισώσεων που επιλύονται είναι εκτενής και η απαιτούμενη χρονική διάρκεια επίλυσης του προβλήματος σημαντική ακόμα και για σύγχρονους υπολογιστές. Η ακρίβεια της λύσης, η ταχύτητα της σύγκλισης αλλά και η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς είναι παράμετροι ανάλογες της πυκνότητας του πλέγματος, με αποτέλεσμα η επιλογή του αριθμού των κόμβων που χρησιμοποιούνται να είναι αντικείμενο που απαιτεί τη στάθμιση του απαιτούμενου χρόνου επίλυσης και της

προσδοκώμενης ακρίβειας για κάθε πρόβλημα. Άμεση συνέπεια της απαίτησης σημαντικής υπολογιστικής ισχύος είναι πως η συνεκτική θεωρία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση ενός περιορισμένου μόνο αριθμού σχεδιάσεων.

Από την άλλη μεριά η δυναμική θεωρία αποτελεί προσέγγιση που αγνοεί τη συνεκτικότητα και βασίζεται στη μοντελοποίηση των φαινομένων με χρήση συνοριακών στοιχείων (Boundary Element Method). Το πεδίο επίλυσης αφορά μόνο το στερεό σύνορο του σώματος και την ελεύθερη επιφάνεια ενώ η διακριτοποίηση του γίνεται με επίπεδα επιφανειακά στοιχεία που διατάσσονται στο χώρο. Αποτέλεσμα αυτής της προσέγγισης είναι η απαίτηση αισθητά μικρότερης απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύος, εν συγκρίσει με τη συνεκτική θεωρία, δεδομένου ότι το σύνολο των εξισώσεων που επιλύονται, προκύπτουν από διακριτοποίηση με υποπολλαπλάσιο συνήθως αριθμό κόμβων. Το μειονέκτημα της θεωρίας δυναμικού είναι πως δεν έχει τη δυνατότητα να μοντελοποιήσει φαινόμενα που σχετίζονται με τη συνεκτικότητα και κατ' επέκταση να προβλέψει την επιρροή τους. Άμεση συνέπεια αυτού του γεγονότος είναι πως, με χρήση της θεωρίας αυτής και για την περίπτωση που εξετάζεται, μπορεί να εκτιμηθεί μόνο η αντίσταση κυματισμού. Ωστόσο, για την ταχύτητα υπηρεσίας του πλοίου στην οποία θα γίνουν οι προσομοιώσεις, αυτή η συνιστώσα αποτελεί σημαντικό ποσοστό της συνολικής αντίστασης κι επομένως η ελαχιστοποίηση της έχει αξιολογικά οφέλη. Σχετικά με την απόκριση του πλοίου σε κυματισμούς, η δυναμική θεωρία δίνει καλύτερα αποτελέσματα από τη συνεκτική για όλες τις κινήσεις του πλοίου εκτός του διατοιχισμού. Δεδομένου λοιπόν ότι ο δεύτερος στόχος της παρούσης μελέτης είναι η ελαχιστοποίηση των επιταχύνσεων κατά την κίνηση προνευτασμού, η δυναμική θεωρία είναι η καταλληλότερη γι' αυτή την περίπτωση.

Για τις ανάγκες της βελτιστοποίησης σχεδίασης που θα πραγματοποιηθεί, απαιτείται η υδροδυναμική αξιολόγηση ενός μεγάλου αριθμού εναλλακτικών σχεδιάσεων κι επομένως η μόνη πρακτικά εφαρμόσιμη διαδικασία είναι η χρήση της δυναμικής θεωρίας προκειμένου να λάβουμε αποτελέσματα σε εύλογο χρονικό διάστημα. Η βελτιστοποίηση θα πραγματοποιηθεί με κριτήρια αφενός την αντίσταση κυματισμού κατά την πλεύση σε ήρεμο νερό κι αφετέρου την επιτάχυνση στην πλώρη κατά την κίνηση προνευτασμού. Προς επιβεβαίωση της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων, η αρχική και μια βελτιστοποιημένη γεωμετρία θα εξεταστούν ως προς τη συνολική τους αντίσταση με χρήση λογισμικού που υπολογίζει τα χαρακτηριστικά της συνεκτικής ροής γύρω από σώματα.

Για την εκτίμηση της αντίστασης κυματισμού θα χρησιμοποιηθεί το λογισμικό SWAN 2⁵ που δημιουργήθηκε από τον Καθηγητή MIT, Παύλο Σκλαβούνο. Το πρόγραμμα αυτό υπολογίζει επίσης το πεδίο των παραγόμενων κυματισμών που επίσης θα χρησιμοποιηθεί με τρόπο που θα περιγραφεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Η απόκριση του πλοίου κυματισμούς αν και μπορεί να εκτιμηθεί από το SWAN 2, θα υπολογιστεί με χρήση του κώδικα SPP-86⁶, που έχει δημιουργηθεί από το Εργαστήριο Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής ΕΜΠ. Τα αποτελέσματα του λογισμικού αυτού έχουν συγκριθεί προγενέστερα με τα αντίστοιχα του SWAN 2 κι έχει διαπιστωθεί ότι είναι ακριβέστερα. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα χρησιμοποιεί τη δισδιάστατη θεωρία λωρίδων των Salvensen, Tuck και Fatinsen, σε συνδυασμό με την θεωρία του Frank⁷, για την αναπαράσταση της γεωμετρίας.

Η συνολική αντίσταση θα υπολογιστεί με χρήση του λογισμικού STAR CCM+⁸ που παρέχεται από την εταιρία CD Adapco και αποτελεί ένα πολύ ισχυρό εργαλείο επίλυσης προβλημάτων ρευστομηχανικής. Προκειμένου να υλοποιηθεί εκτενής έλεγχος των εξαγόμενων αποτελεσμάτων η μοντελοποίηση της πλεύσης των γεωμετριών που θα εξεταστούν θα αφορά τόσο συνεκτική όσο και μη συνεκτική ροή γύρω από τη γάστρα. Με μοντελοποίηση της μη συνεκτικής ροής μπορεί να υπολογιστεί μόνο η αντίσταση κυματισμού ωστόσο αυτό γίνεται με χρήση τρισδιάστατου πλέγματος και όχι συνοριακών στοιχείων όπως στην περίπτωση του SWAN 2. Η ροή αφορά και στις δύο προσεγγίσεις ρευστό δύο φάσεων (νερού και αέρα) με ελεύθερη επιφάνεια μεταξύ τους ενώ η επίλυση των εξισώσεων που διέπουν τη συνεκτική ροή θα πραγματοποιηθεί με τη μέθοδο RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes). Το τρισδιάστατο πλέγμα που εκτείνεται γύρω από το στερεό σύνορο θα διακριτοποιηθεί με σταδιακή αραιώση ανάλογα με την απόσταση από αυτό ενώ θα εφαρμοστούν επίσης τοπικές πυκνώσεις σε περιοχές που έχουμε έντονες αλλαγές του πεδίου ταχύτητας και πίεσης όπως ο βολβός και η πρύμνη.

1.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων από αλγορίθμους

Κάθε διαδικασία βελτιστοποίησης μιας σχεδίασης είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με αξιολόγηση της απόδοσης των εναλλακτικών επιλογών από αλγορίθμους, προκειμένου να

⁵ SWAN 2 (2002), User Manual : «*Ship Flow Simulation in Calm Water and in Waves*», Boston Marine Consulting Inc., Boston MA 02116, USA.

⁶ SPP-86 (1994), User's Manual, *Report No: NAL-114-F-94*, Lab. Ships and Marine Hydrodynamics, National Technical Univ. of Athens.

⁷ Frank, W. (1967), *Oscillation of Cylinders in or Below the Free Surface of Deep Fluids*, NSRDC, Rep. No. 2375, Washington, D.C.

⁸ <http://www.cd-adapco.com/products/star-ccm>

μεγιστοποιηθεί η αποδοτικότητα της διερεύνησης του συνολικού χώρου των λύσεων και της εύρεσης των βέλτιστων. Η αποδοτικότητα αυτή μπορεί να σχετίζεται είτε με την ελαχιστοποίηση των απαιτούμενων υπολογισμών προκειμένου να επιτευχθεί ένας στόχος, ή με την ευρύτερη δυνατή απόδοση των βέλτιστων λύσεων για έναν προκαθορισμένο αριθμό υπολογισμών. Οι αλγόριθμοι αξιολόγησης έχουν ευρεία εφαρμογή σε μη γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης για τα οποία αποτελούν πολλές φορές και τη μοναδική εφικτή διαδικασία επίλυσης τους.

Αντικείμενο αξιολόγησης από αλγόριθμους αποτελεί ένα σύστημα που εξαρτάται από ένα σύνολο μεταβλητών σχεδίασης που διακυμαίνονται εντός ενός προκαθορισμένου εύρους. Ο συνδυασμός αυτών των μεταβλητών επηρεάζει την απόδοση του συστήματος ως προς κάποια κριτήρια που αποτελούν τις αντικειμενικές συναρτήσεις και των οποίων επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση, λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη τυχόν περιορισμούς που έχουν τεθεί και αφορούν στις τιμές χαρακτηριστικών του συστήματος. Στις περιπτώσεις που έχουμε αλληλεξάρτηση της επιρροής των μεταβλητών σχεδίασης στις αντικειμενικές συναρτήσεις, η βέλτιστη λύση που προκύπτει από τη διακύμανση του συνόλου των μεταβλητών δεν συμπίπτει με τη λύση που απαρτίζεται από το συνδυασμό των τιμών των μεταβλητών σχεδίασης κατά την αναζήτηση τους μεμονωμένα.

Η βελτιστοποίηση μπορεί να είναι μονοκριτηριακή ή πολυκριτηριακή ανάλογα με τον αριθμό των επιλεγέντων κριτηρίων αξιολόγησης. Σε μια μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση η βέλτιστη λύση προφανώς είναι μόνο μία. Αντίθετα στις περιπτώσεις πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης η επιλογή της βέλτιστης περίπτωσης δεν είναι προφανής καθώς προκύπτουν πολλές διαφορετικές σχεδιάσεις για τις οποίες ισχύει η αμφιμονοσήμαντη σχέση ότι δεν αποτελούν σαφώς καλύτερες ή χειρότερες επιλογές από άλλες. Αν εξετάσουμε τη διασπορά του συνόλου των λύσεων σε διάγραμμα με άξονες τις αντικειμενικές συναρτήσεις τους, οι βέλτιστες λύσεις αποτελούν το σύνολο των διακριτών σημείων που παρεμβάλλει μια καμπύλη σε ένα επίπεδο ή μια επιφάνεια στο χώρο όταν έχουμε 2 και 3 αντικειμενικές συναρτήσεις αντίστοιχα. Αυτή η γεωμετρική αναπαράσταση επιτυγχάνεται όπως είναι προφανές για μέγιστο αριθμό συναρτήσεων ίσο με 3, ωστόσο βελτιστοποίηση με χρήση αλγορίθμων πραγματοποιείται για οποιονδήποτε τέτοιο αριθμό.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής η χρήση αλγορίθμων αξιολόγησης αποσκοπεί στην ευρύτερη δυνατή απόδοση του συνόλου των βέλτιστων σχεδιάσεων για έναν προκαθορισμένο αριθμό υπολογισμών. Η επιλογή μιας ή περισσότερων λύσεων από τις παραχθείσες εξαρτάται από την σχετική σημαντικότητα των κριτηρίων που έχουν επιλεγεί και αποτελεί αντικείμενο της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων.

Ο αλγόριθμος που θα χρησιμοποιηθεί για τις ανάγκες της βελτιστοποίησης ανήκει στην κατηγορία των γενετικών αλγορίθμων, των οποίων η λειτουργία παρουσιάζει ομοιότητες με τη διαδικασία της πραγματικής φυσικής εξέλιξη των γενεών. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται κάποιες αρχικές λύσεις (γονείς) από τις οποίες παράγονται νέες (απόγονοι) μέσω των διαδικασιών της μετάλλαξης και της διασταύρωσης των χαρακτηριστικών των γονέων τα οποία και αποτελούν τις μεταβλητές σχεδίασης. Η διαδικασία παραγωγής νέων γενεών βασίζεται στην επιβίωση των ισχυρότερων γονέων όπως συμβαίνει και στη φύση. Αν ένας γονέας έχει καλύτερα χαρακτηριστικά από έναν άλλο έχει περισσότερες πιθανότητες να επιλεγεί για την παραγωγή νέων απογόνων. Η επανάληψη της διαδικασίας παραγωγής γενεών από τις προηγούμενες οδηγεί στη σταδιακή και συνεχή βελτίωση της απόδοσης των λύσεων μέχρι να τερματιστεί η διαδικασία και να καταλήξουμε στις βέλτιστες.

Δεδομένου ότι οι μεταβλητές σχεδίασης που καθιστούν μια λύση καλύτερη από άλλες είναι άγνωστες πριν την έναρξη της διαδικασίας, η αναζήτηση τους υλοποιείται με εισαγωγή ενός παράγοντα τυχαιότητας στη διακύμανση των τιμών τους. Η τυχαιότητα αυτή εξασφαλίζεται με στοχαστικό προσδιορισμό της συχνότητας διασταύρωσης και μετάλλαξης των χαρακτηριστικών των γονέων.

Στην περίπτωση της γάστρας που εξετάζεται οι μεταβλητές σχεδίασης μπορεί να επηρεάζουν γωνίες χαρακτηριστικών καμπυλών, κύριες διαστάσεις, αδιάστατους συντελεστές και γενικώς οποιοδήποτε στοιχείο του πλοίου πιθανόν επηρεάζει τα κριτήρια βελτιστοποίησης. Τα κριτήρια αυτά αποτελούν τα προκύπτοντα αποτελέσματα της υδροδυναμικής τους αξιολόγησης που περιεγράφηκαν νωρίτερα. Δεδομένου ότι έχουμε δύο αντικειμενικές συναρτήσεις των οποίων αναζητείται η ελάχιστη τιμή, το πρόβλημα που θα επιλυθεί είναι ελαχιστοποίησης μέσω πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης με περιορισμούς.

1.5 Η ενοποιημένη διαδικασία βελτιστοποίησης της υδροδυναμικής συμπεριφοράς πλοίων

Στη συνήθη περίπτωση, η βελτιστοποίηση μιας μορφής πλοίου από άποψη υδροδυναμικής αφορά την ελαχιστοποίηση της συνολικής του αντίστασης η οποία σε συνδυασμό με τον συντελεστή πρόωσης καθορίζει την κατανάλωση καυσίμου. Δεδομένου ότι το κόστος καυσίμου αποτελεί το κυριότερο μεταξύ του συνόλου των ημερήσιων εξόδων ενός πλοίου, η ελαχιστοποίηση του αποτελεί ζήτημα μείζονος σημασίας.

Η εκτίμηση της αντίστασης κυματισμού από το SWAN 2 βασίζεται στην ολοκλήρωση των πιέσεων πάνω στο στερεό σύνορο. Ωστόσο, στην πραγματικότητα το πεδίο πιέσεων

επηρεάζεται από την συνεκτικότητα που όπως αναφέρθηκε νωρίτερα δε λαμβάνεται υπόψη από τη θεωρία δυναμικού που χρησιμοποιεί το συγκεκριμένο λογισμικό. Κατά συνέπεια, και προς διερεύνηση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων, η βελτιστοποίηση θα πραγματοποιηθεί δύο φορές, με πρώτο κριτήριο αφενός την αντίσταση κυματισμού στην πρώτη κι αφετέρου το μέγιστο ύψος των παραγόμενων από το πλοίο κυματισμών στη δεύτερη.

Όσον αφορά την απόκρισή του σε κυματισμούς που αποτελεί το δεύτερο κριτήριο, συνήθως δε λαμβάνεται υπόψη κατά τη διαδικασία μελέτης και σχεδίασης. Ωστόσο αποτελεί παράγοντα που καθορίζει τη γενικότερη απόδοση του σχεδιαζόμενου πλοίου καθώς επηρεάζει τις ελκτικές του ικανότητες, την πρόσθετη αντίσταση λόγω κινήσεων, την άνεση επιβατών και πληρώματος και σε μερικές περιπτώσεις ακραίων καιρικών συνθηκών την πιθανότητα επιβιωσιμότητάς του. Ως εκ τούτου, η καλή συμπεριφορά ενός πλοίου σε τυχαίους κυματισμούς, που κατά κανόνα υφίστανται κατά τη διάρκεια της πλεύσης του, αποτελεί επιθυμητό χαρακτηριστικό ανεξάρτητα από την επιδίωξη επίτευξης του κατά το στάδιο της σχεδίασης.

Το εύρος και η επιτάχυνση των κινήσεων ενός πλοίου κατά την αλληλεπίδραση του με κύματα επηρεάζεται κυρίως από γενικά χαρακτηριστικά της σχεδίασης όπως οι κύριες διαστάσεις και η θέση του κέντρου βάρους αλλά σε κάποιο βαθμό και από γεωμετρικές λεπτομέρειες. Επομένως η ελαχιστοποίηση αυτών των κινήσεων μπορεί να εξασφαλιστεί τόσο με παρεμβάσεις κατά το στάδιο της αρχικής σχεδίασης όσο και με κάποιες που μπορούν να γίνουν σε τελικό στάδιο ή ακόμα και σε υπάρχουσες σχεδιάσεις. Σε κάθε περίπτωση κριτήριο συνήθως δεν αποτελεί ο προσδιορισμός συγκεκριμένων τιμών που απαιτείται να μην παραβιαστούν αλλά η κατά το δυνατόν καλύτερη επίδοση.

Τα χαρακτηριστικά μιας γεωμετρίας που εξασφαλίζουν τις ελάχιστες κινήσεις κι επιταχύνσεις, στη γενική περίπτωση μπορεί να προκαλέσουν αύξηση της αντίστασης της σε ήρεμο νερό. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την αξία εφαρμογής ενός σχήματος πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης με αξιολόγηση και των δύο μεγεθών ταυτόχρονα. Αυτή η επιλογή αποτελεί μια σαφώς καλύτερη προσέγγιση από τη βελτιστοποίηση μιας γάστρας σε δύο διαφορετικά στάδια με ένα κριτήριο για κάθε ένα. Σε μια τέτοια διαδικασία η βελτιστοποίηση οδηγεί σε μια σαφή εικόνα την απόδοσης της γεωμετρίας με βάση τα δύο κριτήρια και εναπόκειται στο σχεδιαστή να κρίνει την σχετική σημαντικότητα καθενός.

Η παραπάνω λογική αφορά όλες τις πτυχές απόδοσης ενός πλοίου που διέπονται από κανόνες αλληλεπίδρασης καθώς απώτερος στόχος είναι πάντοτε η συνολική βελτίωση της επίδοσης του πλοίου. Στην περίπτωση της υδροδυναμικής ένας παράγοντας που έχει

σημαντική συμμετοχή στη συνολική απόδοση είναι το προωστήριο μέσο (προπέλες) καθώς υπάρχει αμφίπλευρη επιρροή των αποδόσεων αυτού και της περιβάλλουσας περιοχής της γάστρας. Συνεπώς, η αποδοτικότερη πρακτική συνίσταται στη βελτιστοποίηση του αυτοπροωθούμενου πλοίου τόσο σε ήρεμο νερό όσο και σε κυματισμούς. Ωστόσο, το πρόβλημα αυτό είναι αρκετά περίπλοκο και ξεφεύγει κατά πολύ από τη μελέτη που τελείται στην παρούσα εργασία.

Συνοψίζοντας, η μελέτη αυτή στοχεύει στην υδροδυναμική βελτιστοποίηση τη γυμνής γάστρας ενός ταχύπλουου Ε/Γ-Ο/Γ στην υπηρεσιακή του ταχύτητα, απουσία παρελκομένων και προωστήριου μέσου. Για τη διαδικασία βελτιστοποίησης κριτήρια θα αποτελέσουν αφενός η αντίσταση κυματισμού ως συνιστώσα της συνολικής αντίστασης ρυμούλκησης κατά την πλεύση σε ήρεμο νερό κι αφετέρου η τιμή της επιτάχυνσης στην πλήρη στην κίνηση προνευταισμού και κατά την αλληλεπίδραση με αρμονικούς κυματισμούς.

Η αρχική και μια επιλεγείσα γεωμετρία θα υποβληθούν σε μοντελοποίηση, με χρήση τρισδιάστατων πλεγμάτων, της πλεύσης τους σε ήρεμο νερό, αφενός με χρήση της μη συνεκτικής κι αφετέρου της συνεκτικής θεωρίας προκειμένου να πιστοποιηθεί η επιτευχθείσα βελτίωση της αντίστασης κυματισμού και της συνολικής αντίστασης ρυμούλκησης γυμνής γάστρας, αντίστοιχα.

Η πιστοποίηση των αποτελεσμάτων με χρήση τρισδιάστατων πλεγμάτων, εκτός του υπολογισμού της συνολικής αντίστασης, εξυπηρετεί και μια επιπλέον σκοπιμότητα που προκύπτει από περιορισμούς της υπολογιστικής διαδικασίας με χρήση των μεθόδων επίπεδων επιφανειακών στοιχείων (panel methods). Στις μεθόδους αυτές το στερεό σύνορο και η ελεύθερη επιφάνεια αποτελούν ένα ενιαίο τρισδιάστατο σύνολο από επίπεδα στοιχεία που διέπεται από έναν κανόνα συνέχειας στο σύνολο της έκτασης τους. Αυτός ο κανόνας θα πρέπει απαραίτητως να ικανοποιείται σε κάθε πιθανή εκτέλεση υπολογισμών προκειμένου να έχουμε αξιόπιστα αποτελέσματα.

Σε πολλές περιπτώσεις μορφών γάστρας όπου έχουμε νομείς με γνήσια αύξουσα μεταβολή και απουσία ιδιαιτεροτήτων όπως ο βολβός, η προαναφερθείσα απαίτηση δεν αποτελεί τροχοπέδη καθώς ικανοποιείται σε κάθε περίπτωση. Ωστόσο σε άλλες περιπτώσεις, όπως είναι κι αυτή που εξετάζεται, η παρουσία του βολβού καθώς και νομέων με πολλαπλά σημεία τομής με την ίσαλο προκαλούν διαταραχές κατά την διαδικασία εκτέλεσης των υπολογισμών. Το φαινόμενο αυτό εντείνεται από το γεγονός πως η υπολογιστική διαδικασία εκτελείται επαναληπτικά για διάφορες τιμές παράλληλης βύθισης και διαγωγής προκειμένου να βρεθεί η πραγματική κατάσταση πλεύσης στην ταχύτητα

προσομοίωσης. Κατά τη διαδικασία αυτή, η διακύμανση της παράλληλης βύθισης και διαγωγής αυξάνει τις πιθανότητες εμφάνισης ασυνέχειας στο ενοποιημένο πλέγμα στερεού συνόρου κι ελεύθερης επιφάνειας.

Για την αποφυγή τέτοιων προβλημάτων η εξεταζόμενη γεωμετρία θα υποστεί τροποποιήσεις που όμως θα πρέπει να προκαλούν την ελάχιστη δυνατή διαφοροποίηση από την πραγματική μορφή. Κατά συνέπεια, η περαιτέρω αξιολόγηση με χρήση τρισδιάστατων πλεγμάτων, αποσκοπεί και στη διασφάλιση της εξαγωγής συμπερασμάτων που δεν επηρεάζονται σημαντικά από την προαναφερθείσα τροποποίηση της γεωμετρικής μορφής. Η γεωμετρική αναπαράσταση και οι αναγκαίες προσαρμογές θα αναλυθούν εκτενώς στο επόμενο κεφάλαιο.

Κεφάλαιο 2. Παραμετρική μοντελοποίηση της γάστρας πλοίων

2.1 Γενικά στοιχεία παραμετρικής σχεδίασης

Η παραμετρική μοντελοποίηση αναφέρεται στην κατασκευή μιας γεωμετρικής αναπαράστασης με χρήση αλληλεξαρτώμενων παραμέτρων που επηρεάζουν τη μορφή της. Στην παρούσα εργασία θα μοντελοποιηθεί το δοθέν επιβατηγό ταχύπλοο σκάφος, εκκινώντας από τη σχεδίαση των κύριων καμπυλών όπως τα FOS, FOB, CPC και το σύνορο του καταστρώματος και καταλήγοντας στον προσδιορισμό των νομέων και τελικά των επιφανειών που στο σύνολο τους αποτελούν τη γάστρα.

Σε μια συμβατική, μη παραμετρική σχεδίαση, το σύνολο των χαρακτηριστικών που προσδιορίζουν το πλοίο είναι σταθερά και για την ολοκλήρωση της διαδικασίας αρκεί η τελική μορφή να συνδυάζει τα επιμέρους στοιχεία με τέτοιο τρόπο ώστε να προκύπτει μια γεωμετρία που πληροί τις απαιτήσεις συνέχειας και ομαλότητας σε όλα τα σημεία της. Από την άλλη μεριά, σε μια παραμετρική σχεδίαση θα πρέπει για κάθε πιθανή μεταβολή της γεωμετρίας που προκύπτει από μεταβολή των παραμέτρων της να διατηρούνται τα ίδια στοιχεία ομαλότητας. Αυτό καθιστά τη διαδικασία της μοντελοποίησης ιδιαίτερα περίπλοκη και ειδικά στην περίπτωση περιοχών του πλοίου όπου έχουμε εξάρτηση της μορφής τους από περισσότερες από μια παραμέτρους. Σε αυτή την περίπτωση οι πιθανές μορφές που μπορεί να λάβει μια περιοχή της γάστρας κινείται σε χώρο που έχει διάσταση ανάλογη με τον αριθμό των τοπικών παραμέτρων που την επηρεάζουν. Κατ' επέκταση, σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να προκύψουν απαράδεκτες μορφές ακόμα και για συνδυασμό τιμών παραμέτρων που δεν ανήκουν στα άκρα του αντίστοιχου εύρους οι οποίες συνήθως είναι πιθανότερο να δημιουργήσουν ανωμαλίες. Η εύρεση του συνδυασμού των τιμών που προκαλούν τέτοια προβλήματα είναι πολλές φορές δύσκολη ή και αδύνατη και η τεχνική που μπορεί να εφαρμοστεί για την καταστολή της εμφάνισης απαράδεκτων μορφών είναι η εισαγωγή απαιτήσεων που απορρίπτουν τέτοιες περιπτώσεις όταν υπάρχουν.

Για τη διαχείριση μιας παραμετρικής γεωμετρίας απαιτείται η χρήση παραμέτρων στο σύνολο των επιμέρους περιοχών ενδιαφέροντος που συνδέονται μεταξύ τους με σχέσεις αλληλεξάρτησης οι οποίες καθορίζουν το διαχωρισμό τους σε εξαρτημένες κι ανεξάρτητες. Οι εξαρτημένες παράμετροι επηρεάζονται από άλλες εξαρτημένες ή ανεξάρτητες και παραμένουν δέσμιες των αλλαγών των τιμών από τις οποίες εξαρτώνται. Αντίθετα, οι ανεξάρτητες μπορούν να λάβουν τιμές κατά τη βούληση του σχεδιαστή και είναι οι μοναδικές που μπορούν να αποτελέσουν τις μεταβλητές σχεδίασης.

Ο αριθμός των μεταβλητών σχεδίασης και παραμέτρων καθώς και ο βαθμός στον οποίο αυτές επηρεάζουν τη γεωμετρία αποτελεί αντικείμενο που θα πρέπει να μελετηθεί εκτενώς προκειμένου να καθοριστεί ο βέλτιστος τρόπος εξυπηρέτησης του σκοπού της μελέτης. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά δεν καθορίζονται από γενικούς κανόνες καθώς μεγάλος αριθμός παραμέτρων συνεπάγεται τον εκτενέστερο έλεγχο της γεωμετρίας σε τοπικό επίπεδο αλλά ταυτόχρονα και μια δυσκολότερα διαχειρίσιμη σχεδίαση. Αντίθετα μικρός αριθμός παραμέτρων μπορεί να εξασφαλίσει ότι ελαχιστοποιείται η πιθανότητα εμφάνισης ανωμαλιών λόγω της αλληλεπίδρασης διαφορετικών παραμέτρων, ωστόσο η απόκλιση από μια αρχική μορφή που θέλουμε να προσεγγίσουμε θα είναι εν γένει μεγαλύτερη.

Στα πλαίσια της παρούσης εργασίας επιδίωξη αποτελεί η βελτιστοποίηση μιας υπάρχουσας μορφής κι επομένως η ακρίβεια προσέγγισης της αποτελεί σημαντικό παράγοντα. Η παραμετρική σχεδίαση θα πραγματοποιηθεί με χρήση σχεδιαστικών εργαλείων του CAESSES – Friendship Framework σε συνδυασμό με πολυωνυμικές καμπύλες όπως οι NURBS (Non Uniform Rational B-Splines) και οι B-Splines. Οι καμπύλες αυτές αποτελούν ισχυρά σχεδιαστικά εργαλεία που σήμερα χρησιμοποιούνται εκτενέστατα στη σχεδίαση πολύπλοκων γεωμετρικών μορφών. Οι ιδιότητες τους περιγράφονται στις ενότητες που ακολουθούν καθώς αποτελούν το θεωρητικό υπόβαθρο της βελτιστοποίησης αναπαράστασης πολύπλοκων καμπυλών που πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον του CAESSES-Friendship Framework.

2.2 Ιδιότητες καμπυλών NURBS και B-Splines

Οι δύο αυτοί τύποι καμπυλών βασίζονται στην ίδια φιλοσοφία και η διαφορά τους έγκειται στο γεγονός πως οι NURBS ορίζονται από περισσότερες παραμέτρους που επηρεάζουν τη μορφή της καμπύλης. Οι NURBS αποτελούν γενίκευση της ομάδας καμπυλών B-Splines.

Για την κατασκευή των καμπυλών NURBS απαιτείται να προσδιοριστούν τα επόμενα στοιχεία :

- $P_0, P_1, P_2, \dots, P_n$, $n + 1$ σημεία ελέγχου
- $w_0, w_1, w_2, \dots, w_n$, $n + 1$ συντελεστές βάρους που αντιστοιχούν στα σημεία ελέγχου
- $p = k - 1$ ο βαθμός της καμπύλης όπου k η τάξη της και $k \leq n + 1$
- $U = \{u_0, u_1, u_2, \dots, u_m\}$, $0 < u_i < 1$, το κομβοδιάγραμμα όπου $m = n + k$

Η μορφή της καμπύλης επηρεάζεται άμεσα από τις θέσεις των σημείων ελέγχου. Το σύνολο των ευθυγράμμων τμημάτων που ενώνει τα σημεία ελέγχου διαδοχικά αποτελεί το πολύγωνο ελέγχου.

Οι συντελεστές βάρους αποτελούν ένα σύνολο από αλγεβρικούς αριθμούς, κάθε ένας από τους οποίους επηρεάζει τη μορφή του τμήματος της καμπύλης που εξαρτάται από το

σημείο ελέγχου στο οποίο ο εκάστοτε συντελεστής αντιστοιχεί. Η επιρροή των συντελεστών βάρους σχετίζεται με τη σύγκριση της τιμής τους ως προς αυτές των υπολοίπων.

Ο βαθμός της καμπύλης είναι μια ιδιαίτερος σημαντική παράμετρος που καθορίζει την ευελιξία της, τη μορφή της, τον αριθμό των σημείων που επηρεάζουν ένα συγκεκριμένο τμήμα της καθώς και τον ελάχιστο αριθμό σημείων που τελικά απαιτούνται για την κατασκευή της.

Το κομβοδιάνυσμα είναι ένα σύνολο τιμών που επίσης επηρεάζουν τη μορφή της καμπύλης αλλά και την τάξη της συνέχειας στο σύνολο του μήκους της. Η συνέχεια αυτή καθορίζεται από την απόσταση των διαδοχικών κόμβων. Στην περίπτωση που οι κόμβοι του κομβοδιανύσματος ισαπέχουν έχουμε ένα ομοιόμορφο κομβοδιάνυσμα ενώ όταν αυτό δεν ισχύει το κομβοδιάνυσμα είναι ανομοιόμορφο. Η συνέχεια της καμπύλης μεταξύ των τμημάτων που επηρεάζονται από διαδοχικούς κόμβους εξαρτάται από την πολλαπλότητα μιας συγκεκριμένης τιμής και προκύπτει από την επόμενη σχέση :

$$C^f = C^{k-r-1}$$

Όπου $r + 1$ είναι η πολλαπλότητα του κόμβου που επηρεάζει το συγκεκριμένο σημείο. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων τα ακραία σημεία είναι επιθυμητό να παρεμβάλλονται, κάτι που απαιτεί συνέχεια μηδενικής τάξης. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε :

$$C^f = C^{k-r-1} = C^0 \Rightarrow$$

$$k - r - 1 = 0 \Rightarrow$$

$$k = r + 1$$

Επομένως τα ακραία σημεία ελέγχου παρεμβάλλονται όταν έχουμε ένα πλήθος κόμβων που είναι ίσο με την τάξη της καμπύλης με ίδιες τιμές για κάθε ένα από τα δύο άκρα του κομβοδιανύσματος. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε ένα ανοικτό κομβοδιάνυσμα.

Με χρήση των κόμβων του κομβοδιανύσματος κατασκευάζονται οι συναρτήσεις βάσεις που προκύπτουν από τις ακόλουθες δύο σχέσεις :

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, & u_i < u < u_{i+1} \\ 0, & \text{elsewhere} \end{cases}$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u)$$

Οι μεγιστοβάθμιες συναρτήσεις βάσεις έχουν τον ίδιο βαθμό με την καμπύλη. Η πολυωνυμική καμπύλη NURBS προκύπτει τότε από την επόμενη σχέση :

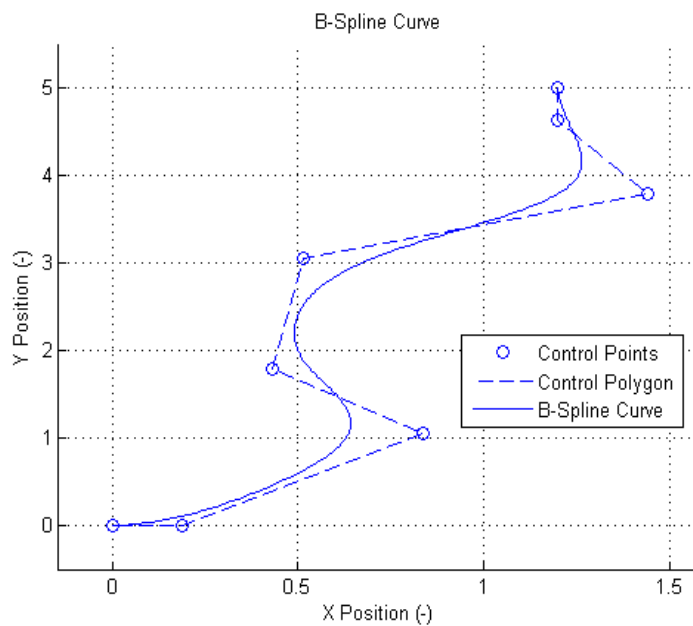
$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) \omega_i P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) \omega_i}, \quad 0 < u < 1$$

Το εκάστοτε σημείο $C(u)$ της καμπύλης είναι στην πραγματικότητα πίνακας με στοιχεία τις συντεταγμένες του και κάθε ένα προκύπτει από τις συντεταγμένες του συνόλου των σημείων ελέγχου που το επηρεάζουν και που προκύπτουν από τους πίνακες P_i .

Ειδική περίπτωση των καμπυλών NURBS αποτελούν οι B-Splines, οι οποίες διαφέρουν σε σχέση με τις πρώτες μόνο στην απουσία των βαρών για κάθε σημείο. Αυτές προκύπτουν από την επόμενη σχέση :

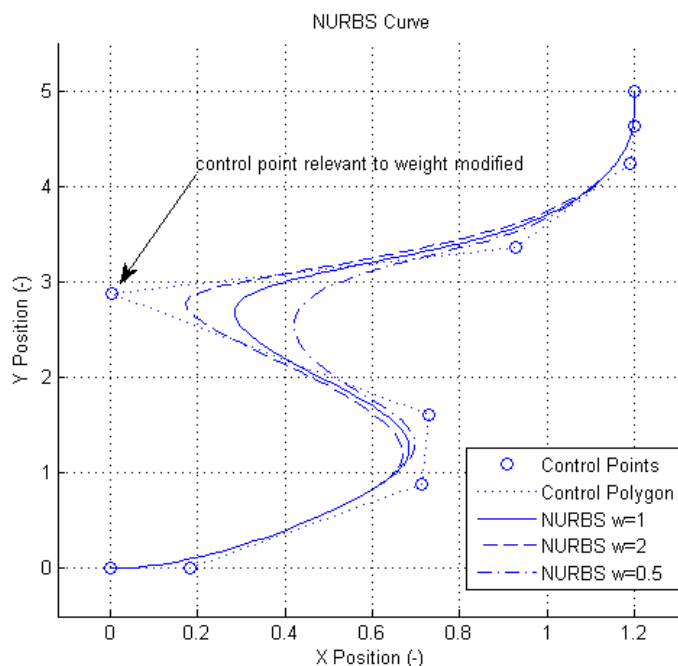
$$C(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)P_i$$

Η απουσία των βαρών τις καθιστά λιγότερο ευέλικτες σε γεωμετρικές μεταβολές ωστόσο είναι λιγότερες και οι παράμετροι που χρειάζεται να καθοριστούν. Στο σχήμα 4 φαίνεται η αναπαράσταση μιας καμπύλης B-Spline όπως αυτή προκύπτει από τα σημεία ελέγχου που παρουσιάζονται στο ίδιο σχήμα.



Σχήμα 4. Αναπαράσταση καμπύλης B-Spline

Στο σχήμα 5 έχουμε την αναπαράσταση μιας καμπύλης NURBS για τρεις διαφορετικές τιμές ενός συντελεστή βάρους που αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο σημείο ελέγχου. Με αυτόν τον τρόπο καταδεικνύεται η επιρροή που μπορεί να έχει η μεταβολή ενός τέτοιου συντελεστή στη μορφή της καμπύλης. Τα σημεία ελέγχου και οι κόμβοι του κομβοδιανύσματος παραμένουν σταθεροί για όλες τις περιπτώσεις. Οι συντελεστές βάρους που αντιστοιχούν στα υπόλοιπα σημεία ελέγχου έχουν τιμή 1 που παραμένει αμετάβλητη.



Σχήμα 5. Αναπαράσταση καμπύλης NURBS

Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται επίσης πως από τη μεταβολή ενός συντελεστή βάρους έχουμε επιρροή της καμπύλης σε ένα συγκεκριμένο μόνο κομμάτι της. Τα τμήματα της που δεν επηρεάζονται από το συγκεκριμένο σημείο ελέγχου παραμένουν αμετάβλητα.

2.3 Παρεμβολή καμπυλών με χρήση NURBS και B-Splines

Μετά την απόδοση των χαρακτηριστικών των καμπυλών NURBS και B-Splines θα αναλυθεί ο τρόπος προσέγγισης μη παραμετρικών καμπυλών με αντίστοιχες πολυωνυμικές, που θα αποδίδουν την αρχική μορφή κατά το δυνατόν καλύτερα. Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιηθούν καμπύλες B-Splines που στη συνέχεια μπορούν εύκολα να μετατραπούν σε NURBS με την εισαγωγή βαρών σε κάθε σημείο ελέγχου. Σε αυτή τη βάση υπάρχει εκτενής μελέτη από τους Piegl και Tiller⁹.

Η εξίσωση που δίνει τη γεωμετρία μιας καμπύλης B-Spline παρατέθηκε ανωτέρω και προκύπτει από το σύνολο των τιμών της παραμέτρου u στο διάστημα $[0, 1]$. Η προσέγγιση λοιπόν μιας δεδομένης μη παραμετρικής καμπύλης συνίσταται στην απαίτηση να παρεμβάλλεται ένα σύνολο σημείων της. Είναι προφανές πως όσο περισσότερα είναι αυτά τα σημεία τόσο καλύτερη είναι η προσέγγιση της αρχικής καμπύλης. Έστω λοιπόν ότι απαιτούμε να παρεμβάλλονται τα σημεία Q_i μιας δεδομένης καμπύλης. Τότε προκύπτει ένα σύστημα $(n + 1) \times (n + 1)$, εξισώσεων και αγνώστων που φαίνεται στη συνέχεια :

⁹ Piegl, L., Tiller, W., (1997), The NURBS Book, 2nd edition

$$\mathbf{Q}_k = \mathbf{C}(\bar{u}_k) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(\bar{u}_k) \mathbf{P}_i$$

Από τη μορφή του συστήματος είναι εμφανές ότι ο αριθμός των σημείων παρεμβολής που ανήκουν στη μη παραμετρική καμπύλη, είναι ίσος με τον αριθμό των σημείων ελέγχου της καμπύλης B-Spline που θα τα παρεμβάλει. Επομένως τίθεται άμεσα το ζήτημα της εύρεσης του επιθυμητού αριθμού σημείων. Αυτό δεν αποτελεί προφανή επιλογή καθώς ο αριθμός αυτός θα έχει αντικρουόμενες επιπτώσεις στον στόχο που θέλουμε να πετύχουμε. Μεγάλος αριθμός σημείων συνεπάγεται καλή προσέγγιση της αρχικής καμπύλης, αλλά και περιορισμό της διαχειρισιμότητας της προκύπτουσας B-Spline. Κατά συνέπεια, η επιλογή του αριθμού των σημείων αυτών εξαρτάται από την μεταβλητότητα της μορφής της αρχικής καμπύλης καθώς και από τη σημαντικότητα διατήρησης της. Αυτό αποτελεί αντικείμενο που θα αξιολογηθεί ανά περίπτωση καθώς δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν όλες οι καμπύλες του πλοίου με τον ίδιο τρόπο.

Προς το παρόν θα παρατεθεί η μεθοδολογία προσέγγισης και τα επιμέρους ζητήματα που αφορούν το κατά πόσο αυτή η προσέγγιση είναι ικανοποιητική, θα εξεταστούν όταν προκύψουν. Η ποιότητα της προσέγγισης εξαρτάται τόσο από την επιλογή του αριθμού και της θέσης των σημείων παρεμβολής αλλά και από τα δεδομένα που στοιχειοθετούν τη μεθοδολογία.

Τα πρώτα ζητήματα που ανακύπτουν στην διαδικασία παρεμβολής είναι η επιλογή των παραμέτρων \bar{u}_k και η κατασκευή του κομβοδιανύσματος \mathbf{U} . Οι παράμετροι \bar{u}_k εκφράζουν την προσέγγιση της θέσης στο επικαμπύλιο μήκος της καμπύλης B-Spline, με βάση τα δεδομένα των σημείων παρεμβολής. Για τον καθορισμό τους υπάρχουν τρεις βασικές μεθοδολογίες :

1. Μέθοδος ισοκατανομής

$$\bar{u}_0 = 0$$

$$\bar{u}_n = 1$$

$$\bar{u}_k = \frac{k}{n}, \quad k = 1, \dots, n-1$$

2. Μέθοδος chord length

$$d = \sum_{k=1}^n |\mathbf{Q}_k - \mathbf{Q}_{k-1}|$$

$$\bar{u}_0 = 0$$

$$\bar{u}_n = 1$$

$$\bar{u}_k = \bar{u}_{k-1} + \frac{|\mathbf{Q}_k - \mathbf{Q}_{k-1}|}{d}, \quad k = 1, \dots, n-1$$

3. Μέθοδος centripetal

$$d = \sum_{k=1}^n \sqrt{|Q_k - Q_{k-1}|}$$

$$\bar{u}_0 = 0$$

$$\bar{u}_n = 1$$

$$\bar{u}_k = \bar{u}_{k-1} + \frac{\sqrt{|Q_k - Q_{k-1}|}}{d}, \quad k = 1, \dots, n-1$$

Οι δύο τελευταίες μέθοδοι είναι οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες ενώ η μέθοδος centripetal δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε περιπτώσεις που έχουμε απότομη μεταβολή της γεωμετρίας.

Για την παραγωγή του (ανοικτού) κομβοδιανύσματος μια συνήθης πρακτική είναι η κατασκευή του ως ομοιόμορφου όπως φαίνεται στη συνέχεια :

$$u_0 = \dots = u_p = 0$$

$$u_{m-p} = \dots = u_m = 1$$

$$u_{j+p} = \frac{j}{n-p+1}, \quad j = 1, \dots, n-p$$

Ωστόσο η κατασκευή του κομβοδιανύσματος ως ομοιόμορφου μπορεί να οδηγήσει σε ιδιομορφία το σύστημα εξισώσεων της παρεμβολής της καμπύλης και για αυτό προτιμάται η επόμενη μέθοδος.

$$u_0 = \dots = u_p = 0$$

$$u_{m-p} = \dots = u_m = 1$$

$$u_{j+p} = \frac{1}{p} \sum_{i=j}^{j+p-1} \bar{u}_i, \quad j = 1, \dots, n-p$$

Σε αυτή, για κάθε κόμβο χρησιμοποιούνται οι παραμετρικές θέσεις του μήκους της καμπύλης στο τμήμα το οποίο επηρεάζει.

Με βάση αυτά μπορεί να λυθεί το σύστημα εξισώσεων παρεμβολής που παρατέθηκε νωρίτερα από το οποίο προκύπτουν τα σημεία ελέγχου της καμπύλης και φαίνεται στη συνέχεια σε μητρωϊκή μορφή :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ N_{0,p} & N_{1,p} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & N_{k-1,p} & N_{k,p} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ \vdots \\ P_{n-1} \\ P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_0 \\ Q_1 \\ \vdots \\ Q_{n-1} \\ Q_n \end{bmatrix}$$

Ο πρώτος πίνακας είναι διάστασης $(n + 1) \times (n + 1)$ και περιέχει τις συναρτήσεις βάσης που αντιστοιχούν σε κάθε τμήμα της καμπύλης B-Spline. Η θέση της πρώτης μη μηδενικής συνάρτησης βάσης κάθε σειράς, προκύπτει από το διάστημα του κομβοδιανύσματος στο οποίο ανήκει η παράμετρος \bar{u}_k , που αντιστοιχεί στο σημείο παρεμβολής το οποίο βρίσκεται στην ίδια σειρά με την εκάστοτε ομάδα συναρτήσεων βάσης.

Για την εύρεση των σημείων ελέγχου αρκεί η επίλυση του συστήματος με κάποια από τις διαθέσιμες μεθόδους. Η επιλογή της μεθόδου είναι ελάσσονος σημασίας καθώς όλες καταλήγουν στο ίδιο αποτέλεσμα. Για τις ανάγκες του παρόντος επιλέχθηκε η μέθοδος της τριγωνοποίησης του πίνακα των συναρτήσεων βάσης που οδηγεί σε άμεση επίλυση του συστήματος μέσω αντικαταστάσεων του συνόλου των αγνώστων. Αν ονομάσουμε τον πίνακα των συναρτήσεων βάσης A τότε το σύστημα γράφεται στην επόμενη μορφή.

$$AP = Q$$

Έστω L ο τριγωνικός πίνακας με μηδενικά τα στοιχεία που βρίσκονται άνω της διαγωνίου του και U ο τριγωνικός πίνακας με μηδενικά τα στοιχεία που βρίσκονται κάτω από αυτή. Αυτοί οι πίνακες απαιτείται να έχουν γινόμενο τον πίνακα A κι έτσι έχουμε :

$$LU = A \Rightarrow \begin{bmatrix} L_{00} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ L_{10} & L_{11} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ L_{n-1,0} & L_{n-1,1} & \dots & L_{n-1,n-1} & 0 \\ L_{n0} & L_{n1} & \dots & L_{n,n-1} & L_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{00} & U_{01} & \dots & U_{0,n-1} & U_{0,n} \\ 0 & U_{11} & \dots & U_{1,n-1} & U_{1,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & U_{n-1,n-1} & U_{n-1,n} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & U_{n,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{00} & A_{01} & \dots & A_{0,n-1} & A_{0,n} \\ A_{10} & A_{11} & \dots & A_{1,n-1} & A_{1,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ A_{n-1,0} & A_{n-1,1} & \dots & A_{n-1,n-1} & A_{n-1,n} \\ A_{n0} & A_{n1} & \dots & A_{n,n-1} & A_{nn} \end{bmatrix}$$

Το σύστημα τροποποιείται σε μορφή που μπορεί εύκολα να λυθεί όπως φαίνεται στη συνέχεια :

$$AP = LUP = L(UP) = Ly = Q \Rightarrow$$

$$Ly = Q \Rightarrow \begin{bmatrix} L_{00} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ L_{10} & L_{11} & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ L_{n-1,0} & L_{n-1,1} & \dots & L_{n-1,n-1} & 0 \\ L_{n0} & L_{n1} & \dots & L_{n,n-1} & L_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_{n-1} \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_0 \\ Q_1 \\ \vdots \\ Q_{n-1} \\ Q_n \end{bmatrix}$$

Στην προκειμένη περίπτωση ο πίνακας των αγνώστων συντελεστών είναι ο y του οποίου τα στοιχεία βρίσκονται με διαδοχικές αντικαταστάσεις σύμφωνα με τις επόμενες σχέσεις :

$$y_0 = \frac{Q_0}{L_{00}}$$

$$y_i = \frac{1}{L_{ii}} \left(Q_i - \sum_{j=0}^{i-1} L_{ij} y_j \right), \quad i = 1, \dots, n$$

Αφού βρεθούν τα στοιχεία του πίνακα \mathbf{y} , εφαρμόζεται η αντίστροφη διαδικασία για να βρεθούν τα σημεία ελέγχου του πίνακα \mathbf{P} .

$$\mathbf{UP} = \mathbf{y} \Rightarrow \begin{bmatrix} U_{00} & U_{01} & \dots & U_{0,n-1} & U_{0,n} \\ 0 & U_{11} & \dots & U_{1,n-1} & U_{1,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & U_{n-1,n-1} & U_{n-1,n} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & U_{n,n} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ \vdots \\ P_{n-1} \\ P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_{n-1} \\ y_n \end{bmatrix}$$

Τα σημεία ελέγχου βρίσκονται από τις επόμενες δύο σχέσεις :

$$P_n = \frac{Q_n}{U_{nn}}$$

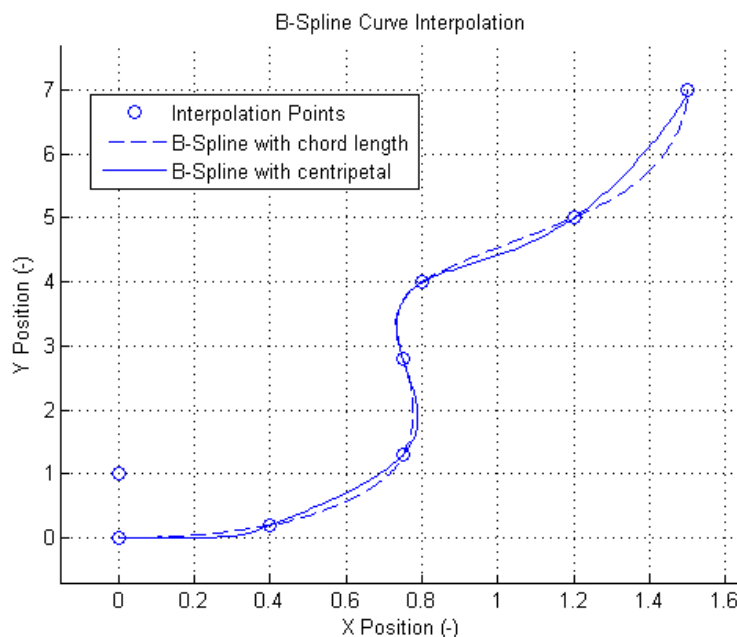
$$P_i = \frac{1}{U_{ii}} \left(y_i - \sum_{j=i+1}^n U_{ij} P_j \right), \quad i = n-1, \dots, 0$$

Με βάση αυτά μπορούμε να έχουμε μια πρώτη προσέγγιση της αρχικής καμπύλης κατά την οποία η παρεμβολή των σημείων που έχουν επιλεγεί αποτελεί την κατ' αρχήν απαίτηση του. Επιπρόσθετα στοιχεία που πρέπει να οριστούν είναι ο βαθμός της καμπύλης, η μέθοδος προσδιορισμού των παραμέτρων \bar{u}_k και ο αριθμός των συντεταγμένων των σημείων παρεμβολής ανάλογα με το αν η καμπύλη κείται σε επίπεδο ή τοποθετείται στον τρισδιάστατο χώρο.

Η εύρεση του συνόλου των σημείων ελέγχου και των κόμβων του κομβοδιανύσματος υπολογίζονται από πρόγραμμα του οποίου ο κώδικας έχει κατασκευαστεί από τον συντάκτη σε γλώσσα Visual C++, με βάση σημειώσεις της βιβλιογραφίας¹⁰.

Στο σχήμα 6 βλέπουμε ένα σύνολο τυχαίων σημείων και δύο καμπύλες B-Splines που τα παρεμβάλλουν. Για την πρώτη έχει χρησιμοποιηθεί η μέθοδος chord length, ενώ για τη δεύτερη η μέθοδος centripetal. Το πολύγωνο και τα σημεία ελέγχου έχουν παραλειφθεί για λόγους ευκρίνειας του σχήματος.

¹⁰ Piegl, L., Tiller, W., (1997), The NURBS Book, 2nd edition, Chapter 9



Σχήμα 6. Αναπαράσταση καμπύλης με διαφορετικές μεθόδους με χρήση B-Splines

Στο ανωτέρω σχήμα βλέπουμε πως όλα τα σημεία παρεμβολής που έχουν επιλεγεί, ανήκουν και στις δύο προκύπτουσες καμπύλες κι επομένως οι απαιτήσεις μας καλύπτονται και στις δύο περιπτώσεις. Ωστόσο συνάγεται πως δεν μπορεί να εξαχθεί συμπέρασμα σχετικά με την καλύτερη από τις δύο μεθόδους, καθώς αυτό είναι κάτι που θα εξαρτηθεί από τη σύγκριση των B-Splines με μια αρχική καμπύλη που θέλουμε να προσεγγίσουμε. Η εύρεση της καταλληλότερης μεθόδου αποτελεί αντικείμενο που θα εξεταστεί σε επόμενη ενότητα.

2.4 Απαιτήσεις συνέχειας μεταξύ δύο καμπυλών B-Splines

Κατά τη διαδικασία της σχεδίασης της γεωμετρίας υπάρχουν πολλές περιπτώσεις όπου δύο καμπύλες ή επιφάνειες έχουν ένα κοινό σημείο ή μια κοινή πλευρά αντίστοιχα. Στο σημείο επαφής των δύο στοιχείων συνήθως απαιτείται να έχουμε μιας συγκεκριμένης τάξης συνέχεια ανάλογα με το σημείο της γεωμετρίας στο οποίο αναφερόμαστε. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων αυτή η απαίτηση μπορεί να είναι μηδενικής, πρώτης, ή δεύτερης τάξης. Η συνέχεια πρώτης τάξης εξασφαλίζεται όταν έχουμε απλή ταύτιση των ακραίων σημείων ή πλευρών ενώ οι άλλες δύο είναι πιο σύνθετες και χρειάζεται να οριστούν περισσότερες απαιτήσεις. Δεδομένου ότι η συνέχεια μηδενικής τάξης είναι απλή περίπτωση, δεν χρειάζεται να αναλυθεί περισσότερο και κατ' επέκταση θα επικεντρωθούμε στις άλλες δύο.

Συνέχεια πρώτης τάξης καλείται αλλιώς και συνέχεια εφαπτομενικού διανύσματος και υφίσταται όταν το διάνυσμα που εφάπτεται της πρώτης καμπύλης στο σημείο P_n έχει ίδιο μέτρο και φορά με το αντίστοιχο διάνυσμα της δεύτερης καμπύλης στο σημείο P_0 . Αν θεωρήσουμε πως δεδομένα είναι τα στοιχεία της πρώτης καμπύλης τότε η συνέχεια εξασφαλίζεται με κατάλληλη χωροθέτηση των δύο πρώτων σημείων της δεύτερης. Συγκεκριμένα οι σχέσεις που συνδέουν τα ακραία σημεία ελέγχου με το εφαπτομενικό διάνυσμα είναι οι επόμενες :

$$-P_0 + P_1 = \frac{u_{p+1}}{p} D_0$$

$$-P_{n+1} + P_{n+2} = \frac{1 - u_{m-p-1}}{p} D_n$$

Τα σημεία ελέγχου στις παραπάνω εξισώσεις είναι διανύσματα με στοιχεία τις συντεταγμένες τους κάτι που ισχύει και για τα διανύσματα πρώτης παραγώγου D_0 και D_n . Οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να αποτελέσουν απαιτήσεις για μια καμπύλη ανεξάρτητα από το αν έχουν κοινό σημείο με άλλη, κάτι που βρίσκει ευρεία εφαρμογή στη ναυπηγική. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι καμπύλες των οποίων τα ακραία σημεία βρίσκονται πάνω στα FOS ή FOB. Προκειμένου να έχουμε ομαλή μορφή της προκύπτουσας μορφής γάστρας στην περιοχή του κοινού σημείου θα πρέπει το ακραίο εφαπτομενικό διάνυσμα να είναι ομοεπίπεδο με αυτές οι επιφάνειες. Σε αυτές τις περιπτώσεις δεν έχουμε συγκεκριμένα στοιχεία για το μέτρο του εφαπτομενικού διανύσματος ωστόσο μια λογική επιλογή είναι η διαστατοποίηση των αδιάστατων μοναδιαίων διανυσμάτων D_n ή D_0 με χρήση του μήκους d όπως αυτό ορίζεται από την χρησιμοποιούμενη μέθοδο παρεμβολής. Αυτή η τεχνική είναι και η προταθείσα από τη βιβλιογραφία που έχει χρησιμοποιηθεί¹¹. Η εισαγωγή του παράγοντα d εξασφαλίζει πως η τάξη μεγέθους του μέτρου των εφαπτομενικών διανυσμάτων είναι συγκρίσιμη με αυτή του επικαμπύλιου μήκους της αρχικής μη παραμετρικής καμπύλης.

Όταν απαιτείται συνέχεια εφαπτομενικού διανύσματος στα άκρα της καμπύλης έχουμε δύο ακόμα εξισώσεις που εισαγάγουν δύο ακόμα αγνώστους. Οι αγνώστοι αυτοί αποτελούν δύο επιπλέον σημεία ελέγχου τα οποία τοποθετούνται ανάμεσα στα δύο πρώτα και στα δύο τελευταία σημεία του συστήματος εξισώσεων παρεμβολής που παρατέθηκε νωρίτερα. Το σύστημα εξισώσεων που πρέπει να επιλυθεί σε αυτή την περίπτωση είναι το επόμενο :

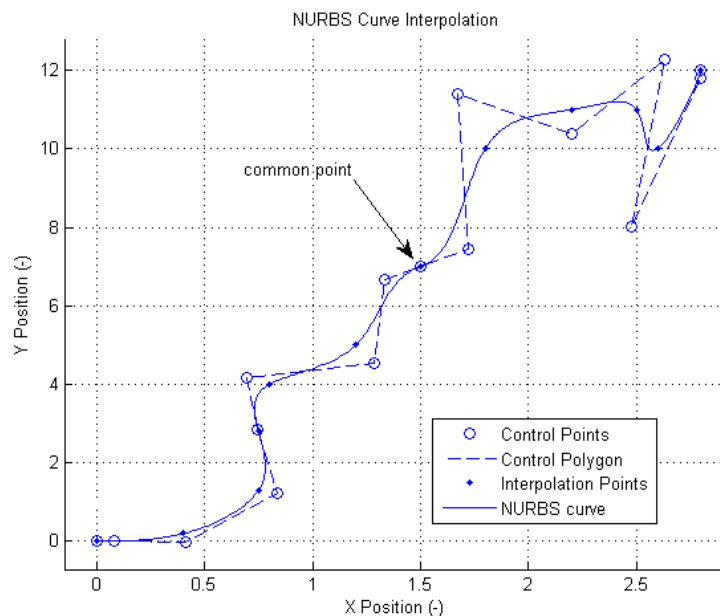
¹¹ Piegl, L., Tiller, W., (1997), The NURBS Book, 2nd edition, Chapter 9

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{p} & \frac{1}{p} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ u_{p+1} & u_{p+1} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ N_{0,p} & N_{1,p} & N_{1,p} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & N_{k-2,p} & N_{k-1,p} & N_{k,p} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -\frac{1}{1-u_{m-p-1}} & \frac{1}{1-u_{m-p-1}} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_n \\ P_{n+1} \\ P_{n+2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_0 \\ D_0 \\ Q_1 \\ \vdots \\ Q_{n-1} \\ D_n \\ Q_n \end{bmatrix}$$

Για την επίλυση του συστήματος ακολουθείται η ίδια διαδικασία της τριγωνοποίησης και των διαδοχικών αντικαταστάσεων. Στην περίπτωση που επιθυμούμε συνέχεια εφαπτομενικού διανύσματος της δεύτερης καμπύλης με την πρώτη έχουμε την επόμενη απαίτηση που αφορά τη δεύτερη :

$$D_0^{(2)} = D_n^{(1)}$$

Στη συνέχεια φαίνονται δύο καμπύλες που έχουν συνέχεια εφαπτομενικού διανύσματος στο κοινό τους σημείο.



Σχήμα 7. Αναπαράσταση δύο καμπυλών B-Splines με απαίτηση συνέχειας εφαπτομενικού διανύσματος.

Στο παραπάνω σχήμα είναι εμφανές πως η απαίτηση εφαπτομενικού διανύσματος οδήγησε σε διάταξη των δύο πρώτων σημείων της δεύτερης καμπύλης ώστε να είναι συνευθειακά με τα δύο τελευταία της πρώτης. Από τα τμήματα των δύο πολυγώνων ελέγχου γύρω από το κοινό σημείο είναι εμφανές πως τα γειτονικά σημεία των δύο καμπυλών δεν ισαπέχουν από αυτό. Η διάταξη αυτή προκύπτει από την απαίτηση ικανοποίησης των δύο εξισώσεων που συνδέουν το εφαπτομενικό διάνυσμα με τις

συντεταγμένες των σημείων ελέγχου καθώς και από την ανισοκατανομή των κομβοδιανυσμάτων των δύο καμπυλών.

Η συνέχεια δεύτερης τάξης καλείται και συνέχεια καμπυλότητας κι εκφράζει το ρυθμό μεταβολής του εφαπτομενικού διανύσματος κατά μήκος της καμπύλης. Η καμπυλότητα είναι κι αυτή ένα διάνυσμα που είναι κάθετο στο εφαπτομενικό κάθε σημείου της καμπύλης. Οι σχέσεις που εκφράζουν την καμπυλότητα φαίνονται στη συνέχεια :

$$C^2(0) = \frac{p-1}{u_{p+1}-u_2} \left[\frac{p}{u_{p+2}-u_2} (P_2 - P_1) - \frac{p}{u_{p+1}-u_1} (P_1 - P_0) \right]$$

$$C^2(1) = \frac{p(p-1)}{1-u_{m-p-1}} \left[\frac{P_n}{1-u_{m-p-1}} - \frac{(2-u_{m-p-1}-u_{m-p-2})P_{n-1}}{(1-u_{m-p-1})(1-u_{m-p-2})} + \frac{P_{n-2}}{1-u_{m-p-2}} \right]$$

Η χρησιμότητα των παραπάνω εξισώσεων άπτεται της απαίτησης συνέχειας για τη δεύτερη καμπύλη, από τα στοιχεία προκύπτουν από την πρώτη. Για να απαιτηθεί συνέχεια καμπυλότητας θα πρέπει προφανώς να έχει πρώτα εξασφαλιστεί συνέχεια πρώτης τάξης. Η συνέχεια καμπυλότητας επιβάλλει την εισαγωγή ενός ακόμα σημείου ελέγχου σε κάθε σημείο που απαιτείται να υφίσταται. Το σύστημα εξισώσεων για την παρεμβολή της δεύτερης καμπύλης προκειμένου να έχει συνέχεια δεύτερης τάξης με την πρώτη φαίνεται ακολούθως :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{u_{p+1}}{p} & \frac{u_{p+1}}{p} & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \frac{p}{p} & -\frac{p}{p} & -\frac{p}{p} & \frac{p}{p} & \dots & 0 & 0 \\ u_{p+1}-u_1 & u_{p+1}-u_1 & u_{p+2}-u_2 & u_{p+2}-u_2 & \dots & 0 & 0 \\ N_{0,p} & N_{1,p} & N_{1,p} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & N_{k-2,p} & N_{k-1,p} & N_{k,p} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -\frac{1-u_{m-p-1}}{p} & \frac{1-u_{m-p-1}}{p} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \vdots \\ P_n \\ P_{n+1} \\ P_{n+2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_0 \\ D_0 \\ \frac{u_{p+1}-u_2}{p-1} C^2(0) \\ Q_1 \\ \vdots \\ Q_{n-1} \\ D_n \\ Q_n \end{bmatrix}$$

Η διαδικασία επίλυσης του συστήματος παραμένει η ίδια με τις προηγούμενες περιπτώσεις. Η συνέχεια καμπυλότητας εν γένει δεν απαιτείται σε ελεύθερα άκρα καμπυλών ωστόσο είναι σημαντική σε κοινά σημεία μεταξύ δύο διαφορετικών. Στα

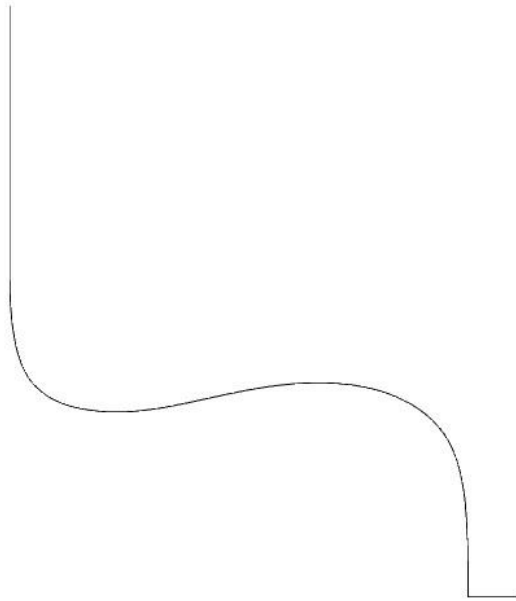
εσωτερικά μιας καμπύλης τέτοια συνέχεια υπάρχει σε όλο το μήκος της εφόσον είναι τουλάχιστον τρίτου βαθμού και δεν υπάρχουν πολλαπλοί κόμβοι. Θα πρέπει να σημειωθεί πως η συνέχεια πρώτης και δεύτερης τάξης απαιτούν δύο επιπλέον σημεία ελέγχου, ανάμεσα στο πρώτο και δεύτερο της καμπύλης B-Spline. Αυτό μπορεί σε πολλές περιπτώσεις να προκαλέσει τοπική παραμόρφωση της καμπύλης και ειδικά όταν η διαμόρφωση του κομβοδιανύσματος προκαλεί συγκέντρωση σημείων ελέγχου στα άκρα.

2.5 Βελτιστοποίηση της ακρίβειας παρεμβολής καμπυλών με χρήση πολυωνυμικών καμπυλών B-Splines

Η παρεμβολή καμπυλών με χρήση πολυωνυμικών B-Splines όπως έχει δείχθει νωρίτερα βασίζεται στην παρεμβολή σημείων που κείνται κατά μήκος της με επίλυση του κατάλληλου συστήματος εξισώσεων. Ωστόσο η επίλυση οποιουδήποτε συστήματος από αυτά που παρατέθηκαν νωρίτερα δεν εξασφαλίζει με κανέναν τρόπο την ακρίβεια της προσέγγισης στα υπόλοιπα σημεία της καμπύλης που δεν απαιτείται να παρεμβάλλονται. Η προφανής επιλογή για την καλύτερη προσέγγιση μιας καμπύλης είναι η εισαγωγή περισσότερων σημείων. Ωστόσο, δεδομένου ότι σε όλα τα συστήματα που εξετάζονται έχουμε ισάριθμες εξισώσεις με αγνώστους, αυτό προϋποθέτει την εισαγωγή περισσότερων σημείων ελέγχου. Αυτή η επιλογή εν γένει καθιστά την καμπύλη B-Spline δυσκολότερα διαχειρίσιμη κι επομένως δεν αποτελεί τη βέλτιστη. Στο συγκεκριμένο γεγονός εντοπίζεται η προαναφερθείσα τοποθέτηση πως η προσέγγιση καμπυλών και η ευκρηστία τους αποτελούν αντικρουόμενες απαιτήσεις.

Για τις ανάγκες του παρόντος, η κατά το δυνατόν ακριβέστερη προσέγγιση μιας αρχικής δοθείσας και πολύπλοκης μορφής γάστρας αποτέλεσε σημαντική απαίτηση καθώς τα ιδιόμορφα χαρακτηριστικά της επηρεάζουν ουσιαστικά το κτηθέν αποτέλεσμα. Η παραμετρική αναπαράσταση της γεωμετρίας υλοποιήθηκε με στάθμιση της απαιτούμενης ακρίβειας και του επιθυμητού εύρους μεταβολής σε μια στρατηγική που εξυπηρετεί σε έναν ικανοποιητικό βαθμό και τις δύο αυτές απαιτήσεις. Αρχικά προσδιορίστηκε ο μέγιστος αριθμός σημείων ελέγχου που θα χρησιμοποιηθούν για την προσέγγιση των καμπυλών με απότομες μεταβολές, και στη συνέχεια αναζητήθηκε η βέλτιστη προσέγγιση με βάση αυτό το δεδομένο.

Τυπική περίπτωση τέτοιων καμπυλών, των οποίων η παρεμβολή είναι δύσκολη, είναι οι νομείς του πρυμναίου τμήματος του πλοίου. Ως επιβατηγό έχει δύο προπέλες με αποτέλεσμα οι πρυμναίοι νομείς να δημιουργούν κοιλότητες ώστε να εξασφαλίζεται η αποδοτική τους λειτουργία. Έτσι οι νομείς στη συγκεκριμένη περιοχή έχουν τη μορφή που φαίνεται στο σχήμα 8.



Σχήμα 8. Πρυμναίος νομέας ταχύπλοου E/Γ-0/Γ

Η προσέγγιση νομέων της πρύμνης όπως αυτός που φαίνεται στο σχήμα 8, δεν μπορεί να γίνει με τη μέγιστη ακρίβεια αν δεν πληρούνται ορισμένες προϋποθέσεις. Η πρώτη αφορά στη θέση των σημείων παρεμβολής. Δεδομένου ότι η καμπύλη έχει τοπικά μέγιστα κι ελάχιστα, ο μοναδικός τρόπος αυτά να αποτελέσουν σημεία την καμπύλης B-Spline είναι να τοποθετηθούν εκεί σημεία παρεμβολής. Η δεύτερη αφορά την διατήρηση της κλίσης του εφαπτομενικού διανύσματος στα άκρα της ώστε να εξασφαλίζεται η διατήρηση της μορφής τοπικά και στην ευρύτερη περιοχή. Η τρίτη προϋπόθεση αφορά την εύρεση της βέλτιστης μεθόδου παρεμβολής που επηρεάζει την κατανομή των κόμβων του κομβοδιανύσματος.

Σε προηγούμενη ενότητα δόθηκαν οι σχέσεις των μεθόδων ισοκατανομής, centripetal και chord length. Κάθε μια παράγει μια B-Spline που έχει διαφορετική μορφή από αυτές των υπολοίπων, ωστόσο όλες θα παρεμβάλλουν τα σημεία που απαιτείται κι επομένως είναι αποδοτικές με βάση αυτές τις απαιτήσεις. Το ζήτημα που τίθεται λοιπόν αφορά το ποια είναι η καταλληλότερη για κάθε περίπτωση. Η απάντηση σε αυτό το ζήτημα εξαρτάται αποκλειστικά από την ποιότητα προσέγγισης της μορφής της αρχικής καμπύλης στο σύνολο της, όταν οι μέθοδοι συγκρίνονται υπό τις ίδιες συνθήκες. Η χρήση αυτών των μεθόδων εντάχθηκε σε μια τεχνική ευρύτερης διερεύνησης της καταλληλότερης που αναλύεται στη συνέχεια αφού εντοπιστούν οι διαφορές μεταξύ τους.

Αρχικά φαίνεται η ανάπτυξη των εξισώσεων διαμόρφωσης του παραμετρικού χωρίου από τη μέθοδο chord length.

$$d = \sum_{k=1}^n |\mathbf{q}_k - \mathbf{q}_{k-1}| = \sum_{k=1}^n \sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2}$$

$$\bar{u}_k = \bar{u}_{k-1} + \frac{|\mathbf{q}_k - \mathbf{q}_{k-1}|}{d} = \bar{u}_{k-1} + \frac{\sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2}}{\sum_{k=1}^n \sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2}} \Rightarrow$$

$$\bar{u}_k = \bar{u}_{k-1} + \frac{((x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2)^a}{\sum_{k=1}^n ((x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2)^a}, \quad a = 0.5, \quad k = 1, \dots, n-1$$

Αντίστοιχα για τη μέθοδο centripetal θα είναι :

$$d = \sum_{k=1}^n \sqrt{|\mathbf{q}_k - \mathbf{q}_{k-1}|} = \sum_{k=1}^n \sqrt{\sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2}}$$

$$\bar{u}_k = \bar{u}_{k-1} + \frac{\sqrt{|\mathbf{q}_k - \mathbf{q}_{k-1}|}}{d} = \bar{u}_{k-1} + \frac{\sqrt{\sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2}}}{\sum_{k=1}^n \sqrt{\sqrt{(x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2}}} \Rightarrow$$

$$\bar{u}_k = \bar{u}_{k-1} + \frac{((x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2)^a}{\sum_{k=1}^n ((x_k - x_{k-1})^2 + (y_k - y_{k-1})^2)^a}, \quad a = 0.25, \quad k = 1, \dots, n-1$$

Για μηδενική τιμή του εκθέτη a προκύπτει η μέθοδος ισοκατανομής :

$$d = \sum_{k=1}^n 1 = n$$

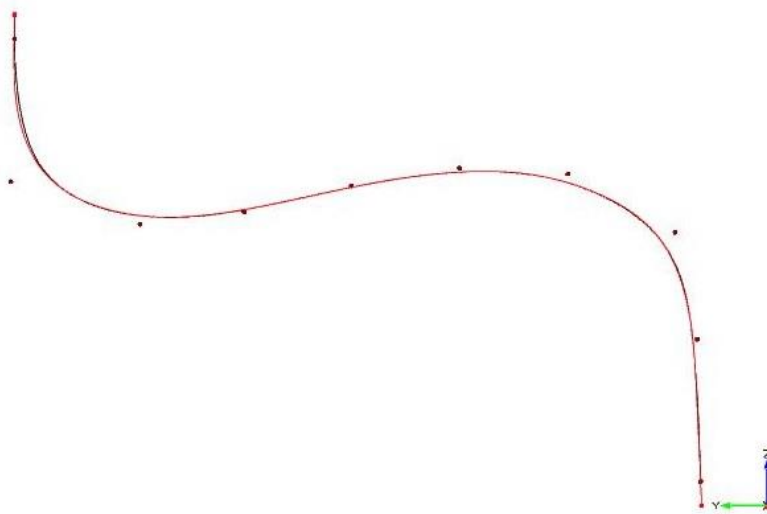
$$\bar{u}_k = \bar{u}_{k-1} + \frac{1}{d} = \bar{u}_{k-1} + \frac{1}{n}, \quad k = 1, \dots, n-1 \Rightarrow$$

$$\bar{u}_k = \frac{k}{n}, \quad a = 0, \quad k = 1, \dots, n-1$$

Σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις ισχύει πως $\bar{u}_0 = 0$ και $\bar{u}_n = 1$. Με βάση τα παραπάνω συνάγεται πως αφενός η μοναδική διαφορά των τριών μεθόδων είναι η τιμή του εκθέτη a , κι αφετέρου πως για ενδιαμέσες τιμές αυτού του εκθέτη λαμβάνουμε νέες μεθόδους παρεμβολής. Για εύρος διακύμανσης του εκθέτη αυτού, ίσο με $[0, 0.5]$ έχουμε ένα άπειρο σύνολο μεθόδων που αποτελούν ενδιαμέσες των μεθόδων chord length και ισοκατανομής.

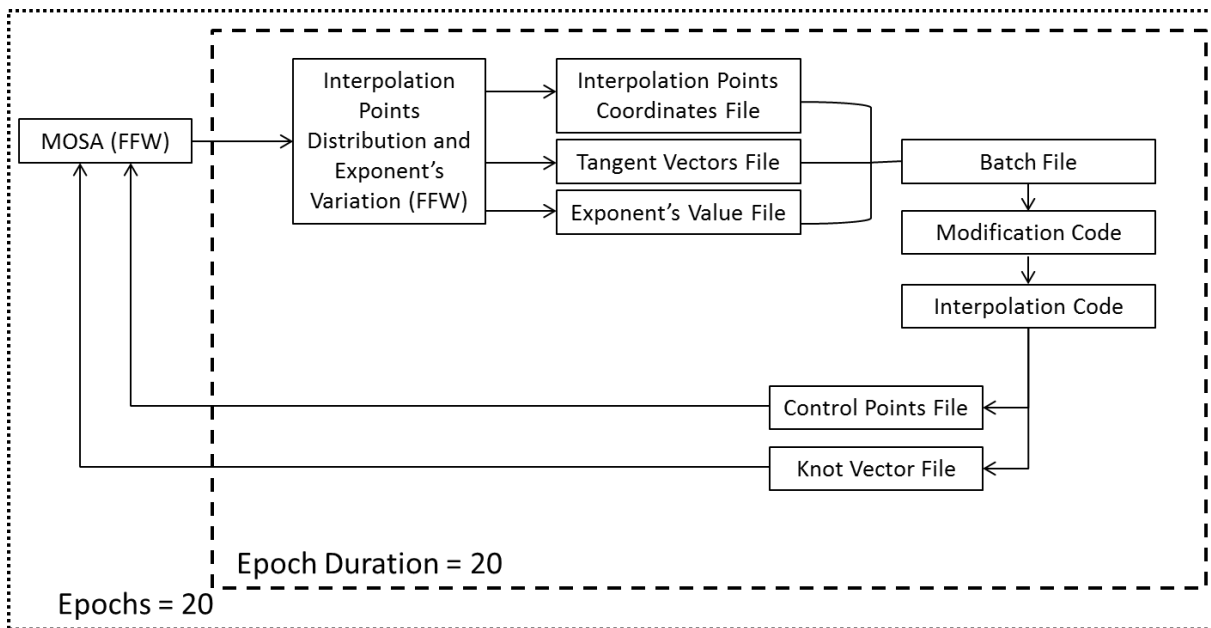
Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω ιδιότητες, εφαρμόστηκε μια διαδικασία βελτιστοποίησης προκειμένου να λάβουμε την μικρότερη δυνατή απόκλιση μεταξύ αρχικών καμπυλών και καμπυλών B-Splines. Στη διαδικασία αυτή αντικειμενική συνάρτηση αποτέλεσε το άθροισμα των αποστάσεων μεταξύ αρχικής και τελικής καμπύλης για ένα σύνολο σημείων κατά μήκος τους, ενώ ως μεταβλητές σχεδίασης τέθηκαν οι θέσεις των σημείων

παρεμβολής και η τιμή του εκθέτη α . Με αυτόν τον τρόπο επιδιώκεται αφενός να παρεμβληθούν τυχόν τοπικά ακρότατα και αφετέρου να βρεθεί η βέλτιστη μέθοδος. Σε όλες τις περιπτώσεις τέθηκε απαίτηση εφαπτομενικού διανύσματος στα άκρα συγκεκριμένου μέτρου και φοράς, με βάση την κλίση της αρχικής καμπύλης στα αντίστοιχα σημεία. Στο σχήμα 9 φαίνεται μια τυπική περίπτωση παρεμβολής του μη ευθύγραμμου τμήματος ενός πρυμναίου νομέα όπως προκύπτει από τη διαδικασία βελτιστοποίησης, καθώς και τα σημεία ελέγχου της προκύπτουσας καμπύλης B-Spline. Είναι εμφανές πως οι δύο καμπύλες είναι σχεδόν ταυτόσημες.



Σχήμα 9. Παρεμβολή πρυμναίου νομέα (μαύρο χρώμα) με B-Spline (κόκκινο χρώμα)

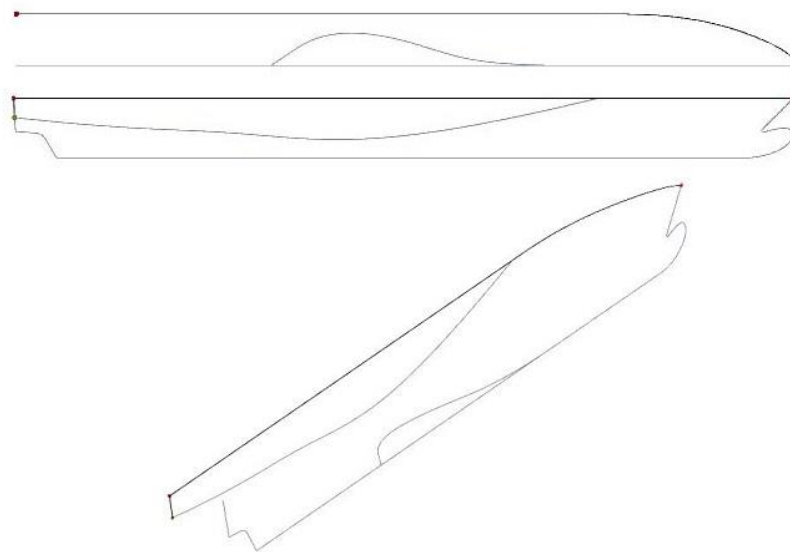
Στο σχήμα 10 φαίνεται η διαδικασία βελτιστοποίησης σε μορφή διαγράμματος ροής. Η παραγωγή των εναλλακτικών λύσεων και η αξιολόγηση της συσχέτισης των τιμών των μεταβλητών σχεδίασης με την προκύπτουσα τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, πραγματοποιήθηκαν στο περιβάλλον CAESSES – Friendship Framework. Η διαδικασία αυτή αποτελεί ένα σύστημα συνεχούς και επαναλαμβανόμενης αλληλεπίδρασης και ανταλλαγής αρχείων εισόδου και αποτελεσμάτων. Κριτήρια σύγκλισης δεν έχουν τεθεί και η διαδικασία τερματίζεται για δεδομένο αριθμό 400 εξεταζόμενων διαφορετικών περιπτώσεων. Η βελτιστοποίηση είναι μονοκριτηριακή και επομένως αρκεί η επιλογή της βέλτιστης περίπτωσης μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας. Η αξιολόγηση των εναλλακτικών περιπτώσεων έγινε με χρήση του αλγορίθμου MOSA, του οποίου η λειτουργία θα περιγραφεί σε επόμενο κεφάλαιο.



Σχήμα 10. Βελτιστοποίηση παρεμβολής καμπύλης με χρήση του περιβάλλοντος του CAESES - Friendship Framework

2.6 Παραμετρική σχεδίαση αρχικής γεωμετρίας ταχύπλοου Ε/Γ - Ο/Γ

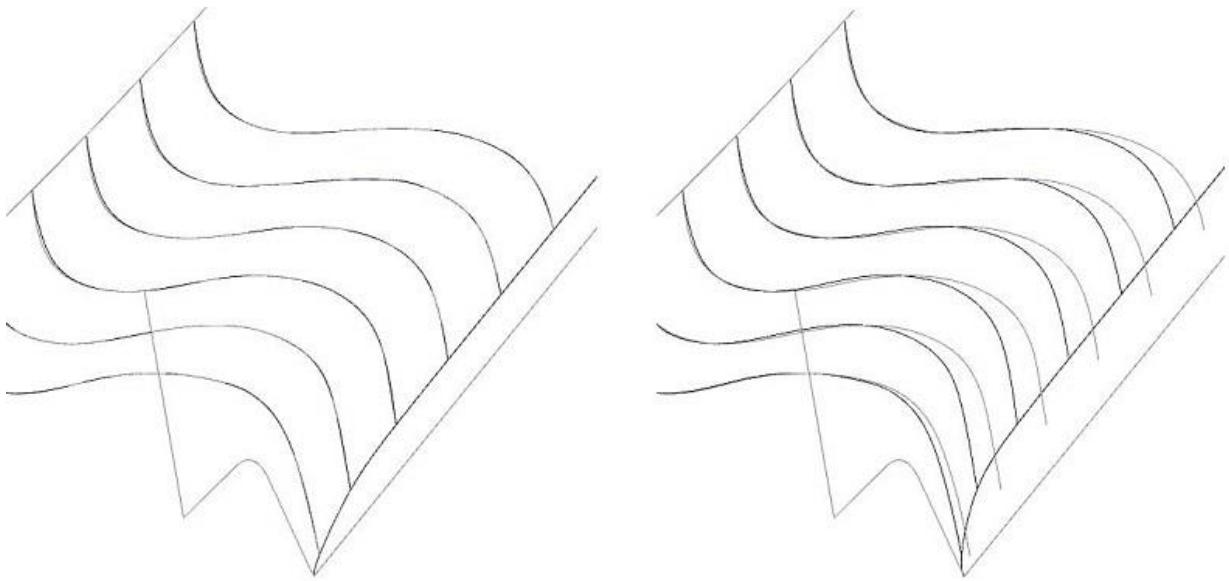
Η παραμετρική σχεδίαση της αρχικής γεωμετρίας στηρίχθηκε αρχικά στις κύριες καμπύλες της, FOS, FOB, CPC και περιγράμματος καταστρώματος οι οποίες και διατηρήθηκαν στην αρχική τους μορφή χωρίς να παραμετροποιηθούν. Εξαιρέση αποτελεί ένα μικρό τμήμα της καμπύλης CPC στην πρύμνη όπως θα φανεί και στη συνέχεια. Οι καμπύλες αυτές φαίνονται στο σχήμα 11.



Σχήμα 11. Κύριες καμπύλες αρχικής γεωμετρίας Ε/Γ-Ο/Γ

Με βάση αυτές τις αρχικές καμπύλες, κατασκευάστηκε όλη η υπόλοιπη γεωμετρία. Αρχικά δημιουργήθηκε το περίγραμμα του skeg στο βασικό επίπεδο αναφοράς. Το μέγιστο πλάτος αυτής της καμπύλης αποτελεί μεταβλητή σχεδίασης που μπορεί να λαμβάνει τιμές εντός ενός εύρους. Στη συνέχεια εφαρμόστηκε η διαδικασία βελτιστοποίησης της παρεμβολής στο σύνολο των πρυμναίων νομέων οι οποίοι και αναπαραστάθηκαν με B-Splines. Μέσω παραμετροποίησης αυτών των κτηθέντων καμπυλών κατέστη δυνατή η τροποποίηση της μορφής τους μεταβάλλοντας το μέγιστο πλάτος του skeg. Δεδομένου ότι η μορφή των καμπυλών B-Splines παραμένει αμετάβλητη σε αφινικούς μετασχηματισμούς, η προκύπτουσα επιφάνεια παραμένει ομαλή για όλες τις τιμές της εν λόγω μεταβλητής σχεδίασης.

Μια ενδεικτική μεταβολή των πρυμναίων νομέων λόγω μεταβολής του μέγιστου πλάτους του skeg παρουσιάζεται στο σχήμα 12. Για λόγους πιστοποίησης της ποιότητας παρεμβολής αλλά και κατανόησης της μεταβολής των νομέων, έχουν διατηρηθεί οι αρχικές καμπύλες και στα δύο τμήματα του σχήματος.



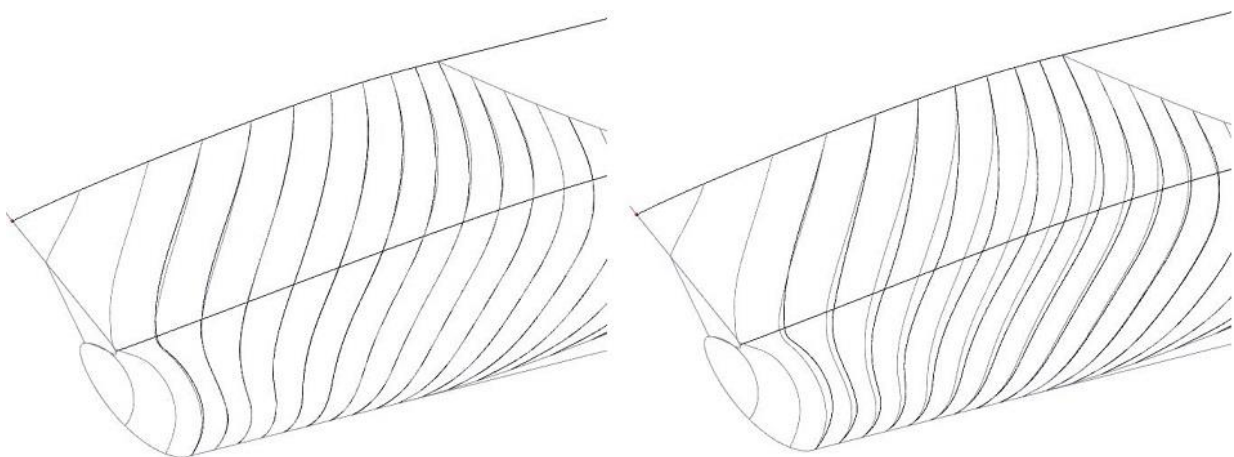
Σχήμα 12. Μεταβολή πρυμναίου τμήματος E/Γ-O/Γ, μεταξύ αρχικής (αριστερά) και τυχούσας (δεξιά) μορφής

Αντίστοιχα με την περίπτωση του skeg, δημιουργήθηκε μεταβλητή σχεδίασης που ρυθμίζει το βύθισμα στον καθρέπτη. Αυτή επηρεάζει την καμπύλη CPC, στο τμήμα που βρίσκεται πίσω από την πρυμναία κάθετο και τη μορφή των νομέων που εξαρτώνται από αυτή.

Σχετικά με το πρωραίο τμήμα, αρχικά προσδιορίστηκε η παραμετρική αναπαράσταση της ισάλου γραμμής προκειμένου να δημιουργηθούν μεταβλητές σχεδίασης για τη γωνία εισόδου και το συντελεστή εμβαδού επιφανείας της. Το πρωραίο τμήμα της ισάλου

χωρίστηκε σε δύο τμήματα εκ των οποίων το πρώτο αποτελεί καμπύλη B-Spline, για την οποία εφαρμόστηκε η βελτιστοποίηση της παρεμβολής, ενώ για το δεύτερο χρησιμοποιήθηκε μια FSpline. Αυτή είναι μια εύχρηστη καμπύλη του CAESSES – Friendship Framework που κι αυτή αποτελεί στην πραγματικότητα μια B-Spline η οποία όμως ορίζεται από ολιγάριθμα δεδομένα όπως οι συντεταγμένες των ακραίων σημείων της και οι γωνίες των εφαπτομενικών της διανυσμάτων.

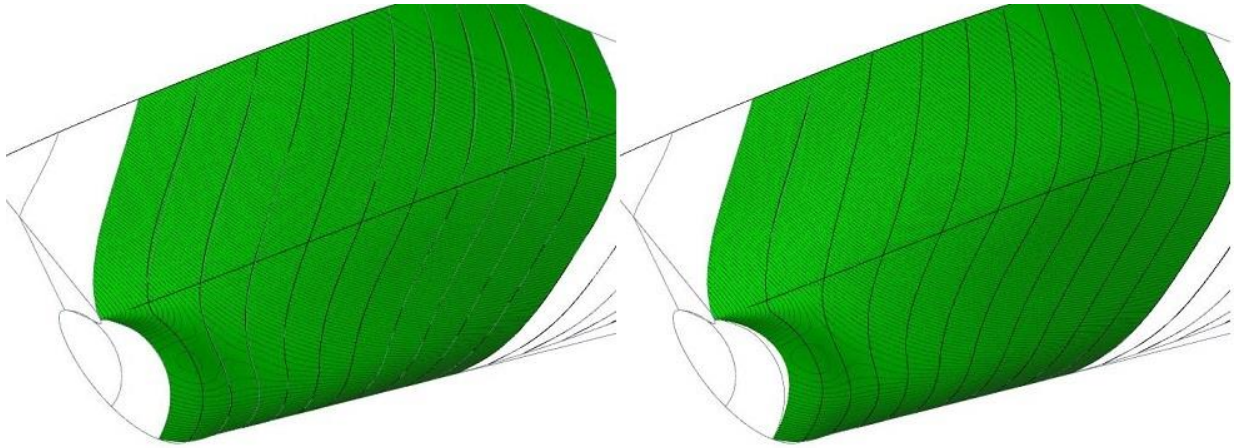
Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν οι πρωραίοι νομείς για τους οποίους ακολουθήθηκε η ίδια ακριβώς τεχνική. Το κοινό σημείο των δύο τμημάτων κάθε νομέα προφανώς βρίσκεται στην ισάλο γραμμή, ενώ το κατώτερο τμήμα τους που επηρεάζει άμεσα την υδροδυναμική συμπεριφορά του πλοίου βρέθηκε με τη μέθοδο βελτιστοποίησης της παρεμβολής. Το ανώτερο τμήμα, για το οποίο η ακρίβεια της προσέγγισης της αρχικής καμπύλης είναι ελάσσονος σημασίας, δημιουργήθηκε με χρήση καμπύλης FSpline. Με αυτόν τον τρόπο τόσο το πρωραίο τμήμα της ισάλου όσο και οι νομείς που εξαρτώνται από αυτή μπορούν να μεταβάλλονται διατηρώντας την ομαλότητα τους για ένα εύρος μεταβολής τόσο της γωνίας εισόδου όσο και της τεταγμένης του κοινού σημείου των δύο τμημάτων της ισάλου. Στο σχήμα 13 φαίνεται η αρχική και μια τυχούσα μορφή των πρωραίων νομέων για μεταβολή των δύο μεταβλητών σχεδίασης από τις οποίες εξαρτώνται. Και πάλι έχουν διατηρηθεί οι αρχικές καμπύλες και στα δύο τμήματα του σχήματος για λόγους σύγκρισης. Οι ίδιες μεταβολές μεταξύ αρχικής και τελικής μορφής του πρωραίου τμήματος φαίνονται στο σχήμα 14, στο οποίο όμως παρουσιάζονται και οι προκύπτουσες επιφάνειες.



Σχήμα 13. Μεταβολή πρωραίου τμήματος E/Γ-Ο/Γ, μεταξύ αρχικής (αριστερά) και τυχούσας (δεξιά) μορφής

Στα σχήματα 13 και 14 είναι εμφανές πως η ομαλότητα τόσο στις καμπύλες όσο και στις προκύπτουσες επιφάνειες διατηρείται και στους δύο συνδυασμούς μεταβλητών σχεδίασης από τους οποίους έχουμε την αρχική και μια τυχαία μορφή. Η επιλογή των τιμών των

μεταβλητών σχεδίασης για την απόδοση των σχημάτων ήταν τυχαία κι είναι κοντά στα άκρα του εύρους που έχει επιλεγεί για τις συγκεκριμένες μεταβλητές. Ενδεικτικά αναφέρεται πως αντίστοιχη ποιότητα ομαλότητας προκύπτει για οποιονδήποτε συνδυασμό τιμών μεταβλητών εντός του προαναφερθέντος εύρους.

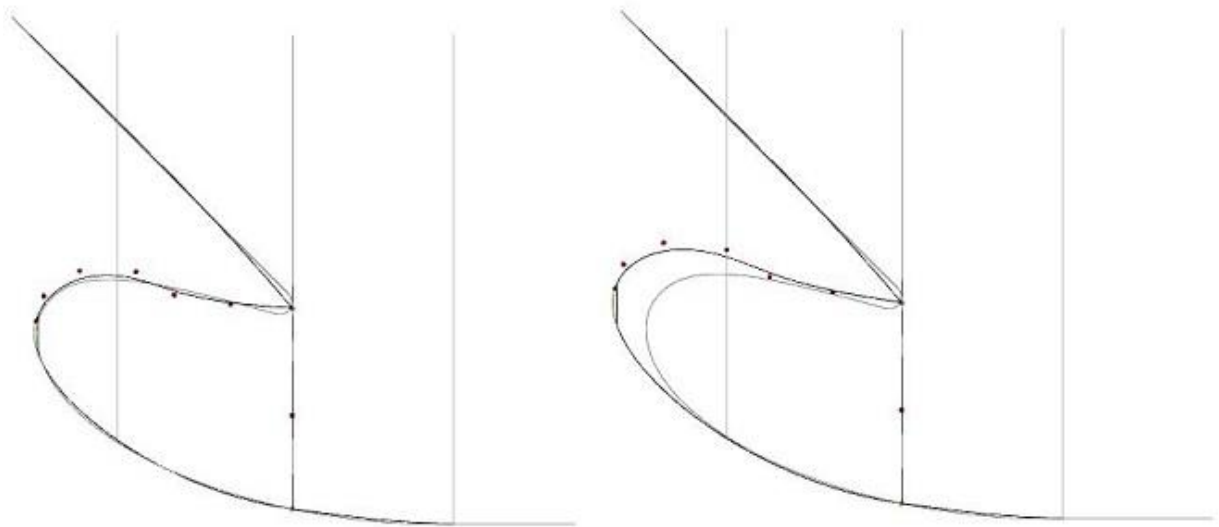


Σχήμα 14. Μεταβολή επιφανειών προωραίου τμήματος E/Γ-Ο/Γ, μεταξύ αρχικής (αριστερά) και τυχούσας (δεξιά) μορφής

Στη συνέχεια κατασκευάστηκε η βολβοειδής πλήρη εφαρμόζοντας όμως μια εντελώς διαφορετική διαδικασία από αυτή που έχει αναφερθεί μέχρι τώρα. Βασικός λόγος αυτής της προσέγγισης αποτελεί το γεγονός πως επηρεάζει άμεσα την αντίσταση κυματισμού κι επομένως καθίσταται σημαντική η εισαγωγή μεγάλου αριθμού μεταβλητών που επηρεάζουν στο μέγιστο βαθμό τη μορφή της επιφάνειάς του. Επιπρόσθετα, οι νομείς του βολβού αποτελούν καμπύλες χωρίς σημαντικές αλλαγές διανύσματος καμπυλότητας κι επομένως η αρχική τους μορφή μπορεί να προσεγγιστεί με απλά κι εύχρηστα σχεδιαστικά εργαλεία σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό. Προκειμένου να μοντελοποιηθεί παραμετρικά η μορφή του, είναι απαραίτητη η εξάρτηση της τομής της επιφάνειάς του με το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας από μεταβλητές σχεδίασης και παραμέτρους. Με αυτό το δεδομένο το άνω μέρος (πάνω από το σημείο μέγιστου μήκους του) του προφίλ του βολβού αναπαραστάθηκε με B-Spline καθώς έχει μεταβολές καμπυλότητας ενώ το κάτω τμήμα του αναπαραστάθηκε με FSpline καθώς έχει απλούστερη μορφή. Το προφίλ του βολβού φαίνεται στο σχήμα 15 μαζί με την αρχική μορφή του αντίστοιχου τμήματος.

Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, η απόδοση του προφίλ δεν είναι απόλυτα πιστή ενώ δεν πραγματοποιήθηκε βελτιστοποίηση παρεμβολής. Ο λόγος αυτής της μικρής απόκλισης κυρίως στο σημείο της προωραίας καθέτου οφείλεται στην ιδιαιτερότητα αυτού του σημείου. Στην πραγματικότητα αποτελεί σημείο ιδιομορφίας καθώς πρύμνηθεν αυτού τοποθετούνται νομείς που στο ύψος της ισάλου έχουν συνέχεια εφαπτομενικού διανύσματος ενώ πρώραθεν οι νομείς του βολβού καταλήγουν στο διάμηκες επίπεδο

συμμετρίας υπό γωνία που καθιστά αδύνατη την ύπαρξη συνέχειας διανύσματος με τμήμα καμπύλης άνωθεν της ισάλου. Στο σημείο συνάντησης επομένως θα πρέπει να υπάρχει ομαλή μετάβαση από τη μία διαμόρφωση στην άλλη. Η διατήρηση της ομαλότητας της προκύπτουσας επιφάνειας σε εκείνο το σημείο κι εκατέρωθεν, για όλο το εύρος διακύμανσης των μεταβλητών σχεδίασης, εισήγαγε αυτή τη μικρή απόκλιση που φαίνεται στο σχήμα 15. Επισημαίνεται πως η γωνία που σχηματίζει η επιφάνεια του βολβού με τον άξονα z στο σημείο τομής της με το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας και στην προωραία κάθετο, όπως και η γωνία εισόδου που αναφέρθηκε προηγουμένως αποτελούν μεταβλητές σχεδίασης που μεταβάλλονται ανεξάρτητα. Πρόκειται για γωνίες που έχουν κοινό σημείο αρχής κι εκτείνονται σε δύο διαφορετικά και κάθετα μεταξύ τους επίπεδα, με αποτέλεσμα τη δυσχέρεια διατήρησης της ομαλότητας των παρακείμενων επιφανειών κατά τη διαδικασία παραμετρικής μοντελοποίησης της συγκεκριμένης περιοχής. Η παραμετρική σχεδίαση του άνω και κάτω προφίλ του βολβού πραγματοποιήθηκε προκειμένου να τεθούν ως μεταβλητές σχεδίασης το μήκος και η ανύψωση του tip του βολβού. Η αρχική και μια τυχούσα μορφή φαίνονται στο σχήμα 15.

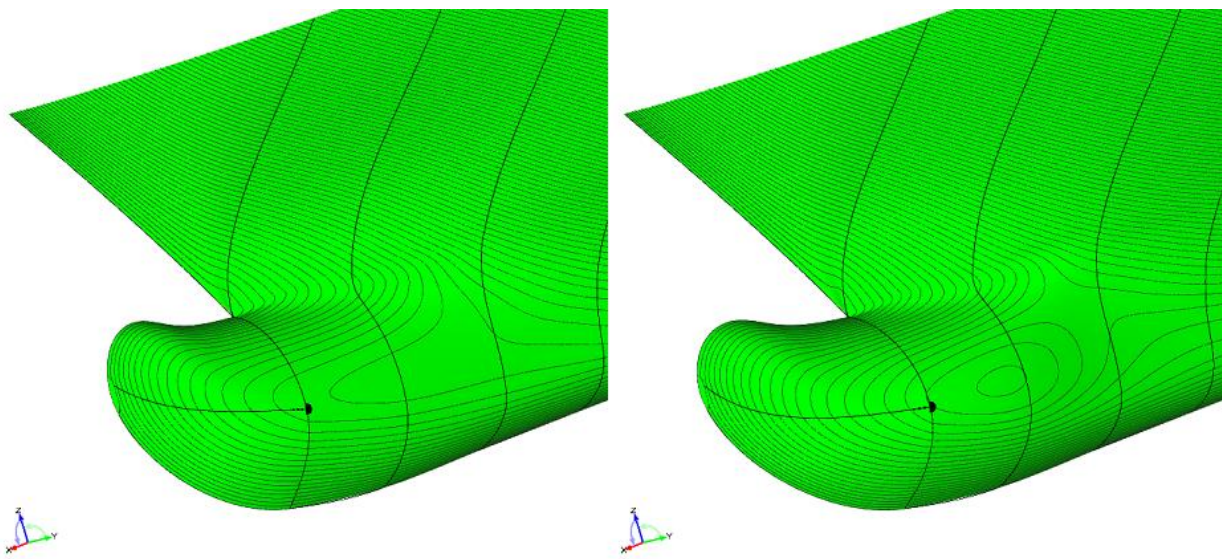


Σχήμα 15. Μεταβολή μεταξύ αρχικής (αριστερά) και τυχούσας (δεξιά) μορφής προφίλ βολβού

Στη συνέχεια κατασκευάστηκε η καμπύλη μεγίστου πάχους του βολβού που αποτελεί και τη μοναδική με σημεία των οποίων οι συντεταγμένες μεταβάλλονται σε όλες τις διαστάσεις. Η καμπύλη αυτή ξεκινά από την προωραία κάθετο και καταλήγει στο tip του βολβού. Προκειμένου να καταστεί δυνατή η μεταβολή χαρακτηριστικών γωνιών της σε δύο επίπεδα σχεδιάστηκαν αρχικά δύο ανεξάρτητες καμπύλες εκ των οποίων η πρώτη δίνει την τεταγμένη ενώ η δεύτερη την κατηγμένη της σε κάθε σημείο κατά το διάμηκες. Κάθε μια από τις γωνίες που σχηματίζει η εκάστοτε καμπύλη στο tip του βολβού, με τον άξονα που δεν περιλαμβάνεται στο επίπεδο στο οποίο ανήκει η άλλη, αποτελούν μεταβλητές

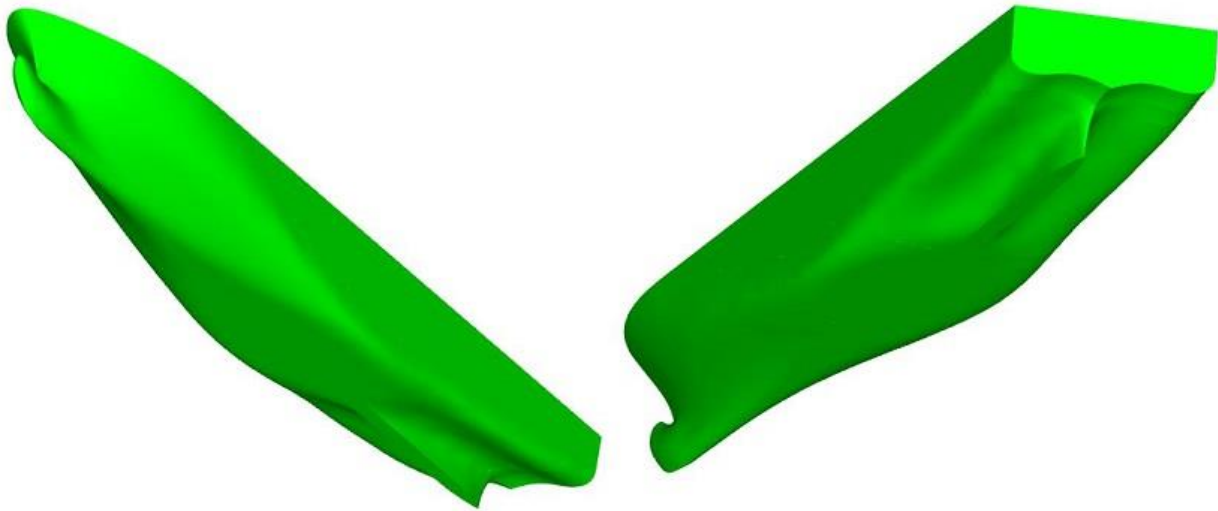
σχεδίασης. Η ενιαία τρισδιάστατη καμπύλη που προκύπτει από τη σύνθεση των δύο, έχει συνέχεια εφαπτομενικού διανύσματος με την καμπύλη παρεμβολής των ισοϋψών σημείων των νομέων που βρίσκονται πρὸ μνηθεν της πρωραίας καθέτου.

Η επιφάνεια του βολβού κατασκευάζεται από το σύνολο άπειρων νομέων οι οποίοι αποτελούν τη σύνθεση δύο καμπυλών FSpline, με κοινό σημείο την καμπύλη μεγίστου πάχους. Οι άπειρες αυτές καμπύλες αποτελούν το αποτέλεσμα συνάρτησης που δίνει τα χαρακτηριστικά κατασκευής τους σε άπειρες θέσεις κατά το διάμηκες. Τα χαρακτηριστικά αυτά αφορούν τις γωνίες που σχηματίζει κάθε νομέας με τον άξονα z στο άνω και κάτω προφίλ του βολβού. Αυτές οι γωνίες, προκειμένου να υπάρχει συνέχεια κατά τον άξονα ανάπτυξης της επιφάνειας, δίνονται από συνεχείς καμπύλες των οποίων οι τιμές στα άκρα αποτελούν μεταβλητές σχεδίασης. Οι μεταβλητές αυτές είναι συνολικά 4 καθώς ορίζονται για το άνω και κάτω προφίλ του βολβού, στις δύο ακραίες θέσεις ανάπτυξης της επιφάνειας. Το tip του βολβού αποτελεί σημείο ιδιομορφίας στο οποίο πρακτικά μηδενίζεται το εμβαδόν της κατασκευαζόμενης επιφάνειας. Για την άρση αυτής της ιδιομορφίας δημιουργήθηκαν τοπικές επιφάνειες από τις προκύπτουσες συνοριακές καμπύλες. Στο σχήμα 16 φαίνονται η αρχική και μια τυχαία επιφάνεια του βολβού μέσω απόδοσης τυχαίων τιμών στις μεταβλητές σχεδίασης. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και η επιφάνεια που προκύπτει από τους νομείς πρὸ μνηθεν της πρωραίας καθέτου για λόγους οπτικής ανίχνευσης της ομαλότητας της συνολικής επιφάνειας. Στην περίπτωση της τυχούσας επιφάνειας του σχήματος, οι τιμές που έχουν αλλάξει αφορούν όλες τις μεταβλητές σχεδίασης που σχετίζονται με τον βολβό. Για λόγους χωρικής αντίληψης φαίνεται και η καμπύλη μεγίστου πάχους.



Σχήμα 16. Μεταβολή μεταξύ αρχικής (αριστερά) και τυχούσας (δεξιά) μορφής επιφάνειας βολβού

Στο σχήμα 17 φαίνονται δύο όψεις της συνολικής αρχικής γεωμετρίας όπως αυτή προέκυψε τελικά από τη διαδικασία παραμετρικής μοντελοποίησης.



Σχήμα 17. Η παραμετρικά αναπαριστάμενη αρχική γεωμετρία ενός E/Γ-0/Γ

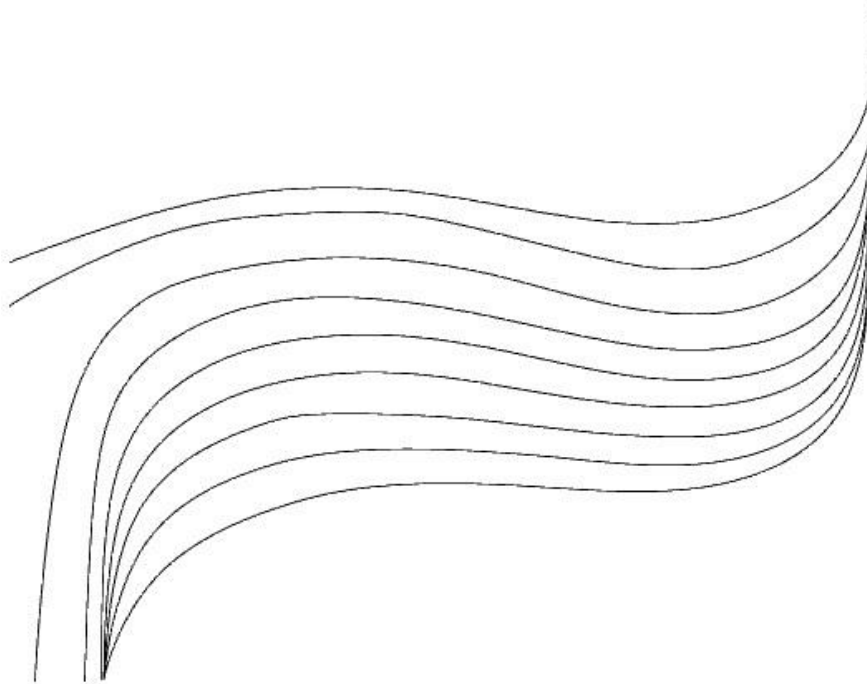
2.7 Τροποποίηση πρυμναίων νομέων

Όπως έχει δείχθει νωρίτερα αλλά φαίνεται και στις όψεις του σχήματος 17, οι πρυμναίοι νομείς έχουν τοπικά μέγιστα κι ελάχιστα. Αυτό για κάποιους νομείς συνεπάγεται πολλαπλά σημεία τομής με την ίσαλο επιφάνεια, κάτι που όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο προκαλεί διαταραχές στην εκτέλεση των προγραμμάτων που χρησιμοποιούν τη θεωρία δυναμικού. Για την εφαρμογή λοιπόν της διαδικασίας βελτιστοποίησης καθίσταται αναγκαία η τροποποίηση τους κατά τέτοιο τρόπο ώστε να αρθεί αυτή η ιδιομορφία. Η τροποποίηση των νομέων της πρύμνης εν γένει έχει μικρότερη επιρροή στην αντίσταση κυματισμού σε σχέση με τους πρωραίους αλλά και τον βολβό, κι επομένως μια μικρή μεταβολή τους αναμένεται να μην επηρεάσει ιδιαίτερα την εκτίμηση της αντίστασης κυματισμού. Επιπρόσθετα η όποια επιρροή αυτής της τροποποίησης αφορά το σύνολο των εξεταζόμενων λύσεων κι επομένως η σύγκριση των εναλλακτικών γεωμετριών τελείται υπό αυτό το δεδομένο για όλους τους υπολογισμούς. Σε κάθε περίπτωση οι γεωμετρίες που θα επιλεγούν καθώς και η αρχική, θα αξιολογηθούν με μοντελοποίηση της ροής γύρω από την μη τροποποιημένη γάστρα με χρήση τρισδιάστατων πλεγμάτων μέσω του λογισμικού STAR CCM+. Στη μοντελοποίηση αυτή θα χρησιμοποιηθεί τόσο η συνεκτική όσο και η μη συνεκτική θεωρία για την εκτίμηση της συνολικής και της αντίστασης κυματισμού αντίστοιχα. Κατά συνέπεια η όποια επιλογή θα διέπεται από την ασφάλεια της επιπλέον αξιολόγησης της μη τροποποιημένης μορφής γάστρας. Συμπληρωματικές προσομοιώσεις στο STAR CCM+, θα υπάρξουν και για τους

τροποποιημένους νομείς ούτως ώστε η διαδικασία πιστοποίησης να είναι κατά το δυνατόν πληρέστερη.

Προκειμένου να πραγματοποιηθεί τροποποίηση που προκαλεί την ελάχιστη μεταβολή μεταξύ αρχικών και τροποποιημένων νομέων, θα εφαρμοστεί μια διαδικασία βελτιστοποίησης με χρήση του γενετικού αλγορίθμου NSGA-II, η λειτουργία του οποίου θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο. Σκοπός της βελτιστοποίησης θα είναι η εύρεση του συνόλου των χαρακτηριστικών των νομέων που συνολικά προκαλούν την ελάχιστη διαφορά εκτοπίσματος και διαμήκους θέσης του κέντρου άντωσης, εν συγκρίσει με τις αρχικές γραμμές.

Η τροποποίηση πρυμναίων νομέων αφορά αυτούς που βρίσκονται στις διαμήκεις θέσεις -6.5 (καθρέφτης), $0, 5, \dots, 30, 35$. Οι νομείς αυτοί αποτελούν περιπτώσεις όπου δεν έχουμε γνήσια αύξουσα μορφή και φαίνονται στο σχήμα 18.



Σχήμα 18. Πρυμναίοι νομείς προς τροποποίηση για χρήση από λογισμικά θεωρίας δυναμικού

Η μέθοδος τροποποίησης που επιλέχθηκε, διατηρεί ένα μέρος των αρχικών νομέων και εισαγάγει μια νέα καμπύλη στο τμήμα τους που παρουσιάζει το εν λόγω πρόβλημα. Για τους δύο πρώτους νομείς που δεν έχουν σημείο στο βασικό επίπεδο αναφοράς (-6.5 και 0), η αρχή της νέας αυτής καμπύλης συμπίπτει με την αρχή των νομέων στο διάμηκες επίπεδο συμμετρίας, ενώ το τέλος της βρίσκεται σε τυχόν σημείο τους. Για τους υπόλοιπους νομείς κατασκευάζονται νέες καμπύλες των οποίων τα άκρα βρίσκονται σε

τυχαίες θέσεις. Οι θέσεις αυτών των τυχαίων σημείων εξαρτώνται άμεσα ή έμμεσα από μεταβλητές σχεδίασης για όλες τις περιπτώσεις προσαρμογής της μορφής των νομέων.

Για τις ανάγκες της βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 8 μεταβλητές σχεδίασης. Οι δύο πρώτες αφορούν τις τιμές των γωνιών με τον άξονα y , στην αρχή των νέων καμπυλών που προσαρτώνται στους δύο πρώτους νομείς. Οι υπόλοιπες μεταβλητές ορίζουν τη θέση 6 σημείων που ανά τρία παρεμβάλλονται από δύο δευτεροβάθμιες καμπύλες. Οι μεταβλητές αυτές αποτελούν παράμετρο που κινείται εντός της μονοδιάστατης αναπαράστασης του επικαμπύλιου μήκους των αρχικών νομέων.

Η πρώτη καμπύλη (Inter 1) παρεμβάλλει τα αρχικά σημεία των νέων καμπυλών στους νομείς 5,20 και 35. Για τους νομείς αυτούς τα αρχικά σημεία προκύπτουν απευθείας από τις τιμές των μεταβλητών που κινούνται στο εύρος της μονοδιάστατης αναπαράστασης του επικαμπύλιου μήκους. Για τους νομείς 10,15,25 και 30, τα αρχικά σημεία των νέων καμπυλών προκύπτουν από την εξαγωγή των συντεταγμένων των σημείων τους που απέχουν την μικρότερη απόσταση από το σημείο της τρισδιάστατης δευτεροβάθμιας καμπύλης παρεμβολής που βρίσκεται στην ίδια θέση κατά το διάμηκες με τον αντίστοιχο νομέα.

Η δεύτερη καμπύλη (Inter 2) παρεμβάλλει τα τελικά σημεία των νέων καμπυλών στο νομέα του καθρέφτη και τους νομείς 15 και 35 και τα οποία εξαρτώνται άμεσα από μεταβλητές σχεδίασης. Τα τελικά σημεία των ενδιάμεσων νομέων 0,5,10,20,25 και 30 προκύπτουν με την ίδια ακριβώς λογική που προκύπτουν και τα αρχικά σημεία των νομέων που δεν εξαρτώνται πρωτοβάθμια από μεταβλητές σχεδίασης.

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, σκοπός της εφαρμογής μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης για την τροποποίηση των πρυμναίων νομέων, είναι η ελαχιστοποίηση της προκαλούμενης μεταβολής των υδροστατικών χαρακτηριστικών της γεωμετρίας. Τα κυριότερα στοιχεία ενδιαφέροντος είναι το εκτόπισμα και η διαμήκης θέση του κέντρου άντωσης κι επομένως η διαφορά τους μεταξύ αρχικών και τροποποιημένων νομέων αποτελούν τις δύο πρώτες αντικειμενικές συναρτήσεις. Προκειμένου να επιδιωχθεί η ελάχιστη μεταβολή και σε τοπικό επίπεδο, δημιουργήθηκε μια τρίτη συνάρτηση που αφορά τη διαφορά του εμβαδού επιφάνειας μεταξύ αρχικών και τελικών νομέων. Προκειμένου να εξασφαλιστεί και η ομαλότητα της επιφάνειας που θα κατασκευαστεί από τους παραχθέντες νομείς, δημιουργήθηκε μια τελευταία αντικειμενική συνάρτηση που αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση της διαφοράς του μήκους μεταξύ αρχικού και τροποποιημένου νομέα σε κάθε διαμήκη θέση. Οι τέσσερις αντικειμενικές συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται στη συνέχεια :

Objective function 1 : minimize : $\{\nabla_I - \nabla_F\}$

Objective function 2 : minimize : $\{LCB_I - LCB_F\}$

Objective function 3 : minimize : $\left\{ \sum_{i=1}^n (A_{Ii} - A_{Fi})^2 \right\}$

Objective function 4 : minimize : $\left\{ \sum_{i=1}^n (L_{Ii} - L_{Fi})^2 \right\}$

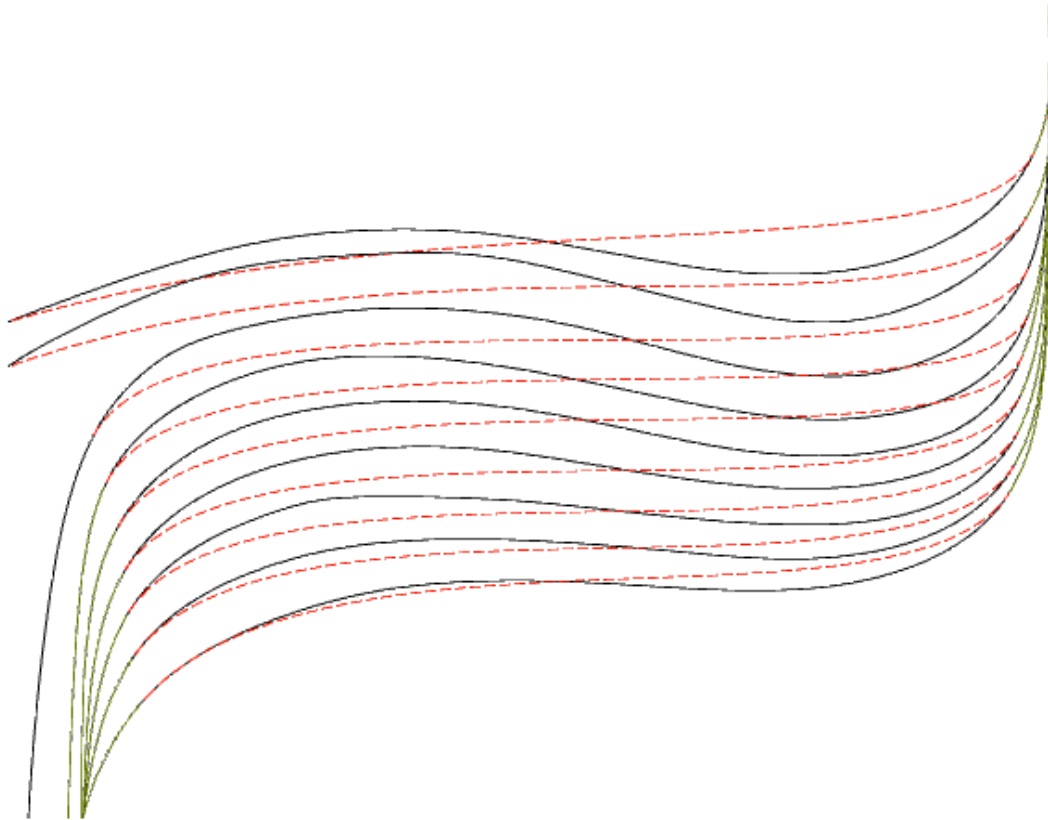
Για την εξασφάλιση της απαίτησης που αποτελεί και την αιτία τροποποίησης των νομέων, τέθηκαν περιορισμοί που αφορούν την κλίση του εφαπτομενικού διανύσματος στο μέσον των νέων καμπυλών προκειμένου να αποκλείονται περιπτώσεις στις οποίες αυτή η κλίση είναι αρνητική. Για τον ίδιο λόγο τέθηκαν περιορισμοί προκειμένου η κατακόρυφη θέση του αρχικού σημείου κάθε νέας καμπύλης να είναι πάντα μικρότερη από τη θέση του τέλους της. Ο τελευταίος περιορισμός δεν αφορά τους νομείς στον καθρέπτη και στη θέση 0 καθώς σε αυτούς η εν λόγω απαίτηση ικανοποιείται για κάθε πιθανό συνδυασμό μεταβλητών σχεδίασης.

Οι αρχικές και τελικές τιμές των μεταβλητών σχεδίασης που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και τα εύρη μεταβολής τους, φαίνονται στον πίνακα 1.

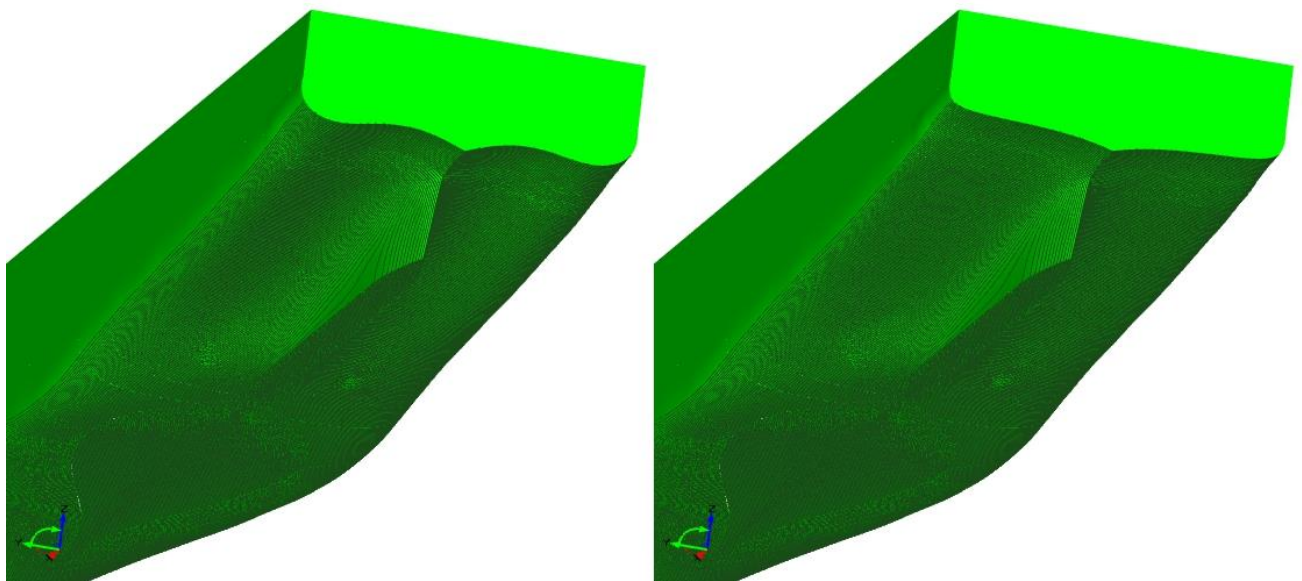
Μεταβλητή Σχεδίασης	Μονάδες	Κάτω Όριο	Άνω Όριο	Τελική Τιμή
Angle Start Point Transom	(deg)	16	26	16.326
Angle Start Point Section 0	(deg)	16	26	19.73
Start Point Pos. Section 5	(-)	0.15	0.18	0.1608
Start Point Pos. Section 20	(-)	0.14	0.18	0.1468
Start Point Pos. Section 35	(-)	0.09	0.16	0.1051
End Point Pos. Transom	(-)	0.83	0.88	0.8594
End Point Pos. Section 15	(-)	0.87	0.91	0.8925
End Point Pos. Section 35	(-)	0.78	0.85	0.8413

Πίνακας 1. Τιμές μεταβλητών σχεδίασης για βελτιστοποίηση της διαδικασίας τροποποίησης πρυμναίων νομέων

Για την διαδικασία αυτή δημιουργήθηκαν 30 γενιές με 16 μέλη η κάθε μια κι επομένως εξετάστηκαν 480 διαφορετικές περιπτώσεις. Ως αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης, οι διαφορές μεταξύ αρχικής και τροποποιημένης γεωμετρίας, ήταν +0.027% για το εκτόπισμα και -0.014% για τη διαμήκη θέση του κέντρου άντωσης. Τα ποσοστά αυτά είναι αμελητέα και σαφώς μικρότερα από το πιθανό εύρος σφάλματος εκτίμησης των υδροστατικών στοιχείων από ένα λογισμικό. Στα σχήματα 19 και 20 φαίνονται οι γραμμές και οι, προκύπτουσες από αυτές, επιφάνειες αντίστοιχα, για τους αρχικούς και τροποποιημένους νομείς. Οι τιμές των μεταβλητών σχεδίασης που αφορούν τη βελτιστοποίηση της γάστρας είναι οι ίδιες για όλες τις περιπτώσεις.



Σχήμα 19. Αρχικοί (συνεχείς καμπύλες) και τροποποιημένοι (διακεκομμένες καμπύλες) νομείς με βάση τη βελτιστοποίηση τροποποίησης της μορφής τους



Σχήμα 20. Αρχική (αριστερά) και τροποποιημένη (δεξιά) επιφάνεια με βάση τη βελτιστοποίηση τροποποίησης των πρυμναίων νομέων

Κεφάλαιο 3. Προσομοίωση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς ενός πλοίου

3.1 Θεωρητική προσέγγιση της αντίστασης¹²

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

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

Το φαινόμενο της αντίστασης από φυσική σκοπιά προκύπτει από την κατανομή των εφαπτομενικών και κάθετων στοιχειωδών δυνάμεων στα ύφαλα του σκάφους. Η προβολή και σύνθεση στη διεύθυνση της κίνησης, των ολοκληρωμάτων των δυνάμεων αυτών στο σύνολο της βρεχόμενης επιφάνειας αποτελεί τη συνολική αντίσταση. Οι βασικές λοιπόν κατηγορίες της αντίστασης του σκάφους είναι δύο:

- Αντίσταση τριβής
- Αντίσταση πίεσης

Με χρήση των αρχών της διαστατικής ανάλυσης αποδεικνύεται πως η αντίσταση ενός σκάφους εξαρτάται από δύο αδιάστατες παραμέτρους. Αυτές είναι οι αριθμοί Reynolds και Froude των οποίων δίνεται ο ορισμός στη συνέχεια.

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

¹² Γ.Κ. Πολίτη, Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. «Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου», Αθήνα, 2011

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

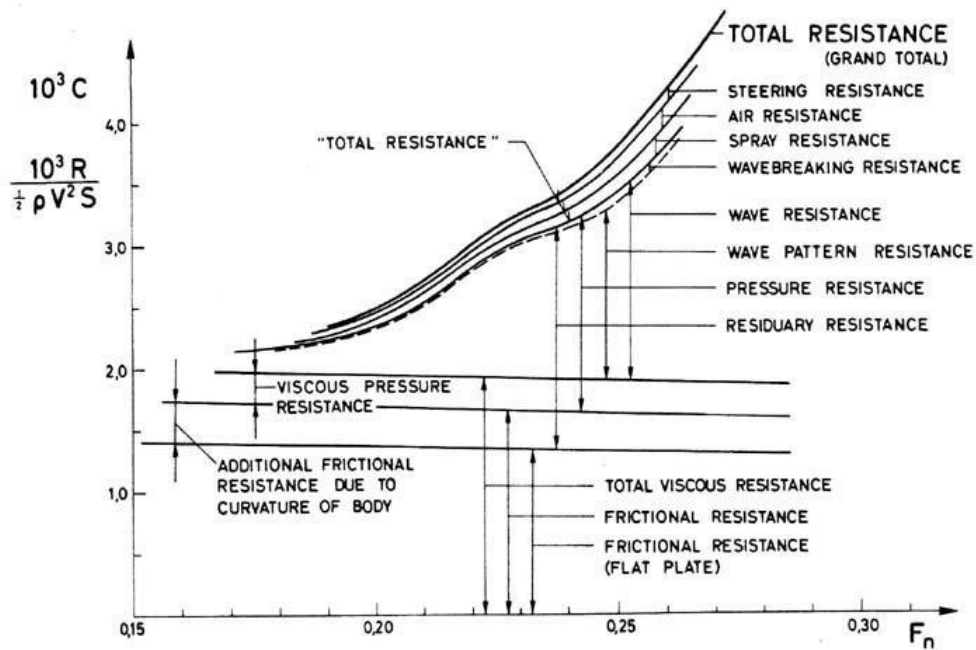
όπου U είναι η ταχύτητα με την οποία κινείται το σκάφος, L το μήκος της ισάλου του, ν η κινηματική συνεκτικότητα του νερού και g η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Ο αριθμός Reynolds εκφράζει τον λόγο αδρανειακών και συνεκτικών δυνάμεων ενώ ο Froude αδρανειακών και βαρυτικών. Ως εκ τούτου η μεν αντίσταση τριβής εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds ενώ η αντίσταση πίεσης από τον αριθμό Froude. Η θεώρηση αυτή δεν είναι απόλυτα ακριβής καθώς υπάρχει αλληλοσυσχέτιση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά την πλεύση του σκάφους, ωστόσο καταδεικνύει την κύρια εξάρτηση των συνιστωσών της αντίστασης από τους παραπάνω αδιάστατους αριθμούς.

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

Οι κατηγορίες αντίστασης και η εξάρτηση τους από τον αριθμό Froude φαίνονται στο σχήμα 21¹³. Συγκεκριμένα βλέπουμε πως οι συνιστώσες που σχετίζονται με συνεκτικά φαινόμενα δεν εξαρτώνται από αυτόν και παραμένουν σταθερές, σε αντίθεση με την αντίσταση κυματισμού και τις υπόλοιπες συνιστώσες της. Στην πραγματικότητα όμως, οι συνιστώσες αντίστασης συνεκτικότητας εξαρτώνται από τον αριθμό Froude, καθώς οι παραγόμενοι κυματισμοί μεταβάλλουν τη βρεχόμενη επιφάνεια και επηρεάζουν την ταχύτητα του ρευστού και το οριακό στρώμα, κοντά στην ίσαλο. Η αντίσταση κυματισμού με τη σειρά της δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τον αριθμό Froude καθώς το οριακό στρώμα μεταβάλλει τις κάθετες πιέσεις στη γάστρα με αποτέλεσμα να έχουμε επιρροή των παραγόμενων κυματισμών.

¹³ Γ.Κ. Πολίτη, Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. «Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου», Αθήνα, 2011



Σχήμα 21. Η εξάρτηση των συνιστωσών της αντίστασης από τον αριθμό Froude

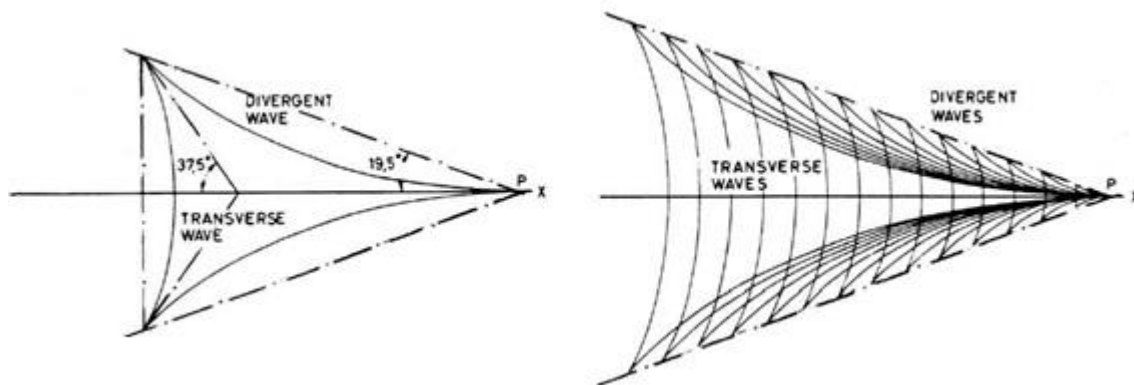
Η συνολική αντίσταση λοιπόν και σύμφωνα με το σχήμα 21, αναλύεται στις ακόλουθες επιμέρους συνιστώσες:

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

Η αντίσταση τριβής επίπεδης πλάκας αποτελεί προσέγγιση της αντίστασης τριβής του σκάφους με θεώρηση μιας επίπεδης επιφάνειας ισοβαδικής με τη βρεχόμενη επιφάνεια του πλοίου, που κινείται σε ρευστό με τον ίδιο αριθμό Reynolds με το σκάφος. Η αντίσταση τριβής λόγω καμπυλότητας περιλαμβάνει την συνιστώσα της αντίστασης που γεννάται εξ' αιτίας της διαφορετικής γεωμετρίας μεταξύ επίπεδης πλάκας και γάστρας. Η καμπυλότητα της γάστρας προκαλεί αύξηση της ταχύτητας του ρευστού στο μέσο του σκάφους, με αποτέλεσμα την αύξηση της αντίστασης τριβής καθώς αυτή εξαρτάται άμεσα από την ταχύτητα. Η αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας είναι αντίσταση που οφείλεται στη μεταβολή του πεδίου πιέσεων πρύμνηθεν, και πηγάζει όμως από φαινόμενα

συνεκτικότητας. Συγκεκριμένα η επέκταση του οριακού στρώματος πίσω από το σώμα, η αποκόλληση της ροής και η δημιουργία δρόμου δινών αποτελούν φαινόμενα που οφείλονται στη συνεκτικότητα, καθώς δεν υφίστανται σε ιδανικό ρευστό. Αποτέλεσμα αυτών των φαινομένων είναι η μείωση του πεδίου πιέσεων και η διαμόρφωση μιας συνολικής συνιστώσας στην περιοχή της πρύμνης που είναι μικρότερη από την αντίστοιχη της πλώρης. Οι τρεις πρώτες συνιστώσες αντίστασης αποτελούν την αντίσταση συνεκτικότητας ενώ η αντίσταση τριβής λόγω καμπυλότητας και η αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας, την αντίσταση λόγω μορφής.

Η αντίσταση κυματισμού οφείλεται στην συνεχή παραγωγή κυματισμών από το σκάφος κατά τη διάρκεια της πλεύσης του. Οι κυματισμοί αυτοί αποτελούν μεταδιδόμενη ενέργεια και το μέγεθος τους εξαρτάται άμεσα από την ταχύτητα, τη γεωμετρία και το εκτόπισμα. Η αντίσταση κυματισμού αποτελεί σημαντική συνιστώσα της συνολικής αντίστασης σε μεγάλες ταχύτητες και κατ' επέκταση ενδιαφέρει ιδιαίτερα στην παρούσα περίπτωση όπου μελετάται ταχύπλοο σκάφος. Το σύνολο των παραγόμενων από το σκάφος κυματισμών αποτελείται τόσο από εγκάρσιους που κινούνται με την ταχύτητα του σκάφους, όσο και από αποκλίνοντες που ταξιδεύουν υπό γωνία πίσω από αυτό. Η πρώτη θεωρητική προσέγγιση του συστήματος κυματισμών που παράγει ένα πλοίο έγινε από τον Lord Kelvin στα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Στο σχήμα 20¹⁴ φαίνεται το σύστημα των δύο αυτών κατηγοριών κυματισμών, που παράγεται από ένα κινούμενο σημείο πίεσης.



Σχήμα 22. Το σύστημα κυματισμών του Kelvin

Η θεώρηση του σκάφους ως ενός σημείου πίεσης αποτελεί μια παραδοχή που ισχύει μακριά από το σώμα με αποτέλεσμα οι λεπτομέρειες της γεωμετρίας του σκάφους να έχουν επιρροή μεγαλύτερης τάξης στο φαινόμενο κι επομένως να μπορούν να αμεληθούν. Οι αποκλίνοντες κυματισμοί εκτείνονται εντός των ευθειών που σχηματίζουν γωνία περίπου 19,5° από τη διεύθυνση κίνησης ενώ οι εγκάρσιοι σχηματίζουν γωνία με την ίδια

¹⁴ Γ.Κ. Πολίτη, Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π. «Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου», Αθήνα, 2011

ευθεία περίπου $37,5^\circ$. Τα δύο συστήματα κυματισμών κινούνται με την ταχύτητα του σκάφους ενώ αν αυτή παραμένει σταθερή η παραγωγή τους είναι σταθερή και μόνιμη και τα συστήματα αυτά φαίνονται ακίνητα για έναν παρατηρητή πάνω στο σκάφος.

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

3.2 Εκτίμηση της αντίστασης πλοίου με την τρισδιάστατη θεωρία δυναμικού

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1, η δυναμική θεωρία έχει περιορισμένες δυνατότητες υπολογισμού υδροδυναμικών φαινομένων καθώς παραλείπει τα φαινόμενα συνεκτικότητας που λαμβάνουν χώρα. Κατ' επέκταση μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για την εκτίμηση υδροδυναμικών φαινομένων που δεν επηρεάζονται σε σημαντικό βαθμό από την τριβή μεταξύ των μορίων του νερού.

Για τις ανάγκες του παρόντος θα υπολογιστούν το πεδίο κυματισμών και η αντίσταση κυματισμού που θα παρουσιάσει ένα ταχύπλοο Ε/Γ-Ο/Γ στην υπηρεσιακή του ταχύτητα και του οποίου η παραμετρική αναπαράσταση περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η αξιολόγηση θα γίνει για ένα σύνολο εναλλαγών της αρχικής γεωμετρίας οι οποίες προκύπτουν με διακύμανση των μεταβλητών σχεδίασης που επιλέχθηκαν. Λόγω του εκτενούς αριθμού εναλλακτικών γεωμετριών που θα εξεταστούν, η μόνη ρεαλιστική προσέγγιση του προβλήματος σε εύλογο χρόνο και με δεδομένη την διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ είναι η χρήση κωδικών που χρησιμοποιούν τη θεωρία δυναμικού. Εν προκειμένω, το λογισμικό με το οποίο θα γίνει ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών της πλεύσης σε ήρεμο νερό είναι το SWAN 2, που χρησιμοποιεί τη μέθοδο διανομής πηγών

Rankine σε παραλληλόγραμμα στοιχεία (Rankine Panel Method - RPM) στο στερεό σύνορο και την ελεύθερη επιφάνεια. Το μαθηματικό υπόβαθρο που θα χρησιμοποιηθεί θα περιγραφεί συνοπτικά στη συνέχεια ενώ πιο αναλυτικά αποτυπώνεται από τον Καθηγητή MIT, Παύλο Σκλαβούνου¹⁵.

Το SWAN 2, βασίζεται στην χρήση του θεωρήματος Green για την απόδοση του δυναμικού ταχύτητας που είναι αντίστοιχο με τη διανομή πηγών και δίπολων πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια και το στερεό σύνορο. Οι εξισώσεις κίνησης της ροής του ρευστού διατυπώνονται με βάση ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων $\mathbf{x} = (x, y, z)$, το οποίο κινείται με ταχύτητα $U(t)$, που ισούται με την ταχύτητα του πλοίου. Η αρχή του συστήματος συντεταγμένων τοποθετείται πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια. Θεωρώντας μη συνεκτική τη ροή, η ταχύτητα διαταραχής του ρευστού $\mathbf{v}(\mathbf{x}, t)$ ορίζεται ως η κλίση του δυναμικού ταχύτητας $\Phi(\mathbf{x}, t)$, ή αλλιώς $\mathbf{v} = \nabla\Phi(\mathbf{x}, t)$. Η διατήρηση της συνέχειας εκφράζεται με ικανοποίηση της εξίσωσης Laplace για το δυναμικό ταχύτητας σε όλο το πεδίο κι επομένως $\nabla^2\Phi = 0$.

Η θέση σε κάθε σημείο της ελεύθερης επιφάνειας εκφράζεται μέσω της ανύψωσης $\zeta(x, y, t)$, που μαζί με το δυναμικό ταχύτητας αποτελούν τις δύο άγνωστες ποσότητες προς εύρεση και οι οποίες σχετίζονται με τη δυναμική και την κινηματική συνθήκη.

Η κινηματική συνθήκη επιβάλλει κάθε στοιχειώδες σωματίδιο που βρίσκεται στη διεπιφάνεια νερού και αέρα, να παραμένει εκεί σε κάθε περίπτωση. Η μαθηματική έκφραση αυτής της συνθήκης είναι η επόμενη :

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\vec{U} - \nabla\Phi) \cdot \nabla \right] \zeta = \frac{\partial\Phi}{\partial z} \quad , \quad \text{σε κάθε } z = \zeta(x, y, t)$$

Η δυναμική συνθήκη επιβάλλει η πίεση του νερού στην ελεύθερη επιφάνεια να είναι ίση με την ατμοσφαιρική η οποία θεωρείται μηδενική. Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση Bernoulli, προκύπτει :

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - \vec{U} \cdot \nabla \right] \Phi + \frac{1}{2} \nabla\Phi \cdot \nabla\Phi = -gz \quad , \quad \text{σε κάθε } z = \zeta(x, y, t)$$

Στο στερεό σύνορο θα πρέπει η κάθετη σε αυτό, συνιστώσα της ταχύτητας του νερού να είναι ίση με την κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας του πλοίου στο αντίστοιχο σημείο, που μαθηματικά εκφράζεται με την επόμενη σχέση :

$$\frac{\partial\Phi}{\partial n} = \vec{U} \cdot \vec{n} + \vec{v} \cdot \vec{n}$$

¹⁵ Ohkusu, M., Advances in Marine Hydrodynamics, 1996, Chapter 4

όπου \vec{n} είναι το κάθετο διάνυσμα σε κάθε στοιχείο και \vec{v} η ταχύτητα διαταραχής του πλοίου λόγω της παρουσίας κυματισμών. Οι παραπάνω εξισώσεις είναι προφανώς χρονικά εξαρτώμενες ωστόσο στην περίπτωση απουσίας κυματισμών και σε άπειρο χρόνο η ταχύτητα σταθεροποιείται και το δυναμικό ταχύτητας και η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας καθίστανται μεγέθη ανεξάρτητα του χρόνου. Η επίλυση των παραπάνω εξισώσεων παρουσιάζει δυσκολίες και κατ' επέκταση κρίνεται σκόπιμη η γραμμικοποίηση τους που βασίζεται σε δύο παραδοχές. Η πρώτη είναι ότι οι περιβάλλοντες κυματισμοί είναι σχετικά μικρού μεγέθους και η γάστρα είναι σχετικά λεπτόγραμμη.

Με βάση τις δύο αυτές παραδοχές προκύπτει ότι η διαταραχή της κίνησης του νερού λόγω της παρουσίας του πλοίου και η διαταραχή του ίδιου του πλοίου, είναι μικρές σε σχέση με την ταχύτητα του. Σε αυτή την περίπτωση το δυναμικό ταχύτητας μπορεί να διασπαστεί σε ένα δυναμικό κύριας ροής και σε ένα δυναμικό διαταραχής, ενώ το ίδιο μπορεί να γίνει και για την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας. Οι δύο αυτές απλοποιήσεις φαίνονται στη συνέχεια :

$$\Phi = \varphi_0 + \varphi_1, \quad |\nabla\varphi_1| \ll |\nabla\varphi_0|$$

$$\zeta = \zeta_0 + \zeta_1, \quad |\nabla\zeta_1| \ll |\nabla\zeta_0|$$

Έτσι η εξίσωση που διέπει την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας γίνεται :

$$\zeta_0 = \frac{\vec{U} \cdot \nabla \varphi_0}{g} - \frac{1}{2g} \nabla \varphi_0 \cdot \nabla \varphi_0, \quad z = 0$$

Με αντικατάσταση της παραπάνω εξίσωσης στην κινηματική και δυναμική συνθήκη της ελεύθερης επιφάνειας και υπό τις παραδοχές που προαναφέρθηκαν έχουμε :

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\vec{U} - \nabla \varphi_0) \cdot \nabla \right] \zeta_1 = \frac{\partial^2 \varphi_0}{\partial z^2} \zeta_1 + \frac{\partial \varphi_1}{\partial z}, \quad \text{στο } z = 0$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial t} - (\vec{U} - \nabla \varphi_0) \cdot \nabla \right] \varphi_1 = -g\zeta_1 + \vec{U} \cdot \nabla \varphi_0 - \frac{1}{2} \nabla \varphi_0 \cdot \nabla \varphi_0, \quad \text{στο } z = 0$$

Όσον αφορά το στερεό σύνορο, η γραμμικοποίηση βασίζεται στις ίδιες παραδοχές με την ελεύθερη επιφάνεια. Έτσι, με $\vec{n} = (n_1, n_2, n_3)$ να αναπαριστά το κάθετο διάνυσμα στο σύνορο με φορά προς το ρευστό, το δυναμικό βασικής ροής προκύπτει :

$$\frac{\partial \varphi_0}{\partial n} = \vec{U} \cdot \vec{n} = U \cdot n_1, \quad \text{στο στερεό σύνορο } \bar{S}$$

Το δυναμικό διαταραχής φ_1 περιλαμβάνει το δυναμικό προσπίπτοντος κυματισμού καθώς και τα δυναμικά κυματισμού περίθλασης κι ακτινοβολίας. Το δυναμικό περίθλασης του περιβάλλοντος κυματισμού ικανοποιείται μέσω της απαίτησης η κάθετη ταχύτητα να είναι

ιση και αντίθετη με αυτή που αντιστοιχεί στο δυναμικό περίθλασης πάνω στο στερεό σύνορο, κάτι που φαίνεται στην επόμενη σχέση :

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = -\frac{\partial \varphi_1}{\partial n}, \quad \text{στο στερεό σύνορο } \bar{S}$$

Το δυναμικό ακτινοβολίας για κάθε έναν από τους έξι βαθμούς ελευθερίας του πλοίου, δίνεται από τις επόμενες σχέσεις :

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = \sum_{j=1}^6 \left(\frac{\partial \xi_j}{\partial t} n_j + \xi_j m_j \right), \quad \text{στο στερεό σύνορο } \bar{S}$$

$$(n_4, n_5, n_6) = \vec{x} \times \vec{n}$$

$$(m_1, m_2, m_3) = (\vec{n} \cdot \nabla)(\bar{U} - \nabla \varphi_0)$$

$$(m_4, m_5, m_6) = (\vec{n} \cdot \nabla)[\vec{x} \times (\bar{U} - \nabla \varphi_0)]$$

Η εξίσωση Green μπορεί να εφαρμοστεί για τα δυναμικά ταχύτητας και πηγών Rankine όπως φαίνεται στη συνέχεια :

$$G(\vec{x}; \vec{\xi}) = \frac{1}{2\pi |\vec{x} - \vec{\xi}|}$$

Η εφαρμογή της εξίσωσης Green οδηγεί στην ολοκληρωτική σχέση μεταξύ της τιμής και της παραγώγου στο κάθετο διάνυσμα του δυναμικού φ , πάνω στο στερεό σύνορο S και την ελεύθερη επιφάνεια F , που τελικά λαμβάνει την ακόλουθη μορφή :

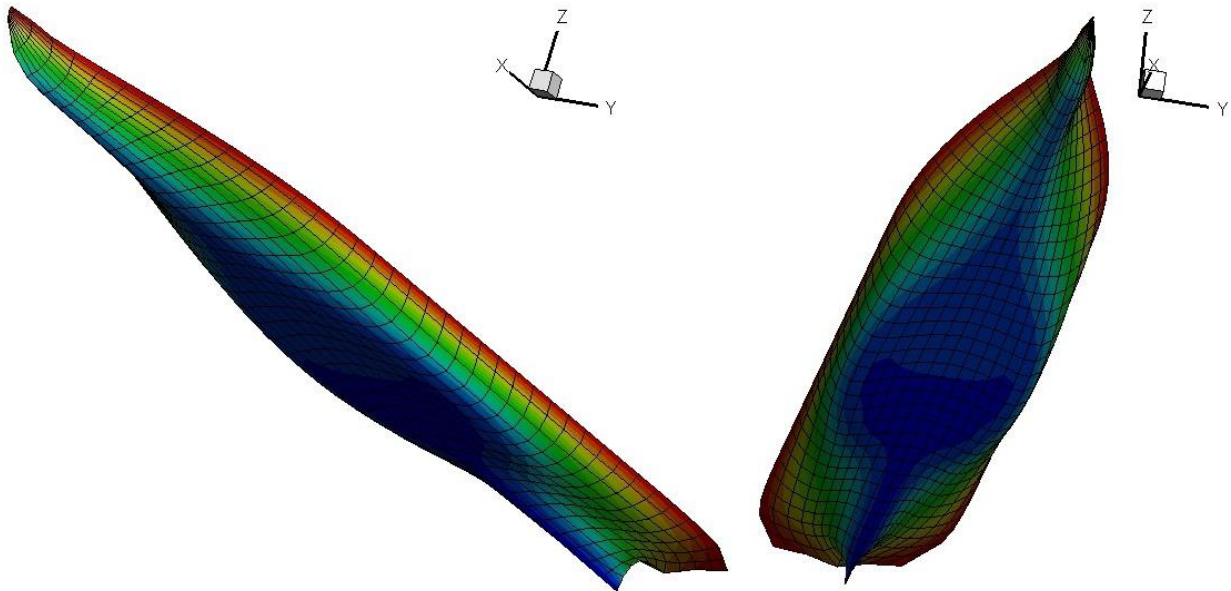
$$\varphi(\vec{x}, t) + \iint_{F+S} \varphi(\vec{\xi}, t) \frac{\partial G}{\partial n_{\xi}}(\vec{x}; \vec{\xi}) d\xi - \iint_{F+S} \frac{\partial \varphi(\vec{\xi}, t)}{\partial n_{\xi}} G(\vec{x}; \vec{\xi}) d\xi = 0$$

Για τον υπολογισμό του πεδίου των παραγόμενων κυματισμών και την εκτίμηση της αντίστασης κυματισμού το SWAN 2 απαιτεί συγκεκριμένα δεδομένα που αφορούν τη γεωμετρία και κάποια υδροστατικά της χαρακτηριστικά. Τα δεδομένα εισόδου, η λειτουργία και οι περιορισμοί του προγράμματος περιγράφονται λεπτομερώς στο εγχειρίδιο χρήσης¹⁶.

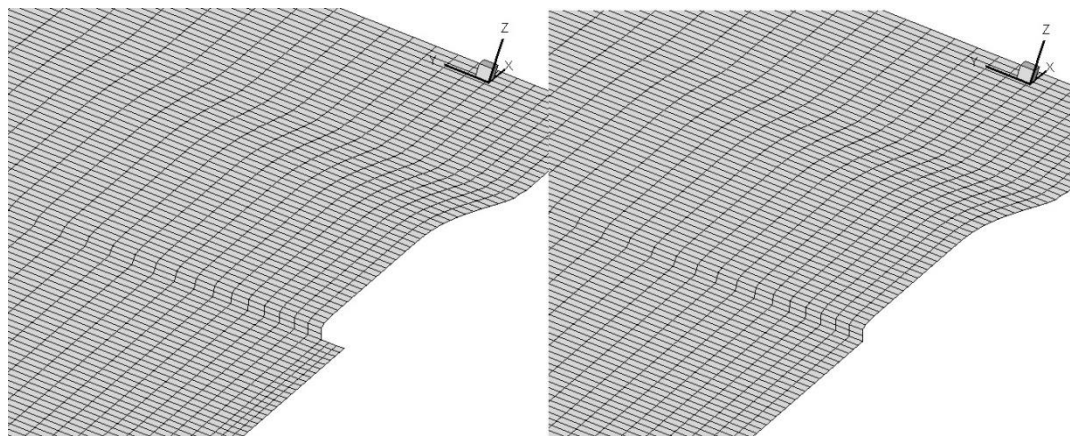
Συνοπτικά για την εκτέλεση του προγράμματος απαιτείται αρχικά η περιγραφή της γεωμετρίας από νομείς των οποίων ο μέγιστος κι ελάχιστος αριθμός εξαρτώνται από την ταχύτητα προσομοίωσης. Βάσει αυτών καθώς και στοιχείων που αφορούν την έκταση της ελεύθερης επιφάνειας κατασκευάζεται επιφανειακό δισδιάστατο πλέγμα που, όπως

¹⁶ SWAN 2 (2002), User Manual : «Ship Flow Simulation in Calm Water and in Waves», Boston Marine Consulting Inc., Boston MA 02116, USA

περιγράφηκε νωρίτερα, καλύπτει την ελεύθερη επιφάνεια και το στερεό σύνορο. Ένα τυπικό δείγμα του δημιουργούμενου υπολογιστικού πλέγματος φαίνεται στα σχήματα 23, 24 και 25.



Σχήμα 23. Αναπαράσταση στερεού συνόρου στο SWAN 2

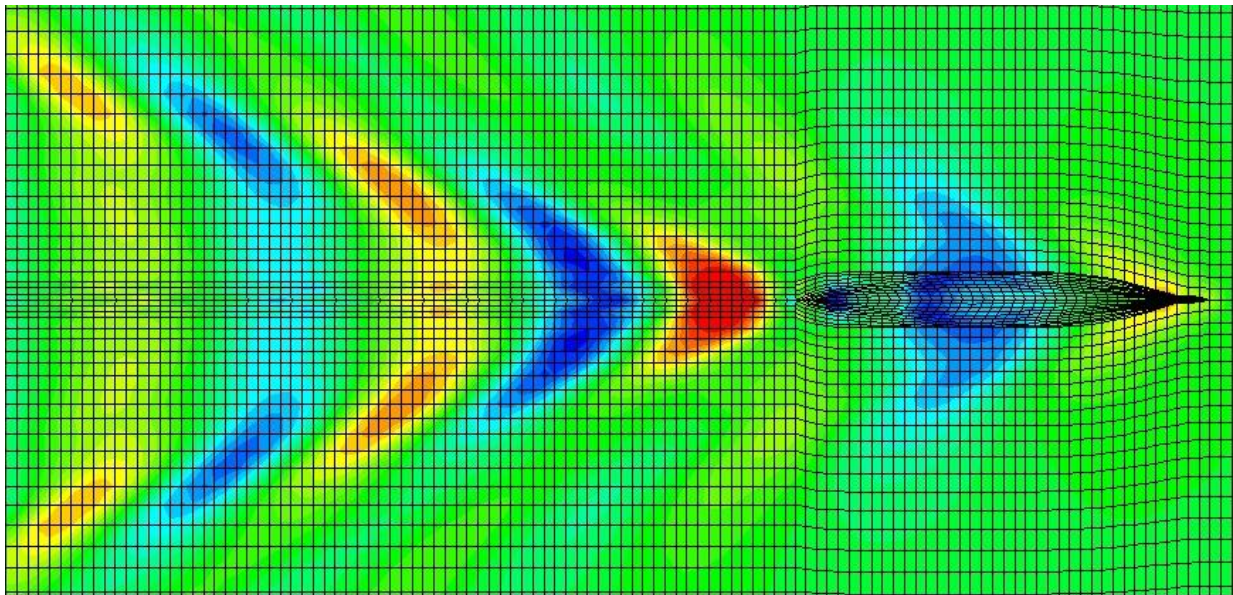


Σχήμα 24. Υπολογιστικό πλέγμα ελεύθερης επιφάνειας με (αριστερά) και χωρίς (δεξιά) την περιοχή του ομόρου στο SWAN 2

Στο σχήμα 23 φαίνεται το πλέγμα στο στερεό σύνορο όπως διαμορφώνεται με βάση τους νομείς που δίνονται. Δεδομένου ότι το υδροδυναμικό πρόβλημα αφορά τα ύφαλα, η γεωμετρία άνωθεν της ισάλου παραλείπεται καθώς δεν έχει καμία συμμετοχή στην επίλυση. Τα χρώματα που φαίνονται αφορούν την καθ' ύψος θέση προκειμένου να είναι

ευκολότερη η χωρική αντίληψη της γεωμετρίας. Το στερεό σύνορο είναι και το μοναδικό που εκτείνεται στο χώρο, όντας δισδιάστατο επιφανειακό, κείμενο πάνω στη γάστρα.

Στο σχήμα 24 φαίνονται τα υπολογιστικά πλέγματα της ελεύθερης επιφάνειας στην περιβάλλουσα περιοχή καθώς και στην περιοχή του ομόρου του πλοίου η οποία και φαίνεται μόνο στο αριστερά τμήμα του σχήματος. Αυτό που επίσης φαίνεται είναι πως το πλέγμα είναι ορθογώνιο που ακολουθεί τη μορφή της γεωμετρίας κατά τον άξονα y , ενώ σε μεγαλύτερη απόσταση από τη γάστρα έχουμε σταδιακή εξομάλυνση αυτής της επιρροής.



Σχήμα 25. Πεδίο κυματισμών κατά την πλεύση σε ήρεμο νερό παραγόμενο από το SWAN 2

Στο σχήμα 25 φαίνεται το πεδίο των παραγόμενων ακολουθούντων και αποκλινόντων κυματισμών μαζί με το υπολογιστικό πλέγμα στο σύνολο του. Σε αυτό με μπλε χρώμα αναπαρίστανται οι κοιλάδες των κυμάτων και με κόκκινο οι κορυφές. Το υπολογιστικό πλέγμα εκτείνεται μισό μήκος πλοίου πρόωραθεν της πλώρης, ένα μήκος κατά το εγκάρσιο και δύο μήκη πρύμνηθεν του καθρέφτη. Η εκτέλεση του προγράμματος γίνεται επαναληπτικά μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση στην τιμή της διαγωγής και της παράλληλης βύθισης ώστε να συμπίπτουν με αυτές που πραγματικά θα αποκτήσει το πλοίο κατά την πλεύση του. Όλες οι προσομοιώσεις πλεύσης θα πραγματοποιηθούν στην υπηρεσιακή ταχύτητα του πλοίου.

3.3 Εκτίμηση της αντίστασης πλοίου με χρήση της συνεκτικής θεωρίας

Η συνεκτική θεωρία όπως έχει αναφερθεί νωρίτερα αποτελεί εντελώς διαφορετική προσέγγιση από τη θεωρία δυναμικού. Η βασική της διαφορά έγκειται στο γεγονός πως λαμβάνει υπόψη τη συνεκτικότητα των ρευστών. Για την επίλυση προβλημάτων

υδροδυναμικής χρησιμοποιούνται τρεις βασικές αρχές που είναι η διατήρηση της μάζας, η διατήρηση της ενέργειας και η ισχύς του δευτέρου νόμου του Νεύτωνα. Η αρχές αυτές εντάσσονται στις εξισώσεις συνέχειας, ορμής κι ενέργειας για όλα τα υδροδυναμικά προβλήματα που επιλύονται με αυτή την προσέγγιση. Οι εξισώσεις που διέπουν τη ροή είναι γνωστές ως εξισώσεις Navier-Stokes.

Στα πλαίσια του παρόντος η υδροδυναμική συμπεριφορά του πλοίου που εξετάζεται πραγματοποιείται με χρήση του λογισμικού STAR CCM+. Το συγκεκριμένο λογισμικό χρησιμοποιεί την μέθοδο των όγκων ελέγχου για την αριθμητική επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes. Οι εξισώσεις αυτές φαίνονται στη συνέχεια για την έκφραση των εξισώσεων της συνέχειας, της ορμής και της ενέργειας αντίστοιχα :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho dV + \oint \rho(\mathbf{v} - \mathbf{v}_g) \cdot d\mathbf{a} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \mathbf{v} dV + \oint \rho \mathbf{v} \otimes (\mathbf{v} - \mathbf{v}_g) d\mathbf{a} = - \oint p \mathbf{I} \cdot d\mathbf{a} + \oint \mathbf{T} \cdot d\mathbf{a} + \int_V \mathbf{f}_r + \mathbf{f}_g + \mathbf{f}_u + \mathbf{f}_\omega + \mathbf{f}_L dV$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho E dV + \oint [\rho H(\mathbf{v} - \mathbf{v}_g) + p \mathbf{v}_g] d\mathbf{a} = \oint \mathbf{T} \cdot \mathbf{v} d\mathbf{a} + \int_V (\mathbf{f}_r + \mathbf{f}_g + \mathbf{f}_u + \mathbf{f}_\omega + \mathbf{f}_L) \cdot \mathbf{v} dV$$

Οι όροι των παραπάνω εξισώσεων περιγράφονται στη συνέχεια :

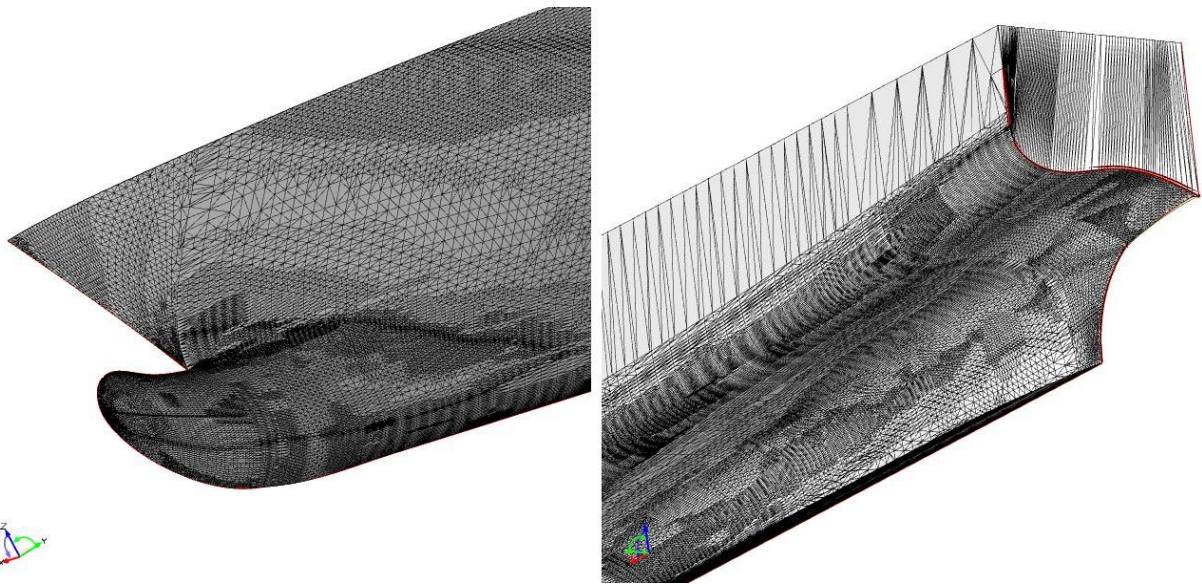
- $d\mathbf{a}$ η επιφάνεια ενός στοιχειώδους όγκου ελέγχου dV
- ρ η πυκνότητα του ρευστού
- p η πίεση του ρευστού
- \mathbf{v} το διάνυσμα της ταχύτητας
- \mathbf{v}_g το διάνυσμα της ταχύτητας πλέγματος
- E η συνολική ενέργεια ανά μονάδα μάζας
- \mathbf{T} ο τανυστής των συνεκτικών τάσεων
- \mathbf{f}_r η δύναμη στο στερεό σύνορο λόγω περιστροφής
- \mathbf{f}_g η δύναμη στο στερεό σύνορο λόγω βαρύτητας
- \mathbf{f}_u η δύναμη στο στερεό σύνορο λόγω δύναμης προσδιορισμένης από το χρήστη
- \mathbf{f}_ω η δύναμη στο στερεό σύνορο λόγω στροβιλότητας
- \mathbf{f}_L η δύναμη Laplace

Για τον τανυστή συνεκτικών τάσεων χρησιμοποιείται η προσέγγιση του Boussinesq που δίνει :

$$\mathbf{T} = \mu_{eff} \left[\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{v}) \mathbf{I} \right], \quad \mu_{eff} = \mu_{laminar} + \mu_{turbulent}$$

Η διαχείριση των εξισώσεων Navier-Stokes πραγματοποιήθηκε με τη μη ενοποιημένη προσέγγιση και κατ' επέκταση η επίλυση των εξισώσεων της ροής, για την πίεση και τις συνιστώσες της ταχύτητας, υλοποιείται διαδοχικά. Η απόκλιση μεταξύ των υπολογισμών για τις εξισώσεις συνέχειας κι ορμής αντιμετωπίζεται με αλγόριθμο πρόβλεψης και διόρθωσης. Η ροή μοντελοποιείται ως τυρβώδης και για την εκτίμηση των φαινομένων τύρβης χρησιμοποιείται το μοντέλο k-ε.

Για την αναπαράσταση του στερεού συνόρου χρησιμοποιείται ένα τριγωνικό επιφανειακό πλέγμα που εξάγεται από τον CAESES – Friendship Framework. Τυπική μορφή του πλέγματος αυτού φαίνεται στο σχήμα 26.

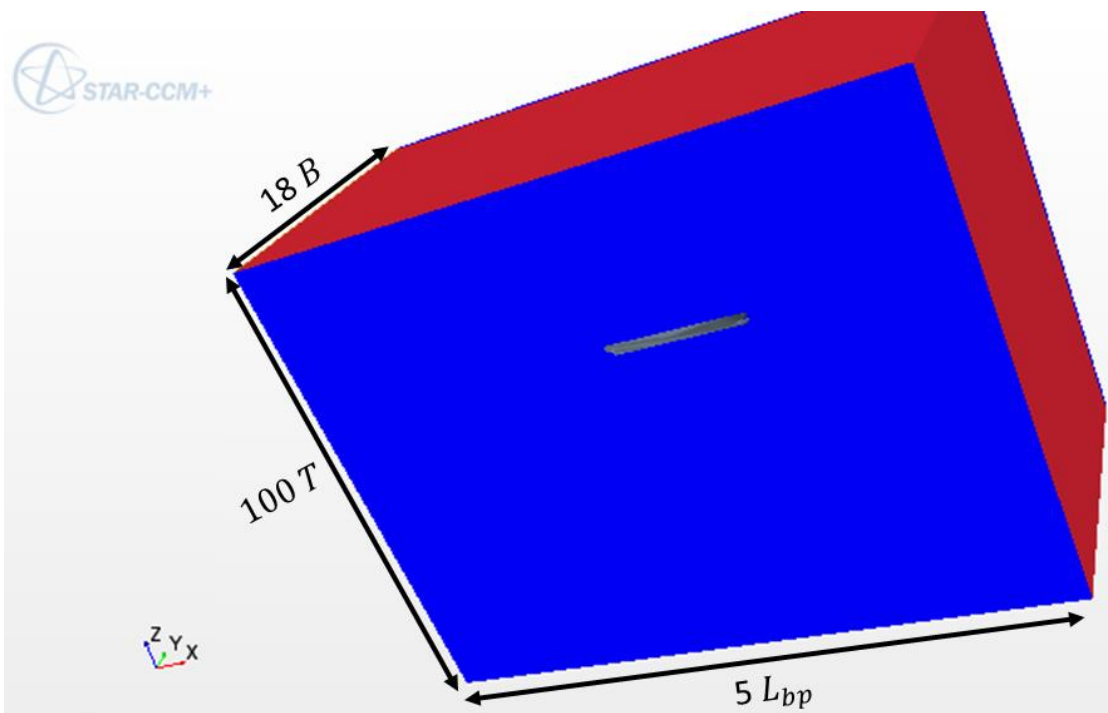


Σχήμα 26. Τριγωνικό επιφανειακό πλέγμα παραγόμενο από το CAESES – Friendship Framework

Η γεωμετρία της γάστρας εισάγεται στο STAR CCM+ όπου χρησιμοποιείται για τη διαμόρφωση ενός κλειστού χωρίου που περιλαμβάνει τόσο το στερεό σύνορο όσο και την αναπαράσταση του όγκου εντός του οποίου λαμβάνει χώρα η προσομοίωση. Οι διαστάσεις αυτού του χωρίου θα πρέπει να είναι επαρκείς ώστε να μην έχουμε επιρροή του πεδίου επίλυσης από τα σύνορα. Τυπικό παράδειγμα αποτελεί το βάθος που ανάλογα με το ύψος των παραγόμενων κυμάτων μπορεί να έχει επίδραση στο αποτέλεσμα της προσομοίωσης.

Από την άλλη μεριά είναι προφανές πως η έκταση αυτού του όγκου είναι άμεσα συναρτώμενη του πλήθους των όγκων ελέγχου κι επομένως με τον αριθμό των κόμβων επίλυσης που έχουν άμεση σχέση με την απαιτούμενη υπολογιστική ισχύ.

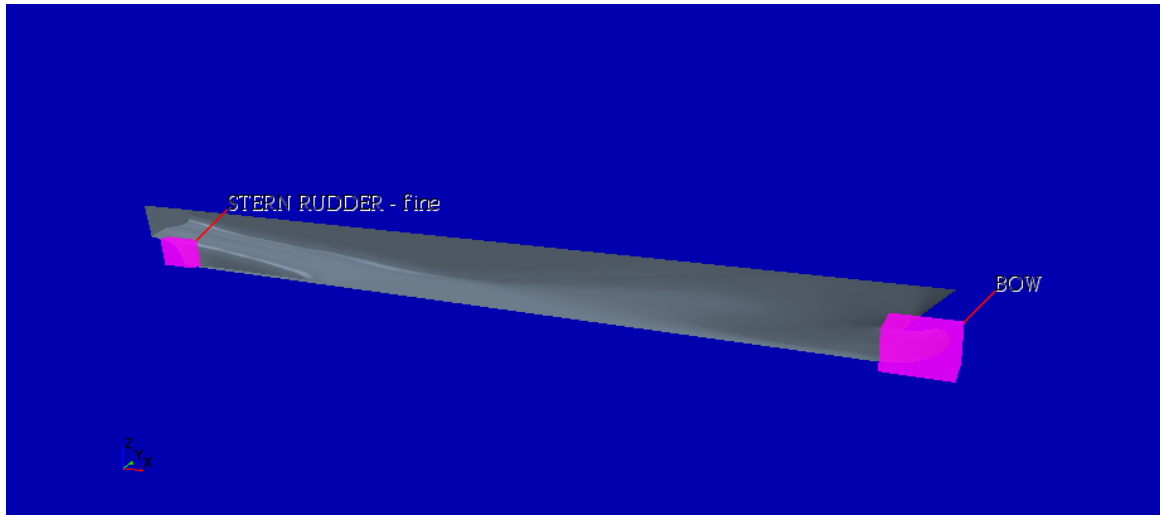
Η διαστασιολόγηση του χωρίου επίλυσης βασίσθηκε στην προτεινόμενη μεθοδολογία του λογισμικού. Το χωρίο αυτό και οι διαστάσεις του φαίνονται στο σχήμα 27 ως συνάρτηση των κύριων διαστάσεων του πλοίου.



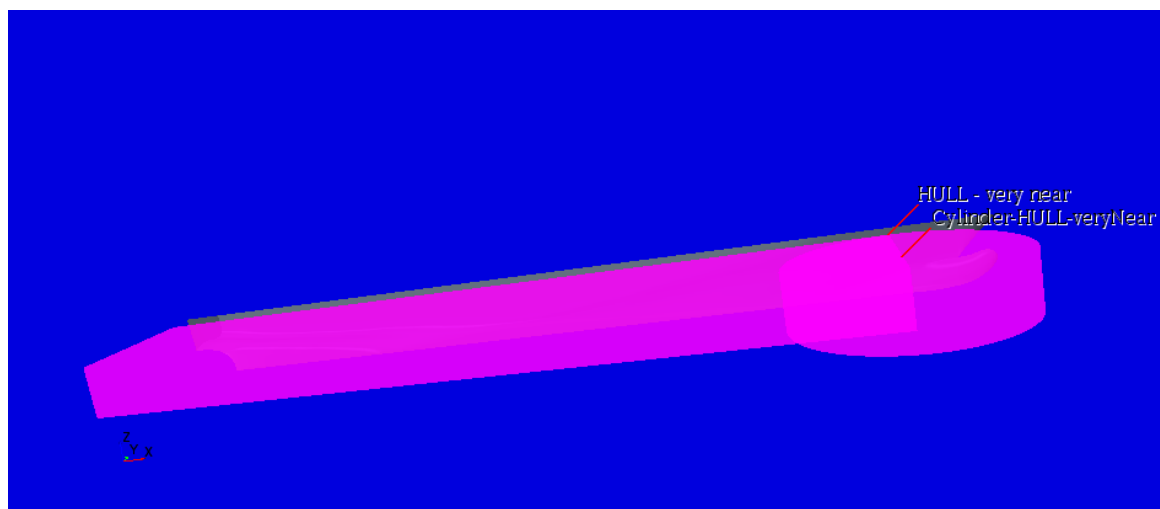
Σχήμα 27. Υπολογιστικό χωρίο στο περιβάλλον STAR CCM+

Για τη διακριτοποίηση του συνολικού χωρίου σε επιμέρους στοιχειώδεις όγκους ελέγχου προκειμένου να γίνει η επίλυση των εξισώσεων που διέπουν τη ροή, απαιτείται η κατασκευή τρισδιάστατου πλέγματος. Προκειμένου να γίνει βέλτιστη χρήση της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος, η διαμόρφωση του πλέγματος πραγματοποιείται με εφαρμογή στρατηγικών πυκνώσης σε περιοχές που έχουμε σημαντικές μεταβολές του πεδίου πιέσεων και ταχύτητας. Οι όγκοι αυτοί φαίνονται στη συνέχεια ενώ για κάθε μια κατηγορία θα παρατεθεί κι ένα σχήμα :

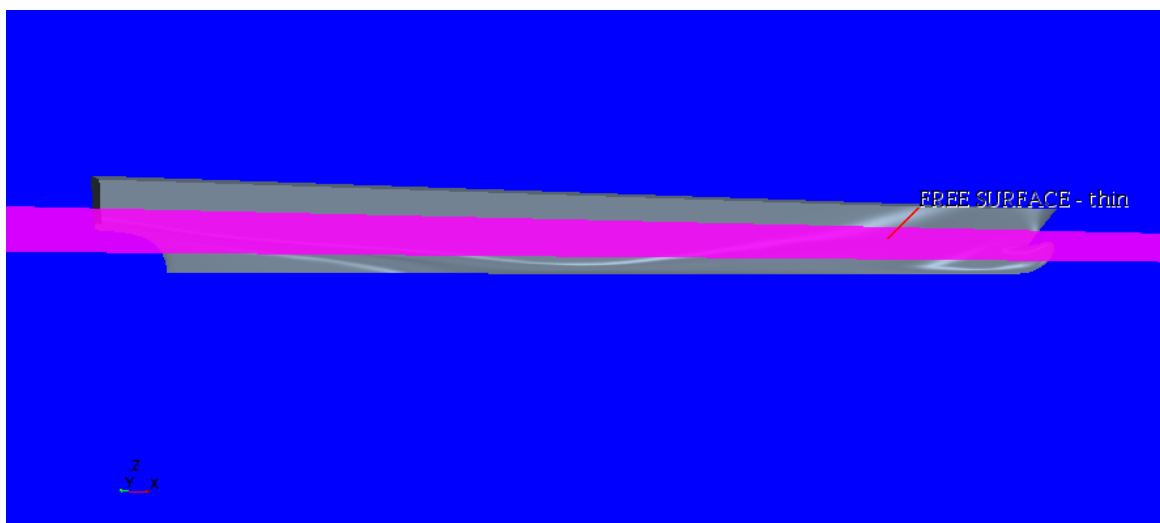
- Παραλληλόγραμμοι όγκοι στην περιοχή του βολβού και της πρύμνης
- Παραλληλόγραμμος και κυλινδρικός όγκος γύρω από τη γάστρα και την περιοχή του βολβού αντίστοιχα, (τρία ζεύγη κι ένας παραλληλόγραμμος όγκος με διαφορετική πυκνωση και διαστάσεις)
- Παραλληλόγραμμος όγκος για την ελεύθερη επιφάνεια (τρεις όγκοι με διαφορετική πυκνωση και διαστάσεις)
- Παραλληλόγραμμοι όγκοι (ένας εκ των οποίων περιστραμμένος) και ένας κυλινδρικός όγκος για τη διαχείριση χωρίου επέκτασης του συστήματος των παραγόμενων κυματισμών (τρία σύνολα με διαφορετική πυκνωση και διαστάσεις)



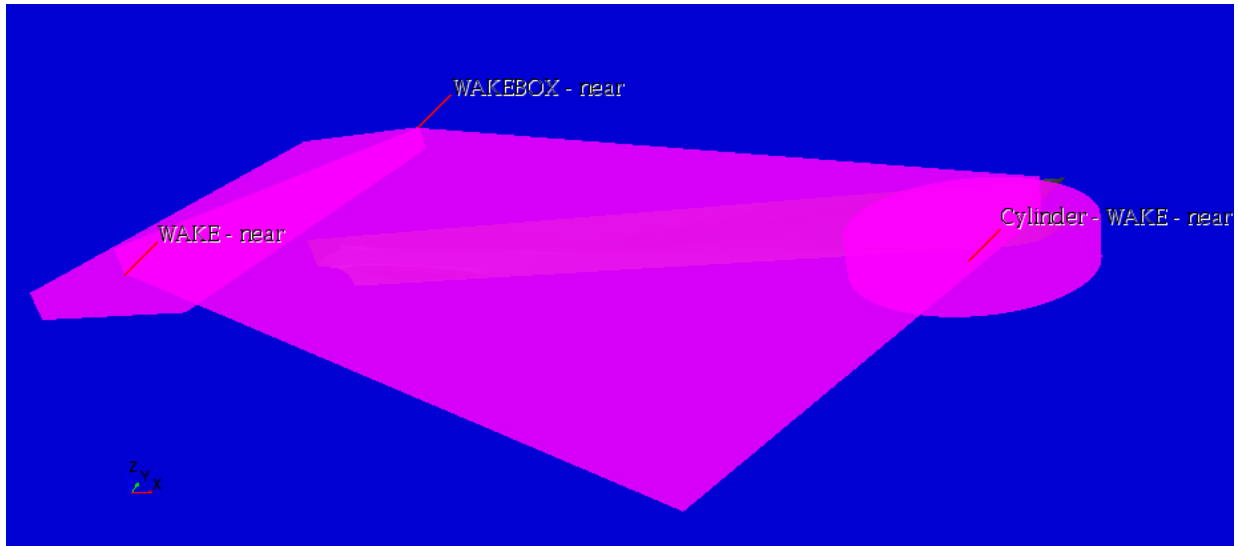
Σχήμα 28. Όγκοι διαχείρισης πλέγματος γύρω από την πρύμνη και την περιοχή του βολβού



Σχήμα 29. Όγκοι διαχείρισης πλέγματος γύρω από τη γάστρα και τον βολβό

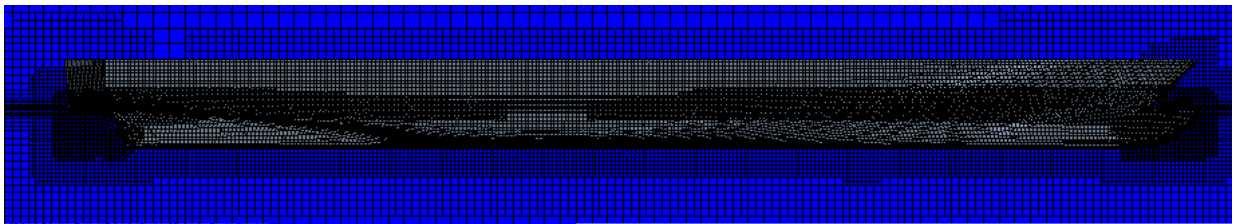


Σχήμα 30. Όγκος διαχείρισης πλέγματος γύρω από την ελεύθερη επιφάνεια

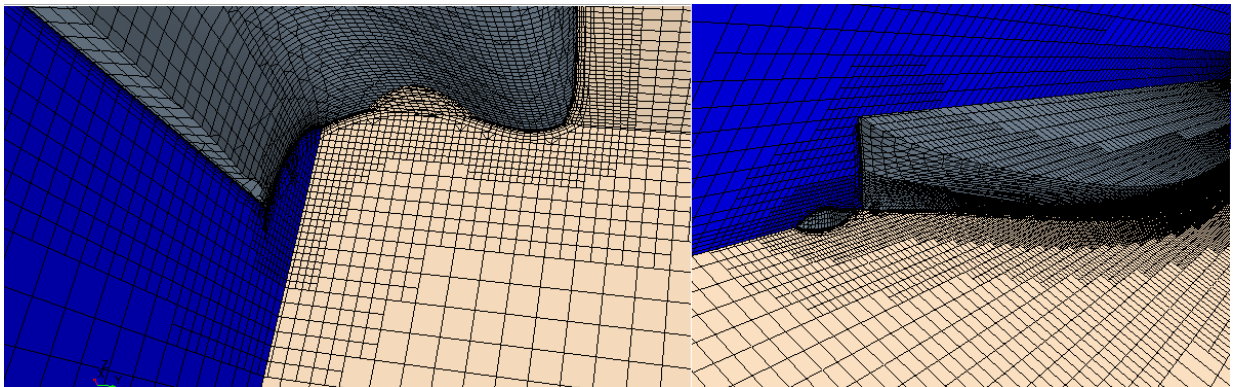


Σχήμα 31. Όγκοι διαχείρισης πλέγματος που αφορά το πεδίο κυματισμών

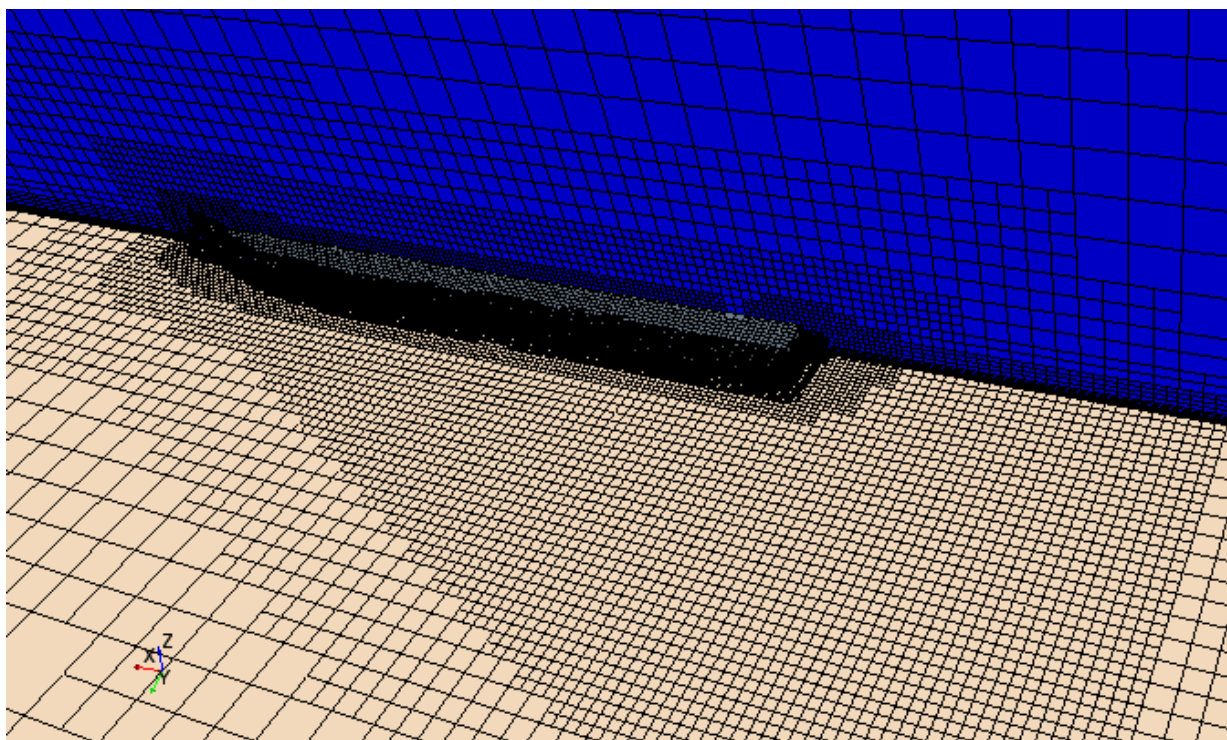
Το αποτέλεσμα της εφαρμοζόμενης στρατηγικής πυκνώσης του πλέγματος φαίνεται στα σχήματα 32 ως 34. Όπως είναι εμφανές το πλέγμα γίνεται σταδιακά αραιότερο όσο μεγαλώνει η απόσταση από τη γάστρα.



Σχήμα 32. Υπολογιστικό πλέγμα γύρω από τη γάστρα



Σχήμα 33. Υπολογιστικό πλέγμα στην ελεύθερη επιφάνεια και κατά το εγκάρσιο



Σχήμα 34. Υπολογιστικό πλέγμα στην ελεύθερη επιφάνεια για τη διαχείριση χωρίου επέκτασης του συστήματος των παραγόμενων κυματισμών

Η διαδικασία προετοιμασίας μιας προσομοίωσης είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα κι επομένως το μεγαλύτερο μέρος της αυτοματοποιήθηκε με χρήση μακροεντολών java. Σε αυτές εισάγεται ένα μικρό πλήθος παραμέτρων που αφορούν τις κύριες διαστάσεις του πλοίου, τις επιμέρους διαστάσεις του βολβού καθώς και τη θέση κι έκταση της περιοχής μεταβολών της γεωμετρίας στην πρύμνη.

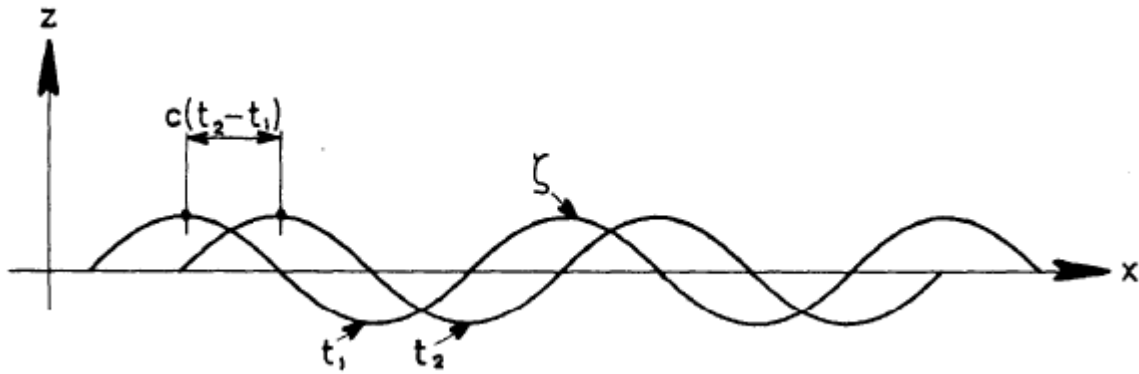
Η χρήση αυτών των μακροεντολών μειώνει δραματικά τον απαιτούμενο χρόνο διαμόρφωσης του περιβάλλοντος επίλυσης, με αποτέλεσμα να μπορεί να ολοκληρωθεί σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα. Το σημαντικότερο ίσως κέρδος της αυτοματοποίησης της διαδικασίας είναι πως αποκλείεται με αυτόν τον τρόπο η εισαγωγή λανθασμένων δεδομένων. Η διαδικασία αυτή μπορεί να εφαρμοστεί για κάθε τύπο πλοίου που έχει διαμόρφωση βολβοειδούς πλώρης.

3.4 Μελέτη της συμπεριφοράς πλοίου σε κυματισμούς

Η μελέτη της υδροδυναμικής συμπεριφοράς ενός πλοίου σε κυματισμούς συνίσταται στην εκτίμηση της απόκρισης του κατά την αλληλεπίδραση του με αυτούς. Η αλληλεπίδραση αυτή προκύπτει κατά κύριο λόγο από φαινόμενα που σχετίζονται με την κατανομή των πιέσεων πάνω στη γάστρα και λιγότερο με τη συνεκτικότητα, κι επομένως μπορεί να μελετηθεί με χρήση της δυναμικής θεωρίας με ικανοποιητική ακρίβεια. Αυτό ισχύει για

όλες τις κινήσεις εκτός του διατοιχισμού όπου έχουμε σημαντικές εφαιπτομενικές τάσεις μεταξύ ρευστού και στερεού συνόρου. Στη συνέχεια θα γίνει μια σύντομη περιγραφή του επιστημονικού υπόβαθρου για την μελέτη των αποκρίσεων ενός πλοίου.

Ένας απλός αρμονικός κυματισμός είναι συνάρτηση τόσο του χρόνου όσο και του χώρου. Η περίπτωση του προφίλ ενός τέτοιου κυματισμού φαίνεται στο σχήμα 35¹⁷.



Σχήμα 35. Χωροχρονικά εξαρτώμενος αρμονικός κυματισμός

Στην περίπτωση των αρμονικών κυματισμών η ανύψωση της επιφάνειας της θάλασσας μπορεί να εκφραστεί μέσω μιας συνάρτησης δυναμικού, που στη γενική περίπτωση δίνεται από την επόμενη σχέση¹⁸ :

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

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

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

Για βαθύ νερό η συνάρτηση δυναμικού λαμβάνει την ακόλουθη μορφή.

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

Στην παραπάνω σχέση ζ_a είναι το πλάτος την απομάκρυνσης κατά την ταλαντωτική κίνηση, που αριθμητικά συμπίπτει με το πλάτος του αρμονικού κυματισμού. Το δυναμικό αυτό αφορά τον αδιατάρακτο κυματισμό και ως εκ τούτου δεν σχετίζεται με την παρουσία πλωτού σώματος.

¹⁷ TU Delft, «Introduction in Ship Hydromechanics», 2002

¹⁸ TU Delft, «Introduction in Ship Hydromechanics», 2002

Κατά την κίνηση ενός σώματος στην ελεύθερη επιφάνεια έχουμε συνολικά τρία δυναμικά κυματισμών που φαίνονται στη συνέχεια :

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

Το δυναμικό προσπίπτοντος κυματισμού αφορά τον αδιατάρακτο κυματισμό. Το δυναμικό περίθλασης προκύπτει από το αποτέλεσμα της πρόσκρουσης κυματισμών στο στερεό σύνορο του σκάφους, με δεδομένο πως το μήκος κύματος είναι συγκρίσιμο με το μήκος του πλοίου. Όταν το μήκος κύματος είναι αρκετά μικρότερο από το μήκος του σκάφους έχουμε την περίπτωση της ανάκλασης. Το δυναμικό ακτινοβολίας αφορά τους παραγόμενους κυματισμούς λόγω των ταλαντωτικών κινήσεων του σκάφους μέσα στο νερό. Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις το πλοίο έχει μηδενική ταχύτητα.

Στα πλαίσια την γραμμικής θεώρησης του προβλήματος συμπεριφοράς του σκάφους (γραμμικοποίησης εξισώσεων που διέπουν τη συμπεριφορά της ελεύθερης επιφάνειας) το συνολικό δυναμικό της επιφάνειας της θάλασσας προκύπτει από την γραμμική υπέρθεση των τριών δυναμικών που προαναφέρθηκαν και προκύπτει :

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

Με συναρτήσεις δυναμικού μπορούν να παρασταθούν πολλά πεδιακά μεγέθη που χρησιμοποιούνται στη μελέτη της συμπεριφοράς ενός σκάφους σε κυματισμούς όπως η ταχύτητα των εγκαρσίων τομών του στερεού συνόρου. Αυτή η περίπτωση εντάσσεται στα πλαίσια της θεωρίας λωρίδων στην οποία βασίζεται η θεωρία του Frank¹⁹ για την επίλυση του δισδιάστατου προβλήματος η οποία θα αναλυθεί στις επόμενες παραγράφους.

Σύμφωνα με τη θεωρία λωρίδων το τρισδιάστατο πρόβλημα του προσδιορισμού των αποκρίσεων του σκάφους επιλύεται με κατά μήκος ολοκλήρωση των αποκρίσεων των εγκαρσίων τομών του. Κατ' αυτή την έννοια το τρισδιάστατο πρόβλημα ανάγεται σε επιμέρους και απλούστερα δισδιάστατα.

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

¹⁹ TU Delft, «Offshore Hydromechanics», 2001

Όπως και στην περίπτωση του δυναμικού του κυματισμού που περιγράφηκε νωρίτερα, το ρευστό θεωρείται ασυμπίεστο, μη συνεκτικό, αστρόβιλο ενώ οι επιφανειακές τάσεις αμελούνται. Οι απομακρύνσεις και οι ταχύτητες θεωρούνται αρκετά μικρές ώστε να ληφθούν υπόψη μόνο οι γραμμικοί όροι της συνθήκης ελεύθερης επιφάνειας, της κινηματικής συνθήκης στο σύνορο του νομέα και η εξίσωση Bernoulli. Στα πλαίσια της θεώρησης χρονικά αρμονικού προβλήματος συμπεριφοράς με συγκεκριμένη συχνότητα ω , το δυναμικό ταχύτητας προκύπτει όπως φαίνεται στη συνέχεια :

$$\phi^{(m)}(x, y, t) = \mathcal{R}e\{\phi^{(m)}(x, y) \cdot e^{-i\omega t}\}$$

Σε αυτή την εξίσωση οι δείκτες (m) λαμβάνουν τιμές 2,3 και 4 για κινήσεις στους αντίστοιχους βαθμούς ελευθερίας. Το μέγεθος $\phi^{(m)}(x, y)$ αναπαριστά το μιγαδικό πλάτος της ταχύτητας εξαρτώμενο από τη θέση και καλείται και παραστατικός μιγάδας της ποσότητας $\phi^{(m)}(x, y, t)$.

Για το διοδιάστατο σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται στη θεωρία του Frank πρέπει να πληρούνται οι συνθήκες που φαίνονται στην συνέχεια²⁰ :

1. Εξίσωση της συνέχειας ή εξίσωση Laplace

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

2. Συνοριακή συνθήκη μη εισχώρησης στον πυθμένα

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

3. Συνοριακή συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας

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

4. Κινηματική οριακή συνθήκη στο στερεό σύνορο του σώματος

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

5. Συνθήκη ακτινοβολίας. Σε μεγάλη απόσταση από τον κύλινδρο πρέπει να έχει μορφή αρμονικού προοδευτικού κυματισμού βαρύτητας

6. Συμμετρική και αντισυμμετρική συνθήκη

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

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

²⁰ SPP-86, User Manual

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\Phi^{(m)}(x, y, t) = \text{Re} \left\{ \int_{\zeta_0} Q(s) \cdot G(z, \zeta) \cdot e^{-i\omega t} ds \right\}$$

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

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

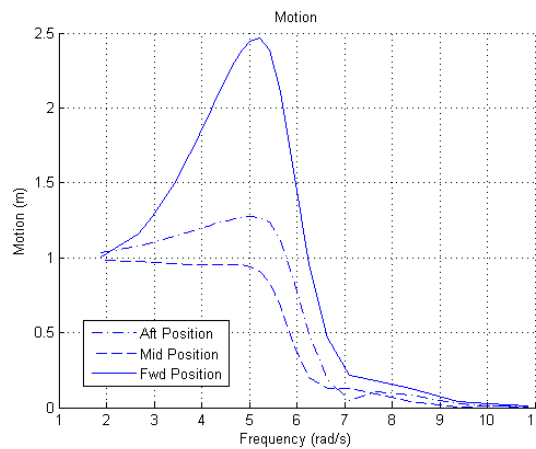
Από την πίεση μπορούν να βρεθούν οι υδροδυναμικοί αδρανειακοί συντελεστές και συντελεστές απόσβεσης που δίνονται από τις επόμενες σχέσεις:

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

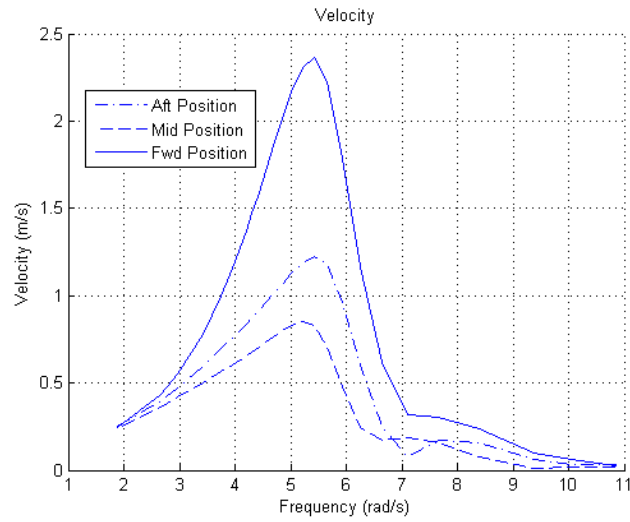
$$N^{(m)}(\omega) = 2 \sum_{j=1}^N P_u^{(m)}(x_j, y_j, \omega) n_j^{(m)} |s_j|$$

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

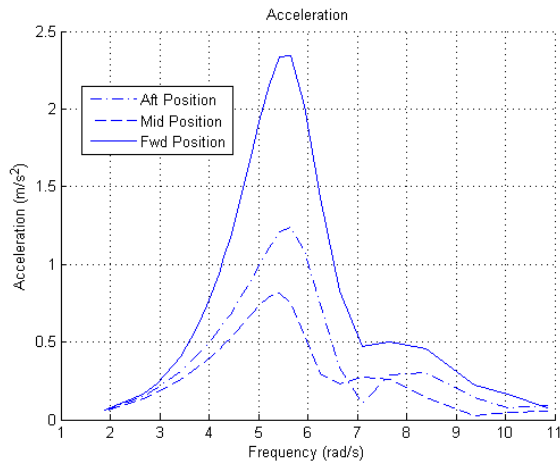
Στα πλαίσια της θεωρίας που περιγράφηκε ανωτέρω το λογισμικό SPP-86 υπολογίζει τις μετατοπίσεις, ταχύτητες κι επιταχύνσεις του πλοίου σε επιλεγμένες θέσεις. Η προσομοίωση της πλεύσης μπορεί να γίνει για ένα πλήθος κυματισμών διαφόρων συχνοτήτων και γωνιών συνάντησης με το πλοίο. Στα σχήματα 36, 37 και 38 φαίνονται οι καμπύλες RAO της κίνησης, ταχύτητας κι επιτάχυνσης στο πρυμναίο, μέσο και πωραίο τμήμα ενός πλοίου κατά την αλληλεπίδραση του με μετωπικούς κυματισμούς διαφόρων συχνοτήτων.



Σχήμα 36. Καμπύλες RAO της κάθετης κίνησης πλοίου κατά την πλεύση σε μετωπικούς κυματισμούς



Σχήμα 37. Καμπύλες RAO της κάθετης ταχύτητας πλοίου κατά την πλεύση σε μετωπικούς κυματισμούς



Σχήμα 38. Καμπύλες RAO της κάθετης επιτάχυνσης πλοίου κατά την πλεύση σε μετωπικούς κυματισμούς

Κεφάλαιο 4. Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης

4.1 Γενικά στοιχεία αλγορίθμων

Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία, ανήκουν στην κατηγορία των εξελικτικών στρατηγικών (Evolutionary Strategies) που αποτελούν ένα ευρύ σύνολο μεθόδων βελτιστοποίησης σε προβλήματα διαφόρων επιστημονικών πεδίων. Οι δύο αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν προορίζονται για περιπτώσεις με δύο τουλάχιστον κριτήρια βελτιστοποίησης, ωστόσο λειτουργούν αποδοτικά και για ένα.

Στην προκειμένη περίπτωση έχουμε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης και για την επίλυση του θα παραχθεί ένα σύνολο εναλλακτικών επιλογών μέσω εφαρμογής μιας διαδικασίας πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης από την οποία θα προκύψει ένα πλήθος βέλτιστων λύσεων. Οι βέλτιστες λύσεις χαρακτηρίζονται από ισοδυναμία ποιότητας, η οποία προκύπτει από την αδυναμία σύγκρισης διαφορετικών κριτηρίων βελτιστοποίησης μεταξύ τους. Το σύνολο των σχεδιάσεων που έχουν αυτό το χαρακτηριστικό ανήκουν σε μια συννοριακή καμπύλη που περιβάλλει το χώρο διασποράς των λύσεων (Pareto Front) όταν αυτός αναπαρασταθεί σε ένα διάγραμμα με άξονες τα δύο κριτήρια βελτιστοποίησης.

Το πρώτο κριτήριο βελτιστοποίησης θα αφορά την πλεύση σε ήρεμο νερό και το δεύτερο την αλληλεπίδραση του σκάφους με κυματισμούς. Αυτά τα κριτήρια αν και εκφράζονται με αλγεβρικές τιμές δεν μπορούν αξιολογηθούν μεταξύ τους σε μια κοινή στρατηγική κυρίως επειδή αναφέρονται σε διαφορετικές επιδόσεις των οποίων η σχετική σημαντικότητα δεν υπόκειται σε κάποιον γενικό κανόνα. Κατά συνέπεια τα παραγόμενα αποτελέσματα θα εξεταστούν με γνώμονα τις επιδόσεις ως προς κάθε ένα κριτήριο ώστε να προκύψει η τελικά επιλεγείσα γεωμετρία. Κατά τη διαδικασία αξιολόγησης των τιμών των κριτηρίων προφανώς θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η αντίστοιχη απόδοση της αρχικής γεωμετρίας.

Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν είναι αφενός ο MOSA για τη μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση της παρεμβολής καμπυλών κι αφετέρου ο NSGA II για την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς του πλοίου που εξετάζεται. Οι αρχές λειτουργίας των δύο αυτών αλγορίθμων αναλύεται στη συνέχεια.

4.2 Ο αλγόριθμος MOSA²¹

Ο αλγόριθμος MOSA (Multi Objective Simulated Annealing) είναι η επέκταση της μονοκριτηριακής διαδικασίας βελτιστοποίησης SA (Simulated Annealing), σε ένα

²¹ Ulungu, E.L., J. Teghem, Ph. Fortemps, and D. Tuyttens (1999). "MOSA Method: A Tool for Solving MOCO Problems." *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 8, 221–236.

πολυκριτηριακό σχήμα. Η φιλοσοφία του αλγορίθμου MOSA βασίζεται στα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά της ανόπτησης σιδήρου. Κατά τη διαδικασία αυτή, ο τηγμένος σίδηρος καταλήγει σε στέρεα κατάσταση ελάχιστης εσωτερικής ενέργειας όταν η θερμοκρασία του μειώνεται σταδιακά και με χαμηλό ρυθμό. Αυτή η ιδιότητα έχει άμεση εφαρμογή στη λογική του αλγορίθμου MOSA προκειμένου να εξασφαλιστεί η ευρύτερη δυνατή αναζήτηση των εναλλακτικών επιλογών εντός του χώρου που περιλαμβάνει το σύνολο των λύσεων.

Για την περιγραφή των χαρακτηριστικών του αλγορίθμου MOSA, θα αποτυπωθεί αρχικά η λειτουργία της διαδικασίας SA. Σε αυτή ο στόχος είναι η εύρεση της βέλτιστης λύσης με γνώμονα ένα μόνο κριτήριο $z(X)$, εξαρτώμενο από την εκάστοτε εναλλακτική λύση X . Προκειμένου η αναζήτηση να μην περιοριστεί σε τοπικά βέλτιστες λύσεις ο αλγόριθμος έχει τη δυνατότητα να αποδεχθεί και αυτές που δεν είναι καλύτερες από την μέχρι τότε βέλτιστη. Για την εκκίνηση της διαδικασίας απαιτούνται τα επόμενα βασικά δεδομένα :

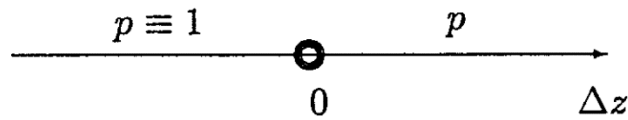
- Η στρατηγική ένταξης των εναλλακτικών λύσεων στις επιλογές
- Ο προσδιορισμός της γειτονιάς $V(X)$ γύρω από μια λύση X που περιλαμβάνει εφικτές επιλογές ούτως ώστε να διερευνηθεί το σύνολο του χώρου των λύσεων D
- Ο προσδιορισμός βασικών μεγεθών που καθορίζουν τη βελτιστοποίηση όπως η αρχική θερμοκρασία T_0 , το βήμα μείωσής της N_{Step} , ο συντελεστής ψύξης α και τα κριτήρια τερματισμού των επαναλήψεων N_{Stop} η/και T_{Stop} .

Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου συγκρίνονται μια λύση που υπολογίστηκε στη συγκεκριμένη επανάληψη και η μέχρι τότε επιλεγείσα ως βέλτιστη και αποφασίζεται αν η αντίστοιχη για το επόμενο βήμα θα αντικατασταθεί από την υπολογισθείσα ή θα παραμείνει η ίδια. Η διαδικασία αυτή οδηγεί μετά το πέρας του συνόλου των επαναλήψεων σε μια τελικά επιλεγείσα ως βέλτιστη. Σε τυχόν ενδιάμεσο στάδιο λειτουργίας του αλγορίθμου, η διαφορά των επιδόσεων της λύσης Y που υπολογίστηκε και της μέχρι τότε βέλτιστης X_n δίνεται από την επόμενη σχέση :

$$\Delta z = z(Y) - z(X_n)$$

Η απόφαση αντικατάστασης της επιλεγείσας σε κάθε επανάληψη, δεν εξαρτάται μόνο από την επίδοση των δύο συγκρινόμενων αλλά και από μια πιθανότητα $p < 1$, προκειμένου να μην εγκλωβιστεί η διαδικασία στο πρώτο τοπικό ελάχιστο με βάση το κριτήριο που έχει τεθεί. Η επιλογή λοιπόν της νέας λύσης X_{n+1} προκύπτει όπως φαίνεται στη συνέχεια :

- Για $\Delta z < 0 \Rightarrow X_{n+1} = Y$ με πιθανότητα $P = 1$
- Για $\Delta z > 0 \Rightarrow X_{n+1} = Y$ με πιθανότητα $P = p$ και $X_{n+1} = X_n$ με πιθανότητα $P = 1 - p$



Σχήμα 39. Περιπτώσεις σύγκρισης εναλλακτικών λύσεων σε βελτιστοποίηση ενός κριτηρίου

Η πιθανότητα p δίνεται από την επόμενη σχέση :

$$p = \exp\left(-\frac{\Delta z}{T_n}\right) = e^{-\frac{\Delta z}{T_n}}$$

Από την παραπάνω σχέση είναι εμφανές πως η πιθανότητα να αντικατασταθεί η επιλεγείσα λύση από μια άλλη που δεν είναι καλύτερη από αυτή, είναι ανάλογη της θερμοκρασίας T_n και αντίστροφα ανάλογη της διαφοράς των επιδόσεων τους Δz .

Η θερμοκρασία T_n μειώνεται με ρυθμό που καθορίζεται από τον συντελεστή ψύξης α μετά από κάθε εκτέλεση ενός αριθμού επαναλήψεων, ο οποίος ορίζεται από το βήμα μείωσής N_{Step} , σύμφωνα με την επόμενη σχέση :

$$T_n = \alpha \cdot T_{n-1} , \quad \text{if } (n \bmod N_{Step} = 0)$$

Καθώς εξελίσσεται η λειτουργία του αλγορίθμου η θερμοκρασία σταδιακά μειώνεται, με αποτέλεσμα να ελαχιστοποιείται και η πιθανότητα να επιλεγούν λύσεις που δεν είναι αυστηρά καλύτερες από την επιλεγείσα στο εκάστοτε βήμα. Σταδιακά καταλήγουμε στην επιλογή λύσεων που έχουν μόνο καλύτερες επιδόσεις.

Η διαδικασία τερματίζεται όταν ικανοποιηθεί ένα από τα δύο κριτήρια που έχουν τεθεί N_{Stop} ή T_{Stop} . Το κριτήριο N_{Stop} αφορά τον αριθμό των διαδοχικών επαναλήψεων του αλγορίθμου χωρίς να υπάρξει βελτίωση της επίδοσης ενώ T_{Stop} είναι η τιμή της θερμοκρασίας που καθορίζει τον τερματισμό της διαδικασίας όταν $T_n < T_{Stop}$. Αν έχουν τεθεί και τα δύο κριτήρια, προφανώς η επαναληπτική διαδικασία τερματίζεται όταν ικανοποιηθεί για πρώτη φορά το ένα από αυτά.

Η επέκταση της μονοκριτηριακής διαδικασίας σε πολυκριτηριακές περιπτώσεις βελτιστοποίησης επιβάλλει τον προσδιορισμό επιπλέον στρατηγικών αξιολόγησης της επίδοσης των εφικτών λύσεων καθώς η επιλογή της καλύτερης δεν είναι πάντοτε προφανής. Στην προκειμένη περίπτωση έχουμε ένα σύνολο κριτηρίων βελτιστοποίησης $z_k(X), k = 1, \dots, K$, κι επομένως ένα διάνυσμα διαφορών επίδοσης με ισάριθμες μεταβλητές όπως φαίνεται στη συνέχεια.

$$\Delta Z = (\Delta z_k(X), k = 1, \dots, K)$$

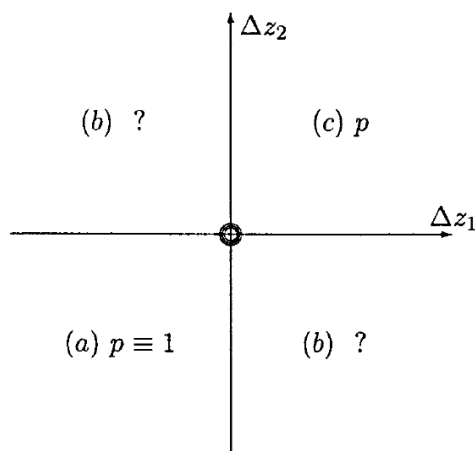
$$\Delta z_k = z_k(Y) - z_k(X_n)$$

Ο στόχος της βελτιστοποίησης με γνώμονα ένα σύνολο κριτηρίων z_k , είναι η εύρεση του συνόλου των λύσεων X^* για τις οποίες ισχύει ότι δεν υπάρχει καμία άλλη λύση $X \in D$ ώστε $z_k(X) \leq z_k(X^*)$, $k = 1, \dots, K$ με τουλάχιστον μία αυστηρή ανισότητα. Το σύνολο των βέλτιστων λύσεων $\overline{E(P)}$ αποτελεί την προσέγγιση του πραγματικού συνόλου $E(P)$. Κατά την αναζήτηση των βέλτιστων, μείζονος σημασίας είναι αφενός η κατά το δυνατόν ευρύτερη αναζήτηση μεταξύ των εφικτών επιλογών κι αφετέρου η διασφάλιση της κατά μέγιστο βαθμό προσέγγισης του πραγματικού συνόλου. Ο βαθμός επίτευξης των δύο αυτών χαρακτηριστικών αποτελεί δείκτη της αποτελεσματικότητας του αλγορίθμου.

Σχετικά με την αξιολόγηση της επίδοσης της προκύπτουσας λύσης Y εν συγκρίσει με αυτή της βέλτιστης μέχρι την εκάστοτε επανάληψη X_n , έχουμε τις τρεις επόμενες περιπτώσεις :

- a) $\Delta z_k \leq 0 \forall k$
- b) $\exists(k, k'), \Delta z_k < 0, \Delta z_{k'} > 0$
- c) $\Delta z_k \geq 0 \forall k - \{k'\}, \exists k', \Delta z_{k'} > 0$

Στο σχήμα 40 φαίνονται οι τρεις περιπτώσεις για βελτιστοποίηση με γνώμονα δύο κριτήρια.



Σχήμα 40. Περιπτώσεις σύγκρισης εναλλακτικών λύσεων σε βελτιστοποίηση δύο κριτηρίων

Η μόνη περίπτωση που η επιλογή αντικατάστασης είναι προφανής είναι η περίπτωση (α), όπου η εξεταζόμενη λύση έχει καλύτερη επίδοση και για τα δύο κριτήρια. Η περίπτωση (c) μπορεί να αντιμετωπιστεί με τον ίδιο τρόπο που αντιμετωπίζεται και στην περίπτωση της μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης βάσει ενός κανόνα υπολογισμού της πιθανότητας p . Η διαχείριση των λύσεων που ανήκουν στις δύο ισοδύναμες εναλλακτικές της περίπτωσης (b), μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους.

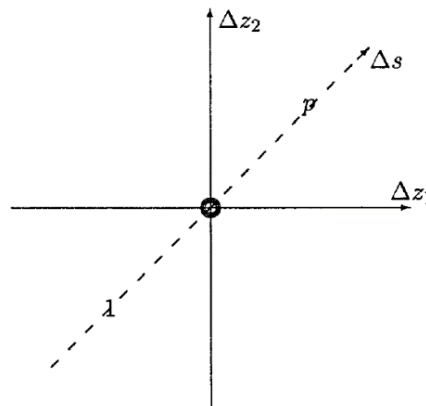
Όταν η περίπτωση (b) αντιμετωπίζεται όπως η περίπτωση (a), εξασφαλίζεται μια ευρεία αναζήτηση ωστόσο αποδεικνύεται πως δεν προσεγγίζεται ικανοποιητικά το σύνολο των πραγματικά βέλτιστων λύσεων $E(P)$. Εναλλακτικά, αν αντιμετωπιστεί όπως η περίπτωση (c) οδηγεί στο αντίστροφο αποτέλεσμα. Κατά συνέπεια ούτε αυτή η περίπτωση κρίνεται ικανοποιητική καθώς απαιτείται η περαιτέρω μέριμνα για την διασφάλιση της ευρύτερης δυνατής διασποράς της αναζήτησης μεταξύ των εφικτών λύσεων.

Το προτεινόμενο σύστημα αξιολόγησης κι επιλογής που εφαρμόζεται από τον αλγόριθμο MOSA, χρησιμοποιεί ένα σύστημα κανονικοποίησης των κριτηρίων αξιολόγησης με τη μέθοδο του σταθμισμένου μέσου όρου.

Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, η αξιολόγηση της επίδοσης βάσει ενός συνόλου διαφορετικών κριτηρίων που ανήκουν σε ένα διάνυσμα $\Delta Z = (\Delta z_k(X), k = 1, \dots, K)$, γίνεται ενοποίηση των μεταβλητών του με χρήση πολλαπλασιαστών λ . Έτσι προκύπτει ένα αλγεβρικό μέγεθος Δs για το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί λογική αντίστοιχη του αλγορίθμου μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης SA που περιγράφηκε νωρίτερα. Το μέγεθος αυτό προκύπτει από την επόμενη σχέση :

$$\Delta s = s(Z(Y), \lambda) - s(Z(X_n), \lambda)$$

Στο σχήμα 41 φαίνεται η απεικόνιση του Δs για δύο κριτήρια βελτιστοποίησης.



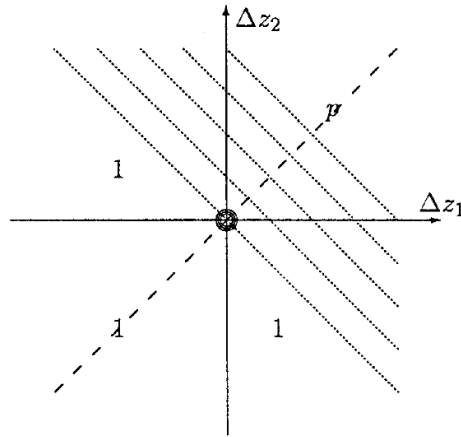
Σχήμα 41. Μονοδιάστατη αξιολόγηση λύσεων σε βελτιστοποίηση δύο κριτηρίων

Όπως φαίνεται από τη σχέση που δίνει την ποσότητα Δs , η σταθμισμένη ποσότητα s που χαρακτηρίζει κάθε λύση είναι συνάρτηση τόσο των κριτηρίων βελτιστοποίησης όσο και των πολλαπλασιαστών λ . Οι εξισώσεις που δίνουν τις τιμές των μεγεθών αυτών φαίνονται στη συνέχεια :

$$s(Z, \lambda) = \sum_{k=1}^K \lambda_k z_k$$

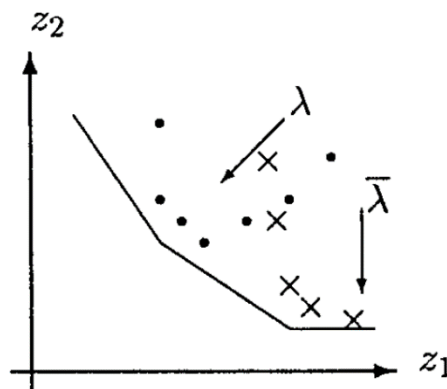
$$\sum_{k=1}^K \lambda_k = 1, \lambda_k > 0 \forall k$$

Στο σχήμα 42 έχουμε την απεικόνιση της κανονικοποίησης δύο κριτηρίων για τιμές συντελεστών $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$.



Σχήμα 42. Κανονικοποίηση κριτηρίων για συντελεστές $\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$

Για διαφορετικές τιμές των συντελεστών λ προφανώς έχουμε διαφορετική κλίση των ευθειών του σχήματος. Ο συνδυασμός των τιμών αυτών αποδεικνύεται πως έχει σημαντική επίδραση στα παραγόμενα αποτελέσματα του αλγορίθμου καθώς κάθε τέτοια περίπτωση συνεπάγεται και μια διαφορετική κατεύθυνση κατά την απόδοση του συνόλου των βέλτιστων. Κατά συνέπεια το σύνολο $PE(\lambda)$ που προκύπτει για έναν συγκεκριμένο συνδυασμό τιμών συντελεστών, δε συμπίπτει με το σύνολο $PE(\bar{\lambda})$ που θα προκύψει από έναν διαφορετικό συνδυασμό. Η αναντιστοιχία αυτή παρουσιάζεται στο σχήμα 43.



Σχήμα 43. Λύσεις βελτιστοποίησης με δύο κριτήρια για διαφορετικούς συντελεστές λ

Προκειμένου λοιπόν να έχουμε διασπορά του πλήθους των βέλτιστων λύσεων, εκτελείται ένα σύνολο ομάδων επαναλήψεων χρησιμοποιώντας διαφορετικά διανύσματα συντελεστών για κάθε μία σύμφωνα με τις επόμενες σχέσεις :

$$\lambda^{(l)} = (\lambda_k^{(l)}, k = 1, \dots, K), l \in L$$

$$\lambda_k^{(l)} > 0 \quad \forall k$$

$$\sum_{k=1}^K \lambda_k^{(l)} = 1, \quad \forall l \in L$$

Όταν ολοκληρωθεί η αξιολόγηση για το σύνολο των διαφορετικών συνδυασμών συντελεστών πραγματοποιείται σύγκριση των επιδόσεων του συνόλου των παραχθέντων λύσεων $\cup_{l=1}^L \mathbf{PE}(\lambda^{(l)})$ ώστε να αποκλειστούν περιπτώσεις που είναι αυστηρά χειρότερες από άλλες διαθέσιμες. Έτσι τελικά λαμβάνουμε το τελικό σύνολο βέλτιστων λύσεων με διαλογή (Λ) βάσει των επιδόσεων τους όπως φαίνεται στη σχέση που ακολουθεί :

$$\widehat{\mathbf{E}}(\mathcal{P}) = \bigwedge_{l=1}^L \mathbf{PE}(\lambda^{(l)})$$

4.3 Ο αλγόριθμος NSGA-II²²

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.

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

²² Kalyanmoy Deb, Sameer Agarwal, T. Meyarivan, «A fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm : NSGA-II», 2002

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 περαιτέρω 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 :

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

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

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

Απαιτείται δηλαδή να υπάρχει τουλάχιστον μια αντικειμενική συνάρτηση με μικρότερη τιμή και όσον αφορά τις υπόλοιπες 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 εξεταζόμενη 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 :

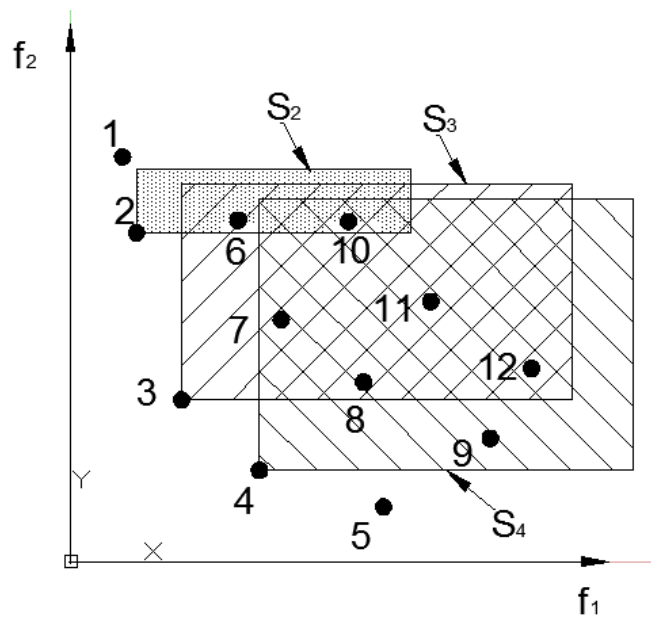
```

forall p in P
  S_p = empty set
  n_p = 0
forall q in P
  if (p < q) then
    S_p = S_p union {p}
  else if (q < p) then
    n_p = n_p + 1
if n_p = 0 then
  p_rank = 1
  F_1 = F_1 union {p}
i = 1
while F_i not empty
  Q = empty set
  forall p in F_i
    forall q in S_p
      n_q = n_q - 1
      if n_q = 0 then
        q_rank = i + 1
        Q = Q union {q}
  i = i + 1
  F_i = Q

```

Στην παραπάνω αλληλουχία ενεργειών τα μεγέθη p και q αντιστοιχούν σε μέλη των παραγόμενων πληθυσμών κάθε επανάληψης, S_p είναι το σύνολο των λύσεων από τις οποίες υπερέχει η λύση p και 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 44 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 44. 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 δεύτερου επιπέδου.

Όταν εξεταστούν οι λύσεις από τις οποίες υπερέχει η λύση 3, θα ελεγχθούν όλες όσες ανήκουν στο σύνολο S_3 εκτός από την 6 που 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 :

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

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 ($i <_n j$) αν ισχύει η ακόλουθη συνθήκη :

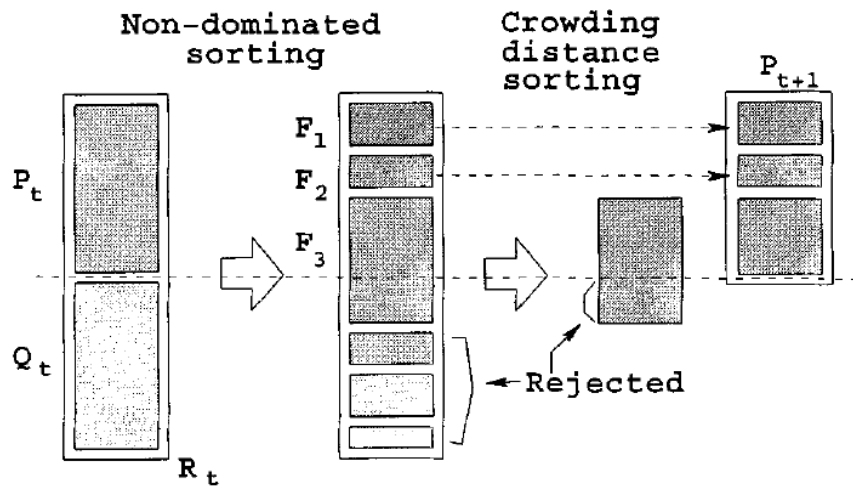
$$\{(i_{rank} < j_{rank}) \text{ or } [(i_{rank} = j_{rank}) \text{ and } (i_{distance} > j_{distance})]\}$$

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

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

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 σχήμα 45²³.



Σχήμα 45. 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. Η επιλογή των τιμών των δεδομένων εισόδου θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

²³ Kalyanmoy Deb, Sameer Agarwal, T. Meyarivan, «A fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm : NSGA-II», 2002

Κεφάλαιο 5. Βελτιστοποίηση σχεδίασης Ε-Γ/Ο-Γ

5.1 Γενικά στοιχεία διαδικασίας βελτιστοποίησης

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή της ενοποιημένης διαδικασίας βελτιστοποίησης της γάστρας του επιλεγέντος επιβατηγού – οχηματαγωγού πλοίου (Rorax vessel), τα κύρια χαρακτηριστικά του οποίου φαίνονται στον πίνακα 2.

Μέγεθος	Τιμή
Μήκος μεταξύ καθέτων (m)	174.8
Πλάτος (m)	25
βύθισμα (m)	6.39
Εκτόπισμα (tn)	17201
Υπηρειακή ταχύτητα (kn)	29.03

Πίνακας 2. Κύρια χαρακτηριστικά ταχύπλοου Ε-Γ/Ο-Γ

Η συνολική διαδικασία βελτιστοποίησης πραγματοποιείται επαναληπτικά και συνοψίζεται στα επόμενα βήματα :

1. Διακύμανση των μεταβλητών και παραγωγή διαφορετικών γεωμετριών
2. Υπολογισμός των τιμών των κριτηρίων βελτιστοποίησης
3. Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από γενετικό αλγόριθμο
4. Επανάληψη των βημάτων 1 ως 3

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται όσες φορές απαιτείται προκειμένου να καταλήξουμε σε ένα πλήθος διαθέσιμων σχεδιάσεων ούτως ώστε να μπορεί να επιλεγεί μια αρκούντως ικανοποιητική λύση. Στόχος της βελτιστοποίησης είναι η εύρεση μιας εναλλακτικής μορφής γάστρας που θα έχει καλύτερα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά από την πατρική τόσο σε ήρεμο νερό όσο και σε κυματισμούς. Για το σκοπό αυτό η αναζήτηση μιας καλύτερης σχεδίασης θα πραγματοποιηθεί αξιολογώντας την απόδοση 1600 διαφορετικών σχεδιάσεων. Από προγενέστερη εμπειρία, ο αριθμός αυτός κρίνεται επαρκής για την επίτευξη αυτού του στόχου. Δεδομένης της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος αλλά και του αριθμού των εναλλακτικών λύσεων, η μόνη πρακτικά εφαρμόσιμη τεχνική περιλαμβάνει τη χρήση κωδίκων που επιλύουν τα υδροδυναμικά προβλήματα με τη δυναμική θεωρία. Η συνεκτική θεωρία θα περιοριστεί αποκλειστικά στην αξιολόγηση των εξαγόμενων αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τη διαδικασία βελτιστοποίησης.

Η εκτέλεση των προγραμμάτων που χρησιμοποιούν τη δυναμική θεωρία απαιτεί τη γεωμετρική περιγραφή της προς αξιολόγηση γάστρας και ορισμένα υδροστατικά της στοιχεία. Οι λεπτομέρειες που αφορούν κάθε στάδιο της βελτιστοποίησης αναλύονται στις επόμενες ενότητες.

5.2 Χαρακτηριστικά γεωμετρικής αναπαράστασης

Η πατρική γάστρα που εξετάζεται διαμορφώθηκε παραμετρικά ώστε ένας περιορισμένος αριθμός μεταβλητών σχεδίασης να διαμορφώνει τη μορφή συγκεκριμένων τμημάτων της που επηρεάζουν άμεσα τις αντικειμενικές συναρτήσεις που έχουν επιλεγεί. Τα τμήματα αυτά αφορούν τόσο το πρωραίο όσο και το πρυμναίο τμήμα της γάστρας και κυρίως τον βολβό του οποίου το σχήμα έχει σημαντική επιρροή στην αντίσταση κυματισμού. Είναι χαρακτηριστικό πως από τις 12 συνολικά μεταβλητές σχεδίασης οι 8 αφορούν τον βολβό.

Τόσο οι μεταβλητές όσο και το εύρος διακύμανσης τους έχουν επιλεγεί ώστε να επιτυγχάνεται ευρεία μεταβολή της παραγόμενης επιφάνειας με ταυτόχρονη όμως επιδίωξη διατήρησης μιας ομαλής γεωμετρίας. Η επιδίωξη αυτή δεν μπορεί να διασφαλιστεί παρά μόνο αν εξεταστούν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί των τιμών των μεταβλητών. Είναι προφανές πως αυτό είναι πρακτικά αδύνατον καθώς ο συνολικός αριθμός των πιθανών συνδυασμών είναι εξωπραγματικός. Αυτό που μπορεί να πραγματοποιηθεί είναι έλεγχος της παραγόμενης γεωμετρίας για συνδυασμό των ακραίων τιμών των μεταβλητών καθώς αυτές συγκεντρώνουν τις περισσότερες πιθανότητες παραγωγής ανώμαλων μορφών. Αυτή είναι και η πρακτική που εφαρμόστηκε στα πλαίσια του παρόντος ενώ για τη διασφάλιση της ομαλότητας της τελικά επιλεγείσας γεωμετρίας, η εκάστοτε βελτιστοποιημένη μορφή γάστρας αποτέλεσε αντικείμενο περαιτέρω διερεύνησης. Βάσει των προαναφερθέντων, προέκυψαν τα εύρη διακύμανσης των μεταβλητών σχεδίασης και οι τιμές που αντιστοιχούν στην πατρική μορφή γάστρας και παρουσιάζονται στον πίνακα 3. Σημειώνεται επίσης πως για λόγους σύγκρισης των εναλλακτικών λύσεων που προκύπτουν με την πατρική, έχει τεθεί περιορισμός στη μεταβολή του εκτοπίσματος και της διαμήκουσ θέσης του κέντρου άντωσης προκειμένου να μην υπερβαίνουν το $\pm 1.5\%$.

Μεταβλητή Σχεδίασης	Μονάδα	Αρχική Τιμή	Κάτω Όριο	Άνω Όριο
Skeg Breadth	(m)	1.37	0.9	2.2
Transom Height from BL	(m)	6.05	5.95	6.15
Waterline Fwd fullness	(%)	0	-6.82	6.99
Entrance Angle	(deg)	12.5	10	16
Bulb Length	(m)	7.6	6.8	8.4
Bulb Tip Z Position	(m)	6	5.2	6.4
Bulb Mid Crv End Angle Z	(deg)	0	0	60
Bulb Mid Crv End Angle Y	(deg)	90	60	90
Bulb Sec Aft Low Angle	(deg)	32	20	50
Bulb Sec Aft Up Angle	(deg)	153	140	170
Bulb Sec Fwd Low Angle	(deg)	25	15	35
Bulb Sec Fwd Up Angle	(deg)	145	135	155

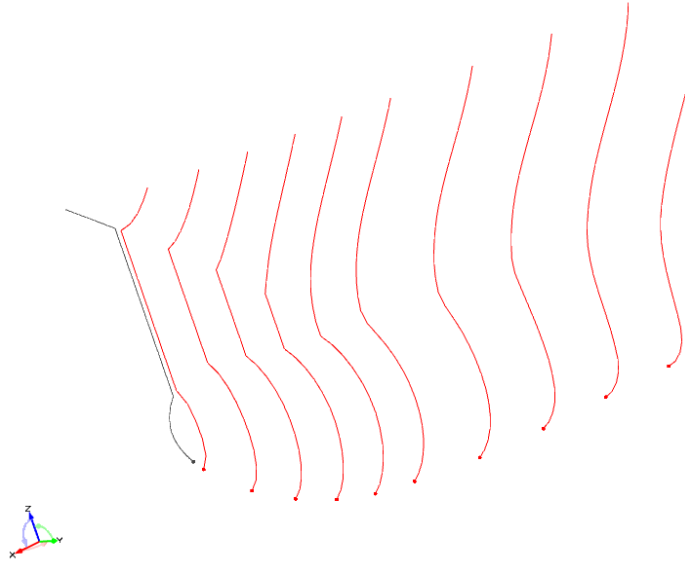
Πίνακας 3. Αρχικές τιμές και όρια μεταβλητών σχεδίασης

Όπως έχει αναφερθεί νωρίτερα, η περιγραφή της γεωμετρίας προκειμένου να χρησιμοποιηθεί από κώδικες δυναμικής θεωρίας, πραγματοποιείται μέσω ενός αριθμού νομέων κατά το διάμηκες. Για λόγους λειτουργίας των προγραμμάτων η γάστρα περιγράφεται με διαφορετικό αριθμό νομέων για κάθε περίπτωση.

Συγκεκριμένα για το λογισμικό SWAN 2 η περιγραφή της γεωμετρίας πραγματοποιείται με 70 καμπύλες που αποτελούν συνδυασμό νομέων και προφίλ. Αυτή η απαίτηση σχετίζεται με τον τρόπο που εκλαμβάνει το πρόγραμμα την περιγραφή της γεωμετρίας και κυρίως για τα τμήματα της που δεν αποτελούν μέρος των καμπυλών περιγραφής. Περισσότερα στοιχεία μπορούν να βρεθούν στο εγχειρίδιο χρήσης του συγκεκριμένου προγράμματος. Εδώ θα γίνει μια συνοπτική ανάλυση της μεθόδου αναπαράστασης που εφαρμόστηκε.

Δεδομένου ότι έχουμε πρύμνη καθρέφτη, η περιγραφή της γεωμετρίας πρέπει υποχρεωτικά να περιγράφεται από νομέα σε εκείνο το σημείο και όχι με προφίλ. Έτσι έχουμε ένα σύνολο 63 νομέων που περιγράφουν τη γάστρα από τον καθρέφτη μέχρι την πρωραία κάθετο. Για την περιγραφή του βολβού χρησιμοποιούνται 6 συνολικά καμπύλες με αποτέλεσμα η διακριτοποίηση της επιφάνειας του να είναι προφανώς πυκνότερη από αυτή της γάστρας. Αυτό συμβαίνει καθώς ο βολβός αποτελεί στοιχείο που επηρεάζει σημαντικά την αξιολόγηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς των εναλλακτικών σχεδιάσεων.

Δεδομένου ότι η επιφάνεια του βολβού έχει πολλαπλά σημεία τομής με την ίσαλο αλλά και του γεγονότος ότι αυτό δημιουργεί υπολογιστικά σφάλματα στο πρόγραμμα SWAN 2, η περιοχή μεταξύ του βολβού και του άνω τμήματος της γάστρας λαμβάνεται ως επιφάνεια μικρού πλάτους (1 cm), παρότι δεν αποτελεί μέρος της γεωμετρίας. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται πως το υπολογιστικό πλέγμα της ελεύθερης επιφάνειας γύρω από το βολβό δεν θα έχει ασυνέχειες και σημεία τομής με το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας μεταξύ του βολβού και της πρωραίας καθέτου. Η ανάγκη αυτή προκύπτει από το γεγονός πως η εκτέλεση του SWAN 2 πραγματοποιείται επαναληπτικά μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση των τιμών της της παράλληλης βύθισης και διαγωγής. Συνδυασμός αυτών των τιμών σε κάποια επανάληψη μπορεί να προκαλέσει σημαντική ανάδυση του βολβού με αποτέλεσμα να προκληθούν τα προβλήματα που αναφέρθηκαν ανωτέρω. Πρώραθεν του πρώτου νομέα έχουμε μια καμπύλη που περιγράφει το προφίλ του πλοίου στη συγκεκριμένη περιοχή. Αυτή η περιγραφή εκλαμβάνεται από το πρόγραμμα ως εκ περιστροφής προκύπτουσα επιφάνεια μεταξύ προφίλ και πρώτου νομέα. Η περιγραφή του πρωραίου τμήματος του πλοίου φαίνεται στο σχήμα 46.



Σχήμα 46. Περιγραφή πρωραίου τμήματος γάστρας

Η περιγραφή της γάστρας για το λογισμικό SPP-86 απαιτεί μόνο ένα σύνολο νομέων χωρίς ιδιαιτερότητες και καμπύλες προφίλ. Το λογισμικό αυτό εκτελεί υπολογισμούς για την ισοβύθιστη κατάσταση χωρίς αναζήτηση των πραγματικών τιμών διαγωγής και παράλληλης βύθισης σε πραγματικές συνθήκες πλεύσης. Η περιγραφή της γεωμετρίας γίνεται με χρήση 30 νομέων για τη γάστρα και 6 για τον βολβό.

Τα υδροστατικά στοιχεία των εναλλακτικών σχεδιάσεων που απαιτούνται για την εκτέλεση των δύο προγραμμάτων SWAN 2 και SPP-86, υπολογίζονται εντός του περιβάλλοντος CAESSES – Friendship Framework, κι εξάγονται σε ένα κοινό αρχείο κειμένου. Τα στοιχεία αυτά φαίνονται στη συνέχεια :

- Βάρος εκτοπίσματος για θαλασσινό νερό Δ (tn) ($\rho = 1.025 \text{ tn/m}^3$)
- Κατακόρυφη θέση κέντρου βάρους KG (m)
- Ακτίνα αδράνειας περί τον άξονα x (m)
- Ακτίνα αδράνειας περί τον άξονα y (m)
- Διαμήκης θέση κέντρου βάρους LCG (m)
- Μήκος μεταξύ καθέτων L_{BP} (m)
- Πλάτος B (m)
- Βύθισμα T (m)
- Κατακόρυφη θέση κέντρου άντωσης KB (m)
- Πρισματικός συντελεστής C_p (-)
- Συντελεστής γάστρας C_b (-)
- Εγκάρσια ακτίνα αδράνειας BM_T (m)

Κάθε ένα από τα δύο προγράμματα χρησιμοποιεί μόνο ένα μέρος από τα παραπάνω υδροστατικά στοιχεία.

5.3 Χαρακτηριστικά υδροδυναμικής αξιολόγησης

Στην παρούσα ενότητα γίνεται περιγραφή της εκτέλεσης των δύο προγραμμάτων υδροδυναμικής αξιολόγησης και των αποτελεσμάτων που παράγουν. Η προσομοίωση της πλεύσης όλων των εναλλακτικών γεωμετριών γίνεται σε κάθε περίπτωση για θαλασσινό νερό πυκνότητας $\rho = 1.025 \text{ tn/m}^3$ ενώ η ταχύτητα αποτελεί την υπηρεσιακή του πλοίου που εξετάζεται και είναι σε αριθμό Froude 0,348 ή 29,03 κόμβους.

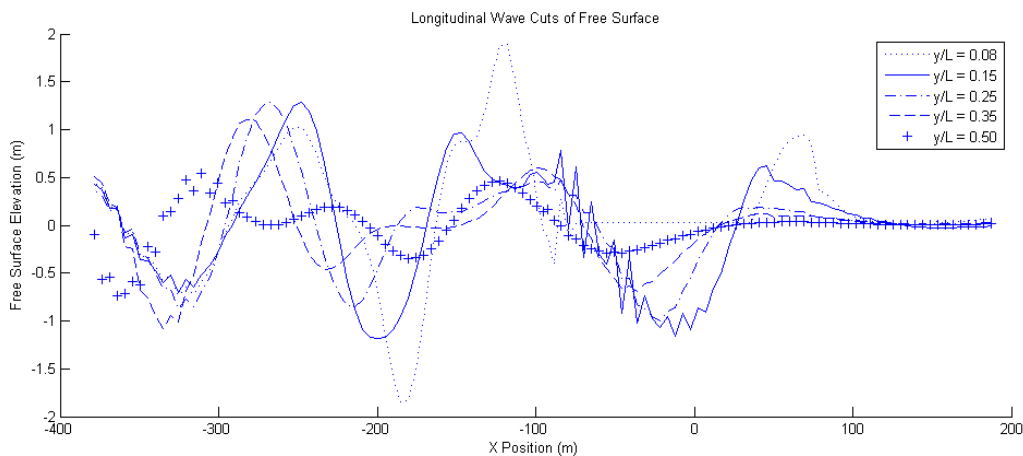
Για την εύρεση των πραγματικών τιμών του βυθίσματος και της διαγωγής που θα αποκτήσει το προς εξέταση πλοίο κατά την πλεύση του η εκτέλεση του προγράμματος SWAN 2 επαναλαμβάνεται κατά μέγιστο 10 φορές. Σε περίπτωση που δεν έχει επιτευχθεί σύγκλιση σε μικρότερο αριθμό επαναλήψεων, θεωρείται πως η προσομοίωση είναι ανεπιτυχής και η συγκεκριμένη γεωμετρία απορρίπτεται. Η σύγκλιση θεωρείται επιτυχής όταν η διαφορά των τιμών του βυθίσματος και της διαγωγής μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων είναι μικρότερη από 10^{-4} και 10^{-3} για τις περιπτώσεις παράλληλης βύθισης και διαγωγής αντίστοιχα.

Όσον αφορά την πλεύση σε ήρεμο νερό, σκοπός της βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση της αντίστασης κυματισμού. Αυτή η αντίσταση σχετίζεται με τους αποκλίνοντες κι εγκάρσιους κυματισμούς που παράγονται από το πλοίο κατά την πλεύση του ωστόσο ο βαθμός αυτής της συσχέτισης θα αποτελέσει αντικείμενο μελέτης. Το λογισμικό SWAN 2 προκειμένου να εκτιμήσει την αντίσταση κυματισμού, χρησιμοποιεί τη μέθοδο της ολοκλήρωσης των πιέσεων πάνω στην βρεχόμενη επιφάνεια. Ωστόσο, το πεδίο πιέσεων στην περιοχή της πρύμνης επηρεάζεται έντονα από φαινόμενα συνεκτικότητας την οποία όμως δε λαμβάνει υπόψη η θεωρία δυναμικού. Αντίθετα, με χρήση της θεωρίας αυτής μπορεί να εκτιμηθεί με καλή ακρίβεια το σύστημα των παραγόμενων κυματισμών που επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από το προωαίο τμήμα του πλοίου και σχετίζεται με την προαναφερθείσα συνιστώσα της αντίστασης.

Βάσει των ανωτέρω και προς εξακρίβωση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της διαδικασίας, η βελτιστοποίηση θα πραγματοποιηθεί δύο φορές χρησιμοποιώντας ως αντικειμενική συνάρτηση το μέγιστο ύψος αποκλινόντων κυματισμών στην πρώτη (Optimization 1) και την αντίσταση κυματισμού στη δεύτερη (Optimization 2). Οι τιμές των δύο κριτηρίων θα υπολογιστούν και στις δύο περιπτώσεις προκειμένου να καταστεί ευκολότερη η αξιολόγηση της διαδικασίας.

Η τιμή της αντίστασης κυματισμού εξάγεται άμεσα από το αρχείο αποτελεσμάτων που παράγεται από το λογισμικό κι επομένως η ελαχιστοποίηση της εναπόκειται στην απευθείας αξιολόγηση της από τον γενετικό αλγόριθμο. Αντίθετα η ελαχιστοποίηση του μέγιστου ύψους των παραγόμενων κυματισμών θα πρέπει να αφορά μια χαρακτηριστική τιμή που θα εξαχθεί από το πεδίο τιμών που περιγράφει την ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας. Η τιμή αυτή αφορά μια διαμήκη τομή του πεδίου κυματισμών σε μια συγκεκριμένη απόσταση κατά το εγκάρσιο, και της οποίας η επιλογή θα πρέπει να γίνει με βάση κάποια κριτήρια.

Στο σχήμα 47 φαίνονται οι τομές του πεδίου κυματισμών που παράγονται από το συγκεκριμένο πλοίο σε διάφορες αποστάσεις από αυτό, αδιαστατοποιημένες ως προς το μήκος μεταξύ καθέτων. Η αρχή του συστήματος συντεταγμένων τοποθετείται στο μέσο νομέα και πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια για όλες τις περιπτώσεις τομών.

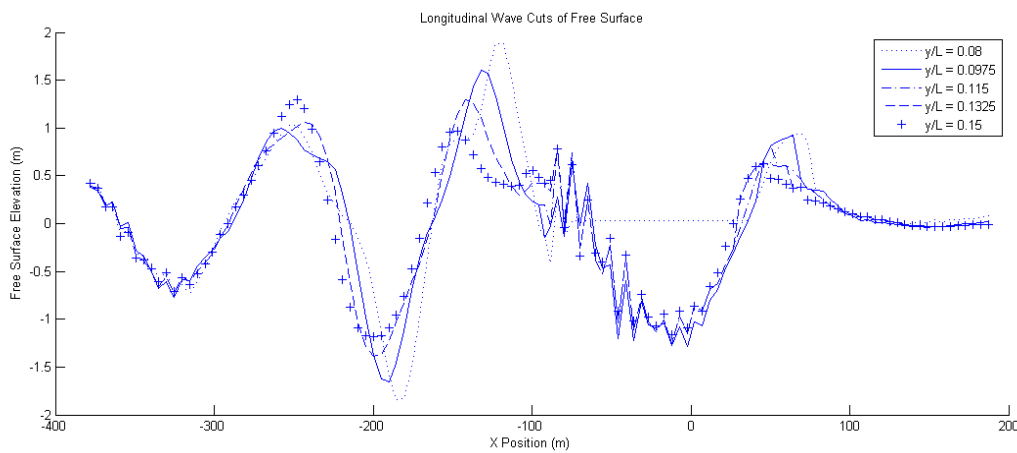


Σχήμα 47. Διαμήκεις τομές ελεύθερης επιφάνειας σε αποστάσεις $y/L=0.08\div 0.5$

Από το σχήμα 47 φαίνεται αρχικά πως έχουμε μια έντονη διαταραχή της ελεύθερης επιφάνειας, που εντοπίζεται στην περιοχή γύρω από το πρυμναίο τμήμα του πλοίου και κοντά σε αυτό. Αυτή η περιοχή θα πρέπει να αφαιρεθεί από το πεδίο διερεύνησης καθώς αποτελεί μη αξιόπιστο παράγοντα εξαγωγής αποτελεσμάτων. Κατά συνέπεια το μέγιστο ύψος κύματος θα αναζητηθεί στην περιοχή της ελεύθερης επιφάνειας που εκτείνεται πρύμνηθεν του καθρέπτη του πλοίου (-94,2 m).

Πρύμνηθεν του πλοίου εντοπίζονται δύο κορυφές και δύο κοιλάδες των οποίων το πλάτος είναι σημαντικότερο από των υπόλοιπων τοπικών ακροτάτων κι εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος της εγκάρσιας απόστασης της εκάστοτε τομής, από το πλοίο. Είναι λοιπόν προφανές πως η κορυφή και κοιλάδα που θα χρησιμοποιηθούν για την εξαγωγή του μέγιστου ύψους κύματος δεν είναι οι ίδιες για όλες τις διαμήκεις τομές καθώς σε κάθε μια έχουμε διαφορετική θέση του ολικού μέγιστου κι ελάχιστου.

Από το σχήμα 47 φαίνεται επίσης πως η δεύτερη κοιλάδα έχει διαταραχές για όλες σχεδόν τις τομές κι επομένως θα πρέπει επίσης να αποκλειστεί από τους υπολογισμούς. Κατ' επέκταση η περιοχή διερεύνησης θα περιοριστεί στις δύο κύριες κορυφές και την κοιλάδα που βρίσκεται ανάμεσα στις περιοχές διαταραχής. Παρατηρώντας την πρώτη κοιλάδα και δεύτερη κορυφή βλέπουμε πως τα μέγιστα πλάτη τους προκύπτουν από την πρώτη και δεύτερη τομή αντίστοιχα. Σχετικά με την πρώτη κορυφή, το μέγιστο πλάτος προκύπτει από την πρώτη τομή ωστόσο είναι εμφανές πως γι' αυτήν την περίπτωση υπάρχει μια τοπική διαταραχή. Επιπρόσθετα αποτελεί κορυφή που επηρεάζεται άμεσα από τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή του καθρέφτη όπου η συνεκτικότητα έχει σημαντική επιρροή και η οποία αμελείται από τη δυναμική θεωρία. Για την περαιτέρω διερεύνηση της περιοχής παρατίθεται το σχήμα 48 στο οποίο έχουν ληφθεί τομές μεταξύ πρώτης και δεύτερης τομής του σχήματος 47.

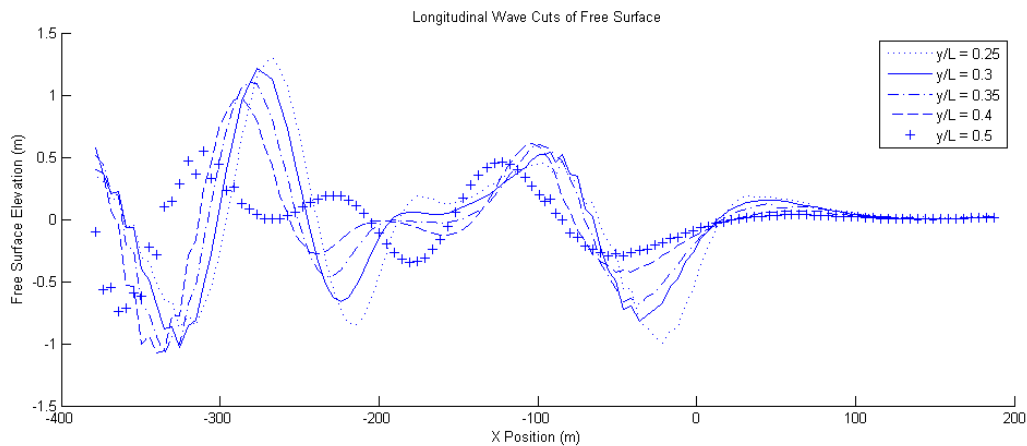


Σχήμα 48. Διαμήκειες τομές ελεύθερης επιφάνειας σε αποστάσεις $y/L=0.08\div 0.15$

Στο σχήμα 48 φαίνεται πως η τοπική διαταραχή της πρώτης κορυφής εξασθενεί σταδιακά με αποτέλεσμα στην τομή για $y/L = 0.15$ να έχουμε πλήρη ομαλοποίηση της μορφής της. Σε αυτή την τομή και σε σύγκριση με τις υπόλοιπες έχουμε επίσης δεύτερη κορυφή ομαλότερης μορφής και μεγαλύτερου πλάτους. Η τομή αυτή αποτελεί και τη μοναδική του σχήματος 48 όπου η δεύτερη κορυφή είναι μεγαλύτερου πλάτους από την πρώτη. Κατ' επέκταση η τομή $y/L = 0.15$ θα μπορούσε να αποτελέσει μια αξιόλογη περίπτωση, βρίσκεται κοντά στις εγκάρσιες αποστάσεις όπου έχουμε τοπική διαταραχή στη δεύτερη κορυφή κι επομένως θα αναζητήσουμε μια τομή σε μεγαλύτερη απόσταση.

Από προγενέστερη εμπειρία του επιβλέποντος προκύπτει πως μια ασφαλής απόσταση εγκάρσιας τομής για τον υπολογισμό του μέγιστου ύψους κύματος κυμαίνεται μεταξύ $y/L = 0.25$ και $y/L = 0.5$. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στο γεγονός πως μακριά από τη γάστρα έχουν εξαλειφθεί τα φαινόμενα διαταραχής που συμβαίνουν κοντά σε αυτή. Κατ'

επέκταση για την πρώτη διαδικασία βελτιστοποίησης θα αναζητηθεί μια διαμήκης τομή σε απόσταση εντός του ανωτέρω εύρους. Στο σχήμα 49 φαίνονται οι τομές για διάφορες ενδιάμεσες αποστάσεις μεταξύ $y/L = 0.25$ και $y/L = 0.5$.



Σχήμα 49. Διαμήκειες τομές ελεύθερης επιφάνειας σε αποστάσεις $y/L=0.25\div 0.5$

Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε πως για όλες τις τομές εκτός της τελευταίας έχουμε μια σημαντική τιμή ύψους κύματος που θα μπορούσε να αποτελέσει κριτήριο βελτιστοποίησης. Το μέγιστο ύψος λαμβάνεται για την πρώτη τομή με φθίνουσα πορεία στη συνέχεια. Προκειμένου να αποφύγουμε την επιλογή ακραίων τιμών του εύρους των εγκάρσιων αποστάσεων, η βελτιστοποίηση θα βασισθεί στα αποτελέσματα της τομής για $y/L = 0.3$. Προς αποφυγή των τοπικών διακυμάνσεων μικρού πλάτους, η περιοχική αναζήτηση του μέγιστου ύψους κύματος για την πρώτη περίπτωση βελτιστοποίησης θα περιοριστεί μεταξύ των θέσεων -200 ως -300 του σχήματος 49, για την προαναφερθείσα εγκάρσια απόσταση. Δεδομένου ότι η σύγκριση των εναλλακτικών μορφών γάστρας θα πραγματοποιηθεί υπό μια κοινή στρατηγική, το γεγονός ότι δε χρησιμοποιείται η πραγματική τιμή του μέγιστου ύψους των παραγόμενων κυματισμών δεν επηρεάζει τα εξαγόμενα συμπεράσματα.

Σχετικά με την αξιολόγηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς των εναλλακτικών σχεδιάσεων σε κυματισμούς θα πραγματοποιηθεί με γνώμονα τις κινήσεις του πλοίου. Συγκεκριμένα με χρήση του λογισμικού SPP-86 θα υπολογιστούν οι αποκρίσεις της γάστρας κατά την πλεύση σε ένα εύρος κυματισμών διαφορετικών συχνοτήτων που προκύπτουν από το αδιαστατοποιημένο μήκος κύματος ως προς το μήκος του πλοίου.

Η αξιολόγηση της εν λόγω συμπεριφοράς του πλοίου συνίσταται στην εκτίμηση των κάθετων επιταχύνσεων στην πλώρη κατά την κίνηση του προνευτασμού. Από την αντίστοιχη καμπύλη RAO θα απομονωθεί η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης η οποία και θα αποτελέσει την αντικειμενική συνάρτηση. Το κριτήριο αυτό θα είναι το δεύτερο από τα

επιλεγέντα προς αξιολόγηση από τον γενετικό αλγόριθμο σε όλες τις περιπτώσεις βελτιστοποίησης. Βάσει προγενέστερων μελετών του επιβλέποντα^{24,25} η ελαχιστοποίηση της μέγιστης τιμής της καμπύλης RAO ενός μεγέθους (εν προκειμένω της επιτάχυνσης) για ένα σύνολο αρμονικών κυματισμών συνεπάγεται βελτίωση των τιμών των αποκρίσεων του πλοίου για το ίδιο μέγεθος και σε τυχαίους κυματισμούς.

Με χρήση του λογισμικού SPP-86 υπολογίζεται επίσης η πρόσθετη αντίσταση λόγω της παρουσίας κυματισμών σε αδιαστατοποιημένη μορφή. Το μέγεθος αυτό αν και είναι σημαντικό δεν αποτελεί αντικειμενική συνάρτηση σε καμία από τις εκτελέσεις βελτιστοποίησης. Η αναφορά και παρουσίαση αποτελεσμάτων που σχετίζονται με αυτό γίνεται για λόγους αξιολόγησης της συμπεριφοράς των γεωμετριών σε ευρύτερο επίπεδο και θα αποτελέσει αντικείμενο σχολιασμού στο επόμενο κεφάλαιο.

5.4 Επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης

Η ενοποιημένη διαδικασία βελτιστοποίησης περιλαμβάνει την ανταλλαγή αποτελεσμάτων και δεδομένων εισόδου, μεταξύ του προγράμματος παραμετρικής μοντελοποίησης CAESES – Friendship Framework κι ενός συνόλου εξωτερικών προγραμμάτων στα οποία περιλαμβάνονται και τα προγράμματα SWAN 2 και SPP-86 που περιγράφηκαν προηγουμένως.

Το περιβάλλον CAESES – Friendship Framework σε πρώτο επίπεδο χρησιμοποιείται για τη διακύμανση των μεταβλητών, τη διαμόρφωση των γεωμετρικών αναπαραστάσεων, τον υπολογισμό των υδροστατικών στοιχείων και την εξαγωγή όλων των απαραίτητων δεδομένων σε μορφή αρχείων. Σε δεύτερο βαθμό αποτελεί των δέκτη των αρχείων αποτελεσμάτων που παράγονται από τα προγράμματα υδροδυναμικής αξιολόγησης. Τα αποτελέσματα αυτά όπως και οι περιορισμοί που έχουν τεθεί, αξιολογούνται από τον γενετικό αλγόριθμο NSGA II προκειμένου να εφαρμοστεί η διαδικασία κατάταξης των εναλλακτικών λύσεων που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η εφαρμοζόμενη διαδικασία βελτιστοποίησης φαίνεται σε μορφή διαγράμματος στο σχήμα 50.

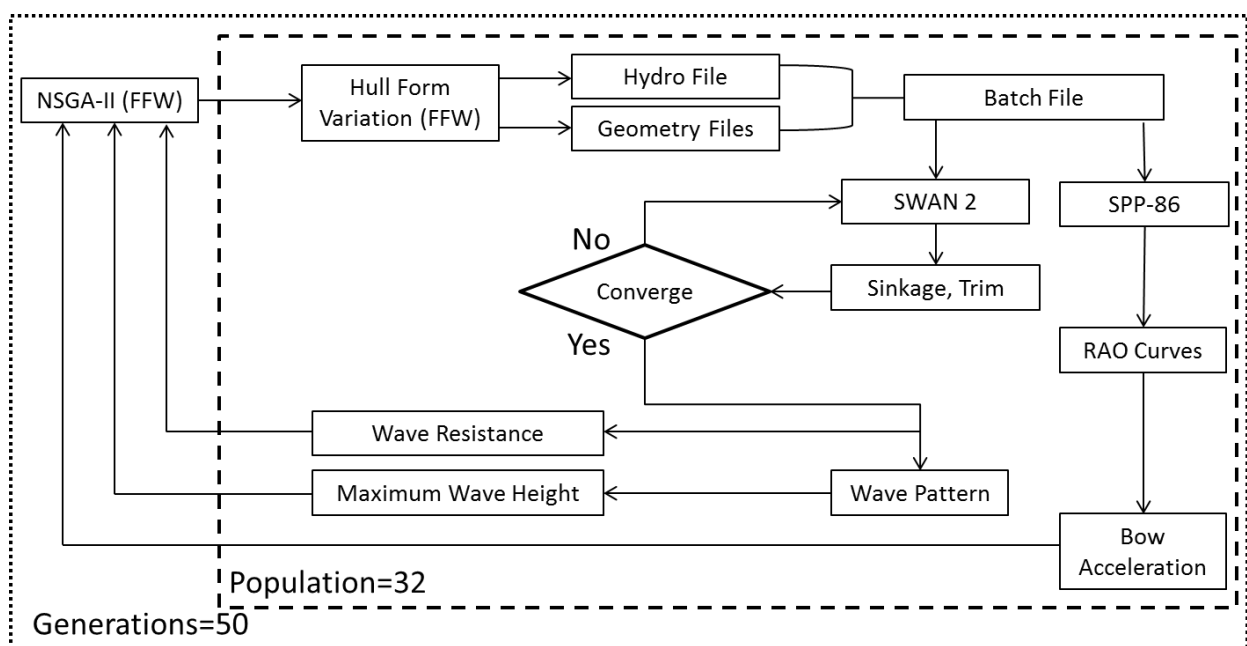
Όπως φαίνεται από το σχήμα αυτό έχουμε συνολικά 50 γενεές με 32 μέλη η κάθε μία, κι επομένως συνολικά 1600 εναλλακτικές μορφές. Η επιλογή των δεδομένων αυτών βασίστηκε πρωτίστως στο γεγονός πως το πλήθος των μελών κάθε γενεάς πρέπει να είναι

²⁴ Grigoropoulos G.J., Loukakis T. (1988), A New Method for Developing Hull Forms with Superior Seakeeping Qualities, Intl. Conf. CADMO '88, Southampton, England, September

²⁵ Grigoropoulos G.J., Loukakis T. (1990), On the Optimization of Hull Forms with Respect to Seakeeping, 5th IMAEM Congress, Athens, May

πολλαπλάσιο του 4. Αυτή η απαίτηση προκύπτει από τις απαιτήσεις λειτουργίας του εξελικτικού αλγορίθμου.

Στην προκειμένη περίπτωση κάθε γενεά αποτελεί το σύνολο που παράγεται σε κάθε επανάληψη βάσει των χαρακτηριστικών της προηγούμενης κι επομένως αποτελεί μια οικογένεια γεωμετριών προς αξιολόγηση. Δεδομένης της λειτουργίας του αλγορίθμου ο αριθμός των γενεών και ο πληθυσμός τους πρέπει να είναι αντίστοιχης τάξης μεγέθους ώστε να έχουμε μια ικανή διασπορά εναλλακτικών επιλογών αλλά και έναν ικανό αριθμό διαδικασιών αναπαραγωγής. Σε κάθε αναπαραγωγή λαμβάνουμε συνεχώς καλύτερες σχεδιάσεις κι επομένως αυτός ο αριθμός επιλέχθηκε να είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό μελών κάθε μίας.



Σχήμα 50. Διαδικασία βελτιστοποίησης υδροδυναμικής συμπεριφοράς E-Γ/O-Γ

Δεδομένα που επίσης απαιτούνται από τον γενετικό αλγορίθμο αφορούν τις πιθανότητες διασταύρωσης και μετάλλαξης που αναλύθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Οι παραχθείσες γεωμετρίες και ειδικά σε προχωρημένα βήματα του αλγορίθμου αποτελούν ικανοποιητικές λύσεις. Κατ' επέκταση η πιθανότητα διασταύρωσης των χαρακτηριστικών τους θα πρέπει να είναι υψηλή προκειμένου να μεγιστοποιήσουμε τον αριθμό των απογόνων που μπορεί να έχουν καλύτερες επιδόσεις και από τους δύο γονείς τους. Αντίθετα επειδή η μετάλλαξη προσδίδει χαρακτηριστικά σε έναν απόγονο που δεν εξαρτώνται από την υδροδυναμική απόδοση των παραχθέντων γεωμετριών αλλά αποτελούν τυχαίο γεγονός, προτιμάται να είναι χαμηλή. Με αυτόν τον τρόπο περιορίζεται η πιθανότητα μετάλλαξης χαρακτηριστικών που προσδίδουν υψηλή απόδοση στις

εναλλακτικές μορφές γάστρας και οι οποίες έχουν προκύψει μετά από εκτενή αριθμό διαδικασιών αναπαραγωγής.

Βάσει των ανωτέρω, οι πιθανότητες διασταύρωσης και μετάλλαξης τέθηκαν ίσες με 0.9 και 0.01 αντίστοιχα. Αυτή η επιλογή δεν επηρεάζει τόσο τη μορφή των βέλτιστων λύσεων όσο την ταχύτητα εύρεσης τους. Δεδομένου λοιπόν ότι ο αριθμός των εξεταζόμενων εναλλακτικών γεωμετριών είναι επαρκής, τα δεδομένα αυτά είναι κατάλληλα για την μελέτη που τελείται στα πλαίσια του παρόντος.

Όπως προκύπτει από το σχήμα 50, η διαχείριση των εξωτερικών προγραμμάτων υλοποιείται στο σύνολο της με χρήση ενός αρχείου batch. Το αρχείο αυτό διασφαλίζει ότι τα εκτελέσιμα αρχεία καθώς και τα αρχεία εισόδου που είναι κοινά για όλες τις περιπτώσεις εναλλακτικών μορφών, θα αντιγραφούν σε έναν φάκελο που είναι μοναδικός για κάθε γεωμετρία και θα εκτελεστούν με τη σειρά που απαιτείται. Ωστόσο, όσον αφορά την υδροδυναμική αξιολόγηση, στο σχήμα αυτό φαίνονται μόνο τα δύο προγράμματα που χρησιμοποιούνται καθώς και το σύνολο των παραθέντων αποτελεσμάτων που προκύπτουν.

Για την επίτευξη της διαδικασίας βελτιστοποίησης χρησιμοποιείται κι ένα σύνολο προγραμμάτων που εκτελούν διαδικαστικές αλλά απαραίτητες προσαρμογές στα αρχεία εισόδου και αποτελεσμάτων και δεν παρουσιάζονται στο σχήμα 50 για λόγους ευκρίνειας και εστίασης στα σημαντικότερα. Τα προγράμματα αυτά φαίνονται στη συνέχεια με μια σύντομη περιγραφή της λειτουργίας τους.

- **Sections_swan.exe.** Πρόγραμμα Visual Fortran που λαμβάνει ως αρχεία εισόδου αυτά που περιέχουν τα σημεία περιγραφής των καμπυλών (δύο διαφορετικά αρχεία) κι εξάγει ένα αρχείο SHF που χρησιμοποιείται από το λογισμικό SWAN 2. Το πρόγραμμα αυτό είναι επιφορτισμένο με τη διαμόρφωση του πρώιμου τμήματος μεταξύ του βολβού και του άνω τμήματος της γάστρας σε επιφάνεια μικρού πλάτους για λόγους που αναφέρθηκαν σε προηγούμενη ενότητα.
- **Shf2pln.exe.** Πρόγραμμα Visual Fortran που μετατρέπει το παραθέν αρχείο SHF σε ένα αρχείο PLN το οποίο περιέχει τα ίδια σημεία σε διατεταγμένη μορφή προκειμένου να χρησιμοποιηθεί από το SWAN 2.
- **Iteration.exe.** Πρόγραμμα Visual Fortran που εκτελεί επαναληπτικά το λογισμικό SWAN 2 κι ελέγχει αν έχει επιτευχθεί σύγκλιση των τιμών παράλληλης βύθισης και διαγωγής. Η επανάληψη αφορά τα εκτελέσιμα αρχεία makessg.exe,

setup.exe και solve.exe που διαμορφώνουν τα αρχεία του SWAN 2 κι επιλύουν το υδροδυναμικό πρόβλημα.

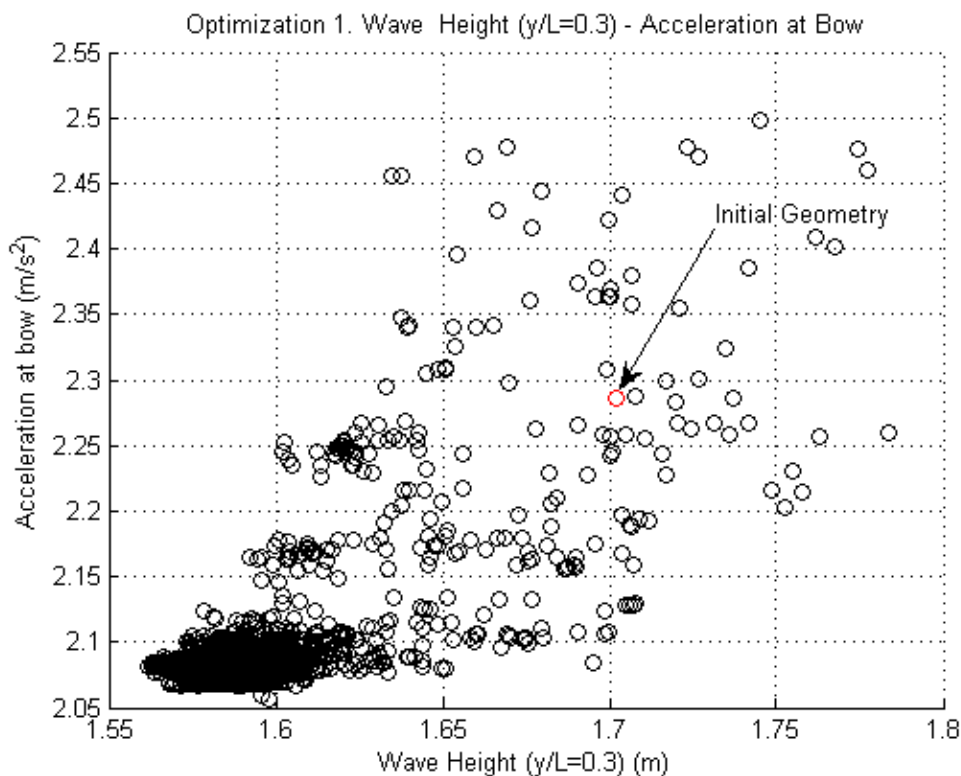
- **Sections_frank.exe.** Πρόγραμμα Visual Fortran που διαμορφώνει το αρχείο που περιέχει τα σημεία περιγραφής των νομέων προς χρήση από το SPP-86, σε ένα αρχείο SHF.
- **Shf2frk.exe.** Πρόγραμμα Visual Fortran που μετατρέπει το παραχθέν αρχείο SHF σε αρχείο εισόδου για το SPP-86. Το αρχείο εισόδου περιλαμβάνει μεταξύ άλλων την περιγραφή της γεωμετρίας, μερικά από τα υδροστατικά στοιχεία και τα δεδομένα που αφορούν τους υπολογισμούς όπως οι συχνότητες των αρμονικών κυματισμών και τη γωνία συνάντησης
- **Results.exe.** Πρόγραμμα Fortran 77 που αποθηκεύει τα αποτελέσματα των υδροδυναμικών υπολογισμών σε αρχείο που τροφοδοτείται στο CAESSES – Friendship Framework προς αξιολόγηση των αντικειμενικών συναρτήσεων. Στα αποτελέσματα περιλαμβάνονται οι τιμές της μέγιστης επιτάχυνσης στην πλώρη, της αντίστασης κυματισμού και του μέγιστου ύψους κύματος για 5 διαμήκεις τομές σε διάφορες εγκάρσιες αποστάσεις. Το μέγιστο ύψος κύματος προκύπτει από το αρχείο του πεδίου κυματισμών σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφηκε νωρίτερα

Κεφάλαιο 6. Αποτελέσματα και συμπεράσματα

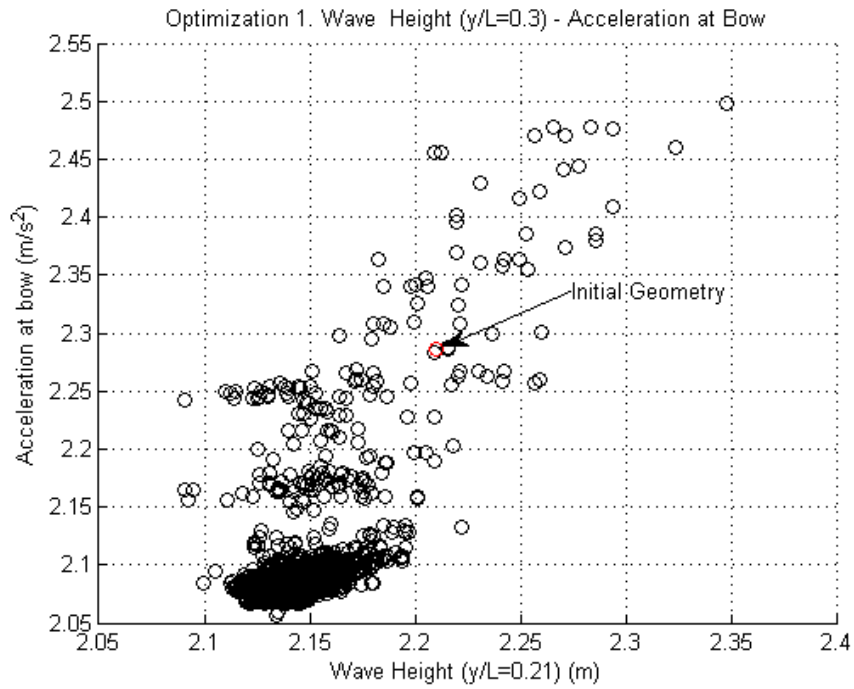
6.1 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης με βάση το μέγιστο ύψος κύματος

Η βελτιστοποίηση αυτή πραγματοποιήθηκε με αντικειμενικές συναρτήσεις το μέγιστο ύψος των παραγόμενων κυματισμών και τη μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης στην πλώρη κατά την κίνηση προνευτασιού. Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο το μέγιστο ύψος κύματος υπολογίστηκε από την εγκάρσια τομή σε απόσταση $y/L = 0.3$. Κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης εξετάστηκαν 1600 διαφορετικές μορφές γάστρας. Για την εκτενέστερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων εκτός από την προαναφερθείσα διαμήκη τομή που αποτελεί το κριτήριο βελτιστοποίησης έχουν ληφθεί τομές και σε αποστάσεις $y/L = 0.21$, $y/L = 0.24$, $y/L = 0.27$ και $y/L = 0.33$. Οι τιμές αυτές προέκυψαν με βάση τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την ερμηνεία του σχήματος 49.

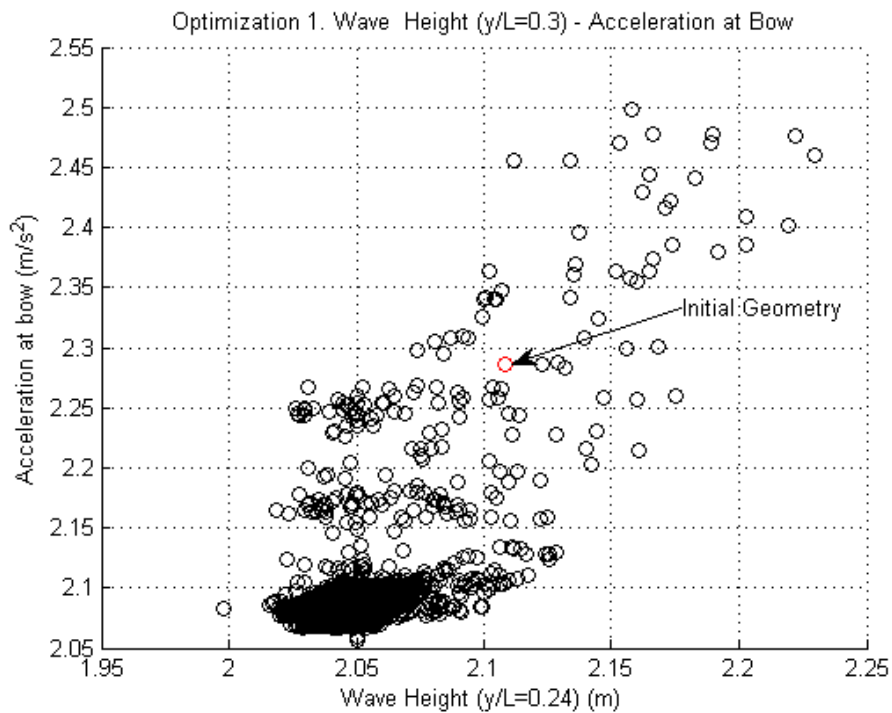
Στα σχήματα 51 ως 62 φαίνονται τα προκύπτοντα διαγράμματα διασποράς του συνόλου των λύσεων με ανά δύο μεγέθη να αποτελούν τους άξονες τους. Σε αυτά φαίνεται αφενός η διασπορά των παραχθέντων γεωμετριών κι αφετέρου η συσχέτιση τους με την επίδοση της αρχικής γεωμετρίας.



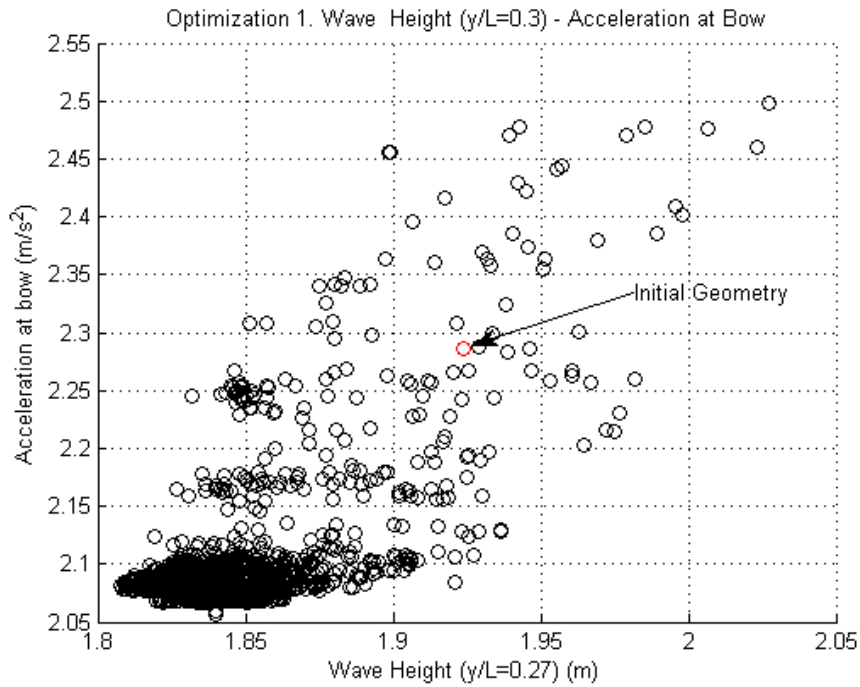
Σχήμα 51. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα το μέγιστο ύψος κύματος σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.3$ και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.3$ - Επιτάχυνση στην πλώρη



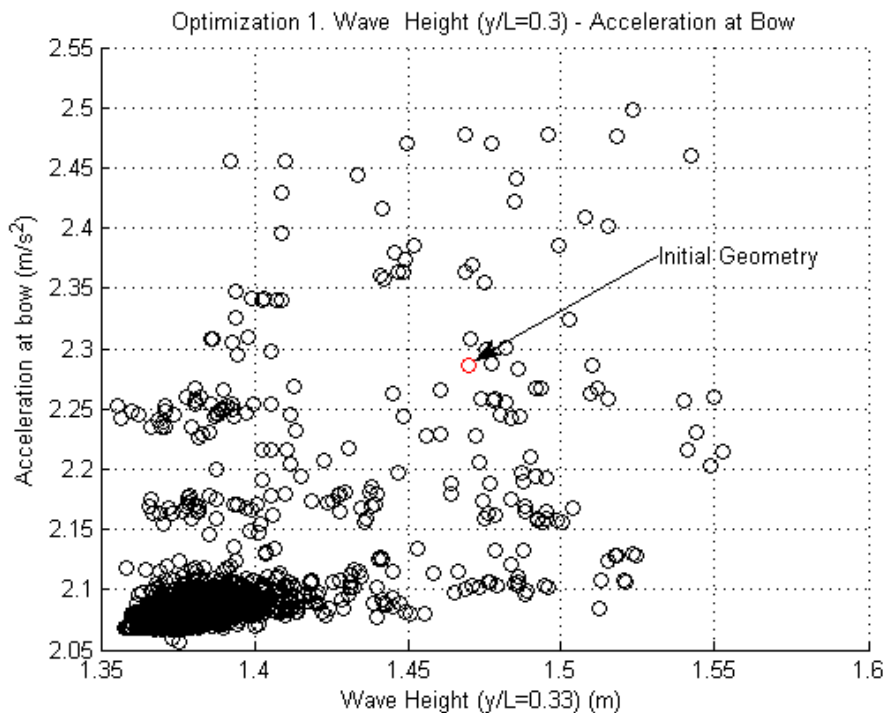
Σχήμα 52. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα το μέγιστο ύψος κύματος σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.3$ και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.21$ - Επιτάχυνση στην πλώρη



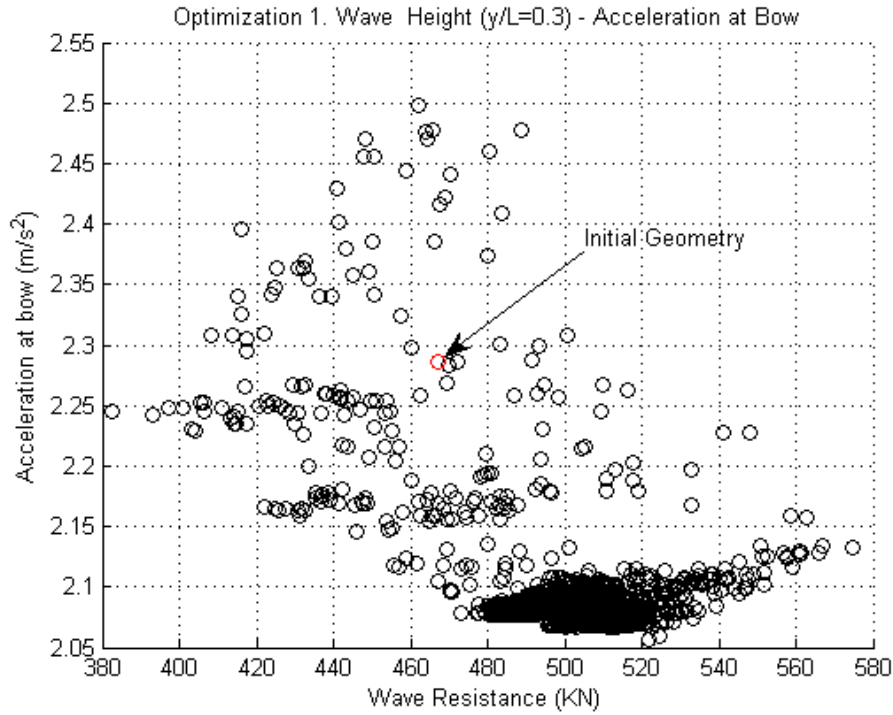
Σχήμα 53. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα το μέγιστο ύψος κύματος σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.3$ και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.24$ - Επιτάχυνση στην πλώρη



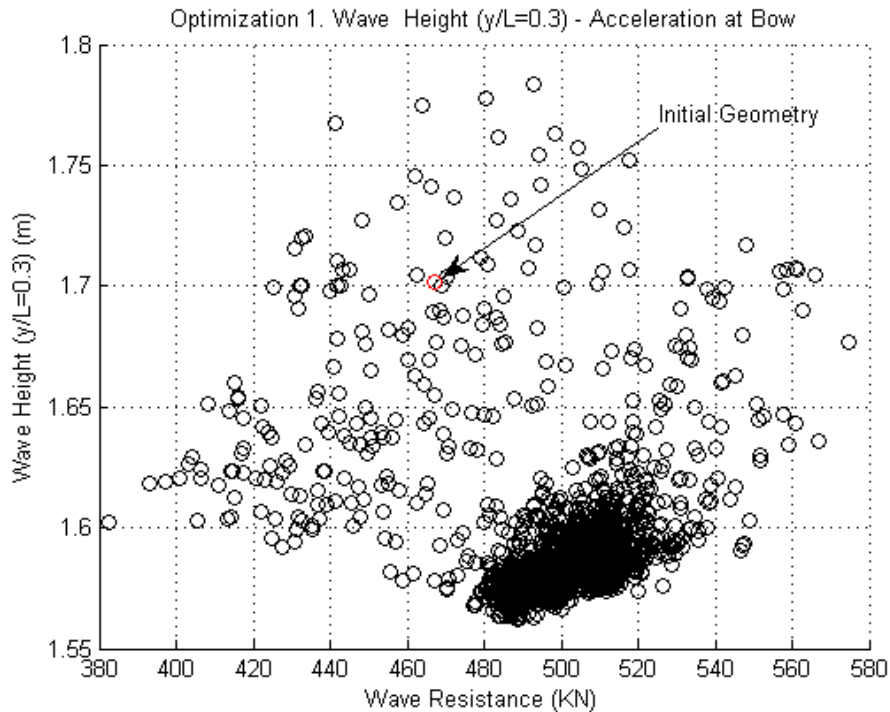
Σχήμα 54. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα το μέγιστο ύψος κύματος σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.3$ και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.27$ - Επιτάχυνση στην πλώρη



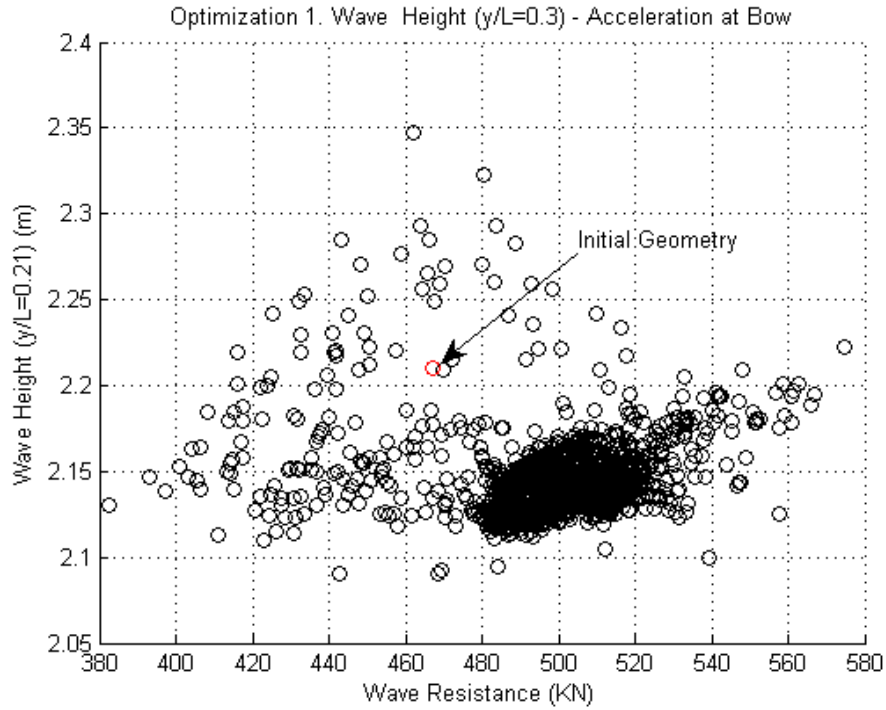
Σχήμα 55. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα το μέγιστο ύψος κύματος σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.3$ και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.33$ - Επιτάχυνση στην πλώρη



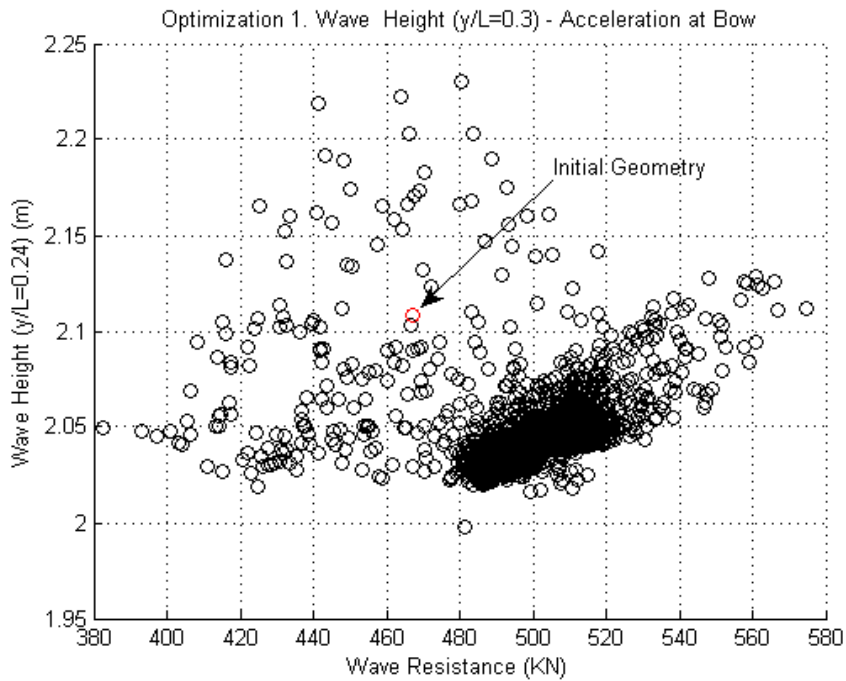
Σχήμα 56. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα το μέγιστο ύψος κύματος σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.3$ και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Αντίσταση κυματισμού - Επιτάχυνση στην πλώρη



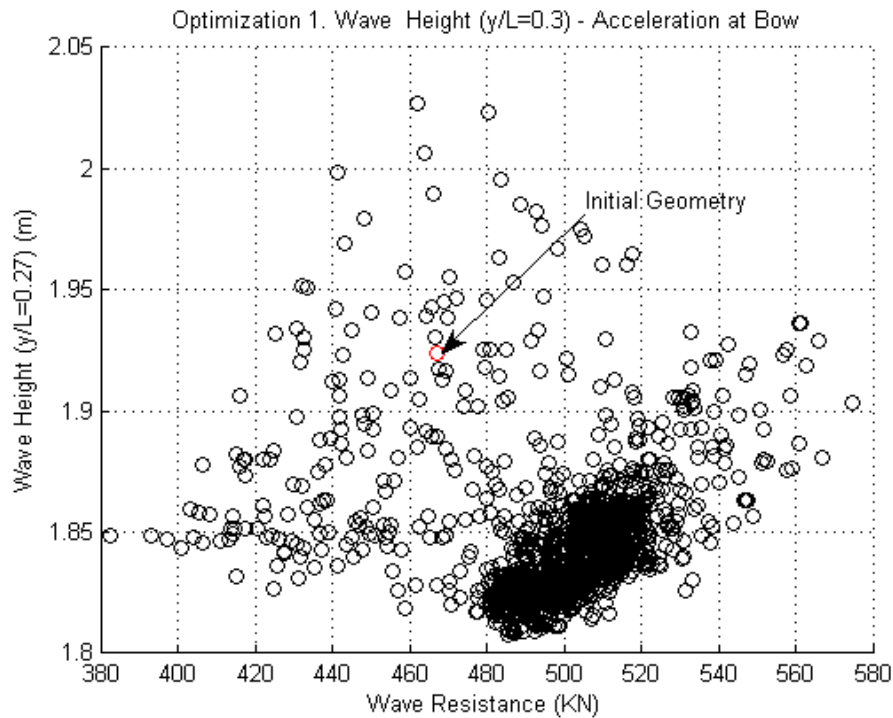
Σχήμα 57. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα το μέγιστο ύψος κύματος σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.3$ και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Αντίσταση κυματισμού - Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.3$



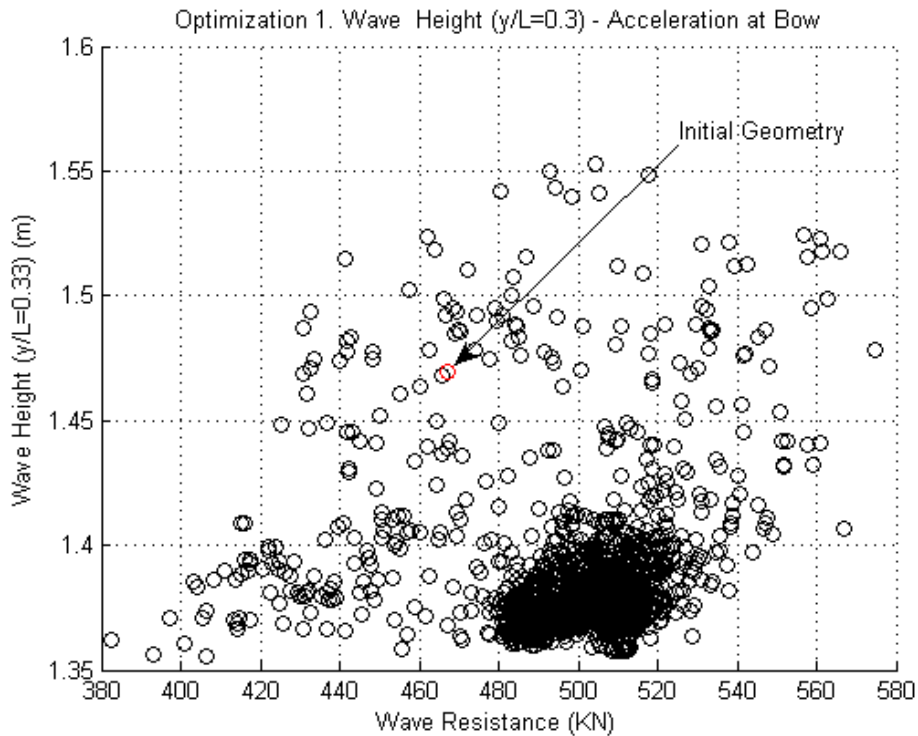
Σχήμα 58. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα το μέγιστο ύψος κύματος σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.3$ και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Αντίσταση κυματισμού - Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.21$



Σχήμα 59. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα το μέγιστο ύψος κύματος σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.3$ και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Αντίσταση κυματισμού - Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.24$



Σχήμα 60. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα το μέγιστο ύψος κύματος σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.3$ και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Αντίσταση κυματισμού - Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.27$



Σχήμα 61. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα το μέγιστο ύψος κύματος σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.3$ και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Αντίσταση κυματισμού - Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.33$

Από το σχήμα 51 παρατηρούμε πως με βάση τα κριτήρια που έχουν τεθεί, η λειτουργία του αλγορίθμου είναι αποδοτική καθώς έχουμε μια πυκνή συγκέντρωση λύσεων στην κάτω αριστερά περιοχή του. Από τα σχήματα 52 ως 55 βλέπουμε πως και για τις υπόλοιπες τομές έχουμε μείωση του μέγιστου ύψους κύματος. Αυτό ήταν αναμενόμενο δεδομένης της αντίστοιχης συμπεριφοράς κορυφών και κοιλάδων στη στενή περιοχή της επιλεγείσας τομής ως κριτήριο βελτιστοποίησης, που αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Ωστόσο είναι σημαντική η παρατήρηση πως η διασπορά αυτή δεν είναι αντίστοιχη σε όλα τα σχήματα κι επομένως το παραπάνω συμπέρασμα αφορά την κατανομή των γεωμετριών στο διάγραμμα ως σύνολο. Με βάση αυτή την παρατήρηση δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να γενικευτεί η αντιστοιχία της συμπεριφοράς των γεωμετριών όσον αφορά τις τιμές του μεμονωμένα.

Από το σχήμα 56 βλέπουμε πως η διασπορά των γεωμετριών όσον αφορά την αντίσταση κυματισμού έχει μορφή από την οποία μπορεί να εξαχθεί μια συννοριακή καμπύλη βελτίστων, από σημεία όμως που παρουσιάζουν σημαντική διασπορά. Επιπρόσθετα βλέπουμε πως η πλειοψηφία των γεωμετριών έχουν μεγαλύτερη αντίσταση κυματισμού από την αρχική.

Στα σχήματα 57 ως 61 γίνεται απευθείας σύγκριση των επιδόσεων των γεωμετριών ως προς την αντίσταση κυματισμού και το μέγιστο ύψος κύματος. Παρατηρώντας τα σχήματα αυτά βλέπουμε πως η πλειοψηφία των γεωμετριών έχει μεγαλύτερη αντίσταση κυματισμού από την αρχική αλλά μικρότερο ύψος κύματος για όλες τις διαμήκεις τομές. Επομένως δεν υπάρχει σε καμία από τις περιπτώσεις διαμήκων τομών αντιστοιχία μεταξύ της ελαχιστοποίησης της αντίστασης κυματισμού και του μέγιστου ύψους των παραγόμενων κυματισμών.

Βάσει των ανωτέρω, η ελαχιστοποίηση της αντίστασης κυματισμού θέτοντας ως κριτήριο στοιχεία που αφορούν το πεδίο των παραγόμενων κυματισμών από το πλοίο, κρίνεται ιδιαίτερα επισφαλής. Θα πρέπει ωστόσο να σημειωθεί πως αυτό το συμπέρασμα αφορά την πλεύση συγκεκριμένης γεωμετρίας σε συγκεκριμένη ταχύτητα και με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε. Κατά συνέπεια, είναι συμπέρασμα που δεν μπορεί να γενικευτεί κι αποτελεί αντικείμενο αξιολόγησης με βάση τα δεδομένα κάθε περίπτωσης.

Από αυτή τη διαδικασία βελτιστοποίησης θα επιλεγεί μια γεωμετρία ως η βέλτιστη με στάθμιση των δύο κριτηρίων που έχουν τεθεί. Λόγω της αναντιστοιχίας οφέλους μεταξύ μέγιστου ύψους κύματος και αντίστασης κυματισμού και δεδομένου ότι εν τέλει αυτό που ενδιαφέρει είναι η μείωση της αντίστασης, η βελτιστοποιημένη γεωμετρία θα επιλεγεί από

τη συνοριακή καμπύλη βελτιστών του σχήματος 56. Στον πίνακα 4 φαίνεται μια λίστα από τις γεωμετρίες που ανήκουν στην περιοχή των ισοδύναμα βέλτιστων λύσεων. Για τη συμπλήρωση του πίνακα αυτού απορρίφθηκαν γεωμετρίες με διαφορά εκτοπίσματος μεγαλύτερη από 1.5% σε σχέση με την αρχική. Οι τιμές που αφορούν τα δύο κριτήρια βελτιστοποίησης φαίνονται με έντονους χαρακτήρες.

Ποσοστιαίες διαφορές μεγεθών ως προς την πατρική μορφή γάστρας							
α/α	Επιτάχυνση στην πλήρη	Αντίσταση κυματισμού	Μέγιστο ύψος κύματος σε διαμήκεις τομές				
			y/L=0.3	y/L=0.21	y/L=0.24	y/L=0.27	y/L=0.33
700	-7.93%	-0.04%	-7.27%	-3.41%	-3.71%	-4.96%	-6.91%
1482	-7.36%	-2.44%	-7.04%	-3.90%	-3.33%	-4.67%	-7.57%
284	-6.13%	-4.58%	-5.95%	-3.08%	-3.18%	-3.59%	-5.74%
1507	-5.53%	-7.66%	-6.05%	-3.94%	-3.33%	-4.83%	-6.14%
1454	-5.35%	-8.86%	-5.76%	-3.09%	-3.47%	-4.54%	-6.85%
160	-5.20%	-9.63%	-5.61%	-3.39%	-3.42%	-3.27%	-4.80%
218	-2.42%	-13.70%	-4.44%	-2.87%	-3.15%	-3.34%	-5.74%
1510	-1.88%	-15.84%	-4.94%	-2.85%	-2.84%	-3.92%	-7.70%
1014	-1.78%	-18.13%	-5.87%	-3.61%	-2.79%	-3.92%	-7.31%

Πίνακας 4. Επιλεγείσες γεωμετρίες από την περιοχή βελτίστων του σχήματος 56

Από τον πίνακα 4 βλέπουμε πως για όλες τις επιλεγείσες γεωμετρίες έχουμε μείωση τόσο της αντίστασης όσο και του μέγιστου ύψους κύματος για όλες τις διαμήκεις τομές. Ωστόσο τα ποσοστά μείωσης δεν υπόκεινται σε έναν κοινό κανόνα που να καθορίζει την τάση τους, κάτι που ενισχύει το συμπέρασμα της μη αντιστοιχίας της συμπεριφοράς των δύο μεγεθών που αναφέρθηκε νωρίτερα. Με βάση το μικρό δείγμα του συνόλου των γεωμετριών που φαίνεται στον πίνακα 4, η αναντιστοιχία αυτή που αρχικώς εντοπίστηκε στα σχήματα 57 ως 61, φαίνεται πως δεν είναι αμφιμονοσήμαντη καθώς η μείωση της αντίστασης συνεπάγεται μείωση του ύψους κύματος ακόμα και αν ποσοτικά δεν υπόκειται σε κάποιον γενικό κανόνα. Αυτό το συμπέρασμα θα αξιολογηθεί περαιτέρω στην επόμενη ενότητα. Οι γεωμετρίες αυτές έχουν επιλεγεί από μια ευρεία περιοχή κι επομένως αποτελούν αντιπροσωπευτικό δείγμα του συνόλου των γεωμετριών που έχουν μικρές τιμές αντικειμενικών συναρτήσεων.

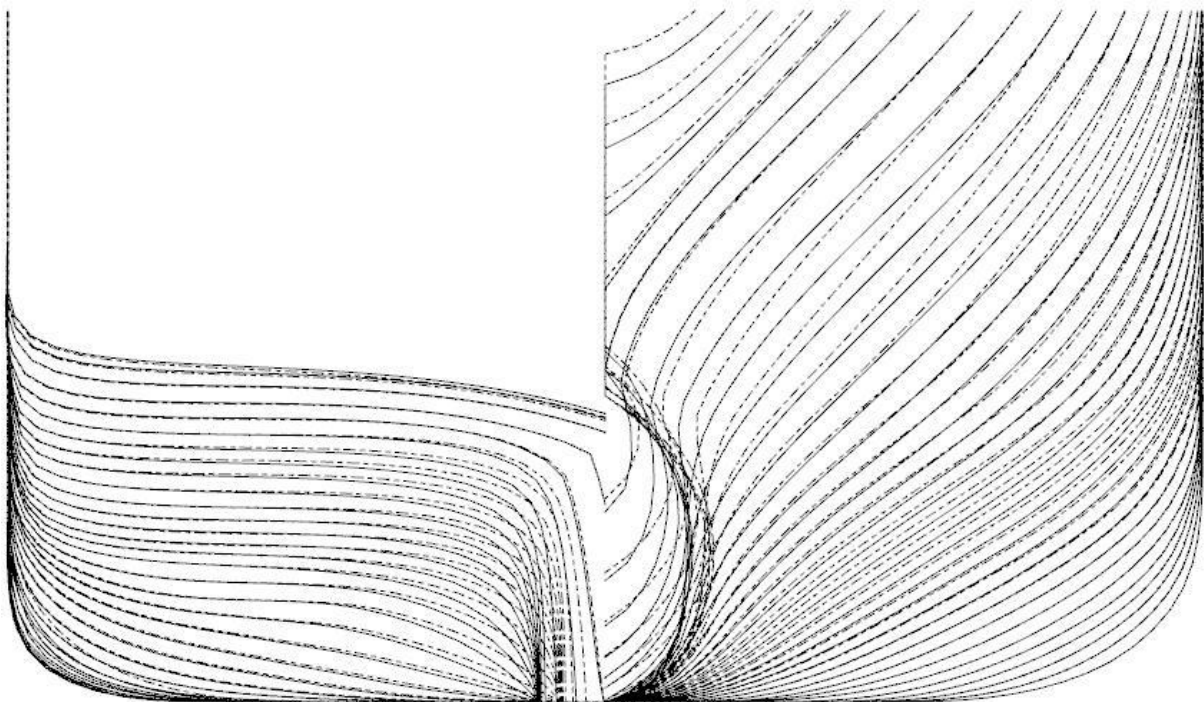
Η γεωμετρία που επιλέγεται γι' αυτή τη βελτιστοποίηση είναι η μορφή γάστρας με αύξοντα αριθμό 1507. Για την επιλογή της λήφθηκαν υπόψη τα δύο κριτήρια βελτιστοποίησης καθώς και η τιμή της αντίστασης κυματισμού. Η διαφορά εκτοπίσματος σε σχέση με την πατρική μορφή γάστρας είναι +0.58%, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό της διαμήκους θέσης του κέντρου άντωσης είναι +0.83%.

Στον πίνακα 5 φαίνονται οι τιμές των μεταβλητών σχεδίασης που διαμορφώνουν την αρχική και την βελτιστοποιημένη γεωμετρία που επιλέχθηκε από αυτή τη διαδικασία βελτιστοποίησης .

Μεταβλητή Σχεδίασης	Μονάδα	Αρχική Γεωμετρία	Βελτιστοποιημένη Γεωμετρία
Skeg Breadth	(m)	1.37	0.906
Transom Height from BL	(m)	6.05	5.976
Waterline Fwd fullness	(%)	0	4.080
Entrance Angle	(deg)	12.5	15.892
Bulb Length	(m)	7.6	8.377
Bulb Tip Z Position	(m)	6	6.154
Bulb Mid Crv End Angle Z	(deg)	0	58.378
Bulb Mid Crv End Angle Y	(deg)	90	62.127
Bulb Sec Aft Low Angle	(deg)	32	35.180
Bulb Sec Aft Up Angle	(deg)	153	144.929
Bulb Sec Fwd Low Angle	(deg)	25	30.101
Bulb Sec Fwd Up Angle	(deg)	145	140.534

Πίνακας 5. Τιμές μεταβλητών σχεδίασης αρχική και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας από την πρώτη διαδικασία βελτιστοποίησης

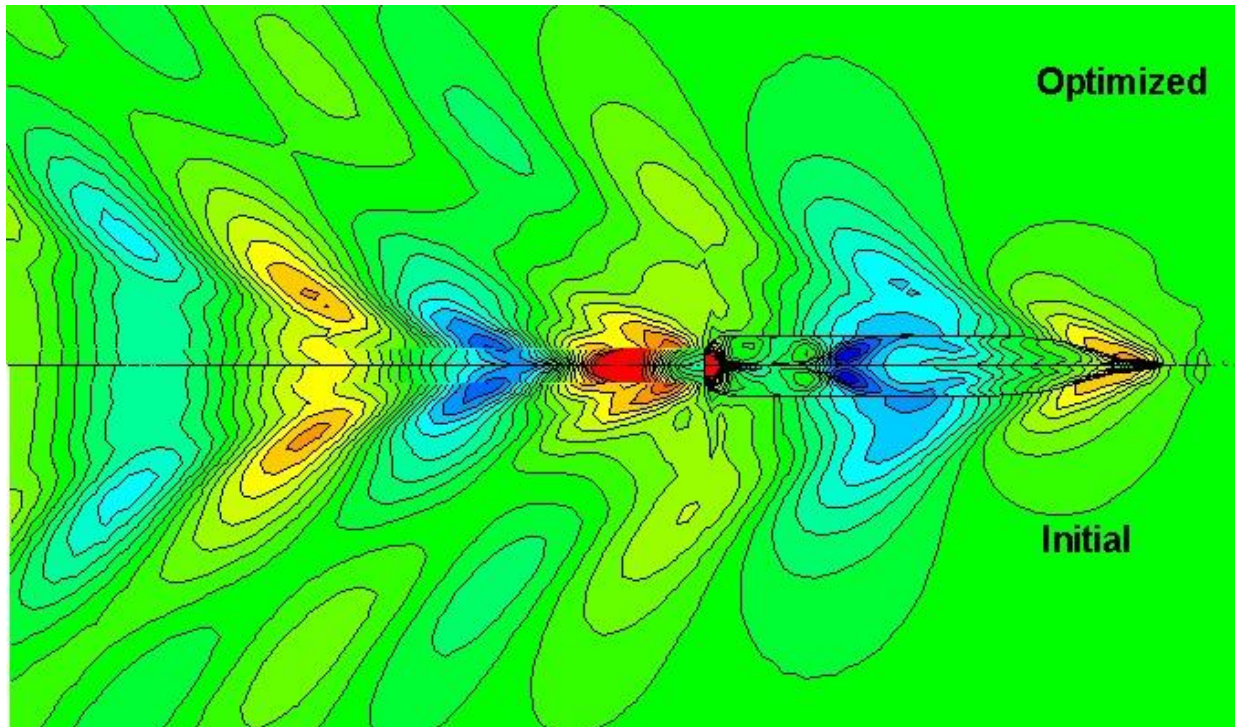
Στο σχήμα 62 φαίνονται οι γραμμές της αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας με συνεχείς και διακεκομμένες καμπύλες αντίστοιχα.



Σχήμα 62. Νομείς αρχικής (συνεχείς καμπύλες) και βελτιστοποιημένης (διακεκομμένες καμπύλες) γεωμετρίας από την πρώτη διαδικασία βελτιστοποίησης

Στο παραπάνω σχήμα είναι εμφανείς οι γεωμετρικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο εικονιζόμενων μορφών γάστρας τόσο στην περιοχή του βολβού όσο και στους προραίους και πρυμναίους νομείς.

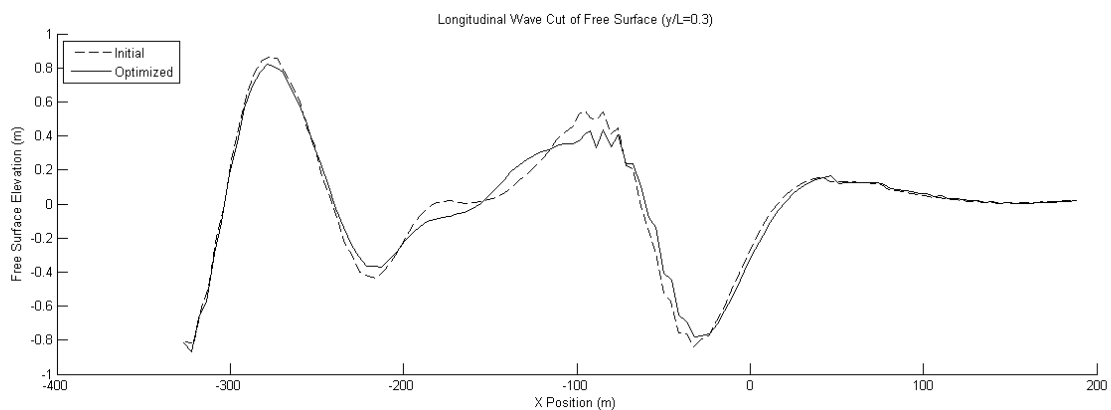
Στο σχήμα 63 φαίνεται το πεδίο των παραγόμενων κυματισμών αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας.



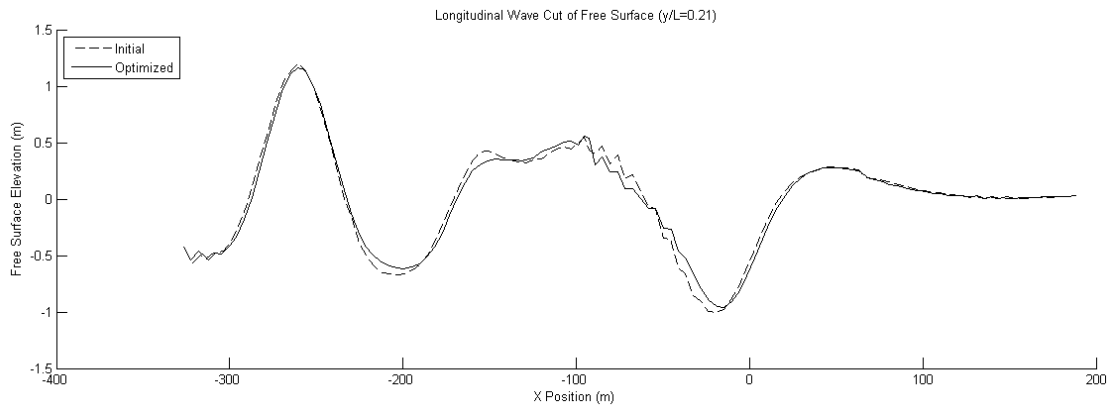
Σχήμα 63. Πεδίο παραγόμενων κυματισμών αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας από την πρώτη διαδικασία βελτιστοποίησης

Από το παραπάνω σχήμα βλέπουμε πως η εξομάλυνση των κορυφών και κοιλάδων του συστήματος κυματισμών είναι μικρή αλλά εμφανής. Εντοπίζεται κυρίως στις κορυφές αλλά και στις κοιλάδες.

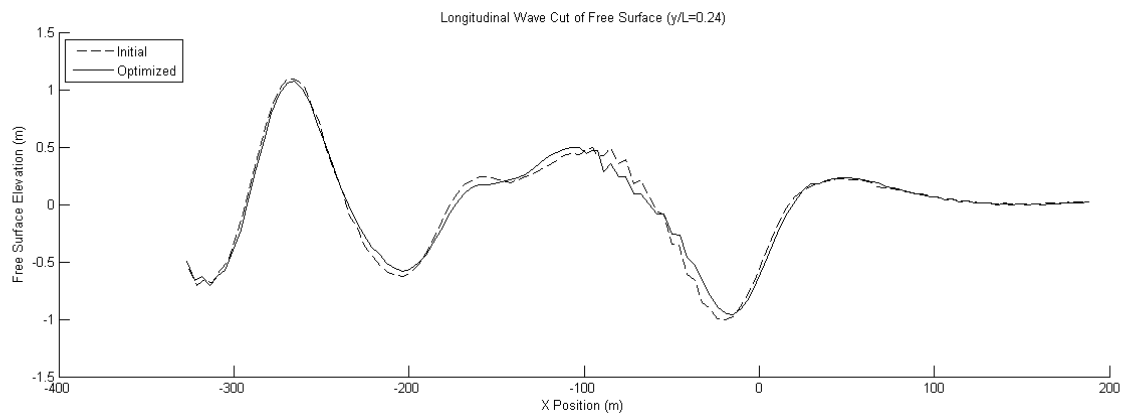
Στα σχήματα 64 ως 68 φαίνονται οι διαμήκεις τομές του συστήματος κυματισμών αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας για τις εγκάρσιες αποστάσεις που παρουσιάστηκαν στον πίνακα 4.



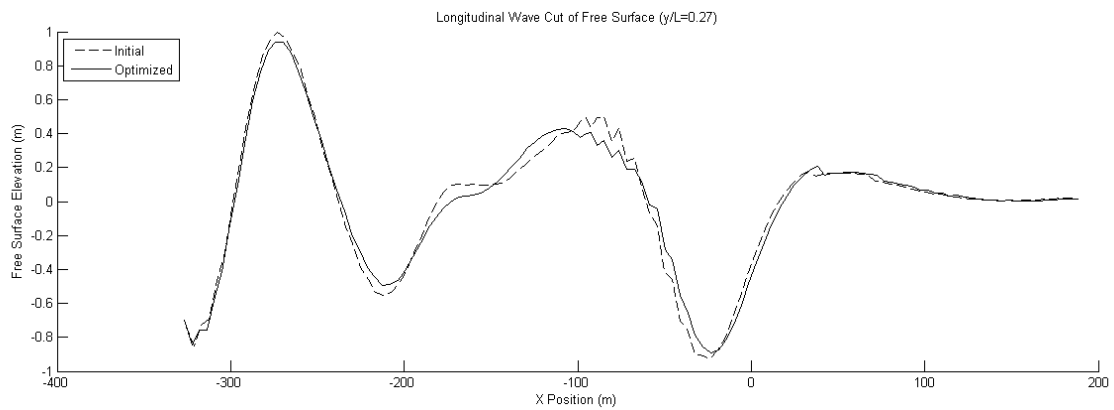
Σχήμα 64. Διαμήκεις τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.3$



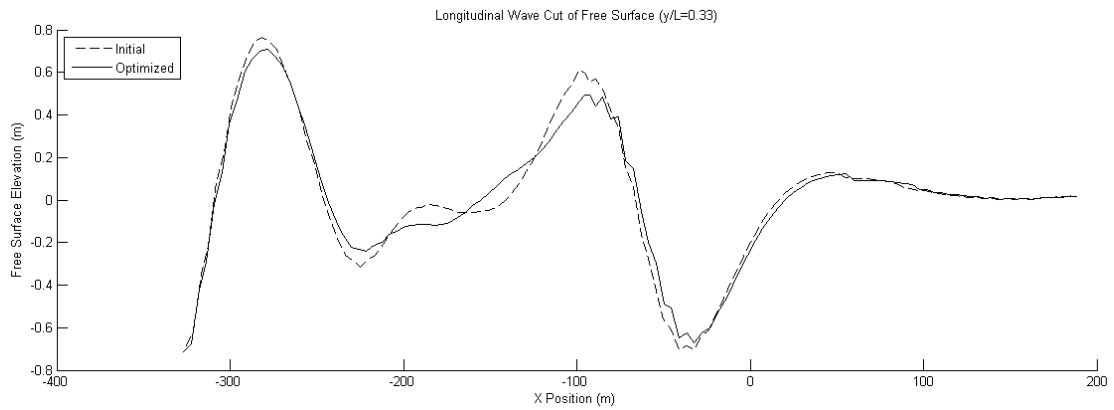
Σχήμα 65. Διαμήκειες τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.21$



Σχήμα 66. Διαμήκειες τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.24$



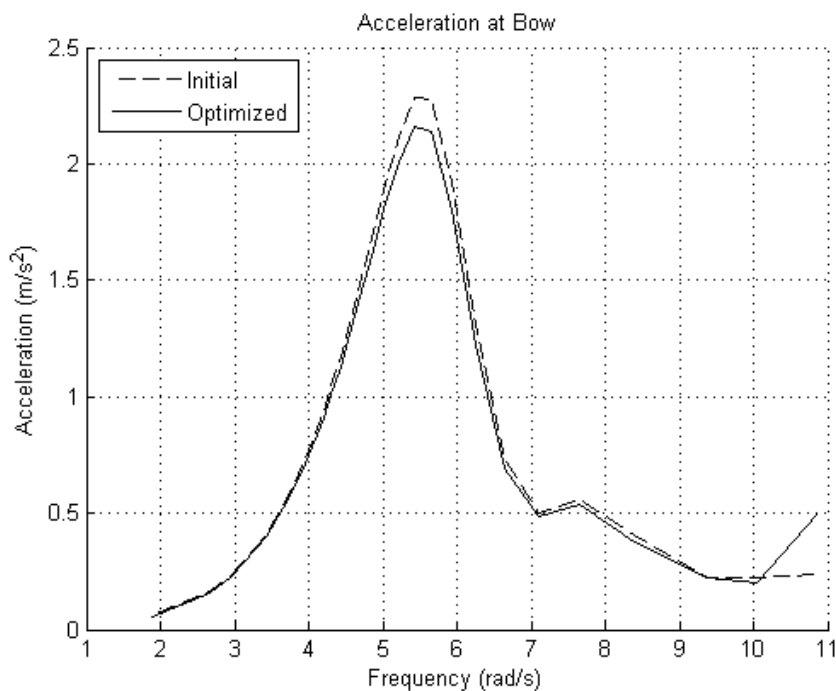
Σχήμα 67. Διαμήκειες τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.27$



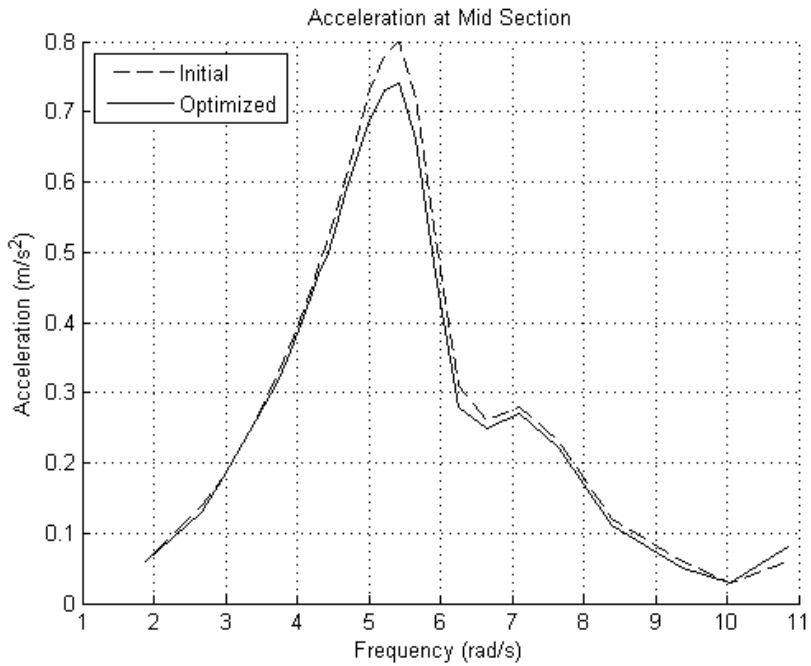
Σχήμα 68. Διαμήκεις τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.33$

Στα σχήματα 64 ως 68 βλέπουμε πως έχουμε μια μικρή βελτίωση σε όλες τις διαμήκεις τομές όπως άλλωστε αναμέναμε βάσει των ποσοστιαίων μειώσεων του πίνακα 4 που αφορούν την επιλεγείσα γεωμετρία.

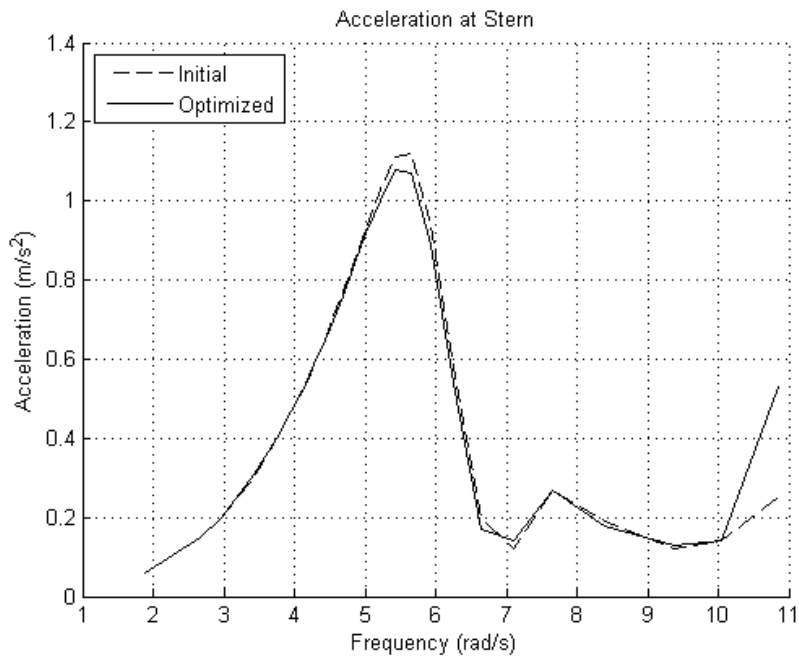
Στα σχήματα 69 ως 71 φαίνονται οι καμπύλες RAO της επιτάχυνσης ως συνάρτηση των συχνοτήτων των μετωπικών κυματισμών, σε τρία διαφορετικά σημεία του πλοίου που τοποθετούνται στην πρύμνη, το μέσο νομέα και την πλώρη. Στη βελτιστοποίηση λήφθηκε υπόψη μόνο η επιτάχυνση στην πλώρη ωστόσο οι άλλες δύο καμπύλες είναι χρήσιμες προκειμένου να αξιολογηθεί η επιλογή που έγινε.



Σχήμα 69. Καμπύλες RAO επιτάχυνσης στην πλώρη αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας



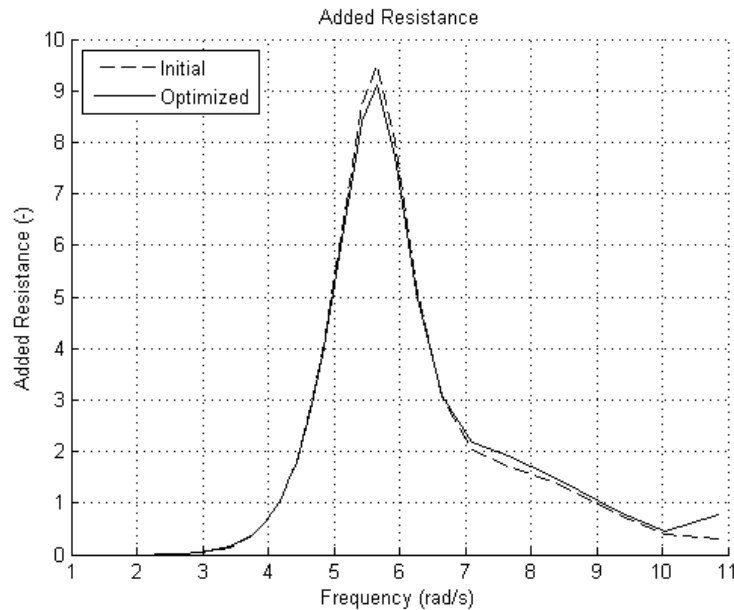
Σχήμα 70. Καμπύλες RAO επιτάχυνσης στο μέσο νομέα αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας



Σχήμα 71. Καμπύλες RAO επιτάχυνσης στην πρύμνη αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας

Στο σχήμα 71 φαίνεται η καμπύλη που δίνει την αδιαστατοποιημένη τιμή της πρόσθετης αντίστασης λόγω των κινήσεων του πλοίου. Το μέγεθος αυτό δεν αποτέλεσε κριτήριο τόσο κατά την αξιολόγηση από τον αλγόριθμο όσο και κατά την επιλογή της βέλτιστης γεωμετρίας. Η παρουσία του είναι συμπληρωματική και η αξιολόγηση της μεταβολής του

θα ενταχθεί στα γενικά συμπεράσματα που θα εξαχθούν από τη διαδικασία βελτιστοποίησης.



Σχήμα 72. Πρόσθετη αντίσταση αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας

Στα διαγράμματα 69 ως 71 βλέπουμε πως για όλες τις καμπύλες έχουμε εμφανή μετατόπιση προς τα κάτω κι επομένως η ελαχιστοποίηση της μέγιστης τιμής της επιτάχυνσης στην πλήρη οδήγηση σε μείωση των επιταχύνσεων σε όλα τα σημεία του πλοίου που απεικονίζονται καθώς και για όλες τις τιμές συχνοτήτων μετωπικών κυματισμών.

Παρατηρώντας το διάγραμμα του σχήματος 72 βλέπουμε πως η μείωση της πρόσθετης αντίστασης για τη βελτιστοποιημένη γεωμετρία δεν είναι αντίστοιχη με αυτές των επιταχύνσεων. Αυτό προκύπτει από το γεγονός πως η πρόσθετη αντίσταση δεν σχετίζεται άμεσα με την επιτάχυνση των κινήσεων. Κατ' επέκταση το μέγεθος αυτό θα μπορούσε να αποτελεί μια πρόσθετη αντικειμενική συνάρτηση σε μια ευρύτερη διαδικασία βελτιστοποίησης. Στην προκειμένη περίπτωση η βελτιστοποιημένη γεωμετρία έχει μειωμένη πρόσθετη αντίσταση κατά 4%.

Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης που μόλις παρουσιάστηκαν θα αναλυθούν εκ νέου συγκρίνοντας τα με αυτά που θα προκύψουν από τη δεύτερη.

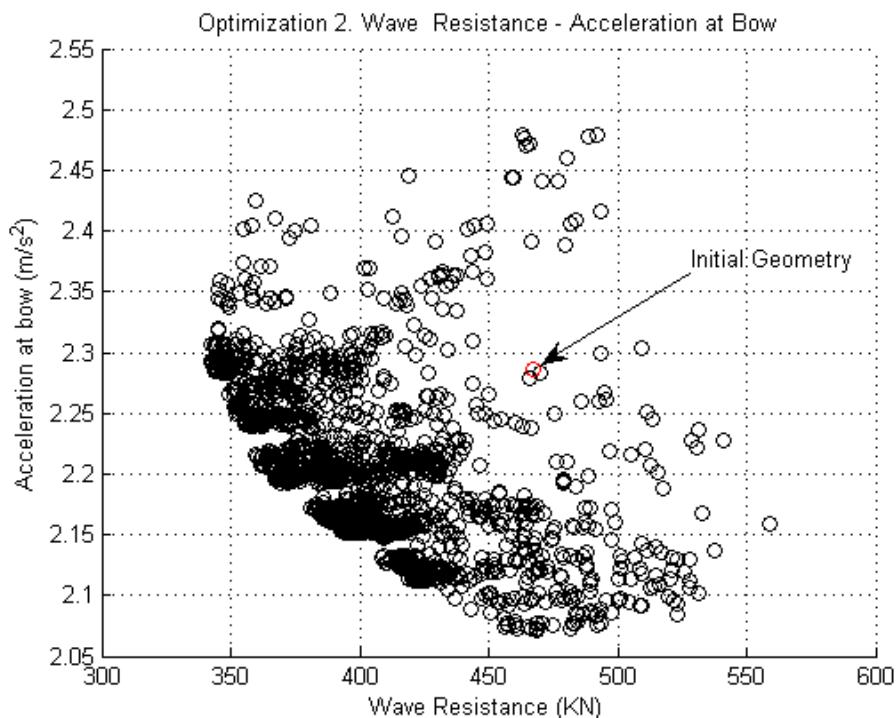
6.2 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης με βάση την αντίσταση κυματισμού

Η βελτιστοποίηση αυτή πραγματοποιήθηκε με αντικειμενικές συναρτήσεις την αντίσταση κυματισμού και τη μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης στην πλήρη. Προκειμένου να

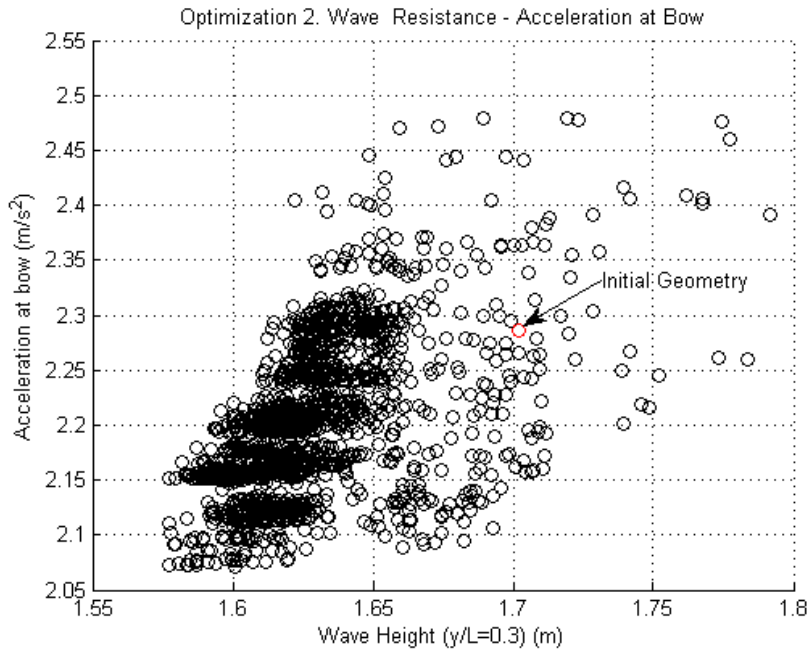
αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας αλλά και να συγκριθεί με αυτή που αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα, υπολογίζονται και παρουσιάζονται όλα τα μεγέθη της προηγούμενης διαδικασίας.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως η διερεύνηση της αξιοπιστίας των δύο διαδικασιών βελτιστοποίησης αφορά την πραγματική υδροδυναμική τους απόδοση σε ήρεμο νερό, που εξαρτάται από τη συνολική τους αντίσταση. Στα πλαίσια αυτής της προσέγγισης η προσπάθεια που τελείται αφορά την ελαχιστοποίηση της αντίστασης κυματισμού που αποτελεί σημαντική συνιστώσα της συνολικής για την ταχύτητα που εξετάζεται κι επομένως θα αντιμετωπιστεί με αυξημένη βαρύτητα σε σύγκριση με το μέγιστο ύψος κύματος όπως έγινε στην προηγούμενη διαδικασία. Ο έλεγχος της αξιοπιστίας εκτίμησης αυτού του μεγέθους από το λογισμικό SWAN 2, θεωρείται πλήρης όταν συγκριθεί και με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο STAR CCM+.

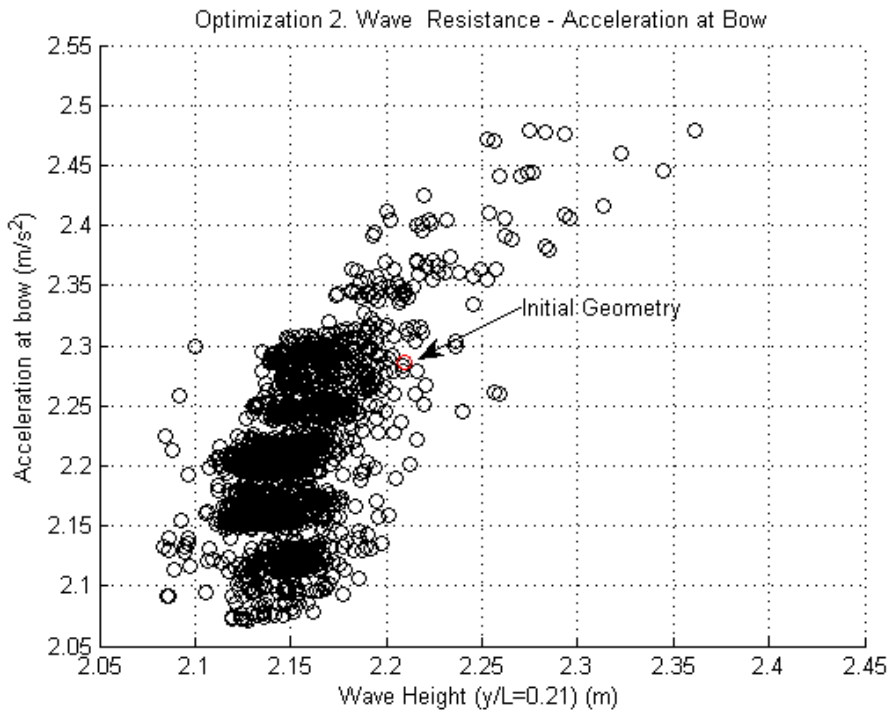
Στα σχήματα 73 ως 83, φαίνονται τα προκύπτοντα διαγράμματα διασποράς του συνόλου των λύσεων. Το διάγραμμα 73 είναι το μοναδικό που έχει ως άξονες τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις αυτής της βελτιστοποίησης.



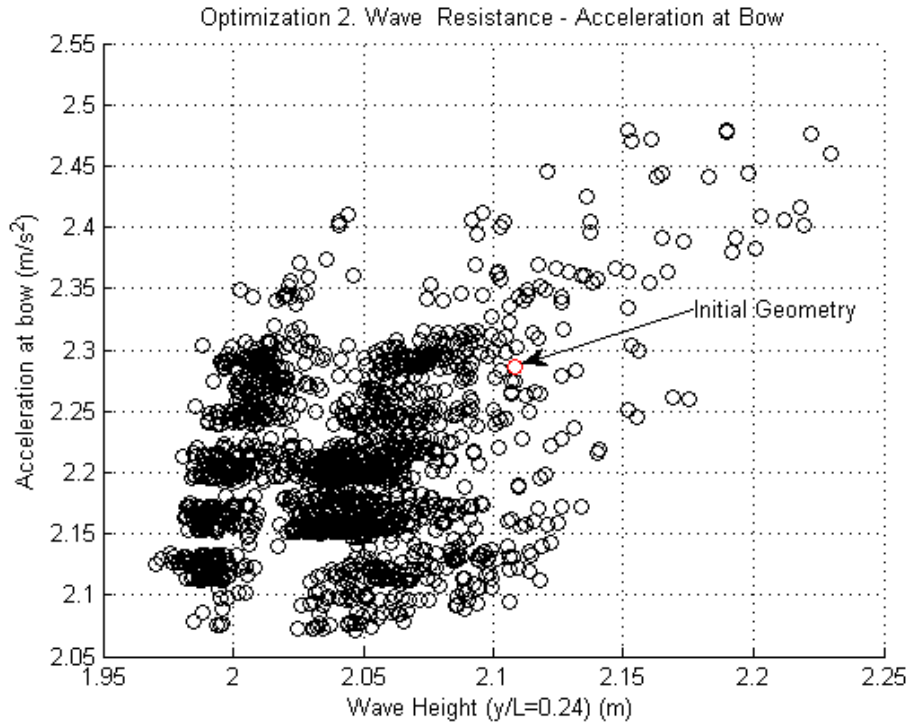
Σχήμα 73. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα την αντίσταση κυματισμού και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Αντίσταση κυματισμού – Επιτάχυνση στην πλώρη



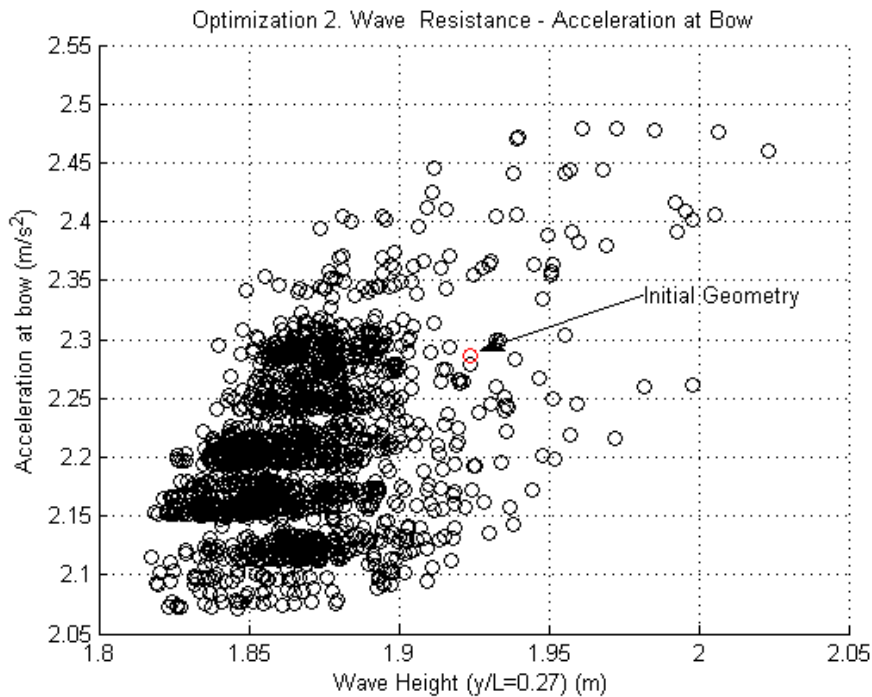
Σχήμα 74. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα την αντίσταση κυματισμού και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $\gamma/L=0.3$ - Επιτάχυνση στην πλώρη



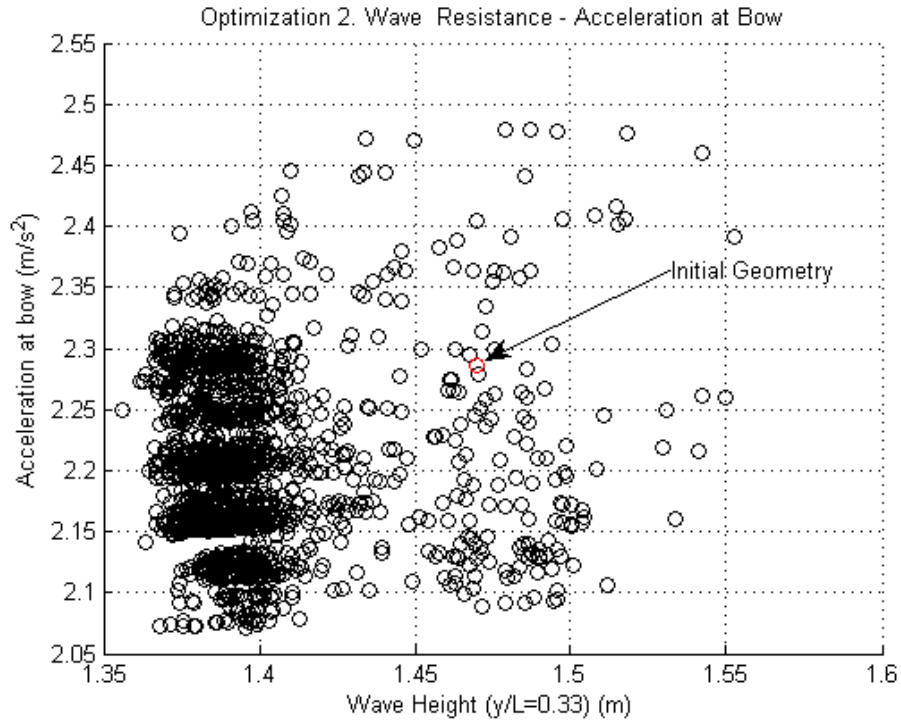
Σχήμα 75. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα την αντίσταση κυματισμού και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $\gamma/L=0.21$ - Επιτάχυνση στην πλώρη



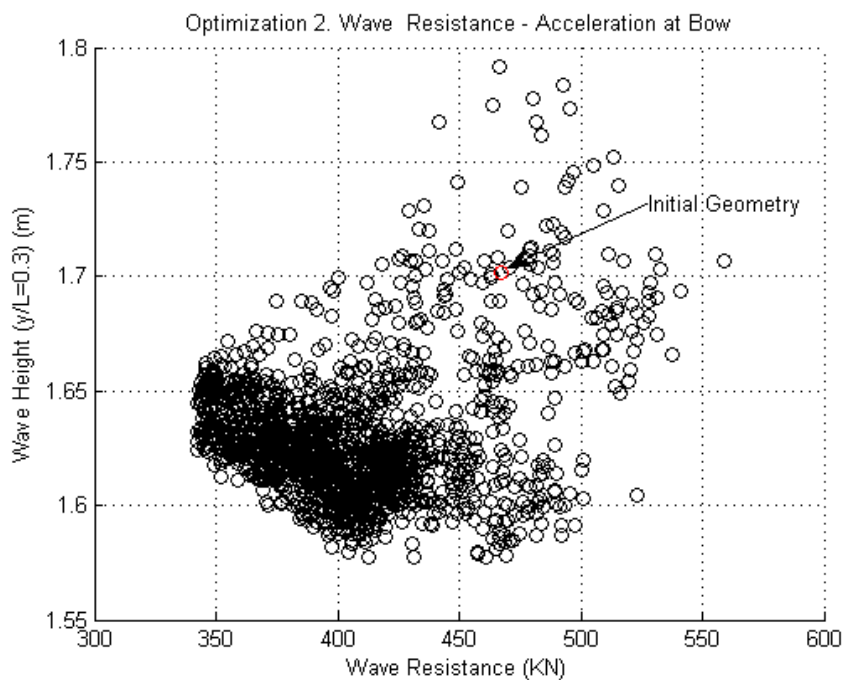
Σχήμα 76. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα την αντίσταση κυματισμού και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.24$ – Επιτάχυνση στην πλώρη



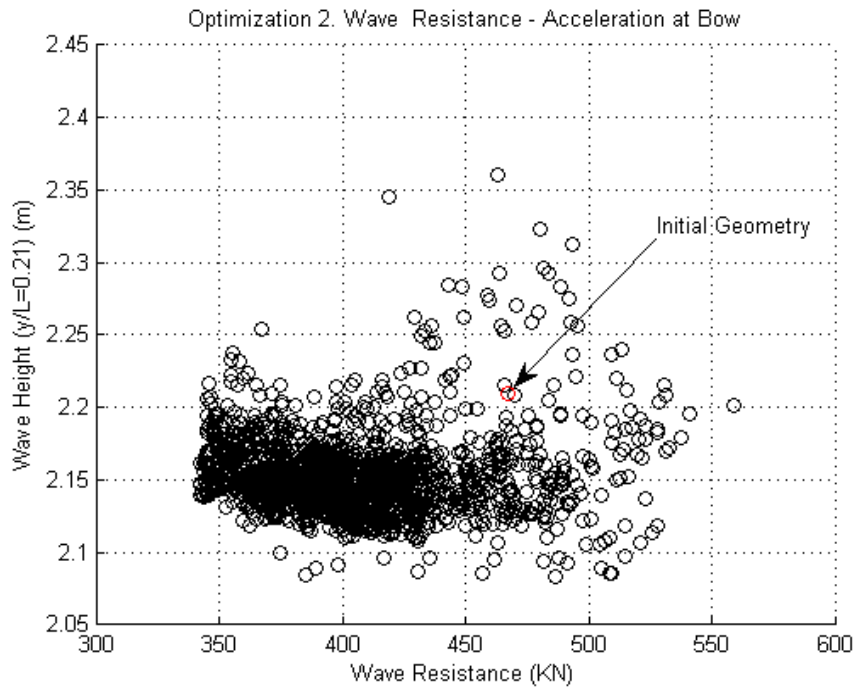
Σχήμα 77. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα την αντίσταση κυματισμού και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.27$ – Επιτάχυνση στην πλώρη



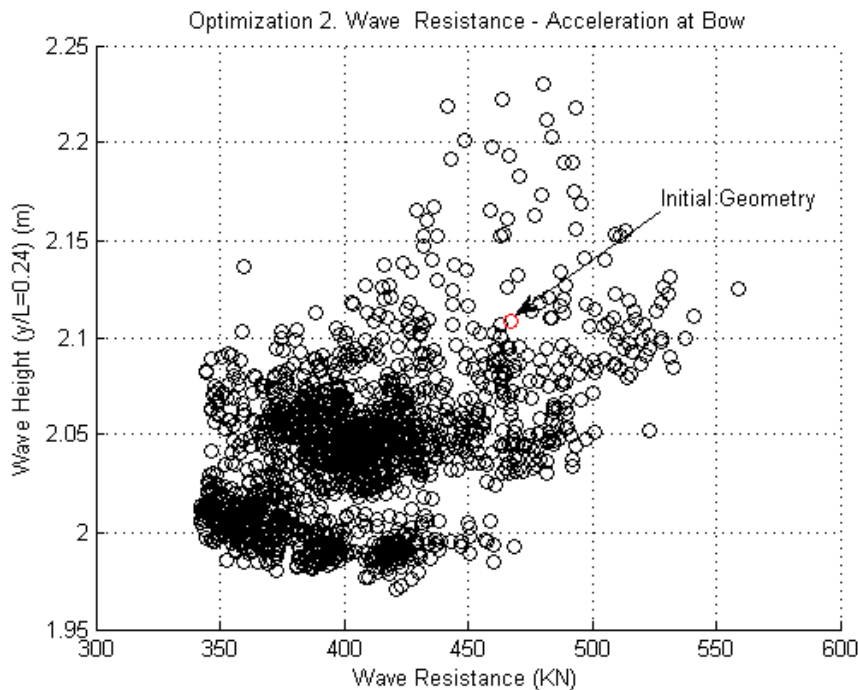
Σχήμα 78. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα την αντίσταση κυματισμού και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $\gamma/L=0.33$ - Επιτάχυνση στην πλώρη



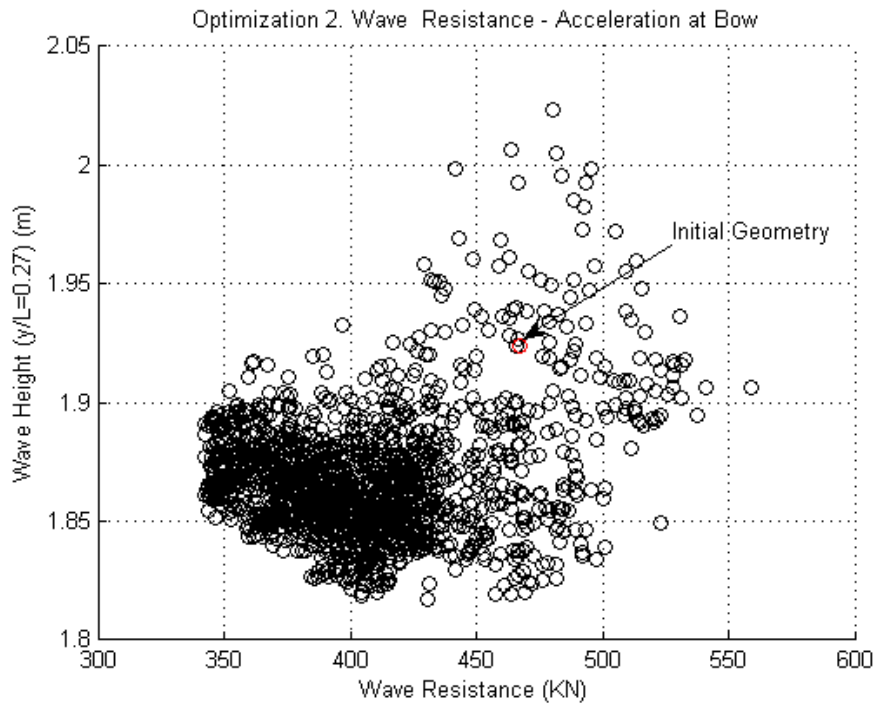
Σχήμα 79. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα την αντίσταση κυματισμού και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Αντίσταση κυματισμού - Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $\gamma/L=0.3$



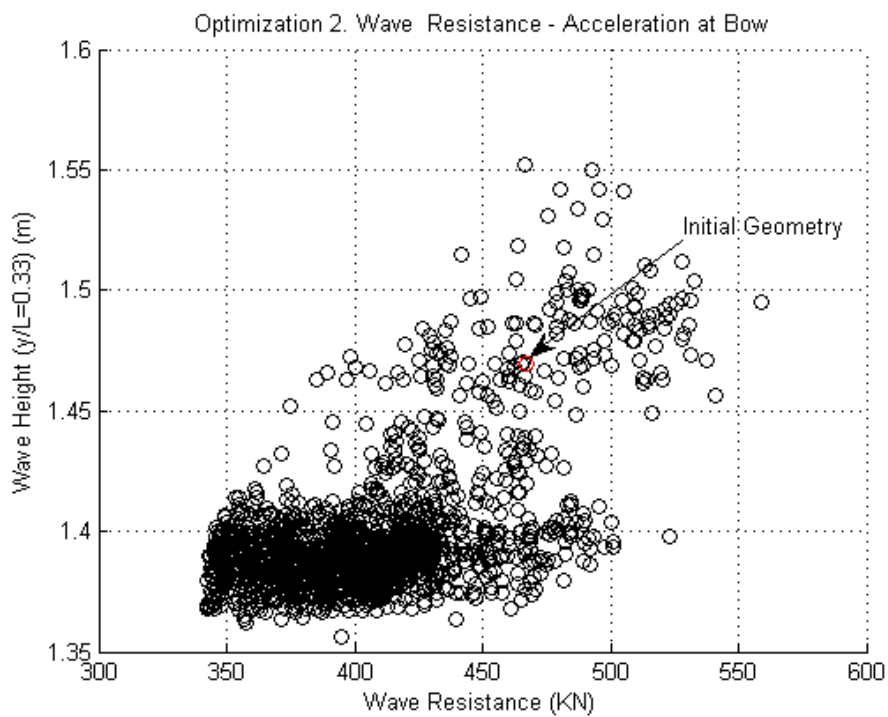
Σχήμα 80. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα την αντίσταση κυματισμού και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Αντίσταση κυματισμού - Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.21$



Σχήμα 81. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα την αντίσταση κυματισμού και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Αντίσταση κυματισμού - Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.24$



Σχήμα 82. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα την αντίσταση κυματισμού και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Αντίσταση κυματισμού - Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.27$



Σχήμα 83. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα την αντίσταση κυματισμού και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Αντίσταση κυματισμού - Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.33$

Η ερμηνεία των διαγραμμάτων των παραπάνω σχημάτων θα ξεκινήσει από αυτό που έχει άξονες τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις. Στο σχήμα 73 λοιπόν έχουμε μια εξαιρετική διασπορά λύσεων που συνάδει απόλυτα με την αναμενόμενη μιας βελτιστοποίησης με γνώμονα δύο κριτήρια. Σε αυτό φαίνεται μια συνεχής και ομαλή καμπύλη βελτίστων (Pareto Front) η οποία περιβάλλει το σύνολο των εφικτών λύσεων που διατάσσονται στο συγκεκριμένο διάγραμμα. Η συντριπτική πλειοψηφία των παραχθέντων μορφών γάστρας έχουν καλύτερες επιδόσεις από την αρχική και για τα δύο επιλεγέντα κριτήρια αυτής της περίπτωσης.

Συγκρίνοντας το σχήμα 73 με το σχήμα 57 που παρουσιάζει τα αντίστοιχα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης που αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα, βλέπουμε πως για τη δεύτερη βελτιστοποίηση, αφενός η μείωση της αντίστασης κυματισμού είναι πολύ σημαντικότερη κι αφετέρου πως η διασπορά των λύσεων είναι αισθητά καλύτερη.

Από τα σχήματα 74 ως 78 βλέπουμε πως η πλειοψηφία των λύσεων που παρουσιάζονται έχουν μικρότερο ύψος παραγόμενων κυματισμών, για όλες τις διαμήκεις τομές, παρότι αυτό το κριτήριο δεν ήταν μια από τις αντικειμενικές συναρτήσεις. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει το συμπέρασμα της προηγούμενης ενότητας, πως μείωση της αντίστασης κυματισμού συνεπάγεται μείωση του μέγιστου ύψους κύματος. Όπως φάνηκε από την προηγούμενη ενότητα το αντίστροφο συνήθως δεν ισχύει κι επομένως η συσχέτιση μεταξύ των δύο μεγεθών είναι μονοσήμαντη.

Το ίδιο συμπέρασμα εξάγεται άμεσα από τα διαγράμματα των σχημάτων 79 ως 83. Στην προηγούμενη ενότητα παρατηρήθηκε πως η πλειοψηφία των γεωμετριών με μικρότερο ύψος κύματος είχαν μεγαλύτερη αντίσταση κυματισμού. Στα διαγράμματα αυτής της ενότητας παρατηρείται το ακριβώς αντίστροφο. Επιπρόσθετα, η διασπορά των λύσεων έχει αντίστοιχη μορφή για όλα τα διαγράμματα εκτός αυτού που φαίνεται στο σχήμα 78 όπου παρατηρείται μια περιοχή ασυνέχειας της διασποράς. Όπως και στην προηγούμενη ενότητα όλα τα μέχρι στιγμής συμπεράσματα αφορούν τη διακύμανση τιμών της διασποράς των λύσεων συνολικά και όχι τις τιμές που αντιστοιχούν σε κάθε γεωμετρία μεμονωμένα.

Η γεωμετρία που θα επιλεγεί γι' αυτή την περίπτωση βελτιστοποίησης θα ανήκει στη συνοριακή καμπύλη βελτίστων του σχήματος 73. Στον πίνακα 6 φαίνεται ένα σύνολο εναλλακτικών μορφών γάστρας που ανήκουν σε αυτό το σύνολο και αποτελούν ισοδύναμα αποδοτικές λύσεις.

α/α	Ποσοστιαίες διαφορές μεγεθών ως προς την πατρική μορφή γάστρας						
	Επιτάχυνση στην πλήρη	Αντίσταση κυματισμού	Μέγιστο ύψος κύματος σε διαμήκεις τομές				
			y/L=0.3	y/L=0.21	y/L=0.24	y/L=0.27	y/L=0.33
1203	-9.33%	-1.28%	-7.31%	-4.10%	-3.96%	-5.23%	-6.92%
1371	-9.25%	-2.40%	-6.36%	-3.34%	-2.60%	-3.25%	-4.80%
1175	-8.64%	-5.09%	-4.81%	-3.26%	-5.33%	-2.73%	-5.40%
1226	-8.21%	-6.49%	-5.68%	-2.58%	-2.04%	-2.95%	-4.48%
1464	-7.55%	-10.25%	-5.15%	-3.61%	-5.88%	-3.87%	-5.71%
1267	-6.92%	-12.18%	-5.63%	-2.77%	-6.24%	-2.79%	-6.03%
1597	-6.74%	-12.54%	-5.99%	-2.79%	-6.22%	-2.67%	-5.38%
1569	-5.87%	-15.71%	-6.44%	-3.75%	-3.51%	-4.87%	-6.29%
1408	-5.49%	-16.80%	-4.82%	-3.45%	-5.83%	-3.80%	-5.18%
1533	-5.32%	-17.36%	-4.29%	-3.24%	-5.67%	-3.34%	-5.63%
1547	-5.05%	-18.15%	-4.81%	-3.37%	-5.71%	-3.70%	-5.44%
1423	-4.98%	-18.51%	-3.92%	-3.38%	-5.97%	-3.90%	-5.60%
1555	-4.04%	-20.89%	-5.60%	-3.13%	-5.29%	-2.34%	-6.25%
1142	-3.94%	-21.34%	-4.48%	-3.45%	-5.45%	-3.91%	-6.33%
1542	-3.44%	-22.54%	-5.03%	-3.54%	-5.63%	-4.18%	-6.08%
1279	-3.06%	-22.97%	-4.13%	-3.98%	-5.84%	-4.19%	-6.10%
1441	-1.95%	-23.87%	-3.11%	-3.11%	-2.50%	-3.49%	-5.78%
1456	-1.54%	-24.57%	-4.94%	-1.69%	-5.24%	-2.87%	-5.41%
1561	-0.84%	-25.28%	-4.32%	-2.19%	-5.03%	-2.93%	-4.32%

Πίνακας 6. Επιλεγείσες γεωμετρίες από την περιοχή βελτίστων του σχήματος 73

Από τα στοιχεία του πίνακα 6 μπορούμε πλέον να αποφανθούμε για τα δεδομένα που αφορούν κάθε γεωμετρία μεμονωμένα. Αρχικά βλέπουμε πως η μείωση αντίστασης κυματισμού επιφέρει μείωση και του μέγιστου ύψους κύματος για όλες τις τομές κι επομένως καμία γεωμετρία δεν ανήκει στη μειοψηφία που παραβιάζει αυτόν τον κανόνα. Το ποσοστό μείωσης του ύψους κύματος είναι συγκρίσιμο με αυτό της προηγούμενης ενότητας, αλλά το αντίστοιχο ποσοστό για την αντίσταση κυματισμού είναι αρκετά μεγαλύτερο.

Μια πρόσθετη παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι πως όλες οι γεωμετρίες αποτελούν μέλη προχωρημένων γενεών. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει 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.

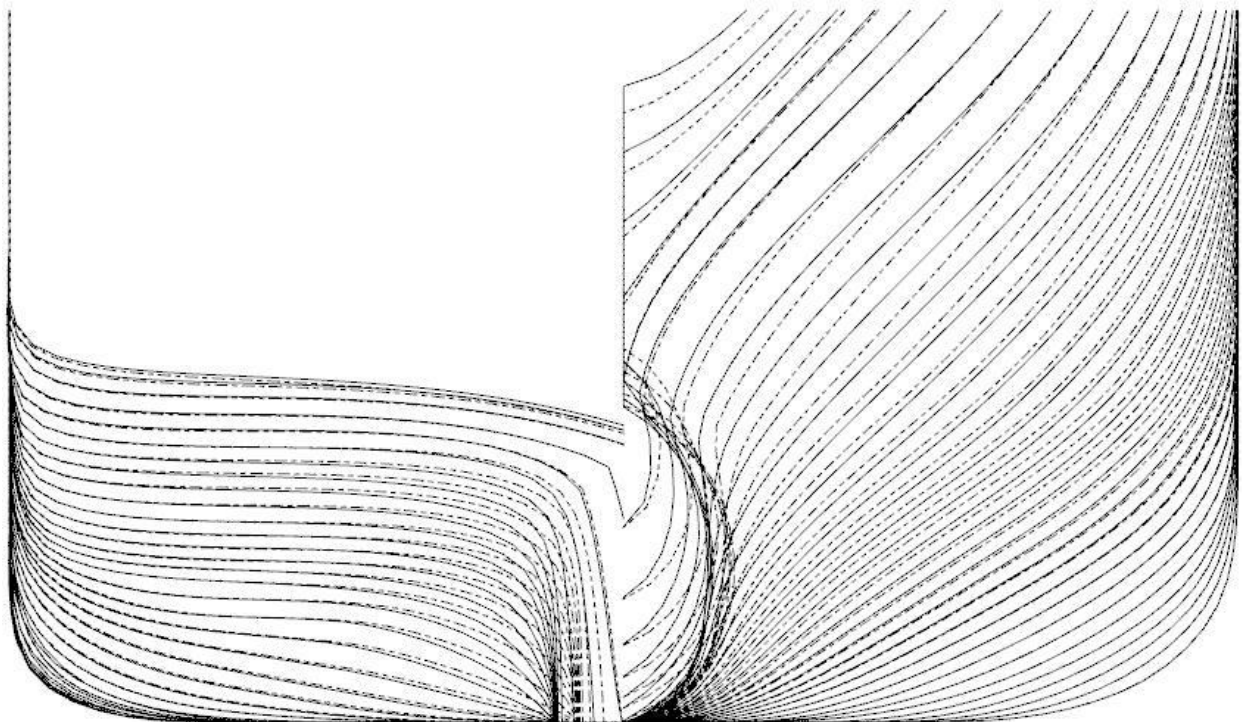
Η μορφή γάστρας που θα επιλεγεί ως βέλτιστη αυτής της διαδικασίας είναι αυτή με αύξοντα αριθμό 1555. Η γεωμετρία αυτή έχει διαφορά εκτοπίσματος και διαμήκους θέσης του κέντρου άντωσης +0.22% και +0.69% αντίστοιχα, σε σχέση με την πατρική.

Στον πίνακα 7 έχουμε τις τιμές των μεταβλητών σχεδίασης της αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας.

Μεταβλητή Σχεδίασης	Μονάδα	Αρχική Γεωμετρία	Βελτιστοποιημένη Γεωμετρία
Skeg Breadth	(m)	1.37	0.909
Transom Height from BL	(m)	6.05	5.95
Waterline Fwd fullness	(%)	0	2.91
Entrance Angle	(deg)	12.5	15.998
Bulb Length	(m)	7.6	6.947
Bulb Tip Z Position	(m)	6	6.372
Bulb Mid Crv End Angle Z	(deg)	0	31.03
Bulb Mid Crv End Angle Y	(deg)	90	62.237
Bulb Sec Aft Low Angle	(deg)	32	21.022
Bulb Sec Aft Up Angle	(deg)	153	165.09
Bulb Sec Fwd Low Angle	(deg)	25	16.532
Bulb Sec Fwd Up Angle	(deg)	145	154.04

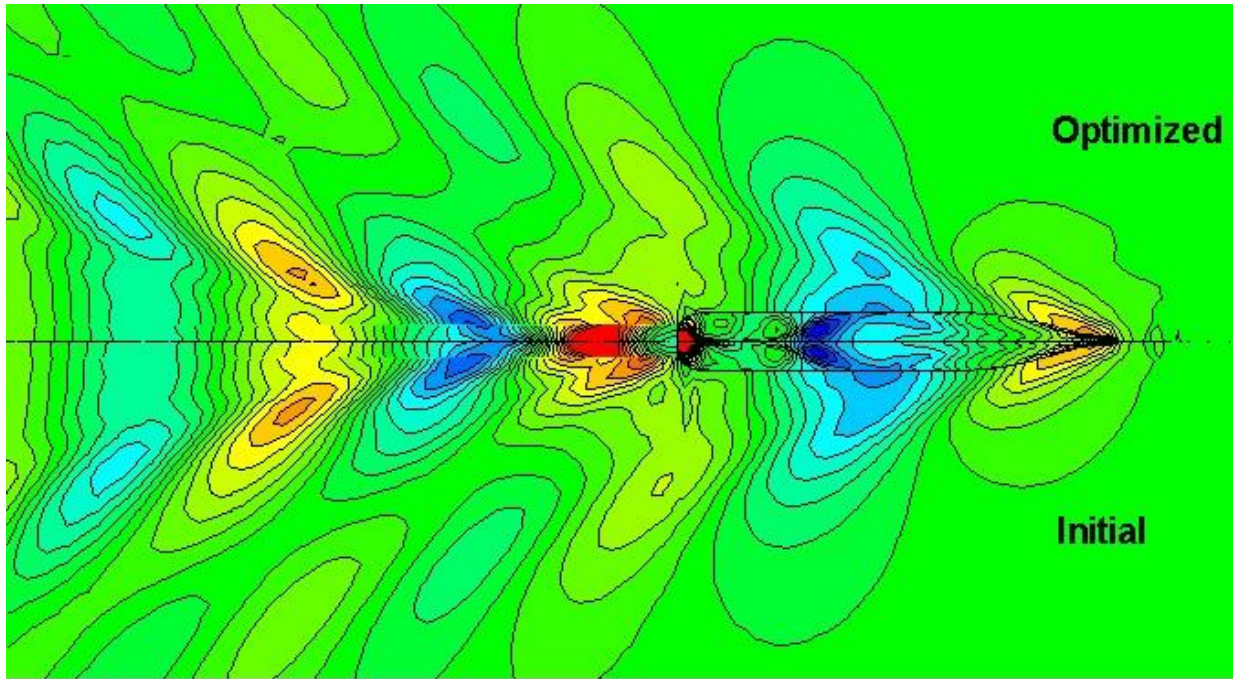
Πίνακας 7. Τιμές μεταβλητών σχεδίασης αρχική και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας από τη δεύτερη διαδικασία βελτιστοποίησης

Στο σχήμα 84 φαίνονται οι νομείς αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας ενώ στο σχήμα 85 το πεδίο των παραγόμενων κυματισμών τους.



Σχήμα 84. Νομείς αρχικής (συνεχείς καμπύλες) και βελτιστοποιημένης (διακεκομμένες καμπύλες) γεωμετρίας από τη δεύτερη διαδικασία βελτιστοποίησης

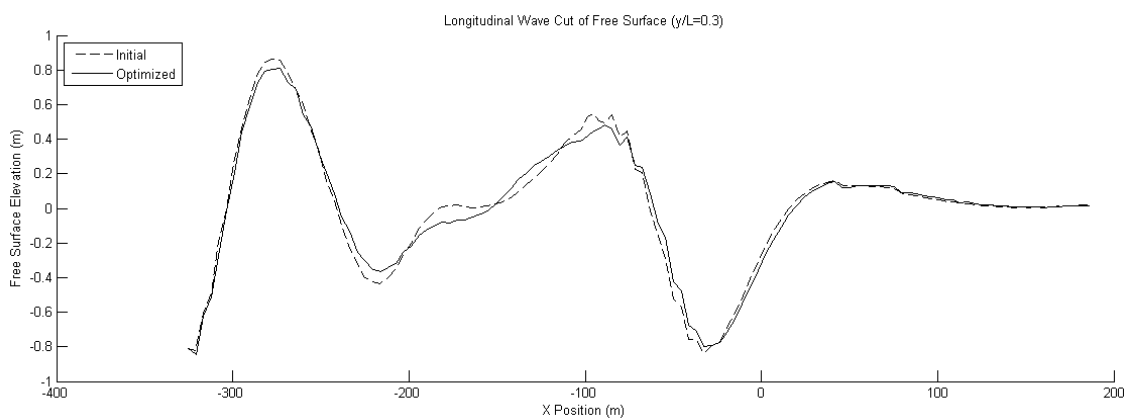
Από τους νομείς των δύο γεωμετριών βλέπουμε, όπως και στην πρώτη περίπτωση, την εμφανή διαφοροποίηση τόσο στην περιοχή του βολβού όσο και στην στους νομείς της πλώρης και της πρύμνης.



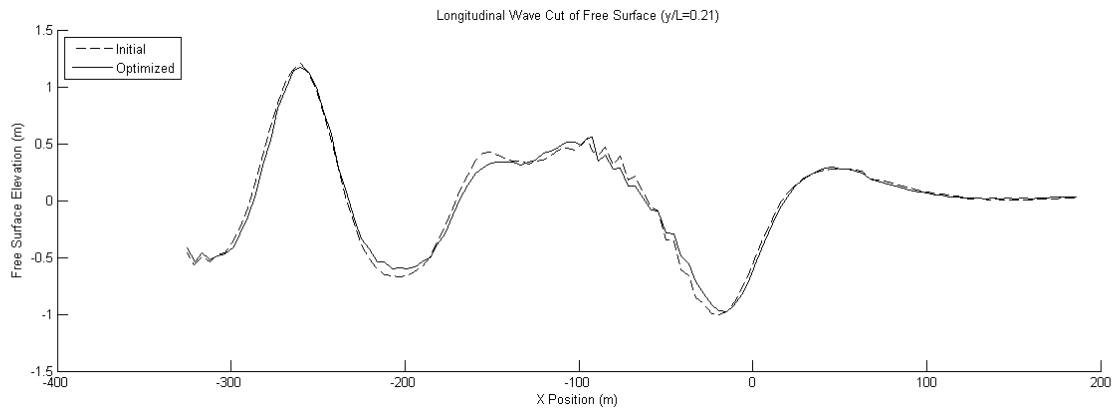
Σχήμα 85. Πεδίο παραγόμενων κυματισμών αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας από τη δεύτερη διαδικασία βελτιστοποίησης

Από τα πεδία των παραγόμενων κυματισμών βλέπουμε πως έχουμε εξομάλυνση για τη βελτιστοποιημένη γεωμετρία που εντοπίζεται κυρίως στις κορυφές. Οι μεταβολές δεν είναι ιδιαίτερα αξιόλογες ωστόσο αυτό είναι κάτι αναμενόμενο δεδομένου ότι και οι τιμές των ποσοστιαίων μειώσεων του ύψους κύματος του πίνακα 6, είναι μικρές.

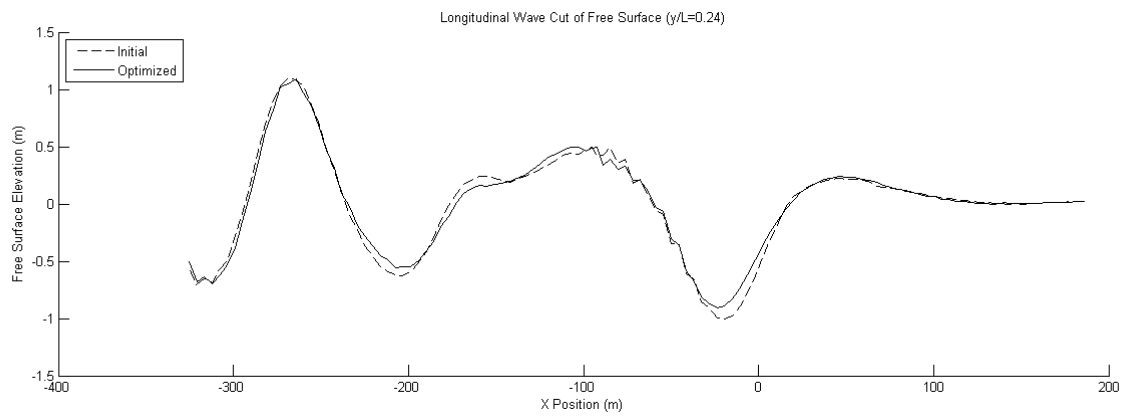
Στα σχήματα 86 ως 90 φαίνονται οι διαμήκεις τομές του συστήματος κυματισμών για όλες τις εγκάρσιες αποστάσεις που υπολογίστηκε το μέγιστο ύψος κύματος.



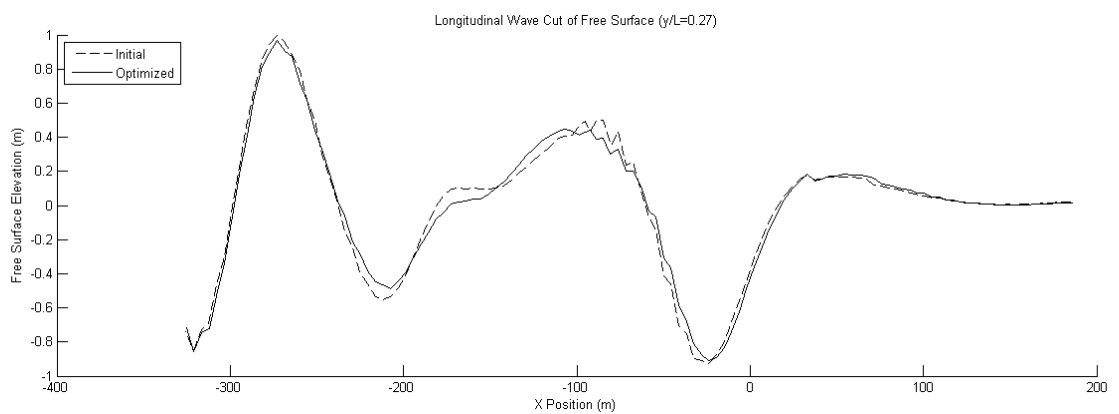
Σχήμα 86. Διαμήκεις τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.3$



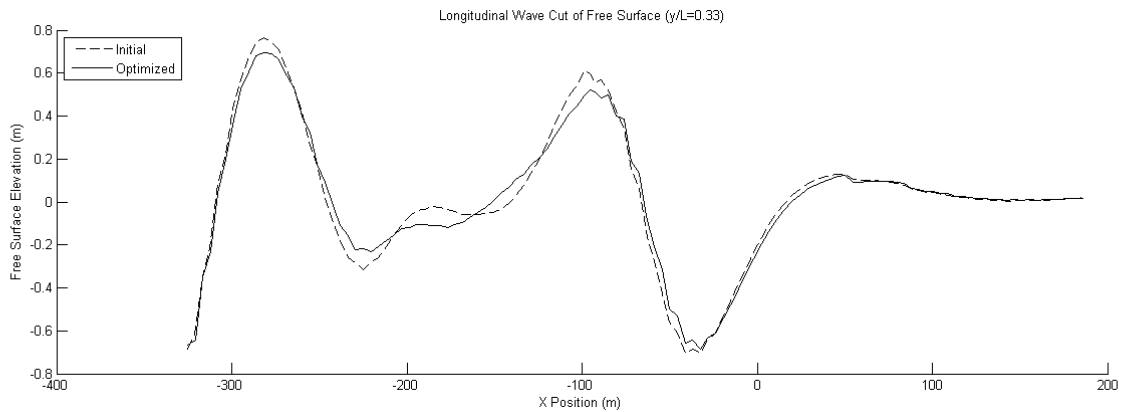
Σχήμα 87. Διαμήκειες τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.21$



Σχήμα 88. Διαμήκειες τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.24$



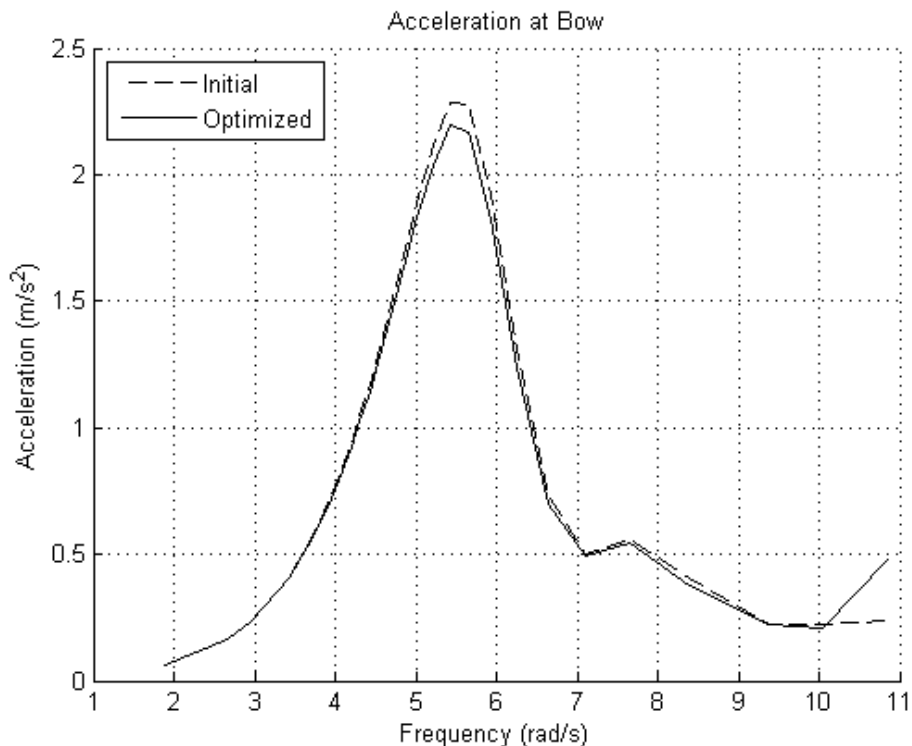
Σχήμα 89. Διαμήκειες τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.27$



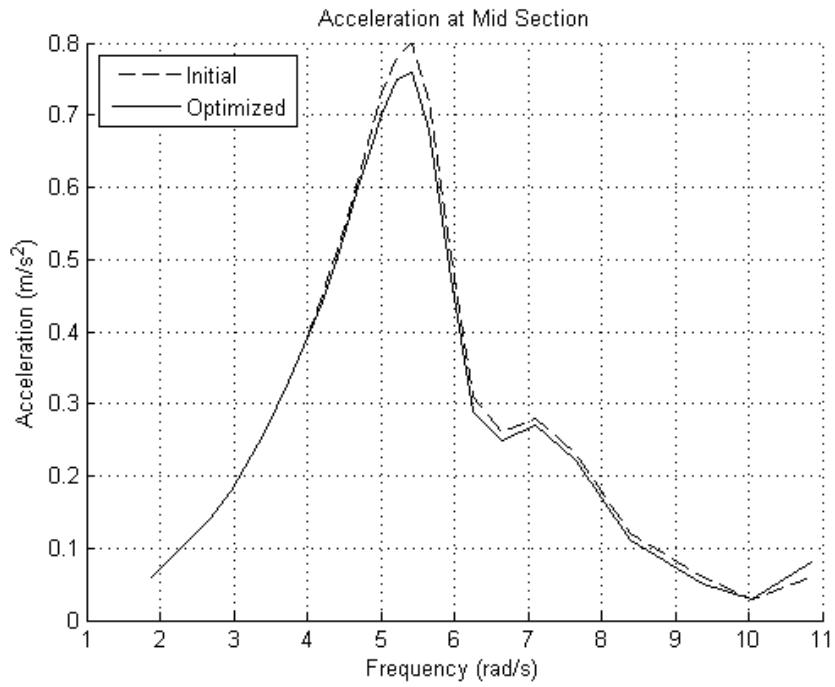
Σχήμα 90. Διαμήκειες τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.33$

Στα σχήματα 86 ως 90 βλέπουμε πως υπάρχει μικρή αλλά εμφανής βελτίωση σε όλες τις διαμήκειες τομές που παρουσιάζονται. Η μέγιστη διαφορά παρατηρείται στην τομή για $y/L = 0.33$ που φαίνεται και από τις ποσοστιαίες μεταβολές του πίνακα 5.

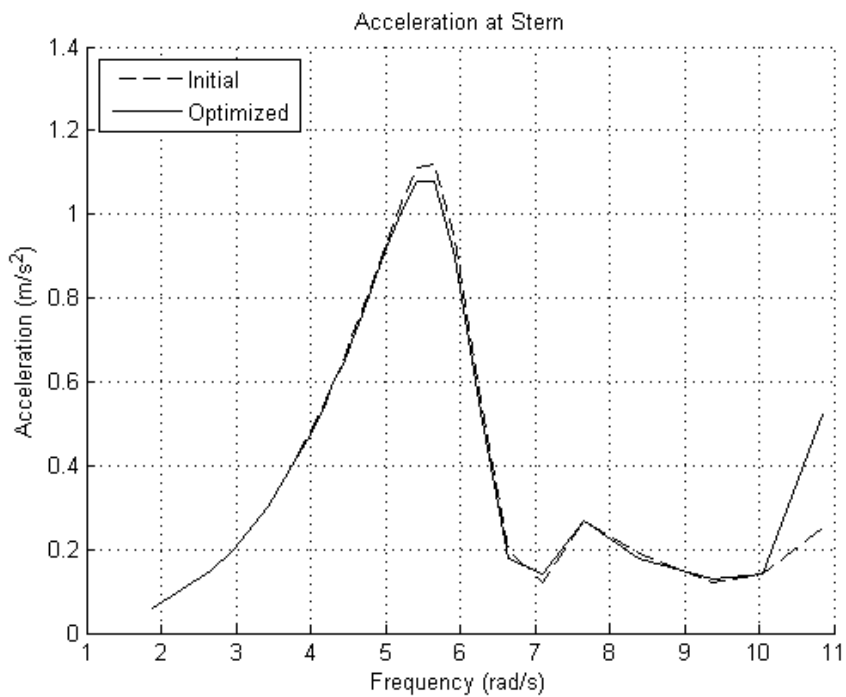
Στα σχήματα 91 ως 93 φαίνονται οι αντίστοιχες καμπύλες της επιτάχυνσης και πρόσθετης αντίστασης που παρουσιάστηκαν και στην προηγούμενη ενότητα.



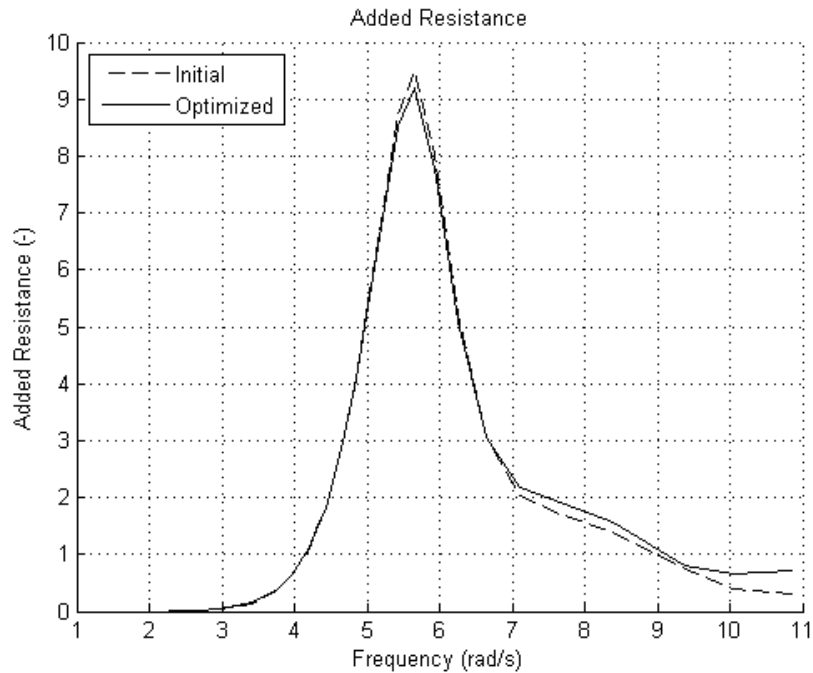
Σχήμα 91. Καμπύλες RAO επιτάχυνσης στην πλώρη αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας



Σχήμα 92. Καμπύλες RAO επιτάχυνσης στο μέσο νομέα αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας



Σχήμα 93. Καμπύλες RAO επιτάχυνσης στην πρύμνη αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας



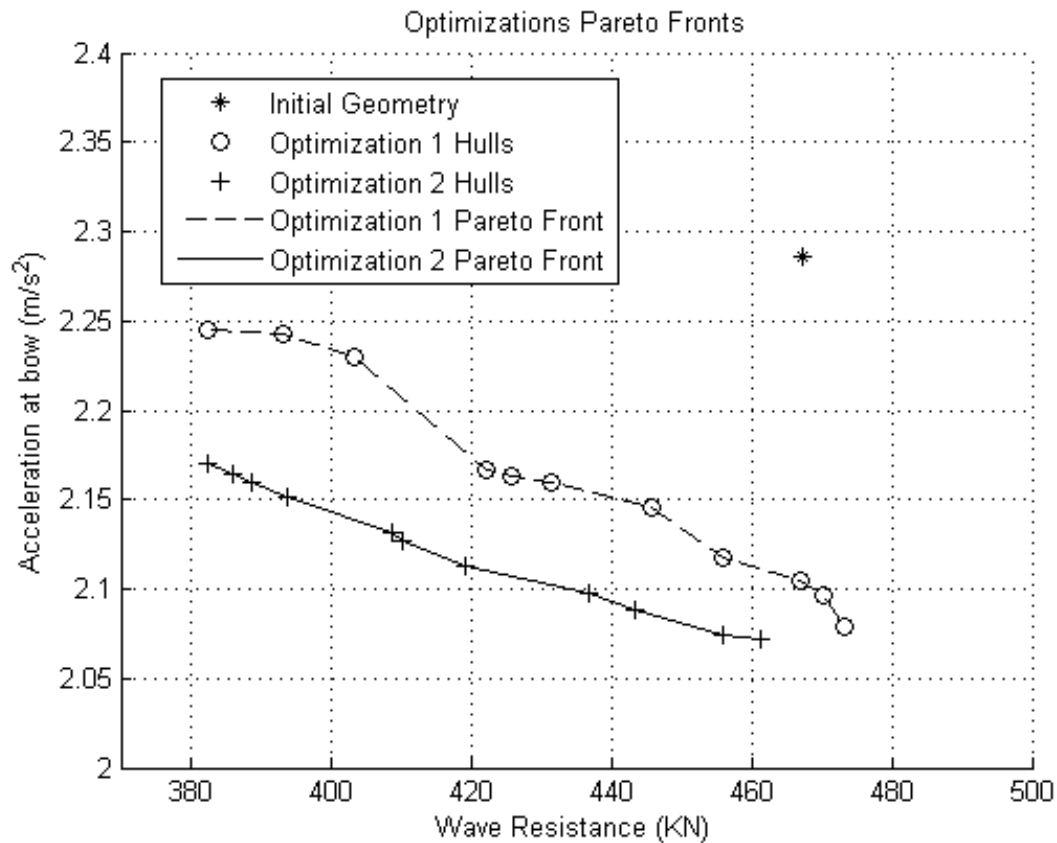
Σχήμα 94. Πρόσθετη αντίσταση αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας

Από τα σχήματα 91 ως 93 βλέπουμε πως η ελαχιστοποίηση της μέγιστης τιμής της επιτάχυνσης στην πλώρη, προκάλεσε παράλληλη μετατόπιση όλων των απεικονιζόμενων καμπυλών. Οι διαφορές σε σχέση με τη μείωση που είχαμε στη βελτιστοποίηση της προηγούμενης ενότητας είναι μικρότερες το οποίο προκύπτει άμεσα από το γεγονός πως είναι μικρότερο το ποσοστό μείωσης της σχετικής αντικειμενικής συνάρτησης που φαίνεται στον πίνακα 6.

Όσον αφορά την πρόσθετη αντίσταση δεν παρατηρείται κάποιο σημαντικό όφελος από τις καμπύλες του σχήματος 94. Συγκεκριμένα, η βελτιστοποιημένη γεωμετρία έχει 2.96% μικρότερη πρόσθετη αντίσταση από την αρχική μορφή γάστρας. Αυτό που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι στις υψηλές συχνότητες αρμονικών κυματισμών η βελτιστοποιημένη γεωμετρία έχει χειρότερες επιδόσεις από την αρχική. Προκειμένου να έχουμε όφελος συνολικά αλλά και μεγαλύτερα ποσοστά κέρδους για τις συχνότητες που έχουμε τις μέγιστες τιμές πρόσθετης αντίστασης, το μέγεθος αυτό θα πρέπει να αποτελέσει αντικειμενική συνάρτηση προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί αποτελεσματικά.

Για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων θα επιλεγεί μια γεωμετρία από τις δύο διαδικασίες βελτιστοποίησης η οποία και θα χρησιμοποιηθεί στην προσομοίωση πλεύσης με χρήση του λογισμικού STAR CCM+. Με βάση τα αποτελέσματα που έχουν παρατεθεί μέχρι τώρα είναι προφανές πως η αποδοτικότερη από τις δύο διαδικασίες είναι η δεύτερη. Ωστόσο για λόγους πληρότητας θα παρατεθεί ένα διάγραμμα στο οποίο θα γίνεται άμεση σύγκριση

των εξαγόμενων αποτελεσμάτων. Στο σχήμα 95 φαίνονται οι δύο συνοριακές καμπύλες βελτίστων που προέκυψαν από τις διαδικασίες βελτιστοποίησης των δύο προηγούμενων ενοτήτων καθώς και η αρχική γεωμετρία.



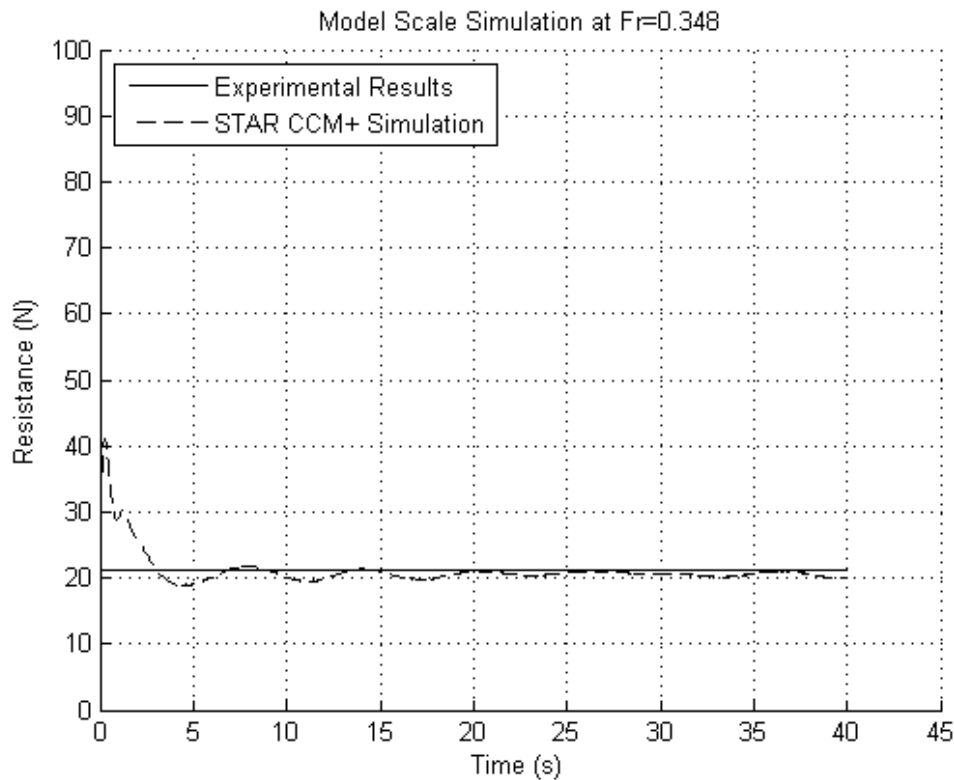
Σχήμα 95. Σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο διαδικασιών βελτιστοποίησης

Από το σχήμα 95 είναι εμφανές πως όλες οι γεωμετρίες της δεύτερης βελτιστοποίησης που ανήκουν στη συνοριακή καμπύλη βελτίστων είναι αυστηρά καλύτερες από τις αντίστοιχες της πρώτης. Όλες οι γεωμετρίες της δεύτερης έχουν τουλάχιστον μία αντικειμενική συνάρτηση με μικρότερη τιμή από όλες τις εναλλακτικές σχεδιάσεις της πρώτης. Είναι επίσης αξιοσημείωτο το γεγονός πως η διαφορά μεταξύ των δύο καμπυλών βελτίστων σε επίπεδο μεγεθών, είναι συγκρίσιμη με τη διαφορά των βελτιστοποιημένων γεωμετριών και της πατρικής μορφής γάστρας. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την αξιόλογη ποιοτική διαφορά μεταξύ των δύο μεθόδων. Η γεωμετρία που επιλέγεται προς περαιτέρω αξιολόγηση από το STAR CCM+ είναι η 1555 από τη δεύτερη βελτιστοποίηση.

6.3 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων με τη βοήθεια του STAR CCM+

Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων του STAR CCM+ θα πρέπει να γίνει μια αποτίμηση της ακρίβειας υπολογισμού της συνολικής αντίστασης από αυτό. Για την

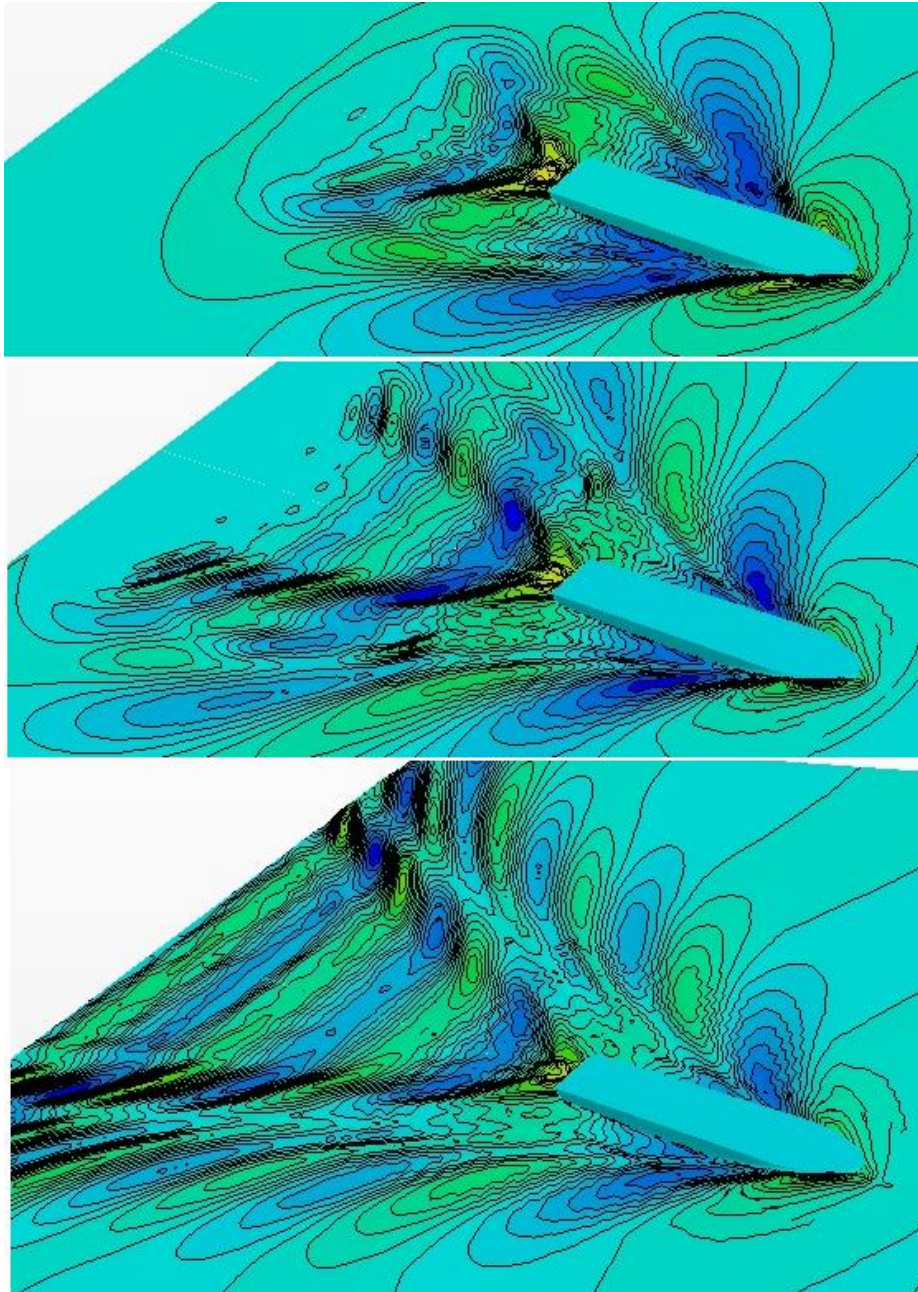
αξιολόγηση αυτής της ακρίβειας πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της πλεύσης σε κλίμακα μοντέλου της ίδιας μορφής γάστρας στην αντίστοιχη ταχύτητα που εξετάζεται και για την κλίμακα του πλοίου ($Fr=0.348$). Τα αποτελέσματά της φαίνονται στο σχήμα 96 όπου και συγκρίνονται με αυτά που έχουν προκύψει από πειραματική διαδικασία στην δεξαμενή δοκιμής προτύπων του Εργαστηρίου Αεροδυναμικής και Υδροδυναμικής ΕΜΠ.



Σχήμα 96. Σύγκριση αποτελεσμάτων αντίστασης της προσομοίωση στο STAR CCM+ με πειραματικά αποτελέσματα σε ταχύτητα $Fr=0.348$

Όπως φαίνεται από το σχήμα 96 η προσέγγιση της πραγματικής τιμής της αντίστασης με χρήση του STAR CCM+ είναι αρκετά ικανοποιητική. Η μέση απόκλιση μεταξύ των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των πειραματικών δεδομένων για την περιοχή όπου έχουμε ομαλοποίηση των τιμών της αντίστασης (25 - 40 s), είναι -2.89%. Το σφάλμα αυτό προφανώς αφορά μόνο τις δοθείσες τιμές της πειραματικής διαδικασίας. Θα πρέπει ωστόσο να σημειωθεί πως και τα αποτελέσματα ενός πειράματος υπόκεινται σε κάποια αβεβαιότητα που προκύπτει από τα σφάλματα μέτρησης των οργάνων που χρησιμοποιούνται και τα οποία δε λαμβάνονται υπόψη στη συγκριτική αξιολόγηση του σχήματος 96.

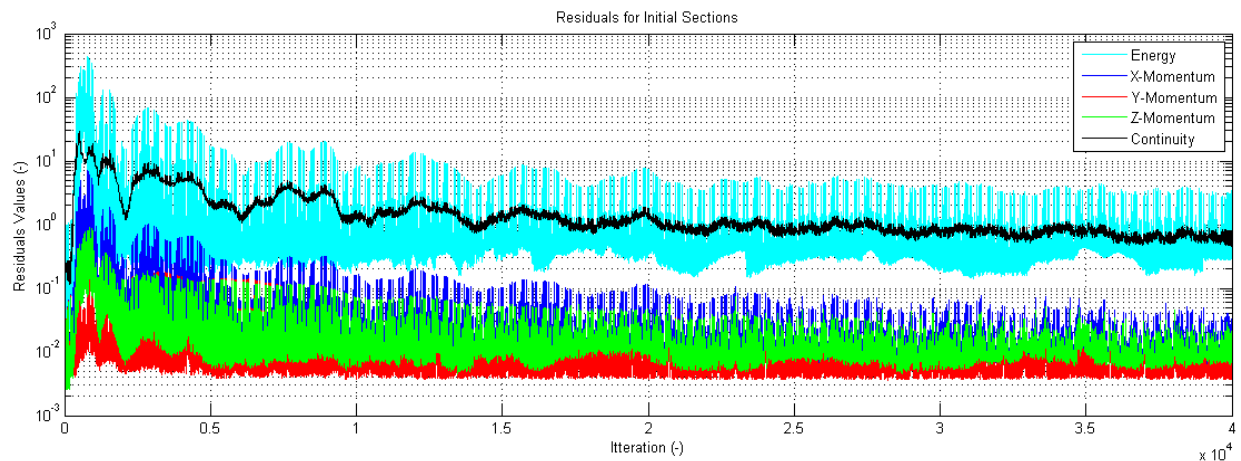
Στο σχήμα 97 φαίνεται η εξέλιξη του πεδίου των παραγόμενων κυματισμών κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης σε κλίμακα μοντέλου.



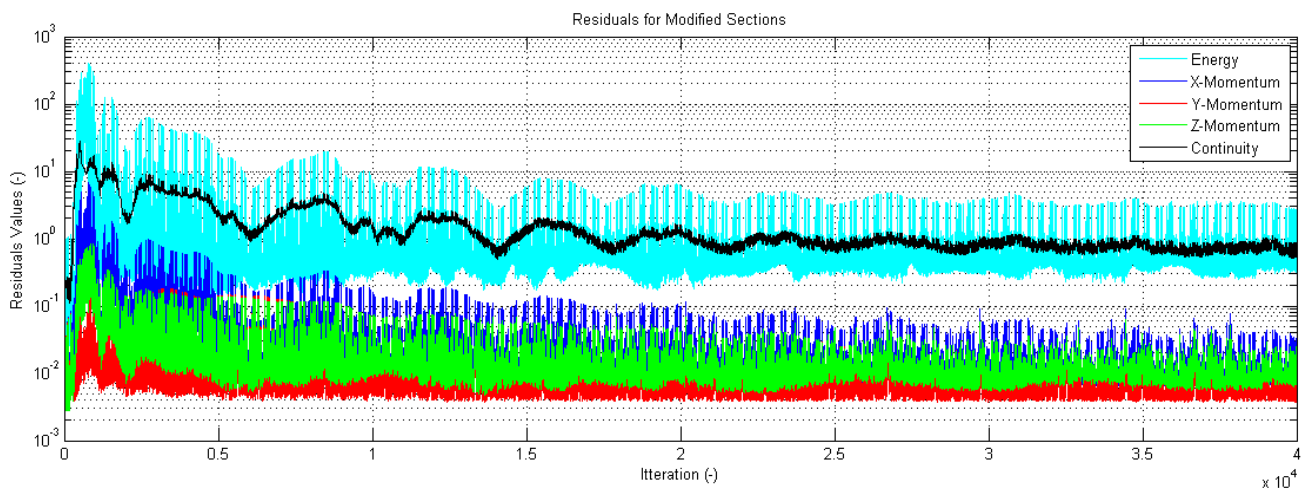
Σχήμα 97. Εξέλιξη του πεδίου των παραγόμενων κυματισμών της προσομοίωσης πλεύσης σε κλίμακα μοντέλου στο STAR CCM+ και σε ταχύτητα $Fr=0.348$

Η χρήση του λογισμικού STAR CCM+, εκτός της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης, αποσκοπεί και στην εκτίμηση της ποσοτικής επιρροής της τροποποίησης των πρυμναίων νομέων. Προς επίτευξη του τελευταίου σκοπού εκτελέστηκαν προσομοιώσεις για δύο εναλλακτικές μορφές της πατρικής γάστρας εκ των οποίων η πρώτη έχει τους αρχικούς πρυμναίους νομείς και η δεύτερη τους τροποποιημένους που προέκυψαν από τη σχετική διαδικασία βελτιστοποίησης που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2. Και στις δύο εκτελέσεις, η ροή προσομοιώθηκε ως μη

συνεκτική και αφορά την κλίμακα του πλοίου. Το χρονικό διάστημα της προσομοίωσης τέθηκε στα 200 δευτερόλεπτα και το βήμα μεταβολής του χρόνου στα 0.05 δευτερόλεπτα. Στα σχήματα 98 και 99 φαίνονται τα διαγράμματα μεταβολής των υπολοίπων των εξισώσεων ορμής ως προς τους τρεις άξονες, ενέργειας και συνέχειας ως προς την εξέλιξη των επαναλήψεων υπολογισμών. Η διακύμανση αυτών των μεγεθών καταδεικνύει την ποιότητα και ταχύτητα της σύγκλισης των υπολογισμών.



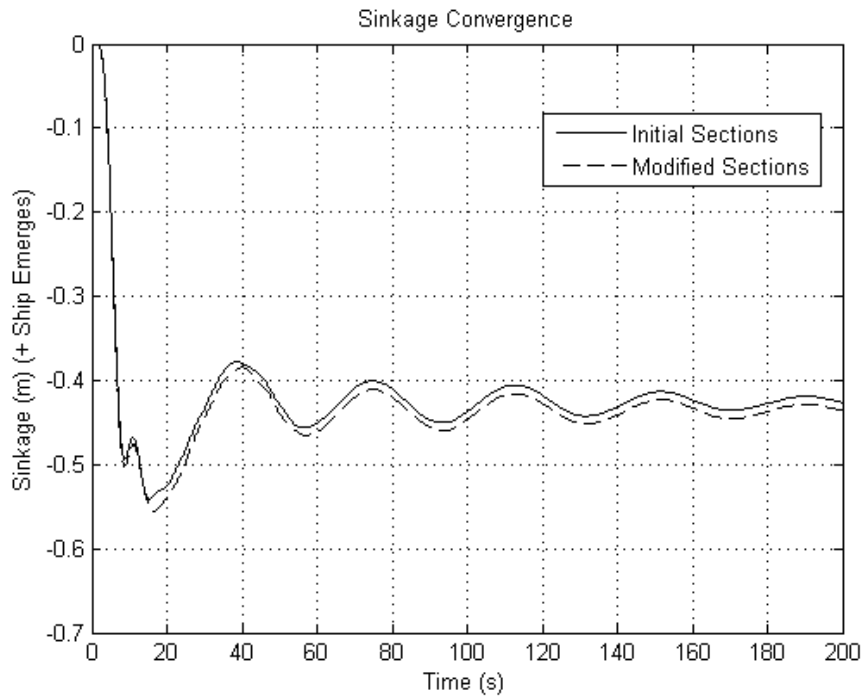
Σχήμα 98. Υπόλοιπα υδροδυναμικών εξισώσεων για προσομοίωση πλεύσης με μη συνεκτική ροή της αρχικής γεωμετρίας με τους μη τροποποιημένους νομείς



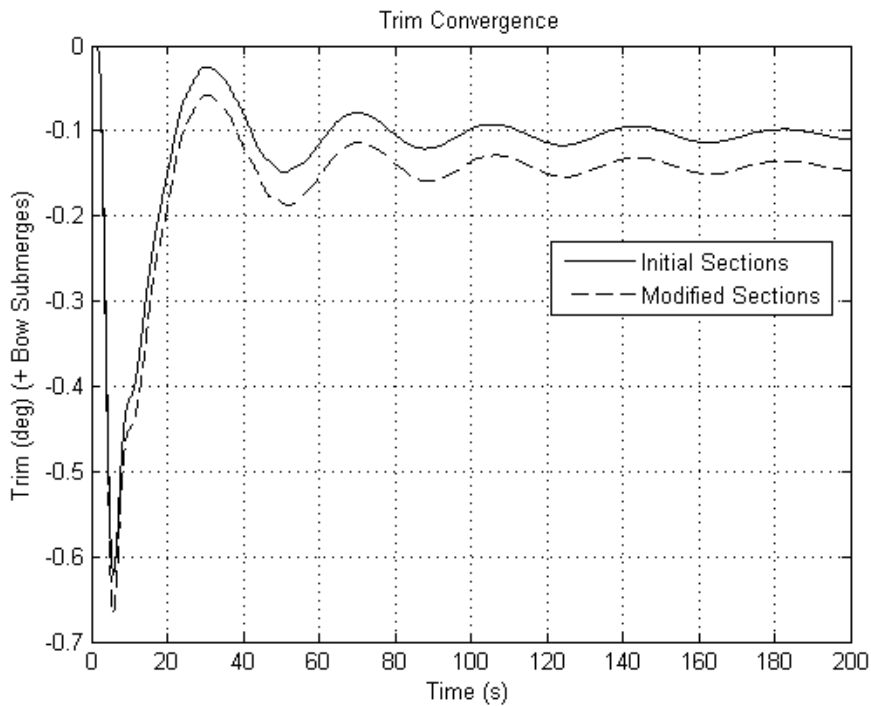
Σχήμα 99. Υπόλοιπα υδροδυναμικών εξισώσεων για προσομοίωση πλεύσης με μη συνεκτική ροή της αρχικής γεωμετρίας με τους τροποποιημένους νομείς

Από τα παραπάνω διαγράμματα βλέπουμε πως υπάρχει μια σταθεροποίηση της διακύμανσης όλων των μεγεθών και στις δύο περιπτώσεις.

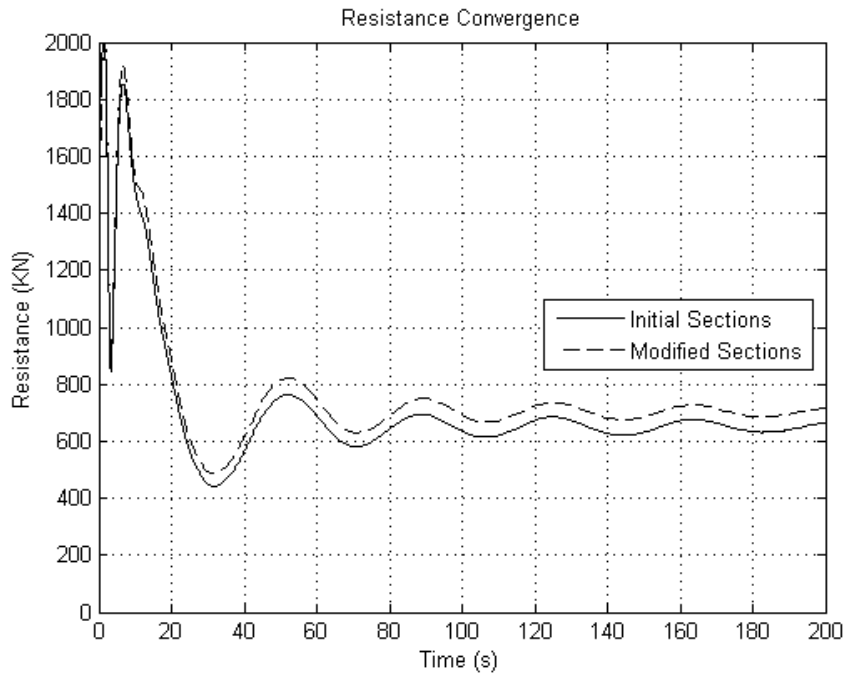
Στα διαγράμματα 100 ως 102 φαίνονται τα συγκριτικά διαγράμματα εξέλιξης στο χρόνο, των τιμών της παράλληλης βύθισης, της διαγωγής και της τιμής της αντίστασης για τις δύο περιπτώσεις.



Σχήμα 100. Εξέλιξη της τιμής της παράλληλης βύθισης για την αρχική γεωμετρία με τους τροποποιημένους και μη, πρυμναίους νομείς σε προσομοίωση της πλεύσης με μη συνεκτική ροή



Σχήμα 101. Εξέλιξη της τιμής της διαγωγής για την αρχική γεωμετρία με τους τροποποιημένους και μη, πρυμναίους νομείς σε προσομοίωση της πλεύσης με μη συνεκτική ροή

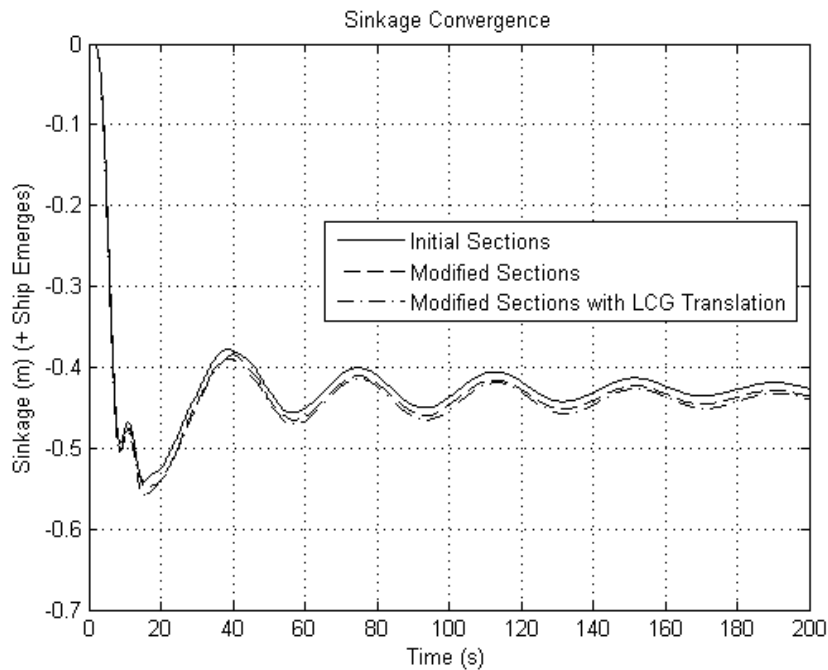


Σχήμα 102. Εξέλιξη της τιμής της αντίστασης για την αρχική γεωμετρία με τους τροποποιημένους και μη, πυρμναίους νομείς σε προσομοίωση της πλεύσης με μη συνεκτική ροή

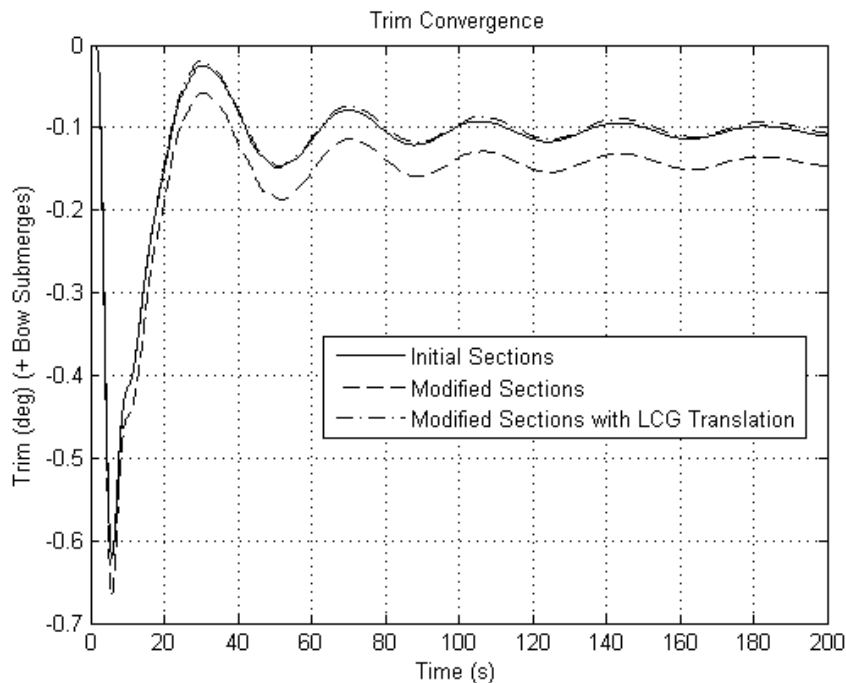
Από το τελευταίο διάγραμμα βλέπουμε πως η γεωμετρία με τους τροποποιημένους νομείς παρουσιάζει εν γένει μεγαλύτερη αντίσταση από τη μη τροποποιημένη μορφή. Λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές αντίστασης των δύο εξεταζόμενων περιπτώσεων στο τμήμα που ποιοτικά παρατηρείται μια εκκίνηση σταθεροποίησης των δύο τιμών (μετά τα 100 s), η τροποποιημένη γεωμετρία έχει περίπου 8 % μεγαλύτερη αντίσταση. Ωστόσο θα πρέπει να σημειωθεί πως αυτή η διαφορά ενδέχεται να μην οφείλεται αποκλειστικά σε γεωμετρικές διαφοροποιήσεις καθώς έχουμε επίσης διαφορές στις τιμές παράλληλης βύθισης και διαγωγής. Συγκεκριμένα, η τροποποιημένη μορφή γάστρας έχει κατά μέσον όρο 2.3 % μεγαλύτερη τιμή παράλληλης βύθισης και 36 % μεγαλύτερη τιμή διαγωγής. Οι τιμές αυτές υπολογίστηκαν με αντίστοιχο τρόπο που εφαρμόστηκε και για την τιμή της διαφοράς της αντίστασης.

Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι δεν θα προκύψουν αβεβαιότητες κατά την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης, θα πρέπει ελεγχθεί η επιρροή στην τιμή της αντίστασης, των προαναφερθέντων διαφοροποιήσεων και κυρίως της διαγωγής. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε μια επιπλέον προσομοίωση της τροποποιημένης μορφής γάστρας με μετακίνηση του κέντρου βάρους κατά 0.2% πρόωραθεν ούτως ώστε να προσεγγιστεί η τιμή της διαγωγής που αποκτά η μη τροποποιημένη μορφή γάστρας. Στα σχήματα 103 ως 105 φαίνονται τα διαγράμματα παράλληλης βύθισης, διαγωγής και

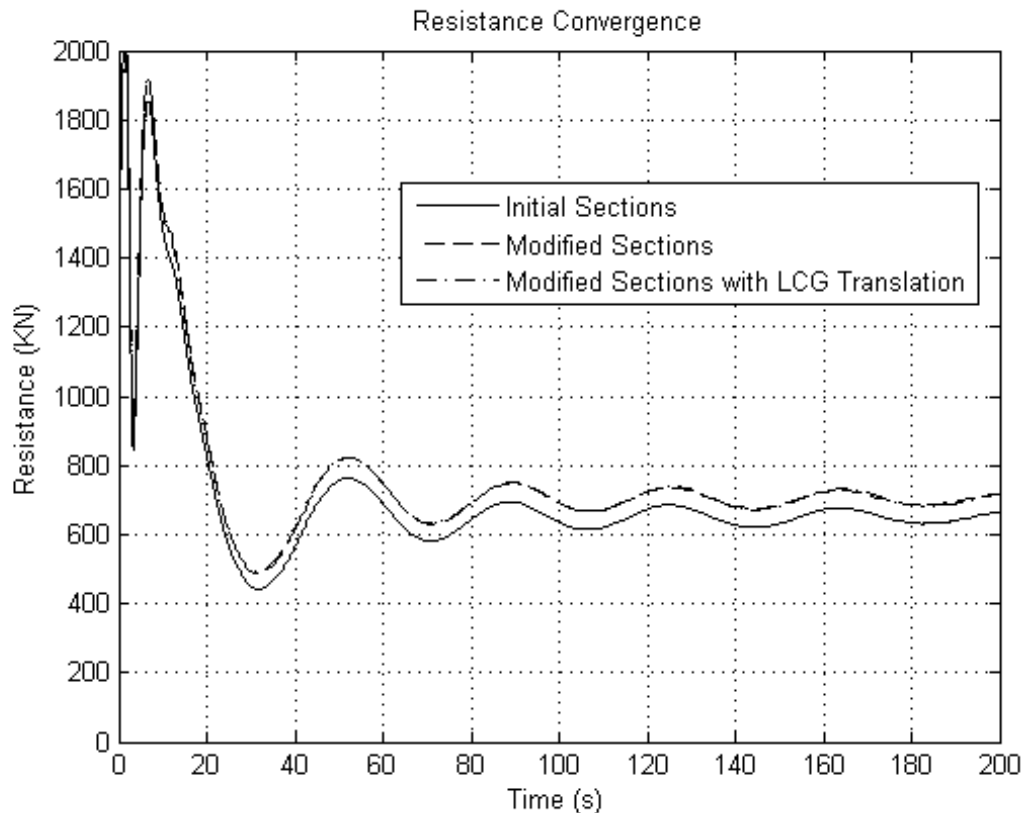
αντίστασης για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις μορφών γάστρας. Η προσομοίωση της πλεύσης πραγματοποιήθηκε στο STAR CCM+ με τις ίδιες ακριβώς συνθήκες.



Σχήμα 103. Εξέλιξη της τιμής της παράλληλης βύθισης εναλλακτικών μορφών γάστρας της αρχικής γεωμετρίας σε προσομοίωση της πλεύσης με μη συνεκτική ροή



Σχήμα 104. Εξέλιξη της τιμής της διαγωγής εναλλακτικών μορφών γάστρας της αρχικής γεωμετρίας σε προσομοίωση της πλεύσης με μη συνεκτική ροή

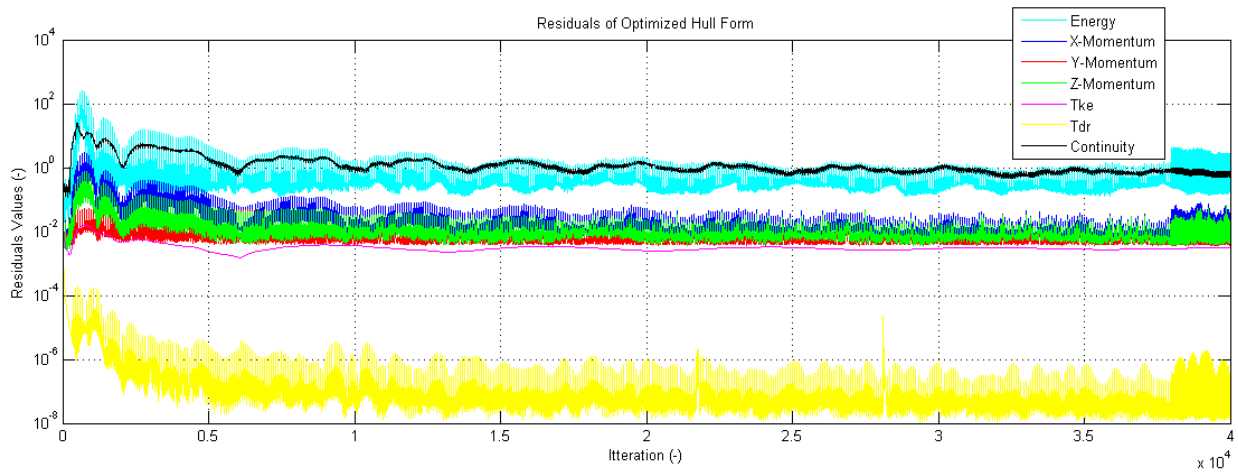


Σχήμα 105. Εξέλιξη της τιμής της αντίστασης εναλλακτικών μορφών γάστρας της αρχικής γεωμετρίας σε προσομοίωση της πλεύσης με μη συνεκτική ροή

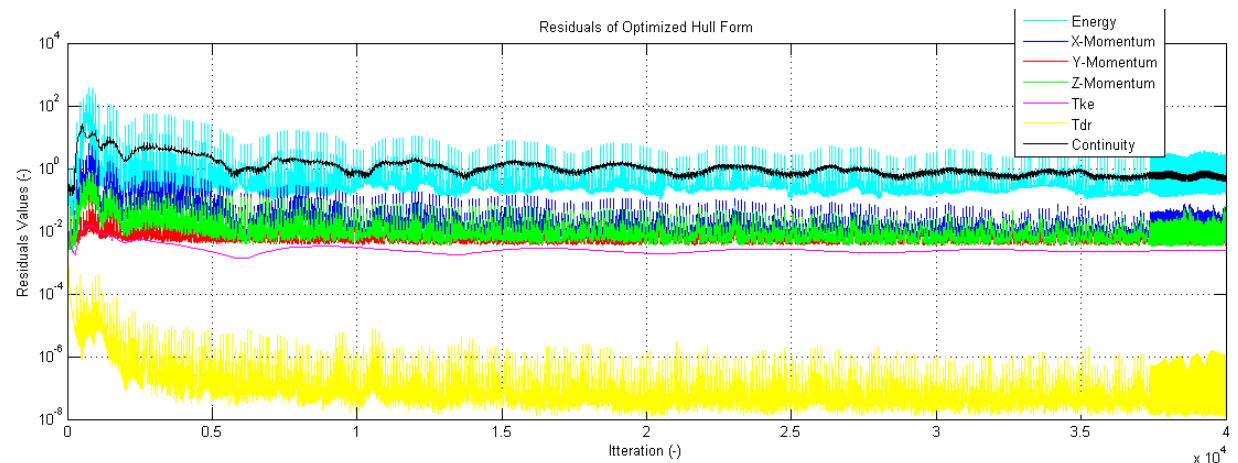
Από το διάγραμμα στο οποίο φαίνεται η εξέλιξη της τιμής της παράλληλης βύθισης, όπως αναμενόταν, έχουμε αντίστοιχη εξέλιξη των τιμών των δύο εναλλακτικών μορφών της αρχικής γεωμετρίας. Αντίθετα, από το διάγραμμα εξέλιξης της διαγωγής βλέπουμε πως η τιμές της τροποποιημένης γεωμετρίας στην οποία μετατοπίστηκε το κέντρο βάρους, έχουν αντίστοιχη εξέλιξη με αυτή της περίπτωσης της μη τροποποιημένης μορφής γάστρας, κάτι που ήταν και ο σκοπός της μετακίνησής του. Ωστόσο, από το διάγραμμα της αντίστασης βλέπουμε πως οι δύο τροποποιημένες γεωμετρίες έχουν σχεδόν ταυτόσημες τιμές σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης. Το συμπέρασμα λοιπόν είναι πως η τιμή της αντίστασης εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από τη διαφοροποίηση της μορφής της γάστρας λόγω της τροποποίησης των πρυμναίων νομέων, και όχι από τις επαγόμενες διακυμάνσεις των τιμών παράλληλης βύθισης και διαγωγής που αυτή προκαλεί στις συγκεκριμένες προσομοιώσεις και στο βαθμό που συμβαίνουν.

Στη συνέχεια θα παρατεθούν τα σχήματα που αφορούν τη συγκριτική διαδικασία της αρχικής μορφής γάστρας με τη βελτιστοποιημένη γεωμετρία 1555 που επιλέχθηκε στην προηγούμενη ενότητα με προσομοίωση της ροής ως τυρβώδους. Στα σχήματα 106 και 107 φαίνονται τα υπόλοιπα των υδροδυναμικών εξισώσεων που αναφέρθηκαν

προηγούμενα. Στα σχήματα αυτά έχουμε δύο επιπλέον εξισώσεις που αφορούν το μοντέλο τύρβης που υφίσταται μόνο σε αυτή την περίπτωση προσομοίωσης.

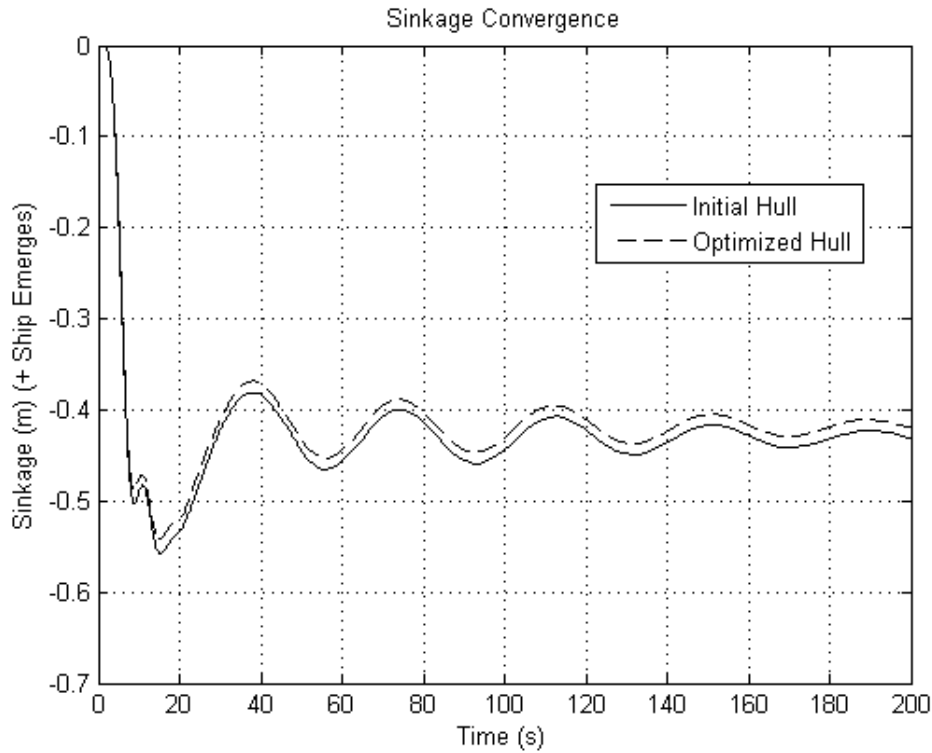


Σχήμα 106. Υπόλοιπα υδροδυναμικών εξισώσεων για προσομοίωση πλεύσης με τυρβώδη ροή της αρχικής γεωμετρίας

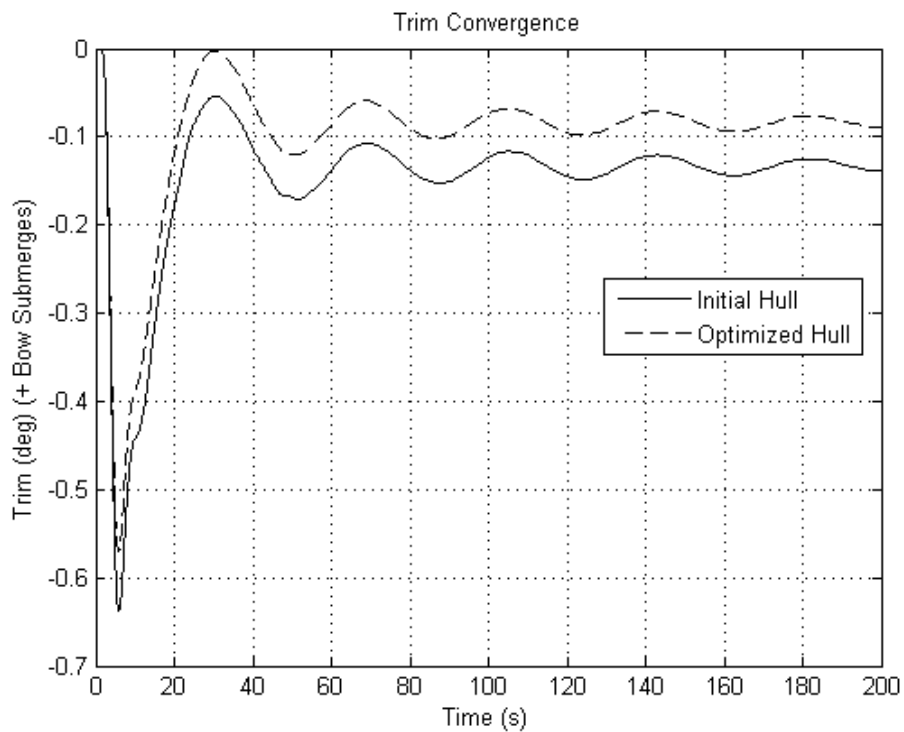


Σχήμα 107. Υπόλοιπα υδροδυναμικών εξισώσεων για προσομοίωση πλεύσης με τυρβώδη ροή της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας

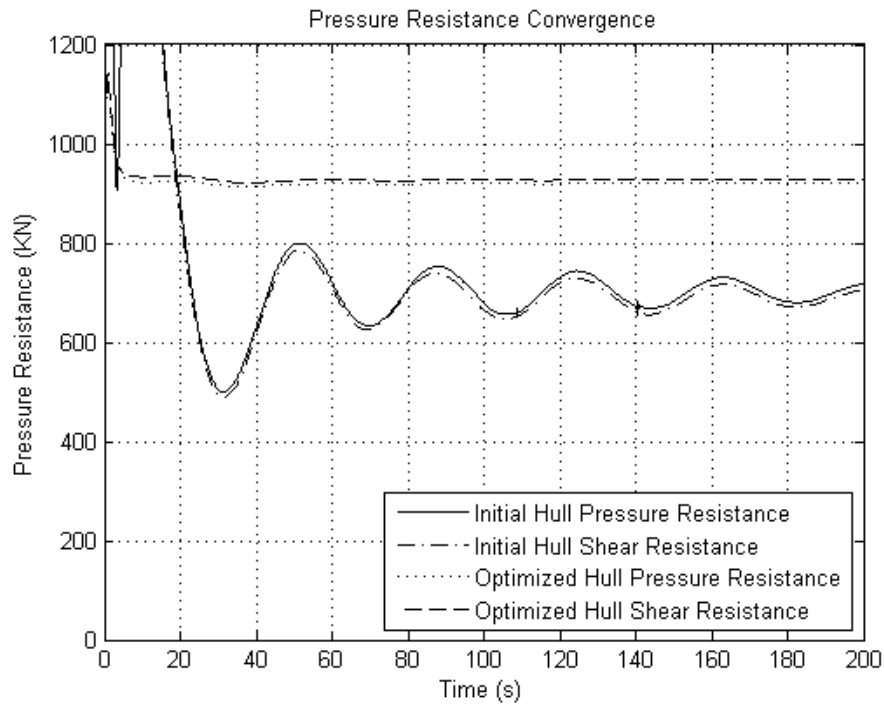
Στα δύο παραπάνω σχήματα βλέπουμε πως έχουμε εξομάλυνση των τιμών των υπολοίπων των υδροδυναμικών εξισώσεων κι επομένως η σύγκλιση θεωρείται πως βαίνει ομαλώς. Στα σχήματα 108 ως 111 φαίνονται από κοινού τα αποτελέσματα των δύο προσομοιώσεων προκειμένου να μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση μεταξύ τους.



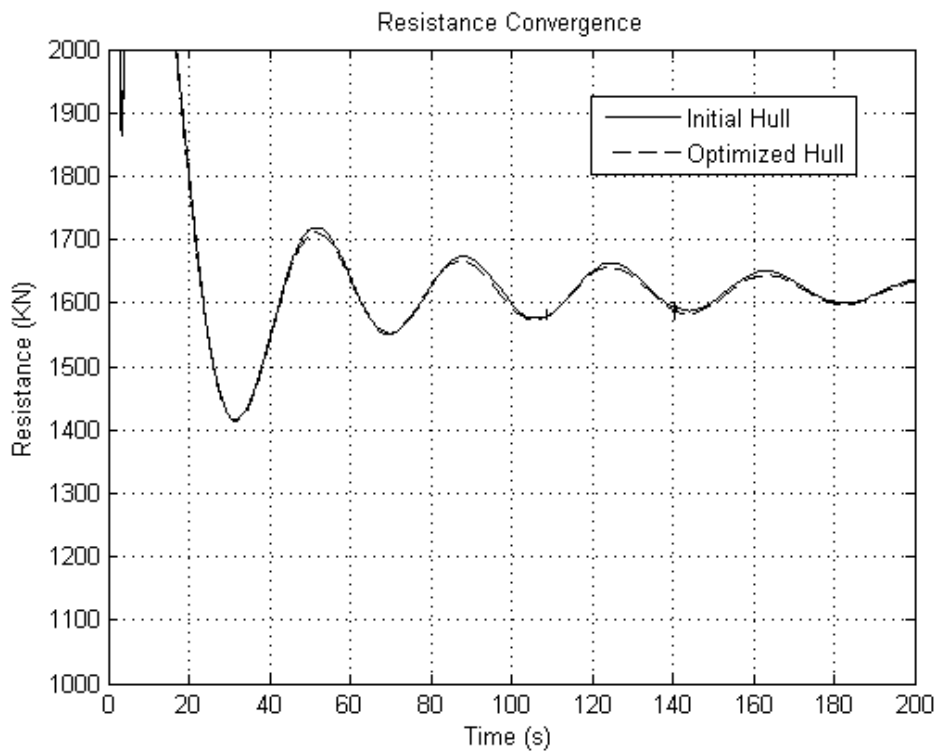
Σχήμα 108. Εξέλιξη της τιμής της παράλληλης βύθισης για προσομοίωση πλεύσης με τυρβώδη ροή της αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας



Σχήμα 109. Εξέλιξη της τιμής της διαγωγής για προσομοίωση πλεύσης με τυρβώδη ροή της αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας



Σχήμα 110. Εξέλιξη της τιμής της αντίστασης πίεσης και τριβής για προσομοίωση πλεύσης με τυρβώδη ροή της αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας



Σχήμα 111. Εξέλιξη της τιμής της αντίστασης πίεσης και τριβής για προσομοίωση πλεύσης με τυρβώδη ροή της αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας

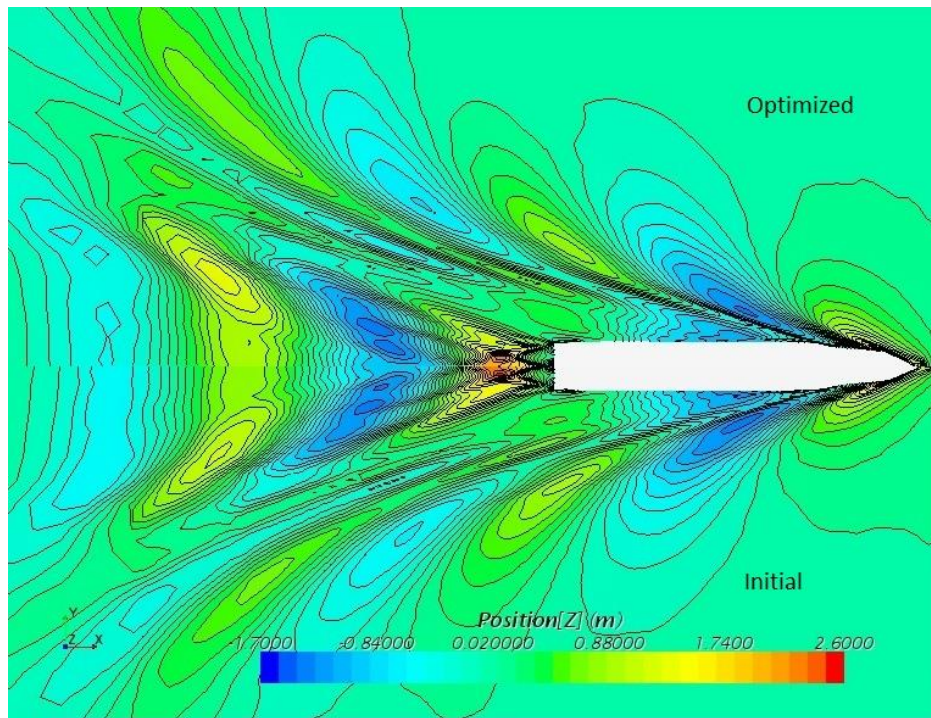
Από τα σχήματα 108 και 109 βλέπουμε πως η βελτιστοποιημένη γεωμετρία έχει ελαφρώς μικρότερη παράλληλη βύθιση και σημαντικά μικρότερη διαγωγή. Τα δεδομένα αυτά δεν προσθέτουν από μόνα τους κάποια πληροφορία αλλά είναι σημαντικά αν συμπεριληφθούν στην αξιολόγηση των επιδόσεων αντίστασης. Στα σχήματα 110 και 111 βλέπουμε την εξέλιξη των τιμών αντίστασης πίεσης και τριβής καθώς και της συνολικής. Το πρώτο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από τα σχήματα αυτά είναι πως δεν έχουμε επίτευξη σημαντικής βελτίωσης των επιδόσεων αντίστασης για την επιλεγείσα γεωμετρία και πάντως σε καμία περίπτωση αντίστοιχου βαθμού με αυτή που αναμενόταν βάσει των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης.

Συγκεκριμένα η βελτιστοποιημένη γεωμετρία έχει περίπου 1.6% μικρότερη αντίσταση πίεσης, 0.79% μεγαλύτερη αντίσταση τριβής και 0.24% μικρότερη τιμή συνολικής αντίστασης. Τα ποσοστά αυτά εκτός του γεγονότος πως είναι αμελητέα, είναι από μικρότερα ως υποπολλαπλάσια του εκτιμώμενου πιθανού σφάλματος της προσομοίωσης.

Θα πρέπει να σημειωθεί πως η αντίσταση πίεσης που φαίνεται στο διάγραμμα 106, περιλαμβάνει τόσο την αντίσταση κυματισμού όσο και την αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας η οποία προφανώς δεν υπολογίζεται στις προσομοιώσεις της βελτιστοποίησης. Με βάση τα αποτελέσματα της αρχικής μορφής γάστρας σε τυρβώδη και μη συνεκτική ροή προκύπτει πως η αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας αποτελεί περίπου το 8% της αντίστασης πίεσης. Κατ' επέκταση αυτή η συνιστώσα της αντίστασης δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να αποτελεί το αίτιο της αναντιστοιχίας αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο λογισμικών και γι' αυτό το λόγο δεν διερευνάται περαιτέρω η συνεισφορά της στα αποτελέσματα.

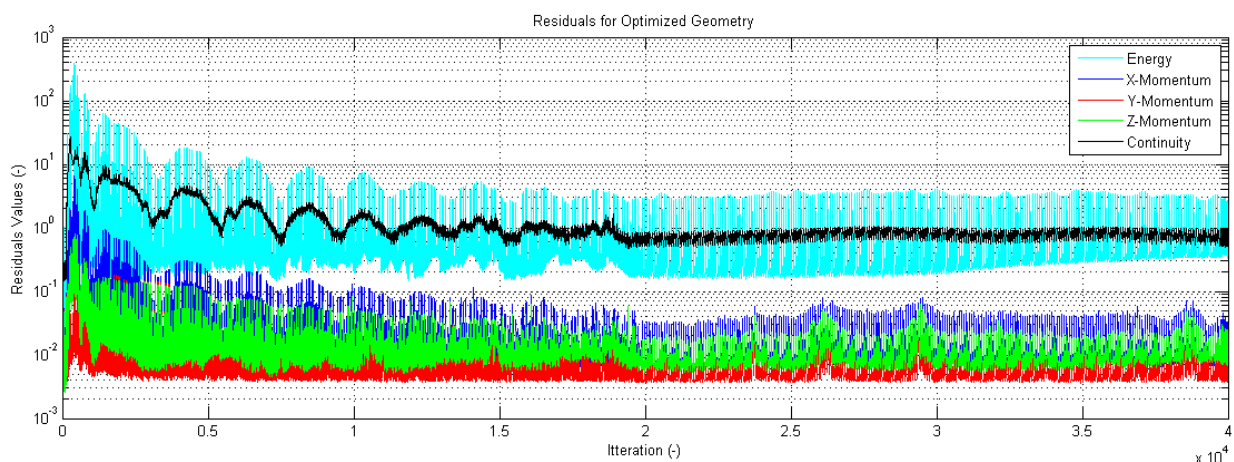
Με βάση τα παραπάνω, τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης με χρήση του λογισμικού υπολογισμού της αντίστασης κυματισμού δεν επιβεβαιώνονται από αυτά που προκύπτουν με χρήση του λογισμικού υπολογισμού της συνολικής αντίστασης STAR CCM+.

Στο σχήμα 112 φαίνονται τα πεδία των παραγόμενων κυματισμών αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας κατά την προσομοίωση σε τυρβώδη ροή. Όπως φαίνεται από το σχήμα αυτό τα δύο πεδία κυματισμών δεν διαφέρουν ιδιαίτερα. Στην περίπτωση της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας παρατηρείται μια ελαφρά εξομάλυνση στους αποκλίνοντες κυματισμούς σε σχέση με την αρχική, ωστόσο επιδεινώση παρατηρείται στο πεδίο των ακολουθούντων. Είναι αξιοσημείωτο πως οι ακολουθούντες κυματισμοί επηρεάζονται σημαντικά από τα συνεκτικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή της πρύμνης και δε λαμβάνονται υπόψη από τη δυναμική θεωρία που χρησιμοποιήθηκε στη διαδικασία βελτιστοποίησης.



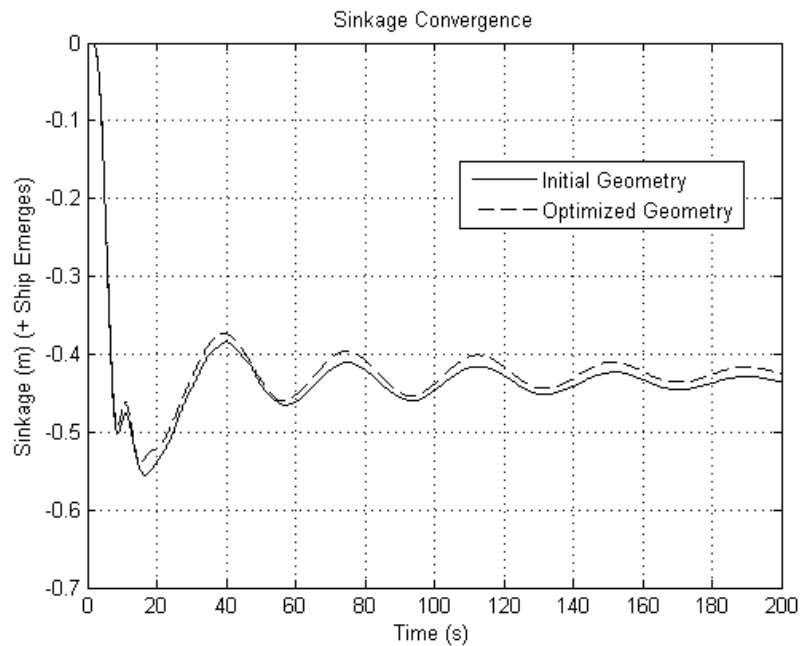
Σχήμα 112. Πεδίο παραγόμενων κυματισμών αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας από την προσομοίωση στο STAR CCM+

Προς περαιτέρω αξιολόγησης αυτών των αποτελεσμάτων θα παρατεθούν τα συγκριτικά αποτελέσματα της προσομοίωσης της πλεύσης αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε μη συνεκτική ροή ούτως ώστε να εξαλειφθούν οι επιρροές στο αποτέλεσμα της αντίστασης τριβής και πίεσης λόγω συνεκτικότητας. Στο σχήμα 113 φαίνεται η εξέλιξη των υπολοίπων των υδροδυναμικών εξισώσεων για τη βελτιστοποιημένη γεωμετρία. Τα συγκριτικά σχήματα 114 ως 116 αφορούν τις δύο γεωμετρίες με τους τροποποιημένους πρυμναίους νομείς προκειμένου να προσεγγιστεί το υδροδυναμικό πρόβλημα που επιλύθηκε με χρήση του SWAN 2.

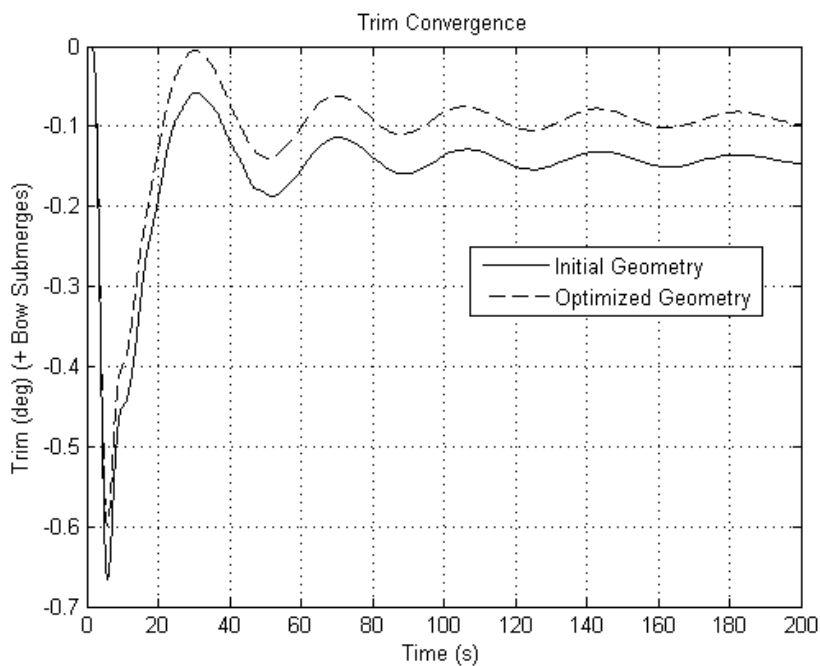


Σχήμα 113. Υπόλοιπα υδροδυναμικών εξισώσεων για προσομοίωση πλεύσης με μη συνεκτική ροή της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας με τους τροποποιημένους νομείς

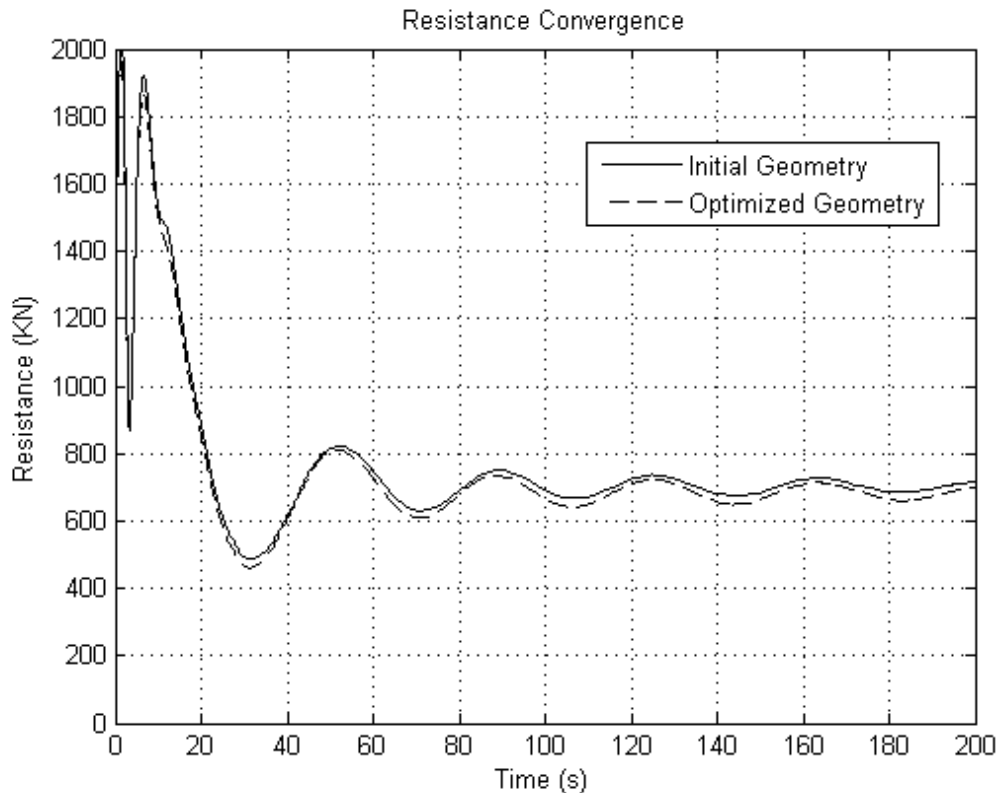
Από το σχήμα 113 βλέπουμε πως και σε αυτή την περίπτωση έχουμε σταθεροποίηση των υπολοίπων των υδροδυναμικών εξισώσεων κι επομένως έχουμε σύγκλιση της προσομοίωσης.



Σχήμα 114. Εξέλιξη της τιμής της παράλληλης βύθισης για την αρχική και βελτιστοποιημένη γεωμετρία με τους τροποποιημένους πρυμναίους νομείς σε προσομοίωση της πλεύσης με μη συνεκτική ροή



Σχήμα 115. Εξέλιξη της τιμής της παράλληλης βύθισης για την αρχική και βελτιστοποιημένη γεωμετρία με τους τροποποιημένους πρυμναίους νομείς σε προσομοίωση της πλεύσης με μη συνεκτική ροή



Σχήμα 116. Εξέλιξη της τιμής της παράλληλης βύθισης για την αρχική και βελτιστοποιημένη γεωμετρία με τους τροποποιημένους πρυμναίους νομείς σε προσομοίωση της πλεύσης με μη συνεκτική ροή

Από τα σχήματα 114 και 115 βλέπουμε πως η βελτιστοποιημένη γεωμετρία έχει λίγο μικρότερη παράλληλη βύθιση και αρκετά μικρότερη εμπρυμνη διαγωγή. Από το σχήμα 116 βλέπουμε πως η τιμή της αντίστασης κυματισμού είναι ελαφρώς μικρότερη για τη βελτιστοποιημένη γεωμετρία, και συγκεκριμένα κατά περίπου 2,86%. Το όφελος στην τιμή της αντίστασης αν και είναι μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα της αντίστασης πίεσης και της συνολικής, δεν είναι σημαντικό και κυρίως δεν κινείται σε ασφαλή πλαίσια αν συγκριθεί με το εκτιμώμενο σφάλμα της προσομοίωσης.

Η συνολική λοιπόν αποτίμηση είναι πως τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης δεν επιβεβαιώνονται από καμία από τις προσομοιώσεις στο λογισμικό STAR CCM+. Θα πρέπει ωστόσο να σημειωθεί πως τα SWAN 2 και STAR CCM+ χρησιμοποιούν πολύ διαφορετικές διαδικασίες υπολογισμών και διακριτοποίησης του υπολογιστικού χώρου. Οι διαφορετικές προσεγγίσεις των δύο λογισμικών θα αναλυθούν στην επόμενη ενότητα όπου θα γίνει προσπάθεια αποτίμησης της αναντιστοιχίας των αποτελεσμάτων τους.

6.4 Σύνοψη και Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία έγινε μελέτη της υδροδυναμικής συμπεριφοράς ενός ταχέως Ε/Γ-ΟΓ πλοίου εκτοπίσματος τόσο σε ήρεμο νερό όσο και σε κυματισμούς. Σκοπός της υδροδυναμικής μελέτης αποτέλεσε η προσπάθεια βελτίωσης των επιδόσεων της γάστρας από πλευράς αντίστασης σε ήρεμο νερό και συμπεριφοράς κατά την πλεύση του σε κυματισμούς.

Για τις ανάγκες της προαναφερθείσας διαδικασίας, αρχικά σχεδιάστηκε παραμετρικά μια δοθείσα μορφή γάστρας ώστε ένας περιορισμένος αριθμός μεταβλητών σχεδίασης να επηρεάζει στο μέγιστο δυνατό βαθμό τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της που επηρεάζουν άμεσα τα κριτήρια με βάση τα οποία αξιολογείται η υδροδυναμική της επίδοση. Κατά την επιλογή των μεταβλητών αυτών αποκλείστηκαν οι περιπτώσεις του μήκους και πλάτους του πλοίου προκειμένου οι γεωμετρικές μεταβολές που επηρεάζουν τη μορφή της γάστρας να περιοριστούν σε συγκεκριμένες περιοχές χωρίς να μεταβάλλονται οι κύριες διαστάσεις του.

Η παραμετρική σχεδίαση υλοποιήθηκε στο λογισμικό CAESES-Friendship Framework, με συνδυασμό των σχεδιαστικών εργαλείων του και μιας τεχνικής ακριβούς παραμετρικής αναπαράστασης δοθέντων καμπυλών με B-Splines. Η τεχνική αυτή βασίζεται στην αποδοτική συνεργασία ενός αλγορίθμου βελτιστοποίησης με ένα λογισμικό παρεμβολής σημείων από καμπύλες B-Spline που δημιουργήθηκε από τον συντάκτη σε γλώσσα προγραμματισμού Visual C++. Το αποτέλεσμα της παραμετρικής σχεδίασης είναι μια γάστρα που προσεγγίζει με ακρίβεια την δοθείσα μη παραμετρική μορφή, κι εξαρτάται από 12 συνολικά μεταβλητές σχεδίασης των οποίων οι τιμές διακυμαίνονται εντός ενός εύρους. Από την τυχαία διακύμανση των μεταβλητών σχεδίασης προκύπτουν διαφορετικές μορφές γάστρας προκειμένου να αναζητηθεί η μορφή εκείνη που συνολικά είναι αποδοτικότερη από την αρχική.

Η υδροδυναμική αξιολόγηση των εναλλακτικών μορφών υλοποιήθηκε με τρία διαφορετικά λογισμικά. Για τις ανάγκες της βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα SWAN 2 και SPP-86 για την εκτίμηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς των γεωμετριών, από πλευράς αντίστασης σε ήρεμο νερό και απόκρισης σε αρμονικούς κυματισμούς αντίστοιχα. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε δύο φορές με εναλλαγή του κριτηρίου αξιολόγησης της αντίστασης της γάστρας κατά την πλεύση σε ήρεμο νερό. Στην πρώτη το κριτήριο ήταν το μέγιστο ύψος κύματος σε μια διαμήκη τομή κατά το εγκάρσιο ενώ στη δεύτερη κριτήριο αποτέλεσε η αντίσταση κυματισμού.

Από τις δύο διαδικασίες βελτιστοποίησης επιλέχθηκε μια μορφή γάστρας με καλύτερα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά από την αρχική. Η γεωμετρία αυτή είχε 20.89% μικρότερη αντίσταση κυματισμού, 4.04% μικρότερη επιτάχυνση στην πλήρη κατά την κίνηση του προνευτασμού και 2.96% μικρότερη πρόσθετη αντίσταση σε σχέση με την πατρική μορφή γάστρας. Η επιλεγείσα γεωμετρία αξιολογήθηκε στη συνέχεια με τη βοήθεια του λογισμικού STAR CCM+, τόσο ως προς τη συνολική της αντίσταση όσο και ως προς την αντίσταση κυματισμού, προκειμένου να ελεγχθεί η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων που προέκυψαν. Η προσομοίωση δεν επιβεβαίωσε τα οφέλη της βελτιστοποίησης και τουλάχιστον όχι με τρόπο αδιαμφισβήτητο. Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται σε διάφορους παράγοντες που αναλύονται στη συνέχεια.

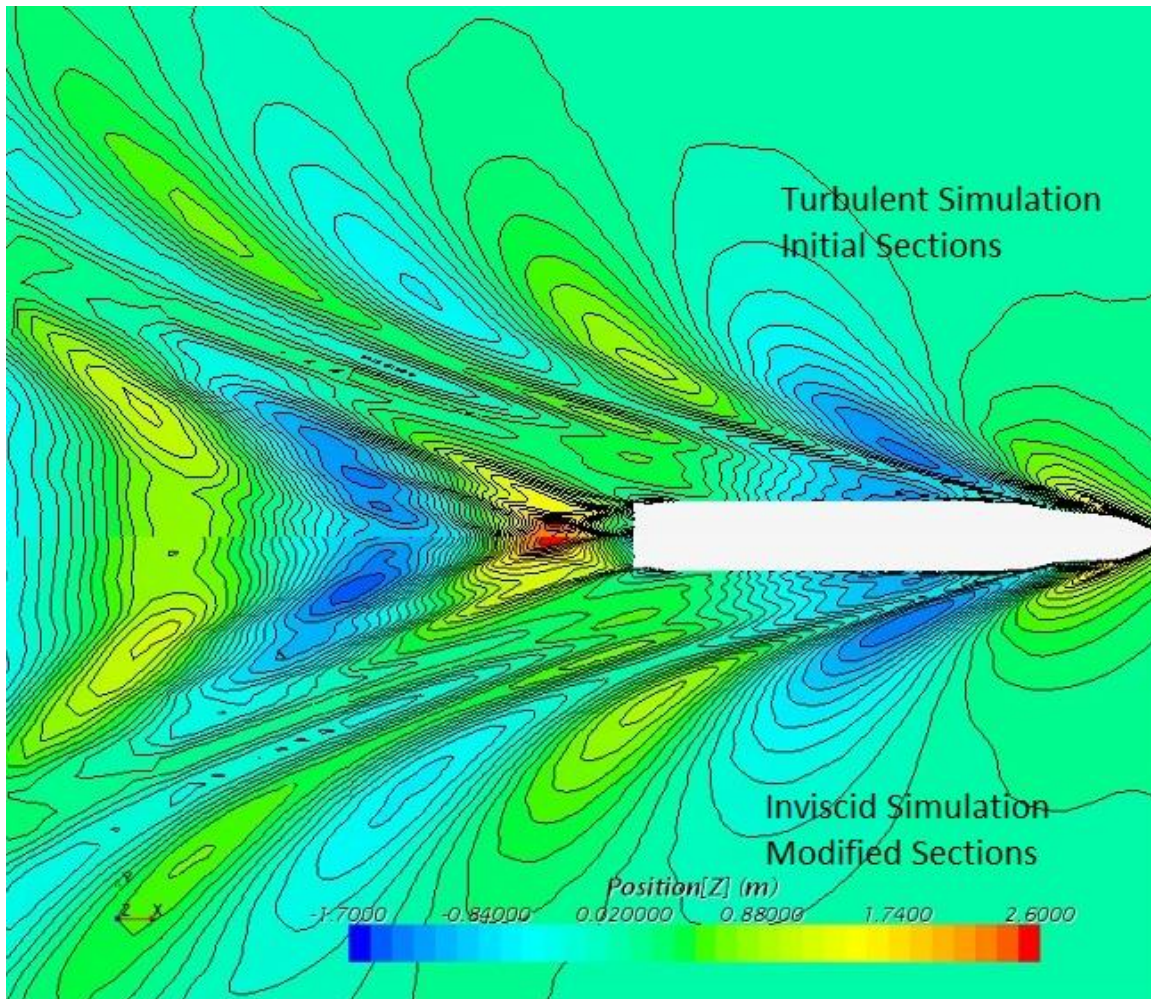
Οι κύριες διαφορές της προσομοίωσης του υδροδυναμικού φαινομένου από το SWAN 2 και το STAR CCM+ στην περίπτωση που εξετάζεται, εντοπίζονται στη διαδικασία επίλυσης, στον τρόπο και την πυκνότητα διακριτοποίησης του χωρίου καθώς και στη μορφή γάστρας που εξετάζεται.

Σχετικά με τη διακριτοποίηση του πεδίου και την επίλυση του υδροδυναμικού προβλήματος έχει γίνει μια σύντομη περιγραφή για κάθε περίπτωση σε προηγούμενο κεφάλαιο. Στο SWAN 2 έχουμε ένα σύνολο από επίπεδα επιφανειακά στοιχεία τα οποία χρησιμοποιούνται για τη διακριτοποίηση της γάστρας και του στερεού συνόρου, κι επομένως η ανάλυση του προβλήματος βασίζεται στην επίλυση συννοριακών εξισώσεων. Ο αριθμός των στοιχείων αυτών είναι της τάξης των 5000 για το σύνολο της επιφάνειας που εξετάζεται, ενώ η γάστρα του πλοίου περιγράφεται από ένα σύνολο 70 νομέων. Στο STAR CCM+ έχουμε ένα τρισδιάστατο πλέγμα από εξαεδρικούς όγκους ελέγχου που καλύπτουν το σύνολο του χωρίου που περιβάλλει τη γάστρα. Το υδροδυναμικό λοιπόν πρόβλημα επιλύεται στο σύνολο ενός προκαθορισμένου όγκου ρευστού. Ο αριθμός των όγκων ελέγχου είναι της τάξης του 1.700.000, ενώ η γεωμετρία του πλοίου αναπαρίσταται μέσω ενός επιφανειακού πλέγματος που αποτελείται από περίπου 100.000 τριγωνικά στοιχεία. Συνεπώς είναι προφανές πως η ακρίβεια αναπαράστασης και η διακριτοποίηση του πεδίου είναι τάξης μεγέθους λεπτομερέστερη για την περίπτωση του λογισμικού STAR CCM+ εν συγκρίσει με το SWAN 2.

Η τελευταία διαφορά μεταξύ των δύο προσομοιώσεων αφορά στην αναπαράσταση της γάστρας που για λόγους που έχουν εξηγηθεί νωρίτερα, ήταν απαραίτητο να τροποποιηθεί στην περιοχή της πρύμνης προκειμένου να μπορεί να αξιολογηθεί από το SWAN 2. Αυτή η τροποποίηση είχε κάποια συμμετοχή στη διαμόρφωση του αποτελέσματος όχι όμως τόσο σημαντική ώστε να αποτελεί την κύρια αιτία αναντιστοιχίας μεταξύ των δύο λογισμικών.

Ένας επιπλέον παράγοντας που πρέπει να αναφερθεί αποτελεί η διαμόρφωση του πεδίου ακολουθούντων κυματισμών που φαίνεται στο σχήμα 110. Από αυτό είναι εμφανές πως η βελτιστοποιημένη γεωμετρία έχει μεγαλύτερο ύψος κύματος στο συγκεκριμένο σύστημα κυματισμών από την αρχική. Η περιοχή στην οποία αναπτύσσονται οι ακολουθούντες κυματισμοί επηρεάζεται άμεσα από συνεκτικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην πρύμνη και τα οποία αγνοούνται από το λογισμικό SWAN 2.

Προς σύγκριση των διαφορετικών συνθηκών υπό τις οποίες εκτελέστηκαν οι προσομοιώσεις από τα δύο λογισμικά, παρατίθεται το σχήμα 117. Σε αυτό φαίνονται τα πεδία κυματισμών που παράγονται αφενός από γάστρα με τροποποιημένους νομείς σε μη συνεκτική ροή κι αφετέρου από γάστρα με μη τροποποιημένους νομείς σε τυρβώδη ροή. Και στις δύο περιπτώσεις εξετάζεται η πατρική μορφή γάστρας.



Σχήμα 117. Πεδίο παραγόμενων κυματισμών αρχικής γεωμετρίας με τους τροποποιημένους και μη πρυμναίους νομείς σε τυρβώδη και μη συνεκτική ροή από την προσομοίωση στο STAR CCM+

Από το σχήμα 117 βλέπουμε πως έχουμε σημαντική επιρροή των διαφορετικών συνθηκών προσομοίωσης τόσο στους αποκλίνοντες όσο και στους ακολουθούντες κυματισμούς. Στην

περίπτωση των ακολουθούντων κυματισμών βλέπουμε πως η διαφορά που προκύπτει μεταξύ των δύο προσομοιώσεων μπορεί να αποτελεί αξιόλογο παράγοντα στη διαμόρφωση του συγκριτικού αποτελέσματος της συγκεκριμένης περιοχής που σχολιάστηκε νωρίτερα και αφορά το σχήμα 112.

Καταλήγοντας μπορούμε να εξάγουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα :

1. Η δυναμική θεωρία αντιμετωπίζει δυσκολίες στην εκτίμηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς ενός πολύπλοκου, γεωμετρικά, πλοίου σύγχρονης σχεδίασης σε ήρεμο νερό καθώς και στον υπολογισμό της αντίστασης κυματισμού
2. Η θεώρηση συνεκτικής ροής οδηγεί σε καλύτερη εκτίμηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς, ιδιαίτερα στην κλίμακα προτύπου όπου και συμβαδίζει με τα πειραματικά αποτελέσματα (Σχήμα 96)
3. Η ελαχιστοποίηση της αντίστασης με βάση την ποιότητα του συστήματος των παραγόμενων κυματισμών αλλά και την αντίσταση κυματισμού με τη βοήθεια λογισμικού που βασίζεται στη δυναμική θεωρία, παρήγαγε γεωμετρίες με βελτιωμένα χαρακτηριστικά αν και οι απόλυτες τιμές των υπολογισθέντων μεγεθών απέχουν από τις πραγματικές
4. Η αναντιστοιχία αποτελεσμάτων μεταξύ των λογισμικών που χρησιμοποιήθηκαν επηρεάζεται από τις διαφορές της προσομοίωσης των υδροδυναμικών φαινομένων καθώς κι αυτές που αφορούν την περιγραφή της γεωμετρίας
5. Η χρήση γενετικών αλγορίθμων σε μια πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση μπορεί να εξασφαλίσει την αξιόπιστη σύγκλιση προς τις βέλτιστες λύσεις εφόσον είναι ικανοποιητική η υδροδυναμική αξιολόγηση των εναλλακτικών μορφών γάστρας
6. Η διαδικασία βελτιστοποίησης της υδροδυναμικής συμπεριφοράς ενός πλοίου με χρήση μεθόδων δυναμικής ροής θα πρέπει να αξιολογείται με έλεγχο του αποτελέσματος μέσω κωδίκων CFD
7. Σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το αποτέλεσμα της μοντελοποίησης είναι η ακριβής παραμετρική αναπαράσταση της γεωμετρίας της γάστρας
8. Σε κάθε περίπτωση όλα τα αποτελέσματα που προκύπτουν από υπολογιστικές διαδικασίες θα πρέπει να ελέγχονται με εκτέλεση πειραμάτων σε κλίμακα μοντέλου σε πειραματική δεξαμενή

Παράρτημα Α - Λογισμικά και γλώσσες προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκαν

1. Microsoft Word
2. Microsoft Excel
3. Microsoft Powerpoint
4. Γλώσσα προγραμματισμού Fortran 77
5. Γλώσσα προγραμματισμού Fortran 95
6. Γλώσσα προγραμματισμού Intel Visual Fortran
7. Γλώσσα προγραμματισμού Visual C++
8. Γλώσσα προγραμματισμού Java
9. Υπολογιστικό πακέτο Matlab
10. Λογισμικό διαχείρισης αποτελεσμάτων προσομοίωσης Tecplot 2008
11. Σχεδιαστικό πρόγραμμα Rhinoceros 5.0
12. Σχεδιαστικό πρόγραμμα AVEVA Lines
13. Λογισμικό παραμετρικής μοντελοποίησης CAESES – Friendship Framework
14. Λογισμικό εκτίμησης υδροδυναμικής συμπεριφοράς πλοίων SWAN 2
15. Λογισμικό εκτίμησης υδροδυναμικής συμπεριφοράς πλοίων SPP-86
16. Λογισμικό επίλυσης προβλημάτων ρευστομηχανικής STAR CCM+

Παράρτημα Β – Συγκεντρωτική λίστα σχημάτων

Σχήμα 1. Η σπειροειδής διαδικασία σχεδίασης πλοίων	7
Σχήμα 2. Η ενοποιημένη διαδικασία σχεδίασης πλοίων	8
Σχήμα 3. Η επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών πλοίων	10
Σχήμα 4. Αναπαράσταση καμπύλης B-Spline	24
Σχήμα 5. Αναπαράσταση καμπύλης NURBS.....	25
Σχήμα 6. Αναπαράσταση καμπύλης με διαφορετικές μεθόδους με χρήση B-Splines..	30
Σχήμα 7. Αναπαράσταση δύο καμπυλών B-Splines με απαίτηση συνέχειας εφαπτομενικού διανύσματος.....	32
Σχήμα 8. Πρυμναίος νομέας ταχύπλοου E/Γ-O/Γ.....	35
Σχήμα 9. Παρεμβολή πρυμναίου νομέα (μαύρο χρώμα) με B-Spline (κόκκινο χρώμα)	37
Σχήμα 10. Βελτιστοποίηση παρεμβολής καμπύλης με χρήση του περιβάλλοντος του CAESES – Friendship Framework.....	38
Σχήμα 11. Κύριες καμπύλες αρχικής γεωμετρίας E/Γ-O/Γ.....	38
Σχήμα 12. Μεταβολή πρυμναίου τμήματος E/Γ-O/Γ, μεταξύ αρχικής (αριστερά) και τυχούσας (δεξιά) μορφής	39
Σχήμα 13. Μεταβολή πρωραίου τμήματος E/Γ-O/Γ, μεταξύ αρχικής (αριστερά) και τυχούσας (δεξιά) μορφής	40
Σχήμα 14. Μεταβολή επιφανειών πρωραίου τμήματος E/Γ-O/Γ, μεταξύ αρχικής (αριστερά) και τυχούσας (δεξιά) μορφής.....	41
Σχήμα 15. Μεταβολή μεταξύ αρχικής (αριστερά) και τυχούσας (δεξιά) μορφής προφίλ βολβού	42
Σχήμα 16. Μεταβολή μεταξύ αρχικής (αριστερά) και τυχούσας (δεξιά) μορφής επιφάνειας βολβού	43
Σχήμα 17. Η παραμετρικά αναπαριστάμενη αρχική γεωμετρία ενός E/Γ-O/Γ	44
Σχήμα 18. Πρυμναίοι νομείς προς τροποποίηση για χρήση από λογισμικά θεωρίας δυναμικού	45

Σχήμα 19. Αρχικοί (συνεχείς καμπύλες) και τροποποιημένοι (διακεκομμένες καμπύλες) νομείς με βάση τη βελτιστοποίηση τροποποίησης της μορφής τους	48
Σχήμα 20. Αρχική (αριστερά) και τροποποιημένη (δεξιά) επιφάνεια με βάση τη βελτιστοποίηση τροποποίησης των πρυμναίων νομέων	48
Σχήμα 21. Η εξάρτηση των συνιστωσών της αντίστασης από τον αριθμό Froude	51
Σχήμα 22. Το σύστημα κυματισμών του Kelvin	52
Σχήμα 23. Αναπαράσταση στερεού συνόρου στο SWAN 2	57
Σχήμα 24. Υπολογιστικό πλέγμα ελεύθερης επιφάνειας με (αριστερά) και χωρίς (δεξιά) την περιοχή του ομόρου στο SWAN 2	57
Σχήμα 25. Πεδίο κυματισμών κατά την πλεύση σε ήρεμο νερό παραγόμενο από το SWAN 2	58
Σχήμα 26. Τριγωνικό επιφανειακό πλέγμα παραγόμενο από το CAESES – Friendship Framework	60
Σχήμα 27. Υπολογιστικό χωρίο στο περιβάλλον STAR CCM+	61
Σχήμα 28. Όγκοι διαχείρισης πλέγματος γύρω από την πρύμνη και την περιοχή του βολβού	62
Σχήμα 29. Όγκοι διαχείρισης πλέγματος γύρω από τη γάστρα και τον βολβό	62
Σχήμα 30. Όγκος διαχείρισης πλέγματος γύρω από την ελεύθερη επιφάνεια	62
Σχήμα 31. Όγκοι διαχείρισης πλέγματος που αφορά το πεδίο κυματισμών	63
Σχήμα 32. Υπολογιστικό πλέγμα γύρω από τη γάστρα	63
Σχήμα 33. Υπολογιστικό πλέγμα στην ελεύθερη επιφάνεια και κατά το εγκάρσιο	63
Σχήμα 34. Υπολογιστικό πλέγμα στην ελεύθερη επιφάνεια για	64
Σχήμα 35. Χωροχρονικά εξαρτώμενος αρμονικός κυματισμός	65
Σχήμα 36. Καμπύλες RAO της κάθετης κίνησης πλοίου κατά την πλεύση σε μετωπικούς κυματισμούς	69
Σχήμα 37. Καμπύλες RAO της κάθετης ταχύτητας πλοίου κατά την πλεύση σε μετωπικούς κυματισμούς	70
Σχήμα 38. Καμπύλες RAO της κάθετης επιτάχυνσης πλοίου κατά την πλεύση σε μετωπικούς κυματισμούς	70
Σχήμα 39. Περιπτώσεις σύγκρισης εναλλακτικών λύσεων σε βελτιστοποίηση ενός κριτηρίου	73

Σχήμα 40. Περιπτώσεις σύγκρισης εναλλακτικών λύσεων σε βελτιστοποίηση δύο κριτηρίων.....	74
Σχήμα 41. Μονοδιάστατη αξιολόγηση λύσεων σε βελτιστοποίηση δύο κριτηρίων.....	75
Σχήμα 42. Κανονικοποίηση κριτηρίων για συντελεστές $\lambda_1=\lambda_2=0.5$	76
Σχήμα 43. Λύσεις βελτιστοποίησης με δύο κριτήρια για διαφορετικούς συντελεστές λ . 76	
Σχήμα 44. Παραγόμενες λύσεις στο επίπεδο των αντικειμενικών συναρτήσεων	80
Σχήμα 45. Διαδικασία παραγωγής νέας γενιάς στον αλγόριθμο NSGA-II	82
Σχήμα 46. Περιγραφή πρωταίου τμήματος γάστρας	86
Σχήμα 47. Διαμήκεις τομές ελεύθερης επιφάνειας σε αποστάσεις $y/L=0.08\div 0.5$	88
Σχήμα 48. Διαμήκεις τομές ελεύθερης επιφάνειας σε αποστάσεις $y/L=0.08\div 0.15$	89
Σχήμα 49. Διαμήκεις τομές ελεύθερης επιφάνειας σε αποστάσεις $y/L=0.25\div 0.5$	90
Σχήμα 50. Διαδικασία βελτιστοποίησης υδροδυναμικής συμπεριφοράς Ε-Γ/Ο-Γ	92
Σχήμα 51. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα το μέγιστο ύψος κύματος σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.3$ και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.3$ – Επιτάχυνση στην πλώρη	95
Σχήμα 52. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα το μέγιστο ύψος κύματος σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.3$ και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.21$ – Επιτάχυνση στην πλώρη	96
Σχήμα 53. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα το μέγιστο ύψος κύματος σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.3$ και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.24$ – Επιτάχυνση στην πλώρη	96
Σχήμα 54. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα το μέγιστο ύψος κύματος σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.3$ και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.27$ – Επιτάχυνση στην πλώρη	97
Σχήμα 55. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα το μέγιστο ύψος κύματος σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.3$ και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.33$ – Επιτάχυνση στην πλώρη	97
Σχήμα 56. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα το μέγιστο ύψος κύματος σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.3$ και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Αντίσταση κυματισμού – Επιτάχυνση στην πλώρη	98

Σχήμα 57. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα το μέγιστο ύψος κύματος σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.3$ και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλήρη. Αντίσταση κυματισμού - Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.3$	98
Σχήμα 58. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα το μέγιστο ύψος κύματος σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.3$ και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλήρη. Αντίσταση κυματισμού - Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.21$	99
Σχήμα 59. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα το μέγιστο ύψος κύματος σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.3$ και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλήρη. Αντίσταση κυματισμού - Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.24$	99
Σχήμα 60. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα το μέγιστο ύψος κύματος σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.3$ και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλήρη. Αντίσταση κυματισμού - Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.27$	100
Σχήμα 61. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα το μέγιστο ύψος κύματος σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.3$ και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλήρη. Αντίσταση κυματισμού - Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.33$	100
Σχήμα 62. Νομείς αρχικής (συνεχείς καμπύλες) και βελτιστοποιημένης (διακεκομμένες καμπύλες) γεωμετρίας από την πρώτη διαδικασία βελτιστοποίησης	103
Σχήμα 63. Πεδίο παραγόμενων κυματισμών αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας από την πρώτη διαδικασία βελτιστοποίησης	104
Σχήμα 64. Διαμήκεις τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.3$	104
Σχήμα 65. Διαμήκεις τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.21$	105
Σχήμα 66. Διαμήκεις τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.24$	105
Σχήμα 67. Διαμήκεις τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.27$	105
Σχήμα 68. Διαμήκεις τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.33$	106
Σχήμα 69. Καμπύλες RAO επιτάχυνσης στην πλήρη αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας.....	106

Σχήμα 70. Καμπύλες RAO επιτάχυνσης στο μέσο νομέα αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας.....	107
Σχήμα 71. Καμπύλες RAO επιτάχυνσης στην πρύμνη αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας.....	107
Σχήμα 72. Πρόσθετη αντίσταση αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας	108
Σχήμα 73. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα την αντίσταση κυματισμού και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Αντίσταση κυματισμού – Επιτάχυνση στην πλώρη	109
Σχήμα 74. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα την αντίσταση κυματισμού και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.3$ – Επιτάχυνση στην πλώρη.....	110
Σχήμα 75. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα την αντίσταση κυματισμού και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.21$ – Επιτάχυνση στην πλώρη.....	110
Σχήμα 76. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα την αντίσταση κυματισμού και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.24$ – Επιτάχυνση στην πλώρη.....	111
Σχήμα 77. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα την αντίσταση κυματισμού και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.27$ – Επιτάχυνση στην πλώρη.....	111
Σχήμα 78. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα την αντίσταση κυματισμού και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.33$ – Επιτάχυνση στην πλώρη.....	112
Σχήμα 79. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα την αντίσταση κυματισμού και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Αντίσταση κυματισμού - Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.3$	112
Σχήμα 80. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα την αντίσταση κυματισμού και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Αντίσταση κυματισμού - Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.21$	113
Σχήμα 81. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα την αντίσταση κυματισμού και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη. Αντίσταση κυματισμού - Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.24$	113

Σχήμα 82. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα την αντίσταση κυματισμού και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλήρη. Αντίσταση κυματισμού - Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.27$	114
Σχήμα 83. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με γνώμονα την αντίσταση κυματισμού και τη μέγιστη επιτάχυνση στην πλήρη. Αντίσταση κυματισμού - Μέγιστο ύψος κύματος σε απόσταση $y/L=0.33$	114
Σχήμα 84. Νομείς αρχικής (συνεχείς καμπύλες) και βελτιστοποιημένης (διακεκομμένες καμπύλες) γεωμετρίας από τη δεύτερη διαδικασία βελτιστοποίησης	117
Σχήμα 85. Πεδίο παραγόμενων κυματισμών αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας από τη δεύτερη διαδικασία βελτιστοποίησης	118
Σχήμα 86. Διαμήκεις τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.3$	118
Σχήμα 87. Διαμήκεις τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.21$	119
Σχήμα 88. Διαμήκεις τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.24$	119
Σχήμα 89. Διαμήκεις τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.27$	119
Σχήμα 90. Διαμήκεις τομές αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε εγκάρσια απόσταση $y/L=0.33$	120
Σχήμα 91. Καμπύλες RAO επιτάχυνσης στην πλήρη αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας.....	120
Σχήμα 92. Καμπύλες RAO επιτάχυνσης στο μέσο νομέα αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας.....	121
Σχήμα 93. Καμπύλες RAO επιτάχυνσης στην πρύμνη αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας.....	121
Σχήμα 94. Πρόσθετη αντίσταση αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας	122
Σχήμα 95. Σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο διαδικασιών βελτιστοποίησης.....	123
Σχήμα 96. Σύγκριση αποτελεσμάτων αντίστασης της προσομοίωσης στο STAR CCM+ με πειραματικά αποτελέσματα σε ταχύτητα $Fr=0.348$	124
Σχήμα 97. Εξέλιξη του πεδίου των παραγόμενων κυματισμών της προσομοίωσης πλεύσης σε κλίμακα μοντέλου στο STAR CCM+ και σε ταχύτητα $Fr=0.348$	125

Σχήμα 98. Υπόλοιπα υδροδυναμικών εξισώσεων για προσομοίωση πλεύσης με μη συνεκτική ροή της αρχικής γεωμετρίας με τους μη τροποποιημένους νομείς.....	126
Σχήμα 99. Υπόλοιπα υδροδυναμικών εξισώσεων για προσομοίωση πλεύσης με μη συνεκτική ροή της αρχικής γεωμετρίας με τους τροποποιημένους νομείς.....	126
Σχήμα 100. Εξέλιξη της τιμής της παράλληλης βύθισης για την αρχική γεωμετρία με τους τροποποιημένους και μη, πρυμναίους νομείς σε προσομοίωση της πλεύσης με μη συνεκτική ροή.....	127
Σχήμα 101. Εξέλιξη της τιμής της διαγωγής για την αρχική γεωμετρία με τους τροποποιημένους και μη, πρυμναίους νομείς σε προσομοίωση της πλεύσης με μη συνεκτική ροή.....	127
Σχήμα 102. Εξέλιξη της τιμής της αντίστασης για την αρχική γεωμετρία με τους τροποποιημένους και μη, πρυμναίους νομείς σε προσομοίωση της πλεύσης με μη συνεκτική ροή.....	128
Σχήμα 103. Εξέλιξη της τιμής της παράλληλης βύθισης εναλλακτικών μορφών γάστρας της αρχικής γεωμετρίας σε προσομοίωση της πλεύσης με μη συνεκτική ροή.....	129
Σχήμα 104. Εξέλιξη της τιμής της διαγωγής εναλλακτικών μορφών γάστρας της αρχικής γεωμετρίας σε προσομοίωση της πλεύσης με μη συνεκτική ροή.....	129
Σχήμα 105. Εξέλιξη της τιμής της αντίστασης εναλλακτικών μορφών γάστρας της αρχικής γεωμετρίας σε προσομοίωση της πλεύσης με μη συνεκτική ροή.....	130
Σχήμα 106. Υπόλοιπα υδροδυναμικών εξισώσεων για προσομοίωση πλεύσης με τυρβώδη ροή της αρχικής γεωμετρίας.....	131
Σχήμα 107. Υπόλοιπα υδροδυναμικών εξισώσεων για προσομοίωση πλεύσης με τυρβώδη ροή της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας.....	131
Σχήμα 108. Εξέλιξη της τιμής της παράλληλης βύθισης για προσομοίωση πλεύσης με τυρβώδη ροή της αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας.....	132
Σχήμα 109. Εξέλιξη της τιμής της διαγωγής για προσομοίωση πλεύσης με τυρβώδη ροή της αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας.....	132
Σχήμα 110. Εξέλιξη της τιμής της αντίστασης πίεσης και τριβής για προσομοίωση πλεύσης με τυρβώδη ροή της αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας.....	133
Σχήμα 111. Εξέλιξη της τιμής της αντίστασης πίεσης και τριβής για προσομοίωση πλεύσης με τυρβώδη ροή της αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας.....	133

Σχήμα 112. Πεδίο παραγόμενων κυματισμών αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας από την προσομοίωση στο STAR CCM+	135
Σχήμα 113. Υπόλοιπα υδροδυναμικών εξισώσεων για προσομοίωση πλεύσης με μη συνεκτική ροή της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας με τους τροποποιημένους νομείς .	135
Σχήμα 114. Εξέλιξη της τιμής της παράλληλης βύθισης για την αρχική και βελτιστοποιημένη γεωμετρία με τους τροποποιημένους πρυμναίους νομείς σε προσομοίωση της πλεύσης με μη συνεκτική ροή	136
Σχήμα 115. Εξέλιξη της τιμής της παράλληλης βύθισης για την αρχική και βελτιστοποιημένη γεωμετρία με τους τροποποιημένους πρυμναίους νομείς σε προσομοίωση της πλεύσης με μη συνεκτική ροή	136
Σχήμα 116. Εξέλιξη της τιμής της παράλληλης βύθισης για την αρχική και βελτιστοποιημένη γεωμετρία με τους τροποποιημένους πρυμναίους νομείς σε προσομοίωση της πλεύσης με μη συνεκτική ροή	137
Σχήμα 117. Πεδίο παραγόμενων κυματισμών αρχικής γεωμετρίας με τους τροποποιημένους και μη πρυμναίους νομείς σε τυρβώδη και μη συνεκτική ροή από την προσομοίωση στο STAR CCM+	140

Βιβλιογραφία

1. Abt, C.; Harries S., Heimann, J., Winter, H., (2003), From Redesign to Optimal Hull Lines by means of Parametric Modelling, 2nd Intl. Conf. Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries, COMPIT 2003, Hamburg
2. Ahmad F. Mohamad Ayob, Tapabrata Ray, Warren Smith, A Hydrodynamic Preliminary Design Optimization Framework for High Speed Planning Craft
3. Alrefaei M, Diabat A., (2009), A simulated annealing technique for multi-objective simulation optimization
4. Aravind Seshardi, «A Fast Elitist Multi-Objective Genetic Algorithm: NSGA-II»
5. Bailey, P.A., Hudson, D.A., Price, W.G., Temarel, P. (2000), Comparisons between Theory and Experiment in a Seakeeping Validation Study, Trans. RINA, 142, pp. 44-77
6. Bandyopadhyay, S. et al., (2008) A Simulated Annealing Based Multi-Objective Optimization Algorithm : AMOSA
7. Blok, J.J., Beukelman, W. (1984), The High-Speed Displacement Ship Systematic Series Hull Forms – Seakeeping Characteristics, Trans. SNAME, **92**, pp. 125-150
8. Bruzzone, D., Gualeni, P., Sebastiani, L. (2000), Application of Green's Function Methods to the Seakeeping Computations for High-Speed Vehicles, Intl. Conf. Ship and Shipping Research NAV 2000, Paper 9.1, Venice, September 19-22.
9. Campana, E., Peri, D., Tahara, Y., Kandasamy, M., Stern, F., (2009), Numerical Optimization Methods for Ship Hydrodynamic Design
10. Chang H. et al. (2014), Ship Resistance Performance Optimization based in approximation model of CFD, Journal of Ship Research, Wuhan, Hubei, China
11. Coello Coello C. Lamont G., Van Veldhuizen D., (2007), Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems, Second Edition
12. Daehwan Park, (2012), FRIENDSHIP SYSTEMS, Shape Optimization Using FRIENDSHIP-Framework and STAR-CCM+, Presentation, Potsdam, Germany, May
13. Dongkyung N., Cheol Hoon P., (2000), Multiobjective Simulated Annealing: A Comparative Study to Evolutionary Algorithms
14. Fogel, D. (1994) An Introduction to Simulated Evolutionary Optimization
15. Frank Manual
16. Frank, W. (1967), Oscillation of Cylinders in or Below the Free Surface of Deep Fluids, NSRDC, Rep. No. 2375, Washington, D.C.
17. Friendship Systems, (2012), Friendship Framework User's Guide
18. Grigoropoulos G., Harries, S., Damala, D., Birk, L., Heimann, J. (2003), Seakeeping assessment for high-speed monohulls – A comparative study, 8th Intl. Marine Design Conf., Athens, 5-8 May
19. Grigoropoulos G.J. (1989), Hull Form Optimization with Respect to Seakeeping, PhD Thesis, NTUA, Dept. of Naval Arch. and Marine Eng., Athens, Greece, May.
20. Grigoropoulos G.J., Damala D., (2011), Dynamic Performance of the NTUA Double-Chine Series Hull Forms in Random Waves

21. Grigoropoulos G.J., Loukakis T. (1988), A New Method for Developing Hull Forms with Superior Seakeeping Qualities, Intl. Conf. CADMO '88, Southampton, England, September
22. Grigoropoulos G.J., Loukakis T. (1990), On the Optimization of Hull Forms with Respect to Seakeeping, 5th IMAEM Congress, Athens, May
23. Grigoropoulos G.J., Loukakis T., Resistance and Seakeeping Characteristics of a Systematic Series in the Pre-planing Condition
24. Grigoropoulos G.J., Perdikari T., Asouti V., Giannakoglou K., (2011), MDO of Hull Forms Using Low-Cost Evolutionary Algorithms
25. Grigoropoulos, G.J., (2004), Hull Form optimization for hydrodynamic performance, Marine Technology, Vol. 41, No. 4, October
26. Grigoropoulos, G.J., Chalkias, (2010), Hull-Form Optimization in Calm and Rough Water, Computer Aided Design 42, pp. 977-984
27. Grigoropoulos, G.J., Chalkias, D.S., Tikkos, C. (2004), Multi-Objective Hull Form Optimization of High-Speed Vessels, Intl. Conf. HIPER 2004, Rome, 27-29 September
28. Grossi, L., Dogliani, M. (2000), Load and Seakeeping Assessment of HSC Based on Full-Scale Monitoring, Intl. Conf. On Ship and Shipping Research NAV 2000, Paper 2.8, Venice, Sept. 19-22.
29. Heimann, J. (2006), CFD-based Optimization of the Wave-Making Characteristics of Ship Hulls, Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft e.V. , 101, pp. 234-249
30. Hoffmann, M., Juhasz I., (2008) On Interpolation by Spline Curves with Shape Parameters
31. <http://www.cd-adapco.com/products/star-ccm>
32. <https://www.caeses.com/>
33. Juangphanich Paht, LU Factorization C Code
34. Jung H.B., Kim K., A New Parameterization Method for NURBS Surface Interpolation, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology
35. Kalyanmoy Deb, Sameer Agarwal, T. Meyarivan, (2002) A fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm : NSGA-II
36. Konak et al., (2006), Multi-objective Optimization Using Genetic Algorithms : A Tutorial
37. Kundu P. K., Cohen I.M., (2010), Fluid Mechanics, 4th Edition
38. Li et al., «Bow and Stern Shape Integrated Optimization for a Full Ship by a Simulation-Based Design Technique», Journal of Ship Research, Vol. 58, No. 2, pp 83-96
39. Li H., Landa-Silva D., An Adaptive Evolutionary Multi-objective Approach Based on Simulated Annealing
40. Li, S.,Z., Zhao, F., Ni, Q.,J., (2014) Bow and Stern Shape Integrated Optimization for A Full Ship by a Simulation Based Design Technique, Journal of Ship Research, Vol. 58, N°2, June
41. Ma. Guadalupe Castillio Tapia, Carlos A. Coello Coello, «Applications of Multi-Objective Evolutionary Algorithms in Economics and Finance : A Survey»

42. Molland A.F., Wellicome J.F., Couser P.R., (1995), Resistance experiments on a systematic series of high speed displacement catamaran forms : variation of length displacement ratio and breadth-draught ratio
43. Naderia B., Sadeghib H., (2011), A Multi-objective Simulated Annealing Algorithm for Solving the Flexible no-wait Flowshop Scheduling Problem with Transportation Times
44. Ohkusu, M., (1996), Advances in Marine Hydrodynamics, Chapter 4
45. Papanikolaou et al., Integrated Design and Multiobjective Optimization Approach to Ship Design
46. Pellegrini, R., Campana, E., Diez, M., Serani, A., et al. (2014), Application of Derivative Free Multi-Objective Algorithms to Reliability-Based Robust Design Optimization of a High Speed Catamaran in Real Ocean Environment, 29th Symposium on Naval Hydrodynamics, Gothenburg, Sweden, August.
47. Peri, D., Kandasamy, M., Tahara, Y., Wilson, W., Miozzi, M., Campana, E., Stern, F., (2012) Simulation Based Design with Variable Physics Modeling and Experimental Verification of a waterjet propelled Catamaran, 29th Symposium on Naval Hydrodynamics, Gothenburg, Sweden, August
48. Peric M., CFD Case Studies in Marine and Offshore Engineering, CD Adapco Presentation
49. Peric M., Computation of Free Surface Flows Using Finite Volume Method, CD Adapco Presentation
50. Peric M., Multiphysics Simualtion for Marine Applications, CD Adapco Presentation
51. Piegl, L., Tiller W., (1997), The NURBS Book, 2nd edition
52. Prahasto T., (1998), Simultaneous Multi Curve Approximation with NURBS, PHD Thesis, Ontario, Canada
53. Rogers David F., An Introduction to NURBS with Historical Perspective
54. Safaei N., Multi-objective Simulated Annealing for a Maintenance Workforce Scheduling Problem: A case Study
55. Salvesen N., Tuck E.O., Faltinsen O. (1970), Ship Motions and Sea Loads, Trans. SNAME, 78, pp. 250-287.
56. Sclavounos, P.D. (1996), Computation of Wave Ship Interactions, Advances in Marine Hydrodynamics, ed. by M. Qhkusu, Computational Mechanics Publ.
57. SPP-86 (1994), User's Manual, Report No: NAL-114-F-94, Lab. Ships and Marine Hydrodynamics, National Technical Univ. of Athens.
58. Suman B., Kumar P, (2006), A survey of simulated annealing as a tool for single and multiobjective optimization
59. Swan 1 Manual, 2001
60. SWAN 2 (2002), User Manual : «Ship Flow Simulation in Calm Water and in Waves», Boston Marine Consulting Inc., Boston MA 02116, USA
61. TU Delft, (2001), Offshore Hydromechanics
62. TU Delft, (2002) Introduction in Ship Hydromechanics
63. Tuyttens D. et al., (2000), Performance of the MOSA Method for the Bicriteria Assignment Problem
64. Ulker E., (2012), NURBS Curve Fitting Using Artificial Immune System, International Journal of Innovative Computing

65. Ulungu, E.L., J. Teghem, Ph. Fortemps, and D. Tuyttens (1999). MOSA Method: A Tool for Solving MOCO Problems, *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 8, 221–236.
66. Zhang W., (2012), The Research of the NURBS Curve Interpolation Algorithm, University of Science and Technology Liaoning, China
67. Zhu Z.Y., Leung K.S., An Enhanced Annealing Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization Problems
68. Αθανασούλη Γ. Α., «Δυναμική Πλοίου κι Εργαστήριο», Αθήνα 2008
69. Γρηγορόπουλου Γρ., Λουκάκη Θ., (2002) Συστηματική Σειρά ΕΜΠ, Περιγραφή και Αποτελέσματα, Αθήνα
70. Ζαραφωνίτη Γ., Μελέτη και Σχεδίαση Πλοίων Νέας Τεχνολογίας
71. Λουκάκη Θ.Α., Γρηγορόπουλου Γρ., (1996) Υδροδυναμική Σχεδίαση Μικρών Σκαφών, Αθήνα
72. Μακρής Δ. (2012), Δυνατότητες της παραμετρικής μοντελοποίησης για τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης πλοίων, Διπλωματική Εργασία
73. Πολίτη Γ.Κ., (2011), Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου, Αθήνα
74. Τζαμπίρα Γ., (1998) Αριθμητικές Προσομοιώσεις Υδροδυναμικών Ροών, Αθήνα
75. Τζαμπίρα Γ., Σημειώσεις CFD Revol
76. Τσαγγάρης Σ., (2005) Μηχανική των Ρευστών, Εκδόσεις Συμεών