

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



Διπλωματική Εργασία

« Βελτιστοποίηση υδροδυναμικής σχεδίασης Περιπολικού
Ανοικτής Θαλάσσης »

Αντώνιος Σακελλαρίου

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

Αθήνα 2018

Περιεχόμενα

Πρόλογος	3
Εισαγωγή.....	5
Κεφάλαιο 1. Περιγραφή της Μελέτης	7
1.1 Περιγραφή Διαδικασίας Βελτιστοποίησης	7
1.2 Περιγραφή του Υπό Μελέτη Πλοίου	10
Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό Πλαίσιο και Εργαλεία της Βελτιστοποίησης	14
2.1 Αντικειμενικές Συναρτήσεις.....	14
2.2 Γενετικοί Αλγόριθμοι.....	16
2.3 Ο Αλγόριθμος NSGA-II	18
2.4 Αντίσταση Πλοίου	21
2.4.1 Εισαγωγή	21
2.4.2 Αντίσταση Κυματισμού.....	22
2.4.3 Αντίσταση Τριβής	23
2.4.4 Αντίσταση Λόγω Πιέσεων Συνεκτικότητας.....	23
2.4.5 Αντίσταση Ανέμου	24
2.4.6 Αντίσταση Παρελκόμενων	24
2.5 Η Απόκριση του Πλοίου σε Θαλάσσιους Κυματισμούς	25
2.5.1 Εισαγωγή	25
2.5.2 Οι Κινήσεις του Πλοίου	25
2.5.3 Η Συμπεριφορά του Πλοίου σε Κυματισμούς	28
2.5.4 Η θεωρία του Frank	31
2.6 SWAN 2.....	35
2.7 SPP-86.....	37
2.8 CAESES Friendship Framework.....	39
Κεφάλαιο 3. Εκτέλεση Πολυκριτηριακής Βελτιστοποίησης	41
3.1 Παραμετρική Σχεδίαση	41
3.1.3 Κατασκευή Διαμήκων Παραμετρικών Καμπυλών.....	44
3.1.4 Κατασκευή Παραμετρικών Νομέων.....	46
3.1.5 Κατασκευή Επιφανειών	51
3.1.6 Κατασκευή Skeg.....	53
3.1.7 Χαρακτηριστικά Συνολικής Παραμετρικής Επιφάνειας και Περιορισμοί	56
3.2 Υπολογισμός Υδροδυναμικών Χαρακτηριστικών	58
3.3 Προετοιμασία Εκτέλεσης Κώδικα SPP-86	61
3.4 Προετοιμασία Εκτέλεσης Κώδικα SWAN 2	62
3.5 Διασύνδεση CAESES FFW με Εξωτερικούς Κώδικες.....	64
Κεφάλαιο 4. Παρουσίαση Αποτελεσμάτων	67
4.1 Επιλογή Βέλτιστης Γεωμετρίας	67
4.2 Βελτιστοποίηση Αντίστασης	74
4.3 Βελτιστοποίηση Δυναμικής Συμπεριφοράς σε Κυματισμούς	78
4.3 Αξιολόγηση Βελτιστοποίησης και Επίδρασης Μεταβλητών Σχεδίασης	80

Κεφάλαιο 5. Σύνοψη και Εξαγωγή Συμπερασμάτων	93
Βιβλιογραφία	95
Συγκεντρωτική Αναφορά Διαγραμμάτων - Εικόνων - Πινάκων.....	99

Πρόλογος

Η παρούσα Διπλωματική εργασία αποτελεί το τελευταίο κεφάλαιο της φοίτησής μου στο τμήμα της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας μου, αποτέλεσε η βελτιστοποίηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς ενός πλοίου. Με την ολοκλήρωση της εργασίας, ανέπτυξα τις γνώσεις μου στους τομείς της υδροδυναμικής, της παραμετρικής σχεδίασης αλλά και στον προγραμματισμό που αφορά τους κώδικες βελτιστοποίησης. Σε συνδυασμό με τον κύκλο σπουδών της Σχολής θεωρώ ότι απέκτησα γνώσεις σε μεγάλο εύρος του τομέα της ναυπηγικής αλλά, πρωτίστως, εξέλιξα τον τρόπο σκέψης μου ως προς την επίλυση σύνθετων προβλημάτων.

Με αφορμή αυτόν τον πρόλογο, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου σε όλους τους Καθηγητές αλλά και το υπόλοιπο διδακτικό προσωπικό της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του ΕΜΠ για την συνεισφορά τους σε όσα αποκόμισα κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον πτυχιούχο Ναυπηγό Μηχανολόγο Μηχανικό Μακρή Δημήτριο, για τη βοήθεια του στην εκμάθηση του CAESES Friendship Framework, καθώς και στην προετοιμασία και εκτέλεση της διαδικασίας παραμετρικής μοντελοποίησης και βελτιστοποίησης.

Ιδιαίτερα θα επιθυμούσα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της Διπλωματικής εργασίας Καθηγητή Γρηγόρη Γρηγορόπουλο, για την καθοδήγηση του καθ' όλη τη διάρκεια εκπονήσεως της συγκεκριμένης εργασίας.

Η εργασία αυτή είναι αφιερωμένη στη σύζυγο μου Κωνσταντίνα για την πολύτιμη στήριξη που μου προσέφερε, η οποία κατέστησε δυνατή την ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Αντώνιος Σακελλαρίου,

Αθήνα 2018

Αυτή η σελίδα έχει σκόπιμα αφεθεί κενή

Εισαγωγή

Η εκτίμηση και βελτιστοποίηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς των πλοίων κατά το στάδιο της σχεδίασης τους κατέχει εξέχουσα σημασία όσο αφορά στην ελαχιστοποίηση της απαιτούμενης ισχύος και ως εκ τούτου στην αποδοτικότερη λειτουργία τους. Οι νέοι κανονισμοί που θεσπίζονται από διεθνείς ναυτιλιακούς οργανισμούς, οι οποίοι απαιτούν όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ενεργειακή οικονομία και μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων, έχουν καταστήσει αυτή την ανάγκη για βέλτιστη υδροδυναμική σχεδίαση επιτακτική.

Η βελτιστοποίηση σχεδίασης πλοίων όμως, η οποία συνεχώς εξελίσσεται μέσω της ανάπτυξης σύγχρονων εργαλείων, δύναται να εφαρμοστεί και σε υπάρχοντα πλοία είτε με την έννοια προσθήκης μετατροπών σε αδελφά πλοία τα οποία δεν έχουν ακόμη κατασκευαστεί, είτε με την έννοια μετασκευών σε ήδη κατασκευασμένα πλοία. Αυτού του τύπου οι μετασκευές, οι οποίες πραγματοποιούνται προκειμένου η γεωμετρία του υπάρχοντος πλοίου να εναρμονιστεί με την προκύπτουσα από μια διαδικασία βελτιστοποίησης, είναι σε πολλές περιπτώσεις τεχνικά δυνατή αλλά και οικονομικά συμφέρουσα.

Μία μέθοδος, προκειμένου οι ναυπηγοί να εκτιμήσουν τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά ενός πλοίου, αποτελεί η διεξαγωγή πειραμάτων με μοντέλο υπό κλίμακα σε δεξαμενή. Η συγκεκριμένη μέθοδος, παρότι εξάγει αξιόπιστα συμπεράσματα για την πρόβλεψη υδροδυναμικών χαρακτηριστικών, ενέχει σημαντικά μειονεκτήματα, τα κυριότερα εκ των οποίων αποτελούν το κόστος και το μεγάλο χρονικό διάστημα που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της διαδικασίας. Πλέον οι ναυπηγοί διαθέτουν αξιολογες εναλλακτικές λύσεις μέσω συστημάτων CAD/CAE, τα οποία έχουν τη δυνατότητα σε πολύ συντομότερο χρόνο να παράξουν και να εξετάσουν έναν αριθμό διαφορετικών γεωμετριών, δίνοντας κατ' αυτό τον τρόπο μια καθοδήγηση στον ερευνητή για την εκτέλεση πειραμάτων σε δεξαμενή ώστε να έχει ήδη στη διάθεση του ένα μοντέλο με χαρακτηριστικά κοντά στο βέλτιστο.

Η εύρεση της βέλτιστης γεωμετρίας ενός πλοίου αποτελεί ένα εξαιρετικά πολύπλοκο πρόβλημα καθώς εξαρτάται από μεγάλο αριθμό παραγόντων, των οποίων το μέγεθος συνεισφοράς στην μείωση της αντίστασης δεν μπορεί να είναι εκ των προτέρων γνωστό. Επομένως, το πρώτο βήμα στη διαδικασία βελτιστοποίησης μιας υφιστάμενης σχεδίασης είναι η ακριβής παραμετρική μοντελοποίηση της αρχικής γάστρας, με εισαγωγή μεταβλητών παραμέτρων που αντιπροσωπεύουν τα στοιχεία της σχεδίασης που επιθυμούμε να μεταβάλλονται. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης παράγει έναν

αριθμό εναλλακτικών γεωμετριών, οι οποίες αξιολογούνται ως προς την αντίσταση και την συμπεριφορά σε κυματισμό. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης ανατροφοδοτούνται στον αλγόριθμο, ο οποίος εξάγει μια νέα σειρά γεωμετριών. Με αυτό τον τρόπο, στη τελευταία σειρά γεωμετριών προκύπτει η βέλτιστη γάστρα ως προς τις απαιτήσεις που έχουμε θέσει.

Συγκεκριμένα, η παραμετρική μοντελοποίηση εκτελέστηκε με χρήση του λογισμικού CAESSES Friendship Framework (FFW), ενώ ο γενετικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης NSGA II είναι, επίσης, ενσωματωμένος στο ανωτέρω πρόγραμμα. Σημαντική δυνατότητα που παρέχει ο NSGA II είναι η εισαγωγή περιορισμών κατά την παραγωγή νέων γεωμετριών ώστε να μην αλλοιωθούν χαρακτηριστικά του πλοίου που επιθυμούμε να διατηρήσουμε. Τα προγράμματα που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών και με βάση τα αποτελέσματα των οποίων εκτελείται η βελτιστοποίηση είναι το SPP-86, το οποίο αναπτύχθηκε από το ΕΝΘΥ ΕΜΠ και χρησιμοποιεί την θεωρία των Salvesen, Tuck και Fatinsen σε συνδυασμό με τη θεωρία του Frank για τον υπολογισμό των δυναμικών αποκρίσεων σε κυματισμούς και το SWAN 2 2002 το οποίο δημιουργήθηκε από τον καθηγητή MIT, Παύλο Σκλαβούνο, για τον υπολογισμό της αντίστασης κυματισμού σε ήρεμο νερό.

Τελικά, τα χαρακτηριστικά της βέλτιστης γεωμετρίας όπως προκύπτει από την ανωτέρω διαδικασία, παρουσιάζονται και αναλύονται, σε σύγκριση με το πατρικό πλοίο.

Κεφάλαιο 1. Περιγραφή της Μελέτης

1.1 Περιγραφή Διαδικασίας Βελτιστοποίησης

Η μελέτη που παρουσιάζεται στη παρούσα εργασία έχει ως στόχο την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση της γάστρας του περιπολικού ανοικτής θαλάσσης HSY 56 του Πολεμικού Ναυτικού ως προς τα υδροδυναμικά της χαρακτηριστικά. Προτού παρατεθεί αναλυτικά η συγκεκριμένη διαδικασία βελτιστοποίησης, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν γενικά στοιχεία τα οποία διέπουν την έννοια της βελτιστοποίησης .

Η βελτιστοποίηση αποτελεί μια διαδικασία έρευνας η οποία ξεκίνησε να αναπτύσσεται από τα πρώτα χρόνια της εξέλιξης των επιστημών. Η εξέλιξη της διαχρονικά είναι συνυφασμένη με την ανάπτυξη μαθηματικών μεθόδων οι οποίες αποσκοπούσαν στην εύρεση της βέλτιστης λύσης για ένα δεδομένο πρόβλημα και μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις περιόδους:

- Αρχικά, δεν είχε επινοηθεί κάποια γενική μέθοδος για τον προσδιορισμό ενός μέγιστου ή ελάχιστου σημείου μιας συνάρτησης. Μονάχα ειδικές τεχνικές είχαν αναπτυχθεί για αυτό το σκοπό, οι οποίες όμως είχαν εφαρμογή σε ορισμένες ειδικές συναρτήσεις. Τυπικό παράδειγμα αποτελεί η τετραγωνική συνάρτηση μιας μεταβλητής $y = ax^2 + bx + c$.
- Μια νέα περίοδος ξεκίνησε το 1646. Ο Γάλλος νομικός και ερασιτέχνης μαθηματικός Pierre de Fermat πρότεινε μια μέθοδο υπολογισμού μέγιστων και ελάχιστων σημείων οποιασδήποτε διαφορίσιμης συνάρτησης, θέτοντας την παράγωγο της συνάρτησης ίση με μηδέν. Καθώς την συγκεκριμένη περίοδο η βελτιστοποίηση δεν αποτελούσε σημαντικό κλάδο των εφαρμοσμένων μαθηματικών, τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής δεν έτυχαν μεγάλης προσοχής από τους μαθηματικούς της εποχής.
- Μια καινούρια εποχή για τη βελτιστοποίηση εισήχθη με την επινόηση του γραμμικού προγραμματισμού, ο οποίος αναπτύχθηκε με σκοπό την όσο το δυνατόν αποδοτικότερη εξυπηρέτηση των αναγκών εφοδιασμού των στρατευμάτων κατά το Β' Παγκόσμιο Πόλεμο. Στη συνέχεια, το 1951, ο μαθηματικός Albert Tucker και ο φοιτητής του, Harold Kuhn, δημοσίευσαν τις συνθήκες Kuhn-Tucker, οι οποίες θεωρούνται ο θεμέλιος λίθος της βελτιστοποίησης μη γραμμικού προγραμματισμού. Παρ' όλα αυτά, η θεωρία του μη γραμμικού

προγραμματισμού όταν οι περιορισμοί είναι όλοι στη μορφή ισοτήτων είχε διατυπωθεί πολύ νωρίτερα από τον Euler και τον Lagrange. Τελικά, τη δεκαετία του 1960, οι G. Zoutendijk, J . B. Rosen, P. Wolfe, M. J . Powell, και άλλοι δημοσίευσαν έναν αριθμό αλγορίθμων για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Αυτοί οι αλγόριθμοι σχηματίζουν το κυρίως σώμα του μη γραμμικού προγραμματισμού.

Σήμερα, η βελτιστοποίηση έχει σημειώσει σημαντική εξέλιξη, βρίσκοντας εφαρμογή σε ένα ευρύ φάσμα επιστημών όπως τα μαθηματικά, η επιστήμη της βιομηχανικής μηχανολογίας, η επιστήμη των υπολογιστών, και η διοικητική επιστήμη.

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης κατά το σχεδιασμό ενός πλοίου ενέχει ορισμένα προβλήματα υπολογιστικής φύσεως, τα οποία καλείται να αντιμετωπίσει ο σχεδιαστής. τα οποία συνίστανται στο ότι η βέλτιστη σχεδίαση ενός πλοίου είναι ένα πρόβλημα μη γραμμικό και ασυνεχές το οποίο εξαρτάται από τα κάτωθι:

Ένα σύνολο μεταβλητών και παραμέτρων, οι οποίες μεταβάλλονται σε ένα εκ των προτέρων ορισμένο εύρος τιμών.

Ένα πλήθος μεγεθών τα οποία πρέπει να παραμείνουν σταθερά ή η διακύμανση τους να διατηρείται εντός συγκεκριμένου εύρους.

Οι μεταβλητές σχεδίασης σε πολλές περιπτώσεις επιφέρουν αντικρουόμενα αποτελέσματα στην υπό εξέταση γεωμετρία ως προς το μέγεθος βελτιστοποίησης. Επίσης η επίπτωσή τους είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η αναγνώριση του μεγέθους επιρροής της καθεμιάς από αυτές.

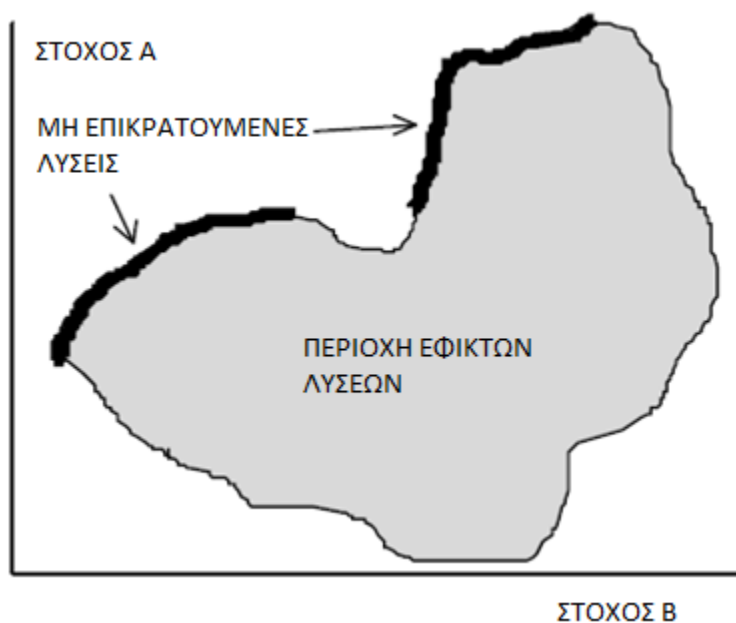
Μία διατύπωση του προβλήματος της βελτιστοποίησης θα μπορούσε να είναι η εξής:

Εύρεση της βέλτιστης τιμής μίας η περισσότερων μεταβλητών σχεδίασης, αρχής γεννωμένης από μία «πατρική» γάστρα, η γεωμετρία της οποίας περιγράφεται από ένα πλήθος γεωμετρικών στοιχείων που εξαρτώνται από αυτές τις μεταβλητές σχεδίασης κι ένα σύνολο άλλων παραμέτρων.

Αυτά τα χαρακτηριστικά της βελτιστοποίησης της γάστρας ενός πλοίου καθιστούν αδόκιμη την εφαρμογή τεχνικών όπως ο γραμμικός, ο μη γραμμικός και ο δυναμικός προγραμματισμός, καθώς επίσης και η μέθοδος των συντελεστών Lagrange.

Σε πλήρη αντιπαράθεση, οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικοί σε προβλήματα τέτοιου τύπου, γεγονός το οποίο βρίσκει εφαρμογή ιδιαίτερα σε περιπτώσεις που έχουμε πρόβλημα βελτιστοποίησης με πολυάριθμες αντικειμενικές συναρτήσεις που ενδεχομένως έχουν αντικρουόμενη εξάρτηση σε σχέση με τις τιμές των μεταβλητών σχεδίασης (πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση).

Η διαδικασία βελτιστοποίησης παράγει εν τέλει ένα σύνολο βέλτιστων λύσεων, οι οποίες είναι ισοδύναμες υπό την έννοια ότι δεν μπορεί μία συγκεκριμένη γεωμετρία να θεωρηθεί αυστηρά ανώτερη από τις υπόλοιπες. Ο γεωμετρικός τόπος του συνόλου των βέλτιστων λύσεων δημιουργεί τη συνοριακή καμπύλη βέλτιστων στην περίπτωση βελτιστοποίησης με δύο αντικειμενικές συναρτήσεις, ενώ στην περίπτωση τριών αντικειμενικών συναρτήσεων παράγει τη συνοριακή επιφάνεια βέλτιστων. Οι έτερες γεωμετρίες που δημιουργούνται κατά την εξέλιξη της διαδικασίας αποτελούν μη επικρατούσες λύσεις, με κριτήριο τις συγκεκριμένες αντικειμενικές συναρτήσεις καθώς υπάρχουν άλλες με καλύτερη επίδοση ως προς τουλάχιστον μία εξ αυτών. Μια τυπική διασπορά των εφικτών/βέλτιστων λύσεων φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 1.1. Πεδίο εναλλακτικών λύσεων ως αποτέλεσμα διαδικασίας βελτιστοποίησης

Μετά την παραγωγή του πλήθους των εναλλακτικών γεωμετριών, είναι στην ευχέρεια του σχεδιαστή να επιλέξει τη μοναδική βέλτιστη λύση που θα χρησιμοποιήσει στη συνέχεια, είτε λαμβάνοντας υπόψη τη βαρύτητα του

κάθε κριτηρίου βελτιστοποίησης των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων είτε βάσει άλλων κριτηρίων που δεν έχουν τεθεί ως αντικειμενικές συναρτήσεις.

1.2 Περιγραφή του Υπό Μελέτη Πλοίου

Η διαδικασία βελτιστοποίησης θα εκτελεστεί με βάση τη γάστρα του περιπολικού ανοικτής θαλάσσης HSY 56 του Πολεμικού Ναυτικού. Η κανονιοφόρος ΚΑΣΟΣ (πρώην ΠΥΡΠΟΛΗΤΗΣ) είναι η πρώτη του συγκεκριμένου τύπου, ο οποίος είναι εξ' ολοκλήρου Ελληνικής σχεδίασης και ναυπήγησης. Καθελκύστηκε στις 16 Σεπτεμβρίου 1992 και ενεργοποιήθηκε στα Ελληνικά Ναυπηγεία ΑΕ (Σκαραμαγκά) στις 4 Μαΐου 1993. Μετά τη Κ/Φ ΚΑΣΟΣ, ακολούθησε η κατασκευή της ίδιου τύπου Κ/Φ ΠΟΛΕΜΙΣΤΗΣ (ύψωση Σημαίας την 16-06-1994). Στη συνέχεια, κατασκευάστηκαν οι τέσσερις Κανονιοφόροι τύπου HSY 56Α, οι οποίες διαθέτουν πανομοιότυπη γάστρα και διαφέρουν μόνο όσο αφορά στις υπερκατασκευές τους.

Στις δύο εικόνες που ακολουθούν φαίνεται η Κ/Φ ΚΑΣΟΣ (HSY 56) και η Κ/Φ ΜΑΧΗΤΗΣ (πρώτη του τύπου HSY 56Α) εν πλω.



Εικόνα 1.2. Κανονιοφόρος ΚΑΣΟΣ (HSY 56) εν πλω



Εικόνα 1.3. Κανονιοφόρος ΜΑΧΗΤΗΣ (HSY 56Α) εν πλω

Στον επόμενο πίνακα φαίνονται μερικά από τα γενικά χαρακτηριστικά του πλοίου:

MAIN CHARACTERISTICS

1611-12

Length overall, L_{OA}	56.50 m
Length between perpendiculars, L_{BP}	51.00 m
Length at waterline, L_{WL}	52.57 m
Beam, B	10.00 m
Beam at waterline, B_{WL}	9.52 m
Depth, D	5.30 m
Draught, T	2.49 m
Displacement, Δ	551.00 mt
Longitudinal Centre of Gravity from O, LCG	-2.70 m
Longitudinal Centre of Flotation from O, LCF	-4.12 m
Vertical Centre of Gravity, VCG	4.04 m
Virtual KG	4.185 m
Transverse Metacenter, KM	5.876 m
Virtual Trans. Metac. Height, GM_V	1.691 m
C_B	0.431
C_M	0.696
C_P	0.619
Non-dimensional radii of gyration	
Roll, i_{xx}/B	0.35
Pitch, i_{yy}/L_{BP}	0.25
Yaw, i_{zz}/L_{BP}	0.25
Wetted Surface, WS	480.00 m ²
Area of Skeg	31.60 m ²
Area of each rudder	3.00 m ²
Length of bilge keels	-
Width of bilge keels	-
Shaft Brackets taken into account	YES

Πίνακας 1.1. Κύρια χαρακτηριστικά της γάστρας HSY 56

Η προωστήρια ισχύς παρέχεται από δύο Wartsila Diesel Nohab 16V25 10000 HP, ενώ για την παροχή ηλεκτρικής ισχύος διαθέτει τρεις γεννήτριες DEMP / MAN με ισχύ 184 KW έκαστη. Η μέγιστη ακτίνα ενέργειας του πλοίου είναι 2500 ναυτικά μίλια.

Οι συνολικά έξι κανονιοφόροι που διαθέτουν την γάστρα που πρόκειται να βελτιστοποιηθεί, αποτελούν πολύτιμες μονάδες του Πολεμικού Ναυτικού καθώς εκτελούν συνεχώς καθήκοντα περιφρούρησης των θαλασσιών συνόρων με σημαντικά μεγαλύτερο χρονικό διάστημα παραμονής εν πλω σε σύγκριση με έτερους τύπους πλοίων του Πολεμικού Ναυτικού. Το γεγονός ότι πλοία του συγκεκριμένου τύπου βρίσκονται σε ενέργεια από το 1993 και

συνεχίζουν να αποτελούν αξιόπιστες μονάδες με υψηλή διαθεσιμότητα καταδεικνύει την πολύ καλή αρχική σχεδίαση τους, ιδιαίτερα αν λάβουμε υπόψη ότι τότε δεν υπήρχαν διαθέσιμα τα σύγχρονα εργαλεία σχεδίασης, κάποια εκ των οποίων χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση του παρόντος.

Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό Πλαίσιο και Εργαλεία της Βελτιστοποίησης

2.1 Αντικειμενικές Συναρτήσεις

Η βελτιστοποίηση που θα πραγματοποιηθεί στη παρούσα μελέτη είναι μια διαδικασία πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, η οποία αποσκοπεί στην βελτίωση των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών μιας δοθείσας γάστρας.

Αρχικά, πρέπει να ενσωματωθεί στη διαδικασία ένας περιορισμός στο εκτόπισμα της γάστρας, εντός ενός εύρους που θεωρείται αποδεκτό. Αυτό είναι απαραίτητο διότι, σε περίπτωση που δεν δεσμευτεί το εκτόπισμα του πλοίου, υπάρχει μεγάλη πιθανότητα η διαδικασία βελτιστοποίησης να οδηγήσει σε μορφές γάστρας με σημαντικά χαμηλότερο εκτόπισμα, οι οποίες δεν θα πληρούν τις απαιτήσεις του σχεδιαστή.

Όσο αφορά τις παραμέτρους σχεδίασης, αυτές θα επιλεγούν κατά τη παραμετρική σχεδίαση της γάστρας στο CAESES και θα έχουν τη δυνατότητα μεταβολής εντός συγκεκριμένου εύρους τιμών. Η τιμή της κάθε παραμέτρου θα μεταβάλλεται από τον αλγόριθμο κατά την βελτιστοποίηση και θα εκτελείται έλεγχος εάν η γεωμετρία που προκύπτει πληρεί τον περιορισμό εκτοπίσματος. Θα γίνει λεπτομερής αναφορά στις παραμέτρους σχεδίασης που επιλέχθηκαν σε επόμενο κεφάλαιο.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης αποσκοπεί στην βελτίωση των επόμενων δύο υδροδυναμικών χαρακτηριστικών της πατρικής γάστρας :

- Την αντίσταση κυματισμού
- Των δυναμικών αποκρίσεων σε κυματισμούς

Από τα χαρακτηριστικά που παρατέθηκαν ανωτέρω θα προκύψουν οι αντικειμενικές συναρτήσεις, οι οποίες δίνουν στην πραγματικότητα αλγεβρικά μεγέθη τα οποία ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης θα επιδιώξει να ελαχιστοποιήσει. Επομένως, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι οι αντικειμενικές συναρτήσεις πρέπει να προσδιοριστούν προσεκτικά ώστε να αντιπροσωπεύουν τους στόχους που έχουν τεθεί, απεικονίζοντας με ακρίβεια το περιβάλλον και τις συνθήκες μέσα στις οποίες το πλοίο θα περάσει τον επιχειρησιακό του βίο.

Όσον αφορά στην αντίσταση του πλοίου σε ήρεμο νερό, το κριτήριο βελτιστοποίησης θα είναι η αντίσταση κυματισμού στην ταχύτητα των 25 κόμβων.

Έτσι η πρώτη αντικειμενική συνάρτηση που αφορά την αντίσταση θα είναι αυτή που φαίνεται στη συνέχεια :

$$F_1 = \frac{R_{Wi}}{R_{W0}} \Bigg|_{25 \text{ knots}}$$

όπου :

- R_{W0} η αντίσταση κυματισμού της πατρικής γάστρας και
- R_{Wi} η αντίσταση κυματισμού της εκάστοτε βελτιστοποιημένης γάστρας

Όσον αφορά απόκριση του πλοίου σε κυματισμούς και με γνώμονα την ασφαλή εργασία του πληρώματος, θα τεθεί το δεύτερο κριτήριο της βελτιστοποίησης το οποίο αφορά την ελαχιστοποίηση της κάθετης επιτάχυνσης στο ύψος της γέφυρας και ενώ το πλοίο θα πλέει με ταχύτητα 25 κόμβων σε θάλασσα με μετωπικούς κυματισμούς.

Κατ' αυτό τον τρόπο, η δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση καθορίζεται ως εξής :

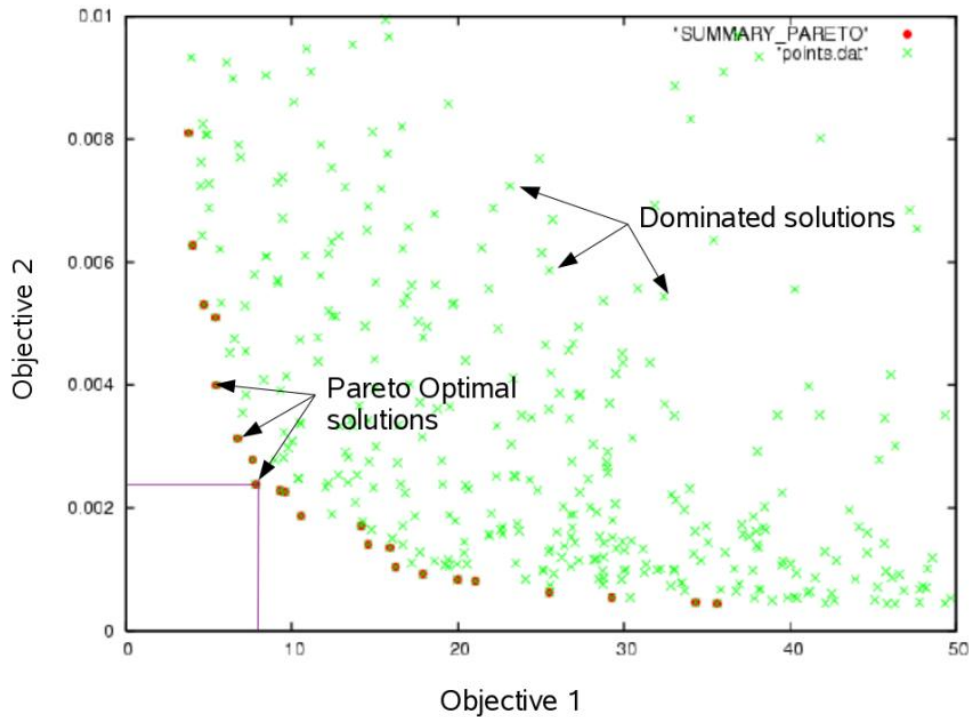
$$F_2 = \frac{RMS(a_{z_i})}{RMS(a_{z_0})} \Bigg|_{\substack{25 \text{ knots} \\ 180^\circ}}$$

Όπου :

- a_{z_0} η κάθετη επιτάχυνση της γέφυρας της πατρικής γάστρας
- a_{z_i} η κάθετη επιτάχυνση της γέφυρας της εκάστοτε βελτιστοποιημένης γάστρας

Αφού ολοκληρώθηκε ο προσδιορισμός των αντικειμενικών συναρτήσεων, έχουμε πλέον ορίσει το πρόβλημα ελαχιστοποίησης που θα κληθεί να επεξεργαστεί ο γενετικός αλγόριθμος. Τα αποτελέσματα των συναρτήσεων F_1 και F_2 θα αναπαρασταθούν στο επίπεδο σύστημα συντεταγμένων, όπου υπό τη μορφή σημείων θα έχουμε το σύνολο των αναπαραχθέντων γεωμετριών. Μέσω του συγκεκριμένου διαγράμματος αναμένεται να εντοπιστεί το υποσύνολο των γεωμετριών που αποτελούν το γεωμετρικό τόπο της συνοριακής καμπύλης βέλτιστων λύσεων (Pareto front).

Μια τυπική μορφή του διαγράμματος φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 2.1. Διασπορά εναλλακτικών λύσεων και βέλτιστες λύσεις από διαδικασία βελτιστοποίησης

2.2 Γενετικοί Αλγόριθμοι

Η διαδικασία βελτιστοποίησης προϋποθέτει τη χρήση ενός αλγόριθμου ώστε να είναι εφικτή η αξιολόγηση των παραγόμενων λύσεων και κατ' επέκταση η συνεχής βελτίωσή τους. Στο πλαίσιο της παρούσης εργασίας ο τύπος του αλγόριθμου που χρησιμοποιήθηκε είναι γενετικός.

Όπως έχει προαναφερθεί, οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν ευρεία εφαρμογή σε προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Καθώς αποδεικνύονται ιδιαίτερα αποτελεσματικοί, έχουν τύχει μεγάλης εξέλιξης με αποτέλεσμα να υπάρχει πλέον σημαντικό πλήθος αυτών που ανταποκρίνεται σε κάθε ανάγκη.

Στα προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, όπου οι αντικειμενικές συναρτήσεις είναι περισσότερες της μίας, προκύπτουν περισσότερες από μία βέλτιστες λύσεις, υπό την έννοια ότι καμία από αυτές δεν μπορεί να θεωρηθεί καλύτερη από τις υπόλοιπες όπως θα εξηγηθεί παρακάτω. Στόχος των γενετικών αλγορίθμων είναι η ανάδειξη των βέλτιστων λύσεων σε μη γραμμικά προβλήματα, προσδιορίζοντας την υφή του προβλήματος που

αντιμετωπίζει ο σχεδιαστής βάσει των μεταβλητών, των περιορισμών και των κριτηρίων βελτιστοποίησης.

Οι βέλτιστες λύσεις προσδιορίζονται ως εκείνες, σε σχέση με τις οποίες, οι έτερες λύσεις δεν έχουν καλύτερη επίδοση ως προς όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις. Οι δύο αντικειμενικές συναρτήσεις που έχουν τεθεί στη παρούσα εργασία, αντιπροσωπεύουν δύο διαφορετικά χαρακτηριστικά του πλοίου. Για αυτό το λόγο προκύπτει ένα πλήθος βέλτιστων λύσεων, λόγω του ότι υπάρχει αδυναμία απευθείας σύγκρισης των δύο συναρτήσεων. Επομένως, πρέπει να γίνει αναπαράσταση αυτών των δύο κριτηρίων σε ένα κοινό επίπεδο σύστημα συντεταγμένων, στο οποίο ο κάθε άξονας θα αντιπροσωπεύει μία εκ των συναρτήσεων. Αυτό θα επιτρέψει την καλύτερη αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, μέσω του ευκολότερου εντοπισμού όλων των ισοδύναμα βέλτιστων λύσεων και τελικά θα οδηγήσει στην επιλογή της γεωμετρίας που ανταποκρίνεται καλύτερα στις απαιτήσεις.

Η πραγματική φυσική εξέλιξη των γενεών αποτέλεσε την έμπνευση για την ανάπτυξη των γενετικών αλγορίθμων, στην οποία οφείλουν και το όνομά τους. Πιο αναλυτικά, με βάση ορισμένες αρχικές σχεδιάσεις (γονείς) δημιουργούνται νέες (απογόνοι), αρχικά μέσω της διασταύρωσης των χαρακτηριστικών των γονέων και, έπειτα, μέσω της μετάλλαξης των χαρακτηριστικών των απογόνων. Βασική ιδιότητα της διαδικασίας που ακολουθούν οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι ότι οι αρχικές σχεδιάσεις, εκ των οποίων παράγονται οι νέες, αποτελούν σχεδιάσεις με επιθυμητά χαρακτηριστικά. Για την παραγωγή των επόμενων γενεών, έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα επιλογής οι αρχικές σχεδιάσεις που διαθέτουν καλύτερη απόδοση ως προς τα κριτήρια από τις υπόλοιπες. Αυτή η λογική με την οποία εκτελείται η επιλογή αποτελεί το κύριο πλεονέκτημα των γενετικών αλγορίθμων, καθιστώντας εφικτή την συνεχή βελτίωση των λύσεων έως ότου καταλήξουμε στις βέλτιστες στο τέλος της διαδικασίας.

Είναι πλέον σαφές ότι οι δύο βασικές ομοιότητες των γενετικών αλγορίθμων με την φυσική εξέλιξη είναι η τυχαιότητα κατά την παραγωγή απογόνων και η επιβίωση των καλύτερων μελών. Η ιδιότητα της διασταύρωσης των χαρακτηριστικών των γονέων, είναι η παράγοντας διαφοροποίησης αυτών σε σχέση με τους απογόνους τους. Σε συνδυασμό με την ιδιότητα της μετάλλαξης των χαρακτηριστικών ενός απογόνου, υπάρχει η δυνατότητα επιπρόσθετης βελτίωσης του απογόνου σε σύγκριση με τους γονείς. Σημαντικό ρόλο κατέχει σε αυτή την εξέλιξη η τυχαιότητα, η οποία εισάγεται μέσω κάποιας προστεθειμένης πιθανότητας εμφάνισης των ιδιοτήτων της διασταύρωσης και της μετάλλαξης.

Αν στην φύση υπήρχε η δυνατότητα να επιλεγούν οι απόγονοι τα καλύτερα χαρακτηριστικά από τους γονείς τους, τότε με βεβαιότητα θα εμφανίζονταν συνεχώς καλύτερες γενιές απογόνων. Παρότι στην πραγματικότητα δεν είναι δυνατό να συμβεί το παραπάνω, οι γενετικοί αλγόριθμοι λειτουργούν με βάση αυτή την αρχή.

2.3 Ο Αλγόριθμος NSGA-II

Ο γενετικός αλγόριθμος που θα χρησιμοποιηθεί είναι ενσωματωμένος στο πρόγραμμα CAESSES FRIENDSHIP και ονομάζεται NSGA-II (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II). Αποτελεί εξελιγμένη εκδοχή του NSGA, του οποίου η ονομασία ελήφθη από την λογική διαδικασία κατάταξης των σχεδιάσεων μίας γενιάς και των απογόνων της, ώστε να προκύψει η επόμενη γενιά. Η διαδικασία που εκτελείται από τον NSGA-II περιγράφεται βηματικά ως κάτωθι :

- Παράγεται ένας πληθυσμός αρχικών σχεδιάσεων.
- Παράγεται ένας πληθυσμός απογόνων, ισάριθμος με τον πληθυσμό αρχικών σχεδιάσεων.
- Κατατάσσει όλες τις προηγούμενες σχεδιάσεις (γονείς και απογόνους) σε επίπεδα ανάλογα με την επίδοση τους στα κριτήρια βελτιστοποίησης.
- Οι σχεδιάσεις κάθε επιπέδου κατατάσσονται σε φθίνουσα σειρά απόστασης από τις γειτονικές τους.
- Παράγεται μια νέα γενιά σχεδιάσεων με ίδιο αριθμό μελών με τον αρχικό πληθυσμό, βάσει της κατάταξής τους.
- Επανάληψη των βημάτων 2 ως 5.

Η κατάταξη της εκάστοτε σχεδίασης εκτελείται με βάση με την υπεροχή τους ως προς τις έτερες και την απόστασή τους από γειτονικές τους και αναπαρίσταται στο επίπεδο που ορίζουν οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων. Ορίζοντας ως x_{ix} τις μεταβλητές απόφασης αριθμού n και ως $f_j(x_i)$ τις αντικειμενικές συναρτήσεις αριθμού m , το πρόβλημα βελτιστοποίησης καθορίζεται ως κάτωθι :

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

Μεταξύ δύο σχεδιάσεων p και q , η πρώτη σχεδίαση είναι καλύτερη από τη δεύτερη ($p < q$), στην περίπτωση που ισχύει :

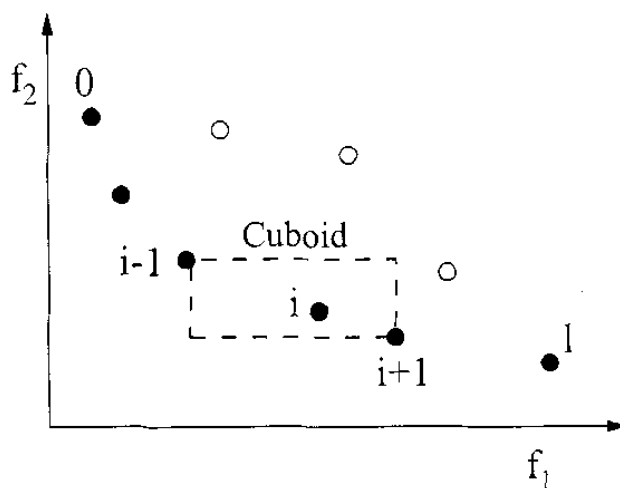
- $f_j(X_1) \leq f_j(X_2)$
- $f_k(X_1) < f_k(X_2)$

Από τον μαθηματικό ορισμό του προβλήματος ελαχιστοποίησης που παρατέθηκε ανωτέρω, γίνεται κατανοητό ότι το κριτήριο προκειμένου μία σχεδίαση να υπερέχει μιας άλλης είναι η πρώτη να έχει όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις **τουλάχιστον** ισοδύναμες (ή καλύτερες), ενώ επίσης να έχει **τουλάχιστον** μία από αυτές υπερέχουσα των υπολοίπων.

Οι σχεδιάσεις κατατάσσονται σε επίπεδα, όπως αναφέρθηκε στο τρίτο βήμα της διαδικασίας που ακολουθεί ο NSGA-II, μέσω επαναλαμβανόμενων ελέγχων υπεροχής της καθεμίας. Πιο αναλυτικά:

- Οι σχεδιάσεις σε σύγκριση με τις οποίες δεν υφίσταται κάποια άλλη που να υπερέχει, αποτελούν το πρώτο επίπεδο.
- Από τις έτερες σχεδιάσεις εντοπίζονται εκείνες από τις οποίες υπερέχει μία μόνο άλλη σχεδίαση και αυτές συγκροτούν το δεύτερο επίπεδο.
- Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου το σύνολο των σχεδιάσεων που έχουν παραχθεί στην δεδομένη επανάληψη, να έχει καταταγεί σε κάποιο επίπεδο.

Το σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζει, σε πρόβλημα δύο αντικειμενικών συναρτήσεων, την παραπάνω διαδικασία κατάταξης των σχεδιάσεων σε επίπεδα.



Εικόνα 2.2. Κατάταξη λύσεων κατά τη λειτουργία του αλγορίθμου NSGA-II

Μετά το πέρας της κατάταξης των σχεδιάσεων σε επίπεδα, εκτελείται η κατάταξη των σχεδιάσεων κάθε επιπέδου σύμφωνα με την απόστασή τους από τις άλλες λύσεις κατά φθίνουσα σειρά. Αυτό αποσκοπεί στην επίτευξη όσο το δυνατόν μεγαλύτερου εύρους λύσεων στο επίπεδο που ορίζουν οι

αντικειμενικές συναρτήσεις, γεγονός που δίνει πλεονέκτημα στον συγκεκριμένο αλγόριθμο καθώς σε παλαιότερες μεθόδους το εύρος καθοριζόταν από τον σχεδιαστή μέσω μίας τιμής διασποράς.

Επίσης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι στο τελευταίο επίπεδο κατάταξης ο αριθμός λύσεων που επιλέγεται ισούται με τον αριθμό των λύσεων της πρώτης γενιάς, ενώ οι υπόλοιπες λύσεις απορρίπτονται ως χειρότερες αυτών που επελέγησαν.

2.4 Αντίσταση Πλοίου

2.4.1 Εισαγωγή

Για την κίνηση ενός πλοίου, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός προωστήριου μέσου το οποίο καλείται να υπερνικήσει την αντίσταση, δηλαδή την δύναμη που αντιτίθεται στην ώση. Προκειμένου να γίνει η βέλτιστη επιλογή προωστήριας εγκατάστασης θα πρέπει να έχει προηγηθεί ο υπολογισμός της αντίστασης. Είναι, επομένως, φανερό ότι η απόδοση του πλοίου σε οικονομικό επίπεδο είναι συνδεδεμένη άρρηκτα με τον ακριβή υπολογισμό και ελαχιστοποίηση της αντίστασης στο στάδιο της σχεδίασης, καθώς με βάση το τελευταίο προσδιορίζεται το μέγεθος (άρα και του κόστος) της προωστήριας εγκατάστασης, η έλικα και η κατανάλωση καυσίμου.

Παρότι το μέσο πρόωσης επιδρά στην αντίσταση του πλοίου, ο υπολογισμός της θεωρείται ως αποτέλεσμα υπέρθεσης επιμέρους συνιστωσών για λόγους απλούστευσης. Κατ' αυτή την έννοια, αν θα ήταν εφικτό να έχουμε μια εξωτερική πηγή να προωθεί την γυμνή γάστρα, η οποία δεν θα έχει καμία αλληλεπίδραση με τη γάστρα ή το νερό, θα ήταν δυνατό να εξαχθεί μία συνολική αντίσταση R_T , η οποία μπορεί να αναλυθεί σε συνιστώσες. Οι επιμέρους συνιστώσες εξαρτώνται από την αλληλεπίδραση του πλοίου με την ελεύθερη επιφάνεια, φαινόμενα συνεκτικότητας και μεταβολής της κατανομής των πιέσεων.

Η αντίσταση ενός σκάφους εξαρτάται από δύο αδιάστατους συντελεστές – τους αριθμούς Reynolds και Froude. Αυτές ορίζονται ως εξής:

$$Re = \frac{U \times L}{\nu}$$

$$Fn = \frac{U}{\sqrt{g \times L}}$$

όπου:

- U η ταχύτητα του σκάφους,
- L το μήκος της ισάλου του,
- ν η κινηματική συνεκτικότητα και
- g η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Ο αριθμός Froude εκφράζει το λόγο αδρανειακών και βαρυτικών δυνάμεων και επηρεάζει την αντίσταση πίεσης, ενώ ο αριθμός Reynolds εκφράζει τον λόγο αδρανειακών και συνεκτικών δυνάμεων και επιδρά στην αντίσταση τριβής.

Γενικά, η αντίσταση ενός σκάφους το οποίο κινείται σε ήρεμο νερό εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την ταχύτητά του, το εκτόπισμά του και την μορφή της γάστρας του. Η συνολική αντίσταση R_T αναλύεται στις κάτωθι κύριες συνιστώσες:

- αντίσταση κυματισμού
- αντίσταση τριβής
- αντίσταση λόγω πιέσεων συνεκτικότητας
- αντίσταση παρελκόμενων και
- αντίσταση ανέμου

2.4.2 Αντίσταση Κυματισμού

Ένα σώμα κινούμενο σε ήρεμο νερό παράγει κυματισμούς, λόγω του πεδίου πιέσεων που δημιουργείται γύρω του και το οποίο μεταφέρεται υπό τη μορφή ενέργειας από το σώμα στο ρευστό. Αυτή η ροή ενέργειας μεταφράζεται σαν δύναμη που αντιτίθεται στην κίνηση του σώματος και αποτελεί την αντίσταση κυματισμού.

Σε κάθε βυθισμένο σώμα επιδρά μια κάθετη, προς τον πυθμένα του, δύναμη, οφειλόμενη στη δημιουργία κυματισμού στην επιφάνεια του ρευστού. Η ένταση της δύναμης μειώνεται με την αύξηση του βάθους έως ότου να γίνει αμελητέα. Αυτό το φαινόμενο υφίσταται σε βάθη περίπου ίσα με το μισό του μήκους του σώματος. Για ένα κυματισμό με μήκος λ σε βαθύ νερό, η ταχύτητα ορίζεται σαν:

$$C^2 = \frac{g \times \lambda}{2\pi}$$

Καθώς ο κυματισμός κινείται μαζί με το πλοίο, η ταχύτητα C εξισώνεται με την ταχύτητα του σκάφους και το μήκος λ είναι ανάλογο του μήκους του σκάφους. Κατ' αυτό τον τρόπο, ο ανωτέρω αδιάστατος συντελεστής διαμορφώνεται ως $V^2/g\lambda$ ή $V/\sqrt{g\lambda}$ και ονομάζεται αριθμός Froude. Αυτός ο αδιάστατος αριθμός παίζει καθοριστικό ρόλο στην αντίσταση κυματισμού.

Η αντίσταση κυματισμού είναι υπολογίζεται από το πρόγραμμα SWAN 2 του οποίου η λειτουργία θα αναλυθεί στη συνέχεια.

2.4.3 Αντίσταση Τριβής

Το νερό, διά μέσω του οποίου γίνεται η κίνηση του πλοίου, διαθέτει κάποιο ιξώδες. Ένα σώμα κινούμενο εντός ρευστού που βρίσκεται σε ηρεμία, συμπαρασύρει ένα λεπτό στρώμα του ρευστού το οποίο εφάπτεται στην επιφάνεια του και δεν έχει ταχύτητα σχετική με το σώμα. Ταυτόχρονα, το ρευστό παραμένει σε ηρεμία σε μία ικανή απόσταση από το σώμα, επομένως η ταχύτητα του ρευστού παρουσιάζει αύξηση κοντά στην επιφάνεια του σώματος και μειώνεται σταδιακά μακρύτερα από αυτό. Η περιοχή που παρατηρούνται μεγάλες μεταβολές της ταχύτητας ονομάζεται οριακό στρώμα. Το πάχος του οριακού στρώματος δεν μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια καθώς θεωρητικά εκτείνεται έως το άπειρο, όμως συμβατικά θεωρείται ως η απόσταση όπου η ταχύτητα του ρευστού είναι ίση με το 1% της ταχύτητας κίνησης του σώματος.

Το ρευστό δέχεται διάτμηση λόγω της κλίσης της ταχύτητας του σε σχέση με σώμα, οπότε στο σώμα επάγεται μία αντίσταση, η οποία ονομάζεται αντίσταση τριβής. Αν v η ταχύτητα του ρευστού και y η απόσταση από το σώμα, τότε η διατμητική τάση είναι:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy}$$

Για αριθμούς Reynolds μικρότερους από 3×10^5 (ή έως και 10^6), υπάρχει στρωτή ροή όπου η διάτμηση οφείλεται εξ' ολοκλήρου στην κίνηση των μορίων. Για μεγαλύτερους αριθμούς Reynolds έχουμε τυρβώδη ροή όπου εμφανίζεται το ίδιο φαινόμενο με την στρωτή ροή, όμως παράλληλα υφίσταται μια αλληλεπίδραση λόγω της μεταφοράς μάζας ανάμεσα σε γειτονικά στρώματα του ρευστού.

Για λόγους απλούστευσης, η αντίσταση τριβής διαιρείται σε δύο συνιστώσες. Η πρώτη είναι η αντίσταση που προκύπτει από μια επίπεδη πλάκα επιφάνειας ίδιας με το πλοίο και η δεύτερη είναι η επαυξημένη αντίσταση τριβής λόγω του πραγματικού σχήματος του πλοίου. Επιπλέον, ένας ακόμα παράγοντας που λαμβάνεται υπόψη είναι η τραχύτητα της γάστρας η οποία εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους, όπως η ποιότητα των συγκολλήσεων και των διεργασιών κατασκευής των ελασμάτων.

2.4.4 Αντίσταση Λόγω Πιέσεων Συνεκτικότητας

Η συνολική αντίσταση αποτελεί το άθροισμα των πιέσεων που ασκούνται κατά μήκος του πλοίου. Η δημιουργία κυματισμών είναι η μία συνιστώσα

και αναφέρθηκε παραπάνω. Το έτερο τμήμα αντίστασης πιέσεων οφείλεται σε φαινόμενα συνεκτικότητας που λαμβάνουν χώρα στο πρυμναίο τμήμα του πλοίου και αποτελείται είτε από φορτίσεις λόγω ασυνεχειών της γάστρας είτε από την αύξηση του οριακού στρώματος, ιδιαίτερα σε σημεία αποκόλλησης της ροής. Επομένως η μορφή της γάστρας καθορίζει το μέγεθος αυτών των συνιστωσών, για αυτό και η επαγόμενη αντίσταση ονομάζεται και αντίσταση μορφής, η οποία είναι πρωτίστως σημαντική για πλοία μεγάλου συντελεστή γάστρας.

2.4.5 Αντίσταση Ανέμου

Ο αέρας αντιτίθεται στην κίνηση του πλοίου καθότι κατά την ροή του πάνω στις υπερκατασκευές συναντά ασυνέχειες με συνέπεια να υφίσταται αποκόλληση ροής. Για αυτό το λόγο, η αντίσταση ανέμου μεταβάλλεται αναλόγως του τετραγώνου της ταχύτητας του πλοίου. Για πλοίο που κινείται με πλήρη ισχύ και σε κατάσταση ανέμου η οποία είναι μηδέν, η αντίσταση του ανέμου συνιστά το 2-4% της συνολικής. Για πλοίο που κινείται αντίθετα στη κατεύθυνση του ανέμου, και με δεδομένο ότι κινούνται με την ίδια ταχύτητα, η αντίσταση τετραπλασιάζεται αφού η σχετική τους ταχύτητα είναι διπλάσια. Επομένως, σε περίπτωση κακών καιρικών συνθηκών η αντίσταση του ανέμου δύναται να μειώσει σημαντικά την ταχύτητα του πλοίου.

2.4.6 Αντίσταση Παρελκόμενων

Η ανάλυση της αντίστασης ενός πλοίου μέχρι αυτό το σημείο δεν συμπεριλάμβανε την επίδραση των παρελκόμενων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα παρελκόμενων είναι το πηδάλιο ή ο άξονας του πλοίου, επομένως γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι το κάθε παρελκόμενο έχει δικό του μήκος το οποίο διαφέρει σημαντικά από το μήκος του πλοίου και, άρα έχει ξεχωριστό αριθμό Reynolds. Στην πραγματικότητα, κάθε παρελκόμενο επάγει τη δική του αντίσταση στο πλοίο που πρέπει να μετατραπεί με ξεχωριστή κλίμακα από τις πειραματικές στις πραγματικές συνθήκες. Η αντίσταση των παρελκόμενων δεν είναι μεγάλου μεγέθους σε σύγκριση με τις άλλες κατηγορίες αντίστασης οπότε τυχόν μικρές ανακρίβειες στον προσδιορισμό της δεν επηρεάζουν σημαντικά την συνολική αντίσταση. Υπολογίζεται συνήθως μέσω εμπειρικών τύπων ή μέσω πειραμάτων σε δεξαμενή, συνήθως υπό τη θεώρηση ότι η αντίσταση τους είναι και αυτή ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας του πλοίου, ώστε να έχει σταθερή συμβολή στον αδιάστατο συντελεστή της αντίστασης.

2.5 Η Απόκριση του Πλοίου σε Θαλάσσιους Κυματισμούς

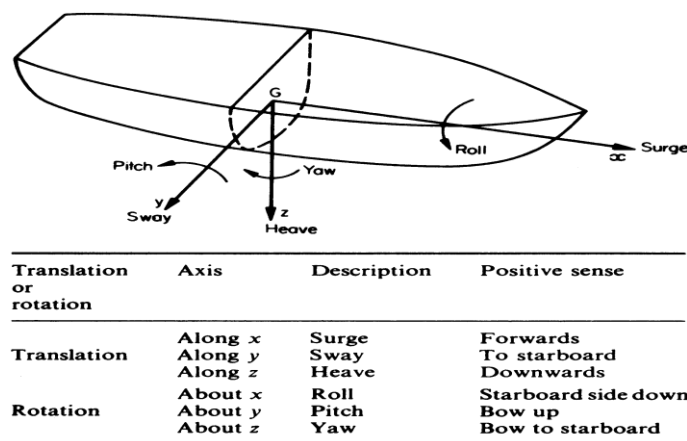
2.5.1 Εισαγωγή

Σημαντικός παράγοντας της επιχειρησιακής του ικανότητας του πλοίου αποτελεί η παράμετρος της αξιοπλοΐας, η οποία ενέχει την ικανότητα του πλοίου να παραμένει ευσταθές και να φέρει εις πέρας την αποστολή του. Η αξιοπλοΐα, ή αλλιώς seakeeping, αποκτά ιδιαίτερο βάρος στη σχεδίαση ενός πλοίου αν αναλογιστούμε ότι μεγάλου πλάτους κινήσεις του πλοίου μπορούν να δυσχεραίνουν την διατήρηση της πορείας του, αυξάνουν την κατανάλωση καυσίμου, ενώ, εξίσου σημαντικά επηρεάζουν την ευχέρεια εκτέλεσης των καθηκόντων του πληρώματος.

Η αξιοπλοΐα αναλύει τους παράγοντες που συντελούν στα ανωτέρω, όπως είναι οι κινήσεις και η ταχύτητα του πλοίου, η δυναμική των κυματισμών, αλλά και φαινόμενα χαμηλότερης συχνότητας όπως η σφυρόκρουση.

2.5.2 Οι Κινήσεις του Πλοίου

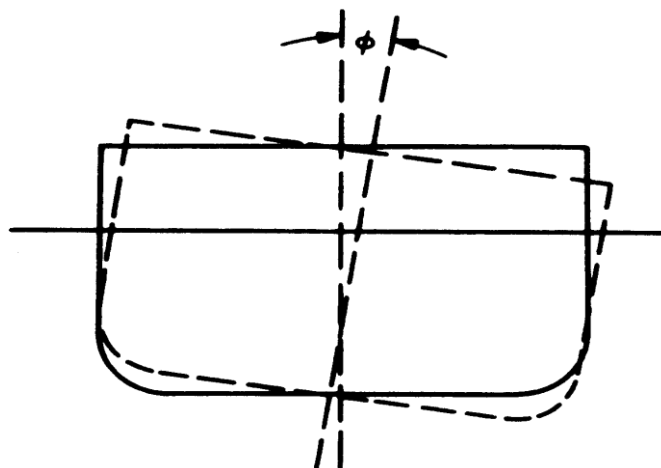
Κάθε σώμα που επιπλέει έχει 6 βαθμούς ελευθερίας, οι οποίοι ορίζουν κινήσεις ως προς τις 6 κατευθύνσεις τους. Αυτές οι κινήσεις προσδιορίζονται ως μετατοπίσεις του κέντρου βάρους του πλοίου και περιστροφές γύρω από άξονες που περνούν από το κέντρο βάρους, όπως φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 2.3. Οι κινήσεις του πλοίου

Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή της κάθε κίνησης που εκτελεί ένα πλοίο.

Rolling



Εικόνα 2.4. Κίνηση Roll του πλοίου

Η ροπή που δέχεται ένα πλοίο, σε περίπτωση εγκάρσιας κλίσης γωνίας φ , είναι τέτοια που τείνει να επαναφέρει το πλοίο στην αρχική του θέση. Για μικρές τιμές της γωνίας φ ισχύει:

$$M = -\Delta \overline{GM}_T \varphi$$

Εφαρμόζοντας τον νόμο του Νεύτωνα:

$$-\Delta \overline{GM}_T \varphi = \frac{\Delta}{g} k_{xx}^2 \frac{d^2 \varphi}{dt^2}$$

$$\frac{d^2 \varphi}{dt^2} + \left(g \frac{\overline{GM}_T}{k_{xx}^2} \right) \varphi = 0$$

Η ανωτέρω διαφορική εξίσωση εκφράζει απλή αρμονική κίνηση με περίοδο T_φ όπου:

$$T_\varphi = 2\pi \left(\frac{k_{xx}^2}{g \overline{GM}_T} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{2\pi k_{xx}}{(g \overline{GM}_T)^{\frac{1}{2}}}$$

Η περίοδος T_φ είναι ανεξάρτητη της γωνίας φ , ενώ το roll διαρκεί όσο η προσέγγιση $\overline{GZ} = \overline{GM}_T \varphi$, δηλαδή ισχύει για γωνίες προσεγγιστικά έως $\pm 10^\circ$. Επιπρόσθετα, αύξηση του \overline{GM}_T επιφέρει αύξηση της σταθερότητας του πλοίου και μείωση της περιόδου T_φ .

Pitching

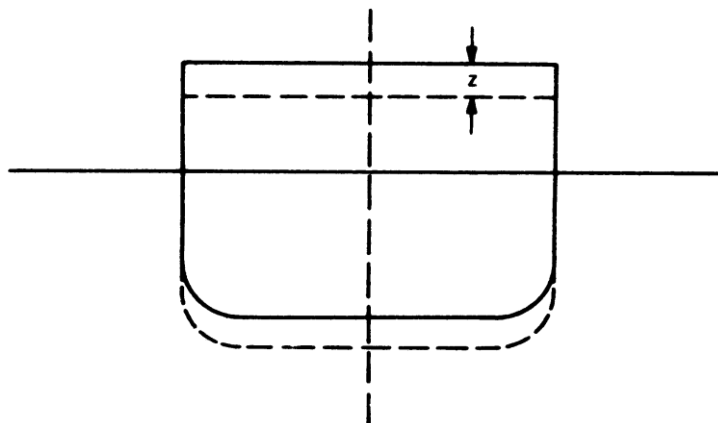
Σε απευθείας αναλογία με το rolling είναι:

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} + \left(g \frac{\overline{GM}_L}{k_{yy}^2} \right) \theta = 0$$

και η περίοδος:

$$T_{\phi} = \frac{2\pi k_{yy}}{(g\overline{GM}_L)^{\frac{1}{2}}}$$

Heaving



Εικόνα 2.5. Κίνηση Heave του πλοίου

Αν z η κατακόρυφη μετατόπιση του πλοίου τότε η επιπρόσθετη ασκούμενη δύναμη F_z τείνει να επαναφέρει το πλοίο στην αρχική του θέση και έχει μέτρο:

$$F_z = -\frac{A_w z}{u}$$

όπου u η πυκνότητα του νερού.

Κατ' αυτό τον τρόπο παίρνουμε την διαφορική εξίσωση της κίνησης:

$$\frac{\Delta}{g} \frac{d^2 z}{dt^2} = -\frac{A_w z}{u}$$

$$\dot{\eta} \quad \frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{g A_w}{u \Delta} z = 0$$

η οποία διαθέτει περίοδο $T = 2\pi \left(\frac{u \Delta}{g A_w} \right)^{\frac{1}{2}}$

Surge

Σε ήρεμο νερό και υπό σταθερή ισχύ, ένα πλοίο κινείται με σταθερή ταχύτητα. Σε περίπτωση συνάντησης με κυματισμούς υφίσταται μια μέση μείωση της ταχύτητας του λόγω της επαυξημένης αντίστασης και της μεταβολής στις συνθήκες λειτουργίας της προπέλας. Η ταχύτητα δεν είναι πλέον σταθερή και προκειμένου καθοριστεί η μεταβολή της ταχύτητας γύρω από την νέα μέση τιμή χρησιμοποιείται ο όρος surge. Σε αυτή τη περίπτωση εξελίσσονται διάφορα φαινόμενα όπως η ύπαρξη μιας τροχιάς

των σωματιδίων των κυματισμών που τείνει να αυξήσει την ταχύτητα του πλοίου στις κορυφές του κυματισμού και να την μειώσει στις κοιλάδες.

Sway

Όταν το σύστημα των κυματισμών συναντά το πλοίο υπό γωνία, τότε στο πλοίο επάγονται κάθετες δυνάμεις που προέρχονται από παρόμοιες πηγές με αυτές που προκαλούν την κίνηση surge. Οι κάθετες στην κίνηση του πλοίου δυνάμεις επιφέρουν μια πλευρική ολίσθηση σε σχέση με την κανονική κατεύθυνση και οι μεταβολές γύρω από μια μέση τιμή ονομάζονται sway.

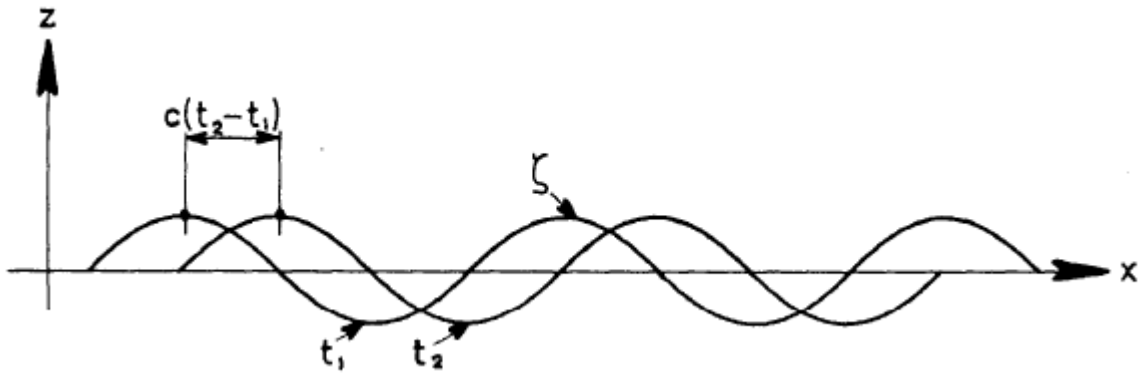
Yaw

Οι κάθετες δυνάμεις που περιγράφηκαν στην παραπάνω παράγραφο ασκούν επίσης ροπές οι οποίες τείνουν να στρέψουν το πλοίο. Ταυτόχρονα έτερες ασκούμενες ροπές, λόγω της λειτουργίας του πηδαλιού, τείνουν να διορθώσουν αυτές τις κινήσεις. Οι αλλαγές στη γωνία, στην οποία κατευθύνεται ένα πλοίο γύρω από τη μέση γωνία ονομάζεται yaw.

2.5.3 Η Συμπεριφορά του Πλοίου σε Κυματισμούς

Ο όρος αξιοπλοΐα ενός πλοίου, περικλείει την απόκριση του κατά την συνάντηση του με θαλάσσιους κυματισμούς. Η συμπεριφορά του πλοίου εξετάζεται χρησιμοποιώντας τις αρχές θεωρίας δυναμικού που καταλήγει σε εξισώσεις απλούστερης μορφής σε σχέση με τις εξισώσεις Navier-Stokes. Η αλληλεπίδραση του πλοίου με τους κυματισμούς εξαρτάται σε μικρό βαθμό από συνεκτικά φαινόμενα. Γι αυτό το λόγο η θεωρία δυναμικού εισάγει μικρό σφάλμα στους υπολογισμούς με εξαίρεση την κίνηση του roll, όπου οι δυνάμεις συνεκτικότητας δεν είναι δυνατό να αμεληθούν.

Οι θαλάσσιοι κυματισμοί θεωρούνται ως μια τυχαία σύνθεση πολλών αρμονικών κυματισμών, καθένας εκ των οποίων διαθέτει τη δική του συχνότητα, πλάτος και κατεύθυνση μετάδοσης. Ένας απλός αρμονικός κυματισμός είναι συνάρτηση του χρόνου και του χώρου.



Εικόνα 2.6. Απλός αρμονικός κυματισμός

Για τους αρμονικούς κυματισμούς, η ανύψωση της επιφάνειας της θάλασσας μπορεί να εκφραστεί σαν μια συνάρτηση δυναμικού. Το δυναμικό είναι μια βαθμωτή συνάρτηση πολλών μεταβλητών, όπου η μερική παράγωγος της ως προς συγκεκριμένη κατεύθυνση δίνει την ταχύτητα του ρευστού σε αυτή τη κατεύθυνση. Γενικά, ισχύει:

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

όπου $P(z)$ αποτελεί συνάρτηση της απομάκρυνσης, ω η κυκλική συχνότητα και k ο κυματικός αριθμός.

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

Για βαθύ νερό η συνάρτηση δυναμικού εκφράζεται ως εξής:

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

όπου ζ_a είναι το πλάτος της απομάκρυνσης κατά την ταλάντωση, η οποία συμπίπτει με το πλάτος του κύματος για αρμονικό κυματισμό. Το δυναμικό αυτό χαρακτηρίζει τον αδιατάρακτο κυματισμό και έτσι δεν αφορά την αλληλεπίδραση του με επιπλέον σώμα.

Κατά την κίνηση του πλοίου σε θάλασσα όπου υφίστανται κυματισμοί, υπάρχουν τρία δυναμικά κυματισμών, ως εξής :

- Δυναμικό προσπίπτοντος κυματισμού
- Δυναμικό περίθλασης
- Δυναμικό ακτινοβολίας

Το δυναμικό προσπίπτοντος κυματισμού αφορά τον αδιατάρακτο κυματισμό και περιγράφηκε νωρίτερα.

Το δυναμικό περιθλάσης προκύπτει από την πρόσκρουση κυματισμών στο στερεό σύνορο του σκάφους. Όταν το μήκος κύματος είναι συγκρίσιμο με το μήκος του πλοίου, το αποτέλεσμα διαφέρει από την περίπτωση της ανάκλασης, η οποία λαμβάνει χώρα όταν το μήκος κύματος είναι αρκετά μικρότερο από το μήκος του σκάφους.

Τελικά, το δυναμικό ακτινοβολίας παράγεται από τους κυματισμούς λόγω των ταλαντωτικών κινήσεων του σκάφους μέσα στο νερό.

Στο πλαίσιο της γραμμικής θεώρησης του προβλήματος συμπεριφοράς του πλοίου, το συνολικό δυναμικό της επιφάνειας της θάλασσας προκύπτει από την γραμμική υπέρθεση των τριών παραπάνω δυναμικών:

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

Το δυναμικό Φ πρέπει να πληροί τις συνθήκες που ακολουθούν:

1. Εξίσωση της συνέχειας ή εξίσωση Laplace

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

2. Συνοριακή συνθήκη μη εισχώρησης στον πυθμένα

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=-h} = 0$$

3. Συνοριακή συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας

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

4. Κινηματική οριακή συνθήκη στο στερεό σύνορο του σώματος

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

5. Συνθήκη ακτινοβολίας

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

6. Συμμετρική και αντισυμμετρική συνθήκη

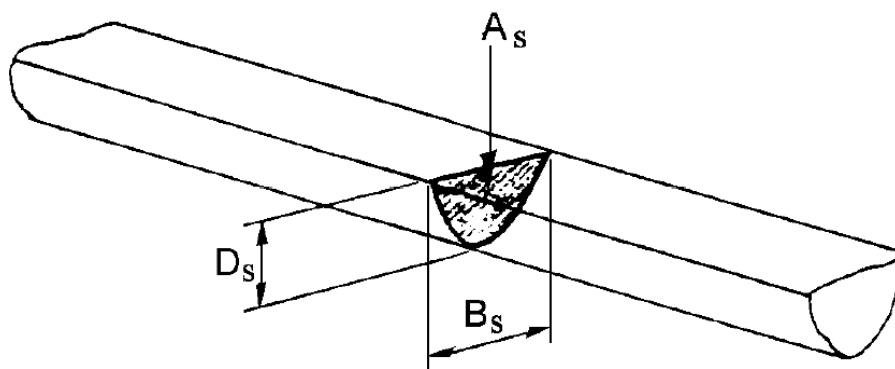
$$\Phi_2(-y, z) = -\Phi_2(y, z), \text{ sway}$$

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

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

Με χρήση των συναρτήσεων δυναμικού δύναται να αναπαρασταθούν διάφορα πεδιακά μεγέθη που βρίσκουν εφαρμογή στη μελέτη της

συμπεριφοράς ενός πλοίου σε κυματισμούς όπως η ταχύτητα του στερεού συνόρου. Αυτή η αναπαράσταση είναι βοηθά στη μελέτη της συμπεριφοράς του σκάφους, στο πλαίσιο της θεωρίας λωρίδων με σκοπό τον υπολογισμό μεγεθών σε εγκάρσιες τομές κατά μήκος του σκάφους. Η φιλοσοφία της θεωρίας λωρίδων φαίνεται σχηματικά στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 2.7. Θεωρία Λωρίδων

Στη θεωρία λωρίδων εκτελείται κατά μήκος ολοκλήρωση των αποκρίσεων στις εγκάρσιες τομές του πλοίου, ώστε να επιλυθεί το τρισδιάστατο πρόβλημα. Κατ' αυτό τον τρόπο, το τρισδιάστατο πρόβλημα διασπάται σε επιμέρους δισδιάστατα.

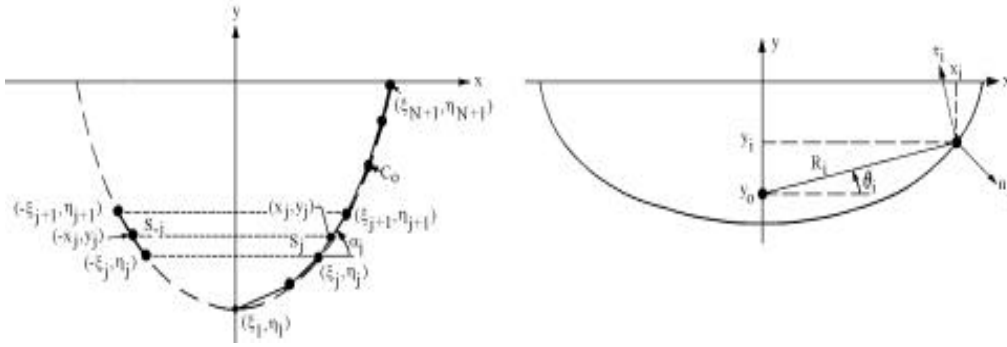
2.5.4 Η θεωρία του Frank

Η επίλυση των δισδιάστατων προβλημάτων στα οποία καταλήγει η θεωρία λωρίδων γίνεται με χρήση της θεωρίας του Frank. Σύμφωνα με αυτή, οι εγκάρσιες τομές του πλοίου μετατρέπονται σε μη κυκλικής διατομής κυλίνδρους μέσω σύμμορφου μετασχηματισμού. Το σύστημα συντεταγμένων κείται στο εγκάρσιο επίπεδο, όπου ο άξονας x εφάπτεται στην ίσαλο και ο άξονας y είναι κάθετος σε αυτή ενώ τα θετικά ορίζονται προς τα πάνω. Το σύνορο της επιφάνειας του νομέα βρίσκεται στο ημιεπίπεδο των αρνητικών τεταγμένων και ο άξονας y αποτελεί άξονα συμμετρίας του. Το ρευστό θεωρείται ασυμπίεστο, μη συνεκτικό, αστρόβιλο και οι επιφανειακές τάσεις θεωρούνται αμελητέες. 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.

Επομένως, το δυναμικό ταχύτητας εκφράζεται (στο πλαίσιο ενός χρονικά αρμονικού προβλήματος συμπεριφοράς με συγκεκριμένη συχνότητα ω) ως κάτωθι:

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

όπου ο δείκτης (m) παίρνει τις τιμές 2, 3 και 4 για κινήσεις στους αντίστοιχους βαθμούς ελευθερίας. Το μέγεθος αναπαριστά το μιγαδικό πλάτος της ταχύτητας εξαρτώμενο από τη θέση και καλείται αλλιώς παραστατικός μιγάδας της ποσότητας. Στην εικόνα που ακολουθεί αναπαρίσταται το σύστημα συντεταγμένων και τα σημεία κατά μήκος του στερεού συνόρου τα οποία χρησιμοποιούνται στη θεωρία του Frank.



Εικόνα 2.8. Η εγκάρσια τομή όπως χρησιμοποιείται στη θεωρία του Frank

Έστω $N+1$ σημεία (ξ, η) τα οποία ανήκουν στο τέταρτο τεταρτημόριο, ώστε να κείτονται στην αρνητική πλευρά του άξονα y . Για μερικώς βυθισμένους κυλίνδρους ισχύει ότι τα σημεία κείτονται στα θετικά του άξονα x , ενώ για πλήρως βυθισμένους κυλίνδρους ισχύει ότι $\xi_{N+1} = \xi_1$ και $\eta_{N+1} < 0$.

Στη συνέχεια γίνεται ένωση των σημείων μέσω ευθύγραμμων τμημάτων, οπότε τελικά δημιουργούνται N ευθύγραμμα τμήματα. Η επιφάνεια δημιουργείται σε συνδυασμό με τον κατοπτρισμό τους στο τρίτο τεταρτημόριο, όπως φαίνεται στην εικόνα. Έστω ότι οι συντεταγμένες, το μήκος και η γωνία ενός τυχαίου τμήματος αναπαρίστανται από τον δείκτη j , οπότε για το αντίστοιχο τμήμα στο τρίτο τεταρτημόριο ισχύει:

$$\xi_{-j} = -\xi_j \text{ και } \eta_{-j} = \eta_j \quad \forall 1 \leq j \leq N+1$$

Τα δυναμικά και οι πιέσεις υπολογίζονται στο μέσο των ευθύγραμμων τμημάτων. Οι συντεταγμένες του μέσου κάθε ευθύγραμμου τμήματος είναι:

$$x_j = \frac{\xi_j + \xi_{j+1}}{2} \text{ και } y_j = \frac{\eta_j + \eta_{j+1}}{2} \quad 1 \leq j \leq N$$

Το μήκος υπολογίζεται ως:

$$|s_j| = \sqrt{(\xi_{j+1} - \xi_j)^2 + (\eta_{j+1} - \eta_j)^2}$$

Και η γωνία:

$$\alpha_i = \arctan\left(\frac{\eta_{i+1} - \eta_i}{\xi_{i+1} - \xi_i}\right)$$

Έτσι έχουμε το διάνυσμα που τέμνει το ευθύγραμμο τμήμα στο μέσο:

$$\vec{\eta}_i = \vec{i} \sin \alpha_i - \vec{j} \cos \alpha_i$$

Ο κύλινδρος εξαναγκάζεται σε μια απλή αρμονική κίνηση με γωνιακή ταχύτητα ω σύμφωνα με την εξίσωση:

$$S^{(m)} = A^{(m)} \cos(\omega t)$$

όπου $m = 2, 3, 4$ (sway, heave και roll αντίστοιχα)

Οι ταλαντώσεις κατά την κίνηση του roll εκτελούνται γύρω από ένα άξονα στο κέντρο συμμετρίας του κυλίνδρου.

Οποιοδήποτε σημείο του κυλίνδρου κινείται με ταχύτητες:

$$\text{Sway: } v^{-(2)} = -iA^{(2)}\omega \sin(\omega t)$$

$$\text{Heave: } v^{-(3)} = -jA^{(3)}\omega \sin(\omega t)$$

Η κίνηση του roll γύρω από ένα σημείο $(0, y_0)$ του άξονα περιγράφεται στην παραπάνω εικόνα. Θεωρώντας ένα σημείο (x, y) προκύπτει:

$$R_I = \sqrt{x^2 + (y - y_0)^2} \text{ και } \theta_i = \arctan\left(\frac{y - y_0}{x}\right) = \arcsin\left(\frac{y - y_0}{R_I}\right) = \arccos\left(\frac{x}{R_I}\right)$$

Έτσι το διάνυσμα της κίνησης ως προς την γωνία θ είναι:

$$\tau_i = \vec{i} \sin \theta + \vec{j} \cos \theta = -\frac{y - y_0}{R_I} \vec{i} + \frac{x}{R_I} \vec{j}$$

$$\text{Έτσι ώστε Roll: } v^{(4)} = R_I A^{(4)} \tau_i = \omega A^{(4)} \{(y - y_0)\vec{i} - x\vec{j}\} \sin(\omega t)$$

Η ταχύτητες στο μέσο είναι:

$$\text{Sway: } v^{(2)} = -\omega A^{(2)} \sin \alpha \sin(\omega t)$$

$$\text{Heave: } v^{(3)} = \omega A^{(3)} \cos \alpha \sin(\omega t)$$

$$\text{Roll: } v^{(4)} = \omega A^{(4)} \{(y - y_0) \sin \alpha + x \cos \alpha\} \sin(\omega t)$$

Και μετά από απλοποίηση:

$$\text{Sway: } v^{(2)} = -\sin \alpha$$

$$\text{Heave: } v^{(3)} = \cos \alpha$$

$$\text{Roll: } v^{(4)} = \{(y - y_0) \sin \alpha + x \cos \alpha\}$$

Συνεπώς, προκύπτει το συμπέρασμα ότι η κίνηση heave είναι συμμετρική ως προς τον y άξονα ενώ οι κινήσεις sway και roll αντισυμμετρικές. Οι εξισώσεις επίσης εφαρμόζονται στα μέσα των N ευθύγραμμων τμημάτων και θεωρείται ότι ο μιγαδικός αριθμός $Q(s)$ που περιγράφει τη δύναμη σε κάθε κομμάτι παραμένει σταθερός αλλά είναι διαφορετικός σε κάθε ένα από αυτά.

Έτσι προκύπτουν 2N αλγεβρικές εξισώσεις και το παρακάτω σύστημα:

$$\text{Re}\{Q^{(m)}(s)\} = Q_j^{(m)} \quad \text{και} \quad \text{Im}\{Q^{(m)}(s)\} = Q_{N+j}^{(m)}$$

Οπότε για $i = 1, 2, \dots, N$

$$+\sum_{j=1}^n \{Q^{(m)} I_{ij}^{(m)}\} + \sum_{j=1}^n \{Q^{(m)} J_{ij}^{(m)}\} = 0$$

$$-\sum_{j=1}^n \{Q^{(m)} J_{ij}^{(m)}\} + \sum_{j=1}^n \{Q_{N+j}^{(m)} I_{ij}^{(m)}\} = 0$$

Εν τέλει, η υδροδυναμική πίεση σε κάθε σημείο κατά μήκος του κυλίνδρου υπολογίζεται από τις ταχύτητες:

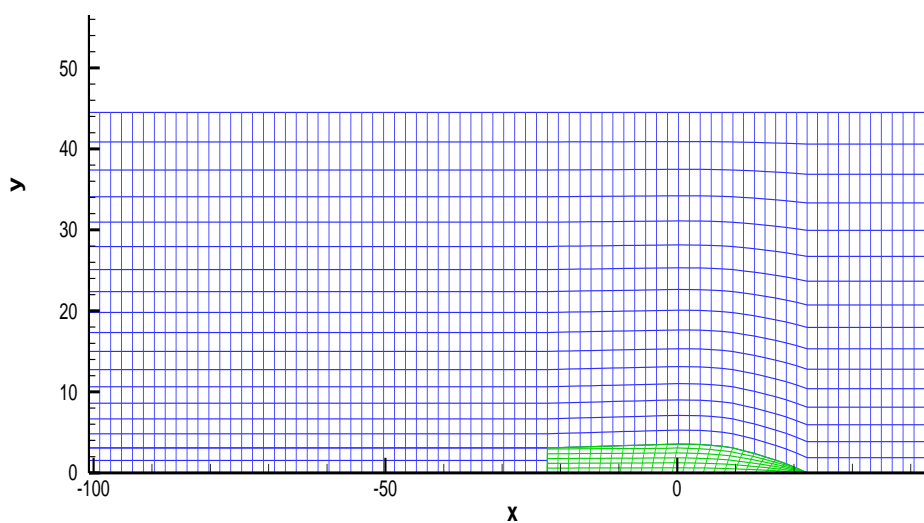
$$p^{(m)}(x, y, \omega, t) = -\rho \frac{\theta \Phi^{(m)}}{\theta t}(x, y, \omega, t)$$

$$p^{(m)}(x, y, \omega, t) = p_a^{(m)}(x, y, \omega, t) \cos(\omega t) + p_v^{(m)}(x, y, \omega, t) \sin(\omega t)$$

2.6 SWAN 2

Το λογισμικό SWAN 2 (Ship Wave ANalysis) είναι ένα υπολογιστικό πρόγραμμα με την δυνατότητα ανάλυσης της ροής γύρω από πλοίο που είτε παραμένει ακίνητο είτε πλέει σε ρευστό άπειρου ή πεπερασμένου βάθους. Οι Kring και Sclanounos (MIT 2005) ανέπτυξαν το συγκεκριμένο λογισμικό. Χρησιμοποιώντας τη θεωρία δυναμικού και τρισδιάστατα τετράπλευρα, στα οποία διανέμονται πηγές Rankine, το SWAN 2 επιλύει τη σταθερή αλλά και τη μη σταθερή ροή στην ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού γύρω από το πλοίο. Τα τετράπλευρα (panels) που δημιουργούνται από το λογισμικό περιγράφουν το στερεό σύνορο του μέρους της γάστρας που βρίσκεται από την ίσαλο και κάτω καθώς και την ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού, χρησιμοποιώντας ένα σύνολο από νομείς που εισάγονται από τον χρήστη καθώς και ορισμένες επιπρόσθετες γραμμές οι οποίες περιγράφουν την υπό εξέταση γάστρα κατά το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας. Η γάστρα πρέπει να διαθέτει συμμετρία ως προς τον διαμήκη άξονα της στην περίπτωση μονόγαστρων πλοίων, ενώ η μορφή της πρύμνης δύναται να είναι μόνο τύπου cruiser ή transom. Όσον αφορά στο πλέγμα τετράπλευρων της ελεύθερης επιφάνειας, η πυκνότητα και η έκταση του μπορεί να καθοριστεί από τον χρήστη, ενώ βάσει αυτής της επιλογής το πρόγραμμα προτείνει το ιδανικό χρονικό βήμα εκτέλεσης των υπολογισμών.

Τυπικό παράδειγμα μιας κατανομής panels στο σύνορο της επιφάνειας της γάστρας και στην ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού αναπαρίσταται στο επόμενο σχήμα.



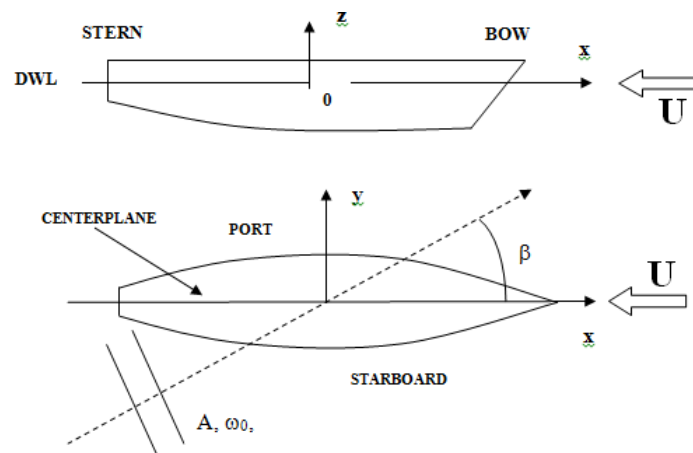
Εικόνα 2.9. Δημιουργία συννοριακών στοιχείων στο στερεό σύνορο και την ελεύθερη επιφάνεια από το SWAN 2

Προκειμένου να εκτελεσθεί το SWAN 2 απαιτεί δύο αρχεία εισόδου εκ των οποίων το πρώτο περιέχει την περιγραφή της γεωμετρίας (.PLN), ενώ το δεύτερο περιέχει δεδομένα για την κατασκευή του πλέγματος και ότι επιπρόσθετο δεδομένο απαιτείται για την εκτέλεση των υπολογισμών (SWAN.INP). Χρησιμοποιώντας τα προαναφερθέντα αρχεία εισόδου, το υποπρόγραμμα makessg.exe παράγει το αρχείο που περιέχει την μορφή του πλέγματος (SSG) που περιγράφηκε προηγουμένως. Διαθέτοντας πλέον τα τρία αρχεία PLN, INP και SSG, το υποπρόγραμμα setup.exe παράγει τα ενδιάμεσα αρχεία JOU. Τέλος, με όλα τα προηγούμενα στη διάθεσή του και χρησιμοποιώντας το υποπρόγραμμα solve.exe, το SWAN 2 επιλύει το πρόβλημα και εξάγει τα αρχεία με δεδομένα για την αντίσταση, το πεδίο κυματισμών και τα υπόλοιπα αποτελέσματα που του έχουν ζητηθεί. Στον επόμενο πίνακα φαίνονται συγκεντρωτικά τα απαραίτητα αρχεία εισόδου και τα αρχεία εξόδου για το κάθε υποπρόγραμμα :

ΑΡΧΕΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ	ΥΠΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑ	ΑΡΧΕΙΑ ΕΞΟΔΟΥ
INP, PLN	makessg	SSG, GEO
INP, PLN, SSG	setup	JOU
INP, PLN, SSG, JOU, [PMS]	solve	OUT, WP, [LDS], [WKE]

Πίνακας 2.1. Σύνοψη υποπρογραμμάτων και αρχείων εισόδου/εξόδου SWAN 2

Στο επόμενο σχήμα φαίνεται το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιεί το SWAN 2 για να ορίσει τα στοιχεία της γεωμετρίας.



Εικόνα 2.10. Σύστημα συντεταγμένων για τον προσδιορισμό της γεωμετρίας στο SWAN 2

Η επιφάνεια της γάστρας αναπαρίσταται μέσω ενός συνόλου καμπυλών που ονομάζονται σταθμοί (stations). Αυτές είναι τρισδιάστατες καμπύλες οι οποίες ορίζονται από ένα σύνολο σημείων. Οι σταθμοί που εισάγονται στο SWAN 2 πρέπει να εισάγονται από πλώρα προς τα πρύμα, ενώ τα σημεία του κάθε σταθμού πρέπει να είναι καταταγμένα από την τρόπιδα προς το κατάστρωμα. Οι σταθμοί δύναται να είναι δύο τύπων:

- Σταθμοί τύπου A
Ορίζουν την μορφή της πλώρης και της πρύμνης, εάν η τελευταία είναι τύπου cruiser και αποτελούν την πρώτη και την τελευταία γραμμή που εισάγεται στο PLN αντίστοιχα. Τα σημεία που ορίζουν τις γραμμές αυτές πρέπει να είναι συνεπίπεδα για συμμετρικό πλοίο δηλαδή να βρίσκονται όλα επί του επιπέδου $y=0$. Επίσης, η αρχή της καμπύλης της πλώρης πρέπει να βρίσκεται πιο πλώρα από την αρχή του πρώτου σταθμού τύπου B και, αντίστοιχα, η αρχή της καμπύλης της πρύμνης πρέπει να βρίσκεται πιο πρύμα της αρχής του τελευταίου σταθμού τύπου B.
- Σταθμοί τύπου B
Χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της γάστρας, υπό την έννοια εγκάρσιων τομών μεταξύ πλώρας και πρύμνης.

Για πλοίο το οποίο διαθέτει συμμετρική γάστρα κατά το διάμηκες, τα σημεία των σταθμών τύπου B περιγράφουν μόνο τη μισή εγκάρσια τομή κατά τα θετικά του y άξονα.

Τα εξαγόμενα αρχεία περιέχουν τη διαμήκη διαγωγή του πλοίου, τη δυναμική βύθιση του και την τιμή του συντελεστή αντίστασης κυματισμού για τη δεδομένη ταχύτητα καθώς και άλλες πληροφορίες. Οι προκύπτουσες τιμές της διαγωγής και της βύθισης μπορούν, κάθε φορά, να επανεισαχθούν στο SWAN 2 για τη δημιουργία νέου αρχείου SSG, εκτελώντας κατ' αυτό τον τρόπο μια επαναληπτική διαδικασία, έως ότου υπάρξει σύγκλιση των τιμών αυτών των δύο μεγεθών.

2.7 SPP-86

Ο κώδικας SPP-86 έχει αναπτυχθεί από τον Τομέα Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής ΕΜΠ. Χρησιμοποιώντας αυτό το υπολογιστικό πρόγραμμα γίνει η εκτίμηση των δυναμικών αποκρίσεων των διαφόρων σχεδιάσεων κατά την πλεύση σε κυματισμούς.

Η θεωρία λωρίδων αποτελεί την βάση προκειμένου ο SPP-86 να εκτελέσει την επίλυση του διδιάστατου υδροδυναμικού προβλήματος. Με είσοδο τις συντεταγμένες των σημείων που ορίζουν το περίγραμμα μιας διατομής της γάστρας, γίνεται υπολογισμός του διδιάστατου δυναμικού για τις κινήσεις heave, sway και roll. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω προσδιορισμού παλλόμενων σημειακών πηγών κατά μήκος του περιγράμματος των διατομών.

Το σύστημα συντεταγμένων του κώδικα βρίσκεται στο εγκάρσιο επίπεδο, με τον άξονα x να εφάπτεται στην ίσαλο, τον άξονα y να είναι κάθετος σε αυτή και με τα θετικά προς τα πάνω. Το περίγραμμα του νομέα βρίσκεται στο ημιεπίπεδο των αρνητικών του άξονα y ο οποίος αποτελεί και άξονα συμμετρίας του. Ο κώδικας υπολογίζει τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά της πρόσθετης μάζας και της απόσβεσης για την δεδομένη συχνότητα ολοκληρώνοντας κατά μήκος του πλοίου.

Οι κάτωθι παραδοχές γίνονται προκειμένου να εφαρμοστεί η θεωρία του Frank:

- Το ρευστό είναι ατριβές και ασυμπίεστο
- Οι επιφανειακές τάσεις δε λαμβάνονται υπόψη
- Το περιβάλλον υδροδυναμικό πεδίο είναι αστρόβιλο
- Οι κινήσεις του πλοίου είναι επαρκώς μικρές, ώστε να λαμβάνονται υπόψη μόνο οι γραμμικοί όροι της συνθήκης ελεύθερης επιφάνειας, της κινηματικής συνθήκης στο σύνορο του σταθμού και η εξίσωση Bernoulli.

Το δυναμικό της ταχύτητας που προσδιορίζεται είναι:

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

όπου ο συντελεστής (m) λαμβάνει τις τιμές 2, 3 και 4 αναλόγως ποιά κίνηση εξετάζεται.

Συνοπτικά, οι συνθήκες που πρέπει να ισχύουν είναι οι εξής :

- Εξίσωση συνέχειας (Laplace)
- Συνοριακή συνθήκη με εισχώρησης στον πυθμένα
- Συνοριακή συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας
- Κινηματική οριακή συνθήκη στο στερεό σύνορο του σώματος
- Συνθήκη ακτινοβολίας

Μέσω της κατανομής παλλόμενων σημειακών πηγών στο σύνορο του νομέα προσδιορίζεται μία συνάρτηση δυναμικού που πληροί τις ανωτέρω συνθήκες ως κάτωθι :

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

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

Διά της υπόθεσης γραμμικότητας, το δυναμικό της ταχύτητας είναι:

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

όπου C_0 το σύνορο του βυθισμένου νομέα στη μέση θέση ισορροπίας του και $Q(s)$ η ένταση της σημειακής πηγής ως συνάρτηση της επικαμπύλιας θέσης της πάνω στον νομέα. Έχοντας προσδιορίσει το δυναμικό ταχύτητας, βρίσκεται η πίεση σε τυχούσα θέση μέσω 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 τις ακόλουθες σχέσεις υπολογίζονται οι υδροδυναμικοί αδρανειακοί συντελεστές και συντελεστές απόσβεσης :

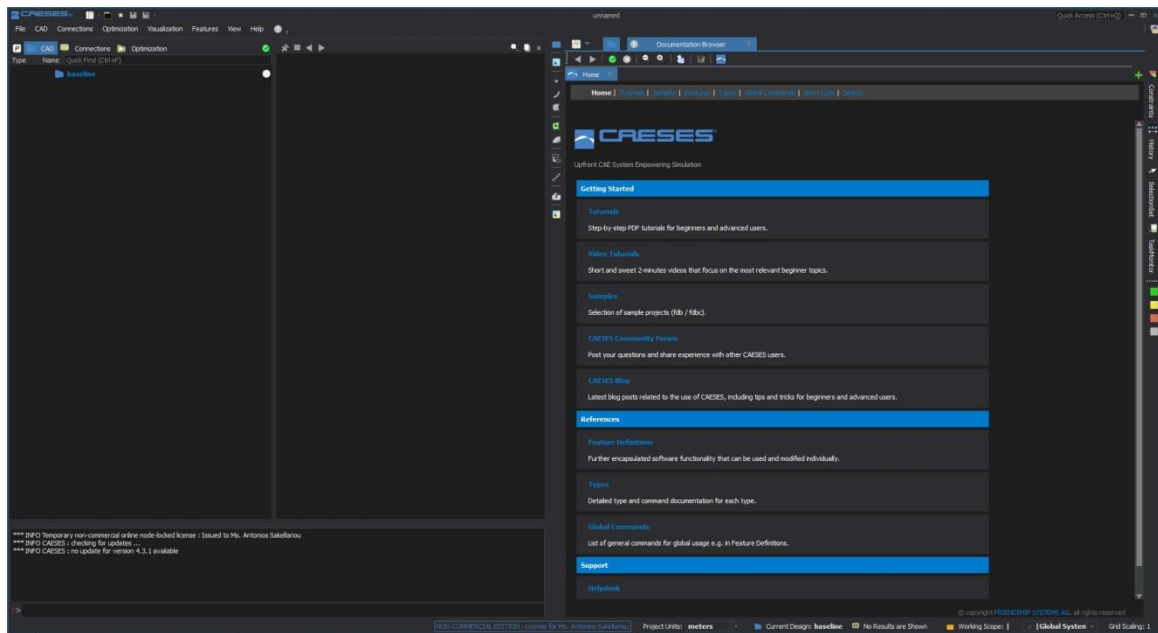
$$M^{(m)}(\omega) = 2 \sum_{j=1}^N P_a^{(m)}(x_j, y_j, \omega) n_j^{(m)} |s_j|$$

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

Τέλος, με ολοκλήρωση των πιέσεων στο σύνορο των νομέων και ακολούθως στο σύνολο της επιφάνεια της γάστρας, προσδιορίζονται οι ασκούμενες δυνάμεις, ροπές και, έπειτα, οι μετατοπίσεις, ταχύτητες κι επιταχύνσεις του σκάφους.

2.8 CAESSES Friendship Framework

Το CAESSES Friendship Framework αποτελεί ένα εύχρηστο λογισμικό με ευρύ φάσμα δυνατοτήτων όπως παραμετρική μοντελοποίηση πολύπλοκων γεωμετριών και εκτέλεση πολυκριτηριακών βελτιστοποιήσεων. Στο πλαίσιο της παραμετρικής μοντελοποίησης, διαθέτει πλειάδα δυνατοτήτων γεωμετρικής αναπαράστασης μέσω καμπυλών ή επιφανειών οι οποίες δύναται να μεταβάλλονται από ένα σύνολο παραμέτρων, ώστε να μεταβάλλεται επίσης η μορφή της τελικής σχεδίασης.



Εικόνα 2.11. Περιβάλλον του CAESES Friendship Framework version 4.3.1

Το σύνολο των παραμέτρων, το ποίο καθορίζεται από τον σχεδιαστή, λειτουργεί σαν βάση τροποποίησης της αρχικής μορφής με σκοπό, κατά την διαδικασία βελτιστοποίησης, να προκύψουν διαφοροποιημένες μορφές της γεωμετρίας αυτής με καλύτερη επίδοση ως προς τα κριτήρια ενδιαφέροντος. Στη διαδικασία βελτιστοποίησης ο σχεδιαστής διαμορφώνει το περιβάλλον αξιολόγησης της επίδοσης των εναλλακτικών γεωμετριών, είτε μέσω δημιουργίας υπορουτινών στο περιβάλλον του CAESES FFW, είτε με την εκτέλεση υπολογισμών εξωτερικών προγραμμάτων. Στην δεύτερη περίπτωση, το CAESES FFW εξάγει δεδομένα τα οποία τροφοδοτούνται στα εξωτερικά προγράμματα, των οποίων τα αποτελέσματα ανατροφοδοτούνται ώστε να εκτελεστεί η βελτιστοποίηση.

Ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών εκείνων, ή αλλιώς των τιμών των μεταβλητών σχεδίασης, που επιδρούν θετικά ή αρνητικά στην επίδοση των γεωμετριών, απαιτεί την ύπαρξη ενός αλγόριθμου βελτιστοποίησης. Το CAESES FFW περιέχει ένα πακέτο τέτοιων αλγορίθμων, καθιστώντας το ικανό να εκτελέσει πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, όπως αυτή που εκτελείται στο πλαίσιο της παρούσης εργασίας.

Κεφάλαιο 3. Εκτέλεση Πολυκριτηριακής Βελτιστοποίησης

Η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση προϋποθέτει ένα σύνολο ενεργειών προτού εκτελεστεί και οι οποίες περιλαμβάνουν τα ακόλουθα :

- Παραμετρική σχεδίαση της δοθείσας γεωμετρίας
- Διαμόρφωση του περιβάλλοντος εκτέλεσης υπολογισμών
- Επιλογή και διαμόρφωση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης
- Σύνδεση του περιβάλλοντος παραμετρικής σχεδίασης, των υπολογιστικών εργαλείων και του αλγορίθμου αξιολόγησης

3.1 Παραμετρική Σχεδίαση

3.1.1 Εισαγωγή

Η διαδικασία της παραμετρικής σχεδίασης της γάστρας που βελτιστοποιήθηκε ξεκίνησε από την εξαγωγή της μορφής των νομέων από το σχέδιο του Body Plan με χρήση του προγράμματος AutoCAD. Από αυτή τη διαδικασία προέκυψε ένα αρχείο IGES το οποίο εισήχθη στο CAESES FFW και αποτέλεσε τη βάση επί της οποίας έγινε η παραμετρική απεικόνιση του πλοίου.

Πριν ξεκινήσει η διαδικασία της σχεδίασης, ο σχεδιαστής θα πρέπει να έχει επιλέξει τις μεταβλητές σχεδίασης, λαμβάνοντας υπόψη τους στόχους και τους επιβαλλόμενους περιορισμούς, που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Θα πρέπει εδώ να τονισθεί η διαφορά μεταξύ των παραμέτρων και των μεταβλητών σχεδίασης. Παράμετροι είναι το σύνολο των μεγεθών τα οποία, καθώς μεταβάλλονται, επηρεάζουν την γεωμετρία του πλοίου και ενδέχεται να είναι ή να μην είναι εξαρτημένα από άλλα μεγέθη ή παραμέτρους. Μεταβλητές σχεδίασης είναι μεγέθη τα οποία είναι ανεξάρτητα από οποιοδήποτε άλλο μέγεθος και η μεταβολή της τιμής τους ελέγχεται από το γενετικό αλγόριθμο κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, προκειμένου να καταλήξει στη βέλτιστη γεωμετρία.

Είναι αναγκαίος ο επακριβής καθορισμός των μεταβλητών σχεδίασης πριν την έναρξη της παραμετρικής μοντελοποίησης, καθώς η γεωμετρική αναπαράσταση του πλοίου πρέπει να βασιστεί σε αυτά τα μεγέθη. Η εισαγωγή παραμέτρων και μεταβλητών σχεδίασης εκ των υστέρων σε υπάρχον παραμετρικό μοντέλο είναι ιδιαίτερος δύσκολη και επικίνδυνη για την ευστάθεια των αλληλεξαρτήσεων, ενώ συνήθως προϋποθέτει επανασχεδίαση τμημάτων της γάστρας που εξαρτώνται από αυτές.

Κατά τη παραμετρική σχεδίαση, θα πρέπει επίσης να οριστεί το αποδεκτό εύρος διακύμανσης της τιμής έκαστης μεταβλητής σχεδίασης, ώστε σε ακόμα και στις ακραίες τιμές τους να προκύπτουν γεωμετρικά συνεχείς και λειτουργικές μορφές του πλοίου. Είναι κρίσιμο να συμβαίνει το παραπάνω, όχι απλώς μεμονωμένα για κάθε μεταβλητή σχεδίασης, αλλά και για συνδυασμούς τους οι οποίοι επηρεάζουν το ίδιο ή γειτονικά τμήματα της γάστρας.

Οι παράμετροι έχουν προφανώς ιδιαίτερη αξία και διευκολύνουν την δημιουργία αλληλεξαρτήσεων κατά την σχεδίαση, όμως ταυτόχρονα το πλήθος τους θα πρέπει να συγκρατείται όσο το δυνατό χαμηλότερο. Η επιτυχία μιας παραμετρικής σχεδίασης συνίσταται στο να εκπληρώνει τους στόχους του σχεδιαστή με τον μικρότερο δυνατό αριθμό παραμέτρων, ώστε η γεωμετρική διαμόρφωση να έχει την απλούστερη δυνατή μορφή.

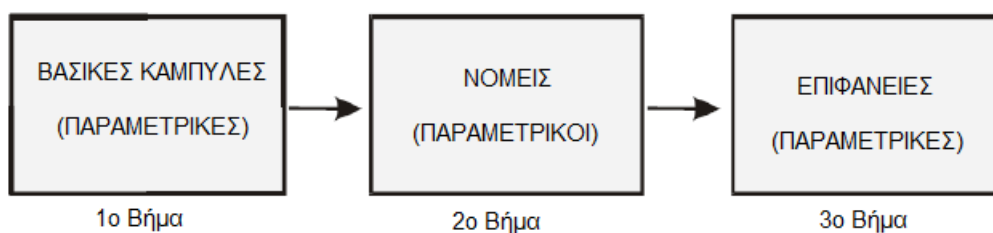
Περίληπτικά, η παραμετρική σχεδίαση θα πρέπει να βασίζεται στις ακόλουθες βασικές αρχές :

- Να επιτυγχάνονται όλα τα φυσικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλοίου καθώς και οι απαιτήσεις μεταβολής της αρχικής μορφής
- Να προκύπτει μια ποιοτική, ομαλή και συνεχής γεωμετρία σε κάθε παραλλαγή.

Για την παραμετρική σχεδίαση της υπό εξέταση πατρικής γάστρας (χωρίς παρελκόμενα), με βάση τα όσα αναφέρθηκαν ανωτέρω, ακολουθήθηκαν τα εξής τρία βήματα:

- Παραμετρική σχεδίαση των βασικών διαμήκων καμπυλών της γάστρας
- Παραμετρική σχεδίαση ικανού αριθμού νομέων οι οποίοι εξαρτώνται από τις βασικές καμπύλες
- Διαμόρφωση επιφανειών που προκύπτουν από τις βασικές καμπύλες και τους νομείς, οι οποίες θα είναι επίσης παραμετρικές καθώς εξαρτώνται άμεσα από παραμετρικές γραμμές

Ακολουθεί μια σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας.



Εικόνα 3.1. Σχηματική διαδικασία παραμετρικής σχεδίασης

3.1.2 Μεταβλητές Σχεδίασης - Παράμετροι

Η γάστρα που πρόκειται να βελτιστοποιηθεί αναπαρίσταται από ένα σύνολο βασικών διαμήκων καμπυλών και μια ομάδα 26 νομέων, τα οποία θα παρουσιαστούν αναλυτικά στη συνέχεια. Μπορούμε να διαχωρίσουμε την πατρική γεωμετρία σε 2 βασικά τμήματα (γάστρα και skeg), σε κάθε ένα εκ των οποίων επιδρούν διαφορετικές μεταβλητές σχεδίασης.

Οι διάφορες γεωμετρικές αναπαραστάσεις του πλοίου κατά την βελτιστοποίηση δημιουργούνται μέσω του CAESES FFW το οποίο επιλέγει τιμές για τις μεταβλητές σχεδίασης μέσα από το εύρος που του έχει οριστεί. Το εύρος αυτό προσδιορίστηκε ώστε να προκύπτουν γεωμετρίες αποδεκτής μορφής όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Ο κάτωθι πίνακας παρουσιάζει συγκεντρωτικά τις μεταβλητές σχεδίασης και το εύρος τους :

A/A	Μεταβλητή Σχεδίασης	Μονάδα Μέτρησης	Κατώτατη Τιμή	Αρχική Τιμή	Ανώτατη Τιμή
1	Πλάτος Επίπεδου Πυθμένα	m	0.1	0.1	0.8
2	Πλάτος Ισάλου στο Transom	m	3.3	3.66	3.9
3	Πλάτος Ισάλου στη Μέση Τομή	m	4.5	4.8	5.1
4	Γωνία Εισόδου Πλώρης	deg	35	38.5	43
5	Γωνία Ανύψωσης Πυθμένα (από baseline)	deg	0.1	0.96	1.5
6	Βάθος Σφήνας στη Πρύμνη	m	0	1.8	1.8
7	Ύψος skeg (από baseline)	m	1.1	1.21	1.5
8	Γωνία Ανύψωσης Νομέα στη Μέση Τομή	deg	10	14.07	17

Πίνακας 3.1. Αρχικές κι ακραίες τιμές μεταβλητών σχεδίασης

Τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά του πλοίου επηρεάζονται από τη διακύμανση των ανωτέρω μεταβλητών σχεδίασης, μεταβάλλοντας κατ' αυτό τον τρόπο την αντίσταση κυματισμού καθώς και τη δυναμική του συμπεριφορά σε κυματισμό. Ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή της επίδρασης των μεταβλητών σχεδίασης στα δύο μεγέθη που έχουν τεθεί ως αντικειμενικές συναρτήσεις της βελτιστοποίησης.

Το μέγιστο πλάτος της πρύμνης, το βύθισμα του πρυμναίου υδροδυναμικού πτερυγίου και το ύψος του Skeg επιδρούν πρωτίστως στην δυναμική συμπεριφορά του πλοίου σε κυματισμούς. Η αντίσταση κυματισμού επηρεάζεται σε μικρότερο βαθμό από τη μεταβολή αυτών των χαρακτηριστικών διότι η θεωρία δυναμικού αγνοεί τα φαινόμενα συνεκτικότητας, τα οποία κυρίως λαμβάνουν χώρα στο πρυμναίο τμήμα του πλοίου. Οι υπόλοιπες μεταβλητές σχεδίασης επηρεάζουν την γενική μορφή

του πλοίου στην πλώρη αλλά και κατά μήκος του μέσου τμήματος του, επομένως επηρεάζουν την έκβαση και των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων.

Στην παρούσα παραμετρική σχεδίαση κατεβλήθη προσπάθεια οι μεταβλητές σχεδίασης να μην έχουν μονάχα τοπική επίδραση στην διαμόρφωση της γεωμετρίας του πλοίου αλλά να την επηρεάζουν σε βαθμό που θα τροποποιούνται ευρύτερα τμήματα της γάστρας. Η αλληλεπίδραση των μεταβλητών σχεδίασης με εκτενή τμήματα του πλοίου είναι ιδιαίτερως σημαντική καθώς, κατ' αυτό τον τρόπο, προκύπτουν συνεχείς και ομαλότερες γεωμετρίες, ενώ ταυτόχρονα καταφέρνουμε με μικρότερο αριθμό παραμέτρων να έχουμε μεγάλη επίδραση στη μεταβολή της γεωμετρίας.

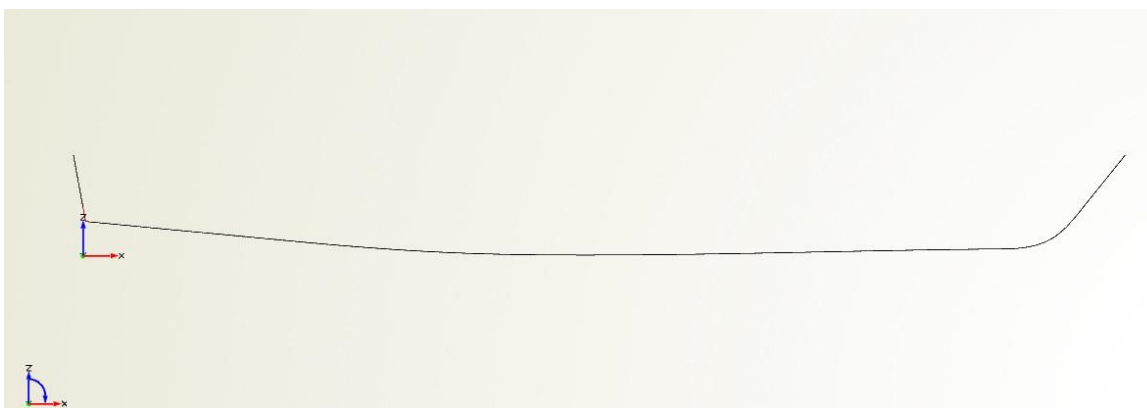
3.1.3 Κατασκευή Διαμήκων Παραμετρικών Καμπυλών

Αρχικά, απεικονίσθηκαν μέσω παραμετρικών γραμμών οι διαμήκεις καμπύλες του πλοίου, οι οποίες είναι οι εξής:

- η τομή της γάστρας με το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας (Centerline, CL)
- η ίσαλος γραμμή (Waterline, WL) και
- η γραμμή του καταστρώματος (Deckline).
-

Centerline (CL)

Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται η παραμετρική Centerline της γάστρας.



Εικόνα 3.2. Τομή διαμήκους επιπέδου συμμετρίας

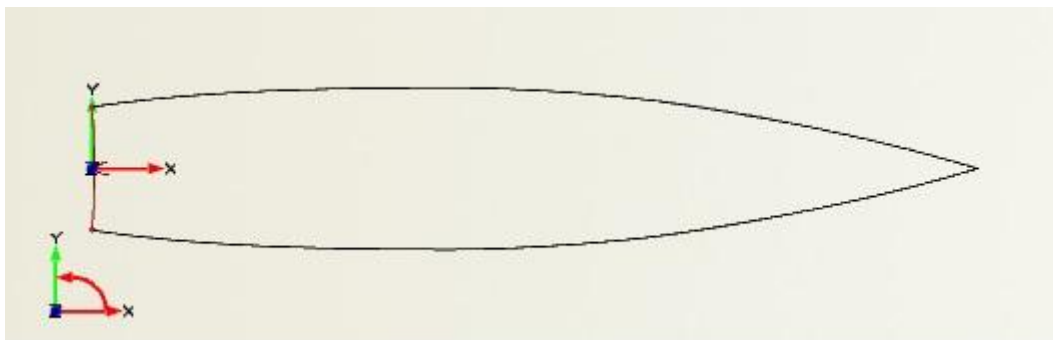
Αυτή αποτελείται από ένα σύνολο 8 καμπυλών προκειμένου να εισαχθούν οι απαραίτητες μεταβλητές σχεδίασης, ενώ έχει εξασφαλισθεί η ομαλή μετάβαση από την μία στην επόμενη κατά μήκος του πλοίου, δεσμεύοντας τα αρχικά/τελικά σημεία τους καθώς και την τιμή της εφαπτομένης σε αυτά.

Σημείο ενδιαφέροντος σε αυτή την παραμετρική γραμμή αποτελεί το πρυμναίο τμήμα της καθώς το ακρότατο σημείο του κινείται κατά τον άξονα Z προς την baseline και πάνω στην διεύθυνση που ορίζει το Transom στο επίπεδο X-Z. Κατ' αυτό τον τρόπο, δημιουργείται ένα υδροδυναμικό πτερύγιο (οφήνα) του οποίου το βύθισμα ελέγχεται από την αντίστοιχη μεταβλητή σχεδίασης.

Για λόγους απλούστευσης της διαδικασίας και προκειμένου η σχεδίαση να είναι όσο το δυνατό πιο ευσταθής, το Skeg δεν περιλαμβάνεται στην παραμετρική Centerline, αλλά σχεδιάστηκε αυτόνομα και παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Waterline (WL)

Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται η παραμετρική Waterline της γάστρας.

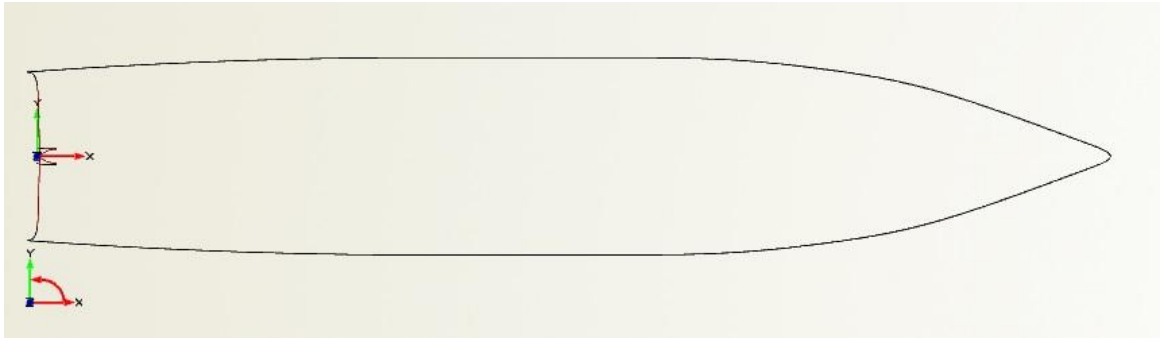


Εικόνα 3.3. Ίσαλος γραμμή

Η παραμετρική Waterline αποτελείται από μία καμπύλη B-Spline και δύο καμπύλες F-Spline, γεγονός που επιτρέπει την ομαλή και συνεχή διαδοχή τους, καθώς η B-Spline τροφοδοτεί τις έτερες δύο με την τιμή της εφαπτομένης της στην αρχή και το τέλος της αντίστοιχα. Επίσης, ο καθορισμός του τρόπου αλληλεπίδρασης των τριών καμπυλών καθιστά εφικτή την ομοιόμορφη μεταβολή του πλάτους καθ' όλο το μήκος του πλοίου για οποιαδήποτε μεταβολή του πλάτους της μέσης τομής ή/και της πρύμνης.

Deckline

Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται η παραμετρική Deckline της γάστρας.



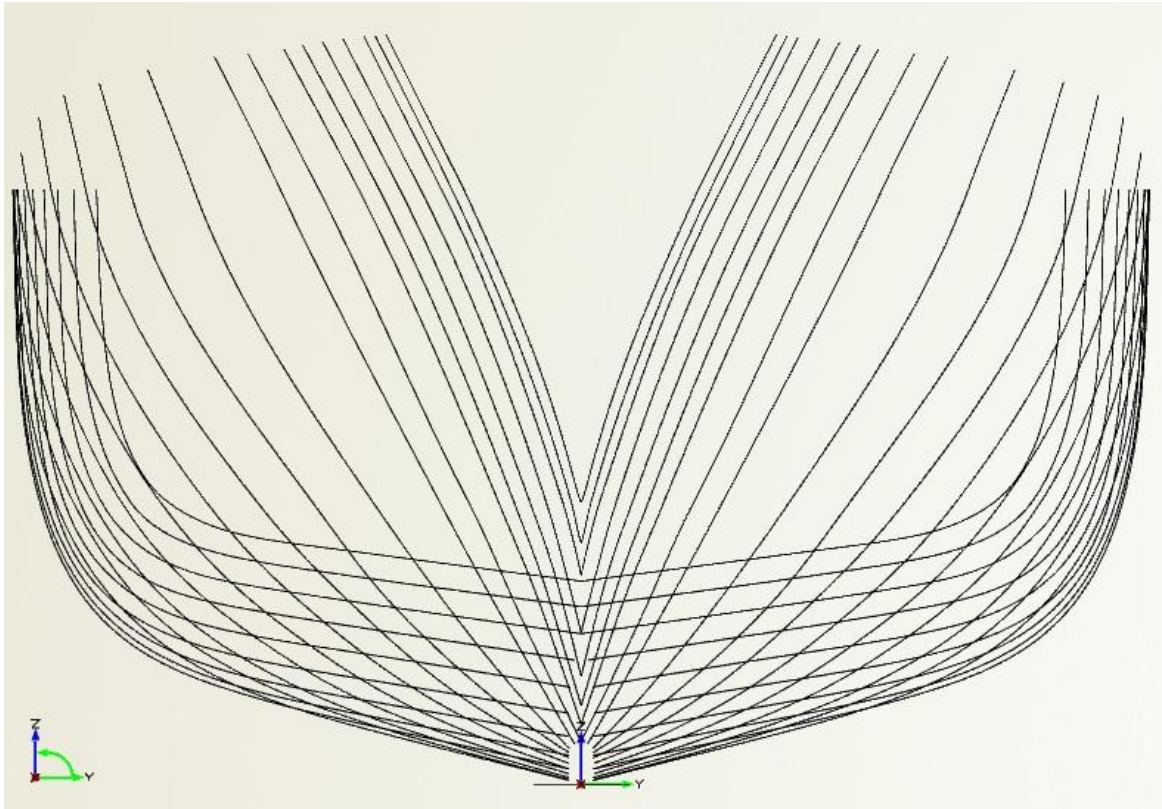
Εικόνα 3.4. Γραμμή καταστρώματος

Η παραμετρική Deckline αποτελείται από δύο παραμετρικές καμπύλες, μία B-Spline στο προωαίο τμήμα προκειμένου να αναπαρασταθεί με ακρίβεια και μία F-Spline στο πρυμναίο τμήμα το οποίο διαθέτει πολύ απλή μορφή. Η μορφή του καταστρώματος δεν επηρεάζεται άμεσα από κάποια εκ των μεταβλητών σχεδίασης, πλην όμως μεταβάλλει τη μορφή του καθ' όλο το μήκος του ανάλογα με τις μεταβολές που επιδέχεται η ίσαλος, ώστε η γάστρα να διατηρεί αρμονική μορφή.

Το κατάστρωμα παραμένει αμετάβλητο στο μεγαλύτερο μέρος του κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης καθώς δεν επηρεάζεται από κάποια μεταβλητή σχεδίασης, εξαιρουμένης της πρώτης του πίνακα 4.1.

3.1.4 Κατασκευή Παραμετρικών Νομέων

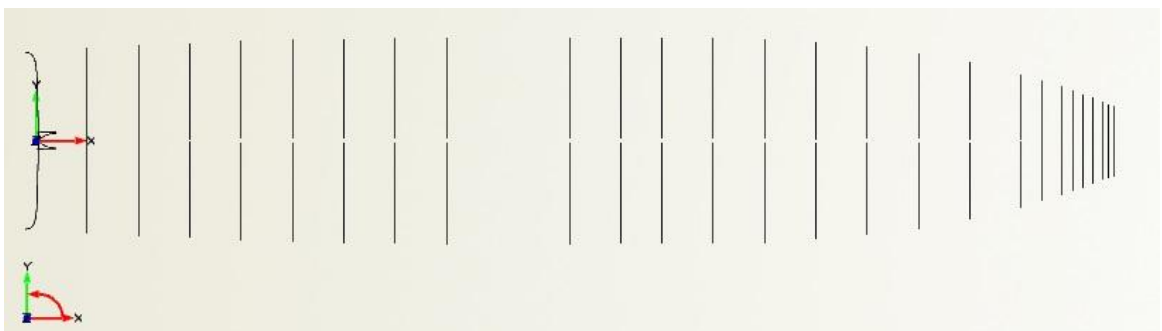
Το επόμενο βήμα στη διαδικασία παραμετρικής σχεδίασης, μετά το πέρας της κατασκευής των βασικών διαμήκων καμπυλών, είναι η σχεδίαση των παραμετρικών νομέων του πλοίου. Στα επόμενα σχήματα φαίνονται όψεις των νομέων που σχεδιάστηκαν στο περιβάλλον του CAESES FFW.



Εικόνα 3.5.1 Οι παραμετρικοί νομείς σχεδίασης



Εικόνα 3.5.2 Διαμήκης θέση παραμετρικών νομέων

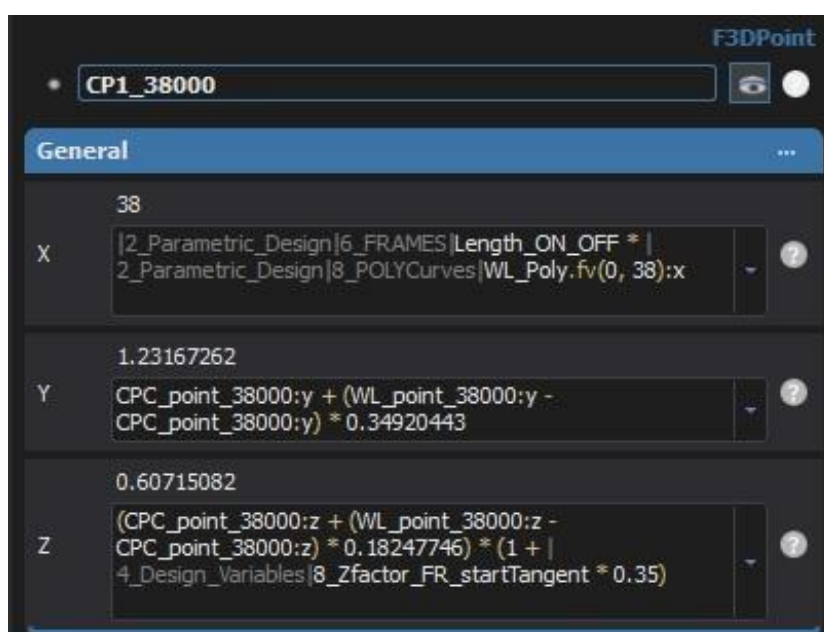


Εικόνα 3.5.3 Κάτοψη παραμετρικών νομέων

Οι βασικές διαμήκεις καμπύλες της γάστρας λειτούργησαν ως βάση για την δημιουργία των 37 παραμετρικών νομέων, οι οποίοι έχουν συγκεκριμένη διαμήκη θέση. Όπως γίνεται εύκολα αντιληπτό από τα σχήματα που προηγήθηκαν, επιλέχθηκε πυκνότερη κατανομή νομέων στην περιοχή της πλώρης για την πιστή αναπαράσταση της, καθώς σε εκείνη την περιοχή η μεταβολή της γεωμετρίας είναι εντονότερη. Το σύνολο των παραμετρικών νομέων, αναπαρίσταται με δύο τμήματα ως εξής:

- ένα τμήμα άνωθεν της ισάλου και
- ένα τμήμα κάτωθεν αυτής

Το τμήμα κάθε νομέα που βρίσκεται κάτωθεν της ισάλου, χρησιμοποιεί για τον προσδιορισμό του αρχικού και τελικού σημείου του, τη γραμμή της Centerline και τη γραμμή της ισάλου αντίστοιχα, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι αυτά τα δύο ακραία σημεία είναι σταθερά προσαρμοσμένα. Επίσης, όπως είναι ευνόητο, με κάθε μεταβολή των προαναφερθεισών γραμμών μεταβάλλεται αντίστοιχα η αρχική και τελική θέση του τμήματος του νομέα. Προκειμένου να διατηρηθεί ομαλή η μορφή του τμήματος για κάθε θέση της αρχής/τέλους του, εκτελέστηκε μια διαδικασία αδιαστατοποίησης της τεταγμένης των ενδιάμεσων σημείων του. Η τιμή της τεταγμένης των ενδιάμεσων σημείων μεταβάλλεται ανάλογα με την διαφορά των τεταγμένων του τελικού από το αρχικό σημείο. Ένα παράδειγμα για τον τρόπο με τον οποίο ενσωματώθηκε η αδιαστατοποίηση στο περιβάλλον του CAESES FFW φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



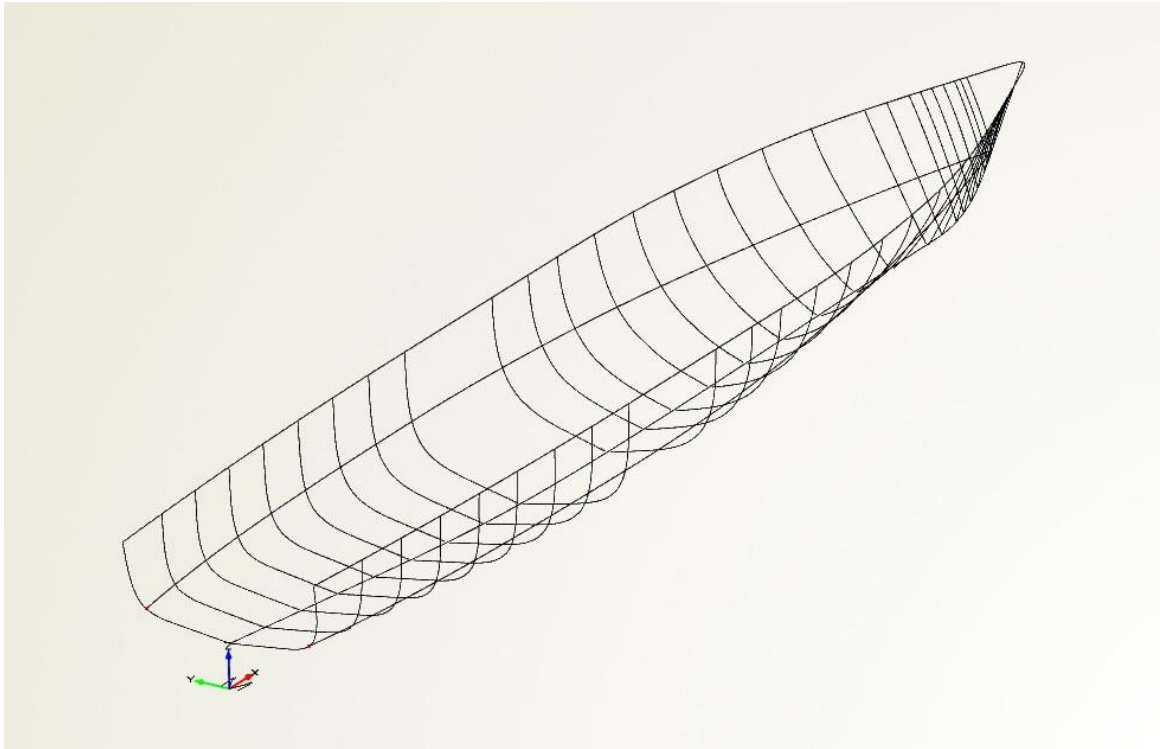
Εικόνα 3.6. Παραμετροποίηση συντεταγμένων σημείων στο CAESES FFW

Στο σχήμα αυτό παρουσιάζεται η αδιαστατοποίηση του πρώτου σημείου ελέγχου (control point) της B-Spline που αναπαριστά το κατώτερο τμήμα του νομέα σε μήκος 38 μέτρων από τη πρύμνη. Η αδιαστατοποίηση πραγματοποιήθηκε ως προς την σχετική μετακίνηση των δύο ακραίων σημείων του τμήματος του νομέα 38μ, τα οποία εδράζονται στη CL και στη WL, βάσει του ποσοστού της αρχικής μεταξύ τους κάθετης απόστασης, επί του επιπέδου ZY.

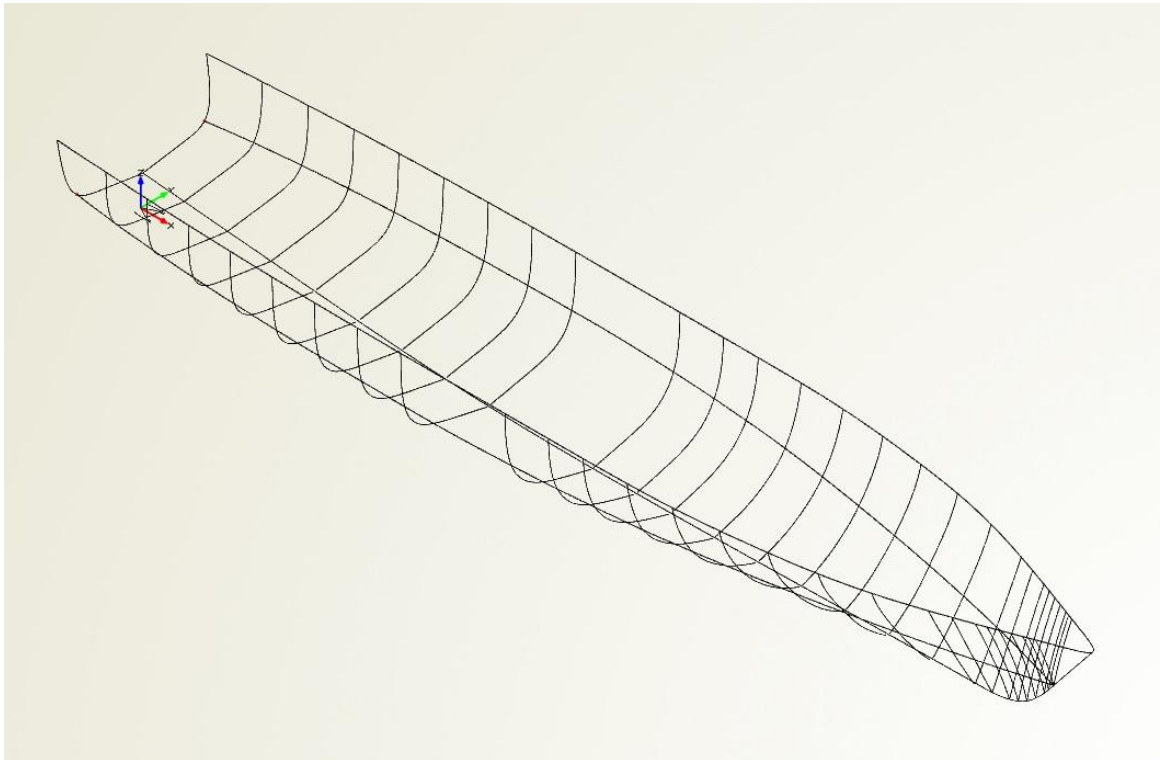
Για τα τμήματα των νομέων άνωθεν της ισάλου ακολουθείται η ίδια διαδικασία που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Σε αυτή την περίπτωση η διαφορά έγκειται στο ότι οι καμπύλες αναφορές είναι η γραμμή της ισάλου και η γραμμή του καταστρώματος. Τα άνωθεν της ισάλου τμήματα νομέων αναπαρίστανται στο σύνολο τους με χρήση F-Spline καμπυλών, οι οποίες έχουν τη δυνατότητα να παίρνουν την τιμή της εφαπτομένης στο τέλος του κάτω της ισάλου τμήματος, γεγονός το οποίο καθιστά εφικτή την συνέχεια εφαπτομενικού διανύσματος στο σημείο σύνδεσης των δύο τμημάτων.

Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να αποσαφηνιστεί ότι η επιλογή καμπυλών B-Spline για την αναπαράσταση των κάτω της ισάλου τμημάτων έγινε με γνώμονα την καλύτερη δυνατή (πιστή) απεικόνιση των πατρικών νομέων καθώς, οι B-Spline είναι προτιμότερες σε περιπτώσεις μεγάλης καμπυλότητας. Εξάλλου το τμήμα του πλοίου κάτωθεν της ισάλου είναι και το κρισιμότερο για την εξαγωγή ορθών αποτελεσμάτων. Οι καμπύλες F-Spline επιλέχθηκαν για την αναπαράσταση των τμημάτων των νομέων άνωθεν της ισάλου, καθώς η γεωμετρία τους είναι επαρκώς απλή ώστε να μπορούν να αποτυπωθούν πιστά από αυτού του είδους την παραμετρική καμπύλη. Επίσης, ένας ακόμα λόγος προτίμησης των F-Spline, όπου αυτές δύναται να εφαρμοστούν, είναι η ευκολία στη χρήση που προσφέρουν, καθώς, μέσω του απλού ορισμού τους, διευκολύνουν την δημιουργία ομαλών συνδέσεων μεταξύ καμπυλών και, ως εκ τούτου, ομαλών επιφανειών.

Στα δύο σχήματα που ακολουθούν φαίνονται δύο όψεις του συνόλου των βασικών διαμήκων καμπυλών και νομέων σε παραμετρική μορφή.



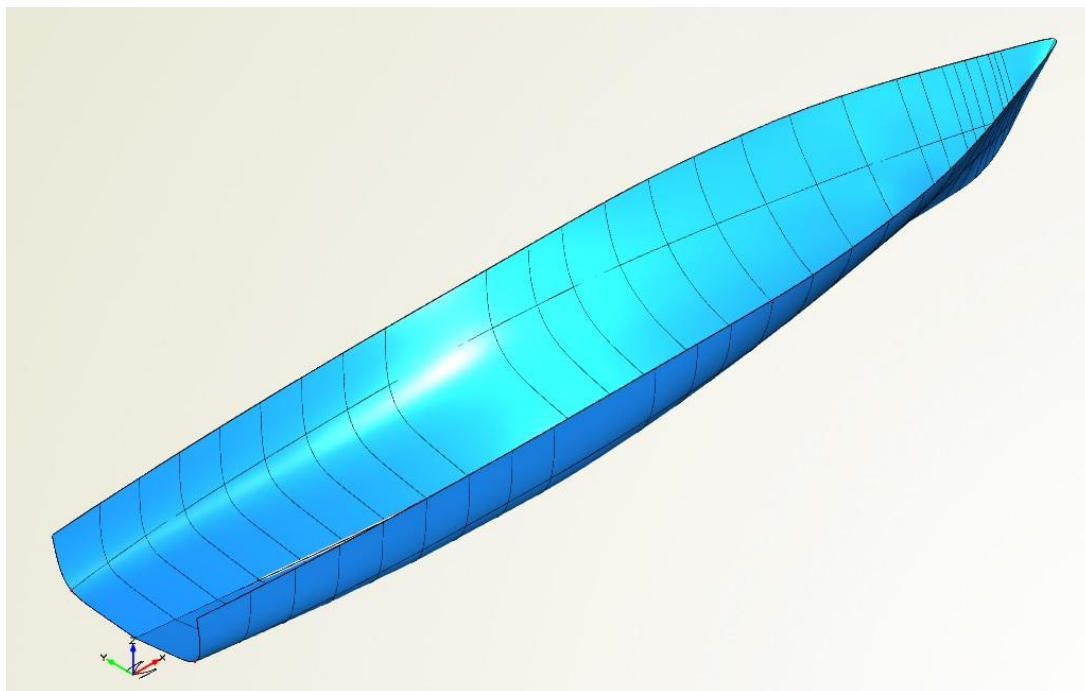
Εικόνα 3.7.1. Σύνολο παραμετρικών καμπυλών



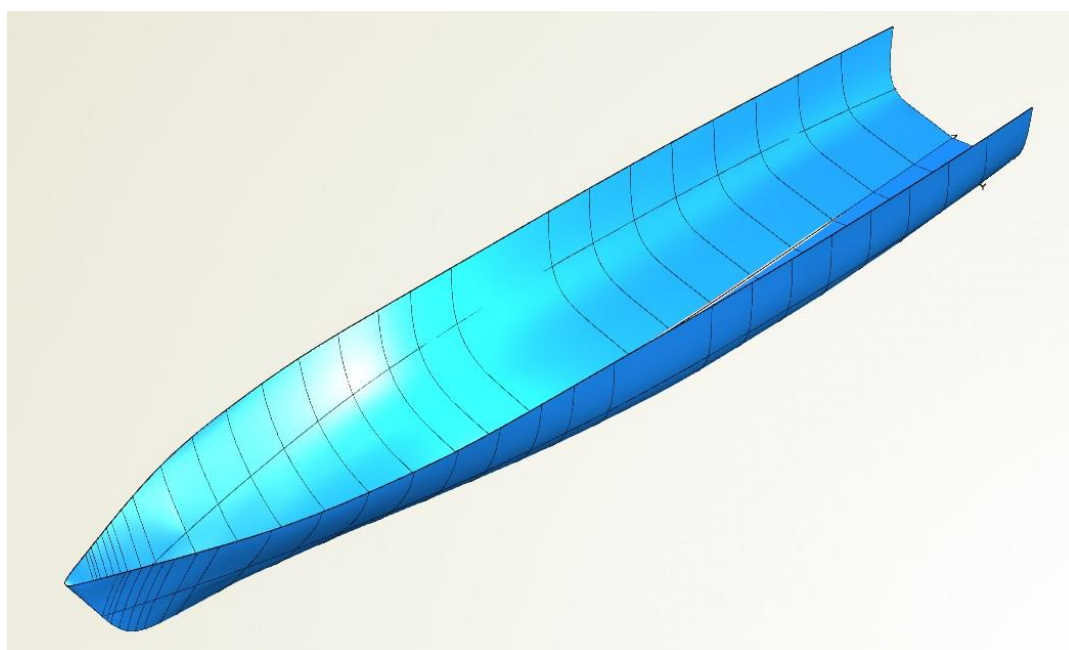
Εικόνα 3.7.2. Σύνολο παραμετρικών καμπυλών

3.1.5 Κατασκευή Επιφανειών

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής των βασικών διαμήκων καμπυλών και νομέων, ακολουθεί το τελευταίο βήμα της παραμετρικής σχεδίασης το οποίο είναι η δημιουργία των επιφανειών της γάστρας. Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται τρεις διαφορετικές όψεις της συνολικής επιφάνειας.

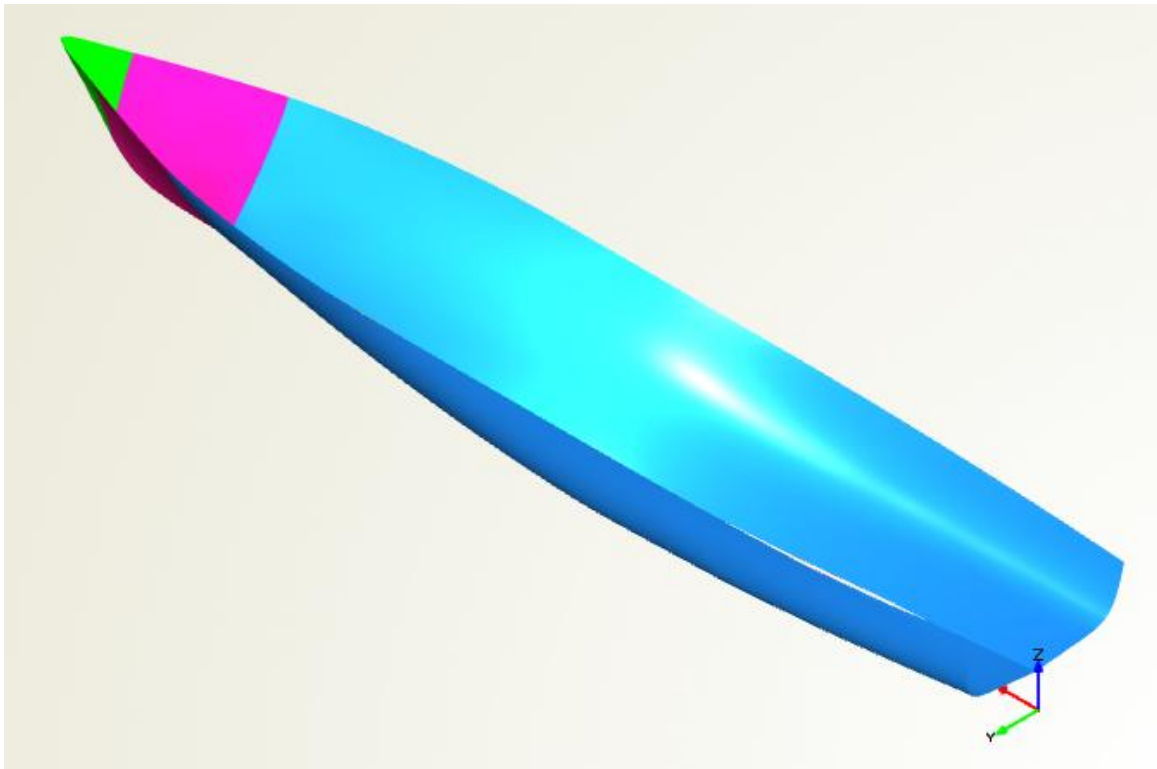


Εικόνα 3.8.1. Συνολική παραμετρική επιφάνεια

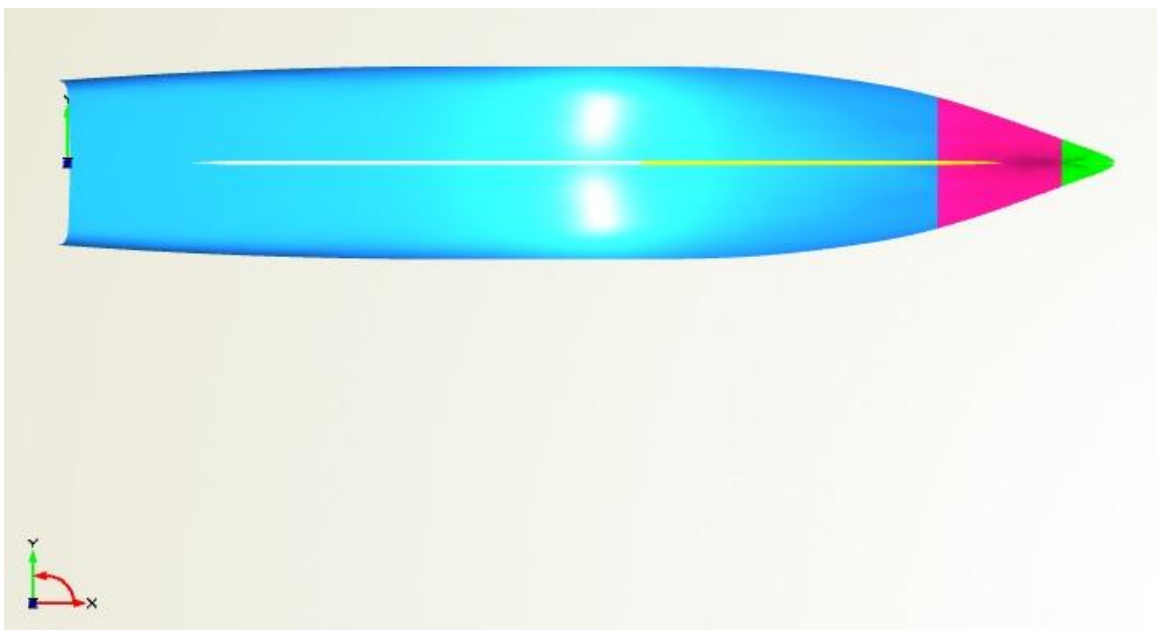


Εικόνα 3.8.2. Συνολική παραμετρική επιφάνεια

Για την αναπαράσταση της επιφάνειας της γάστρας χρησιμοποιήθηκαν συνολικά μόλις 4 επιφάνειες. Στα δύο σχήματα που ακολουθούν απεικονίζονται με διαφορετικό χρωματισμό οι επιφάνειες αυτές.



Εικόνα 3.9.1. Τμήματα παραμετρικής επιφάνειας γάστρας



Εικόνα 3.9.2. Τμήματα παραμετρικής επιφάνειας γάστρας

Το πρυμναίο και μεσαίο τμήμα, λόγω των μικρών και ομαλών μεταβολών της γεωμετρίας τους, αποτέλεσαν ενοποιημένα το πρώτο τμήμα (με μπλε χρώμα), το επίπεδο τμήμα του πυθμένα που εκτείνεται από την αρχή του Skeg (το οποίο δεν απεικονίζεται εδώ) έως την πλήρη αποτελεί τη δεύτερη επιφάνεια (με κίτρινο χρώμα), η προραία περιοχή από το μήκος των 45.5 μέτρων έως τα 52.57 μέτρα (ακρότατο σημείο της ισάλου) αποτελεί την τρίτη επιφάνεια (με κόκκινο χρώμα) και, τέλος, η τέταρτη επιφάνεια της γάστρας είναι η περιοχή της πλήρης άνωθεν της ισάλου (με πράσινο χρώμα).

Η επιλογή της έκτασης κάθε επιφάνειας εκτελέστηκε λαμβάνοντας υπόψη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της πατρικής γάστρας αλλά και τυχόν πολυπλοκότητες που ενδεχομένως να εμφανιστούν σε εναλλακτικές σχεδιάσεις. Η ορθή επιλογή και διαμόρφωση των επιφανειών είναι κρίσιμης σημασίας για την εξαγωγή αποτελεσμάτων με ακρίβεια. Αυτό συμβαίνει διότι η γεωμετρία του πλοίου γίνεται αντιληπτή από τα δύο υπολογιστικά προγράμματα SPP-86 και SWAN 2, με τη μορφή εγκάρσιων τομών της συνολικής παραμετρικής επιφάνειας, σε μήκη του πλοίου τα οποία δεν συμπίπτουν απαραίτητα με τους νομείς σχεδίασης (όπου υπάρχει με βεβαιότητα ακριβής απεικόνιση της τομής). Επομένως, όσο ακριβής και αν είναι η παραμετρική σχεδίαση των γραμμών του πλοίου, εάν από τον ορισμό των επιφανειών προκαλούνται ανωμαλίες στην συνολική επιφάνεια της γάστρας, η βελτιστοποίηση ενδεχομένως να παρεκτραπεί και να αποδώσει μη ρεαλιστικά αποτελέσματα.

3.1.6 Κατασκευή Skeg

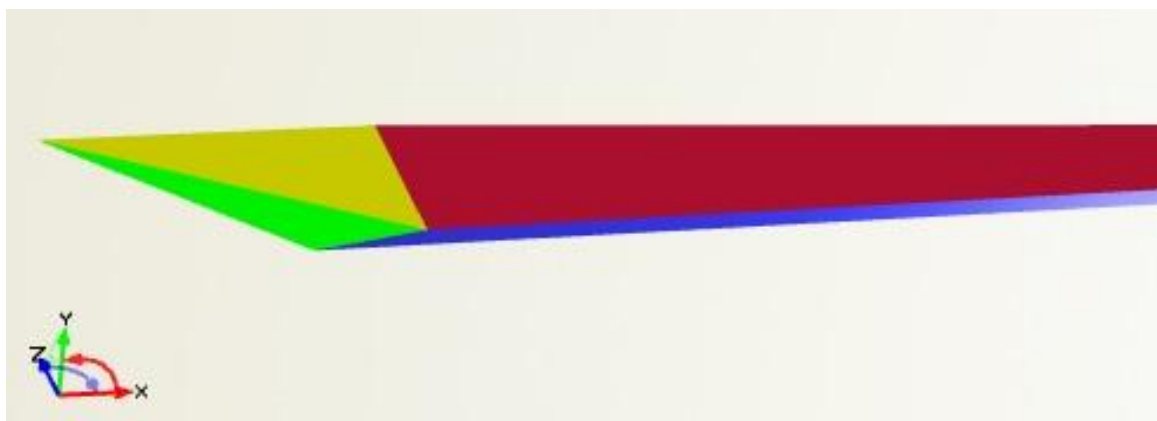
Η επιφάνεια του Skeg σχεδιάστηκε αυτόνομα και προσαρμόστηκε στη συνέχεια στην επιφάνεια της γάστρας. Ο κύριος λόγος που επιλέχθηκε αυτή η διαδικασία είναι ότι στην σύνδεση του Skeg με τους νομείς της περιοχής του, δεν υφίσταται συνέχεια εφαπτομενικού διανύσματος, ενώ οι επιφάνειες του είναι επίπεδες και υπό γωνία μεταξύ τους, γεγονός που καθιστά αδύνατη την ενοποίηση τους με την υπόλοιπη γεωμετρία μέσω του CAESSES FFW υπό την έννοια δημιουργίας μίας ενιαίας επιφάνειας πρύμνης-μεσαίου τμήματος-skeg.

Το παραμετρικό Skeg του πλοίου σχεδιάστηκε με τη χρήση συνολικά τεσσάρων επιφανειών. Αυτός ο αριθμός μπορεί να φαίνεται μεγάλος, ειδικά αν αναλογιστούμε ότι επαρκεί για την απεικόνιση ολόκληρης της γάστρας, όμως ταυτόχρονα είναι ο μικρότερος δυνατός διότι, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, οι επιφάνειες του Skeg δημιουργούν ακμές στην σύνδεση τους, όπου δεν υπάρχει συνέχεια εφαπτομενικού διανύσματος, καθιστώντας αδύνατη διαμόρφωση εκτενέστερων επιφανειών.

Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνεται η διαμόρφωση των επιφανειών του Skeg.

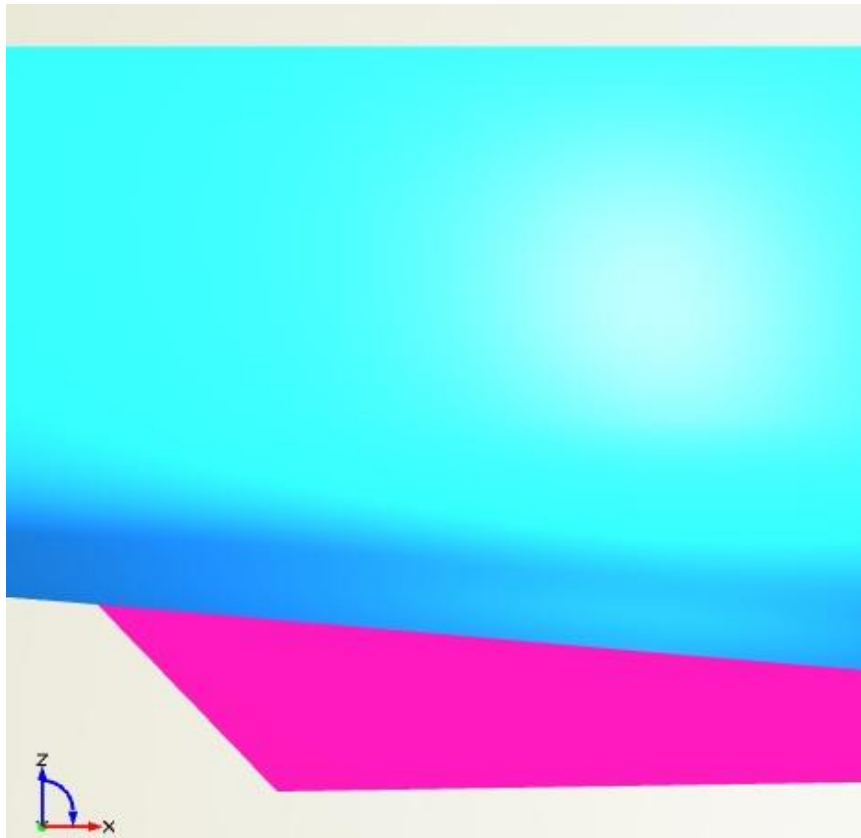


Εικόνα 3.10.1. Όψη επιφανειών Skeg στο επίπεδο x-z

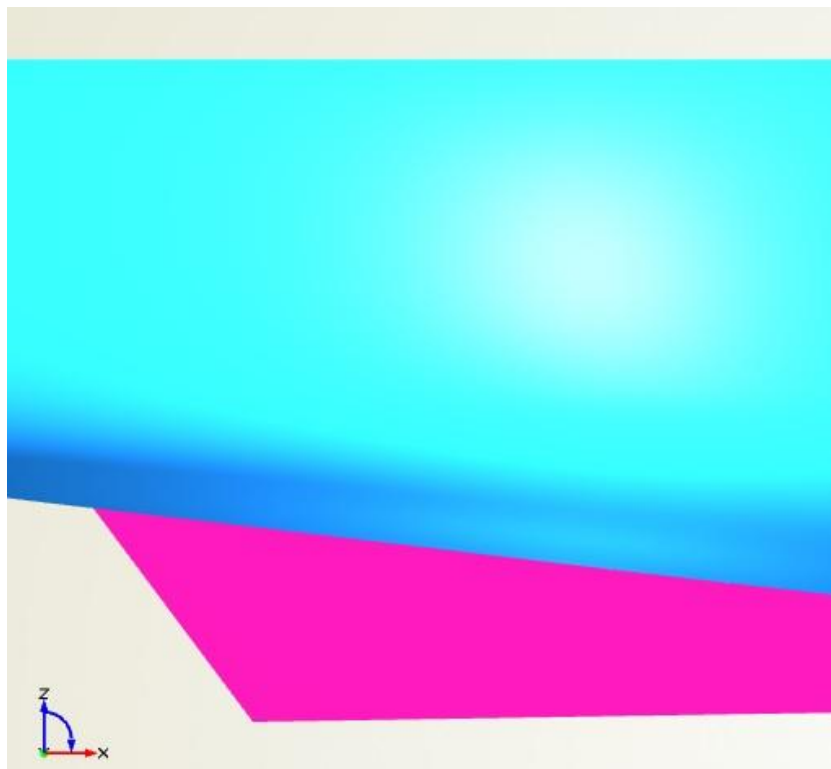


Εικόνα 3.10.2. Όψη επιφανειών Skeg

Ενδιαφέρον στην σχεδίαση του skeg παρουσιάζει το ακρότατο προς τη πρύμνη σημείο του το οποίο έχει τη δυνατότητα κίνησης κατά τον άξονα Z, συμπαρασύροντας προφανώς την επιφάνεια της γάστρας για λόγους συνέχειας, οπότε καθίσταται εφικτή η μεταβολή του μέγιστου ύψους του Skeg και της συνολικής επιφάνειας του. Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η μεταβολή του Skeg για τις ακρότατες τιμές της μεταβλητής σχεδίασης που την ελέγχει.



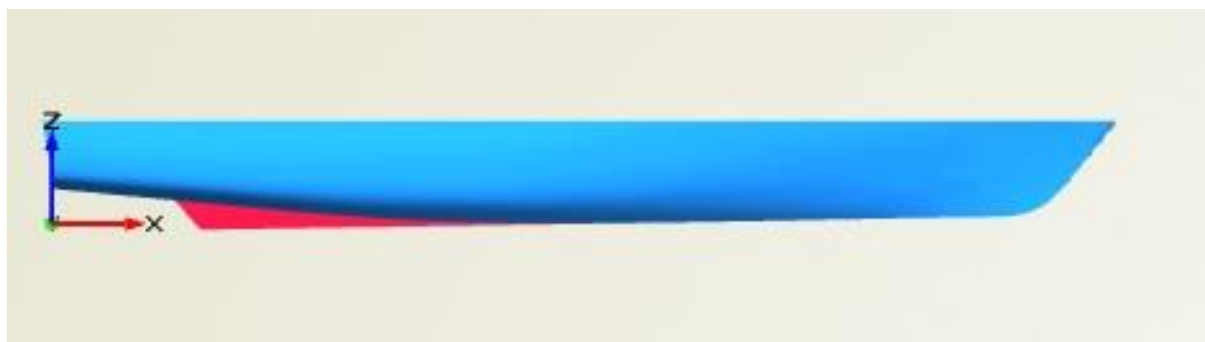
Εικόνα 3.11.1. Ελάχιστο ύψος παραμετρικού Skeg



Εικόνα 3.11.2. Μέγιστο ύψος παραμετρικού Skeg

3.1.7 Χαρακτηριστικά Συνολικής Παραμετρικής Επιφάνειας και Περιορισμοί

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής των επιφανειών της γάστρας και του Skeg, είναι δυνατή η σύνδεση τους ώστε να προκύψει η συνολική επιφάνεια του πλοίου, η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 3.12. Συνολική επιφάνεια γάστρας.

Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται ορισμένα χαρακτηριστικά της πατρικής γεωμετρίας και αυτής που προέκυψε μετά την παραμετρική μοντελοποίηση. Για την παραμετρική γάστρα, κάποια χαρακτηριστικά της έχουν ορισθεί κατά τη σχεδίαση ενώ άλλα υπολογίζονται από το λογισμικό του CAESSES FFW.

Μέγεθος	Πατρική γάστρα	Παραμετρική γάστρα
Μήκος LOA (m)	56.53	56.53
Μήκος Lwl (m)	52.57	52.57
Μέγιστο Πλάτος (m)	10	10
Βύθισμα (m)	2.49	2.49
KG (m)	4.185	4.185
Εκτόπισμα σε θαλασσινό νερό (tn) ($\rho = 1.025 \text{ kg/m}^3$)	551	551.4
Cb (-)	0.431	0.432
Cp (-)	0.619	0.621

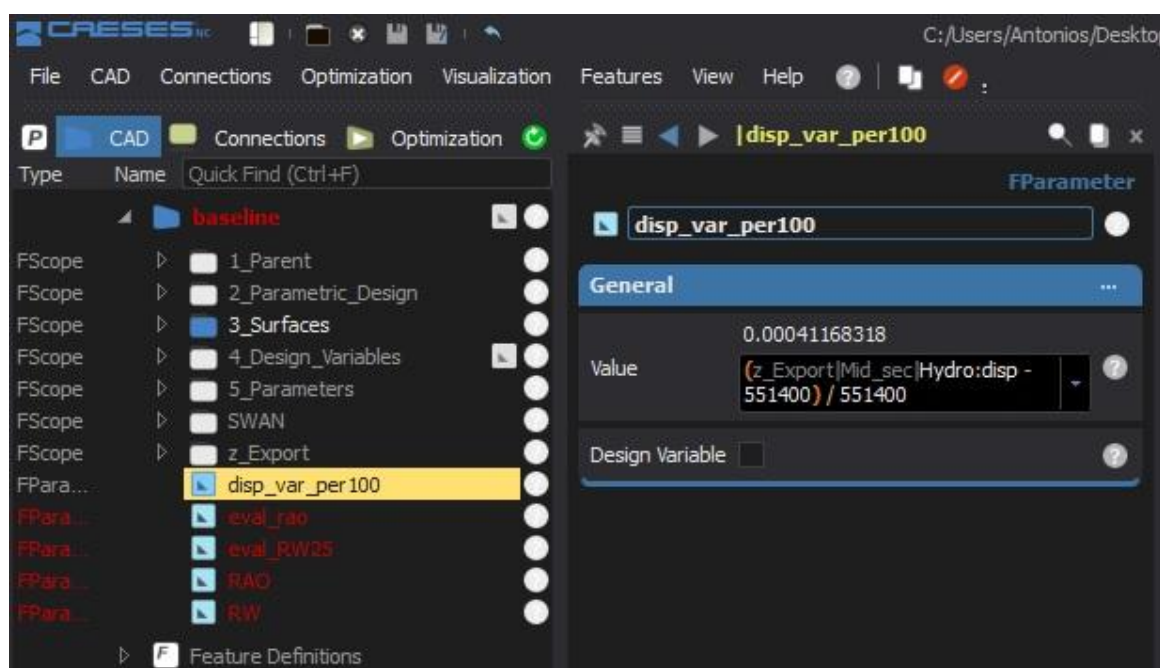
Πίνακας 3.2. Κύρια χαρακτηριστικά αρχικής και παραμετρικής γάστρας

Από τα στοιχεία του ανωτέρω πίνακα γίνεται αντιληπτό ότι η προσαρμογή της παραμετρικής γάστρας στην πατρική είναι πολύ καλή, αφού τα μεγέθη τους σχεδόν ταυτίζονται. Για παράδειγμα, η διαφορά εκτοπίσματος μεταξύ των δύο γεωμετριών είναι μόλις $0,4 \text{ m}^3$, δηλαδή μια διαφορά της τάξης του 0,07%, γεγονός που καταδεικνύει την ακρίβεια της παραμετρικής σχεδίασης. Η όσο το δυνατό πιστότερη αναπαράσταση της πατρικής γεωμετρίας αποτελεί κύρια επιδίωξη κατά τη σχεδίαση.

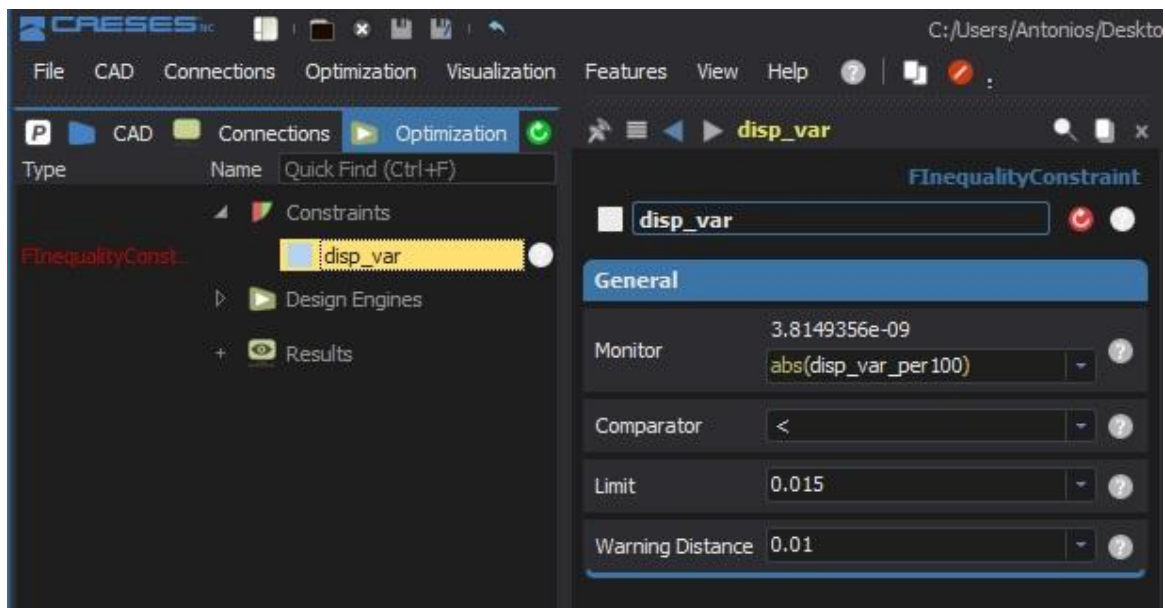
Ανακεφαλαιώνοντας, προκειμένου να καταλήξουμε σε μια αξιόπιστη βελτιστοποίηση, η παραμετρική σχεδίαση του σκάφους πρέπει γίνεται με γνώμονα ένα σύνολο απαιτήσεων, οι οποίες εξασφαλίζονται ως εξής :

- Ακριβής αναπαράσταση της πατρικής γεωμετρίας κατά την παραμετρική σχεδίαση.
- Ορθή επιλογή των μεταβλητών σχεδίασης, οι οποίες εκτιμάται ότι θα επιφέρουν σημαντικές αλλαγές στα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά του πλοίου.
- Εξασφάλιση ότι προκύπτουν ομαλές μορφές γάστρας για οποιοδήποτε συνδυασμό τιμών των μεταβλητών σχεδίασης.

Επιπρόσθετα, ενώ περιορισμοί σε μεγέθη όπως το πλάτος εύκολα ενσωματώνονται μέσω του εύρους της μεταβλητής σχεδίασης που τα ελέγχει, στην περίπτωση του εκτοπίσματος πρέπει να γίνει ειδική μέριμνα καθώς δεν είναι μέγεθος που ορίζεται απευθείας από τον σχεδιαστή, αλλά προκύπτει μετά την διαμόρφωση της γεωμετρίας. Αυτό εξασφαλίζεται μέσω της δυνατότητας που παρέχει το CEASES FFW να εισαχθούν παράμετροι των οποίων η διακύμανση πρέπει να βρίσκεται εντός συγκεκριμένου εύρους, διαφορετικά η σχεδίαση θα θεωρείται ως μη αποδεκτή και δεν θα λαμβάνεται υπόψη κατά τη βελτιστοποίηση. Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνεται η εισαγωγή της παραμέτρου που υπολογίζει την ποσοστιαία διαφοροποίηση του εκτοπίσματος της τρέχουσας γεωμετρίας με την πατρική και, στη συνέχεια, η συνθήκη ελέγχου αυτού του μεγέθους στην διαδικασία βελτιστοποίησης.



Εικόνα 3.13.1. Παράμετρος ποσοστιαίας διαφοράς εκτοπίσματος



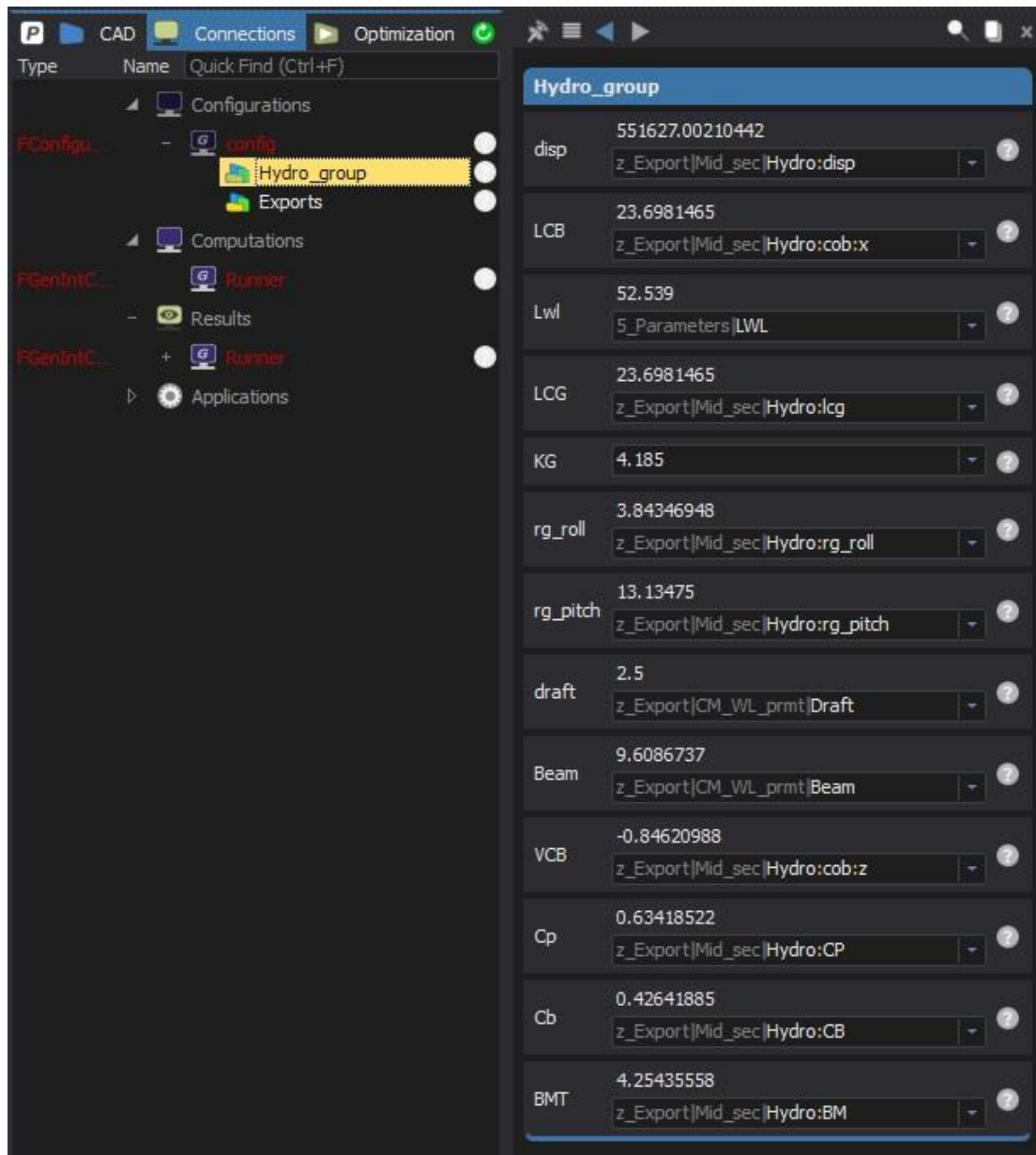
Εικόνα 3.13.2. Εισαγωγή περιορισμού ανισότητας

3.2 Υπολογισμός Υδροδυναμικών Χαρακτηριστικών

Προκειμένου να υπολογιστούν τα υδροδυναμικά μεγέθη των αντικειμενικών συναρτήσεων για κάθε γεωμετρία που παράγεται κατά την βελτιστοποίηση, απαιτείται η διασύνδεση του CAESES FFW με εξωτερικά προγράμματα που εκτελούν τους προαναφερθέντες υπολογισμούς. Μέσω του εξωτερικού κώδικα SWAN 2 γίνεται ο υπολογισμός της αντίστασης, ενώ με χρήση του εξωτερικού κώδικα SPP-86 υπολογίζεται η δυναμική συμπεριφορά σε κυματισμούς. Η διασύνδεση του CAESES FFW με τους δύο αυτούς κώδικες συνίσταται στην εξαγωγή δεδομένων από το CAESES FFW, τα οποία περιέχουν πληροφορίες σχετικά με τη μορφή και τα υδροστατικά μεγέθη της εκάστοτε γεωμετρίας, και στην τροφοδότηση τους σε αυτούς. Στη συνέχεια, αφού οι δύο κώδικες λάβουν τις απαραίτητες πληροφορίες από το CAESES FFW, υπολογίζουν τα αντίστοιχα υδροδυναμικά μεγέθη, των οποίων οι τιμές πρέπει να ανατροφοδοτηθούν στο CAESES FFW για να χρησιμοποιηθούν από τον γενετικό αλγόριθμο NSGA-II, συνιστώντας κατ' αυτό τον τρόπο ένα μηχανισμό ανάδρασης στην διαδικασία βελτιστοποίησης. Ακολούθως θα παρουσιαστεί ο μηχανισμός διασύνδεσης που επιτρέπει τη συνεργασία των τριών προγραμμάτων.

Το πρώτο αρχείο που εξάγεται από το CAESES FFW έχει την κατάληξη .hydro και εκμεταλλεύεται την ικανότητα του CAESES να υπολογίζει τις διάφορα υδροστατικά μεγέθη με τη χρήση υπορουτινών. Έτσι το πρώτο αρχείο που εξάγεται από το πρόγραμμα έχει κατάληξη .hydro.

Στην επόμενη εικόνα φαίνονται τα υδροστατικά μεγέθη μιας τυχαίας γεωμετρίας που υπολογίζονται από το CAESES και στη συνέχεια εξάγονται στο αρχείο .hydro.



Εικόνα 3.14. Εξαγωγή υδροστατικών χαρακτηριστικών από το CAESES FFW

Εκτός του .hydro, γίνεται εξαγωγή ακόμα τριών αρχείων από το CAESES FFW, τα οποία περιέχουν αποκλειστικά πληροφορίες για τη μορφή της εκάστοτε γάστρας και τα οποία είναι τα κάτωθι :

- sec_bow.shf
- sec_mid.shf
- sec_frank.shf

Τα δύο πρώτα αρχεία, `sec_bow.shf` και `sec_mid.shf`, εξάγονται για χρήση από το SWAN 2. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, απαιτεί την τροφοδότηση από τον χρήστη με τουλάχιστον δύο διαφορετικούς τύπους νομέων (Σταθμοί τύπου A και B), γεγονός που εξηγεί την ανάγκη εξαγωγής δύο διαφορετικών αρχείων. Η πρύμνη του πλοίου είναι τύπου `transom` οπότε δεν απαιτείται ύπαρξη ξεχωριστού αρχείου για την περιγραφή της. Στο αρχείο `sec_bow.shf`, όπως καταδεικνύει το όνομα του περιέχεται η γεωμετρία της πλώρης υπό τη μορφή τομής με το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας (`center plane`), ενώ αυτός ο τύπος σταθμού είναι τύπου A. Οι τύπου B σταθμοί περιλαμβάνουν όλους τους νομείς και την πρύμνη και περιέχονται στο αρχείο `sec_mid.shf`.

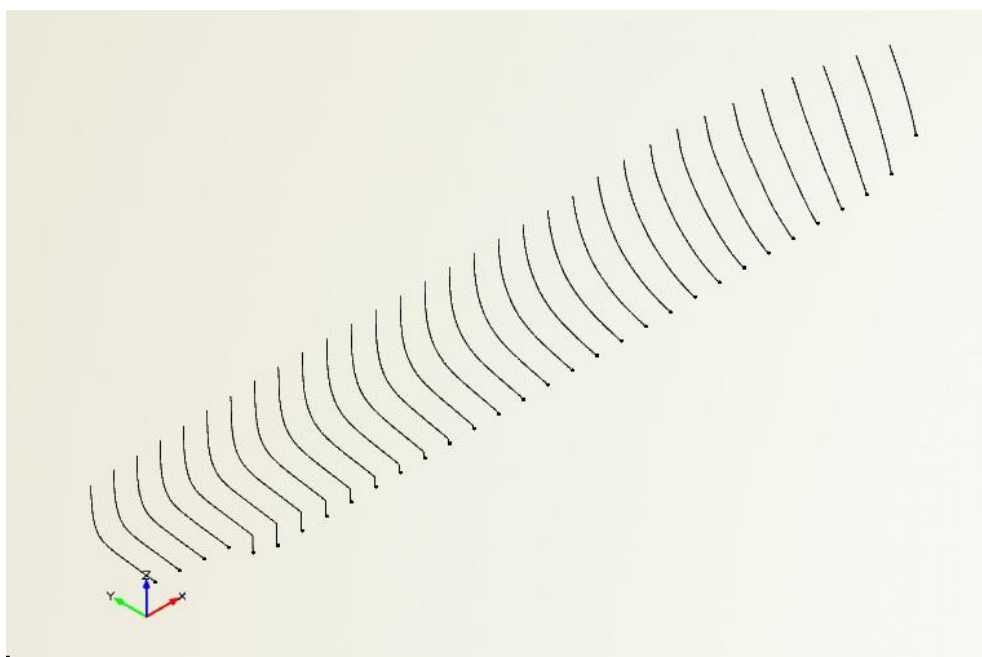
Ανακεφαλαιώνοντας, το αρχείο `sec_bow.shf` περιέχει μία μόνο καμπύλη που βρίσκεται πάνω στο διάμηκες επίπεδο συμμετρίας, ενώ το `sec_mid.shf` περιέχει ένα σύνολο 36 νομέων, οι οποίοι κατανεμήθηκαν κατά μήκος του πλοίου με τρόπο τέτοιο ώστε η γεωμετρία της γάστρας να αποδίδεται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Αυτό σημαίνει πυκνωση των νομέων στην περιοχή της πλώρης όπου η γεωμετρία αλλάζει με μεγαλύτερο ρυθμό και αραιότερη κατανομή τους στο μέσο και πρυμναίο τμήμα του πλοίου. Συγκεκριμένα 30 νομείς κατανέμονται από την πρύμνη έως τα 48m, ενώ από τα 49m έως σχεδόν το ακρότατο σημείο της ισάλου (52.57m) κατανέμονται οι υπόλοιποι έξι νομείς, δηλαδή η κατανομή νομέων στην πρωραία περιοχή είναι περίπου τρεις φορές πυκνότερη. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνονται οι σταθμοί που περιέχονται στα δύο αρχεία που περιγράφηκαν και τα οποία χρησιμοποιούνται από το SWAN 2.



Εικόνα 3.15. Νομείς πατρικής μορφής γάστρας για το πρόγραμμα SWAN 2 (πρόοψη)

Το τρίτο αρχείο εξαγωγής της μορφής της γεωμετρίας ονομάζεται `sec_frank.shf` και, όπως μαρτυρά η ονομασία του, χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα SPP-86. Ο SPP-86, σε αντίθεση με το SWAN 2, χρειάζεται μόνο ένα τύπο νομέων για να εκτελέσει υπολογισμούς οπότε το συγκεκριμένο αρχείο περιέχει τη μορφή ενός συνόλου 32 εγκάρσιων τομών.

Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι παρόμοιο με αυτό που παρουσιάστηκε προηγουμένως και παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα.



Σχήμα 3.16. Νομείς πατρικής μορφής γάστρας για το πρόγραμμα SPP-86 (προοπτική όψη)

3.3 Προετοιμασία Εκτέλεσης Κώδικα SPP-86

Για την εκτέλεση του κώδικα SPP-86 απαιτείται προηγουμένως η εκτέλεση δύο βοηθητικών προγραμμάτων τα οποία διαβάζουν και τροποποιούν τα αρχεία `.hydro` και `sec_frank.shf` ώστε να προκύψει το αρχείο εισόδου που χρειάζεται ο συγκεκριμένος κώδικας. Το πρώτο βοηθητικό εκτελέσιμο αρχείο παράγει το αρχείο `superfrank.shf`, το οποίο περιέχει την μορφή των νομέων με τροποποιημένη την τιμή του Z κάθε σημείου ώστε αυτή να εκφράζεται σε σχέση με την απόσταση της από την ίσαλο. Επίσης, στο αρχείο `superfrank.shf` αμελείται η μορφή των νομέων άνωθεν της ισάλου (η περιγραφή τους σταματά στην ίσαλο). Στη συνέχεια εκτελείται το δεύτερο βοηθητικό εκτελέσιμο το οποίο λαμβάνει το αρχείο εξαγωγής του πρώτου με σκοπό να διαμορφώσει το τελικό αρχείο εισόδου του κώδικα SPP-86.

Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι ο υπολογισμός των μεγεθών που αφορούν τις αποκρίσεις του πλοίου κατά την αλληλεπίδραση του με αρμονικούς και τυχαίους κυματισμούς. Η διαδικασία αυτή εκτελείται δύο φορές προκειμένου να προκύψουν οι δύο συνιστώσες της δεύτερης αντικειμενικής συνάρτησης της διαδικασίας βελτιστοποίησης που εκτελείται στο παρόν.

Τέλος, κατόπιν της εκτέλεσης του SPP-86, λαμβάνουμε τα αποτελέσματα της δυναμικής συμπεριφοράς του πλοίου σε μετωπικούς κατά την πλεύση με ταχύτητα 25 κόμβων.

3.4 Προετοιμασία Εκτέλεσης Κώδικα SWAN 2

Με παρόμοια λογική με την περίπτωση του SPP-86, εκτελείται στη συνέχεια ο κώδικας SWAN 2, ο οποίος προϋποθέτει επίσης την εκτέλεση δύο βοηθητικών προγραμμάτων αλλά και τη διαμόρφωση ενός επιπλέον αρχείου txt το οποίο περιέχει απαραίτητες πληροφορίες. Το πρώτο βοηθητικό πρόγραμμα λαμβάνει τα αρχεία .hydro, sec_bow.shf και sec_mid.shf και βάσει αυτών δημιουργεί ένα αρχείο με κατάληξη .shf, το οποίο περιέχει μια ενοποιημένη μορφή της γεωμετρίας. Ακολούθως εκτελείται το δεύτερο βοηθητικό πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιεί το αρχείο .shf προκειμένου να εξάγει ένα αρχείο με κατάληξη .pln, το οποίο περιλαμβάνει την τελική μορφή της γεωμετρίας με τρόπο που μπορεί να γίνει αντιληπτή από το SWAN 2. Πλέον το μόνο που απομένει για την εκτέλεση του SWAN 2 είναι η διαμόρφωση του αρχείου txt με ονομασία swaninp. Αυτό το αρχείο είναι απαραίτητο καθώς περιέχει πληροφορίες για μεγέθη όπως η ταχύτητα πλεύσης για τον υπολογισμό της αντίστασης, αρχικές τιμές δυναμικής βύθισης και διαγωγής, όπως επίσης, τον ορισμό του πλέγματος των panels και των χρονικών βημάτων που επιλέγει ο χρήστης.

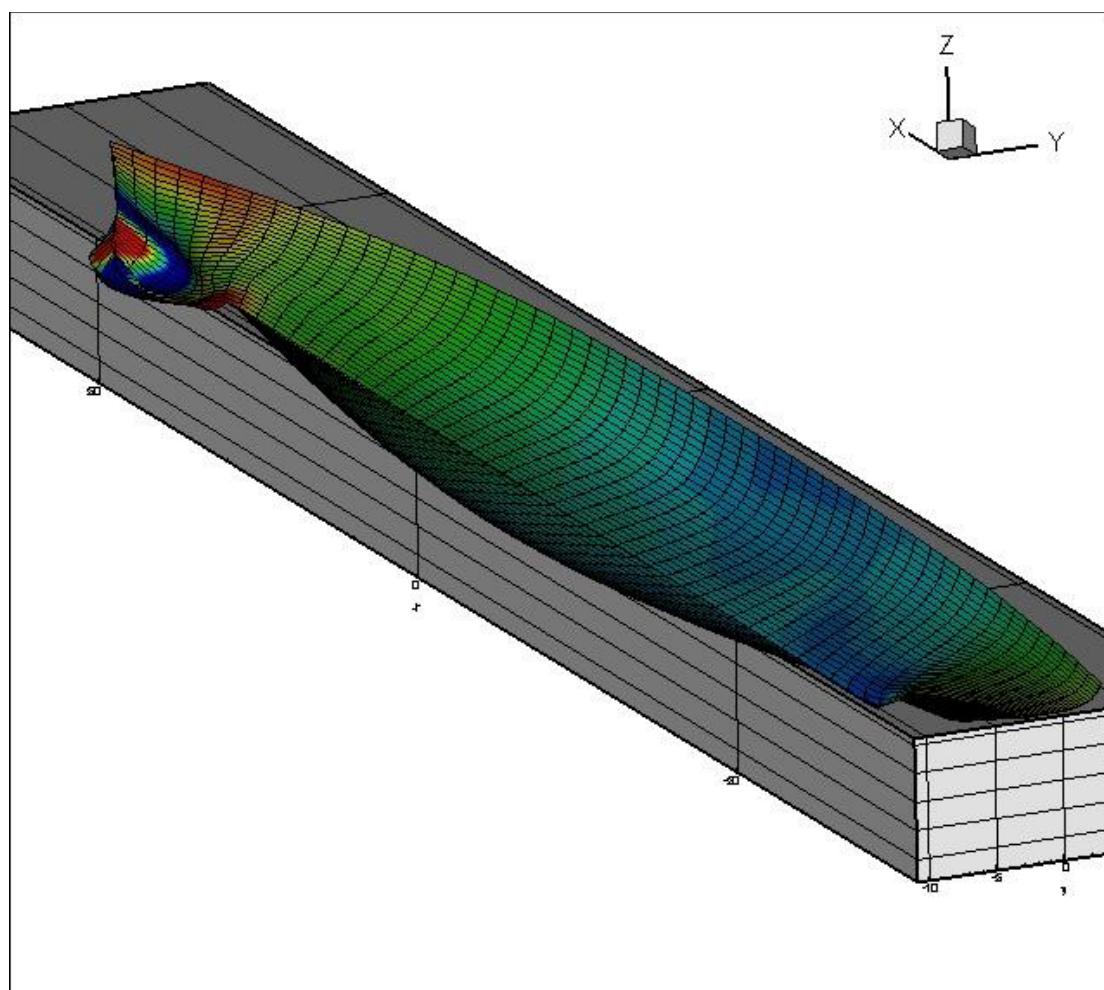
Στη συνέχεια, εκτελείται ο κώδικας Itter_swan2.exe, ο οποίος ενσωματώνει μια επαναληπτική διαδικασία κατά την οποία εκτελούνται τα τρία υποπρογράμματα του SWAN 2. Αυτά είναι το makessg.exe, το setup.exe και το solve.exe. Το makessg.exe είναι επιφορτισμένο με την διαμόρφωση του αρχείου με κατάληξη .ssg, το οποίο περιλαμβάνει την πλήρη γεωμετρική περιγραφή, υπό μορφή πλεγμάτων, του στερεού συνόρου και της ελεύθερης επιφάνειας. Ακολουθούν τα έτερα δύο προγράμματα, setup.exe και solve.exe, τα οποία, με δεδομένο το αρχείο .ssg, υλοποιούν τους απαραίτητους υπολογισμούς για την εκτίμηση της αντίστασης της γάστρας.

Ο κώδικας Itter_swan2.exe, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, εκτελεί επαναληπτικά τη διαδικασία υπολογισμού της αντίστασης. Για τη δεδομένη ταχύτητα που έχει επιλεγεί, υπολογίζεται το βύθισμα και η διαγωγή που θα αποκτήσει το σκάφος, των οποίων οι τιμές ανατροφοδοτούνται σαν

αρχικές τιμές για την επόμενη επανάληψη. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να πληρείται ένα κριτήριο σύγκλισης των μεγεθών αυτών, οπότε προκύπτει το τελικό αποτέλεσμα της αντίστασης.

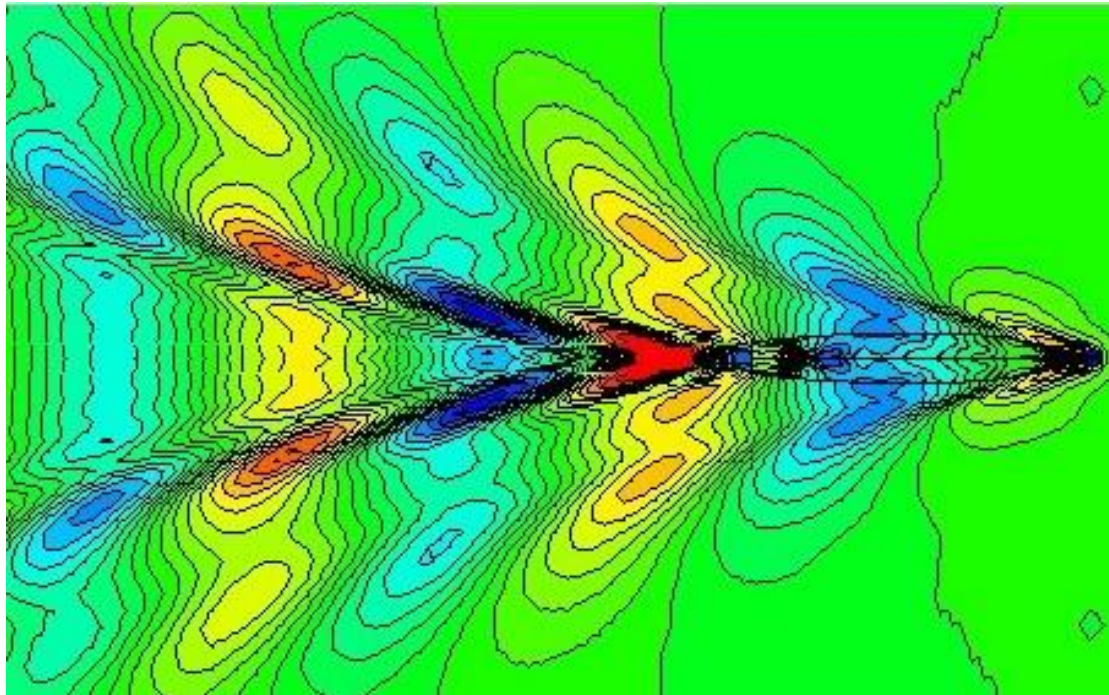
Σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμο να τονισθεί ότι η ακρίβεια των υπολογισμών αλλά και η χρονική διάρκεια που απαιτείται για την ολοκλήρωση της επαναληπτικής διαδικασίας, εξαρτάται από την πυκνότητα του πλέγματος που περιγράφει την γεωμετρία (.ssg file). Αυτό το πλέγμα συνίσταται από επιφανειακά ορθογώνια στοιχεία που αναπαριστούν το στερεό σύνορο της γάστρας και την ελεύθερη επιφάνεια του νερού.

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται το εν λόγω πλέγμα για την αρχική μορφή γάστρας, όπου έχουν χρησιμοποιηθεί 57 x 27 επιφανειακά στοιχεία. Αυτός ο αριθμός είναι σχετικά μεγάλος και προκαλεί καθυστέρηση της ολοκλήρωσης της επαναληπτικής διαδικασίας, όμως εξασφαλίζει ικανοποιητική ακρίβεια στην αναπαράσταση της γεωμετρίας και ως εκ τούτου στα εξαγόμενα αποτελέσματα.



Εικόνα 3.17. Παράδειγμα επιφανειακού πλέγματος περιγραφής του στερεού συνόρου στο πρόγραμμα SWAN 2

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον στα αρχεία εξαγωγής του SWAN 2 παρουσιάζει το αρχείο αναπαράστασης της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας, όπου φαίνεται το πεδίο των παραγόμενων ακολουθούντων και αποκλινόντων κυματισμών. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα παράδειγμα του εν λόγω αρχείου για την αρχική μορφή της γάστρας και σε αριθμό Froude 0.564 που αντιστοιχεί σε ταχύτητα 25 κόμβων.

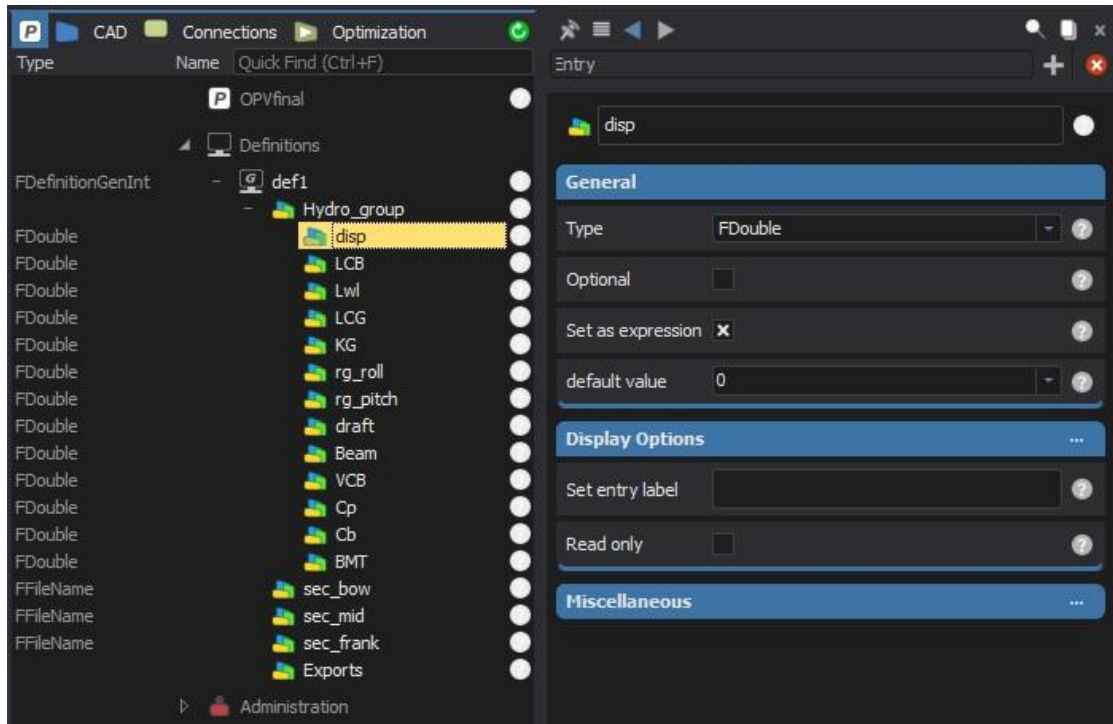


Εικόνα 3.18. Παράδειγμα πεδίου παραγόμενων κυματισμών στο πρόγραμμα SWAN 2

3.5 Διασύνδεση CAESES FFW με Εξωτερικούς Κώδικες

Σύμφωνα με τα όσα έχουν περιγραφεί έως τώρα, τα αποτελέσματα από την εκτέλεση των δύο εξωτερικών προγραμμάτων πρέπει να τροφοδοτηθούν στο CAESES FFW προκειμένου να αξιοποιηθούν από τον γενετικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Αυτό επιτυγχάνεται, αρχικά μέσω της χρήσης ενός εκτελέσιμου αρχείου με ονομασία results.exe το οποίο διαβάζει τα αρχεία εξόδου των SWAN 2 και SPP-86 και ανασύρει τις τιμές των υδροδυναμικών μεγεθών που χρησιμοποιούνται στις αντικειμενικές συναρτήσεις. Οι συγκεκριμένες τιμές που στην περίπτωση μας είναι δύο στον αριθμό, εγγράφονται από το results.exe σε ένα αρχείο results.txt, το οποίο συνδέεται με το CAESES FFW για να ολοκληρωθεί η διαδικασία ανατροφοδότησης.

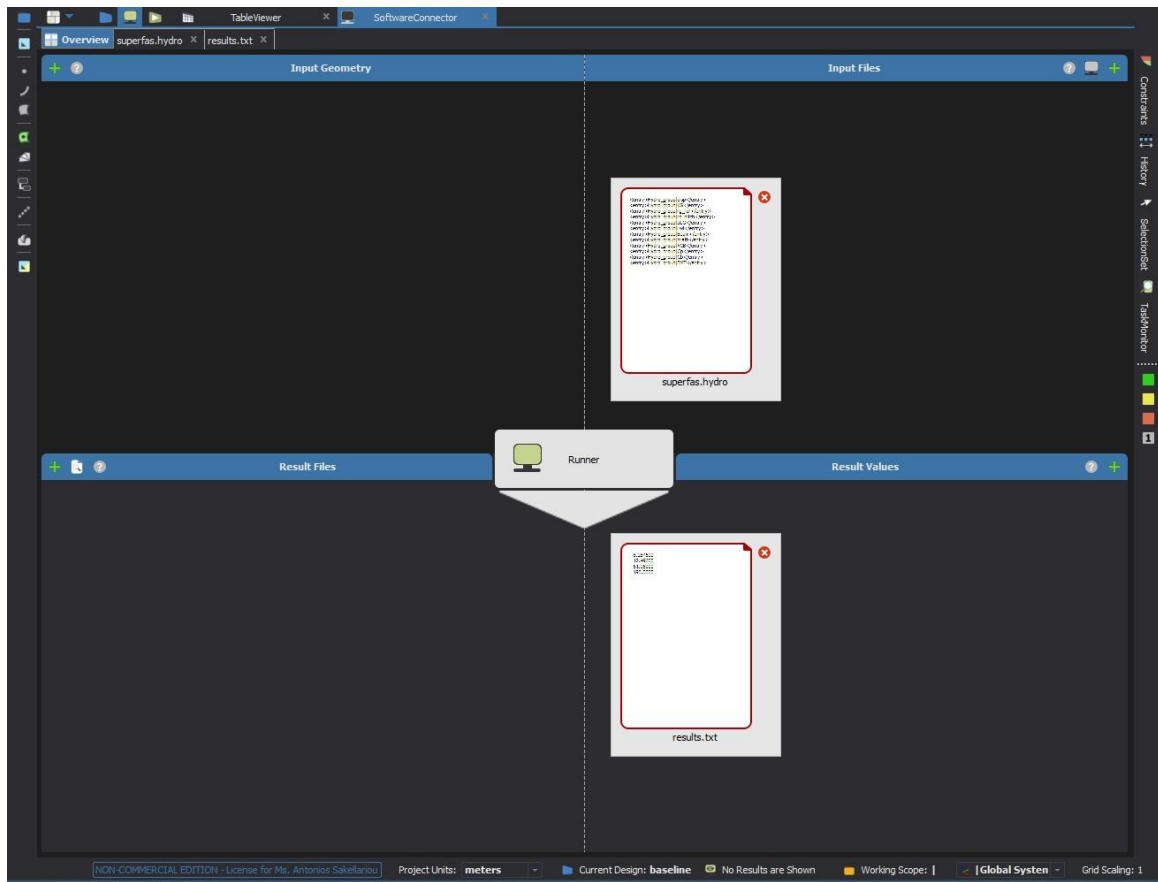
Στις επόμενες εικόνες από το περιβάλλον του CAESES FFW φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο γίνεται συνολικά η εξαγωγή δεδομένων προς τους εξωτερικούς κώδικες και έπειτα η ανατροφοδότηση των αποτελεσμάτων τους.



Εικόνα 3.19.1. Ορισμός του τύπου κάθε εξαγόμενου στοιχείου (π.χ. πραγματικός αριθμός, file και λοιπά)



Εικόνα 3.19.2. Εξαγωγή αρχείων γεωμετρικής αναπαράστασης (offsets)



Εικόνα 3.19.3. CAESSES FFW Software Connector - Εξαγωγή αρχείου υδροστατικών χαρακτηριστικών (.hydro) και εισαγωγή αποτελεσμάτων (results.txt)

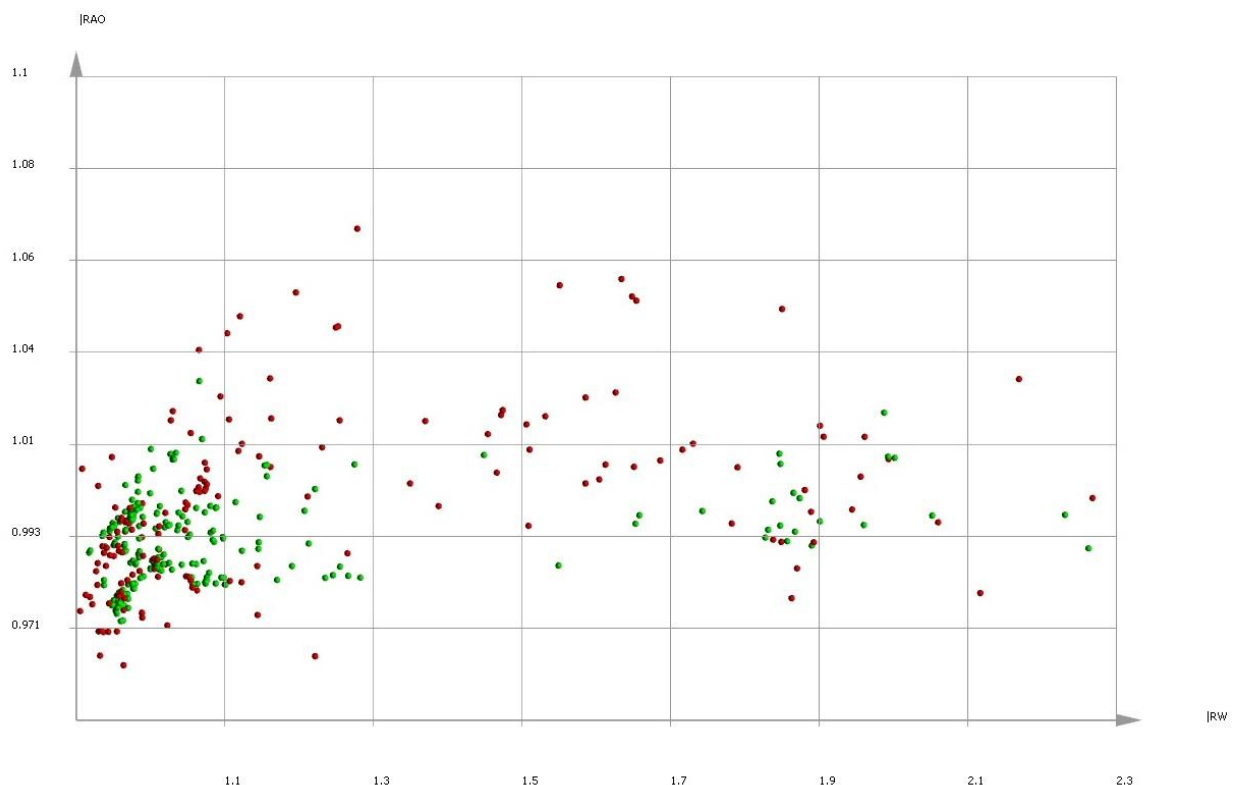
Για την εκτέλεση του συνόλου των εξωτερικών προγραμμάτων και βοηθητικών εκτελέσιμων είναι απαραίτητη η χρήση ενός αρχείου .bat. Μέσω αυτού του αρχείου γίνεται η διαδοχική κλήση των προγραμμάτων καθώς και άλλες λειτουργίες που επιθυμεί ο χρήστης όπως η διαγραφή περιττών/βοηθητικών αρχείων που προκύπτουν κατά την εκτέλεση των προγραμμάτων.

Κεφάλαιο 4. Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

4.1 Επιλογή Βέλτιστης Γεωμετρίας

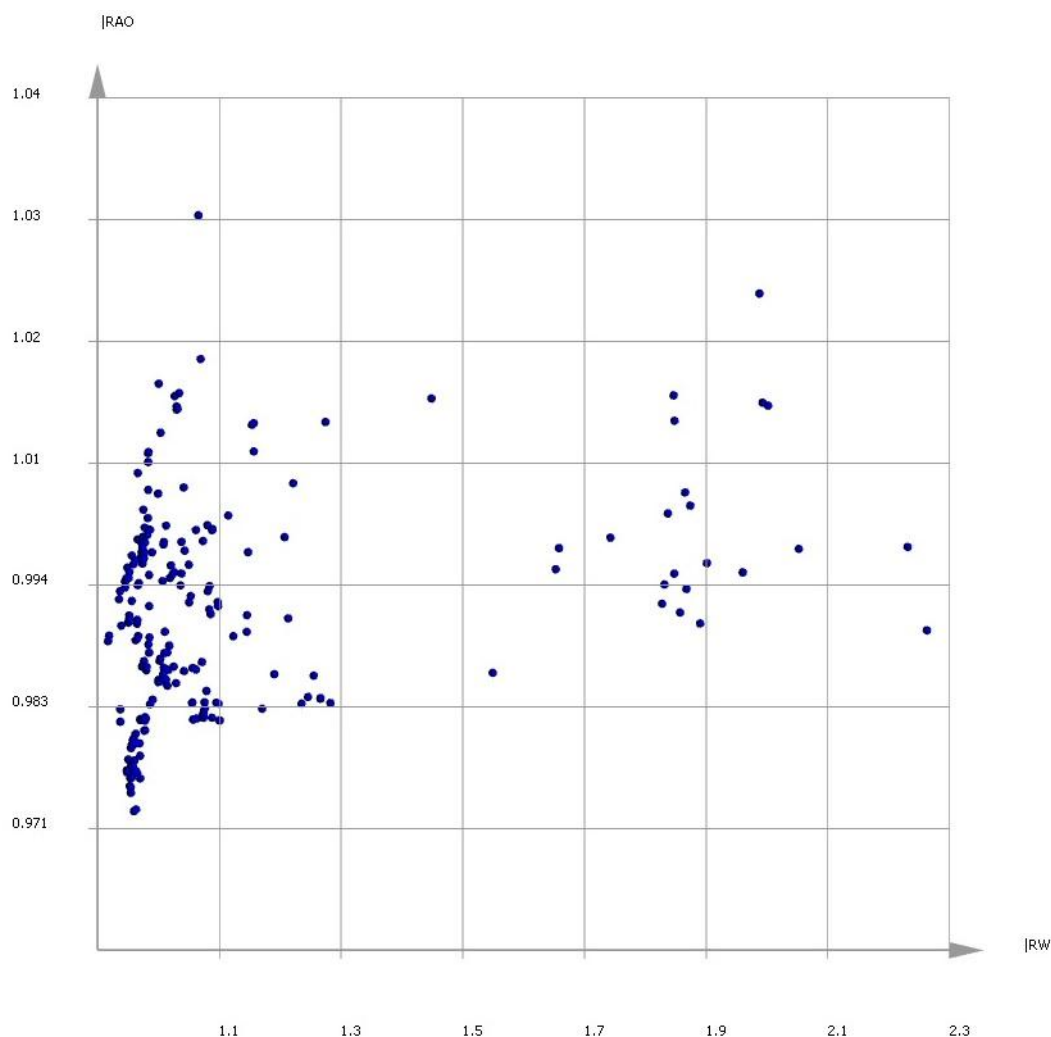
Τα αποτελέσματα που παρήχθησαν από τον γενετικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο. Η βελτιστοποίηση εκτελέστηκε ως προς δύο κριτήρια βελτιστοποίησης (αντίσταση κυματισμού RW και απόκριση σε κυματισμούς RAO) για συνολικά τετρακόσιες διαφορετικές γεωμετρίες. Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων θα χρησιμοποιηθεί διάγραμμα στο οποίο ο άξονας των X περιέχει την τιμή της αντίστασης κυματισμού και ο άξονας Y την τιμή της απόκρισης σε κυματισμούς σε αδιάστατη μορφή για κάθε γάστρα (η τιμή του κάθε μεγέθους είναι διαιρεμένη με την αντίστοιχη του πατρικού πλοίου). Επομένως αν αναπαριστούσαμε σε αυτό το διάγραμμα την απόδοση της πατρική γάστρας, αυτή θα καταλάμβανε το σημείο (1,1).

Ακολουθεί το εν λόγω διάγραμμα για το σύνολο των διαφορετικών γεωμετριών που προέκυψαν από τη διαδικασία βελτιστοποίησης.



Διάγραμμα 4.1. Γεωμετρίες που προέκυψαν από τη διαδικασία βελτιστοποίησης

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το ίδιο διάγραμμα συμπεριλαμβάνοντας μόνο τις γεωμετρίες που πληρούν τον περιορισμό εκτοπίσματος που τέθηκε.



Διάγραμμα 4.2. Γεωμετρίες εντός του περιορισμού εκτοπίσματος

Οι γεωμετρίες οι οποίες διαθέτουν τιμή μικρότερη της μονάδας για κάποιο κριτήριο, αποτελούν καλύτερες σχεδιάσεις από την πατρική ως προς αυτό το κριτήριο. Έτσι, θα μπορούσε να γίνει μια ομαδοποίηση των γεωμετριών με βάση την απόδοσή τους σε σύγκριση με το πατρικό πλοίο.

Ομάδα	Αντικειμενική Συνάρτηση	Κατανομή γεωμετριών	
1	$RAO < 1$	201	84.81%
2	$RW < 1$	113	47.67%
3	$RAO < 1 \ \& \ RW < 1$	104	43.88%
4	$RAO > 1 \ \& \ RW < 1$	8	3.37%
5	$RAO < 1 \ \& \ RW > 1$	94	38.66%
6	$RAO > 1 \ \& \ RW > 1$	28	11.81%

Πίνακας 4.1. Κατάταξη γεωμετριών ως προς την απόδοσή τους

Επομένως, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η επιθυμητή λύση είναι μέλος της τρίτης ομάδας του πίνακα που προηγείται.

Στους δύο πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι δεκαπέντε καλύτερες γεωμετρίες ως προς το κάθε κριτήριο καθώς και η απόδοση τους ως προς το έτερο.

A/A Σχεδίασης	RAO	Ποσοστό RAO	RW	Ποσοστό RW
383	0.9731	-2.69%	0.9600	-4.00%
399	0.9732	-2.68%	0.9632	-3.68%
381	0.9748	-2.52%	0.9548	-4.52%
348	0.9753	-2.47%	0.9542	-4.58%
373	0.9754	-2.46%	0.9532	-4.68%
368	0.9761	-2.39%	0.9700	-3.00%
359	0.9762	-2.38%	0.9537	-4.63%
322	0.9762	-2.38%	0.9558	-4.42%
396	0.9762	-2.38%	0.9553	-4.47%
372	0.9766	-2.34%	0.9653	-3.47%
361	0.9767	-2.33%	0.9484	-5.16%
324	0.9768	-2.32%	0.9600	-4.00%
329	0.9768	-2.32%	0.9484	-5.16%
371	0.9768	-2.32%	0.9490	-5.10%

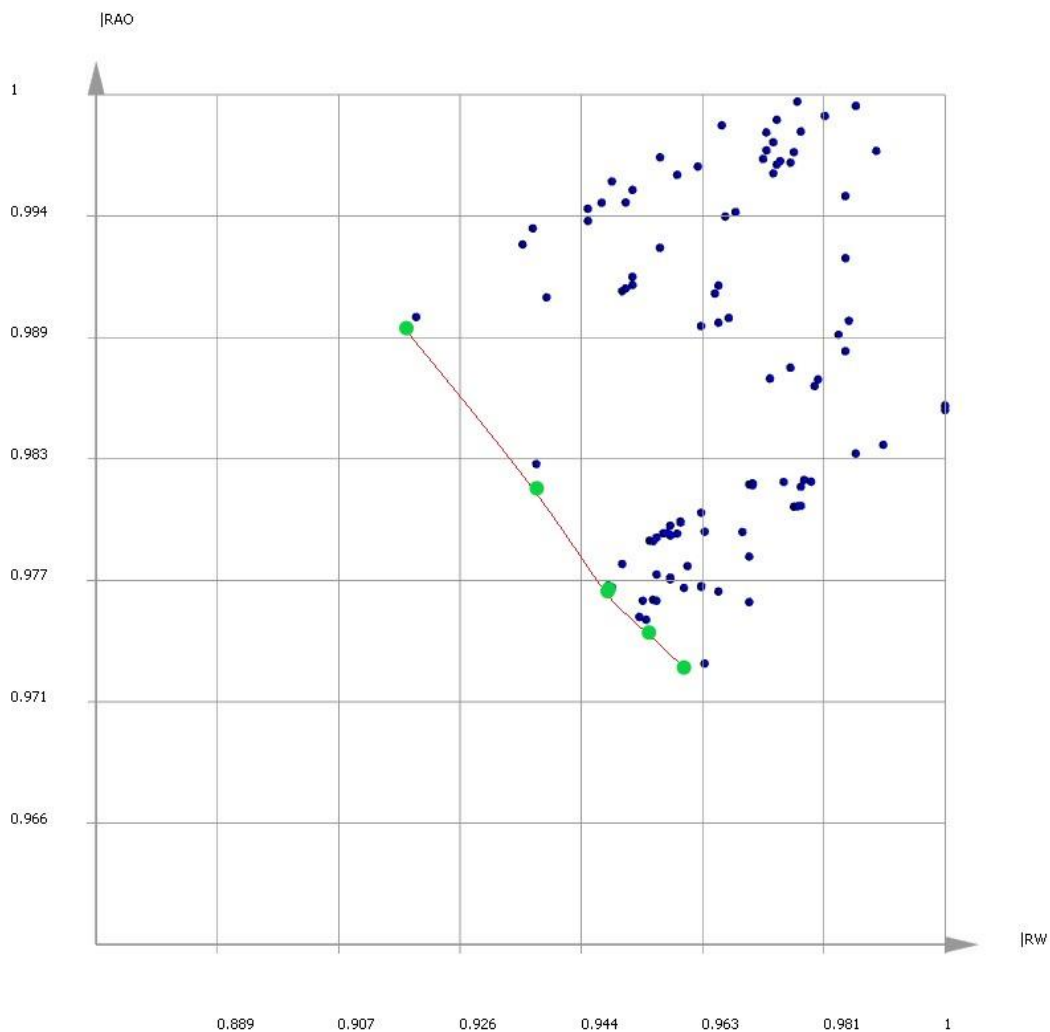
Πίνακας 4.2. Βέλτιστες γεωμετρίες ως προς την απόκριση σε κυματισμούς

A/A Σχεδίασης	RW	Ποσοστό RW	RAO	Ποσοστό RAO
397	0.9174	-8.26%	0.9890	-1.10%
362	0.9190	-8.10%	0.9895	-1.05%
367	0.9353	-6.47%	0.9930	-0.70%
388	0.9369	-6.31%	0.9937	-0.63%
386	0.9374	-6.26%	0.9815	-1.85%
353	0.9374	-6.26%	0.9826	-1.74%
374	0.9390	-6.10%	0.9905	-0.95%
377	0.9453	-5.47%	0.9941	-0.59%
357	0.9453	-5.47%	0.9946	-0.54%
309	0.9474	-5.26%	0.9949	-0.51%
361	0.9484	-5.16%	0.9767	-2.33%
329	0.9484	-5.16%	0.9768	-2.32%
394	0.9484	-5.16%	0.9769	-2.31%
371	0.9490	-5.10%	0.9768	-2.32%

Πίνακας 4.3. Βέλτιστες γεωμετρίες ως προς την απόκριση σε κυματισμούς

Από τους παραπάνω πίνακες βλέπουμε ότι επιτυγχάνεται μέγιστη μείωση της αντίστασης στην ταχύτητα των 25 κόμβων κατά 8.26% και μέγιστη μείωση του συντελεστή απόκρισης σε κυματισμούς κατά 2.69% στην ίδια ταχύτητα. Επίσης συμπεραίνεται ότι βελτίωση της απόδοσης ως προς το ένα κριτήριο συνεπάγεται συνήθως μείωση της απόδοσης ως προς το άλλο, γεγονός που αναμένεται σε μια πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση.

Το ουσιαστικό ενδιαφέρον του σχεδιαστή έγκειται στον προσδιορισμό του Pareto front, δηλαδή στον προσδιορισμό των βέλτιστων λύσεων. Αυτές φαίνονται στο διάγραμμα και τον πίνακα που ακολουθεί.



Διάγραμμα 4.3. Απεικόνιση του Pareto front

Pareto Front					
A/A	A/A Σχεδίασης	RW	Ποσοστό RW	RAO	Ποσοστό RAO
1	397	0.9174	-8.26%	0.9890	-1.10%
2	386	0.9374	-6.26%	0.9815	-1.85%
3	361	0.9484	-5.16%	0.9768	-2.32%
4	381	0.9547	-4.53%	0.9747	-2.53%
5	383	0.9600	-4.00%	0.9731	-2.69%

Πίνακας 4.4. Σχεδιάσεις του Pareto front και η επίδοση τους ως προς τα κριτήρια βελτιστοποίησης

Στον ανωτέρω πίνακα παρατηρούμε ότι ως προς την αντίσταση κυματισμού επιτυγχάνεται βελτίωση από 4% έως 8.26% ενώ ως προς την απόκριση σε κυματισμούς σημειώνεται βελτίωση από 1.1% έως 2.69%. Καθώς καμία εκ των γεωμετριών του Pareto front δεν επιτυγχάνει καλύτερη επίδοση από τις άλλες και στα δύο κριτήρια, η επιλογή της βέλτιστης γεωμετρίας θα πρέπει να γίνει βάσει του ποσοστού της βελτίωσης που επιτυγχάνεται στα δύο κριτήρια και λαμβάνοντας υπόψη τη σχετική σημαντικότητα μεταξύ τους.

Τελικά, παρατηρούμε ότι η γάστρα 397 παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση ως προς το κριτήριο της αντίστασης κυματισμού, η γάστρα 383 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη βελτίωση στο πεδίο της απόκρισης σε κυματισμούς ενώ η γάστρα 361 αποτελεί τον καλύτερο συμβιβασμό σε σχέση με τις δύο προηγούμενες.

Στον επόμενο πίνακα δίνονται οι τιμές των μεταβλητών σχεδίασης όπως αντιστοιχούν στις περιπτώσεις των σχεδιάσεων υπό α/α 361, 383 και 397.

A/A	Μεταβλητή Σχεδίασης	Μονάδα	Πατρική Γάστρα	Γάστρα nu. 361	Γάστρα nu. 383	Γάστρα nu. 397
1	Πλάτος Επίπεδου Πυθμένα	m	0.1	0.278	0.278	0.678
2	Πλάτος Ισάλου Transom	m	3.66	3.868	3.79	3.808
3	Πλάτος Ισάλου στη Μέση Τομή	m	4.8	5.040	5.040	4.702
4	Γωνία Εισόδου Πλώρης	deg	38.5	36.91	36.96	40.62
5	Γωνία Ανύψωσης Πυθμένα	deg	0.96	0.937	1.17	0.937
6	Βάθος Σφήνας στη Πρύμνη	m	1.800	1.57	1.494	1.565
7	Ύψος skeg (από baseline)	m	1.210	1.33	1.344	1.334
8	Γωνία Ανύψωσης Νομέα Μέσης Τομής	deg	14.070	15.84	15.82	15.82

Πίνακας 4.5. Τιμές μεταβλητών σχεδίασης βέλτιστων γεωμετριών

Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται οι νομείς της πατρικής μορφής γάστρας και των βέλτιστων γεωμετριών μέχρι το ύψος της ισάλου ώστε να αποτυπωθεί καλύτερα η διαφοροποίηση τους.



Εικόνα 4.1. Όψη στο επίπεδο $y-z$ των νομέων πατρικής σχεδίασης έως το ύψος της ισάλου



Εικόνα 4.2. Όψη στο επίπεδο $y-z$ των νομέων σχεδίασης 397 έως το ύψος της ισάλου



Εικόνα 4.3. Όψη στο επίπεδο $y-z$ των νομέων σχεδίασης 383 έως το ύψος της ισάλου



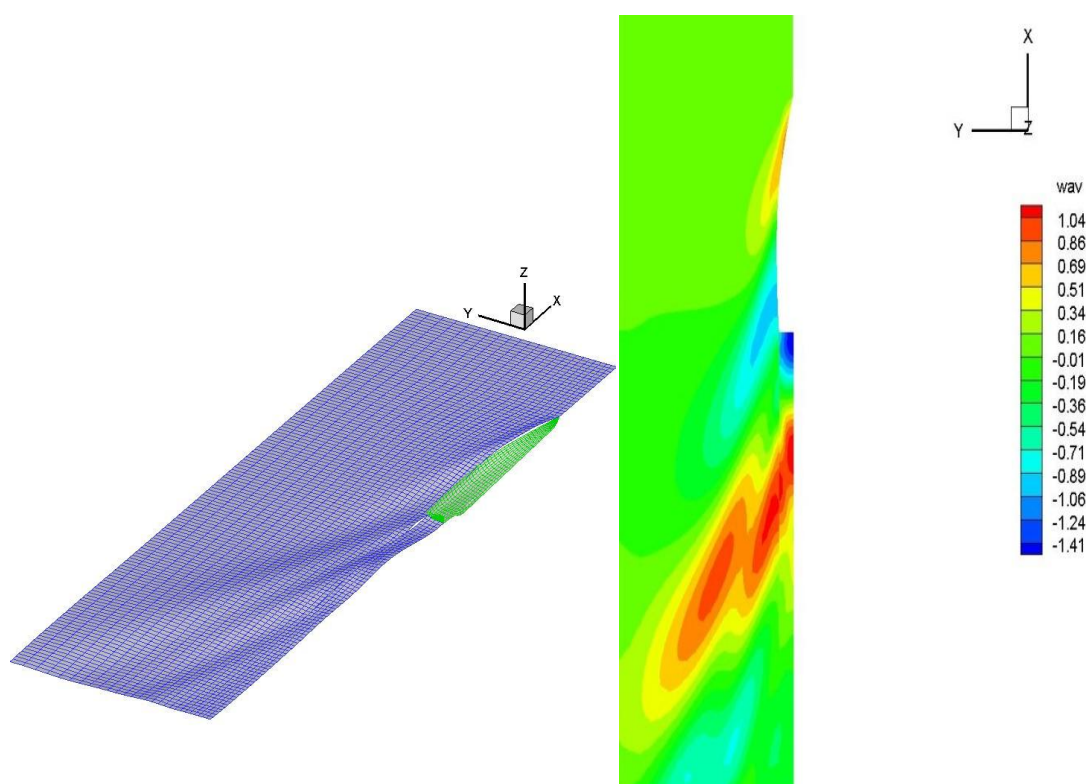
Εικόνα 4.4. Όψη στο επίπεδο $y-z$ των νομέων σχεδίασης 361 έως το ύψος της ισάλου

Από τις ανωτέρω εικόνες συμπεραίνεται ότι η γεωμετρία του πλοίου άλλαξε ομοιόμορφα καθ' όλο το μήκος του, οδηγώντας σε αποδοτικότερες σχεδιάσεις. Επίσης, παρατηρούμε ότι οι προκύπτουσες γεωμετρίες είναι εξίσου ομαλές με την πατρική χωρίς να παρουσιάζουν καμία απότομη γεωμετρική μεταβολή. Αυτός ο στόχος είχε επισημανθεί από την αρχή ως εξέχουσα σημασία από την περιγραφή της διαδικασίας παραμετρικής μοντελοποίησης. Είναι προφανές πως δεν αρκεί να βελτιώσουμε τις επιδόσεις μιας δοθείσας γεωμετρίας αλλά είναι επίσης απαραίτητο η

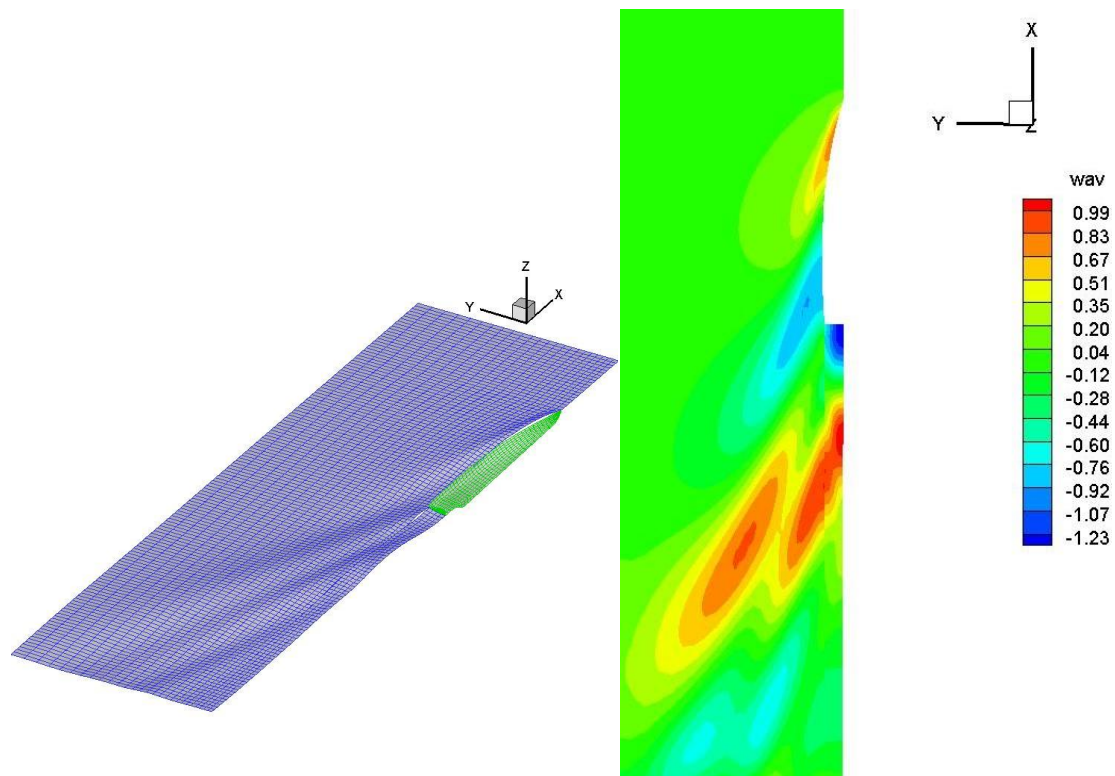
προκύπτουσα μορφή γάστρας να έχει άρτια γεωμετρικά χαρακτηριστικά και να συνάδει με ένα σύνολο γεωμετρικών περιορισμών που ετέθησαν ως απαιτήσεις στη διαδικασία βελτιστοποίησης.

4.2 Βελτιστοποίηση Αντίστασης

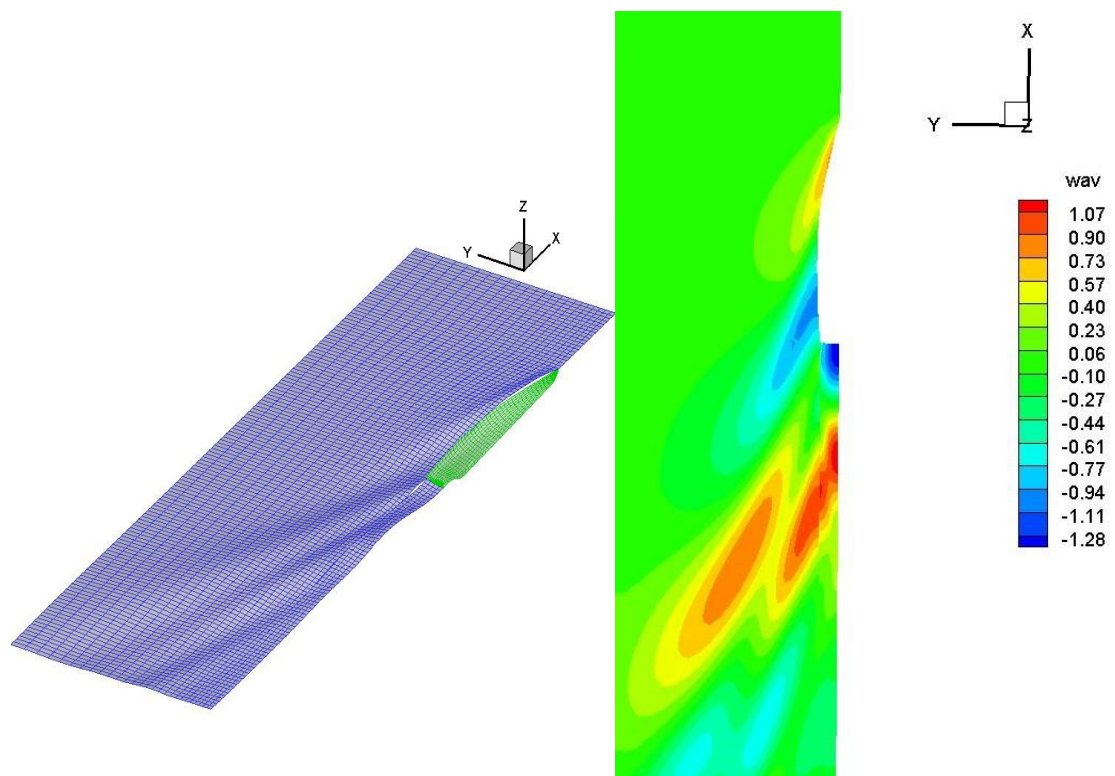
Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται σχηματικά τα πεδία των παραγόμενων κυματισμών για ταχύτητα πλεύσης 25 κόμβων, υπό τη μορφή πλέγματος ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας και κάτοψης με χρωματική απεικόνιση της ανύψωσης ελεύθερης επιφάνειας, για την πατρική γάστρα και τις τρεις σχεδιάσεις που επιλέχθηκαν ως βέλτιστες.



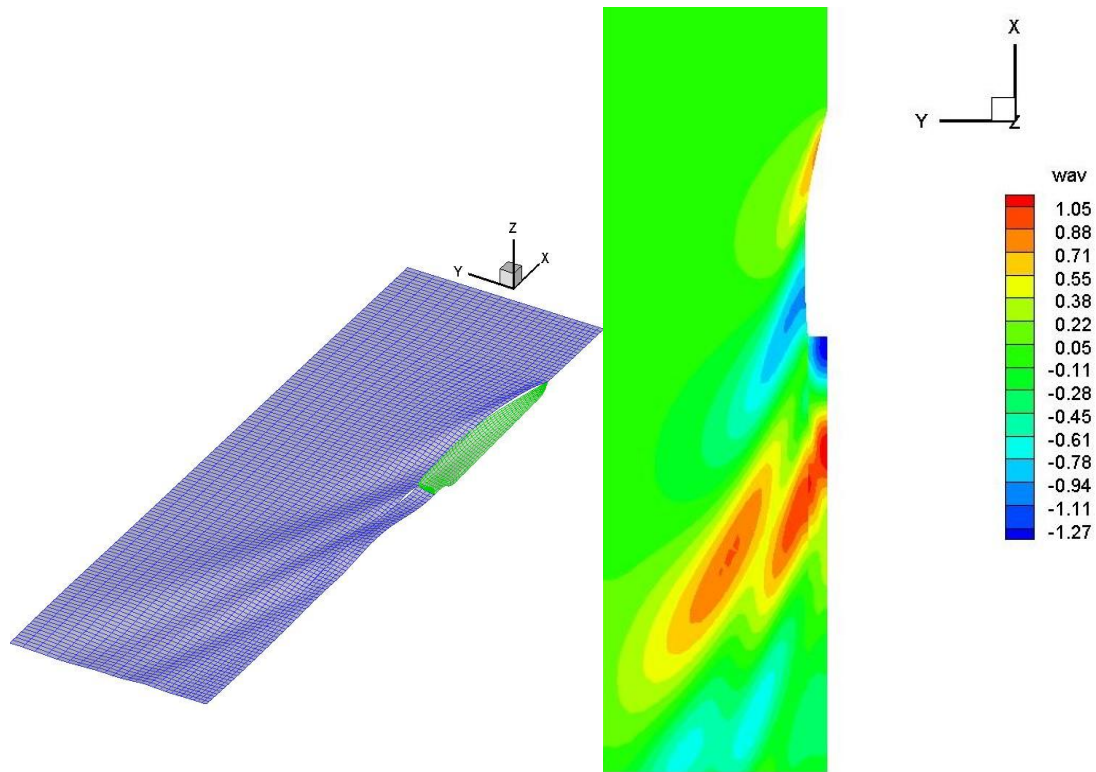
Εικόνα 4.5. Απεικόνιση ελεύθερης επιφάνειας πατρικής σχεδίασης σε ταχύτητα 25 κόμβων



Εικόνα 4.6. Απεικόνιση ελεύθερης επιφάνειας σχεδίασης 397 σε ταχύτητα 25 κόμβων



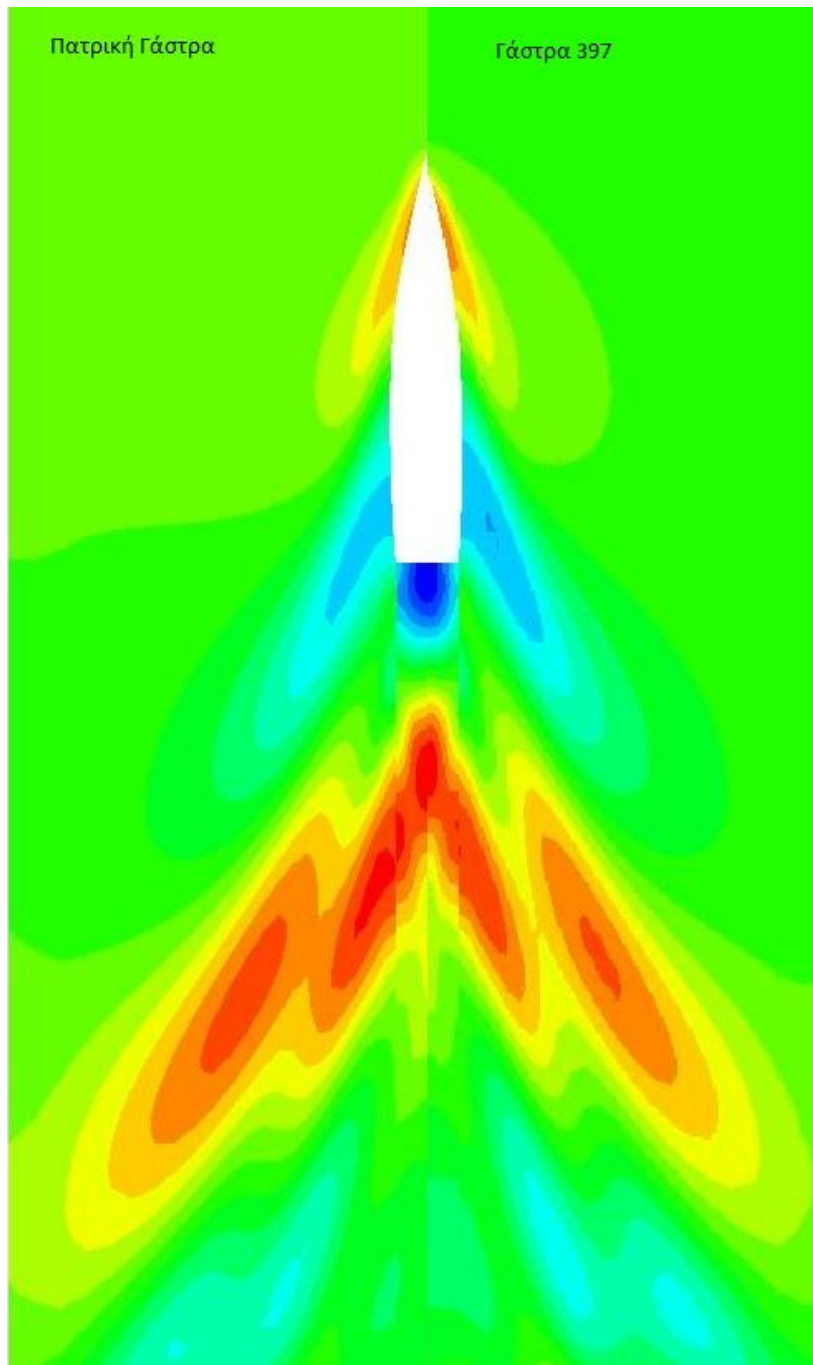
Εικόνα 4.7. Απεικόνιση ελεύθερης επιφάνειας σχεδίασης 383 σε ταχύτητα 25 κόμβων



Εικόνα 4.8. Απεικόνιση ελεύθερης επιφάνειας σχεδίασης 361 σε ταχύτητα 25 κόμβων

Στις παραπάνω εικόνες γίνεται εμφανής η υπεροχή των βελτιστοποιημένων γεωμετριών σε σύγκριση με τη πατρική ως προς το παραγόμενο πεδίο κυματισμών. Ιδιαίτερα αισθητή είναι η διαφορά της κοιλάδας του παραγόμενου κύματος στη πρύμνη του πλοίου, όπου η πατρική σχεδίαση σημειώνει την τιμή των 1.41 μέτρων σε αντίθεση με την αμέσως επόμενη χειρότερη τιμή των 1.28 μέτρων που σημειώνει η γάστρα 383.

Ακολουθεί μια εικόνα άμεσης σύγκρισης μεταξύ των πεδίων κυματισμών της πατρικής γάστρας και της γάστρας 397, η οποία είναι και η αποδοτικότερη ως προς την αντίσταση κυματισμού.



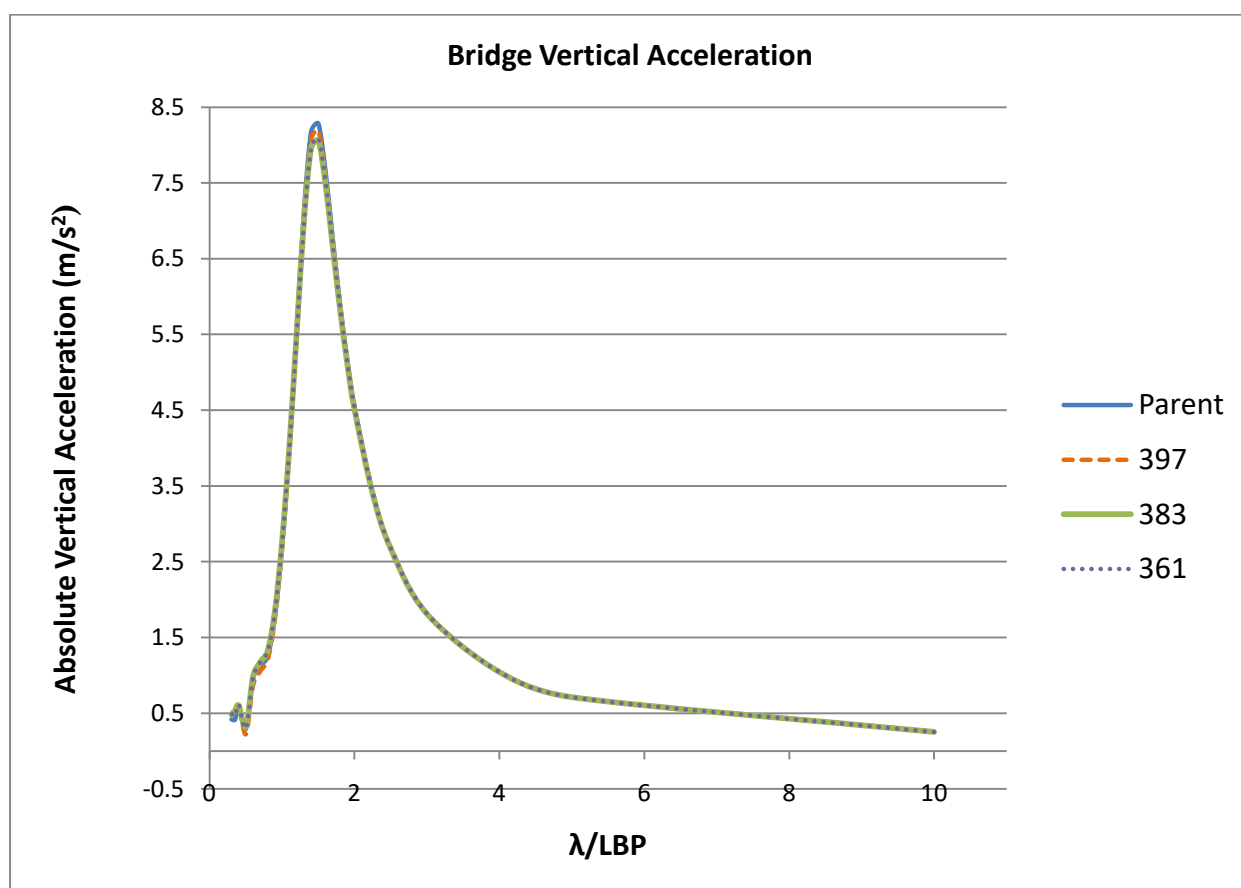
Εικόνα 4.9. Σύγκριση παραγόμενου πεδίου κυματισμού πατρικής σχεδίασης με σχεδίαση 397 σε ταχύτητα 25 κόμβων

Είναι, επομένως, φανερό η υπεροχή της βελτιστοποιημένης γάστρας 397 στο τομέα των παραγόμενων κυματισμών για πλεύση σε ταχύτητα 25 κόμβων.

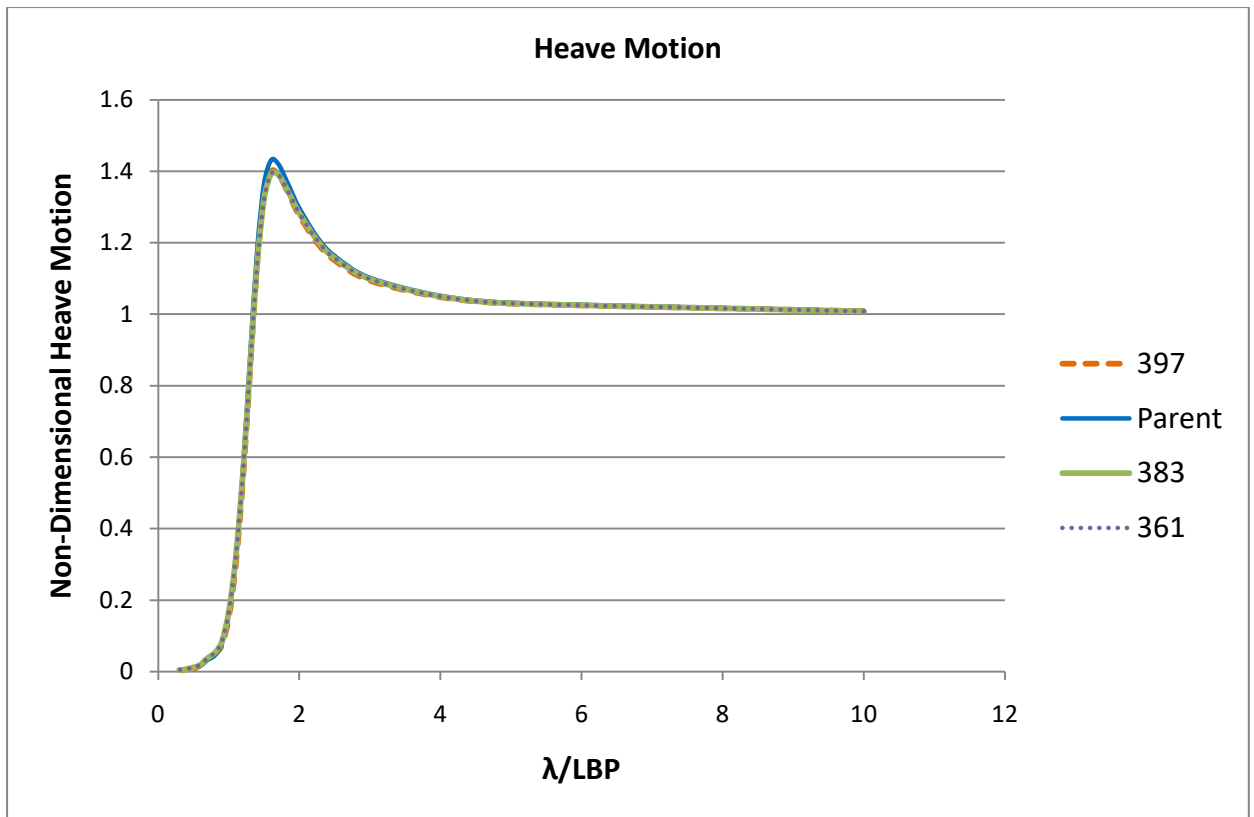
4.3 Βελτιστοποίηση Δυναμικής Συμπεριφοράς σε Κυματισμούς

Η αντικειμενική συνάρτηση, βάσει της οποίας γίνεται η βελτιστοποίηση της δυναμικής συμπεριφοράς σε κυματισμούς λαμβάνει υπόψη τις κάθετες επιταχύνσεις στη γέφυρα κατά την πλεύση με ταχύτητα 25 κόμβων και κατά τη συνάντηση με μετωπικούς κυματισμούς.

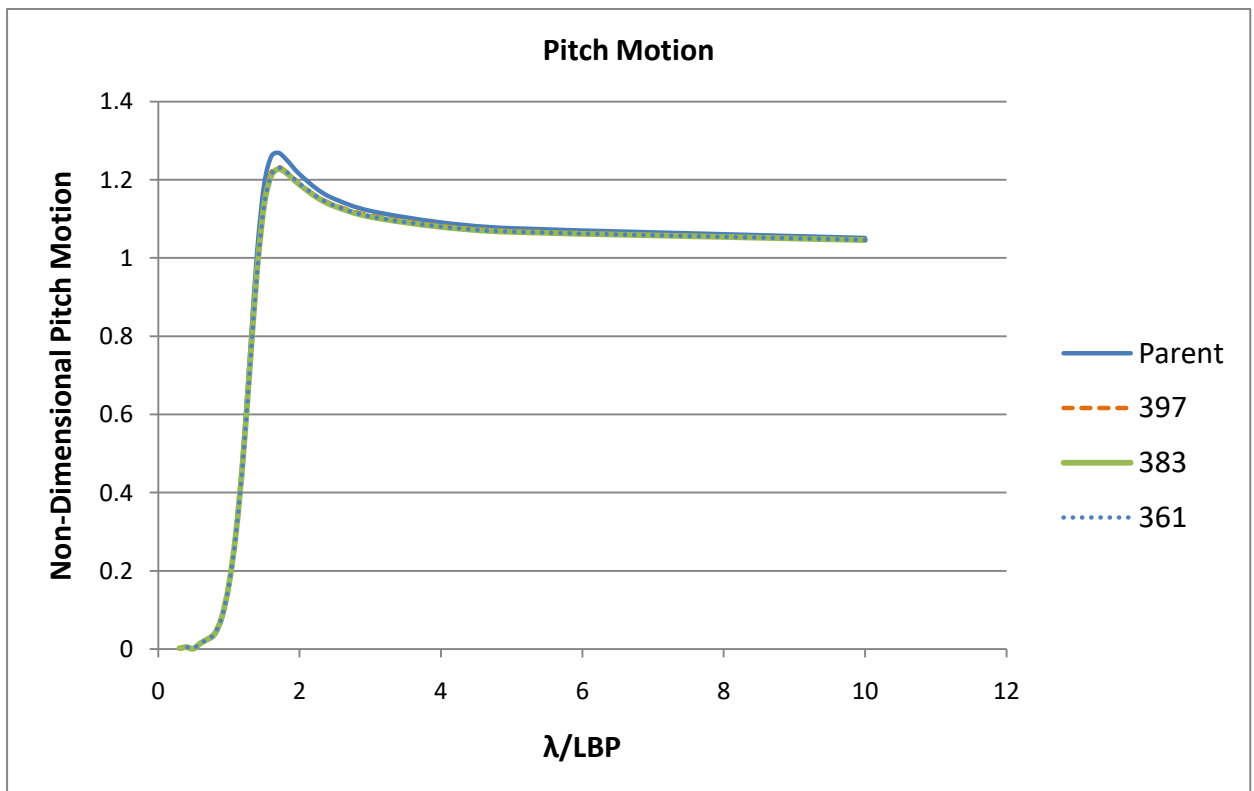
Τα διαγράμματα που παρατίθενται στη συνέχεια παρουσιάζουν την σύγκριση των τριών βέλτιστων σχεδιάσεων με την πατρική ως προς αυτό το μέγεθος καθώς και ως προς τις αποκρίσεις τους στις κινήσεις heave και pitch, ώστε να υπάρξει μια ολοκληρωμένη εικόνα για τη διαφοροποίηση των γεωμετριών.



Διάγραμμα 4.4. Σύγκριση κάθετης επιτάχυνσης στη γέφυρα πατρικής και βελτιστοποιημένων μορφών γάστρας



Διάγραμμα 4.5. Σύγκριση κίνησης Heave πατρικής και βελτιστοποιημένων μορφών γάστρας



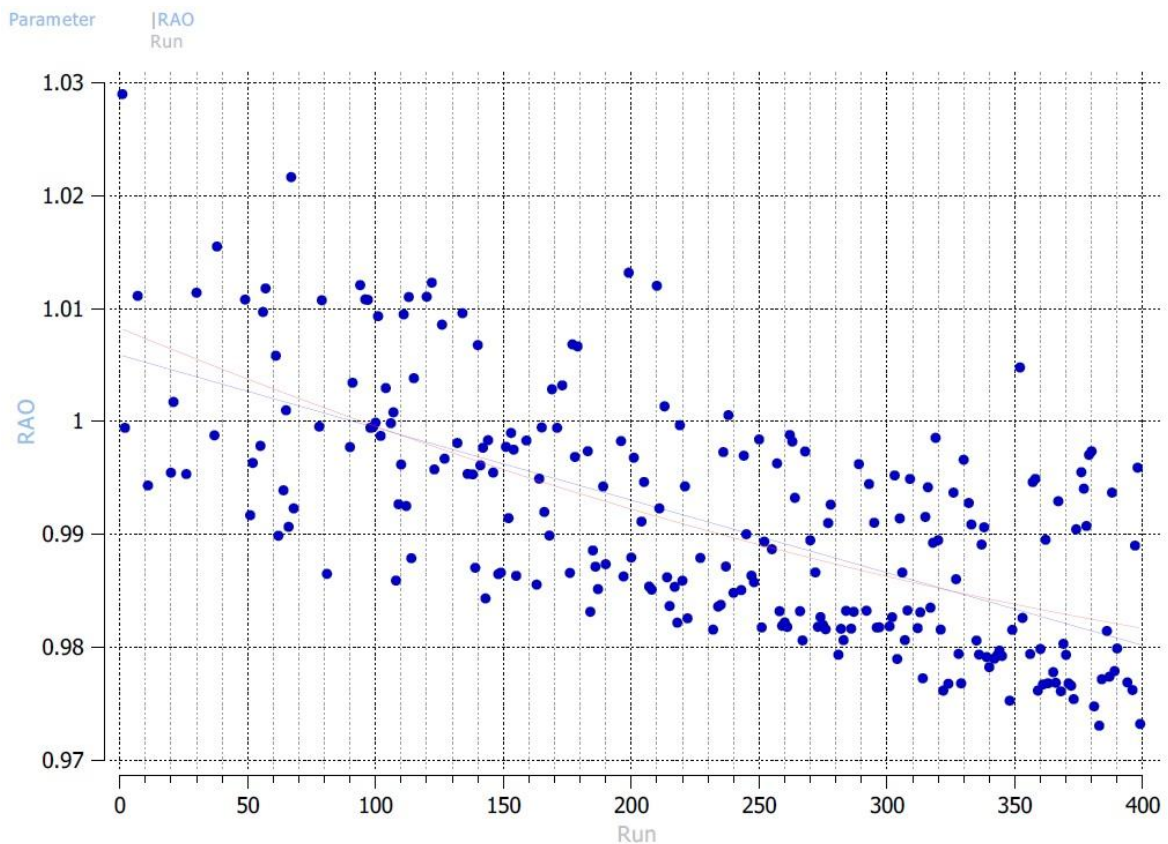
Διάγραμμα 4.6. Σύγκριση κίνησης Pitch πατρικής και βελτιστοποιημένων μορφών γάστρας

Παρατηρούμε ότι η μείωση της κάθετης επιτάχυνσης στη γέφυρα δεν γίνεται ιδιαίτερα αισθητή, γεγονός που είναι αναμενόμενο καθώς η βελτίωση είναι της τάξης του 1.1% έως 2.69% μεταξύ των βέλτιστων γεωμετριών. Παρ' όλα αυτά, οι κινήσεις Heave και Pitch παρουσιάζουν μεγαλύτερη βελτίωση η οποία αποτυπώνεται στα διαγράμματα, παρά το ότι τα συγκεκριμένα μεγέθη δεν συμπεριελήφθησαν σε κάποια αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης.

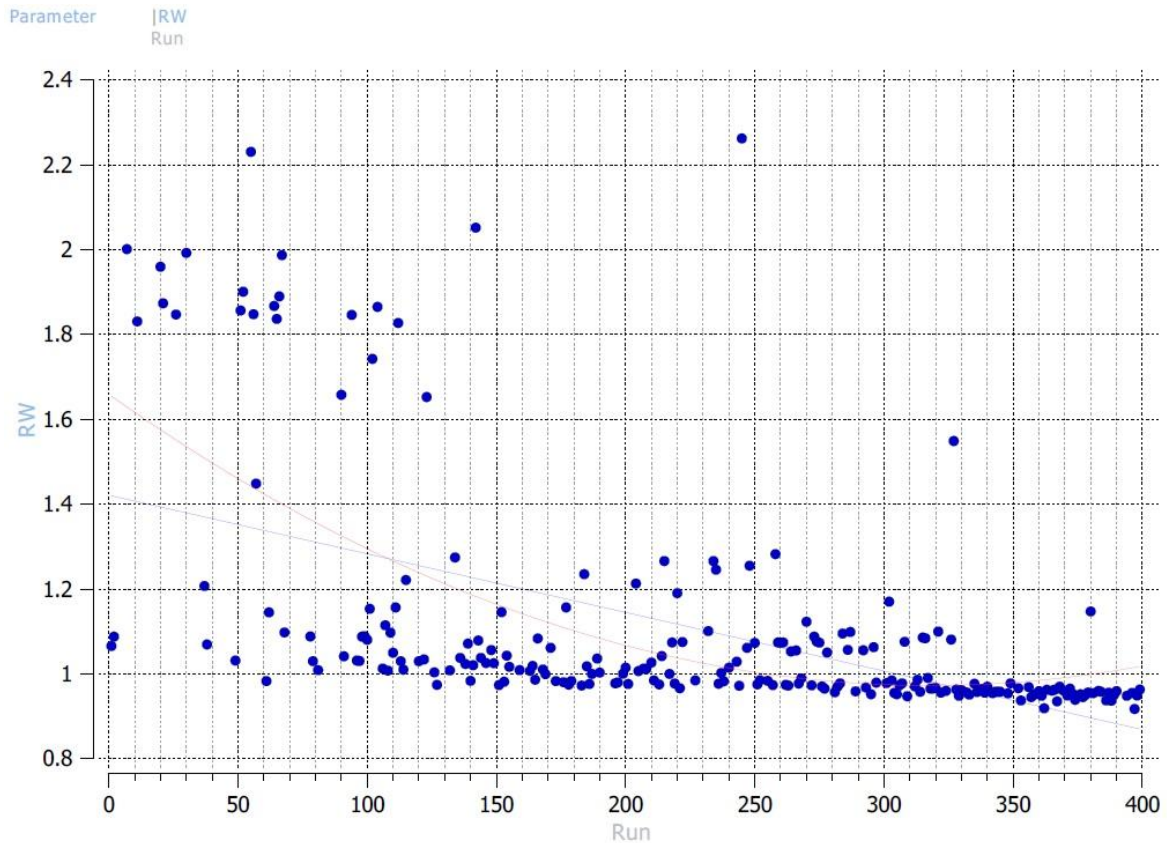
4.3 Αξιολόγηση Βελτιστοποίησης και Επίδρασης Μεταβλητών Σχεδίασης

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας βελτιστοποίησης και της εξαγωγής αποτελεσμάτων, κρίνεται σκόπιμο να εξετασθεί η πορεία της διαδικασίας καθώς και η επίδραση των μεταβλητών σχεδίασης σε αυτή, ώστε να προκύψουν συμπεράσματα τα οποία θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν μελλοντικά.

Καταρχάς, εξετάζεται η αποδοτικότητα του γενετικού αλγόριθμου NSGA-II, υπό την έννοια της ταχύτητας βελτίωσης των μεγεθών και κατά πόσο συνέκλινε σε αποδοτικότερες μορφές γάστρας. Η εξέλιξη των κριτηρίων βελτιστοποίησης φαίνεται στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Διάγραμμα 4.7. Εξέλιξη του κριτηρίου RAO



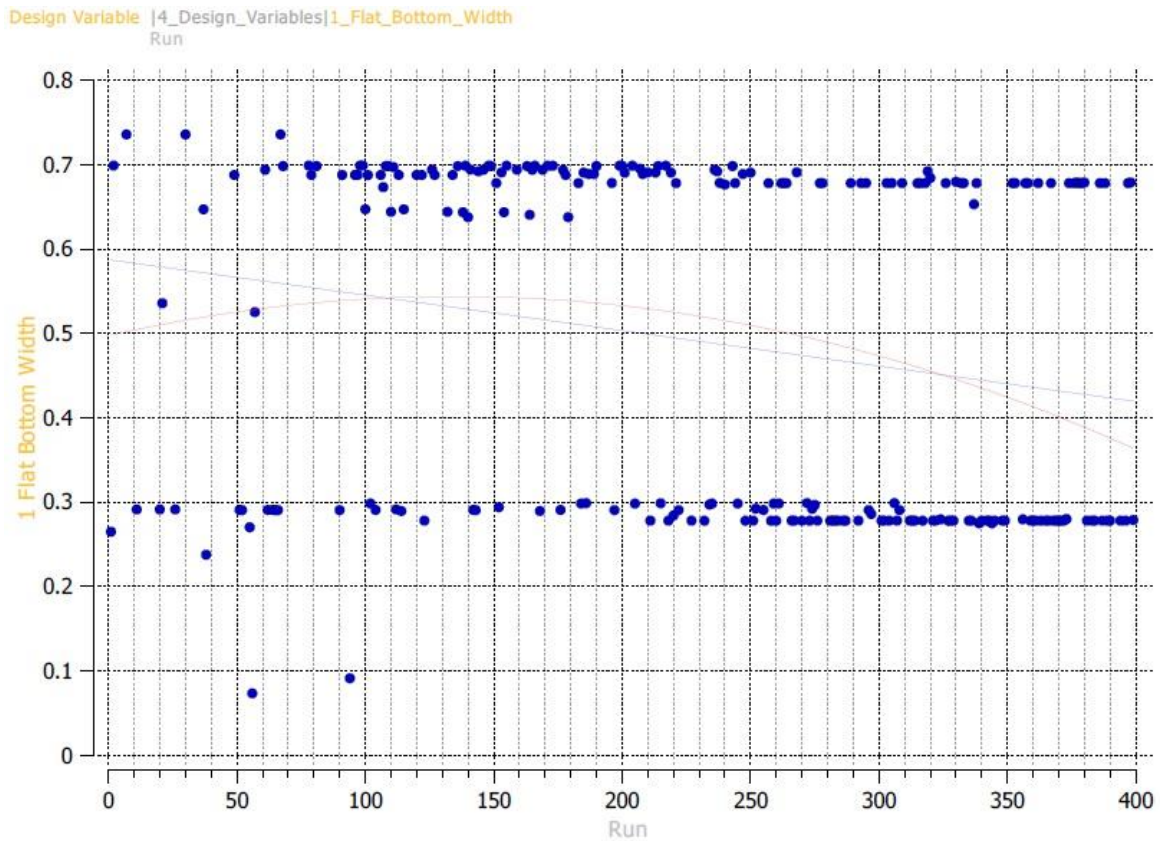
Διάγραμμα 4.8. Εξέλιξη του κριτηρίου αντίστασης κυματισμού

Παρατηρούμε ότι ο γενετικός αλγόριθμος έχει συγκλίνει σε αποδοτικές γεωμετρίες και για τα δύο κριτήρια βελτιστοποίησης. Παρ' ότι στην περίπτωση της αντίστασης κυματισμού σημειώνεται μεγάλη διακύμανση του μεγέθους, παρατηρούμε ότι κατά την παραγωγή των τελευταίων γενεών γαστρών ο αλγόριθμος έχει καταλήξει σε μεγάλο βαθμό στα χαρακτηριστικά των γεωμετριών που αποδίδουν καλύτερα, με αποτέλεσμα την σύγκλιση του κριτηρίου σε ικανοποιητικά επίπεδα. Επομένως, συμπεραίνουμε ότι ο αριθμός των παραγόμενων γεωμετριών που επιλέχθηκε ήταν ικανοποιητικός, ενώ αύξηση του θα είχε ελάχιστη επίδραση στην βελτίωση των αποτελεσμάτων καθώς και αρνητική επίπτωση στην χρονική διάρκεια ολοκλήρωσης της διαδικασίας.

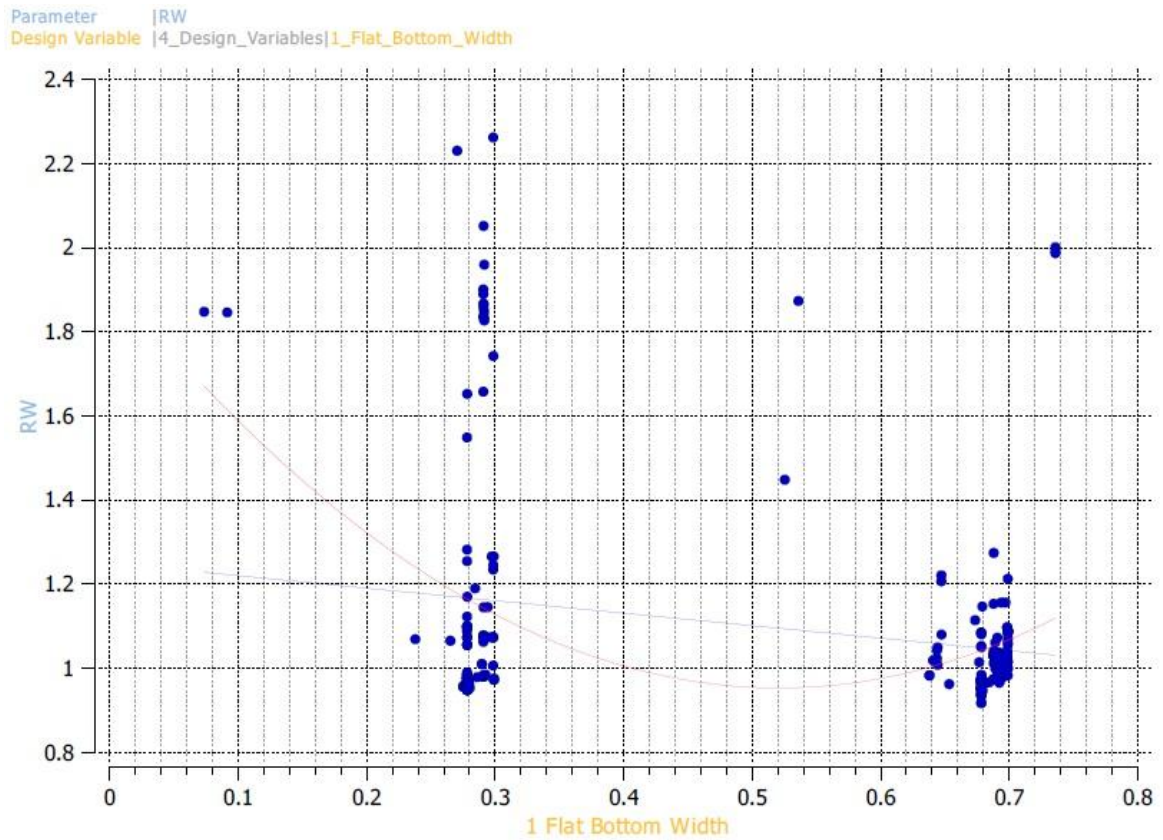
Όσο αφορά στις μεταβλητές σχεδίασης, μπορούμε με παρόμοιο τρόπο να καταλάβουμε το μέγεθος επίδρασης τους στην βελτίωση του κάθε κριτηρίου. Παρατηρώντας την εξέλιξη τους κατά την εκτέλεση της διαδικασίας και σε συνάρτηση με την αντίστοιχη διαφοροποίηση των κριτηρίων, καταλήγουμε στις εξής σημαντικότερες μεταβλητές σχεδίασης:

1) Πλάτος Επίπεδου Πυθμένα

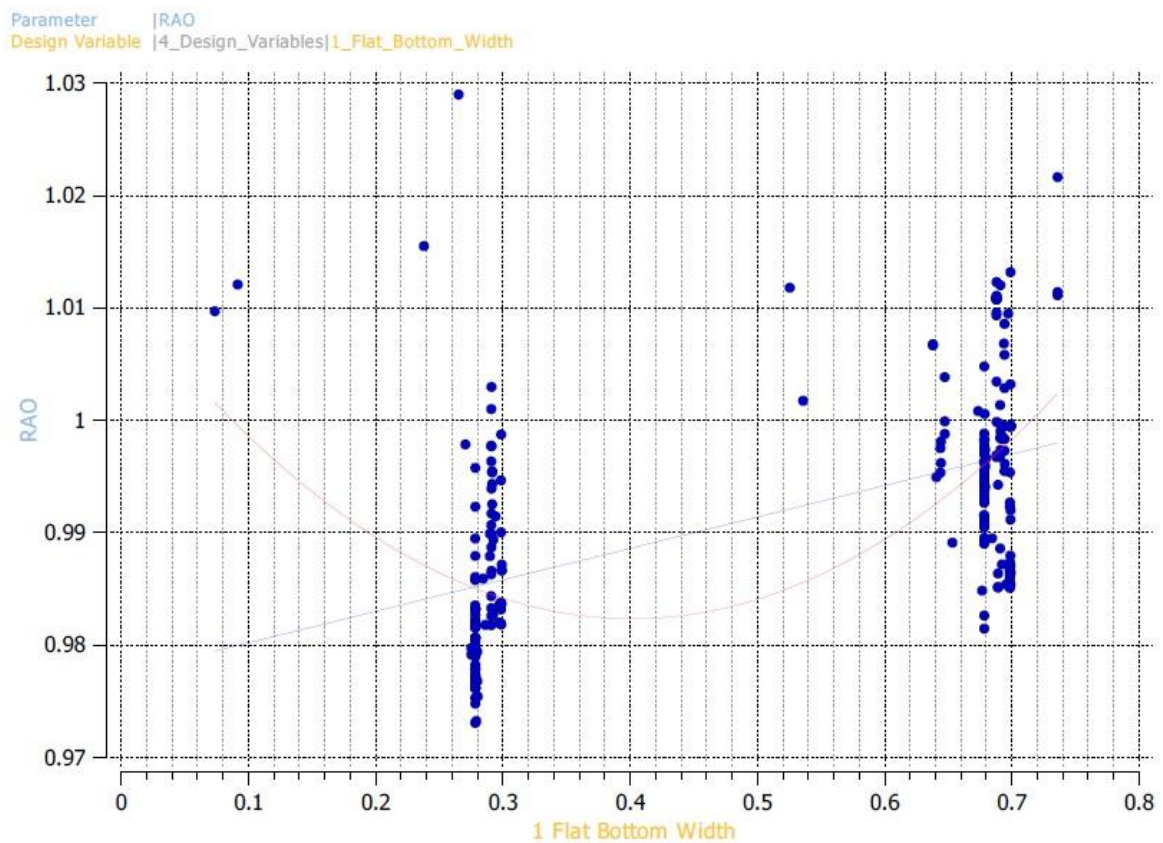
Κατά την διαδικασία σχεδίασης δόθηκε η δυνατότητα εισαγωγής ενός επίπεδου τμήματος στον πυθμένα του πλοίο, γεγονός το οποίο φαίνεται να είχε ευεργετική επίδραση στην απόδοση των βελτιστοποιημένων σχεδιάσεων. Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα της εξέλιξης του μεγέθους κατά τη διαδικασία και των τιμών των κριτηρίων βελτιστοποίησης αποκλειστικά συναρτήσει της συγκεκριμένης μεταβλητής.



Διάγραμμα 4.9.1. Εξέλιξη του πλάτους επίπεδου πυθμένα



Διάγραμμα 4.9.2. Πλάτους επίπεδου πυθμένα -Αντίσταση κυματισμού

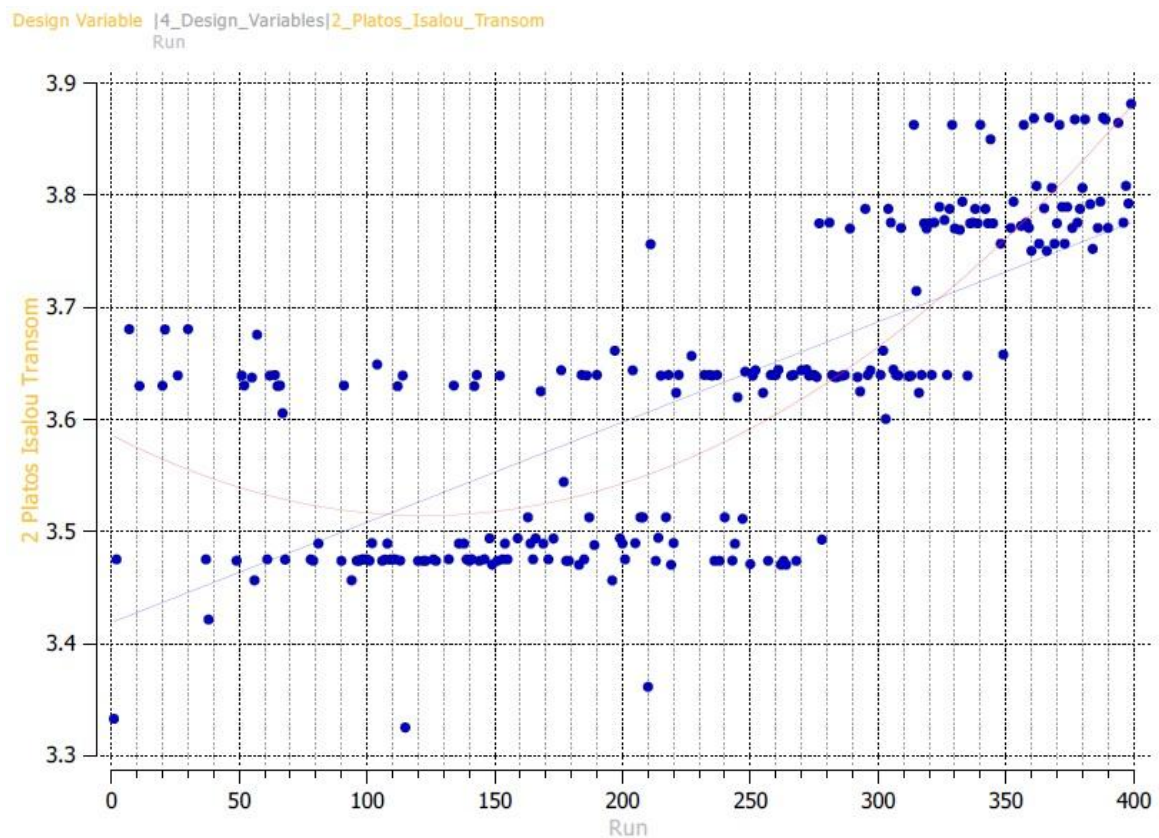


Διάγραμμα 4.9.3. Πλάτους επίπεδου πυθμένα -Αντίσταση κυματισμού

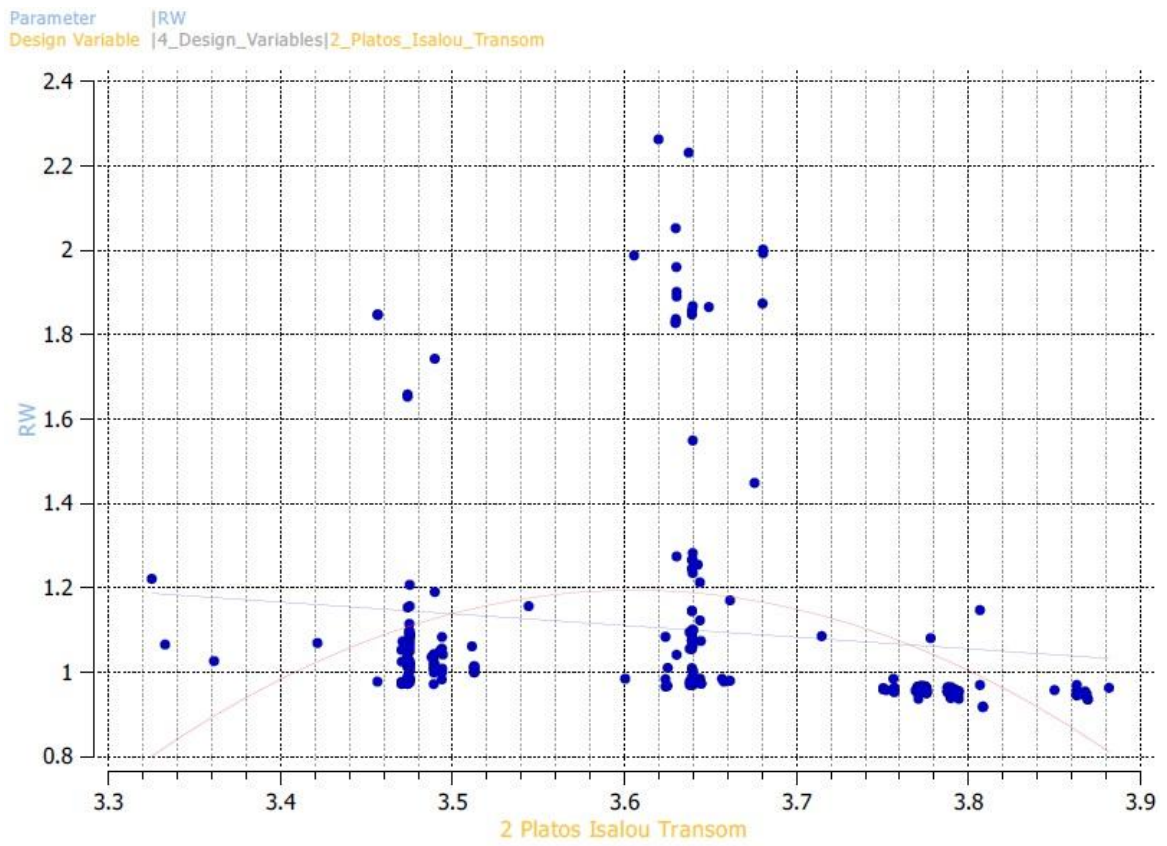
Όπως είναι εμφανές από τα ανωτέρω διαγράμματα, ο αλγόριθμος κατέληξε σε δύο τιμές αυτής της μεταβλητής για καλύτερη απόδοση της γάστρας, με την τιμή των 28cm έως 30cm να υπερτερεί στην απόκριση σε κυματισμούς. Το βέβαιο είναι ότι η εισαγωγή του στην σχεδίαση της πατρικής γάστρας επέφερε βελτίωση των χαρακτηριστικών της.

2) Πλάτος Ισάλου στο Transom

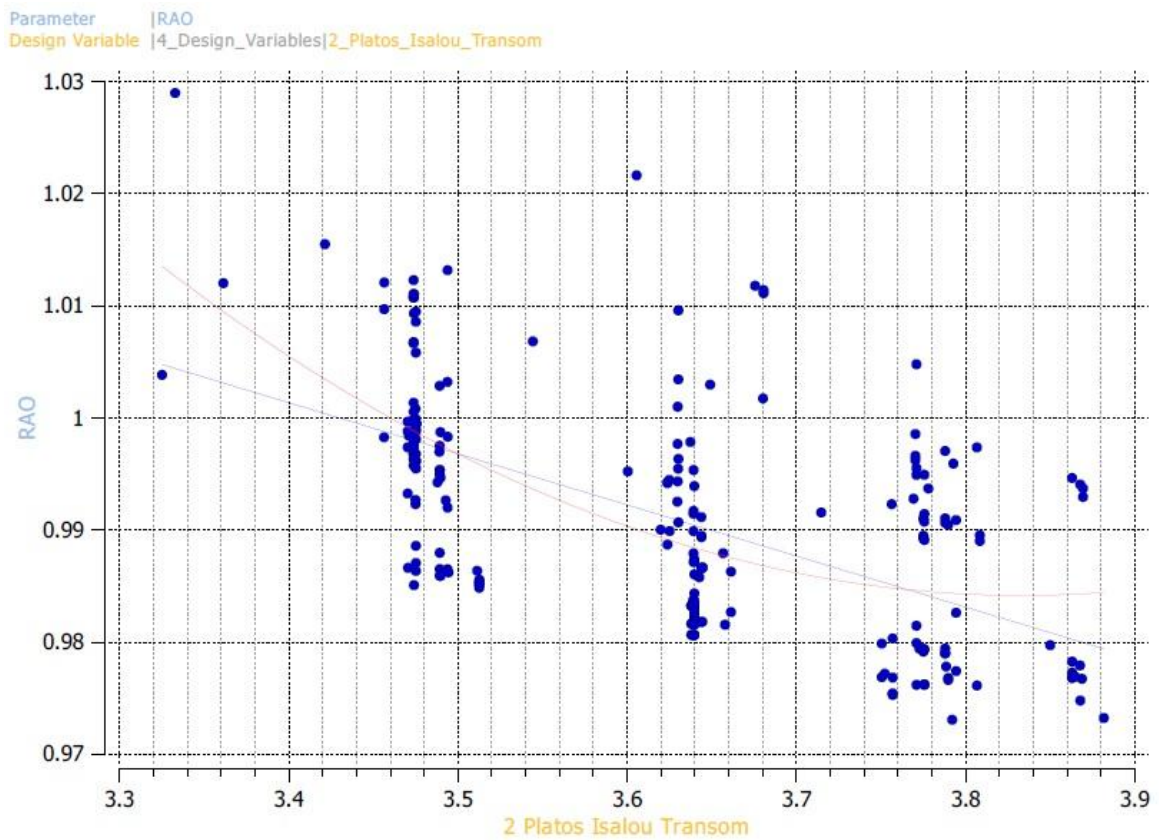
Τα αντιστοιχα διαγράμματα για αυτή την μεταβλητή παρατίθενται στη συνέχεια.



Διάγραμμα 4.10.1. Εξέλιξη του πλάτους ισάλου στο transom



Διάγραμμα 4.10.2. Πλάτους ισάλου στο transom- Αντίσταση κυματισμού

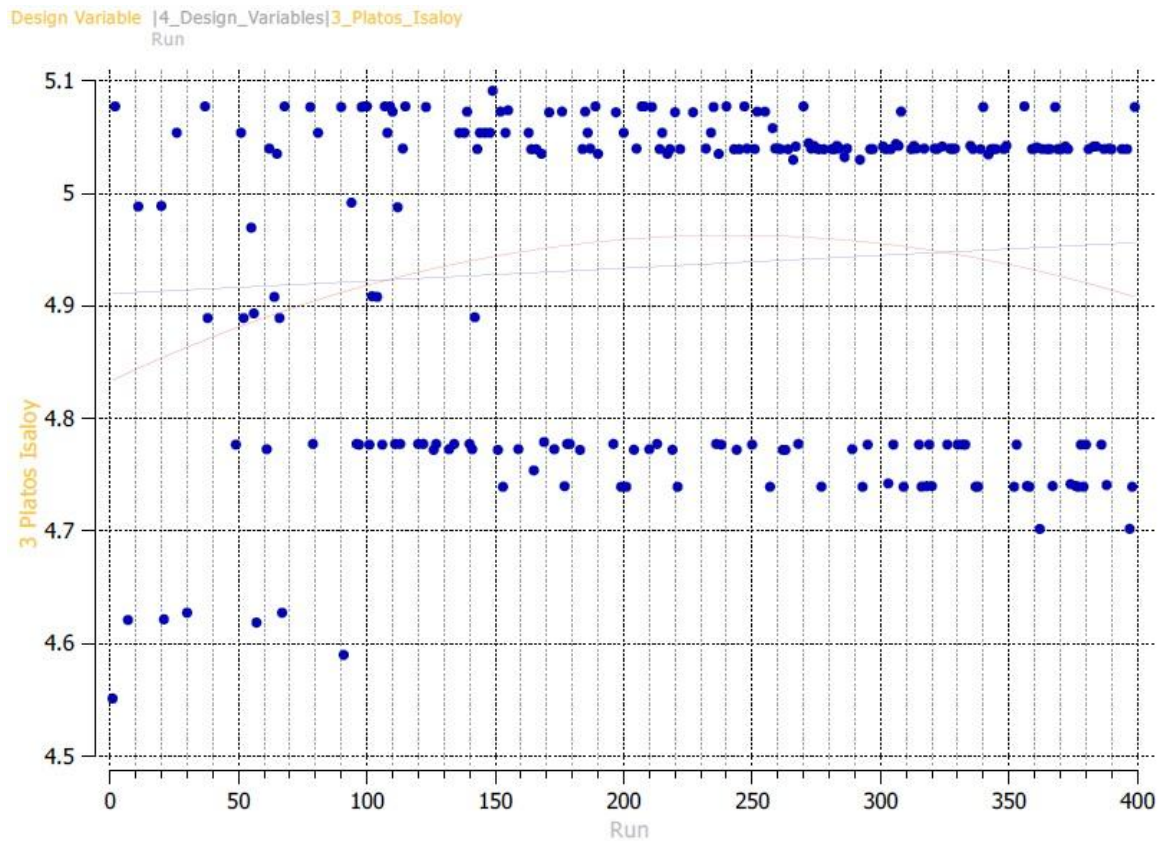


Διάγραμμα 4.10.3. Πλάτους ισάλου στο transom- RAO

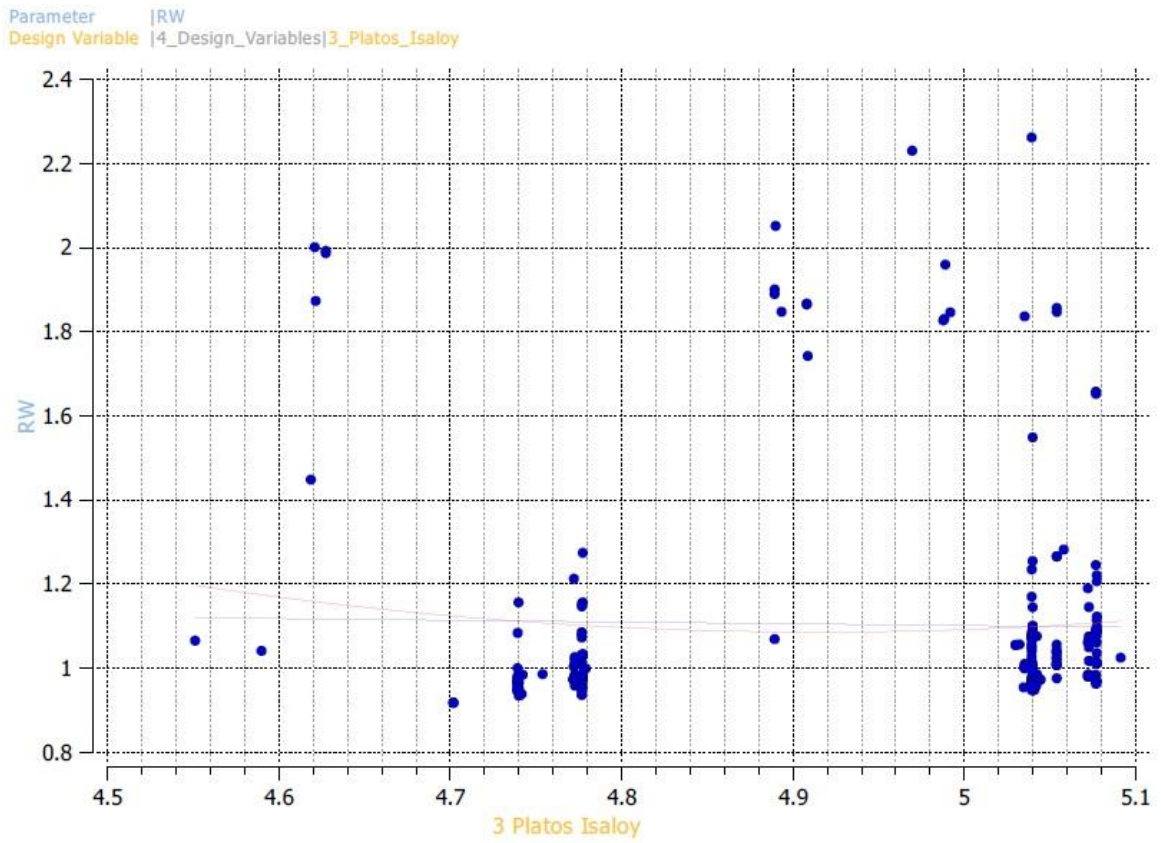
Για τη μεταβλητή σχεδίασης του πλάτους καθρέφτη συμπεραίνουμε ότι αύξηση της τιμής της έως τα 3.8m επιφέρει βελτίωση των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών της γάστρας. Περαιτέρω αύξηση φαίνεται να μην προτείνεται καθώς η τιμή των 3.9m έχει ελαφρώς χειρότερες επιδόσεις και επιλέγεται λιγότερες φορές από τον αλγόριθμο.

3) Πλάτος Ισάλου στη Μέση Τομή

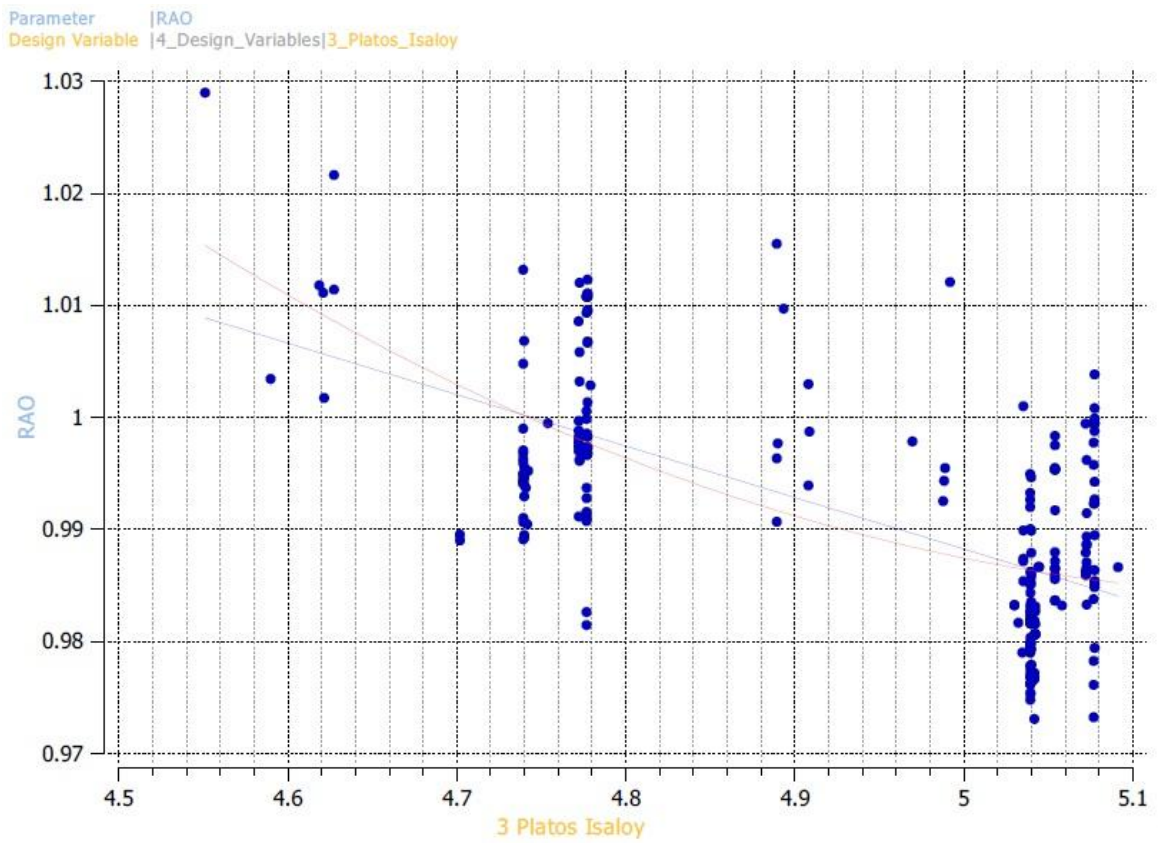
Το πλάτος ισάλου στη μέση τομή μεταβάλλεται κατά τον τρόπο που φαίνεται στα ακόλουθα διαγράμματα.



Διάγραμμα 4.11.1. Εξέλιξη του πλάτους ισάλου στη μέση τομή



Διάγραμμα 4.11.2. Πλάτους ισάλου στη μέση τομή - Αντίσταση κυματισμού

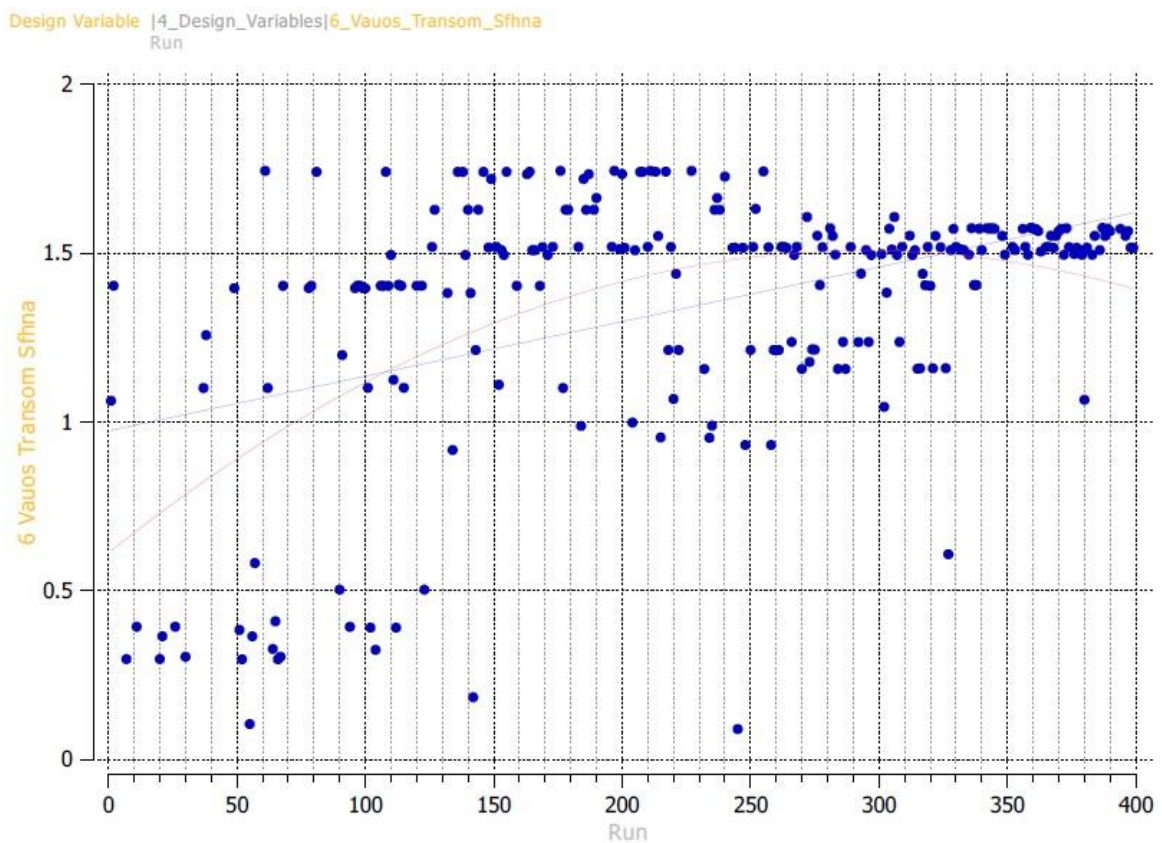


Διάγραμμα 4.11.3. Πλάτους ισάλου στη μέση τομή - RAO

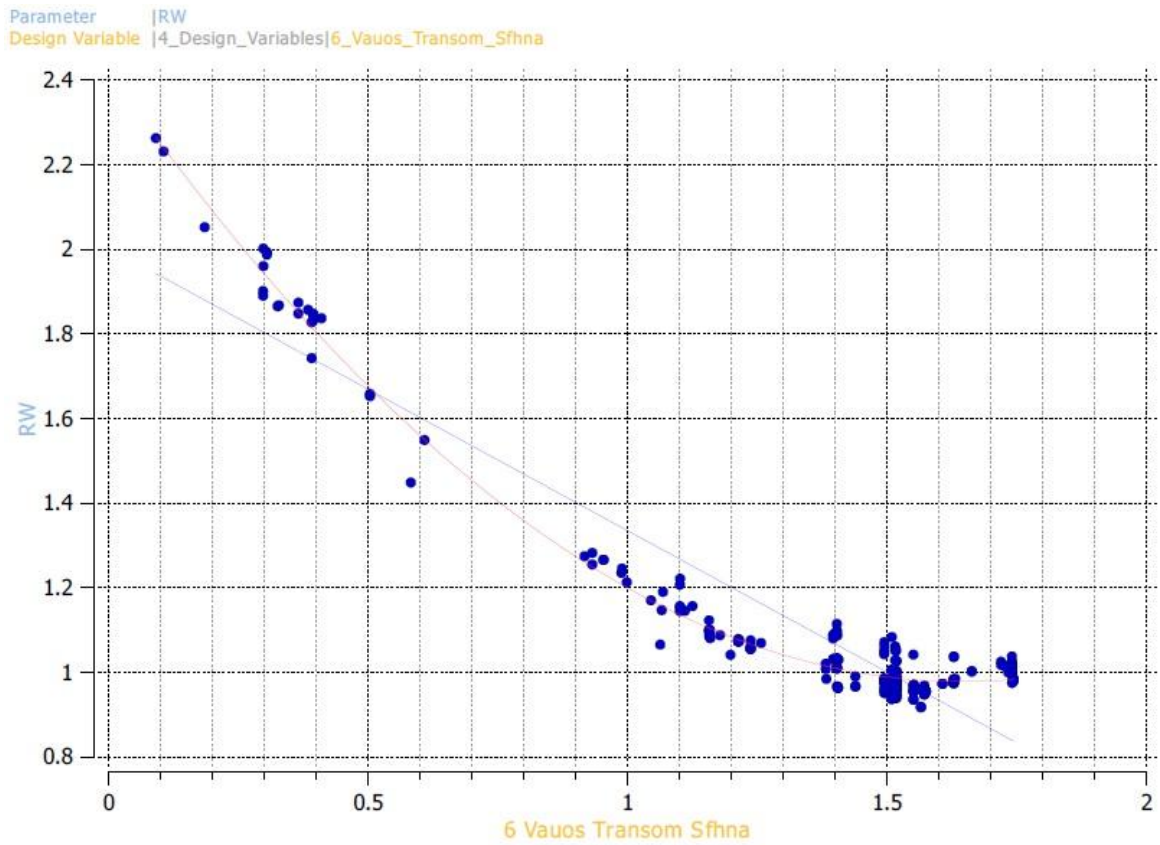
Παρατηρούμε ότι οι βέλτιστες επιλογές ως προς το πλάτος της μέσης τομής στην ίσαλο είναι είτε η διατήρηση του στα επίπεδα της πατρικής σχεδίασης είτε η αύξηση του κατά περίπου 30cm. Η δεύτερη επιλογή φαίνεται να αποδίδει καλύτερα ως προς την απόκριση σε κυματισμούς, ενώ σε καμία περίπτωση δεν προτείνεται μείωση του.

4) Υδροδυναμικό Πτερύγιο στην Πρύμνη (Σφήνα)

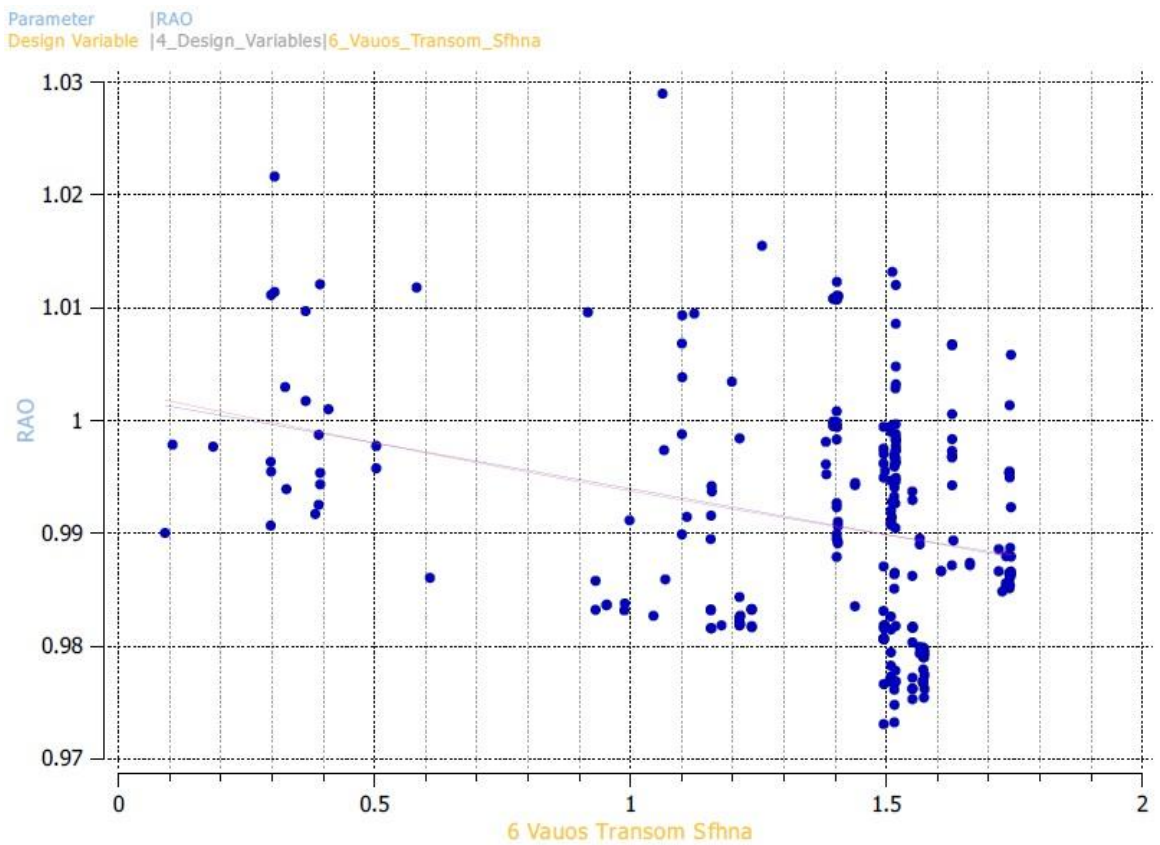
Με παρόμοιο τρόπο με την περίπτωση του επίπεδου πυθμένα, η παραμετρική σχεδίαση του πλοίου επιτρέπει την αλλαγή της απόστασης του κατώτατου σημείου του transom σε σχέση με την baseline, εισάγοντας κατ' αυτό τον τρόπο ένα υδροδυναμικό πτερύγιο στην γάστρα. Τα σχετικά διαγράμματα ακολουθούν.



Διάγραμμα 4.12.1. Εξέλιξη της απόστασης του υδροδυναμικού πτερυγίου από τη baseline



Διάγραμμα 4.12.2. Υδροδυναμικό περύγιο - Αντίσταση κυματισμού

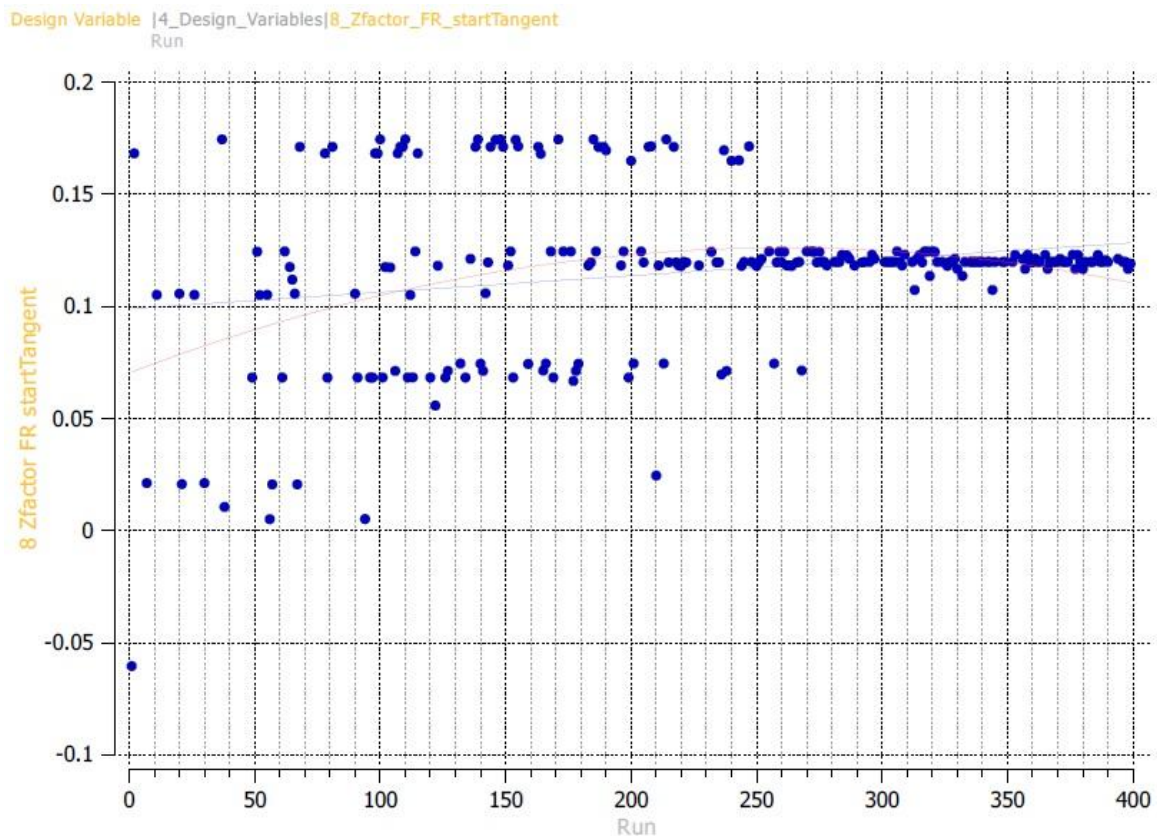


Διάγραμμα 4.12.3. Υδροδυναμικό περύγιο - RAO

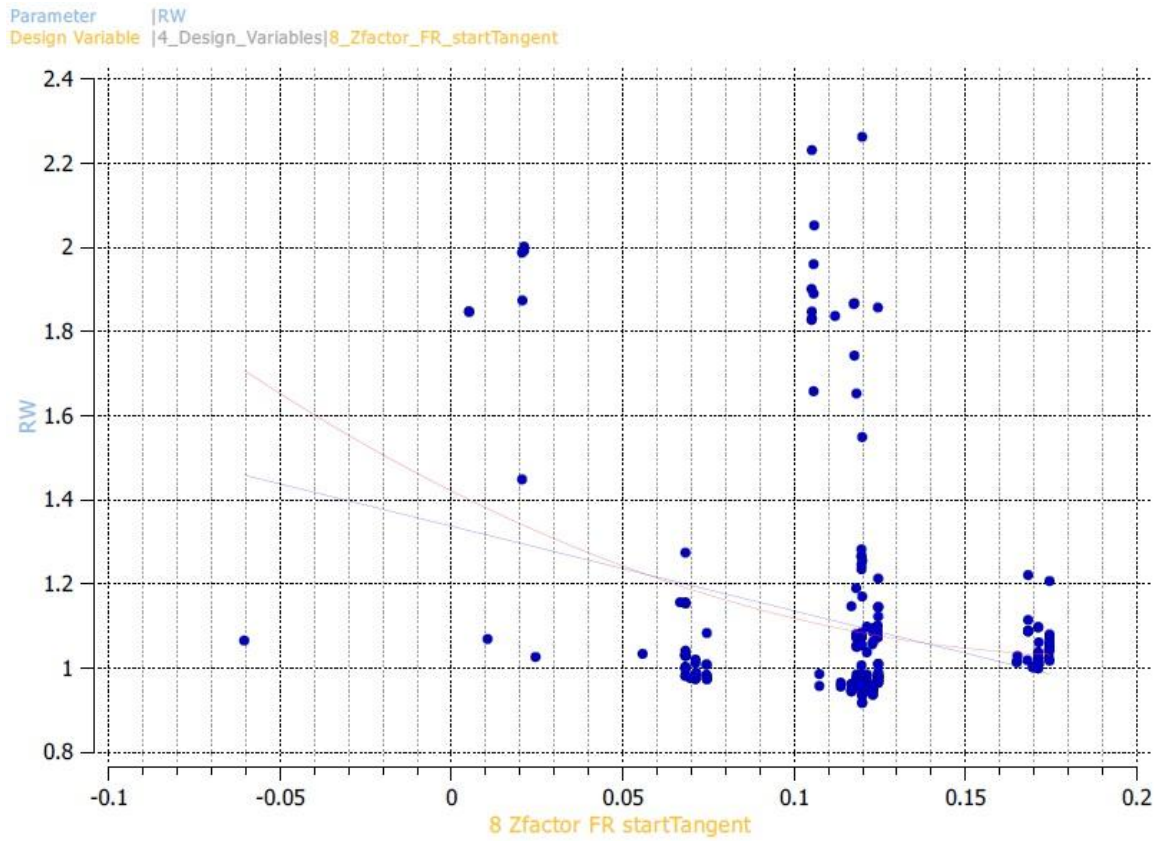
Συμπεραίνουμε ότι η εισαγωγή ενός πτερυγίου που θα εκτείνεται έως 30cm χαμηλότερα από την πρύμνη θα ήταν ωφέλιμη προσθήκη για τη γάστρα. Παρ' ότι η διαδικασία βελτιστοποίησης ξεκινάει με επιλογή μεγαλύτερου πτερυγίου (έως και 1.8m), παρατηρούμε καταλήγουμε σε πολύ μικρότερη τιμή τελικά. Έτσι, η εισαγωγή μεγαλύτερου υδροδυναμικού πτερυγίου δεν ενδείκνυται στην συγκεκριμένη περίπτωση.

5) Γωνία Ανύψωσης Νομέα στη Μέση Τομή

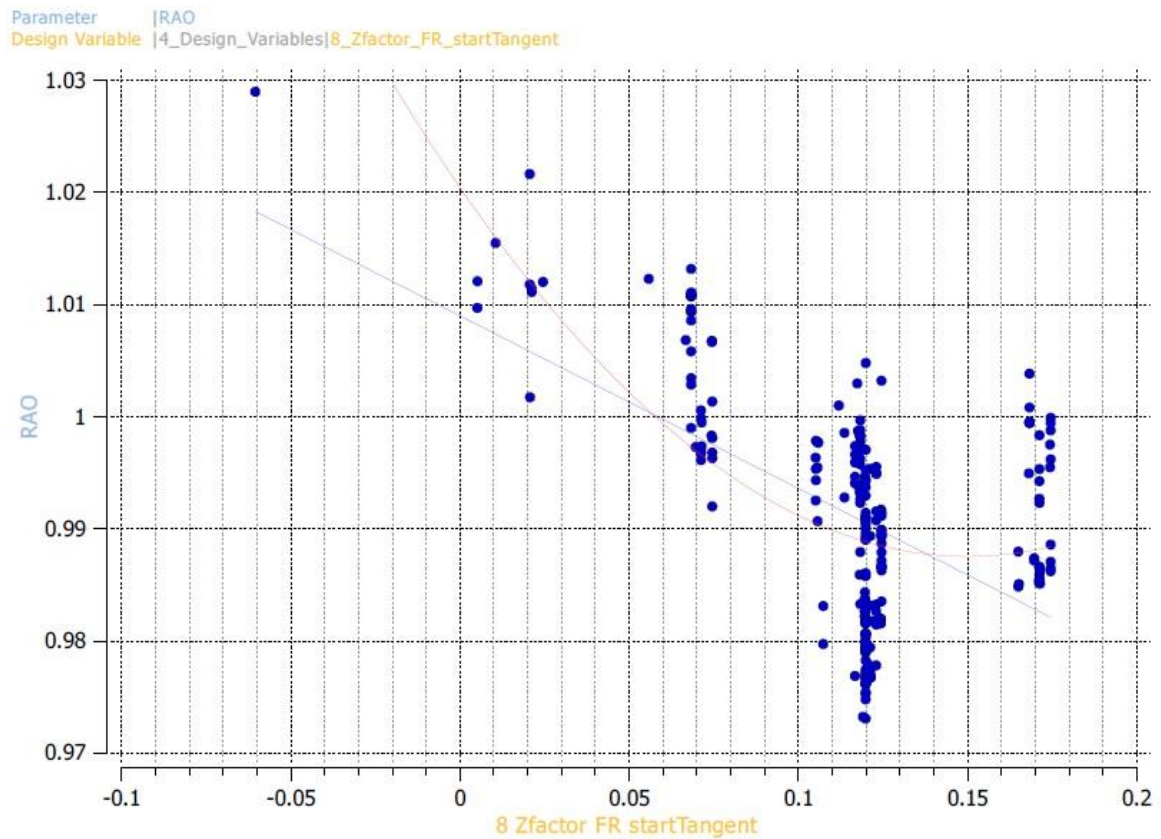
Τα διαγράμματα για αυτή τη μεταβλητή σχεδίασης παρουσιάζονται στη συνέχεια.



Διάγραμμα 4.13.1. Εξέλιξη της γωνίας ανύψωσης μέσου νομέα



Διάγραμμα 4.13.2. Γωνία ανύψωσης μέσου νομέα - Αντίσταση κυματισμού



Διάγραμμα 4.13.3. Γωνία ανύψωσης μέσου νομέα - RAO

Παρατηρούμε ότι η αύξηση της γωνίας από την πατρική τιμή των 14.07^0 (αντιστοιχεί σε μηδενική ανύψωση του πρώτου σημείου ελέγχου της καμπύλης) στην τιμή των 15.9^0 (αντιστοιχεί σε ανύψωση κατά 12cm) είναι ευνοϊκή στην διαμόρφωση και των δύο κριτηρίων βελτιστοποίησης.

Οι μεταβλητές σχεδίασης που παρατέθηκαν ανωτέρω είχαν σαφή μεταβολή σε σχέση με τη πατρική τιμή και σύγκλιση σε μία ή, το πολύ, δύο τιμές, επομένως είναι ασφαλές να υποθέσουμε ότι αυτή η διαμόρφωση τους έχει θετική επίδραση στους στόχους της βελτιστοποίησης. Παρ' όλα αυτά, πρέπει να τονισθεί ότι δεν μπορεί να γίνει η υπόθεση ότι μεταβολή μίας μόνο μεταβλητής στην τιμή που υποδεικνύεται από τη βελτιστοποίηση θα έχει θετικά αποτελέσματα στην πατρική γάστρα, καθώς τα αποτελέσματα προκύπτουν από το συνδυασμό όλων των παραμέτρων, ενώ η επίδραση της καθεμίας μεταβλητής θα πρέπει να ερευνηθεί ξεχωριστά.

Για τις υπόλοιπες μεταβλητές σχεδίασης, η τιμή τους κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης, είτε δεν μεταβλήθηκε αισθητά σε σχέση με την πατρική, είτε παρουσίασε μεγάλη διακύμανση, γεγονός που ενισχύει την υπόθεση ότι δεν είχαν ιδιαίτερη επίδραση στα αποτελέσματα.

Τελικά, αξίζει να επισημανθεί ότι καμία εκ των μεταβλητών σχεδίασης δεν συνέκλινε σε ακρότατη τιμή του εύρους της κατά την βελτιστοποίηση, το οποίο καταδεικνύει ότι το εύρος διακύμανσης που ορίστηκε ήταν επαρκές για το σύνολο των μεταβλητών και δεν επηρέασε περιοριστικά την εξέλιξη της διαδικασίας.

Κεφάλαιο 5. Σύνοψη και Εξαγωγή Συμπερασμάτων

Στο πλαίσιο της παρούσης διπλωματικής εργασίας εκτελέσθηκε μια διαδικασία πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης γάστρας. Αρχικά, ολοκληρώθηκε η παραμετρική σχεδίαση της πατρικής μορφής γάστρας, κάνοντας χρήση του λογισμικού CAESSES Friendship Framework, με κύριο στόχο τη δημιουργία ενός συνόλου μεταβλητών σχεδίασης. Αυτές κατέστη δυνατό να επηρεάζουν εκτεταμένα τμήματα της γάστρας, ενώ το εύρος τιμών τους προσδιορίστηκε με μέριμνα να παράγονται ομαλές γεωμετρίες για κάθε συνδυασμό τους.

Ακολούθως, διαμορφώθηκε η διασύνδεση του λογισμικού παραμετρικής σχεδίασης CAESSES FFW με δύο εξωτερικά προγράμματα τα οποία επιφορτίζονται με τον υπολογισμό της υδροδυναμικής συμπεριφοράς κάθε εναλλακτικής γεωμετρίας. Συγκεκριμένα, το λογισμικό SPP-86 χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των αποκρίσεων κατά την πλεύση του πλοίου σε κυματισμούς, ενώ μέσω του λογισμικού SWAN 2 υπολογίσθηκε η αντίσταση κυματισμού και το πεδίο παραγόμενων κυματισμών.

Τελευταίο βήμα της διαδικασίας αποτέλεσε η επιλογή του γενετικού αλγόριθμου βελτιστοποίησης καθώς και ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών του, ώστε να επιτευχθεί ο στόχος της βελτιστοποίησης. Ως αντικειμενικές συναρτήσεις επιλέχθηκαν, η τιμή της αντίστασης κυματισμού σε πλεύση με ταχύτητα 25 κόμβων και η τιμή της μέγιστης κάθετης επιτάχυνσης σε πλεύση σε μετωπικούς κυματισμούς στην ίδια ταχύτητα.

Από τη διαδικασία βελτιστοποίησης παρήχθη ένα σύνολο τετρακοσίων εναλλακτικών μορφών γάστρας, μέσα από τις οποίες προσδιορίστηκε το υποσύνολο των βέλτιστων λύσεων. Η επιλογή της προτιμώμενης γεωμετρίας δεν είναι προφανής σε περίπτωση πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης και για την περίπτωση αυτή ελήφθη υπόψη η σχετική σημαντικότητα των δύο κριτηρίων και το ποσοστό βελτίωσης που επετεύχθη στο καθένα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η επιλογή της βέλτιστης γεωμετρίας θα πρέπει να πιστοποιείται μέσω τις εκτέλεσης πειραμάτων σε δεξαμενή.

Συνοψίζοντας, στο τέλος της εργασίας προκύπτουν τα κάτωθι συμπεράσματα:

1. Η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση με χρήση υπολογιστικών πακέτων έχει τη δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων σε σύντομο χρονικό διάστημα και αποτελεί αξιόλογο εργαλείο για κάθε σχεδιαστή.
2. Η διαδικασία βελτιστοποίησης μιας γάστρας προϋποθέτει τον επακριβή προσδιορισμό των κριτηρίων τα οποία θα πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικά της απόδοσης του πλοίου στους τομείς ενδιαφέροντος, ώστε να προκύψει μια αποδοτική μορφή του πλοίου αυτού.
3. Η παραμετρική μοντελοποίηση πρέπει να εκτελείται με πρωταρχική μέριμνα στο να προκύπτουν ομαλές μορφές της γεωμετρίας για κάθε συνδυασμό των μεταβλητών σχεδίασης ώστε η διαδικασία βελτιστοποίησης να μην παρεκτραπεί.
4. Κρίσιμα χαρακτηριστικά της γάστρας τα οποία πρέπει να διατηρηθούν εντός συγκεκριμένου εύρους θα πρέπει να δεσμεύονται με την εισαγωγή περιορισμών στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης.
5. Η επιλογή της βέλτιστης γεωμετρίας θα πρέπει να σταθμίζει αφενός τις αντικειμενικές συναρτήσεις, κι αφετέρου ποιοτικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε εναλλακτικής μορφής γάστρας.
6. Η βελτιστοποιημένη μορφή γάστρας που προκύπτει από μια διαδικασία όπως αναπτύχθηκε στο παρόν, θα πρέπει επίσης να αξιολογείται ως προς τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά της στη δεξαμενή προτύπων, ώστε να πιστοποιηθεί η απόδοση της.

Βιβλιογραφία

1. A.J.Brown – J.Salcedo “Multiple-Objective Optimization in Naval Ship Design”, paper (Naval Engineers Journal, vol 115, No.4, pp.49-61), 2003
2. 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
3. Aravind Seshardi, «A Fast Elitist Multi-Objective Genetic Algorithm: NSGA-II»
4. Athanassoulis G.A., Belibasakis K.A., “Ship Dynamics”, Lecture Notes, NTUA, Athens, 2012
5. Athanassoulis G.A., Loukakis T.A., “An Extended-Lewis Form Family of Ship Sections and Its Applications to Seakeeping Calculations”, I.S.P., Vol. 32, No.366, pp.33-43, 1985
6. Avanzini, G., Benedetti, L., and Penna, R., "Experimental Evaluation of Ship Resistance for RANS Code Validation", ISOPE '98, Montreal, Canada, Maggio 1998.
7. 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
8. Danisman D.B., “Reduction of demi-hull wave interference resistance in fast displacement catamarans utilizing an optimized centerbulb concept.” *Ocean Engineering* 91 (2014):227–234.
9. Danisman D.B., Mesbahi E., Atlar M., Goren O., “A New Hull Form Optimisation Technique For Minimum Wave Resistance.” *10th IMAM Congress*, Crete, Greece, (13-17 May 2002).
10. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T., *A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II*, Evolutionary Computation, IEEE Transactions, Vol. 6, Issue 2, 2002.
11. Diez M., Peri D., “Robust optimization for ship conceptual design.” *Ocean Engineering* 37(11) (2010).
12. Diez M., Volpi S., Serani A., Stern F., Campana E.F., “Simulation-based Design Optimization by Sequential Multi-criterion Adaptive Sampling and Dynamic Radial Basis Functions.” In Proc. *EUROGEN 2015 - International Conference on Evolutionary and Deterministic Methods for Design, Optimization and Control with Applications to Industrial and Societal Problems*, University of Strathclyde, Glasgow, UK, (14-16 Sept. 2015).
13. Frank Manual
14. Frank, W. (1967), Oscillation of Cylinders in or Below the Free Surface of Deep Fluids, NSRDC, Rep. No. 2375, Washington, D.C.
15. Friendship Systems, (2012), Friendship Framework User’s Guide

16. G.J. Grigoropoulos, T. A. Loukakis, Resistance and Seakeeping Characteristics of a Systematic Series in the Pre-planing Condition
17. Grigoropoulos G.J. (1989), Hull Form Optimization with Respect to Seakeeping, PhD Thesis, NTUA, Dept. of Naval Arch. and Marine Eng., Athens, Greece
18. Grigoropoulos G.J., "Hull Form optimization for hydrodynamic performance, Marine Technology", Vol. 41, No. 4, 2004
19. Grigoropoulos G.J., "Hydrodynamics and Aerodynamics of Sailing Yachts", Lecture Notes, NTUA, Athens, 1999
20. Grigoropoulos G.J., "Seakeeping, Part B: Application in Ship Design and Operation", Lecture Notes, NTUA, Athens, 2004
21. Grigoropoulos G.J., Athanasoulis G.A., "Seakeeping, Part A: Theoretical Analysis", Lecture Notes, NTUA, Athens, 1998
22. Grigoropoulos G.J., Damala D., (2011), Dynamic Performance of the NTUA Double-Chine Series Hull Forms in Random Waves
23. Grigoropoulos G.J., Perdikari T., Asouti V., Giannakoglou K., (2011), MDO of Hull Forms Using Low-Cost Evolutionary Algorithms
24. Grigoropoulos, G.J., Chalkias, (2010), Hull-Form Optimization in Calm and Rough Water, Computer Aided Design 42, pp. 977-984
25. 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.
26. Gulddammer H.E., Harvald Sv. Aa., "Ship Resistance: Effect of Form and Principal Dimensions", Copenhagen, 1974
27. Harvald Sv.Aa., "Resistance and Propulsion of Ships", Denmark, 1983
28. Kalyanmoy Deb, Sameer Agarwal, T. Meyarivan, (2002) A fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm : NSGA-II
29. Kring, D., Sclavounos, P. *Numerical Stability Analysis for Time-Domain Ship Motion Simulations*. Journal of Ship Research, Vol. 39, No. 4, pp. 313-320, 1995.
30. Kyrtatos N.P., "Basic Principals of Propulsion of Ships", Lecture Notes (in Greek) NTUA, Athens, 2007
31. Larsson L., Eliasson R.E., "Principals of Yacht Design", London, 2000
32. Larsson L., Raven H.C., "Ship Resistance and Flow", New Jersey, 2010
33. Leroyer A., Visonneau M., "Numerical methods for RANS simulations of a self-propelled fish-like body." *Journal of Fluid and Structures* 20(3) (2005): 975-991.
34. Lewandowski E.M., "The Dynamics of Marine Craft: Maneuvering and Seakeeping", Washington DC, 2004
35. Li H., Landa-Silva D., An Adaptive Evolutionary Multi-objective Approach Based on Simulated Annealing

36. Li, S., Zhao, F., Ni, Q., (2014) Bow and Stern Shape Integrated Optimization for A Full Ship by a Simulation Based Design Technique, *Journal of Ship Research*, Vol. 58, N^o2, June
37. Longo J., Stern F., “Uncertainty Assessment for Towing Tank Tests With Example for Surface Combatant DTMB Model 5415.” *J. Ship Research*. 49(1) (2005): 55-68.
38. Molland A.F., Turnock S.R., Hudson D.A., “Ship Resistance and Propulsion”, New York, 2011
39. Naderia B., Sadeghib H., (2011), A Multi-objective Simulated Annealing Algorithm for Solving the Flexible no-wait Flowshop Scheduling Problem with Transportation Times
40. Ohkusu, M., (1996), *Advances in Marine Hydrodynamics*, Chapter 4
41. Olivieri A., Pistani F., Avanzini A., Stern F., Penna R., “Towing tank, sinkage and trim, boundary layer, wake, and free surface flow around a naval combatant INSEAN 2340 model.” Tech. rep., *DTIC Document* (2001)
42. Papanikolaou et al., *Integrated Design and Multiobjective Optimization Approach to Ship Design*
43. 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.
44. Queutey P., Visonneau M., “An interface capturing method for free-surface hydrodynamic flows.” *Computers and Fluids* 36(9) (2007): 1481-1510.
45. Salvesen N., Tuck E.O., Faltinsen O. (1970), *Ship Motions and Sea Loads*, Trans. SNAME, 78, pp. 250-287.
46. Schlichting H., Gersten K., *Boundary-Layer Theory*, Springer-Verlag, Berlin (2000).
47. Schneekluth H., Bertram V., “Ship Design for Efficiency and Economy”, 2004
48. Sclavounos, P.D. (1996), *Computation of Wave Ship Interactions*, *Advances in Marine Hydrodynamics*, ed. by M. Ohkusu, Computational Mechanics Publ.
49. Serani A., Diez M., Campana E.F., “Single- and multi-objective design optimization study for DTMB 5415, based on low-fidelity solvers.” *INSEAN Tech, rep.* 2015-TR-002 (2015a).
50. Serani A., Diez M., Leotardi C., Peri D., Fasano G., Iemma U., Campana E.F., “On the use of synchronous and asynchronous single-objective deterministic particle swarm optimization in ship design problems.” In Proc. *OPT-i 2014 - 1st International Conference in Engineering and Applied Sciences Optimization*, Kos, Greece (4-6 June 2014).
51. Serani A., Fasano G., Liuzzi G., Lucidi G., Iemma U., Campana E.F., Diez M., “Derivative-free global design optimization in ship hydrodynamics by local hybridization.” In Proc. *14th International Conference on Computer Application*

- and Information Technology in the Maritime Industries*, Ulrichshusen, Germany (11-13 May 2015b): 331-342.
52. SPP-86 (1994), User's Manual, Report No: NAL-114-F-94, Lab. Ships and Marine Hydrodynamics, National Technical Univ. of Athens.
53. Suman B., Kumar P, (2006), A survey of simulated annealing as a tool for single and multiobjective optimization
54. SWAN 2 (2002), User Manual : «Ship Flow Simulation in Calm Water and in Waves», Boston Marine Consulting Inc., Boston MA 02116, USA
55. TU Delft, (2002) Introduction in Ship Hydromechanics
56. Tzabiras G., "A method for predicting the influence of an additive bulb on ship resistance," *Proceedings of the 8th International Conference on Hydrodynamics*, Nantes (2008): 53-60.
57. Watson D.G.M. , "Practical Ship Design", The Netherlands, 2002
58. Ζαραφωνίτη Γ., Μελέτη και Σχεδίαση Πλοίων Νέας Τεχνολογίας
59. Πολίτη Γ.Κ., (2011), Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου, Αθήνα

Συγκεντρωτική Αναφορά Διαγραμμάτων - Εικόνων - Πινάκων

Εικόνα 1.1. Πεδίο εναλλακτικών λύσεων ως αποτέλεσμα διαδικασίας βελτιστοποίησης	9
Εικόνα 1.2. Κανονιοφόρος ΚΑΣΟΣ (HSY 56) εν πλω	10
Εικόνα 1.3. Κανονιοφόρος ΜΑΧΗΤΗΣ (HSY 56Α) εν πλω.....	11
Πίνακας 1.1. Κύρια χαρακτηριστικά της γάστρας HSY 56	12
Εικόνα 2.1. Διασπορά εναλλακτικών λύσεων και βέλτιστες λύσεις από διαδικασία βελτιστοποίησης	16
Εικόνα 2.2. Κατάταξη λύσεων κατά τη λειτουργία του αλγορίθμου NSGA-II.....	19
Εικόνα 2.3. Οι κινήσεις του πλοίου	25
Εικόνα 2.4. Κίνηση Roll του πλοίου	26
Εικόνα 2.5. Κίνηση Heave του πλοίου	27
Εικόνα 2.6. Απλός αρμονικός κυματισμός.....	29
Εικόνα 2.7. Θεωρία Λωρίδων.....	31
Εικόνα 2.8. Η εγκάρσια τομή όπως χρησιμοποιείται στη θεωρία του Frank.....	32
Εικόνα 2.9. Δημιουργία συντοριακών στοιχείων στο στερεό σύνορο και την ελεύθερη επιφάνεια από το SWAN 2.....	35
Πίνακας 2.1. Σύνοψη υποπρογραμμάτων και αρχείων εισόδου/εξόδου SWAN 2.....	36
Εικόνα 2.10. Σύστημα συντεταγμένων για τον προσδιορισμό της γεωμετρίας στο SWAN 2	36
Εικόνα 2.11. Περιβάλλον του CAESES Friendship Framework version 4.3.1	40
Εικόνα 3.1. Σχηματική διαδικασία παραμετρικής σχεδίασης.....	42
Πίνακας 3.1. Αρχικές κι ακραίες τιμές μεταβλητών σχεδίασης	43
Εικόνα 3.2. Τομή διαμήκους επιπέδου συμμετρίας.....	44
Εικόνα 3.3. Ίσαλος γραμμή	45
Εικόνα 3.4. Γραμμή καταστρώματος	46
Εικόνα 3.5.1 Οι παραμετρικοί νομείς σχεδίασης	47
Εικόνα 3.5.2 Διαμήκης θέση παραμετρικών νομέων	47
Εικόνα 3.5.3 Κάτοψη παραμετρικών νομέων	47
Εικόνα 3.6. Παραμετροποίηση συντεταγμένων σημείων στο CAESES FFW	48

Εικόνα 3.7.1. Σύνολο παραμετρικών καμπυλών.....	50
Εικόνα 3.7.2. Σύνολο παραμετρικών καμπυλών.....	50
Εικόνα 3.8.1. Συνολική παραμετρική επιφάνεια	51
Εικόνα 3.8.2. Συνολική παραμετρική επιφάνεια	51
Εικόνα 3.9.1. Τμήματα παραμετρικής επιφάνειας γάστρας.....	52
Εικόνα 3.9.2. Τμήματα παραμετρικής επιφάνειας γάστρας.....	52
Εικόνα 3.10.1. Όψη επιφανειών Skeg στο επίπεδο x-z	54
Εικόνα 3.10.2. Όψη επιφανειών Skeg	54
Εικόνα 3.11.1. Ελάχιστο ύψος παραμετρικού Skeg.....	55
Εικόνα 3.11.2. Μέγιστο ύψος παραμετρικού Skeg	55
Εικόνα 3.12. Συνολική επιφάνεια γάστρας.....	56
Πίνακας 3.2. Κύρια χαρακτηριστικά αρχικής και παραμετρικής γάστρας	56
Εικόνα 3.13.1. Παράμετρος ποσοστιαίας διαφοράς εκτοπίσματος.....	57
Εικόνα 3.13.2. Εισαγωγή περιορισμού ανισότητας	58
Εικόνα 3.14. Εξαγωγή υδροστατικών χαρακτηριστικών από το CAESES FFW	59
Εικόνα 3.15. Νομείς πατρικής μορφής γάστρας για το πρόγραμμα SWAN 2 (πρόοψη).....	60
Σχήμα 3.16. Νομείς πατρικής μορφής γάστρας για το πρόγραμμα SPP-86 (προοπτική όψη)	61
Εικόνα 3.17. Παράδειγμα επιφανειακού πλέγματος περιγραφής του στερεού συνόρου στο πρόγραμμα SWAN 2	63
Εικόνα 3.18. Παράδειγμα πεδίου παραγόμενων κυματισμών στο πρόγραμμα SWAN 2	64
Εικόνα 3.19.1. Ορισμός του τύπου κάθε εξαγόμενου στοιχείου (π.χ. πραγματικός αριθμός, file και λουπά)	65
Εικόνα 3.19.2. Εξαγωγή αρχείων γεωμετρικής αναπαράστασης (offsets).....	65
Εικόνα 3.19.3. CAESES FFW Software Connector - Εξαγωγή αρχείου υδροστατικών χαρακτηριστικών (.hydro) και εισαγωγή αποτελεσμάτων (results.txt)	66
Διάγραμμα 4.1. Γεωμετρίες που προέκυψαν από τη διαδικασία βελτιστοποίησης	67
Διάγραμμα 4.2. Γεωμετρίες εντός του περιορισμού εκτοπίσματος.....	68
Πίνακας 4.1. Κατάταξη γεωμετριών ως προς την απόδοσή τους.....	68

Πίνακας 4.2. Βέλτιστες γεωμετρίες ως προς την απόκριση σε κυματισμούς	69
Πίνακας 4.3. Βέλτιστες γεωμετρίες ως προς την απόκριση σε κυματισμούς	69
Διάγραμμα 4.3. Απεικόνιση του Pareto front	70
Πίνακας 4.4. Σχεδιάσεις του Pareto front και η επίδοση τους ως προς τα κριτήρια βελτιστοποίησης	71
Πίνακας 4.5. Τιμές μεταβλητών σχεδίασης βέλτιστων γεωμετριών	71
Εικόνα 4.1. Όψη στο επίπεδο γ-z των νομέων πατρικής σχεδίασης έως το ύψος της ισάλου	72
Εικόνα 4.2. Όψη στο επίπεδο γ-z των νομέων σχεδίασης 397 έως το ύψος της ισάλου	72
Εικόνα 4.3. Όψη στο επίπεδο γ-z των νομέων σχεδίασης 383 έως το ύψος της ισάλου	73
Εικόνα 4.4. Όψη στο επίπεδο γ-z των νομέων σχεδίασης 361 έως το ύψος της ισάλου	73
Εικόνα 4.5. Απεικόνιση ελεύθερης επιφάνειας πατρικής σχεδίασης σε ταχύτητα 25 κόμβων	74
Εικόνα 4.6. Απεικόνιση ελεύθερης επιφάνειας σχεδίασης 397 σε ταχύτητα 25 κόμβων	75
Εικόνα 4.7. Απεικόνιση ελεύθερης επιφάνειας σχεδίασης 383 σε ταχύτητα 25 κόμβων	75
Εικόνα 4.8. Απεικόνιση ελεύθερης επιφάνειας σχεδίασης 361 σε ταχύτητα 25 κόμβων	76
Εικόνα 4.9. Σύγκριση παραγόμενου πεδίου κυματισμού πατρικής σχεδίασης με σχεδίαση 397 σε ταχύτητα 25 κόμβων	77
Διάγραμμα 4.4. Σύγκριση κάθετης επιτάχυνσης στη γέφυρα πατρικής και βελτιστοποιημένων μορφών γάστρας	78
Διάγραμμα 4.5. Σύγκριση κίνησης Heave πατρικής και βελτιστοποιημένων μορφών γάστρας	79
Διάγραμμα 4.6. Σύγκριση κίνησης Pitch πατρικής και βελτιστοποιημένων μορφών γάστρας	79
Διάγραμμα 4.7. Εξέλιξη του κριτηρίου RAO	80
Διάγραμμα 4.8. Εξέλιξη του κριτηρίου αντίστασης κυματισμού	81
Διάγραμμα 4.9.1. Εξέλιξη του πλάτους επίπεδου πυθμένα	82
Διάγραμμα 4.9.2. Πλάτους επίπεδου πυθμένα -Αντίσταση κυματισμού	83

Διάγραμμα 4.10.1. Εξέλιξη του πλάτους ισάλου στο transom	84
Διάγραμμα 4.10.2. Πλάτους ισάλου στο transom- Αντίσταση κυματισμού	85
Διάγραμμα 4.10.3. Πλάτους ισάλου στο transom- RAO	85
Διάγραμμα 4.11.1. Εξέλιξη του πλάτους ισάλου στη μέση τομή	86
Διάγραμμα 4.11.2. Πλάτους ισάλου στη μέση τομή - Αντίσταση κυματισμού	87
Διάγραμμα 4.11.3. Πλάτους ισάλου στη μέση τομή - RAO	87
Διάγραμμα 4.12.1. Εξέλιξη της απόστασης του υδροδυναμικού πτερυγίου από τη baseline	88
Διάγραμμα 4.12.2. Υδροδυναμικό πτερύγιο - Αντίσταση κυματισμού	89
Διάγραμμα 4.13.1. Εξέλιξη της γωνίας ανύψωσης μέσου νομέα	90
Διάγραμμα 4.13.2. Γωνία ανύψωσης μέσου νομέα - Αντίσταση κυματισμού	91
Διάγραμμα 4.13.3. Γωνία ανύψωσης μέσου νομέα - RAO	91