

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Παραμετρική μοντελοποίηση και υδροδυναμική βελτιστοποίηση πλοίου
μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων»**

Κωνσταντίνος Θεοδοσόπουλος

Επιβλέπων: Γρηγορόπουλος Γρηγόριος
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2019

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, στη σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών και συγκεκριμένα στον τομέα Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής, κατά το έτος 2018-2019.

Αντικείμενο αυτής της εργασίας αποτελεί η βελτιστοποίηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς της γάστρας ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, μέσω κατάλληλης μεθοδολογίας. Κατά τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας αποκόμισα πολύτιμες γνώσεις, τόσο στον τομέα της υδροδυναμικής όσο και σε αυτούς της παραμετρικής σχεδίασης και του προγραμματισμού που αφορά τους κώδικες βελτιστοποίησης. Οι γνώσεις αυτές σε συνδυασμό με την γνώση και την εμπειρία που απέκτησα κατά το σύνολο της φοίτησης μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο θα αποτελέσουν ένα χρήσιμο υπόβαθρο κατά τη διάρκεια της επαγγελματικής μου καριέρας.

Θα ήθελα να απευθύνω θερμές ευχαριστίες σε όλους τους καθηγητές της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών για την συνεισφορά τους τόσο στον τομέα των γνώσεων όσο και της διαμόρφωσης του τρόπου σκέψης μου ως νέου μηχανικού. Ξεχωριστές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στο επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας, κ. Γρηγόριο Γρηγορόπουλο, καθηγητή ΕΜΠ, για την στήριξη, την καθοδήγηση και την πολύτιμη συνεισφορά καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας.

Η εργασία αυτή είναι αφιερωμένη στην οικογένειά μου, για την στήριξη και όλα όσα μου έχουν προσφέρει προκειμένου να αποφοιτήσω ως Ναυπηγός Μηχανολόγος Μηχανικός.

Κωνσταντίνος Θεοδοσόπουλος

Αθήνα, Ιανουάριος 2019

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εισαγωγή νέων κανονισμών στον τομέα της ναυπηγικής από τους διεθνείς ναυτιλιακούς οργανισμούς, οι απαιτήσεις για όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ενεργειακή οικονομία, το ανταγωνιστικό οικονομικό περιβάλλον σε συνδυασμό με τη προσπάθεια των ναυτιλιακών εταιρειών να αναπτυχθούν έχει οδηγήσει την ναυπηγική βιομηχανία στην εισαγωγή νέων και οικονομικά αποδοτικών σχεδίων για όλους τους τύπους εμπορικών πλοίων.

Η σχεδίαση ενός πλοίου αποτελεί μια χρονοβόρα και πολύπλοκη διαδικασία κατά την οποία λαμβάνονται υπόψη ένα σύνολο παραμέτρων που αφορούν κυρίως την αξιοπιστία, την αξιοπλοΐα, την ασφάλεια, την απόδοση και την επίτευξη του στόχου για τον οποίο προορίζεται. Προκειμένου να βελτιώσουν ένα σχέδιο, οι ναυπηγοί έχουν πλέον στη διάθεση τους τα συστήματα CAD/CAE, τα οποία προσφέρουν την διερεύνηση πολλών εναλλακτικών λύσεων σε εύλογο χρονικό διάστημα και με σχετικά μικρό κόστος. Τα συστήματα αυτά τα τελευταία χρόνια έχουν βελτιωθεί σε τέτοιο επίπεδο από τις εταιρείες λογισμικού, ώστε η χρήση της διαδικασίας βελτιστοποίησης στο στάδιο της σχεδίασης να έχει αποκτήσει ιδιαίτερο νόημα.

Αντικείμενο της παρούσης διπλωματικής εργασίας αποτελεί η βελτιστοποίηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Η υδροδυναμική συμπεριφορά επηρεάζει ουσιαστικά τα χαρακτηριστικά ενός πλοίου απευθείας αλλά και μέσω άλλων αντικειμένων της βελτιστοποίησης της σχεδίασης όπως η μεταφορική ικανότητα, ο υπολογισμός αντοχής, οι ταλαντώσεις κλπ., που συνολικά απαρτίζουν την μελέτη και σχεδίαση ενός πλοίου. Μια αποτελεσματική σχεδίαση θα πρέπει να ικανοποιεί μια πληθώρα απαιτήσεων όπως αυτές των διεθνών κανονισμών και του πλοιοκτήτη καθώς και να είναι κατά το δυνατόν αποδοτικότερη οικονομικά. Η οικονομική αποτελεσματικότητα του πλοίου σχετίζεται άμεσα με την κατανάλωση καυσίμου η οποία είναι άμεσα συναρτημένη με την υδροδυναμική απόδοση που εξετάζεται στα πλαίσια του παρόντος.

Η παρούσα εργασία εξετάζει τη μελέτη ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (χωρητικότητας 4.250 TEU). Αρχικά πραγματοποιείται η διαμόρφωση της γάστρας από κατάλληλες μετρήσεις που εξήχθησαν στο παρελθόν από τα κατασκευαστικά σχέδια και κατόπιν η δημιουργία του παραμετρικού μοντέλου με τη χρήση του λογισμικού CAESSES - Friendship Framework ώστε ένας περιορισμένος αριθμός μεταβλητών σχεδίασης να επηρεάζει στο μέγιστο βαθμό τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την υδροδυναμική απόδοση. Κατά την διαδικασία της σχεδίασης θα επιδιωχθεί η μέγιστη δυνατή ταύτιση της προκύπτουσας παραμετρικής μορφής με την αρχική η οποία αποτελεί προϊόν συμβατικής σχεδίασης.

Η υδροδυναμική αξιολόγηση των παραχθειςών γεωμετριών συνίσταται στην συμπεριφορά τους κατά την πλεύση τόσο σε ήρεμο νερό όσο και σε κυματισμούς. Όλοι οι υπολογισμοί θα υλοποιηθούν για δύο καταστάσεις φόρτωσης - κατάσταση πλήρους φόρτωσης και κατάσταση μερικής φόρτωσης - σε δύο διαφορετικές ταχύτητες ($F_n=0.247$ και $F_n=0.252$ αντίστοιχα) κατά την πλεύση σε θαλασσινό νερό πυκνότητας $\rho=1025 \text{ kg/m}^3$.

Όσον αφορά την πλεύση σε ήρεμο νερό, αντικείμενο ελαχιστοποίησης θα είναι η αντίσταση κυματισμού. Η προσομοίωση της πλεύσης θα υλοποιηθεί με χρήση του λογισμικού SWAN 2, το οποίο χρησιμοποιεί την τεχνική ολοκλήρωσης των πιέσεων στο στερεό σύνορο και την ελεύθερη επιφάνεια στα πλαίσια της δυναμικής θεωρίας.

Η αξιολόγηση της συμπεριφοράς του πλοίου σε κυματισμούς θα υλοποιηθεί με χρήση του λογισμικού SPP-86 που χρησιμοποιεί τη θεωρία λωρίδων προκειμένου να υπολογίσει τις αποκρίσεις του πλοίου κατά την αλληλεπίδραση του με αυτούς. Θα εκτιμηθεί η επαγόμενη κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλώρη κατά την πλεύση σε αρμονικούς κυματισμούς διαφόρων συχνοτήτων ενώ η μέγιστη τιμή της θα είναι το μέγεθος ελαχιστοποίησης.

Από την διακύμανση του συνόλου των μεταβλητών σχεδίασης θα προκύψουν οι εναλλακτικές γεωμετρίες των οποίων οι επιδόσεις θα αξιολογηθούν ώστε να καταλήξουμε σε ένα σύνολο διαφορετικών μορφών γάστρας με καλύτερες επιδόσεις από την αρχική. Η αξιολόγηση της συσχέτισης μεταξύ των τιμών των μεταβλητών σχεδίασης και των υδροδυναμικών επιδόσεων της εκάστοτε μορφής θα πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια ενός γενετικού αλγορίθμου. Προκειμένου η σύγκριση μεταξύ των βελτιστοποιημένων γεωμετριών και της πατρικής γάστρας να γίνει υπό καθεστώς ομοιότητας των γενικών χαρακτηριστικών τους, θα τεθούν περιορισμοί στο εύρος μεταβολής των τιμών εκτοπίσματος και διαμήκους θέσης του κέντρου άντωσης και για τις δύο καταστάσεις. Κάθε γεωμετρία που παραβιάζει τους εν λόγω περιορισμούς θα απορρίπτεται και ο συνδυασμός των τιμών των μεταβλητών σχεδίασης που τη διαμορφώνουν θα αποφεύγεται στις μεταγενέστερες σχεδιάσεις.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	1
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	2
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CAD/CAM ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΠΛΟΙΩΝ	6
1.1 Γενικά περί Μελέτης Πλοίου	6
1.2 Υδροδυναμική Βελτιστοποίηση Πλοίου	10
1.3 Παραμετρική Σχεδίαση.....	11
1.4 Αξιολόγηση της Υδροδυναμικής Συμπεριφοράς Πλοίων.....	13
1.5 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων από Αλγορίθμους.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΛΟΙΟΥ	17
2.1 Θεωρητική Προσέγγιση της Αντίστασης πλοίου	17
2.1.1 Αντίσταση Τριβής	20
2.1.2 Αντίσταση Πίεσης Λόγω Συνεκτικότητας.....	22
2.1.3 Αντίσταση Κυματισμού.....	22
2.1.4 Αντίσταση Θραύσεως Κύματος	23
2.1.5 Αντίσταση Δημιουργίας Αφρού	23
2.1.6 Αντίσταση Ανέμου	23
2.1.7 Αντίσταση Ελιγμών - Αντίσταση Παρελκόμενων	24
2.1.8 Κριτήριο Βελτιστοποίησης – Αντίσταση Κυματισμού σε Ήρεμο Νερό	24
2.2 Εκτίμηση της Αντίστασης Πλοίου με την Τρισδιάστατη Θεωρία Δυναμικού	26
2.3 Η Απόκριση του Πλοίου στους Θαλάσσιους Κυματισμούς	30
2.3.1 Οι Κινήσεις του Πλοίου	31
2.3.2 Συμπεριφορά του Πλοίου σε Κυματισμούς.....	32
2.3.3 Η Θεωρία του Frank.....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	40
3.1 Γενικά Στοιχεία Αλγορίθμων.....	40
3.2 Ο Αλγόριθμος NSGA II.....	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΟΙΟΥ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ.....	46
4.1 Εισαγωγικά Στοιχεία	46
4.2 Στάδιο 1 ^ο : Συλλογή Δεδομένων	46

4.3 Στάδιο 2 ^ο : Δημιουργία Αρχικής Γάστρας	48
4.4 Στάδιο 3 ^ο : Παραμετρική Μοντελοποίηση Γάστρας	54
4.4.1 Γενικά Στοιχεία της Παραμετρικής Σχεδίασης	54
4.4.2 Ιδιότητες Καμπυλών B-Splines και Απαιτήσεις Συνέχειας	55
4.4.3 Σχεδίαση Βασικών Καμπυλών της Μορφής της Γάστρας	57
4.4.4 Διαμόρφωση Νομέων.....	59
4.4.5 Διαμόρφωση Βολβοειδούς Πλώρης	60
4.4.6 Παραγωγή Επιφανειών και Επιλογή Παραμέτρων Σχεδίασης.....	66
4.5 Στάδιο 4 ^ο : Σύζευξη προγράμματος CAESES – Υπολογιστικών Κωδίκων.....	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ CONTAINERSHIP ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ...	73
5.1 Επαναληπτική Διαδικασία Βελτιστοποίησης.....	73
5.2 Αποτελέσματα Πατρικής Γάστρας	75
5.3 Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης.....	77
5.3.1 Εισαγωγή	77
5.3.2 Μονοκριτηριακή Βελτιστοποίηση Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στην Πλώρη.....	78
5.3.3 Μονοκριτηριακή Βελτιστοποίηση Αντίστασης Κυματισμού σε Ήρεμο Νερό	91
5.3.4 Αποτελέσματα Πολυκριτηριακής Βελτιστοποίησης	107
5.4 Συμπεράσματα	125
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α - FRIENDSHIP-FRAMEWORK.....	129
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β - ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ ΚΑΙ ΓΛΩΣΣΕΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ.....	132
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ - ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΗ ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ	133
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ - ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΗ ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	134
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	138

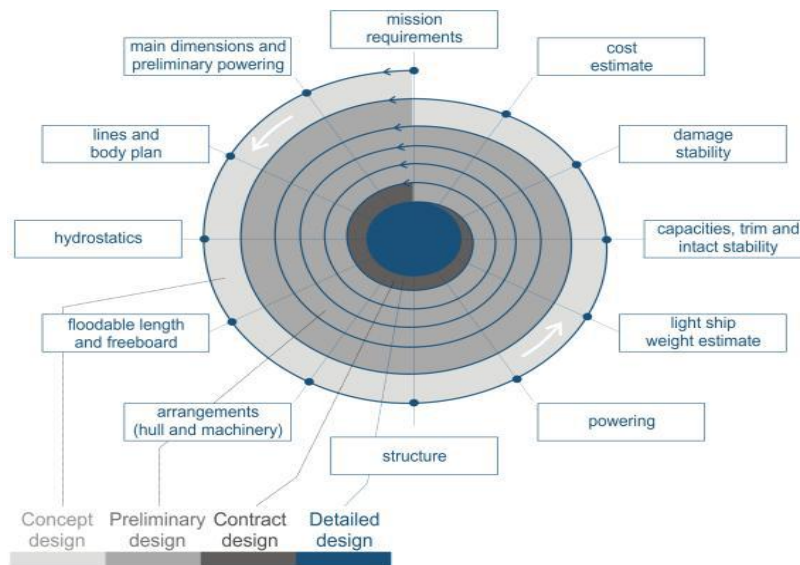
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ CAD/CAM ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΠΛΟΙΩΝ

1.1 Γενικά περί Μελέτης Πλοίου

Η μελέτη και σχεδίαση ενός πλοίου είναι μια ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία που απαιτεί την δαπάνη σημαντικού αριθμού ανθρωποωρών καθώς και τον συνδυασμό πολλών, επιστημονικών ή μη, κλάδων. Στο παρελθόν αποτελούσε περισσότερο μια μορφή τέχνης παρά επιστήμη, η οποία εξαρτιόταν κατά κύριο λόγο στην εμπειρία των ναυπηγών σε διαφορετικούς τεχνικούς κλάδους καθώς επίσης και στην πρακτική τους εμπειρία. Οι περισσότερες σχεδιαστικές λύσεις προέρχονταν από ευρηματικές μεθόδους, δηλαδή μέσω της αποκτούμενης εμπειρίας από τη διαδικασία της δοκιμής και του λάθους. Σταδιακά η διαδικασία αυτή αντικαταστάθηκε από την συσσωρευμένη εμπειρία, η οποία δημιούργησε μία βάση δεδομένων (ημι-εμπειρικές σχέσεις και στατιστικά δεδομένα για τα υπάρχοντα πλοία και τις επιτυχείς σχεδιάσεις).

Η κλασική μέθοδος σχεδίασης θεωρείται μία διαδοχική και επαναληπτική διαδικασία, κατά την οποία οι σχεδιαστές επικεντρώνονται κάθε φορά σε ένα πρόβλημα. Για την ολοκλήρωση ενός κύκλου απαιτείται να ληφθούν υπ όψιν πολυάριθμες παράμετροι που σε πολλές περιπτώσεις είναι αντικρουόμενης επίδρασης. Οι δυσκολίες προέρχονται από την περιπλοκή των διαφόρων τεχνικοοικονομικών απαιτήσεων, οι οποίες κατά μέρος αλληλοσυγκρούονται, και από τις απαιτήσεις των ισχυόντων κανονισμών ασφαλείας. Μερικές από αυτές τις παραμέτρους είναι οι απαιτήσεις του πλοιοκτήτη, οι διεθνείς κανονισμοί, η ασφαλής πλεύση αλλά και η βέλτιστη κατά το δυνατόν απόδοση τόσο σε τεχνικό όσο και σε οικονομικό επίπεδο για την αποδοτικότερη εκμετάλλευση του διατιθέμενου κεφαλαίου. Η παραδοσιακή διαδικασία μελέτης και σχεδίασης αποτυπώνεται σε μια σπειροειδή επαναληπτική διαδικασία όπως φαίνεται στο Σχήμα 1¹. Σε αυτό παρουσιάζονται τα διάφορα στάδια της σχεδίασης ως στρώματα από διαδοχικές σπείρες που εκτελούνται με φορά από την περιφέρεια προς το κέντρο. Σε κάθε σπείρα εκτελείται ένα σύνολο διαδοχικών υπολογισμών από τους οποίους προκύπτουν τα χαρακτηριστικά της σχεδίασης.

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



Σχήμα 1. Η σπειροειδής διαδικασία σχεδίασης πλοίων

Σχολιάζοντας την επαναληπτική διαδικασία με βάση την Ελικοειδή καμπύλη μελέτης (Σχήμα 1) διακρίνουμε τις εξής φάσεις:

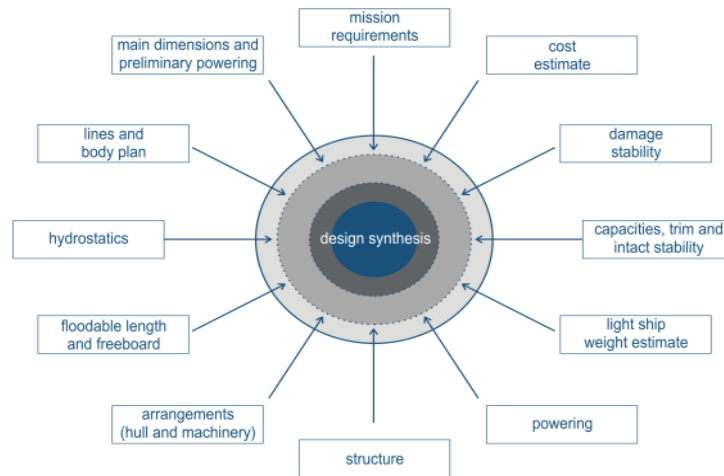
- **Μελέτη εφικτότητας αρχικού σχεδιασμού (Concept design) - 1^η σπείρα** : Μεταφράζει σε πρώτη προσέγγιση τις απαιτήσεις του πλοιοκτήτη σε τεχνικά χαρακτηριστικά με απώτερο σκοπό να καθοριστούν οι βασικές διαστάσεις και οι συντελεστές μορφής του πλοίου.
- **Προμελέτη (Preliminary design) – 2^η έως 4^η σπείρα** : Αποτελεί την περαιτέρω λεπτομερέστερη επεξεργασία των επιμέρους βημάτων της μελέτης του πλοίου. Δημιουργείται ένα αρχικό σχέδιο που περιλαμβάνει τον υπολογισμό βαρών, την ανάλυση του deadweight, τον υπολογισμό ευστάθειας καθώς και τις αρχικές γραμμές του πλοίου.
- **Μελέτη προδιαγραφών του πλοίου (Contract Design) – 5^η σπείρα** : Στόχος της φάσης αυτής είναι η εκπόνηση των απαραίτητων υπολογισμών και σχεδίων και η επακριβής σύνταξη των τεχνικών προδιαγραφών που αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα του επίσημου συμβολαίου. Τα τελικά σχέδια, λεπτομερείς υδροστατικοί και υδροδυναμικοί υπολογισμοί καθώς και η εσωτερική διάταξη περατώνονται σε αυτό το στάδιο.

- **Μελέτη λεπτομερούς σχεδίασης (Detailed design)** : Στην τελευταία φάση της μελέτης γίνεται η λεπτομερής σχεδίαση όλων των κατασκευαστικών στοιχείων καθώς και η σύνταξη προδιαγραφών κατασκευής και εφαρμογής - εγκατάστασης για τους τεχνίτες του ναυπηγείου. Αποτελεί το πιο χρονοβόρο στάδιο από άποψη ανθρωπικών.

Βασικό μειονέκτημα της παραπάνω μεθοδολογίας είναι πως κάθε επιμέρους εργασία εκτελείται μεμονωμένα κατά την διεκπεραίωση του αντίστοιχου σταδίου χωρίς να λαμβάνονται υπ όψιν οι απαιτήσεις και οι περιορισμοί των επόμενων σταδίων. Σαν αποτέλεσμα, ο σχεδιαστής αρχικά δεν μπορεί να έχει πλήρη εικόνα όλων των υποσυστημάτων, ενώ αυτού του είδους η προσέγγιση αυξάνει τις πιθανότητες να εμφανιστούν περιορισμοί που να επηρεάζουν τα αποτελέσματα κάποιου άλλου σταδίου. Σε κάθε σπείρα λαμβάνονται υπόψη όλοι οι περιορισμοί και οι ανάγκες προσαρμογής που έχουν προκύψει από τις προηγούμενες και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά σχεδίασης αναπροσδιορίζονται ώστε να καλύπτουν όλες τις σχετικές απαιτήσεις. Η τελική σχεδίαση προκύπτει όταν το σύνολο των χαρακτηριστικών του πλοίου δεν χρήζουν διόρθωσης.

Μια πιο σύγχρονη μορφή της διαδικασίας σχεδίασης πλοίου, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2², απαιτεί την ενσωμάτωση όλων των σχεδιαστικών παραμέτρων σε μία ενοποιημένη διαδικασία. Το συγκεκριμένο μοντέλο αποτελεί την σύνθεση τεχνοοικονομικών βάσεων δεδομένων, σχεδιαστικών εργαλείων CAD, αλγορίθμων αξιολόγησης και βελτιστοποίησης και συστημάτων ανταλλαγής πληροφοριών, με αποτέλεσμα την ενίσχυση της αποδοτικότητας της διαδικασίας μελέτης πλοίου. Η διαδικασία μελέτης και σχεδίασης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2 στην πραγματικότητα αποτελεί προσπάθεια βελτιστοποίησης της παραδοσιακής διαδικασίας σχεδίασης ούτως ώστε να απαιτεί τους ελάχιστους δυνατούς πόρους παράγοντας ταυτόχρονα καλύτερες σχεδιάσεις

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



Σχήμα 2. Η εννοποιημένη διαδικασία σχεδίασης πλοίων

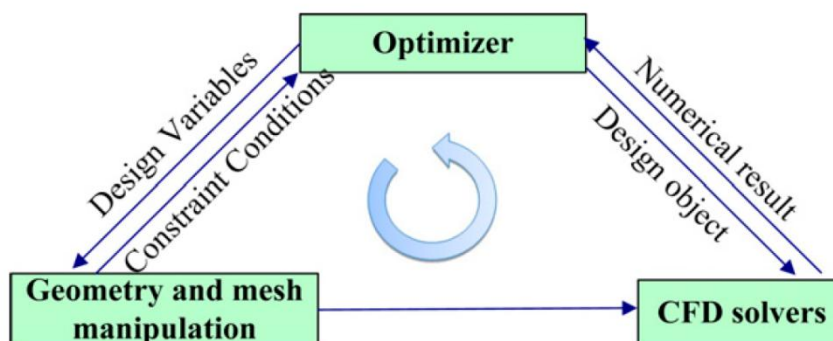
Αμιγώς συνδεδεμένη με την διαδικασία της σχεδίασης είναι αυτή της βελτιστοποίησης, δηλαδή η επιλογή της καλύτερης δυνατής λύσης μέσα από το σύνολο των δυνατών επιλογών, βασιζόμενη σε ένα σύνολο κριτηρίων. Μια σχεδίαση λοιπόν που παίρνει υπ όψιν της τις περισσότερες δυνατές παραμέτρους από διαφορετικούς τομείς του πλοίου έχει ως στόχο την βελτιστοποίηση του παραγόμενου σχεδίου για ολόκληρο τον κύκλο ζωής του, όπου κύριοι στόχοι είναι η απόδοση του, η μείωση του ρίσκου και του κόστους, ενώ κύριοι σχεδιαστικοί περιορισμοί είναι οι κανονισμοί ασφαλείας, η κατάσταση της αγοράς (ζήτηση, κόστος υλικών, κόστος καυσίμων κ.α.) και άλλοι περιορισμοί. Σε μια περίοδο όπου ο διεθνής ανταγωνισμός είναι αυξημένος, είναι επιτακτική η βελτίωση της απόδοσης των πλοίων με το μικρότερο δυνατό κόστος. Η σχεδίαση του πλοίου παρέχει αυτήν την δυνατότητα, καθώς χωρίς την παρέμβαση στο πλοίο μετά το τέλος την κατασκευής του (προσθήκη συσκευών που αυξάνουν την απόδοση) μπορούμε να παράγουμε μια πιο αποδοτική λύση. Πλέον η βελτιστοποίηση έχει αναχθεί σε μία σύνθετη διαδικασία με την χρήση ποικίλων και πολύπλοκων μαθηματικών μοντέλων. Συνήθως συνίσταται στην συγκριτική αξιολόγηση πολλών διαφορετικών εναλλακτικών σχεδιάσεων ώστε να επιλεγεί τελικά η αποδοτικότερη λύση, με γνώμονα συγκεκριμένα κριτήρια. Η διακύμανση των χαρακτηριστικών του συστήματος που εξετάζεται πραγματοποιείται μέσω ενός συνόλου μεταβλητών που λαμβάνουν τιμές εντός ενός εύρους, με στόχο την εύρεση της τιμής που δίνει την καλύτερη επίδοση με βάση τα κριτήρια που έχουν επιλεγεί.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η βελτιστοποίηση της σχεδίασης των γραμμών της γάστρας (Lines and Body Plan των Σχημάτων 1.1 και 1.2) ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Κριτήρια βελτιστοποίησης θα αποτελέσουν η υδροδυναμική του συμπεριφορά σε ήρεμο νερό και σε κυματισμούς για δύο διαφορετικές καταστάσεις φόρτωσης κατά την πλεύση σε δύο διαφορετικές ταχύτητες αντίστοιχα.

1.2 Υδροδυναμική Βελτιστοποίηση Πλοίου

Η υδροδυναμική σχεδίαση ενός πλοίου είναι ένα περίπλοκο πρόβλημα, όπου πλήθος απαιτήσεων σχεδίασης αλληλεπιδρούν. Για την σωστή σχεδίαση απαιτείται να εξασφαλιστεί η καλή συμπεριφορά όχι μόνο σε ήρεμο νερό αλλά και σε ένα εύρος συνθηκών λειτουργίας, δηλαδή να μην υφίσταται έντονους κραδασμούς, διαβροχή των καταστρωμάτων ή μεγάλη απώλεια ταχύτητας όταν ταξιδεύει σε κατάσταση κυματώδους θάλασσας. Τα πειράματα αποτελούν και σήμερα την πλέον αξιόπιστη λύση για τη μελέτη υδροδυναμικών φαινομένων και την πρόβλεψη της υδροδυναμικής συμπεριφοράς πλοίων σε πραγματικές συνθήκες. Παρ' όλα αυτά η διαδικασία είναι χρονοβόρα, με μεγάλο κόστος και χωρίς την δυνατότητα δοκιμής πολλών εναλλακτικών επιλογών σε ότι αφορά την γάστρα.

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



Σχήμα 3. Η επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών πλοίων

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

Όπως είναι προφανές η αποδοτικότητα της διαδικασίας βελτιστοποίησης εξαρτάται άμεσα από την επιλογή της κατάλληλης δομής σε κάθε ένα από τα τρία τμήματα της αλλά και από τον τρόπο που αυτά επικοινωνούν.

1.3 Παραμετρική Σχεδίαση

Η βασική αρχή πίσω από τα συστήματα CAD και την διαδικασία βελτιστοποίησης είναι η παραμετρική σχεδίαση. Η επιλογή αυτών των παραμέτρων είναι βασική επιλογή του σχεδιαστή και εξαρτάται από τα κριτήρια σχεδίασης, ώστε να τα επηρεάζουν άμεσα. Πάνω στην επιλογή αυτή βασίζεται όλη η διαδικασία της βελτιστοποίησης. Ανάλογα με τον βαθμό παραμετροποίησης του σχεδίου, οι μεταβλητές σχεδίασης μπορούν να επηρεάσουν συγκεκριμένα μέρη της γεωμετρίας. Αναλυτικότερα μπορούμε να διακρίνουμε τις παρακάτω βασικές κατηγορίες παραμετρικής σχεδίασης:

- **Συμβατική σχεδίαση** : Ο σχεδιαστής έχει πλήρη έλεγχο του σχεδίου και των καμπυλών που το αποτελούν. Αλλαγές στο γεωμετρικό μοντέλο μπορούν να επιτευχθούν μόνο με την απευθείας μετακίνηση σημείων των καμπυλών. Σε αυτή τη περίπτωση ο σχεδιαστής πρέπει να είναι ιδιαίτερα προσεχτικός με το αποτέλεσμα καθώς και με την ομαλότητα των καμπυλών. Η συνολική διαδικασία είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και οδηγεί σε ένα μόνο σχέδιο.
- **Ημι-παραμετρική σχεδίαση** : Λογισμικά όπως CAESSES – Friendship Framework, Avena Marine και Rhinoceros μπορούν να τροποποιήσουν μια δεδομένη γεωμετρία, ρυθμίζοντας ορισμένες παραμέτρους του σχεδίου. Παράγωγα σχέδια μπορούν να δημιουργηθούν είτε με προηγμένους μετασχηματισμούς, είτε με την απ' ευθείας μεταβολή των εισηγμένων παραμέτρων. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου σε σχέση με την συμβατική είναι η παράγωγή πολλών γεωμετριών σε σύντομο χρονικό διάστημα.
- **Πλήρως παραμετρική σχεδίαση** : Ολόκληρο το σχέδιο παράγεται συναρτήσεων παραμέτρων και συναρτήσεων που τις συνδέουν μεταξύ τους. Κάθε καμπύλη που παράγεται βασίζεται σε αυτές τις παραμέτρους, ενώ ο σχεδιαστής μπορεί να θέσει και ορισμένους περιορισμούς ώστε να προσδιορίσει καλύτερα το εύρος μέσα στο οποίο θα παραχθούν οι επιθυμητές γεωμετρίες. Αυτή η προσέγγιση απαιτεί καλή γνώση της διαδικασίας της παραμετρικής σχεδίασης και είναι αποδοτική μόνο όταν απαιτούνται λίγες μεταβολές στην γεωμετρία κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Μόλις το τελικό σχέδιο παραχθεί (που απαιτεί τον περισσότερο χρόνο), μια πληθώρα γεωμετριών μπορούν να παραχθούν.

Για τις ανάγκες του παρόντος η παραμετρική μοντελοποίηση μιας αρχικής δοθείσας γεωμετρίας πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού CAESSES – Friendship Framework⁴ που παρέχεται από την εταιρία Friendship Systems. Το βασικότερο στοιχείο κατά την παραμετρική σχεδίαση είναι ο εξ' αρχής προσδιορισμός του συνόλου των μεταβλητών σχεδίασης που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν. Αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό προκειμένου να είναι σαφώς προκαθορισμένες ούτως ώστε η συνολική διαδικασία της σχεδίασης να βασισθεί σε συγκεκριμένα δεδομένα που συχνά θέτουν περιορισμούς και μειώνουν σημαντικά τις διαθέσιμες εναλλακτικές επιλογές διαμόρφωσης της γάστρας. Σε πολλές περιπτώσεις η απαίτηση δημιουργίας ορισμένων μεταβλητών σχεδίασης μπορεί ακόμα και να μεταβάλει τον τρόπο με τον οποίο δημιουργούνται τα τμήματα της γεωμετρίας ενός πλοίου. Για τις ανάγκες της εργασίας ακολουθείται η φιλοσοφία της ημι-παραμετρικής σχεδίασης, καθώς δεν απαιτείται η εξ ολοκλήρου μεταβολή της γεωμετρίας τους πλοίου. Επομένως δεν υπάρχουν μεταβλητές που επηρεάζουν κύριες διαστάσεις (global design variables), καθώς θέλαμε να τις κρατήσουμε σταθερές, αφού αυτές πολλές φορές υπόκεινται σε εξωτερικούς περιορισμούς (π.χ. περιορισμός βυθίσματος ή πλάτους). Αντιθέτως υπάρχουν μόνο μεταβλητές που επηρεάζουν τοπικά τμήματα του πλοίου. Η επιλογή των μεταβλητών σχεδίασης εξαρτάται άμεσα από τα κριτήρια βελτιστοποίησης που έχουν επιλεγεί ώστε να προκαλούν σχεδιαστικές αλλαγές που έχουν άμεση σχέση με τις επιδόσεις του πλοίου ως προς αυτά τα κριτήρια. Η διαδικασία της παραμετρικής σχεδίασης προφανώς έχει πολλούς διαφορετικούς τρόπους να υλοποιηθεί. Η καταλληλότερη για κάθε περίπτωση προκύπτει από την αλληλουχία εξάρτησης των γεωμετρικών τμημάτων του πλοίου κάτι που πρωτογενώς προκύπτει από τις μεταβλητές σχεδίασης που έχουν επιλεγεί.

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

Οι επιλεγείσες μεταβλητές σχεδίασης μπορεί να επηρεάζουν γεωμετρικά χαρακτηριστικά οποιουδήποτε από τα παραπάνω τμήματα. Δεδομένου ότι η συνολική γεωμετρία αποτελεί το συνδυασμό επιμέρους σχεδιαστικών στοιχείων που εξαρτώνται από τα προαναφερθέντα τμήματα, είναι απαραίτητη η δημιουργία παραμέτρων που εξαρτώνται σε πολλαπλά επίπεδα από τις επιλεγμένες μεταβλητές σχεδίασης, ώστε η μορφή γάστρας συνολικά, να παραμένει ομαλή σε όλο το εύρος μεταβολής τους. Σε αντίθεση με τις μεταβλητές σχεδίασης οι παράμετροι μπορούν να εξαρτώνται και από άλλες παραμέτρους. Για παράδειγμα αν τεθεί ως μεταβλητή σχεδίασης το πλάτος σε κάποιο σημείο του πρωραίου τμήματος της ισάλου πλευσης στο βύθισμα σχεδίασης, τότε θα πρέπει να δημιουργηθούν παράμετροι που επηρεάζουν τα σημεία όλων των νομέων που έχουν κοινό σημείο με την ίσαλο. Επιπρόσθετα και προκειμένου να παραμένει ομαλή η μορφή αυτών των νομέων σε ενδεχομένη μεταβολή της εν λόγω μεταβλητής σχεδίασης, θα πρέπει να υπάρχουν παράμετροι που θα εξασφαλίζουν αυτή την απαίτηση. Η ίδια τεχνική εφαρμόζεται για όλες τις περιπτώσεις.

⁴ <https://www.caeses.com/> - Βλ. Παράρτημα Α

Η διαδικασία της παραμετρικής σχεδίασης προφανώς έχει πολλούς διαφορετικούς τρόπους να υλοποιηθεί. Η καταλληλότερη για κάθε περίπτωση προκύπτει από την αλληλουχία εξάρτησης των γεωμετρικών τμημάτων του πλοίου κάτι που πρωτογενώς προκύπτει από τις μεταβλητές σχεδίασης που έχουν επιλεγεί. Κατά συνέπεια γεωμετρικά στοιχεία που εξαρτώνται άμεσα από μεταβλητές σχεδίασης αποτελούν την κορυφή της πυραμίδας εξάρτησης και τα υπόλοιπα που απαιτούνται για την ολοκλήρωση της σχεδίασης, έπονται χρονικά κι εξαρτώνται από αυτά. Η παραμετρική σχεδίαση ολοκληρώνεται με την αποτύπωση ολόκληρης της μορφής της γάστρας με επιφάνειες που προκύπτουν από παρεμβολή καμπυλών.

1.4 Αξιολόγηση της Υδροδυναμικής Συμπεριφοράς Πλοίων

Η αξιολόγηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς ενός πλοίου αποτελεί ένα από τα βασικά μέρη της σχεδίασης του. Η πιο αξιόπιστη μέθοδος είναι αυτή των πειραμάτων μέσω προτύπων, που είναι όμως χρονοβόρα και έχει υπολογίσιμο κόστος. Προκύπτει λοιπόν η ανάγκη προσομοίωσης των υδροδυναμικών φαινομένων, καθώς είναι πρακτικά η μόνη εφικτή λύση για την αξιολόγηση μεγάλου αριθμού γαστρών σε εύλογο χρονικό διάστημα.

Η αξιολόγηση της υδροδυναμικής απόδοσης του πλοίου που εξετάζεται αφορά δύο επιλεγέντα κριτήρια. Το πρώτο είναι η αντίσταση κυματισμού κατά την πλεύση του σε ήρεμο νερό ενώ το δεύτερο η απόκριση του σε μετωπικούς κυματισμούς και συγκεκριμένα η κίνηση προνευτασμού. Η μελέτη της συμπεριφοράς της γάστρας του πλοίου σε ήρεμο νερό επηρεάζει άμεσα την κατανάλωσης καυσίμου και επομένως την οικονομική αποδοτικότητα του πλοίου. Επίσης η ασφάλεια και η ικανότητα λειτουργίας υπό δυσμενείς καιρικές και θαλάσσιες συνθήκες αποτελούν όλο και πιο σημαντικά στοιχεία διάκρισης των σύγχρονων πλοίων. Ιδιαίτερα, η συμπεριφορά σε κυματισμούς που επιδρά τόσο στο πλήρωμα, όσο και στο ίδιο το πλοίο, μελετάται ήδη από τη φάση της προκαταρκτικής σχεδίασης πλοίου

Για τις ανάγκες της βελτιστοποίησης σχεδίασης που θα πραγματοποιηθεί, απαιτείται η υδροδυναμική αξιολόγηση ενός μεγάλου αριθμού εναλλακτικών σχεδιάσεων κι επομένως η μόνη πρακτικά εφαρμόσιμη διαδικασία είναι η χρήση της δυναμικής θεωρίας προκειμένου να λάβουμε αποτελέσματα σε εύλογο χρονικό διάστημα. Η βελτιστοποίηση θα πραγματοποιηθεί με κριτήρια αφενός την αντίσταση κυματισμού κατά την πλεύση σε ήρεμο νερό κι αφετέρου την επιτάχυνση στην πλήρη κατά την κίνηση προνευτασμού. Η δυναμική θεωρία αποτελεί προσέγγιση που αγνοεί τη συνεκτικότητα και βασίζεται στη μοντελοποίηση των φαινομένων με χρήση συνοριακών στοιχείων (Boundary Element Method). Το πεδίο επίλυσης αφορά μόνο το στερεό σύνορο του σώματος και την ελεύθερη επιφάνεια ενώ η διακριτοποίηση του γίνεται με επίπεδα επιφανειακά στοιχεία που διατάσσονται στο χώρο. Αποτέλεσμα αυτής της προσέγγισης είναι η απαίτηση αισθητά μικρότερης απαιτούμενης υπολογιστικής ισχύος, εν συγκρίσει με τη συνεκτική θεωρία, δεδομένου ότι το σύνολο των εξισώσεων που επιλύονται, προκύπτουν από διακριτοποίηση με υποπολλαπλάσιο συνήθως αριθμό κόμβων. Το μειονέκτημα της θεωρίας δυναμικού είναι πως δεν έχει τη δυνατότητα να μοντελοποιήσει φαινόμενα που σχετίζονται με τη συνεκτικότητα και κατ' επέκταση να προβλέψει την επιρροή τους.

Σχετικά με την απόκριση του πλοίου σε κυματισμούς, η δυναμική θεωρία δίνει καλύτερα αποτελέσματα από τη συνεκτική για όλες τις κινήσεις του πλοίου εκτός του διατοιχισμού. Δεδομένου λοιπόν ότι ο δεύτερος στόχος της παρούσης μελέτης είναι η ελαχιστοποίηση των επιταχύνσεων κατά την κίνηση προνευτασμού, η δυναμική θεωρία είναι η καταλληλότερη γι' αυτή την περίπτωση.

Για την εκτίμηση της αντίστασης κυματισμού θα χρησιμοποιηθεί το λογισμικό SWAN 2⁵. Οι προσομοιώσεις στα πλαίσια μιας μελέτης οφείλουν να είναι όσον το δυνατό πιο ρεαλιστικές και να προσεγγίζουν την πραγματικότητα. Για αυτό το λόγο επιλέχθηκε να μελετηθούν δύο από τις βασικότερες καταστάσεις πλεύσης ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων που αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο χρόνο πλεύσης του. Αυτές είναι η κατάσταση Full Load Departure και η κατάσταση Half Load Departure (η οποία είναι μια μέση κατάσταση φόρτωσης με διαφορετικό συντελεστή φόρτωσης t/TEU από την κατάσταση FLD). Κατά την διάρκεια ενός τυπικού ταξιδιού ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και δεδομένου πως δύναται να μεταφέρει διαφόρους τύπους φορτίων για εκφόρτωση σε διαφορετικά λιμάνια, υπερτερεί η κατάσταση μερικής φόρτωσης. Επομένως στη διαδικασία βελτιστοποίησης θα συνεκτιμηθούν σε μία αντικειμενική συνάρτηση με συντελεστή βαρύτητας 0.6 για την Half Load Departure και 0.4 για την Full Load Departure.

Όσον αφορά τις ταχύτητες πλεύσης, μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους, επιλέχθηκαν ώστε και αυτές να αντιπροσωπεύουν την επικρατούσα κατάσταση. Μια τυπική ταχύτητα με την οποία ταξιδεύουν αυτά τα πλοία είναι οι 25 κόμβοι, μια ταχύτητα χαρακτηριστικά μεγαλύτερη από των άλλων εμπορικών πλοίων, η οποία είναι γύρω στους 14 κόμβους. Η ταχύτητα που επιλέχθηκε για την κατάσταση Full Load Departure είναι οι 23.5 knots ενώ για την κατάσταση Half Load Departure είναι οι 24 knots.

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

1.5 Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων από Αλγορίθμους

Κάθε διαδικασία βελτιστοποίησης είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την χρήση αλγορίθμων για την αξιολόγηση του συνόλου των πιθανών γεωμετριών και την εύρεση των βέλτιστων. Οι αλγόριθμοι

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

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

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

αξιολόγησης έχουν ευρεία εφαρμογή σε μη γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης για τα οποία αποτελούν πολλές φορές και τη μοναδική εφικτή διαδικασία επίλυσης τους. Αντικείμενο αξιολόγησης από αλγόριθμους αποτελεί ένα σύστημα που εξαρτάται από ένα σύνολο μεταβλητών σχεδίασης που διακυμαίνονται εντός ενός προκαθορισμένου εύρους. Ο συνδυασμός αυτών των μεταβλητών επηρεάζει την απόδοση του συστήματος ως προς κάποια κριτήρια που αποτελούν τις αντικειμενικές συναρτήσεις και των οποίων επιδιώκεται η ελαχιστοποίηση ή η μεγιστοποίηση, λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη τυχόν περιορισμούς που έχουν τεθεί και αφορούν στις τιμές χαρακτηριστικών του συστήματος.

Η βελτιστοποίηση μπορεί να είναι μονοκριτηριακή ή πολυκριτηριακή ανάλογα με τον αριθμό των επιλεγέντων κριτηρίων αξιολόγησης. Σε μια μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση η βέλτιστη λύση προφανώς είναι μόνο μία. Αντίθετα στις περιπτώσεις πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης η επιλογή της βέλτιστης περίπτωσης δεν είναι προφανής καθώς προκύπτουν πολλές διαφορετικές σχεδιάσεις για τις οποίες ισχύει η αμφιμονοσήμαντη σχέση ότι δεν αποτελούν σαφώς καλύτερες ή χειρότερες επιλογές από άλλες. Στην περίπτωση ύπαρξης πολλών κριτηρίων που μπορεί να έχουν αντικρουόμενη επίδραση στη σχεδίαση η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση είναι προτιμότερη. Για παράδειγμα, τα χαρακτηριστικά μιας γεωμετρίας που εξασφαλίζουν τις ελάχιστες κινήσεις κι επιταχύνσεις, στη γενική περίπτωση μπορεί να προκαλέσουν αύξηση της αντίστασης της σε ήρεμο νερό. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την αξία εφαρμογής ενός σχήματος πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης με αξιολόγηση και των δύο μεγεθών ταυτόχρονα. Αυτή η επιλογή αποτελεί μια σαφώς καλύτερη προσέγγιση από τη βελτιστοποίηση μιας γάστρας σε δύο διαφορετικά στάδια με ένα κριτήριο για κάθε ένα. Σε μια τέτοια διαδικασία η βελτιστοποίηση οδηγεί σε μια σαφή εικόνα την απόδοσης της γεωμετρίας με βάση τα δύο κριτήρια και εναπόκειται στο σχεδιαστή να κρίνει την σχετική σημαντικότητα καθενός.

Το πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης ορίζεται ως εξής:

$$\text{Min } [\mu_1(x), \mu_2(x), \dots, \mu_n(x)]^T$$

$$g(x) \leq 0$$

$$h(x) = 0$$

$$x_l \leq x \leq x_u$$

όπου η μ_i είναι η i -οστή αντικειμενική συνάρτηση, οι g, h είναι το σύνολο των περιορισμών σε μορφή ισότητας και ανισότητας και X είναι το διάνυσμα μεταβλητών σχεδίασης. Η λύση του παραπάνω προβλήματος είναι ένα σύνολο λύσεων, για τις οποίες η βελτίωση μιας εκ των αντικειμενικών συναρτήσεων θα επιφέρει την χειροτέρευση κάποια άλλης. Επομένως αντί για μία και μοναδική λύση η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση έχει θεωρητικά άπειρο αριθμό λύσεων (Pareto Solutions).

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

Ο αλγόριθμος που θα χρησιμοποιηθεί για τις ανάγκες της βελτιστοποίησης ανήκει στην κατηγορία των γενετικών αλγορίθμων, των οποίων η λειτουργία παρουσιάζει ομοιότητες με τη διαδικασία της πραγματικής φυσικής εξέλιξη των γενεών. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται κάποιες αρχικές λύσεις (γονείς) από τις οποίες παράγονται νέες (απόγονοι) μέσω των διαδικασιών της μετάλλαξης και της διασταύρωσης των χαρακτηριστικών των γονέων τα οποία και αποτελούν τις μεταβλητές σχεδίασης. Η επανάληψη της διαδικασίας παραγωγής γενεών από τις προηγούμενες οδηγεί στη σταδιακή και συνεχή βελτίωση της απόδοσης των λύσεων μέχρι να τερματιστεί η διαδικασία και να καταλήξουμε στις βέλτιστες.

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

Η παραπάνω λογική αφορά όλες τις πτυχές απόδοσης ενός πλοίου που διέπονται από κανόνες αλληλεπίδρασης καθώς απώτερος στόχος είναι πάντοτε η συνολική βελτίωση της επίδοσης του πλοίου. Στην περίπτωση της υδροδυναμικής, ένας παράγοντας που έχει σημαντική συμμετοχή στη συνολική απόδοση είναι το προωστήριο μέσο (προπέλες) καθώς υπάρχει αμφίπλευρη επιρροή των αποδόσεων αυτού και της περιβάλλουσας περιοχής της γάστρας. Συνεπώς, η αποδοτικότερη πρακτική συνίσταται στη βελτιστοποίηση του αυτοπροωθούμενου πλοίου τόσο σε ήρεμο νερό όσο και σε κυματισμούς. Ωστόσο, το πρόβλημα αυτό είναι αρκετά περίπλοκο και ξεφεύγει κατά πολύ από τη μελέτη που τελείται στην παρούσα εργασία.

Συνοψίζοντας, η μελέτη αυτή στοχεύει στην υδροδυναμική βελτιστοποίηση τη γυμνής γάστρας ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων λαμβάνοντας υπ' όψιν δύο διαφορετικές καταστάσεις φόρτωσης, απουσία παρελκόμενων και προωστήριου μέσου. Για τη διαδικασία βελτιστοποίησης κριτήρια θα αποτελέσουν αφενός η αντίσταση κυματισμού ως συνιστώσα της συνολικής αντίστασης ρυμούλκησης κατά την πλεύση σε ήρεμο νερό κι αφετέρου η μέγιστη τιμή της κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη κατά την αλληλεπίδραση με μετωπικούς κυματισμούς. Δεδομένου ότι έχουμε δύο αντικειμενικές συναρτήσεις των οποίων αναζητείται η ελάχιστη τιμή, το πρόβλημα που θα επιλυθεί είναι ελαχιστοποίησης μέσω πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης με περιορισμούς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΛΟΙΟΥ

2.1 Θεωρητική Προσέγγιση της Αντίστασης πλοίου

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

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

Η αντίσταση ενός πλοίου σε μία δεδομένη ταχύτητα είναι η δύναμη που απαιτείται για να ρυμουλκηθεί το πλοίο σε αυτήν την ταχύτητα σε ήρεμο νερό. Αν η γάστρα δεν έχει παρελκόμενα (ή προσαρτήματα – appendages), τότε η αντίσταση καλείται αντίσταση γυμνής γάστρας (bare hull) ή ρυμούλκησης (towing). Η αντίσταση ρυμούλκησης δεν είναι ίδια με την αντίσταση πρόωσης (propulsion resistance) – αν και διαφέρουν συνήθως λίγο – διότι στην τελευταία εμπλέκονται και οι αλληλεπιδράσεις γάστρας - έλικας.

Σε κάθε σημείο επαφής της γάστρας με το περιβάλλον ρευστό ασκείται μια στοιχειώδης δύναμη, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως συνισταμένη μιας κάθετης στην επιφάνεια συνιστώσας που οφείλεται στην πίεση και μιας εφαπτόμενης στην επιφάνεια συνιστώσας που οφείλεται στην συνεκτικότητα (Νευτώνειες τάσεις). Η αντίσταση του πλοίου είναι (εξ' ορισμού) η προβολή κατά την διεύθυνση κίνησης του πλοίου του ολοκληρώματος των στοιχειωδών αυτών δυνάμεων στην επιφάνεια της γάστρας. Προκύπτουν έτσι με φυσικό τρόπο οι δύο βασικές συνιστώσες της αντίστασης του πλοίου. Η αντίσταση τριβής και η αντίσταση πίεσης:

- **Αντίσταση τριβής:** είναι η συνιστώσα της αντίστασης που παράγεται με ολοκλήρωση στην επιφάνεια της γάστρας των εφαπτομενικών τάσεων (τάσεις συνεκτικότητας) και προβολή κατά τη διεύθυνση της ροής
- **Αντίσταση πίεσης:** είναι η συνιστώσα της αντίστασης που παράγεται με ολοκλήρωση στην επιφάνεια της γάστρας των κάθετων τάσεων (δυνάμεις πίεσης) και προβολή κατά την διεύθυνση της ροής

Με τη χρήση της διαστατικής ανάλυσης (θεώρημα Π) οποιοσδήποτε φυσικός νόμος μπορεί να εκφραστεί σε ισοδύναμη αδιάστατη μορφή, όπου ο αριθμός των παραμέτρων (ανεξάρτητων και εξηρημένων) στην πιο συνηθισμένη περίπτωση μειώνονται κατά τρεις - δεδομένου ότι οι βασικές ποσότητες στην μηχανική είναι τρεις: η μάζα, το μήκος και ο χρόνος. Κατόπιν ανάλυσης του φαινομένου καταλήγουμε πως η αντίσταση R (εξηρητημένη μεταβλητή) σχετίζεται με τις ανεξάρτητες μεταβλητές με τη σχέση:

$$R = f(\rho, V, L, \nu, g)$$

όπου,

ρ : η πυκνότητα του νερού

V : η ταχύτητα του πλοίου

L : το μήκος του πλοίου

ν : η κινηματική συνεκτικότητα του νερού

g : η επιτάχυνση της βαρύτητας

Εφαρμόζοντας το θεώρημα Π καταλήγουμε στις εξής αδιάστατες παραμέτρους:

$$\text{Αριθμός Froude: } Fn = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

$$\text{Αριθμός Reynolds: } Re = \frac{VL}{\nu}$$

$$\text{Συντελεστής αντίστασης πλοίου: } C_T = \frac{R}{0.5 \rho SV^2}$$

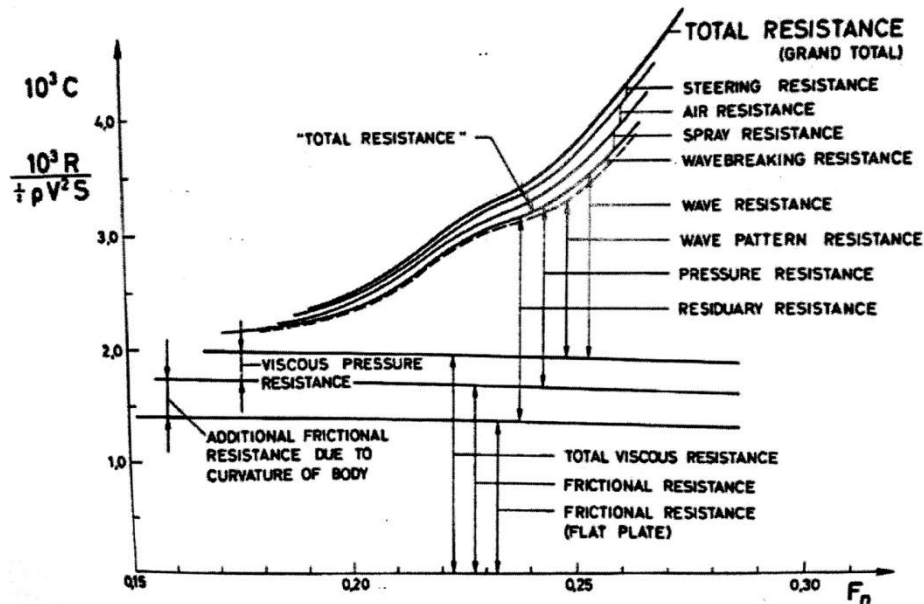
Ο αριθμός Reynolds από φυσικής απόψεως αντιπροσωπεύει τον λόγο δυνάμεων αδράνειας (inertia forces) προς τις συνεκτικές δυνάμεις (viscous forces) και ο αριθμός Froude είναι ο λόγος των αδρανειακών δυνάμεων προς τις βαρυτικές δυνάμεις (gravity forces). Ο συντελεστής αντίστασης C_T εξαρτάται τόσο από τον αριθμό Froude όσο και από τον αριθμό Reynolds. Προς απλοποίηση του φαινομένου θεωρούμε ότι η αντίσταση τριβής εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds ενώ η αντίσταση πίεσης από τον αριθμό Froude που δεν είναι απόλυτα ακριβές.

Για τη μελέτη κι εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός πλεούμενου από πλευράς αντίστασης, γίνεται περεταίρω διαχωρισμός αυτής σε επιμέρους κατηγορίες οι οποίες εξαρτώνται από φαινόμενα συνεκτικότητας, μεταβολής της κατανομής των πιέσεων (που οφείλεται στη συνεκτικότητα) και αλληλεπίδρασης με την ελεύθερη επιφάνεια. Θα πρέπει να τονιστεί πως ακόμα και μετά τον διαχωρισμό σε κατηγορίες, δεν άπτονται όλες αυτές οι συνιστώσες αποκλειστικά φαινομένων αντίστασης τριβής ή πίεσης, καθώς και πάλι υπάρχουν περιπτώσεις που υπάρχει συσχέτιση και με τις δύο κατηγορίες του φυσικού προβλήματος. Η ανάλυση του φαινομένου της αντίστασης σε υποκατηγορίες και η παραδοχή της μεταξύ τους ανεξαρτησίας διευκολύνει την συνολική μελέτη του ενιαίου προβλήματος. Οι κατηγορίες αντίστασης και η εξάρτησή τους από τον αριθμό Froude φαίνονται στο Σχήμα 4⁸. Συγκεκριμένα βλέπουμε πως οι συνιστώσες που σχετίζονται με συνεκτικά φαινόμενα δεν εξαρτώνται από αυτόν και παραμένουν σταθερές, σε αντίθεση με την αντίσταση κυματισμού και τις υπόλοιπες συνιστώσες της. Στην πραγματικότητα όμως, οι συνιστώσες αντίστασης συνεκτικότητας εξαρτώνται από τον αριθμό Froude, καθώς οι παραγόμενοι κυματισμοί μεταβάλλουν τη βρεχόμενη επιφάνεια και επηρεάζουν την ταχύτητα του ρευστού και το οριακό στρώμα, κοντά στην ίσαλο. Η αντίσταση κυματισμού με τη σειρά της δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τον αριθμό Froude καθώς το οριακό στρώμα μεταβάλλει τις κάθετες πιέσεις στη γάστρα με αποτέλεσμα να έχουμε επιρροή των παραγόμενων κυματισμών.

Η συνολική αντίσταση λοιπόν μπορεί να αναλυθεί στις ακόλουθες επιμέρους συνιστώσες κάτι που φαίνεται και σχηματικά στη συνέχεια:

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

⁸ Πολίτη Γ.Κ., (2011) «Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου», Αθήνα



Σχήμα 4. Συνιστώσες αντίστασης πλοίου υπό τη μορφή του αδιάστατου συντελεστή αντίστασης C ως προς τον αριθμό Froude

2.1.1 Αντίσταση Τριβής

Το νερό, μέσω του οποίου το πλοίο κινείται, έχει ιξώδες, χαρακτηριστικό που παρουσιάζει πρακτικά κάθε ρευστό. Όταν ένα σώμα κινείται σε ένα ρευστό που βρίσκεται σε ηρεμία, παρουσιάζεται η προσκόλληση ενός λεπτού στρώματος του υγρού στην επιφάνεια του σώματος. Το στρώμα αυτό κινείται με την ίδια ταχύτητα, όπως το σώμα, ενώ σε μια απόσταση μακριά από το σώμα το υγρό μένει ανεπηρέαστο. Η ταχύτητα παρουσιάζει μεγάλες μεταβολές κοντά στο σώμα και σταδιακά μειώνεται καθώς απομακρύνεται από αυτό. Η περιοχή που παρατηρούνται μεγάλες μεταβολές της ταχύτητας ονομάζεται οριακό στρώμα. Ο ορισμός του όρου πάχος οριακού στρώματος είναι σχετικά αυθαίρετος καθώς στη θεωρία εκτείνεται μέχρι το άπειρο. Συνηθίζεται όμως να ορίζεται ως πάχος οριακού στρώματος η απόσταση όπου η ταχύτητα του ρευστού είναι 1% της ταχύτητας με την οποία κινείται το σώμα.

Λόγω της κλίσης της ταχύτητας του ρευστού ως προς το σώμα, το ρευστό βρίσκεται σε διάτμηση και το σώμα τελικά υφίσταται μια αντίσταση, η οποία ορίζεται ως αντίσταση τριβής. Θεωρώντας v την ταχύτητα του ρευστού και y την απόσταση από το σώμα, τότε η διατμητική τάση δίδεται από τον τύπο:

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

Αυτή η θεώρηση έχει εφαρμογή στην περίπτωση στρωτής ροής όπου κάθε σωματίδιο ακολουθεί την δική του ροϊκή γραμμή χωρίς να υπάρχει μεταφορά μάζας μεταξύ των γειτονικών στρωμάτων. Σε αυτή

την περίπτωση η διάτμηση οφείλεται αυτή καθ' αυτή στην κίνηση των μορίων. Η στρωτή ροή εμφανίζεται σε χαμηλούς αριθμούς Reynolds. Σε μεγαλύτερους αριθμούς έχουμε εμφάνιση τυρβώδους ροής. Το σημείο που έχουμε μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή ονομάζεται κρίσιμος αριθμός Reynolds και εξαρτάται από το πόσο ήρεμη είναι η επιφάνεια του ρευστού καθώς και από την ύπαρξη αρχικής τύρβης σε αυτό. Συνήθως αυτή η μετάβαση συμβαίνει μεταξύ αριθμών Reynolds 3×10^5 και 10^6 . Στην τυρβώδη ροή εμφανίζεται το ίδιο μοντέλο με την στρωτή ροή αλλά ταυτόχρονα έχουμε και μια αλληλεπίδραση που οφείλεται στη μεταφορά μάζας μεταξύ των γειτονικών στρωμάτων ρευστού.

Σε πρακτικό επίπεδο, η ροή γύρω από ένα πλοίο που ταξιδεύει στη θάλασσα θεωρείται τυρβώδης. Σε μια δεξαμενή ένα ποσοστό της ροής μπορεί να θεωρηθεί στρωτό αλλά είναι αρκετά ευαίσθητο σε εξωγενείς παράγοντες, οπότε ποικίλει σημαντικά σε ένα δεδομένο μοντέλο. Λόγω της διαφοράς στην αντίσταση μεταξύ στρωτής και τυρβώδους ροής, αυτό το φαινόμενο οδήγησε σε ασαφή αποτελέσματα σε πειράματα σε δεξαμενές. Έτσι σήμερα έχουμε τεχνητή παραγωγή τυρβώδους ροής στις περισσότερες δεξαμενές. Για ευκολία, η αντίσταση τριβής χωρίζεται σε δύο μορφές. Η πρώτη είναι η αντίσταση που προκύπτει από μια επίπεδη πλάκα επιφάνειας ίδιας με το πλοίο και η άλλη η αυξημένη αντίσταση τριβής που οφείλεται στο πραγματικό σχήμα του πλοίου.

Η τραχύτητα της γάστρας αποτελεί επίσης ένα περίπλοκο αντικείμενο. Σε μια τραχιά επιφάνεια η αντίσταση ακολουθεί μια λεία καμπύλη καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds μέχρι κάποια τιμή όπου η καμπύλη γίνεται οριζόντια. Όσο πιο τραχιά είναι η επιφάνεια τόσο πιο γρήγορα η καμπύλη γίνεται οριζόντια, δηλαδή η αντίσταση παύει να εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds. Η τραχύτητα εξαρτάται από έναν ευρύ αριθμό ποικίλων παραμέτρων. Τα ελάσματα, από κατασκευής παρουσιάζουν κάποια τραχύτητα που οφείλεται στις συγκολλήσεις και στις διεργασίες παρασκευής. Η τραχύτητα αναμένεται να αυξηθεί λόγω των φορτίσεων του νερού και της διάβρωσης με το πέρασμα των χρόνων, καθώς οι βαφές φθείρονται.

Συνοπτικά λοιπόν έχουμε τις εξής συνιστώσες:

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

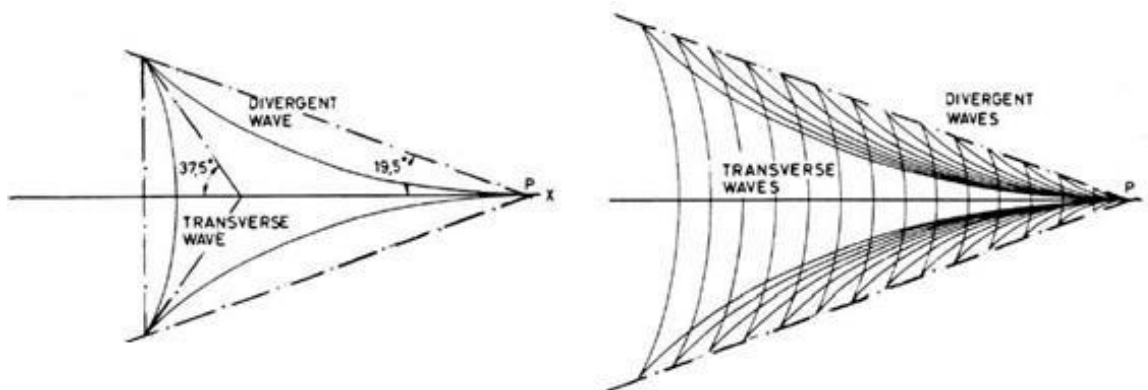
2.1.2 Αντίσταση Πίεσης Λόγω Συνεκτικότητας

Η αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας είναι η συνιστώσα της αντίστασης που οφείλεται στη μεταβολή του πεδίου πιέσεων πρύμνηθεν και πηγάζει από φαινόμενα συνεκτικότητας. Συγκεκριμένα η επέκταση του οριακού στρώματος πίσω από το σώμα, η αποκόλληση της ροής, η δημιουργία δρόμου δινών και ανάστροφης ροής αποτελούν φαινόμενα που οφείλονται στη συνεκτικότητα, καθώς δεν υφίστανται σε ιδανικό ρευστό. Αποτέλεσμα αυτών των φαινομένων είναι η μείωση του πεδίου πιέσεων και η διαμόρφωση μιας συνολικής συνιστώσας στην περιοχή της πρύμνης που είναι μικρότερη από την αντίστοιχη της πλώρης. Η αντίσταση τριβής επίπεδης πλάκας, η αντίσταση τριβής λόγω καμπυλότητας και η αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας αποτελούν την αντίσταση συνεκτικότητας ενώ οι δυο τελευταίες αποτελούν την αντίσταση λόγω μορφής.

2.1.3 Αντίσταση Κυματισμού

Η αντίσταση κυματισμού ενός πλοίου σχετίζεται με την συνισταμένη δύναμη που είναι αποτέλεσμα (κυρίως) των καθέτων πιέσεων του ρευστού που δρουν στην γάστρα, όπως η αντίσταση τριβής είναι αποτέλεσμα των εφαπτομενικών τάσεων του ρευστού. Καθώς το σώμα ταξιδεύει, στην ελεύθερη επιφάνεια τα κινούμενα σημεία πίεσης προκαλούν κύματα που απλώνονται μακριά από το σώμα μεταφέροντας μαζί τους ορισμένο ποσό ενέργειας το οποίο διασκορπίζεται στη θάλασσα. Η αντίσταση κυματισμού μπορεί να χαρακτηριστεί επίσης από την ενέργεια που δαπανάται από το πλοίο για να διατηρηθεί το σύστημα των κυματισμών. Η αντίσταση κυματισμού αποτελεί σημαντική συνιστώσα της συνολικής αντίστασης σε μεγάλες ταχύτητες. Ο θεωρητικός προσδιορισμός της αντίστασης κυματισμού απαιτεί γνώση του συστήματος των κυματισμών που δημιουργείται από ένα κινούμενο πλοίο.

Η πρώτη θεωρητική προσέγγιση του συστήματος κυματισμών που παράγει ένα πλοίο έγινε από τον Lord Kelvin στα τέλη του 19ου αιώνα. Ο Kelvin θεώρησε ένα μοναδικό σημείο πίεσης που ταξιδεύει σε μία ευθεία γραμμή πάνω στην επιφάνεια του νερού, δημιουργώντας κύματα τα οποία έχουν μια χαρακτηριστική μορφή. Η θεώρηση του σκάφους ως ενός σημείου πίεσης αποτελεί μια παραδοχή που ισχύει μακριά από το σώμα με αποτέλεσμα οι λεπτομέρειες της γεωμετρίας του σκάφους να έχουν επιρροή μεγαλύτερης τάξης στο φαινόμενο κι επομένως να μπορούν να αμεληθούν. Εμφανίζεται ένα σύστημα εγκάρσιων κυματισμών που ακολουθεί το σημείο πίεσης, μαζί με μία σειρά αποκλινόντων κυματισμών που απλώνονται πίσω από το σημείο πίεσης. Οι αποκλίνοντες κυματισμοί εκτείνονται εντός των ευθειών που σχηματίζουν γωνία περίπου 19.5° από τη διεύθυνση κίνησης ενώ οι εγκάρσιοι σχηματίζουν γωνία με την ίδια ευθεία περίπου 37.5° . Τα δύο συστήματα κυματισμών κινούνται με την ταχύτητα του σκάφους ενώ αν αυτή παραμένει σταθερή η παραγωγή τους είναι σταθερή και μόνιμη και τα συστήματα αυτά φαίνονται ακίνητα για έναν παρατηρητή πάνω στο σκάφος.



Σχήμα 5. Σύστημα κυματισμών κατά Kelvin⁹

2.1.4 Αντίσταση Θραύσεως Κύματος

Η αντίσταση θραύσεως κύματος προέρχεται από την παρουσία ανεμογενών κυματισμών στην πορεία του σκάφους και δεν σχετίζονται με αυτούς που παράγονται από το ίδιο το πλοίο. Η αντίσταση αυτή οφείλεται στην πρόσκρουση θαλάσσιων κυματισμών πάνω στο πλοίο και στις προκαλούμενες κινήσεις heave, pitch και roll. Οι κινήσεις αυτές δυσχεραίνουν την κίνηση του και αποτιμώνται ως μια πρόσθετη αντίσταση.

2.1.5 Αντίσταση Δημιουργίας Αφρού

Η αντίσταση δημιουργίας αφρού αφορά ενέργεια που αποδίδεται στη θάλασσα από την κίνηση του σκάφους και τη θραύση του ρευστού που δεν μεταδίδεται τελικά ως κύμα.

2.1.6 Αντίσταση Ανέμου

Η αντίσταση του ανέμου είναι μη μηδενική, ακόμα και σε άπνοια, λόγω της ταχύτητας του πλοίου. Ο αέρας είναι ρευστό οπότε και αυτό έχει την τάση να αντιστέκεται στην κίνηση του πλοίου. Κατά την κίνηση του πλοίου ο αέρας που ρέει πάνω στις υπερκατασκευές συναντά πληθώρα ασυνεχειών οι οποίες οδηγούν στην αποκόλληση της ροής. Όταν το πλοίο κινείται με πλήρη ισχύ και η κατάσταση του ανέμου είναι μηδέν, η αντίσταση του ανέμου αποτελεί το 2-4% της συνολικής αντίστασης. Όταν το πλοίο κινείται αντίρροπα της κατεύθυνσης του ανέμου με την ίδια ταχύτητα με αυτόν, η σχετική

⁹ Πολίτη Γ.Κ., (2011) «Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου», Αθήνα

ταχύτητα του ανέμου διπλασιάζεται, οπότε η αντίσταση τετραπλασιάζεται. Έτσι σε κακές καιρικές συνθήκες η αντίσταση του ανέμου μπορεί να αποτελέσει σημαντικό παράγοντα της μείωση της ταχύτητας του πλοίου.

2.1.7 Αντίσταση Ελιγμών - Αντίσταση Παρελκόμενων

Η αντίσταση ελιγμών οφείλεται στην απόκλιση του σκάφους από την ευθύγραμμη πορεία του καθώς και από τις συνιστώσες των παραγόμενων δυνάμεων στα παρελκόμενα πηδαλιουχίας. Τυπικά παραδείγματα παρελκόμενων είναι το πηδάλιο, ο άξονας του πλοίου και άλλα. Κάθε παρελκόμενο έχει το δικό του μήκος, το οποίο είναι μικρότερο από το μήκος του πλοίου και αντιστοίχως έχει ξεχωριστό αριθμό Reynolds. Η αντίσταση των παρελκόμενων μπορεί να υπολογιστεί από εμπειρικούς τύπους ή από πειράματα σε δεξαμενή, τρέχοντας τη γάστρα μια φορά γυμνή και μια φορά με αντίστοιχα παρελκόμενα.

2.1.8 Κριτήριο Βελτιστοποίησης – Αντίσταση Κυματισμού σε Ήρεμο Νερό

Η συνολική αντίσταση R_T ενός πλοίου αποτελείται από πολλές συνιστώσες. Μελετώντας την αντίσταση γυμνής γάστρας σε ήρεμο νερό, οι συνιστώσες αυτές μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κυρίως ομάδες ως εξής:

- Αντίσταση Τριβής (R_F)
- Υπόλοιπη Αντίσταση (R_R)
- Αντίσταση Αέρα (R_A)

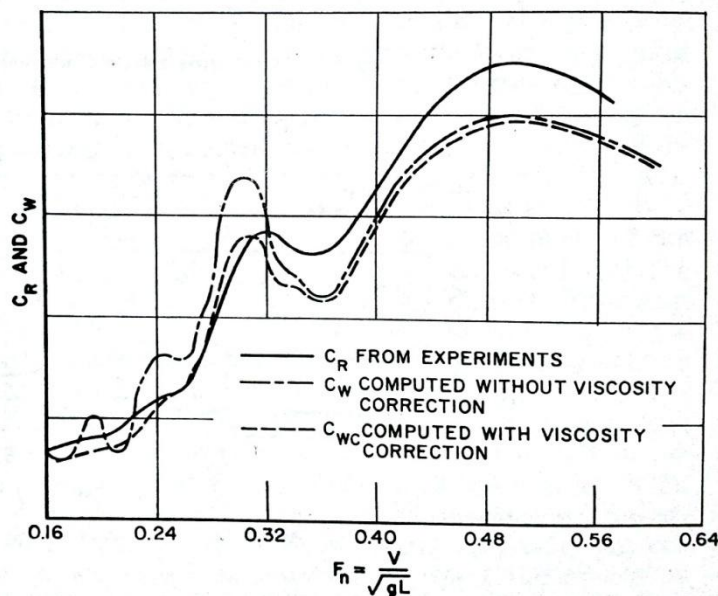
Η αντίσταση τριβής και η αντίσταση ανέμου περιγράφηκαν στα κεφάλαια 2.1.2 και 2.1.6 αντίστοιχα. Η υπόλοιπη αντίσταση περιλαμβάνει την αντίσταση κυματισμού (R_W) και την αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας (R_{PV}).

Το πλήρες φαινόμενο της αντίστασης και ο προσδιορισμός της, όπως και κάθε πρόβλημα ρευστομηχανικής, θα μπορούσε να επιτευχθεί με την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes οι οποίες περιγράφουν τη ροή πραγματικού ρευστού. Η επίλυση όμως των εξισώσεων αυτών είναι ιδιαίτερα δύσκολη, χρονοβόρα, πραγματοποιείται μόνο με αριθμητικές μεθόδους και σε κάποιες περιπτώσεις είναι αδύνατη ακόμα και αριθμητικά. Οι πιο δημοφιλείς αριθμητικές μέθοδοι που ακολουθούνται για την επίλυση των πεδιακών εξισώσεων είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (Finite Element Methods – FEM), των πεπερασμένων διαφορών (Finite Difference Method – FDM) και των όγκων ελέγχου (Finite Volume Method – FVM), η εφαρμογή των οποίων απαιτεί την χρησιμοποίηση αριθμητικών πλεγμάτων. Εάν το ρευστό θεωρηθεί ατριβές (μη συνεκτικό), και αστρόβιλο, οι εξισώσεις Navier-Stokes εκφυλλίζονται στις εξισώσεις Euler και Bernoulli. Οι εξισώσεις Euler και Bernoulli είναι

ισοδύναμες και για αυτό το λόγο παρουσιάζεται μόνο η εξίσωση Bernoulli μη μόνιμης ροής. Τελικά η θεώρηση τυρβώδους ροής απορρίπτεται, γιατί θα έκανε αδύνατη την εξέταση ενός μεγάλου αριθμού γεωμετριών.

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

Αμελώντας λοιπόν φαινόμενα συνεκτικότητας μπορούμε να μελετήσουμε ένα φαινόμενο με χρήση της θεωρίας δυναμικού που είναι αρκετά απλούστερη. Σύμφωνα με το Σχήμα 6¹⁰ η απλοποίηση αυτή δεν φαίνεται να έχει μεγάλη επίδραση στα αποτελέσματα (ασθενή επίδραση των φαινομένων συνεκτικότητας στον υπολογισμό της υπόλοιπης αντίστασης), ειδικά στους μικρούς αριθμούς Froude όπου ενδιαφερόμαστε για αυτήν την εργασία.



Σχήμα 6. Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων για τον αδιάστατο συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης (C_R) με αριθμητικούς υπολογισμούς του αδιάστατου συντελεστή αντίστασης κυματισμού (C_W)

Στην συγκεκριμένη μελέτη επιδιώκεται η βελτιστοποίηση της μορφής της γάστρας του υπό μελέτη πλοίου προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί μόνο η συνιστώσα της υπόλοιπης αντίστασης μέσω ελαχιστοποίησης της αντίστασης κυματισμού η οποία αποτελεί το κύριο τμήμα της πρώτης. Όλοι οι

¹⁰ Πολίτη Γ.Κ., (2011) «Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου», Αθήνα

υπολογισμοί γίνονται με γνώμονα την αντίσταση γυμνής γάστρας ή αλλιώς αντίσταση ρυμούλκησης. Είναι σημαντικό να τονιστεί πως στην αντίσταση αυτή δεν περιλαμβάνεται η αντίσταση παρελκόμενων και η αντίσταση λόγω της παρουσίας του προωστήριου συστήματος και της αλληλεπίδρασης του με τη γάστρα, καθώς σε αυτή την περίπτωση θα αναφερόμασταν στην αντίσταση αυτοπροωθούμενου σκάφους.

2.2 Εκτίμηση της Αντίστασης Πλοίου με την Τρισδιάστατη Θεωρία Δυναμικού

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2.1, το ιδανικό για την εκτίμηση της αντίστασης του πλοίου θα ήταν η χρήση της συνεκτικής θεωρίας και των εξισώσεων Navier-Stokes. Λόγω του εκτενούς αριθμού εναλλακτικών γεωμετριών που θα εξεταστούν, η μόνη ρεαλιστική προσέγγιση του προβλήματος σε εύλογο χρόνο και με δεδομένη την διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ είναι η χρήση κωδίκων που χρησιμοποιούν τη θεωρία δυναμικού, η οποία παραλείπει τα φαινόμενα συνεκτικότητας και επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για τον υπολογισμό φαινομένων που δεν εξαρτώνται από αυτά

Εν προκειμένω, το λογισμικό με το οποίο θα γίνει ο υπολογισμός των χαρακτηριστικών της πλεύσης σε ήρεμο νερό είναι το SWAN 2 που αναπτύχθηκε από την ερευνητική ομάδα του καθηγητή Π. Σκλαβούνου στο Τεχνολογικό Ινστιτούτο της Μασαχουσέτης και χρησιμοποιεί τη μέθοδο διανομής πηγών Rankine σε παραλληλόγραμμα στοιχεία (Rankine Panel Method - RPM) στο στερεό σύνορο και την ελεύθερη επιφάνεια. Στην συνέχεια θα γίνει μια συνοπτική παρουσίαση της θεωρίας¹¹.

Το SWAN 2 βασίζεται στην χρήση του θεωρήματος Green για την απόδοση του δυναμικού ταχύτητας που είναι αντίστοιχο με τη διανομή πηγών και δίπολων πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια και το στερεό σύνορο. Οι εξισώσεις κίνησης της ροής του ρευστού διατυπώνονται με βάση ένα καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων $x=(x,y,z)$, το οποίο κινείται με ταχύτητα $U(t)$, που ισούται με την ταχύτητα του πλοίου. Η αρχή του συστήματος συντεταγμένων τοποθετείται πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια. Θεωρώντας μη συνεκτική τη ροή, η ταχύτητα διαταραχής του ρευστού $v(x,t)$ ορίζεται ως η κλίση του δυναμικού ταχύτητας $\phi(x,t)$, ή αλλιώς $v=\nabla\phi(x,t)$. Η διατήρηση της συνέχειας εκφράζεται με ικανοποίηση της εξίσωσης Laplace για το δυναμικό ταχύτητας σε όλο το πεδίο κι επομένως $\nabla^2\phi=0$. Η θέση σε κάθε σημείο της ελεύθερης επιφάνειας εκφράζεται μέσω της ανύψωσης $\zeta(x,y,t)$, που μαζί με το δυναμικό ταχύτητας αποτελούν τις δύο άγνωστες ποσότητες προς εύρεση και οι οποίες σχετίζονται με τη δυναμική και την κινηματική συνθήκη.

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

¹¹ Ohkusu, M., Advances in Marine Hydrodynamics, 1996, Chapter 4: Free-surface potential flow past ships in calm water and in waves by Rankine Panel Method

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

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

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

Πάνω στην επιφάνεια της γάστρας, η κάθετη σε αυτή συνιστώσα της ταχύτητας του νερού πρέπει να είναι ίση με την κάθετη συνιστώσα της ταχύτητας του στερεού συνόρου:

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

όπου \vec{n} είναι το κάθετο μοναδιαίο διάνυσμα πάνω στην επιφάνεια του πλοίου και \vec{v} είναι η ταχύτητα διαταραχής του πλοίου λόγω της παρουσίας κυματισμών. Καθώς στο πρόβλημα μας δεν έχουμε επιφανειακούς κυματισμούς, για $t \rightarrow \infty$ η ταχύτητα τείνει σε μία σταθερή τιμή, ενώ το δυναμικό της ταχύτητας και η ανύψωση της ελεύθερης επιφάνειας καθίστανται μεγέθη ανεξάρτητα του χρόνου. Η επίλυση των παραπάνω εξισώσεων παρουσιάζει δυσκολίες και κατ' επέκταση κρίνεται σκόπιμη η γραμμικοποίηση τους που βασίζεται σε δύο παραδοχές. Η πρώτη είναι ότι οι περιβάλλοντες κυματισμοί είναι σχετικά μικρού μεγέθους και η δεύτερη ότι η γάστρα είναι σχετικά λεπτόγραμμη.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Το δυναμικό διαταραχής φ_1 περιλαμβάνει το δυναμικό προσπίπτοντος κυματισμού καθώς και τα δυναμικά κυματισμού περίθλασης κι ακτινοβολίας. Το δυναμικό περίθλασης του περιβάλλοντος κυματισμού ικανοποιείται μέσω της απαίτησης η κάθετη ταχύτητα να είναι ίση και αντίθετη με αυτή που αντιστοιχεί στο δυναμικό περίθλασης πάνω στο στερεό σύνορο, κάτι που φαίνεται στην επόμενη σχέση:

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

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

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

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

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

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

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

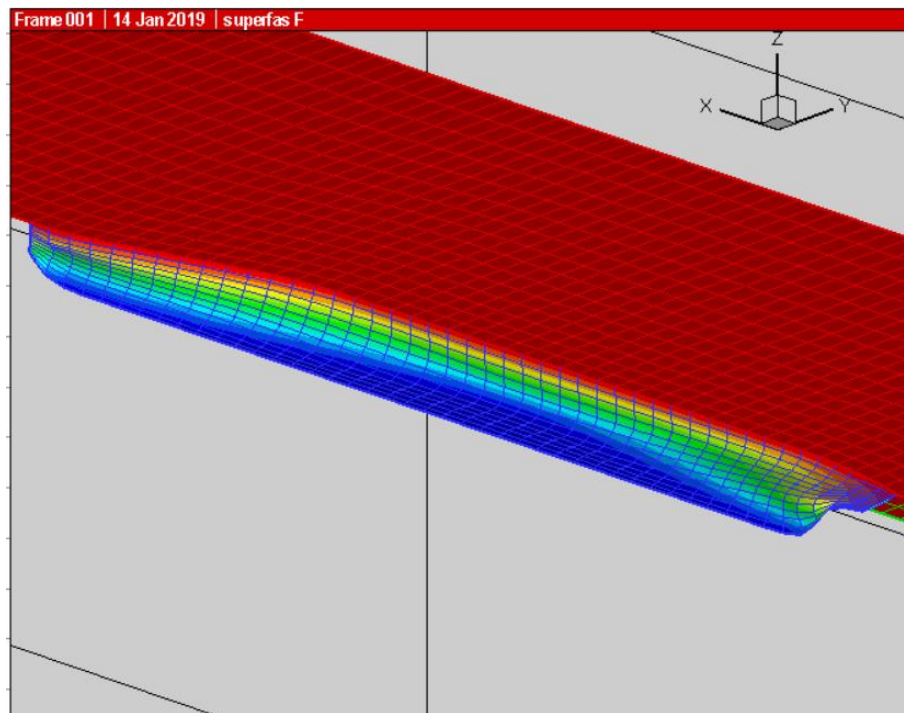
$$G(\vec{x}; \vec{\xi}) = \frac{1}{2\pi|\vec{x} - \vec{\xi}|}$$

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

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

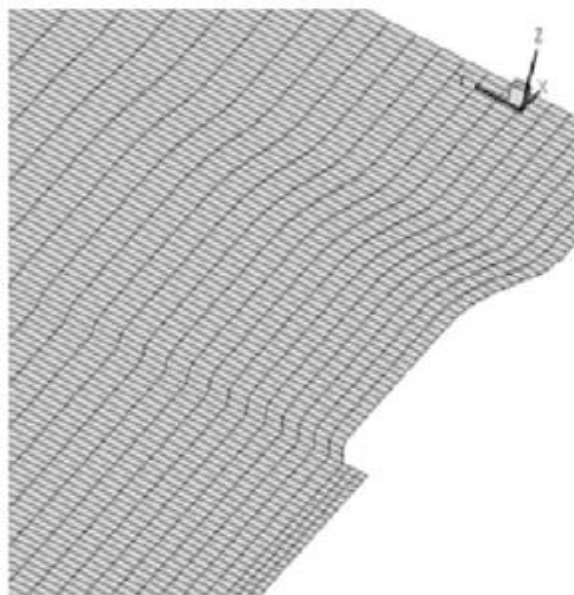
Για τον υπολογισμό του πεδίου των παραγόμενων κυματισμών και την εκτίμηση της αντίστασης κυματισμού το SWAN 2 απαιτεί συγκεκριμένα δεδομένα που αφορούν τη γεωμετρία και κάποια υδροστατικά της χαρακτηριστικά. Τα δεδομένα εισόδου, η λειτουργία και οι περιορισμοί του προγράμματος περιγράφονται λεπτομερώς στο εγχειρίδιο χρήσης¹².

Συνοπτικά για την εκτέλεση του προγράμματος απαιτείται αρχικά η περιγραφή της γεωμετρίας από νομείς των οποίων ο μέγιστος κι ελάχιστος αριθμός εξαρτώνται από την ταχύτητα προσομοίωσης. Βάσει αυτών καθώς και στοιχείων που αφορούν την έκταση της ελεύθερης επιφάνειας κατασκευάζεται επιφανειακό δισδιάστατο πλέγμα που, όπως περιγράφηκε νωρίτερα, καλύπτει την ελεύθερη επιφάνεια και το στερεό σύνορο. Ο χρήστης του προγράμματος έχει την δυνατότητα να ορίσει την πυκνότητα του πλέγματος καθώς επίσης και την έκτασή του, όσον αφορά το πλέγμα της ελεύθερης επιφάνειας. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας η έκταση του πλέγματος της ελεύθερης επιφάνειας ορίστηκε σαν ποσοστό του μήκους μεταξύ καθέτων του πλοίου (με τιμές 0.5, 1.5 και 0.5 για την πρωραία, πρυμναία και εγκάρσια έκτασή του από το στερεό σύνορο αντίστοιχα). Ένα τυπικό δείγμα του δημιουργούμενου υπολογιστικού πλέγματος φαίνεται στα Σχήματα 7 και 8.



Σχήμα 7. Αναπαράσταση στερεού συνόρου στο SWAN 2

¹² SWAN 2 (2002), User Manual : «Ship Flow Simulation in Calm Water and in Waves», Boston Marine Consulting Inc., Boston MA 02116, USA



Σχήμα 8. Υπολογιστικό πλέγμα ελεύθερης επιφάνειας στο SWAN 2

Στα σχήμα 7 φαίνεται το πλέγμα στο στερεό σύνορο όπως διαμορφώνεται με βάση τους νομείς που δίνονται. Δεδομένου ότι το υδροδυναμικό πρόβλημα αφορά τα ύφαλα, η γεωμετρία άνωθεν της ισάλου παραλείπεται καθώς δεν έχει καμία συμμετοχή στην επίλυση. Τα χρώματα που φαίνονται αφορούν την καθ' ύψος θέση προκειμένου να είναι ευκολότερη η χωρική αντίληψη της γεωμετρίας. Το στερεό σύνορο είναι και το μοναδικό που εκτείνεται στο χώρο, όντας δισδιάστατο επιφανειακό, κείμενο πάνω στη γάστρα.

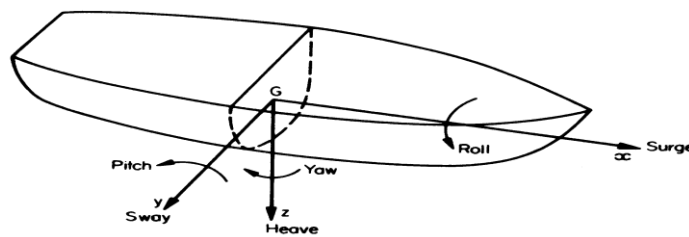
Στο σχήμα 8 φαίνονται τα υπολογιστικά πλέγματα της ελεύθερης επιφάνειας στην περιβάλλουσα περιοχή καθώς και στην περιοχή του ομόρου του πλοίου. Αυτό που επίσης φαίνεται είναι πως το πλέγμα είναι ορθογώνιο και ακολουθεί τη μορφή της γεωμετρίας κατά τον άξονα y , ενώ σε μεγαλύτερη απόσταση από τη γάστρα έχουμε σταδιακή εξομάλυνση αυτής της επιρροής.

2.3 Η Απόκριση του Πλοίου στους Θαλάσσιους Κυματισμούς

Ο όρος αξιοπλοΐα περικλείει όλες τις πτυχές της σχεδίασης ενός πλοίου που επηρεάζουν την ικανότητά του να παραμένει ευσταθές σε όλες τις συνθήκες και να φέρει εις πέρας την αποστολή του. Για το λόγο αυτό θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν όχι μόνο η δύναμη, η ευστάθεια και η αντοχή, αλλά και εκείνοι οι παράγοντες που επηρεάζονται άμεσα από τους κυματισμούς. Η αξιοπλοΐα ή όπως είναι γνωστή ως seakeeping, αναλύει τέτοιες παραμέτρους όπως οι κινήσεις του πλοίου, η ταχύτητά του, η δυναμική των κυματισμών και η σφυρόκρουση.

2.3.1 Οι Κινήσεις του Πλοίου

Όπως είναι γνωστό ένα επιπλέον σώμα έχει 6 βαθμούς ελευθερίας. Για να γίνει αναλυτική περιγραφή της κίνησης του πλοίου είναι απαραίτητο να οριστούν κινήσεις και ως προς τις 6 κατευθύνσεις των βαθμών ελευθερίας. Αυτές οι κινήσεις ορίζονται ως μετατοπίσεις του κέντρου βάρους το πλοίου και περιστροφές γύρω από άξονες που περνούν από το κέντρο βάρους.



Translation or rotation	Axis	Description	Positive sense
Translation	Along x	Surge	Forwards
	Along y	Sway	To starboard
	Along z	Heave	Downwards
Rotation	About x	Roll	Starboard side down
	About y	Pitch	Bow up
	About z	Yaw	Bow to starboard

Σχήμα 9. Οι κινήσεις του πλοίου¹³

Συνοπτικά οι κινήσεις του πλοίου χωρίζονται ως εξής:

- Μεταφορικές:
 - Διαμήκης οριζόντια ταλάντωση (Surge)
 - Εγκάρσια οριζόντια ταλάντωση (Sway)
 - Κατακόρυφη ταλάντωση (Heave)

- Περιστροφικές
 - Ταλάντωση περί το διαμήκη άξονα / Διατοιχισμός (Roll)
 - Ταλάντωση περί τον εγκάρσιο άξονα / Προνευτασμός (Pitch)
 - Ταλάντωση περί τον κατακόρυφο άξονα (Yaw)

¹³ Πολίτη Γ.Κ., (2011) «Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου», Αθήνα

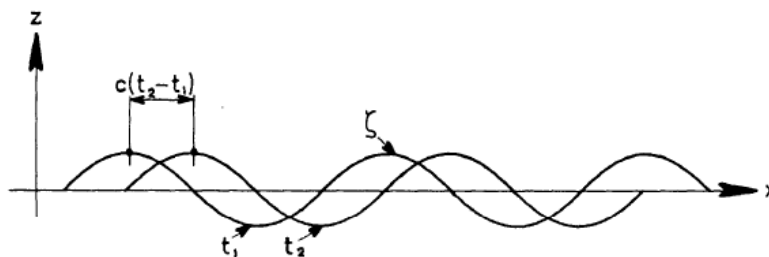
Κατά την κίνηση ενός σκάφους σε heave, pitch ή roll, μεταβάλλεται ο όγκος και η μορφή των υφάλων, με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται υδροστατικές δυνάμεις και ροπές που τείνουν να επαναφέρουν το πλοίο στην θέση ισορροπίας. Αντίθετα, κατά την κίνηση surge, sway ή yaw μεταβάλλεται η θέση ή κατεύθυνση του πλοίου, ενώ η μορφή των υφάλων παραμένει ανεπηρέαστη, με συνέπεια στις κινήσεις αυτές να μην εμφανίζονται υδροστατικοί όροι επαναφοράς. Οι κινήσεις όπου αναπτύσσονται υδροστατικοί όροι επαναφοράς, χαρακτηρίζονται από την εμφάνιση φαινομένων συντονισμού όταν η συχνότητα διέγερσης πλησιάζει τις ιδιοσυχνότητες του πλοίου. Οι κινήσεις που κατά κύριο λόγο εξετάζονται κατά την πλεύση σε μετωπικούς κυματισμούς είναι οι heave και pitch. Αυτό επιλέγεται γιατί οι υψηλές τιμές αυτών των κινήσεων επιδρούν σημαντικά στις κατακόρυφες επιταχύνσεις κατά μήκος του πλοίου και προκαλούν προβλήματα όπως μετακινήσεις φορτίου, ανάδυση έλικας, κακή πηδαλιουχία, έλλειψη ευστάθειας, διαβροχή καταστρώματος κ.α, επηρεάζοντας έτσι την άνεση του πληρώματος και των επιβατών.

2.3.2 Συμπεριφορά του Πλοίου σε Κυματισμούς

Η μελέτη της υδροδυναμικής συμπεριφοράς ενός πλοίου σε κυματισμούς συνίσταται στην εκτίμηση της απόκρισης του κατά την αλληλεπίδραση του με αυτούς. Η αλληλεπίδραση αυτή προκύπτει κατά κύριο λόγο από φαινόμενα που σχετίζονται με την κατανομή των πιέσεων πάνω στη γάστρα και λιγότερο με τη συνεκτικότητα, κι επομένως μπορεί να μελετηθεί με χρήση της δυναμικής θεωρίας με ικανοποιητική ακρίβεια. Η ακρίβεια σε αυτή την περίπτωση είναι ικανοποιητική για όλες τις κινήσεις του σκάφους εκτός από την κίνηση roll κατά την οποία δυνάμεις συνεκτικότητας έχουν σημαντική επίδραση

Οι θαλάσσιοι κυματισμοί είναι τυχαίοι. Παρ' όλα αυτά, μπορούν να αναπαρασταθούν ως υπέρθεση πολλών απλών αρμονικών κυματισμών, ο καθένας με το δικό του πλάτος, συχνότητα και διεύθυνση διάδοσης. Αυτού του είδους η ανάλυση είναι αρκετά χρήσιμη, καθώς μπορούμε να προβλέψουμε τυχαίες συμπεριφορές μέσω της πολύ απλούστερης θεωρίας των απλών αρμονικών κυματισμών

Ένας απλός αρμονικός κυματισμός είναι συνάρτηση τόσο του χρόνου όσο και του χώρου. Η περίπτωση του προφίλ ενός τέτοιου κυματισμού φαίνεται στο Σχήμα 10¹⁴:



Σχήμα 10. Απλός Αρμονικός Κυματισμός

¹⁴ K.J Rawson & E.C Tupper, (2001), «Basic Ship Theory», Butterworth Heinemann, London

Η ανύψωση της επιφάνειας της θάλασσας μπορεί να εκφραστεί μέσω μιας συνάρτησης δυναμικού, που στη γενική περίπτωση δίνεται από την επόμενη σχέση:

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

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

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

Για βαθύ νερό η συνάρτηση δυναμικού λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

$$\Phi_w(x,z,t)=\frac{\zeta_0 g}{\omega} e^{kz} \sin(kx-\omega t)$$

Το δυναμικό αυτό αφορά τον αδιατάρακτο κυματισμό και ως εκ τούτου δεν σχετίζεται με την παρουσία πλωτού σώματος.

Στα πλαίσια του γραμμικού προβλήματος, το συνολικό δυναμικό της ροής Φ στο σωματόδετο σύστημα συντεταγμένων που κινείται με μέση ταχύτητα U του πλοίου διαχωρίζεται σε δύο μέρη: ένα χρονικά ανεξάρτητο Φ_s , το οποίο σχετίζεται με τη ροή εξ' αιτίας της μέσης κίνησης του πλοίου και ένα αρμονικά εξαρτώμενο Φ_T από το χρόνο, εξ' αιτίας των ταλαντώσεων του πλοίου από τη δράση του προσπίπτοντος κυματισμού, ως ακολούθως¹⁵:

$$\Phi(x,y,z;t)=(-Ux+\Phi_s(x,y,z,))+\text{Re}(\Phi_T(x,y,z)e^{j\omega t})$$

Το χρονικά εξαρτώμενο δυναμικό Φ_s αναλύεται στα επί μέρους:

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

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

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

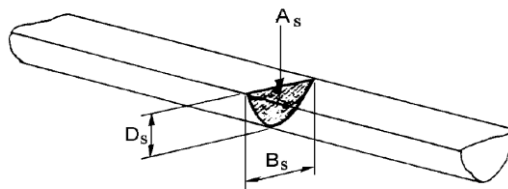
$$\Phi(x,y,z;t) = \Phi_w + \Phi_r + \Phi_d$$

¹⁵ Αθανασούλης Γ.Α., Μπελιμπασάκης Κ.Α., (2012), «Δυναμική Πλοίου», κεφάλαιο 3, Αθήνα

Με συναρτήσεις δυναμικού μπορούν να παρασταθούν πολλά πεδιακά μεγέθη που χρησιμοποιούνται στη μελέτη της συμπεριφοράς ενός σκάφους σε κυματισμούς όπως η ταχύτητα των εγκάρσιων τομών του στερεού συνόρου. Αυτή η περίπτωση εντάσσεται στα πλαίσια της θεωρίας λωρίδων στην οποία βασίζεται η θεωρία του Frank¹⁶ για την επίλυση του δισδιάστατου προβλήματος, η οποία θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

2.3.3 Η Θεωρία του Frank

Σύμφωνα με τη θεωρία των λωρίδων, το τρισδιάστατο πρόβλημα του προσδιορισμού των αποκρίσεων του σκάφους επιλύεται με κατά μήκος ολοκλήρωση των αποκρίσεων στις εγκάρσιες τομές του. Κατ' αυτή την έννοια το τρισδιάστατο πρόβλημα ανάγεται σε επιμέρους απλούστερα δισδιάστατα. Για την επίλυση των δισδιάστατων προβλημάτων χρησιμοποιείται η θεωρία του Frank¹⁷.



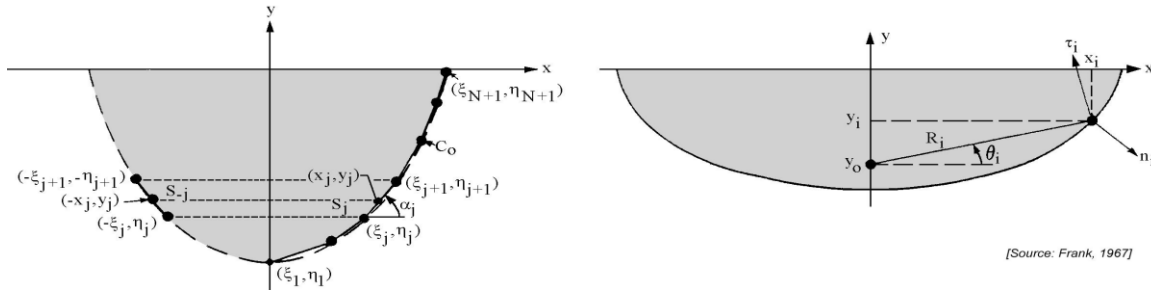
Σχήμα 11. Σχηματική Απεικόνιση Θεωρίας Λωρίδων¹⁸

Οι μέθοδοι απεικόνισης απαιτούν κάθε εγκάρσια τομή να τέμνει την ίσαλο. Σαν αποτέλεσμα βυθισμένες τομές, όπως αυτές των βολβοειδών πλωρών δεν μπορούν να αναπαρασταθούν. Στη θεωρία του Frank οι εγκάρσιες τομές του σκάφους μετασχηματίζονται σε μη κυκλικής διατομής κυλίνδρους με χρήση σύμμορφου μετασχηματισμού. Το σύστημα συντεταγμένων κείται στα εγκάρσια επίπεδα με τον άξονα x εφαπτόμενο στην ίσαλο και τον y κάθετο σε αυτή και με τα θετικά προς τα πάνω. Το σύνορο της επιφάνειας του νομέα βρίσκεται στο ημι-επίπεδο των αρνητικών τεταγμένων και ο άξονας y αποτελεί άξονα συμμετρίας του, όπως φαίνεται στο Σχήμα 12:

¹⁶ TU Delft, (2001), «Offshore Hydromechanics»

¹⁷ Frank, W. (1967), Oscillation of Cylinders in or Below the Free Surface of Deep Fluids, NSRDC, Rep. No. 2375, Washington, D.C.

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



Σχήμα 12. Σύστημα αναφοράς κατά Frank¹⁹

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

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

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

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

1. Εξίσωση της συνέχειας ή εξίσωση Laplace:

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

2. Συνοριακή συνθήκη μη εισχώρησης:

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

3. Συνοριακή συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας:

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

¹⁹ TU Delft, (2002), «Introduction in Ship Hydromechanics»

²⁰ SPP-86 (1994), User's Manual, Report No: NAL-114-F-94, Lab. Ships and Marine Hydrodynamics, National Technical Univ. of Athens

4. Κινηματική οριακή συνθήκη στο στερεό σύνορο του σώματος:

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

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

6. Συμμετρική και αντισυμμετρική συνθήκη:

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

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

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

Μια συνάρτηση δυναμικού που πληροί και τις 6 προαναφερθείσες συνθήκες βασίζεται στη κατανομή παλλόμενων σημειακών πηγών στο σύνορο του νομέα. Βασιζόμενος σε προγενέστερες εργασίες των Wehausen και Laitone, ο Frank εισήγαγε μια έκφραση του μιγαδικού δυναμικού σε μια θέση z , λόγω σημειακής πηγής σε μια θέση ζ , στο κάτω μισό του επιπέδου x - y που φαίνεται στη συνέχεια:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

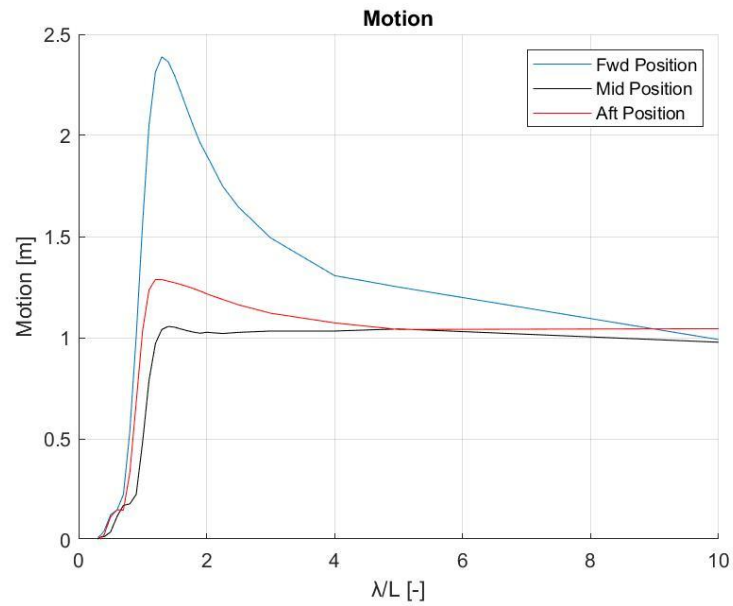
Από την πίεση μπορούν να βρεθούν οι υδροδυναμικοί αδρανειακοί συντελεστές και συντελεστές απόσβεσης που δίνονται από τις επόμενες σχέσεις:

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

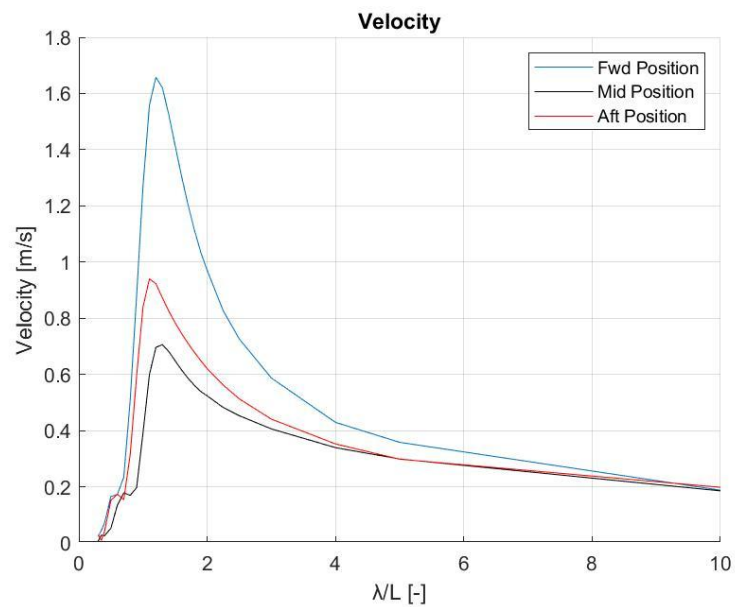
$$N^{(m)}(\omega) = 2 \sum_{j=1}^N P_u^{(m)}(x_j, y_j, \omega) n_j^{(m)} |s_j|$$

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

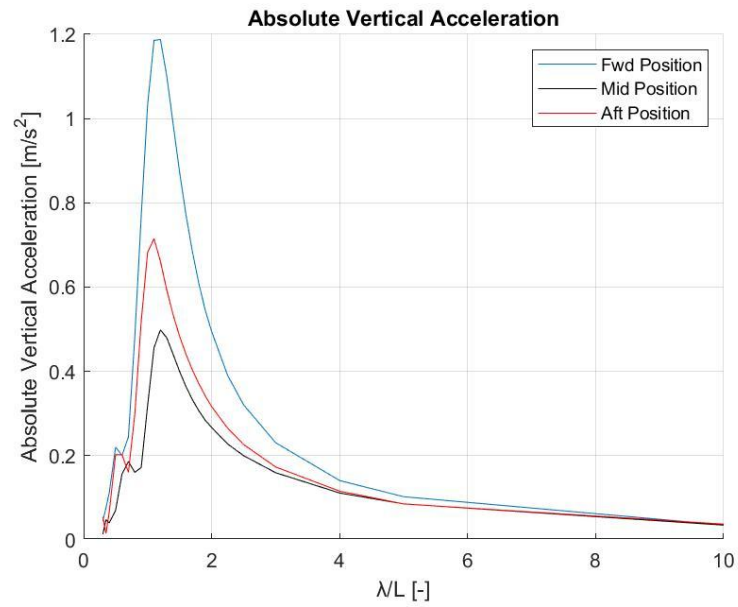
Στα πλαίσια τις θεωρίας που περιγράφηκε ανωτέρω το λογισμικό SPP-86 υπολογίζει τις μετατοπίσεις, ταχύτητες κι επιταχύνσεις του πλοίου σε επιλεγμένες θέσεις. Η προσομοίωση της πλεύσης μπορεί να γίνει για ένα πλήθος κυματισμών διαφόρων συχνοτήτων και γωνιών συνάντησης με το πλοίο. Στα Σχήματα 13, 14 και 15 φαίνονται οι καμπύλες RAO της κίνησης, ταχύτητας κι επιτάχυνσης στο πρυμναίο, μέσο και πρωραίο τμήμα του υπό μελέτη πλοίου κατά την αλληλεπίδραση του με μετωπικούς κυματισμούς διαφόρων συχνοτήτων κατά την πλεύση με ταχύτητα 23.5 kn στην κατάσταση Full Load Departure.



Σχήμα 13. Καμπύλες RAO της κάθετης κίνησης στο πρυμναίο, μέσο και πωραίο τμήμα του πλοίου κατά την αλληλεπίδραση με μετωπικούς κυματισμούς, κατάσταση φόρτωσης FLD, $V=23.5$ kn



Σχήμα 14. Καμπύλες RAO της κάθετης ταχύτητας κίνησης στο πρυμναίο, μέσο και πωραίο τμήμα του πλοίου κατά την αλληλεπίδραση με μετωπικούς κυματισμούς, κατάσταση φόρτωσης FLD, $V=23.5$ kn



Σχήμα 15. Καμπύλες RAO της κάθετης επιτάχυνσης κίνησης στο πρυμναίο, μέσο και πωραίο τμήμα του πλοίου κατά την αλληλεπίδραση με μετωπικούς κυματισμούς, κατάσταση φόρτωσης FLD, $V=23.5$ kn

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

3.1 Γενικά Στοιχεία Αλγορίθμων

Τα πολυκριτηριακά προβλήματα βελτιστοποίησης αποτελούν ένα ιδιαίτερο δύσκολο πρόβλημα, καθώς τα διάφορα κριτήρια συνήθως είναι αντικρουόμενα μεταξύ τους, εμποδίζοντας έτσι την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση όλων των κριτηρίων. Τα περισσότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει ένας μηχανικός αποτελούν τέτοιου είδους προβλήματα - π.χ. μεγιστοποίηση της απόδοσης και ελαχιστοποίηση του κόστους.

Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι προσέγγισης των πολυκριτηριακών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Η πρώτη βασίζεται στον συνδυασμό των επί μέρους αντικειμενικών συναρτήσεων σε μία σύνθετη συνάρτηση - ή διαφορετικά η μετατροπή όλων εκτός από μια αντικειμενική συνάρτηση σε περιορισμούς. Πέρα από τις δυσκολίες εφαρμογής αυτής της μεθόδου²¹, το αποτέλεσμα της θα ήταν μία μοναδική λύση και όχι ένα σύνολο βέλτιστων λύσεων, από τις οποίες ο σχεδιαστής θα μπορεί να επιλέξει. Η δεύτερη γενική προσέγγιση έγκειται στον καθορισμό ενός συνόλου βέλτιστων λύσεων. Το σύνολο των σχεδιάσεων αυτών ανήκουν σε μια συνοριακή καμπύλη που περιβάλλει το χώρο διασποράς των λύσεων (Pareto Front). Το σύνολο των λύσεων που βρίσκονται σε αυτήν την συνοριακή καμπύλη δεν επικαλύπτονται, με την έννοια ότι για να μετακινηθούμε από μία βέλτιστη λύση σε κάποια άλλη θυσιάζεται κάποιο από τα κριτήρια για να βελτιωθεί η κατάσταση κάποιου άλλου. Το σύνολο λύσεων Pareto συνήθως προτιμάται από αποτελέσματα μοναδικών λύσεων, καθώς είναι πιο πρακτικό σε πραγματικά προβλήματα, όπου η τελική επιλογή του σχεδιαστή είναι μια προσπάθεια συγκερασμού των αντικρουόμενων απαιτήσεων.

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία (NSGA II), ανήκει στην κατηγορία των εξελικτικών στρατηγικών (Evolutionary Strategies) που αποτελούν ένα ευρύ σύνολο μεθόδων βελτιστοποίησης σε προβλήματα διαφόρων επιστημονικών πεδίων. Οι γενετικοί αλγόριθμοι, που είναι υποκατηγορία των εξελικτικών αλγορίθμων, μιμούνται τη φυσική εξελικτική διαδικασία εκμεταλλευόμενοι τεχνικές όπως αυτή της κληρονομικότητας (inheritance), της μετάλλαξης (mutation), της επιλογής (selection) και της διασταύρωσης (crossover). Συγκεκριμένα χρησιμοποιούνται κάποιες αρχικές σχεδιάσεις (γονείς) από τις οποίες παράγονται νέες (απόγονοι) με χρήση των παραπάνω τεχνικών. Το σημαντικότερο όμως χαρακτηριστικό αυτής της διαδικασίας είναι πως οι γονείς που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των απογόνων αποτελούν επιλεγμένες σχεδιάσεις με επιθυμητά στοιχεία. Αν μια πατρική σχεδίαση είναι καλύτερη από μια άλλη, έχει περισσότερες πιθανότητες να επιλεγεί για την παραγωγή νέων σχεδιάσεων. Αυτό το πλεονέκτημα των γενετικών αλγορίθμων καθιστά δυνατή την εύρεση συνεχώς καλύτερων γεωμετριών μέχρι να τερματιστεί η διαδικασία και να καταλήξουμε στις βέλτιστες λύσεις.

²¹ Abdullah Konak et al., (2006), Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. Reliability Engineering and System Safety 91.

Στην προκειμένη περίπτωση έχουμε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης και για την επίλυση του θα παραχθεί ένα σύνολο εναλλακτικών επιλογών μέσω εφαρμογής μιας διαδικασίας πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης από την οποία θα προκύψει ένα πλήθος βέλτιστων λύσεων. Οι βέλτιστες λύσεις χαρακτηρίζονται από ισοδυναμία ποιότητας, η οποία προκύπτει από την αδυναμία σύγκρισης διαφορετικών κριτηρίων βελτιστοποίησης μεταξύ τους.

Το πρώτο κριτήριο βελτιστοποίησης θα αφορά την αντίσταση κυματισμού σε ήρεμο νερό και το δεύτερο την κατακόρυφη επιτάχυνση της πλώρης κατά την αλληλεπίδραση του σκάφους με κύματα συχνοτήτων που προκαλούν την μέγιστη απόκριση. Η έννοια των «ισοδύναμα βέλτιστων» λύσεων προκύπτει από την αδυναμία σύγκρισης διαφορετικών κριτηρίων βελτιστοποίησης. Αυτά τα κριτήρια αν και εκφράζονται με αλγεβρικές τιμές δεν μπορούν να αξιολογηθούν μεταξύ τους σε μια κοινή στρατηγική, κυρίως επειδή αναφέρονται σε διαφορετικές επιδόσεις των οποίων η σχετική σημαντικότητα δεν υπόκειται σε κάποιον γενικό κανόνα. Κατά συνέπεια τα παραγόμενα αποτελέσματα θα εξεταστούν με γνώμονα τις επιδόσεις ως προς κάθε ένα κριτήριο ώστε να προκύψει η τελικά επιλεγείσα γεωμετρία. Κατά τη διαδικασία αξιολόγησης των τιμών των κριτηρίων προφανώς θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και η αντίστοιχη απόδοση της αρχικής γεωμετρίας.

3.2 Ο Αλγόριθμος NSGA II

Για την εύρεση των βέλτιστων λύσεων θα χρησιμοποιηθεί ο αλγόριθμος NSGA-II²² (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II) που αποτελεί βελτιωμένη έκδοση του ομώνυμου προγενέστερου του, ο οποίος αναπτύχθηκε από τον καθηγητή Kalyanmoy Deb.

Στη φύση τα χαρακτηριστικά των ειδών προκύπτουν από διασταύρωση των χαρακτηριστικών των γονέων τους και μετάλλαξης αυτών που τελικά θα αποκτήσουν. Τα χαρακτηριστικά αυτά αποτελούν το σύνολο των ιδιοτήτων κάθε μέλους και καθορίζουν τις πιθανότητες επιβίωσης του. Η διαρκής κι επαναλαμβανόμενη παραγωγή απογόνων από τα μέλη που τελικά επιβίωσαν οδηγεί στη σταδιακή εξάλειψη μελών με χαρακτηριστικά που δεν τους επιτρέπουν να επιβιώσουν. Η διασταύρωση των χαρακτηριστικών των γονέων κατά την αναπαραγωγή καθιστά τους απόγονους τους διαφορετικούς από κάθε έναν γονέα. Αν τα χαρακτηριστικά που θα αποκτήσει ο απόγονος από κάθε γονέα είναι καλύτερα από του άλλου, θα αποτελεί μέλος με περισσότερες πιθανότητες επιβίωσης και από τους δύο γονείς του. Η μετάλλαξη των χαρακτηριστικών ενός απογόνου μπορεί με τη σειρά της, να βελτιώσει περαιτέρω τα χαρακτηριστικά που έχει λάβει από τους δύο γονείς. Αν και στη φυσική εξελικτική διαδικασία η παραγωγή συνεχώς καλύτερων απογόνων δεν είναι εφικτή, στη δομή του αλγορίθμου είναι απαιτούμενο.

Ο αλγόριθμος NSGA-II χρησιμοποιεί αυτήν ακριβώς τη λογική προκειμένου να βρεθούν μέλη που έχουν καλύτερα χαρακτηριστικά από άλλα. Συγκεκριμένα οι δύο βασικές ομοιότητες του με την φυσική

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

εξέλιξη είναι η χρήση των διαδικασιών διασταύρωσης και μετάλλαξης και η επιβίωση των ισχυρότερων μελών ενός είδους. Η τυχαιότητα που διέπει τη διασταύρωση και μετάλλαξη στη φύση διασφαλίζεται μέσω του προσδιορισμού αντίστοιχων πιθανοτήτων να συμβούν. Η επιβίωση του ισχυρότερου αντιστοιχεί στη διαδικασία κατάταξης των λύσεων. Τα χαρακτηριστικά των μελών μιας γενιάς είναι το σύνολο των μεταβλητών σχεδίασης ενώ η επιβιωσιμότητα αφορά την απόδοση με βάση τις αντικειμενικές συναρτήσεις που έχουν επιλεγεί.

Η λειτουργία του αλγορίθμου αυτού συνοψίζεται στα επόμενα βήματα :

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

Οι κατατάξεις των σχεδιάσεων ανάλογα με την υπεροχή τους ως προς άλλες και την απόσταση από γειτονικές τους αφορά το επίπεδο με άξονες τις τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων. Αν συμβολίσουμε με x_i τις μεταβλητές απόφασης αριθμού n και με $f_j(x_i)$ τις αντικειμενικές συναρτήσεις αριθμού m , το πρόβλημα ελαχιστοποίησης που καλούμαστε να επιλύσουμε είναι το εξής:

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

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

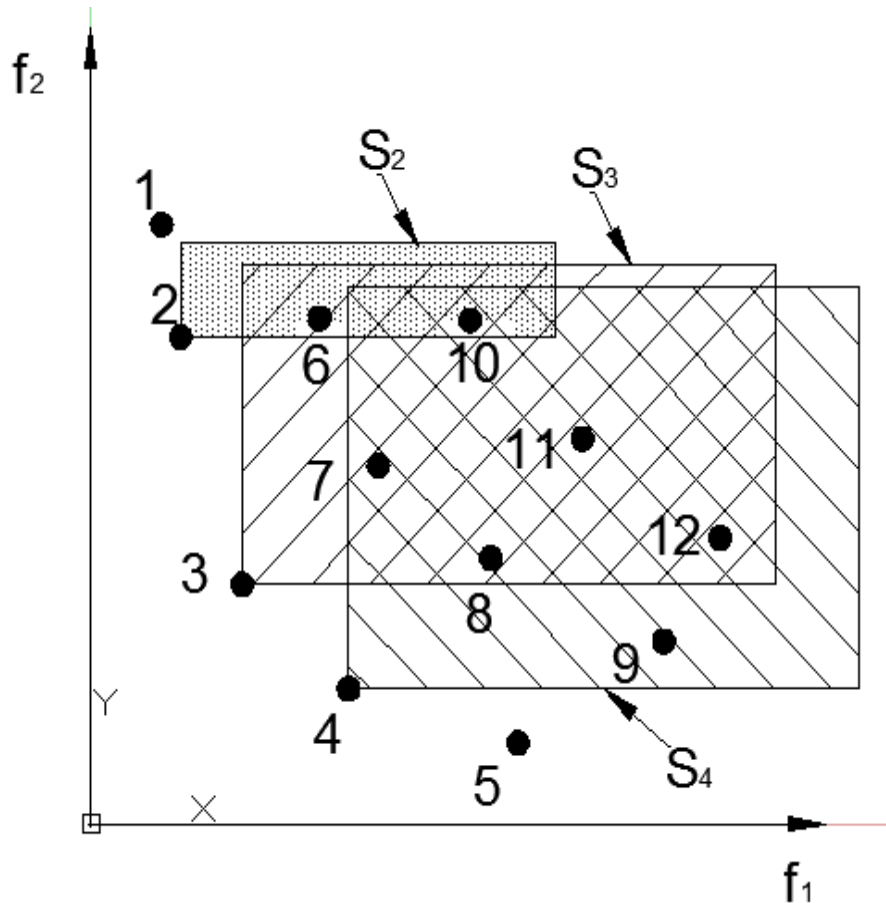
- $f_j(\mathbf{X}_1) \leq f_j(\mathbf{X}_2)$, $\forall j \in \{1, \dots, m\}$
- $\exists f_k(\mathbf{X}_1) < f_k(\mathbf{X}_2)$, $k \in \{1, \dots, m\}$

Απαιτείται δηλαδή να υπάρχει τουλάχιστον μια αντικειμενική συνάρτηση με μικρότερη τιμή και όσον αφορά τις υπόλοιπες αντικειμενικές συναρτήσεις οι δύο σχεδιάσεις να είναι τουλάχιστον ισοδύναμες. Η διαδικασία κατάταξης των σχεδιάσεων σε επίπεδα (\mathcal{F}_i) γίνεται με διαδοχικούς ελέγχους των παραχθειςών γεωμετριών ξεκινώντας από αυτές των οποίων δεν υπερέχει καμία άλλη και οι οποίες αποτελούν το πρώτο επίπεδο. Στη συνέχεια γίνεται έλεγχος του αριθμού των σχεδιάσεων που υπερέχουν κάθε εξεταζόμενης και αν αυτές είναι λιγότερες από δύο, η εξεταζόμενη αποτελεί μέλος του

επόμενου επιπέδου. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να εξεταστούν όλες οι γεωμετρίες που έχουν παραχθεί στην παρούσα επανάληψη. Η διαδικασία κατάταξης φαίνεται σε μορφή ψευδοκώδικα στη συνέχεια:

$$\begin{aligned}
 & \forall p \in P \\
 & \mathcal{S}_p = \emptyset \\
 & n_p = 0 \\
 & \forall q \in P \\
 & \text{If } (p < q) \text{ then} \\
 & \quad \mathcal{S}_p = \mathcal{S}_p \cup \{p\} \\
 & \text{Else if } (q < p) \text{ then} \\
 & \quad n_p = n_p + 1 \\
 & \quad \text{If } n_p = 0 \text{ then} \\
 & \quad \quad p_{rank} = 1 \\
 & \mathcal{F}_1 = \mathcal{F}_1 \cup \{p\} \\
 & \quad i = 1 \\
 & \text{While } \mathcal{F}_i \neq \emptyset \\
 & \quad Q \neq \emptyset \\
 & \quad \forall p \in \mathcal{F}_i \\
 & \quad \forall q \in \mathcal{S}_p \\
 & \quad \quad n_q = n_q - 1 \\
 & \quad \text{If } n_q = 0 \text{ then} \\
 & \quad \quad q_{rank} = i + 1 \\
 & \quad \quad Q = Q \cup \{q\} \\
 & \quad \quad i = i + 1 \\
 & \quad \mathcal{F}_i = Q
 \end{aligned}$$

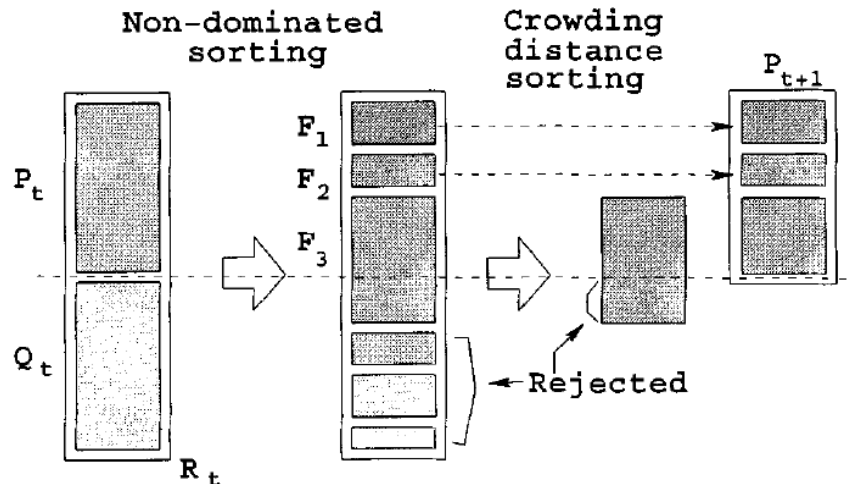
Στην παραπάνω αλληλουχία ενεργειών τα μεγέθη p και q αντιστοιχούν σε μέλη των παραγόμενων πληθυσμών κάθε επανάληψης, \mathcal{S}_p είναι το σύνολο των λύσεων από τις οποίες υπερέχει η λύση p και n_p είναι ο αριθμός των λύσεων που υπερέχουν της λύσης p . Το μέγεθος \mathcal{F}_i είναι το σύνολο των λύσεων που ανήκουν στο επίπεδο i , ενώ με p_{rank} συμβολίζεται ο βαθμός της λύσης p , που αντιστοιχεί στο επίπεδο στο οποίο ανήκει. Η χρησιμότητα του βαθμού της κάθε λύσης έγκειται στην κατάταξη που θα γίνει στην συνέχεια. Το μέγεθος Q αποτελεί το σύνολο των λύσεων στο οποίο προσωρινά αποθηκεύονται τα μέλη κάθε επιπέδου \mathcal{F}_i , $i \geq 2$. Για την αποσαφήνιση της διαδικασίας κατάταξης σε επίπεδα παραθέεται το Σχήμα 16 στο οποίο φαίνονται διάφορες λύσεις και η συσχέτισή τους με τις υπόλοιπες. Επειδή το σχήμα κείται σε επίπεδο, αναφερόμαστε στην περίπτωση με δύο αντικειμενικές συναρτήσεις.



Σχήμα 16. Παραγόμενες λύσεις στο επίπεδο των αντικειμενικών συναρτήσεων

Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία κατάταξης σε επίπεδα γίνεται εκ νέου κατάταξη των λύσεων κάθε επιπέδου με φθίνουσα σειρά της απόστασης τους από τις υπόλοιπες. Σκοπός της δεύτερης αυτής κατάταξης είναι η επιδίωξη μεγάλου εύρους λύσεων στο επίπεδο των αντικειμενικών συναρτήσεων. Η διαδικασία της ταξινόμησης αυτής επαναλαμβάνεται ισάριθμες με το πλήθος των αντικειμενικών συναρτήσεων φορές. Για κάθε επανάληψη υπολογίζεται η απόσταση κάθε λύσης από τις γειτονικές της, αφού ταξινομηθούν όλες σύμφωνα με την τιμή κάθε αντικειμενικής συνάρτησης. Η συνολική τιμή της απόστασης κάθε λύσης είναι το άθροισμα που προκύπτει από τις τιμές κάθε βήματος που αφορά μια αντικειμενική συνάρτηση. Οι αποστάσεις αυτές προστίθενται σε αδιάστατη μορφή ώστε να υπάρχει ισοκατανομή της συμμετοχής κάθε μιας στο συνολικό άθροισμα. Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι πως για το τελευταίο επίπεδο τη κατάταξης γίνεται επιλογή τέτοιου αριθμού λύσεων ώστε το σύνολο της κάθε γενιάς να είναι ακριβώς ίσο με έναν αριθμό που αποτελεί και τον αριθμό των λύσεων της πρώτης γενιάς. Οι υπόλοιπες λύσεις απορρίπτονται καθώς είναι υποδεέστερες αυτών που διατηρήθηκαν. Αξίζει επίσης να σημειωθεί πως η διασφάλιση της διατήρησης σε κάθε βήμα των

καλύτερων σχεδιάσεων από το σύνολο ενός πληθυσμού γονέων και απογόνων είναι ακόμα μία εξέλιξη του αλγορίθμου NSGA. Η συνολική διαδικασία ενός επαναληπτικού βήματος φαίνεται στο Σχήμα 17²³:



Σχήμα 17. Η λειτουργία του αλγορίθμου NSGA II

Για τη διαδικασία βελτιστοποίησης της υδροδυναμικής συμπεριφοράς του πλοίου που εξετάζεται με χρήση του αλγορίθμου NSGA-II, απαιτούνται δεδομένα που καθορίζουν την αποδοτικότητα αλλά και την έκταση διερεύνησης του προβλήματος. Αρχικά πρέπει να προσδιοριστούν ο αριθμός των γενεών και το πλήθος των μελών τους. Αυτά τα δύο δεδομένα επηρεάζουν την έκταση των εξεταζόμενων περιπτώσεων αλλά και την αποτελεσματικότητα της εξελικτικής διαδικασίας. Η αποτελεσματικότητα αυτή εξαρτάται τόσο από το εύρος των γενεών προκειμένου να υπάρχει πληθώρα διαφορετικών μελών όσο και από τον αριθμό γενεών ώστε η εξέλιξη να έχει ένα εκτενές διάστημα διαμόρφωσης των πληθυσμών. Τα δύο τελευταία δεδομένα που πρέπει να οριστούν είναι οι πιθανότητες διασταύρωσης και μετάλλαξης που επηρεάζουν τη διαδικασία αναπαραγωγής και διαμόρφωσης των χαρακτηριστικών των απογόνων.

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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο. ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΛΟΙΟΥ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ

4.1 Εισαγωγικά Στοιχεία

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή της διαδικασίας σχεδίασης και παραμετρικής μοντελοποίησης της γάστρας του επιλεγέντος πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, τα κύρια χαρακτηριστικά του οποίου φαίνονται στον Πίνακα 1:

Πίνακας 1. Στοιχεία πλοίου

YM SEATTLE 4250 TEU Container Vessel	
Length O.A.	260.049 m
Length B. P.	244.8 m
Breadth	32.25 m
Depth	19.3 m
Draft design (moulded)	11.0 m

4.2 Στάδιο 1^ο: Συλλογή Δεδομένων

Βασικό στάδιο αυτής της εργασίας είναι η δημιουργία της γάστρας του πλοίου. Καθ' ότι δεν υπήρχε έτοιμο αρχείο με τις επιφάνειες της γάστρας, καθώς επίσης και Lines Plan από το οποίο θα μπορούσε να κατασκευαστεί το παραμετρικό μοντέλο, θα έπρεπε να αναζητηθούν τα κατάλληλα σχέδια από τα οποία θα μπορούσαμε να αντλήσουμε όλες τις απαραίτητες πληροφορίες με την μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια.

Για την περάτωση του σταδίου χρησιμοποιήθηκαν:

- Το σχέδιο του General Arrangement (GA) που εισήχθη στο πρόγραμμα AutoCAD 2015 υπό κλίμακα και χρησιμοποιήθηκε για τις καμπύλες του profile και του Flat of side (FOS).
- Αρχείο excel που περιλάμβανε μετρήσεις επί των κατασκευαστικών νομέων (frames) του πλοίου υπό κατάλληλη κλίμακα και χρησιμοποιήθηκε για τους νομείς και την καμπύλη Flat of bottom (FOB).

Το σύνολο των σχεδίων και μετρήσεων μπορούσαν να δώσουν σχεδόν πλήρη περιγραφή της γεωμετρίας. Το μόνο κομμάτι που δεν υπήρχε ήταν το κομμάτι της χοάνης στην πρύμνη. Το συγκεκριμένο κομμάτι καταρχάς ήταν μικρό σε μήκος και κατά δεύτερον δεν θα επηρέαζε ιδιαίτερα τους υπολογισμούς της δυναμικής θεωρίας. Επομένως μια προσέγγιση των νομέων σε εκείνο το σημείο από τις εξαγόμενες ισάλους θα ήταν ικανοποιητική.

Τα δεδομένα για τις καταστάσεις πλεύσης, οι οποίες θα μοντελοποιηθούν αντλήθηκαν από το trim & stability booklet. Στον Πίνακα 2 φαίνονται τα υδροστατικά χαρακτηριστικά του πλοίου για τις δύο καταστάσεις πλεύσης που θα μας απασχολήσουν (Full Load Departure & Half Load Departure) σε βυθίσματα 12.626 m και 11.025 m. Τα στοιχεία αντλήθηκαν από τον υδροστατικό πίνακα, όπου τα βυθίσματα μεταβάλλονται κατά 10 cm. Η γεωμετρία της γάστρας θα παραχθεί χωρίς να ληφθούν υπ όψιν τα ελάσματα, επομένως μας ενδιαφέρουν τα βυθίσματα moulded. Για το βύθισμα 11.025 m τα κοντινότερα βυθίσματα ήταν τα 11.0 m και 11.1 m, ενώ για το βύθισμα 12.626 m ήταν τα βυθίσματα 12.6 m και 12.7 m, στα οποία έγινε γραμμική παρεμβολή.

Πίνακας 2. Υδροστατικά στοιχεία πατρικού πλοίου

Hydrostatic particulars		
Draft moulded (m) :	11.025	12.626
Moulded volume (m ³) :	54718	65392
Displ. In S.W. (ton) :	56291	67253
L.C.F from AP (m) :	107.284	104.294
L.C.B from AP (m) :	116.841	114.949
V.C.B above B.L (m) :	6.081	7.014
T.P.C (ton/1cm) :	66.0	70.4
M.T.C (ton-m/1cm) :	953.2	1139.2
K.M.T (m) :	15.036	15.194
W.P.A (m ²) :	6425	6857
Wetted surface (m ²) :	10127	11209
Block coeff. (Cb) :	0.6301	0.6573
Prism. coeff. (Cp) :	0.6455	0.6713
W.P.A coeff. (Cw) :	0.8138	0.8685
Midsh. coeff. (Cm) :	0.9763	0.9793

Οι αντίστοιχες καταστάσεις φόρτωσης που επιλεχτήκαν είναι οι εξής:

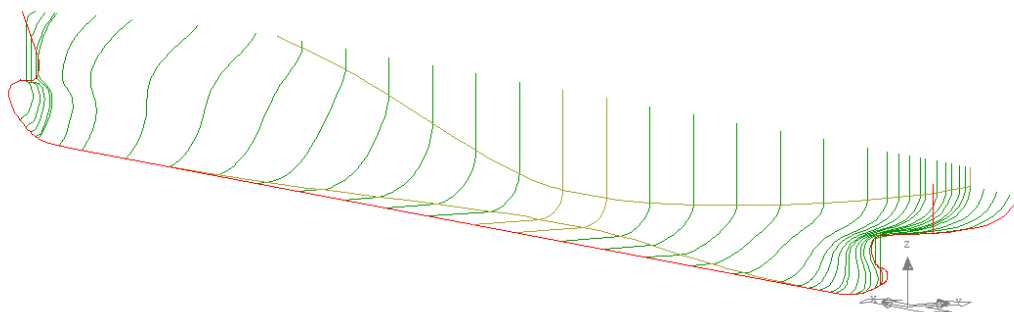
Πίνακας 3. Καταστάσεις φόρτωσης

Loading Conditions	Displ. (T)	DEQ (m)	DA (m)	DF (m)	TRIM (- : by stern)	KG (m)	L.C.G (m)
COND. No.12 - HOMO.16 T/TEU DEP.COND.at Td. (2,047 TEU)	56291	11.025	11.173	10.798	-0.376	13.117	116.185
COND. No.22 – DEP.COND. 4,253 TEU (HOLD:15T, DECK:AVG.5.44T)	67253	12.626	12.665	12.573	-0.092	14.082	114.795

Επομένως η επιτυχία της σχεδίασης των επομένων σταδίων θα αξιολογηθεί με βάση τα παραπάνω στοιχεία. Εφόσον η απόκλιση από τα βασικά μεγέθη θα είναι μικρή οι σχεδιάσεις θα θεωρηθούν αποδεκτές.

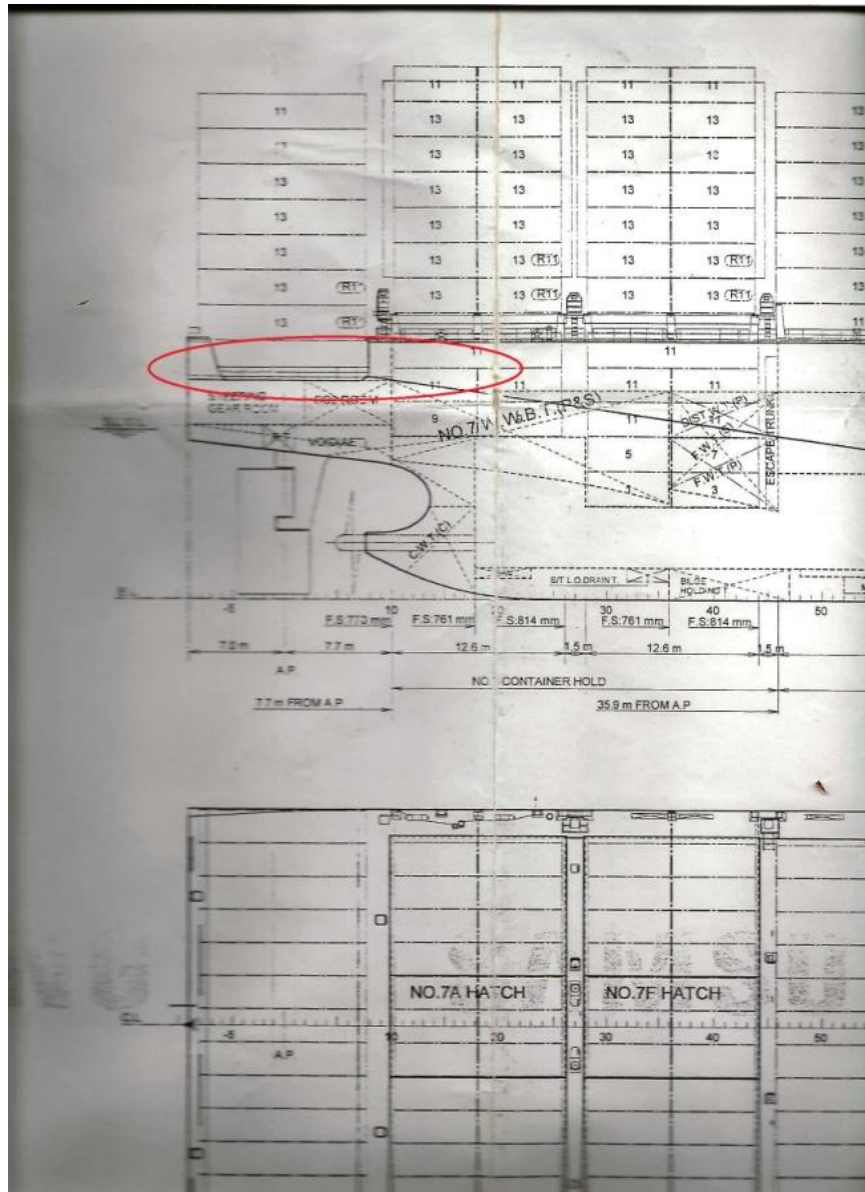
4.3 Στάδιο 2^ο: Δημιουργία Αρχικής Γάστρας

Σε αυτό το στάδιο ζητούμενο είναι η δημιουργία των γραμμών του πλοίου με τέτοιο τρόπο ώστε να προσεγγίζουν όσο δυνατόν καλύτερα τα υδροστατικά χαρακτηριστικά του. Όπως έχει αναφερθεί, το Lines Plan του πλοίου δεν ήταν δυνατό να βρεθεί, γεγονός που δυσχεραίνει την δημιουργία των γραμμών. Με δεδομένο λοιπόν μία σειρά μετρήσεων επί των σχεδίων έγινε η προσπάθεια προσέγγισης της γεωμετρίας της γάστρας. Για αυτό το στάδιο χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Avena Tribon και συγκεκριμένα το πρόγραμμα Lines. Τα δεδομένα εισήχθησαν σε μορφή αρχείου britfair. Η αρχική αναπαράσταση της γεωμετρίας παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.

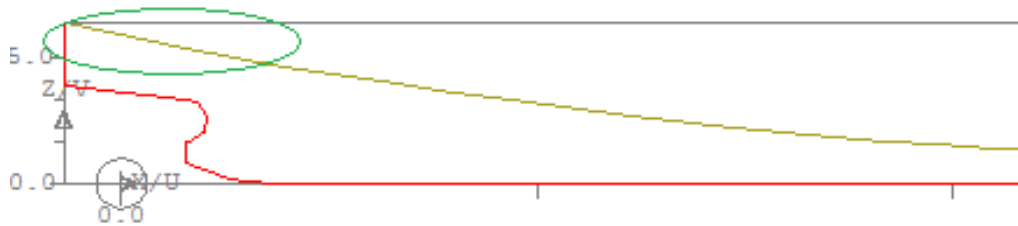


Σχήμα 18. Αναπαράσταση αρχικής γεωμετρίας στο πρόγραμμα Lines

Για την καμπύλη του Flat of Side (FOS), κατά το στάδιο της αρχικής σχεδίασης έγινε η παραδοχή της γραμμικής προέκτασής της μέχρι το σημείο τομής της καμπύλης transom με την ίσαλο στο deck – όπως φαίνεται στα Σχήματα 19 και 20 - ώστε να διευκολυνθεί η αναπαράστασή της με μια ενιαία καμπύλη F-Spline κατά το στάδιο της παραμετρικής σχεδίασης, όπως θα αναφερθεί στο κεφάλαιο 4.4, και με δεδομένο πως το συγκεκριμένο τμήμα της γεωμετρίας δεν επηρεάζει τα υπό μελέτη υδροδυναμικά μεγέθη.

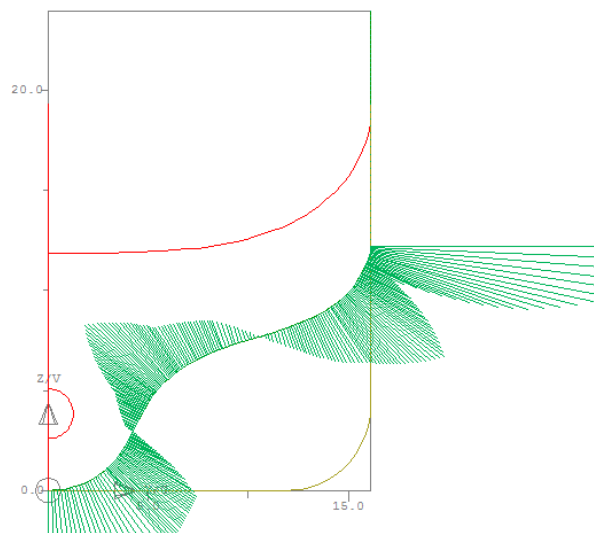


Σχήμα 19. Καμπύλη Flat of Side (FOS) πατρικού πλοίου

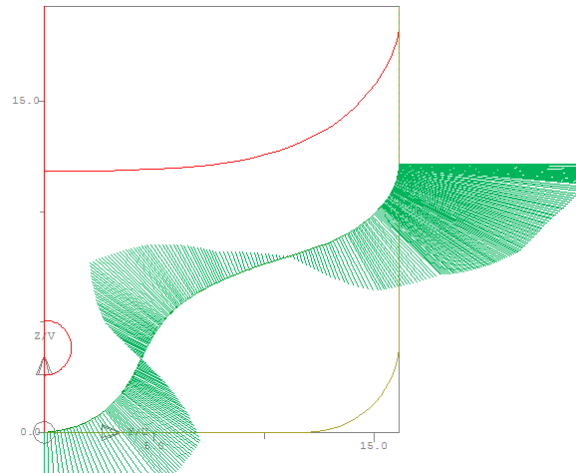


Σχήμα 20. Γραμμική προέκταση καμπύλης Flat of Side (FOS) στο πρόγραμμα Lines

Κατόπιν ξεκίνησε η διαδικασία της εξομάλυνσης. Αφού έγινε η εξομάλυνση των βασικών καμπυλών profile, FOS, FOB και transom, ακολούθησε η διαδικασία εξομάλυνσης σε κάθε νομέα. Αξίζει να σημειωθεί πως οι αρχικές μετρήσεις επί των σχεδίων που αντλήθηκαν από το αρχείο excel είχαν αρκετά μεγάλη ακρίβεια, καθώς όπως φαίνεται και στα Σχήματα 21 και 22 οι καμπύλες, πριν την εξομάλυνση, ήταν ήδη αρκετά ομαλές.

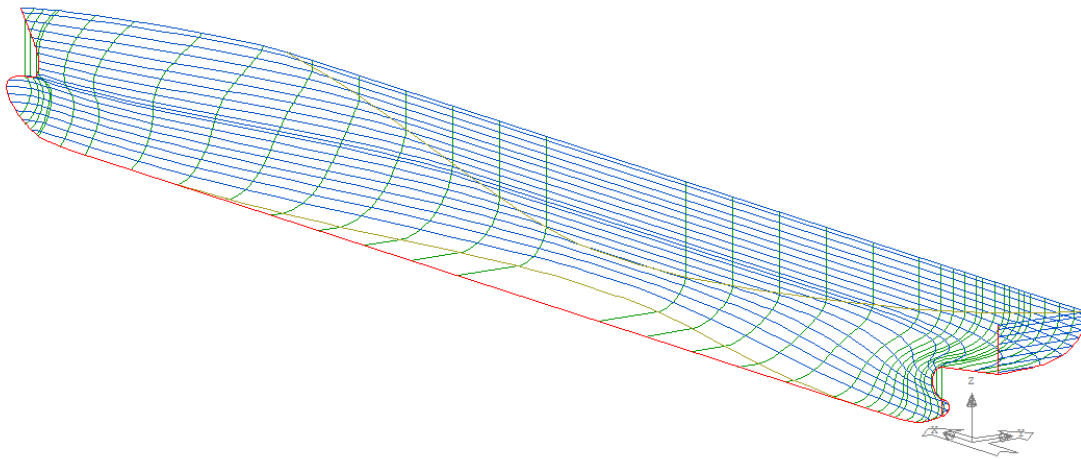


Σχήμα 21. Διαδικασία εξομάλυνσης νομέα - αρχική γεωμετρία



Σχήμα 22. Διαδικασία εξομάλυνσης νομέα - τελική γεωμετρία

Ύστερα δημιουργήθηκαν οι ίσαλοι (waterlines) παρεμβάλλοντας σημεία από τους νομείς, ώστε να εξομαλυνθούν και αυτές. Η εξομάλυνση πραγματοποιήθηκε επαναληπτικά μεταξύ νομέων και ισάλων μέχρι να μην παρατηρείται ουσιαστική μεταβολή στην καμπυλότητα.



Σχήμα 23. Τελική Μορφή Γάστρας

Εφόσον η διαδικασία της δημιουργίας της αρχικής γεωμετρίας έγινε μέσω μετρήσεων από σχέδια και κατόπιν ακολούθησε εξομάλυνση των καμπύλων, κάτι που μπορεί να μετέβαλε τις αρχικές καμπύλες, ο μόνος τρόπος αξιολόγησης του αποτελέσματος είναι μέσω των υδροστατικών υπολογισμών του προγράμματος Avena Lines. Στον Πίνακα 4 φαίνονται οι τιμές για τα μεγέθη που

υπολογίζει το πρόγραμμα. Αν και σε αυτές μπορεί να υπεισέρχεται ένα σφάλμα στον υπολογισμό, όπως και σε κάθε πρόγραμμα, είναι μια καλή ένδειξη για το τελικό αποτέλεσμα.

Πίνακας 4. Υδροστατικά στοιχεία παραχθείσας γεωμετρίας

Aveva Lines Hull		
Draft (m) :	11.025	12.626
Total volume (m ³) :	54599	65249
L.C.B from AP (m) :	117.032	115.132
V.C.B above B.L (m) :	6.108	7.042
K.M.T (m) :	15.046	15.207
W.S.A (m ²) :	9941	11050
Block coeff. (Cb) :	0.6273	0.6546
Prism. coeff. (Cp) :	0.6417	0.6677
Midsh. coeff. (Cm) :	0.9775	0.9804

Ακολουθεί ο συγκεντρωτικός Πίνακας 5 που αποτυπώνει τις διαφορές των διαφόρων υδροστατικών τιμών μεταξύ των παραχθείσων και των πραγματικών:

Πίνακας 5. Αποκλίσεις υδροστατικών μεγεθών παραχθείσας γεωμετρίας από πατρικό πλοίο

Draft (m):	11.025		12.626	
	Απόλυτο σφάλμα	% ποσοστό	Απόλυτο σφάλμα	% ποσοστό
Total volume (m ³) :	119.3	0,2	142.7	0.2
L.C.B from AP (m) :	0.191	0.16	0.183	0.16
V.C.B above B.L (m) :	0.027	0.44	0.028	0.39
K.M.T (m) :	0.01	0.07	0.013	0.08
W.S.A (m ²) :	186.4	1.8	158.7	1.4
Block coeff. (Cb) :	0.0028	0.44	0.0027	0.42
Midsh. coeff. (Cm) :	0.0013	0.13	0.0011	0.12
Prism. coeff. (Cp) :	0.0038	0.58	0.0036	0.54

Από τον παραπάνω πίνακα αξίζει να σημειωθούν τα παρακάτω:

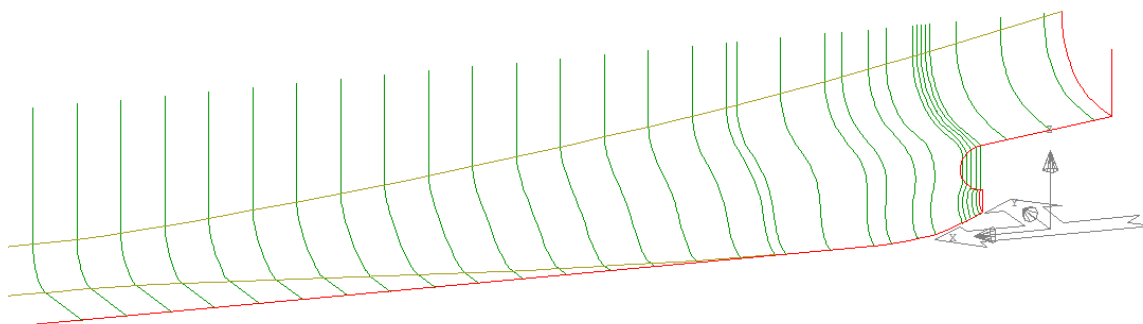
- Η μέγιστη διαφορά στον όγκο στην μερικώς φορτωμένη κατάσταση με βύθισμα 11.025 m είναι 119.3 tons ενώ στην κατάσταση πλήρους φόρτωσης με βύθισμα 12.626 m είναι 142.7 tons. Παρατηρούμε λοιπόν ότι το σφάλμα στον όγκο κατά την σχεδίαση της πατρικής

γάστρας μέσω του προγράμματος Avena Lines μεταφέρεται αυτούσιο στα δύο βυθίσματα και ισοδυναμεί με 0.2 %.

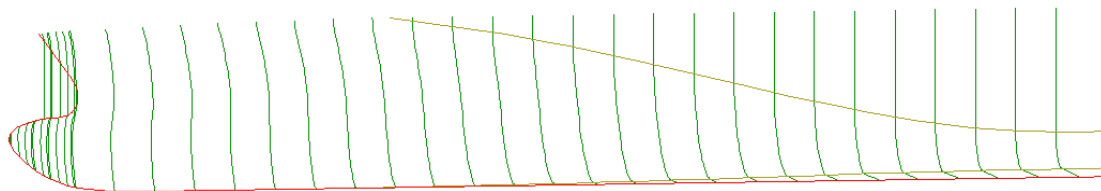
- Υπάρχει καλή προσέγγιση του συντελεστή C_m (σφάλμα 0.12-0.13 % για τις δύο υπό μελέτη καταστάσεις) καθώς επηρεάζεται μόνο από την γεωμετρία της μέσης τομής που ήταν εύκολο να παραχθεί.
- Η μικρή διαφορά στα μεγέθη V.C.B και L.CB δείχνει την καλή προσέγγιση στην κατακόρυφη και διαμήκη κατανομή του όγκου.
- Οι μεγαλύτερες διαφορές παρατηρούνται στα μεγέθη C_b και W.S.A αλλά και αυτές κινούνται σε χαμηλά επίπεδα.

Συνολικά μπορούμε να αποφανθούμε πως η πρώτη προσέγγιση της γεωμετρίας κρίνεται ικανοποιητική, καθώς έχουμε μια αρκετά πιστή αναπαράσταση της πραγματικής γεωμετρίας.

Έχοντας έτοιμη πλέον τη γάστρα μπορούμε να ετοιμάσουμε τα απαραίτητα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν ως είσοδος για το επόμενο στάδιο. Δημιουργήθηκαν νομείς σε επιλεγμένες θέσεις κατά το διάμηκες, έτσι ώστε να περιγράφονται όσο το δυνατόν καλύτερα οι τοπικές λεπτομέρειες (π.χ. νομείς στην αρχή και το τέλος των γραμμών FOS & FOB, νομείς στα σημεία τομής των ισάλων με τις γραμμές FOS & FOB). Επίσης αυξήθηκε σημαντικά ο αριθμός των νομέων και δημιουργήθηκαν νομείς με σταθερή απόσταση μεταξύ τους κατά 5 m (στοιχείο που θα διευκολύνει την δημιουργία των επιφανειών στο πρόγραμμα CAESES). Τέλος έγινε ιδιαίτερη πύκνωση νομέων στο βολβό, στοιχείο με ιδιαίτερη σημασία για το τελικό αποτέλεσμα καθώς και στην περιοχή της χοάνης για καλύτερη περιγραφή της περιοχής που θα διευκολύνει την εξαγωγή κατάλληλων επιφανειών στο πρόγραμμα CAESES χωρίς τοπικές ασυνέχειες. Στα Σχήματα 24 και 25 φαίνεται η τελική μορφή της γάστρας που θα χρησιμεύσει ως δεδομένο εισόδου για το πρόγραμμα CAESES για τη δημιουργία της παραμετρικής γάστρας.



Σχήμα 24. Τελικό αρχείο γραμμών - πρυμναίο τμήμα



Σχήμα 25. Τελικό αρχείο γραμμών - πρωραίο τμήμα

4.4 Στάδιο 3^ο: Παραμετρική Μοντελοποίηση Γάστρας

4.4.1 Γενικά Στοιχεία της Παραμετρικής Σχεδίασης

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

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

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

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

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, επιδίωξη αποτελεί η βελτιστοποίηση μιας υπάρχουσας μορφής και επομένως η ακρίβεια προσέγγισης αποτελεί σημαντικό παράγοντα. Η παραμετρική σχεδίαση θα πραγματοποιηθεί με χρήση σχεδιαστικών εργαλείων του CAESSES – Friendship Framework σε συνδυασμό με πολυωνυμικές καμπύλες. Οι καμπύλες αυτές αποτελούν ισχυρά σχεδιαστικά εργαλεία που σήμερα χρησιμοποιούνται εκτενέστατα στη σχεδίαση πολύπλοκων γεωμετρικών μορφών. Οι ιδιότητές τους περιγράφονται στην ενότητα 4.4.2 που ακολουθεί καθώς αποτελούν το θεωρητικό υπόβαθρο της βελτιστοποίησης αναπαράστασης πολύπλοκων καμπυλών που πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον του CAESSES - Friendship Framework.

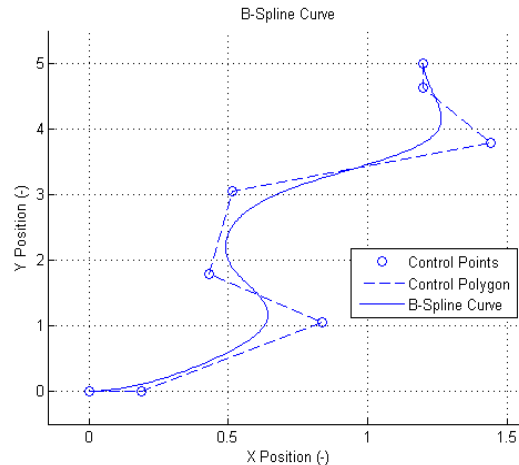
4.4.2 Ιδιότητες Καμπυλών B-Splines και Απαιτήσεις Συνέχειας

Για την κατασκευή των καμπυλών B-Splines απαιτείται να προσδιοριστούν τα επόμενα στοιχεία :

- $P_0, P_1, P_2, \dots, P_n$, $n+1$ σημεία ελέγχου
- $p=k-1$ ο βαθμός της καμπύλης όπου k η τάξη της και $k \leq n+1$

Η μορφή της καμπύλης επηρεάζεται άμεσα από τις θέσεις των σημείων ελέγχου. Το σύνολο των ευθυγράμμων τμημάτων που ενώνει τα σημεία ελέγχου διαδοχικά αποτελεί το πολύγωνο ελέγχου. Ο βαθμός της καμπύλης είναι μια ιδιαιτέρως σημαντική παράμετρος που καθορίζει την ευελιξία της, τη μορφή της, τον αριθμό των σημείων που επηρεάζουν ένα συγκεκριμένο τμήμα της καθώς και τον ελάχιστο αριθμό σημείων που τελικά απαιτούνται για την κατασκευή της.

Στο Σχήμα 26 φαίνεται η αναπαράσταση μιας καμπύλης B-Spline όπως αυτή προκύπτει από τα σημεία ελέγχου που παρουσιάζονται στο ίδιο σχήμα:



Σχήμα 26. Αναπαράσταση Καμπύλης B-Spline

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

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

- $-P_0 + P_1 = [u_{(p+1)}/\rho] * D_0$
- $-P_{(n+1)} + P_{(n+2)} = [(1-u_{(m-p-1)})/\rho] * D_n$

Τα σημεία ελέγχου στις παραπάνω εξισώσεις είναι διανύσματα με στοιχεία τις συντεταγμένες τους κάτι που ισχύει και για τα διανύσματα πρώτης παραγώγου D_0 και D_n . Οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να αποτελέσουν απαιτήσεις για μια καμπύλη ανεξάρτητα από το αν έχουν κοινό σημείο με άλλη, κάτι που βρίσκει ευρεία εφαρμογή στη ναυπηγική. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι καμπύλες των οποίων τα ακραία σημεία βρίσκονται πάνω στα FOS ή FOB. Προκειμένου να έχουμε ομαλή μορφή της προκύπτουσας μορφής γάστρας στην περιοχή του κοινού σημείου θα πρέπει το ακραίο εφαπτομενικό διάνυσμα να είναι ομοεπίπεδο με αυτές οι επιφάνειες. Σε αυτές τις περιπτώσεις δεν έχουμε συγκεκριμένα στοιχεία για το μέτρο του εφαπτομενικού διανύσματος ωστόσο μια λογική επιλογή είναι η διαστατοποίηση των αδιάστατων μοναδιαίων διανυσμάτων D_n ή D_0 με χρήση του μήκους d όπως

αυτό ορίζεται από την χρησιμοποιούμενη μέθοδο παρεμβολής. Αυτή η τεχνική είναι και η προτεινόμενη από τη βιβλιογραφία που έχει χρησιμοποιηθεί. Η εισαγωγή του παράγοντα d εξασφαλίζει πως η τάξη μεγέθους του μέτρου των εφαπτομενικών διανυσμάτων είναι συγκρίσιμη με αυτή του επικαμπύλιου μήκους της αρχικής μη παραμετρικής καμπύλης.

4.4.3 Σχεδίαση Βασικών Καμπυλών της Μορφής της Γάστρας

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

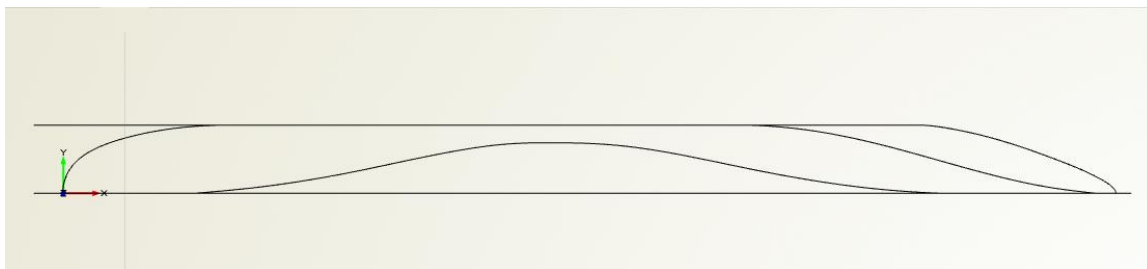
1. Παραμετρική σχεδίαση της γάστρας
2. Διακύμανση των μεταβλητών και παραγωγή διαφορετικών γεωμετριών
3. Υπολογισμός των τιμών των κριτηρίων βελτιστοποίησης
4. Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από γενετικό αλγόριθμο
5. Παραγωγή νέων σχεδιάσεων
6. Επανάληψη των βημάτων 2 έως 5

Το κάθε ένα από αυτά τα βήματα πραγματοποιείται από ένα ή περισσότερα λογισμικά που θα περιγραφούν στη συνέχεια ξεκινώντας από την παραμετρική σχεδίαση καθώς αποτελεί ίσως την σημαντικότερη διαδικασία της βελτιστοποίησης, για το λόγο ότι μια λανθασμένη σχεδίαση θα οδηγούσε εύκολα σε σφάλματα κατά το τρέξιμο των αλγορίθμων. Η παραμετρική σχεδίαση της γάστρας όπως αναφέρθηκε παραπάνω έγινε με το λογισμικό CAESES – Friendship Framework στο οποίο εισήχθησαν σε μορφή αρχείου IGES οι γραμμές που παρήχθησαν από το πρόγραμμα Aveva Lines.

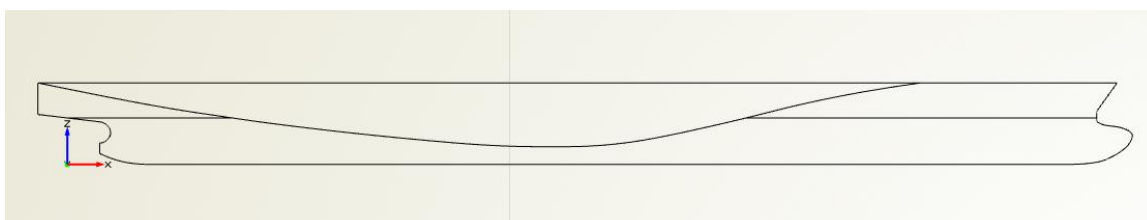
Η λογική της σχεδίασης επιβάλλει τη χρησιμοποίηση καμπυλών με περισσότερες επιλογές ελέγχου (B-Spline) στα σημεία όπου θα μεταβάλλεται έντονα η γεωμετρία και η μεταβολή αυτή μας ενδιαφέρει, ενώ στα μέρη του πλοίου όπου η ακριβής αναπαράσταση είναι ελάσσονος σημασίας γίνεται να χρησιμοποιηθούν απλούστερες μορφές καμπυλών (F-Spline) προς διευκόλυνση της διαδικασίας της σχεδίασης. Οι ιδιότητες των πολυωνυμικών καμπυλών B-Spline αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 4.4.3. Η καμπύλη F-Spline είναι μια εύχρηστη καμπύλη του CAESES που αποτελεί στην πραγματικότητα μια καμπύλη B-Spline, η οποία όμως ορίζεται από ολιγάριθμα δεδομένα, όπως οι συντεταγμένες των ακραίων σημείων της και οι γωνίες των εφαπτομενικών της διανυσμάτων.

Το πρώτο βήμα της σχεδίασης είναι η δημιουργία των καμπύλων που περιγράφουν τη μορφή της γάστρας του πλοίου δηλαδή του Flat of Side (FOS), του Flat of Bottom (FOB), του Center Plane Curve (CPC) και δύο ισάλων στο ύψος του βυθίσματος σχεδίασης και στο ύψος του κοίλου. Συγκεκριμένα:

- Η καμπύλη Flat of Bottom (FOB) δημιουργήθηκε με 2 καμπύλες B-Spline (μία για το πρωραίο και μία για το πρυμναίο τμήμα της αντίστοιχα) χρησιμοποιώντας κατάλληλο αριθμό σημείων ελέγχου.
- Η καμπύλη Flat of Side (FOS) κατασκευάστηκε ξεχωριστά για το πρωραίο και το πρυμναίο τμήμα της αντίστοιχα, όπως και η καμπύλη Flat of Bottom (FOB). Σε κάθε τμήμα της χρησιμοποιήθηκε μία καμπύλη B-Spline με κατάλληλο αριθμό σημείων ελέγχου για το κατώτερο μέρος της καμπύλης μέχρι την ίσαλο και μια καμπύλη F-Spline για το μέρος από την ίσαλο μέχρι το κοίλο.
- Η καμπύλη του προφίλ – Center Plane Curve (CPC) κατασκευάστηκε με χρήση τμηματικών F-Splines. Σε ορισμένα τμήματα με έντονη αλλαγή γεωμετρίας (περιοχή χοάνης με μεγάλη μεταβολή καμπυλότητας που είναι δύσκολο να προσεγγιστεί με χρήση F-Spline) και τμήματα που απαιτείται η ακριβής αναπαράσταση της γεωμετρίας (περιοχή βολβοειδούς πλώρης) έγινε χρήση καμπυλών B-Splines με κατάλληλο αριθμό σημείων ελέγχου.
- Η καμπύλη της ισάλου στο βύθισμα σχεδίασης κατασκευάστηκε ξεχωριστά για το πρωραίο και το πρυμναίο τμήμα της αντίστοιχα, όπως και οι καμπύλες Flat of Side (FOS) και Flat of Bottom (FOB). Το πρυμναίο τμήμα δημιουργήθηκε με χρήση B-Spline με κατάλληλο αριθμό σημείων ελέγχου. Το πρωραίο τμήμα δημιουργήθηκε με χρήση τόσο B-Spline (από το σημείο τομής της ισάλου με την καμπύλη Flat of Side μέχρι το σημείο επί της ισάλου που βρίσκεται στο 65 % του επικαμπύλιου μήκους του συνολικού πρωραίου τμήματος της, μετρούμενο από την καμπύλη FOS) όσο και F-Spline, προς διευκόλυνση της παραμετροποίησης της καμπύλης (η καμπύλη F-spline χρησιμοποιήθηκε στο τμήμα από την πρωραία κάθετο μέχρι το τελευταίο σημείο της παραπάνω καμπύλης B-Spline, όπου η γωνία εισόδου μεταβάλλεται, καθώς η F-Spline δίνει τη δυνατότητα ελέγχου των γωνιών στα άκρα και διευκολύνει την εισαγωγή της παραμέτρου, ενώ η τεταγμένη του σημείο σύνδεσης των δύο αυτών καμπυλών αποτέλεσε και αυτή στοιχείο παραμετροποίησης ώστε να μεταβάλλεται παραμετρικά η πληρότητα του πρωραίου τμήματος της γάστρας).
- Η καμπύλη της ισάλου στο ύψος του κοίλου διατηρήθηκε στην αρχική της μορφή χωρίς να παραμετροποιηθεί και κατασκευάστηκε με χρήση καμπύλης παρεμβολής σημείων (interpolation curve) 3^{ου} βαθμού όπου χρησιμοποιήθηκαν τα ανώτατα σημεία των αρχικών νομέων όπως εισήχθησαν στο πρόγραμμα μέσω του αρχείου IGES.



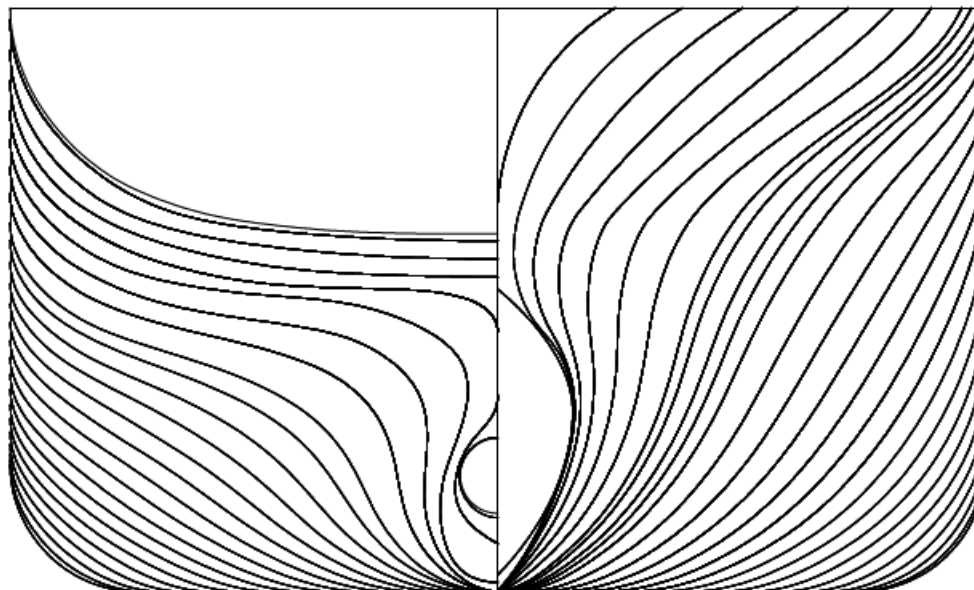
Σχήμα 27. Κάτοψη βασικών καμπυλών στο πρόγραμμα CAESES



Σχήμα 28. Διαμήκης όψη βασικών καμπυλών στο πρόγραμμα CAESES

4.4.4 Διαμόρφωση Νομέων

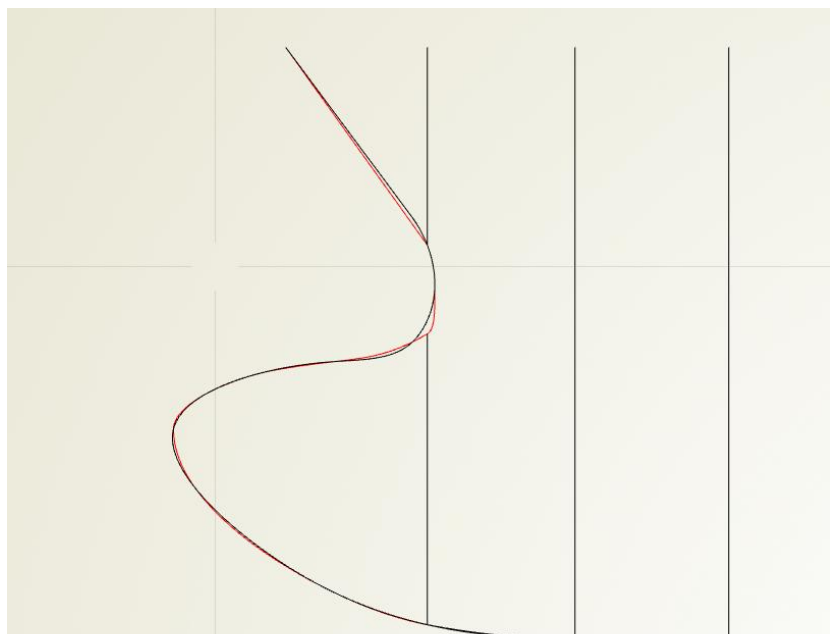
Επόμενο βήμα της σχεδίασης είναι η διαμόρφωση των νομέων. Το πρυμναίο και πρωραίο τμήμα σχεδιάστηκε με την ίδια τεχνική που θα περιγραφεί. Οι νομείς χωρίστηκαν σε δύο τμήματα όπου το κοινό σημείο των δύο τμημάτων κάθε νομέα προφανώς βρίσκεται στην ίσαλο γραμμή. Το κατώτερο τμήμα τους που επηρεάζει άμεσα την υδροδυναμική συμπεριφορά του πλοίου και μας ενδιαφέρει η ακριβής απεικόνιση του αποτελείται από καμπύλες B-spline. Το ανώτερο τμήμα, για το οποίο η ακρίβεια της προσέγγισης της αρχικής καμπύλης είναι ελάσσονος σημασίας, δημιουργήθηκε με χρήση καμπύλης F-Spline. Σε όλα τα σημεία σύνδεσης των δύο καμπυλών ικανοποιείται η απαίτηση για C^1 συνέχεια (συνέχεια εφαπτομενικού διανύσματος). Όλα τα σημεία ελέγχου των νομέων αδιαστατοποιήθηκαν ως προς «σταθερά σημεία» (σημεία επί του προφίλ και των ισάλων), ώστε να μεταβάλλεται ομαλά η μορφή τους σε οποιαδήποτε μεταβολή πραγματοποιείται στις μεταβλητές σχεδίασης οι οποίες επηρεάζουν αντίστοιχα κομμάτια της γάστρας.



Σχήμα 29. Διαμόρφωση πρυμναίων (αριστερά) και πρωραίων (δεξιά) νομέων

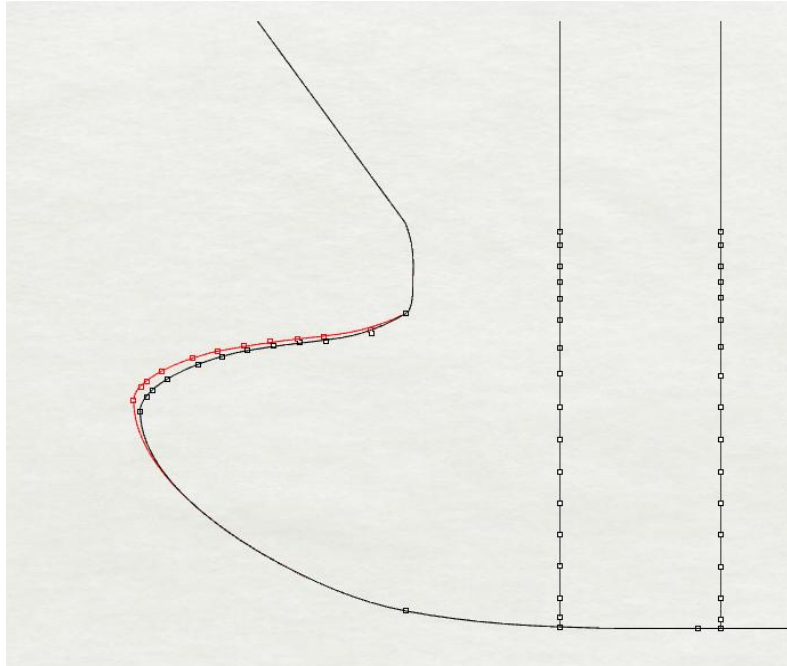
4.4.5 Διαμόρφωση Βολβοειδούς Πλώρης

Στη συνέχεια κατασκευάστηκε η βολβοειδής πλώρη εφαρμόζοντας όμως μια εντελώς διαφορετική διαδικασία από αυτή που έχει αναφερθεί μέχρι τώρα. Βασικός λόγος αυτής της προσέγγισης αποτελεί το γεγονός πως επηρεάζει άμεσα την αντίσταση κυματισμού κι επομένως καθίσταται σημαντική η εισαγωγή μεγάλου αριθμού μεταβλητών που επηρεάζουν στο μέγιστο βαθμό τη μορφή της επιφάνειάς του. Επιπρόσθετα, οι νομείς του βολβού αποτελούν καμπύλες χωρίς σημαντικές αλλαγές διανύσματος καμπυλότητας κι επομένως η αρχική τους μορφή μπορεί να προσεγγιστεί με απλά κι εύχρηστα σχεδιαστικά εργαλεία σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό. Προκειμένου να μοντελοποιηθεί παραμετρικά η μορφή του, είναι απαραίτητη η εξάρτηση της τομής της επιφάνειάς του με το διάμετρος επίπεδο συμμετρίας από μεταβλητές σχεδίασης και παραμέτρους. Με αυτό το δεδομένο το άνω μέρος (πάνω από το σημείο μέγιστου μήκους του) του προφίλ του βολβού αναπαραστάθηκε με B-Spline καθώς έχει σημαντικές μεταβολές καμπυλότητας ενώ το κάτω τμήμα του αναπαραστάθηκε με τμηματικά F-Splines καθώς έχει απλούστερη μορφή. Το προφίλ του βολβού φαίνεται στο Σχήμα 30 μαζί με την αρχική μορφή του αντίστοιχου τμήματος.



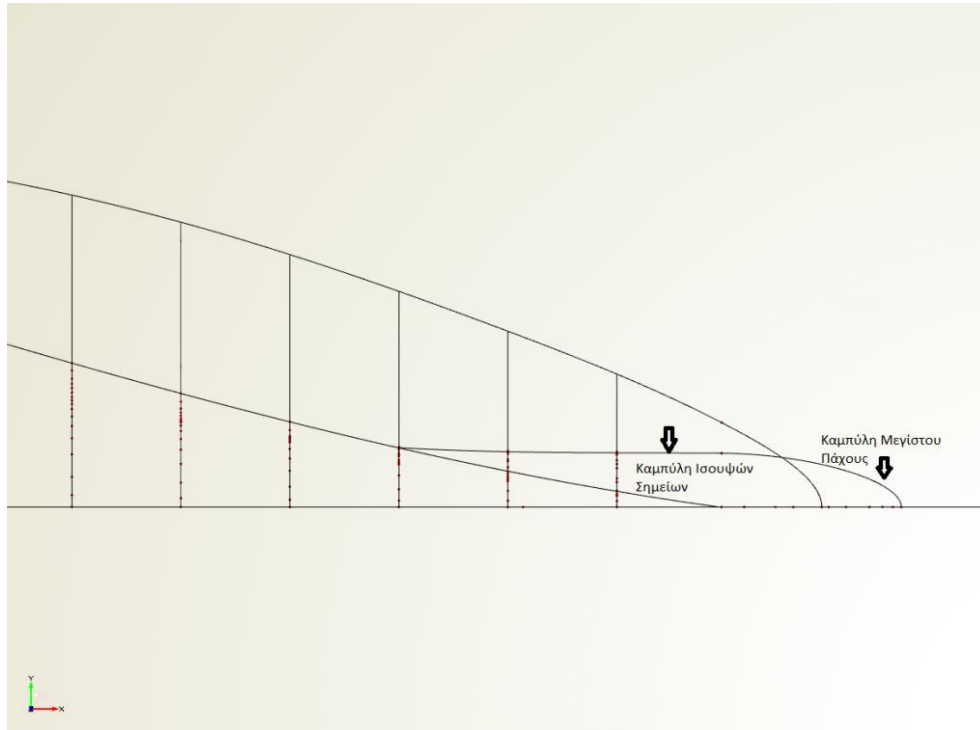
Σχήμα 30. Αρχική – μη παραμετρική (μαύρη) και τελική - παραμετρική (κόκκινη) μορφή προφίλ του βολβού

Όπως φαίνεται στο Σχήμα αυτό, η απόδοση του προφίλ του βολβού δεν αποτελεί ακριβή αναπαράσταση της αρχικής γεωμετρίας. Ο λόγος αυτής της μικρής απόκλισης κυρίως στο σημείο της πρωραίας καθέτου οφείλεται στην ιδιαιτερότητα αυτής της περιοχής. Στην πραγματικότητα αποτελεί σημείο ιδιομορφίας καθώς πρύμνηθεν αυτού τοποθετούνται νομείς που στο ύψος της ισάλου έχουν συνέχεια εφαπτομενικού διανύσματος ενώ πύραθεν οι νομείς του βολβού καταλήγουν στο διάμηκες επίπεδο συμμετρίας υπό γωνία που καθιστά αδύνατη την ύπαρξη συνέχειας διανύσματος με τμήμα καμπύλης άνωθεν της ισάλου. Στο σημείο συνάντησης επομένως θα πρέπει να υπάρχει ομαλή μετάβαση από τη μία διαμόρφωση στην άλλη. Η διατήρηση της ομαλότητας της προκύπτουσας επιφάνειας σε εκείνο το σημείο κι εκατέρωθεν, για όλο το εύρος διακύμανσης των μεταβλητών σχεδίασης, εισήγαγε αυτή τη μικρή απόκλιση που φαίνεται στο Σχήμα 30. Η παραμετρική σχεδίαση του άνω και κάτω προφίλ του βολβού πραγματοποιήθηκε προκειμένου να τεθούν ως μεταβλητές σχεδίασης το μήκος και η ανύψωση του tip του βολβού. Η αρχική και μια τυχούσα μορφή φαίνονται στο σχήμα 31.



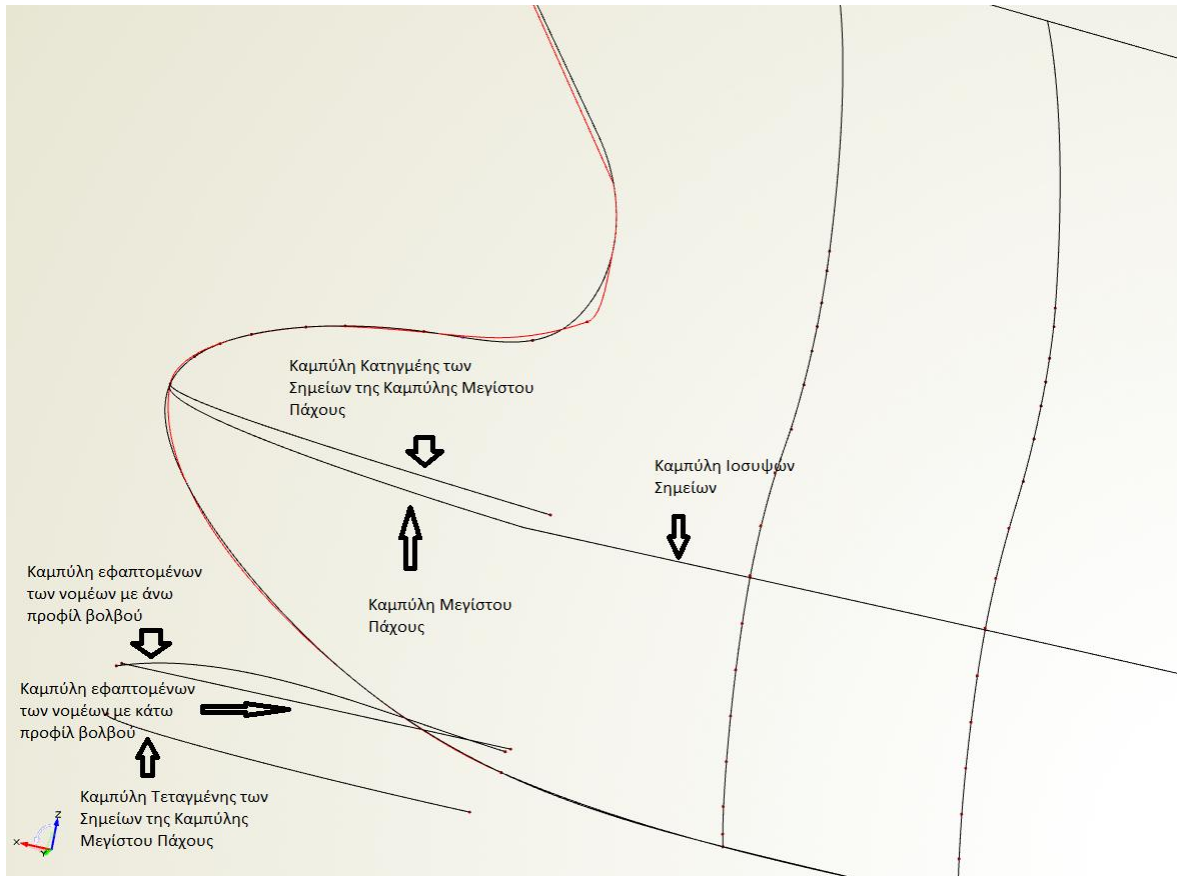
Σχήμα 31. Μεταβολή μεταξύ αρχικής (μαύρη) και τυχούσας (κόκκινη) μορφής προφίλ του βολβού

Στη συνέχεια κατασκευάστηκε η καμπύλη μεγίστου πάχους του βολβού που αποτελεί και τη μοναδική με σημεία των οποίων οι συντεταγμένες μεταβάλλονται σε όλες τις διαστάσεις. Η καμπύλη αυτή ξεκινά από την πρωραία κάθετο και καταλήγει στο tip του βολβού. Προκειμένου να καταστεί δυνατή η μεταβολή χαρακτηριστικών γωνιών της σε δύο επίπεδα σχεδιάστηκαν αρχικά δύο ανεξάρτητες καμπύλες εκ των οποίων η πρώτη δίνει την τεταγμένη ενώ η δεύτερη την κατηγμένη της σε κάθε σημείο κατά το διάμηκες. Κάθε μια από τις γωνίες που σχηματίζει η εκάστοτε καμπύλη στο tip του βολβού με τον άξονα που δεν περιλαμβάνεται στο επίπεδο στο οποίο ανήκει η άλλη αποτελούν μεταβλητές σχεδίασης. Η ενιαία τρισδιάστατη καμπύλη που προκύπτει από τη σύνθεση των δύο, έχει συνέχεια εφαπτομενικού διανύσματος με την καμπύλη παρεμβολής των ισοϋψών σημείων των νομέων που βρίσκονται πρύμνηθεν της πρωραίας καθέτου, ώστε να επιτυγχάνεται C^1 συνέχεια μεταξύ των παραγόμενων επιφανειών.



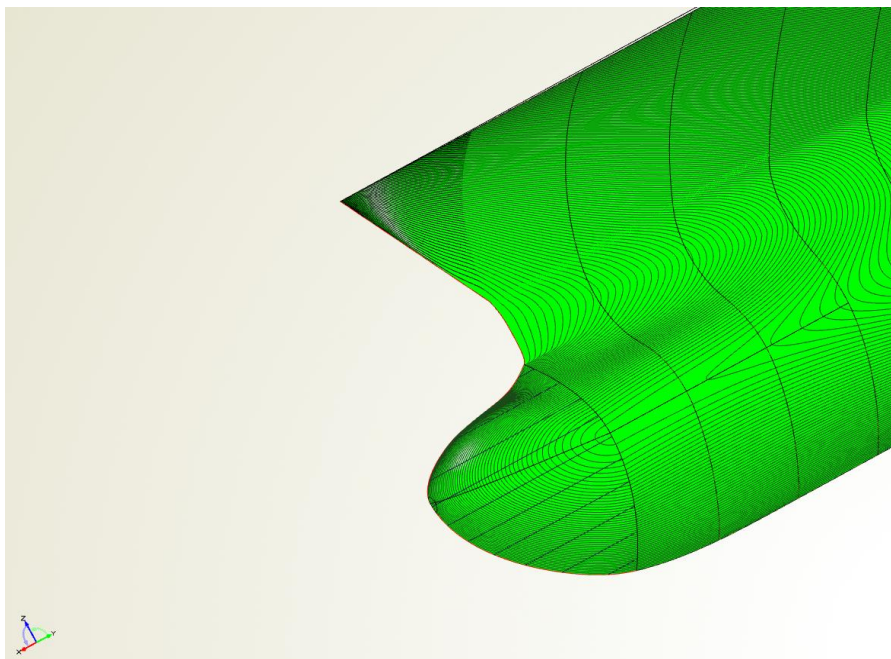
Σχήμα 32. Κάτοψη της καμπύλης μέγιστου πάχους του βολβού και της καμπύλης ισοϋψών σημείων των νομέων πρύμνηθεν της πρωραίας καθέτου

Η επιφάνεια του βολβού κατασκευάζεται από το σύνολο άπειρων νομέων οι οποίοι αποτελούν τη σύνθεση δύο καμπυλών FSpline, με κοινό σημείο την καμπύλη μέγιστου πάχους. Οι άπειρες αυτές καμπύλες αποτελούν το αποτέλεσμα συνάρτησης που δίνει τα χαρακτηριστικά κατασκευής τους σε άπειρες θέσεις κατά το διάμηκες. Τα χαρακτηριστικά αυτά αφορούν τις γωνίες που σχηματίζει κάθε νομέας με τον άξονα z στο άνω και κάτω προφίλ του βολβού. Αυτές οι γωνίες, προκειμένου να υπάρχει συνέχεια κατά τον άξονα ανάπτυξης της επιφάνειας, δίνονται από συνεχείς καμπύλες των οποίων οι τιμές στα άκρα αποτελούν μεταβλητές σχεδίασης. Οι μεταβλητές αυτές είναι συνολικά 4 καθώς ορίζονται για το άνω και κάτω προφίλ του βολβού, στις δύο ακραίες θέσεις ανάπτυξης της επιφάνειας.

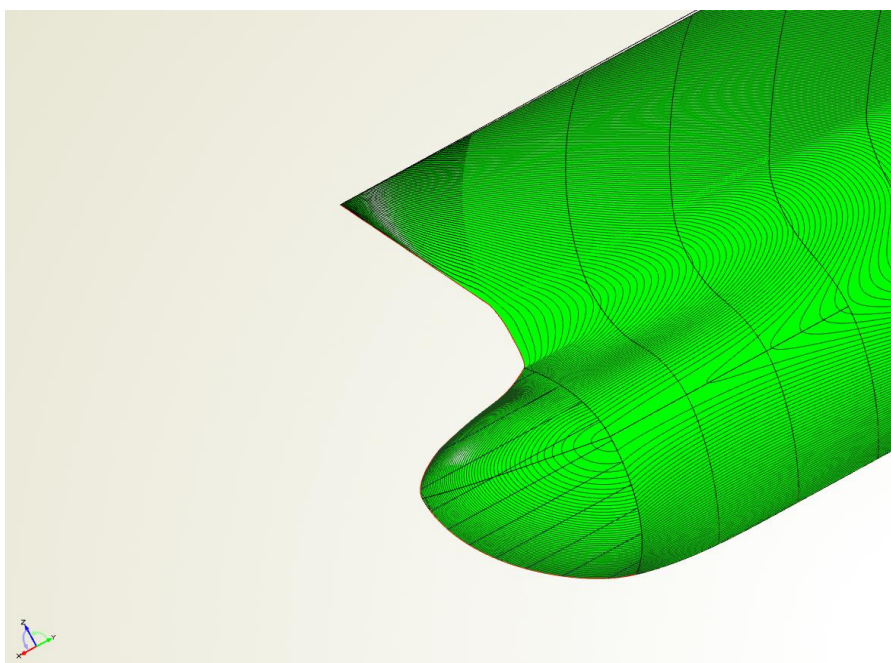


Σχήμα 33. Καμπύλες βολβοειδούς πλώρης (με μαύρο αναπαριστάται η αρχική - μη παραμετρική μορφή του προφίλ το βολβού)

Το tip του βολβού αποτελεί σημείο ιδιομορφίας στο οποίο πρακτικά μηδενίζεται το εμβαδόν της κατασκευαζόμενης επιφάνειας. Για την άρση αυτής της ιδιομορφίας δημιουργήθηκαν τοπικές επιφάνειες από τις προκύπτουσες συνοριακές καμπύλες με χρήση της εντολής Coons Patch η οποία δημιουργεί επιφάνεια από τέσσερις καμπύλες που τέμνονται ανά δύο. Στα Σχήματα 34 και 35 φαίνονται η αρχική και μια τυχαία επιφάνεια του βολβού μέσω απόδοσης τυχαίων τιμών στις μεταβλητές σχεδίασης. Στα ίδια σχήματα φαίνεται και η επιφάνεια που προκύπτει από τους νομείς πρύμνηθεν της πρωραίας καθέτου για λόγους οπτικής ανίχνευσης της ομαλότητας της συνολικής επιφάνειας. Στην περίπτωση της τυχούσας επιφάνειας του σχήματος, οι τιμές που έχουν αλλάξει αφορούν όλες τις μεταβλητές σχεδίασης που σχετίζονται με τον βολβό. Για λόγους χωρικής αντίληψης φαίνεται και η καμπύλη μεγίστου πάχους.



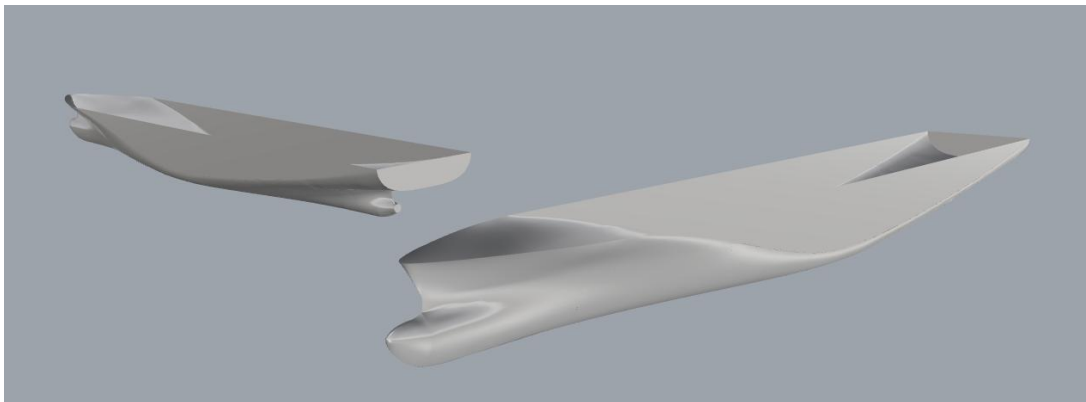
Σχήμα 34. Αρχική Μορφή επιφάνειας του βολβού



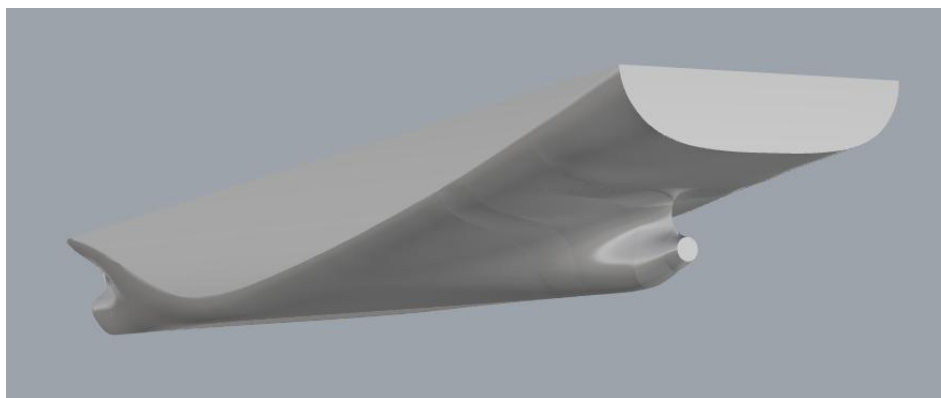
Σχήμα 35. Τυχούσα μορφή επιφάνειας του βολβού

4.4.6 Παραγωγή Επιφανειών και Επιλογή Παραμέτρων Σχεδίασης

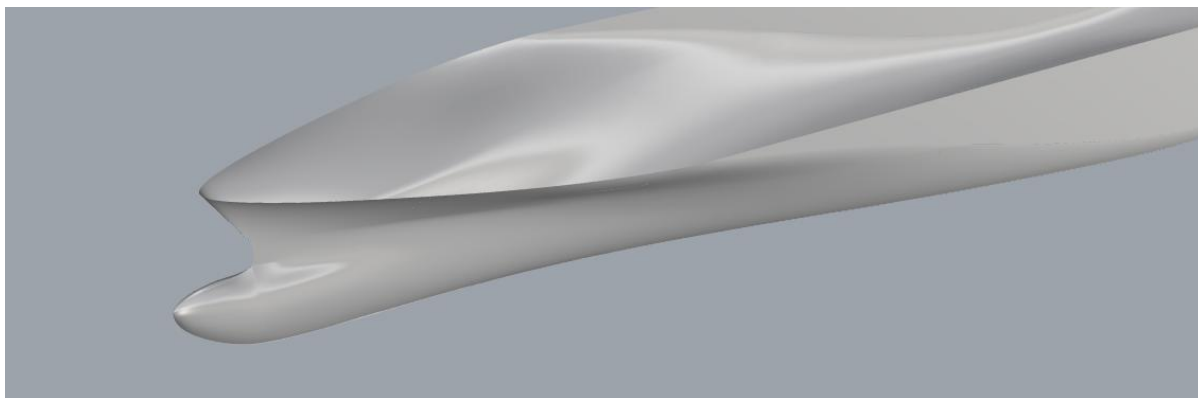
Τα τελευταία βήματα της παραμετρικής σχεδίασης είναι η δημιουργία των επιφανειών και η επιλογή των παραμέτρων βάσει των οποίων θα γίνει η βελτιστοποίηση. Οι επιφάνειες κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας αποκλειστικά τις εντολές Loft και Coons Patch. Η πρώτη δημιουργεί επιφάνειες κατά το διάμηκες παίρνοντας πληροφορίες από τους αντίστοιχους νομείς, ενώ η δεύτερη, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 4.4.5 δημιουργεί μία επιφάνεια από τέσσερις συνοριακές καμπύλες που τέμνονται ανά δύο. Η διαδικασία κατασκευής της επιφάνειας του βολβού περιγράφηκε εκτενώς στο κεφάλαιο 4.4.5. Συνοπτικά, αναφέρουμε πως η επιφάνεια του βολβού κατασκευάζεται από το σύνολο άπειρων νομέων οι οποίοι αποτελούν τη σύνθεση δύο καμπυλών F-Spline, με κοινό σημείο την καμπύλη μεγίστου πάχους. Η δημιουργία των επιφανειών του βολβού αποτέλεσε το δυσκολότερο τμήμα της διαδικασίας παραγωγής επιφανειών καθώς ουσιαστικά η περιπλοκότητα των επιφανειών είναι σαφώς μεγαλύτερη. Επίσης, εφόσον ο βολβός επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα δύο κριτήρια βελτιστοποίησης, κατά τη δημιουργία του απαιτήθηκε εξαιρετική ακρίβεια και προσοχή.



Σχήμα 36. Η παραμετρική γεωμετρία του YM SEATTLE



Σχήμα 37. Η παραμετρική γεωμετρία του YM SEATTLE - πρυμναίο τμήμα



Σχήμα 38. Η παραμετρική γεωμετρία του YM SEATTLE - πρωραίο τμήμα

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

Τόσο οι μεταβλητές όσο και το εύρος διακύμανσης τους έχουν επιλεγεί ώστε να επιτυγχάνεται ευρεία μεταβολή της παραγόμενης επιφάνειας με ταυτόχρονη όμως επιδίωξη διατήρησης μιας ομαλής γεωμετρίας. Η επιδίωξη αυτή δεν μπορεί να διασφαλιστεί παρά μόνο αν εξεταστούν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί των τιμών των μεταβλητών. Είναι προφανές πως αυτό είναι πρακτικά αδύνατον καθώς ο συνολικός αριθμός των πιθανών συνδυασμών είναι εξωπραγματικός. Αυτό που μπορεί να πραγματοποιηθεί είναι έλεγχος της παραγόμενης γεωμετρίας για συνδυασμό των ακραίων τιμών των μεταβλητών καθώς αυτές συγκεντρώνουν τις περισσότερες πιθανότητες παραγωγής ανώμαλων μορφών. Αυτή είναι και η πρακτική που εφαρμόστηκε στα πλαίσια του παρόντος. Βάσει των προαναφερθέντων, προέκυψαν τα εύρη διακύμανσης των μεταβλητών σχεδίασης και οι τιμές που αντιστοιχούν στην πατρική μορφή γάστρας και παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6. Μεταβλητές σχεδίασης και εύρος διακύμανσης

Μεταβλητή Σχεδίασης	Αρχική Τιμή	Κάτω Όριο	Άνω Όριο
Bulbous Bow Tip Elevation (m) :	8.249	7.424	9.074
Bulbous Bow Length (m):	6.908	6.424	7.392
FWD LOW TAN of BB sections (deg):	46	29	69
FWD UP TAN of BB sections (deg):	180	150	180
AFT LOW TAN of BB sections (deg):	46	29	69
AFT UP TAN of BB sections (deg):	140	130	150
Entrance Angle on BB Max Beam Z Curve (deg):	0	0	30
Entrance Angle on BB Max Beam Y Curve (deg):	90	60	90
Entrance Angle of WL at FP (deg):	7.8	6.2	11.5
Y Position at Point on WL (m):	8.685	7.816	9.987
Y Position at Point on Transom Curve (m):	11.772	10.006	12.949
Z Position on Transom Lower Point (m):	11.836	11.659	12.014

Σημειώνεται επίσης πως για λόγους σύγκρισης των εναλλακτικών λύσεων που προκύπτουν με την πατρική, έχει τεθεί περιορισμός στη μεταβολή του εκτοπίσματος και της διαμήκου θέσης του κέντρου άντωσης προκειμένου να μην υπερβαίνουν το $\pm 1.5\%$ στις δύο υπό μελέτη καταστάσεις φόρτωσης.

Εφόσον πλέον το παραμετρικό μοντέλο είναι έτοιμο, είναι αναγκαίο να γίνουν ξανά υδροστατικοί υπολογισμοί, αυτή τη φορά μέσω του προγράμματος CAESES προς εξακρίβωση της ακρίβειας της σχεδίασης. Στον Πίνακα 7 που ακολουθεί παρατίθενται ορισμένα βασικά υδροστατικά μεγέθη:

Πίνακας 7. Υπολογισμός υδροστατικών μεγεθών παραμετρικής γάστρας μέσω CAESES στο βύθισμα T=11.025 m και αποκλίσεις από πατρικό πλοίο

Hydrostatic particulars			
Draft (m) :	11.025		
	Πατρική Γάστρα	Παραμετρική Γάστρα	% ποσοστό
Total volume (m ³) :	54718	54535	0.33
L.C.F from AP (m) :	107.284	107.7	0.38
L.C.B from AP (m) :	116.841	116.997	0.13
V.C.B above B.L (m) :	6.081	6.111	0.49
T.P.C (ton/1cm) :	66.0	65.8	0.30
M.T.C (ton-m/1cm) :	953.2	942.1	1.16
K.M.T (m) :	15.036	15.034	0.013
W.P.A (m ²) :	6425	6413	0.18
Wetted Surface (m ²) :	10127	9921	2.03
Block coeff. (Cb) :	0.6301	0.6266	0.55
Prism. coeff. (Cp) :	0.6455	0.6409	0.71
W.P.A coeff. (Cw) :	0.8138	0.8123	0.18
Midsh. coeff. (Cm) :	0.9763	0.9775	0.12

Πίνακας 8. Υπολογισμός υδροστατικών μεγεθών παραμετρικής γάστρας μέσω CAESES στο βύθισμα T=12.626 m και αποκλίσεις από πατρικό πλοίο

Hydrostatic particulars			
Draft (m) :	12.626		
	Πατρική Γάστρα	Παραμετρική Γάστρα	% ποσοστό
Total volume (m ³) :	65392	65193	0.30
L.C.F from AP (m) :	104.294	104.338	0.04
L.C.B from AP (m) :	114.949	115.097	0.12
V.C.B above B.L (m) :	7.014	7.047	0.47
T.P.C (ton/1cm) :	70.4	70.3	0.14
M.T.C (ton-m/1cm) :	1139.2	1139.2	0.0
K.M.T (m) :	15.194	15.208	0.09
Wetted Surface (m ²) :	11209	11021	1.67
W.P.A (m ²) :	6857	6859	0.03
Block coeff. (Cb) :	0.6573	0.6541	0.48
Prism. coeff. (Cp) :	0.6713	0.6671	0.62
W.P.A coeff. (Cw) :	0.8685	0.8688	0.03
Midsh. coeff. (Cm) :	0.9793	0.9804	0.11

Σύμφωνα με τους παραπάνω Πίνακες 7 και 8 και συγκρίνοντας το % ποσοστό απόκλισης των υδροστατικών μεγεθών όπως υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα CAESES με το % ποσοστό απόκλισης όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 5 του κεφαλαίου 4.3 κατά τον υπολογισμό αυτών μέσω του προγράμματος Avena Lines συμπεραίνουμε ότι η σχεδιασμένη γάστρα αποτελεί καλή προσέγγιση στην πραγματική γεωμετρία. Τα σφάλματα που προέκυψαν κατά το στάδιο της σχεδίασης της αρχικής γάστρας του πλοίου μέσω του προγράμματος Avena Lines μεταφέρθηκαν σχεδόν αυτούσια και στο στάδιο της παραμετρικής σχεδίασης με ορισμένες μικρές αποκλίσεις. Αυτό προφανώς οφείλεται στην τυχαιότητα των σφαλμάτων κατά την διαδικασία των μετρήσεων καθώς επίσης και στην διαφορετική ακρίβεια με την οποία υπολογίζει το κάθε πρόγραμμα τα παραπάνω μεγέθη. Τέλος μέσω των υδροστατικών υπολογισμών που πραγματοποιούνται από το πρόγραμμα CAESES παρατηρούμε πως η περιγραφή των δύο ισάλων πλεύσεως θεωρείται ικανοποιητική με μικρή απόκλιση της επιφάνειάς της.

4.5 Στάδιο 4^ο: Σύζευξη προγράμματος CAESES – Υπολογιστικών Κωδίκων

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

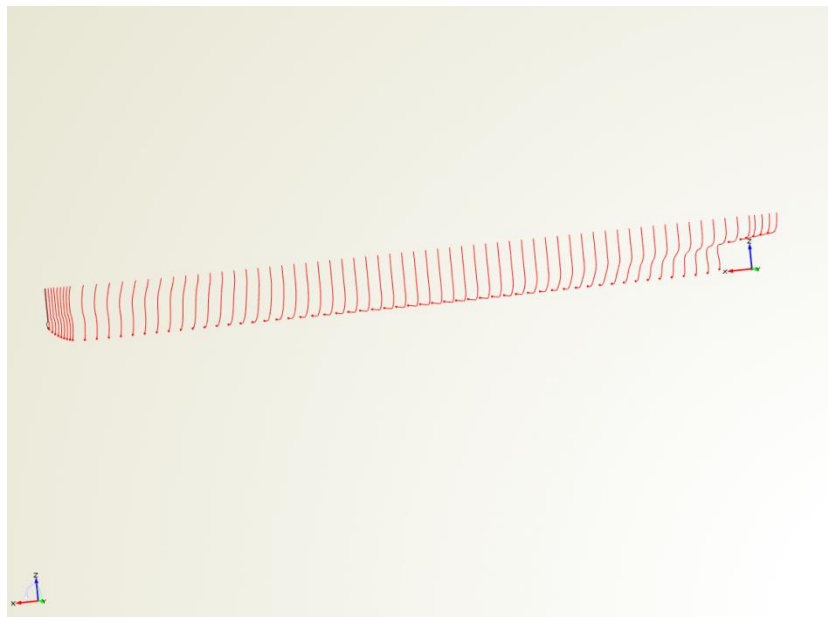
Συγκεκριμένα για το λογισμικό SWAN 2 η περιγραφή της γεωμετρίας πραγματοποιείται με καμπύλες που αποτελούν συνδυασμό νομέων και προφίλ. Αυτή η απαίτηση σχετίζεται με τον τρόπο που εκλαμβάνει το πρόγραμμα την περιγραφή της γεωμετρίας και κυρίως για τα τμήματα της που δεν αποτελούν μέρος των καμπυλών περιγραφής.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

- Δεδομένου ότι έχουμε πρύμνη καθρέφτη, ο οποίος όμως δεν βυθίζεται σε κάθε περίπτωση (στην Full Load Departure έχουμε σημαντική βύθιση του καθρέφτη ενώ στην Half Load Departure ο καθρέφτης παραμένει αβύθιστος), η περιγραφή της γεωμετρίας της πρύμνης διαφέρει στις δύο καταστάσεις. Στην κατάσταση Full Load Departure η περιγραφή της πρύμνης γίνεται από νομέα ενώ στην κατάσταση Half load Departure γίνεται από το αντίστοιχο μέρος του προφίλ.
- Για την περιγραφή του βολβού χρησιμοποιούνται 8 συνολικά καμπύλες με αποτέλεσμα η διακριτοποίηση της επιφάνειας του να είναι προφανώς πυκνότερη από αυτή της γάστρας. Αυτό συμβαίνει καθώς ο βολβός αποτελεί στοιχείο που επηρεάζει σημαντικά την αξιολόγηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς των εναλλακτικών σχεδιάσεων.
- Η περιοχή μεταξύ του βολβού και του άνω τμήματος της γάστρας λαμβάνεται ως επιφάνεια μικρού πλάτους (1 cm), παρότι δεν αποτελεί μέρος της γεωμετρίας. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται πως το υπολογιστικό πλέγμα της ελεύθερης επιφάνειας γύρω από το βολβό

δεν θα έχει ασυνέχειες και σημεία τομής με το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας μεταξύ του βολβού και της πρωραίας καθέτου. Η ανάγκη αυτή προκύπτει από το γεγονός πως η εκτέλεση του SWAN 2 πραγματοποιείται επαναληπτικά μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση των τιμών της παράλληλης βύθισης και διαγωγής. Συνδυασμός αυτών των τιμών σε κάποια επανάληψη μπορεί να προκαλέσει σημαντική ανάδυση του βολβού με αποτέλεσμα να προκληθούν τα προβλήματα που αναφέρθηκαν ανωτέρω.

- Συνολικά έχουμε 61 νομείς που περιγράφουν τη γάστρα από τον καθρέφτη μέχρι την πρωραία κάθετο για την κατάσταση Full Load Departure και 60 νομείς για την κατάσταση Half Load Departure.
- Πρώραθεν του πρώτου νομέα έχουμε μια καμπύλη που περιγράφει το προφίλ του πλοίου στη συγκεκριμένη περιοχή.

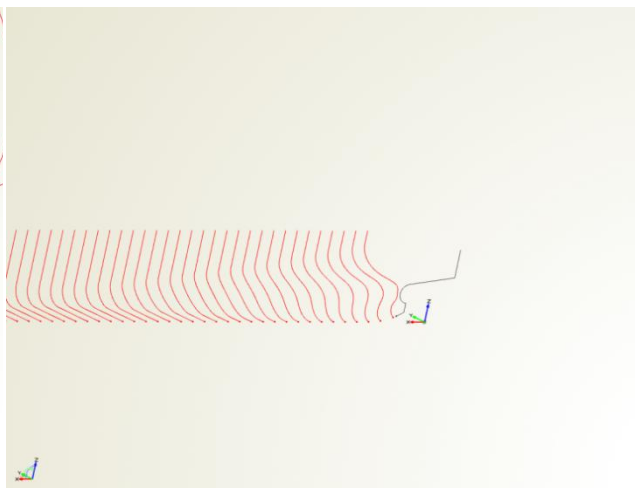
Η περιγραφή του πρυμναίου και του πρωραίου τμήματος του πλοίου φαίνεται στα Σχήματα 39, 40 και 41 που ακολουθούν:



Σχήμα 39. Περιγραφή γεωμετρίας στην κατάσταση Full Load Departure



Σχήμα 40. Περιγραφή πρωραίας γεωμετρίας στην κατάσταση Half Load Departure



Σχήμα 41. Περιγραφή πρυμναίας γεωμετρίας στην κατάσταση Half Load Departure

Η περιγραφή της γάστρας για το λογισμικό SPP-86 απαιτεί μόνο ένα σύνολο νομέων χωρίς ιδιαιτερότητες και καμπύλες προφίλ. Το λογισμικό αυτό εκτελεί υπολογισμούς για την ισοβύθιστη κατάσταση χωρίς αναζήτηση των πραγματικών τιμών διαγωγής και παράλληλης βύθισης σε πραγματικές συνθήκες πλεύσης. Η περιγραφή της γεωμετρίας γίνεται με χρήση 36 νομέων για τη γάστρα και 6 για τον βολβό.

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

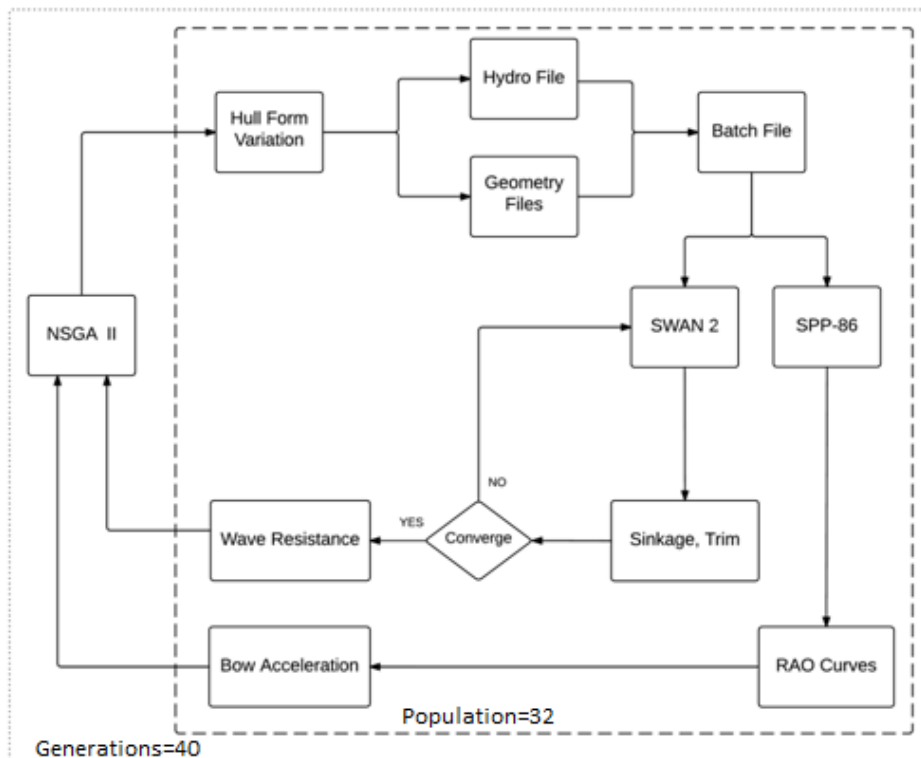
- Βάρος εκτοπίσματος για θαλασσινό νερό Δ (tn) ($\rho=1.025 \text{ tn/m}^3$)
- Κατακόρυφη θέση κέντρου βάρους KG (m)
- Ακτίνα αδράνειας περί τον άξονα χ (m)
- Ακτίνα αδράνειας περί τον άξονα γ (m)
- Διαμήκης θέση κέντρου βάρους LCG (m)
- Μήκος μεταξύ καθέτων LBP (m)
- Πλάτος B (m)
- Βύθισμα T (m)
- Κατακόρυφη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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ CONTAINERSHIP ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Επαναληπτική Διαδικασία Βελτιστοποίησης

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

Το περιβάλλον CAESES – Friendship Framework σε πρώτο επίπεδο χρησιμοποιείται για τη διακύμανση των μεταβλητών, τη διαμόρφωση των γεωμετρικών αναπαραστάσεων, τον υπολογισμό των υδροστατικών στοιχείων και την εξαγωγή όλων των απαραίτητων δεδομένων σε μορφή αρχείων. Σε δεύτερο βαθμό αποτελεί τον δέκτη των αρχείων αποτελεσμάτων που παράγονται από τα προγράμματα υδροδυναμικής αξιολόγησης. Τα αποτελέσματα αυτά όπως και οι περιορισμοί που έχουν τεθεί, αξιολογούνται από τον γενετικό αλγόριθμο NSGA II προκειμένου να εφαρμοστεί η διαδικασία κατάταξης των εναλλακτικών λύσεων που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3.2. Η εφαρμοζόμενη διαδικασία βελτιστοποίησης φαίνεται σε μορφή διαγράμματος στο Σχήμα 42:



Σχήμα 42. Διαδικασία βελτιστοποίησης υδροδυναμικής συμπεριφοράς πλοίου Containership

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 42 έχουμε συνολικά 40 γενεές με 32 μέλη η κάθε μία, κι επομένως συνολικά 1280 εναλλακτικές μορφές. Η επιλογή των δεδομένων αυτών βασίστηκε πρωτίστως στο γεγονός πως το πλήθος των μελών κάθε γενεάς πρέπει να είναι πολλαπλάσιο του 4. Αυτή η απαίτηση προκύπτει από τις απαιτήσεις λειτουργίας του εξελικτικού αλγορίθμου.

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

Δεδομένα που επίσης απαιτούνται από τον γενετικό αλγορίθμο αφορούν τις πιθανότητες διασταύρωσης και μετάλλαξης που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 3.2. Οι παραχθείσες γεωμετρίες και ειδικά σε προχωρημένα βήματα του αλγορίθμου αποτελούν ικανοποιητικές λύσεις. Κατ' επέκταση η πιθανότητα διασταύρωσης των χαρακτηριστικών τους θα πρέπει να είναι υψηλή προκειμένου να μεγιστοποιήσουμε τον αριθμό των απογόνων που μπορεί να έχουν καλύτερες επιδόσεις και από τους δύο γονείς τους. Αντίθετα επειδή η μετάλλαξη προσδίδει χαρακτηριστικά σε έναν απόγονο που δεν εξαρτώνται από την υδροδυναμική απόδοση των παραχθεισών γεωμετριών αλλά αποτελούν τυχαίο γεγονός, προτιμάται να είναι χαμηλή. Με αυτόν τον τρόπο περιορίζεται η πιθανότητα μετάλλαξης χαρακτηριστικών που προσδίδουν υψηλή απόδοση στις εναλλακτικές μορφές γάστρας και οι οποίες έχουν προκύψει μετά από εκτενή αριθμό διαδικασιών αναπαραγωγής.

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

Όπως προκύπτει από το Σχήμα 42, η διαχείριση των εξωτερικών προγραμμάτων υλοποιείται στο σύνολο της με χρήση ενός αρχείου batch. Το αρχείο αυτό διασφαλίζει ότι τα εκτελέσιμα αρχεία καθώς και τα αρχεία εισόδου που είναι κοινά για όλες τις περιπτώσεις εναλλακτικών μορφών, θα αντιγραφούν σε έναν φάκελο που είναι μοναδικός για κάθε γεωμετρία και θα εκτελεστούν με τη σειρά που απαιτείται. Ωστόσο, όσον αφορά την υδροδυναμική αξιολόγηση, στο σχήμα αυτό φαίνονται μόνο τα δύο προγράμματα που χρησιμοποιούνται καθώς και το σύνολο των παραχθέντων αποτελεσμάτων που προκύπτουν.

Για την επίτευξη της διαδικασίας βελτιστοποίησης χρησιμοποιείται κι ένα σύνολο προγραμμάτων που εκτελούν διαδικαστικές αλλά απαραίτητες προσαρμογές στα αρχεία εισόδου και αποτελεσμάτων και δεν παρουσιάζονται στο Σχήμα 42 για λόγους ευκρίνειας και εστίασης στα σημαντικότερα. Τα προγράμματα αυτά φαίνονται στη συνέχεια με μια σύντομη περιγραφή της λειτουργίας τους:

- **Sections_swan.exe.** Πρόγραμμα Visual Fortran που λαμβάνει ως αρχεία εισόδου αυτά που περιέχουν τα σημεία περιγραφής των καμπυλών (δύο διαφορετικά αρχεία για την κατάσταση Full Load Departure και τρία διαφορετικά αρχεία για την κατάσταση Half Load Departure) κι εξάγει ένα αρχείο SHF που χρησιμοποιείται από το λογισμικό SWAN 2. Το πρόγραμμα αυτό είναι επιφορτισμένο με τη διαμόρφωση του πρωταίου τμήματος μεταξύ του βολβού και του άνω τμήματος της γάστρας σε επιφάνεια μικρού πλάτους για λόγους που αναφέρθηκαν στ κεφάλαιο 4.5.
- **Shf2pln.exe.** Πρόγραμμα Visual Fortran που μετατρέπει το παραχθέν αρχείο SHF σε ένα αρχείο PLN το οποίο περιέχει τα ίδια σημεία σε διατεταγμένη μορφή προκειμένου να χρησιμοποιηθεί από το SWAN 2.
- **Iteration.exe.** Πρόγραμμα Visual Fortran που εκτελεί επαναληπτικά το λογισμικό SWAN 2 και ελέγχει αν έχει επιτευχθεί σύγκλιση των τιμών παράλληλης βύθισης και διαγωγής. Η επανάληψη αφορά τα εκτελέσιμα αρχεία makessg.exe, setup.exe και solve.exe που διαμορφώνουν τα αρχεία του SWAN 2 και επιλύουν το υδροδυναμικό πρόβλημα.
- **Sections_frank.exe.** Πρόγραμμα Visual Fortran που λαμβάνει ως αρχεία εισόδου αυτά που περιέχουν τα σημεία περιγραφής των νομέων (ένα αρχεία για κάθε κατάσταση) και εξάγει ένα αρχείο SHF που χρησιμοποιείται από το λογισμικό SPP-86.
- **Shf2frk.exe.** Πρόγραμμα Visual Fortran που μετατρέπει το παραχθέν αρχείο SHF σε αρχείο εισόδου FRK για το SPP-86. Το αρχείο εισόδου περιλαμβάνει μεταξύ άλλων την περιγραφή της γεωμετρίας, μερικά από τα υδροστατικά στοιχεία και τα δεδομένα που αφορούν τους υπολογισμούς όπως οι συχνότητες των αρμονικών κυματισμών και η γωνία συνάντησης.
- **Results.exe.** Πρόγραμμα Fortran 77 που αποθηκεύει τα αποτελέσματα των υδροδυναμικών υπολογισμών σε αρχείο που τροφοδοτείται στο CAESES – Friendship Framework προς αξιολόγηση των αντικειμενικών συναρτήσεων. Στα αποτελέσματα περιλαμβάνονται οι συνδυασμένες τιμές της μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλήρη και της αντίστασης κυματισμού σε ήρεμο νερό για τις δυο καταστάσεις φόρτωσης (11.025 m και 12.626.m) με ποσοστό 60 % και 40 % αντίστοιχα καθώς και τις τιμές των επιμέρους συνιστωσών τους..

5.2 Αποτελέσματα Πατρικής Γάστρας

Αρχικά θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που παρήχθησαν για την πατρική γάστρα όπως αυτή δημιουργήθηκε από το πρόγραμμα CAESES. Αυτά τα αποτελέσματα θα χρησιμοποιηθούν ως βάση αναφοράς για την βελτιστοποίηση, ώστε να μπορούν να υπολογιστούν οι μεταβολές των υπολογιζόμενων μεγεθών. Αυτό γίνεται καθώς δεν υπάρχει κάποιο άλλο δεδομένο για το υπάρχον

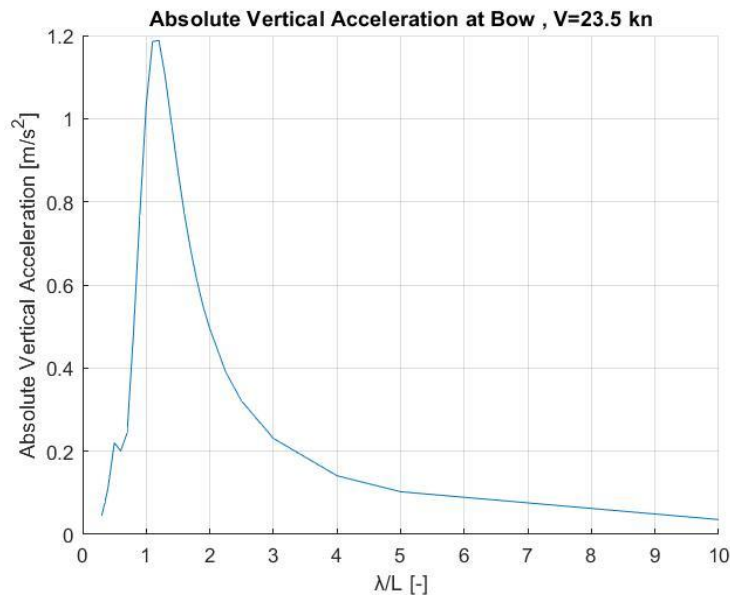
πλοίο το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως συγκριτικό μέγεθος. Καθώς όμως μας ενδιαφέρει η σχετική βελτίωση της γεωμετρίας ως προς την αρχικά παραχθείσα, αυτό δεν επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα.

Το αρχείο batch που δημιουργήθηκε για τις ανάγκες της βελτιστοποίησης χρησιμοποιεί τα εκτελέσιμα αρχεία που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 5.1 καθώς επίσης και μία σειρά από εξαγόμενα αρχεία από το CAESES που αφορούν την γεωμετρία του πλοίου και τα υδροστατικά του στοιχεία. Η διαδικασία γίνεται δύο φορές, μία για το βύθισμα των 12.626 m μία για το βύθισμα των 11.025 m, τα αποτελέσματα των οποίων συνδυάζονται – με ποσοστό 0.4 και 0.6 αντίστοιχα όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1.4 - για να πάρουμε το τελικό αποτέλεσμα. Συγκεκριμένα τα αποτελέσματα για την πατρική γάστρα είναι τα ακόλουθα:

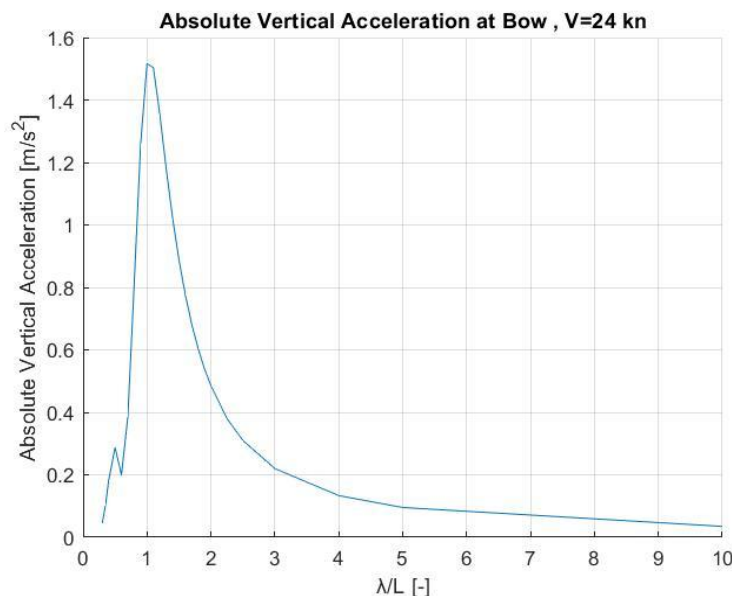
Πίνακας 9. Αρχικές τιμές κριτηρίων βελτιστοποίησης

T [m]	V [knots]	Αντίσταση κυματισμού [kN]	Επιτάχυνση στην πλώρη [m/s ²]	Αντικειμενική συνάρτηση αντίστασης	Αντικειμενική συνάρτηση επιτάχυνσης
12.626	23.5	226.1	1.1877	291.6	1.3850
11.025	24	335.3	1.5166		

Στα σχήματα 43 και 44 φαίνονται οι καμπύλες RAO της κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη της πατρικής γάστρας σε συνάρτηση με τον αδιάστατο συντελεστή λ/L των αρμονικών κυματισμών για τις δύο υπό μελέτη καταστάσεις φόρτωσης.



Σχήμα 43. Καμπύλη RAO της κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη πατρικής γάστρας σε απλούς αρμονικούς μετωπικούς κυματισμούς για την κατάσταση Full Load Departure και ταχύτητα πλοίου 23.5 kn



Σχήμα 44. Καμπύλη RAO της κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλήρη πατρικής γάστρας σε απλούς αρμονικούς κυματισμούς για την κατάσταση Half Load Departure και ταχύτητα πλοίου 24 kn

5.3 Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης

5.3.1 Εισαγωγή

Η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αποτελεί το βασικό στόχο της παρούσα εργασίας. Πραγματοποιήθηκε με αντικειμενικές συναρτήσεις την αντίσταση κυματισμού σε ήρεμο νερό και την μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλήρη σε απλούς αρμονικούς κυματισμούς με συντελεστή βαρύτητας 50% (για δύο καταστάσεις φόρτωσης $T=12.626$ m και $T=11.025$ m με συντελεστή βαρύτητας 40% και 60% ανά κατάσταση αντίστοιχα). Η αξιολόγηση της συμπεριφοράς του πλοίου σε κυματισμούς συνίσταται στην εκτίμηση των κάθετων επιταχύνσεων στην πλήρη κατά την κίνηση του προνευτασμού. Από την αντίστοιχη καμπύλη RAO θα απομονωθεί η μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης η οποία και θα αποτελέσει την αντικειμενική συνάρτηση. Το κριτήριο αυτό θα είναι το δεύτερο από τα επιλεγέντα προς αξιολόγηση από τον γενετικό αλγόριθμο σε όλες τις περιπτώσεις βελτιστοποίησης. Βάσει προγενέστερων μελετών του επιβλέποντα^{24,25} η ελαχιστοποίηση της μέγιστης τιμής της καμπύλης RAO ενός μεγέθους (εν προκειμένω της επιτάχυνσης) για ένα σύνολο αρμονικών κυματισμών συνεπάγεται βελτίωση των τιμών των αποκρίσεων του πλοίου για το ίδιο μέγεθος και σε τυχαίους κυματισμούς.

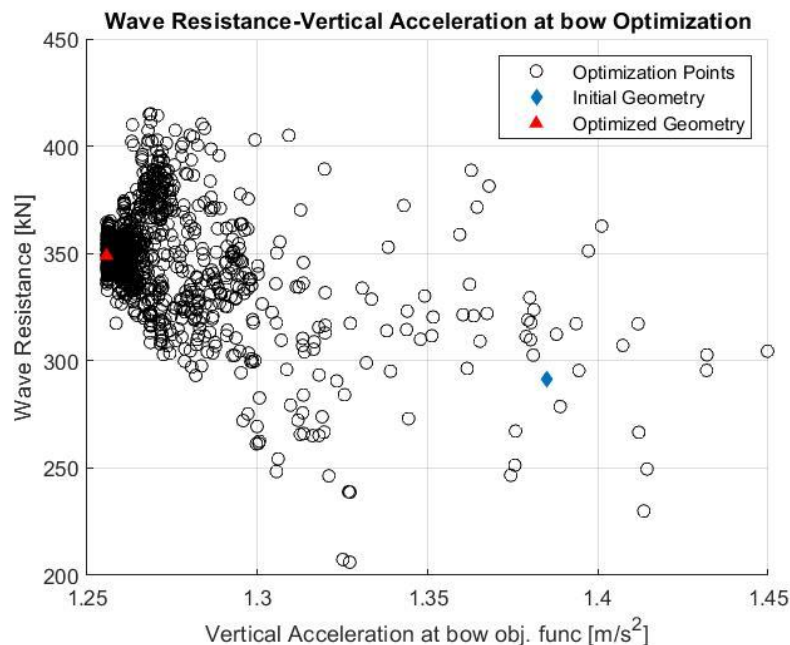
²⁴ Grigoropoulos G.J., Loukakis T. (1988), A New Method for Developing Hull Forms with Superior Seakeeping Qualities, Intl. Conf. CADMO '88, Southampton, England, September

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

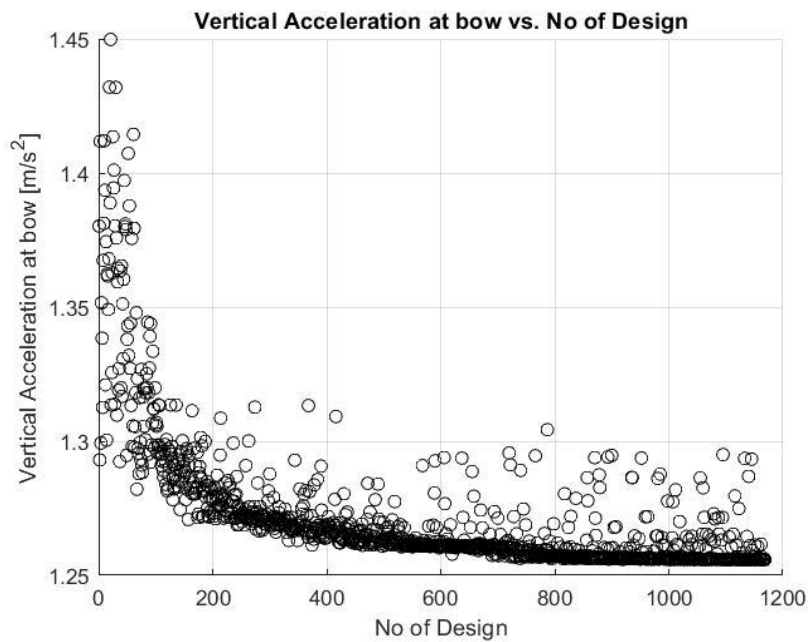
Για την καλύτερη κατανόηση της συγκεκριμένης πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης αρχικά θα παρουσιασθούν κατά σειρά τα αποτελέσματα των επιμέρους μονοκριτηριακών βελτιστοποιήσεων.

5.3.2 Μονοκριτηριακή Βελτιστοποίηση Κατακόρυφης Επιτάχυνσης στην Πλώρη

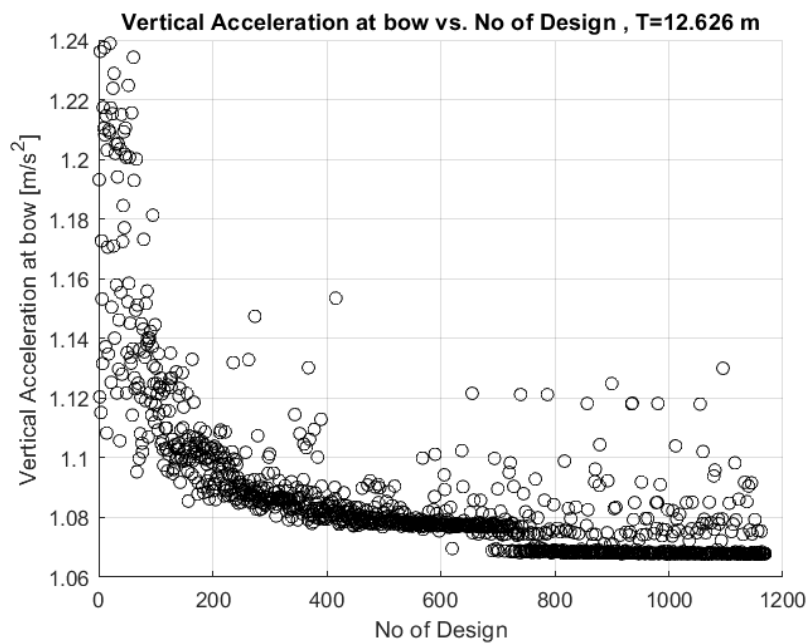
Αρχικά, θα παρουσιασθούν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης που έγινε με κριτήριο την μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλώρη σε απλούς αρμονικούς κυματισμούς για τι δύο καταστάσεις φόρτωσης ($T=12.626$ m και $T=11.025$ m) σε ταχύτητες 23.5 kn και 24 kn με συντελεστή βαρύτητας 40% και 60% αντίστοιχα. Κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης παρήχθησαν 1280 διαφορετικές γεωμετρίες. Στα σχήματα 45-63 παρουσιάζονται τα προκύπτοντα διαγράμματα διασποράς του συνόλου των λύσεων όπου εμφανίζονται μόνο οι αποδεκτές γεωμετρίες, οι οποίες για τη συγκεκριμένη περίπτωση ήταν 1169/1280. Στα πρώτα διαγράμματα παρουσιάζονται οι διασπορές των λύσεων τόσο της αντικειμενικής συνάρτησης της κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη που αποτέλεσε το κριτήριο βελτιστοποίησης όσο και της αντίστασης κυματισμού σε ήρεμο νερό και στη συνέχεια η διακύμανση των μεταβλητών σχεδίασης και των τιμών που έγινε σύγκλιση καθώς και η διακύμανση των περιορισμών σχεδίασης που θα αποτελέσουν και βάση σχολιασμού και εξαγωγής συμπερασμάτων για την ποιότητα της διαδικασίας.



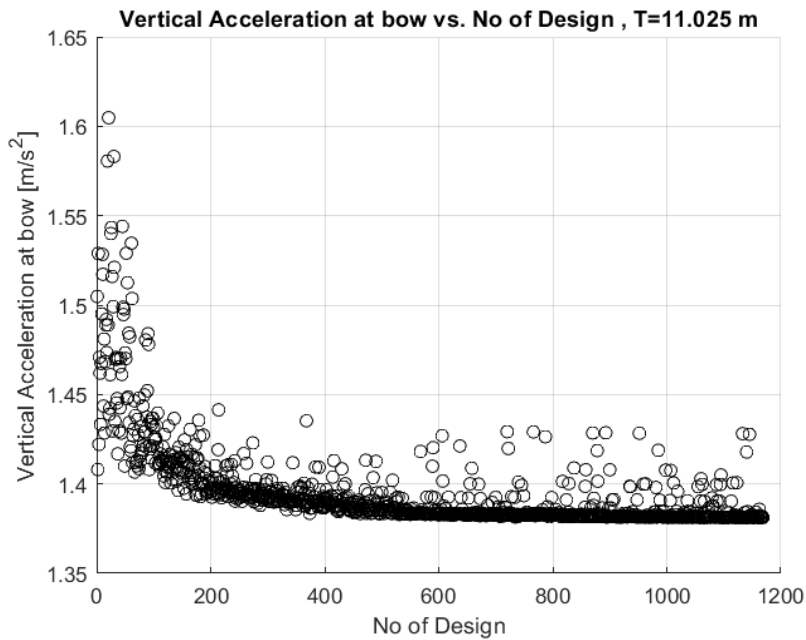
Σχήμα 45. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με κριτήριο την μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλώρη



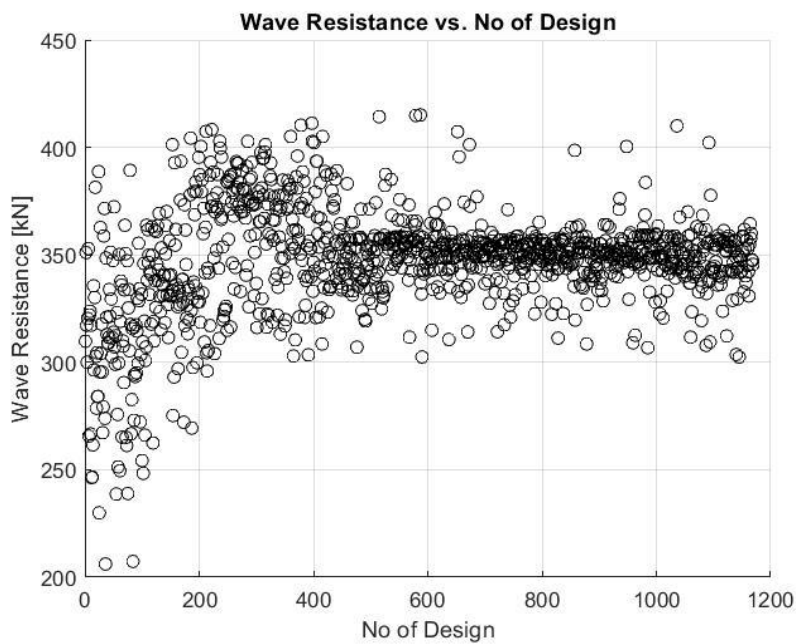
Σχήμα 46. Διασπορά λύσεων - Μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλώρη (40% FLD & 60% HLD)



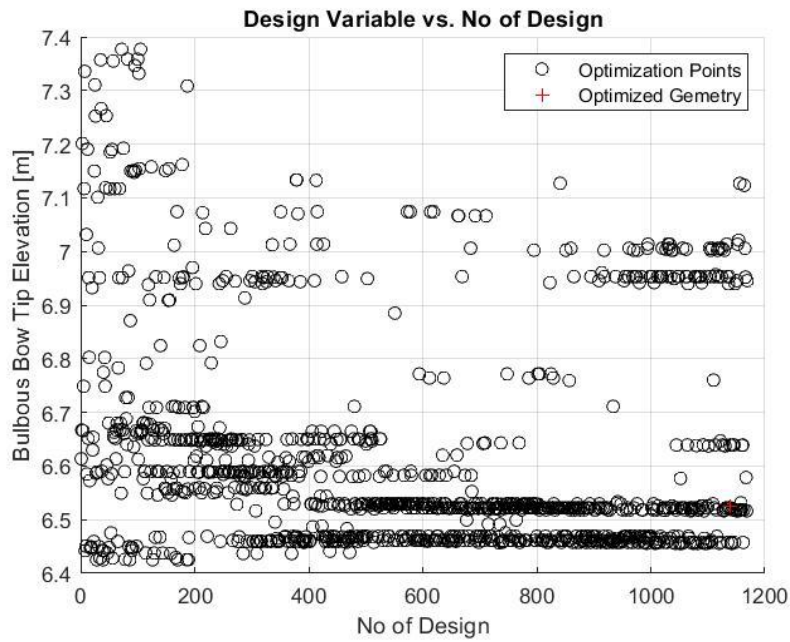
Σχήμα 47. Διασπορά λύσεων - Μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλώρη T=12.626 m, V=23.5 kn



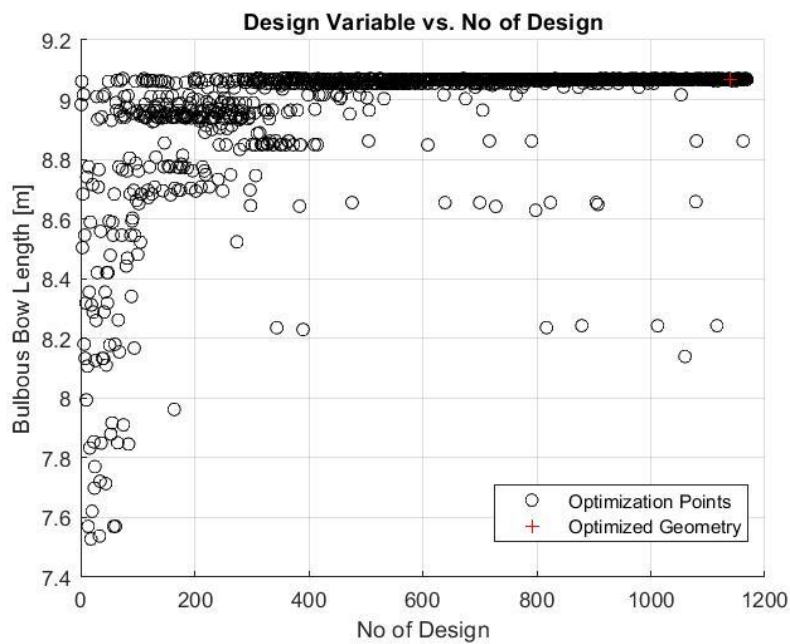
Σχήμα 48. Διασπορά λύσεων - Μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλώρη, T=11.025 m, V=24 kn



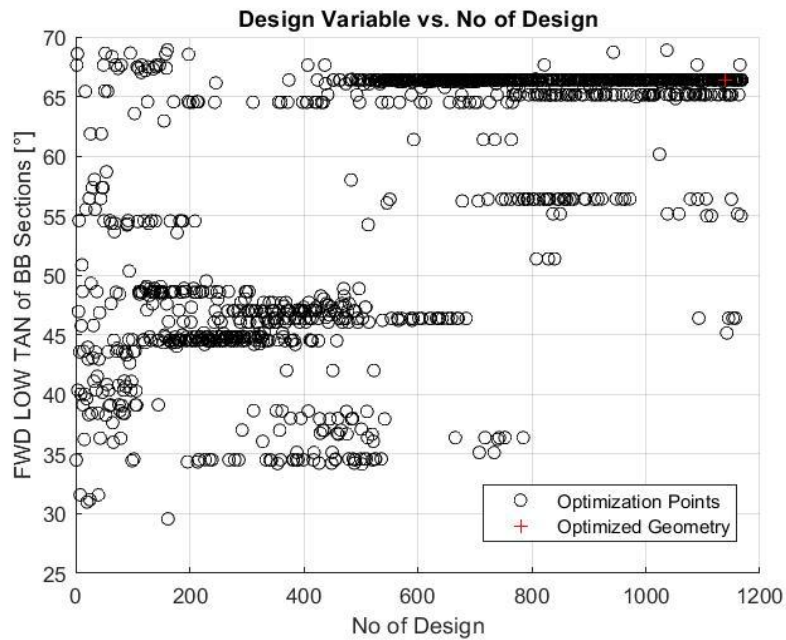
Σχήμα 49. Διασπορά λύσεων - Αντίσταση Κυματισμού σε ήρεμο νερό (40% FLD & 60 % HLD)



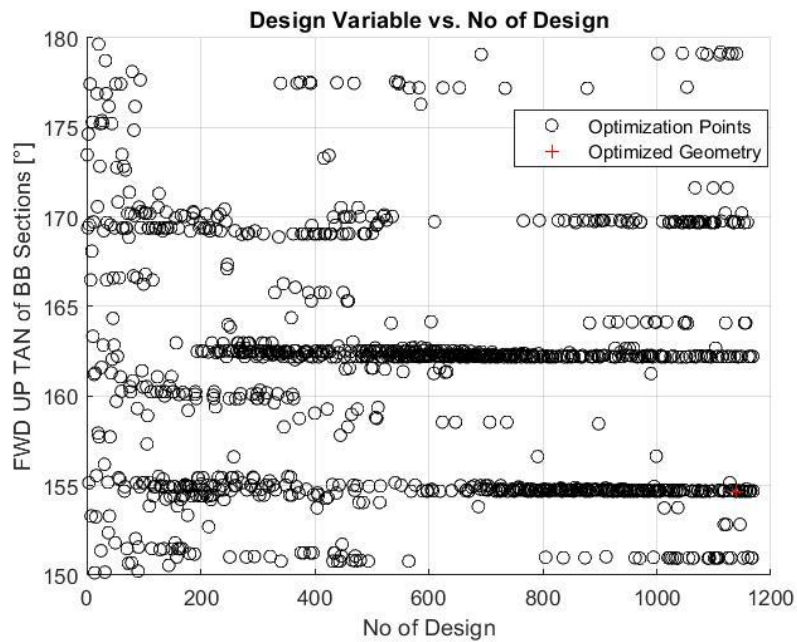
Σχήμα 50. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης - Καθ' ύψος θέση σημείου tip του βολβού



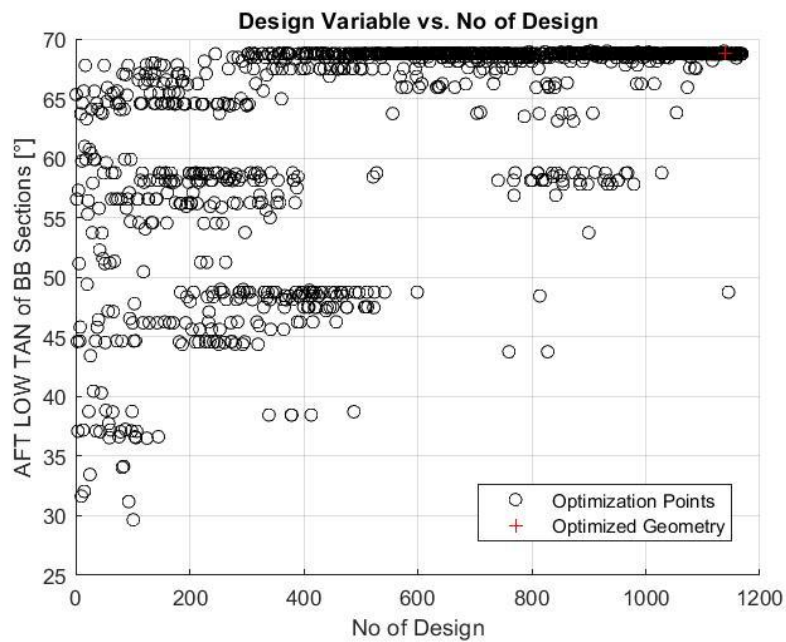
Σχήμα 51. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης - Μήκος Βολβού



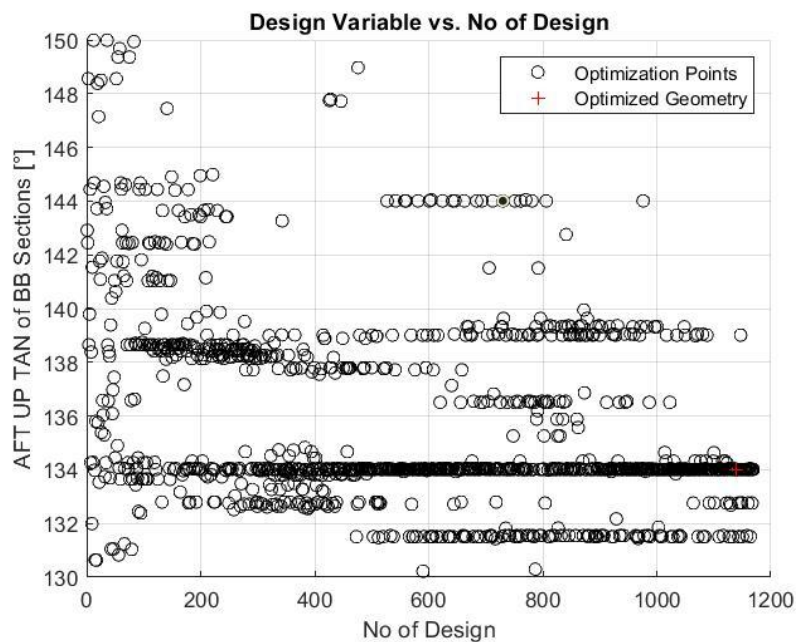
Σχήμα 52. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης – Γωνία επαπτομένης των πρωραίων νομέων του βολβού με τον άξονα z στο σημείο τομής με το κάτω τμήμα του προφίλ του



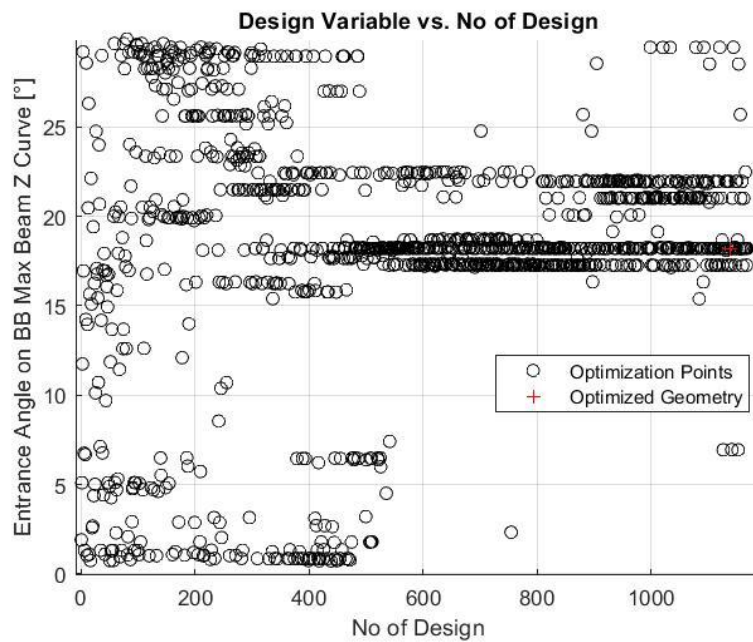
Σχήμα 53. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης – Γωνία επαπτομένης των πρωραίων νομέων του βολβού με τον άξονα z στο σημείο τομής με το άνω τμήμα του προφίλ του



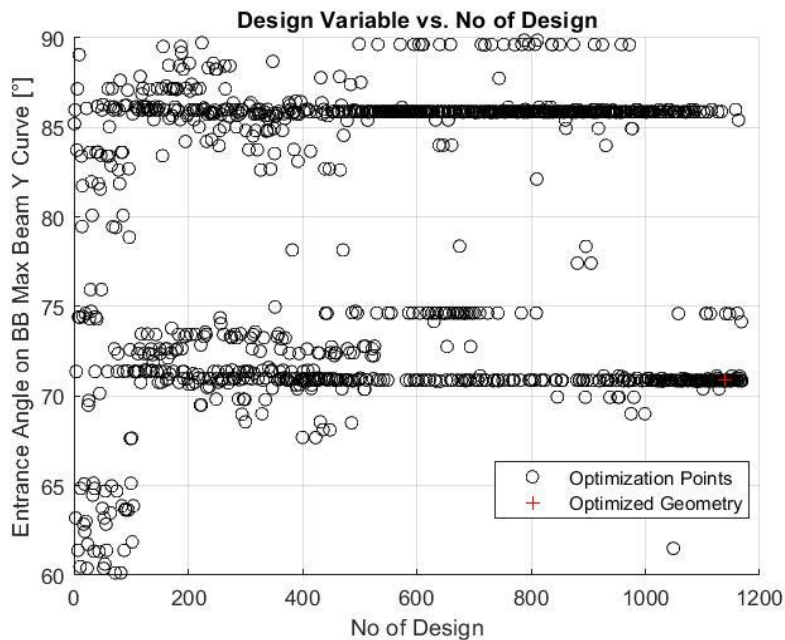
Σχήμα 54. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης – Γωνία επαπτομένης των πρυμναίων νομέων του βολβού με τον άξονα z στο σημείο τομής με το κάτω τμήμα του προφίλ του



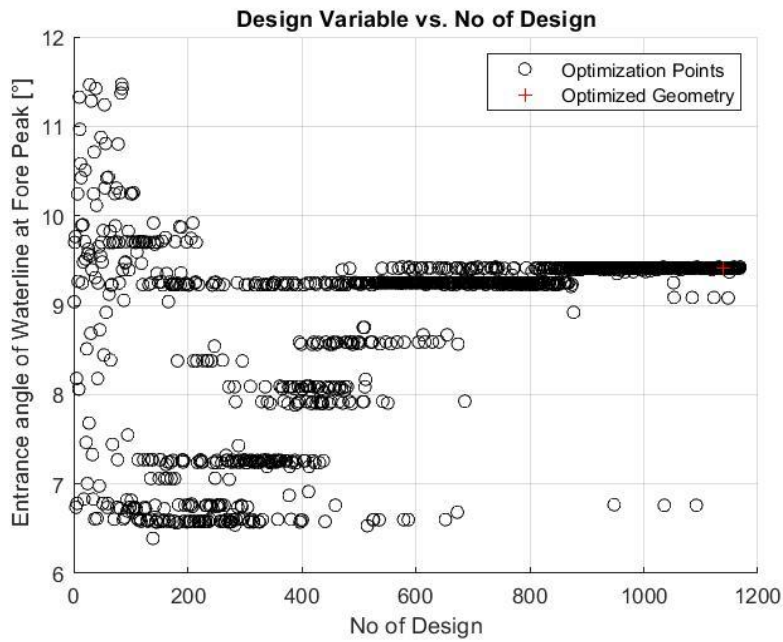
Σχήμα 55. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης – Γωνία επαπτομένης των πρυμναίων νομέων του βολβού με τον άξονα z στο σημείο τομής με το άνω τμήμα του προφίλ του



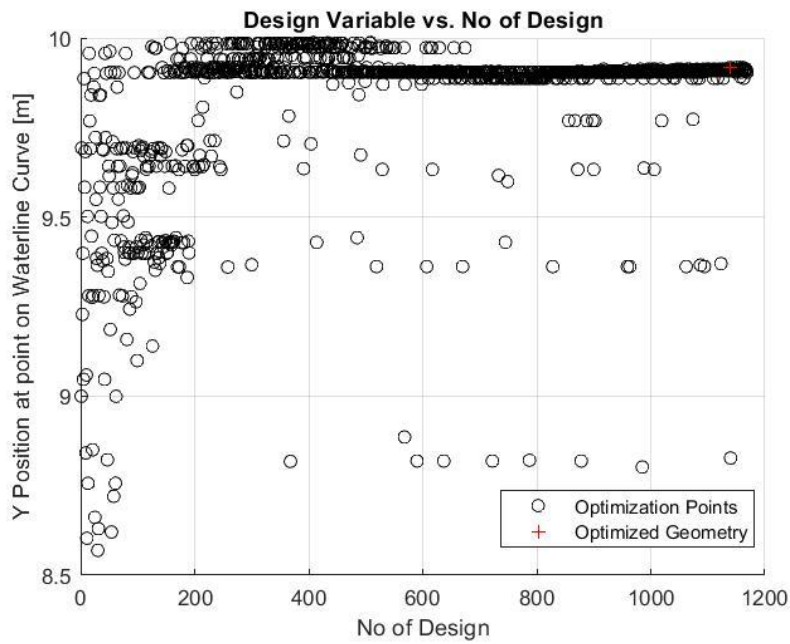
Σχήμα 56. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης - Γωνία εισόδου της καμπύλης κατηγμένων των σημείων της καμπύλης μεγίστου πάχους του βολβού



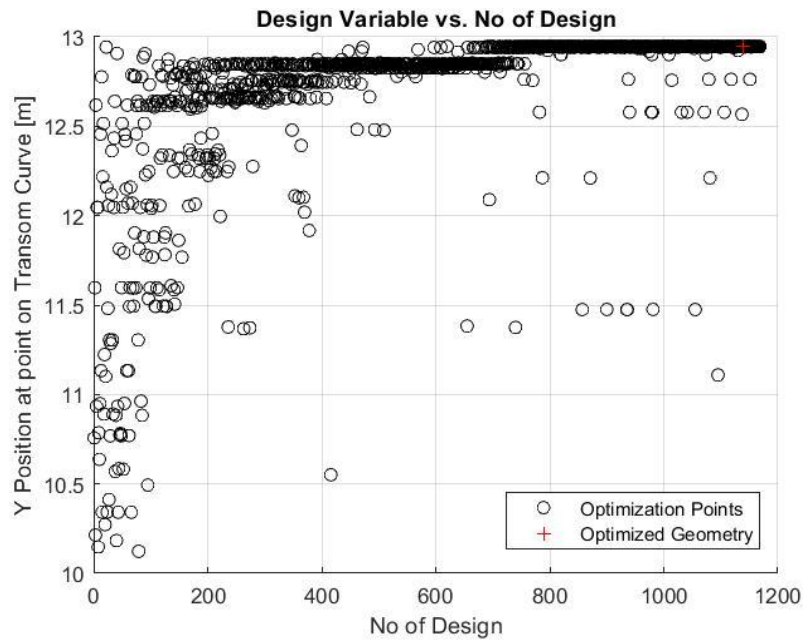
Σχήμα 57. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης - Γωνία εισόδου της καμπύλης τεταγμένων των σημείων της καμπύλης μεγίστου πάχους του βολβού



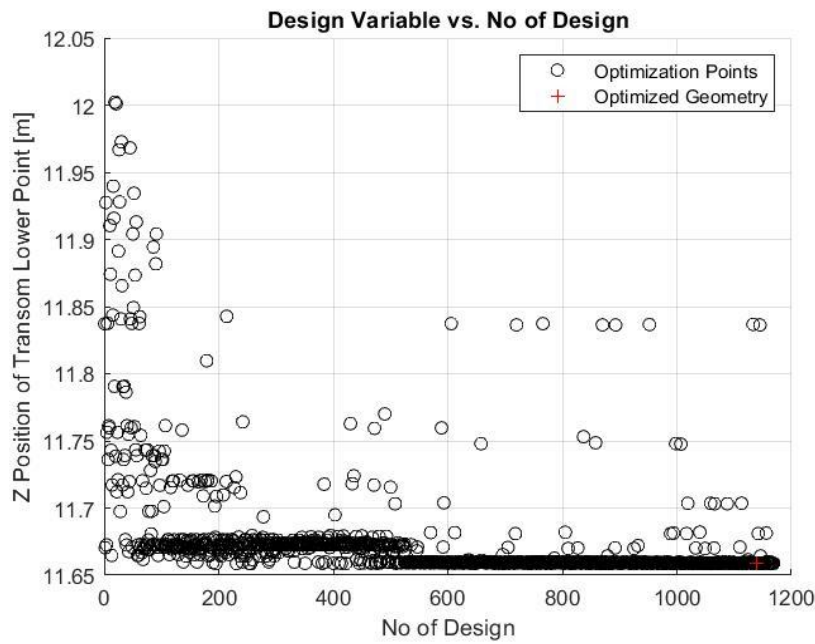
Σχήμα 58. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης - Γωνία εισόδου της ισάλου σχεδίασης



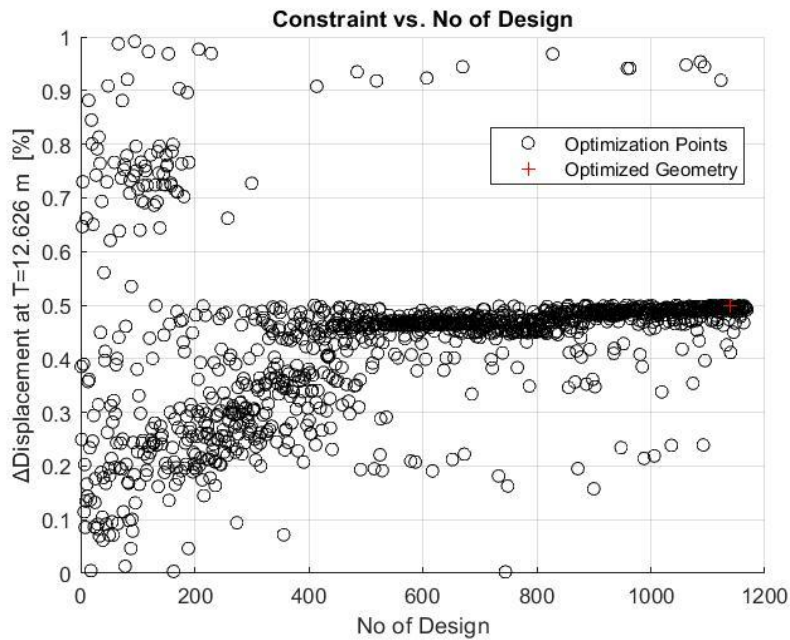
Σχήμα 59. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης - Πλάτος σημείου της ισάλου σχεδίασης στο πρωραίο τμήμα της



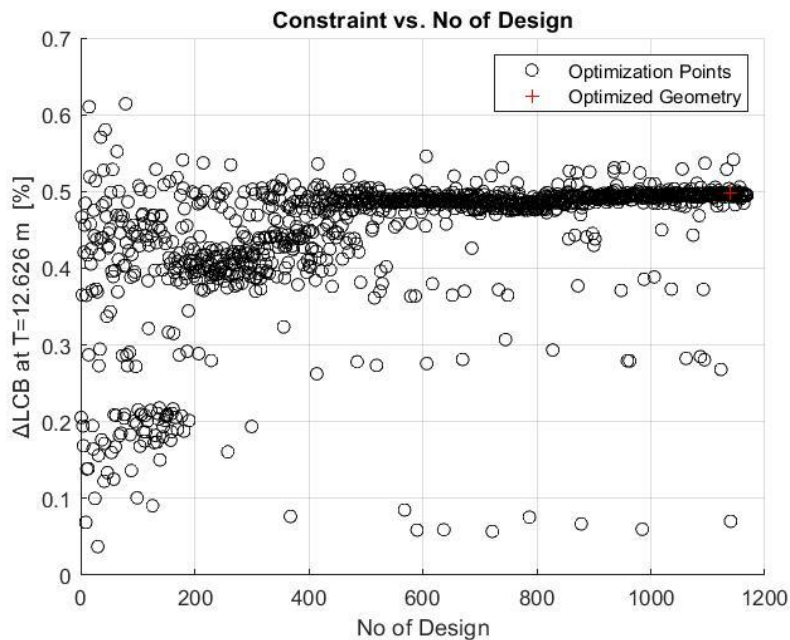
Σχήμα 60. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης - Πλάτος σημείου της καμπύλης Transom



Σχήμα 61. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης - Καθ' ύψος θέση του σημείου τομής της καμπύλης Transom με την καμπύλη Center Plane Curve (CPC)



Σχήμα 62. Διακύμανση περιορισμού σχεδίασης - % Μεταβολή εκτόπισματος στην κατάσταση Full Load Departure, T=12.626 m



Σχήμα 63. Διακύμανση περιορισμού σχεδίασης - % Μεταβολή διαμήκουθς θέσης κέντρου άντωσης στην κατάσταση Full Load Departure, T=12.626 m

Η ερμηνεία των παραπάνω διαγραμμάτων θα ξεκινήσει από αυτό που έχει άξονες την αντικειμενική συνάρτηση της μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη που χρησιμοποιήθηκε σαν κριτήριο της μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης και τον αριθμό των παραχθειών γεωμετριών (Σχήμα 46). Παρατηρείται ότι η διασπορά των λύσεων της αντικειμενικής συνάρτησης της μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη παρουσιάζει την αναμενόμενη μορφή μιας βελτιστοποίησης με κριτήριο τη συγκεκριμένη μεταβλητή. Στις πρώτες γάστρες υπάρχει αραιή κατανομή των λύσεων και σε τιμές σχετικά υψηλές, ενώ παρατηρείται σταδιακή σύγκλιση των λύσεων σε μια βέλτιστη τιμή αισθητά καλύτερη από την αρχική.

Στα Σχήματα 47 και 48 παρουσιάζεται η κατανομή των λύσεων των επιμέρους συνιστωσών της αντικειμενικής συνάρτησης. Στο βύθισμα των 12.626 m η μέση τιμή είναι 1.0879 m/s^2 , η τυπική απόκλιση είναι 0.028 m/s^2 ενώ η ελάχιστη τιμή είναι 1.0677 m/s^2 . Στο βύθισμα των 11.025 m η μέση τιμή είναι 1.3958 m/s^2 , η τυπική απόκλιση είναι 0.025 m/s^2 ενώ η ελάχιστη τιμή είναι 1.3810 m/s^2 . Παρόλο που η τυπική απόκλιση στο βύθισμα των 11.025 m είναι μικρότερη η ταχύτητα σύγκλισης είναι μεγαλύτερη όπως προκύπτει από την σύγκριση των σχημάτων 47 και 48. Ακόμα όμως και στην περίπτωση των 11.025 m ο αριθμός των γεωμετριών είναι ικανός ώστε να αποφανθούμε πως η σύγκλιση είναι ικανοποιητική.

Η αντίσταση κυματισμού φυσιολογικά δεν παρουσιάζει κάποια σύγκλιση και οι λύσεις εμφανίζουν την τυχαιότητα που αναμέναμε. Επιπλέον, όπως παρατηρούμε από το Σχήμα 49, σε προχωρημένες γενεές όπου έχουμε σαφή βελτίωση της αντικειμενικής συνάρτησης της μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης της πλώρης, η αντίσταση κυματισμού παρουσιάζει αύξηση σε σχέση με την αρχική γεωμετρία. Ενδεικτικό είναι πως η μέση τιμή της αντίστασης κυματισμού για τις 1169 αποδεκτές γεωμετρίες είναι 347.1 kN, τιμή σαφώς υψηλότερη σε σύγκριση με την αντίστοιχη τιμή της αρχικής γεωμετρίας όπως φαίνεται στον Πίνακα 9 του κεφαλαίου 5.2. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η περίπτωση της μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης με αντικειμενική συνάρτηση την μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση της πλώρης οδηγεί σε διακύμανση των μεταβλητών σχεδίασης και κατάταξη των γεωμετριών από τον αλγόριθμο NSGA II με τέτοιο τρόπο που βελτιώνει την αντικειμενική συνάρτηση αλλά παράγει σε προχωρημένες γενεές σχεδιάσεις με υψηλότερη αντίσταση κυματισμού σε ήρεμο νερό.

Στα υπόλοιπα Σχήματα (50-63) παρουσιάζεται η διακύμανση των μεταβλητών σχεδίασης καθώς και των περιορισμών που τέθηκαν (για χάριν συντομίας παρουσιάζονται μόνο τα διαγράμματα της % μεταβολής του εκτοπίσματος και της διαμήκου θέσης του κέντρου άντωσης στην κατάσταση Full Load Departure καθώς για την κατάσταση Half Load Departure εμφανίζουν αντίστοιχη μορφή). Γενικά η πλειοψηφία των μεταβλητών ακολουθεί συγκλίνουσα πορεία σε συγκεκριμένες τιμές, άλλες από τις πρώτες σχεδιάσεις που παρήγαγε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης και άλλες στην τελευταία φάση της. Αν και ελάχιστες εξ' αυτών δεν συγκλίνουν, όπως στην περίπτωση της καθ' ύψους θέσης του tip του βολβού που παραθέεται στο Σχήμα 50, φαίνεται πως αυτό δεν επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι αυτές οι παράμετροι δεν έχουν μεγάλη επίδραση στο υπό μελέτη μέγεθος. Επιπλέον παρατηρούμε πως ορισμένες μεταβλητές σχεδίασης συγκλίνουν κοντά στις τιμές των ακραίων τιμών διακύμανσής τους. Πρακτικά αυτό σημαίνει πως υπάρχει περιθώριο αύξησης του

εύρους διακύμανσης των μεταβλητών αυτών. Ωστόσο, το εύρος διακύμανσης των μεταβλητών σχεδίασης, όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4.4.6, ορίστηκε με σκοπό την διατήρηση της ομαλότητας της γεωμετρίας πραγματοποιώντας κατάλληλο έλεγχο των παραγόμενων σχεδιάσεων με τον συνδυασμό των ακραίων τιμών των μεταβλητών. Επομένως, το εύρος αυτό έχει οριστεί κατάλληλα ώστε να περιοριστεί σημαντικά η πιθανότητα παραγωγής ανώμαλων μορφών γάστρας.

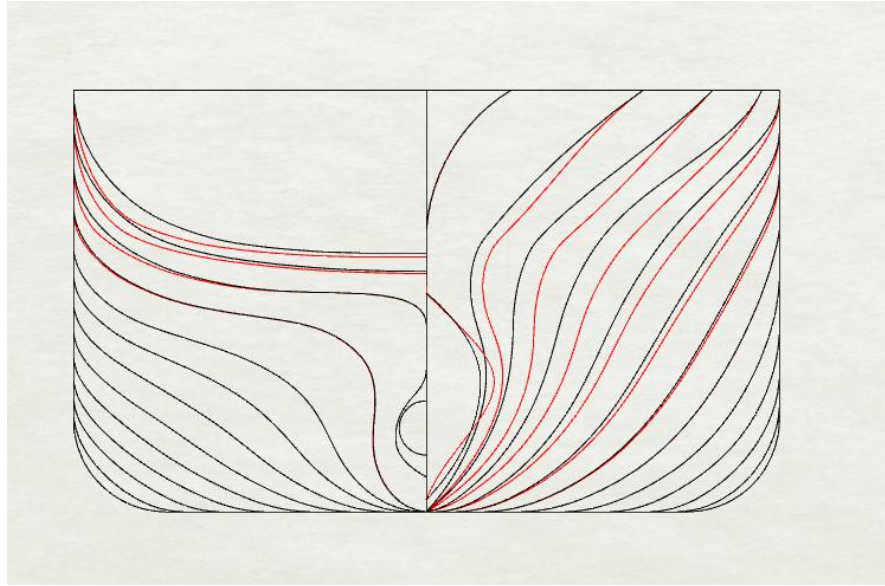
Στον Πίνακα 10 έχουμε τις τιμές των μεταβλητών σχεδίασης της αρχικής και της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας. Στον Πίνακα 11 έχουμε την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας καθώς και την ποσοστιαία μεταβολή της. Όπως αναμενόταν, η βέλτιστη γεωμετρία αποτελεί σχεδίαση που ανήκει στις τελευταίες γενιές που παρήχθησαν από τον αλγόριθμο NSGA II (design no: 1244) και οι % μεταβολές των περιορισμών σχεδίασης είναι +0.499 % μεταβολή του εκτοπίσματος και +0.497 % (μετακίνηση κέντρου άντωσης προς μέσο νομέα) μεταβολή της διαμήκου θέσης του κέντρου άντωσης για την κατάσταση Full Load Departure και +0.410 % και +0.533 αντίστοιχα για την κατάσταση Half Load Departure. Στο Σχήμα 64 φαίνονται οι νομείς της αρχικής και της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας, ενώ στα Σχήματα 65 και 66 φαίνονται οι καμπύλες RAO της επιτάχυνσης στην πλήρη σε συνάρτηση με τον αδιάστατο συντελεστή λ/L των μετωπικών κυματισμών για τις δύο υπό μελέτη καταστάσεις φόρτωσης, όπου παρατηρείται εμφανής βελτίωση στην μέγιστη τιμή της κατακόρυφης επιτάχυνσης και στις δύο περιπτώσεις.

Πίνακας 10. Τιμές μεταβλητών σχεδίασης αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας

Μεταβλητή Σχεδίασης	Πατρική Γάστρα	Βελτιστοποιημένη Γάστρα
Bulbous Bow Tip Elevation (m) :	8.249	6.524
Bulbous Bow Length (m):	6.908	9.068
FWD LOW TAN of BB sections (deg):	46	66.4
FWD UP TAN of BB sections (deg):	180	154.7
AFT LOW TAN of BB sections (deg):	46	68.8
AFT UP TAN of BB sections (deg):	140	134.0
Entrance Angle on BB Max Beam Z Curve (deg):	0	18.2
Entrance Angle on BB Max Beam Y Curve (deg):	90	70.9
Entrance Angle of WL at FP (deg):	7.8	9.4
Y Position at Point on WL (m):	8.685	9.917
Y Position at Point on Transom Curve (m):	11.772	12.948
Z Position on Transom Lower Point (m):	11.836	11.659

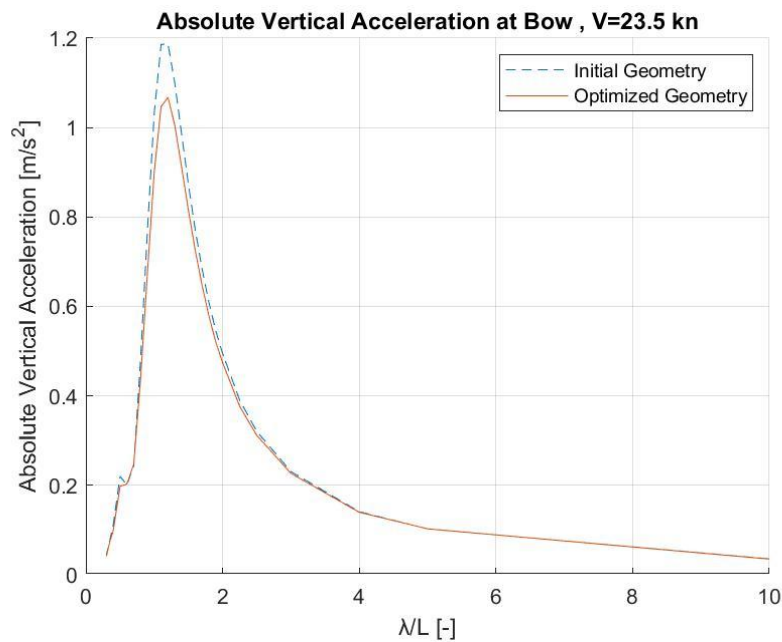
Πίνακας 11. Σύγκριση αντικειμενικής συνάρτησης αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας

Αντικειμενική Συνάρτηση	Πατρική Γάστρα	Βελτιστοποιημένη Γάστρα	Ποσοστιαία Μεταβολή (%)
Μέγιστη Κατακόρυφη Επιτάχυνση στην Πλήρη (m/s^2) :	1.3850	1.2557	-9.34

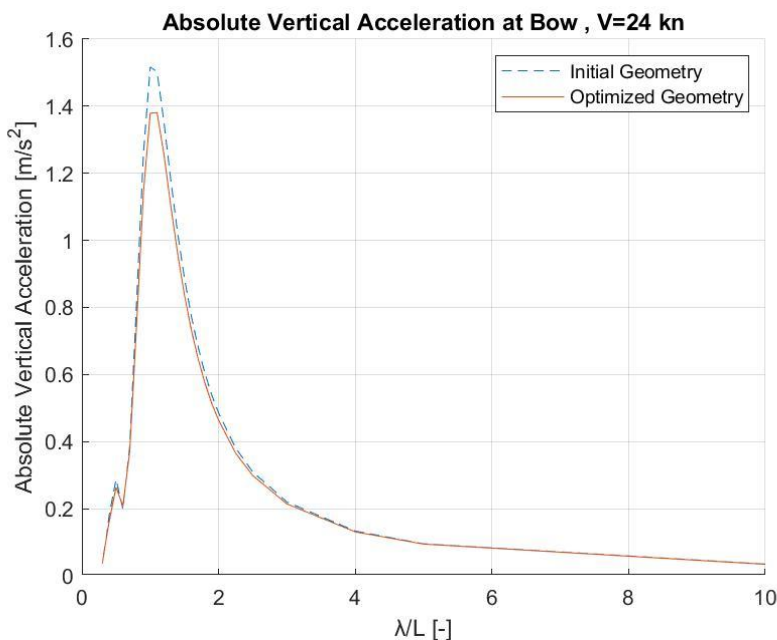


Σχήμα 64. Νομείς αρχικής (μαύρες καμπύλες) και βελτιστοποιημένης (κόκκινες καμπύλες) γεωμετρίας

Από τους νομείς των δύο γεωμετριών παρατηρούμε την εμφανή διαφοροποίηση τόσο στην περιοχή του βολβού (8 μεταβλητές σχεδίασης) όσο και στους πρωραίους νομείς. Μεταβολές παρατηρούνται επίσης στην περιοχή της πρύμνης (2 μεταβλητές σχεδίασης).



Σχήμα 65. Καμπύλη RAO της κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη σε απλούς αρμονικούς μετωπικούς κυματισμούς για την κατάσταση Full Load Departure και ταχύτητα πλοίου 23.5 kn



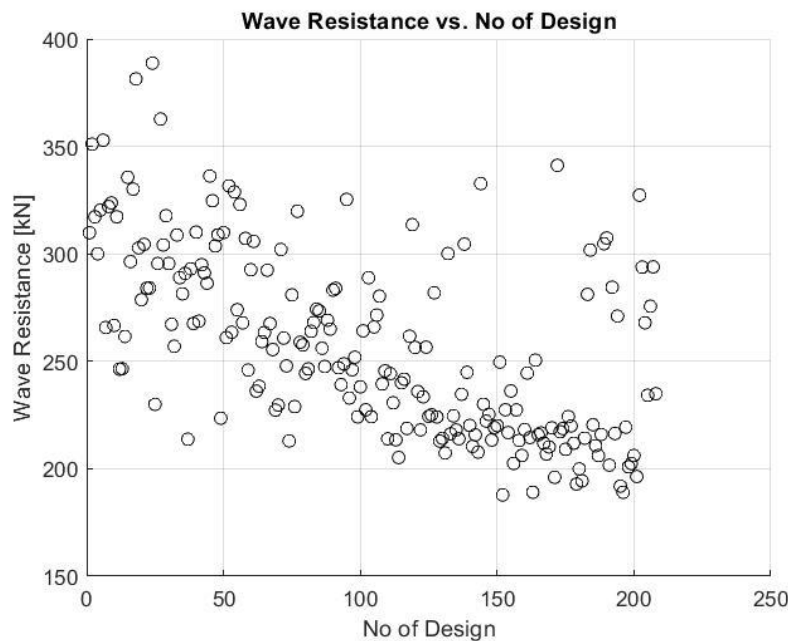
Σχήμα 66. Καμπύλη RAO της κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη σε απλούς αρμονικούς μετωπικούς κυματισμούς για την κατάσταση Half Load Departure και ταχύτητα πλοίου 24 kn

5.3.3 Μονοκριτηριακή Βελτιστοποίηση Αντίστασης Κυματισμού σε Ήρεμο Νερό

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της 2^{ης} μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης που πραγματοποιήθηκε με κριτήριο την αντίσταση κυματισμού σε ήρεμο νερό για τις δύο καταστάσεις φόρτωσης ($T=12.626$ m και $T=11.025$ m) σε ταχύτητες 23.5 kn και 24 kn με συντελεστή βαρύτητας 40% και 60% αντίστοιχα.

Αρχικά έγινε δοκιμή ώστε η συγκεκριμένη περίπτωση μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης να πραγματοποιηθεί με χρήση όλων των παραμέτρων σχεδίασης (12 στο σύνολό τους όπως αναφέρεται στο κεφάλαιο 4.4.6). Η διαδικασία βελτιστοποίησης δεν ολοκληρώθηκε επιτυχώς καθώς ήδη από τις πρώτες 8 γενιές σχεδιάσεων που παρήγαγε ο αλγόριθμος NSGA II παρατηρήθηκαν 48 μη αποδεκτές γεωμετρίες. Οι μη αποδεκτές γεωμετρίες οφείλονται είτε σε παραβίαση των περιορισμών σχεδίασης που έχουν τεθεί (το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με κατάλληλη μείωση των ορίων διακύμανσης των παραμέτρων σχεδίασης) είτε στην δημιουργία ασυνεχειών στις παραμετρικές επιφάνειες (λόγω των μεταβολών των παραμέτρων σχεδίασης που πραγματοποιεί ο γενετικός αλγόριθμος) που καταστούν αδύνατο τον υπολογισμό της αντίστασης κυματισμού σε ήρεμο νερό από το πρόγραμμα SWAN 2. Λόγω του τρόπου λειτουργίας του γενετικού αλγορίθμου NSGA II, η παραπάνω διαπίστωση οδηγεί στο συμπέρασμα πως στο σύνολο των 1280 γεωμετριών θα είχαμε περίπου 250 γεωμετρίες με μη επιτυχή υπολογισμό της αντίστασης κυματισμού σε ήρεμο νερό. Επομένως ο συνολικός αριθμός γεωμετριών δεν θα ήταν ικανός ώστε να αποφανθούμε πως η σύγκλιση και η

ποιότητα της διαδικασίας είναι ικανοποιητική. Ενδεικτικά παραθέεται το Σχήμα 67 που έχει άξονες την αντικειμενική συνάρτηση της αντίστασης κυματισμού σε ήρεμο νερό που χρησιμοποιήθηκε σαν κριτήριο της μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης και τον αριθμό των παραχθειςών γεωμετριών, στο οποίο παρατηρούμε πως σε προχωρημένες σχεδιάσεις λαμβάνουμε καλύτερες τιμές σε σύγκριση με την αρχική αντίσταση κυματισμού της πατρικής γάστρας που φαίνεται στον Πίνακα 9 του κεφαλαίου 5.2. Ωστόσο αντίστοιχη βελτίωση στην τιμή της αντίστασης κυματισμού σε ήρεμο νερό παρατηρείται και στη διαδικασία βελτιστοποίησης που θα αναλυθεί στη συνέχεια.

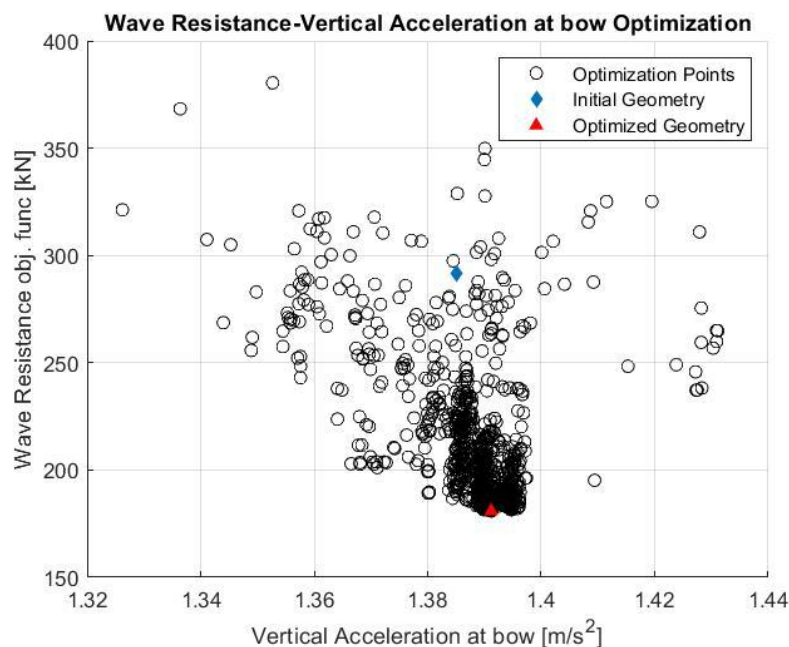


Σχήμα 67. Διασπορά λύσεων - Αντίσταση κυματισμού σε ήρεμο νερό (40% FLD & 60 % HLD)

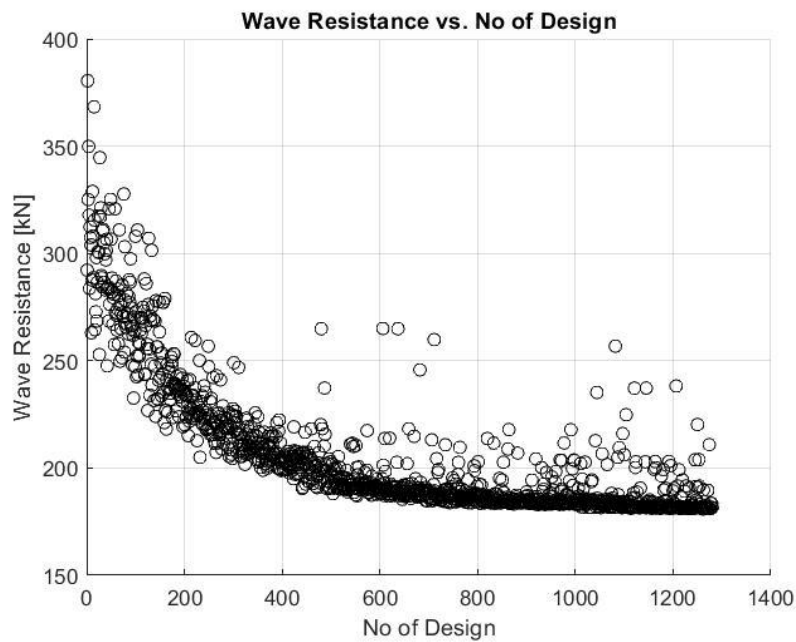
Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2.2, ο υπολογισμός της αντίστασης κυματισμού σε ήρεμο νερό πραγματοποιείται από το πρόγραμμα SWAN 2 με χρήση της θεωρίας δυναμικού η οποία παραλείπει τα φαινόμενα συνεκτικότητας. Τα φαινόμενα συνεκτικότητας εμφανίζονται κατά κύριο λόγο στην περιοχή της πρύμνης του πλοίου κατά την κίνησή του σε ήρεμο νερό λόγω της επέκτασης του οριακού στρώματος πίσω από το πλοίο, της αποκόλληση της ροής, της δημιουργία δρόμου δινών και ανάστροφης ροής κλπ. Επομένως, μέσω των υπολογισμών της θεωρίας δυναμικού η επιρροή της γεωμετρίας της πρύμνης στο τελικό αποτέλεσμα της αντίστασης κυματισμού σε ήρεμο νερό θεωρείται μικρή σε σύγκριση με την γεωμετρία του βολβού και των πρωραίων νομέων. Για την πραγματοποίηση λοιπόν της μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης με κριτήριο την αντίσταση κυματισμού σε ήρεμο νερό αποφασίστηκε η μείωση των μεταβλητών σχεδίασης σε 10 – διατηρώντας τα ίδια όρια διακύμανσης – εξαιρώντας από την διαδικασία τις δύο μεταβλητές σχεδίασης στην περιοχή της πρύμνης (καθ' ύψος θέση του σημείου τομής της καμπύλης Transom με την καμπύλη Center Plane Curve & πλάτος σημείου

της καμπύλης Transom) καθώς θεωρήθηκε ότι δεν θα επηρεάσουν σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα. Για τον έλεγχο αυτού του ισχυρισμού πραγματοποιήθηκε διαδικασία βελτιστοποίησης για περιορισμένο αριθμό γεωμετριών (15 γενεές x 32 μέλη = 480 γεωμετρίες) με μοναδικές μεταβλητές σχεδίασης τις δύο προαναφερθείσες και διαπιστώθηκε μια μείωση 6% της αντίστασης κυματισμού σε ήρεμο νερό.

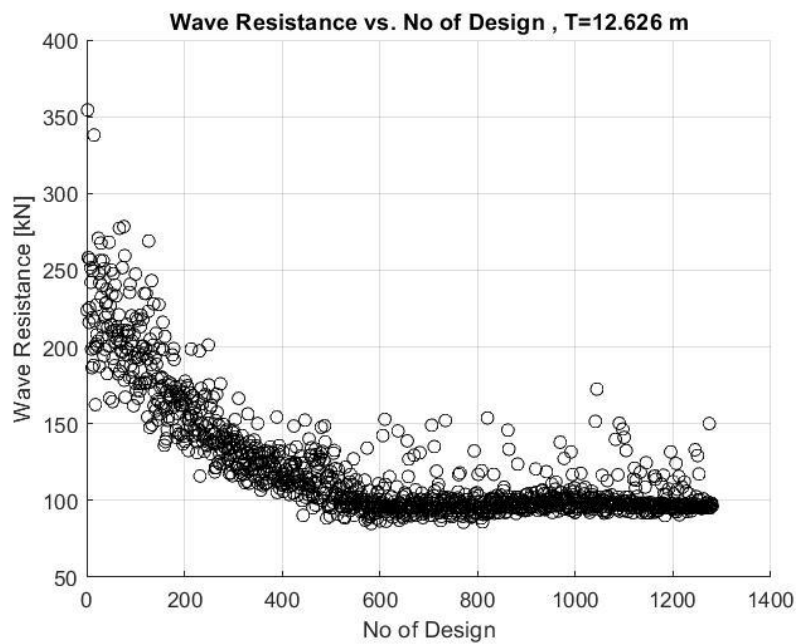
Κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης με 10 μεταβλητές σχεδίασης παρήχθησαν 1280 διαφορετικές γεωμετρίες. Στα σχήματα 68-85 παρουσιάζονται τα προκύπτοντα διαγράμματα διασποράς του συνόλου των λύσεων όπου εμφανίζονται μόνο οι αποδεκτές γεωμετρίες, οι οποίες για τη συγκεκριμένη περίπτωση ήταν 1280/1280 (καμία γεωμετρία από τις παραχθείσες δεν κρίθηκε μη αποδεκτή σύμφωνα με τους περιορισμούς σχεδίασης στη μεταβολή του εκτοπίσματος και της διαμήκουσ θέσης του κέντρου άντωσης - προκειμένου να μην υπερβαίνουν το $\pm 1.5\%$ - στις δύο υπό μελέτη καταστάσεις φόρτωσης). Στα πρώτα διαγράμματα παρουσιάζονται οι διασπορές των λύσεων τόσο της αντικειμενικής συνάρτησης της αντίστασης κυματισμού σε ήρεμο νερό που αποτέλεσε το κριτήριο βελτιστοποίησης όσο και της κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη και στη συνέχεια η διακύμανση των μεταβλητών σχεδίασης και των τιμών που έγινε σύγκλιση καθώς και η διακύμανση των περιορισμών σχεδίασης που θα αποτελέσουν και βάση σχολιασμού και εξαγωγής συμπερασμάτων για την ποιότητα της διαδικασίας.



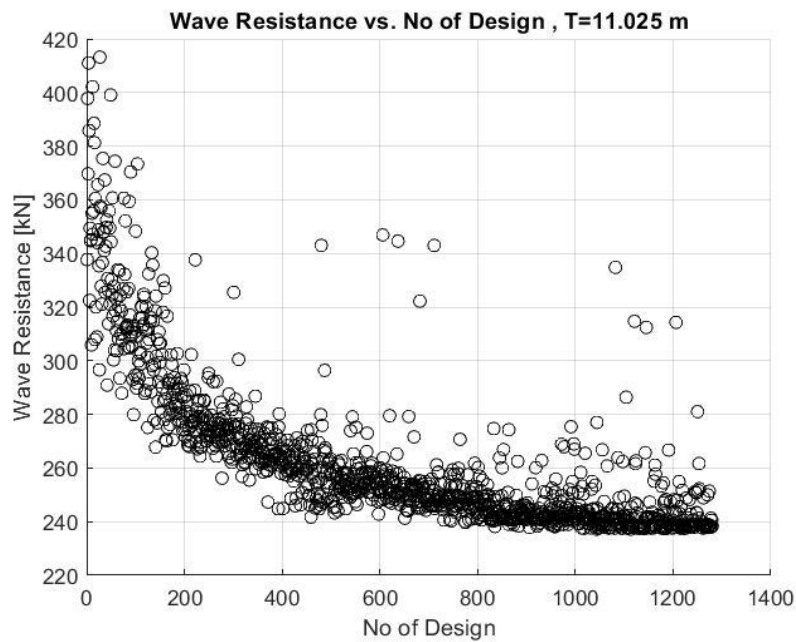
Σχήμα 68. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με κριτήριο την αντίσταση κυματισμού σε ήρεμο νερό



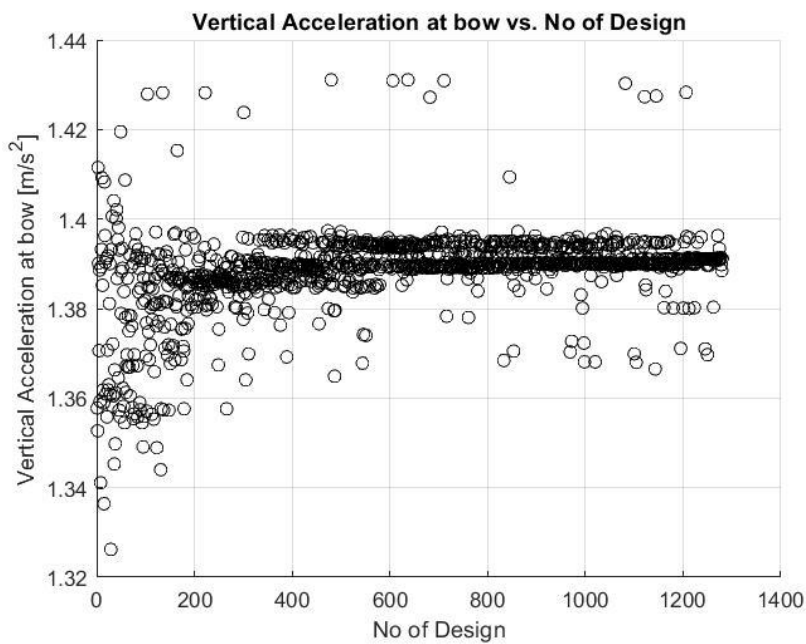
Σχήμα 69. Διασπορά λύσεων - Αντίσταση κυματισμού σε ήρεμο νερό (40% FLD & 60 % HLD)



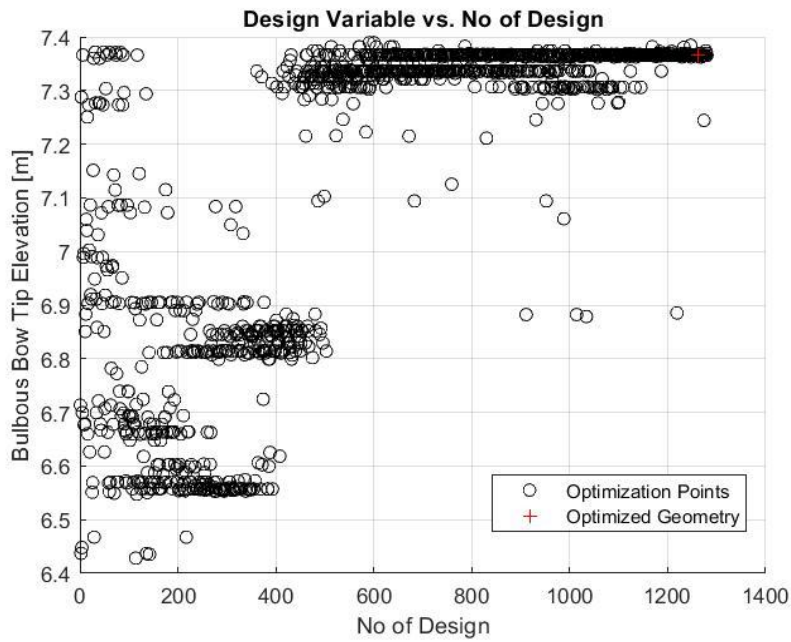
Σχήμα 70. Διασπορά λύσεων - Αντίσταση κυματισμού σε ήρεμο νερό, T=12.626 m, V=23.5 kn



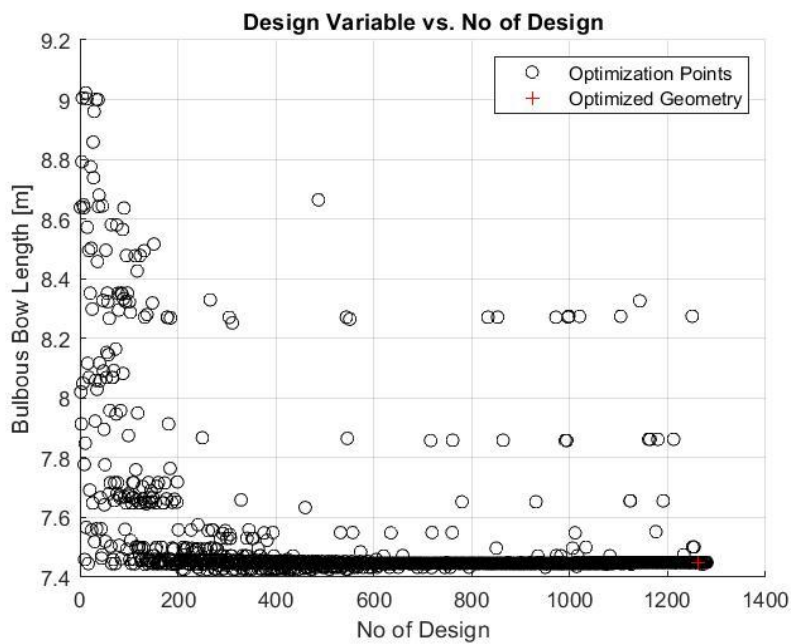
Σχήμα 71. Διασπορά λύσεων - Αντίσταση κυματισμού σε ήρεμο νερό, T=11.025 m, V=24 kn



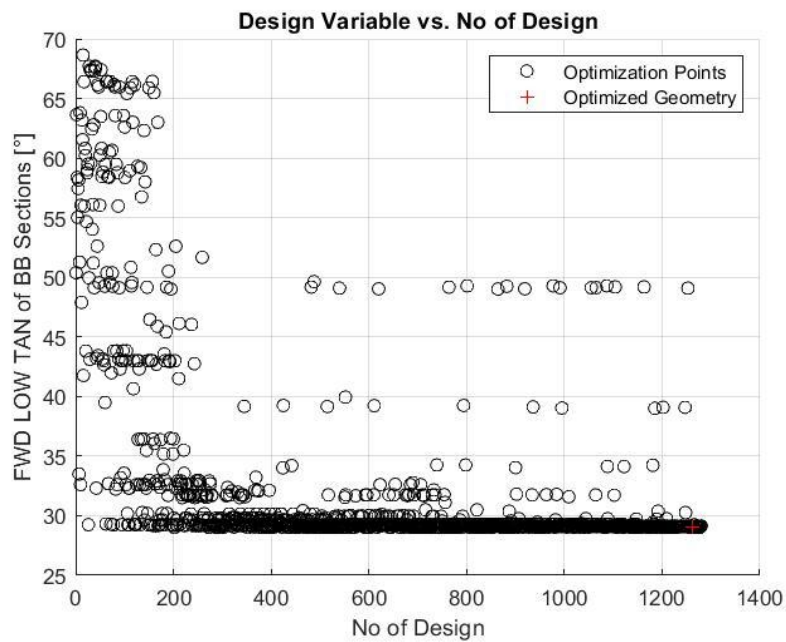
Σχήμα 72. Διασπορά λύσεων - Μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλώρη (40% FLD & 60 % HLD)



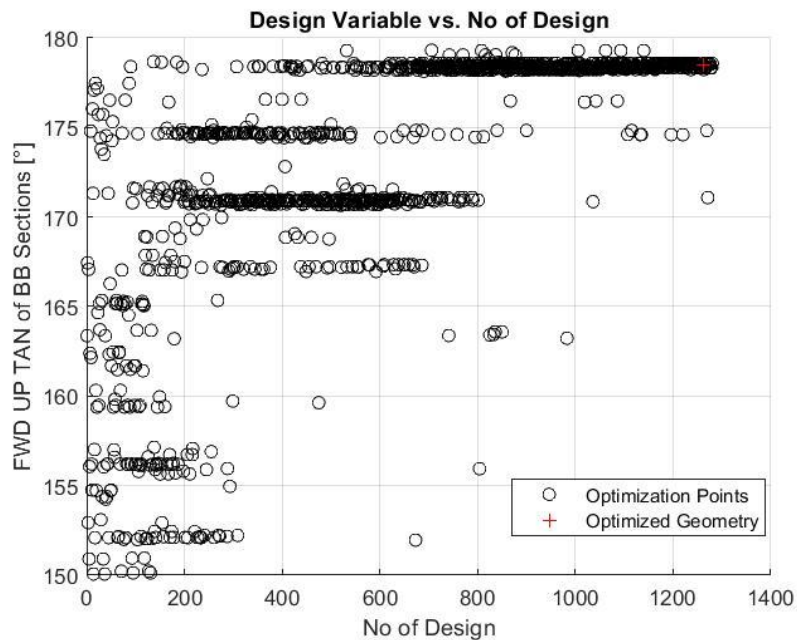
Σχήμα 73. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης - Καθ' ύψος θέση σημείου tip του βολβού



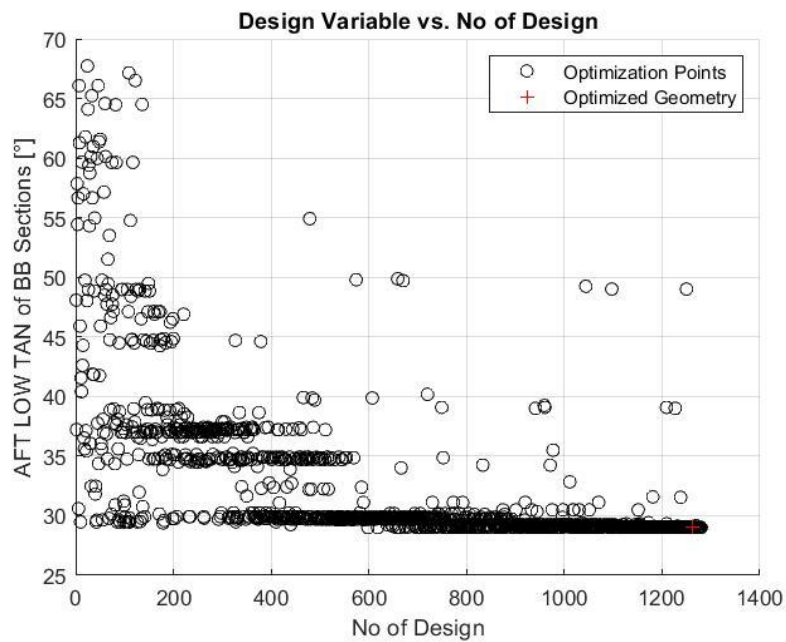
Σχήμα 74. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης - Μήκος Βολβού



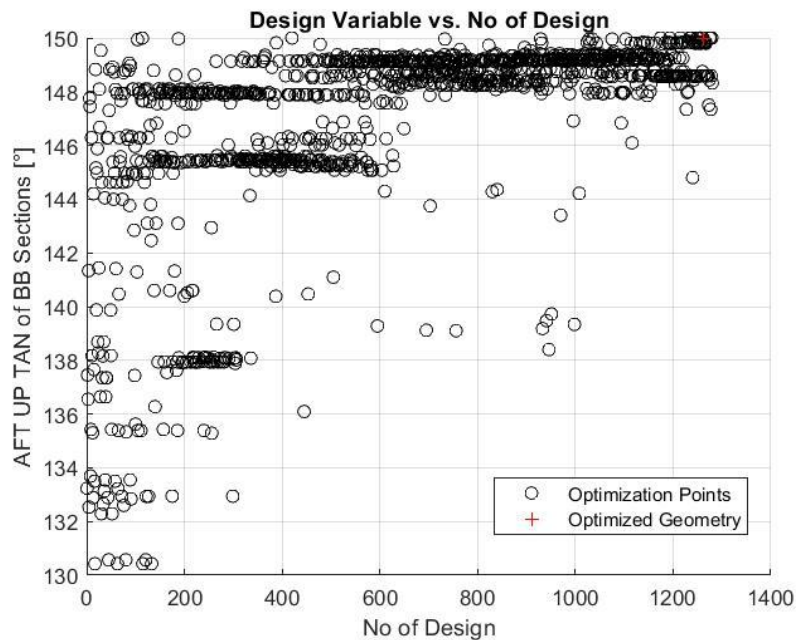
Σχήμα 75. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης – Γωνία επαπτομένης των πωραίων νομέων του βολβού με τον άξονα z στο σημείο τομής με το κάτω τμήμα του προφίλ του



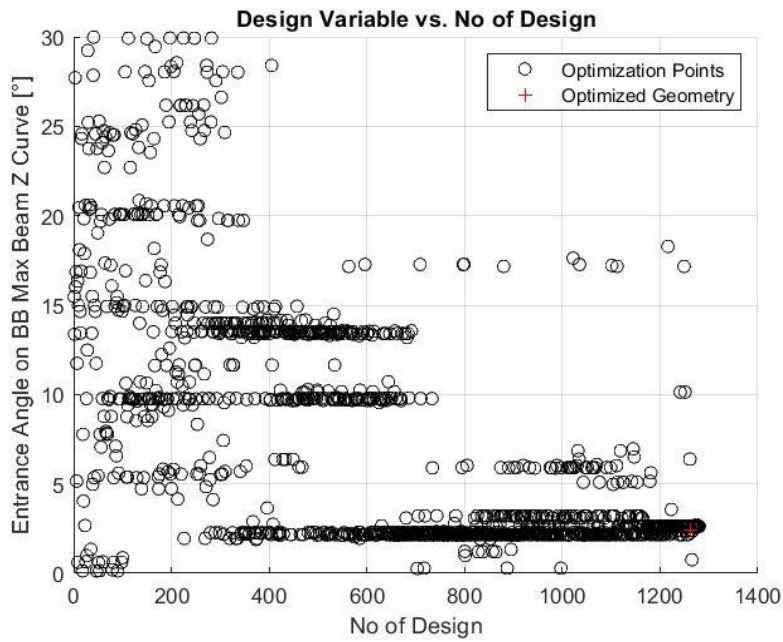
Σχήμα 76. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης – Γωνία επαπτομένης των πωραίων νομέων του βολβού με τον άξονα z στο σημείο τομής με το άνω τμήμα του προφίλ του



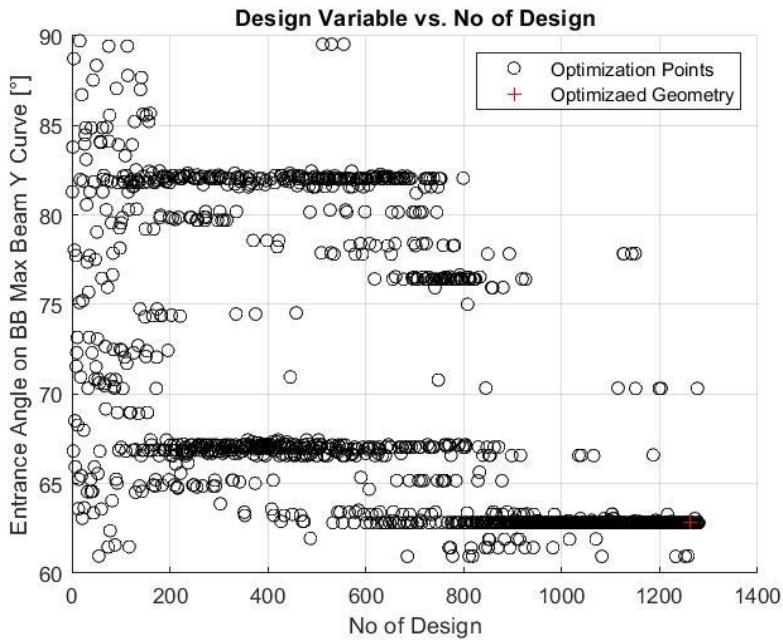
Σχήμα 77. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης – Γωνία επαπτομένης των πρυμναίων νομέων του βολβού με τον άξονα z στο σημείο τομής με το κάτω τμήμα του προφίλ του



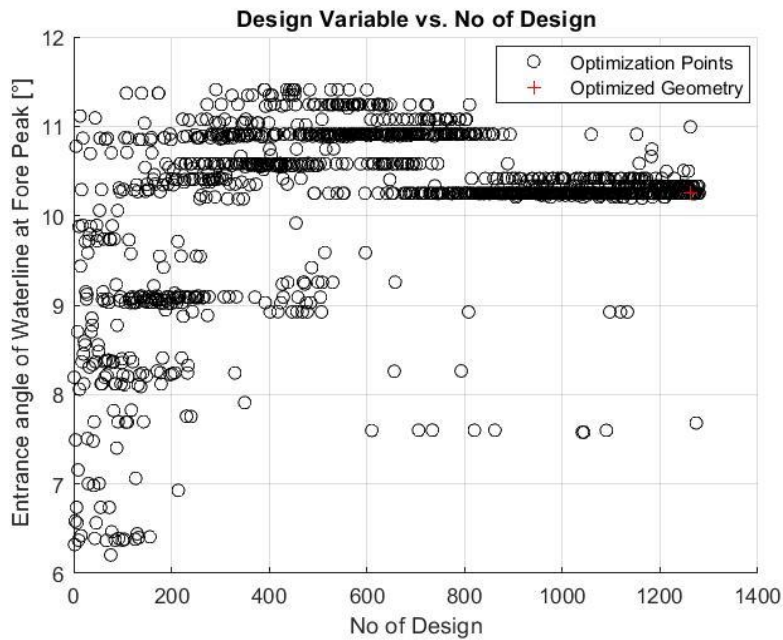
Σχήμα 78. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης – Γωνία επαπτομένης των πρυμναίων νομέων του βολβού με τον άξονα z στο σημείο τομής με το άνω τμήμα του προφίλ του



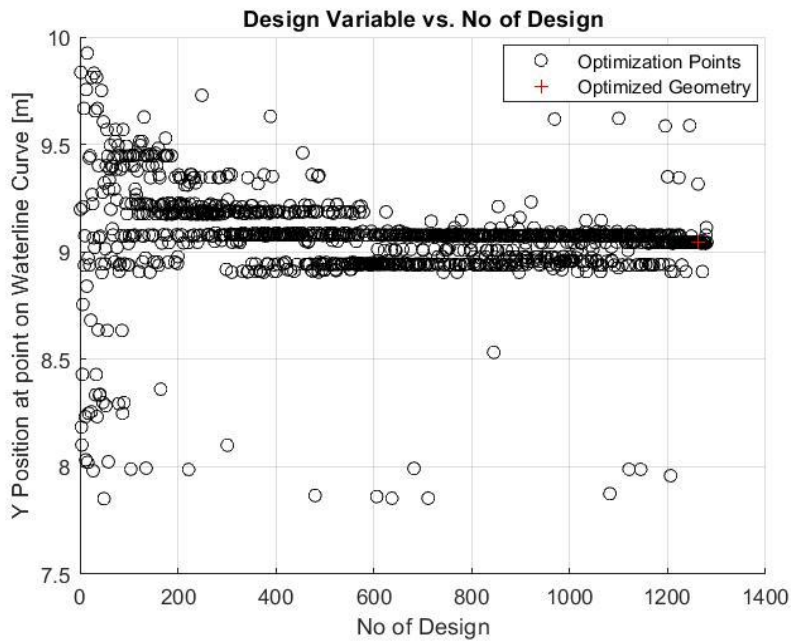
Σχήμα 79. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης - Γωνία εισόδου της καμπύλης κατηγμένων των σημείων της καμπύλης μεγίστου πάχους του βολβού



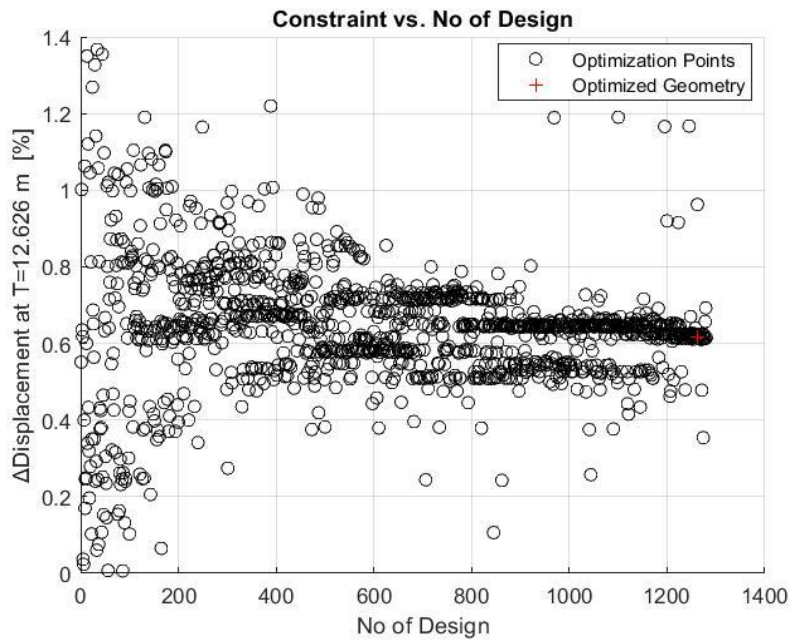
Σχήμα 80. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης - Γωνία εισόδου της καμπύλης τεταγμένων των σημείων της καμπύλης μεγίστου πάχους του βολβού



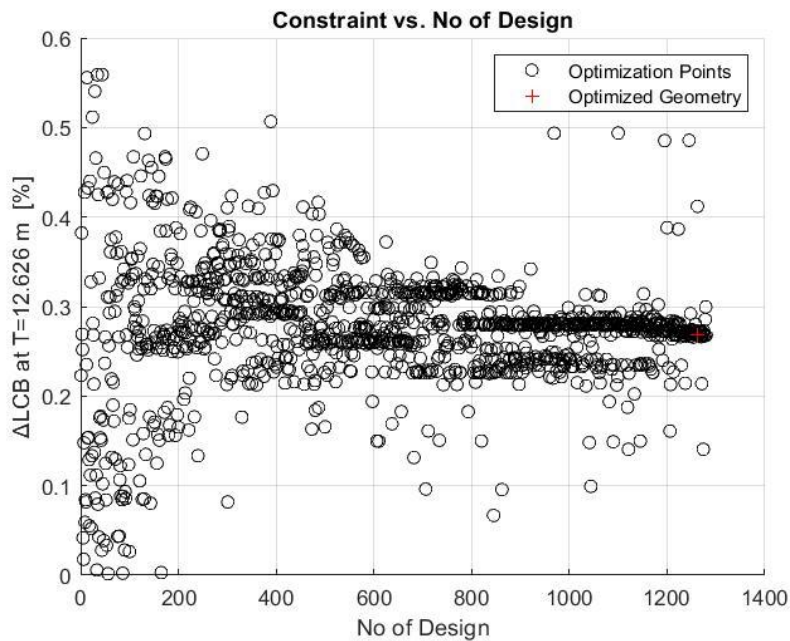
Σχήμα 81. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης - Γωνία εισόδου της ισάλου σχεδίασης



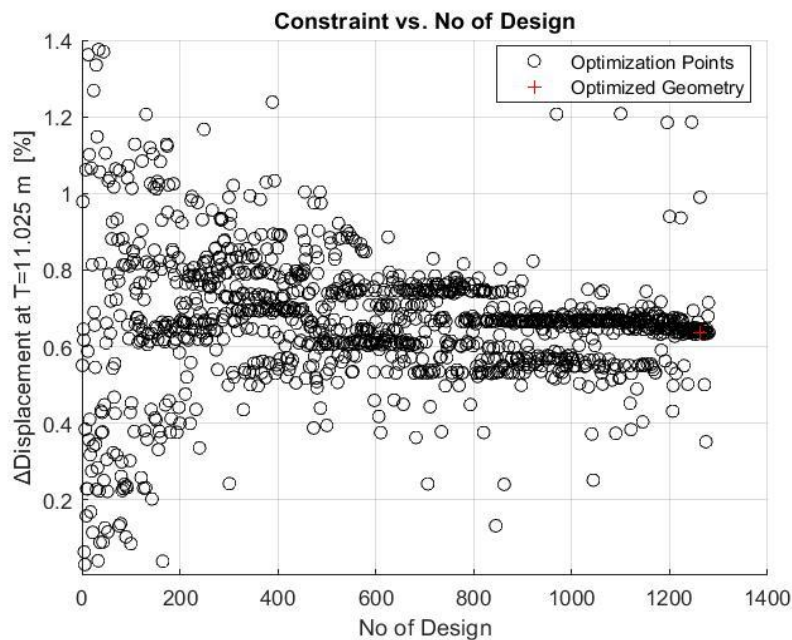
Σχήμα 82. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης - Πλάτος σημείου της ισάλου σχεδίασης στο πρωραίο τμήμα της



Σχήμα 83. Διακύμανση περιορισμού σχεδίασης - % Μεταβολή εκτόπισματος στην κατάσταση Full Load Departure, T=12.626 m



Σχήμα 84. Διακύμανση περιορισμού σχεδίασης - % Μεταβολή διαμήκουθς θέσης κέντρου άντωσης στην κατάσταση Full Load Departure, T=12.626 m



Σχήμα 85. Διακύμανση περιορισμού σχεδίασης - % Μεταβολή εκτοπίσματος στην κατάσταση Half Load Departure, $T=12.626$ m

Η ερμηνεία των παραπάνω διαγραμμάτων θα ξεκινήσει από αυτό που έχει άξονες την αντικειμενική συνάρτηση της αντίστασης κυματισμού σε ήρεμο νερό που χρησιμοποιήθηκε σαν κριτήριο της μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης και τον αριθμό των παραχθεισών γεωμετριών (Σχήμα 69). Παρατηρείται ότι η διασπορά των λύσεων της αντικειμενικής συνάρτησης της αντίστασης κυματισμού σε ήρεμο νερό παρουσιάζει την αναμενόμενη μορφή μιας βελτιστοποίησης με κριτήριο τη συγκεκριμένη μεταβλητή. Στις πρώτες γάστρες υπάρχει αραιή κατανομή των λύσεων και σε τιμές σχετικά υψηλές, ενώ παρατηρείται σταδιακή σύγκλιση των λύσεων σε μια βέλτιστη τιμή αισθητά καλύτερη από την αρχική.

Επιπλέον μέσω της σύγκρισης των Σχημάτων 67 και 69 μπορούμε να αποφανθούμε πως ο ισχυρισμός που έγινε για την μικρή εξάρτηση της τιμής της αντίστασης κυματισμού σε ήρεμο νερό, μέσω υπολογισμών της θεωρίας δυναμικού, από την γεωμετρία της πρύμνης είναι σωστός καθώς και στις δύο περιπτώσεις βελτιστοποίησης λαμβάνουμε παρόμοιες τιμές. Ενδεικτικό μέγεθος αποτελεί η ελάχιστη τιμή της αντίστασης κυματισμού σε ήρεμο νερό όπου για την 1^η περίπτωση βελτιστοποίησης με 12 μεταβλητές σχεδίασης είναι 187.8 kN ενώ για την 2^η περίπτωση βελτιστοποίησης με 10 μεταβλητές σχεδίασης είναι 180.9 kN (βέβαια, όπως αναφέραμε και παραπάνω, ο μικρός αριθμός γεωμετριών της 1^{ης} περίπτωση βελτιστοποίησης με 12 μεταβλητές δεν μας επιτρέπει την ασφαλή εξαγωγή συμπερασμάτων).

Στα Σχήματα 70 και 71 παρουσιάζεται η κατανομή των λύσεων των επιμέρους συνιστωσών της αντικειμενικής συνάρτησης. Στο βύθισμα των 12.626 m η μέση τιμή είναι 122.4 kN, η τυπική απόκλιση είναι 39.6 kN ενώ η ελάχιστη τιμή είναι 84.9 kN. Στο βύθισμα των 11.025 m η μέση τιμή είναι 263.3 kN,

η τυπική απόκλιση είναι 29.0 kN ενώ η ελάχιστη τιμή είναι 237.2 kN. Παρόλο που η τυπική απόκλιση στο βύθισμα των 11.025 m είναι μικρότερη η ταχύτητα σύγκλισης είναι σχεδόν ίδια όπως προκύπτει από την σύγκριση των σχημάτων 70 και 71.

Η μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλήρη παρουσιάζει κάποια σύγκλιση όπως παρατηρούμε στο Σχήμα 72 - παρά την τυχαιότητα του φαινομένου -, σε τιμή όμως ελαφρώς υψηλότερη σε σχέση με την αρχική Ενδεικτικό είναι πως η μέση τιμή της αντίστασης κυματισμού για τις 1280 αποδεκτές γεωμετρίες είναι 1.3884 m/s^2 , ενώ η αντίστοιχη τιμή της αρχικής γεωμετρίας όπως φαίνεται στον Πίνακα 9 του κεφαλαίου 5.2 είναι 1.3850 m/s^2 . Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η περίπτωση της μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης με αντικειμενική συνάρτηση την αντίσταση κυματισμού σε ήρεμο νερό οδηγεί σε διακύμανση των μεταβλητών σχεδίασης και κατάταξη των γεωμετριών από τον αλγόριθμο NSGA II με τέτοιο τρόπο που βελτιώνει την αντικειμενική συνάρτηση αλλά χωρίς να προσδίδει καλύτερα χαρακτηριστικά στις γεωμετρίες ως προς την κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλήρη.

Στα υπόλοιπα Σχήματα (73-85) παρουσιάζεται η διακύμανση των μεταβλητών σχεδίασης καθώς και των περιορισμών που τέθηκαν (για χάριν συντομίας παρουσιάζονται μόνο τα διαγράμματα της % μεταβολής του εκτοπίσματος και της διαμήκου θέσης του κέντρου άντωσης στην κατάσταση Full Load Departure και της % μεταβολής του εκτοπίσματος για την κατάσταση Half Load Departure ενώ το διαγράμματα της % μεταβολής της διαμήκου θέσης του κέντρου άντωσης για την κατάσταση Half Load Departure εμφανίζει αντίστοιχη μορφή). Γενικά η πλειοψηφία των μεταβλητών ακολουθεί συγκλίνουσα πορεία σε συγκεκριμένες τιμές, άλλες από τις πρώτες σχεδιάσεις που παρήγαγε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης και άλλες στην τελευταία φάση της. Όπως και στην περίπτωση της 1^{ης} μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης που πραγματοποιήθηκε με αντικειμενική συνάρτησης την μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλήρη, ορισμένες μεταβλητές σχεδίασης συγκλίνουν κοντά στις ακραίες τιμές διακύμανσής τους. Ωστόσο, όπως αναφέραμε, το εύρος διακύμανσης των μεταβλητών σχεδίασης, ορίστηκε με σκοπό την διατήρηση της ομαλότητας της παραγόμενης γεωμετρίας και γι' αυτό δεν κρίνεται κατάλληλη η αύξηση του εύρους των συγκεκριμένων μεταβλητών (ειδικά όσον αφορά τις μεταβλητές που αναφέρονται στο βολβό και το εύρος τους έχει καθοριστεί αυστηρά για τη διατήρηση της συνέχειας των παραγόμενων επιφανειών).

Στον Πίνακα 12 έχουμε τις τιμές των μεταβλητών σχεδίασης της αρχικής της και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας. Στον Πίνακα 13 έχουμε την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας καθώς και την ποσοστιαία μεταβολή της. Όπως αναμενόταν, η βέλτιστη γεωμετρία αποτελεί σχεδίαση που ανήκει στις τελευταίες γενιές που παρήχθησαν από τον αλγόριθμο NSGA II (design no: 1260) και οι % μεταβολές των περιορισμών σχεδίασης είναι +0.615 % μεταβολή του εκτοπίσματος και +0.268 % (μετακίνηση κέντρου άντωσης προς μέσο νομέα) μεταβολή της διαμήκου θέσης του κέντρου άντωσης για την κατάσταση Full Load Departure και +0.637 % και +0.275 αντίστοιχα για την κατάσταση Half Load Departure Στο Σχήμα 86 φαίνονται οι νομείς της αρχικής και της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας, ενώ στα Σχήματα 87 και 88 φαίνονται οι καμπύλες RAO της επιτάχυνσης στην πλήρη σε συνάρτηση με τον αδιάστατο συντελεστή λ/L των μετωπικών κυματισμών για τις δύο υπό μελέτη καταστάσεις φόρτωσης, όπου δεν παρατηρείται βελτίωση στην μέγιστη τιμή της κατακόρυφης επιτάχυνσης όπως αναμενόταν. Τέλος στα Σχήμα 89 και 90 φαίνεται το πεδίο κυματισμών

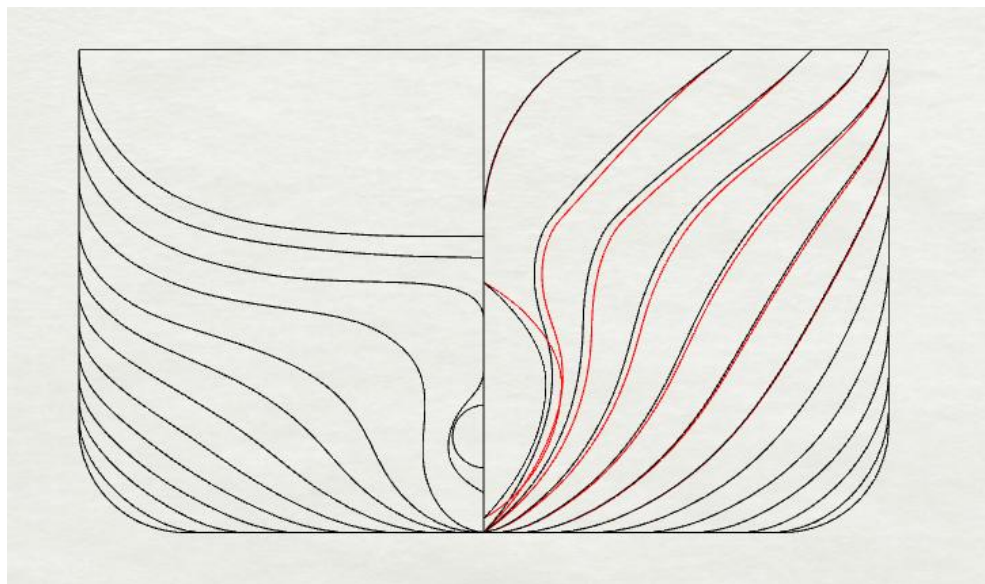
της αρχικής και της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας κατά την πλεύση με ταχύτητα 23.5 kn και 24 kn αντίστοιχα.

Πίνακας 12. Τιμές μεταβλητών σχεδίασης αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας

Μεταβλητή Σχεδίασης	Πατρική Γάστρα	Βελτιστοποιημένη Γάστρα
Bulbous Bow Tip Elevation (m) :	8.249	7.365
Bulbous Bow Length (m):	6.908	7.450
FWD LOW TAN of BB sections (deg):	46	29.1
FWD UP TAN of BB sections (deg):	180	178.5
AFT LOW TAN of BB sections (deg):	46	29.1
AFT UP TAN of BB sections (deg):	140	149.9
Entrance Angle on BB Max Beam Z Curve (deg):	0	2.4
Entrance Angle on BB Max Beam Y Curve (deg):	90	62.8
Entrance Angle of WL at FP (deg):	7.8	10.3
Y Position at Point on WL (m):	8.685	9.044

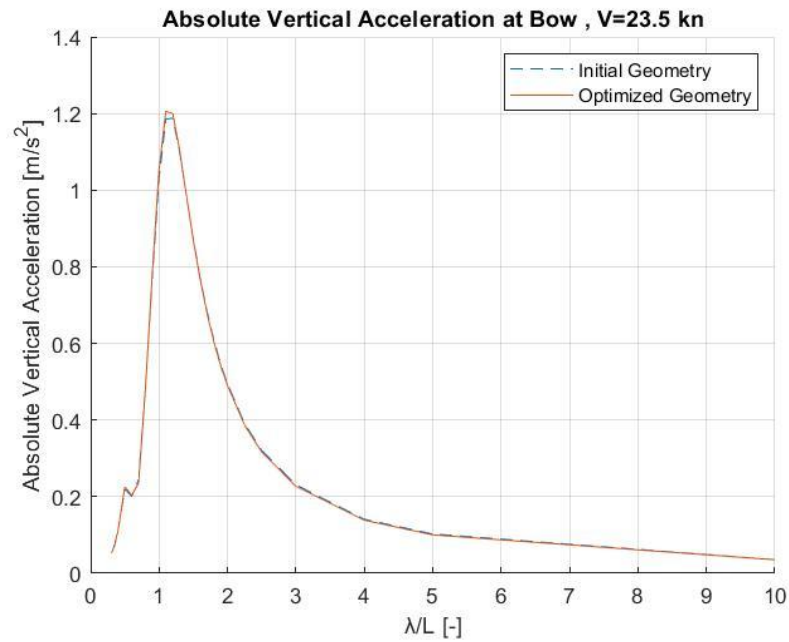
Πίνακας 13. Σύγκριση αντικειμενικής συνάρτησης αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας

Αντικειμενική Συνάρτηση	Πατρική Γάστρα	Βελτιστοποιημένη Γάστρα	Ποσοστιαία Μεταβολή (%)
Αντίσταση Κυματισμού σε ήρεμο νερό (kN) :	291.6	180.9	-37.98

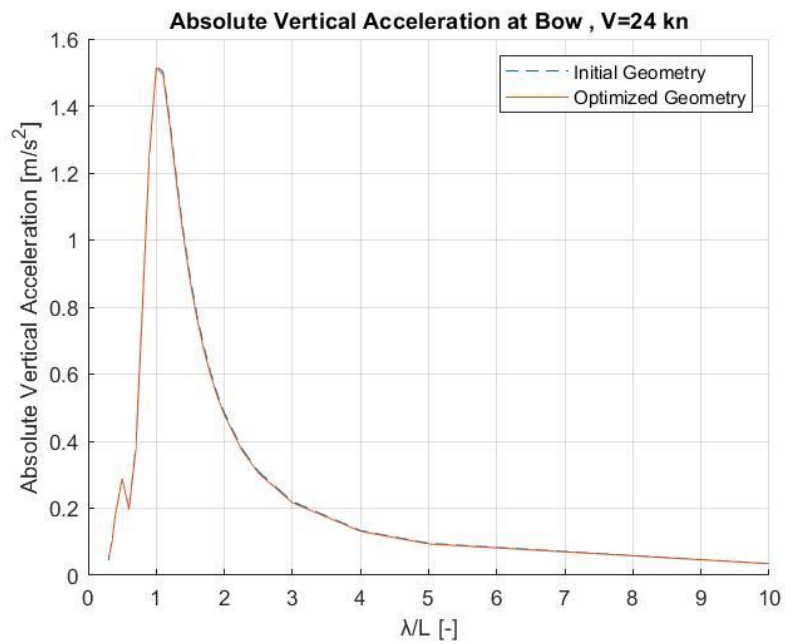


Σχήμα 86. Νομείς αρχικής (μαύρες καμπύλες) και βελτιστοποιημένης (κόκκινες καμπύλες) γεωμετρίας

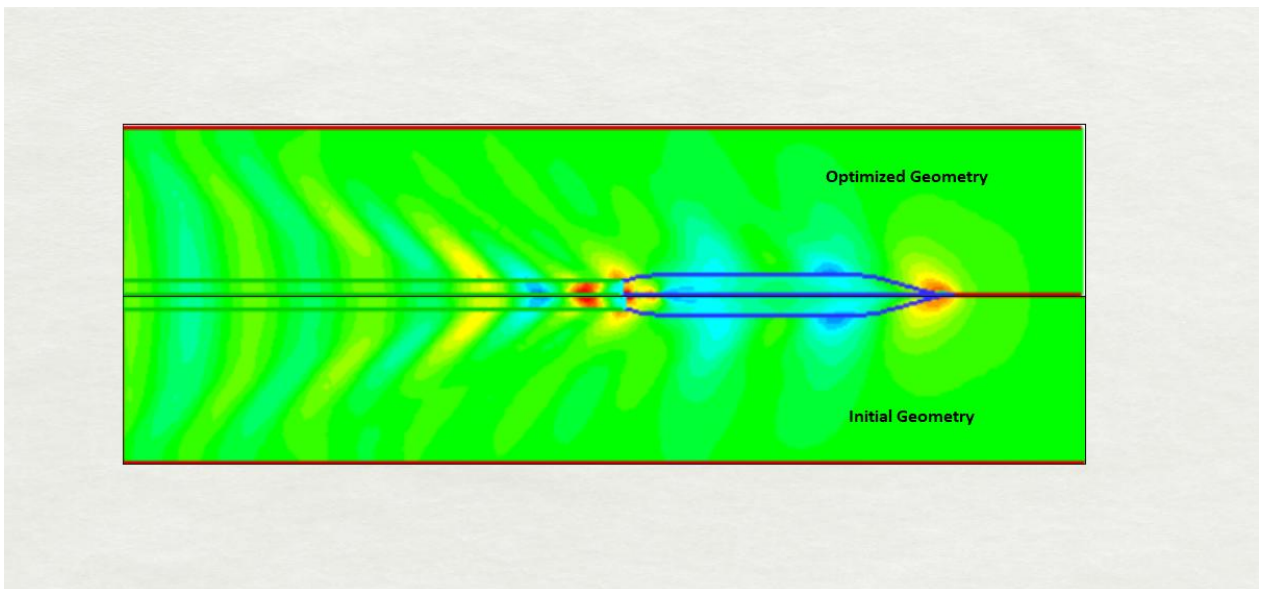
Από τους νομείς των δύο γεωμετριών παρατηρούμε την εμφανή διαφοροποίηση τόσο στην περιοχή του βολβού (8 μεταβλητές σχεδίασης) όσο και στους πρωραίους νομείς. Μεταβολές δεν παρατηρούνται στην περιοχή της πρύμνης καθώς στην διαδικασία βελτιστοποίησης εξαιρέθηκαν οι 2 μεταβλητές σχεδίασης που επηρεάζουν το πρυμναίο τμήμα της γεωμετρίας.



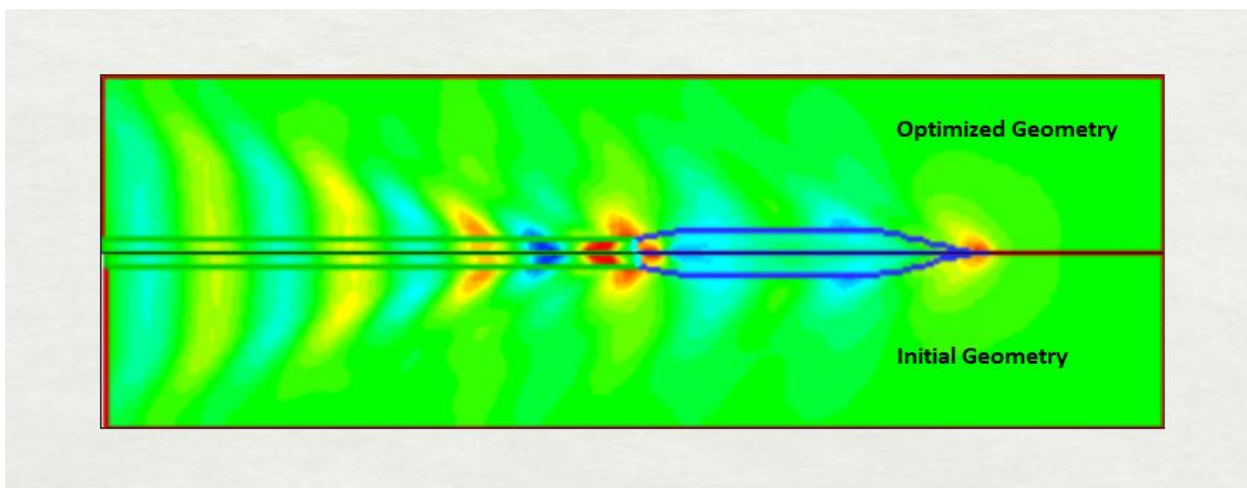
Σχήμα 87. Καμπύλη RAO της κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη σε απλούς αρμονικούς μετωπικούς κυματισμούς για την κατάσταση Full Load Departure και ταχύτητα πλοίου 23.5 kn



Σχήμα 88. Καμπύλη RAO της κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη σε απλούς αρμονικούς μετωπικούς κυματισμούς για την κατάσταση Half Load Departure και ταχύτητα πλοίου 24 kn



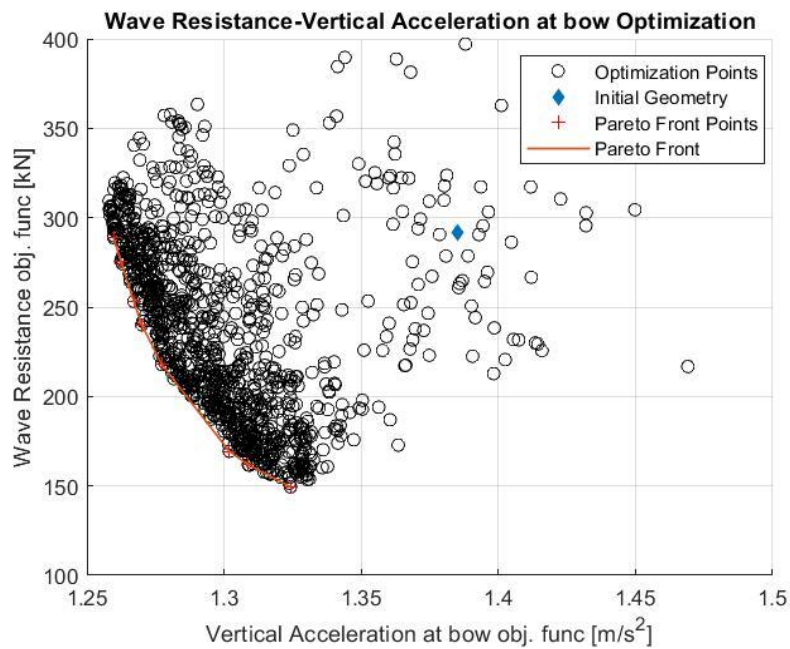
Σχήμα 89. Πεδίο κυματισμών αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας, $F_n=0.247$



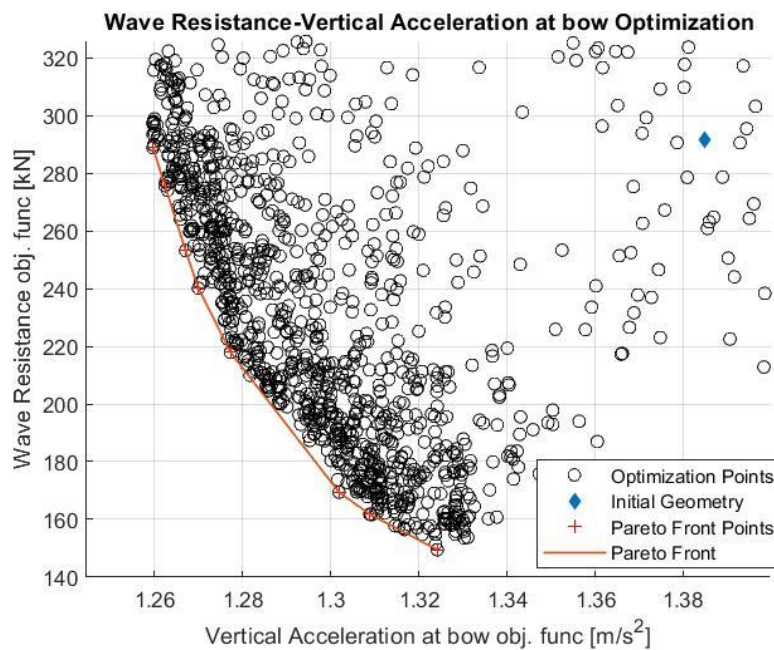
Σχήμα 90 Πεδίο κυματισμών αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας, $F_n=0.252$

5.3.4 Αποτελέσματα Πολυκριτηριακής Βελτιστοποίησης

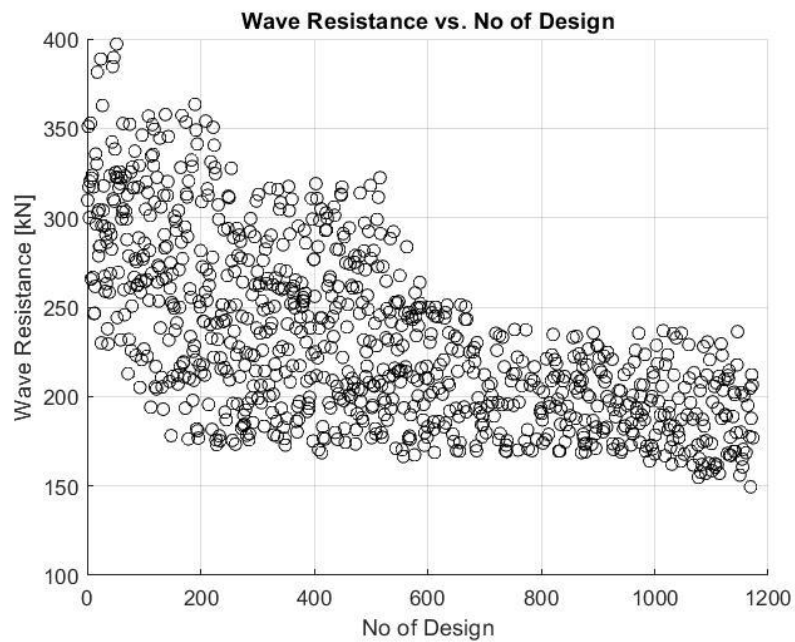
Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή του κεφαλαίου 5.3, η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αποτελεί το βασικό στόχο της παρούσα εργασίας. Πραγματοποιήθηκε με αντικειμενικές συναρτήσεις την αντίσταση κυματισμού σε ήρεμο νερό και την μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλήρη σε απλούς αρμονικούς μετωπικούς κυματισμούς με συντελεστή βαρύτητας 50% (για δύο καταστάσεις φόρτωσης $T=12.626$ m και $T=11.025$ m με συντελεστή βαρύτητας 40% και 60% ανά κατάσταση αντίστοιχα). Κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκαν όλες οι μεταβλητές σχεδίασης – 12 στο σύνολο -, όπως και στην μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση του κεφαλαίου 5.3.2, και παρήχθησαν 1280 διαφορετικές γεωμετρίες. Στα σχήματα 91-107 παρουσιάζονται τα προκύπτοντα διαγράμματα διασποράς του συνόλου των λύσεων όπου εμφανίζονται μόνο οι αποδεκτές γεωμετρίες, οι οποίες για τη συγκεκριμένη περίπτωση ήταν 1173/1280. Στα πρώτα διαγράμματα παρουσιάζονται οι διασπορές των συναρτήσεων των αντικειμενικών συναρτήσεων, καθώς και των επιμέρους συνιστωσών τους και στη συνέχεια η διακύμανση των μεταβλητών σχεδίασης (για χάριν συντομίας παρουσιάζονται ορισμένες από αυτές) και των τιμών που έγινε σύγκλιση καθώς και η διακύμανση των περιορισμών σχεδίασης που θα αποτελέσουν και βάση σχολιασμού και εξαγωγής συμπερασμάτων για την ποιότητα της διαδικασίας.



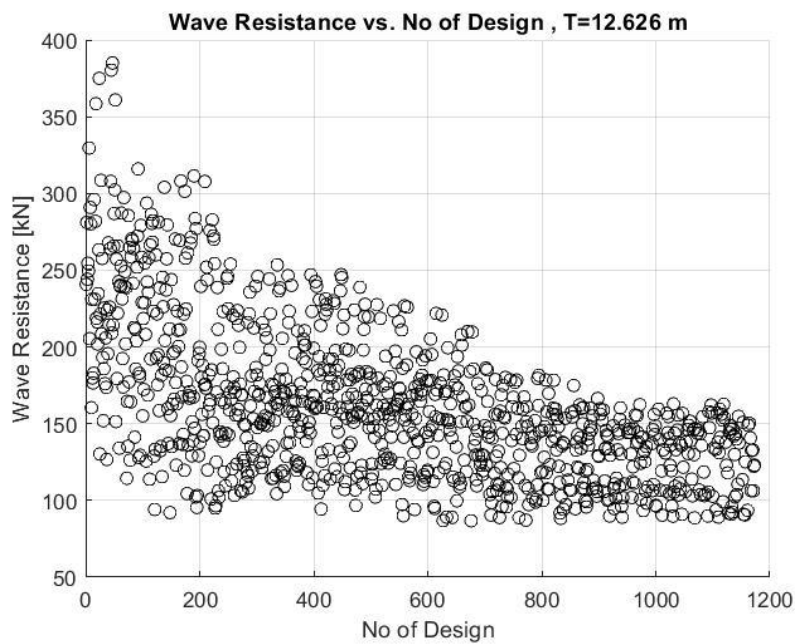
Σχήμα 91. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με κριτήρια την μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλώρη και την αντίσταση κυματισμού σε ήρεμο νερό



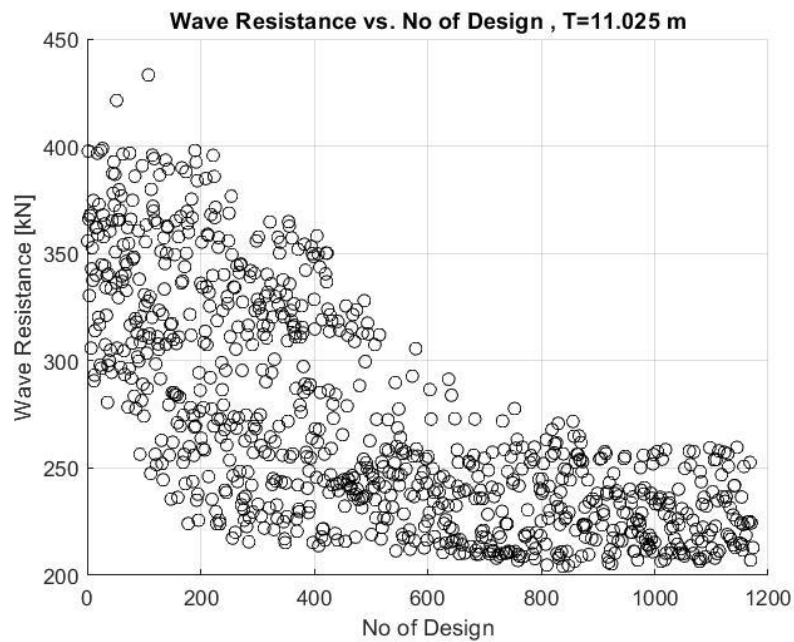
Σχήμα 92. Λεπτομερέστερη απεικόνιση Σχήματος 90 - Περιοχή βέλτιστων λύσεων



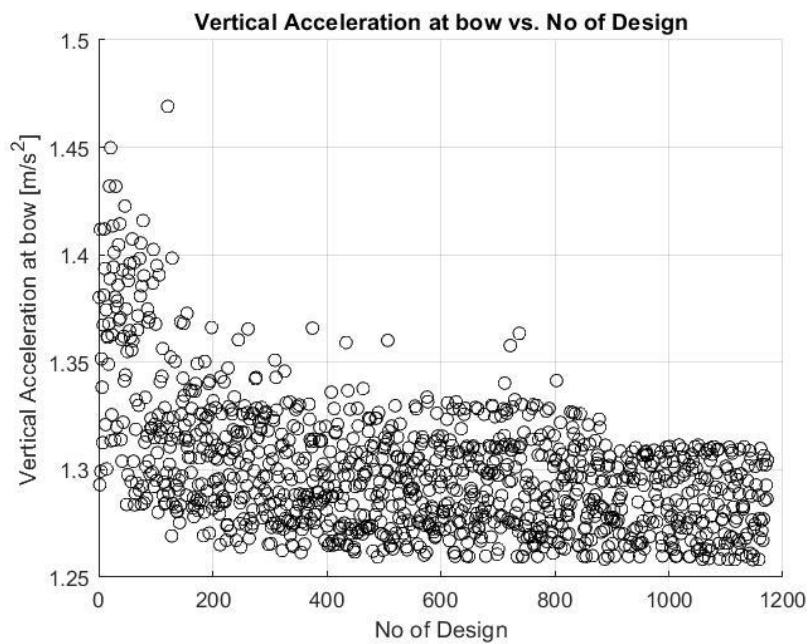
Σχήμα 93. Διασπορά λύσεων - Αντίσταση κυματισμού σε ήρεμο νερό (40% FLD & 60 % HLD)



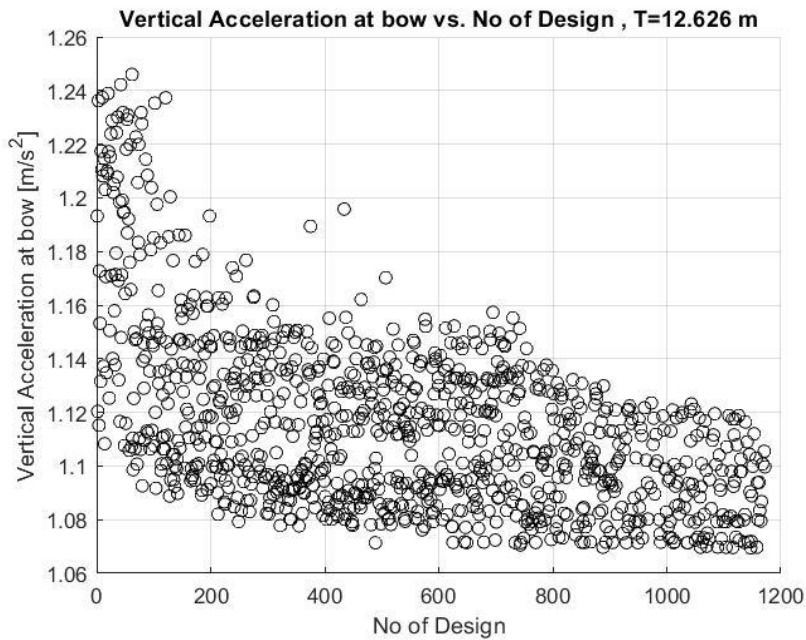
Σχήμα 94. Διασπορά λύσεων - Αντίσταση κυματισμού σε ήρεμο νερό, T=12.626 m, V=23.5 kn



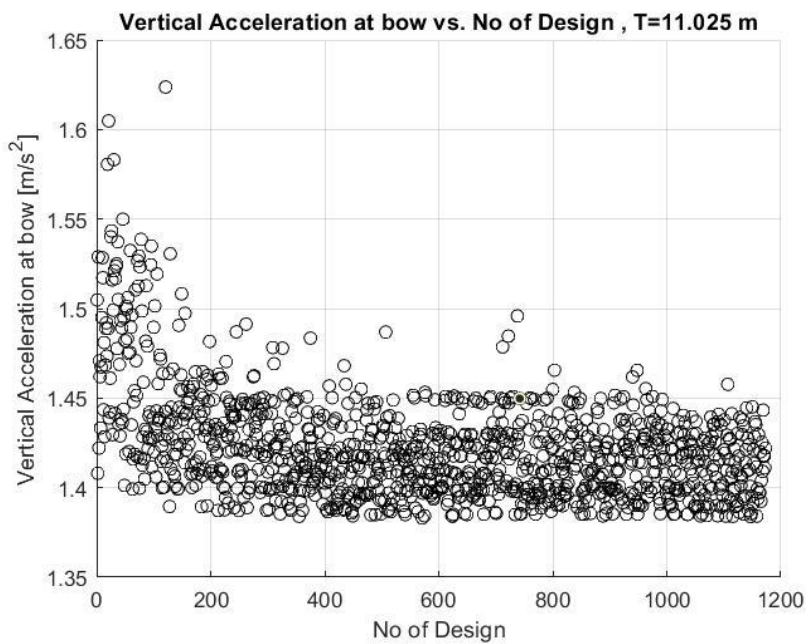
Σχήμα 95. Διασπορά λύσεων - Αντίσταση κυματισμού σε ήρεμο νερό, T=11.025 m, V=24 kn



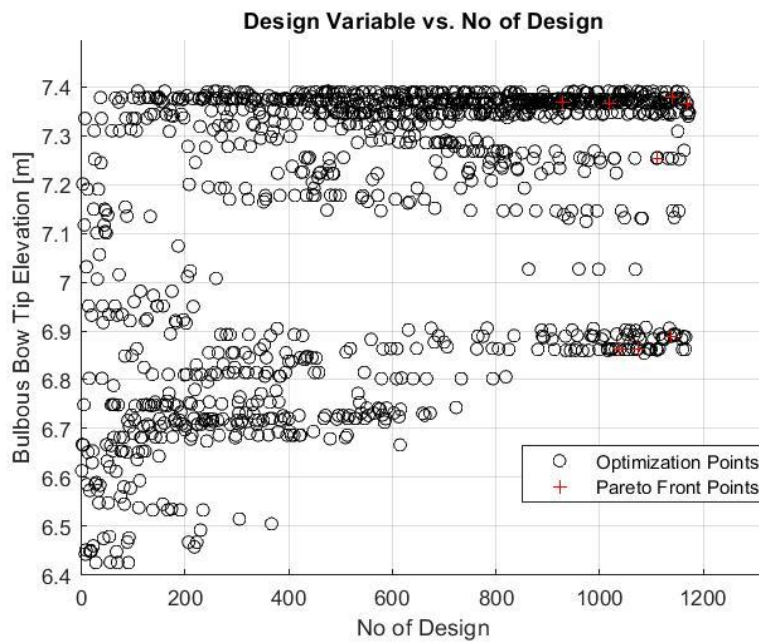
Σχήμα 96. Διασπορά λύσεων - Μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλώρη (40% FLD & 60 % HLD)



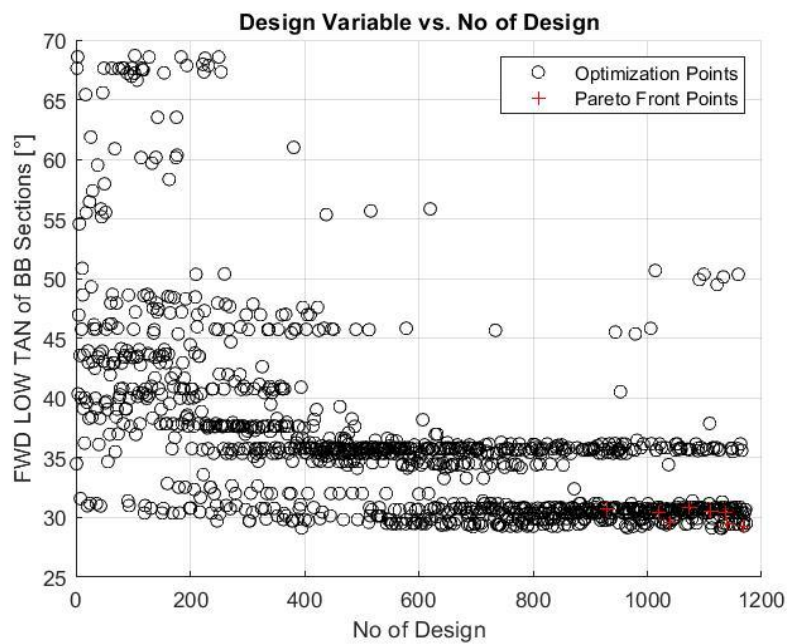
Σχήμα 97. Διασπορά λύσεων - Μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλώρη, T=12.626 m, V=23.5 kn



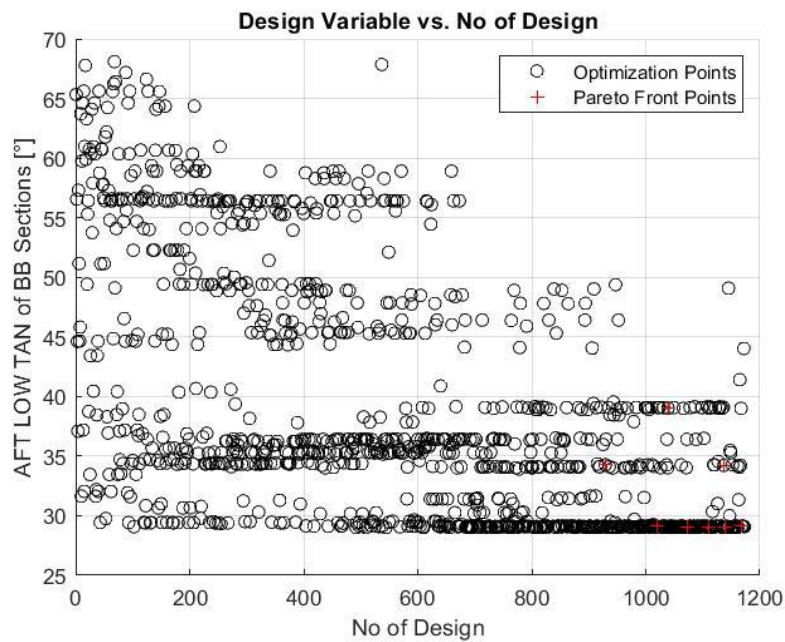
Σχήμα 98. Διασπορά λύσεων - Μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλώρη, T=11.025 m, V=24 kn



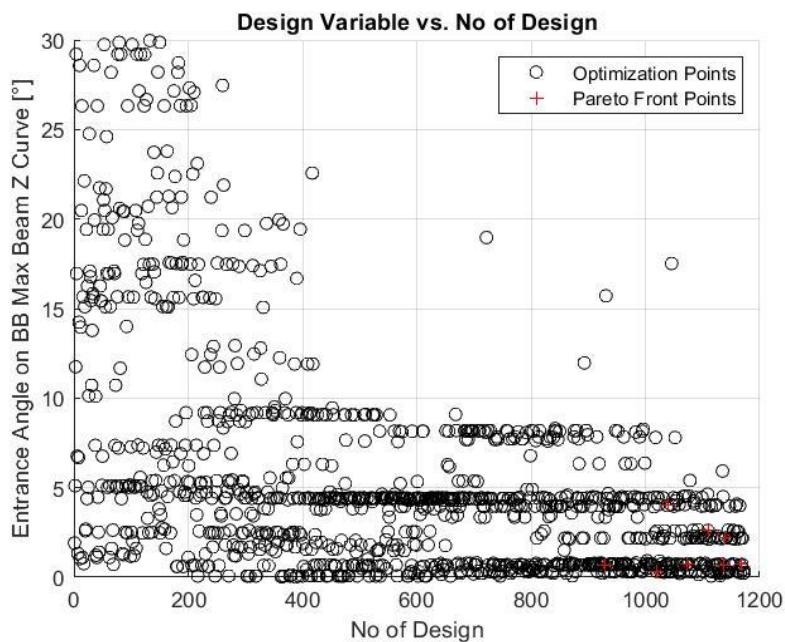
Σχήμα 99. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης - Καθ' ύψος θέση σημείου tip του βολβού



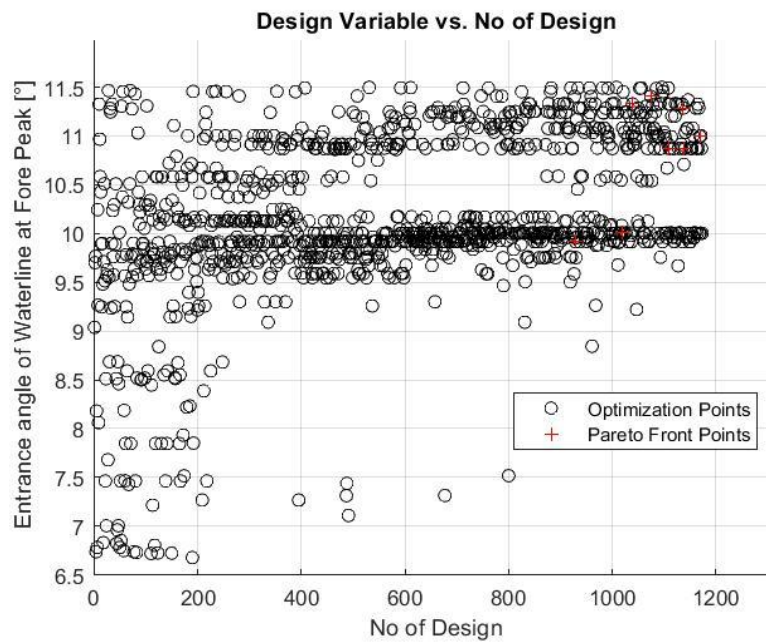
Σχήμα 100. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης – Γωνία εφαπτομένης των προβαίων νομέων του βολβού με τον άξονα z στο σημείο τομής με το κάτω τμήμα του προφίλ του



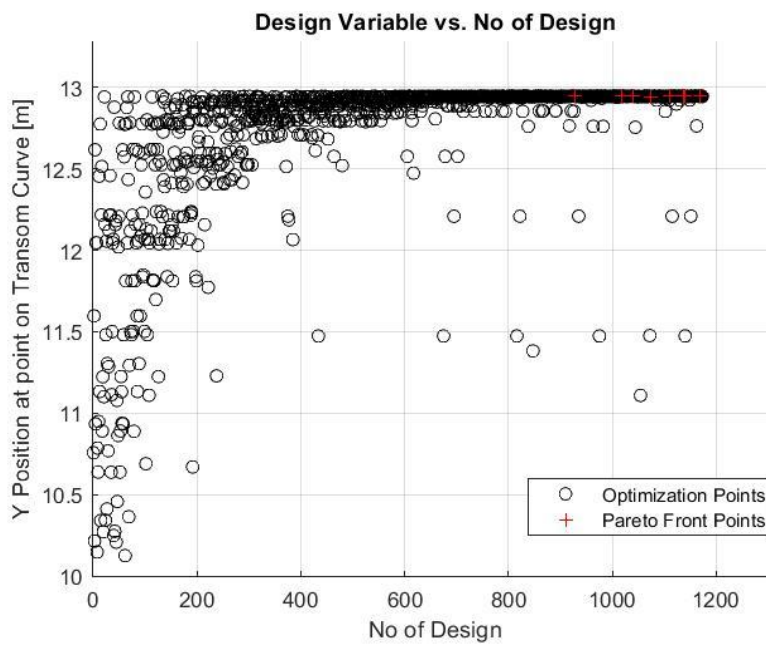
Σχήμα 101. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης – Γωνία εφαπτομένης των πρυμναίων νομέων του βολβού με τον άξονα z στο σημείο τομής με το κάτω τμήμα του προφίλ του



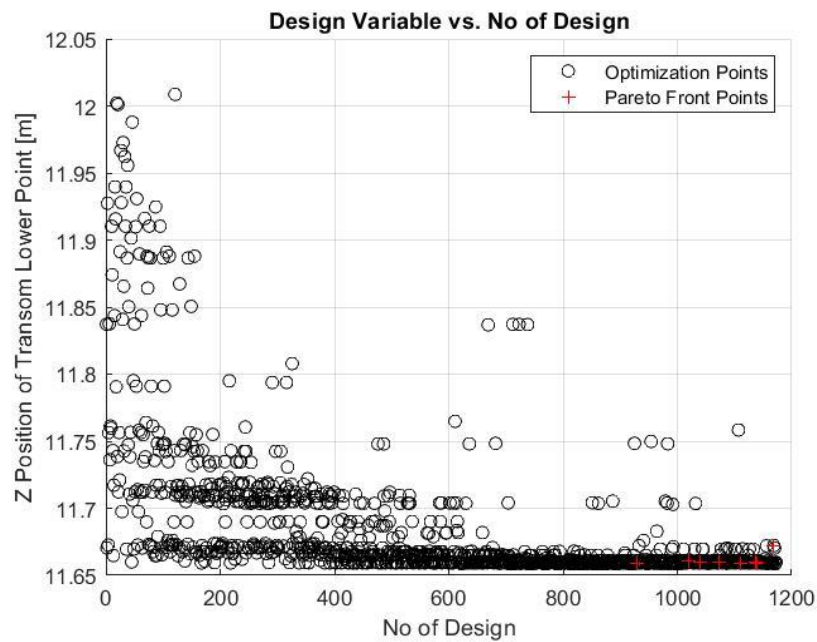
Σχήμα 102. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης - Γωνία εισόδου της καμπύλης κατηγμένων των σημείων της καμπύλης μεγίστου πάχους του βολβού



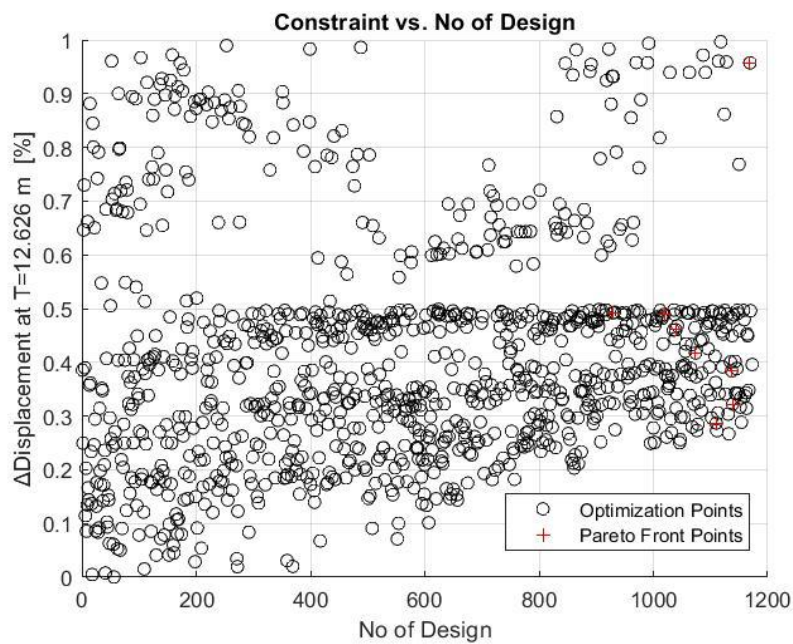
Σχήμα 103. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης - Γωνία εισόδου της ισάλου σχεδίασης



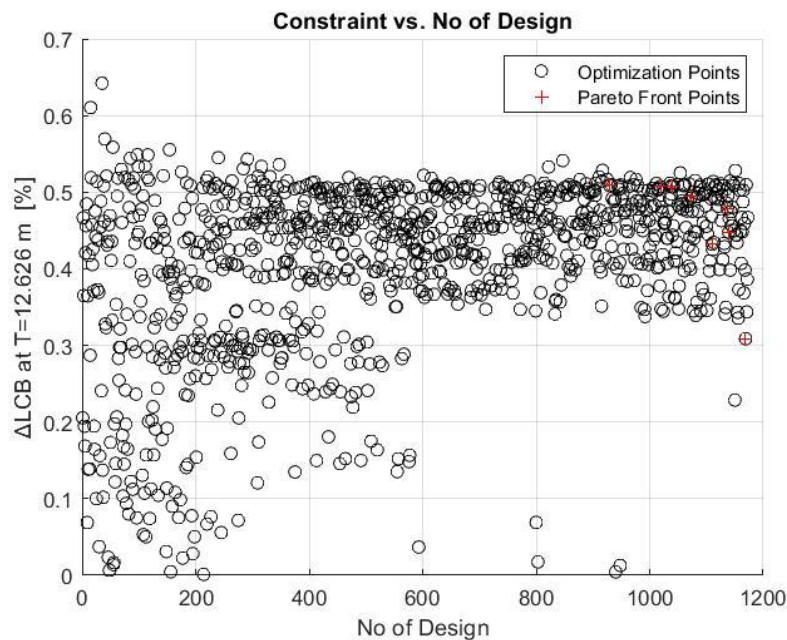
Σχήμα 104. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης - Πλάτος σημείου της καμπύλης Transom



Σχήμα 105. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης - Καθ' ύψος θέση του σημείου τομής της καμπύλης Transom με την καμπύλη Center Plane Curve (CPC)



Σχήμα 106. Διακύμανση περιορισμού σχεδίασης - % Μεταβολή εκποτίσματος στην κατάσταση Full Load Departure, T=12.626m



Σχήμα 107. Διακύμανση περιορισμού σχεδίασης - % Μεταβολή διαμήκου θέσης κέντρου άντωσης στην κατάσταση Full Load Departure, T=12.626 m

Η ερμηνεία των διαγραμμάτων των παραπάνω σχημάτων θα ξεκινήσει από αυτό που έχει άξονες τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις. Στο Σχήμα 91 έχουμε διασπορά λύσεων που συνάδει απόλυτα με την αναμενόμενη μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης με γνώμονα δύο κριτήρια. Στο Σχήμα 92 φαίνεται μια συνεχής και ομαλή καμπύλη βέλτιστων λύσεων (Pareto Front) η οποία περιβάλλει το σύνολο των εφικτών λύσεων που διατάσσονται στο συγκεκριμένο διάγραμμα. Η συντριπτική πλειοψηφία των παραχθειςών μορφών γάστρας έχουν καλύτερες επιδόσεις από την αρχική και για τα δύο επιλεγέντα κριτήρια αυτής της περίπτωσης.

Στα Σχήματα 93-98 παρουσιάζεται η κατανομή των λύσεων των αντικειμενικών συναρτήσεων και των επιμέρους συνιστωσών τους. Για την αντίσταση κυματισμού, στο βύθισμα των 12.626 m η μέση τιμή είναι 163.2 kN, η τυπική απόκλιση είναι 52.1 kN με ελάχιστη τιμή αντίστασης τα 63 kN. Στο βύθισμα των 11.025 m η μέση τιμή είναι 285.3 kN, η τυπική απόκλιση 52.9 kN και η ελάχιστη τιμή αντίστασης 204.2 kN. Παρατηρούμε από τα Σχήματα 93 και 94 πως και στις δύο περιπτώσεις η ταχύτητα σύγκλισης είναι σχεδόν ίδια.

Παρόμοια συμπεράσματα ισχύουν για τα Σχήματα 97 και 98. Για το βύθισμα T=12.626 m η μέση τιμή είναι 1.1181 m/s², η τυπική απόκλιση 0.0322 m/s² ενώ η ελάχιστη τιμή είναι 1.0695 m/s². Για το βύθισμα των 11.025 m η μέση τιμή είναι 1.4227 m/s², η τυπική απόκλιση 0.0030 m/s² ενώ η ελάχιστη τιμή είναι 1.3831 m/s². Παρόλο που η τυπική απόκλιση στο βύθισμα των 11.025 m είναι μικρότερη η ταχύτητα σύγκλισης είναι μεγαλύτερη όπως προκύπτει από την σύγκριση των Σχημάτων 97 και 98. Ακόμα όμως και στην περίπτωση των 11.025 m ο αριθμός των γεωμετριών είναι ικανός ώστε να

αποφανθούμε πως η σύγκλιση είναι ικανοποιητική Σε σύγκριση με τα σχήματα της αντίστασης κυματισμού η μεταβολή της επιτάχυνσης είναι εμφανώς μικρότερη

Στα υπόλοιπα σχήματα (99-107) παρουσιάζεται η συμπεριφορά των μεταβλητών σχεδίασης καθώς και των περιορισμών που τέθηκαν (για χάριν συντομίας παρουσιάζονται μόνο τα διαγράμματα της % μεταβολής του εκτοπίσματος και της διαμήκουσ θέσης του κέντρου άντωσης στην κατάσταση Full Load Departure καθώς για την κατάσταση Half Load Departure εμφανίζουν αντίστοιχη μορφή). Γενικά η πλειοψηφία των μεταβλητών ακολουθεί συγκλίνουσα πορεία σε συγκεκριμένες τιμές, άλλες από τις πρώτες σχεδιάσεις που παρήγαγε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης και άλλες στην τελευταία φάση της. Αν και ελάχιστες εξ' αυτών (βλ. Σχήμα 103) δεν συγκλίνουν φαίνεται πως αυτό δεν επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα. Αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στο γεγονός ότι αυτές οι παράμετροι δεν έχουν μεγάλη επίδραση στα μελετώμενα μεγέθη για τη συγκεκριμένη περίπτωση είτε στο γεγονός πως δεν υπάρχουν τιμές των μεταβλητών αυτών για τις οποίες έχουμε βέλτιστες τιμές και για τα δύο κριτήρια ταυτόχρονα.

Η γεωμετρία που θα επιλεγεί γι' αυτή την περίπτωση βελτιστοποίησης θα ανήκει στη συνοριακή καμπύλη βέλτιστων γεωμετριών του Σχήματος 92. Στον Πίνακα 14 φαίνεται ένα σύνολο εναλλακτικών μορφών γάστρας που ανήκουν σε αυτό το σύνορο και αποτελούν ισοδύναμα αποδοτικές λύσεις:

Πίνακας 14. Ποσοστιαία μεταβολή αντικειμενικών συναρτήσεων (και επιμέρους συνιστωσών τους) των επιλεγέντων γεωμετριών από το μέτωπο Pareto σε σύγκριση με την αρχική

Ποσοστιαία μεταβολή μεγεθών ως προς την πατρική γάστρα (%)							
T=11.025 m				T=12.626 m			
α/α	Μέγιστη Κατακόρυφη Επιτάχυνση στην πλώρη	Αντίσταση κυματισμού	Μέγιστη Κατακόρυφη Επιτάχυνση στην πλώρη	Αντίσταση κυματισμού	Αντικειμενική Συνάρτηση μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη	Αντικειμενική Συνάρτηση αντίστασης κυματισμού	
1275	-4.83	-38.23	-3.54	-72.15	-4.39	-48.75	
1205	-5.87	-37.01	-4.77	-60.58	-5.49	-44.53	
1237	-6.28	-36.15	-5.47	-54.75	-6.00	-41.92	
1158	-6.75	-32.69	-5.97	-42.59	-6.48	-35.76	
1228	-7.62	-25.23	-7.17	-34.23	-7.46	-28.02	
1106	-7.71	-22.88	-7.90	-30.65	-7.78	-25.29	
1235	-7.99	-8.89	-8.91	-37.15	-8.30	-17.65	
1130	-8.20	-5.10	-9.11	-31.18	-8.51	-13.19	

Από τα στοιχεία του πίνακα 14 μπορούμε πλέον να αποφανθούμε για τα δεδομένα που αφορούν κάθε γεωμετρία μεμονωμένα.

Μια πρώτη παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι πως όλες οι γεωμετρίες αποτελούν μέλη προχωρημένων γενεών. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την αποτελεσματικότητα της εξελικτικής

διαδικασίας του αλγορίθμου ,ανεξάρτητα από τον βαθμό επιτυχίας επιλογής αντικειμενικών συναρτήσεων ο οποίος και σχετίζεται με υδροδυναμικά στοιχεία και όχι με τη διαδικασία αξιολόγησης των κριτηρίων που έχουν τεθεί, καθώς οι βέλτιστες τιμές των κριτηρίων παρουσιάζονται προς το τέλος της διαδικασίας.

Επίσης, παρατηρούμε πως δεν υπάρχει γεωμετρία μεταξύ των επιλεγέντων από το μέτωπο Pareto για την οποία και τα δύο κριτήρια να λαμβάνουν την ελάχιστη τιμή τους. Ωστόσο, παρατηρούμε πως η μείωση του ενός μεγέθους στην μία κατάσταση φόρτωσης επιφέρει μείωση και στην άλλη κατάσταση φόρτωσης, δηλαδή δεν έχουμε μία κατάσταση όπου η βελτίωση των γραμμών για ένα βύθισμα επιφέρει χειροτέρευση στην απόδοση κάποιου άλλου βυθίσματος.. Αν και η ποσοστιαία μείωση είναι σχεδόν ίδια για τις επιταχύνσεις (διαφορά της τάξης του 1% μεταξύ των δύο καταστάσεων φόρτωση) δεν ισχύει το ίδιο στην περίπτωση αντίστασης κυματισμού σε ήρεμο νερό. Εκεί παρατηρούμε σημαντική απόκλιση της ποσοστιαίας μείωσης της αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως στο υπό εξέταση βύθισμα των 11.025 m της κατάστασης Half Load Departure, εξαιτίας της σύγκλισης του προγράμματος SWAN 2 σε τιμές έμπυρμνης διαγωγής για τις παραχθείσες γεωμετρίες (όπως και στην περίπτωση του πατρικού πλοίου) παρατηρείται ανάδυση τμήματος του βολβού (σε αντίθεση με το βύθισμα των 12.626 m όπου ο βολβός παραμένει πλήρως βυθισμένος), γεγονός που επιβαρύνει σημαντικά την τιμή της αντίστασης κυματισμού σε ήρεμο νερό και δυσχεράνει την αποδοτικότητα της βελτιστοποίησης.

Όσον αφορά τις ποσοστιαίες μεταβολές στα δύο κριτήρια βελτιστοποίησης συγκριτικά, παρατηρούμε ότι είναι δυσανάλογες. Συνολικά όμως αυτό δεν ισχύει καθώς η μείωση της επιτάχυνσης μεταφέρεται αυτούσια στο πλοίο, ενώ η αντίσταση κυματισμού αποτελεί μόνο μια συνιστώσα της συνολικής αντίστασης του πλοίου. Για να γίνει αντιληπτό το μέγεθος της συνεισφοράς της μείωσης της αντίστασης κυματισμού στην συνολική αντίσταση του πλοίου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Hughes. Ο συντελεστής ολικής αντίστασης C_T δίνεται από τον παρακάτω τύπο²⁶:

$$C_T(Re,Fn) = (1+k) C_F(Re) + C_W(Fn)$$

όπου,

C_F είναι ο συντελεστής αντίστασης τριβής

C_W είναι ο συντελεστής αντίστασης κυματισμού

$C = 0.5 \times S \times \rho \times V^2$, όπου S η επιφάνεια της γάστρας και V η ταχύτητα

Από την βιβλιογραφία²⁷ και με τη βοήθεια κατάλληλου υπολογιστικού εργαλείου (feature definition) που διαθέτει το πρόγραμμα CAESES ο συντελεστής $(1+k)$ υπολογίστηκε 1.17 για την κατάσταση Full Load Departure και 1.12 για την κατάσταση Half Load Departure. Προφανώς ο συντελεστής αυτός

²⁶ Πολίτη Γ.Κ., (2011) «Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου», Αθήνα

²⁷ J.E Choi et al., (2010), Resistance and propulsion characteristics of various commercial ships based on CFD results. Elsevier

εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πλοίου, ορισμένα από τα οποία όπως η διαμήκης θέση του κέντρου άντωσης, ο όγκος εκτοπίσματος, ο συντελεστής γάστρας κ.α. μεταβάλλονται ανά σχεδίαση. Ωστόσο, με δεδομένο πως όλες οι σχεδιάσεις του μετώπου Pareto παρήχθησαν μέσω διακύμανσης των μεταβλητών σχεδίασης επί της αρχικής γεωμετρίας και με δεδομένο πως κρίθηκαν αποδεκτές προς αξιολόγηση με βάση τους περιορισμούς σχεδίασης που τέθηκαν κατά την διαδικασία βελτιστοποίησης, οι παραπάνω συντελεστές θα χρησιμοποιηθούν για την εκτίμηση της συνολικής αντίστασης των βέλτιστων γεωμετριών.

Ο συντελεστής τριβής C_F υπολογίζεται με τον τύπο της ITTC (1957):

$$C_F = \frac{0.075}{(\log Rn - 2)^2}$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτουν οι Πίνακες 15 και 16 με τους αδιάστατους συντελεστές αντίστασης καθώς και την ολική αντίσταση της πατρικής γάστρας στις δύο υπό μελέτη καταστάσεις φόρτωσης:

Πίνακας 15. Στοιχεία αντίστασης πατρικής γάστρας στην κατάσταση Full Load Departure

	C_F	C_W	C_T	R_T [kN]
Πατρική Γάστρα	1.383×10^{-3}	2.675×10^{-4}	1.885×10^{-3}	1593.9

Πίνακας 16. Στοιχεία αντίστασης πατρικής γάστρας στην κατάσταση Half Load Departure

	C_F	C_W	C_T	R_T [kN]
Πατρική Γάστρα	1.380×10^{-3}	4.214×10^{-4}	1.946×10^{-3}	1547.8

Στον Πίνακα 17 παρουσιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή της συνολικής αντίστασης μεταξύ των επιλεγέντων σχεδιάσεων από το μέτωπο Pareto και της αρχικής γεωμετρίας για τις δύο υπό μελέτη καταστάσεις φόρτωσης καθώς και μια εκτίμηση της ποσοστιαίας μεταβολής της συνδυασμένης συνολικής αντίστασης (με ποσοστό 40 % για την κατάσταση Full Load Departure και 60 % για την κατάσταση Half Load Departure).

Πίνακας 17. Σύγκριση συνολικής αντίστασης των επιλεγέντων γεωμετριών από το μέτωπο Pareto με την αρχική

Ποσοστιαία μεταβολή συνολικής αντίστασης ως προς την πατρική γάστρα (%)			
α/α	T=11.025 m	T=12.626 m	(1-R _{T_OPT} / R _{T_INITIAL})*100
	(1-R _{T_OPT_HLD} / R _{T_INITIAL_HLD})*100	(1-R _{T_OPT_FLD} / R _{T_INITIAL_FLD})*100	
1275	-17.44	-9.79	-14.33
1205	-15.70	-7.99	-12.57
1237	-14.82	-7.09	-11.68
1158	-13.15	-5.29	-9.95
1235	-12.25	-4.44	-9.07
1228	-11.93	-4.02	-8.71
1106	-11.44	-3.52	-8.21
1130	-11.43	-3.51	-8.21

Με βάση τον Πίνακα 17 συμπεράνουμε πως η ποσοστιαία μεταβολή ως προς την αρχική ολική αντίσταση είναι μέγεθος συγκρίσιμο με αυτό της επιτάχυνσης. Η παραπάνω ανάλυση είναι καθαρά προσεγγιστική, με μόνο στόχο να δείξει πως η μείωση των δύο μεγεθών είναι συγκρίσιμη, καθώς δεν λαμβάνεται υπ όψιν η επίδραση της αλλαγής της γεωμετρίας στις υπόλοιπες συνιστώσες της αντίστασης.

Η καταλληλότερη γάστρα είναι αυτή η οποία θα έχει τον καλύτερο συνδυασμό ποσοστιαίας μείωσης των δύο κριτηρίων βελτιστοποίησης. Η μορφή γάστρας που θα επιλεγεί ως βέλτιστη αυτής της διαδικασίας είναι αυτή με αύξοντα αριθμό 1106. Στην γεωμετρία αυτή παρατηρούνται τα εξής:

- Η ποσοστιαία μείωση της αντικειμενικής συνάρτησης της αντίστασης κυματισμού σε ήρεμο νερό εμφανίζει την μικρότερη διαφορά της στις δύο καταστάσεις φόρτωσης (< 8%), σε σύγκριση με τις υπόλοιπες γεωμετρίες του μετώπου Pareto.
- Η ποσοστιαία μείωση της αντικειμενικής συνάρτησης της μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη είναι σχεδόν ίδια για τα δύο βυθίσματα πλευσης (διαφορά < 0.20%).
- Η γεωμετρία αυτή έχει διαφορά εκτοπίσματος και διαμήκους θέσης του κέντρου άντωσης +0.489 % και +0.507 % αντίστοιχα, σε σχέση με την πατρική στο βύθισμα των 12.626 m και +0.419 % και +0.552 % αντίστοιχα, σε σχέση με την πατρική στο βύθισμα των 11.025 m.

Στον Πίνακα 18 έχουμε τις τιμές των μεταβλητών σχεδίασης της αρχικής και της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας που επιλέχθηκε από το μέτωπο Pareto (design no: 1106). Στον Πίνακα 19 έχουμε τις τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων της αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας καθώς και τις ποσοστιαίες μεταβολές τους. Στο Σχήμα 108 φαίνονται οι νομείς της αρχικής και της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας ενώ στα Σχήματα 109 και 110 φαίνονται οι καμπύλες RAO της επιτάχυνσης στην πλώρη σε συνάρτηση με τον αδιάστατο συντελεστή λ/L των μετωπικών κυματισμών για τις δύο υπό μελέτη καταστάσεις φόρτωσης,, όπου παρατηρείται εμφανής βελτίωση στην μέγιστη τιμή της κατακόρυφης

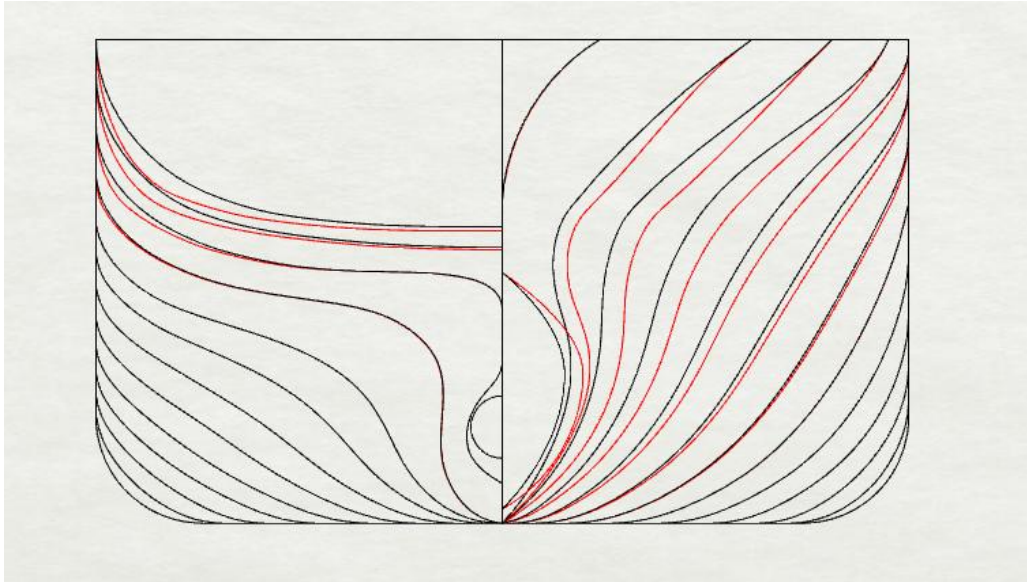
επιτάχυνσης και στις δύο περιπτώσεις. Τέλος στα Σχήμα 111 και 112 φαίνεται το πεδίο κυματισμών της αρχικής και της βελτιστοποιημένης γεωμετρίας κατά την πλεύση με ταχύτητα 23.5 kn και 24 kn αντίστοιχα.

Πίνακας 18. Τιμές μεταβλητών σχεδίασης αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας

Μεταβλητή Σχεδίασης	Πατρική Γάστρα	Βελτιστοποιημένη Γάστρα
Bulbous Bow Tip Elevation (m) :	8.249	7.367
Bulbous Bow Length (m):	6.908	8.403
FWD LOW TAN of BB sections (deg):	46	30.4
FWD UP TAN of BB sections (deg):	180	176.9
AFT LOW TAN of BB sections (deg):	46	29.1
AFT UP TAN of BB sections (deg):	140	144.9
Entrance Angle on BB Max Beam Z Curve (deg):	0	0.5
Entrance Angle on BB Max Beam Y Curve (deg):	90	67.1
Entrance Angle of WL at FP (deg):	7.8	10.0
Y Position at Point on WL (m):	8.685	9.787
Y Position at Point on Transom Curve (m):	11.772	12.948
Z Position on Transom Lower Point (m):	11.836	11.661

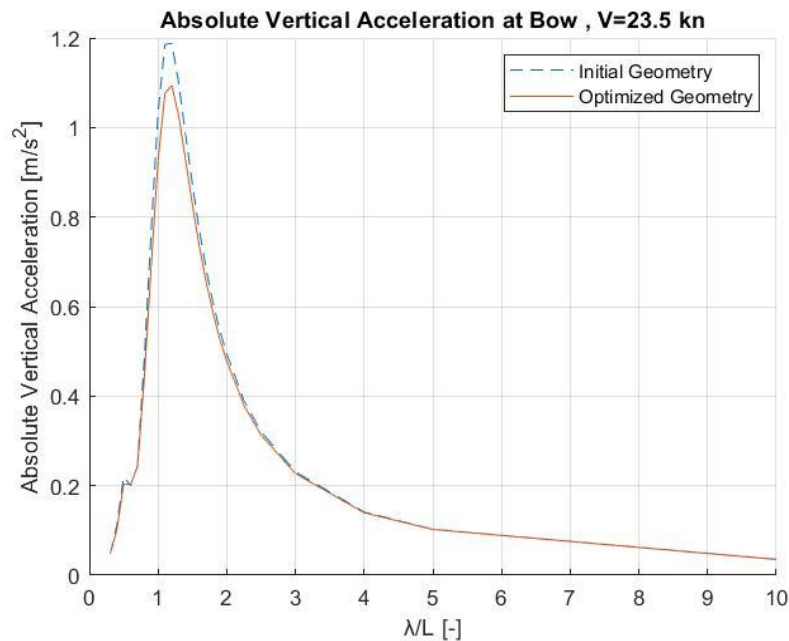
Πίνακας 19. Σύγκριση αντικειμενικών συναρτήσεων αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας

Αντικειμενική Συνάρτηση	Πατρική Γάστρα	Βελτιστοποιημένη Γάστρα	Ποσοστιαία Μεταβολή (%)
Αντίσταση Κυματισμού σε ήρεμο νερό (kN) :	291.6	217.9	-25.29
Μέγιστη Κατακόρυφη Επιτάχυνση στην Πλήρη (m/s ²) :	1.3850	1.2773	-7.78

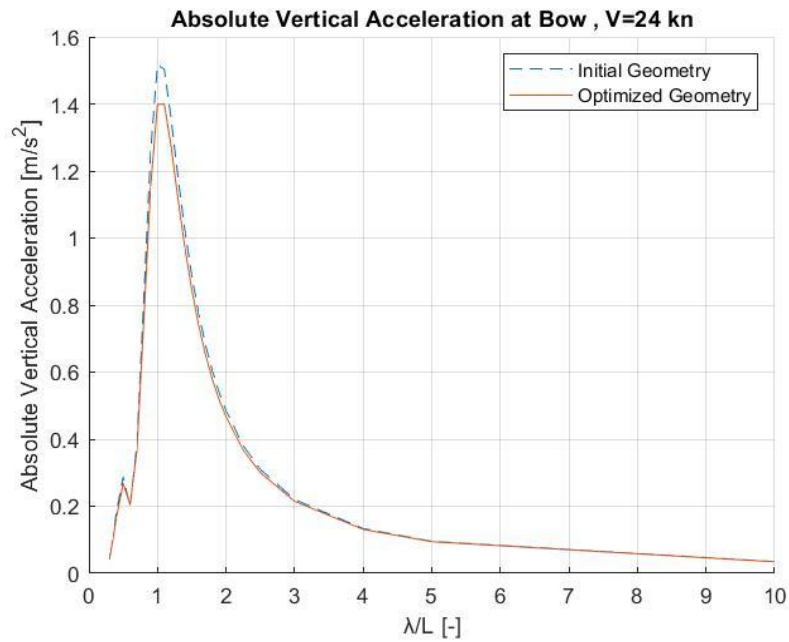


Σχήμα 108. Νομείς αρχικής (μαύρες καμπύλες) και βελτιστοποιημένης (κόκκινες καμπύλες) γεωμετρίας

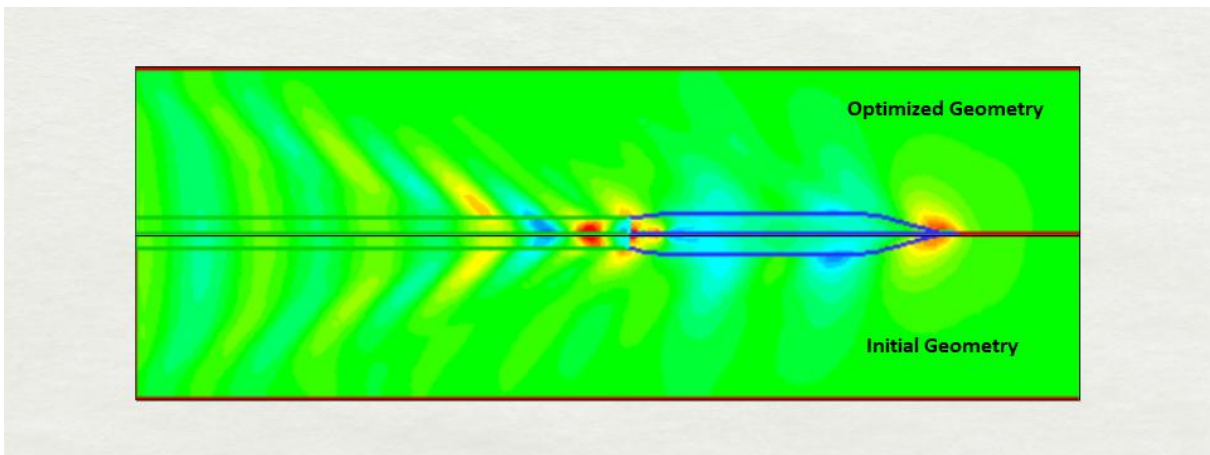
Από τους νομείς των δύο γεωμετριών παρατηρούμε την εμφανή διαφοροποίηση τόσο στην περιοχή του βολβού (8 μεταβλητές σχεδίασης) όσο και στους πρωραίους νομείς. Μεταβολές παρατηρούνται επίσης στην περιοχή της πρύμνης (2 μεταβλητές σχεδίασης).



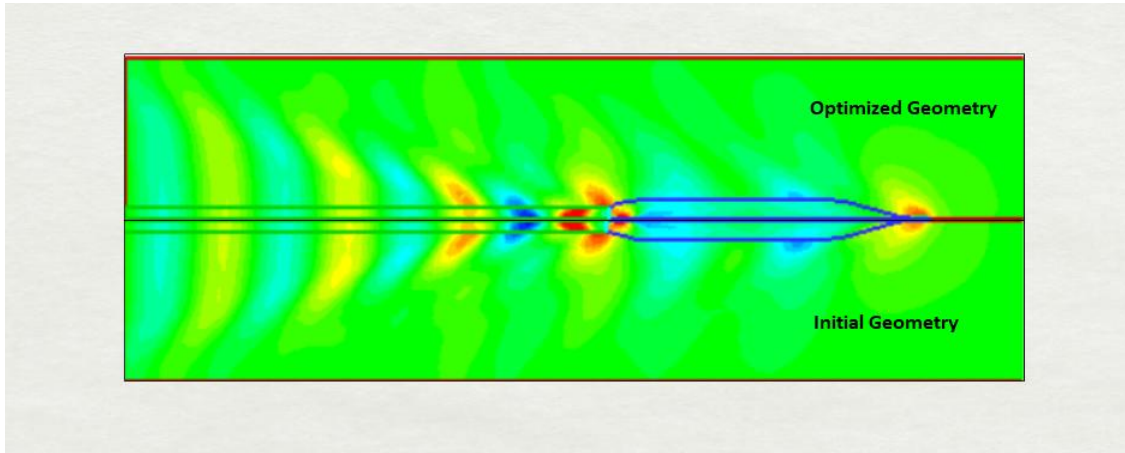
Σχήμα 109. Καμπύλη RAO της κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη σε απλούς αρμονικούς μετωπικούς κυματισμούς για την κατάσταση Full Load Departure και ταχύτητα πλοίου 23.5 kn



Σχήμα 110. Καμπύλη RAO της κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη σε απλούς αρμονικούς μετωπικούς κυματισμούς για την κατάσταση Half Load Departure και ταχύτητα πλοίου 24 kn



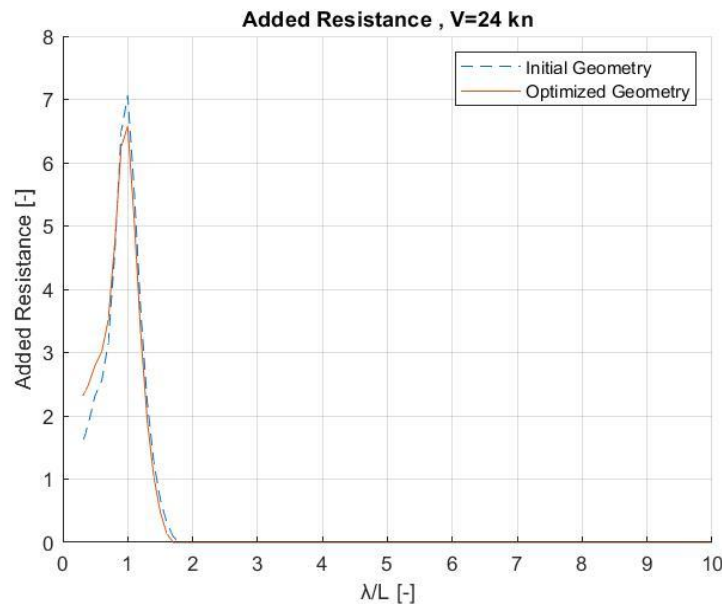
Σχήμα 111. Πεδίο κυματισμών αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας, $F_n=0.247$



Σχήμα 112 Πεδίο κυματισμών αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας, $F_n=0.252$

Στα σχήματα 111 και 112 απεικονίζονται οι παραγόμενοι κατά την πλεύση κυματισμοί σε διάφορες αποστάσεις από το πλοίο. Οι αποστάσεις αυτές ορίζονται ως ποσοστό επί του μήκους μεταξύ καθέτων του πλοίου μετρούμενες κάθετα στο διάμηκες αυτού. Στην υψηλή ταχύτητα έχουμε μεγαλύτερο μήκος κύματος τόσο για τους αποκλίνοντες όσο και για τους ακολουθούντες κυματισμούς.

Τέλος, θα κάνουμε μια αναφορά στο μέγεθος της πρόσθετης αντίστασης. Με χρήση του λογισμικού SPP-86 υπολογίζεται η πρόσθετη αντίσταση λόγω της παρουσίας κυματισμών σε αδιαστατοποιημένη μορφή. Το μέγεθος αυτό αν και είναι σημαντικό δεν αποτελεί αντικειμενική συνάρτηση σε καμία από τις εκτελέσεις βελτιστοποίησης. Στο Σχήμα 113 φαίνεται η καμπύλη που δίνει την αδιαστατοποιημένη τιμή της πρόσθετης αντίστασης λόγω των κινήσεων του πλοίου ($V=24$ kn):



Σχήμα 113. Πρόσθετη αντίσταση αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας, $V=24$ kn

Παρατηρώντας το διάγραμμα του Σχήματος 113 βλέπουμε πως η μείωση της πρόσθετης αντίστασης για τη βελτιστοποιημένη γεωμετρία είναι αντίστοιχη με αυτές των επιταχύνσεων. Το μέγεθος αυτό θα μπορούσε να αποτελεί μια πρόσθετη αντικειμενική συνάρτηση σε μια ευρύτερη διαδικασία βελτιστοποίησης. Η βελτιστοποιημένη γεωμετρία έχει μειωμένη πρόσθετη αντίσταση κατά 6.89 % από την αρχική μορφή γάστρας. Αυτό που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι στις υψηλές συχνότητες αρμονικών κυματισμών (περιοχή μικρών μηκών κύματος) η βελτιστοποιημένη γεωμετρία έχει χειρότερες επιδόσεις από την αρχική. Προκειμένου να έχουμε μεγαλύτερα ποσοστά κέρδους για τις συχνότητες που έχουμε τις μέγιστες τιμές πρόσθετης αντίστασης, το μέγεθος αυτό θα πρέπει να αποτελέσει αντικειμενική συνάρτηση προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί αποτελεσματικά.

5.4 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία έγινε μελέτη της υδροδυναμικής συμπεριφοράς ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων τόσο σε ήρεμο νερό όσο και σε κυματισμούς. Σκοπός της υδροδυναμικής μελέτης αποτέλεσε η προσπάθεια βελτίωσης των επιδόσεων της γάστρας από πλευράς αντίστασης σε ήρεμο νερό και συμπεριφοράς κατά την πλεύση του σε αρμονικούς μετωπικούς κυματισμούς.

Για τις ανάγκες της διαδικασίας, αρχικά σχεδιάστηκε παραμετρικά μια δοθείσα μορφή γάστρας ώστε ένας περιορισμένος αριθμός μεταβλητών σχεδίασης να επιδρά στο μέγιστο δυνατό βαθμό στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της που επηρεάζουν άμεσα τα κριτήρια με βάση τα οποία αξιολογείται η υδροδυναμική της επίδοση. Κατά την επιλογή των παραμέτρων αποκλείστηκαν οι κύριες διαστάσεις του πλοίου προκειμένου να μην υπάρχει μεγάλη μεταβολή στη μορφή της γάστρας.

Η παραμετρική σχεδίαση υλοποιήθηκε στο λογισμικό CAESSES - Friendship Framework, με συνδυασμό των σχεδιαστικών εργαλείων. Το αποτέλεσμα της παραμετρικής σχεδίασης είναι μια γάστρα που προσεγγίζει με ακρίβεια την δοθείσα μη παραμετρική μορφή, κι εξαρτάται από 12 συνολικά μεταβλητές σχεδίασης των οποίων οι τιμές διακυμαίνονται εντός ενός εύρους. Από την τυχαία διακύμανση των μεταβλητών σχεδίασης προκύπτουν διαφορετικές μορφές γάστρας προκειμένου να αναζητηθεί η μορφή εκείνη που συνολικά είναι αποδοτικότερη από την αρχική.

Η υδροδυναμική αξιολόγηση των εναλλακτικών μορφών υλοποιήθηκε με δύο διαφορετικά λογισμικά. Για τις ανάγκες της βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα SWAN 2 και SPP-86 για την εκτίμηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς των γεωμετριών, από πλευράς αντίστασης σε ήρεμο νερό και απόκρισης σε αρμονικούς κυματισμούς αντίστοιχα. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε συνολικά τρεις φορές με εναλλαγή των αντικειμενικών συναρτήσεων για δύο διαφορετικές καταστάσεις φόρτωσης με διαφορετικές ταχύτητες. Οι πρώτες δύο πραγματοποιήθηκαν με κριτήριο μία αντικειμενική συνάρτηση κάθε φορά ενώ η τρίτη ενσωμάτωσε στην διαδικασία βελτιστοποίησης και τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις ως κριτήρια ταυτόχρονα. Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των βελτιστοποιήσεων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 20. Συγκριτικά αποτελέσματα των τριών βελτιστοποιήσεων - Ποσοστιαίες μεταβολές αντικειμενικών συναρτήσεων βέλτιστων γεωμετριών ως προς την αρχική (%)

Μέθοδοι Βελτιστοποίησης	Αντίσταση Κυματισμού	Κατακόρυφη Επιτάχυνση στην πλώρη
Μονο/κή Βελτι/ση (ως προς μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλώρη)	-	-9.34
Μονο/κή Βελτι/ση (ως προς αντίσταση κυματισμού σε ήρεμο νερό)	-37.98	-
Πολύ/κή Βελτι/ση (ως προς τις 2 αντικειμενικές συναρτήσεις ταυτόχρονα)	-25.29	-7,78

Σύμφωνα με τον Πίνακα 20 οι μονοκριτηριακές βελτιστοποιήσεις κατέληξαν σε καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την ποσοστιαία μείωση των αντικειμενικών συναρτήσεων, αν και παρατηρούμε πως η διαφορά στην περίπτωση της κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη δεν είναι μεγάλη. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς στην περίπτωση της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης στόχος είναι η επίτευξη καλύτερης υδροδυναμικής συμπεριφοράς των σχεδιάσεων ως προς τα δύο κριτήρια ταυτόχρονα. Επομένως οδηγούμαστε στην επιλογή της βέλτιστης σχεδίασης από το μέτωπο Pareto και όχι με κριτήριο τις ελάχιστες τιμές για κάθε αντικειμενική συνάρτηση ξεχωριστά. Ενδεικτικά αναφέρουμε πως από το σύνολο των αποδεκτών γεωμετριών της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης οι ελάχιστες τιμές που προέκυψαν είναι 149.5 kN για την αντίσταση κυματισμού σε ήρεμο νερό και 1.2581 m/s² για την κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλώρη και αντιστοιχούν σε ποσοστό μείωσης 48.75 % και 9.16 % αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές είναι κοντά στα αποτελέσματα των μονοκριτηριακών βελτιστοποιήσεων.

Όσον αφορά την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο 5.3.4, επιλέγεται σαν βέλτιστη η γεωμετρία 1106 από το μέτωπο Pareto, της οποίας οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων παραθέτονται στον Πίνακα 19. Η ποσοστιαία μείωση της μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης στην πλώρη είναι 7.78 %, αρκετά μικρότερη από την αντίστοιχη της αντίστασης κυματισμού σε ήρεμο νερό. Ωστόσο, όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο 5.3.4, η αντίσταση κυματισμού αποτελεί μόνο μια συνιστώσα της συνολικής αντίστασης του πλοίου. Σύμφωνα λοιπόν με την ανάλυση που έγινε με την μέθοδο Hughes προκύπτει ο ακόλουθος Πίνακας 21:

Πίνακας 21. Συγκριτικός πίνακας συνολικής αντίστασης αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας 1106

	R _{T_FLD} [kN]	R _{T_HLD} [kN]	R _{T_COMBINED}	Ποσοστιαία Μεταβολή (%)
Πατρική Γάστρα	1593.9	1547,8	1566.2	
Βελτιστοποιημένη Γάστρα (design no: 1106)	1537.9	1370.8	1437.6	-8.21

Από τον Πίνακα 21, παρατηρούμε πως μέσω της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης επιτεύχθηκε μείωση 8.21 % της συνολικής αντίστασης της πατρικής γάστρας, μέγεθος συγκρίσιμο με αυτό της επιτάχυνσης (-7.78 %).

Καταλήγοντας μπορούμε να εξάγουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Από το σύνολο της εργασίας φαίνονται τα πλεονεκτήματα της βελτιστοποίησης της γεωμετρίας της γάστρας μέσω συστημάτων CAD/CAM. Με την ενσωμάτωση της διαδικασίας της βελτιστοποίησης σε πρώιμα στάδια της μελέτης μπορούν να παραχθούν αποδοτικότερες γεωμετρίες.
- Για την υδροδυναμική βελτιστοποίηση, η δυναμική θεωρία είναι η καταλληλότερη για την αξιολόγηση ενός πολύ μεγάλου αριθμού διαφορετικών γεωμετριών σε εύλογο χρονικό διάστημα. Η χρήση αντίστοιχου λογισμικού επέφερε γεωμετρίες με βελτιωμένα χαρακτηριστικά σε σχέση με την πατρική γάστρα.
- Η χρήση γενετικών αλγορίθμων σε μια πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση μπορεί να εξασφαλίσει την αξιόπιστη σύγκλιση προς τις βέλτιστες λύσεις ανεξαρτήτως της επιλογής των αντικειμενικών συναρτήσεων κάτι που εξαρτάται από υδροδυναμικά κριτήρια. Εφόσον είναι ικανοποιητική η υδροδυναμική αξιολόγηση, εξασφαλίζεται η παραγωγή γεωμετριών με καλύτερα χαρακτηριστικά.
- Η μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση είναι λογικό να οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα για το εκάστοτε κριτήριο σε σύγκριση με την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση που στόχο έχει καλύτερα αποτελέσματα και για τα δύο κριτήρια ταυτόχρονα.
- Η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση σε δύο βυθίσματα είναι ικανοποιητική αλλά μπορεί να διευρυνθεί ακόμα περαιτέρω. Αρχικά θα μπορούσε να γίνει μια βελτιστοποίηση λαμβάνοντας υπ όψιν ακόμα μεγαλύτερο αριθμό καταστάσεων φορτώσεως, έτσι ώστε να διευρυνθεί το όφελος για περισσότερες καταστάσεις λειτουργίας του πλοίου. Επιπλέον θα μπορούσε να συνεκτιμηθούν περισσότερα κριτήρια υδροδυναμικά ή μη για τη συνολικότερη βελτιστοποίηση του πλοίου. Περιοριστικός παράγοντας είναι η εύρυθμη λειτουργία του αλγορίθμου βελτιστοποίησης για περισσότερες αντικειμενικές συναρτήσεις. Τέλος, η ίδια διαδικασία θα ήταν επιθυμητό να ακολουθηθεί και για άλλα παραδείγματα πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων καθώς και για άλλες ταχύτητες υπηρεσίας με σκοπό να εξαχθούν συμπεράσματα για το κατά πόσο τα αποτελέσματα είναι ανάλογα με αυτά της παρούσας εργασίας.
- Σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το αποτέλεσμα της μοντελοποίησης είναι η ακριβής παραμετρική αναπαράσταση της γεωμετρίας της γάστρας.

- Απαιτείται σωστή και καλή αξιολόγηση των παραμέτρων με σκοπό να επιλεγθεί ο κατάλληλος αριθμός αλλά και εκείνες οι παράμετροι που θα οδηγήσουν σε αποδεκτά αποτελέσματα. Υπερβολικός αριθμός παραμέτρων είναι ικανός να οδηγήσει σε βελτιστοποίηση χρονοβόρα και με αποτέλεσμα όχι καλύτερα από αντίστοιχες διαδικασίες. Απαιτείται επίσης ο σωστός καθορισμός του εύρους διακύμανσης των παραμέτρων για την αποφυγή παραγωγής ανώμαλων μορφών. Τέλος, μια διαδικασία που μπορεί να ακολουθηθεί για τον έλεγχο της συνεισφοράς των επιλεγθεισών παραμέτρων είναι η πραγματοποίηση βελτιστοποιήσεων με χρήση κάθε μίας παραμέτρου ξεχωριστά. Με αυτόν τον τρόπο θα διαπιστώσουμε αν κάθε παράμετρος συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση των αντικειμενικών συναρτήσεων (καθώς και το ποσοστό επιρροής της) ή αν μπορεί να εξαιρεθεί από την διαδικασία.
- Η δυναμική συμπεριφορά του πλοίου και πρωτίστως η αντίσταση του είναι φαινόμενα άμεσα εξαρτημένα με τη συνεκτικότητα η οποία παραλείπεται στα πλαίσια της δυναμικής θεωρίας που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη. Η διάσπαση των ρευστομηχανικών φαινομένων είναι μια βολική αλλά αυθαίρετη διαδικασία που αναπόφευκτα εισάγει σφάλματα. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων με τη θεωρία της συνεκτικής ροής μέσω κωδίκων CFD θα έδινε μια πληρέστερη εικόνα.
- Σε κάθε περίπτωση όλα τα αποτελέσματα που προκύπτουν από υπολογιστικές διαδικασίες θα πρέπει να ελέγχονται με εκτέλεση πειραμάτων υπό κλίμακα σε πειραματική δεξαμενή.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α - FRIENDSHIP-FRAMEWORK

The FRIENDSHIP - FRAMEWORK is a CAE package for the design of functional surfaces. It offers a wide range of CAD functionality for conventional NURBS - modeling, partially parametric modeling with various transformations and fully parametric modeling.

This software comes with a set of embedded variation and optimization strategies. These algorithms can be comfortably linked to the geometry and perform automatic variant creation. For that purpose, comprehensive variant and constraint management are provided.

Any program or tool which is needed for geometry design and analysis can be coupled. Convenient integration mechanisms make the external program an inherent part of the FRIENDSHIP - FRAMEWORK. By doing so, design and analysis expertise is centralized in order to streamline the design process. CFD solvers are coupled to the CAD through various levels of integration; tool- or project specific integration or by a common data interface. Therefore, results of CFD computations can be easily used as measures of merit for optimization procedures, driving the design process.

In addition to configuration and execution of external programs, comprehensive post-processing functionality is available. Result data gets visualized and tables are generated so that the entire design process finally takes place within a single workbench.

1.5.1 Design principles

A typical design procedure within the FRIENDSHIP - FRAMEWORK starts with a parametric model of the considered shape. During the geometry setup, objects are related to each other via introducing dependencies. Changes that are applied to one object are internally passed to dependent objects for update purposes. Surfaces are no longer described via basic point data. More intuitive descriptors (e.g. user-defined distributions which describe product properties) help to modify geometry smartly in a way that the resulting surfaces cover high fairness for geometrically feasible designs. Note that no “black-box” models are used, the engineer is completely free to set up any individual design. In the second step, parts of the geometry are linked to variation engines. Any floating-point number of the model setup can be varied. The user chooses a specific engine and defines bounds for variables as well as constraints and objectives. In order to be able to assess the manual or automatic variants, external software is coupled and configured. The engines simply evaluate parameters that request an external value. This transfers external data into the FRIENDSHIP - FRAMEWORK. Based on this integration – along with parametric geometry variation – sophisticated formal optimizations can be carried out.

1.5.2 Basic elements

The FRIENDSHIP-FRAMEWORK allows designing with a wide variety of point, curve and surface types. Curve intersection point, NURBS curve, lofted surface, Coons patch etc., are already known from other CAD programs and are fully-functional. Within the FRIENDSHIP - FRAMEWORK there are some special entities, which make the software a unique fully-parametric CAD tool. The most important of these is the following:

1.5.2.1 Meta - Surfaces

They are novel surface entities developed for collecting information available in two distinct directions. They yield the Cartesian coordinates of any point on the surface for any pair of surface coordinates u and v , basically giving an unambiguous mapping from 2 to 3 as would, say, Bézier or B-Spline surfaces, too. However, they are more flexible as they do not assume any particular representation with regard to the curves they capture.

1.5.2.2 Feature modeling

Features are the way scripts can be implemented into a design. They work the same way than libraries for a programming language. On one hand can be produced with a little more than a click of the mouse instead of modeling them from the scratch every time which would take quite a while but on the other hand, the user has to be quite familiar with script writing, especially when difficult geometries and concepts are required.

They can be created either as "persistent", in the case their result will be an object incorporated to the current design, or transient if they are just needed to perform a task on the design (a geometric transformation for instance).

Features encapsulate any user-defined command sequence and that makes it available for writing macros and subroutines. They are high-level entities that can offer readily shaped and parameterized elements, as opposed to primitive elements like points, lines and "normal" curves and surfaces and represent specific work processes which can be stored externally and reused.

Features work on the base of an editor where the necessary input parameters and types are specified as arguments and then a process is described via commands. This script is finally evaluated and returns the produced output that makes up the feature's attribute. Features are flexible and can be combined with each other providing sophisticated objects.

1.5.2.3 Curve engines

One of the useful objects for defining hull shapes in the FRIENDSHIP FRAMEWORK is called the Curve Engine. It allows for a type of curve to be defined at any position by a parameterization function of its position. In opposition to a classic hull design software where a few sections are defined at specific points along the hull length, the use of the curve engine allows to have a continuous section envelope running along the whole hull:

Basically, the curve engine combines a "template" curve definition with a continuous description of this definition. The template is formulated as Feature definition and describes a curve by means of its configurable parameters. Then, the curve engine takes this definition and connects the parameters with a functional description of them, i.e. distribution. This means that for each (abscissa) value in the interval of the functions, a curve can be generated where the information stems from the input functions (i.e. the ordinate value of them). (FRIENDSHIP Systems GmbH 2010)

1.5.2.4 Design engine

In order to fulfill this objective of performance driven design, FF has several optimization algorithms implemented. The type of objects they belong to are "Design Engines". These design engines can be used to either alter an existing design or create new ones. These entities enclose several variation-optimization algorithms, embedded in FRIENDSHIP-FRAMEWORK, which are available for Design of Experiments, single-objective and multi-objective optimizations. To name some: Sobol, Exhaustive Search NSGA-II, Mosa etc. Design variables are chosen from the project which shall be involved in the variation/optimization. For the most engines the lower and upper bound need to be set, as well as the current value. Then, the evaluations are chosen, which are parameters involved in the project. The results of the variant creations are presented in a table, with the value of the variables used to create them, the F -parameter object(s) on which the evaluation is running and the constraints of the design that have been defined by the user.. The evaluations can be set as objectives which then are minimized. Equality or inequality constraints may also be involved. According to the underlying algorithm, these constraints may be considered or not.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β - ΛΟΓΙΣΜΙΚΑ ΚΑΙ ΓΛΩΣΣΕΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ

1. Microsoft Word
2. Microsoft Excel
3. Microsoft PowerPoint
4. Γλώσσα προγραμματισμού Fortran 77
5. Γλώσσα προγραμματισμού Fortran 95
6. Γλώσσα προγραμματισμού Intel Visual Fortran
7. Γλώσσα προγραμματισμού Visual C++
8. Υπολογιστικό πακέτο Matlab
9. Λογισμικό διαχείρισης αποτελεσμάτων προσομοίωσης Tecplot 10
10. Σχεδιαστικό πρόγραμμα AutoCAD 2015
11. Σχεδιαστικό πρόγραμμα Rhinoceros 5.0
12. Σχεδιαστικό πρόγραμμα AVEVA Lines
13. Λογισμικό παραμετρικής μοντελοποίησης CAESES – Friendship Framework
14. Λογισμικό εκτίμησης υδροδυναμικής συμπεριφοράς πλοίων SWAN 2
15. Λογισμικό εκτίμησης υδροδυναμικής συμπεριφοράς πλοίων SPP-86

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ - ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΗ ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΛΟΙΟΥ.....	46
ΠΙΝΑΚΑΣ 2. ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΑΤΡΙΚΟΥ ΠΛΟΙΟΥ	47
ΠΙΝΑΚΑΣ 3. ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΦΟΡΤΩΣΗΣ	48
ΠΙΝΑΚΑΣ 4. ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΑΡΑΧΘΕΙΣΑΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ	52
ΠΙΝΑΚΑΣ 5. ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΠΑΡΑΧΘΕΙΣΑΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΑΠΟ ΠΑΤΡΙΚΟ ΠΛΟΙΟ.....	52
ΠΙΝΑΚΑΣ 6. ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΕΥΡΟΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ	68
ΠΙΝΑΚΑΣ 7. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ ΜΕΣΩ CAESES ΣΤΟ ΒΥΘΙΣΜΑ T=11.025 Μ ΚΑΙ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ ΑΠΟ ΠΑΤΡΙΚΟ ΠΛΟΙΟ	69
ΠΙΝΑΚΑΣ 8. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΥΔΡΟΣΤΑΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ ΜΕΣΩ CAESES ΣΤΟ ΒΥΘΙΣΜΑ T=12.626 Μ ΚΑΙ ΑΠΟΚΛΙΣΕΙΣ ΑΠΟ ΠΑΤΡΙΚΟ ΠΛΟΙΟ	69
ΠΙΝΑΚΑΣ 9. ΑΡΧΙΚΕΣ ΤΙΜΕΣ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	76
ΠΙΝΑΚΑΣ 10. ΤΙΜΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ	89
ΠΙΝΑΚΑΣ 11. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ	89
ΠΙΝΑΚΑΣ 12. ΤΙΜΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ	104
ΠΙΝΑΚΑΣ 13. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ	104
ΠΙΝΑΚΑΣ 14. ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ (ΚΑΙ ΕΠΙΜΕΡΟΥΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΩΝ ΤΟΥΣ) ΤΩΝ ΕΠΙΛΕΓΕΤΩΝ ΓΕΩΜΕΤΡΙΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΜΕΤΩΠΟ PARETO ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΡΧΙΚΗ	117
ΠΙΝΑΚΑΣ 15. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΠΑΤΡΙΚΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ FULL LOAD DEPARTURE	119
ΠΙΝΑΚΑΣ 16. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΠΑΤΡΙΚΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ HALF LOAD DEPARTURE	119
ΠΙΝΑΚΑΣ 17. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΕΠΙΛΕΓΕΤΩΝ ΓΕΩΜΕΤΡΙΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΜΕΤΩΠΟ PARETO ΜΕ ΤΗΝ ΑΡΧΙΚΗ.....	120
ΠΙΝΑΚΑΣ 18. ΤΙΜΕΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ	121
ΠΙΝΑΚΑΣ 19. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ	121
ΠΙΝΑΚΑΣ 20. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΕΩΝ - ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΕΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΓΕΩΜΕΤΡΙΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΑΡΧΙΚΗ (%)	126
ΠΙΝΑΚΑΣ 21. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΟΣ ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΟΛΙΚΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ 1106	126

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ - ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΗ ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΣΧΗΜΑ 1. Η ΣΠΕΙΡΟΕΙΔΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΠΛΟΙΩΝ	7
ΣΧΗΜΑ 2. Η ΕΝΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΠΛΟΙΩΝ	9
ΣΧΗΜΑ 3. Η ΕΠΑΝΑΛΗΠΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΠΛΟΙΩΝ	10
ΣΧΗΜΑ 4. ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΥΠΟ ΤΗ ΜΟΡΦΗ ΤΟΥ ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ C_R ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΑΡΙΘΜΟ FROUDE 20	
ΣΧΗΜΑ 5. ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΚΑΤΑ ΚΕΛΒΙΝ	23
ΣΧΗΜΑ 6. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΑΔΙΑΣΤΑΤΟ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΥΠΟΛΟΙΠΗΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ (C_R) ΜΕ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟΥΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥΣ ΤΟΥ ΑΔΙΑΣΤΑΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ (C_W)	25
ΣΧΗΜΑ 7. ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΣΤΕΡΕΟΥ ΣΥΝΟΡΟΥ ΣΤΟ SWAN 2	29
ΣΧΗΜΑ 8. ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟ ΠΛΕΓΜΑ ΕΛΕΥΘΕΡΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΣΤΟ SWAN 2	30
ΣΧΗΜΑ 9. ΟΙ ΚΙΝΗΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ	31
ΣΧΗΜΑ 10. ΑΠΛΟΣ ΑΡΜΟΝΙΚΟΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΣ	32
ΣΧΗΜΑ 11. ΣΧΗΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΘΕΩΡΙΑΣ ΛΩΡΙΔΩΝ	34
ΣΧΗΜΑ 12. ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΑΦΟΡΑΣ ΚΑΤΑ FRANK	35
ΣΧΗΜΑ 13. ΚΑΜΠΥΛΕΣ RAO ΤΗΣ ΚΑΘΕΤΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΤΟ ΠΡΥΜΝΑΙΟ, ΜΕΣΟ ΚΑΙ ΠΡΩΡΑΙΟ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΕ ΜΕΤΩΠΙΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ, ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΦΟΡΤΩΣΗΣ FLD, $V=23.5$ ΚΝ	38
ΣΧΗΜΑ 14. ΚΑΜΠΥΛΕΣ RAO ΤΗΣ ΚΑΘΕΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΤΟ ΠΡΥΜΝΑΙΟ, ΜΕΣΟ ΚΑΙ ΠΡΩΡΑΙΟ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΕ ΜΕΤΩΠΙΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ, ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΦΟΡΤΩΣΗΣ FLD, $V=23.5$ ΚΝ	38
ΣΧΗΜΑ 15. ΚΑΜΠΥΛΕΣ RAO ΤΗΣ ΚΑΘΕΤΗΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΣΤΟ ΠΡΥΜΝΑΙΟ, ΜΕΣΟ ΚΑΙ ΠΡΩΡΑΙΟ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΜΕ ΜΕΤΩΠΙΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ, ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΦΟΡΤΩΣΗΣ FLD, $V=23.5$ ΚΝ	39
ΣΧΗΜΑ 16. ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΕΣ ΛΥΣΕΙΣ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ	44
ΣΧΗΜΑ 17. Η ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ NSGA II	45
ΣΧΗΜΑ 18. ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΑΡΧΙΚΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ LINES	48
ΣΧΗΜΑ 19. ΚΑΜΠΥΛΗ FLAT OF SIDE (FOS) ΠΑΤΡΙΚΟΥ ΠΛΟΙΟΥ	49
ΣΧΗΜΑ 20. ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΡΟΕΚΤΑΣΗ ΚΑΜΠΥΛΗΣ FLAT OF SIDE (FOS) ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ LINES	50
ΣΧΗΜΑ 21. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗΣ ΝΟΜΕΑ - ΑΡΧΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ	50
ΣΧΗΜΑ 22. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΞΟΜΑΛΥΝΣΗΣ ΝΟΜΕΑ - ΤΕΛΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ	51
ΣΧΗΜΑ 23. ΤΕΛΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΓΑΣΤΡΑΣ	51
ΣΧΗΜΑ 24. ΤΕΛΙΚΟ ΑΡΧΕΙΟ ΓΡΑΜΜΩΝ - ΠΡΥΜΝΑΙΟ ΤΜΗΜΑ	53
ΣΧΗΜΑ 25. ΤΕΛΙΚΟ ΑΡΧΕΙΟ ΓΡΑΜΜΩΝ - ΠΡΩΡΑΙΟ ΤΜΗΜΑ	54
ΣΧΗΜΑ 26. ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΚΑΜΠΥΛΗΣ B-SPLINE	56
ΣΧΗΜΑ 27. ΚΑΤΟΨΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ CAESES	59
ΣΧΗΜΑ 28. ΔΙΑΜΗΚΗΣ ΟΨΗ ΒΑΣΙΚΩΝ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΣΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ CAESES	59
ΣΧΗΜΑ 29. ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΠΡΥΜΝΑΙΩΝ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) ΚΑΙ ΠΡΩΡΑΙΩΝ (ΔΕΞΙΑ) ΝΟΜΕΩΝ	60
ΣΧΗΜΑ 30. ΑΡΧΙΚΗ – ΜΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ (ΜΑΥΡΗ) ΚΑΙ ΤΕΛΙΚΗ - ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ (ΚΟΚΚΙΝΗ) ΜΟΡΦΗ ΠΡΟΦΙΛ ΤΟΥ ΒΟΛΒΟΥ	61
ΣΧΗΜΑ 31. ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΜΕΤΑΞΥ ΑΡΧΙΚΗΣ (ΜΑΥΡΗ) ΚΑΙ ΤΥΧΟΥΣΑΣ (ΚΟΚΚΙΝΗ) ΜΟΡΦΗΣ ΠΡΟΦΙΛ ΤΟΥ ΒΟΛΒΟΥ	62
ΣΧΗΜΑ 32. ΚΑΤΟΨΗ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΥ ΒΟΛΒΟΥ ΚΑΙ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΙΣΟΨΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΤΩΝ ΝΟΜΕΩΝ ΠΡΥΜΝΗΘΕΝ ΤΗΣ ΠΡΩΡΑΙΑΣ ΚΑΘΕΤΟΥ	63
ΣΧΗΜΑ 33. ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΒΟΛΒΟΕΙΔΟΥΣ ΠΛΩΡΗΣ (ΜΕ ΜΑΥΡΟ ΑΝΑΠΑΡΙΣΤΑΤΑΙ Η ΑΡΧΙΚΗ - ΜΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΦΙΛ ΤΟ ΒΟΛΒΟΥ)	64
ΣΧΗΜΑ 34. ΑΡΧΙΚΗ ΜΟΡΦΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΟΥ ΒΟΛΒΟΥ	65
ΣΧΗΜΑ 35. ΤΥΧΟΥΣΑ ΜΟΡΦΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΤΟΥ ΒΟΛΒΟΥ	65

ΣΧΗΜΑ 36. Η ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ ΥΜ SEATTLE.....	66
ΣΧΗΜΑ 37. Η ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ ΥΜ SEATTLE - ΠΡΥΜΝΑΙΟ ΤΜΗΜΑ.....	66
ΣΧΗΜΑ 38. Η ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΟΥ ΥΜ SEATTLE - ΠΡΩΡΑΙΟ ΤΜΗΜΑ	67
ΣΧΗΜΑ 39. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ FULL LOAD DEPARTURE	71
ΣΧΗΜΑ 40. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΩΡΑΙΑΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ HALF LOAD DEPARTURE.....	72
ΣΧΗΜΑ 41. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΥΜΝΑΙΑΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ HALF LOAD DEPARTURE	72
ΣΧΗΜΑ 42. ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΛΟΙΟΥ CONTAINERSHIP	73
ΣΧΗΜΑ 43. ΚΑΜΠΥΛΗ RAO ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΛΩΡΗ ΠΑΤΡΙΚΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ ΣΕ ΑΠΛΟΥΣ ΑΡΜΟΝΙΚΟΥΣ ΜΕΤΩΠΙΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ FULL LOAD DEPARTURE ΚΑΙ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΟΙΟΥ 23.5 ΚΝ.....	76
ΣΧΗΜΑ 44. ΚΑΜΠΥΛΗ RAO ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΛΩΡΗ ΠΑΤΡΙΚΗΣ ΓΑΣΤΡΑΣ ΣΕ ΑΠΛΟΥΣ ΑΡΜΟΝΙΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ HALF LOAD DEPARTURE ΚΑΙ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΟΙΟΥ 24 ΚΝ.....	77
ΣΧΗΜΑ 45. ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΛΥΣΕΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΗΝ ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΣΤΗΝ ΠΛΩΡΗ	78
ΣΧΗΜΑ 46. ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΛΥΣΕΩΝ - ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΣΤΗΝ ΠΛΩΡΗ (40% FLD & 60 % HLD)	79
ΣΧΗΜΑ 47. ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΛΥΣΕΩΝ - ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΣΤΗΝ ΠΛΩΡΗ T=12.626 Μ, V=23.5 ΚΝ.....	79
ΣΧΗΜΑ 48. ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΛΥΣΕΩΝ - ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΣΤΗΝ ΠΛΩΡΗ, T=11.025 Μ, V=24 ΚΝ.....	80
ΣΧΗΜΑ 49. ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΛΥΣΕΩΝ - ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΕ ΗΡΕΜΟ ΝΕΡΟ (40% FLD & 60 % HLD)	80
ΣΧΗΜΑ 50. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ - ΚΑΘ' ΥΨΟΣ ΘΕΣΗ ΣΗΜΕΙΟΥ TIP ΤΟΥ ΒΟΛΒΟΥ	81
ΣΧΗΜΑ 51. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ - ΜΗΚΟΣ ΒΟΛΒΟΥ.....	81
ΣΧΗΜΑ 52. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ – ΓΩΝΙΑ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΗΣ ΤΩΝ ΠΡΩΡΑΙΩΝ ΝΟΜΕΩΝ ΤΟΥ ΒΟΛΒΟΥ ΜΕ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Ζ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΤΟΜΗΣ ΜΕ ΤΟ ΚΑΤΩ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΠΡΟΦΙΛ ΤΟΥ.....	82
ΣΧΗΜΑ 53. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ – ΓΩΝΙΑ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΗΣ ΤΩΝ ΠΡΩΡΑΙΩΝ ΝΟΜΕΩΝ ΤΟΥ ΒΟΛΒΟΥ ΜΕ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Ζ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΤΟΜΗΣ ΜΕ ΤΟ ΑΝΩ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΠΡΟΦΙΛ ΤΟΥ.....	82
ΣΧΗΜΑ 54. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ – ΓΩΝΙΑ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΗΣ ΤΩΝ ΠΡΥΜΝΑΙΩΝ ΝΟΜΕΩΝ ΤΟΥ ΒΟΛΒΟΥ ΜΕ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Ζ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΤΟΜΗΣ ΜΕ ΤΟ ΚΑΤΩ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΠΡΟΦΙΛ ΤΟΥ.....	83
ΣΧΗΜΑ 55. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ – ΓΩΝΙΑ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΗΣ ΤΩΝ ΠΡΥΜΝΑΙΩΝ ΝΟΜΕΩΝ ΤΟΥ ΒΟΛΒΟΥ ΜΕ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Ζ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΤΟΜΗΣ ΜΕ ΤΟ ΑΝΩ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΠΡΟΦΙΛ ΤΟΥ.....	83
ΣΧΗΜΑ 56. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ - ΓΩΝΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΚΑΤΗΓΜΕΝΩΝ ΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΥ ΒΟΛΒΟΥ.....	84
ΣΧΗΜΑ 57. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ - ΓΩΝΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΥ ΒΟΛΒΟΥ.....	84
ΣΧΗΜΑ 58. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ - ΓΩΝΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ ΤΗΣ ΙΣΑΛΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ	85
ΣΧΗΜΑ 59. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ - ΠΛΑΤΟΣ ΣΗΜΕΙΟΥ ΤΗΣ ΙΣΑΛΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΣΤΟ ΠΡΩΡΑΙΟ ΤΜΗΜΑ ΤΗΣ	85
ΣΧΗΜΑ 60. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ - ΠΛΑΤΟΣ ΣΗΜΕΙΟΥ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ TRANSOM.....	86
ΣΧΗΜΑ 61. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ - ΚΑΘ' ΥΨΟΣ ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΤΟΜΗΣ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ TRANSOM ΜΕ ΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΗ CENTER PLANE CURVE (CPC)	86
ΣΧΗΜΑ 62. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ - % ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΕΚΤΟΠΙΣΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ FULL LOAD DEPARTURE, T=12.626 Μ.....	87
ΣΧΗΜΑ 63. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ - % ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΔΙΑΜΗΚΟΥΣ ΘΕΣΗΣ ΚΕΝΤΡΟΥ ΑΝΤΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ FULL LOAD DEPARTURE, T=12.626 Μ.....	87
ΣΧΗΜΑ 64. ΝΟΜΕΙΣ ΑΡΧΙΚΗΣ (ΜΑΥΡΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ) ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ (ΚΟΚΚΙΝΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ) ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ	90
ΣΧΗΜΑ 65. ΚΑΜΠΥΛΗ RAO ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΛΩΡΗ ΣΕ ΑΠΛΟΥΣ ΑΡΜΟΝΙΚΟΥΣ ΜΕΤΩΠΙΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ FULL LOAD DEPARTURE ΚΑΙ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΟΙΟΥ 23.5 ΚΝ.....	90
ΣΧΗΜΑ 66. ΚΑΜΠΥΛΗ RAO ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΛΩΡΗ ΣΕ ΑΠΛΟΥΣ ΑΡΜΟΝΙΚΟΥΣ ΜΕΤΩΠΙΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ HALF LOAD DEPARTURE ΚΑΙ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΟΙΟΥ 24 ΚΝ	91
ΣΧΗΜΑ 67. ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΛΥΣΕΩΝ - ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΕ ΗΡΕΜΟ ΝΕΡΟ (40% FLD & 60 % HLD)	92

ΣΧΗΜΑ 68. ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΛΥΣΕΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΕ ΗΡΕΜΟ ΝΕΡΟ	93
ΣΧΗΜΑ 69. ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΛΥΣΕΩΝ - ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΕ ΗΡΕΜΟ ΝΕΡΟ (40% FLD & 60 % HLD)	94
ΣΧΗΜΑ 70. ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΛΥΣΕΩΝ - ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΕ ΗΡΕΜΟ ΝΕΡΟ, $T=12.626$ Μ, $V=23.5$ ΚΝ.....	94
ΣΧΗΜΑ 71. ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΛΥΣΕΩΝ - ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΕ ΗΡΕΜΟ ΝΕΡΟ, $T=11.025$ Μ, $V=24$ ΚΝ.....	95
ΣΧΗΜΑ 72. ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΛΥΣΕΩΝ - ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΣΤΗΝ ΠΛΩΡΗ (40% FLD & 60 % HLD)	95
ΣΧΗΜΑ 73. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ - ΚΑΘ' ΥΨΟΣ ΘΕΣΗ ΣΗΜΕΙΟΥ TIP ΤΟΥ ΒΟΛΒΟΥ	96
ΣΧΗΜΑ 74. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ - ΜΗΚΟΣ ΒΟΛΒΟΥ	96
ΣΧΗΜΑ 75. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ – ΓΩΝΙΑ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΗΣ ΤΩΝ ΠΡΩΡΑΙΩΝ ΝΟΜΕΩΝ ΤΟΥ ΒΟΛΒΟΥ ΜΕ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Ζ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΤΟΜΗΣ ΜΕ ΤΟ ΚΑΤΩ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΠΡΟΦΙΛ ΤΟΥ.....	97
ΣΧΗΜΑ 76. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ – ΓΩΝΙΑ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΗΣ ΤΩΝ ΠΡΩΡΑΙΩΝ ΝΟΜΕΩΝ ΤΟΥ ΒΟΛΒΟΥ ΜΕ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Ζ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΤΟΜΗΣ ΜΕ ΤΟ ΑΝΩ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΠΡΟΦΙΛ ΤΟΥ.....	97
ΣΧΗΜΑ 77. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ – ΓΩΝΙΑ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΗΣ ΤΩΝ ΠΡΥΜΝΑΙΩΝ ΝΟΜΕΩΝ ΤΟΥ ΒΟΛΒΟΥ ΜΕ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Ζ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΤΟΜΗΣ ΜΕ ΤΟ ΚΑΤΩ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΠΡΟΦΙΛ ΤΟΥ.....	98
ΣΧΗΜΑ 78. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ – ΓΩΝΙΑ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΗΣ ΤΩΝ ΠΡΥΜΝΑΙΩΝ ΝΟΜΕΩΝ ΤΟΥ ΒΟΛΒΟΥ ΜΕ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Ζ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΤΟΜΗΣ ΜΕ ΤΟ ΑΝΩ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΠΡΟΦΙΛ ΤΟΥ.....	98
ΣΧΗΜΑ 79. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ - ΓΩΝΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΚΑΤΗΓΜΕΝΩΝ ΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΥ ΒΟΛΒΟΥ.....	99
ΣΧΗΜΑ 80. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ - ΓΩΝΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΤΕΤΑΓΜΕΝΩΝ ΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΥ ΒΟΛΒΟΥ.....	99
ΣΧΗΜΑ 81. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ - ΓΩΝΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ ΤΗΣ ΙΣΑΛΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ	100
ΣΧΗΜΑ 82. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ - ΠΛΑΤΟΣ ΣΗΜΕΙΟΥ ΤΗΣ ΙΣΑΛΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ ΣΤΟ ΠΡΩΡΑΙΟ ΤΜΗΜΑ ΤΗΣ	100
ΣΧΗΜΑ 83. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ - % ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΕΚΤΟΠΙΣΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ FULL LOAD DEPARTURE, $T=12.626$ Μ.....	101
ΣΧΗΜΑ 84. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ - % ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΔΙΑΜΗΚΟΥΣ ΘΕΣΗΣ ΚΕΝΤΡΟΥ ΑΝΤΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ FULL LOAD DEPARTURE, $T=12.626$ Μ.....	101
ΣΧΗΜΑ 85. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ - % ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΕΚΤΟΠΙΣΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ HALF LOAD DEPARTURE, $T=12.626$ Μ.....	102
ΣΧΗΜΑ 86. ΝΟΜΕΙΣ ΑΡΧΙΚΗΣ (ΜΑΥΡΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ) ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ (ΚΟΚΚΙΝΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ) ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ	104
ΣΧΗΜΑ 87. ΚΑΜΠΥΛΗ RAO ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΛΩΡΗ ΣΕ ΑΠΛΟΥΣ ΑΡΜΟΝΙΚΟΥΣ ΜΕΤΩΠΙΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ FULL LOAD DEPARTURE ΚΑΙ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΟΙΟΥ 23.5 ΚΝ.....	105
ΣΧΗΜΑ 88. ΚΑΜΠΥΛΗ RAO ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΛΩΡΗ ΣΕ ΑΠΛΟΥΣ ΑΡΜΟΝΙΚΟΥΣ ΜΕΤΩΠΙΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ HALF LOAD DEPARTURE ΚΑΙ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΟΙΟΥ 24 ΚΝ	106
ΣΧΗΜΑ 89. ΠΕΔΙΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ, $F_N=0.247$	106
ΣΧΗΜΑ 90 ΠΕΔΙΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ, $F_N=0.252$	107
ΣΧΗΜΑ 91. ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΛΥΣΕΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΤΗΝ ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΣΤΗΝ ΠΛΩΡΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΕ ΗΡΕΜΟ ΝΕΡΟ	108
ΣΧΗΜΑ 92. ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΣΤΕΡΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΣΧΗΜΑΤΟΣ 90 - ΠΕΡΙΟΧΗ ΒΕΛΤΙΣΤΩΝ ΛΥΣΕΩΝ	108
ΣΧΗΜΑ 93. ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΛΥΣΕΩΝ - ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΕ ΗΡΕΜΟ ΝΕΡΟ (40% FLD & 60 % HLD)	109
ΣΧΗΜΑ 94. ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΛΥΣΕΩΝ - ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΕ ΗΡΕΜΟ ΝΕΡΟ, $T=12.626$ Μ, $V=23.5$ ΚΝ.....	109
ΣΧΗΜΑ 95. ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΛΥΣΕΩΝ - ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥ ΣΕ ΗΡΕΜΟ ΝΕΡΟ, $T=11.025$ Μ, $V=24$ ΚΝ.....	110
ΣΧΗΜΑ 96. ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΛΥΣΕΩΝ - ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΣΤΗΝ ΠΛΩΡΗ (40% FLD & 60 % HLD)	110
ΣΧΗΜΑ 97. ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΛΥΣΕΩΝ - ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΣΤΗΝ ΠΛΩΡΗ, $T=12.626$ Μ, $V=23.5$ ΚΝ.....	111
ΣΧΗΜΑ 98. ΔΙΑΣΠΟΡΑ ΛΥΣΕΩΝ - ΜΕΓΙΣΤΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗ ΣΤΗΝ ΠΛΩΡΗ, $T=11.025$ Μ, $V=24$ ΚΝ.....	111
ΣΧΗΜΑ 99. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ - ΚΑΘ' ΥΨΟΣ ΘΕΣΗ ΣΗΜΕΙΟΥ TIP ΤΟΥ ΒΟΛΒΟΥ	112

ΣΧΗΜΑ 100. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ – ΓΩΝΙΑ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΗΣ ΤΩΝ ΠΡΩΡΑΙΩΝ ΝΟΜΕΩΝ ΤΟΥ ΒΟΛΒΟΥ ΜΕ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Ζ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΤΟΜΗΣ ΜΕ ΤΟ ΚΑΤΩ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΠΡΟΦΙΛ ΤΟΥ.....	112
ΣΧΗΜΑ 101. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ – ΓΩΝΙΑ ΕΦΑΠΤΟΜΕΝΗΣ ΤΩΝ ΠΡΥΜΝΑΙΩΝ ΝΟΜΕΩΝ ΤΟΥ ΒΟΛΒΟΥ ΜΕ ΤΟΝ ΑΞΟΝΑ Ζ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΤΟΜΗΣ ΜΕ ΤΟ ΚΑΤΩ ΤΜΗΜΑ ΤΟΥ ΠΡΟΦΙΛ ΤΟΥ.....	113
ΣΧΗΜΑ 102. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ - ΓΩΝΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΚΑΤΗΓΜΕΝΩΝ ΤΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΠΑΧΟΥΣ ΤΟΥ ΒΟΛΒΟΥ.....	113
ΣΧΗΜΑ 103. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ - ΓΩΝΙΑ ΕΙΣΟΔΟΥ ΤΗΣ ΙΣΑΛΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ	114
ΣΧΗΜΑ 104. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ - ΠΛΑΤΟΣ ΣΗΜΕΙΟΥ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ TRANSOM.....	114
ΣΧΗΜΑ 105. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ - ΚΑΘ' ΥΨΟΣ ΘΕΣΗ ΤΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΤΟΜΗΣ ΤΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ TRANSOM ΜΕ ΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΗ CENTER PLANE CURVE (CPC)	115
ΣΧΗΜΑ 106. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ - % ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΕΚΤΟΠΙΣΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ FULL LOAD DEPARTURE, T=12.626M	115
ΣΧΗΜΑ 107. ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ - % ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΔΙΑΜΗΚΟΥΣ ΘΕΣΗΣ ΚΕΝΤΡΟΥ ΑΝΤΩΣΗΣ ΣΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ FULL LOAD DEPARTURE, T=12.626 M.....	116
ΣΧΗΜΑ 108. ΝΟΜΕΙΣ ΑΡΧΙΚΗΣ (ΜΑΥΡΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ) ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ (ΚΟΚΚΙΝΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ) ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ	122
ΣΧΗΜΑ 109. ΚΑΜΠΥΛΗ RAO ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΛΩΡΗ ΣΕ ΑΠΛΟΥΣ ΑΡΜΟΝΙΚΟΥΣ ΜΕΤΩΠΙΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ FULL LOAD DEPARTURE ΚΑΙ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΟΙΟΥ 23.5 ΚΝ.....	122
ΣΧΗΜΑ 110. ΚΑΜΠΥΛΗ RAO ΤΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΛΩΡΗ ΣΕ ΑΠΛΟΥΣ ΑΡΜΟΝΙΚΟΥΣ ΜΕΤΩΠΙΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΥΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ HALF LOAD DEPARTURE ΚΑΙ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΛΟΙΟΥ 24 ΚΝ	123
ΣΧΗΜΑ 111. ΠΕΔΙΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ, FN=0.247.....	123
ΣΧΗΜΑ 112 ΠΕΔΙΟ ΚΥΜΑΤΙΣΜΩΝ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ, FN=0.252.....	124
ΣΧΗΜΑ 113. ΠΡΟΣΘΕΤΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΑΡΧΙΚΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ, V=24 ΚΝ.....	124

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. A. Papanikolaou et al., «Integrated Design and Multiobjective Optimization Approach to Ship Design»
2. Li et al., «Bow and Stern Shape Integrated Optimization for a Full Ship by a Simulation-Based Design Technique», *Journal of Ship Research*, Vol. 58, No. 2, pp 83-96
3. <https://www.caeses.com/>
4. SWAN 2 (2002), User Manual : «Ship Flow Simulation in Calm Water and in Waves», Boston Marine Consulting Inc., Boston MA 02116, USA
5. SPP-86 (1994), User's Manual, Report No: NAL-114-F-94, Lab. Ships and Marine Hydrodynamics, National Technical Univ. of Athens
6. Frank, W. (1967), Oscillation of Cylinders in or Below the Free Surface of Deep Fluids, NSRDC, Rep. No. 2375, Washington, D.C.
7. Πολίτη Γ.Κ., (2011) «Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου», Αθήνα.
8. Ohkusu, M., *Advances in Marine Hydrodynamics*, 1996, Chapter 4: Free-surface potential flow past ships in calm water and in waves by Rankine Panel Method
9. K.J Rawson & E.C Tupper, (2001), «Basic Ship Theory», Butterworth Heinemann, London
10. Αθανασούλης Γ.Α., Μπελιμπασάκης Κ.Α., (2012), «Δυναμική Πλοίου», κεφάλαιο 3, Αθήνα
11. TU Delft, (2001), «Offshore Hydromechanics»
12. Frank, W. (1967), Oscillation of Cylinders in or Below the Free Surface of Deep Fluids, NSRDC, Rep. No. 2375, Washington, D.C.
13. TU Delft, (2002), «Introduction in Ship Hydromechanics»
14. Abdullah Konak et al., (2006), Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. *Reliability Engineering and System Safety* 91.

15. Kalyanmoy Deb, Sameer Agarwal, T. Meyarivan, (2002), «A fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm : NSGA-II»
16. Grigoropoulos G.J., Loukakis T. (1988), A New Method for Developing Hull Forms with Superior Seakeeping Qualities, Intl. Conf. CADMO '88, Southampton, England, September
17. Grigoropoulos G.J., Loukakis T. (1990), On the Optimization of Hull Forms with Respect to Seakeeping, 5th IMAEM Congress, Athens, May
18. J.E Choi et al., (2010), Resistance and propulsion characteristics of various commercial ships based on CFD results. Elsevier
19. A. Papanikolaou. Ship Design: Methodologies of Preliminary Design.
20. A.Papanikolaou., (2009), Holistic ship design optimization. Elsevier.
21. Frank Manual
22. Friendship Systems, Friendship Framework User's Guide, 2012.
23. Gregory J. Grigoropoulos, Dimitris Chalkias., (2009), Hull-form optimization in calm and rough water. Elsevier
24. J. Holtrop, G.G.J. Mennen.,. An approximate Power Prediction Method. International Shpbuilding Progress. 1978.
25. Τσαγγάρης Σ., (2005), Μηχανική των Ρευστών, Εκδόσεις Συμεών.
26. Μακρης Δ., (2015), «Παραμετρική μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς ταχύπλοου Ε/Γ-Ο/Γ»
27. Zhu Z.Y., Leung K.S. An Enhanced Annealing Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization Problems.
28. Seshardi, Aravind. «A Fast Elitist Multi-Objective Genetic Algorithm: NSGA-II».
29. Fogel, D., (1994), An Introduction to Simulated Evolutionary Optimization. Salvesen N., Tuck E.O., Faltinsen O. Ship motions and sea loads. s.l. : Transactions SNAME. Vol. 78, 1970