

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



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Παραμετρική μοντελοποίηση και υδροδυναμική βελτιστοποίηση πλοίου
μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου»**

Νικόλαος Σκιαδάς

Επιβλέπων: Γρηγορόπουλος Γρηγόριος
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα 2015

Στην Οικογένεια μου

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, στο τμήμα Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών και συγκεκριμένα στον τομέα Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής, κατά το έτος 2014-2015. Η περάτωση της διπλωματικής εργασίας οδηγεί στην αποφοίτησή μου από το τμήμα της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.

Αντικείμενο αυτής της εργασίας αποτελεί η υδροδυναμική βελτιστοποίηση της γάστρας ενός πλοίου μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNGC), μέσω κατάλληλης μεθοδολογίας. Κατά τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας αποκόμισα πολύτιμες γνώσεις, τόσο στον τομέα της υδροδυναμικής όσο και σε αυτούς της σχεδίασης και του προγραμματισμού. Οι γνώσεις αυτές συμπληρώνουν τις υπόλοιπες που απέκτησα κατά το σύνολο της φοίτησής μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο και θα αποτελέσουν ένα χρήσιμο υπόβαθρο κατά τη διάρκεια της επαγγελματικής μου καριέρας.

Για την υλοποίηση της εργασίας χρειάστηκαν γνώσεις από διάφορους κλάδους, επομένως θα ήθελα να απευθύνω θερμές ευχαριστίες σε όλους τους καθηγητές της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών για όσα διδάχτηκα και κυρίως στην συνεισφορά της διαμόρφωσης του τρόπου σκέψης μου. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στο επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας, Γρηγόριο Γρηγορόπουλο, καθηγητή ΕΜΠ, για την στήριξη, την καθοδήγηση και την πολύτιμη συνεισφορά καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την "Maran Gas" για την προμήθεια των απαραίτητων σχεδίων, καθώς επίσης τον απόφοιτο της σχολής κ. Δημήτριο Μακρή για την πολύτιμη βοήθεια του.

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

Νικόλαος Σκιαδάς
Αθήνα, Δεκέμβριος 2015

Περίληψη

Η εισαγωγή νέων και αυστηρών κανονισμών από τους διεθνείς οργανισμούς στη ναυτιλία, 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 διαφόρων τύπων εμπορικών πλοίων. Η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών με πιο οικολογικά καύσιμα όπως το φυσικό αέριο αναζωπύρωσε το ενδιαφέρον για την εξόρυξη και τη μεταφορά του, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια με τη θέσπιση κανονισμών για την μείωση των εκπομπών ρύπων, κάνοντας έτσι δημοφιλή τα LNG στους πλοιοκτήτες. Ως εκ τούτου απαιτείται η παραγωγή όλο και αποδοτικότερων πλοίων.

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 υγροποιημένου φυσικού αερίου. 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 LNG χωρητικότητας 160.000m^3 . Αρχικά πραγματοποιείται η διαμόρφωση της γάστρας από κατασκευαστικά σχέδια και κατόπιν η δημιουργία του παραμετρικού μοντέλου-με τη χρήση του λογισμικού CAESES- ώστε ένας περιορισμένος αριθμός μεταβλητών σχεδίασης να επηρεάζει στο μέγιστο βαθμό τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την υδροδυναμική απόδοση. Η υδροδυναμική αξιολόγηση των παραχθισών γεωμετριών συνίσταται στην συμπεριφορά τους κατά την πλεύση τόσο σε ήρεμο νερό όσο και σε κυματισμούς. 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, που χρησιμοποιεί τη θεωρία δυναμικού. 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 επιτάχυνση στην πλώρη κατά την πλεύση σε αρμονικούς κυματισμούς διαφόρων συχνοτήτων προκειμένου να βρεθεί η σχετική καμπύλη RAO, ενώ η μέγιστη τιμή της θα είναι το μέγεθος ελαχιστοποίησης. Η διαδικασία βελτιστοποίησης θα πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια ενός γενετικού αλγορίθμου. Από τη διακύμανση του συνόλου των μεταβλητών σχεδίασης θα προκύψουν οι εναλλακτικές γεωμετρίες των οποίων οι επιδόσεις θα αξιολογηθούν ώστε να καταλήξουμε σε ένα σύνολο διαφορετικών μορφών γάστρας με καλύτερες επιδόσεις από την αρχική.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	1
Περίληψη	2
Κεφάλαιο 1. Συστήματα CAD/CAM και βελτιστοποίηση σχεδίασης πλοίων.....	5
1.1 Γενικά περί μελέτης πλοίου.....	5
1.2 Η υδροδυναμική βελτιστοποίηση πλοίου	8
1.3 Παραμετρική σχεδίαση.....	9
1.4 Αξιολόγηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς πλοίων	11
Κεφάλαιο 2. Θεωρητική προσέγγιση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς του πλοίου	15
2.1 Αντίσταση πλοίου	15
2.2 Η τρισδιάστατη θεωρία δυναμικού.....	21
2.3 Συμπεριφορά πλοίου σε κυματισμούς.....	24
Κεφάλαιο 3. Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης.....	31
3.1 Γενικά στοιχεία αλγορίθμων	31
3.2 Ο αλγόριθμος NSGA II.....	33
Κεφάλαιο 4. Βελτιστοποίηση σχεδίασης LNGC.....	38
4.1 Εισαγωγικά στοιχεία	38
4.2 Στάδιο 1 ^ο : Συλλογή δεδομένων.....	39
4.3 Στάδιο 2 ^ο : Δημιουργία αρχικής γάστρας	44
4.4 Στάδιο 3 ^ο : Παραμετρική μοντελοποίηση.....	47
4.5 Στάδιο 4 ^ο : Σύζευξη CAESES- υπολογιστικών κωδίκων	53
4.6 Στάδιο 5 ^ο : Επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης.....	56
Κεφάλαιο 5. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	59
5.1 Αποτελέσματα πατρικής γάστρας.....	59
5.2 Αποτελέσματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης	60
5.3 Αποτελέσματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης στο βύθισμα σχεδίασης.....	70

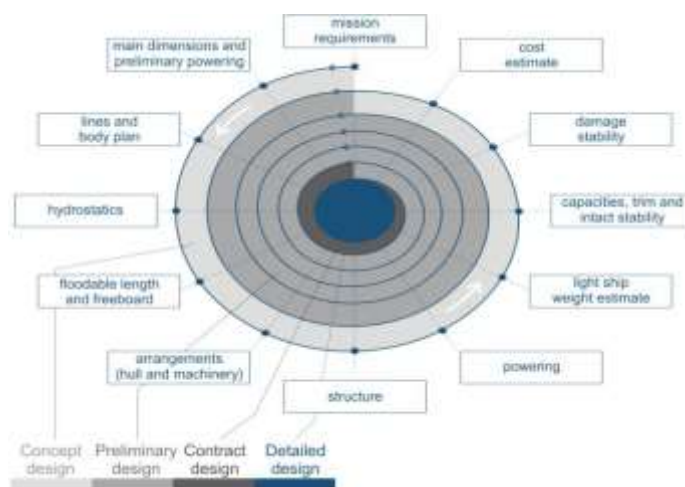
5.4. Αποτελέσματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης σε βύθισμα διαφορετικό του βυθίσματος σχεδίασης	81
5.5 Συμπεράσματα.....	93
Παράρτημα Α – FRIENDSHIP-FRAMEWORK.....	97
Παράρτημα Β – Λογισμικά και γλώσσες προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκαν	100
Παράρτημα Γ – Συγκεντρωτική λίστα σχημάτων.....	101
Βιβλιογραφία	104

Κεφάλαιο 1. Συστήματα CAD/CAM και βελτιστοποίηση σχεδίασης πλοίων

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 λόγω των απαιτήσεων 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 1. Σε αυτό παρουσιάζονται τα διάφορα στάδια της σχεδίασης ως στρώματα από διαδοχικές σπείρες που εκτελούνται με φορά από την περιφέρεια προς το κέντρο. Σε κάθε σπείρα εκτελείται ένα σύνολο διαδοχικών υπολογισμών από τους οποίους προκύπτουν τα χαρακτηριστικά της σχεδίασης.



Σχήμα 1. Η παραδοσιακή σπειροειδής διαδικασία σχεδίασης πλοίων (πηγή: [1])

Σχολιάζοντας την επαναληπτική διαδικασία με βάση την Ελικοειδή καμπύλη μελέτης (σχήμα 1) διακρίνουμε τις εξής φάσεις[2]:

- **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 οι 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 επισήμου 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 ανθρωποωρών.

Βασικό μειονέκτημα της παραπάνω μεθοδολογίας είναι πως κατά την μεμονωμένη διεκπεραίωση ενός σταδίου δεν λαμβάνονται υπ όψιν οι παράμετροι 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 συστημική προσέγγιση στη σχεδίαση πλοίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2 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



Σχήμα 2 Η ενοποιημένη διαδικασία σχεδίασης πλοίων (πηγή [1])

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 σαν 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.

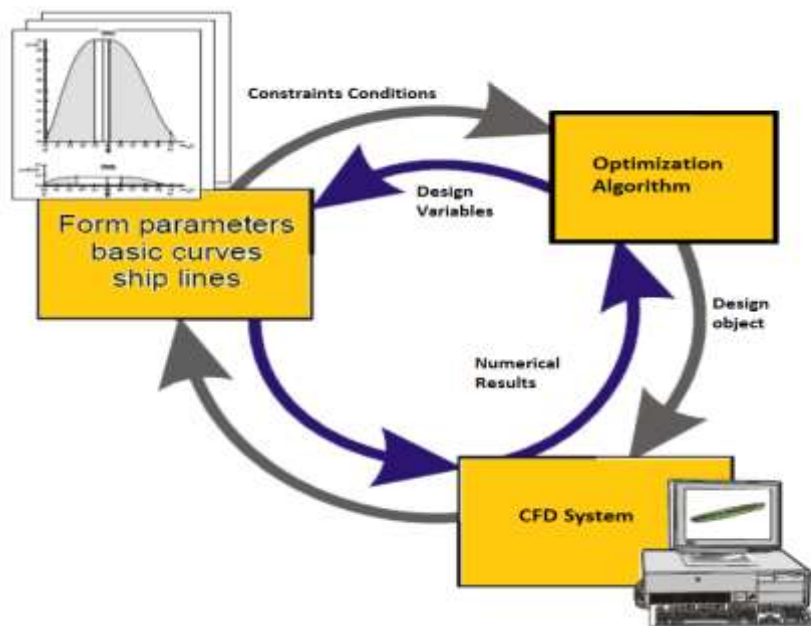
Στην παρούσα εργασία αντικείμενο αποτελεί η βελτιστοποίηση της σχεδίασης των γραμμών της γάστρας (Lines and Body Plan των σχημάτων 1 και 2) ενός Πλοίου μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG CARRIER) σε ταχύτητα χαμηλότερη αυτής της υπηρεσιακής. Κριτήρια βελτιστοποίησης θα αποτελέσουν η υδροδυναμική του συμπεριφορά σε ήρεμο νερό και σε κυματισμούς.

1.2 Η 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 διαβροχής των καταστρωμάτων ή μεγάλη απώλεια ταχύτητας όταν ταξιδεύει σε κατάσταση κυματώδους θάλασσας. Συγκεκριμένα για τα κριτήρια που θα μας απασχολήσουν η εκτίμηση τους βασιζόταν κατά κύριο λόγο σε δοκιμές προτύπων υπό κλίμακα μέσω πειραμάτων σε δεξαμενές. Τα πειράματα παραμένουν ακόμα και σήμερα την πιο αξιόπιστη λύση για τον καθορισμό της υδροδυναμικής συμπεριφοράς ενός πλοίου που πρόκειται να κατασκευαστεί. 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.. Η ενσωμάτωση αυτού του είδους των λογισμικών έχει αλλάξει την λογική της σχεδίασης, εφόσον πλέον μπορούν να γίνουν πολύ εύκολα χιλιάδες επαναλήψεις μιας σχεδίασης. Συγκεκριμένα τα συστήματα CAD/CAM μπορούν να περιλάβουν διάφορους περιορισμούς στη διαδικασία (π.χ. περιβαλλοντικά κριτήρια, κριτήρια ευστάθειας κ.α.). Σαν αποτέλεσμα, κάθε κύκλος υπολογισμών βασίζεται στα δοθέντα κριτήρια και πληροί τους περιορισμούς. Επομένως κάθε σχέδιο είναι έγκυρο και δεν απαιτούνται περεταίρω υπολογισμοί. Επιπροσθέτως, η υπολογιστική ισχύς δίνει τη δυνατότητα στον σχεδιαστή του πολύ σύντομου χρόνου εκτέλεσης αναλυτικών υπολογισμών, δίνοντας το πλεονέκτημα της περάτωσης πολλών εναλλακτικών σχεδίων σε εύλογο χρονικό διάστημα. Η ενοποιημένη διαδικασία σχεδίασης είναι επίσης σε μεγάλο βαθμό αυτοματοποιημένη, γεγονός που μειώνει δραστικά περιττές καθυστερήσεις στον συνολικό χρόνο της σχεδίασης του πλοίου.

Αποτέλεσμα αυτών των εξελίξεων είναι η ενσωμάτωση στη συμβατική σχεδίαση, της σχεδίασης που είναι βασισμένη στην προσομοίωση (Simulation Based Design - SBD), καθώς πλέον καθίσταται δυνατή η αξιολόγηση της απόδοσης ενός πλοίου με χρήση υπολογιστικών εργαλείων, πριν αυτό κατασκευαστεί και διαπιστωθεί η συμπεριφορά του στις δοκιμές μετά την καθέλκυση. Η σχεδίαση με βάση την προσομοίωση συνιστά τον συνδυασμό τριών βασικών στοιχείων που είναι η παραγωγή διαφορετικών γεωμετριών, η εκτίμηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς από προγράμματα και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων από εργαλεία βελτιστοποίησης. Η διαδικασία αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 3, στο οποίο φαίνεται τόσο η ανάλυση της βελτιστοποίησης σχεδίασης σε επιμέρους τμήματα όσο και η αλληλεπίδραση μεταξύ τους.



Σχήμα 3 Η επαναληπτική διαδικασία υδροδυναμικής βελτιστοποίησης

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

1.3 Παραμετρική σχεδίαση

Η βασική αρχή πίσω 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 το CAESSES, Avena Marine και Rhinoceros μπορούν να τροποποιήσουν μια δεδομένη γεωμετρία ,ρυθμίζοντας ορισμένες παραμέτρους του σχεδίου. Παράγωγα σχέδια μπορούν να δημιουργηθούν με προηγμένους μετασχηματισμούς (π.χ. Lackenby transformation) ,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 συναρτήσει 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 CAESSES¹ 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.

¹ Βλ. Παράρτημα Α

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 συντοριακή καμπύλη του καταστρώματος (Deck) και τη τομή της γάστρας με το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας (Center Plane Curve - CPC). Στη συνέχεια προσδιορίζεται η μορφή των νομένων και της ισάλου επιφανείας, ενώ τελικά σχεδιάζονται ειδικά τμήματα του πλοίου όπως ο βολβός.

Οι επιλεγείσες μεταβλητές σχεδίασης μπορεί να επηρεάζουν γεωμετρικά χαρακτηριστικά οποιουδήποτε από τα παραπάνω τμήματα. Δεδομένου ότι η συνολική γεωμετρία αποτελεί το συνδυασμό επιμέρους σχεδιαστικών στοιχείων που εξαρτώνται από τα προαναφερθέντα τμήματα, είναι απαραίτητη η δημιουργία παραμέτρων που εξαρτώνται σε 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 η πρωραία διαμήκης θέση του παράλληλου τμήματος, θα πρέπει να δημιουργηθούν παράμετροι που να μεταβάλουν ομαλά τις καμπύλες Flat of Side (FOS) και Flat of Bottom (FOB) και της ισάλου. Σε τρίτο επίπεδο μια μεταβολή των καμπυλών FOS και FOB θα επιφέρει μεταβολή και στους εγκάρσιους νομείς. Οπότε θα πρέπει να εισαχθούν παράμετροι και στους νομείς για να διατηρηθεί συνολικά η ομαλότητα τα γεωμετρίας. Η ίδια τεχνική εφαρμόζεται για όλες τις περιπτώσεις. 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 κυματισμούς και συγκεκριμένα η κίνηση προνευτασμού. Η μελέτη της συμπεριφοράς της γάστρας του πλοίου σε ήρεμο νερό δίνει σημαντικές πληροφορίες για τις απαιτήσεις ισχύος καθώς και για τους παραγόμενους από το πλοίο κυματισμούς, επηρεάζοντας εν γένει 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 συντοκικών 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 υποπλαπλάσιο 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 του. 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 2². 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 LNG, που αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο χρόνο πλεύσης του. Αυτές είναι η Full Load Departure και η Ballast Departure (η οποία είναι μια μέση κατάσταση μεταξύ Max Ballast και Ballast Arrival). Σε ένα τυπικό ταξίδι η κάθε μια από τις δύο αυτές καταστάσεις αποτελούν το 50% του χρόνου ταξιδιού. Επομένως στη διαδικασία βελτιστοποίησης θα συνεκτιμηθούν σε μία αντικειμενική συνάρτηση με συντελεστή βαρύτητας 0.5.

Όσον αφορά τις ταχύτητες πλεύσης, μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους, επιλέχθηκαν ώστε και αυτές να αντιπροσωπεύουν την επικρατούσα κατάσταση. Συγκεκριμένα, παρόλο που η ταχύτητα σχεδιασμού είναι 19.9 knots, αυτή δεν συναντάται στις σημερινές καταστάσεις πλεύσης. Η άνοδος της τιμής του πετρελαίου δημιούργησε μία νέα τάση- αυτή του slow steaming- κατά την οποία τα πλοία πλέουν σε μία ταχύτητα χαμηλότερη αυτής της ταχύτητας σχεδίασης, με αποτέλεσμα την σημαντική εξοικονόμηση καυσίμου, με αύξηση όμως του χρόνου ταξιδιού. Σύμφωνα λοιπόν με αυτή τη πρακτική τα πλοία LNG πλέουν σε χαμηλότερες ταχύτητες από 4 έως 8 knots. Αξιολογώντας τα παραπάνω η ταχύτητα που επιλέχθηκε για την κατάσταση Full Load Departure είναι οι 16 knots ενώ για την κατάσταση Ballast Departure είναι οι 14 knots.

Η απόκριση του πλοίου κυματισμούς αν και μπορεί να εκτιμηθεί από το SWAN 2, θα υπολογιστεί με χρήση του κώδικα SPP-86³, που έχει δημιουργηθεί από το Εργαστήριο

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

³ SPP-86 (1994), User's Manual, Report No: NAL-114-F-94, Lab. Ships and Marine Hydrodynamics, National Technical Univ. of Athens.

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 Frank⁴, για την αναπαράσταση της γεωμετρίας.

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

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:

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

$$g(\mathbf{x}) \leq 0$$

$$h(\mathbf{x}) = 0$$

$$\mathbf{x}_l \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}_u$$

⁴ Frank, W. (1967), Oscillation of Cylinders in or Below the Free Surface of Deep Fluids, *NSRDC, Rep. No. 2375*, Washington, D.C.

όπου η μ_i είναι η i -οστή αντικειμενική συνάρτηση και οι g, h είναι το σύνολο των περιορισμών σε μορφή ισότητας και ανισότητας. 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).

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 υγροποιημένου αερίου λαμβάνοντας υο όψιν δύο διαφορετικές καταστάσεις φόρτωσης σε ταχύτητες χαμηλότερες της υπηρεσιακής, απουσία παρελκομένων και προωστήριου μέσου. Για τη διαδικασία βελτιστοποίησης κριτήρια θα αποτελέσουν αφενός η αντίσταση κυματισμού ως συνιστώσα της συνολικής αντίστασης ρυμούλκησης κατά την πλεύση σε ήρεμο νερό κι αφετέρου η τιμή της επιτάχυνσης στην πλήρη στην κίνηση προνευτασμού και κατά την αλληλεπίδραση με αρμονικούς 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.

Κεφάλαιο 2. Θεωρητική προσέγγιση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς του πλοίου

2.1 Αντίσταση πλοίου

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

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 στην 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.

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 εξαρτημένων) 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 παραμέτρους⁵:

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

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

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

Ο αριθμός Re από φυσικής απόψεως αντιπροσωπεύει τον λόγο δυνάμεων αδράνειας (inertia forces) προς τις συνεκτικές δυνάμεις (viscous forces) και ο αριθμός Fn 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 μεν αντίσταση τριβής εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds ενώ η αντίσταση πίεσης από τον αριθμό Froude που δεν είναι απόλυτα ακριβές.

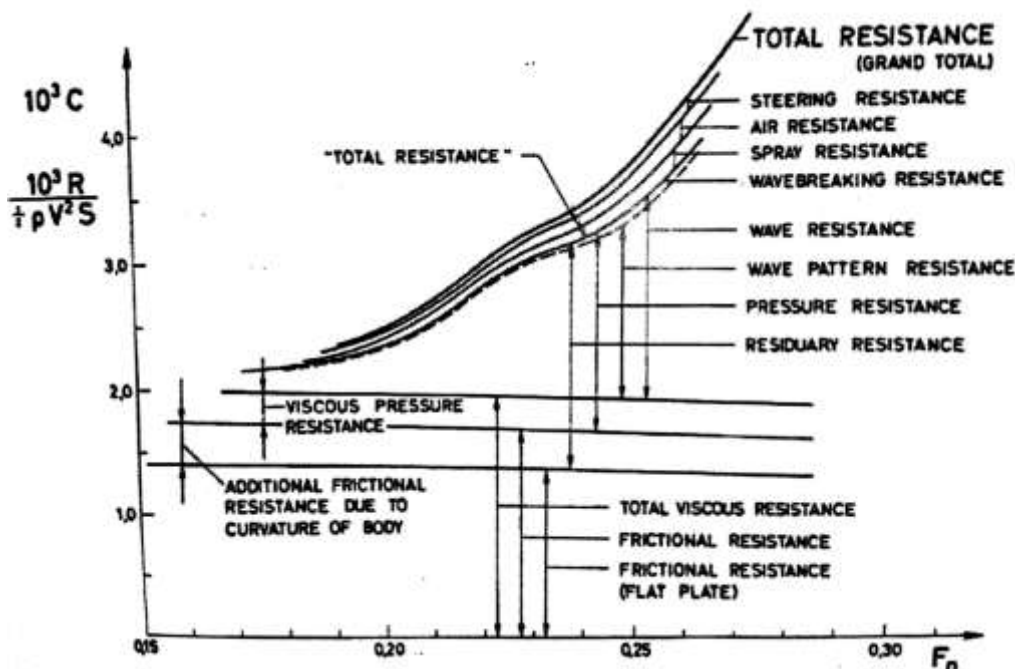
Για τη μελέτη κι εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός πλεούμενου από πλευράς αντίστασης, γίνεται περεταίρω διαχωρισμός αυτής σε επιμέρους κατηγορίες οι οποίες εξαρτώνται από φαινόμενα συνεκτικότητας, μεταβολής της κατανομής των πιέσεων (που οφείλεται στη συνεκτικότητα) και αλληλεπίδρασης με την ελεύθερη επιφάνεια. 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. Στην πραγματικότητα, οι συνιστώσες αντίστασης συνεκτικότητας εξαρτώνται και 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

⁵ Παραλείπεται ο αριθμός σπηλαίωσης ο οποίος εμφανίζεται στην περίπτωση του αυτοπροωθούμενου πλοίου

καθώς το οριακό στρώμα μεταβάλλει τις κάθετες πιέσεις στη γάστρα με αποτέλεσμα να έχουμε επιρροή των παραγόμενων κυματισμών.

Η αντίσταση του πλοίου μπορεί να θεωρηθεί ότι συνίσταται στην αντίσταση συνεκτικότητας (viscous resistance) και στην αντίσταση κυματισμού (wave resistance). Η συνολική λοιπόν, μπορεί να αναλυθεί στις ακόλουθες επιμέρους συνιστώσες κάτι που φαίνεται και σχηματικά στη συνέχεια:

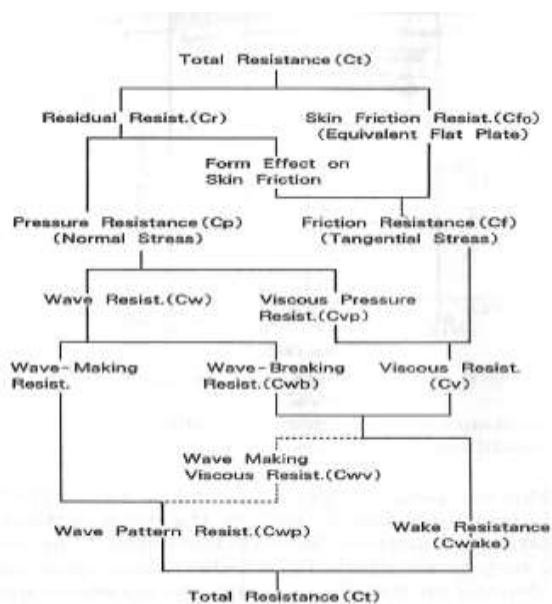
- Αντίσταση τριβής επίπεδης πλάκας
- Αντίσταση τριβής λόγω καμπυλότητας
- Αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας
- Αντίσταση κυματισμού
- Αντίσταση θραύσης κύματος
- Αντίσταση λόγω δημιουργίας αφρού
- Αντίσταση ανέμου
- Αντίσταση ελιγμών



Σχήμα 4 Συνιστώσες αντίστασης πλοίου υπό τη μορφή του αδιάστατου συντελεστή αντίστασης C ως προς τον αριθμό Froude (πηγή: [35])

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

αποκόλληση της ροής, 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 πλήρης. Η αντίσταση τριβής επίπεδης πλάκας, λόγω καμπυλότητας και λόγω συνεκτικότητας αποτελούν την αντίσταση συνεκτικότητας ενώ οι δυο τελευταίες αποτελούν την αντίσταση λόγω μορφής. Στο σχήμα που ακολουθεί αναλύεται σχηματικά ο τρόπος συσχέτισης των διαφόρων συνιστωσών της αντίστασης

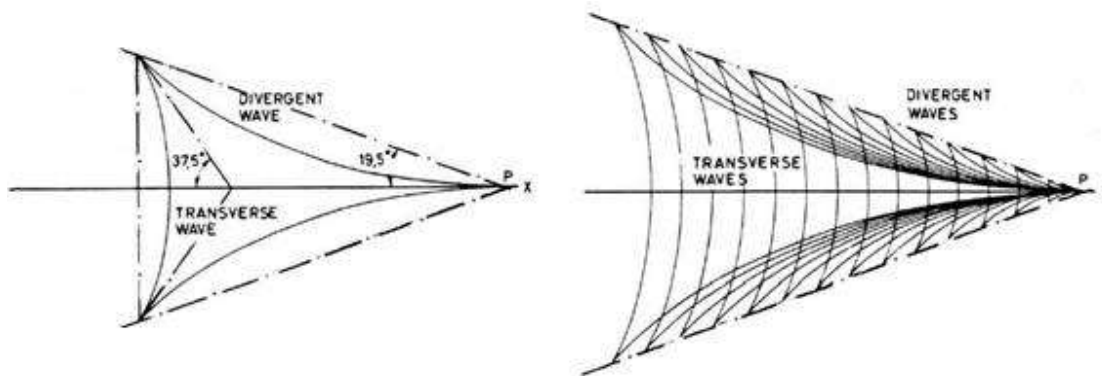


Σχήμα 5 Διαχωρισμός των επί μέρους συνιστωσών της αντίστασης του πλοίου (πηγή: [25])

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. 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 εγκαρσίων κυματισμών που ακολουθεί το σημείο πίεσης, μαζί με μία σειρά αποκλινόντων κυματισμών που απλώνονται πίσω από το σημείο πίεσης. Οι αποκλινόντες 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 6 Σύστημα κυματισμών κατά Kelvin (πηγή: [35])

Άλλες συνιστώσες αντίστασης είναι αυτή της αντίστασης θραύσεως κύματος πλήρης, που πρέπει να λαμβάνεται υπ όψιν στην περίπτωση παχύγραμμων μορφών γάστρας. Η αιτία του φαινομένου θεωρείται η αποκόλληση ροής στην ελεύθερη επιφάνεια και εν γένει μπορεί να αποφευχθεί αν τα εμβαδά των επιφανειών των νομέων του πλοίου κοντά στην πρωραία κάθετο δεν αυξάνονται απότομα. Επόμενη συνιστώσα είναι η πρόσθετη αντίσταση κυματισμού που προέρχεται από την παρουσία ανεμογενών κυματισμών στην πορεία του σκάφους και δεν σχετίζονται με αυτούς που παράγονται από το ίδιο το πλοίο. Η αντίσταση αυτή οφείλεται στις προκαλούμενες κινήσεις heave, pitch και roll του σκάφους από την πρόσκρουση θαλάσσιων κυματισμών πάνω στο πλοίο. 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. Τέλος η αντίσταση ανέμου, που είναι μη μηδενική ακόμα και σε άπνοια, λόγω της ταχύτητας του πλοίου, όσο και η τραχύτητα της γάστρας λόγω ρύπανσης μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά (αυξήσουν) την αντίσταση του πλοίου.

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

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

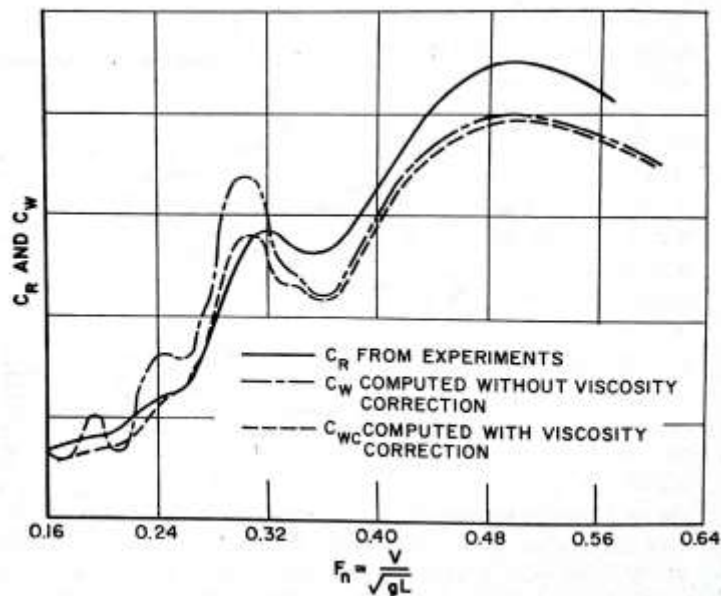
$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}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

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

Η επίλυση των εξισώσεων αυτών είναι ιδιαίτερως 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 γι 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 7 η απλοποίηση αυτή δεν φαίνεται να έχει μεγάλη επίδραση στα αποτελέσματα (ασθενή επίδραση των φαινομένων συνεκτικότητας στα φαινόμενα κυματισμού), ειδικά στους μικρούς αριθμούς Froude, όπου ενδιαφερόμαστε γι αυτήν την εργασία



Σχήμα 7. Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με θεωρητικές προβλέψεις του συντελεστή αντίστασης κυματισμού (πηγή:[35])

Στην συγκεκριμένη μελέτη θα υπολογιστεί και στη συνέχεια θα γίνει βελτιστοποίηση με γνώμονα την αντίσταση γυμνής γάστρας ή αλλιώς αντίσταση ρυμούλκησης. Είναι σημαντικό να τονιστεί πως στην αντίσταση αυτή δεν περιλαμβάνεται η αντίσταση παρελκόμενων και η αντίσταση λόγω της παρουσίας του προωστήριου συστήματος και της αλληλεπίδρασης του με τη γάστρα, καθώς σε αυτή την περίπτωση θα αναφερόμασταν στην αντίσταση αυτοπροωθούμενου σκάφους

2.2 Η τρισδιάστατη θεωρία δυναμικού

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο 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. Η αλληλεπίδραση του σκάφους με τους κυματισμούς εξαρτάται ασθενώς από συνεκτικά φαινόμενα και κατ' επέκταση η χρήση της θεωρίας δυναμικού εισάγει μικρότερο σφάλμα στους υπολογισμούς.

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, 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 θεωρίας⁶.

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 :

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

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 :

⁶ Free-surface potential flow past ships in calm water and in waves by Rankine Panel Method Ohkusu, M., Advances in Marine Hydrodynamics, 1996, Chapter 4

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

Πάνω στην επιφάνεια της γάστρας, η κάθετη σε αυτή συνιστώσα της ταχύτητας του νερού 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, καθώς $t \rightarrow \infty$ 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 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 :

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

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

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

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

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

$$\frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = -\frac{\partial \varphi_0}{\partial n}, \quad \text{στο στερεό σύνορο } \bar{S}$$

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 χρήσης⁷

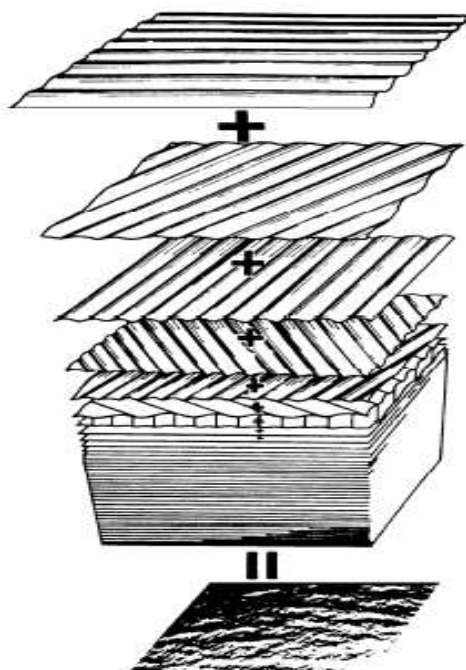
⁷ SWAN 2 (2002), User Manual : «Ship Flow Simulation in Calm Water and in Waves», Boston Marine Consulting Inc., Boston MA 02116, USA

2.3 Συμπεριφορά πλοίου σε κυματισμούς

Οι θαλάσσιοι κυματισμοί προκαλούν περιοδικά φορτία σε κάθε είδους θαλάσσια κατασκευή. Για τα πλοία συγκεκριμένα, τα κύματα και οι προκαλούμενες κινήσεις του πλοίου από αυτά προκαλούν επιπρόσθετη αντίσταση στην κίνηση του πλοίου, μειώνουν την ταχύτητα του πλοίου για δεδομένη ισχύ, που αυξάνει το χρόνο ταξιδιού και αυξάνει την κατανάλωση καυσίμου. Επίσης οι κινήσεις του πλοίου μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα ασφάλειας μέσω φαινομένων όπως η σφυρόκρουση ή η διαβροχή καταστρώματος. Επομένως είναι σημαντικό να γνωρίζουμε την συμπεριφορά των κυμάτων

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

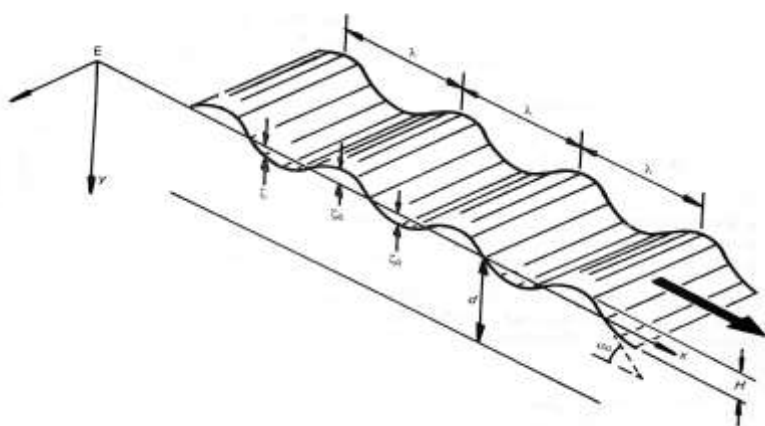
Οι θαλάσσιοι κυματισμοί (π.χ. κυματισμοί ανέμου) είναι τυχαίοι. Παρ' όλα αυτά, μπορούν να αναπαρασταθούν ως υπέρθεση πολλών απλών αρμονικών κυματισμών, ο καθένας με το δικό του πλάτος, συχνότητα και διεύθυνση διάδοσης. Αυτού του είδους η ανάλυση είναι αρκετά χρήσιμη, καθώς μπορούμε να προβλέψουμε τυχαίες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



Σχήμα 8 Τυχαίος κυματισμός ως υπέρθεση απλών αρμονικών κυματισμών (πηγη: [5])

Η αρχή της υπέρθεσης εισήχθη για πρώτη φορά στην υδροδυναμική από τους [St. Denis & Pierson, 1953] αποτυπώνεται στο Σχήμα 8. Για να αναλυθεί ένα σύστημα κυματισμών, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τις ιδιότητες των απλών αρμονικών συνιστωσών, όπως η πίεση του ρευστού στο χώρο και στο χρόνο, η σχέση μεταξύ του μήκους κύματος και της περιόδου κ.τ.λ. Σε αυτή τη λογική τα κύματα κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες

- **Περιοχή «βαθέως νερού»** : Η περιοχή θεωρείται βαθιά όταν το βάθος του νερού h είναι μεγαλύτερο από μισό μήκος κύματος λ , δηλαδή $h/\lambda > 1/2$
- **Περιοχή «ρηχού νερού»** : Η περιοχή θεωρείται ρηχή όταν το βάθος του νερού είναι μικρότερο από το $1/20$ του μήκους κύματος, δηλαδή $h/\lambda < 1/20$.



Σχήμα 9. Αρμονικός κυματισμός (πηγή : [23])

Για την περίπτωση της θεωρίας δυναμικού (και των παραδοχών της) και των απλών αρμονικών κυματισμών που θα μας απασχολήσουν είναι απαραίτητο να θεωρήσουμε μικρή κλίση στην ελεύθερη επιφάνεια ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί η γραμμική θεωρία στα κύματα. Σε αυτή τη περίπτωση το προφίλ ενός τέτοιου κυματισμού προσεγγίζει αυτό του ημιτόνου, ενώ η κίνηση ενός σωματιδίου εξαρτάται από το βάθος νερού. Με αυτές τις παραδοχές 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 $P(z)$ αποτελεί συνάρτηση της απομάκρυνσης, ω την κυκλική συχνότητα και k τον κυματικό αριθμό.

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

Για βαθύ νερό η συνάρτηση δυναμικού λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

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

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 , 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 ακολούθως⁸:

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

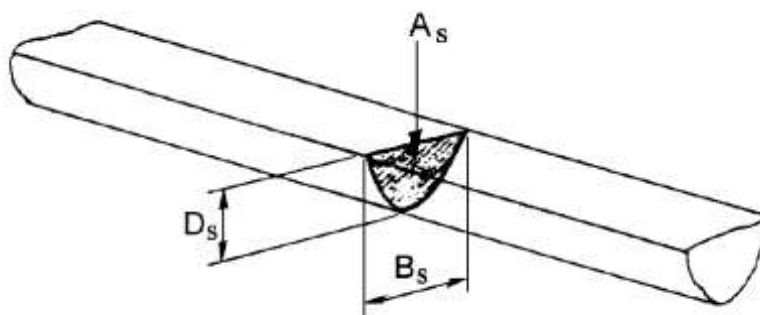
Το χρονικά εξαρτώμενο δυναμικό Φ_s αναλύεται στα επί μέρους:

- 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.

Το πρόγραμμα SPP-86 που θα χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς του πλοίου σε αρμονικούς κυματισμούς χρησιμοποιεί τη θεωρία λωρίδων σε συνδυασμό με τη θεωρία του Frank για την επίλυση του τρισδιάστατου προβλήματος. Σύμφωνα με τη θεωρία λωρίδων το τρισδιάστατο πρόβλημα του προσδιορισμού των αποκρίσεων του σκάφους επιλύεται με κατά μήκος ολοκλήρωση των αποκρίσεων των εγκάρσιων τομών του. Κατ' αυτή την έννοια το τρισδιάστατο πρόβλημα ανάγεται σε επιμέρους και απλούστερα δισδιάστατα.

Με συναρτήσεις δυναμικού μπορούν να παρασταθούν πολλά πεδιακά μεγέθη που χρησιμοποιούνται στη μελέτη της συμπεριφοράς ενός σκάφους σε κυματισμούς όπως για παράδειγμα, της ταχύτητας του στερεού συνόρου. Αυτή η αναπαράσταση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στη μελέτη της συμπεριφοράς του σκάφους, στα πλαίσια της θεωρίας λωρίδων για τον υπολογισμό μεγεθών που αφορούν εγκάρσιες τομές κατά μήκος του σκάφους

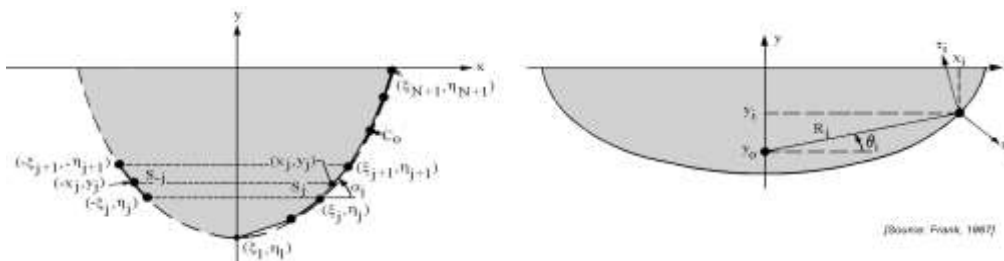


Σχήμα 10. Σχηματική απεικόνιση θεωρίας λωρίδων [πηγη:[5]]

⁸ Αθανασούλης Γ.Α., Μπελιμπασάκης Κ.Α. 2012. *Δυναμική Πλοίου*. Αθήνα, κεφάλαιο 3

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

Οι μέθοδοι απεικόνισης (π.χ. Lewis conformal mapping) 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 γ κάθετο σε αυτή και με τα θετικά προς τα πάνω. Το σύνορο της επιφάνειας CO, του νομέα βρίσκεται στο ημιεπίπεδο των αρνητικών τεταγμένων και ο άξονας γ αποτελεί άξονα συμμετρίας του, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 11. Σύστημα αναφορά κατά Frank (πηγη:[5])

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

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

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

Για το δισδιάστατο σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται στη θεωρία του Frank πρέπει να πληρούνται οι συνθήκες που φαίνονται στην συνέχεια¹⁰ :

1. Εξίσωση της συνέχειας ή εξίσωση Laplace .

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

⁹ Frank, 1967

¹⁰ (Delft, 2001)

2. Συνοριακή συνθήκη μη εισχώρησης.

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

3. Συνοριακή συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας.

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

4. Κινηματική οριακή συνθήκη στο στερεό σύνορο του σώματος.

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

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

6. Συμμετρική και αντισυμμετρική συνθήκη.

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

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

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

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

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

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

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

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

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 :

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

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

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

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

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

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

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.

Κεφάλαιο 3. Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης

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 ελαχιστοποίησης του κόστους.

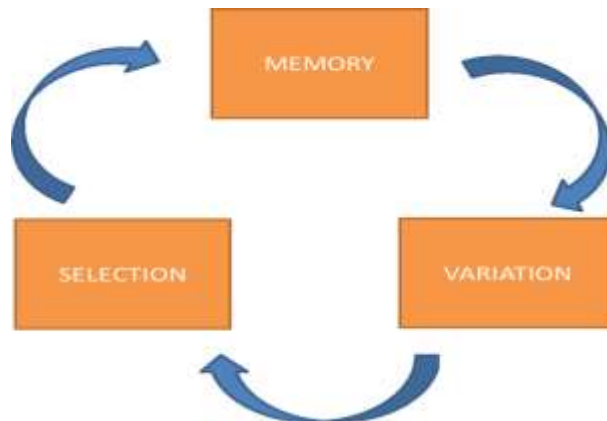
Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι προσέγγισης των πολυκριτηριακών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Η πρώτη βασίζεται στον συνδυασμό των επί μέρους αντικειμενικών συναρτήσεων σε μία σύνθετη συνάρτηση- ή διαφορετικά η μετατροπή όλων εκτός από μια αντικειμενική συνάρτηση σε περιορισμούς. Πέρα από τις δυσκολίες εφαρμογής αυτής της μεθόδου¹¹ 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 που έχουν αυτό το χαρακτηριστικό 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 θυσιάζονται κάποια 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.

¹¹ Abdullah Konak et al. 2006. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. *Reliability Engineering and System Safety* 91.

Η βασική λογική λειτουργίας αυτών των αλγορίθμων, όπως φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί, συνοψίζεται στα παρακάτω στάδια:

1. Καθορισμός ενός πεδίου «μνήμης» που θα περιέχει το σύνολο των λύσεων
2. Καθορισμός μιας διαδικασίας επιλογής, η οποία θα καθορίζει ποιες από τις παραπάνω λύσεις θα πρέπει να κρατηθούν στην μνήμη. Οι δύο βασικοί τύποι επιλογής είναι:
 - Επιλογή τύπου ζευγαρώματος (mating), όπου επιλέγονται οι εν δυνάμει καλύτερες λύσεις
 - Φυσική επιλογή (environmental), η οποία καθορίζει ποιες λύσεις θα παραμείνουν στην μνήμη
3. Καθορισμός μιας διαδικασίας μεταβολής, η οποία παίρνει ένα υποσύνολο των λύσεων και το μεταβάλλει συστηματικά, ή τυχαία, για να παράγει καλύτερες λύσεις. Ορισμένοι από τους τελεστές που χρησιμοποιούνται είναι:
 - Διασταύρωση, όπου παράγονται νέοι απόγονοι συνδυάζοντας χαρακτηριστικά δύο ή περισσότερων γονέων
 - Μετάλλαξη, όπου μεταβάλλονται μονάδες με μικρή πιθανότητα επιβίωσης.



Σχήμα 12. Η λειτουργία ενός γενετικού αλγορίθμου (πηγή:[30])

Σε μορφή ψευτοκώδικα η λειτουργία ενός γενετικού αλγορίθμου μπορεί να περιγραφεί ως εξής:

```
Generate initial population, G(0);  
Evaluate G(0);  
t=0;  
repeat  
  t=t+1;  
  generate G(t) using G(t-1);  
  evaluate G(t);  
until a solution is found
```

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 πλεύση σε ήρεμο νερό και το δεύτερο την αλληλεπίδραση του σκάφους με κυματισμούς. 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 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-II¹² (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 εφικτό, 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 εξέλιξη είναι η χρήση των διαδικασιών διασταύρωσης και διασταύρωσης και μετάλλαξη στη φύση, διασφαλίζεται μέσω του προσδιορισμού

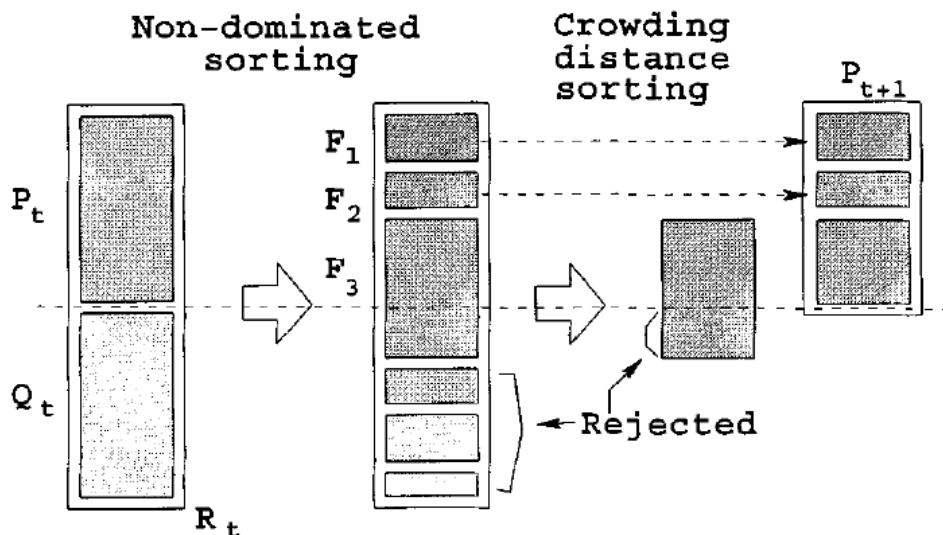
¹² Kalyanmoy Deb, Sameer Agarwal, T. Meyarivan, «A fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm : NSGA-II», 2002

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. Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι τα εξής:

- Μια διαδικασία μη κυριαρχούμενης ταξινόμησης (non-dominated sorting), όπου κάθε μονάδα ταξινομείται βάσει στο επίπεδο κυριαρχίας τους επί των υπολοίπων
- Εφαρμόζεται την τεχνική του ελιτισμού, η οποία αποθηκεύει όλες τις μη κυριαρχούμενες λύσεις, βελτιώνοντας έτσι την ταχύτητα σύγκλισης.
- Εφαρμόζει αυτόματα κατάλληλο μηχανισμό σύμφωνα με την απόσταση του κάθε είδους από τα υπόλοιπα, για να ενισχυθεί ποικιλομορφία και η διασπορά λύσεων.

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



Σχήμα 13. Η λειτουργία του αλγορίθμου NSGA II (πηγή:[16])

Αν λάβουμε δύο σχεδιάσεις p και q με διανύσματα μεταβλητών απόφασης X_1 και X_2 , για ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης η πρώτη σχεδίαση υπερέχει της δεύτερης ($p < q$) αν ισχύουν οι δύο επόμενες συνθήκες :

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

Απαιτείται δηλαδή να υπάρχει τουλάχιστον μια αντικειμενική συνάρτηση με μικρότερη τιμή και όσον αφορά τις υπόλοιπες αντικειμενικές συναρτήσεις οι δύο σχεδιάσεις να είναι τουλάχιστον ισοδύναμες. Πιο συγκεκριμένα ο χειρισμός των λύσεων ελίτ έχει ως εξής. Υπάρχουν δύο πληθυσμοί : ο πληθυσμός των γονέων (parent population) και ο πληθυσμός των απογόνων (offspring population) , ενώ δεν υπάρχει ρητός πληθυσμός ελίτ λύσεων (SPEA). Ο χειρισμός των ελίτ λύσεων γίνεται ως εξής: ο πληθυσμός απογόνων Q_t δημιουργείται χρησιμοποιώντας τον πληθυσμό γονέων P_t . Στη συνέχεια, αντί να βρει κανείς το μη κυριαρχούμενο μέτωπο του πληθυσμού Q_t , πρώτα οι δύο πληθυσμοί συνδυάζονται μαζί για να σχηματίσουν τον πληθυσμό R_t μεγέθους $2N$. Τότε μια μη κυριαρχούμενη διάταξη (non-dominated sorting) χρησιμοποιείται για να ταξινομήσει ολόκληρο το πληθυσμό R_t . Αν και αυτό απαιτεί περισσότερη προσπάθεια σε σύγκριση με τη διεξαγωγή της μη κυριαρχούμενης διάταξης στον Q_t μόνο, επιτρέπει έναν ολικό έλεγχο μη κυριαρχίας ανάμεσα στους απογόνους και στις γονεϊκές λύσεις. 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 :

```

 $\forall p \in P$ 
 $S_p = \emptyset$ 

 $n_p = 0$ 
 $\forall q \in P$ 
  If  $(p < q)$  then
     $S_p = S_p \cup \{p\}$ 
  Else if  $(q < p)$  then
     $n_p = n_p + 1$ 
If  $n_p = 0$  then
   $p_{rank} = 1$ 

 $\mathcal{F}_1 = \mathcal{F}_1 \cup \{p\}$ 
 $i = 1$ 
While  $\mathcal{F}_i \neq \emptyset$ 
   $Q \neq \emptyset$ 
   $\forall p \in \mathcal{F}_i$ 
     $\forall q \in S_p$ 
       $n_q = n_q - 1$ 
      If  $n_q = 0$  then
         $q_{rank} = i + 1$ 
         $Q = Q \cup \{q\}$ 
   $i = i + 1$ 
 $\mathcal{F}_i = Q$ 

```

Στην παραπάνω αλληλουχία ενεργειών τα μεγέθη p και q αντιστοιχούν σε μέλη των παραγόμενων πληθυσμών κάθε επανάληψης, S_p είναι το σύνολο των λύσεων από τις οποίες υπερέχει η λύση p και με n_p εκφράζεται ο αριθμός των λύσεων που υπερέχουν της λύσης p . Το μέγεθος \mathcal{F}_i είναι το σύνολο των λύσεων που ανήκουν στο επίπεδο i , ενώ με $prank$ συμβολίζεται ο βαθμός της λύσης p , που αντιστοιχεί στο επίπεδο στο οποίο ανήκει. Όλες οι λύσεις στο πρώτο μη κυριαρχούμενο επίπεδο έχουν τον αριθμό n_p ίσο με μηδέν. Για κάθε μέλος (q) του συνόλου S_p μειώνεται ο αριθμός κυριαρχίας n_p του κατά μία μονάδα. Όταν για κάποιο στοιχείο q το n_p γίνει μηδέν, αποθηκεύεται σε μία ξεχωριστή λίστα Q . Αυτές οι λύσεις αποτελούν το δεύτερο επίπεδο. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για τα υπόλοιπα στοιχεία της λίστας Q δημιουργώντας το τρίτο επίπεδο κ.ο.κ.

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

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

Για αυτό ο σκοπό, για κάθε αντικειμενική συνάρτηση, στις ακραίες τιμές (λύσεις με τις μεγαλύτερες ή μικρότερες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης) δίνεται η τιμή απόστασης άπειρο. Για όλες τις ενδιάμεσες τιμές δίνεται μία τιμή απόστασης ίση με την απόλυτη αδιαστατοποιημένη διαφορά των τιμών δύο γειτονικών λύσεων. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για κάθε αντικειμενική συνάρτηση. Η ολική τιμή απόστασης ισούται με το άθροισμα των επιμέρους αδιαστατοποιημένων τιμών απόστασης για κάθε αντικειμενική συνάρτηση. (Κάθε αντικειμενική συνάρτηση έχει αδιαστατοποιηθεί πριν ξεκινήσει η διαδικασία). Στον παραπάνω αλγόριθμο η τιμή $I[i].m$ αναφέρεται στην τιμή της m -αντικειμενική συνάρτηση για την i -λύση στο σύνολο I και οι παράμετροι f_m^{max} και f_m^{min} αναφέρονται στην μέγιστη και ελάχιστη τιμή για την m αντικειμενική συνάρτηση.

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

$$\begin{aligned}
 i <_n j \quad & \text{if } (i_{rank} < j_{rank}) \\
 \text{or } ((i_{rank} &= j_{rank}) \\
 \text{and } (i_{distance} &> j_{distance}))
 \end{aligned}$$

Ο νέος πληθυσμός γεμίζει με λύσεις από διαφορετικά μη κυριαρχούμενα μέτωπα, ξεκινώντας από το καλύτερο μη κυριαρχούμενο μέτωπο, ακολουθούμενο από το δεύτερο

κοκ. Αφού το συνολικό μέγεθος του πληθυσμού R_t είναι $2N$, δεν μπορούν όλα τα μέτωπα να φιλοξενηθούν στις N θέσεις που είναι διαθέσιμες στο νέο πληθυσμό., ενώ τα επιπλέον μέτωπα διαγράφονται. Όταν το τελευταίο επιτρεπόμενο μέτωπο εξετάζεται, μπορεί να υπάρχουν περισσότερες λύσεις σε αυτό από τις ελεύθερες θέσεις στο νέο πληθυσμό. Αντί να απορρίπτονται αυθαίρετα, είναι χρήσιμο να χρησιμοποιηθεί μια στρατηγική θέσης (niching strategy) για να διαλέξουμε τα μέλη του τελευταίου μετώπου που βρίσκονται στη λιγότερη πολυπληθή περιοχή του μετώπου. Μια στρατηγική σαν κι αυτή δεν επηρεάζει την πορεία του αλγορίθμου στα αρχικά στάδια της εξέλιξης, γιατί αρχικά στην πορεία του αλγορίθμου υπάρχουν πολλά μέτωπα στο συνδυασμένο πληθυσμό. Είναι πιθανό λύσεις πολλών καλών μη κυριαρχούμενων μετώπων να βρίσκονται ήδη στον νέο πληθυσμό, προτού αθροιστούν σε πλήθος N . Τότε σχεδόν δεν ενδιαφέρει ποια λύση από το τελευταίο μέτωπο συμπεριλαμβάνεται για να συμπληρώσει τον πληθυσμό. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια των τελευταίων σταδίων της προσομοίωσης, είναι πιθανό ότι οι περισσότερες λύσεις στον πληθυσμό R_t βρίσκονται στο καλύτερο μη κυριαρχούμενο μέτωπο. Είναι επίσης πιθανό ότι στο πληθυσμό R_t μεγέθους $2N$, ο αριθμός των λύσεων στο πρώτο μη κυριαρχούμενο μέτωπο να υπερβαίνει τις N . Ο παραπάνω αλγόριθμος διασφαλίζει ότι η στρατηγική θέσης να επιλέξει ένα διαφοροποιημένο (diverse) σύνολο λύσεων. Η συνολική διαδικασία μιας επανάληψης t του αλγορίθμου φαίνεται στη συνέχεια σε μορφή ψευδοκώδικα.

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

Μετά την ολοκλήρωση της τελευταίας κατάταξης τα μέλη της γενιάς έχουν χωριστεί σε δύο ισάριθμες ομάδες εκ των οποίων η πρώτη περιλαμβάνει όλες τις λύσεις που υπερέχουν σε σχέση με τα αυτές της δεύτερης. Για την παραγωγή κάθε απογόνου χρησιμοποιούνται τα χαρακτηριστικά δύο γονέων που υπόκεινται στη διαδικασία της διασταύρωσης.

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

Κεφάλαιο 4. Βελτιστοποίηση σχεδίασης LNGC

4.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή της ενοποιημένης διαδικασίας βελτιστοποίησης της γάστρας του επιλεγέντος πλοίου μεταφοράς υγροποιημένου αερίου, τα κύρια χαρακτηριστικά του οποίου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα :

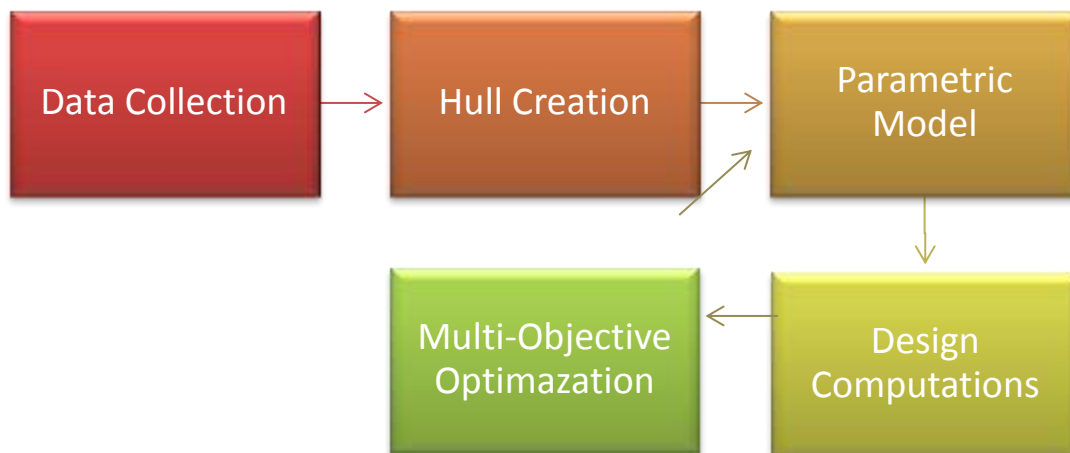
Πίνακας 1. Στοιχεία πλοίου

MARAN GAS EFESOS 159.800 M ³ LNG CARRIER	
Length O.A.	294.2 m (approx.)
Length B. P.	283.2 m
Breadth	44 m
Depth	26 m
Draft design	11.5
Design speed	19.9 knots

Ο βασικός σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση της αντίστασης κυματισμού παράλληλα με τη ελαχιστοποίηση της επιτάχυνσης στην πλήρη κατά την κίνηση προνευτασμού. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται όσες φορές απαιτείται προκειμένου να καταλήξουμε σε ένα πλήθος διαθέσιμων σχεδιάσεων ούτως ώστε να μπορεί να επιλεγεί μια αρκούντως ικανοποιητική λύση. Στόχος της βελτιστοποίησης είναι η εύρεση μιας εναλλακτικής μορφής γάστρας που θα έχει καλύτερα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά από την πατρική τόσο σε ήρεμο νερό όσο και σε κυματισμούς. Για το σκοπό αυτό η αναζήτηση μιας καλύτερης σχεδίασης θα πραγματοποιηθεί αξιολογώντας την απόδοση 1000 περίπου διαφορετικών σχεδιάσεων. Από προγενέστερη εμπειρία, ο αριθμός αυτός κρίνεται επαρκής για την επίτευξη αυτού του στόχου. Δεδομένης της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος αλλά και του αριθμού των εναλλακτικών λύσεων, η μόνη πρακτικά εφαρμόσιμη τεχνική περιλαμβάνει τη χρήση κωδίκων που επιλύουν τα υδροδυναμικά προβλήματα με τη δυναμική θεωρία .

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

1. Συλλογή δεδομένων.
2. Δημιουργία γάστρας.
3. Δημιουργία παραμετρικού μοντέλου.
4. Διακύμανση των μεταβλητών και παραγωγή διαφορετικών γεωμετριών.
5. Υπολογισμός των τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων.
6. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων από γενετικό αλγόριθμο.
7. Επανάληψη βημάτων 4 ως 6.



Σχήμα 14. Συνολική διαδικασία βελτιστοποίησης

4.2 Στάδιο 1^ο: Συλλογή δεδομένων

Βασικό στάδιο αυτής της εργασίας ήταν η δημιουργία της γάστρας του πλοίου από το μηδέν. 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 το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τα περισσότερα βασικά δομικά σχέδια που μπορούσε να παραχωρήσει η εταιρεία, η οποία είχε δώσει και το πλοίο. Για την επιλογή των νομέων που θα χρησιμοποιούνταν υπήρχε ένας βασικός περιορισμός. Δεν μπορούσε να χρησιμοποιηθεί μια αυθαίρετη ισοδιαμέριση του μήκους του πλοίου για τη θέση των νομέων, καθώς οι διαθέσιμοι νομείς ήταν στις προκαθορισμένες θέσεις των κατασκευαστικών νομέων (frames), και μάλιστα όχι σε όλους από αυτούς. Επομένως, τουλάχιστον για το πρωταρχικό στάδιο επιλέγονταν νομείς οι οποίοι ήταν κοντά αριθμητικά σε μία ισοδιαμέριση, όπου αυτό ήταν δυνατό. Κατά δεύτερον οι νομείς επιλέγονταν με γνώμονα της καλύτερη δυνατή περιγραφή της γεωμετρία και των μεταβολών της κατά το διάμηκες.

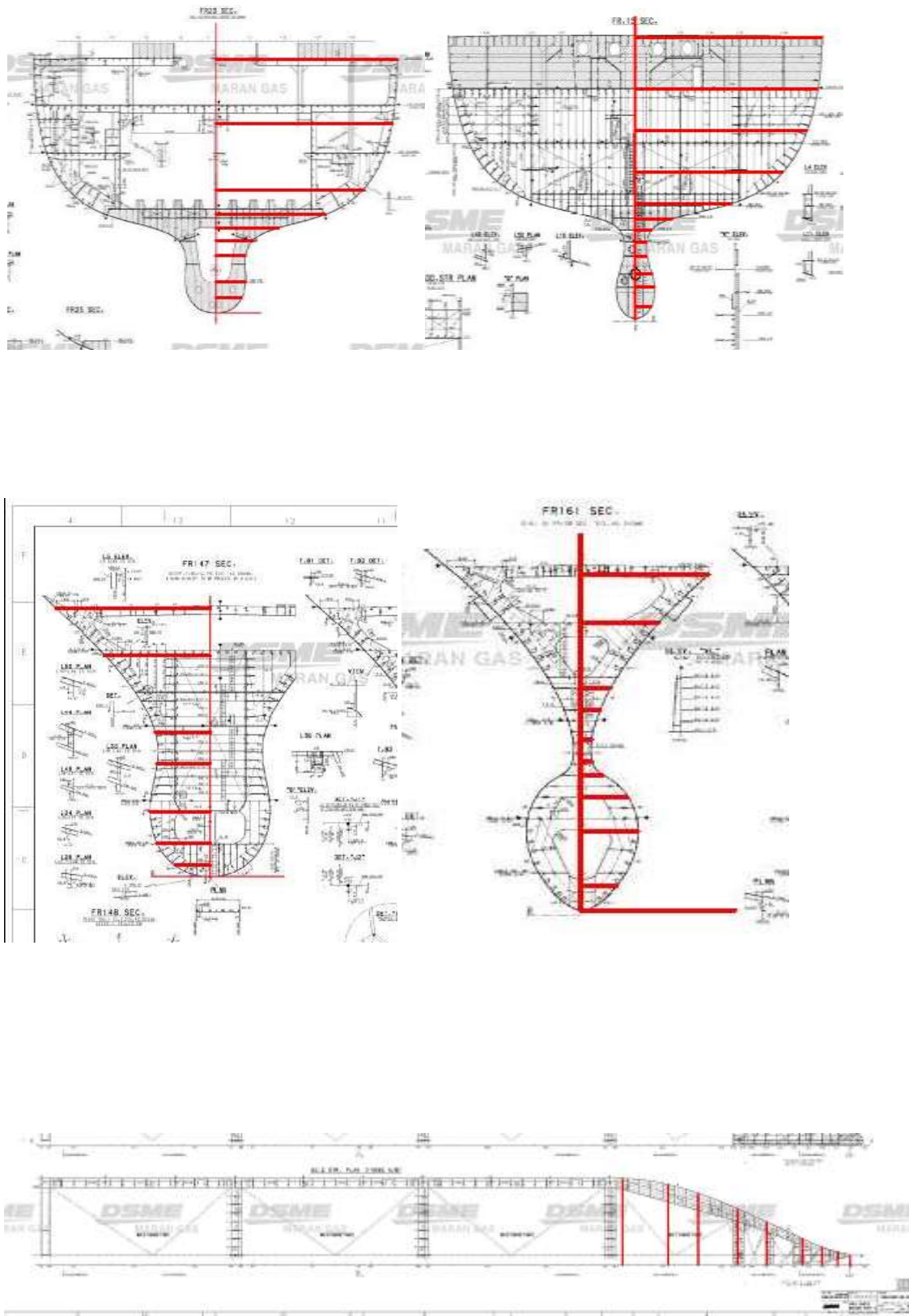
Για την περάτωση του σταδίου χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Autocad 14', στο οποίο εισάγονταν ένα-ένα τα σχέδια υπό κλίμακα για να πάρουμε τις μετρήσεις. Συγκεκριμένα:

- Το σχέδιο του General Arrangement (GA) χρησιμοποιήθηκε για τις καμπύλες του profile και του Flat of side (FOS).

- Το σχέδιο του Shell expansion χρησιμοποιήθηκε για την καμπύλη του Flat of bottom (FOB).
- Σχέδια με λεπτομέρειες της γεωμετρίας του πλοίου (structural designs) χρησιμοποιήθηκαν για του νομείς. Σε ορισμένα από αυτά έγιναν μετρήσεις και σε ισάλους για εξακρίβωση των μετρήσεων επί των νομέων.

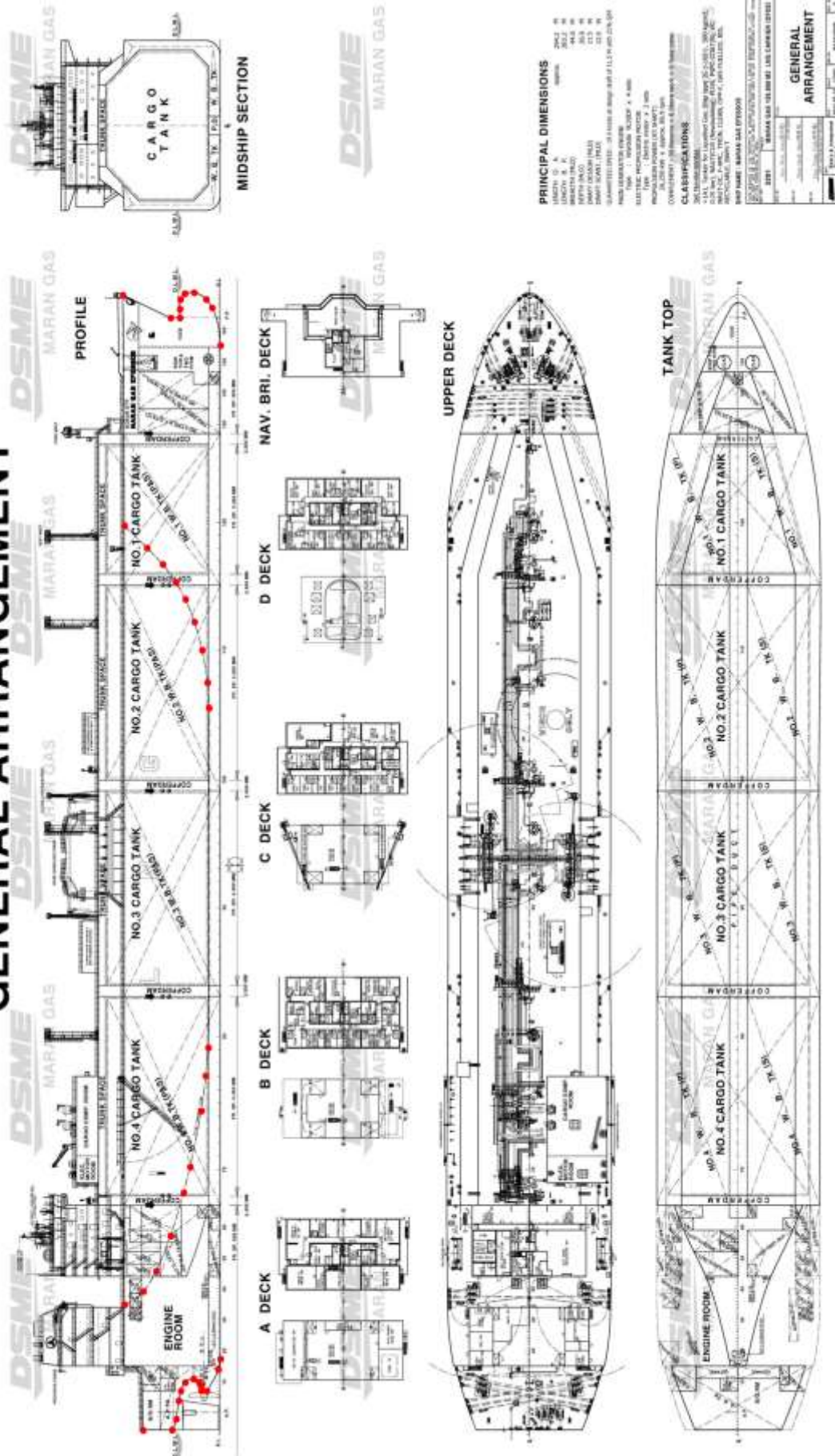
Το σύνολο των σχεδίων μπορούσαν να δώσουν σχεδόν πλήρη περιγραφή της γεωμετρίας. Το μόνο κομμάτι που δεν υπήρχε στα σχέδια ήταν το κομμάτι της χράνης στην πρύμνη. Το συγκεκριμένο κομμάτι καταρχάς ήταν μικρό σε μήκος και κατά δεύτερον δεν θα επηρέαζε ιδιαίτερα τους υπολογισμούς της δυναμικής θεωρίας.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

Κατόπιν, σημεία κατανέμονταν κατάλληλα πάνω στις καμπύλες ενδιαφέροντος, χρησιμοποιώντας τα λιγότερα δυνατά σημεία, αλλά με πύκνωση στα σημεία έντονης μεταβολής της γεωμετρίας. Τέλος, καταγράφονταν οι συντεταγμένες του κάθε σημείου, δημιουργώντας έτσι μία λίστα μετρήσεων για κάθε καμπύλη.



Σχήμα 15. Structural designs

GENERAL ARRANGEMENT



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 & ballast) σε βυθίσματα 11.44m και 9.65m. Τα στοιχεία αντλήθηκαν από το υδροστατικό διάγραμμα, όπου τα βυθίσματα μεταβάλλονται κατά 5cm. Το μοντέλο θα παραχθεί χωρίς να ληφθούν υπ όψιν τα ελάσματα, επομένως μας ενδιαφέρουν τα βυθίσματα moulded. Για τα βυθίσματα 9.5 m τα κοντινότερα ήταν τα 9.629 m και 9.729 m, ενώ για τα 11.5m ήταν τα βυθίσματα 11,429m και 11.479 m, στα οποία και έγινε γραμμική παρεμβολή.

Πίνακας 2. Υδροστατικά στοιχεία πατρικού

Hydrostatic particulars		
Draft moulded (m) :	9.651	11.44
Moulded volume (m ³) :	89516	108238
Displ. In S.W. (ton) :	91754	110944
L.C.F from AP (m) :	137.918	134.170
L.C.B from AP (m) :	141.393	141.591
V.C.B above B.L. (m) :	5.05	6.01
T.P.C (ton/1cm) :	105.97	108.97
M.T.C (ton-m/1cm) :	1807.86	1942.09
K.M.T (m) :	21.744	20.283
I long. (*1/1000) (m ⁴) :	50032	53712
I tran. (*1/1000) (m ⁴) :	14889	15472
W.P.A moulded (m ²) :	10344	10643
Wetted surface (m ²) :	14254	15599
Block coeff. (Cb) :	0.7444	0.7594
Prism. Coeff. (Cp) :	0.7520	0.7660
W.P.A. coeff. (Cw) :	0.8293	0.8526
Midsh. Coeff. (Cm) :	0.9899	0.9915

Οι αντίστοιχες καταστάσεις φόρτωσης που επιλεχτήκαν είναι οι εξής:

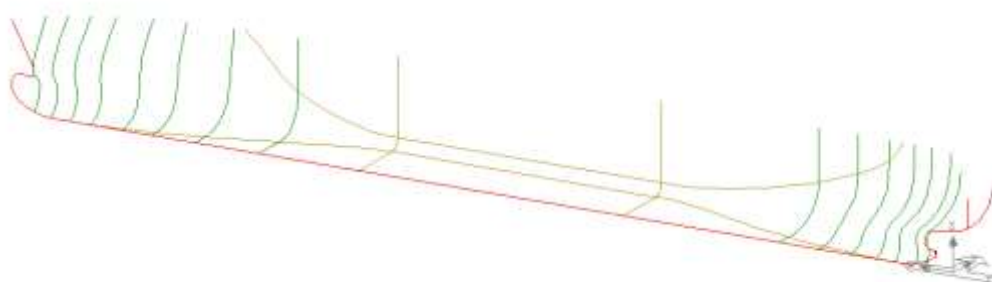
Πίνακας 3. Καταστάσεις φόρτωσης

Loading Conditions	Displ. (T)	DEQ (m)	DA (m)	DF (m)	TRIM	KG (m)	L.C.G (m)
Ballast Dep. Condition	91754	9.65	9.97	9.31	0.66	12.08	141.421
Homo. Design Load Dep. Cond. (S.G.= 0.46)	110944	11.44	11.44	11.44	0.00	15.90	141.592

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.

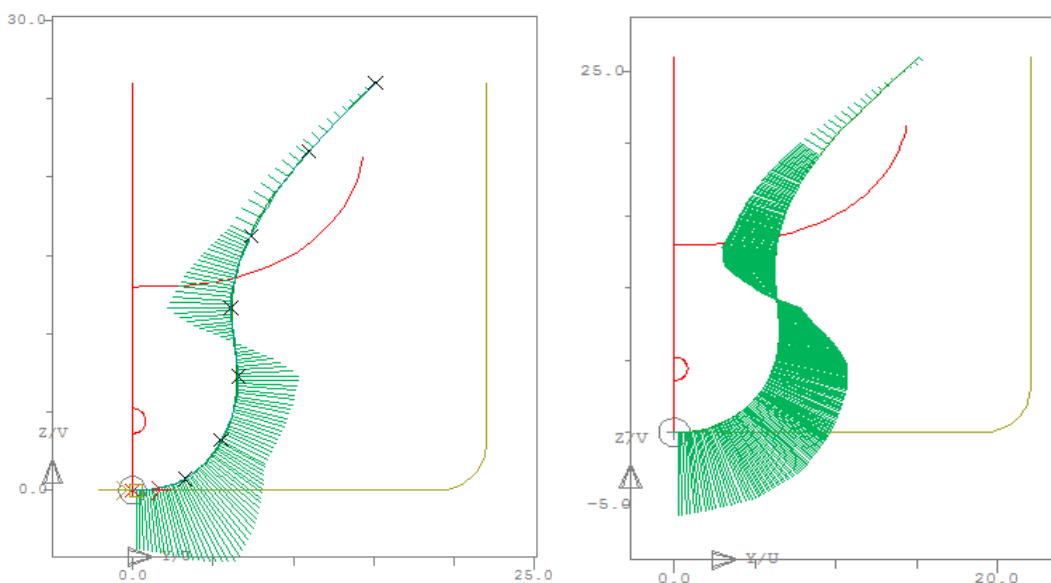
4.3 Στάδιο 2^ο: Δημιουργία αρχικής γάστρας

Σε αυτό το στάδιο ζητούμενο ήταν 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.



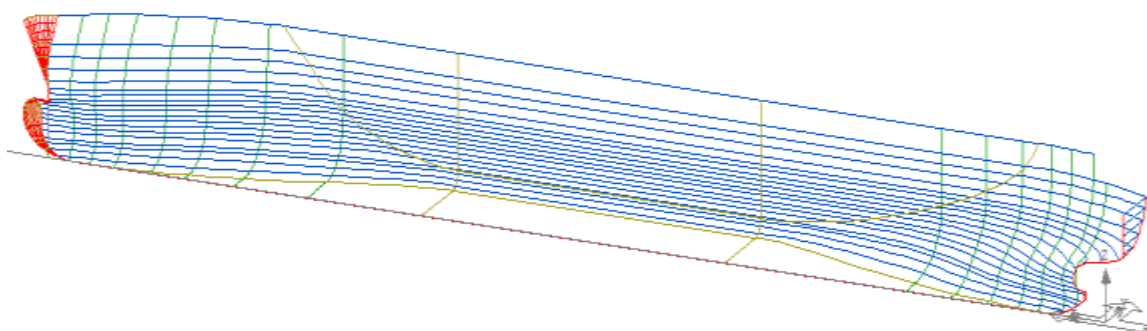
Σχήμα 16. Αρχική γεωμετρία

Κατόπιν ξεκίνησε η διαδικασία της εξομάλυνσης. Αφού έγινε η εξομάλυνση των βασικών καμπυλών profile, FOS & FOB, έγινε εξομάλυνση σε κάθε νομέα. Ύστερα δημιουργήθηκαν οι ίσαλοι (waterlines) από τους νομείς, ώστε να εξομαλυνθούν και αυτοί. Η εξομάλυνση πραγματοποιήθηκε επαναληπτικά μεταξύ νομέων και ισάλων μέχρι να μην παρατηρείται ουσιαστική μεταβολή στην καμπυλότητα. Αξίζει να σημειωθεί πως οι αρχικές μετρήσεις επί των σχεδίων είχαν αρκετά μεγάλη ακρίβεια, καθώς όπως φαίνεται και στο επόμενο Σχήμα οι καμπύλες, πριν την εξομάλυνση, ήταν ήδη αρκετά ομαλές.



Σχήμα 17. Εξομάλυνση νομέα

Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία της εξομάλυνσης όλων των καμπύλων, ακολούθησε η δημιουργία της καμπύλης halvesiding και του End Surface. Με την εξομάλυνση της καμπύλης halvesiding παράλληλα με την αυτήν των πρωραίων νομέων και των ισάλων, δημιουργήθηκε η End surface (κόκκινη επιφάνεια στο Σχήμα που ακολουθεί), που είναι ουσιαστικά μια ομαλή επιφάνεια στην πλώρη του πλοίου (οι ίσαλοι κλείνουν με ένα καμπύλο τμήμα στην πλώρη). Αυτό το κομμάτι μπορεί να μην επηρέασε τα υδροστατικά στοιχεία του πλοίου, έδωσε όμως μια πιο σωστή περιγραφή των νομέων και των ισάλων στο πρωραίο τμήμα.



Σχήμα 18. Τελική μορφή γάστρας

Εφόσον η διαδικασία της δημιουργίας της αρχικής γεωμετρίας έγινε μέσω μετρήσεων από ηλεκτρονικά σχέδια και κατόπιν ακολούθησε εξομάλυνση των καμπύλων, κάτι που μπορεί να μετέβαλε τις αρχικές καμπύλες, ο μόνος τρόπος αξιολόγησης του αποτελέσματος ήταν μέσω των υδροστατικών υπολογισμών του προγράμματος Avena Lines. Στον πίνακα που ακολουθεί 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

Avena Lines Hull		
Draft (m) :	9.651	11.44
Total volume (m ³) :	89727	108474
LCB (m) :	141.82	141.69
VCB (m) :	5.0598	6.01
KMT (m) :	21.63	20.25
WSA (m ²) :	14246	15452
Cb :	0.7461	0.761
Cm :	0.9909	0.9923
Cp :	0.7530	0.767

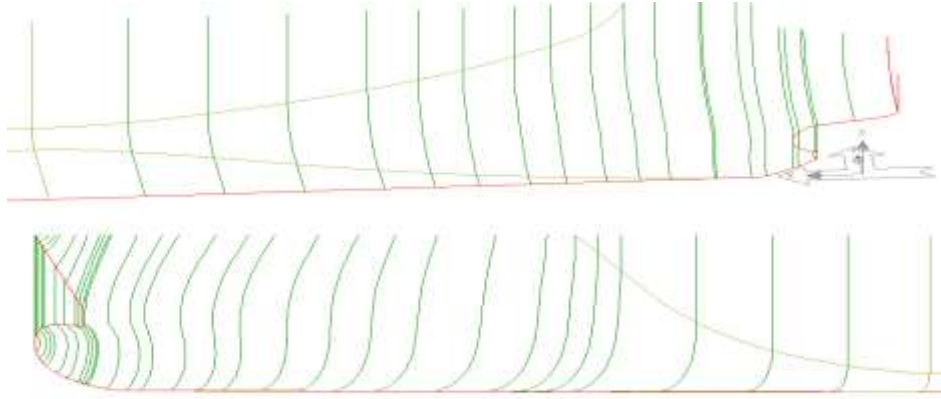
Ακολουθεί συγκεντρωτικός Πίνακας που αποτυπώνει τις διαφορές των διαφόρων υδροστατικών τιμών μεταξύ των παραχθειςών και των πραγματικών

Πίνακας 5. Διαφορές Υδροστατικών μεγεθών

Draft (m):	9.561		11.44	
	Απόλυτο σφάλμα	% ποσοστό	Απόλυτο σφάλμα	% ποσοστό
Total volume (m ³) :	211	0,0024	236	0,0021
LCB (m) :	0.43		0,10	
VCB (m) :	0	0.0	0	0
KMT (m) :	0.11	0.005	0.03	0.0014
WSA (m ²) :	143	0.01	20	0.0012
Cb :	0.0017	0.0022	0.0016	0.0021
Cm :	0	0	0	0
Cp :	0.001	0.0013	0.005	0.0065

Από τον παραπάνω πίνακα αξίζει να σημειωθούν τα παρακάτω: η μέγιστη διαφορά στον όγκο είναι 0,0024% (211 tons) στην κατάσταση των 9.5 m. Το ίδιο σφάλμα μεταφέρεται σχεδόν αυτούσιο στο βύθισμα των 11.5 m (236 tons) αλλά εκεί το ποσοστό είναι ακόμα μικρότερο (0,0021%). Εξίσου καλή ήταν και η τιμή για τον συντελεστή Cb. Μηδενικές διαφορές παρατηρούνται στα μεγέθη V.C.B και στο Cm. Αν και για το Cm η επίτευξή του ήταν εύκολη, καθώς επηρεάζεται μόνο από την γεωμετρία της μέσης τομής, που ήταν σχετικά εύκολο να παραχθεί, η μηδενική διαφορά στα V.C.B δείχνει την σωστή κατακόρυφη κατανομή του όγκου. Οι μεγαλύτερες διαφορές παρατηρούνται στα μεγέθη L.C.B και W.S.A αλλά και αυτές κινούνται σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Συνολικά μπορούμε να αποφανθούμε πως η πρώτη προσέγγιση της γεωμετρίας κρίνεται άκρως ικανοποιητική, καθώς έχουμε μια αρκετά πιστή αναπαράσταση της πραγματικής γεωμετρίας.

Έχοντας έτοιμη πλέον τη γάστρα μπορούμε να ετοιμάσουμε τα απαραίτητα δεδομένα που θα χρησιμεύσουν 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 του FOS & FOB, νομείς στα άκρα του ευθύγραμμου τμήματος του προφίλ κ.τ.λ.). Επίσης δημιουργήθηκαν νομείς όσο τον δυνατόν περισσότερο με σταθερή απόσταση μεταξύ τους (στοιχείο που θα διευκολύνει την δημιουργία των επιφανειών στο CAESES). Γενικά ο αριθμός των νομέων αυξήθηκε σε σχέση με τους αρχικούς για περισσότερη λεπτομέρεια (μικρότερες ισαποστάσεις). Τέλος έγινε ιδιαίτερη πύκνωση νομέων στο βολβό, στοιχείο με ιδιαίτερη σημασία για το τελικό αποτέλεσμα. Στο επόμενο Σχήμα φαίνεται η τελική μορφή της γάστρας που θα χρησιμεύσει ως δεδομένο εισόδου για το πρόγραμμα CAESES και της δημιουργία της παραμετρικής γάστρας.



Σχήμα 19. Τελικό αρχείο γραμμών

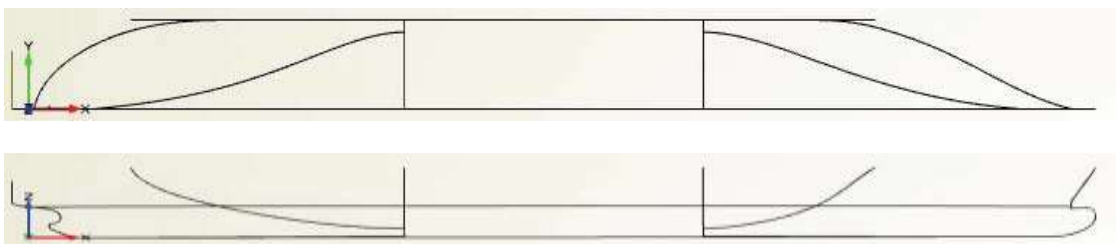
4.4 Στάδιο 3^ο: Παραμετρική μοντελοποίηση

Η παραμετρική σχεδίαση της αρχικής γάστρας έγινε με χρήση του λογισμικού CAESSES¹³. Οι γραμμές που παρήχθησαν από το Avenia Lines εισήχθησαν σε μορφή αρχείου IGES. Η σχεδίαση της γεωμετρίας χωρίζεται σε τέσσερα βασικά μέρη. Αυτά είναι:

- Πρυμναίο τμήμα
- Παράλληλο τμήμα
- Πρωραίο τμήμα
- Βολβοειδής πλώρη

Η λογική της σχεδίασης επιβάλλει τη χρησιμοποίηση καμπυλών με περισσότερες επιλογές ελέγχου στα σημεία όπου θα μεταβάλλεται έντονα η γεωμετρία και η μεταβολή αυτή μας ενδιαφέρει, ενώ στα μέρη του πλοίου όπου η ακριβής αναπαράσταση είναι ελάχιστονο σημασίας γίνεται να χρησιμοποιηθούν απλούστερες μορφές καμπυλών προς διευκόλυνση της διαδικασίας της σχεδίασης.

Η παραμετρική σχεδίαση στηρίχθηκε στις βασικές καμπύλες της, CPC (Center Plane Curve), FOS, FOB, τα όρια του παραλλήλου τμήματος καθώς και την ίσαλο γραμμή στα 11.5m, που θεωρείται βασική παράμετρος της συνολικής σχεδίασης καθώς επηρεάζει άμεσα τα κριτήρια βελτιστοποίησης και η ακριβής προσέγγιση της είναι ιδιαίτερης σημασίας

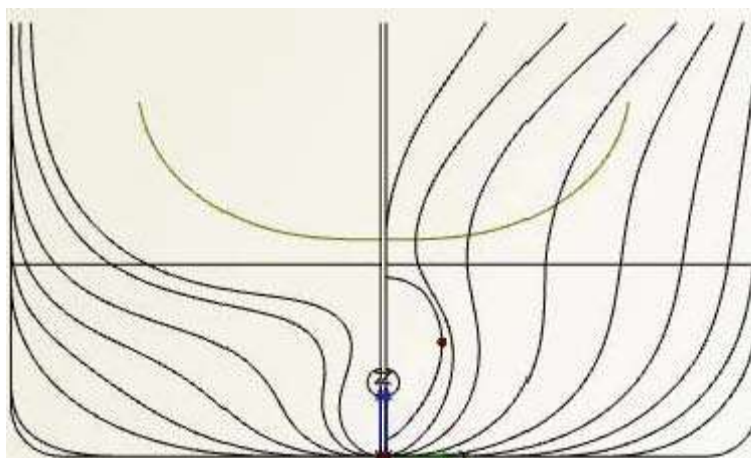


Σχήμα 20. Κάτοψη και διαμήκης όψη βασικών καμπύλων

¹³ Friendship Systems

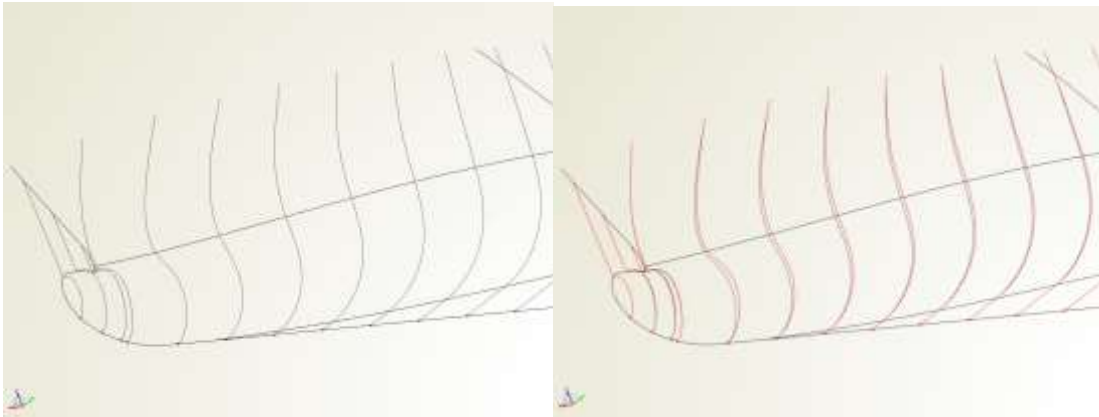
Συγκεκριμένα, οι FOB και FOS δημιουργήθηκαν με B-spline, χρησιμοποιώντας κατάλληλο αριθμό σημείων ελέγχου. Η καμπύλη του προφίλ δημιουργήθηκε με τη χρήση τμηματικών F-splines-Αυτή είναι μια εύχρηστη καμπύλη του CAESSES που κι αυτή αποτελεί στην πραγματικότητα μια B-Spline η οποία όμως ορίζεται από ολιγάριθμα δεδομένα όπως οι συντεταγμένες των ακραίων σημείων της και οι γωνίες των εφαπτομενικών της διανυσμάτων. Η ίσαλος δημιουργήθηκε με τη χρήση τόσο B-splines όσο και F-spline, προς διευκόλυνση της παραμετροποίησης (η F-spline χρησιμοποιήθηκε στο πρωραίο τμήμα όπου η γωνία εισόδου μεταβάλλεται. Καθώς η F-spline δίνει τη δυνατότητα ελέγχου των γωνιών στα άκρα, διευκολύνει την εισαγωγή της παραμέτρου).

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. Όλα τα σημεία ελέγχου των νομέων (καθώς και αυτά των FOS και FOB) αδιαστατοποιήθηκαν ως προς «σταθερά σημεία» (π.χ. σημεία επί του προφίλ και της ισάλου), ώστε να μεταβάλλεται ομαλά η μορφή τους σε οποιαδήποτε μεταβολή πραγματοποιείται στις μεταβλητές σχεδίασης-οι οποίες επηρεάζουν αντίστοιχα κομμάτια της γάστρας.



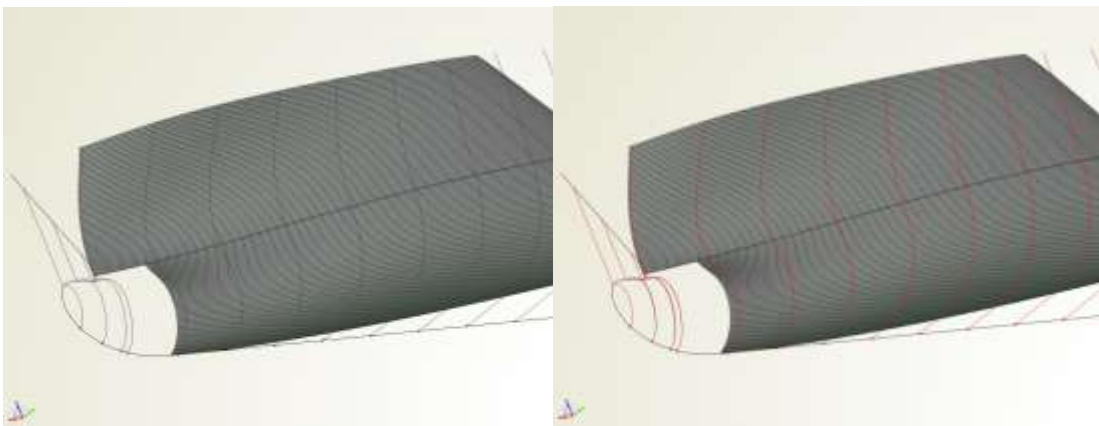
Σχήμα 21. Πρυμναίοι (αριστερά) & πρωραίοι (δεξιά) νομείς

Στο σχήμα 22 φαίνεται η αρχική και μια τυχούσα μορφή των πρωραίων νομέων για μεταβολή των μεταβλητών σχεδίασης από τις οποίες εξαρτώνται. για λόγους σύγκρισης έχουν διατηρηθεί οι αρχικές καμπύλες στο δεξί τμήμα (μαύρες καμπύλες) του σχήματος. Οι ίδιες μεταβολές μεταξύ αρχικής και τελικής μορφής του πρωραίου τμήματος φαίνονται στο σχήμα 22, στο οποίο όμως παρουσιάζονται και οι προκύπτουσες επιφάνειες.



Σχήμα 22. Μεταβολή πρωραίου τμήματος, μεταξύ αρχικής (αριστερά) και τυχούσας μορφής (δεξιά)

Στα σχήματα 22 και 23 είναι εμφανές πως η ομαλότητα τόσο στις καμπύλες όσο και στις προκύπτουσες επιφάνειες διατηρείται και στους δύο συνδυασμούς μεταβλητών σχεδίασης από τους οποίους έχουμε την αρχική και μια τυχασία μορφή. Η επιλογή των τιμών των μεταβλητών σχεδίασης για την απόδοση των σχημάτων ήταν τυχασία κι είναι κοντά στα άκρα του εύρους που έχει επιλεγεί για τις συγκεκριμένες μεταβλητές. Ενδεικτικά αναφέρεται πως αντίστοιχη ποιότητα ομαλότητας προκύπτει για οποιονδήποτε συνδυασμό τιμών μεταβλητών εντός του προαναφερθέντος εύρους.

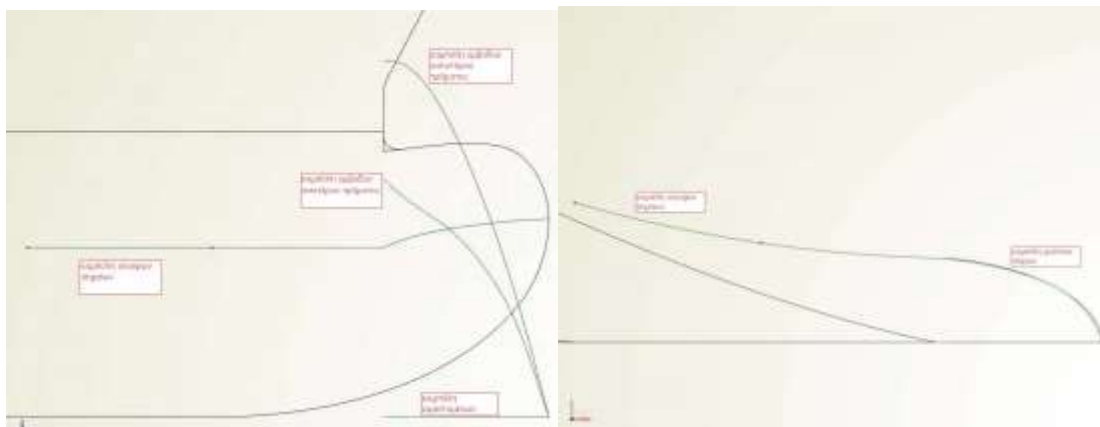


Σχήμα 23. Μεταβολή επιφανειών πρωραίου τμήματος μεταξύ αρχικής (αριστερά) και τυχούσας μορφής (δεξιά)

Στη συνέχεια κατασκευάστηκε η βολβοειδής πλήρη εφαρμόζοντας όμως μια εντελώς διαφορετική διαδικασία από αυτή που έχει αναφερθεί μέχρι τώρα. Βασικός λόγος αυτής της προσέγγισης αποτελεί το γεγονός πως επηρεάζει άμεσα την αντίσταση κυματισμού κι επομένως καθίσταται σημαντική η εισαγωγή μεγάλου αριθμού μεταβλητών που επηρεάζουν στο μέγιστο βαθμό τη μορφή της επιφανείας 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. Για να κατασκευαστεί ο βολβός χρησιμοποιήθηκε μία συνάρτηση ορισμού (feature definition¹⁴), η οποία δημιουργεί μία καμπύλη καθώς

¹⁴ Βλ. Παράρτημα Α

επίσης και τον τρόπο η οποία αυτή μεταβάλλεται κατά μία ορισμένη διεύθυνση (στην περίπτωση μας κατά το διάμηκες). Για το σκοπό 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 τετμημένη της σε κάθε σημείο κατά το διάμηκες. Οι καμπύλες αυτές προσεγγίστηκαν με τμηματικά F-Splines, για την ευκολότερη εισαγωγή μίας παραμέτρου στα 2/3 του μήκους της καμπύλης. Η ενιαία τρισδιάστατη καμπύλη που προκύπτει από τη σύνθεση των δύο, έχει συνέχεια επαφτομενικού 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 πρύμνηθεν και πώραθεν της πρωραίας καθέτου. Δεύτερη καμπύλη που δημιουργήθηκε, για να χρησιμοποιηθεί σαν δεδομένο στην συνάρτηση ορισμού, είναι αυτή του εμβαδού εγκάρσιας επιφάνειας. Συγκεκριμένα δημιουργήθηκαν δύο παρόμοιες καμπύλες, από τις οποίες η πρώτη δίνει το εμβαδό πάνω από την καμπύλη μεγίστου πάχους και του προφίλ κατά το διάμηκες, ενώ η δεύτερη δίνει το αντίστοιχο εμβαδό για το κάτω κομμάτι. Τέλος δημιουργήθηκαν οι καμπύλες που δίνουν την επαφτομένη (στο επίπεδο xz) στην καμπύλη μεγίστου πλάτους και τις επαφτόμενες στα σημεία τομής με το προφίλ.

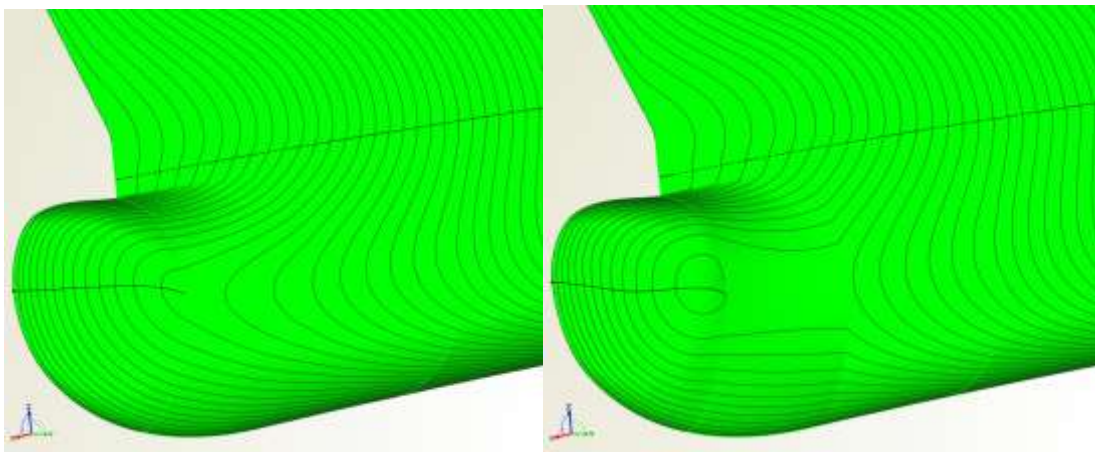


Σχήμα 24. Καμπύλες βολβοειδούς πλώρης

Τέλος, δημιουργήθηκαν οι επιφάνειες χρησιμοποιώντας αποκλειστικά τις εντολές Loft και coons patch. Η πρώτη δημιουργεί επιφάνειες κατά το διάμηκες παίρνοντας πληροφορίες από τους αντίστοιχους νομείς, ενώ η δεύτερη δημιουργεί μία επιφάνεια από τέσσερις συνοριακές καμπύλες που τέμνονται ανά δύο. 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. Οι άπειρες αυτές καμπύλες αποτελούν το αποτέλεσμα συνάρτησης που δίνει τα χαρακτηριστικά κατασκευής τους σε άπειρες θέσεις κατά το διάμηκες. Οι καμπύλες που δίνουν τις πληροφορίες κατά το διάμηκες περιγράφηκαν προηγουμένως.

Στο Σχήμα που ακολουθεί φαίνονται η αρχική και μια τυχαία επιφάνεια του βολβού μέσω απόδοσης τυχαίων τιμών στις μεταβλητές σχεδίασης. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται και η

επιφάνεια που προκύπτει από τους νομείς 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 25. Μεταβολή μεταξύ αρχικής (αριστερά) και τυχούσας (δεξιά) μορφής επιφάνειας βολβού

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 14 συνολικά μεταβλητές σχεδίασης οι 7 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. Σημειώνεται επίσης πως για λόγους σύγκρισης των εναλλακτικών λύσεων που προκύπτουν με την πατρική, έχει τεθεί περιορισμός στη μεταβολή του εκτοπίσματος και της διαμήκους θέσης του κέντρου άντωσης προκειμένου να μην υπερβαίνουν το $\pm 1.5\%$.

Πίνακας 6. Μεταβλητές σχεδίασης

Μεταβλητή Σχεδίασης	Αρχική Τιμή	Κάτω Όριο	Άνω Όριο
2third_max_beam_Y (m) :	2.34	2.1	2.6
2third_max_beam_Z (m) :	7.84	7.5	8
BB_tip_max_beam_Z (m) :	8	7.7	8.3
FP_max_beam_y (m) :	3.345	3.1	3.6
FP_max_beam_Z (m) :	6.84	6.5	7
low_area_fullness :	0.7385	0.71	0.75
upper_area_fullnes :	0.7385	0.71	0.75
on_wl_point_y (m) :	11.39	11	11.8
wl_115_fos_aft (m) :	0	-1	1
wl_115_fos_fore (m) :	0	-1	1
wl_angle_entrance (°) :	12	5	20
xpospnb_fore (m) :	183.26	180	186
xpos_pnb_aft (m) :	102.08	99	105
z_pos_stern (m) :	11.58	11.3	11.75

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 που ακολουθεί παρατίθενται ορισμένα βασικά υδροστατικά μεγέθη

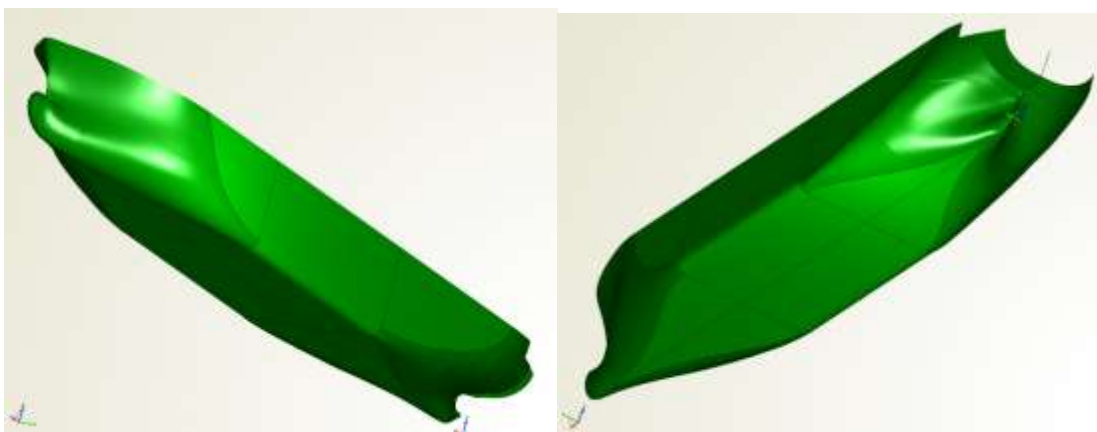
Πίνακας 7. Υπολογισμός υδροστατικών μεγεθών παραμετρικής γάστρας μέσω CAESES

Hydrostatic particulars		
Draft moulded (m) :	9.651	11.44
Moulded volume (m ³) :	89549	108259
L.C.F from AP (m) :	138.34	134.53
L.C.B from AP (m) :	142.17	141.75
V.C.B above B.L. (m) :	5.06	6.01
K.M.T (m) :	21.55	19.98
I long. (*1/1000) (m ⁴) :	49668	53789
I tran. (*1/1000) (m ⁴) :	14847	15435
W.P.A moulded (m ²) :	10292	10630
Block coeff. (Cb) :	0.7446	0.7594
Prism. Coeff. (Cp) :	0.7514	0.7653
Midsh. Coeff. (Cm) :	0.9909	0.9923

Από το παραπάνω Πίνακα σε σύγκριση με τον Πίνακα 2 και 4, προκύπτει πως η προσέγγιση που έγινε μέσω του προγράμματος CAESES είναι ακόμα πιο κοντά στην πραγματική γεωμετρία σε σχέση με αυτή που έγινε στο AVEVA Lines, καθώς οι απόλυτες διαφορές είναι ακόμα μικρότερες. Αυτό προφανώς οφείλεται στην τυχαία σφάλματα κατά

την διαδικασία των μετρήσεων, των σχεδιάσεων που αλληλοεξουδετερώνονται, καθώς επίσης και στην διαφορετική ακρίβεια με την οποία υπολογίζει το κάθε πρόγραμμα τα παραπάνω μεγέθη. Συγκεκριμένα για τον όγκο η απόκλιση είναι 33 m^3 στα 9.65 m , ενώ για το VCB η απόκλιση είναι μηδενική, όπως επίσης μηδενική είναι η απόκλιση για το Cb. Το KM_T που είναι ένα παράγωγο μέγεθος, το οποίο εξαρτάται από το VCB, το I_T και τον όγκο παρουσιάζει επίσης μικρή απόκλιση ($1,5 \%$ στα 11.5 m). Τέλος η περιγραφή της ισάλου θεωρείται ικανοποιητική με απόκλιση της επιφάνειάς της στα $0,005\%$.

Στο Σχήμα 26 φαίνονται δύο όψεις της συνολικής αρχικής γεωμετρίας όπως αυτή προέκυψε τελικά από τη διαδικασία παραμετρικής μοντελοποίησης.



Σχήμα 26. Η παραμετρική γεωμετρία του LNG MARAN GAS EFESOS

4.5 Στάδιο 4^ο: Σύζευξη CAESSES- υπολογιστικών κωδίκων

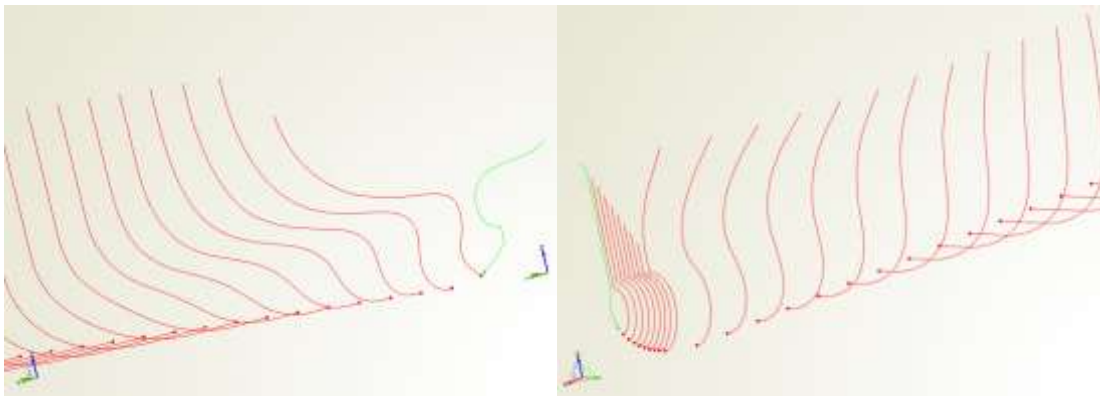
Η η περιγραφή της γεωμετρίας προκειμένου να χρησιμοποιηθεί από κώδικες δυναμικής θεωρίας, πραγματοποιείται μέσω ενός αριθμού νομών κατά το διάμηκες. Για λόγους λειτουργίας των προγραμμάτων η γάστρα περιγράφεται με διαφορετικό αριθμό νομών για κάθε περίπτωση.

Συγκεκριμένα για το λογισμικό SWAN 2 η περιγραφή της γεωμετρίας πραγματοποιείται με 65 καμπύλες που αποτελούν συνδυασμό νομών 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 καμία περίπτωση, η περιγραφή της γεωμετρίας πρέπει υποχρεωτικά περιγράφεται από το αντίστοιχο μέρος του προφίλ. Η καμπύλη αυτή περιγράφει το κομμάτι της γάστρας μέχρι τον πρώτο νομέα. Έτσι έχουμε ένα σύνολο 55 νομών που περιγράφουν τη γάστρα από τον καθρέφτη μέχρι την πρωραία κάθετο. 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.

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



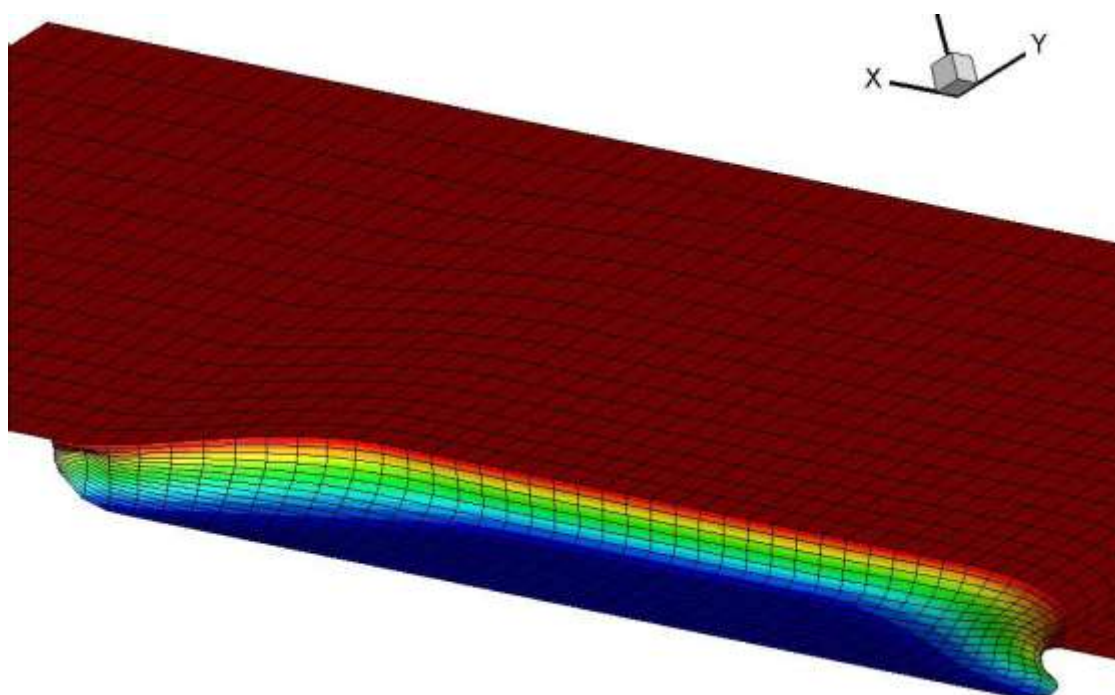
Σχήμα 27. Περιγραφή πρυμναίου (αριστερά) και πρωραίου (δεξιά) τμήματος

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

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

- Βάρος εκτοπίσματος για θαλασσινό νερό Δ (tn) ($\rho=1.025 \text{ tn/m}^3$)
- Κατακόρυφη θέση κέντρου βάρους KG (m)
- Ακτίνα αδράνειας περί τον άξονα x (m)
- Ακτίνα αδράνειας περί τον άξονα y (m)
- Διαμήκης θέση κέντρου βάρους LCG (m)

- Μήκος μεταξύ καθέτων 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)



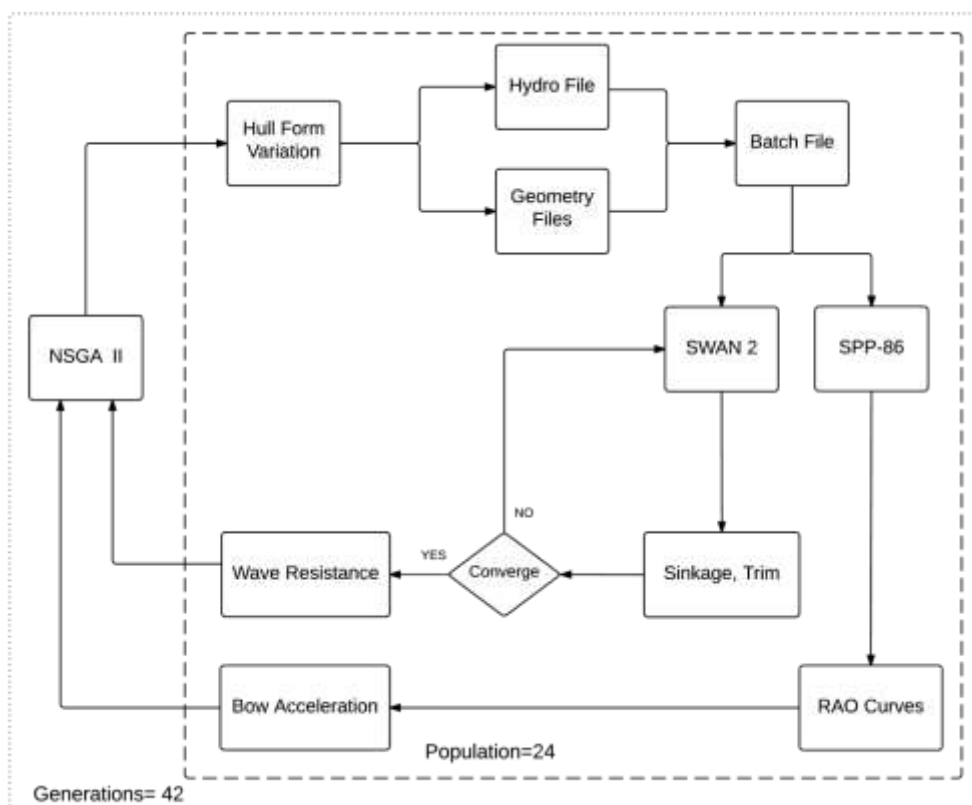
Σχήμα 28. Αναπαράσταση στερεού συνόρου και ελεύθερης επιφάνειας στο SWAN 2

Στο σχήμα 28 φαίνεται το πλέγμα στο στερεό σύνορο και η τα υπολογιστικά πλέγματα της ελεύθερης επιφάνειας στην περιβάλλουσα περιοχή όπως διαμορφώνονται 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. Αυτό που επίσης φαίνεται είναι πως το πλέγμα της ελεύθερης επιφάνειας είναι ορθογώνιο που ακολουθεί τη μορφή της γεωμετρίας κατά τον άξονα y , ενώ σε μεγαλύτερη απόσταση από τη γάστρα έχουμε σταδιακή εξομάλυνση αυτής της επιρροής. 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.

4.6 Στάδιο 5^ο: Επαναληπτική διαδικασία βελτιστοποίησης

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

Το περιβάλλον CAESES – Friendship Framework σε πρώτο επίπεδο χρησιμοποιείται για τη διακύμανση των μεταβλητών, τη διαμόρφωση των γεωμετρικών αναπαραστάσεων, τον υπολογισμό των υδροστατικών στοιχείων και την εξαγωγή όλων των απαραίτητων δεδομένων σε μορφή αρχείων. Σε δεύτερο βαθμό αποτελεί των δέκτη των αρχείων αποτελεσμάτων που παράγονται από τα προγράμματα υδροδυναμικής αξιολόγησης. Τα αποτελέσματα αυτά όπως και οι περιορισμοί που έχουν τεθεί, αξιολογούνται από τον γενετικό αλγόριθμο NSGA II προκειμένου να εφαρμοστεί η διαδικασία κατάταξης των εναλλακτικών λύσεων που περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η εφαρμοζόμενη διαδικασία βελτιστοποίησης φαίνεται σε μορφή διαγράμματος στο σχήμα 29.



Σχήμα 29. Διαδικασία βελτιστοποίησης υδροδυναμικής συμπεριφοράς LNG

Όπως φαίνεται από το σχήμα αυτό έχουμε συνολικά 42 γενεές με 24 μέλη η κάθε μία, κι επομένως συνολικά 1008 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 σε προηγούμενο κεφάλαιο. Οι παραχθείσες γεωμετρίες και ειδικά σε προχωρημένα βήματα του αλγορίθμου αποτελούν ικανοποιητικές λύσεις. Κατ' επέκταση η πιθανότητα διασταύρωσης των χαρακτηριστικών τους θα πρέπει να είναι υψηλή προκειμένου να μεγιστοποιήσουμε τον αριθμό των απογόνων που μπορεί να έχουν καλύτερες επιδόσεις και από τους δύο γονείς τους. Αντίθετα επειδή η μετάλλαξη προσδίδει χαρακτηριστικά σε έναν απόγονο που δεν εξαρτώνται από την υδροδυναμική απόδοση των 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 29, 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 29 για λόγους ευκρίνειας και εστίασης στα σημαντικότερα. Τα προγράμματα αυτά φαίνονται στη συνέχεια με μια σύντομη περιγραφή της λειτουργίας τους.

- **Sections_swan.exe.** Πρόγραμμα Visual Fortran που λαμβάνει ως αρχεία εισόδου αυτά που περιέχουν τα σημεία περιγραφής των καμπυλών (δύο διαφορετικά αρχεία) κι εξάγει ένα αρχείο SHF που χρησιμοποιείται από το λογισμικό SWAN 2. Το πρόγραμμα αυτό είναι επιφορτισμένο με τη διαμόρφωση του πρωραίου τμήματος μεταξύ του βολβού και του άνω τμήματος της γάστρας σε επιφάνεια μικρού πλάτους για λόγους που αναφέρθηκαν σε προηγούμενη ενότητα.
- **Shf2pln.exe.** Πρόγραμμα Visual Fortran που μετατρέπει το 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 κι ελέγχει αν έχει επιτευχθεί σύγκλιση των τιμών παράλληλης βύθισης και διαγωγής. Η επανάληψη αφορά τα εκτελέσιμα αρχεία makessg.exe, setup.exe και solve.exe που διαμορφώνουν τα αρχεία του SWAN 2 κι επιλύουν το υδροδυναμικό πρόβλημα.
- **Sections_frank.exe.** Πρόγραμμα Visual Fortran που διαμορφώνει το αρχείο που περιέχει τα σημεία περιγραφής των νομέων προς χρήση από το SPP-86, σε ένα αρχείο SHF.
- **Shf2frk.exe.** Πρόγραμμα Visual Fortran που μετατρέπει το παραχθέν αρχείο SHF σε αρχείο εισόδου για το SPP-86. Το αρχείο εισόδου περιλαμβάνει μεταξύ άλλων την περιγραφή της γεωμετρίας, μερικά από τα υδροστατικά στοιχεία και τα δεδομένα που αφορούν τους υπολογισμούς όπως οι συχνότητες των αρμονικών κυματισμών και τη γωνία συνάντησης
- **Results.exe.** Πρόγραμμα Fortran 77 που αποθηκεύει τα αποτελέσματα των υδροδυναμικών υπολογισμών σε αρχείο που τροφοδοτείται στο CAESES – Friendship Framework προς αξιολόγηση των αντικειμενικών συναρτήσεων. Στα αποτελέσματα περιλαμβάνονται οι τιμές της μέγιστης επιτάχυνσης στην πλήρη και της αντίστασης κυματισμού για τις δυο καταστάσεις φόρτωσης (11.44 m και 9.65 m).

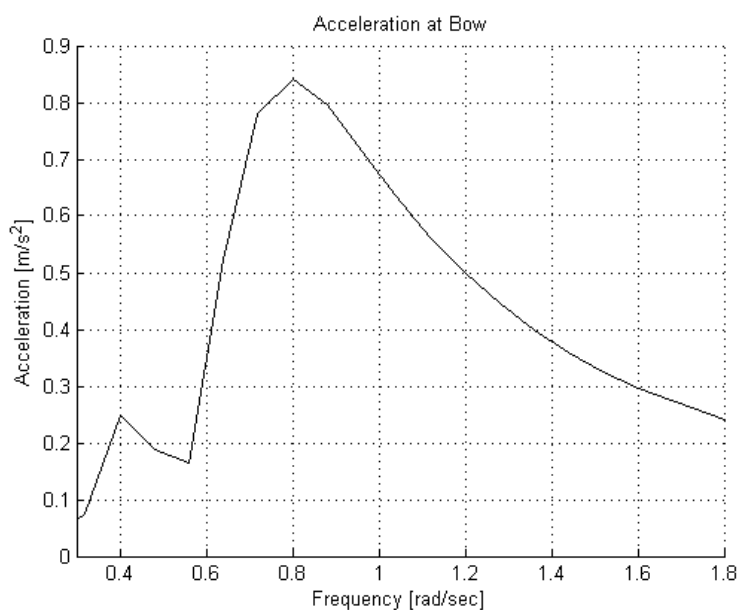
Κεφάλαιο 5. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

5.1 Αποτελέσματα πατρικής γάστρας

Αρχικά θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που παρήχθησαν για την πατρική γάστρα όπως αυτή δημιουργήθηκε από το 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 προηγούμενο κεφάλαιο καθώς επίσης 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 11.44m και μία για το βύθισμα των 9.65m, τα αποτελέσματα των οποίων συνδυάζονται για να πάρουμε το τελικό αποτέλεσμα. Συγκεκριμένα τα αποτελέσματα για την πατρική γάστρα είναι τα ακόλουθα

T [m]	V [knots]	Αντίσταση κυματισμού [kN]	Επιτάχυνση στην πλώρη [m/s ²]	Αντικειμενική συνάρτηση αντίστασης	Αντικειμενική συνάρτηση επιτάχυνσης
11.44	16	152.35	0.8417	181.81	0.7991
9.651	14	211.26	0.7565		

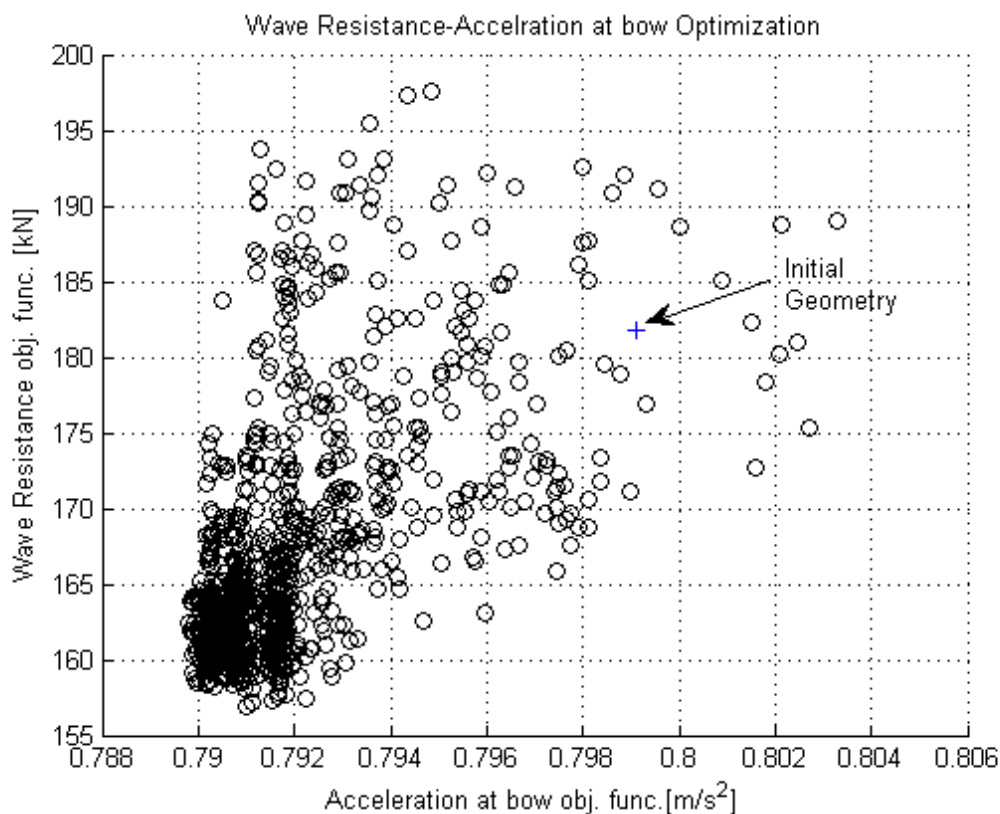


Σχήμα 30. Καμπύλη RAO επιτάχυνσης στην πλώρη πατρικής γάστρας – T=11.44m

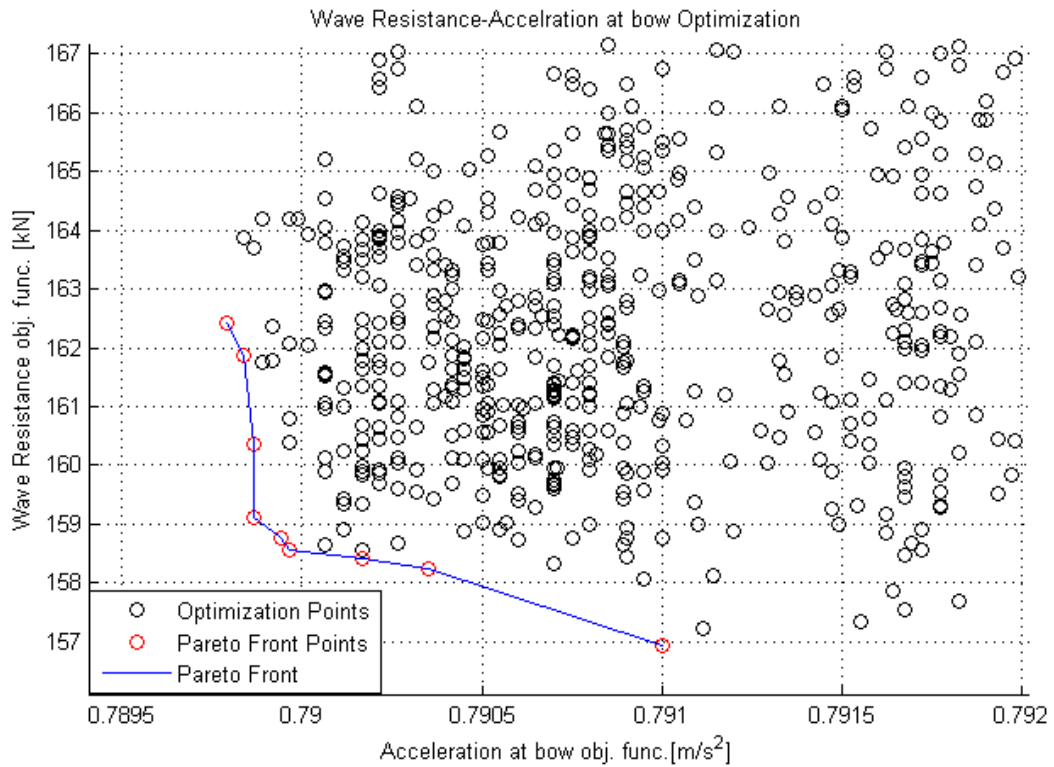
5.2 Αποτελέσματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης

Η βελτιστοποίηση αυτή αποτελεί το βασικό στόχο της παρούσα εργασίας. Πραγματοποιήθηκε με αντικειμενικές συναρτήσεις την αντίσταση κυματισμού σε ήρεμο νερό και την κατακόρυφη επιτάχυνση σε απλούς αρμονικούς κυματισμούς για δύο καταστάσεις φόρτωσης ($T=11\text{ m}$ και $T_a=9.65\text{ m}$), με συντελεστή βαρύτητας 50%. Κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης παρήχθησαν 1008 διαφορετικές γεωμετρίες.

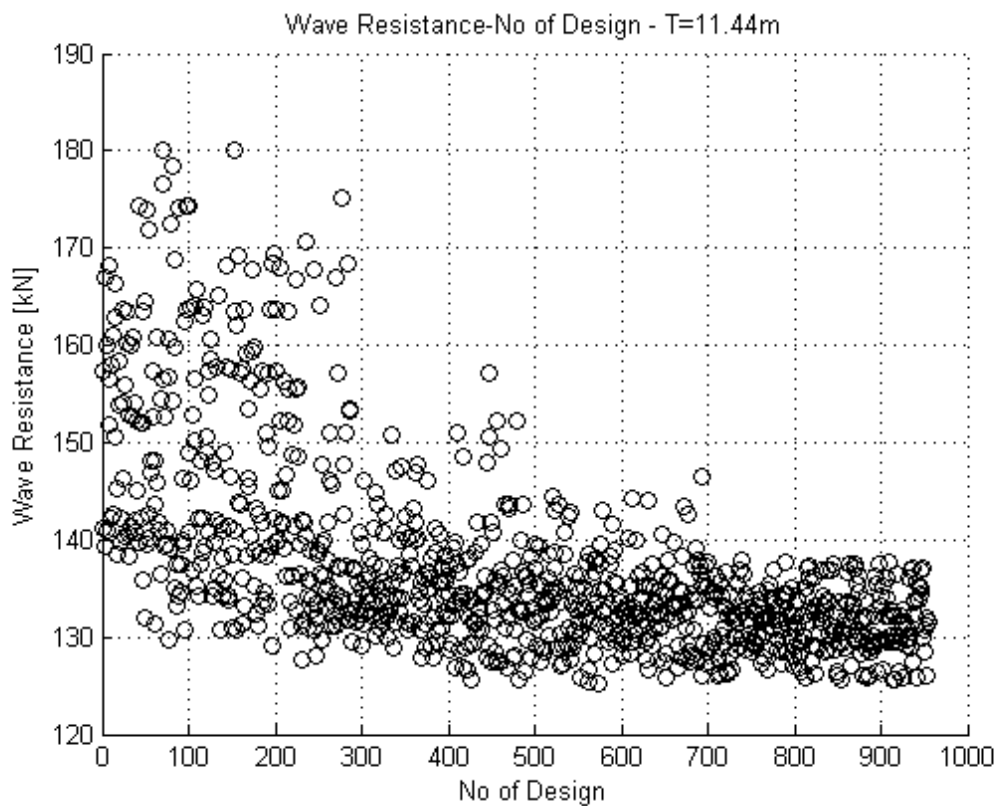
Στα σχήματα 31-42 παρουσιάζονται τα προκύπτοντα διαγράμματα διασποράς του συνόλου των λύσεων-εμφανίζονται μόνο οι αποδεκτές γεωμετρίες, οι οποίες για τη συγκεκριμένη περίπτωση ήταν 955/1008. Αρχικά παρουσιάζεται η διασπορά λύσεων συναρτήσει των αντικειμενικών συναρτήσεων, καθώς και των επιμέρους συνιστωσών τους και κατόπιν η διακύμανση ορισμένων μεταβλητών και περιορισμών σχεδίασης, από τα οποία θα εξαχθούν συμπεράσματα για την ποιότητα της διαδικασίας.



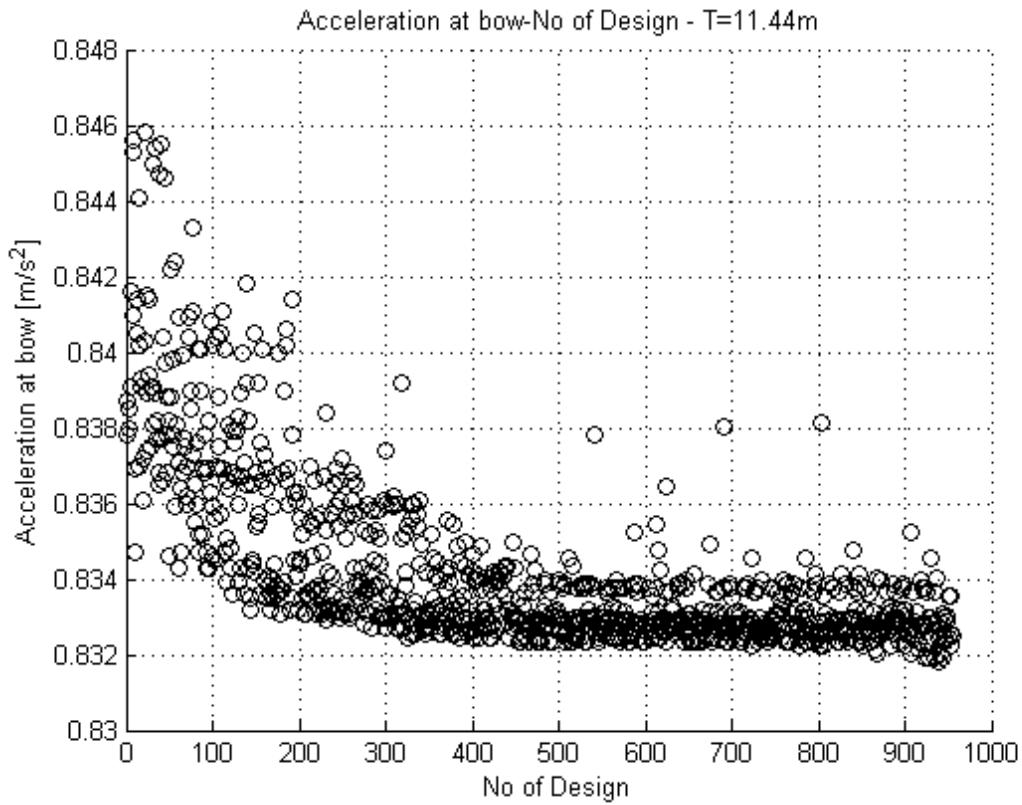
Σχήμα 31. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με κριτήρια την αντίσταση κυματισμού και την μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη



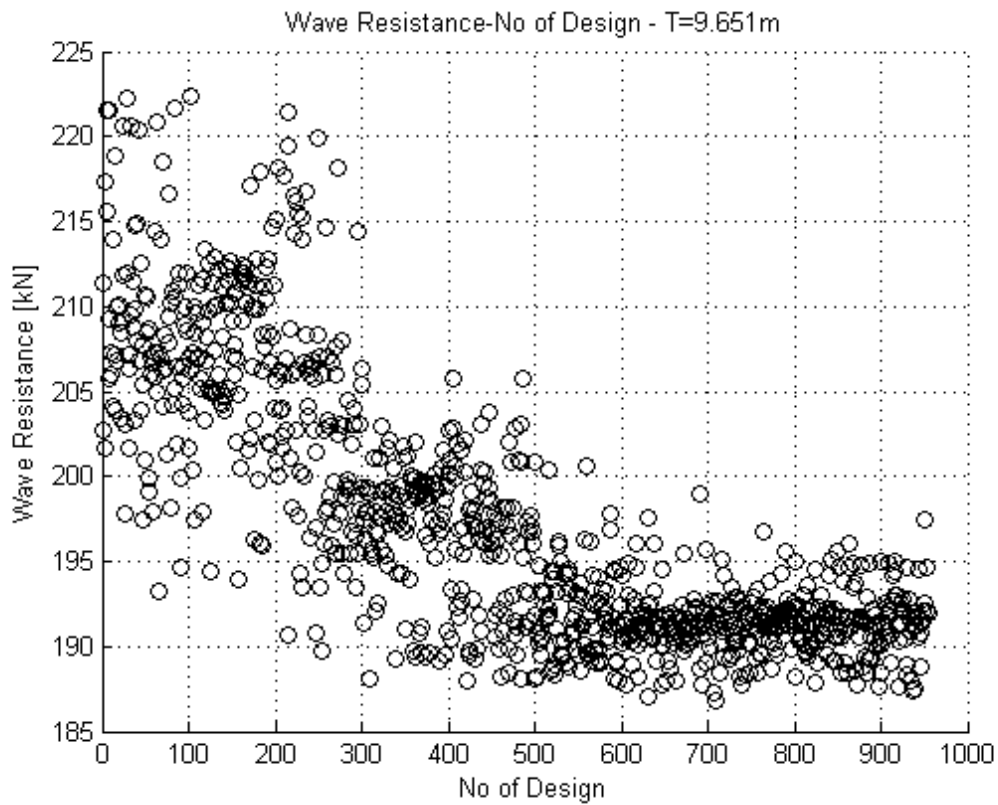
Σχήμα 32. Λεπτομέρεια Σχήματος 29-Περιοχή βέλτιστων λύσεων



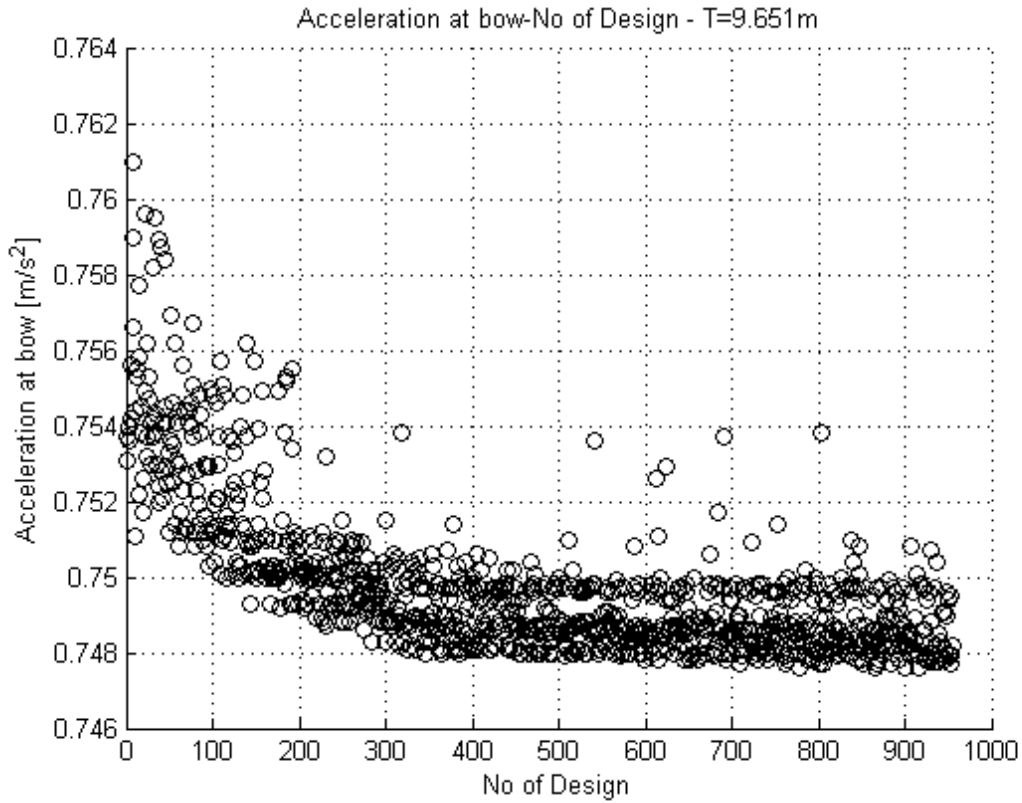
Σχήμα 33. Διασπορά λύσεων-Αντίσταση κυματισμού- T=11.44m



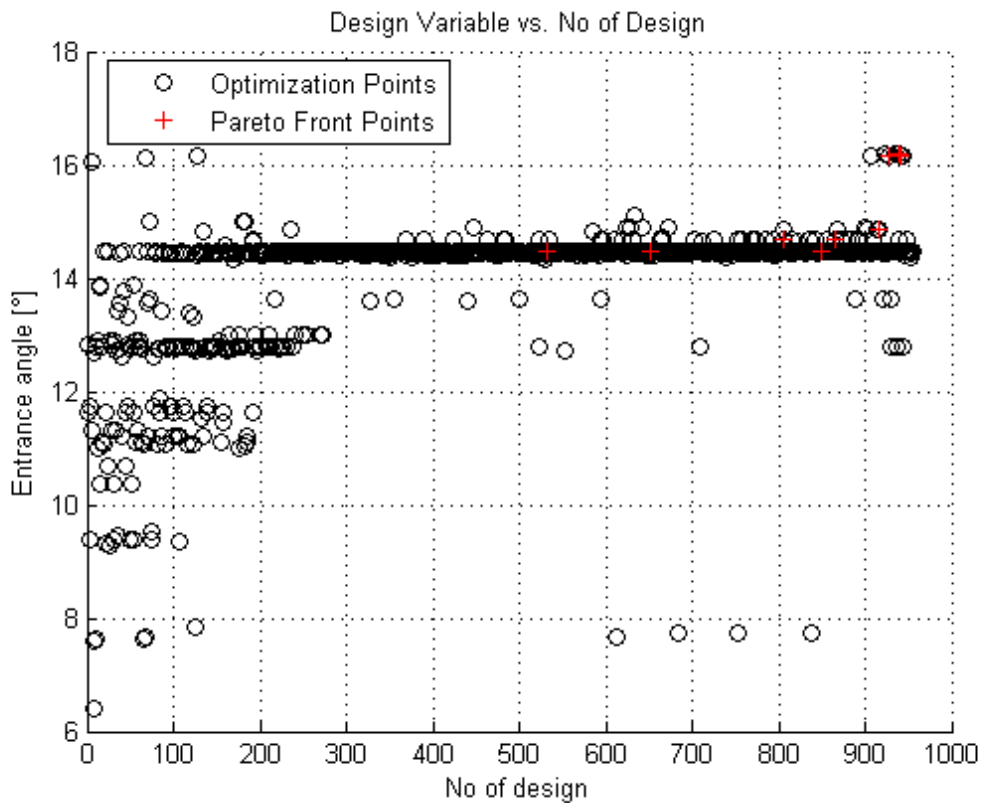
Σχήμα 34. Διασπορά λύσεων-Επιτάχυνση στην πλώρη- T=11.44m



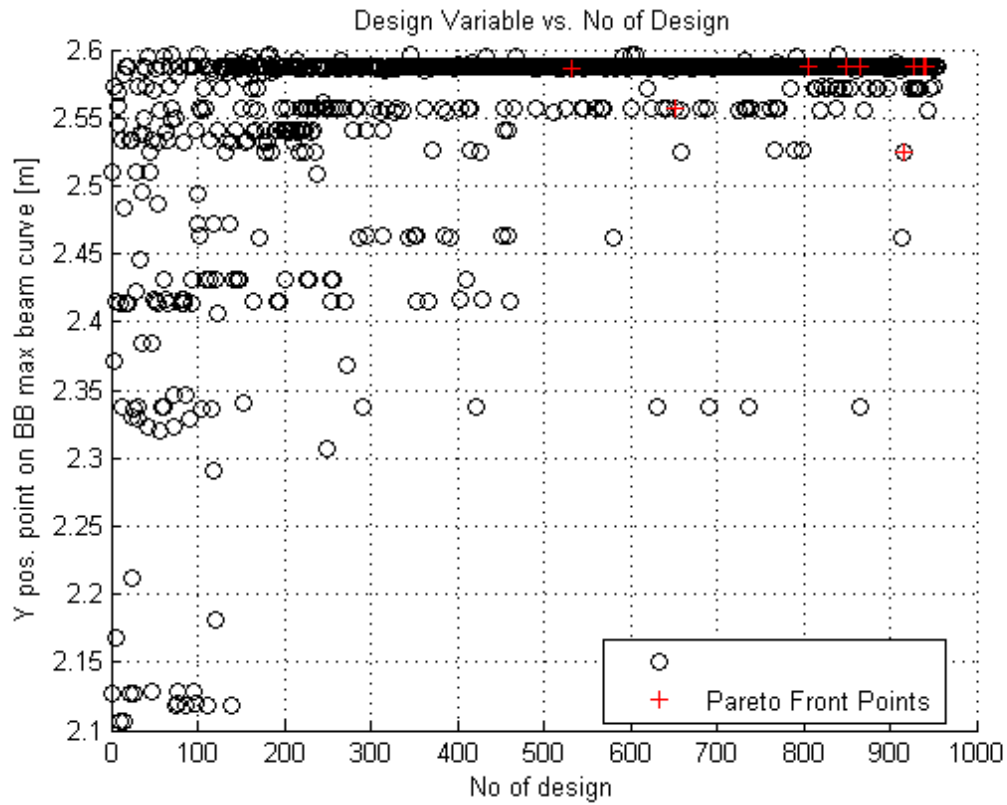
Σχήμα 35. Διασπορά λύσεων-Αντίσταση κυματισμού- T=9.65m



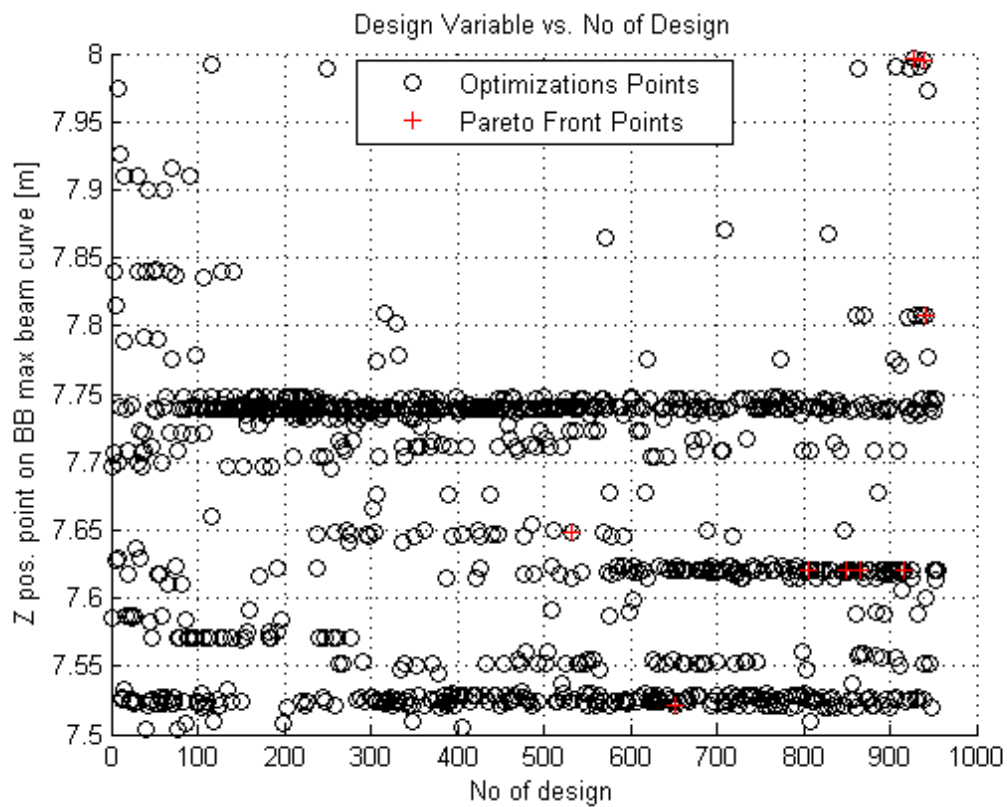
Σχήμα 36. Διασπορά λύσεων-Επιτάχυνση στην πλώρη- T=9.65m



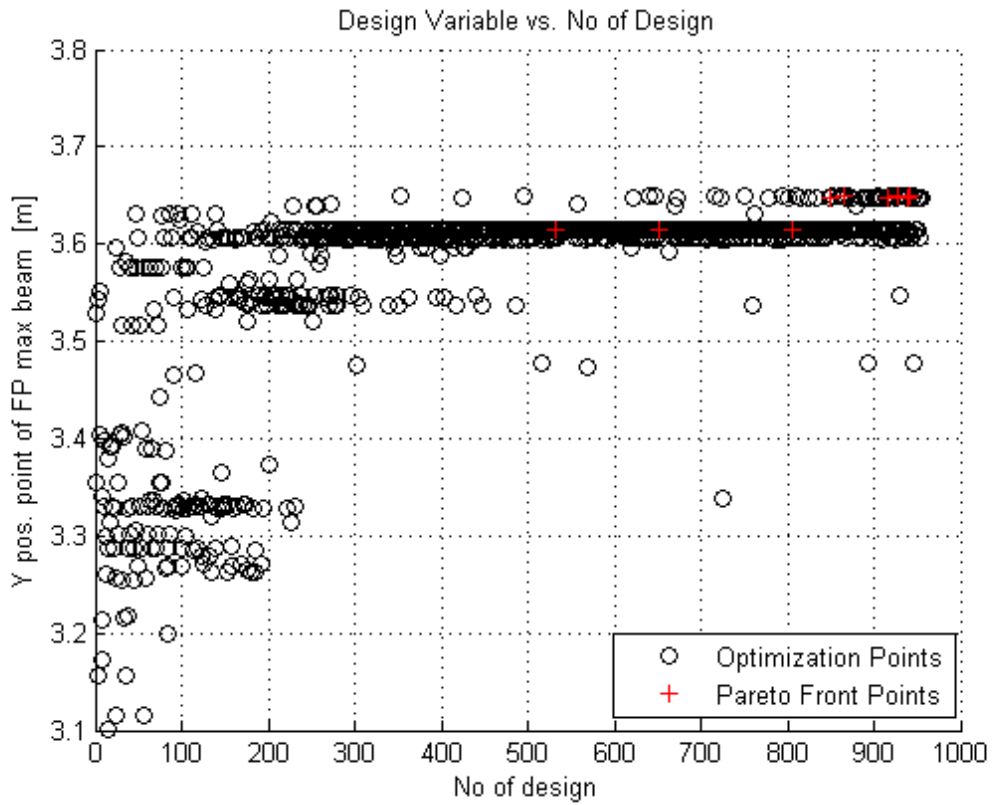
Σχήμα 37. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Γωνία εισόδου ισάλου



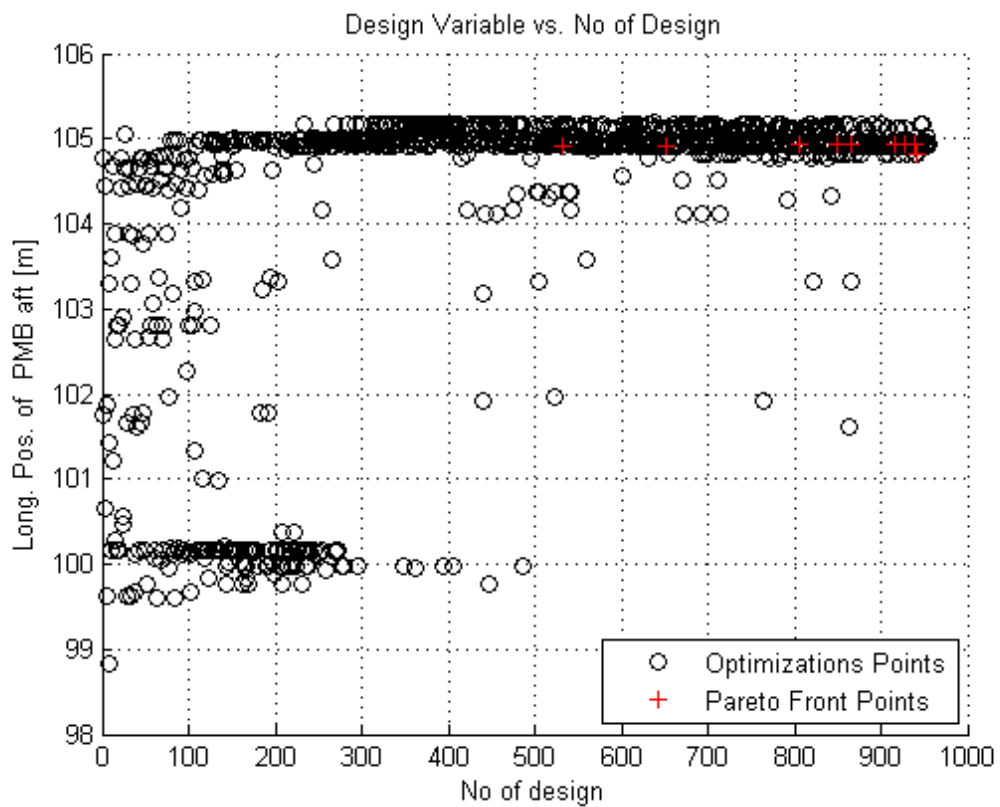
Σχήμα 38. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Σημείο επί της καμπύλης μεγίστου πλάτους βολβού (μεταβολή κατά y)



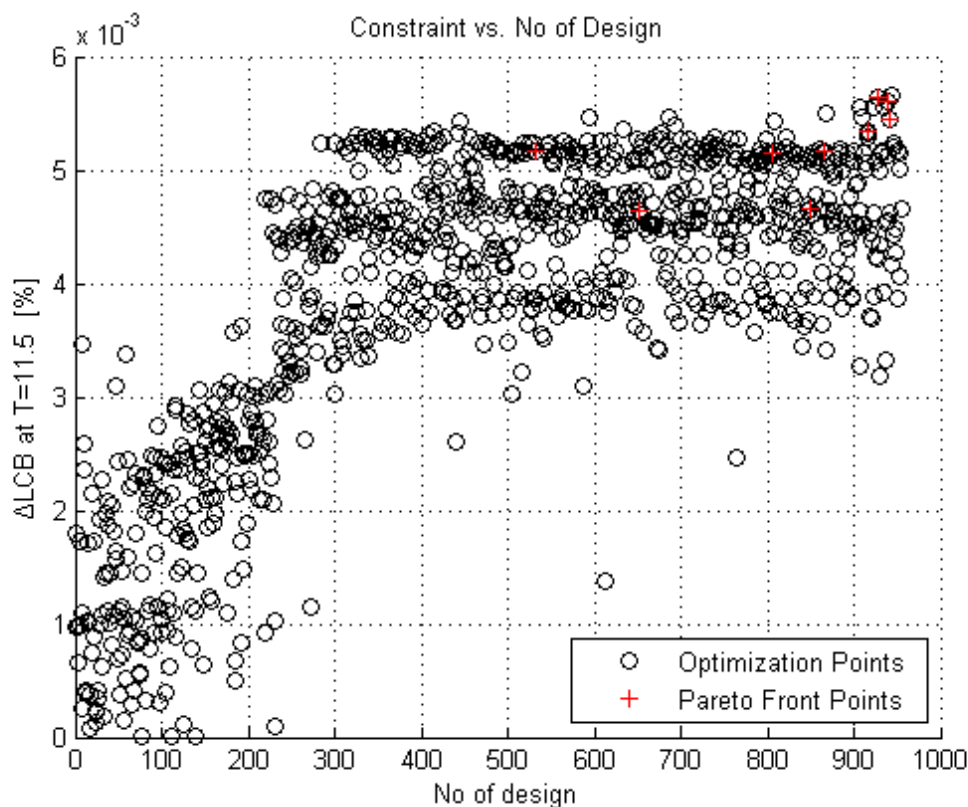
Σχήμα 39. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Σημείο επί της καμπύλης μεγίστου πλάτους βολβού (μεταβολή κατά z)



Σχήμα 40. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Σημείο μεγίστου πλάτους νομέα πρωραίας καθέτου (μεταβολή κατά y)



Σχήμα 41. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Διαμήκης θέση αρχής παράλληλου τμήματος



Σχήμα 42. Διακύμανση περιορισμού σχεδίασης-% Μεταβολή LCB

Η ερμηνεία των διαγραμμάτων των παραπάνω σχημάτων θα ξεκινήσει από αυτό που έχει άξονες τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις. Στο Σχήμα 31 λοιπόν έχουμε μια εξαιρετική διασπορά λύσεων που συνάδει απόλυτα με την αναμενόμενη μιας βελτιστοποίησης με γνώμονα δύο κριτήρια. Στο Σχήμα 32 φαίνεται μια συνεχής και ομαλή καμπύλη βέλτιστων (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 33-36 παρουσιάζεται η κατανομή των λύσεων των επιμέρους συνιστωσών των αντικειμενικών συναρτήσεων. Για την αντίσταση κυματισμού, στο βύθισμα των 11.44 m η μέση τιμή είναι 137.55 kN ενώ η τυπική απόκλιση είναι 10.19 kN με ελάχιστη τιμή αντίστασης τα 125.3 kN. Για T=9.65 m η μέση τιμή είναι 197.25 kN, η τυπική απόκλιση 7.85 kN και η ελάχιστη τιμή αντίστασης 186.85 kN. Παρόλο που η τυπική απόκλιση στο βύθισμα των 9.65 m είναι μικρότερη η ταχύτητα σύγκλισης είναι μεγαλύτερη όπως προκύπτει από την σύγκριση των σχημάτων 31,33. Ακόμα όμως και στην περίπτωση των 9.65 m ο αριθμός των γεωμετριών είναι ικανός ώστε να αποφανθούμε πως η σύγκλιση είναι ικανοποιητική

Παρόμοια συμπεράσματα ισχύουν για τα σχήματα 34,36. Για το βύθισμα T=11.44m η μέση τιμή είναι 0.8342 m/s^2 , η τυπική απόκλιση 0.0023 m/s^2 ενώ η ελάχιστη τιμή είναι 0.8318 m/s^2 . Για το βύθισμα των 9.65 m η μέση τιμή είναι 0.7498 m/s^2 , η τυπική απόκλιση 0.002 m/s^2 ενώ η ελάχιστη τιμή είναι 0.7476 m/s^2 . Παρατηρούμε πως και στις δύο περιπτώσεις η

ταχύτητα σύγκλισης είναι σχεδόν ίδια. Σε σύγκριση με τα σχήματα της αντίστασης κυματισμού η μεταβολή της επιτάχυνσης είναι εμφανώς μικρότερη

Στα υπόλοιπα σχήματα (37-42) παρουσιάζεται η συμπεριφορά των μεταβλητών σχεδίασης καθώς και ενός περιορισμού (ΔLCB). Γενικά η πλειοψηφία των μεταβλητών ακολουθεί την ίδια συγκλίνουσα πορεία, όπως και οι τιμές των γεωμετριών του μετώπου Pareto. Αν και ελάχιστες εξ' αυτών (βλ. Σχήμα 39) δεν συγκλίνουν φαίνεται πως αυτό δεν επηρεάζει το τελικό αποτέλεσμα. Αυτό μπορεί να οφείλεται στο γεγονός ότι αυτοί παράμετροι να μην έχουν μεγάλη επίδραση στα μελετώμενα μεγέθη για τη συγκεκριμένη περίπτωση.

Η γεωμετρία που θα επιλεγεί γι' αυτή την περίπτωση βελτιστοποίησης θα ανήκει στη συννοριακή καμπύλη βέλτιστων του σχήματος 32. Στον πίνακα 8 φαίνεται ένα σύνολο εναλλακτικών μορφών γάστρας που ανήκουν σε αυτό το σύνολο και αποτελούν ισοδύναμα αποδοτικές λύσεις.

Πίνακας 8.Επιλεγείσες γεωμετρίες από το μέτωπο Pareto αντικειμενικών συναρτήσεων

α/α	Ποσοστιαία μεταβολή μεγεθών ως προς την πατρική γάστρα					
	T=9.651 m		T=11.44m		Αντικειμενική συνάρτηση κυματισμού	Αντικειμενική συνάρτηση επιτάχυνσης
	Επιτάχυνση στην πλώρη	Αντίσταση κυματισμού	Επιτάχυνση στην πλώρη	Αντίσταση κυματισμού		
940	-0.0116	-0.0948	-0.0117	-0.1231	-0.1067	-0.0117
924	-0.0116	-0.0905	-0.0116	-0.1362	-0.1097	-0.0116
915	-0.0118	-0.0770	-0.0114	-0.1749	-0.1180	-0.0116
866	-0.0118	-0.0950	-0.0114	-0.1664	-0.1249	-0.0116
942	-0.0114	-0.0926	-0.0115	-0.1739	-0.1267	-0.0115
805	-0.0116	-0.0992	-0.0112	-0.1677	-0.1279	-0.0114
833	-0.0112	-0.1030	-0.0111	-0.1644	-0.1287	-0.0112
850	-0.0110	-0.0983	-0.0109	-0.1732	-0.1296	-0.0109
652	-0.0100	-0.1103	-0.0102	-0.1736	-0.1368	-0.0101

Από τα στοιχεία του πίνακα 8 μπορούμε πλέον να αποφανθούμε για τα δεδομένα που αφορούν κάθε γεωμετρία μεμονωμένα. Αρχικά 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 (περίπου 1%), αυτό δεν ισχύει στην περίπτωση της αντίστασης κυματισμού. Εκεί έχουμε μια ικανοποιητική μείωση (περίπου 17%) στο βύθισμα των 11.44 m ,ενώ η αντίστοιχη μείωση για τα 9.65m είναι περίπου 10%. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε δύο λόγους: αρχικά ,στα 9.65 m ο βολβός είναι αβύθιστος, οπότε δεν λειτουργεί πλήρως αποδοτικά και επομένως μια βελτιστοποίηση του δεν είναι πλήρως αποδοτική γι αυτό το βύθισμα. Δεύτερον οι μεταβλητές σχεδίασης εκτός του βολβού αναφέρονταν κυρίως στην ίσαλο σχεδίασης στα 11.5m. Οπότε μια μεταβολή τους πιθανώς να έχει μεγαλύτερο αντίκτυπο στα βυθίσματα εκείνης της περιοχής.

Όσον αφορά τις ποσοστιαίες μεταβολές στα δύο μεγέθη συγκριτικά, παρατηρούμε ότι είναι δυσανάλογες (μια τάξη μεγέθους διαφορά). 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 υπολογίσουμε προσεγγιστικά την συνολική αντίσταση χρησιμοποιήθηκαν οι μέθοδοι Holtrop και Hollenbach, όπου υπολογίστηκε μία μέση τιμή της συνολικής αντίστασης 883 Kn. Στην περίπτωση των 11.44m βυθίσματος η ελάχιστη επιτευχθείσα τιμή αντίστασης κυματισμού είναι 125.3 kN. Η διαφορά από την αντίσταση κυματισμού της πατρικής γάστρας είναι 27.05 kN. Επομένως η ποσοστιαία μεταβολή ως προς την αρχική ολική αντίσταση είναι περίπου 3%, 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 καθώς επίσης η συνολική αντίσταση δεν είναι γνωστή παρά μόνο προσεγγιστικά.

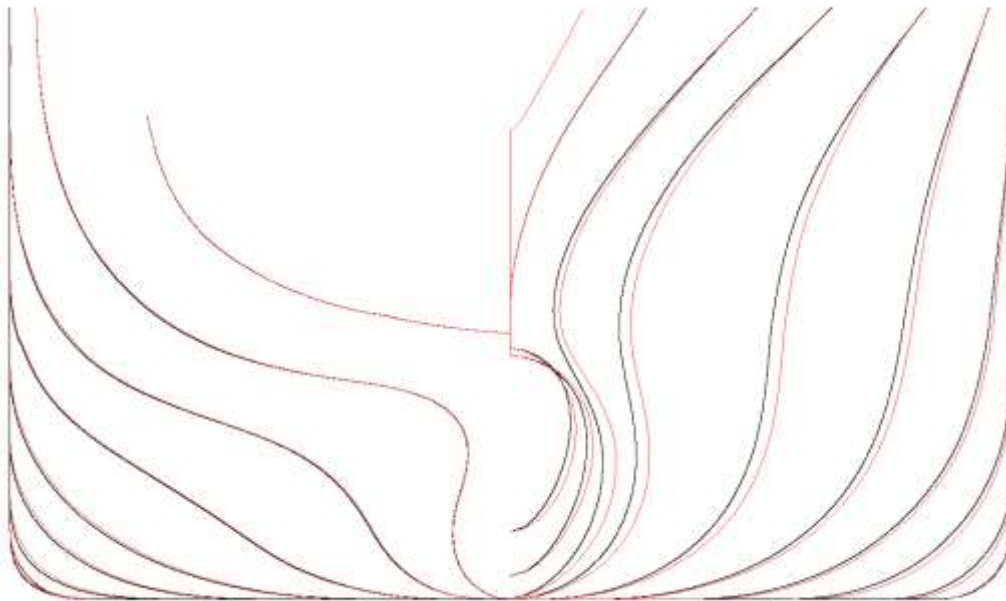
Μια πρόσθετη παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι πως όλες οι γεωμετρίες αποτελούν μέλη προχωρημένων γενεών. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την αποτελεσματικότητα της εξελικτικής διαδικασίας του αλγορίθμου ανεξάρτητα από τον βαθμό επιτυχίας επιλογής αντικειμενικών συναρτήσεων ο οποίος και σχετίζεται με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

Η μορφή γάστρας που θα επιλεγεί ως βέλτιστη αυτής της διαδικασίας είναι αυτή με αύξοντα αριθμό 942. Η γεωμετρία αυτή έχει διαφορά εκτοπίσματος και διαμήκους θέσης του κέντρου άντωσης +0.51% και +0.47% αντίστοιχα, σε σχέση με την πατρική σε βύθισμα 11.44m.

Στον πίνακα 9 έχουμε τις τιμές των μεταβλητών σχεδίασης της αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας. Στο Σχήμα 43 φαίνονται οι νομείς αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας, ενώ στο Σχήμα 44 φαίνεται η βελτίωση στην καμπύλη RAO της επιτάχυνσης.

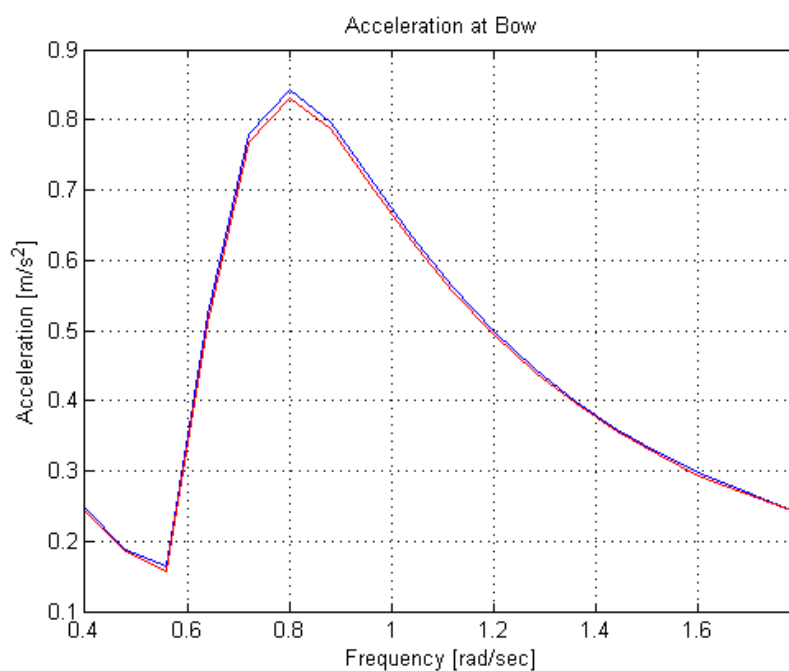
Πίνακας 9. Τιμές μεταβλητών σχεδίασης αρχική και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας

Μεταβλητή Σχεδίασης	Αρχική γεωμετρία	Βελτιστοποιημένη Γεωμετρία
2third_max_beam_Y (m):	2.336	2.587
2third_max_beam_Z (m):	7.841	7.621
BB_tip_max_beam_Z (m) :	8.00	8.284
FP_max_beam_y (m):	3.345	3.614
FP_max_beam_Z (m):	6.684	6.620
low_area_fullness :	0.7385	0.731
upper_area_fullnes:	0.7385	0.740
on_wl_point_y (m):	11.399	11.799
wl_115_fos_aft (m):	0	0.365
wl_115_fos_fore (m):	0	-0.789
wl_angle_entrance:	12	14.482
xpos_pnb_fore (m):	183.26	186.166
xpos_pnb_aft (m):	102.08	104.912
z_pos_stern (m):	11.577	11.731



Σχήμα 43. Νομείς αρχικής (μαύρες καμπύλες) και βελτιστοποιημένης (κόκκινες καμπύλες) γεωμετρίας

Από τους νομείς των δύο γεωμετριών παρατηρούμε την εμφανή διαφοροποίηση τόσο στην περιοχή του βολβού όσο της πλώρης. Μεταβολές παρατηρούνται επίσης στις περιοχές κοντά στο παράλληλο τμήμα, ενώ οι μικρότερες μεταβολές παρατηρούνται στην πρύμνη (μία μόνο μεταβλητή σχεδίασης). Το παραπάνω σχήμα δείχνει πως εκτός από την έντονη μεταβολή του βολβού (7 μεταβλητές σχεδίασης) έχουμε μια συνολική μεταβολή της γεωμετρίας κατά το μήκος του πλοίου.

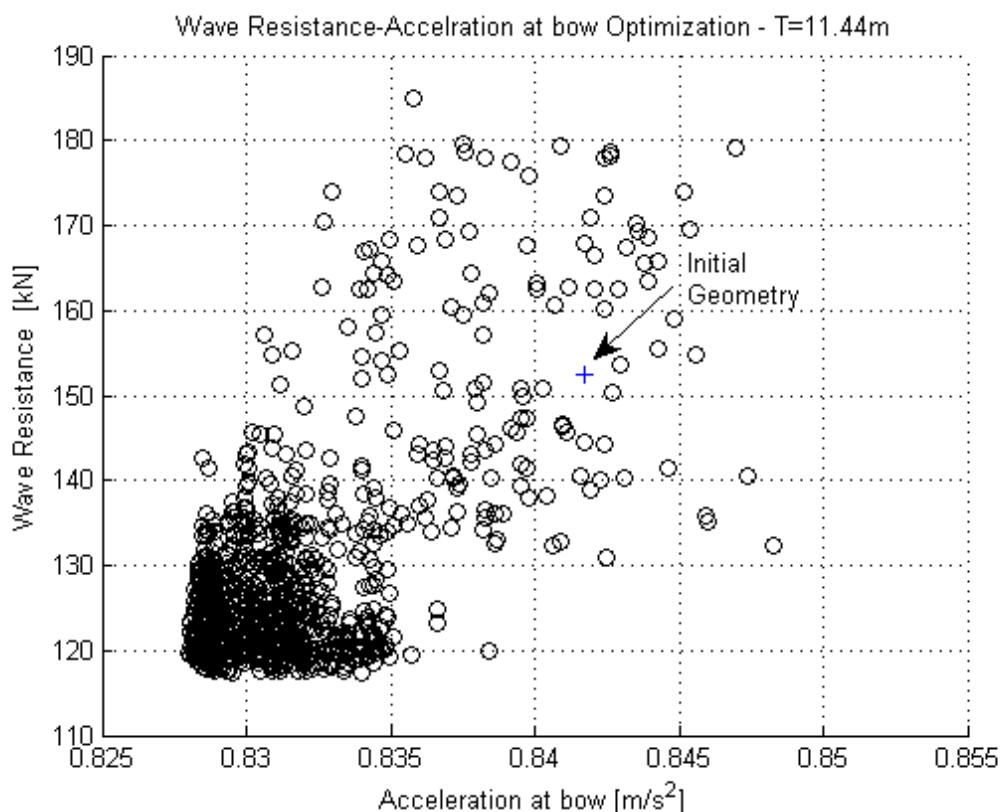


Σχήμα 44. Καμπύλη Rao επιτάχυνσης πατρικής (μπλε) και βελτιστοποιημένης (κόκκινη) γάστρας – $T=11.44m$

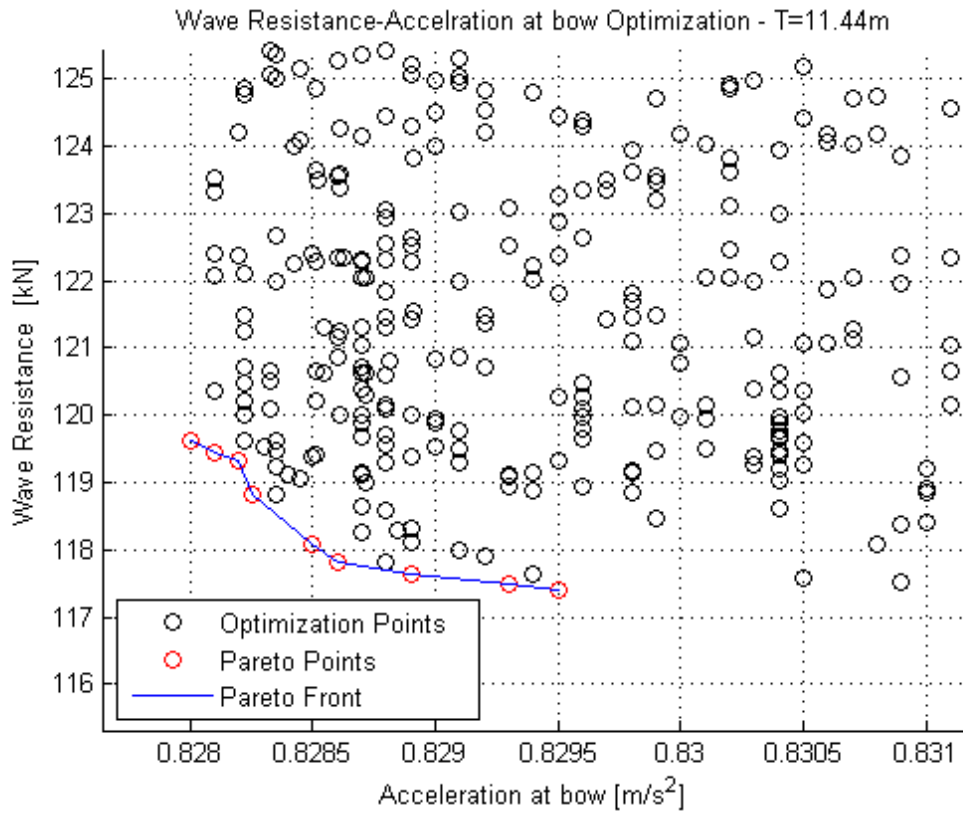
5.3 Αποτελέσματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης στο βύθισμα σχεδίασης

Η βελτιστοποίηση της παρούσας παραγράφου πραγματοποιήθηκε για να αναδειχθούν τυχόν διαφορές με αυτήν της § 5.2. Πραγματοποιήθηκε με αντικειμενικές συναρτήσεις την αντίσταση κυματισμού σε ήρεμο νερό και την κατακόρυφη επιτάχυνση σε απλούς αρμονικούς κυματισμούς για μία κατάσταση φόρτωσης ($T=11.44\text{m}$). Κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης παρήχθησαν 1008 διαφορετικές γεωμετρίες.

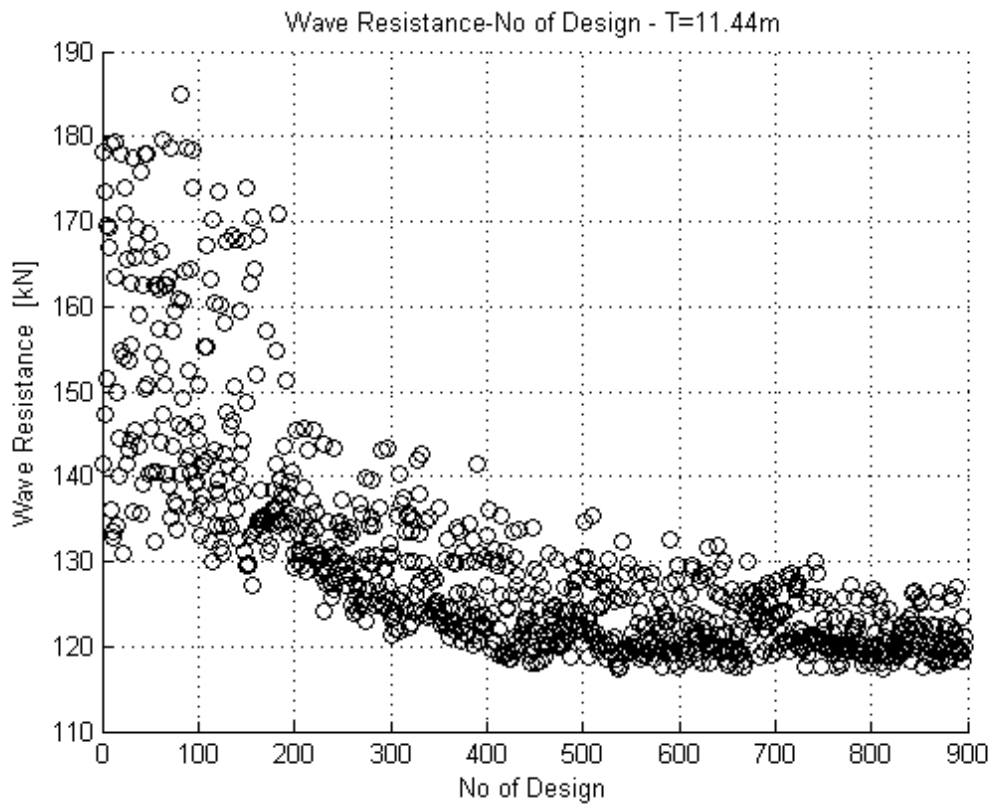
Στα σχήματα 45-56 παρουσιάζονται τα προκύπτοντα διαγράμματα διασποράς των αποδεκτών λύσεων, όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση ήταν 897/1008. Αρχικά παρουσιάζεται η διασπορά λύσεων συναρτήσεως των αντικειμενικών συναρτήσεων, καθώς και των επιμέρους συνιστωσών τους και κατόπιν η διακύμανση ορισμένων μεταβλητών και περιορισμών σχεδίασης. Τα Σχήματα αυτά είναι όμοια με αυτά της § 5.2, ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση μεταξύ τους.



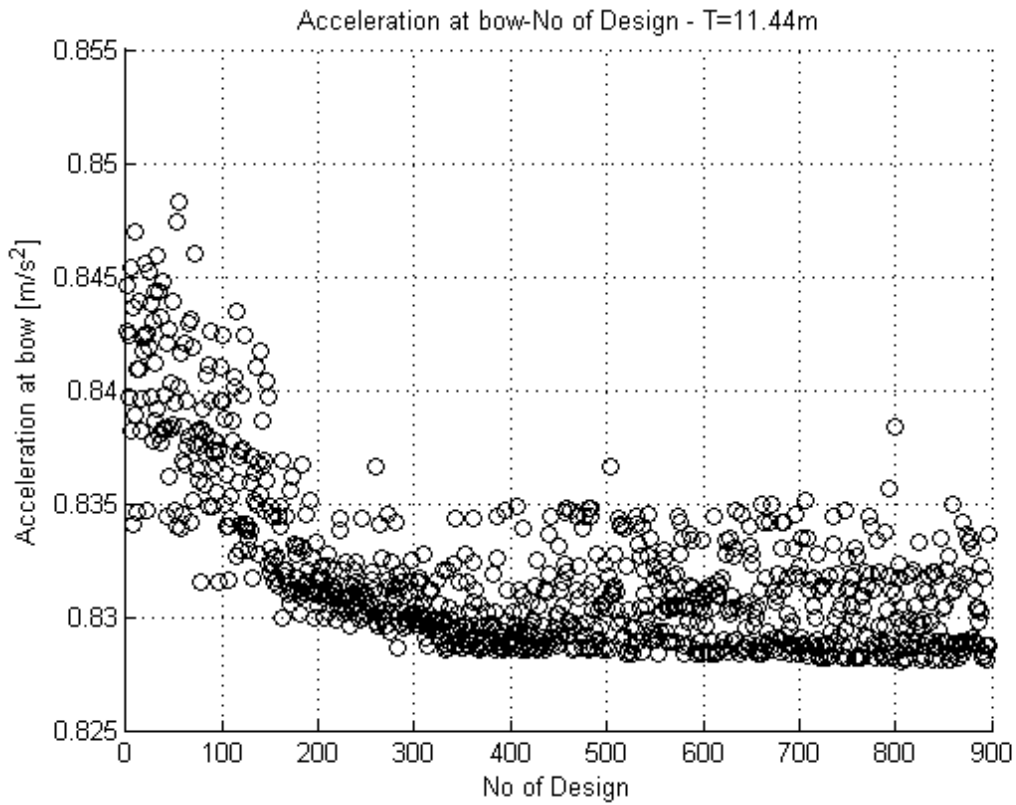
Σχήμα 45. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης στο βύθισμα σχεδίασης με κριτήρια την αντίσταση κυματισμού και την μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη



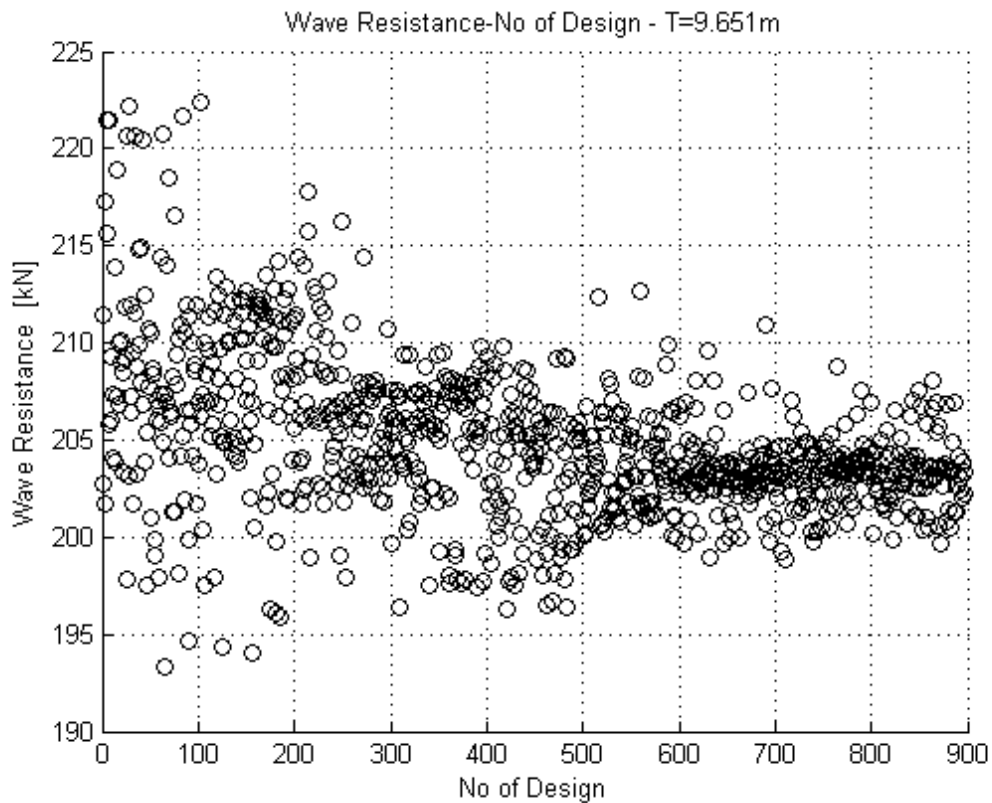
Σχήμα 46. Λεπτομέρεια Σχήματος 42 – Περιοχή βέλτιστων λύσεων



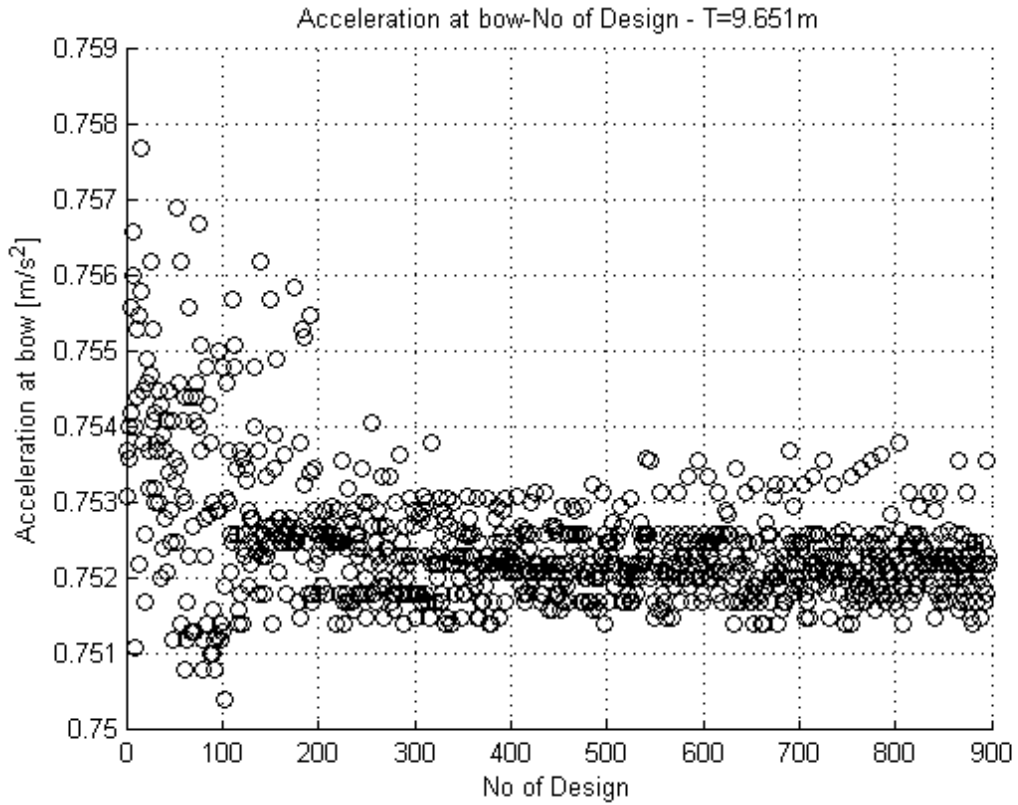
Σχήμα 47. Διασπορά λύσεων-Αντίσταση κυματισμού- T=11.44m



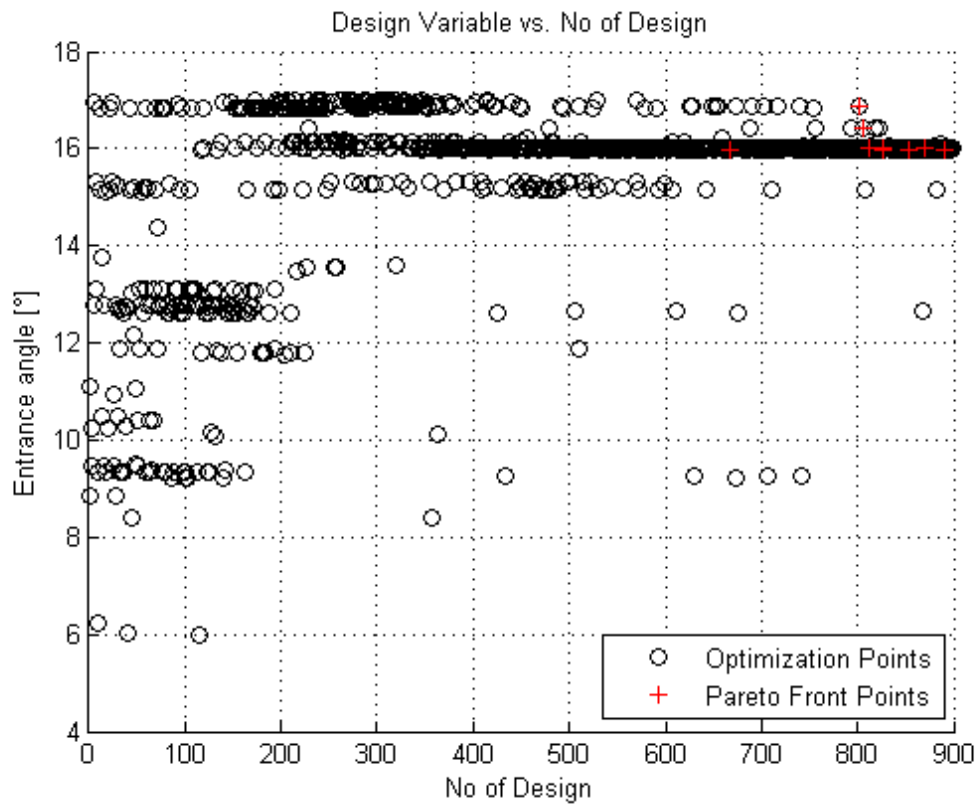
Σχήμα 48. Διασπορά λύσεων-Επιτάχυνση στην πλώρη- T=11.44m



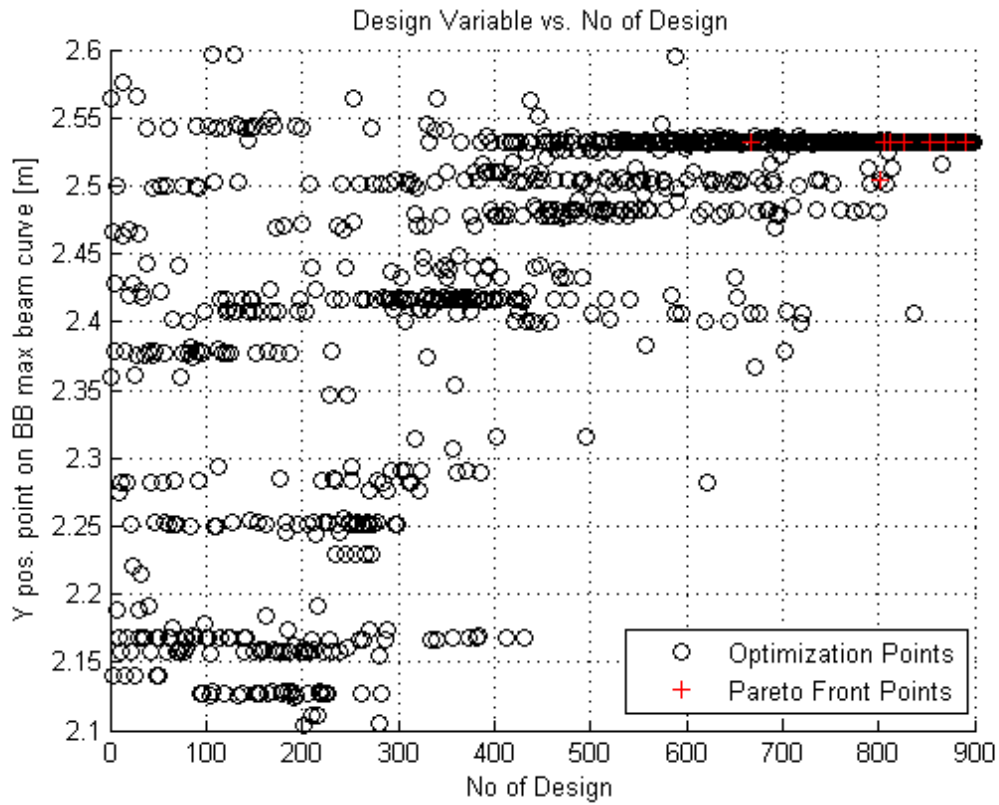
Σχήμα 49. Διασπορά λύσεων-Αντίσταση κυματισμού- T=9.65m



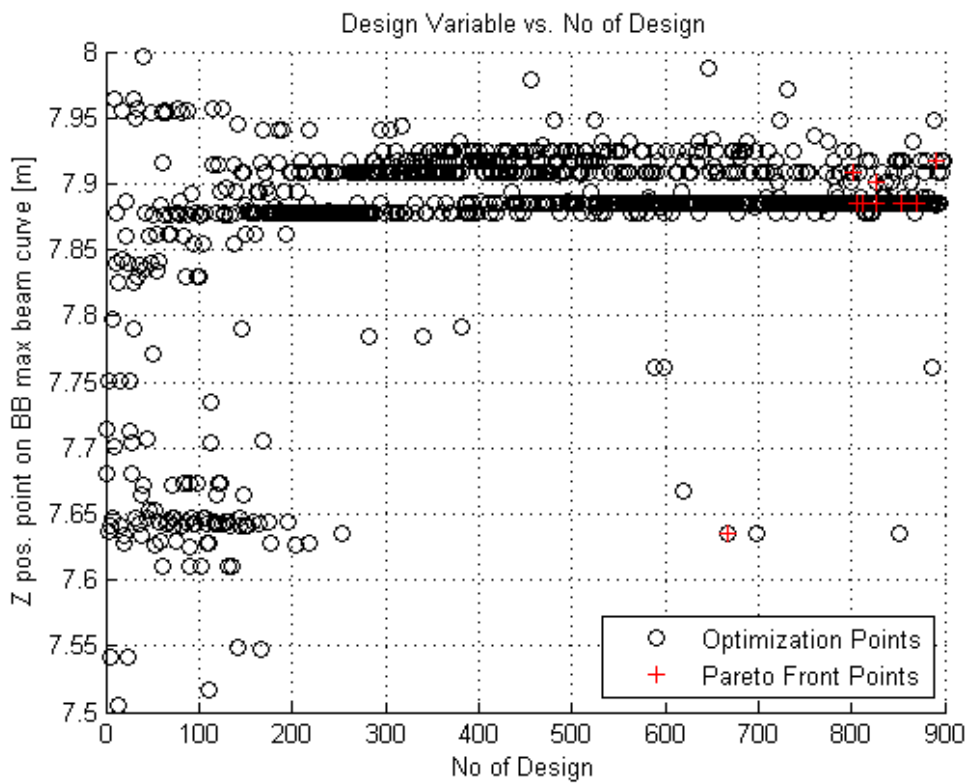
Σχήμα 50. Διασπορά λύσεων-Επιτάχυνση στην πλώρη- T=9.65m



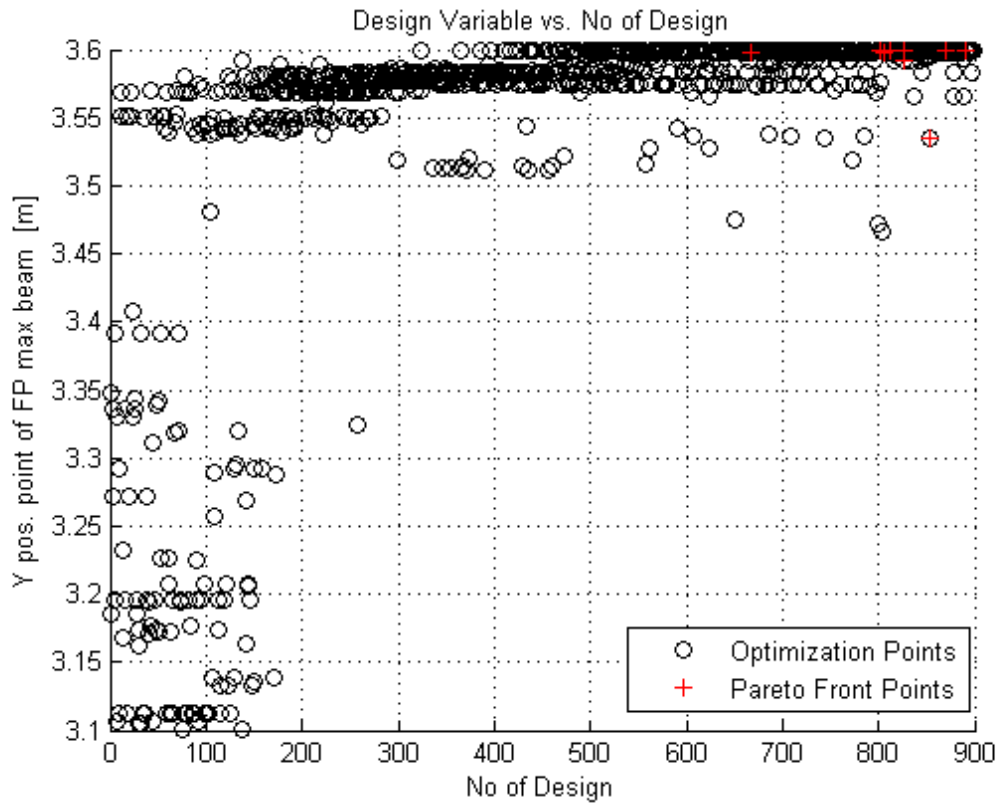
Σχήμα 51. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Γωνία εισόδου ισάλου



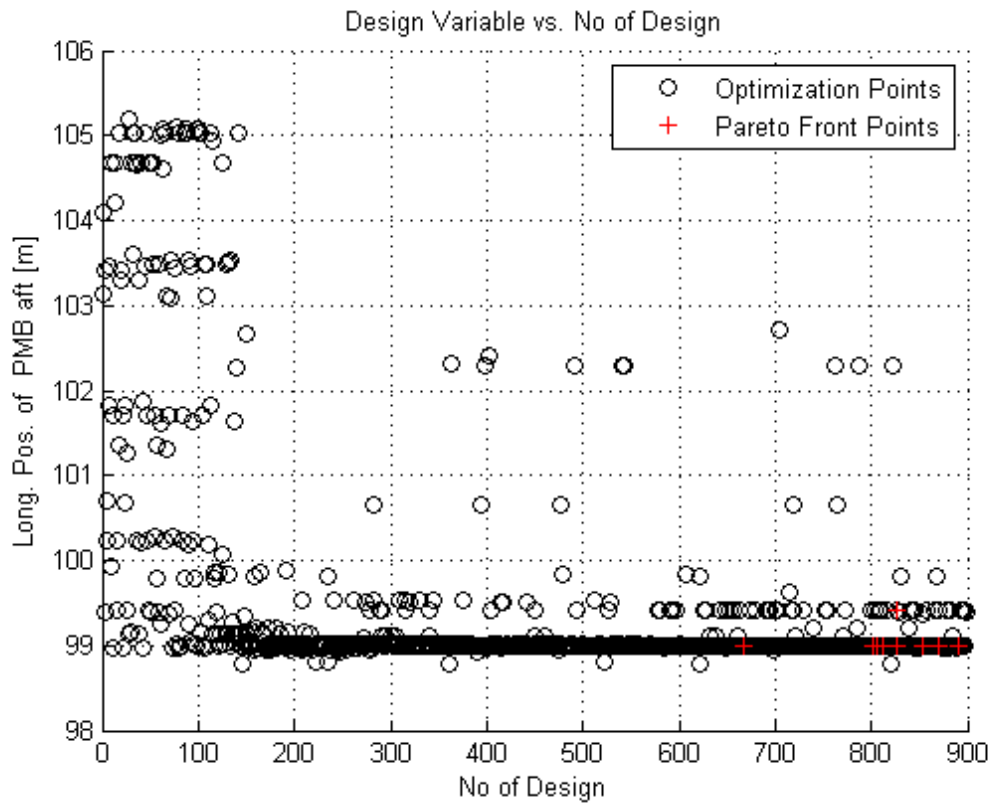
Σχήμα 52. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Σημείο επί της καμπύλης μεγίστου πλάτους βολβού (μεταβολή κατά y)



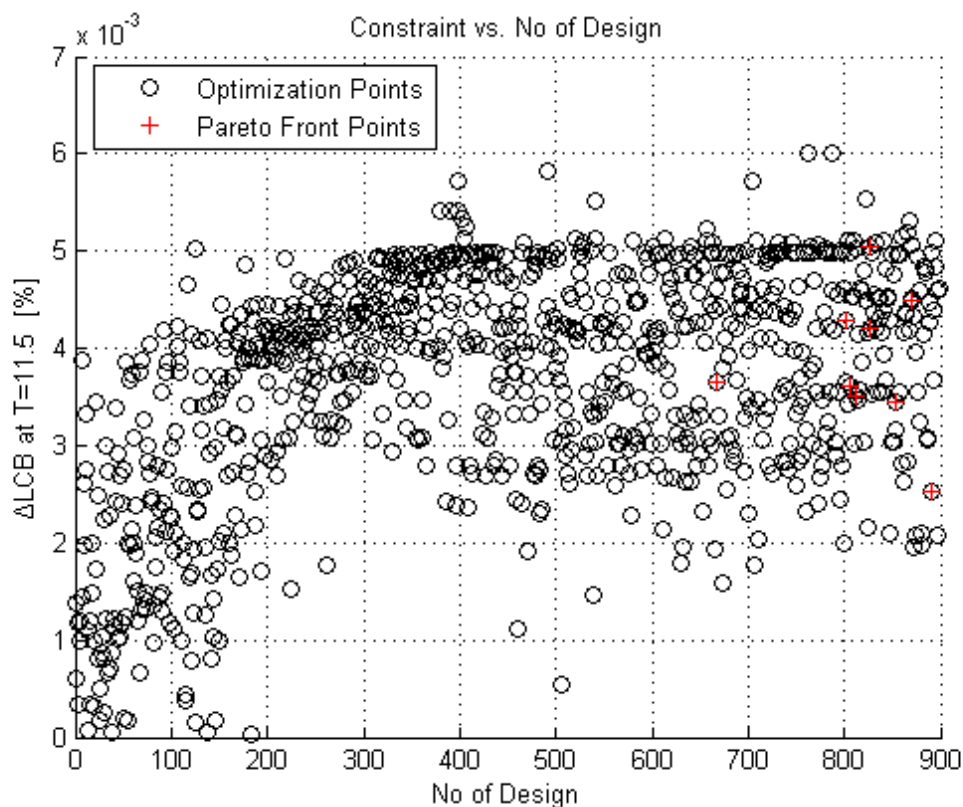
Σχήμα 53. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Σημείο επί της καμπύλης μεγίστου πλάτους βολβού (μεταβολή κατά z)



Σχήμα 54. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Σημείο μεγίστου πλάτους νομέα πρωραίας καθέτου (μεταβολή κατά y)



Σχήμα 55. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Διαμήκης θέση αρχής παράλληλου τμήματος



Σχήμα 56. . Διακύμανση περιορισμού σχεδίασης-% Μεταβολή LCB

Στο Σχήμα 45 απεικονίζεται η διασπορά των λύσεων ως προς τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις. Η διαφορά του με το σχήμα 29 έγκειται στον διαφορετικό τρόπο υπολογισμού των αντικειμενικών συναρτήσεων. Ενώ στη βελτιστοποίηση της § 5.2 λαμβάνονται υπ όψιν τα μεγέθη από δύο διαφορετικές καταστάσεις φόρτωσης εδώ λαμβάνονται υπ όψιν μόνο τα μεγέθη του βυθίσματος των 11.5 m, (αν και υπολογίζονται και αυτά του βυθίσματος των 9.65 m), κάτι που καθιστά τα δύο αυτά σχήματα μη συγκρίσιμα. Στο Σχήμα 45 λοιπόν έχουμε μια εξαιρετική διασπορά λύσεων που συνάδει απόλυτα με την αναμενόμενη μιας βελτιστοποίησης με γνώμονα δύο κριτήρια. Στο Σχήμα 46 φαίνεται μια συνεχής και ομαλή καμπύλη βέλτιστων (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 47,48 παρουσιάζεται η κατανομή των λύσεων για την αντίσταση κυματισμού και την επιτάχυνση στην πλώρη στο βύθισμα των 11.44 m. Η μέση τιμή των λύσεων είναι 129.92 kN, η ελάχιστη τιμή είναι 117.40 kN και η τυπική απόκλιση είναι 13.19 kN. Η μέση τιμή όπως και η τυπική απόκλιση είναι μικρότερες από τα αντίστοιχα μεγέθη της § 5.2, κάτι που δείχνει πως η βελτιστοποίηση ήταν ακόμα καλύτερη επιφέροντας μικρότερες τιμές αντίστασης κυματισμού. Ομοίως για την επιτάχυνση στην πλώρη η μέση τιμή είναι 0.8319 m/s^2 , η ελάχιστη τιμή είναι 0.8280 m/s^2 και η τυπική απόκλιση είναι 0.0037 m/s^2 . Τα

μεγέθη είναι μικρότερα από τα αντίστοιχα μεγέθη της § 5.2, επιφέροντας ελαφρώς καλύτερες λύσεις.

Στα σχήματα 49,50 παρουσιάζονται η διασπορά των λύσεων για το βύθισμα των 9.65 m. Σε αυτά τα σχήματα παρατηρείται διαφορετική συμπεριφορά από τα προηγούμενα. Η τιμή στην οποία συγκλίνουν τόσο η αντίσταση κυματισμού όσο και η επιτάχυνση στην πλώρη είναι διαφορετική από την ελάχιστη τιμή που εμφανίζεται κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα στις πρώτες γενεές της βελτιστοποίησης εμφανίζεται το ολικό ελάχιστο, ενώ στις επόμενες γενεές η τιμή σύγκλισης αυξάνει. Παρ' όλα αυτά οι τιμές και των δύο μεγεθών καταλήγουν σε μία τιμή ελαφρώς μικρότερη της πατρικής (203 kN και 0.752 m/s^2). Η παραπάνω συμπεριφορά οφείλεται στο γεγονός πως το βύθισμα των 9.65 m δεν αποτέλεσε κριτήριο βελτιστοποίησης, επομένως δεν μπορούσε να εγγυηθεί η ελαχιστοποίηση των αντίστοιχων τιμών –αντιθέτως οι τιμές των μεταβλητών σχεδίασης κατέληξαν σε τιμές που ελαχιστοποίησαν μόνο τα μεγέθη του βυθίσματος $T=11.44\text{m}$.

Στα υπόλοιπα σχήματα (41-56) παρουσιάζεται η συμπεριφορά των μεταβλητών σχεδίασης καθώς και ενός περιορισμού (ΔLCB). Σε αυτή τη περίπτωση οι μεταβλητές ακολουθούν την ίδια συγκλίνουσα πορεία, όπως επίσης και οι τιμές για τις γεωμετρίες του μετώπου Pareto.

Η γεωμετρία που θα επιλεγεί σε πρώτη φάση γι' αυτή την περίπτωση βελτιστοποίησης θα ανήκει στη συνοριακή καμπύλη βέλτιστων του σχήματος 45. Στον πίνακα 8 φαίνεται ένα σύνολο εναλλακτικών μορφών γάστρας που ανήκουν σε αυτό το σύνορο και αποτελούν ισοδύναμα αποδοτικές λύσεις.

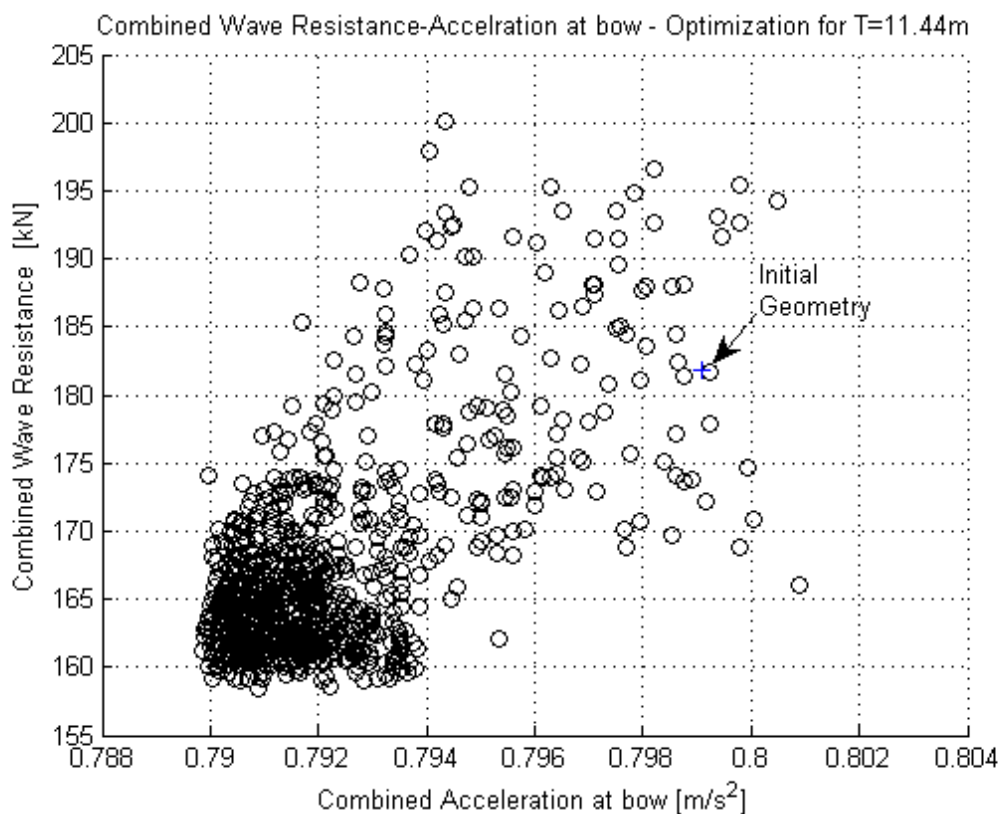
Πίνακας 10. Επιλεγείσες γεωμετρίες από το μέτωπο Pareto αντικειμενικών συναρτήσεων

Ποσοστιαία μεταβολή μεγεθών ως προς την πατρική γάστρα		
T=11.44m		
α/α	Επιτάχυνση στην πλώρη	Αντίσταση κυματισμού
916	-0.0145	-0.229
736	-0.0147	-0.229
962	-0.0152	-0.228
977	-0.0156	-0.227
904	-0.0157	-0.225
933	-0.0160	-0.220
999	-0.0160	-0.217
934	-0.0162	-0.216
907	-0.0163	-0.215

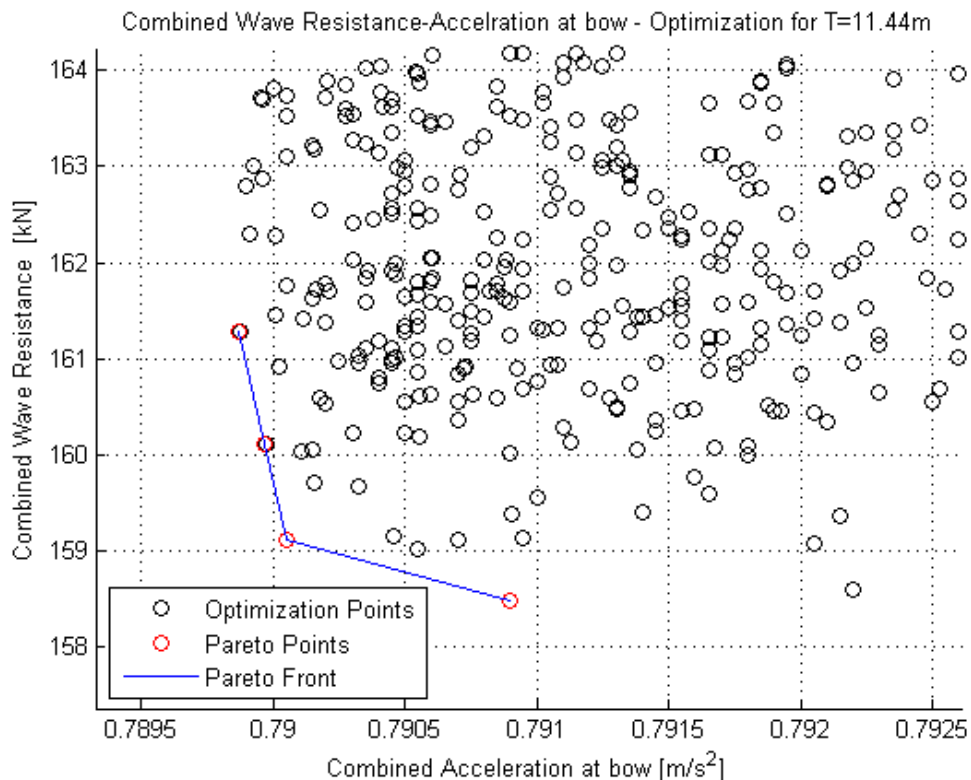
Αρχικά από τα στοιχεία του πίνακα 10 προκύπτει πως η ποσοστιαίες μειώσεις για τις βέλτιστες γεωμετρίες είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τα αντίστοιχα μεγέθη της § 5.2 (1,5% έναντι 1% και 22% έναντι 17%). Μια πρόσθετη παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι πως όλες οι γεωμετρίες αποτελούν μέλη προχωρημένων γενεών. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την αποτελεσματικότητα της εξελικτικής διαδικασίας του αλγορίθμου

Η μορφή γάστρας που θα επιλεγεί ως βέλτιστη αυτής της διαδικασίας είναι αυτή με άξοντα αριθμό 962. Η γεωμετρία αυτή έχει διαφορά εκτοπίσματος και διαμήκους θέσης του κέντρου άντωσης +0.49% και +0.43% αντίστοιχα, σε σχέση με την πατρική σε βύθισμα 11.44m.

Για να μπορεί να γίνει σύγκριση με τις αντικειμενικές συναρτήσεις της § 5.2, παρατίθενται στα Σχήματα 57,58 τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης εκφρασμένα με τα μεγέθη των αντικειμενικών συναρτήσεων της § 5.2. Πλέον τα μεγέθη από τις δυο βελτιστοποιήσεις είναι συγκρίσιμα και μπορούν να εξαχθούν νέα συμπεράσματα. Παρόλο που η συνδυασμένη αντίσταση κυματισμού και η επιτάχυνση στην πλώρη δεν αποτελούν τις αντικειμενικές συναρτήσεις ελαχιστοποίησης τα διαγράμματα που παίρνουμε είναι αντίστοιχα μιας διαδικασίας ελαχιστοποίησης.



Σχήμα 57. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης στο βύθισμα σχεδίασης ως προς την συνδυασμένη αντίσταση κυματισμού και την επιτάχυνση στην πλώρη στα δύο βυθίσματα.



Σχήμα 58. Λεπτομέρεια Σχήματος 54 – Περιοχή βέλτιστων λύσεων

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 58 στην περιοχή των βέλτιστων λύσεων, λαμβάνουμε ένα διαφορετικό μέτωπο Pareto αν λάβουμε υπ όψιν τη συμπεριφορά του πλοίου και στα 9.65m. Στον πίνακα που ακολουθεί αποτυπώνεται το σύνολο των εναλλακτικών μορφών γάστρας που ανήκουν σε αυτό το σύνορο.

Πίνακας 11. Επιλεγείσες γεωμετρίες από το μέτωπο Pareto συνδυασμένων συναρτήσεων

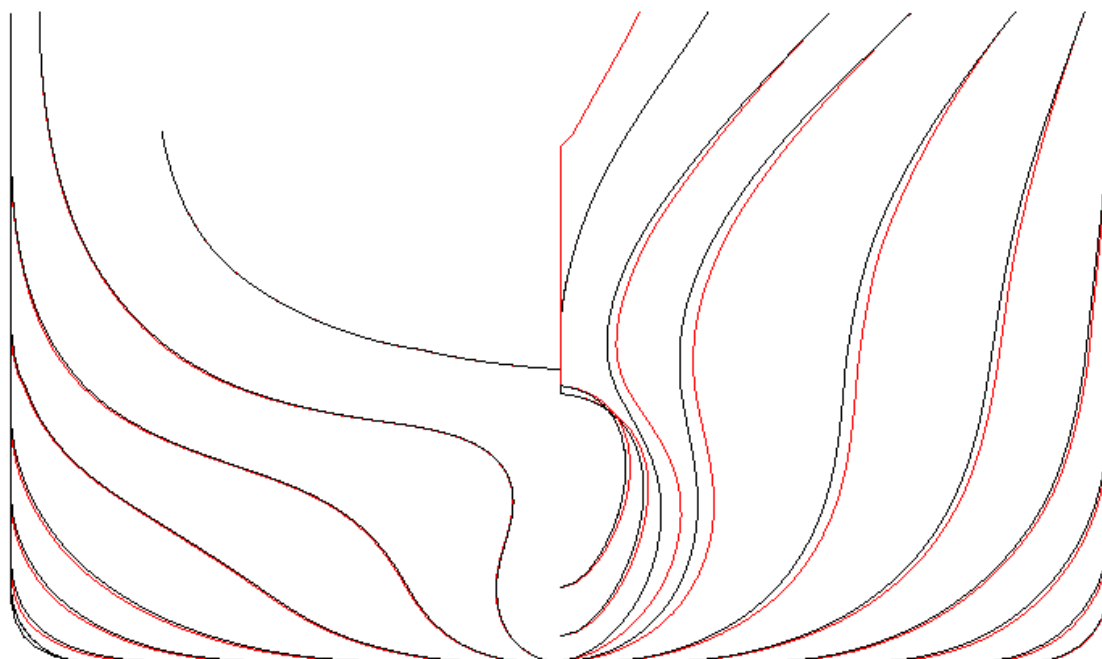
Ποσοστιαία μεταβολή μεγεθών ως προς την πατρική γάστρα						
	T=9.651 m		T=11.44m			
α/α	Επιτάχυνση στην πλώρη	Αντίσταση κυματισμού	Επιτάχυνση στην πλώρη	Αντίσταση κυματισμού	Συνδυασμένη συνάρτηση επιτάχυνσης	Συνδυασμένη Αντίστασης κυματισμού
498	-0.0059	-0.0636	-0.0141	-0.2182	-0.0103	-0.1283
904	-0.0065	-0.0526	-0.0157	-0.2249	-0.0113	-0.1248
640	-0.0064	-0.0505	-0.0159	-0.2148	-0.0114	-0.1193
756	-0.0067	-0.0394	-0.0159	-0.2148	-0.0115	-0.1129

Αρχικά παρατηρούμε ότι το συνολικό ποσοστό μείωσης των συνδυασμένων μεγεθών είναι ελαφρώς μικρότερα από τις αντικειμενικές συναρτήσεις της § 5.2. Αυτό οφείλεται στην αντιστάθμιση της μικρής μείωσης των μεγεθών για T=9.65 m, από την μεγαλύτερη μείωση των μεγεθών για T=11.44m. Επίσης κάποιες από τις βέλτιστες λύσεις δεν αποτελούν μέλη των τελευταίων γενεών. Όπως φαίνεται και στα Σχήματα 46,47 οι γεωμετρίες με τις ελάχιστες τιμές δεν εμφανίζονται στις τελευταίες γενεές, ενώ για το βύθισμα των 11.44m οι γεωμετρίες έχουν τιμές κοντά στην τιμή σύγκλισης. Επομένως γεωμετρίες αρχικών γενεών προκρίνονται ως βέλτιστες.

Σύμφωνα με τα παραπάνω ,αν θέλαμε να κάνουμε μια επιλογή γεωμετρία και σε αυτή τη βελτιστοποίηση που να λαμβάνει υπ όψιν και τις δύο καταστάσεις φόρτωσης θα πρέπει να διαλέξουμε μια γεωμετρία από τον πίνακα 11. Η γάστρα που επιλέγεται τελικά ως βέλτιστη είναι αυτή με αύξοντα αριθμό 904,η οποία εμφανίζεται και στα δύο μέτωπα Pareto και έχει γεωμετρικά χαρακτηριστικά παρόμοια με την πρώτη επιλογή. Στον πίνακα 12 έχουμε τις τιμές των μεταβλητών σχεδίασης της αρχικής και βελτιστοποιημένων γεωμετριών, ενώ στο Σχήμα 59 φαίνονται οι νομείς αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας 2.

Πίνακας 12. Τιμές μεταβλητών σχεδίασης αρχική και βελτιστοποιημένων γεωμετριών

Μεταβλητή Σχεδίασης	Αρχική γεωμετρία	Βελτιστοποιημένη Γεωμετρία 1	Βελτιστοποιημένη Γεωμετρία 2
2third_max_beam_Y (m):	2.336	2.532	2.504
2third_max_beam_Z (m):	7.841	7.886	7.909
BB_tip_max_beam_Z (m) :	8.00	8.266	8.280
FP_max_beam_y (m):	3.345	3.535	3.599
FP_max_beam_Z (m):	6.684	6.997	6.997
low_area_fullness :	0.7385	0.746	0.741
upper_area_fullnes:	0.7385	0.728	0.728
on_wl_point_y (m):	11.399	11.764	11.664
wl_115_fos_aft (m):	0	-0.420	-0.405
wl_115_fos_fore (m):	0	0.96	0.865
wl_angle_entrance:	12	15.988	16.858
xpos_pnb_fore (m):	183.26	185.009	185.209
xpos_pnb_aft (m):	102.08	98.999	98.999
z_pos_stern (m):	11.577	11.625	11.683

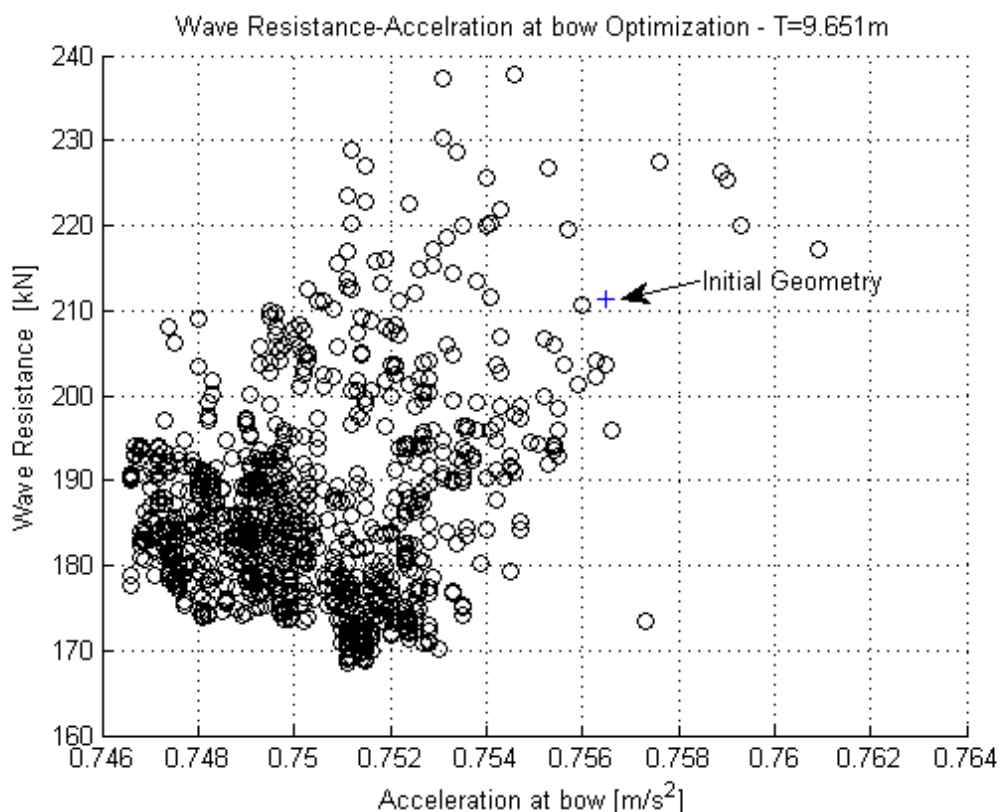


Σχήμα 59. Νομείς αρχικής (μαύρες καμπύλες) και βελτιστοποιημένης (κόκκινες καμπύλες) γεωμετρίας 2-βελτιστοποίηση στο βύθισμα σχεδ

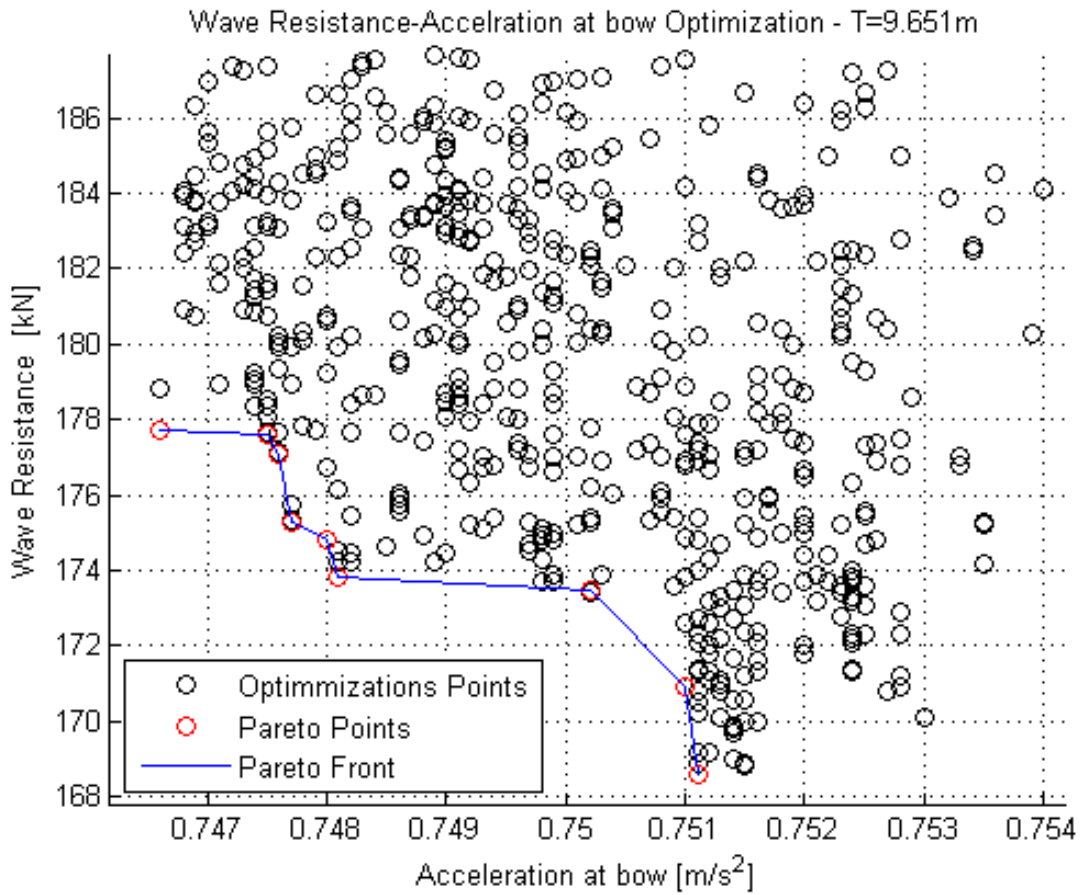
5.4. Αποτελέσματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης σε βύθισμα διαφορετικό του βυθίσματος σχεδίασης

Η τελευταία δοκιμή που έγινε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αποτελεί την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση στο βύθισμα των 9.65m, το οποίο δεν είναι το βύθισμα σχεδίασης. Η βελτιστοποίηση της παρούσας παραγράφου, όπως και της προηγούμενης πραγματοποιήθηκε για να αναδειχθούν τυχόν διαφορές με αυτήν της § 5.2. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις ήταν η αντίσταση κυματισμού σε ήρεμο νερό και η κατακόρυφη επιτάχυνση σε απλούς αρμονικούς κυματισμούς για μία κατάσταση φόρτωσης ($T=9.65m$). Κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης παρήχθησαν 1008 διαφορετικές γεωμετρίες.

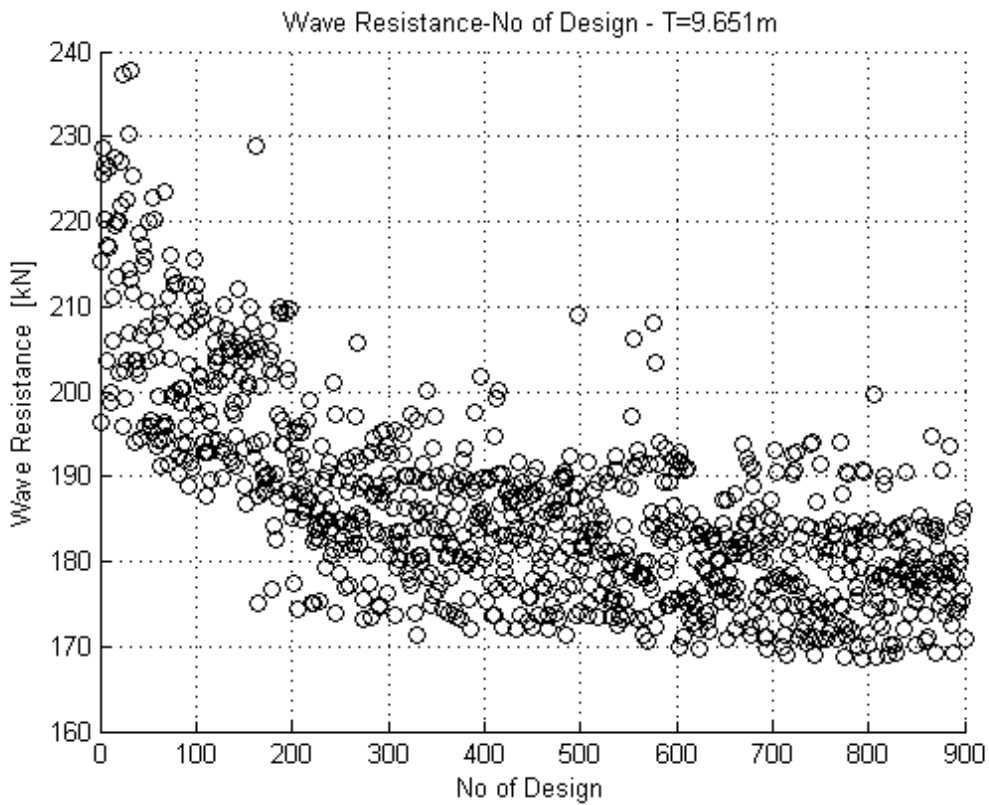
Στα σχήματα 60-71 παρουσιάζονται τα προκύπτοντα διαγράμματα διασποράς των αποδεκτών λύσεων, όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση ήταν 900/1008. Αρχικά παρουσιάζεται η διασπορά λύσεων συναρτήσει των αντικειμενικών συναρτήσεων, καθώς και των επιμέρους συνιστωσών τους και κατόπιν η διακύμανση ορισμένων μεταβλητών και περιορισμών σχεδίασης. Τα Σχήματα αυτά είναι όμοια με αυτά της § 5.2, ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση μεταξύ τους.



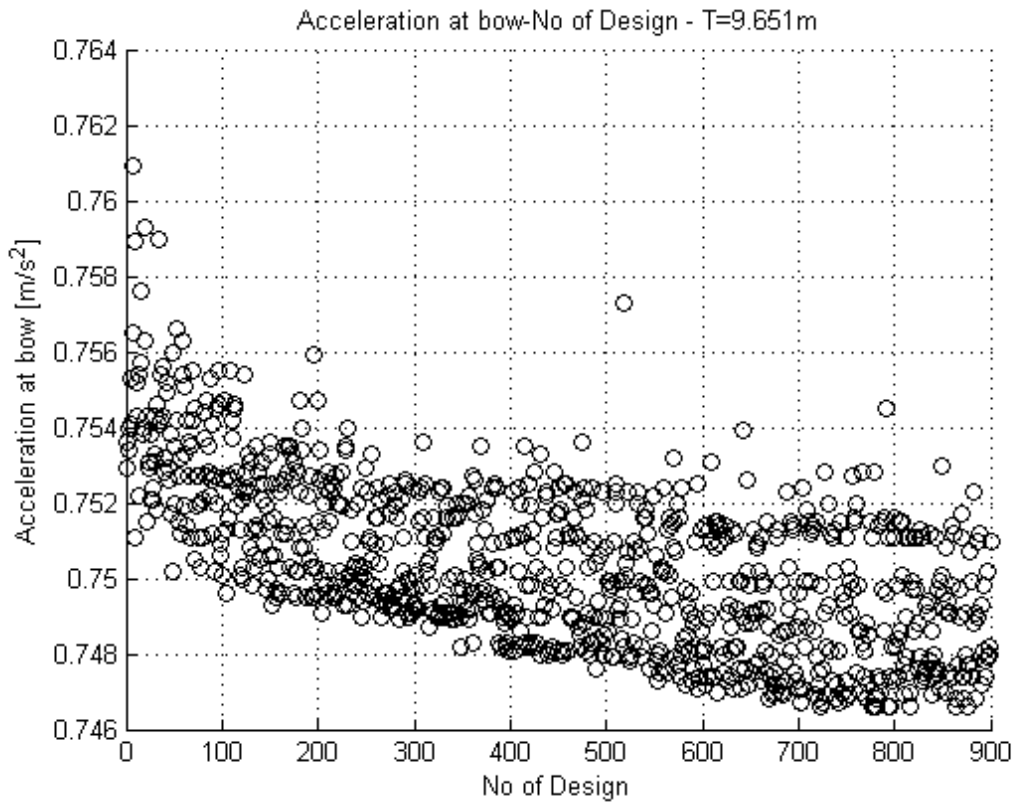
Σχήμα 60. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης στο βύθισμα σχεδίασης με κριτήρια την αντίσταση κυματισμού και την μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη



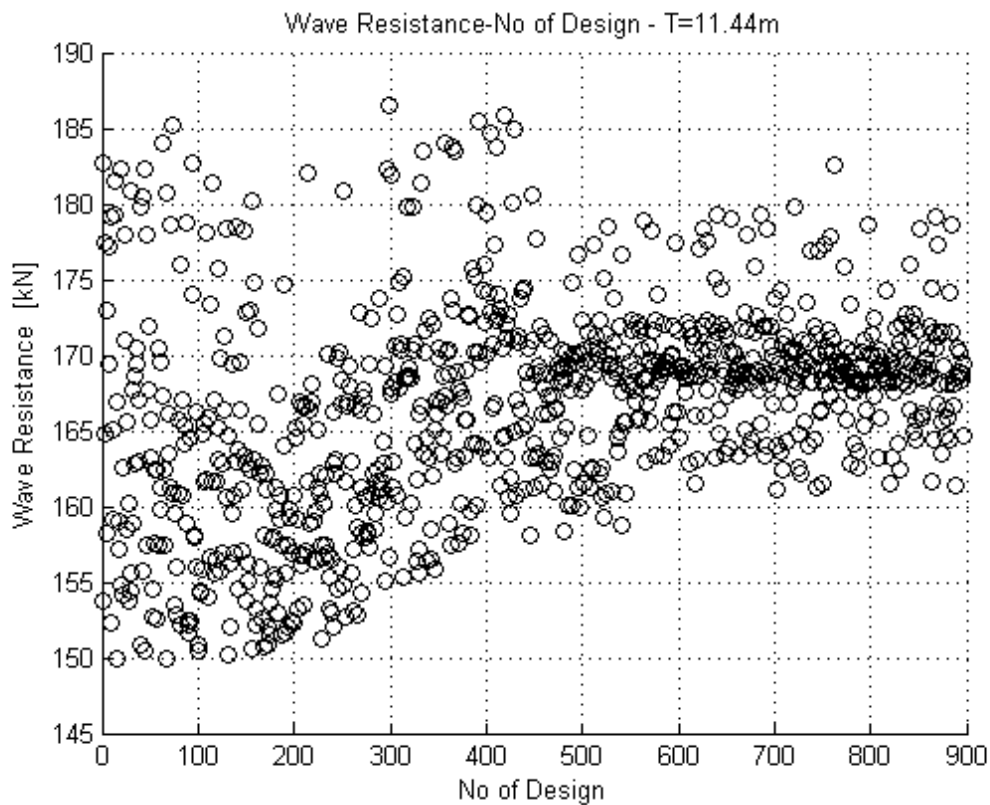
Σχήμα 61. Λεπτομέρεια Σχήματος 57 – Περιοχή βέλτιστων λύσεων



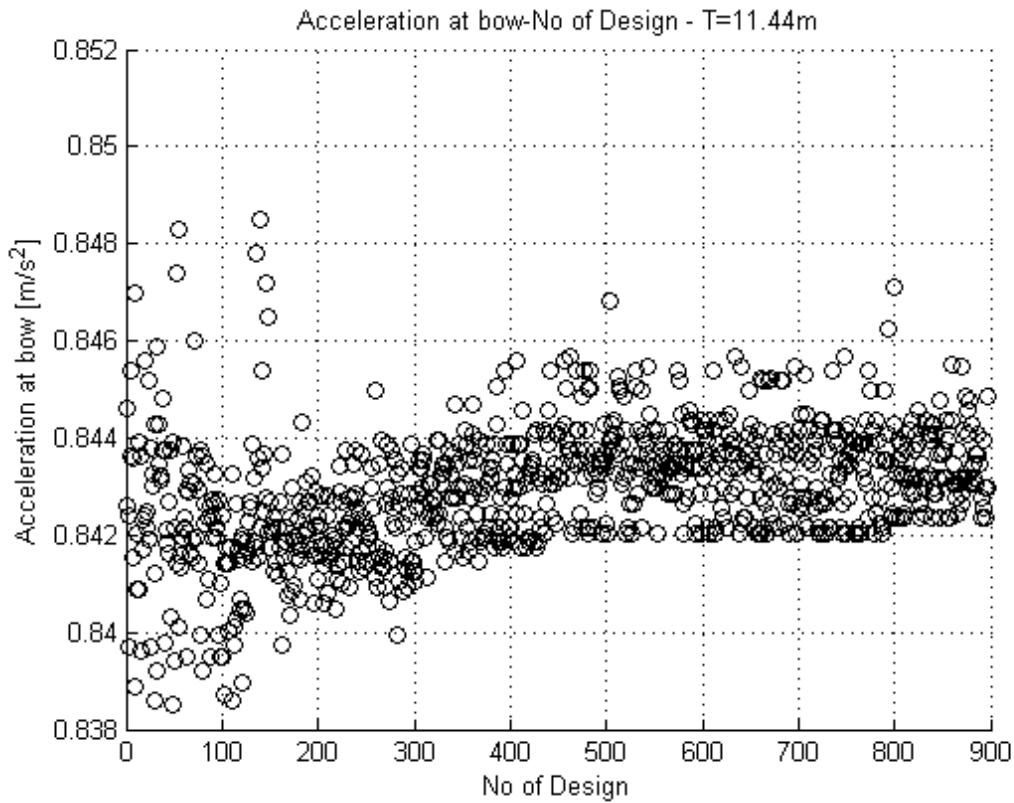
Σχήμα 62. Διασπορά λύσεων-Αντίσταση κυματισμού- T=9.65m



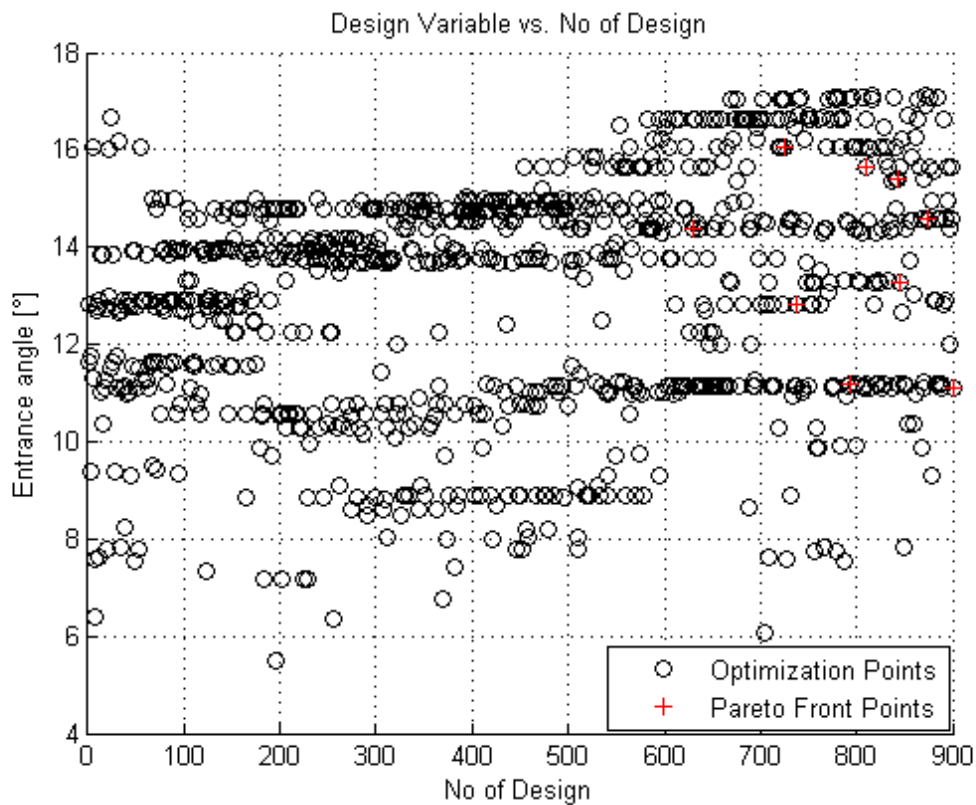
Σχήμα 63. Διασπορά λύσεων-Επιτάχυνση στην πλώρη- T=9.65m



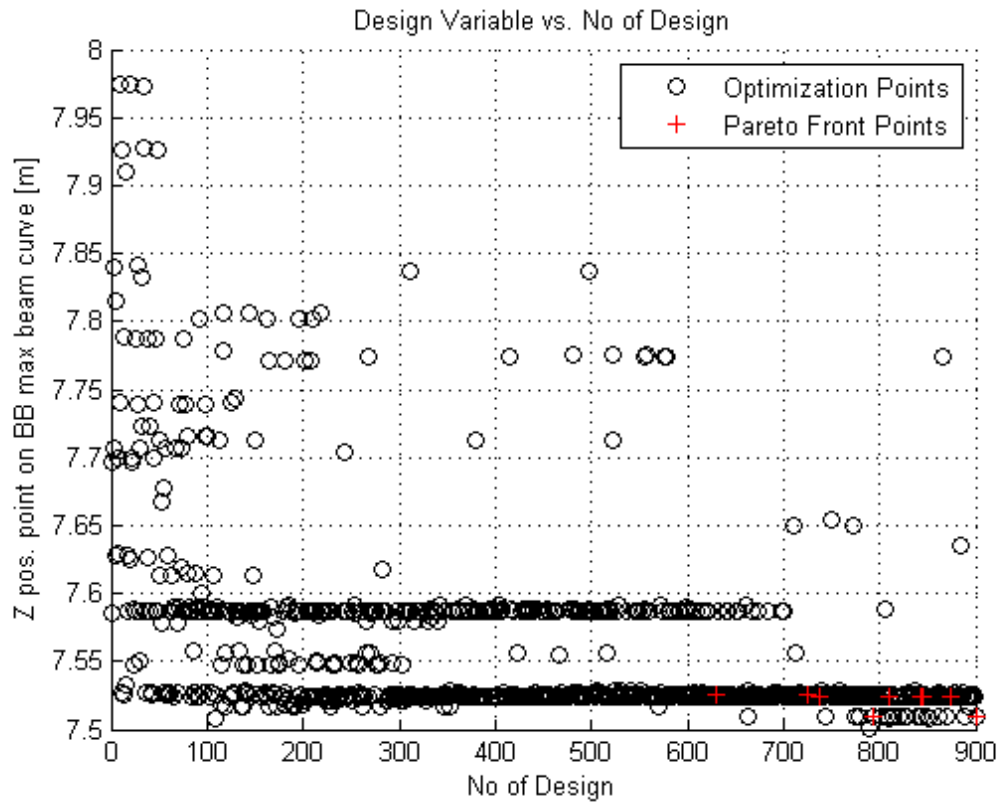
Σχήμα 64. Διασπορά λύσεων-Επιτάχυνση στην πλώρη- T=11.44m



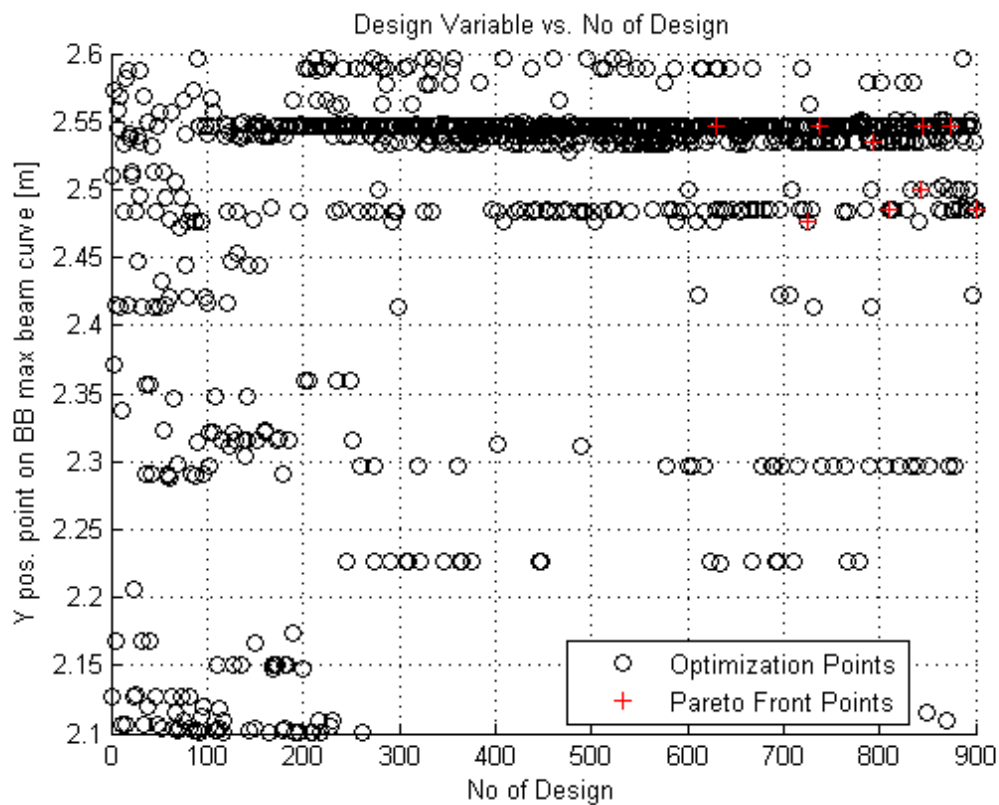
Σχήμα 65. Διασπορά λύσεων-Αντίσταση κυματισμού- T=11.44m



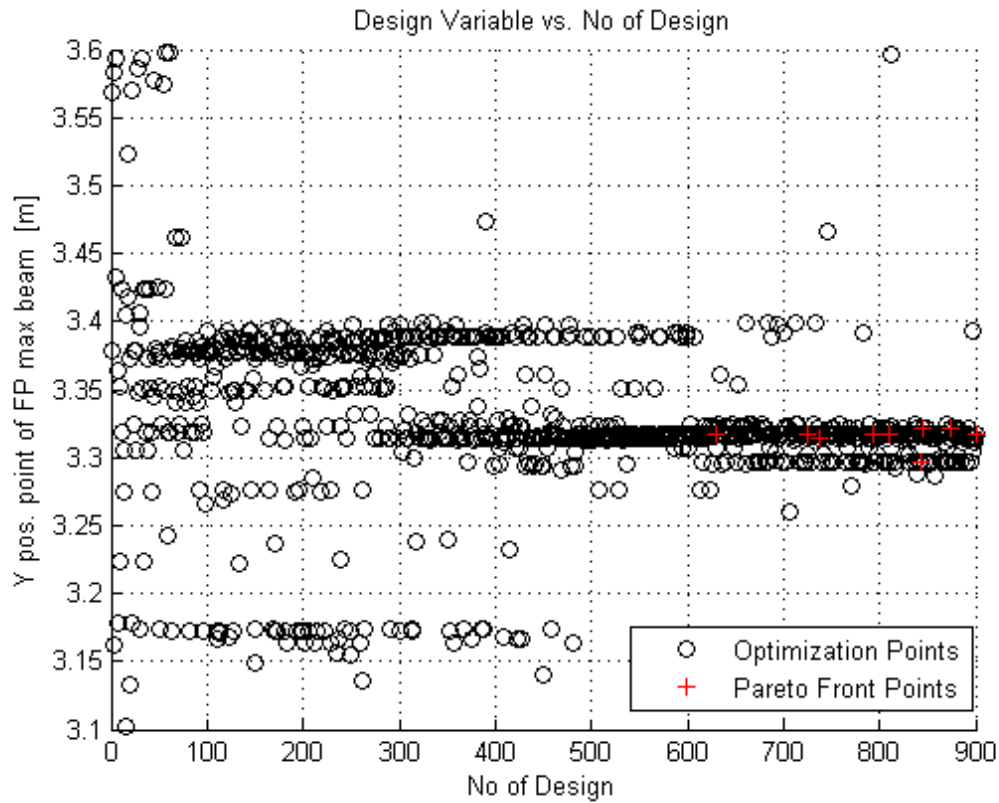
Σχήμα 66. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Γωνία εισόδου ισάλου



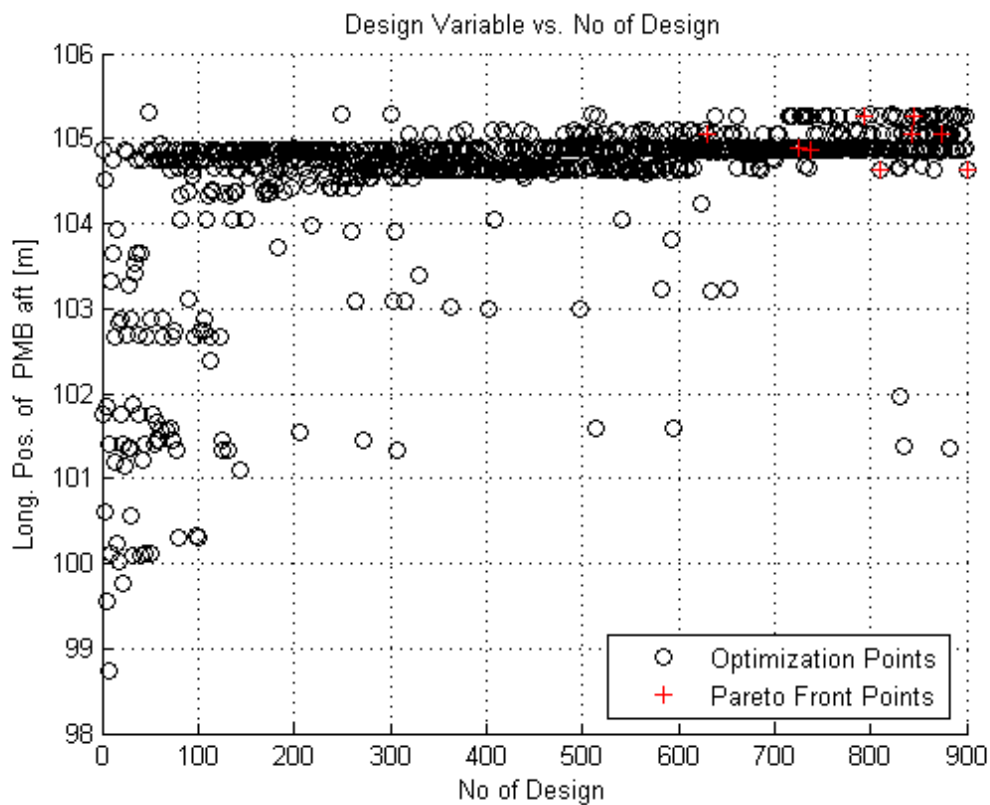
Σχήμα 67. . Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Σημείο επί της καμπύλης μεγίστου πλάτους βολβού (μεταβολή κατά z)



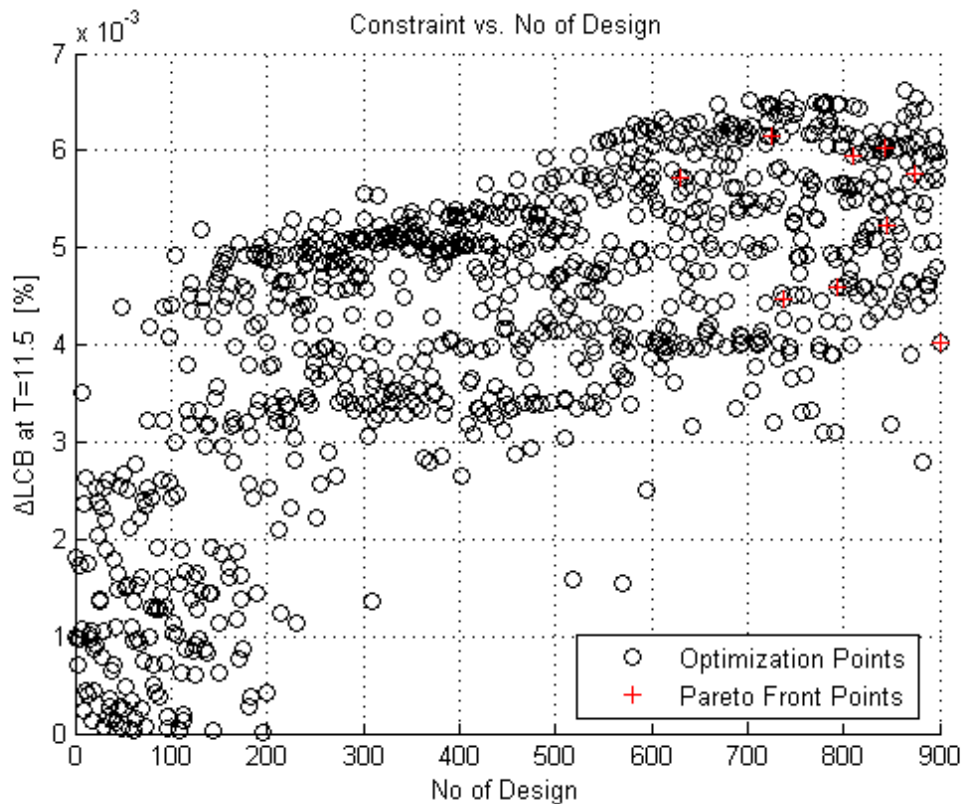
Σχήμα 68. . Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Σημείο επί της καμπύλης μεγίστου πλάτους βολβού (μεταβολή κατά y)



Σχήμα 69. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Σημείο μεγίστου πλάτους νομέα πρωραίας καθέτου (μεταβολή κατά y)



Σχήμα 70. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Διαμήκης θέση αρχής παράλληλου τμήματος



Σχήμα 71. Διακύμανση περιορισμού σχεδίασης-% Μεταβολή LCB

Στο Σχήμα 60 απεικονίζεται η διασπορά των λύσεων ως προς τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις. Στην παρούσα βελτιστοποίηση αντικειμενικές συναρτήσεις αποτελούν η αντίσταση κυματισμού και η επιτάχυνση στην πλώρη σε βύθισμα 9.65m. Η διασπορά και σε αυτό το σχήμα είναι πολύ ικανοποιητική, επιβεβαιώνοντας την σωστή λειτουργία του αλγόριθμου για το πρόβλημα. Στο Σχήμα 61 φαίνεται μια συνεχής και ομαλή καμπύλη βέλτιστων (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 62,63 παρουσιάζεται η κατανομή των λύσεων για την αντίσταση κυματισμού και την επιτάχυνση στην πλώρη στο βύθισμα των 9.65m. Η μέση τιμή των λύσεων είναι 186.71 kN, η ελάχιστη τιμή είναι 168.60 kN και η τυπική απόκλιση είναι 11.95 kN. Η μέση τιμή όπως και η τυπική απόκλιση είναι μικρότερες από τα αντίστοιχα μεγέθη της § 5.2, κάτι που δείχνει πως η βελτιστοποίηση ήταν ακόμα καλύτερη επιφέροντας μικρότερες τιμές αντίστασης κυματισμού. Ομοίως για την επιτάχυνση στην πλώρη η μέση τιμή είναι 0.7504 m/s^2 , η ελάχιστη τιμή είναι 0.7404 m/s^2 και η τυπική απόκλιση είναι 0.0022 m/s^2 . Τα μεγέθη είναι μικρότερα από τα αντίστοιχα μεγέθη της § 5.2, επιφέροντας ελαφρώς καλύτερες λύσεις.

Στα σχήματα 64,65 παρουσιάζονται η διασπορά των λύσεων για το βύθισμα των 11.44 m. Σε αυτά τα σχήματα παρατηρείται διαφορετική συμπεριφορά από τα προηγούμενα. Η τιμή

στην οποία συγκλίνουν τόσο η αντίσταση κυματισμού όσο και η επιτάχυνση στην πλώρη είναι διαφορετική από την ελάχιστη τιμή που εμφανίζεται κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Αν και στις πρώτες γενεές εμφανίζονται τιμές μικρότερες των μεγεθών της πατρικής γάστρας, η τιμή σύγκλισης είναι και στα δύο μεγέθη μεγαλύτερη (170 kN και 0.435 m/s²). Η παραπάνω συμπεριφορά οφείλεται στο γεγονός πως το βύθισμα των 11.44 m δεν αποτέλεσε κριτήριο βελτιστοποίησης, επομένως δεν μπορούσε να εγγυηθεί η ελαχιστοποίηση των αντίστοιχων τιμών –αντιθέτως οι τιμές των μεταβλητών σχεδίασης κατέληξαν σε τιμές που ελαχιστοποίησαν μόνο τα μεγέθη του βυθίσματος T=9.65.

Στα υπόλοιπα σχήματα (66-71) παρουσιάζεται η συμπεριφορά των μεταβλητών σχεδίασης καθώς και ενός περιορισμού (ΔLCB). Σε αυτή τη περίπτωση οι μεταβλητές ακολουθούν την ίδια συγκλίνουσα πορεία, όπως επίσης και οι τιμές για τις γεωμετρίες του μετώπου Pareto. Στην μεταβλητή της γωνίας εισόδου παρατηρούμε πως δεν υπάρχει μία τιμή σύγκλισης. Αυτό συμβαίνει γιατί η συγκεκριμένη μεταβλητή αναφέρεται στην γωνία εισόδου της ισάλου των 11.44m, οπότε τυχόν μεταβολή της δεν επηρεάζει την γάστρα μέχρι τα 9.65m και γι αυτό το λόγο δεν μπορεί επηρεάσει τη διαδικασία.

Η γεωμετρία που θα επιλεγεί σε πρώτη φάση γι' αυτή την περίπτωση βελτιστοποίησης θα ανήκει στη συνοριακή καμπύλη βέλτιστων του σχήματος 60. Στον πίνακα 13 φαίνεται ένα σύνολο εναλλακτικών μορφών γάστρας που ανήκουν σε αυτό το σύνολο και αποτελούν ισοδύναμα αποδοτικές λύσεις.

Πίνακας 13 . Επιλεγείσες γεωμετρίες από το μέτωπο Pareto αντικειμενικών συναρτήσεων

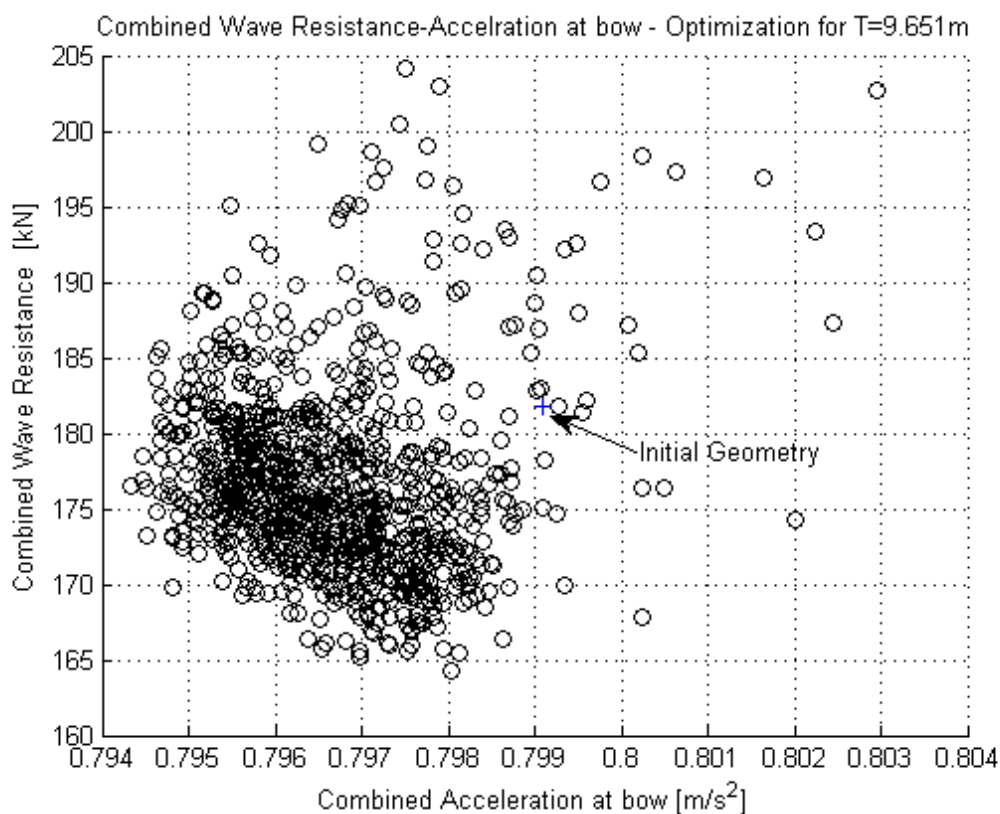
Ποσοστιαία μεταβολή μεγεθών ως προς την πατρική γάστρα		
T=9.65m		
α/α	Επιτάχυνση στην πλώρη	Αντίσταση κυματισμού
940	-0.0131	-0.159
938	-0.0119	-0.159
800	-0.0118	-0.162
903	-0.0116	-0.170
975	-0.0112	-0.173
695	-0.0111	-0.177
813	-0.0083	-0.179
1007	-0.0073	-0.191
883	-0.0071	-0.202

Αρχικά από τα στοιχεία του πίνακα 13 προκύπτει πως η ποσοστιαίες μειώσεις για τις βέλτιστες γεωμετρίες είναι μεγαλύτερες μόνο την αντίσταση κυματισμού σε σχέση με την αντίστοιχη της § 5.2(17% έναντι 9%), ενώ η μείωση της επιτάχυνσης στην πλώρη είναι πρακτικά ίδια. Μια πρόσθετη παρατήρηση που μπορεί να γίνει είναι πως όλες οι γεωμετρίες αποτελούν μέλη προχωρημένων γενεών. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει την αποτελεσματικότητα της εξελικτικής διαδικασίας του αλγορίθμου

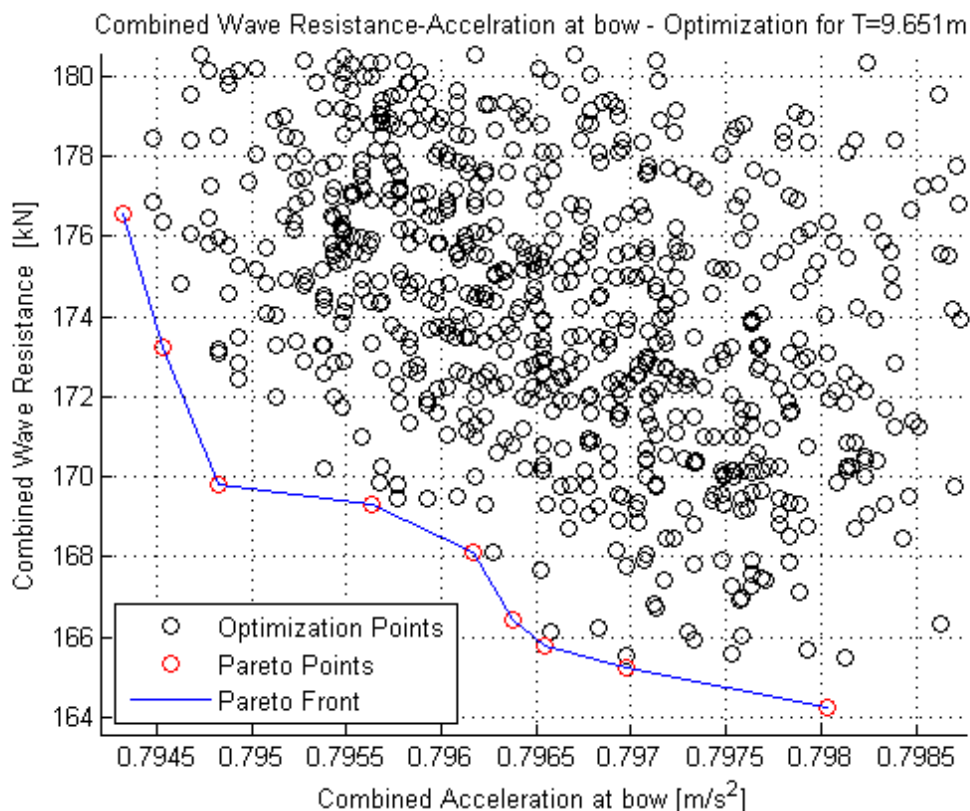
Η μορφή γάστρας που θα επιλεγεί ως βέλτιστη αυτής της διαδικασίας είναι αυτή με αύξοντα αριθμό 975. Η γεωμετρία αυτή έχει διαφορά εκτοπίσματος και διαμήκους θέσης

του κέντρου άντωσης +0.59% και +0.47% αντίστοιχα, σε σχέση με την πατρική σε βύθισμα 11.44m

Για να μπορεί να γίνει σύγκριση με τις αντικειμενικές συναρτήσεις της § 5.2, παρατίθενται στα Σχήματα 72,73 τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης εκφρασμένα με τα μεγέθη των αντικειμενικών συναρτήσεων της § 5.2. Πλέον τα μεγέθη από τις δυο βελτιστοποιήσεις είναι συγκρίσιμα και μπορούν να εξαχθούν νέα συμπεράσματα. Παρόλο που η συνδυασμένη αντίσταση κυματισμού και η επιτάχυνση στην πλώρη δεν αποτελούν τις αντικειμενικές συναρτήσεις ελαχιστοποίησης τα διαγράμματα που παίρνουμε είναι αντίστοιχα μιας διαδικασίας ελαχιστοποίησης



Σχήμα 72. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης στο βύθισμα σχεδίασης ως προς την συνδυασμένη αντίσταση κυματισμού και την επιτάχυνση στην πλώρη στα δύο βυθίσματα



Σχήμα 73. Λεπτομέρεια Σχήματος 69 -Περιοχή βέλτιστων λύσεων

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 72 στην περιοχή των βέλτιστων λύσεων, λαμβάνουμε ένα διαφορετικό μέτωπο Pareto αν λάβουμε υπ όψιν τη συμπεριφορά του πλοίου και στα 11.44m. Στον πίνακα που ακολουθεί αποτυπώνεται το σύνολο των εναλλακτικών μορφών γάστρας που ανήκουν σε αυτό το σύνορο.

Πίνακας 14. Επιλεγείσες γεωμετρίες από το μέτωπο Pareto συνδυασμένων συναρτήσεων

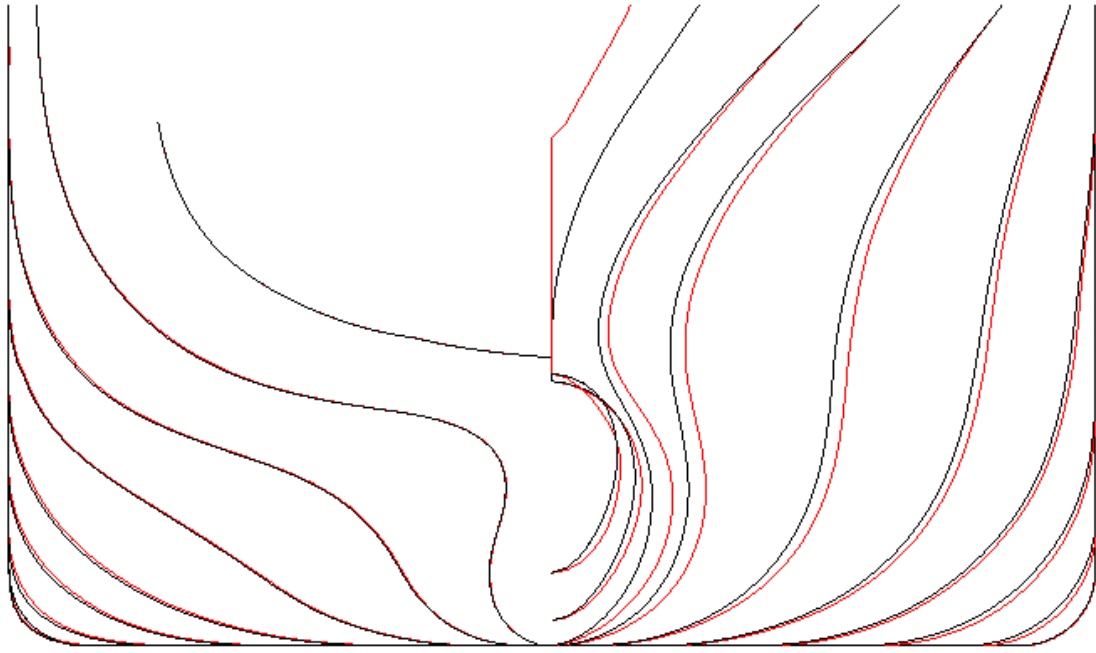
Ποσοστιαία μεταβολή μεγεθών ως προς την πατρική γάστρα						
T=9.651 m			T=11.44m		Συνδυασμένη Αντίσταση κυματισμού	Συνδυασμένη Συνάρτηση επιτάχυνσης
α/α	Επιτάχυνση στην πλώρη	Αντίσταση κυματισμού	Επιτάχυνση στην πλώρη	Αντίσταση κυματισμού		
866	-0.0131	-0.099	0.0004	0.068	-0.029	-0.0060
867	-0.0131	-0.153	0.0008	0.100	-0.047	-0.0058
800	-0.0118	-0.161	0.0004	0.067	-0.066	-0.0054
571	-0.0115	-0.158	0.0020	0.055	-0.069	-0.0044
351	-0.0063	-0.169	-0.0012	0.054	-0.075	-0.0036
284	-0.0065	-0.161	-0.0006	0.022	-0.085	-0.0034
243	-0.0059	-0.172	-0.0008	0.028	-0.088	-0.0033
914	-0.0071	-0.201	0.0014	0.061	-0.091	-0.0026
269	-0.0054	-0.176	0.0023	0.014	-0.096	-0.0014

Αρχικά παρατηρούμε ότι το συνολικό ποσοστό μείωσης των συνδυασμένων μεγεθών είναι το μικρότερο για την επιτάχυνση στην πλήρη σε σχέση με τις άλλες δυο βελτιστοποιήσεις, ενώ είναι σχεδόν μηδενικό για την αντίσταση κυματισμού. Αυτό συμβαίνει γιατί οι τιμές για την κατάσταση των 11.44m είναι μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες της πατρικής γάστρας, ενώ οι τιμές για T=9.65m δεν είναι οι ελάχιστες. Σε σύγκριση, με τις δύο προηγούμενες βελτιστοποιήσεις αυτή έχει τα χειρότερα αποτελέσματα. Επίσης κάποιες από τις βέλτιστες λύσεις δεν αποτελούν μέλη των τελευταίων γενεών. Όπως φαίνεται και στα Σχήματα 61,62 οι γεωμετρίες με τις ελάχιστες τιμές δεν εμφανίζονται στις τελευταίες γενεές, ενώ για το βύθισμα των 9.65m οι γεωμετρίες έχουν τιμές κοντά στην τιμή σύγκλισης. Επομένως γεωμετρίες αρχικών γενεών προκρίνονται ως βέλτιστες.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, αν θέλαμε να κάνουμε μια επιλογή γεωμετρία και σε αυτή τη βελτιστοποίηση που να λαμβάνει υπ όψιν και τις δύο καταστάσεις φόρτωσης θα πρέπει να διαλέξουμε μια γεωμετρία από τον πίνακα 14. Η γάστρα που επιλέγεται τελικά ως βέλτιστη είναι αυτή με αύξοντα αριθμό 800, η οποία εμφανίζεται και στα δύο μέτωπα Pareto και έχει γεωμετρικά χαρακτηριστικά παρόμοια με την πρώτη επιλογή. Στον πίνακα 15 έχουμε τις τιμές των μεταβλητών σχεδίασης της αρχικής και βελτιστοποιημένων γεωμετριών, ενώ στο Σχήμα 56 φαίνονται οι νομείς αρχικής και βελτιστοποιημένης γεωμετρίας 2.

Πίνακας 15. Τιμές μεταβλητών σχεδίασης αρχική και βελτιστοποιημένων γεωμετριών

Μεταβλητή Σχεδίασης	Αρχική γεωμετρία	Βελτιστοποιημένη Γεωμετρία 1	Βελτιστοποιημένη Γεωμετρία 2
2third_max_beam_Y (m):	2.336	2.413	2.477
2third_max_beam_Z (m):	7.841	7.495	7.525
BB_tip_max_beam_Z (m) :	8.00	8.280	8.280
FP_max_beam_y (m):	3.345	3.607	3.617
FP_max_beam_Z (m):	6.684	6.997	6.516
low_area_fullness :	0.7385	0.751	0.711
upper_area_fullnes:	0.7385	0.748	0.716
on_wl_point_y (m):	11.399	11.364	11.764
wl_115_fos_aft (m):	0	-0.320	-0.105
wl_115_fos_fore (m):	0	0.860	0.265
wl_angle_entrance:	12	11.988	16.052
xpospnb_fore (m):	183.26	185.219	185.997
xpos_pnb_aft (m):	102.08	103.999	104.882
z_pos_stern (m):	11.577	11.525	11.357



Σχήμα 74. Νομείς αρχικής (μαύρες καμπύλες) και βελτιστοποιημένης (κόκκινες καμπύλες) γεωμετρίας 2-βελτιστοποίηση στο βύθισμα 9.65m

5.5 Συμπεράσματα

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

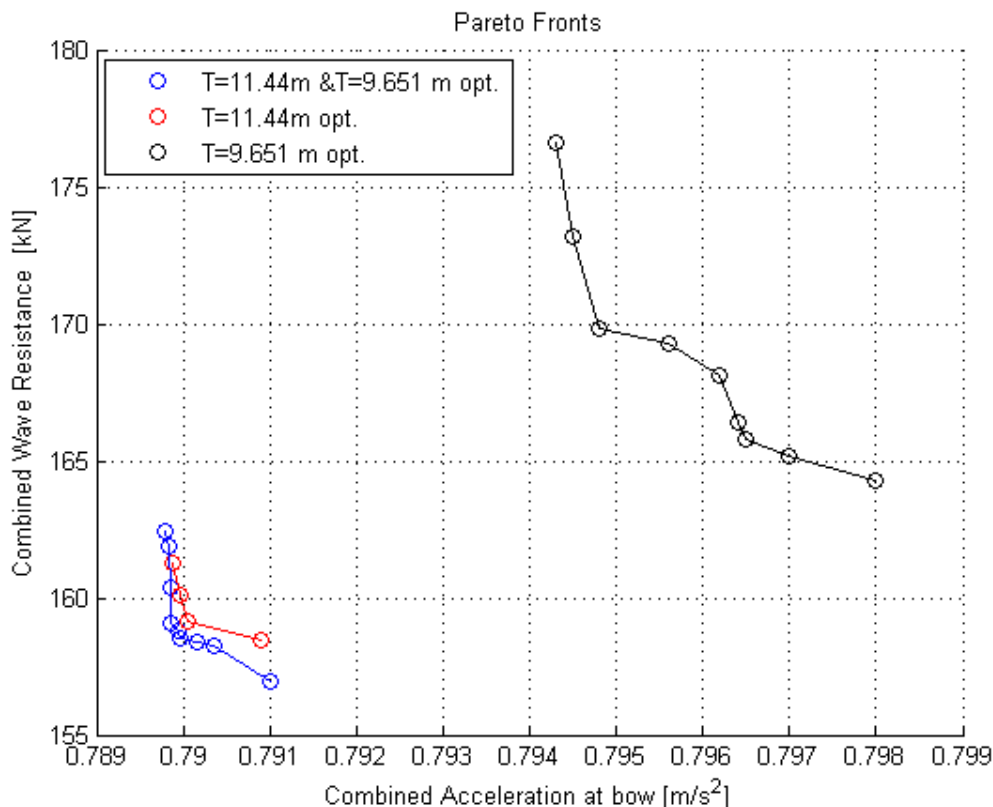
Για τις ανάγκες της προαναφερθείσας διαδικασίας, αρχικά σχεδιάστηκε παραμετρικά μια δοθείσα μορφή γάστρας ώστε ένας περιορισμένος αριθμός μεταβλητών σχεδίασης να επιδρά στο μέγιστο δυνατό βαθμό στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της που επηρεάζουν άμεσα τα κριτήρια με βάση τα οποία αξιολογείται η υδροδυναμική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

Η παραμετρική σχεδίαση υλοποιήθηκε στο λογισμικό CAESES-Friendship Framework, με συνδυασμό των σχεδιαστικών εργαλείων. Το αποτέλεσμα της παραμετρικής σχεδίασης είναι μια γάστρα που προσεγγίζει με ακρίβεια την δοθείσα μη παραμετρική μορφή, κι εξαρτάται από 14 συνολικά μεταβλητές σχεδίασης των οποίων οι τιμές διακυμαίνονται εντός ενός εύρους. Από την τυχαία διακύμανση των μεταβλητών σχεδίασης προκύπτουν διαφορετικές μορφές γάστρας προκειμένου να αναζητηθεί η μορφή εκείνη που συνολικά είναι αποδοτικότερη από την αρχική.

Η υδροδυναμική αξιολόγηση των εναλλακτικών μορφών υλοποιήθηκε με τρία διαφορετικά λογισμικά. Για τις ανάγκες της βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκαν τα προγράμματα SWAN 2 και SPP-86 για την εκτίμηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς των γεωμετριών, από πλευράς αντίστασης σε ήρεμο νερό και απόκρισης σε αρμονικούς κυματισμούς αντίστοιχα. Η βελτιστοποίηση πραγματοποιήθηκε συνολικά τρεις φορές με εναλλαγή των αντικειμενικών συναρτήσεων. Η πρώτη ενσωμάτωσε στις αντικειμενικές συναρτήσεις δύο διαφορετικές καταστάσεις φόρτωσης με διαφορετικές ταχύτητες, ενώ οι δύο επόμενες εξέταζαν την κάθε κατάσταση φόρτωσης ξεχωριστά.

Από κάθε διαδικασία επιλέχθηκε μια γάστρα ως βέλτιστη από το σύνολο των βέλτιστων λύσεων του μετώπου Pareto από τα διαγράμματα με άξονες τις αντικειμενικές συναρτήσεις. Επιπλέον, για τις δύο τελευταίες βελτιστοποιήσεις χαράχθηκε ένα επιπλέον διάγραμμα που συμπεριελάμβανε και τις δυο καταστάσεις φορτώσεως, έτσι ώστε να μπορούν να συγκριθούν με την πρώτη. Από αυτά τα διαγράμματα δημιουργήθηκαν νέα μέτωπα βέλτιστων λύσεων, από τα οποία επιλέχθηκε μια διαφορετική γεωμετρία. Και στις δυο περιπτώσεις η γεωμετρία αυτή κρίθηκε καλύτερη επιλογή της πρώτης.

Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζονται τα τρία μέτωπα Pareto ως προς τα μεγέθη της συνδυασμένης αντίστασης κυματισμού και επιτάχυνσης στην πλώρη, όπου μόνο για την πρώτη περίπτωση αποτέλεσαν αντικειμενικές συναρτήσεις.



Εικόνα 75.Μέτωπα Pareto από τρεις διαφορετικές διαδικασίες βελτιστοποίησης

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα η βελτιστοποίηση που είχε αντικειμενικές συναρτήσεις την συνδυασμένη αντίσταση κυματισμού και την επιτάχυνση στην πλώρη επέφερε τα καλύτερα αποτελέσματα, μειώνοντας εξίσου τα αντίστοιχα μεγέθη και στα δύο βυθίσματα. Η βελτιστοποίηση που έγινε για τα 11.44m επέφερε σχεδόν τις ίδιες βέλτιστες λύσεις, όμως με τη διαφορά ότι η ουσιαστική βελτίωση στην υδροδυναμική συμπεριφορά είχαμε μόνο στην μία κατάσταση. Το μεγαλύτερο ποσοστό μείωσης σε συνδυασμό με την ουδέτερη επίπτωση στα μεγέθη του βυθίσματος των 9.65m, επέφερε παρόμοια αποτελέσματα. Στην βελτιστοποίηση που έγινε για την κατάσταση φόρτωσης των 9.65m τα αποτελέσματα ήταν κατά πολύ χειρότερα. Επομένως η συνδυασμένη βελτιστοποίηση είναι προτιμητέα γιατί εξασφαλίζει ταυτόχρονη βελτίωση των μεγεθών για τα επιλεγμένα βυθίσματα, έναντι μιας βελτιστοποίησης σε ένα μόνο βύθισμα που τα αποτελέσματα είναι αμφίβολα για τις υπόλοιπες καταστάσεις. Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των βελτιστοποιήσεων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 16. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των τριών βελτιστοποιήσεων

	Ποσοστιαία μεταβολή μεγεθών ως προς την πατρική γάστρα					
	T=9.651 m		T=11.44m		Συνδυασμένη Αντίσταση κυματισμού	Συνδυασμένη Συνάρτηση επιτάχυνσης
	Επιτάχυνση στην πλώρη	Αντίσταση κυματισμού	Επιτάχυνση στην πλώρη	Αντίσταση κυματισμού		
1 ^η	-0.0114	-0.0926	-0.0115	-0.1739	-0.1267	-0.0115
2 ^η	-0.0065	-0.0526	-0.0157	-0.2249	-0.1248	-0.0113
3 ^η	-0.0118	-0.161	0.0004	0.067	-0.0661	-0.0054

Για να γίνει αντιληπτό το μέγεθος της συνεισφοράς της μείωσης της αντίστασης κυματισμού στην συνολική αντίσταση του πλοίου θα πρέπει να γίνει ένας υπολογισμός με καλύτερη προσέγγιση από αυτόν της μεθόδου Holtrop. Γι αυτό το σκοπό θα εφαρμοστεί η μέθοδος Hughes. Ο συντελεστής ολικής αντίστασης C_T δίνεται από τον παρακάτω τύπο¹⁵ :

$$C_T(Re,Fn)=(1+k)C_F(Re)+C_w(Fn), \text{ όπου}$$

C_F είναι ο συντελεστής αντίστασης τριβής

C_w είναι ο συντελεστής αντίστασης κυματισμού

Από τη βιβλιογραφία¹⁶ βρέθηκε ο συντελεστής $(1+k)$ ίσος με 1.271. Αυτή η τιμή αφορά ένα όμοιο πλοίο σε βύθισμα πολύ κοντά στο βύθισμα σχεδίασης του πατρικού (11.35m). Επομένως αυτή η τιμή μπορεί να εφαρμοστεί μόνο για τον υπολογισμό της αντίστασης στα 11.44m (στοιχεία για βύθισμα διαφορετικό του βυθίσματος σχεδίασης δεν βρέθηκαν). Ο συντελεστής τριβής υπολογίζεται με τον τύπο της ITTC (1957). Σύμφωνα με τα παραπάνω έχουμε:

	C_F	$(1+k)C_F$	C_w	C_T	R_T [kN]
Parent hull	1.403×10^{-3}	1.783×10^{-3}	2.828×10^{-4}	2.066×10^{-3}	1112.7

Όπως υπολογίστηκε στην § 5.2 η αντίσταση κυματισμού της επιλεγμένης γεωμετρίας ήταν 125.85 kN- επομένως επιτεύχθηκε μια μείωση 26.5 kN. Το νούμερο αυτό μεταφράζεται ως μία μείωση 2.3% ως προς την συνολική αντίσταση της πατρικής γάστρας, όπως υπολογίστηκε παραπάνω

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

¹⁵ Πολίτη Γ.Κ., Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου, Αθήνα, 2011.

¹⁶ J.E Choi et al. Resistance and propulsion characteristics of various commercial ships based on CFD results. Elsevier. 2010.

υδροδυναμικά κριτήρια. Εφόσον είναι ικανοποιητική η υδροδυναμική αξιολόγηση εξασφαλίζεται η παραγωγή γεωμετριών με καλύτερα χαρακτηριστικά.

- Η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση σε δύο βυθίσματα είναι προτιμητέα από την αντίστοιχη του ενός. Η περιοχή βελτιστοποίησης 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 η μη για τη συνολικότερη βελτιστοποίηση του πλοίου. Περιοριστικός παράγοντας είναι η εύρυθμη λειτουργία του αλγορίθμου βελτιστοποίησης για περισσότερες αντικειμενικές συναρτήσεις.
- Σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το αποτέλεσμα της μοντελοποίησης είναι η ακριβής παραμετρική αναπαράσταση της γεωμετρίας της γάστρας.
- 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.
- Η διάσταση από το πραγματικό φαινόμενο και οι περιορισμοί που τίθενται επακολούθως λόγω της παρουσίας των παραδοχών, θα πρέπει να είναι γνωστές παράμετροι στον μηχανικό, ούτως ώστε να μπορεί να αξιολογεί ανά περίπτωση αν αυτή η απόκλιση είναι για εκείνον αποδεκτή στα πλαίσια της εκάστοτε μελέτης του.
- Σε κάθε περίπτωση όλα τα αποτελέσματα που προκύπτουν από υπολογιστικές διαδικασίες θα πρέπει να ελέγχονται με εκτέλεση πειραμάτων σε κλίμακα μοντέλου σε πειραματική δεξαμενή .

Παράρτημα - A 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 modelling.

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 MetaSurfaces

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 Fparameter 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.

Παράρτημα Β – Λογισμικά και γλώσσες προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκαν

1. Microsoft Word
2. Microsoft Excel
3. Microsoft Powerpoint
4. Γλώσσα προγραμματισμού Fortran 77
5. Γλώσσα προγραμματισμού Fortran 95
6. Γλώσσα προγραμματισμού Intel Visual Fortran
7. Γλώσσα προγραμματισμού Visual C++
8. AutoCAD 2014
9. Υπολογιστικό πακέτο Matlab
10. Λογισμικό διαχείρισης αποτελεσμάτων προσομοίωσης Tecplot 2008
11. Σχεδιαστικό πρόγραμμα Rhinoceros 4.0
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

Παράρτημα Γ – Συγκεντρωτική λίστα σχημάτων

Σχήμα 1. Η παραδοσιακή σπειροειδής διαδικασία σχεδίασης πλοίων	5
Σχήμα 2 Η ενοποιημένη διαδικασία σχεδίασης πλοίων	7
Σχήμα 3 Η επαναληπτική διαδικασία υδροδυναμικής βελτιστοποίησης	9
Σχήμα 4 Συνιστώσες αντίστασης πλοίου υπό τη μορφή του αδιάστατου συντελεστή αντίστασης C ως προς τον αριθμό Froude	17
Σχήμα 5 Διαχωρισμός των επί μέρους συνιστωσών της αντίστασης του πλοίου	18
Σχήμα 6 Σύστημα κυματισμών κατά Kelvin	19
Σχήμα 7. Σύγκριση πειραματικών αποτελεσμάτων με θεωρητικές προβλέψεις του συντελεστή αντίστασης κυματισμού	20
Σχήμα 8 Τυχαίος κυματισμός ως υπέρθεση απλών αρμονικών κυματισμών	24
Σχήμα 9. Αρμονικός κυματισμός	25
Σχήμα 10. Σχηματική απεικόνιση θεωρίας λωρίδων	26
Σχήμα 11. Σύστημα αναφορά κατά Frank	27
Σχήμα 12. Η λειτουργία ενός γενετικού αλγορίθμου	32
Σχήμα 13. Η λειτουργία του αλγόριθμου NSGA II	34
Σχήμα 14. Συνολική διαδικασία βελτιστοποίησης	39
Σχήμα 15. Structural designs	41
Σχήμα 16. Αρχική γεωμετρία	44
Σχήμα 17. Εξομάλυνση νομέα.....	44
Σχήμα 18. Τελική μορφή γάστρας.....	45
Σχήμα 19. Τελικό αρχείο γραμμών	47
Σχήμα 20. Κάτοψη και διαμήκης όψη βασικών καμπύλων.....	47
Σχήμα 21. Πρυμναίοι (αριστερά) & πρωραίοι (δεξιά) νομείς	48
Σχήμα 22. Μεταβολή πρωραίου τμήματος, μεταξύ αρχικής (αριστερά) και τυχούσας μορφής (δεξιά).....	49
Σχήμα 23. Μεταβολή επιφανειών πρωραίου τμήματος μεταξύ αρχικής (αριστερά) και τυχούσας μορφής (δεξιά)	49
Σχήμα 24. Καμπύλες βολβοειδούς πλώρης.....	50
Σχήμα 25. Μεταβολή μεταξύ αρχικής (αριστερά) και τυχούσας (δεξιά) μορφής επιφανείας βολβού	51
Σχήμα 26. Η παραμετρική γεωμετρία του LNG MARAN GAS EFESOS	53
Σχήμα 27. Περιγραφή πρυμναίου (αριστερά) και πρωραίου (δεξιά) τμήματος	54
Σχήμα 28. Αναπαράσταση στερεού συνόρου και ελεύθερης επιφάνειας στο SWAN 2	55

Σχήμα 29. Διαδικασία βελτιστοποίησης υδροδυναμικής συμπεριφοράς LNG.....	56
Σχήμα 30. Καμπύλη RAO επιτάχυνσης στην πλήρη πατρικής γάστρας – T=11.44m	59
Σχήμα 31. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με κριτήρια την αντίσταση κυματισμού και την μέγιστη επιτάχυνση στην πλήρη.....	60
Σχήμα 32. Λεπτομέρεια Σχήματος 29-Περιοχή βέλτιστων λύσεων.....	61
Σχήμα 33. Διασπορά λύσεων-Αντίσταση κυματισμού- T=11.44m	61
Σχήμα 34. Διασπορά λύσεων-Επιτάχυνση στην πλήρη- T=11.44m	62
Σχήμα 35. Διασπορά λύσεων-Αντίσταση κυματισμού- T=9.65m	62
Σχήμα 36. Διασπορά λύσεων-Επιτάχυνση στην πλήρη- T=9.65m	63
Σχήμα 37. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Γωνία εισόδου ισάλου	63
Σχήμα 38. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Σημείο επί της καμπύλης μεγίστου πλάτους βολβού (μεταβολή κατά y)	64
Σχήμα 39. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Σημείο επί της καμπύλης μεγίστου πλάτους βολβού (μεταβολή κατά z).....	64
Σχήμα 40. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Σημείο μεγίστου πλάτους νομέα πρωραίας καθέτου (μεταβολή κατά y)	65
Σχήμα 41. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Διαμήκης θέση αρχής παράλληλου τμήματος	65
Σχήμα 42. Διακύμανση περιορισμού σχεδίασης-% Μεταβολή LCB.....	66
Σχήμα 43. Νομείς αρχικής (μαύρες καμπύλες) και βελτιστοποιημένης (κόκκινες καμπύλες) γεωμετρίας.....	69
Σχήμα 44. Καμπύλη RAO επιτάχυνσης πατρικής (μπλε) και βελτιστοποιημένης (κόκκινη) γάστρας – T=11.44m	69
Σχήμα 45. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης στο βύθισμα σχεδίασης με κριτήρια την αντίσταση κυματισμού και την μέγιστη επιτάχυνση στην πλήρη	70
Σχήμα 46. Λεπτομέρεια Σχήματος 42 – Περιοχή βέλτιστων λύσεων	71
Σχήμα 47. Διασπορά λύσεων-Αντίσταση κυματισμού- T=11.44m	71
Σχήμα 48. Διασπορά λύσεων-Επιτάχυνση στην πλήρη- T=11.44m	72
Σχήμα 49. Διασπορά λύσεων-Αντίσταση κυματισμού- T=9.65m	72
Σχήμα 50. Διασπορά λύσεων-Επιτάχυνση στην πλήρη- T=9.65m	73
Σχήμα 51. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Γωνία εισόδου ισάλου	73
Σχήμα 52. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Σημείο επί της καμπύλης μεγίστου πλάτους βολβού (μεταβολή κατά y)	74
Σχήμα 53. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Σημείο επί της καμπύλης μεγίστου πλάτους βολβού (μεταβολή κατά z).....	74

Σχήμα 54. . Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Σημείο μεγίστου πλάτους νομέα πρωραίας καθέτου (μεταβολή κατά γ)	75
Σχήμα 55. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Διαμήκης θέση αρχής παράλληλου τμήματος	75
Σχήμα 56. . Διακύμανση περιορισμού σχεδίασης-% Μεταβολή LCB	76
Σχήμα 57. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης στο βύθισμα σχεδίασης ως προς την συνδυασμένη αντίσταση κυματισμού και την επιτάχυνση στην πλώρη στα δύο βυθίσματα.	78
Σχήμα 58. Λεπτομέρεια Σχήματος 54 – Περιοχή βέλτιστων λύσεων	79
Σχήμα 59. Νομείς αρχικής (μαύρες καμπύλες) και βελτιστοποιημένης (κόκκινες καμπύλες) γεωμετρίας 2- βελτιστοποίηση στο βύθισμα σχεδ	80
Σχήμα 60. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης στο βύθισμα σχεδίασης με κριτήρια την αντίσταση κυματισμού και την μέγιστη επιτάχυνση στην πλώρη	81
Σχήμα 61. Λεπτομέρεια Σχήματος 57 – Περιοχή βέλτιστων λύσεων	82
Σχήμα 62. Διασπορά λύσεων-Αντίσταση κυματισμού- $T=9.65m$	82
Σχήμα 63. Διασπορά λύσεων-Επιτάχυνση στην πλώρη- $T=9.65m$	83
Σχήμα 64. Διασπορά λύσεων-Επιτάχυνση στην πλώρη- $T=11.44m$	83
Σχήμα 65. Διασπορά λύσεων-Αντίσταση κυματισμού- $T=11.44m$	84
Σχήμα 66. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Γωνία εισόδου ισάλου	84
Σχήμα 67. . Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Σημείο επί της καμπύλης μεγίστου πλάτους βολβού (μεταβολή κατά z).....	85
Σχήμα 68. . Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Σημείο επί της καμπύλης μεγίστου πλάτους βολβού (μεταβολή κατά γ)	85
Σχήμα 69. . Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Σημείο μεγίστου πλάτους νομέα πρωραίας καθέτου (μεταβολή κατά γ)	86
Σχήμα 70. Διακύμανση μεταβλητής σχεδίασης-Διαμήκης θέση αρχής παράλληλου τμήματος	86
Σχήμα 71. Διακύμανση περιορισμού σχεδίασης-% Μεταβολή LCB	87
Σχήμα 72. Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης στο βύθισμα σχεδίασης ως προς την συνδυασμένη αντίσταση κυματισμού και την επιτάχυνση στην πλώρη στα δύο βυθίσματα	89
Σχήμα 73. Λεπτομέρεια Σχήματος 69 -Περιοχή βέλτιστων λύσεων	90
Σχήμα 74. Νομείς αρχικής (μαύρες καμπύλες) και βελτιστοποιημένης (κόκκινες καμπύλες) γεωμετρίας 2- βελτιστοποίηση στο βύθισμα 9.65m	92
Εικόνα 75.Μέτπλα Pareto από τρεις διαφορετικές διαδικασίες βελτιστοποίησης	94

Βιβλιογραφία

1. A. Papanikolaou et al., «*Integrated Design and Multiobjective Optimization Approach to Ship Design*».
2. A. Papanikolaou. *Ship Design: Methodologies of Preliminary Design*.
3. A.Papanikolaou.Holistic ship design optimization. *Elsevier*. 2009.
4. Abdullah Konaka, David W. Coitb, Alice E. Smithc. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial.
5. Delft, TU. *Introduction in Ship Hydromechanics*. 2002.
6. Delft, TU. *Offshore Hydromechanics*. 2001 .
7. Dongkyung N., Cheol Hoon P. Multiobjective Simulated Annealing: A Comparative Study to Evolutionary Algorithms. 2000.
8. Fogel, D. An Introduction to Simulated Evolutionary Optimization. 1994.
9. Frank Manual.
10. Frank, W. Oscillation of Cylinders in or Below the Free Surface of Deep Fluids,Rep. No. 2375, Washington, D.C. 1967.
11. Friendship Systems, Friendship Framework User's Guide,2012.
12. Gregory J. Grigoropoulos, Dimitris Chalkias. *Hull-form optimization in calm and rough water*. Elsevier, 2009.
13. <https://www.caeses.com/>.
14. J. Holtrop, G.G.J. Mennen,. An approximate Power Prediction Method. *International Shpbuilding Progress*. 1978.
15. J.E Choi et al. Resistance and propulsion characteristics of various commercial ships based on CFD results. *Elsevier*. 2010.
16. Kalyanmoy Deb, Sameer Agarwal, T. Meyarivan. A fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm : NSGA-II. 2002.
17. Keunjae Kim et al. Hydrodynamic optimization of twin-skeg LNG ships by CFD and model testing. 2014.

18. Kundu P. K., Cohen I.M. *Fluid Mechanics, 4th Edition*. 2010.
19. Lewandowski, E. *The dynamics of marine craft*. s.l. : World Scientific, 2004.
20. Lewis, Edward V. *Principles of Naval Architecture*. Vols. 2 Resistance, Propulsion and Vibration, 1988.
21. Lewis, Edward V. *Principles of Naval Architecture*. Vol. 3 Motions in Waves and Controllability, 1988.
22. 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.
23. Lloyd, A.R.J.M. *SEAKEEPING ship behaviour in rough water*. ELLIS HORWOOD LIMITED, 1989.
24. Ma. Guadalupe Castillio Tapia, Carlos A. Coello Coello. «Applications of Multi-Objective Evolutionary Algorithms in Economics and Finance : A Survey».
25. Ohkusu, M. *Advances in Marine Hydrodynamics Volume 5*. s.l. : Computational Mechanics Publications, 1996.
26. Salvesen N., Tuck E.O. , Faltinsen O. *Ship motions and sea loads*. s.l. : Transactions SNAME. Vol. 78, 1970.
27. Seshardi, Aravind. «A Fast Elitist Multi-Objective Genetic Algorithm: NSGA-II».
28. *SPP-86 , User's Manual, Report No: NAL-114-F-94, Lab. Ships and Marine Hydrodynamics, National Technical Univ. of Athens, 1994.*
29. *SWAN 2 , User Manual : «Ship Flow Simulation in Calm Water and in Waves», Boston Marine Consulting Inc., Boston MA 02116, USA, 2002.*
30. www.openeering.com. MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION AND GENETIC ALGORITHMS.
31. Zhu Z.Y., Leung K.S. *An Enhanced Annealing Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization Problems*.
32. Αθανασούλης Γ.Α., Μπελιμπασάκης Κ.Α. *Δυναμική Πλοίου*. Αθήνα , 2012.

33. Μακρής Δ. *Δυνατότητες της παραμετρικής μοντελοποίησης για τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης πλοίων, Διπλωματική Εργασία, 2012.*
34. Μακρης Δ. «Παραμετρική μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς ταχύπλοου Ε/Γ-Ο/Γ». 2015.
35. Πολίτη Γ.Κ. *Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου, Αθήνα, 2011.*
36. Τσαγγάρης Σ. *Μηχανική των Ρευστών, Εκδόσεις Συμεών, 2005.*
37. Φλώριος Κ. Πολυκριτηριακή συνδυαστική βελτιστοποίηση. Μαθηματική προτυποποίηση και εφαρμογή στον ενεργειακό σχεδιασμό και την οικονομετρία. 2010.