

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



**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

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

**Δημήτριος Δεμερούκας**

**Επιβλέπων: Γρηγορόπουλος Γρηγόριος**  
**Καθηγητής ΕΜΠ**

*Αθήνα 2016*



## Πρόλογος

Η διπλωματική εργασία αποτελεί το τελευταίο κεφάλαιο των σπουδών μου στο τμήμα της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Πραγματοποιήθηκε στον τομέα Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής με επιβλέποντα καθηγητή τον κ. Γ. Γρηγορόπουλο.

Αντικείμενο της παρούσης διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η βελτιστοποίηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς ενός πλοίου. Η παρούσα εργασία εξέτασε τη μελέτη ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Με το πέρας της εργασίας οι γνώσεις μου στον τομέα της υδροδυναμικής, της παραμετρικής σχεδίασης αλλά και στον προγραμματισμό που αφορά τους κώδικες βελτιστοποίησης εμπλουτίστηκαν. Σε συνδυασμό με τα υπόλοιπα μαθήματα κατά τα πέντε έτη φοίτησης μου θεωρώ ότι απέκτησα γνώσεις σε ένα εύρος του τομέα της ναυπηγικής, οι οποίες θα αποτελέσουν βάση για μια αποδοτική επαγγελματική καριέρα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές της σχολής για την πολύτιμη συνεισφορά τους στη διαμόρφωση του τρόπου σκέψης μου ως νέου μηχανικού αλλά και για όσα διδάχθηκα μέσω των γνώσεων και των εμπειριών τους. Ξεχωριστές ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στον κ. Γρηγορόπουλο για την καθοδήγησή του και την αμέριστη συμπαράσταση κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας αλλά και οποιαδήποτε στιγμή χρειάστηκα την βοήθεια και την στήριξή του.

Τέλος, θα ήθελα να αφιερώσω την παρούσα διπλωματική εργασία στην οικογένεια μου, Βασίλη, Αρετή και Παναγιώτη, που χάρη στην στήριξη και τις θυσίες τους αποφοιτώ ως Ναυπηγός Μηχανολόγος Μηχανικός.

Δημήτριος Δεμερούκας

Αθήνα, Μάιος 2016

## Περίληψη

Οι νέες απαιτήσεις στον τομέα της ναυπηγικής, που οφείλονται στους νέους κανονισμούς που θεσπίζονται από τους διεθνείς ναυτιλιακούς οργανισμούς και στις απαιτήσεις για όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ενεργειακή οικονομία, οδηγούν στη δημιουργία νέων σχεδιάσεων για όλους τους τύπους των πλοίων. Η βασική απαίτηση για δραστική μείωση των ρύπων που εκπέμπουν τα πλοία ανάγκασε τους ναυπηγούς στην εύρεση αποδοτικών λύσεων. Ως εκ τούτου η παραγωγή όλο και αποδοτικότερων πλοίων έγινε επιτακτική, με τη μείωση της απαιτούμενης ισχύος για την πρόωση των πλοίων να αποτελεί μια από τις βασικές μεθόδους επίτευξής τους.

Προκειμένου να βελτιώσουν ένα σχέδιο, οι ναυπηγοί έχουν πλέον στη διάθεσή τους τα συστήματα CAD/CAE, τα οποία προσφέρουν τη 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 αποτέλεσε η βελτιστοποίηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς ενός πλοίου. Η παρούσα εργασία εξέτασε τη μελέτη ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Αρχικά πραγματοποιήθηκε η διαμόρφωση της γάστρας από κατασκευαστικά σχέδια και κατόπιν η δημιουργία του παραμετρικού μοντέλου-με τη χρήση ενός λογισμικού - ώστε ένας περιορισμένος αριθμός μεταβλητών σχεδίασης να επηρεάζει στο μέγιστο βαθμό τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με την υδροδυναμική απόδοση. Η υδροδυναμική αξιολόγηση των παραχθειςών 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. Εκτιμήθηκε η επαγόμενη επιτάχυνση στην πλώρη κατά την πλεύση σε αρμονικούς κυματισμούς διαφόρων συχνοτήτων ενώ η μέγιστη τιμή της ήταν το μέγεθος ελαχιστοποίησης. Η διαδικασία βελτιστοποίησης πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ενός γενετικού αλγορίθμου. Από τη διακύμανση του συνόλου των μεταβλητών σχεδίασης προέκυψαν οι εναλλακτικές γεωμετρίες των οποίων οι επιδόσεις αξιολογήθηκαν ώστε να καταλήξουμε σε ένα σύνολο διαφορετικών μορφών γάστρας με καλύτερες επιδόσεις από την αρχική.

# Περιεχόμενα

Πρόλογος .....	1
Περίληψη .....	2
<b>1 Τα Πλοία Μεταφοράς Εμπορευματοκιβωτίων .....</b>	<b>5</b>
1.1 Ιστορικά Στοιχεία.....	5
1.2 Χαρακτηριστικά του Πλοίου Μεταφοράς Εμπορευματοκιβωτίων .....	6
1.3 Οικονομία Κλίμακας.....	8
1.4 Σχεδίαση ενός Πλοίου Μεταφοράς Εμπορευματοκιβωτίων.....	9
<b>2 Η Αντίσταση του Πλοίου .....</b>	<b>10</b>
2.1 Εισαγωγή.....	10
2.2 Είδη Αντίστασης.....	10
2.3 Αντίσταση Κυματισμού .....	11
2.4 Αντίσταση Τριβής .....	13
2.5 Αντίσταση Λόγω Πιέσεων Συνεκτικότητας.....	15
2.6 Αντίσταση Ανέμου.....	15
2.7 Αντίσταση Παρελκομένων.....	16
<b>3 Η Απόκριση του Πλοίου στους Θαλάσσιους Κυματισμούς.....</b>	<b>17</b>
3.1 Εισαγωγή.....	17
3.2 Οι Κινήσεις του Πλοίου .....	17
3.3 Η Συμπεριφορά του Πλοίου σε Κυματισμούς.....	20
3.4 Η θεωρία του Frank .....	24
<b>4 Συστήματα CAD/CAM και βελτιστοποίηση σχεδίασης πλοίων .....</b>	<b>29</b>
4.1 Γενικά περί μελέτης πλοίου .....	29
4.2 Η υδροδυναμική βελτιστοποίηση πλοίου .....	32
4.3 Παραμετρική σχεδίαση.....	33
<b>5 Βελτιστοποίηση με χρήση Αλγορίθμων.....</b>	<b>36</b>
5.1 Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι.....	36
5.2 Πρόβλημα Βελτιστοποίησης Μεικτών Ακεραίων .....	38
5.3 Συνάρτηση Αξιολόγησης .....	39
5.4 Ο Γενετικός Αλγόριθμος NSGA II.....	40
<b>6 Παραμετρική Μοντελοποίηση .....</b>	<b>44</b>
6.1 Γενικά Στοιχεία της Παραμετρικής Σχεδίασης.....	44

6.2 Σχεδίαση Βασικών Καμπυλών της Μορφής της Γάστρας .....	46
6.3 Διαμόρφωση Νομέων .....	49
6.4 Διαμόρφωση Βολβοειδούς Πλώρης .....	51
6.5 Παραγωγή Επιφανειών και Επιλογή Παραμέτρων Σχεδίασης .....	52
7 Διαδικασία Βελτιστοποίησης .....	56
7.1 Εισαγωγή.....	56
7.2 Υπολογιστικοί Κώδικες και Προγράμματα .....	57
7.3 Αποτελέσματα Μονοκριτηριακής Βελτιστοποίησης.....	61
7.4 Αποτελέσματα Πολυκριτηριακής Βελτιστοποίησης .....	80
7.5 Συμπεράσματα .....	98
Παράρτημα Α - FRIENDSHIP-FRAMEWORK.....	102
Παράρτημα Β – Λογισμικά και γλώσσες προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκαν .....	105
Παράρτημα Γ– Συγκεντρωτική λίστα εικόνων .....	106
Παράρτημα Δ– Συγκεντρωτική λίστα πινάκων.....	109
Βιβλιογραφία .....	110

# 1 Τα Πλοία Μεταφοράς Εμπορευματοκιβωτίων

## 1.1 Ιστορικά Στοιχεία

Τα εμπορευματοκιβώτια, σήμερα γνωστά ως μεταλλικά κουτιά μεταφοράς προϊόντων, φτάνουν πίσω στον 18<sup>ο</sup> αιώνα. Πρωτοεμφανίστηκαν τότε ως καρότσια με σκοπό να εξυπηρετούν τις ανάγκες των ορυχείων στη Μεγάλη Βρετανία κουβαλώντας υλικά πάνω σε ράγες και των οποίων η μεταφορά γινόταν με άλογα. Με την εμφάνιση των ατμομηχανών Βρετανοί και Αμερικάνοι έμποροι άρχισαν να χρησιμοποιούν κλειστά κιβώτια με σκοπό την μεταφορά φορτίων σιδήρου και κάρβουνου μεγάλου βάρους. Για πολλά χρόνια αυτού του είδους το εμπόριο γινόταν σε πολύ μικρή κλίμακα μέχρι τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα που άρχισε να διαδίδεται και να παίρνει μεγαλύτερες διαστάσεις. Από το 1929 ο κεντρικός σιδηροδρομικός σταθμός της Πενσυλβάνιας χρησιμοποιούσε 300 εμπορευματοκιβώτια ενώ το 1932 η Μεγάλη Βρετανία είχε 6000 στο δίκτυό της, μερικά από τα οποία ήταν ψυγεία για τη μεταφορά οπωροκηπευτικών.

Η χρήση των εμπορευματοκιβωτίων έκανε την εμφάνισή της στις θαλάσσιες μεταφορές το 1955, όταν ο Malcolm McLean μετασκεύασε ένα δεξαμενόπλοιο, το Ideal X, σε πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων με χωρητικότητα που έφτανε τα 58 κιβώτια και έκανε το ταξίδι από το Newark στο Texas.



Εικόνα 1: Ideal X

Ένας ακόμα πρωτοπόρος υπήρξε μια ναυτιλιακή εταιρεία στις δυτικές ακτές των ΗΠΑ, η Matson Navigation Co, η οποία άρχισε να μετατρέπει φορτηγά πλοία με στόχο τη μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων στο κατάστρωμα. Τέτοιο ήταν το Hawaiian Citizen με δυνατότητα μεταφοράς μέχρι 75 κιβωτίων στο κατάστρωμα.



*Εικόνα 2: Hawaiian Citizen*

Έτσι, με την πάροδο των χρόνων φτάσαμε στην εμφάνιση του πρώτου πλοίου εξ ολοκλήρου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων από μία Ολλανδική εταιρεία την Nedlloyd Delft, η οποία κατασκεύασε το 1970 ένα πλοίο με δυνατότητα μεταφοράς 2600 κιβωτίων. Σήμερα, τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων αποτελούν μια κατηγορία πλοίων, η οποία καλύπτει ένα μεγάλο ποσοστό του παγκόσμιου εμπορίου και χαρακτηρίζονται από την υψηλή τους ταχύτητα και το μέγεθός τους, που φτάνει πλέον στη δυνατότητα μεταφοράς 19000 τυποποιημένων εμπορευματοκιβωτίων (TEU).

## **1.2 Χαρακτηριστικά του Πλοίο Μεταφοράς Εμπορευματοκιβωτίων**

Τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων αποτελούν περίπου το 10% του παγκόσμιου στόλου. Το μέσο μέγεθός τους φτάνει τα 4000 TEU. Η γάστρα χωρίζεται σε αρκετά κύτη ενώ το μήκος και το πλάτος των κυτών επιλέγονται για να ικανοποιούν τις τυποποιημένες διαστάσεις των εμπορευματοκιβωτίων. Επίσης, ένας αριθμός κιβωτίων, μεγαλύτερος από αυτόν των κυτών, μεταφέρεται στο κατάστρωμα του πλοίου. Με αυτόν τον τρόπο οι διαστάσεις της γάστρας είναι μικρότερες και μειώνεται το κόστος κατασκευής. Το κατάστρωμα διαβροχής χαρακτηρίζεται από μεγάλα ανοίγματα για να είναι ευκολότερη η κάθετη φορτοεκφόρτωση των εμπορευματοκιβωτίων. Για να αυξηθεί η αντοχή της κατασκευής χρησιμοποιούνται διπλά τοιχώματα με μεγάλο πάχος. Παράλληλα, για την ασφαλέστερη στοιβασία των εμπορευματοκιβωτίων και την γρήγορη φόρτωση και εκφόρτωση, τα κύτη διαθέτουν



μεταλλικές κυνέλες οδηγούς, στις τυποποιημένες διαστάσεις. Οι δύο πύργοι εκατέρωθεν των κυτών χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά έρματος όταν το πλοίο ταξιδεύει χωρίς φορτίο.

Η αποστολή του συγκεκριμένου τύπου πλοίου είναι η μεταφορά διάφορων τύπων φορτίου. Η περιοχή που θα ταξιδεύει το πλοίο και το αν θα πραγματοποιεί συγκεκριμένες διαδρομές, είναι σημαντικά στοιχεία της σχεδίασής του καθώς καθορίζουν τις χωρητικότητες των δεξαμενών. Ενδέχεται να υπάρχει περιορισμός σε κάποια από τις διαστάσεις και να απαιτείται η ικανοποίηση συγκεκριμένων κανόνων, όπως για παράδειγμα η αντοχή της κατασκευής σε πολικές θερμοκρασίες. Επιπλέον, εξαιρετικά σημαντικοί παράγοντες της σχεδίασης ενός πλοίου είναι ο τύπος του φορτίου και η χωρητικότητα που απαιτείται. Μια ακόμα σημαντική σχεδιαστική παράμετρος είναι η ταχύτητα καθώς δεν επηρεάζει μόνο το μηχανολογικό κομμάτι αλλά και τη μορφή που θα έχει η γάστρα.



Εικόνα 3: Διαμόρφωση των κυτών



Εικόνα 4: MSC Oscar - 19224 TEU

### 1.3 Οικονομία Κλίμακας

Η οικονομία κλίμακας είναι ανέκαθεν ένας σημαντικός παράγοντας στη ναυτιλία. Η ραγδαία αναπτυσσόμενη ανάγκη για μεταφορά προϊόντων με εμπορευματοκιβώτια και το χαμηλότερο κόστος μεταφοράς ανά κιβώτιο οδηγεί τους πλοιοκτήτες να κατασκευάζουν ακόμα μεγαλύτερα πλοία με αποτέλεσμα να έχουν και μικρότερο κόστος ανά ταξίδι. Ανάλογα με το μέγεθός τους τα containerships (παγκόσμια ορολογία) κατατάσσονται σε διάφορες κατηγορίες. Μια κατηγοριοποίηση είναι ο διαχωρισμός τους σε γενεές. Η πρώτη γενεά είναι πλοία που μεταφέρουν μέχρι 1000 TEU και η έκτη μέχρι 8000 TEU. Μια ακόμα κατηγοριοποίηση είναι ο τύπος του πλοίου όπως παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Category	Size group (TEU)
Feeder	100-500
Feedermax	500-1000
Handy	1000-2000
Sub-Panamax	2000-3000
Panamax	Over 3000
Post-Panamax	Over 4000
Super Post-Panamax	Over 10000

*Πίνακας 1: Κατηγοριοποίηση ανάλογα τον τύπο πλοίου<sup>1</sup>*

Η διώρυγα του Παναμά αποτελούσε για πολλά χρόνια έναν σημαντικό σχεδιαστικό περιορισμό για τα containerships καθώς οι διαστάσεις της επέτρεπαν τη διέλευση πλοίων με μέγιστο πλάτος 32.25 m και με περιορισμένο βύθισμα. Για αυτό το λόγο τα πλοία που έχουν τη δυνατότητα να διέρχονται την διώρυγα αποτελούν μια πολύ βασική κατηγορία. Με την αναμενόμενη διαπλάτυνση της διώρυγας όμως θα υπάρξει μια πολύ ευρύτερη εφαρμογή της οικονομίας κλίμακας, ελευθερία σχεδίασης και εμφάνιση περισσότερων πλοίων κατηγορίας Post-Panamax. Έτσι, είναι πιθανή η περεταίρω μείωση του κόστους μεταφοράς των εμπορευματοκιβωτίων και η ακόμα μεγαλύτερη ανάπτυξη αυτού του τομέα.

<sup>1</sup> Shipping Innovation, Niko Wijmolst & Tor Wergeland, IOS Press, Amsterdam 2009

## 1.4 Σχεδίαση ενός Πλοίου Μεταφοράς Εμπορευματοκιβωτίων

Η σχεδίαση ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων ακολουθεί πολλές αρχές που αναφέρθηκαν παραπάνω. Όμως είναι αυτονόητο ότι και αρκετές άλλες παράμετροι πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη σχεδίαση ενός τέτοιου τύπου πλοίου. Ελάχιστες απαιτούμενες διαστάσεις συγκεκριμένων τμημάτων της γάστρας, όπως η προραία φρακτή σύγκρουσης, το ύψος του διπύθμενου και η απόσταση των διπλών τοιχωμάτων, είναι μόνο μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα.

Η απαίτηση για μεγάλα καταστρώματα σε συνδυασμό με την λεπτόγραμμη γάστρα οδηγούν σε έντονες γωνίες στο προφίλ του πλοίου πλώρα και πρίμα. Τέλος, μια καίρια σχεδιαστική παράμετρος είναι ο συντελεστής γάστρας  $C_b$ . Στους περισσότερους τύπους πλοίων ο συντελεστής αυτός κυμαίνεται πάνω από το 0.8, τα containerships έχουν μικρότερο του 0.7. Αυτό οφείλεται στην ταχύτητα υπηρεσίας αυτών των πλοίων. Μια τυπική ταχύτητα με την οποία ταξιδεύουν αυτά τα πλοία είναι οι 25 κόμβοι, μια ταχύτητα χαρακτηριστικά μεγαλύτερη από των άλλων εμπορικών πλοίων, η οποία είναι γύρω στους 14 κόμβους. Λόγω των υψηλών ταχυτήτων, με τις οποίες λειτουργούν αυτά τα πλοία, θεωρείται απαραίτητο να παραμείνει σε χαμηλά επίπεδα η αντίσταση τριβής και κυματισμού, κάτι που επιτυγχάνεται με χαμηλούς συντελεστές γάστρας.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, στα containership κρίνεται ακόμα πιο σημαντική η εύρεση της βέλτιστης σχεδίασης, με σκοπό τον περιορισμό της αντίστασής τους, καθώς, λόγω των μεγάλων ταχυτήτων με τις οποίες ταξιδεύουν, τα κόστη λειτουργίας μπορεί να είναι πολύ υψηλά.

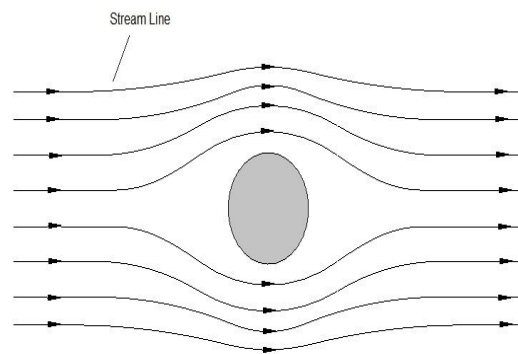
## 2 Η Αντίσταση του Πλοίου

### 2.1 Εισαγωγή

Είναι απαραίτητο κάθε πλοίο να έχει ένα μέσο πρόωσης για να δίνει ώση μέσα στο νερό. Έχει γίνει ξεκάθαρο ότι, αφού το μέσο πρόωσης επηρεάζει την αντίσταση του πλοίου, δεν μπορεί γίνει ακριβής μελέτη αυτών των δύο ξεχωριστά. Παρόλα αυτά, για λόγους ευκολίας η συνολική μελέτη θεωρείται αποτέλεσμα σύζευξης περισσότερων επιμέρους προβλημάτων. Έτσι, αν ήταν δυνατό η γυμνή γάστρα ενός πλοίου να οδηγηθεί από μία εξωτερική πηγή ώσης, η οποία δεν θα αλληλοεπιδρούσε με τη γάστρα ή το νερό, θα είχαμε την μέτρηση μίας ολικής αντίστασης  $R_T$ , η οποία θα ήταν άθροισμα άλλων επιμέρους μορφών αντίστασης. Η διαφοροποίηση αυτών των ειδών αντίστασης είναι απαραίτητη διότι μεταβάλλονται διαφορετικά κατά την μετάβαση από μετρήσεις σε κλίμακα μοντέλου σε κανονική κλίμακα.

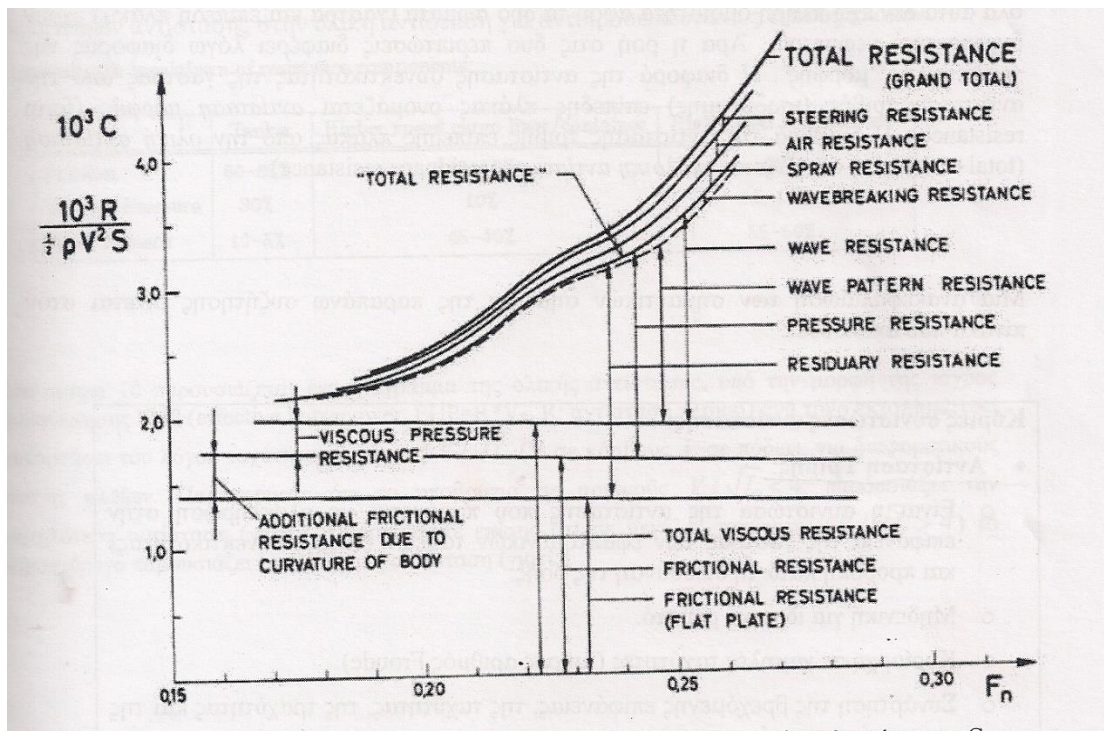
### 2.2 Είδη Αντίστασης

Η κλασική θεωρία της υδροδυναμικής έχει δείξει ότι ένα σώμα πλήρως βυθισμένο σε ρευστό μηδενικού ιξώδους παρουσιάζει μηδενική αντίσταση. Με όποιον τρόπο και αν επηρεαστεί η ροή λόγω της ύπαρξης του σώματος, αυτή θα επιστρέψει στην αρχική της κατάσταση χωρίς να ασκεί κάποια δύναμη στο σώμα. Υπάρχουν μεταβλητές, που αφορούν την πίεση, που καθώς οι γραμμές ροής του ρευστού μεταβάλλονται γύρω από το σώμα αλλάζουν τις ταχύτητες των σωματιδίων. Από αυτήν την σκοπιά και σύμφωνα με την θεωρία του Bernoulli αυξημένες ταχύτητες σχετίζονται με τη μείωση των πιέσεων γύρω από το σώμα. Κατά αυτόν τον τρόπο μπορεί στο σώμα να ασκούνται δυνάμεις μη αμελητέου πλάτους, οι οποίες όμως ασκούνται αναιρώντας η μία την άλλη.



Εικόνα 5: Ροή γύρω από σώμα

Σε πρακτικό επίπεδο κάθε ρευστό έχει ιξώδες και σε ένα πλήρως βυθισμένο σώμα θα ασκείται αντίσταση τριβής. Επιπρόσθετα, όταν το σώμα προσεγγίζει την επιφάνεια οι μεταβλητές της πίεσης μπορούν να μεταφραστούν ως κάθετες διαταραχές της επιφάνειας. Με άλλα λόγια αυτές οι διαταραχές αποτελούν τον κυματισμό που δημιουργείται στην επιφάνεια του ρευστού, ο οποίος επηρεάζει την ισορροπία των πιέσεων που ασκούνται στο σώμα, οδηγώντας στη δημιουργία αντίστασης τριβής. Το πλάτος της αντίστασης τριβής είναι άμεσα συνυφασμένο με την ενέργεια του δημιουργούμενου κυματισμού.



Εικόνα 6: Συνιστώσες Αντίστασης Πλοίου<sup>2</sup>

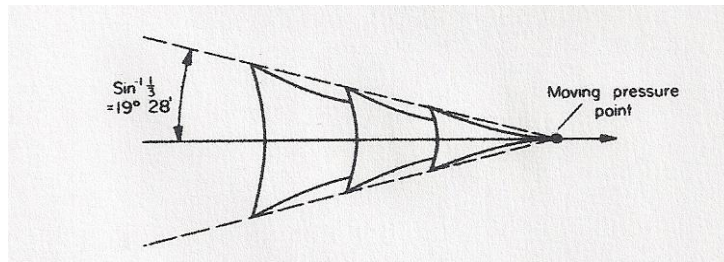
Η συνολική αντίσταση ενός πλοίου κινούμενου σε ήρεμο νερό μπορεί να αναλυθεί σε διάφορες επιμέρους αντιστάσεις. Αυτές είναι η αντίσταση κυματισμού, η αντίσταση τριβής, η αντίσταση λόγω πιέσεων συνεκτικότητας, η αντίσταση παρελκομένων και η αντίσταση ανέμου.

### 2.3 Αντίσταση Κυματισμού

Είναι γνωστό ότι ένα κινούμενο σώμα σε ήρεμο νερό παράγει ένα σύστημα κυματισμού. Αυτό το σύστημα παράγεται από το πεδίο πιέσεων που δημιουργείται γύρω από το σώμα και μεταφέρεται σαν ενέργεια από το σώμα στο ρευστό. Σε ότι αφορά το σώμα, αυτή ενέργεια θα μεταφραστεί ως δημιουργούμενη δύναμη αντίρροπη της κίνησής του. Αυτή η δύναμη αποτελεί την αντίσταση κυματισμού.

<sup>2</sup> Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου, Γ.Κ. Πολίτης, ΕΜΠ, Αθήνα, 2011





Εικόνα 7: Το Σύστημα Κυματισμού κατά Kelvin<sup>3</sup>

Ένα βυθισμένο σώμα δέχεται μια κάθετη δύναμη προς τον πυθμένα, η οποία οφείλεται στη δημιουργία κυματισμού στην επιφάνεια του ρευστού. Το μέγεθος αυτής της δύναμης μειώνεται καθώς αυξάνεται το βάθος και μέχρι να γίνει αμελητέα. Αυτό συνήθως συμβαίνει σε βάθη περίπου στο μισό του μήκους του αντίστοιχου σώματος. Σε ένα κυματισμό μήκους  $\lambda$  σε βαθύ νερό, η ταχύτητα του μπορεί να οριστεί ως:

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

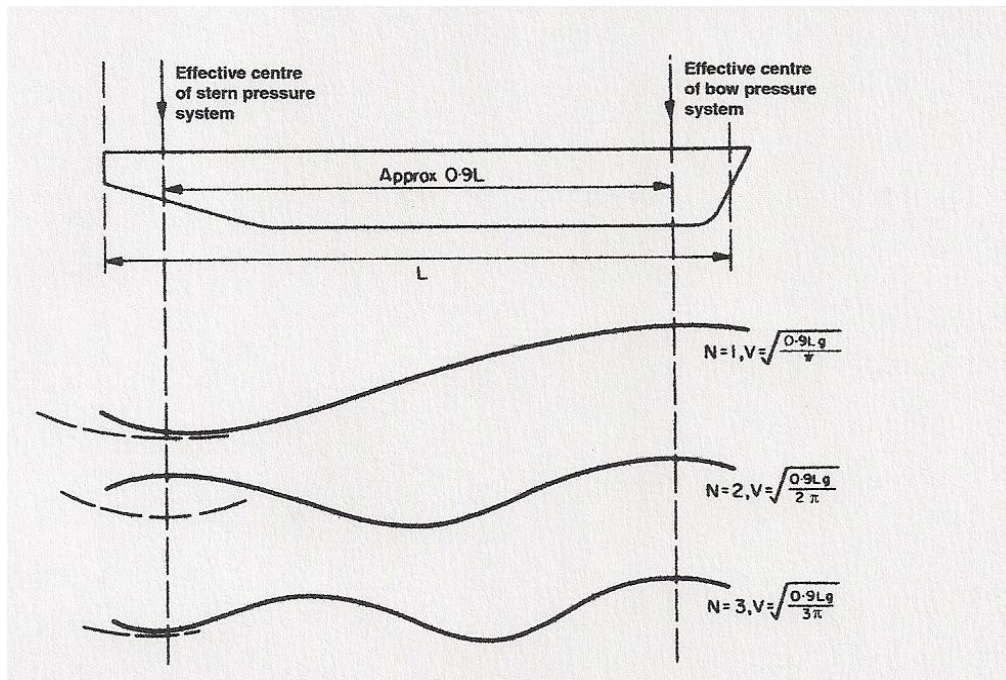
Επειδή ο κυματισμός κινείται μαζί με το πλοίο, η ταχύτητα  $C$  πρέπει να είναι ίση με την ταχύτητα του πλοίου  $V$  και το μήκος  $\lambda$  ανάλογο του μήκους του πλοίου  $L$ . Για αυτό το λόγο ο παραπάνω αδιάστατος συντελεστής μπορεί να εκφραστεί ως  $V^2/g\lambda$  ή  $V/\sqrt{(g\lambda)}$ . Ο συντελεστής αυτός είναι σημαντικός στη μελέτη της αντίστασης κυματισμού και ονομάζεται αριθμός Froude.

Υδροδυναμικά, ένα πλοίο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα κινούμενο πεδίο πιέσεων. Ο Kelvin έκανε την απλούστευση ότι ένα πλοίο μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένα κινούμενο σημείο πίεσης, που ταξιδεύει σε ευθεία γραμμή, δημιουργώντας ένα σύστημα εγκάρσιων κυματισμών, που ακολουθεί το σημείο πίεσης και ένα σύστημα αποκλινόντων κυματισμών, που απλώνονται πίσω από το σημείο πίεσης. Στην πραγματικότητα το σύστημα κυματισμού ενός πλοίου είναι πιο περίπλοκο. Αρχικά μπορεί να θεωρηθεί ως συνδυασμός ενός παραγόμενου συστήματος από την πλώρη και ενός από την πρύμνη. Σε ότι αφορά τους αποκλίνοντες κυματισμούς, αποδεικνύεται ότι αν το μέγιστο ύψος των κυματισμών είναι  $a$  τότε σε εκείνο το σημείο η γωνία τους από τη μέση γραμμή θα είναι  $2a$ . Τα δύο συστήματα εγκάρσιων κυματισμών έχουν ένα μήκος κύματος  $2\pi V^2/g$ . Το πλάτος των εγκάρσιων κυματισμών αυξάνεται καθώς οι αποκλίνοντες διαδίδονται. Η συνολική ενέργεια κάθε κυματισμού είναι σταθερή, έτσι ώστε το ύψος του να μειώνεται σταδιακά καθώς το πλοίο απομακρύνεται από αυτόν. Καθώς στις περισσότερες ταχύτητες τα δύο εγκάρσια συστήματα εμφανίζονται πρίμα του πλοίου υπάρχει μια αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Αν οι κορυφές των δύο κυματισμών συμβάλλουν έχουμε αυξημένο ύψος κύματος, ενώ αν η μία κοιλάδα συμπίπτει με την άλλη κορυφή έχουμε μειωμένο ύψος κύματος. Οπότε η αντίσταση κυματισμού εξαρτάται άμεσα από την ταχύτητα αλλά και από την απόσταση μεταξύ πλώρης και πρύμνης. Ο Froude μελέτησε την επιρροή του μήκους στην αντίσταση και έφτασε στο συμπέρασμα ότι τα δύο εγκάρσια συστήματα απέχουν συνήθως

<sup>3</sup> Basic Ship Theory, K.J Rawson & E.C Tupper, Butterworth Heinemann, London, 2001

μεταξύ τους  $0.9L$ . Η συνθήκη έτσι ώστε η μια κοιλάδα να συμπίπτει με την κορφή του άλλου κυματισμού είναι:

$$\frac{V^2}{0.9L} = \frac{g}{N\pi}$$



Εικόνα 8: Συμβολή Πρυμναίου και Πρωραίου Συστήματος<sup>4</sup>

## 2.4 Αντίσταση Τριβής

Το νερό, μέσω του οποίου το πλοίο κινείται, έχει ιξώδες χαρακτηριστικό που παρουσιάζει πρακτικά κάθε ρευστό. Όταν ένα σώμα κινείται σε ένα ρευστό που βρίσκεται σε ηρεμία, ένα λεπτό στρώμα του ρευστού εφάπτεται στην επιφάνεια του ρευστού και δεν έχει ταχύτητα σχετική με το σώμα. Παράλληλα, σε μια απόσταση από το σώμα το ρευστό παραμένει σε ηρεμία. Η ταχύτητα παρουσιάζει μεγάλες μεταβολές κοντά στο σώμα και σταδιακά μειώνεται καθώς απομακρύνεται από αυτό. Η περιοχή που παρατηρούνται μεγάλες μεταβολές της ταχύτητας ονομάζεται οριακό στρώμα. Ο ορισμός του όρου πάχος οριακού στρώματος είναι σχετικά αυθαίρετος καθώς στη θεωρία εκτείνεται μέχρι το άπειρο. Συνηθίζεται όμως να ορίζεται ως πάχος οριακού στρώματος η απόσταση όπου η ταχύτητα του ρευστού είναι 1% της ταχύτητας με την οποία κινείται το σώμα.

<sup>4</sup> Basic Ship Theory, K.J Rawson & E.C Tupper, Butterworth Heinemann, London, 2001

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

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

Αυτή η θεώρηση έχει εφαρμογή στην περίπτωση στρωτής ροής όπου κάθε σωματίδιο ακολουθεί την δική του ροϊκή γραμμή χωρίς να υπάρχει μεταφορά μάζας μεταξύ των γειτονικών στρωμάτων. Σε αυτή την περίπτωση η διάτμηση οφείλεται αυτή καθ' αυτή στην κίνηση των μορίων. Η στρωτή ροή εμφανίζεται σε χαμηλούς αριθμούς Reynolds. Σε μεγαλύτερους αριθμούς έχουμε εμφάνιση τυρβώδους ροής. Το σημείο που έχουμε μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή ονομάζεται κρίσιμος αριθμός Reynolds και εξαρτάται από το πόσο ήρεμη είναι η επιφάνεια του ρευστού καθώς και από την ύπαρξη αρχικής τύρβης σε αυτό. Συνήθως αυτή η μετάβαση συμβαίνει μεταξύ αριθμών Reynolds  $3 \times 10^5$  και  $10^6$ . Στην τυρβώδη ροή εμφανίζεται το ίδιο μοντέλο με την στρωτή ροή αλλά ταυτόχρονα έχουμε και μια αλληλεπίδραση που οφείλεται στη μεταφορά μάζας μεταξύ των γειτονικών στρωμάτων ρευστού.

Η μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη ροή είναι πολύ σημαντική για την ισορροπία του συστήματος. Σε χαμηλούς αριθμούς Reynolds οι διαταραχές εξαλείφονται και η ροή είναι σταθερή. Στο κρίσιμο σημείο η στρωτή ροή γίνεται ασταθής και η παραμικρή διαταραχή θα προκαλέσει τύρβη. Το κρίσιμο σημείο για μια επίπεδη επιφάνεια είναι μια συνάρτηση του απόστασης  $l$  από το σημείο αποκόλλησης.

$$(R_n) \text{ critical} = \frac{Vl}{\nu}$$

Για μια επίπεδη επιφάνεια το κρίσιμο σημείο είναι περίπου  $10^6$ . Για μια καμπύλη επιφάνεια η κλίση της πίεσης κατά μήκος της επιφάνειας επιδρά σημαντικά κατά την μετάβαση. Η μετάβαση από στρωτή σε τυρβώδη καθυστερεί σε περιοχές χαμηλής πίεσης, δηλαδή σε περιοχές όπου αυξάνεται η ταχύτητα.

Σε μια τραχιά επιφάνεια η αντίσταση ακολουθεί μια λεία καμπύλη, καθώς αυξάνεται ο αριθμός Reynolds μέχρι κάποια τιμή όπου η καμπύλη γίνεται οριζόντια. Όσο πιο τραχιά είναι η επιφάνεια τόσο πιο γρήγορα η καμπύλη γίνεται οριζόντια, δηλαδή η αντίσταση παύει να εξαρτάται από τον αριθμό Reynolds. Σε πρακτικό επίπεδο, η ροή γύρω από ένα πλοίο που ταξιδεύει στη θάλασσα θεωρείται τυρβώδης. Σε μια δεξαμενή ένα ποσοστό της ροής μπορεί να θεωρηθεί στρωτό αλλά είναι αρκετά ευαίσθητο σε εξωγενείς παράγοντες, οπότε ποικίλει



σημαντικά σε ένα δεδομένο μοντέλο. Λόγω της διαφοράς στην αντίσταση μεταξύ στρωτής και τυρβώδους ροής, αυτό το φαινόμενο οδήγησε σε ασαφή αποτελέσματα σε πειράματα σε δεξαμενές. Έτσι σήμερα έχουμε τεχνητή παραγωγή τυρβώδους ροής στις περισσότερες δεξαμενές. Για ευκολία, η αντίσταση τριβής χωρίζεται σε δύο μορφές. Η πρώτη είναι η αντίσταση που προκύπτει από μια επίπεδη πλάκα επιφάνειας ίδιας με το πλοίο και η άλλη η αυξημένη αντίσταση τριβής που οφείλεται στο πραγματικό σχήμα του πλοίου. Η τραχύτητα της γάστρας αποτελεί ένα περίπλοκο αντικείμενο. Εξαρτάται από έναν ευρύ αριθμό ποικίλων παραμέτρων. Τα ελάσματα, από κατασκευής, παρουσιάζουν κάποια τραχύτητα που οφείλεται στις συγκολλήσεις και στις διεργασίες παρασκευής. Η τραχύτητα αναμένεται να αυξηθεί λόγω των φορτίσεων του νερού και της διάβρωσης με το πέρασμα των χρόνων, καθώς οι βαφές φθείρονται.

## 2.5 Αντίσταση Λόγω Πιέσεων Συνεκτικότητας

Η συνολική αντίσταση του πλοίου αφορά το άθροισμα όλων των πιέσεων που ασκούνται στο πρωαίο και πρυμναίου τμήμα του πλοίου. Το ένα κομμάτι προέρχεται από τη δημιουργία κυματισμών γύρω από το πλοίο και αναφέρθηκε παραπάνω. Η εναπομένουσα αντίσταση οφείλεται στα φαινόμενα συνεκτικότητας που αναμένονται να εμφανιστούν στο πρυμναίο τμήμα ενός πλοίου, το οποίο πλέει σε ιδανικό ρευστό. Μέρος αυτής της αντίστασης θα είναι από φορτίσεις που θα οφείλονται σε ασυνέχειες της γάστρας ένα άλλο μέρος από την αύξηση του οριακού στρώματος, ειδικά σε σημεία αποκόλλησης της ροής. Επειδή αυτές οι δύο συνιστώσες οφείλονται στη μορφή της γάστρας, ονομάζονται και αντίσταση μορφής. Η αντίσταση μορφής είναι σημαντική σε πλοία με μεγάλο συντελεστή γάστρας.

## 2.6 Αντίσταση Ανέμου

Ο αέρας είναι ρευστό, όπως το νερό, οπότε και αυτό έχει την τάση να αντιστέκεται στην κίνηση του πλοίου. Κατά την κίνηση του πλοίου ο αέρας που ρέει πάνω στις υπερκατασκευές συναντά πληθώρα ασυνεχειών οι οποίες σαν συνέπεια την αποκόλληση της ροής. Έτσι, όπως αναμενόταν, η αντίσταση μεταβάλλεται ανάλογα με το  $V^2$ . Όταν το πλοίο κινείται με πλήρη ισχύ και η κατάσταση του ανέμου είναι μηδέν, η αντίσταση του ανέμου αποτελεί το 2-4% της συνολικής αντίστασης. Όταν το πλοίο κινείται αντίρροπα της κατεύθυνσης του ανέμου με την ίδια ταχύτητα με αυτόν, η σχετική ταχύτητα του ανέμου διπλασιάζεται, οπότε η αντίσταση τετραπλασιάζεται. Έτσι σε κακές καιρικές συνθήκες η αντίσταση του ανέμου μπορεί να αποτελέσει σημαντικό παράγοντα της μείωση της ταχύτητας του πλοίου.

## 2.7 Αντίσταση Παρελκομένων

Η μέχρι τώρα ανάλυση αφορά την αντίσταση της γυμνής γάστρας ενός πλοίου χωρίς παρελκόμενα. Τυπικά παραδείγματα παρελκομένων είναι το πηδάλιο, ο άξονας του πλοίου και άλλα. Κάθε παρελκόμενο έχει το δικό του μήκος, το οποίο είναι μικρότερο από το μήκος του πλοίου και αντιστοίχως έχει ξεχωριστό αριθμό Reynolds. Ουσιαστικά, κάθε παρελκόμενο έχει τη δική του αντίσταση που μετατρέπεται με διαφορετική κλίμακα από τις πειραματικές στις πραγματικές συνθήκες. Η αντίσταση των παρελκομένων μπορεί να υπολογιστεί από εμπειρικούς τύπους ή από πειράματα σε δεξαμενή, τρέχοντας τη γάστρα μια φορά γυμνή και μια φορά με αντίστοιχα παρελκόμενα. Ευτυχώς, η αντίσταση των παρελκομένων είναι μικρή, οπότε σφάλματα κατά την εύρεσή της δεν αναμένεται να μεταβάλουν σημαντικά την συνολική αντίσταση. Συνήθως γίνεται η θεώρηση ότι και η αντίσταση των παρελκομένων είναι ανάλογη της  $V^2$ , έτσι ώστε η συμβολή τους στον αδιάστατο συντελεστή της αντίστασης να είναι σταθερή.

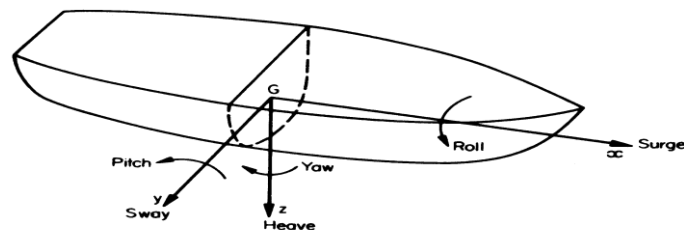
### 3 Η Απόκριση του Πλοίου στους Θαλάσσιους Κυματισμούς

#### 3.1 Εισαγωγή

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

#### 3.2 Οι Κινήσεις του Πλοίου

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



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

Εικόνα 9: Οι κινήσεις του πλοίου<sup>5</sup>

#### Rolling

<sup>5</sup> Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου, Γ.Κ. Πολίτης, ΕΜΠ, Αθήνα, 2011

Έστω  $\varphi$  η εγκάρσια κλίση ενός πλοίου. Η ροπή που ασκείται σε ένα πλοίο θα είναι τέτοια που θα τείνει το πλοίο στην αρχική του θέση. Για μικρές τιμές της γωνίας  $\varphi$  ισχύει:

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

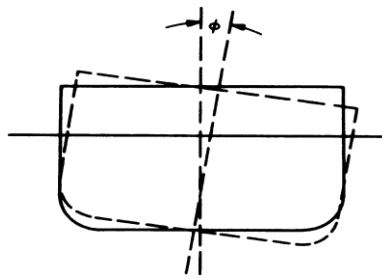
Εφαρμόζοντας τον νόμο του Νεύτωνα:

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

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

Αυτή η διαφορική εξίσωση περιγράφει την απλή αρμονική κίνηση με περίοδο  $T_\varphi$  όπου:

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



Εικόνα 10: Rolling

Σημειώνεται ότι η περίοδος είναι ανεξάρτητη του  $\varphi$  και ότι το roll διαρκεί όσο η προσέγγιση  $\overline{GZ} = \overline{GM}_T \varphi$ , έχει εφαρμογή δηλαδή για γωνίες περίπου μέχρι  $\pm 10$  degrees. Επίσης όσο μεγαλύτερο είναι το  $\overline{GM}_T$  τόσο πιο σταθερό είναι το πλοίο, τόσο μικρότερη είναι η περίοδος και οι κινήσεις είναι πιο γρήγορες.

### Pitching

Σε αντιστοιχία με το roll έχουμε:

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

και η περίοδος:

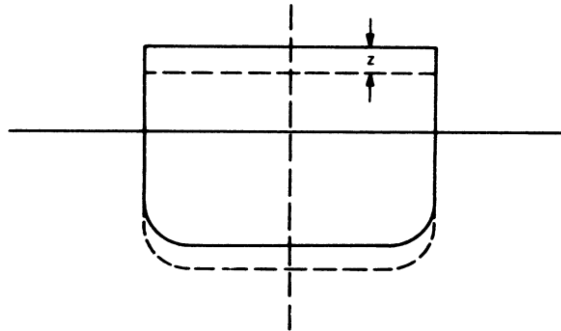
$$T_\theta = \frac{2\pi k_{yy}}{(g \overline{GM}_L)^{\frac{1}{2}}}$$

### Heaving

Έστω  $z$  η κατακόρυφη μετατόπιση του πλοίου κάθε στιγμή. Η ασκούμενη δύναμη  $F_Z$  τείνει να μειώσει το  $z$  και έχει μέτρο:

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

Όπου  $u$  η πυκνότητα του νερού.



Εικόνα 11: Heaving

Έτσι προκύπτει η διαφορική εξίσωση της κίνησης:

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

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

με περίοδο

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

### Surge

Υπό σταθερή ισχύ και σε ήρεμο νερό το ένα πλοίο θα κινείται με σταθερή ταχύτητα. Όταν συναντά κυματισμούς υπάρχει μια μέση μείωση της ταχύτητας λόγω της υπάρχουσας αντίστασης και των αλλαγών στις συνθήκες λειτουργίας της προπέλας. Η ταχύτητα δεν είναι πλέον σταθερή και ο όρος surge χρησιμοποιείται για να καθορίσει τις μεταβολές της ταχύτητας γύρω από την νέα μέση τιμή. Λαμβάνουν χώρα διάφορες επιδράσεις. Υπάρχει μια τροχιά των σωματιδίων των κυματισμών που τείνουν να αυξάνουν την ταχύτητα του πλοίου όταν αυτό βρίσκεται στην κορυφή του κυματισμού και να την μειώνουν όταν βρίσκεται σε κοιλάδα.

### *Sway*

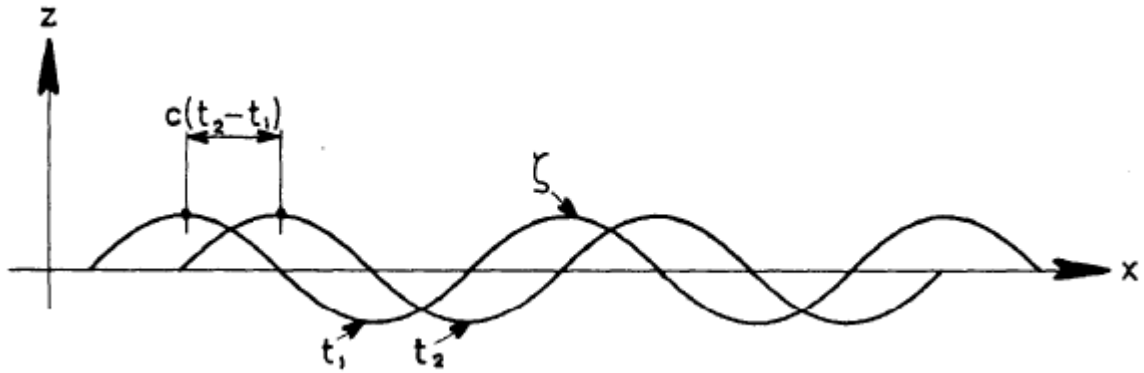
Όταν το σύστημα των κυματισμών βρίσκεται υπό γωνία σε σχέση με την κίνηση του πλοίου, τότε ασκούνται κάθετες δυνάμεις που προέρχονται από παρόμοιες πηγές με αυτές που προκαλούν την κίνηση surge. Οι δυνάμεις αυτές προκαλούν μια πλευρική ολίσθηση του πλοίου από την κανονική του κατεύθυνση και οι μεταβολές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

### *Yaw*

Οι κάθετες δυνάμεις που αναφέρθηκαν παραπάνω ασκούν και ροπές που έχουν την τάση να στρέψουν το πλοίο. Την ίδια στιγμή όμως ασκούμενες ροπές, λόγω της ύπαρξης του πηδαλίου, τείνουν να διορθώσουν αυτές τις κινήσεις. Οι αλλαγές στη γωνία, στην οποία κατευθύνεται ένα πλοίο γύρω από τη μέση γωνία ονομάζεται yaw.

## **3.3 Η Συμπεριφορά του Πλοίου σε Κυματισμούς**

Σημαντική παράμετρος της αξιοπλοΐας του πλοίου, αποτελεί η απόκριση κατά την αλληλεπίδρασή του με τους θαλάσσιους κυματισμούς. Στα πλαίσια αυτά, τα προβλήματα συμπεριφοράς του πλοίου εξετάζονται με χρήση των αρχών της θεωρίας δυναμικού που περιλαμβάνει πολύ απλούστερες εξισώσεις σε σχέση με τις εξισώσεις Navier-Stokes. Σε αντίθεση με την περίπτωση της αντίστασης, 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. 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. Για την κατανόηση της αλληλεπίδρασης του σώματος με τους κυματισμούς θα πρέπει να αναφερθούν περιληπτικά ορισμένες αρχές που διέπουν τη φύση των κυματισμών. Οι θαλάσσιοι κυματισμοί μπορούν να θεωρηθούν ως μια τυχαία σύνθεση πολλών αρμονικών κυματισμών, κάθε ένας από τους οποίους έχει συγκεκριμένη συχνότητα, συγκεκριμένο πλάτος και συγκεκριμένη κατεύθυνση μετάδοσης. Ένας απλός αρμονικός κυματισμός είναι συνάρτηση τόσο του χρόνου όσο και του χώρου.



Εικόνα 12: Απλός Αρμονικός Κυματισμός<sup>6</sup>

Στην περίπτωση των αρμονικών κυματισμών η ανύψωση της επιφάνειας της θάλασσας μπορεί να εκφραστεί μέσω μιας συνάρτησης δυναμικού. Το δυναμικό είναι απλώς μια βαθμωτή συνάρτηση πολλών μεταβλητών, της οποίας η μερική παράγωγος ως προς κάποια διεύθυνση δίνει την ταχύτητα του ρευστού προς αυτή τη διεύθυνση. Στη γενική περίπτωση ισχύει:

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

Όπου  $P(z)$  αποτελεί συνάρτηση της απομάκρυνσης,  $\omega$  η κυκλική συχνότητα και  $k$  ο κυματικός αριθμός.

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

Για βαθύ νερό η συνάρτηση δυναμικού λαμβάνει την ακόλουθη μορφή:

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

όπου  $\zeta_a$  είναι το πλάτος την απομάκρυνσης κατά την ταλαντωτική κίνηση, η οποία συμπίπτει με το πλάτος του κύματος για αρμονικό κυματισμό. Το δυναμικό αυτό αφορά τον αδιατάρακτο κυματισμό και ως εκ τούτου δεν σχετίζεται με την παρουσία πλωτού σώματος.

<sup>6</sup> Basic Ship Theory, K.J Rawson & E.C Tupper, Butterworth Heinemann, London, 2001

Κατά την κίνηση ενός σώματος σε κυματισμένη θάλασσα έχουμε συνολικά τρία δυναμικά κυματισμών, τα οποία είναι τα ακόλουθα :

- Δυναμικό προσπίπτοντος κυματισμού
- Δυναμικό περίθλασης
- Δυναμικό ακτινοβολίας

Το δυναμικό προσπίπτοντος κυματισμού περιγράφηκε νωρίτερα και αφορά τον αδιατάρακτο κυματισμό. Το δυναμικό περίθλασης προκύπτει από το αποτέλεσμα της πρόσκρουσης κυματισμών στο στερεό σύνορο του σκάφους. Στην περίπτωση που το μήκος κύματος είναι συγκρίσιμο με το μήκος του πλοίου, όπως συνήθως συμβαίνει, το αποτέλεσμα είναι διαφορετικό από την περίπτωση της ανάκλασης, η οποία υφίσταται μόνο σε περιπτώσεις όπου το μήκος κύματος είναι αρκετά μικρότερο από το μήκος του σκάφους. Τέλος το δυναμικό ακτινοβολίας αφορά τους παραγόμενους κυματισμούς λόγω των ταλαντωτικών κινήσεων του σκάφους μέσα στο νερό. Σημειώνεται πως στη μέχρι τώρα θεώρηση και ανάλυση το σκάφος έχει μηδενική ταχύτητα. Στα πλαίσια της γραμμικής θεώρησης του προβλήματος συμπεριφοράς του πλοίου, το συνολικό δυναμικό της επιφάνειας της θάλασσας προκύπτει από την γραμμική υπέρθεση των τριών παραπάνω δυναμικών. Έτσι :

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

Το δυναμικό αυτό πρέπει να πληροί ορισμένες συνθήκες που παρουσιάζονται στη συνέχεια.

1. Εξίσωση της συνέχειας ή εξίσωση Laplace

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

2. Συνοριακή συνθήκη μη εισχώρησης στον πυθμένα

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right|_{z=-h} = 0$$



3. Συνοριακή συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας

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

4. Κινηματική οριακή συνθήκη στο στερεό σύνορο του σώματος

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

5. Συνθήκη ακτινοβολίας

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

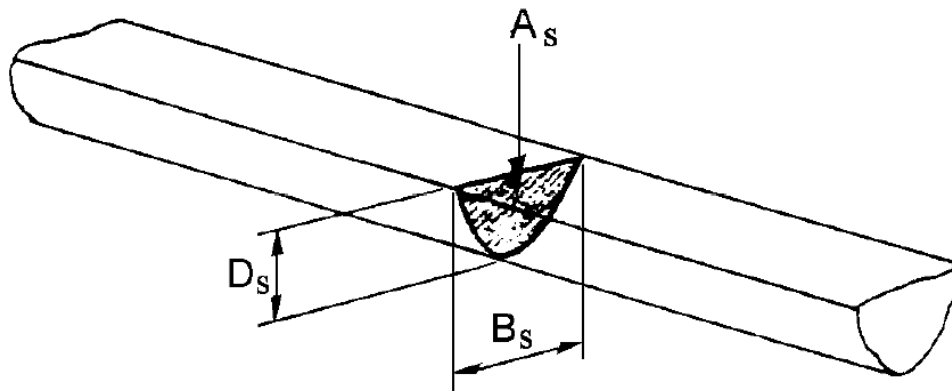
6. Συμμετρική και αντισυμμετρική συνθήκη

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

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

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

Με 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. Η φιλοσοφία της θεωρίας λωρίδων φαίνεται σχηματικά στην επόμενη εικόνα.



Εικόνα 13: Θεωρία Λωρίδων<sup>7</sup>

Σύμφωνα με αυτήν, 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 Frank που περιγράφεται στην επόμενη παράγραφο.

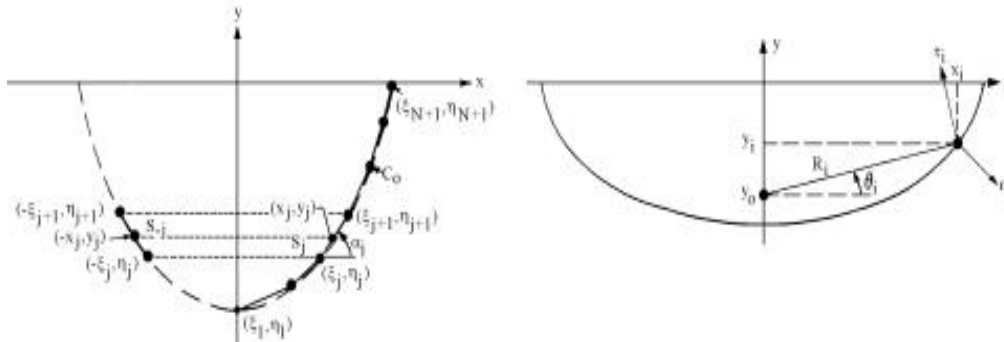
### 3.4 Η θεωρία του Frank

Στη θεωρία του Frank οι εγκάρσιες τομές του σκάφους μετασχηματίζονται σε μη κυκλικής διατομής κυλίνδρους με χρήση σύμμορφου μετασχηματισμού. Το σύστημα συντεταγμένων κείται στα εγκάρσια επίπεδα, με τον άξονα  $x$  εφαπτόμενο στην ίσαλο και τον  $y$  κάθετο σε αυτή και με τα θετικά προς τα πάνω. Το σύνορο της επιφάνειας του νομέα βρίσκεται στο ημιεπίπεδο των αρνητικών τεταγμένων και ο άξονας  $y$  αποτελεί άξονα συμμετρίας του. Όπως και στην περίπτωση του δυναμικού του προσπίπτοντος κυματισμού που περιγράφηκε νωρίτερα, το ρευστό θεωρείται ασυμπίεστο, μη συνεκτικό, αστρόβιλο ενώ οι επιφανειακές τάσεις αμελούνται. Οι απομακρύνσεις και οι ταχύτητες θεωρούνται αρκετά μικρές ώστε να ληφθούν υπόψη μόνο οι γραμμικοί όροι της συνθήκης ελεύθερης επιφάνειας, της κινηματικής συνθήκης στο σύνορο του νομέα και η εξίσωση Bernoulli. Το δυναμικό ταχύτητας λοιπόν προκύπτει, όπως φαίνεται στη συνέχεια στα πλαίσια της θεώρησης χρονικά αρμονικού προβλήματος συμπεριφοράς, με συγκεκριμένη συχνότητα  $\omega$ .

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

<sup>7</sup> Delft, TU. *Introduction in Ship Hydromechanics*. 2002

Σε αυτή την εξίσωση οι δείκτες (m) λαμβάνουν τιμές 2,3 και 4 για κινήσεις στους αντίστοιχους βαθμούς ελευθερίας. Το μέγεθος αναπαριστά το μιγαδικό πλάτος της ταχύτητας εξαρτώμενο από τη θέση και καλείται αλλιώς παραστατικός μιγάδας της ποσότητας. Στην επόμενη εικόνα φαίνεται το σύστημα συντεταγμένων και τα σημεία κατά μήκος του στερεού συνόρου που χρησιμοποιήθηκαν από τον Frank.



Εικόνα 14: Η εγκάρσια τομή όπως χρησιμοποιείται στη θεωρία του Frank<sup>8</sup>

Έστω  $N+1$  σημεία  $(\xi, \eta)$  που βρίσκονται στο τέταρτο τεταρτημόριο έτσι ώστε να βρίσκονται στα αρνητικά του  $y$  άξονα. Για μερικώς βυθισμένους κυλίνδρους τα σημεία βρίσκονται στα θετικά του  $x$  άξονα ενώ για πλήρως βυθισμένους ισχύει ότι  $\xi_{N+1} = \xi_1$  και  $\eta_{N+1} < 0$ .

Ενώνοντας αυτά τα σημεία με συνεχή ευθύγραμμα τμήματα προκύπτουν  $N$  ευθύγραμμα τμήματα σε συνδυασμό με τον καθρεπτισμό τους στο τρίτο τεταρτημόριο δημιουργείται η επιφάνεια όπως φαίνεται στην εικόνα. Έστω οι συντεταγμένες, το μήκος και η γωνία ενός τυχαίου τμήματος περιγράφονται από τον δείκτη  $j$ . Για το αντίστοιχο τμήμα στο τρίτο τεταρτημόριο

Ισχύει:

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

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

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

<sup>8</sup> Introduction in Ship Hydromechanic, Delft TU, 2002

Το μήκος υπολογίζεται από :

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

Και η γωνία:

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

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

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

Ο κύλινδρος εξαναγκάζεται σε μια απλή αρμονική κίνηση με γωνιακή ταχύτητα  $\omega$  σύμφωνα με την εξίσωση:

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

Με  $m = 2, 3, 4$  αναφερόμενο στο sway, heave, roll αντίστοιχα

Οι ταλαντώσεις κατά το roll πραγματοποιούνται γύρω από ένα άξονα στο κέντρο συμμετρίας του κυλίνδρου.

Οποιοδήποτε σημείο του κυλίνδρου κινείται με ταχύτητες:

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

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

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

$$\theta_i = \arctan \left( \frac{y - y_0}{x} \right)$$

$$R_i = \sqrt{x^2 + (y - y_0)^2} \quad \text{και} \quad = \arcsin \left( \frac{y - y_0}{R_i} \right)$$

$$= \arccos \left( \frac{x}{R_i} \right)$$

Έτσι έχουμε το διάνυσμα της κίνησης ως προς την γωνία  $\theta$ :

$$\begin{aligned}\tau_i &= \vec{i} \sin\theta + \vec{j} \cos\theta \\ &= -\frac{y-y_0}{Ri} \vec{i} + \frac{x}{Ri} \vec{j}\end{aligned}$$

Έτσι ώστε Roll:

$$\begin{aligned}v^{(4)} &= R_1 A^{(4)} \tau_i \\ &= \omega A^{(4)} \{ (y - y_0) \vec{i} - x \vec{j} \} \sin(\omega t)\end{aligned}$$

Η ταχύτητες στο μέσο είναι:

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

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

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

Και μετά από απλοποίηση:

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

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

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

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

Έτσι προκύπτουν  $2N$  αλγεβρικές εξισώσεις και το παρακάτω σύστημα:

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

Οπότε για  $i = 1, 2, \dots, N$

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

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

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

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

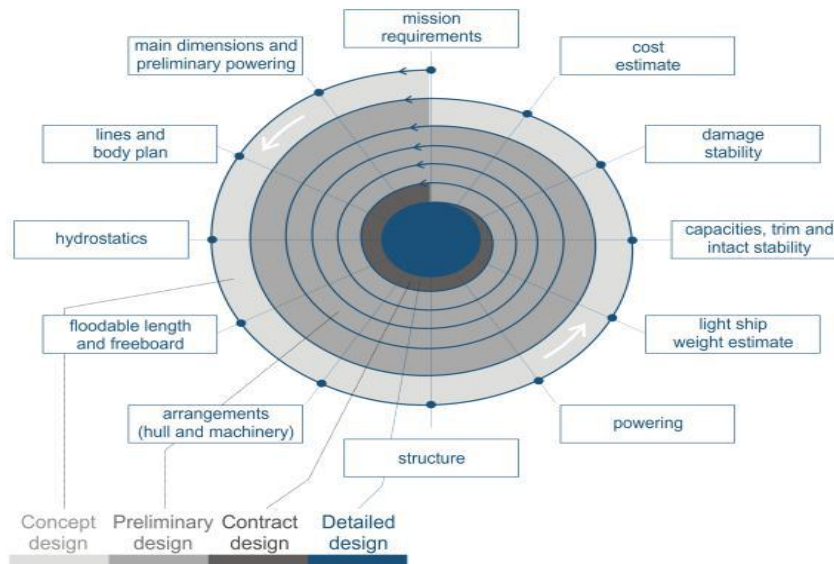
$$p^{(m)}(x, y, \omega, t) = p_a^{(m)}(x, y, \omega, t) \cos(\omega t) + p_v^{(m)}(x, y, \omega, t) \sin(\omega t)$$

## 4 Συστήματα CAD/CAM και βελτιστοποίηση σχεδίασης πλοίων

### 4.1 Γενικά περί μελέτης πλοίου

Η μελέτη και σχεδίαση ενός πλοίου είναι μια ιδιαίτερα πολύπλοκη διαδικασία που απαιτεί τη δαπάνη σημαντικού αριθμού ανθρωποωρών καθώς και το συνδυασμό πολλών, επιστημονικών, ή μη, κλάδων. Στο παρελθόν αποτελούσε περισσότερο μια μορφή τέχνης παρά επιστήμη, η οποία εξαρτιόταν κατά κύριο λόγο από την εμπειρία των ναυπηγών σε διαφορετικούς τεχνικούς κλάδους, καθώς επίσης και από την πρακτική τους εμπειρία. Οι περισσότερες σχεδιαστικές λύσεις προέρχονταν από ευρηματικές μεθόδους, δηλαδή μέσω της αποκτώμενης εμπειρίας από τη διαδικασία της δοκιμής και του λάθους. Σταδιακά η διαδικασία αυτή αντικαταστάθηκε από τη 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 υπόψη πολυάριθμες παράμετροι που σε πολλές περιπτώσεις είναι αντικρουόμενης επίδρασης. Οι δυσκολίες προέρχονται από την περιπλοκή των διαφόρων τεχνικοοικονομικών απαιτήσεων, οι οποίες κατά μέρος αλληλοσυγκρούονται 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.



Εικόνα 15: Η παραδοσιακή σπειροειδής διαδικασία σχεδίασης πλοίων<sup>9</sup>

Σχολιάζοντας την επαναληπτική διαδικασία με βάση την Ελικοειδή καμπύλη μελέτης (εικόνα 15) διακρίνουμε τις εξής φάσεις:

- **Μελέτη εφικτότητας αρχικού σχεδιασμού (Concept design) -1<sup>η</sup> 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<sup>η</sup> έως 4<sup>η</sup> σπείρα** : αποτελεί την περαιτέρω λεπτομερέστερη επεξεργασία των επιμέρους βημάτων της μελέτης του πλοίου. Δημιουργείται ένα αρχικό σχέδιο που περιλαμβάνει τον υπολογισμό βαρών, την ανάλυση του deadweight ,τον υπολογισμό ευστάθειας καθώς και τις αρχικές γραμμές του πλοίου.
- **Μελέτη προδιαγραφών του πλοίου (Contract Design) – 5<sup>η</sup> σπείρα** :Στόχος της φάσης αυτής είναι η εκπόνηση των απαραίτητων υπολογισμών και σχεδίων και η επακριβής σύνταξη των τεχνικών προδιαγραφών που αποτελούν αναπόσπαστο τμήμα του επίσημου συμβολαίου. Τα τελικά σχέδια ,λεπτομερείς υδροστατικοί και υδροδυναμικοί υπολογισμοί καθώς και η εσωτερική διάταξη περατώνονται σε αυτό το στάδιο.
- **Μελέτη λεπτομερούς σχεδίασης (Detailed design)** : στην τελευταία φάση της μελέτης γίνεται η λεπτομερής σχεδίαση όλων των κατασκευαστικών στοιχείων καθώς και η σύνταξη προδιαγραφών κατασκευής και εφαρμογής- εγκατάστασης για τους τεχνίτες του ναυπηγείου. Αποτελεί το πιο χρονοβόρο στάδιο από άποψη ανθρωποωρών.

<sup>9</sup> *Integrated Design and Multiobjective Optimization Approach to Ship Design, A. Papanikolaou et al*

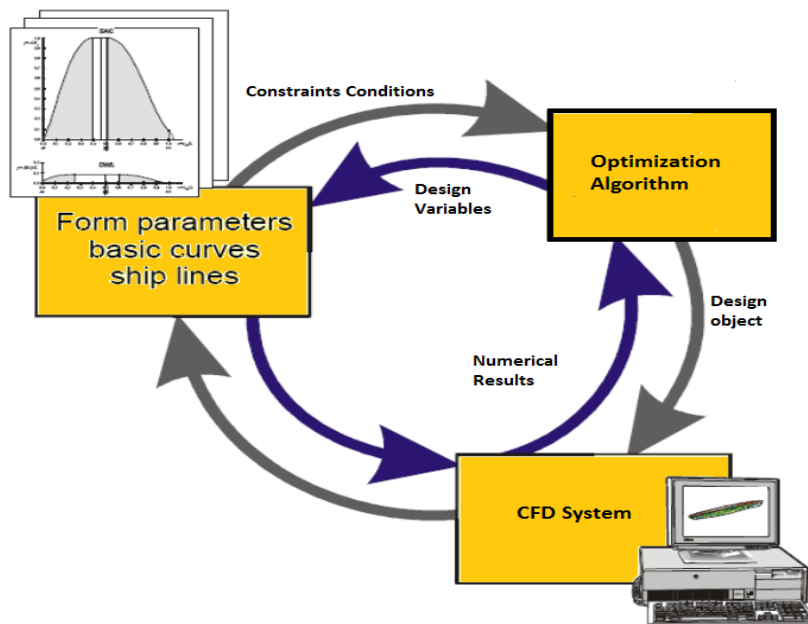


Βασικό μειονέκτημα της παραπάνω μεθοδολογίας είναι πως κατά την μεμονωμένη διεκπεραίωση ενός σταδίου δεν λαμβάνονται υπόψη οι παράμετροι και οι περιορισμοί των επόμενων σταδίων. Σαν αποτέλεσμα, ο σχεδιαστής αρχικά δεν μπορεί να έχει πλήρη εικόνα όλων των υποσυστημάτων, ενώ αυτού του είδους η προσέγγιση 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 τη 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

Αμιγώς συνδεδεμένη με τη 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 λαμβάνει υπόψη τις τις περισσότερες δυνατές παραμέτρους από διαφορετικούς τομείς του πλοίου, έχει στόχο τη βελτιστοποίηση του παραγόμενου σχεδίου για ολόκληρο τον κύκλο ζωής του, όπου κύριοι στόχοι είναι η απόδοσή του και 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 παρέμβαση στο πλοίο μετά το τέλος την κατασκευής του (προσθήκη συσκευών που αυξάνουν την απόδοση) μπορούμε να παράγουμε μια πιο αποδοτική λύση. Η βελτιστοποίηση έχει αναχθεί πλέον σε μία σύνθετη διαδικασία με τη χρήση ποικίλων και πολύπλοκων μαθηματικών μοντέλων. Συνήθως συνίσταται στη 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.

## 4.2 Η υδροδυναμική βελτιστοποίηση πλοίου

Η υδροδυναμική σχεδίαση ενός πλοίου είναι ένα περίπλοκο πρόβλημα, όπου πλήθος απαιτήσεων σχεδίασης αλληλοεπιδρούν. Για τη σωστή σχεδίαση απαιτείται να εξασφαλιστεί η καλή συμπεριφορά όχι μόνο σε ήρεμο νερό αλλά και υπό 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 εκτίμησή τους βασιζόταν κατά κύριο λόγο σε δοκιμές προτύπων υπό κλίμακα μέσω πειραμάτων σε δεξαμενές. Τα πειράματα παραμένουν ακόμα και σήμερα η πιο αξιόπιστη λύση για τον καθορισμό της υδροδυναμικής συμπεριφοράς ενός πλοίου που πρόκειται να κατασκευαστεί. Παρόλα αυτά, η διαδικασία είναι χρονοβόρα, με μεγάλο κόστος και χωρίς τη 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 τη ραγδαία ανάπτυξη της υπολογιστικής ισχύος, έχουν εισαγάγει νέες μεθόδους σχεδίασης και αξιολόγησης της επίδοσης πλοίων τα τελευταία χρόνια.. Η ενσωμάτωση αυτού του είδους των λογισμικών έχει αλλάξει τη 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 στο 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 στο 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 απαιτεί το 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.



Εικόνα 16: 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 τμήματά της αλλά και από τον τρόπο με τον οποίο 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.

### 4.3 Παραμετρική σχεδίαση

Η βασική αρχή πίσω τα συστήματα CAD και τη διαδικασία βελτιστοποίησης είναι η παραμετρική σχεδίαση. Η επιλογή αυτών των παραμέτρων είναι βασική επιλογή του σχεδιαστή και εξαρτάται από τα κριτήρια σχεδίασης. Πάνω στην επιλογή αυτή βασίζεται όλη η διαδικασία της βελτιστοποίησης. Ανάλογα με το 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 CAESES, 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 απευθείας μεταβολή των εισηγμένων παραμέτρων. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου σε σχέση με τη συμβατική είναι η παραγωγή 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 στη 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 αρχικά δοθείσας γεωμετρίας πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού CAESES 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 του πλοίου. Επομένως δεν υπάρχουν μεταβλητές που επηρεάζουν κύριες διαστάσεις (global design variables), καθώς θέλαμε να τις κρατήσουμε σταθερές, αφού αυτές πολλές φορές υπόκεινται σε εξωτερικούς περιορισμούς (π.χ. περιορισμός βυθίσματος ή πλάτους). Αντιθέτως υπάρχουν μόνο μεταβλητές που επηρεάζουν τοπικά τμήματα του πλοίου. Η επιλογή των μεταβλητών σχεδίασης εξαρτάται άμεσα από τα

κριτήρια βελτιστοποίησης που έχουν επιλεγεί ώστε να προκαλούν σχεδιαστικές αλλαγές που έχουν άμεση σχέση με τις επιδόσεις του πλοίου ως προς αυτά τα κριτήρια. Η διαδικασία της παραμετρικής σχεδίασης προφανώς έχει πολλούς διαφορετικούς τρόπους να υλοποιηθεί. Η καταλληλότερη για κάθε περίπτωση προκύπτει από την αλληλουχία εξάρτησης των γεωμετρικών τμημάτων του πλοίου κάτι που πρωτογενώς προκύπτει από τις μεταβλητές σχεδίασης που έχουν επιλεγεί.

Συνήθως η παραμετροποίηση μιας γεωμετρίας ξεκινά όπως και στη συμβατική σχεδίαση με τον προσδιορισμό των κυρίων καμπυλών, όπως το flat of Bottom (FOB), το flat of Side (FOS), τη συννοριακή καμπύλη του καταστρώματος (Deck) και τη τομή της γάστρας με το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας (Center Plane Curve - CPC). Στη συνέχεια προσδιορίζεται η μορφή των νομέων και της ισάλου επιφανείας, ενώ τελικά σχεδιάζονται ειδικά τμήματα του πλοίου όπως ο βολβός. Οι επιλεγείσες μεταβλητές σχεδίασης μπορεί να επηρεάζουν γεωμετρικά χαρακτηριστικά οποιουδήποτε από τα παραπάνω τμήματα. Δεδομένου ότι η συνολική γεωμετρία αποτελεί το συνδυασμό επιμέρους σχεδιαστικών στοιχείων που εξαρτώνται από τα προαναφερθέντα τμήματα, είναι απαραίτητη η δημιουργία παραμέτρων που εξαρτώνται σε 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 παράγοντες. 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.

## 5 Βελτιστοποίηση με χρήση Αλγορίθμων

### 5.1 Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι

Οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν ευρεία εφαρμογή σε προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Διαχρονικά έχουν προταθεί πολλοί τέτοιοι αλγόριθμοι καθώς και παραλλαγές τους με αποτέλεσμα να υπάρχει ένα σημαντικό πλήθος αυτών, οι οποίοι χρησιμοποιούνται κατά περίπτωση και ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη. Σκοπός των αλγορίθμων αυτών είναι η εύρεση των βέλτιστων λύσεων σε μη γραμμικά προβλήματα, λαμβάνοντας υπόψη τις μεταβλητές, τις αντικειμενικές συναρτήσεις και τους περιορισμούς που τίθενται από τον χρήστη και προσδιορίζουν τη φύση του προβλήματος που καλείται αυτός να επιλύσει. Σε περιπτώσεις προβλημάτων με μία αντικειμενική συνάρτηση η βέλτιστη λύση είναι μόνο μία. Αντίθετα όταν έχουμε περισσότερα από ένα κριτήρια βελτιστοποίησης οι βέλτιστες λύσεις είναι περισσότερες, υπό την έννοια ότι καμία από αυτές δεν μπορεί να θεωρηθεί καλύτερη από τις άλλες. Οι βέλτιστες λύσεις υφίστανται όταν καμία από τις υπόλοιπες δεν έχει όλες τις αντικειμενικές της συναρτήσεις μεγαλύτερες ή μικρότερες από αυτές, σε προβλήματα μεγιστοποίησης ή ελαχιστοποίησης αντίστοιχα. Το πλήθος των βέλτιστων λύσεων αποκτά γεωμετρική υπόσταση αν εξετάσουμε τις ιδιότητές τους σε σύστημα συνταγμένων, με άξονες τις αντικειμενικές συναρτήσεις τους. Το σύνολο των βέλτιστων λύσεων μπορεί να αποτελεί τα διακριτά σημεία που παρεμβάλλει μια καμπύλη σε ένα επίπεδο ή μια επιφάνεια στο χώρο όταν έχουμε 2 και 3 αντικειμενικές συναρτήσεις αντίστοιχα. Η γεωμετρική αυτή αναπαράσταση επιτυγχάνεται όπως είναι προφανές για μέγιστο αριθμό συναρτήσεων ίσο με 3, ωστόσο βελτιστοποίηση με χρήση γενετικών αλγορίθμων πραγματοποιείται για οποιονδήποτε τέτοιο αριθμό. Η έννοια των «ισοδύναμα βέλτιστων» λύσεων προκύπτει από την αδυναμία σύγκρισης διαφορετικών κριτηρίων βελτιστοποίησης.

Στην περίπτωση μας κριτήρια βελτιστοποίησης θα αποτελέσουν η αντίσταση κυματισμού και η επιτάχυνση της πλώρης κατά την αλληλεπίδραση του σκάφους με κύματα συχνότητας που προκαλούν τη μέγιστη απόκριση. Αυτά τα κριτήρια αν και εκφράζονται με αλγεβρικές τιμές, δεν μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους κυρίως επειδή αποτελούν μεγέθη που εκφράζουν διαφορετικά φαινόμενα και δευτερευόντως επειδή δεν είναι ίδιας σημαντικότητας η ελαχιστοποίησή τους. Η επιλογή μιας ή περισσότερων λύσεων από τις παραχθείσες, αποτελεί αντικείμενο της αξιολόγησης των αποτελεσμάτων που θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο. Η λειτουργία των γενετικών αλγορίθμων παρουσιάζει ομοιότητες με τη διαδικασία της πραγματικής φυσικής εξέλιξη των γενεών και ακριβώς εκεί οφείλουν και το όνομά τους. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται κάποιες αρχικές σχεδιάσεις (γονείς) από τις οποίες παράγονται νέες (απόγονοι) με χρήση των διαδικασιών της διασταύρωσης των χαρακτηριστικών των γονέων και της μετάλλαξης και των χαρακτηριστικών των ίδιων των απογόνων. Το σημαντικότερο όμως χαρακτηριστικό αυτής της διαδικασίας είναι ότι 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. Οι δύο λοιπόν βασικές ομοιότητες των γενετικών αλγορίθμων με τις διαδικασίες εξέλιξης είναι η εισαγωγή ενός παράγοντα τυχαιότητας στην παραγωγή απογόνων και η επιβίωση των ισχυρότερων μελών ενός είδους. Για παράδειγμα αν ένα θηλαστικό έχει χαρακτηριστικά που του επιτρέπουν να ξεφεύγει από τους θηρευτές του ευκολότερα από ένα άλλο, τότε έχει περισσότερες πιθανότητες επιβίωσης και άρα περισσότερες πιθανότητες να αναπαραχθεί και οι απόγονοι του να έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά με εκείνο. Η διαδικασία της διασταύρωσης των χαρακτηριστικών των γονέων για την παραγωγή των απογόνων, είναι αυτή που διαφοροποιεί τους απογόνους τους, από οποιονδήποτε από τους δύο γονείς. Κατ' επέκταση, ακόμα και χωρίς μετάλλαξη, οι απόγονοι μπορεί να έχουν καλύτερα χαρακτηριστικά από τους γονείς. Αυτό επιτυγχάνεται αν ένας απόγονος λάβει από κάθε γονέα μόνο τα καλύτερα χαρακτηριστικά του, κάτι που φυσικά συμβαίνει τυχαία. Η μετάλλαξη των χαρακτηριστικών ενός απογόνου μπορεί με τη σειρά της, να βελτιώσει περαιτέρω τα χαρακτηριστικά που έχει λάβει από τους γονείς, κάτι που επίσης συμβαίνει τυχαία. Στην περίπτωση των γενετικών αλγορίθμων η τυχαιότητα εισάγεται με τις διαδικασίες διασταύρωσης και μετάλλαξης να πραγματοποιούνται συναρτήσει κάποιας προστεθειμένης πιθανότητας εμφάνισής τους. Αν υπήρχε η δυνατότητα να επιλεγούν τα θηλαστικά με τα καλύτερα χαρακτηριστικά τόσο από τους γονείς όσο και από τους απογόνους τους και αυτά να αποτελούν ένα νέο και το μοναδικό σύνολο που θα αναπαράγει τις νέες γενιές, τότε θα λαμβάναμε συνεχώς σίγουρα καλύτερους απογόνους. Αν και στη φύση κάτι τέτοιο είναι ουτοπικό, στην περίπτωση των γενετικών αλγορίθμων αποτελεί την αρχή λειτουργίας τους. Τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά των γονέων, αποτελούν στην περίπτωση ενός αλγορίθμου τις μεταβλητές σχεδίασης που εξετάζονται.

Στην περίπτωση βελτιστοποίησης της γάστρας αφορούν μεταβλητές εντός ενός εύρους τιμών που μπορεί να χαρακτηρίζουν γωνίες χαρακτηριστικών καμπύλων του σκάφους, κύριες διαστάσεις, αδιάστατους συντελεστές και γενικώς οποιοδήποτε στοιχείο του πλοίου πιθανόν επηρεάζει τα κριτήρια βελτιστοποίησης. Τα κριτήρια βελτιστοποίησης, καλούνται αλλιώς στη γενική περίπτωση αλγορίθμων, αντικειμενικές συναρτήσεις. Αποτελούν τα προκύπτοντα αποτελέσματα ενός προβλήματος τα οποία επιθυμείται να ελαχιστοποιηθούν ή να μεγιστοποιηθούν. Στην περίπτωση που εξετάζεται στα πλαίσια του παρόντος, και δεδομένων των δύο κριτηρίων βελτιστοποίησης, έχουμε προφανώς πρόβλημα ελαχιστοποίησης. Πριν από την εφαρμογή της προτεινόμενης προσέγγισης απαιτείται ο γενετικός αλγόριθμος να ελεγχθεί με έναν σταθερό αριθμό σχεδιαστικών παραμέτρων. Αυτή η περίπτωση πρέπει να χρησιμοποιηθεί με σκοπό να εξευρεθούν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων ελέγχου του αλγορίθμου και ειδικά το μέγεθος του πληθυσμού και ο αριθμός των γενεών. Οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να παράγουν έναν αριθμό διαφορετικών σχεδιασμών στην αρχή και στη συνέχεια να προχωρήσουν με διαδοχικές επαναλήψεις. Κάθε σχεδιασμός αντιστοιχίζεται σε μια ακολουθία bits. Οι καλύτεροι σχεδιασμοί επιλέγονται σε κάθε γενεά και κάποιες λειτουργίες εφαρμόζονται μέσω των δυαδικών ακολουθιών, με σκοπό να παράξουν νέο πληθυσμό. Η χρήση αυτών των λειτουργιών βασίζεται σε βιολογικά φαινόμενα. Ο αλγόριθμος

σταματάει ύστερα από ένα προδιαγεγραμμένο αριθμό γενεών που απαιτείται να οριστεί από τον σχεδιαστή και αποτελεί μια σημαντική παράμετρο του γενετικού αλγόριθμου. Εάν η μέγιστη προσπάθεια είναι περιορισμένη σε ότι έχει σχέση με τον υπολογισμό του συνολικού αριθμού των εκτιμήσεων των αντικειμενικών συναρτήσεων, τότε ο μέγιστος αριθμός γενεών πηγάζει από επιλεγμένο αριθμό σχεδιάσεων.

## 5.2 Πρόβλημα Βελτιστοποίησης Μεικτών Ακεραίων

Η παρούσα πτυχιακή αποτελεί ένα πρόβλημα μεικτών ακεραίων. Το πρόβλημα αυτό επικαλύπτει ένα μεγάλο εύρος βιομηχανικών εφαρμογών. Συγκεκριμένα η βελτιστοποίηση αυτή περιγράφει προβλήματα με διακριτές και συνδυαστικές σχεδιαστικές παραμέτρους, οι οποίες παίρνουν ακέραιες τιμές και οι οποίες αποκτούν χαρακτήρα παραμέτρων βελτιστοποίησης. Η επιλογή του αριθμού των σχεδιαστικών παραμέτρων αποτελεί σημαντικό κομμάτι σε όλα τα προβλήματα βελτιστοποίησης και το τελικό αποτέλεσμα έχει άμεση συνάφεια με την επιλογή αυτή. Διαφορετικές λύσεις μπορούν να εξαχθούν με διαφορετικά σχήματα παραμετροποίησης για το ίδιο πάντα πρόβλημα. Μια αύξηση του αριθμού των παραμέτρων σημαίνει αύξηση της περιπλοκότητας της βελτιστοποίησης, αλλά δεν εγγυάται πιο επιθυμητά αποτελέσματα για το πρόβλημα. Δηλαδή η βέλτιστη λύση θα αποκτηθεί μόνο με το σωστό αριθμό των σχεδιαστικών παραμέτρων.

Σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης ο αριθμός των σχεδιαστικών παραμέτρων αποτελεί ένα πρόβλημα από μόνο του. Η πιο καλή προσέγγιση του προβλήματος είναι να γίνει μια σειρά διατυπώσεων της βελτιστοποίησης, μεταβάλλοντας συστηματικά τον αριθμό των παραμέτρων. Εξάγοντας τα αποτελέσματα αυτών των διατυπώσεων θα μπορούσε να προσεγγιστεί ο βέλτιστος αριθμός παραμέτρων. Στις περισσότερες περιπτώσεις όμως προβλημάτων βελτιστοποίησης δεν υπάρχει μεγάλη διάθεση χρόνου για να γίνουν οι επαρκείς δοκιμές. Οι μέθοδοι μεικτών ακεραίων έχουν μια διαφορετική προσέγγιση στο πρόβλημα. Τα αποτελέσματα διαφορετικών διατυπώσεων συγκρίνονται μεταξύ τους χωρίς να πραγματοποιείται ανάλυση εις βάθος. Μετά από κάποιες επαναλήψεις οι λιγότερα υποσχόμενες διατυπώσεις αποκλείονται από το πρόβλημα, ο αλγόριθμος συνεχίζει να λειτουργεί εστιάζοντας στις εναπομένουσες διατυπώσεις. Στο τέλος αυτή η εκλεκτική διαδικασία συγκλίνει στην πιο αποδεκτή επίλυση του προβλήματος.

Αυτή η μέθοδος έχει βασικό στόχο να κερδίσει όσο το δυνατόν περισσότερο χρόνο. Η βασική ιδέα είναι ότι ύστερα από κάποιες επαναλήψεις ο αλγόριθμος παύει να παράγει καλύτερες λύσεις από τις προηγούμενες και ούτε πρόκειται να υπάρξουν με το συγκεκριμένο δοσμένο αριθμό παραμέτρων. Αυτή η διαδικασία δεν απαιτεί να λυθούν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί των παραμέτρων. Το καίριο κομμάτι αυτής της βελτιστοποίησης είναι η επιλογή των κριτηρίων, βάσει των οποίων ο αλγόριθμος θα παύει να αναλύει μια συγκεκριμένη διατύπωση. Κάθε συνδυασμός παραμέτρων έχει τη δική του περιπλοκότητα καθώς οι τιμές αλλάζουν, συνεπώς είναι δύσκολο να βρεθούν ενιαία κριτήρια που να αφορούν όλες τις πιθανές διατυπώσεις. Έτσι υπάρχει η πιθανότητα να αποκλειστεί η βέλτιστη λύση να εμφανιστεί νωρίς στη διαδικασία της



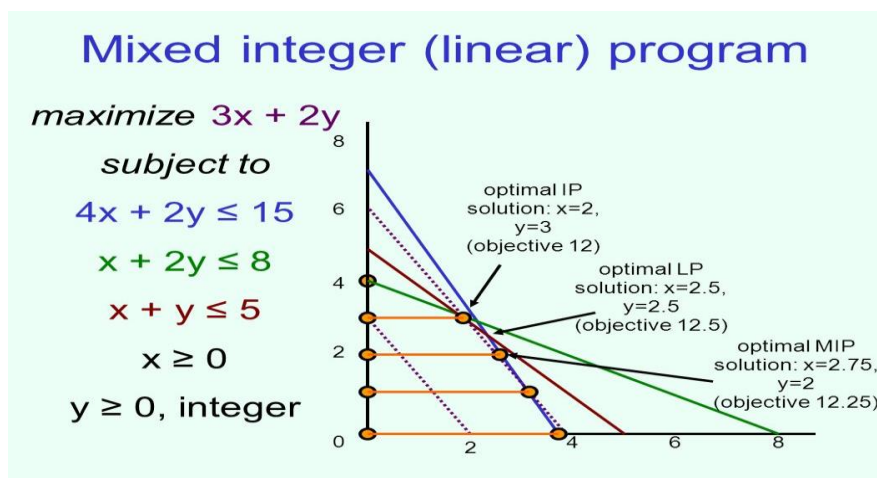
βελτιστοποίησης. Μια διαφορετική λύση είναι να θεωρηθεί ο αριθμός των παραμέτρων ως μία παράμετρος της βελτιστοποίησης.

### 5.3 Συνάρτηση Αξιολόγησης

Για να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα της διαδικασίας, δημιουργούνται κάποιες αλγεβρικές συναρτήσεις για το σκοπό αυτό. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται μια σειρά δευτέρας τάξεως πολυωνυμικών συναρτήσεων της μορφής:

$$f = f_0^N - \sum_{i=0}^N (x_i - x_i^0)^2$$

Τα  $x_i$  αντιστοιχούν στις σχεδιαστικές παραμέτρους με  $I = 1, \dots, N$  και ο πίνακας  $x_i^0$  ορίζει τη θέση της μέγιστης τιμής της συνάρτησης αξιολόγησης, η οποία μέγιστη τιμή είναι η  $f_0^N$ . Η τιμή  $f_0^N$  μπορεί να ποικίλει με σκοπό να ελεγχθεί η ικανότητα του αλγορίθμου να βρει την βέλτιστη λύση. Ο επιθυμητός αριθμός των σχεδιαστικών παραμέτρων μπορεί και αυτός να ποικίλει. Επιπρόσθετα, το πρόβλημα μπορεί να οριστεί με διάφορες συναρτήσεις για διαφορετικές σχεδιαστικές παραμέτρους.



Εικόνα 17: Παράδειγμα Προβλήματος μεικτών Ακεραίων

## 5.4 Ο Γενετικός Αλγόριθμος NSGA II

Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί το σχεδιαστικό πρόγραμμα CAESES FRIENDSHIP είναι ο NSGA II. Η ονομασία του προέρχεται από τον τρόπο με τον οποίο κατατάσσονται οι σχεδιάσεις μιας γενιάς και των απογόνων της, προκειμένου να παραχθεί η επόμενη, όπως θα φανεί και από την επεξήγηση της λειτουργίας του στη συνέχεια. Η διαδικασία εύρεσης των βέλτιστων λύσεων συνοψίζεται στα επόμενα βήματα :

1. Παραγωγή ενός πληθυσμού από σχεδιάσεις (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 σχεδιάσεων κάθε επιπέδου κατά φθίνουσα σειρά απόστασης από τις γειτονικές τους
5. Παραγωγή μια νέας γενιάς σχεδιάσεων ισάριθμων με τον αρχικό πληθυσμό με βάση την κατάταξή τους
6. Επανάληψη των βημάτων 2 ως 5

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

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

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

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

Απαιτείται δηλαδή να υπάρχει τουλάχιστον μια αντικειμενική συνάρτηση με μικρότερη τιμή και όσον αφορά τις υπόλοιπες αντικειμενικές συναρτήσεις, οι δύο σχεδιάσεις να είναι τουλάχιστον ισοδύναμες. Η διαδικασία κατάταξης των σχεδιάσεων σε επίπεδα ( $F_i$ ) γίνεται με διαδοχικούς ελέγχους των παραχθέντων γεωμετριών ξεκινώντας από αυτές από τις οποίες δεν υπερέχει καμία άλλη. Αυτές οι σχεδιάσεις αποτελούν το πρώτο επίπεδο. Για κάθε μια από τις επόμενες σχεδιάσεις ελέγχεται ο αριθμός των σχεδιάσεων που υπερέχει των πρώτων και αν αυτός ο αριθμός είναι 1 αποτελούν μέλη 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 :

```

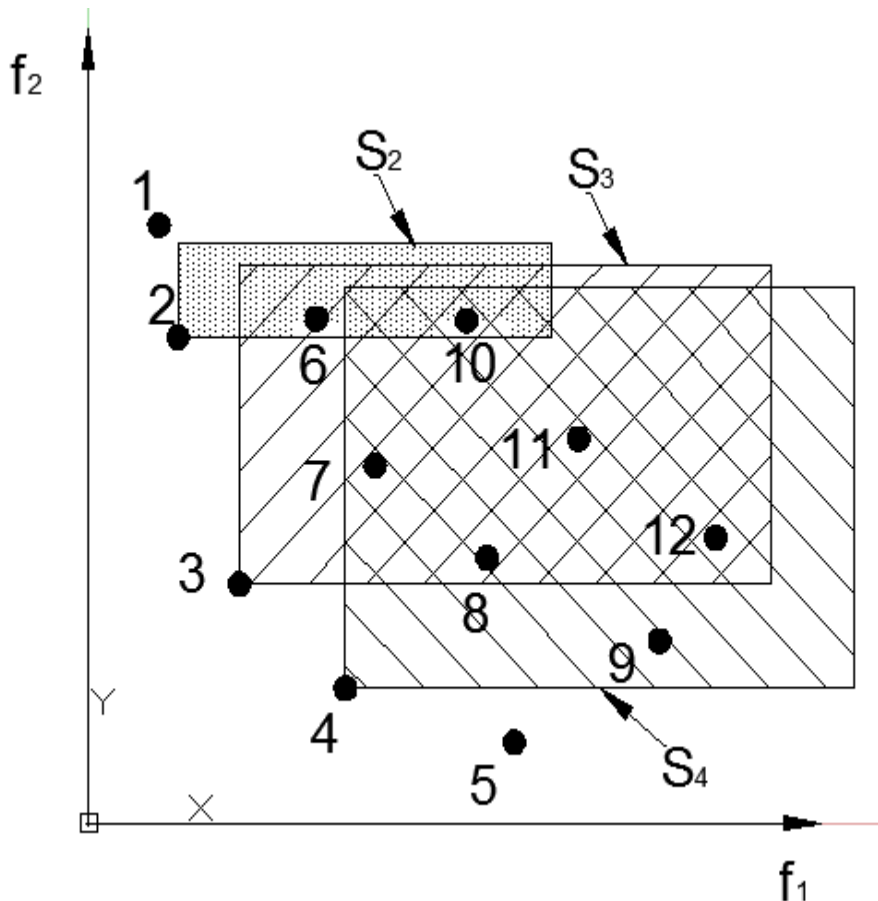
     $\forall p \in P$ 
 $S_p = \emptyset$ 

 $n_p = 0$ 
 $\forall q \in P$ 
    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
                 $q_{rank} = i + 1$ 
                 $Q = Q \cup \{q\}$ 
         $i = i + 1$ 
         $\mathcal{F}_i = Q$ 

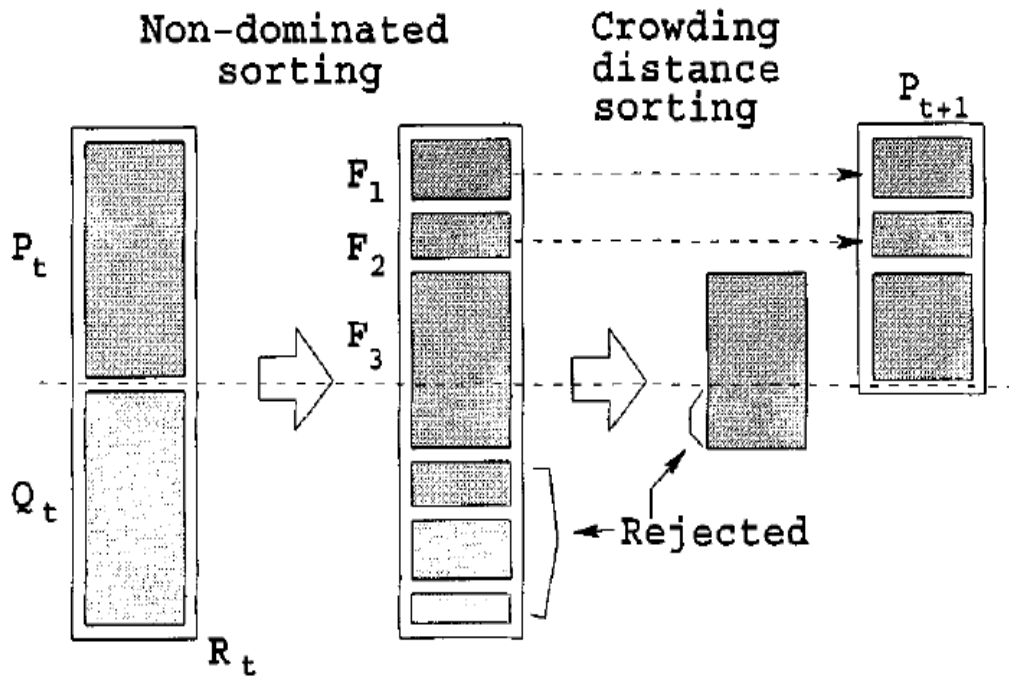
```

Στην αλληλουχία ενεργειών που ακολουθούνται, 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  $n_p$  εκφράζει τον αριθμό των λύσεων που υπερέχουν της λύσης  $p$ . Το μέγεθος  $\mathcal{F}_i$  είναι το σύνολο των λύσεων που ανήκουν στο επίπεδο  $i$  ενώ με  $p_{rank}$  συμβολίζεται ο βαθμός της λύσης  $p$ , που αντιστοιχεί στο επίπεδο στο οποίο ανήκει. Η χρησιμότητα του βαθμού της κάθε λύσης έγκειται στην κατάταξη που θα γίνει στη συνέχεια. Το μέγεθος  $Q$  αποτελεί το σύνολο των λύσεων στο οποίο προσωρινά αποθηκεύονται τα μέλη κάθε επιπέδου  $\mathcal{F}_i$ ,  $i \geq 2$ . Για την αποσαφήνιση της διαδικασίας κατάταξης σε επίπεδα, θα παρατεθεί ένα σχήμα στο οποίο φαίνονται διάφορες λύσεις και η συσχέτιση τους με τις υπόλοιπες. Επειδή το σχήμα κείται σε επίπεδο, αναφερόμαστε στην περίπτωση με δύο αντικειμενικές συναρτήσεις. Προκειμένου να περιγραφούν προβλήματα με τρεις θα πρέπει να καταφύγουμε σε τρισδιάστατο σχήμα.



Εικόνα 18: Παραγόμενες λύσεις στο επίπεδο των αντικειμενικών συναρτήσεων

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



Εικόνα 19: Διαδικασία παραγωγής νέας γενιάς

## 6 Παραμετρική Μοντελοποίηση

### 6.1 Γενικά Στοιχεία της Παραμετρικής Σχεδίασης

Η παραμετρική μοντελοποίηση αναφέρεται στην κατασκευή μιας γεωμετρικής αναπαράστασης με χρήση αλληλεξαρτώμενων παραμέτρων που επηρεάζουν τη μορφή της. Στην παρούσα εργασία θα μοντελοποιηθεί το δοθέν επιβατηγό ταχύπλοο σκάφος, εκκινώντας από τη σχεδίαση των κύριων καμπύλων όπως τα FOS, FOB, CPC και το σύνορο του καταστρώματος και καταλήγοντας στον προσδιορισμό των νομέων και τελικά των επιφανειών που στο σύνολο τους αποτελούν τη γάστρα. Σε μια συμβατική, μη παραμετρική σχεδίαση, το σύνολο των χαρακτηριστικών που προσδιορίζουν το πλοίο είναι σταθερά και για την ολοκλήρωση της διαδικασίας απαιτείται η τελική μορφή να συνδυάζει τα επιμέρους στοιχεία με τέτοιο τρόπο ώστε να προκύπτει μια γεωμετρία που πληροί τις απαιτήσεις συνέχειας και ομαλότητας σε όλα τα σημεία της. Κατά τη διαδικασία της σχεδίασης της γεωμετρίας υπάρχουν πολλές περιπτώσεις όπου δύο καμπύλες ή επιφάνειες έχουν ένα κοινό σημείο ή μια κοινή πλευρά αντίστοιχα. Στο σημείο επαφής των δύο στοιχείων συνήθως απαιτείται να έχουμε μιας συγκεκριμένης τάξης συνέχεια, ανάλογα με το σημείο της γεωμετρίας στο οποίο αναφερόμαστε. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, αυτή η απαίτηση μπορεί να είναι μηδενικής, πρώτης ή δεύτερης τάξης. Η συνέχεια πρώτης τάξης εξασφαλίζεται όταν έχουμε απλή ταύτιση των ακραίων σημείων ή πλευρών ενώ οι άλλες δύο είναι πιο σύνθετες και χρειάζεται να οριστούν περισσότερες απαιτήσεις. Δεδομένου ότι η συνέχεια μηδενικής τάξης είναι απλή περίπτωση, δε χρειάζεται να αναλυθεί περισσότερο και κατ' επέκταση θα επικεντρωθούμε στις άλλες δύο. Η συνέχεια πρώτης τάξης καλείται αλλιώς και συνέχεια εφαπτομενικού διάνυσματος και υφίσταται όταν το διάνυσμα που εφάπτεται της πρώτης καμπύλης στο σημείο  $P_n$ , έχει ίδιο μέτρο και φορά με το αντίστοιχο διάνυσμα της δεύτερης καμπύλης στο σημείο  $P_0$ . Αν θεωρήσουμε ότι δεδομένα είναι τα στοιχεία της πρώτης καμπύλης, τότε η συνέχεια εξασφαλίζεται με κατάλληλη χωροθέτηση των δύο πρώτων σημείων της δεύτερης. Συγκεκριμένα οι σχέσεις που συνδέουν τα ακραία σημεία ελέγχου με το εφαπτομενικό διάνυσμα είναι οι επόμενες :

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

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

Τα σημεία ελέγχου στις παραπάνω εξισώσεις είναι διανύσματα με στοιχεία τις συντεταγμένες τους κάτι που ισχύει και για τα διανύσματα πρώτης παραγώγου  $D_0$  και  $D_n$ . Οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να αποτελέσουν απαιτήσεις για μια καμπύλη ανεξάρτητα από το αν έχουν κοινό σημείο με άλλη, κάτι που βρίσκει ευρεία εφαρμογή στη ναυπηγική. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι καμπύλες, των οποίων τα ακραία σημεία βρίσκονται πάνω στα FOS ή FOB. Προκειμένου να έχουμε ομαλή μορφή της προκύπτουσας μορφής γάστρας στην περιοχή του κοινού σημείου, θα πρέπει το ακραίο εφαπτομενικό διάνυσμα να είναι ομοεπίπεδο με αυτές οι επιφάνειες. Σε αυτές τις περιπτώσεις δεν έχουμε συγκεκριμένα στοιχεία για το μέτρο του εφαπτομενικού διανύσματος, ωστόσο μια λογική επιλογή είναι η διαστατοποίηση των αδιάστατων μοναδιαίων διανυσμάτων  $D_n$  ή  $D_0$  με χρήση του μήκους  $d$ , όπως αυτό ορίζεται από τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο παρεμβολής. Αυτή η τεχνική είναι και η προταθείσα από τη βιβλιογραφία που έχει χρησιμοποιηθεί. Η εισαγωγή του παράγοντα  $d$  εξασφαλίζει πως η τάξη μεγέθους του μέτρου των εφαπτομενικών διανυσμάτων είναι συγκρίσιμη με αυτή του επικαμπύλιου μήκους της αρχικής μη παραμετρικής καμπύλης. Σε μια παραμετρική σχεδίαση θα πρέπει για κάθε πιθανή μεταβολή της γεωμετρίας που προκύπτει από μεταβολή των παραμέτρων της, να διατηρούνται τα ίδια στοιχεία ομαλότητας. Αυτό καθιστά τη διαδικασία της μοντελοποίησης ιδιαίτερα περίπλοκη και ειδικά στην περίπτωση περιοχών του πλοίου, όπου έχουμε εξάρτηση της μορφής τους από περισσότερες από μια παραμέτρους. Σε αυτή την περίπτωση η πιθανή μορφή που μπορεί να λάβει μια περιοχή της γάστρας κινείται σε χώρο που έχει διάσταση ανάλογη με τον αριθμό των τοπικών παραμέτρων που την επηρεάζουν. Κατ' επέκταση, σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να προκύψουν μη αποδεκτές μορφές ακόμα και για συνδυασμό τιμών παραμέτρων που δεν ανήκουν στα άκρα του αντίστοιχου εύρους, οι οποίες συνήθως είναι πιθανότερο να δημιουργήσουν ανωμαλίες.

Η εύρεση του συνδυασμού των τιμών που προκαλούν τέτοια προβλήματα είναι πολλές φορές δύσκολη ή και αδύνατη και η τεχνική που μπορεί να εφαρμοστεί για την καταστολή της εμφάνισης απαράδεκτων μορφών είναι η εισαγωγή απαιτήσεων που απορρίπτουν τέτοιες περιπτώσεις όταν υπάρξουν. Για τη διαχείριση μιας παραμετρικής γεωμετρίας απαιτείται η χρήση παραμέτρων στο σύνολο των επιμέρους περιοχών ενδιαφέροντος που συνδέονται μεταξύ τους με σχέσεις αλληλεξάρτησης οι οποίες καθορίζουν το διαχωρισμό τους σε εξαρτημένες και ανεξάρτητες. Οι εξαρτημένες παράμετροι επηρεάζονται από άλλες εξαρτημένες ή ανεξάρτητες και παραμένουν δέσμιες των αλλαγών των τιμών από τις οποίες εξαρτώνται. Αντίθετα, οι ανεξάρτητες μπορούν να λάβουν τιμές κατά τη βούληση του σχεδιαστή και είναι οι μοναδικές που μπορούν να αποτελέσουν τις μεταβλητές σχεδίασης. Ο αριθμός των μεταβλητών σχεδίασης και παραμέτρων, καθώς και ο βαθμός στον οποίο αυτές επηρεάζουν τη γεωμετρία, αποτελούν αντικείμενο που θα πρέπει να μελετηθεί εκτενώς προκειμένου να καθοριστεί ο βέλτιστος τρόπος εξυπηρέτησης του σκοπού της μελέτης. Τα παραπάνω χαρακτηριστικά δεν καθορίζονται από γενικούς κανόνες καθώς μεγάλος αριθμός παραμέτρων συνεπάγεται τον εκτενέστερο έλεγχο της γεωμετρίας σε τοπικό επίπεδο αλλά ταυτόχρονα και μια δυσκολότερα διαχειρίσιμη σχεδίαση. Αντίθετα μικρός αριθμός παραμέτρων μπορεί να εξασφαλίσει την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας εμφάνισης ανωμαλιών λόγω της αλληλεπίδρασης διαφορετικών παραμέτρων.

Ωστόσο η απόκλιση από μια αρχική μορφή που θέλουμε να προσεγγίσουμε θα είναι εν γένει μεγαλύτερη. Στα πλαίσια της παρούσης εργασίας, επιδίωξη αποτελεί η βελτιστοποίηση μιας υπάρχουσας μορφής και επομένως η ακρίβεια προσέγγισής της αποτελεί σημαντικό παράγοντα. Η παραμετρική σχεδίαση θα πραγματοποιηθεί με χρήση σχεδιαστικών εργαλείων του CAESES – Friendship Framework σε συνδυασμό με πολυωνυμικές καμπύλες. Οι καμπύλες αυτές αποτελούν ισχυρά σχεδιαστικά εργαλεία που σήμερα χρησιμοποιούνται εκτενέστατα στη σχεδίαση πολύπλοκων γεωμετρικών μορφών. Οι ιδιότητές τους περιγράφονται στις ενότητες που ακολουθούν καθώς αποτελούν το θεωρητικό υπόβαθρο της βελτιστοποίησης αναπαράστασης πολύπλοκων καμπύλων που πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον του CAESES-Friendship Framework.

## 6.2 Σχεδίαση Βασικών Καμπύλων της Μορφής της Γάστρας

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

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

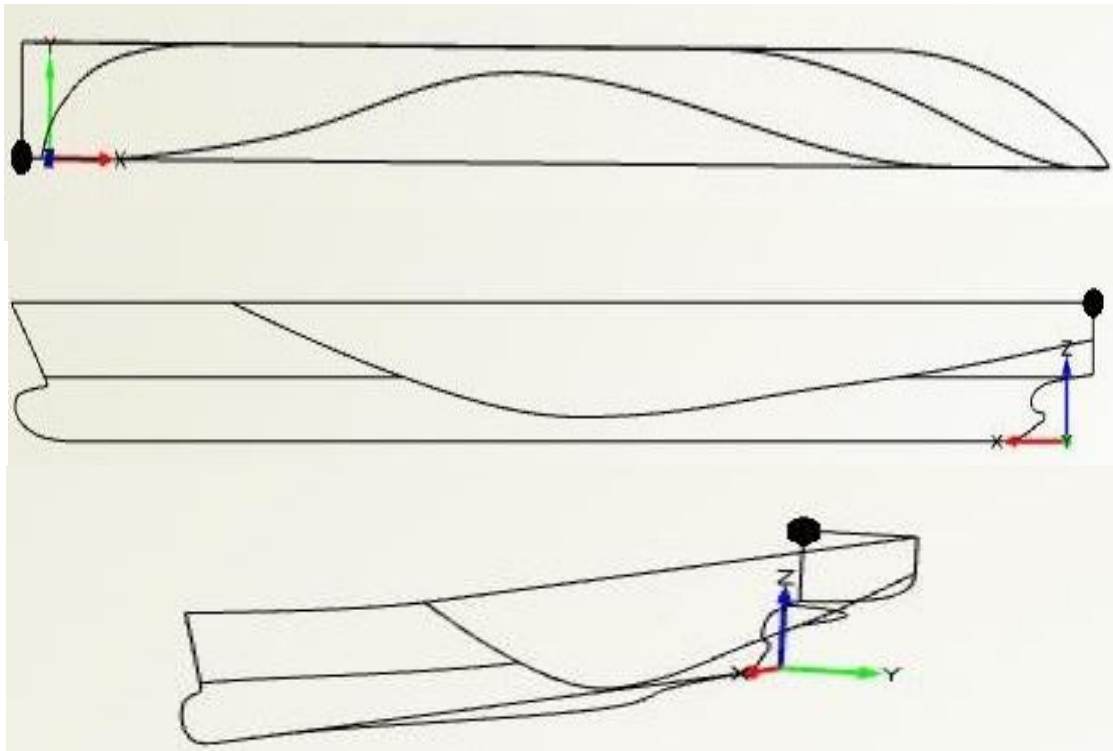
Το κάθε ένα από αυτά τα βήματα πραγματοποιείται από ένα ή περισσότερα λογισμικά που θα περιγραφούν στη συνέχεια ξεκινώντας από την παραμετρική σχεδίαση καθώς αποτελεί ίσως την σημαντικότερη διαδικασία της βελτιστοποίησης, για το λόγο ότι μια λανθασμένη σχεδίαση θα οδηγούσε εύκολα σε σφάλματα κατά το τρέξιμο των αλγορίθμων. Η παραμετρική σχεδίαση της γάστρας όπως αναφέρθηκε παραπάνω έγινε με το λογισμικό CAESES FRIENDSHIP FRAMEWORK<sup>10</sup>. Το πρώτο βήμα της σχεδίασης είναι η δημιουργία των καμπύλων που περιγράφουν τη μορφή της γάστρας του πλοίου δηλαδή του flat of side (FOS), του flat of bottom (FOB), του center profile (CPC) και δύο ισάλων στο ύψος του βυθίσματος σχεδίασης και στο ύψος του κοίλου. Συγκεκριμένα, οι FOB και FOS δημιουργήθηκαν με B-spline, χρησιμοποιώντας κατάλληλο αριθμό σημείων ελέγχου. Η

---

<sup>10</sup> Παράρτημα Α



καμπύλη του προφίλ δημιουργήθηκε με τη χρήση τμηματικών F-splines. Αυτή είναι μια εύχρηστη καμπύλη του CAESES που 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. Οι ίσαλοι δημιουργήθηκαν 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).



Εικόνα 20: Οι βασικές καμπύλες της γεωμετρίας του containership

Για τη δημιουργία αυτών των καμπύλων ήταν απαραίτητες κάποιες πληροφορίες, βάσει των οποίων θα γινόταν η εξαγωγή των καμπύλων. Τέτοιες ήταν ένας πίνακας με βασικές διαστάσεις του υπό σχεδίαση πλοίου αλλά και ένα αρχείο .iges με τις επιφάνειες του πλοίου. Με τη χρήση αυτών των επιφανειών και τις προβολές τους σε διάφορα επίπεδα έγινε η παραγωγή, με πολύ μεγάλη ακρίβεια, των επιθυμητών καμπύλων. Παρακάτω παρατείνονται τα προαναφερθέντα στοιχεία:

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά πατρικού πλοίου και μοντέλου

<b>The MOERI Container Ship KCS</b>			
		Ship	Model
Scale	-	1 : 1	1 : 37.88999
$L_{PP}$	m	230.00	6.0702
$L_{WL}$	m	232.5	6.1357
$B_{WL}$	m	32.2	0.8498
$T_m$	m	10.8	0.2850
$S$	m <sup>2</sup>	9500.7	6.6177
$\nabla$	m <sup>3</sup>	52061.7	0.9571
$C_b$	-	0.651	0.651
$LCG$ from AP	m	111.6	2.945
$VCG$ from BL	m	14.324	0.378

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά Πηδαλίου

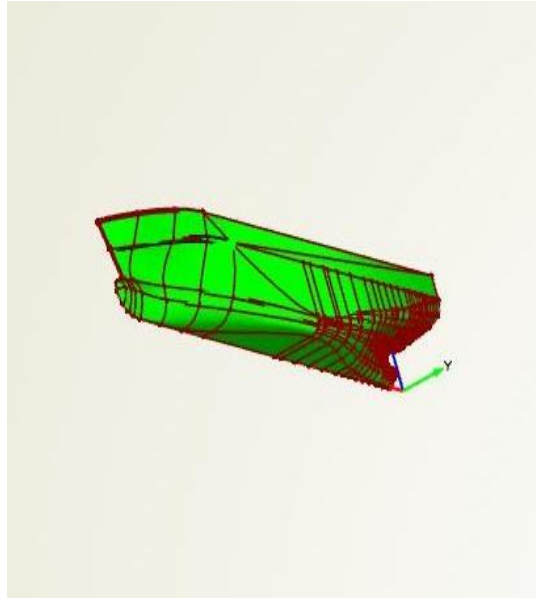
<b>The MOERI Container Ship KCS</b>			
		Ship	Model
Type	-	Semi-balanced horn rudder	Semi-balanced horn rudder
$S$	m <sup>2</sup>	115.0	0.0801
Lat. Area	m <sup>2</sup>	54.45	0.0379
Mov. Area	m <sup>2</sup>	45.50	0.0317

Πίνακας 3: Κατάσταση Δοκιμών

<b>The MOERI Container Ship KCS</b>			
		Ship	Model
$T_F$	m	10.8	0.2850
$T_A$	m	10.8	0.2850
$\nabla$	m <sup>3</sup>	52061.7	0.9571
$U_0$	m/s	12.35	2.017
$Fr$	-	0.26	0.26

Πίνακας 4: Δεδομένα κυματισμών

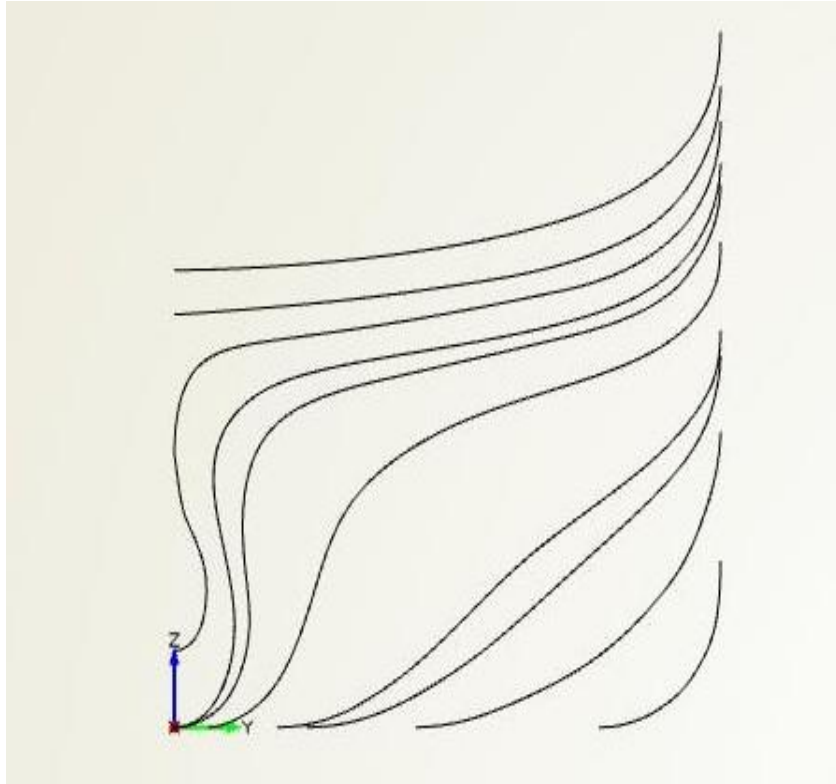
Case ID	Wave ID	Run ID	Wave length [m]	Height [m]	$\lambda/L$ [-]	Period [s]
1	B 09	29	8.321	0.149	1.371	2.308
2	B 01	17	3.034	0.049	0.500	1.394
3	B 13	30	11.840	0.196	1.951	2.753
4	B 03	25	4.554	0.080	0.750	1.707
5	B 02	21	3.949	0.062	0.651	1.590
6	B 07	24	6.979	0.123	1.150	2.114



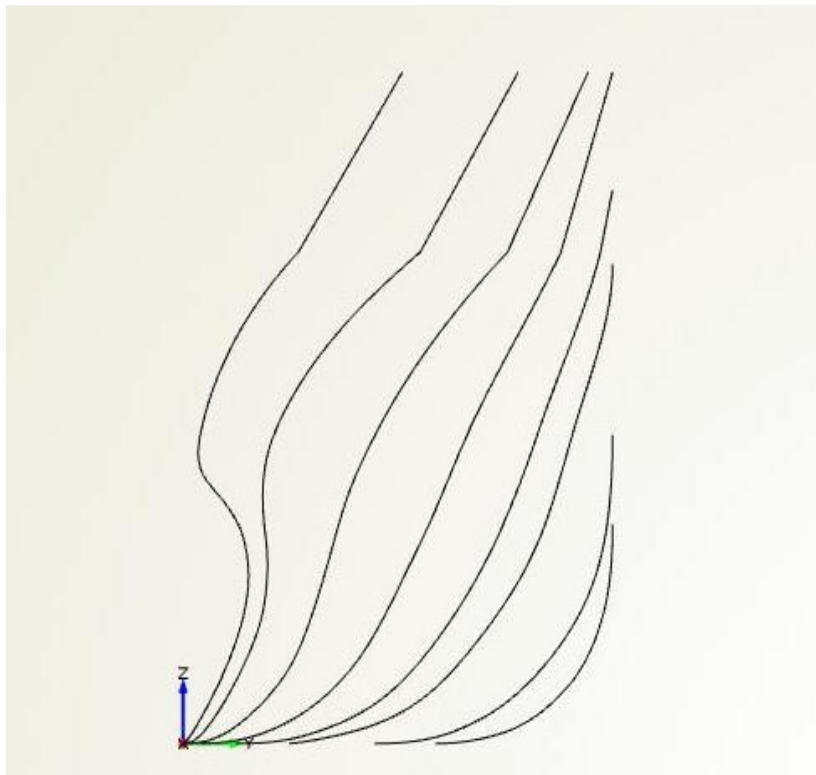
Εικόνα 21: επιφάνειες από το αρχείο iges

### 6.3 Διαμόρφωση Νομέων

Επόμενο βήμα της σχεδίασης είναι διαμόρφωση των νομέων. Η διαδικασία αυτή χωρίστηκε σε δύο κομμάτια. Το πρώτο ήταν, με τη βοήθεια των παραπάνω επιφανειών να εξαχθούν τα offsets των νομέων, δηλαδή μια ομάδα καμπύλων, η οποία αναπαριστά τη μορφή των νομέων αλλά δεν επιδέχονται καμία επεξεργασία. Η χρησιμότητα αυτών των καμπύλων ήταν να αποτελέσουν οδηγό, έτσι ώστε με χρήση άλλων εργαλείων να σχεδιαστούν οι νομείς. Παράλληλα, λόγω της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας πλώρα και πρίμα του πλοίου σε εκείνες τις περιοχές επιλέχθηκε να εξαχθούν περισσότεροι νομείς παρότι κοντά στο μέσο του πλοίου. Κάθε νομέας χωρίστηκε σε δύο τμήματα, εκ των οποίων το πρώτο αποτελεί καμπύλη B-Spline, για την οποία εφαρμόστηκε η βελτιστοποίηση της παρεμβολής, ενώ για το δεύτερο χρησιμοποιήθηκε μια FSpline. Αυτή είναι μια εύχρηστη καμπύλη του CAESSES – Friendship Framework που και 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. Με αυτόν τον τρόπο οι νομείς που εξαρτώνται από αυτή μπορούν να μεταβάλλονται διατηρώντας την ομαλότητά τους για ένα εύρος μεταβολής τόσο της γωνίας εισόδου όσο και της τεταμένης του κοινού σημείου των δύο τμημάτων της ισάλου.



Εικόνα 22: Οι νομείς πρίμα της μέσης τομής

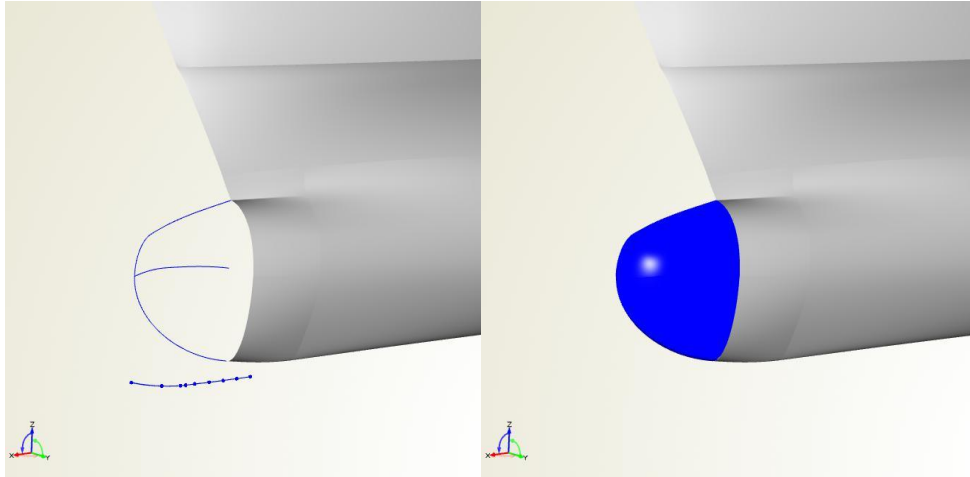


Εικόνα 23: Οι νομείς πώρα της μέσης τομής

## 6.4 Διαμόρφωση Βολβοειδούς Πλώρης

Στη συνέχεια κατασκευάστηκε η βολβοειδής πλώρη εφαρμόζοντας όμως μια εντελώς διαφορετική διαδικασία από αυτή που έχει αναφερθεί μέχρι τώρα. Βασικός λόγος αυτής της προσέγγισης αποτελεί το γεγονός ότι επηρεάζει άμεσα την αντίσταση κυματισμού και 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 και επομένως η αρχική τους μορφή μπορεί να προσεγγιστεί με απλά και εύχρηστα σχεδιαστικά εργαλεία σε πολύ ικανοποιητικό βαθμό. Για να κατασκευαστεί ο βολβός χρησιμοποιήθηκε μία συνάρτηση ορισμού, η οποία δημιουργεί μία καμπύλη και ορίζει τον τρόπο με τον οποίο αυτή μεταβάλλεται κατά μία ορισμένη διεύθυνση (στην περίπτωση μας κατά το διάμηκες). Για το σκοπό αυτό 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 προραία 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 εφαπτομενικού διανύσματος με την καμπύλη παρεμβολής των ισοϋψών σημείων των νομέων που βρίσκονται πρύμνηθεν της προραίας καθέτου, ώστε να επιτυγχάνεται  $C^1$  συνέχεια μεταξύ των παραγόμενων επιφανειών πρύμνηθεν και πρόραθεν της προραίας καθέτου.

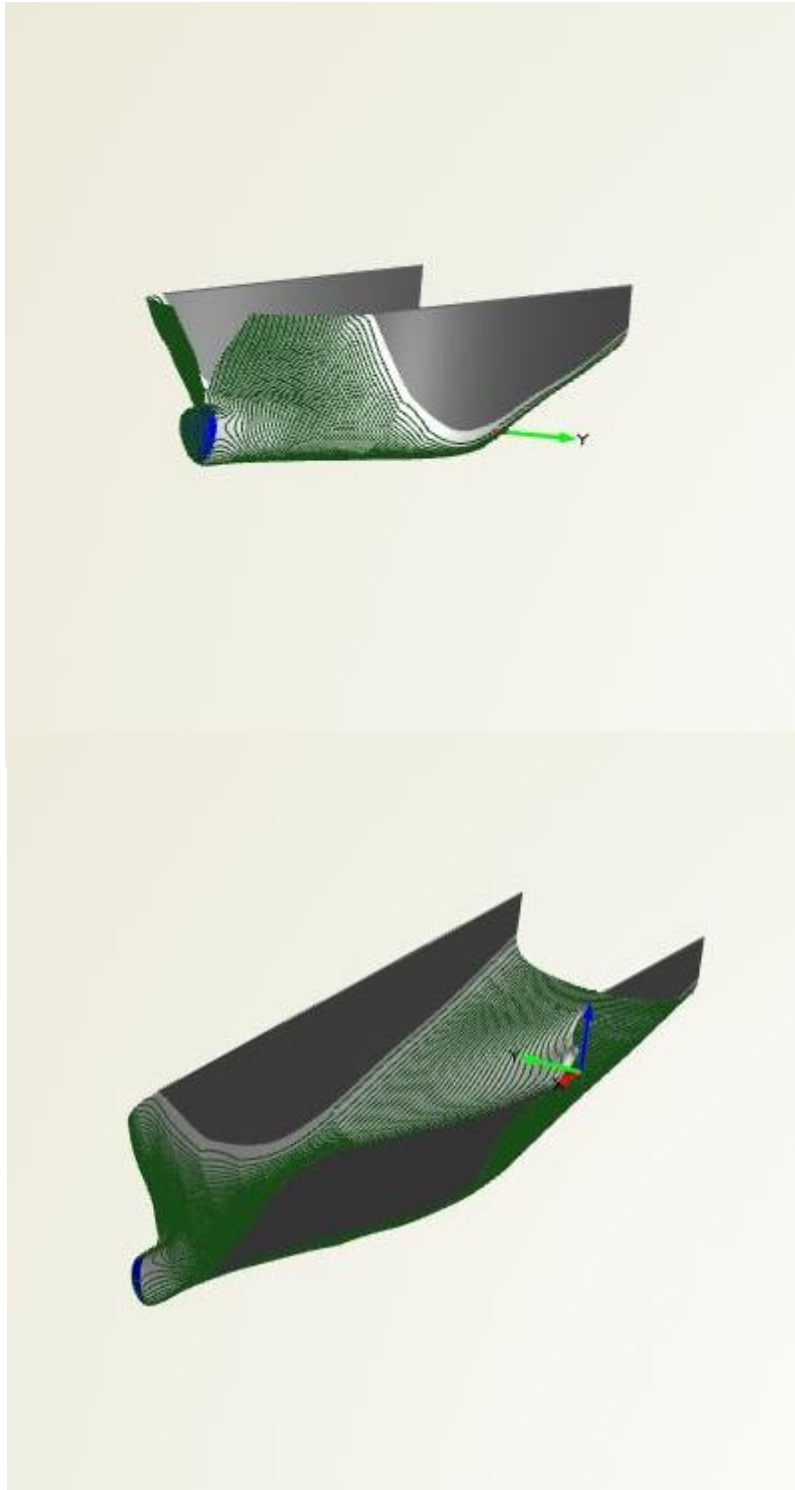
Η δεύτερη καμπύλη, που δημιουργήθηκε, για να χρησιμοποιηθεί ως δεδομένο στη συνάρτηση ορισμού, είναι αυτή του εμβαδού εγκάρσιας επιφανείας. Συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν δύο παρόμοιες καμπύλες, από τις οποίες η πρώτη δίνει το εμβαδό πάνω από την καμπύλη μεγίστου πάχους και του προφίλ κατά το διάμηκες, ενώ η δεύτερη δίνει το αντίστοιχο εμβαδό για το κάτω κομμάτι. Έπειτα δημιουργήθηκαν οι καμπύλες που δίνουν την εφαπτομένη (στο επίπεδο xz) στην καμπύλη μεγίστου πλάτους και τις εφαπτόμενες στα σημεία τομής με το προφίλ. 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 καμπύλων 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 .



Εικόνα 24: Οι γραμμές και η επιφάνεια του βολβού

## 6.5 Παραγωγή Επιφανειών και Επιλογή Παραμέτρων Σχεδίασης

Τελευταία βήματα της παραμετρικής είναι η δημιουργία των επιφανειών και η επιλογή των παραμέτρων βάσει των οποίων θα γίνει η βελτιστοποίηση. Η δημιουργία των επιφανειών έγινε με τη χρήση των εντολών `loft` και `coons patch`. Η πρώτη αφορά την παραγωγή επιφανειών κατά το διάμηκες παίρνοντας πληροφορίες από τους σχεδιασμένους νομείς και χρησιμοποιώντας ως οδηγό βοηθητικές καμπύλες, όπως τις δύο ισάλους, ενώ η δεύτερη δημιουργεί μια 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 καμπύλων 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. Η δημιουργία των επιφανειών του βολβού αποτέλεσε το δυσκολότερο τμήμα της διαδικασίας παραγωγής επιφανειών καθώς ουσιαστικά η περιπλοκότητα των επιφανειών είναι σαφώς μεγαλύτερη. Επίσης, εφόσον ο βολβός επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα δύο κριτήρια βελτιστοποίησης, κατά τη δημιουργία του απαιτήθηκε εξαιρετική ακρίβεια και προσοχή.



Εικόνα 25: Οι παραγόμενες επιφάνειες

Η σχεδίαση της γάστρας πραγματοποιήθηκε εισάγοντας κάποιες παραμέτρους με σκοπό να επηρεάζουν συγκεκριμένα τμήματα της γάστρας και αυτά με τη σειρά τους να επηρεάζουν τις αντικειμενικές συναρτήσεις που επιλέχθηκαν κατά τη βελτιστοποίηση. Τα τμήματα αυτά αφορούν κυρίως το βολβό, το πρωραίο τμήμα και δευτερευόντως το πρυμναίο τμήμα. Χαρακτηριστικό είναι ότι από τις έντεκα μεταβλητές οι οκτώ αφορούν τον βολβό. Τόσο οι μεταβλητές όσο και το εύρος διακύμανσής 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.

Πίνακας 5: Παράμετροι Σχεδίασης

Μεταβλητή Σχεδίασης	Κάτω Όριο	Αρχική Τιμή	Άνω Όριο
<b>DX8%fromFP (m) :</b>	-1.5	0	1.5
<b>DZfos(m) :</b>	-1	0	1
<b>angleisalou (°) :</b>	155	170	180
<b>angleprofile (°) :</b>	69	81	90
<b>bulbousZ (m) :</b>	8.9	9.5	10.1
<b>2/3maxbeamY(m) :</b>	2.1	2.4418466	2.3
<b>2/3maxbeamZ(m):</b>	6.1	6.3	6.5
<b>BBtipmaxbeamZ (m) :</b>	5.7	6	6.3
<b>FPmaxbeamZ (m) :</b>	5.3	5.5	5.8
<b>FPmaxbeamY(m) :</b>	2.1	2.36117	2.5
<b>DLbulb (m) :</b>	-0.8	0	1.2



Ύστερα από την ολοκλήρωση της σχεδίασης της πατρικής γάστρας, έγιναν οι αναγκαίοι υδροστατικοί υπολογισμοί μέσω της χρήσης του CAESES, με σκοπό να γίνει έλεγχος κατά πόσο η γάστρα που σχεδιάστηκε είναι κοντά στην πραγματική. Έτσι προκύπτει ο παρακάτω πίνακας με σύγκριση όσων δεδομένων έχουν δοθεί για το πατρικό πλοίο:

Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά παραμετρικής γάστρας

	<b>Υπό Σχεδίαση Γάστρα</b>	<b>Πατρική Γάστρα</b>	<b>Μεταβολή</b>
<b>BM (m) :</b>	9.073	-	-
<b>KM (m) :</b>	4.189	-	-
<b>Volume (m<sup>3</sup>) :</b>	51741.010	52061.7	0,7%
<b>Cb :</b>	0.647	0.651	0,6%
<b>Cp :</b>	0.898	-	-
<b>Displacement (tons) :</b>	53035.35	-	-
<b>Lcg (m) :</b>	111.76	111.6	0,15%
<b>Lcb (m) :</b>	111.75	-	-

Παρότι τα δεδομένα δεν είναι αρκετά, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η σχεδιασμένη γάστρα παρουσιάζει πολύ καλή προσέγγιση στην πατρική. Αυτό οφείλεται στην προσεκτική σχεδίαση της γάστρας, στην τυχαιότητα των σφαλμάτων που μπορεί να αλληλοεξουδετερώνουν το ένα το άλλο και στην καλή ακρίβεια του λογισμικού CAESES FRIENDSHIP.

## 7 Διαδικασία Βελτιστοποίησης

### 7.1 Εισαγωγή

Η διαδικασία βελτιστοποίησης είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη χρήση αλγόριθμων για την αξιολόγηση του συνόλου των πιθανών γεωμετριών. Οι αλγόριθμοι αξιολόγησης έχουν ευρεία εφαρμογή σε μη γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης, των οποίων αποτελούν πολλές φορές και τη μοναδική εφικτή διαδικασία επίλυσης. 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 και επιταχύνσεις, στη γενική περίπτωση μπορεί να προκαλέσουν αύξηση της αντίστασης 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 της απόδοσης της γεωμετρίας με βάση τα δύο κριτήρια και εναπόκειται στο σχεδιαστή να κρίνει τη σχετική σημαντικότητα καθενός.

Το πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης ορίζεται ως εξής:

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

$$g(\boldsymbol{\chi}) \leq 0$$

$$h(\boldsymbol{\chi}) = 0$$

$$\boldsymbol{\chi} \leq \boldsymbol{\chi} \leq \boldsymbol{\chi}_\mu$$

όπου η  $\mu_i$  είναι η  $i$ -οστή αντικειμενική συνάρτηση και οι  $g, h$  είναι το σύνολο των περιορισμών σε μορφή ισότητας και ανισότητας.  $\boldsymbol{\chi}$  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 τη 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 της γυμνής γάστρας ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Για τη διαδικασία βελτιστοποίησης, κριτήρια θα αποτελέσουν αφενός η αντίσταση κυματισμού ως συνιστώσα της συνολικής αντίστασης ρυμούλκησης κατά την πλεύση σε ήρεμο νερό και αφετέρου η τιμή της επιτάχυνσης στην πλώρη 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 η ελαχιστοποίηση μέσω πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης με περιορισμούς.

## 7.2 Υπολογιστικοί Κώδικες και Προγράμματα

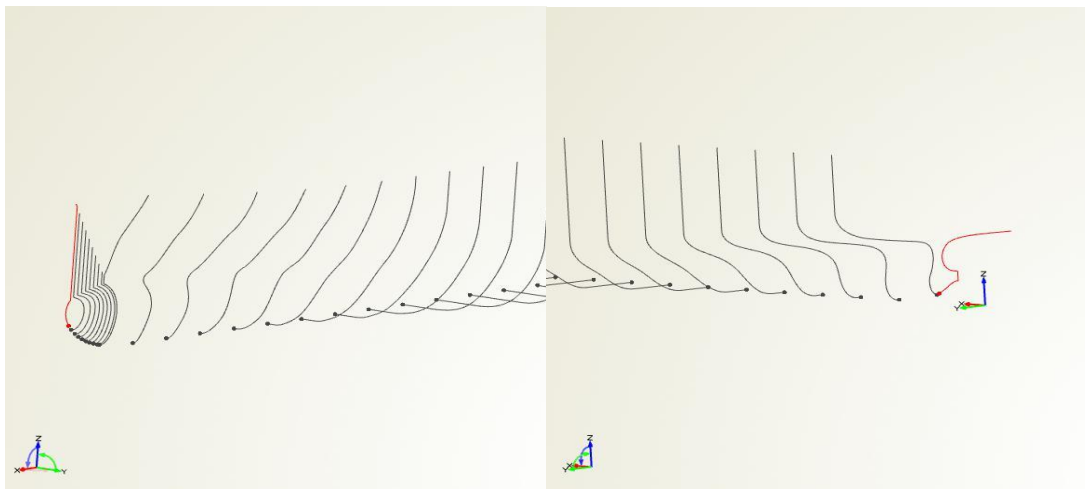
Ο υπό εξέταση κώδικας για τη δυναμική συμπεριφορά πλοίου σε κυματισμούς είναι το σύγχρονο υπολογιστικό πακέτο SWAN2 version 2002<sup>11</sup>, που αναπτύχθηκε από την ερευνητική ομάδα του καθηγητή Π. Σκλαβούνου στο Τεχνολογικό Ινστιτούτο της Μασαχουσέτης, καθώς και το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε στο Ε.Μ.Π. που βασίζεται στη θεωρία λωρίδων και ονομάζεται SPP-86 (1994)<sup>12</sup>. Ο κώδικας SPP86 διαθέτει δύο τρόπους επίλυσης του δισδιάστατου προβλήματος, ο μιν πρώτος με σύμμορφη απεικόνιση της τομής του πλοίου σε κύλινδρο κατά Lewis (Athansoulis, Loukakis, 1985), ο δε δεύτερος με την ακριβή κατανομή πηγών στην τομή (Frank, Salvesen, 1970). Το SPP-86 βασίζεται στη θεωρία λωρίδων, το οποίο λύνει τις εξισώσεις στο πεδίο των συχνοτήτων. Το SWAN-2 επιλύει τη δυναμική ροή και στις τρεις διαστάσεις, με κατανομή πηγών και τετράπλευρων και δίνει στο χρήστη τη δυνατότητα γραφικής αναπαράστασης της ροής. Επιπλέον, το SWAN-2 επιλύει το υδροδυναμικό πρόβλημα στο πεδίο του χρόνου. Προκειμένου η γάστρα να εισαχθεί στους κώδικες δυναμικής θεωρίας, απαιτείται να εξαχθούν νομείς με διαφορετικό αριθμό σε κάθε περίπτωση. Για το λογισμικό SWAN-2 χρησιμοποιούνται 32 καμπύλες, δύο που αφορούν το προφίλ του πλοίου

---

<sup>11</sup> SWAN 2 (2002), User Manual : «Ship Flow Simulation in Calm Water and in Waves», Boston Marine Consulting Inc., Boston MA 02116, USA.

<sup>12</sup> SPP-86 (1994), User's Manual, Report No: NAL-114-F-94, Lab. Ships and Marine Hydrodynamics, National Technical Univ. of Athens.

και άλλοι 30 νομείς. Στην περίπτωση του βολβού η περιγραφή της γεωμετρίας του θα πρέπει να είναι πυκνότερη, καθώς επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα των αντικειμενικών συναρτήσεων. Έτσι για την περιγραφή του επιλέχθησαν 8 νομείς. Μια ακόμα λεπτομέρεια στην περιοχή του βολβού είναι ότι για την αποφυγή σφαλμάτων του λογισμικού το κομμάτι πάνω από το βολβό θεωρήθηκε επιφάνεια πάχους ενός εκατοστού, με σκοπό να αποφευχθούν περιπτώσεις ασυνέχειας με το υπόλοιπο κομμάτι της γάστρας. 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.

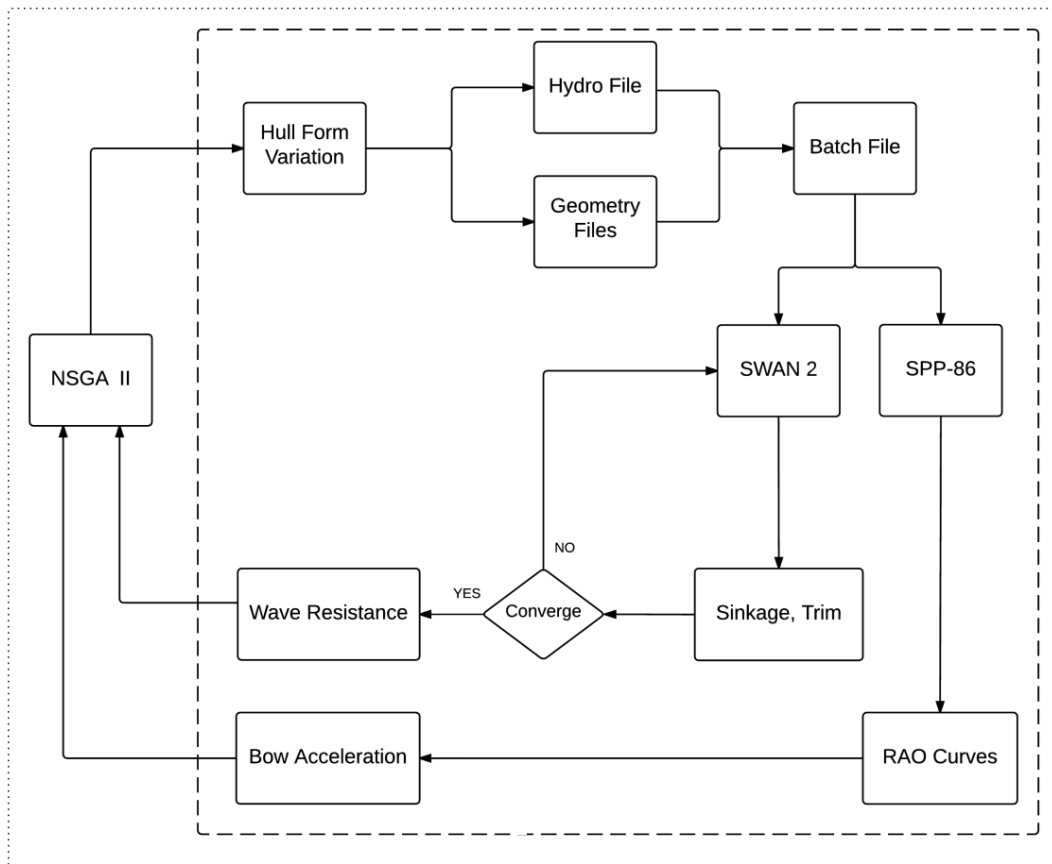


Εικόνα 26: Περιγραφή πρωραίου (αριστερά) και πρυμναίου (δεξιά) τμήματος

Σε ότι αφορά το SPP-86, μια απλή περιγραφή από 25 νομείς στη γάστρα και 7 στο βολβό αρκεί, καθώς το συγκεκριμένο λογισμικό εκτελεί υπολογισμούς για την ισοβύθιστη κατάσταση, χωρίς αναζήτηση τιμών διαγωγής και παράλληλης βύθισης σε πραγματικές συνθήκες πλεύσης. Η ενοποιημένη διαδικασία βελτιστοποίησης περιλαμβάνει την ανταλλαγή αποτελεσμάτων και δεδομένων εισόδου, μεταξύ του προγράμματος παραμετρικής μοντελοποίησης CAESES – Friendship Framework και ενός συνόλου εξωτερικών προγραμμάτων, στα οποία περιλαμβάνονται και τα προγράμματα SWAN 2 και SPP-86 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 τον δέκτη των 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. Έχουμε συνολικά 40 γενεές με 32 μέλη η κάθε μία και επομένως συνολικά 1280 εναλλακτικές μορφές. Η επιλογή των δεδομένων αυτών βασίστηκε πρωτίστως στο γεγονός πως το πλήθος των μελών κάθε γενεάς πρέπει να είναι πολλαπλάσιο του 4. Αυτή η απαίτηση προκύπτει από τις απαιτήσεις λειτουργίας του εξελικτικού αλγορίθμου.



Εικόνα 27: Διαδικασία Βελτιστοποίησης

Στην προκειμένη περίπτωση κάθε γενεά αποτελεί το σύνολο που παράγεται σε κάθε επανάληψη βάσει των χαρακτηριστικών της προηγούμενης και 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 και 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 τη μελέτη που τελείται στα πλαίσια του παρόντος. Η διαχείριση των εξωτερικών προγραμμάτων υλοποιείται στο σύνολό 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 και ένα σύνολο προγραμμάτων που εκτελούν διαδικαστικές αλλά απαραίτητες προσαρμογές στα αρχεία εισόδου και αποτελεσμάτων. 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 καμπύλων (δύο διαφορετικά αρχεία) και εξάγει ένα αρχείο SHF που χρησιμοποιείται από το λογισμικό SWAN 2. Το πρόγραμμα αυτό είναι επιφορτισμένο με τη διαμόρφωση του προωραίου 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.
- **Itteration.exe.** Πρόγραμμα Visual Fortran που εκτελεί επαναληπτικά το λογισμικό SWAN 2 και ελέγχει αν έχει επιτευχθεί σύγκλιση των τιμών παράλληλης βύθισης και διαγωγής. Η επανάληψη αφορά τα εκτελέσιμα αρχεία makessg.exe,setup.exe και solve.exe που διαμορφώνουν τα αρχεία του SWAN 2 και επιλύουν το υδροδυναμικό πρόβλημα.

- **Sections\_frank.exe.** Πρόγραμμα Visual Fortran που 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 η γωνία συνάντησης
- **Results.exe.** Πρόγραμμα Fortran 77 που αποθηκεύει τα αποτελέσματα των υδροδυναμικών υπολογισμών σε αρχείο που τροφοδοτείται στο CAESES – Friendship Framework προς αξιολόγηση των αντικειμενικών συναρτήσεων. Στα αποτελέσματα περιλαμβάνονται οι τιμές της μέγιστης επιτάχυνσης στην πλώρη και της αντίστασης κυματισμού.

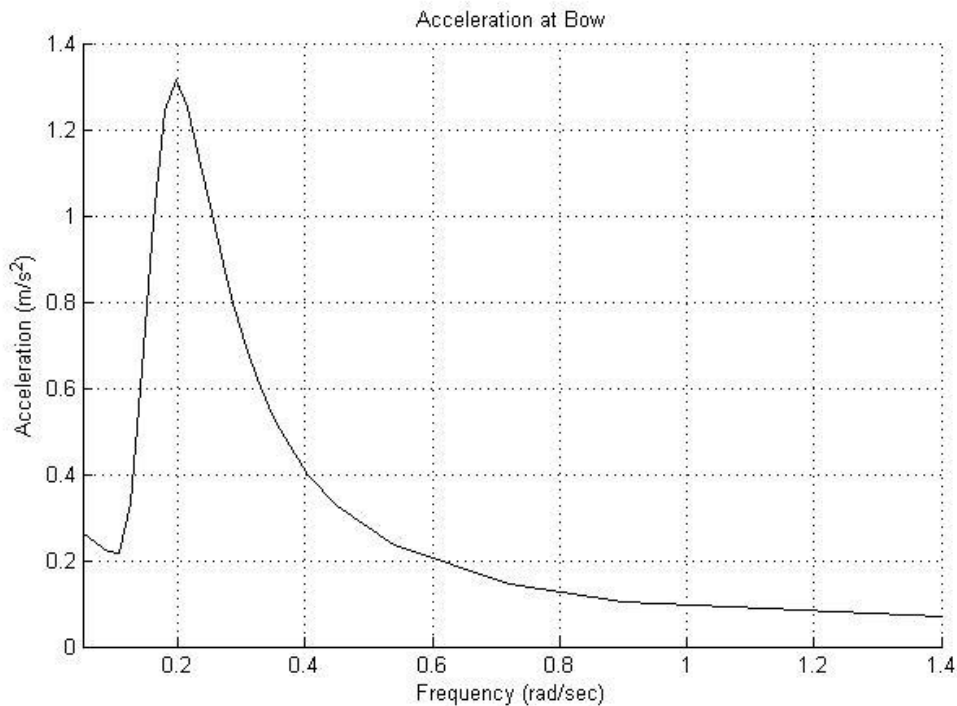
### 7.3 Αποτελέσματα Μονοκριτηριακής Βελτιστοποίησης

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 τη 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 περιεγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο καθώς επίσης μία σειρά από εξαγόμενα αρχεία από το CAESES, που αφορούν την γεωμετρία του πλοίου και τα υδροστατικά του στοιχεία. Συγκεκριμένα τα αποτελέσματα για την πατρική γάστρα είναι τα ακόλουθα

Πίνακας 7: Αρχικές τιμές κριτηρίων βελτιστοποίησης

Τ [m]	V [knots]	Αντίσταση κυματισμού [kN]	Επιτάχυνση στην πλώρη [m/s <sup>2</sup> ]
10.8	25	672	1.3161

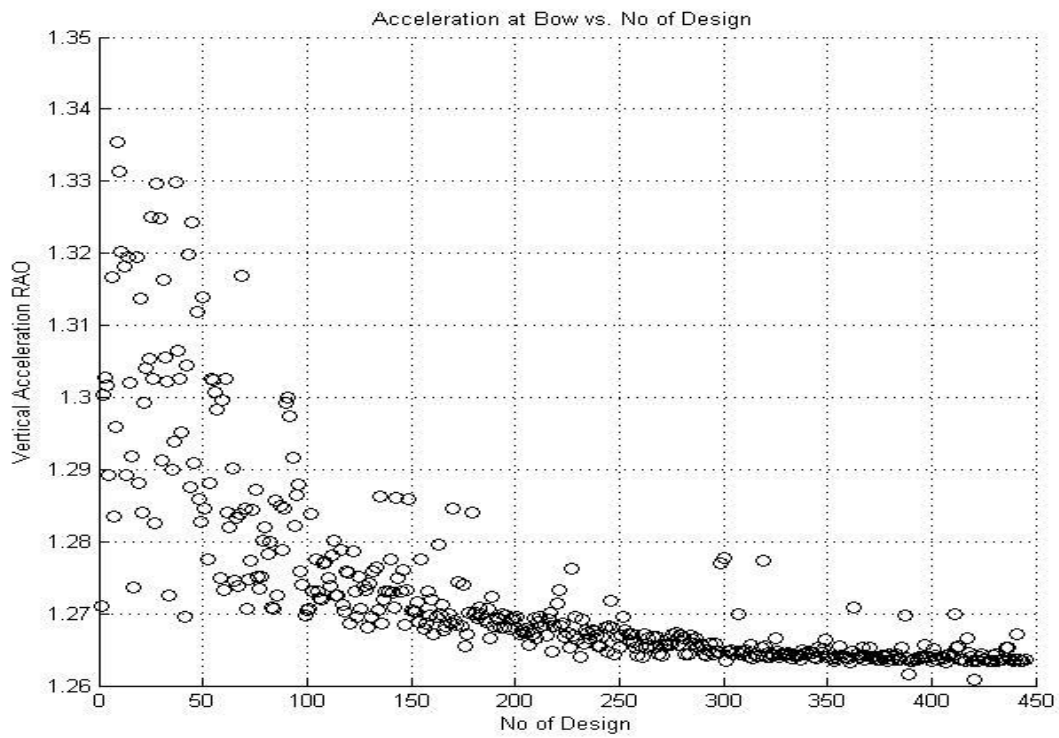


Εικόνα 28: Καμπύλη RAO επιτάχυνσης στην πλώρη πατρικής γάστρας

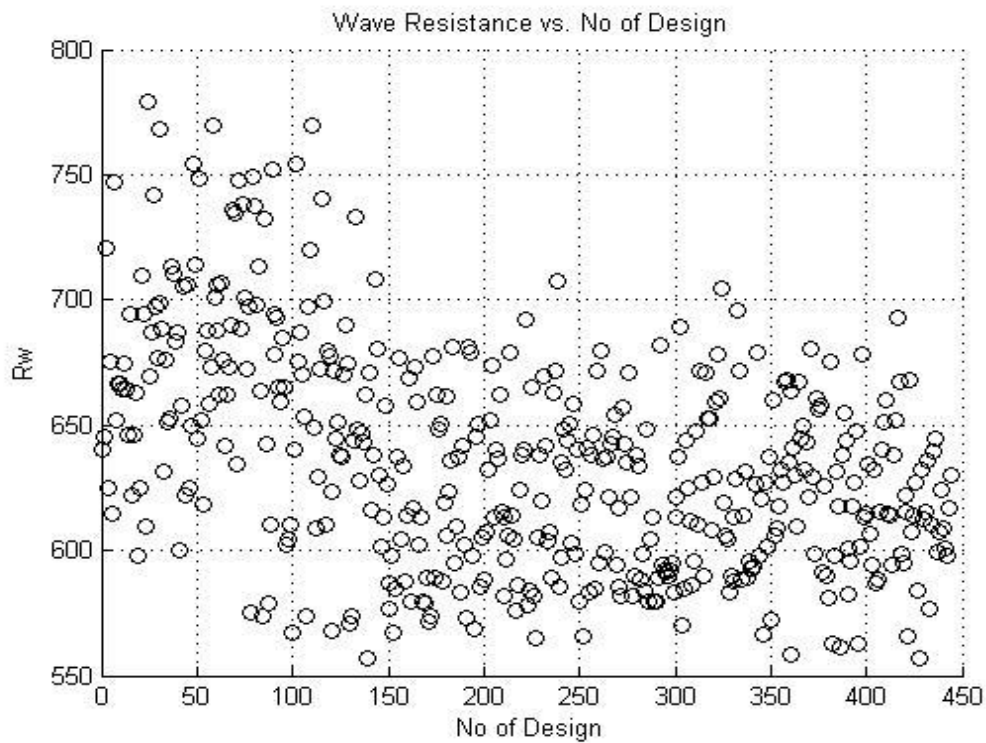
Η βελτιστοποίηση αποτελεί κύριο στόχο της παρούσας εργασίας. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι η αντίσταση κυματισμού σε ήρεμο νερό και η κατακόρυφη επιτάχυνση με συντελεστή βαρύτητας 50%. Για την καλύτερη κατανόηση της συγκεκριμένης πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης αρχικά θα παρουσιασθούν κατά σειρά τα αποτελέσματα των εκάστοτε επιμέρους κριτηρίων και οι τιμές των μεταβλητών, στις οποίες έγινε η σύγκλιση. Αρχικά, θα παρουσιασθούν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης που έγινε με κριτήριο την κατακόρυφη επιτάχυνση και για υπηρεσιακή ταχύτητα  $V=25$  kn. Στις εικόνες 26 - 37 παρουσιάζονται τα διαγράμματα διασποράς που προέκυψαν εκ του συνόλου των λύσεων που παρήγαγε ο αλγόριθμος, οι οποίες για τη συγκεκριμένη περίπτωση ήταν 448. Στις πρώτες εικόνες εμφανίζονται οι διασπορές των λύσεων των αντικειμενικών συναρτήσεων και αυτής που χρησιμοποιήθηκε σαν κριτήριο βελτιστοποίησης και στη συνέχεια η διακύμανση των μεταβλητών και των περιορισμών σχεδίασης που θα αποτελέσουν και βάση σχολιασμού και εξαγωγής συμπερασμάτων της ακολουθούμενης διαδικασίας.



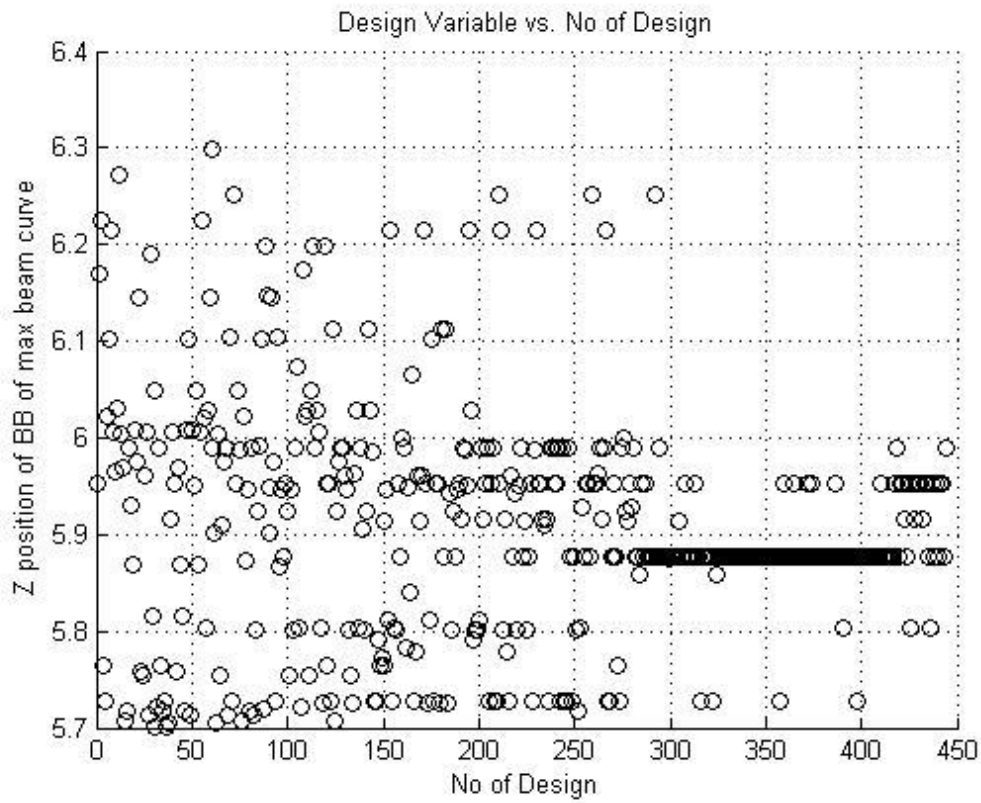
Βελτιστοποίηση επιτάχυνσης



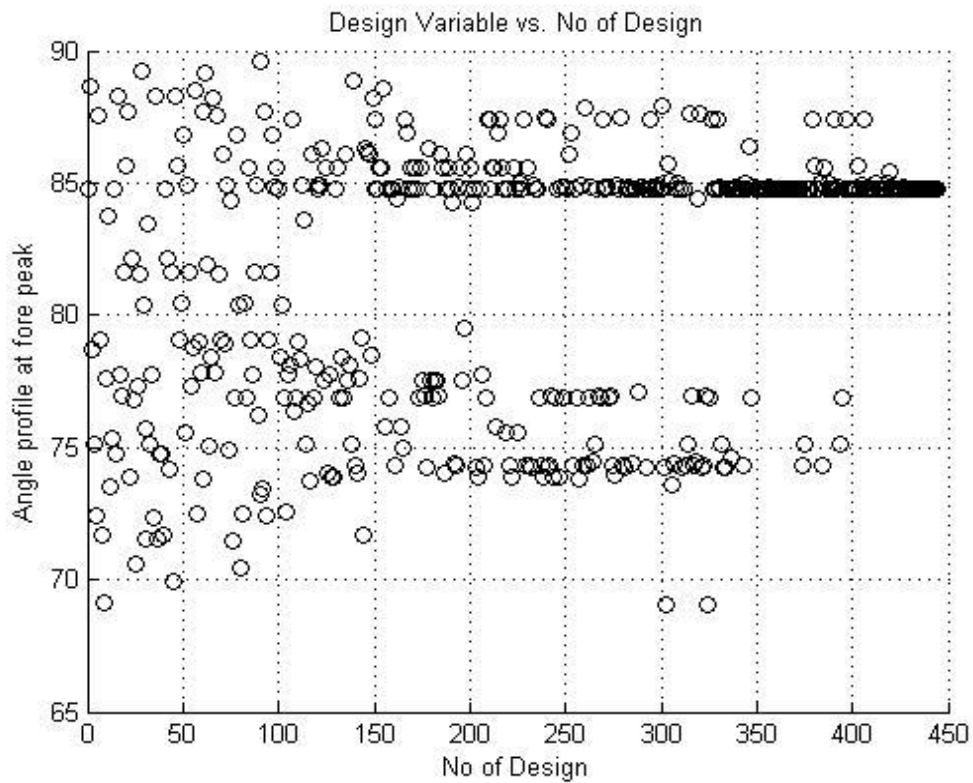
Εικόνα 29: Διασπορά Λύσεων - Επιτάχυνση στην πλώρη -  $V=25 \text{ kn}$



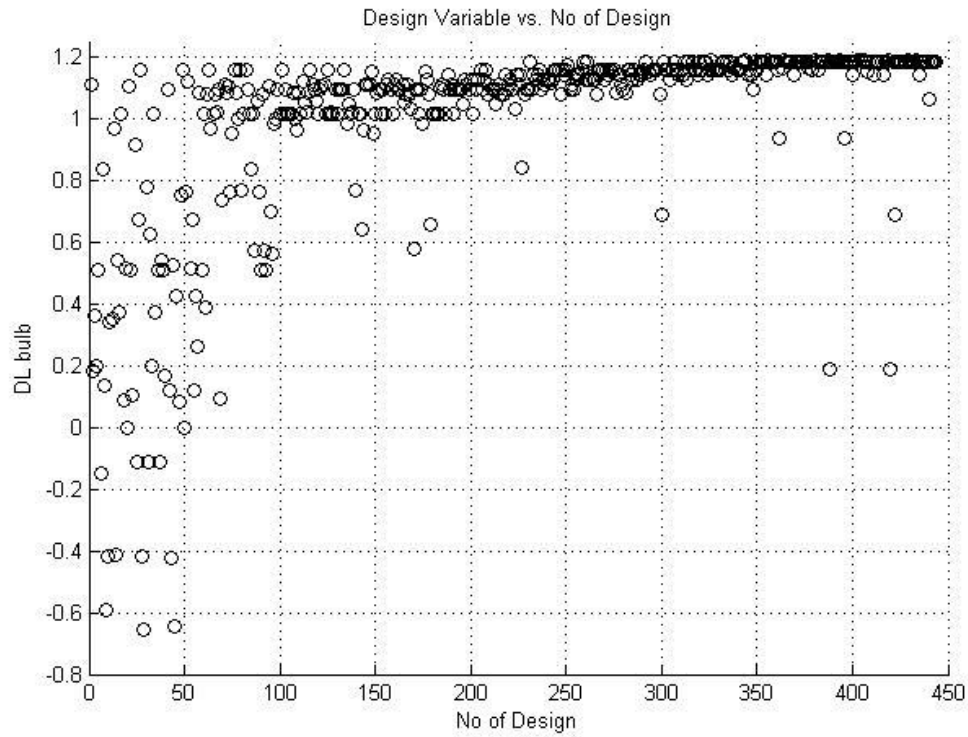
Εικόνα 30: Η αντίσταση κυματισμού των επιμέρους λύσεων



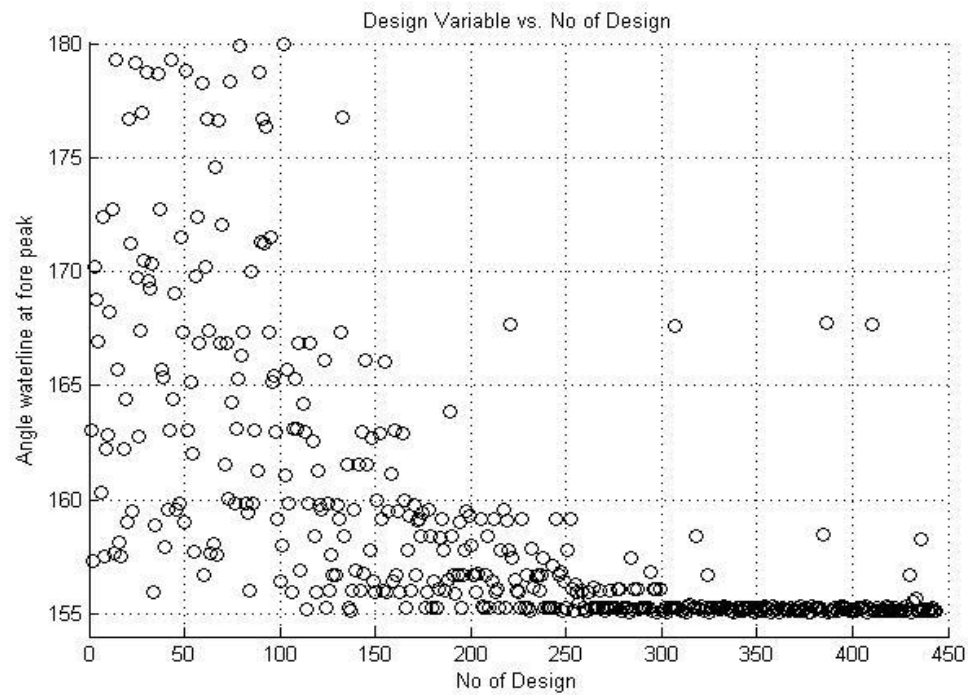
Εικόνα 31: Μεταβλητή σχεδίασης - καθ' ύψος μεταβολή σημείου της καμπύλης μεγίστου πλάτους



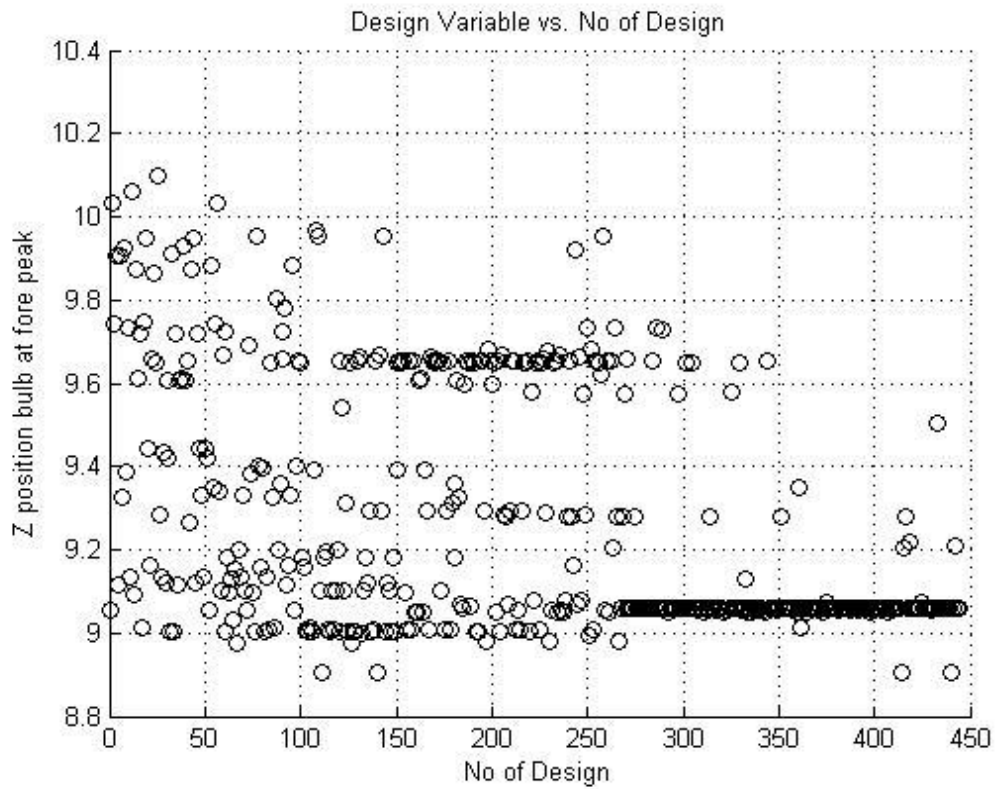
Εικόνα 32: Μεταβλητή σχεδίασης - Γωνία εισόδου του προφίλ στην πλώρη



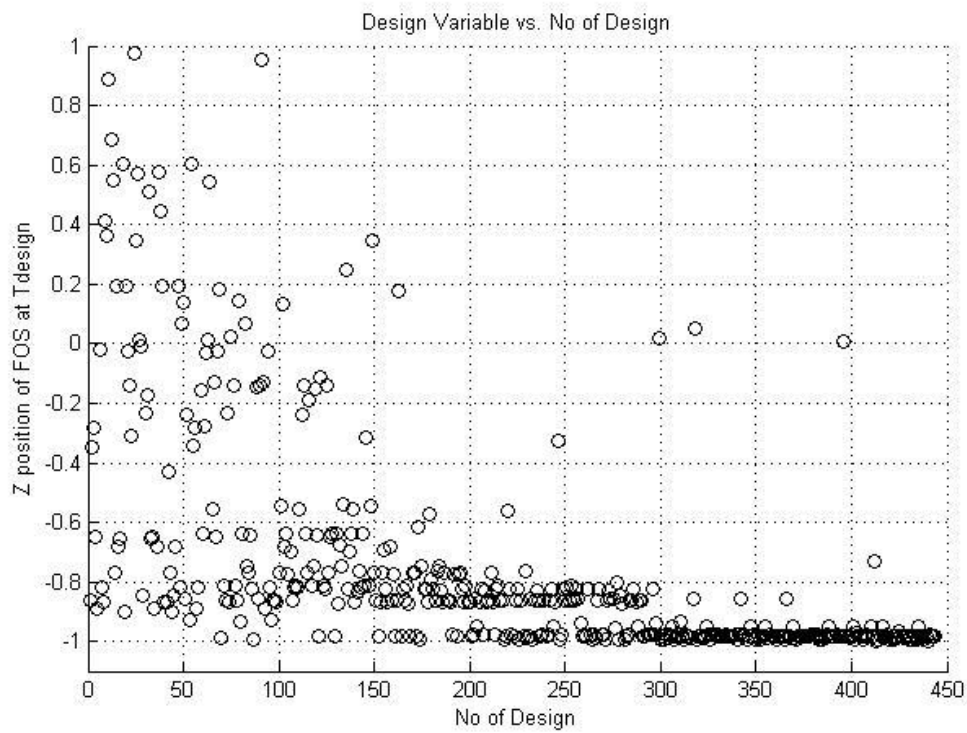
Εικόνα 33: Μεταβλητή σχεδίασης - Μήκος Βολβού



Εικόνα 34: Μεταβλητή σχεδίασης - Γωνία εισόδου στην ίσαλο σχεδίασης

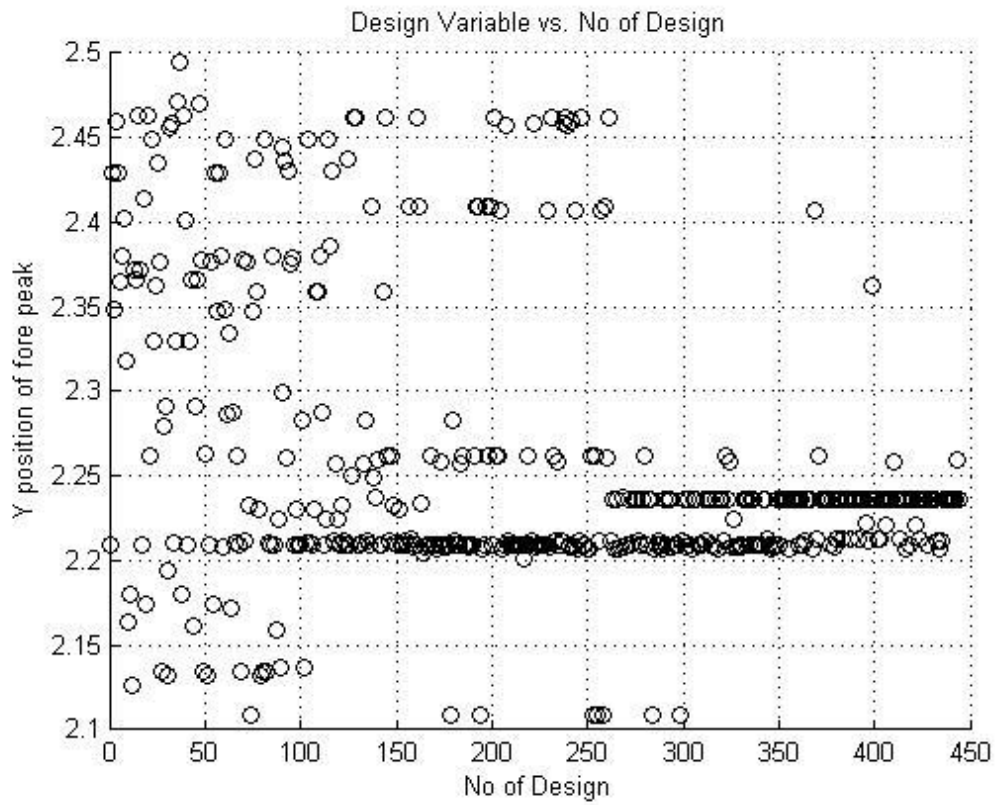


Εικόνα 35: Μεταβλητή σχεδίασης - Καθ' ύψος θέση του προφίλ του βολβού στην πλώρη

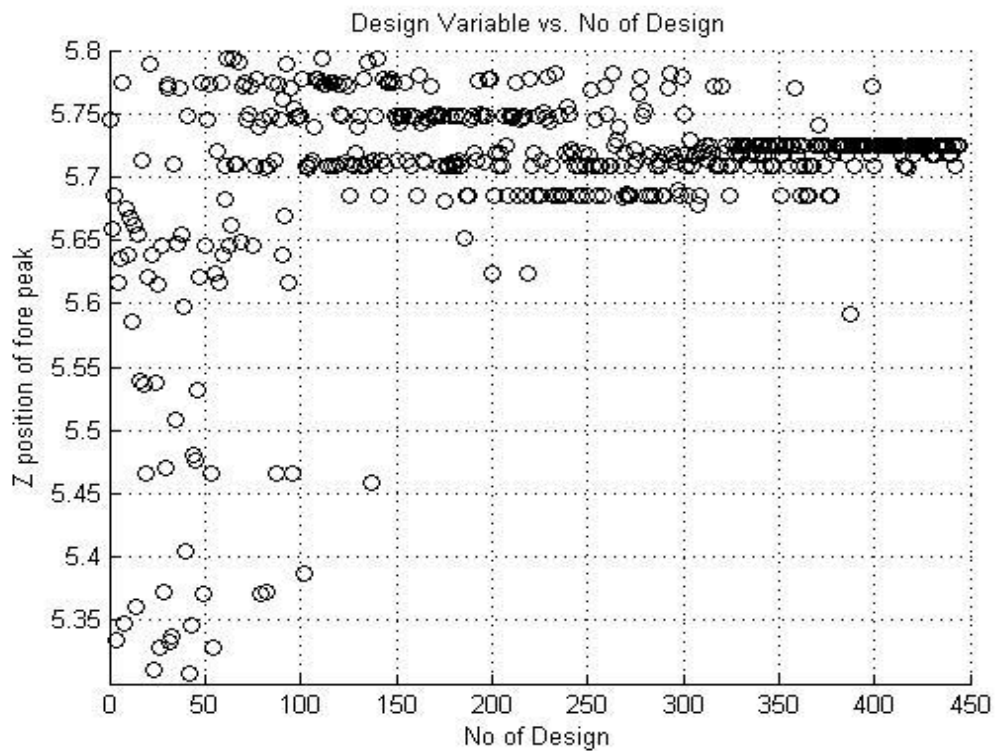


Εικόνα 36: Μεταβλητή σχεδίασης - Καθ' ύψος θέση σημείο του FOS στην ίσαλο σχεδίασης

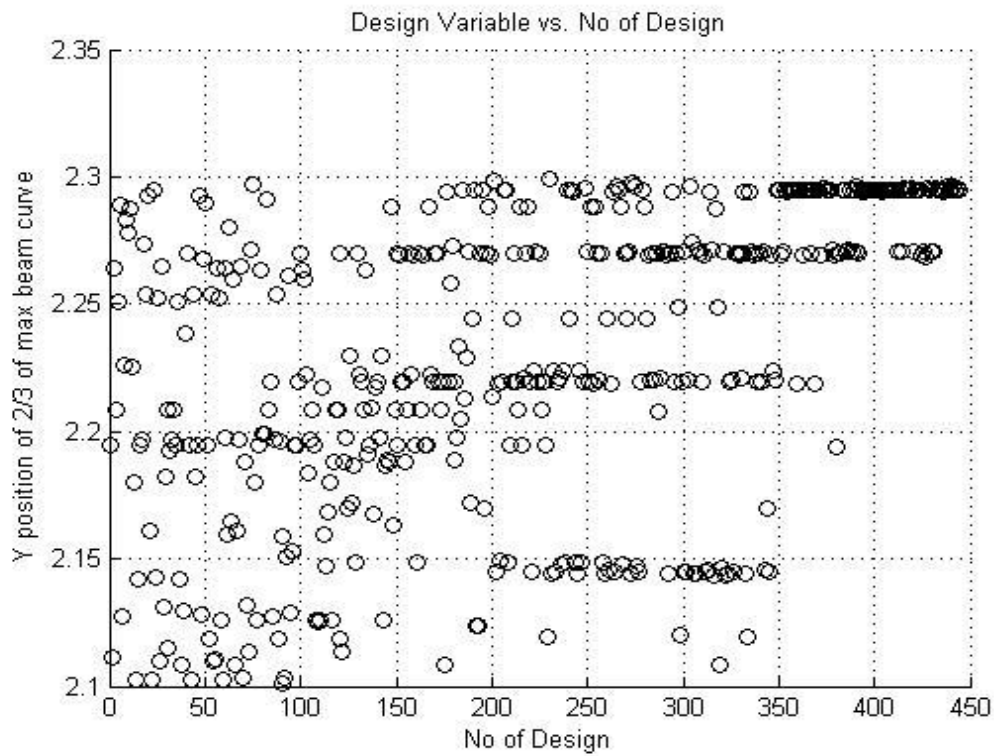




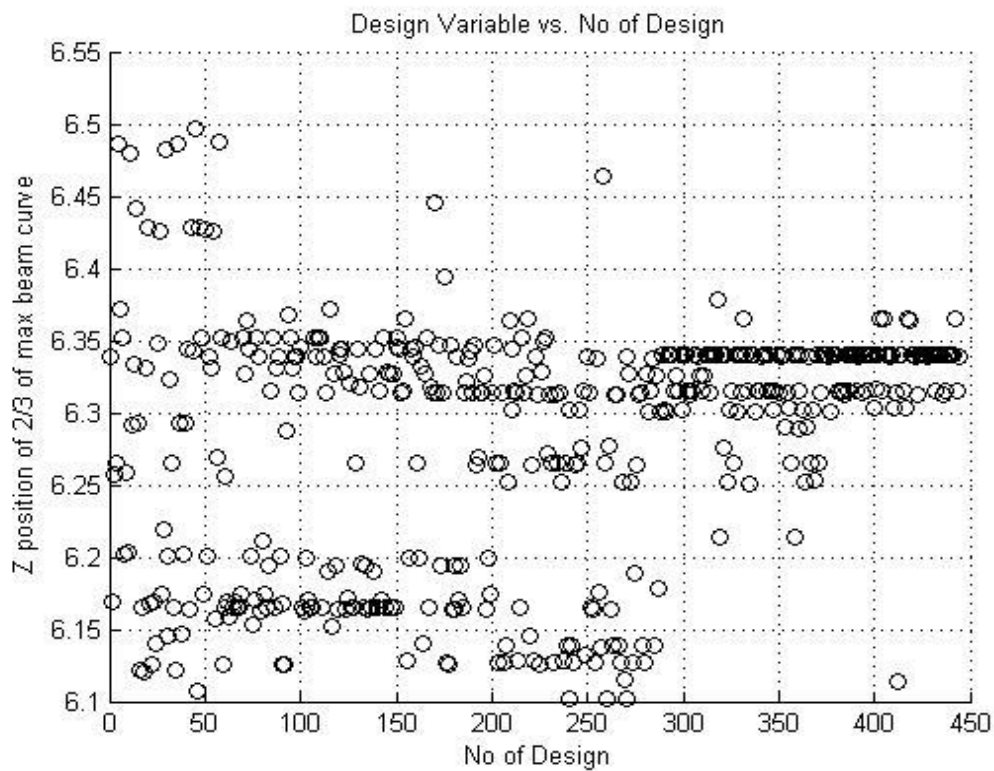
Εικόνα 37: Μεταβλητή σχεδίασης - Πλάτος σημείου της καμπύλης μεγίστου πλάτους στην πλώρη



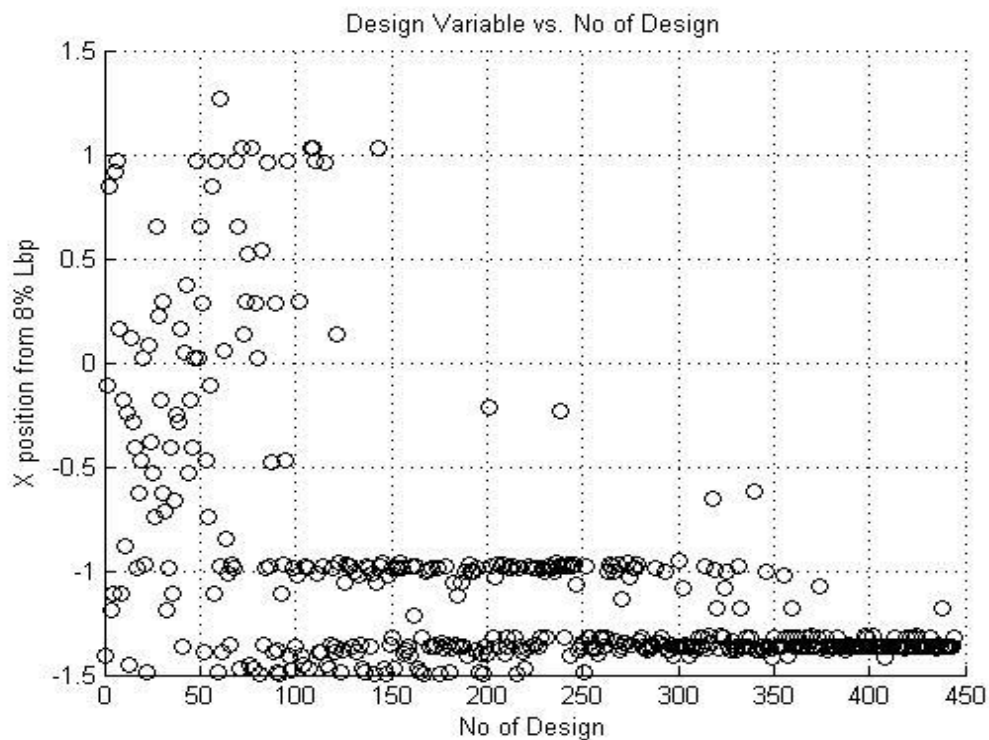
Εικόνα 38: Μεταβλητή σχεδίασης – Καθ' ύψος θέση του fore peak



Εικόνα 39: Μεταβλητή σχεδίασης - Πλάτος σημείου στα 2/3 της καμπύλης μεγίστου πλάτους



Εικόνα 40: Μεταβλητή σχεδίασης - Καθ' ύψος θέσης σημείου στα 2/3 της καμπύλης μεγίστου πλάτους



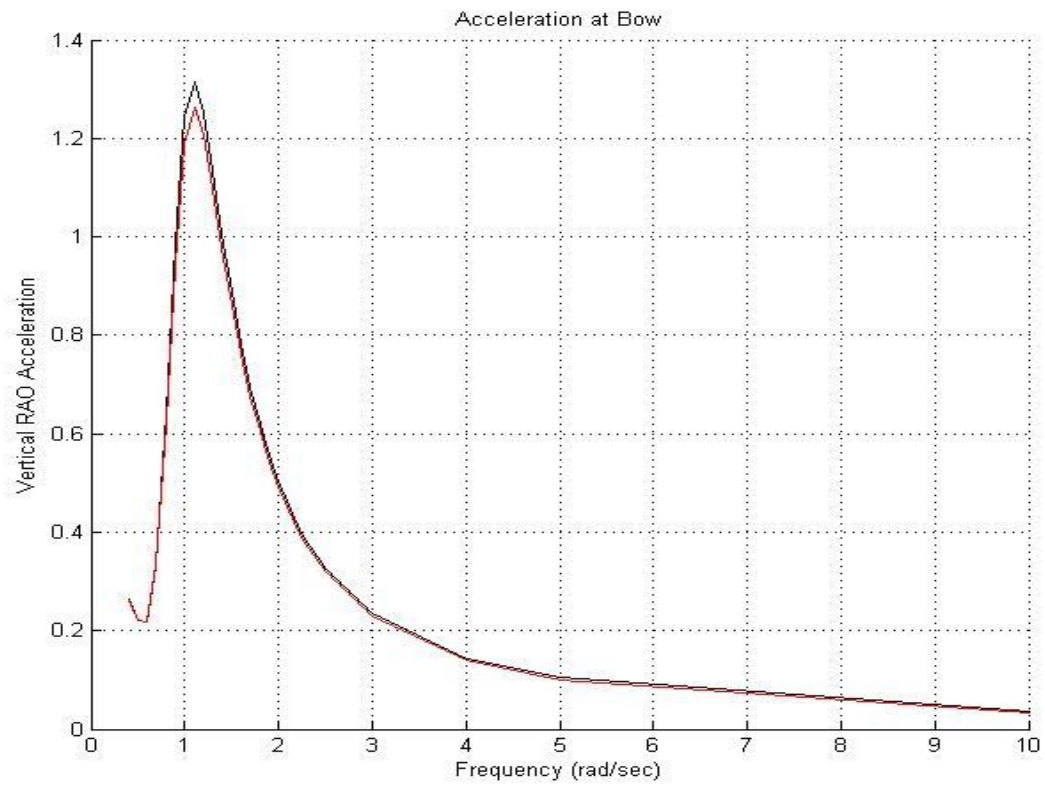
Εικόνα 41:Μεταβλητή σχεδίασης - Θέση νομέα που απέχει 8% Lbp από την πλώρη

Κάνοντας μια ερμηνεία των αποτελεσμάτων που παρήχθησαν, παρατηρείται ότι η διασπορά των λύσεων της αντικειμενικής συνάρτησης της κατακόρυφης επιτάχυνσης παρουσιάζει την αναμενόμενη μορφή μιας βελτιστοποίησης με κριτήριο τη συγκεκριμένη μεταβλητή. Στις πρώτες γάστρες υπάρχει αραιή κατανομή των λύσεων και σε τιμές σχετικά υψηλές, ενώ παρατηρείται σταδιακή σύγκλιση των λύσεων σε μια βέλτιστη με τιμή αισθητά καλύτερη από την αρχική. Για την ταχύτητα υπηρεσίας που επιλέξαμε  $V=25\text{kn}$ , η μέση τιμή των λύσεων της κατακόρυφης επιτάχυνσης ήταν 1.269 , η μέγιστη τιμή 1.3354 και η ελάχιστη 1.2633. Η αντίσταση κυματισμού φυσιολογικά δεν παρουσιάζει κάποια σύγκλιση και οι λύσεις εμφανίζουν την τυχειότητα που αναμέναμε. Οι μεταβλητές σχεδίασης συγκλίνουν και αυτές σε συγκεκριμένες τιμές, άλλες από τις πρώτες σχεδιάσεις που παρήγαγε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης και άλλες στην τελευταία φάση της. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένας πίνακας με τις τιμές σύγκλισης των μεταβλητών και τις ποσοστιαίες μεταβολές από εκείνες της πατρικής γάστρας.

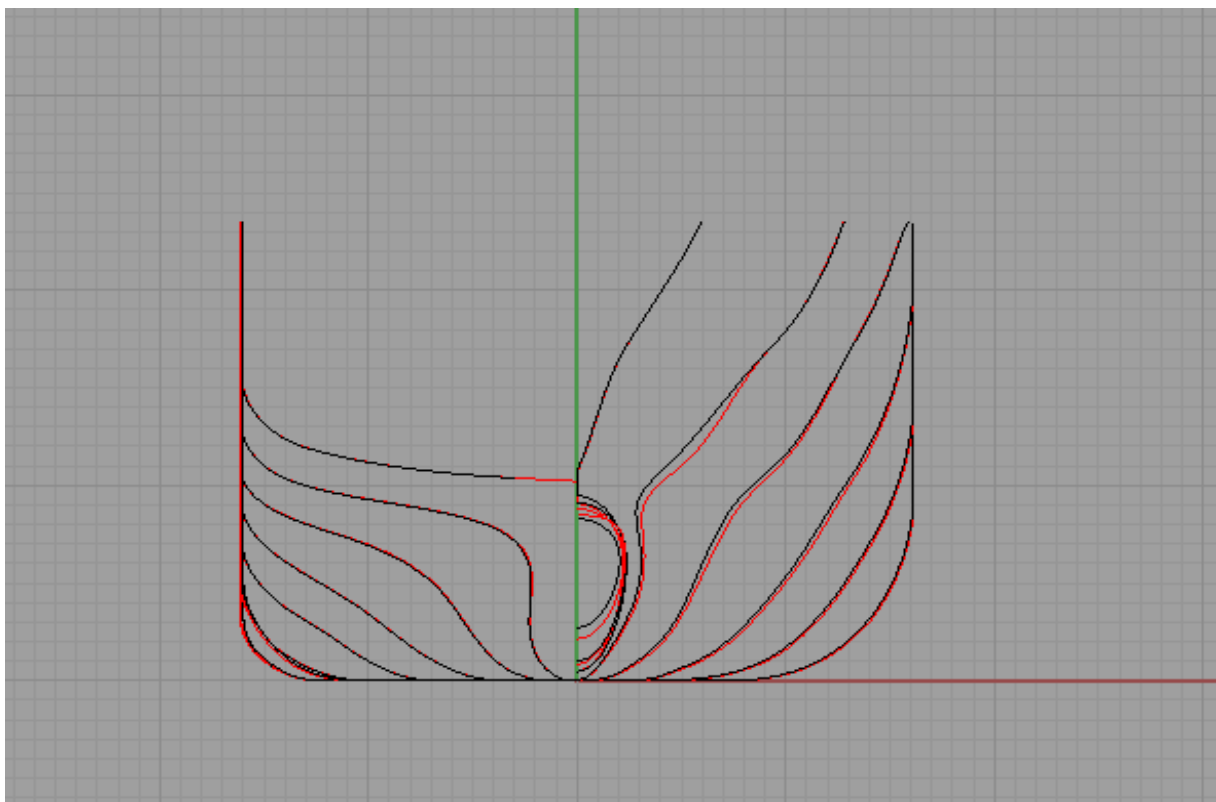
Πίνακας 8: Τιμές μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης κατακόρυφης επιτάχυνσης

Μεταβλητές Σχεδίασης	Τιμές Πατρικής Γάστρας	Τιμές Βελτιστοποιημένης Γάστρας	Ποσοστιαία Μεταβολή (%)
2/3 max beam Y	2.24	2.29	2.25
2/3 max beam Z	6.11	6.33	3.71
BB tip max beam Z	5.88	5.95	1.24
x 8% from FP	17.62	16.25	-7.75
DZ FOS	10.8	9.81	-9.10
FP max beam Z	5.50	5.72	4.09
FP max beam Y	2.36	2.23	-5.27
DL Bulb	8.00	9.18	14.83
Angle Waterline	170	155.24	-8.68
Angle Profile	81	84.78	4.68
Bulbous Z	9.50	9.05	-4.64
<b>Κατακόρυφη Επιτάχυνση</b>	<b>1.3161</b>	<b>1.2636</b>	<b>-3.99</b>



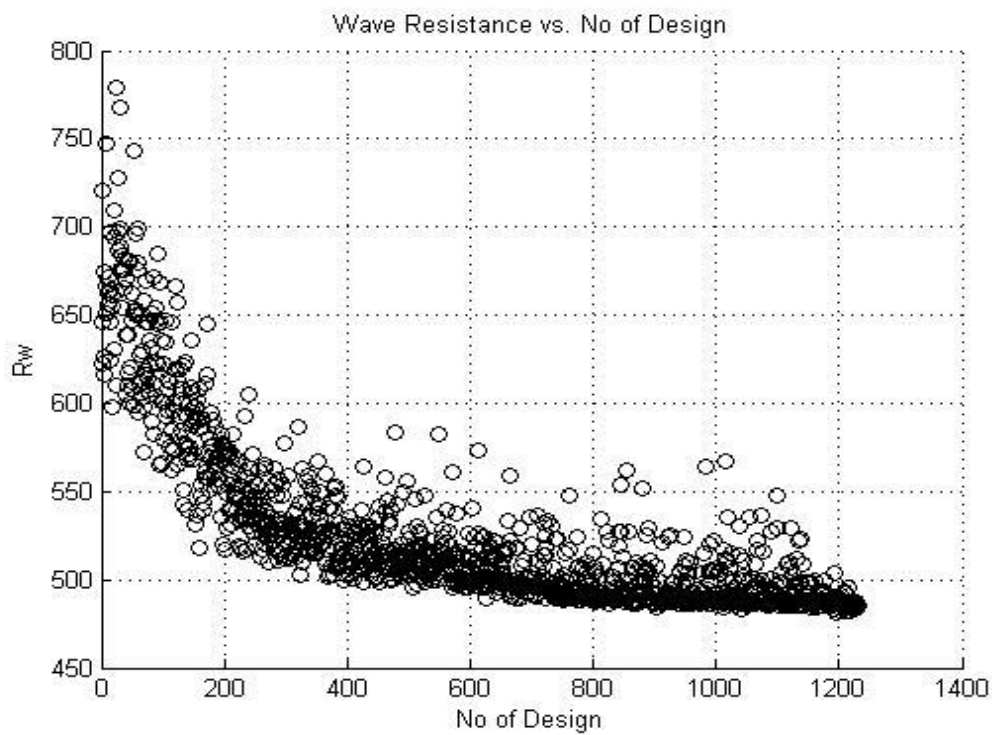


Εικόνα 42: Καμπύλη RAO πατρικής (μαύρο) και βελτιστοποιημένης (κόκκινη) γάστρας

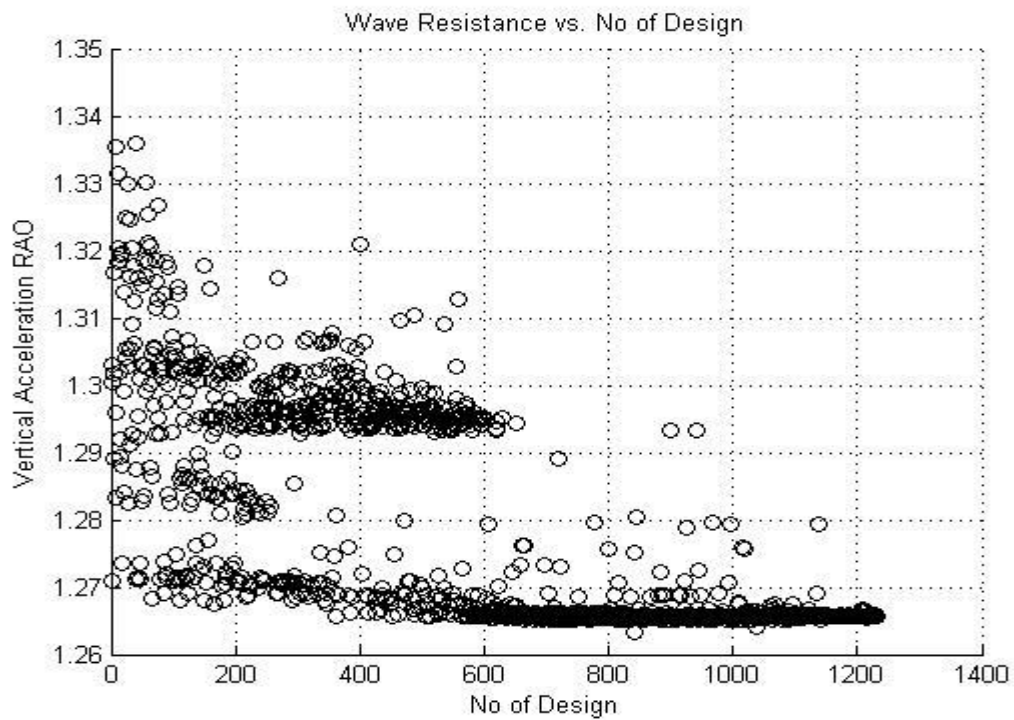


Εικόνα 43: Νομείς αρχικής γεωμετρίας (μαύρες καμπύλες) και βελτιστοποιημένης (κόκκινες καμπύλες) γεωμετρίας

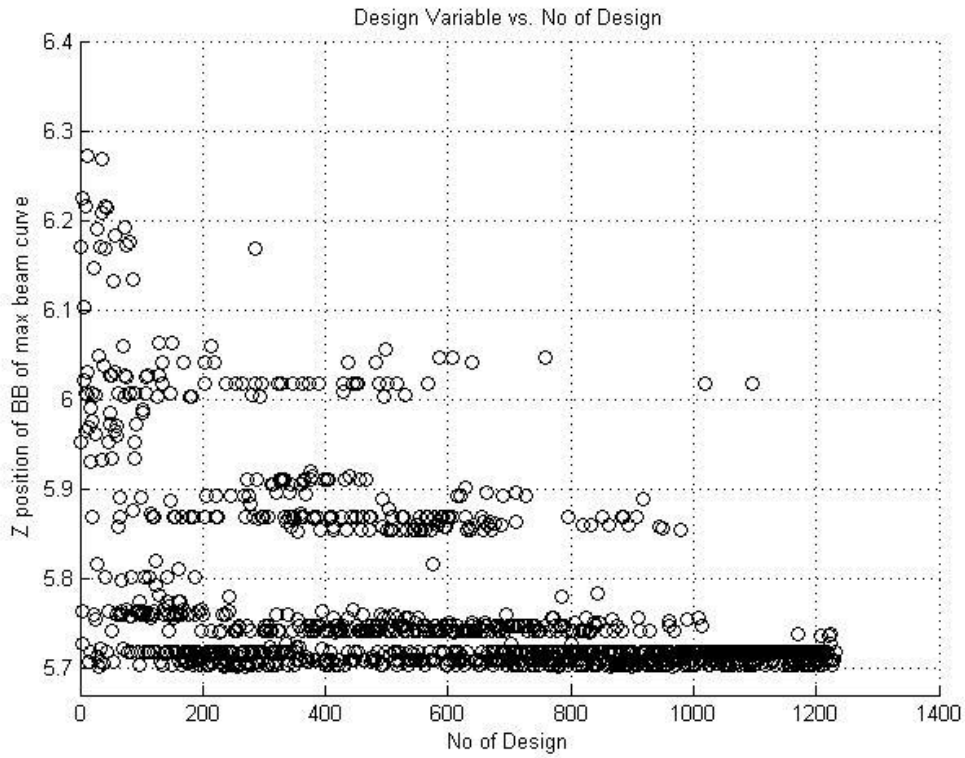
Βελτιστοποίηση Αντίστασης Κυματισμού



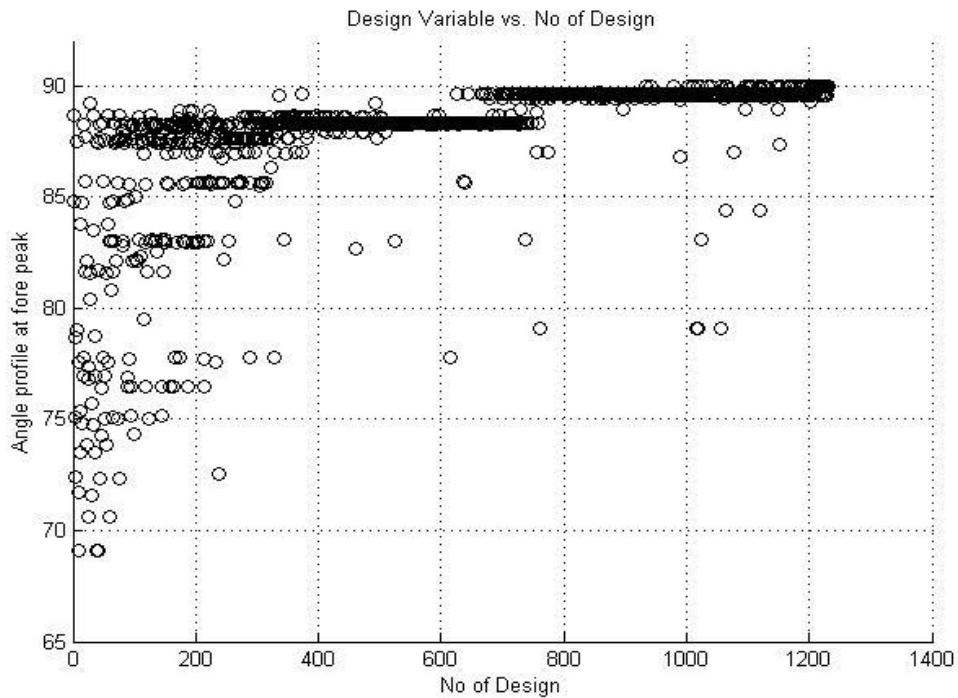
Εικόνα 44: Η αντίσταση κυματισμού των επιμέρους λύσεων



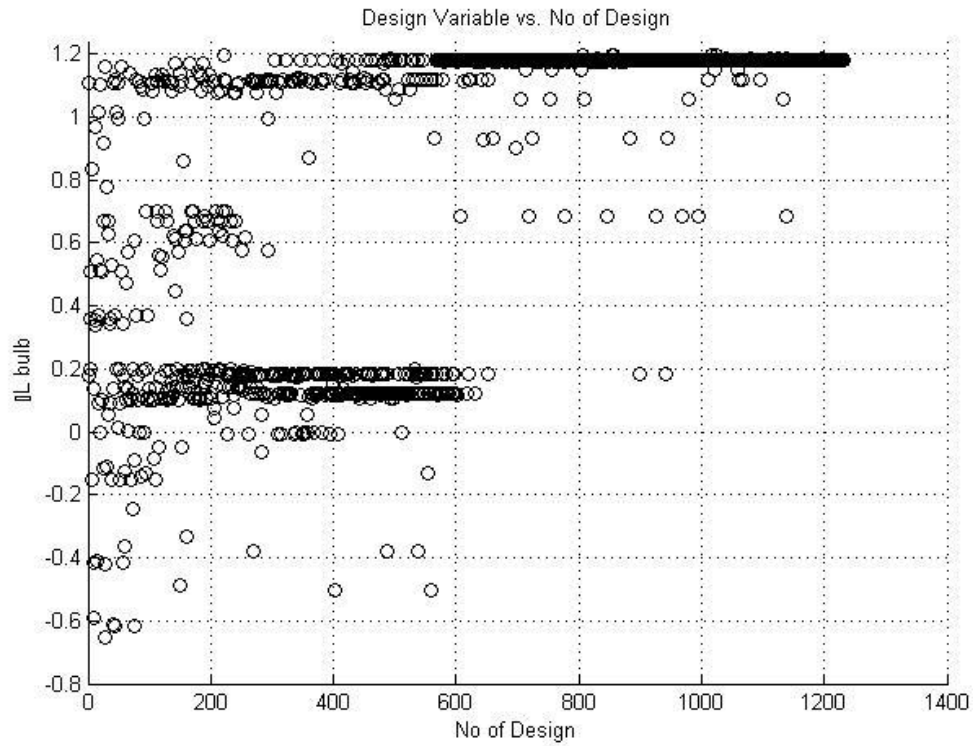
Εικόνα 45: Διασπορά Λύσεων - Επιτάχυνση στην πλώρη -  $V=25 \text{ kn}$



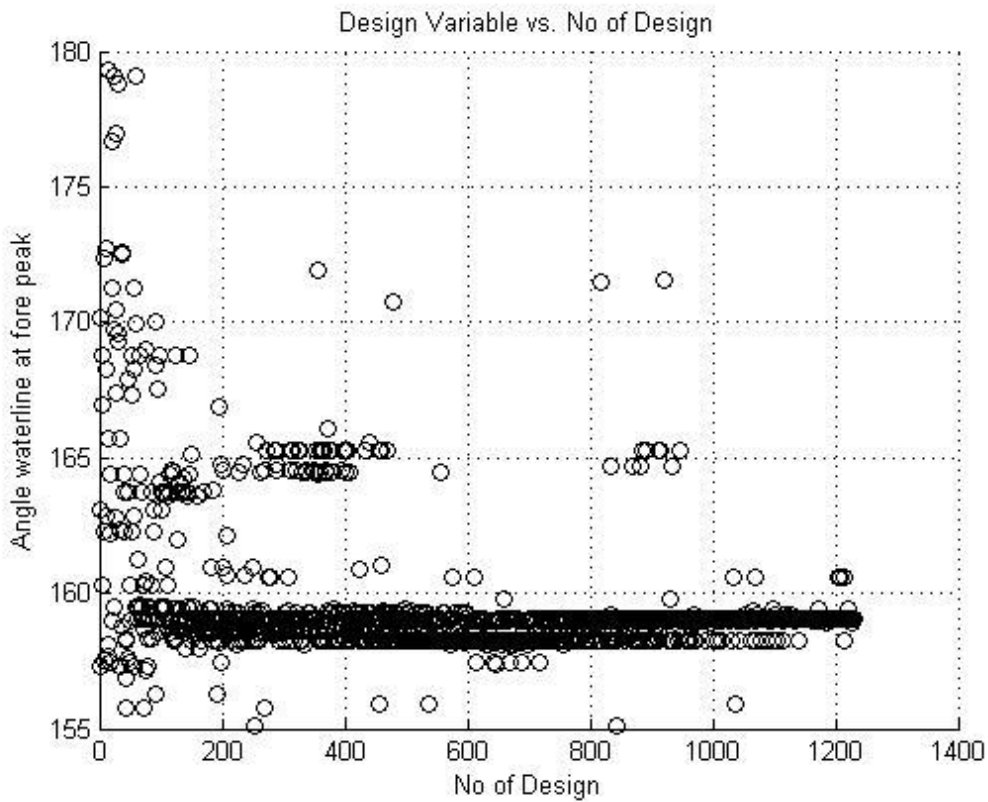
Εικόνα 46: Μεταβλητή σχεδίασης - καθ' ύψος μεταβολή σημείου της καμπύλης μεγίστου πλάτους



Εικόνα 47: Μεταβλητή σχεδίασης - Γωνία εισόδου του προφίλ στην πλώρη

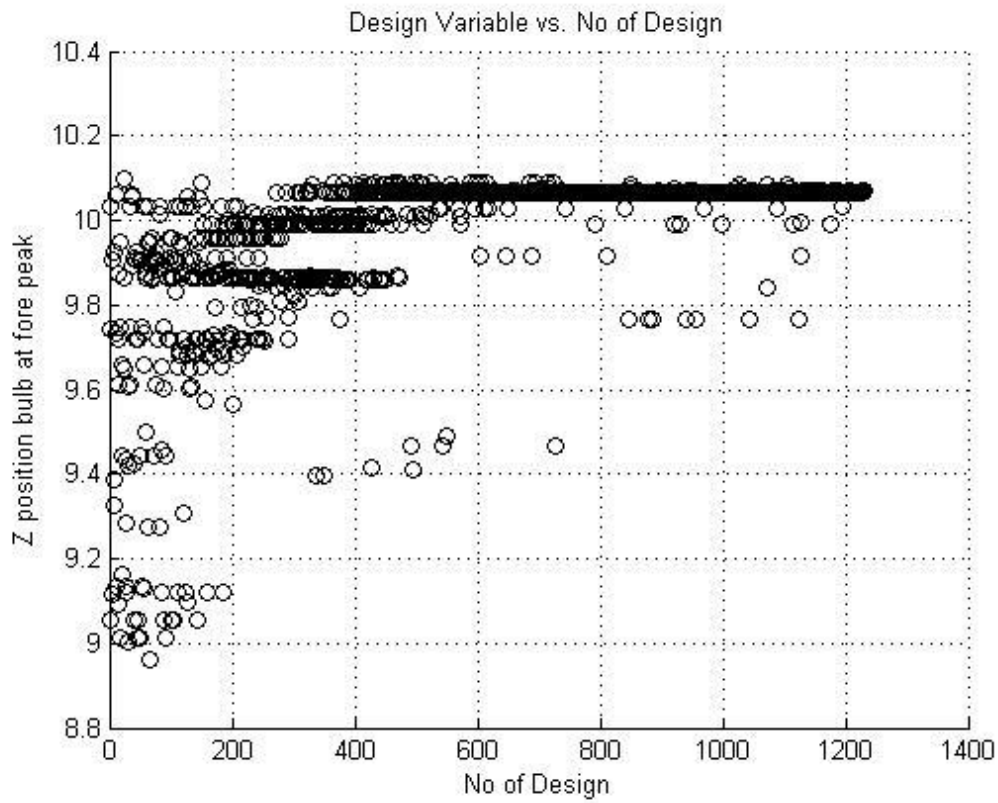


Εικόνα 48: Μεταβλητή σχεδίασης - Μήκος Βολβού

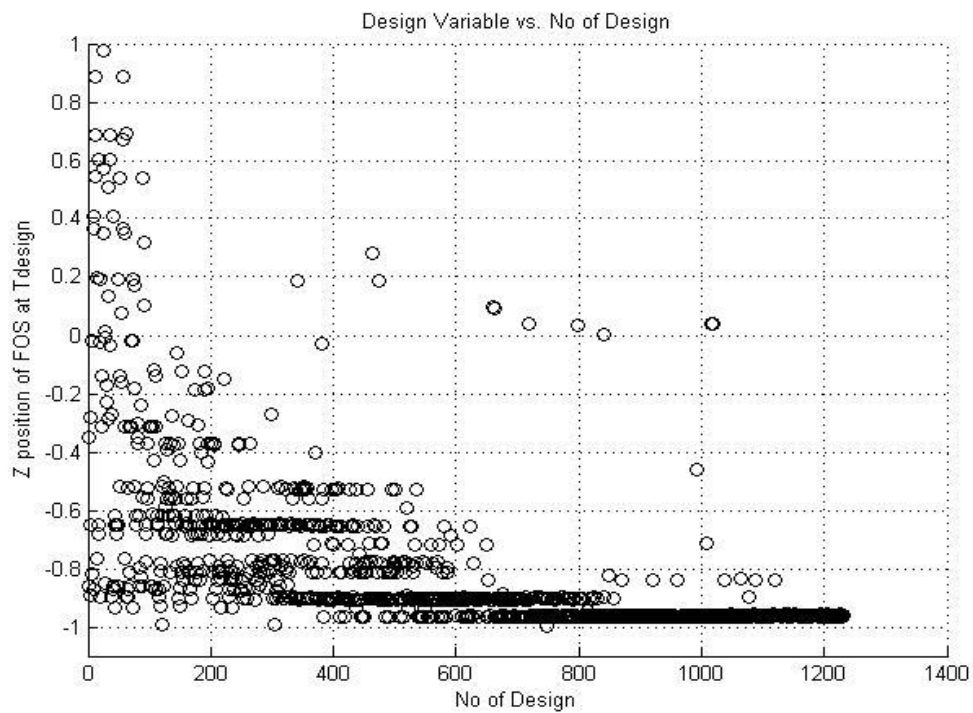


Εικόνα 49: Μεταβλητή σχεδίασης - Γωνία εισόδου στην ίσαλο σχεδίασης

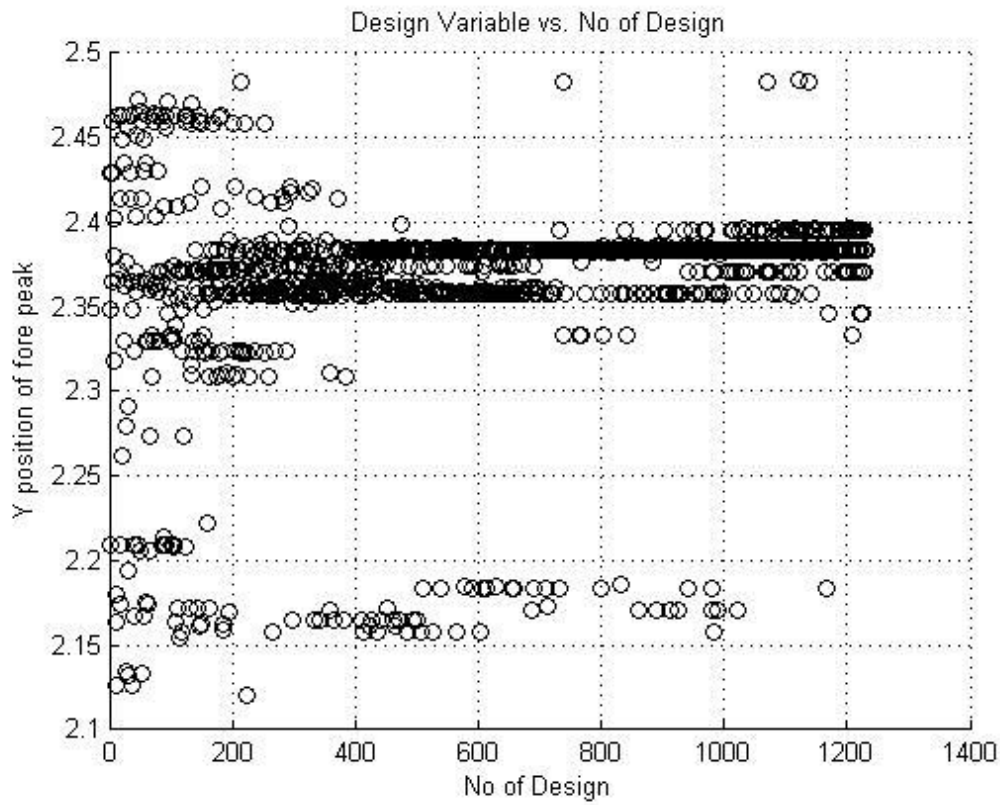




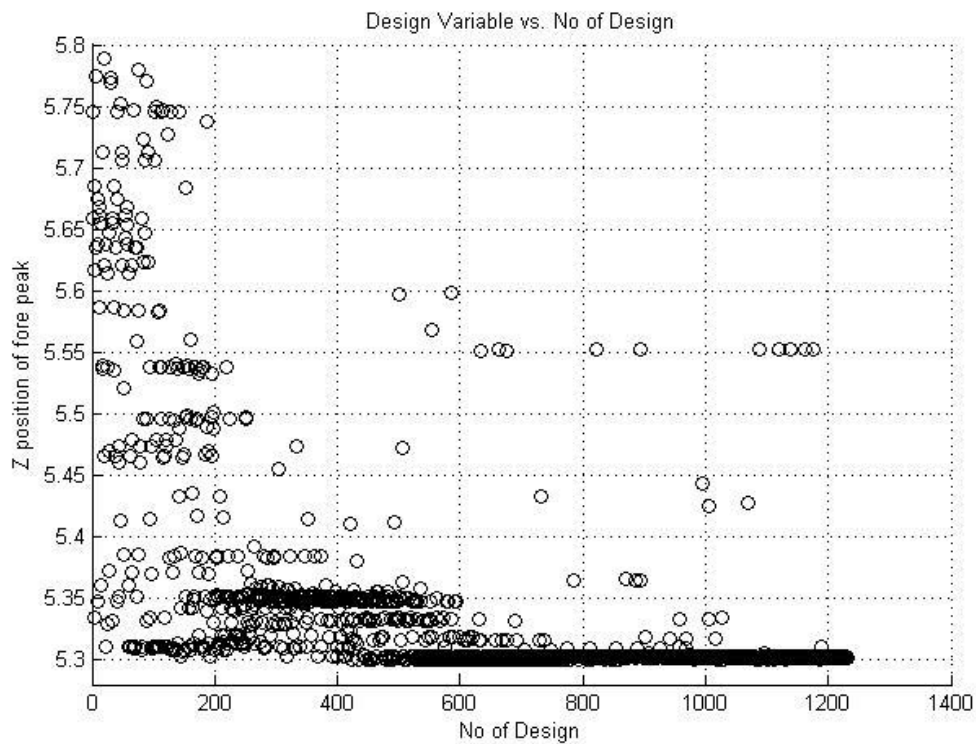
Εικόνα 50: Μεταβλητή σχεδίασης – Καθ' ύψος θέση του προφίλ του βολβού στην πλήρη



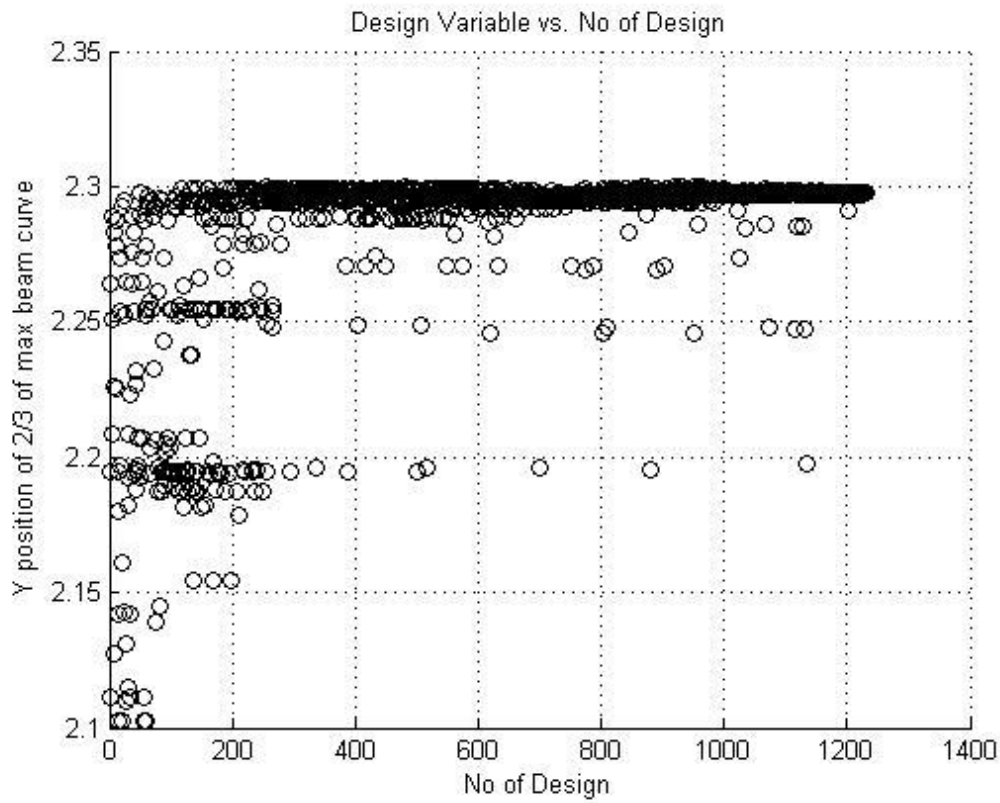
Εικόνα 51: Μεταβλητή σχεδίασης - Καθ' ύψος θέση σημείο του FOS στην ίσαλο σχεδίασης



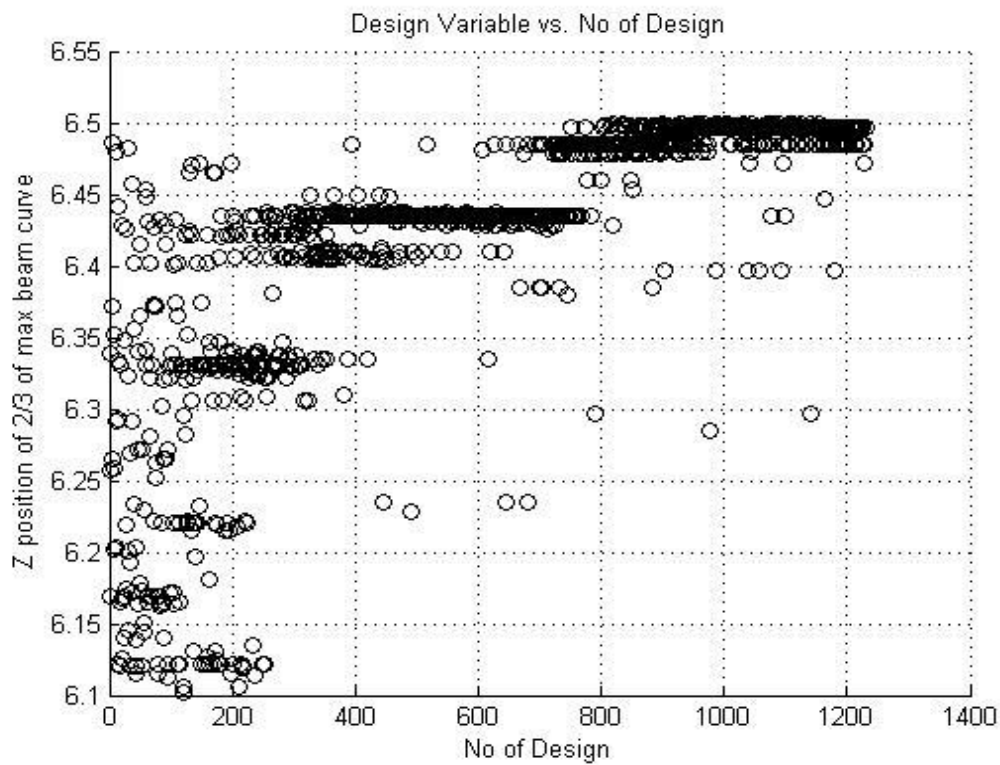
Εικόνα 52: Μεταβλητή σχεδίασης - Πλάτος σημείου της καμπύλης μεγίστου πλάτους στην πλώρη



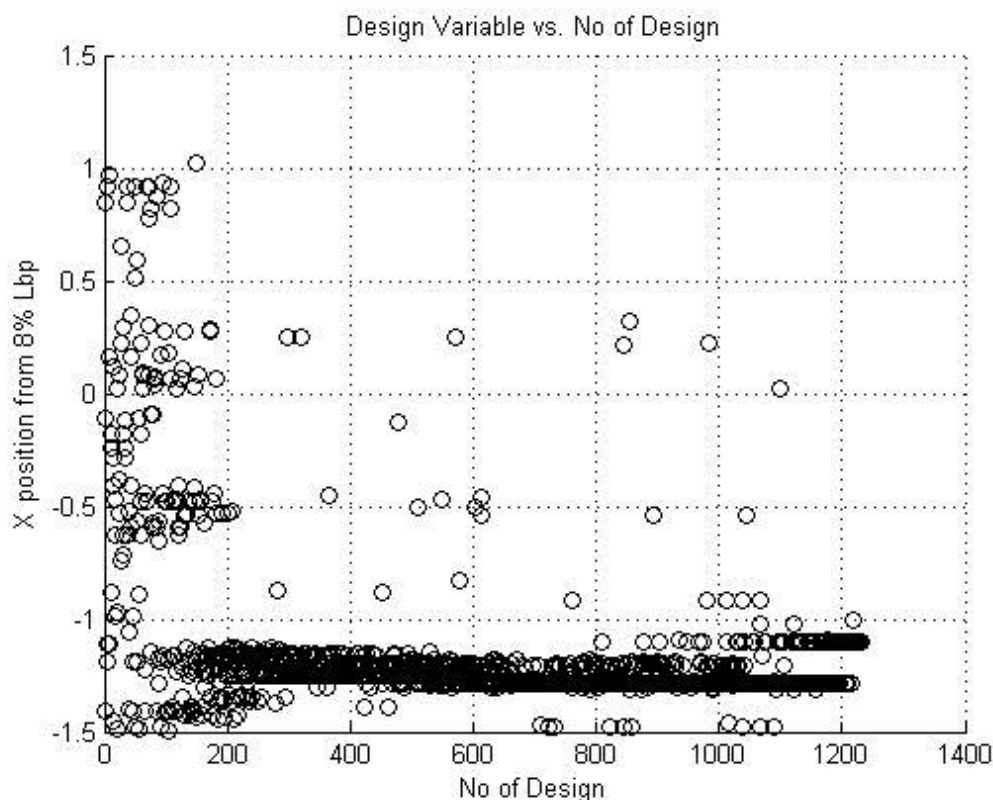
Εικόνα 53: Μεταβλητή σχεδίασης – Καθ' ύψος θέση του fore peak



Εικόνα 54: Μεταβλητή σχεδίασης - Πλάτος σημείου στα 2/3 της καμπύλης μεγίστου πλάτους



Εικόνα 55: Μεταβλητή σχεδίασης - Καθ' ύψος θέσης σημείου στα 2/3 της καμπύλης μεγίστου πλάτους



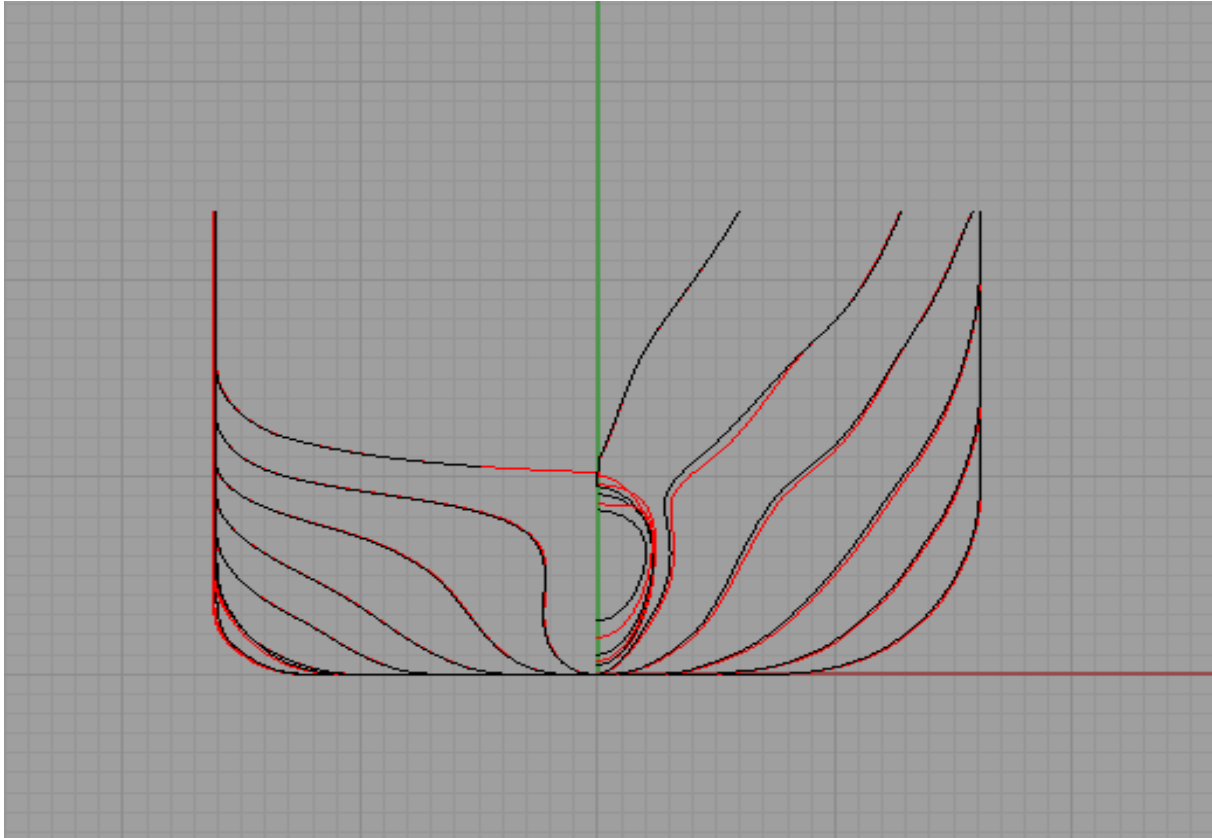
Εικόνα 56: Μεταβλητή σχεδίασης - Θέση νομέα που απέχει 8% Lbp από την πλώρη

Ομοίως, κάνοντας μια ερμηνεία των αποτελεσμάτων που παρήχθησαν παρατηρείται και σε αυτήν την περίπτωση ότι η διασπορά των λύσεων της αντικειμενικής συνάρτησης της αντίστασης κυματισμού παρουσιάζει την αναμενόμενη μορφή μιας βελτιστοποίησης με κριτήριο τη συγκεκριμένη μεταβλητή. Στις πρώτες γάστρες υπάρχει αραιή κατανομή των λύσεων και σε τιμές σχετικά υψηλές, ενώ παρατηρείται σταδιακή σύγκλιση των λύσεων σε μια βέλτιστη με τιμή αισθητά καλύτερη από την αρχική. Για την ταχύτητα υπηρεσίας που επιλέξαμε  $V=25\text{kn}$  η μέση τιμή των λύσεων της αντίστασης κυματισμού ήταν  $508.6\text{ kN}$ , η μέγιστη τιμή  $779.2\text{ kN}$  και η ελάχιστη  $481.6\text{ kN}$ . Η επιτάχυνση στην πλώρη φυσιολογικά δεν παρουσιάζει κάποια σύγκλιση και οι λύσεις εμφανίζουν την τυχαιότητα που αναμέναμε. Οι μεταβλητές σχεδίασης συγκλίνουν και αυτές σε συγκεκριμένες τιμές άλλες από τις πρώτες σχεδιάσεις που παρήγαγε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης και άλλες στην τελευταία φάση της. Στην συνέχεια παρουσιάζεται ένας πίνακας με τις τιμές σύγκλισης των μεταβλητών και τις ποσοστιαίες μεταβολές από εκείνες της πατρικής γάστρας.



Πίνακας 9: Τιμές μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης αντίστασης κυματισμού

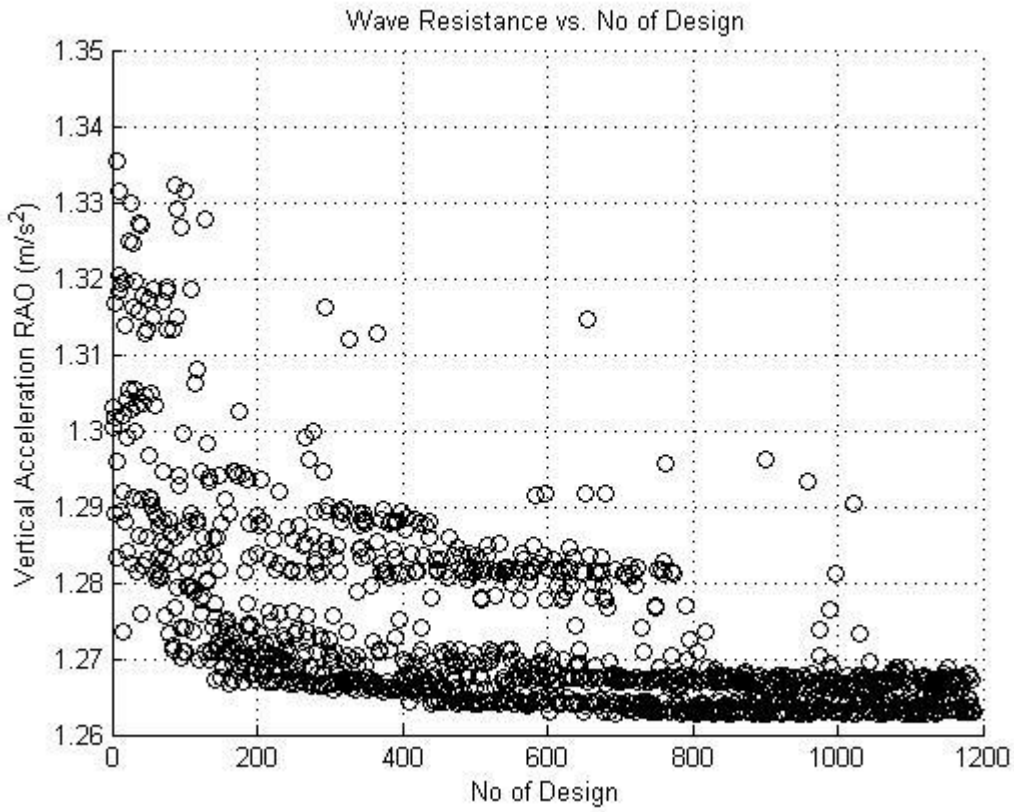
Μεταβλητές Σχεδίασης	Τιμές Πατρικής Γάστρας	Τιμές Βελτιστοποιημένης Γάστρας	Ποσοστιαία Μεταβολή (%)
2/3 max beam Y	2.2442	2.2971	2.36
2/3 max beam Z	6.113	6.4847	6.08
BB tip max beam Z	5.88	5.7092	-2.90
x 8% from FP	17.62	16.5197	-6.24
DZ FOS	10.8	9.8348	-8.94
FP max beam Z	5.5	5.3022	-3.60
FP max beam Y	2.3612	2.3833	0.94
DL Bulb	8	9.1829	14.79
Angle Waterline	170	159.0288	-6.45
Angle Profile	81	89.9465	11.05
Bulbous Z	9.5	10.0665	5.96
<b>Αντίσταση Κυματισμού</b>	<b>672.3</b>	<b>487.8</b>	<b>-27.44</b>



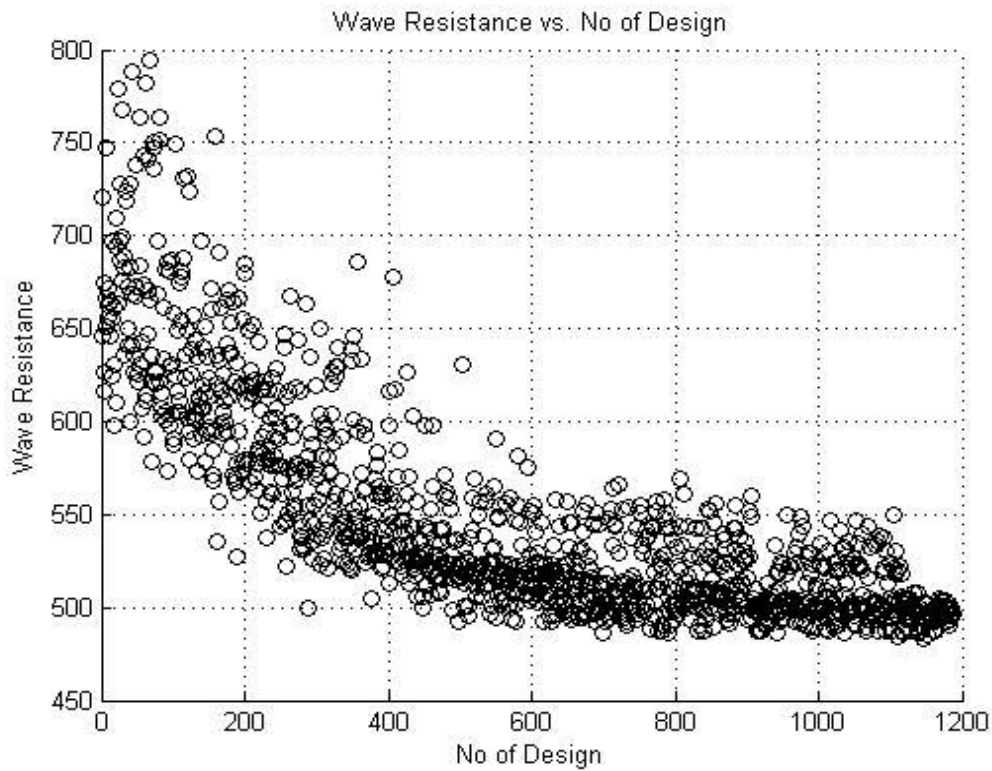
Εικόνα 57: Νομείς αρχικής γεωμετρίας (μαύρες καμπύλες) και βελτιστοποιημένης (κόκκινες καμπύλες) γεωμετρίας

## 7.4 Αποτελέσματα Πολυκριτηριακής Βελτιστοποίησης

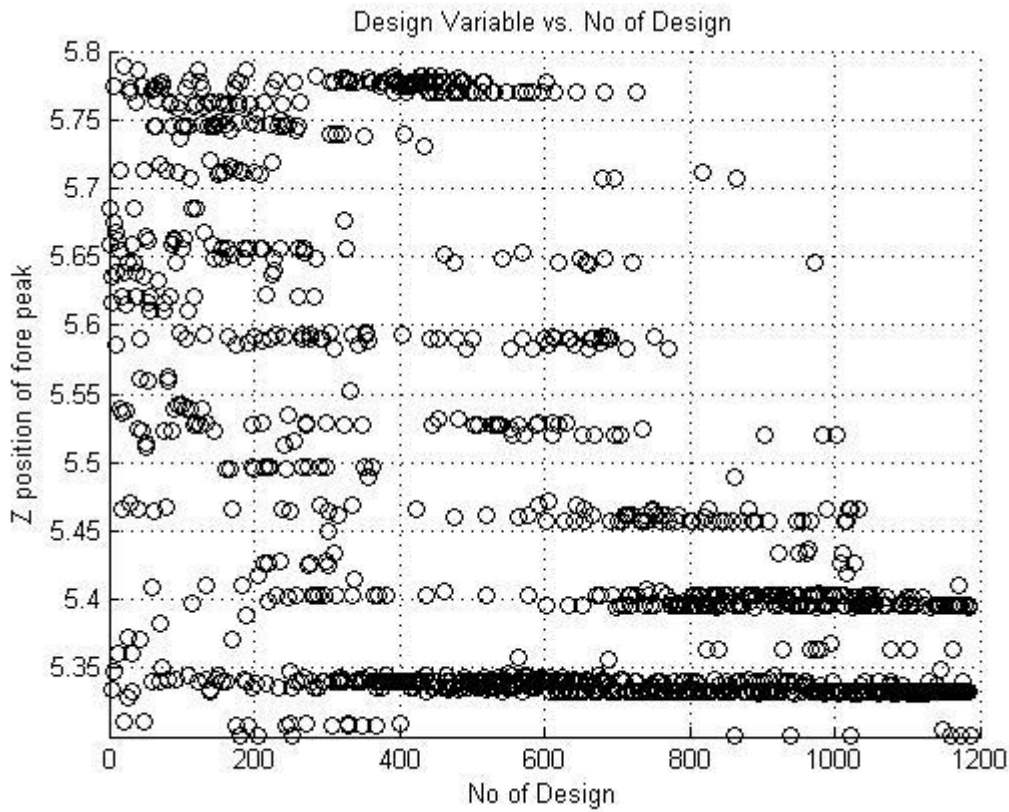
Τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω, αποτελούν το βασικό στόχο της παρούσας εργασίας. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις είναι η αντίσταση κυματισμού σε ήρεμο νερό και η κατακόρυφη επιτάχυνση σε απλούς και πάλι αρμονικούς κυματισμούς για βύθισμα  $T=10.8$  m και ταχύτητα υπηρεσίας  $V=25$  kn, με συντελεστή βαρύτητας 50%. Κατά τη συγκεκριμένη διαδικασία παρήχθησαν 1280 διαφορετικές γεωμετρίες. Στις εικόνες 57- 71 παρουσιάζονται τα διαγράμματα διασποράς του συνόλου των λύσεων συναρτήσει των αντικειμενικών συναρτήσεων καθώς και των επιμέρους συνιστωσών τους και κατόπιν η διασπορά των μεταβλητών σχεδίασης, από τα οποία θα εξαχθούν τα συμπεράσματα της διαδικασίας της βελτιστοποίησης.



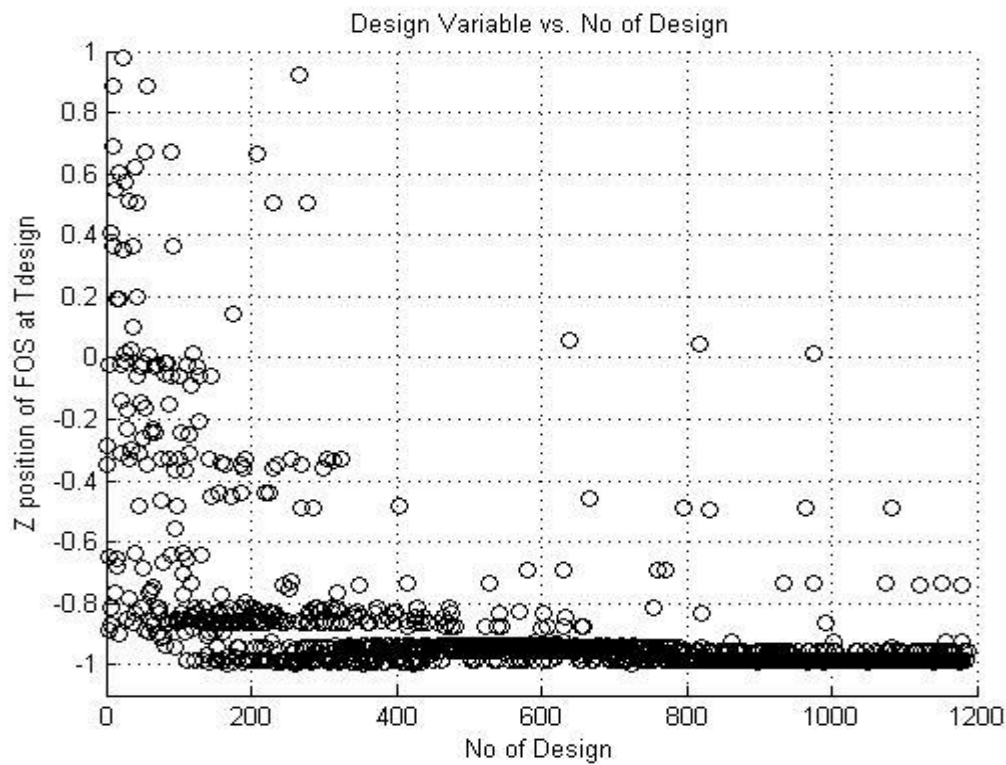
Εικόνα 58: Διασπορά Λύσεων - Επιτάχυνση στην πλώρη -  $V=25 \text{ kn}$



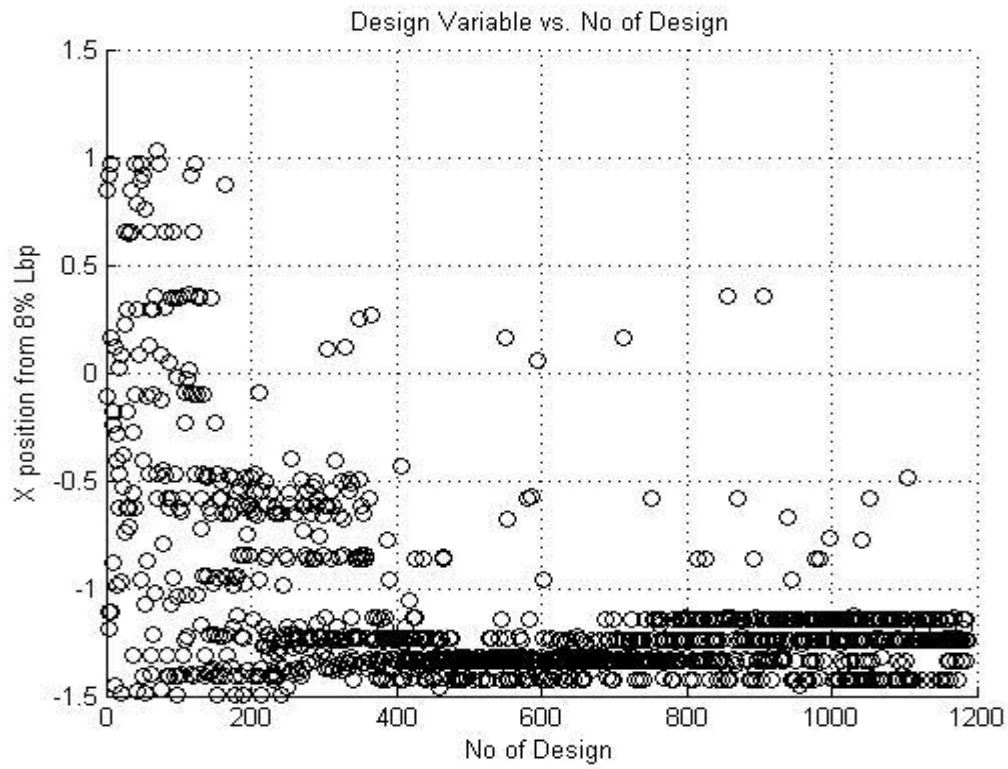
Εικόνα 59: Διασπορά Λύσεων - Αντίσταση Κυματισμού -  $V=25 \text{ kn}$



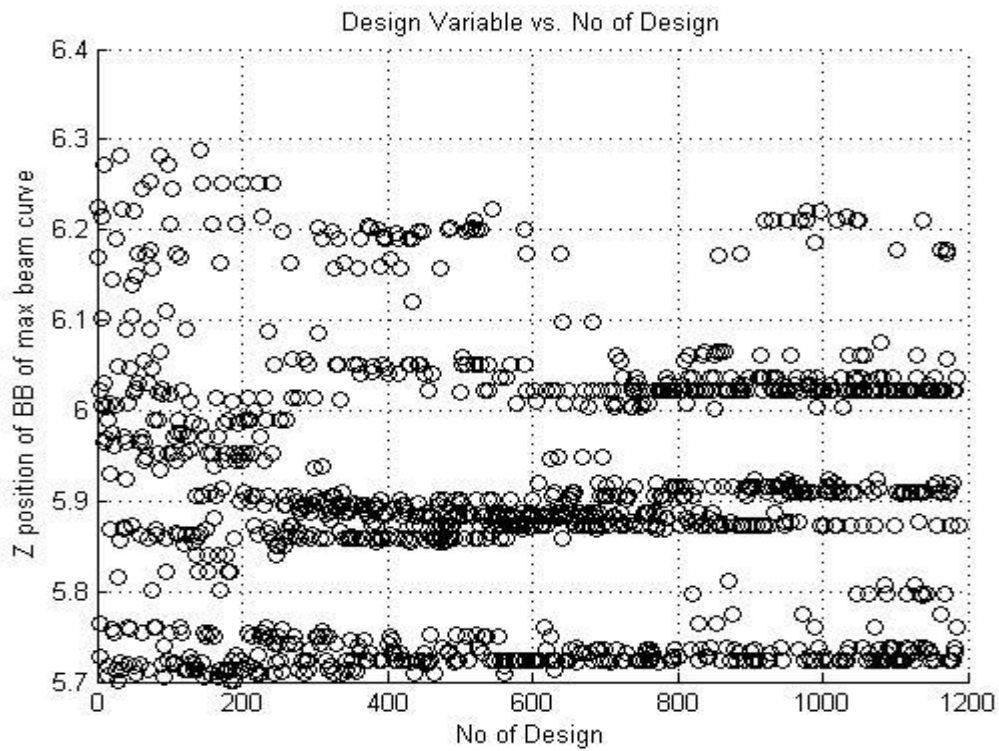
Εικόνα 60: Μεταβλητή σχεδίασης – Καθ' ύψος θέση του fore peak



Εικόνα 61: Μεταβλητή σχεδίασης - Καθ' ύψος θέση σημείο του FOS στην ίσαλο σχεδίασης

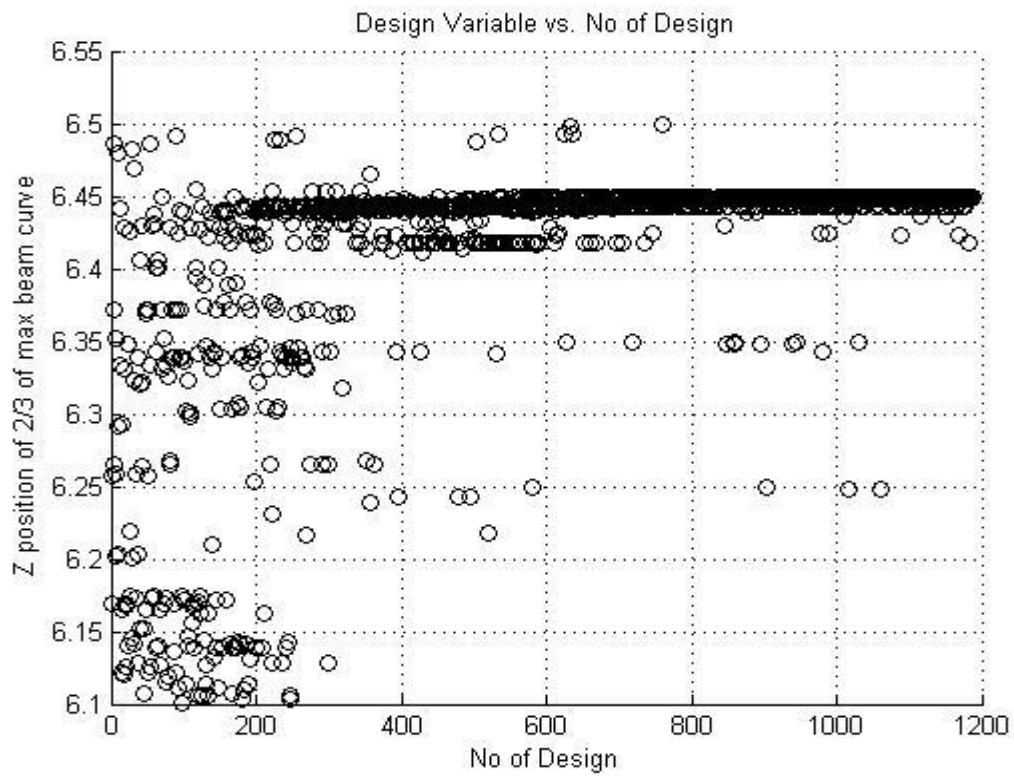


Εικόνα 62: Μεταβλητή σχεδίασης - Θέση νομέα που απέχει 8% Lbp από την πλήρη

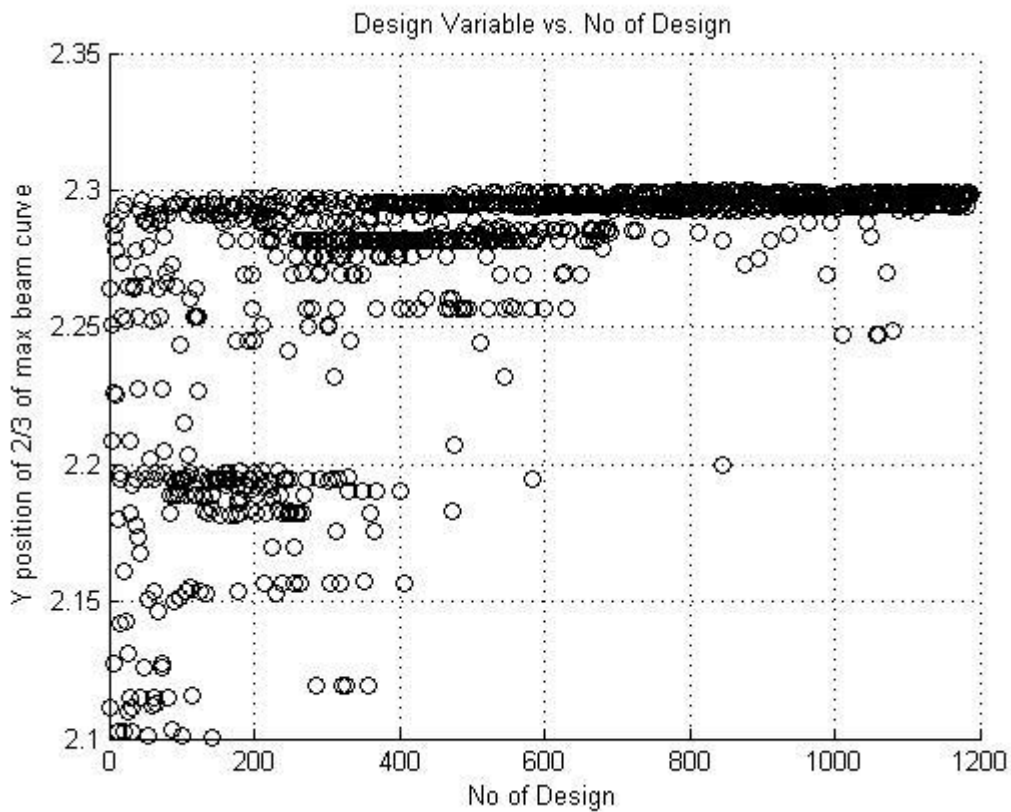


Εικόνα 63: Μεταβλητή σχεδίασης - καθ' ύψος μεταβολή σημείου της καμπύλης μεγίστου πλάτους

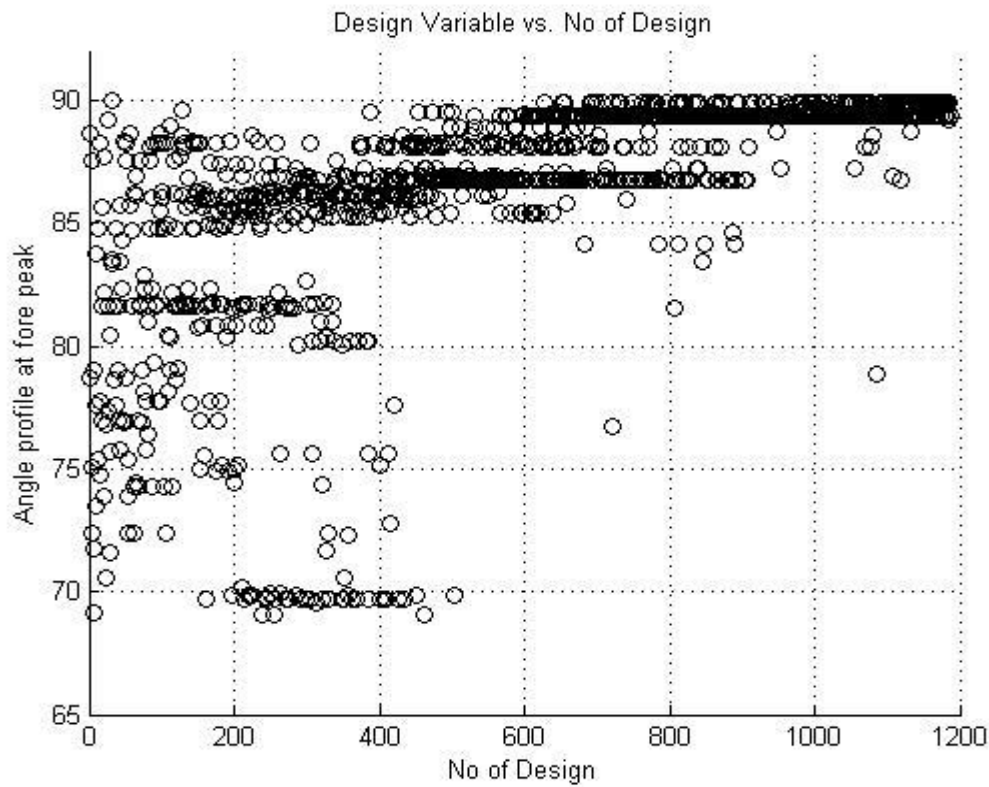




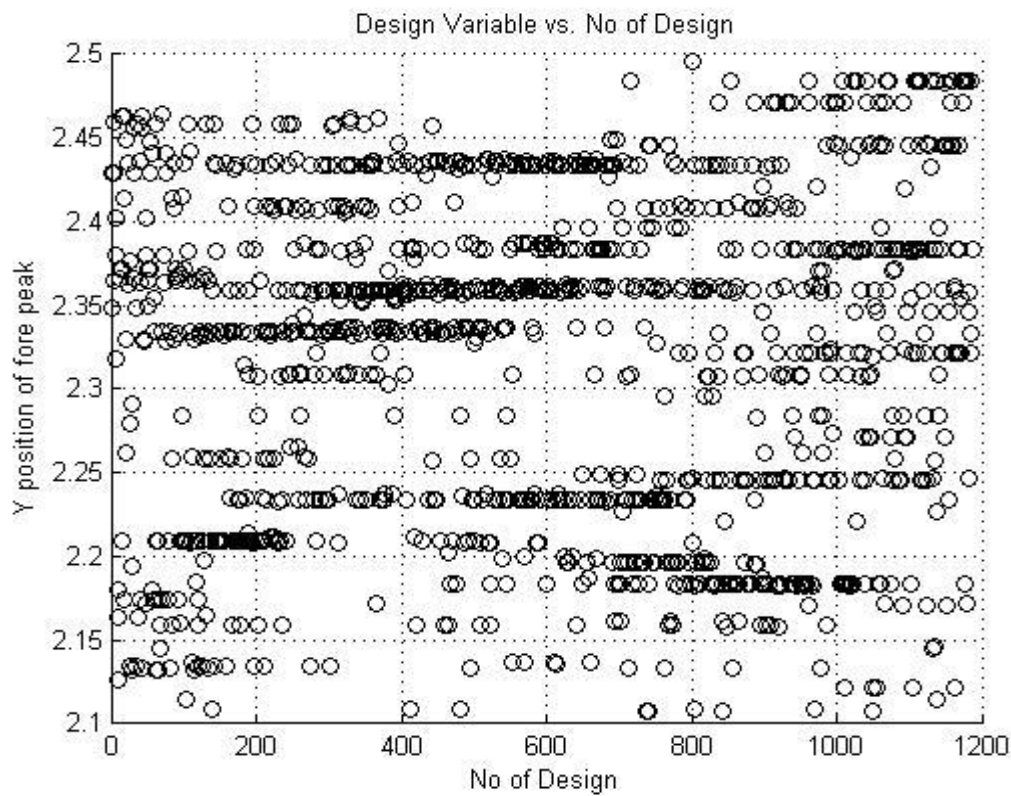
Εικόνα 64: Μεταβλητή σχεδίασης - Καθ' ύψος θέσης σημείου στα 2/3 της καμπύλης μεγίστου πλάτους



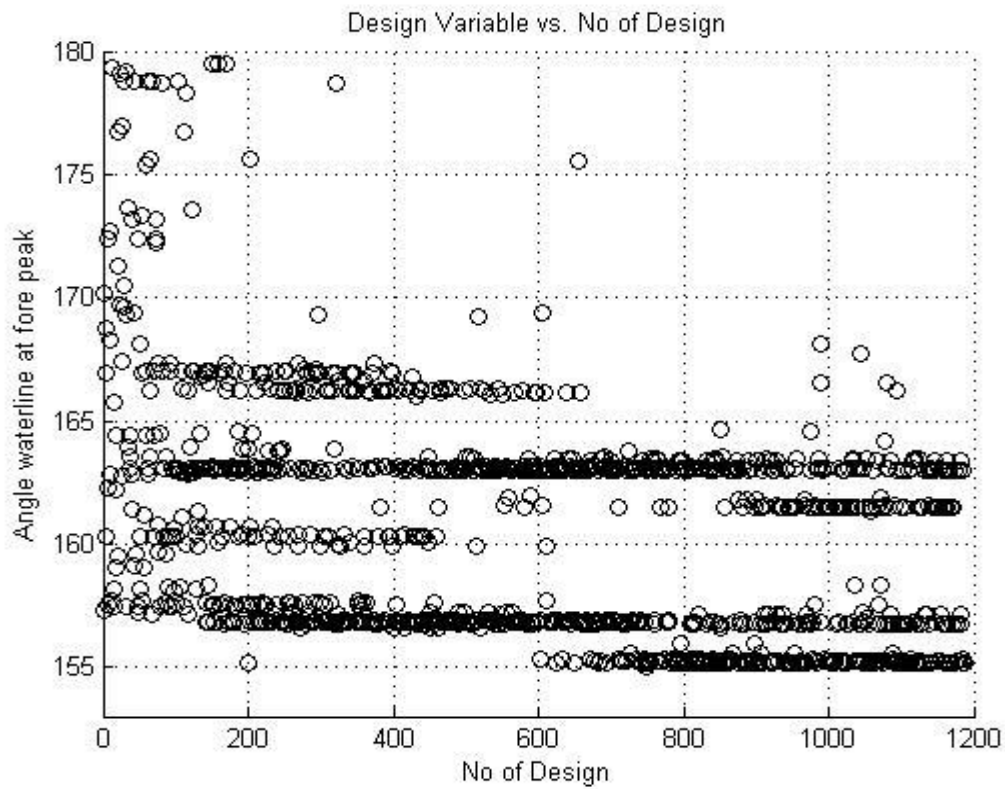
Εικόνα 65: Μεταβλητή σχεδίασης - Πλάτος σημείου στα 2/3 της καμπύλης μεγίστου πλάτους



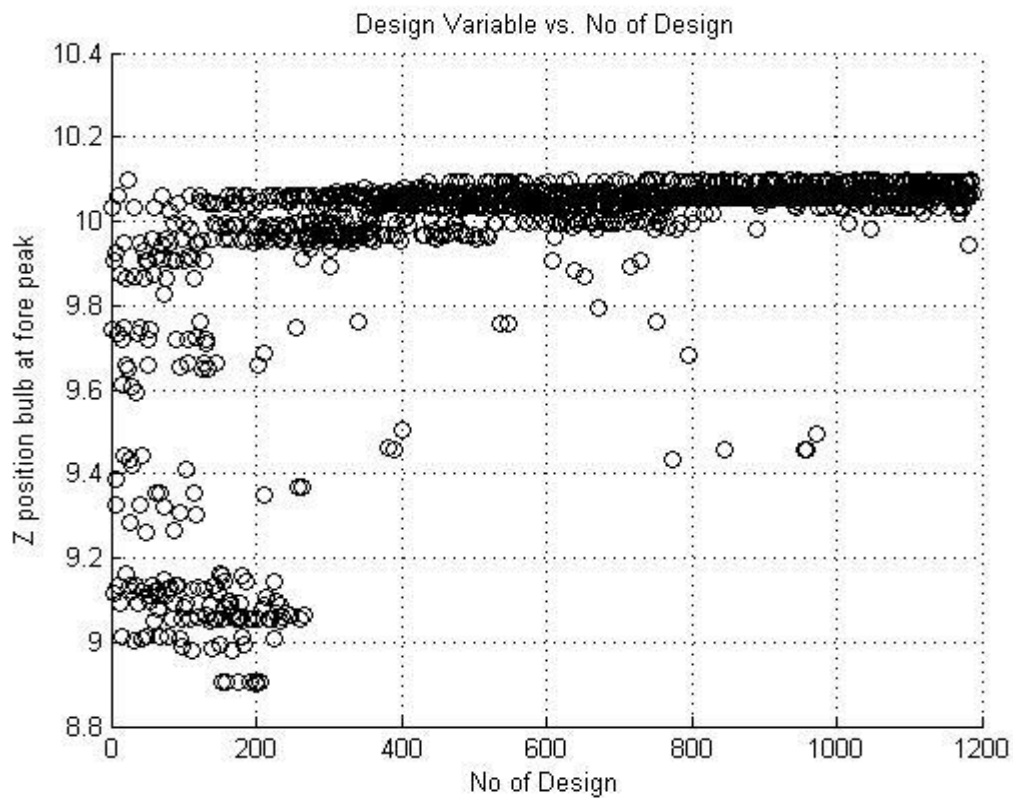
Εικόνα 66: Μεταβλητή σχεδίασης - Γωνία εισόδου του προφίλ στην πλώρη



Εικόνα 67: Μεταβλητή σχεδίασης - Πλάτος σημείου της καμπύλης μεγίστου πλάτους στην πλώρη

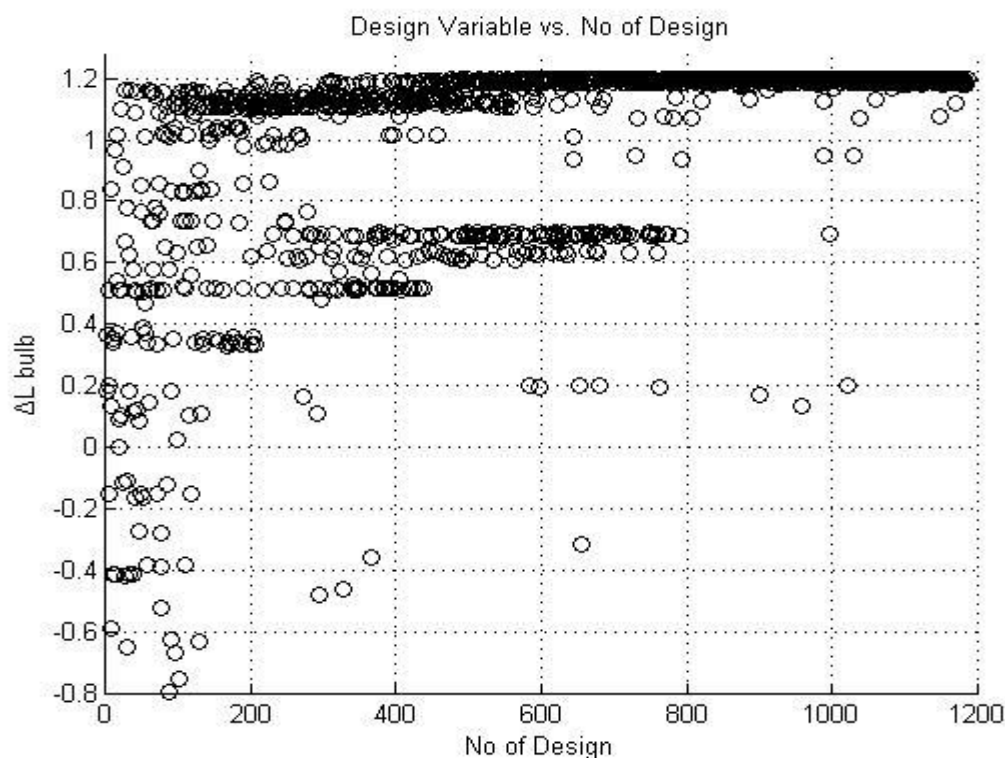


Εικόνα 68: Μεταβλητή σχεδίασης - Γωνία εισόδου στην ίσαλο σχεδίασης



Εικόνα 69: Μεταβλητή Σχεδίασης - Καθ' ύψος θέση του προφίλ του βολβού στην πλώρη



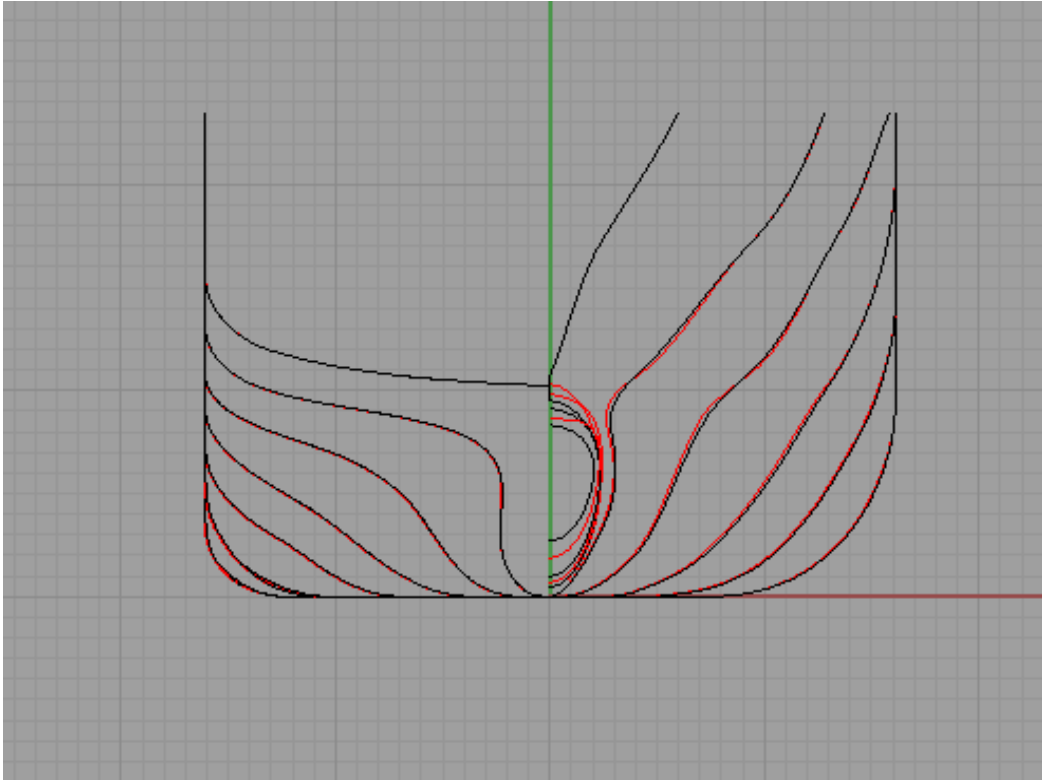


Εικόνα 70: Μεταβλητή σχεδίασης - Μήκος Βολβού

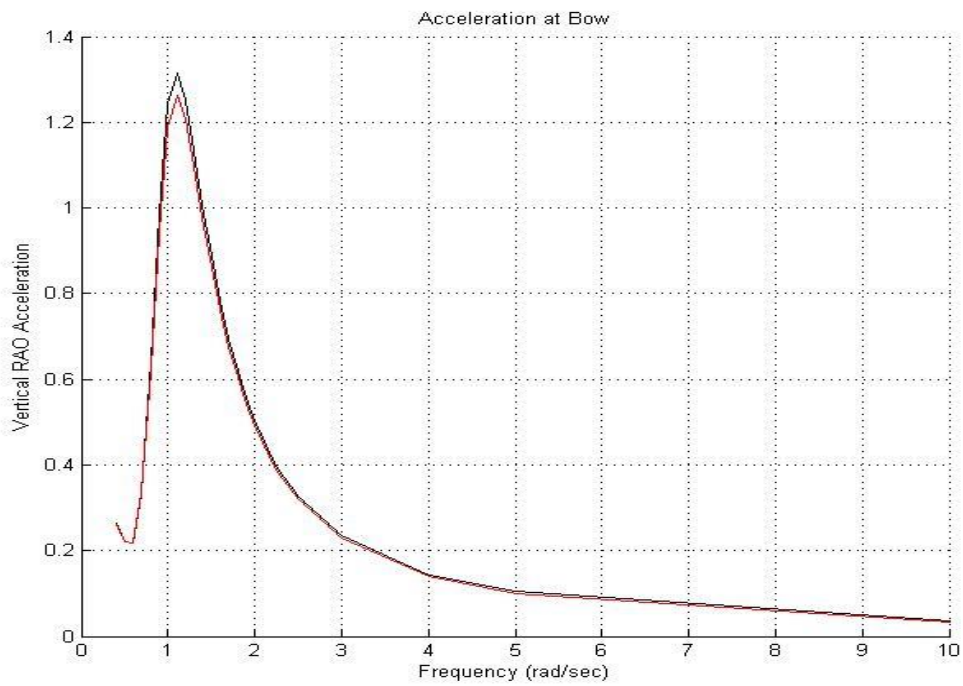
Η πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση αποτελεί το βασικό στόχο αυτής της εργασίας, οπότε η εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων ίσως είναι ένα από τα πιο σημαντικά μέρη της. Η ερμηνεία των διαγραμμάτων των παραπάνω εικόνων θα ξεκινήσει από εκείνο που έχει ως βασικούς άξονες τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις ( εικόνα 59). Έτσι, στην εικόνα 59 παρατηρείται ότι η διασπορά των λύσεων παρουσιάζει την αναμενόμενη μορφή που έπρεπε να είχε, με το πέρασ, μια βελτιστοποίηση βασισμένη σε δύο κριτήρια που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλώρη και η αντίσταση κυματισμού. Επίσης εύκολα μπορεί να παρατηρηθεί ότι η πλειοψηφία των παραγόμενων λύσεων παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα από εκείνα της αρχικής γάστρας κάτι το αναμενόμενο σε μια σωστή διαδικασία βελτιστοποίησης. Στις εικόνες 56-57 παρουσιάζεται η κατανομή των λύσεων των δύο επιμέρους κριτηρίων. Για την κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλώρη η μέση τιμή είναι  $1.2675 \text{ m/s}^2$ , η μέγιστη  $1.3354 \text{ m/s}^2$  και η ελάχιστη  $1.2627 \text{ m/s}^2$ . Ομοίως, για την αντίσταση κυματισμού η μέση τιμή είναι  $525.6 \text{ kN}$ , η μέγιστη  $794.6 \text{ kN}$  και η ελάχιστη  $483.1 \text{ kN}$ . Μελετώντας τη διασπορά των λύσεων και για τα δύο κριτήρια μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η σύγκλιση είναι ικανοποιητική και έχει αποδεκτή μορφή. Οι πρώτες λύσεις βρίσκονται σε τιμές υψηλότερες από τη μέση τιμή και στη συνέχεια παρατηρείται μια φθίνουσα μορφή και σύγκλιση προς μια βέλτιστη τιμή. Στις υπόλοιπες εικόνες παρουσιάζεται η κατανομή των λύσεων των μεταβλητών σχεδίασης. Οι περισσότερες μεταβλητές ακολουθούν την ίδια συγκλίνουσα πορεία. Μερικές όμως φαίνεται να μην παρουσιάζουν συγκλίνουσα μορφή, κάτι το οποίο δεν παρατηρήθηκε στις μονοκριτηριακές βελτιστοποιήσεις. Αυτό συμβαίνει διότι δεν υπάρχουν τιμές των μεταβλητών αυτών για τις οποίες έχουμε βέλτιστες τιμές και για τα δύο κριτήρια ταυτόχρονα.

Πίνακας 10: Τιμές πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης κατακόρυφης επιτάχυνσης (11 παράμετροι)

Μεταβλητές Σχεδίασης	Τιμές Πατρικής Γάστρας	Τιμές Βελτιστοποιημένης Γάστρας	Ποσοστιαία Μεταβολή (%)
2/3 max beam Y	2.2442	2.2972	2.36
2/3 max beam Z	6.1130	6.4487	5.49
BB tip max beam Z	5.8800	-	-
x 8% from FP	17.6200	16.4766	-6.49
DZ FOS	10.8000	9.8432	-8.86
FP max beam Z	5.5000	5.3327	-3.04
FP max beam Y	2.3612	-	-
DL Bulb	8.0000	9.1945	14.93
Angle Waterline	170.0000	155.2960	-8.65
Angle Profile	81.0000	89.3800	10.35
Bulbous Z	9.5000	10.0657	5.95
<b>Αντίσταση Κυματισμού</b>	<b>672.30</b>	<b>494.10</b>	<b>-26.51</b>
<b>Κατακόρυφη Επιτάχυνση</b>	<b>1.3161</b>	<b>1.2644</b>	<b>-3.87</b>

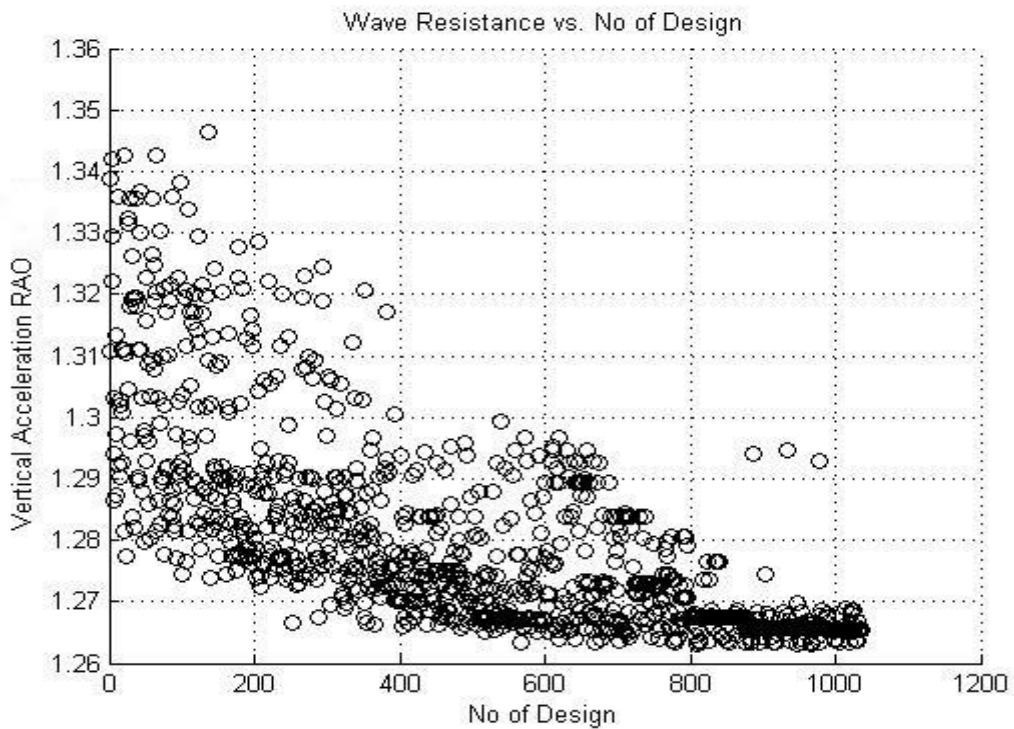


Εικόνα 71: Νομείς αρχικής γεωμετρίας (μαύρες καμπύλες) και βελτιστοποιημένης (κόκκινες καμπύλες) γεωμετρίας (11 παράμετροι)

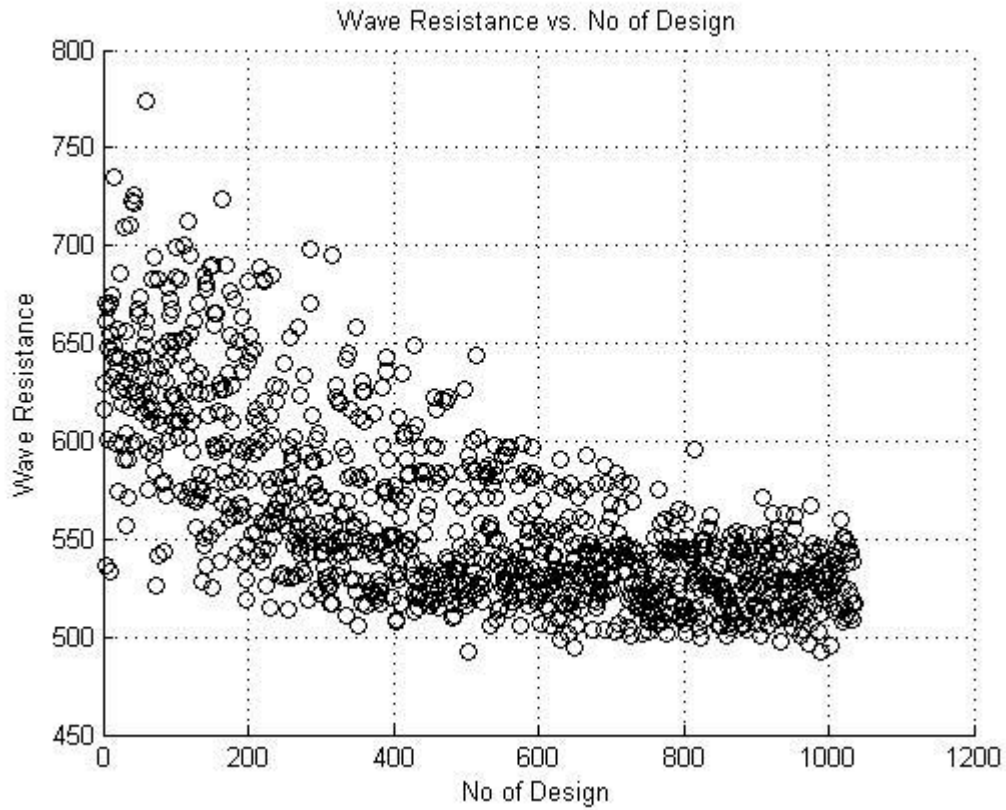


Εικόνα 72: Καμπύλη RAO επιτάχυνσης πατρικής (μαύρη) και βελτιστοποιημένης (κόκκινη) γάστρας

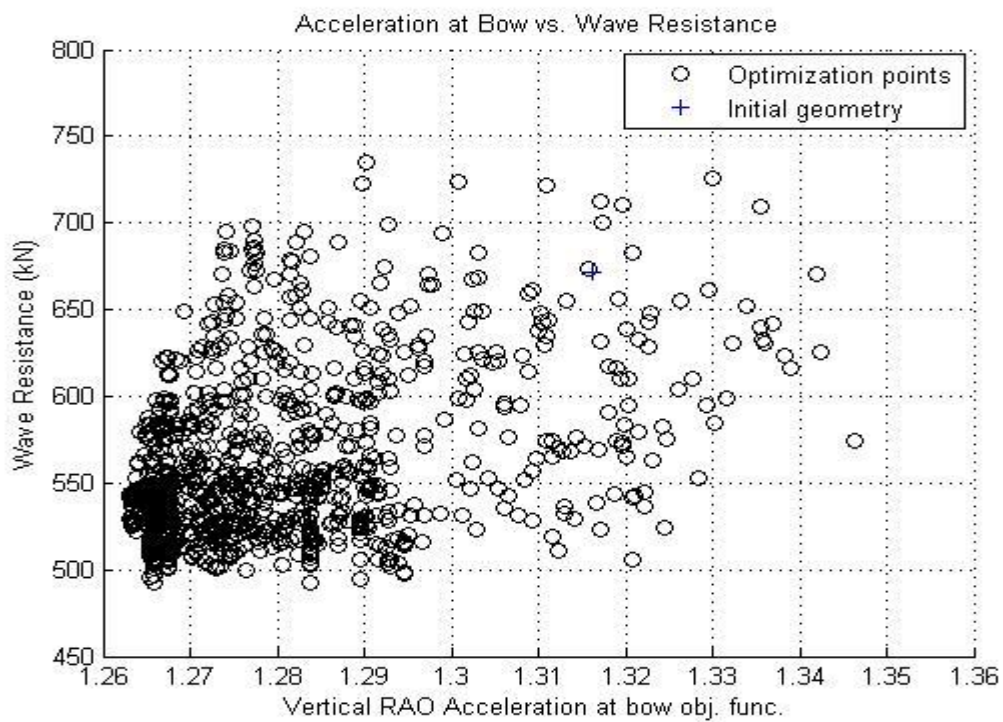
Από την παραπάνω ανάλυση παρατηρείται ότι ορισμένες παράμετροι δεν παρουσιάζουν σύγκλιση ενώ άλλες οι μεταβολή τους είναι πολύ μικρή, για αυτό το λόγο θα ακολουθηθεί η διαδικασία της βελτιστοποίησης με τις λιγότερες εναπομείνουσε παραμέτρους με σκοπό να εξαχθούν περισσότερα χρήσιμα συμπεράσματα. Σκοπός είναι να προκύψουν αποτελέσματα κοντά σε εκείνα της προηγούμενης βελτιστοποίησης αλλά πιο εύκολα και σε πιο σύντομο χρονικό διάστημα. Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα της νέας βελτιστοποίησης:



Εικόνα 73:: Διασπορά Λύσεων - RAO επιτάχυνσης στην πλώρη -  $V=25 \text{ kn}$

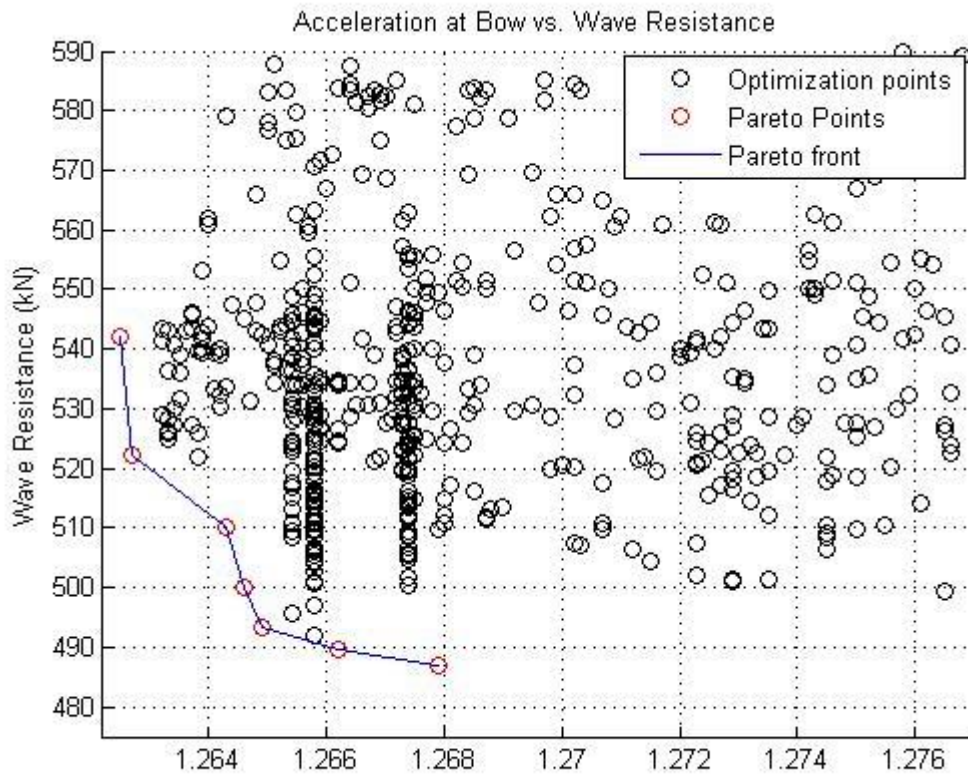


74: Διασπορά Λύσεων – Αντίσταση Κυματισμού -  $V=25 \text{ kn}$

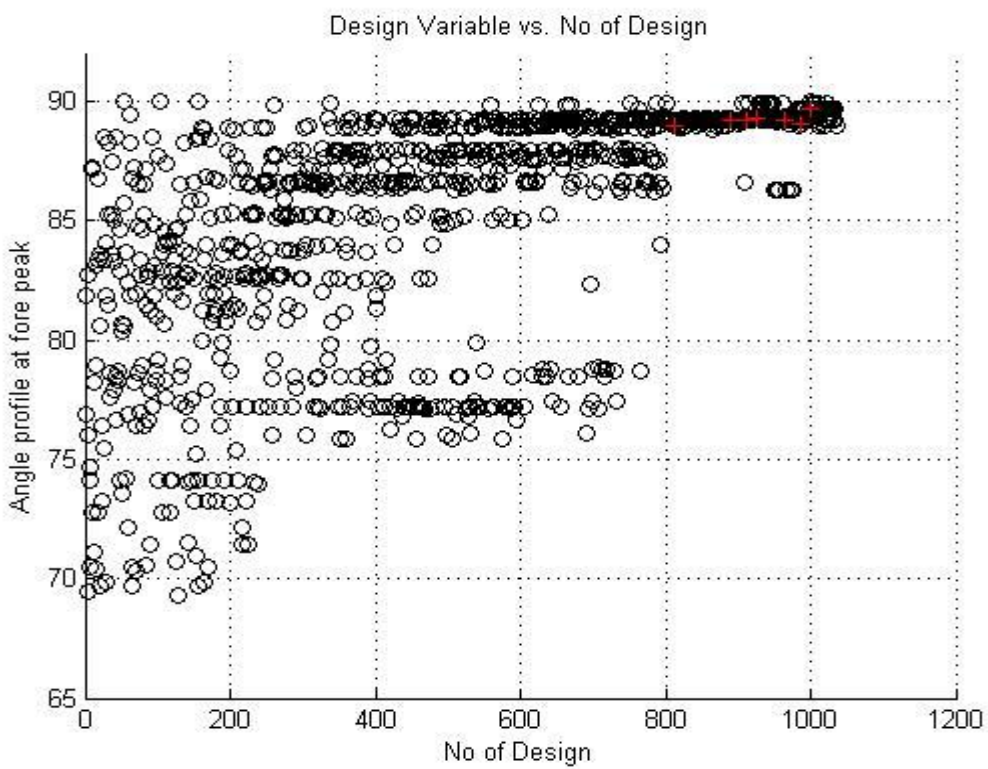


Εικόνα 75: Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με κριτήρια την αντίσταση κυματισμού και το μέγιστο RAO επιτάχυνσης στην πλώρη

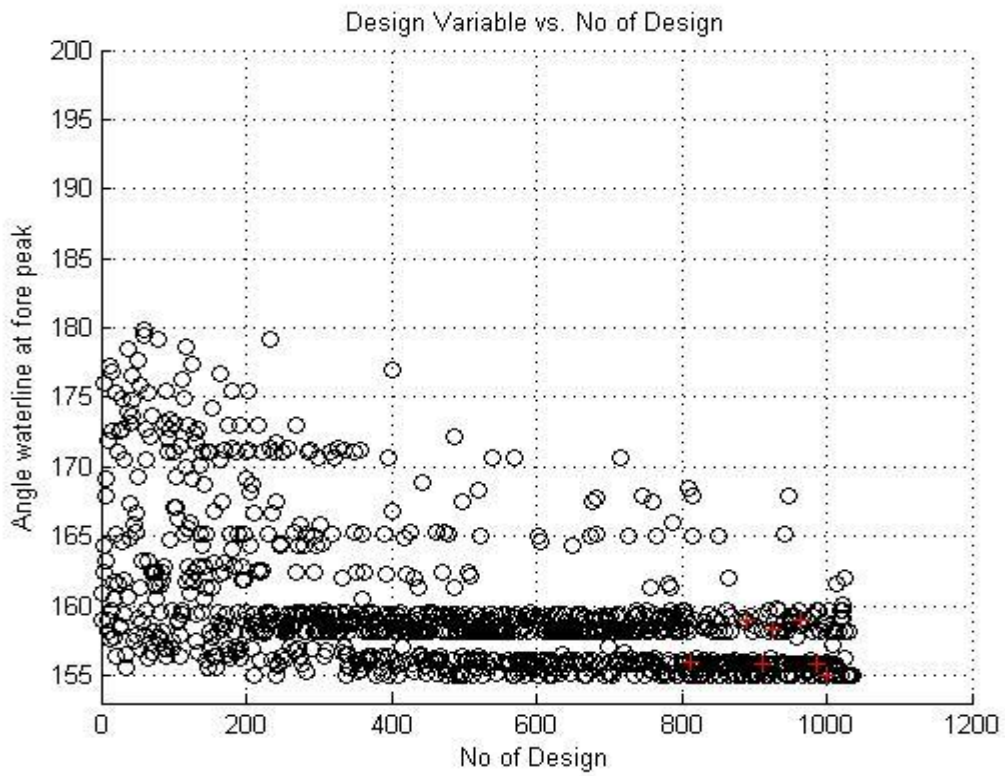




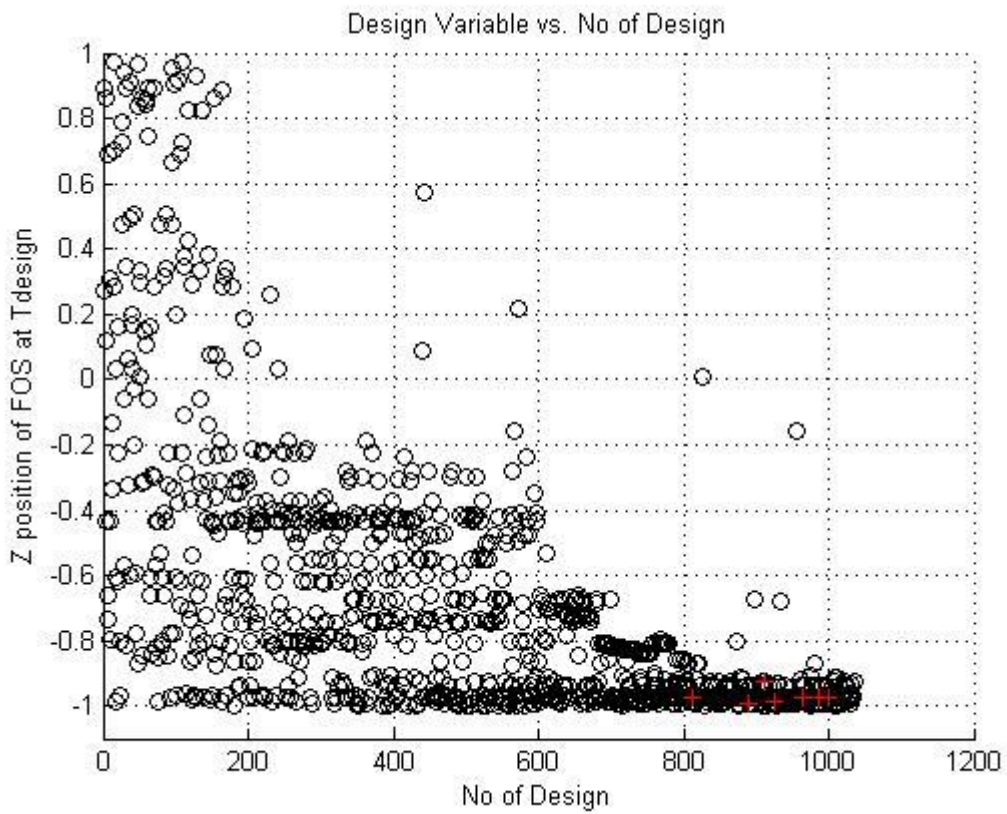
Εικόνα 76: Λεπτομέρεια εικόνας 75 - Περιοχή βέλτιστων λύσεων



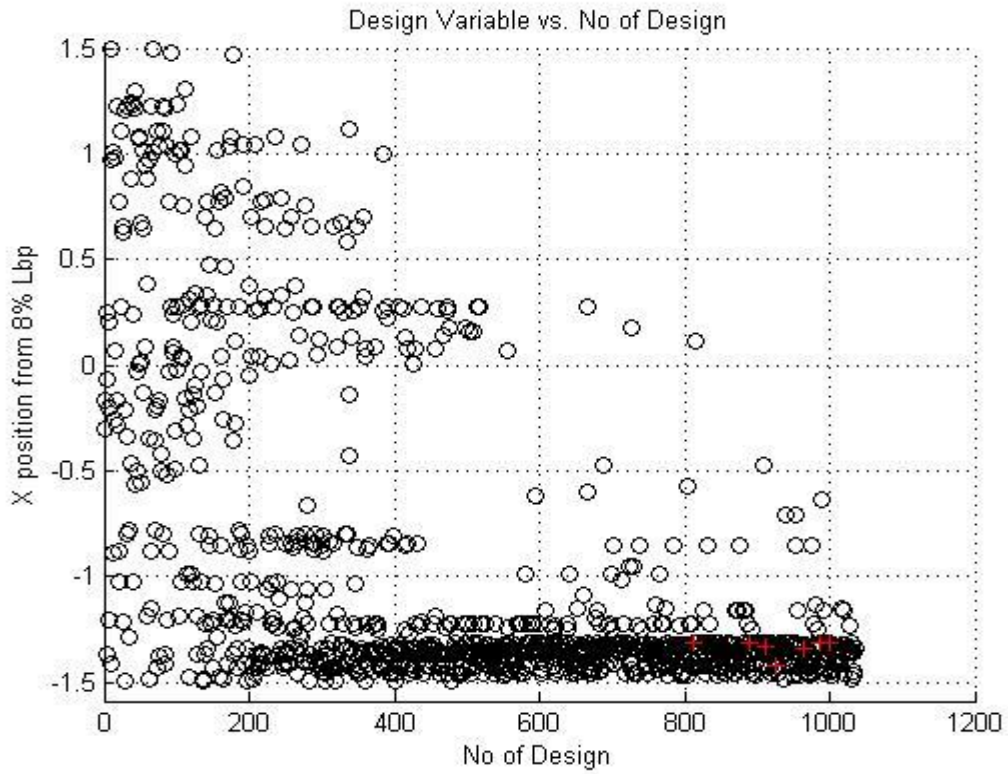
Εικόνα 77: Μεταβλητή σχεδίασης - Γωνία εισόδου του προφίλ στην πλώρη



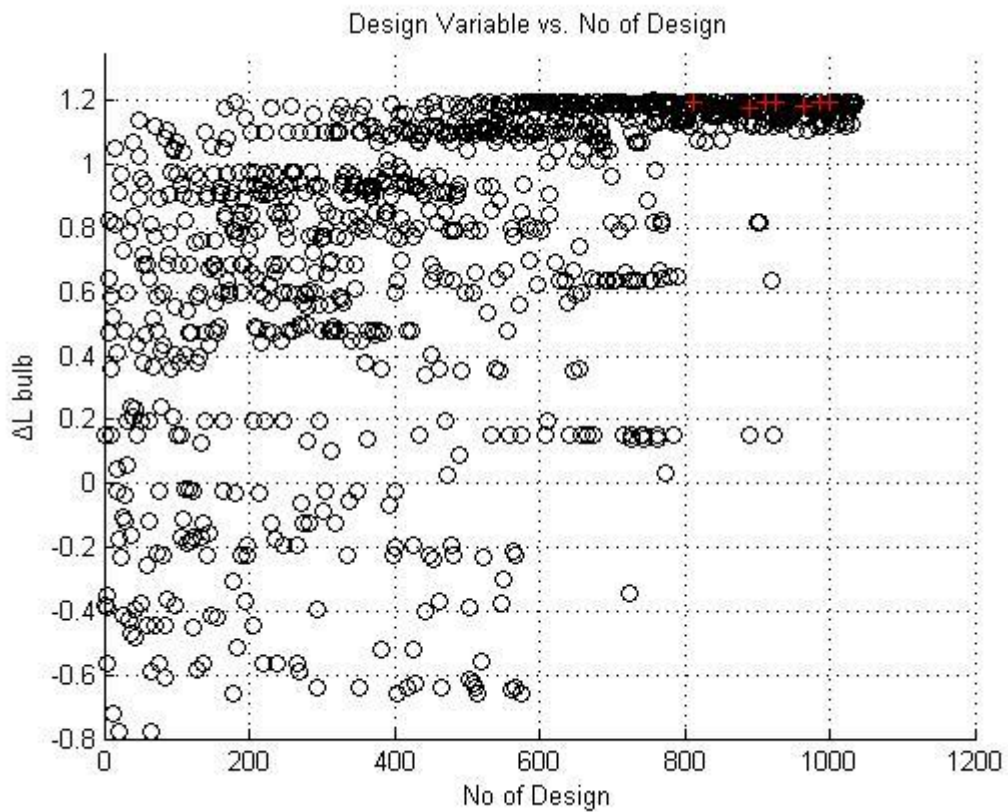
Εικόνα 78: Μεταβλητή σχεδίασης - Γωνία εισόδου στην ίσαλο σχεδίασης



Εικόνα 79: Μεταβλητή Σχεδίασης - Καθ' ύψος θέση του προφίλ του βολβού στην πλώρη



Εικόνα 80: Μεταβλητή σχεδίασης - Θέση νομέα που απέχει 8% Lbp από την πλώρη



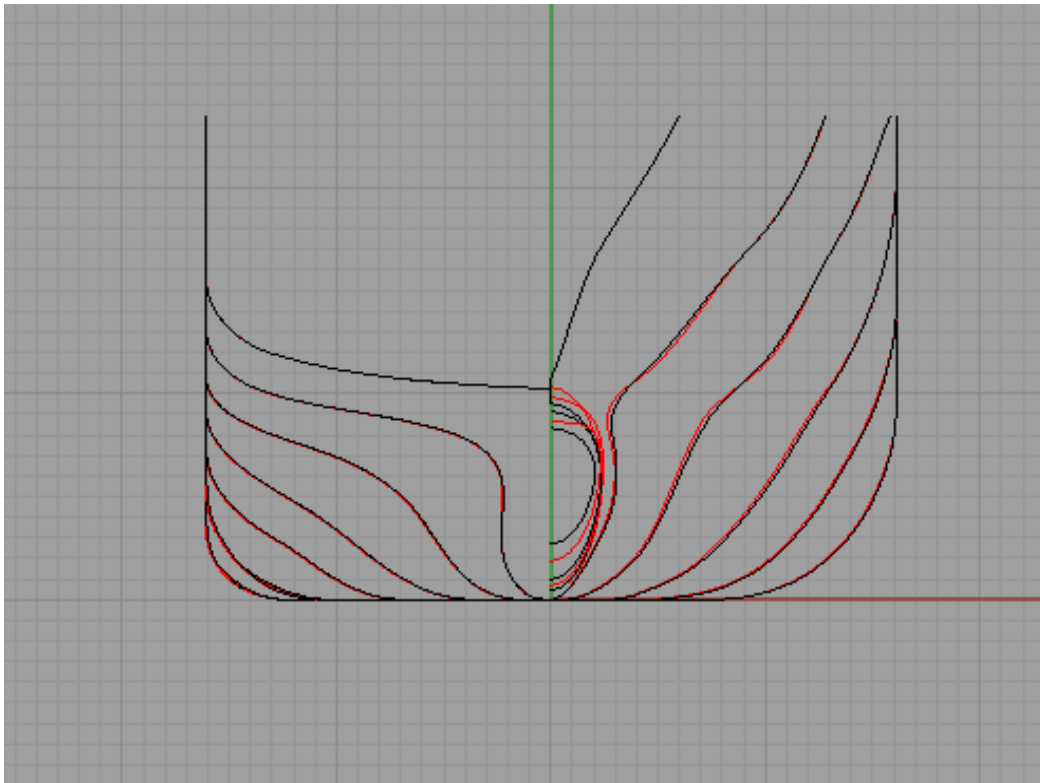
Εικόνα 81: Μεταβλητή σχεδίασης - Μήκος Βολβού



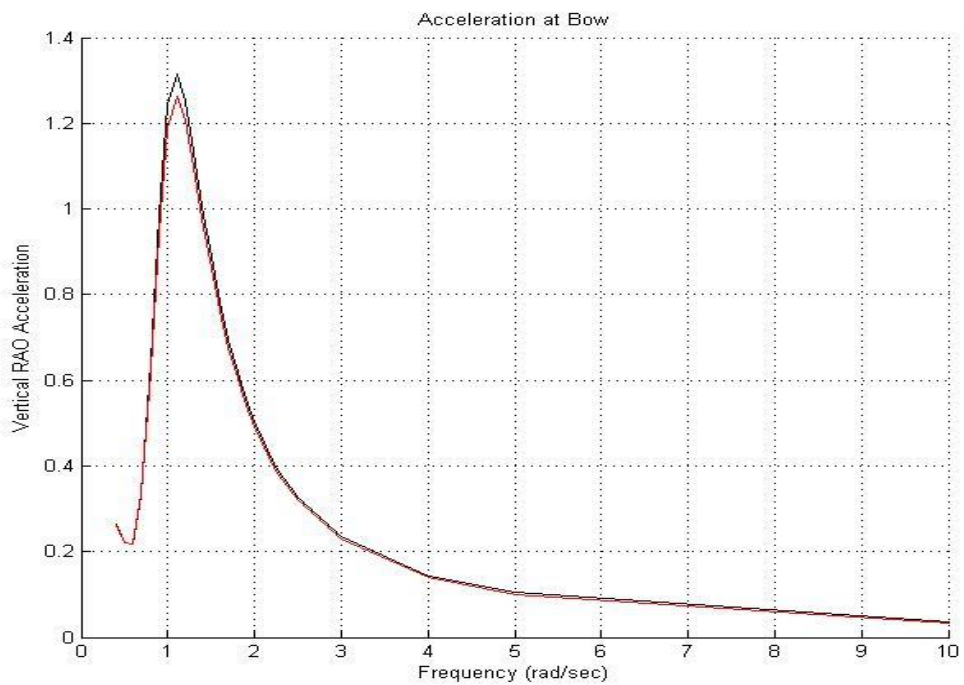
Στις εικόνες 73-74 παρουσιάζεται η κατανομή των λύσεων των δύο επιμέρους κριτηρίων. Για την κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλώρη η μέση τιμή είναι 1.2743 m/s<sup>2</sup>, η μέγιστη 1.3464 m/s<sup>2</sup> και η ελάχιστη 1.2632 m/s<sup>2</sup>. Ομοίως, για την αντίσταση κυματισμού η μέση τιμή είναι 544.7 kN, η μέγιστη 773.5 kN και η ελάχιστη 492 kN. Και σε αυτή την περίπτωση μελετώντας τη διασπορά των λύσεων και για τα δύο κριτήρια μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η σύγκλιση είναι ικανοποιητική και έχει αποδεκτή μορφή. Οι πρώτες λύσεις βρίσκονται σε τιμές υψηλότερες από τη μέση τιμή και στη συνέχεια παρατηρείται μια φθίνουσα μορφή και σύγκλιση προς μια βέλτιστη τιμή. Στις υπόλοιπες εικόνες παρουσιάζεται η κατανομή των λύσεων των μεταβλητών σχεδίασης. Οι περισσότερες μεταβλητές ακολουθούν την ίδια συγκλίνουσα πορεία. Μερικές όμως φαίνεται να μην παρουσιάζουν συγκλίνουσα μορφή, κάτι το οποίο δεν παρατηρήθηκε στις μονοκριτηριακές βελτιστοποιήσεις. Αυτό συμβαίνει διότι δεν υπάρχουν τιμές των μεταβλητών αυτών για τις οποίες έχουμε βέλτιστες τιμές και για τα δύο κριτήρια ταυτόχρονα.

Πίνακας 11: Τιμές πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης κατακόρυφης επιτάχυνσης (5 παράμετροι)

Μεταβλητές Σχεδίασης	Τιμές Πατρικής Γάστρας	Τιμές Βελτιστοποιημένης Γάστρας	Ποσοστιαία Μεταβολή (%)
x 8% from FP	17.6200	16.4888	-6.42
DZ FOS	10.8000	9.8243	-9.03
DL Bulb	8.0000	9.1860	14.83
Angle Waterline	170.0000	155.8100	-8.35
Angle Profile	81.0000	89.3200	10.27
<b>Αντίσταση Κυματισμού</b>	<b>672.30</b>	<b>501.00</b>	<b>-25.48</b>
<b>Κατακόρυφη Επιτάχυνση</b>	<b>1.3161</b>	<b>1.2646</b>	<b>-3.75</b>



Εικόνα 82: Νομείς αρχικής γεωμετρίας (μαύρες καμπύλες) και βελτιστοποιημένης (κόκκινες καμπύλες) γεωμετρίας (5 παράμετροι)



Εικόνα 83: Καμπύλη RAO επιτάχυνσης πατρικής (μαύρη) και βελτιστοποιημένης (κόκκινη) γάστρας (5 παράμετροι)

Στην εικόνα 76 παρουσιάζεται μια συνεχής και ομαλή καμπύλη βέλτιστων λύσεων ( Pareto Front ), η οποία περιβάλλει το σύνολο των λύσεων που έχουν προκύψει από τη διαδικασία της βελτιστοποίησης και έχουν προβληθεί στο συγκεκριμένο διάγραμμα.

Από το σύνολο των λύσεων η γεωμετρία που μπορεί να επιλεγεί θα ανήκει στην συνοριακή καμπύλη που αναφέρθηκε παραπάνω (μέτωπο Pareto). Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται ένα σύνολο εναλλακτικών μορφών γάστρας που ανήκουν στην καμπύλη και μπορούν να αποτελέσουν αποδεκτές λύσεις.

Πίνακας 12: Επιλεγείσες γεωμετρίες από το μέτωπο Pareto

Βύθισμα T=10.8 m και ταχύτητα υπηρεσίας V = 25 kn		
α/α	Επιτάχυνση στην πλώρη	Αντίσταση κυματισμού
812	1.2625	542
891	1.2627	522.4
912	1.2643	510
<b>925</b>	<b>1.2646</b>	<b>501</b>
963	1.2649	493.2
987	1.2662	489.7
1001	1.2679	487.1

Μια πρώτη παρατήρηση που γίνεται στον παραπάνω πίνακα είναι ότι όλες οι επιλεγείσες γεωμετρίες είναι μέλη προχωρημένων γενεών. Αυτό καταδεικνύει ότι η εξελικτική διαδικασία του αλγορίθμου έγινε με αποτελεσματικό τρόπο και οι πιο βέλτιστες τιμές των κριτηρίων που επελέχθησαν παρουσιάστηκαν προς το τέλος της διαδικασίας. Επίσης, παρατηρείται ότι δεν υπάρχει γεωμετρία, για την οποία και τα δύο κριτήρια να παρουσιάζουν καλύτερες τιμές. Η καταλληλότερη γάστρα είναι αυτή η οποία θα έχει τον καλύτερο συνδυασμό των δύο κριτήρια. Έτσι η μορφή της γάστρας που θα επιλεγεί ως βέλτιστη αυτής της διαδικασίας είναι αυτή με αύξοντα αριθμό 925. Στον παρακάτω πίνακα έχουμε τις τιμές της αρχικής και τελικής γάστρας αλλά και τις ποσοστιαίες μεταβολές αυτών.

## 7.5 Συμπεράσματα

Όπως έχει αναφερθεί, κύριος στόχος αυτής της εργασίας είναι η μελέτη της υδροδυναμικής συμπεριφοράς ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Με τη χρήση αλγορίθμων έγινε προσπάθεια βελτίωσης της συμπεριφοράς της γάστρας τόσο ως προς την αντίσταση σε ήρεμο νερό όσο και κατά την πλεύση του σε κυματισμούς. Πρώτο βήμα της διαδικασίας ήταν η παραμετρική σχεδίαση της γάστρας του πλοίου που είχε δοθεί και ο καθορισμός ενός συγκεκριμένου αριθμού μεταβλητών σχεδίασης με σκοπό η μεταβολή αυτών να επηρεάζει αισθητά τα κριτήρια αξιολόγησης της υδροδυναμικής συμπεριφοράς. Κατά την επιλογή των παραμέτρων αποκλείστηκαν οι κύριες διαστάσεις του πλοίου προκειμένου να μην υπάρχει μεγάλη μεταβολή στη μορφή της γάστρας. Η παραμετρική σχεδίαση υλοποιήθηκε στο λογισμικό CAESES-Friendship Framework, με συνδυασμό των σχεδιαστικών εργαλείων.

Από την διαδικασία αυτή παρείχθησαν χρήσιμα συμπεράσματα για την διαδικασία της βελτιστοποίησης και πως οι παράμετροι την επηρεάζουν. Οι αρχικές 11 παράμετροι τελικά κατέληξαν να είναι 5 οι οποίες επηρεάζουν ουσιαστικά τις τιμές των κριτηρίων αξιολόγησης. Η αρχική εκτίμηση για 11 παραμέτρους που θα οδηγούσαν σε καλύτερα αποτελέσματα ήταν υπερτιμημένη και τελικά της ίδιας τάξης αποτελέσματα παρήχθησαν με λιγότερους παραμέτρους και σε πιο σύντομο χρονικό διάστημα. Το αποτέλεσμα της παραμετρικής σχεδίασης είναι μια γάστρα που προσεγγίζει με ακρίβεια τη δοθείσα μη παραμετρική μορφή, και εξαρτάται από 5 συνολικά μεταβλητές σχεδίασης, των οποίων οι τιμές κυμαίνονται εντός ενός εύρους. Τα αποτελέσματα από την βελτιστοποίηση των 5 παραμέτρων είναι οριακά λίγο δυσμενέστερα αλλά όχι σε τέτοιο βαθμό που να είναι αποδεκτή η χρησιμοποίηση έξι ακόμα μεταβλητών σχεδίασης. Επίσης παρατηρείται ότι ο χρόνος σύγκλισης είναι πολύ μικρότερος κάτω που κλάνει την διαδικασία πιο γρήγορη. 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. Οι πρώτες δύο αφορούσαν την βελτιστοποίηση των δύο κριτηρίων ξεχωριστά και η τρίτη και για τα δύο κριτήρια μαζί. Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των βελτιστοποιήσεων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 13: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των τριών βελτιστοποιήσεων

	Αρχική Γάστρα	Μονο/κή Βελτι/ση (ως προς κατακόρυφη επιτάχυνση)	Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	Μονο/κή Βελτι/ση (ως προς αντίσταση κυματισμού)	Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	Πολύ/κή Βελτι/ση (11 παραμετροί)	Ποσοστιαία Μεταβολή (%)	Πολύ/κή Βελτι/ση (5 παραμετροί)	Ποσοστιαία Μεταβολή (%)
Κατακόρυφη Επιτάχυνση (m/s <sup>2</sup> )	1.3161	1.2630	-3.99	-	-	1.2634	-3.87	1.2646	-3.75
Αντίσταση Κυματισμού (kN)	672.3	-	-	487.8	-27.44	494.1	-26.51	501	-25.48

Για να γίνει αντιληπτό το μέγεθος της συνεισφοράς της μείωσης της αντίστασης κυματισμού στη συνολική αντίσταση του πλοίου, θα παρουσιαστεί επίσης το ποσοστό μείωσης της συνολικής αντίστασης του πλοίου. Για το σκοπό αυτό θα αναλυθεί η συνολική αντίσταση σε δύο επιμέρους συνιστώσες, μία της αντίστασης κυματισμού και μία της υπόλοιπης αντίστασης τα επιμέρους της οποίας έχουν αναλυθεί σε παραπάνω παραγράφους :

$$C_{\text{Total}} = C_{\text{Rest}} + C_{\text{Wave}}$$

Όπου:

$C_{\text{Rest}}$  ο συντελεστής της υπόλοιπης αντίστασης

$C_{\text{Wave}}$ , ο συντελεστής αντίστασης κυματισμού

$C_{\text{Total}}$  ο συντελεστής της συνολικής αντίστασης

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

Από τη βιβλιογραφία<sup>13</sup> βρέθηκε ο συντελεστής  $C_{\text{Total}}$  ίσος με  $2.414 \times 10^{-3}$ . Αυτή η τιμή αφορά το υπό μελέτη πλοίο με ίδια ταχύτητα και βύθισμα για το οποίο πραγματοποιήθηκε υπολογισμός της συνολικής αντίστασης με μέθοδο CFD. Για την πατρική γάστρα υπολογίστηκε αντίσταση κυματισμού 672,3 kN δηλαδή  $C_{\text{Wave}} = 0.884 \times 10^{-3}$ .

Όπως υπολογίστηκε η αντίσταση κυματισμού της επιλεγμένης γεωμετρίας ήταν 672,3 kN επομένως επιτεύχθηκε μια μειωμένη αντίσταση κυματισμού 494,1 kN με  $C_{\text{Wave}} = 0.650 \times 10^{-3}$ .

Συμφώνα με τα παραπάνω έχουμε:

<sup>13</sup> Full-scale unsteady RANS CFD simulations of ship behaviour and performance in head seas due to slow steaming, Tahsin Tezdogan, Dept of Naval Architecture, University of Strathclyde

Πίνακας 14: Συγκριτικός πίνακας αντίστασης του υπο μελέτη πλοίου

	$C_{Wave}$	$C_{Rest}$	$C_{Total}$	$R_{Total}$ [kN]
Πατρική γάστρα	$0.887 \times 10^{-3}$	$1.527 \times 10^{-4}$	$2.414 \times 10^{-3}$	1836.4
Βελτιστοποιημένη γάστρα	$0.650 \times 10^{-3}$	$1.527 \times 10^{-4}$	$2.177 \times 10^{-3}$	1655.8

Έτσι επιτεύχθηκε μια μείωση 9.3% ως προς τη συνολική αντίσταση της πατρικής γάστρας, όπως υπολογίστηκε παραπάνω.

Πραγματοποιώντας μια ανακεφαλαίωση της παρούσας εργασίας και μια περεταίρω αξιολόγηση των αποτελεσμάτων μπορούμε να εξάγουμε τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η χρήση συστημάτων CAD/CAM μπορεί να μας οδηγήσει σε αποδοτικότερες μορφές γεωμετρίας της γάστρας ενός πλοίου στα πρώιμα στάδια μιας μελέτης. Τα πλεονεκτήματα είναι πολλά και βοηθούν στην εξαγωγή βέλτιστων αποτελεσμάτων.
- Η δυναμική θεωρία και η θεώρηση συνεκτικής ροής μας οδηγεί σε καλύτερη και ακριβέστερη εκτίμηση της υδροδυναμικής συμπεριφοράς.
- Οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να οδηγήσουν σε μια αξιόπιστη σύγκλιση προς τις βέλτιστες λύσεις ανεξαρτήτως της επιλογής των αντικειμενικών συναρτήσεων, κάτι που εξαρτάται από υδροδυναμικά κριτήρια. Εφόσον είναι ικανοποιητική η υδροδυναμική αξιολόγηση, εξασφαλίζεται η παραγωγή γεωμετριών με καλύτερα χαρακτηριστικά.
- Η μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση είναι λογικό να οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα για το εκάστοτε κριτήριο σε σύγκριση με την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση που στόχο έχει καλύτερα αποτελέσματα και για τα δύο κριτήρια ταυτόχρονα.
- Η δυναμική συμπεριφορά του πλοίου και πρωτίστως η αντίστασή 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 κωδικών CFD θα έδινε μια πληρέστερη εικόνα.
- Η ακριβής μοντελοποίηση της γάστρας και η σωστή επιλογή των παραμέτρων αποτελούν σημαντικούς παράγοντες που οδηγούν σε καλύτερα αποτελέσματα της διαδικασίας της βελτιστοποίησης.

- Απαιτείται σωστή και καλή αξιολόγηση των παραμέτρων με σκοπό να επιλεγθεί ο κατάλληλος αριθμός αλλά και εκείνες οι παράμετροι που θα οδηγήσουν σε αποδεκτά αποτελέσματα
- Υπερβολικός αριθμός παραμέτρων είναι ικανός να οδηγήσει σε βελτιστοποίηση χρονοβόρα και με αποτέλεσμα όχι καλύτερα από αντίστοιχες διαδικασίες
- Η ίδια διαδικασία θα ήταν επιθυμητό να ακολουθηθεί και για άλλα παραδείγματα πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και για άλλες ταχύτητες υπηρεσίας με σκοπό να εξαχθούν συμπεράσματα για το κατά πόσο τα αποτελέσματα είναι ανάλογα με αυτά της παρούσας εργασίας.
- Η εκτέλεση πειραμάτων υπό κλίμακα θα πρέπει να ακολουθούν εκείνα των υπολογιστικών μεθόδων για την επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας αποτελεσμάτων.

## Παράρτημα Α - FRIENDSHIP-FRAMEWORK

The FRIENDSHIP-FRAMEWORK is a CAE package for the design of functional surfaces. It offers a wide range of CAD functionality for conventional NURBS-modeling, partially parametric modeling with various transformations and fully parametric 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 as 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 that their result is 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. They 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 called "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 will be involved in the variation/optimization. For most of the 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 εικόνων

Εικόνα 1: Ideal X .....	5
Εικόνα 2: Hawaiian Citizen .....	6
Εικόνα 3: Διαμόρφωση των κυτών .....	7
Εικόνα 4: MSC Oscar - 19224 TEU .....	7
Εικόνα 5: Ροή γύρω από σώμα .....	10
Εικόνα 6: Συνιστώσες Αντίστασης Πλοίου .....	11
Εικόνα 7: Το Σύστημα Κυματισμού κατά Kelvin.....	12
Εικόνα 8: Συμβολή Πρυμναίου και Πρωραίου Συστήματος .....	13
Εικόνα 9: Οι κινήσεις του πλοίου .....	17
Εικόνα 10: Rolling .....	18
Εικόνα 11: Heaving.....	19
Εικόνα 12: Απλός Αρμονικός Κυματισμός.....	21
Εικόνα 13: Θεωρία Λωρίδων .....	24
Εικόνα 14: Η εγκάρσια τομή όπως χρησιμοποιείται στη θεωρία του Frank .....	25
Εικόνα 15: Η παραδοσιακή σπειροειδής διαδικασία σχεδίασης πλοίων .....	30
Εικόνα 16: Η επαναληπτική διαδικασία υδροδυναμικής βελτιστοποίησης.....	33
Εικόνα 17: Παράδειγμα Προβλήματος μεικτών Ακεραίων .....	39
Εικόνα 18: Παραγόμενες λύσεις στο επίπεδο των αντικειμενικών συναρτήσεων .....	42
Εικόνα 19: Διαδικασία παραγωγής νέας γενιάς .....	43
Εικόνα 20: Οι βασικές καμπύλες της γεωμετρίας του containership.....	47
Εικόνα 21: επιφάνειες από το αρχείο iges.....	49
Εικόνα 22: Οι νομείς πρίμα της μέσης τομής .....	50
Εικόνα 23: Οι νομείς πλώρα της μέσης τομής.....	50
Εικόνα 24: Οι γραμμές και η επιφάνεια του βολβού .....	52
Εικόνα 25: Οι παραγόμενες επιφάνειες .....	53
Εικόνα 26: Περιγραφή πρωραίου (αριστερά) και πρυμναίου (δεξιά) τμήματος.....	58
Εικόνα 27: Διαδικασία Βελτιστοποίησης .....	59
Εικόνα 28: Καμπύλη RAO επιτάχυνσης στην πλήρη πατρικής γάστρας.....	62
Εικόνα 29: Διασπορά Λύσεων - Επιτάχυνση στην πλήρη - $V = 25$ kn .....	63
Εικόνα 30: Η αντίσταση κυματισμού των επιμέρους λύσεων .....	63
Εικόνα 31: Μεταβλητή σχεδίασης - καθ' ύψος μεταβολή σημείου της καμπύλης μεγίστου πλάτους.....	64
Εικόνα 32: Μεταβλητή σχεδίασης - Γωνία εισόδου του προφίλ στην πλήρη.....	64
Εικόνα 33: Μεταβλητή σχεδίασης - Μήκος Βολβού .....	65
Εικόνα 34: Μεταβλητή σχεδίασης - Γωνία εισόδου στην ίσαλο σχεδίασης.....	65
Εικόνα 35: Μεταβλητή σχεδίασης - Καθ' ύψος θέση του προφίλ του βολβού στην πλήρη ...	66
Εικόνα 36: Μεταβλητή σχεδίασης - Καθ' ύψος θέση σημείο του FOS στην ίσαλο σχεδίασης.....	66
Εικόνα 37: Μεταβλητή σχεδίασης - Πλάτος σημείου της καμπύλης μεγίστου πλάτους στην πλήρη .....	67

Εικόνα 38: Μεταβλητή σχεδίασης – Καθ' ύψος θέση του fore peak .....	67
Εικόνα 39: Μεταβλητή σχεδίασης - Πλάτος σημείου στα 2/3 της καμπύλης μεγίστου πλάτους .....	68
Εικόνα 40: Μεταβλητή σχεδίασης - Καθ' ύψος θέσης σημείου στα 2/3 της καμπύλης μεγίστου πλάτους.....	68
Εικόνα 41: Μεταβλητή σχεδίασης - Θέση νομέα που απέχει 8% Lbr από την πλώρη.....	69
Εικόνα 42: Καμπύλη RAO πατρικής (μαύρο) και βελτιστοποιημένης (κόκκινη) γάστρας.....	71
Εικόνα 43: Νομείς αρχικής γεωμετρίας (μαύρες καμπύλες) και βελτιστοποιημένης (κόκκινες καμπύλες) γεωμετρίας.....	71
Εικόνα 44: Η αντίσταση κυματισμού των επιμέρους λύσεων .....	72
Εικόνα 45: Διασπορά Λύσεων - Επιτάχυνση στην πλώρη - $V= 25$ kn.....	72
Εικόνα 46: Μεταβλητή σχεδίασης - καθ' ύψος μεταβολή σημείου της καμπύλης μεγίστου πλάτους.....	73
Εικόνα 47: Μεταβλητή σχεδίασης - Γωνία εισόδου του προφίλ στην πλώρη.....	73
Εικόνα 48: Μεταβλητή σχεδίασης - Μήκος Βολβού.....	74
Εικόνα 49: Μεταβλητή σχεδίασης - Γωνία εισόδου στην ίσαλο σχεδίασης.....	74
Εικόνα 50: Μεταβλητή σχεδίασης – Καθ' ύψος θέση του προφίλ του βολβού στην πλώρη..	75
Εικόνα 51: Μεταβλητή σχεδίασης - Καθ' ύψος θέση σημείο του FOS στην ίσαλο σχεδίασης	75
Εικόνα 52: Μεταβλητή σχεδίασης - Πλάτος σημείου της καμπύλης μεγίστου πλάτους στην πλώρη .....	76
Εικόνα 53: Μεταβλητή σχεδίασης – Καθ' ύψος θέση του fore peak .....	76
Εικόνα 54: Μεταβλητή σχεδίασης - Πλάτος σημείου στα 2/3 της καμπύλης μεγίστου πλάτους .....	77
Εικόνα 55: Μεταβλητή σχεδίασης - Καθ' ύψος θέσης σημείου στα 2/3 της καμπύλης μεγίστου πλάτους.....	77
Εικόνα 56: Μεταβλητή σχεδίασης - Θέση νομέα που απέχει 8% Lbr από την πλώρη.....	78
Εικόνα 57: Νομείς αρχικής γεωμετρίας (μαύρες καμπύλες) και βελτιστοποιημένης (κόκκινες καμπύλες) γεωμετρίας.....	80
Εικόνα 58: Διασπορά Λύσεων - Επιτάχυνση στην πλώρη - $V= 25$ kn.....	81
Εικόνα 59: Διασπορά Λύσεων – Αντίσταση Κυματισμού - $V= 25$ kn.....	81
Εικόνα 60: Μεταβλητή σχεδίασης – Καθ' ύψος θέση του fore peak .....	82
Εικόνα 61: Μεταβλητή σχεδίασης - Καθ' ύψος θέση σημείο του FOS στην ίσαλο σχεδίασης .....	82
Εικόνα 62: Μεταβλητή σχεδίασης - Θέση νομέα που απέχει 8% Lbr από την πλώρη.....	83
Εικόνα 63: Μεταβλητή σχεδίασης - καθ' ύψος μεταβολή σημείου της καμπύλης μεγίστου πλάτους.....	83
Εικόνα 64: Μεταβλητή σχεδίασης - Καθ' ύψος θέσης σημείου στα 2/3 της καμπύλης μεγίστου πλάτους.....	84
Εικόνα 65: Μεταβλητή σχεδίασης - Πλάτος σημείου στα 2/3 της καμπύλης μεγίστου πλάτους .....	84
Εικόνα 66: Μεταβλητή σχεδίασης - Γωνία εισόδου του προφίλ στην πλώρη.....	85

Εικόνα 67: Μεταβλητή σχεδίασης - Πλάτος σημείου της καμπύλης μεγίστου πλάτους στην πλώρη .....	85
Εικόνα 68: Μεταβλητή σχεδίασης - Γωνία εισόδου στην ίσαλο σχεδίασης.....	86
Εικόνα 69: Μεταβλητή Σχεδίασης - Καθ' ύψος θέση του προφίλ του βολβού στην πλώρη ...	86
Εικόνα 70: Μεταβλητή σχεδίασης - Μήκος Βολβού .....	87
Εικόνα 71: Νομείς αρχικής γεωμετρίας (μαύρες καμπύλες) και βελτιστοποιημένης (κόκκινες καμπύλες) γεωμετρίας (11 παράμετροι) .....	89
Εικόνα 72: Καμπύλη RAO επιτάχυνσης πατρικής (μαύρη) και βελτιστοποιημένης (κόκκινη) γάστρας.....	89
Εικόνα 73:: Διασπορά Λύσεων - RAO επιτάχυνσης στην πλώρη - $V=25$ kn.....	90
74: Διασπορά Λύσεων – Αντίσταση Κυματισμού - $V=25$ kn.....	91
Εικόνα 75: Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης με κριτήρια την αντίσταση κυματισμού και το μέγιστο RAO επιτάχυνσης στην πλώρη.....	91
Εικόνα 76: Λεπτομέρεια εικόνας 75 - Περιοχή βέλτιστων λύσεων.....	92
Εικόνα 77: Μεταβλητή σχεδίασης - Γωνία εισόδου του προφίλ στην πλώρη.....	92
Εικόνα 78: Μεταβλητή σχεδίασης - Γωνία εισόδου στην ίσαλο σχεδίασης.....	93
Εικόνα 79: Μεταβλητή Σχεδίασης - Καθ' ύψος θέση του προφίλ του βολβού στην πλώρη ...	93
Εικόνα 80: Μεταβλητή σχεδίασης - Θέση νομέα που απέχει 8% Lbp από την πλώρη.....	94
Εικόνα 81: Μεταβλητή σχεδίασης - Μήκος Βολβού .....	94
Εικόνα 82: Νομείς αρχικής γεωμετρίας (μαύρες καμπύλες) και βελτιστοποιημένης (κόκκινες καμπύλες) γεωμετρίας (11 παράμετροι) .....	96
Εικόνα 83: Καμπύλη RAO επιτάχυνσης πατρικής (μαύρη) και βελτιστοποιημένης (κόκκινη) γάστρας.....	96

## Παράρτημα Δ– Συγκεντρωτική λίστα πινάκων

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά πατρικού πλοίου και μοντέλου .....	48
Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά Πηδαλίου .....	48
Πίνακας 3: Κατάσταση Δοκιμών .....	48
Πίνακας 4: Δεδομένα κυματισμών.....	48
Πίνακας 5: Παράμετροι Σχεδίασης.....	54
Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά παραμετρικής γάστρας.....	55
Πίνακας 7: Αρχικές τιμές κριτηρίων βελτιστοποίησης.....	61
Πίνακας 8: Τιμές μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης κατακόρυφης επιτάχυνσης.....	70
Πίνακας 9: Τιμές μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης αντίστασης κυματισμού .....	79
Πίνακας 10: Τιμές πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης κατακόρυφης επιτάχυνσης (11 παράμετροι).....	88
Πίνακας 11: Τιμές πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης κατακόρυφης επιτάχυνσης (11 παράμετροι).....	95
Πίνακας 12: Επιλεγείσες γεωμετρίες από το μέτωπο Pareto .....	97
Πίνακας 13: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα των τριών βελτιστοποιήσεων.....	99
Πίνακας 14: Συγκριτικός πίνακας αντίστασης του υπο μελέτη πλοίου .....	100



## Βιβλιογραφία

1. An approximate Power Prediction Method, J. Holtrop, G.G.J. Mennen,. International Shpbuilding Progress. 1978.
2. A Fast Elitist Multi-Objective Genetic Algorithm: NSGA-II, Seshardi, Aravind.
3. Basic Ship Theory, K.J Rawson & E.C Tupper, Butterworth Heinemann, London, 2001
4. Frank Manual.
5. Friendship Systems, Friendship Framework User's Guide,2012
6. Friendship Systems, Friendship Framework User's Guide,2012.
7. Hull-form optimization in calm and rough water, Gregory J. Grigoropoulos, Dimitris Chalkias, Elsevier, 2009
8. Introduction in Ship Hydromechanics, Delft TU, 2002
9. Integrated Design and Multiobjective Optimization Approach to Ship Design, A. Papanikolaou et al
10. Full-scale unsteady RANS CFD simulations of ship behaviour and performance in head seas due to slow steaming , Tahsin Tezdogan , Dept of Naval Architecture, University of Strathclyde
11. M. Advances in Marine Hydrodynamics Volume 5. s.l., Ohkusu, Computational Mechanics Publications, 1996.
12. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial, Abdullah Konaka, David W. Coitb, Alice E. Smithc.
13. Principles of Naval Architecture. Vols. 2 Resistance, Propulsion and Vibration, Lewis, Edward V. , 1988.
14. Principles of Naval Architecture. Vol. 3 Motions in Waves and Controllability, Lewis, Edward V. , 1988
15. Resistance and propulsion characteristics of various commercial ships based on CFD results, J.E Choi et al., Elsevier. 2010
16. Ship motions and sea loads. s.l, Salvesen N., Tuck E.O. , Faltinsen O., Transactions SNAME. Vol. 78,1970.

17. Shipping Innovation, Niko Wijnolst & Tor Wergeland, IOS Press, Amsterdam 2009
18. SPP-86 , User's Manual, Report No: NAL-114-F-94, Lab. Ships and Marine Hydrodynamics, National Technical Univ. of Athens,1994.
19. SWAN 2 , User Manual : «Ship Flow Simulation in Calm Water and in Waves», Boston Marine Consulting Inc., Boston MA 02116, USA,2002.
20. The dynamics of marine craft. s.l., Lewandowski, E., World Scientific, 2004.
21. W. Oscillation of Cylinders in or Below the Free Surface of Deep Fluids, Frank, Rep. No. 2375, Washington, D.C. 1967.
22. [www.caeses.com/](http://www.caeses.com/).
23. [www.openeering.com](http://www.openeering.com). MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION AND GENETIC ALGORITHMS.
24. Zhu Z.Y., Leung K.S. An Enhanced Annealing Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization Problems.
25. Αντίσταση και Πρόωση Πλοίου, Πολίτη Γ.Κ, Αθήνα,2011
26. Δυναμική Πλοίου, Αθανασούλης Γ.Α., Μπελιμπασάκης Κ.Α, Αθήνα , 2012