

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



## Διπλωματική Εργασία

---

Βελτιστοποίηση γάστρας τύπου  
Tumblehome σε ήρεμο νερό και  
κυματισμούς.

Πιπεράκης Ελευθέριος

08114022

Επιβλέπων καθηγητής: Γρηγορόπουλος Γρηγόρης

Αθήνα, Φεβρουάριος 2022

# Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	1
1. Εισαγωγή.....	2
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	3
2.1 Αντίσταση.....	3
2.2 Δυναμική συμπεριφορά σε κυματισμούς.....	5
2.3 Γενετικοί Αλγόριθμοι.....	7
2.4 Ο αλγόριθμος NSGA-II.....	9
3. Εργαλεία.....	11
3.1 Το CAESES Friendship Framework.....	11
3.2 SWAN 2002.....	12
3.3 SPP-86.....	14
4. Παραμετρική Μοντελοποίηση.....	15
4.1 Γενικά στοιχεία.....	15
4.2 Πατρική γάστρα.....	16
4.3 Μεταβλητές σχεδίασης.....	18
4.4 Βασικές καμπύλες.....	20
4.5 Κατασκευή βολβού.....	23
4.6 Κατασκευή επιφανειών.....	26
4.7 Κατασκευή skeg.....	28
4.8 Σύγκριση με το πατρικό και περιορισμοί.....	30
4.9 Σύνδεση προγραμμάτων.....	31
5. Μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση.....	36
5.1 Αποτελέσματα πατρικής γάστρας.....	36
5.2 Βελτιστοποίηση ως προς την αντίσταση κυματισμού.....	38
5.3 Βελτιστοποίηση ως προς την κατακόρυφη επιτάχυνση.....	45
6. Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση.....	52
6.1 Βελτιστοποίηση με 10 παραμέτρους.....	52
6.2 Βελτιστοποίηση με 5 παραμέτρους.....	61
7. Συμπεράσματα.....	69
Παράρτημα Α: Λογισμικά και γλώσσες προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκαν.....	70
Παράρτημα Β: Λίστα σχημάτων.....	71
Παράρτημα Γ: Λίστα πινάκων.....	74
Βιβλιογραφία.....	75

## Πρόλογος

Κάθε σχεδιαστής ενός πλοίου οφείλει να βασίζεται τη σχεδίασή του σε ορισμένα χαρακτηριστικά ιδιαίτερης σημασίας, όπως απαιτήσεις υπάρχουν για τις κύριες διαστάσεις και το εκτόπισμα, τις απαιτήσεις ισχύος για πρόωση, τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά κλπ. Ανάλογα με τον τύπο του πλοίου διαφοροποιείται και η σημασία της κάθε απαίτησης.

Σε ένα πολεμικό πλοίο είναι αυξημένη η απαίτηση για την υλοποίηση μια σχεδίασης με τα καλύτερα δυνατά υδροδυναμικά χαρακτηριστικά. Δύο εκ των σημαντικότερων είναι η αντίσταση κυματισμού και η κατακόρυφη επιτάχυνση του πλοίου σε κυματισμούς.

Η αντίσταση κυματισμού είναι σημαντική, αφού η μείωσή της οδηγεί με μείωση της απαιτούμενης ισχύος πρόωσης και άρα σε μείωση της κατανάλωσης καυσίμου. Για την επίτευξη μιας περισσότερο οικονομικής ως προς το καύσιμο σχεδίασης απαιτείται η ελαχιστοποίηση της αντίστασης κυματισμού.

Η κατακόρυφη επιτάχυνση αφορά κυρίως το πλήρωμα του πλοίου και τις εργασίες που πρέπει να πραγματοποιηθούν πάνω σε αυτό. Αν η κατακόρυφη επιτάχυνση είναι μεγάλη σημαίνει πως το πλήρωμα δεν μπορεί εύκολα να εκτελεί εργασίες μέσα στο πλοίο, αλλά και σε πλοία που εξυπηρετούν ελικοδρόμια δεν είναι εύκολη η προσήλωσή τους.

Στην παρούσα μελέτη θα ασχοληθούμε με τα χαρακτηριστικά ενός πολεμικού πλοίου, το οποίο φέρει πλήρωμα, όπως και ελικοδρόμιο. Έτσι στη σχεδίασή του έχει σημαντικό ρόλο η κατακόρυφη επιτάχυνση.

Στόχος της μελέτης είναι η βελτίωση της σχεδίασης ως προς αυτά τα δύο μεγέθη, ώστε το πλοίο να αποκτήσει καλύτερα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά. Ωστόσο, δεν αρκεί να βρεθεί μία απλά καλύτερη σχεδίαση. Απαιτείται να βρεθεί η καλύτερη δυνατή σχεδίαση για όλους τους περιορισμούς που έχουμε βάση σχεδίασης. Η καλύτερη σχεδίαση θα βρεθεί μέσω της διαδικασίας της βελτιστοποίησης.

Στόχος της συγκεκριμένης εργασίας είναι να βρεθεί η καλύτερη δυνατή σχεδίαση, δηλαδή η σχεδίαση που θα μας δώσει τον καλύτερο συνδυασμό τιμών για τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά που αναφέραμε, χωρίς σημαντική απόκλιση ως προς την αρχική σχεδίαση.

Πιπεράκης Ελευθέριος

Αθήνα, Φεβρουάριος 2022

# 1. Εισαγωγή

Η βελτιστοποίηση είναι μια έννοια που άρχισε να βρίσκει εκτενή εφαρμογή στη ναυπηγική τη δεκαετία του 1980. Αν και τα μέσα που χρησιμοποιούνται έχουν εκσυγχρονιστεί από τότε, η φιλοσοφία της βελτιστοποίησης παραμένει η ίδια. Αυτή είναι η εξεύρεση εκείνης της σχεδίασης που θα παρέχει τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα ως προς κάποιο κριτήριο που ορίζει ο σχεδιαστής. Η διαδικασία της βελτιστοποίησης πραγματοποιείται κατά τα αρχικά στάδια της μελέτης και σχεδίασης του πλοίου και συνήθως αφορά τα υδροδυναμικά του χαρακτηριστικά.

Με το πέρασμα το χρόνων και την εξέλιξη των επιστημονικών μέσων έχει βελτιωθεί τόσο η ταχύτητα όσο και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από διαδικασίες βελτιστοποίησης. Ο παράγοντας που διαμόρφωσε τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται σήμερα ήταν η εκμετάλλευση των γενετικών αλγορίθμων κατά τη δεκαετία του 1990.

Στην παρούσα εργασία ασχοληθήκαμε με την παραμετρική μοντελοποίηση και την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση της γάστρας του ONR Tumblehome. Το ONRT είναι ένα πολεμικό πλοίο, το οποίο έχει την ιδιαιτερότητα της ανεστραμμένης πλώρης, δηλαδή, της πλώρης που πάνω από την ίσαλο πλεύσης γυρίζει προς τα πίσω, ενώ έχει τη δυνατότητα να φέρει και sonar στο βολβό του.

Αρχικά, υλοποιήσαμε την παραμετρική σχεδίαση του πλοίου, προσπαθώντας να δημιουργήσουμε μια κατασκευή, της οποίας το εκτόπισμα θα αποκλίνει κατά το ελάχιστο δυνατό από αυτό του πατρικού πλοίου. Η συγκεκριμένη σχεδίαση που θα δημιουργήσουμε θα είναι παραμετρική, δηλαδή θα εξαρτάται από τις τιμές ορισμένων μεταβλητών σχεδίασης που θα θέσουμε στη μελέτη μας. Μεταβάλλοντας τις συγκεκριμένες μεταβλητές θα μπορούμε να μεταβάλουμε συνολικά ολόκληρη τη γάστρα. Αυτή η παραμετρική σχεδίαση θα δημιουργηθεί μέσω του προγράμματος CAESSES FFW.

Στη συνέχεια θα εκτελέσουμε την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση. Τα κριτήρια ως προς τα οποία θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε τη σχεδίαση μας είναι η αντίσταση κυματισμού και η κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλώρη του σκάφους μας. Οι υπολογισμοί για τα δύο κριτήρια βελτιστοποίησης θα γίνουν σε εξωτερικά προγράμματα. Συγκεκριμένα, η αντίσταση κυματισμού θα υπολογισθεί από το SWAN 2002, ενώ η κατακόρυφη επιτάχυνση θα υπολογισθεί από τον κώδικα Frank. Τα εξωτερικά προγράμματα έχουμε τη δυνατότητα να τα συνδέσουμε μέσα στο CAESSES και να υλοποιήσουμε τη βελτιστοποίηση με τη χρήση του γενετικού αλγορίθμου NSGA II. Επειδή, η βελτιστοποίηση που θα εκτελέσουμε είναι πολυκριτηριακή, δηλαδή έχουμε δύο κριτήρια βελτιστοποίησης, δεν θα μπορεί να προκύψει μόλις μόνο μία καλύτερη λύση, αλλά θα προκύψει ένα σύνολο καλύτερων λύσεων.

Σκοπός της μελέτης, τελικά, είναι ο εντοπισμός αυτού του πλήθους των λύσεων που δίνουν τα βέλτιστα αποτελέσματα ως προς τα κριτήρια που έχουμε ορίσει.

## 2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

### 2.1 Αντίσταση

Η αντίσταση είναι η δύναμη που δρα αντίθετα από την ώση ενός πλοίου και είναι αυτή που πρέπει να υπερνικηθεί προκειμένου να ξεκινήσει η κίνησή του. Ο υπολογισμός της αντίστασης είναι σημαντικός για δύο λόγους. Πρώτον για την επιλογή της κατάλληλης προωστήριας εγκατάστασης, δηλαδή των κυρίων μηχανών και της έλικας. Και δεύτερον γιατί η μείωση της αντίστασης οδηγεί στη μείωση της απαιτούμενης ισχύος πρόωσης και άρα στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου.

Η αντίσταση ενός πλοίου οφείλεται στην επαφή του με το ρευστό που το περιβάλλει και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως τη μορφή της γάστρας, το εκτόπισμα και την ταχύτητα πλεύσης. Προκειμένου η ολική αντίσταση ( $R_T$ ) να μπορεί να εκτιμηθεί πιο σωστά, αναλύεται σε ορισμένες συνιστώσες, εκ των οποίων οι δύο κύριες είναι η αντίσταση συνεκτικότητας ( $R_V$ ) και η αντίσταση κυματισμού ( $R_W$ ).

Με τη σειρά της η αντίσταση συνεκτικότητας ( $R_V$ ) αναλύεται στην αντίσταση ( $R_F$ ) τριβής και στην αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας ( $R_{VP}$ ).

Για τον υπολογισμό της αντίστασης συνεκτικότητας θεωρούμε ότι σε κάθε σημείο επαφής της γάστρας με το επιπλέον ρευστό ασκείται μία δύναμη την οποία θεωρούμε συνισταμένη δύο επιμέρους δυνάμεων. Την κάθετη προς την επιφάνεια συνιστώσα την αποδίδουμε στην πίεση, ενώ την εφαπτομενική στη συνεκτικότητα. Η συνολική αντίσταση προκύπτει από την ολοκλήρωση όλων αυτών των στοιχειωδών δυνάμεων και την προβολή τους προς την κίνηση του πλοίου. (1)

Η αντίσταση τριβής προκύπτει από την ολοκλήρωση των εφαπτομενικών τάσεων στην επιφάνεια της γάστρας και προβολή τους στη διεύθυνση κίνησης του πλοίου. Εξαρτάται από το εμβαδόν της βρεχόμενης επιφάνειας της γάστρας, την τραχύτητα και τη γεωμετρία της, καθώς και από την ταχύτητα του πλοίου. Είναι αυτή που κυρίως διαμορφώνει τη συνολική αντίσταση σε χαμηλές ταχύτητες, ενώ όταν η ταχύτητα αυξάνεται εξακολουθεί να παίζει σημαντικό ρόλο, όμως αυξάνεται και η συνεισφορά και της αντίστασης πίεσης.

Με τη σειρά της η αντίσταση τριβής μπορεί να αναλυθεί σε τρεις επιμέρους συνιστώσες, την αντίσταση λείας επίπεδης πλάκας, την επιπρόσθετη αντίσταση λόγω τραχύτητας και την αντίσταση τριβής λόγω της καμπυλότητας του σώματος.

Η αντίσταση τριβής προσεγγίζεται από την αντίσταση επίπεδης πλάκας ίδιου εμβαδού επιφάνειας με τη βρεχόμενη επιφάνεια του πλοίου. Αυτή υπολογίζεται μέσω του συντελεστή αντίστασης τριβής ( $C_F$ ), ο οποίος με τη σειρά του υπολογίζεται από την καμπύλη της ITTC.

$$C_F = \frac{0.075}{\log_{10}(Re - 2)^2}$$

Η καμπύλη της ITTC δεν αντιστοιχεί την αντίσταση κάποιου πραγματικού πλοίου, αλλά είναι καμπύλη συσχετίσεως μοντέλου με πλοίο.

Η αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας προκύπτει από το πεδίο πιέσεων που διαμορφώνεται γύρω από τη γάστρα με την ολοκλήρωση των κάθετων τάσεων στην επιφάνεια της γάστρας και προβολή τους στη διεύθυνση κίνησης του πλοίου. Περιλαμβάνει ένα σύνολο συνιστωσών που εξαρτώνται από φαινόμενα συνεκτικότητας, μεταβολής της κατανομής των πιέσεων και αλληλεπίδρασης με την ελεύθερη επιφάνεια. Εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα του επιπλέοντος σώματος, από τη βρεχόμενη επιφάνεια και τη γεωμετρία του.

Η αντίσταση πίεσης λόγω συνεκτικότητας συνυπολογίζεται στην συνολική αντίσταση ως προσαύξηση στην αντίσταση τριβής με χρήση του διορθωτικού συντελεστή  $k$ .

$$C_V = (1 + k)C_F$$

Η κίνηση του πλοίου μέσα στο ρευστό δημιουργεί κυματισμούς, των οποίων η ένταση εξαρτάται από τον αριθμό Froude. Η ενέργεια που απαιτείται για τη δημιουργία αυτών των κυματισμών απορροφάται από την προωστήρια εγκατάσταση. Έτσι, η αντίσταση κυματισμού προκύπτει από την ενέργεια που δαπανάται από την προωστήρια εγκατάσταση του πλοίου για τη δημιουργία κυματισμών. κυριαρχεί κυρίως σε μεγάλες ταχύτητες και υψηλούς αριθμούς Froude. Εξαρτάται από δύο παράγοντες, την ταχύτητα του πλοίου και τη μορφή της γάστρας του. Είναι μέρος της υπόλοιπης αντίστασης και θεωρείται κυρίως αντίσταση πίεσης.

Ο υπολογισμός της αντίστασης κυματισμού υλοποιείται είτε πειραματικά με τη χρήση μοντέλων πλοίων, είτε μέσω υπολογιστικών προγραμμάτων που χρησιμοποιούν αριθμητικά μοντέλα.

Στη μελέτη μας θα υπολογίσουμε την αντίσταση κυματισμού μέσω του προγράμματος SWAN 2002, το οποίο βασίζεται στη θεωρία δυναμικού και η λειτουργία του εξηγηθεί πιο αναλυτικά παρακάτω.

Για τη βελτιστοποίηση της αντίστασης κυματισμού θα ληφθεί υπόψη η αντίσταση γυμνής γάστρας, δηλαδή της γάστρας χωρίς παρελκόμενα και χωρίς να συνυπολογιστεί η αλληλεπίδραση της προωστήριας εγκατάστασης με αυτή, αφού η συγκεκριμένη μελέτη παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα για την ελαχιστοποίηση της ολικής αντίστασης.

## 2.2 Δυναμική συμπεριφορά σε κυματισμούς

Η δυναμική συμπεριφορά ενός πλοίου σε θαλασσίους κυματισμούς αποτελεί τον δεύτερο σημαντικό παράγοντα όσον αφορά την επιχειρησιακή του απόδοση. Είναι μία παράμετρος με ιδιαίτερη σημασία, αφού οι αποκρίσεις μεγάλου πλάτους αυξάνουν την κατανάλωση καυσίμου, ενώ δυσχεραίνουν την εκτέλεση των εργασιών του πληρώματος. Για τους παραπάνω λόγους, ως δεύτερος αντικειμενικός στόχος της μελέτης ορίζεται ο περιορισμός της κατακόρυφης επιτάχυνσης.

Η αλληλεπίδραση του σκάφους με τους κυματισμούς εξαρτάται ασθενώς από συνεκτικά φαινόμενα, άρα η χρήση της θεωρίας δυναμικού εισάγει μικρότερο σφάλμα στους υπολογισμούς και επομένως είναι αυτή που θα χρησιμοποιηθεί για την μελέτη των δυναμικών αποκρίσεων του σκάφους. Η ακρίβεια που εισάγεται είναι ικανοποιητική για όλες τις κινήσεις του πλοίου, εκτός από το rolling, το οποίο εξαρτάται περισσότερο από φαινόμενα συνεκτικότητας. (2)

Οι θαλάσσιοι κυματισμοί αναλύονται σε μία τυχαία σύνθεση πλήθους αρμονικών κυματισμών. Αυτοί έχουν συγκεκριμένη συχνότητα, πλάτος και κατεύθυνση μετάδοσης και εξαρτώνται από το χώρο και το χρόνο. Η ανύψωση της επιφάνειας της θάλασσας σε έναν αρμονικό κυματισμό εκφράζεται μέσω μιας συνάρτησης δυναμικού. Το δυναμικό είναι μια βαθμωτή συνάρτηση πολλών μεταβλητών, η μερική παράγωγος της οποίας δίνει την ταχύτητα του ρευστού ως προς τη διεύθυνση που υπολογίζεται.

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

Όπου  $P(z)$  η συνάρτηση απομάκρυνσης,  $\omega$  η κυκλική συχνότητα και  $k$  ο κυματικός αριθμός  $k = \frac{\omega^2}{g}$ .

Για βαθύ νερό η συνάρτηση δυναμικού γίνεται:  $\Phi_w(x, z, t) = \frac{g \zeta_a}{\omega} e^{kz} \sin(kx - \omega t)$ .

Όπου  $\zeta_a$  το πλάτος του αρμονικού κυματισμού.

Το δυναμικό αυτό αφορά αδιατάρακτο κυματισμό, δηλαδή κυματισμό χωρίς την παρεμβολή πλωτού μέσου, όπως το σκάφος μας.

Από την κίνηση ενός σώματος στη θάλασσα προκύπτουν τρία διαφορετικά δυναμικά:

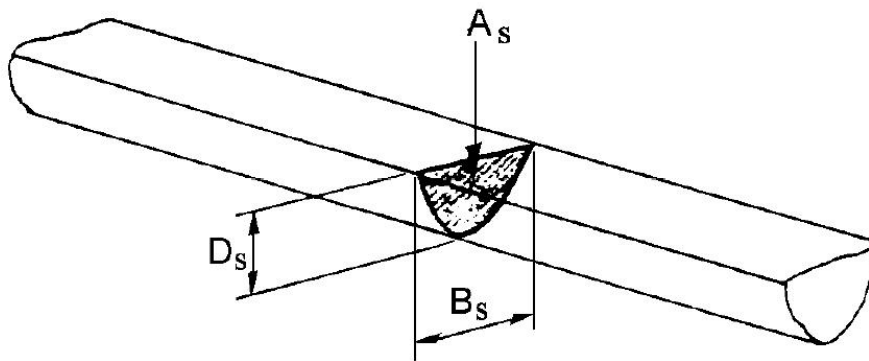
- Δυναμικό προσπίπτοντος κυματισμού, που αφορά τον αδιατάρακτο κυματισμό.
- Δυναμικό περίθλασης, που προκύπτει από στη σύγκρουση του κυματισμού με το στερεό σύνορο του σκάφους.
- Δυναμικό ακτινοβολίας, που αναφέρεται στους κυματισμούς που παράγονται από την κίνηση του σκάφους μέσα στο νερό.

Το δυναμικό θα πρέπει να πληροί τις παρακάτω συνθήκες:

- ✓ Εξίσωση συνέχειας ή Laplace
- ✓ Συνοριακή συνθήκη μη εισχώρησης στον πυθμένα
- ✓ Συνοριακή συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας
- ✓ Κινηματική οριακή συνθήκη στο στερεό σύνορο του σώματος
- ✓ Συνθήκη ακτινοβολίας
- ✓ Συμμετρική και αντισυμμετρική συνθήκη

Η αναπαράσταση των πεδιακών μεγεθών που περιγράφουν τη συμπεριφορά ενός σκάφους σε κυματισμούς γίνεται με τη χρήση συναρτήσεων δυναμικού. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν μελετάμε τη συμπεριφορά του σκάφους μέσω της θεωρίας λωρίδων, με την οποία υπολογίζονται μεγέθη σε εγκάρσιες τομές του σκάφους. Έτσι, με την κατά μήκος ολοκλήρωση των αποκρίσεων του σκάφους σε αυτές τις εγκάρσιες τομές υπολογίζεται η συνολική απόκριση του σκάφους στους κυματισμούς. Ο υπολογισμός των διδιάστατων αποκρίσεων επιλύεται με τη θεωρία του Frank.

Η θεωρία του Frank βασίζεται στο μετασχηματισμό των εγκάρσιων τομών σε κυλίνδρους μη κυκλικής διατομής με τη χρήση σύμμορφου μετασχηματισμού. Κάθε εγκάρσιο επίπεδο έχει το δικό του σύστημα συντεταγμένων, με τον άξονα  $x$  να εφάπτεται στην ίσαλο και τον άξονα  $y$  κάθετο σε αυτή με τα θετικά προς τα πάνω. Στη θεωρία του Frank το ρευστό θεωρείται ασυμπίεστο, αστρόβιλο και μη συνεκτικό, ενώ παραλείπονται και οι επιφανειακές τάσεις.



Σχήμα 1: Θεωρία λωρίδων



### 2.3 Γενετικοί Αλγόριθμοι

Η αξιολόγηση των λύσεων που παράγονται σε μια διαδικασία βελτιστοποίησης, καθώς και η συνεχής βελτίωση των παραγόμενων λύσεων, γίνονται με βάση έναν αλγόριθμο. Στην παρούσα εργασία, το πρόβλημα που καλούμαστε να επιλύσουμε είναι μια διαδικασία πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, η οποία απαιτεί τη διαμόρφωση ενός πλήθους βέλτιστων λύσεων, στο οποίο δίνει λύση η χρήση γενετικών αλγορίθμων. Με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων ξεχωρίζουμε ως βέλτιστες λύσεις εκείνες που παρουσιάζουν την καλύτερη επίδοση ως προς τουλάχιστον μία αντικειμενική συνάρτηση και τουλάχιστον ισοδύναμη με όλες τις υπόλοιπες. (3)

Η βιολογία και η φυσική εξέλιξη των ειδών μέσω της φυσικής επιλογής, της διασταύρωσης και της μετάλλαξης αποτέλεσε τη βάση για τη λειτουργία των γενετικών αλγορίθμων. Το χαρακτηριστικό που τους καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικούς είναι ότι απαιτούν ελάχιστες πληροφορίες για το πρόβλημα που καλούνται να επιλύσουν. Συγκεκριμένα, εξετάζουν μόνο την ποιότητα κάθε ομάδας παραμέτρων μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης. Λόγω της μεγάλης ευελιξίας που διαθέτουν λειτουργούν αποτελεσματικά ως “μετα-εργαλεία”, δηλαδή συστήματα υψηλού επιπέδου που έχουν τη δυνατότητα να δημιουργούν νέα συστήματα. (4)

Τα κύρια πλεονεκτήματα της χρήσης γενετικών αλγορίθμων είναι τα εξής:

- Υπολογιστική απλότητα, η οποία υποστηρίζεται από τη μαθηματικά θεμελιωμένη θεωρία των σχημάτων.
- Αποτελεσματικότητα, που πιστοποιείται τόσο πρακτικά από τη θεωρία των σχημάτων, όσο και πρακτικά από τη χρήση τους σε ένα μεγάλο εύρος επιστημονικών τομέων.
- Γενικότητα, δηλαδή η αποσύζευξή τους από τις λεπτομέρειες του προβλήματος που επιλύουν. Δεν δεσμεύονται δηλαδή από υποθέσεις που αφορούν το χώρο στον οποίο υλοποιείται η αναζήτηση.

Άλλες μέθοδοι αναζήτησης και βελτιστοποίησης που γενικά χρησιμοποιούνται είναι αυτές που βασίζονται σε μαθηματική ανάλυση, οι μέθοδοι απαρίθμησης, οι τυχαίες και οι υβριδικές μέθοδοι.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι υπερτερούν των παραπάνω μεθόδων με τους παρακάτω τρόπους:

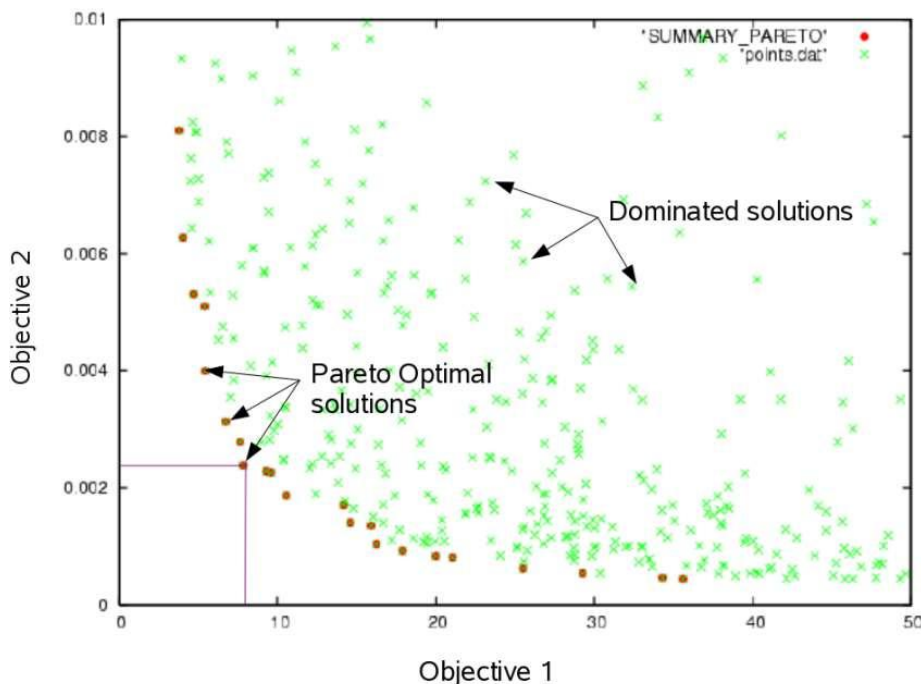
- Δεν επιδρούν σε αυτές καθαυτές τις παραμέτρους του προβλήματος, αλλά σε μια κωδικοποίηση αυτών κι έτσι μπορούν να μην επηρεάζονται από τις ακριβείς τιμές τους.
- Δεν εργάζονται σε ένα μόνο σημείο του χώρου, αλλά διατηρούν ένα πληθυσμό σημείων με τον οποίο ερευνούν το χώρο διεξοδικά. Έτσι αποφεύγουν την παγίδευση σε κάποιο τοπικό ελάχιστο και αναζητούν διαρκώς το ολικό.

- Χρησιμοποιούν απλές συναρτήσεις αποτίμησης και όχι πολύπλοκες παραγώγους.
- Χρησιμοποιούν πιθανοτικούς κανόνες μετάβασης κι όχι ντετερμινιστικούς.

Με βάση τα παραπάνω προκύπτει ότι κατάλληλη λύση για το πρόβλημα που καλούμαστε να λύσουμε είναι η χρήση ενός γενετικού αλγορίθμου. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι στις διάφορες μορφές γεωμετρίας που θα μελετήσουμε δεν επιθυμούμε να παγιδευτούμε σε κάποιο τοπικό ελάχιστο, αλλά θέλουμε να υπολογίσουμε το ολικό, ενώ μας εξυπηρετούν και ως προς την αποτίμηση των αποτελεσμάτων με τις συναρτήσεις που χρησιμοποιούν

Το αρχικό σύνολο λύσεων που παράγει ο γενετικός αλγόριθμος καλείται πληθυσμός, ενώ οι παράμετροι που τίθενται προς βελτιστοποίηση ονομάζονται γονιδιώματα. Με βάση τον αρχικό πληθυσμό, ο υπολογιστής παράγει ένα σύνολο τυχαίων συνδυασμών και μεταλλάξεων των γονιδιωμάτων. Από τις λύσεις που προκύπτουν επιλέγονται οι καλύτερες, οι οποίες θα συνεχίσουν να εξελίσσονται και να μεταλλάσσονται. Έτσι γίνεται σαφές ότι όσο περνούν οι γενιές και επαναλαμβάνεται ο αλγόριθμος προκύπτουν όλο και καλύτερες λύσεις.

Οι δύο αντικειμενικές συναρτήσεις που χρησιμοποιούμε περιγράφουν δύο διαφορετικά χαρακτηριστικά της υδροδυναμικής επίδοσης της γάστρας. Αυτές αποτελούν τους άξονες ενός ορθογωνίου συστήματος συντεταγμένων, στο οποίο απεικονίζεται το σύνολο των λύσεων - σημείων και από το οποίο προκύπτει η συνοριακή καμπύλη βέλτιστων γεωμετριών (Pareto). Από αυτήν την καμπύλη επιλέγουμε έπειτα τη βέλτιστη γεωμετρία με βάση τη σημαντικότητα καθενός εκ των δύο κριτηρίων για τη μελέτη μας.



Σχήμα 2: Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης

## 2.4 Ο αλγόριθμος NSGA-II

Στη συγκεκριμένη διαδικασία βελτιστοποίησης της γάστρας θα χρησιμοποιηθεί ο γενετικός αλγόριθμος NSGA-II (NonDominated Sorting Genetic Algorithm II), ο οποίος αποτελεί εξέλιξη του NSGA.

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος εξυπηρετεί ιδιαίτερα στο πρόβλημά μας αφού εμπεριέχεται στο λογισμικό CAESSES FFW, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση και τη σύνδεση όλων των προγραμμάτων και των διαδικασιών και θα αναλυθεί διεξοδικά παρακάτω.

Η παρουσία δύο κριτηρίων βελτιστοποίησης οδηγεί στην ανάγκη τα συμπεράσματα να εξαχθούν ως ένα σύνολο βέλτιστων λύσεων και όχι ως μια μοναδική βέλτιστη λύση. Αυτό θα υλοποιηθεί με τη χρήση του μετώπου pareto που αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Αναλυτικά η επαναληπτική διαδικασία που ακολουθεί ο NSGA II:

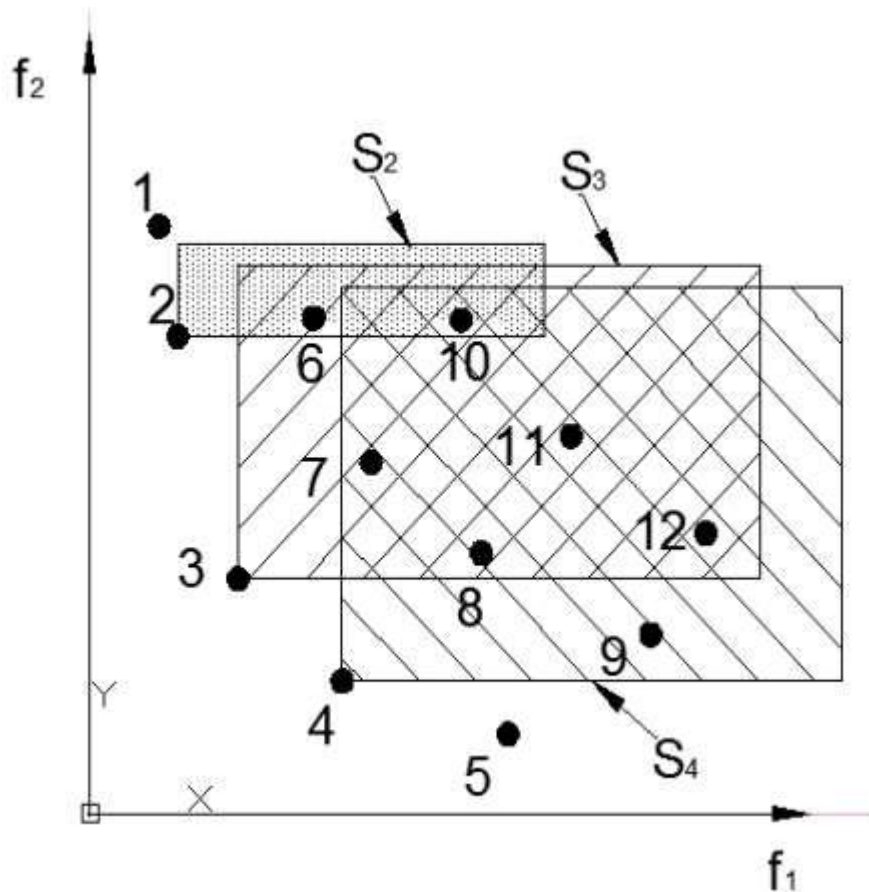
- Παραγωγή ενός πληθυσμού αρχικών σχεδιάσεων.
- Παραγωγή ενός νέου ισάριθμου πληθυσμού, που προέρχεται από τις αρχικές σχεδιάσεις και αποτελεί απόγονό τους
- Κατάταξη όλων των σχεδιάσεων σε επίπεδα σύμφωνα με την υπεροχή τους .
- Κατάταξη των σχεδιάσεων κάθε επιπέδου με φθίνουσα σειρά ως προς την απόσταση από τις γειτονικές τους.
- Παραγωγή μιας νέας γενιάς σχεδιάσεων, ισάριθμη με τον αρχικό πληθυσμό, με βάση την κατάταξη τους.
- Επανάληψη των βημάτων 2 ως 5.

Για την κατάταξη μιας σχεδίασης ως προς την υπεροχή της απέναντι σε άλλες και την απόστασή της από γειτονικές σχεδιάσεις, αναπαρίστανται όλες σε κοινό επίπεδο με άξονες τις τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων. Μία σχεδίαση λέμε ότι υπερέχει έναντι μιας άλλης όταν υπερτερεί σε μία αντικειμενική συνάρτηση και είναι ισοδύναμη ή καλύτερη στις υπόλοιπες συναρτήσεις.

Οι σχεδιάσεις κατατάσσονται σε επίπεδα μέσω επαναλαμβανόμενων ελέγχων υπεροχής της καθεμιάς. Συγκεκριμένα:

- Το πρώτο επίπεδο αποτελείται από τις σχεδιάσεις έναντι των οποίων δεν υπάρχουν άλλες που να υπερτερούν.
- Το δεύτερο επίπεδο αποτελείται από σχεδιάσεις απέναντι στις οποίες υπερέχει μία και μόνο σχεδίαση.
- Επαναληπτικά και με αντίστοιχο τρόπο δημιουργούνται όλα τα επίπεδα έως ότου να καταταχθούν όλες οι σχεδιάσεις.

Στο παρακάτω σχήμα αναπαρίσταται η κατάταξη δώδεκα πιθανών λύσεων ενός προβλήματος σε επίπεδο με άξονες δύο αντικειμενικές συναρτήσεις.



Σχήμα 3: Κατάταξη λύσεων στον NSGA II

Αφού ολοκληρωθεί η κατάταξη των σχεδιάσεων σε επίπεδα, ξεκινά η κατά φθίνουσα σειρά κατάταξη των σχεδιάσεων κάθε επιπέδου, ανάλογα με την απόστασή τους από τις υπόλοιπες λύσεις. Με τη δεύτερη αυτή διαδικασία κατάταξης επιτυγχάνεται ένα μεγαλύτερο εύρος λύσεων στο επίπεδο που ορίζουν οι αντικειμενικές συναρτήσεις, προσδίδοντας στον NSGA II ένα σημαντικό πλεονέκτημα έναντι προγενέστερων μεθόδων, όπου το εύρος καθοριζόταν από μία ορισμένη από το χρήστη τιμή διασποράς.

Σημειώνεται ότι στο τελευταίο επίπεδο της κατάταξης επιλέγεται ένα πλήθος λύσεων που ισούται με τον αριθμό των λύσεων της πρώτης γενιάς, ενώ οι λύσεις που περισσεύουν απορρίπτονται ως χειρότερες λύσεις.

## 3. Εργαλεία

### 3.1 To CAESES Friendship Framework

Το CAESES FFW είναι ένα λογισμικό που παρέχει ένα ολοκληρωμένο σύνολο δυνατοτήτων στον σχεδιαστή. Με τη χρήση του συγκεκριμένου προγράμματος προχωρήσαμε στην αρχική συμβατική σχεδίαση και την παραμετρική μοντελοποίηση του πλοίου μας, ενώ στη συνέχεια είχαμε τη δυνατότητα να συνδέσουμε με αυτό εξωτερικά προγράμματα για να τρέξουμε τη διαδικασία της βελτιστοποίησης. (5,6)

Για την παραμετρική μοντελοποίηση ενός πλοίου, ο σχεδιαστής έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει πλήθος διαφορετικού τύπου σημείων, καμπυλών και επιφανειών. Με αυτά μπορεί να κατασκευάσει μία γάστρα, η οποία θα μεταβάλλεται με τον τρόπο που ο ίδιος επιθυμεί ανάλογα με τις διάφορες τιμές που θα παίρνουν οι παράμετροι.

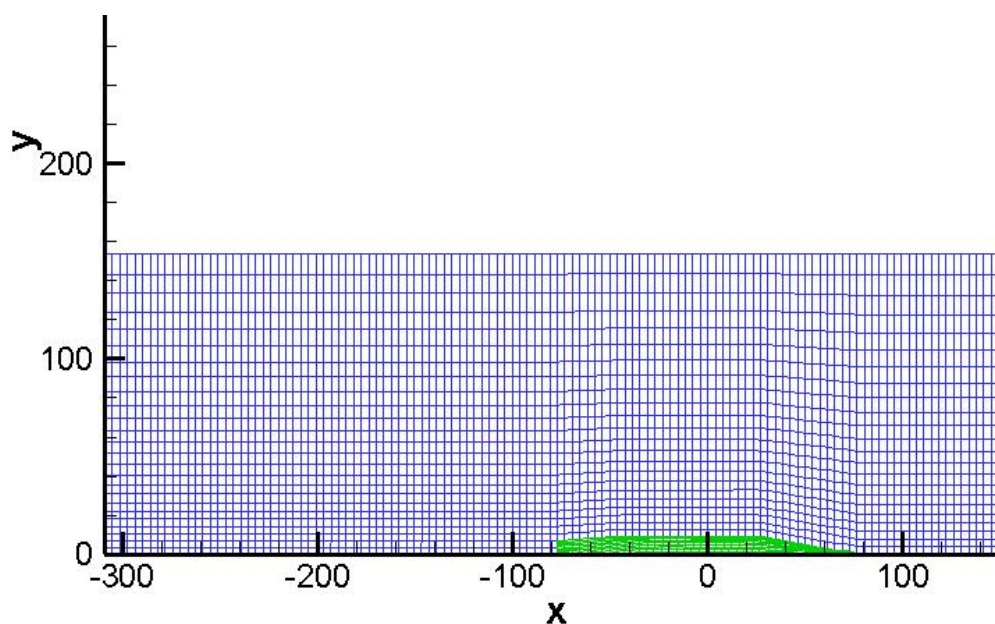
Για τη διαδικασία της βελτιστοποίησης ως προς διάφορα κριτήρια, ο σχεδιαστής ορίζει:

- Τις μεταβλητές σχεδίασης, καθώς και το εύρος των τιμών που μπορούν να πάρουν.
- Τα κριτήρια ως προς τα οποία θα γίνει η κατάταξη των βέλτιστων λύσεων.
- Περιορισμούς σε συγκεκριμένα μεγέθη στα οποία δεν επιθυμεί να υπάρξει μεγάλη μεταβολή, για παράδειγμα το εκτόπισμα, ώστε λύσεις που ξεφεύγουν από την επιθυμητή σχεδίαση να απορρίπτονται.
- Τον αλγόριθμο με βάση τον οποίο θα εκτελεστεί η διαδικασία.
- Τα αρχεία που θα εξάγει στα εξωτερικά προγράμματα, καθώς και τα αρχεία των αποτελεσμάτων τα οποία θα εισαχθούν εκ νέου στο CAESES FFW για να αξιολογηθούν από αυτό.

### 3.2 SWAN 2002

Το υπολογιστικό πρόγραμμα **SWAN 2002**(Ship Wave ANalysis) μας εξυπηρετεί στην ανάλυση της ροής γύρω από το πλοίο, το οποίο είτε παραμένει ακίνητο είτε πλέει σε ρευστό απείρου ή πεπερασμένου βάθους. Το SWAN 2002 επιλύει τη σταθερή και τη μη σταθερή ροή στην ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού γύρω από το σκάφος με τη χρήση της θεωρίας δυναμικού και με τη βοήθεια τρισδιάστατων τετραπλεύρων στα οποία διανέμονται πηγές Rankine. (7)

Στην παρακάτω εικόνα αναπαρίσταται η κατανομή των τετραπλεύρων στο στερεό σύνορο της γάστρας και στην ελεύθερη επιφάνεια.



Σχήμα 4: Δημιουργία επιφανειών από το SWAN 2002

Το SWAN 2002 απαιτεί από το χρήστη την εισαγωγή δύο αρχείων τα οποία θα του δίνουν όλα τα απαραίτητα στοιχεία για να μπορέσει να περιγράψει το στερεό σύνορο της γάστρας που είναι βυθισμένη, καθώς και την ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού. Η πυκνότητα και η έκταση του πλέγματος των τετραπλεύρων της ελεύθερης επιφάνειας καθορίζεται από το χρήστη και βάσει αυτών το πρόγραμμα ορίζει το χρονικό βήμα εκτέλεσης των υπολογισμών. Αναγκαίες συνθήκες για την επιτυχή λειτουργία του προγράμματος είναι η συμμετρία της γάστρας κατά το διάμηκες, καθώς και η ύπαρξη πρύμνης αποκλειστικά τύπου transom ή cruiser.

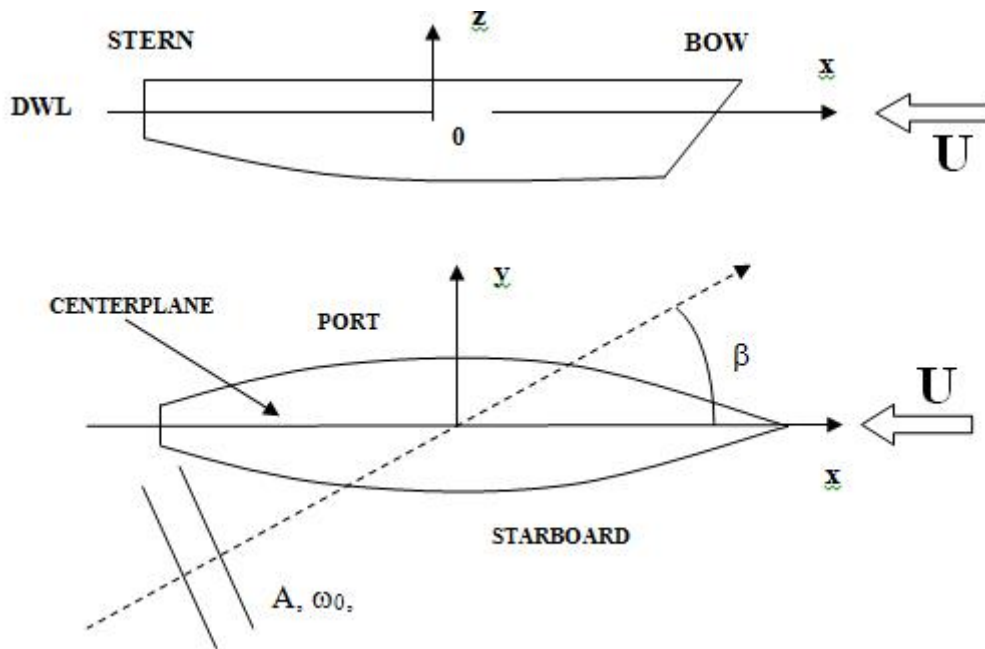
#### ➤ .pln

Το αρχείο .pln περιλαμβάνει το σύνολο των καμπυλών που θα χρειαστεί το SWAN 2002 για την περιγραφή της γάστρας. Συγκεκριμένα περιέχει σταθμούς τύπου A για την περιγραφή του προφίλ πλώρης και πρύμνης στο επίπεδο x-z και σταθμούς τύπου B για την περιγραφή του συνόλου των νομέων στο επίπεδο y-z.

➤ .inp

Το αρχείο αυτό περιλαμβάνει όλα τα απαιτούμενα για τους υπολογισμούς στοιχεία, τα οποία μπορεί ο χρήστης να δώσει και μεμονωμένα μέσα από το interface του προγράμματος.

Παρακάτω παρουσιάζεται το σύστημα συντεταγμένων με βάση το οποίο γίνεται η κατασκευή της γεωμετρίας στο SWAN 2. Συγκεκριμένα η αρχή των αξόνων βρίσκεται στο μέσον του πλοίου, στο επίπεδο της ισάλου, με το x να είναι θετικό προς τα πλώρα, το y προς την port side και το z προς τα πάνω.



Σχήμα 5: Σύστημα συντεταγμένων στο SWAN 2002

Το SWAN 2 εκτελείται με τη χρήση τριών διαφορετικών υποπρογραμμάτων, με τη λειτουργία του καθενός να εξηγείται αναλυτικά παρακάτω.

- Αρχικά εκτελείται το **makessg.exe**, το οποίο παίρνει ως αρχεία εισόδου τα *.pln* και *.inp* και παράγει τη γεωμετρία του πλοίου μέσω panels στα αρχεία *.ssg* και *.geo*.
- Έπειτα τρέχει το αρχείο **setup.exe**, το οποίο καταstrώνει τις εξισώσεις που τεθούν προς επίλυση. Λαμβάνει ως εισόδους τα αρχεία *.pln*, *.inp* και *.ssg* και παράγει αρχεία *.jou*.
- Τέλος, εκτελείται το υποπρόγραμμα **solve.exe**, το οποίο επιλύει τις παραπάνω εξισώσεις, δίνοντας στοιχεία για την αντίσταση και το πεδίο κυματισμών. Εδώ εισάγονται τα αρχεία *.pln*, *.inp*, *.ssg*, *.jou* και εξάγονται τα *.out*, *.wp* και *.wke*.

Για την επίλυση του προβλήματος υπολογισμού της αντίστασης του πλοίου σε μια συγκεκριμένη ταχύτητα τα παραπάνω υποπρογράμματα εκτελούνται επαναληπτικά μέχρις ότου να συγκλίνουν οι τιμές της παράλληλης βύθισης και της διαμήκους διαγωγής του πλοίου.

### 3.3 SPP-86

Το SPP-86 είναι ένα πρόγραμμα το οποίο βασίζεται στη θεωρία λωρίδων προκειμένου να υπολογίσει τις δυναμικές αποκρίσεις των διάφορων σχεδιάσεων κατά την πλεύση. Πρακτικά το συγκεκριμένο πρόγραμμα υπολογίζει το διδιάστατο δυναμικό για τις κινήσεις heave, sway και roll, με τη χρήση των συντεταγμένων του περιγράμματος μιας διατομής της γάστρας. (8)

Το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιεί βρίσκεται στο εγκάρσιο επίπεδο και περιλαμβάνει:

- Τον άξονα x εφαπτομενικό στην ίσαλο
- Τον άξονα y κάθετο στην ίσαλο και θετικό προς τα πάνω

Το περίγραμμα του νομέα βρίσκεται στα αρνητικά y και είναι συμμετρικό προς αυτόν. Η πρόσθετη μάζα και η απόσβεση προκύπτουν με την ολοκλήρωση κατά μήκος του πλοίου.

Για να εφαρμοστεί η θεωρία του Frank θεωρούμε: (9)

- Το ρευστό ασυμπίεστο και ατριβές
- Αμελητέες επιφανειακές τάσεις
- Αστρόβιλο υδροδυναμικό πεδίο
- Μικρές κινήσεις του πλοίου



## 4. Παραμετρική Μοντελοποίηση

### 4.1 Γενικά στοιχεία

Ως παραμετρική μοντελοποίηση αναφέρουμε την κατασκευή μιας γεωμετρικής αναπαράστασης η μορφή της οποίας επηρεάζεται από αλληλοεξαρτώμενες παραμέτρους. Η διαφορά της με μια συμβατική σχεδίασης έγκειται στο γεγονός ότι στη συμβατική σχεδίαση όλα τα επιμέρους χαρακτηριστικά του πλοίου είναι σταθερά, ενώ στην παραμετρική έχουν τη δυνατότητα να μεταβάλλονται ανάλογα με τις απαιτήσεις του σχεδιαστή.

Σε μία παραμετρική σχεδίαση αρχικά ορίζονται οι καμπύλες που αποτελούν όρια του πλοίου, όπως τα CPC, Waterline και Deckline. Αυτές καμπύλες οριοθετούνται από ορισμένα παραμετρικά σημεία, σημεία, δηλαδή, που τουλάχιστον μία από τις συντεταγμένες τους είναι παράμετρος της σχεδίασης. Στη συνέχεια σχεδιάζονται οι νομείς και τέλος προκύπτουν οι επιφάνειες που συνολικά αποτελούν τη γάστρα.

Επειδή η συνολική γάστρα που δημιουργείται αποτελείται από πολλές διαφορετικές καμπύλες κι επιφάνειες, απαιτούμε στα σημεία που αυτές ενώνονται να υπάρχει μία κάποιας τάξης συνέχεια. Συνήθως απαιτείται συνέχεια μηδενικής, πρώτης ή δεύτερης τάξης.

## 4.2 Πατρική γάστρα

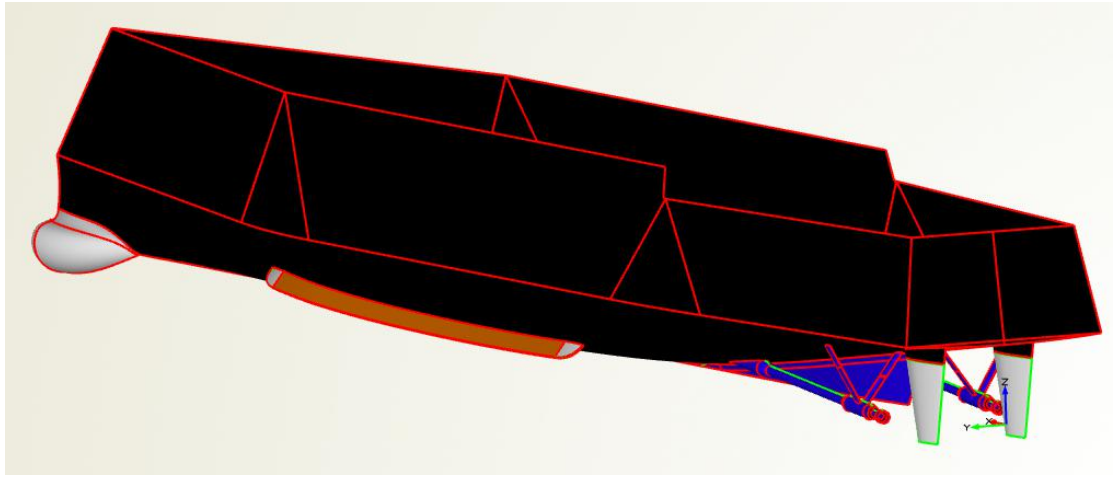
Η διαδικασία της σχεδίασης ξεκινά από τη συλλογή των βασικών στοιχείων της πατρικής γάστρας. Το ONRT είναι ένα πολεμικό πλοίο που διαθέτει ως ιδιαιτερότητα πλώρη της μορφής tumblehome, μία πλώρη δηλαδή που στο βυθισμένο της τμήμα διαθέτει βολβό που περιέχει sonar, ενώ στο αβύθιστο τμήμα η πλώρη δεν ανοίγει προς τα μπροστά, αλλά κλείνει προς τα πίσω. Από την ιστοσελίδα του National Maritime Research Institute (NMRI), που έχει μελετήσει τη συγκεκριμένη σχεδίαση, αντλήθηκαν τα βασικά σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του πειραματικού μοντέλου, αλλά και της full scale γάστρας, καθώς και ένα αρχείο iges που περιλαμβάνει τη γεωμετρική αναπαράσταση του πλοίου. (10)

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα κύρια χαρακτηριστικά του ONRT.

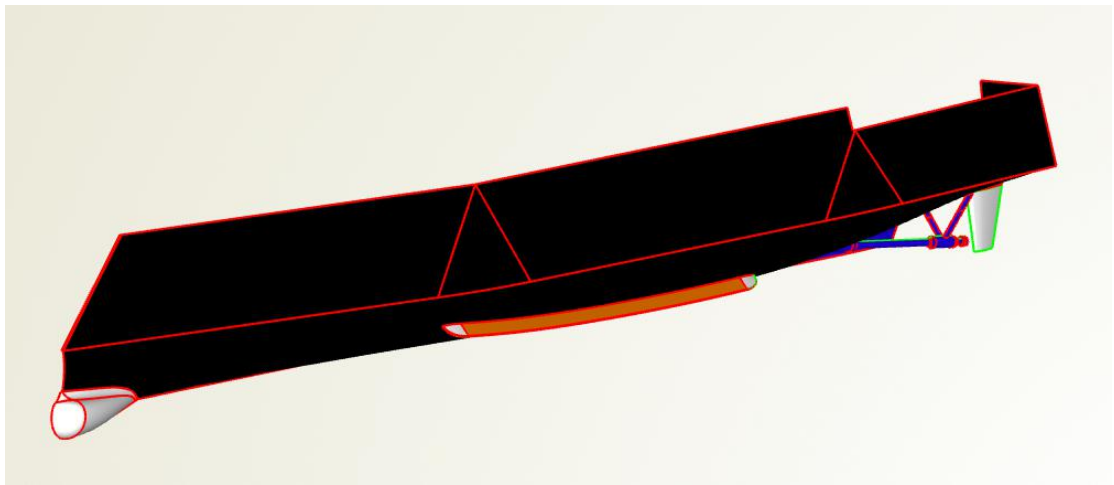
Name		ONR Tumblehome	
Particulars		Model	Ship
Length of waterline	$L_{WL}$ (m)	3.147	154.0
Maximum beam of waterline	$B_{WL}$ (m)	0.384	18.78
Depth	D (m)	0.266	14.5
Draft	T (m)	0.112	5.494
Displacement	$\Delta$	72.6 kg	8507 ton
Wetted surface area (fully appended)	$S_0$ (m <sup>2</sup> )	1.5	NA
Block coefficient (CB)	$\nabla / (L_{WL} B_{WL} T)$	0.535	0.535
LCB	LCB (m) aft of FP	1.625	NA
Vertical Center of Gravity (from keel)	KG (m)	0.156	7,652
Metacentric height	GM (m)	0.0422	NA
Moment of Inertia	$K_{xx}/B$	0.444	0.444
Moment of Inertia	$K_{yy}/L_{WL}, K_{zz}/L_{WL}$	0.246	0.25
Propeller diameter	$D_p$ (m)	0.1066	NA
Propeller center, long. location (from FP)	$x/L_{WL}$	0.9267	NA
Propeller center, lateral location (from CL)	$\pm y/L_{WL}$	0.02661	NA
Propeller center, vert. location (below WL)	$-z/L_{WL}$	0.03565	NA
Propeller shaft angle (downward positive)	$\epsilon$ (deg.)	5	NA
Froude number	$F_n$	0.2	0.2
Speed	U (m/s)	1.11	7.765
Propeller rotation direction (view from stern)		inward	inward
Maximum rudder rate		35.0 deg./s	

Πίνακας 1: Κύρια χαρακτηριστικά ONRT Tumblehome

Στο παρακάτω σχέδιο παρουσιάζεται η γεωμετρία του πατρικού πλοίου, όπως διαμορφώθηκε ώστε να εξυπηρετεί τις σχεδιαστικές μας απαιτήσεις, καθώς και τις απαιτήσεις σύνδεσής του με τα εξωτερικά προγράμματα. Αρχικά περιστρέψαμε και μετατοπίσαμε τη γάστρα για να ταιριάζει στο σύστημα συντεταγμένων που απαιτούν οι υπολογισμοί μας και έπειτα τη μετατρέψαμε από την κλίμακα μοντέλου σε πλήρη κλίμακα πλοίου.



Σχήμα 6: Πατρική γάστρα του ONRT (όψη 1)



Σχήμα 7: Πατρική γάστρα του ONRT (όψη 2)

### 4.3 Μεταβλητές σχεδίασης

Σε μια παραμετρική σχεδίαση απαιτείται να καθοριστούν εξαρχής οι μεταβλητές σχεδίασης, καθώς με βάση αυτές ορίζονται τα σημεία και οι καμπύλες που θα δημιουργήσουμε και πάνω στις οποίες θα βασιστεί η τελική κατασκευή των επιφανειών του πλοίου.

Η επιλογή των παραμέτρων κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης μίας γάστρας γίνεται με βάση την εμπειρία που υπάρχει από εργαστηριακές μετρήσεις. Έτσι, επιλέγονται ως παράμετροι μεγέθη τα οποία επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά του πλοίου. Αυτά εμφανίζονται κυρίως στην πλώρη και στην πρύμνη, όπου είναι πιο έντονα τα φαινόμενα συνεκτικότητας. Οι παράμετροι που επιλέγουμε, λοιπόν, θα χωριστούν σε δύο κατηγορίες, σε αυτές που αφορούν το βολβό και την κατασκευή του, και εκείνες που αφορούν την υπόλοιπη γάστρα.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι παράμετροι που έχουμε επιλέξει να χρησιμοποιήσουμε. Ως τιμή πατρικού ορίζουμε την τιμή του συγκεκριμένου μεγέθους στην αρχική σχεδίαση του πλοίου, ενώ οι ακραίες τιμές έχουν επιλεγεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να παρουσιάζουν μία απόκλιση από τις αρχικές που θα γίνεται αισθητή στον υπολογισμό των κριτηρίων βελτιστοποίησης, χωρίς όμως να παρουσιάζονται ακραίες σχεδιαστικές διαφορές.

Μεταβλητή	Κατώτατη τιμή	Τιμή Πατρικού	Ανώτατη τιμή	Μονάδες
max_beam	9	9.39	9.8	m
deadrise_angle	0	0.058	6	°
transom_max_y	6.7	6.89	7.2	m
entrance_of_wl_angle	8.5	9.509	10.5	°
skeg_z	3.868	3.868	4.2	m

Πίνακας 2: Τιμές μεταβλητών σχεδίασης γάστρας

Η περιγραφή των παραπάνω μεταβλητών έχει ως εξής:

- max\_beam: Προφανώς ορίζει το μέγιστο ημιπλάτος του πλοίου
- deadrise\_angle: Ορίζει τη γωνία ανύψωσης πυθμένα, δηλαδή τη γωνία που σχηματίζει ο καθρέφτης της πρύμνης με τον άξονα y στο επίπεδο yz
- transom\_max\_y: Ορίζει το μέγιστο ημιπλάτος του καθρέφτη.
- entrance\_of\_wl\_angle: Είναι η γωνία εισόδου πλώρης, που περιγράφεται από τη γωνία που σχηματίζει η ίσαλος με τον άξονα x στο fore peak του πλοίου.
- skeg\_z: Περιγράφει το ύψος του ανώτατου σημείου του skeg

Μεταβλητή	Κατώτατη τιμή	Τιμή Πατρικού	Ανώτατη τιμή	Μονάδες
x_bulb_fwd	155.1	155.57	157	m
z_bulb_fwd	-0.3	-0.072	0.15	m
x_bulb_max_beam	152	153.545	154	m
y_bulb_max_beam	2	2.112	2.4	m
z_bulb_bottom	-3	-2.108	-2	m

Πίνακας 3: Τιμές μεταβλητών σχεδίασης βολβού

Η λειτουργία αυτών των μεταβλητών περιγράφεται ως εξής

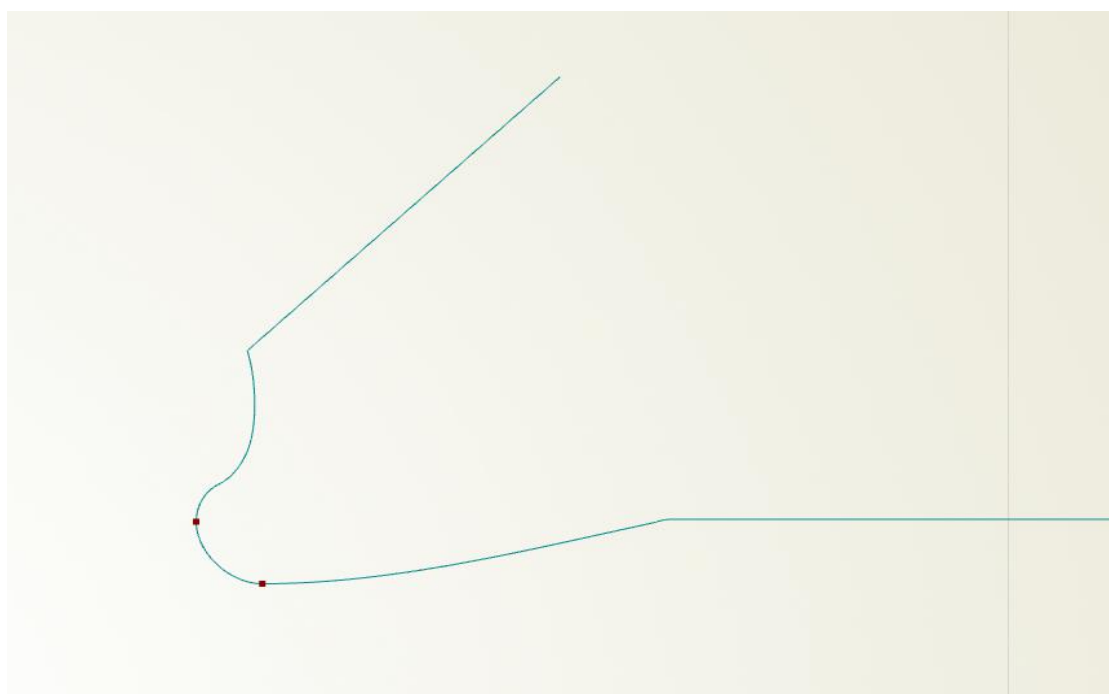
- x\_bulb\_fwd: Ορίζει τη διαμήκη θέση του προωραίου σημείου του βολβού
- z\_bulb\_fwd: Ορίζει το ύψος του προηγούμενου σημείου
- x\_bulb\_max\_beam: Ορίζει τη διαμήκη θέση στην οποία παρουσιάζεται το μέγιστο πλάτος του βολβού
- y\_bulb\_max\_beam: Ορίζει το μέγιστο πλάτος του βολβού
- z\_bulb\_bottom: Ορίζει το ύψος του κατώτατου σημείου του προφίλ του βολβού

#### 4.4 Βασικές καμπύλες

Η παραμετρική σχεδίαση ξεκινά με την κατασκευή των βασικών καμπυλών που αποτελούν τα φυσικά όρια του πλοίου.

Συγκεκριμένα, κατασκευάζονται οι:

- CPC(Center Plane Curve), η οποία αποτελείται από το προφίλ της πλώρης και της πρύμνης. Η καμπύλη αυτή περιλαμβάνει ένα σύνολο από γραμμές (Lines) και f-splines, οι οποίες παρουσιάζουν συνέχεια εφαπτομενικού διανύσματος στα σημεία που ενώνονται. Αρχικά, υπολογίσαμε όλα τα σημεία, παραμετρικά και σταθερά, με βάση τα οποία δημιουργούνται και ενώνονται οι καμπύλες που θέλουμε να κατασκευάσουμε. Για να προκύψουν τα συγκεκριμένα σημεία πήραμε δεδομένα από το iges αρχείο της πατρικής γάστρας. Η CPC εξαρτάται από τέσσερις μεταβλητές σχεδίασης, τις `skeg_z`, `x_bulb_fwd`, `z_bulb_fwd` και `z_bulb_bottom`.



Σχήμα 8: Προφίλ πλώρης με παραμετρικά σημεία

- Waterline, η οποία είναι η ίσαλος γραμμή του πλοίου στο βύθισμα σχεδίασης. Αυτή δημιουργήθηκε με αντίστοιχο τρόπο με τη CPC και εξαρτάται από τρεις μεταβλητές σχεδίασης, τις `max_beam`, `transom_max_y` και `entrance_of_wl_angle`.



Σχήμα 9: Κάτοψη της waterline με παραμετρικό σημείο

- Deckline, η οποία είναι η καμπύλη του ανώτερου καταστρώματος του πλοίου, δημιουργείται με αντίστοιχο τρόπο με τις παραπάνω, χωρίς όμως να εξαρτάται από κάποια μεταβλητή σχεδίασης, αφού βρίσκεται αρκετά πάνω από την ίσαλο πλεύσης και άρα δεν παίζει κάποιο ρόλο στον υπολογισμό της αντίστασης κυματισμού και της κατακόρυφης επιτάχυνσης που είναι τα μεγέθη που απασχολούν τη μελέτη μας.



Σχήμα 10: Προφίλ των συνοριακών καμπυλών του πλοίου



Σχήμα 11: Κάτοψη των συνοριακών καμπυλών του πλοίου



Σχήμα 12: Γενική όψη των συνοριακών καμπυλών του πλοίου

Πέρα από αυτές τις καμπύλες δημιουργήθηκαν και ορισμένοι νομείς, προκειμένου να πάρει η γάστρα μία μορφή παρόμοια με την πατρική. Δεδομένης της σχετικά απλής γεωμετρίας της γάστρας απαιτήθηκε η κατασκευή μόνο πέντε νομέων με καμπύλες f-spline. Σε αυτές ορίσαμε τιμές στο εφαπτομενικό διάνυσμα της αρχής και του τέλους τους, τέτοιες ώστε η μορφή τους να συμπίπτει με τη μορφή των νομέων του πατρικού πλοίου στις αντίστοιχες διαμήκεις θέσεις.



Σχήμα 13: Νομείς αρχικής σχεδίασης στο επίπεδο  $y-z$

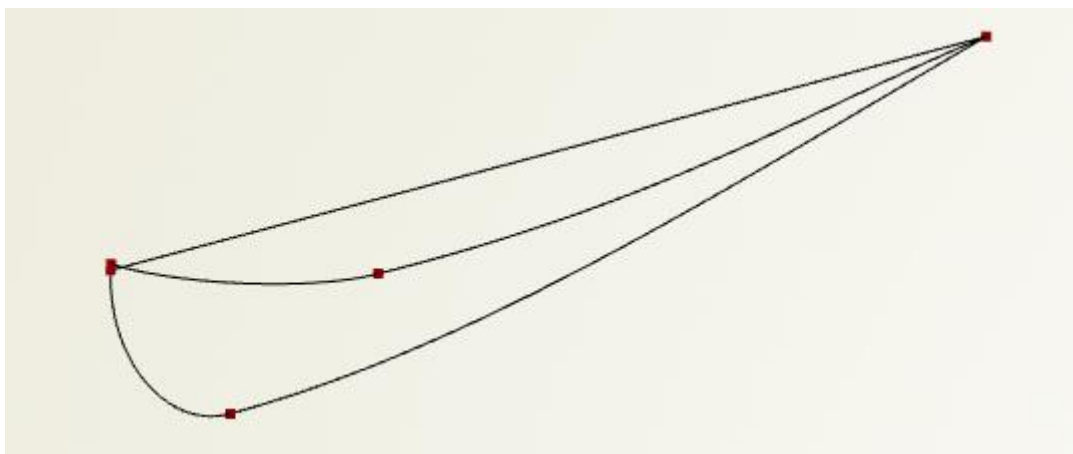


#### 4.5 Κατασκευή βολβού

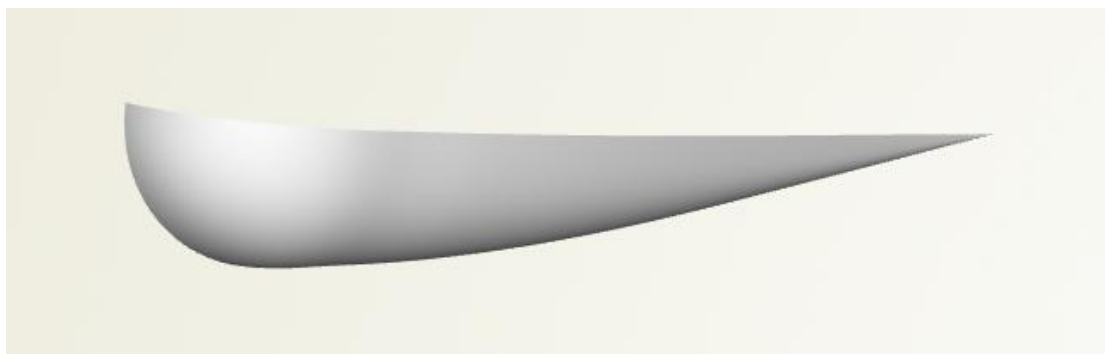
Έπειτα από τη διαμόρφωση των βασικών καμπυλών, προχωρήσαμε στην κατασκευή της βολβοειδούς πλώρης, μία διαδικασία αρκετά περίπλοκη και λεπτομερής. Η πλώρη, και συγκεκριμένα ο βολβός, παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην αντίσταση κυματισμού που προκύπτει και για αυτό άλλωστε χαρακτηρίζεται από πέντε μεταβλητές σχεδίασης που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Η κατασκευή της πλώρης χωρίστηκε σε δύο μέρη, ώστε να γίνει πιο λεπτομερής σχεδίαση και να προκύψει ένα αποτέλεσμα που θα μεταβάλλεται ομαλά για τις διάφορες τιμές των παραμέτρων.

- Αρχικά δημιουργήθηκε το κατώτερο τμήμα του βολβού. Για την κατασκευή του χρειάστηκε να ορίσουμε τρεις βασικές καμπύλες, δύο f-splines και μία line, οι οποίες περιέχουν τρία παραμετρικά σημεία και περιλαμβάνουν το σύνολο των μεταβλητών σχεδίασης του βολβού. Αυτές τις καμπύλες επεξεργάστηκε μια κατάλληλη curve engine και διαμόρφωσε την τελική επιφάνεια του κάτω μέρους του βολβού. Με τη χρήση παραμετρικών σημείων και καμπυλών f-spline καθίσταται εφικτή η ομαλή μεταβολή του τμήματος αυτού για τις διάφορες τιμές των μεταβλητών σχεδίασης.



Σχήμα 14: Γενική όψη των βασικών καμπυλών του κάτω τμήματος βολβού με παραμετρικά σημεία

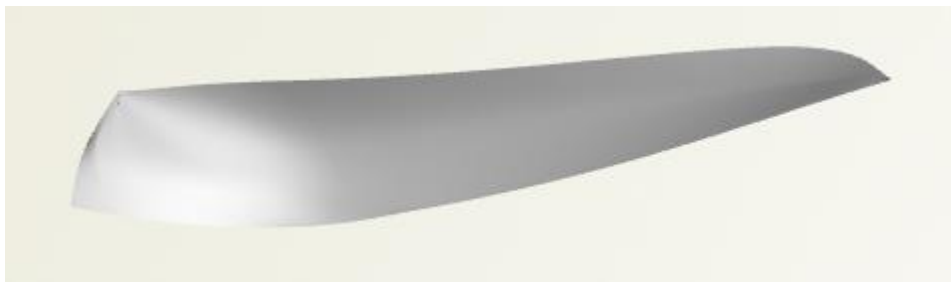


Σχήμα 15: Γενική όψη του κάτω τμήματος βολβού

- Στη συνέχεια δημιουργήθηκε η γεωμετρία του άνω τμήματος του βολβού. Πρώτα δημιουργήθηκαν ορισμένες καμπύλες b-splines και στη συνέχεια καταστρώθηκε μία curve engine, η οποία χρησιμοποίησε αυτές τις b-splines για να σχεδιάσει την επιφάνεια του άνω μέρους του βολβού. Εδώ να σημειωθεί ότι σε αυτό το τμήμα δεν περιλαμβάνονται νέες μεταβλητές σχεδίασης, αλλά εξαρτάται μόνο από τις παραμέτρους στη σύνδεση με το κατώτερο τμήμα του βολβού. Έτσι, έχουμε τη δυνατότητα να δημιουργήσουμε b-splines, οι οποίες χρησιμοποιούν περισσότερα σημεία ορισμού από τις αντίστοιχες f-spline κι άρα μεταβάλλονται πιο δύσκολα, χωρίς να επηρεαστεί αρνητικά το τελικό μας αποτέλεσμα.

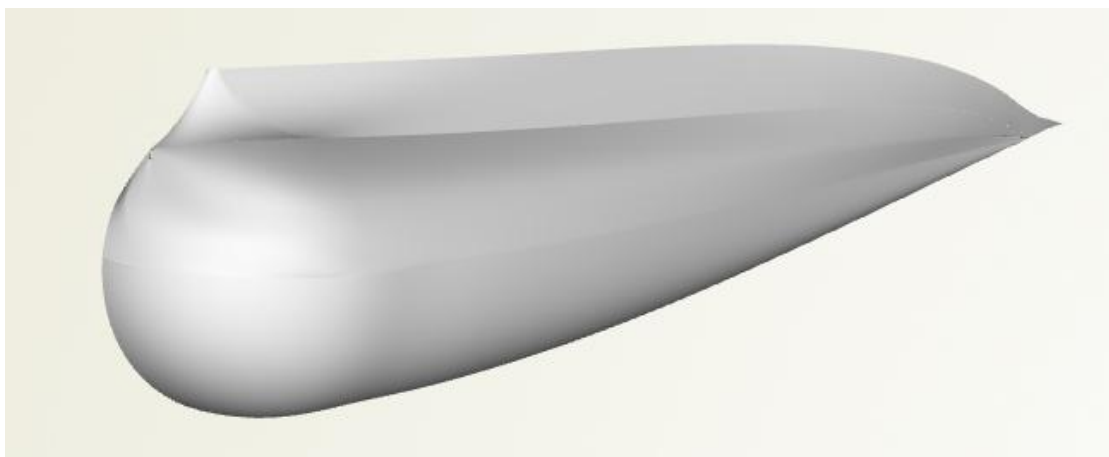


Σχήμα 16 Γενική όψη των καμπυλών του άνω τμήματος του βολβού

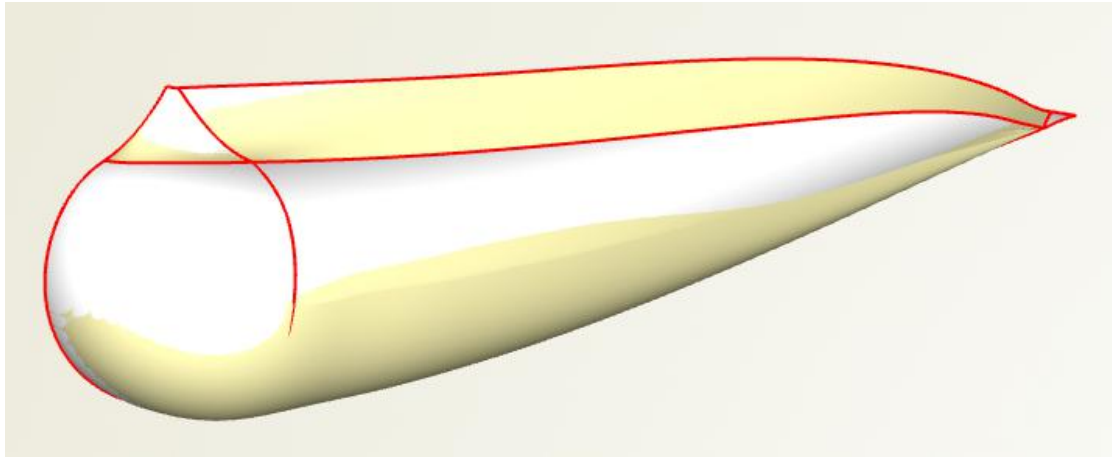


Σχήμα 17: Γενική όψη του άνω τμήματος του βολβού

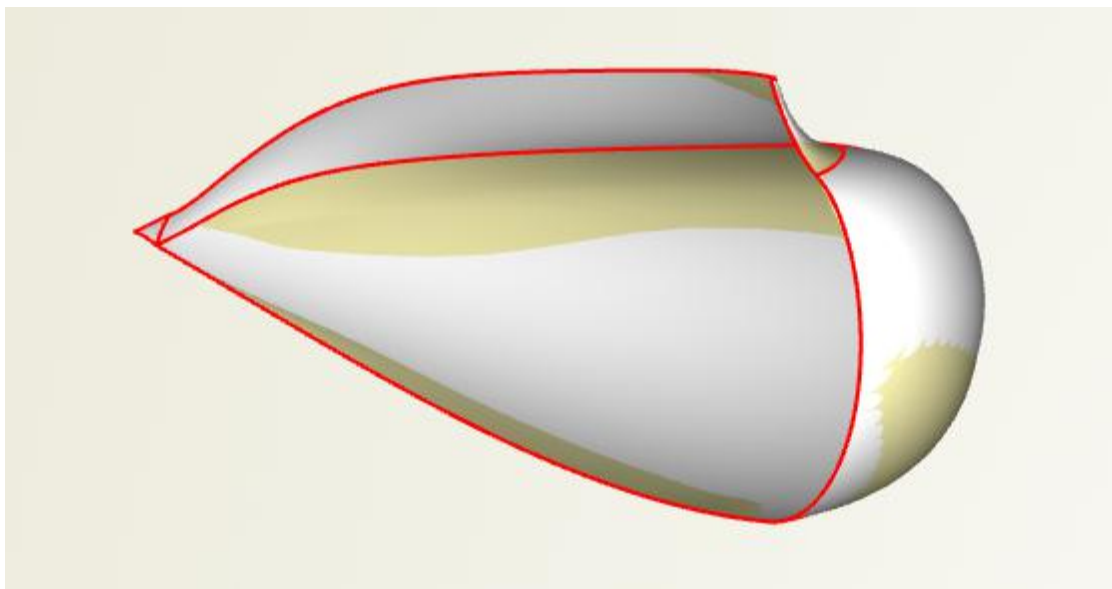
Παρακάτω παρουσιάζεται η συνολική κατασκευή του βολβού και σε σύγκριση με τον αντίστοιχο του πατρικού πλοίου.



Σχήμα 18: Γενική όψη του βολβού



Σχήμα 19: Σύγκριση του βολβού με τον πατρικό (όψη 1)



Σχήμα 20: Σύγκριση του βολβού με τον πατρικό (όψη 2)

#### 4.6 Κατασκευή επιφανειών

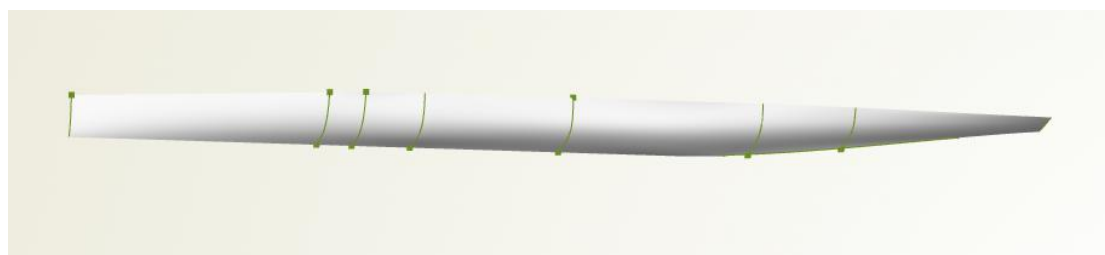
Αφού έχουμε ολοκληρώσει την κατασκευή των βασικών καμπυλών και της βολβοειδούς πλώρης του πλοίου μας, προχωράμε στην διαμόρφωση των επιφανειών που θα αποτελέσουν το περίβλημα της γάστρας.

Η διαδικασία αυτή αποδείχθηκε σχετικά εύκολη, αφού η γεωμετρία της γάστρας δεν παρουσίαζε μεγάλες ιδιαιτερότητες. Οι καμπύλες που είχαμε δημιουργήσει νωρίτερα συμπληρώθηκαν από ορισμένες ακόμη βοηθητικές, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα λεπτομερές σύνολο επιφανειών. Οι βοηθητικές καμπύλες που προσθέσαμε δεν εξαρτώνται από τις παραμέτρους που έχουμε ορίσει εξαρχής, συνεπώς η κατασκευή τους είναι σταθερή και δε χρειάζεται να αναλυθεί περαιτέρω.

Κυρίως χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι επιφανειών:

- Οι ruled surfaces, που ουσιαστικά είναι γραμμικές επιφάνειες στις οποίες ορίζουμε την καμπύλη από την οποία ξεκινούν και την καμπύλη που καταλήγουν και ανάμεσα σε αυτές δημιουργείται η γραμμική επιφάνεια. Η χρήση τους, βέβαια, περιορίζεται κυρίως σε περιπτώσεις που οι καμπύλες των ορίων τις είναι ευθείες γραμμές και η επιφάνεια που θέλουμε να δημιουργηθεί δεν περιλαμβάνει καμπυλότητα.
- Οι lofted surfaces, που αποτελούν πιο περίπλοκες επιφάνειες με καμπυλότητα. Σε αυτές ορίζουμε ένα πλήθος δύο ή περισσότερων καμπυλών από τις οποίες θα διέλθει η επιφάνεια και έχουμε τη δυνατότητα να ορίσουμε έως και δύο rail curves, δηλαδή καμπύλες τις οποίες θα χρησιμοποιήσει ως ράγες η επιφάνεια. Οι rail curves αποτελούν όρια της επιφάνειας, ενώ σε αυτές πρέπει να περιλαμβάνονται και τα άκρα των υπόλοιπων καμπυλών που ορίσαμε στην αρχή.

Αρχικά, λοιπόν, κατασκευάσαμε ως μία lofted surface ολόκληρη την επιφάνεια της γάστρας πρύμνηθεν του βολβού, κάτω από την ίσαλο πλεύσης, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 21: Επιφάνεια κάτω από την ίσαλο πλεύσης, πρύμνηθεν του βολβού

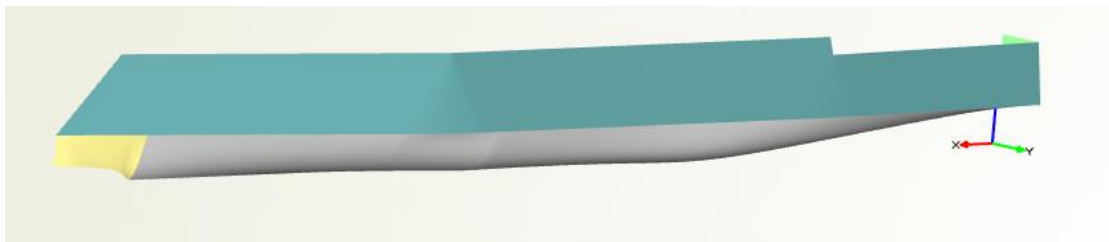
Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, η επιφάνεια αυτή μπορεί να μεταβάλλεται ομαλά, αφού έχει οριστεί από ένα πλήθος f-splines, που είναι οι νομείς που κατασκευάσαμε, ενώ χρησιμοποιεί ως rail curves την CPC και την Waterline. Η επιφάνεια αυτή τελικά εξαρτάται από τρεις κυρίως μεταβλητές σχεδίασης:

- Το `max_beam`, αφού αυτό έχει ιδιαίτερο ρόλο στην κατασκευή της ισάλου γραμμής.
- Το `transom_max_y`, αφού αυτό ορίζει το σημείο που καταλήγει ο μηδενικός νομέας.
- Και η `deadrise_angle`, η οποία καθορίζει τη γωνία που θα σχηματίσει ο μηδενικός νομέας με το προφίλ της πρύμνης.

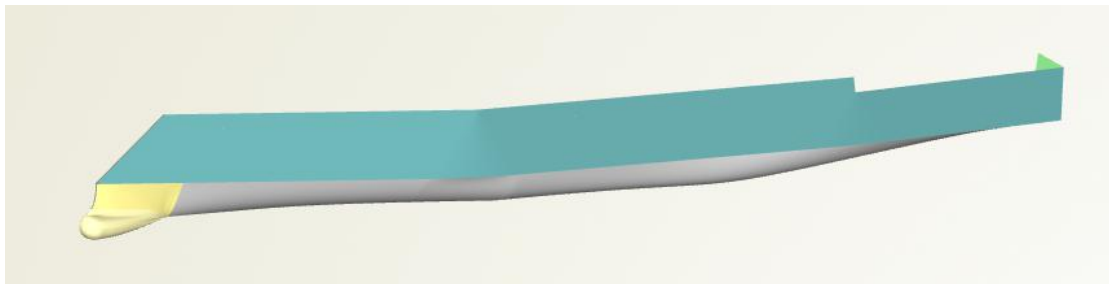
Έπειτα, δημιουργήθηκαν οι υπόλοιπες επιφάνειες με πιο απλό τρόπο και χωρίς να εξαρτώνται άμεσα από τις τιμές των μεταβλητών σχεδίασης, όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 22: Επιφάνεια πάνω από την ίσαλο πλευσης



Σχήμα 23: Συνολική επιφάνεια χωρίς το βολβό



Σχήμα 24: Πλήρης επιφάνεια του πλοίου

#### 4.7 Κατασκευή skeg

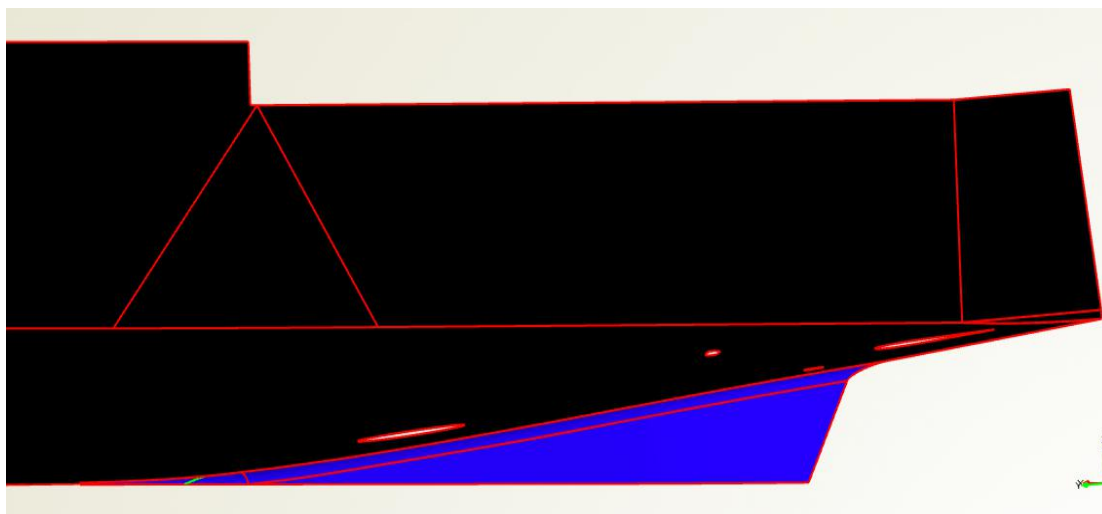
Η παραμετρική μοντελοποίηση ολοκληρώνεται με την κατασκευή του skeg, το οποίο ως προς την αντίσταση κυματισμού επηρεάζει κυρίως στην προσθήκη επιπλέον βρεχόμενης επιφάνειας.

Η κατασκευή του είναι σχετικά απλή, αφού αποτελείται από δύο μόνο επιφάνειες. Συγκεκριμένα δημιουργούνται δύο Multi Segmented Smooth Curves, οι οποίες ορίζονται από δύο σημεία ως αρχή και τέλος κι άλλα δύο κοντινά σε αυτά που δε βρίσκονται όμως στην ίδια ευθεία, κι έτσι προστίθεται η επιθυμητή καμπυλότητα, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Από αυτές τις δύο καμπύλες η μία προβάλλεται στη γάστρα, ώστε να γίνει το κατάλληλο trim, κι έπειτα ενώνεται η γάστρα με τη δεύτερη καμπύλη μας και δημιουργείται η πλαϊνή επιφάνεια του skeg.



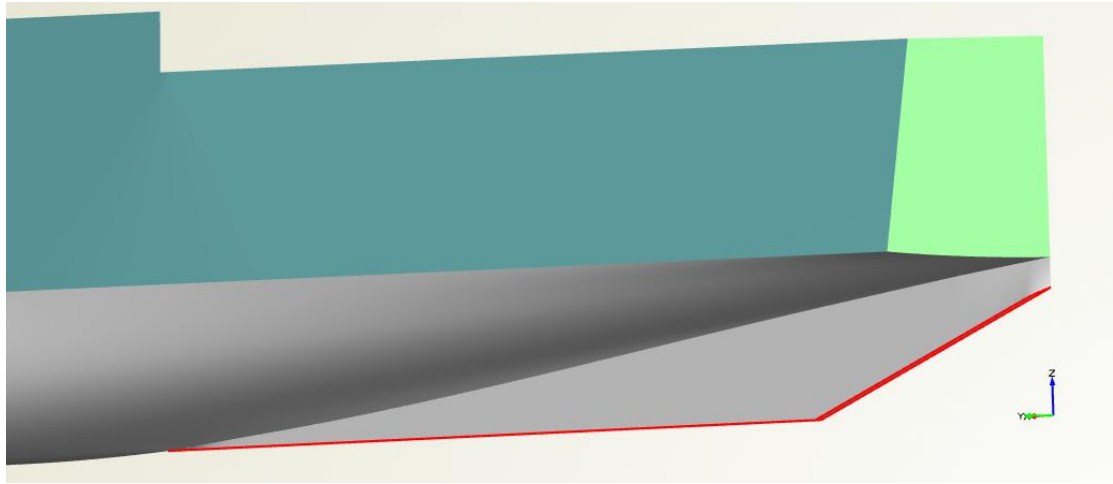
Σχήμα 25: Καμπύλες για την κατασκευή του skeg

Στο πατρικό πλοίο το skeg έχει την παρακάτω μορφή.



Σχήμα 26: Skeg πατρικού πλοίου

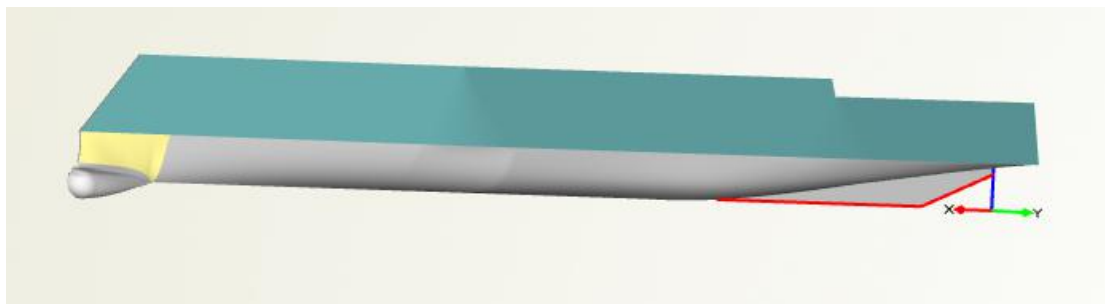
Αρχικά, προχωρήσαμε στην κατασκευή ενός skeg αντίστοιχης μορφής. Παρατηρήθηκαν, ωστόσο, προβλήματα κατά τον υπολογισμό τη αντίστασης κυματισμού από το SWAN 2002. Αυτά αποδόθηκαν στο γεγονός ότι ο καθρέφτης είναι βυθισμένος μόνο για ελάχιστα εκατοστά με αποτέλεσμα η θεωρία δυναμικού να αποτυγχάνει να προβλέψει σωστά την αντίσταση στην πρύμνη μας. Κρίναμε, λοιπόν, ότι μία πολύ αποδοτική λύση θα ήταν η επέκταση του skeg μέχρι την πρυμναία κάθετο, αφού μία τέτοια μετατροπή θα επηρέαζε μόνο τη βρεχόμενη επιφάνεια. Η κατασκευή που προέκυψε τελικά έφερε σαφώς καλύτερα αποτελέσματα και η μορφή της παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



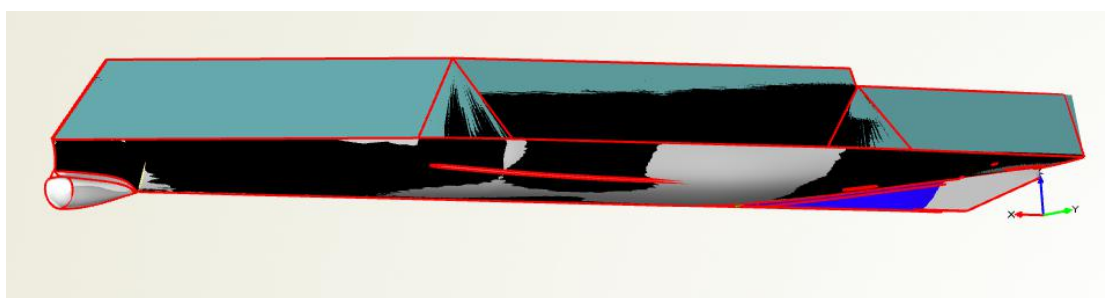
Σχήμα 27: Τελική κατασκευή skeg

#### 4.8 Σύγκριση με το πατρικό και περιορισμοί

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η συνολική επιφάνεια της γάστρας που δημιουργήθηκε, καθώς και η σύγκρισή της με την πατρική.



Σχήμα 28: Τελική μορφή του πλοίου



Σχήμα 29: Πατρικό πλοίο

Παρατηρούμε ότι η σύγκριση των δύο γεωμετριών είναι ικανοποιητική και ότι δεν υπάρχουν αποκλίσεις τη μορφή της γάστρας. Ο βασικός περιορισμός με βάση τον οποίον υλοποιήθηκε η σχεδίαση ήταν η κατά το δυνατόν μικρότερη απόκλιση ως προς το εκτόπισμα που θα προέκυπτε. Συγκεκριμένα το εκτόπισμα της πατρικής γάστρας είναι ίσο με:

$$D_0 = 8,507 \text{ ton}$$

ενώ το εκτόπισμα της νέας είναι ίσο με:

$$D_p = 8,622 \text{ ton}$$

δηλαδή υπάρχει απόκλιση της τάξης του 1,35%. Αυτή την απόκλιση θεωρούμε αποδεκτή και άρα κρίνουμε ως αποδεκτό το εκτόπισμα της αρχικής σχεδίασης. Με βάση αυτό, λοιπόν, θα θέσουμε τον περιορισμό στη διαδικασία της βελτιστοποίησης και θα απαιτήσουμε απόκλιση μικρότερη του 1%.

Δηλαδή αν  $D$  είναι το εκτόπισμα που προκύπτει από κάθε νέα γεωμετρία, απαιτούμε:

$$\frac{D - D_p}{D_p} < 0.01$$

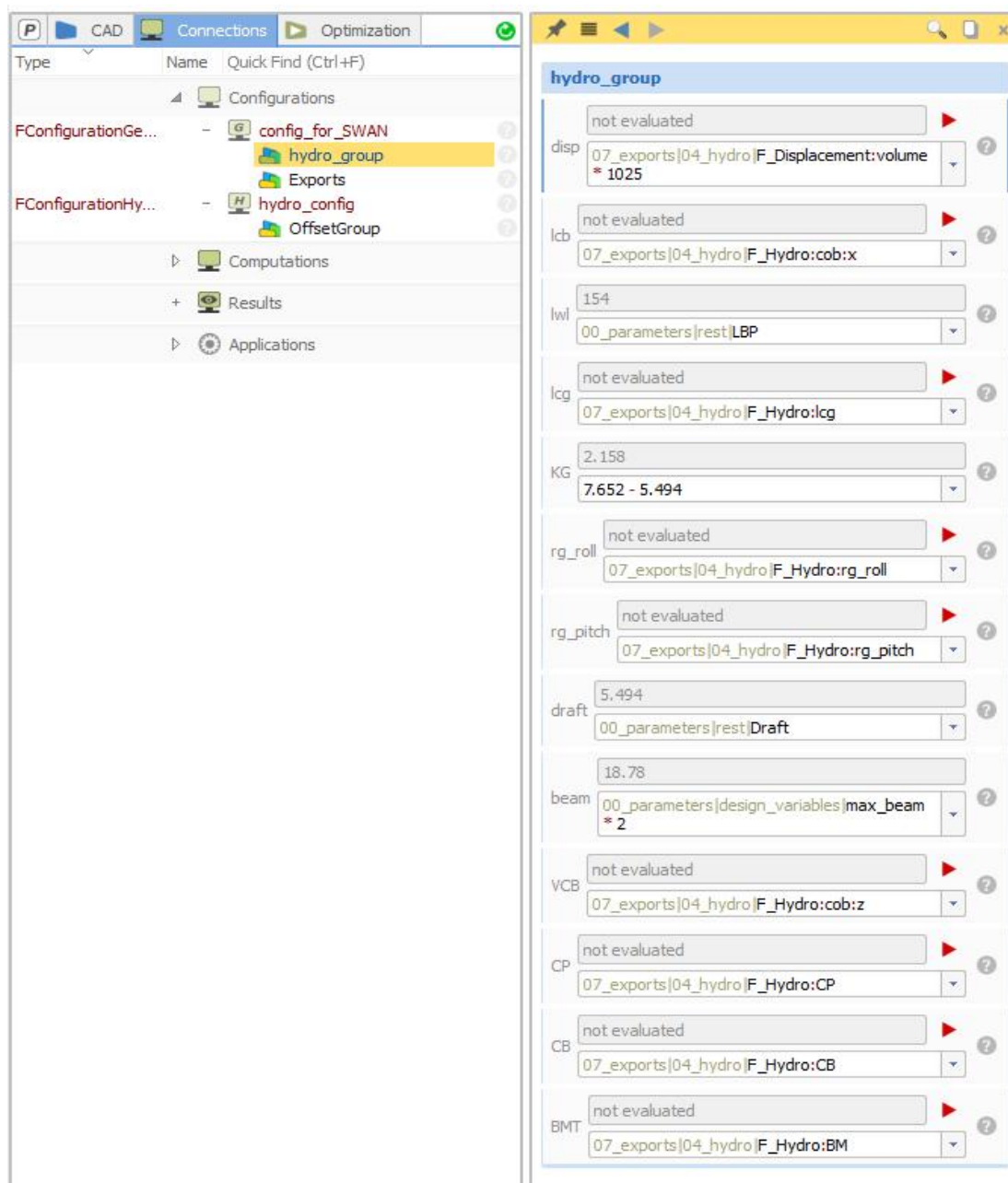


## 4.9 Σύνδεση προγραμμάτων

Για να προχωρήσουμε από την παραμετρική σχεδίαση στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση της γάστρας μας πρέπει πρώτα να συνδέσουμε το CAESES με τα εξωτερικά προγράμματα που θα εκτελέσουν τους υπολογισμούς, δηλαδή το SWAN 2002 για την αντίσταση κυματισμού και τον κώδικα Frank για την κατακόρυφη επιτάχυνση.

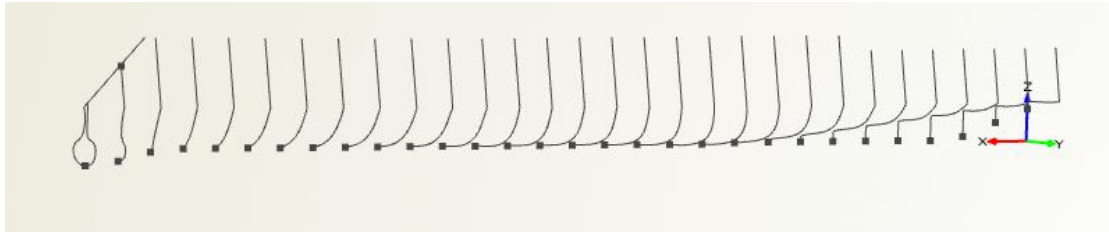
Ξεκινάμε με τη δημιουργία μια διαμόρφωσης, η οποία θα εξάγει τα αρχεία που επιθυμούμε. Συγκεκριμένα θα εξαχθούν συνολικά τέσσερα αρχεία:

- .hydro: ένα αρχείο που περιλαμβάνει τα υδροστατικά χαρακτηριστικά του πλοίου, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



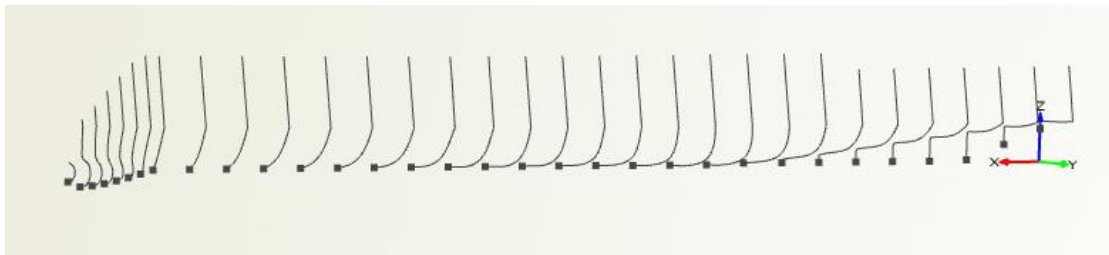
Σχήμα 30: Υδροδυναμικά χαρακτηριστικά στο CAESES FFW

- `sec_mid.shf`: ένα αρχείο που περιλαμβάνει τους 30 ισαπέχοντες νομείς του πλοίου και θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της αντίστασης στο SWAN 2002.
- `sec_bow.shf`: το αρχείο που περιλαμβάνει το προφίλ της πλώρης και θα χρησιμοποιηθεί επίσης στο SWAN 2002.

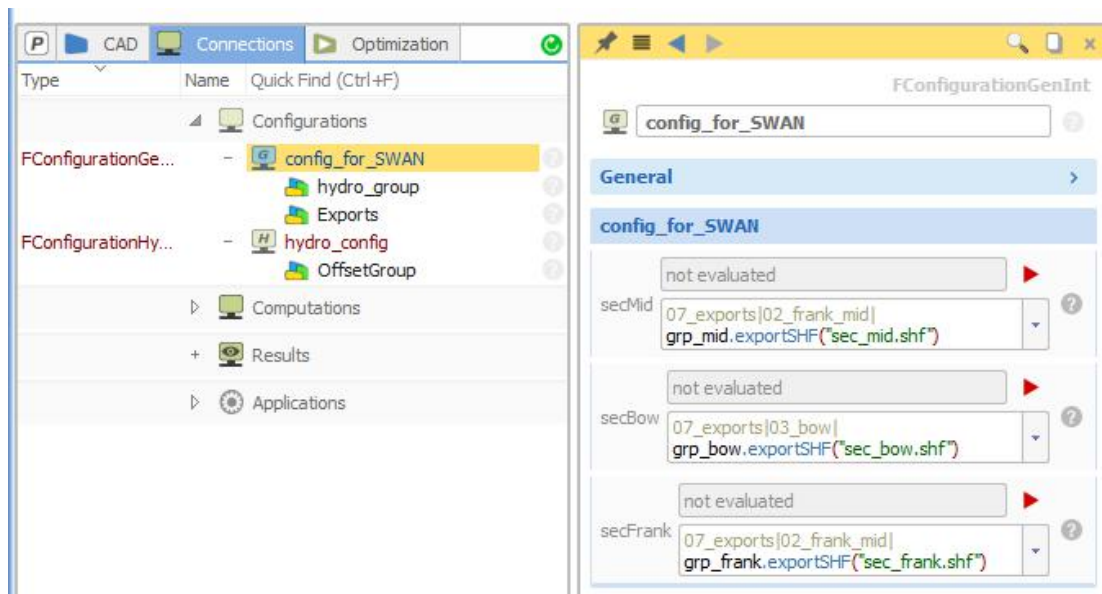


Σχήμα 31: Νομείς εισόδου για το SWAN 2002

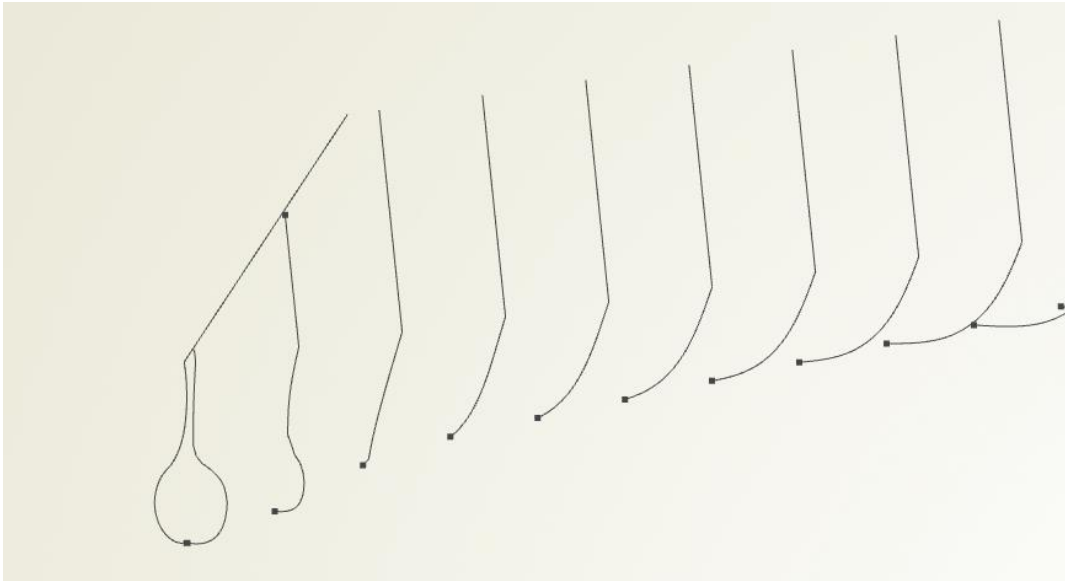
- `sec_frank.shf`: το αρχείο που θα χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της κατακόρυφης επιτάχυνσης από τον κώδικα Frank και περιλαμβάνει 25 ισαπέχοντες νομείς στο τμήμα της γάστρας πρύμνηθεν του βολβού και άλλους 8 νομείς που περιγράφουν τη γεωμετρία της βολβοειδούς πλώρης.



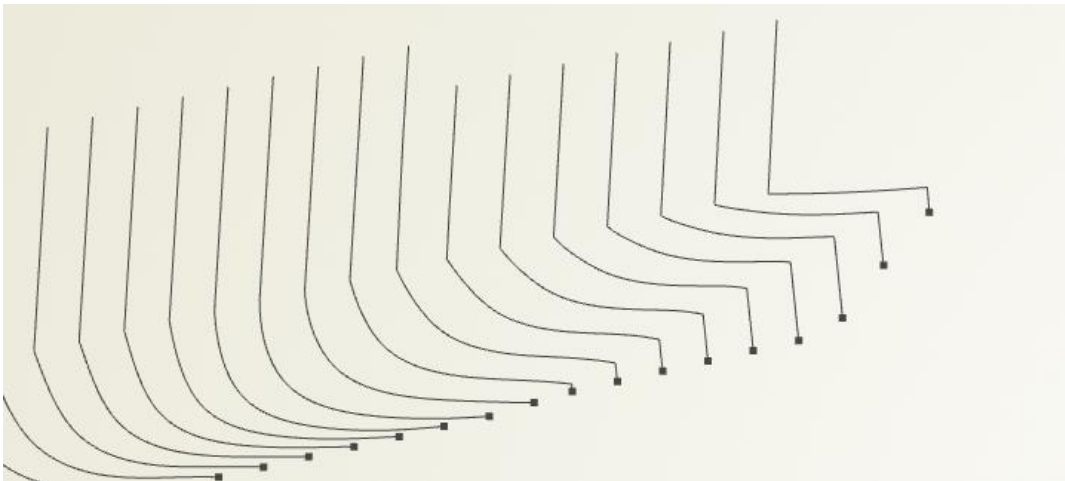
Σχήμα 32: Νομείς εισόδου για τον κώδικα Frank



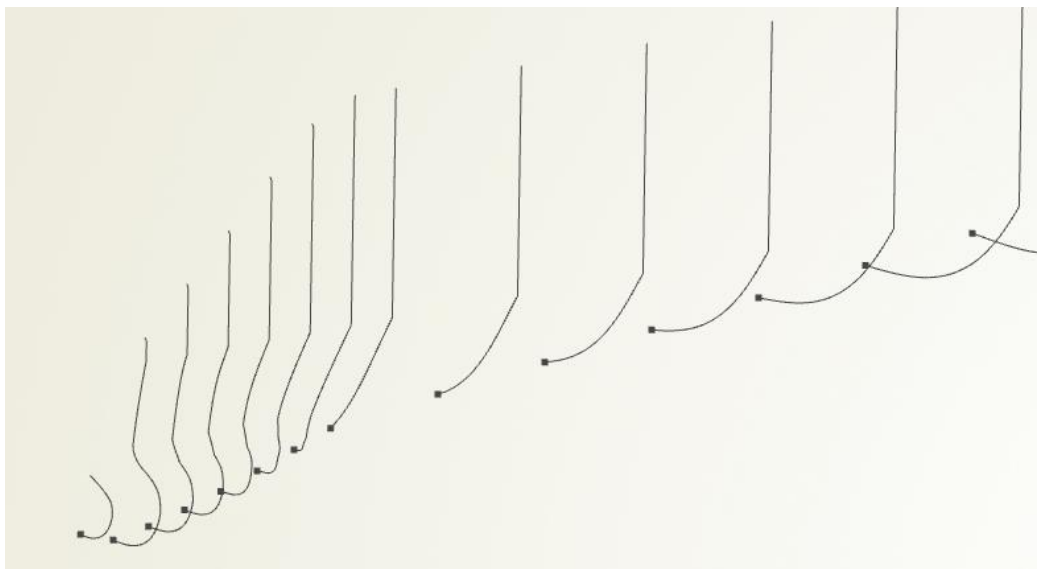
Σχήμα 33: Εξαγόμενα αρχεία από το CAESES FFW



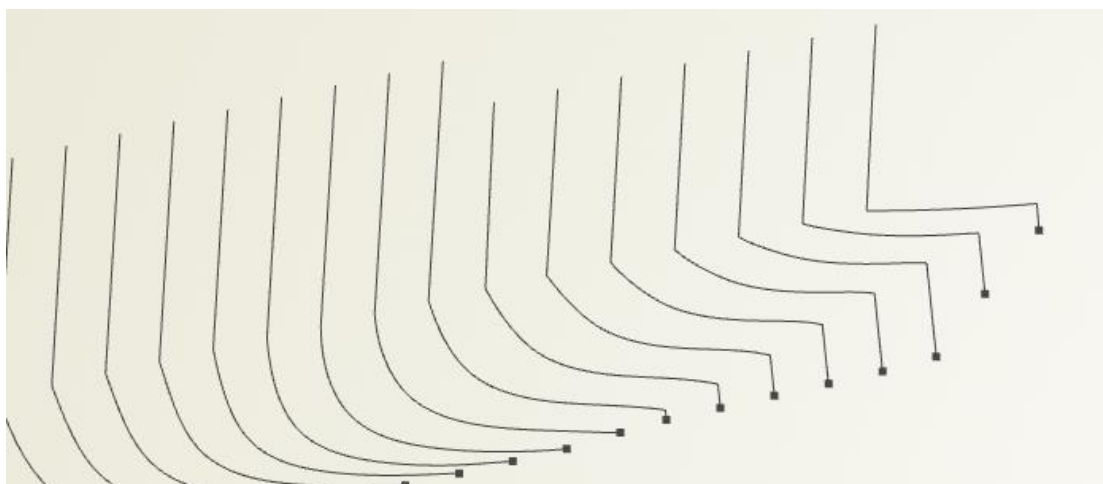
Σχήμα 34: Πρωραίοι νομείς για εισαγωγή στο SWAN 2002



Σχήμα 35: Πρυμναίοι νομείς για εισαγωγή στο SWAN 2002



Σχήμα 36: Πρωραίοι νομείς για εισαγωγή στο Frank



Σχήμα 37: Πρυμναίοι νομείς για εισαγωγή στο Frank

Τα αρχεία που εξάγονται από το CAESES δεν είναι άμεσα έτοιμα προς χρήση από τα εξωτερικά προγράμματα, συνεπώς εκτελούμε την παρακάτω διαδικασία, ώστε να τα μετατρέψουμε σε αποδεκτά αρχεία εισαγωγής.

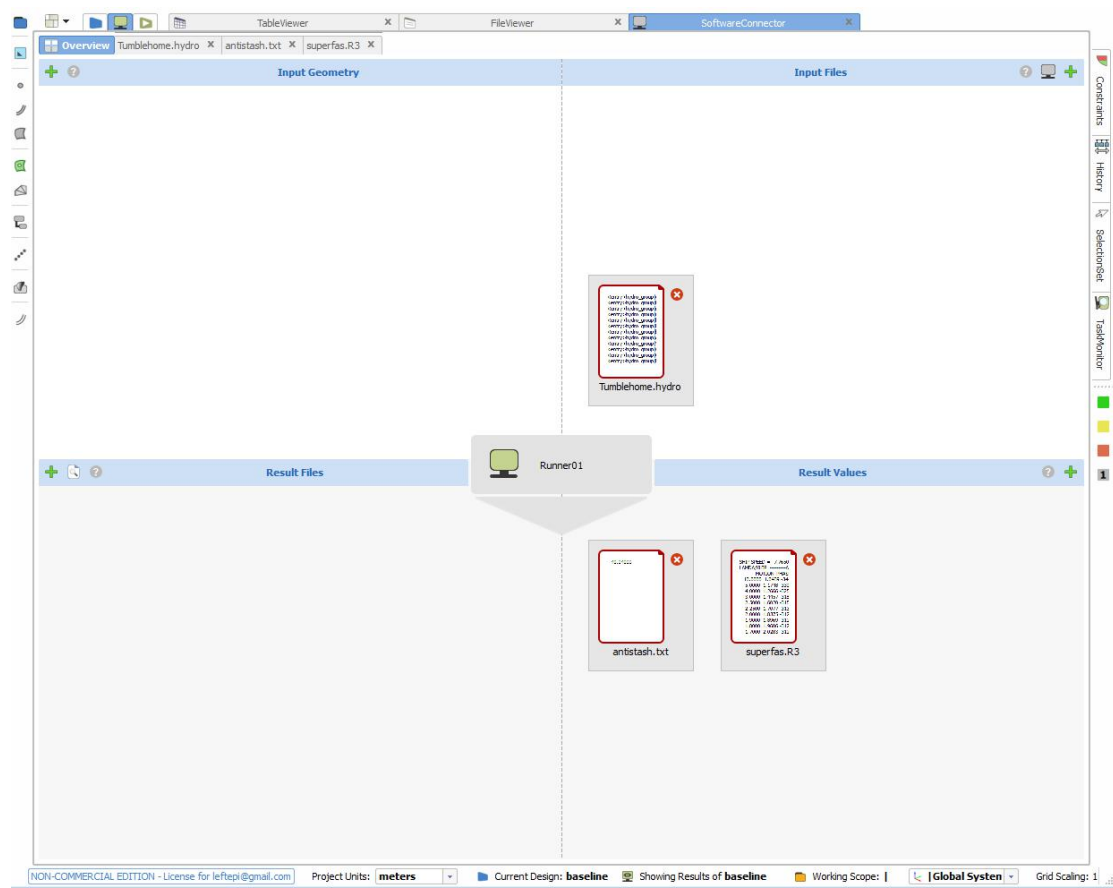
- SWAN 2002: Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα το συγκεκριμένο πρόγραμμα λαμβάνει ως αρχεία εισόδου ένα αρχείο .inp, το οποίο δημιουργούμε εμείς κι ένα αρχείο .rln που περιλαμβάνει τους νομείς και το προφίλ της πλώρης. Με τη χρήση κατάλληλου κώδικα συνενώνουμε τα δύο αρχεία, sec\_mid.shf και sec\_bow.shf, και τα μορφοποιούμε κατάλληλα, ώστε να τα μετατρέψουμε στο αρχείο .rln που χρειαζόμαστε.

Προφανώς η διαδικασία αυτή δε μπορεί να γίνεται χειροκίνητα για όλες τις γεωμετρίες που θα δημιουργηθούν κατά τη βελτιστοποίηση, συνεπώς δημιουργούμε ένα αρχείο batch, το οποίο περιγράφει τα εξωτερικά προγράμματα που πρέπει να εκτελεστούν ώστε να προκύψουν τα αρχεία εισόδου, αλλά και να εκτελεστεί το SWAN. Αυτό το batch file εισάγεται στο CAESES και ουσιαστικά διαχειρίζεται όλη τη διαδικασία υπολογισμού της αντίστασης κυματισμού με αυτοματοποιημένο τρόπο.

- Κώδικας Frank: Ο συγκεκριμένος κώδικας απαιτεί ως είσοδο αρχείο της μορφής .frk που περιλαμβάνει ιδιαίτερη διαμόρφωση. Αρχικά, τρέχουμε έναν κώδικα που μορφοποιεί τους νομείς μας όπως έχουν εξαχθεί στο αρχείο sec\_frank.shf, ώστε να γίνουν κατάλληλοι προς περαιτέρω επεξεργασία. Έπειτα, ένα δεύτερο πρόγραμμα λαμβάνει ως είσοδο το αρχείο που δημιουργήσαμε, καθώς και το αρχείο .hydro, με τα υδροστατικά χαρακτηριστικά και τα μετατρέπει στο αρχείο .frk που χρειαζόμαστε. Το αρχείο αυτό τρέχει τελικά στον κώδικα Frank και μας δίνει τα στοιχεία των κινήσεων του πλοίου και συγκεκριμένα την κατακόρυφη επιτάχυνση που εμείς επιθυμούμε.

Όλη αυτή η διαδικασία εκτελείται με παρόμοιο τρόπο με παραπάνω με τη χρήση batch file που διαχειρίζεται τη διαδικασία.

Και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις οι αριθμοί που μας ενδιαφέρουν εμάς ως αποτέλεσμα εισάγονται στο SWAN, έπειτα από δική μας υπόδειξη αναφορικά με το αρχείο που πρέπει να ανοίξει και το στοιχείο που πρέπει να διαβάσει.



Σχήμα 38: Σύνδεση προγραμμάτων στο CAESSES FFW

## 5. Μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση

Για να αποκτήσουμε πληρέστερη εικόνα ως προς τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης, θα εκτελέσουμε έξι συνολικά διαδικασίες βελτιστοποίησης. Πρώτα θα τις τρέξουμε ως προς ένα και μόνο κριτήριο αξιολόγησης, δηλαδή θα εκτελέσουμε ξεχωριστή διαδικασία για την αντίσταση κυματισμού και την κατακόρυφη επιτάχυνση. Με αυτόν τον τρόπο θα αποσυνδέσουμε τα κριτήρια της αξιολόγησης και θα μπορέσουμε να διακρίνουμε και την επίδραση που έχει κάθε παράμετρος σε καθένα από τα δύο κριτήρια.

Έπειτα, θα κρίνουμε τη σημαντικότητα της κάθε παραμέτρου για τη μελέτη μας και την επιδραστικότητά της στα αποτελέσματά μας. Έτσι θα μπορέσουμε να αφαιρέσουμε τις λιγότερο επιδραστικές παραμέτρους και να εκτελέσουμε ξανά τη διαδικασία, χρησιμοποιώντας μόνο εκείνες που θεωρούμε σημαντικές.

### 5.1 Αποτελέσματα πατρικής γάστρας

Αρχικά, εκτελέσαμε τους υδροδυναμικούς υπολογισμούς για την αρχική μας σχεδίαση που εδώ θα αναφέρεται ως πατρική γάστρα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν αποτέλεσαν σημείο αναφοράς για τη μετέπειτα σύγκριση και αξιολόγηση των εξαγόμενων της βελτιστοποίησης.

Έτσι, σε όλα τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν παρακάτω θ γίνεται εμφανής η μεταβολή των τιμών των μεταβλητών σχεδίασης όσο και των κριτηρίων σε σχέση με αυτές της πατρικής γάστρας.

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της πατρικής γάστρας.

Μέγεθος	V	R	Κατακόρυφη επιτάχυνση	Εκτόπισμα
Μονάδες	(m/s)	(kN)	(m/s <sup>2</sup> )	ton
Τιμή	7,765	103,7	2,168	8.622

Πίνακας 4: Αποτελέσματα πατρικής γάστρας

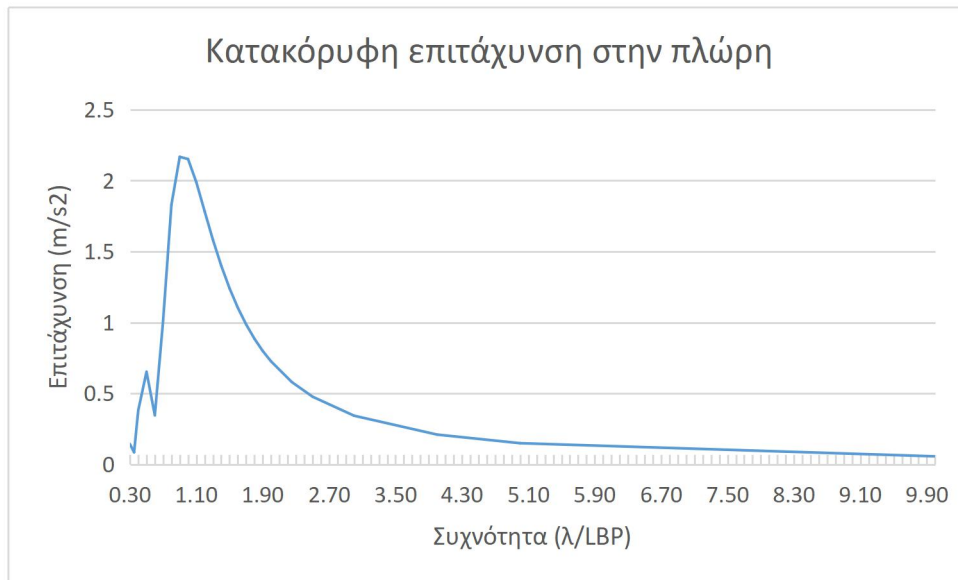
Η αντίσταση κυματισμού που υπολογίσαμε για την πατρική γάστρα συνοδεύεται από τον αντίστοιχο συντελεστή  $C_w=1,014*10^{-3}$ , αποτέλεσμα που είναι αρκετά κοντά με αυτά που συναντήσαμε για το ίδιο πλοίο στη βιβλιογραφία μας.

Συγκεκριμένα, οι Jianwei Wu, Xiaoyi Liu, Decheng Wan στη δημοσίευση “Multi-objective hydrodynamic optimization for ONR tumblehome ship” (11), υπολογίζουν τον συντελεστή αντίστασης του ONRT με τη χρήση CFD  $C_w=1,071*10^{-3}$  για  $F_n=0,41$ .

Επίσης, οι Cihad Delen, Ugur Can, Sakir Bal στη δημοσίευση “Prediction of Resistance and Self-Propulsion Characteristics of a Full-Scale Naval Ship by CFD-

Based GEOSIM Method” (12), υπολογίζουν τον συντελεστή αντίστασης του ONRT με τη μέθοδο GEOSIM  $C_w=1,083 \cdot 10^{-3}$  για  $F_n=0,3$ .

Οι αποκλίσεις της τάξης του 7% από το δικό μας υπολογισμό προκύπτουν φυσιολογικά, αφού διαφέρει τόσο ο αριθμός Froude, όσο και η μέθοδος υπολογισμού. Συνεπώς, θεωρούμε το αποτέλεσμα ικανοποιητικό και προχωράμε τη μελέτη μας.

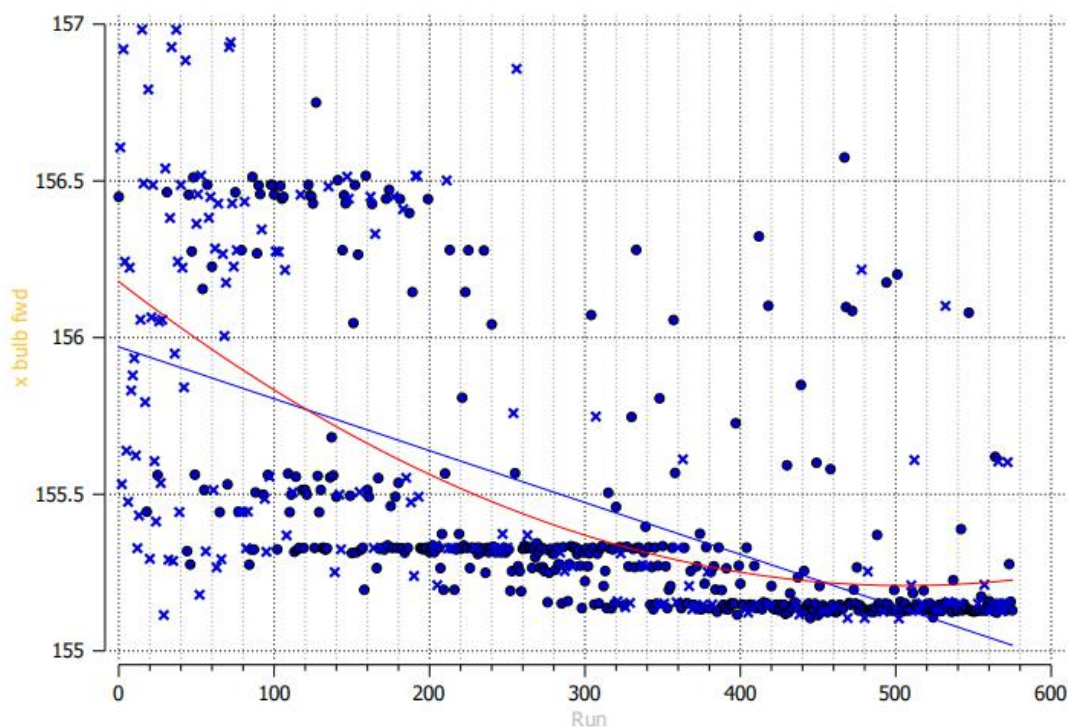


Σχήμα 39: RAO Πατρικής γάστρας

## 5.2 Βελτιστοποίηση ως προς την αντίσταση κυματισμού

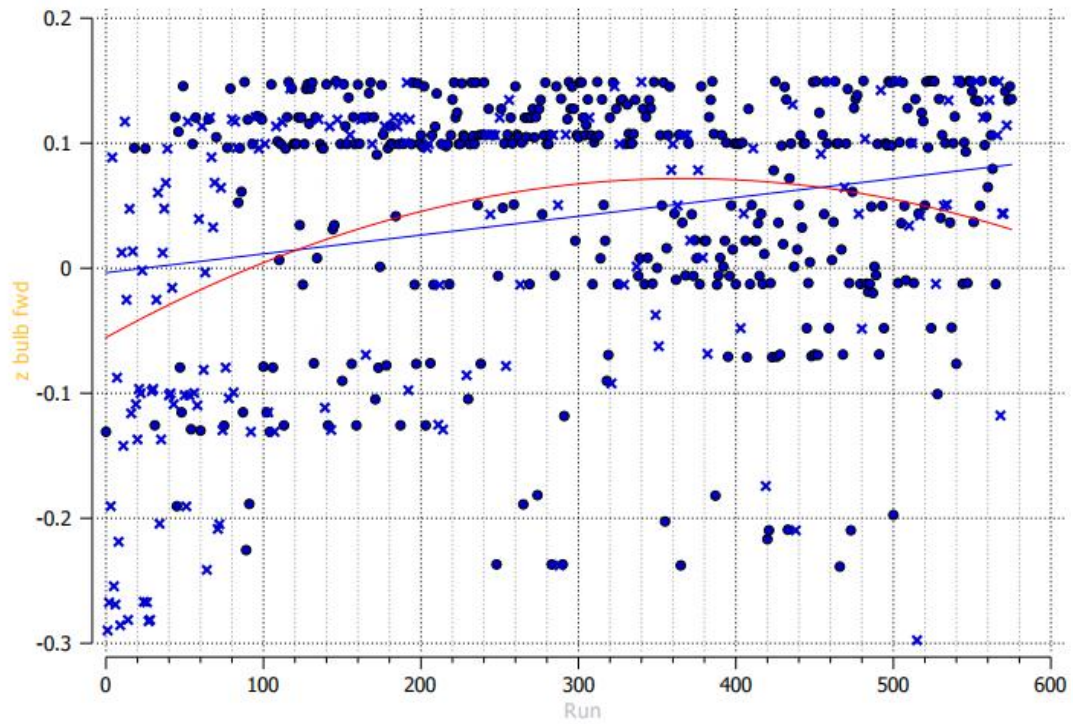
Σε αυτή την ενότητα θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης ως προς την αντίσταση κυματισμού. Η διαδικασία εκτελείται για  $F_n=0,2$  και  $V=7,765$  m/s, ενώ οι μεταβλητές σχεδίασης παίρνουν τις τιμές που φαίνονται στους πίνακες 2 και 3.

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η εξέλιξη των τιμών που λαμβάνουν οι μεταβλητές σχεδίασης και η αντίσταση κυματισμού κατά την εκτέλεση της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Στην παρούσα διαδικασία εκτελέστηκαν 564 επαναλήψεις. Με κύκλο εμφανίζονται τα αποδεκτά αποτελέσματα, δηλαδή αυτά που πληρούν την απαίτηση για την ελάχιστη απόκλιση του εκτοπίσματος, ενώ με x αναπαρίστανται οι μη αποδεκτές λύσεις.

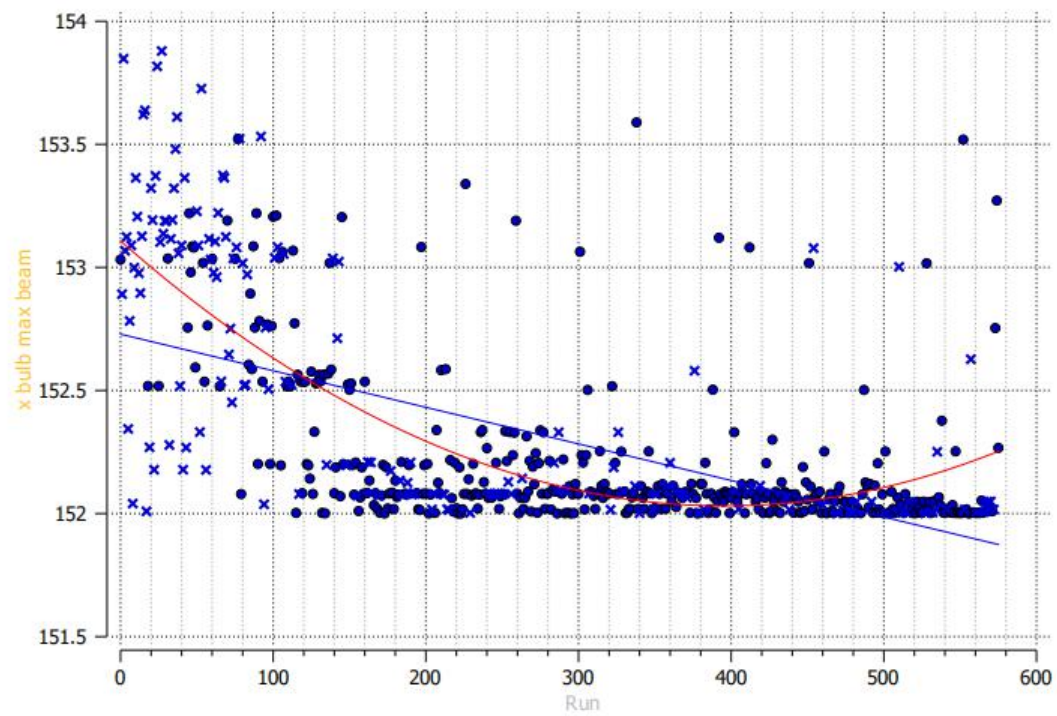


Σχήμα 40: Εξέλιξη της  $x_{bulb\_fwd}$  κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης

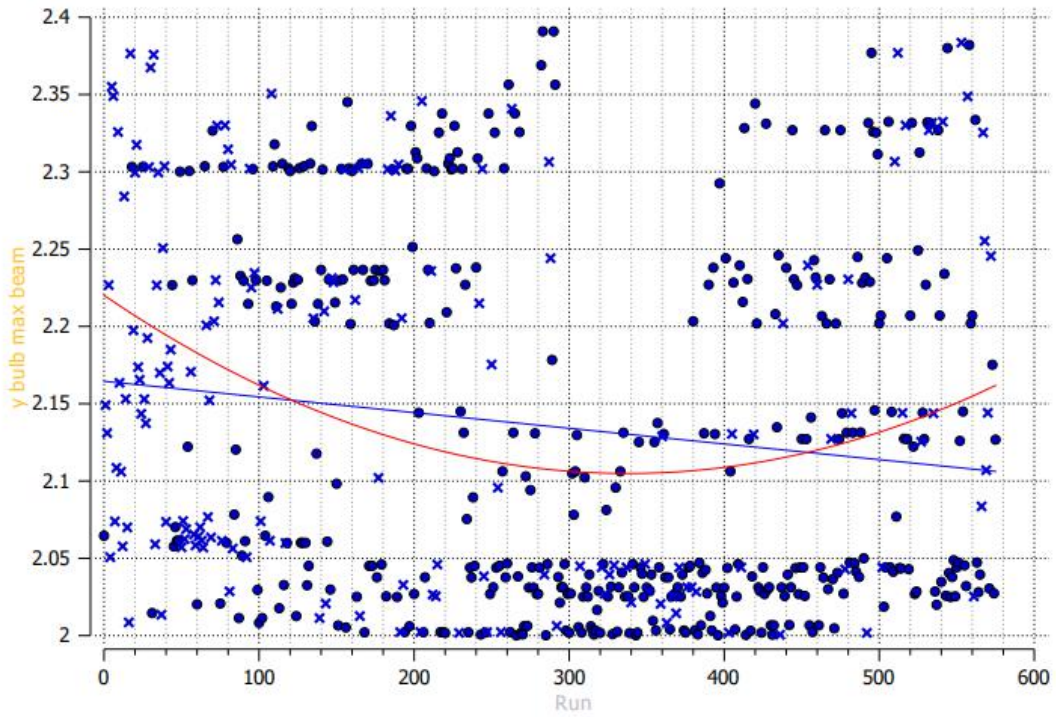




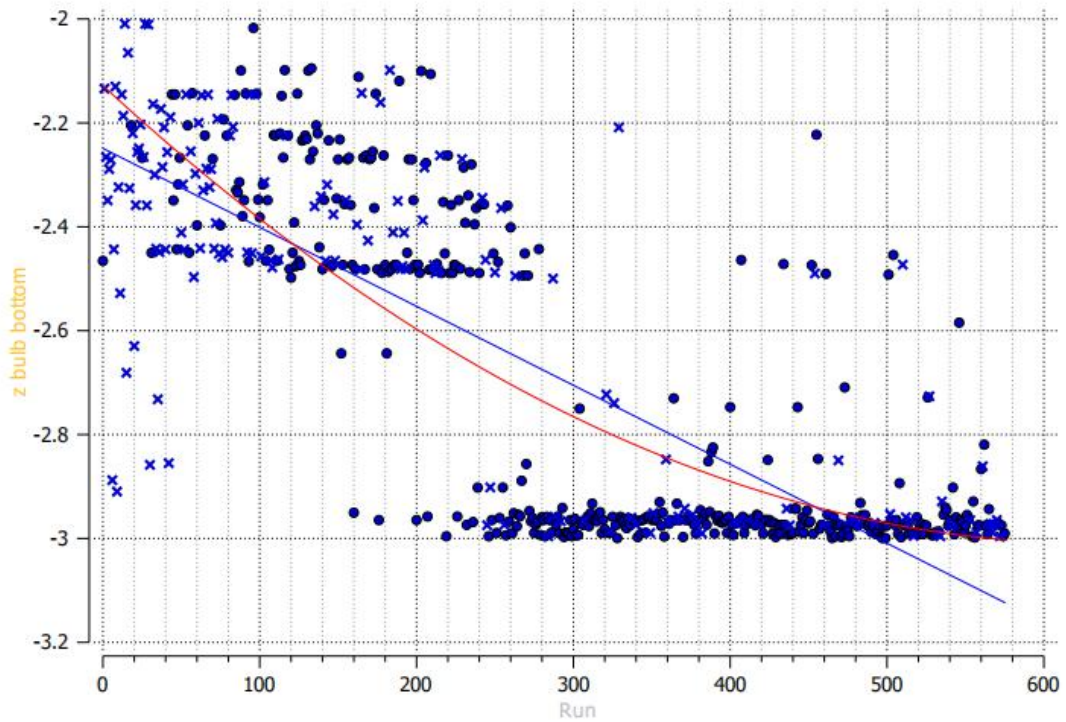
Σχήμα 41: Εξέλιξη της  $z_{bulb\_fwd}$  κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης



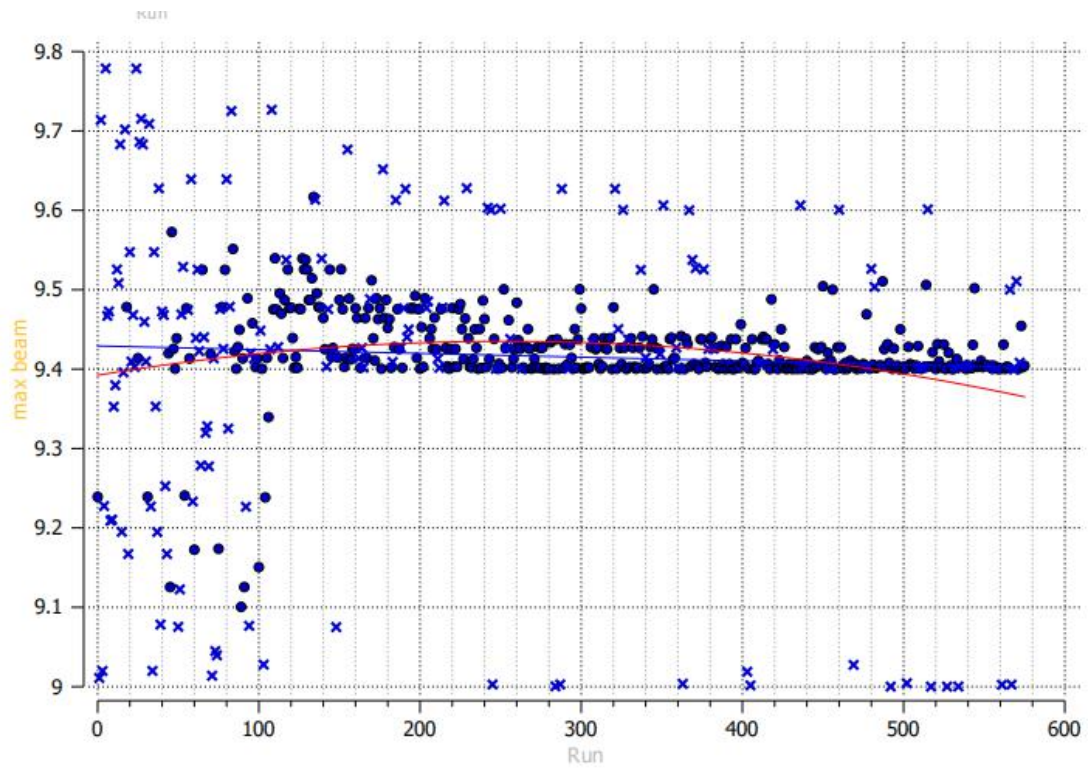
Σχήμα 42: Εξέλιξη της  $x_{bulb\_max\_beam}$  κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης



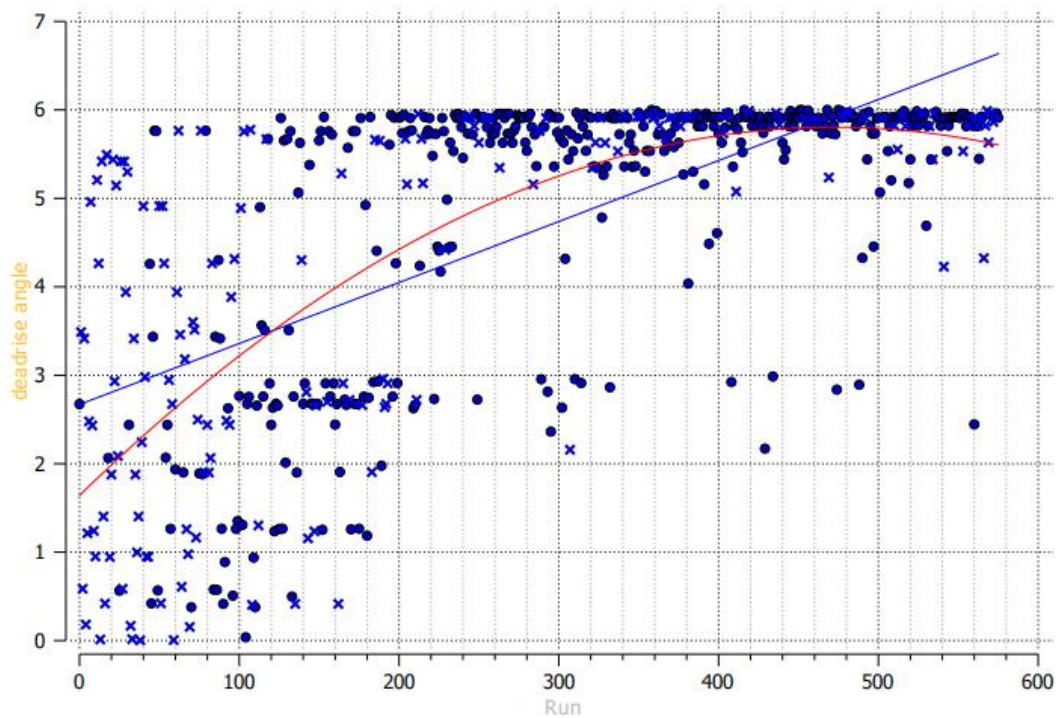
Σχήμα 43: Εξέλιξη της  $y\_bulb\_max\_beam$  κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης



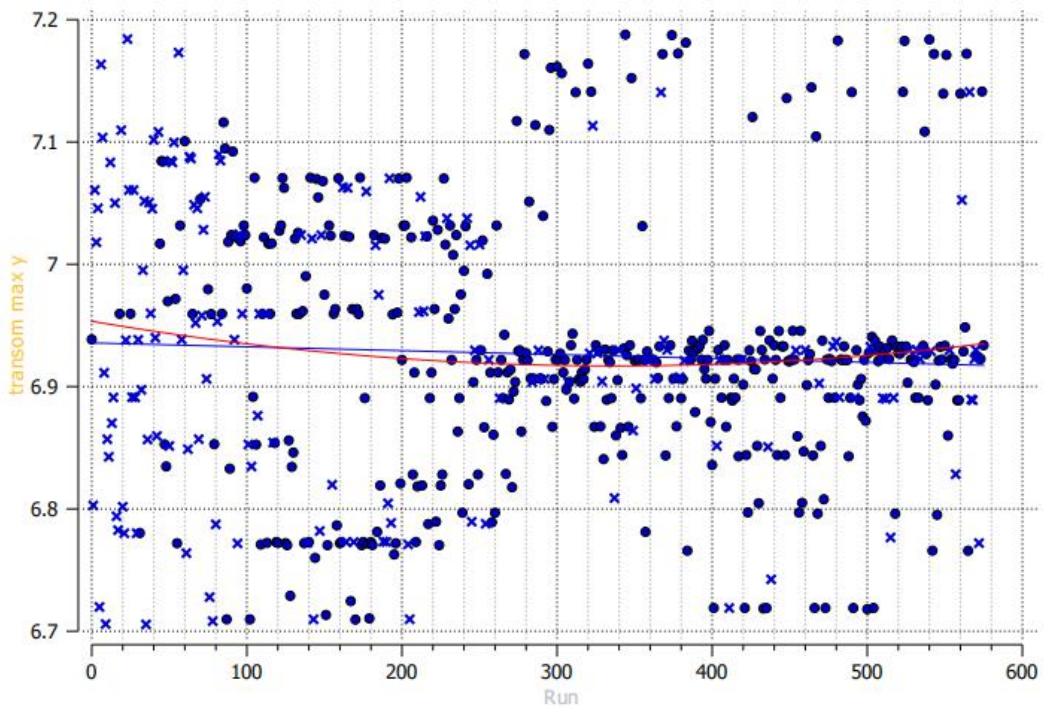
Σχήμα 44: Εξέλιξη της  $z\_bulb\_bottom$  κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης



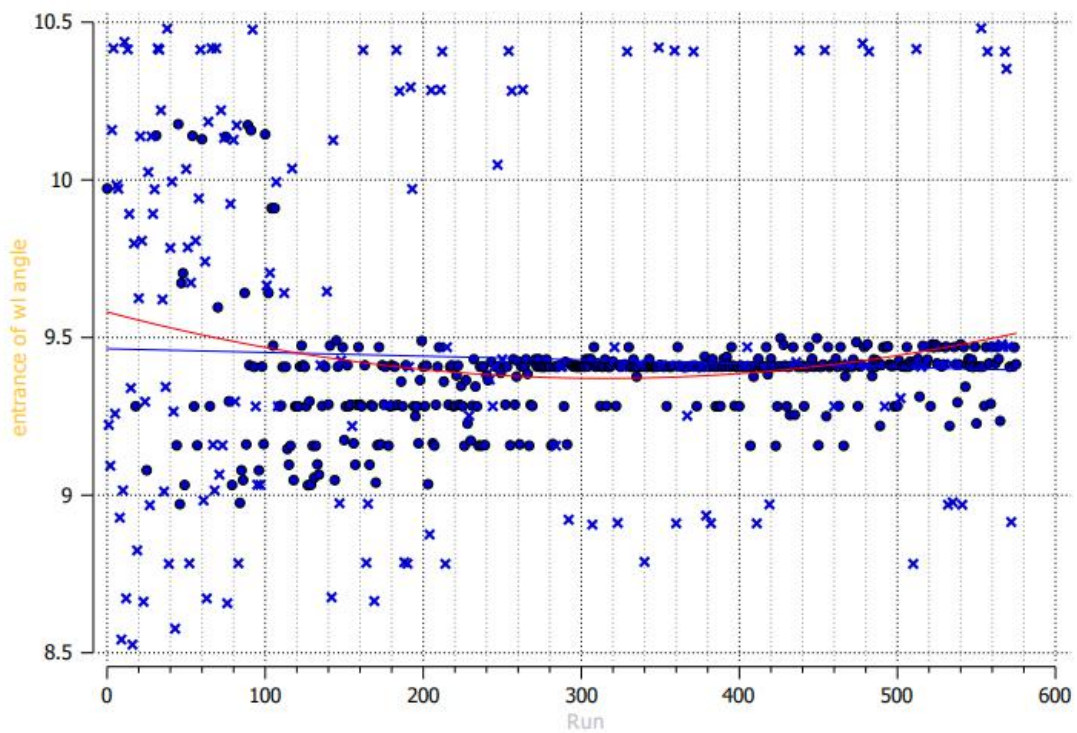
Σχήμα 45: Εξέλιξη της `max_beam` κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης



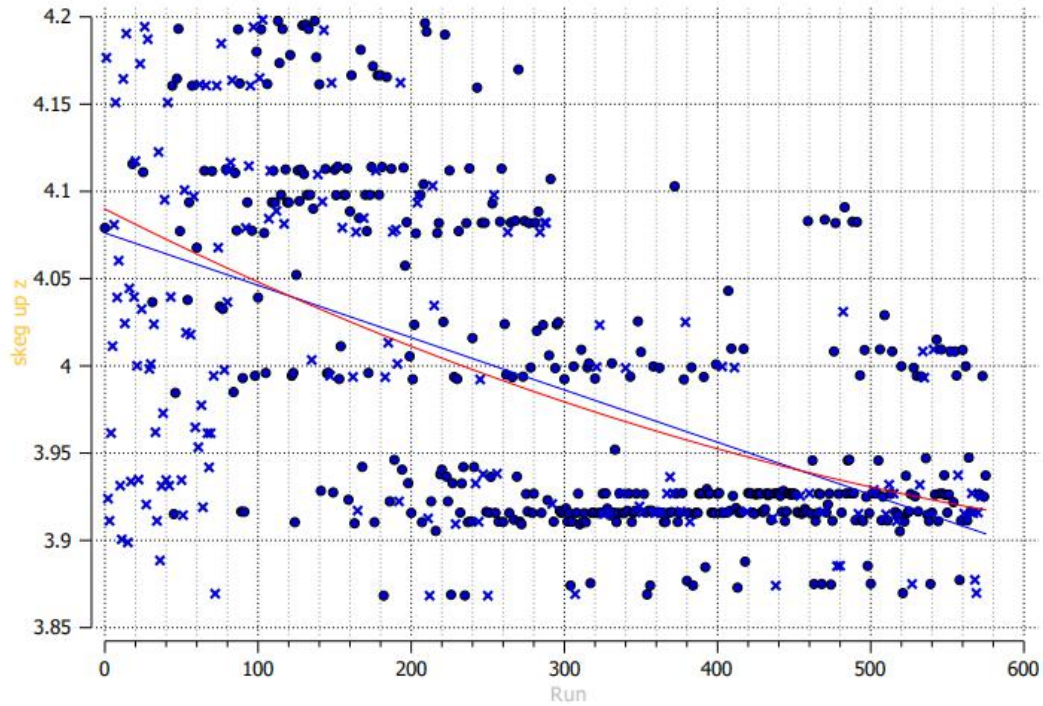
Σχήμα 46: Εξέλιξη της `deadrise_angle` κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης



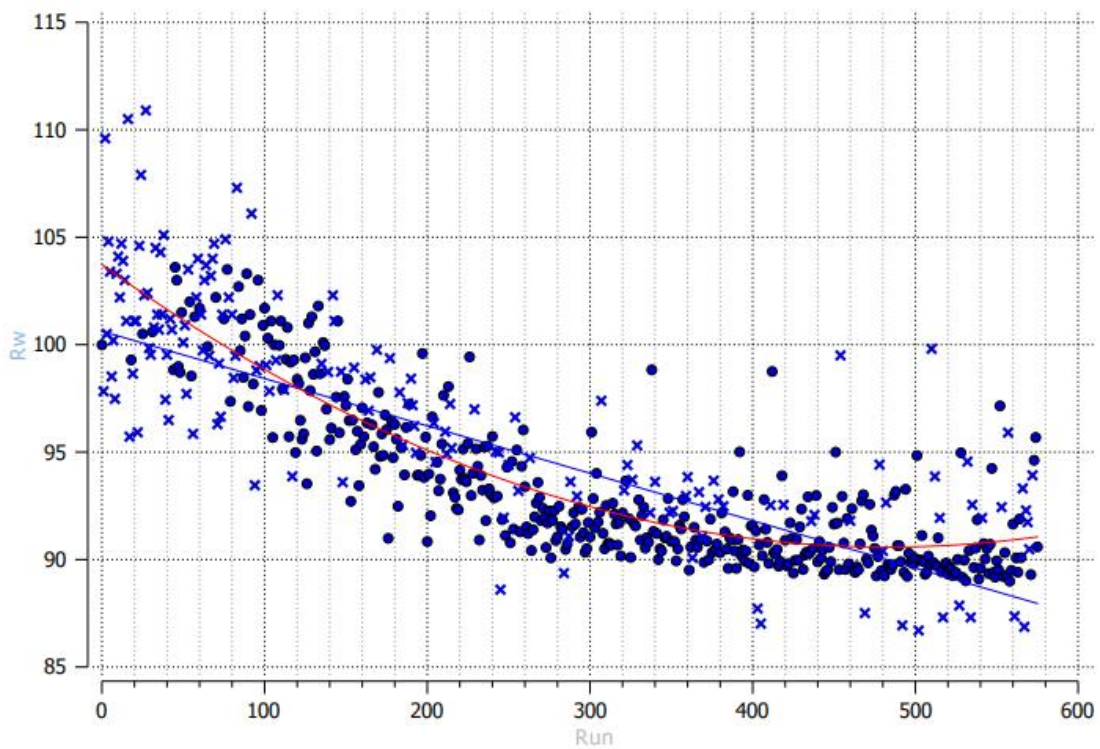
Σχήμα 47: Εξέλιξη της transom\_max\_y κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης



Σχήμα 48: Εξέλιξη της entrance\_of\_wl\_angle κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης



Σχήμα 49: Εξέλιξη της skew\_z κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης



Σχήμα 50: Εξέλιξη της αντίστασης κυματισμού  $R_w$  κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι αναμενόμενα αν αναλογιστούμε τον τρόπο λειτουργίας των γενετικών αλγορίθμων και συγκεκριμένα του NSGA II. Στην αρχή βλέπουμε να επιλέγει διάσπαρτες τιμές για της παραμέτρους μέσα σε όλο το εύρος των μεταβλητών σχεδίασης που έχουμε ορίσει. Έπειτα, οι περισσότερες μεταβλητές συγκλίνουν προς κάποια τιμή καθώς εξελίσσεται η

διαδικασία, ενώ και η αντίσταση φτάνει σε σύγκλιση. Επίσης, εξαιτίας της λειτουργίας του γενετικού αλγορίθμου NSGA II, προκύπτουν σημεία που απέχουν από τη σύγκλιση, αφού ο αλγόριθμος ελέγχει την πιθανότητα να προκύψουν καλές τιμές της αντίστασης σε διαφορετικές περιοχές των τιμών των παραμέτρων.

Στους παρακάτω πίνακες παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων για τη βέλτιστη λύση, καθώς και η βέλτιστη αντίσταση κυματισμού.

Μεταβλητή	Τιμή Πατρικού	Βέλτιστη τιμή	Μεταβολή	Μονάδες
x_bulb_fwd	155,57	155,13	-0,003	m
z_bulb_fwd	-0,072	0,098	-2,361	m
x_bulb_max_beam	153,55	152,00	-0,010	m
y_bulb_max_beam	2,112	2,382	0,128	m
z_bulb_bottom	-2,108	-2,975	0,411	m

Πίνακας 5: Βέλτιστες τιμές και μεταβολή των παραμέτρων του βολβού

Μεταβλητή	Τιμή Πατρικού	Βέλτιστη τιμή	Μεταβολή	Μονάδες
max_beam	9,390	9,000	-0,042	m
deadrise_angle	0,058	5,916	101,000	°
transom_max_y	6,890	6,889	0,000	m
entrance_of_wl_angle	9,509	9,418	-0,010	°
skeg_z	3,868	9,877	1,554	m

Πίνακας 6: Βέλτιστες τιμές και μεταβολή των παραμέτρων της γάστρας

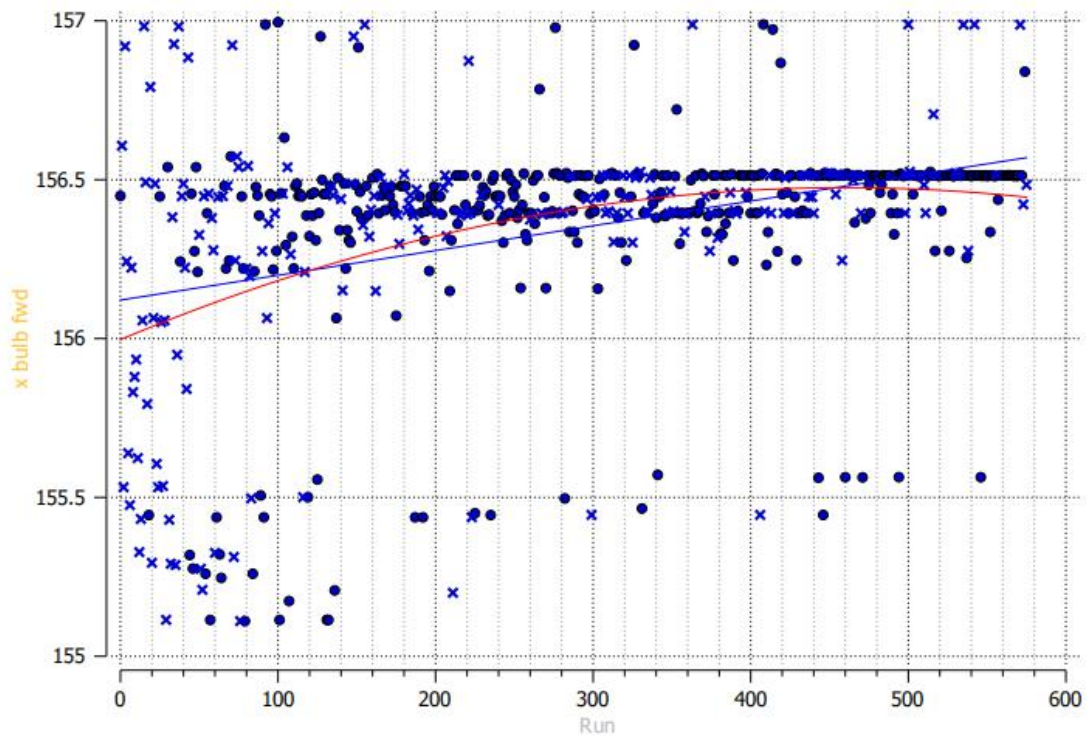
	Τιμή Πατρικού	Βέλτιστη τιμή	Μεταβολή
Αντίσταση κυματισμού	103,700	88,99	-0,142
Εκτόπισμα	8.622	8617,0	-0,001

Πίνακας 7: Αποτελέσματα βέλτιστης λύσης

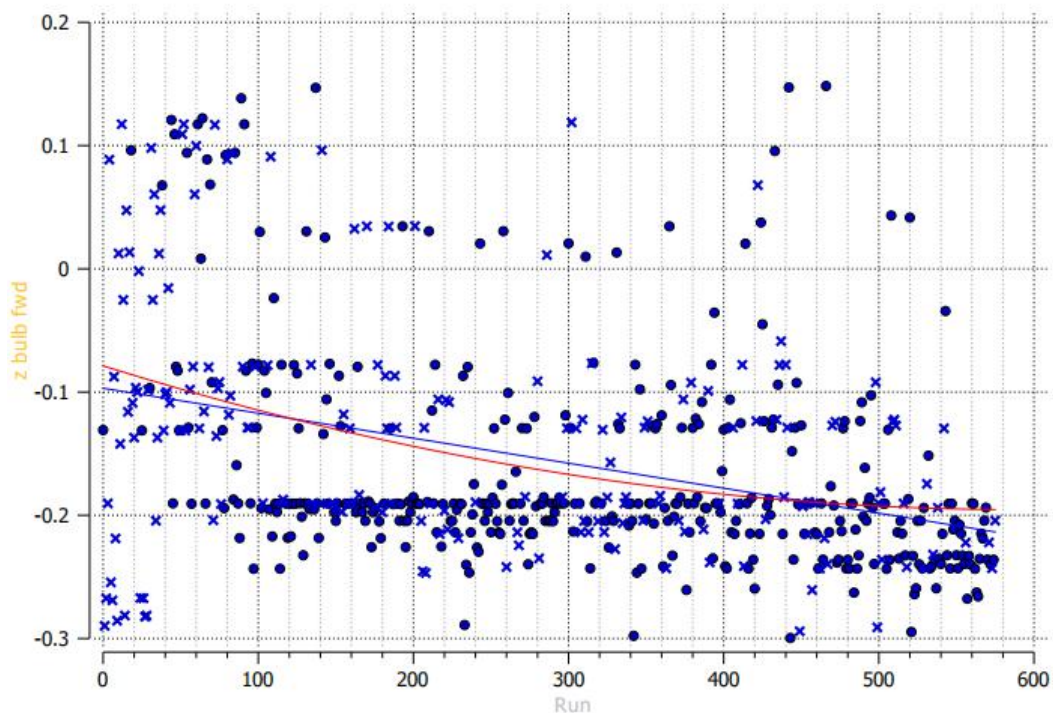
Προκύπτει, λοιπόν, μία λύση άκρως ικανοποιητική, αφού μειώνει την αντίσταση κυματισμού κατά 14,2%, ενώ το εκτόπισμα αποκλίνει από την αρχική σχεδίαση μόλις κατά 0,1%.

### 5.3 Βελτιστοποίηση ως προς την κατακόρυφη επιτάχυνση

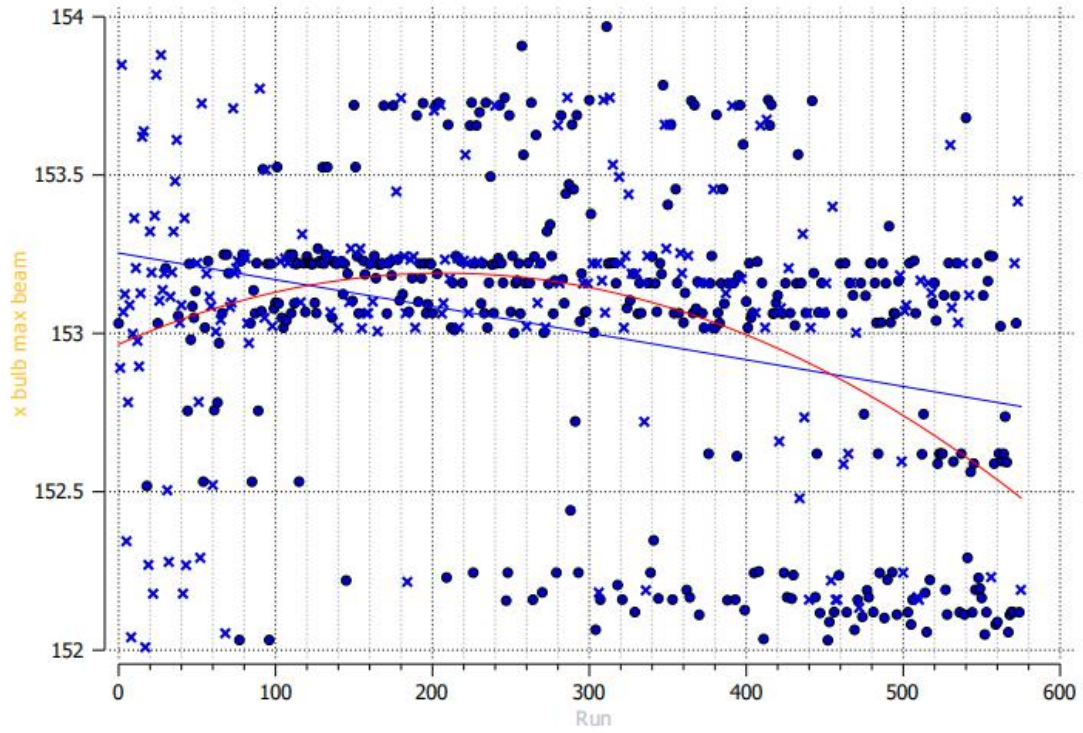
Εδώ θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα ως προς την κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλώρη. Η βελτιστοποίηση εκτελείται με τον ίδιο τρόπο με παραπάνω με τη διαφορά ότι ως κριτήριο λαμβάνεται μόνο η κατακόρυφη επιτάχυνση, χωρίς η αντίσταση να παίζει κάποιο ρόλο.



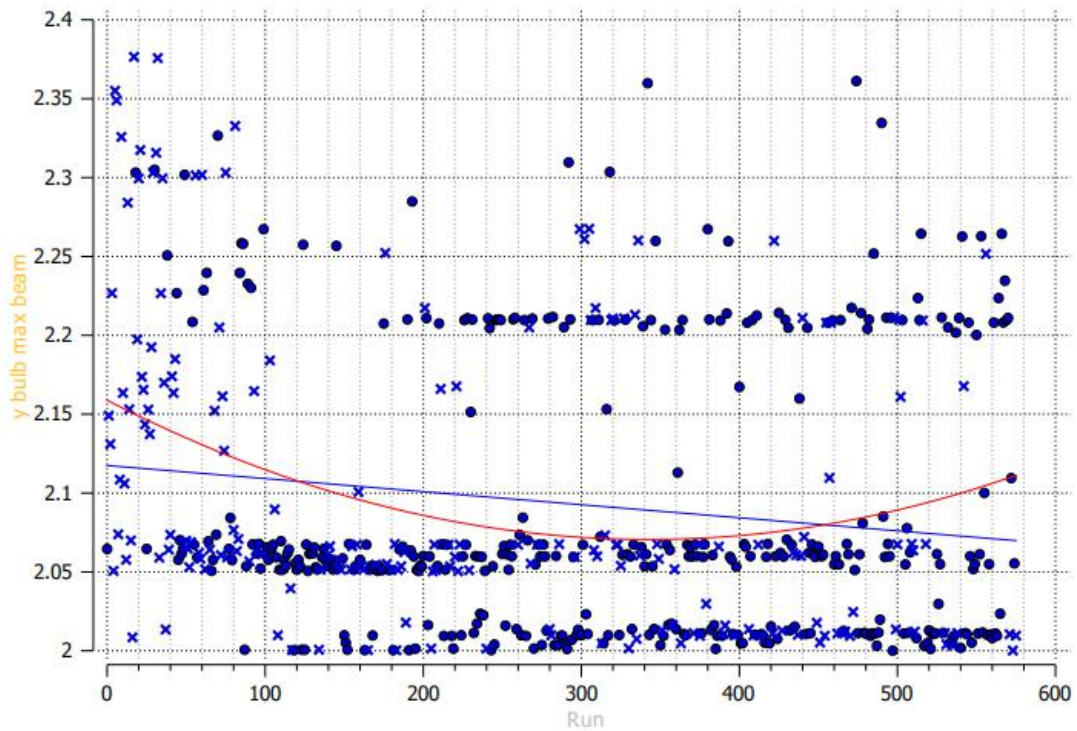
Σχήμα 51: Εξέλιξη της  $x_{bulb\_fwd}$  κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης



Σχήμα 52: Εξέλιξη της  $z_{bulb\_fwd}$  κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης

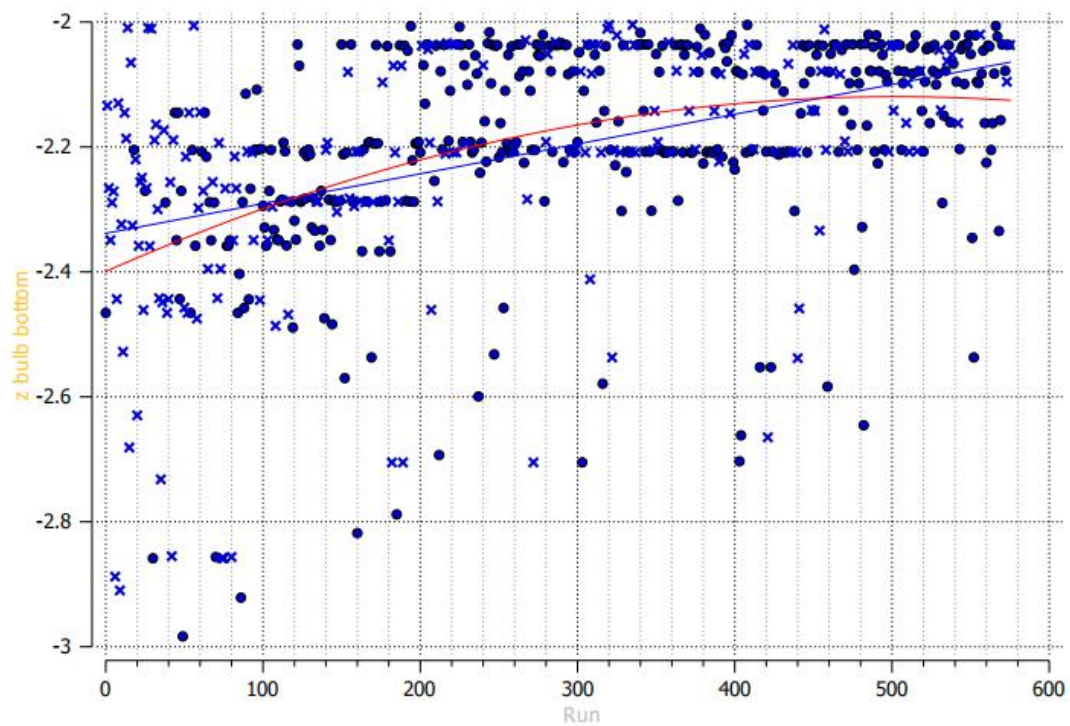


Σχήμα 53: Εξέλιξη της  $x_{bulb\_max\_beam}$  κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης

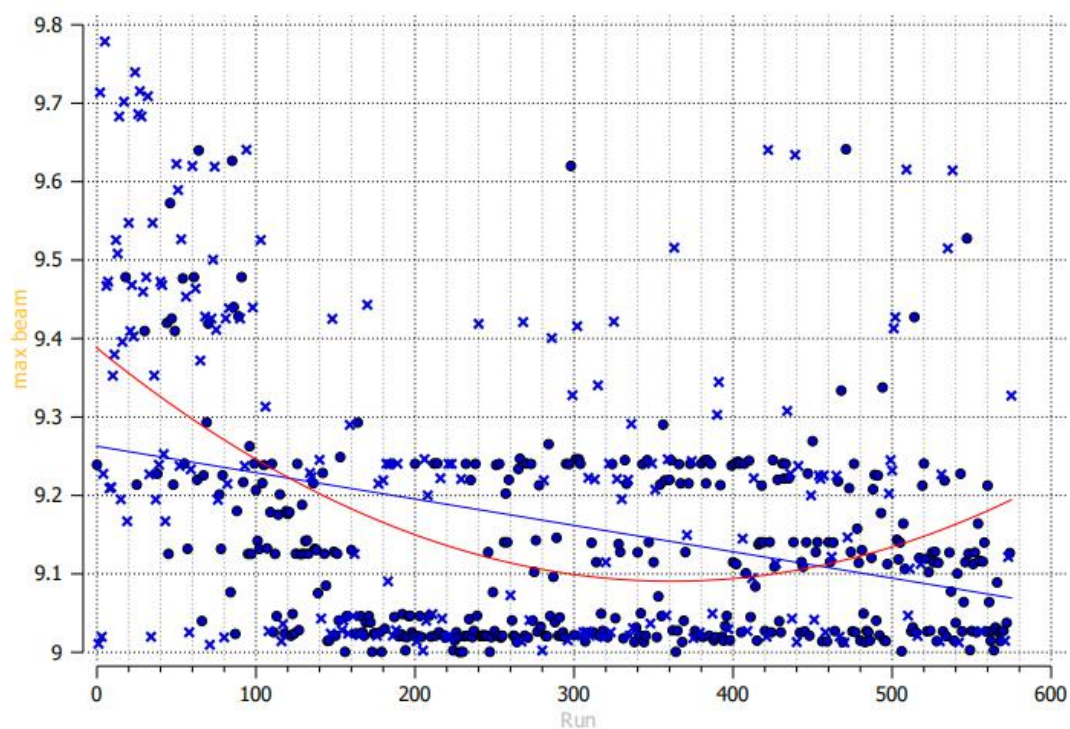


Σχήμα 54: Εξέλιξη της  $y_{bulb\_max\_beam}$  κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης

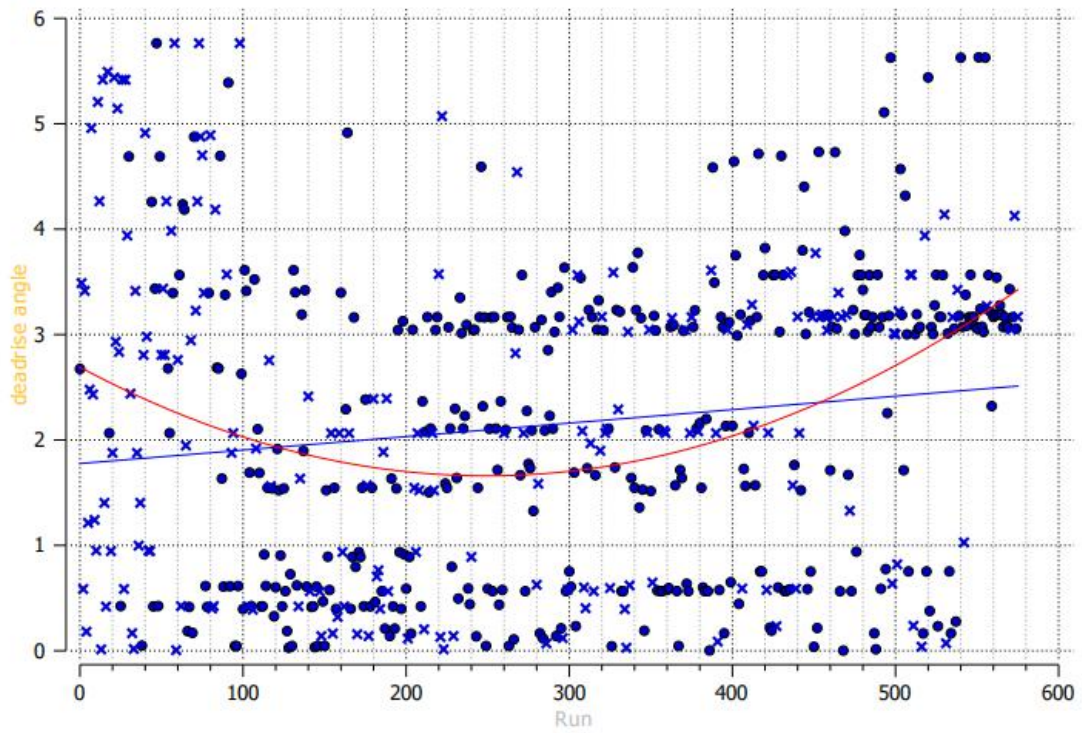




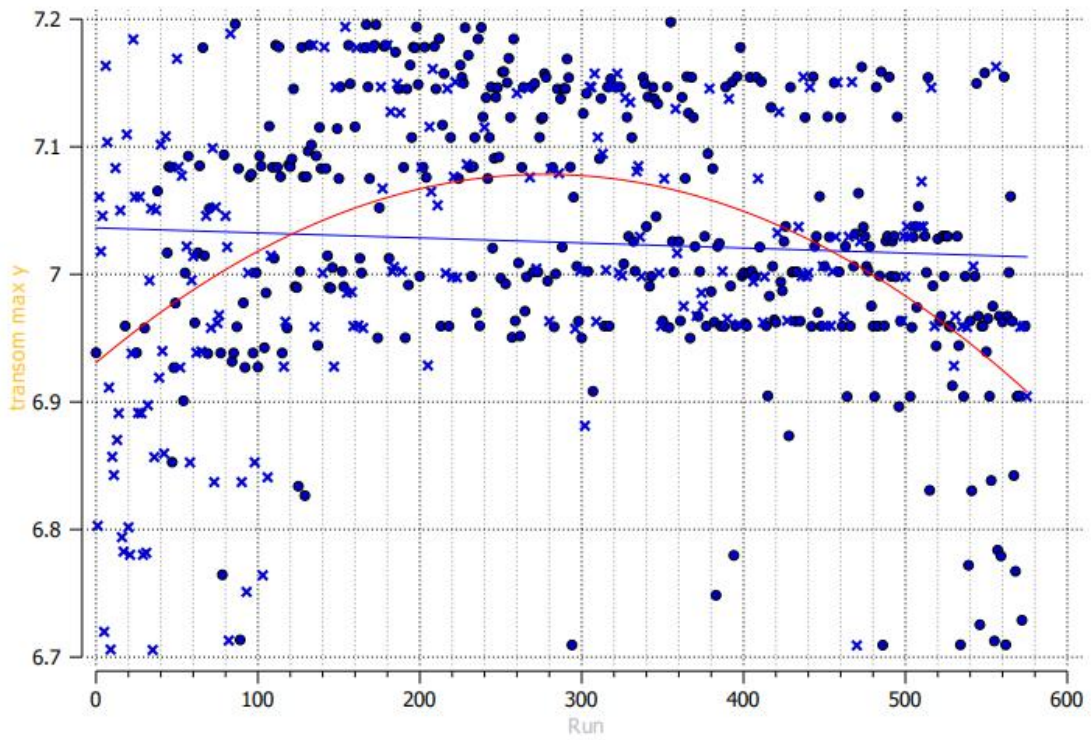
Σχήμα 55: Εξέλιξη της  $z_{bulb\_bottom}$  κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης



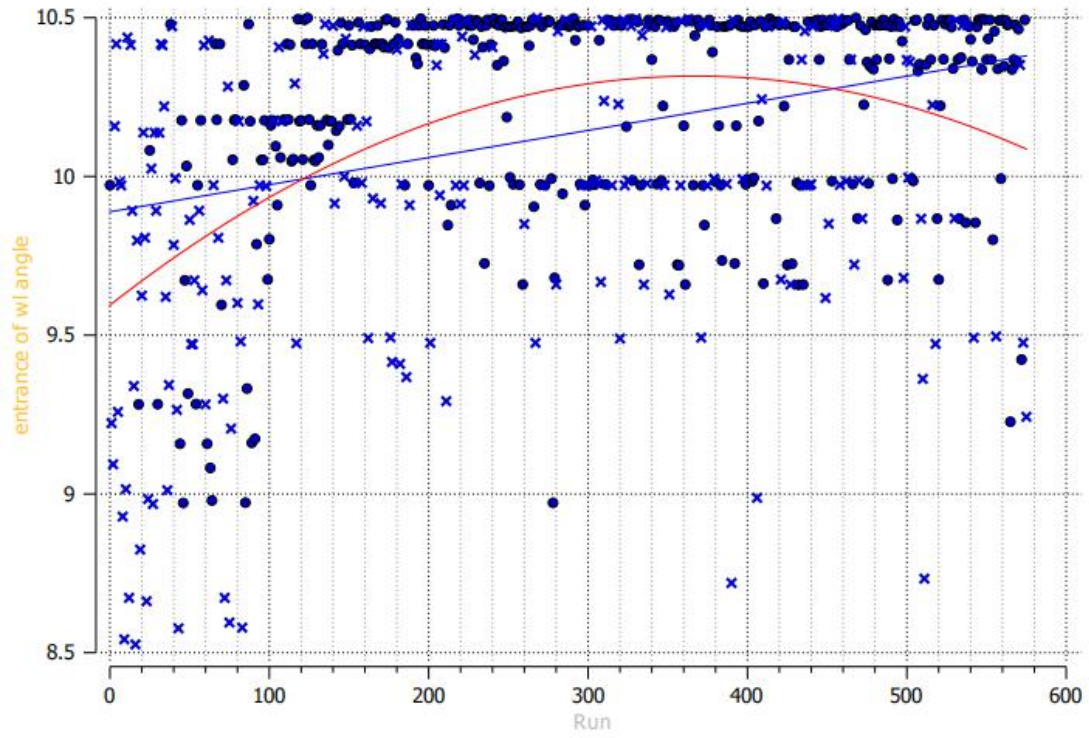
Σχήμα 56: Εξέλιξη της  $max\_beam$  κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης



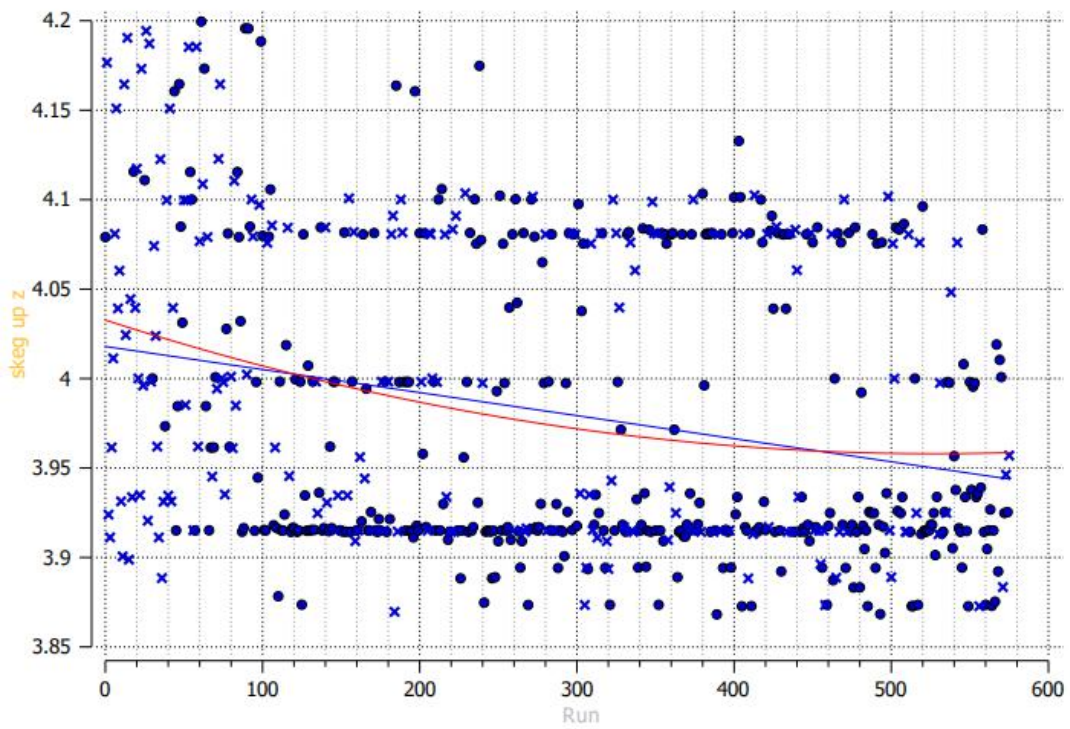
Σχήμα 57: Εξέλιξη της deadrise\_angle κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης



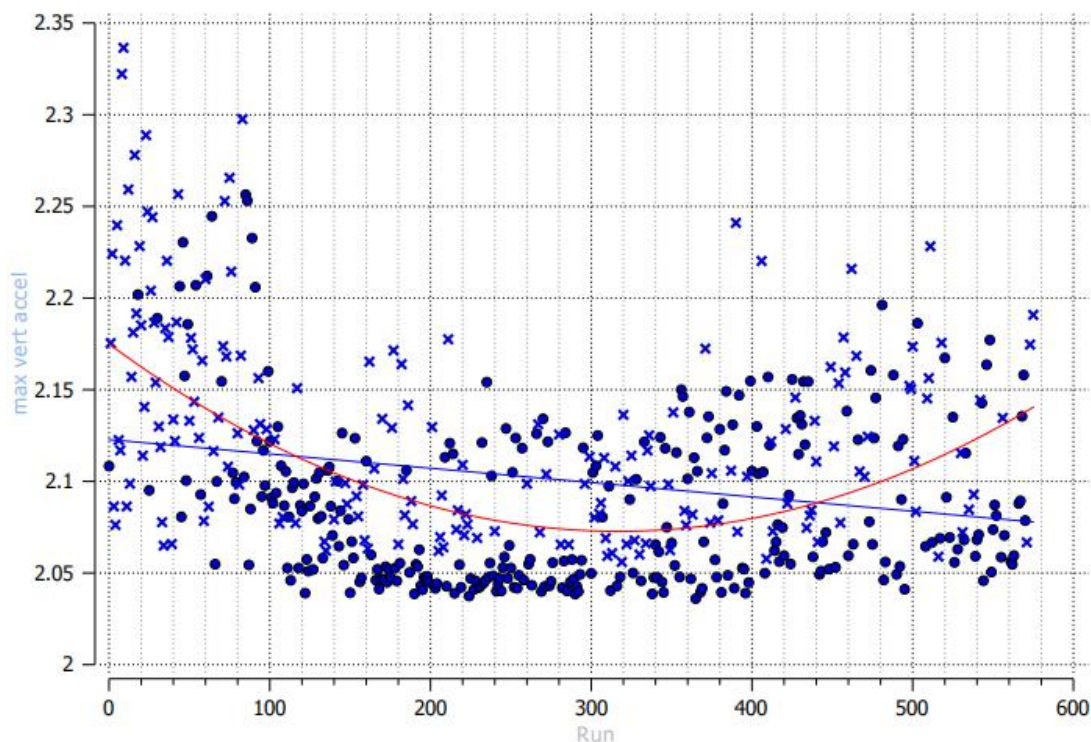
Σχήμα 58: Εξέλιξη της transom\_max\_y κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης



Σχήμα 59: Εξέλιξη της entrance\_of\_wl\_angle κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης



Σχήμα 60: Εξέλιξη της skveg\_z κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης



Σχήμα 61: Εξέλιξη της μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης

Και εδώ τα αποτελέσματα είναι αναμενόμενα, με τις μεταβλητές και την κατακόρυφη επιτάχυνση να συγκλίνουν και με τον αλγόριθμο να λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο με πριν.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων στη βέλτιστη σχεδίαση, καθώς και το RAO της κατακόρυφης επιτάχυνσης της βέλτιστης σχεδίασης σε σύγκριση με το πατρικό.

Μεταβλητή	Τιμή Πατρικού	Βέλτιστη τιμή	Μεταβολή	Μονάδες
x_bulb_fwd	155,57	156,51	0,006	m
z_bulb_fwd	-0,072	0,035	-1,479	m
x_bulb_max_beam	153,55	153,73	0,001	m
y_bulb_max_beam	2,112	2,011	-0,048	m
z_bulb_bottom	-2,108	-2,037	-0,034	m

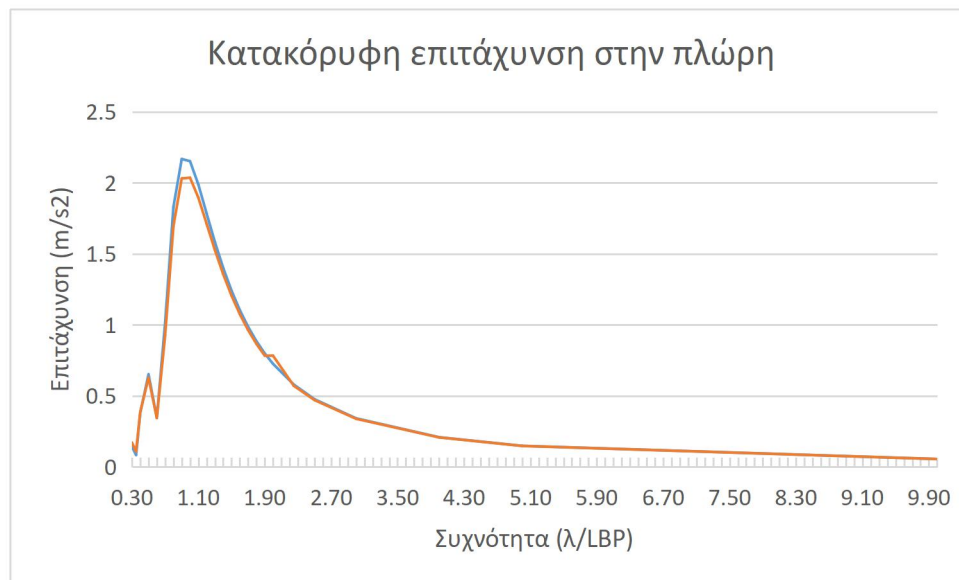
Πίνακας 8: Βέλτιστες τιμές και μεταβολή των παραμέτρων του βολβού

Μεταβλητή	Τιμή Πατρικού	Βέλτιστη τιμή	Μεταβολή	Μονάδες
max_beam	9,390	9,028	-0,039	m
deadrise_angle	0,058	1,569	26,052	°
transom_max_y	6,890	7,155	0,038	m
entrance_of_wl_angle	9,509	10,489	0,103	°
skæg z	3,868	3,914	0,012	m

Πίνακας 9: Βέλτιστες τιμές και μεταβολή των παραμέτρων της γάστρας

	Τιμή Πατρικού	Βέλτιστη τιμή	Μεταβολή
Κατακόρυφη επιτάχυνση	2,168	2,036	-0,061
Εκτόπισμα	8622	8586,8	-0,004

Πίνακας 10: Αποτελέσματα βέλτιστης τιμής



Σχήμα 62: RAO βελτιστοποιημένης γάστρας (κόκκινη γραμμή) σε σύγκριση με το RAO πατρική γάστρας (μπλε γραμμή)

Προκύπτει σημαντική βελτίωση ως προς την κατακόρυφη επιτάχυνση, αφού αυτή μειώνεται κατά 6,1%, ενώ το εκτόπισμα αποκλίνει μόνο κατά 0,4%.

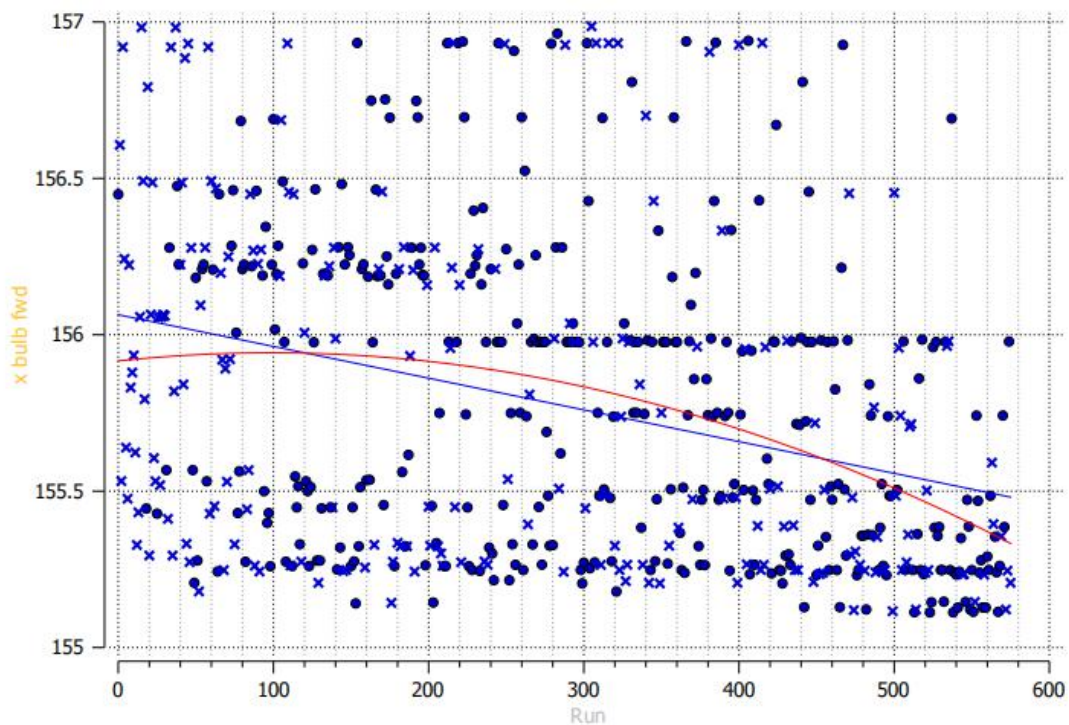
Όσον αφορά και τις δύο διαδικασίες βελτιστοποίησης που αναλύθηκαν παραπάνω, αξίζει να σημειωθεί ότι και στις δύο βέλτιστες λύσεις που προέκυψαν, το εκτόπισμα έχει μειωθεί σε σχέση με την αρχική μας σχεδίαση. Αυτό σημαίνει ότι έχει προσεγγίσει περισσότερο την τιμή του εκτοπίσματος του πατρικού πλοίου.

## 6. Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση

Αφού ολοκληρώσαμε την ξεχωριστή βελτιστοποίηση και ανάλυση των δύο κριτηρίων, προχωρήσαμε στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση. Σε αυτή τη διαδικασία απαιτείται η ταυτόχρονη μείωση τόσο της αντίστασης κυματισμού, όσο και της κατακόρυφης επιτάχυνσης. Είναι, λοιπόν αδύνατο να βρεθεί μία και μοναδική βέλτιστη λύση, αντίθετα οι βέλτιστες λύσεις είναι πολλές και σχηματίζουν ένα πεδίο λύσεων που υπερέχουν έναντι των υπολοίπων.

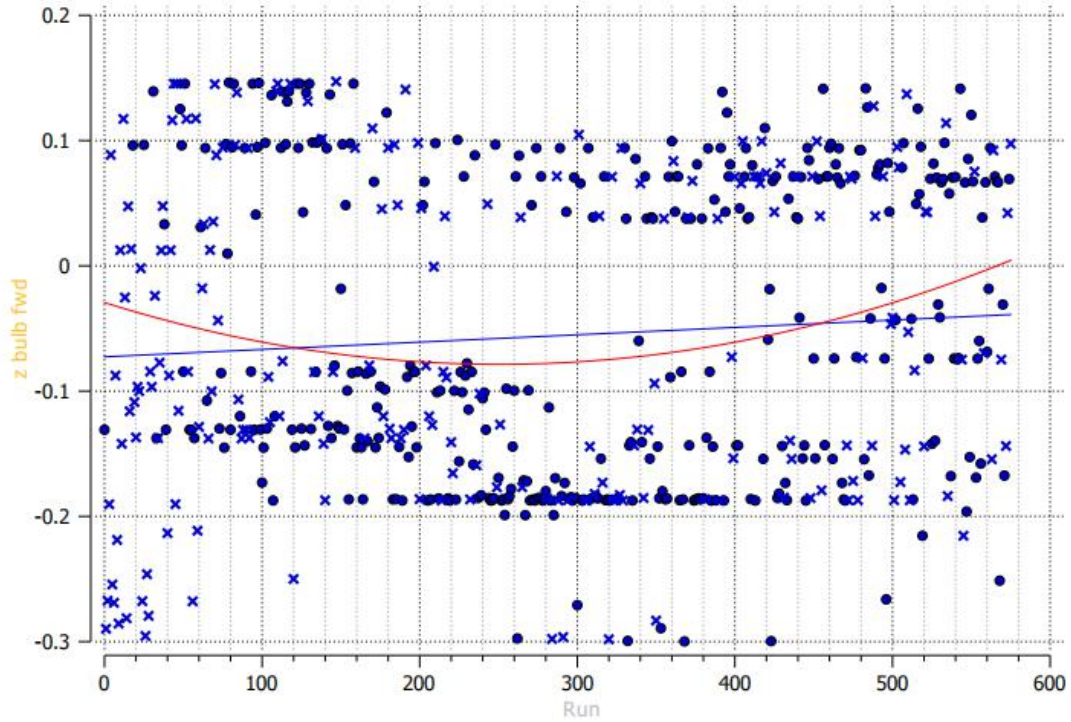
### 6.1 Βελτιστοποίηση με 10 παραμέτρους

Παρακάτω θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της διαδικασίας αναφορικά με την εξέλιξη των τιμών των δύο κριτηρίων, αλλά και των μεταβλητών σχεδίασης. Τα όρια των μεταβλητών σχεδίασης είναι αυτά που έχουμε ορίσει στην αρχή της μελέτης μας



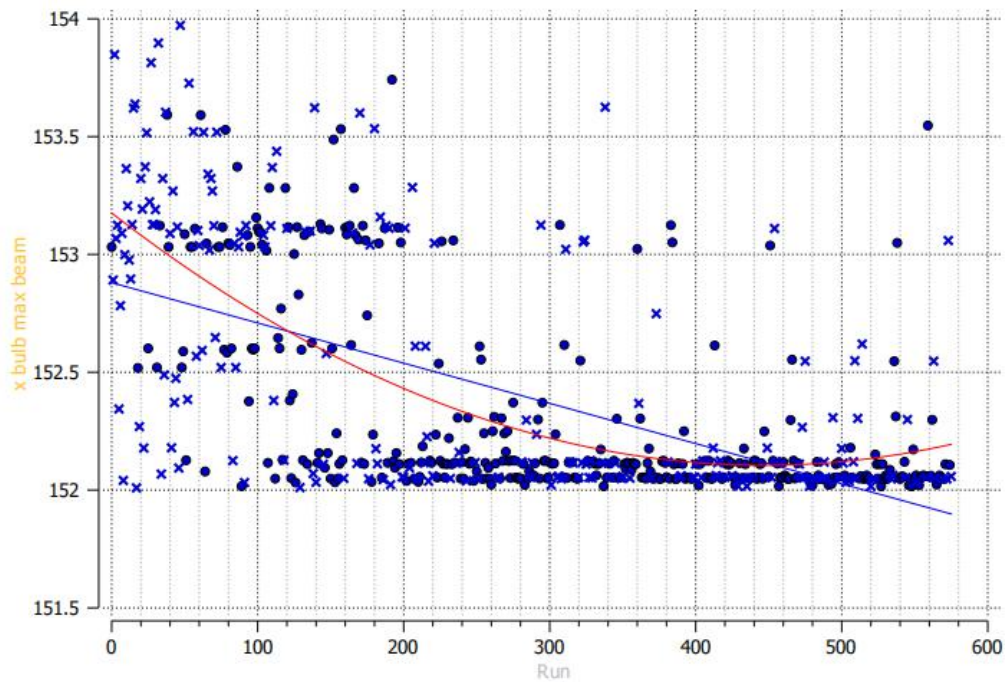
Σχήμα 63: Εξέλιξη της  $x_{bulb\_fwd}$  κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης

Η παράμετρος  $x_{bulb\_fwd}$  φαίνεται να συγκλίνει προς μία περιοχή, αλλά παίρνει τιμές και από διαφορετικές περιοχές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, όπως είδαμε στην εκτέλεση των δύο μονοκριτηριακών βελτιστοποιήσεων, τα δύο μας κριτήρια συγκλίνουν σε διαφορετικές περιοχές τιμών της παραμέτρου. Συνεπώς, έχει αξία η μελέτη της συγκεκριμένης μεταβλητής για τον εντοπισμό των περιοχών που παρέχουν καλύτερες τιμές και για τα δύο κριτήρια ταυτόχρονα.



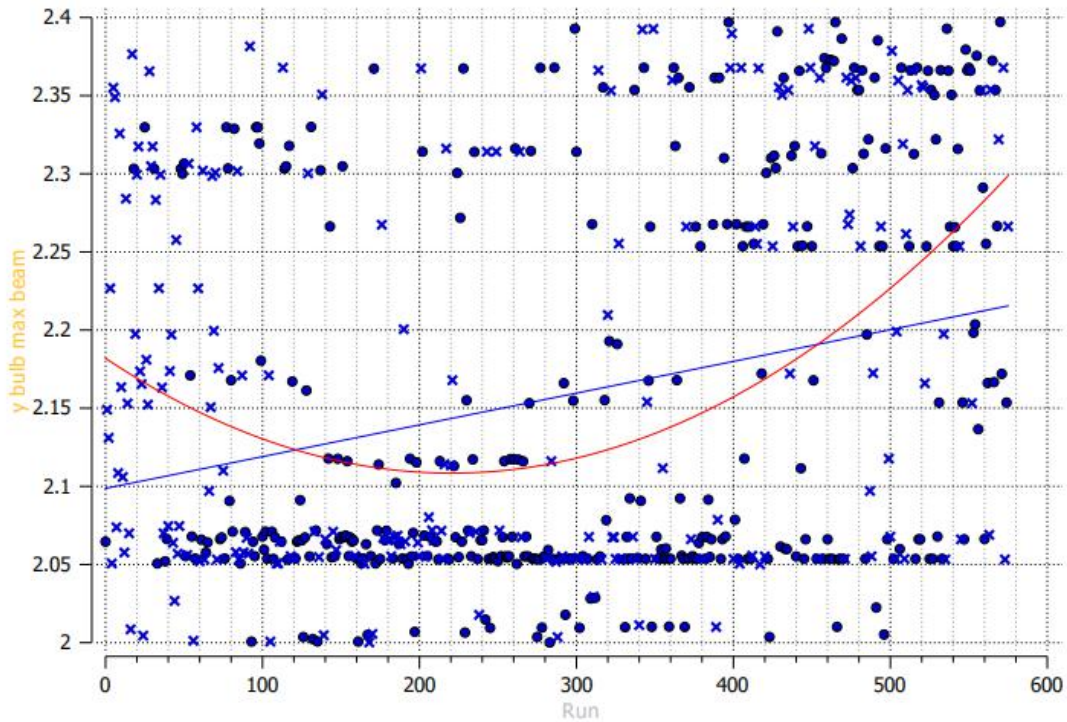
Σχήμα 64: Εξέλιξη της  $z\_bulb\_fwd$  κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης

Παρατηρούμε ότι η μεταβλητή  $z\_bulb\_fwd$  παίρνει τιμές σε δύο κυρίως περιοχές, χωρίς όμως η συνεισφορά της στην αντίσταση να είναι σημαντική, ενώ και η μεταβολή της ως απόλυτο μέγεθος είναι και αυτή μικρή. Συνεπώς, η συγκεκριμένη παράμετρος δεν παίζει τόσο σημαντικό ρόλο στη βελτιστοποίηση.



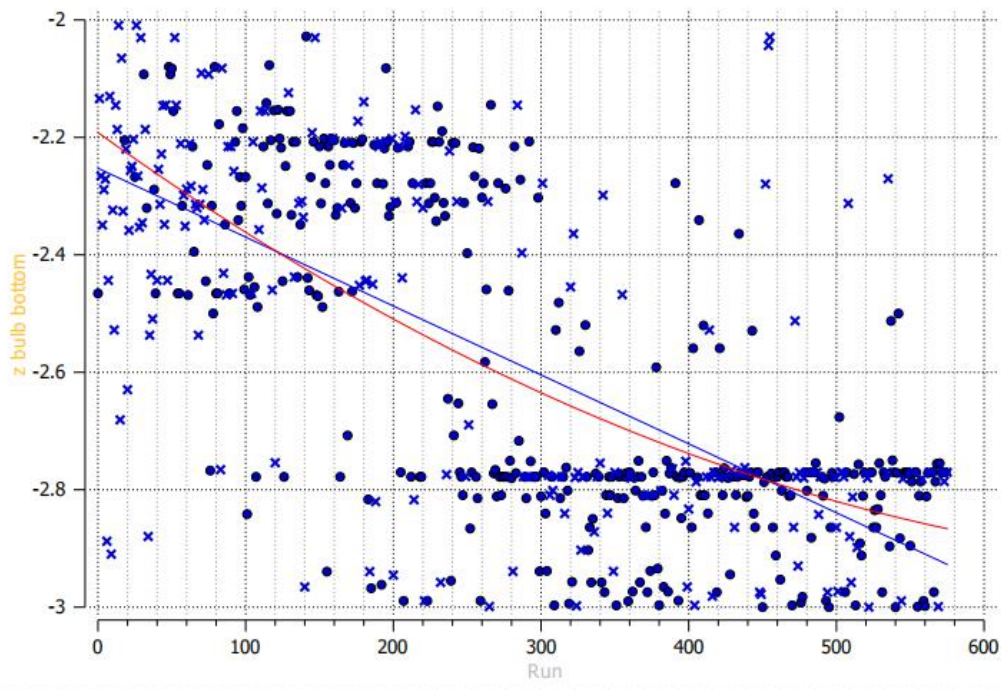
Σχήμα 65: Εξέλιξη της  $x\_bulb\_max\_beam$  κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης

Η παράμετρος  $x\_bulb\_max\_beam$  συγκλίνει επιτυχώς στα 152,1m περίπου και βοηθά στη βελτίωση των κριτηρίων μας.



Σχήμα 66: Εξέλιξη της  $y\_bulb\_max\_beam$  κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης

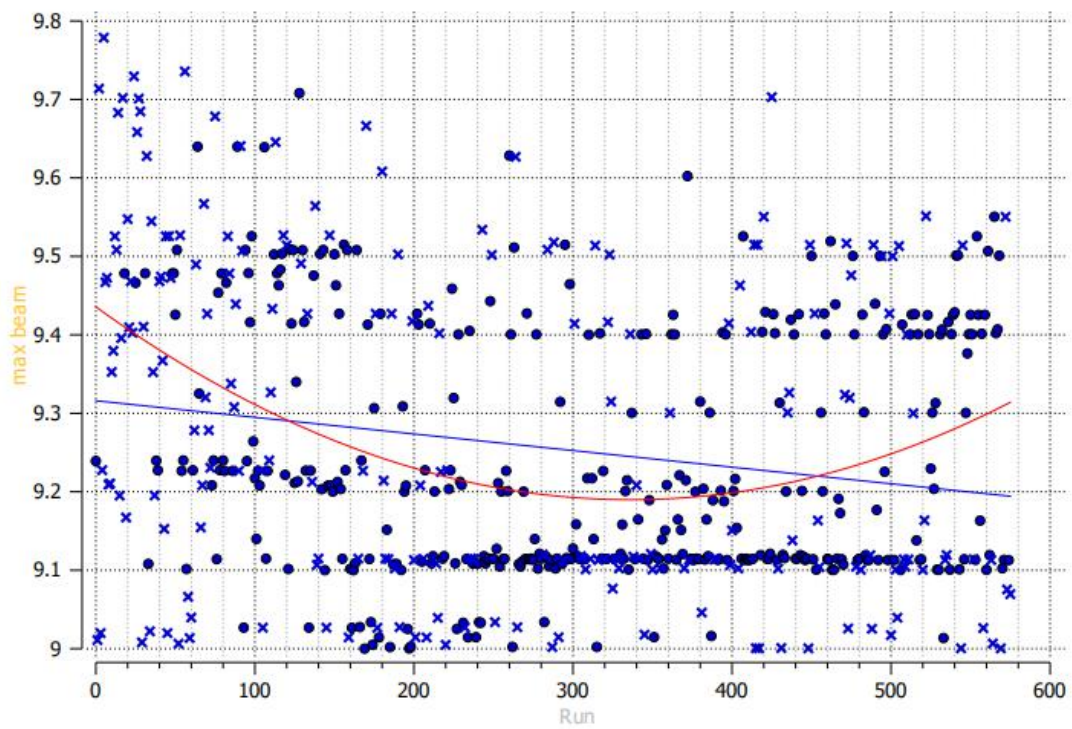
Η παραπάνω μεταβλητή ενώ αρχικά δείχνει να συγκλίνει, στην πορεία παίρνει τιμές και βρίσκει λύσεις και σε άλλη περιοχή από αυτή της σύγκλισης. Δε μπορεί, λοιπόν, να μας δώσει σαφή εικόνα ως προς τη σημασία που έχει κατά τη βελτιστοποίηση και θα αφαιρεθεί.



Σχήμα 67: Εξέλιξη της  $z\_bulb\_bottom$  κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης

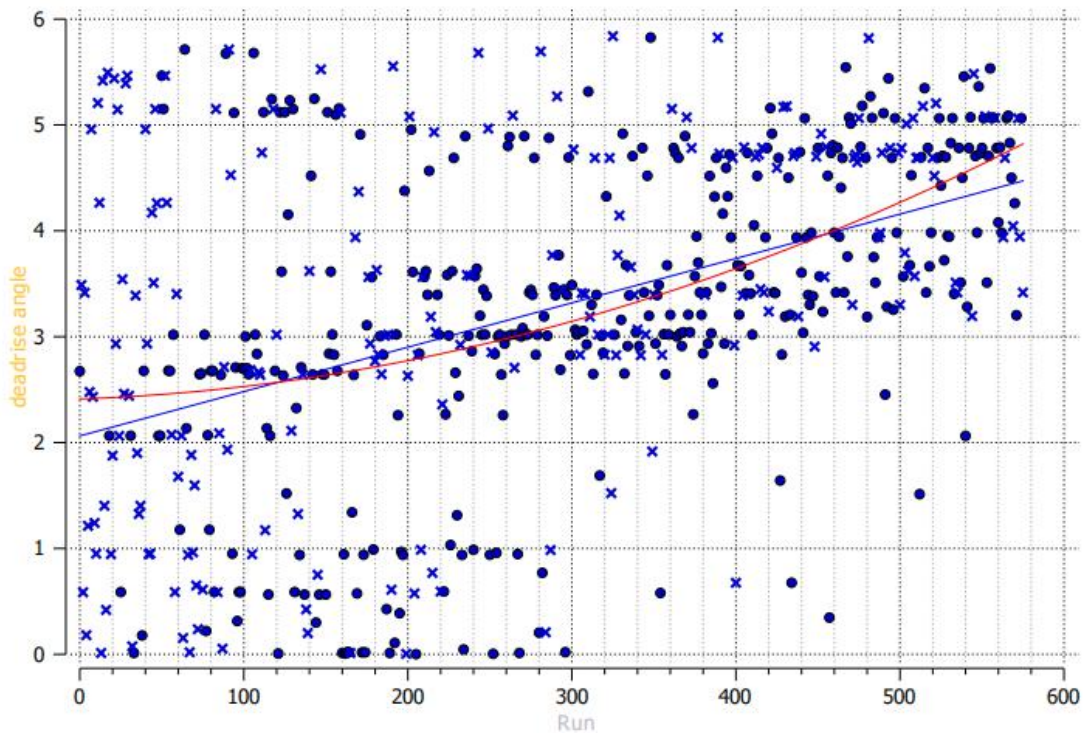
Η  $z\_bulb\_bottom$  συγκλίνει κοντά στην τιμή  $-2,8m$  και δείχνει να επηρεάζει τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης με τη μεταβολή της.





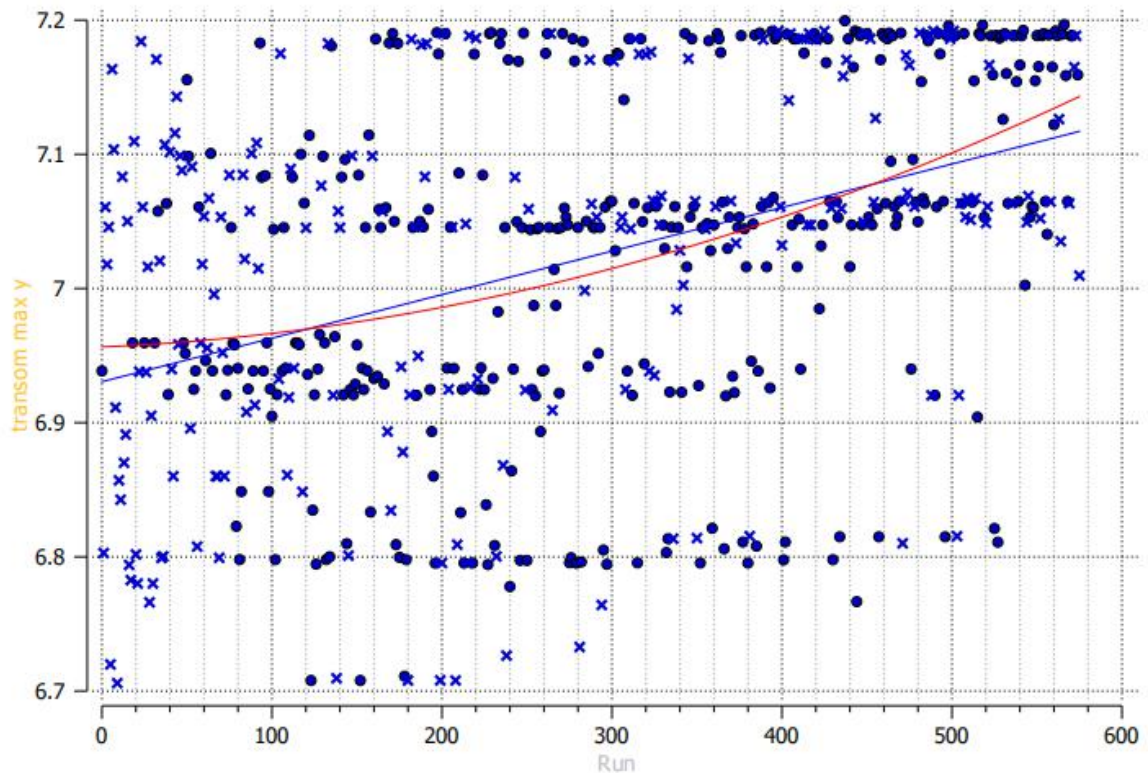
Σχήμα 68: Εξέλιξη της max\_beam κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης

Το μέγιστο πλάτος συγκλίνει στα 9,1m, ωστόσο παίρνει τιμές και σε άλλες περιοχές. Είναι μια παράμετρος που γενικά επηρεάζει τη βελτιστοποίηση.



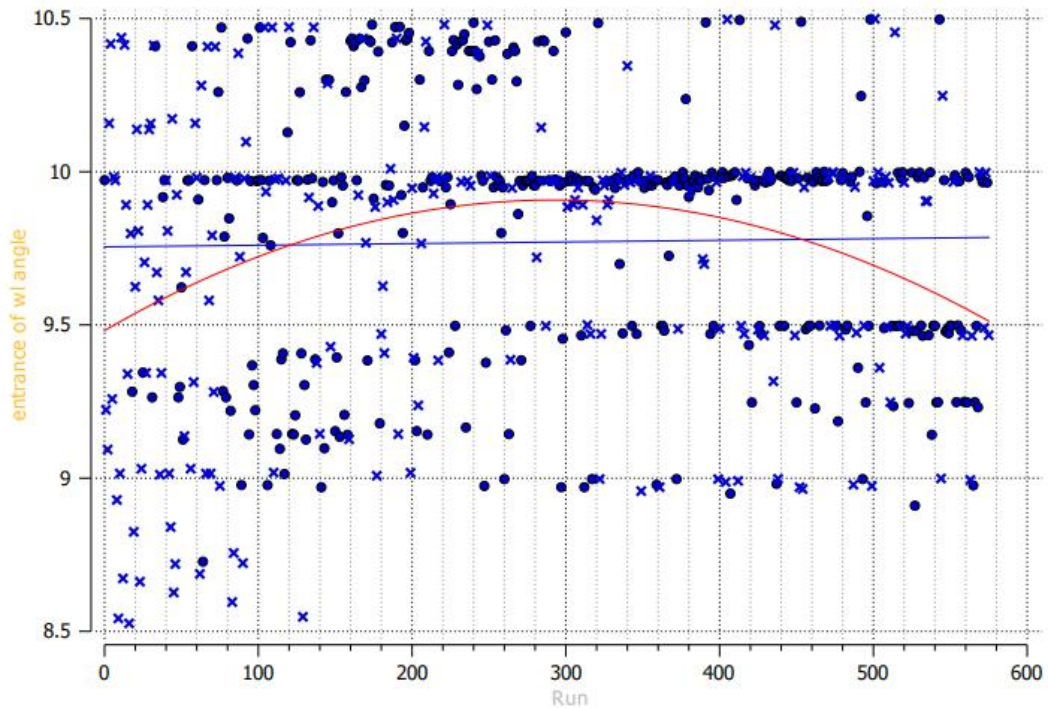
Σχήμα 69: Εξέλιξη της deadrise\_angle κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης

Η *deadrise\_angle* αποτέλεσε μία ιδιαίτερη περίπτωση στη μελέτη μας. Η συγκεκριμένη μεταβλητή φαίνεται να συγκλίνει σε όλο και μεγαλύτερες τιμές, ενώ έχει και πολύ θετική συμβολή στη μείωση της αντίστασης κυματισμού. Αυτό, όμως οφείλεται περισσότερο στον τρόπο με το οποίο το SWAN δημιουργεί τις επιφάνειες και με στον τρόπο με τον οποίο αναλύει φαινόμενα συνεκτικότητας στην πρύμνη. Δε μπορούμε, συνεπώς, να εμπιστευτούμε τα αποτελέσματα που προκύπτουν και για αυτό αφαιρούμε τη συγκεκριμένη παράμετρο από τη μελέτη μας.



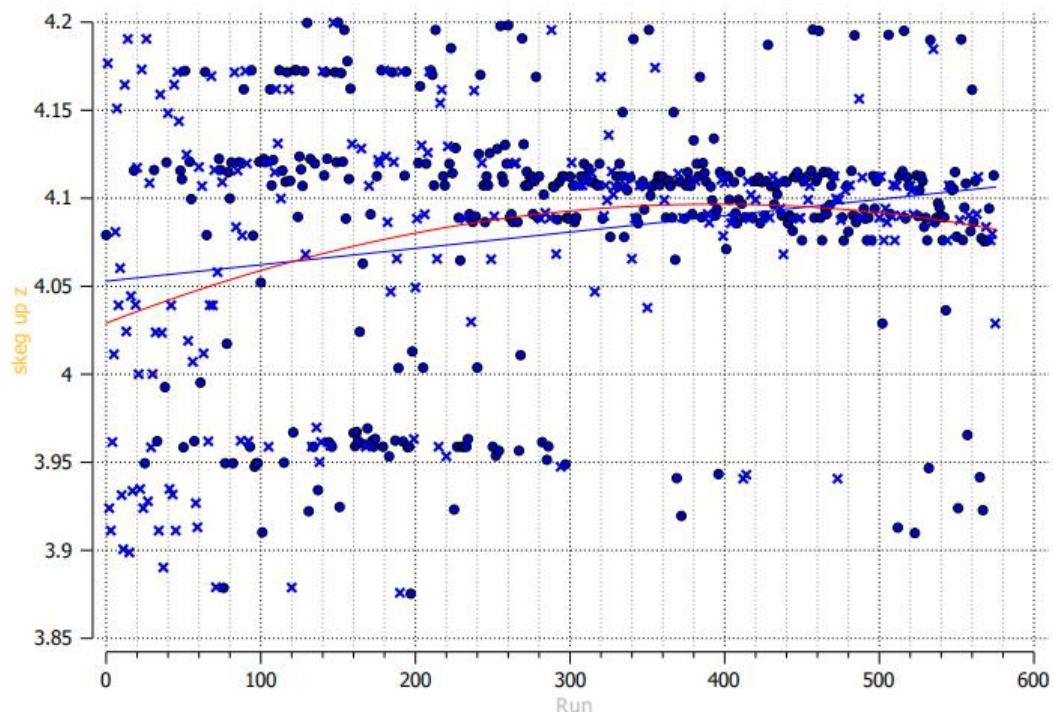
Σχήμα 70: Εξέλιξη της *transom\_max\_y* κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης

Αντίστοιχα με τη *deadrise\_angle*, το *transom\_max\_y* δείχνει να βελτιώνει τις γεωμετρίες μας όσο αυξάνεται η τιμή του. Για τον ίδιο λόγο με παραπάνω, και αφού δεν εμπιστευόμαστε τα αποτελέσματα που παράγει το SWAN στην πρύμνη, αφαιρούμε το πλάτος του καθρέφτη από τη μελέτη μας.



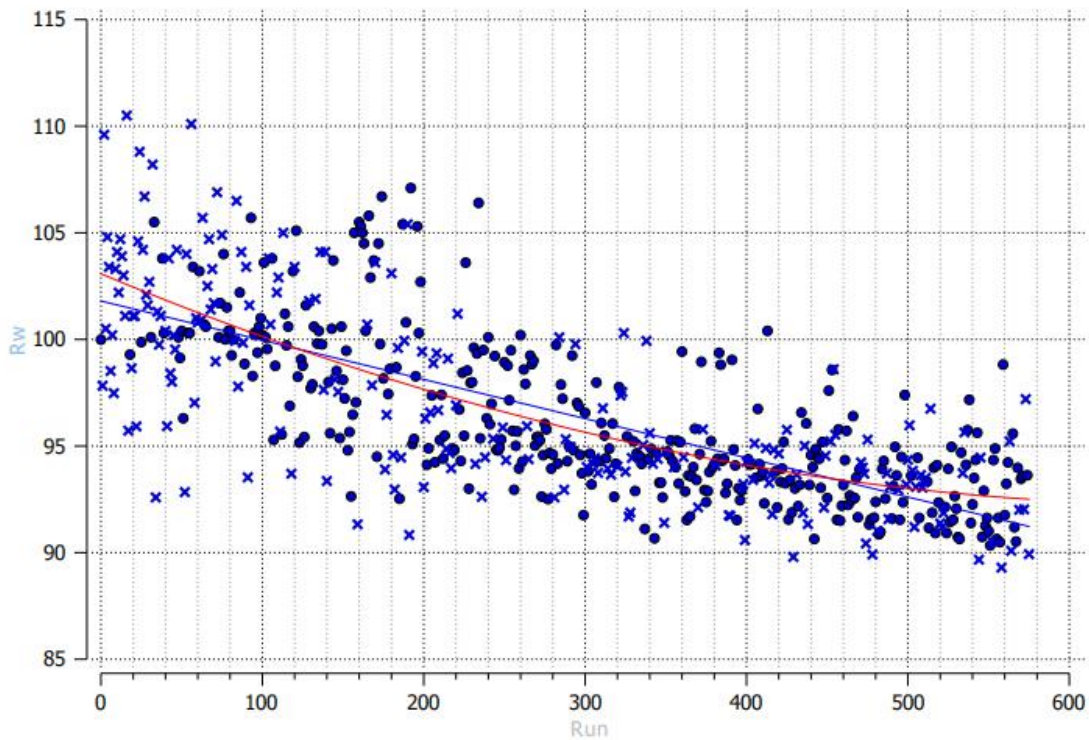
Σχήμα 71: Εξέλιξη της entrance\_of\_wl\_angle κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης

Η γωνία εισόδου πλώρης δείχνει να συγκλίνει σε μία περιοχή, αλλά παίρνει τιμές και σε άλλες. Είναι μια χρήσιμη παράμετρος για τη βελτιστοποίηση που εκτελούμε.

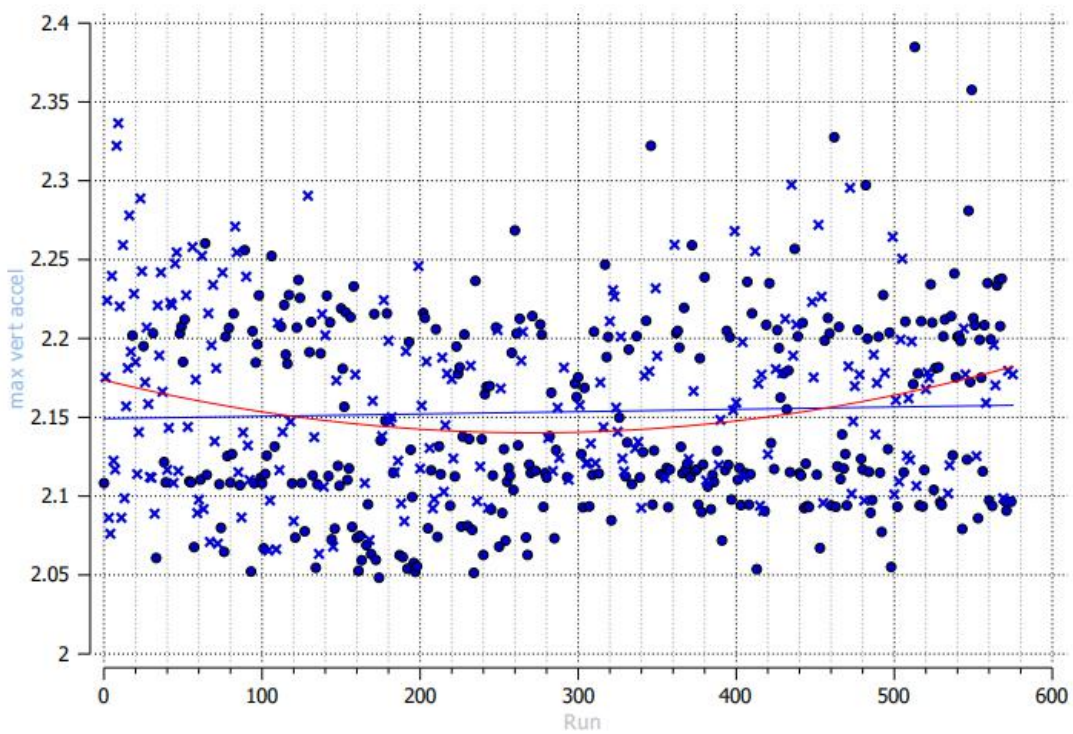


Σχήμα 72: Εξέλιξη της skew\_z κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης

Η μεταβλητή skew\_z δείχνει να συγκλίνει στην τιμή που έχει στο πατρικό πλοίο, συνεπώς δεν έχει ιδιαίτερο νόημα η μελέτη της και την αφαιρούμε.



Σχήμα 73: Εξέλιξη της αντίστασης κυματισμού  $R_w$  κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης



Σχήμα 74: Εξέλιξη της μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης

Παρατηρούμε ότι, όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις υπάρχει σύγκλιση των λύσεων. Παρακάτω παρουσιάζονται η τιμές που προκύπτουν σε μία εκ των βέλτιστων λύσεων, καθώς και το σύνολο των συνδυασμών των βέλτιστων λύσεων.

Μεταβλητή	Τιμή Πατρικού	Βέλτιστη τιμή	Μεταβολή	Μονάδες
x_bulb_fwd	155,57	155,29	-0,002	m
z_bulb_fwd	-0,072	-0,069	-0,046	m
x_bulb_max_beam	153,55	152,06	-0,010	m
y_bulb_max_beam	2,112	2,066	-0,022	m
z_bulb_bottom	-2,108	-2,998	0,422	m

Πίνακας 11: Τιμές των παραμέτρων του βολβού για μία εκ των βέλτιστων λύσεων

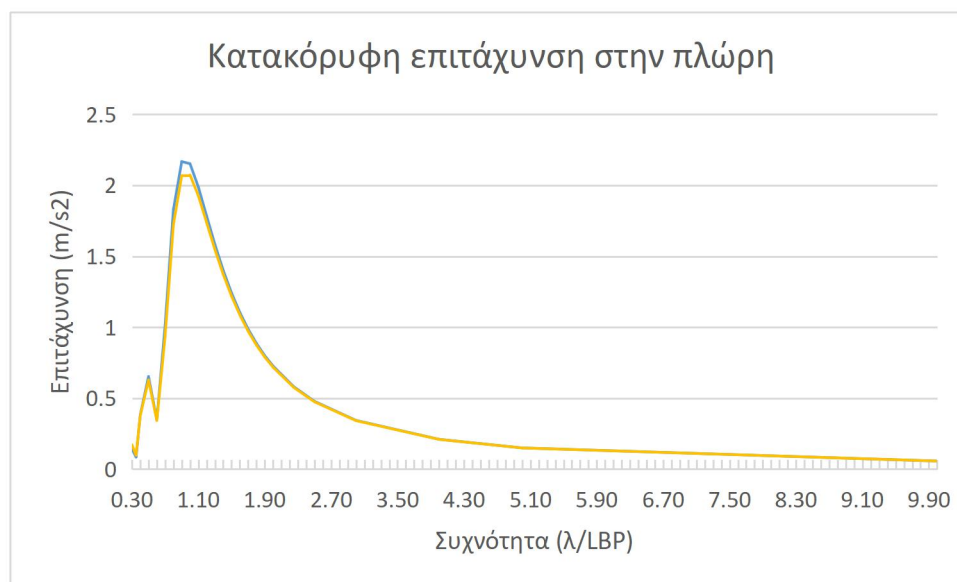
Μεταβλητή	Τιμή Πατρικού	Βέλτιστη τιμή	Μεταβολή	Μονάδες
max_beam	9,390	9,100	-0,031	m
deadrise_angle	0,058	4,079	69,328	°
transom_max_y	6,890	7,122	0,034	m
entrance_of_wl_angle	9,509	9,997	0,051	°
skeg_z	3,868	4,162	0,076	m

Πίνακας 12: Τιμές των παραμέτρων της γάστρας για μία εκ των βέλτιστων λύσεων

	Τιμή Πατρικού	Βέλτιστη τιμή	Μεταβολή
Κατακόρυφη επιτάχυνση	2,168	2,097	-0,033
Αντίσταση κυματισμού	103,700	91,76	-0,115
Εκτόπισμα	8.622	8545,3	-0,009

Πίνακας 13: Τιμές μίας εκ των βέλτιστων λύσεων

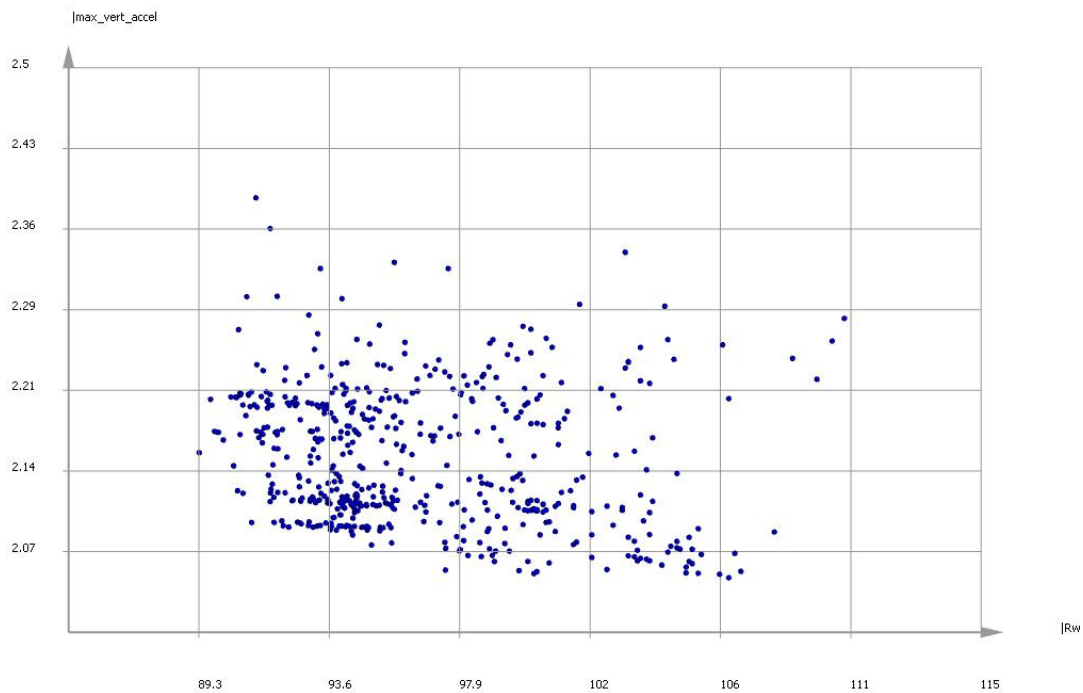
Ακολουθεί η αναπαράσταση του RAO μιας εκ των βέλτιστων λύσεων σε σύγκριση με το RAO της πατρικής γάστρας.



Σχήμα 75: RAO μιας εκ των βέλτιστων λύσεων (πορτοκαλί γραμμή) σε κοινό διάγραμμα με το RAO της πατρικής γάστρας (μπλε γραμμή)

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται όλες οι λύσεις που προέκυψαν κατά τη βελτιστοποίηση σε κοινό διάγραμμα της κατακόρυφης επιτάχυνσης και της αντίστασης κυματισμού. Οι λύσεις που βρίσκονται κάτω και αριστερά στο

διάγραμμα είναι οι βέλτιστες και σχηματίζουν το μέτωπο των pareto λύσεων, δηλαδή όλων των λύσεων απέναντι στις οποίες δεν υπερισχύει κάποια άλλη λύση.



Σχήμα 76: Παράσταση της αντίστασης κυματισμού(οριζόντιος άξονας) και της κατακόρυφης επιτάχυνσης(κατακόρυφος άξονας)

Όπως ήταν αναμενόμενο, οι παραπάνω λύσεις δε μπορούν να διακριθούν μεταξύ τους, ως προς τον μία υπερισχύει έναντι μίας άλλης και η σχεδίαση που θα επιλεγεί τελικά έχει να κάνει με τις προτεραιότητες του κατασκευαστή ή και με κάποια επιπλέον όρια που μπορεί να τεθούν. Σε κάθε περίπτωση, οι μεταβολές που προκύπτουν είναι σημαντικές, αφού όλες ξεπερνούν το 2%.

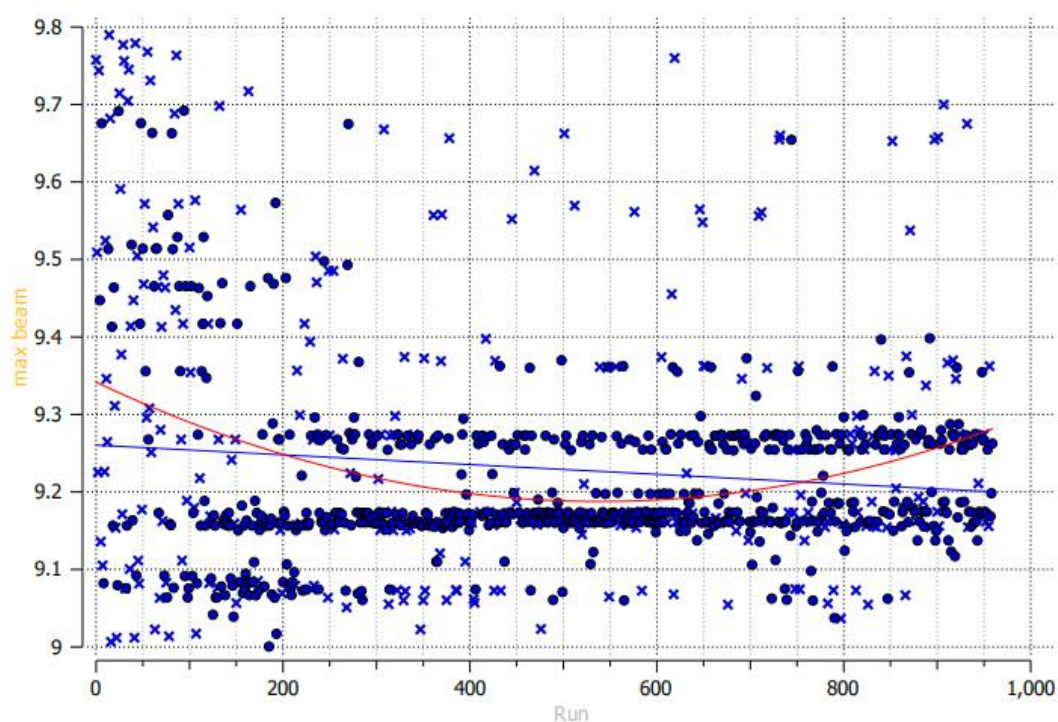
## 6.2 Βελτιστοποίηση με 5 παραμέτρους

Ένα από τα συμπεράσματα που εξάγαμε από την παραπάνω διαδικασία ήταν ότι ορισμένες από τις μεταβλητές σχεδίασης δεν είχαν και τόσο σημαντική επίδραση στα αποτελέσματα που προέκυψαν. Ταυτόχρονα, υπήρχαν και κάποιες με σημαντική επίδραση, όπως η *deadrise\_angle*, που όμως οφείλονταν στην αδυναμία της θεωρίας δυναμικού να περιγράψει σωστά τις ροές στην πρύμνη. Έτσι επιλέξαμε να εκτελέσουμε εκ νέου τη βελτιστοποίηση με βάση τις πέντε παραμέτρους που φαίνονται παρακάτω.

Μεταβλητή	Κατώτατη τιμή	Τιμή Πατρικού	Ανώτατη τιμή	Μονάδες
max_beam	9,000	9,390	9,800	m
entrance_of_wl_angle	8,500	9,509	10,500	°
x_bulb_fwd	155,100	155,570	157,000	m
x_bulb_max_beam	152,000	153,545	154,000	m
z_bulb_bottom	-3,000	-2,108	-2,000	m

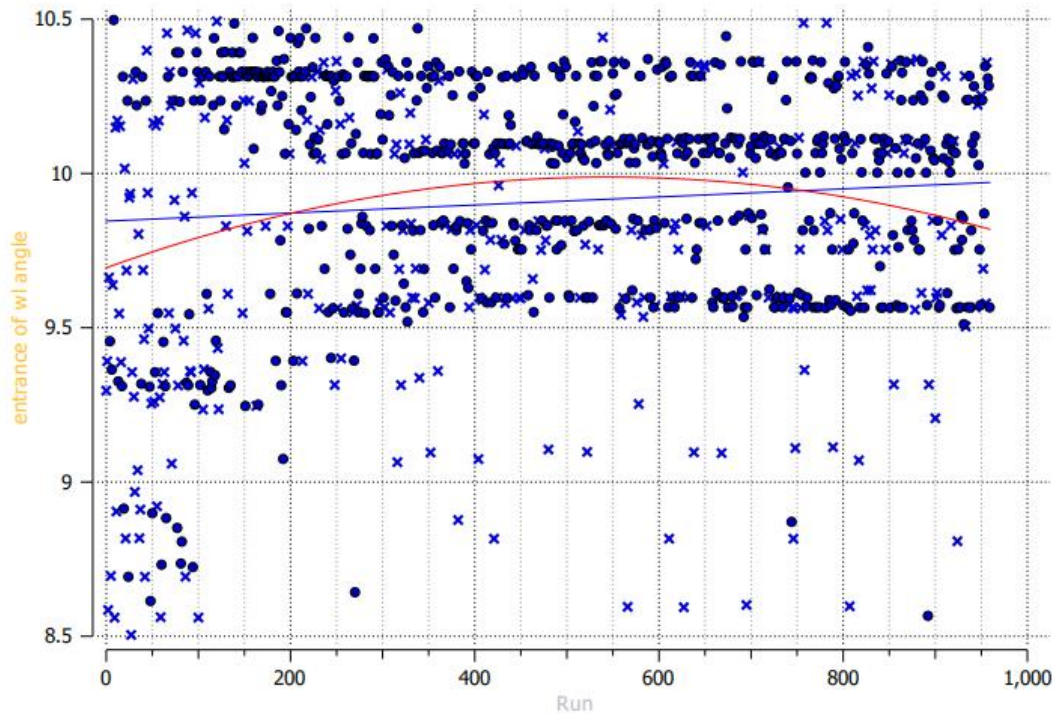
Πίνακας 14: Παράμετροι της νέας βελτιστοποίησης

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της νέας διαδικασίας βελτιστοποίησης.



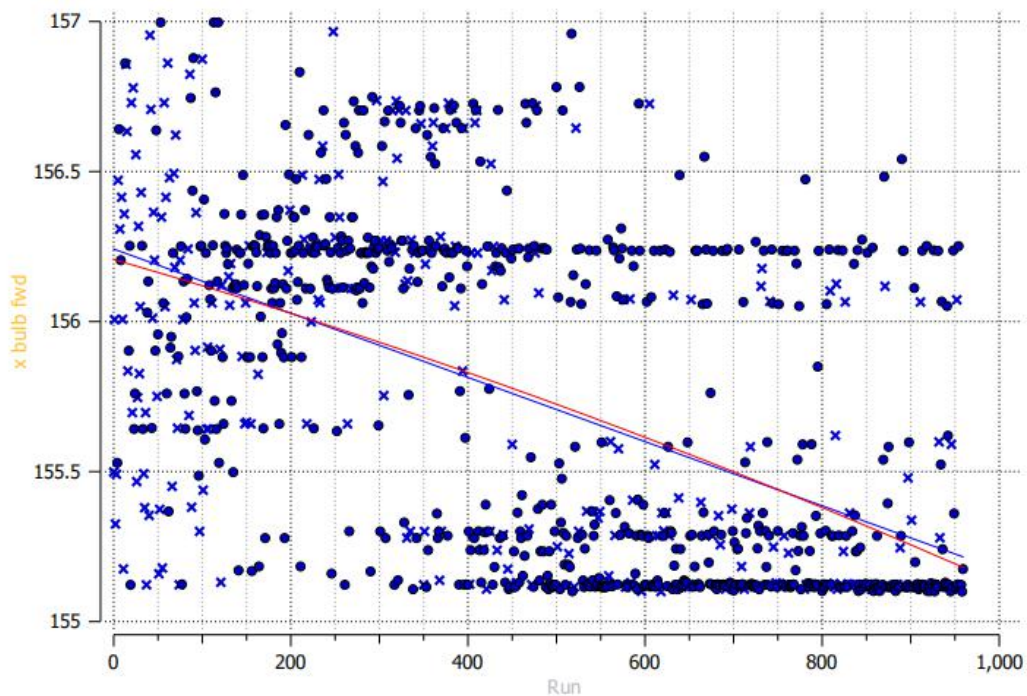
Σχήμα 77: Εξέλιξη της *max\_beam* κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης

Παρατηρούνται καλύτερες τιμές στα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά με μία μικρή μείωση του πλάτους της γάστρας που φαίνεται να συγκλίνει σε δύο κοντινές περιοχές.



Σχήμα 78: Εξέλιξη της entrance\_of\_wl\_angle κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης

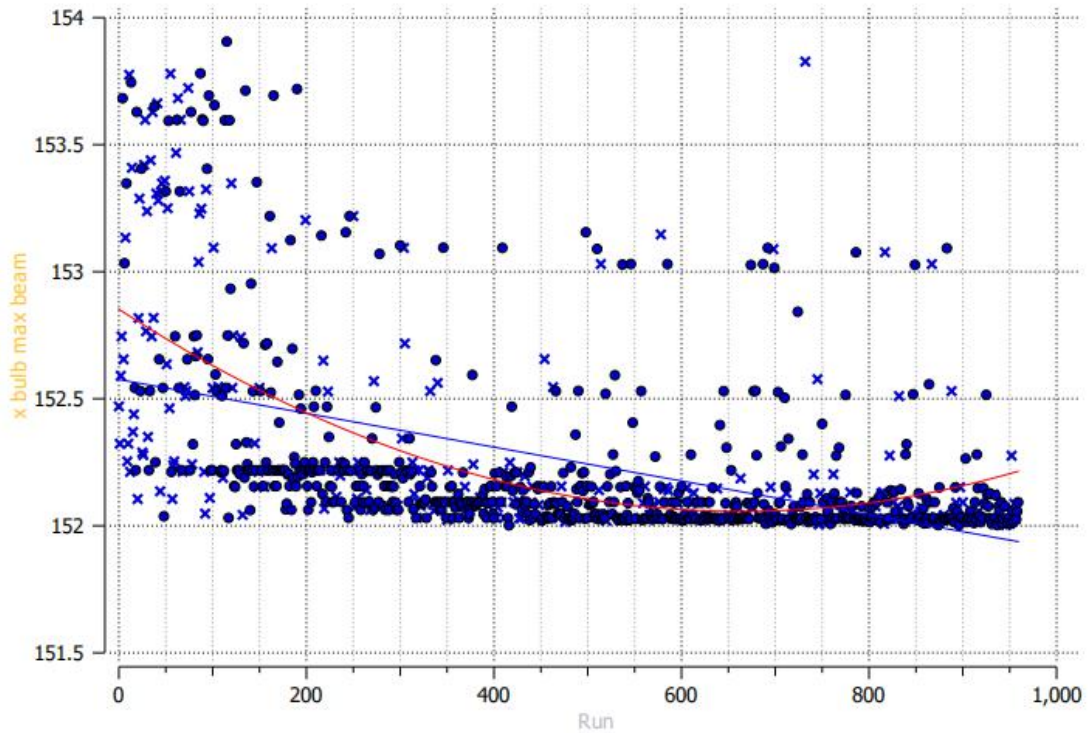
Η γωνία εισόδου πλήρης παρουσιάζει σύγκλιση, αλλά παίρνει αρκετές τιμές και από κοντινές περιοχές. Συγκριτικά με την πατρική γάστρα παρουσιάζεται αυξημένη.



Σχήμα 79: Εξέλιξη της x\_bulb\_fwd κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης

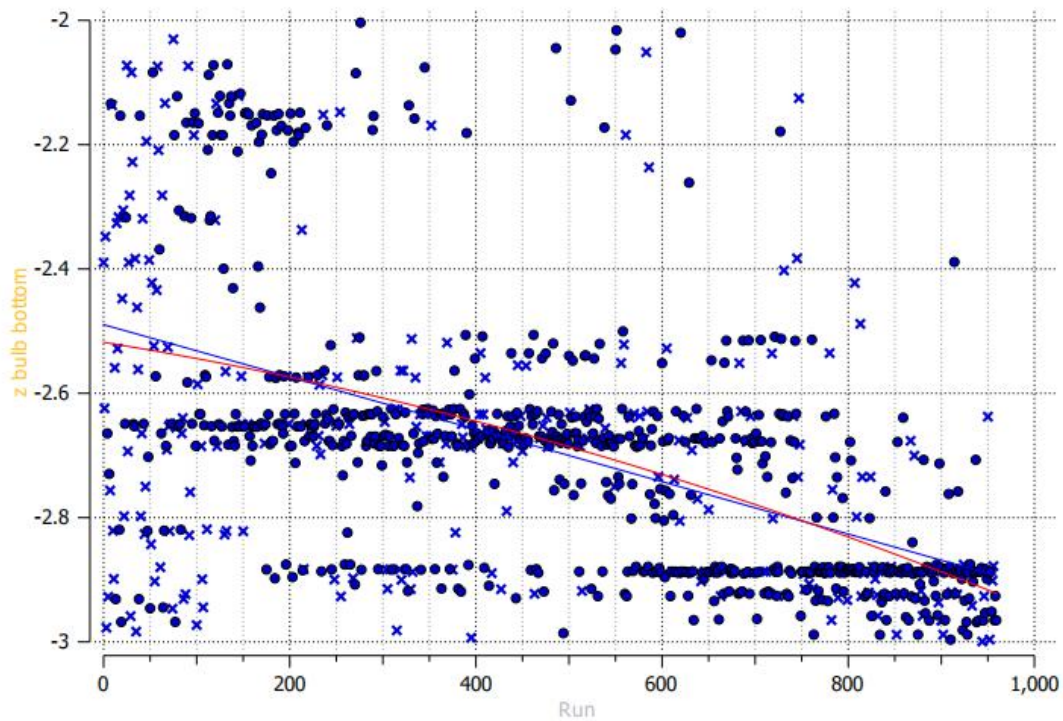
Το x\_bulb\_fwd στην αρχή εγκλωβίζεται σε τοπικό ελάχιστο αλλά χάρη στη λειτουργία των γενετικών αλγορίθμων ξεφεύγει από αυτό και βρίσκει το ολικό συγκλίνοντας σε τιμή αρκετά μικρότερη της πατρικής





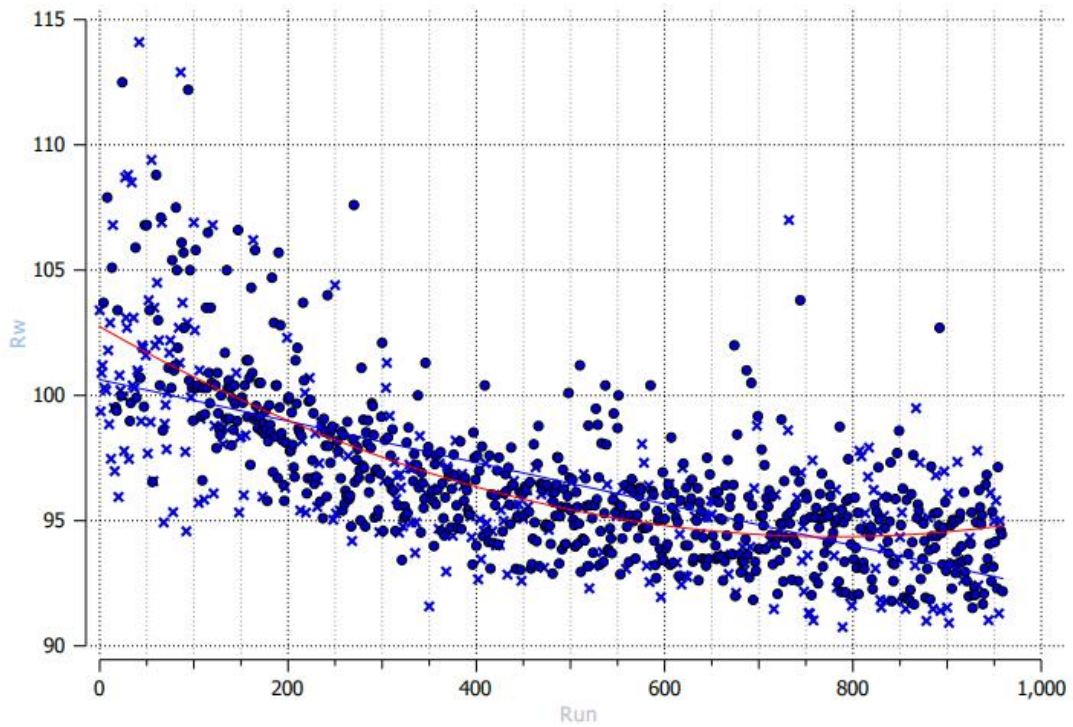
Σχήμα 80: Εξέλιξη της  $x\_bulb\_max\_beam$  κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης

Η διαμήκης θέση του μέγιστου πλάτους του βολβού συγκλίνει γρήγορα σε τιμή μικρότερη του πατρικού.

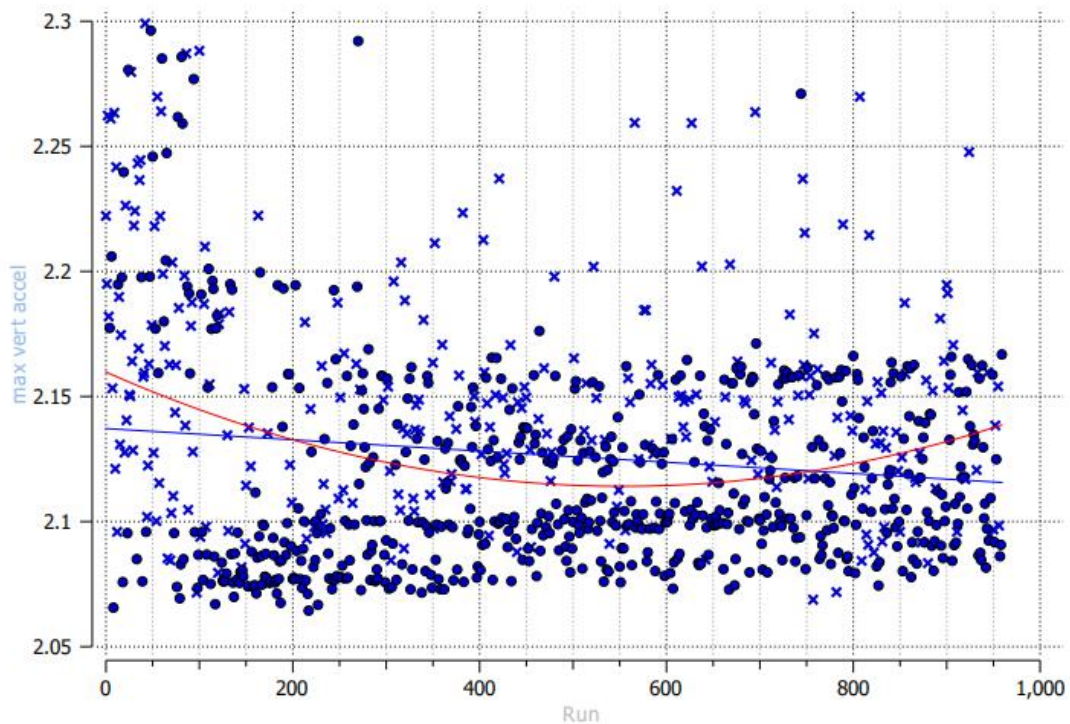


Σχήμα 81: Εξέλιξη της  $z\_bulb\_bottom$  κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης

Το  $z\_bulb\_bottom$  παρουσιάζει σύγκλιση σε τιμή αρκετά μικρότερη από αυτή της πατρικής γάστρας.



Σχήμα 82: Εξέλιξη της αντίστασης κυματισμού  $R_w$  κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης



Σχήμα 83: Εξέλιξη της μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης

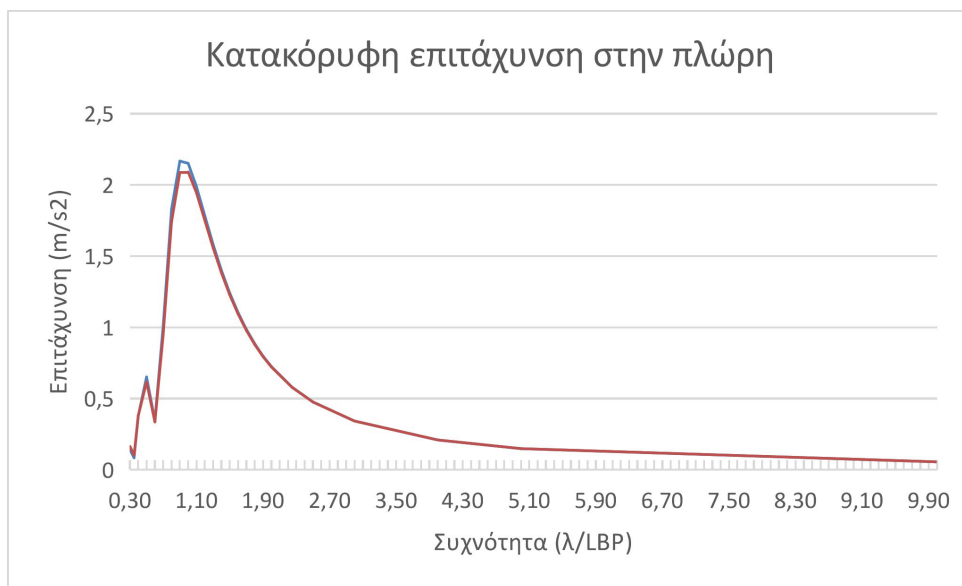
Όπως και πριν, παρατηρείται σύγκλιση των λύσεων, ενώ παρακάτω παρουσιάζονται οι τιμές σε μία από τις βέλτιστες λύσεις, καθώς και τα διάφορα ζεύγη βέλτιστων λύσεων.

Μεταβλητή	Τιμή Πατρικού	Βέλτιστη τιμή	Μεταβολή	Μονάδες
max_beam	9,390	9,173	-0,023	m
entrance_of_wl_angle	9,509	10,246	0,078	°
x_bulb_fwd	155,57	155,12	-0,003	m
x_bulb_max_beam	153,55	152,26	-0,008	m
z_bulb_bottom	-2,108	-2,996	0,421	m

Πίνακας 15: Τιμές των παραμέτρων για μία εκ των βέλτιστων λύσεων

	Τιμή Πατρικού	Βέλτιστη τιμή	Μεταβολή
Κατακόρυφη επιτάχυνση	2,168	2,0916	-0,035
Αντίσταση κυματισμού	103,700	93,76	-0,096
Εκτόπισμα	8.622	8662,0	0,005

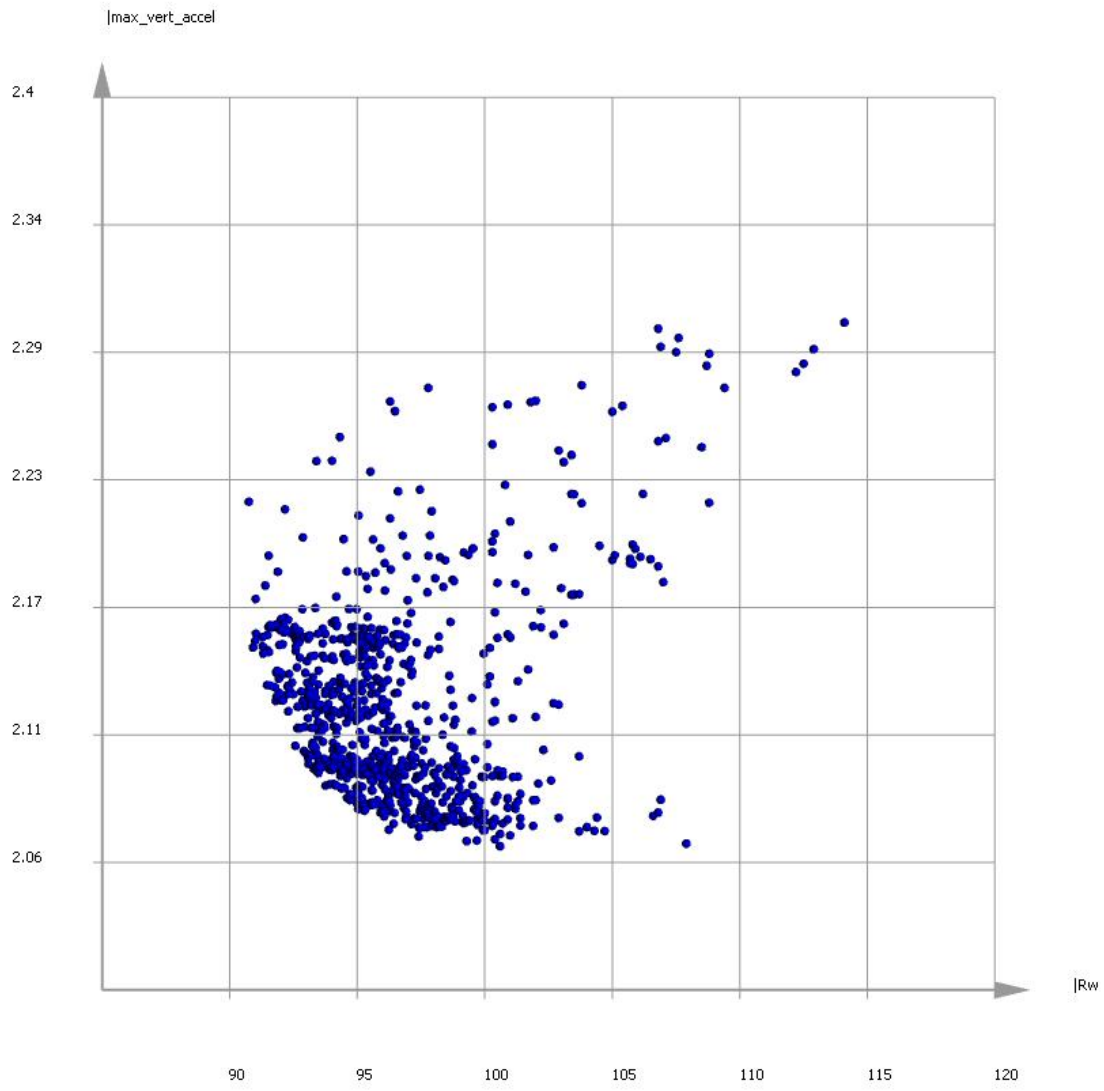
Πίνακας 16: Αποτελέσματα μίας εκ των βέλτιστων λύσεων



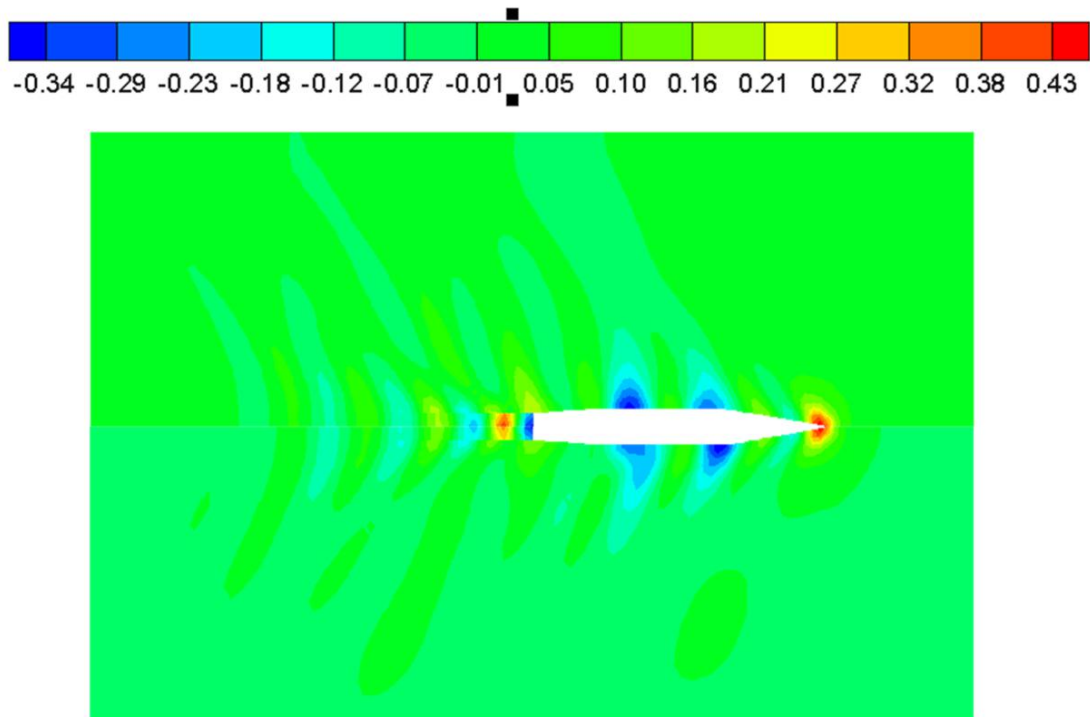
Σχήμα 84: RAO μιας εκ των βέλτιστων λύσεων (πράσινη γραμμή) σε σύγκριση με το RAO της πατρικής γάστρας (μπλε γραμμή)

Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα των τιμών της κατακόρυφης επιτάχυνσης ως προς την αντίσταση κυματισμού, όπου οι παραπάνω λύσεις φαίνεται να σχηματίζουν το μέτωπο pareto, ενώ οι υπόλοιπες λύσεις υστερούν συγκριτικά με αυτές.

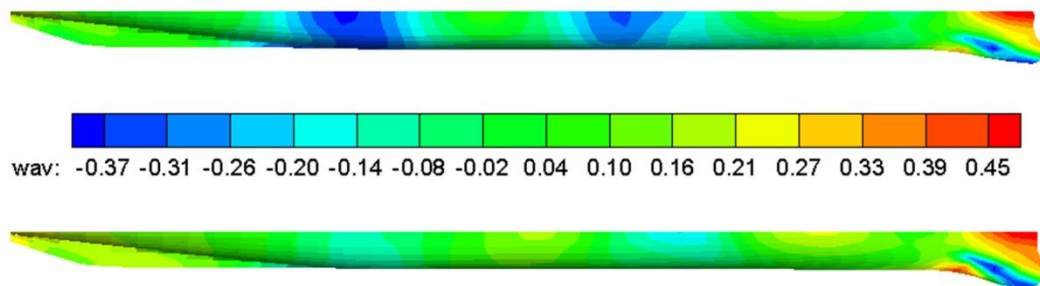
Επίσης, παρουσιάζεται η σύγκριση της πατρικής γάστρας με μία από τις βέλτιστες ως προς τη ροή γύρω από την επιφάνεια του πλοίου, τις πιέσεις που ασκούνται στη γάστρα, καθώς και ως προς τη διαμόρφωση των νομέων.



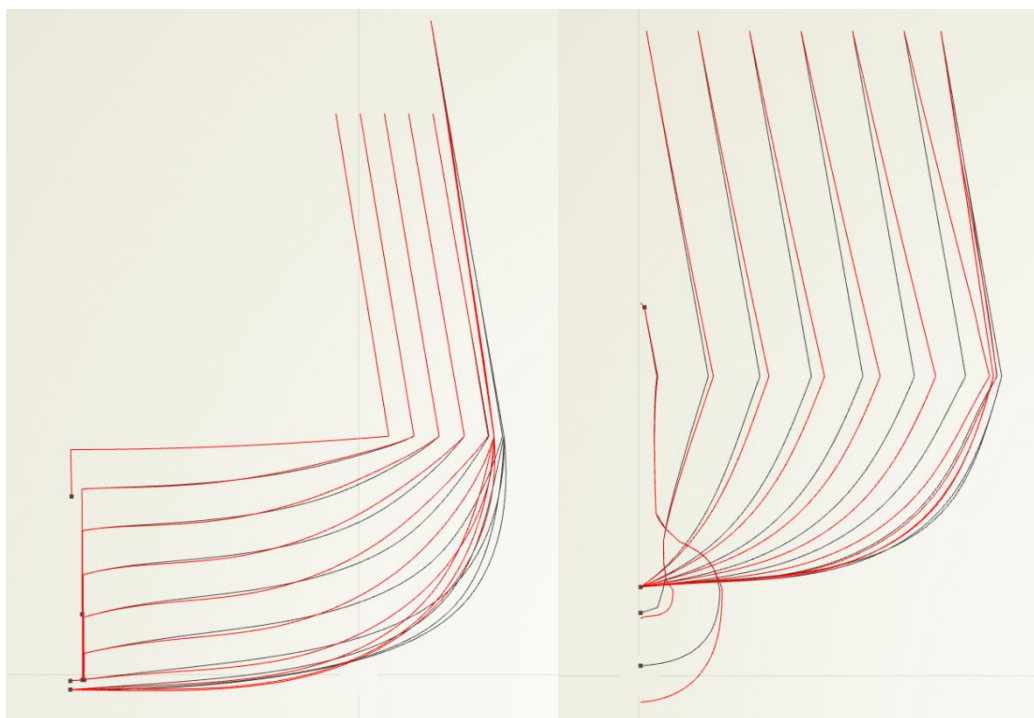
Σχήμα 85: Κοινό διάγραμμα των τιμών της αντίστασης κυματισμού και της κατακόρυφης επιτάχυνσης



Σχήμα 86: Σύγκριση της ροής γύρω από τη γάστρα. Πάνω φαίνεται το πατρικό πλοίο και κάτω η βέλτιστη σχεδίαση



Σχήμα 87: Σύγκριση των πιέσεων στη γάστρα του πατρικού πλοίου (κάτω) και της βέλτιστης σχεδίασης (πάνω)



Σχήμα 88: Σύγκριση των νομέων της πατρικής γάστρας (μαύροι νομείς) και της βέλτιστης (κόκκινοι νομείς)

Στο παραπάνω σχήμα γίνεται εμφανής η μείωση του πλάτους, η αύξηση της γωνίας εισόδου πλώρης, καθώς και η μείωση της κατακόρυφης θέσης του κατώτατου σημείου του προφίλ του βολβού.

Κρίνοντας από τα παραπάνω σχήματα γίνεται εμφανής η βελτίωση των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών της γάστρας, καθώς και οι συνολικές μεταβολές που προέκυψαν.

## 7. Συμπεράσματα

Όπως είχε αναφερθεί εξαρχής, σκοπός της συγκεκριμένης μελέτης ήταν ο υπολογισμός και η βελτιστοποίηση των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών ενός πολεμικού πλοίου, του ONR Tumblehome. Απαιτήσαμε την εύρεση των βέλτιστων δυνατών τιμών τόσο για την αντίσταση κυματισμού, όσο και για την κατακόρυφη επιτάχυνση στην πλώρη, αφού είναι δύο παράγοντες που επηρεάζουν την επιχειρησιακή δυνατότητα του πλοίου.

Ξεκινήσαμε με την δημιουργία μιας παραμετρικής σχεδίασης του πλοίου, η οποία δε θα απέκλινε ιδιαίτερα από το πατρικό. Έπειτα συνδέσαμε τη σχεδίασή μας με εξωτερικά προγράμματα για τον υπολογισμό των επιθυμητών μεγεθών και εκτελέσαμε τον γενετικό αλγόριθμο για τη βελτιστοποίηση.

Εκτελέσαμε συνολικά τέσσερις διαδικασίες βελτιστοποίησης, μία για καθένα από τα μεγέθη που θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε ξεχωριστά και δύο ακόμη για την ταυτόχρονη βελτιστοποίησή τους. Μετά την πρώτη εκτέλεση της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης αξιολογήσαμε τη συνεισφορά των παραμέτρων και οδηγηθήκαμε στη μείωσή τους από 10 σε 5, διατηρώντας εκείνες που κρίναμε ως περισσότερο επιδραστικές.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν μας έδειξαν σημαντική μείωση και για τα δύο υδροδυναμικά μεγέθη, χωρίς η τελική σχεδίαση να αποκλίνει σημαντικά από το πατρικό πλοίο. Συγκεκριμένα, για την επίτευξη των βέλτιστων γεωμετριών απαιτήθηκε η μείωση του πλάτους της γάστρας, του μήκους του βολβού, της διαμήκουσ θέσης του μέγιστου πλάτους του βολβού, και η αύξηση της γωνίας εισόδου πλώρης και της απόλυτης τιμής της κατακόρυφης θέσης του κατώτατου σημείου του προφίλ του βολβού.

Παρατηρούμε, τελικά, ότι έχει ιδιαίτερη σημασία στη διαδικασία της μελέτης ενός πλοίου η προσπάθεια βελτιστοποίησης ορισμένων χαρακτηριστικών που μπορεί να θεωρούνται από τον κατασκευαστή ή τον πλοιοκτήτη ως σημαντικά. Έτσι, μπορεί να προκύπτει η βέλτιστη δυνατή σχεδίαση ως προς τα χαρακτηριστικά που επιθυμούμε, χωρίς να υπονομεύεται η υπόλοιπη σχεδίαση.

## Παράρτημα Α: Λογισμικά και γλώσσες προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκαν

1. Microsoft Word
2. Microsoft Excel
3. Microsoft Powerpoint
4. Fortran 77
5. Fortran 95
6. Editor Notepad++
7. Compiler Cygwin64
8. CAESES – Friendship Framework
9. SWAN 2002
10. SPP-86
11. Tecplot10



## Παράρτημα Β: Λίστα σχημάτων

Σχήμα 1 : Θεωρία λωρίδων	6
Σχήμα 2 : Διασπορά λύσεων βελτιστοποίησης	8
Σχήμα 3 : Κατάταξη λύσεων στον NSGA II	10
Σχήμα 4 : Δημιουργία επιφανειών από το SWAN 2002	12
Σχήμα 5 : Σύστημα συντεταγμένων στο SWAN 2002	13
Σχήμα 6 : Πατρική γάστρα του ONRT (όψη 1)	17
Σχήμα 7 : Πατρική γάστρα του ONRT (όψη 2)	17
Σχήμα 8 : Προφίλ πλήρης με παραμετρικά σημεία	20
Σχήμα 9 : Κάτοψη της waterline με παραμετρικό σημείο	20
Σχήμα 10 : Προφίλ των συνοριακών καμπυλών του πλοίου	21
Σχήμα 11 : Κάτοψη των συνοριακών καμπυλών του πλοίου	21
Σχήμα 12 : Γενική όψη των συνοριακών καμπυλών του πλοίου	21
Σχήμα 13 : Νομείς αρχικής σχεδίασης στο επίπεδο y-z	22
Σχήμα 14 : Γενική όψη των βασικών καμπυλών του κάτω τμήματος βολβού με παραμετρικά σημεία	23
Σχήμα 15 : Γενική όψη του κάτω τμήματος βολβού	23
Σχήμα 16 : Γενική όψη των καμπυλών του άνω τμήματος του βολβού	24
Σχήμα 17 : Γενική όψη του άνω τμήματος του βολβού	24
Σχήμα 18 : Γενική όψη του βολβού	24
Σχήμα 19 : Σύγκριση του βολβού με τον πατρικό (όψη 1)	25
Σχήμα 20 : Σύγκριση του βολβού με τον πατρικό (όψη 2)	25
Σχήμα 21 : Επιφάνεια κάτω από την ίσαλο πλευσης, πρύμνηθεν του βολβού	26
Σχήμα 22 : Επιφάνεια πάνω από την ίσαλο πλευσης	27
Σχήμα 23 : Συνολική επιφάνεια χωρίς το βολβό	27
Σχήμα 24 : Πλήρης επιφάνεια του πλοίου	27
Σχήμα 25 : Καμπύλες για την κατασκευή του skeg	28
Σχήμα 26 : Skeg πατρικού πλοίου	28
Σχήμα 27 : Τελική κατασκευή skeg	29
Σχήμα 28 : Τελική μορφή του πλοίου	30
Σχήμα 29 : Πατρικό πλοίο	30
Σχήμα 30 : Υδροδυναμικά χαρακτηριστικά στο CAESES FFW	31
Σχήμα 31 : Νομείς εισόδου για το SWAN 2002	32
Σχήμα 32 : Νομείς εισόδου για τον κώδικα Frank	32
Σχήμα 33 : Εξαγόμενα αρχεία από το CAESES FFW	32
Σχήμα 34 : Πρωραίοι νομείς για εισαγωγή στο SWAN 2002	33

Σχήμα 35 : Πρυμναίοι νομείς για εισαγωγή στο SWAN 2002_____	33
Σχήμα 36 : Πρωραίοι νομείς για εισαγωγή στο Frank_____	33
Σχήμα 37 : Πρυμναίοι νομείς για εισαγωγή στο Frank_____	34
Σχήμα 38 : Σύνδεση προγραμμάτων στο CAESES FFW_____	35
Σχήμα 39 : RAO Πατρικής γάστρας_____	37
Σχήμα 40 : Εξέλιξη της $x_{bulb\_fwd}$ κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	38
Σχήμα 41 : Εξέλιξη της $z_{bulb\_fwd}$ κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	39
Σχήμα 42 : Εξέλιξη της $x_{bulb\_max\_beam}$ κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	39
Σχήμα 43 : Εξέλιξη της $y_{bulb\_max\_beam}$ κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	40
Σχήμα 44 : Εξέλιξη της $z_{bulb\_bottom}$ κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	40
Σχήμα 45 : Εξέλιξη της $max\_beam$ κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	41
Σχήμα 46 : Εξέλιξη της $deadrise\_angle$ κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	41
Σχήμα 47 : Εξέλιξη της $transom\_max\_y$ κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	42
Σχήμα 48 : Εξέλιξη της $entrance\_of\_wl\_angle$ κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	42
Σχήμα 49 : Εξέλιξη της $skeg\_z$ κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	43
Σχήμα 50 : Εξέλιξη της αντίστασης κυματισμού $R_w$ κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	43
Σχήμα 51 : Εξέλιξη της $x_{bulb\_fwd}$ κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	45
Σχήμα 52 : Εξέλιξη της $z_{bulb\_fwd}$ κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	45
Σχήμα 53 : Εξέλιξη της $x_{bulb\_max\_beam}$ κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	46
Σχήμα 54 : Εξέλιξη της $y_{bulb\_max\_beam}$ κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	46
Σχήμα 55 : Εξέλιξη της $z_{bulb\_bottom}$ κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	47
Σχήμα 56 : Εξέλιξη της $max\_beam$ κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	47
Σχήμα 57 : Εξέλιξη της $deadrise\_angle$ κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	48
Σχήμα 58 : Εξέλιξη της $transom\_max\_y$ κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	48
Σχήμα 59 : Εξέλιξη της $entrance\_of\_wl\_angle$ κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	49
Σχήμα 60 : Εξέλιξη της $skeg\_z$ κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	49
Σχήμα 61 : Εξέλιξη της μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	50
Σχήμα 62 : RAO βελτιστοποιημένης γάστρας (κόκκινη γραμμή) σε σύγκριση με το RAO πατρική γάστρας (μπλε γραμμή)_____	51
Σχήμα 63 : Εξέλιξη της $x_{bulb\_fwd}$ κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	52
Σχήμα 64 : Εξέλιξη της $z_{bulb\_fwd}$ κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	53
Σχήμα 65 : Εξέλιξη της $x_{bulb\_max\_beam}$ κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	53
Σχήμα 66 : Εξέλιξη της $y_{bulb\_max\_beam}$ κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	54
Σχήμα 67 : Εξέλιξη της $z_{bulb\_bottom}$ κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	54
Σχήμα 68 : Εξέλιξη της $max\_beam$ κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	55

Σχήμα 69 : Εξέλιξη της <i>deadrise_angle</i> κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	55
Σχήμα 70 : Εξέλιξη της <i>transom_max_y</i> κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	56
Σχήμα 71 : Εξέλιξη της <i>entrance_of_wl_angle</i> κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης__	57
Σχήμα 72 : Εξέλιξη της <i>skeg_z</i> κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	57
Σχήμα 73 : Εξέλιξη της αντίστασης κυματισμού <i>Rw</i> κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	58
Σχήμα 74 : Εξέλιξη της μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	58
Σχήμα 75 : RAO μιας εκ των βέλτιστων λύσεων (πορτοκαλί γραμμή) σε κοινό διάγραμμα με το RAO της πατρικής γάστρας (μπλε γραμμή)_____	59
<i>Σχήμα 76 : Παράσταση της αντίστασης κυματισμού και της κατακόρυφης επιτάχυνσης</i>	60
Σχήμα 77 : Εξέλιξη της <i>max_beam</i> κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	61
Σχήμα 78 : Εξέλιξη της <i>entrance_of_wl_angle</i> κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης__	62
Σχήμα 79 : Εξέλιξη της <i>x_bulb_fwd</i> κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	62
Σχήμα 80 : Εξέλιξη της <i>x_bulb_max_beam</i> κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	63
Σχήμα 81 : Εξέλιξη της <i>z_bulb_bottom</i> κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	63
Σχήμα 82 : Εξέλιξη της αντίστασης κυματισμού <i>Rw</i> κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	64
Σχήμα 83 : Εξέλιξη της μέγιστης κατακόρυφης επιτάχυνσης κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης_____	64
Σχήμα 84 : RAO μιας εκ των βέλτιστων λύσεων (πράσινη γραμμή) σε σύγκριση με το RAO της πατρικής γάστρας (μπλε γραμμή)_____	65
Σχήμα 85 : Κοινό διάγραμμα των τιμών της αντίστασης κυματισμού και της κατακόρυφης επιτάχυνσης_____	66
Σχήμα 86 : Σύγκριση της ροής γύρω από τη γάστρα. Πάνω φαίνεται το πατρικό πλοίο και κάτω η βέλτιστη σχεδίαση_____	67
Σχήμα 87 : Σύγκριση των πιέσεων στη γάστρα του πατρικού πλοίου (κάτω) και της βέλτιστης σχεδίασης (πάνω)_____	67
Σχήμα 88 : Σύγκριση των νομέων της πατρικής γάστρας (μαύροι νομείς) και της βέλτιστης (κόκκινοι νομείς)_____	68

## Παράρτημα Γ: Λίστα πινάκων

Πίνακας 1 : Κύρια χαρακτηριστικά ONRT Tumblehome _____	16
Πίνακας 2 : Τιμές μεταβλητών σχεδίασης γάστρας _____	18
Πίνακας 3 : Τιμές μεταβλητών σχεδίασης βολβού _____	19
Πίνακας 4 : Αποτελέσματα πατρικής γάστρας _____	36
Πίνακας 5 : Βέλτιστες τιμές και μεταβολή των παραμέτρων του βολβού _____	44
Πίνακας 6 : Βέλτιστες τιμές και μεταβολή των παραμέτρων της γάστρας _____	44
Πίνακας 7 : Αποτελέσματα βέλτιστης λύσης _____	44
Πίνακας 8 : Βέλτιστες τιμές και μεταβολή των παραμέτρων του βολβού _____	50
Πίνακας 9 : Βέλτιστες τιμές και μεταβολή των παραμέτρων της γάστρας _____	50
Πίνακας 10 : Αποτελέσματα βέλτιστης τιμής _____	51
Πίνακας 11 : Τιμές των παραμέτρων του βολβού για μία εκ των βέλτιστων λύσεων _____	59
Πίνακας 12 : Τιμές των παραμέτρων της γάστρας για μία εκ των βέλτιστων λύσεων _____	59
Πίνακας 13 : Τιμές μίας εκ των βέλτιστων λύσεων _____	59
Πίνακας 14 : Παράμετροι της νέας βελτιστοποίησης _____	61
Πίνακας 15 : Τιμές των παραμέτρων για μία εκ των βέλτιστων λύσεων _____	65
Πίνακας 16 : Αποτελέσματα μίας εκ των βέλτιστων λύσεων _____	65

## Βιβλιογραφία

1. Αντίσταση και πρόωση πλοίου, Πολίτης Γ.Κ, Αθήνα,2011
2. Δυναμική πλοίου, Αθανασούλης Γ.Α., Μπελιμπασάκης Κ.Α, Αθήνα , 2012
3. Τεχνητή και Υπολογιστική Νοημοσύνη και εφαρμογές στη σχεδίαση πλοίων, Γ.Ι. Γρηγορόπουλος, Αθήνα, 2014
4. Έμπειρα συστήματα στη σχεδίαση και λειτουργία πλοίων, Υπολογιστική νοημοσύνη, Σημειώσεις παρουσιάσεων, Δρ. Σπύρος Ράπτης
5. Friendship Systems, Friendship Framework User's Guide
6. [www.caeses.com](http://www.caeses.com)
7. SWAN 2 , User Manual : «Ship Flow Simulation in Calm Water and in Waves», Boston Marine Consulting Inc., Boston MA 02116, USA,2002.
8. SPP-86 , User's Manual, Report No: NAL-114-F-94, Lab. Ships and Marine Hydrodynamics, National Technical Univ. of Athens,1994.
9. Frank Manual
10. [https://t2015.nmri.go.jp/onrt\\_gc.html](https://t2015.nmri.go.jp/onrt_gc.html)
11. Multi-objective hydrodynamic optimization for ONR tumblehome ship, Jianwei Wu, Xiaoyi Liu, Decheng Wan
12. Prediction of Resistance and Self-Propulsion Characteristics of a Full-Scale Naval Ship by CFD-Based GEOSIM Method, Cihad Delen, Ugur Can, Sakir Bal