



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΝΑΥΤΙΚΗ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗ

Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση Γάστρας
Πολεμικού Πλοίου τ. 5415M ως προς την Αντίστασή
του σε Ήρεμο Νερό

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Του

Σταύρος Γουργιώτης
Αριθμός Μητρώου Φοιτητή: 08113808

Επιβλέπων Καθηγητής: Γρηγόριος Γρηγορόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2017

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Εικόνες.....	3
Πίνακες.....	5
Σχήματα.....	6
Σύνοψη.....	7
Ευχαριστίες.....	8
Εισαγωγή.....	9
Γενικότητες.....	9
Κατάρτιση Στόχων – Μεθοδολογία.....	11
Διάρθρωση Εργασίας.....	14
Σημασία της Μελέτης.....	15
Περιγραφή του Πλαισίου της Μελέτης.....	16
Βελτιστοποίηση.....	16
Χρήση της Βελτιστοποίησης στη Σύγχρονη Ναυπηγία.....	17
Το Πατρικό Πλοίο (DDG-51).....	18
Γενική Περιγραφή.....	18
Απόπειρες Βελτιστοποίησης από το Αμερικάνικο Ναυτικό (USN).....	20
Άλλες Απόπειρες Βελτιστοποίησης.....	21
Πειραματική Διαδικασία.....	25
Γενετικοί Αλγόριθμοι.....	25
Γενικότητες.....	25
Λειτουργία Γενετικών Αλγορίθμων.....	26
Ο Αλγόριθμος NSGA - II.....	27
Περιγραφή Κριτηρίων Βελτιστοποίησης.....	29
Αντίσταση.....	29
Δυναμικές Αποκρίσεις.....	34
Υπολογιστικά Προγράμματα.....	36
Swan 2 2002.....	36
SPP-86.....	40
CAE System Friendship Framework.....	42
Μοντελοποίηση - Παραμετροποίηση.....	44
Εισαγωγικά.....	44
Μεταβλητές Σχεδίασης - Παράμετροι.....	46
Παραμετρική Μοντελοποίηση.....	47
1 ^ο Βήμα. Βασικές Διαμήκεις Καμπύλες.....	48

2 ^ο Βήμα. Νομείς.....	50
3 ^ο Βήμα. Επιφάνειες.....	53
Βολβός.....	55
Skeg.....	59
Υπολογισμός Υδροδυναμικών Χαρακτηριστικών.....	63
Διεργασία SPP-86.....	67
Διεργασία SWAN – II.....	67
Διεργασία Βελτιστοποίησης – Λήψη Γεωμετριών.....	69
Διαδικασία Αξιολόγησης και Παραγωγής Εναλλακτικών Γεωμετριών.....	71
Αποτελέσματα - Συμπεράσματα.....	72
Επιδόσεις Πατρικής Γεωμετρίας.....	72
Ευρήματα – Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης.....	73
Μερική Βελτιστοποίηση ως προς F_1	75
Μερική Βελτιστοποίηση ως προς F_2	77
Αρχικά Συμπεράσματα.....	78
Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση.....	79
Μονοκριτηριακή Βελτιστοποίηση ως προς F_1	89
Συμπεράσματα -Αξιολόγηση Διαδικασίας.....	95
Μελλοντική Έρευνα.....	96
Βιβλιογραφία.....	98
Παραρτήμα.....	106
To Batch File.....	106

EIKONEΣ

Εικόνα 1: Εναλλακτικές ουτοπικές και βέλτιστες λύσεις προβλήματος βελτιστοποίησης (μέτωπο Pareto)	14
Εικόνα 2: Πεδίο εφικτών λύσεων κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης	18
Εικόνα 3: Φωτογραφία του DDG-51 (αριστερά), απεικόνιση της γεωμετρίας του (δεξιά).....	19
Εικόνα 4: Γενικά χαρακτηριστικά του πατρικού σκάφους.....	20
Εικόνα 5: Μετατροπές του σκάφους προς ενίσχυση της υδροδυναμικής του αποδοτικότητας	22
Εικόνα 6: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης.....	23
Εικόνα 7: Bodyplan βελτιστοποιημένης γεωμετρίας	23
Εικόνα 8: Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της πατρικής γεωμετρίας που χρησιμοποιήθηκαν	24
Εικόνα 9: Κατάταξης των λύσεων σε επίπεδα από τον NSGA-II	28
Εικόνα 10: Κατάταξης των λύσεων ενός επιπέδου σε φθίνουσα σειρά από τον NSGA-II	29
Εικόνα 11: Πλέγμα στερεού συνόρου και ελεύθερης επιφάνειας	37
Εικόνα 12: Χρησιμοποιούμενο σύστημα συντεταγμένων από SWAN-II	38
Εικόνα 13: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε	44
Εικόνα 14: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας παραμετρικής μοντελοποίησης που χρησιμοποιήθηκε	46
Εικόνα 15: Αρχική (πατρική) γεωμετρία, μη παραμετροποιημένη	48
Εικόνα 16: Διαμήκης τομή παραμετρικού μοντέλου.....	48
Εικόνα 17: Η Centerline του παραμετρικού μοντέλου.....	48
Εικόνα 18: Η ίσαλος του παραμετρικού μοντέλου.....	49
Εικόνα 19: Πλάγια όψη της παραμετρικής γραμμής καταστρώματος	50
Εικόνα 20: Κάτοψη γραμμής καταστρώματος	50
Εικόνα 21: Εκ δεξιών πλάγια όψη παραμετρικών νομέων	50
Εικόνα 22: Κάτοψη παραμετρικών νομέων	50
Εικόνα 23: Πρόοψη παραμετρικών νομέων	51
Εικόνα 24: Αδιαστατοποίηση των παραμετρικών νομέων	52
Εικόνα 25: Παραμετρικές καμπύλες ορισμού της γεωμετρίας.....	52
Εικόνα 26: Παραμετρικές επιφάνειες ορισμού της γεωμετρίας	53
Εικόνα 27: Παραμετρικές επιφάνειες ορισμού της γεωμετρίας (προοπτικά).....	54
Εικόνα 28: Παραμετρικές επιφάνειες ορισμού της γεωμετρίας (κάτοψη)	55
Εικόνα 29: Εγκάρσιες βοηθητικές τομές αρχικής επιφάνειας βολβού	55
Εικόνα 30: Εξάρτηση της άνω συνοριακής καμπύλης της κατώτερης επιφάνειας βολβού από μεταβλητές σχεδίασης	56
Εικόνα 31: Εξάρτηση της κάτω συνοριακής καμπύλης της κατώτερης επιφάνειας βολβού από μεταβλητές σχεδίασης	56
Εικόνα 32: Συναρτησιακές καμπύλες διαμόρφωσης επιφάνειας βολβού	57
Εικόνα 33: Κατώτερη επιφάνεια βολβού	57
Εικόνα 34: Καμπυλότητα εγκαρσίων τομών αρχικής επιφάνειας βολβού	57
Εικόνα 35: Ενδιάμεση επιφάνεια βολβού.....	58
Εικόνα 36: Ανώτερη επιφάνεια βολβού	58
Εικόνα 37: Συνολική επιφάνεια βολβού.....	58
Εικόνα 38: Περίγραμμα βάσης skeg.....	59
Εικόνα 39: Άνω και κάτω συνοριακές καμπύλες ορισμού skeg.....	59
Εικόνα 40: Επιφάνεια skeg.....	59
Εικόνα 41: Σύνδεση επιφάνειας skeg και περίξ αυτού γάστρας.....	60
Εικόνα 42: Διαμόρφωση της περιοχής για της ακραίες τιμές της παραμέτρου	60
Εικόνα 43: Συνολική επιφάνεια παραμετρικού μοντέλου	61
Εικόνα 44: Υδροστατικά μεγέθη του παραμετρικού μοντέλου	61
Εικόνα 45: Χειραγώγηση μεταβολής βυθίσματος.....	63
Εικόνα 46: Εξαγωγή υδροστατικών χαρακτηριστικών από το Friendship	64
Εικόνα 47: Νομείς πατρικής μορφής γάστρας για το πρόγραμμα SWAN-II (πρόοψη)	65
Εικόνα 48: Νομείς πατρικής μορφής γάστρας για το πρόγραμμα SWAN-II (προοπτικά).....	66
Εικόνα 49: Νομείς πατρικής μορφής γάστρας για το πρόγραμμα SPP-86 (προοπτικά).....	66

Εικόνα 50: Επιφανειακό πλέγμα στερεού συνόρου για το πρόγραμμα SWAN-II	69
Εικόνα 51: Εξαγωγή αρχείων γεωμετρικής αναπαράστασης από το Friendship.....	70
Εικόνα 52: Εξαγωγή αρχείου υδροστατικών χαρακτηριστικών και επανεισαγωγή αποτελεσμάτων	70
Εικόνα 53: Παραγόμενο πεδίο κυματισμών σε ταχύτητα 18 κόμβων	72
Εικόνα 54: Παραγόμενο πεδίο κυματισμών σε ταχύτητα 30 κόμβων	73
Εικόνα 55: Σύγκριση πατρικής και βελτιστοποιημένης μορφής γάστρας	82
Εικόνα 56: Παραγόμενο πεδίο κυματισμών βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε ταχύτητα 18 κόμβων..	83
Εικόνα 57: Παραγόμενο πεδίο κυματισμών βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε ταχύτητα 30 κόμβων..	83

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 1: Διαδοχή εκτέλεσης προγραμμάτων SWAN-II.....	38
Πίνακας 2: Οι μεταβλητές σχεδίασης και τα εύρη τιμών τους.....	47
Πίνακας 3: Κατάταξη αποτελεσμάτων ως προς το κριτήριο F_1	75
Πίνακας 4: Οι τιμές των παραμέτρων για τη βέλτιστη γεωμετρία ως προς F_1	76
Πίνακας 5: Κατάταξη αποτελεσμάτων ως προς το κριτήριο F_2	77
Πίνακας 6: Οι τιμές των παραμέτρων για τη βέλτιστη γεωμετρία ως προς F_2	77
Πίνακας 7: Επιδόσεις βέλτιστων γεωμετριών.....	81
Πίνακας 8: Οι τιμές των παραμέτρων για την επιλεχθείσα γεωμετρία.....	82
Πίνακας 9: Κατάταξη αποτελεσμάτων μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης.....	90
Πίνακας 10: Οι τιμές των παραμέτρων για την επιλεχθείσα γεωμετρία (μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση)	90

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 1: Διασπορά δυνατών αποτελεσμάτων κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης.....	74
Σχήμα 2: Τοπική καμπύλη βέλτιστων γεωμετριών	80
Σχήμα 3: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών πατρικής και βελτιστοποιημένης μορφής Fr: 0.25, $y/L = 0.23$	84
Σχήμα 4: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών πατρικής και βελτιστοποιημένης μορφής Fr: 0.25, $y/L = 0.26$	84
Σχήμα 5: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών πατρικής και βελτιστοποιημένης μορφής Fr: 0.25, $y/L = 0.3$	85
Σχήμα 6: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών πατρικής και βελτιστοποιημένης μορφής Fr: 0.25, $y/L = 0.33$	85
Σχήμα 7: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών πατρικής και βελτιστοποιημένης μορφής Fr: 0.41, $y/L = 0.23$	86
Σχήμα 8: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών πατρικής και βελτιστοποιημένης μορφής Fr: 0.41, $y/L = 0.26$	86
Σχήμα 9: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών πατρικής και βελτιστοποιημένης μορφής Fr: 0.41, $y/L = 0.3$	87
Σχήμα 10: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών πατρικής και βελτιστοποιημένης μορφής Fr: 0.41, $y/L = 0.33$	87
Σχήμα 11: Σύγκριση κάθετης επιτάχυνσης στη γέφυρα πατρικής και βελτιστοποιημένης μορφής γάστρας Fr: 0.25, $x = 27$ m.....	88
Σχήμα 12: Σύγκριση κίνησης διατοιχισμού πατρικής και βελτιστοποιημένης μορφής γάστρας Fr: 0.25	88
Σχήμα 13: Διασπορά δυνατών αποτελεσμάτων κατά τη διαδικασία μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης	89
Σχήμα 14: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών Fr: 0.25, $y/L = 0.23$	91
Σχήμα 15: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών Fr: 0.25, $y/L = 0.26$	91
Σχήμα 16: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών Fr: 0.25, $y/L = 0.3$	92
Σχήμα 17: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών Fr: 0.25, $y/L = 0.33$	92
Σχήμα 18: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών Fr: 0.41, $y/L = 0.23$	93
Σχήμα 19: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών Fr: 0.41, $y/L = 0.26$	93
Σχήμα 20: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών Fr: 0.41, $y/L = 0.3$	94
Σχήμα 21: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών Fr: 0.41, $y/L = 0.33$	94

ΣΥΝΟΨΗ

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η τροποποίηση της γεωμετρίας της γάστρας του DDG-51 με σκοπό την βελτίωση της δυναμικής του συμπεριφοράς σε κυματισμό και η απομείωση της αντίστασής του κατά την πλεύση.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει την παραμετρική μοντελοποίηση της πατρικής γεωμετρίας, και τη μεταβολή συγκεκριμένων, προεπιλεγμένων σχεδιαστικών της παραμέτρων. Οι διάφοροι συνδυασμοί των παραπάνω παραμέτρων δημιουργούν ένα πλήθος εναλλακτικών γεωμετριών οι οποίες αξιολογούνται ως προς τα κριτήρια που προαναφέρθηκαν. Η αξιολόγηση γίνεται μέσω εξειδικευμένων υπολογιστικών εργαλείων και τα αποτελέσματα που κάθε φορά προκύπτουν επανεισάγονται στο παραμετροποιημένο μοντέλο, ως ανάδραση του γενετικού αλγορίθμου, συντελώντας στη δημιουργία της επόμενης, κάθε φορά βελτιωμένης γεωμετρίας.

Η παραπάνω περιγραφείσα διαδικασία έδωσε ενθαρρυντικά αποτελέσματα καθώς η τελική γεωμετρία φέρεται να αποδίδει σημαντικά καλύτερα τόσο ως προς το κριτήριο της δυναμικής της συμπεριφοράς σε κυματισμό, κυρίως όμως ως προς εκείνο της βελτίωσης της αντίστασής της κατά τον πλου. ,

Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν, οι διαδικασία που ακολουθήθηκε καθώς και παρόμοιες προσπάθειες βελτιστοποίησης του σκάφους περιγράφονται με σαφήνεια στα εισαγωγικά κεφάλαια της εργασίας. Επιπλέον, γίνεται λεπτομερής αναφορά στο πατρικό σκάφος και στο σημαντικό ρόλο που αυτό διαδραματίζει, κυρίως για το Αμερικάνικο Πολεμικό Ναυτικό (USN).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα κατ’ αρχήν να ευχαριστήσω το σύνολο του διδακτικού προσωπικού του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου που εμπλέκεται στο Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών ‘*Ναυτική και Θαλάσσια Τεχνολογία και Επιστήμη*’ υπό την αιγίδα της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών. Κατά τη διάρκεια της φοίτησής μου απέκτησα πληθώρα γνώσεων που άπτονται μεγάλου εύρους γνωστικών αντικειμένων. Κυρίως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της εργασίας αυτής Καθηγητή του ΕΜΠ κύριο Γρηγόρη Γρηγορόπουλο για την υποστήριξή του καθ’ όλη τη διάρκεια της έρευνας που πραγματοποιήθηκε. Οι γνώσεις του, οι ιδέες του, οι συμβουλές και η καθοδήγησή του υπήρξαν κεφαλαιώδους σημασίας για την επιτυχή ολοκλήρωσή της.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Ναυπηγό Μηχανολόγο Μηχανικό Δημήτριο Μακρή για τις πολύωρες συζητήσεις μας. Η εμπειρία του και οι γνώσεις του στον τομέα της παραμετρικής μοντελοποίησης υπήρξαν εκ των ων ουκ άνευ για την ολοκλήρωση του έργου μου. Επίσης θα πρέπει να αναφέρω ότι η διαδικασία της παραμετρικής μοντελοποίησης του πλοίου έγινε σε συνεργασία με τον συμφοιτητή μου Πέτρο Σιρίτογλου ενώ τμήμα της παραμετρικής γάστρας (βολβός) σχεδιάστηκε από την Ναυπηγό Μηχανολόγο Μηχανικό Ελένη Αλωνιάτη.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου, Ιωάννη και Μαρία, καθώς και τα αδέρφια μου, Κωνσταντίνο και Άρτεμη, για τη στήριξή τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου. Τέλος οφείλω να ευχαριστήσω τη σύζυγό μου Γεωργία για τη διαρκή της συμπαράσταση, υπομονή και αφοσίωση, χωρίς τις οποίες η επιτυχής ολοκλήρωση των σπουδών μου θα ήταν αδύνατη.

15 Οκτωβρίου 2017
Σταύρος Γουργιώτης

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΓΕΝΙΚΟΤΗΤΕΣ

Ένα από τα κύρια προβλήματα που ο ναυπηγός ανέκαθεν καλούνταν να λύσει, είναι η επίτευξη των καλύτερων δυνατών χαρακτηριστικών για το πλοίο που σχεδιάζει. Η αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος απαιτεί τη δυνατότητα από μέρους του ναυπηγού να εκτιμήσει την υδροδυναμική συμπεριφορά του πλοίου πριν καν το τελευταίο κατασκευαστεί. Η παραπάνω διαδικασία όμως, δηλαδή η βελτιστοποίηση μιας γάστρας, μπορεί να εφαρμοστεί και σε υπάρχοντα, ήδη κατασκευασμένα πλοία. Αυτό συμβαίνει διότι τα πορίσματα της βελτιστοποίησης, δηλαδή τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που προέκυψαν από την τελευταία, μπορούν να βρουν εφαρμογή σε πλοία της ίδιας κλάσης (τα λεγόμενα ‘‘αδελφά’’ πλοία) που μελλοντικά θα κατασκευαστούν. Φυσικά πρέπει να λάβουμε υπόψιν και τη δυνατότητα μετασκευής ενός πλοίου προκειμένου αυτό να εναρμονιστεί κατά το δυνατόν με τη βελτιστοποιημένη σχεδίαση. Μια τέτοια διαδικασία είναι πολύ συχνά δυνατή και συμφέρουσα τόσο από τεχνικής όσο και από οικονομικής απόψεως.

Λαμβάνοντας τα παραπάνω υπόψη και με δεδομένη την πρόθεση του Ναυτικού των ΗΠΑ όχι απλώς να διατηρήσει σε ενέργεια τα αντιτορπιλικά κλάσης Arleigh Burke αλλά και να αυξήσει τον αριθμό τους στο κοντινό μέλλον, μπορεί κανείς να αντιληφθεί το λόγο για τον οποίο η βελτιστοποίηση της γάστρας τους θεωρείται αναγκαία αλλά και επίκαιρη. Είναι γνωστό πως οι μονάδες αυτές διαδραματίζουν σημαντικότατο ρόλο στην εξυπηρέτηση της αποστολής του ΑΠΝ.

Φυσικά η δυνατότητα εκτίμησης της υδροδυναμικής συμπεριφοράς ενός πλοίου πριν αυτό κατασκευαστεί παρέχεται από την κλασική μέθοδο της εκτέλεσης πειραμάτων σε δεξαμενή δοκιμών με χρήση μοντέλου υπό κλίμακα. Η μέθοδος αυτή έχει χρησιμοποιηθεί επι μακρόν και είναι γνωστό πως παρέχει αποτελέσματα υψηλής αξιοπιστίας. Ωστόσο, παραμένει δέσμια σημαντικών μειονεκτημάτων. Καταρχήν, οι διαστάσεις των δεξαμενών δοκιμών είναι περιορισμένες γεγονός που εισάγει σφάλματα στα αποτελέσματα που εξάγονται. Επιπλέον η σχεδίαση και κατασκευή του μοντέλου αλλά και η εκτέλεση των πειραμάτων απαιτούν σημαντικό χρόνο ενώ η όλη διαδικασία συνοδεύεται και από σχετικά υψηλό κόστος. Ως εκ τούτου οι Ναυπηγοί ερευνητές του χώρου έχουν στραφεί στην ανάπτυξη νέων εργαλείων προσπαθώντας να παρακάμψουν την παραπάνω διαδικασία. Πρόκειται για εξειδικευμένα υπολογιστικά

πακέτα τα οποία παρέχουν τη δυνατότητα πρόβλεψης των απαιτούμενων μεγεθών με ταχύτητα και αξιοπιστία.

Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής γίνεται χρήση τέτοιων εργαλείων τα οποία συνεργάζονται προκειμένου όχι μόνο να εκτιμηθεί η συμπεριφορά της υπό εξέταση γάστρας αλλά και να δώσουν στο χρήστη την καλύτερη δυνατή γεωμετρία (βέλτιστη) η οποία να επιτυγχάνει, κατά το δυνατόν, τα προσδοκώμενα χαρακτηριστικά. Φυσικά πρέπει να σημειωθεί πως η βέλτιστη σχεδίαση της γάστρας ενός πλοίου επηρεάζεται από μια πληθώρα παραγόντων και η εύρεσή της αποτελεί ένα πρόβλημα υψηλής πολυπλοκότητας η επίλυση του οποίου προϋποθέτει την λεπτομερή και με ακρίβεια αποτύπωση του συνόλου των παραμέτρων που υπεισέρχονται σε αυτό.

Εστιάζοντας στη διαδικασία που ακολουθήσαμε, αρχικά πραγματοποιήθηκε η παραμετρική μοντελοποίηση της πατρικής γάστρας. Εν συνεχεία ένας αλγόριθμος αναλαμβάνει την παραγωγή μιας σειράς εναλλακτικών γεωμετριών μέσω της μεταβολής της τιμής ενός πλήθους μεταβλητών σχεδίασης οι οποίες εισήχθησαν στο μοντέλο κατά τη διαδικασία της μοντελοποίησης. Συγχρόνως τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά των προαναφερθεισών εναλλακτικών γεωμετριών αξιολογούνται και συγκρίνονται μεταξύ τους πριν επανεισαχθούν στον παραπάνω αλγόριθμο ως ανάδραση. Έτσι οι γεωμετρίες που ο τελευταίος παράγει βαίνουν διαρκώς βελτιούμενες. Τελικά η ανωτέρω διαδικασία συγκλίνει στην τελική γενεά σχεδιάσεων (τη γνωστή γενιά Pareto), η οποία εμπεριέχει και τη βέλτιστη γεωμετρία, αυτή που τελικά επιλέχθηκε ως τέτοια.

Συγκεκριμενοποιώντας τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση της παραπάνω περιγραφείσας διαδικασίας, το περιβάλλον όπου έλαβε χώρα η παραμετρική μοντελοποίηση είναι αυτό του CAESSES/FRIENDSHIP-Framework (FFW). Στο πρόγραμμα αυτό ενσωματώνεται και ο γενετικός αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για τη βελτιστοποίηση, ο NSGA II. Σε ό,τι δε αφορά στην εκτίμηση των χαρακτηριστικών των διαφόρων γεωμετριών που προέκυψαν κατά τη διαδικασία, το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση της αντίστασης κυματισμού τους σε ήρεμο νερό είναι το SWAN 2 2002, ενώ το SPP-86 είναι αυτό που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό των αποκρίσεών τους σε τυχαίους κυματισμούς.

Εν τέλει, τόσο τα υδροδυναμικά όσο και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τελικά επιλεγείσας – βέλτιστης γεωμετρίας παρουσιάζονται και αναλύονται με την

έμφαση να δίδεται στις επιδόσεις της τελικής γάστρας ως προς την αντίσταση κυματισμού της. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν επιπλέον συγκρίνονται με τα αντίστοιχα της πατρικής. Το ίδιο γίνεται και για κάποιες άλλες γεωμετρίες οι οποίες παρουσιάζουν ενδιαφέρον όπως θα δούμε και στα επόμενα κεφάλαια.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονιστεί ότι οι διαδικασίες της παραμετρικής μοντελοποίησης και της βελτιστοποίησης έγιναν σε συνεργασία με τον συμφοιτητή μου στο ίδιο πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών Πέτρο Σιρίτογλου. Επιπλέον, η συγγραφή και σύνταξη ορισμένων εδαφίων της παρούσης που αφορούν στη λειτουργία του γενετικού αλγορίθμου NSGA II και των εξωτερικών προγραμμάτων αξιολόγησης των εναλλακτικών γεωμετριών (SWAN II & SPP - 86), καθώς επίσης και στη διαδικασία που ακολουθήθηκε για την παραμετρική σχεδίαση της αρχικής γεωμετρίας, έγιναν από κοινού με τον προαναφερθέντα. Ως εκ τούτου αποτελούν τμήμα και της δικής του διπλωματικής εργασίας.

ΚΑΤΑΡΤΙΣΗ ΣΤΟΧΩΝ – ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Πυρήνα της όλης προσπάθειας αποτελεί η κατάρτιση των αντικειμενικών συναρτήσεων βάσει των οποίων θα επιχειρηθεί η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας μας. Το πρόβλημα το οποίο καλούμαστε να επιλύσουμε συνίσταται στην ταυτόχρονη απομείωση:

- Της αντίστασης του πλοίου
- Των δυναμικών του αποκρίσεων

Στην όλη διαδικασία θα πρέπει να λάβουμε υπόψη τους εξής περιορισμούς:

- Το μήκος μεταξύ καθέτων και το εκτόπισμα του προς βελτιστοποίηση πλοίου πρέπει να διατηρηθούν σταθερά.
- Το μέγιστο πλάτος του πλοίου δύναται να μεταβληθεί το πολύ κατά 10 %.
- Το μέγιστο βύθισμα του πλοίου δύναται να μεταβληθεί το πολύ κατά 5 %.
- Οι διαστάσεις του βολβού, όπου είναι εγκατεστημένο το ηχοβολιστικό του πλοίου (sonar dome), δύναται να μεταβληθούν μόνον κατά τρόπον ώστε να εμπεριέχεται, σε κάθε περίπτωση, κύλινδρος συγκεκριμένων διαστάσεων (βάσης διαμέτρου $D = 4,9 \text{ m}$ και ύψους $H = 1,7 \text{ m}$).

Έτσι οι παράμετροι σχεδίασης που θα επιλεγούν θα έχουν τη δυνατότητα να μεταβάλλονται εντός συγκεκριμένου εύρους τιμών ώστε κάθε φορά και για κάθε συνδυασμό τους οι παραγόμενες γεωμετρίες να πληρούν τους προαναφερθέντες

περιορισμούς. Λεπτομερής αναφορά στις παραμέτρους σχεδίασης θα γίνει σε επόμενο κεφάλαιο της παρούσης.

Προκειμένου να γίνουν συγκεκριμένες οι αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματός μας λαμβάνουμε υπόψη επιπλέον το περιβάλλον και τις συνθήκες μέσα στις οποίες το πλοίο θα κληθεί να επιχειρήσει. Έτσι υποθέτουμε, όσον αφορά στην αντίσταση του πλοίου σε ήρεμο νερό, ότι το πλοίο θα περάσει το 85 % του επιχειρησιακού του βίου σε ταχύτητα 18 κόμβων (αριθμός Froude, $Fn = 0,248$) και το υπόλοιπο 15 % σε ταχύτητα 30 κόμβων (αριθμός Froude, $Fn = 0,413$).

Όσον αφορά στην άνετη και ασφαλή εργασία του πληρώματος, θα επιχειρηθεί μείωση της κάθετης επιτάχυνσης στο ύψος της γέφυρας και ενώ το πλοίο θα πλέει με ταχύτητα 30 κόμβων σε θάλασσα με πρωραίους κυματισμούς. Αναφορικά με την ακριβή θέση της γέφυρας, αυτή θεωρείται ότι βρίσκεται 27 m πρόωθεν του σταθμού 10 (St 10) ενώ κείται 24,75 m άνωθεν της τρόπιδας του πατρικού πλοίου.

Επιπλέον σε ό, τι αφορά στην ασφάλεια επιχειρήσεων ελικοπτέρου (Ε/Π), δηλαδή την ασφαλή προσαπονήωσή του, θα επιχειρηθεί μείωση του διατοιχισμού του πλοίου ενώ αυτό πλέει με ταχύτητα 18 κόμβων σε θάλασσα με πρυμναίους κυματισμούς και υπό γωνία συνάντησης 30 μοιρών. Το δε ελικοδρόμιο βρίσκεται 34,75 m πρύμνηθεν του σταθμού 10 (St 10) και 2,65 m άνωθεν της τρόπιδας του πατρικού πλοίου.

Τέλος, οι προαναφερθέντες κυματισμοί θα αντιστοιχούν σε κατάσταση θαλάσσης 5 (Sea state: 5). Συγκεκριμένα το φάσμα τους θα αντιστοιχεί σε σημαντικό ύψος κύματος $H_{1/3}$ ίσο με 3 m, περίοδο κορυφών T_p ίση με 10,4 sec ενώ θα διατίθεται η χρονική του ιστορία διάρκειας μίας ώρας.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω μπορούμε πλέον να καταρτίσουμε τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματός μας. Αυτές είναι οι εξής:

$$\triangleright F_1 = 0.85 \left. \frac{R_{T_0}}{R_{T_i}} \right|^{18 \text{ kn}} + 0.15 \left. \frac{R_{T_0}}{R_{T_i}} \right|^{30 \text{ kn}} \quad \text{όπου:}$$

R_{T_0} η ολική αντίσταση της βελτιστοποιημένης σχεδίασης (optimised),

R_{T_i} η ολική αντίσταση της αρχικής σχεδίασης (initial)

Η ολική αντίσταση υπολογίζεται κάθε φορά ως ο γραμμικός συνδυασμός των αντιστάσεων τριβής και κυματισμού βάσει της εξίσωσης:

$$R_T = (1 + \kappa)R_F + R_W \quad (\kappa = 0,3) \quad \text{με:}$$

$R_F = \frac{1}{2} C_F S \rho V^2$ όπου $C_F = \frac{0,075}{(\log Re - 2)^2}$ ο συντελεστής αντίστασης τριβής, ρ η πυκνότητα του ρευστού (θαλασσινό νερό), S η βρεχόμενη επιφάνεια και V η ταχύτητα πλεύσης και Re ο αριθμός Reynolds που αντιστοιχεί.

$$\triangleright F_2 = 0.5 \frac{RMS(a_{z_0})}{RMS(a_{z_i})} \Big|_{180^\circ}^{30 \text{ kn}} + 0.5 \frac{RMS(\varphi_0)}{RMS(\varphi_i)} \Big|_{30^\circ}^{18 \text{ kn}} \quad \text{όπου:}$$

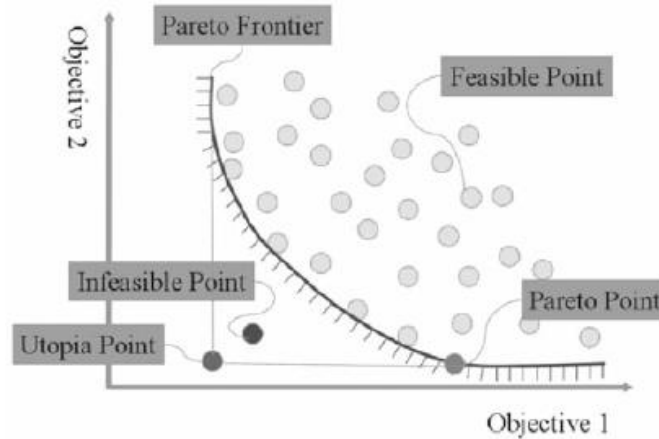
a_{z_0} και a_{z_i} η κάθετη επιτάχυνση στο ύψος της γέφυρας της βελτιστοποιημένης και της αρχικής σχεδίασης αντίστοιχα και

φ_0 και φ_i το πλάτος διατοιχισμού της βελτιστοποιημένης και της αρχικής σχεδίασης αντίστοιχα.

Η πρώτη από αυτές, όπως είναι προφανές, αφορά στο πρόβλημα της ελαχιστοποίησης της αντίστασης. Σε αυτήν έχει ενσωματωθεί η υπόθεση ότι το πλοίο θα περάσει το 85% του επιχειρησιακού του βίου πλέοντας με ταχύτητα 18 κόμβων και το υπόλοιπο 15% με ταχύτητα 30. Αυτό γίνεται με τη χρήση των συντελεστών 0,85 και 0,15 στους δύο προσθετούς της συνάρτησής μας.

Η δεύτερη αφορά στην ελαχιστοποίηση των δυναμικών αποκρίσεων του πλοίου σε διατοιχισμό και κάθετη επιτάχυνση της γέφυρας. Όπως είναι σαφές από τη χρήση του συντελεστή 0,5 και στους δύο προσθετούς της συνάρτησης αυτής, δίνεται η ίδια βαρύτητα και στις δύο υπό εξέταση αποκρίσεις, ενώ θεωρείται ισοπίθανη η εμφάνιση και των δύο συνθηκών διέγερσης του σκάφους.

Με δεδομένες πλέον τις αντικειμενικές συναρτήσεις, έχουμε ορίσει πλήρως το πρόβλημα ελαχιστοποίησης που καλούμαστε να αντιμετωπίσουμε. Οι τιμές των F_1 και F_2 θα αποτελέσουν του άξονες στο επίπεδο σύστημα συντεταγμένων, επί του οποίου θα παρασταθεί με μορφή σημείων το σύνολο των βέλτιστων σχεδιάσεων της γενεάς Pareto όπως θα δούμε λεπτομερέστερα στα κεφάλαια που ακολουθούν.



Εικόνα 1: Εναλλακτικές ουτοπικές και βέλτιστες λύσεις προβλήματος βελτιστοποίησης (μέτωπο Pareto)

Η γεωμετρική αυτή αναπαράσταση των λύσεών μας θα μας βοηθήσει να τις συγκρίνουμε μεταξύ τους και να επιλέξουμε τελικά αυτήν που κάθε φορά εξυπηρετεί το σκοπό μας. Οι δύο προαναφερθείσες συναρτήσεις αποτελούν μια μαθηματική, αλγεβρική έκφραση που ποσοτικοποιεί με τρόπο αντικειμενικό και κατανοητό τα δύο κριτήρια που θέσαμε προηγουμένως, βοηθώντας εμάς και τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης να αξιολογήσει τις γεωμετρίες που προκύπτουν. Τα κριτήρια (αντίσταση και δυναμική συμπεριφορά) αναλύονται περαιτέρω σε επόμενο κεφάλαιο της εργασίας αυτής.

ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί γίνεται αναφορά στην έννοια της βελτιστοποίησης καθώς επίσης και στον εξέχοντα ρόλο που αυτή διαδραματίζει σε μια πληθώρα τομέων της σύγχρονης έρευνας και επιστήμης, στους οποίους βεβαίως συμπεριλαμβάνεται και η ναυπηγική. Στη συνέχεια το υπό μελέτη πλοίο, η γάστρα του οποίου πρόκειται να βελτιστοποιηθεί, παρουσιάζεται εκτενώς. Επιπλέον, παλαιότερες προσπάθειες βελτιστοποίησής του, παρόμοιες με τη δική μας, καταγράφονται και παρουσιάζονται.

Το επόμενο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στην πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά τη διάρκεια της παρούσας μελέτης. Καταρχήν, παρουσιάζονται συνοπτικά τα τεχνικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε, αλγόριθμοι και υπολογιστικά προγράμματα. Ακολουθεί μια λεπτομερής περιγραφή της μοντελοποίησης και της παραμετροποίησης της αρχικής, προς βελτιστοποίηση γεωμετρίας καθώς και της εκτέλεσης της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης καθαυτής.

Στο τελευταίο κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προαναφερθείσα διαδικασία. Οι καλύτερες, με βάση τα προαναφερθέντα κριτήρια αξιολόγησης, γεωμετρίες επιλέγονται, αξιολογούνται και παρουσιάζονται. Επιπλέον, προτείνονται και περεταίρω θέματα προς μελέτη και διερεύνηση από μελλοντικούς μελετητές του αντικειμένου.

ΣΗΜΑΣΙΑ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Όπως θα γίνει κατανοητό και από τις παραγράφους που ακολουθούν το υπό μελέτη πλοίο αποτελεί κεφάλαιο για το πολεμικό ναυτικό και κατ’ επέκταση για την αμυντική μηχανή των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής. Επιπλέον το συγκεκριμένο όπλο παρουσιάζει και σημαντική εμπορική αξία καθώς πλήθος χωρών συμμάχων των ΗΠΑ επιθυμούν να το εντάξουν στο δυναμικό τους.

Μελέτες όπως η δική μας αυξάνουν την εμπορική και επιχειρησιακή αξία του σκάφους, καθιστώντας το πιο οικονομικό κατά τη λειτουργία του και πιο αξιόπιστο και λειτουργικό, αυξάνοντας το εύρος των (καιρικών) συνθηκών κατά τις οποίες δύναται να είναι πλήρως επιχειρησιακό. Τα παραπάνω υπογραμμίζονται και από τις μελέτες που ήδη έχουν διενεργηθεί και εφαρμοστεί σε μια προσπάθεια επίτευξης των προαναφερθέντων στόχων.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

Η βελτιστοποίηση ξεκίνησε από τα πρώτα χρόνια του ανθρώπινου πολιτισμού. Φυσικά, πριν την πλήρη θεμελίωση των μαθηματικών, η βελτιστοποίηση μπορούσε να γίνει μόνο μέσω προσομοίωσης. Η ιστορία της βελτιστοποίησης στο πλαίσιο της εξέλιξης των μαθηματικών μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις περιόδους:

Την πρώτη περίοδο, δεν ήταν γνωστή κάποια γενική μέθοδος για να βρεθεί ένα μέγιστο/ελάχιστο σημείο μιας συνάρτησης. Μόνο ειδικές τεχνικές είχαν βρεθεί για να μεγιστοποιηθούν/ελαχιστοποιηθούν κάποιες ειδικές συναρτήσεις. Τυπικό παράδειγμα αποτελεί η τετραγωνική συνάρτηση μιας μεταβλητής $y = ax^2 + bx + c$.

Μία νέα περίοδος ξεκίνησε το 1646 από τον Pierre de Fermat. Πρότεινε μια γενική προσέγγιση για να υπολογιστούν μέγιστα/ελάχιστα σημεία μιας διαφορίσιμης συνάρτησης θέτοντας την παράγωγό της συνάρτησης ίση με μηδέν. Σε αυτή την περίοδο, η βελτιστοποίηση υπήρχε σκόρπια και ατάκτως στα μαθηματικά. Επειδή η βελτιστοποίηση δεν είχε γίνει σημαντικός κλάδος των εφαρμοσμένων μαθηματικών, μερικοί μαθηματικοί δεν έδωσαν τόσο μεγάλη προσοχή στα αποτελέσματα της.

Η ανακάλυψη του γραμμικού προγραμματισμού ξεκίνησε μια καινούρια εποχή για τη βελτιστοποίηση, η οποία τέθηκε σε εφαρμογή προκειμένου να εξυπηρετήσει τις ανάγκες εφοδιασμού των στρατευμάτων που προέκυψαν κατά τη διεξαγωγή το Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου. Μετέπειτα το 1951, ο Albert Tucker και ο φοιτητής του Harold Kuhn δημοσίευσαν τις συνθήκες Kuhn-Tucker. Αυτό θεωρείται ως το αρχικό σημείο του μη γραμμικού προγραμματισμού. Όμως, η θεωρία του μη γραμμικού προγραμματισμού όταν οι περιορισμοί είναι όλοι στη μορφή ισοτήτων ήταν γνωστή για πολύ καιρό στην πραγματικότητα, από τον Euler και τον Lagrange. Τέλος, τη δεκαετία του 1960, οι G. Zoutendijk, J. B. Rosen, P. Wolfe, M. J. Powell, και άλλοι δημοσίευσαν έναν αριθμό αλγορίθμων για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Αυτοί οι αλγόριθμοι σχηματίζουν το κυρίως σώμα του μη γραμμικού προγραμματισμού.

Σήμερα, η βελτιστοποίηση έχει εξελιχθεί, περιλαμβάνοντας ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών επιστημών μεταξύ των οποίων τα μαθηματικά, η επιστήμη των υπολογιστών, η επιστήμη της βιομηχανικής μηχανολογίας και η διοικητική επιστήμη,

ενώ βρίσκει πλείστες όσες πρακτικές εφαρμογές σε διάφορες εκφάνσεις της ανθρώπινης δημιουργικότητας και τεχνολογίας.

Χρήση της Βελτιστοποίησης στη Σύγχρονη Ναυπηγία

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης κατά το σχεδιασμό της γάστρας ενός πλοίου δεν αποτελεί καινοφανή σκέψη, ωστόσο θέτει στο σχεδιαστή έναν αριθμό από δύσκολα προβλήματα υπολογιστικής φύσεως. Η βέλτιστη σχεδίαση ενός πλοίου είναι ένα πρόβλημα μη γραμμικό, ασυνεχές και δεσμεύεται από πληθώρα:

- μεταβλητών και παραμέτρων, οι οποίες εκ των πραγμάτων κινούνται εντός περιορισμένου εύρους τιμών,
- αλλά και μεγεθών που πρέπει να παραμείνουν σταθερά ή να μην υπερβούν ένα συγκεκριμένο όριο.

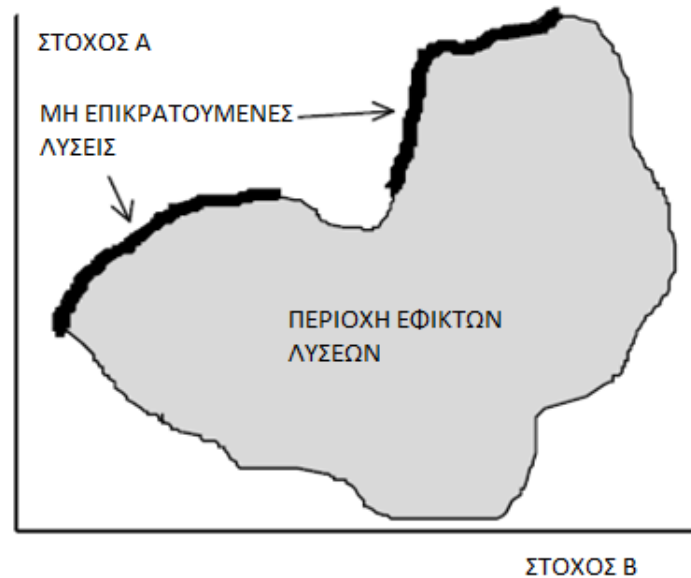
Επιπλέον, οι προαναφερθείσες μεταβλητές και παράμετροι πολύ συχνά προσδίδουν στην υπό μελέτη γεωμετρία χαρακτηριστικά με αντικρουόμενες επιπτώσεις στο προς βελτιστοποίηση μέγεθος. Μάλιστα η επίπτωσή τους, τις περισσότερες φορές, είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί με αποτέλεσμα να καθίσταται δυσχερής η άμεση σύγκριση της επιρροής καθεμιάς από αυτές. Με μία πρόταση το πρόβλημα της βελτιστοποίησης στο πλαίσιο της ναυπηγίας θα μπορούσε να τεθεί ως ακολούθως:

«Εύρεση της βέλτιστης τιμής του μεγέθους ή των μεγεθών που μας ενδιαφέρουν, αρχής γενωμένης από μία «πατρική» γάστρα, η γεωμετρία της οποίας περιγράφεται από ένα πλήθος καμπυλών και διέπεται από ένα πλήθος μεταβλητών σχεδίασης, συναρτήσει των μεταβλητών αυτών.»

Αυτά της τα γνωρίσματα καθιστούν αναποτελεσματική την εφαρμογή τεχνικών βελτιστοποίησης όπως ο γραμμικός, ο μη γραμμικός και ο δυναμικός προγραμματισμός, καθώς επίσης και η μέθοδος των συντελεστών Lagrange.

Αντιθέτως, οι γενετικοί αλγόριθμοι αποδεικνύονται πολύ αποτελεσματικοί σε προβλήματα αυτού του είδους, κατά μείζονα λόγο στην περίπτωση που το πρόβλημα που ο σχεδιαστής καλείται να επιλύσει είναι πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών, ενίοτε αντικρουόμενων μεγεθών-στόχων εκτεφρασμένων με τη μορφή αντικειμενικών συναρτήσεων (πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση). Όπως θα εξηγηθεί εκτενέστερα στο οικείο κεφάλαιο της παρούσης εργασίας, αυτό συμβαίνει επειδή δημιουργούν ένα πλήθος από μοναδικές σχεδιάσεις στο οποίο επιβάλλεται, σε έναν μόνο κύκλο

βελτιστοποίησης, να καταλάβει θέσεις επί του άνω συνόρου των εφικτών λύσεων (γενεά Pareto). Διαδοχικές επαναλήψεις της διαδικασίας, μέχρις ότου τα αποτελέσματά της συγκλίνουν, αναδεικνύουν το σύνολο των τελικά βέλτιστων λύσεων.



Εικόνα 2: Πεδίο εφικτών λύσεων κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης

Τέλος, χάριν πληρότητας, αξίζει να σημειωθεί ότι η κωδικοποίηση των προαναφερθέντων αλγορίθμων με δυαδικό κώδικα προσφέρει κάποια πλεονεκτήματα και η χρήση της είναι γενικά και ευρέως αποδεκτή. Ωστόσο μια βελτιστοποίηση των γενετικών αλγορίθμων (βελτιστοποίηση της βελτιστοποίησης) έχει δώσει ταχύτερα και ποιοτικότερα αποτελέσματα, σε ό,τι αφορά το σύνολο Pareto, με χρήση δεκαδικής κωδικοποίησης.

[ΤΟ ΠΑΤΡΙΚΟ ΠΛΟΙΟ \(DDG-51\)](#)

Γενική Περιγραφή

Το πατρικό πλοίο, τη σχεδίαση της γάστρας του οποίου θα επιχειρήσουμε να βελτιστοποιήσουμε, προέρχεται από το DDG-51 το πρώτο αντιτορπιλικό της κλάσης Arleigh Burke. Πρόκειται για ένα από τα πλέον σύγχρονα αντιτορπιλικά παγκοσμίως με ικανότητα διεξαγωγής πολλαπλών αποστολών αμυντικής και επιθετικής φύσεως. Το Αμερικάνικο Πολεμικό Ναυτικό (USN) θεωρεί πως τα συγκεκριμένα πλοία είναι όχι μόνο τα πλέον ικανά του όπλα επιφανείας, αλλά και εκείνα που διαθέτουν τη μεγαλύτερη επιβιωσιμότητα σε συνθήκες μάχης.



Εικόνα 3: Φωτογραφία του DDG-51 (αριστερά), απεικόνιση της γεωμετρίας του (δεξιά)

Το DDG-51 είναι το πρώτο πλοίο του Αμερικανικού ΠΝ στην κατασκευή του οποίου ενσωματώθηκαν τεχνικές μείωσης της ενεργού ανακλαστικής του επιφάνειας (RCS) ώστε να έχει μειωμένη πιθανότητα εντοπισμού από τα αντίπαλα radar. Πέρα από τα παραπάνω το πλοίο παρουσιάζει μειωμένη ακουστική και θερμική υπογραφή, ενώ τα ζωτικά του συστήματα είναι ενισχυμένα έναντι ηλεκτρομαγνητικών και ηχητικών παλμών. Έτσι αυτό το πλοίο, που αρχικά σχεδιάστηκε για την αντιμετώπιση Σοβιετικών πολεμικών αεροσκαφών, πυραύλων cruise και πυρηνικών υποβρυχίων, μπορεί να διεξάγει με επιτυχία αντιαεροπορικές (AAW), ανθυποβρυχιακές (ASW) και κατά στόχων επιφανείας (ASUW) επιχειρήσεις, σε περιβάλλον υψηλής απειλής, δικαιολογώντας τον τίτλο του πλοίου με τη μεγαλύτερη επιβιωσιμότητα, που προαναφέραμε.

Το πλοίο διαθέτει μία από τις καλύτερες μορφές γάστρας που έχουν χρησιμοποιηθεί σε στρατιωτικές εφαρμογές η οποία επιτυγχάνει εξαιρετικές επιδόσεις στους τομείς της ταχύτητας, της πλήρους εκμετάλλευσης της διατιθέμενης από την προωστήρια εγκατάσταση ισχύος, της συμπεριφοράς σε κυματισμό και της ευστάθειας, παρόλο που η αρχική σχεδίασή της ανάγεται στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Η μορφή της, η οποία χαρακτηρίζεται από έντονο flair και ισαλογραμμή σε σχήμα “V”, του επιτρέπει την επίτευξη υψηλών ταχυτήτων υπό δυσμενείς καιρικές συνθήκες.

Η πρόωση του πλοίου παρέχεται από τέσσερις αεροπορικής προέλευσης αεριοστροβίλους LM-2500, συνολικής ισχύος 100.000 Hp, με τους οποίους επιτυγχάνει ταχύτητα 30 κόμβων σε ανοιχτή θάλασσα και ακτίνα δράσης, με οικονομική ταχύτητα 20 κόμβων, 4400 ναυτικών μιλίων.

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

DESIGNATION	SYMBOL	MAGNITUDE	UNIT
Length between perpendiculars	L_{PP}	142.00	m
Length on waterline	L_{WL}	142.00	m
Length overall submerged	L_{OS}	142.13	m
Breadth moulded on WL	B	19.06	m
Draught moulded on FP	T_F	6.15	m
Draught moulded on AP	T_A	6.15	m
Displacement volume moulded	∇	8431.8	m^3
Displacement mass in seawater	Δ_1	8642.6	t
Wetted surface area bare hull	S	2972.6	m^2
LCB position aft of FP	FB	71.97	m
LCB position forward of midship		-0.683	% of L_{PP}
Transverse metacentric height	GMt	1.95	m
Vertical position centre of gravity	KG	7.51	m
Natural period of roll	T_ϕ	11.50	s
Block coefficient	C_B	0.507	-
Midship section coefficient	C_M	0.821	-
Prismatic coefficient	C_P	0.617	-
Length-Breadth ratio	L_{PP}/B	7.452	-
Breadth-Draught ratio	B/T	3.099	-
Length-Draught ratio	L_{PP}/T	23.089	-
Mass radius of gyration around x-axis	$k_{xx} = 0.4 \cdot B_{WL}$	7.62	m
Mass radius of gyration around y-axis	$k_{yy} = 0.25 \cdot L_{PP}$	35.5	m
Mass radius of gyration around z-axis	$k_{zz} = k_{yy}$	35.5	m

Εικόνα 4: Γενικά χαρακτηριστικά του πατρικού σκάφους

Απόπειρες Βελτιστοποίησης από το Αμερικάνικο Ναυτικό (USN)

Τα χαρακτηριστικά τους αυτά καθιστούν τα πλοία αυτής της κλάσης ιδιαιτέρως σημαντικά για το Αμερικάνικο ΠΝ. Ενδεικτικό του γεγονότος αυτού αποτελεί το ότι το έτος 2014 ήταν σε διαδικασία κατασκευής η ενεργοποίησης δέκα επιπλέον πλοία της κλάσης για λογαριασμό του Ναυτικού των ΗΠΑ. Ο μέχρι τούδε προγραμματισμός των ενόπλων δυνάμεων της χώρας (καλοκαίρι 2015) προβλέπει την κατασκευή ακόμα είκοσι τεσσάρων, ανεβάζοντας έτσι τον αριθμό τους στα εβδομήντα δύο. Μελλοντικά σχεδιάζεται η κατασκευή ακόμα περισσότερων πλοίων αυτής της κλάσης, ώστε ο συνολικός τους αριθμός να αγγίζει τα ενενήντα. Ωστόσο, από το 1991 οπότε το πρώτο πλοίο της κλάσης τέθηκε σε υπηρεσία, έχει συντελεστεί σημαντική πρόοδος στους τομείς της υδροδυναμικής και της ναυπηγικής. Έτσι το Ναυτικό Κέντρο Πολέμου Επιφανείας (Naval Surface Warfare Center / Carderock Division) καταβάλλει προσπάθειες εκμετάλλευσης της προαναφερθείσας προόδου, με σκοπό οι διάφορες καινοτομίες που έχουν προκύψει, αφενός να βρουν εφαρμογή στα πλοία της κλάσης

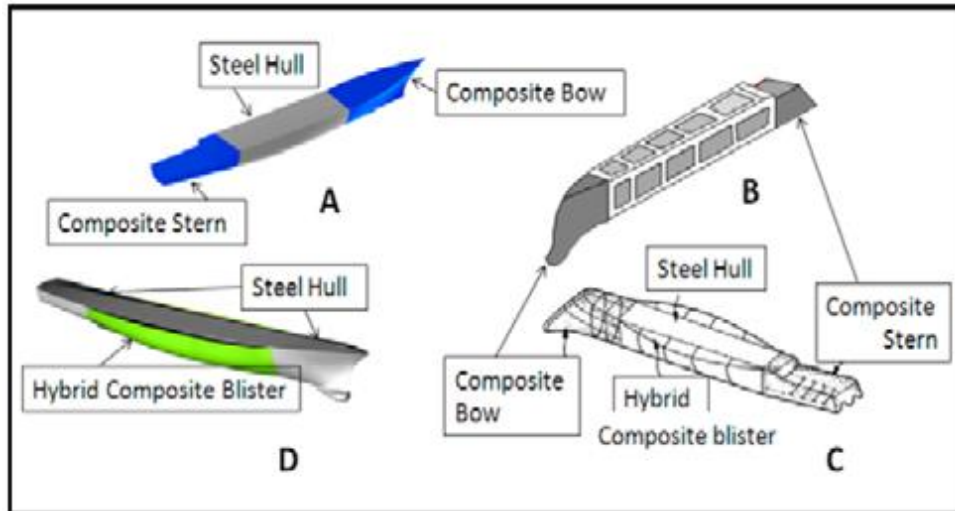
που θα κατασκευαστούν μελλοντικά και αφετέρου, να εφαρμοστούν (retrofit) στα ήδη υπάρχοντα όπου αυτό είναι οικονομικά εφικτό. Ενδεικτικά αναφέρονται μερικές από τις μετατροπές που εξετάζονται από τον προαναφερθέντα φορέα (NSWCCD), με κύριο στόχο τη μείωση της ετήσιας κατανάλωσης καυσίμου των σκαφών:

- Αύξηση της διαμέτρου της έλικας προς επαύξηση του βαθμού αποδόσεώς της
- Χρήση πρωραίου βολβού
- Χρήση πρυμναίου βολβού
- Ακριβέστερη ρύθμιση του συστήματος μεταβολής βήματος των ελίκων ώστε να βελτιωθεί η συνεργασία έλικας – προωστήριας μηχανής
- Χρήση πρυμναίου πτερυγίου
- Χρήση συνεστραμμένων πτερυγίων

Σύμφωνα με την ίδια πηγή (NSWCCD) πολλές από τις παραπάνω μεταβολές της σχεδίασης της γάστρας του πλοίου, θα αποσβέσουν το κόστος εγκατάστασής τους χάρη στην μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και του κόστους συντήρησης που θα επιφέρουν. Χαρακτηριστικά αναφέρεται πως μία μέτρια μείωση του κόστους καυσίμου κατά 300.000 \$ ανά πλοίο και έτος (περίπου 3 %) αντιπροσωπεύει συνολικό κέρδος ύψους 735.000.000 \$ για τον υπάρχοντα στόλο των περίπου 70 πλοίων με επιχειρησιακό βίο περί τα 35 έτη το καθένα, ένα ποσό διόλου ευκαταφρόνητο.

Άλλες Απόπειρες Βελτιστοποίησης

Επιπλέον, η μεγάλη σημασία του συγκεκριμένου πλοίου για την πολεμική μηχανή των ΗΠΑ, την οδήγησε στην απόφαση να προχωρήσει σε εκσυγχρονισμό και επαύξηση των δυνατοτήτων του. Ο παραπάνω εκσυγχρονισμός θα περιλαμβάνει κυρίως νέο τακτικό σύστημα μάχης και τα παρελκόμενα συστήματα παροχής ισχύος και ψύξης αυτών. Η συνεπακόλουθη μεταβολή των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών του πλοίου, λόγω αύξησης του εκτοπίσματός του, σε συνδυασμό με την υψηλή του επιχειρησιακή αξία, το έχει καταστήσει αντικείμενο μελέτης από διάφορες επιστημονικές ομάδες, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της γάστρας του ώστε να απομειωθούν οι συνέπειές της που αφορούν στην συνεπαγόμενη αύξηση της αντίστασης και μείωση της αξιοπλοΐας του.



Εικόνα 5: Μετατροπές του σκάφους προς ενίσχυση της υδροδυναμικής του αποδοτικότητας

Χωρίς βελτιώσεις της μορφής της γάστρας, οι παραπάνω μεταβολές θα απομειώσουν την υδροδυναμική αποδοτικότητα του σκάφους, οδηγώντας σε αύξηση του ετήσιου κόστους σε καύσιμα αλλά και τη μείωση της ακτίνας δράσης του. Έτσι εξετάστηκαν διάφορες περιπτώσεις μετατροπών της μορφής της γάστρας του. Σε αυτές συμπεριλαμβάνονται οι εξής:

- Μετατροπές της πλώρης του σκάφους (flared και wave-piercing)
- Μετατροπή του βολβού του σκάφους
- Μετατροπές της πρύμνης του σκάφους
- Χρήση παρατροπιδίων με τη μορφή “φουσκάλων”
- Μεταβολή των υλικών κατασκευής του σκάφους

Μονοκριτηριακές απόπειρες βελτιστοποίησης έχουν δώσει αποτελέσματα όπου επιτυγχάνεται μείωση της αντίστασης κατά 7 % (σε οικονομική ταχύτητα 20 κόμβων) και μείωση του εύρους ταλάντωσης σε διατοιχισμό έως και κατά 34,8 % (σε πλευρικούς κυματισμούς περιόδου $T=11,74$ sec) καθώς επίσης και μείωση της κίνησης του Heave κατά 5,3 % (με ταυτόχρονη όμως αύξηση του εύρους προνευτασμού κατά 72,4 %).

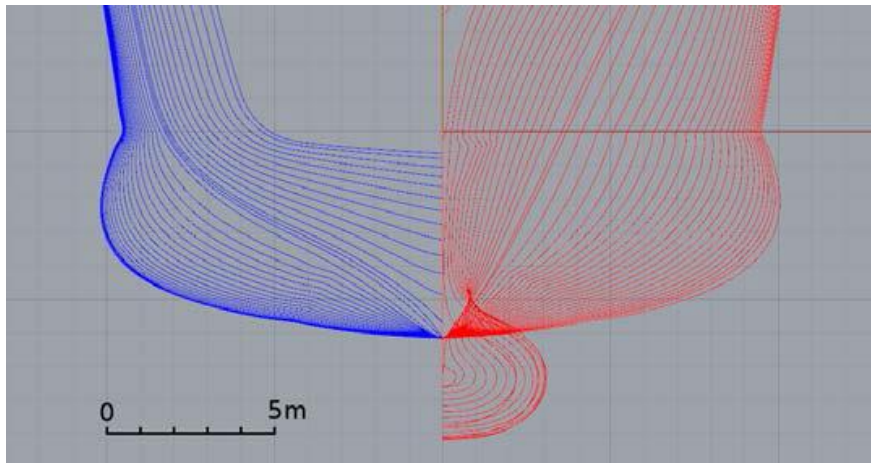
Οι πολυκριτηριακές απόπειρες βελτιστοποίησης έχουν επιτύχει βελτίωση της αντίστασης του σκάφους κατά 1,4 % σε ταχύτητα λίγο κάτω από την οικονομική (19 κόμβων) με παράλληλη βελτίωση των δυναμικών αποκρίσεών του, αφού διαπιστώθηκε αύξηση του σχετικού δείκτη (SPI Keane and Sandberg (1984)) κατά περίπου 8 %. Ταυτόχρονα επετεύχθη συγκράτηση του λειτουργικού κόστους του πλοίου, από τη

σκοπία της ετήσιας κατανάλωσης σε καύσιμο, αφού προέκυψε ελαφρά μόνον αύξησή της κατά 1,7 %.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκεντρώνονται στον παρακάτω πίνακα, ενώ η μορφή του βελτιστοποιημένου πλοίου φαίνεται στο παρακάτω body plan.

	Baseline 5415	Solution 1049	Solution 1049 No Bulb
Blister cost	N/A	\$5.469M	\$5.469M
Resistance at 15 kts	2.262E5 N	2.286E5 N	2.274E5 N
Resistance at 17 kts	3.177E5 N	3.047E5 N	3.049E5 N
Resistance at 19 kts	3.904E5 N	3.851E5 N	3.856E5 N
SPI	0.61296	0.66247	0.66247
Prop. fuel expense	\$6.062M	\$6.166M	\$6.135M

Εικόνα 6: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης



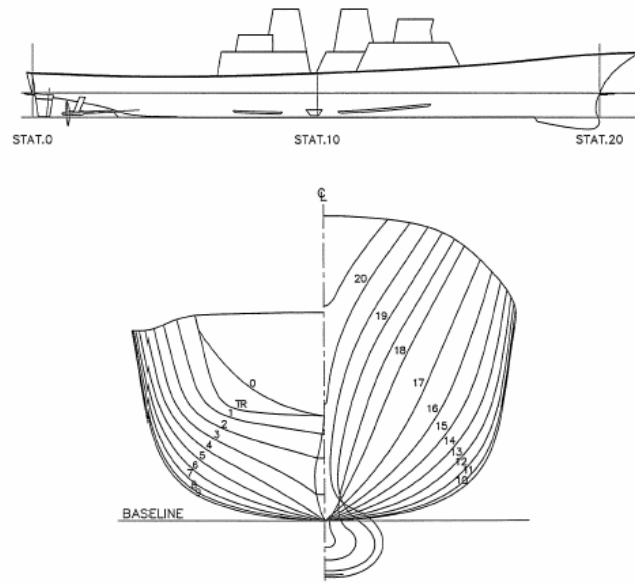
Εικόνα 7: Bodyplan βελτιστοποιημένης γεωμετρίας

Η μοντελοποίηση και εν συνεχεία παραμετροποίηση του σκάφους, στο πλαίσιο της παρούσης εργασίας, έγινε με βάση την παρακάτω γενική του διάταξη (general arrangement), και το προερχόμενο από αυτή Bodyplan.

Το μοντέλο αυτό δημιουργήθηκε στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος “Thales” των παρακάτω εκπαιδευτικών ιδρυμάτων:

- INSEAN (Italy)
- DMI (Denmark) and
- MARIN (The Netherlands)

υπό την αιγίδα του Βασιλικού Ολλανδικού Ναυτικού, του Ιταλικού Ναυτικού και του Ναυτικού της Δανίας.



Εικόνα 8: Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της πατρικής γεωμετρίας που χρησιμοποιήθηκαν

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

Γενικότητες

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο οι γενετικοί αλγόριθμοι βρίσκουν εφαρμογή στο ευρύ πεδίο των προβλημάτων βελτιστοποίησης και δει προβλημάτων με περισσότερα του ενός κριτήρια βελτιστοποίησης, όπως στην υπό εξέταση περίπτωση όπου τα κριτήριά μας είναι η ελαχιστοποίηση της αντίστασης και των δυναμικών αποκρίσεων του πλοίου σε κυματισμό. Στα προβλήματα αυτά προκύπτουν περισσότερες από μία βέλτιστες λύσεις, δεδομένου ότι καμία από αυτές δεν μπορεί να θεωρηθεί καλύτερη από τις άλλες όπως θα εξηγηθεί παρακάτω. Οι αλγόριθμοι αυτοί αναδεικνύουν τις βέλτιστες λύσεις σε μη γραμμικά προβλήματα βάσει των μεταβλητών, των περιορισμών και των κριτηρίων βελτιστοποίησης (συνήθως εκπεφρασμένων με τη μορφή αντικειμενικών συναρτήσεων) που ο σχεδιαστής θέτει και που περιγράφουν το προς επίλυση πρόβλημα.

Οι βέλτιστες λύσεις προκύπτουν ως εκείνες οι οποίες μεγιστοποιούν μία τουλάχιστον αντικειμενική συνάρτηση, ενώ προσδίδουν στις υπόλοιπες τιμή τουλάχιστον ίση με εκείνη που τους προσδίδουν οι λοιπές εφικτές λύσεις. Προφανώς τα ανωτέρω αφορούν σε πρόβλημα μεγιστοποίησης. Το αντίθετο ισχύει για προβλήματα ελαχιστοποίησης.

Οι δύο αντικειμενικές συναρτήσεις της υπό εξέταση περίπτωσης, περιγράφουν δύο ανόμοια χαρακτηριστικά της γάστρας. Έτσι έχουμε ένα πλήθος βέλτιστων λύσεων που προκύπτει εξ’ αιτίας της αδυναμίας μας να συγκρίνουμε τα δύο κριτήρια που περιγράφουν το πρόβλημά μας. Η αδυναμία μας αυτή είναι απόρροια του γεγονότος ότι τα δύο αυτά κριτήρια περιγράφουν διαφορετικής φύσεως και μάλιστα διαφορετικής σημασίας φαινόμενα. Προκειμένου να μπορέσει κανείς να καταλήξει στη βέλτιστη για εκείνον επιλογή, θα πρέπει οι εφικτές λύσεις να παρασταθούν σε ένα επίπεδο σύστημα συντεταγμένων με άξονες τις προαναφερθείσες συναρτήσεις. Μια τέτοιου είδους παράσταση θα μας βοηθήσει να αξιολογήσουμε τις διάφορες λύσεις που θα προκύψουν και να επιλέξουμε την καλύτερη γεωμετρία στο σχετικό κεφάλαιο της παρούσης.

Λειτουργία Γενετικών Αλγορίθμων

Ο τρόπος με τον οποίον οι γενετικοί αλγόριθμοι αναδεικνύουν τις βέλτιστες λύσεις προσομοιάζει τη γνωστή μας διαδικασία της “εξέλιξης ειδών” και της “φυσικής επιλογής” που προτάθηκε από το Δαρβίνο και τεκμηριώθηκε από τον Mendel χρησιμοποιώντας τους μηχανισμούς της *διασταύρωσης* και της *μετάλλαξης*. Η διαδικασία της διασταύρωσης των χαρακτηριστικών των γονέων από μόνη της διαφοροποιεί τους απογόνους που παράγονται και από τους δύο γονείς. Άρα, ακόμα και χωρίς τη διαδικασία της μετάλλαξης, οι απόγονοι μπορεί να έχουν καλύτερα χαρακτηριστικά από κάθε γονέα εάν επί παραδείγματι ένας απόγονος λάβει από κάθε γονέα μόνο τα χαρακτηριστικά που είναι καλύτερα από του άλλου. Χάριν όμως, στην ύπαρξη και της διαδικασίας της μετάλλαξης των χαρακτηριστικών ενός απογόνου, αυτά μπορούν να βελτιωθούν έτι περαιτέρω.

Οι δύο αυτές διαδικασίες, έτσι όπως περιγράφησαν παραπάνω, λαμβάνουν χώρα στη φύση διεπόμενες από τυχαιότητα. Αντίθετα, στην περίπτωση των γενετικών αλγορίθμων η τυχαιότητα εισάγεται με τις διαδικασίες διασταύρωσης και μετάλλαξης να πραγματοποιούνται συναρτήσει κάποιας προτεθειμένης πιθανότητας εμφάνισης τους. Έτσι αυτό που στη φύση είναι ανεδαφικό αποτελεί την αρχή λειτουργίας των γενετικών αλγορίθμων. Στην περίπτωση που εξετάζουμε, δηλαδή τη βελτιστοποίηση της γάστρας του AVT-204, κριτήρια βελτιστοποίησης αποτελούν οι αντικειμενικές συναρτήσεις, όπως αυτές θα περιγραφούν αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους του παρόντος κεφαλαίου, ενώ τα προς βελτιστοποίηση χαρακτηριστικά αντιστοιχούν στις μεταβλητές σχεδίασης που έχουν επιλεγεί.

Συγκεκριμένα, εν πρώτοις χρησιμοποιούνται ορισμένες αρχικές σχεδιάσεις από τις οποίες, μέσω των διαδικασιών της διασταύρωσης και της μετάλλαξης, προκύπτουν οι νεότερες. Κρίσιμο στοιχείο της όλης διαδικασίας αποτελεί το γεγονός ότι, σε κάθε κύκλο της, οι σχεδιάσεις που επιλέγονται ως αρχικές έχουν κάποια επιθυμητά χαρακτηριστικά, τα οποία και μεταφέρουν στους απογόνους τους. Με λίγα λόγια, εάν μια πατρική σχεδίαση συγκεντρώνει καλύτερα χαρακτηριστικά από μια άλλη, τότε η πρώτη έχει περισσότερες πιθανότητες να επιλεγεί και να παράγει απογόνους. Αυτό τους το σημαντικό πλεονέκτημα καθιστά, τους γενετικούς αλγορίθμους, ικανούς για την εύρεση διαρκώς καλύτερων γεωμετριών-λύσεων από τη μία γενεά στην επόμενη μέχρις ότου η διαδικασία ολοκληρωθεί και καταλήξουν στη βέλτιστη λύση. Όπως,

λοιπόν συμβαίνει και στη φύση, έτσι και οι γενετικοί αλγόριθμοι αφενός εισάγουν έναν παράγοντα τυχαιότητας στη διαδικασία παραγωγής και αφετέρου από κάθε γενεά επιβιώνουν, μεταβιβάζοντας τα (επιθυμητά) χαρακτηριστικά τους, μόνο τα ισχυρότερα μέλη.

Ο Αλγόριθμος NSGA - II

Ο γενετικός αλγόριθμος που θα χρησιμοποιηθεί για την εξεύρεση των βέλτιστων σχεδιάσεων της γάστρας που μας ενδιαφέρει είναι ο NSGA-II (Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II). Ο αλγόριθμος αυτός αποτελεί βελτιωμένη έκδοση του ομώνυμου προγενεστέρου του (NSGA). Η παρουσία δύο στόχων στο πρόβλημά μας έχει σαν αποτέλεσμα την ανάδειξη μιας ομάδας βέλτιστων λύσεων, γνωστής ως γενεάς Pareto, αντί μίας και μοναδικής βέλτιστης λύσης. Η επαναληπτική διαδικασία που αυτός εφαρμόζει αναζητώντας τις βέλτιστες σχεδιάσεις είναι η ακόλουθη:

1. Αρχικά, παράγεται ένας πληθυσμός από (αρχικές) σχεδιάσεις.
2. Στη συνέχεια παράγεται ένας πληθυσμός, ισάριθμος με τον προηγούμενο. Ο πληθυσμός αυτός προέρχεται από τις αρχικές σχεδιάσεις και αποτελεί τους απογόνους αυτών.
3. Καθεμία από τις σχεδιάσεις αυτές, τόσο οι αρχικές όσο και οι παραχθείσες (γονείς και απόγονοι), κατατάσσεται σε επίπεδα σύμφωνα με την υπεροχή της έναντι των υπολοίπων.
4. Ακολούθως, οι σχεδιάσεις κάθε επιπέδου κατατάσσονται κατά φθίνουσα σειρά απόστασης από τις γειτονικές τους.
5. Τέλος παράγεται μια νέα γενιά σχεδιάσεων, ισάριθμη με τον αρχικό πληθυσμό, με βάση την κατάταξη τους
6. Επανάληψη των βημάτων 2 ως 5.

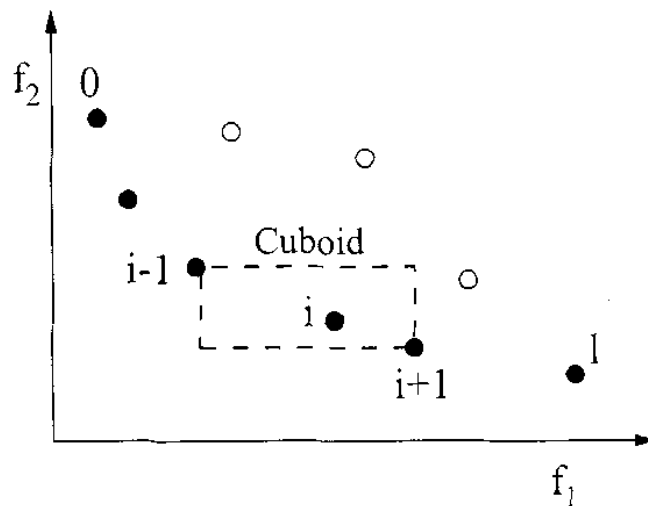
Όπως βλέπουμε παραπάνω προκειμένου να γίνει η κατάταξη των σχεδιάσεων που κάθε φορά παράγονται, τίθεται θέμα υπεροχής της μίας ως προς τις υπόλοιπες, καθώς επίσης και απόστασης της κάθε μίας από τις γειτονικές της. Οι συγκρίσεις αυτές γίνονται με βάση τη θέση κάθε σχεδιάσεως σε ένα επίπεδο σύστημα συντεταγμένων του οποίου άξονες αποτελούν οι διάφορες τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων του προβλήματός μας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο, προκειμένου μία σχεδίαση ‘Α’ να υπερέχει μιας άλλης ‘Β’ απαιτείται, η πρώτη να καθιστά όλες τις

αντικειμενικές συναρτήσεις τουλάχιστον ισοδύναμες, ενώ ταυτόχρονα να καθιστά τουλάχιστον μία από αυτές υπερέχουσα των υπολοίπων.

Η διαδικασία κατάταξης των διαφόρων σχεδιάσεων σε επίπεδα (βήμα υπ’ αριθ. 3) γίνεται με διαδοχικούς ελέγχους υπεροχής της καθεμίας. Συγκεκριμένα:

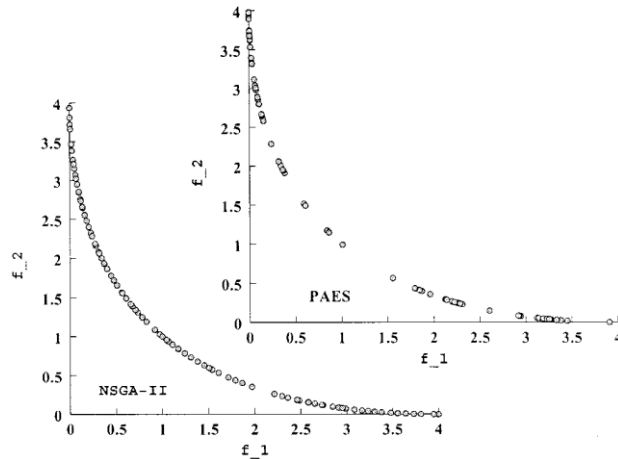
- Οι σχεδιάσεις εκείνες από τις οποίες δεν υπερέχει καμία άλλη συγκροτούν το πρώτο επίπεδο.
- Οι υπόλοιπες σχεδιάσεις ελέγχονται ώστε να εντοπιστούν εκείνες από τις οποίες υπερέχει μία μόνο άλλη σχεδίαση. Αυτές, με τη σειρά τους αποτελούν το δεύτερο επίπεδο.
- Επανάληψη της διαδικασίας έως ότου καταταγούν σε κάποιο επίπεδο όλες οι παραχθείσες σχεδιάσεις της παρούσας επανάληψης.

Η διαδικασία κατάταξης των σχεδιάσεων σε επίπεδα, που περιγράφηκε παραπάνω, γίνεται περισσότερο κατανοητή με το παρακάτω εποπτικό σχήμα.



Εικόνα 9: Κατάταξης των λύσεων σε επίπεδα από τον NSGA-II

Στη συνέχεια ακολουθεί η κατάταξη κατά φθίνουσα σειρά των σχεδιάσεων κάθε επιπέδου ανάλογα με την απόστασή τους από τις υπόλοιπες λύσεις. Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα ο λόγος για τον οποίο πραγματοποιείται αυτή η κατάταξη είναι η επίτευξη κατά το δυνατόν μεγαλύτερου εύρους λύσεων στο επίπεδο που ορίζουν οι αντικειμενικές συναρτήσεις, σε αντίθεση με προγενέστερες μεθόδους όπου το εύρος καθοριζόταν από μια τιμή διασποράς η οποία οριζόταν από το χρήστη.



Εικόνα 10: Κατάταξης των λύσεων ενός επιπέδου σε φθίνουσα σειρά από τον NSGA-II

Τελικά προκύπτει η συνολική κατάταξη των σχεδιάσεων. Όπως είδαμε αυτές κατατάσσονται κατ’ αρχήν σε επίπεδα και στη συνέχεια εντός του κάθε επιπέδου με βάση τη διασπορά των γειτονικών τους λύσεων.

Σημαντικό είναι το γεγονός ότι στο τελευταίο επίπεδο κατάταξης επιλέγονται τόσες λύσεις ώστε το σύνολο της κάθε γενιάς να ισούται με τον αριθμό των λύσεων της πρώτης γενιάς. Οι υπόλοιπες λύσεις απορρίπτονται ως χειρότερες αυτών που επελέγησαν.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Όπως έχει καταστεί σαφές οι αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματός μας ορίζονται μέσω της δυναμικής συμπεριφοράς σε κυματισμό και της αντίστασης της προς βελτίωση γάστρας, αφού σκοπός μας είναι η εύρεση μιας γεωμετρίας γι’ αυτήν, η οποία θα ελαχιστοποιεί τις τιμές των παραπάνω μεγεθών. Στο σημείο λοιπόν αυτό, χάριν πληρότητας, θα πρέπει να γίνει μια σύντομη θεωρητική αναφορά στα προαναφερθέντα φαινόμενα καθώς και στον τρόπο με τον οποίο αυτά επηρεάζουν ένα πλοίο, τόσο σε ό,τι αφορά στη σχεδιάσή του, όσο και στην ικανότητά του να αντεπεξέρχεται στην αποστολή του καθ’ όλη τη διάρκεια του επιχειρησιακού του βίου.

Αντίσταση

Προκειμένου ένα πλοίο να κινηθεί πρέπει καταρχήν να υπερνικήσει την αντίσταση, δηλαδή την δύναμη που δρα αντίθετα στην ώση. Ο υπολογισμός της αντίστασης ενός πλοίου διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην επιλογή προωστήριας εγκατάστασής του, δηλαδή της κατάλληλης έλικας και εν συνεχεία της κατάλληλης

συνεργαζόμενης με αυτήν Κύριας Μηχανής. Γίνεται λοιπόν σαφές πως από τον ακριβή υπολογισμό αλλά και την ελαχιστοποίηση της αντίστασης εξαρτώνται σημαντικά ζητήματα που άπτονται της οικονομικής αποδοτικότητας του πλοίου, όπως ενδεικτικά το μέγεθος και άρα το κόστος της προωστήριας εγκατάστασης, η κατανάλωση καυσίμου και τα χαρακτηριστικά της έλικας του.

Για τη μελέτη και εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός πλεούμενου από πλευράς αντίστασης, γίνεται διαχωρισμός της σε επιμέρους κατηγορίες οι οποίες εξαρτώνται από φαινόμενα συνεκτικότητας, μεταβολής της κατανομής των πιέσεων (που οφείλονται στη συνεκτικότητα του ρευστού μέσα στο οποίο το πλεούμενο κινείται) και αλληλεπίδρασής του με την ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού. Αποδεικνύεται πως η αντίσταση ενός σκάφους εξαρτάται από δύο αδιάστατες παραμέτρους – τους αριθμούς Reynolds και Froude. Οι προαναφερθείσες παράμετροι ορίζονται ως εξής:

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad \text{και} \quad Fn = \frac{U}{\sqrt{gL}}$$

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

Παρατηρώντας τις παραπάνω εκφράσεις μπορεί κανείς να διαπιστώσει πως ο αριθμός Reynolds εκφράζει τον λόγο αδρανειακών και συνεκτικών δυνάμεων ενώ ο Froude αδρανειακών και βαρυντικών. Κατά συνέπεια, η μεν αντίσταση τριβής εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τον αριθμό Reynolds ενώ η αντίσταση πίεσης κυρίως από τον αριθμό Froude.

Γενικά η αντίσταση ενός πλοίου (σε ήρεμο νερό) εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα πλεύσης του, το εκτόπισμά του και την μορφή της γάστρας του, κυρίως το βρεχόμενο τμήμα αυτής (ύφαλα). Η συνολική αντίσταση R_T , αποτελείται από πολλές συνιστώσες αντιστάσεις R , που μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κυρίως ομάδες ως εξής:

1. Αντίσταση τριβής
2. Υπόλοιπη Αντίσταση
3. Αντίσταση Αέρα

Ο βαθμός επιρροής των δύο πρώτων συνιστωσών, της αντίστασης τριβής και της υπόλοιπης αντίστασης, εξαρτάται από το πόσο μεγάλο είναι το υπό ισάλου τμήμα της γάστρας του σκάφους, ενώ η επιρροή της αντίστασης του αέρα εξαρτάται από το μέγεθος και τη γεωμετρία του άνωθεν της ισάλου τμήματος της γάστρας (έξαλα). Επικεντρωνόμενοι στο βυθισμένο τμήμα της γάστρας, νερό ταχύτητας V και πυκνότητας ρ παρουσιάζει δυναμική πίεση που δίδεται από τον τύπο (Νόμος Bernoulli):

$$P = \frac{1}{2} \rho V^2$$

Στην πράξη αυτό σημαίνει πως όταν ένα ακίνητο σώμα βρεθεί μέσα σε ροή, λόγω της προαναφερθείσας πίεσης θα αναπτυχθεί στην επιφάνειά του μια ανάλογη δύναμη. Η σχέση αυτή αποτελεί τη βάση για τον υπολογισμό ή τη μέτρηση των διαφόρων αντιστάσεων R της γάστρας ενός πλοίου μέσω αδιάστατων συντελεστών αντίστασης C . Συγκεκριμένα οι διάφοροι συντελεστές C συσχετίζονται με μια δύναμη αναφοράς K , που ορίζεται ως ‘‘η δύναμη, που η δυναμική πίεση νερού με ταχύτητα ίση με τη ταχύτητα του πλοίου V ασκεί σε μία επιφάνεια, που είναι ίση με την βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας, A_S ’’. Συνεπώς οι υπολογισμοί αντίστασης γίνονται, εν γένει, βάσει των σχέσεων:

$$K = \frac{1}{2} \rho V^2 A_S \quad \text{για την εκάστοτε δύναμη αναφοράς, και}$$

$$R = CK \quad \text{για τις διάφορες αντιστάσεις.}$$

Οι επιστήμονες, έχοντας συγκεντρώσει πλήθος από πειραματικά δεδομένα μετρήσεων σε δεξαμενές και με την βοήθεια των γνωστών, αδιάστατων παραμέτρων γάστρας, έχουν αναπτύξει μεθόδους για τον υπολογισμό όλων των αναγκαίων συντελεστών αντίστασης C και, κατά συνέπεια, των διαφόρων αντιστάσεων που προκύπτουν.

Στις επόμενες παραγράφους θα αναφερθούμε με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στις προαναφερθείσες συνιστώσες της αντίστασης.

Αντίσταση τριβής R_F

Όπως προαναφέρθηκε, η αντίσταση τριβής της γάστρας εξαρτάται από το μέγεθος της βρεχόμενης επιφάνειάς της, A_S , και από τον ειδικό συντελεστή

αντίστασης τριβής C_F . Η τριβή αυξάνεται με την ρύπανση της γάστρας από θαλάσσιους οργανισμούς, όστρακα, φύκια, κ.λ.π. Η συγκεκριμένη συνιστώσα αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό μέρος της συνολικής αντίστασης του πλοίου, αγγίζοντας το 70 - 90 % της R_T για αργά πλοία και άλλες φορές λιγότερο από 40 % για γρήγορα πλοία. Η αντίσταση τριβής υπολογίζεται ως ακολούθως:

$$R_F = C_F K$$

Υπόλοιπη αντίσταση R_R

Η υπόλοιπη αντίσταση περιλαμβάνει την αντίσταση κυματισμού και την αντίσταση λόγω κατανομής της πίεσης. Η πρώτη αφορά στην απώλεια ενέργειας που προκύπτει λόγω της δημιουργίας κυμάτων από το σκάφος κατά την διάρκεια της προώσεώς του μέσα στο νερό. Η δεύτερη έχει να κάνει με την απώλεια πίεσης που προκύπτει, ειδικά στην πρύμνη του σκάφους εξαιτίας της εκεί ύπαρξης παχύτερου οριακού στρώματος. Το παραπάνω φαινόμενο εντείνεται ακόμα περισσότερο στην περίπτωση που έχουμε και αποκόλληση της ροής που δημιουργεί δίνες. Η αντίσταση κυματισμού για χαμηλές ταχύτητες πλεύσης είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας αυτής. Ωστόσο, η συνιστώσα αυτή της αντίστασης αυξάνει πολύ γρηγορότερα σε υψηλότερες ταχύτητες ορίζοντας, θεωρητικά, ένα φράγμα ταχύτητας πάνω από το οποίο επιπλέον αύξηση της ωστικής ισχύος του πλοίου δεν έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερη ταχύτητα πλεύσης καθώς όλη η επιπλέον ενέργεια θα μετατρέπεται σε ενέργεια κυματισμού. Η υπόλοιπη αντίσταση συνήθως αντιπροσωπεύει το 10 - 25 % της συνολικής αντίστασης για αργά πλοία και έως 40 - 60 % για ταχεία. Άξιο λόγου επίσης είναι ότι η πλεύση σε ρηχό νερό μπορεί να έχει επίσης μεγάλη επίπτωση στην υπόλοιπη αντίσταση καθώς το εκτοπιζόμενο νερό κάτω από το πλοίο έχει μεγαλύτερη δυσκολία να κινηθεί προς τα πίσω. Υπολογίζοντας κανείς τον συντελεστή υπόλοιπης αντίστασης C_R , η σχετική διαδικασία είναι γνωστή στους επιστήμονες και περιγράφεται σε εξειδικευμένη βιβλιογραφία, μπορεί να υπολογίσει και την αντίστοιχη συνιστώσα ως εξής:

$$R_R = C_R K$$

Αντίσταση του αέρα R_A

Σε ήρεμο νερό, η αντίσταση του αέρα είναι, θεωρητικά, ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας πλεύσης και της μετωπικής επιφάνειας των εξάλων το

πλοίου. Η συνιστώσα αυτή αντιπροσωπεύει συνήθως περίπου το 2 % της συνολικής αντίστασης R_T . Ειδικά για πλοία εμπορευματοκιβωτίων (container) με αντίθετο άνεμο, η αντίσταση λόγω του αέρα μπορεί να αποτελεί μέχρι και το 10 % της συνολικής. Κατ’ αναλογία προς τις άλλες μορφές αντίστασης που εξετάσαμε στις προηγούμενες παραγράφους, η αντίσταση του αέρα δύναται να εκφρασθεί ως $R_A = C_A K$, όμως μερικές φορές είναι βασισμένη στο 90 % της δυναμικής πίεσης του αέρα με ταχύτητα πλεύσης V , δηλαδή :

$$R_A = 0.9 \frac{1}{2} \rho_{air} V^2 A_{air}$$

Το πλήρες φαινόμενο της αντίστασης και συνεπώς ο προσδιορισμός της θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί με την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes, όπως άλλωστε και κάθε πρόβλημα ρευστομηχανικής, οι οποίες περιγράφουν τη ροή πραγματικού ρευστού. Η επίλυση όμως των εξισώσεων αυτών είναι εξαιρετικά δύσκολη ενώ πραγματοποιείται αποκλειστικά με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων υπολογισμού. Σε κάποιες δε περιπτώσεις είναι εντελώς αδύνατη. Θεωρώντας όμως το ρευστό ατριβές (μη συνεκτικό) και αστρόβιλο, οι παραπάνω εξισώσεις εκφυλίζονται στις ισοδύναμες εξισώσεις Euler και Bernoulli.

Στο πλαίσιο της παρούσης εργασίας καταβάλλεται προσπάθεια βελτιστοποίησης της μορφής της γάστρας προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί μόνον η συνιστώσα της υπολειπόμενης αντίστασης μέσω της ελαχιστοποίησης της αντίστασης κυματισμού η οποία αποτελεί τμήμα της πρώτης. Όπως έχει προαναφερθεί η αντίσταση κυματισμού εξαρτάται (κατά προσέγγιση) μόνο από τον αριθμό Froude, αποτελεί αντίσταση πίεσης και κατά συνέπεια μπορεί να εκτιμηθεί χρησιμοποιώντας τη θεωρία δυναμικού (potential flow), θεωρία πάνω στην οποία βασίζεται για τους υπολογισμούς του το πρόγραμμα SWAN – II που θα χρησιμοποιήσουμε στη μελέτη μας. Επίσης αποτελεί σημαντική συνιστώσα αντίστασης σε σχετικά μεγάλες ταχύτητες όπως συμβαίνει στην περίπτωση του σκάφους που εξετάζεται, όπου ο αριθμός Froude λαμβάνει τιμές 0,248 και 0,413. Έτσι λοιπόν, βάσει αυτής της θεώρησης, θα υποθέσουμε ρευστό ατριβές και αστρόβιλο, αμελώντας τα φαινόμενα συνεκτικότητας, δηλαδή την αντίσταση λόγω τριβής και λόγω διαταραχής του πεδίου πίεσεων του ομώρου της γάστρας, καθώς επίσης και την αντίσταση του αέρα, και θα μελετήσουμε, εκμεταλλευόμενοι τη θεωρία δυναμικού, μόνο την ελαχιστοποίηση της αντίστασης

κυματισμού. Παρόλα αυτά τονίζεται πως, όπως ήδη αναφέρθηκε, οι πρώτες από τις αντικειμενικές μας συναρτήσεις (F_1) διαμορφώθηκε λαμβάνοντας υπόψη και τις λοιπές συνιστώσες της αντίστασης που προαναφέρθηκαν (πλην αυτής του αέρα).

Επιπλέον στη συγκεκριμένη μελέτη θα υπολογιστεί και στη συνέχεια θα γίνει βελτιστοποίηση με γνώμονα την αντίσταση γυμνής γάστρας ή αλλιώς αντίσταση ρυμούλκησης. Είναι σημαντικό να τονιστεί πως στην αντίσταση αυτή δεν περιλαμβάνεται η αντίσταση παρελκόμενων και η αντίσταση λόγω της παρουσίας του προωστήριου συστήματος και της αλληλεπίδρασης του με τη γάστρα, καθώς σε αυτή την περίπτωση θα αναφερόμασταν στην αντίσταση αυτοπροωθούμενου σκάφους. Οι δύο αντιστάσεις δεν διαφέρουν ιδιαίτερα μεταξύ τους και η βελτιστοποίηση της γυμνής γάστρας μας δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα για την ελαχιστοποίηση της συνολικής αντίστασης.

Δυναμικές Αποκρίσεις

Κατά την πλεύση ενός σκάφους, πέρα από την αντίσταση που αυτό παρουσιάζει, σημαντική παράμετρος της αξιοπλοΐας και της επιχειρησιακής του ικανότητας αποτελεί και η απόκρισή του σε αλληλεπίδραση με τους θαλάσσιους κυματισμούς. Οι κινήσεις του πλοίου, καταρχήν επηρεάζουν αρνητικά την άνεση του πληρώματος, προκαλώντας του ναυτία και δυσχεραίνοντας την εκτέλεση των καθημερινών εργασιών. Επιπλέον τα σύγχρονα πολεμικά πλοία, όπως αυτό που μελετάμε, είναι φορείς ελικοπτέρων (Ε/Π), τα οποία αποτελούν εξεχούσης σημασίας επιχειρησιακό ‘εργαλείο’ στην επίτευξη του έργου τους. Όπως είναι κατανοητό οι μεγάλοι εύρους αποκρίσεις του πλοίου καθιστούν το ‘εργαλείο’ αυτό μη επιχειρησιακό, στερώντας του την ικανότητα να προσαπονηώνεται. Έχοντας υπόψη αυτά, η προσπάθειά μας θα επικεντρωθεί αφενός στην απομείωση των κάθετων επιταχύνσεων στο ύψος της γέφυρας του πλοίου και αφετέρου στην κατά το δυνατόν μείωση του εύρους διατοιχισμού του.

Όπως και στην περίπτωση της αντίστασης, θεωρούμε το ρευστό ατρίβες και αστρόβιλο και συνεπώς έχουμε τη δυνατότητα να μελετήσουμε τη δυναμική του συμπεριφορά με χρήση των αρχών της θεωρίας δυναμικού. Σε αντίθεση όμως με την περίπτωση της αντίστασης, όπου οι υπολογισμοί μας θεωρούνται ακριβείς μόνο όσον αφορά σε μία από τις συνιστώσες της, αυτήν της αντίστασης κυματισμού, η εξάρτηση των δυναμικών αποκρίσεων ενός πλοίου κατά τους διάφορους βαθμούς ελευθερίας

από φαινόμενα συνεκτικότητας είναι εν γένει αμελητέα. Έτσι, εξαιρουμένης της κίνησης του διατοιχισμού όπου οι συνεκτικές δυνάμεις επιδρούν σημαντικότερα, η θεώρηση ατρίβους και αστρόβιλου ρευστού εισάγει μόνο μικρά σφάλματα στα αποτελέσματά μας, καθιστώντας τα ικανοποιητικής ακρίβειας.

Προκειμένου να καταστεί δυνατή η μελέτη των δυναμικών αποκρίσεων ενός πλοίου πρέπει προηγουμένως να βρεθούν μαθηματικές εκφράσεις για τις διάφορες κινήσεις που δύναται να πραγματοποιήσει ένα επιπλέον σώμα, σε συνέπεια των δυνάμεων που δέχεται ενώ αυτό κινείται (πλέει) σε μη ήρεμο νερό. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι πρέπει να καταστρωθούν οι εξισώσεις κίνησης του πλοίου, στους έξι βαθμούς ελευθερίας του, ως συνάρτηση των κυματισμών του θαλασσίου περιβάλλοντος στο οποίο κινείται, αλλά και των κυματισμών που η κίνησή του προκαλεί στο ίδιο το περιβάλλον.

Τόσον οι εξισώσεις κίνησης επιπλέοντος σώματος, όσον και το γενικό υδρομηχανικό πρόβλημα εμφανίζει έντονη εξάρτηση από την συχνότητα, ως εκ τούτου οι δυναμικές αποκρίσεις ενός πλοίου σε κυματισμούς υπολογίζονται καταρχήν χωριστά για κάθε μία από τις συχνότητες οι οποίες συνιστούν τον κυματισμό που μελετάμε. Όμως οι φυσικοί κυματισμοί και οι ταλαντωτικές κινήσεις ενός πλοίου δεν αποτελούν απλή υπέρθεση ενός αριθμού ημιτόνων. Προκειμένου να είναι δυνατή η πρακτική αξιοποίηση των υπολογισμών που αφορούν στη δυναμική συμπεριφορά ενός πλοίου σε ημιτονικούς κυματισμούς, πρέπει να είναι δυνατή η αναγωγή τους σε φυσικούς κυματισμούς. Η αναγωγή αυτή βασίζεται στη στοχαστική περιγραφή τόσο της διέγερσης (κύματα) όσο και των αποκρίσεων του πλοίου, και κατόπιν στην εφαρμογή της αρχής της υπέρθεσης. Η αρχή αυτή, βέβαια, προϋποθέτει ότι η δυναμική συμπεριφορά ενός πλοίου σε κυματισμούς μοντελοποιείται σαν ένα γραμμικό σύστημα.

Έχοντας στη διάθεσή μας τις εξισώσεις που περιγράφουν τις διάφορες κινήσεις του πλοίου, αλλά και τη δυνατότητα να παραστήσουμε τα πεδίακά μεγέθη που μας ενδιαφέρουν με τη βοήθεια συναρτήσεων δυναμικού, μπορούμε να μελετήσουμε τη δυναμική συμπεριφορά του σκάφους στο πλαίσιο της θεωρίας λωρίδων. Σύμφωνα με αυτή το τρισδιάστατο πρόβλημα του προσδιορισμού των αποκρίσεων του σκάφους επιλύεται με κατά μήκος ολοκλήρωση των αποκρίσεων στις εγκάρσιες τομές του. Κατ’ αυτή την έννοια το τρισδιάστατο πρόβλημα ανάγεται σε επιμέρους απλούστερα

δισδιάστατα. Για την επίλυση των δισδιάστατων προβλημάτων χρησιμοποιείται η θεωρία του Frank. Λεπτομερέστερη ανάλυση γίνεται στο οικείο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας όπου περιγράφεται η λειτουργία του υπολογιστικού κώδικα SPP-86.

Έχοντας επιτύχει, λοιπόν αξιόπιστη πρόβλεψη της συμπεριφοράς του πλοίου σε τυχαίους κυματισμούς μπορούμε να επιχειρήσουμε τη βελτιστοποίηση της γάστρας μας προκειμένου οι αποκρίσεις της, στους εξεταζόμενους βαθμούς ελευθερίας, να ελαχιστοποιηθούν. Η εκτίμηση της συμπεριφοράς κάθε γεωμετρίας που θα παραχθεί, στο πλαίσιο της διαδικασίας βελτιστοποίησης, θα γίνει μέσω της εκτίμησης της αντίστοιχης συνάρτησης μεταφοράς (Response Amplitude Operator, RAO).

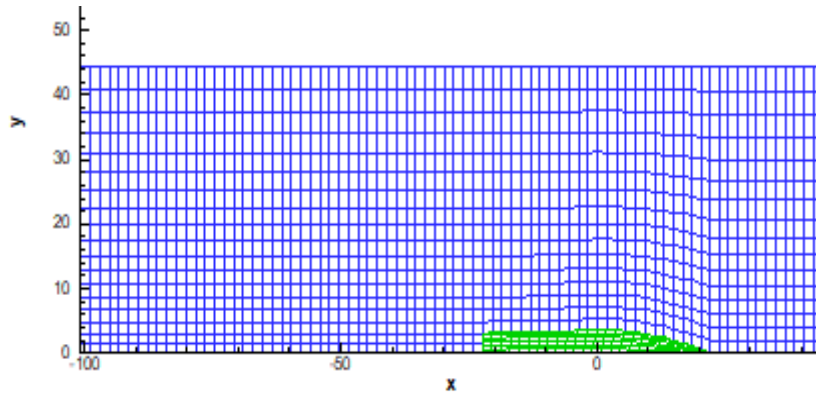
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ

Swan 2 2002

Το πακέτο λογισμικού SWAN2 2002 (Ship Wave ANalysis) είναι ένα υπολογιστικό πρόγραμμα το οποίο δύναται να αναλύσει τη σταθερή και μη σταθερή, μηδενικής και πρόσω ταχύτητας ροή, γύρω από πλοίο το οποίο παραμένει ακίνητο ή πλέει σε ρευστό απείρου ή πεπερασμένου βάθους. Η όλη ανάπτυξη του προγράμματος έγινε στο MIT από τους Kring & Sclavounos (1995). Η επίλυση, τόσο της σταθερής όσο και της μη σταθερής ροής στην ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού γύρω από το πλοίο, γίνεται με χρήση της θεωρίας δυναμικού μέσω τρισδιάστατων τετραπλεύρων, αποτελούμενα από πηγές Rankine. Τα προαναφερθέντα τετράπλευρα (panels) κατανέμονται στις επιφάνειες της υπό μελέτη γάστρας (ύφαλα) και της ελεύθερης επιφάνειας του ρευστού. Η όλη διαδικασία πραγματοποιείται στο πεδίο του χρόνου. Οι οριακές συνθήκες, της ελεύθερης επιφάνειας και του στερεού συνόρου, που εισάγονται στο πρόγραμμα, γραμμικοποιούν τις διαταραχές του σταθερού και μη σταθερού φαινομένου γύρω από το πλοίο. Στις παραγράφους που ακολουθούν θα γίνει αναφορά κυρίως στα χαρακτηριστικά και στις δυνατότητες του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκαν στο πλαίσιο της παρούσης εργασίας.

Η δημιουργία των panels, που προαναφέραμε, δεν απαιτεί τη χρήση κάποιου προγράμματος σχεδίασης. Αρκεί μόνον η εισαγωγή στο πρόγραμμα της γεωμετρίας της γάστρας με τη μορφή καμπυλών offset. Το ίδιο το Swan 2 στη συνέχεια, με τη χρήση ενσωματωμένων σε αυτό ρουτινών, παράγει τα απαιτούμενα panels. Σε κάθε περίπτωση η προς εξέταση γάστρα θα πρέπει να είναι συμμετρική ως προς τον διαμήκη

της άξονα συμμετρίας (για μονόγαστρα πλοία), ενώ περιορισμός υπάρχει και ως προς τη μορφή της πρύμνης της, αφού αυτή μπορεί να είναι μόνο τύπου cruiser ή transom. Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας κατανομής των panels στην ελεύθερη επιφάνεια του ρευστού και στη επιφάνεια της γάστρας φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 11: Πλέγμα στερεού συνόρου και ελεύθερης επιφάνειας

Ο χρήστης του προγράμματος έχει τη δυνατότητα να ορίσει την πυκνότητα του πλέγματος καθώς επίσης και την έκτασή του, όσον αφορά στο πλέγμα της ελεύθερης επιφάνειας, επηρεάζοντας κατ’ αυτόν τον τρόπο την επ’ άπειρο συμπεριφορά της λύσης. Ανεξάρτητα από τη δυνατότητα αυτή που παρέχεται στο χρήστη, το πρόγραμμα διαθέτει ρουτίνα η οποία διασφαλίζει (αλλάζοντας το χρονικό βήμα των κινήσεων του πλοίου και της ελεύθερης επιφάνειας) πως το εκάστοτε πλέγμα ανταποκρίνεται στα κριτήρια σταθερότητας το προγράμματος.

Λειτουργία του προγράμματος

Το αρχείο εισόδου στο Swan - II, στο οποίο έχει ήδη γίνει αναφορά στην προηγούμενη παράγραφο, είναι το PLN file. Αυτό, μέσω του εκτελέσιμου αρχείου makessg.exe μετατρέπεται στο αρχείο το οποίο περιέχει το προαναφερθέν πλέγμα (SSGfile). Τα χαρακτηριστικά του πλέγματος (πυκνότητα, έκταση) ορίζονται από τον χρήστη μέσω ενός δεύτερου αρχείου εισόδου του INP file. Έχοντας πλέον, στη διάθεσή του και τα τρία αρχεία (PLN, INP και SSG) το πρόγραμμα μέσω του εκτελέσιμου setup.exe παράγει το ενδιάμεσο αρχείο JOU file. Τελικά, με όλα τα προηγούμενα αρχεία στη διάθεσή του και με χρήση του solve.exe, το Swan - II επιλύει το πρόβλημα δίδοντας τα αντίστοιχα αρχεία εξόδου.

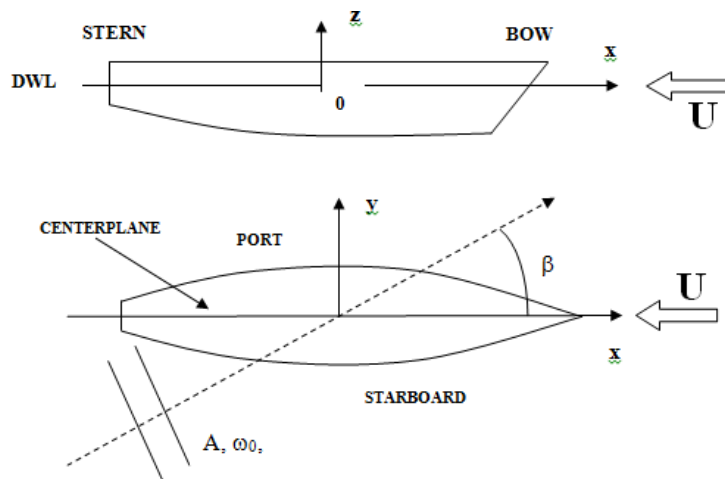
Τα όσα περιγράφηκαν προηγουμένως παρουσιάζονται παρακάτω υπό μορφή πίνακα:

A/A	Αρχεία Εισόδου	Εκτελέσιμο Πρόγραμμα	Αρχεία Εξόδου
1	INP, PLN	makecssg	SSG, GEO
2	INP, PLN, SSG	setup	JOU
3	INP, PLN, SSG, JOU, [PMS]	solve	OUT, WP, [LDS], [WKE]

Πίνακας 1: Διαδοχή εκτέλεσης προγραμμάτων SWAN-II

Σύστημα αναφοράς – Αρχείο εισόδου

Άξιος λόγου είναι ο τρόπος με τον οποίο πρέπει να ορίσουμε την υπο μελέτη γεωμετρία στο αρχείο εισόδου (PLN), προκειμένου το πρόγραμμα να μπορέσει να προβεί στην ορθή επίλυση του προβλήματος. Καταρχήν οι συντεταγμένες, των καμπυλών της γάστρας μας, ορίζονται με βάση το σύστημα αναφοράς που απεικονίζεται παρακάτω.



Εικόνα 12: Χρησιμοποιούμενο σύστημα συντεταγμένων από SWAN-II

Η επιφάνεια της γάστρας ορίζεται από διάφορα σημεία, τα οποία με τη σειρά τους, βρίσκονται επί καμπυλών τις οποίες ονομάζουμε σταθμούς (stations). Οι σταθμοί, λοιπόν, είναι τρισδιάστατες καμπύλες οι οποίες μπορεί να κείνται σε ένα επίπεδο ή και όχι. Οι σταθμοί που εισάγονται στο Swan θα πρέπει να ορίζονται από τον πρωραίο προς τον πρυμναίο. Το πρόγραμμα δέχεται δύο ειδών σταθμούς:

- Σταθμοί τύπου A. Χρησιμοποιούνται για να ορίσουν την πρόρη (κοράκι) και την πρύμνη τύπου cruiser.

Η πρώτη και η τελευταία καμπύλη που θα εισαχθεί στο PLN (πρόρη και πρύμνη) θα είναι αυτού του τύπου. Τα σημεία που ορίζουν την καμπύλη αυτή αριθμούνται από την τροπίδα προς το κατάστρωμα και είναι συνεπίπεδα για συμμετρικό πλοίο (βρίσκονται

όλα επί του επιπέδου $y=0$). Επιπλέον τα σημεία αυτά πρέπει να βρίσκονται πρόωραθεν και πρύμνηθεν της ΠΡ και ΠΜ καθέτου του πλοίου αντίστοιχα.

- Σταθμοί τύπου Β. Χρησιμοποιούνται για την περιγραφή της γάστρας του πλοίου μεταξύ πρόρης και πρύμνης.

Λόγω της συμμετρίας της γάστρας των πλοίων εκατέρωθεν του centerplane οι σταθμοί αυτοί αρκεί να οριστεί μόνο τμήμα τους που αφορά το θετικό κομμάτι του άξονα των y . Όπως και προηγουμένως τα σημεία και των καμπυλών αυτών αριθμούνται από την τρόπιδα προς το κατάστρωμα.

Αρχεία εξόδου – Επαναλήψεις

Τα αρχεία εξόδου περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, τη δυναμική βύθιση του πλοίου, τη διαμήκη του διαγωγή καθώς επίσης και την τιμή του συντελεστή αντίστασης κυματισμού για δεδομένη ταχύτητα κίνησης του πλοίου. Οι τιμές της διαγωγής και της βύθισης μπορούν, κάθε φορά, να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα εισόδου για τη δημιουργία νέου αρχείου SSG. Έτσι τα ‘‘υποπρογράμματα’’ setup και solve, που έχουν προαναφερθεί, μπορούν να ‘‘ξανατρέχουν’’, στο πλαίσιο μιας επαναληπτικής διαδικασίας, έως ότου η αντίσταση κυματισμού, η βύθιση και η διαγωγή συγκλίνουν. Αυτός είναι και ο τρόπος με τον οποίο το πρόγραμμα υπολογίζει με ακρίβεια την αντίσταση κυματισμού του πλοίου για την εκάστοτε ταχύτητα.

Περιορισμοί

Η θεωρία στην οποία βασίζεται το Swan - II για την επίλυση των προβλημάτων, επιβάλλει κάποιους αριθμητικούς και φυσικούς περιορισμούς όσον αφορά στα δεδομένα που του δίδονται ως είσοδος.

Ο συνδυασμός ταχύτητας του πλοίου, περιόδου κυματισμού και γωνίας συνάντησης των δύο, καθορίζουν τη συχνότητα συνάντησης ω . Μέσω αυτής ορίζεται η μειωμένη συχνότητα $\tau = \frac{U\omega}{g}$. Για τιμές αυτής της παραμέτρου περίξ της κρίσιμης τιμής 0,25 απαιτείται προσεκτική διακριτοποίηση του πλέγματος της ελεύθερης επιφάνειας. Συγκεκριμένα όταν η προαναφερθείσα τιμή πρέπει να προσεγγιστεί, η ελεύθερη επιφάνεια θα πρέπει να εκτείνεται σε μεγαλύτερη απόσταση γύρω από το πλοίο προς όλες τις κατευθύνσεις. Έτσι θα επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς που το πρόγραμμα θα πραγματοποιήσει.

Σε περίπτωση που οι υπολογισμοί αφορούν πλεύση σε ρευστό πεπερασμένου βάθους H θα πρέπει να αποφευχθούν βάθη τα οποία οδηγούν σε αριθμό Froude μεταξύ των τιμών 0,9 και 1,1.

Ο τρόπος με τον οποίο προσεγγίζεται η ελεύθερη επιφάνεια (με χρήση panels) δεν είναι σε θέση να αναπαραστήσει με απόλυτη ακρίβεια τη συνεχή της μορφή. Όταν τα panels που δημιουργούνται έχουν μεγάλο λόγο επιμήκους τα αποτελέσματα που παράγονται είναι μειωμένης ακρίβειας αφού η ροή των κυμάτων γίνεται ασταθής. Το εκτελέσιμο makessg, μέσω αριθμητικής ανάλυσης, φροντίζει να αποφεύγει αυτό το φαινόμενο. Επίσης, με τον ίδιο τρόπο, διασφαλίζει τόσο την μη ύπαρξη αλλαγή φάσης των κυματισμών, όσο και την αμελητέα απώλεια πλάτους τους. Γενικά, επιμήκη panels είτε στην ελεύθερη επιφάνεια είτε στο στερεό σύνορο γάστρας-ρευστού θεωρούνται ως ανώμαλα και θα πρέπει να αποφεύγονται. Τέτοιου είδους panels εμφανίζονται συχνά κοντά στην πρύμνη του σκάφους όταν αυτή είναι τύπου cruiser. Ο καλύτερος τρόπος να τα αποφύγουμε, είναι η χρήση σταθμού τύπου B κατά την περιγραφή της πρύμνης της γάστρας μας.

Πέρα από τα παραπάνω οι μέγιστες τιμές κάποιων μεταβλητών έχουν οριστεί στο Swan ως εξής:

➤ Αριθμός σταθμών	300
➤ Αριθμός καμπυλών ($y > 0$)	300
➤ Αριθμός panels	3000
➤ Αριθμός κυματικών συχνοτήτων	20

SPP-86

Ο κώδικας SPP-86 (γνωστός και απλά ως FRANK 52), ο οποίος δημιουργήθηκε από τον Τομέα Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, αποτελεί το υπολογιστικό εργαλείο που θα χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση των δυναμικών αποκρίσεων των διαφορετικών εναλλακτικών σχεδιάσεων που θα εξεταστούν σε κυματισμό.

Ο κώδικας FRANK εκμεταλλεύομενος την ομώνυμη μέθοδο και εν συνεχεία εφαρμόζοντας τη θεωρία λωρίδων επιτυγχάνει την επίλυση του διδιάστατου

υδροδυναμικού προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα ως είσοδος για το πρόγραμμα χρησιμοποιούνται οι συντεταγμένες σημείων τα οποία κείνται στο περίγραμμα μιας εγκάρσιας διατομής της γάστρας του υπό μελέτη πλοίου όπου και υπολογίζεται το διδιάστατο δυναμικό για το σύνολο των κινήσεων των heave, sway και roll. Αυτό επιτυγχάνεται χάρη στον προσδιορισμό της θέσης ενός πλήθους παλλόμενων σημειακών πηγών (Rankine) κατά μήκος του παραπάνω περιγράμματος. Το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται κείται στα νοητά εγκάρσια επίπεδα που δημιουργούνται και ο άξονας των x είναι εφαπτόμενος στην ίσαλο ενώ ο αντίστοιχος των y παραμένει κάθετος σε αυτή με τη θετική φορά να ορίζεται προς τα άνω. Κατ’ αυτόν τον τρόπο η συνοριακή καμπύλη της επιφάνειας του νομέα, όπως αυτή προκύπτει από της εγκάρσιες τομές που περιγράφησαν προηγουμένως, βρίσκεται στο ημιεπίπεδο των αρνητικών τεταγμένων με τον άξονα των y να αποτελεί άξονα συμμετρίας της. Ακολούθως, ολοκληρώνοντας κατά το μήκος της γάστρας υπολογίζονται τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά πρόσθετης μάζας και της αποσβέσεως για μια δεδομένη κάθε φορά συχνότητα. Προκειμένου να εφαρμοστεί η θεωρία του Frank γίνονται οι εξής παραδοχές, οι οποίες έχουν ήδη αναφερθεί:

- Το ρευστό λαμβάνεται ως ατριβές και ασυμπίεστο.
- Οι επιφανειακές τάσεις αγνοούνται.
- Το περιβάλλον υδροδυναμικό πεδίο λογίζεται αστρόβιλο.
- Οι κινήσεις του σκάφους θεωρούνται αρκετά μικρές, ώστε να ληφθούν υπόψη μόνον οι γραμμικοί όροι της συνθήκης ελεύθερης επιφάνειας, της κινηματικής συνθήκης στο σύνορο του νομέα και η εξίσωση Bernoulli.

Έτσι το προς προσδιορισμό δυναμικό της ταχύτητας είναι:

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

Με το m να λαμβάνει τιμές 2, 3 και 4 ανάλογα με το ποια από τις προηγούμενες κινήσεις εξετάζουμε.

Λαμβάνοντας υπόψη τις συνθήκες που πρέπει να πληροί η ζητούμενη συνάρτηση δυναμικού, με δεδομένο το σύστημα συντεταγμένων που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, αλλά και τη γραμμική υπόθεση που προαναφέρθηκε, το δυναμικό της ταχύτητας μπορεί να γραφεί ως εξής:

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

Όπου C_0 είναι το σύνορο του βυθισμένου νομέα στη μέση θέση ισορροπίας του, $Q(s)$ η ένταση της πηγής Rankine συναρτήσεως της επικαμπύλιας θέσης της επί του συνόρου του νομέα και $G(z, \zeta)$ μια κατάλληλη συνάρτηση δυναμικού. Χρησιμοποιώντας τη γραμμικοποιημένη εξίσωση Bernoulli μπορεί πλέον να βρεθεί η τιμή της πίεσης σε τυχαία θέση συναρτήσεως της οποίας τελικά υπολογίζονται οι ζητούμενοι συντελεστές (μάζας και αποσβέσεως).

Ολοκληρώνοντας (αριθμητικά) τις πιέσεις πάνω στο σύνορο των νομέων και στη συνέχεια κατά μήκος ολόκληρης της επιφάνειας του βυθισμένου όγκου, μπορούν να υπολογιστούν οι ασκούμενες δυνάμεις, ροπές και συνεπώς οι μετατοπίσεις, ταχύτητες και επιταχύνσεις του σκάφους.

CAE System Friendship Framework

Ο όρος που συνήθως χρησιμοποιείται για να περιγράψει προγράμματα σαν το CAE system Friendship Framework είναι ο: Computer Aided Engineering (CAE) δηλαδή μηχανική υποβοηθούμενη από ηλεκτρονικό υπολογιστή. Βασικό χαρακτηριστικό των προγραμμάτων του είδους αυτού είναι η δυνατότητα που παρέχουν όχι μόνο για σχεδίαση (modeling) αλλά και για εκτέλεση προσομοίωσης των συνθηκών μέσα στις οποίες θα κληθεί το εκάστοτε μοντέλο να λειτουργήσει. Εσχάτως, και μετά την αύξηση του ενδιαφέροντος για τα οφέλη της διαδικασίας της βελτιστοποίησης, χρησιμοποιείται και ο όρος Simulation Driven Design. Με αυτόν χαρακτηρίζονται τα προγράμματα όπου τον κεντρικό ρόλο διαδραματίζει η λειτουργία της προσομοίωσης παρά η σχεδίαση αυτή καθαυτή. Έτσι, η προσομοίωση χρησιμοποιείται για την παραγωγή των διαφόρων γεωμετριών και όχι απλά για την αξιολόγησή τους. Συγκεκριμένα, η αρχική ιδέα ήταν η παραγωγή ορισμένων γεωμετριών, οι οποίες έχουν προκύψει από ‘‘χειροκίνητη’’ μεταβολή κάποιων παραμέτρων, και στη συνέχεια η επιλογή, μέσω διαδοχικών προσομοιώσεων της καθεμίας από αυτές, εκείνης με τις καλύτερες επιδόσεις. Πλέον η βασική ιδέα είναι να αφήσουμε την προσομοίωση να μας ‘‘πει’’ πώς θα πρέπει να είναι η βέλτιστη γεωμετρία. Τα προαπαιτούμενα για την εφαρμογή μιας τέτοιας διαδικασίας είναι τα ακόλουθα:

- Επιλογή λειτουργικών παραμέτρων. Οι παράμετροι που επιλέγονται θα πρέπει να είναι κατά το δυνατόν ανεξάρτητοι μεταξύ τους και η μεταβολή των τιμών τους να επηρεάζει τη λειτουργικότητα της γεωμετρίας, η οποία όμως θα πρέπει να παραμένει εφικτή.
- Άμεση σύνδεση σχεδίασης μοντέλου και προσομοίωσης. Τα εργαλεία της αριθμητικής προσομοίωσης, που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση των διαφόρων μεταβλητών σχεδίασης, θα πρέπει να είναι άμεσα προσβάσιμα από το ίδιο το περιβάλλον σχεδίασης, χωρίς να απαιτείται η κανενός είδους επέμβαση από την πλευρά του χρήστη. Κατ’ αυτόν τον τρόπο καθίσταται δυνατή η αξιολόγηση και κατάταξη των παραμέτρων.
- Παροχή δυνατότητας αποτελεσματικής διαχείρισης των μεταβλητών των σταθερών και των προσκοπτουσών, κάθε φορά γεωμετριών. Το μεγάλο πλήθος των παραμέτρων και των αντιστοίχων γεωμετριών που παράγονται πρέπει να είναι κατάλληλα οργανωμένα ώστε να καθίσταται δυνατή η σύγκριση μεταξύ τους και η εν συνεχεία εξαγωγή συμπερασμάτων. Επιπλέον, η οργάνωση αυτή αναδεικνύει τις τιμές των παραμέτρων που δίνουν μη εφικτές λύσεις ώστε αυτές να αποκλειστούν από το χρήστη.

Το CAE System Friendship Framework είναι ένα πρόγραμμα που συγκεντρώνει τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά. Πρόκειται για μια πλατφόρμα η οποία ενσωματώνει τις δυνατότητες σχεδίασης CAD και προσομοίωσης μέσω CFD. Το δεύτερο της χαρακτηριστικό δε χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσης αφού προτιμήθηκε το Swan II. Η εφαρμογή δημιουργήθηκε για τη σχεδίαση λειτουργικών επιφανειών όπως γάστρες, έλικες και παρελκόμενα πλοίων. Πέραν αυτών όμως βρίσκει εφαρμογή και στη σχεδίαση πτερυγίων στροβίλων, αντλιών και γενικά επιφανειών που εκτίθενται στη δυναμική ροή κάθε είδους ρευστού. Προσφέρει στο χρήστη ένα ευρύ φάσμα δυνατοτήτων όπως:

- Δυνατότητα δημιουργίας σύνθετων, πλήρως παραμετροποιημένων μοντέλων. Επιπλέον μη παραμετρικά σχήματα μπορούν να εισαχθούν στο πρόγραμμα και μέσω κατάλληλης επεξεργασίας να παραμετροποιηθούν. Η διαδικασία αυτή υποστηρίζεται από πληθώρα παραμετρικών καμπυλών και επιφανειών.
- Παρέχεται στο χρήστη η δυνατότητα εύκολης διασύνδεσης του προγράμματος με εξωτερικούς κώδικες πχ προσομοίωσης.

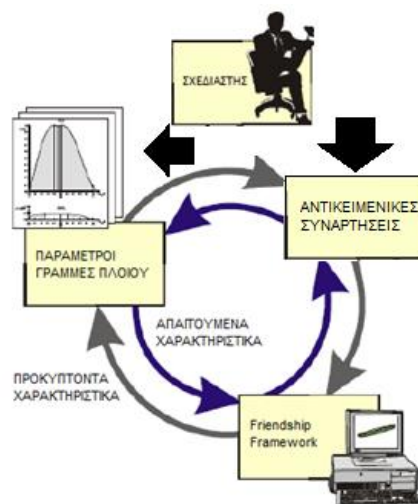
- Επιπλέον παρέχεται, από το πρόγραμμα, μεγάλος αριθμός από διαφορετικούς αλγορίθμους για την εκτέλεση διαφόρων διεργασιών όπως μονοκριτηριακή ή πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση.

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας το λειτουργικό πρόγραμμα χρησιμοποιήθηκε για την παραμετρική μοντελοποίηση της υπό μελέτη γάστρας και για τη βελτιστοποίηση της γεωμετρίας της μέσω του ενσωματωμένου σε αυτό αλγορίθμου NSGA II. Η αξιολόγηση των διαφόρων γεωμετριών που παρήχθησαν έγινε με τα προγράμματα προσομοίωσης που περιγράφονται στις προηγούμενες παραγράφους του παρόντος κεφαλαίου (SPP-86 & Swan - II) μέσω διασύνδεσής τους με το Friendship. Η διαδικασία θα αναλυθεί εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο της παρούσης.

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ - ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ

Εισαγωγικά

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η διαδικασία της μοντελοποίησης της υπο βελτιστοποίηση γάστρας ξεκίνησε από το αρχείο IGES (Initial Graphics Exchange Specification) του μοντέλου που δημιουργήθηκε στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος “Thales” των εκπαιδευτικών ιδρυμάτων INSEAN (Italy), DMI (Denmark) και MARIN (The Netherlands). Έχοντας κατά νου το πλαίσιο που δημιουργείται αφενός από τους στόχους της βελτιστοποίησης και αφετέρου από τους περιορισμούς που επιβάλλονται, όπως αυτοί περιγράφονται σε προηγούμενο κεφάλαιο της εργασίας, επελέγησαν και οι μεταβλητές σχεδίασης, μέσω της μεταβολής των οποίων επιχειρήθηκε η βελτιστοποίηση της γάστρας του DDG-51.



Εικόνα 13: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί πως οι δύο διαδικασίες, της μοντελοποίησης και της παραμετροποίησης της γάστρας, πρέπει να πραγματοποιηθούν ταυτόχρονα, αφού η μία επηρεάζει και εξαρτάται από την άλλη. Η απλή εισαγωγή μεταβλητών σε ένα ήδη υπάρχον μοντέλο είναι μη λειτουργική καθώς η μεταβολή τους επηρεάζει τη γεωμετρία σε μεμονωμένα μόνον σημεία με αποτέλεσμα να προκύπτουν ασυνέχειες οι οποίες καθιστούν την προκύπτουσα γάστρα μη εφικτή.

Έτσι, κατά τη διάρκεια της μοντελοποίησης, πρέπει να ληφθεί μέριμνα ώστε η μεταβολή των τιμών των διαφόρων μεταβλητών σχεδίασης εντός του επιλεχθέντος εύρους τους να οδηγεί σε γεωμετρίες συνεχείς και λειτουργικές. Αυτό επιτυγχάνεται επιβάλλοντας εξάρτηση της μορφής των καμπυλών, και κατά συνέπεια των επιφανειών που προκύπτουν από αυτές, της περιοχής που επηρεάζεται από κάποια παράμετρο από την εκάστοτε τιμή που αυτή λαμβάνει. Επιπλέον, η χρήση μεγάλου αριθμού σχεδιαστικών παραμέτρων, πρέπει να αποφευχθεί. Είναι εύκολα κατανοητό πως η δυσκολία επίλυσης του προβλήματος κλιμακώνεται αναπόδραστα με την αύξηση της σχεδιαστικής ελευθερίας που προσδίδεται στη γεωμετρία μέσω μεταβλητών σχεδίασης. Έτσι, με χρήση κατά το δυνατόν λιγότερων μεταβλητών, πρέπει να επιτυγχάνονται δραστικές μεταβολές στη μορφή και κατ' επέκταση στα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά της γάστρας. Επιπρόσθετα, η χρήση πληθώρας σχεδιαστικών παραμέτρων καθιστά δυσχερή, αν όχι αδύνατη, την τήρηση των περιορισμών στους οποίους έχουμε ήδη αναφερθεί.

Συνοπτικά, οι δύο διαδικασίες θα πρέπει να γίνουν κατά τρόπον ώστε:

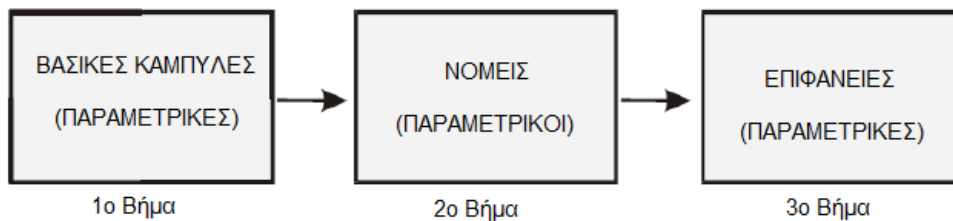
- Να επιτυγχάνονται όλα τα φυσικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά που απαιτούνται, και
- Να προκύπτει μια ποιοτική, ομαλή και συνεχής, δηλαδή μια αποδεκτή ναυπηγικά γεωμετρία.

Γίνεται λοιπό κατανοητό πως η μοντελοποίηση και η παραμετροποίηση αποτελούν κατ' ουσίαν ενιαία διαδικασία, αφού η μία αποτελεί κομμάτι της άλλης, και στο εξής θα αντιμετωπίζονται ως μία (παραμετρική μοντελοποίηση).

Έχοντας λάβει υπόψιν τα παραπάνω, ακολουθήθηκαν τα εξής τρία βήματα για την παραμετρική μοντελοποίηση της προς βελτιστοποίηση “γυμνής” (άνευ παρελκομένων) γάστρας:

- Παραμετρική σχεδίαση των βασικών διαμήκων καμπυλών της γάστρας
- Παραμετρική σχεδίαση ικανού αριθμού νομέων οι οποίοι προκύπτουν από τις προαναφερθείσες βασικές καμπύλες και περιγράφουν τη μορφή της γάστρας
- Σχηματισμός περιορισμένου αριθμού επιφανειών, οι οποίες παρεμβάλουν τους νομείς που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο βήμα, και κατά συνέπεια αναπαριστούν τη μορφή της εκάστοτε γάστρας.

ή σχηματικά:



Εικόνα 14: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας παραμετρικής μοντελοποίησης που χρησιμοποιήθηκε

Από τα παραπάνω καθίσταται σαφές πως και οι επιφάνειες του τρίτου βήματος είναι επίσης παραμετρικές (ως παρεμβολή παραμετρικών καμπυλών).

Μεταβλητές Σχεδίασης - Παράμετροι

Όπως θα δούμε αναλυτικότερα στη συνέχεια, η υπό μελέτη γάστρα αναπαρίσταται από μια ομάδα βασικών διαμήκων καμπυλών, οι οποίες παρέχουν τοπολογικές πληροφορίες, και ένα σύνολο 19 καμπυλών νομέων. Στη συνέχεια οι επιφάνειες της γάστρας δημιουργούνται παρεμβάλλοντας τους προαναφερθέντες παραμετρικούς νομείς. Η πατρική γεωμετρία χωρίζεται σε 3 βασικές περιοχές (κυρίως γάστρα, βολβός και skeg) και σε κάθε μία από αυτές ενσωματώνονται συγκεκριμένες μεταβλητές σχεδίασης. Οι εναλλακτικές γεωμετρίες παράγονται ορίζοντας το εύρος μεταβολής της κάθε μεταβλητής σχεδίασης στο περιβάλλον του CAESES Friendship Framework. Το εύρος αυτό έχει καθοριστεί μετά από εφαρμογή των απόστατων τιμών της κάθε παραμέτρου στην πατρική γάστρα και έλεγχο πως η εκάστοτε παραγόμενη γεωμετρία παραμένει αποδεκτή και εντός των περιορισμών που έχουν αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Οι μεταβλητές σχεδίασης αυτές, καθώς επίσης και το εύρος μεταβολής τους παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

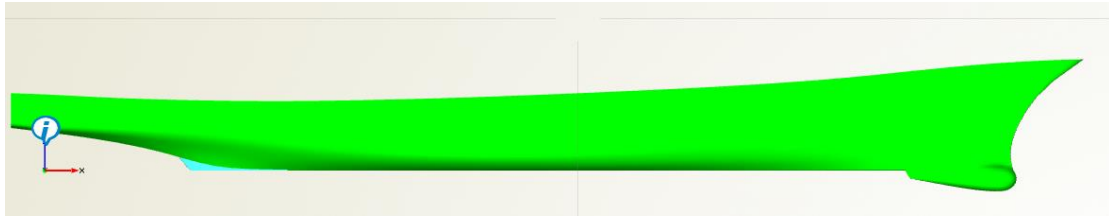
A/A	ΜΕΤΑΒΛΗΤΗ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ	Μονάδα Μέτρησης	Κατώτατη Τιμή	Αρχική Τιμή (πατρικό)	Ανώτατη Τιμή
1	Μέγιστο πλάτος πρύμνης	m	6.5	6.919	7.2
2	Μέγιστο πλάτος βολβού	m	2.9	3.2	3.6
3	Γωνία εισόδου πλώρης	deg	185.3	190.3	195.3
4	Βύθισμα ΠΜ υδροδυναμικού πτερυγίου	m	0.0	0.0	0.6
5	Μέγιστο πλάτος ισάλου	m	9.0	9.528	9.8
6	Διαμήκης θέση πρυμναίας κατατομής βολβού	m	125.8	126.2	126.5
7	Διαμήκης θέση προραίας κατατομής βολβού	m	140.8	141.9	142.5
8	Ύψος skeg	m	1.5	1.958	2.5
9	Διαμήκης θέση μεγίστου πλάτους βολβού	m	135.8	136.0	138.0
10	Ανύψωση προραίου σημείου βολβού	m	-1.7	-1.3	-1.3

Πίνακας 2: Οι μεταβλητές σχεδίασης και τα εύρη τιμών τους

Καθεμία από τις παραπάνω σχεδιαστικές παραμέτρους μεταβάλλει τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά της γάστρας, ασκώντας επιρροή όχι μόνο στην αντίσταση κυματισμού της, αλλά και στη δυναμική συμπεριφορά της σε τυχαίους κυματισμούς. Όπως ήδη έχει αναφερθεί η παραμετρική μοντελοποίηση της πατρικής γάστρας έχει γίνει κατά τρόπον ώστε η μεταβολή της τιμής κάθε παραμέτρου να επηρεάζει τη γεωμετρία σε όλη της την έκταση και όχι μόνον τοπικά. Κατ’ αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η αλλαγή της μορφής της γάστρας με μικρό αριθμό παραμέτρων να είναι δραστική, αλλά και η παραγόμενη γεωμετρία να παραμένει ομαλή και συνεχής. Πιο συγκεκριμένα, το μέγιστο πλάτος της πρύμνης (A/A 1) αφορά κυρίως τη δυναμική συμπεριφορά του σκάφους σε κυματισμό. Η επίδραση αυτής της παραμέτρου στην αντίσταση κυματισμού του σκάφους είναι ήσσονα καθώς τα συνεκτικά φαινόμενα, που κυρίως εμφανίζονται στην πρύμνη, αγνοούνται από τη θεωρία δυναμικού. Το αυτό ισχύει τόσο για το βύθισμα υδροδυναμικού πτερυγίου της πρύμνης (A/A 4) όσο και για το ύψος (βαθμό αποκάλυψης) του skeg (A/A 8). Το μέγιστο πλάτος ισάλου (A/A 5) και η γωνία εισόδου πλώρης (A/A 3) επιδρούν στην εν γένει μορφή των προραίων και μεσαίων νομέων του σκάφους, ως εκ τούτου αφορούν και στις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις. Οι μεταβλητές A/A 2, 6, 7, 9 και 10 αφορούν στο βολβό και κατά συνέπεια ασκούν επίδραση κυρίως στην αντίσταση κυματισμού της γάστρας. Παρόλα αυτά η επίδρασή τους και στις δυναμικές αποκρίσεις της γάστρας σε κυματισμό δεν πρέπει να θεωρείται αμελητέα.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

Εισάγοντας στο πρόγραμμα σχεδίασης CAESSES Friendship Framework το αρχείο IGES του προγράμματος ‘‘Thales’’ για το μοντέλο μας, στο οποίο έχουμε ήδη αναφερθεί, προέκυψε η παρακάτω γεωμετρία:



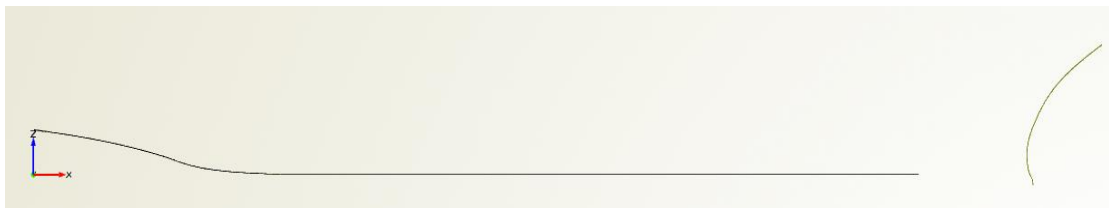
Εικόνα 15: Αρχική (πατρική) γεωμετρία, μη παραμετροποιημένη

1^ο Βήμα. Βασικές Διαμήκεις Καμπύλες

Καταρχήν πραγματοποιήθηκε η παραμετρική σχεδίαση των βασικών διαμήκων καμπυλών της γάστρας. Αυτές είναι η τομή της γάστρας με το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας (centerline, CL), η ίσαλος πλεύσης (waterline, WL) και η γραμμή του καταστρώματος (deckline).

Centerline, CL

Η γραμμή αυτή φαίνεται στις παρακάτω εικόνες. Σε αυτήν έχει συμπεριληφθεί η γραμμή της πλώρης, από το κατώτατο σημείο της μέχρι και το ύψος του καταστρώματος. Ωστόσο, δεν έχει συμπεριληφθεί το τμήμα της που αφορά στον βολβό, καθώς αυτός σχεδιάστηκε μεμονωμένα, εξ ολοκλήρου παραμετρικά. Επιπλέον, για τον ίδιο λόγο, έχει αφαιρεθεί το κομμάτι του skeg. Όπως βλέπουμε στην εικόνα 17 στο σημείο αυτό η centerline έχει τη μορφή τομής της γάστρας με το skeg, γεγονός που θα καταστήσει δυνατή τη συναρμογή τους αργότερα.



Εικόνα 16: Διαμήκης τομή παραμετρικού μοντέλου



Εικόνα 17: Η Centerline του παραμετρικού μοντέλου

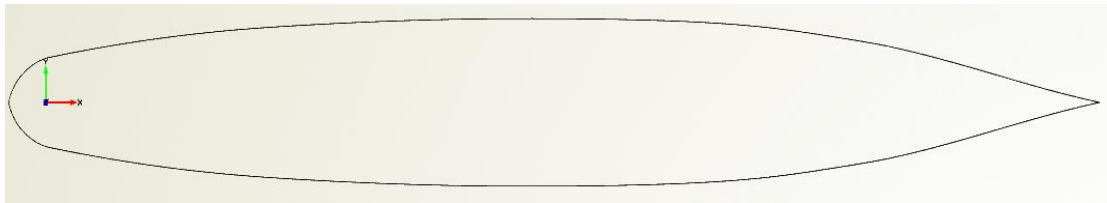
Ενδιαφέρον σ' αυτή τη γραμμή παρουσιάζει το πρυμναίο της τμήμα. Το ακρότατο σημείο του, έχει τη δυνατότητα να μετακινείται κατά τον άξονα Z,

επιτρέποντας τη δημιουργία υδροδυναμικής σφήνας μεταβλητού βυθίσματος στην πρυμναία περιοχή της γάστρας.

Ο τρόπος σχεδίασης του βολβού και του skeg θα περιγραφεί αναλυτικότερα σε επόμενες παραγράφους.

Waterline, WL

Η παραμετρική ίσαλος σχεδίασεως του πλοίου απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα. Αποτελείται από 5 καμπύλες F-Spline, με εξαίρεση τη δεύτερη κατά σειρά (από πρόρα προς τα πρύμα) η οποία είναι B-Spline. Χάρη σε αυτή τη διαδοχή των δύο ειδών καμπυλών στο προωαίο τμήμα της ισάλου, η καμπύλη έχει τη δυνατότητα να διαφοροποιεί κατά τρόπο συνεχή και ομαλό τη μορφή της, επηρεαζόμενη από τις παραμέτρους που αφορούν στη μεταβολή της γωνίας εισόδου και του μεγίστου πλάτους της, στην περιοχή της μέσης τομής του σκάφους



Εικόνα 18: Η ίσαλος του παραμετρικού μοντέλου

Επιπλέον, οι πέντε καμπύλες που συναποτελούν τη γραμμή ισάλου, συνδέονται κατά τρόπον ώστε να διατηρείται συνέχεια εφαπτομένης μεταξύ του πρυμναίου τμήματος καθεμίας με το προωαίο αυτής που τη διαδέχεται, εξασφαλίζοντας σε κάθε περίπτωση την ομαλή της μορφή.

Deckline

Στα δύο σχήματα που ακολουθούν παρατίθεται η μορφή της γραμμής του καταστρώματος. Το κατάστρωμα πρακτικά παραμένει αμετάβλητο κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης καθώς δεν επηρεάζεται από κάποια σχεδιαστική παράμετρο, εξαιρουμένης της πρώτης του πίνακα του προηγούμενου κεφαλαίου (A/A 1).



Εικόνα 19: Πλάγια όψη της παραμετρικής γραμμής καταστρώματος



Εικόνα 20: Κάτοψη γραμμής καταστρώματος

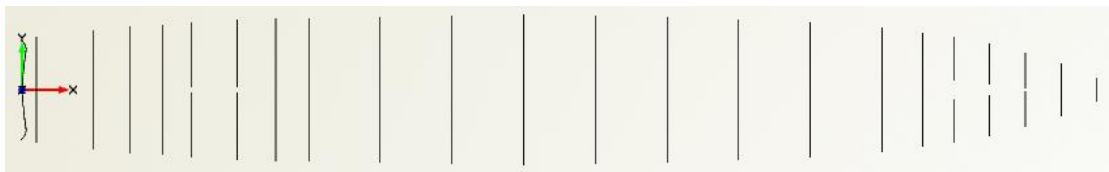
Έτσι το πρυμναίο τμήμα της γραμμής καταστρώματος αποτελείται από «γενετικές» καμπύλες (generic), μέχρι μήκους 35 μέτρων πώραθεν του σταθμού 0. Πρόκειται για ένα είδος τρισδιάστατης καμπύλης που προσεγγίζει με μεγάλη ακρίβεια την πραγματική μορφή του καταστρώματος και επιτρέπει στο πλάτος της πρύμνης του σκάφους να μεταβάλλεται (μέχρι τιμής ίσης με το μέγιστο πλάτος του καταστρώματος), διατηρώντας την αρμονική του μορφή και κατ' επέκταση την αρμονική μορφή του πρυμναίου τμήματος της γάστρας που επίσης μεταβάλλεται μαζί του.

2^ο Βήμα. Νομείς

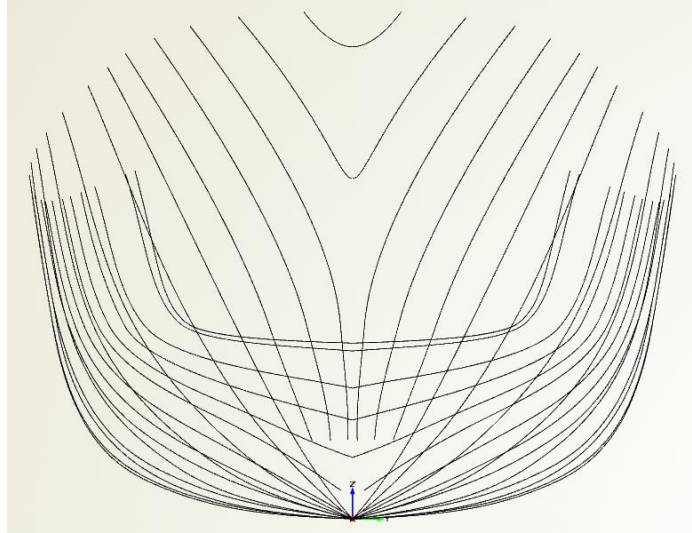
Έχοντας πλέον ολοκληρώσει την παραμετρική σχεδίαση των διαμήκων καμπυλών του σκάφους προχωράμε στη σχεδίαση των παραμετρικών νομέων του. Χρησιμοποιώντας τις καμπύλες του πρώτου βήματος ως γραμμές αναφοράς σχεδιάστηκαν 19 παραμετρικοί νομείς οι οποίοι διατηρούν σταθερή τη διαμήκη θέση τους. Οι νομείς αυτοί φαίνονται στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικόνα 21: Εκ δεξιών πλάγια όψη παραμετρικών νομέων



Εικόνα 22: Κάτοψη παραμετρικών νομέων



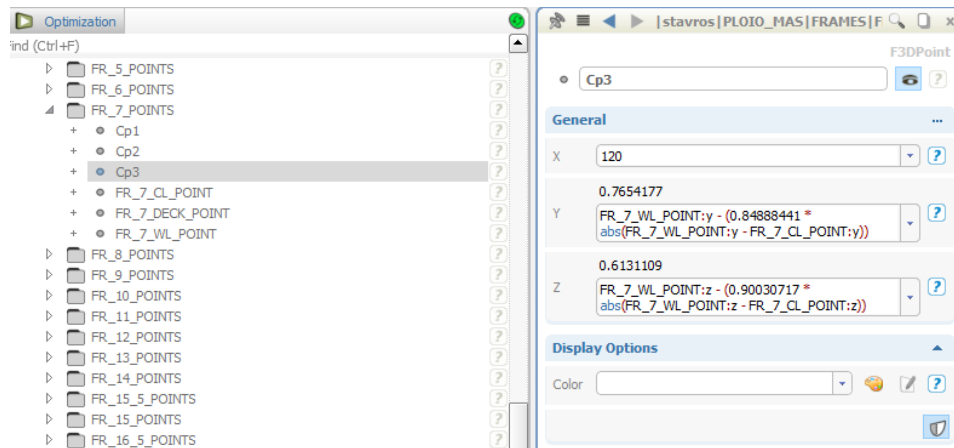
Εικόνα 23: Πρόοψη παραμετρικών νομέων

Άξιο λόγου είναι πως και σε αυτή την περίπτωση, όπως και στην περίπτωση των διαμήκων καμπυλών, οι νομείς δεν περιλαμβάνουν το βολβό του σκάφους, ούτε το skeg. Οι δύο αυτές επιφάνειες δε θα προκύψουν ως παρεμβολή των παραμετρικών νομέων, αλλά θα σχεδιαστούν μεμονωμένα και στη συνέχεια θα προσαρμοσθούν στην υπόλοιπη γάστρα.

Οι παραμετρικοί νομείς στο σύνολό τους, με εξαίρεση τους 2 προωραίους, αποτελούνται από δύο τμήματα:

- ένα άνωθεν της ισάλου σχεδιάσεως και
- ένα κάτωθεν αυτής

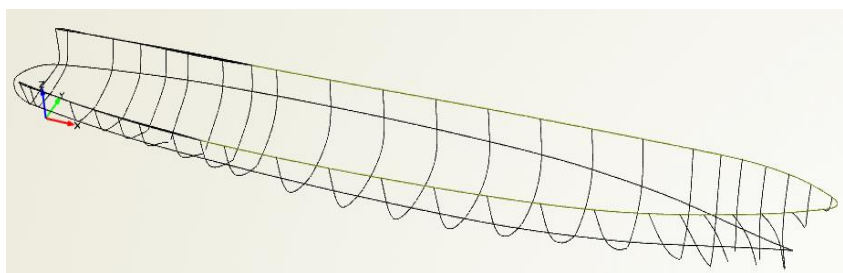
Το άνωθεν ισάλου τμήμα του κάθε νομέα χρησιμοποιεί ως γραμμές αναφοράς τη γραμμή του καταστρώματος και τη γραμμή της ισάλου σχεδιάσεως. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι τα δύο ακραία σημεία του τμήματος, άνω και κάτω, είναι σταθερά προσαρμοσμένα επί των Deckline και Waterline αντίστοιχα. Φυσικά οι δύο γραμμές αναφοράς έχουν τη δυνατότητα να αλλάζουν τη μορφή τους πράγμα που συνεπάγεται πως και τα ακραία σημεία των τμημάτων των νομέων τις ακολουθούν. Τα ενδιάμεσα σημεία ελέγχου του κάθε τμήματος, όπου αυτά υπάρχουν, έχουν υποστεί αδιαστατοποίηση, σε ότι αφορά την τεταγμένη τους (Y), συναρτήσεως των τεταγμένων των ακραίων του σημείων (βλέπε εικόνα 24). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα και αυτά να κινούνται σε αναλογία με τη σχετική κίνηση των δύο ακραίων σημείων. Έτσι το κάθε τμήμα αλλάζει τη μορφή του παραμένοντας ομαλό, συνεχές και σε αρμονία με την περίξ αυτού περιοχή.



Εικόνα 24: Αδιαστατοποίηση των παραμετρικών νομέων

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται ένα παράδειγμα της αδιαστατοποίησης στην οποία έγινε αναφορά προηγουμένως. Το παράδειγμα δείχνει τον τρόπο με τον οποίο αδιαστατοποιήθηκε το σημείο ελέγχου (control point) υπ' αριθμόν 3 του υπ' αριθμόν 7 νομέα του πλοίου. Όπως είναι αντιληπτό, η αδιαστατοποίηση έγινε ως προς την σχετική μετακίνηση των δύο ακραίων σημείων του τμήματος του νομέα 7, που εδράζονται επί των WL και CL, ως ποσοστό της αρχικής μεταξύ τους κάθετης απόστασης, επί του επιπέδου ZY. Επίσης καθίσταται σαφές το γεγονός ότι οι παραμετρικοί νομείς που σχεδιάστηκαν έχουν την τετμημένη τους (X) δεσμευμένη.

Η ίδια ακριβώς λογική ακολουθείται και στην περίπτωση των κάτωθεν ισάλου τμημάτων των νομέων. Η μόνη διαφορά είναι πως στην περίπτωση αυτή ως γραμμές αναφοράς χρησιμοποιούνται η ίσαλος σχεδιάσεως (WL) και η κεντρική γραμμή της γάστρας (CL). Η σύνδεση των δύο τμημάτων που απαρτίζουν τον εκάστοτε νομέα γίνεται και πάλι με τη δέσμευση της συνέχειας εφαπτομένης μεταξύ των δύο ευθυγράμμων τμημάτων. Κατ' αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η ομαλή ενοποίησή τους και ο νομέας που προκύπτει είναι σε κάθε περίπτωση συνεχής. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται ταυτόχρονα το σύνολο των παραμετρικών νομέων και των παραμετρικών διαμήκων καμπυλών (βήματα 1 και 2).



Εικόνα 25: Παραμετρικές καμπύλες ορισμού της γεωμετρίας

Σημαντικό επίσης είναι πως για το σχεδιασμό των νομέων δε χρησιμοποιείται παντού ο ίδιος τύπος καμπύλης. Σε περιοχές της γάστρας όπου παρουσιάζεται μεγάλη καμπυλότητα ή όπου αναμένεται έντονη αλλαγή της αρχικής γεωμετρίας κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης, προτιμάται η χρήση των B-Splines. Επίσης, B-Splines χρησιμοποιούνται στις περιοχές της γάστρας όπου υπάρχει απαίτηση υψηλής ακρίβειας στην αναπαράσταση των επιφανειών, όπως για παράδειγμα στα ύφαλα του πλοίου. Αντίθετα, όπου η απαιτούμενη ακρίβεια και η πολυπλοκότητα της γεωμετρίας το επιτρέπουν χρησιμοποιήθηκαν F-Splines. Οι τελευταίες είναι πιο εύχρηστες, καθιστούν το μοντέλο απλούστερο και κατ' επέκταση μειώνουν την πολυπλοκότητα και τον απαιτούμενο, για τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, χρόνο.

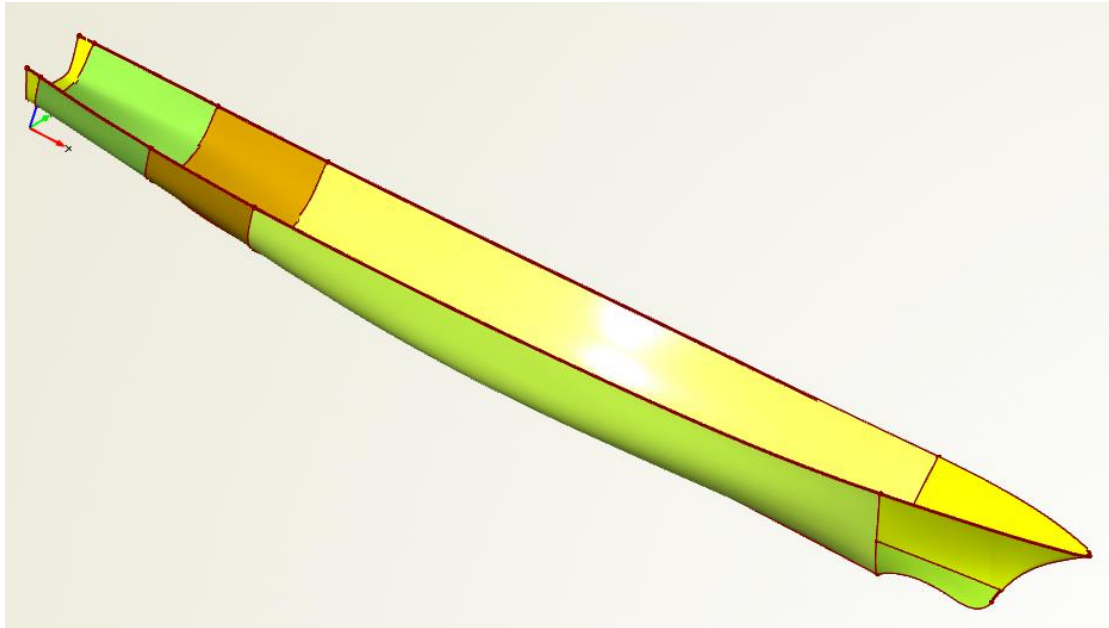
3^ο Βήμα. Επιφάνειες

Το τελευταίο βήμα της παραμετρικής μοντελοποίησης αφορά στο σχηματισμό των επιφανειών οι οποίες τελικά αναπαριστούν τη μορφή της γάστρας. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι επιφάνειες αυτές προκύπτουν ως παρεμβολή των παραμετρικών νομέων που περιεγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο κατά συνέπεια είναι και αυτές παραμετρικές. Η μορφή της παραμετρικά μοντελοποιημένης γάστρας είναι αυτή που φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν.



Εικόνα 26: Παραμετρικές επιφάνειες ορισμού της γεωμετρίας

Παρατηρούμε πως τελικά η όλη γεωμετρία της γάστρας (πλην skeg και βολβού) αναπαρίσταται με τη χρήση μόλις έξι επιφανειών. Η εκλογή των ορίων της κάθε επιφάνειας έγινε με γνώμονα τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του σκάφους και την κατά τόπους πολυπλοκότητα αυτών. Επίσης ελήφθησαν υπόψη και οι αλλαγές που θα υποστεί η αρχική γεωμετρία υπό την επίδραση των σχεδιαστικών παραμέτρων.

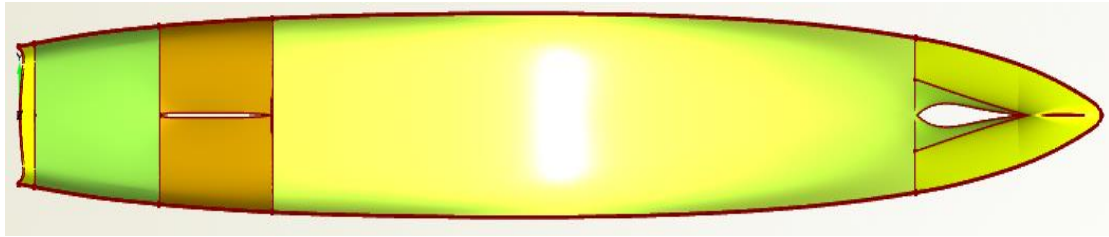


Εικόνα 27: Παραμετρικές επιφάνειες ορισμού της γεωμετρίας (προοπτικά)

Όπως και προηγούμενα, σκοπός αυτής της κατάτμησης της συνολικής επιφάνειας, είναι η επίτευξη μιας συνεχούς και ομαλής γεωμετρίας. Η καλή ποιότητα της επιφάνειας αποτελεί αναγκαία συνθήκη για την ορθή διεξαγωγή των υπολογισμών που θα εκτελέσουν στη συνέχεια τα δύο υπολογιστικά προγράμματα στα οποία έχουμε αναφερθεί. Η ορθότητα των υπολογισμών, όπως είναι φυσικό, θα οδηγήσει και στην εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων από τη διαδικασία της βελτιστοποίησης.

Αυτά τα ποιοτικά γνωρίσματα, στα οποία αναφερθήκαμε προηγουμένως, είναι προφανές ότι πρέπει να διατηρούνται καθ' όλη τη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι τα ίδια ποιοτικά γνωρίσματα θα πρέπει να χαρακτηρίζουν και όλες τις γεωμετρίες που θα παραχθούν από τον γενετικό αλγόριθμο στο πλαίσιο της βελτιστοποίησης. Έτσι οι επιφάνειες, οι οποίες συγκροτούν τη γεωμετρία μας, έχουν επιλεγεί ώστε να συμβάλλουν στη διατήρηση της ομαλότητας της γάστρας σε όλο το εύρος τιμών των παραμέτρων που έχουν επιλεγεί.

Από την περιγραφή των προηγούμενων βημάτων της παραμετρικής μοντελοποίησης έχει γίνει κατανοητό πως η όλη διαδικασία δεν περιλαμβάνει το σχεδιασμό του βολβού και του skeg. Όπως έχει αναφερθεί, τα δύο αυτά τμήματα σχεδιάστηκαν κατά μόνας. Όπως λοιπόν παρατηρούμε και στην εικόνα που ακολουθεί, η γεωμετρία που μέχρι στιγμής έχει προκύψει δεν τα περιλαμβάνει.

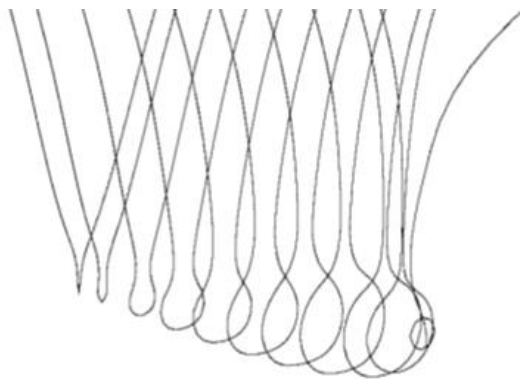


Εικόνα 28: Παραμετρικές επιφάνειες ορισμού της γεωμετρίας (κάτοψη)

Βολβός

Η κατασκευή του βολβού έγινε από τη Διπλωματούχο Ναυπηγό Μηχανολόγο Μηχανικό Ελένη Αλωνιάτη στα πλαίσια της δικής Διπλωματικής εργασίας και κατ' επέκταση η περιγραφή της γεωμετρίας του θα γίνει με σημείο αναφοράς το σχετικό κεφάλαιο από την εργασία αυτή.

Το τμήμα του βολβού έχει προκύψει από τη συναρμογή τριών διαφορετικών επιφανειών οι οποίες προέκυψαν με τη χρήση διάφορων εργαλείων σχεδίασης του CAESSES FFW, του προγράμματος που περιγράφηκε στα προηγούμενα. Η κατασκευή των επιφανειών αυτών έγινε χρησιμοποιώντας ως βάση διάφορα σημεία καμπύλες της αρχικής γεωμετρίας του πατρικού σκάφους και συγκεκριμένα τις εγκάρσιες τομές της και σημεία που κείνται επ' αυτών (εικόνα 29). Η τελική παραμετροποιημένη μορφή απαρτίζεται από τις τρεις προαναφερθείσες επιφάνειες, η σχεδίαση των οποίων περιγράφεται στις παραγράφους που ακολουθούν.

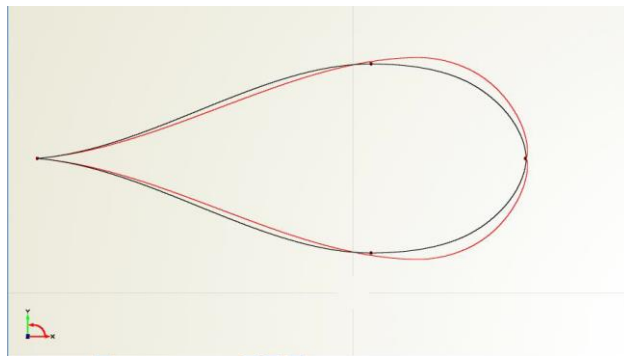


Εικόνα 29: Εγκάρσιες βοηθητικές τομές αρχικής επιφάνειας βολβού

Κατώτερο τμήμα

Η επιφάνεια αυτή σχεδιάστηκε με χρήση του curve engine, ενός σχεδιαστικού εργαλείου που δύναται να κατασκευάσει παραμετρικές καμπύλες βάση ενός συνόλου εντολών.

Αρχή της κατασκευής της συγκεκριμένης επιφάνειας αποτελούν το άνω και κάτω σύνορό της. Η πρώτη από αυτές τις καμπύλες συμπίπτει με το την τομή μεγίστου πλάτους του αρχικού βολβού. Η προσέγγιση της καμπύλης αυτής έγινε από τη διαδοχή δύο F-spline οι οποίες συναντώνται στη διαμήκη θέση του μεγίστου πάχους της αρχικής γεωμετρίας. Η θέση αυτού του σημείου αποτελεί μία από τις μεταβλητές σχεδίασης. Η μεταβολή της θέσης του δίνει μεταβολές των παραπάνω καμπυλών που φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 30: Εξάρτηση της άνω συνοριακής καμπύλης της κατώτερης επιφάνειας βολβού από μεταβλητές σχεδίασης

Η κάτω συνοριακή καμπύλη του τμήματος ταυτίζεται με την τομή του αρχικού βολβού με το επίπεδο διαμήκους συμμετρίας. Η καμπύλη αυτή επίσης προσεγγίζεται από τη διαδοχή δυο F-spline με το σημείο συνάντησής τους να βρίσκεται στο μέγιστο πλάτος, κατά το διάμηκες, της αρχικής γεωμετρίας. Η θέση του σημείου αυτού, τόσο καθ' ύψος όσο και κατά το διάμηκες αποτελούν επίσης παραμέτρους μεταβολής της γεωμετρίας του βολβού. Οι μορφές της συνοριακής καμπύλης συναρτήσει της θέσης του σημείου συνάντησης των καμπυλών που την απαρτίζουν φαίνεται παρακάτω.



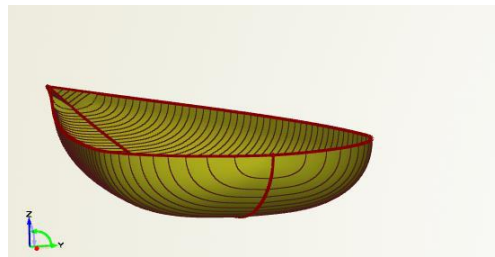
Εικόνα 31: Εξάρτηση της κάτω συνοριακής καμπύλης της κατώτερης επιφάνειας βολβού από μεταβλητές σχεδίασης

Η τελική μορφή του τμήματος αυτού της επιφάνειας ορίζεται από τις δύο προαναφερθείσες συνοριακές καμπύλες και μια πληθώρα συναρτησιακών καμπυλών που επηρεάζουν διάφορες παραμέτρους της γεωμετρίας όπως η κατανομή του πάχους της. Καμπύλες σαν κι αυτές φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 32: Συναρτησιακές καμπύλες διαμόρφωσης επιφάνειας βολβού

Κατ’ αυτόν τον τρόπο προκύπτει το κάτω παραμετροποιημένο τμήμα της γεωμετρίας του βολβού, όπως αυτή φαίνεται στη εικόνα που παρατίθεται παρακάτω.



Εικόνα 33: Κατώτερη επιφάνεια βολβού

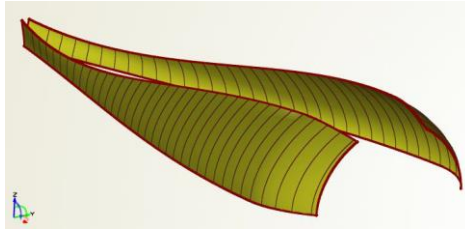
Ενδιάμεσο τμήμα

Και το τμήμα αυτό του παραμετροποιημένου βολβού κατασκευάστηκε χρησιμοποιώντας την ίδια τεχνική και το ίδιο σχεδιαστικό εργαλείο (curve engine) με το προηγούμενο αυτή τη φορά ως κάτω σύνορο του τμήματος χρησιμοποιήθηκε η κάτω συνοριακή καμπύλη του προηγούμενου ενώ το άνω σύνορο αποτέλεσε ο γεωμετρικός τόπος των σημείων που η καμπυλότητα της αρχικής, μη παραμετρικής, γεωμετρίας αλλάζει πρόσημο. Κάποια από τα σημεία αυτά εμφανίζονται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 34: Καμπυλότητα εγκάρσιων τομών αρχικής επιφάνειας βολβού

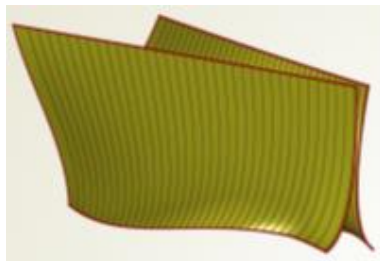
Η επιφάνεια του τμήματος αυτού προέκυψε τελικά με τη χρήση παρόμοιων συναρτησιακών καμπυλών με εκείνες του προηγούμενου τμήματος. Αυτή τη φορά η παραμετροποίηση αφορά τις γωνίες του συνόρου της προκύπτουσας επιφάνειας η οποία διαμορφώνεται όπως φαίνεται ακολούθως.



Εικόνα 35: Ενδιάμεση επιφάνεια βολβού

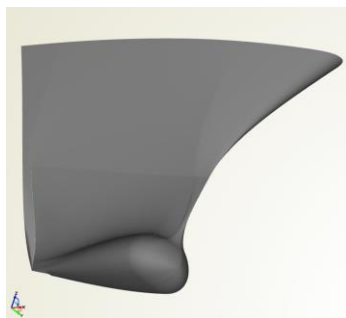
Ανώτερο τμήμα

Το άνω τμήμα του παραμετρικού βολβού προκύπτει αποκλειστικά από συναρτησιακές καμπύλες που βασίζονται στις τιμές της πατρικής γεωμετρίας. Αυτή τη φορά οι συνοριακές καμπύλες που ορίζουν τα όρια του τμήματος αυτού είναι το άνω σύνορο του ενδιάμεσου τμήματος και η ίσαλος γραμμή του όλου σκάφους. Η τελική γεωμετρία ακολουθεί.



Εικόνα 36: Ανώτερη επιφάνεια βολβού

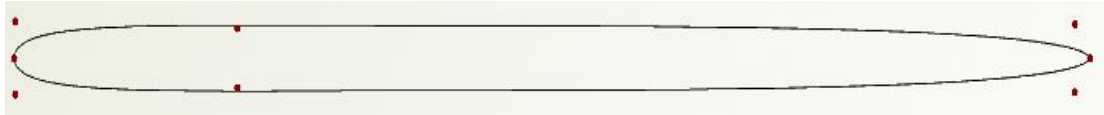
Η ομαλή και συνεχής ένωση των ως άνω τμημάτων επιτεύχθηκε με τη χρήση coons patches, ενός άλλου σχεδιαστικού εργαλείου του CAESES, δίνοντας την τελική παραμετρική επιφάνεια του βολβού όπως αυτή φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 37: Συνολική επιφάνεια βολβού

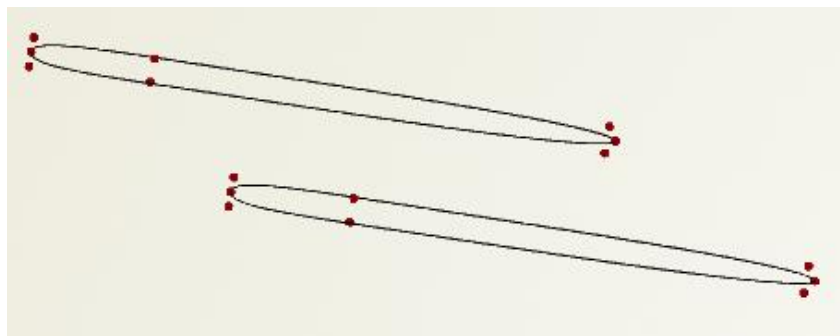
Skeg

Βασική καμπύλη για τη σχεδίαση του Skeg αποτέλεσε το περίγραμμα της βάσης του όπως αυτό φαίνεται στην επόμενη εικόνα. Η καμπύλη αυτή κείται στο επίπεδο $Z = 0$.

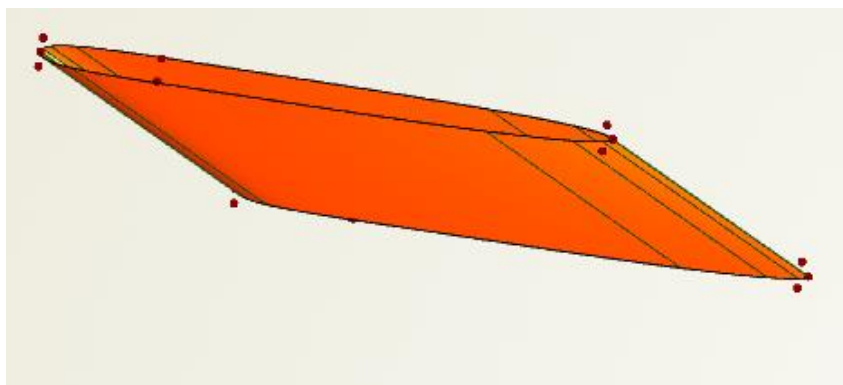


Εικόνα 38: Περίγραμμα βάσης skeg

Στη συνέχεια σχεδιάστηκε η προβολή του παραπάνω περιγράμματος στο επίπεδο $Z = 5,943$, δηλαδή περίπου 6 μέτρα πάνω από την προηγούμενη, μετατοπισμένη όμως προς τα πρύμα. Η μετατόπιση αυτή έγινε κατά τρόπον ώστε το πρυμναίο σημείο της δεύτερης καμπύλης να αποτελεί γραμμική παρεκβολή της πρυμναίας ακμής του Skeg, όπως φαίνεται στις εικόνες που ακολουθούν. Η επιφάνεια που δημιουργείται, παρεμβάλει τις δύο καμπύλες και αποτελεί την επιφάνεια του skeg.

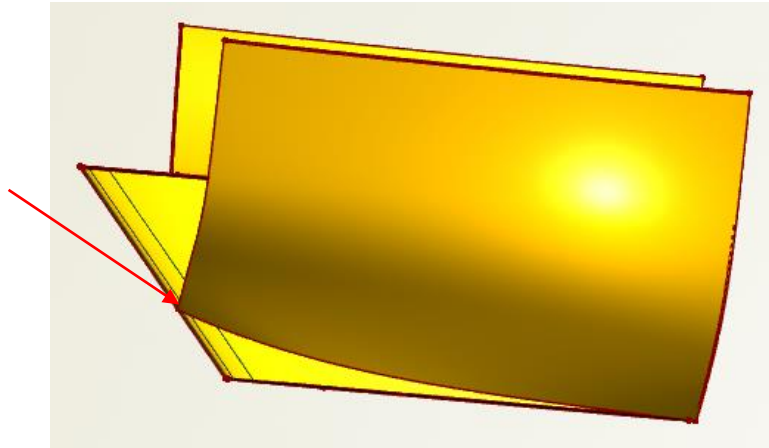


Εικόνα 39: Άνω και κάτω συνοριακές καμπύλες ορισμού skeg



Εικόνα 40: Επιφάνεια skeg

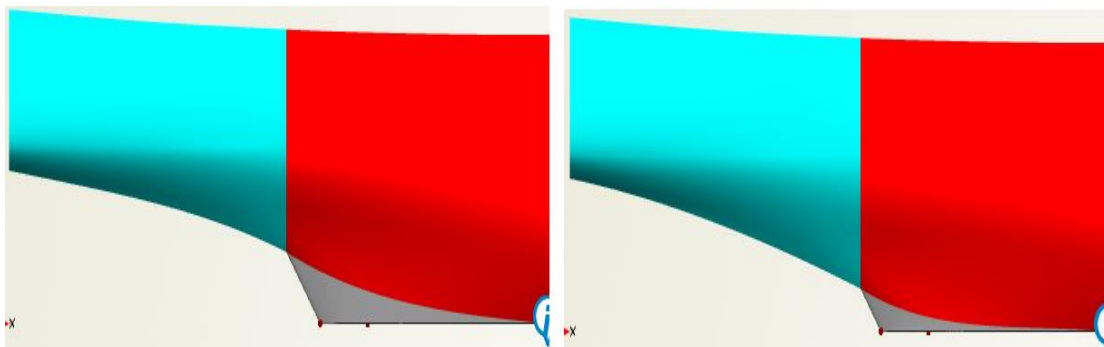
Το αποτέλεσμα, σε συνδυασμό με την υπόλοιπη επιφάνεια της γάστρας, που προκύπτει είναι αυτό που απεικονίζεται ακολούθως.



Εικόνα 41: Σύνδεση επιφάνειας skeg και περίξ αυτού γάστρας

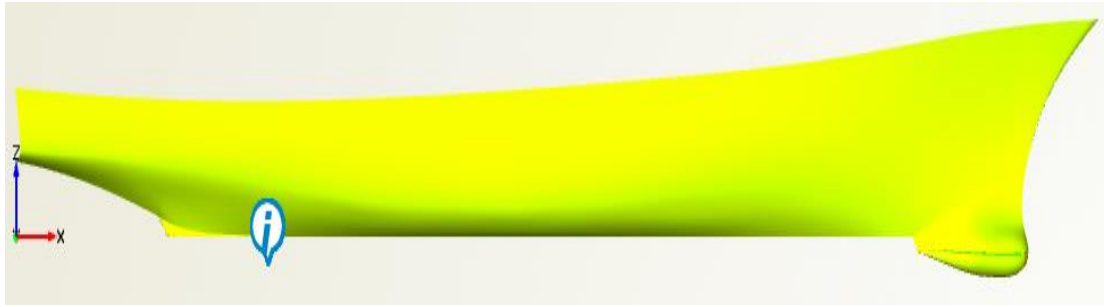
Το σημείο που υποδεικνύεται με το κόκκινο βέλος ουσιαστικά υλοποιεί τη παράμετρο A/A_8 του πίνακα του προηγούμενου κεφαλαίου. Στο σημείο αυτό παρέχεται η δυνατότητα να λαμβάνει οποιαδήποτε θέση επί της πρυμναίας ακμής του skeg, ενώ η επιφάνεια της γάστρας αλλάζει τη μορφή της συναρτήσει της θέσης του. Κατ' αυτόν τον τρόπο "αποκαλύπτεται" κάθε φορά μεγαλύτερο ή μικρότερο τμήμα του skeg (ως τομή δύο επιφανειών) αλλάζοντας ταυτόχρονα και τη γεωμετρία της γύρω περιοχής.

Για λόγους σαφήνειας, παρατίθεται η μορφή που λαμβάνει το skeg και η περίξ αυτό περιοχή για τις δύο ακραίες τιμές της παραμέτρου που τα επηρεάζουν.



Εικόνα 42: Διαμόρφωση της περιοχής για της ακραίες τιμές της παραμέτρου

Έχοντας πλέον σχεδιάσει και τα δύο επιπλέον τμήματα, δηλαδή το skeg και το βολβό, προκύπτει η τελική μορφή της παραμετρικής γάστρας η οποία και θα υποστεί τη διαδικασία της βελτιστοποίησης.



Εικόνα 43: Συνολική επιφάνεια παραμετρικού μοντέλου

Στην παρακάτω εικόνα εμφανίζονται τα υδροστατικά μεγέθη της παραμετροποιημένης γάστρας, όπως αυτά υπολογίστηκαν από το Friendship Framework.

Hydro_group	
disp	8635459.60600992
LCB	70.21059527
Lwl	142
LCG	70.21059527
KG	7.54
rg_roll	7.624
rg_pitch	35.5
draft	6.15
Beam	19.06
VCB	-2.498840848
Cp	0.61842816
Cb	0.50614533
BMT	5.78863202

Εικόνα 44: Υδροστατικά μεγέθη του παραμετρικού μοντέλου

Αξιίζει να σημειωθεί πως η αρχική γάστρα (αρχείο IGES της Thales) και το αποτέλεσμα της παραμετρικής μοντελοποίησης που έγινε, σχεδόν ταυτίζονται. Το εκτόπισμα της αρχικής γάστρας προκύπτει ίσο με 8642.6 tons. Αντίστοιχα το εκτόπισμα της παραμετροποιημένης γάστρας, με τις σχεδιαστικές παραμέτρους να λαμβάνουν τις αρχικές τους τιμές (στήλη 5 πίνακα 2), είναι 8635.4 tons. Η διαφορά των δύο μοντέλων, θεωρώντας το εκτόπισμά τους ως μέτρο σύγκρισης, ανέρχεται μόλις στο 0,08 % γεγονός που αναδεικνύει την ακρίβεια της διαδικασίας της μοντελοποίησης που συντελέστηκε. Η ακρίβεια αυτή είναι ένα από τα ζητούμενα της όλης διαδικασίας καθώς θα επιτρέψει στους υπολογισμούς που θα εκτελεστούν, από το Swan – II και το SPP - 86, να είναι επίσης ακριβείς και κατά συνέπεια τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα ανταποκρίνονται κατά το δυνατόν στην πραγματικότητα, αφού δεν θα εμπεριέχεται σε αυτά σφάλμα που να οφείλεται σε κακή αναπαράσταση της υπό μελέτη γεωμετρίας.

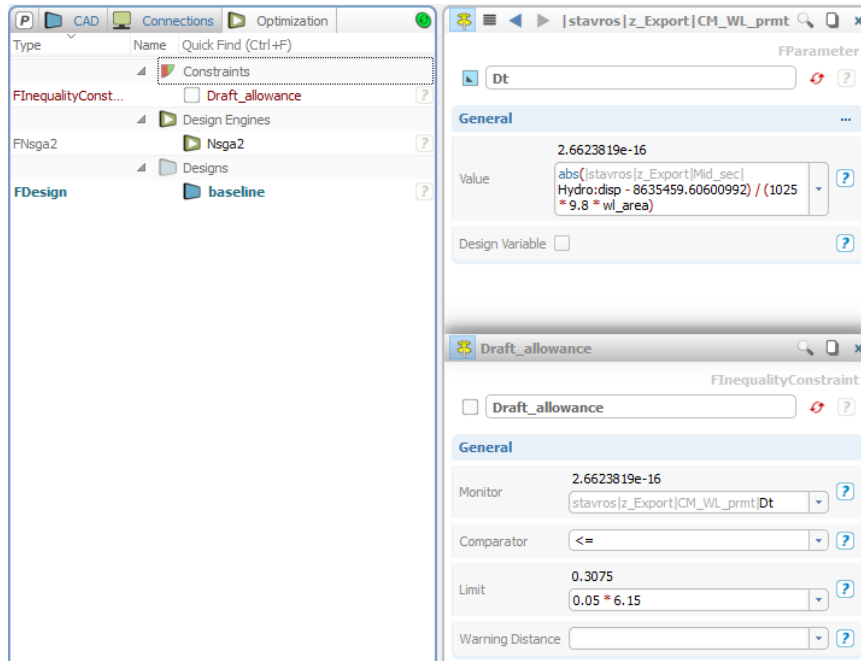
Η όλη προσπάθεια της βελτιστοποίησης γίνεται υπό την αίρεση των περιορισμών, στους οποίους έχουμε αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο της παρούσης. Η εξασφάλιση της εφαρμογής των περιορισμών αυτών, έγινε μέσω:

- της ακριβούς προσέγγισης της αρχικής γεωμετρίας κατά τη διάρκεια της μοντελοποίησης
- της στοχευμένης επιλογής των μεταβλητών σχεδίασης, ώστε αυτές να επιφέρουν μεν δραστικές αλλαγές στη γεωμετρία, χωρίς όμως η μεταβολή κάποιας να επηρεάζει έντονα και ανεξέλεγκτα τις υπόλοιπες
- της προσεκτικής επιλογής του εύρους μεταβολής της κάθε μεταβλητής, ώστε να μην επιτρέπεται η υπέρβαση των οριακών τιμών των διαφόρων μεγεθών που αποτελούν τους σχεδιαστικούς περιορισμούς του προβλήματός μας

Τα παραπάνω επίρρωσαν την τήρηση του συνόλου των περιορισμών με εξαίρεση αυτών που απαιτούν:

- τη διατήρηση του εκτοπίσματος του σκάφους σταθερού, και
- τη μεταβολή του βυθίσματός του να περιορίζεται εντός ενός εύρους της τάξεως του +/- 5 %.

Το εκάστοτε εκτόπισμα του σκάφους είναι συνάρτηση της μορφής της γάστρας αλλά και του βυθίσματος στο οποίο το πλοίο επιπλέει. Η αλλαγή όμως των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της γάστρας, μέσω της μεταβολής των τιμών των μεταβλητών σχεδίασης οδηγούν, όπως είναι φυσικό, σε αλλαγή του βυθισμένου όγκου της γάστρας μεταβάλλοντας κατά συνέπεια και την τιμή του εκτοπίσματος. Προκειμένου να εξασφαλιστεί η διατήρηση του εκτοπίσματος σταθερού, δημιουργήθηκε η παράμετρος Dt . Η παράμετρος αυτή, λαμβάνει την τιμή της μεταβολής του βυθίσματος που είναι απαιτητή προκειμένου, η εκάστοτε προκύπτουσα γεωμετρία να αποκτήσει το εκτόπισμα του αρχικού. Κάθε φορά η τιμή της παραμέτρου Dt ελέγχεται, και σε περίπτωση που υπερβαίνει 5 % του αρχικού βυθίσματος, η αντίστοιχη γεωμετρία απορρίπτεται. Κατ’ αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η διατήρηση του σταθερού εκτοπίσματος εκμεταλλευόμενοι το επιτρεπτό εύρος μεταβολής του βυθίσματος του σκάφους. Στις εικόνες που ακολουθούν εμφανίζονται όσα περιεγράφηκαν παραπάνω.



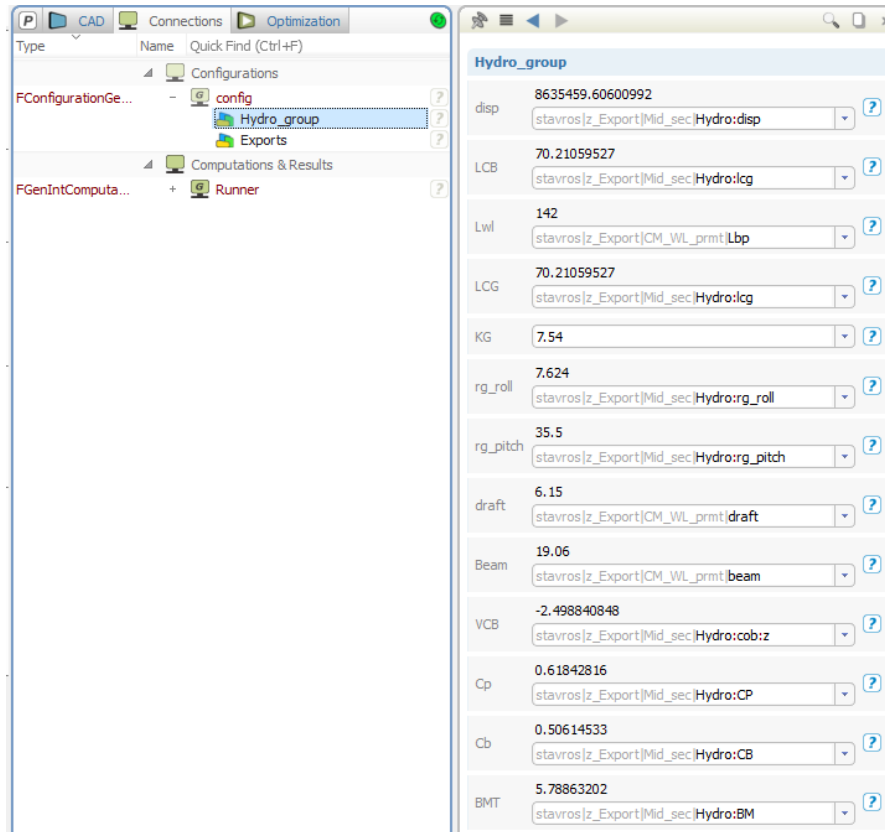
Εικόνα 45: Χειραγώγηση μεταβολής βυθίσματος

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, παρόλο που το CAESES Friendship Framework παρέχει τη δυνατότητα προσομοίωσης μέσω CFD, προτιμήθηκε η χρήση εξωτερικών κωδικών για τον υπολογισμό τόσο της αντίστασης, όσο και της δυναμικής συμπεριφοράς των διαφόρων γαστρών. Ωστόσο η διαδικασία της παραγωγής εναλλακτικών γεωμετριών, οι οποίες αξιολογούνται από τους εξωτερικούς κώδικες Swan II και SPP-86, γίνεται από το ίδιο το Friendship. Έτσι προκύπτει η ανάγκη εξαγωγής δεδομένων από το Friendship προκειμένου αυτά να αποτελέσουν είσοδο στα δύο εξωτερικά υπολογιστικά πακέτα που προαναφέρθηκαν. Επίσης, τα δεδομένα που προκύπτουν από τους υπολογισμούς που διεξάγουν τα δύο εξωτερικά προγράμματα, πρέπει να εισαχθούν ως ανάδραση στο Friendship προκειμένου να αξιοποιηθούν από τον ενσωματωμένο σε αυτό γενετικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης (NSGA II). Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο διασυνδέθηκαν τα τρία προγράμματα, ώστε να συνεργαστούν επιτυχώς και να παρέχουν τα αποτελέσματα που θα εξετάσουμε στη συνέχεια.

Το Friendship έχει τη δυνατότητα να υπολογίζει τις τιμές διαφόρων μεγεθών που αφορούν σε μια δοθείσα γεωμετρία. Έτσι το πρώτο αρχείο που εξάγεται από το πρόγραμμα είναι το .hydro. Στο αρχείο αυτό περιλαμβάνονται οι τιμές διαφόρων

υδροστατικών μεγεθών της εκάστοτε γεωμετρίας. Επί παραδείγματι παρατίθεται το περιεχόμενο του αρχείου αυτού που αφορά στην πατρική γεωμετρία.



Εικόνα 46: Εξαγωγή υδροστατικών χαρακτηριστικών από το Friendship

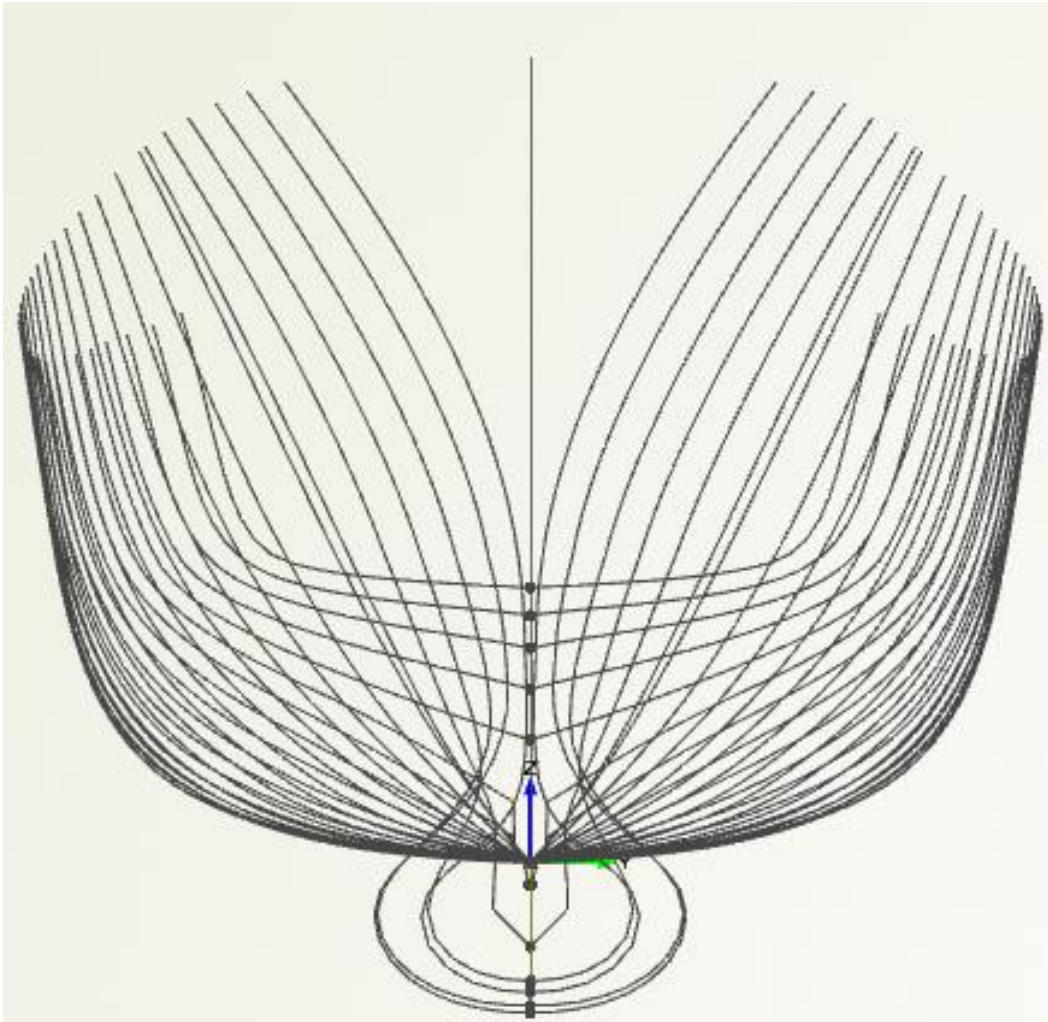
Τα υπόλοιπα αρχεία που εξάγονται έχουν να κάνουν με τη μορφή της γάστρας που κάθε φορά εξετάζεται. Τα αρχεία αυτά είναι τα ακόλουθα:

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

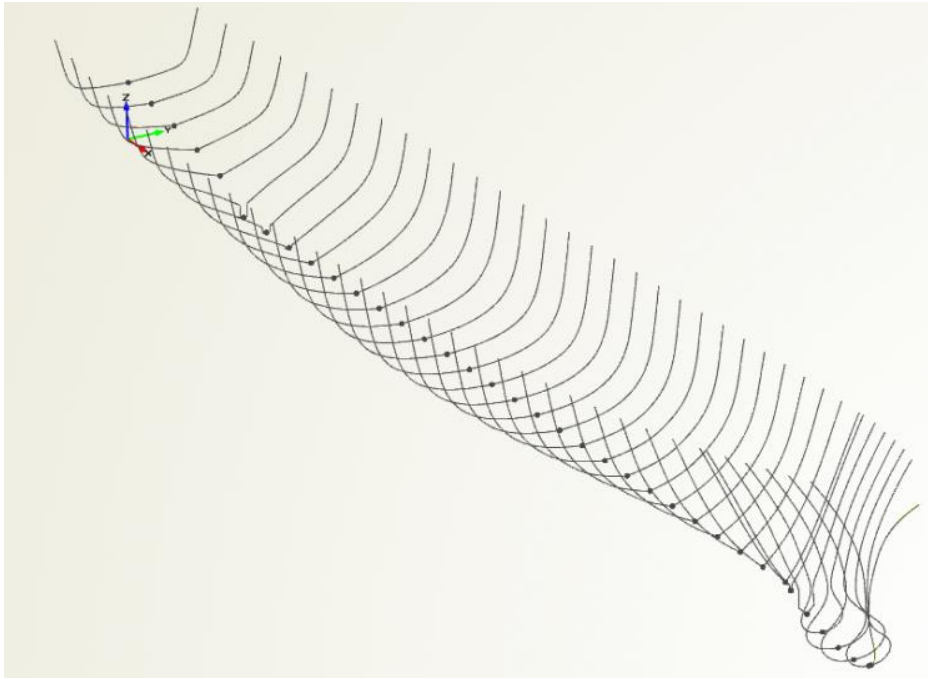
Τα δύο πρώτα περιέχουν πληροφορία η οποία θα αξιοποιηθεί από το Swan 2. Ουσιαστικά, περιλαμβάνουν έναν αριθμό νομέων της γάστρας, μέσω των οποίων το Swan θα “αντιληφθεί” τη μορφή της. Ο λόγος για τον οποίον απαιτούνται δύο αρχεία για την πληροφορία αυτή, έχει να κάνει με τον τρόπο που το Swan αντιλαμβάνεται τα είδη των νομέων. Όπως έχει αναφερθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο η πλώρα του σκάφους ορίζεται με τη βοήθεια σταθμού τύπου “A”. Αντίθετα, οι νομείς μεταξύ πλώρας και πρύμνης ορίζονται με τη βοήθεια σταθμών τύπου “B”. Αυτή είναι και η διαφοροποίηση μεταξύ των sec_bow.shf και sec_mid.shf. Η πρύμνη του πλοίου μας

δεν είναι τύπου cruiser (είναι τύπου transom) ως εκ τούτου, ο νομέας που την περιγράφει περιλαμβάνεται στο sec_mid.shf.

Έτσι, το αρχείο sec_bow.shf περιλαμβάνει έναν μόνο νομέα, αυτόν της πλώρης, ο οποίος βρίσκεται επί του διαμήκου επιπέδου συμμετρίας της γάστρας. Αντίθετα, το sec_mid.shf περιλαμβάνει συνολικά 36 νομείς (30 νομείς είναι ισοκατανεμημένοι από την πρύμνη του σκάφους μέχρι και 125 μέτρα πώραθεν αυτής, ενώ 6 ακόμα νομείς ισοκατανέμονται από το 126^ο μέτρο της γάστρας μέχρι και το 140,7^ο). Το αποτέλεσμα είναι αυτό που απεικονίζεται στις παρακάτω εικόνες.

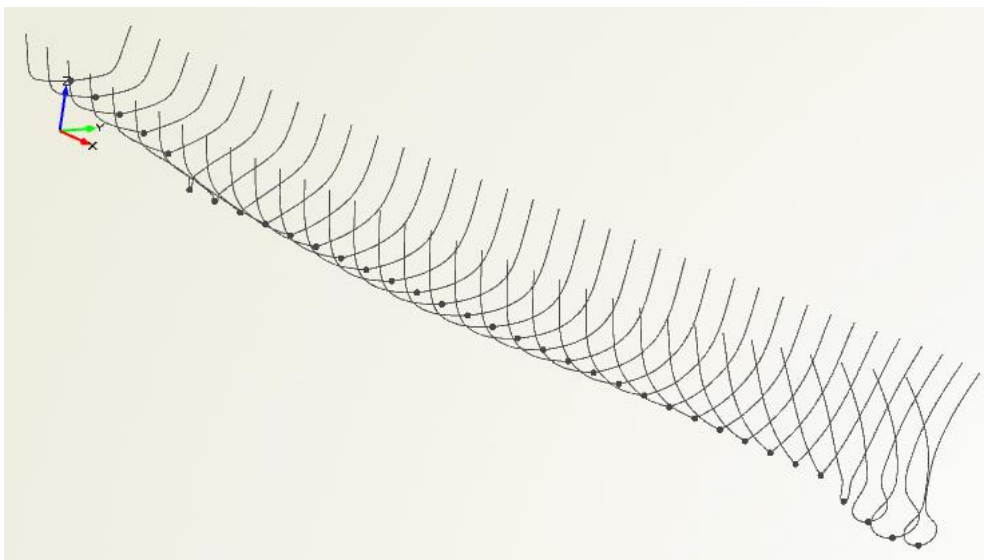


Εικόνα 47: Νομείς πατρικής μορφής γάστρας για το πρόγραμμα SWAN-II (πρόοψη)



Εικόνα 48: Νομείς πατρικής μορφής γάστρας για το πρόγραμμα SWAN-II (προοπτικά)

Σε αντιστοιχία με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, το αρχείο `sec_frank.shf` περιλαμβάνει τους νομείς που απαιτούνται προκειμένου το SPP-86 να αντιληφθεί τη μορφή της εκάστοτε γάστρας. Εδώ δεν υπάρχει καμία απαίτηση για νομείς διαφορετικών τύπων, έτσι το μοναδικό αυτό αρχείο περιλαμβάνει 35 συνολικά νομείς που “περιγράφουν” τη γεωμετρία για λογαριασμό του SPP-86. Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι παρόμοιο με αυτό που παρουσιάστηκε προηγουμένως και εικονίζεται ακολούθως.



Εικόνα 49: Νομείς πατρικής μορφής γάστρας για το πρόγραμμα SPP-86 (προοπτικά)

Διεργασία SPP-86

Ο πρώτος από τους εξωτερικούς κώδικες, στους οποίους αναφερθήκαμε προηγουμένως, που εκτελείται είναι ο SPP-86 (γνωστός και ως FRANK 52). Η διαδικασία προετοιμασίας του αρχείου εισόδου για τους υπολογισμούς που διεξάγει το SPP-86 είναι η εξής:

Το εκτελέσιμο αρχείο sections_frank.exe λαμβάνοντας ως είσοδο τα .hydro και sec_frank.shf δημιουργεί το αρχείο superfrank.shf το οποίο επίσης περιγράφει τη γεωμετρία της γάστρας, αλλά σε μορφή που αντιλαμβάνεται το επίσης εκτελέσιμο αρχείο shf2frk0248.exe. Σκοπός του τελευταίου δεν είναι άλλος από το να μετατρέπει το τροποποιημένο αρχείο της γεωμετρίας σε κατάλληλη μορφή ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί τελικά από το πρόγραμμα Frank52.exe, τον πυρήνα του SPP-86. Το αποτέλεσμα της όλης διαδικασίας είναι η παραγωγή αρχείων τα οποία εκτιμούν τα ζητούμενα μεγέθη, επιταχύνσεις και πλάτη αποκρίσεων της εκάστοτε γάστρας, τόσο σε αρμονικούς όσο και σε τυχαίους κυματισμούς. Το παραγόμενο αρχείο που αφορά στους τυχαίους κυματισμούς είναι σε δυαδική μορφή. Την ευθύνη της μετατροπής του σε μορφή που να μπορεί να αξιοποιηθεί αναλαμβάνει το εκτελέσιμο αρχείο irreg651.exe το οποίο εκτελείται στη συνέχεια.

Ο παραπάνω κύκλος αφορά στον πρώτο συνδυασμό ταχύτητας και γωνίας συνάντησης που μας ενδιαφέρει (ταχύτητα 18 κόμβων σε θάλασσα με πρυμναίους κυματισμούς υπό γωνία συνάντησης 30 μοιρών). Για το δεύτερο συνδυασμό που εξετάζουμε (ταχύτητα 30 κόμβων σε θάλασσα με πρωραίους κυματισμούς) ο ίδιος κύκλος επαναλαμβάνεται μόνο που στη θέση του shf2frk0248.exe εκτελείται το shf2frk0413.exe (ο αριθμός στο τέλος του ονόματος των αρχείων υποδηλώνει την εκάστοτε ταχύτητα πλεύσης – αριθμός Froude) το οποίο περιέχει τα νέα δεδομένα κίνησης του πλοίου. Κατ’ αυτόν τον τρόπο εκτιμώνται οι δύο συνιστώσες της αντικειμενικής συνάρτησης που αφορά στη βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς του πλοίου μας (F_2) όπως αυτή περιγράφηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Διεργασία SWAN – II

Αμέσως μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, εκτελείται ο κώδικας Swan. Η λογική που ακολουθείται και εδώ είναι παρόμοια με εκείνη που περιγράφηκε για την περίπτωση του SPP-86. Κατ’

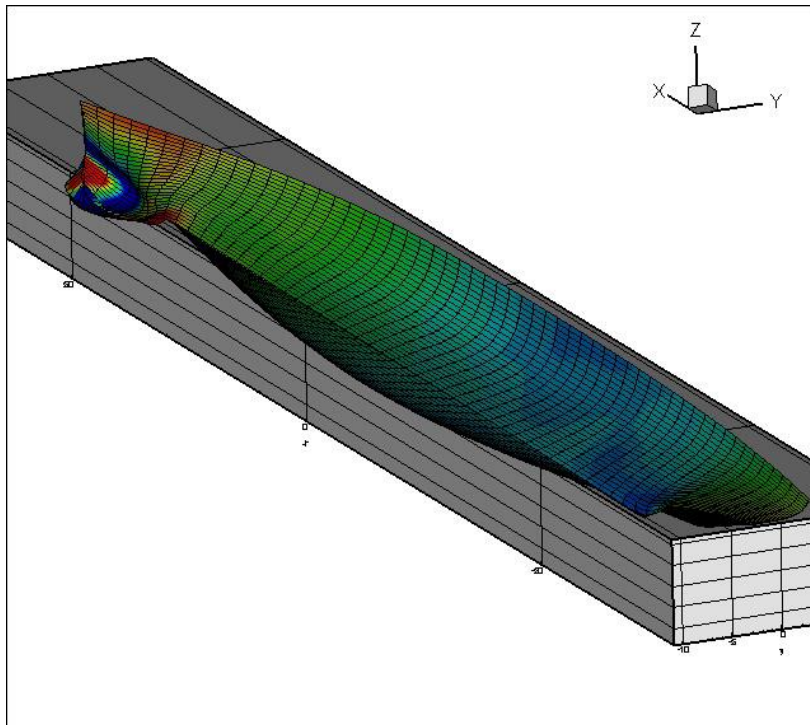
αρχήν εκτελείται το sections_SWAN2.exe. Αυτό λαμβάνοντας ως είσοδο τα εξαγόμενα από το Friendship αρχεία .hydro, sec_bow.shf και sec_mid.shf δημιουργεί το αρχείο τύπου .shf, το οποίο περιγράφει τη γεωμετρία της γάστρας, σε μορφή που αντιλαμβάνεται το εκτελέσιμο αρχείο που θα το χρησιμοποιήσει στη συνέχεια, δηλαδή το shf2rln.exe. Όπως και στην περίπτωση του SPP-86, σκοπός του τελευταίου είναι η μετατροπή του τροποποιημένου αρχείου της γεωμετρίας της γάστρας, σε μορφή η οποία να μπορεί να χρησιμοποιηθεί τελικά από το βασικό πρόγραμμα Itter_swan2.exe. Έτσι προκύπτει το αρχείο .rln το οποίο αποτελεί το αρχείο εισόδου για το SWAN – II.

Εκτός από το αρχείο .rln, το κεντρικό πρόγραμμα του Swan, το Itter_swan2.exe, χρησιμοποιεί ως είσοδο και το αρχείο swaninp. Το αρχείο swaninp, όπως έχει αναφερθεί στο οικείο κεφάλαιο, παρέχεται από το χρήστη και περιλαμβάνει τα απαραίτητα δεδομένα για την ταχύτητα υπολογισμού της αντίστασης, αλλά και τον τρόπο με τον οποίο θα δημιουργηθεί το πλέγμα των panels. Ενσωματωμένα στο Itter_swan2.exe είναι τα προγράμματα makessg.exe, setup.exe και solve.exe. Το πρώτο από αυτά είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία του αρχείου .ssg το οποίο περιέχει την πλήρη γεωμετρική περιγραφή, υπό μορφήν πλεγμάτων, των στερεών συνόρων και της ροής (ελεύθερη επιφάνεια) που μελετάται. Τα δύο άλλα προγράμματα (setup.exe και solve.exe) έχοντας πρόσβαση στο .ssg υλοποιούν τους απαραίτητους υπολογισμούς για την εκτίμηση της αντίστασης της γάστρας.

Ο κώδικας Swan, όπως μαρτυρά και το όνομα του προγράμματος (Itter_swan2.exe), εκτελείται επανειλημμένα. Για τη συγκεκριμένη ταχύτητα που εξετάζεται, το βύθισμα και η διαγωγή που θα αποκτήσει το σκάφος στο τέλος κάθε εκτέλεσης του κώδικα, χρησιμοποιούνται ως αρχικές τιμές για την επόμενη επανάληψη του. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου οι τιμές των μεγεθών αυτών συγκλίνουν, οπότε και έχουμε το τελικό αποτέλεσμα της τιμής της αντίστασης.

Κατ’ αναλογία με την περίπτωση του κώδικα SPP-86, ο παραπάνω κύκλος αφορά στην πρώτη ταχύτητα πλεύσης, αυτή των 18 κόμβων. Οι υπολογισμοί επαναλαμβάνονται ακόμα μία φορά για την περίπτωση της δεύτερης ταχύτητας πλεύσης, δηλαδή αυτής των 30 κόμβων. Αυτή τη φορά ο κώδικας χρησιμοποιεί ως είσοδο, ένα δεύτερο αρχείο swaninp στο οποίο ο χρήστης έχει εισάγει τα δεδομένα που αφορούν στη δεύτερη ταχύτητα πλεύσης. Να σημειώσουμε σε αυτό το σημείο πως, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, σε όλες της προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν

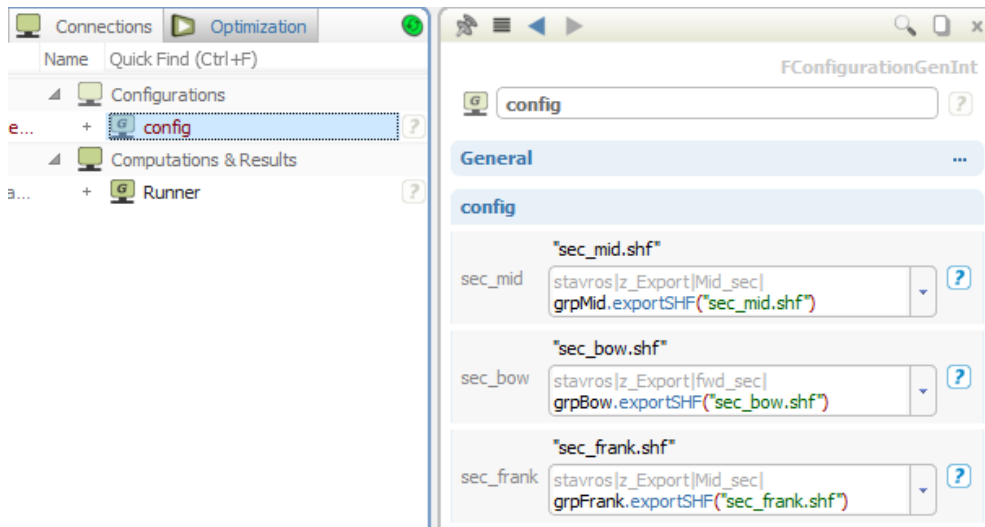
χρησιμοποιήθηκε η ίδια πλεγματοποίηση (αποτελούμενη από 57 x 27 στοιχεία/panels) το αποτέλεσμα της οποίας εμφανίζεται στις παρακάτω εικόνες. Ο αριθμός αυτός είναι σχετικά μεγάλος και οδηγεί σε καθυστέρηση της εκτέλεσης των υπολογισμών ωστόσο επιλέγεται προς επαύξηση της ακρίβειας αναπαράστασης της γεωμετρίας και κατά συνέπεια των παραγομένων αποτελεσμάτων. Σημειώνεται εδώ πως η διαμόρφωση τέτοιου αριθμού panels κατέστη δυνατή μετά από τροποποίηση που έγινε στον κώδικα του SWAN - II, από τον Ναυπηγό Μηχανολόγο Μηχανικό Δημήτριο Μακρή.



Εικόνα 50: Επιφανειακό πλέγμα στερεού συνόρου για το πρόγραμμα SWAN-II

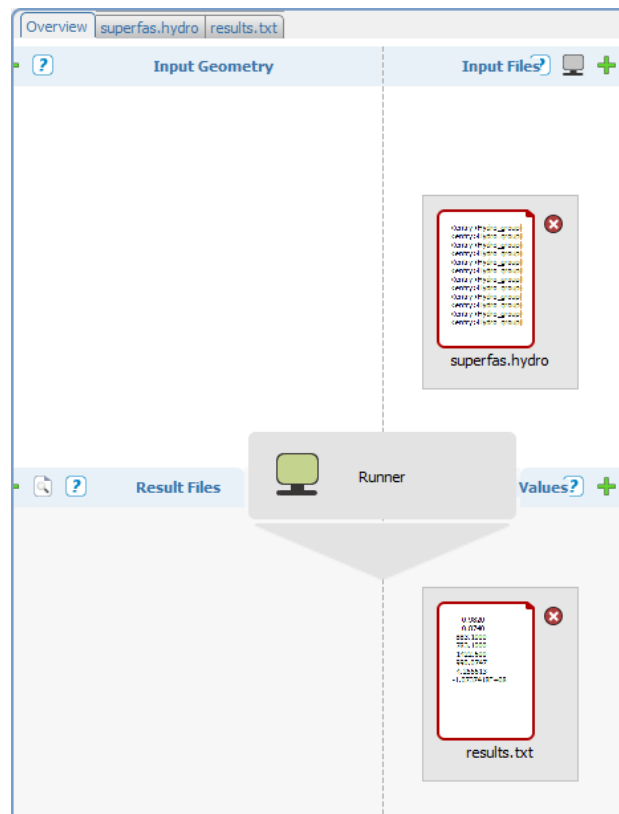
Διεργασία Βελτιστοποίησης – Λήψη Γεωμετριών

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή του κεφαλαίου, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις που εκτελούν οι δύο εξωτερικοί κώδικες (Swan-II & SPP-86) πρέπει να εισαχθούν στο περιβάλλον του Friendship, ως ανάδραση, ώστε να αξιοποιηθούν από τον γενετικό αλγόριθμο της βελτιστοποίησης. Το έργο αυτό αναλαμβάνει το πρόγραμμα results.exe. Το πρόγραμμα αυτό ανασύρει από τα παραγόμενα αρχεία των Swan & SPP-86 τα αποτελέσματα των υπολογισμών τους και τα συγκεντρώνει σε ένα απλό αρχείο .txt. Το αρχείο αυτό αποτελεί είσοδο για το Friendship το οποίο με τη σειρά του παράγει, μετά από αξιολόγηση των αποτελεσμάτων αυτών, την επόμενη γενεά γαστρών που θα υποστούν τη διαδικασία της προσομοίωσης που περιγράφηκε στα προηγούμενα.



Εικόνα 51: Εξαγωγή αρχείων γεωμετρικής αναπαράστασης από το Friendship

Στις εικόνες 50 & 51 καταγράφεται ο τρόπος με τον οποίον υλοποιείται η διασύνδεση των τριών προγραμμάτων, που περιγράφεται στις προηγούμενες παραγράφους, μέσα στο περιβάλλον του CAESES Friendship Framework. Στην προηγούμενη εικόνα εμφανίζεται η εξαγωγή των αρχείων .shf που περιγράφουν τη γεωμετρία της εκάστοτε γάστρας ενώ στη επόμενη η απλή διασύνδεση, drag and drop, των superfas.hydro και results.exe με το Friendship.



Εικόνα 52: Εξαγωγή αρχείου υδροστατικών χαρακτηριστικών και επανεισαγωγή αποτελεσμάτων

Η όλη διαδικασία κυριαρχείται από ένα batch file, στο οποίο περιέχονται όλες οι απαραίτητες εντολές, και με τη σειρά που αυτές πρέπει να εκτελεστούν ώστε να συντελεστεί η διαδικασία που περιγράφεται στις προηγούμενες παραγράφους του παρόντος κεφαλαίου. Για λόγους πληρότητας το σχετικό αρχείο παρατίθεται ως παράτημα.

Διαδικασία Αξιολόγησης και Παραγωγής Εναλλακτικών Γεωμετριών

Όπως ήδη έχει αναφερθεί το Friendship αξιολογεί τις διάφορες γάστρες με βάση τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις που περιγράφησαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, οι οποίες περιέχονται στο αρχείο results.txt. Όπως μνημονεύεται και στο οικείο κεφάλαιο ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει την πιθανότητα μετάλλαξης και διασταύρωσης με την οποία λειτουργεί ο γενετικός αλγόριθμος της βελτιστοποίησης. Στην περίπτωση μας έχει επιλεγεί οι τιμές των δύο αυτών πιθανοτήτων να είναι 0.01 και 0.9, αντίστοιχα. Επιπλέον ο γενετικός αλγόριθμος θα παράγει συνολικά 25 γενεές με 16 μέλη η κάθε μία από αυτές. Τα παραπάνω δεδομένα εισάγονται στο περιβάλλον του Friendship στο πεδίο που αφορά στη διαμόρφωση του αλγορίθμου NSGA II. Μέσω της διαδικασίας της βελτιστοποίησης και βάσει των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων το Friendship θα επαναλάβει όλη τη διαδικασία μέχρι να καταλήξει στη γενεά Pareto, στην οποία θα περιλαμβάνονται οι βέλτιστες λύσεις για το πρόβλημα που έχει τεθεί. Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων και η επιλογή των βέλτιστων, κατά περίπτωση γαστρών, αποτελεί το αντικείμενο του επομένου κεφαλαίου της παρούσης.

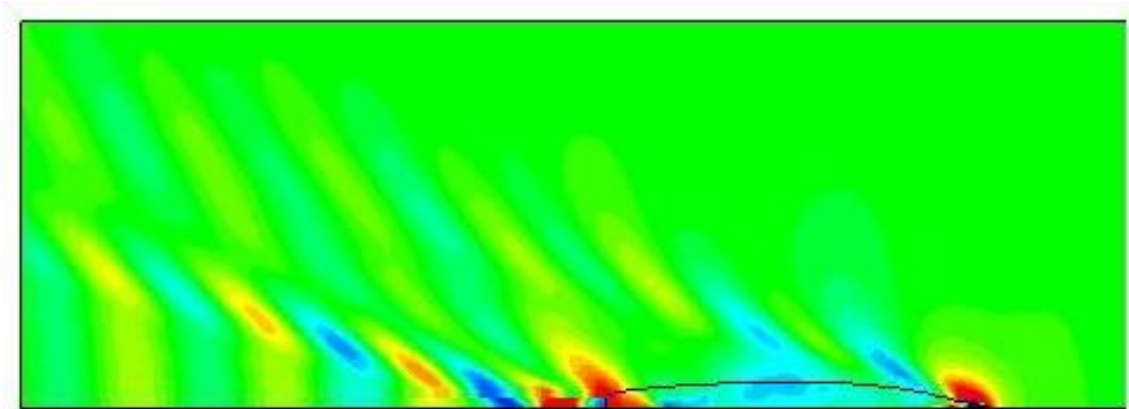
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Έχοντας ολοκληρώσει τη διασύνδεση των προγραμμάτων, που συνεργαζόμενα υλοποιούν τη διαδικασία της βελτιστοποίησης όπως αυτή έχει περιγραφεί στα προηγούμενα, μπορούμε πλέον να προχωρήσουμε στην λήψη, καταγραφή και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν. Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετάσουμε τα παραγόμενα από τους υπολογισμούς αποτελέσματα για κάθε μια από τις περιπτώσεις που περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους. Η αξιολόγηση περιλαμβάνει τόσο την εκτίμηση της ποιότητας της γεωμετρίας που κάθε φορά προκύπτει, όσο και την αποτύπωση και αξιολόγηση του ποσοστού βελτίωσης των χαρακτηριστικών της συγκρινόμενα με τα αντίστοιχα της πατρικής.

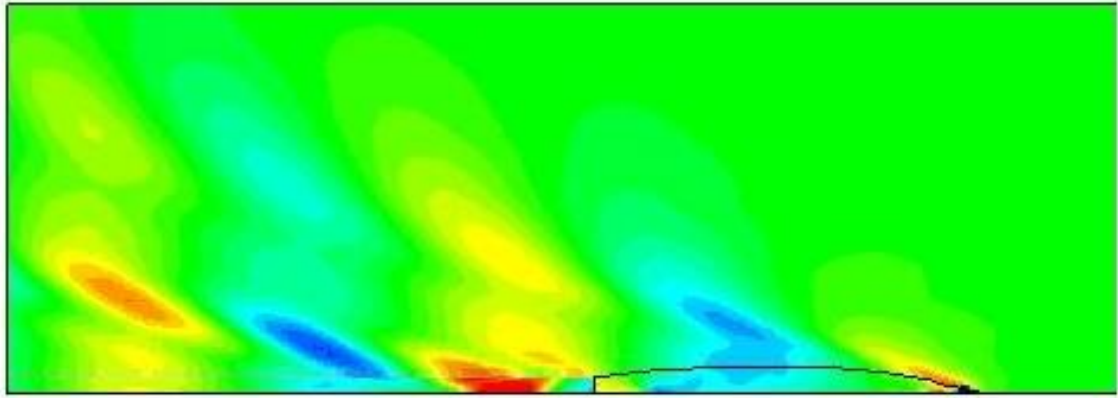
ΕΠΙΔΟΣΕΙΣ ΠΑΤΡΙΚΗΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ

Κατ’ αρχήν εξετάστηκαν οι επιδόσεις της πατρικής γάστρας σε ότι αφορά στην αντίσταση και στη δυναμική της συμπεριφορά. Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν και αφορούν στα υπό εξέταση μεγέθη, αποτελούν τις τιμές αναφοράς των αντικειμενικών μας συναρτήσεων. Οι τιμές που κάθε φορά θα υπολογίζονται για τις διάφορες εναλλακτικές σχεδιάσεις θα συγκρίνονται, μέσω των αντικειμενικών συναρτήσεων, με αυτές και κατ’ αυτόν τον τρόπο θα αξιολογείται η εκάστοτε υπό εξέταση γάστρα. Όπως είναι αναμενόμενο, για την πατρική γάστρα, οι αντικειμενικές συναρτήσεις F_1 και F_2 λαμβάνουν την τιμή 1.

Στις εικόνες που ακολουθούν απεικονίζεται το πεδίο κυματισμών που η πατρική γεωμετρία παράγει κατά την πλεύση της με ταχύτητα 18 και 30 κόμβων αντιστοίχως.



Εικόνα 53: Παραγόμενο πεδίο κυματισμών σε ταχύτητα 18 κόμβων



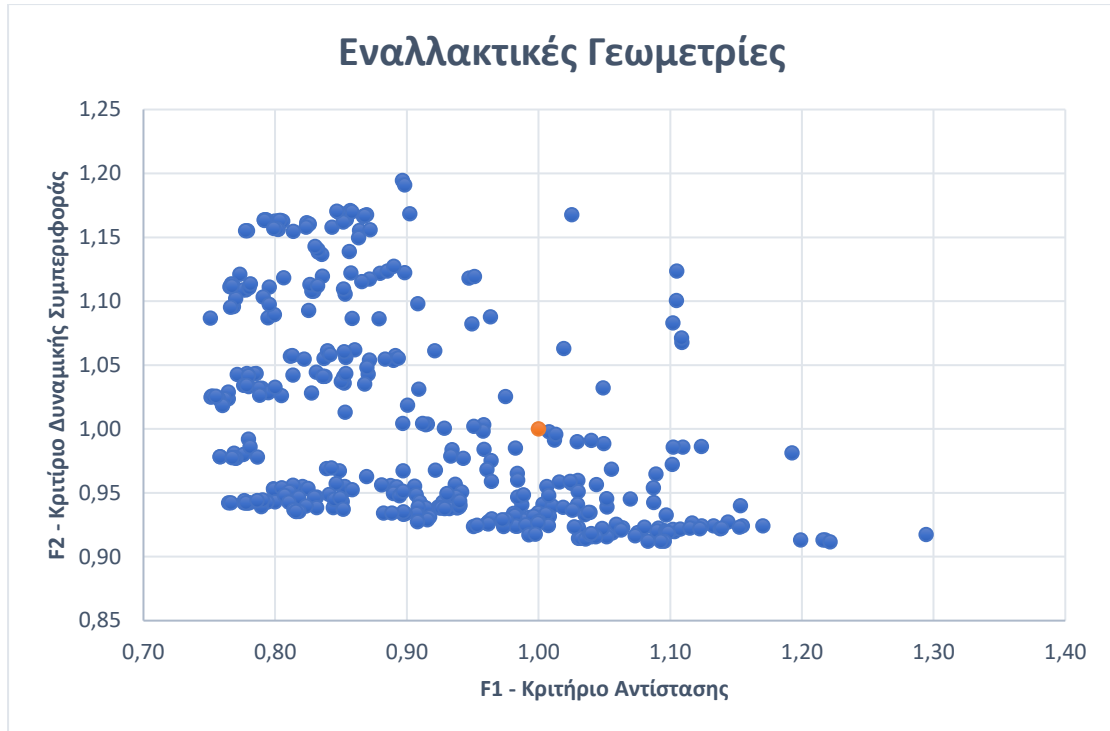
Εικόνα 54: Παραγόμενο πεδίο κυματισμών σε ταχύτητα 30 κόμβων

Με μια πρώτη ματιά μπορεί κανείς να παρατηρήσει τη διαφορά στο μήκος κύματος των παραγόμενων κυματισμών για τις δύο ταχύτητες. Είναι εμφανές πως στην υψηλή ταχύτητα έχουμε μεγαλύτερο μήκος κύματος τόσο για τους αποκλίνοντες όσο και για τους ακολουθούντες κυματισμούς.

ΕΥΡΗΜΑΤΑ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Στο διάγραμμα που ακολουθεί εμφανίζονται οι επιδόσεις όλων των εναλλακτικών γεωμετριών (400) που παράχθηκαν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Όπως είναι προφανές, η επίδοση της κάθε μίας από αυτές αντιπροσωπεύεται και αξιολογείται βάσει του συνδυασμού των τιμών που επιτυγχάνει για τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις, όπως αυτές λεπτομερώς περιγράφησαν στα προηγούμενα. Έτσι, η κάθε γεωμετρία τοποθετείται στο καρτεσιανό επίπεδο με άξονες τις τιμές των συναρτήσεων αυτών. Όπως είδη έχει αναφερθεί η πατρική γάστρα λαμβάνει το ζεύγος τιμών $(x, y) = (F_1, F_2) = (1, 1)$ και έχει ξεχωριστά σημειωθεί επάνω στο παρακάτω διάγραμμα.



Σχήμα 1: Διασπορά δυνατών αποτελεσμάτων κατά τη διαδικασία βελτιστοποίησης

Στρέφοντας την προσοχή μας στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε πως αυτό μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα τεταρτημόρια καθένα από τα οποία περιλαμβάνει εναλλακτικές γεωμετρίες με κοινά χαρακτηριστικά ως προς το συνδυασμό τιμών (F_1, F_2) που λαμβάνουν. Έτσι:

- Γεωμετρίες με συνδυασμό τιμών

$$F_1, F_2 : \{F_1 > 1 \wedge F_2 > 1\}$$

Παρουσιάζουν χειρότερες επιδόσεις από την πατρική ως προς και τα δύο κριτήρια και βρίσκονται στο πρώτο τεταρτημόριο του διαγράμματος.

- Γεωμετρίες με συνδυασμό τιμών

$$F_1, F_2 : \{F_1 > 1 \wedge F_2 < 1\} \vee \{F_1 < 1 \wedge F_2 > 1\}$$

Παρουσιάζουν χειρότερη επίδοση από την πατρική ως προς ένα από τα δύο κριτήρια και καλύτερη ως προς το άλλο ενώ βρίσκονται στο δεύτερο και τέταρτο τεταρτημόριο του διαγράμματος.

- Γεωμετρίες με συνδυασμό τιμών

$$F_1, F_2 : \{F_1 < 1 \wedge F_2 < 1\}$$

Παρουσιάζουν καλύτερες επιδόσεις από την πατρική ως προς και τα δύο κριτήρια και βρίσκονται στο τρίτο τεταρτημόριο του διαγράμματος.

Λαμβάνοντας υπόψη πως επιχειρείται βελτιστοποίηση και ως προς τα δύο κριτήρια, αντιλαμβάνεται κανείς πως η βέλτιστη γεωμετρία δεν μπορεί παρά να ανήκει στο τρίτο τεταρτημόριο του παραπάνω διαγράμματος. Το τεταρτημόριο αυτό περιλαμβάνει 154 γεωμετρίες από το σύνολο των 400 που παρήχθησαν, ένα ποσοστό της τάξεως του 38,5 %.

Ωστόσο, στις επόμενες παραγράφους θα αναφερθούμε και σε κάποιες άλλες από τις εναλλακτικές γεωμετρίες που προέκυψαν κατά τη διαδικασία και οι οποίες παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Συγκεκριμένα οι γεωμετρίες αυτές θα αποτελούν τη ‘βέλτιστη’ επιλογή στην περίπτωση που η επιλογή γινόταν με βάση ένα μόνο, κάθε φορά, από τα δύο κριτήρια που τέθηκαν στον αλγόριθμο που χρησιμοποιήθηκε.

Μερική Βελτιστοποίηση ως προς F_1

Εξετάζοντας τη διαδικασία της βελτιστοποίησης αποκλειστικά από τη σκοπιά της απομείωσης της αντίστασης του πλοίου μπορούμε να κατατάξουμε τις παραχθείσες γεωμετρίες με σειρά αύξουσας τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης F_1 . Κατ’ αυτόν τον τρόπο η πρώτη σε σειρά από τις εναλλακτικές γεωμετρίες θα είναι αυτή που επιτυγχάνει μέγιστη βελτίωση της αντίστασης που αυτή παρουσιάζει συγκρινόμενη με την πατρική.

Η προαναφερθείσα κατάταξη δίνει τα ακόλουθα αποτελέσματα (10 καλύτερα αποτελέσματα):

A/A	Αριθμός Εναλλακτικής Γεωμετρίας	Τιμή F_1	Τιμή F_2
1	des0385	0,7509	1,0867
2	des0289	0,7512	1,0249
3	des0305	0,7519	1,0255
4	des0343	0,7525	1,0255
5	des0394	0,7549	1,0256
6	des0381	0,7568	1,0238
7	des0342	0,7580	0,9782
8	des0307	0,7583	0,9782
9	des0346	0,7597	1,0195
10	des0387	0,7601	1,0184

Πίνακας 3: Κατάταξη αποτελεσμάτων ως προς το κριτήριο F_1

Οι τιμές που λαμβάνουν οι μεταβλητές σχεδίασης για την υπ’ αριθμόν 385 (βέλτιστη ως προς F_1) γεωμετρία συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

A/A	Μεταβλητή Σχεδίασης	Μονάδα Μέτρησης	Αρχική Τιμή (πατρικό)	Τελική Τιμή
1	Μέγιστο πλάτος πρύμνης	m	6,919	6,916
2	Μέγιστο πλάτος βολβού	m	3,2	3,178
3	Γωνία εισόδου πλώρης	deg	190,3	185,653
4	Βύθισμα ΠΜ υδροδυναμικού πτερυγίου	m	0,0	0,057
5	Μέγιστο πλάτος ισάλου	m	9,528	9,194
6	Διαμήκης θέση πρυμναίας κατατομής βολβού	m	126,2	125,934
7	Διαμήκης θέση προωραίας κατατομής βολβού	m	141,9	141,602
8	Ύψος skeg	m	1,958	2,491
9	Διαμήκης θέση μεγίστου πλάτους βολβού	m	136,0	137,867
10	Ανύψωση προωραίου σημείου βολβού	m	-1,3	-1,572

Πίνακας 4: Οι τιμές των παραμέτρων για τη βέλτιστη γεωμετρία ως προς F_1

Παρατηρούμε πως οι παράμετροι οι οποίες αφορούν στο σχήμα και τη θέση του βολβού του πλοίου υφίστανται, εν γένει, σημαντική μεταβολή της τιμής τους. Οι μεταβλητές αυτές (A/A 6, 7, 9 και 10) μεταβάλλονται κατά τουλάχιστον 27 cm, διαφοροποιώντας την αρχική τους τιμή μέχρι και κατά περίπου 20 % (A/A 10). Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνει το σημαντικό ρόλο που διαδραματίζει ο προωραίος βολβός ενός πλοίου στην απομείωση της αντίστασης κυματισμού που αυτό παρουσιάζει. Επιπλέον, η μεταβλητή A/A 5 παρουσιάζει μεταβολή της τιμής της, η οποία βαίνει μειούμενη κατά περίπου 33 cm αυξάνοντας τη λυγρότητα του σκάφους. Τέλος σημαντική μεταβολή παρουσιάζει και η μεταβλητή A/A 8 που αφορά στη διαμόρφωση της γεωμετρίας των πρυμναίων υφάλων του σκάφους μας. Μπορούμε λοιπόν να συμπεράνουμε πως οι προαναφερθείσες μεταβλητές σχεδίασης είναι εκείνες οι οποίες επηρεάζουν κατά μείζονα λόγο την αντίσταση του πλοίου μας. Αντίθετα οι λοιπές μεταβλητές φαίνεται να μην ασκούν σημαντική επιρροή στην αντικειμενική συνάρτηση F_1 η οποία εκφράζει το κριτήριο της αντίστασης της γεωμετρίας μας.

Στρέφοντας την προσοχή του ξανά στον πίνακα (4), μπορεί κανείς να διαπιστώσει πως για την καλύτερη από τις παραχθείσες γεωμετρίες επιτυγχάνεται εντυπωσιακή μείωση της τιμής του πρώτου μας κριτηρίου της τάξεως του 24,91 %. Αντίθετα η τιμή της F_2 παρουσίασε αύξηση κατά 8,67 %. Η συμπεριφορά αυτή δεν περιορίζεται μόνο στη συγκεκριμένη γεωμετρία. Παρατηρούμε πως η βελτίωση της τιμής της πρώτης αντικειμενικής συνάρτησης συνεπάγεται, εν γένει, μεταβολή επί τα χείρω της τιμής της δεύτερης που αφορά στη δυναμική συμπεριφορά της γάστρας σε κυματισμό.

Μερική Βελτιστοποίηση ως προς F_2

Μελετώντας τη διασπορά των εναλλακτικών γεωμετριών στο επίπεδο των F_1, F_2 και εστιάζοντας μόνο στη βελτίωση της συμπεριφοράς του πλοίου παρουσία κυματισμών μπορούμε, ξανά, να τις κατατάξουμε σε σειρά αύξουσας τιμής αυτή τη φορά όμως της αντικειμενικής συνάρτησης F_2 . Η γεωμετρία που παρουσιάζει την ελάχιστη τιμή για τη συνάρτηση F_2 είναι αυτή που αποδίδει βέλτιστα κατά τον πλου στις συνθήκες που περιγράφησαν στο οικείο κεφάλαιο.

Η κατάταξη αυτή δίνει τα αποτελέσματα που φαίνονται παρακάτω (10 καλύτερα αποτελέσματα):

A/A	Αριθμός Εναλλακτικής Γεωμετρίας	Τιμή F_1	Τιμή F_2
1	des0393	1,2214	0,9115
2	des0395	1,0831	0,9121
3	des0380	1,0927	0,9121
4	des0360	1,0955	0,9121
5	des0340	1,1991	0,9132
6	des0363	1,2161	0,9132
7	des0312	1,2177	0,9132
8	des0354	1,0358	0,9139
9	des0301	1,0303	0,9145
10	des0341	1,0320	0,9145

Πίνακας 5: Κατάταξη αποτελεσμάτων ως προς το κριτήριο F_2

Οι τιμές που λαμβάνουν οι μεταβλητές σχεδίασης για την υπ’ αριθμόν 393 (βέλτιστη ως προς F_2) γεωμετρία συνοψίζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

A/A	Μεταβλητή Σχεδίασης	Μονάδα Μέτρησης	Αρχική Τιμή (πατρικό)	Τελική Τιμή
1	Μέγιστο πλάτος πρύμνης	m	6,919	7,091
2	Μέγιστο πλάτος βολβού	m	3,2	2,913
3	Γωνία εισόδου πλώρης	deg	190,3	195,050
4	Βύθισμα ΠΜ υδροδυναμικού πτερυγίου	m	0,0	0,133
5	Μέγιστο πλάτος ισάλου	m	9,528	9,795
6	Διαμήκης θέση πρυμναίας κατατομής βολβού	m	126,2	125,868
7	Διαμήκης θέση προραίας κατατομής βολβού	m	141,9	141,078
8	Ύψος skeg	m	1,958	2,470
9	Διαμήκης θέση μεγίστου πλάτους βολβού	m	136,0	137,876
10	Ανύψωση προραίου σημείου βολβού	m	-1,3	-1,572

Πίνακας 6: Οι τιμές των παραμέτρων για τη βέλτιστη γεωμετρία ως προς F_2

Αυτή τη φορά διαπιστώνουμε πως μεταβλητές που αφορούν στα κατά τόπους πλάτη της γάστρας μας (A/A 1, 2, 3 και 5) εμφανίζουν γενικά τάση αύξησης της τιμής τους. Η παρατήρηση αυτή συνάδει με το γεγονός πως πλατύτερες γεωμετρίες εμφανίζουν καλύτερη ευστάθεια. Ενδιαφέρον επίσης είναι πως οι μεταβλητές που φάνηκε να επηρεάζουν το πρώτο κριτήριο, παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά και

στην περίπτωση που τώρα εξετάζουμε. Οι μεταβλητές A/A 6 έως και 10 τείνουν να μεταβάλλουν τις τιμές τους κατά τρόπο παρόμοιο με εκείνον της σχεδίασης 385. Επιπλέον στην προκειμένη περίπτωση η παρουσία της πρυμναίας υδροδυναμικής σφήνας φαίνεται να ασκεί κάποια επιρροή στην υδροδυναμική συμπεριφορά του πλοίου, καθώς η σχετική μεταβλητή σχεδίασης (A/A 8) παρουσιάζει παρατηρήσιμη μεταβολή.

Μελετώντας τον πίνακα (6) διαπιστώνουμε πως η καλύτερη, ως προς F_2 , γεωμετρία βελτιώνει την τιμή της αντίστοιχης αντικειμενικής συνάρτησης κατά 8,85 %. Ωστόσο, για την ίδια γεωμετρία η τιμή της F_1 αυξάνεται κατά 22,14 % συγκρινόμενη με την τιμή της πατρικής. Όπως και στην κατάταξη της προηγούμενης παραγράφου παρατηρούμε πως η βελτίωση της τιμής της δεύτερης αντικειμενικής συνάρτησης για κάποια γάστρα συνοδεύεται, γενικά, από επιδείνωση της τιμής της πρώτης, συνεπώς και της αντίστασης που αυτή παρουσιάζει.

Αρχικά Συμπεράσματα

Οι δύο περιπτώσεις που μέχρι τώρα έχουν εξεταστεί, επαληθεύουν το γεγονός ότι η μείωση της αντίστασης κυματισμού και η βελτίωση της δυναμικής συμπεριφοράς ενός πλοίου είναι στόχοι αντικρουόμενοι που ο ένας αντιτίθεται στον άλλον. Όπως είδαμε, υπάρχουν μεταβλητές σχεδίασης που προσδίδουν στη γεωμετρία χαρακτηριστικά που ευνοούν τη βελτίωση της τιμής της F_1 , ταυτόχρονα τείνουν επιδεινώνουν την τιμή της F_2 και τούμπαλιν. Επιπλέον, παρατηρούμε πως οι διάφορες μεταβλητές σχεδίασης επηρεάζουν με διαφορετική η κάθε μια βαρύτητα τη συμπεριφορά της γάστρας σε ότι αφορά την αντίσταση και τις δυναμικές της αποκρίσεις. Ωστόσο, οι μεταβλητές που αφορούν στη γεωμετρία του βολβού φαίνεται να συμβάλλουν στην ταυτόχρονη βελτίωση και των δύο κριτηρίων που έχουν τεθεί. Βέβαια είναι σημαντικό να τονιστεί πως οι εναλλακτικές γεωμετρίες που εξετάστηκαν προήλθαν από τη διεξαγωγή πολυπαραμετρικής διαδικασίας βελτιστοποίησης και όχι μονοκριτηριακής. Αυτό σημαίνει πως οι μεταβλητές σχεδίασης λαμβάνουν τις τελικές τους τιμές επηρεαζόμενες από αμφότερα τα κριτήρια.

Σε συνέχεια λοιπόν, όσων διαπιστώνονται στην προηγούμενη παράγραφο και σε συνάφεια με τα αναφερόμενα στα προηγούμενα κεφάλαια, περί ιδιοτήτων των γενετικών αλγορίθμων, εκτιμάται ως ορθή και ενδεδειγμένη η επιλογή αυτής της μεθόδου (με χρήση του γενετικού αλγορίθμου NSGA II) για την επίλυση του

πολυκριτηριακού προβλήματος βελτιστοποίησης (ελαχιστοποίησης) που καλούμαστε να επιλύσουμε στο πλαίσιο της παρούσης εργασίας.

Με δεδομένα τα συμπεράσματα των προηγούμενων παραγράφων, προχωράμε στη θεώρηση της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης της γάστρας του DDG-51, που είναι και το ζητούμενο της μελέτης μας. Οι εναλλακτικές γεωμετρικές παρήχθησαν άλλωστε λαμβάνοντας υπόψη και τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις. Η διαδικασία, μετά την ολοκλήρωσή της, μας παρέχει ένα πλήθος από βέλτιστες λύσεις, τη γνωστή γενεά Pareto. Η τελικά επιλεγθείσα γεωμετρία θα ανήκει σε αυτή τη γενεά γαστρών. Η μορφή, οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά της θα αναλυθούν στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου.

Ωστόσο, οι παρατηρήσεις που προέκυψαν από τη μελέτη των παραπάνω “ειδικών λύσεων” μας ώθησαν στην εκτέλεση και μιας μονοκριτηριακής απόπειρας βελτιστοποίησης μόνο ως προς την αντίσταση (F_1) κριτήριο το οποίο αποτελεί και το βαρύνον, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, μεταξύ των δύο που χρησιμοποιήθηκαν.

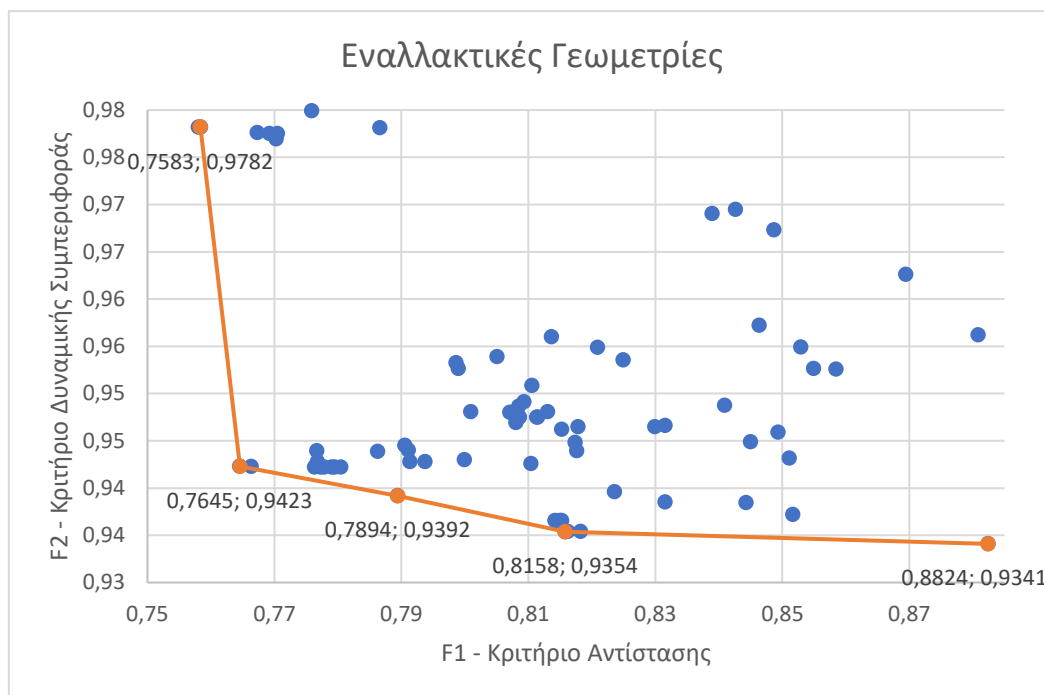
Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση

Όπως έχει ήδη εξηγηθεί σε προηγούμενα κεφάλαια, προκειμένου τα αποτελέσματα της διαδικασίας της βελτιστοποίησης να αποκτήσουν πρακτική αξία, θα πρέπει οι διάφορες λύσεις να μπορούν να συγκριθούν μεταξύ τους. Ο τρόπος να δώσουμε γεωμετρική υπόσταση στα αποτελέσματά μας είναι, όπως είδαμε, να τα παραστήσουμε σε ένα επίπεδο σύστημα συνταγμένων, με άξονες τις αντικειμενικές μας συναρτήσεις. Κατ’ αυτόν τον τρόπο προκύπτει ένα διάγραμμα με άξονες, πρακτικά, τα δύο κριτήρια βελτιστοποίησης στο οποίο παρουσιάζεται το σύνολο των αποδεκτών γεωμετριών.

Έχοντας πλέον τα αποτελέσματά μας σε αυτή τη μορφή, είναι δυνατό να εξετάσουμε και να συγκρίνουμε τις ιδιότητές τους, προκειμένου να βγάλουμε τα συμπεράσματά μας. Το σύνολο των βέλτιστων λύσεων, στην προκειμένη περίπτωση, θα αποτελείται από διακριτά σημεία τα οποία δύναται να παρεμβάλει μια καμπύλη, το μέτωπο Pareto στο οποίο αναφερθήκαμε στην εισαγωγή της παρούσης.

Το διάγραμμα που ακολουθεί προκύπτει από το διάγραμμα 1 εστιάζοντας στο τρίτο του τεταρτημόριο· εκείνο στο οποίο συγκεντρώνονται οι βέλτιστες λύσεις του προβλήματός μας δηλαδή εκείνες για τις οποίες οι δύο αντικειμενικές συναρτήσεις

λαμβάνουν ταυτόχρονα τιμή το πολύ ίση με μονάδα. Οι πέντε γεωμετρίες οι οποίες έχουν ξεχωριστά σημαθεί, απαρτίζουν το τοπικό μέτωπο Pareto και αποτελούν μια ομάδα ‘‘ισοδύναμα’’ βέλτιστων λύσεων. Όπως είναι κατανοητό η λύση που θα επιλέξουμε ως βέλτιστη δε μπορεί παρά να βρίσκεται μεταξύ των πέντε αυτών γεωμετριών που προαναφέρθηκαν και απαρτίζουν το Pareto Front. Η έμφαση για την επιλογή της συνολικά βέλτιστης γάστρας δίνεται στην βελτιστοποίηση της αντίστασης της γεωμετρίας λαμβάνοντας ωστόσο υπόψη και την κατά το δυνατόν μέγιστη βελτίωση της δυναμικής του συμπεριφοράς σε κυματισμό. Για το λόγο αυτό η μέγιστη τιμή για την πρώτη αντικειμενική συνάρτηση (F_1) περιορίστηκε στο 0,89.



Σχήμα 2: Τοπική καμπύλη βέλτιστων γεωμετριών

Εστιάζοντας την προσοχή μας στις γεωμετρίες αυτές (πίνακας 7) μπορούμε να κάνουμε τις ακόλουθες παρατηρήσεις σχετικά με τις επιδόσεις τους:

Η γεωμετρία A/A 1 παρουσιάζει την ελάχιστη τιμή ως προς F_1 όμως η επίδοσή της ως προς F_2 είναι μάλλον απογοητευτική καθώς βελτιώνει τη δυναμική συμπεριφορά της γάστρας σε κυματισμό μόλις κατά 2,18 % ως προς την πατρική. Μπορούμε λοιπόν να την απορρίψουμε αμέσως.

Ομοίως η γεωμετρία A/A 5 μπορεί να απορριφθεί καθώς η επιλογή της θα μας στερούσε σχεδόν το 50 % της μέγιστης βελτίωσης ως προς F_1 που μπορούμε να επιτύχουμε. Λαμβάνοντας υπόψη την αυξημένη βαρύτητα του πρώτου κριτηρίου μια

τέτοια επιλογή καθίσταται προβληματική. Οι επικρατέστερες λοιπόν γεωμετρίες είναι οι A/A 2, 3 και 4.

Συγκρίνοντας τις εναπομείνουσες τρεις γεωμετρίες παρατηρούμε πως η μετάβαση από την A/A 2 στην 3 και κατόπιν από την A/A 3 στην 4 συνεπάγεται απώλεια κατά περίπου 2,5 % ως προς F_1 και κέρδος κατά περίπου 0,3 % ως προς F_2 κάθε φορά ως προς την πατρική. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός πως η επιλογή των λύσεων για τη δημιουργία του Pareto Front είναι ήδη προκατειλημμένη ως προς F_1 , όπως προαναφέρθηκε, και τη μικρή δυνατότητα βελτίωσης ως προς F_2 που έχουμε στη διάθεσή μας (μόλις 8,85 % ως προς την πατρική) μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα πως η συνολικά βέλτιστη γεωμετρία είναι η A/A 4. Επιλέγοντας τη συγκεκριμένη γάστρα ως τη βέλτιστη έχουμε απώλεια μόλις 6,49 % ως προς F_1 και 2,39 % ως προς F_2 λαμβάνοντας ως τιμή εκκίνησης τη βέλτιστη για κάθε κριτήριο επίδοση που επετεύχθη.

A/A	Αριθμός Εναλλακτικής Γεωμετρίας	Τιμή F_1	Τιμή F_2	$ F_{1max} - F_1 $ x100%	$ F_{2max} - F_2 $ x100%
1	des0307	0,7583	0,9782	0,74	6,67
2	des0383	0,7645	0,9423	1,36	3,08
3	des0331	0,7894	0,9392	3,85	2,77
4	des0384	0,8158	0,9354	6,49	2,39
5	des0370	0,8824	0,9341	13,15	2,26

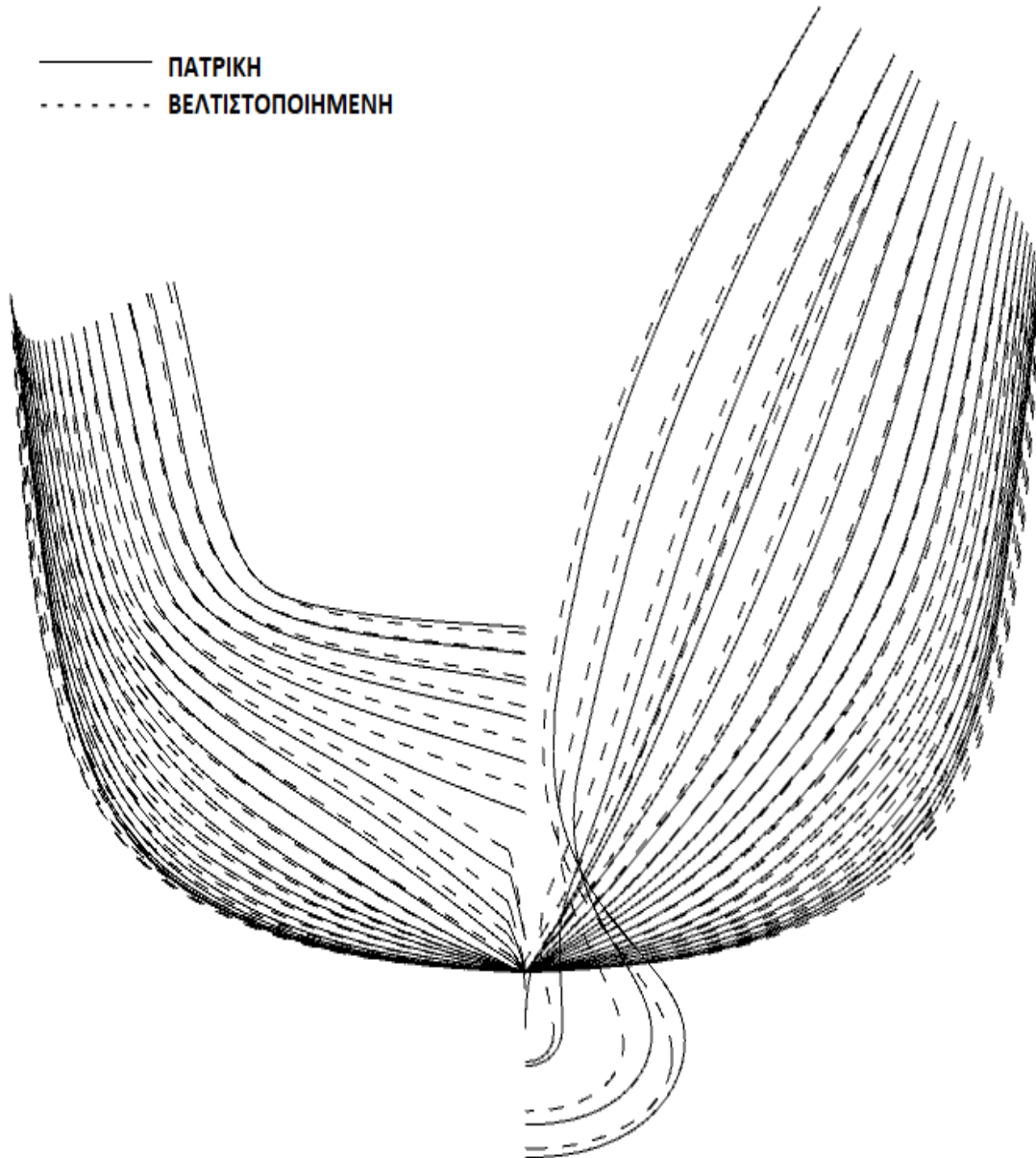
Πίνακας 7: Επιδόσεις βέλτιστων γεωμετριών

Στον παρακάτω πίνακα εμφανίζονται οι τιμές που λαμβάνουν, για την επιλεγθείσα γεωμετρία, οι μεταβλητές σχεδίασης που χρησιμοποιήθηκαν, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζεται το bodyplan της επιλεγθείσας γάστρας σε σύγκριση με την πατρική. Παρατηρώντας κανείς τους νομείς της βελτιστοποιημένης γάστρας διαπιστώνει πως η μέριμνα που ελήφθη στο στάδιο της παραμετρικής μοντελοποίησης ώστε να επιτευχθεί ομαλότητα και συνέχεια κατά τη μεταβολή των τιμών των μεταβλητών σχεδίασης, απέδωσε. Η γεωμετρία που προέκυψε παραμένει ομαλή, συνεχείς και ναυπηγικά ορθή και λειτουργική. Επιπλέον, δεν παραβιάζει τους σχεδιαστικούς περιορισμούς που εξ’ αρχής είχαν τεθεί.

A/A	Μεταβλητή Σχεδίασης	Μονάδα Μέτρησης	Αρχική Τιμή (πατρικό)	Τελική Τιμή
1	Μέγιστο πλάτος πρύμνης	m	6,919	7,052
2	Μέγιστο πλάτος βολβού	m	3,2	2,949
3	Γωνία εισόδου πλώρης	deg	190,3	187,508
4	Βύθισμα ΠΜ υδροδυναμικού πτερυγίου	m	0,0	0,132
5	Μέγιστο πλάτος ισάλου	m	9,528	9,793
6	Διαμήκης θέση πρυμναίας κατατομής βολβού	m	126,2	125,956

7	Διαμήκης θέση προραίας κατατομής βολβού	m	141,9	141,513
8	Ύψος skeg	m	1,958	2,949
9	Διαμήκης θέση μεγίστου πλάτους βολβού	m	136,0	137,755
10	Ανύψωση προραίου σημείου βολβού	m	-1,3	-1,672

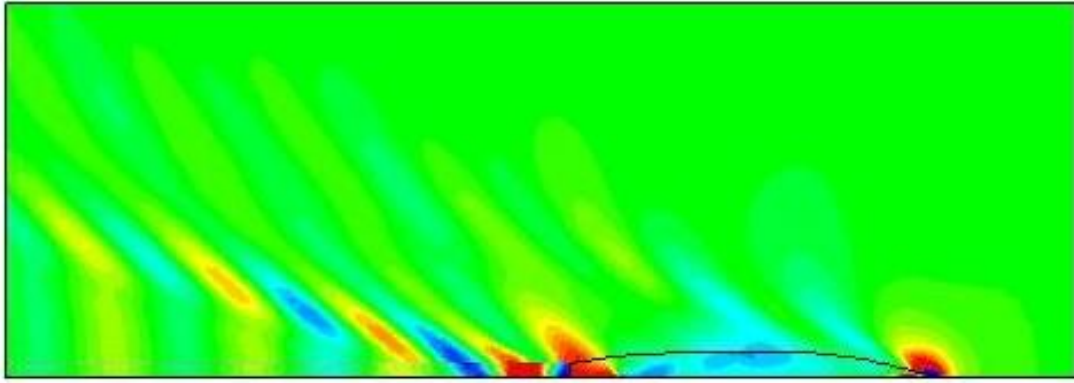
Πίνακας 8: Οι τιμές των παραμέτρων για την επιλεγθείσα γεωμετρία



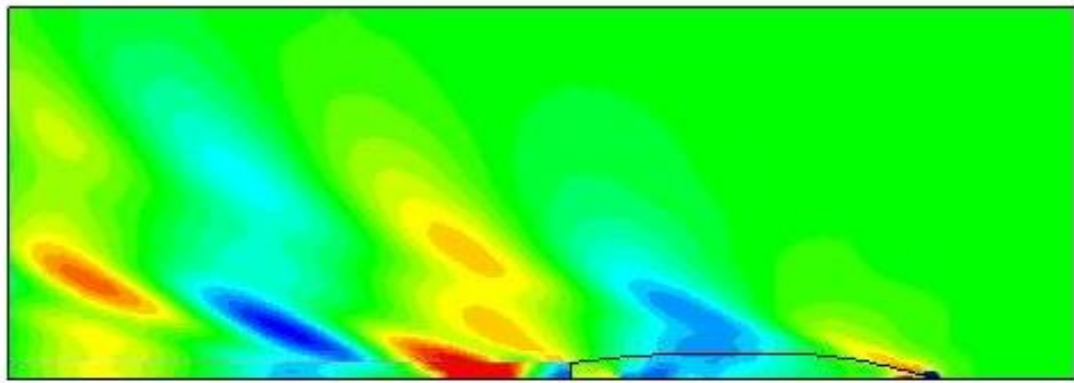
Εικόνα 55: Σύγκριση πατρικής και βελτιστοποιημένης μορφής γάστρας

Επιπλέον, στις εικόνες που ακολουθούν μπορεί κανείς να παρατηρήσει τη διαμόρφωση του πεδίου κυματισμών και για τις δύο ταχύτητες που υπεισέρχονται στα κριτήριά μας. Σε αντιστοιχία με τις εικόνες 53 και 54 παρατηρούμε την επίδραση της

ταχύτητας πλεύσης στο μήκος κύματος των αποκλινόντων και των ακολουθούντων κυματισμών. Οι προαναφερθείσες εικόνες γίνονται πιο κατανοητές μελετώντας τις διαμήκεις τομές του πεδίου των παραγόμενων κυματισμών για κάθε μια από τις δύο ταχύτητες που εξετάστηκαν.



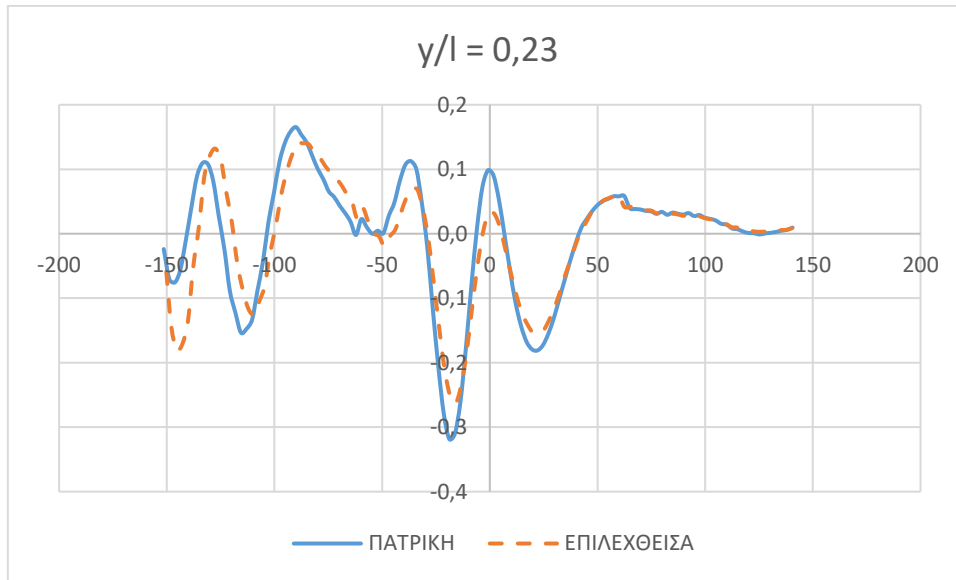
Εικόνα 56: Παραγόμενο πεδίο κυματισμών βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε ταχύτητα 18 κόμβων



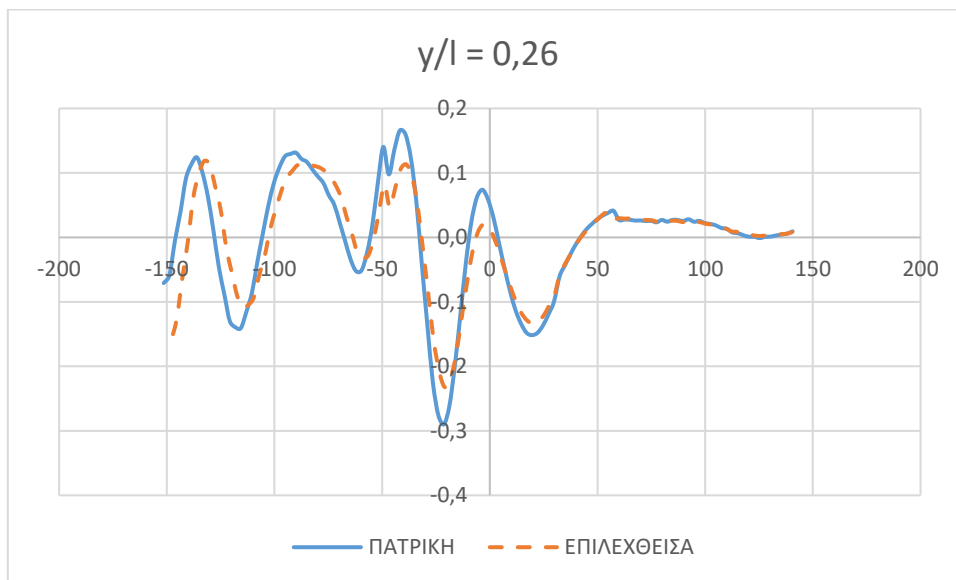
Εικόνα 57: Παραγόμενο πεδίο κυματισμών βελτιστοποιημένης γεωμετρίας σε ταχύτητα 30 κόμβων

Τα σχετικά διαγράμματα που παρατίθενται απεικονίζουν το εκάστοτε πλάτος των παραγόμενων κατά την πλεύση κυματισμών, όπως αυτοί δημιουργούνται σε διάφορες αποστάσεις από το πλοίο. Οι τελευταίες ορίζονται ως ποσοστό επί του μήκους μεταξύ καθέτων (L_{BP}) του πλοίου, μετρούμενες κάθετα στο διάμηκες αυτού. Σε όλες τις περιπτώσεις που απεικονίζονται και αφορούν στη μικρή ταχύτητα του σκάφους είναι εμφανής η βελτίωση (μείωση) του πλάτους του συστήματος κυματισμών, κυρίως πρύμνηθεν του σκάφους, γεγονός που σαφώς υποδηλώνει μείωση της ενέργειας που αναλύεται για την παραγωγή του. Παρατηρώντας όμως τα διαγράμματα που προέκυψαν για την υψηλή ταχύτητα πλεύσης διαπιστώνουμε πως η πατρική γεωμετρία παρουσιάζεται ίδια ή και ελαφρώς καλύτερη συγκρινόμενη με την επιλεχθείσα. Κάτι τέτοιο φαντάζει εν πρώτοις οξύμωρο ωστόσο, θα πρέπει να συνυπολογίσουμε τον

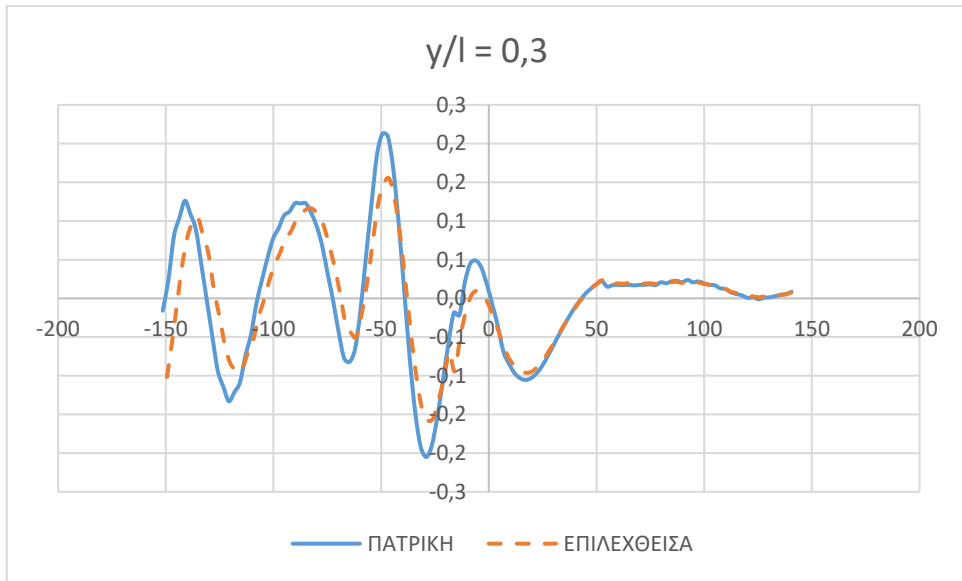
τρόπο με τον οποίο ορίσαμε τη σχετική αντικειμενική συνάρτηση (F_1). Το γεγονός ότι αυτή δίνει κατά μείζονα λόγο έμφαση στη χαμηλή ταχύτητα (θεωρήσαμε πως το πλοίο θα πλέει με αυτή κατά 85 %) φαίνεται πως υπερκάλυψε τη μικρή επιδείνωση (ή αν μη τί άλλο τη μη καλυτέρευση) που η νέα γεωμετρία παρουσιάζει στην υψηλή ταχύτητα.



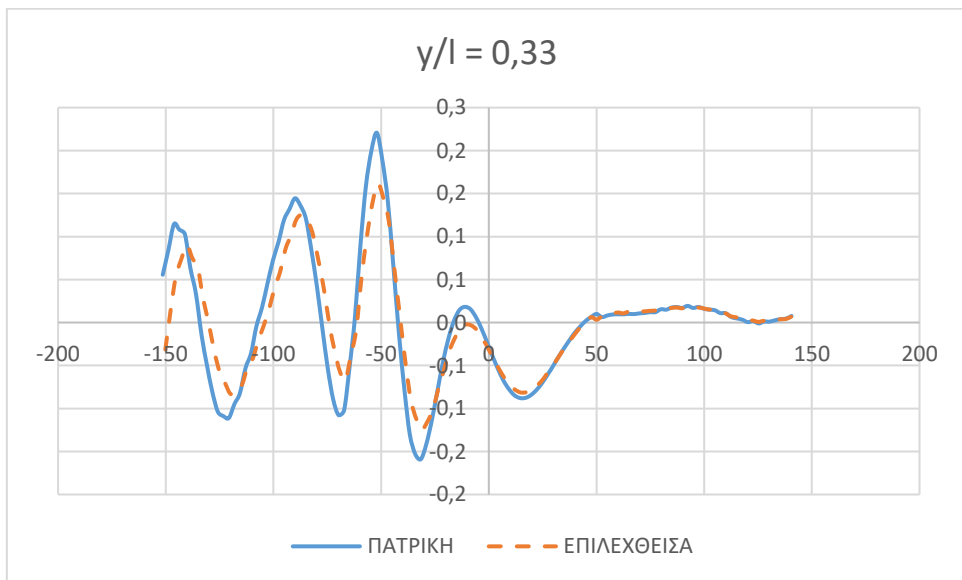
Σχήμα 3: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών πατρικής και βελτιστοποιημένης μορφής $Fr: 0.25$, $\gamma/L = 0.23$



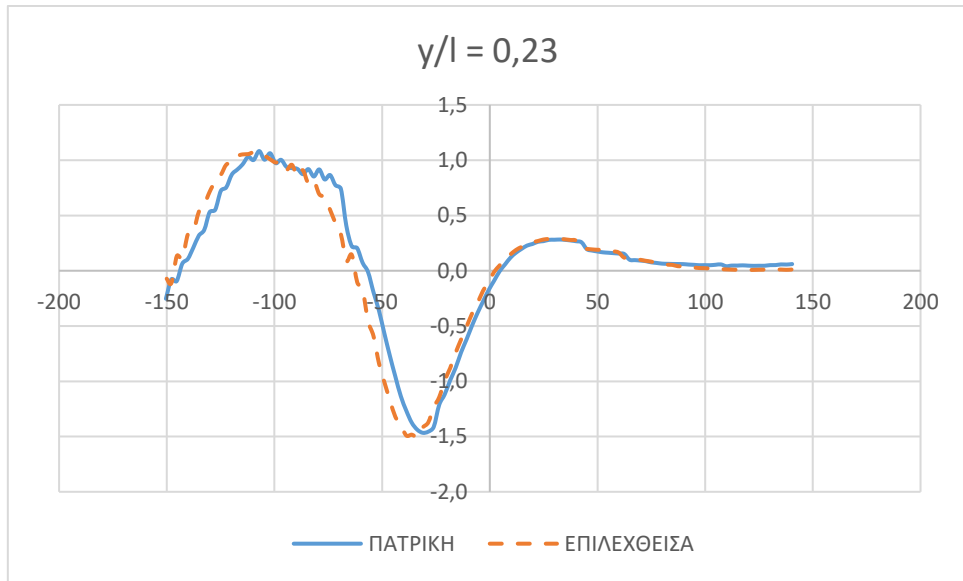
Σχήμα 4: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών πατρικής και βελτιστοποιημένης μορφής $Fr: 0.25$, $\gamma/L = 0.26$



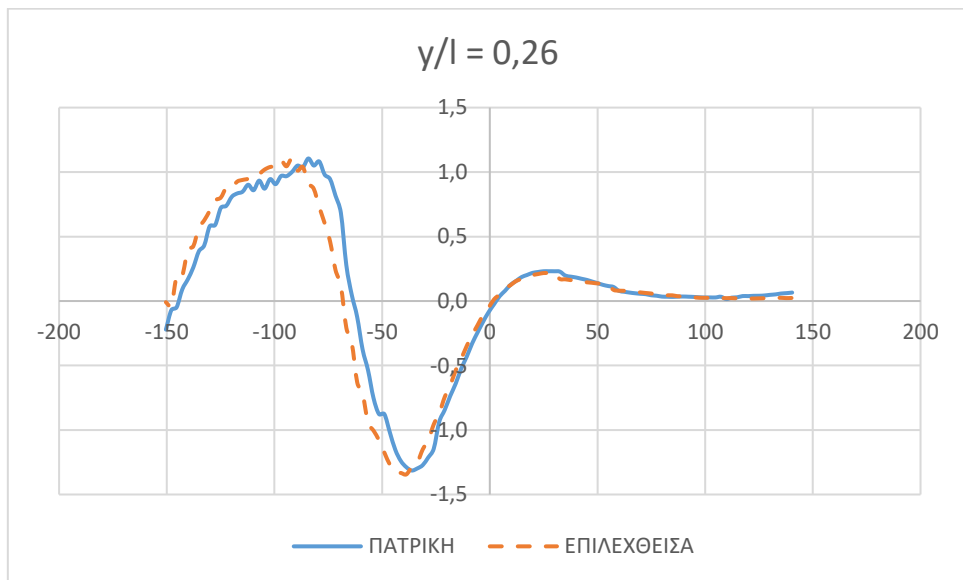
Σχήμα 5: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών πατρικής και βελτιστοποιημένης μορφής $Fr: 0.25$, $\gamma/L = 0.3$



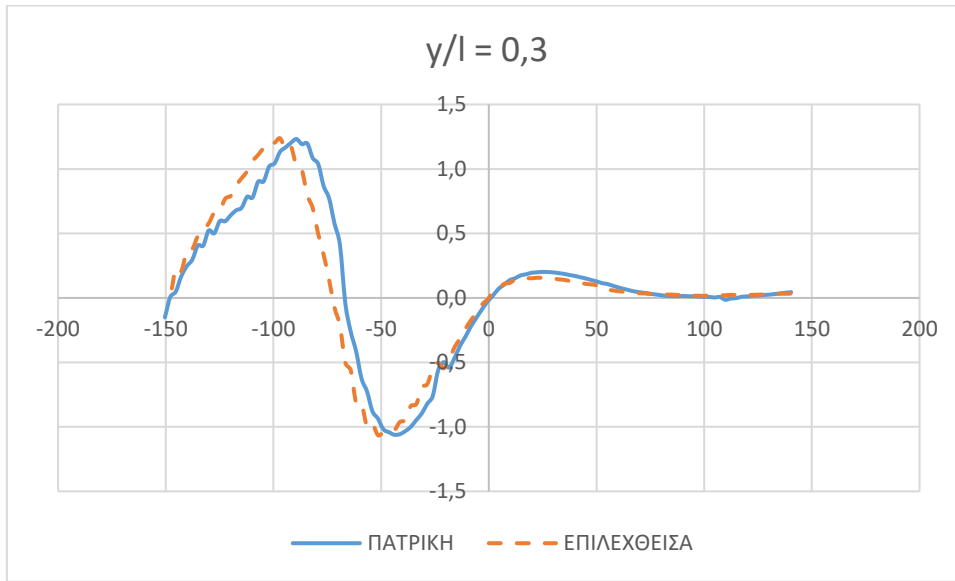
Σχήμα 6: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών πατρικής και βελτιστοποιημένης μορφής $Fr: 0.25$, $\gamma/L = 0.33$



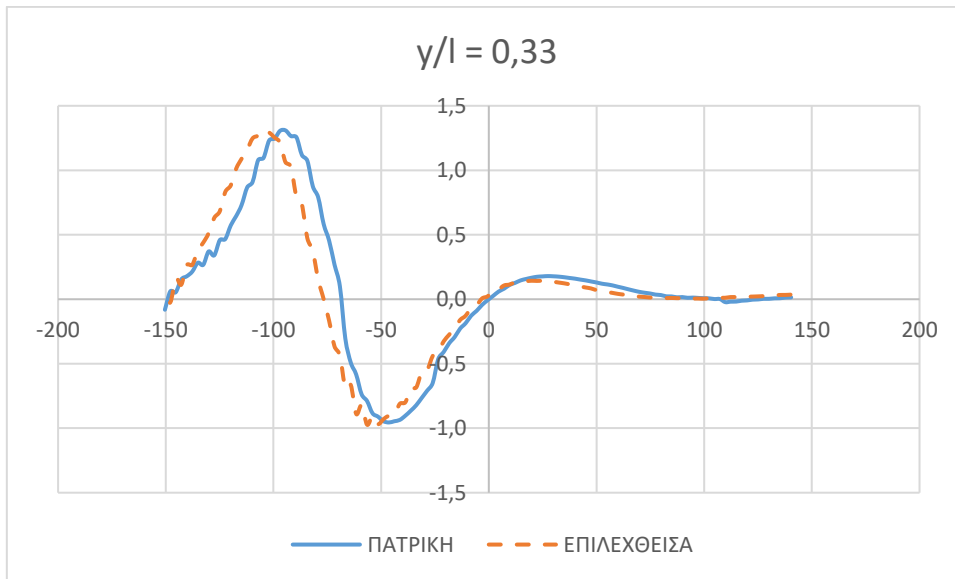
Σχήμα 7: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών πατρικής και βελτιστοποιημένης μορφής $Fr: 0,41$, $\gamma/L = 0,23$



Σχήμα 8: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών πατρικής και βελτιστοποιημένης μορφής $Fr: 0,41$, $\gamma/L = 0,26$



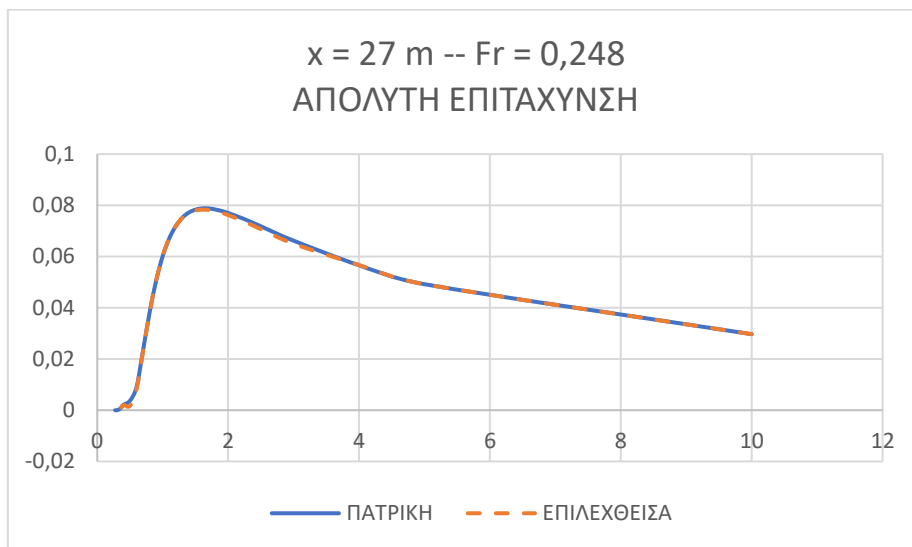
Σχήμα 9: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών πατρικής και βελτιστοποιημένης μορφής $Fr: 0.41$, $y/L = 0.3$



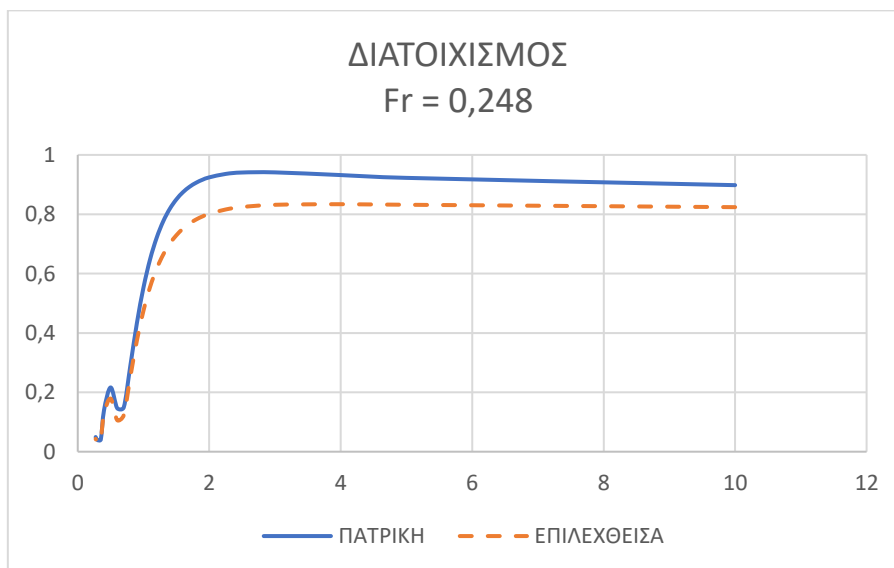
Σχήμα 10: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών πατρικής και βελτιστοποιημένης μορφής $Fr: 0.41$, $y/L = 0.33$

Καταλήγοντας, και στο πλαίσιο της πλήρους αξιολόγησης της επιλεχθείσας γεωμετρίας, ακολουθεί μια συνοπτική παρουσίαση των επιδόσεών της και όσον αφορά στο κομμάτι της δυναμικής της συμπεριφοράς σε κυματισμό. Τα ενδεικτικά διαγράμματα που ακολουθούν καταδεικνύουν την βελτίωση που επιτεύχθηκε τόσο ως προς κριτήριο της καθέτου επιταχύνσεως, όσο και ως προς εκείνο του πλάτους διατοιχισμού. Όπως έχει αναλυτικά συζητηθεί στο σχετικό κεφάλαιο τα δύο αυτά μεγέθη συνδυαζόμενα συνιστούν το δεύτερο κριτήριο της βελτιστοποίησης που

πραγματοποιήθηκε η δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση. Παρατηρήθηκε πως επετεύχθη ελάχιστη μόνον μείωση των τιμών της κατακόρυφου επιταχύνσεως στα διάφορα σημεία του σκάφους, τόσο στη μικρή όσο και στην υψηλή ταχύτητα πλεύσης. Αντίθετα, καταγράφηκε σημαντική βελτίωση όσον αφορά στο πλάτος διατοιχισμού της γάστρας. Αυτό δικαιολογεί και τη μικρή μόνον μείωση της τιμής της σχετικής αντικειμενικής συνάρτησης καθώς φαίνεται πως η μείωση αυτή προήλθε σχεδόν εξολοκλήρου εξαιτίας της βελτίωσης της κίνησης του roll. Επιπλέον, η παραπάνω παρατήρηση καταδεικνύει πως οι μεταβλητές σχεδίασης που επιλέχθηκαν αποδείχτηκαν μάλλον ανεπαρκής στο να επηρεάσουν τη γεωμετρία κατά τρόπον ώστε να συνεισφέρουν αρκούτως στην απομείωση των καθέτων επιταχύνσεων.



Σχήμα 11: Σύγκριση κάθετης επιτάχυνσης στη γέφυρα πατρικής και βελτιστοποιημένης μορφής γάστρας $Fr: 0,25$, $x = 27\text{ m}$

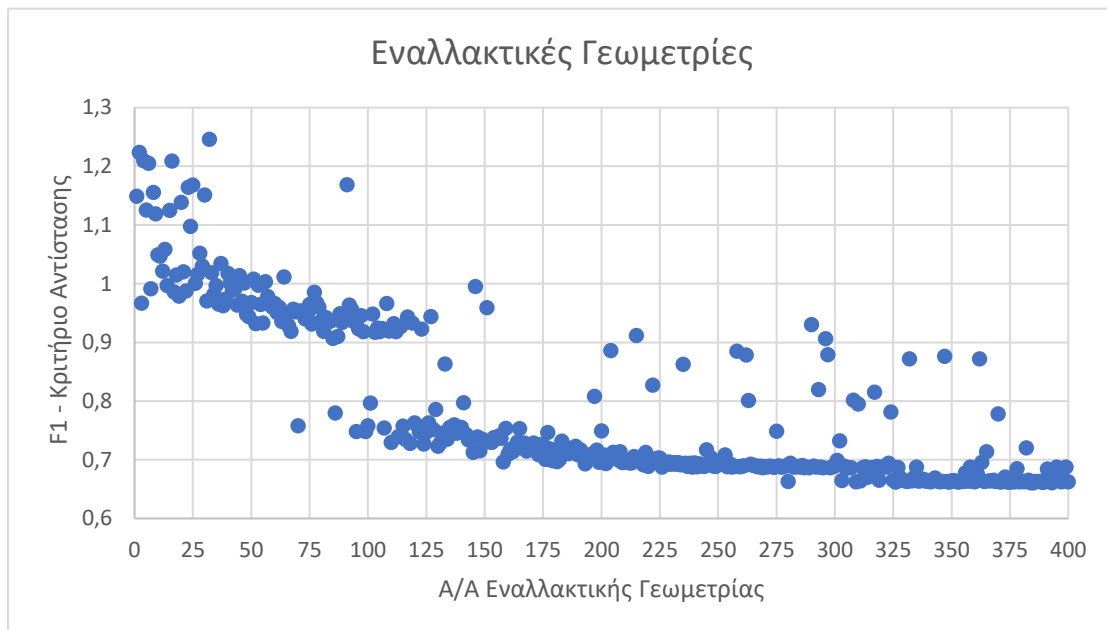


Σχήμα 12: Σύγκριση κίνησης διατοιχισμού πατρικής και βελτιστοποιημένης μορφής γάστρας $Fr: 0,25$

Μονοκριτηριακή Βελτιστοποίηση ως προς F_1

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εκτέλεση της μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης που εδώ παρουσιάζεται είναι εντελώς όμοια με εκείνη που περιγράφεται και για την αντίστοιχη πολυκριτηριακή. Το ίδιο ακριβώς παραμετρικό μοντέλο και οι ίδιοι εξωτερικοί κώδικες χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των παραχθεισών εναλλακτικών γεωμετριών. Η μόνη διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι, αυτή τη φορά, ο γενετικός αλγόριθμος λαμβάνει αποκλειστικά υπόψη την αντικειμενική συνάρτηση F_1 ως κριτήριο αξιολόγησης της εκάστοτε γεωμετρίας και φυσικά οι τιμές της συνάρτησης αυτής είναι οι μόνες που υπολογίζονται και του δίδονται ως ανάδραση.

Το αποτέλεσμα που προέκυψε από αυτή τη διαδικασία παριστάται στο διάγραμμα που ακολουθεί:



Σχήμα 13: Διασπορά δυνατών αποτελεσμάτων κατά τη διαδικασία μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης

Όπως παρατηρούμε υπάρχει μια γενικότερη τάση προς βελτίωση της αντίστασης κυματισμού καθώς παράγονται ολοένα και περισσότερες εναλλακτικές γεωμετρίες. Αυτό αποτυπώνεται και στον παρακάτω πίνακα στον οποίο κατατάσσονται οι γεωμετρίες (δέκα καλύτερες) σε σειρά φθίνουσας απόδοσης ως προς F_1 . Διαπιστώνει κανείς πως οι καλύτερες γεωμετρίες αντιστοιχούν εν γένει, σε μεγάλο άξοντα αριθμό εναλλακτικής σχεδίασης.

A/A	Αριθμός Εναλλακτικής Γεωμετρίας	Τιμή F_1
1	des0392	0,66057
2	des0384	0,66074
3	des0383	0,66076
4	des0388	0,66156
5	des0374	0,66171
6	des0352	0,66185
7	des0370	0,66189
8	des0373	0,66210
9	des0325	0,66213
10	des0348	0,66213

Πίνακας 9: Κατάταξη αποτελεσμάτων μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης

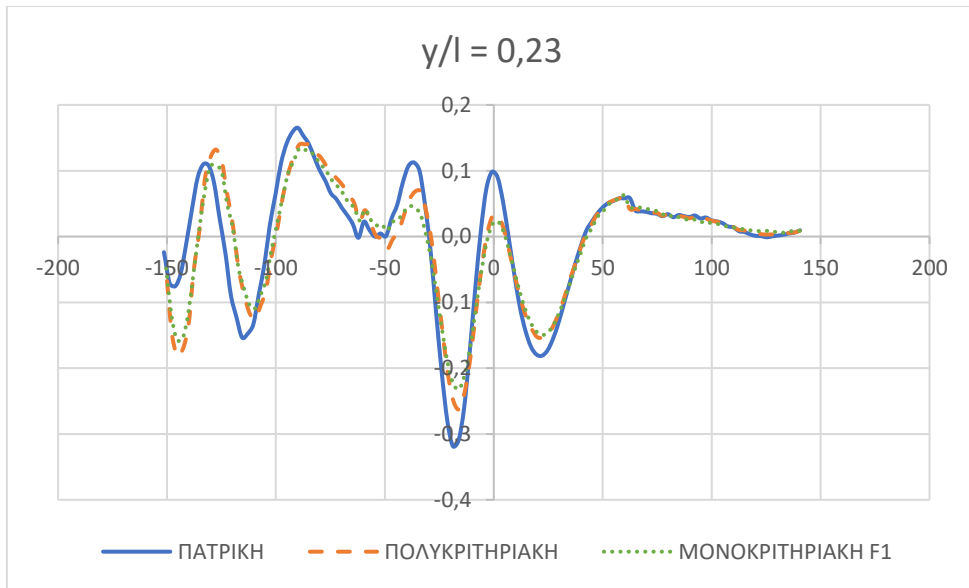
Από τον παραπάνω πίνακα καθίσταται σαφές πως ένα ικανό πλήθος από τις γεωμετρίες που προέκυψαν παρουσιάζουν σημαντικά καλύτερη συμπεριφορά σε ότι αφορά στην αντίστασή τους σε ήρεμο νερό ακόμη και αν συγκριθούν με τη γεωμετρία βέλτιστης επίδοσης ως προς F_1 της πολυκριτηριακής διαδικασίας, η οποία πέτυχε τιμή για την F_1 ίση με περίπου 75 %, όπως παρουσιάστηκε στις προηγούμενες παραγράφους. η νέα γεωμετρία παρουσιάζεται κατά μείζονα λόγο βελτιωμένη όταν συγκριθεί με την επιλεγθείσα η οποία πέτυχε τιμή για την F_1 ίση με 81 % περίπου.

Οι μεταβλητές σχεδίασης της γεωμετρίας A/A 392 της μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης λαμβάνουν τις τιμές που εμφανίζονται στον ακόλουθο πίνακα.

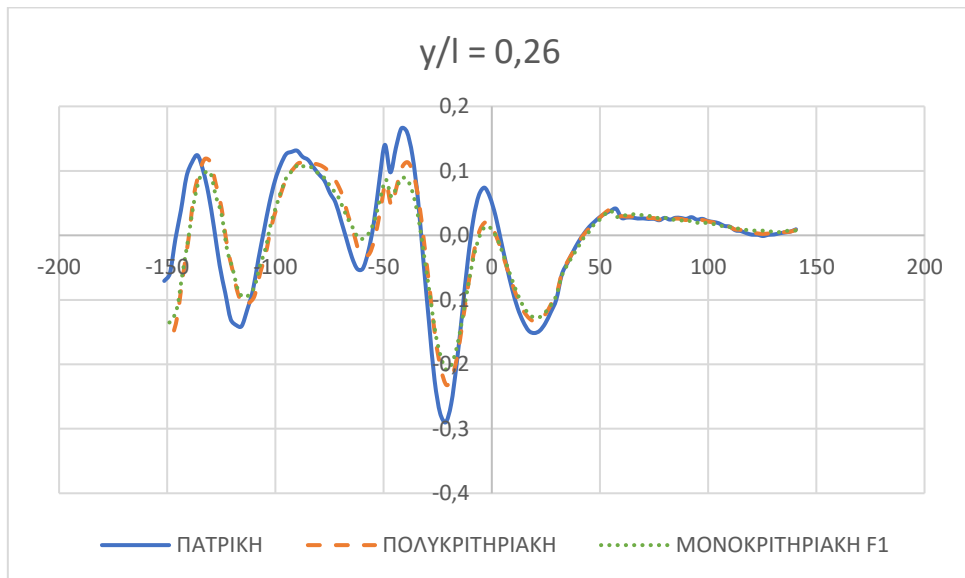
A/A	Μεταβλητή Σχεδίασης	Μονάδα Μέτρησης	Αρχική Τιμή (πατρικό)	Τελική Τιμή
1	Μέγιστο πλάτος πρύμνης	m	6,919	6,529
2	Μέγιστο πλάτος βολβού	m	3,2	3,513
3	Γωνία εισόδου πλώρης	deg	190,3	185,3
4	Βύθισμα ΠΜ υδροδυναμικού πτερυγίου	m	0,0	0,087
5	Μέγιστο πλάτος ισάλου	m	9,528	9,009
6	Διαμήκης θέση πρυμναίας κατατομής βολβού	m	126,2	125,838
7	Διαμήκης θέση προραίας κατατομής βολβού	m	141,9	140,8
8	Ύψος skeg	m	1,958	2,49
9	Διαμήκης θέση μεγίστου πλάτους βολβού	m	136,0	136,8
10	Ανύψωση προραίου σημείου βολβού	m	-1,3	-1,668

Πίνακας 10: Οι τιμές των παραμέτρων για την επιλεγθείσα γεωμετρία (μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση)

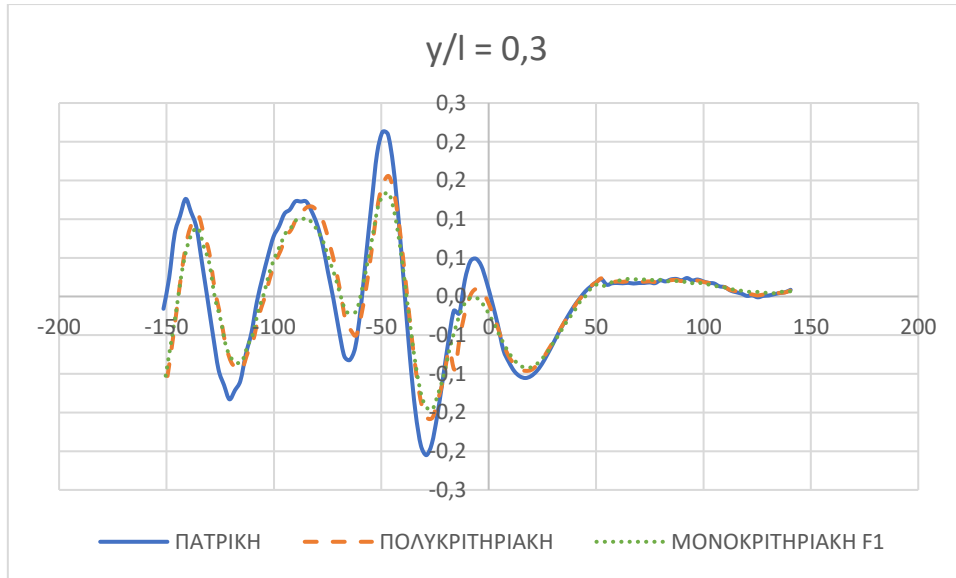
Προχωρώντας στη μελέτη του πεδίου κυματισμών της παραπάνω γεωμετρίας και συγκρίνοντάς τη τόσο με την πατρική όσο και με την επιλεγθείσα της πολυκριτηριακής διαδικασίας, λαμβάνουμε τα παρακάτω διαγράμματα. Η βελτίωση στο πλάτος του παραγόμενου κυματισμού, σε σύγκριση με τη γεωμετρία που προέκυψε από την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, είναι εμφανής σε ότι αφορά στην ταχύτητα πλεύσης των 18 κόμβων. Βελτίωση επίσης παρουσιάζεται και στην υψηλή ταχύτητα παρόλο που αυτή είναι μικρότερη σε σχέση με εκείνη της χαμηλής. Σε κάθε περίπτωση πάντως η νέα γάστρα είναι αρκετά καλύτερη από την πατρική.



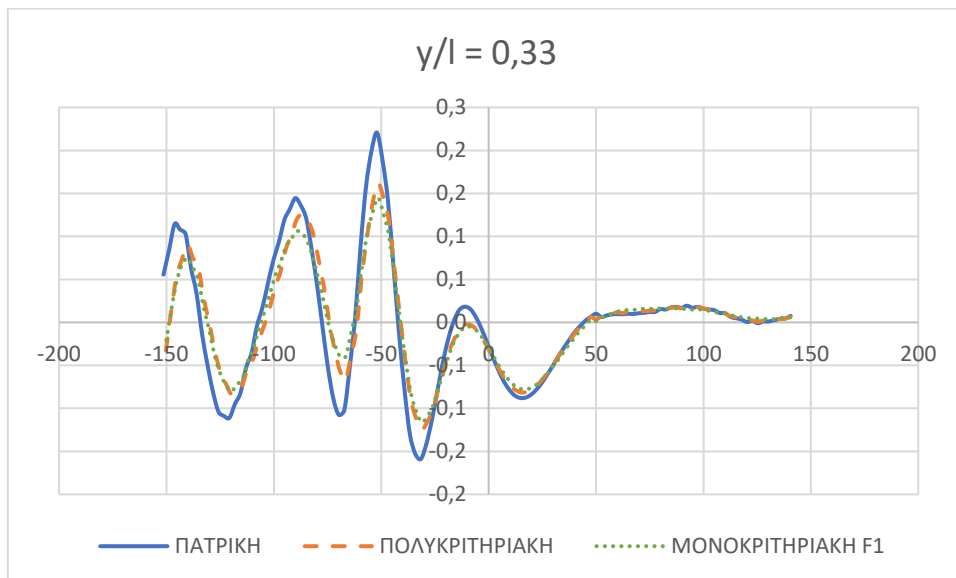
Σχήμα 14: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών $Fr: 0.25$, $\gamma/L = 0.23$



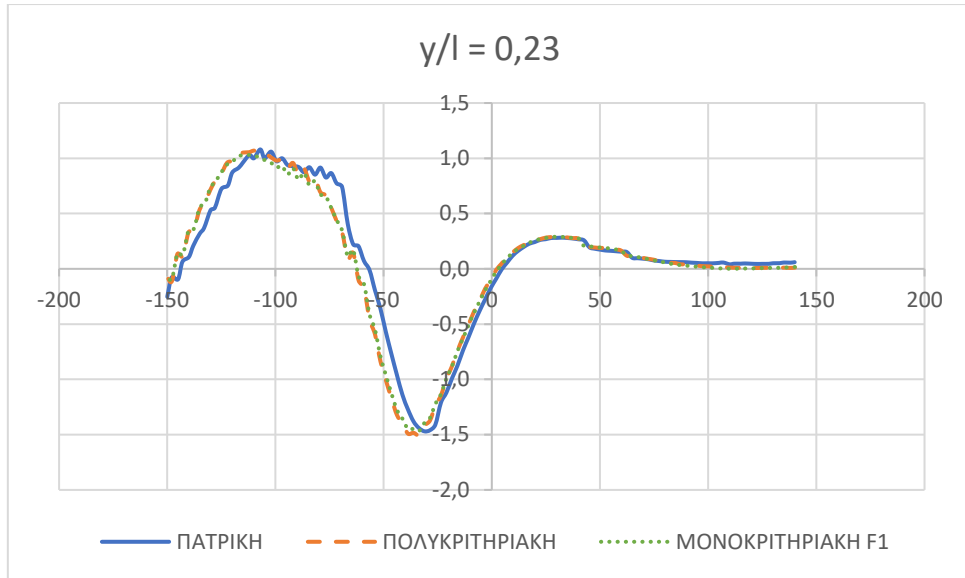
Σχήμα 15: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών $Fr: 0.25$, $\gamma/L = 0.26$



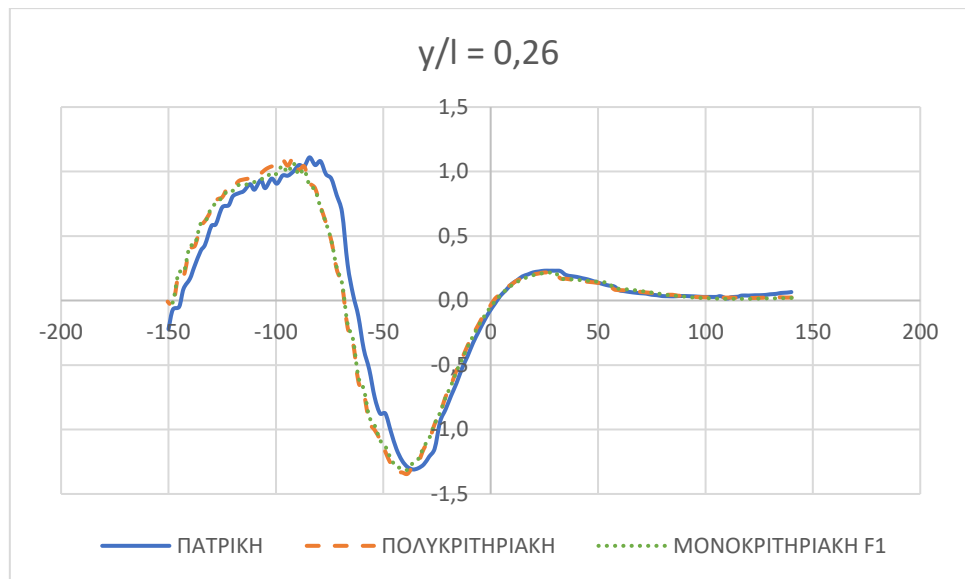
Σχήμα 16: Σύγκριση διαμήκουσ τομής παραγόμενων κυματισμών $Fr: 0.25$, $\gamma/L = 0.3$



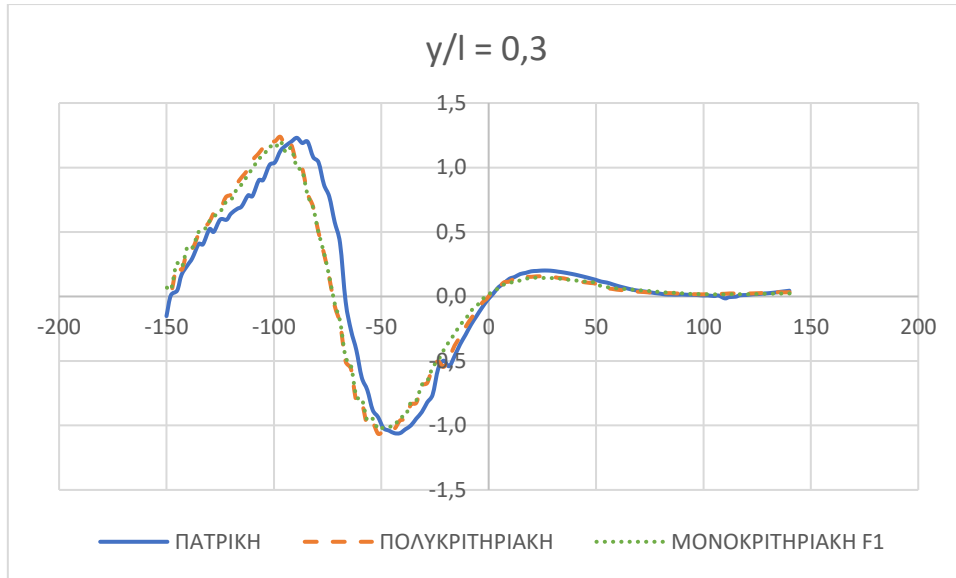
Σχήμα 17: Σύγκριση διαμήκουσ τομής παραγόμενων κυματισμών $Fr: 0.25$, $\gamma/L = 0.33$



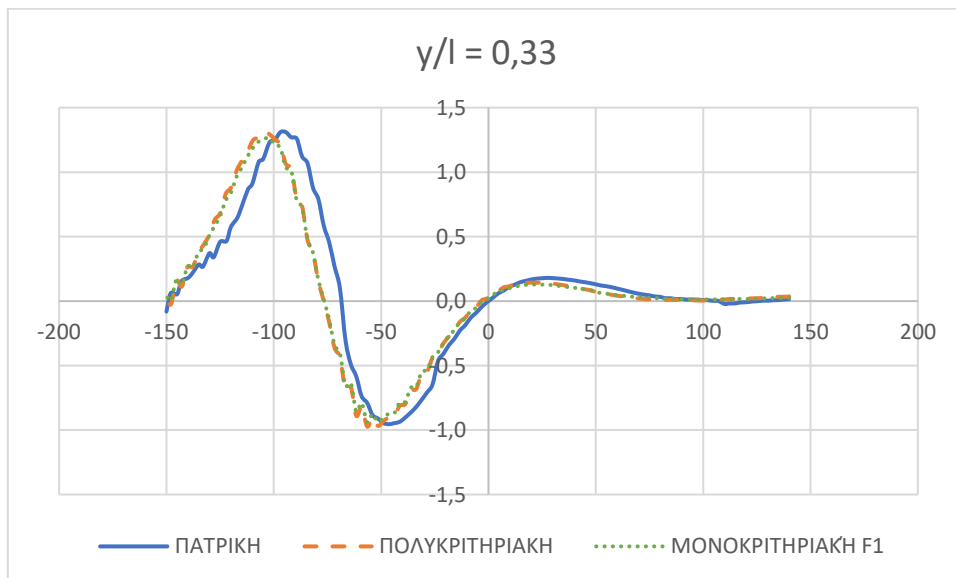
Σχήμα 18: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών $Fr: 0.41$, $\gamma/L = 0.23$



Σχήμα 19: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών $Fr: 0.41$, $\gamma/L = 0.26$



Σχήμα 20: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών $Fr: 0.41$, $y/L = 0.3$



Σχήμα 21: Σύγκριση διαμήκους τομής παραγόμενων κυματισμών $Fr: 0.41$, $y/L = 0.33$

Οι παραπάνω παρατηρήσεις συνηγορούν στο ότι οι βελτίωση της συμπεριφοράς ενός πλοίου όσον αφορά στην αντίσταση που αυτό παρουσιάζει κατά την πλεύση του και της δυναμικής του συμπεριφοράς σε κυματισμό είναι στόχοι εν γένει αντικρουόμενοι, συμπέρασμα στο οποίο είχαμε οδηγηθεί και στα προηγούμενα. Αυτή τη φορά η βελτιστοποίηση που έλαβε χώρα ήταν απαλλαγμένη από τη “δουλειά” της ταυτόχρονης βελτίωσης και του κριτηρίου της αντικειμενικής συνάρτησης F_2 . Κατ’

αυτόν τον τρόπο η διαδικασία απέφερε σημαντική βελτίωση της αντίστασης που το πλοίο παρουσιάζει.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ -ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Από τις προηγούμενες παραγράφους γίνεται σαφές πως η μεθοδολογία και η εν γένει διαδικασία που ακολουθήθηκε απέδωσαν τα αναμενόμενα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα επετεύχθη σημαντική μείωση της αντίστασης του πλοίου, στόχος που εξ αρχής είχε τεθεί ως ο βαρύνων μεταξύ των δύο που αποτέλεσαν τα κριτήρια της έρευνάς μας. Επιπλέον, βελτιώθηκε η δυναμική συμπεριφορά του πλοίου σε κυματισμό, αν και η βελτίωση αυτή υπήρξε μικρότερη συγκρινόμενη με την προαναφερθείσα της αντίστασης. Λαμβάνοντας αυτά τα αποτελέσματα όπως, εμφανίζονται και στον πίνακα (7), μπορούμε να συμπεράνουμε πως η διαδικασία της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης αποτελεί ένα χρήσιμο εργαλείο στα χέρια του ναυπηγού μηχανολόγου μηχανικού το οποίο μπορεί να προσφέρει ουσιώδη αποτελέσματα σε μικρό χρονικό διάστημα. Αντιλαμβάνεται κανείς πως ο πειραματισμός σε υπό κλίμακα μοντέλα των εναλλακτικών γεωμετριών με χρήση δεξαμενής δοκιμών θα ήταν ασύμφορος τόσο από άποψη χρόνου όσο και από οικονομικής απόψεως.

Ωστόσο, είναι σημαντικό να τονιστεί πως η διαδικασία θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη παραπάνω του ενός κριτήρια προκειμένου να αποφευχθούν ανεπιθύμητες ‘παρενέργειες’ στη συμπεριφορά και στις επιδόσεις της τελικής γεωμετρίας. Για παράδειγμα διαπιστώσαμε πως η μέγιστη βελτιστοποίηση ως προς ένα μόνον κριτήριο επιφέρει σημαντικότερη επιδείνωση ως προς το άλλο κατά τη διάρκεια της ταυτόχρονης εμπλοκής και των δύο κριτηρίων στην όλη διαδικασία. Επιπλέον, θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να λαμβάνονται μέτρα ώστε η τελική γεωμετρία να παραμένει εφικτή και λειτουργική. Αυτό σημαίνει πως οι παράμετροι σχεδίασης καθώς επίσης και τα εύρη τιμών τους θα πρέπει να επιλέγονται με ιδιαίτερη προσοχή και κατά τρόπον ώστε:

- Να επιτρέπουν τη μέγιστη δυνατή αλλαγή των χαρακτηριστικών της αρχικής γεωμετρίας και συγχρόνως,
- Να εξασφαλίζουν την ομαλότητα, τη λειτουργικότητα και τη δυνατότητα εκπλήρωσης της αποστολής του σκάφους που θα προκύψει.

Η ταυτόχρονη εξασφάλιση των παραπάνω θα επιτρέψει μέγιστη ελευθερία κατά τη δημιουργία εναλλακτικών γεωμετριών, προστατεύοντας παράλληλα την τελική σχεδίαση από μη επιθυμητά χαρακτηριστικά που ενδεχομένως να την καθιστούν δύσχρηστη ή ακόμα και μη λειτουργική.

ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Παρά τα εντυπωσιακά αποτελέσματα που εξήχθησαν κατά την παρούσα έρευνα είναι σημαντικό αυτά να επιβεβαιωθούν και πειραματικά με τη χρήση υπό κλίμακα μοντέλου της επιλεγθείσας γεωμετρίας. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που θα πραγματοποιηθούν στη δεξαμενή προτύπων είναι εκείνα που τελικά θα καθορίσουν την επιτυχία ή όχι της διαδικασίας που ακολουθήθηκε.

Επιπλέον, μελλοντικοί ερευνητές θα μπορούσαν να πειραματιστούν χρησιμοποιώντας διαφορετικές παραμέτρους σχεδίασης που θα οδηγήσουν στη δημιουργία και δοκιμή άλλων γεωμετριών προς αναζήτηση της βέλτιστης εστιάζοντας, ενδεχομένως, ακόμα περισσότερο στο κομμάτι των καθέτων επιταχύνσεων. Παρόμοια επίδραση στις παραχθείσες γεωμετρίες θα μπορούσε επίσης να επιφέρει μια διαφορετική παραμετρική μοντελοποίηση της πατρικής γάστρας. Ακόμα και με τη χρήση των ίδιων μεταβλητών σχεδίασης που εφαρμόστηκαν και σε αυτήν την έρευνα, η διαφορετική παραμετροποίηση και μοντελοποίηση της αρχικής, πατρικής γεωμετρίας μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία διαφορετικών εναλλακτικών γεωμετριών από αυτές που εδώ παρήχθησαν.

Επιπρόσθετα, η εκτέλεση μονοκριτηριακών προσπαθειών βελτιστοποίησης πρέπει να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής έρευνας, καθώς θα προσφέρει ξεκάθαρες πληροφορίες για την επιρροή κάθε μεταβλητής και παραμέτρου σχεδίασεως σε κάθε ένα από τα διάφορα κριτήρια βελτιστοποίησης. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να εξεταστεί η συνεισφορά των παραμέτρων αποκλειστικά σε μια κάθε φορά από τις αντικειμενικές συναρτήσεις, χωρίς την επίδραση των υπολοίπων.

Τέλος, σημαντικό ρόλο στην έρευνά μας διαδραμάτισαν τα υπολογιστικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν. Η μελλοντική χρήση πιο σύγχρονων, ακριβέστερων και ισχυρότερων υπολογιστικών εργαλείων ίσως οδηγήσει σε γεωμετρία βελτιωμένων χαρακτηριστικών και συνεπώς καλύτερων επιδόσεων. Ακόμα και η χρήση διαφορετικών παραμέτρων για τον αλγόριθμο που χρησιμοποιήθηκε (ή και εντελώς

άλλου αλγορίθμου) ενδέχεται να βελτιώσει περαιτέρω τις επιδόσεις της τελικής γεωμετρίας που θα παραχθεί.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

A. J. Brown – J. Salcedo “Multiple-Objective Optimization in Naval Ship Design”, paper (Naval Engineers Journal, vol 115, No.4, pp.49-61), 2003

Abt, C.; Harries S., Heimann, J., Winter, H., (2003), From Redesign to Optimal Hull Lines by means of Parametric Modelling, 2nd Intl. Conf. Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries, COMPIT 2003, Hamburg

Aloniati Eleni Irini, “Parametric design and optimization of the hydrodynamic performance of DTMB 5415M with respect to sonar dome’s design variables”, Athens, 2015

Anderson T.J., “Operational Profiling and Statistical Analysis of Arleigh Burke-class Destroyers”, Master Thesis, MIT, 2013

Aravind Seshardi, «A Fast Elitist Multi-Objective Genetic Algorithm: NSGAIII»

Athanassoulis G.A., Loukakis T.A., “An Extended-Lewis Form Family of Ship Sections and Its Applications to Seakeeping Calculations”, I.S.P., Vol. 32, No.366, pp.33-43, 1985

Athanassoulis G.A., Belibasakis K.A., “Ship Dynamics”, Lecture Notes, NTUA, Athens, 2012

Avanzini, G., Benedetti, L., and Penna, R., "Experimental Evaluation of Ship Resistance for RANS Code Validation", ISOPE '98, Montreal, Canada, Maggio 1998

Bailey, P.A., Hudson, D.A., Price, W.G., Temarel, P. (2000), Comparisons between Theory and Experiment in a Seakeeping Validation Study, Trans. RINA, 142, pp. 44-77

Caeses.com, (2014). The CAE system Friendship Framework, [online]

Chen X., Diez M., Kandasamy M., Zhang Z., Campana E.F., Stern F., “Highfidelity global optimization of shape design by dimensionality reduction, metamodels and deterministic particle swarm.” Engineering Optimization 47(4) (2015):473-494

Cusanelli D.S., Karafiath G., “Hydrodynamic Energy Saving Enhancements for DDG 51 Class Ships”, ASNE, 2012

Danisman D.B., Mesbahi E., Atlar M., Goren O., “A New Hull Form Optimisation Technique For Minimum Wave Resistance.” 10th IMAM Congress, Crete, Greece, (13-17 May 2002)

Danisman D.B., “Reduction of demi-hull wave interference resistance in fast displacement catamarans utilizing an optimized centerbulb concept.” *Ocean Engineering* 91 (2014):227–234

Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T., A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *Evolutionary Computation*, IEEE Transactions, Vol. 6, Issue 2, 2002

Deng G., Queutey P., Visonneau M., “Three-dimensional flow computation with Reynolds stress and algebraic stress models.” in Rodi W., Mulas M. eds, *Engineering Turbulence Modelling and Experiments* 6 (2006): 389-398

Diez M., Peri D., “Robust optimization for ship conceptual design.” *Ocean Engineering* 37(11) (2010)

Diez M., Volpi S., Serani A., Stern F., Campana E.F., “Simulation-based Design Optimization by Sequential Multi-criterion Adaptive Sampling and Dynamic Radial Basis Functions.” In Proc. EUROGEN 2015 – International Conference on Evolutionary and Deterministic Methods for Design, Optimization and Control with Applications to Industrial and Societal Problems, University of Strathclyde, Glasgow, UK, (14-16 Sept. 2015)

Diez, M., Serani, A., Campana, E.F., Goren, O., Sarioz, K., Danisman, D.B., Grigoropoulos, G., Aloniati, E., Visonneau, M., Queutey, P., and Stern, F. (2015). Multi-objective Hydrodynamic Optimization of the DTMB 5415 for Resistance and Seakeeping, Research Paper conducted within the NATO RTO Task Group AVT-204 Fas.org, (2014). DDG-51 ARLEIGH BURKE-class, [online]

Frank Manual

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

Friendship Systems, (2012), *Friendship Framework User’s Guide*

G.J. Grigoropoulos, T. A. Loukakis, Resistance and Seakeeping Characteristics of a Systematic Series in the Pre-planing Condition

Grigoropoulos G.J. (1989), Hull Form Optimization with Respect to Seakeeping, PhD Thesis, NTUA, Dept. of Naval Arch. and Marine Eng., Athens, Greece, May.

Grigoropoulos G.J., Athanasoulis G.A., “Seakeeping, Part A: Theoretical Analysis”, Lecture Notes, NTUA, Athens, 1998

Grigoropoulos G.J., “Hydrodynamics and Aerodynamics of Sailing Yachts”, Lecture Notes, NTUA, Athens, 1999

Grigoropoulos G.J., “Hull Form optimization for hydrodynamic performance, Marine Technology”, Vol. 41, No. 4, 2004

Grigoropoulos G.J., “Seakeeping, Part B: Application in Ship Design and Operation”, Lecture Notes, NTUA, Athens, 2004

Grigoropoulos, G.J., Chalkias, (2010), Hull-Form Optimization in Calm and Rough Water, Computer Aided Design 42, pp. 977-984

Grigoropoulos G.J., Damala D., (2011), Dynamic Performance of the NTUA Double-Chine Series Hull Forms in Random Waves

Grigoropoulos G.J., Perdikari T., Asouti V., Giannakoglou K., (2011), MDO of Hull Forms Using Low-Cost Evolutionary Algorithms

Grigoropoulos, G., Bassler, C., Bordier, L., Goren, O., Abdel-Maksoud, M., Visonneau, M. (2014). AVT-204. In: Minutes of Copenhagen Meetings

Grossi, L., Dogliani, M. (2000), Load and Seakeeping Assessment of HSC Based on Full-Scale Monitoring, Intl. Conf. On Ship and Shipping Research NAV 2000, Paper 2.8, Venice, Sept. 19-22.

Guilmineau E., Chikhaoui O., Deng G.B., Visonneau M., “Cross wind effects on a simplified car model by a DES approach.” Computers and Fluids 78 (2013): 29-40.

Guldhammer H.E., Harvald Sv. Aa., ‘‘Ship Resistance: Effect of Form and Principal Dimensions’’, Copenhagen, 1974

Harvald Sv.Aa., ‘‘Resistance and Propulsion of Ships’’, Denmark, 1983

Heimann, J. (2006), CFD-based Optimization of the Wave-Making Characteristics of Ship Hulls, *Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft e.V.*, 101, pp. 234-249

Kalyanmoy Deb, Sameer Agarwal, T. Meyarivan, (2002) A fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm : NSGA-II 83

Kandasamy M., Wu P.C., Zalek S., Karr D., Bartlett S., Nguyen L. and Stern F., ‘‘CFD based Hydrodynamic Optimization and Structural Analysis of the Hybrid Ship Hull’’, Research Gate, 2014

Kring, D., Sclavounos, P. Numerical Stability Analysis for Time-Domain Ship Motion Simulations. *Journal of Ship Research*, Vol. 39, No. 4, pp. 313-320, 1995.

Kyrtatos N.P., ‘‘Basic Principals of Propulsion of Ships’’, Lecture Notes (in Greek) NTUA, Athens, 2007

Larsson L., Eliasson R.E., ‘‘Principals of Yacht Design’’, London, 2000

Larsson L., Raven H.C., ‘‘Ship Resistance and Flow’’, New Jersey, 2010

Leroyer A., Visonneau M., ‘‘Numerical methods for RANS simulations of a selfpropelled fish-like body.’’ *Journal of Fluid and Structures* 20(3) (2005): 975-991.

Lewandowski E.M., ‘‘The Dynamics of Marine Craft: Maneuvering and Seakeeping’’, Washington DC, 2004

Li H., Landa-Silva D., An Adaptive Evolutionary Multi-Objective Approach Based on Simulated Annealing

Li, S.,Z., Zhao, F., Ni, Q.,J., (2014) Bow and Stern Shape Integrated Optimization for A Full Ship by a Simulation Based Design Technique, *Journal of Ship Research*, Vol. 58, No2, June

Longo J., Stern F., ‘‘Uncertainty Assessment for Towing Tank Tests with Example for Surface Combatant DTMB Model 5415.’’ *J. Ship Research*. 49(1) (2005): 55-68

Ma. Guadalupe Castillio Tapia, Carlos A. Coello Coello, «Applications of Multi-Objective Evolutionary Algorithms in Economics and Finance : A Survey»

MARIN, (2009). Seakeeping tests for 5415m destroyer, Challenging wind and waves - Linking Hydrodynamic research to the maritime industry, Data Report

MARIN, (2011). Simulation of the roll decay motion and behaviour in Waves of 5415m, Challenging wind and waves - Linking Hydrodynamic research to the maritime industry, Data Report

Molland A.F., Wellicome J.F., Couser P.R., (1995), Resistance experiments on a systematic series of high speed displacement catamaran forms: variation of length displacement ratio and breadth-draught ratio

Molland A.F., Turnock S.R., Hudson D.A., “Ship Resistance and Propulsion”, New York, 2011

Naderia B., Sadeghib H., (2011), A Multi-objective Simulated Annealing Algorithm for Solving the Flexible no-wait Flowshop Scheduling Problem with Transportation Times

NATO AVT-161 working group, (2011). NATO AVT-161: instructions for roll damping and seakeeping simulations, MARIN - Challenging wind and waves - Linking Hydrodynamic research to the maritime industry, Data Report

Ohkusu, M., (1996), Advances in Marine Hydrodynamics, Chapter 4

Olivieri A., Pistani F., Avanzini A., Stern F., Penna R., “Towing tank, sinkage and trim, boundary layer, wake, and free surface flow around a naval combatant INSEAN 2340 model.” Tech. rep., DTIC Document (2001)

Papanikolaou et al., Integrated Design and Multiobjective Optimization Approach to Ship Design

Pellegrini, R., Campana, E., Diez, M., Serani, A., et al. (2014), Application of Derivative Free Multi-Objective Algorithms to Reliability-Based Robust Design Optimization of a High Speed Catamaran in Real Ocean Environment, 29th Symposium on Naval Hydrodynamics, Gothenburg, Sweden, August

Queutey P., Visonneau M., “An interface capturing method for free-surface hydrodynamic flows.” *Computers and Fluids* 36(9) (2007): 1481-1510

Rourke R., “Navy DDG-51 and DDG-1000 Destroyer Programs: Background and Issues for Congress”, Congressional Research Service, 2015

Salvesen N., Tuck E.O., Faltinsen O. (1970), *Ship Motions and Sea Loads*, Trans. SNAME, 78, pp. 250-287

Schlichting H., Gersten K., *Boundary-Layer Theory*, Springer-Verlag, Berlin (2000)

Schneekluth H., Bertram V., “Ship Design for Efficiency and Economy”, 2004

Sclavounos, P.D. (1996), *Computation of Wave Ship Interactions*, *Advances in Marine Hydrodynamics*, ed. by M. Qhkus, Computational Mechanics Publ.

Serani A., Diez M., Leotardi C., Peri D., Fasano G., Iemma U., Campana E.F., “On the use of synchronous and asynchronous single-objective deterministic particle swarm optimization in ship design problems.” In Proc. OPT-i 2014 - 1st International Conference in Engineering and Applied Sciences Optimization, Kos, Greece (4-6 June 2014)

Serani A., Fasano G., Liuzzi G., Lucidi G., Iemma U., Campana E.F., Diez M., “Derivative-free global design optimization in ship hydrodynamics by local hybridization.” In Proc. 14th International Conference on Computer Application and Information Technology in the Maritime Industries, Ulrichshusen, Germany (11-13 May 2015b): 331-342

Serani A., Diez M., Campana E.F., “Single- and multi-objective design optimization study for DTMB 5415, based on low-fidelity solvers.” INSEAN Tech, rep. 2015-TR-002 (2015a)

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

Suman B., Kumar P, (2006), *A survey of simulated annealing as a tool for single and multiobjective optimization*

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

TU Delft, (2002) Introduction in Ship Hydromechanics

Tzabiras G., ‘‘A method for predicting the influence of an additive bulb on ship resistance,’’ Proceedings of the 8th International Conference on Hydrodynamics, Nantes (2008): 53-60

Watson D.G.M. , ‘‘Practical Ship Design’’, The Netherlands, 2002

www.cenaero.be, (2014). Pareto Front. [online]

._*_*_*_*_*_*_*_*_

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, (2015). Προβλήματα Βελτιστοποίησης, Μαθηματική θεωρία Βελτιστοποίησης, Κεφάλαιο 1

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, (2015). Πρόωση Πλοίου: Γενικές Αρχές, Βασική Θεωρία Πλοίου, Κεφάλαιο 10.

Ζαραφωνίτη Γ., Μελέτη και Σχεδίαση Πλοίων Νέας Τεχνολογίας

Μακρής, Δ. (2012). Δυνατότητες της παραμετρικής μοντελοποίησης για τη βελτιστοποίηση της σχεδίασης πλοίων, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών

Παπαζανάκης, Γ. (2007). Ανάπτυξη πιθανοθεωρητικού μοντέλου για την διερεύνηση δυναμικών αποκρίσεων πλοίου σε κυματισμούς & εφαρμογή του με χρήση των προγραμμάτων NEWDRIFT & PROBAN, Μεταπτυχιακή Εργασία, ΕΜΠ, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών

Πετρόπουλος, Γ. (2012). Λειτουργησιμότητα μεγάλων ναυτικών μονάδων στο θαλάσσιο περιβάλλον του Αιγαίου πελάγους ως προς τη δυναμική συμπεριφορά, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών

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

Πολυτεχνική Σχολή/Πανεπιστήμιο Πατρών, (2012). Βελτιστοποίηση, Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής

Πούλιος, Π. (2008). Συγκριτική μελέτη δυναμικών αποκρίσεων πλοίων σε

Κυματισμούς, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών

Σκουντζούρης, Φ. (2012). Πειραματική διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς ταχύπλοων σκαφών με διπλή ακμή σε τυχαίους κυματισμούς, Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών

Χατζηπαναγιώτου, Ε. (2009). Πολυ-κριτηριακή βελτιστοποίηση της δυναμικής συμπεριφοράς φρεγάτας ως προς την άνεση του πληρώματος και την επιχειρησιακή υποστήριξη ελικοπτέρου, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, ΕΜΠ, Τομέας Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

TO BATCH FILE

```
Copy C:\Users\Stavros.Stavros-PC\Desktop\programs\sections_SWAN2.exe sections_SWAN2.exe
copy C:\Users\Stavros.Stavros-PC\Desktop\programs\shf2pln.exe shf2pln.exe
copy C:\Users\Stavros.Stavros-PC\Desktop\programs\lter_swan2.exe lter_swan2.exe
copy C:\Users\Stavros.Stavros-PC\Desktop\programs\makessg.exe makessg.exe
copy C:\Users\Stavros.Stavros-PC\Desktop\programs\set_mak.exe set_mak.exe
copy C:\Users\Stavros.Stavros-PC\Desktop\programs\solve.exe solve.exe
copy C:\Users\Stavros.Stavros-PC\Desktop\programs\swaninp swaninp
copy C:\Users\Stavros.Stavros-PC\Desktop\programs\sections_frank.exe sections_frank.exe
copy C:\Users\Stavros.Stavros-PC\Desktop\programs\shf2frk0248.exe shf2frk0248.exe
copy C:\Users\Stavros.Stavros-PC\Desktop\programs\shf2frk0413.exe shf2frk0413.exe
copy C:\Users\Stavros.Stavros-PC\Desktop\programs\Frank52.exe Frank52.exe
copy C:\Users\Stavros.Stavros-PC\Desktop\programs\irreg651.exe irreg651.exe
copy C:\Users\Stavros.Stavros-PC\Desktop\programs\results.exe results.exe
```

```
sections_frank.exe
shf2frk0248.exe
Frank52.exe
irreg651.exe superfas.1.1.1
ren superfas.frk superfasprv.frk
ren superfas.IRR superfasprv.IRR
ren superfas.RRD superfasprv.RRD
ren superfas.R1 superfasprv.R1
ren superfas.R2 superfasprv.R2
ren superfas.R3 superfasprv.R3
ren superfas.VER superfasprv.VER
ren test.txt testprv.txt
shf2frk0413.exe
Frank52.exe
irreg651.exe superfas.1.1.1
sections_SWAN2.exe
shf2pln.exe
lter_swan2.exe
copy C:\Users\Stavros.Stavros-PC\Desktop\programs\swaninp2 swaninp
```

```
del superfas.ssg
del superfas.geo
del superfas.joul
del superfas.jou1a
del superfas.jou2
del superfas.jou3
del superfas.jou4
del superfas.jou5
del superfas.jou6
del superfas.jou7
del superfas.jou7a
del superfas.wp
del superfas*.wake
del fort.82
del fort.83
del fort.84
del fort.85
del fort.86
del fort.95
del Convergence.out
```

```
ren superfas.out superfas2.out
```

```
ltter_swan2.exe  
results.exe  
del superfas.jou1  
del superfas.jou2  
del superfas.jou3  
del superfas.jou4
```