



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΛΟΙΟΥ ΚΑΙ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΓΑΣΤΡΑΣ ΔΙΓΑΣΤΡΟΥ ΕΠΙΒΑΤΗΓΟΥ- ΟΧΗΜΑΤΑΓΩΓΟΥ ΠΛΟΙΟΥ ΑΝΟΙΧΤΟΥ ΤΥΠΟΥ

Διπλωματική εργασία

του

Ξενοφώντος Β. Πελοποννήσιου

Επιβλέπων: Γεώργιος Ν. Ζαραφονίτης, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2021

Πρόλογος

Το παρόν αποτελεί το τελευταίο κεφάλαιο της φοίτησής μου στο προπτυχιακό τμήμα της σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η διπλωματική μου εργασία είχε αντικείμενο που εμπίπτει σε ένα επιστημονικό πεδίο στο οποίο δραστηριοποιούνται τόσο ο τομέας Μελέτης Πλοίου και Θαλασσίων Μεταφορών όσο και ο τομέας Ναυτικής και Θαλάσσιας Υδροδυναμικής.

Αντικείμενο της διπλωματικής μου εργασίας αποτέλεσε η σχεδιαστική βελτιστοποίηση της γάστρας ενός δίγαστρου επιβατηγού-οχηματαγωγού πλοίου ανοιχτού τύπου. Η εκπόνηση της εργασίας μου συνεισέφερε στην αισθητή ανάπτυξη των γνώσεών μου στα γνωστικά πεδία της παραμετρικής σχεδίασης, της υδροδυναμικής και της σχεδιαστικής βελτιστοποίησης.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές της σχολής για την συνεισφορά τους στη διαμόρφωση του τρόπου σκέψης μου ως νέου μηχανικού. Τις ιδιαίτερες ευχαριστίες μου θα ήθελα να εκφράσω στον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Γεώργιο Ζαραφονίτη, αφενός για την ευκαιρία που μου παρείχε να ενασχοληθώ με ένα θέμα που με ενδιέφερε ιδιαίτερα και αφετέρου για την πολύτιμη καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Επιπρόσθετα θα ήθελα να αποδώσω ευχαριστίες για την πολύτιμη συνδρομή τους στην εκπόνηση της εργασίας μου στην υποψήφια διδάκτορα κα. Αφροδίτη Κανελλοπούλου για την καθοδήγησή της κατά τη διάρκεια ενασχόλησής μου με το λογισμικό του CAESES, καθώς και στο μέλος του ειδικού τεχνικού εργαστηριακού προσωπικού της σχολής κ. Δημήτρη Μουρκογιάννη για την καθοδήγησή του τόσο κατά τη φάση της γνωριμίας και αρχικής εξοικείωσής μου με το λογισμικό του Shipflow όσο και στο θεωρητικό υπόβαθρο που σχετιζόταν με αυτό. Θα ήθελα τέλος να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για τη στήριξη και τη συμπαράσταση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Ξενοφών Πελοποννήσιος

Αθήνα 2021

Περιεχόμενα

Εισαγωγή.....	1
1 Τα CAD και CAE συστήματα και το CAESES	3
1.1 Τρόποι γεωμετρικής αναπαράστασης της μορφής της γάστρας του πλοίου	3
1.2 Φιλοσοφίες γεωμετρικής μοντελοποίησης.....	4
1.3 Ενσωμάτωση των CAE στα CAD συστήματα	5
1.4 Το λογισμικό του CAESES.....	6
1.4.1 Γενική περιγραφή.....	6
1.4.2 Βασικά σχεδιαστικά εργαλεία του λογισμικού	7
1.4.3 Παραμετρική σχεδίαση με χρήση των feature definitions.....	10
2 Το παραμετρικό μοντέλο της ημιγάστρας.....	13
2.1 Μοντελοποίηση της γυμνής ημιγάστρας.....	13
2.1.1 Βασικές καμπύλες	15
2.1.2 Βασικές παράμετροι	17
2.1.3 Διαδικασία δημιουργίας επιφανειών	21
2.2 Εκτίμηση μέγιστης δυνατής διαμέτρου έλικας.....	25
2.3 Εκλογή των παραμέτρων που μετετράπησαν σε μεταβλητές σχεδίασης.....	28
2.4 Πρόσθετες βασικές βοηθητικές οντότητες.....	29
3 Υδροδυναμική ανάλυση.....	31
3.1 Διατύπωση του προβλήματος συνοριακών συνθηκών της κίνησης πλοίου με σταθερή ευθύγραμμη ταχύτητα σε αρχικώς ήρεμο νερό	31
3.2 Μη γραμμικό και γραμμικοποιημένο πρόβλημα.....	33
3.3 Οι μέθοδοι των συνοριακών στοιχείων με κατανομή πηγών Rankine.....	34
3.4 Αριθμητική προσέγγιση της αντίστασης κυματισμού του μη γραμμικού προβλήματος μέσω χρήσης συνοριακών στοιχείων πηγών Rankine.....	35
3.5 Αποσύνθεση της ολικής αντίστασης του δίγαστρου πλοίου	37
3.6 Το λογισμικό υπολογιστικής υδροδυναμικής του Shipflow.....	38
3.6.1 Γενική περιγραφή.....	38
3.6.2 Τα δομοστοιχεία του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκαν	39
3.6.3 Βασικές εντολές που χρησιμοποιήθηκαν	40
3.6.4 Σύζευξη Shipflow και CAESES.....	42
3.7 Το διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας.....	44
3.8 Εκτίμηση των συντελεστών αλληλεπίδρασης έλικας-γάστρας.....	46
3.8.1 Πραγματικό ποσοστό ομόρου	46
3.8.2 Ποσοστό μείωσης ώσης	47
3.8.3 Βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής	48

3.9	Ο συντελεστής πρόωσης	49
3.10	Το πρόγραμμα του GRID	50
3.10.1	Εμπλεκόμενα μεγέθη των αρχείων εισόδου και εξόδου του προγράμματος... ..	50
3.10.2	Σύζευξη GRID και CAESES.....	51
4	Η σχεδιαστική βελτιστοποίηση	53
4.1	Γενική περιγραφή	53
4.2	Τεχνικές αναζήτησης βέλτιστης λύσης	55
4.3	Η διαδικασία του σχεδιασμού πειραμάτων και ο αλγόριθμος Sobol	56
4.4	Οι γενετικοί αλγόριθμοι	58
4.4.1	Ο μηχανισμός της βιολογικής εξέλιξης.....	58
4.4.2	Ο αλγόριθμος NSGA-II.....	59
4.5	Καθορισμός του προβλήματος βελτιστοποίησης του παρόντος παραμετρικού μοντέλου.....	61
4.5.1	Επιλογή των μεταβλητών σχεδίασης.....	61
4.5.2	Καθορισμός της αντικειμενικής συνάρτησης.....	62
4.5.3	Προσδιορισμός των περιορισμών.....	62
5	Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων	66
5.1	Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων Sobol και NSGA-II.....	66
5.1.1	Διαγράμματα χρονικής ιστορίας τρεξιμάτων	66
5.1.2	Διαγράμματα των παραμέτρων αξιολόγησης.....	71
5.1.3	Διαγράμματα της αντικειμενικής συνάρτησης.....	73
5.2	Αποτελέσματα αρχικής και βέλτιστης γάστρας	84
5.2.1	Μεταβλητές σχεδίασης και κύριες διαστάσεις.....	84
5.2.2	Υδροστατικά και υδροδυναμικά στοιχεία και στοιχεία πρόωσης	85
5.2.3	Body plans ημιγαστρών.....	88
5.2.4	Διαγράμματα συναρτήσεως του αριθμού Froude και της ταχύτητας πλεύσης... ..	89
6	Σύνοψη και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη	95
6.1	Σύνοψη	95
6.2	Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη	96
	Βιβλιογραφία.....	97
	Παραρτήματα	100
A.	Αλγόριθμοι βασικών feature definitions που χρησιμοποιήθηκαν	100
A.1	Αλγόριθμος feature definition εύρεσης βυθίσματος υδροστατικής ισορροπίας ισοβύθιστης κατάστασης.....	100
A.2	Αλγόριθμος feature definition δημιουργίας τυχαίας αφηρημένης εγκάρσιας τομής της γάστρας	101
A.3	Αλγόριθμος feature definition εύρεσης της μέγιστης δυνατής διαμέτρου της έλικας και των απαιτούμενων αποστάσεων της από το πηδάλιο, τη γάστρα και το βασικό επίπεδο αναφοράς	101

A.4	Αλγόριθμος feature definition εύρεσης των συντελεστών αυτοπρόωσης.....	102
A.5	Αλγόριθμος feature definition εύρεσης των SHP_{min} , $P.C._{max}$ και των n και PD που αντιστοιχούν σε αυτές	103
A.6	Αλγόριθμος feature definition εύρεσης της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος βελτιστοποίησης.....	103
B.	Αρχείο διαμόρφωσης Shipflow αρχικής γάστρας	104

Περιεχόμενα σχήματα

Σχήμα 1: Γραφικό περιβάλλον χρήστη του CAESES	7
Σχήμα 2: Διαδικασία δημιουργίας παραμετρικής επιφάνειας με χρήση μιας meta surface (Friendship Systems).....	12
Σχήμα 3: Καμπύλη τρόπιδας	15
Σχήμα 4: Καμπύλη διαμήκους κατανομής ημιπλάτους καταστρώματος	15
Σχήμα 5: Καμπύλη ισάλου σχεδίασης.....	16
Σχήμα 6: Κανονικοποιημένη καμπύλη γωνίας εισόδου πλώρης.....	16
Σχήμα 7: Καμπύλη διαμήκους κατανομής flare.....	16
Σχήμα 8: Καμπύλη διαμήκους κατανομής διαμήκους θέσης εγκαρσίων τομών πλοίου.....	17
Σχήμα 9: Ορισμός απόστασης ημιγαστρών δίγαστρου πλοίου (Ramsani, Tam, & Dev, 2016)	18
Σχήμα 10: Καμπύλη τρόπιδας με το σημείο της αρχής της ($x=0$), το πρώτο ενδιάμεσο σημείο της (αριστερό κίτρινο σημείο) και το δεύτερο ενδιάμεσο σημείο της (δεξιό κίτρινο σημείο)	19
Σχήμα 11: Πρυμναίο τμήμα ημιγάστρας σε κοίλο $D=10$ m.....	22
Σχήμα 12: Πρωραίο τμήμα ημιγάστρας σε κοίλο $D=10$ m	23
Σχήμα 13: Παράλληλο τμήμα ημιγάστρας σε κοίλο $D=10$ m.....	23
Σχήμα 14: 1 ^η άποψη τελικής επιφάνειας ημιγάστρας παραμετρικού μοντέλου	24
Σχήμα 15: 2 ^η άποψη τελικής επιφάνειας ημιγάστρας παραμετρικού μοντέλου	24
Σχήμα 16: 3 ^η άποψη τελικής επιφάνειας ημιγάστρας παραμετρικού μοντέλου	25
Σχήμα 17 (α) & (β): Δίσκος της έλικας στην εκτιμώμενη διαμήκη θέση της (κίτρινη κατακόρυφη ευθεία) και ημιγάστρα του παραμετρικού μοντέλου.....	27
Σχήμα 18: Τυπικό πλέγμα γάστρας πλοίου αποτελούμενο από τετρακομβικά συνοριακά στοιχεία (Janson, Chalmers University of Technology, Spinney, & Rolls-Royce UK, A Comparison of Four Wave Cut Analysis Methods for Wave Resistance Prediction, 2004) ...	35
Σχήμα 19: Προσέγγιση σε ζώνες (Sahoo & Salas, 2007).....	39
Σχήμα 20: Διακριτοποίηση της ελεύθερης επιφάνειας στο Shipflow (Flowtech International AB)	41
Σχήμα 21: Offsets της τελικής επιφάνειας της ημιγάστρας πριν την είσοδό τους στο Shipflow	43
Σχήμα 22: Τυπικό διάγραμμα έλικας σε ελεύθερη ροή για διάφορους λόγους βήματος της έλικας (Πολίτης, 2018).....	45
Σχήμα 23: Τυπικό διάγραμμα μεγεθών έλικας σε ελεύθερη ροή και καμπύλης συντελεστή ώσης αυτοπροωθούμενου πλοίου (Stapersma & Woud, 2005).....	46
Σχήμα 24: Γενικευμένο πρόβλημα σχεδιαστικής βελτιστοποίησης πλοίου (Papanikolaou, 2009).....	54
Σχήμα 25: Μέτωπο Pareto εκτεινόμενο μεταξύ των βέλτιστων λύσεων f_{1o} και f_{2o} (Parsons & Thurnau, 2009)	55
Σχήμα 26: Τυπικό αποτέλεσμα εξερεύνησης του χώρου των σχεδιαστικών λύσεων με χρήση του αλγορίθμου Sobol (Couser, Harries, & Tillig, 2011).....	56
Σχήμα 27: Τμηματική κάλυψη του χώρου των σχεδιαστικών λύσεων με χρήση του αλγορίθμου Sobol (Azmin & Stobart, 2015).....	57
Σχήμα 28: Διαδικασία ταξινόμησης του γενετικού αλγορίθμου NSGA-II (Deb, Pratap, Agarwal, & Meyarivan, 2002).....	60

Σχήμα 29: Εμπλεκόμενα μεγέθη του πίνακα 4-3	65
Σχήμα 30: Ορισμός αποστάσεων έλικας-γάστρας, έλικας-πηδαλίου και έλικας-ποδοστήματος (Lloyd's Register, 2020)	65
Σχήμα 31: Χρονική ιστορία ισχύος ρυμούλκησης καθαρής γάστρας	67
Σχήμα 32: Χρονική ιστορία ισχύος πρόωσης καθαρής γάστρας.....	67
Σχήμα 33: Χρονική ιστορία συντελεστή πρόωσης καθαρής γάστρας.....	68
Σχήμα 34: Χρονική ιστορία ισχύος ρυμούλκησης ρυπασμένης γάστρας	68
Σχήμα 35: Χρονική ιστορία ισχύος πρόωσης ρυπασμένης γάστρας.....	69
Σχήμα 36: Χρονική ιστορία συντελεστή πρόωσης ρυπασμένης γάστρας.....	69
Σχήμα 37: Χρονική ιστορία σταθμισμένης ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύος πρόωσης.....	70
Σχήμα 38: Βύθισμα κατάστασης πλήρους φόρτωσης συναρτήσει του βυθίσματος σχεδίασης	71
Σχήμα 39: Βύθισμα κατάστασης πλήρους φόρτωσης συναρτήσει του πλάτους της ημιγάστρας	72
Σχήμα 40: Στατική βρεχόμενη επιφάνεια συναρτήσει του πλάτους της ημιγάστρας στην ίσαλο	72
Σχήμα 41: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει του πλάτους της ημιγάστρας στην ίσαλο	74
Σχήμα 42: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει του βυθίσματος της κατάστασης πλήρους φόρτωσης	74
Σχήμα 43: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει της στατικής βρεχόμενης επιφάνειας	75
Σχήμα 44: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το μήκος της ισάλου διαμήκους θέσης του κέντρου άντωσης	75
Σχήμα 45: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει του βυθίσματος σχεδίασης	76
Σχήμα 46: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει του σημείου τομής της κάτω ακμής του καθρέφτη με το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας	77
Σχήμα 47: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει της ολικής αντίστασης καθαρής γάστρας.....	78
Σχήμα 48: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει του συντελεστή γάστρας	79
Σχήμα 49: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει του συντελεστή μέσης τομής.....	79
Σχήμα 50: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει του πρισματικού συντελεστή.....	80
Σχήμα 51: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει του μήκους του πρυμναίου τμήματος.....	81
Σχήμα 52: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει του μήκους του προραίου τμήματος	82
Σχήμα 53: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει του μήκους του παράλληλου τμήματος.....	82
Σχήμα 54: Body plan αρχικής ημιγάστρας: (α) πρυμναίο τμήμα (αριστερά) και (β) προραίο τμήμα (δεξιά).....	88

Σχήμα 55: Body plan βέλτιστης ημιγάστρας: (α) πρυμναίο τμήμα (αριστερά) και (β) πρωραίο τμήμα (δεξιά).....	88
Σχήμα 56: Συντελεστής κυματισμού συναρτήσει του αριθμού Froude	89
Σχήμα 57: Συντελεστής κυματισμού συναρτήσει της ταχύτητας πλεύσης	90
Σχήμα 58: Ισχύς ρυμούλκησης καθαρής γάστρας συναρτήσει του αριθμού Froude	90
Σχήμα 59: Ισχύς ρυμούλκησης καθαρής γάστρας συναρτήσει της ταχύτητας πλεύσης	91
Σχήμα 60: Συντελεστής πρόωσης καθαρής γάστρας συναρτήσει του αριθμού Froude	91
Σχήμα 61: Συντελεστής πρόωσης καθαρής γάστρας συναρτήσει της ταχύτητας πλεύσης	92
Σχήμα 62: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει του αριθμού Froude	92
Σχήμα 63: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει της ταχύτητας πλεύσης	93

Περιεχόμενοι πίνακες

Πίνακας 1: Βασικά χαρακτηριστικά πλοίου διπλωματικής Πάνου Τσιούμα (Τσιούμας, 2018)	13
Πίνακας 2: Υδροστατικά στοιχεία πλοίου διπλωματικής Πάνου Τσιούμα (Τσιούμας, 2018)	14
Πίνακας 3: Βασικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση της μέγιστης δυνατής διαμέτρου της έλικας.....	28
Πίνακας 4: Παράμετροι που μετετράπησαν σε μεταβλητές σχεδίασης	29
Πίνακας 5: Όρια του λόγου εκτεταμένης επιφάνειας συναρτήσει του αριθμού πτερυγίων της σειράς ελίκων Wageningen B (Πολίτης, 2018).....	49
Πίνακας 6: Μεγέθη του GRID που αποτέλεσαν εξαρτώμενες παραμέτρους του CAESES ...	52
Πίνακας 7: Ενεργές μεταβλητές σχεδίασης προβλήματος βελτιστοποίησης	61
Πίνακας 8: Περιορισμοί του παρόντος προβλήματος σχεδιαστικής βελτιστοποίησης	63
Πίνακας 9: Ελάχιστες και προτεινόμενες αποστάσεις μεταξύ έλικας-γάστρας, έλικας-πηδαλίου και έλικας-ποδοστήματος	64
Πίνακας 10: Μεταβλητές σχεδίασης αρχικής και βέλτιστης γάστρας	84
Πίνακας 11: Κύριες διαστάσεις αρχικής και βέλτιστης γάστρας	84
Πίνακας 12: Υδροστατικά στοιχεία αρχικής και βέλτιστης γάστρας.....	85
Πίνακας 13: Υδροδυναμικά στοιχεία αρχικής και βέλτιστης γάστρας	86
Πίνακας 14: Στοιχεία ελίκων αρχικής και βέλτιστης γάστρας.....	86
Πίνακας 15: Στοιχεία πρόωσης αρχικής και βέλτιστης γάστρας.....	87

Εισαγωγή

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η σχεδιαστική βελτιστοποίηση της γάστρας ενός αργόπλοου δίγαστρου επιβατηγού-οχηματαγωγού πλοίου ανοικτού τύπου. Η μείωση των ενεργειακών απαιτήσεων και των εκπεμπόμενων ρύπων των πλοίων έχουν αποτελέσει τα τελευταία χρόνια σημαντική παράμετρο σχεδίασής τους, γεγονός που καταδεικνύεται από τους κανονισμούς που διαρκώς θεσπίζουν οι διεθνείς ναυτιλιακοί οργανισμοί. Σε αυτό το πλαίσιο η σχεδιαστική βελτιστοποίηση των πλοίων έχει καταστεί επιβεβλημένη ώστε να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση της απαιτούμενης ισχύος τους και συνεπακόλουθα να καταστεί αποδοτικότερη η λειτουργία τους.

Ο κλασικός τρόπος εκτίμησης των υδροδυναμικών επιδόσεων ενός πλοίου είναι η διενέργεια πειραμάτων σε μοντέλο υπό κλίμακα σε δεξαμενή δοκιμών. Η μέθοδος αυτή αν και διακρίνεται για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων της έχει υψηλό κόστος και είναι ιδιαιτέρως χρονοβόρα. Παράλληλα δεν παρέχει ικανοποιητική ευελιξία ως προς χρήση πολλών διαφορετικών γαστρών, παραπλήσιων σε γεωμετρικά χαρακτηριστικά ως προς μία γάστρα αναφοράς, δυσχεραίνοντας κατ' αυτό τον τρόπο την απόπειρα εκτίμησης εκείνων των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της γάστρας που βελτιστοποιούν τα βασικά κριτήρια απόδοσής της.

Μία αποτελεσματική και αποδοτική λύση σε αυτό το πρόβλημα έχουν προσφέρει οι μέθοδοι που βασίζονται στη συνδυασμένη χρήση CAD/CAE συστημάτων τα οποία παρέχουν τη δυνατότητα αυτοματοποίησης της διαδικασίας σχεδιαστικής βελτιστοποίησης και δύνανται να δημιουργήσουν και να αξιολογήσουν ως προς κάποια κριτήρια απόδοσης ένα μεγάλο αριθμό διαφορετικών γαστρών σε συντομότερο χρονικό διάστημα και με πολύ μεγαλύτερη ευελιξία έναντι των πειραμάτων σε δεξαμενή. Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε μία βελτιστοποίηση, η οποία ήταν υποκείμενη σε μία σειρά περιορισμών. Το προς εξέταση πρόβλημα αφορούσε στη σχεδιαστική βελτιστοποίηση της γάστρας ως προς την ισχύ πρόωσης.

Ως προκαταρκτικό στάδιο της σχεδιαστικής βελτιστοποίησης ήταν η δημιουργία ενός παραμετρικού μοντέλου της ημιγάστρας -η δεύτερη ημιγάστρα του πλοίου προέκυπτε σε επόμενο στάδιο μέσω κατοπτρισμού του παραμετρικού μοντέλου ως προς το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας- σε κατάλληλο λογισμικό, επιλέγοντας τις παραμέτρους του κατά τρόπο τέτοιο, ώστε το μοντέλο να μπορεί να έχει τη μεγαλύτερη δυνατή ευελιξία ως προς την τροποποίηση της μορφής του. Για την υλοποίηση αυτής της παραμετρικής μοντελοποίησης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό του CAESES.

Για τους σκοπούς της βελτιστοποίησης έγινε διασύνδεση του CAESES με το λογισμικό υπολογιστικής υδροδυναμικής του Shipflow ώστε να καταστεί εφικτή η εκτίμηση της αντίστασης κυματισμού και κατ' επέκταση της ολικής αντίστασης της γάστρας. Για κάθε παραγόμενη παραλλαγή της αρχικής γάστρας κατά τη διαδικασία της σχεδιαστικής βελτιστοποίησης πραγματοποιείτο και μία δεύτερη, εσωτερική βελτιστοποίηση ως προς την ισχύ πρόωσης. Για τους σκοπούς της εσωτερικής βελτιστοποίησης έγινε διασύνδεση και του προγράμματος του GRID, όπου με τη συνδυασμένη χρήση και των τριών προγραμμάτων ήταν εφικτή η εκτίμηση της ισχύος πρόωσης για κάθε παραλλαγή γάστρας.

Η υλοποίηση της διαδικασίας βελτιστοποίησης προϋπέθετε προκειμένου να αυτοματοποιηθεί τη δυνατότητα αυτόματης τροποποίησης ορισμένων επιλεγμένων σχεδιαστικών παραμέτρων του παραμετρικού μοντέλου ώστε να παραγόταν ένα μεγάλο πλήθος διαφορετικών γαστρών και κατόπιν αξιολόγησης του εκάστοτε κοινού κριτηρίου απόδοσής τους. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιήθηκε μέσω χρήσης των αποκαλούμενων μηχανών σχεδίασης. Κάθε

βελτιστοποίηση υλοποιήθηκε σε δύο φάσεις, όπου κάθε φάση αντιστοιχούσε και στη χρήση κατάλληλης μηχανής σχεδίασης.

Κατά την πρώτη φάση έγινε χρήση της μηχανής σχεδίασης που έκανε χρήση του αλγορίθμου Sobol προκειμένου να γίνει μία πρώτη εξερεύνηση του χώρου των σχεδιαστικών λύσεων. Στη δεύτερη φάση έγινε χρήση της μηχανής σχεδίασης που έκανε χρήση του γενετικού αλγορίθμου NSGA-II, ο οποίος λάμβανε ως δεδομένα τα αποτελέσματα που είχαν προκύψει από την εκτέλεση του Sobol, όπου έχοντας πλέον μία ικανοποιητική πληροφορία του χώρου των εφικτών σχεδιαστικών λύσεων μπορούσε να πραγματοποιήσει μία στοχευμένη βελτιστοποίηση ως προς την ισχύ πρόωσης.

Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα όλων των παραλλαγμένων γαστρών που προέκυψαν από τις μηχανές σχεδίασης παρουσιάστηκαν σε κοινά διαγράμματα και σχολιάστηκαν, ενώ τα χαρακτηριστικά της βέλτιστης γάστρας παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν σε σύγκριση με την αρχική γάστρα. Τέλος, έγινε χρήση της μηχανής σχεδίασης Ensemble Investigation προκειμένου να γίνει μία σύγκριση ορισμένων βασικών χαρακτηριστικών αντίστασης και πρόωσης μεταξύ της αρχικής και της βέλτιστης γάστρας για ένα εύρος ταχυτήτων πλευσης.

1 Τα CAD και CAE συστήματα και το CAESES

1.1 Τρόποι γεωμετρικής αναπαράστασης της μορφής της γάστρας του πλοίου

Ο ορισμός της μορφής της γάστρας του πλοίου είναι ένα από τα πρώτα βήματα που απαιτούνται κατά τη σχεδίασή του λόγω του ότι στην αρχή πολλές απαραίτητες αξιολογήσεις εξαρτώνται από μία, έστω δοκιμαστική, περιγραφή της μορφής της γάστρας. Η αρχικά δοκιμαστική αυτή περιγραφή κατά την εξέλιξη της μελέτης και σχεδίασης του πλοίου τροποποιείται κατάλληλα με βάση τις απαιτήσεις του πλοιοκτήτη, τους εθνικούς και διεθνείς κανονισμούς, τους κανόνες των νηογνομόνων και τους περιορισμούς του περιβάλλοντος δράσης του πλοίου και καταλήγει σε μία οριστική και εξομαλυσμένη μορφή γάστρας, όντας πλέον έτοιμη για κατασκευή.

Η δημιουργία της μορφής της επιφάνειας της γάστρας βασίζεται στη δημιουργία ενός συστήματος καμπυλών, επί της πληροφορίας των οποίων βασίζονται για να χτιστούν οι επιμέρους επιφάνειες που τελικά συνθέτουν την επιφάνεια της γάστρας του πλοίου. Οι επικρατέστερες αναπαραστάσεις καμπυλών στον ορισμό της μορφής της γάστρας είναι οι ακόλουθες παραμετρικές και τμηματικά πολυωνυμικές μορφές (Nowacki, 2009):

- Καμπύλες Bezier
- Καμπύλες B-splines
- Καμπύλες NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines)

Οι προαναφερθείσες αναπαραστάσεις έχουν έναντι άλλων αναπαραστάσεων το πλεονέκτημα ότι είναι χειρίσιμες μέσω ελέγχου των κορυφών τους, κάτι το οποίο μπορεί να διαπιστώσει ο εκάστοτε χρήστης στην οθόνη του υπολογιστή του. Επιπρόσθετα μπορούν να παρέχουν οποιασδήποτε τάξης τμηματική συνέχεια ενώ συγχρόνως μπορούν να υψωθούν σε μεγάλους πολυωνυμικούς βαθμούς. Λόγω αυτών των γνωρισμάτων τους οι συγκεκριμένες αναπαραστάσεις καμπυλών μπορούν να παρέχουν μια μεγάλη ποικιλία σχημάτων.

Οι επιφανειακές αναπαραστάσεις που δομούνται με βάση την πληροφορία που εμπεριέχεται στις ανωτέρω αναπαραστάσεις καμπυλών για την περίπτωση ορθογωνικών μοτίβων τμημάτων επιφάνειας είναι οι εξής:

- Επιφάνειες Coons
- Επιφάνειες Bezier
- Επιφάνειες B-splines
- Επιφάνειες NURBS

Οι ως άνω τύποι γεωμετρικής αναπαράστασης είναι πλήρως επαρκείς για τη μοντελοποίηση της μορφής μιας οσοδήποτε πολύπλοκης μορφής γάστρας, υπό την προϋπόθεση ότι θα συνδυαστούν με επαρκή δεδομένα, κατάλληλες απαιτήσεις συνέχειας, περιορισμούς και διαδικασίες δημιουργίας.

1.2 Φιλοσοφίες γεωμετρικής μοντελοποίησης

Με βάση τα υπάρχοντα CAD (Computer-Aided Design) εργαλεία μπορούν να διακριθούν τρεις βασικές φιλοσοφίες γεωμετρικής μοντελοποίησης (Harriss, Abt, & Brenner, 2019):

- **Συμβατική σχεδίαση:** Παραδοσιακά στα περισσότερα συστήματα CAD οι δημιουργούμενες γεωμετρικές γαστρών ελέγχονται απευθείας από χαμηλού επιπέδου οντότητες και συγκεκριμένα από σημεία. Ο σχεδιαστής καλείται να μετακινήσει χωριστά κάθε σημείο προκειμένου να πετύχει την επιθυμητή αλλαγή στη γεωμετρία της γάστρας. Αυτός ο τρόπος σχεδίασης από τη μία πλευρά συνεπάγεται ότι ο σχεδιαστής έχει τον απόλυτο έλεγχο της γεωμετρίας, από την άλλη όμως απαιτείται να έχει μεγάλη εμπειρία και εξειδικευμένες γνώσεις ώστε να δημιουργήσει και κατόπιν να τροποποιήσει κατάλληλα τη γεωμετρία. Η όποια τροποποίηση μπορεί να χρειαστεί να πραγματοποιηθεί μετά την περάτωση της αρχικής σχεδίασης είναι χρονοβόρα και απαιτεί ειδικούς χειρισμούς. Ωστόσο η επίτευξη της επιθυμητής μορφής της γάστρας είναι μία σημαντική υπόθεση, ιδίως εφόσον η σχεδίαση πρέπει να υποστεί κατάλληλη εξομάλυνση ή/και να ικανοποιήσει συγκεκριμένους περιορισμούς.
- **Ημιπαραμετρική σχεδίαση:** Αυτή η κατηγορία αναφέρεται σε CAD εργαλεία που προσφέρουν τη δυνατότητα κατασκευής επί υπάρχοντων γεωμετριών και τροποποίησης της ήδη υπάρχουσας μορφής της γάστρας μέσω ελέγχου των παραμέτρων της, παρέχοντας με τον τρόπο αυτό τη δυνατότητα δημιουργίας παραλλαγών (variants) της μορφής της γάστρας. Κάθε καινούργια μορφή γάστρας κληρονομεί πάντοτε όλα τα χαρακτηριστικά που υπάρχουν στην πατρική της μορφή. Η νέα μορφή της γάστρας που προκύπτει προέρχεται από μαθηματικούς μετασχηματισμούς ή παραμορφώσεις. Οι μετασχηματισμοί μπορούν να είναι είτε ολιστικοί είτε τοπικοί. Οι ολιστικοί μετασχηματισμοί υλοποιούνται μέσω της τροποποίησης των συντελεστών μορφής της γάστρας και ως εκ τούτου η χρήση τους συχνά προτιμάται έναντι των τοπικών. Η χαρακτηριστικότερη περίπτωση ολιστικού μετασχηματισμού στη σχεδίαση του πλοίου είναι ο μετασχηματισμός Lackenby (Han, Lee, & Choi, 2012), που χρησιμοποιείται από πληθώρα CAD λογισμικών όπως το Aneva, το CAESES κλπ.

Ο λόγος που αυτή η σχεδιαστική φιλοσοφία χαρακτηρίζεται ως ημιπαραμετρική έγκειται στο ότι υπακούει σε μία τυποποιημένη διαδικασία, κατά την οποία οι επιβαλλόμενες στη μορφή της γεωμετρίας αλλαγές δίνονται σε μορφή παραμέτρων που σχετίζονται με συγκεκριμένες ιδιότητες του σχεδιαστικού προβλήματος. Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει αυτή η διαδικασία είναι η ταχύτητα και η απλότητά της για τον σχεδιαστή, επιτρέποντάς του να πραγματοποιήσει σχεδιαστική βελτιστοποίηση και να παράγει γρήγορα ένα μεγάλο αριθμό παραλλαγών της γεωμετρίας. Η φιλοσοφία αυτή έχει ωστόσο τα σημαντικά μειονεκτήματα της έλλειψης ευελιξίας και ελέγχου της μορφής της εκάστοτε παραλλαγής.

- **Πλήρως παραμετρική σχεδίαση:** Σε αυτή τη σχεδιαστική φιλοσοφία η γεωμετρία καθορίζεται από σχέσεις που δημιουργούνται από παραμέτρους μορφής, γεγονός που επιτρέπει την γρήγορη και αποδοτική δημιουργία και τροποποίηση της γάστρας του πλοίου. Οι παράμετροι μορφής είναι υψηλού επιπέδου περιγραφείς των λειτουργικών χαρακτηριστικών της γάστρας. Οι παραλλαγές της γάστρας προκύπτουν μέσω τροποποίησης των τιμών των παραμέτρων μορφής της. Ως επακόλουθο αυτών των τροποποιήσεων έρχεται η ενημέρωση των εξαρτημένων από αυτές γεωμετρικών οντοτήτων που συμβάλλουν στην δημιουργία της τελικής επιφάνειας της γάστρας.

1.3 Ενσωμάτωση των CAE στα CAD συστήματα

Μέχρι πριν από λίγες μόλις δεκαετίες τα CAD και CAE (Computer-Aided Engineering) συστήματα που υπήρχαν ήταν τελείως αποσυνδεδεμένα μεταξύ τους και χρησιμοποιούσαν διαφορετικά εργαλεία για την επίλυση των διαφόρων σχεδιαστικών προβλημάτων. Όταν η γεωμετρία ήταν έτοιμη από το CAD λογισμικό έπρεπε να μεταφορτωθεί στο αντίστοιχο CAE λογισμικό στο οποίο πραγματοποιούνταν οι απαραίτητοι υπολογισμοί. Εφόσον ο μηχανικός επιθυμούσε να ελέγξει τις επιπτώσεις που έχει στους ανωτέρω υπολογισμούς μία αλλαγή στη γεωμετρία ήταν υποχρεωμένος να πραγματοποιήσει την επιθυμητή αλλαγή στο CAD λογισμικό και να μεταφορτώσει εκ νέου την τροποποιημένη γεωμετρία στο CAE λογισμικό. Κατόπιν έπρεπε να εφαρμόσει εκ νέου την απαραίτητη φυσική του προβλήματος και να εκτελέσει εκ νέου την προσομοίωση. Όπως γίνεται αντιληπτό επρόκειτο για μία διαδικασία ιδιαίτερας χρονοβόρα.

Ένα επιπρόσθετο πρόβλημα που προέκυπτε ήταν ότι τα CAD σχέδια που εισάγονταν αρχικά στα CAE συστήματα εμπειρείχαν αρκετές φορές υπερβολικές πληροφορίες για τους σκοπούς της διακριτοποίησης της επιφάνειας από το CAE λογισμικό και την περάτωση της επακόλουθης προσομοίωσης, γεγονός που είχε άμεση συνέπεια στους υπολογιστικούς χρόνους. Ήταν συνεπώς μία συνήθης πρακτική η διενέργεια αφαίρεσης γνωρισμάτων (defeaturing) των αρχικών CAD γεωμετριών προκειμένου να απαλλαγούν από περιττές για τις γεωμετρικές προσομοιώσεις πληροφορίες (Schreier, 2009). Τέλος, προκειμένου να επιλυθούν προβλήματα βελτιστοποίησης, το μοντέλο έπρεπε να αλλάζει με κάποιο τρόπο τις μεταβλητές σχεδίασής του. Εφόσον αυτό πραγματοποιείτο χειροκίνητα, επρόκειτο για μια διαδικασία χρονοβόρα. Επομένως ήταν αναγκαία όχι μόνο η ενσωμάτωση των CAE στα CAD λογισμικά, αλλά και η αυτοματοποίηση της διαδικασίας ενσωμάτωσής τους (Benaouali & Kachel, 2017).

Τα τελευταία χρόνια οι πάροχοι των διάφορων CAD και CAE λογισμικών έχουν κάνει μεγάλα βήματα για να περιορίσουν σημαντικά αυτά τα προβλήματα. Τα CAE προγράμματα πλέον λειτουργούν με ιθαγενείς CAD γεωμετρίες καθώς έχουν εσωτερικά ενσωματωμένους CAD πυρήνες. Συνεπώς δεν είναι αναγκαίο πλέον να γίνεται εξαγωγή των CAD γεωμετριών σε τυποποιημένες μορφές αρχείων όπως το IGES (Initial Graphics Exchange Specification). Συγχρόνως υπάρχουν πλέον διαδραστικοί σύνδεσμοι μεταξύ των CAD και CAE συστημάτων ούτως ώστε εφόσον πραγματοποιηθεί μία αλλαγή στη γεωμετρία στο ένα περιβάλλον αυτόματα να γίνεται ενημέρωση της γεωμετρίας στο άλλο περιβάλλον.

Στον τομέα της σχεδίασης πλοίων η επίτευξη της σύζευξης αυτής μεταξύ των CAD και CAE συστημάτων γίνεται αντιληπτή κυρίως μέσω των σύνθετων εργαλείων ανάλυσης που πλέον έχουν ενσωματωθεί στη διαδικασία της σχεδίασης. Τα βασικότερα σύνθετα εργαλεία ανάλυσης αφορούν στη χρήση των μεθόδων των συνοριακών στοιχείων και των πεπερασμένων όγκων της CFD (Computational Fluid Dynamics) ανάλυσης για τους σκοπούς της υδροδυναμικής σχεδίασης και στις μεθόδους των πεπερασμένων στοιχείων για τους σκοπούς της κατασκευαστικής σχεδίασης.

1.4 Το λογισμικό του CAESES

1.4.1 Γενική περιγραφή

Το CAESES είναι ένα ευέλικτο CAE λογισμικό που αποσκοπεί στο σχεδιασμό βέλτιστων προϊόντων που εκτίθενται σε ροές. Εφοδιασμένο με έναν ισχυρό και εξελιγμένο CAD πυρήνα το λογισμικό παρέχει σε πρώτο στάδιο τη δυνατότητα δημιουργίας ενός ευέλικτου παραμετρικού μοντέλου. Το παραμετρικό αυτό μοντέλο μπορεί στη συνέχεια να διασυνδεθεί εύκολα με διάφορα εργαλεία προσομοίωσης CFD ή δομικής ανάλυσης. Κάνοντας στη συνέχεια χρήση των αποτελεσμάτων αυτών των CFD εργαλείων προσομοίωσης μπορεί να πραγματοποιηθεί με ολοκληρωμένο και γρήγορο τρόπο η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας, είτε πρόκειται για μονοκριτηριακή είτε για πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση.

Το CAESES βασίζεται σε μια αυστηρά ιεραρχική δομή. Κάθε οντότητα που εμπεριέχει συνιστά μία συγκεκριμένη βαθμίδα της ιεραρχίας και είναι εφοδιασμένη με τις δικές της εγγενείς ιδιότητες (properties) και λειτουργίες (functions) (Friendship Systems, 2012). Συγχρόνως όμως κάθε οντότητα είναι εφοδιασμένη και με τις ιδιότητες και λειτουργίες όλων των προηγούμενων βαθμίδων της ιεραρχίας. Για παράδειγμα η έλλειψη ως γεωμετρική οντότητα στο CAESES καταλαμβάνει την ακόλουθη θέση στην ιεραρχία: FObject → FManaged → FEntity → FDrawable → FGeometry → FCurve → FEllipse. Επομένως η έλλειψη ως οντότητα είναι εφοδιασμένη και με τις ιδιότητες και λειτουργίες των βαθμίδων FCurve, FGeometry κ.ο.κ.

Προτού γίνει οποιαδήποτε αναφορά στα βασικά εργαλεία του CAESES που χρησιμοποιήθηκαν για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας, κρίθηκε σκόπιμο να προηγηθεί μία περιγραφή του γραφικού περιβάλλοντος χρήστη (Graphical User Interface – GUI) του λογισμικού. Στην προκαθορισμένη μορφή του το περιβάλλον αυτό αποτελείται από τα εξής παράθυρα:

- **Object tree:** Περιέχει όλες τις δημιουργούμενες από το χρήστη οντότητες και αποτελείται από τρεις βασικές καρτέλες, του CAD, των connections και του optimization. Η CAD καρτέλα περιέχει όλες τις δημιουργούμενες γεωμετρικές οντότητες του τρέχοντος project. Η καρτέλα των connections περιέχει τις οντότητες που απαιτούνται για να πραγματοποιηθεί η διασύνδεση του CAESES με κάποια εφαρμογή (αρχείο τύπου .exe ή .bat) προκειμένου να γίνουν οι επιθυμητοί υπολογισμοί. Όσον αφορά στην καρτέλα του optimization, αυτή είναι εφοδιασμένη με δύο πολύ σημαντικές κατηγορίες οντοτήτων: τις μηχανές σχεδίασης (design engines) και τους περιορισμούς (constraints).

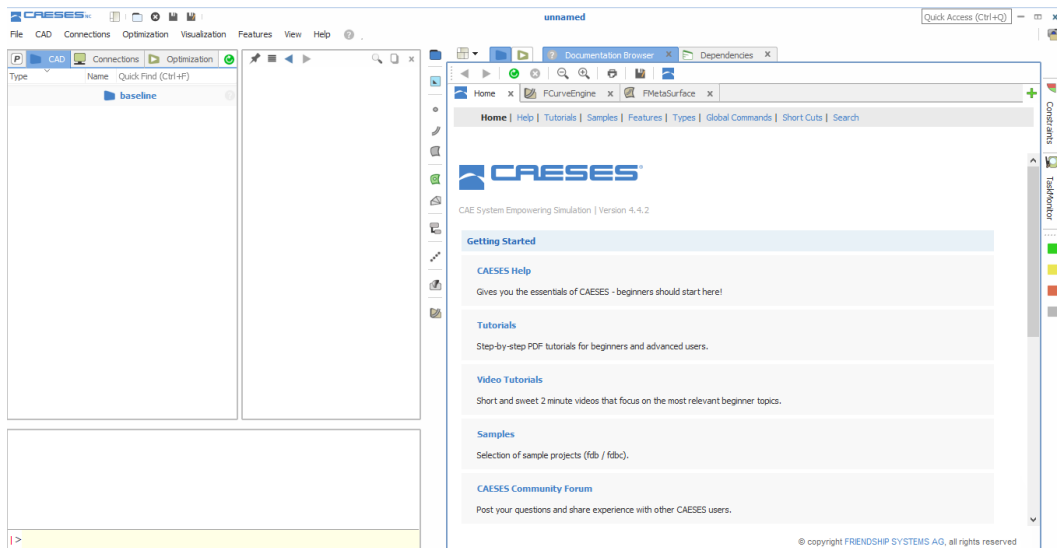
Η πρώτη κατηγορία εμπεριέχει τα αποθηκευμένα αποτελέσματα από τα τρεξίματα των αλγορίθμων σχεδιαστικής βελτιστοποίησης ή αναζήτησης του χώρου των σχεδιαστικών λύσεων μέσω των οποίων γίνεται η διαδικασία της βελτιστοποίησης και μέσω της οποίας προκύπτουν οικογένειες καινούργιων παραλλαγμένων μοντέλων με αυτοματοποιημένο τρόπο. Η δεύτερη κατηγορία αφορά στους περιορισμούς που επιβάλλονται επί του εκάστοτε παραμετρικού μοντέλου. Στα πλαίσια της σχεδιαστικής βελτιστοποίησης η εκάστοτε μηχανή σχεδίασης επιβάλλει τους περιορισμούς αυτούς σε κάθε ένα από τα μέλη της οικογένειας παραμετρικών μοντέλων που προκύπτουν.

- **Object editor:** Παρέχει όλες τις προς επεξεργασία πληροφορίες της εκάστοτε επιλεγμένης οντότητας.
- **Console:** Πρόκειται για το παράθυρο εντολών του CAESES. Στο παράθυρο αυτό ο χρήστης μπορεί να δει χρήσιμα μηνύματα, όπως για παράδειγμα σφάλματα τα οποία

μπορεί να εμφανίζονται κατά τη δημιουργία μιας επιφάνειας, την παραβίαση των ορίων κάποιας μεταβλητής κλπ.

- **3DWindow:** Παρέχει την τρισδιάστατη αναπαράσταση της γεωμετρίας και όλων των σημείων, καμπυλών, επιφανειών και offsets που μπορεί να τη συνοδεύουν. Δίνεται στο χρήστη η δυνατότητα ενεργοποίησης και απενεργοποίησης της οπτικοποίησης κάθε μίας εκ των ανωτέρω ομάδων γεωμετρικών οντοτήτων.
- **Dependencies:** Στο παράθυρο αυτό εμφανίζεται όλη η πληροφορία σχετικά με τη δημιουργία και χρήση της επιλεγμένης οντότητας.
- **Documentation Browser:** Στο παράθυρο αυτό εμφανίζονται οι απαραίτητες και λεπτομερείς πληροφορίες για κάθε οντότητα του CAESES. Η δόμηση του παραθύρου αυτού για κάθε οντότητα ξεκινάει με τη γενική περιγραφή της, συνεχίζει με τη θέση που αυτή καταλαμβάνει στην ιεραρχία, ενώ κατόπιν αναφέρονται ο τρόπος δημιουργίας της, οι ιδιότητες ή/και οι συναρτήσεις με τις οποίες είναι εφοδιασμένη.

Στο CAESES όλες οι οντότητες μπορούν να δημιουργηθούν με τη βοήθεια εντολών. Για το λόγο αυτό παρέχεται για κάθε οντότητα μέσω του documentation browser και η πληροφορία της εντολής μέσω της οποίας δημιουργείται. Στο σχήμα 1 που ακολουθεί παρουσιάζεται το γραφικό περιβάλλον χρήστη του CAESES:



Σχήμα 1: Γραφικό περιβάλλον χρήστη του CAESES

1.4.2 Βασικά σχεδιαστικά εργαλεία του λογισμικού

Τα βασικά CAD εργαλεία που παρέχει το CAESES για τη διαδικασία της παραμετρικής μοντελοποίησης είναι τα ακόλουθα (Friendship Systems, 2012):

- **Παράμετροι:** Είναι οντότητες που λαμβάνουν ως τιμή είτε έναν πραγματικό αριθμό, είτε μία συστοιχία αριθμών, είτε μια συστοιχία χαρακτήρων. Αναλόγως της φύσεως της τιμής που μπορούν να λάβουν χωρίζονται στις εξής τρεις κατηγορίες:
 - *Parameters:* Πρόκειται για τις κλασικές παραμέτρους που μπορούν να λάβουν ως τιμή έναν πραγματικό αριθμό είτε άμεσα -μέσω πληκτρολόγησής της επιθυμητής τιμής- είτε έμμεσα μέσω μιας έκφρασης. Είναι η σημαντικότερη κατηγορία παραμέτρων και η πλέον χρησιμοποιούμενη κατά την παραμετρική μοντελοποίηση. Αιτία για αυτό είναι τόσο το ότι η τιμή που λαμβάνουν είναι πραγματικός αριθμός

και συνεπώς μπορούν πολύ εύκολα να αντικαταστήσουν την πληροφορία μίας γεωμετρικής οντότητας (π.χ απόσταση μεταξύ δύο σημείων μιας καμπύλης), όσο και το ότι μέσα από το σύνολο των διαθέσιμων παραμέτρων γίνεται η μετέπειτα επιλογή των μεταβλητών σχεδίασης. Οι μεταβλητές σχεδίασης είναι απαραίτητες για τη διαδικασία της σχεδιαστικής βελτιστοποίησης μιας παραμετρικής γεωμετρίας, καθώς όλες ή κάποιες εξ αυτών θα χρησιμοποιηθούν από τις μηχανές σχεδίασης και θα αποτελέσουν τις ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος βελτιστοποίησης, παρέχοντας τη δυνατότητα αυτοματοποιημένης δημιουργίας παραλλαγών της μορφής του παραμετρικού μοντέλου.

- *Series parameter:* Πρόκειται για παραμέτρους που εμπεριέχουν μια συστοιχία αριθμών. Μια τέτοια παράμετρος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παράδειγμα στην περίπτωση που είναι επιθυμητό να δημιουργηθεί μία ομάδα νομέων από την επιφάνεια μιας γάστρας, η οποία θα αναπαριστά τους νομείς της σε κάποιες συγκεκριμένες διαμήκειες θέσεις της.
- *String parameter:* Πρόκειται για παραμέτρους που εμπεριέχουν μια συστοιχία χαρακτήρων.
- **Σημεία:** Τα σημαντικότερα είδη σημείων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα εξής:
 - **3D Point:** Πρόκειται για τον πλέον χρησιμοποιούμενο τύπο σημείου όπου ο χρήστης ορίζει άμεσα τις συντεταγμένες του.
 - **Curve Intersection Point:** Είναι το σημείο τομής μεταξύ δύο βοηθητικών καμπυλών.
 - **Curve Normal Point:** Πρόκειται για ένα σημείο που ανήκει στην ευθεία που είναι κάθετη σε ένα συγκεκριμένο σημείο μιας καμπύλης. Ως είσοδο πέραν της καμπύλης η οντότητα αυτή αναμένει μία τιμή της παραμέτρου που διατρέχει την καμπύλη –με τιμή που μπορεί να κυμαίνεται από 0 έως 1- ώστε να παρθεί ένα συγκεκριμένο σημείο της, καθώς και την απόσταση που θέλει ο χρήστης να απέχει από την καμπύλη το κάθετο αυτό σημείο.
- **Καμπύλες:** Τα σημαντικότερα είδη καμπυλών που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα ακόλουθα¹:
 - **Line:** Είναι η ευθεία γραμμή που ορίζεται από τα σημεία της αρχής και του τέλους της.
 - **Image Curve:** Πρόκειται για καμπύλη-είδωλο μιας αρχικής καμπύλης. Η image curve προκειμένου να οριστεί καλώς αναμένει από τον εκάστοτε χρήστη τον ορισμό της πηγιάς καμπύλης, του πεδίου τιμών της (domain) που είναι το διάστημα $[0,1]$ ή οποιοδήποτε υποσύνολό του², καθώς και τον τυχόντα μετασχηματισμό που θα επιβληθεί.
 - **Generic Curve:** Πρόκειται ουσιαστικά για την εξ ορισμού παραμετρική καμπύλη. Ορίζεται μέσω των γενικευμένων συντεταγμένων της X,Y,Z οι οποίες εξαρτώνται από την παράμετρο t και η οποία αυτόματα διατρέχει το διάστημα $[0,1]$.
 - **Intersection curve:** Είναι μια καμπύλη που προκύπτει από την τομή μεταξύ δύο επιφανειών ή επιπέδων. Για τη δημιουργία της το λογισμικό ζητάει κατ' αρχήν από το χρήστη να ορίσει την πρώτη επιφάνεια. Στη συνέχεια ζητάει τον τύπο της τομής, που μπορεί να είναι η τομή της αρχικώς ορισθείσας επιφάνειας είτε με άλλη

¹ Για λόγους πληρότητας και καλύτερης κατανόησης δεν έχει συμπεριληφθεί στις καμπύλες, αν και εκεί υπάρχει, η κατηγορία των Curve Engines, καθώς απαιτείται να έχει προηγηθεί ο ορισμός του feature definition.

² Το domain μπορεί να είναι και ακόμα και ένα υπερσύνολο του διαστήματος $[0,1]$ υπό κάποιες προϋποθέσεις. Μπορεί να είναι ένα διάστημα της μορφής $[-0.05, 1.05]$, όπου θα πρέπει όμως το αριστερό άκρο να είναι πολύ μικρός αρνητικός αριθμός, ενώ το δεξιό άκρο αριθμός ελάχιστα μεγαλύτερος της μονάδας. Αυτό οφείλεται στο ότι το CAESSES παρέχει τη δυνατότητα για extrapolation, εντός περιορισμένων και λογικών βέβαια πλαισίων ώστε να είναι μην απωλέσει την αξιοπιστία του.

συνεργαζόμενη επιφάνεια, είτε με κάποιο από τα τρία βασικά επίπεδα (xy,yz,zx) είτε με κάποιο άλλο αυθαίρετο επίπεδο.

- **Projection curve:** Είναι μια καμπύλη προβολής μιας αρχικής καμπύλης πάνω σε μία επιφάνεια. Για την παραγωγή αυτού του τύπου καμπύλης πέραν της πηγαίας καμπύλης και της επιφάνειας στην οποία θα προβληθεί αυτή, ζητείται και η κατεύθυνση της προβολής της.
- **Poly Curve:** Πρόκειται για μια καμπύλη που αποτελείται από μία λίστα επιμέρους καμπυλών.
- **Interpolation Curve:** Μέσω της εν λόγω καμπύλης επιτυγχάνεται η παρεμβολή κάποιων δοθέντων τρισδιάστατων σημείων. Η καμπύλη προκειμένου να δημιουργηθεί απαιτεί από το χρήστη να ορίσει το βαθμό της και τα σημεία που θα παρεμβάλλει. Επιπρόσθετα, ο χρήστης μπορεί να ορίσει τη μέθοδο παρεμβολής που θα ακολουθήσει η καμπύλη (default, uniform, chord length, centripetal), καθώς και τη γωνία που θα σχηματίζει σε κάποιο ή κάποια από τα σημεία που της έχουν δοθεί. Για την υλοποίηση της τελευταίας λειτουργίας είναι ωστόσο απαραίτητο να οριστεί και το επίπεδο ως προς το οποίο θα νοούνται οι γωνίες αυτές.
- **Επιφάνειες:** Τα σημαντικότερα είδη επιφανειών που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα κάτωθι³:
 - **Ruled Surface:** Είναι μία γραμμική επιφάνεια που δημιουργείται μεταξύ δύο αυθαίρετων καμπυλών.
 - **Lofted Surface:** Πρόκειται για μία επιφάνεια που δομείται μεταξύ δύο ή περισσότερων αυθαίρετων καμπυλών που είναι κατάλληλα προσανατολισμένες. Επιπρόσθετα αυτή η επιφάνεια παρέχει τη δυνατότητα στο χρήστη να εισαγάγει και μία ή δύο καμπύλες-οδηγούς (rail curves), καθώς και μία ή δύο γειτονικές -εφόσον υπάρχουν- επιφάνειες της δημιουργούμενης lofted επιφάνειας οι οποίες θα παρέχουν την πληροφορία της παραγωγού της επιφάνειας στην αρχή ή/και στο τέλος του loft. Με βάση τα παραπάνω γίνεται κατανοητό ότι οι lofted επιφάνειες αποτελούν υπερσύνολο των ruled επιφανειών.
 - **Coons Patch:** Είναι μία επιφάνεια που ορίζεται μέσω τεσσάρων συνοριακών καμπυλών, κατάλληλα προσανατολισμένων και με τις καμπύλες αυτές να έχουν ανά δύο κοινά άκρα. Επιπρόσθετα υπάρχει η δυνατότητα να δοθεί η πληροφορία για τις παραγωγούς γειτονικών επιφανειών ώστε να επιτυγχάνεται ομαλή μετάβαση από το ένα επιφανειακό τμήμα στο άλλο. Εναλλακτικά ο χρήστης μπορεί να δώσει την πληροφορία μίας τρισδιάστατης καμπύλης ώστε η επιφάνεια να πραγματοποιήσει διγραμμική (bilinear) παρεμβολή των ενδιάμεσων σημείων της.
- **Συνοριακές αναπαραστάσεις (Brep-Boundary Representations):** Πρόκειται για μοντέλα επιφανειών τα οποία βρίσκουν κυρίως εφαρμογή όταν απαιτούνται διαδικασίες αλληλεπίδρασης μεταξύ επιφανειών. Τέτοιες διαδικασίες αλληλεπίδρασης είναι η συνένωση δύο επιφανειών, το κλείσιμο των οπών μιας επιφάνειας, η αποκοπή (trim) μιας επιφάνειας. Πιο συγκεκριμένα οι βασικές διαθέσιμες λειτουργίες που παρέχονται μέσω μιας Brep είναι οι εξής:
 - *Add sources:* Είναι η λειτουργία μέσω της οποίας αποκτά υπόσταση μια Brep. Μέσω αυτής της λειτουργίας μπορεί να καταρτισθεί λίστα από επιφάνειες ή/και άλλες Breps ώστε να προκύψει τελικά η επιθυμητή Brep επιφάνεια.
 - *Boolean operation:* Μέσω αυτής της λειτουργίας επιτυγχάνεται η αλληλεπίδραση μεταξύ δύο Brep, παρέχοντας ορισμένες επιλογές αλληλεπίδρασης στο χρήστη. Οι επιλογές αυτές είναι η ένωση (union) δύο Brep, όπου παρέχεται και η δυνατότητα φιλεταρίσματος της τελικής Brep στην ακμή της ένωσης, η τομή (intersection) όπου

³ Για λόγους πληρότητας και καλύτερης κατανόησης δεν έχει συμπεριληφθεί στις επιφάνειες, αν και εκεί υπάρχει, η κατηγορία των Meta Surfaces, καθώς απαιτείται να έχει προηγηθεί ο ορισμός του feature definition και της curve engine.

η τελικώς προκύπτουσα Brep είναι η τομή των δύο επιμέρους Brep, η διαφορά (difference) όπου η τελική συνοριακή αναπαράσταση είναι μία εκ των δύο αρχικών Brep δίχως την τομή τους.

- *Cut min max*: Η λειτουργία αυτή δίνει τη δυνατότητα στον εκάστοτε χρήστη να ορίσει τα ανώτατα και κατώτατα x, y, και z όρια μιας Brep.
 - *Edge fillet*: Μέσω της συγκεκριμένης λειτουργίας επιτυγχάνεται το φιλετάρισμα των κλειστών ακμών μιας Brep.
 - *Intersect and trim*: Λειτουργία που επιτυγχάνει να τμήσει και κατόπιν να αποκόψει το επιθυμητό κομμάτι μιας Brep. Η προς επεξεργασία Brep δύναται να αλληλεπιδράσει με επιφάνειες, άλλες Breps ή ακόμα και επιφάνειες που έχουν προκύψει από την εξέλαση (extrusion) καμπυλών κατά μία συγκεκριμένη κατεύθυνση.
 - *Project and trim*: Λειτουργία που επιτυγχάνει να τμήσει και προαιρετικά να αποκόψει το επιθυμητό κομμάτι μιας Brep μέσω της προβολής μιας καμπύλης πάνω σε μια Brep, προσδιορίζοντας την κατεύθυνση της προβολής.
 - *Remove faces*: Με αυτή τη λειτουργία επιτυγχάνεται η διαγραφή των επιλεγμένων επιφανειακών τμημάτων μιας Brep.
- **Μετασχηματισμοί (Transformations)**: Είναι οντότητες που παρέχουν τη δυνατότητα μετασχηματισμού μιας γεωμετρίας. Οι βασικές και ευρέως χρησιμοποιούμενες δυνατότητες μετασχηματισμών που παρέχει το CAESES είναι η μετατόπιση (translation), η περιστροφή (rotation), η παραμόρφωση (scaling), καθώς και συνδυασμός αυτών με την επιθυμητή σειρά μέσω μιας αλυσίδας μετασχηματισμών (transformation chain). Ένας επιπρόσθετος μετασχηματισμός που βρίσκει μεγάλη εφαρμογή στην παραμετρική μοντελοποίηση γαστρών πλοίων είναι ο μετασχηματισμός Lackenby.
 - **Offsets**: Σε αυτή την κατηγορία γεωμετρικών οντοτήτων υπάγονται τα section groups, τα επίπεδα και τα offsets. Τα section groups είναι μια ομάδα τομών μιας επιφάνειας. Για να μπορέσει η ομάδα αυτή να δημιουργηθεί χρειάζεται να της οριστεί κατά τη δημιουργία της πέραν της επιφάνειας και ένα βοηθητικό επίπεδο, ούτως ώστε να έχει την πληροφορία της διεύθυνσης ως προς την οποία θα πραγματοποιηθούν οι παράλληλες τομές στην επιφάνεια. Σύμφωνα με τα ως άνω γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι τα section groups συνιστούν την ιδεώδη γεωμετρική οντότητα για την απεικόνιση των γραμμών μιας γάστρας. Τα offsets είναι οντότητες polylines που χρησιμοποιούνται τόσο για την αναπαράσταση των νομέων όσο και για την διακριτοποίηση της γεωμετρίας της γάστρας. Μία διακριτοποίηση που είναι απαραίτητη προκειμένου η παραμετρική γεωμετρία να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το εργαλείο CFD προσομοίωσης του Shipflow.

1.4.3 Παραμετρική σχεδίαση με χρήση των feature definitions

Αν και τα ανωτέρω CAD εργαλεία που παρατέθηκαν μπορεί να αποδειχθούν πολύ σημαντικά για την υλοποίηση μιας παραμετρικής γεωμετρίας με το λογισμικό του CAESES, ο πυρήνας της παραμετρικής σχεδίασης του συγκεκριμένου λογισμικού βρίσκεται στις επαναλαμβανόμενες σχεδιαστικές αναθέσεις που εμπεριέχονται στις οντότητες που λέγονται feature definitions. Πρόκειται για οντότητες που εμπεριέχουν μία σειρά εντολών σε μορφή κώδικα, καθορισμένων από το χρήστη και οι οποίες είναι γραμμένες σε μία ειδική γλώσσα προγραμματισμού, την feature programming language. Τα feature definitions προκειμένου να οριστούν καλώς πρέπει να περιέχουν τα ακόλουθα στοιχεία:

- **Ορίσματα εισόδου (Input arguments):** Είναι οι μεταβλητές εισόδου του feature definition. Οι μεταβλητές αυτές δεν έχουν περιορισμό ως προς το πόσες μπορούν να είναι και ως προς τη φύση τους.
- **Αλγόριθμος (αναφέρεται ως Function):** Είναι η αλληλουχία εντολών που υπαγορεύουν το πώς θα γίνει η αξιοποίηση των ορισμάτων εισόδου.
- **Ιδιότητες εξόδου (Output attributes):** Είναι τα εξαγόμενα του αλγορίθμου τα οποία δεν έχουν περιορισμό ως προς το πόσα μπορούν να είναι και ως προς τη φύση τους.

Όσον αφορά στον τρόπο εκτέλεσης ενός feature definition, μπορεί να πραγματοποιηθεί με τους κάτωθι δύο τρόπους:

Προσωρινός (Transient): Ο αλγόριθμος εκτελείται μία μόνο φορά και οι παραγόμενες οντότητες εμφανίζονται στο object tree.

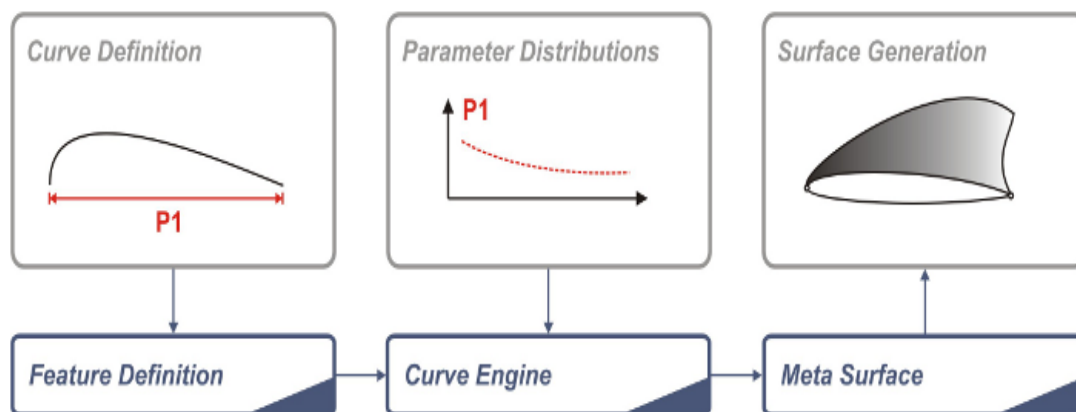
Διαρκής (Persistent): Ο αλγόριθμος του feature definition εμφανίζεται στο object tree και διατηρεί τη δομή του και τόσο τα ορίσματα εισόδου όσο και ο αλγόριθμος είναι προσβάσιμα και επιδέχονται τροποποίησης οποτεδήποτε.

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία με τα οποία είναι εφοδιασμένο ένα feature definition γίνεται εμφανές πως έχει τη λογική μιας διαδικασίας· οι ανεξάρτητες μεταβλητές του εκάστοτε προβλήματος -που μπορεί να είναι από απλές παράμετροι μέχρι επιφάνειες ή ακόμα και άλλα feature definitions- αλληλεπιδρούν με τη διαδικασία και δίνουν τις εξαρτημένες μεταβλητές που μπορεί ομοίως να κυμαίνονται από απλές παραμέτρους μέχρι επιφάνειες ή ακόμα και άλλα feature definitions. Μία σημαντική χρησιμότητα των οντοτήτων των feature definitions έγκειται στην ικανότητά τους να δημιουργούν αφηρημένες περιγραφές σύνθετων παραμετρικών καμπυλών, οι οποίες στη συνέχεια αξιοποιούνται κατάλληλα από τις λεγόμενες μηχανές καμπυλών (curve engines) και κατόπιν από τα μοντέλα επιφάνειας των meta surfaces. Αυτή η αλληλουχία σχεδιαστικών αναθέσεων αποτελεί τον αποτελεσματικότερο και πλέον ευέλικτο τρόπο δημιουργίας μιας παραμετρικής επιφάνειας με το συγκεκριμένο λογισμικό.

Όσον αφορά στις μηχανές καμπυλών, η σημασία τους είναι θεμελιώδης για τη δημιουργία των παραμετρικών επιφανειών μέσω των meta surfaces. Αυτό που επιτυγχάνουν είναι η διασύνδεση ενός πρότυπου ορισμού καμπύλης (template curve definition) με τη συνεχή περιγραφή του εν λόγω ορισμού. Λαμβάνουν ως είσοδό τους ένα feature definition, από το οποίο και αναμένουν να δοθεί ως όρισμα μία από τις καμπύλες που αυτό δίνει ως έξοδο (attribute) που αποκαλείται καμπύλη βάσης (base curve). Επιπλέον ζητείται από το χρήστη να οριστεί ο άξονας ως προς τον οποίο θα γίνει η διαβίβαση της πληροφορίας της καμπύλης βάσης. Κατόπιν ζητείται ο καθορισμός της πληροφορίας του πώς θα μεταβάλλονται ως προς τη διεύθυνση του άξονα αυτού τα ορίσματα εισόδου που συνθέτουν την καμπύλη βάσης. Ο καθορισμός αυτής της πληροφορίας γίνεται μέσω μιας συνεχούς κατανομής (distribution), η οποία μπορεί να δοθεί είτε μέσω μιας συνεχούς καμπύλης που θα βρίσκεται υποχρεωτικά πάνω σε επίπεδο στο οποίο ανήκει ο άξονας διαβίβασης της πληροφορίας της καμπύλης βάσης, είτε μέσω μιας απλής παραμέτρου που λαμβάνει πραγματική τιμή. Η δεύτερη εκδοχή δεν εκφράζει τίποτε άλλο παρά την εκφυλισμένη περίπτωση μιας τυχαίας κατανομής, την ομοιόμορφη κατανομή.

Όσον αφορά στις meta surfaces, πρόκειται για τον πιο ευέλικτο τύπο επιφάνειας του CAESES, παρέχοντας τη δυνατότητα δημιουργίας και παραμετροποίησης σύνθετων ελευθέρων μορφών (Brenner, Harries, Kroeger, & Rung, 2015). Η επιφάνεια μιας meta surface αποτελεί επί της ουσίας την οπτικοποίηση της πληροφορίας που εμπεριέχεται στην αντίστοιχη μηχανή καμπυλών, ζητώντας απλώς επιπρόσθετα την αρχή και το τέλος του ορισμού της, οι οποίες πρέπει να βρίσκονται εντός των ορίων που θέτουν οι ακρότατες τιμές των συντεταγμένων του άξονα διαβίβασης της πληροφορίας των κατανομών των ορισμάτων εισόδου. Αυτό ισχύει για την κλασική περίπτωση όπου η μηχανή καμπυλών είναι ίδια στην αρχή και στο τέλος του

ορισμού της meta surface, όπως συμβαίνει στην περίπτωση δημιουργίας της επιφάνειας της γάστρας ενός πλοίου με εφαρμογή της εν λόγω σχεδιαστικής προσέγγισης. Σε περίπτωση όμως που οι μηχανές καμπυλών στην αρχή και στο τέλος του ορισμού διαφέρουν, τότε το CAESSES κάνει μίξη των πληροφοριών των δύο μηχανών καμπυλών μέσω δικού του εγγενή μηχανισμού. Παρακάτω παρατίθεται σχήμα που απεικονίζει με τον πλέον παραστατικό τρόπο την ανωτέρω εκτεθείσα διαδικασία δημιουργίας μιας παραμετρικής επιφάνειας με χρήση της meta surface:



Σχήμα 2: Διαδικασία δημιουργίας παραμετρικής επιφάνειας με χρήση μιας meta surface (*Friendship Systems*)

Μία σημαντική επιπλέον ιδιότητα που έχουν τα feature definitions είναι η δυνατότητά τους να παράγουν τα λεγόμενα features. Τα features αποτελούν ουσιαστικά τη μετάβαση από την αφηρημένη περιγραφή που παρέχουν τα feature definitions σε μία συγκεκριμένη περιγραφή. Αποτελούν επί της ουσίας ένα στιγμιότυπο ενός feature definition. Τα δεδομένα εισόδου που αναμένει ένα feature, στην περίπτωση που το εξαγόμενο του είναι μία ή περισσότερες γεωμετρικές οντότητες, είναι τα ίδια με αυτά μίας μηχανής καμπυλών. Η ειδοποιός διαφορά όμως είναι ότι ενώ η μηχανή καμπυλών αν δεν διασυνδεθεί με μία meta surface δεν θα δώσει τίποτα ως εξαγόμενο, το feature θα δώσει ως εξαγόμενο ένα συγκεκριμένο στιγμιότυπο μιας εκ των καμπυλών που αποτελούν έξοδο του feature definition του.

Για να γίνει αυτό πιο κατανοητό δίνεται το παράδειγμα μίας σχεδιαστικής προσέγγισης της δημιουργίας της γάστρας ενός πλοίου. Μια τυχαία εγκάρσια τομή της μπορεί να περιγραφεί από ένα κατάλληλο feature definition. Στη συνέχεια περιγράφονται με καμπύλες ή/και παραμέτρους όλες οι κατανομές που είναι επιθυμητό να αποδοθούν σε κάθε ένα εκ των ορισμάτων εισόδου αυτού του feature definition ώστε να οριστεί ο τρόπος μεταβολής κάθε ορίσματος κατά το διαμήκη άξονα. Κατόπιν πραγματοποιείται η διασύνδεση της πληροφορίας μεταξύ των ορισμάτων εισόδου και των αντίστοιχων κατανομών μέσω μιας μηχανής καμπυλών. Τέλος, διασυνδέεται η μηχανή καμπυλών με μία meta surface και έτσι προκύπτει τελικά η επιφάνεια της γάστρας. Στον αντίποδα, αν εξαχθεί ένα feature από το ίδιο feature definition, το εξαγόμενο θα είναι μία εγκάρσια τομή του πλοίου σε μία συγκεκριμένη διαμήκη θέση του.

2 Το παραμετρικό μοντέλο της ημιγάστρας

2.1 Μοντελοποίηση της γυμνής ημιγάστρας

Το παραμετρικό μοντέλο της ημιγάστρας του δίγαστρου ROPAX πλοίου ανοιχτού τύπου μοντελοποιήθηκε με τη βοήθεια του CAESES. Το παραμετρικό αυτό μοντέλο δημιουργήθηκε έχοντας ως οδηγό ένα ήδη υπάρχον μοντέλο από τη βιβλιοθήκη του CAESES. Αρχικά έπρεπε να πραγματοποιηθούν ορισμένες βασικές τροποποιήσεις σε κάποιες από τις βασικές διαστάσεις του πλοίου. Συγκεκριμένα τέθηκε ως απαίτηση το ολικό μήκος⁴, το ολικό πλάτος, το κοίλο και το εκτόπισμα του πλοίου να είναι ίδια με αυτά του πλοίου της διπλωματικής του Πάνου Τσιούμα (Τσιούμας, 2018) που είχε το ίδιο πλοίο και να παραμένουν ίδια για κάθε παραλλαγή γάστρας κατά τη φάση της σχεδιαστικής βελτιστοποίησης.

Επιπρόσθετα τέθηκε ως απαίτηση η τελική επιφάνεια της γάστρας του πλοίου να έχει στο βύθισμα της κατάσταση πλήρους φόρτωσης (Full Load Departure-FLD) συντελεστή γάστρας C_B παραπλήσιο με το συντελεστή γάστρας του πλοίου του Πάνου Τσιούμα στο βύθισμα της αντίστοιχης κατάστασης φόρτωσης. Τα βασικά χαρακτηριστικά του δίγαστρου ROPAX πλοίου ανοιχτού τύπου του Πάνου Τσιούμα παρατίθενται παρακάτω:

Πίνακας 1: Βασικά χαρακτηριστικά πλοίου διπλωματικής Πάνου Τσιούμα (Τσιούμας, 2018)

Μήκος O.A	L_{OA} [m]	86.0
Ολικό πλάτος	B [m]	23.0
Πλάτος ημιγαστρών	B_{dh} [m]	7.00
Κοίλο	D [m]	6.40
Βύθισμα σχεδίασης	T [m]	3.40
Εκτόπισμα	Δ [t]	2473.8
Ταχύτητα υπηρεσίας	V_S [kn]	12.3

Κατόπιν παρατίθενται κατωτέρω τα υδροστατικά στοιχεία του πλοίου του Πάνου Τσιούμα, τα οποία έχουν υπολογιστεί με την υπόθεση της ισοβύθισης και άνευ εγκάρσιας κλίσης κατάστασης με βήμα βυθίσματος 0.5 m, συμπεριλαμβανομένου και του βυθίσματος της FLD:

⁴ Το ολικό μήκος του πλοίου για κάθε παραλλαγή της αρχικής ημιγάστρας κατά τη φάση της σχεδιαστικής βελτιστοποίησης εμφάνιζε μία μικρή διαφοροποίηση της τάξεως των ± 0.15 m ως προς το ολικό μήκος των 86.0 m.

Πίνακας 2: Υδροστατικά στοιχεία πλοίου διπλωματικής Πάνου Τσιούμα (Τσιούμας, 2018)

T m	DISP t	VOLT m3	LCB m	VCB m	KMT m	KML m	LCA m
1.000	422.6	412.3	41.639	0.585	94.344	597.036	42.08
1.500	759.3	740.8	41.794	0.883	64.352	417.138	42.00
2.000	1152.2	1124.1	41.822	1.180	49.200	325.407	41.73
2.500	1592.5	1553.7	41.719	1.477	39.972	268.234	41.44
3.000	2070.5	2020.0	41.611	1.771	33.798	229.580	41.17
3.400	2473.8	2413.5	41.553	2.004	30.177	206.913	40.96
3.500	2578.1	2515.2	41.526	2.063	29.390	202.092	40.90
4.000	3112.2	3036.3	41.412	2.352	26.022	181.249	40.65
4.500	3679.3	3589.5	41.286	2.646	23.576	171.825	40.29
5.000	4365.6	4259.2	41.069	2.980	21.923	234.704	39.14

T m	TPC t/cm	MCT tm/cm	WLA m2	WSA m2	CB	CM	CP	CW
1.000	6.1	30.0	591.5	695	0.3449	0.460	0.7491	0.4999
1.500	7.3	37.6	713.5	895	0.4151	0.539	0.7703	0.6040
2.000	8.3	44.5	813.2	1086	0.4734	0.603	0.7851	0.6888
2.500	9.2	50.6	895.3	1269	0.5243	0.656	0.7993	0.7588
3.000	9.9	56.2	963.4	1449	0.5687	0.701	0.8116	0.8169
3.400	10.3	60.3	1009.2	1592	0.5998	0.731	0.8202	0.8558
3.500	10.4	61.4	1019.5	1628	0.6073	0.738	0.8225	0.8646
4.000	10.9	66.3	1064.6	1807	0.6418	0.770	0.8338	0.9007
4.500	11.8	74.1	1151.3	2010	0.6717	0.795	0.8447	0.9243
5.000	18.8	120.4	1834.4	2794	0.6979	0.816	0.8556	0.9416

Οι όποιες επιπρόσθετες τροποποιήσεις και προσθήκες έλαβαν χώρα στη συνέχεια έγιναν με γνώμονα τα εξής κριτήρια:

- Το πλοίο να έχει κάποια συγκεκριμένα μορφολογικά χαρακτηριστικά στις περιοχές της πρύμνης και της πλώρης. Πιο συγκεκριμένα:
 - ❖ Η περιοχή της πρύμνης έπρεπε να είναι αρκούτως υπερυψωμένη ως προς το βασικό επίπεδο αναφοράς ώστε να μπορεί να χωρέσει -κατόπιν εφαρμογής και κάποιων απαραίτητων περιορισμών- δίχως προβλήματα μία ικανοποιητικής διαμέτρου έλικα και το πηδάλιο.
 - ❖ Η πλώρη να είναι δίχως βολβό και να έχει ένα προφίλ ευθείας γραμμής.
- Η τελική επιφάνεια να είναι όσο το δυνατόν πιο ομαλή γίνεται.

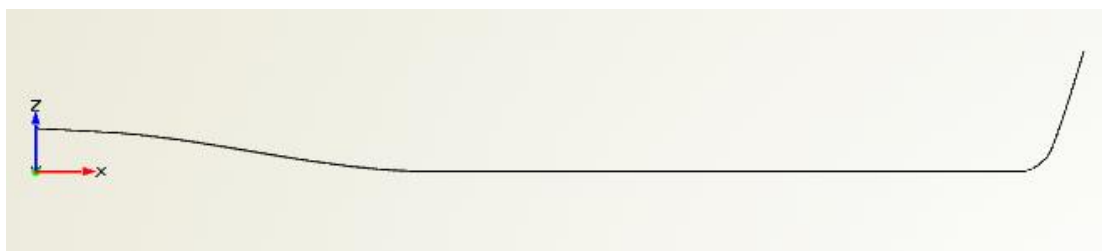
Στο μοντέλο αυτό μελετήθηκε αρχικά εκτενώς κάθε μια εκ των μεταβλητών σχεδιάσής του, των παραμέτρων του καθώς και των διαφόρων γεωμετρικών οντοτήτων του ούτως ώστε να καταστεί σαφής η λειτουργία και η χρησιμότητα κάθε μίας εξ αυτών. Κατόπιν πραγματοποιήθηκαν οι κατάλληλες τροποποιήσεις σε κάποιες από τις μεταβλητές σχεδίασης και τις παραμέτρους, ενώ παράλληλα προστέθηκαν κάποιες παράμετροι αλλά και αφαιρέθηκαν κάποιες άλλες ώστε να ικανοποιηθούν οι προαναφερθείσες απαιτήσεις που είχαν τεθεί για το υπό μελέτη παραμετρικό μοντέλο.

Όταν εν τέλει κρίθηκε ότι όλα τα ανωτέρω κριτήρια ικανοποιούνται, το παραμετρικό μοντέλο βρισκόταν πλέον στην τελική του μορφή και ήταν έτοιμο για να χρησιμοποιηθεί στο επόμενο στάδιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, που ήταν η αρχική εξερεύνηση του χώρου των σχεδιαστικών λύσεων, με τη χρήση ενός αλγορίθμου της ομάδας μεθόδων σχεδιασμού πειραμάτων (Design of experiments-DoE), του αλγορίθμου Sobol.

Παρακάτω επεξηγούνται και σε ορισμένες περιπτώσεις που κρίθηκε απαραίτητο αναλύονται εκτενώς όλες οι βασικές παράμετροι και οι γεωμετρικές οντότητες που ο χρήστης θα συναντήσει στο τελικό αρχείο του παραμετρικού μοντέλου και που συνέβαλαν στη δημιουργία της τελικής μορφής του.

2.1.1 Βασικές καμπύλες

CPC (Center Plane Curve): Πρόκειται για την καμπύλη του προφίλ της ημιγάστρας που αντιστοιχεί στην τομή του διαμήκους επιπέδου συμμετρίας με την επιφάνεια της ημιγάστρας. Η καμπύλη αυτή προέκυψε μέσω μιας polycurve η οποία εμπεριέχει δύο επιμέρους καμπύλες: την καμπύλη όλου του προφίλ πλην της πλώρης και την καμπύλη της πλώρης. Οι επιμέρους αυτές καμπύλες δημιουργήθηκαν μέσω δύο διαφορετικών features, των keel και stem, τα οποία δίνουν ως έξοδο τις επιμέρους CPC της τρόπιδας -πλην της πλώρης- και της πλώρης.



Σχήμα 3: Καμπύλη τρόπιδας

Deck: Είναι η 3D καμπύλη του καταστρώματος, η οποία δημιουργήθηκε με την ακόλουθη λογική: πρώτα μέσω ενός feature δημιουργήθηκε μία πρώτη βοηθητική καμπύλη (deckY) του καταστρώματος στο xy επίπεδο και κατόπιν, πάλι με τη συνδρομή ενός feature, παράχθηκε μία δεύτερη βοηθητική καμπύλη του (deckZ) στο xz επίπεδο. Έχοντας με τον τρόπο αυτό όλη την απαραίτητη πληροφορία για την 3D αναπαράσταση της καμπύλης του καταστρώματος έγινε η κατάλληλη σύνθεση αυτής της πληροφορίας μέσω του feature που προέκυψε από το feature definition Curve3DFrom2PlanarCurves. Το προκύπτον feature απαιτούσε ως είσοδο προκειμένου να δημιουργήσει την ζητούμενη 3D καμπύλη δύο επιμέρους καμπύλες, εκ των οποίων η πρώτη θα έπρεπε να είναι ορισμένη στο xy επίπεδο και η δεύτερη στο xz επίπεδο. Έτσι με δεδομένο ότι η ανεξάρτητη μεταβλητή x και των δύο καμπυλών είχε το ίδιο πεδίο ορισμού και για τις δύο βοηθητικές καμπύλες, σε κάθε x αντιστοιχιζόταν ένα ζεύγος (y,z), παράγοντας τελικώς την τρισδιάστατη καμπύλη του καταστρώματος.



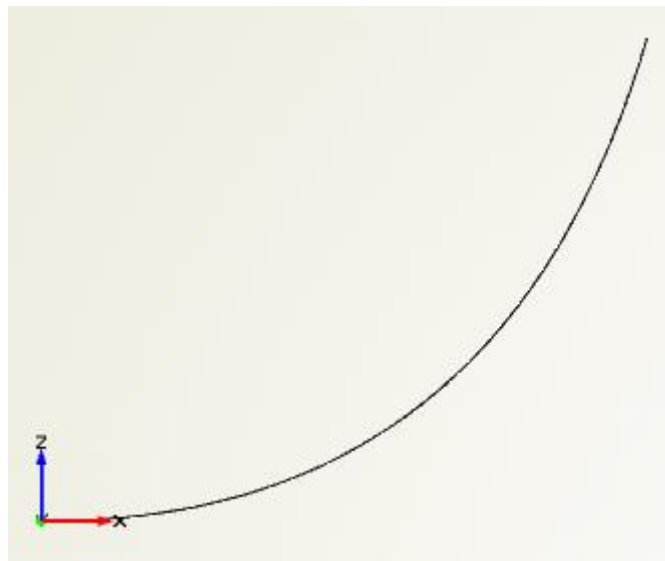
Σχήμα 4: Καμπύλη διαμήκους κατανομής ημιπλάτους καταστρώματος

Dwl (Design Water Line): Πρόκειται για την διδιάστατη καμπύλη της ισάλου σχεδίασης. Η καμπύλη αυτή προέκυψε κατ' αρχήν μέσω ενός feature, ίδιου με αυτό με το οποίο εξήχθησαν και οι καμπύλες keel, stem, deckY και deckZ που αναλύθηκαν παραπάνω. Η δημιουργούμενη καμπύλη της ισάλου σχεδίασης ωστόσο έπρεπε να υποστεί κατάλληλο μετασχηματισμό ώστε να ανήκει στο zx επίπεδο και όχι στο xy επίπεδο. Ο λόγος πίσω από αυτό είχε να κάνει μία εγγενή απαίτηση του λογισμικού, σύμφωνα με την οποία οι κατανομές που ορίζονται στην ίδια μηχανή καμπυλών πρέπει οπωσδήποτε να ανήκουν στο ίδιο επίπεδο. Προκειμένου λοιπόν να επιτευχθεί αυτό δημιουργήθηκε μία καμπύλη-είδωλο (image curve). Ως μετασχηματισμός ορίστηκε εδώ μία δεξιόστροφη περιστροφή 90° γύρω από το διαμήκη άξονα x ονόματι toPlane.



Σχήμα 5: Καμπύλη ισάλου σχεδίασης

Entrance_angle: Είναι η κανονικοποιημένη καμπύλη της γωνίας εισόδου της πλώρης του πλοίου. Καθορίζει την κατανομή της γωνίας που σχηματίζει κάθε ισάλος της πλώρης από το βασικό επίπεδο αναφοράς έως το κοίλο.



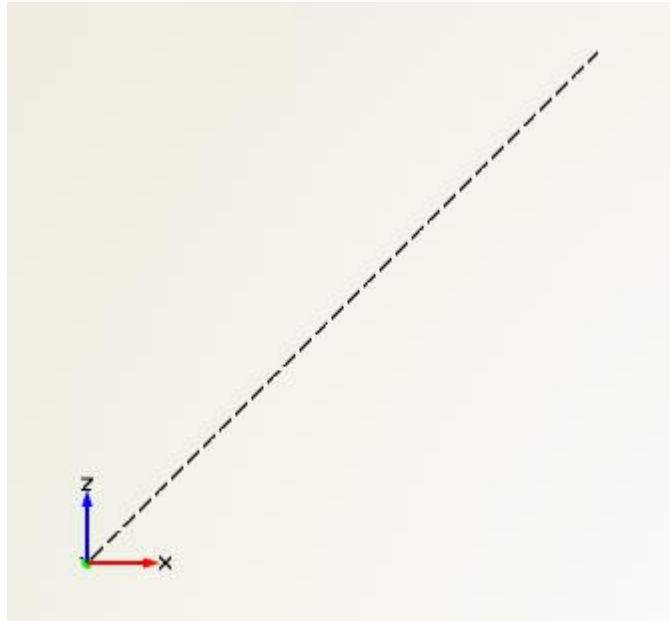
Σχήμα 6: Κανονικοποιημένη καμπύλη γωνίας εισόδου πλώρης

Flare: Καθορίζει τη γωνία ανοίγματος της κάθε εγκάρσιας τομής του πλοίου, από τον καθρέφτη μέχρι την προραία κάθετο του, στο ύψος της ισάλου σχεδίασης.



Σχήμα 7: Καμπύλη διαμήκους κατανομής flare

For_X: Καθορίζει την κατανομή της διαμήκους θέσης κάθε εγκάρσιας τομής του πλοίου. Η κατανομή αυτή είναι η ευθεία με εξίσωση $z=x$. Αυτή η κατανομή αν και πολύ απλή στη μορφή είναι απαραίτητη σε αυτή τη μορφή ώστε να μπορεί μετέπειτα να «καταλάβει» η μηχανή καμπυλών ότι η καμπύλη της τυχαίας εγκάρσιας τομής θα κινείται κατά το διάμηκες εντός του διαστήματος που ορίζει το σύνολο τιμών αυτής της καμπύλης και ότι η μεταβολή της θα ακολουθεί την εν λόγω κατανομή.



Σχήμα 8: Καμπύλη διαμήκους κατανομής διαμήκους θέσης εγκαρσίων τομών πλοίου

2.1.2 Βασικές παράμετροι

Οι βασικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή της παραμετρικής επιφάνειας της ημιγιάστρας ήταν οι κάτωθι και χωρίστηκαν σε ομάδες αναλόγως του φακέλου (score) στον οποίο ανήκαν σύμφωνα με την τελική εκδοχή του αρχείου του παραμετρικού μοντέλου της παρούσας διπλωματικής εργασίας:

- **Παράμετροι κύριων διαστάσεων**

height: Το κοίλο του πλοίου. Τονίζεται ότι το κοίλο αυτό δεν συμπίπτει με το πραγματικό κοίλο του πλοίου, καθώς όταν δημιουργήθηκε η τελική παραμετρική επιφάνεια της ημιγιάστρας, αυτή αποκόπηκε κατάλληλα ώστε το κοίλο της να είναι ίδιο με αυτό της διπλωματικής του Πάνου Τσιούμα - $D = 6.40\text{ m}$ - από τον οποίο πάρθηκαν τα απαραίτητα δεδομένα για την μοντελοποίηση της ημιγιάστρας της παρούσας διπλωματικής.

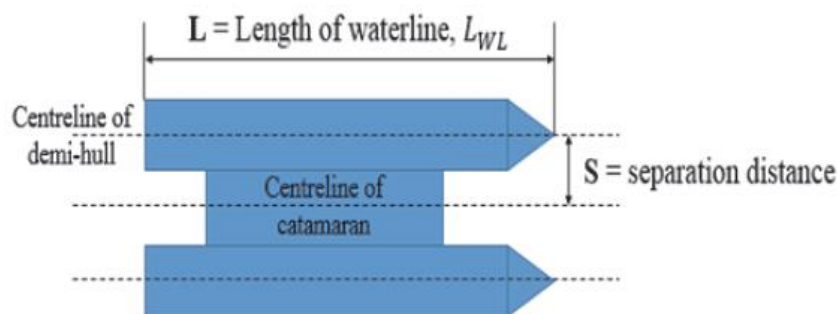
beam: Ελέγχει το μέγιστο πλάτος της ημιγιάστρας του σκάφους και αντιστοιχεί στο μέγιστο πλάτος σε κοίλο ίσο με αυτό που υπαγορεύει η παράμετρος height.

Beam_OA: Το ολικό πλάτος του δίγαστρου πλοίου.

draft: Το βύθισμα σχεδίασης του πλοίου, μέσω του οποίου ορίζεται η απόσταση της καμπύλης της dwl που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα από το βασικό επίπεδο αναφοράς. Να σημειωθεί ότι το εν λόγω βύθισμα δεν συμπίπτει με το πραγματικό βύθισμα του πλοίου, με βάση το οποίο στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν οι υδροστατικοί υπολογισμοί και οι απαραίτητοι υδροδυναμικοί υπολογισμοί στο Shipflow. Το συγκεκριμένο βύθισμα δεν έχει δηλαδή φυσική σημασία και συνέδραμε μόνο σε σχεδιαστικούς σκοπούς.

Length_at_real_height: Το ολικό μήκος του πλοίου στο ύψος των 6.40 m που αντιστοιχεί στο κοίλο της διπλωματικής του Πάνου Τσιούμα. Σκοπός αυτής της παραμέτρου ήταν να λαμβάνει -ασχέτως των μετασχηματισμών που είχε υποστεί η πρωραία επιφάνεια της ημιγιάστρας- μία τιμή πολύ κοντά στα 86.0 m που είναι και το ολικό μήκος του πλοίου της διπλωματικής του Πάνου Τσιούμα

Seperation: Η απόσταση μεταξύ των ημιγαστρών του πλοίου. Η σύμβαση που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό της απόστασης αυτής ήταν ότι η τιμή της θα είναι ίση με την απόσταση μεταξύ της centerline του δίγαστρου πλοίου και της centerline της κάθε ημιγάστρας του. Η παράμετρος αυτή, αν και δεν χρησιμοποιήθηκε στη διαδικασία της παραμετρικής μοντελοποίησης της ημιγάστρας του πλοίου, ήταν απαραίτητη ως είσοδος για τη μετέπειτα αρχικοποίηση του Shipflow προκειμένου να πραγματοποιηθούν οι απαραίτητοι υδροδυναμικοί υπολογισμοί. Παρακάτω παρατίθεται εικόνα που επεξηγεί τον τρόπο υπολογισμού της απόστασης μεταξύ των ημιγαστρών του δίγαστρου πλοίου:



Σχήμα 9: Ορισμός απόστασης ημιγαστρών δίγαστρου πλοίου (Ramsani, Tam, & Dev, 2016)

xFp: Το μήκος του σκάφους μετρούμενο από τον καθρέφτη έως και την προραία κάθετο (Fore Perpendicular-F.P.), προτού επιβληθεί γραμμική διαμήκης παραμόρφωση στο προραίο τμήμα της ημιγάστρας. Προτού συμβεί αυτό, η προραία κάθετος βρισκόταν σε διαμήκη θέση 84.0 m από τον καθρέφτη, ενώ μετά την επιβολή της γραμμικής διαμήκους παραμόρφωσης του προραίου τμήματος υπόκειται κατάλληλη μικρή διαμήκη μετατόπιση.

xPeak: Το ολικό μήκος του πλοίου στο κοίλο που υπαγορεύεται από την παράμετρο height.

deltaCP: Μεταβολή του πρισματικού συντελεστή. Μέσω της μεταβλητής αυτής, ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει τον πρισματικό συντελεστή της ημιγάστρας.

deltaXCB: Μεταβολή της διαμήκους θέσης του κέντρου άντωσης. Μέσω της μεταβλητής αυτής, ο χρήστης μπορεί να τροποποιήσει τη διαμήκη θέση του κέντρου όγκου της ημιγάστρας.

• Παράμετροι της καμπύλης του καθρέφτη

beam_factor: Συντελεστής που καθορίζει το ποσοστό του μέγιστου πλάτους του καθρέφτη ως προς το μέγιστο πλάτος της ημιγάστρας.

beam_transom: Το μέγιστο πλάτος του καθρέφτη όπως προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του πλάτους της ημιγάστρας με την παράμετρο beam_factor.

height_factor: Συντελεστής που καθορίζει σε τι ποσοστό του κοίλου του πλοίου θα φτάνει η άνω ακμή του καθρέφτη.

height_transom: Το ύψος στο οποίο φτάνει η άνω ακμή του καθρέφτη, όπως προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του κοίλου της ημιγάστρας με την παράμετρο height_factor.

zTransom: Η z-συντεταγμένη που καθορίζει την κατακόρυφη απόσταση από το βασικό επίπεδο αναφοράς του σημείου της κάτω ακμής του καθρέφτη που ανήκει πάνω στο διάμηκες επίπεδο συμμετρίας.

- **Παράμετροι της καμπύλης της τροπίδας Center Plane Curve (CPC)**

xCPC_stern_INTpoint: Ελέγχει τη x-συντεταγμένη του πρώτου -βαίνοντας από τον καθρέφτη προς την πλώρη- ενδιάμεσου σημείου ελέγχου της καμπύλης της τροπίδας.

zCPC_stern_INTpoint: Ελέγχει τη z-συντεταγμένη του πρώτου -βαίνοντας από τον καθρέφτη προς την πλώρη- ενδιάμεσου σημείου ελέγχου της καμπύλης της τροπίδας.

TangentBow: Η γωνία που σχηματίζει με τον κατακόρυφο άξονα Oz το ενδιάμεσο σημείο ελέγχου της καμπύλης της πλώρης.

xAftBase: Η διαμήκης θέση του δεύτερου ενδιάμεσου σημείου ελέγχου της τροπίδας, το οποίο συμπίπτει με το πρώτο σημείο της καμπύλης της τροπίδας -βαίνοντας από τον καθρέφτη προς την πλώρη- που κείται επί του βασικού επιπέδου αναφοράς. Ακολουθεί σχήμα στο οποίο επεξηγείται η διαμήκης θέση που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη παράμετρο:



Σχήμα 10: Καμπύλη τροπίδας με το σημείο της αρχής της ($x=0$), το πρώτο ενδιάμεσο σημείο της (αριστερό κίτρινο σημείο) και το δεύτερο ενδιάμεσο σημείο της (δεξιό κίτρινο σημείο)

xFwdBase: Η διαμήκης θέση που καθορίζει το πέρας της καμπύλης της τροπίδας και την έναρξη της καμπύλης του προφίλ της πλώρης.

zCPC_stern: Η z-συντεταγμένη που καθορίζει την κατακόρυφη απόσταση από το βασικό επίπεδο αναφοράς του πρώτου ενδιάμεσου σημείου ελέγχου της καμπύλης της τροπίδας.

zVertStemLow: Η z-συντεταγμένη που καθορίζει την κατακόρυφη απόσταση από το βασικό επίπεδο αναφοράς του ενδιάμεσου σημείου ελέγχου της καμπύλης του προφίλ της πλώρης.

- **Παράμετροι της καμπύλης της ισάλου σχεδίασης**

beamAtTransom: Το πλάτος του καθρέφτη στο ύψος της καμπύλης της ισάλου σχεδίασης.

beamMax: Το μέγιστο πλάτος της καμπύλης της ισάλου σχεδίασης.

entranceAngle: Η γωνία εισόδου της καμπύλης της ισάλου σχεδίασης.

tanAtTransom: Η γωνία εξόδου της καμπύλης της ισάλου σχεδίασης.

- **Παράμετροι της καμπύλης του flare**

atMaxBeam: Flare στο μέγιστο πλάτος της ημιγιάστρας. Τονίζεται ότι η γωνία αυτή είναι δεκαπλάσια σε μέγεθος από τη γωνία που τελικώς υπεισέρχεται στον προσδιορισμό της καμπύλης του flare.

atTransom: Flare στον καθρέφτη της ημιγιάστρας. Τονίζεται ότι η γωνία αυτή είναι δεκαπλάσια σε μέγεθος από τη γωνία που τελικώς υπεισέρχεται στον προσδιορισμό της καμπύλης του flare.

tanAtFp: Γωνία συνάρτησης flare στην προωαία κάθετο.

- **Παράμετροι σχετιζόμενες με τις επιμέρους επιφάνειες της γιάστρας**

Real_x_max_Area: Η θέση στην οποία εμφανίζεται ο νομέας με τη μέγιστη επιφάνεια.

Aftbody_scaled_edge_pos: Η διαμήκης θέση του προωαίου νομέα του πρυμναίου τμήματος της επιφάνειας της ημιγιάστρας.

Aftbody_scaling_factor: Ο συντελεστής, με τιμή μικρότερη ή ίση της μονάδας, που καθορίζει τη γραμμική παραμόρφωση (κατά το διάμηκες) του πρυμναίου τμήματος της επιφάνειας της ημιγιάστρας.

Forebody_scaled_edge_pos: Η διαμήκης θέση του πρυμναίου νομέα του προωαίου τμήματος της επιφάνειας της ημιγιάστρας.

Forebody_scaling_factor: Ο συντελεστής, με τιμή μικρότερη ή ίση της μονάδας, που καθορίζει που καθορίζει τη γραμμική παραμόρφωση του προωαίου τμήματος της επιφάνειας της ημιγιάστρας.

Midbody_length: Το μήκος του παράλληλου τμήματος της ημιγιάστρας.

- **Παράμετροι σχετιζόμενες με τα υδροστατικά στοιχεία της ημιγιάστρας**

Actual_draft_FLD: Το πραγματικό βύθισμα της τελικής επιφάνειας της ημιγιάστρας στην ισοβύθιστη κατάσταση που αντιστοιχούσε στην κατάσταση πλήρους φόρτωσης, όπως προέκυψε με τη βοήθεια του αλγορίθμου Brent.

beam_wl: Το μέγιστο πλάτος της ημιγιάστρας στο βύθισμα της κατάστασης πλήρους φόρτωσης.

CB: Ο συντελεστής γιάστρας του πλοίου.

CM: Ο συντελεστής μέσης τομής του πλοίου.

CP: Ο πρισματικός συντελεστής του πλοίου.

CWP: Ο συντελεστής ισάλου επιφανείας του πλοίου.

KM_T: Η κατακόρυφη θέση του εγκάρσιου μετακέντρου του πλοίου.

Lpp_final: Το μήκος μεταξύ καθέτων του σκάφους που αφορούν στην τελική επιφάνεια της ημιγιάστρας.

Lwl_final: Το μήκος του πλοίου στην ίσαλο του βυθίσματος της κατάστασης πλήρους φόρτωσης.

LCB: Η διαμήκης θέση του κέντρου άντωσης.

rel_LCB: Η σχετική, ως προς το μήκος του πλοίου στην ίσαλο του βυθίσματος της κατάστασης πλήρους φόρτωσης, διαμήκης θέση του κέντρου άντωσης.

Static_SR: Ο συντελεστής λυγηρότητας της κάθε ημιγάστρας.

Static_volume: Ο στατικός όγκος εκτοπίσματος του δίγαστρου πλοίου στο βύθισμα της κατάστασης πλήρους φόρτωσης.

Static_WPA: Η στατική ίσαλος επιφάνεια του δίγαστρου πλοίου στο βύθισμα της κατάστασης πλήρους φόρτωσης.

Static_WSA: Η στατική βρεχόμενη επιφάνεια του δίγαστρου πλοίου στο βύθισμα της κατάστασης πλήρους φόρτωσης.

2.1.3 Διαδικασία δημιουργίας επιφανειών

Η παραγωγή της τελικής επιφάνειας της γάστρας πραγματοποιήθηκε σταδιακά. Το αρχικό παραμετρικό μοντέλο που πάρθηκε από τη βιβλιοθήκη του CAESES για την αναπαράσταση της επιφάνειας της γάστρας χρησιμοποιούσε δύο meta surfaces, μία για το κυρίως τμήμα της (main) και μία για την πλώρη (stem). Σύμφωνα με όσα είχαν αναφερθεί για τις meta surfaces στο προηγούμενο κεφάλαιο, προκειμένου κάθε μία εκ των δύο να δημιουργηθεί έπρεπε να προηγηθεί ο ορισμός των αντίστοιχων curve engines αλλά και να τεθούν τα διαμήκη όριά τους.

Με την επιφάνεια της γάστρας που προέκυπτε μετά τις διάφορες τροποποιήσεις ή/και προσθήκες που είχαν προηγηθεί ξεκίνησε το δεύτερο στάδιο της δημιουργίας της τελικής επιφάνειας του παραμετρικού μοντέλου. Εκτενέστερα, αρχικά βρέθηκε η πραγματική διαμήκης θέση του νομέα του πλοίου με τη μέγιστη επιφάνεια και αποθηκεύτηκε στην παράμετρο Real_x_max_Area. Η ανάγκη εύρεσης της θέσης της μέγιστης επιφάνειας προέκυψε λόγω της ανάγκης επίτευξης μεγαλύτερου συντελεστή γάστρας C_B σε σχέση με τον μέγιστο που μπορούσε να παρέχει το μοντέλο δίχως να χαλάνε οι γραμμές του. Συγκεκριμένα επιδιώχθηκε η τιμή που θα προέκυπτε για την τελική επιφάνεια της ημιγάστρας του παραμετρικού μοντέλου να είναι αρκετά κοντά στην αντίστοιχη τιμή του C_B του πλοίου του Πάνου Τσιούμα από τον οποίο πάρθηκαν τα δεδομένα για το υπάρχον μοντέλο.

Το σκεπτικό πίσω από την εύρεση της θέσης του νομέα με τη μέγιστη επιφάνεια ήταν να δημιουργηθεί ένα παράλληλο τμήμα το οποίο θα είχε την ίδια επιφάνεια διατομής καθ' όλο το μήκος του και η οποία θα συνέπιπτε με το νομέα με τη μέγιστη επιφάνεια. Για να μπορούσε όμως αυτό το τμήμα να υπάρξει ήταν απαραίτητο να δημιουργηθούν ένα πρυμναίο και ένα πρωραίο τμήμα για την ημιγάστρα, κατάλληλα παραμορφωμένα κατά το διαμήκη άξονα, ώστε να δημιουργηθεί κενό μεταξύ τους. Το κενό αυτό στη συνέχεια θα κάλυπτε το παράλληλο τμήμα. Κατ' αυτό τον τρόπο η αύξηση του συντελεστή γάστρας θα ήταν δεδομένη και το ποσοστό αύξησής του εξαρτώμενο πρωτίστως από το μήκος αυτού του παράλληλου τμήματος. Η ανάγκη διαμήκους παραμόρφωσης του πρυμναίου και πρωραίου τμήματος της γάστρας αποτέλεσε οδηγό για τη δημιουργία δύο μετασχηματισμών -συγκεκριμένα δύο παραμορφώσεων (scalings)-, όπου ο καθένας εξ αυτών θα ενσωματωνόταν στην αντίστοιχη Brep επιφάνεια.

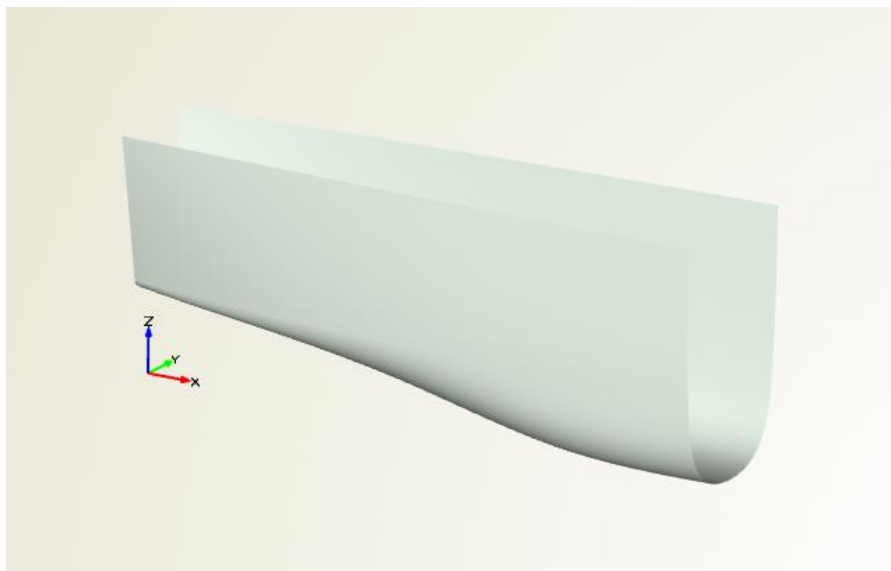
Αφού λοιπόν βρέθηκε η θέση αυτή δημιουργήθηκε μία πρώτη Brep επιφάνεια για την αναπαράσταση του πρυμναίου τμήματος της ημιγάστρας, δεχόμενη ως επιφάνεια εισόδου την meta surface που έδινε τη μέχρι τώρα κύρια επιφάνεια της γάστρας. Η επιλογή της Brep έγινε

με γνώμονα τη δυνατότητα που παρέχει ως οντότητα για αλληλεπίδραση με άλλες καμπύλες και επιφάνειες, καθώς και τη δυνατότητά της να υπόκειται σε μετασχηματισμούς μετά τη δημιουργία της (post processing transformations). Έτσι έγινε αρχικά χρήση μίας εκ των λειτουργιών αλληλεπίδρασης που παρέχουν οι Brep, της cut min max. Η λειτουργία αυτή δίνει τη δυνατότητα στον εκάστοτε χρήστη να ορίσει τα x, y, και z όρια της Brep που ορίστηκε στη λειτουργία του add source.

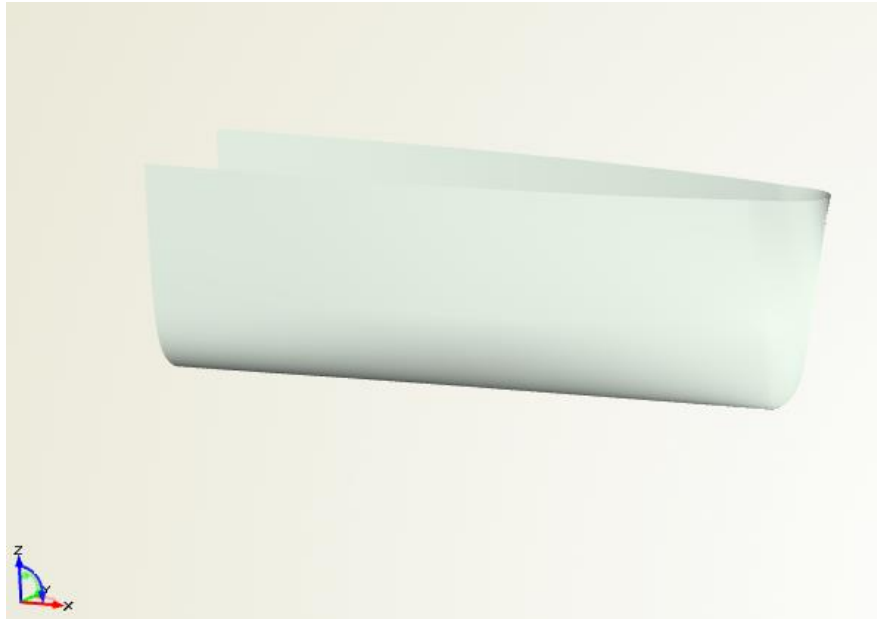
Για τους σκοπούς των παραμορφώσεων του πρυμναίου και του πρωραίου τμήματος ορίστηκαν οι μετασχηματισμοί παραμόρφωσης Aftbody_scaling και Forebody_scaling αντίστοιχα. Σε κάθε μία εξ αυτών των παραμορφώσεων δινόταν η πληροφορία της παραμόρφωσης μόνο κατά το διάμηκες (Factor X). Επομένως για την παραμόρφωση Aftbody_scaling δόθηκε στο πεδίο της διαμήκους παραμόρφωσης η παράμετρος Aftbody_scaling_factor, ενώ για την παραμόρφωση Forebody_scaling δόθηκε στο πεδίο της διαμήκους παραμόρφωσης η παράμετρος Forebody_scaling_factor.

Έτσι θέτοντας ως μέγιστο διάμηκες όριο στην εν λόγω νεοσυσταθείσα Brep τη θέση του νομέα με τη μέγιστη επιφάνεια και επιβάλλοντας κατάλληλη διαμήκη παραμόρφωση ως post processing διαδικασία προέκυψε η επιφάνεια του πρυμναίου τμήματος. Στη συνέχεια με όμοιο τρόπο δημιουργήθηκε η επιφάνεια του πρωραίου τμήματος, θέτοντας απλά τώρα τη θέση του νομέα με τη μέγιστη επιφάνεια ως το ελάχιστο διάμηκες όριο και επιβάλλοντας ως post processing διαδικασία την παραμόρφωση που αντιστοιχούσε στο πρωραίο τμήμα.

Παρακάτω παρατίθενται δύο σχήματα που απεικονίζουν την τελική μορφή της παραμετρικής επιφάνειας του πρυμναίου και πρωραίου τμήματος της γάστρας, όπως αυτά προκύψανε από την εκπόνηση της ως άνω διαδικασίας που περιγράφηκε:

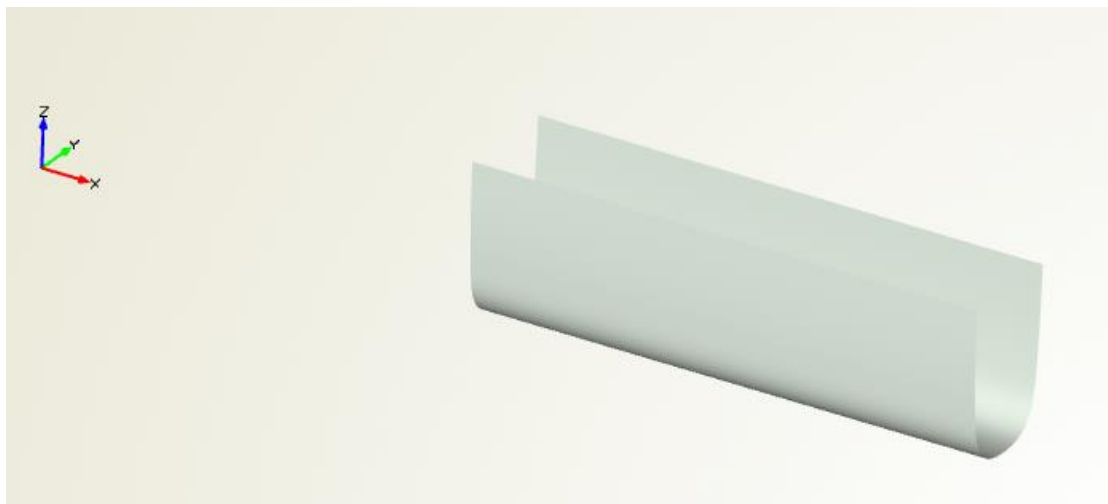


Σχήμα 11: Πρυμναίο τμήμα ημιγάστρας σε κούλο D=10 m



Σχήμα 12: Πρωραίο τμήμα ημιγάστρας σε κοίλο $D=10$ m

Συνέχεια είχε η δημιουργία του ενδιάμεσου τμήματος της γάστρας. Για τη δημιουργία του τμήματος αυτού έγινε χρήση μιας lofted επιφάνειας, χρησιμοποιώντας ως καμπύλες αρχής και τέλους του loft που χρησιμοποιήθηκε την πρωραία ακμή⁵ της Brep του πρυμναίου τμήματος και την πρυμναία ακμή της Brep του πρωραίου τμήματος αντίστοιχα, ενώ παράλληλα δεν χρειάστηκε να δοθεί η επιπρόσθετη πληροφορία κάποιας καμπύλης-οδηγού (rail curve). Σύμφωνα με όσα εκτέθηκαν παραπάνω οι δύο αυτές ακμές είναι ίδιες μιας και πρόκειται για τον ίδιο νομέα, το νομέα με τη μέγιστη επιφάνεια, έχοντας απλά υποστεί κατάλληλη διαμήκη μετατόπιση. Παρακάτω παρατίθεται σχήμα που απεικονίζει την τελική μορφή της παραμετρικής επιφάνειας του παράλληλου τμήματος της γάστρας, όπως αυτό προέκυψε από την εκπόνηση της ως άνω διαδικασίας που περιγράφηκε:



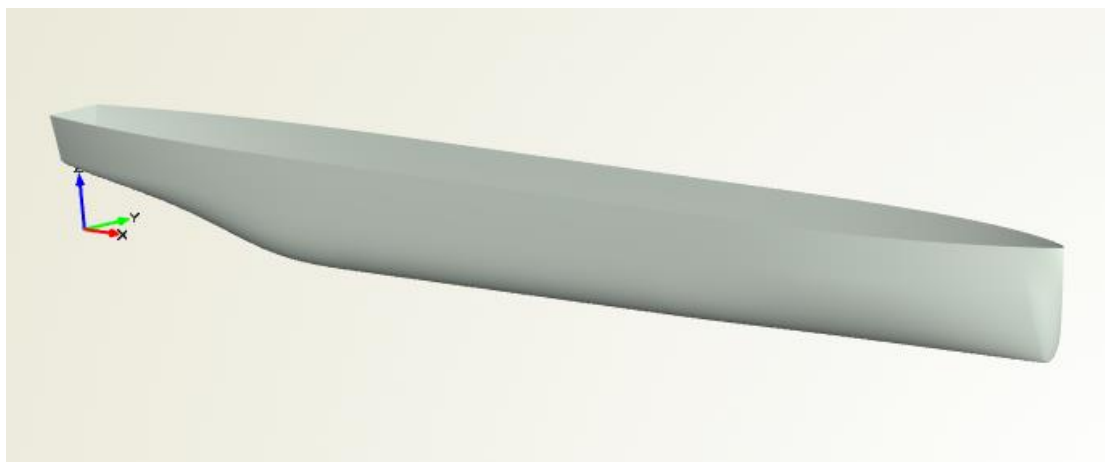
Σχήμα 13: Παράλληλο τμήμα ημιγάστρας σε κοίλο $D=10$ m

Μετά τη δημιουργία και του ενδιάμεσου τμήματος του πλοίου δημιουργήθηκε μία ακόμα Brep ονόματι Hull_Final, επιφάνεια στην οποία τοποθετήθηκαν ως πηγαίες επιφάνειές της οι Breps του πρυμναίου, του ενδιάμεσου και του πρωραίου τμήματος. Αυτό που πλέον απέμενε για την

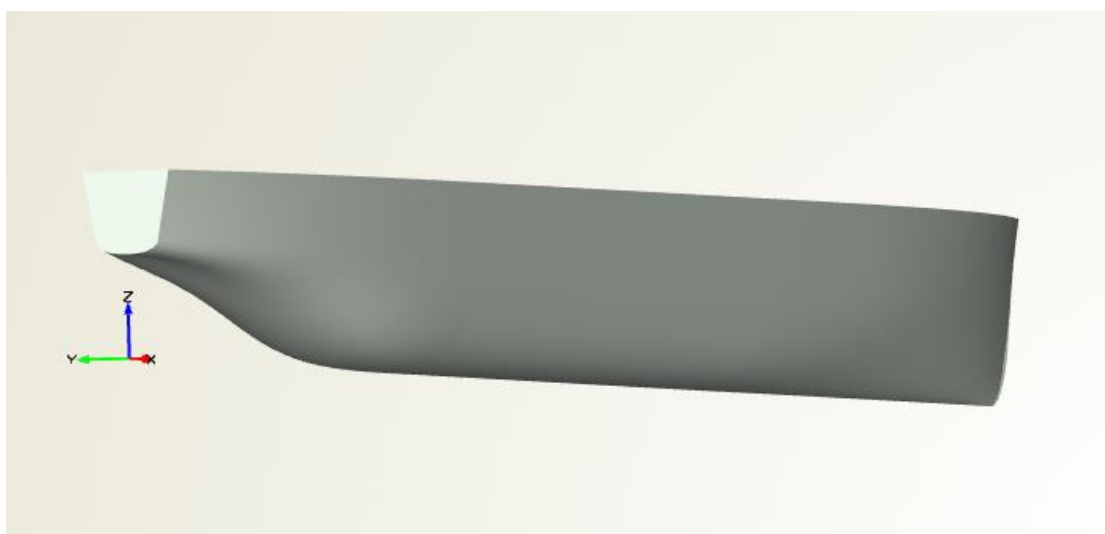
⁵ Με τον όρο ακμή δεν νοείται κάποιο chine αλλά κάποιο από τα edges της κάθε επιφάνειας.

αναπαράσταση της τελικής επιφάνειας της ημιγάστρας ήταν η δημιουργία της επιφάνειας του καθρέφτη. Η επιφάνεια αυτή δημιουργήθηκε μέσω της χρήσης μίας επιφάνειας coons patch. Η επιφάνεια δέχτηκε ως συνοριακές καμπύλες κατά σειρά την κατακόρυφη επί του επιπέδου yz ευθεία που ξεκινούσε από το σημείο τομής της κάτω ακμής του περιγράμματος του καθρέφτη με το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας, τις δύο ακμές της Brep Hull_Final που δημιουργούσαν το περίγραμμα του καθρέφτη και την οριζόντια επί του yz επιπέδου ευθεία που αποτελούσε την άνω ακμή του περιγράμματος του καθρέφτη στο ύψος του αρχικού κοίλου.

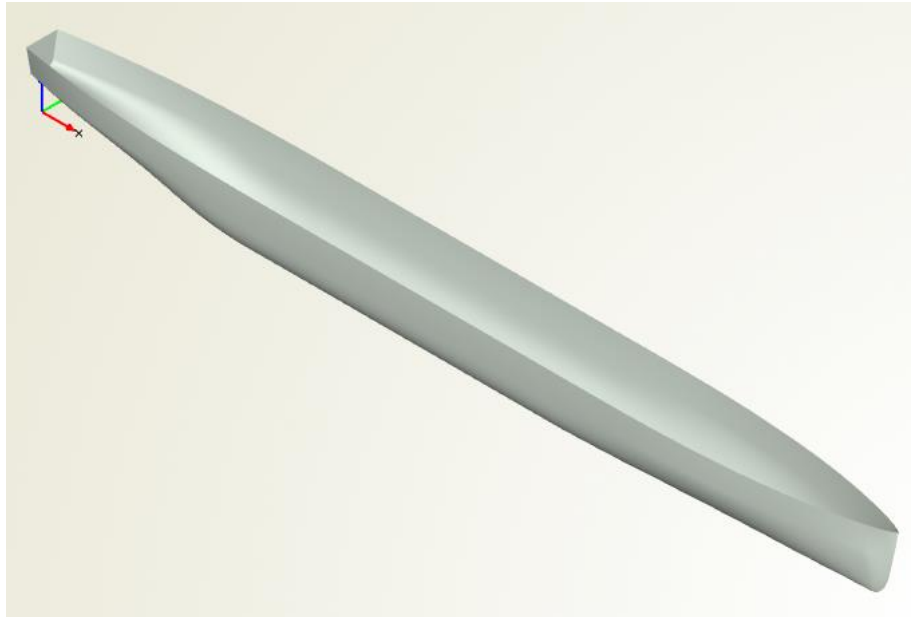
Αυτό το οποίο απέμενε πλέον ήταν η ενσωμάτωση της συνοριακής αναπαράστασης της Hull_Final και της επιφάνειας του καθρέφτη ονόματι Transom σε μία ενιαία Brep και τη συνεπακόλουθη αποκοπή της γάστρας κατά το εγκάρσιο στο ύψος των 6.40 m, ώστε να συμπίπτει με το κοίλο του πλοίου. Αυτό επετεύχθη μέσω χρήσης μίας τελευταίας Brep ονόματι Hull_final_with_transom και έτσι πλέον η παραμετρική επιφάνεια της γυμνής ημιγάστρας του πλοίου ήταν έτοιμη. Παρακάτω παρατίθεται εικόνα που απεικονίζει την τελική μορφή της παραμετρικής επιφάνειας ολόκληρης της ημιγάστρας:



Σχήμα 14: 1^η άποψη τελικής επιφάνειας ημιγάστρας παραμετρικού μοντέλου



Σχήμα 15: 2^η άποψη τελικής επιφάνειας ημιγάστρας παραμετρικού μοντέλου



Σχήμα 16: 3^η άποψη τελικής επιφάνειας ημιγάστρας παραμετρικού μοντέλου

2.2 Εκτίμηση μέγιστης δυνατής διαμέτρου έλικας

Με την επιφάνεια της ημιγάστρας πλέον στην τελική της μορφή και έχοντας υπ' όψιν ότι ως προωστήριο μέσο του πλοίου θα χρησιμοποιείτο έλικα και ως μέσο ελέγχου πορείας πηδάλιο ακολούθησε μία διαδικασία εκτίμησης της μέγιστης δυνατής διαμέτρου της έλικας που μπορούσε να τοποθετηθεί στη συγκεκριμένη αρχική μορφή της ημιγάστρας. Ο λόγος που ήταν επιδιωκόμενη η μέγιστη δυνατή διάμετρος αποδίδεται στο ότι η αύξηση της διαμέτρου της έλικας -με ταυτόχρονη μείωση των στροφών της- αυξάνει τον υδροδυναμικό βαθμό απόδοσής της. Η επιδίωξη ήταν η εύρεση της μέγιστης διαμέτρου να γίνει με υψηλό βαθμό παραμετροποίησης των μεταβλητών του προβλήματος, ώστε να υπήρχε σημαντική ευελιξία και για τους σκοπούς της μετέπειτα διαδικασίας βελτιστοποίησης. Η διάμετρος της έλικας προσδιορίστηκε μέσω των ακόλουθων μεγεθών και απαιτήσεων:

- Εκτιμώμενο μήκος χορδής του πηδαλίου.
- Προτεινόμενες/ελάχιστες αποστάσεις (clearances) της έλικας από τη γάστρα, το πηδάλιο και το βασικό επίπεδο αναφοράς⁶ σύμφωνα με τους κανονισμούς του Lloyd's Register, 2020).
- Εκτιμώμενη διαμήκης θέση.
- Ύψος της πρύμνης στην εκτιμώμενη διαμήκη θέση.
- Βύθισμα του πλοίου στην εκτιμώμενη διαμήκη θέση της έλικας στην εκτιμώμενη κατάσταση ερματισμού (Ballast Arrival), θέτοντας ως απαίτηση η άκρη του πτερυγίου της έλικας να απέχει από την ίσαλο γραμμή κατ' ελάχιστο 30 cm.
- Απαίτηση η μέγιστη δυνατή διάμετρος της έλικας να μην υπερβαίνει το 70% του βυθίσματος της κατάστασης πλήρους φόρτωσης.

⁶ Η κατακόρυφη απόσταση d του Lloyd's αναφέρεται ως προς το ποδόστημα, εφόσον το πλοίο διαθέτει κρεμαστό πηδάλιο. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας η απόσταση d θεωρήθηκε ίση προς την απόσταση του άκρου του πτερυγίου της έλικας ως προς το βασικό επίπεδο αναφοράς.

Το πρώτο απαραίτητο στάδιο αυτής της διαδικασίας ήταν η εκτίμηση του μήκους της χορδής του πηδαλίου. Για την εκτίμηση του μήκους της χορδής του πηδαλίου έγινε εκτίμηση μέσω του τύπου που αποτελεί ενδιάμεση τιμή της επιφάνειας του πηδαλίου (Αθανασούλης & Μπελιμπασάκης, 2012), ώστε το πλοίο να έχει καλές ελικτικές ικανότητες:

$$A_R = \frac{L_{BP} \cdot T}{45} \quad (2.1)$$

όπου:

L_{BP} : Το μήκος μεταξύ καθέτων του πλοίου

T : Το βύθισμα του πλοίου στην κατάσταση πλήρους φόρτωσης

Κάνοντας την υπόθεση ότι η επιφάνεια του πηδαλίου ήταν περίπου ορθογωνική, το μήκος της χορδής του προέκυψε ως εξής:

$$chord = \frac{A_R}{span} \quad (2.2)$$

όπου:

$span$: Το άνοιγμα του πηδαλίου

Προκειμένου όμως να καταστεί δυνατή η εκτίμηση της διαμήκους θέσης της έλικας έπρεπε να εκτιμηθεί πέραν του μήκους της χορδής του πηδαλίου και η ελάχιστη τιμή της απόστασης έλικας-πηδαλίου με βάση τους κανονισμούς κάποιου νηογνώμονα. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας οι αποστάσεις της έλικας από τη γάστρα, το πηδάλιο και το βασικό επίπεδο αναφοράς βρέθηκαν μέσω των κανονισμών του Lloyd's.

Όλες όμως οι αποστάσεις αυτές είναι συνάρτηση της διαμέτρου της έλικας, η οποία ήταν το ζητούμενο. Για το λόγο αυτό έγινε μία εκτίμηση ως προς την μέγιστη τιμή της προτεινόμενης απόστασης έλικας-πηδαλίου με βάση τη μέγιστη αναμενόμενη διάμετρο έλικας που μπορούσε να εμφανιστεί. Κάνοντας την παραδοχή ότι η διαμήκης θέση του χείλους εκφυγής του πηδαλίου συνέπιπτε με τη θέση $x = 0$ του καθρέφτη, η διαμήκης θέση της έλικας προέκυψε τελικά για κάθε ημιγάστρα με τον ακόλουθο τρόπο:

$$x_{propeller} = chord + c_{max} \quad (2.3)$$

όπου:

$c_{max} = 0.12 \cdot D_{max}$: Η πιο απαισιόδοξη εκτίμηση της προτεινόμενης κατά Lloyd's απόστασης έλικας-πηδαλίου.

Επισημαίνεται ότι η διαμήκης θέση της έλικας όπως προέκυψε από τον τύπο (2.3) αναφερόταν στη διαμήκη θέση του άκρου του πτερυγίου της έλικας (blade propeller tip). Οι σχέσεις που αφορούν σε όλες τις αποστάσεις της έλικας καθώς και οι αντίστοιχοι περιορισμοί που λήφθηκαν παρατίθενται στην ενότητα του καθορισμού του προβλήματος βελτιστοποίησης του παρόντος παραμετρικού μοντέλου, στο κεφάλαιο της σχεδιαστικής βελτιστοποίησης.

Με γνωστή την εκτιμώμενη διαμήκη θέση της έλικας, η εύρεση του ύψους της πρύμνης στην εκτιμώμενη διαμήκη θέση υπολογιζόταν εύκολα μέσω εύρεσης της κατηγμένης του σημείου τομής μίας κατακόρυφης ευθείας του επιπέδου zx με εξίσωση $x = x_{propeller}$ με την καμπύλη της τροπίδας της τελικής συνοριακής αναπαράστασης της ημιγάστρας.

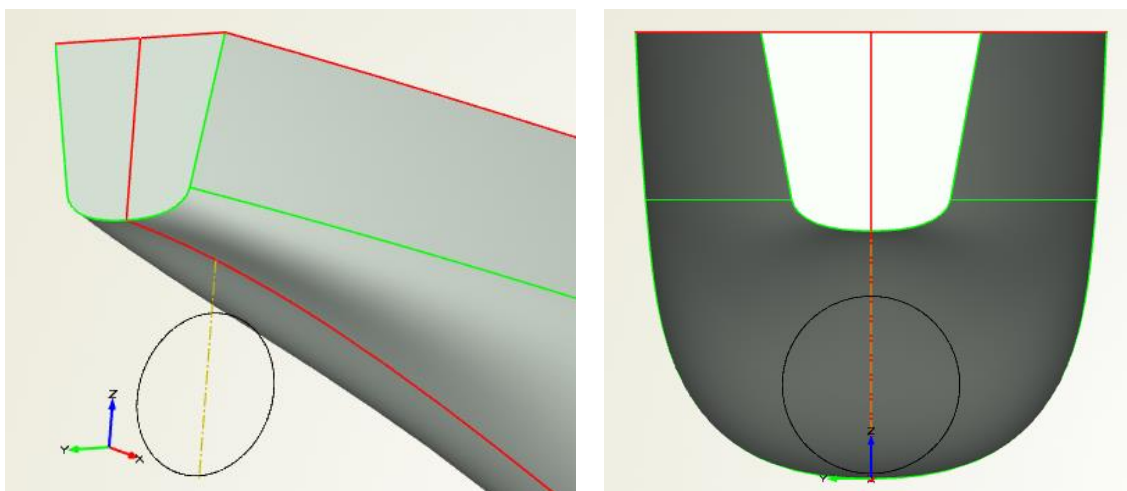
Ο πρώτος από τους τρεις περιορισμούς που τέθηκαν προκειμένου να βρεθεί η μέγιστη δυνατή διάμετρος της έλικας ήταν το συνολικό ύψος των ελάχιστων κατά Lloyd's κατακόρυφων αποστάσεων και της διαμέτρου της έλικας στη θέση $x = x_{propeller}$ να είναι μικρότερο ή ίσο του ύψους της πρύμνης στην αντίστοιχη θέση. Όμως οι κατακόρυφες αποστάσεις a και d από την ημιγιάστρα και το βασικό επίπεδο αναφοράς αντίστοιχα του νηογνώμονα ήταν συναρτήσεις της άγνωστης διαμέτρου της έλικας.

Επομένως η προσέγγιση της λύσης του εν λόγω προβλήματος προέκυψε μέσω επαναληπτικής διαδικασίας. Σε αυτή την επαναληπτική διαδικασία, που δημιουργήθηκε με τη συνδρομή κατάλληλου feature definition, ως συνθήκες εισόδου στον επαναληπτικό βρόχο τέθηκαν, πέραν των περιορισμών των κατακόρυφων αποστάσεων του Lloyd's, η απαίτηση η άκρη του πτερυγίου της έλικας να απέχει από την ίσαλο γραμμή της κατάστασης ερματισμού κατ'ελάχιστο 30 cm και η απαίτηση η μέγιστη δυνατή διάμετρος της έλικας να μην υπερβαίνει το 70% του βυθίσματος της κατάστασης πλήρους φόρτωσης.

Η εκτίμηση του βυθίσματος του πλοίου στην εκτιμώμενη θέση της έλικας στην κατάσταση ερματισμού πραγματοποιήθηκε κάνοντας χρήση κάποιων βασικών στοιχείων της κατάστασης φόρτωσης Passengers Only Arrival από τη διπλωματική του Πάνου Τσιούμα. Συγκεκριμένα, έγινε αρχικά εύρεση του εκτοπίσματος της Ballast Arrival μέσω αφαίρεσης της ομάδας βαρών των επιβατών από την κατάσταση φόρτωσης Passengers Only Arrival, που είναι και η μόνη που χωρίζει αυτές τις δύο καταστάσεις φόρτωσης.

Κατόπιν, έγινε η παραδοχή ότι η διαγωγή του πλοίου στην κατάσταση Ballast Arrival θα παρέμενε ίδια με αυτή της Passengers Only Arrival, εκτίμηση η οποία ήταν κατά τι πιο απαισιόδοξη από την πραγματική, δεδομένου ότι το πλοίο στην κατάσταση Passengers Only Arrival είχε έμπρυμη διαγωγή 25.3 cm και η ομάδα βάρους των επιβατών βρισκόταν πρόωραθεν του LCF, επομένως η αφαίρεσή της θα ενίσχυε ελαφρώς την πρυμναία διαγωγή του πλοίου. Σε κάθε περίπτωση η επίδραση της ομάδας βάρους των επιβατών στη διαγωγή του πλοίου για τους σκοπούς της παρούσας εκτίμησης κρίθηκε αμελητέα.

Προκειμένου να βρεθεί τελικώς το βύθισμα του πλοίου στην εκτιμώμενη διαμήκη θέση της έλικας για την κατάσταση ερματισμού, βρέθηκε μέσω υδροστατικών υπολογισμών η διαμήκης θέση του κέντρου πλευστότητας (Longitudinal Center of Floatation-LCF) στην κατάσταση ερματισμού και με γνωστά πλέον το βύθισμα του πλοίου στην LCF και τη διαγωγή του βρέθηκε το βύθισμα του πλοίου στην εκτιμώμενη διαμήκη θέση της έλικας.



Σχήμα 17 (α) & (β): Δίσκος της έλικας στην εκτιμώμενη διαμήκη θέση της (κίτρινη κατακόρυφη ευθεία) και ημιγιάστρα του παραμετρικού μοντέλου

Παρακάτω παρατίθενται οι βασικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της διαδικασίας που περιγράφηκε ανωτέρω:

Πίνακας 3: Βασικές παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση της μέγιστης δυνατής διαμέτρου της έλικας

Παράμετρος	Μονάδες	Περιγραφή
A_R	m ²	Εκτίμηση της επιφάνειας του πηδαλίου μέσω του τύπου (2.1)
Chord_estimation	m	Η εκτίμηση της χορδής του πηδαλίου βάσει του τύπου (2.2)
c_max	m	Μέγιστη εκτιμώμενη προτεινόμενη απόσταση έλικας-πηδαλίου
Prop_long_pos	m	Η εκτιμώμενη διαμήκης θέση της έλικας με τη μέγιστη δυνατή διάμετρο
Prop_sternframe_h	m	Το ύψος της πρύμνης στην εκτιμώμενη διαμήκη θέση της έλικας
a	m	Η κατακόρυφη απόσταση της άκρης του πτερυγίου της έλικας από την ημιγιάστρα στην εκτιμώμενη διαμήκη θέση της κατά Lloyd's
d	m	Η κατακόρυφη απόσταση της άκρης του πτερυγίου της έλικας από το βασικό επίπεδο αναφοράς στην εκτιμώμενη διαμήκη θέση της κατά Lloyd's
Actual_draft_FLD	m	Το βύθισμα του πλοίου στην Full Load Departure
Actual_draft_BA	m	Το βύθισμα του κέντρου πλευστότητας στην Ballast Arrival
LCF_BA	m	Η διαμήκης θέση του κέντρου πλευστότητας στην Ballast Arrival
Draft_propeller_tip_BA	m	Το βύθισμα του πλοίου της BA στην εκτιμώμενη διαμήκη θέση της έλικας
D_propeller	m	Η μέγιστη δυνατή εκτιμώμενη διάμετρος της έλικας

2.3 Εκλογή των παραμέτρων που μετετράπησαν σε μεταβλητές σχεδίασης

Παρακάτω παρατίθεται ο συγκεντρωτικός πίνακας με όλες τις μεταβλητές σχεδίασης του αρχείου του παραμετρικού μοντέλου, όπου παρατίθενται οι μονάδες μέτρησης τους, η προκαθορισμένη τιμή τους και το κάτω και άνω όριο κάθε μιας εξ αυτών. Για την περιγραφή κάθε μίας εκ των παρακάτω μεταβλητών σχεδίασης γίνεται παραπομπή στο αντίστοιχο εδάφιο περιγραφής των παραμέτρων του παραμετρικού μοντέλου. Οι μεταβλητές σχεδίασης που τελικά επελέγησαν να μπουν και είναι ενεργές εντός των μηχανών σχεδίασης του προβλήματος βελτιστοποίησης ήταν ένα υποσύνολο των μεταβλητών σχεδίασης που παρατίθενται στον κατωτέρω πίνακα.

Πίνακας 4: Παράμετροι που μετετράπησαν σε μεταβλητές σχεδίασης

A/A	Μεταβλητή σχεδίασης	Μονάδες	Κατώτατο όριο	Προκαθορισμένη τιμή	Ανώτατο όριο
1	xCPC_stern_INTpoint	m	5.0	5.5	6.0
2	zCPC_stern_INTpoint	m	-0.4	-0.295	0.02
3	beam	m	5.5	7.0	8.0
4	draft	m	3.8	4.0	4.5
5	height	m	8	10	15
6	beam_factor	m	0.6	0.65	1.0
7	height_factor	m	0.75	1.0	1.0
8	zTransom	m	3.45	3.55	3.65
9	deltaCP	-	-0.05	0.00	0.02
10	deltaXCB	m	-0.005	0.005	0.015
11	entranceAngle	deg	7	11	13
12	tanAtTransom	deg	2	9	15
13	atMaxBeam	deg	80	87	90
14	atTransom	deg	70	80	85
15	tanAtFp	deg	80	80	90
16	Aftbody_scaling_factor	-	0.60	0.70	0.80
17	Forebody_scaling_factor	-	0.60	0.65	0.85

2.4 Πρόσθετες βασικές βοηθητικές οντότητες

Πέραν των βασικών καμπυλών, παραμέτρων/μεταβλητών σχεδίασης και επιφανειών που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του παραμετρικού μοντέλου και αναλύθηκαν ανωτέρω, υπήρξαν και ορισμένες ακόμα οντότητες που διαδραμάτισαν σημαντικό ρόλο στην κατασκευή του. Η βασικότερη από τις επιπρόσθετες αυτές οντότητες ήταν το feature που έβρισκε το πραγματικό βύθισμα του σκάφους. Το feature αυτό χρησιμοποιήθηκε στην τελική επιφάνεια της ημιγάστρας για αμφότερες τις καταστάσεις πλήρους φόρτωσης και ερματισμού.

Απαιτούσε ως δεδομένα εισόδου τον επιδιωκόμενο όγκο (target volume), τη μεταβλητή σχεδίασης του βυθίσματος σχεδίασης καθώς και ένα άνω και κάτω όριο που θα έθετε το πεδίο τιμών αναζήτησης του πραγματικού βυθίσματος, ενώ επίσης ήθελε και μία Brep που θα αντιπροσώπευε την επιφάνεια όλης της ημιγάστρας. Το εν λόγω feature προκειμένου να δώσει ως έξοδο το πραγματικό βύθισμα του πλοίου έκανε χρήση -εντός του αλγορίθμου του feature definition που μας έδινε το συγκεκριμένο feature- και ενός άλλου αλγορίθμου ονόματι Brent.

Ο αλγόριθμος Brent είναι ο αλγόριθμος που υλοποιεί τη μέθοδο του Brent (Brent, 1973). Η μέθοδος Brent είναι μία υβριδική μέθοδος εύρεσης της ρίζας μιας εξίσωσης. Συνδυάζει τις μεθόδους της διχοτόμησης, της απομόνωσης και της αντίστροφης τετραγωνικής παρεμβολής με τρόπο τέτοιο, ώστε να έχει την αξιοπιστία της μεθόδου της διχοτόμησης, αλλά ταχύτητα σύγκλισης αρκετά γρήγορη όσο οι άλλες δύο λιγότερο αξιόπιστες μέθοδοι (Wikipedia, 2021).

Μία ακόμη βοηθητική οντότητα ήταν εκείνη που συνέβαλε στην υλοποίηση της πλήρους διαδικασίας που περιγράφηκε στην ενότητα της εκτίμησης της μέγιστης διαμέτρου της έλικας και έγινε μέσω ενός feature που προέκυπτε από το feature definition ονόματι Propeller_Rudder. Μέσω αυτού του feature definition εκτιμήθηκε η διάμετρος της έλικας μέσω της επαναληπτικής διαδικασίας ελέγχου των κατακόρυφων περιορισμών που έθετε το τοπικό ύψος της ημιγάστρας, το βύθισμα της κατάστασης ερματισμού και το βύθισμα της κατάστασης πλήρους φόρτωσης στην εκτιμώμενη διαμήκη θέση της έλικας.

Μία τελευταία βασική βοηθητική οντότητα που αξιοποίησε ορισμένα από τα υδροστατικά αποτελέσματα του παραμετρικού μοντέλου της ημιγάστρας και την εκτιμώμενη μέγιστη δυνατή διάμετρο της έλικας ήταν το feature definition ονόματι Self_propulsion_coefficients. Αυτό το feature definition δεχόταν ως είσοδο το συντελεστή γάστρας, τον πρισματικό συντελεστή, το συντελεστή ισάλου επιφανείας, την ολική αντίσταση της ρυπασμένης γάστρας, όπως αυτή προέκυπτε από το Shipflow, την απόσταση του ελικοφόρου άξονα από την ίσαλο, τη διάμετρο της έλικας και το LCB του πλοίου υπολογισμένο ως προς το μέσο του μήκους του. Η οντότητα έδινε ως έξοδο τους τρεις συντελεστές αυτοπρόωσης: το ποσοστό ομόρου w , το ποσοστό μείωσης ώσης t και το βαθμό απόδοσης σχετικής περιστροφής η_R , μεγέθη απαραίτητα για τους υπολογισμούς που θα πραγματοποιούσε στη συνέχεια το πρόγραμμα του GRID.

3 Υδροδυναμική ανάλυση

3.1 Διατύπωση του προβλήματος συνοριακών συνθηκών της κίνησης πλοίου με σταθερή ευθύγραμμη ταχύτητα σε αρχικώς ήρεμο νερό

Η μέθοδος της δυναμικής ροής (potential flow method) είναι πολύ διαδεδομένη για την εκτίμηση της ροής γύρω από αυθαίρετα τρισδιάστατα σώματα. Στην περίπτωση των πλοίων η βασική χρησιμότητά της έγκειται στη δυνατότητα που παρέχει για εκτίμηση της αντίστασης κυματισμού που προκαλεί το ίδιο το πλοίο (wavemaking resistance). Η μέθοδος αυτή υποθέτει ότι το ρευστό είναι μη συνεκτικό και ασυμπίεστο και η ροή του αστρόβιλη. Με αυτές τις υποθέσεις επιτυγχάνεται μία εξιδανικευμένη ροή του περιβάλλοντος ρευστού, η οποία είναι απαλλαγμένη από τις επιδράσεις της συνεκτικότητας και στην οποία επικρατούν μονάχα οι βαρυτικές επιδράσεις, κάτι το οποίο έρχεται σε συμφωνία με την υπόθεση του Froude που αφορά στο διαχωρισμό της αντίστασης συνεκτικότητας από την αντίσταση κυματισμού.

Η υπόθεση της δυναμικής ροής επιτρέπει τη μονοσήμαντη περιγραφή της ταχύτητας κάθε σημείου του πεδίου ροής μέσω μία βαθμωτής συνάρτησης που λέγεται δυναμικό ταχύτητας (velocity potential) και συμβολίζεται με φ . Η ταχύτητα σε κάθε σημείο του πεδίου ροής συνδέεται με το δυναμικό ταχύτητας κάθε σημείου του μέσω της κάτωθι σχέσης ορισμού:

$$\vec{U} \stackrel{\text{def}}{=} \vec{\nabla}\varphi \quad (3.1)$$

Το δυναμικό ταχύτητας είναι στη γενική περίπτωση μία βαθμωτή συνάρτηση εξαρτώμενη τόσο από τις χωρικές συντεταγμένες x , y και z όσο και από το χρόνο t . Επειδή όμως το πρόβλημα που εξετάζεται ασχολείται με τη ροή στη σταθεροποιημένη κατάσταση -όπου το πλοίο κινείται με σταθερή ταχύτητα \vec{U} για χρονικό διάστημα τέτοιο ώστε πλέον κάθε σημείο του πεδίου ροής να έχει κάθε χρονική στιγμή την ίδια ταχύτητα- η ανεξάρτητη μεταβλητή του χρόνου απαλείφεται.

Έστω ότι η ροή του ρευστού μακριά από το σώμα συμβολίζεται με $\vec{U}_\infty = (U_{\infty x}, U_{\infty y}, U_{\infty z})$ και έστω BS η βρεχόμενη επιφάνεια του πλοίου. Η παρουσία της επιφάνειας BS προκαλεί διαταραχή (disturbance) του πεδίου ροής σε μία περιοχή γύρω από την BS και η ταχύτητα \vec{U} που περιγράφει κάθε σημείο του μπορεί να αποσυντεθεί ως εξής:

$$\vec{U} = \vec{U}_\infty + \vec{u} \quad (3.2)$$

όπου:

\vec{u} : Η ταχύτητα διαταραχής (disturbance velocity)

Κάνοντας εκ νέου εκμετάλλευση των υποθέσεων του μη συνεκτικού ρευστού και της αστρόβιλης ροής του μπορεί να οριστεί και το δυναμικό της ταχύτητας διαταραχής φ' ομοίως με προηγούμενως ως εξής:

$$\vec{u} \stackrel{\text{def}}{=} \vec{\nabla}\varphi' \quad (3.3)$$

Προτού αναφερθούν οι συνοριακές συνθήκες του προβλήματος, είναι απαραίτητο να οριστούν τα χωρία ορισμού του προβλήματος. Έτσι ορίζονται κατά σειρά το πεδίο ροής $D \subseteq R^3$, η επιφάνεια της γάστρας $BS \subseteq R^2$ και το η ελεύθερη επιφάνεια $FS \subseteq R^2$. Το ολικό δυναμικό φ ικανοποιεί την εξίσωση Laplace, δηλαδή:

$$\nabla^2 \varphi = 0 \text{ εντός του } D \quad (3.4)$$

Όσον αφορά στο ολικό δυναμικό της ταχύτητας (total velocity potential) του πεδίου ροής φ , αυτό αποσυντίθεται με τον ακόλουθο τρόπο (Hess & Smith, Calculation of Non-Lifting Potential Flow About Arbitrary Three-Dimensional Bodies, 1962):

$$\varphi = \Phi + \varphi' \quad (3.5)$$

όπου:

Φ : Το δυναμικό της ταχύτητας της αδιατάρακτης ροής μακριά από το πλοίο

Το πρόβλημα συνοριακών τιμών της κίνησης του πλοίου σε αρχικώς ήρεμο νερό πρέπει προκειμένου να οριστεί καλώς να υπακούει σε μια σειρά συνοριακών συνθηκών. Η πρώτη συνοριακή συνθήκη που πρέπει να υπακούει αφορά στην κινηματική συνοριακή συνθήκη της βρεχόμενης επιφάνειας της γάστρας BS (Hess & Smith, Calculation of Non-Lifting Potential Flow About Arbitrary Three-Dimensional Bodies, 1962):

- Επί της βρεχόμενης επιφάνειας BS του πλοίου η ολική ταχύτητα στην κάθετη στην επιφάνεια διεύθυνση πρέπει να έχει τιμή ίση προς (συνθήκη μη εισχώρησης):

$$\frac{\partial \varphi'}{\partial n} = -\vec{U}_\infty \cdot \vec{n} \text{ επί της BS} \quad (3.6)$$

- Μία ακόμη συνοριακή συνθήκη που πρέπει να ικανοποιείται είναι η συνθήκη ακτινοβολίας. Σύμφωνα με αυτή η ταχύτητα διαταραχής \vec{u} -που αποδίδεται στην παρουσία της γάστρας- πρέπει να αποσβέννεται με τρόπο τέτοιο, ώστε καθώς η απόσταση r μεταξύ ενός σημείου του άπειρου ρευστού και του πλοίου τείνει στο άπειρο η \vec{u} να τείνει στο μηδέν, δηλαδή:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} |\nabla \varphi'| = 0 \quad (3.7)$$

- Στη σταθεροποιημένη κατάσταση (steady state) απαιτείται και μία ακόμη συνθήκη ακτινοβολίας ώστε να εξασφαλιστεί το ότι τα κύματα δεν θα διαδίδονται ανάντη της ροής (nonexistence of upstream waves).

Η δεύτερη ομάδα συνοριακών συνθηκών του εξεταζόμενου προβλήματος συνοριακών τιμών σχετίζεται με την κινηματική και δυναμική συνοριακή συνθήκη που επιβάλλονται στην ελεύθερη επιφάνεια. Αμφότερες οι δύο αυτές συνοριακές συνθήκες επιβάλλονται στην αρχικώς άγνωστη κυματισμένη ελεύθερη επιφάνεια, έστω FS.

Για τη μαθηματική μοντελοποίηση των συνθηκών αυτών έχει γίνει η εισαγωγή του όρου h , ο οποίος συμβολίζει την κατακόρυφη απόσταση ενός τυχαίου σημείου του πεδίου ροής από την αρχικώς αδιατάρακτη ελεύθερη επιφάνεια. Κατ' αυτό τον τρόπο το h συμβολίζει την κανονικοποιημένη ανύψωση του δημιουργούμενου κύματος (normalized wave elevation). Οι δύο προαναφερθείσες συνθήκες είναι οι κάτωθι:

- Η ροή πρέπει να είναι εφαπτομενική στην ελεύθερη επιφάνεια FS, επομένως η ροή στη διεύθυνση που είναι κάθετη στην FS πρέπει να είναι μηδέν (κινηματική συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας):

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0 \text{ επί της FS} \quad (3.8)$$

- Η στατική πίεση στην ελεύθερη επιφάνεια πρέπει να είναι σταθερή (δυναμική συνθήκη ελεύθερης επιφάνειας). Με εφαρμογή της εξίσωσης Bernoulli μεταξύ δύο σημείων του

ρευστού, ενός επί της κυματισμένης ελεύθερης επιφάνειας κοντά στο σώμα (p, U) και ενός επί της αδιατάρακτης ελεύθερης επιφάνειας μακριά από το σώμα (p_∞, U_∞) προκύπτει ότι:

$$gh + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 - U_\infty^2 \right] = 0 \text{ επί της } FS \quad (3.9)$$

3.2 Μη γραμμικό και γραμμικοποιημένο πρόβλημα

Το πρόβλημα της ελεύθερης επιφάνειας είναι εξόχως μη γραμμικό, γεγονός που αποδίδεται αφενός στο ότι οι σχέσεις (3.8) και (3.9) είναι μη γραμμικές και αφετέρου στο ότι επιβάλλονται στην αρχικώς άγνωστη κυματισμένη ελεύθερη επιφάνεια και ως εκ τούτου τα μεγέθη τα σχετιζόμενα με τη ροή του ρευστού εξαρτώνται μη γραμμικά από τη θέση της ελεύθερης επιφάνειας. Υπάρχουν δύο βασικές μέθοδοι για την επίλυση του προβλήματος. Η πρώτη λύνει το γραμμικοποιημένο πρόβλημα και βασίζεται στην υπόθεση της συνεχούς κατανομής πηγών Kelvin μόνο επί της βρεχόμενης επιφάνειας της γάστρας. Η δεύτερη μπορεί να λύσει τόσο το γραμμικοποιημένο όσο και το μη γραμμικό πρόβλημα μέσω της υπόθεσης κατανομής πηγών Rankine τόσο επί της βρεχόμενης επιφάνειας της γάστρας όσο και επί της ελεύθερης επιφάνειας. Σε κάθε περίπτωση, μέσω της υπόθεσης των κατανομών των πηγών μοναδικός άγνωστος του προβλήματος είναι οι εντάσεις των πηγών, οι οποίες εμφανίζονται και στην τελική συνοριακή ολοκληρωματική εξίσωση του εκάστοτε προβλήματος.

Το δυναμικό της πηγής Kelvin (Baar & Price, 1988) που συνδέεται με το γραμμικοποιημένο πρόβλημα εκφράζεται μέσω της συνάρτησης Green (Noblesse, 1981). Το μεγάλο πλεονέκτημα χρήσης της συνάρτησης Green είναι ότι ικανοποιεί εξ ορισμού το γραμμικοποιημένο πρόβλημα και ως εκ τούτου δεν απαιτείται διακριτοποίηση της ελεύθερης επιφάνειας. Ωστόσο παρουσιάζει τα σοβαρά μειονεκτήματα ότι είναι πολύ δύσκολος ο προσδιορισμός της καθώς και η εύρεση του δυναμικού όπως προκύπτει από την συνοριακή ολοκληρωματική εξίσωση του γραμμικοποιημένου προβλήματος, ενώ δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του μη γραμμικού προβλήματος.

Η πηγή Rankine αποτελεί εκφυλισμένη μορφή της πηγής Kelvin και έχει το πλεονέκτημα ότι το δυναμικό της υπολογίζεται πολύ εύκολα. Ωστόσο η πηγή Rankine δεν ικανοποιεί εξ ορισμού τις συνοριακές συνθήκες -γραμμικοποιημένες ή μη- της ελεύθερης επιφάνειας. Ως εκ τούτου απαιτείται η διακριτοποίηση της ελεύθερης επιφάνειας σε μία απόσταση από τη βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας. Το δυναμικό της πηγής Rankine μοναδιαίας εκροής δίνεται από τη σχέση (Janson, Potential Flow Panel Methods for the Calculation of Free Surface Flows with Lift, 1997):

$$\varphi_R = -\frac{1}{4\pi r} \quad (3.10)$$

όπου:

r : Η απόσταση μεταξύ της σημειακής πηγής και ενός σημείου του πεδίου ροής

3.3 Οι μέθοδοι των συνοριακών στοιχείων με κατανομή πηγών Rankine

Οι μέθοδοι των συνοριακών στοιχείων είναι μέθοδοι ανάλυσης της συμπεριφοράς των μηχανικών συστημάτων που υποβάλλονται σε εξωτερική φόρτιση (Κατσιαδέλης, 2012). Μία εκ των βασικών εφαρμογών τους αφορά στην χρήση τους για την επίτευξη προσεγγιστικής λύσης των δυνάμεων που δρουν επί ενός σώματος που είναι εκτεθειμένο σε κάποια ροή ρευστού. Η αριθμητική προσέγγιση της λύσης βασίζεται στη χρήση στοιχείων -που αποκαλούνται συνοριακά στοιχεία (panels)- για τη διακριτοποίηση της επιφάνειας του σώματος και κατόπιν την αποτύπωση ενός στοιχείου ροής (flow element) σε κάθε στοιχείο που απαρτίζει το διακριτοποιημένο σώμα, όπου το καθένα θα πρέπει να ικανοποιεί κάποιες συγκεκριμένες συνοριακές συνθήκες. Στην αριθμητική αυτή προσέγγιση πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν και η αλληλεπίδραση μεταξύ των συνοριακών στοιχείων.

Οι συνοριακές ολοκληρωτικές εξισώσεις (Boundary Integral Equations-BIE) αποτελούν ένα κλασικό εργαλείο για την ανάλυση των προβλημάτων συνοριακών τιμών για μερικές διαφορικές εξισώσεις (Costabel, 1987). Έχουν αναπτυχθεί αρκετές μέθοδοι μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η αριθμητική επίλυση των συνοριακών ολοκληρωτικών εξισώσεων, όπου κάθε μία εξ αυτών εξ αυτών των μεθόδων αποκαλείται μέθοδος συνοριακών στοιχείων (Boundary Element Method - BEM). Η λογική των διαφόρων μεθόδων συνοριακών στοιχείων που έχουν αναπτυχθεί είναι η επίλυση της μερικής διαφορικής εξίσωσης που αποτελεί τη μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος στο σύνορο (boundary) και κατόπιν η εκμετάλλευση της πληροφορίας που παρέχεται από αυτή τη λύση για εύρεση της λύσης εντός του χωρίου ορισμού (domain) της εξίσωσης.

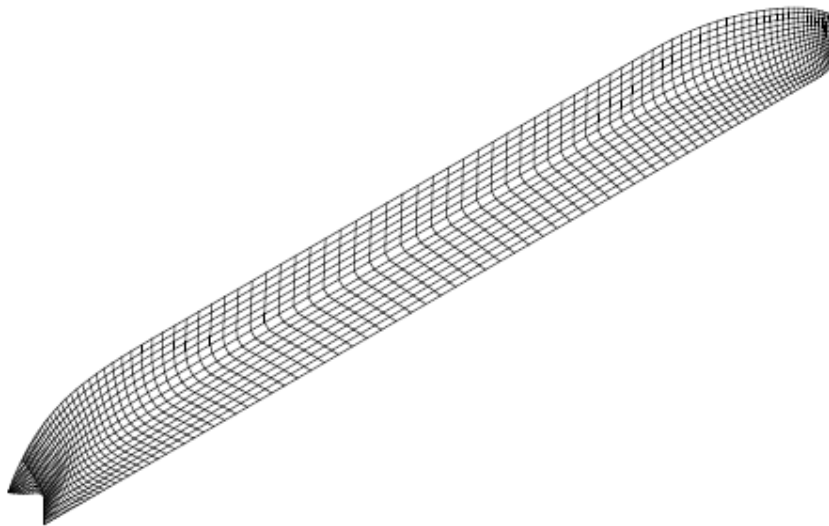
Το λογισμικό υπολογιστικής υδροδυναμικής (Computational Fluid Dynamics-CFD) του Shipflow που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας για την πραγματοποίηση των απαραίτητων υδροδυναμικών υπολογισμών του προβλήματος βελτιστοποίησης κάνει χρήση μίας κατηγορίας μεθόδων των συνοριακών στοιχείων που αποκαλείται μέθοδοι των συνοριακών στοιχείων με κατανομή πηγών Rankine (Rankine source panel methods). Πρόκειται για την πλέον διαδεδομένη μέθοδο συνοριακών στοιχείων για την αριθμητική προσέγγιση υδροδυναμικών προβλημάτων. Η εν λόγω μέθοδος βρίσκει εφαρμογή στην περίπτωση ροών με δυναμικό χωρίς άνωση. Στην περίπτωση ροών με άνωση η μέθοδος γενικεύεται προκειμένου να συμπεριληφθούν και οι επιδράσεις της κυκλοφορίας της ροής μέσω της κατανομής διπόλων αντί πηγών ή ακόμα και μέσω της συνδυασμένης κατανομής διπόλων και πηγών (Janson, Potential Flow Panel Methods for the Calculation of Free Surface Flows with Lift, 1997).

Με τη μέθοδο συνοριακών στοιχείων με κατανομή πηγών Rankine παρέχεται η δυνατότητα προσέγγισης της λύσης του προβλήματος συνοριακών τιμών με χρήση των γραμμικών ή μη γραμμικών συνοριακών συνθηκών της ελεύθερης επιφάνειας. Ωστόσο, λόγω του ότι η πραγματική ελεύθερη επιφάνεια είναι αρχικά άγνωστη, η λύση βρίσκεται μέσω επαναληπτικής διαδικασίας. Όλες οι μέθοδοι των συνοριακών στοιχείων με κατανομή πηγών Rankine έχουν ως κοινό στοιχείο την υπόθεση ότι οι εντάσεις των πηγών κάθε συνοριακού στοιχείου προκύπτουν ως οι εντάσεις πηγών Rankine.

Το λογισμικό του Shipflow για την αριθμητική προσέγγιση της λύσης κάνει χρήση συνοριακών στοιχείων πηγών Rankine, όπου διακριτοποιεί με συνοριακά στοιχεία τη βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας και την ελεύθερη επιφάνεια. Το πρόγραμμα παρέχει η δυνατότητα χρήσης ενός εκ των ακόλουθων δύο τύπων συνοριακών στοιχείων με τις κάτωθι παραδοχές ως προς την κατανομή της έντασης των πηγών τους στην επιφάνειά τους:

- Επίπεδα τετρακομβικά συνοριακά στοιχεία με σταθερή ένταση πηγής (μέθοδος πρώτης τάξης)
- Παραβολικά συνοριακά στοιχεία με γραμμικά μεταβαλλόμενη ένταση πηγής (μέθοδος ανώτερης τάξης)

Το κάθε συνοριακό στοιχείο αποτελεί το δομικό στοιχείο της διαδικασίας διακριτοποίησης και κάθε ένα χαρακτηρίζεται από το σημείο ελέγχου του (control point), το οποίο θεωρείται ότι βρίσκεται στο κεντροειδές της επιφάνειάς του. Δημιουργώντας μία συστοιχία από συνοριακά στοιχεία ως προς δύο ή τρεις διευθύνσεις προκύπτει η δημιουργία του πλέγματος (mesh ή grid), το οποίο εφόσον δομηθεί ορθά μπορεί να προσεγγίσει ικανοποιητικά τις γεωμετρίες της βρεχόμενης επιφάνειας της γάστρας και της ελεύθερης επιφάνειας. Όσο πιο μικρές οι διαστάσεις των συνοριακών στοιχείων που θα διακριτοποιούν τις επιφάνειες του προβλήματος, τόσο εγγύτερη θα είναι η αναπαράστασή τους στις πραγματικές επιφάνειες. Ωστόσο αυτό έρχεται με σημαντικό υπολογιστικό κόστος και για το λόγο αυτό ο τρόπος διακριτοποίησης της επιφάνειας γίνεται με τρόπο τέτοιο, ώστε αφενός η αριθμητική προσέγγιση της τελικής λύσης να είναι ικανοποιητική και αφετέρου οι υπολογιστικοί χρόνοι να βρίσκονται εντός αναμενόμενων πλαισίων.



Σχήμα 18: Τυπικό πλέγμα γάστρας πλοίου αποτελούμενο από τετρακομβικά συνοριακά στοιχεία (Janson, Chalmers University of Technology, Spinney, & Rolls-Royce UK, *A Comparison of Four Wave Cut Analysis Methods for Wave Resistance Prediction*, 2004)

3.4 Αριθμητική προσέγγιση της αντίστασης κυματισμού του μη γραμμικού προβλήματος μέσω χρήσης συνοριακών στοιχείων πηγών Rankine

Απώτερο ζητούμενο του προβλήματος είναι η αριθμητική προσέγγιση της αντίστασης κυματισμού R_w . Η συλλογιστική που ακολουθείται για την αριθμητική προσέγγιση της λύσης του προβλήματος κάνοντας χρήση συνοριακών στοιχείων πηγών Rankine είναι η ακόλουθη (Heimann, 2005):

1. Υπολογισμός μίας βασικής λύσης (base solution) μέσω επιβολής των συνοριακών συνθηκών στην αρχικώς αδιατάρακτη ελεύθερη επιφάνεια.

2. Εύρεση της ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας h από τη δυναμική συνοριακή συνθήκη της ελεύθερης επιφάνειας.
3. Μετακίνηση των συνοριακών στοιχείων που διακριτοποιούν την ελεύθερη επιφάνεια στη νέα ανυψωμένη ελεύθερη επιφάνεια που υπαγορεύεται από το προηγούμενο βήμα.
4. Αλλαγή του βυθίσματος (sink) και της διαγωγής (trim) της γάστρας ώστε να επιτυγχάνεται υδροστατική ισορροπία πάνω στη νέα ελεύθερη επιφάνεια.
5. Μετακίνηση της τελευταίας γνωστής λύσης του προβλήματος της δυναμικής ροής στη μετατοπισμένη ελεύθερη επιφάνεια του προηγούμενου βήματος.
6. Επίλυση του προβλήματος συνοριακών τιμών ως προς την πραγματική ελεύθερη επιφάνεια.
7. Επανάληψη των βημάτων (2)-(6) μέχρι τη σύγκλιση.

Όσον αφορά στη διαδικασία αριθμητικής επίλυσης του προβλήματος συνοριακών τιμών σε κάθε επανάληψη, η διαδικασία που ακολουθείται είναι η ακόλουθη:

1. Επίλυση ενός γραμμικού $N \times N$ συστήματος της διακριτοποιημένης συνοριακής ολοκληρωματικής εξίσωσης του προβλήματος, όπου για κάθε j -συνοριακό στοιχείο υπάρχει μία γραμμική εξίσωση η οποία έχει ως μόνο άγνωστο της ένταση σ_j του συνοριακού στοιχείου.
2. Με γνωστές τις εντάσεις όλων των συνοριακών στοιχείων επίλυση νέου γραμμικού συστήματος εξισώσεων για την εύρεση της ταχύτητας U_i σε κάθε σημείο ελέγχου (control point) του κάθε συνοριακού στοιχείου i που επάγει το δυναμικό ταχύτητας της πηγής έντασης σ_j . Σημειώνεται ότι η ταχύτητα που επάγει το ίδιο το συνοριακό στοιχείο j στον εαυτό του είναι ίση προς 2π .
3. Με γνωστές τις ταχύτητες στο σημείο ελέγχου κάθε συνοριακού στοιχείου, εύρεση των πιέσεων p_i στο σημείο ελέγχου κάθε i -συνοριακού στοιχείου. Το διακριτοποιημένο πεδίο δυναμικών πιέσεων της βρεχόμενης επιφάνειας της γάστρας και της ελεύθερης επιφάνειας μπορεί να περιγραφεί μέσω εφαρμογής της εξίσωσης Bernoulli μεταξύ του σημείου ελέγχου του συνοριακού στοιχείου i (U_i, p_i) και ενός σημείου της ελεύθερης επιφάνειας μακριά από το σώμα (U_∞, p_∞):

$$p_i = p_\infty + \frac{1}{2} \rho (U_\infty^2 - U_i^2) \quad (3.11)$$

4. Αριθμητική ολοκλήρωση των γνωστών πλέον πιέσεων επί της βρεχόμενης διακριτοποιημένης επιφάνειας της γάστρας και εύρεση της αντίστασης κυματισμού R_W . Με γνωστό πλέον το δυναμικό πεδίο πιέσεων η ζητούμενη αντίσταση κυματισμού μπορεί να βρεθεί μέσω ολοκλήρωσης των δυναμικών πιέσεων επί της βρεχόμενης επιφάνειας της γάστρας του πλοίου. Η αναλυτική έκφραση που δίνει την αντίσταση κυματισμού σε αυτή την περίπτωση είναι η κάτωθι:

$$R_W = \left| \iint_{BS} p \vec{n} ds \right| \quad (3.12)$$

Για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τη θεωρία συνεχούς κατανομής πηγών Rankine και τη γενική περιγραφή της διαδικασίας διακριτοποίησης του προβλήματος, ο αναγνώστης παραπέμπεται στις δημοσιεύσεις των J. L. Hess and A. M. O. Smith (Hess & Smith, Calculation of Non-Lifting Potential Flow About Arbitrary Three-Dimensional Bodies, 1962) (Hess & Smith, Calculation of Potential Flow about Arbitrary Bodies, 1967), C.W. Dawson (Dawson, 1977) και Carl-Erik Janson (Janson, Potential Flow Panel Methods for the Calculation of Free Surface Flows with Lift, 1997).

3.5 Αποσύνθεση της ολικής αντίστασης του δίγαστρου πλοίου

Η συνήθης σχέση μέσω της οποίας πραγματοποιείται η αποσύνθεση της ολικής αντίστασης στη γενική περίπτωση είναι η ακόλουθη (ITTC, 2008):

$$C_T = (k + 1)C_F + C_W \quad (3.13)$$

Η σχέση (3.13) αποτελεί τη σχέση με την οποία γίνονται παραδοσιακά οι υπολογισμοί της ολικής αντίστασης στην περίπτωση των μονόγαστρων πλοίων. Στην περίπτωση των δίγαστρων πλοίων (catamarans) η σχέση που χρησιμοποιείται είναι η εξής (Insel & Molland, 1991):

$$C_{T_CAT} = (\beta k + 1)C_F + \tau C_W \quad (3.14)$$

όπου:

β : Ο συντελεστής συνεκτικής παρεμβολής (viscous interference factor). Πρόκειται για τον συντελεστή υδροδυναμικής αλληλεπίδρασης των ημιγαστρών που λαμβάνει υπ' όψιν τόσο την αλλαγή του πεδίου πιέσεων γύρω από τις ημιγάστρες όσο και την αύξηση της ταχύτητας εντός του τμήματος της ελεύθερης επιφάνειας που βρίσκεται στην περιοχή ανάμεσα στις ημιγάστρες.

τ : Ο συντελεστής κυματικής παρεμβολής (wave interference factor). Πρόκειται για τον συντελεστή υδροδυναμικής αλληλεπίδρασης των ημιγαστρών που λαμβάνει υπ' όψιν την συμβολή των συστημάτων κυματισμών των ημιγαστρών στην περιοχή της ελεύθερης επιφάνειας ανάμεσα στις ημιγάστρες.

Σύμφωνα με τη σχέση (3.14), για την εύρεση της ολικής αντίστασης του δίγαστρου πλοίου είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός του όρου $\beta k + 1$. Η εμπειρική σχέση που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής -δεδομένου ότι το πλοίο είναι δίγαстро- για την εκτίμηση του όρου $(\beta k + 1)$ είναι αυτή που παρατίθεται από τον Molland (Molland, Turnock, & Hudson, 2017):

$$\beta k + 1 = 3.03 \cdot \left(\frac{L}{\nabla^{1/3}} \right)^{-0.40} \quad (3.15)$$

όπου:

L: Το μήκος του πλοίου στην ίσαλο

∇ : Ο στατικός όγκος εκτοπίσματος του πλοίου

Ειδικότερα, όσον αφορά στον όρο $\frac{L}{\nabla^{1/3}}$, αυτός αναπαριστά το συντελεστή λυγερότητας (Slenderness Ratio – SR)

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η σχέση που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της αντίστασης τριβής της ισοδύναμης επίπεδης πλάκας ήταν αυτή της ITTC (ITTC, 1957), που αποτελεί σήμερα την καθιερωμένη καμπύλη για υπολογισμούς αντίστασης:

$$C_F = \frac{0.075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (3.16)$$

Όσον αφορά στην αντίσταση κυματισμού, αυτή υπολογίστηκε μέσω του λογισμικού υπολογιστικής υδροδυναμικής του Shipflow.

3.6 Το λογισμικό υπολογιστικής υδροδυναμικής του Shipflow

3.6.1 Γενική περιγραφή

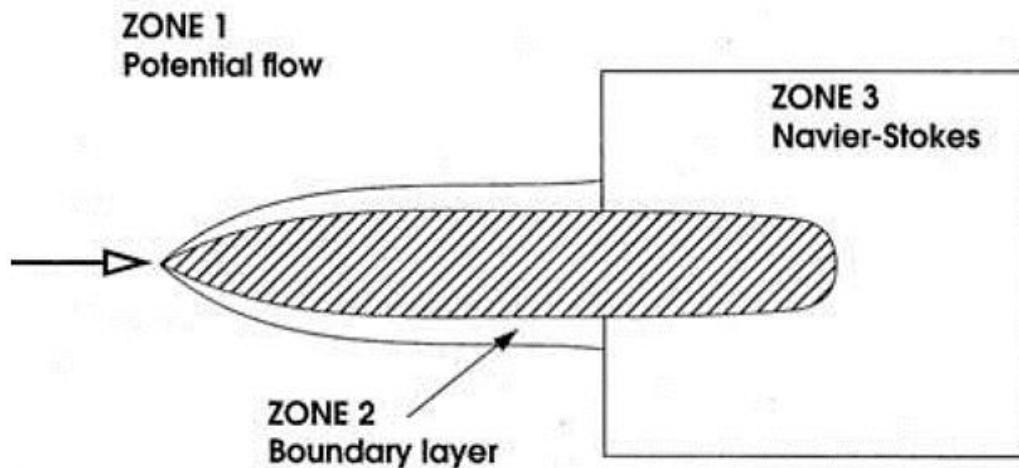
Το λογισμικό του Shipflow αναπτύχθηκε με σκοπό τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών πολύπλοκων ροών ρευστών γύρω από κινούμενα σώματα είτε σε πλήρως βυθισμένη κατάσταση, είτε κινούμενων επί μιας ελεύθερης επιφάνειας. Βασικές περιοχές μελέτης στις οποίες το λογισμικό βρίσκει ευρεία εφαρμογή είναι ο υπολογισμός της αντίστασης τριβής και κυματισμού, η ανάπτυξη των κυματικών προφίλ μέσω της ανάλυσης κυματικών τομών, οι τροποποιήσεις των πεδίων ταχύτητας και ροής γύρω από αντικείμενα όπως έλικες, καθώς και ο έλεγχος της συμπεριφοράς πλοίων σε κυματισμούς (seakeeping).

Για την εύρεση των χαρακτηριστικών της ροής γύρω από το πλοίο -είτε πρόκειται για το πραγματικό πλοίο είτε για κάποιο μοντέλο του- το Shipflow μπορεί να κάνει διάσπαση του πεδίου ροής σε περιοχές, κάνοντας κατ' αυτό τον τρόπο χρήση της προσέγγισης σε ζώνες (zonal approach). Η διάσπαση αυτή συμβάλλει στη μείωση του υπολογιστικού χρόνου και εφοδιάζει κάθε ζώνη με μία διαφορετική μέθοδο επίλυσης. Οι ζώνες είναι οι ακόλουθες (Larsson, 1993):

Ζώνη 1: Μέθοδος ροής με δυναμικό, για την ανάλυση της ροής του ρευστού στην εξώτερη περιοχή της ελεύθερης επιφάνειας. Στην περιοχή αυτή το ρευστό λογίζεται ως μη συνεκτικό και η ροή του αστρόβιλη, σύμφωνα με τα όσα εκτέθηκαν για τη δυναμική ροή και στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου. Για την επίλυση γίνεται χρήση των συνοριακών στοιχείων πηγών Rankine με δυνατότητα χρήσης είτε των γραμμικοποιημένων είτε των μη γραμμικών συνοριακών συνθηκών της ελεύθερης επιφάνειας που αναφέρθηκαν στο παρόν κεφάλαιο.

Ζώνη 2: Μέθοδος λεπτού οριακού στρώματος, όπου η φύση της ροής του ρευστού αλλάζει καθώς το ρευστό κινείται κατά μήκος του πλοίου. Στη ζώνη αυτή για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών της ροής γίνεται χρήση της θεωρίας του λεπτού οριακού στρώματος. Για την περιοχή της στρωτής ροής τα χαρακτηριστικά της ροής υπολογίζονται μέσω της θεωρίας του στρωτού οριακού στρώματος, ενώ για τις περιοχές της μεταβατικής και της τυρβώδους ροής τα χαρακτηριστικά της υπολογίζονται μέσω της θεωρίας του τυρβώδους οριακού στρώματος. Για αμφοτέρω στρωτό και τυρβώδες οριακό στρώμα γίνεται χρήση της ολοκληρωματικής εξίσωσης της ορμής.

Ζώνη 3: Μέθοδος των εξισώσεων RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes). Στην εν λόγω περιοχή της ελεύθερης επιφάνειας η ροή είναι πλήρως τυρβώδης και υπάρχει συνεκτικός ομόρους. Για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών της ροής σε αυτή την περιοχή επιστρατεύονται οι θεμελιώδεις εξισώσεις της ρευστομηχανικής των Navier-Stokes μαζί με την αντίστοιχη θεωρία τους, ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η καταναλισκόμενη ενέργεια και συνεπακόλουθα η επαγόμενη αντίσταση. Εκτενέστερα, η λύση των εξισώσεων RANS προκύπτει μέσω πεπερασμένων διαφορών εφαρμόζοντας συνήθως το μοντέλο τύρβης δύο εξισώσεων k-ε επί ενός κυλινδρικού δομημένου πλέγματος.



Σχήμα 19: Προσέγγιση σε ζώνες (Sahoo & Salas, 2007)

Το Shipflow παρέχει και τη δυνατότητα της ολιστικής προσέγγισης του προβλήματος (global approach). Μέσω της εν λόγω προσέγγισης δίνεται η δυνατότητα προσδιορισμού των χαρακτηριστικών της ροής ολόκληρου του πεδίου ροής μέσω αριθμητικής επίλυσης των εξισώσεων RANS, με τον τρόπο που περιγράφηκε για την τρίτη ζώνη. Αυτή η πρακτική αν και παρέχει τα ακριβέστερα δυνατά αποτελέσματα αποφεύγεται, λόγω του ότι είναι πολύ χρονοβόρα και απαιτεί πολύ μεγάλη υπολογιστική ισχύ.

3.6.2 Τα δομοστοιχεία του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκαν

Με βάση τη λογική των ζωνών που αναπτύχθηκε παραπάνω το λογισμικό είναι χωρισμένο σε έξι δομοστοιχεία (modules). Με κατάλληλους συνδυασμούς κάποιων εξ αυτών των δομοστοιχείων μπορεί κάθε φορά να γίνει ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών της ροής της εκάστοτε ζώνης. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε χρήση της μεθόδου της πρώτης ζώνης για όλο το πεδίο ροής. Τα δομοστοιχεία του Shipflow που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα ακόλουθα (Flowtech International AB):

Xran: Είναι ο επιλυτής δυναμικής ροής γύρω από τρισδιάστατα σώματα που βασίζεται σε κάποια μέθοδο επιφανειακών ιδιομορφιών συνοριακών στοιχείων.

Xmesh: Είναι η γεννήτρια συνοριακών στοιχείων που χρησιμοποιείται στο δομοστοιχείο δυναμικής ροής του xran. Το συγκεκριμένο δομοστοιχείο μπορεί να εκτελεστεί είτε αυτόματα ως ενσωματωμένο πρόγραμμα κατά την εκτέλεση του xran -οπότε και δομεί αυτόματα το πλέγμα των συνοριακών στοιχείων της βρεχόμενης επιφάνειας της γάστρας και της ελεύθερης επιφάνειας- είτε ως ξεχωριστό πρόγραμμα εφόσον είναι επιθυμητή η χειροκίνητη διακριτοποίηση της βρεχόμενης επιφάνειας της γάστρας και της ελεύθερης επιφάνειας. Το δομοστοιχείο του xmesh εκτελείται επίσης κατά τη διάρκεια των υπολογισμών της δυναμικής ροής όταν πραγματοποιούνται επαναλήψεις παράλληλης βύθισης ή/και διαγωγής ή μη γραμμικές επαναλήψεις, οπότε και η διακριτοποίηση των επιφανειών μέσω των συνοριακών στοιχείων αλλάζει σε κάθε επανάληψη.

3.6.3 Βασικές εντολές που χρησιμοποιήθηκαν

Το λογισμικό του Shipflow είναι εφοδιασμένο με μία πολύ μεγάλη ποικιλία εντολών. Η πληροφορία που ελέγχει τη συμπεριφορά του Shipflow δίνεται εντός ενός αρχείου διαμόρφωσης στη μορφή μίας αλληλουχίας εντολών (input configuration file). Υπάρχουν ορισμένες εντολές που είναι κοινές για όλα τα δομοστοιχεία του λογισμικού. Οι εντολές αυτές εμπερικλείονται σε ένα ενιαίο πρόγραμμα που αποκαλείται xflow. Ορισμένες εκ των εντολών που βρίσκονται εντός του xflow είναι υποχρεωτικό να προσδιοριστούν ώστε να μπορούν να εκτελεστούν τα επιμέρους προγράμματα.

Για τη διενέργεια των απαραίτητων υδροδυναμικών υπολογισμών της παρούσας διπλωματικής εργασίας τα δομοστοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αυτά των xran, xmesh και xflow. Για κάθε ένα εξ αυτών έγινε χρήση ορισμένων εκ των παρεχόμενων εντολών τους. Οι βασικές εντολές που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του αρχείου εντολών για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναλύονται παρακάτω, ενώ παρατίθεται και το αρχείο διαμόρφωσης της τελικής μορφής του παραμετρικού μοντέλου στην αντίστοιχη ενότητα του παραρτήματος. Οι βασικές εντολές των οποίων έγινε χρήση ανά δομοστοιχείο ήταν οι ακόλουθες (Flowtech International AB):

Xflow:

Program: Αναφέρονται τα προγράμματα που θα χρησιμοποιηθούν.

Offsetfile: Το όνομα του αρχείου που περιέχει τα offsets της επιφάνειας της γάστρας, τον προσανατολισμό και το μέγεθος της γάστρας που περιγράφεται στο αρχείο των offsets. Οι επιμέρους εντολές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι εξής:

- Lpp: Το μήκος αναφοράς που χρησιμοποιείται για την αδιαστατοποίηση των συντεταγμένων του αρχείου των offsets.
- Zori: Προσδιορίζει την θέση της z-συντεταγμένης του συστήματος συντεταγμένων επί του οποίου θα πραγματοποιηθούν οι υδροδυναμικοί υπολογισμοί.

Hulltype: Ο τύπος της γάστρας.

Vship: Η ταχύτητα του πλοίου

- Fn: Ο αριθμός Froude του πλοίου.
- Rn: Ο αριθμός Reynolds του πλοίου.

Xran:

Control:

- Nonlinear: Γίνεται χρήση των μη γραμμικών συνοριακών συνθηκών της ελεύθερης επιφάνειας.
- Free: Το πλοίο μπορεί να μεταβάλλει την παράλληλη βύθισή του και τη διαγωγή του κατά τη διάρκεια διενέργειας των απαραίτητων υπολογισμών.

Iteration:

- Maxit: Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων για παράλληλη βύθιση και διαγωγή ή/και μη γραμμικούς υπολογισμούς.

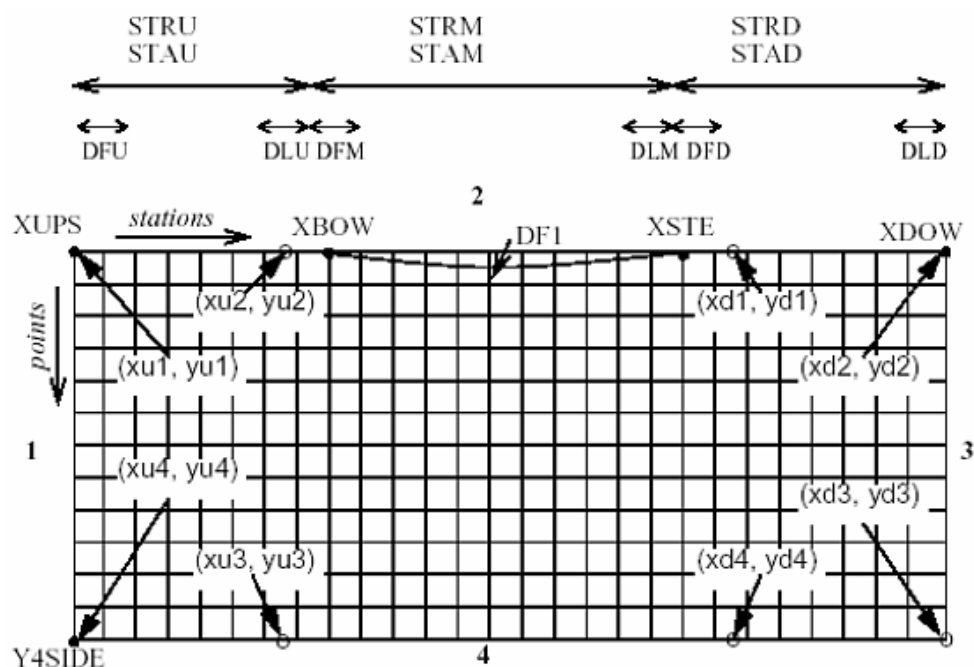
Xmesh:

Body: Αυτή η ομάδα εντολών στο τελικό αρχείο του Shipflow εμφανίζεται έξι φορές όπου οι τρεις αφορούν στη μισή ημιγάστρα και οι άλλες τρεις στην άλλη μισή ημιγάστρα. Η δεύτερη ημιγάστρα προέκυπτε μέσω κατοπτρισμού της πρώτης ημιγάστρας ως προς το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας του πλοίου, κάτι το οποίο γινόταν αντιληπτό για το Shipflow μέσω του κατάλληλου ορισμού του τύπου του πλοίου -εν προκειμένω 'cata'- στην εντολή hulltype.

Οι εντολές αυτής της ομάδας εντολών που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι κάτωθι:

- Ytra: Καθορίζει την εγκάρσια μετακίνηση των σημείων του αρχείου των offsets ως προς το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας του πλοίου. Για το δίγαστρο πλοίο της παρούσας διπλωματικής εργασίας η τιμή που έλαβε αυτή η εντολή ήταν η απόσταση μεταξύ των ημιγαστρών (separation).
- Ymir: Τα σημεία των offsets κατοπτρίζονται ως προς το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας της ημιγάστρας.
- Station: Το πλήθος των σταθμών ολόκληρου ή μέρους του σώματος.
- Point: Το πλήθος των σημείων κάθε σταθμού.

Free: Αυτή η ομάδα εντολών στο τελικό αρχείο του Shipflow εμφανίζεται δύο φορές όπου η μία αφορά στο τμήμα της ελεύθερης επιφάνειας εκτός των ημιγαστρών και η άλλη στο τμήμα της ελεύθερης επιφάνειας μεταξύ των ημιγαστρών. Προτού αναφερθούν οι επιμέρους εντολές αυτής της κατηγορίας εντολών παρατίθεται το κατωτέρω σχήμα που θα διευκολύνει την κατανόησή τους.



Σχήμα 20: Διακριτοποίηση της ελεύθερης επιφάνειας στο Shipflow (Flowtech International AB)

Οι βασικές εντολές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι ακόλουθες:

- Point: Το πλήθος των σημείων κάθε σταθμού.
- Xups: Η x-συντεταγμένη του ορίου της περιοχής της ανάντη ροής (upstream).
- Xdown: Η x-συντεταγμένη του ορίου της περιοχής της κατάντη ροής (downstream).
- Stau: Το πλήθος των σταθμών στην περιοχή της ανάντη ροής.

- Stam: Το πλήθος των σταθμών στην περιοχή της ροής που καταλαμβάνει η επιφάνεια της γάστρας.
- Stad: Το πλήθος των σταθμών στην περιοχή της κατάντη ροής.

Transom:

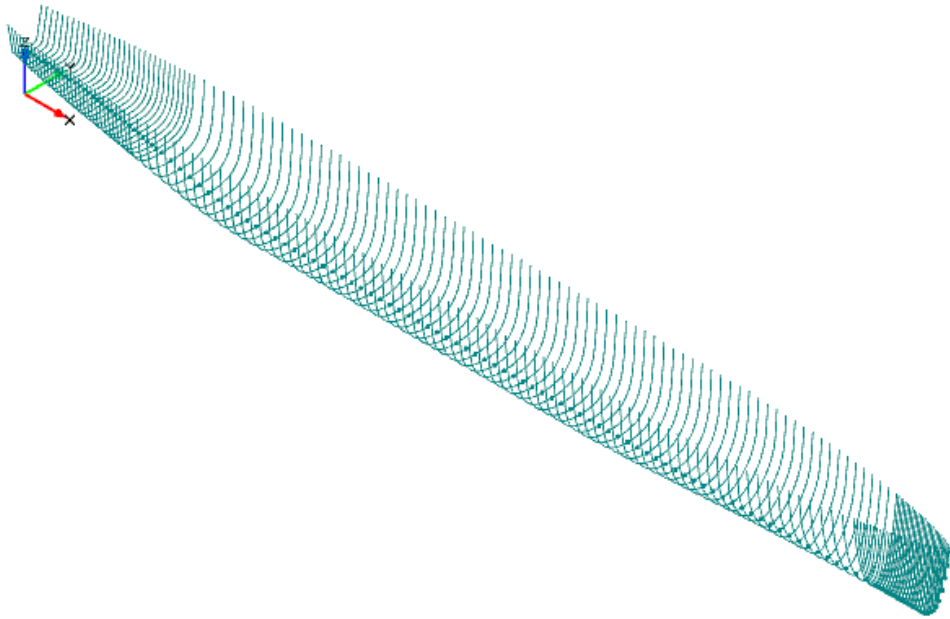
- Point: Το πλήθος των σημείων κάθε σταθμού.
- Stad: Το πλήθος των σταθμών στην περιοχή της κατάντη ροής.

3.6.4 Σύζευξη Shipflow και CAESES

Το Shipflow μαζί με το CAESES συνθέτουν ένα αποδοτικό περιβάλλον για τη σχεδίαση και υδροδυναμική βελτιστοποίηση πλοίων. Το CAESES παρέχει τα απαραίτητα εργαλεία για τη δημιουργία μίας παραμετρικής γεωμετρίας καθώς και τα απαραίτητα εργαλεία βελτιστοποίησης και το Shipflow παρέχει τα απαραίτητα εργαλεία υπολογιστικής υδροδυναμικής ώστε να αξιοποιηθούν τα εργαλεία βελτιστοποίησης με τα οποία είναι εφοδιασμένο το CAESES. Με αυτή τη σύζευξη επιτυγχάνεται μία αυτοματοποιημένη διαδικασία σχεδιαστικής βελτιστοποίησης πλοίων ως προς κάποιο υδροδυναμικό κριτήριο. Η συνδυαστική χρήση των λογισμικών του CAESES και του Shipflow διευκολύνεται μέσω της ύπαρξης ενός κοινού γραφικού περιβάλλοντος χρήστη (Graphical User Interface - GUI).

Προκειμένου να επιτευχθεί η μεταβίβαση της πληροφορίας της ημιγάστρας από το CAESES στο Shipflow έπρεπε κατ' αρχήν η συνοριακή αναπαράσταση Brep της γεωμετρίας της ημιγάστρας να μετατραπεί σε offset group. Αρχικά δημιουργήθηκαν τρία section groups για το πρυμναίο τμήμα (stern), το παράλληλο τμήμα (PMB) και για το πρωραίο τμήμα (stem), λαμβάνοντας έκαστο ως είσοδο την τελική συνοριακή αναπαράσταση της ημιγάστρας. Κάθε section group διακριτοποιούσε με διαφορετικό αριθμό sections την εκάστοτε περιοχή της ημιγάστρας. Ο λόγος που έγινε αυτό αποδίδεται στο ότι το πρωραίο και το πρυμναίο τμήμα της ημιγάστρας είχαν πιο πολύπλοκη γεωμετρία από το παράλληλο τμήμα της και έπρεπε ως εκ τούτου να έχουν πυκνότερη διακριτοποίηση από το παράλληλο τμήμα ώστε να μην τυχόν χαθεί σημαντική πληροφορία της γεωμετρίας αυτών των τμημάτων από το Shipflow.

Στη συνέχεια τα τρία section groups αποτέλεσαν το καθένα ξεχωριστά είσοδο για τη δημιουργία τριών αντίστοιχων image offset groups. Αυτού του τύπου οι οντότητες είναι οντότητες που μπορούν να διαβαστούν από το Shipflow. Ωστόσο οι οντότητες αυτές είχαν δύο προβλήματα. Το πρώτο πρόβλημα ήταν ότι το Shipflow «διαβάζει» τα offsets του κάθε offset group από το πρωραίο προς το πρυμναίο άκρο ενώ τα αρχικά image offset groups περιείχαν την πληροφορία αντίστροφα. Προκειμένου να αντιστραφεί η φορά τους, έγινε χρήση εγγενούς λειτουργίας των image offset groups οντοτήτων. Το δεύτερο πρόβλημα σχετιζόταν με το ότι επειδή το Shipflow πρέπει να δεχτεί ένα ενιαίο αρχείο με όλα τα offsets της ημιγάστρας του πλοίου, έπρεπε να ομαδοποιηθούν. Αυτό έγινε μέσω της οντότητας του offset group assembly, το οποίο έλαβε ως είσοδο τα τρία καινούργια -αντεστραμμένα- image offset groups.



Σχήμα 21: Offsets της τελικής επιφάνειας της ημιγάστρας πριν την είσοδό τους στο Shipflow

Η σύζευξη μεταξύ των λογισμικών ολοκληρώθηκε μέσω των οντοτήτων διαμόρφωσης (configuration) και υπολογισμών (computations) του Shipflow που είναι ενσωματωμένα στο CAESSES. Έχοντας έτοιμη πλέον την οντότητα που θα αποτελούσε την είσοδο στην εντολή 'file' της ομάδας εντολών 'offset' του xflow του Shipflow αυτό που απέμενε ήταν η εξαγωγή της από το CAESSES στο Shipflow σε κατάλληλη μορφή. Μέσω λειτουργίας ειδικά για την περίπτωση των offset group assembly οντοτήτων επιτεύχθηκε η εξαγωγή του offset group assembly της ημιγάστρας σε αρχείο της μορφής .shf και στη συνέχεια αυτόματη εισαγωγή του στο Shipflow.

Κατόπιν επικυρώθηκαν κατάλληλα και οι υπόλοιπες εντολές του xflow καθώς και των δύο χρησιμοποιηθέντων δομοστοιχείων του xmesh και του xran και έτσι το αρχείο επικύρωσης των υδροδυναμικών υπολογισμών ήταν πλέον έτοιμο. Ειδικά όσον αφορά στην εντολή zori του xflow σημειώνεται ότι αυτή σχετίζεται με το ότι το CAESSES χρησιμοποιεί εν γένει διαφορετικό σύστημα συντεταγμένων από το Shipflow.

Συγκεκριμένα, στην περίπτωση του παρόντος παραμετρικού μοντέλου η αρχή του συστήματος συντεταγμένων του CAESSES βρίσκεται επί του βασικού επιπέδου αναφοράς της ημιγάστρας και η διαμήκης του θέση συμπίπτει με αυτή του καθρέφτη. Στον αντίποδα, η αρχή του συστήματος συντεταγμένων του Shipflow βρίσκεται επί της αρχικώς αδιατάρακτης ελεύθερης επιφάνειας και η διαμήκης θέση του συμπίπτει με αυτή της προωραίας άκρης του πλοίου στο ύψος της αρχικώς αδιατάρακτης ελεύθερης επιφάνειας.

Τέλος, συμπληρώθηκε κατάλληλα το αρχείο των υδροδυναμικών υπολογισμών του Shipflow. Για να είναι η οντότητα αυτή λειτουργική έπρεπε να οριστεί η κατάλληλη τοπική εφαρμογή (local application) στις ρυθμίσεις τοπικής εκτέλεσης, που ήταν ένα αρχείο μορφής .bat. Όσον αφορά στις γενικές ρυθμίσεις εκτέλεσης, συμπληρώθηκε στο πεδίο της διαμόρφωσης η προαναφερθείσα υδροδυναμική διαμόρφωση.

3.7 Το διάγραμμα ελεύθερης ροής της έλικας

Ο κλασικός τρόπος παρουσίασης της συμπεριφοράς της έλικας σε ελεύθερη ροή -δίχως δηλαδή την παρουσία της γάστρας πλώραθέν της- υλοποιείται μέσω του διαγράμματος της έλικας σε ελεύθερη ροή. Το συγκεκριμένο διάγραμμα αποτελεί την αποτύπωση των πειραματικών αποτελεσμάτων του συντελεστή ώσης k_{T0} , του συντελεστή ροπής k_{Q0} και του βαθμού απόδοσης της έλικας σε ελεύθερη ροή η_0 συναρτήσει του συντελεστή προχώρησης J_0 . Τα προαναφερθέντα μεγέθη ορίζονται ως εξής⁷:

$$k_{T0} = \frac{T_0}{\rho n^2 D^4} \quad (3.17)$$

$$k_{Q0} = \frac{Q_0}{\rho n^2 D^5} \quad (3.18)$$

$$J_0 = \frac{V_0}{nD} \quad (3.19)$$

$$\eta_0 = \frac{J k_{T0}}{2\pi k_{Q0}} \quad (3.20)$$

όπου:

T_0 : Η ώση της έλικας σε ελεύθερη ροή

D : Η διάμετρος της έλικας

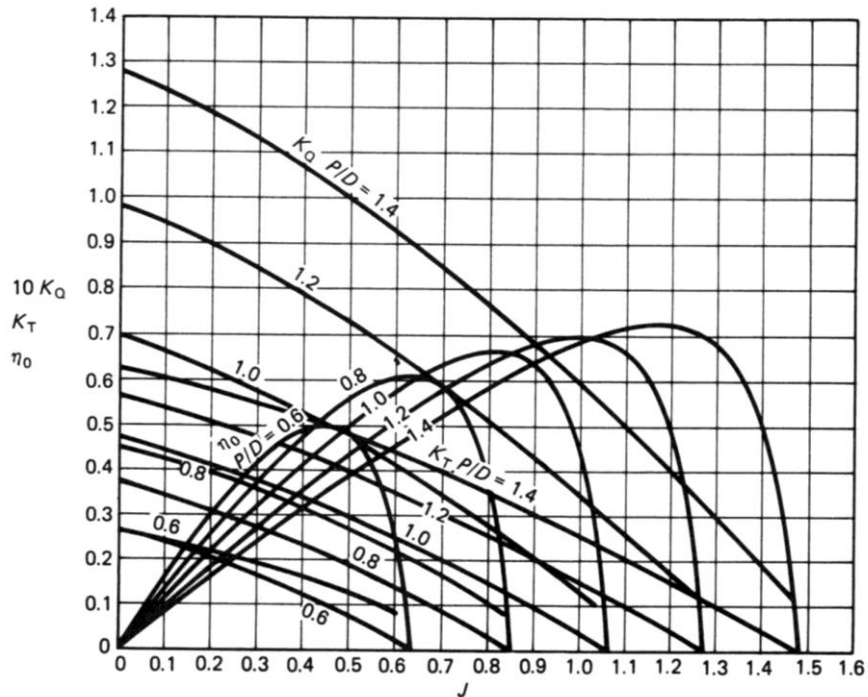
n : Οι στροφές της έλικας

J_0 : Ο συντελεστής προχώρησης της έλικας σε ελεύθερη ροή

V_0 : Η ταχύτητα της ροής που «βλέπει» η έλικα όντας σε ελεύθερη ροή

Ένα τυπικό διάγραμμα της έλικας σε ελεύθερη ροή παρατίθεται παρακάτω, όπου ως παράμετρος υπάρχει ο λόγος βήματος $\frac{P}{D}$ της έλικας, με δεδομένα όλα τα υπόλοιπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της έλικας.

⁷ Η χρήση του δείκτη 0 στα μεγέθη των συντελεστών ώσης και ροπής και ορισμένων εκ των εμπλεκόμενων μεγεθών τους γίνεται προκειμένου να γίνει σαφής διάκριση μεταξύ των μεγεθών που αφορούν στην έλικα σε ελεύθερη ροή σε σχέση με τα αντίστοιχα μεγέθη του αυτοπροωθούμενου πλοίου που παρατίθενται στη συνέχεια.

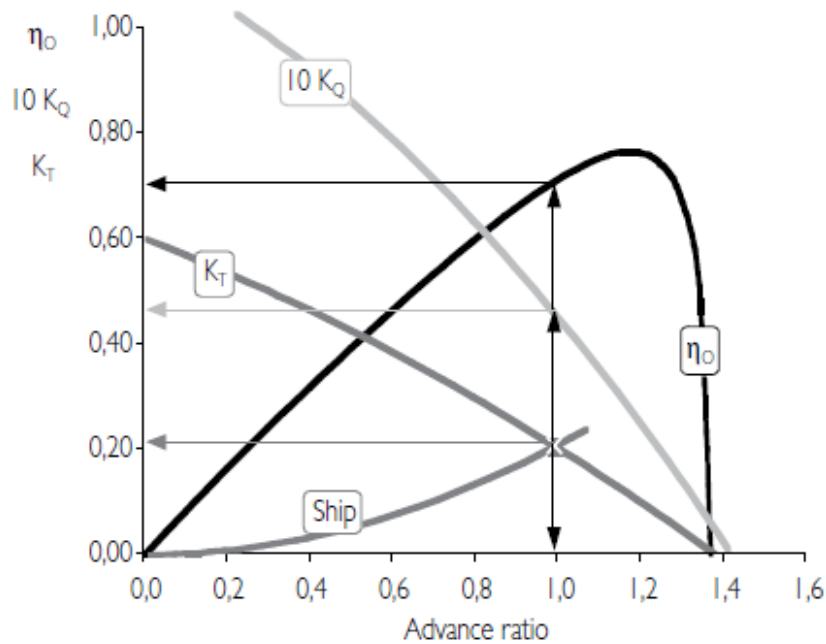


Σχήμα 22: Τυπικό διάγραμμα έλικας σε ελεύθερη ροή για διάφορους λόγους βήματος της έλικας (Πολίτης, 2018)

Για μία συγκεκριμένη τιμή του λόγου βήματος $\frac{P}{D}$ προκύπτει μία καμπύλη από κάθε μία εκ των τριών οικογενειών καμπυλών του ανωτέρω σχήματος. Με δεδομένα και όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της έλικας (διάμετρος D , αριθμός πτερυγίων z , λόγος εκτεταμένης επιφάνειας $\frac{A_E}{A_0}$) προκειμένου να μπορεί να βρεθεί οποιοδήποτε εκ των μεγεθών των στροφών n της έλικας, της ταχύτητας πλεύσης V , της ώσης της έλικας T , της ροπής στη θέση της έλικας Q που αντιστοιχούν στο πρόβλημα του αυτοπροωθούμενου πλοίου, αρκεί να είναι γνωστά δύο εξ αυτών. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας τα μεγέθη που ήταν γνωστά ήταν τα V και T . Σε αυτή την περίπτωση, ο συντελεστής ώσης του αυτοπροωθούμενου πλοίου συναρτήσει του συντελεστή προχώρησης εκφράζεται μέσω της κάτωθι παραβολής (Stapersma & Woud, 2005):

$$k_{Tship} = \left(\frac{T}{\rho V_0^2 D^2} \right) J_0^2 \quad (3.21)$$

Κατόπιν, με εφαρμογή της μεθόδου εξίσωσης ώσης ($T=T_0$), βρίσκεται η τομή μεταξύ της παραβολής του αυτοπροωθούμενου πλοίου που ορίζεται από την (3.21) και με την αντίστοιχη καμπύλη $k_T(J) - J_0$ της έλικας σε ελεύθερη ροή, ώστε να βρεθεί το σημείο λειτουργίας της έλικας, όπως φαίνεται στο τυπικό διάγραμμα που ακολουθεί:



Σχήμα 23: Τυπικό διάγραμμα μεγεθών έλικας σε ελεύθερη ροή και καμπύλης συντελεστή ώσης αυτοπροωθούμενου πλοίου (Stapersma & Woud, 2005)

3.8 Εκτίμηση των συντελεστών αλληλεπίδρασης έλικας-γάστρας

Το αυτοπροωθούμενο πλοίο διαφέρει από το αντίστοιχο ρυμουλκούμενο λόγω της ύπαρξης και λειτουργίας της έλικας στο πρυμναίο τμήμα του. Τα μεγέθη των στροφών n , της ταχύτητας πλεύσης V , της ώσης της έλικας T , της ροπής στη θέση της έλικας Q και της αντίστασης R περιγράφουν μονοσήμαντα την κατάσταση πλεύσης του αυτοπροωθούμενου πλοίου.

3.8.1 Πραγματικό ποσοστό ομόρου

Η έλικα λειτουργεί στον πραγματικό ομόρου του πλοίου και «βλέπει» μονάχα μία μέση αξονική πραγματική ταχύτητα V_0 , που αντιστοιχεί στην ταχύτητα του πραγματικού ομόρου, διαφορετική από την ταχύτητα V του πλοίου. Επειδή μάλιστα το πλοίο μπλοκάρει τη ροή προς την έλικα ισχύει γενικά ότι $V_0 < V$. Ορίζεται συνεπώς το πραγματικό ποσοστό ομόρου w ως εξής:

$$w = \frac{V - V_0}{V} \Leftrightarrow V_0 = V(1 - w) \quad (3.22)$$

Προκειμένου να υπολογιστεί η ταχύτητα του πραγματικού ομόρου ώστε να μπορούν μετά να γίνουν οι απαραίτητοι υπολογισμοί από το πρόγραμμα του GRID που αφορούσαν στο πρόβλημα της έλικας σε ελεύθερη ροή έπρεπε να εκτιμηθεί το ποσοστό ομόρου w . Για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής έγινε εκτίμησή του μέσω των κάτωθι εμπειρικών τύπων (Πολίτης, 2018):

$$w_{Kruger} = 0.75C_B - 0.24 \quad (3.23\alpha)$$

$$w_{Hecksher} = 0.7C_p - 0.18 \quad (3.23\beta)$$

$$w_{Troost} = 0.25 + 2.5 \cdot (C_B - 0.6)^2 \quad (3.23\gamma)$$

Η τελική τιμή του πραγματικού ποσοστού ομόρου προέκυψε ως ο μέσος όρος των τριών ανωτέρω μεθόδων, δηλαδή:

$$w = \frac{w_{Kruger} + w_{Hecksher} + w_{Troost}}{3} \quad (3.24)$$

Το πραγματικό ποσοστό ομόρου κυμαίνεται συνήθως στην περιοχή τιμών 0.05 έως 0.45. Ειδικότερα για τα μονέλικα πλοία, οι τιμές του w κυμαίνονται συνήθως από 0.20 έως 0.45.

3.8.2 Ποσοστό μείωσης ώσης

Για ίδια ταχύτητα πλεύσης V μεταξύ αυτοπροωθούμενου και ρυμουλκούμενου πλοίου η αντίσταση R του αυτοπροωθούμενου είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη R_0 του ρυμουλκούμενου⁸, δηλαδή $R > R_0$. Προκειμένου όμως το πλοίο να κινείται με σταθερή ταχύτητα V θα πρέπει η αναπτυσσόμενη ώση της έλικας να είναι ίση προς την ολική αντίστασή του, επομένως θα πρέπει $T = R$ και αντίστοιχα $T_0 = R_0$. Ορίζεται επομένως το ποσοστό μείωσης ώσης (thrust deduction) ως εξής:

$$t = \frac{T - R_0}{T} \Leftrightarrow T = \frac{R_0}{1 - t} \quad (3.25)$$

Ο τύπος (3.25) είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό της αναπτυσσόμενης ώσης της έλικας. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής η αντίσταση R_0 της γυμνής (χωρίς τα παρελκόμενα) γάστρας προέκυψε ως το εξαγόμενο των υδροδυναμικών υπολογισμών του λογισμικού υπολογιστικής υδροδυναμικής του Shipflow. Για την εκτίμηση του ποσοστού μείωσης ώσης έγινε χρήση των ακόλουθων τριών εμπειρικών τύπων που αφορούν σε μονέλικα πλοία⁹ (Πολίτης, 2018):

$$t_{Hecksher} = 0.5C_p - 0.12 \quad (3.26\alpha)$$

$$t_{Danckwardt} = 0.5C_B - 0.15 \quad (3.26\beta)$$

$$t_{SSPA} = w \cdot \left(1.57 - 2.3 \frac{C_B}{C_{WP}} + 1.5C_B \right) \quad (3.26\gamma)$$

Η τελική τιμή του ποσοστού μείωσης ώσης προέκυψε ως ο μέσος όρος των τριών ανωτέρω μεθόδων, δηλαδή:

$$t = \frac{t_{Hecksher} + t_{Danckwardt} + t_{SSPA}}{3} \quad (3.27)$$

Το ποσοστό μείωσης ώσης κυμαίνεται συνήθως στην περιοχή τιμών 0.1 έως 0.3.

⁸ Ως ρυμουλκούμενο πλοίο νοείται η γυμνή του γάστρα με όλα της τα παρελκόμενα πλην της έλικας. Προφανώς η ανισότητα συνεχίζει να ισχύει με αυτή τη φορά και για τη γυμνή και άνευ παρελκομένων γάστρα.

⁹ Έγινε χρήση των τύπων για μονέλικα πλοία καθώς εξετάστηκε η μία μόνο ημιγάστρα.

3.8.3 Βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής

Η πραγματική ταχύτητα της ροής του νερού γύρω από την έλικα στον ομόρου της γάστρας του πλοίου αφενός δεν είναι σταθερή και αφετέρου δεν είναι υπό σωστές γωνίες ως προς την επιφάνεια του δίσκου της έλικας, αλλά έχει μία τύπου στρόβιλη ροή (MAN Energy Solutions, 2018). Ως εκ τούτου -και σε αντιδιαστολή με τη λειτουργία της έλικας σε ελεύθερη ροή- η απόδοση της έλικας επηρεάζεται από έναν παράγοντα η_R που αποκαλείται βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής. Ο η_R ορίζεται μέσω του κάτωθι τύπου:

$$\eta_R = \frac{Q_0}{Q} \quad (3.28)$$

όπου:

Q_0 : Η ροπή της έλικας σε ελεύθερη ροή

Q : Η ροπή της έλικας του αυτοπροωθούμενου πλοίου

Προκειμένου να βρεθεί για κάθε λόγο βήματος η ισχύς πρόωσης SHP μέσω του GRID, έπρεπε να βρεθεί η ροπή της έλικας του αυτοπροωθούμενου πλοίου. Για να συμβεί όμως αυτό, έπρεπε πρώτα να βρεθεί η ροπή της έλικας σε ελεύθερη ροή και κατόπιν με γνωστό τον η_R να βρεθεί η ροπή της έλικας του αυτοπροωθούμενου πλοίου. Για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής ο βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής εκτιμήθηκε μέσω του ακόλουθου τύπου (Holtrup & Mennen, 1982), όπου για την περίπτωση των μονέλικων πλοίων είναι ο ακόλουθος:

$$\eta_R = 0.9922 - 0.05908 \frac{A_E}{A_0} + 0.07424(C_P - 0.0225 \cdot LCB_{midship}) \quad (3.29)$$

όπου:

$\frac{A_E}{A_0}$: Ο λόγος εκτεταμένης επιφάνειας (expanded area ratio).

$LCB_{midship}$: Η διαμήκης θέση του κέντρου άντωσης, μετρούμενη από το μέσο του πλοίου.

Ειδικότερα, όσον αφορά στο λόγο εκτεταμένης επιφάνειας, η αρχική εκτίμηση αυτού πραγματοποιήθηκε μέσω του τύπου του Keller. Για λόγους περιορισμού/αποφυγής φαινομένων σπηλαιώσης στην έλικα η εκτίμηση που πραγματοποιήθηκε για το λόγο εκτεταμένης επιφάνειας από τον τύπο του Keller αποτέλεσε την ελάχιστη αποδεκτή τιμή του (Gaafary, El-Kilani, & Moustafa, 2011), δηλαδή:

$$\frac{A_E}{A_0} \geq \left[\frac{A_E}{A_0} \right]_{min} = \frac{(1.3 + 0.3 \cdot z) \cdot T}{(p_0 - p_v) \cdot D_{ελ}^2} + k \quad (3.30)$$

όπου:

z : Ο αριθμός των πτερυγίων της έλικας.

T : Η αναπτυσσόμενη ώση της έλικας.

$p_0 = p_{atm} + \rho gh$: Η στατική πίεση στο κέντρο του ελικοφόρου άξονα στη θέση της έλικας για απόσταση του κέντρου του h από την αδιατάρακτη ελεύθερη επιφάνεια του νερού.

p_v : Η πίεση ατμοποίησης του θαλασσινού νερού.

k: Συντελεστής που κυμαίνεται από 0 για διπλέλικα πολεμικά πλοία με πρύμνη άβακος μέχρι 0.2 για μονέλικα πλοία.

Η εκτίμηση του λόγου εκτεταμένης επιφάνειας έγινε με τη συνδρομή κατάλληλου feature definition, όπου το αποτέλεσμά του προέκυπτε πάντοτε με ακρίβεια δύο σημαντικών ψηφίων. Σε κάθε περίπτωση, προκειμένου να μειωθεί περαιτέρω ο κίνδυνος εμφάνισης φαινομένων σπηλαιώσης, ο λόγος εκτεταμένης επιφάνειας δεν επιτρεπόταν να λάβει τιμή κάτω από 0.55.

Όσον αφορά στον αριθμό πτερυγίων της έλικας, επελέγη η έλικα να έχει $z = 5$ πτερύγια¹⁰. Ο λόγος πίσω από αυτή την επιλογή του αριθμού πτερυγίων ήταν ότι τα 2 και 3 πτερύγια κρίθηκαν λίγα, ενώ τα 6 και 7 πτερύγια κρίθηκαν πολλά. Επομένως η λήψη απόφασης ως προς τον αριθμό των πτερυγίων θα κρινόταν μεταξύ των 4 ή των 5 πτερυγίων. Η περίπτωση της τετράπτερης έλικας απορρίφθηκε λόγω του ότι εμφανίζει μεταβαλλόμενο βήμα σε ακτινικές θέσεις έως και το 50% της ακτίνας της έλικας, ενώ η αντίστοιχη πεντάπτερη -όπως και όλες οι υπόλοιπες έλικες της σειράς- εμφανίζει σταθερό βήμα σε κάθε ακτινική της θέση.

Σε κάθε περίπτωση τα όρια ισχύος των πολωνύμων παλινδρόμησης των οποίων κάνει χρήση το GRID κυμαίνονται σε λόγους βήματος $0.5 \leq \frac{P}{D} \leq 1.4$, ενώ τα όρια του λόγου εκτεταμένης επιφάνειας συναρτήσει του αριθμού πτερυγίων της έλικας παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί. Οι διακριτές τιμές του λόγου εκτεταμένης επιφάνειας αφορούν στα διαγράμματα που είναι διαθέσιμα για τη σειρά ελίκων Wageningen B.

Πίνακας 5: Όρια του λόγου εκτεταμένης επιφάνειας συναρτήσει του αριθμού πτερυγίων της σειράς ελίκων Wageningen B (Πολίτης, 2018)

Blade number (Z)	Blade area ratio A_E/A_0					
2	0.30					
3	0.35		0.50	0.65	0.80	
4	0.40		0.55	0.70	0.85	1.00
5	0.45		0.60	0.75	1.05	
6	0.50		0.65	0.80		
7	0.55		0.70	0.85		

Για μονέλικα πλοία ο βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής λαμβάνει συνήθως τιμές στο εύρος 1.00 έως 1.07 (MAN Energy Solutions, 2018). Αυτό το εύρος τιμών οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ο στροβιλισμός του νερού στην περιοχή γύρω από την έλικα έχει θετική επίδραση στον υδροδυναμικό βαθμό απόδοσής της.

3.9 Ο συντελεστής πρόωσης

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης της προωστήριας εγκατάστασης του πλοίου καλείται συντελεστής πρόωσης (propulsive coefficient) και ορίζεται μέσω της σχέσης:

$$P.C. = \frac{EHP}{SHP} \quad (3.31)$$

¹⁰ Η κάθε περίπτωση έλικας αφορούσε στη σειρά ελίκων Wageningen B-series, καθώς τα πολωνύμα παλινδρόμησης αυτής της σειράς χρησιμοποιεί και το GRID για την επίλυση του προβλήματος εύρεσης της ισχύος πρόωσης SHP.

όπου:

$EHP = R_0 \cdot V$ [kW]: Η ισχύς ρυμούλκησης της γυμνής γάστρας του πλοίου, με ή χωρίς τα παρελκόμενά της (Effective Horse Power).

$SHP = 2\pi n_e Q_e$ [kW]: Η ισχύς πρόωσης (Shaft Horse Power).

Ο συντελεστής πρόωσης μπορεί εναλλακτικά να γραφεί συναρτήσει ορισμένων επιμέρους βαθμών απόδοσης. Συγκεκριμένα η εναλλακτική γραφή του συντελεστή είναι η ακόλουθη:

$$P.C. = \eta_H \eta_0 \eta_R \eta_S \quad (3.32)$$

όπου:

$\eta_H = \frac{1-t}{1-w}$: Ο βαθμός απόδοσης γάστρας (hull efficiency), που είναι ο λόγος μεταξύ της ισχύος ρυμούλκησης προς την ισχύ της ώσης που η έλικα διαβιβάζει στο νερό.

$\eta_0 = \frac{TV_0}{2\pi Q_0}$: Η απόδοση της έλικας σε ελεύθερη ροή η οποία σχετίζεται με τη λειτουργία της σε ομογενή ομόρου «βλέποντας» παράλληλη εισερχόμενη ροή, καθώς δεν υπάρχει η παρουσία της γάστρας ώστε να τη μεταβάλλει.

η_S : Ο βαθμός απόδοσης του αξονικού συστήματος του πλοίου, συμπεριλαμβανομένου και του μειωτήρα, αν και εφόσον υπάρχει.

3.10 Το πρόγραμμα του GRID

Η ολότητα των λύσεων των προβλημάτων πρόωσης περιέχονται στα διαγράμματα ισοβηματικών-ισοταχών καμπυλών. Με τη βοήθεια αυτών των διαγραμμάτων γίνεται η επιλογή του κινητήρα και του μειωτήρα -αν και εφόσον υπάρχει- του πλοίου. Το πρόγραμμα GRID (Πολίτης, 2018) είναι ένα πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή γραμμένο σε γλώσσα Fortran-95 που κάνει τον υπολογισμό αυτού του πλέγματος. Οι υπολογισμοί που πραγματοποιεί το εν λόγω πρόγραμμα βασίζονται στη σειρά ελίκων Wageningen-B, με τους περιορισμούς που η σειρά αυτή επιβάλλει στον αριθμό z των πτερυγίων της έλικας, στο λόγο εκτεταμένης επιφάνειας $\frac{A_E}{A_0}$ και στο λόγο βήματος $\frac{P}{D}$.

3.10.1 Εμπλεκόμενα μεγέθη των αρχείων εισόδου και εξόδου του προγράμματος

Το πρόγραμμα δέχεται ως είσοδο τα ακόλουθα δεδομένα:

- Διάμετρος της έλικας $D_{ελ}$ [m]
- Αριθμός πτερυγίων z
- Λόγος εκτεταμένης επιφάνειας $\frac{A_E}{A_0}$
- Βαθμός απόδοσης αξονικού συστήματος, με ενσωματωμένο και το βαθμό απόδοσης του μειωτήρα, αν και εφόσον υπάρχει, η_S
- Αριθμός ελίκων n_p
- Ταχύτητα του πλοίου V_S [m/s]

- Αντίσταση ρυμούλκησης R_T του πλοίου στην ως άνω ταχύτητα [kN]
- Ποσοστό ομόρου w
- Ποσοστό μείωσης ώσης t
- Βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής η_R

Το GRID υπολογίζει αρχικά τον συντελεστή ώσης k_{T0} της έλικας σε ελεύθερη ροή που περιγράφηκε παραπάνω με τη συνδρομή των πολυωνύμων παλινδρόμησης της σειράς Wageningen-B συναρτήσει των μεγεθών J , $\frac{P}{D}$, $\frac{A_E}{A_0}$, z . Με μονοσήμαντα προσδιορισμένη την κατάσταση αυτοπρώωσης του πλοίου βρίσκει την ώση T του αυτοπροωθούμενου πλοίου. Έχοντας ως παράμετρο το λόγο βήματος της έλικας και με βάση τη μέθοδο εξίσωσης ώσης βρίσκει με αριθμητική μέθοδο για κάθε λόγο βήματος τις στροφές της έλικας n για τις οποίες $T=T_0$. Με γνωστές πλέον τις στροφές n της έλικας υπολογίζει κατά σειρά το συντελεστή προχώρησης, το συντελεστή ροπής k_{Q0} της έλικας σε ελεύθερη ροή, τη ροπή στη θέση της έλικας, την αποδιδόμενη ισχύ στην έλικα, την ισχύ πρόωσης και τέλος το συντελεστή πρόωσης. Κατόπιν εκτέλεσης του GRID τα τελικά αποτελέσματά που εμφανίζονται είναι τα ακόλουθα:

- Στροφές της έλικας n [rpm]
- Λόγος βήματος της έλικας $\frac{P}{D}$
- Ώση της έλικας T [kN]
- Ροπή στη θέση της έλικας Q [kNm]
- Αποδιδόμενη ισχύς στην έλικα DHP [kW]
- Ισχύς πρόωσης SHP [kW]
- Συντελεστής πρόωσης P.C.

3.10.2 Σύζευξη GRID και CAESES

Η διασύνδεση μεταξύ του GRID και του CAESES πραγματοποιήθηκε μέσα από το CAESES και ήταν ως διαδικασία παρόμοια με την αντίστοιχη που ακολουθήθηκε για τη σύζευξη του Shipflow με το CAESES. Η διασύνδεση στην προκειμένη περίπτωση έγινε μέσω του software connector του CAESES, ο οποίος ζητούσε τον προσδιορισμό των αρχείων εισόδου και εξόδου του GRID καθώς και το εκτελέσιμο αρχείο του -αποκαλούμενο ως runner- που θα ήταν ένα αρχείου τύπου .exe ή .bat. Το αρχείο εισόδου του GRID ήταν ένα αρχείο τύπου file ονόματι 'grid_d_input', ενώ το αρχείο εξόδου του προγράμματος ήταν ένα αρχείο επίσης τύπου file ονόματι 'grid_d_output'. Το εκτελέσιμο αρχείο του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα αρχείο τύπου .exe ονόματι 'grid_d_07'.

Αυτό το οποίο απέμενε να πραγματοποιηθεί προκειμένου να ολοκληρωθεί η σύζευξη των δύο προγραμμάτων ήταν να δοθεί στο CAESES η δυνατότητα αφενός να μπορεί να τροποποιήσει κατάλληλα ορισμένα από τα πεδία του αρχείου εισόδου και αφετέρου να μπορεί να πάρει την πληροφορία των τιμών ορισμένων πεδίων του αρχείου εξόδου. Όσον αφορά στο αρχείο εισόδου, ήταν επιθυμητό να μπορούν ορισμένα από τα πεδία του να λαμβάνουν σε κάθε τρέξιμο κάθε παραλλαγή γάστρας κατά τη φάση της βελτιστοποίησης τις τιμές ορισμένων παραμέτρων του προβλήματος, ώστε η διαδικασία της σχεδιαστικής βελτιστοποίησης να μπορούσε να αυτοματοποιηθεί.

Με την ίδια λογική, ήταν επιθυμητό οι τιμές ορισμένων πεδίων του αρχείου εξόδου να μπορούσαν να εξαχθούν και να αποθηκευτούν σε παραμέτρους εντός του CAESES, ώστε να υφίσταντο περαιτέρω επεξεργασία στη συνέχεια. Τα μεγέθη των αρχείων εισόδου του GRID που παραμετροποιήθηκαν και μεταβάλλονταν για κάθε νέα παραλλαγμένη γάστρα που προέκυπτε κατά τη φάση της βελτιστοποίησης, καθώς και τα μεγέθη του αρχείου εξόδου του προγράμματος που παραμετροποιήθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί:

Πίνακας 6: Μεγέθη του GRID που αποτέλεσαν εξαρτώμενες παραμέτρους του CAESES

Αρχείο εισόδου GRID	Αρχείο εξόδου GRID
Διάμετρος έλικας $D_{ελ}$	Στροφές έλικας n
Λόγος εκτεταμένης επιφάνειας $\frac{A_E}{A_0}$	Ροπή στη θέση της έλικας Q
Απόσταση ελικοφόρου άξονα h από ίσαλο	Αποδιδόμενη ισχύς στην έλικα DHP
Αντίσταση ρυμούλκησης R_T	Ισχύς πρόωσης SHP
Ποσοστό ομόρου w	Συντελεστής πρόωσης P.C.
Ποσοστό μείωσης ώσης t	
Βαθμός απόδοσης σχετικής περιστροφής η_R	

Δεδομένου ότι το GRID χρειαζόταν ως είσοδο για να μπορέσει να τρέξει την αντίσταση ρυμούλκησης R_T , αυτό προϋπέθετε ότι για κάθε παραλλαγμένη γάστρα που θα προέκυπτε κατά τη σχεδιαστική βελτιστοποίηση θα έπρεπε να τρέχει πρώτα το Shipflow ώστε να βρίσκει το συντελεστή κυματισμού C_w και κατ' επέκταση την ολική αντίσταση R_T και μετά από την εκτέλεσή του θα έτρεχε το GRID.

4 Η σχεδιαστική βελτιστοποίηση

4.1 Γενική περιγραφή

Η σχεδιαστική βελτιστοποίηση τυπικά μοντελοποιείται στα πλαίσια των προβλημάτων μη γραμμικού προγραμματισμού (Non Linear Programming-NLP (Sun & Yuan, 2006)). Για την επίτευξη μίας γενικής περιγραφής σχεδιαστικής βελτιστοποίησης, η μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος απαιτεί αρχικά το διάνυσμα των, έστω M , μεταβλητών σχεδίασης $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_M)^T$ που ανήκει σε ένα υποσύνολο X του R^M . Κάθε μία εκ των μεταβλητών σχεδίασης του διανύσματος έχει άνω και κάτω όριο x_i^u και x_i^l . Τα κριτήρια της βελτιστοποίησης εκφράζονται μέσω του διανύσματος των αντικειμενικών συναρτήσεων (objective functions) $\vec{F} = (F_1, F_2, \dots, F_N)^T$ και των περιορισμών ισότητας και ανισότητας (equality and inequality constraints), έστω $\vec{h} = (h_1, \dots, h_p)$ και $\vec{g} = (g_1, \dots, g_q)$ αντίστοιχα, που είναι συναρτήσεις κάποιων ή και όλων των μεταβλητών σχεδίασης του διανύσματος \vec{x} .

Το διάνυσμα \vec{F} των αντικειμενικών συναρτήσεων καλείται και σύνθετη αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος και οι επιμέρους αντικειμενικές συναρτήσεις καλούνται και κριτήρια απόδοσης. Τα ανωτέρω συνθέτουν τη γενική μορφή των περιορισμένων (constrained) προβλημάτων μη γραμμικού προγραμματισμού, η λύση των οποίων προκύπτει μέσω της εύρεσης εκείνου του διανύσματος -αν και εφόσον υπάρχει- των μεταβλητών σχεδίασης \vec{x} που αποτελεί λύση του κάτωθι προβλήματος (Tahara, Peri, Campana, & Stern, 2011):

$$\text{Minimize or Maximize: } \begin{cases} F_1(\vec{x}) \\ \vdots \\ F_N(\vec{x}) \end{cases}, \vec{x} \in X \subseteq R^M$$

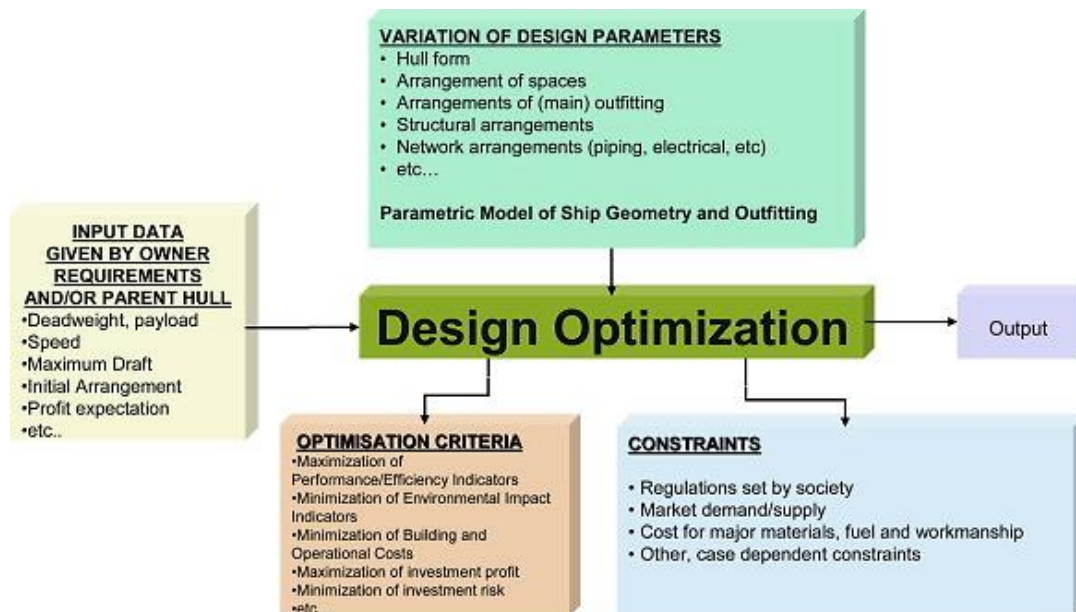
και είναι υποκείμενη στους κάτωθι περιορισμούς:

$$h_j(\vec{x}) = 0 \quad (j = 1, \dots, p) \tag{4.1}$$

$$g_j(\vec{x}) \leq 0 \quad (j = 1, \dots, q)$$

$$x_i^l \leq x_i \leq x_i^u \quad (i = 1, \dots, M)$$

Στην περίπτωση της γενικευμένης σχεδιαστικής βελτιστοποίησης πλοίων, η ροή του προβλήματος λαμβάνει τη μορφή που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



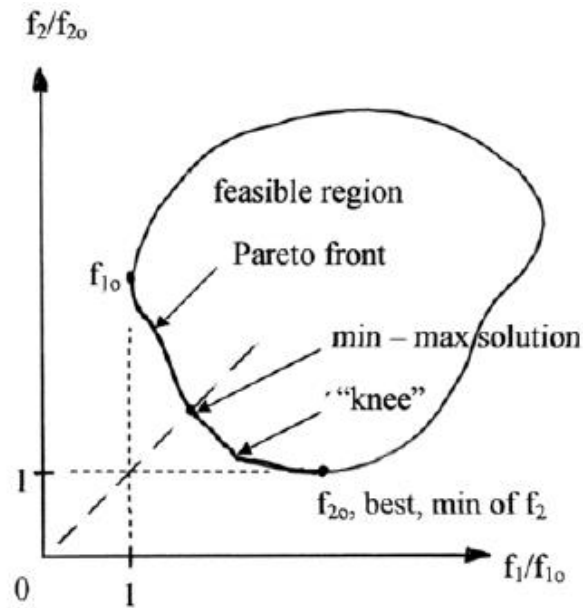
Σχήμα 24: Γενικευμένο πρόβλημα σχεδιαστικής βελτιστοποίησης πλοίου (Papanikolaou, 2009)

Όταν πολλαπλά αντιφατικά κριτήρια βελτιστοποίησης συνυπάρχουν στο ίδιο πρόβλημα, τότε ο πιο κοινός ορισμός των λύσεων που είναι οι εγγύτερες στη βέλτιστη λύση προκύπτει μέσω της βελτιστοποίησης Pareto (Pareto optimality (Censor, 1977)). Η βελτιστοποίηση Pareto μπορεί να εκφραστεί με τον ακόλουθο τρόπο: ένα σχέδιο είναι βέλτιστο κατά Pareto εφόσον ικανοποιεί τους περιορισμούς και είναι τέτοιο, ώστε κανένα κριτήριο να μην μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω δίχως να προκαλέσει τουλάχιστον ένα εκ των υπολοίπων κριτηρίων να μειωθεί.

Η ως άνω διατύπωση της βελτιστοποίησης Pareto αναγνωρίζει την ανταγωνιστική αλληλεπίδραση μεταξύ των κριτηρίων. Η βελτιστοποίηση με βάση αυτή την προσέγγιση δίνει ως λύση του σχεδιαστικού προβλήματος ένα σύνολο λύσεων που λογίζονται ως εξίσου καλές. Προκειμένου να επιλεγεί τελικώς μία σχεδιαστική λύση ως η βέλτιστη ανάμεσα σε αυτή την ομάδα βέλτιστων λύσεων, ένας ή περισσότεροι συμβιβασμοί (trade-offs) είναι αναγκαίο να πραγματοποιηθούν. Επομένως στην περίπτωση της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, όπως γίνεται αντιληπτό, είναι αναπόφευκτη η πραγματοποίηση μίας διαδικασίας λήψης απόφασης (decision-making) από την πλευρά του σχεδιαστή ως προς το πώς θα εκλεγεί η βέλτιστη λύση.

Η κλασικότερη πολυκριτηριακή σχεδιαστική βελτιστοποίηση που συναντάται είναι αυτή που κάνει χρήση δύο κριτηρίων. Η απαίτηση για ελαχιστοποίηση/μεγιστοποίηση δύο ή περισσότερων αντιφατικών κριτηρίων οδηγεί στη δημιουργία του μετώπου Pareto, επί του οποίου βρίσκονται οι βέλτιστες σχεδιαστικές λύσεις του προβλήματος. Το μέτωπο εκτείνεται μεταξύ της λύσης που αποτελεί τη βέλτιστη ως προς το πρώτο κριτήριο, έστω f_{10} , και της λύσης που αποτελεί τη βέλτιστη ως προς το δεύτερο κριτήριο, έστω f_{20} . Το μέτωπο μπορεί και να έχει κενά εφόσον ο χώρος των εφικτών λύσεων είναι μη κυρτός.

Οι σχεδιαστές συνήθως επικεντρώνονται στις σχεδιαστικές λύσεις που βρίσκονται στα «γόνανα» του μετώπου Pareto, που είναι οι περιοχές στις οποίες παρουσιάζεται μία απότομη αλλαγή της κλίσης της καμπύλης του μετώπου. Οι λύσεις που αντιστοιχούν σε αυτά τα σημεία κρίνονται αποδοτικότερες λόγω του ότι η απώλεια του ενός κριτηρίου αρχίζει να αυξάνεται ταχύτερα με κάθε βελτίωση του άλλου κριτηρίου. Παρακάτω παρατίθεται εικόνα που δείχνει μία τυπική αναπαράσταση του πώς εκτείνεται το μέτωπο Pareto μεταξύ των προαναφερθεισών βέλτιστων τιμών f_{10} και f_{20} , όπου οι άξονες κάθε κριτηρίου είναι κανονικοποιημένοι ως προς την αντίστοιχη βέλτιστη τιμή τους.



Σχήμα 25: Μέτωπο Pareto εκτεινόμενο μεταξύ των βέλτιστων λύσεων f_{10} και f_{20} (Parsons & Thurnau, 2009)

Στο ανωτέρω σχήμα παρατηρούνται πέραν των όσων προαναφέρθηκαν και η περιοχή των εφικτών σχεδιαστικών λύσεων (feasible region), καθώς και η ουτοπική λύση (utopian solution) του προβλήματος, που αντιστοιχεί στην τομή των βέλτιστων τιμών κάθε κριτηρίου, όπου στην περίπτωση των κανονικοποιημένων αξόνων αντιστοιχεί στο σημείο (1,1).

Όσον αφορά στην περίπτωση της μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης, αυτή αποτελεί εκφυλισμένη περίπτωση της πολυκριτηριακής. Συγκεκριμένα, ο τύπος (4.1) ισχύει ως έχει και για την περίπτωση της μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης, με μοναδική διαφορά ότι η διανυσματική αντικειμενική συνάρτηση $\vec{F} \in R^N$ εκφυλίζεται στη βαθμωτή αντικειμενική συνάρτηση $F \in R$. Αντίστοιχα, η αναπαράσταση των βέλτιστων σχεδιαστικών λύσεων του προβλήματος συναρτήσει των κριτηρίων είναι μία υπερπιφάνεια του R^N στην γενική περίπτωση χρήσης N κριτηρίων, μία επιφάνεια του R^3 στην περίπτωση τριών κριτηρίων, μία καμπύλη του R^2 στην περίπτωση δύο κριτηρίων και εκφυλίζεται σε ένα σημείο ενός άξονα στην μονοκριτηριακή βελτιστοποίηση.

4.2 Τεχνικές αναζήτησης βέλτιστης λύσης

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την αναζήτηση του ελάχιστου ή μέγιστου μιας αντικειμενικής συνάρτησης κατηγοριοποιούνται σε τρεις βασικές ομάδες (Κώστας, 2014):

- **Μέθοδοι μαθηματικής ανάλυσης (Calculus based):** Διακρίνονται σε άμεσες και έμμεσες. Όσον αφορά στις άμεσες μεθόδους, αυτές χρησιμοποιούν την εκάστοτε αντικειμενική συνάρτηση $F_i(\vec{x})$ και τις πρώτες μερικές παραγώγους αυτής, οπότε και αποκαλούνται gradient-based, ή χρησιμοποιούν και τον Hessian-πίνακα (Brilliant, 2021) που αποτελείται από τις δεύτερες μερικές παραγώγους της, οπότε αποκαλούνται gradient και Hessian-based αντίστοιχα.
- **Μέθοδοι απαρίθμησης (Enumeration methods):** Οι μέθοδοι απαρίθμησης επιλύουν το πρόβλημα των τοπικών ελαχίστων/μεγίστων που εμφανίζονται, καθώς διατρέχουν κάθε σημείο του χώρου σχεδίασης. Αυτή η εξαντλητική κάλυψη του εφικτού χώρου επιφέρει

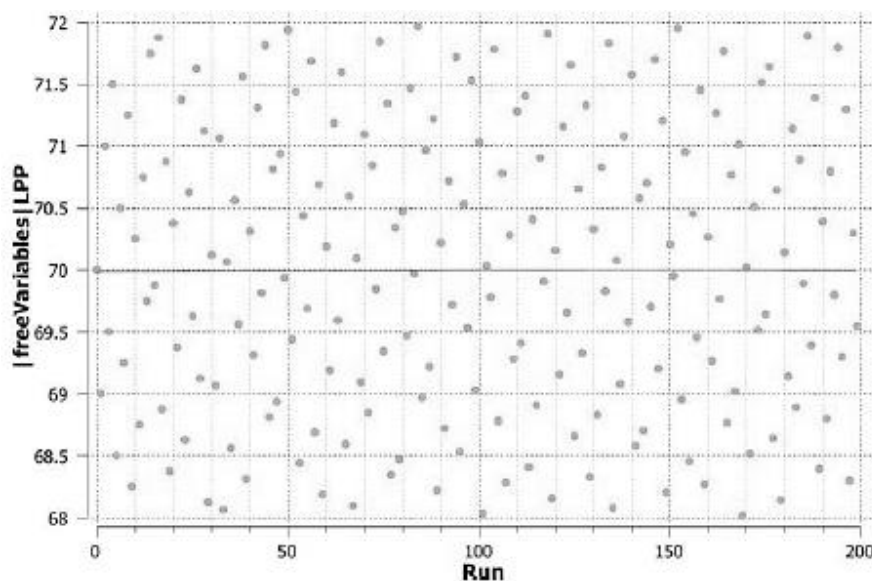
μεγάλο υπολογιστικό κόστος. Ωστόσο παρά το μεγάλο υπολογιστικό κόστος, οι εν λόγω μέθοδοι χρησιμοποιούνται ευρέως αφού αφενός η υλοποίησή τους είναι εύκολη και αφετέρου η δυνατότητα αλγοριθμικής παραλληλοποίησης επιτρέπει μέχρι ενός σημείου την αντιμετώπιση του υπολογιστικού κόστους.

- **Μέθοδοι τυχαίας αναζήτησης με οδήγηση (Guided random search techniques):** Πρόκειται για βελτίωση των απαριθμητικών μεθόδων καθώς ο εφικτός χώρος διατρέχεται πιο αποδοτικά. Οι δυο πιο γνωστές μέθοδοι της συγκεκριμένης κατηγορίας είναι η προσομοίωση απόπτωσης και οι γενετικοί αλγόριθμοι.

4.3 Η διαδικασία του σχεδιασμού πειραμάτων και ο αλγόριθμος Sobol

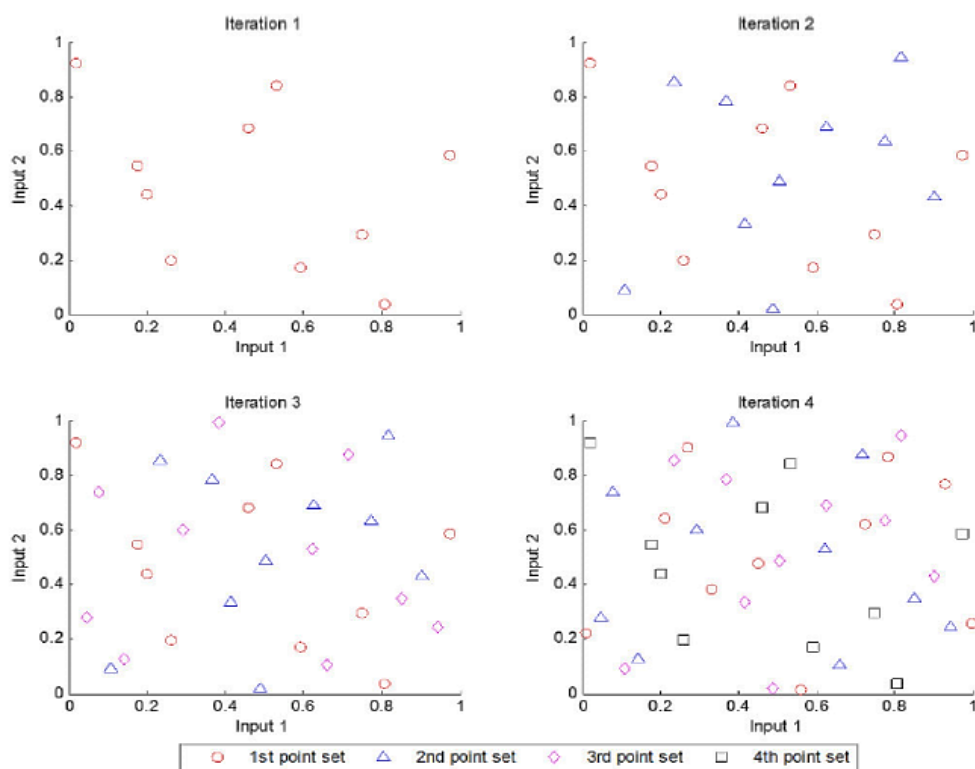
Ο σχεδιασμός πειραμάτων (Design of Experiments-DoE or experiment design) είναι μία διαδικασία δημιουργίας ακολουθιών (sequences) σχεδίων μέσω της οποίας ο χρήστης μπορεί να εξετάσει πολλαπλές παραμέτρους και να κατανοήσει ποσοτικά την επίδρασή τους στο εκάστοτε σχέδιο (Koutroukis, 2012). Ο σχεδιασμός πειραμάτων είναι πολύ αποτελεσματικός στη συσσώρευση πληροφοριών σχετικά με το εκάστοτε πρόβλημα βελτιστοποίησης και σχετικά με ολόκληρο το σχεδιαστικό χώρο. Συγχρόνως μέσω αυτού μπορούν να εντοπιστούν οι τάσεις των μεταβλητών σχεδίασης του προβλήματος σε σχέση με τις αντικειμενικές συναρτήσεις που το συνθέτουν. Εναλλακτικά, ο σχεδιασμός πειραμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μία μέθοδος αρχικοποίησης μίας μετέπειτα στοχευμένης βελτιστοποίησης, κάτι το οποίο έχει ιδιαίτερη σημασία μιας και η αποδοτικότητα του μετέπειτα αλγορίθμου βελτιστοποίησης αυξάνεται εφόσον έχει μία πρότερη γνώση του σχεδιαστικού χώρου.

Υπάρχουν τρεις κύριες κατηγορίες της προσέγγισης του σχεδιασμού πειραμάτων: η κλασική σχεδίαση (classical design), η σχεδίαση συμπλήρωσης του σχεδιαστικού χώρου (space-filling design) και η βέλτιστη σχεδίαση (optimum design) (Azmin & Stobart, 2015). Η ακολουθία Sobol υπάγεται στην κατηγορία της σχεδίασης συμπλήρωσης του σχεδιαστικού χώρου. Πρόκειται για έναν ντετερμινιστικό αλγόριθμο που μιμείται τη συμπεριφορά μιας τυχαίας ακολουθίας μέσω της δημιουργίας μιας ομοιόμορφης (quasi-random) ακολουθίας σχεδίων η οποία επιτυγχάνει την ομοιόμορφη κατανομή τους εντός του σχεδιαστικού χώρου.



Σχήμα 26: Τυπικό αποτέλεσμα εξερεύνησης του χώρου των σχεδιαστικών λύσεων με χρήση του αλγορίθμου Sobol (Couser, Harries, & Tillig, 2011)

Το αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό αυτού του αλγορίθμου είναι ότι επιτυγχάνει τη δημιουργία της εν λόγω ακολουθίας με υψηλό βαθμό διασκορπισμού της στο σχεδιαστικό χώρο, ενώ παράλληλα αποφεύγει τις επικαλύψεις των επόμενων με τα προηγούμενα παραγόμενα σχέδια της ακολουθίας. Ο αλγόριθμος Sobolj επιτρέπει επιπρόσθετα τη σταδιακή και τμηματική κάλυψη του χώρου των σχεδιαστικών λύσεων με ακολουθίες σχεδίων, αποφεύγοντας εκ νέου την επικάλυψή τους και διατηρώντας την ομοιομορφία στην κατανομή της τελικής ακολουθίας επί του σχεδιαστικού χώρου.



Σχήμα 27: Τμηματική κάλυψη του χώρου των σχεδιαστικών λύσεων με χρήση του αλγορίθμου Sobolj (Azmin & Stobart, 2015)

Μέσω της χρήσης του αλγορίθμου Sobolj και της DoE διαδικασίας γενικότερα επιτυγχάνεται η εξερεύνηση (exploration) του χώρου των σχεδιαστικών λύσεων. Η σημαντική ποσότητα δεδομένων που συσσωρεύονται μπορούν μετέπειτα να αξιοποιηθούν στα πλαίσια μίας αυτοματοποιημένης διαδικασίας βελτιστοποίησης. Στην περίπτωση της βελτιστοποίησης της γάστρας ενός πλοίου, τα δεδομένα αυτά μπορούν να αξιοποιηθούν με τρόπο τέτοιο, ώστε να καθοριστούν ορισμένα κριτήρια απόδοσης της γάστρας για μία συγκεκριμένη ομάδα μεταβλητών σχεδίασης. Τέτοιοι τρόποι αξιοποίησης αυτών των δεδομένων περιλαμβάνουν την παλινδρομική ανάλυση, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και τις επιφάνειες απόκρισης (response surfaces).

4.4 Οι γενετικοί αλγόριθμοι

4.4.1 Ο μηχανισμός της βιολογικής εξέλιξης

Οι γενετικοί αλγόριθμοι (Holland, 1992) είναι διαδικασίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση προβλημάτων εύρεσης και βελτιστοποίησης. Βασιζόμενοι στη βιολογική εξελικτική διαδικασία, επιχειρούν την επίλυση του εκάστοτε προβλήματος μέσω της αρχής της φυσικής επιλογής ή επιβίωσης. Πρόκειται για στοχαστικές διαδικασίες που έχουν το ισχυρό πλεονέκτημα έναντι των συμβατικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης ότι έχουν πολύ μεγάλη πιθανότητα να εντοπίσουν το ολικό ακρότατο του προβλήματος και όχι κάποιο εκ των τοπικών ακροτάτων που μπορεί να υπάρχουν (Mason, Couser, Mason, Smith, & von Konsky, 2005). Η λύση που προκύπτει ως αποτέλεσμα της εφαρμογής των γενετικών αλγορίθμων δεν είναι κατ' ανάγκη η βέλτιστη, αλλά κατά κανόνα επιτυγχάνουν να παράγουν ικανοποιητικές λύσεις σε ικανοποιητικό χρονικό διάστημα.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι αναζητούν τη βέλτιστη λύση εξελίσσοντας σε γενιές ένα πληθυσμό πιθανών λύσεων του σχεδιαστικού χώρου και όχι ένα μεμονωμένο σημείο του, όπως κάνουν οι συμβατικές τεχνικές βελτιστοποίησης. Το άγνωστο διάνυσμα των μεταβλητών σχεδίασης του προβλήματος \vec{x} κωδικοποιείται σε δυαδική μορφή και αποκαλείται χρωμόσωμα. Ο αρχικός πληθυσμός λύσεων -ή μελών όπως αποκαλούνται- παράγεται τυχαία και στη συνέχεια κάθε μέλος κρίνεται με βάση την καταλληλότητά του για επιβίωση. Κριτήριο για την ικανότητα κάθε μέλους να επιβιώσει είναι η συνάρτηση καταλληλότητας/υγείας (fitness function).

Η εξέλιξη του αρχικού πληθυσμού επιτυγχάνεται μέσω των γενετικών τελεστών. Οι γενετικοί τελεστές επιδρούν επί των χρωμοσωμάτων κάθε γενιάς προκειμένου να δημιουργήσουν την επόμενη, συνήθως βελτιωμένη, έχοντας υψηλότερη μέση καταλληλότητα από την προηγούμενη. Τα μέλη με υψηλότερη καταλληλότητα επιβίωσης σε μία γενιά είναι πιθανότερο να επιβιώσουν και να αναπαραχθούν μεταξύ τους ώστε να παράγουν παιδιά με ακόμη καλύτερα χαρακτηριστικά, ενώ τα μέλη με χαμηλότερη καταλληλότητα επιβίωσης τελικά θα εκλείψουν.

Οι συνήθεις γενετικοί τελεστές που εμφανίζονται στους γενετικούς αλγορίθμους είναι αυτοί της επιλογής (selection), της διασταύρωσης (crossover) και της μετάλλαξης (mutation) (Parsons & Thurnau, 2009). Ο τελεστής της επιλογής διαλέγει ορισμένα μέλη από κάθε γενιά που θα αποτελέσουν τον πυρήνα της επόμενης γενιάς σύμφωνα με ένα πρόγραμμα τυχαίας επιλογής, το οποίο όμως είναι μεροληπτικό ως προς τα μέλη με υψηλότερη καταλληλότητα, ούτως ώστε να έχουν αυξημένες πιθανότητες να αντιγραφούν στην επόμενη γενιά. Ο τελεστής της διασταύρωσης συνδυάζει δύο τυχαία επιλεγμένα γονεϊκά χρωμοσώματα προκειμένου να δημιουργήσει δύο νέα παιδιά μέσω ανταλλαγής ή συνδυασμού τμημάτων γονιδίων από τους γονείς. Ο τελεστής της μετάλλαξης παρέχει τη δυνατότητα μεταβολής ενός τυχαίου γονιδίου ενός τυχαία επιλεγμένου χρωμοσώματος, με σκοπό να αυξήσει την ποικιλομορφία του νέου πληθυσμού.

Η αναζήτηση της βέλτιστης λύσης μέσω της χρήσης γενετικών αλγορίθμων είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ της διατήρησης επαρκούς ποικιλομορφίας εντός του πληθυσμού προκειμένου να καλυφθεί ένα ικανοποιητικό μέρος του χώρου των σχεδιαστικών λύσεων και της ανάγκης σύγκλισης του εκάστοτε αλγορίθμου στη βέλτιστη λύση εντός αποδεκτού χρονικού διαστήματος (Mason, Couser, Mason, Smith, & von Konsky, 2005). Η πρώτη απαίτηση του εν λόγω συμβιβασμού έχει να κάνει με την εξερεύνηση (exploration) του σχεδιαστικού χώρου ενώ η δεύτερη με την αξιοποίησή του (exploitation). Ο βαθμός αναζήτησης και αξιοποίησης που επιδεικνύει ο εκάστοτε γενετικός αλγόριθμος καθορίζεται από τις ακόλουθες βασικές μεταβλητές:

- i. **Τη μέθοδο φυσικής επιλογής:** Οι πιο γνωστές μέθοδοι φυσικής επιλογής είναι η roulette wheel selection και η tournament selection (Mason, Couser, Mason, Smith, & von Kony, 2005). Αμφότερες οι μέθοδοι λειτουργούν επιλέγοντας δύο μέλη του πληθυσμού και συγκρίνοντας τις επιδόσεις καταλληλότητάς τους. Το μέλος που έχει την υψηλότερη επίδοση μεταξύ των δύο επιλέγεται να γίνει γονέας κάποιου μέλους της επόμενης γενιάς. Η roulette wheel selection αποδίδει μία πιθανότητα αντιπροσώπευσης στην επόμενη γενιά αναλογική του μεγέθους της επίδοσης καταλληλότητας του κάθε μέλους. Αυτό συνεπάγεται μία εγγενή αδυναμία της μεθόδου, καθώς η πιθανότητα αντιπροσώπευσης της επόμενης γενιάς είναι εξαρτώμενη από τον συντελεστή κλίμακας (scaling factor) που χρησιμοποιείται για την αναγωγή των αποτελεσμάτων της αντικειμενικής συνάρτησης προκειμένου να δημιουργηθούν οι επιδόσεις καταλληλότητας. Η τροποποίηση του συντελεστή κλίμακας μπορεί να επιφέρει πολύ μεγάλες αλλαγές στα αποτελέσματα της διαδικασίας επιλογής, είναι δε δύσκολο να προβλεφθεί ορθά εκ των προτέρων. Στον αντίποδα, η μέθοδος της tournament selection πραγματοποιεί μία απλή σύγκριση των επιδόσεων καταλληλότητας, όντας απαλλαγμένη από την αναγωγή τους. Ως εκ τούτου η μέθοδος αυτή είναι απλούστερη στην υλοποίησή της και πιο εύρωστη σε σχέση με την roulette wheel selection, γι' αυτό και συνήθως προτιμάται.
- ii. **Τον ελιτισμό:** Ο ελιτισμός εξασφαλίζει ότι το επόμενο καλύτερο μέλος της επόμενης γενιάς θα είναι κατ' ελάχιστο εξίσου καλό με το καλύτερο της προηγούμενης γενιάς. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω αυτόματης συμπερίληψης του καλύτερου μέλους της προηγούμενης στην επόμενη γενιά.
- iii. **Το διαμοιρασμό καταλληλότητας:** Ο διαμοιρασμός της καταλληλότητας λειτουργεί μέσω της αναγωγής της καταλληλότητας των μελών σύμφωνα με το πόσο παρόμοια είναι συγκριτικά με όλα τα υπόλοιπα μέλη του πληθυσμού. Στα μέλη που είναι πολύ παρόμοια με άλλα τους επιβάλλεται μία ποινή, ενώ στα μέλη που επιδεικνύουν καινούργια χαρακτηριστικά δίδεται μία επιβράβευση με μία -σχετική ως προς τον πληθυσμό- αύξηση της καταλληλότητάς τους. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται ότι ο πληθυσμός διατηρεί επαρκή ποικιλομορφία, γεγονός που μπορεί να αποσοβήσει φαινόμενα πρόωμης σύγκλισης σε εσφαλμένα ακρότατα.

4.4.2 Ο αλγόριθμος NSGA-II

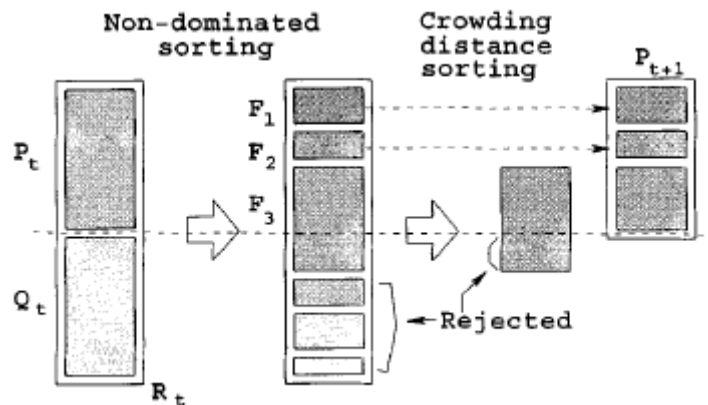
Ο NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm) είναι ένας γενετικός αλγόριθμος ιδιαίτερα αποδοτικός στην επίλυση προβλημάτων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Αποτελεί βελτιωμένη εκδοχή του γενετικού αλγορίθμου NSGA (Mendoza, Bernal-Agustín, & Domínguez-Navarro, 2006), έχοντας εξαλείψει ή περιορίσει σημαντικά ορισμένες βασικές αδυναμίες του. Συγκεκριμένα, ο NSGA-II είναι απαλλαγμένος από την υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα της μη κυριαρχούμενης ταξινόμησης (non-dominated sorting), έχει ενσωματωμένο τον ελιτισμό και δεν χρειάζεται να του προσδιοριστεί κατάλληλα μία παράμετρος διαμοιρασμού προκειμένου να εξασφαλίζει την ποικιλομορφία εντός του πληθυσμού. Στη συνέχεια περιγράφεται συνοπτικά η διαδικασία με την οποία ο NSGA-II πραγματοποιεί τη μετάβαση από τη μία γενιά στην επόμενη της.

Στην αρχή είναι απαραίτητο να υπάρξει ένας αρχικός πληθυσμός λύσεων προκειμένου ο αλγόριθμος να έχει ένα σημείο εκκίνησης. Αυτός ο αρχικός γονεϊκός πληθυσμός P_0 που αποτελείται από N μέλη δημιουργείται κατά τρόπο στοχαστικό. Ο πληθυσμός αυτός στη συνέχεια ταξινομείται σύμφωνα με τη μη κυριαρχικότητα. Η βασική λογική της ταξινόμησης της μη κυριαρχικότητας είναι η ομαδοποιημένη κατάταξη των σχεδιαστικών λύσεων σε επίπεδα μη κυριαρχικότητας (Deb, Pratap, Agarwal, & Meyarivan, 2002). Σε κάθε λύση

αποδίδεται μία καταλληλότητα ανάλογα με το επίπεδο μη κυριαρχικότητας στο οποίο έχει καταταχθεί· το 1 αντιστοιχεί στο βέλτιστο επίπεδο, το 2 στο επόμενο βέλτιστο επίπεδο κ.ο.κ. Αρχικά χρησιμοποιούνται οι γενετικοί τελεστές της επιλογής -όπου επιλέγεται η μέθοδος της tournament selection-, της διασταύρωσης και της μετάλλαξης προκειμένου να παραχθεί ένας πληθυσμός Q_0 αποτελούμενος από N παιδιά-μέλη.

Στην γενική περίπτωση της t -οστής γενιάς οι αντίστοιχοι πληθυσμοί - N μελών έκαστος- γονέων και παιδιών θα είναι P_t και Q_t αντίστοιχα. Πριν την έναρξη της ταξινόμησης δημιουργείται ο συνδυασμένος πληθυσμός γονέων-παιδιών $R_t = P_t \cup Q_t$, ο οποίος αποτελείται από $2N$ μέλη και θα αποτελέσει τον προς ταξινόμηση πληθυσμό. Μέσω της διαδικασίας σύγκρισης αμφοτέρων των πληθυσμών γονέων και παιδιών εισαγάγεται αυτόματα ο ελιτισμός, καθώς διασφαλίζεται ότι οι γονεϊκές βέλτιστες λύσεις που αντιπροσωπεύουν την τρέχουσα γενιά συγκρίνονται με τις αντίστοιχες βέλτιστες της επόμενης γενιάς. Ο σκοπός είναι από τις $2N$ λύσεις να επιλεγούν οι N βέλτιστες που θα αποτελέσουν τις γονεϊκές λύσεις της $t+1$ γενιάς P_{t+1} .

Μέσω της μη κυριαρχούμενης ταξινόμησης οι λύσεις κατατάσσονται όπως προαναφέρθηκε αναλόγως του επιπέδου μη κυριαρχικότητάς τους F_i . Μόλις βρεθεί και το τελευταίο επίπεδο μη κυριαρχικότητας F_1 για το οποίο ο ταξινομημένος πληθυσμός είναι τουλάχιστον N τότε η ταξινόμηση σταματάει. Όμως με αυτόν τον τρόπο ο ταξινομημένος πληθυσμός που θα αποτελέσει τις γονεϊκές λύσεις P_{t+1} μπορεί να είναι μεγαλύτερος του N , κάτι το οποίο είναι μη αποδεκτό. Για το λόγο αυτό πραγματοποιείται και μία δεύτερη φάση ταξινόμησης βασισμένη στην αποκαλούμενη απόσταση συνωστισμού (crowding distance). Η ταξινόμηση αυτή πραγματοποιείται μέσω χρήσης του ομώνυμου τελεστή (crowding distance operator), ο οποίος ελέγχει την εγγύτητα μεταξύ των λύσεων επί του σχεδιαστικού χώρου και επιβάλλει ποινή σε εκείνες που βρίσκονται αρκετά κοντά μεταξύ τους. Η ταξινόμηση μέσω της απόστασης συνωστισμού πραγματοποιείται μόνο στο τελευταίο επίπεδο μη κυριαρχικότητας F_1 και με τρόπο τέτοιο, ώστε να απορριφθούν τόσες λύσεις από το εν λόγω επίπεδο ώστε τελικά το νέο επίπεδο κυριαρχικότητας F_1 αθροιζόμενο με τα ανώτερα επίπεδα να δίνουν πληθυσμό βέλτιστων λύσεων N .



Σχήμα 28: Διαδικασία ταξινόμησης του γενετικού αλγορίθμου NSGA-II (Deb, Pratap, Agarwal, & Meyarivan, 2002)

Έτσι προκύπτει ο νέος γονεϊκός πληθυσμός P_{t+1} αποτελούμενος από N μέλη, επί του οποίου επιδρούν εκ νέου οι γενετικοί τελεστές της επιλογής, της διασταύρωσης και της μετάλλαξης προκειμένου να παράξουν τον πληθυσμό παιδιών Q_{t+1} και η διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως επαναλαμβάνεται από την αρχή.

Στην περίπτωση των περιορισμένων προβλημάτων βελτιστοποίησης αυτό το οποίο αλλάζει είναι ότι η εκάστοτε λύση μπορεί να είναι είτε εφικτή είτε μη εφικτή. Η βασική αρχή που διέπει την επεκτεταμένη έννοια της μη κυριαρχικότητας στην περίπτωση των περιορισμένων

προβλημάτων βελτιστοποίησης είναι ότι κάθε εφικτή λύση έχει πάντοτε υψηλότερο βαθμό μη κυριαρχικότητας από οποιαδήποτε μη εφικτή λύση. Επομένως η περιπτωσιολογία της ταξινόμησης μεταξύ δύο λύσεων στη γενική περίπτωση της περιορισμένης πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης είναι η ακόλουθη:

- Μεταξύ δύο εφικτών λύσεων επιλέγεται ως καλύτερη εκείνη που βρίσκεται στο καλύτερο επίπεδο μη κυριαρχικότητας.
- Μεταξύ μίας εφικτής και μίας ανέφικτης λύσης επιλέγεται ως καλύτερη η εφικτή.
- Μεταξύ δύο ανέφικτων λύσεων επιλέγεται ως καλύτερη εκείνη με τη μικρότερη ολική παραβίαση των περιορισμών.

Στην περίπτωση της μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης η περιπτωσιολογία της ταξινόμησης μεταξύ δύο λύσεων τροποποιείται ως εξής:

- Μεταξύ δύο εφικτών λύσεων επιλέγεται ως καλύτερη εκείνη που έχει την καλύτερη αντικειμενική συνάρτηση.
- Μεταξύ μίας εφικτής και μίας ανέφικτης λύσης επιλέγεται ως καλύτερη η εφικτή.
- Μεταξύ δύο ανέφικτων λύσεων επιλέγεται ως καλύτερη εκείνη με τη μικρότερη ολική παραβίαση των περιορισμών.

4.5 Καθορισμός του προβλήματος βελτιστοποίησης του παρόντος παραμετρικού μοντέλου

4.5.1 Επιλογή των μεταβλητών σχεδίασης

Το βασικότερο κομμάτι κατά τη διαδικασία δόμησης του εκάστοτε προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η εκλογή των κατάλληλων μεταβλητών σχεδίασης καθώς και η κατάλληλη εκλογή των κατώτατων και ανώτατων ορίων κάθε μιας εξ αυτών. Πρόκειται για μία διαδικασία λήψης αποφάσεων, της οποίας η δυσκολία είναι άμεσα συνδεδεμένη με το βαθμό των διαθέσιμων σχεδιαστικών παραμέτρων. Οι μεταβλητές σχεδίασης που επιλέγονται μπαίνουν ως είσοδος στην εκάστοτε μηχανή σχεδίασης και έτσι πραγματοποιείται η αυτοματοποίηση της διαδικασίας παραγωγής παραλλαγμένων γαστρών για τους σκοπούς της σχεδιαστικής βελτιστοποίησης. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε μία σχεδιαστική βελτιστοποίηση. Οι μεταβλητές σχεδίασης που επελέγησαν για τους σκοπούς της εν λόγω βελτιστοποίησης, καθώς και τα κάτω και άνω όρια κάθε μιας εξ αυτών, ήταν οι κάτωθι:

Πίνακας 7: Ενεργές μεταβλητές σχεδίασης προβλήματος βελτιστοποίησης

A/A	Μεταβλητή σχεδίασης	Μονάδες	Κατώτατο όριο	Τιμή αναφοράς	Ανώτατο όριο
1	beam	m	5.5	7.0	8.0
2	draft	m	3.8	4.0	4.5
3	zTransom	m	3.45	3.55	3.65
4	Aftbody_scale_factor	-	0.60	0.70	0.80
5	Forebody_scale_factor	-	0.60	0.65	0.85

Σημειώνεται ότι όσον αφορά στη μεταβλητή σχεδίασης beam, που μετέβαλλε στο πλάτος των ημιγαστρών, έγινε η παραδοχή ότι η μεταβολή του πλάτους των ημιγαστρών -δεδομένου ότι οι υπόλοιπες κύριες διαστάσεις παρέμεναν σταθερές- δεν επηρέασε το βάρος της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου, διατηρώντας αναλλοίωτο κατ' αυτό τον τρόπο το εκτόπισμα του πλοίου για κάθε παραλλαγή γάστρας.

4.5.2 Καθορισμός της αντικειμενικής συνάρτησης

Η βελτιστοποίηση που πραγματοποιήθηκε ήταν μονοκριτηριακή. Για τις ανάγκες του προβλήματος ως αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση επελέγη μία σταθμισμένη συνάρτηση της ελάχιστης ισχύος πρόωσης (SHP_{min}). Η παράμετρος που έδινε αυτή την αντικειμενική συνάρτηση προέκυπτε ως ο μέσος όρος (με ίσες βαρύτητες 0.5 για καθαρή και 0.5 για ρυπασμένη γάστρα) των αποτελεσμάτων των SHP_{min} που έδινε ως έξοδο το GRID (Πολίτης, 2018) για τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας, όπου για τη θεώρηση της ρυπασμένης γάστρας έγινε η αυθαίρετη υπόθεση ότι αυτή έχει 20% μεγαλύτερη ολική αντίσταση ως προς την καθαρή γάστρα.

Δεδομένου ότι είχε αποφασιστεί η έλικα να είναι σταθερού βήματος (Fixed Pitch Propeller-FPP), δεν γινόταν για κάθε γάστρα κατά τη βελτιστοποίηση να λαμβάνεται ο μέσος όρος των αντίστοιχων SHP_{min} του GRID λόγω του ότι μπορεί η ελάχιστη τιμή για την SHP της καθαρής γάστρας να εμφανιζόταν για λόγο βήματος $\frac{P}{D}$ διαφορετικό από το λόγο βήματος που εμφανιζόταν η αντίστοιχη ελάχιστη τιμή για τη ρυπασμένη γάστρα.

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, δημιουργήθηκε αλγόριθμος ο οποίος συνέκρινε τα εξής δύο αθροίσματα που ενέπλεκαν τις δύο SHP_{min} του GRID: α) το άθροισμα των SHP καθαρής και ρυπασμένης γάστρας που αντιστοιχούσε στο βέλτιστο λόγο βήματος της καθαρής γάστρας και β) το άθροισμα των SHP καθαρής και ρυπασμένης γάστρας που αντιστοιχούσε στο βέλτιστο λόγο βήματος της ρυπασμένης γάστρας. Το μικρότερο εκ των δύο αθροισμάτων διαιρείτο δια δύο και έτσι προέκυπτε ο μέσος όρος της σταθμισμένης αντικειμενικής συνάρτησης στη γενική περίπτωση. Στην περίπτωση βέβαια όπου ο βέλτιστος λόγος βήματος καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ήταν ο ίδιος, η σταθμισμένη αντικειμενική συνάρτηση προέκυπτε απευθείας ως ο μέσος όρος των SHP_{min} των δύο διακριτών καταστάσεων.

4.5.3 Προσδιορισμός των περιορισμών

Για το πρόβλημα βελτιστοποίησης που θα ακολουθούσε αυτό το οποίο απέμενε να πραγματοποιηθεί ήταν η επιβολή κάποιων περιορισμών (constraints). Οι περιορισμοί αυτοί μπορούσαν να είναι είτε περιορισμοί ισοτήτων, όπου απλά ζητείται από το χρήστη -πέραν από τις παραμέτρους ως προς τις οποίες θα ελέγχεται η ισότητά τους- μία ανοχή σε σχέση με την τιμή της ισότητας, είτε ανισοτήτων, όπου εκεί παρέχεται -πέραν των παραμέτρων, των οποίων θα ελέγχεται η ορθή ή μη τήρηση της ανισότητά τους- προαιρετικά η δυνατότητα στο χρήστη να θέσει μία απόσταση ειδοποίησης (warning distance) της παραμέτρου της οποίας την τιμή θέλει να ελέγχει, ούτως ώστε όταν η τιμή της παραμέτρου βρεθεί κάτω από την τιμή της απόστασης ειδοποίησης ο περιορισμός αυτός θα βρίσκεται στην περιοχή προειδοποίησης.

Η χρησιμότητα των περιορισμών έγκειται στη δυνατότητα που παρέχουν για φιλτράρισμα των παραλλαγών γαστρών που προκύπτουν από τις μηχανές σχεδίασης (design engines).

Συγκεκριμένα μέσω των περιορισμών οι παραλλαγές γαστρών που τελικώς προκύπτουν από τους αλγορίθμους βελτιστοποίησης ελέγχονται κάθε φορά για το αν ικανοποιούν όλους τους ενεργούς περιορισμούς της εκάστοτε μηχανής σχεδίασης. Αν και εφόσον τους ικανοποιούν όλους τότε οι αντίστοιχες παραλλαγμένες γάστρες ανταποκρίνονται σε εφικτές (feasible) σχεδιαστικές λύσεις, σε αντίθετη περίπτωση ανταποκρίνονται σε ανέφικτες (unfeasible).

Σε αυτά τα πλαίσια και με το σκεπτικό του ότι έπρεπε να τεθούν ορισμένοι περιορισμοί που αφορούσαν στη γεωμετρία της κάθε ημιγάστρας, στην υδροστατική ισορροπία του πλοίου καθώς και στις απαιτούμενες αποστάσεις μεταξύ ημιγάστρας και έλικας δημιουργήθηκαν οι περιορισμοί που παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 8: Περιορισμοί του παρόντος προβλήματος σχεδιαστικής βελτιστοποίησης

Όνομα περιορισμού	Εποπτευόμενο μέγεθος	Τελεστής	Όριο	Μονάδες
Transom_immersion_check	Actual_draft - zTransom	>	0.00	m
Transom_max_immersion_check	Actual_draft - zTransom	≤	0.40	m
LCB_min_check	LCB	≥	40.0	m
LCB_max_check	LCB	≤	46.0	m
Propeller_vertical_check	Prop_sternframe_h	≥	d + D_propeller + a	m
Propeller_horizontal_check ¹¹	Real_hhp_clearance	≥	1.3·b	m
Rudder_propeller_clearance_check	Real_rp_clearance	≥	1.3·c	m

Στη συνέχεια επεξηγούνται οι ως άνω χρησιμοποιούμενοι περιορισμοί του προβλήματος βελτιστοποίησης:

Transom_immersion_check & Transom_max_immersion_check: Οι περιορισμοί που αφορούσαν στη βύθιση του καθρέφτη της ημιγάστρας. Οι περιορισμοί αυτοί συνδυαστικά απαιτούσαν τα ακόλουθα όρια βύθισης για το σημείο τομής της κάτω ακμής του καθρέφτη με το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας:

$$0 \text{ m} < \text{Βύθιση σημείου καθρέφτη} \leq 0.4 \text{ m}$$

LCB_min_check & LCB_max_check: Οι περιορισμοί που αφορούσαν στο ελάχιστο και μέγιστο αποδεκτό όριο της διαμήκου θέσης του κέντρου άντωσης της κάθε ημιγάστρας και ολόκληρου του πλοίου γενικότερα. Τα όρια που τέθηκαν δημιουργούσαν ένα σχετικά μεγάλο σύνολο αποδεκτών τιμών που μπορούσε να λάβει το η διαμήκου θέση του κέντρου άντωσης, λόγω του ότι ο τύπος του πλοίου είναι τέτοιος, ώστε να υπάρχει μεγάλη ευχέρεια διαμήκου μετατόπισης της υπερκατασκευής προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή διαγωγή.

¹¹ Τόσο σε αυτό τον περιορισμό, όσο και στον επόμενο έγινε η υπόθεση συντελεστή ασφαλείας S.F. = 1.3 κατά τον έλεγχο, λόγω του ότι οι αποστάσεις αυτές κανονικά υπολογίζονται ως τη διαμήκη θέση του χείλους πρόσπτωσης ή εκφυγής της έλικας και όχι ως προς τη διαμήκη θέση του άκρου του πτερυγίου της έλικας.

Propeller_vertical_check, Propeller_horizontal_check & Rudder_propeller_clearance check: Οι περιορισμοί αυτοί σχετίζονται με τις απαιτήσεις των νηογνομόνων σχετικά με τις ελάχιστες και προτεινόμενες αποστάσεις που θα πρέπει να έχει η έλικα ως προς τη γάστρα, το πηδάλιο και το ποδόστημα του πηδαλίου, αν και εφόσον έχει τοποθετηθεί κρεμαστό πηδάλιο. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας υποτέθηκε απόσταση της έλικας ως προς το βασικό επίπεδο αναφοράς ίσης προς την προτεινόμενη τιμή της απόστασης της έλικας από το ποδόστημα. Οι εν λόγω αποστάσεις σύμφωνα με τον Lloyd's (Lloyd's Register, 2020) για μονέλικα πλοία¹² φαίνονται στον κατωτέρω πίνακα:

Πίνακας 9: Ελάχιστες και προτεινόμενες αποστάσεις μεταξύ έλικας-γάστρας, έλικας-πηδαλίου και έλικας-ποδοστήματος

Number of blades	Hull clearances for single screw, in metres, see Figure 6.7.12 Propeller clearances			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
3	1,20Κδ	1,80Κδ	0,12δ	0,03δ
4	1,00Κδ	1,50Κδ	0,12δ	0,03δ
5	0,85Κδ	1,275Κδ	0,12δ	0,03δ
6	0,75Κδ	1,125Κδ	0,12δ	0,03δ
Minimum value	0,10δ	0,15δ	t_R	—

¹² Σε αυτή την κατηγορία υπάγεται το εξεταζόμενο δίγατρο πλοίο μιας και είναι εφοδιασμένο με μία έλικα ανά ημιγάστρα.

L as defined in Pt 3, Ch 6, 1.4 Symbols and definitions 1.4.1

C_b = moulded block coefficient at load draught

$$K = \left(0,1 + \frac{L}{3050} \right) \left(\frac{3,48 C_b P}{L^2} + 0,3 \right)$$

$$= \left(K = \left(0,1 + \frac{L}{3050} \right) \left(\frac{2,56 C_b P}{L^2} + 0,3 \right) \right)$$

t_R = thickness of rudder, in metres, measured at $0,7R_p$ above the shaft centreline

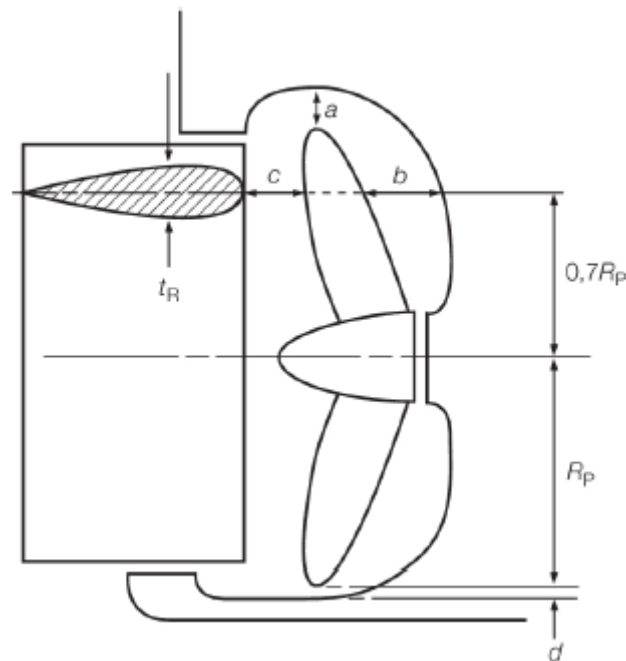
P = designed power on one shaft, in kW (shp)

R_p = propeller radius, in metres

δ = propeller diameter, in metres

Σχήμα 29: Εμπλεκόμενα μεγέθη του πίνακα 9

Στο σχήμα που ακολουθεί επεξηγούνται οι εμπλεκόμενες αποστάσεις του παραπάνω πίνακα:



Σχήμα 30: Ορισμός αποστάσεων έλικας-γάστρας, έλικας-πηδαλίου και έλικας-ποδοστήματος (Lloyd's Register, 2020)

5 Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων

5.1 Παρουσίαση και σχολιασμός αποτελεσμάτων Sobol και NSGA-II

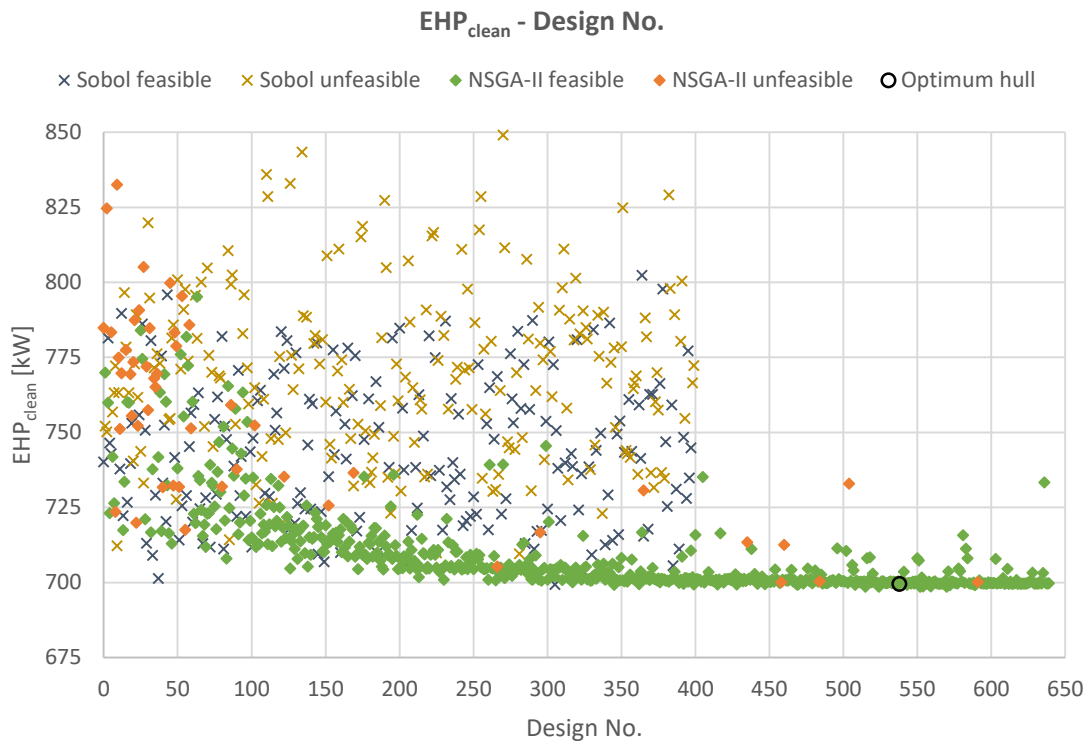
Έχοντας εφοδιάσει τις μηχανές σχεδίασης των αλγορίθμων Sobol και NSGA-II με τις απαραίτητες ενεργές μεταβλητές σχεδίασης, τις παραμέτρους αξιολόγησης (evaluations), την αντικειμενική συνάρτηση και τους ενεργούς περιορισμούς, αυτό το οποίο απέμενε ήταν ο καθορισμός του αριθμού παραλλαγμένων γαστρών που θα έτρεχαν οι δύο αυτές μηχανές σχεδίασης. Εκτενέστερα, ο Sobol έτρεξε για 400 παραλλαγές γαστρών ενώ ο NSGA-II για 640 παραλλαγές γαστρών, λαμβάνοντας γνώση των αποτελεσμάτων των 400 γαστρών που είχε προηγουμένως τρέξει ο Sobol. Όσον αφορά στον NSGA-II, έτρεξε 20 γενιές παραλλαγών με πληθυσμό 32 μελών έκαστη, με πιθανότητα διασταύρωσης 0.9 και πιθανότητα μετάλλαξης 0.01, τιμές που αποτελούσαν τις προκαθορισμένες τιμές του CAESES. Σημειώνεται ότι όλες οι γάστρες τρέξανε στο Shipflow για την ταχύτητα υπηρεσίας των 12.3 κόμβων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων των δύο αλγορίθμων, τα οποία χωρίστηκαν σε τρεις ομάδες. Η πρώτη ομάδα αφορά στα διαγράμματα της χρονικής ιστορίας των τρεξιμάτων των αλγορίθμων και για το λόγο αυτό ο οριζόντιος άξονάς τους είναι ο αύξων αριθμός του κάθε σχεδίου (design number). Η δεύτερη ομάδα αφορά στα διαγράμματα που συσχετίζουν τις παραμέτρους αξιολόγησης μεταξύ τους και με κάποια μεταβλητή σχεδίασης. Η τρίτη και τελευταία ομάδα αφορά στα διαγράμματα της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος συναρτήσει διαφόρων παραμέτρων αξιολόγησης.

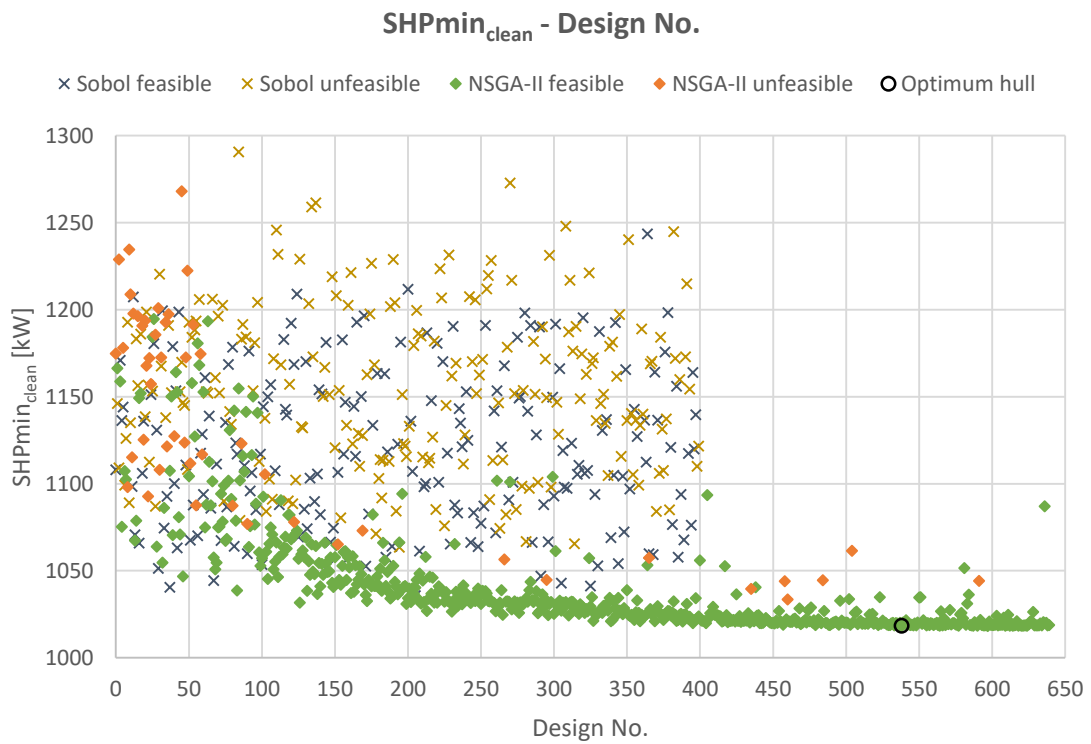
Για όλα τα διαγράμματα που παρατίθενται σε αυτή την ενότητα επισημαίνεται ότι όλες οι μη εφικτές λύσεις προέκυψαν λόγω της παραβίασης των δύο περιορισμών που αφορούσαν στη βύθιση του σημείου τομής της κάτω ακμής του καθρέφτη με το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας.

5.1.1 Διαγράμματα χρονικής ιστορίας τρεξιμάτων

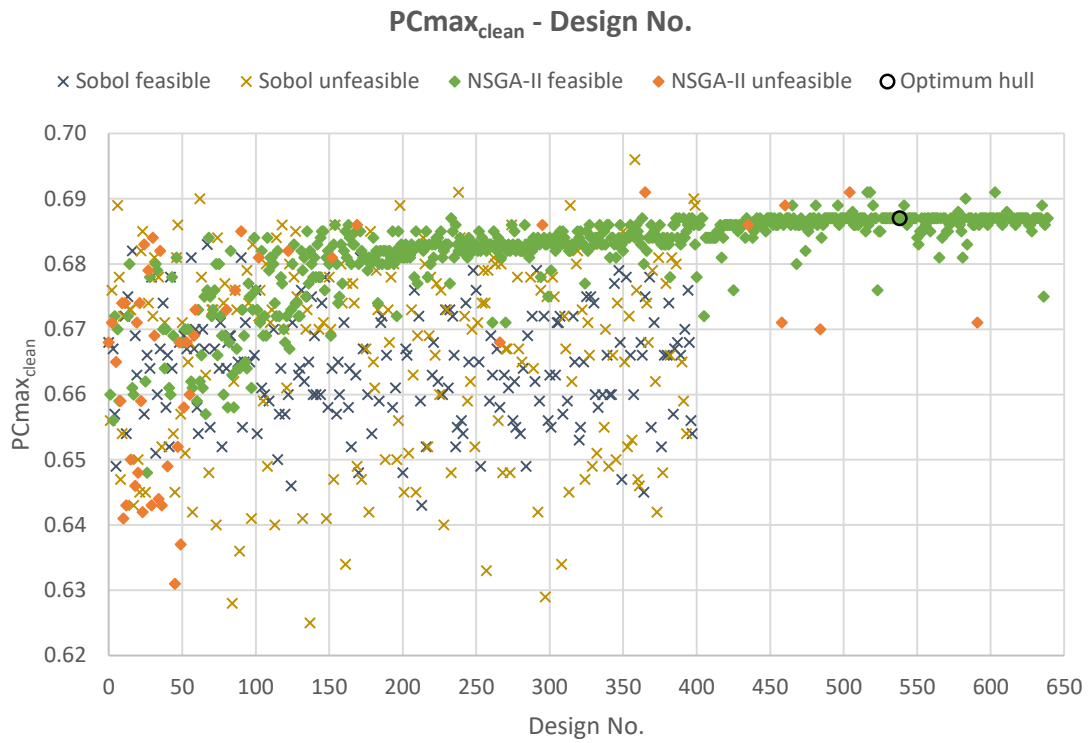
Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα που αφορούν στη χρονική ιστορία των τρεξιμάτων των δύο μηχανών σχεδίασης:



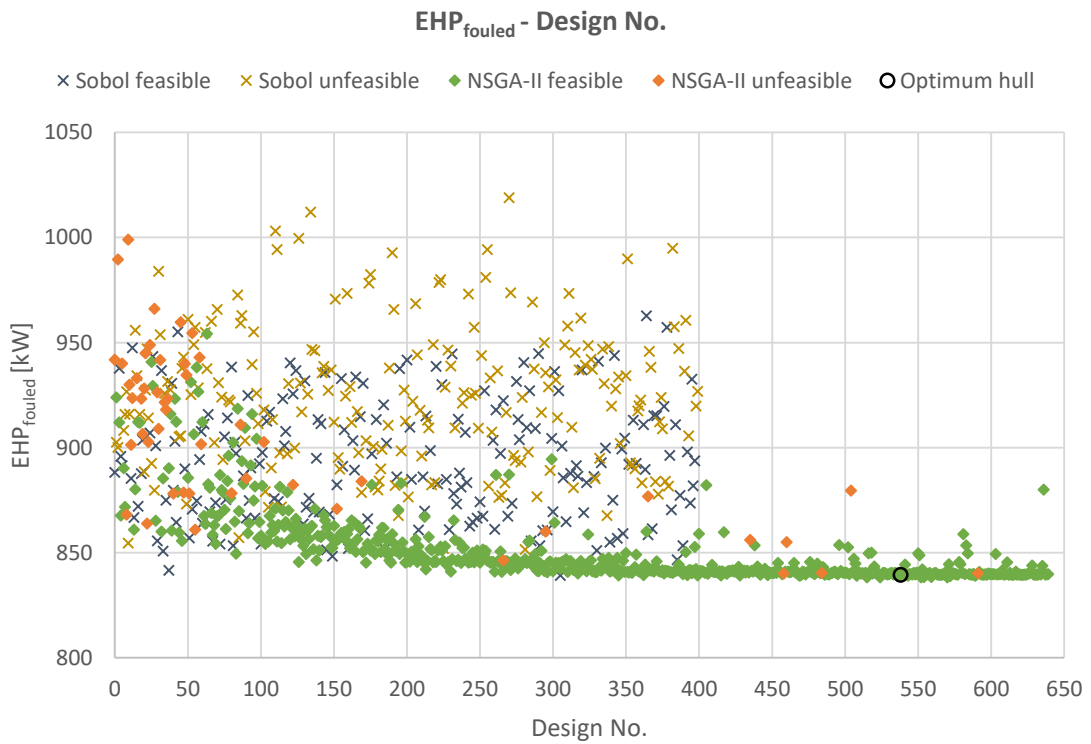
Σχήμα 31: Χρονική ιστορία ισχύος ρυμούλκησης καθαρής γάστρας



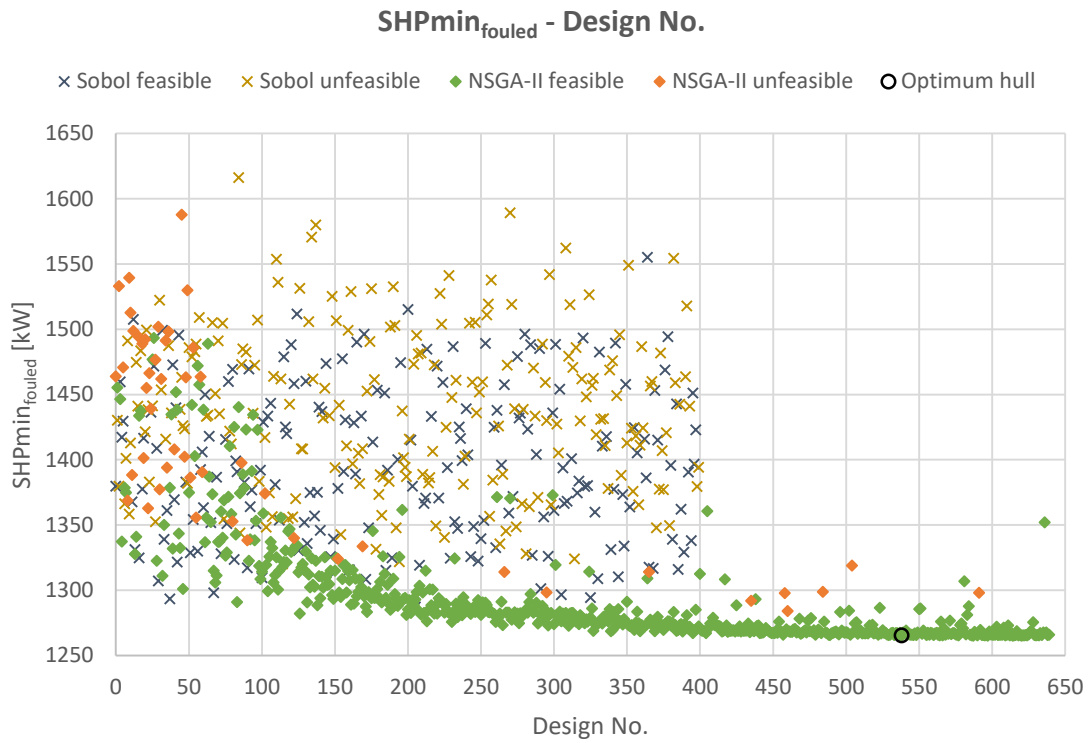
Σχήμα 32: Χρονική ιστορία ισχύος πρόωσης καθαρής γάστρας



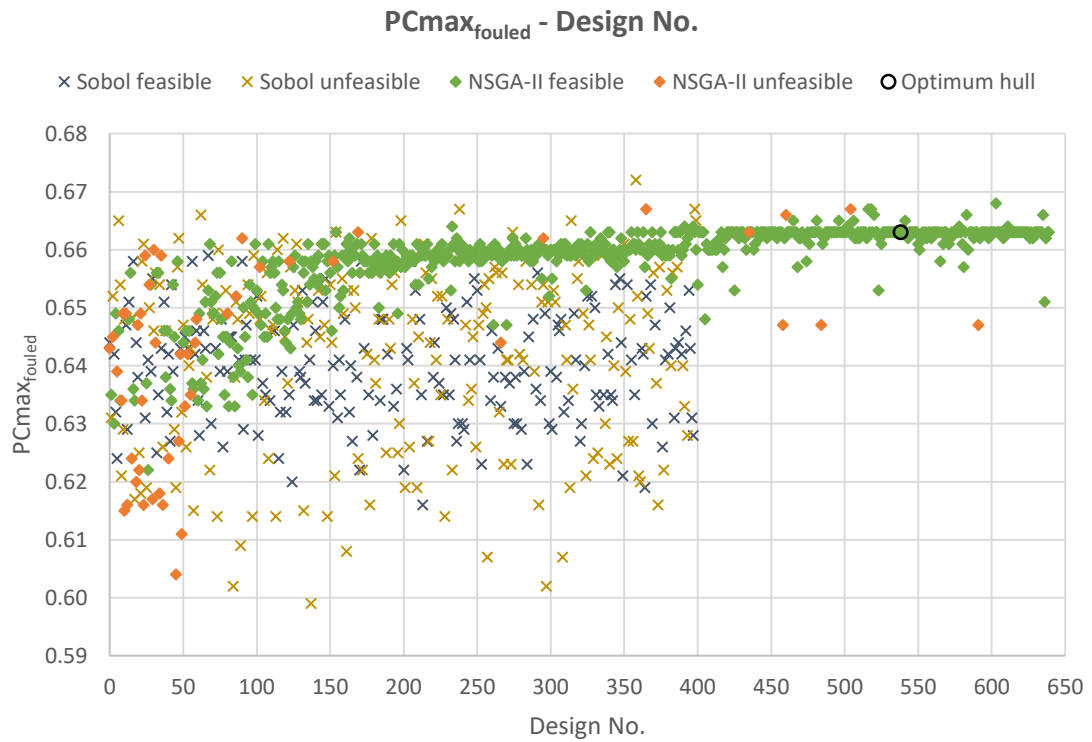
Σχήμα 33: Χρονική ιστορία συντελεστή πρόωσης καθαρής γάστρας



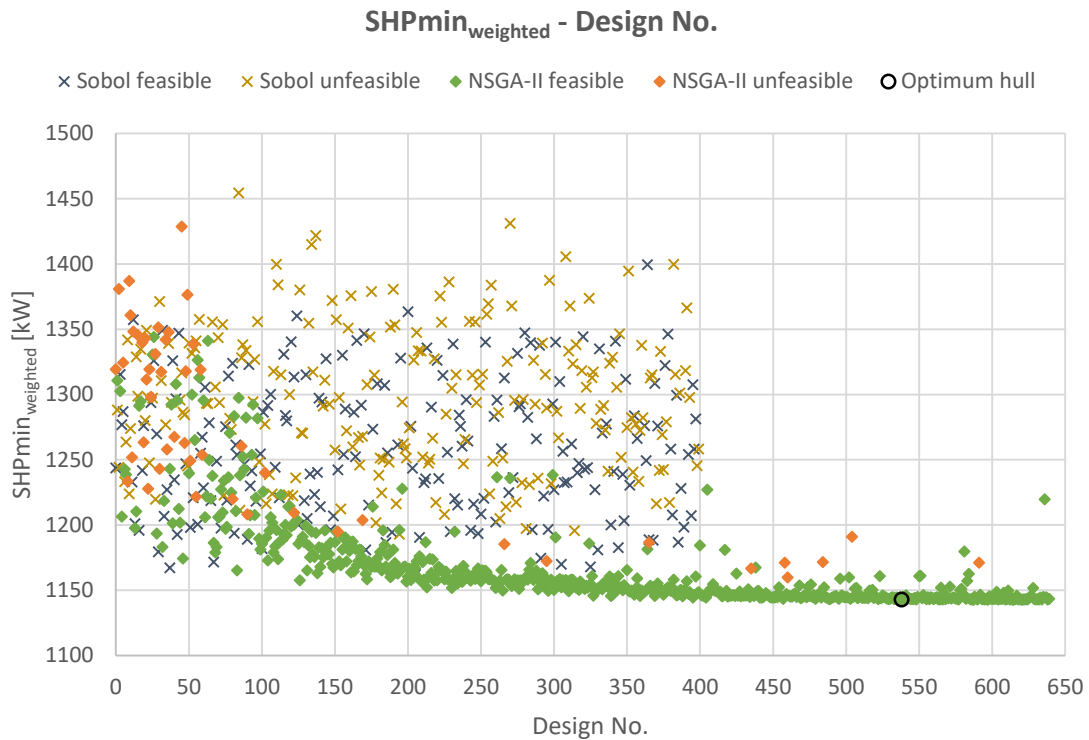
Σχήμα 34: Χρονική ιστορία ισχύος ρυμούλκησης ρυπασμένης γάστρας



Σχήμα 35: Χρονική ιστορία ισχύος πρόωσης ρυπασμένης γάστρας



Σχήμα 36: Χρονική ιστορία συντελεστή πρόωσης ρυπασμένης γάστρας



Σχήμα 37: Χρονική ιστορία σταθμισμένης ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύος πρόωσης

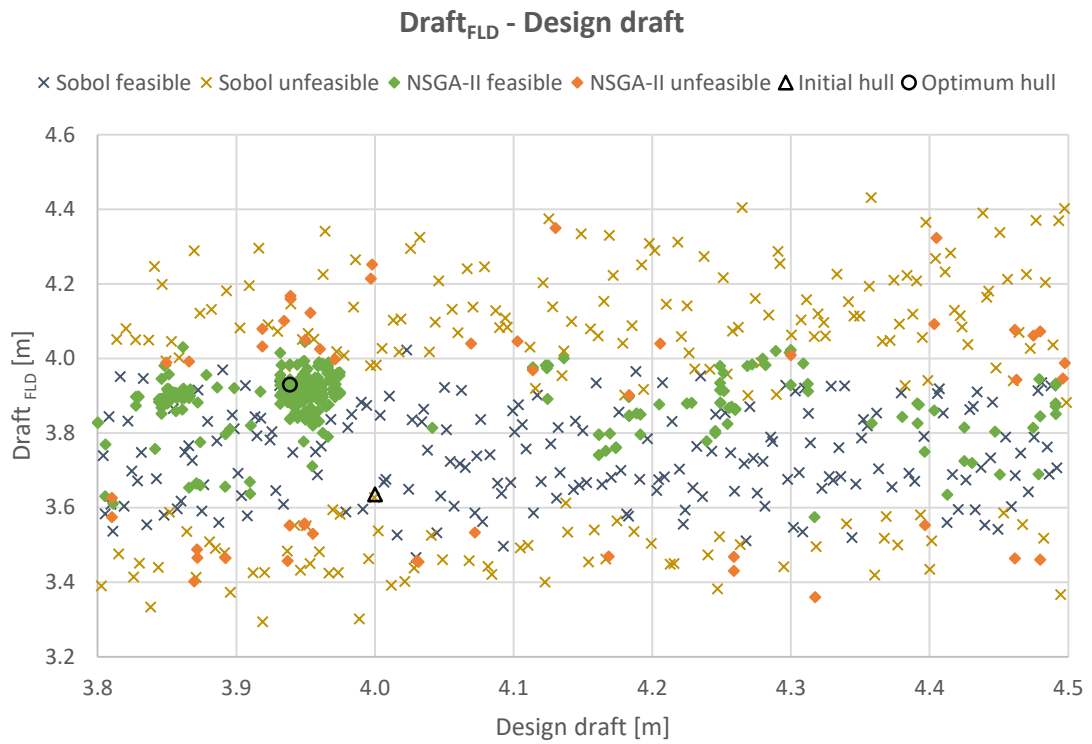
Στα ανωτέρω διαγράμματα παρατηρείται ότι για κάθε μέγεθος και κατάσταση γάστρας (καθαρή, ρυπασμένη, σταθμισμένη κατάσταση) ο αλγόριθμος Sobol πραγματοποιεί μία ικανοποιητική εξερεύνηση του χώρου των σχεδιαστικών λύσεων, γεγονός που καταδεικνύεται από την εξέλιξη της αντικειμενικής συνάρτησης $SHP_{\min_weighted}$, ενώ εξίσου ικανοποιητική είναι και η διασπορά των τιμών των δύο παραμέτρων αξιολόγησης, της EHP και του PC_{\max} .

Όσον αφορά στην αξιολόγηση της αποδοτικότητας του NSGA-II, -κατόπιν παρατήρησης του σχήματος 37- αυτή κρίνεται καλή, καθώς ο αλγόριθμος αφενός συγκλίνει σε βέλτιστη λύση και αφετέρου αρχίζει να συγκλίνει αρκετά νωρίς. Συγκεκριμένα, δαπανάει μόλις τα 150 περίπου πρώτα τρεξίματα για την εξερεύνηση του χώρου των σχεδιαστικών λύσεων και για τα υπόλοιπα περίπου 490 τρεξίματα αναλώνεται στην εκμετάλλευσή του. Αν ο αλγόριθμος δεν έκανε χρήση των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου Sobol τότε θα δαπανούσε περισσότερο χρόνο στην εξερεύνηση του χώρου των σχεδιαστικών λύσεων.

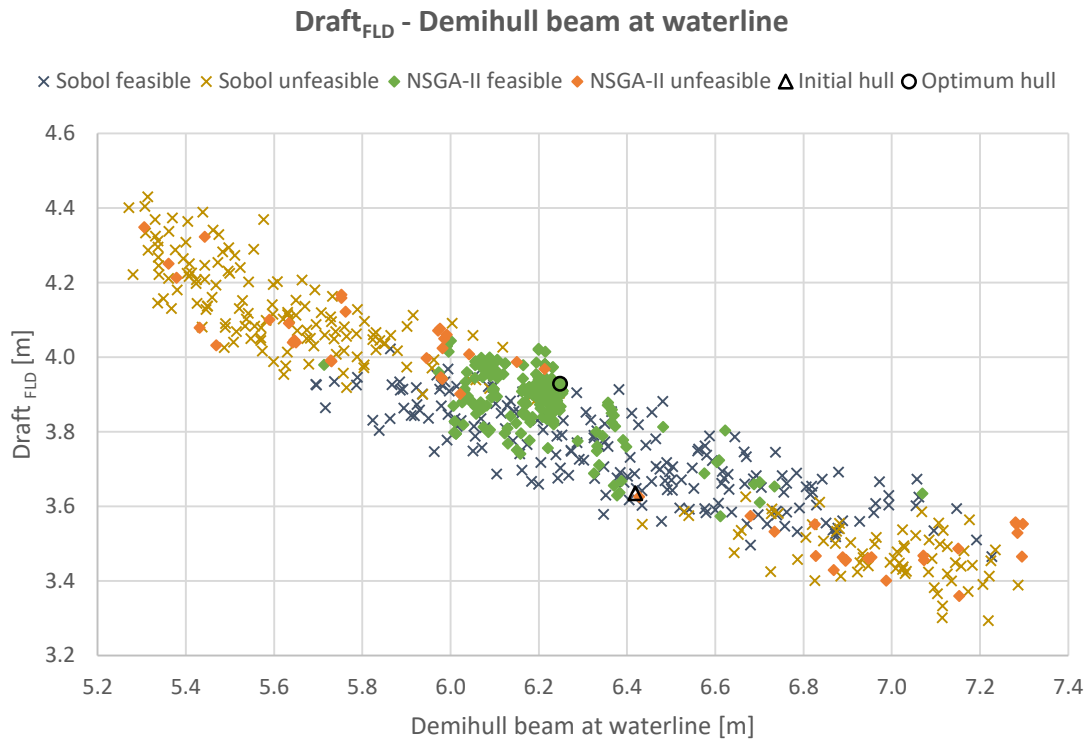
Σε όλα τα ανωτέρω διαγράμματα 31 έως 37 παρατηρούνται τρεις διακριτές περιοχές της συμπεριφοράς του NSGA-II. Η πρώτη είναι μία περιοχή εξερεύνησης που αφορά στις 150 περίπου πρώτες γάστρες. Η δεύτερη είναι μία περιοχή σύγκλισης στη βέλτιστη λύση που αφορά περίπου στις γάστρες 150 έως 400 στην οποία υπάρχει μια ορατή βελτίωση της αντικειμενικής συνάρτησης και αντίστοιχη μεταβολή των παραμέτρων αξιολόγησης. Η τρίτη είναι μία περιοχή ασυμπτωτικής συμπεριφοράς που εμφανίζεται για τις γάστρες 400 έως 640 όπου η βελτίωση της αντικειμενικής συνάρτησης και αντίστοιχη μεταβολή των παραμέτρων αξιολόγησης είναι πλέον πολύ μικρή.

5.1.2 Διαγράμματα των παραμέτρων αξιολόγησης

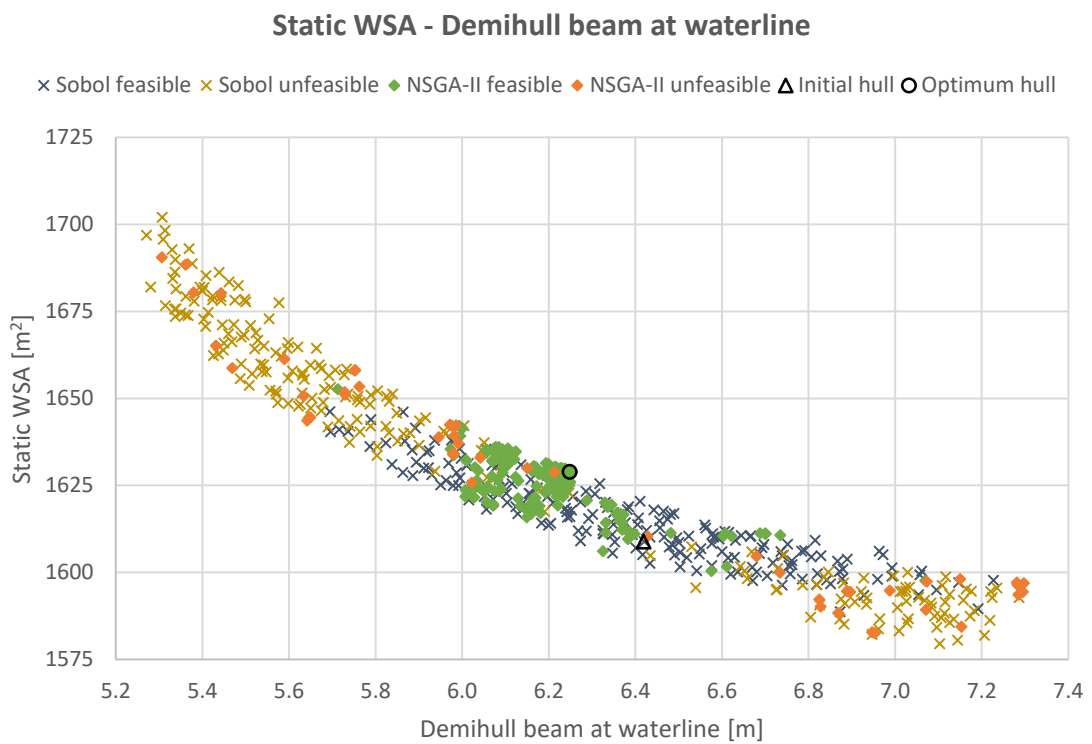
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα που συσχετίζουν κάποιες εκ των παραμέτρων αξιολόγησης μεταξύ τους:



Σχήμα 38: Βύθισμα κατάστασης πλήρους φόρτωσης συναρτήσει του βυθίσματος σχεδίασης



Σχήμα 39: Βύθισμα κατάστασης πλήρους φόρτωσης συναρτήσει του πλάτους της ημιγάστρας στην ίσαλο



Σχήμα 40: Στατική βρεχόμενη επιφάνεια συναρτήσει του πλάτους της ημιγάστρας στην ίσαλο

Στο σχήμα 38 παρατηρείται ότι το βύθισμα του πλοίου στην κατάσταση FLD είναι ανεξάρτητο από το βύθισμα σχεδίασης, που αποτέλεσε μία από τις μεταβλητές σχεδίασης του προβλήματος. Επιπρόσθετα, παρατηρείται ότι ο NSGA-II αναζητά τη βέλτιστη γάστρα σε τιμές βυθίσματος σχεδίασης μεταξύ περίπου 3.93 m έως 3.98 m και σε τιμές 3.80 m έως 4.00 m για το βύθισμα του πλοίου στην κατάσταση FLD αντίστοιχα, με τη βέλτιστη γάστρα να έχει βύθισμα σχεδίασης περί τα 3.94 m και περί τα 3.93 m στην κατάσταση FLD αντίστοιχα.

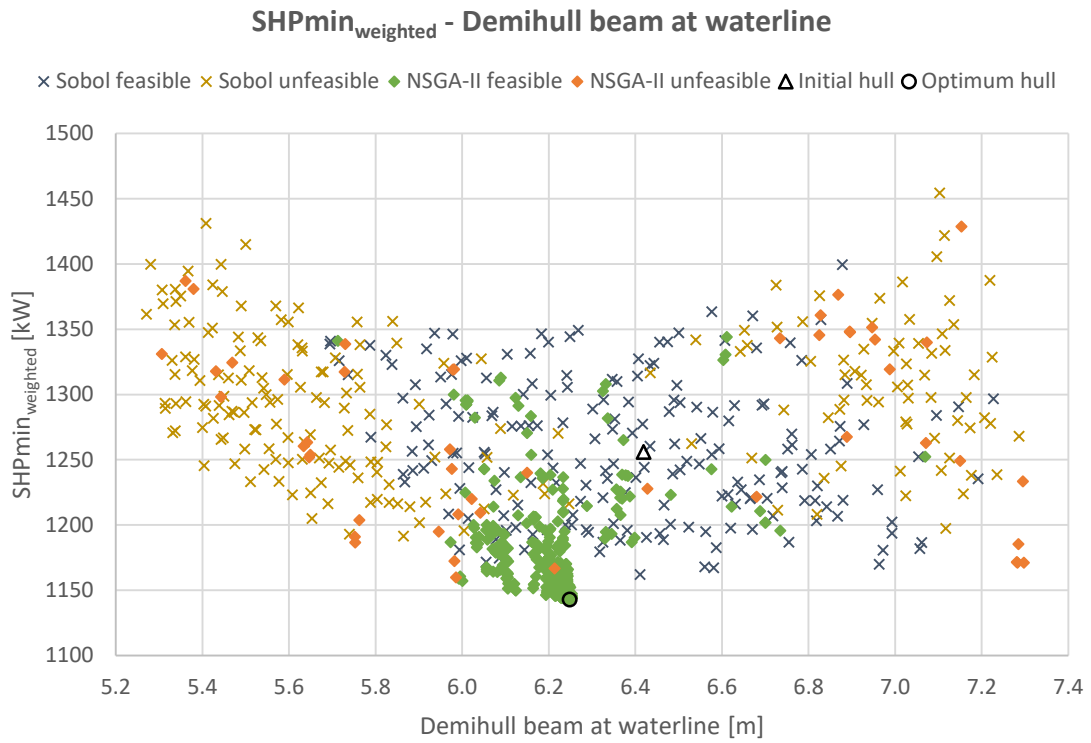
Επίσης, παρατηρείται ότι οι μη εφικτές λύσεις -οι οποίες σχετίζονται αποκλειστικά με την παραβίαση των περιορισμών βύθισης του καθρέφτη- εμφανίζονται για τιμές βυθίσματος της FLD περίπου 3.45 και κάτω ή περίπου 4.05 και πάνω. Αυτό είναι λογικό και αναμενόμενο, αφού οι περιορισμοί του καθρέφτη σχετίζονται με τη βύθιση του καθρέφτη, του οποίου το ύψος από το βασικό επίπεδο αναφοράς καθορίζεται από τη μεταβλητή σχεδίασης zTransom.

Στο σχήμα 39 παρατηρείται ότι τα βυθίσματα στα οποία αναζητά τη βέλτιστη λύση ο NSGA-II αντιστοιχούν σε πλάτη ημιγάστρας στην ίσαλο που κυμαίνονται από 6.0 m - 6.3 m, με τη βέλτιστη γάστρα να εντοπίζεται σε πλάτος ημιγάστρας στην ίσαλο περί τα 6.25 m. Κάτω από τα περίπου 5.8 m και άνω από τα περίπου 6.9 m η πλειονότητα των γαστρών αντιστοιχεί σε μη εφικτές λύσεις, κάτι που σχετίζεται με τη μη βύθιση ή την άνω των 40 cm βύθιση του επίμαχου σημείου του καθρέφτη αντίστοιχα. Η αντιστρόφως ανάλογη σχέση που φαίνεται να συνδέει το πλάτος της ημιγάστρας με το βύθισμα είναι λογική, καθώς για σταθερό εκτόπισμα η αύξηση του πλάτους οδηγεί σε μείωση του βυθίσματος και αντίστροφα.

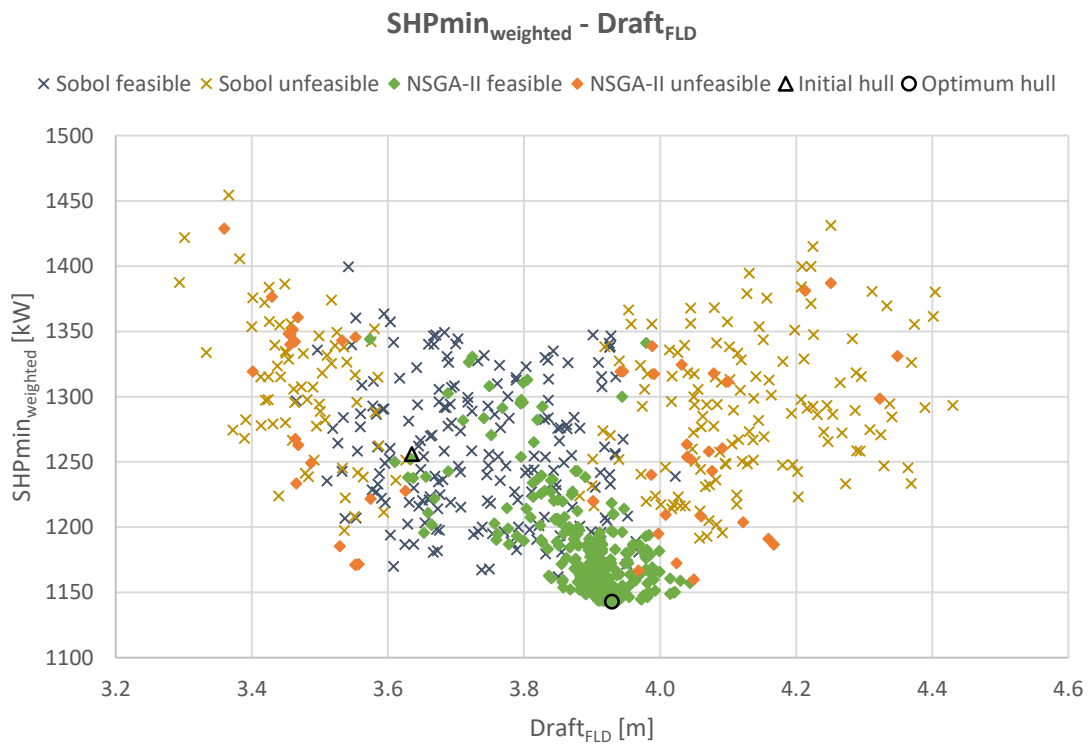
Στο σχήμα 40 παρατηρείται ότι για τις παραπάνω τιμές του πλάτους της ημιγάστρας στην ίσαλο η στατική βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας του πλοίου κυμαίνεται μεταξύ περίπου 1615 m² και 1635 m².

5.1.3 Διαγράμματα της αντικειμενικής συνάρτησης

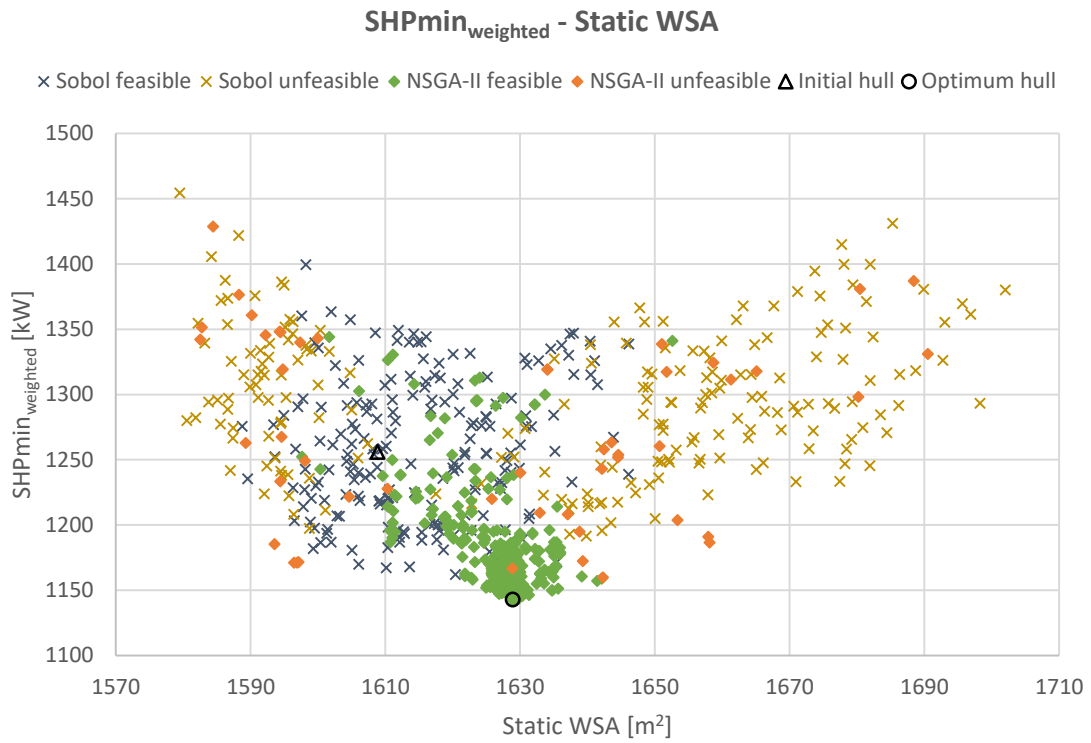
Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα που συσχετίζουν την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος με κάποιες εκ των παραμέτρων αξιολόγησης:



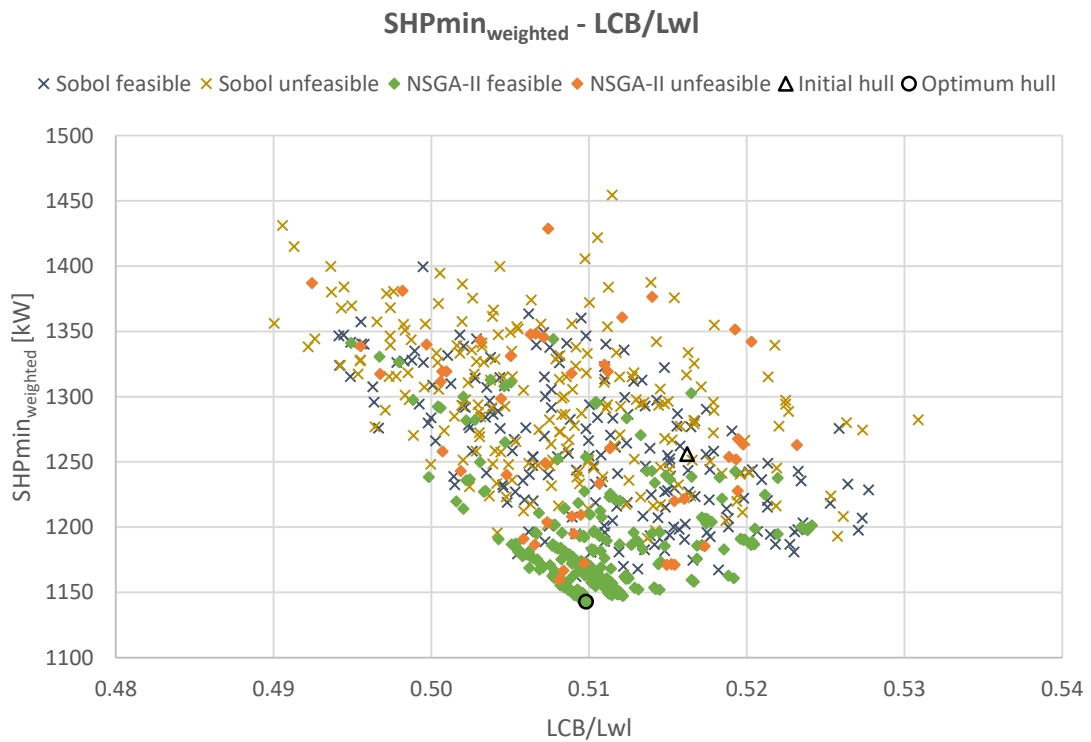
Σχήμα 41: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει του πλάτους της ημιγάστρας στην ίσαλο



Σχήμα 42: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει του βυθίσματος της κατάστασης πλήρους φόρτωσης



Σχήμα 43: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει της στατικής βρεχόμενης επιφάνειας



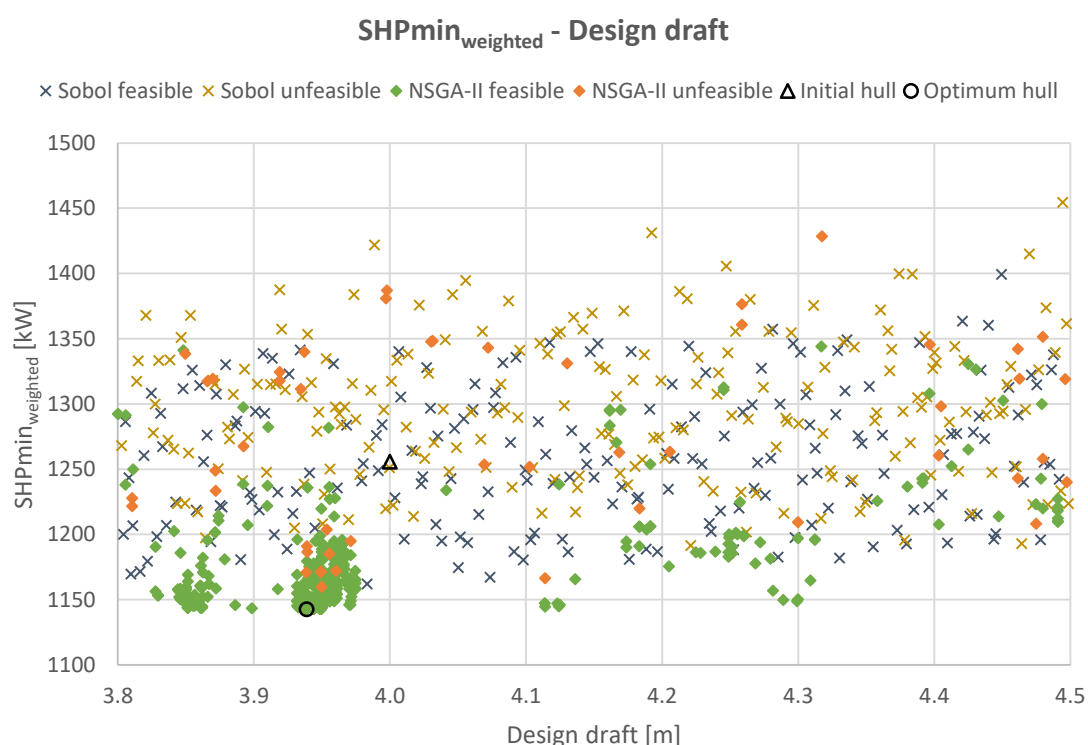
Σχήμα 44: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει της κανονικοποιημένης ως προς το μήκος της ισάλου διαμήκους θέσης του κέντρου άντωσης

Σύμφωνα με το σχήμα 41, η αναζήτηση της βέλτιστης λύσης οδηγεί στη δημιουργία δύο περιοχών αναζήτησης του βέλτιστου πλάτους της ημιγιάστρας στην ίσαλο. Αρχικά ο αλγόριθμος αναζήτησε τη βέλτιστη λύση σε μία περιοχή πλάτων από περίπου 6.07 m έως 6.12 m, η οποία ωστόσο εγκαταλείφθηκε. Κατόπιν, αναζήτησε τη βέλτιστη λύση σε μία περιοχή πλάτων από περίπου 6.16 m έως 6.25 m όπου και βρήκε τη βέλτιστη λύση, σε πλάτος 6.25 m. Όσον αφορά στην βέλτιστη γάστρα -που κατέχει την ελάχιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης- λαμβάνει μία τιμή περί τα 1145 kW.

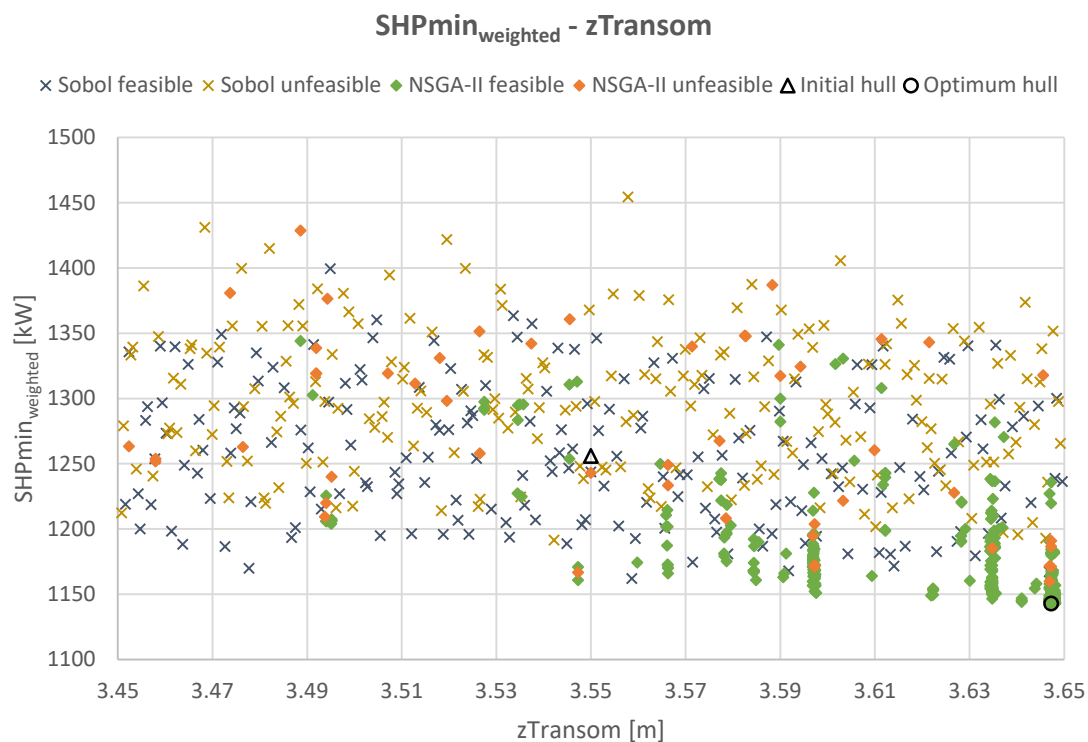
Σύμφωνα με το σχήμα 42, η αναζήτηση της βέλτιστης λύσης πραγματοποιείται σε μία περιοχή τιμών βυθίσματος της FLD μεταξύ περίπου 3.85 m και 4.00 m. Όπως είναι λογικό, εμφανίζονται δύο διακριτές περιοχές μη εφικτών λύσεων, όπου η μία αντιστοιχεί σε βυθίσματα περίπου 3.45 m και κάτω και η άλλη σε βυθίσματα περίπου 4.05 m και άνω.

Με βάση το σχήμα 43, η αναζήτηση της βέλτιστης λύσης πραγματοποιείται σε μία περιοχή τιμών της στατικής βρεχόμενης επιφάνειας μεταξύ περίπου 1615 m² και 1635 m². Εμφανίζονται δύο διακριτές περιοχές μη εφικτών λύσεων, όπου η μία που εμφανίζεται για 1595 m² και κάτω αντιστοιχεί σε βυθίσματα περίπου 3.45 m και κάτω και η άλλη που εμφανίζεται για 1645 m² και άνω αντιστοιχεί σε βυθίσματα περίπου 4.05 m και άνω.

Στο σχήμα 44 παρατηρείται ότι ο NSGA-II αναζητά τη βέλτιστη λύση σε μία περιοχή της κανονικοποιημένης ως προς το μήκος της ισάλου διαμήκουθς θέσης του κέντρου άντωσης που κυμαίνεται περίπου μεταξύ 0.505 και 0.513, με την αντίστοιχη περιοχή για τη σταθμισμένη ισχύ πρόωσης να κυμαίνεται μεταξύ περίπου 1145 kW και 1190 kW.



Σχήμα 45: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει του βυθίσματος σχεδίασης

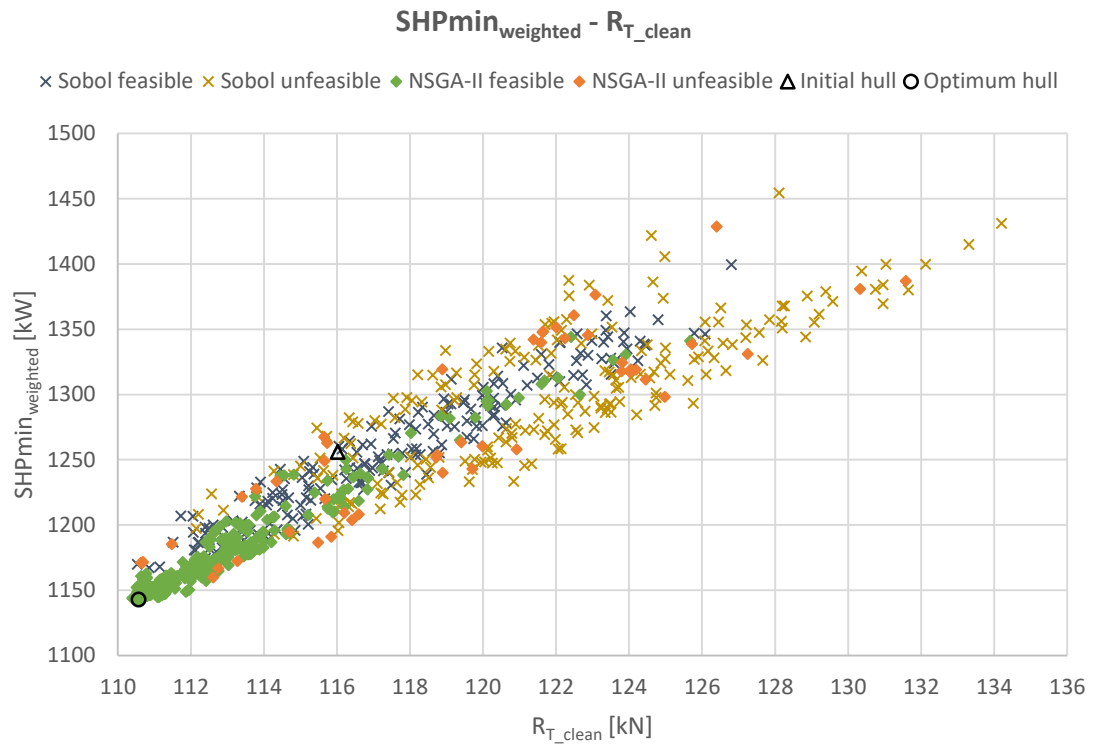


Σχήμα 46: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει του σημείου τομής της κάτω ακμής του καθρέφτη με το διάμηκες επίπεδο συμμετρίας

Στο σχήμα 45 φαίνεται ότι ο αλγόριθμος Sobol κάνει μία ικανοποιητική εξερεύνηση του χώρου των σχεδιαστικών λύσεων, φροντίζοντας οι τιμές της μεταβλητής σχεδίασης draft να έχουν καλή διασπορά. Επιπρόσθετα, η αναζήτηση της βέλτιστης λύσης πραγματοποιείται σε δύο φάσεις. Κατά την πρώτη φάση ο NSGA-II αναζητά τη βέλτιστη λύση στο διάστημα των περίπου 3.85-3.87 m του βυθίσματος σχεδίασης. Κατά την δεύτερη φάση ο NSGA-II αναζητά τη βέλτιστη λύση στο διάστημα των περίπου 3.93-3.97 m της μεταβλητής σχεδίασης και τη βρίσκει τελικά για τιμή περί τα 3.94 m.

Στο σχήμα 46 φαίνεται ότι ο αλγόριθμος Sobol κάνει μία ικανοποιητική εξερεύνηση του χώρου των σχεδιαστικών λύσεων, φροντίζοντας οι τιμές της μεταβλητής σχεδίασης zTransom να έχουν καλή διασπορά. Επιπρόσθετα, η αναζήτηση της βέλτιστης λύσης πραγματοποιείται σε τρεις φάσεις. Κατά την πρώτη φάση¹³ ο NSGA-II αναζητά τη βέλτιστη λύση στα περίπου 3.597 m. Κατά τη δεύτερη φάση ο γενετικός αλγόριθμος αναζητά τη βέλτιστη λύση στα περίπου 3.635 m, ενώ κατά την τρίτη και τελευταία φάση την αναζητά στα περίπου 3.647 m όπου και τελικώς τη βρίσκει.

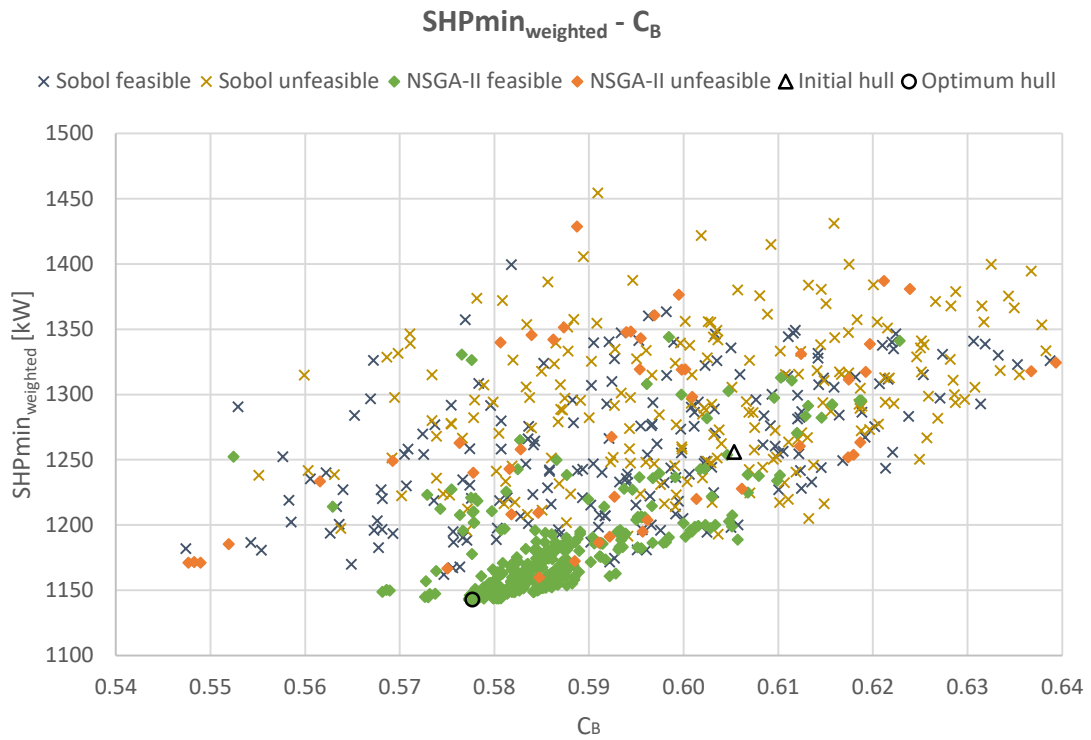
¹³ Για το ποια φάση αναζήτησης από τις δύο πρώτες προηγήθηκε, πραγματοποιήθηκε έλεγχος της χρονικής ιστορίας των τιμών της μεταβλητής σχεδίασης zTransom.



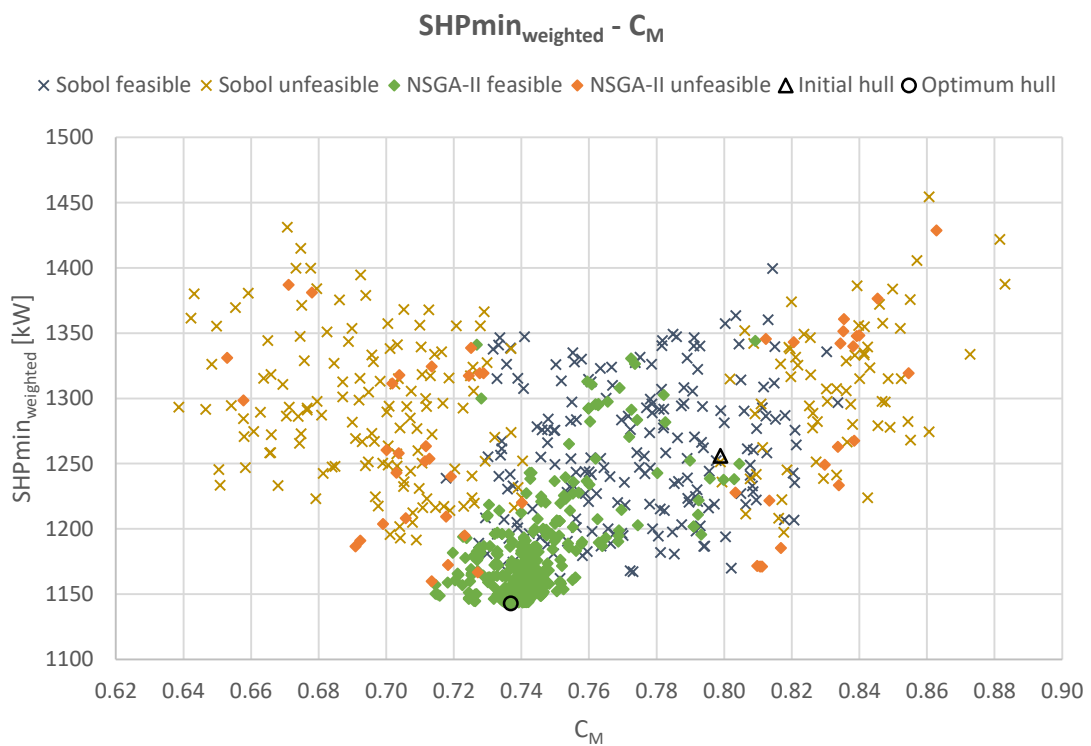
Σχήμα 47: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει της ολικής αντίστασης καθαρής γάστρας

Σύμφωνα με το σχήμα 47, η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι ανάλογη της ολικής αντίστασης, κάτι που είναι λογικό, καθώς αυξανόμενης της αντίστασης αυξάνεται η απαίτηση ανάπτυξης ώσης από την έλικα και ως εκ τούτου αυξάνεται η απαίτηση ισχύος της προωστήριας εγκατάστασης. Παρατηρείται ότι οι εφικτές λύσεις τόσο του Sobol όσο και του NSGA-II βρίσκονται σε μία λωρίδα που διατηρεί περίπου σταθερό το πλάτος της για τις διάφορες τιμές της ολικής αντίστασης.

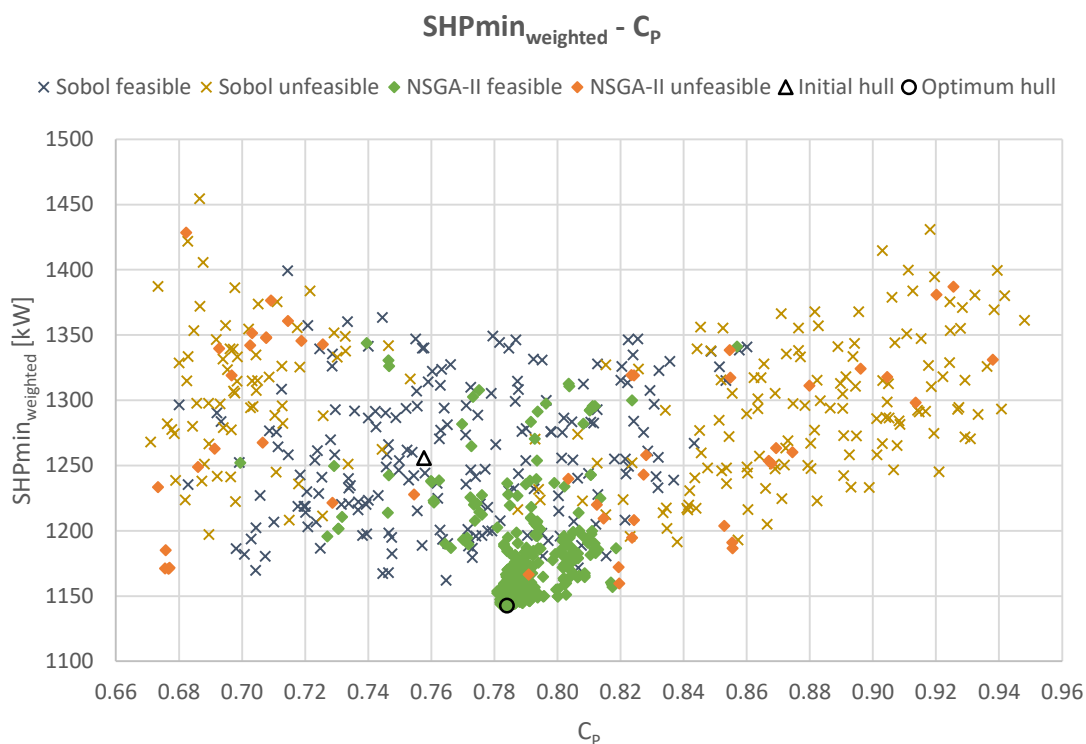
Όπως είναι λογικό η βέλτιστη γάστρα -που κατέχει την ελάχιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης- έχει μία από τις μικρότερες τιμές ολικής αντίστασης. Συγκεκριμένα, η αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνει έχει μία ελάχιστη τιμή περί τα 1145 kW, τα οποία για τη βέλτιστη γάστρα αντιστοιχούν σε περίπου 110.5 kN.



Σχήμα 48: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει του συντελεστή γάστρας



Σχήμα 49: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει του συντελεστή μέσης τομής



Σχήμα 50: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει του πρισματικού συντελεστή

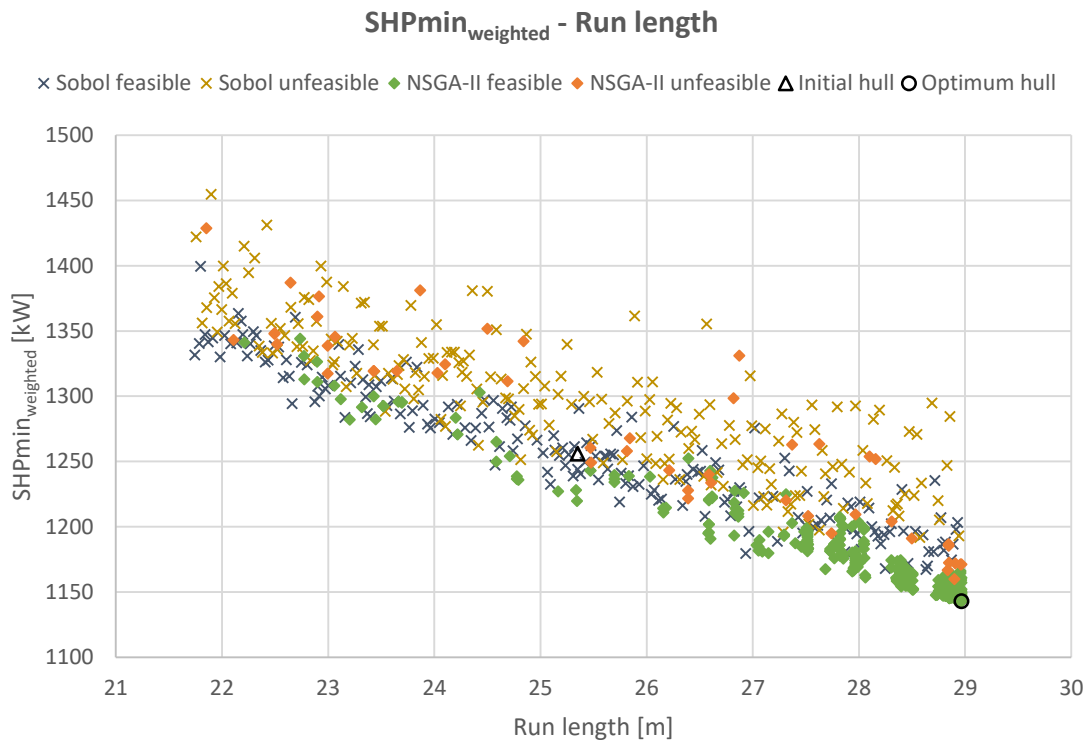
Στο σχήμα 48 παρατηρείται πως ο NSGA-II αναζητεί τη λύση σε μία περιοχή τιμών του συντελεστή γάστρας μεταξύ περίπου 0.578 και 0.589. Η βέλτιστη γάστρα αντιστοιχεί σε τιμή του συντελεστή γάστρας περί το 0.578. Η συμπεριφορά που παρουσιάζει ο συντελεστής γάστρας υπαγορεύεται κυρίως από τη συμπεριφορά που εμφανίζουν το πλάτος της κάθε ημιγάστρας και από το βύθισμα, καθώς το εκτόπισμα των παραλλαγμένων γαστρών είναι σταθερό και το μήκος των εφικτών παραλλαγμένων γαστρών στην ίσαλο είναι περίπου σταθερό, παρουσιάζοντας πολύ μικρή διακύμανση.

Στο σχήμα 49 παρατηρείται ότι ο NSGA-II αναζητεί τη λύση σε μία περιοχή τιμών του συντελεστή μέσης τομής μεταξύ περίπου 0.720 και 0.750. Η βέλτιστη γάστρα αντιστοιχεί σε τιμή του συντελεστή μέσης τομής περί το 0.737. Παρατηρούνται επίσης δύο διακριτές περιοχές μη εφικτών σχεδιαστικών λύσεων, όπου η περιοχή που αντιστοιχεί σε συντελεστές μέσης τομής περίπου 0.72 και κάτω αντιστοιχεί σε μικρά πλάτη ημιγαστρών και συνεπώς σε βυθίσματα άνω των 4.05 m, ενώ η περιοχή που αντιστοιχεί σε συντελεστές μέσης τομής περίπου 0.82 και άνω αντιστοιχεί σε μεγάλα πλάτη ημιγαστρών και συνεπώς σε βυθίσματα των 3.45 m και κάτω.

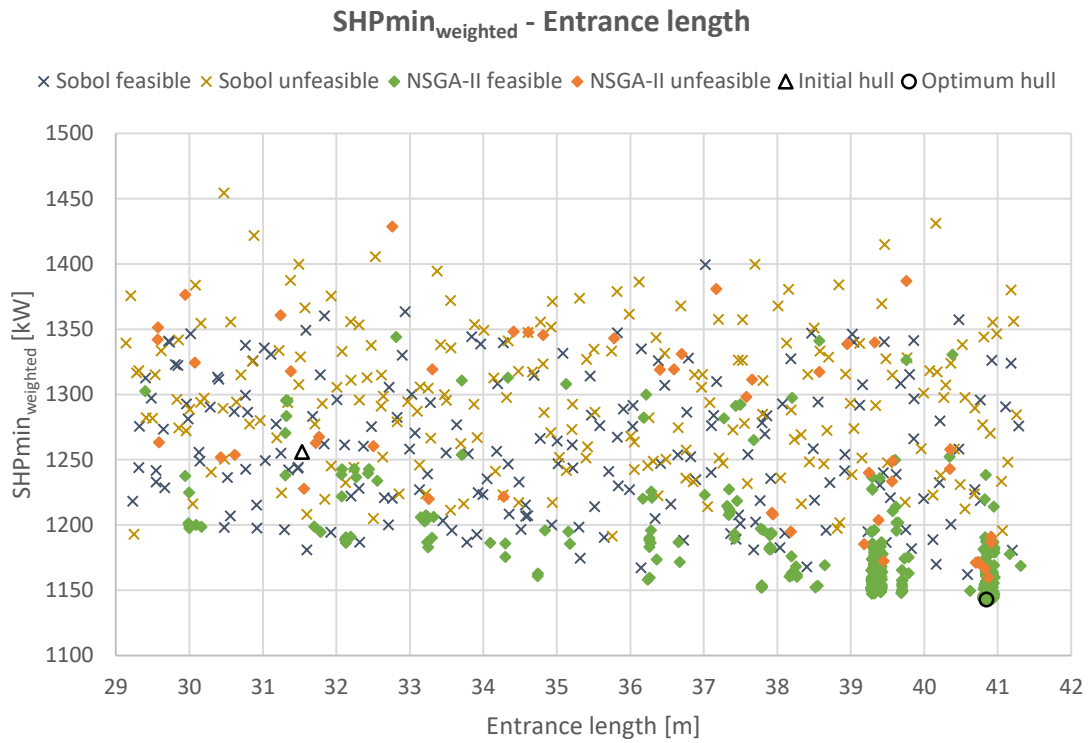
Στο σχήμα 50 παρατηρείται πως ο NSGA-II αναζητεί τη λύση σε μία περιοχή τιμών του πρισματικού συντελεστή μεταξύ περίπου 0.780 και 0.796. Η βέλτιστη γάστρα αντιστοιχεί σε τιμή του πρισματικού συντελεστή περί το 0.784. Παρατηρούνται και εδώ δύο διακριτές περιοχές μη εφικτών σχεδιαστικών λύσεων, όπου η περιοχή που αντιστοιχεί σε πρισματικούς συντελεστές περίπου 0.70 και κάτω αντιστοιχεί σε μεγάλα πλάτη ημιγαστρών και συνεπώς σε βυθίσματα των 3.45 m και κάτω, ενώ η περιοχή που αντιστοιχεί σε πρισματικούς συντελεστές

περίπου 0.86 και άνω αντιστοιχεί σε μικρά πλάτη ημιγασρών και συνεπώς σε βυθίσματα άνω των 4.05 m.

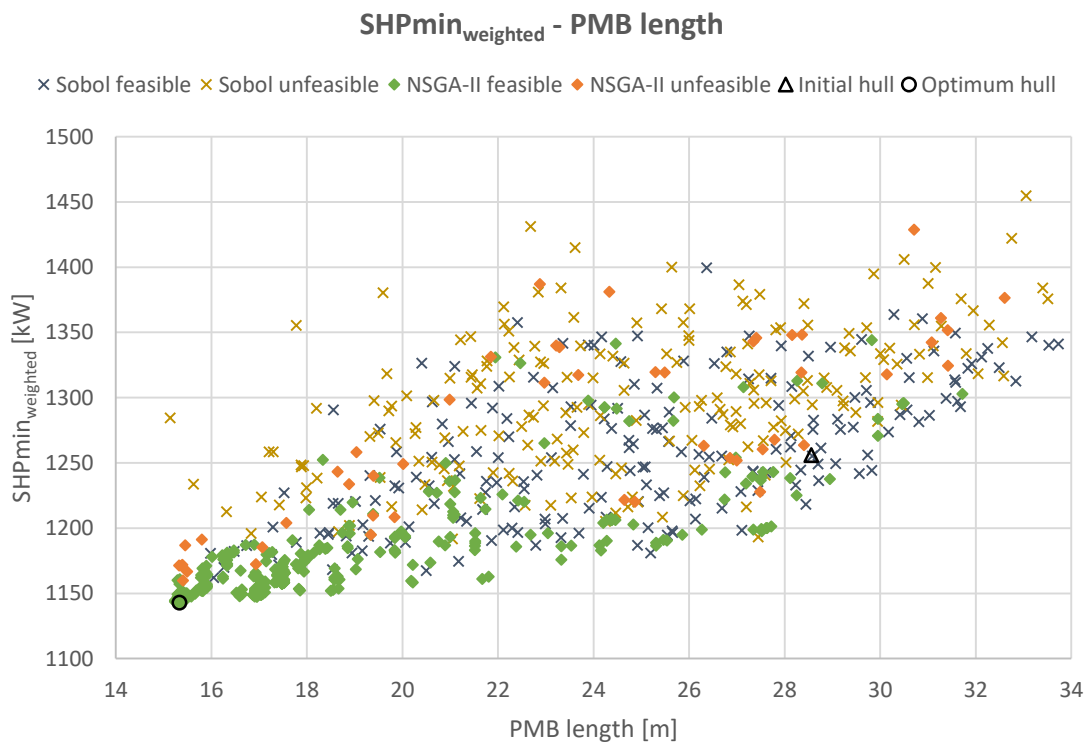
Κοινό χαρακτηριστικό των σχημάτων 48-50 είναι ότι η συμπεριφορά που παρουσιάζουν οι τρεις συντελεστές μορφής συναρτήσει της αντικειμενικής συνάρτησης επηρεάζεται κατά κύριο λόγο από τη συμπεριφορά που εμφανίζουν το πλάτος της κάθε ημιγάστρας και το βύθισμα ως προς την αντικειμενική συνάρτηση.



Σχήμα 51: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει του μήκους του πρυμναίου τμήματος



Σχήμα 52: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει του μήκους του πρωραίου τμήματος



Σχήμα 53: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει του μήκους του παράλληλου τμήματος

Στο σχήμα 51 παρατηρείται ότι η ισχύς πρόωσης είναι αντιστρόφως ανάλογη από το μήκος του πρυμναίου τμήματος. Όσον αφορά στη σύγκλιση προς τη βέλτιστη λύση, αυτή εμφανίζεται σε ομάδες. Συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος αναζητάει τις λύσεις πρώτα στις περιοχές μήκους του πρυμναίου τμήματος περί τα 27.7 m - 28.0 m και 28.4 m - 28.5 m, προτού κάνει την τελική αναζήτηση στην περιοχή των 28.8 m - 29.0 m και εντοπίσει τη βέλτιστη γάστρα που αντιστοιχεί σε μήκος πρυμναίου τμήματος περί τα 29.0 m.

Στο σχήμα 52 παρατηρείται πως η σύγκλιση προς τη βέλτιστη λύση πραγματοποιήθηκε σε δύο φάσεις αναζήτησης. Κατά την πρώτη φάση, έγινε αναζήτηση της βέλτιστης λύσης σε μήκος πρωραίου τμήματος περί τα 39.4 m, ενώ στη δεύτερη φάση έγινε αναζήτηση της βέλτιστης λύσης σε μήκος πρωραίου τμήματος περί τα 40.8 m, όπου και βρέθηκε η βέλτιστη λύση.

Στο σχήμα 53 παρατηρείται ότι η σύγκλιση προς τη βέλτιστη λύση πραγματοποιήθηκε σε δύο φάσεις αναζήτησης. Κατά την πρώτη φάση, έγινε αναζήτηση της βέλτιστης λύσης σε μήκος παράλληλου τμήματος μεταξύ περίπου 16.6 m έως 18.4 m, ενώ στη δεύτερη φάση έγινε αναζήτηση της βέλτιστης λύσης σε μήκος παράλληλου τμήματος μεταξύ περίπου 15.2 m και 16.5 m, με τη βέλτιστη λύση να βρίσκεται περί τα 15.3 m.

Με βάση τα διαγράμματα 51 και 52 προκύπτει το συμπέρασμα ότι για τη μείωση της ισχύος πρόωσης έχει μεγάλη επίδραση η αύξηση του μήκους του πρυμναίου τμήματος, για το οποίο μάλιστα παρατηρείται ότι εφόσον η μεταβλητή σχεδίασης `Aftbody_scaling_factor` λάμβανε ακόμη μεγαλύτερο ανώτατο όριο θα μπορούσε πιθανώς να οδηγήσει σε ακόμη μεγαλύτερη μείωση της ισχύος πρόωσης. Η αντίστοιχη επίδραση που έχει η αύξηση του μήκους του πρωραίου τμήματος είναι μικρή. Σε κάθε περίπτωση για την ελαχιστοποίηση της ισχύος πρόωσης παρατηρείται προτίμηση της ταυτόχρονης αύξησης των μηκών του πρυμναίου και πρωραίου τμήματος, η οποία συνεπάγεται μείωση του μήκους του παράλληλου τμήματος, όπως διαπιστώνεται από το σχήμα 53.

5.2 Αποτελέσματα αρχικής και βέλτιστης γάστρας

Σε αυτή την ενότητα παρατίθενται τα βασικότερα συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ της αρχικής μορφής της γάστρας -τελική μορφή του παραμετρικού μοντέλου- και της βέλτιστης γάστρας.

5.2.1 Μεταβλητές σχεδίασης και κύριες διαστάσεις

Αρχικά παρατίθενται οι τιμές των ενεργών μεταβλητών σχεδίασης του προβλήματος βελτιστοποίησης που αφορούν στην αρχική και στη βέλτιστη γάστρα, καθώς και οι κύριες διαστάσεις τους:

Πίνακας 10: Μεταβλητές σχεδίασης αρχικής και βέλτιστης γάστρας

Όνομα μεταβλητής σχεδίασης	Μονάδες	Αρχική γάστρα	Βέλτιστη γάστρα 0538	Μεταβολή
beam	m	7.000	6.748	-3.59%
draft	m	4.000	3.939	-1.53%
zTransom	m	3.550	3.647	2.74%
Aftbody_scaling_factor	-	0.7000	0.7998	14.26%
Forebody_scaling factor	-	0.6500	0.8401	29.25%

Πίνακας 11: Κύριες διαστάσεις αρχικής και βέλτιστης γάστρας

Όνομα	Συμβολισμός	Μονάδες	Αρχική γάστρα	Βέλτιστη γάστρα 0538	Μεταβολή
Μήκος ισάλου	L_{wl}	m	85.44	85.14	-0.35%
Πλάτος ημιγάστρας στην ίσαλο	b_{wl}	m	6.419	6.248	-2.66%
Ολικό πλάτος	$B_{O.A.}$	m	23.00	23.00	0.00%
Κοίλο	D	m	6.400	6.400	0.00%
Βύθισμα FLD	T_{FLD}	m	3.635	3.929	8.08%

5.2.2 Υδροστατικά και υδροδυναμικά στοιχεία και στοιχεία πρόωσης

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικά υδροστατικά και υδροδυναμικά στοιχεία της αρχικής και της βέλτιστης γάστρας, καθώς και τα βασικά στοιχεία πρόωσης των δύο γαστρών:

Πίνακας 12: Υδροστατικά στοιχεία αρχικής και βέλτιστης γάστρας

Όνομα	Συμβολισμός	Μονάδες	Αρχική γάστρα	Βέλτιστη γάστρα 0538	Μεταβολή
Εκτόπισμα	Δ	t	2473.8	2473.8	0.00%
Διαμήκης θέση κέντρου άντωσης	LCB	m	44.11	43.41	-1.59%
Κατακόρυφη θέση κέντρου άντωσης	KB	m	2.138	2.339	9.43%
Εγκάρσιο μετακεντρικό ύψος	KM_T	m	3.291	3.332	1.26%
Διάμηκες μετακεντρικό ύψος	KM_L	m	187.39	172.13	-8.14%
Διαμήκης θέση κέντρου πλευστότητας	LCF	m	41.51	40.59	-2.21%
Επιφάνεια ισάλου	WPA	m ²	938.82	886.11	-5.61%
Στατική βρεχόμενη επιφάνεια	WSA_{STATIC}	m ²	1608.8	1628.9	1.25%
Συντελεστής λυγηρότητας	$\frac{L_{wl}}{\frac{1}{\nabla^3}}$	-	6.370	6.346	-0.37%
Συντελεστής γάστρας	C_B	-	0.605	0.578	-4.57%
Συντελεστής μέσης τομής	C_M	-	0.799	0.737	-7.77%
Πρισματικός συντελεστής	C_P	-	0.758	0.784	3.46%
Συντελεστής ισάλου επιφανείας	C_{WP}	-	0.856	0.833	-2.69%

Πίνακας 13: Υδροδυναμικά στοιχεία αρχικής και βέλτιστης γάστρας

Όνομα	Συμβολισμός	Μονάδες	Αρχική γάστρα	Βέλτιστη γάστρα 0538	Μεταβολή
Δυναμική βρεχόμενη επιφάνεια	$WSA_{RUNNING}$	m ²	1624.3	1642.5	1.12%
Συντελεστής μορφής	1+k	-	1.445	1.447	0.15%
Αντίσταση τριβής ¹⁴	R_F	kN	56.36	57.02	1.17%
Αντίσταση συνεκτικότητας	R_V	kN	81.43	82.50	1.32%
Αντίσταση μορφής	R_{FORM}	kN	25.07	25.48	1.65%
Αντίσταση κυματισμού	R_W	kN	34.59	28.06	-18.87%
Υπόλοιπη αντίσταση	R_R	kN	59.66	53.54	-10.25%
Ολική αντίσταση	R_T	kN	116.0	110.6	-4.70%
Ισχύς ρυμούλκησης	EHP	kW	734.04	699.54	-4.70%

Πίνακας 14: Στοιχεία ελίκων αρχικής και βέλτιστης γάστρας

Όνομα	Συμβολισμός	Μονάδες	Αρχική γάστρα	Βέλτιστη γάστρα 0538	Μεταβολή
Αριθμός πτερυγίων	z	-	5	5	0.00%
Διάμετρος έλικας	D_{PROP}	m	2.54	2.75	8.27%
Λόγος εκτεταμένης επιφάνειας	$\frac{A_E}{A_0}$	-	0.57	0.55	-3.51%

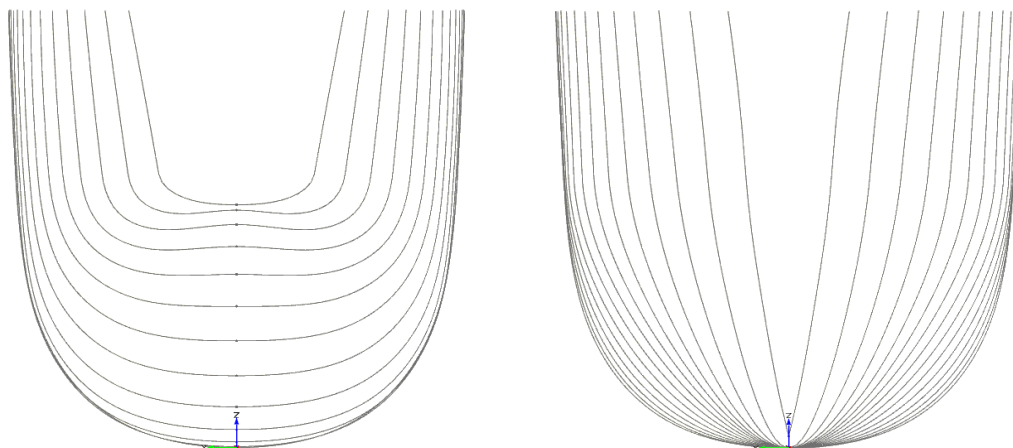
¹⁴ Ισοδύναμη επίπεδης πλάκας

Πίνακας 15: Στοιχεία πρόωσης αρχικής και βέλτιστης γάστρας

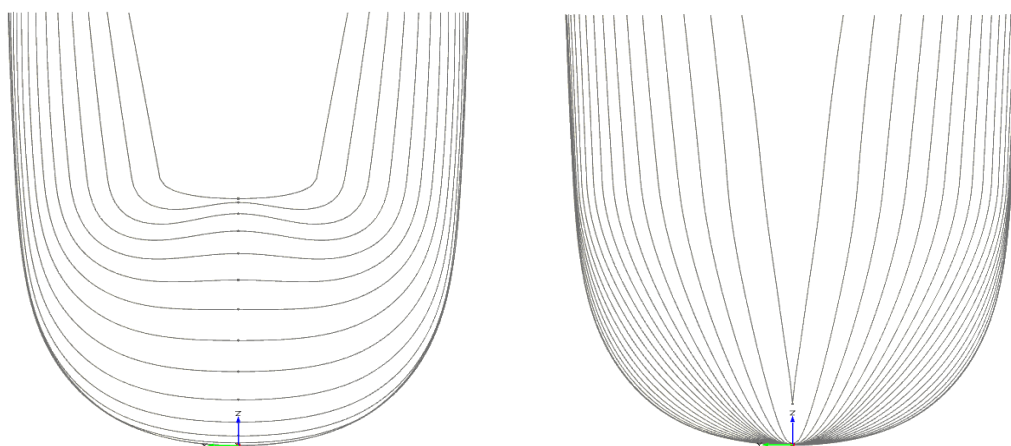
Όνομα	Συμβολισμός	Μονάδες	Αρχική γάστρα	Βέλτιστη γάστρα 0538	Μεταβολή
Καθαρή γάστρα					
Βέλτιστος αριθμός στροφών	n	rpm	168.9	137.4	-18.65%
Βέλτιστος λόγος βήματος	$\frac{P}{D}$	-	1.0	1.1	10.00%
Βέλτιστη ροπή στην έλικα	Q	kN·m	30.96	34.68	12.02%
Ελάχιστη ισχύς πρόωσης	SHP _{min}	kW	1117.5	1018.4	-8.87%
Μέγιστος συντελεστής πρόωσης	PC _{max}	-	0.657	0.687	4.57%
Ρυπασμένη γάστρα					
Βέλτιστος αριθμός στροφών	n	rpm	178.6	154.8	-13.33%
Βέλτιστος λόγος βήματος	$\frac{P}{D}$	-	1.0	1.0	0.00%
Βέλτιστη ροπή στην έλικα	Q	kN·m	36.53	38.25	4.71%
Ελάχιστη ισχύς πρόωσης	SHP _{min}	kW	1394.3	1265.3	-9.25%
Μέγιστος συντελεστής πρόωσης	PC _{max}	-	0.632	0.663	4.91%
Σταθμισμένη SHP_{min}					
Ελάχιστη ισχύς πρόωσης	SHP _{min_weighted}	kW	1255.9	1142.8	-9.01%

5.2.3 Body plans ημιγαστρών

Στα σχήματα που ακολουθούν παρατίθενται τα body plans των πρυμναίων και προραίων τμημάτων της αρχικής και της βέλτιστης ημιγάστρας:



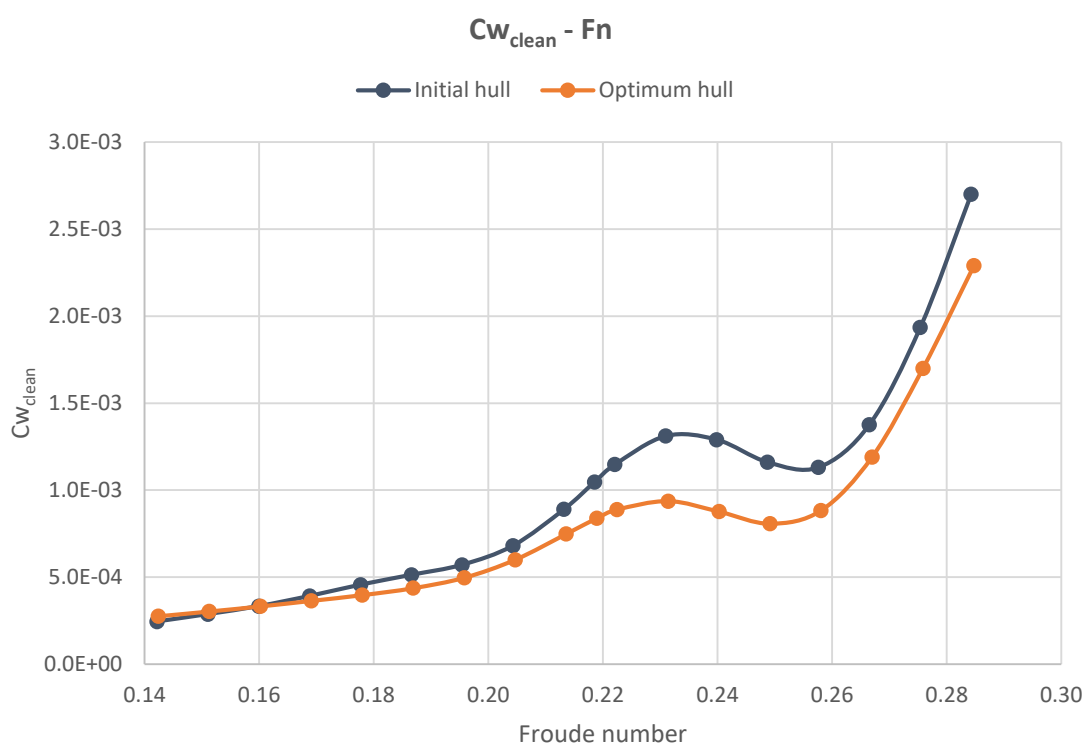
Σχήμα 54: Body plan αρχικής ημιγάστρας: (α) πρυμναίο τμήμα (αριστερά) και (β) προραίο τμήμα (δεξιά)



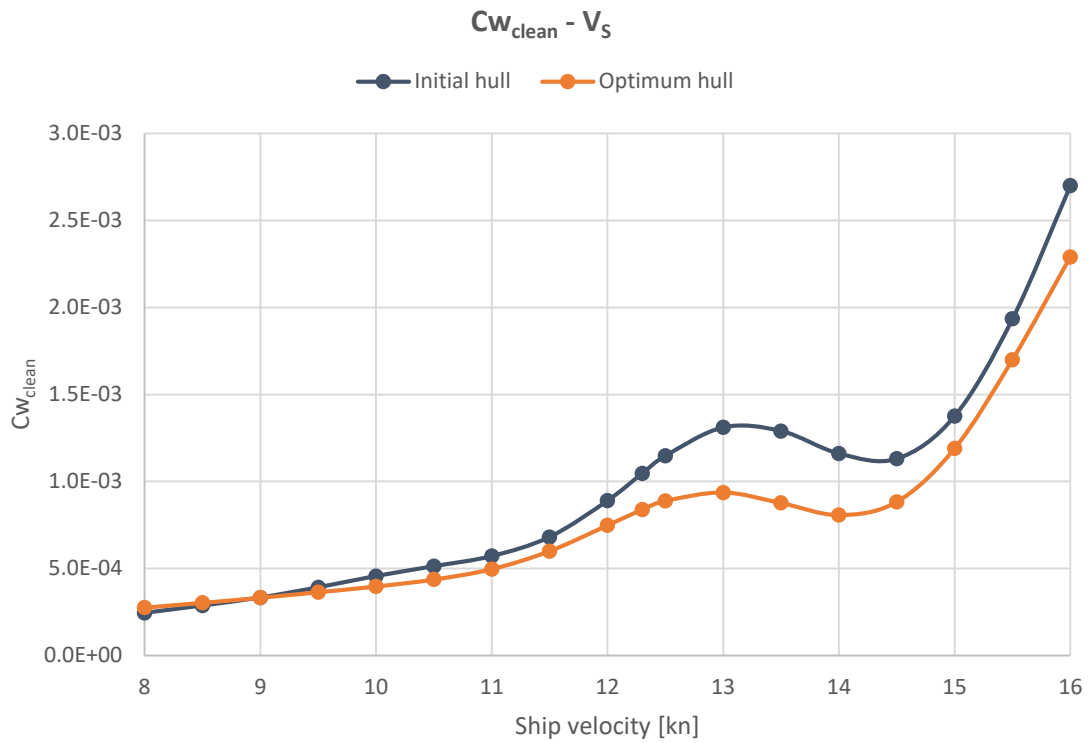
Σχήμα 55: Body plan βέλτιστης ημιγάστρας: (α) πρυμναίο τμήμα (αριστερά) και (β) προραίο τμήμα (δεξιά)

5.2.4 Διαγράμματα συναρτήσεως του αριθμού Froude και της ταχύτητας πλεύσης

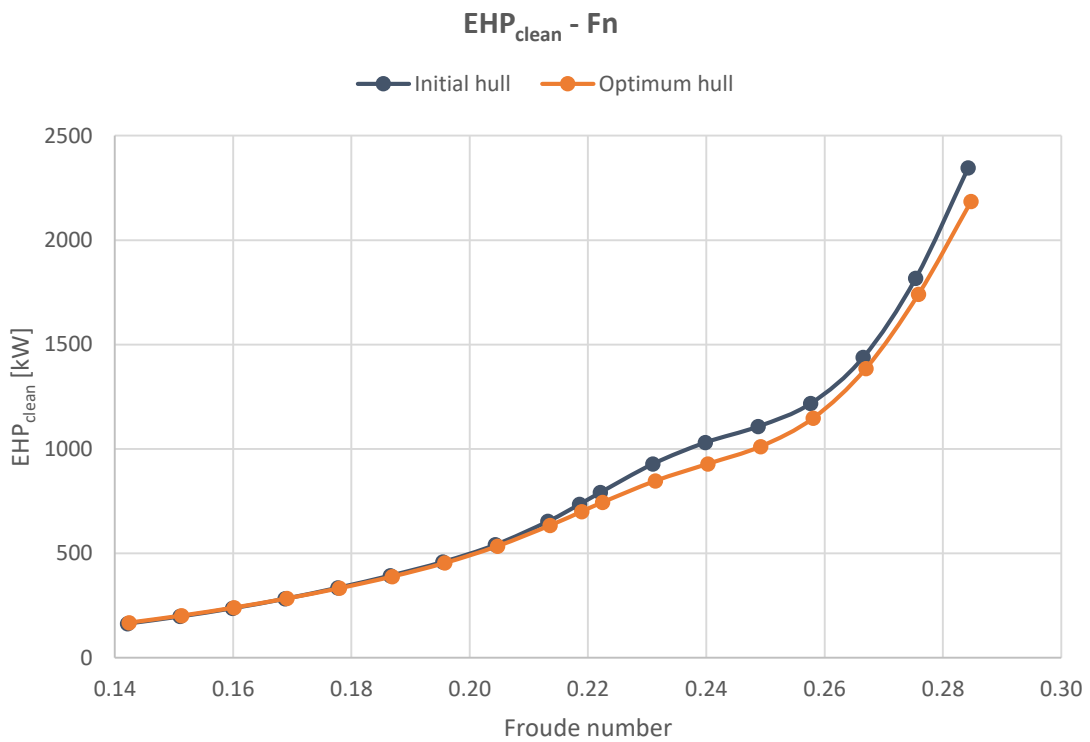
Ως τελευταίο στάδιο της παράθεσης αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν δύο τρεξίματα με χρήση της μηχανής σχεδίασης Ensemble Investigation (Friendship Systems) για διαφορετικές ταχύτητες πλεύσης της αρχικής και της βέλτιστης γάστρας. Εκτενέστερα, με μοναδική μεταβλητή σχεδίασης την ταχύτητα πλεύσης V_{ship} της κάθε γάστρας, πραγματοποιήθηκαν τρεξίματα με την εν λόγω μηχανή σχεδίασης από 8 έως 16 kn με βήμα 0.5 kn, όπου συμπεριλήφθηκε και η ταχύτητα υπηρεσίας των 12.3 kn. Παρακάτω παρατίθενται τα γραφήματα που εμπλέκουν ορισμένες παραμέτρους αξιολόγησης με τον αριθμό Froude και την ταχύτητα πλεύσης της αρχικής και της βέλτιστης γάστρας:



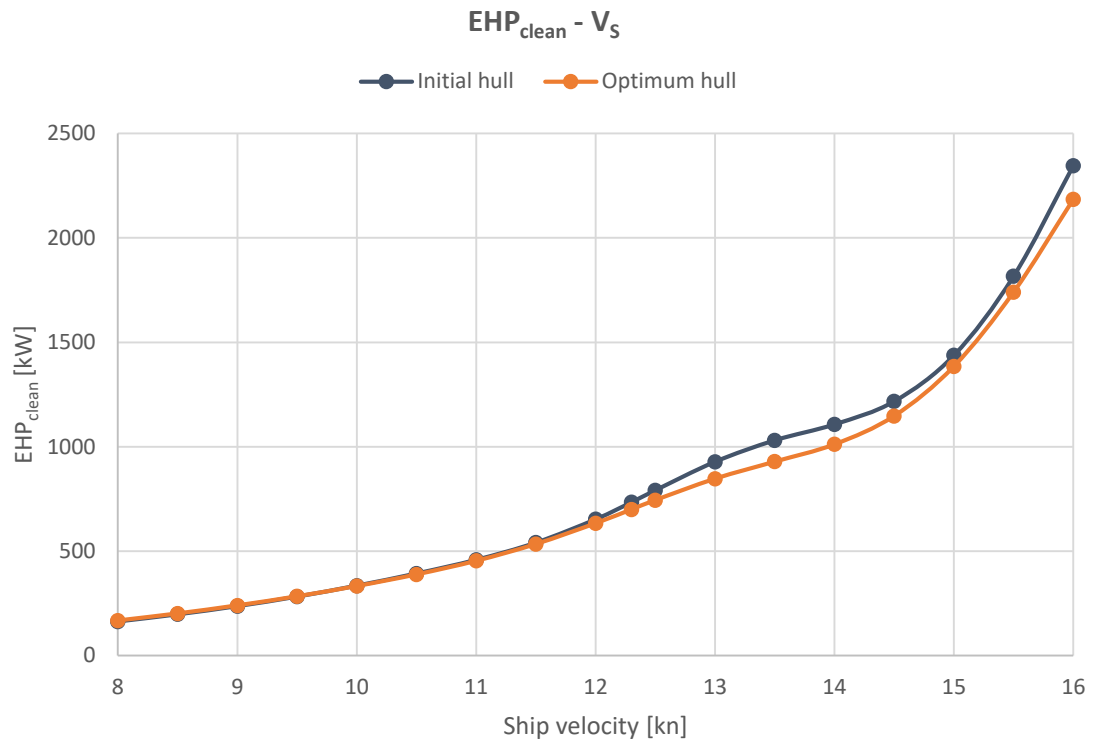
Σχήμα 56: Συντελεστής κυματισμού καθαρής γάστρας συναρτήσεως του αριθμού Froude



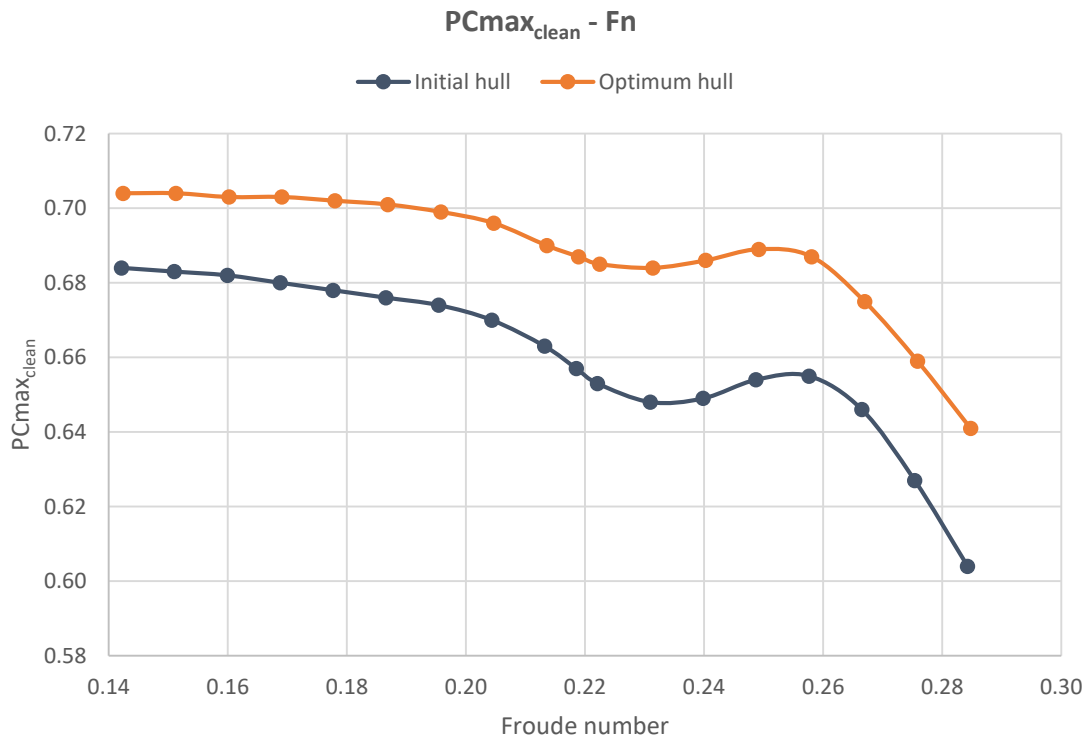
Σχήμα 57: Συντελεστής κυματισμού καθαρής γάστρας συναρτήσει της ταχύτητας πλεύσης



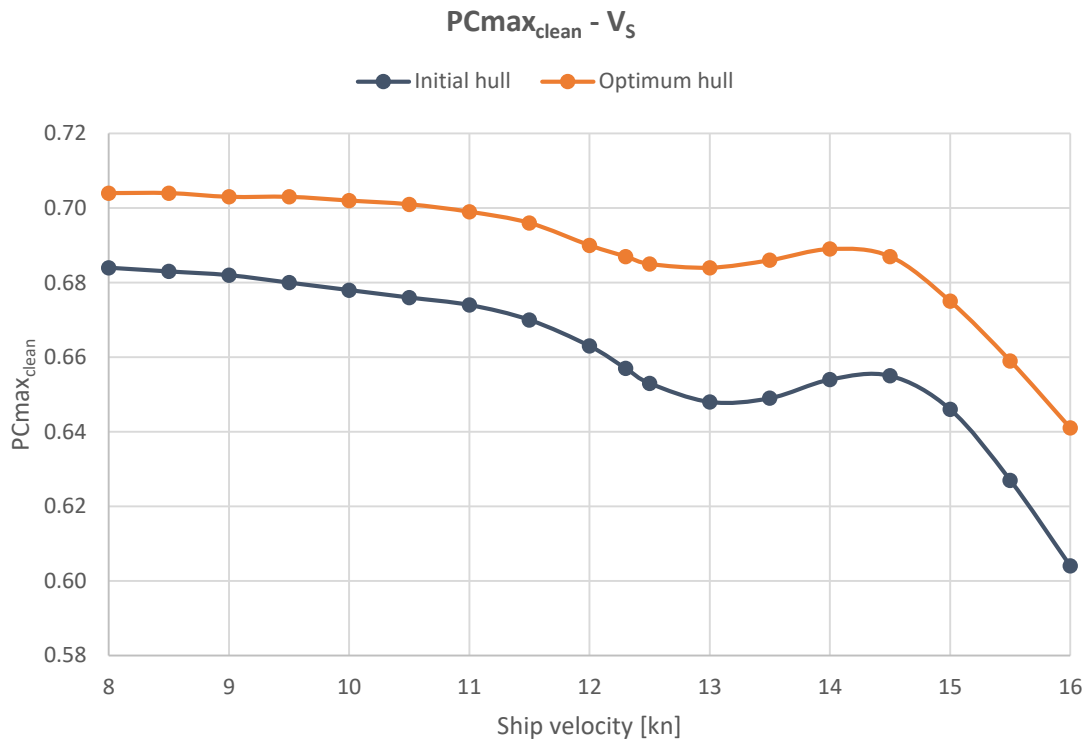
Σχήμα 58: Ισχύς ρυμούλκησης καθαρής γάστρας συναρτήσει του αριθμού Froude



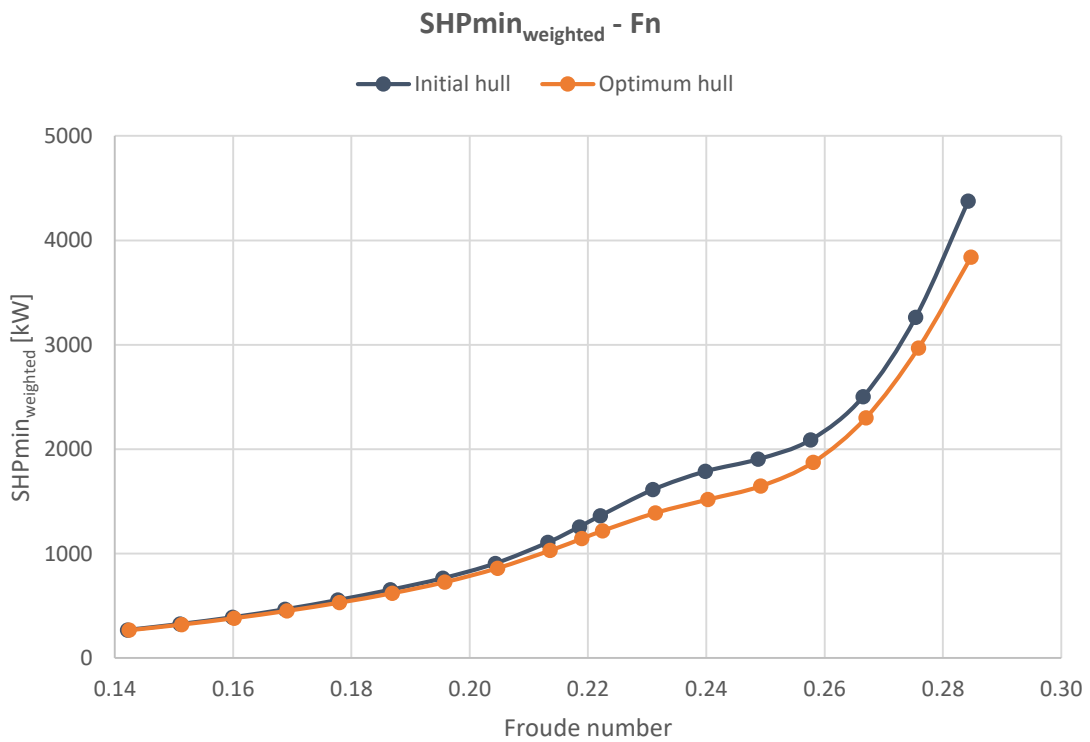
Σχήμα 59: Ισχύς ρυμούλκησης καθαρής γάστρας συναρτήσει της ταχύτητας πλεύσης



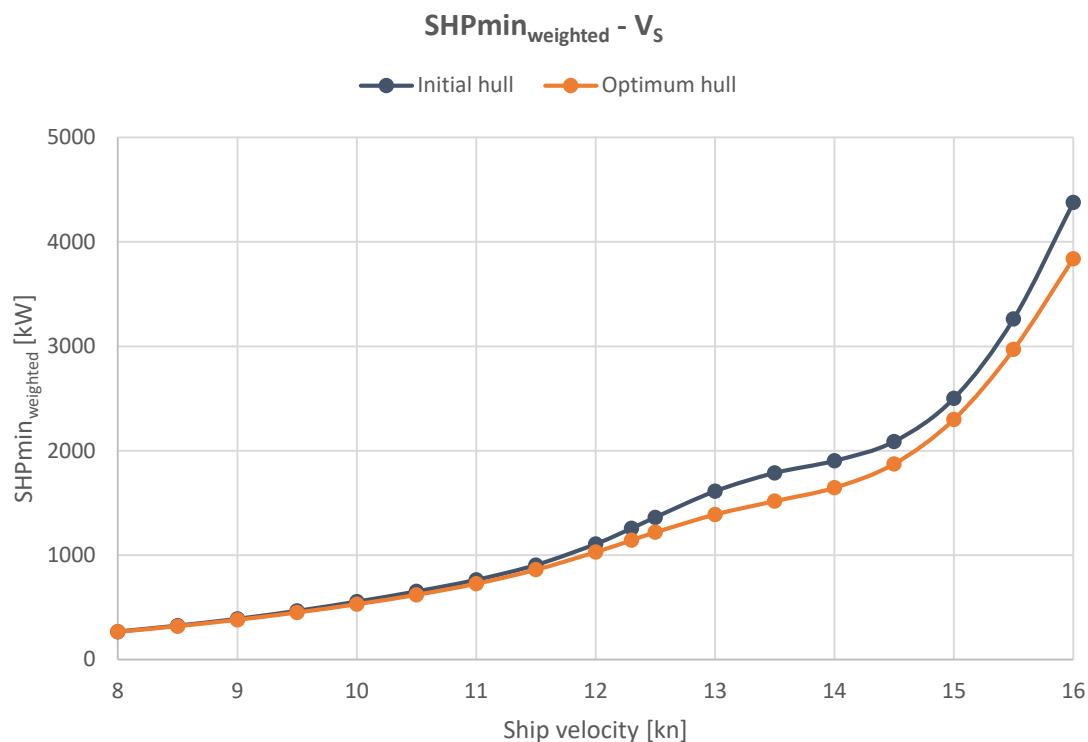
Σχήμα 60: Συντελεστής πρόωσης καθαρής γάστρας συναρτήσει του αριθμού Froude



Σχήμα 61: Συντελεστής πρόωσης καθαρής γάστρας συναρτήσει της ταχύτητας πλεύσης



Σχήμα 62: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει του αριθμού Froude



Σχήμα 63: Σταθμισμένη ως προς τις καταστάσεις καθαρής και ρυπασμένης γάστρας ισχύς πρόωσης συναρτήσει της ταχύτητας πλεύσης

Στα σχήματα 56 και 57 παρατηρούνται δύο τοπικά ακρότατα σε αμφότερες τις καμπύλες των συντελεστών κυματισμού της αρχικής και της βέλτιστης καθαρής γάστρας συναρτήσει του αριθμού Froude και της ταχύτητας πλεύσης αντίστοιχα. Όσον αφορά στην αρχική γάστρα, παρατηρείται ένα τοπικό μέγιστο σε Froude περίπου 0.232, με αντίστοιχη ταχύτητα πλεύσης περί τους 13.1 κόμβους, με συντελεστή κυματισμού περίπου $1.3 \cdot 10^{-3}$ και ένα τοπικό ελάχιστο σε Froude περίπου 0.255, με αντίστοιχη ταχύτητα πλεύσης περί τους 14.5 κόμβους, με συντελεστή κυματισμού περίπου $1.1 \cdot 10^{-3}$. Όσον αφορά στη βέλτιστη γάστρα, παρατηρείται ένα τοπικό μέγιστο σε Froude περίπου 0.231, με αντίστοιχη ταχύτητα πλεύσης περί τους 13.0 κόμβους, με συντελεστή κυματισμού περίπου $9.5 \cdot 10^{-4}$ και ένα τοπικό ελάχιστο σε Froude περίπου 0.250, με αντίστοιχη ταχύτητα πλεύσης περί τους 14.0 κόμβους, με συντελεστή κυματισμού περίπου $8.0 \cdot 10^{-4}$.

Επιπλέον, παρατηρείται στα ίδια σχήματα και μία περιοχή απότομης αύξησης του συντελεστή κυματισμού και για τις δύο γάστρες. Όσον αφορά στην αρχική γάστρα, η περιοχή αυτή εντοπίζεται από Froude περίπου 0.267 και άνω, με αντίστοιχες ταχύτητες πλεύσης περί τους 15.0 κόμβους και άνω, ενώ όσον αφορά στη βέλτιστη γάστρα, η περιοχή αυτή εντοπίζεται από Froude περίπου 0.258 και άνω, με αντίστοιχες ταχύτητες πλεύσης περί τους 14.5 κόμβους και άνω.

Στα σχήματα 58 και 59 παρατηρείται ότι οι καμπύλες της ισχύος ρυμούλκησης της αρχικής και της βέλτιστης καθαρής γάστρας σχεδόν συμπίπτουν για Froude από περίπου 0.142 έως 0.214 και ταχύτητες από 8.0 έως 12.0 κόμβους αντίστοιχα, ενώ από εκεί και πάνω παρατηρείται μία ελαφρά κατακόρυφη απόκλιση, η οποία μεγιστοποιείται για αριθμό Froude 0.285 και ταχύτητα πλεύσης 16 κόμβων.

Στα σχήματα 60 και 61 παρατηρείται ότι οι καμπύλες του συντελεστή πρόωσης της αρχικής και της βέλτιστης καθαρής γάστρας παρουσιάζουν μία περίπου σταθερή διαφορά μεταξύ τους για δεδομένο αριθμό Froude και ταχύτητα πλεύσης αντίστοιχα, η οποία μεγιστοποιείται για Froude περί το 0.23 και αντίστοιχη ταχύτητα περί τους 13.0 κόμβους. Παράλληλα παρατηρείται μία μεγάλη διαμήκης απόκλιση μεταξύ των δύο καμπυλών σε μία περιοχή τιμών του συντελεστή πρόωσης από περίπου 0.684 έως περίπου 0.648. Η μεγαλύτερη διαμήκης απόκλιση εντοπίζεται για το βέλτιστο συντελεστή πρόωσης της αρχικής καθαρής γάστρας, που είναι 0.684 και αντιστοιχεί σε αριθμό Froude περίπου 0.142 και ταχύτητα πλεύσης 8.0 κόμβων αντίστοιχα. Αυτός ο συντελεστής πρόωσης αντιστοιχεί στη βέλτιστη καθαρή γάστρα σε δύο ταχύτητες πλεύσης: μία περί τους 13.0 κόμβους -με αντίστοιχο αριθμό Froude περίπου 0.231- και άλλη μία περί τους 14.7 κόμβους, με αντίστοιχο αριθμό Froude περίπου 0.262.

Στα σχήματα 62 και 63 παρατηρείται ότι οι καμπύλες της σταθμισμένης ισχύος πρόωσης της αρχικής και της βέλτιστης γάστρας σχεδόν συμπίπτουν για Froude από περίπου 0.142 έως 0.205 και ταχύτητες από 8.0 έως 11.5 κόμβους αντίστοιχα, ενώ από εκεί και πάνω παρατηρείται μία κατακόρυφη απόκλιση, η οποία μεγιστοποιείται για αριθμό Froude 0.285 και ταχύτητα πλεύσης 16 κόμβων. Μία τοπική μεγιστοποίηση της κατακόρυφης απόκλισης εντοπίζεται σε αριθμό Froude περίπου 0.240 και ταχύτητας πλεύσης περίπου 13.5 κόμβων αντίστοιχα, όπου η ισχύς πρόωσης της αρχικής γάστρας είναι περί τα 1790 kW, ενώ της βέλτιστης περί τα 1520 kW.

Επιπλέον, παρατηρείται στα ίδια σχήματα και μία περιοχή απότομης αύξησης της ισχύος πρόωσης και για τις δύο γάστρες. Τόσο για την αρχική όσο και για τη βέλτιστη γάστρα η περιοχή αυτή εντοπίζεται από Froude περίπου 0.258 και άνω, με αντίστοιχες ταχύτητες πλεύσης περί τους 14.5 κόμβους και άνω.

Όσον αφορά στα δύο τελευταία διαγράμματα, μπορεί επίσης να εξαχθεί σημαντική πληροφορία και με βάση τη διαμήκη απόκλιση των καμπυλών της σταθμισμένης ισχύος πρόωσης της αρχικής και της βέλτιστης γάστρας. Εκτενέστερα, παρατηρείται μία μέγιστη οριζόντια απόκλιση των διαγραμμάτων για μία ισχύ πρόωσης περί τα 1700 kW, για την οποία η αρχική γάστρα επιτυγχάνει μία ταχύτητα πλεύσης περί τους 13.2 κόμβους και Froude περίπου 0.235 αντίστοιχα, ενώ η βέλτιστη γάστρα επιτυγχάνει μία ταχύτητα πλεύσης περί τους 14.1 κόμβους και Froude περίπου 0.252 αντίστοιχα. Το αποτέλεσμα αυτό υποδεικνύει ότι μπορεί -υπό προϋποθέσεις- για την ίδια ισχύ πρόωσης να επιτευχθεί σημαντική αύξηση της ταχύτητας πλεύσης μεταξύ της αρχικής και της βέλτιστης γάστρας.

Συμπερασματικά, διαπιστώνεται ότι η βέλτιστη -στην ταχύτητα υπηρεσίας των 12.3 κόμβων- γάστρα παρουσιάζει καλύτερες επιδόσεις από την αρχική γάστρα και σε ταχύτητες πλεύσεις διαφορετικές των 12.3 κόμβων. Ειδικότερα, με εξαίρεση την περιοχή ταχυτήτων πλεύσης των 8-10 κόμβων όπου οι επιδόσεις των δύο γαστρών είναι -εξαιρουμένου του συντελεστή πρόωσης- σχεδόν ίδιες, από τους 10 έως τους 16 κόμβους η βέλτιστη γάστρα παρουσιάζει καλύτερες επιδόσεις αντίστασης και πρόωσης.

6 Σύνοψη και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

6.1 Σύνοψη

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε μία διαδικασία μονοκριτηριακής σχεδιαστικής βελτιστοποίησης της γάστρας ενός δίγαστρου επιβατηγού-οχηματαγωγού πλοίου ανοιχτού τύπου, με αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος την ισχύ πρόωσης. Σε πρώτη φάση δημιουργήθηκε το επιθυμητό παραμετρικό μοντέλο της επιφάνειας της ημιγάστρας στο CAESES. Στη συνέχεια ως πρώτο στάδιο για τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης πραγματοποιήθηκε η διασύνδεση του CAESES με δύο προγράμματα.

Το πρώτο ήταν το Shipflow, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του συντελεστή κυματισμού, με σκοπό να καταστεί εφικτός ο υπολογισμός της ολικής αντίστασης. Με γνωστή την ολική αντίσταση έγινε διασύνδεση και του GRID, με σκοπό τη διενέργεια μίας δεύτερης, εσωτερικής, βελτιστοποίησης για τον προσδιορισμό του βέλτιστου λόγου βήματος της έλικας που ελαχιστοποιούσε την απαιτούμενη ισχύ πρόωσης για κάθε παραλλαγή γάστρας.

Επόμενο βήμα ήταν η διενέργεια της αρχικής εξερεύνησης του χώρου των σχεδιαστικών λύσεων, με χρήση του αλγόριθμου Sobol, καθώς και η διενέργεια της σχεδιαστικής βελτιστοποίησης, όπου έγινε χρήση του γενετικού αλγορίθμου NSGA-II. Τέλος, προσδιορίστηκαν οι μεταβλητές σχεδίασης που θα ήταν ενεργές κατά τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, ενώ επίσης προσδιορίστηκαν οι περιορισμοί του προβλήματος και ορίστηκε η αντικειμενική συνάρτησή του.

Η συνολική διαδικασία της βελτιστοποίησης που διενεργήθηκε παρείχε ένα σύνολο 1040 παραλλαγών της μορφής της γάστρας, όπου οι 400 πρώτες παραλλαγές προέκυψαν κατά το τρέξιμο του αλγορίθμου Sobol και οι επόμενες 640 κατά το τρέξιμο του αλγορίθμου NSGA-II. Ως βέλτιστη γάστρα επελέγη εκείνη της οποίας η αντικειμενική συνάρτηση είχε την χαμηλότερη τιμή, αφού προηγήθηκε έλεγχος της ομαλότητας της επιφάνειάς της.

Από την εκπόνηση της παρούσας εργασίας το συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι η χρήση επιλυτών δυναμικής ροής παρέχει τη δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων σε σύντομο χρονικό διάστημα, γεγονός που καθιστά εφικτή την κατάστρωση και διεκπεραίωση μιας διαδικασίας αυτοματοποιημένης σχεδιαστικής βελτιστοποίησης με μεγάλο αριθμό παραλλαγών γαστρών. Σε κάθε περίπτωση, μετά το πέρας μιας τέτοιας μελέτης, ο μελετητής θα πρέπει να ελέγχει τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις υπολογιστικές διαδικασίες ως προς την εγκυρότητά τους μέσω της διενέργειας πειραμάτων σε κλίμακα μοντέλου σε πειραματική δεξαμενή.

6.2 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

Η χρήση επιλυτή δυναμικής ροής για τον υπολογισμό της αντίστασης κυματισμού και κατ' επέκταση της ολικής αντίστασης αποτέλεσε ένα χρήσιμο εργαλείο για την περάτωση μίας αυτοματοποιημένης διαδικασίας σχεδιαστικής βελτιστοποίησης ως προς την ισχύ πρόωσης του υπό μελέτη δίγαστρου επιβατηγού-οχηματαγωγού πλοίου ανοιχτού τύπου. Με αφορμή τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας παρατίθενται οι κάτωθι προτάσεις για μελέτη σε επόμενο στάδιο:

- Διενέργεια αυτοματοποιημένης βελτιστοποίησης με χρήση πιο εξελιγμένων CFD επιλυτών για ακόμα ακριβέστερα αποτελέσματα, με ή χωρίς τη χρήση των αποτελεσμάτων δυναμικής ροής της παρούσας διπλωματικής εργασίας.
- Προσθήκη βολβού στο παρόν παραμετρικό μοντέλο και πραγματοποίηση νέας βελτιστοποίησης.
- Με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία για την έλικα κάθε παραλλαγμένης μορφής γάστρας, διενέργεια ανάλυσης ομόρου (wake analysis) και ανάλυσης βέλτιστης σχεδίασης έλικας.
- Διερεύνηση των ελικτικών ικανοτήτων του πλοίου, μέσω δημιουργίας παραμετρικού μοντέλου του πηδαλίου.
- Διερεύνηση της δυνατότητας διαμήκους μετατόπισης της μίας ημιγάστρας (staggered catamaran) με στόχο την αύξηση της ταχύτητας υπηρεσίας για την ίδια ισχύ πρόωσης ή τη μείωση της ισχύος πρόωσης για την ίδια ταχύτητα υπηρεσίας.
- Διερεύνηση της επίδρασης του πλάτους -ολικού ή/και ημιγαστρών- και του βυθίσματος στο βάρος της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου μέσω της διενέργειας νέας βελτιστοποίησης, λαμβάνοντας υπ' όψιν το μεταβλητό εκτόπισμα.
- Έλεγχος άθικτης ευστάθειας και ευστάθειας μετά από βλάβη για τη βέλτιστη γάστρα.
- Εκ νέου τρέξιμο των παραλλαγών των γαστρών για την περίπτωση της απομονωμένης ημιγάστρας (isolated demihull) με σκοπό την εκτίμηση των συντελεστών συνεκτικής παρεμβολής β και κυματικής παρεμβολής τ.

Βιβλιογραφία

1. Azmin, F. M., & Stobart, R. (2015). *Benefiting from Sobol Sequences Experiment Design Type for Model-based Calibration*.
2. Baar, J., & Price, W. G. (1988). Developments in the Calculation of the Wavemaking Resistance of Ships. *Proceedings of the Royal Society of London, Vol. 416*, σσ. 115-147.
3. Benaouali, A., & Kachel, S. (2017). An Automated CAD/CAE Integration System for the Parametric Design OF Aircraft Wing Structures. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 447-459.
4. Brenner, M., Harries, S., Kroeger, J., & Rung, T. (2015). Parametric-adjoint approach for the efficient optimization of flow-exposed geometries. *VI International Conference on Computational Methods in Marine Engineering*.
5. Brent, R. P. (1973). *Algorithms for Minimization Without Derivatives*. New York: Prentice-Hall.
6. *Brilliant*. (2021, April). Ανάκτηση από Hessian Matrix: <https://brilliant.org/wiki/hessian-matrix/>
7. Censor, Y. (1977). Pareto Optimality in Multiobjective Problems. *Applied Mathematics and Optimization* (σσ. 41-59). Springer-Verlag New York Inc.
8. Costabel, M. (1987). *Principles of Boundary Element Methods*. Technische Hochschule Darmstadt.
9. Couser, P., Harries, S., & Tillig, F. (2011). Numerical Hull Series for Calm Water and Sea-Keeping. *10th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries*. Berlin.
10. Dawson, C. W. (1977). *A Practical Computer Method for Solving Ship-Wave Problems*.
11. Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002). A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 6*.
12. Flowtech International AB. (n.d.). Shipflow 6.4 Users Manual. Gothenburg, Sweden.
13. Friendship Systems. (2012). *Friendship Framework User's Guide*.
14. Friendship Systems. (n.d.). CAESES documentation browser.
15. Gaafary, M. M., El-Kilani, H. S., & Moustafa, M. M. (2011, March 5). Optimum design of B-series marine propellers. *Alexandria Engineering Journal*, 13-18.
16. Han, S., Lee, Y.-S., & Choi, Y. (2012). Hydrodynamic hull form optimization using parametric models. *Springer International Publishing*.
17. Harries, S., Abt, C., & Brenner, M. (2019). Upfront CAD - Parametric Modeling Techniques for Shape Optimization. *Springer International Publishing*.
18. Heimann, J. (2005). *CFD Based Optimization of the Wave-Making Characteristics of Ship Hulls*. Berlin.

19. Hess, J. L., & Smith, A. (1962). *Calculation of Non-Lifting Potential Flow About Arbitrary Three-Dimensional Bodies*.
20. Hess, J. L., & Smith, A. (1967). *Calculation of Potential Flow about Arbitrary Bodies*. Long Beach, California.
21. Holland, J. H. (1992, July). Genetic Algorithms. *Scientific American*, Vol. 267(1), σσ. 66-73.
22. Holtrop, J., & Mennen, G. G. (1982). An Approximate Power Prediction Method. *International Shipbuilding Progress*, (σσ. 166-170).
23. Insel, M., & Molland, A. F. (1991). *An investigation into the resistance components of high speed displacement catamarans*. Royal Institution of Naval Architects.
24. ITTC. (1957). Concluding Technical Session. *8th International Towing Tank Conference*, (σσ. 323-332). Madrid.
25. ITTC. (2008). The Resistance Committee. *Proceedings of 25th ITTC, Vol. III*, σσ. 671-686. Fukuoka.
26. Janson, C.-E. (1997). *Potential Flow Panel Methods for the Calculation of Free Surface Flows with Lift*. Chalmers University of Technology, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Gothenburg.
27. Janson, C.-E., Chalmers University of Technology, Spinney, D., & Rolls-Royce UK. (2004). A Comparison of Four Wave Cut Analysis Methods for Wave Resistance Prediction. *Ship Technology Research*, 173-184.
28. Koutroukis, G. L. (2012). *Parametric Design and Multiobjective Optimization-Study of an Ellipsoidal Containership*. Athens.
29. Larsson, L. (1993). Resistance and flow predictions using SHIPFLOW code. *19th WEGEMNT School*. Nantes, France.
30. Lloyd's Register. (2020). *Rules and Regulations for the Classification of Ships*.
31. MAN Energy Solutions. (2018, October). Basic principles of ship propulsion. Denmark.
32. Mason, A., Couser, P., Mason, G., Smith, C. R., & von Kinsky, B. R. (2005). Optimisation of Vessel Resistance using Genetic Algorithms and Artificial Neural Networks.
33. Mendoza, F., Bernal-Agustín, J. L., & Domínguez-Navarro, J. A. (2006). NSGA and SPEA Applied to Multiobjective Design of Power Distribution Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 21.
34. Molland, A. F., Turnock, S. R., & Hudson, D. A. (2017). *Ship Resistance and Propulsion : Practical Estimation of Ship Propulsive Power* (2nd εκδ.). Cambridge University Press.
35. Noblesse, F. (1981, October). Alternative integral representations for the Green function of the theory of ship wave resistance. *Journal of Engineering Mathematics*, Vol. 15.
36. Nowacki, H. (2009). Five decades of Computer-Aided Design. *Elsevier*, 956-969.
37. Papanikolaou, A. (2009). Holistic ship design optimization. *Elsevier*(42), 1028-1044.
38. Parsons, M. G., & Thurnau, A. F. (2009). Applications of Optimization in Early Stage Ship Design. *1er Congreso Internacional de Diseño e Ingeniería Naval*.

39. Ramsani, Z. B., Tam, I. C., & Dev, A. (2016). Effect of Hull Form and its Associated Parameters on the Resistance of a Catamaran. *Proceedings of the 6th International Conference on Operation and Technology of Offshore Support Vessels*.
40. Sahoo, P., & Salas, M. A. (2007). Practical Evaluation of Resistance of High-Speed Catamaran Hull Forms-Part I. *Ships and Offshore Structures*, 307-324.
41. Schreier, P. (2009, December 15). *Closing the CAD/CAE gap*. Ανάκτηση από Scientific Computing World: scientific-computing.com/issue/december-2009january-2010
42. Stapersma, D., & Woud, H. K. (2005). Matching propulsion engine with propulsor. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 25-32.
43. Sun, W., & Yuan, Y.-X. (2006). *Optimization Theory and Methods - Non Linear Programming*. New York: Springer Science+Business Media, LLC.
44. Tahara, Y., Peri, D., Campana, E. F., & Stern, F. (2011). Single- and multiobjective design optimization of a fast multihull ship: numerical and experimental results. *Springer International Publishing, Vol. 16*, 412-433.
45. *Wikipedia*. (2021). Ανάκτηση από Brent's method: https://en.wikipedia.org/wiki/Brent%27s_method
46. Αθανασούλης, Γ. Α., & Μπελιμπασάκης, Κ. Α. (2012). *Δυναμική Πλοίου*.
47. Κατσιαδέλης, Ι. Θ. (2012). *Συνοριακά Στοιχεία - Θεωρία και Εφαρμογές*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία.
48. Κώστας, Κ. Β. (2014). *3D Σχεδίαση & Υπολογισμοί με το Rhino 3d*. Εκδόσεις DaVinci.
49. Πολίτης, Γ. Κ. (2018). *Αντίσταση και πρόωση πλοίου* (5η εκδ.). Αθήνα.
50. Τσιούμας, Π. (2018). Μελέτη και σχεδίαση δίγαστρου επιβατηγού οχηματαγωγού πλοίου ανοιχτού τύπου.

Παραρτήματα

A. Αλγόριθμοι βασικών feature definitions που χρησιμοποιήθηκαν

Οι αλγόριθμοι που εκτίθενται παρακάτω αφορούν σε feature definitions του τελικού αρχείου του παραμετρικού μοντέλου της ημιγάστρας και είναι γραμμένα στην ειδικά διαμορφωμένη γλώσσα προγραμματισμού του CAESSES, την Feature Programming Language.

A.1 Αλγόριθμος feature definition εύρεσης βυθίσματος υδροστατικής ισορροπίας ισοβύθισης κατάστασης

```
1 // Execute calcDisplacement from OffsetGroupAssembly
2
3 designvariable Draft_fromVol()
4 Draft_fromVol.setLowerBound(DraftMin)
5 Draft_fromVol.setUpperBound(DraftMax)
6 Draft_fromVol.setDefaultValue(Design_Draft)
7
8 parameter errorVol((TargetVol-
HullBrep.getDisplacement(Draft_fromVol,0,0,true).at(0).castTo(FDouble))^2)
9 //parameter errorVol((TargetVol-
Hull.getDisplacement(Draft_fromVol,0,0,true).at(0).castTo(FDouble))^2)
10 //parameter errorVol((TargetVol-
offsets.calcDisplacement(Draft_fromVol,0,true,false).at(0).castTo(FDouble))^2)
11
12 de_brent brent()
13 brent.setResultsCSV(false)
14 brent.setDesignVariables([[Draft_fromVol, DraftMin, DraftMax, true]])
15 brent.setEvaluations([[errorVol, true]])
16 brent.setAsVariantCreator(false)
17 brent.setKeepUpToDate(true)
18
19 Parameter evalVolume(HullBrep.getDisplacement(Draft_fromVol,0,0,true).at(0).castTo(FDouble))
```

A.2 Αλγόριθμος feature definition δημιουργίας τυχαίας αφηρημένης εγκάρσιας τομής της γάστρας

```
1 point onKeel (xPos, 0, zKeel)
2 point onDwl (xPos, yDwl, draft)
3 point onDeck (xPos, yDeck, ZDeck)
4
5 fsplinecurve bilge (onKeel, onDwl) {
6     .setActivePlaneYZ ()
7     .setStartTan (0)
8     .setEndTan (tanDwl)
9     .setAreaAxis (2)
10    .setAreaValue (area)
11 }
12
13 fsplinecurve side (onDwl, onDeck) {
14     .setActivePlaneYZ ()
15     .setStartTan (bilge.getTan (1, 0))
16 }
17
18 polycurve section ([bilge, side])
```

A.3 Αλγόριθμος feature definition εύρεσης της μέγιστης δυνατής διαμέτρου της έλικας και των απαιτούμενων αποστάσεων της από το πηδάλιο, τη γάστρα και το βασικό επίπεδο αναφοράς

```
1 // Propeller
2 double Diameter (2.00)
3 double a (0.1*Diameter)
4 double d (0.03*Diameter)
5
6 while (AND(Diameter+d+a<=Sternframe_height_p-0.0113,Diameter<=min(0.7*T_FLD-0.01,T_BA_prop-d-0.31)))
7     Diameter = Diameter + 0.01
8     a = 0.1*Diameter
9     d = 0.03*Diameter
10 endwhile
11 double b (0.15*Diameter)
12 double c (0.12*Diameter)
13
14 // Rudder
15 double A_R(Lbp*T_FLD/45) // Enhanced maneuverability
16
17 double span(Sternframe_height_r-2*d)
18 double chord(A_R/Span) // Rectangular rudder profile assumption
19 double t_R (0.15*chord) // NACA 0015
20
21 if (c < t_R)
22     c = t_R
23 endif
```

A.4 Αλγόριθμος feature definition εύρεσης των συντελεστών αλληλεπίδρασης έλικας-γάστρας

```
1 // Real wake percentage w
2
3 double w_Kruger(0.75*Cb-0.24)
4 double w_Heckscher(0.7*Cp-0.18)
5 double w_Troost(0.25+2.5*(Cb-0.6)^2)
6 double w_mean((w_Kruger+w_Heckscher+w_Troost)/3)
7
8 // Thrust deduction percentage t
9
10 double t_Heckscher(0.5*Cp-0.12)
11 double t_Danckwardt(0.5*Cb-0.15)
12 double t_SSPA(w_mean*(1.57-2.3*(Cb/Cwp)+1.5*Cb))
13 double t_mean((t_Heckscher+t_Danckwardt+t_SSPA)/3)
14
15 // Expanded area ratio Ae/Ao - Wagenigen B-screw series
16
17 double Thrust(Rt_fouled/(1-t_mean))
18 double p0(101.3+1.0259*9.81*Shaft_depth) // in kN/m^2
19 double pv(173.35/9.81) // in kN/m^2
20 integer z(5)
21 double k(0.2)
22 double Ae_Ao_min((1.3+0.3*z)*Thrust/((p0-pv)*D_prop^2)+k)
23 double Ae_Ao(0.55) // Minimum acceptable value of EAR to avoid cavitation
24
25 while (Ae_Ao < Ae_Ao_min)
26     Ae_Ao = Ae_Ao + 0.01
27 endwhile
28
29 // Efficiency rate of relative revolution nr
30
31 double nr(0.9922-0.05908*Ae_Ao+0.07424*(Cp-0.0225*LCB_midship))
```


A.5 Αλγόριθμος feature definition εύρεσης των SHP_{min} , $P.C._{max}$ και των n και $\frac{P}{D}$ που αντιστοιχούν σε αυτές

```

1  fseries P_D ()
2  P_D.addInterval(0.6,1.4,9)
3
4  fseries PC ()
5  PC.addValue([PC_06,PC_07,PC_08,PC_09,PC_10,PC_11,PC_12,PC_13,PC_14])
6
7  fseries SHP ()
8  SHP.addValue([SHP_06,SHP_07,SHP_08,SHP_09,SHP_10,SHP_11,SHP_12,SHP_13,SHP_14])
9
10 fseries RPM ()
11 RPM.addValue([RPM_06,RPM_07,RPM_08,RPM_09,RPM_10,RPM_11,RPM_12,RPM_13,RPM_14])
12
13 double min(0)
14 integer min_pos(0)
15 integer ii(0)
16
17 while (ii<9)
18   if (ii==0)
19     min = SHP.at(ii)
20   else
21     if (SHP.at(ii) < min)
22       min = SHP.at(ii)
23       min_pos = ii
24     endif
25   endif
26   ii = ii+1
27 endwhile
28
29 double RPM_min_pos(RPM.at(min_pos))
30 double P_D_min_pos(P_D.at(min_pos))
31 double SHP_min(SHP.at(min_pos))
32 double PC_max(PC.at(min_pos))

```

A.6 Αλγόριθμος feature definition εύρεσης της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος βελτιστοποίησης

```

1  double SHP_min_combined()
2  double PC_max_combined ()
3
4  double S1(0)
5  double S2(0)
6  double S3(0)
7  double S4(0)
8
9  if (min_pos_clean == min_pos_fouled)
10   SHP_min_combined = (SHP_clean.at(min_pos_clean)+SHP_fouled.at(min_pos_fouled))/2
11   PC_max_combined = (PC_clean.at(min_pos_clean)+PC_fouled.at(min_pos_fouled))/2
12 else
13   S1 = SHP_clean.at(min_pos_clean)+SHP_fouled.at(min_pos_clean)
14   S2 = SHP_clean.at(min_pos_fouled)+SHP_fouled.at(min_pos_fouled)
15   SHP_min_combined = min(S1,S2)/2
16
17   S3 = PC_clean.at(min_pos_clean)+PC_fouled.at(min_pos_clean)
18   S4 = PC_clean.at(min_pos_fouled)+PC_fouled.at(min_pos_fouled)
19   PC_max_combined = max(S3,S4)/2
20 endif

```

B. Αρχείο διαμόρφωσης Shipflow αρχικής γάστρας

```
xflow
  title( title = "ROPAX_CATAMARAN" )
  program( xmesh, xpan )
  vship( fn = 0.21854073 )
  hull( cata, xmman )
  offset( file = |16_Shipflow_connection|Offset_Hull.exportSHF("offset_hull"),
lpp = 85.44337095, zori = 3.63521678 )
end

xmesh
  body( grno = 2, offsetg = "Offset_Midbody_Rev", ytra = 8.15452584,
station = 37, point = 14, expanel = 10 )
  body( grno = 1, offsetg = "Offset_Stem_Rev", ytra = 8.15452584,
station = 14, point = 11, expanel = 4 )
  body( grno = 3, offsetg = "Offset_Stern_Rev", ytra = 8.15452584,
station = 25, point = 13, expanel = 8 )
  body( grno = 4, offsetg = "Offset_Stem_Rev", ytra = 8.15452584, ymir,
station = 14, point = 11, expanel = 4 )
  body( grno = 5, offsetg = "Offset_Midbody_Rev", ytra = 8.15452584, ymir,
station = 37, point = 14, expanel = 10 )
  body( grno = 6, offsetg = "Offset_Stern_Rev", ytra = 8.15452584, ymir,
station = 25, point = 13, expanel = 8 )
  free( grno = 7, point = 5, ibd4 = [4,5,6], y2side = 0, xups = -0.5,
xdow = 2.7, stau = 12, stam = 30, stad = 40 )
  free( grno = 8, point = 30, ibd2 = [1,2,3], y4side = -1, xups = -0.5,
xdow = 2.7, stau = 12, stam = 30, stad = 40 )
  transom( grno = 9, point = 4, ibd1 = [3,6], stad = 40 )
end

xpan
  control( free, nonlin, zraise = 0.2403948, zfact = 0.75 )
  iterati( maxit = 10 )
  parall( nthread = 2 )
end
```