



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Εργαστήριο Μηχανικής Ρευστών & Στροβιλομηχανών  
Διευθυντής: Καθηγητής Υάκινθος Κυριάκος

**Design and layout parametric optimization of a wingsail concept:  
the Aegean Marathon tanker case study**

**Παραμετρική βελτιστοποίηση του σχεδιασμού μίας διάταξης ιστίων:  
η περίπτωση του δεξαμενοπλοίου Aegean Marathon**

Επιβλέποντες:

**Capt. Μαθαίου Δημήτριος** | CEO των εταιριών Arcadia Shipmanagement Co Ltd  
& Aegean Bulk Inc Co | Πρόεδρος του Green Awards Foundation

**Prof. Υάκινθος Κυριάκος** | Κοσμήτορας Πολυτεχνικής Σχολής και Καθηγητής  
του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

**Dr Παναγιώτου Περικλής** | Ερευνητικό Προσωπικό του Αριστοτελείου Πανεπι-  
στημίου Θεσσαλονίκης

Όνομα:

**Μακράμ Θεόδωρος - Ευάγγελος** AEM: 6170

Θεσσαλονίκη, 2021

# Περιεχόμενα

Ονοματολογία .....	i
Κατάλογος Εικόνων .....	vi
Κατάλογος Διαγραμμάτων.....	viii
Κατάλογος Πινάκων .....	ix
Περίληψη .....	xi
Abstract .....	xii
Ευχαριστίες .....	xiii
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή .....	1
1.1 Παράγοντες για αξιοποίηση του ανέμου .....	1
1.2 Ιστορία .....	2
1.3 Σκοπός.....	7
1.4 Απαιτήσεις .....	7
Κεφάλαιο 2 Εργαλεία και Μέθοδοι .....	9
2.1 Κινήσεις .....	9
2.2 Εξισώσεις Κίνησης .....	10
2.3 Εξωτερικά φορτία .....	11
2.3.1 Υδροδυναμικά φορτία κύτους .....	12
2.3.2 Φορτία προπέλας .....	12
2.3.3 Φορτία πηδαλίου.....	13
2.3.4 Αεροδυναμικά φορτία wingsail .....	15
2.4 Εξισώσεις κίνησης σε ισορροπία κατά την διάρκεια πλεύσης και μέθοδος επίλυσης .....	18
2.5 Ευστάθεια .....	20
2.5.1 Εγκάρσια στατική ευστάθεια .....	20
2.6 Βελτιστοποίηση με την μέθοδο Taguchi .....	21
Κεφάλαιο 3 Case Study: Aegean Marathon .....	25
3.1 Κύτος .....	26
3.2 Πηδάλιο & Προπέλα.....	27
3.3 Wingsails.....	29
3.3.1 Λειτουργία .....	29

3.3.2 Θέση ιστίων και ευστάθεια πλοίου.....	29
3.3.3 Αεροδυναμικά χαρακτηριστικά.....	30
3.3.4 Εφαρμογή μεθόδου Taguchi.....	31
3.3.5 Αεροτομές.....	32
3.3.6 Υπεραντωτικές διατάξεις.....	34
3.3.7 Μοντέλα CAD.....	34
3.3.8 Βάρος.....	35
3.3.9 Προσομοιώσεις CFD.....	40
Κεφάλαιο 4 Αποτελέσματα.....	46
4.1 Διαπιστώσεις.....	46
4.2 Συντελεστής ώσης.....	49
4.3 Κέρδη.....	53
4.4 Στατιστικές Αναλύσεις.....	54
4.5 Αλληλεπιδράσεις.....	62
4.6 Βέλτιστη Διάταξη.....	64
4.7 Προσομοίωση ταξιδιού.....	66
Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα.....	68
Κεφάλαιο 6 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	69
Αναφορές.....	70

# Ονοματολογία

## Συντομογραφίες

AoA	Angle of Attack
AWA	Apparent Wind Angle
AWS	Apparent Wind Speed
B.L.	Ship's keel Base Line
CAD	Computer-Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
C.O.T.	Crude Oil Tanks
ECA	Emission Controlled Area
EEDI	Energy Efficiency Design Index
IMO	International Maritime Organization
L.C.B.	Longitudinal Center of Buoyancy
L.C.F.	Longitudinal Center of Flotation
L.C.G.	Longitudinal Center of Gravity
MAC	Mean Aerodynamic Chord
MARPOL	International Convention for the Protection of Pollution from Ships
M.C.R.	Maximum Continuous Rating of main engine
MEPC	Maritime Environmental Protection Committee
MMG	Mathematical Model for Maneuvering Ship Motion
OPEC	Organization of the Petroleum Exporting Countries
SEEMP	Ship Energy Efficiency Management Plan
SFOC	Specific Fuel Oil Consumption
SNR	Signal to Noise Ratio
TWA	True Wind Angle
TWS	True Wind Speed
V.C.G.	Vertical Center of Gravity
WAPS	Wind-Assisted Propulsion Systems

## Λατινικά σύμβολα

$A_L$	Lateral projected area of ship excluding projected area of sails ( $m^2$ )
$A_R$	Rudder Area ( $m^2$ )
$A_T$	Transverse projected area of ship excluding projected area of sails ( $m^2$ )
AR	Aspect Ratio of Wingsail
b	Wingsail span (m)
B	Breadth (m)
$C_B$	Block coefficient
$C_D$	Drag force coefficient
$C_L$	Lift force coefficient
$C_M$	Midship coefficient
$C_P$	Prismatic coefficient
$C_{root}$	Wingsail root chord (m)
$C_{tip}$	Wingsail tip chord (m)
$C_{WL}$	Waterline Area coefficient
d	Ship's draft (m)
$df_E$	Degrees of freedom of the error
$df_i$	Degrees of freedom of each design factor
$df_T$	Total degrees of freedom
D	Ship's depth (m)
$D_P$	Propeller diameter (m)
$f_A$	Rudder lift gradient coefficient
$F_D$	Drag force of wingsail (N)
$F_i$	F-ratio of each design factor
$F_L$	Lift force of wingsail (N)
Fr	Froude number
$F'_N$	Non-dimensional normal rudder force
g	Acceleration of gravity ( $m/s^2$ )

G	Center of Gravity
$h_R$	Rudder span (height) (m)
$I_{XX}, I_{ZZ}$	Heel and yaw related mass moments of inertia
J	Advance coefficient of propeller
k	Propeller and rudder wake-related coefficient
K	Heel moment acting on the ship (N·m)
$K_T(J)$	Advance coefficient dependent propeller thrust
$K'_H, K'_R, K'_W$	Non-dimensional contribution to heel moment regarding Hull, Rudder, Wing-sails
$K'_{\beta}, K'_{\phi}, \dots$	Hydrodynamic derivatives associated with $K'_H$ moment
L	Lift force generated by the wingsails
$L_{PP}, L_{OA}, L_{WL}$	Ship's length between perpendiculars, length overall and length of waterline
m	Ship's mass (kg)
M	Metacenter
$MS_E$	Mean squares of the error
$MS_i$	Mean squares of each design factor
M/S	Midship section
n	Propeller revolution (rpm)
N	Yaw moment acting on the ship (N·m)
$N'_H, N'_R, N'_W$	Non-dimensional contribution to yaw moment regarding Hull, Rudder, Wing-sails
$N'_{\beta}, N'_{\phi}, \dots$	Hydrodynamic derivatives associated with $N'_H$ moment
P	Propeller's pitch (m)
r	Yaw angular velocity (rad/s)
$R_0, R_1, R_2, R_3$	Coefficients of calm water resistance
s	Propeller related coefficient
S	Wingsail area (m <sup>2</sup> )
SS	Total sum of squares of the design factors
$SS_E$	Sum of squares of the error

$SS_i$	Sum of squares of each design factor
$t_p$	Thrust deduction fraction of propeller
$t_R$	Rudder additional drag coefficient
$u$	Longitudinal ship velocity at center of gravity (m/s)
$U$	Steady ship velocity (m/s)
$U'_R$	Non-dimensional effective speed of water flow over rudder
$v$	Lateral ship velocity at center of gravity (m/s)
$w_P$	Wake coefficient at propeller position in maneuvering motions
$w_{P0}$	Wake coefficient at propeller position in straight moving
$w_R, w_{R0}$	Rudder wake coefficients
$x_H$	Acting point of rudder interaction force
$x_R$	Longitudinal location of rudder (m)
$X$	Longitudinal acting on the ship (N)
$X'_H, X'_P, X'_R, X'_W$	Non-dimensional contribution to longitudinal force regarding Hull, Propeller, Rudder, Wingsails
$X'_{\beta\beta}, X'_{\beta\varphi}, \dots$	Hydrodynamic derivatives associated with $X'_H$ force
$X'_{0H}$	Non-dimensional calm water resistance
$Y$	Lateral force acting on the ship (N)
$Y'_H, Y'_P, Y'_R, Y'_W$	Non-dimensional contribution to lateral force regarding Hull, Propeller, Rudder, Wingsails
$Y'_{\beta}, Y'_{\varphi}, \dots$	Hydrodynamic derivatives associated with $Y'_H$ force
$z_R$	Vertical location of rudder (m)

### **Ελληνικά σύμβολα**

$\alpha_H$	Ratio of additional lateral force
$\alpha_R$	Effective inflow rudder angle ( $^\circ$ )
$\beta$	Drift (leeway) angle ( $^\circ$ )
$\gamma$	Effective rudder angle coefficient
$\delta$	Rudder angle ( $^\circ$ )

$\Delta$	Displacement of the ship (t)
$\varepsilon$	Ratio of wake fraction at propeller and rudder positions
$\eta_P$	Ratio of propeller diameter to rudder span (height)
$\lambda$	Wingsail taper ratio
$\Lambda$	Rudder aspect ratio
$\Lambda_{c/4}$	Quarter chord sweep of wingsail
$\rho, \rho_{\text{air}}$	Water and air density ( $\text{kg/m}^3$ )
$\varphi$	Ship's heel angle ( $^\circ$ )
$\psi$	Ship's heading angle relative to true wind ( $^\circ$ )
$\psi'$	Ship's heading angle relative to apparent wind ( $^\circ$ )



## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1. Το πλοίο 'Buckau', 1924.....	2
Εικόνα 1.2. Φορτηγό πλοίο της εταιρίας Vale με 5 Flettner Rotors.....	2
Εικόνα 1.3. Το yacht 'Maltese Falcon' εφοδιασμένο με 3 DynaRig.....	3
Εικόνα 1.4. Το πλοίο 'Alcyone' του Cousteau με 2 Turbosail.....	3
Εικόνα 1.5. Το bulk carrier 'Usuki Pioneer' με 2 wingsails, 1985.....	3
Εικόνα 1.6. Το tanker 'Shin Aitoku Maru' με 2 wingsails, 1980.....	4
Εικόνα 1.7. Το concept πλοίου Wind Challenger εφοδιασμένο με 9 τηλεσκοπικά ιστία πλήρως ανεπτυγμένα στη θάλασσα.....	4
Εικόνα 1.8. Το concept πλοίου Wind Challenger εφοδιασμένο με 9 τηλεσκοπικά ιστία πλήρως κλειστά στο λιμάνι.....	4
Εικόνα 1.9. Δεξαμενόπλοιο με 4 wingsails: Concept της εταιρίας Becker Marine Systems.....	5
Εικόνα 1.10. Εσωτερικά συστήματα ενός wingsail (πηγή: [4]).....	5
Εικόνα 1.11. Διαδικασία αναδίπλωσης wingsail της εταιρείας Bound4Blue (πηγή: [4]).....	6
Εικόνα 2.1. Βασικά στοιχεία ενός πλοίου με WAPS (πηγή: [9]).....	9
Εικόνα 2.2. Σύστημα συντεταμένων και ορισμός ταχυτήτων, δυνάμεων, ροπών και γωνιών (πηγή: [6]).....	11
Εικόνα 2.3. Τρίγωνο ταχυτήτων ανέμου (πηγή: [18]).....	16
Εικόνα 2.4. Δυνάμεις που ασκούνται στο wingsail όταν κινείται κόντρα στον άνεμο-upwind (αριστερά) και όταν πηγαίνει μαζί με αυτόν-downwind (δεξιά) (πηγή: [40]).....	17
Εικόνα 2.5. Σχέση μεταξύ της πορείας και της ώσης και πλάγιας δύναμης για ένα πλοίο με ιστία (πηγή: [6]).....	18
Εικόνα 2.6. Εγκάρσια στατική ευστάθεια (πηγή: [20]).....	20
Εικόνα 3.1. Πρόοψη του Aegean Marathon.....	25
Εικόνα 3.2. Κάτοψη του Aegean Marathon.....	25
Εικόνα 3.3. Τομή στο μέσο του Aegean Marathon.....	25
Εικόνα 3.4. Υδροδυναμικά φορτία κύτους.....	28
Εικόνα 3.5. Κάτοψη του πλοίου με τις περιοχές που μπορούν να τοποθετηθούν τα wingsail.....	29
Εικόνα 3.6. Κάτοψη του Aegean Marathon με τα κέντρα βάρους των δεξαμενών και το συνολικό κέντρο βάρους του.....	30
Εικόνα 3.7. Η αεροτομή Joukowski 12%.....	34

Εικόνα 3.8. Plain flap.....	34
Εικόνα 3.9. Πλάγια όψη του Configuration 7.....	37
Εικόνα 3.10. Ισομετρική προβολή του Configuration 7.....	37
Εικόνα 3.11. Διαφορές στις διαστάσεις (σε m) των Configuration 2 & 7.....	38
Εικόνα 3.12. Πρωτότυπο wingsail της εταιρείας TOKYO-Mitsui O.S.K., Ltd. (πηγή: [32]).....	39
Εικόνα 3.13. Απεικόνιση της ρίζας ενός ιστίου με 20 <sup>ο</sup> εκτροπή της επιφάνειας ελέγχου και διάκενο μεταξύ του κυρίου μέρους και του flap .....	42
Εικόνα 3.14. Η γεωμετρία φτερού που αναλύθηκε στις προσομοιώσεις χωρίς διάκενο και 20 <sup>ο</sup> εκτροπή του flap .....	43
Εικόνα 3.15. Το πλέγμα του Configuration 4.....	44
Εικόνα 3.16. Το πλέγμα του Configuration 8.....	44
Εικόνα 3.17. Το πλέγμα του Configuration 7.....	45
Εικόνα 4.1. Τοπικό σύστημα συντεταγμένων των Configuration 1, 6 & 8.....	47
Εικόνα 4.2. Τοπικό σύστημα συντεταγμένων των Configuration 2, 4 & 9.....	47
Εικόνα 4.3. Τοπικό σύστημα συντεταγμένων των Configuration 3, 5 & 7.....	48
Εικόνα 4.4. Σκιαγράφιση πίεσης της 8 <sup>ης</sup> διάταξης στην ρίζα της πτέρυγας σε συνθήκες αέρα 5 Beaufort και κατεύθυνση 45 <sup>ο</sup> .....	62
Εικόνα 4.5. Σκιαγράφιση πίεσης της 4 <sup>ης</sup> διάταξης στην ρίζα της πτέρυγας σε συνθήκες αέρα 5 Beaufort και κατεύθυνση 45 <sup>ο</sup> .....	63
Εικόνα 4.6. Σκιαγράφιση πίεσης της 5 <sup>ης</sup> διάταξης στην ρίζα της πτέρυγας σε συνθήκες αέρα 5 Beaufort και κατεύθυνση 45 <sup>ο</sup> .....	63
Εικόνα 4.7. Σκιαγράφιση πίεσης του μονού ιστίου της 5 <sup>ης</sup> διάταξης στην ρίζα της πτέρυγας σε συνθήκες αέρα 5 Beaufort και κατεύθυνση 45 <sup>ο</sup> .....	64
Εικόνα 4.8. Το Aegean Marathon με εγκατεστημένη την βέλτιστη διάταξη ιστίων.....	66
Εικόνα 4.9. Μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει του φορτίου του κινητήρα του πλοίου.....	67

## Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 4.1. Πολικό διάγραμμα του συντελεστή ώσης του Configuration 1 .....	49
Διάγραμμα 4.2. Πολικό διάγραμμα του συντελεστή ώσης του Configuration 2 .....	49
Διάγραμμα 4.3. Πολικό διάγραμμα του συντελεστή ώσης του Configuration 3 .....	50
Διάγραμμα 4.4. Πολικό διάγραμμα του συντελεστή ώσης του Configuration 4 .....	50
Διάγραμμα 4.5. Πολικό διάγραμμα του συντελεστή ώσης του Configuration 5 .....	51
Διάγραμμα 4.6. Πολικό διάγραμμα του συντελεστή ώσης του Configuration 6 .....	51
Διάγραμμα 4.7. Πολικό διάγραμμα του συντελεστή ώσης του Configuration 7 .....	52
Διάγραμμα 4.8. Πολικό διάγραμμα του συντελεστή ώσης του Configuration 8 .....	52
Διάγραμμα 4.9. Πολικό διάγραμμα του συντελεστή ώσης του Configuration 9 .....	53
Διάγραμμα 4.10. Συγκεντρωτικό διάγραμμα με την επίδραση των παραγόντων A, B & C στις παραμέτρους αξιολόγησης.....	57
Διάγραμμα 4.11. Επίδραση των παραγόντων A, B & C στον συντελεστή $C_X$ .....	58
Διάγραμμα 4.12. Επίδραση των παραγόντων A, B & C στον συντελεστή $C_Y$ .....	58
Διάγραμμα 4.13. Επίδραση των παραγόντων A, B & C στον συντελεστή $C_N$ .....	59
Διάγραμμα 4.14. Επίδραση των παραγόντων A, B & C στον συντελεστή $C_K$ .....	59
Διάγραμμα 4.15. Επίδραση των παραγόντων A, B & C στο βάρος.....	60
Διάγραμμα 4.16. Πολικό διάγραμμα του συντελεστή ώσης της βέλτιστης διάταξης ιστίων .....	65
Διάγραμμα 4.17. Πολικό διάγραμμα του κέρδους της βέλτιστης διάταξης .....	65

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1. Χαρακτηριστικά του δεξαμενοπλοίου Aegean Marathon της εταιρίας Arcadia Shipmanagment Co. Ltd. ....	7
Πίνακας 2.1. Σύγκριση μεταξύ πλήρης μελέτης και της μεθόδου Taguchi.....	21
Πίνακας 3.1. Κύρια χαρακτηριστικά του Aegean Marathon σε καταστάσεις φόρτωσης fully loaded και ballast.....	26
Πίνακας 3.2. Υδροδυναμικά παράγωγα και συντελεστές αδιατάραχτου νερού (πηγή: [6]) .....	27
Πίνακας 3.3. Χαρακτηριστικά rudder του Aegean Marathon .....	28
Πίνακας 3.4. Χαρακτηριστικά προπέλας του Aegean Marathon .....	28
Πίνακας 3.5. Παράμετροι και τα επίπεδα τους.....	31
Πίνακας 3.6. $L_9$ ορθογώνιος πίνακας.....	32
Πίνακας 3.7. Αριθμοί Reynolds για ταχύτητες ανέμου 2-5 Beaufort και κατευθύνσεις $30^\circ$ - $150^\circ$ 33	
Πίνακας 3.8. Χαρακτηριστικά σχεδιασμού των Configuration.....	35
Πίνακας 3.9. Βάρος των wingsail και μεταβολή του μετακεντρικού ύψους.....	36
Πίνακας 3.10. Συνολικές προσομοιώσεις για πλήρη ανάλυση.....	40
Πίνακας 3.11. Αριθμός προσομοιώσεων μετά από τις απλοποιήσεις .....	41
Πίνακας 3.12. Σχετικές ταχύτητες και γωνίες των προσομοιώσεων .....	41
Πίνακας 3.13. Αριθμός στοιχείων των πλεγμάτων των 9 διατάξεων .....	43
Πίνακας 4.1. Αεροδυναμικά φορτία εξαιτίας των wingsail (Configuration 2).....	46
Πίνακας 4.2. Μέσο και μέγιστο κέρδος κάθε διάταξης.....	54
Πίνακας 4.3. Αποτελέσματα ανάλυσης SNR για τις παραμέτρους αξιολόγησης $C_X$ , $C_Y$ και $C_N$ . 54	
Πίνακας 4.4. Αποτελέσματα ανάλυσης SNR για τις παραμέτρους αξιολόγησης $C_K$ και βάρος.. 55	
Πίνακας 4.5. Πίνακας απόκρισης της παραμέτρου $C_X$ .....	55
Πίνακας 4.6. Πίνακας απόκρισης της παραμέτρου $C_Y$ .....	55
Πίνακας 4.7. Πίνακας απόκρισης της παραμέτρου $C_N$ .....	56
Πίνακας 4.8. Πίνακας απόκρισης της παραμέτρου $C_K$ .....	56
Πίνακας 4.9. Πίνακας απόκρισης της παραμέτρου του βάρους .....	56
Πίνακας 4.10. Οι βέλτιστες τιμές των παραγόντων A, B, C για την βελτιστοποίηση των παραμέτρων αξιολόγησης.....	60
Πίνακας 4.11. Στατιστική ανάλυση ANOVA της παραμέτρου $C_X$ για τις τιμές SNR.....	61

Πίνακας 4.12. Στατιστική ανάλυση ANOVA της παραμέτρου $C_Y$ για τις τιμές SNR .....	61
Πίνακας 4.13. Στατιστική ανάλυση ANOVA της παραμέτρου $C_N$ για τις τιμές SNR .....	61
Πίνακας 4.14. Στατιστική ανάλυση ANOVA της παραμέτρου $C_K$ για τις τιμές SNR .....	61
Πίνακας 4.15. Στατιστική ανάλυση ANOVA της παραμέτρου του βάρους για τις τιμές SNR ...	62
Πίνακας 4.16. Ταχύτητα, κατεύθυνση και χρονική διάρκεια ανέμου σχετικά με το Aegean Marathon σε ταξίδι που πραγματοποίησε το 2020 .....	66

## Περίληψη

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη της βέλτιστης διάταξης ιστίων προς εγκατάσταση στο δεξαμενόπλοιο Aegean Marathon της εταιρίας Arcadia Shipmanagement Co Ltd. Ο απαραίτητος περιορισμός των εκλυόμενων αέριων ρύπων δίνει πρόσφορο έδαφος για την ανάπτυξη τεχνολογιών που αξιοποιούν αποδοτικά την αιολική ενέργεια. Σχεδιάζονται εννέα διατάξεις ιστίων σύμφωνα με την μέθοδο Taguchi με παράγοντες σχεδιασμού: το διάταμα, τον λόγο εγκλεισμού και τον αριθμό των ιστίων. Τα αεροδυναμικά τους χαρακτηριστικά αναλύονται με την μέθοδο της Υπολογιστής Ρευστοδυναμικής (CFD) και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ιστίων μελετώνται. Ως παράμετροι αξιολόγησης των διατάξεων επιλέγονται οι συντελεστές ώσης, πλάγιας δύναμης και ροπών ως προς τον διαμήκη και κάθετο άξονα του πλοίου καθώς και το βάρος τους. Εξάγονται οι συνδυασμοί που βελτιστοποιούν τις παραμέτρους αξιολόγησης και σχολιάζονται. Διεξάγεται μία Ανάλυση Διασποράς (ANOVA) για να κατανοηθούν και να αξιολογηθούν οι επιρροές των παραγόντων σχεδιασμού στις παραμέτρους αξιολόγησης. Επιλέγεται και αναλύεται η βέλτιστη διάταξη βάσει των παραδοχών που γίνονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα της. Τέλος, το πραγματικό κέρδος εφαρμογής των ιστίων καταδεικνύεται από την ανάλυση των δεδομένων ανέμου ενός ταξιδιού του Aegean Marathon. Τα αποτελέσματα της επικείμενης μελέτης είναι υποσχόμενα για τον ναυτιλιακό κλάδο και δείχνουν ότι η κατανάλωση καυσίμου μπορεί να μειωθεί σημαντικά.

## **Abstract**

This Master Thesis proposes the optimum configuration of wingsails to be installed on the deck of the Suezmax tanker ship Aegean Marathon owned and operated by Arcadia Shipmanagement Co Ltd. The increasing necessity of reducing the air pollution has provided fertile ground for the development of new, more efficient technologies that will utilize the wind energy. In total, nine configurations are designed, following the guidelines of the Taguchi method and the design factors are defined as: the aspect ratio, the taper ratio and the number of wingsails. The aerodynamic characteristics of each configuration are analyzed with the high-fidelity method of Computational Fluid Dynamics (CFD) and the interactions between the sails are appreciated. The performance parameters are selected as: the thrust force coefficient, the side force coefficient, the yaw and heel moments coefficients and the weight of each configuration. The combinations that optimize each performance parameter are extracted. An Analysis of Variance (ANOVA) is conducted to determine the contribution of the design factors to the performance criteria. The optimum combination is chosen, according to the assumptions and simplifications that have been made, and its results are evaluated. Finally, the actual benefit of the wingsails optimum configuration is computed according to the wind data obtained from an Aegean Marathon's route. The results of the current study are deemed promising for the maritime industry and indicate that the fuel consumption is significantly reduced.

## Ευχαριστίες

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Capt. Ματθαίου Δημήτριο, CEO των εταιριών Arcadia Shipmanagement Co Ltd & Aegean Bulk Co Inc, Πρόεδρο του Green Award Foundation, και συνεπιβλέπων της διπλωματικής μου εργασίας, που μου πρότεινε το θέμα και ήταν αρωγός καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης της μελέτης. Η εξειδίκευση στον ναυτιλιακό κλάδο και η παρακίνηση του, ήταν οι βασικοί παράγοντες για την επιτυχή ολοκλήρωση της διατριβής. Η συμβολή του Capt. Δημήτριου Ματθαίου ήταν πολύτιμη αφού έγινε προσπάθεια να ελαχιστοποιηθεί το κενό μεταξύ των θεωρητικών γνώσεων που παρέχουν τα ακαδημαϊκά μαθήματα και των εφαρμοζόμενων πρακτικών στην Ναυτιλιακή Βιομηχανία. Τον ευχαριστώ ειλικρινά που με εμπιστεύτηκε και μου έδωσε την ευκαιρία να συνεργαστούμε για ακόμη μία φορά (προηγούμενη μελέτη: *An analysis of the new IMO environmental regulation, Case Study: M/T Aegean Dream*).

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Διδάκτορα Παναγιώτου Περικλή που επέβλεψε την διπλωματική μου εργασία, με καθοδήγησε με τις χρήσιμες συμβουλές του και τον γενικότερο τρόπο σκέψης ενός Μηχανικού που προσεγγίζει ένα τέτοιο πολύπλοκο θέμα. Συν τους άλλους, μου έδωσε την ευκαιρία και φρόντισε για την παροχή των μέσων και πόρων για την επιτυχή εκπλήρωση της προκείμενης μελέτης.

Επιπροσθέτως οφείλω ένα ευχαριστώ και στους υποψήφιους διδάκτορες του Εργαστηρίου Μηχανικής Ρευστών & Στροβιλομηχανών, Δημόπουλο Θωμά και Μητρίδη Δημήτριο για την βοήθεια τους στις προσομοιώσεις και στην δημιουργία των απαραίτητων κατασκευαστικών σχεδίων.

Τέλος, το μεγαλύτερο ευχαριστώ το χρωστάω στους γονείς, τα αδέρφια και τους φίλους μου, και ειδικότερα στην μητέρα μου, για την αμέριστη και άνευ όρων ηθική και συναισθηματική υποστήριξη, υπομονή και αγάπη τους. Δεν θα βρισκόμουν εδώ χωρίς εσάς!



# Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Η πρόωση των εμπορικών πλοίων με την βοήθεια του ανέμου έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον του ναυτιλιακού κλάδου ως μία εναλλακτική βιώσιμη λύση των ορυκτών καυσίμων. Τα πλοία με ιστία παραγκωνίστηκαν από τις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα αφού οι τεχνολογίες του ατμού και των κινητήρων diesel ωρίμασαν και προσέφεραν αξιοπιστία. Ωστόσο, με την πρώτη κρίση του Οργανισμού των Χωρών Εξαγωγής Πετρελαίου (OPEC) το 1973, η παγκόσμια οικονομία και η ναυτιλία έπρεπε να επανεξετάσουν την πλήρη εξάρτησή τους από τα ορυκτά καύσιμα. Η επόμενη δεκαετία σηματοδεύτηκε με την αναγέννηση της ιδέας για πρόωση των εμπορικών πλοίων με τον άνεμο, με την Ιαπωνία να εφαρμόζει τέτοια συστήματα σε περίπου 20 πλοία. Η ελλιπής τεχνολογία, τα υλικά και η ελάττωση με την πάροδο του χρόνου της τιμής των ναυτιλιακών καυσίμων οδήγησε στην μη μαζική εφαρμογή τέτοιων συστημάτων αφού δεν ήταν οικονομικά βιώσιμα. Τη σήμερα, η λύση αυτή έχει αποκτήσει μεγάλο ενδιαφέρον με κίνητρο τον περιορισμό των επιπτώσεων στο περιβάλλον και στην υγεία των ανθρώπων.

## 1.1 Παράγοντες για αξιοποίηση του ανέμου

Περίπου το 80-90% των παγκόσμιων αγαθών κατά όγκο μεταφέρονται μέσω της θάλασσας, αντιπροσωπεύοντας το 3% του ετησίου αποτυπώματος διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) [1]. Σύμφωνα με την 4<sup>η</sup> έκθεση του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (International Maritime Organization – IMO), οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου των ναυτιλιακών δραστηριοτήτων αυξήθηκαν κατά 9.6% την περίοδο 2012-2018, ενώ εκτιμάται ότι μέχρι το 2050 τα επίπεδα θα έχουν αυξηθεί κατά 90-130% από εκείνα του 2008 [1]. Επιπλέον, η ναυτιλία είναι υπεύθυνη για το 13% των συνολικών εκπομπών θεικών οξειδίων και για το 15% των νιτρικών οξειδίων [1].

Ο κύριος στόχος του IMO είναι η μείωση κατά 50% του εκλυόμενου CO<sub>2</sub> μέχρι το έτος 2050 συνεπικουρώντας έτσι στον σκοπό της Συνθήκης του Παρισιού, δηλαδή στην αποφυγή αύξησης της θερμοκρασίας της ατμόσφαιρας πάνω από 2°C συγκριτικά με τα επίπεδα της προ-βιομηχανικής εποχής.

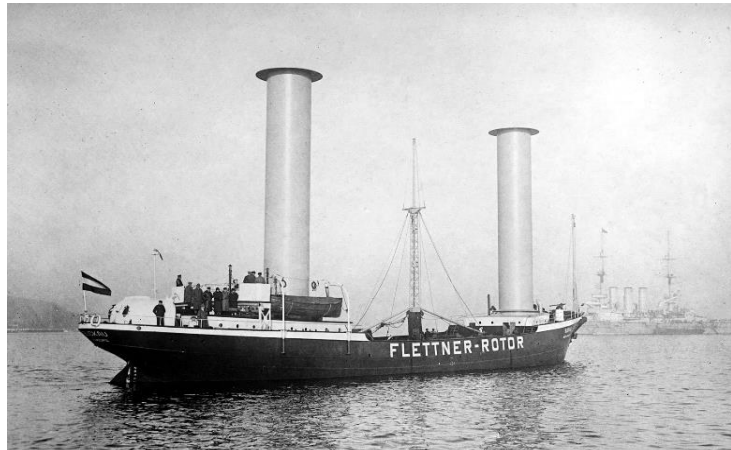
Ο IMO έχει θεσπίσει δύο σημαντικά μέτρα για τα πλοία: τον Energy Efficiency Design Index (EEDI) που επιβάλλει ολοένα και πιο αυστηρούς στόχους για τα νεότερα πλοία και το Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP) που στοχεύει στην βελτίωση της απόδοσης όλων των πλοίων. Επιπλέον, μέσω του ρυθμιστικού φορέα του για την πρόληψη της θαλάσσιας ρύπανσης (International Convention for the Protection of Pollution from Ships – MARPOL) έχουν δημιουργηθεί διάφορα Παραρτήματα για την προστασία του περιβάλλοντος. Το 1997, ο MARPOL εξέδωσε το Πρωτόκολλο του 1997 και θεσπίστηκε το νέο Παράρτημα VI: «Κανονισμοί για την πρόληψη της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα πλοία». Το Παράρτημα αυτό επικεντρώνεται στα οξείδια του θείου (SO<sub>x</sub>) και του αζώτου (NO<sub>x</sub>), ενώ εισάγει επίσης και την έννοια των περιοχών ελεγχόμενων εκπομπών (Emission Controlled Areas – ECA), στις οποίες η υιοθέτηση αυστηρότερων κανονισμών για τις εκπομπές αέρα κρίθηκε απαραίτητη λόγω του ευαίσθητου οικοσυστήματός τους. Αδιαμφισβήτητα μία από τις σκληρότερες τροποποιήσεις του προαναφερθέντος

Παραρτήματος, το επονομαζόμενο «Sulfur Cap», εισήγαγε ένα νέο παγκόσμιο όριο περιεκτικότητας σε θείο στα ναυτιλιακά καύσιμα και τέθηκε σε ισχύ την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2020 παράλληλα με το υπάρχον αυστηρό όριο εντός των καθορισμένων περιοχών ECA. Για να συμμορφωθεί η ναυτιλιακή βιομηχανία με το νέο αυτό μέτρο, κλήθηκε να χρησιμοποιήσει καθαρότερα και ακριβότερα καύσιμα ή να εγκαταστήσει μηχανήματα καθαρισμού των καυσαερίων πάνω στα πλοία (scrubbers), αυξάνοντας έτσι το λειτουργικό κόστος.

Παράλληλα με την μόλυνση του περιβάλλοντος, ένα ακόμη σημαντικό αίτιο που οδηγεί σε νέες νομοθεσίες είναι οι επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων, αφού εικάζεται πως η ναυτιλία οδηγεί σε 432 πρώιμους θανάτους σε 8 περιοχές της Μεσογείου κάθε έτος [2].

## 1.2 Ιστορία

Την δεκαετία του 1920, ο Γερμανός Atnon Flettner εφηύρε τα Flettner Rotors ή Rotor Sails, τα οποία μελετώνται και εφαρμόζονται μέχρι σήμερα. Τα ιστία αυτά είναι περιστρεφόμενοι κύλινδροι που τοποθετούνται πάνω στο πλοίο και αξιοποιώντας το Magnus effect παράγουν μια δύναμη που συνδράμει στην πρόωση του πλοίου. Εφαρμόστηκαν πρώτη φορά στο πλοίο 'Buckau' το 1924 ενώ η πιο πρόσφατη εφαρμογή τους είναι το 2021 σε φορτηγό πλοίο της εταιρίας Vale.



Εικόνα 1.1. Το πλοίο 'Buckau', 1924

Το DynaRig συλλήφθηκε σαν ιδέα την δεκαετία του 1960 από τον Wilhelm Prölb και εγκαταστάθηκε πρώτη φορά στο 'Maltese Falcon' το 2006. Αποτελείται από τρία αυτόνομα περιστρεφόμενα κατάρτια και παρομοιάζει τα τετράγωνα ιστία των πλοίων του 19<sup>ου</sup> αιώνα.

Το 1980 ο Γάλλος Jacques-Yves Cousteau εφηύρε τα Turbosail που σαν βάση είχαν τα Rotor Sails και τις πτέρυγες των αεροπλάνων. Δηλαδή, είναι πεπλατυσμένοι κύλινδροι, σαν παχιές συμμετρικές αεροτομές, με ένα κινητό πτερύγιο τύπου flap στην ακμή φυγής, ώστε να αυξηθεί η παραγόμενη δύναμη.



Εικόνα 1.2. Φορτηγό πλοίο της εταιρίας Vale με 5 Flettner Rotors



Εικόνα 1.3. Το yacht 'Maltese Falcon' εφοδιασμένο με 3 DynaRig

Τα τελευταία χρόνια, έχοντας πλήθος πληροφοριών από τον τομέα της αεροναυτικής, έχει αναπτυχθεί και το concept των Rigid Wingsails που εφεξής θα καλούνται απλώς wingsails. Συντίθενται κατά κύριο λόγο από λεπτές συμμετρικές αεροτομές, διαθέτουν flaps στην ακμή φυγής τους και είναι ανάλογα των πτερύγων των σύγχρονων αεροσκαφών. Έχουν επίσης την δυνατότητα να περιστρέφονται κατά 360°, αξιοποιώντας έτσι τους ανέμους σχεδόν σε όλο το εύρος κατευθύνσεων τους.



Εικόνα 1.4. Το πλοίο 'Alcyone' του Cousteau με 2 Turbosail

Τα πλοία 'Usuki Pioneer' και 'Shin Aitoku Maru' (βλέπε Εικόνα 1.5, Εικόνα 1.6) ήταν εξοπλισμένα με υφασμάτινα wingsails. Το πρώτο ήταν φορτηγό πλοίο με μήκος  $L_{PP} = 152m$  και συνολικό εμβαδόν ιστίων  $640m^2$ , ενώ το δεύτερο ήταν δεξαμενόπλοιο με  $L_{PP} = 66m$  και είχε  $194.4m^2$ .

Η σημαντικότερη μέχρι στιγμής μελέτη που έχει διεξαχθεί και υπάρχουν διαθέσιμα τα αποτελέσματα της είναι του πλοίου Wind Challenger. Το πανεπιστήμιο του Tokyo σε συνεργασία με ιδιωτικές ναυτιλιακές εταιρίες, ξεκίνησαν αυτό το project το 2009 και συνεχίζουν μέχρι σήμερα. Μελετούν την εγκατάσταση 9 τηλεσκοπικών wingsail ύψους 50m και πλάτους 20m, δηλαδή συνολικά  $9,000m^2$  επιφάνειας σε ένα φορτηγό πλοίο βάρους 180,000 τόνων (βλ. Εικόνα 1.7, Εικόνα 1.8).



Εικόνα 1.5. Το bulk carrier 'Usuki Pioneer' με 2 wingsails, 1985

Σύμφωνα με το τελευταίο δημοσιευμένο paper του project [3], κατέληξαν ότι από κατασκευαστικής άποψης είναι δυνατόν να τοποθετηθούν τα 9 αυτά wingsail με τις παραπάνω διαστάσεις. Επιπλέον, η μελέτη τους έδειξε πως για 12 m/s ταχύτητα ανέμου κάθετου στην πορεία του πλοίου και 14 knots ταχύτητα πλοίου, ο λόγος εξοικονόμησης ενέργειας ανέρχεται στο 80%,



Εικόνα 1.6. Το tanker 'Shin Aitoku Maru' με 2 wingsails, 1980

ενώ η προσομοίωση του ταξιδιού από Yokohama προς Seattle με πραγματικά δεδομένα ανέμου έδειξε ότι η μείωση στην κατανάλωση καυσίμου είναι της τάξης του 20–30%. Αξίζει να σημειωθεί πως το 2014 κατασκευάστηκε μοντέλο 1/2.5 ενός wingsail και δοκιμάστηκε στο έδαφος, ενώ συμφωνήθηκε να τοποθετηθούν 4 ιστία με τις προαναφερθέντες διαστάσεις σε φορτηγό πλοίο 84,000 τόνων.



Εικόνα 1.7. Το concept πλοίου Wind Challenger εφοδιασμένο με 9 τηλεσκοπικά ιστία πλήρως ανεπτυγμένα στη θάλασσα

Ένας καινοτόμος τρόπος για να αναδιπλώνονται τα wingsail παρουσιάζεται στην Εικόνα 1.11. Το concept αυτό είναι της εταιρείας Bound4Blue που ασχολείται με αυτού του είδους τις τεχνολογίες, ωστόσο δεν έχει δημοσιευθεί ακόμα [4].

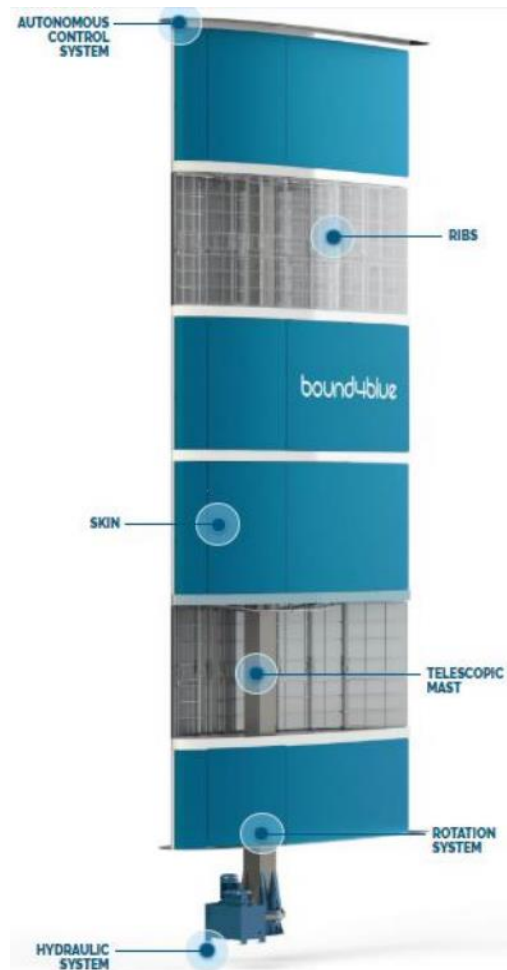


Εικόνα 1.8. Το concept πλοίου Wind Challenger εφοδιασμένο με 9 τηλεσκοπικά ιστία πλήρως κλειστά στο λιμάνι

Προηγούμενες μελέτες [5] έχουν καταδείξει πως για να προβλεφθεί σωστά το κέρδος που προσφέρουν τα wingsail, είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψιν οι αεροδυναμικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτών και μεταξύ του πλοίου. Τα φαινόμενα αυτά παρότι αποδεδειγμένα έχουν σημαντική επιρροή στην απόδοση του πλοίου, συχνά παραμελούνται ή υπεραπλουστεύονται.



Εικόνα 1.9. Δεξαμενόπλοιο με 4 wingsails: Concept της εταιρίας Becker Marine Systems



Εικόνα 1.10. Εσωτερικά συστήματα ενός wingsail (πηγή: [4])



Εικόνα 1.11. Διαδικασία αναδίπλωσης wingsail της εταιρείας Bound4Blue (πηγή: [4])

Ένα υβριδικό πλοίο, εκείνο δηλαδή που χρησιμοποιεί κινητήρα diesel και τον άνεμο για την πρόωση του, έχει αποδειχθεί ότι η κατανάλωση καυσίμου του μπορεί να μειωθεί σημαντικά από αρκετές μελέτες τα τελευταία χρόνια όπως για παράδειγμα στις [6], [7]. Την δεδομένη στιγμή τα συστήματα αυτά υπάρχουν και χρησιμοποιούνται, ωστόσο οι ναυτιλιακές εταιρείες είναι διστακτικές και δεν τα εγκαθιστούν, ειδικά σε ήδη υπάρχοντα πλοία. Στην πραγματικότητα, η μόνη βιώσιμη λύση που υπάρχει και μπορεί να προσφέρει σημαντική μείωση στην κατανάλωση καυσίμου στο εγγύς μέλλον, είναι τα συστήματα πρόωσης με την βοήθεια του ανέμου (Wind-Assisted Propulsion Systems – WAPS).

### 1.3 Σκοπός

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να συνδράμει με τα αποτελέσματα της στην ακαδημαϊκή και ναυτιλιακή κοινότητα και να ερευνήσει εάν είναι βιώσιμη μία τέτοια λύση για ένα δεξαμενόπλοιο. Υπό την επίβλεψη του **Εργαστηρίου Μηχανικής Ρευστών και Στροβιλομηχανών (ΕΜΡΣ)** και της Ελληνικής ναυτιλιακής εταιρίας **Arcadia Shipmanagement Co. Ltd.**, μελετήθηκε η εφαρμογή wingsail στο Suezmax δεξαμενόπλοιο **Aegean Marathon**. Τα κύρια χαρακτηριστικά του παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1.

*Πίνακας 1.1. Χαρακτηριστικά του δεξαμενοπλοίου Aegean Marathon της εταιρίας Arcadia Shipmanagement Co. Ltd.*

Aegean Marathon's Particulars	
Deadweight Tonnage	158,913.80 MT
Length Overall, $L_{OA}$ (m)	274.22
Length Between Perpendiculars, $L_{PP}$ (m)	263.14
Breadth, $B$ (m)	48.00
Depth, $D$ (m)	23.10
Design Draft, $d$ (m)	16.00
Speed, (kn)	12
Main Engine	B&W 6G70ME-C 9.2
Upper deck to radar mast top (m)	26.70
Lateral projected area, $A_L$ (m <sup>2</sup> )	6,300.79
Transverse projected area, $A_T$ (m <sup>2</sup> )	1,141.92

### 1.4 Απαιτήσεις

Η τεχνολογία των ιστίων που μελετήθηκε είναι συμπληρωματική του κινητήρα στην κίνηση του πλοίου. Δηλαδή, η κύρια μονάδα ισχύος του δεξαμενοπλοίου παραμένει αμετάβλητη με σκοπό να λειτουργεί κατά το δυνατόν λιγότερο για να μειωθεί η κατανάλωση καυσίμων και επομένως να περιοριστούν οι αέριοι ρύποι. Σκοπός λοιπόν της εγκατάστασης είναι να διατηρείται σταθερή η ταχύτητα του πλοίου με το ελάχιστο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Έγιναν μία σειρά από παραδοχές που αποτελούν και τις απαιτήσεις της αποστολής:

- Τα ιστία θα μπορούν να λειτουργούν με ταχύτητες ανέμου έως 8 Beaufort, ενώ σε αντίθετη περίπτωση θα υπάρχει μηχανισμός που θα κατεβαίνουν για να μην προκληθεί ζημιά στην εγκατάσταση
- Η επίδραση του νερού και των κυμάτων δεν λαμβάνεται υπόψιν και θεωρείται ότι δεν επηρεάζουν αεροδυναμικά τα wingsail όπως και δεν έχουν επιρροή στην υδροδυναμική συμπεριφορά του πλοίου
- Η ταχύτητα του Aegean Marathon παραμένει σταθερή και ίση με 12 κόμβους
- Το ύψος των ιστίων δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 60 μέτρα, αφενός για να μπορούν να αναδιπλώνονται και να περνά το πλοίο κάτω από γέφυρες. Τα περισσότερα wingsail αυτή τη στιγμή στην αγορά είναι αναδιπλούμενα [8]
- Υπάρχει περιορισμένος χώρος πάνω στο κατάστρωμα που θα τοποθετηθούν καθώς δεν πρέπει να εμποδίζουν την φορτοεκφόρτωση του φορτίου
- Τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, τα υλικά και η αντοχή των wingsail δεν μελετώνται και θεωρείται ότι μπορούν να κατασκευαστούν, να τοποθετηθούν και να αντέξουν τα φορτία του ανέμου



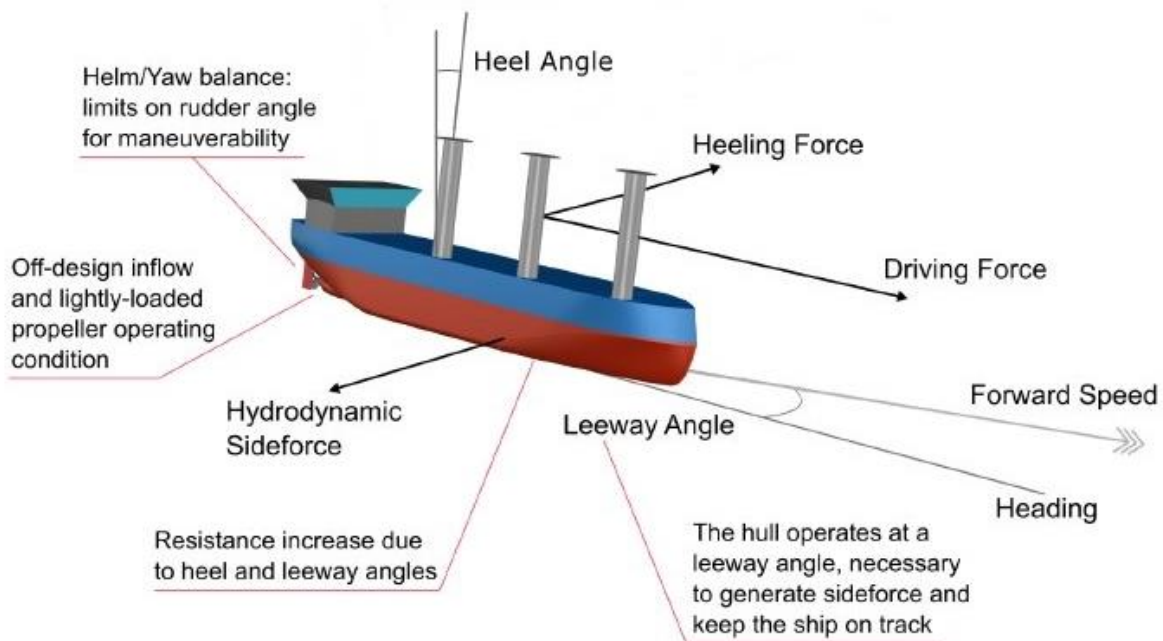
## Κεφάλαιο 2 Εργαλεία και Μέθοδοι

Στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι να σκιαγραφηθούν οι βασικές έννοιες και θεωρίες της φυσικής ενός πλοίου με ιστία.

Εξ ορισμού, η πλεύση είναι η κίνηση ενός πλοίου πάνω στην οριακή επιφάνεια δύο πεδίων ροής, του αέρα και του νερού. Απαραίτητη προϋπόθεση για την ευστάθεια του πλοίου είναι η επακριβής γνώση και τοποθέτηση του σε σωστή πορεία.

### 2.1 Κινήσεις

Η εγκατάσταση ιστίων σε ένα πλοίο συνεπάγεται την δημιουργία ενός ζεύγους δυνάμεων και ροπών πέραν της αεροδυναμικής ώσης που παράγουν. Τα φορτία αυτά πρέπει να αντισταθμιστούν από αντίστοιχες υδροδυναμικές αντιδράσεις. Εξαιτίας των φορτίων αυτών, το πλοίο θα κινείται με μία γωνία  $\beta$  (leeway angle) γύρω από τον άξονα του yaw, η οποία παρομοιάζεται με γωνία προσβολής (angle of attack) στο κύτος του πλοίου. Η γωνία αυτή ευθύνεται για την υδροδυναμική πλάγια δύναμη που δημιουργείται, σε αντίθεση με την αεροδυναμική [9]. Τα κύτη των συμβατικών εμπορικών πλοίων είναι ακατάλληλα στην παραγωγή επαρκούς πλάγιας δύναμης και έτσι κατά κανόνα χρειάζεται τα πλοία να κινούνται με μεγάλες γωνίες  $\beta$  [9]. Επίσης, το πηδάλιο (rudder) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να αντισταθμίσει την ροπή με την αντίστοιχη επιβάρυνση σε υδροδυναμική αντίσταση. Σε αυτήν την περίπτωση πρέπει να διερευνηθεί ότι το rudder μπορεί να κινηθεί περαιτέρω και επαρκεί ώστε να καλύψει τυχόν μανούβρες που θα χρειαστούν.



Εικόνα 2.1. Βασικά στοιχεία ενός πλοίου με WAPS (πηγή: [9])

Για να επιτευχθεί σταθερή πλεύση, απαιτείται να υπάρχει ισοζύγιο σε όλους του βαθμούς ελευθερίας. Αναπόφευκτα το πλοίο θα κινείται σταθερά με μία γωνία  $\beta$  για να μπορεί να δημιουργήσει την απαραίτητη πλάγια δύναμη και μια γωνία  $\varphi$  εξαιτίας των ροπών.

Η γωνία  $\varphi$  ή heeling angle, είναι η γωνία που σχηματίζεται όταν το πλοίο κλίνει προς τα δεξιά (starboard side) ή προς τα αριστερά (port side). Η γωνία  $\beta$  ή leeway angle, ορίζεται ως η γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης του πλοίου και του διαμήκη άξονα του.

## 2.2 Εξισώσεις Κίνησης

Η τοποθέτηση wingsail σε ένα πλοίο επιφέρει μεταβολές στην κίνηση και την ευστάθεια του. Στο παρόν Υποκεφάλαιο θα αναπτυχθούν οι εξισώσεις κίνησης και οι συνθήκες ισορροπίας των υδροδυναμικών και αεροδυναμικών φορτίων που δέχεται ένα πλοίο με ιστία. Οι εξισώσεις αυτές μοντελοποιούνται βάσει του μοντέλου MMG (Mathematical Model for Maneuvering Ship Motion) και σταθερές συνθήκες πλεύσης όπως προτάθηκαν από τον Yoshimura [10]. Έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί αρκετές παραλλαγές του μοντέλου MMG για την μελέτη της συμπεριφοράς του πλοίου σε ελιγμούς (maneuvers), κάθε μία με τους δικούς της περιορισμούς και απλοποιήσεις, όπως για παράδειγμα στις μελέτες [6], [10], [11], [12], [13].

Οι εξισώσεις κίνησης του πλοίου εκφράζονται συνήθως με 3 εξισώσεις αντιπροσωπεύοντας τις κινήσεις στο οριζόντιο επίπεδο: surge, sway και yaw. Ωστόσο, στην περίπτωση που υπάρχουν ιστία, πρέπει να μελετηθεί και η κίνηση roll εξαιτίας της πλάγιας δύναμης που αναπτύσσεται. Οι υπόλοιπες κινήσεις στο κατακόρυφο επίπεδο, δηλαδή pitch και heave, θεωρούνται λιγότερο σημαντικές από το roll και δεν μελετώνται.

Σύμφωνα με το μοντέλο MMG [12] οι εξισώσεις που κυβερνούν τις κινήσεις του πλοίου ως προς το κέντρο βάρους του, είναι:

$$m\dot{u} - mvr = X \quad (2.1)$$

$$m\dot{v} + mur = Y \quad (2.2)$$

$$I_{zz}\dot{r} = N \quad (2.3)$$

$$I_{xx}\ddot{\varphi} = K - GM \cdot m \cdot g \cdot \sin\varphi \quad (2.4)$$

Οι ταχύτητες  $u$ ,  $v$ ,  $r$  και οι εξωτερικές δυνάμεις και ροπές  $X$ ,  $Y$ ,  $N$  και  $K$  παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.2. Η μάζα του πλοίου και οι ροπές αδράνειας των κινήσεων yaw και roll στους άξονες  $z$  και  $x$ , δηλώνονται με  $m$ ,  $I_{zz}$  και  $I_{xx}$ , αντίστοιχα.

Η σταθερή πλεύση (steady sailing) προκύπτει όταν δεν υπάρχουν μεταβολές στις παραμέτρους  $u$ ,  $v$ ,  $r$ ,  $\varphi$  και έτσι οι Εξισώσεις (2.7)-(2.10) μετασχηματίζονται:

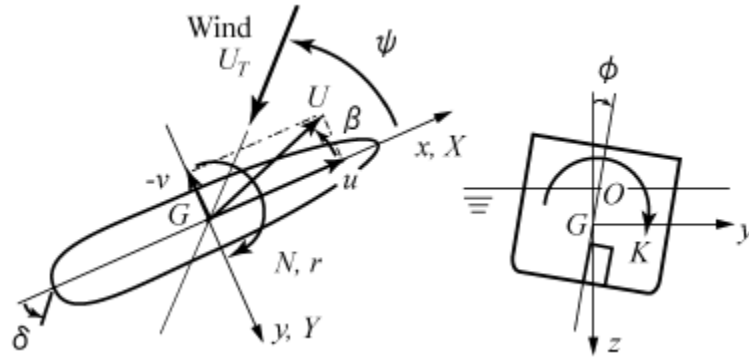
$$X = 0 \quad (2.5)$$

$$Y = 0 \quad (2.6)$$

$$N = 0 \quad (2.7)$$

$$K - GM \cdot m \cdot g \cdot \sin\varphi = 0 \quad (2.8)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις θα επιλυθούν ως προς την σταθερή ταχύτητα πλοίου, drift, heel και γωνίες rudder, δηλαδή  $U$ ,  $\beta$ ,  $\varphi$  και  $\delta$ , αντίστοιχα για διαφορετικές πραγματικές ταχύτητες ανέμου  $U_T$  και κατευθύνσεις  $\psi$ .



Εικόνα 2.2. Σύστημα συντεταμένων και ορισμός ταχυτήτων, δυνάμεων, ροπών και γωνιών (πηγή: [6])

### 2.3 Εξωτερικά φορτία

Τα εξωτερικά φορτία  $X$ ,  $Y$ ,  $N$  και  $K$  περιλαμβάνουν παράγοντες από τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά του κύτους του πλοίου (hull), από την ώση της προπέλας, από τις δυνάμεις που αναπτύσσονται στο rudder και από τις αεροδυναμικές δυνάμεις του κύτους και των wingsail. Αναλύονται λοιπόν:

$$X = X_{H0} + X_H + X_P + X_R + X_W \quad (2.9)$$

$$Y = Y_H + Y_R + Y_W \quad (2.10)$$

$$N = N_H + N_R + N_W \quad (2.11)$$

$$K = K_H + K_R + K_W \quad (2.12)$$

Οι δείκτες  $H$ ,  $P$ ,  $R$ ,  $W$  υποδεικνύουν τα Hull, Propeller, Rudder και Wingsail, αντίστοιχα.

Επιπλέον, τα εξωτερικά φορτία αδιαστατοποιούνται με το μήκος  $L_{PP}$  και το βύθισμα  $d$  ως εξής:

$$X' = X'_H + X'_P + X'_R + X'_W = \frac{X}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L_{PP} \cdot d \cdot U^2} \quad (2.13)$$

$$Y' = Y'_H + Y'_R + Y'_W = \frac{Y}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L_{PP} \cdot d \cdot U^2} \quad (2.14)$$

$$N' = N'_H + N'_R + N'_W = \frac{N}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L_{PP}^2 \cdot d \cdot U^2} \quad (2.15)$$

$$K' = K'_H + K'_R + K'_W = \frac{K}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L_{PP} \cdot d^2 \cdot U^2} \quad (2.16)$$

### 2.3.1 Υδροδυναμικά φορτία κύτους

Όταν το πλοίο κινείται με μηδενικές γωνίες drift και heel, η μόνη αντίσταση που πρέπει να ξεπεράσει είναι εκείνη του ακίνητου νερού (calm water resistance), εφόσον έχει γίνει η παραδοχή ότι δεν μελετάται η επίδραση των κυμάτων. Στην συγκεκριμένη περίπτωση θεωρείται ότι οι παραπάνω γωνίες είναι μη-μηδενικές, επομένως λαμβάνονται υπόψιν οι επιρροές τους και οι δυνάμεις και ροπές που δημιουργούνται εκφράζονται με τα αντίστοιχα υδροδυναμικά παράγωγα (hydrodynamic derivatives), σύμφωνα με [10].

Έτσι, τα υδροδυναμικά φορτία στο κύτος του πλοίου εκφράζονται ως:

$$X'_H = X'_{H0} + X'_{\beta\beta}\beta^2 + X'_{\beta\varphi}\beta\varphi + X'_{\varphi\varphi}\varphi^2 + X'_{\beta\beta\beta}\beta^3 \quad (2.17)$$

$$Y'_H = Y'_\beta\beta + Y'_\varphi\varphi + Y'_{\beta\beta\beta}\beta^3 + Y'_{\beta\beta\varphi}\beta^2\varphi + Y'_{\beta\varphi\varphi}\beta\varphi^2 + Y'_{\varphi\varphi\varphi}\varphi^3 \quad (2.18)$$

$$N'_H = N'_\beta\beta + N'_\varphi\varphi + N'_{\beta\beta\beta}\beta^3 + N'_{\beta\beta\varphi}\beta^2\varphi + N'_{\beta\varphi\varphi}\beta\varphi^2 + N'_{\varphi\varphi\varphi}\varphi^3 \quad (2.19)$$

$$K'_H = K'_\beta\beta + K'_\varphi\varphi + K'_{\beta\beta\beta}\beta^3 + K'_{\beta\beta\varphi}\beta^2\varphi + K'_{\beta\varphi\varphi}\beta\varphi^2 + K'_{\varphi\varphi\varphi}\varphi^3 \quad (2.20)$$

Η αντίσταση του αδιατάραχτου νερού υπολογίζεται από το πολυώνυμο της Εξίσωσης (2.21) και εξαρτάται από τον αριθμό Froude.

$$X'_{H0} = R_0 + R_1 \cdot Fr + R_2 \cdot Fr^2 + R_3 \cdot Fr^3 \quad (2.21)$$

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \cdot L_{WL}}} \quad (2.22)$$

### 2.3.2 Φορτία προπέλας

Τα φορτία στον άξονα  $x$  της προπέλας υπολογίζονται σύμφωνα με [11] όπως φαίνεται στην σχέση (2.23). Στους άξονες  $y, z$  θεωρούνται μηδενικά για απλούς ελιγμούς.

$$X'_P = \frac{(1 - t_p) \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D_P^4 \cdot K_T(J)}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L_{PP} \cdot d \cdot U^2} \quad (2.23)$$

Όπου,  $t_p$  είναι το thrust deduction fraction και θεωρείται σταθερό για λόγους απλότητας,  $n$  η γωνιακή ταχύτητα της προπέλας,  $D_P$  η διάμετρος της και  $K_T(J)$  ο advance coefficient που εξαρτάται από τον συντελεστή ώσης  $J$ .

Ο συντελεστής ώσης για σταθερή πλεύση, σύμφωνα με το μοντέλο MMG υπολογίζεται:

$$J = \frac{u \cdot (1 - w_P)}{(n \cdot D_P)} \quad (2.24)$$

Στην παραπάνω Εξίσωση, με  $u$  σημαίνεται η ταχύτητα της κίνησης surge, δηλαδή στον άξονα  $x$  όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2 και είναι  $u = U \cdot \cos\beta$  και  $w_P$  το wake fraction και υπολογίζεται από την Εξίσωση (2.25).

$$w_P = w_{P0} \cdot \exp(-4.0 \cdot \beta^2) \quad (2.25)$$

Όπου,  $w_{P0}$  ο wake fraction coefficient που λαμβάνεται από την στατιστική σχέση (2.26) της BSRA [14] στα πρώιμα στάδια σχεδιασμού και για εύρη  $C_B = 0.55-0.85$  &  $Fr = 0.12-0.36$ .

$$w_{P0} = -0.0458 + 0.3745 \cdot C_B^2 + 0.1590 \cdot D_W - 0.8635 \cdot Fr + 1.4773 \cdot Fr^2 \quad (2.26)$$

Με τον συντελεστή  $D_W$  να είναι:

$$D_W = \frac{B}{\Delta^{1/3}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta^{1/3}}{D_P}} \quad (2.27)$$

Όπου,  $B$  το πλάτος του πλοίου,  $\Delta$  το εκτόπισμα του και  $D_P$  η διάμετρος της προπέλας.

Ο συντελεστής μείωσης ώσης της προπέλας ( $t_P$ ) υπολογίζεται σύμφωνα με [14]:

$$t_P = -0.2064 + 0.3246 \cdot C_B^2 - 2.1504 \cdot C_B \cdot \frac{LCB}{L_{PP}} + 0.1705 \cdot \frac{B}{\Delta^{1/3}} + 0.1504 \cdot \frac{P}{D_P} \quad (2.28)$$

Όπου,  $LCB$  είναι η οριζόντια θέση του κέντρου άνωσης του πλοίου και μετράται από την μέση του και  $P$  είναι το βήμα της προπέλας.

Ο συντελεστής  $K_T(J)$ , γενικότερα έχει την μορφή της Εξίσωσης (2.29). Τα  $a_0, a_1, a_2$  είναι σταθερές και μπορούν να βρεθούν μόνο πειραματικά. Λαμβάνονται για μορφή κύτους KVLCC2 από [15] και φαίνονται στον Πίνακα 3.4.

$$K_T(J) = a_0 + a_1 \cdot J + a_2 \cdot J^2 \quad (2.29)$$

### 2.3.3 Φορτία πηδαλίου

Τα εξωτερικά φορτία του rudder βρίσκονται από τις Εξισώσεις (2.30)-(2.33), σύμφωνα με [11], [12].

$$X'_R = -(1 - t_R) \cdot F'_N \cdot \sin\delta \quad (2.30)$$

$$Y'_R = -(1 + \alpha_H) \cdot F'_N \cdot \cos\delta \quad (2.31)$$

$$N'_R = -(x'_R + a_H \cdot x'_H) \cdot F'_N \cdot \cos\delta \quad (2.32)$$

$$K'_R = (1 + a_H) \cdot z'_R \cdot F'_N \cdot \cos\delta \quad (2.33)$$

Ο συντελεστής επιπλέον οπισθέλκουσας,  $t_R$ , υπολογίζεται [11]:

$$(1 - t_R) = 0.28 \cdot C_B + 0.55 \quad (2.34)$$

Η κάθετη δύναμη  $F'_N$  που επενεργεί στο rudder βρίσκεται από την Εξίσωση (2.35).

$$F'_N = \frac{f_A \cdot A_R \cdot U_R'^2 \cdot \sin\alpha_R}{L_{PP} \cdot d} \quad (2.35)$$

Όπου,  $f_A$  είναι η κλίση του συντελεστή άντωσης του πηδαλίου,  $A_R$  η επιφάνεια του,  $U_R'$  και  $\alpha_R$  η ταχύτητα και η γωνία της ροής στο rudder αντίστοιχα.

$$f_A = \frac{6.13 \cdot \Lambda}{2.25 + \Lambda} \quad (2.36)$$

$$U_R'^2 = (1 - w_R)^2 \cdot \left[ 1 + \frac{\eta_P \cdot k \cdot \{2 - (2 - k) \cdot s\} \cdot s}{(1 - s)^2} \right] \quad (2.37)$$

Η ταχύτητα της ροής στο πηδάλιο,  $U_R'$ , εξαρτάται από:

$$w_R = w_{R0} \cdot \frac{w_P}{w_{P0}} = w_{R0} \cdot \exp(-4.0 \cdot \beta^2) \quad (2.38)$$

Όπου το  $w_{R0}$  υπολογίζεται με την βοήθεια του  $\varepsilon$  [11]:

$$\varepsilon = \frac{(1 - w_{R0})}{(1 - w_{P0})} = -156.2 \cdot \left( \frac{C_B \cdot B}{L_{PP}} \right)^2 + 41.6 \cdot \left( \frac{C_B \cdot B}{L_{PP}} \right) - 1.76 \quad (2.39)$$

Όπου οι παράγοντες  $\eta_P$ ,  $k$  και  $s$  είναι:

$$\eta_P = \frac{D_P}{h_R} \quad (2.40)$$

$$k = 0.6 \cdot \frac{(1 - w_P)}{(1 - w_R)} \quad (2.41)$$

$$s = 1 - \frac{u \cdot (1 - w_P)}{n \cdot P} \quad (2.42)$$

Η γωνία προσβολής που «βλέπει» το rudder και ο συντελεστής εξομάλυνσης της ροής δίνονται από τις Εξισώσεις (2.43) & (2.44), από [6], [11], αντίστοιχα.

$$a_R = \delta - \gamma \cdot \beta \quad (2.43)$$

$$\gamma = -22.2 \cdot \left( \frac{C_B \cdot B}{L_{PP}} \right)^2 + 0.02 \cdot \left( \frac{C_B \cdot B}{L_{PP}} \right) + 0.68 \quad (2.44)$$

Ο παράγοντας  $\alpha_H$  δίνεται από την Εξίσωση (2.45) σύμφωνα με [16].

$$\alpha_H = 3.6 \cdot \frac{C_B}{(L_{PP}/B)} \quad (2.45)$$

Οι αδιάστατες αποστάσεις  $x'_R = x_R/L_{PP}$  και  $z'_R = z_R/d$ , σχετίζονται με το σημείο του rudder που βρίσκεται στο σημείο τομής της πίσω κάθετης γραμμής του πλοίου (aft perpendicular) και της οριζόντιας ευθείας που βρίσκεται  $0.68 \cdot d$  από την αδιατάραχτη ελεύθερη επιφάνεια. Ως σύστημα αναφοράς για τις αποστάσεις αυτές, ορίζεται ως η τομή του αδιατάραχτου νερού, το μέσο του πλοίου και το διαμήκες επίπεδο συμμετρίας του πλοίου [6]. Θεωρείται πως είναι  $x_R = -L_{PP}/2$  και η αδιάστατη απόσταση είναι  $x'_R = -0.5$ , ενώ  $z'_R = 0.68$ .

Με  $x_H$  ορίζεται η απόσταση που ασκείται η κάθετη δύναμη  $F_N$  και στην αδιάστατη μορφή της κυμαίνεται από  $-0.4$  έως  $-0.5$  [16].

Γενικά, τα μεγέθη και οι συντελεστές που οφείλονται στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ του κύτους, του πηδαλίου και της προπέλας, όπως τα  $\alpha_H$ ,  $x_H$ ,  $w_{RO}$ ,  $w_{PO}$ ,  $\gamma$ , είναι πολύ δύσκολα να προσδιοριστούν και πρέπει να γίνει πειραματική μελέτη του πλοίου. Ωστόσο, στα αρχικά στάδια σχεδιασμού που ερευνάται η συμπεριφορά σε ελιγμούς του πλοίου, είναι αποδεκτό να γίνουν απλοποιητικές παραδοχές και να χρησιμοποιηθούν εμπειρικοί και στατιστικοί τύποι.

Τυπικά, στο πηδάλιο επέρχεται απώλεια στήριξης στις  $\pm 35$ - $45^\circ$ . Τα περισσότερα πηδάλια των συμβατικών πλοίων έχουν εύρος κίνησης  $\pm 35^\circ$  για να αποφεύγεται η απώλεια στήριξης, η μείωση της ταχύτητας και οι μεγάλες γωνίες κλίσης του πλοίου κατά την διάρκεια ελιγμών [17]. Από κατασκευής, το Aegean Marathon έχει τον περιορισμό αυτό, δηλαδή των  $\pm 35^\circ$ .

### 2.3.4 Αεροδυναμικά φορτία wingsail

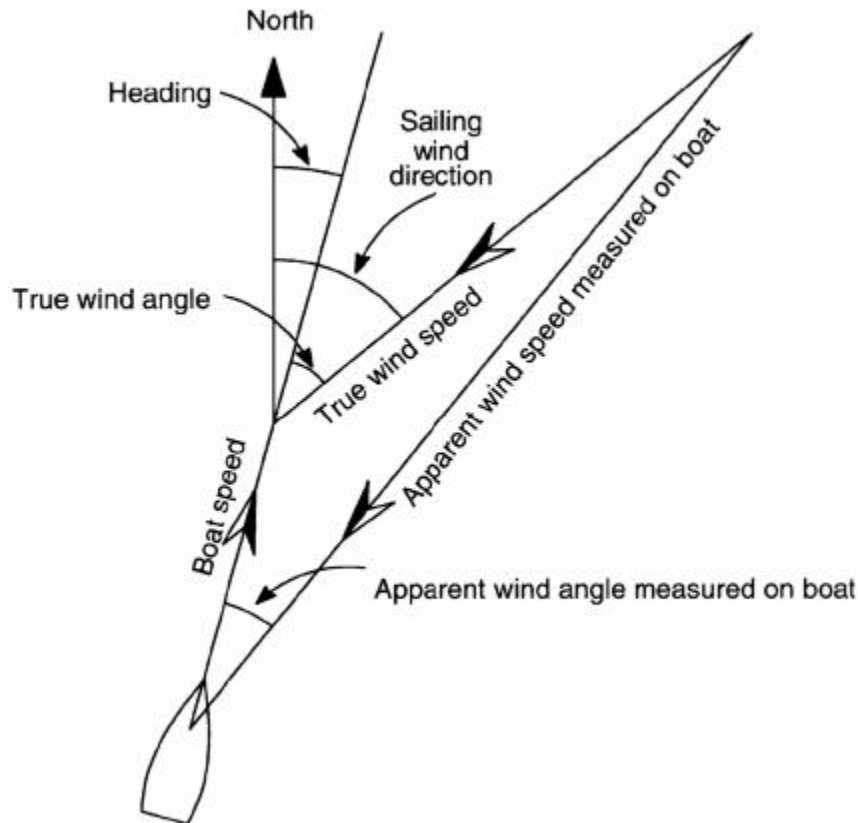
Η συνιστάμενη δύναμη που κινεί ένα πλοίο με ιστία οφείλεται στον σχετικό άνεμο (Apparent Wind) σε συνδυασμό με την κύρια μονάδα ισχύος. Η ταχύτητα του σχετικού ανέμου ορίζεται ως εκείνη που βλέπει ένας ακίνητος παρατηρητής πάνω στο πλοίο και είναι το διανυσματικό άθροισμα της ταχύτητας του πραγματικού ανέμου (True Wind Speed – TWS) και της ταχύτητας που κινείται το πλοίο (Vessel Speed – U). Γεωμετρικά, τα παραπάνω μεγέθη συνδέονται και απεικονίζονται στο τρίγωνο ταχυτήτων στην Εικόνα 2.3 [18].

Όσο μικραίνει η ταχύτητα του πλοίου, η ταχύτητα του σχετικού ανέμου AWS, πλησιάζει την TWS. Αντιθέτως, η πραγματική ταχύτητα του αέρα δεν επηρεάζεται από κάποιο μέγεθος παρά μόνον από το περιβάλλον.

Από το τρίγωνο ταχυτήτων προκύπτουν οι Εξισώσεις (2.46), (2.47) για την ταχύτητα και την γωνία του σχετικού ανέμου.

$$AWS = \sqrt{U^2 + TWS^2 + 2 \cdot U \cdot TWS \cdot \cos(TWA)} \quad (2.46)$$

$$AWA = \arccos\left(\frac{TWS \cdot \cos(TWA) + U}{AWS}\right) \quad (2.47)$$

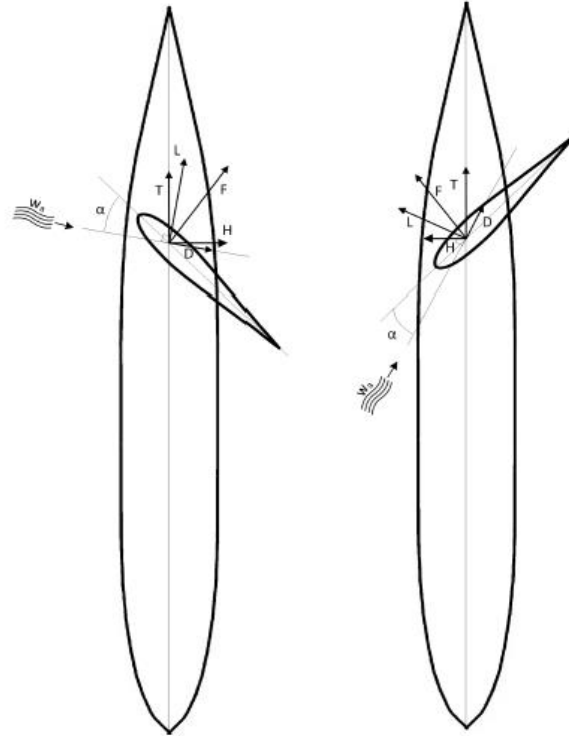


Εικόνα 2.3. Τρίγωνο ταχυτήτων ανέμου (πηγή: [18])

Όπως προαναφέρθηκε, η συνιστάμενη δύναμη που παράγεται από τα wingsail οφείλεται στον σχετικό άνεμο. Η δύναμη αυτή αναλύεται με δύο τρόπους. Ο πρώτος βασίζεται στην αεροδυναμική και αναλύεται στην κάθετη ως προς την ταχύτητα του σχετικού ανέμου δύναμη που ονομάζεται άντωση (Lift – L) και στην οριζόντια που είναι η οπισθέλκουσα (Drag – D), όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4. Αντίθετα, ο δεύτερος τρόπος δείχνει την ώση (Thrust) και την πλάγια δύναμη (Side Force) (βλ. Εικόνα 2.4, Εικόνα 2.5).

Τα αναπτυσσόμενα φορτία εξαιτίας του ανέμου στα wingsail, μπορούν να εκφραστούν με δύο τρόπους, είτε σχετικά με την ταχύτητα του πλοίου  $U$  όπως φαίνεται στις Εξισώσεις (2.48)-(2.51), είτε βάσει της ταχύτητας του σχετικού ανέμου όπως φαίνεται στις Εξισώσεις (2.52)-(2.55) [6]. Με τον πρώτο τρόπο προκύπτουν τα αδιάστατα φορτία που υπεισέρχονται στα ισοζύγια δυνάμεων και ροπών, ενώ με τον δεύτερο προκύπτουν οι αδιάστατοι συντελεστές των δυνάμεων-ροπών.





Εικόνα 2.4. Δυνάμεις που ασκούνται στο wingsail όταν κινείται κόντρα στον άνεμο-upwind (αριστερά) και όταν πηγαίνει μαζί με αυτόν-downwind (δεξιά) (πηγή: [40])

$$X'_W = X_W / \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L_{PP} \cdot d \cdot U^2 \right) \quad (2.48)$$

$$Y'_W = Y_W / \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L_{PP} \cdot d \cdot U^2 \right) \quad (2.49)$$

$$N'_W = N_W / \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L_{PP}^2 \cdot d \cdot U^2 \right) \quad (2.50)$$

$$K'_W = K_W / \left( \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L_{PP} \cdot d^2 \cdot U^2 \right) \quad (2.51)$$

Όπου,  $X_W$ ,  $Y_W$ ,  $N_W$ ,  $K_W$  οι δυνάμεις και ροπές που ασκούνται στο πλοίο εξαιτίας των wingsail και υπολογίζονται ως προς το κέντρο βάρους του πλοίου.

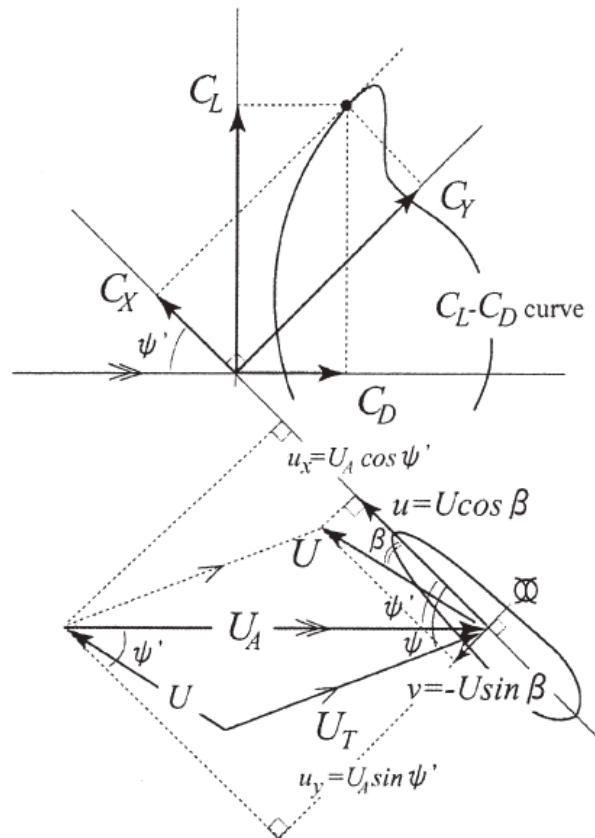
$$C_X = X_W / \left( \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot U_A^2 \cdot A_T \right) \quad (2.52)$$

$$C_Y = Y_W / \left( \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot U_A^2 \cdot A_L \right) \quad (2.53)$$

$$C_N = N_W / \left( \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot U_A^2 \cdot A_L \cdot L_{OA} \right) \quad (2.54)$$

$$C_K = K_W / \left( \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot U_A^2 \cdot A_L^2 / L_{OA} \right) \quad (2.55)$$

Με  $U_A$  σημαίνεται η σχετική ταχύτητα του ανέμου,  $A_T$  η εγκάρσια επιφάνεια του πλοίου ενώ με  $A_L$  η πλάγια επιφάνεια του.



Εικόνα 2.5. Σχέση μεταξύ της πορείας και της ώσης και πλάγιας δύναμης για ένα πλοίο με ιστία (πηγή: [6])

Τα παραπάνω αεροδυναμικά φορτία υπολογίζονται μέσω προσομοιώσεων Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής (Computational Fluid Dynamics – CFD) και η διαδικασία υπολογισμού τους περιγράφεται στο Υποκεφάλαιο 3.3.9.

## 2.4 Εξισώσεις κίνησης σε ισορροπία κατά την διάρκεια πλεύσης και μέθοδος επίλυσης

Οι εξισώσεις κίνησης (2.5)-(2.8) μετασχηματίζονται σύμφωνα με όλα τα παραπάνω στις εξής:

$$X'_{H0} + X'_{\beta\beta}\beta^2 + X'_{\beta\varphi}\beta\varphi + X'_{\varphi\varphi}\varphi^2 + X'_{\beta\beta\beta}\beta^3 + \frac{(1-t_P) \cdot n^2 \cdot D_P^4 \cdot K_T(J)}{\frac{1}{2} \cdot L_{PP} \cdot d \cdot U^2} - (1-t_R) \cdot F'_N \cdot \sin\delta + \frac{X_W}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L_{PP} \cdot d \cdot U^2} = 0 \quad (2.56)$$

$$Y'_{\beta}\beta + Y'_{\varphi}\varphi + Y'_{\beta\beta\beta}\beta^3 + Y'_{\beta\beta\varphi}\beta^2\varphi + Y'_{\beta\varphi\varphi}\beta\varphi^2 + Y'_{\varphi\varphi\varphi}\varphi^3 - (1+\alpha_H) \cdot F'_N \cdot \cos\delta + \frac{Y_W}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L_{PP} \cdot d \cdot U^2} = 0 \quad (2.57)$$

$$N'_{\beta}\beta + N'_{\varphi}\varphi + N'_{\beta\beta\beta}\beta^3 + N'_{\beta\beta\varphi}\beta^2\varphi + N'_{\beta\varphi\varphi}\beta\varphi^2 + N'_{\varphi\varphi\varphi}\varphi^3 - (x'_R + a_H \cdot x'_H) \cdot F'_N \cdot \cos\delta + \frac{N_W}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L_{PP}^2 \cdot d \cdot U^2} = 0 \quad (2.58)$$

$$K'_{\beta}\beta + K'_{\varphi}\varphi + K'_{\beta\beta\beta}\beta^3 + K'_{\beta\beta\varphi}\beta^2\varphi + K'_{\beta\varphi\varphi}\beta\varphi^2 + K'_{\varphi\varphi\varphi}\varphi^3 + (1+a_H) \cdot z'_R \cdot F'_N \cdot \cos\delta + \frac{K_W}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot L_{PP} \cdot d^2 \cdot U^2} = 0 \quad (2.59)$$

Πρόκειται για 4 μη-γραμμικές εξισώσεις με 4 αγνώστους, την ταχύτητα του πλοίου  $U$  και τις γωνίες  $\beta$ ,  $\delta$ ,  $\varphi$ . Από την βιβλιογραφία [6], [10], προτείνεται η μέθοδος Newton για την επίλυση των εξισώσεων. Η μέθοδος αυτή έχει ένα σημαντικό μειονέκτημα: είναι πολύ δύσκολο να συγκλίνει εάν οι αρχικές τιμές που θα οριστούν για τις άγνωστες μεταβλητές δεν είναι κοντά στις λύσεις των εξισώσεων, καθώς δεν μπορεί να οριστεί ο αντίστροφος πίνακας της Ιακωβιανής ορίζουσας [19]. Όταν πρόκειται για επίλυση μη-γραμμικών εξισώσεων με 4 μεταβλητές η μέθοδος Newton γράφεται:

$$x^{(k)} = x^{(k-1)} - J(x^{(k-1)})^{-1} \cdot F(x^{(k-1)}) \quad (2.60)$$

$$F(x) = \begin{bmatrix} f_1(U, \beta, \delta, \varphi) \\ f_2(U, \beta, \delta, \varphi) \\ f_3(U, \beta, \delta, \varphi) \\ f_4(U, \beta, \delta, \varphi) \end{bmatrix} \quad (2.61)$$

$$x = \begin{bmatrix} U \\ \beta \\ \delta \\ \varphi \end{bmatrix} \quad (2.62)$$

Έτσι, διερευνώνται τα κατάλληλα  $x$  που μηδενίζουν την νέα συνάρτηση  $F(x)$ .

## 2.5 Ευστάθεια

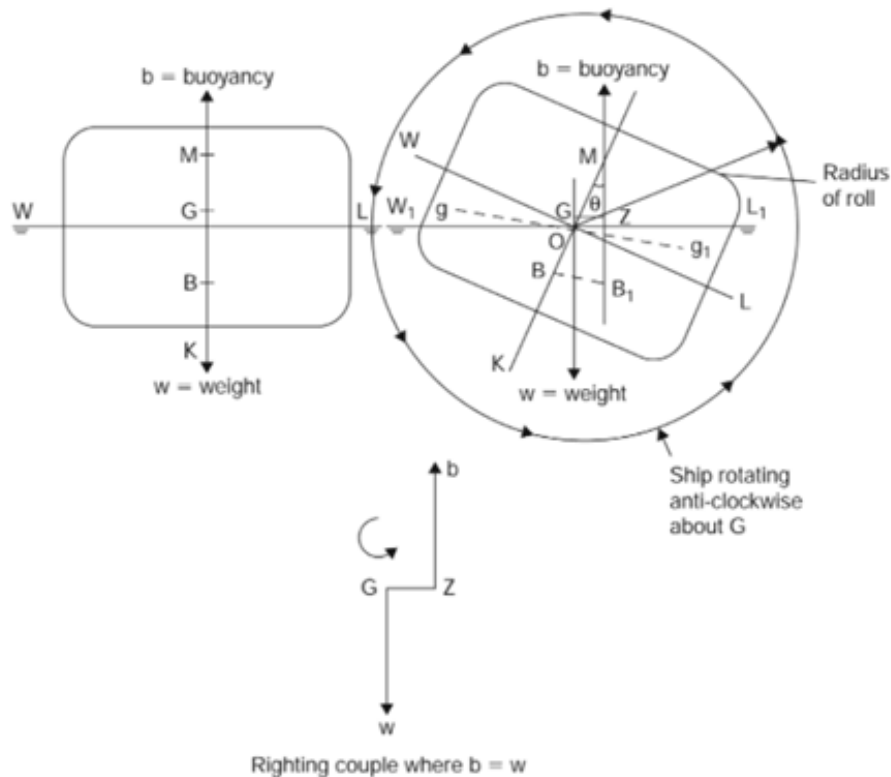
Το κέντρο βάρους (Center of Gravity –  $G$ ) ενός σώματος ορίζεται ως το σημείο στο οποίο ασκείται η δύναμη της βαρύτητας κάθετα προς τα κάτω και ισούται με το συνολικό βάρος του σώματος.

Ως κέντρο άνωσης (Center of Buoyancy –  $B$ ) ορίζεται το σημείο στο οποίο ασκείται η άνωση κάθετα προς τα πάνω και ισούται με το βάρος του νερού που έχει εκτοπιστεί από το σώμα. Με άλλα λόγια είναι το κέντρο βάρους του βυθισμένου όγκου.

Για να επιπλέει ένα πλοίο σε στάσιμα νερά, πρέπει να εκτοπίζει το βάρος του σε νερό και το κέντρο βάρους να είναι στην ίδια κάθετη γραμμή με το κέντρο άνωσης.

### 2.5.1 Εγκάρσια στατική ευστάθεια

Θεωρείται ένα πλοίο σε στάσιμα νερά όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.6. Μέσω μίας εξωτερικής δύναμης, το πλοίο κλίνει προς τα δεξιά κατά μία γωνία  $\theta$  (heel angle). Το κέντρο βάρους παραμένει αμετάβλητο, εφόσον δεν υπάρχει αλλαγή στην κατανομή του βάρους, Η «σφήνα»  $WOW_1$  που βγαίνει από το νερό έχει ένα κέντρο άνωσης  $b$  και ένα κέντρο βάρους  $g$ , ενώ η  $LOL_1$  που βυθίζεται έχει  $b_1$  και  $g_1$  αντίστοιχα. Έτσι, το συνολικό κέντρο άνωσης μετατοπίζεται από το σημείο  $B$  στο  $B_1$  κατά τρόπο ώστε οι ευθείες  $BB_1$  και  $gg_1$  να είναι παράλληλες.



Εικόνα 2.6. Εγκάρσια στατική ευστάθεια (πηγή: [20])

Οι κάθετες ευθείες που περνούν από τα κέντρα άνωσης  $B$ ,  $B_1$ , τέμνονται στο σημείο  $M$  που καλείται μετάκεντρο (Metacenter –  $M$ ). Η κάθετη απόσταση μεταξύ του κέντρου βάρους  $G$  και του μετακέντρου  $M$ , ονομάζεται μετακεντρικό ύψος (metacentric height). Εάν το  $G$  είναι κάτω από το  $M$ , τότε το μετακεντρικό ύψος θεωρείται θετικό, εάν ταυτίζονται τότε είναι μηδέν ενώ σε αντίθετη περίπτωση αρνητικό.

Για να είναι ένα πλοίο ευσταθές πρέπει να έχει θετικό μετακεντρικό ύψος, δηλαδή το κέντρο βάρους να βρίσκεται πιο κάτω από το μετάκεντρο [20].

## 2.6 Βελτιστοποίηση με την μέθοδο Taguchi

Τα πολυσύνθετα προβλήματα βελτιστοποίησης της μηχανικής, συχνά απαιτούν την εξέταση πολλών παραγόντων (factors) σε διαφορετικά επίπεδα (levels) οδηγώντας σε σημαντική ποσότητα συνδυασμών. Η τεχνική του καθορισμού και της διερεύνησης όλων των πιθανών συνθηκών σε ένα πείραμα που περιλαμβάνει πολλαπλούς παράγοντες είναι γνωστή ως design of experiments (DOE) ή factorial design [21]. Ο χρόνος και οι πόροι που χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν για να γίνει πλήρης μελέτη (full factorial design) του χωρίου σχεδίασης (design space), ειδικά στις περιπτώσεις που απαιτείται να διεξαχθούν πειράματα ή προσομοιώσεις, είναι περιοριστικοί παράγοντες του προβλήματος.

Για ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με  $m$  παράγοντες και  $L$  επίπεδα παραγόντων, οι πιθανοί συνδυασμοί για πλήρη μελέτη του χωρίου σχεδίασης είναι  $N$  και υπολογίζονται από την Εξίσωση (2.63).

$$N = L^m \quad (2.63)$$

Πίνακας 2.1. Σύγκριση μεταξύ πλήρους μελέτης και της μεθόδου Taguchi

Factors	Levels	Total number of experiments	
		Full factorial design	Taguchi design
2	2	4 ( $2^2$ )	4
3	2	8 ( $2^3$ )	4
4	2	16 ( $2^4$ )	8
7	2	128 ( $2^7$ )	8
15	2	32,765 ( $2^{15}$ )	16
4	3	81 ( $3^4$ )	9

Ένας τρόπος για να καταστεί βιώσιμη η πλήρης μελέτη του design space είναι να μειωθεί η ποιότητα των πειραμάτων. Στόχος της μεθόδου Taguchi ωστόσο, είναι να μειώσει τον αριθμό των πειραμάτων με κατάλληλο τρόπο (βλ. Πίνακα 2.1) ώστε να εξασφαλίζεται η ποιότητα και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Η μέθοδος αυτή είναι ευρέως διαδεδομένη στην βιομηχανία αφού μεγιστοποιεί την «ευρωστία» των προϊόντων και των διαδικασιών καθιστώντας τα μη ευαίσθητα στην επιρροή ανεξέλεγκτων παραγόντων. Για παράδειγμα, στην έρευνα [22] μελετήθηκε η επιρροή 3 βασικών παραμέτρων στην απόδοση ενός Blended-Wing-Body μη επανδρωμένου αεροχήματος. Στην παρούσα εργασία, η μεθοδολογία αυτή θα χρησιμοποιηθεί για να βρεθεί η βέλτιστη διάταξη και διαμόρφωση των wingsail πάνω στο Aegean Marathon.

Ο τρόπος με τον οποίο καθορίζεται ο αριθμός των πειραμάτων είναι με την δημιουργία ορθογώνιων πινάκων (Orthogonal Arrays – OAs). Το πρώτο βήμα για την κατασκευή των ορθογώνιων πινάκων είναι ο καθορισμός των συνολικών βαθμών ελευθερίας του προβλήματος, δηλαδή το άθροισμα των επιμέρους βαθμών ελευθερίας των παραγόντων. Ο κάθε παράγοντας έχει βαθμούς ελευθερίας ίσους με τα επίπεδα του, μείον ένα, καθώς ο ένας αυτός θεωρείται ως η κατάσταση αναφοράς [23]. Δηλαδή εάν ένας παράγοντας έχει 3 επίπεδα, τότε θα έχει 2 βαθμούς ελευθερίας, αφού το ένα επίπεδο είναι η κατάσταση αναφοράς με την οποία θα συγκριθούν τα άλλα 2 επίπεδα. Το δεύτερο βήμα αποτελεί την επιλογή της διάταξης του OA. Οι γραμμές του πίνακα απεικονίζουν το αριθμό των πειραμάτων και πρέπει να είναι τουλάχιστον ίσες με τους συνολικούς βαθμούς ελευθερίας. Ο αριθμός των στηλών του μεταφράζεται στον μέγιστο αριθμό παραγόντων που μπορούν να μελετηθούν από τον συγκεκριμένο πίνακα.

Για να αξιολογηθούν τα αποτελέσματα, προτείνεται [21] να χρησιμοποιείται το Signal to Noise Ratio (SNR). Μεγάλη τιμή του SNR υποδεικνύει ότι το αποτέλεσμα επηρεάζεται ελάχιστα από τον «ήχο». Τα τελικά αποτελέσματα λοιπόν μεταφράζονται σε SNR και κατατάσσονται σε 3 κατηγορίες, ανάλογα με την απαίτηση τους, όπως φαίνεται στις Εξισώσεις (2.64), (2.65), (2.66).

$$\textit{Smaller the better: SNR} = -10 \cdot \log_{10} \sum_1^n y^2 \quad (2.64)$$

$$\textit{Nominal the better: SNR} = -10 \cdot \log_{10} \sum_1^n \frac{\bar{Y}}{S_y^2} \quad (2.65)$$

$$\textit{Bigger the better: SNR} = -10 \cdot \log_{10} \sum_1^n \frac{1}{y^2} \quad (2.66)$$

Όπου,  $n$  είναι ο αριθμός των πειραμάτων,  $y$  το μέγεθος που χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση του αποτελέσματος (performance metric) και ορίζεται κατάλληλα από τον σχεδιαστή,  $\bar{Y}$ ,  $S_y^2$  είναι η μέση τιμή και η διακύμανση του κάθε performance metric  $y$ .

$$\bar{Y} = \frac{\sum_1^n y}{n} \quad (2.67)$$

$$S_y^2 = \frac{\sum_1^n (y - \bar{Y})^2}{n} \quad (2.68)$$

Με την έννοια «Smaller the better» σημαίνεται πως το αποτέλεσμα είναι επιθυμητό να είναι το μικρότερο δυνατό, σε αντίθεση με το «Bigger the better» που το αποτέλεσμα πρέπει να είναι το μεγαλύτερο δυνατό. Στην περίπτωση που χρειάζεται να επιτευχθεί συγκεκριμένη τιμή του αποτελέσματος, χρησιμοποιείται το «Nominal the better».

Η μέθοδος Taguchi συνηθίζεται να συνοδεύεται από μία ανάλυση διασποράς (ANOVA) από την οποία προκύπτει η επιρροή του κάθε παράγοντα στο τελικό αποτέλεσμα. Δηλαδή με την

προσέγγιση αυτή ο σχεδιαστής μπορεί να αντιληφθεί ποιοι παράγοντες είναι σημαντικοί και κατά πόσο επηρεάζουν το αποτέλεσμα.

Σύμφωνα με την μεθοδολογία που παρουσιάζεται στην [24], και χρησιμοποιείται και στην [22], ορίζεται και η ANOVA στην παρούσα εργασία. Οι αριθμοί των παραγόντων και των επιπέδων τους σημαίνονται με  $i, j$  αντίστοιχα, ενώ με  $k$  ορίζεται ο συνολικός αριθμός των πειραμάτων. Το ποσοστό επιρροής του κάθε παράγοντα υπολογίζεται από την Εξίσωση (2.69).

$$\text{Percentage Contribution} = \frac{SS_i}{SS} \cdot 100 \quad (2.69)$$

Όπου,  $SS_i$  και  $SS$  είναι το άθροισμα των τετραγώνων κάθε παράγοντα  $i$  και το άθροισμα των τετραγώνων όλων των παραγόντων, αντίστοιχα, και βρίσκονται από τις Εξισώσεις (2.70) & (2.71).

$$SS_i = \sum_1^j (SNR_{ij} - \overline{SNR})^2 \quad (2.70)$$

$$SS = \sum_1^k (SNR_k - \overline{SNR})^2 \quad (2.71)$$

Ο όρος  $SNR_{ij}$  είναι η μέση τιμή  $SNR$  του παράγοντα  $i$  στο επίπεδο  $j$  και ο  $SNR_k$  αναφέρεται στο πείραμα  $k$ .

Επιπλέον η συνολική μέση τιμή του  $SNR$  υπολογίζεται ως εξής:

$$\overline{SNR} = \frac{\sum_1^k SNR_k}{k} \quad (2.72)$$

Το κλάσμα F της ανάλυσης ANOVA βρίσκεται από την σχέση (2.73):

$$F_i = \frac{MS_i}{MS_E} \quad (2.73)$$

Όπου,  $MS_i$  και  $MS_E$  είναι τα μέσα τετράγωνα του κάθε παράγοντα  $i$  και του σφάλματος αντίστοιχα και είναι:

$$MS_i = \frac{SS_i}{df_i} \quad (2.74)$$

$$MS_E = \frac{SS_E}{df_E} \quad (2.75)$$

Τα  $df_i$  και  $df_E$  είναι οι βαθμοί ελευθερίας των παραγόντων  $i$  και του σφάλματος, αντίστοιχα, ενώ  $SS_E$  είναι το άθροισμα των τετραγώνων του σφάλματος:

$$df_i = \text{number of levels of factor } i - 1 \quad (2.76)$$

$$df_E = df_T - \sum_1^i df_i \quad (2.77)$$

$$SS_E = SS - \sum_1^i SS_i \quad (2.78)$$

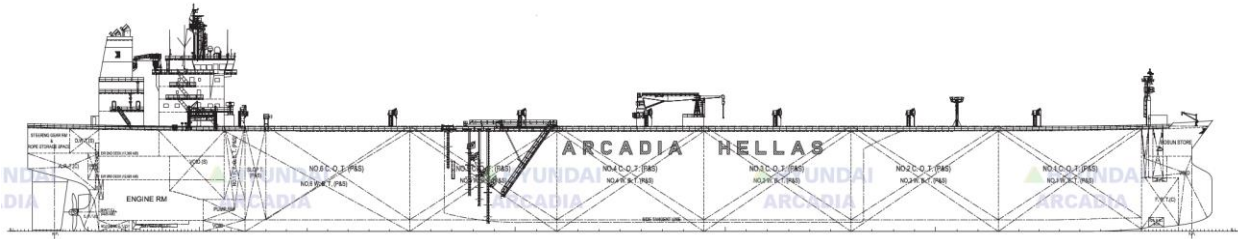
Ο βαθμός ελευθερίας  $df_T$  ισούται με τον αριθμό των διατάξεων (Configuration) μείον έναν.

Ανακεφαλαιώνοντας, χρησιμοποιείται η μέθοδος Taguchi με σκοπό να μειωθεί ο αριθμός των πειραμάτων χωρίς να χαθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων συγκριτικά με μία πλήρη μελέτη. Κατόπιν υπολογίζεται η επί τοις εκατό επίδραση κάθε παράγοντα στις παραμέτρους αξιολόγησης και τέλος με την βοήθεια της ANOVA και ενός F-test βρίσκεται η σημαντικότητα κάθε παράγοντα στο τελικό αποτέλεσμα.

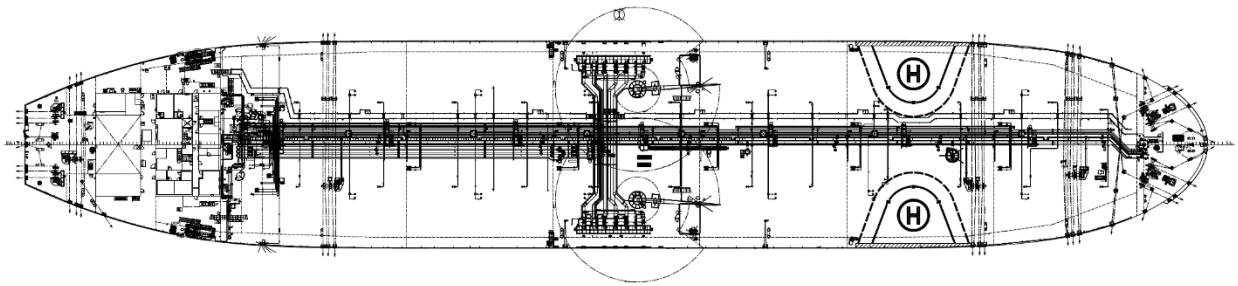


## Κεφάλαιο 3 Case Study: Aegean Marathon

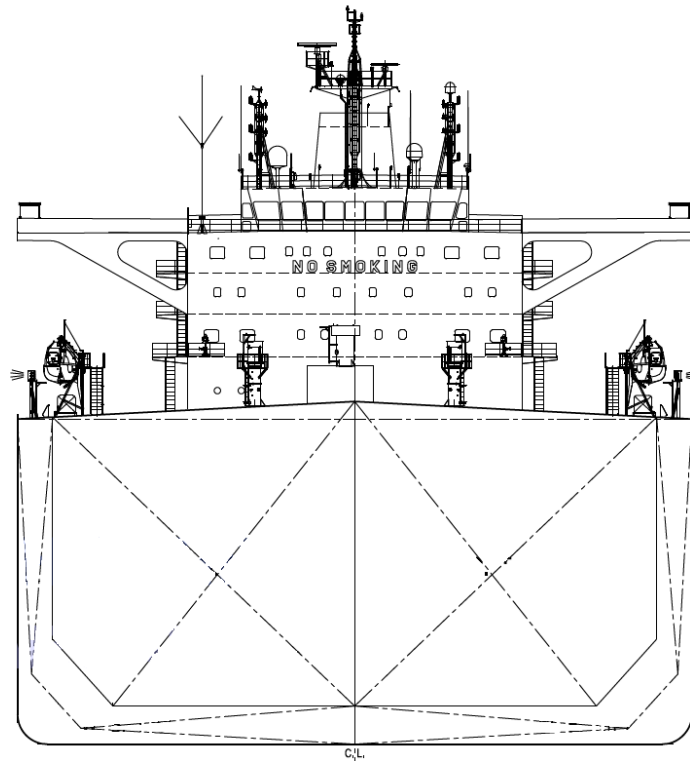
Το υπό μελέτη δεξαμενόπλοιο, Aegean Marathon, παρουσιάζεται στις Εικόνες 3.1, 3.2, 3.3.



Εικόνα 3.1. Πρόοψη του Aegean Marathon



Εικόνα 3.2. Κάτοψη του Aegean Marathon



Εικόνα 3.3. Τομή στο μέσο του Aegean Marathon

Τα κύρια χαρακτηριστικά του υπό μελέτη πλοίου που απαιτούνται για τους υπολογισμούς, παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1. Κύρια χαρακτηριστικά του Aegean Marathon σε καταστάσεις φόρτωσης *fully loaded* και *ballast*

	Fully loaded	Ballast
Displacement, $\Delta$ (t)	183,853.0	116,963.1
Length of Water Line, $L_{WL}$ (m)	269.20	262.99
Block Coefficient, $C_B$ (-)	0.848	0.809
Midship Coefficient, $C_M$ (-)	0.9986	0.9972
Waterplane Area Coefficient, $C_{WL}$ (-)	0.894	0.863
Prismatic Coefficient, $C_P$ (-)	0.849	0.811
Draft Forward, $d_{for}$ (m)	17.36	9.94
Draft Aft, $d_{aft}$ (m)	16.99	12.94
Draft Mean, $d$ (m)	17.17	11.44
L.C.B. from M/S (% $L_{PP}$ )	2.7818	5.87
L.C.F. from M/S (m)	-3.36	1.97
T.P.C. (t/cm)	118.62	114.45
L.C.G. from M/S (m)	7.32	5.93
V.C.G. above B.L. (m)	13.32	11.50
Corrected Metacentric Height, $GM$ (m)	5.38	10.30
Heeling Angle, $\varphi$ ( $^\circ$ )	-0.3	-0.2

### 3.1 Κύτος

Τα υδροδυναμικά παράγωγα μπορούν να βρεθούν με 4 μεθόδους. Η πρώτη και πιο αξιόπιστη είναι η πειραματική μελέτη μοντέλου του εκάστοτε πλοίου σε υδροδυναμική σήραγγα και η εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Η δεύτερη αφορά την μοντελοποίηση και επίλυση του πλοίου με την βοήθεια της Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Η τρίτη είναι η απευθείας λήψη δεδομένων από πειραματικές μελέτες παρόμοιων πλοίων, ενώ με την τέταρτη υπολογίζονται τα derivatives από εμπειρικές σχέσεις ή εξισώσεις που έχουν προκύψει από στατιστικές παλινδρομήσεις λαμβάνοντας υπόψη πλήθος πλοίων.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας τα derivatives που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό των εξωτερικών φορτίων στο κύτος του πλοίου, λήφθηκαν από [6] και παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2. Στο πείραμα που πραγματοποίησαν, χρησιμοποίησαν μοντέλο δεξαμενοπλοίου με παρόμοια  $L/B$ ,  $B/d$  και  $C_B$ . Η απόκλιση τους από το Aegean Marathon είναι της τάξης του 5%.

Πίνακας 3.2. Υδροδυναμικά παράγωγα και συντελεστές αδιατάραχτου νερού (πηγή: [6])

Hydrodynamic Derivatives	
$X'_{\beta\beta}$	0.0046
$X'_{\beta\varphi}$	-0.0277
$X'_{\varphi\varphi}$	0.0176
$X'_{\beta\beta\beta\beta}$	0.1616
$Y'_{\beta}$	0.2836
$Y'_{\varphi}$	0.0237
$Y'_{\beta\beta\beta}$	0.6724
$Y'_{\beta\beta\varphi}$	0.3467
$Y'_{\beta\varphi\varphi}$	1.5391
$Y'_{\varphi\varphi\varphi}$	-0.6382
$N'_{\beta}$	0.1264
$N'_{\varphi}$	-0.0225
$N'_{\beta\beta\beta}$	-0.0085
$N'_{\beta\beta\varphi}$	-0.0379
$N'_{\beta\varphi\varphi}$	-0.0454
$N'_{\varphi\varphi\varphi}$	-0.0775
$K'_{\beta}$	-0.0312
$K'_{\varphi}$	-0.0582
$K'_{\beta\beta\beta}$	-1.1221
$K'_{\beta\beta\varphi}$	2.4186
$K'_{\beta\varphi\varphi}$	1.5020
$K'_{\varphi\varphi\varphi}$	2.5521
Calm water resistance coefficients	
$R_0$	$1.16 \cdot 10^{-2}$
$R_1$	$-1.15 \cdot 10^{-2}$
$R_2$	$-1.58 \cdot 10^{-1}$
$R_3$	1.14

Τα υδροδυναμικά φορτία που ασκούνται στο κύτος του πλοίου για γωνίες  $\beta$  από  $-30^\circ$  έως  $30^\circ$  και  $\varphi$  από  $0^\circ$  έως  $12^\circ$  με βήμα  $3^\circ$ , παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.4.

### 3.2 Πηδάλιο & Προπέλα

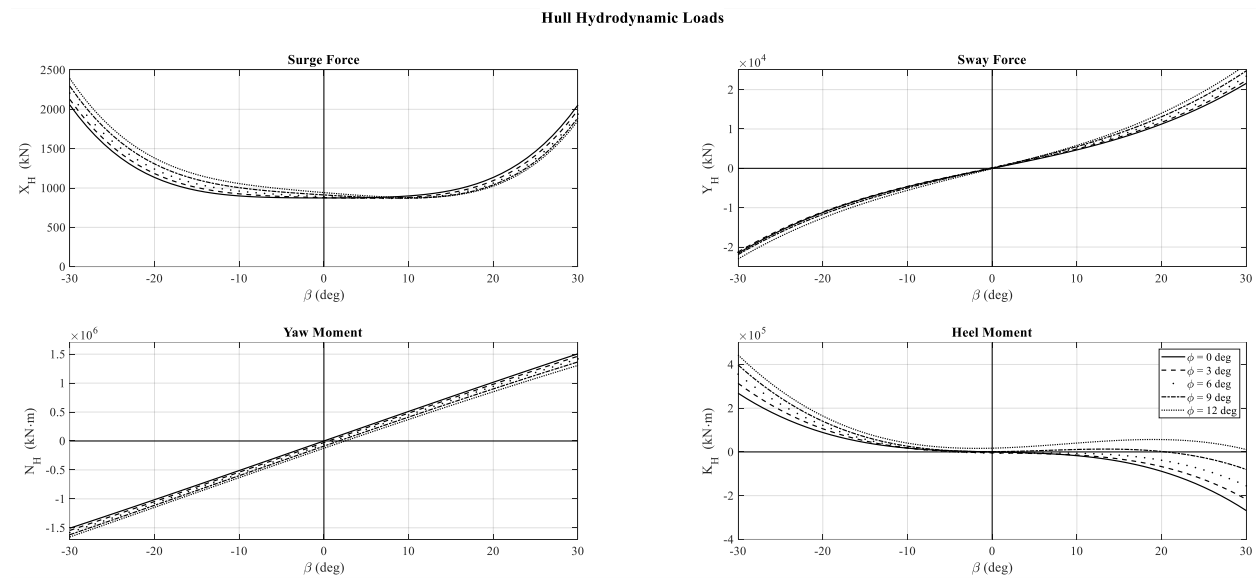
Οι βασικές πληροφορίες και τα χαρακτηριστικά του rudder και της προπέλας του συγκεκριμένου δεξαμενοπλοίου παρουσιάζονται στους Πίνακες 3.3 και 3.4.

Πίνακας 3.3. Χαρακτηριστικά rudder του Aegean Marathon

Rudder's Particulars	
Aspect Ratio, $\lambda$ (m)	1.50
Height, $h_R$ (m)	11.10
Area, $A_R$ (m <sup>2</sup> )	82.14
$l - t_R$	0.778
$\alpha_H$	0.557
$x'_H$	-0.40
$x'_R$	-0.50
$z'_R$	0.68
Maximum angle for steering, $\delta_{min/max}$ (°)	$\pm 35$

Πίνακας 3.4. Χαρακτηριστικά προπέλας του Aegean Marathon

Propeller's Particulars	
Diameter, $D_P$ (m)	8.80
Pitch, $P$ (m)	6.379
Revolution @ M.C.R., $n_{M.C.R.}$ (rpm)	77.10
$l - t_P$	0.7708
$l - w_{P0}$	0.5184
$\alpha_0$	0.2930
$\alpha_1$	-0.2748
$\alpha_2$	-0.1389



Εικόνα 3.4. Υδροδυναμικά φορτία κύτους

### 3.3 Wingsails

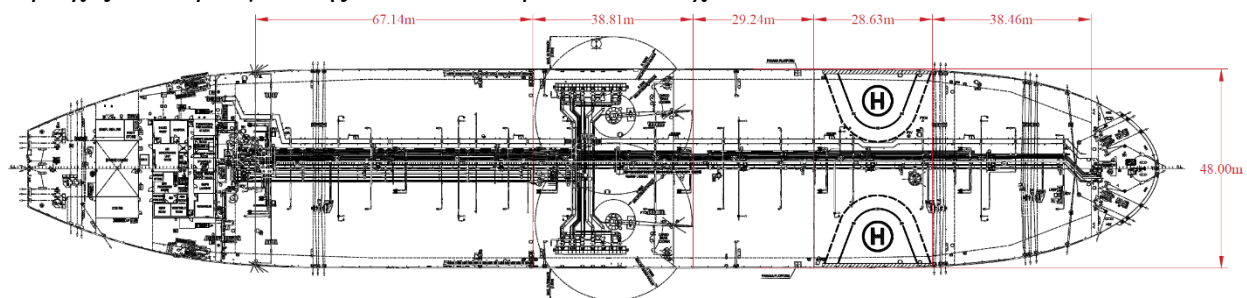
#### 3.3.1 Λειτουργία

Η μελέτη για την λειτουργία των wingsail πάνω στο πλοίο, βασίζεται στην πρώτη παραδοχή (βλ. Απαιτήσεις), δηλαδή ότι θα λειτουργούν σε ταχύτητες ανέμων 2-8 Beaufort, ενώ σε μεγαλύτερες ή μικρότερες ταχύτητες θα παραμένουν κατεβασμένα. Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν ταχύτητες ανέμου 2-5 Beaufort και κατευθύνσεις  $30^{\circ}$ - $150^{\circ}$  και  $210^{\circ}$ - $330^{\circ}$  για λόγους που θα αναλυθούν αργότερα.

#### 3.3.2 Θέση ιστίων και ευστάθεια πλοίου

Πάνω στο κατάστρωμα (deck) του πλοίου υπάρχουν συγκεκριμένες περιοχές που μπορούν να τοποθετηθούν wingsail ώστε η φορτοεκφόρτωση του να πραγματοποιείται απρόσκοπτα αλλά και να μην εμποδίζονται οι υπόλοιπες λειτουργίες του.

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.5, οι διαθέσιμοι χώροι είναι εκείνοι που σημαίνονται με τις αποστάσεις 67.14m, 29.24m και 38.46m. Στις ενδιάμεσες, 38.81m και 28.63m είναι οι γερανοί και οι περιοχές απο-προσγείωσης του ελικοπτερου, αντίστοιχα.



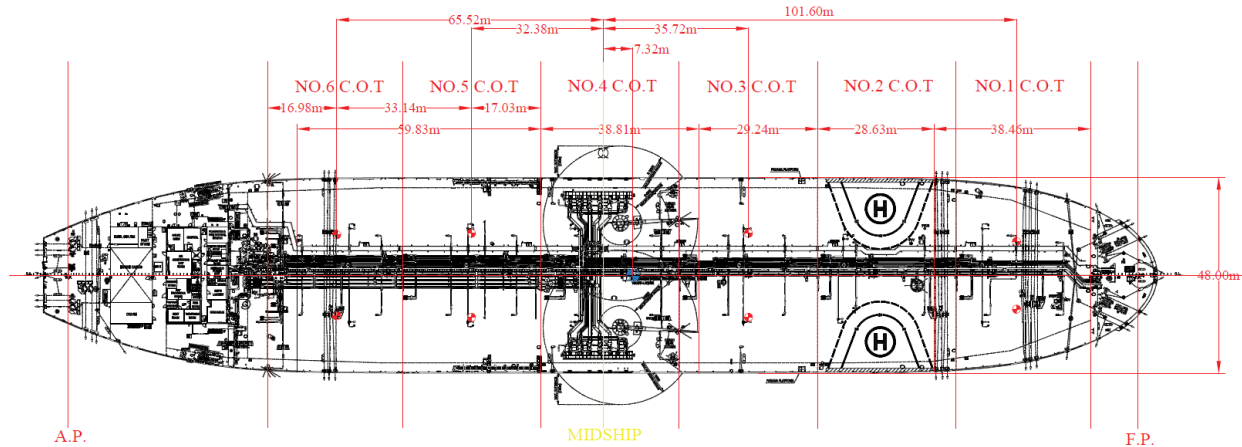
Εικόνα 3.5. Κάτοψη του πλοίου με τις περιοχές που μπορούν να τοποθετηθούν τα wingsail

Επιλέγεται τα wingsail να τοποθετηθούν σε δυάδες εκατέρωθεν των κυρίων σωλήνων ώστε το βάρος τους να είναι τοποθετημένο συμμετρικά στον διαμήκη του άξονα και να μην επηρεάζεται το κέντρο βάρους του στον άξονα  $y$  (Εικόνα 2.2). Επιπλέον, τοποθετώντας τα έτσι επηρεάζεται ελάχιστα η ορατότητα από την γέφυρα.

Θεωρητικά, τα wingsail θα μπορούσαν να τοποθετηθούν σε οποιαδήποτε θέση στις προαναφερθείσες αποστάσεις, αλλά στην συγκεκριμένη περίπτωση θεωρείται ότι τα κέντρα βάρους τους μπορούν να τοποθετηθούν μόνο πάνω στα κέντρα βάρους των δεξαμενών αργού πετρελαίου (Crude Oil Tanks – C.O.T.). Σε συνδυασμό με μείωση του φορτίου των δεξαμενών κατά το βάρος του κάθε wingsail, εξασφαλίζεται η μη μεταβολή του συνολικού κέντρου βάρους του Aegean Marathon στον διαμήκη άξονα  $x$ . Επιπλέον, είναι αναμενόμενο, λόγω μείωσης της πληρότητας των δεξαμενών, να δημιουργηθούν νέες ελεύθερες επιφάνειες που θα μεταβάλλουν την ευστάθεια, ωστόσο θεωρείται πως το βάρος του κάθε wingsail είναι πολύ μικρότερο από το βάρος του φορτίου κι έτσι τα φαινόμενα αυτά δεν λαμβάνονται υπόψιν.

Ο μόνος άξονας στον οποίο θα μεταβληθεί το κέντρο βάρους του πλοίου, είναι ο  $z$  (Εικόνα 2.2). Τα CG των αεροδυναμικών διατάξεων βρίσκονται ψηλότερα από το CG του πλοίου, επομένως αναμένεται πως το τελευταίο θα μετατοπιστεί προς τα επάνω με την τοποθέτησή τους.

Καταλήγοντας, η ευστάθεια του πλοίου επηρεάζεται μόνο στον  $z$  άξονα λόγω βάρους των αεροδυναμικών διατάξεων και σε όλους τους άξονες εξαιτίας των αεροδυναμικών φορτίων που αναπτύσσονται κατά την λειτουργία τους.



Εικόνα 3.6. Κάτοψη του Aegean Marathon με τα κέντρα βάρους των δεξαμενών και το συνολικό κέντρο βάρους του

Στην Εικόνα 3.6 παρουσιάζονται τα κέντρα βάρους των δεξαμενών 1, 3, 5, 6 (κόκκινα σε αποστάσεις +35.72m, +101.60m, -32.38m και -65.52m από το midship) και το συνολικό κέντρο βάρους του πλοίου (μπλε σε απόσταση +7.32m από το midship). Έτσι λοιπόν, είναι δυνατόν να τοποθετηθούν 4 δυάδες wingsail. Το CG της δεξαμενής 6 απέχει περίπου 17m από την αρχή της γέφυρας, επομένως θεωρείται ότι δεν μπορεί να τοποθετηθεί εκεί wingsail για να μην εμποδίζεται η λειτουργία του πλοίου. Τελικά, οι δυάδες που μπορούν να τοποθετηθούν είναι 1, 2 ή 3.

### 3.3.3 Αεροδυναμικά χαρακτηριστικά

Η απόσταση των κεντρικών σωλήνων από τις άκρες του πλοίου είναι λίγο μεγαλύτερη από 20m, άρα θεωρείται ότι η μέγιστη χορδή στην ρίζα ( $C_{root}$ ) που μπορούν να έχουν τα wingsail ώστε να μην εξέχουν είναι  $C_{root,max} = 20m$ . Επιλέγεται η χορδή αυτή να παραμείνει σταθερή και ίση με την μέγιστη και να διερευνηθούν οι παράμετροι του διατάματος (Aspect Ratio –  $AR$ ) και του λόγου εγκλεισμού (taper ratio –  $\lambda$ ). Το  $AR$  επιλέγεται να λαμβάνει τιμές από 2.5-3.5, καθώς μικρότερες από 2.5 θα καθιστούσαν «κοντό» το wingsail, ενώ με τιμές μεγαλύτερες από 3.5 θα ήταν αρκετά ψηλό και δεν θα καλυπτόταν ο περιορισμός των 60m σε ύψος (βλ. Απαιτήσεις). Σύμφωνα με τον Anderson [25], προτείνεται το taper ratio να κυμαίνεται μεταξύ 0.4-0.5 για βέλτιστη αεροδυναμική συμπεριφορά. Μία ακόμη αεροδυναμική παράμετρος είναι η οπισθόκλιση (sweep) στο 25% της χορδής,  $A_{c/4}$ , και θεωρείται για όλες τις περιπτώσεις ότι είναι μηδέν.

Το  $AR$  συνδέεται με την επιφάνεια αναφοράς του wingsail,  $S$ , και το ύψος του (span),  $b$ .

$$AR = \frac{b^2}{S} \quad (3.1)$$

$$S = b \cdot \left( \frac{C_{root} + C_{tip}}{2} \right) \quad (3.2)$$

$$C_{tip} = \lambda \cdot C_{root} \quad (3.3)$$

Κρατώντας σταθερή τη χορδή στην ρίζα και μεταβάλλοντας τα  $AR$ ,  $\lambda$ , επηρεάζεται το span και η χορδή στην άκρη του wingsail,  $C_{tip}$ , και τα μεγέθη αυτά συνδέονται όπως φαίνεται στις Εξισώσεις (3.1), (3.2), (3.3).

### 3.3.4 Εφαρμογή μεθόδου Taguchi

Η μέθοδος Taguchi, όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία για να εκλεχθεί η βέλτιστη διαμόρφωση και διάταξη (configuration) των wingsail. Αποφασίζεται λοιπόν ως παράμετροι να είναι τα  $AR$ ,  $\lambda$  και ο αριθμός των δυάδων, σε 3 επίπεδα ο καθένας, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.5.

Πίνακας 3.5. Παράμετροι και τα επίπεδα τους

Factors	Levels		
	I	II	III
A, AR	2.5	3	3.5
B, $\lambda$	0.4	0.45	0.5
C, Pairs	1	2	3

Οι πίνακες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με παράγοντες που έχουν 3 levels, είναι οι  $L_9$ ,  $L_{27}$ ,  $L_{81}$ . Οι αριθμοί 9, 27 και 81 υποδηλώνουν τον αριθμό των πειραμάτων-configuration του προβλήματος. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα 3 παραγόντων με 3 επίπεδα ο κάθε ένας, επιλέγεται ο ορθογώνιος πίνακας  $L_9$ , και τα configuration που προκύπτουν φαίνονται στον Πίνακα 3.6. Δηλαδή, ο συνδυασμός των παραγόντων A, B, C παράγει 9 διαφορετικά configuration των wingsail.

Ως κριτήρια για την αξιολόγηση της επίδοσης κάθε configuration, επιλέγονται: ο συντελεστής παραγωγής ώσης  $C_X$ , οι γωνίες  $\beta$ ,  $\delta$ ,  $\varphi$  και το βάρος των wingsail, και βελτιστοποιούνται με τα κριτήρια «Bigger the better» για τον συντελεστή ώσης και «Smaller the better» για τα υπόλοιπα.

Πίνακας 3.6.  $L_9$  ορθογώνιος πίνακας

Configuration	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

### 3.3.5 Αεροτομές

Οι αεροτομές των αεροσκαφών είναι σχεδιασμένες να παράγουν αρκετό lift και το μικρότερο δυνατό drag σε μικρές γωνίες προσβολής κατά την διάρκεια της ευθείας πλεύσης. Μόνον στις φάσεις της απογείωσης και προσγείωσης απαιτείται να έχει η αεροτομή μεγάλο συντελεστή άντωσης. Αντιθέτως, στα ιστία ενός πλοίου χρειάζονται αεροτομές που στην ευθεία πλεύση να έχουν μεγάλο  $C_l$  και μικρό  $C_d$  [26]. Ωστόσο, στα πλαίσια της εργασίας δεν θα αναπτυχθούν νέες κατάλληλες αεροτομές για τα wingsail, αλλά θα συλλεχθούν και θα μελετηθούν υπάρχουσες αεροτομές από τον κλάδο της αεροναυτικής.

Επιλέγεται να τοποθετηθούν συμμετρικές αεροτομές στα wingsail, καθώς θα μπορούν να παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά σε ανέμους είτε όταν έρχονται από την δεξιά (starboard side) είτε από την αριστερή μεριά (port side) του πλοίου.

Για κάθε ένα από τα 9 configuration πρέπει να υπολογιστεί η μέση αεροδυναμική χορδή (Mean Aerodynamic Chord – MAC) και να διερευνηθεί ποια αεροτομή είναι η καταλληλότερη.

$$MAC = \frac{2}{3} \cdot C_{root} \cdot \frac{1 + \lambda + \lambda^2}{1 + \lambda} \quad (3.4)$$

$$Re = \frac{\rho \cdot AWS \cdot MAC}{\mu} \quad (3.5)$$

Όπου, οι συνθήκες του αέρα είναι: πυκνότητα  $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$  και κινηματικό ιξώδες  $\mu = 1.7404 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ , AWS είναι η σχετική ταχύτητα του ανέμου για 2-5 Beaufort και κατευθύνσεις  $30^\circ$ - $150^\circ$  (Εξίσωση (2.46)), MAC η μέση αεροδυναμική χορδή για  $\lambda = 0.4$ - $0.45$ - $0.5$ .

Οι αριθμοί *Reynolds* για τις διάφορες ταχύτητες και κατευθύνσεις ανέμου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.7.



Πίνακας 3.7. Αριθμοί Reynolds για ταχύτητες ανέμου 2-5 Beaufort και κατευθύνσεις 30°-150°

Reynolds Number	$\lambda = 0.4$		$\lambda = 0.45$		$\lambda = 0.5$	
	min	max	min	max	min	max
Re <sub>2bf</sub>	$3.99 \cdot 10^6$	$8.93 \cdot 10^6$	$4.10 \cdot 10^6$	$9.13 \cdot 10^6$	$4.17 \cdot 10^6$	$9.35 \cdot 10^6$
Re <sub>3bf</sub>	$1.94 \cdot 10^6$	$1.10 \cdot 10^7$	$1.99 \cdot 10^6$	$1.13 \cdot 10^7$	$2.03 \cdot 10^6$	$1.15 \cdot 10^7$
Re <sub>4bf</sub>	$7.23 \cdot 10^5$	$1.35 \cdot 10^7$	$7.40 \cdot 10^5$	$1.38 \cdot 10^7$	$7.57 \cdot 10^5$	$1.41 \cdot 10^7$
Re <sub>5bf</sub>	$3.38 \cdot 10^6$	$1.62 \cdot 10^7$	$3.46 \cdot 10^6$	$1.66 \cdot 10^7$	$3.54 \cdot 10^6$	$1.70 \cdot 10^7$
Total	$7.23 \cdot 10^5$	$1.62 \cdot 10^7$	$7.40 \cdot 10^5$	$1.66 \cdot 10^7$	$7.57 \cdot 10^5$	$1.70 \cdot 10^7$

Οι  $Re$  όπως φαίνεται στον παραπάνω Πίνακα κυμαίνονται από  $7.23 \cdot 10^5$  ο ελάχιστος, έως  $1.70 \cdot 10^7$  ο μέγιστος, επομένως για αυτό το εύρος θα μελετηθούν οι συμμετρικές αεροτομές των wingsail.

Η καταλληλότερη αεροτομή, σύμφωνα με [27] είναι εκείνη που έχει:

- Τον μεγαλύτερο συντελεστή άντωσης,  $C_{lmax}$
- Τον χαμηλότερο συντελεστή οπισθέλκουσας,  $C_{dmin}$
- Τον υψηλότερο λόγο  $(C_l/C_d)_{max}$
- Την μεγαλύτερη κλίση συντελεστή άντωσης συναρτήσει της γωνίας προσβολής
- Τον μικρότερο συντελεστή ροπής,  $C_m$
- Όσο το δυνατόν μεγαλύτερη γωνία απώλειας στήριξης και ομαλή συμπεριφορά του  $C_l$  μετά το stall

Επιπλέον, ο άνεμος τόσο κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας έχει υψηλή τύρβη και η ταχύτητα και η στροφή (twist) του σχετικού ανέμου που «βλέπουν» τα wingsail μεταβάλλονται χρονικά. Συστήνεται λοιπόν, να επιλέγονται προφίλ αεροτομών που δεν έχουν εξαιρετικά μεγάλο συντελεστή άντωσης αφού υπάρχει περίπτωση να πέσουν σε απώλεια στήριξης εξαιτίας της δυναμικής συμπεριφοράς του ανέμου [28].

Για το εύρος του αριθμού Reynolds που εξάχθηκε παραπάνω, αναλύθηκαν 50 συμμετρικές αεροτομές σε γωνίες προσβολής 0°-25° στο πρόγραμμα XFLR.

Οι 6 αεροτομές που παρουσιάζουν τις καλύτερες συμπεριφορές βάσει των κριτηρίων που τέθηκαν νωρίτερα είναι οι NACA 0012, BELL 540, GOE 410, Joukowski 15%, EPPLER 472, Joukowski 12%, με τις 2 τελευταίες να έχουν ελάχιστα καλύτερες συμπεριφορές. Η EPPLER 472 είναι καλύτερη στους χαμηλούς αριθμούς Reynolds, ενώ η Joukowski υπερτερεί στους μεσαίους και υψηλούς. Επιπλέον, η Joukowski παρουσιάζει το μέγιστο πάχος της στο 25% της χορδής, έναντι 17.5% της EPPLER, που κατασκευαστικά είναι προτιμητέο για καλύτερη στήριξη.

Επομένως, ως αεροτομή των wingsail επιλέγεται η Joukowski 12% για όλα τα configuration και παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.7. Αξίζει να σημειωθεί πως και για ταχύτητες ανέμου 6-8 Beaufort, η επιλεγθείσα αεροτομή είναι η καταλληλότερη.



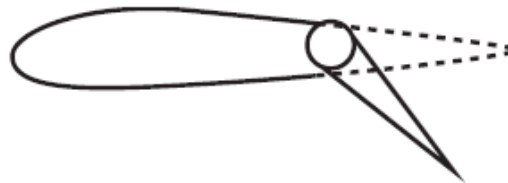
Εικόνα 3.7. Η αεροτομή Joukowski 12%

### 3.3.6 Υπεραντωτικές διατάξεις

Ο Smith [29] έχει αποδείξει ότι μία πτέρυγα με  $(n+1)$  στοιχεία, κατά κανόνα παρουσιάζει υψηλότερο μέγιστο συντελεστή άντωσης από ότι μία πτέρυγα με  $(n)$  στοιχεία. Το γεγονός αυτό είναι επιθυμητό στην περίπτωση των wingsail καθώς αναζητάτε η μεγιστοποίηση της ώσης.

Διάφορες γεωμετρίες υπεραντωτικών διατάξεων στην ακμή φυγής της πτέρυγας (flaps) έχουν αναπτυχθεί και μελετηθεί για την εφαρμογή τους σε αεροπλάνα. Για λόγους απλότητας της κατασκευής και βάρους, επιλέγεται να μελετηθούν τα plain flaps στην συγκεκριμένη εφαρμογή.

Σύμφωνα με τις συστάσεις των [27], [30], [31], η χορδή τους είναι 20-30% της χορδής της πτέρυγας και επιλέγεται να είναι 30%.



Εικόνα 3.8. Plain flap

### 3.3.7 Μοντέλα CAD

Για την πραγματοποίηση των CFD προσομοιώσεων είναι αναγκαίο να δημιουργηθούν τρισδιάστατα μοντέλα CAD για τα 9 διαφορετικά configuration.

Για την σχεδίαση κάθε configuration:

1. Η χορδή στην ρίζα παραμένει σταθερή και ίση με  $C_{root} = 20m$ , και προκύπτει η χορδή στην άκρη  $C_{tip}$ , μέσω της Εξίσωσης (3.3), για τα 3 διαφορετικά  $\lambda$
2. Το span  $b$  του wingsail επιλέγεται κατάλληλα ώστε να επιτυγχάνεται το ζητούμενο  $AR$
3. Η οπισθόκλιση στο 25% της χορδής,  $A_{c/4}$ , είναι μηδενική
4. Σχεδιάζονται οι υπεραντωτικές διατάξεις με 30% χορδή
5. Επιλέγεται ο αριθμός των δυάδων και τοποθετούνται στις κατάλληλες αποστάσεις

Μεταβάλλοντας οποιαδήποτε από τις παραπάνω παραμέτρους, δεν επηρεάζει τις υπόλοιπες, επομένως είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Η επιφάνεια  $S$ , αναπόφευκτα εισέρχεται στους υπολογισμούς, ωστόσο δεν μελετάται ξεχωριστά.

Στις Εικόνες 3.9, 3.10, παρουσιάζεται ενδεικτικά το τρισδιάστατο CAD του Configuration 7 των wingsail με μηδενική εκτροπή των flap (βλ. Πίνακες 3.5, 3.6) και στην Εικόνα 3.11, οι διαφορές μεταξύ των Configuration 2 & 7.

Στον παρακάτω Πίνακα, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού του κάθε Configuration.

Πίνακας 3.8. Χαρακτηριστικά σχεδιασμού των Configuration

Configuration	Root Chord – $C_{root}$ (m)	Tip Chord – $C_{tip}$ (m)	Span – $b$ (m)	Planform Area – $S$ (m <sup>2</sup> )
1	20	8	35.00	490.00
2	20	9	36.25	525.63
3	20	10	37.50	562.50
4	20	8	42.00	588.00
5	20	9	43.50	630.75
6	20	10	45.00	675.00
7	20	8	49.00	686.00
8	20	9	50.75	735.88
9	20	10	52.50	787.50

Οι αποστάσεις των ζευγαριών των wingsail επιλέχθηκαν κατά τρόπο τέτοιο ώστε οι δυνάμεις που αναπτύσσονται να βρίσκονται κοντά στο κέντρο βάρους του πλοίου. Δηλαδή, στα Configuration 1, 6 και 8 που είναι ένα ζευγάρι, τοποθετήθηκε στην μεσαία περιοχή πάνω από τις δεξαμενές Νο. 3 (Εικόνα 3.6). Στα Configuration 2, 4 και 9 τα δύο ζευγάρια τοποθετήθηκαν σε απόσταση 68.1m και το CG βρίσκεται ενδιάμεσα τους. Τέλος, στις υπόλοιπες περιπτώσεις το τρίτο pair βρίσκεται πάνω από τις δεξαμενές Νο. 1.

### 3.3.8 Βάρος

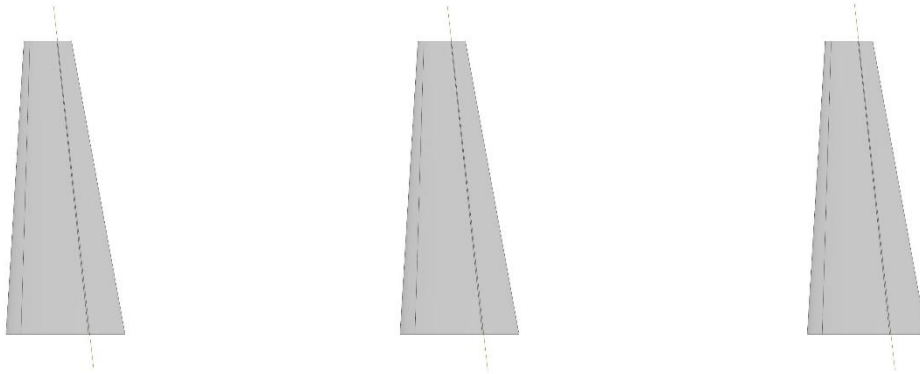
Η εταιρεία TOKYO-Mitsui O.S.K. Lines, Ltd., κατασκεύασε ένα wingsail (Εικόνα 3.12) για στατικές δοκιμές στην στεριά. Σύμφωνα με το επίσημο site της [32], το wingsail αυτό έχει διαστάσεις: συνολικό ύψος μαζί με τον μηχανισμό 27.5m, καθαρό ύψος 20m, χορδή 10m που συνεπάγονται επιφάνεια 200m<sup>2</sup>. Η κατασκευή αυτή ζυγίζει περίπου 60 τόνους. Εφόσον, δεν υπάρχουν άλλα διαθέσιμα δεδομένα βάρους για wingsail, θα θεωρηθεί, σε αυτό το στάδιο της μελέτης, ότι το βάρος αυτών που θα τοποθετηθούν στο Aegean Marathon, εξαρτάται γραμμικά από την επιφάνεια τους, δεδομένου ότι τα 200m<sup>2</sup> μαζί με τον μηχανισμό ζυγίζουν 60 τόνους. Σημειώνεται πως στην πραγματικότητα η παραδοχή αυτή υπερεκτιμά το βάρος τους, το οποίο δεν εξαρτάται γραμμικά από την επιφάνεια. Αφενός υπάρχει taper ratio στα υπό μελέτη ιστία, δηλαδή μικραίνουν κατά ύψος, και αφετέρου το κεντρικό κάθετο δομικό στοιχείο (spar) ζυγίζει περισσότερο από τα οριζόντια στοιχεία (ribs), άρα η μεταβολή κατά ύψος θα έχει σημαντικότερη επίδραση στο βάρος από ότι η μεταβολή κατά πλάτος.

Πίνακας 3.9. Βάρος των wingsail και μεταβολή του μετακεντρικού ύψους

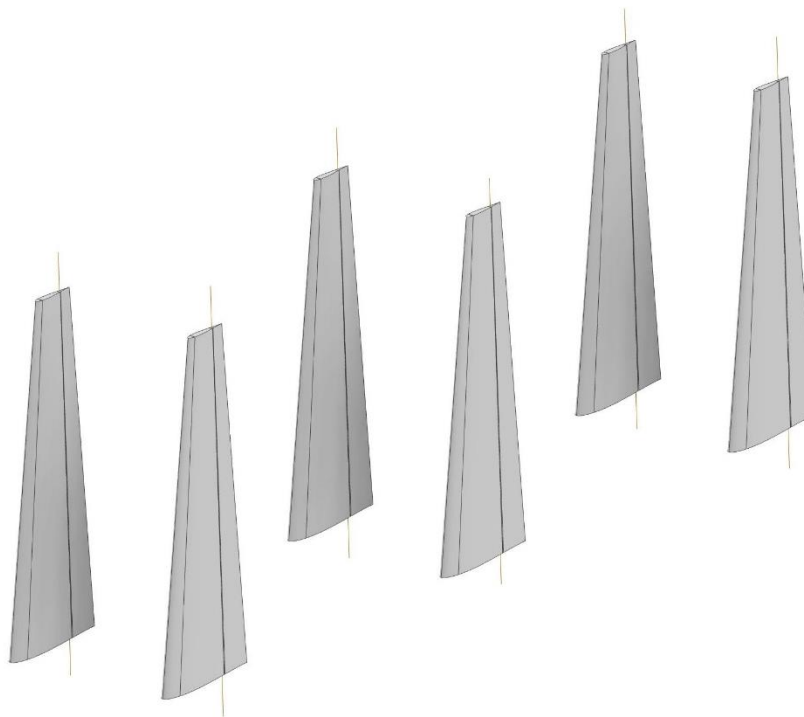
Configura- tion	No. of Wing- sails	Total Planform Area (m <sup>2</sup> )	Total Weight (tn)	Total Cargo Reduction (%)	GM shift on z axis (m)
1	2	980.00	294.00	0.191	-0.0397
2	4	2,102.50	630.75	0.410	-0.0869
3	6	3,375.00	1,012.50	0.658	-0.1424
4	4	2,352.00	705.60	0.458	-0.1065
5	6	3,784.50	1,135.35	0.738	-0.1752
6	2	1,350.00	405.00	0.263	-0.0639
7	6	4,116.00	1,234.80	0.802	-0.2060
8	2	1,471.75	441.53	0.287	-0.0754
9	4	3,150.00	945.00	0.614	-0.1652

Το συνολικό φορτίο cargo σε fully loaded condition είναι 153,929.20 tn και παρατηρείται πως εξαιτίας των ιστίων θα χρειαστεί να μειωθεί το φορτίο από 0.191% στο Configuration 1 έως 0.802% στο Configuration 7. Υποθέτοντας πως το κέντρο βάρους των wingsail βρίσκεται στο 35% του ύψους τους, προκύπτει και η μεταβολή του μετακεντρικού ύψους GM που υπεισέρχεται στους υπολογισμούς. Όπως φαίνεται στον παραπάνω Πίνακα, η μεταβολή του GM είναι αρνητική, όπως αναμενόταν και κυμαίνεται από 0.0397m έως 0.2060m.

Επιπλέον, επαληθεύεται η υπόθεση που έγινε νωρίτερα (βλ. Υποκεφάλαιο 3.3.2), ότι η μείωση του cargo εξαιτίας του βάρους των wingsail δεν επιφέρει μεταβολές στην συμπεριφορά του πλοίου, αφού συγκριτικά το βάρος τους είναι πολύ μικρό.

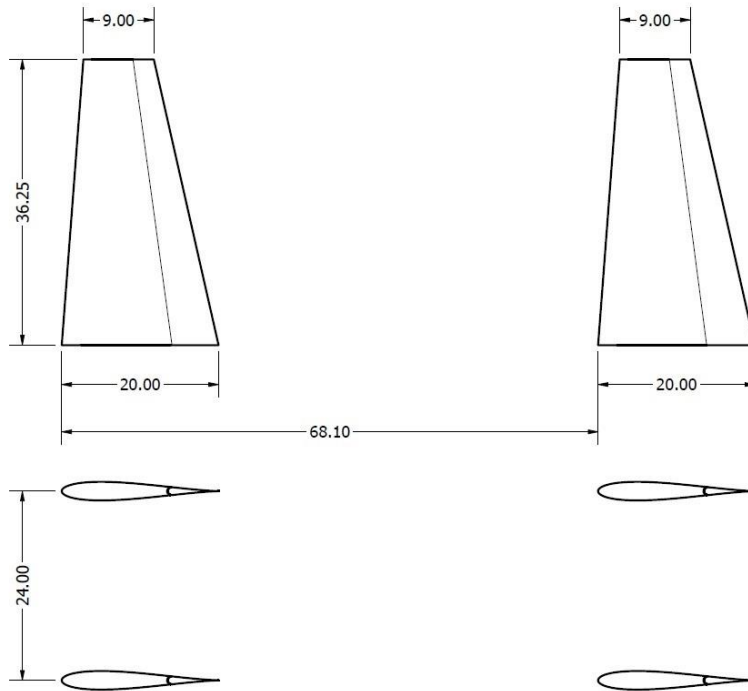


*Εικόνα 3.9. Πλάγια όψη του Configuration 7*

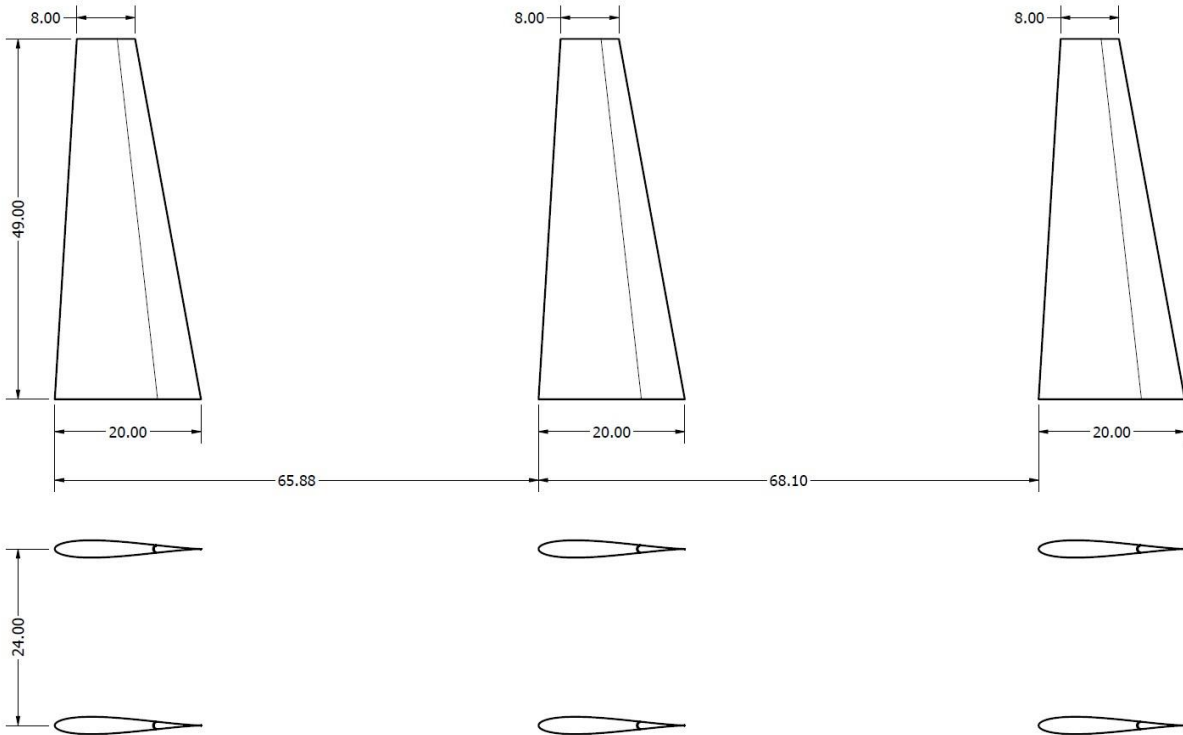


*Εικόνα 3.10. Ισομετρική προβολή του Configuration 7*

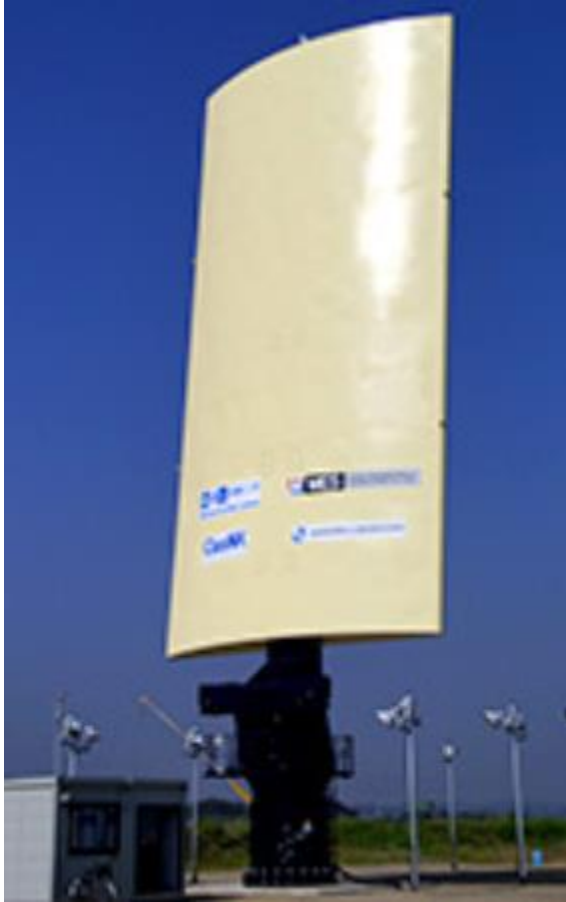
Configuration 2



Configuration 7



Εικόνα 3.11. Διαφορές στις διαστάσεις (σε m) των Configuration 2 & 7



Εικόνα 3.12. Προτότυπο wingsail της εταιρείας TOKYO-Mitsui O.S.K., Ltd. (πηγή: [32])

### 3.3.9 Προσομοιώσεις CFD

Ο υπολογισμός των δυνάμεων και ροπών εξαιτίας των wingsail πραγματοποιήθηκε με μεθόδους υψηλής ανάλυσης (high-fidelity) – CFD. Η απόφαση αυτή λήφθηκε καθώς οι μέθοδοι χαμηλής ανάλυσης (low-fidelity), όπως το XFLR, είναι μεν είναι γρήγορες και οικονομικές, ωστόσο:

- Δεν μπορούν να προβλέψουν τα φαινόμενα λόγω ιξώδους και τείνουν να υποεκτιμούν την οπισθέλκουσα
- Δεν είναι δυνατόν να προβλέψουν την αλληλεπίδραση της ροής μεταξύ των ιστίων

Εάν αγνοηθούν τα δύο παραπάνω bullets είναι αποδεδειγμένο [5] πως για την συγκεκριμένη εφαρμογή τα αποτελέσματα που θα παραχθούν είναι παραπλανητικά και οδηγούν σε πολύ αισιόδοξα αποτελέσματα.

Για να είναι η μελέτη να είναι πλήρης, θα έπρεπε να διεξαχθούν 36,855 CFD (βλ. Πίνακα 3.10). Επειδή αυτό δεν είναι επιτεύξιμο και το χρονικό–υπολογιστικό κόστος θα ήταν πολύ μεγάλο, πρέπει να γίνουν κάποιες απλοποιήσεις.

Πίνακας 3.10. Συνολικές προσομοιώσεις για πλήρη ανάλυση

Variable	Quantity
Vessel Speed	1 (6.173 m/s)
Wingsail Configurations	9
True Wind Speeds	8 (1-2-3-4-5-6-7-8 Beaufort)
True Wind Angles	13 (0-15-30-45-60-75-90-105-120-135-150-165-180 degrees)
Angle of Attack	9 (0-3-6-9-12-14-16-18-20 degrees)
Flap angles	5 (0-10-20-30-40 degrees)
Total CFD simulations	36,855

Η επιλεγμένη αεροτομή, *Joukowski 12%*, αναλύθηκε στο λογισμικό XFLR για όλα τα εύρη του αριθμού *Reynolds* και βρέθηκε ότι η βέλτιστη γωνία τοποθέτησης του flap είναι οι 20°, δίνοντας σχεδόν το μέγιστο δυνατό lift και ταυτόχρονα ικανοποιητικό λόγο *L/D*. Για την γωνία του flap αυτή, βρέθηκε ότι για χαμηλούς *Re* ( $1-3 \cdot 10^6$ ) η βέλτιστη γωνία προσβολής είναι 12°, ενώ για τους μεγαλύτερους είναι 14°. Μελετώντας μόνο τις κατευθύνσεις ανέμου 30-45-90-135-150 μοιρών, τα απαιτούμενα *CFD* μειώνονται σημαντικά, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.11.

Δημιουργήθηκαν 9 πλέγματα (mesh) για τα 9 διαφορετικά configuration στο λογισμικό ANSA pre-processor της εταιρείας BETA CAE Systems [33]. Το κάθε ένα πλέγμα, επιλύεται 12 φορές, όσες είναι δηλαδή και οι ταχύτητες που προκύπτουν από τις διάφορες ταχύτητες και κατευθύνσεις ανέμου, όπως φαίνονται στον Πίνακα 3.12. Ακολουθείται αυτή η διαδικασία επίλυσης καθώς η γωνία προσβολής παραμένει σταθερή και στην πραγματικότητα αλλάζουν η σχετική ταχύτητα και η γωνία του ανέμου που «βλέπουν» τα wingsail. Η σχετική γωνία *AWA*, δεν λαμβάνεται υπόψιν για τον υπολογισμό των φορτίων, ωστόσο παίζει σημαντικό ρόλο στην τελική αποτύπωση των φορτίων. Δηλαδή, τα φορτία που θα παραχθούν από τα wingsail είναι ανεξάρτητα από την *AWA*,



αλλά το σύστημα συντεταγμένων του πλοίου είναι στραμμένο κατά την γωνία AWA, επομένως τα φορτία θα πρέπει να πολλαπλασιαστούν με το ημίτονο ή συνημίτονο της γωνίας.

Πίνακας 3.11. Αριθμός προσομοιώσεων μετά από τις απλοποιήσεις

Variable	Quantity
Vessel Speed	<b>1</b> (6.173 m/s)
Wingsail Configurations	<b>9</b>
True Wind Speeds	<b>4</b> (2-3-4-5 Beaufort)
True Wind Angles	<b>5</b> (30-45-90-135-150 degrees)
Angle of Attack	<b>1</b> (12 14 degrees)
Flap angles	<b>1</b> (20 degrees)
Total CFD simulations	<b>180</b>

Πίνακας 3.12. Σχετικές ταχύτητες και γωνίες των προσομοιώσεων

TWS (beauf.)	TWA (°)	AWS (m/s)	AWA (°)	AoA (°)
2	30	8.308	8.191	14
	45	8.024	12.042	14
	90	6.611	20.982	14
	135	4.800	20.410	14
	150	4.289	16.019	14
3	30	10.175	12.341	14
	45	9.746	18.393	14
	90	7.551	35.167	14
	135	4.365	44.793	14
	150	3.244	42.102	12
4	30	12.431	15.624	14
	45	11.891	23.464	14
	90	9.107	47.327	14
	135	4.948	73.104	14
	150	3.369	83.624	12
5	30	15.024	18.145	14
	45	14.400	27.355	14
	90	11.211	56.589	14
	135	6.632	93.839	14
	150	5.062	112.428	14

Ο όγκος ελέγχου που περιέχει τα wingsail έχει διαστάσεις:

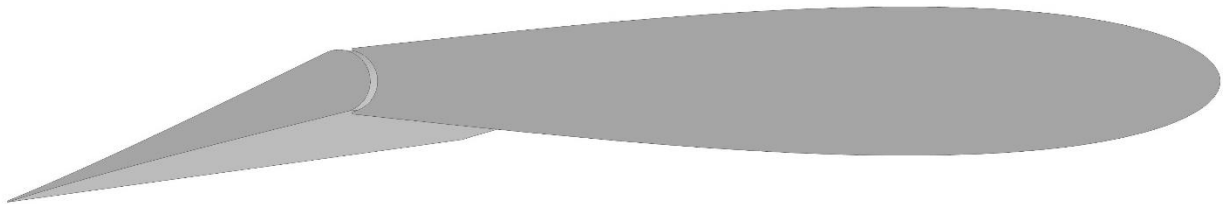
- Το *inlet* απέχει 3 φορές την χορδή του root, δηλαδή 60m, από το πρώτο wingsail

- Το *outlet* απέχει 10 φορές την χορδή του root, δηλαδή 200m, από το τελευταίο wingsail
- Τα *top*, *bottom* και *side* απέχουν 5 φορές την χορδή του root, δηλαδή 100m, από κάθε wingsail αντίστοιχα

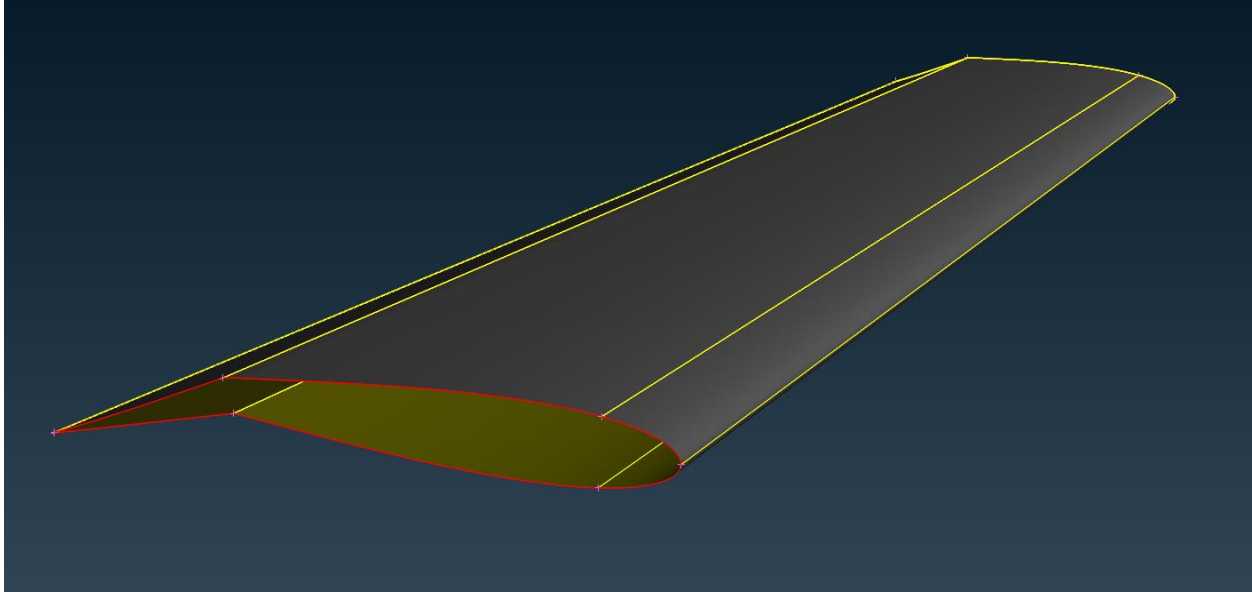
Επιπλέον, για καλύτερη κατανόηση των φαινομένων αλληλεπίδρασης μεταξύ των πτερύγων δημιουργήθηκε ένα *size box* το οποίο έχει πυκνότερο πλέγμα από τον όγκο ελέγχου και διαστάσεις 1 χορδή στα *inlet*, *top*, *bottom*, *side* και 3 χορδές στο *outlet*.

Για να μοντελοποιηθεί σωστά το οριακό στρώμα που σχηματίζεται πάνω στα ιστία, δημιουργήθηκαν 15 inflation layers γύρω από κάθε ιστίο με αρχικό ύψος πρώτου κελιού 0.053m και ρυθμό ανάπτυξης 1.2. Τέλος, δημιουργήθηκε ένα μη-δομημένο πλέγμα στον όγκο ελέγχου.

Αρχικά, κάθε ιστίο είχε σχεδιαστεί να έχει ένα διάκενο μεταξύ της επιφάνειας ελέγχου και του κυρίως μέρους του όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.13 ώστε η επιφάνεια να μπορεί να κινηθεί με τους κατάλληλους μηχανισμούς. Κατά την δημιουργία του πλέγματος όμως δημιουργούνταν αρνητικοί όγκοι και τεμνόμενα στοιχεία και δεν μπορούσε να επιλυθεί. Δοκιμάστηκαν διάφοροι τρόποι για να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα αυτά, όπως πύκνωση του πλέγματος στα προβληματικά σημεία, μείωση του αρχικού ύψος του πρώτου κελιού των layers ή αύξηση του διακένου, αλλά δεν υπήρξε θετικό αποτέλεσμα. Έτσι, τα διάκενα κλείστηκαν (βλ. Εικόνα 3.14) και δημιουργήθηκε μία μη-ρεαλιστική γεωμετρία φτερού που στην πραγματικότητα δεν μπορεί να κατασκευαστεί, αλλά μπορεί να μελετηθεί.



Εικόνα 3.13. Απεικόνιση της ρίζας ενός ιστίου με  $20^\circ$  εκτροπή της επιφάνειας ελέγχου και διάκενο μεταξύ του κυρίου μέρους και του flap



Εικόνα 3.14. Η γεωμετρία φτερού που αναλύθηκε στις προσομοιώσεις χωρίς διάκενο και  $20^\circ$  εκτροπή του flap

Στον Πίνακα 3.11 παρουσιάζεται ο αριθμός των στοιχείων των πλεγμάτων για όλα τα Configuration.

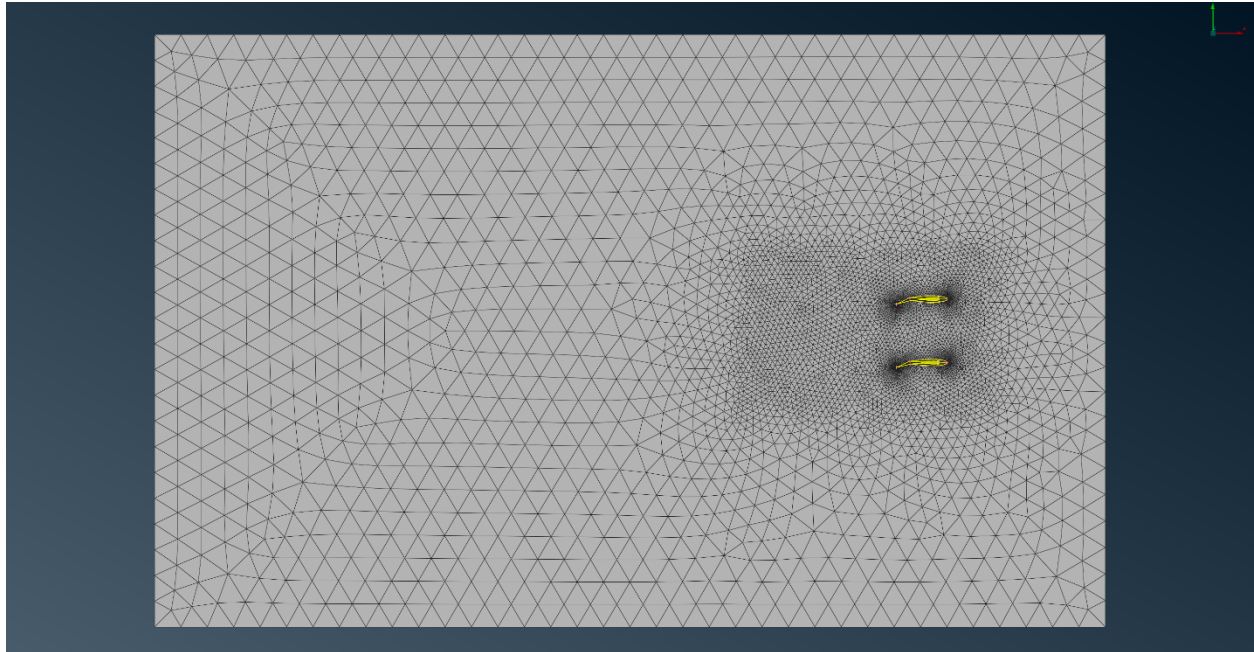
Πίνακας 3.13. Αριθμός στοιχείων των πλεγμάτων των 9 διατάξεων

Configuration	Number of Elements
1	9,553,308
2	19,257,736
3	29,386,858
4	21,746,655
5	33,220,895
6	11,621,193
7	37,468,140
8	12,983,503
9	26,573,145

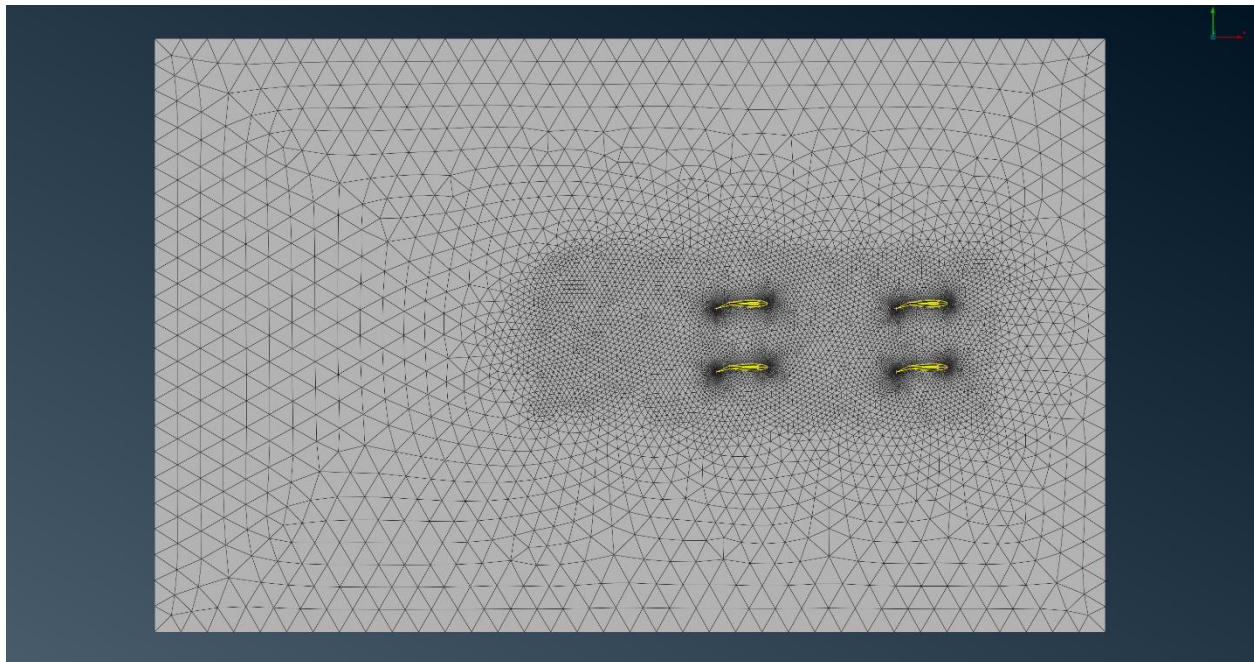
Τα πλέγματα αυτά εισάγονται στο λογισμικό ANSYS CFX [34] για να επιλυθούν. Ο επιλυτής CFX χρησιμοποιεί την μέθοδο πεπερασμένων όγκων (Finite Volume Method) για την επίλυση των εξισώσεων Navier-Stokes. Οι εξισώσεις συνέχειας και ορμής επιλύονται ταυτόχρονα και παράλληλα σαν σύστημα διαφορικών εξισώσεων, με αποτέλεσμα ο αριθμός των επαναλήψεων μέχρι την σύγκλιση να είναι σχετικά μικρός και η επίλυση να αριθμητικά σταθερή.

Ως μοντέλο τύρβης επιλέχθηκε το Spalart-Allmaras (S-A) καθώς έχει αναπτυχθεί και βελτιστοποιηθεί για εξωτερικές ροές με μεταβλητή κλίση πίεσης, όπως εξωτερικές ροές γύρω από πτέρυγες και αεροτομές. Χρησιμοποιεί μόνο μία εξίσωση μεταφοράς για τον υπολογισμό του κινηματικού ιξώδους της τύρβης ( $\tilde{\nu}$ ) και μία αλγεβρική σχέση για τον προσδιορισμό της κλίμακας μήκους [35]. Για το συγκεκριμένο μοντέλο τύρβης, προτείνεται από τους συγγραφείς του το  $y^+$  να μην ξεπερνά την τιμή 5.

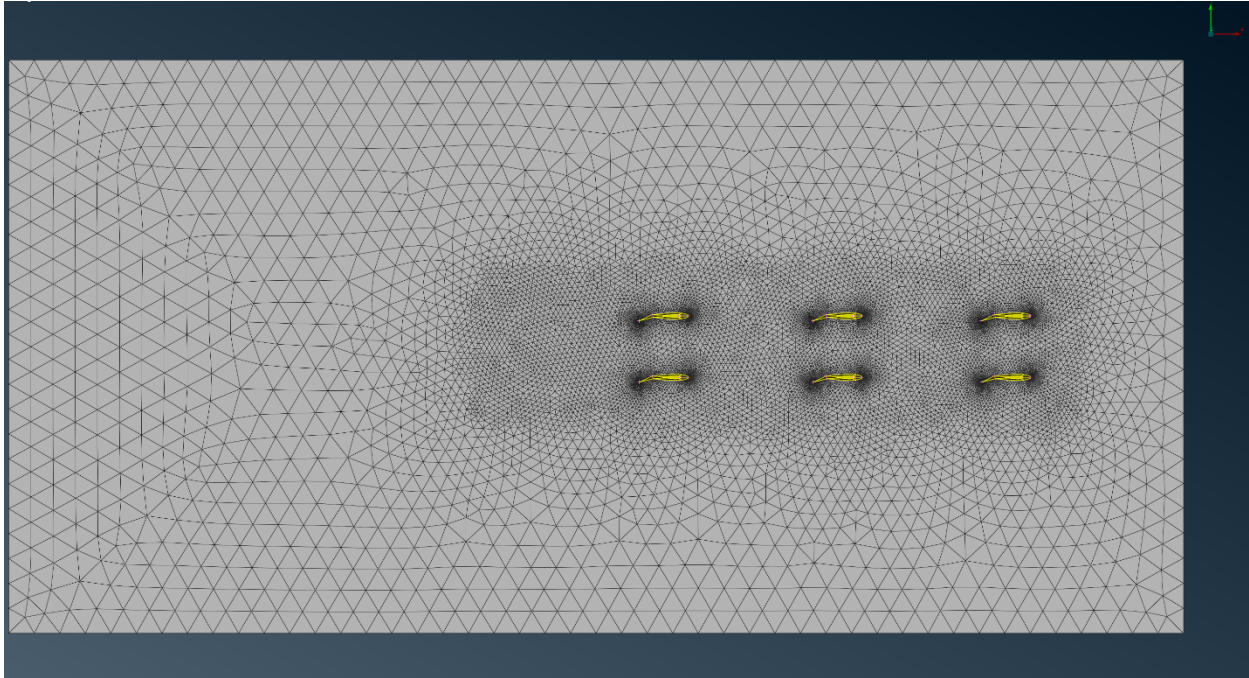
Για τις διάφορες καταστάσεις στην είσοδο (*inlet*), επιλέγονται το *fractional intensity* = 0.01 και το *eddy viscosity ratio* = 0.21, σύμφωνα με [36], [37].



Εικόνα 3.16. Το πλέγμα του Configuration 8



Εικόνα 3.15. Το πλέγμα του Configuration 4



*Εικόνα 3.17. Το πλέγμα του Configuration 7*

## Κεφάλαιο 4 Αποτελέσματα

### 4.1 Διαπιστώσεις

Κατά την διεξαγωγή των CFD προσομοιώσεων, πολύ γρήγορα διαπιστώθηκε πως οι δυνάμεις και οι ροπές εξαρτώνται από το τετράγωνο της ταχύτητας εισόδου του ανέμου. Αυτό το γεγονός είναι σαφώς αναμενόμενο, αφού δεν αλλάζει καμία άλλη συνθήκη παρά μόνον η ταχύτητα. Για να αποδειχθεί αυτό, παρατίθενται στον Πίνακα 4.1 τα αναλυτικά αποτελέσματα του Configuration 2 για το οποίο πραγματοποιήθηκαν και οι 12 προσομοιώσεις. Οι ροπές ως προς τους άξονες  $x$  και  $z$ ,  $M_x$  και  $M_z$  αντίστοιχα, είναι υπολογισμένες ως προς το σύστημα αναφοράς που έχει ως αρχή το κέντρο βάρους του πλοίου μαζί με τα ιστία και κατευθύνσεις αξόνων – τοπικό σύστημα συντεταγμένων – όπως ορίζεται στις Εικόνες 4.1, 4.2 και 4.3 για τις 3 διαφορετικές περιπτώσεις.

Πίνακας 4.1. Αεροδυναμικά φορτία εξαιτίας των wingsail (Configuration 2)

Configuration 2							
Condition	AWS (m/s)	AoA (°)	$F_x$ (N)	$F_y$ (N)	$M_z$ (N·m)	$M_x$ (N·m)	$M_y$ (N·m)
B2W45	8.024	14	4,383	99,820	208,426	2,505,510	-102,493
B2W90	6.611	14	2,973	67,716	141,518	1,699,670	-69,516
B2W135	4.800	14	1,565	35,654	74,539	894,897	-36,598
B3W45	9.746	14	6,471	147,338	307,392	3,698,280	-151,306
B3W90	7.551	14	3,881	88,379	184,707	2,218,310	-90,734
B3W135	4.365	14	1,293	29,473	61,602	739,738	-30,251
B4W45	11.891	14	9,638	219,444	457,069	5,508,240	-225,357
B4W90	9.107	14	5,649	128,629	268,445	3,228,650	-132,090
B4W135	4.948	14	1,667	37,957	792,55.5	952,738	-38,970
B5W45	14.400	14	14,141	321,960	669,431	8,081,610	-330,661
B5W90	11.211	14	8,566	195,035	406,420	4,895,530	-200,287
B5W135	6.632	14	2,994	68,190	142383	1,711,604	-70,011

Οι λόγοι  $F_x/AWS^2$ ,  $F_y/AWS^2$ ,  $M_z/AWS^2$ ,  $M_x/AWS^2$  και  $M_y/AWS^2$  όλων των καταστάσεων είναι περίπου ίδιοι και έχουν μέγιστη απόκλιση 0.28% από τον μέσο όρο τους. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και για τα υπόλοιπα Configuration. Η ακρίβεια αυτή είναι αποδεκτή και για τον λόγο αυτό δεν χρειάστηκε να διεξαχθούν όλες οι προσομοιώσεις, παρά μόνο 3 για κάθε Configuration, εκτός του 2<sup>ου</sup> που έγιναν 12, ώστε να παραχθούν τα trends των φορτίων.

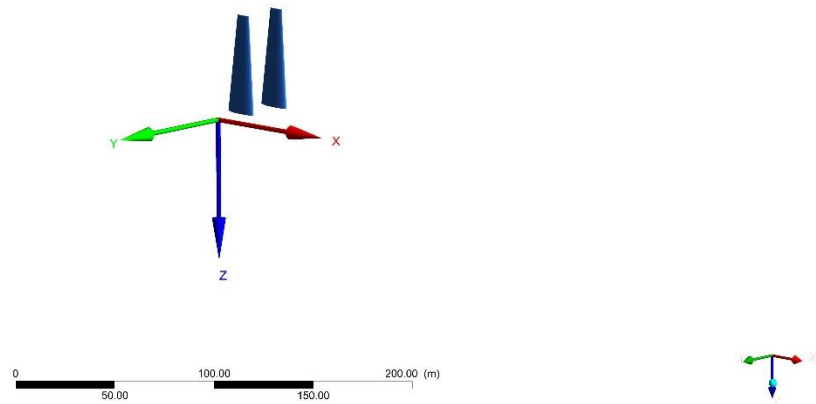
Τα προαναφερθέντα φορτία είναι υπολογισμένα ως προς το τοπικό σύστημα συντεταγμένων των ιστίων και πρέπει να μεταφραστούν στο γενικό σύστημα συντεταγμένων του πλοίου ώστε οι δυνάμεις  $F_x$ ,  $F_y$  να είναι τα Thrust και Side Force αντίστοιχα και οι ροπές  $M_z$ ,  $M_x$  να είναι οι ροπές που προκαλούν το Yaw και το Heel αντίστοιχα. Το γενικό σύστημα συντεταγμένων του πλοίου έχει την ίδια αρχή με το τοπικό, άξονες  $x$ ,  $y$  στραμμένους κατά την εκάστοτε γωνία (AWA-AoA) και ίδιο άξονα  $z$ , άρα:

$$Thrust = F_x \cdot \cos(AWA - AoA) + F_y \cdot \sin(AWA - AoA) \quad (4.1)$$

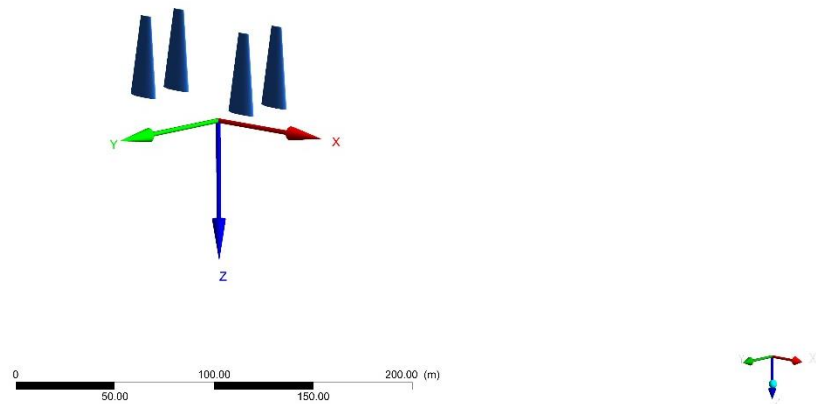
$$Side\ Force = -F_x \cdot \sin(AWA - AoA) + F_y \cdot \cos(AWA - AoA) \quad (4.2)$$

$$Yaw\ Moment = M_z \quad (4.3)$$

$$Heel\ Moment = M_x \cdot \cos(AWA - AoA) + M_y \cdot \sin(AWA - AoA) \quad (4.4)$$



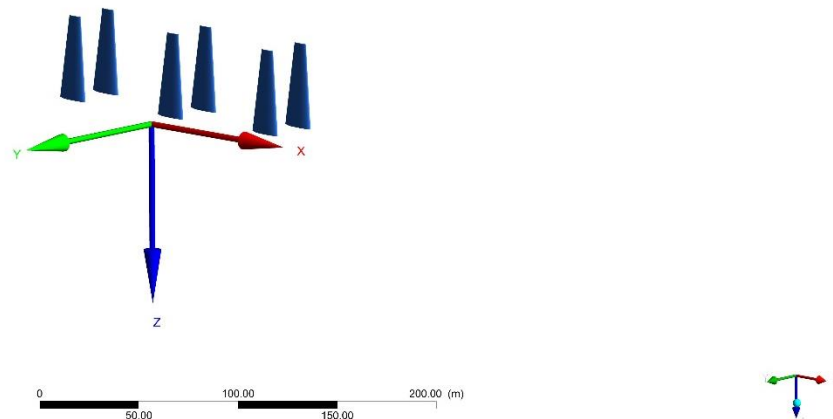
Εικόνα 4.1. Τοπικό σύστημα συντεταγμένων των Configuration 1, 6 & 8



Εικόνα 4.2. Τοπικό σύστημα συντεταγμένων των Configuration 2, 4 & 9

Οι λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκε να μην μελετηθούν γωνίες ανέμου μικρότερες από 30° και μεγαλύτερες των 150° είναι:

- i. Η ροή του ανέμου εμποδίζεται από την γέφυρα του πλοίου και πρακτικά στο εύρος των 150°-210° τα wingsail δεν μπορούν να λειτουργήσουν αποδοτικά
- ii. Ακόμη και εάν είχε αγνοηθεί η επίδραση της γέφυρας στην ροή του ανέμου, για γωνίες 0°-30° και 150°-180° το κέρδος σε ώση είναι είτε πάρα πολύ μικρό είτε αρνητικό, ειδικά για χαμηλές ταχύτητες ανέμου (2-4 Beaufort)



Εικόνα 4.3. Τοπικό σύστημα συντεταγμένων των Configuration 3, 5 & 7

Επιπλέον, θα μπορούσε να γίνει παρεμβολή των αποτελεσμάτων για ταχύτητες ανέμου 6-8 Beaufort, ωστόσο για ταχύτητες 14-15 m/s το  $y^+$  είναι περίπου 5, οπότε σε μεγαλύτερες ταχύτητες θα ξεπερνούσε το όριο αυτό και δεν θα ήταν αποδεκτές οι λύσεις καθώς το οριακό στρώμα δεν θα περιγραφόταν σωστά.

Όπως αναφέρθηκε και στα Υποκεφάλαια 2.6 και 3.3.4, η αξιολόγηση των Configuration γίνεται με την μέθοδο Taguchi και της στατιστικής ανάλυσης ANOVA βάσει του συντελεστή ώσης και της αντίστοιχης συμπεριφοράς του πλοίου, δηλαδή τις γωνίες  $\beta$ ,  $\delta$ ,  $\varphi$ . Για την εύρεση των γωνιών αυτών και της ταχύτητας του πλοίου με κάθε διάταξη wingsail, πρέπει να επιλυθούν οι εξισώσεις κίνησης (2.56)-(2.59). Για την εύρεση αρχικών τιμών για την μέθοδο Newton σαρώθηκαν, στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB, οι λύσεις των εξισώσεων δίνοντας τιμές στους 4 αγνώστους ως εξής: ταχύτητα πλοίου  $U = 6 - 10$  m/s με βήμα 0.1 m/s και γωνίες  $\beta$ ,  $\delta$ ,  $\varphi = -10 - 10^\circ$  με βήμα  $0.1^\circ$ . Με τον τρόπο αυτό θα μπορούσαν να βρεθούν που περίπου βρίσκονται τα μηδενικά των τεσσάρων εξισώσεων. Ωστόσο, λόγω της φύσης του προβλήματος, των παραδοχών που έχουν γίνει και των πολλών δεδομένων που έχουν ληφθεί από άλλες μελέτες και παλιές στατιστικές σχέσεις, δεν ήταν δυνατόν να συγκλίνουν οι εξισώσεις.

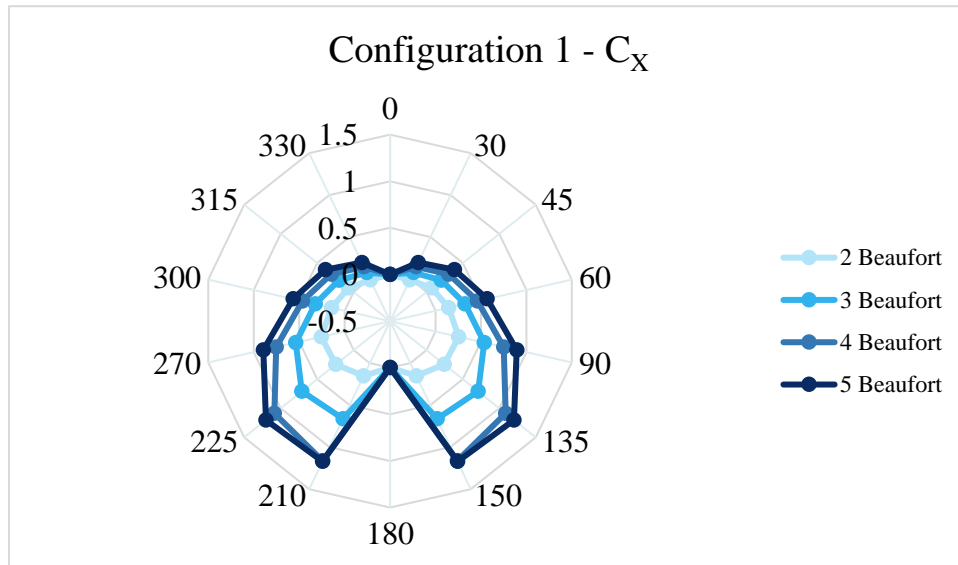
Έτσι, αποφασίστηκε να συγκριθούν οι διατάξεις των wingsail βάσει των αδιάστατων συντελεστών  $C_X$ ,  $C_Y$ ,  $C_N$ ,  $C_K$  και του βάρους τους με τα κριτήρια «Bigger the better» για το πρώτο και «Smaller the better» για τα υπόλοιπα, χωρίς να μελετηθεί η επίπτωση που θα έχουν στην συμπεριφορά του πλοίου. Δηλαδή, μπορεί να επιλεγεί ένα Configuration ως βέλτιστο σύμφωνα με τα παραπάνω κριτήρια, αλλά η συμπεριφορά του πλοίου να είναι εκτός των ορίων που έχουν τεθεί νωρίτερα και να μην γίνει αποδεκτό.

Αξίζει ωστόσο να αναφερθεί πως οι γωνίες  $\beta$ ,  $\delta$ ,  $\varphi$ , δεν επηρεάζονται σημαντικά με την εγκατάσταση ιστίων στις μελέτες [6], [38].

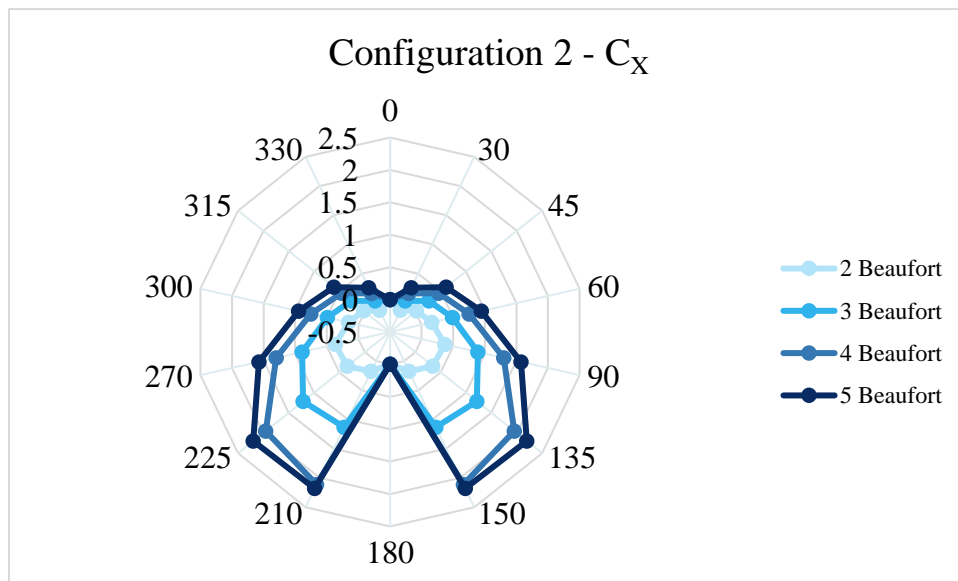


### 4.2 Συντελεστής ώσης

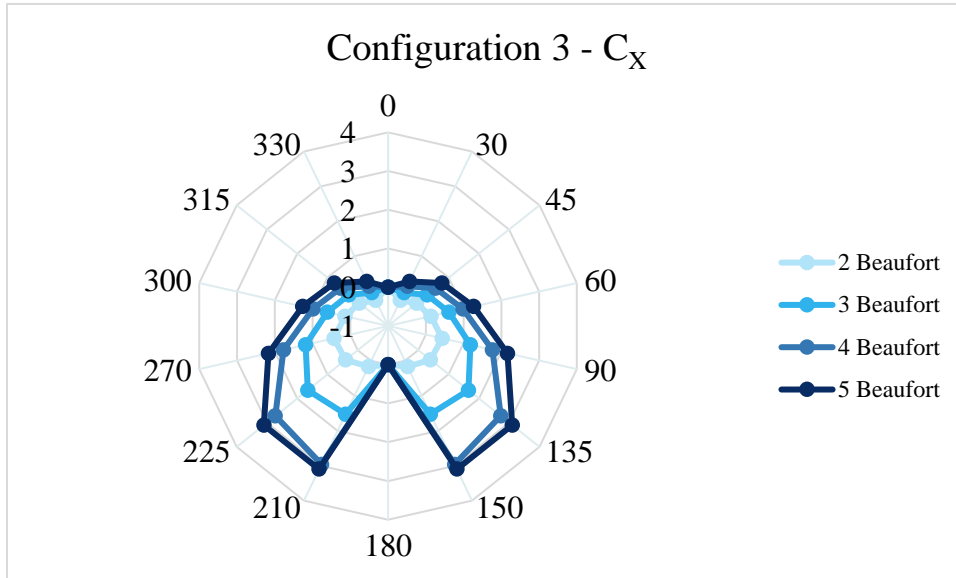
Αρχικά παρατίθενται τα πολικά διαγράμματα του συντελεστή ώσης για κάθε διάταξη και ταχύτητες ανέμου 2-5 Beaufort και κατευθύνσεις 30°-150° & 210°-330°. Ο κατακόρυφος άξονας των Διαγραμμάτων συμβολίζει τον συντελεστή  $C_x$ , ενώ ο αραχνοειδές άξονας την πραγματική γωνία του ανέμου που βλέπουν τα wingsail.



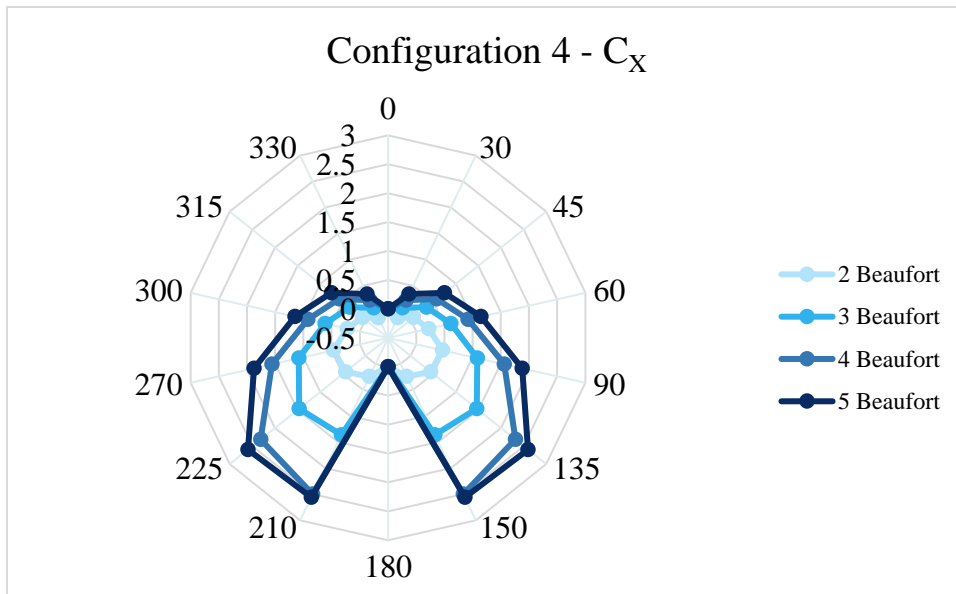
Διάγραμμα 4.1. Πολικό διάγραμμα του συντελεστή ώσης του Configuration 1



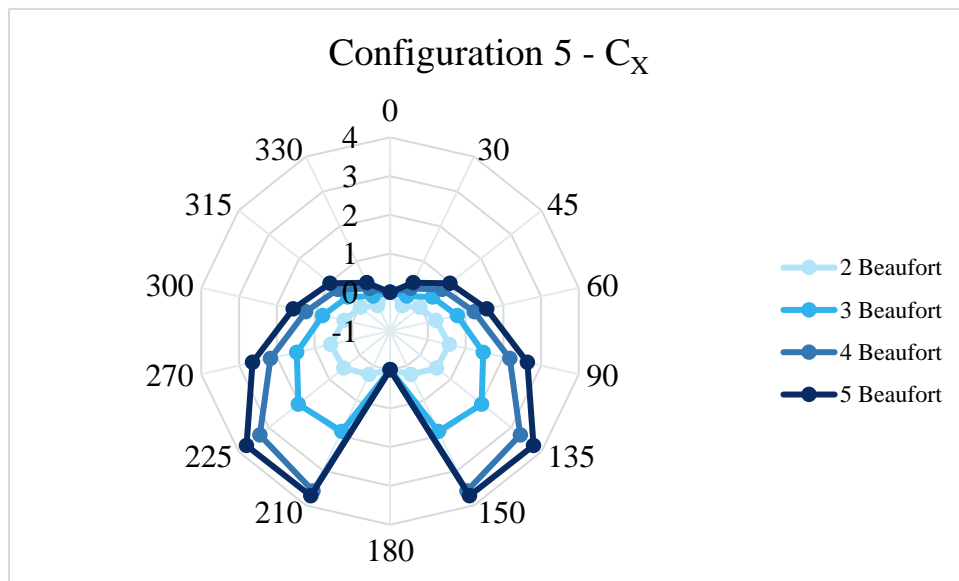
Διάγραμμα 4.2. Πολικό διάγραμμα του συντελεστή ώσης του Configuration 2



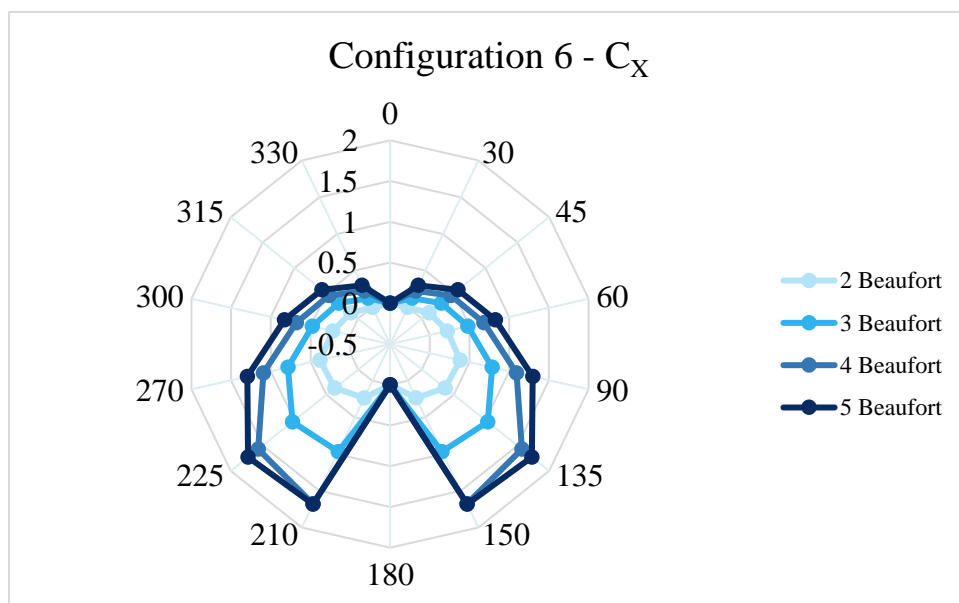
Διάγραμμα 4.3. Πολικό διάγραμμα του συντελεστή ώσης του Configuration 3



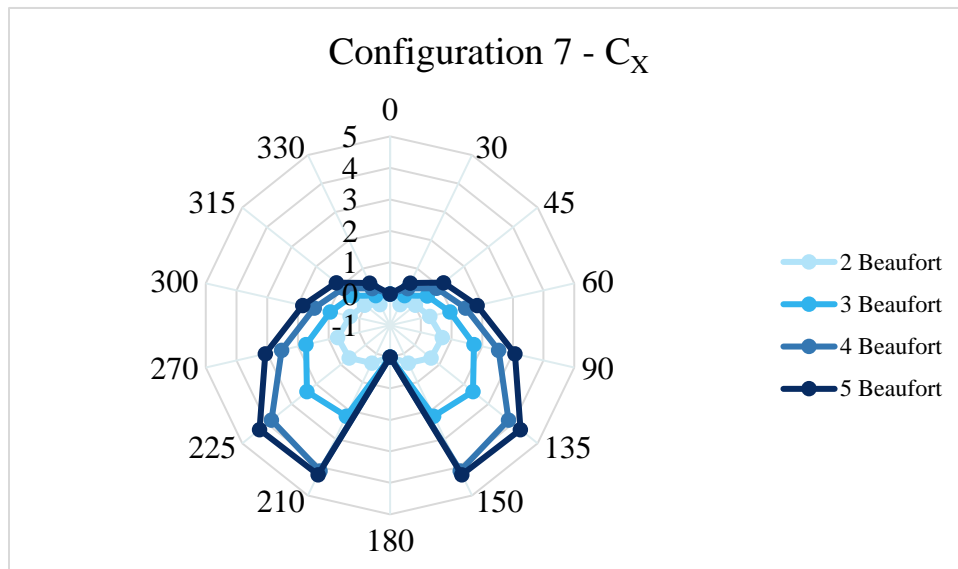
Διάγραμμα 4.4. Πολικό διάγραμμα του συντελεστή ώσης του Configuration 4



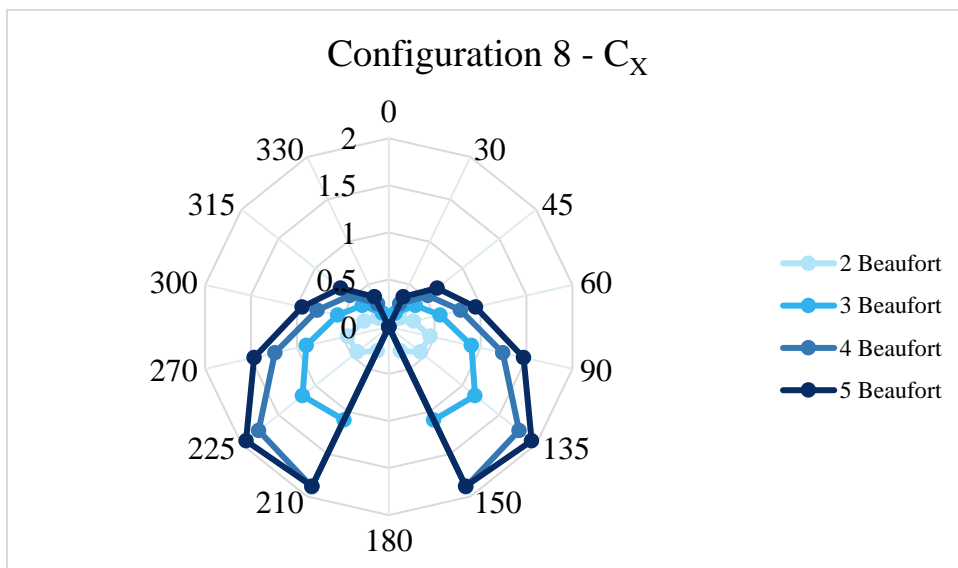
Διάγραμμα 4.5. Πολικό διάγραμμα του συντελεστή ώσης του Configuration 5



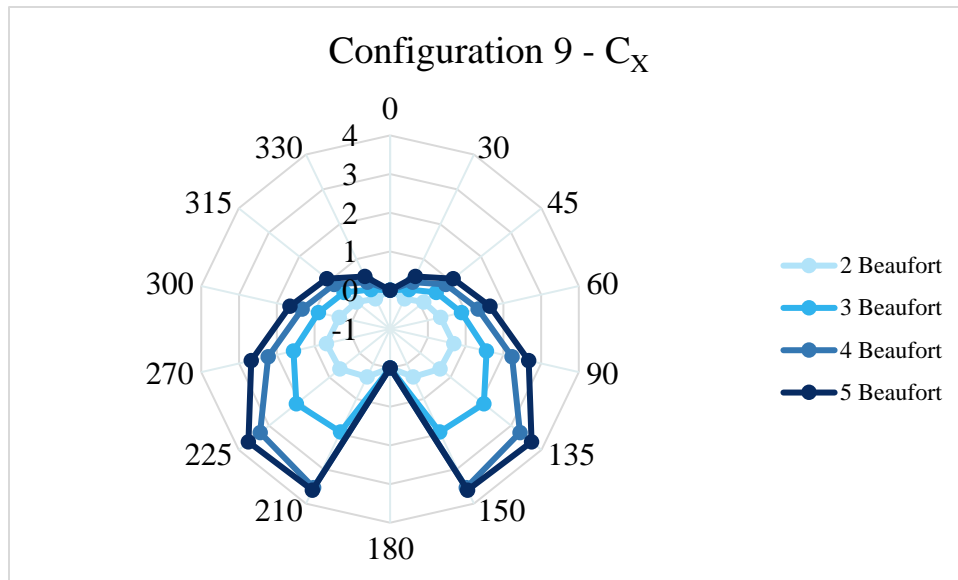
Διάγραμμα 4.6. Πολικό διάγραμμα του συντελεστή ώσης του Configuration 6



Διάγραμμα 4.7. Πολικό διάγραμμα του συντελεστή ώσης του Configuration 7



Διάγραμμα 4.8. Πολικό διάγραμμα του συντελεστή ώσης του Configuration 8



Διάγραμμα 4.9. Πολικό διάγραμμα του συντελεστή ώσης του Configuration 9

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα, όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα του ανέμου, τόσο μεγαλύτερη ώση παράγεται από τα ιστία και σε όλες τις περιπτώσεις η μέγιστη ώση παρουσιάζεται εκεί που ο σχετικός άνεμος βρίσκεται τα wingsail με όσο μεγαλύτερη γωνία γίνεται έως τις 90°. Για παράδειγμα, στα 4 Beaufort σε πραγματική γωνία ανέμου 150°, ο συντελεστής  $C_x$  είναι μεγαλύτερος από εκείνον στις 135° που με την σειρά του είναι μεγαλύτερος από των 90°, καθώς η σχετική γωνία που βλέπουν τα ιστία είναι 83.6°, 73.1° και 47.3° αντίστοιχα. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό αφού στις 90° σχετικής γωνίας ανέμου, το lift βρίσκεται περίπου στην ίδια ευθεία με τον διαμήκη άξονα του πλοίου, άρα θα παράγεται η μέγιστη ώση (βλ. Εικόνα 2.4).

### 4.3 Κέρδη

Εν συνεχεία, στον Πίνακα 4.2, παρουσιάζονται τα μέσα κέρδη κάθε διάταξης και το μέγιστο της συγκρινόμενα με την ώση που παράγει η προπέλα για να κινήσει το πλοίο από την Εξίσωση (2.23), θεωρώντας ότι είναι σταθερή για όλες τις κατευθύνσεις και ταχύτητες ανέμου. Για όλες τις διατάξεις το μέγιστο κέρδος παρουσιάζεται στα 5 Beaufort και 90° γωνία ανέμου.

Πίνακας 4.2. Μέσο και μέγιστο κέρδος κάθε διάταξης

Configuration	Average Benefit	Maximum Benefit
1	4.75%	16.28%
2	7.59%	28.66%
3	9.79%	39.42%
4	9.33%	34.03%
5	12.33%	48.08%
6	6.99%	23.62%
7	14.71%	55.85%
8	8.05%	26.70%
9	13.49%	48.73%

#### 4.4 Στατιστικές Αναλύσεις

Μετά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των CFD προσομοιώσεων και των κερδών κάθε διάταξης, διεξάγεται η ανάλυση SNR για να καθοριστεί ο βέλτιστος συνδυασμός των παραμέτρων σχεδιασμού. Οι μέσες τιμές των αναθεωρημένων παραμέτρων αξιολόγησης, δηλαδή  $C_X$ ,  $C_Y$ ,  $C_N$ ,  $C_K$  και το βάρος, μαζί με τις αντίστοιχες τιμές SNR παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.3, 4.4.

Πίνακας 4.3. Αποτελέσματα ανάλυσης SNR για τις παραμέτρους αξιολόγησης  $C_X$ ,  $C_Y$  και  $C_N$ 

Configuration	Ave. $C_X$ (-)	SNR (dB)	Ave. $C_Y$ (-)	SNR (dB)	Ave. $C_N$ (-)	SNR (dB)
1	0.4876	-6.239	0.1740	15.189	0.0239	32.431
2	0.8110	-1.819	0.3278	9.689	0.0030	50.354
3	1.0776	0.650	0.4697	6.563	0.0840	21.512
4	0.9849	-0.132	0.3840	8.315	0.0028	51.001
5	1.3373	2.524	0.5621	5.003	0.0975	20.217
6	0.7134	-2.934	0.2494	12.063	0.0341	29.357
7	1.5769	3.956	0.6418	3.852	0.1090	19.249
8	0.8150	-1.777	0.2779	11.124	0.0385	28.285
9	1.4157	3.019	0.5411	5.334	0.0026	51.819

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης SNR για κάθε μία παράμετρο αξιολόγησης φαίνονται στους Πίνακες 4.5, 4.6, 4.7, 4.8 και 4.9. Ως Delta ορίζεται η διαφορά μεταξύ του μέγιστου και ελάχιστου SNR κάθε παράγοντα ενώ με Rank ορίζεται η σημαντικότητα του κάθε παράγοντα στο αποτέλεσμα.

Πίνακας 4.4. Αποτελέσματα ανάλυσης SNR για τις παραμέτρους αξιολόγησης  $C_K$  και βάρος

Configuration	Ave. $C_K$ (-)	SNR (dB)	Weight (tn)	SNR (dB)
1	0.1855	14.631	294.00	-49.367
2	0.3583	8.915	630.75	-55.997
3	0.5451	5.270	1,012.50	-60.108
4	0.4594	6.756	705.60	-56.971
5	0.7136	2.930	1,135.35	-61.103
6	0.3166	9.989	405.00	-52.149
7	0.8767	1.143	1,234.80	-61.832
8	0.3809	8.383	441.53	-52.899
9	0.7677	2.297	945.00	-59.509

Πίνακας 4.5. Πίνακας απόκρισης της παραμέτρου  $C_X$ 

Level	A	B	C
1	-2.469	-0.805	-3.650
2	-0.181	-0.357	0.356
3	1.733	0.245	2.377
Delta	4.202	1.050	6.026
Rank	2	3	1
Contribution Ratio	37.26%	9.31%	53.43%

Πίνακας 4.6. Πίνακας απόκρισης της παραμέτρου  $C_Y$ 

Level	A	B	C
1	10.480	9.119	12.792
2	8.460	8.605	7.779
3	6.770	7.987	5.140
Delta	3.710	1.132	7.652
Rank	2	3	1
Contribution Ratio	29.70%	9.06%	61.24%

Πίνακας 4.7. Πίνακας απόκρισης της παραμέτρου  $C_N$ 

Level	A	B	C
1	34.766	34.227	30.024
2	33.525	32.952	51.058
3	33.118	34.229	20.326
Delta	1.648	1.277	30.732
Rank	2	3	1
Contribution Ratio	4.90%	3.79%	91.31%

Πίνακας 4.8. Πίνακας απόκρισης της παραμέτρου  $C_K$ 

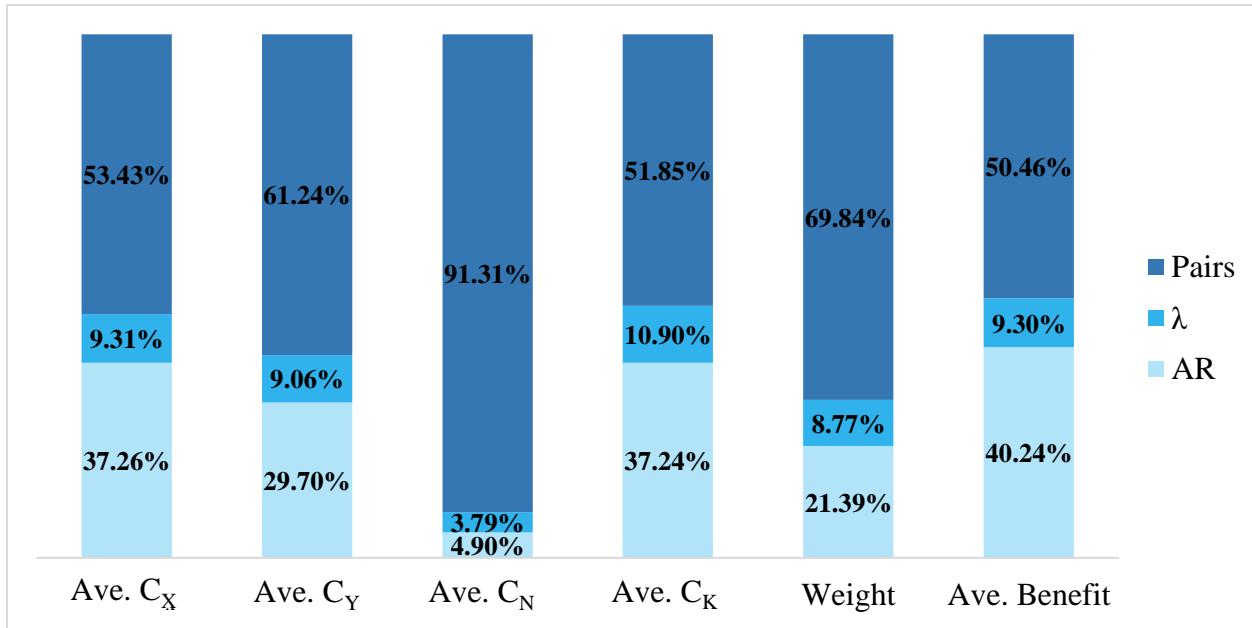
Level	A	B	C
1	9.606	7.510	11.001
2	6.558	6.743	5.989
3	3.941	5.852	3.115
Delta	5.664	1.658	7.887
Rank	2	3	1
Contribution Ratio	37.24%	10.90%	51.85%

Πίνακας 4.9. Πίνακας απόκρισης της παραμέτρου του βάρους

Level	A	B	C
1	-55.157	-56.057	-51.472
2	-56.741	-56.666	-57.492
3	-58.080	-57.255	-61.014
Delta	2.923	1.199	9.542
Rank	2	3	1
Contribution Ratio	21.39%	8.77%	69.84%

Συγκεντρωτικά, η επίδραση κάθε παράγοντα στις παραμέτρους αξιολόγησης παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4.10. Ο αριθμός των δυνάδων φαίνεται πως είναι ο κυρίαρχος παράγοντας και για τα 5 μεγέθη. Επιπλέον, ερευνάται και η επίδραση των παραγόντων στο συνολικό κέρδος σε ώση, που πρακτικά είναι πολύ κοντά στις τιμές που προέκυψαν για τον συντελεστή ώσης.

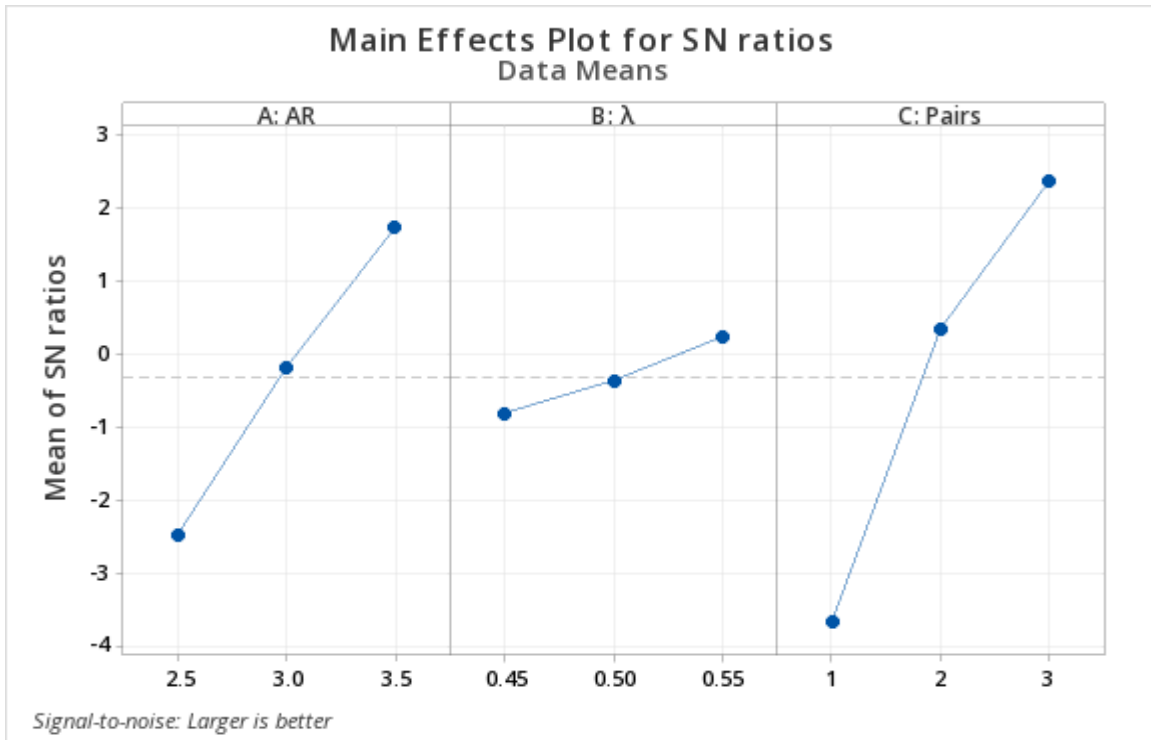




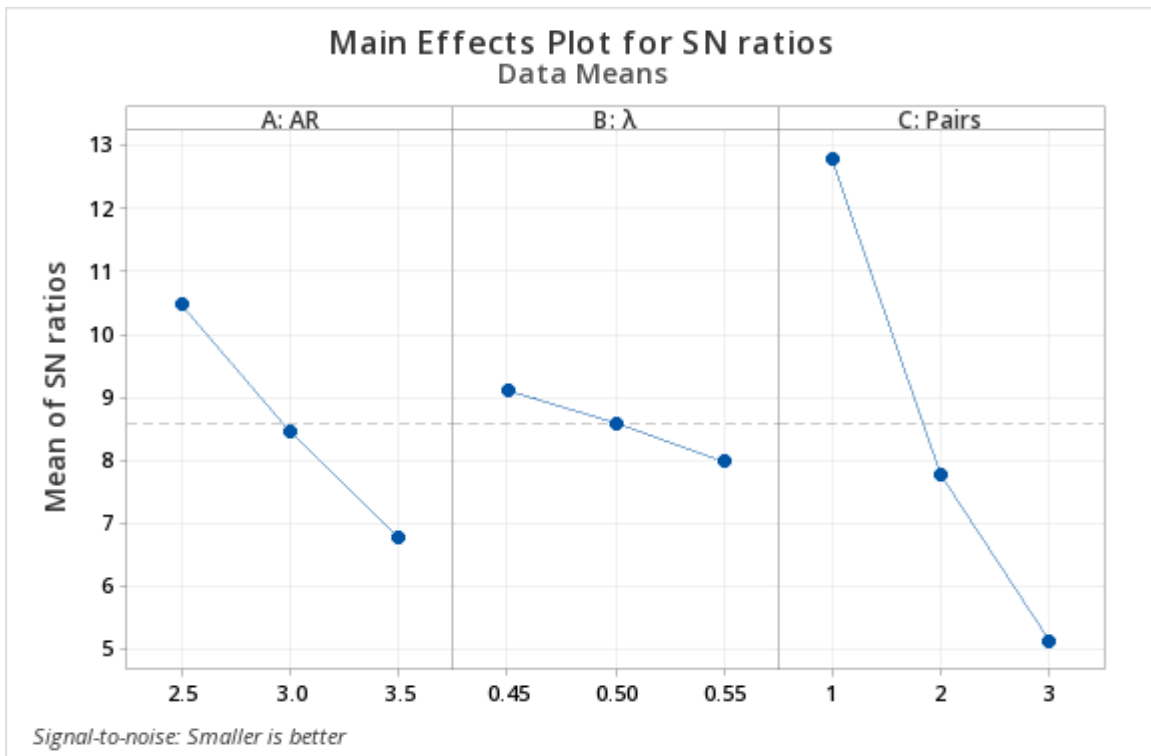
Διάγραμμα 4.10. Συγκεντρωτικό διάγραμμα με την επίδραση των παραγόντων A, B & C στις παραμέτρους αξιολόγησης

Η επιρροή των παραγόντων AR, λ και των ζευγαριών των wingsail παρουσιάζεται στα Διαγράμματα 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 και 4.15. Αναλυτικότερα, ο μέγιστος συντελεστής ώσης επιτυγχάνεται όταν και οι 3 παράμετροι βρίσκονται στο τρίτο τους επίπεδο, δηλαδή εκεί που τα ιστία είναι τα περισσότερα και τα μεγαλύτερα. Οι συντελεστές C<sub>Y</sub> και C<sub>K</sub> και το συνολικό βάρος των wingsail, μειώνονται όσο λιγότερες και μικρότερες πτέρυγες εγκατασταθούν, ενώ για τον συντελεστή C<sub>N</sub> πολύ σημαντικό ρόλο διαδραματίζει ο αριθμός των δυάδων. Στις 2 δυάδες, επειδή το κέντρο βάρους του πλοίου βρίσκεται ανάμεσα τους, οι ροπές ως προς τον άξονα z αλληλοαναιρούνται και ο αντίστοιχος συντελεστής είναι πολύ μικρός.

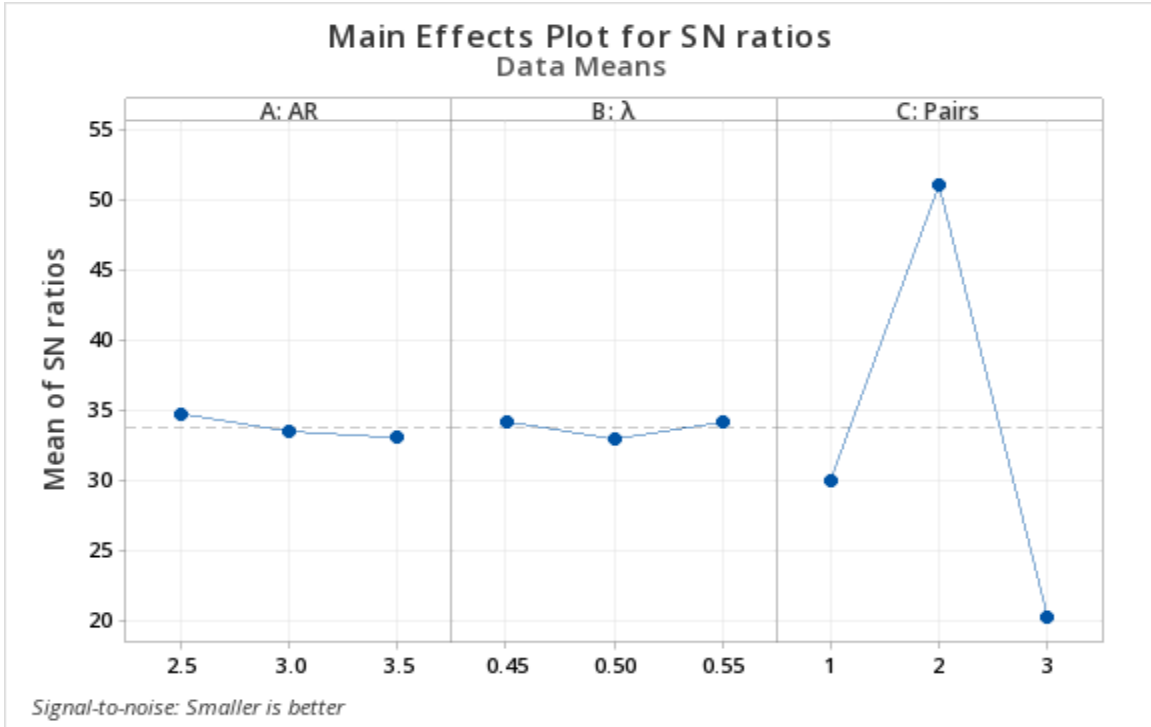
Τα βέλτιστα αποτελέσματα για σχεδόν όλες τις παραμέτρους αξιολόγησης πέραν του συντελεστή ώσης εντοπίζονται στις λιγότερες και μικρότερες πτέρυγες (βλ. Πίνακα 4.10), που είναι λογικό, όμως η συμπεριφορά του πλοίου μπορεί να είναι μέσα στα όρια και να μπορούν να εγκατασταθούν όλες οι διατάξεις. Επίσης, όπως δείχθηκε στο Υποκεφάλαιο 3.3.8, ο περιορισμός του βάρους μπορεί να χαλαρώσει αφού η βαρύτερη διάταξη δεν μειώνει το συνολικό cargo ούτε 1%. Επομένως, επιλέγεται να βελτιστοποιηθεί ο C<sub>X</sub> και το μέσο κέρδος, καταλήγοντας στην βέλτιστη διάταξη A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub>, δηλαδή AR = 3.5, λ = 0.5 και 3 δυάδες.



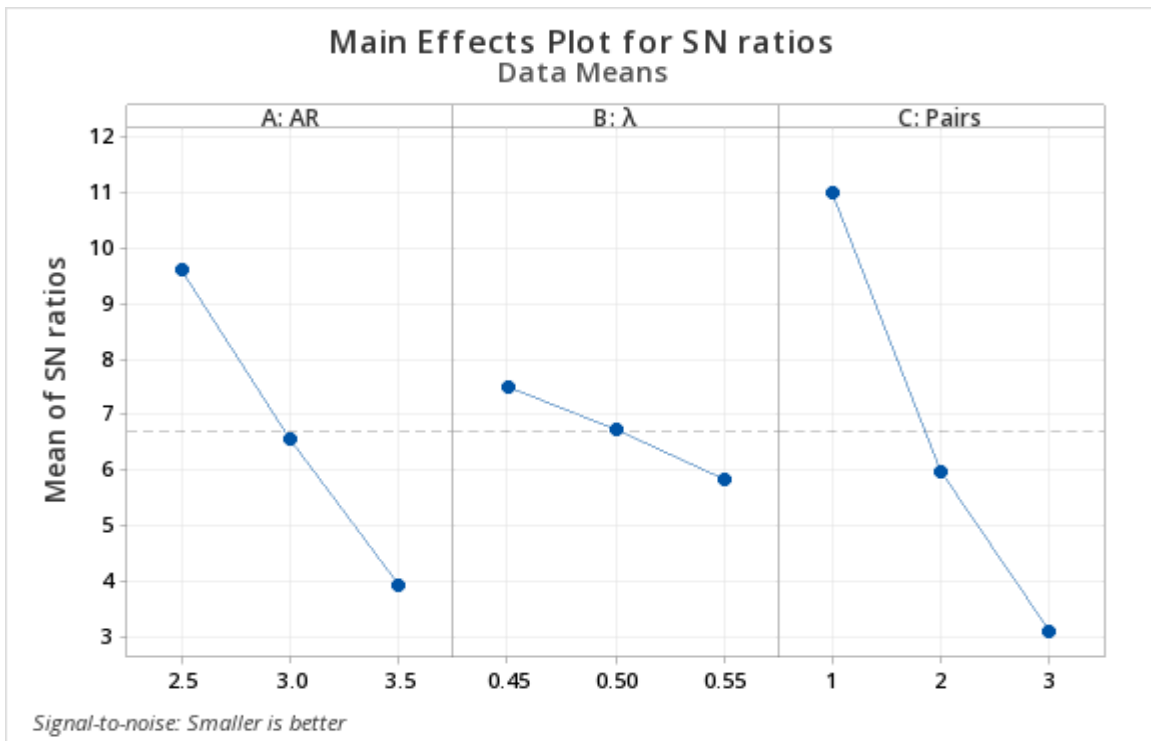
Διάγραμμα 4.11. Επίδραση των παραγόντων A, B & C στον συντελεστή  $C_x$



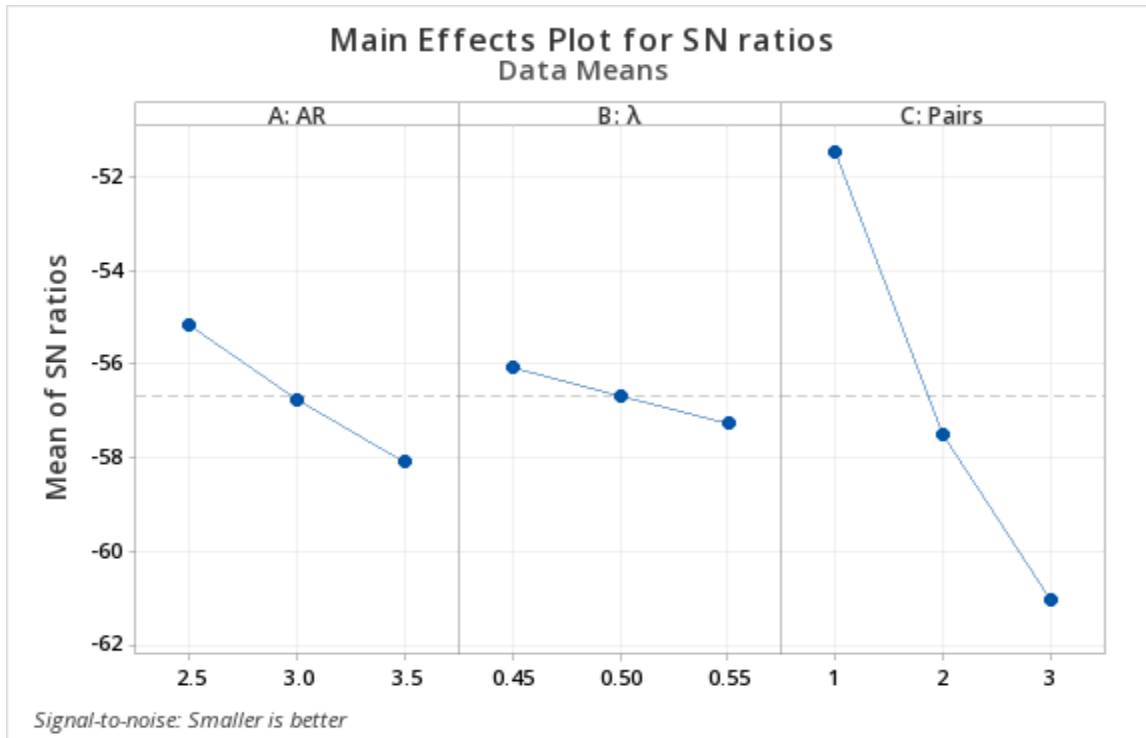
Διάγραμμα 4.12. Επίδραση των παραγόντων A, B & C στον συντελεστή  $C_y$



Διάγραμμα 4.13. Επίδραση των παραγόντων A, B & C στον συντελεστή  $C_N$



Διάγραμμα 4.14. Επίδραση των παραγόντων A, B & C στον συντελεστή  $C_K$



Διάγραμμα 4.15. Επίδραση των παραγόντων A, B & C στο βάρος

Πίνακας 4.10. Οι βέλτιστες τιμές των παραγόντων A, B, C για την βελτιστοποίηση των παραμέτρων αξιολόγησης

	Design Parameters		
	A (AR)	B (λ)	C (Pairs)
Ave. C <sub>X</sub>			
Optimum level	3	3	3
Optimum value	3.5	0.5	3
Ave. C <sub>Y</sub>			
Optimum level	1	1	1
Optimum value	2.5	0.4	1
Ave. C <sub>N</sub>			
Optimum level	1	1	2
Optimum value	2.5	0.4	2
Ave. C <sub>K</sub>			
Optimum level	1	1	1
Optimum value	2.5	0.4	1
Weight			
Optimum level	1	1	1
Optimum value	2.5	0.4	1

Η στατιστική ανάλυση ANOVA διεξάχθηκε για να βρεθεί η σημαντικότητα των παραγόντων. Τα αποτελέσματα της παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 και 4.15. Όταν ο όρος  $p$ -value ενός παράγοντα είναι μεγαλύτερος της τιμής 0.05 σημαίνεται ότι για το μελετώμενο εύρος του παράγοντα δεν παρατηρείται σημαντική αλλαγή στην παράμετρο αξιολόγησης. Αποδείχθηκε και νωρίτερα, αλλά φαίνεται και εδώ, πως για τον συντελεστή της ροπής yaw, οι παράγοντες AR, λ είναι ασήμαντοι.

Πίνακας 4.11. Στατιστική ανάλυση ANOVA της παραμέτρου  $C_X$  για τις τιμές SNR

Source	DOF	SS	MS	F	p-value
A: AR	2	26.5636	13.2818	439.33	0.002
B: λ	2	1.6658	0.8329	27.55	0.035
C: Pairs	2	56.4431	28.2216	933.49	0.001
Error	2	0.0605	0.0302		
Total	8	84.733			

Πίνακας 4.12. Στατιστική ανάλυση ANOVA της παραμέτρου  $C_Y$  για τις τιμές SNR

Source	DOF	SS	MS	F	p-value
A: AR	2	20.707	10.354	482.55	0.002
B: λ	2	1.926	0.963	44.87	0.022
C: Pairs	2	90.632	45.316	2,112.03	0
Error	2	0.043	0.0215		
Total	8	113.307			

Πίνακας 4.13. Στατιστική ανάλυση ANOVA της παραμέτρου  $C_N$  για τις τιμές SNR

Source	DOF	SS	MS	F	p-value
A: AR	2	4.760	2.380	0.98	0.504
B: λ	2	3.020	1.509	0.62	0.616
C: Pairs	2	1,482.170	741.086	306.47	0.003
Error	2	4.840	2.418		
Total	8	1494.79			

Πίνακας 4.14. Στατιστική ανάλυση ANOVA της παραμέτρου  $C_K$  για τις τιμές SNR

Source	DOF	SS	MS	F	p-value
A: AR	2	48.235	24.117	924.70	0.001
B: λ	2	4.134	2.067	79.26	0.012
C: Pairs	2	95.605	47.802	1,832.83	0.001
Error	2	0.052	0.0261		
Total	8	148.026			

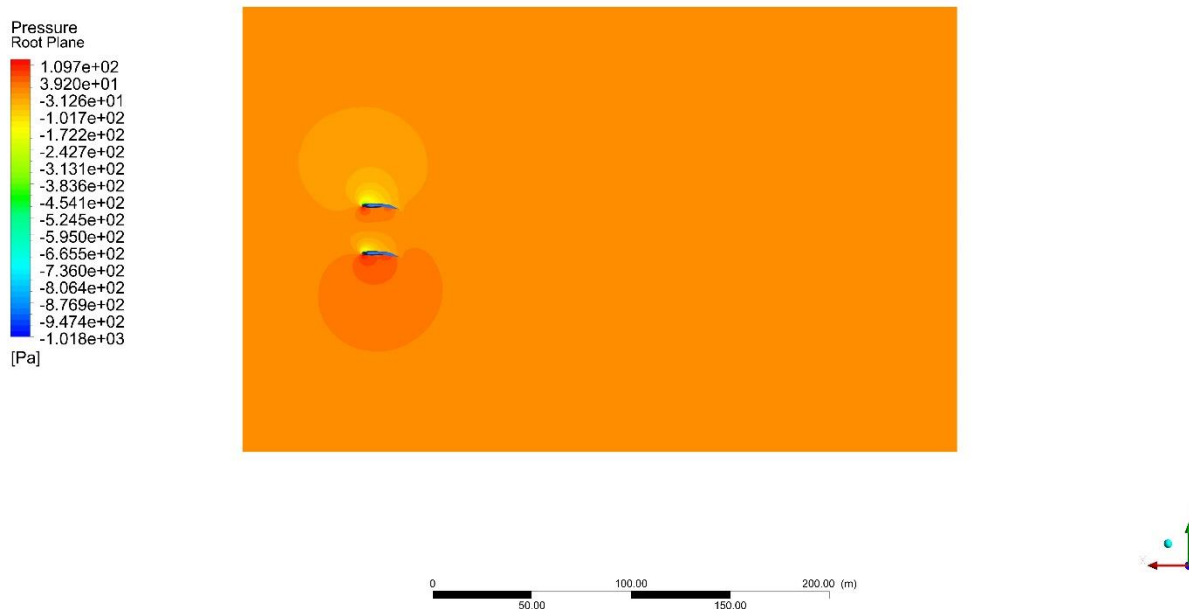
Πίνακας 4.15. Στατιστική ανάλυση ANOVA της παραμέτρου του βάρους για τις τιμές SNR

Source	DOF	SS	MS	F	p-value
A: AR	2	12.842	6.421	5.97E+09	0
B: λ	2	2.155	1.078	1.00E+09	0
C: Pairs	2	139.708	69.854	6.50E+10	0
Error	2	1.67E-08	1.08E-09		
Total	8	154.705			

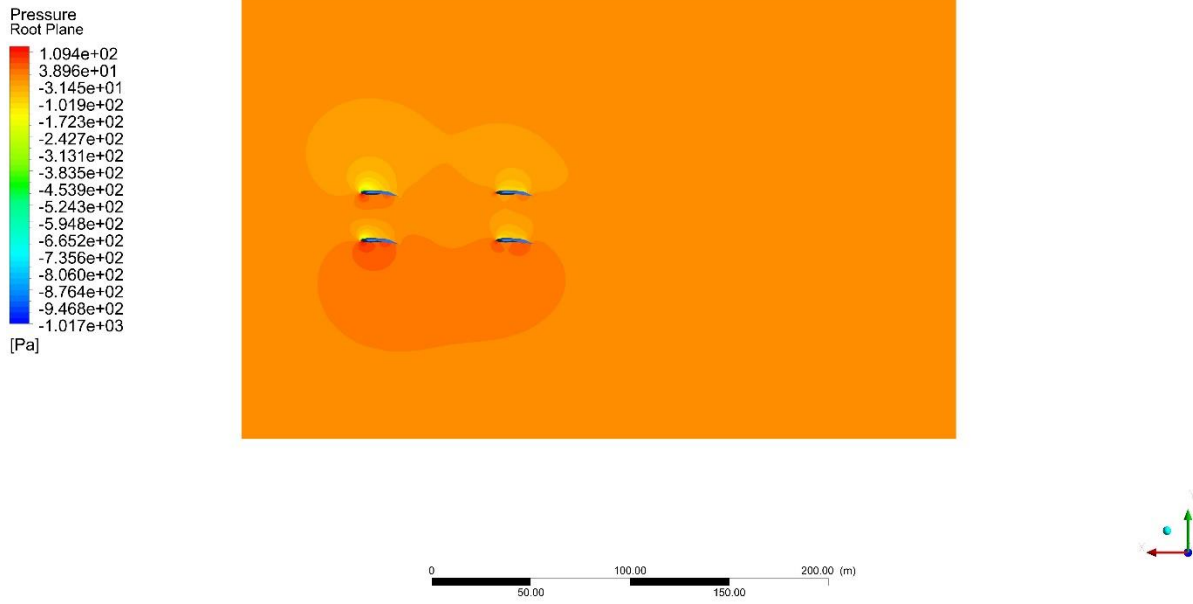
## 4.5 Αλληλεπιδράσεις

Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ιστίων αποδεδειγμένα υφίστανται [5] και κατά περιπτώσεις μπορεί να είναι εντονότερες όταν τα ιστία βρίσκονται κοντά μεταξύ τους ενώ σε άλλες χαμηλότερες όταν απέχουν μεγάλες αποστάσεις. Στην μελετηθείσα περίπτωση για να ποσοτικοποιηθούν οι αλληλεπιδράσεις, πέραν από της οπτικής αναπαράστασης των Εικόνων 4.4, 4.5 και 4.6, διεξάχθηκε μία επιπλέον προσομοίωση της 5<sup>ης</sup> διάταξης με μόνο ένα wingsail αντί για 6 που έχει κανονικά.

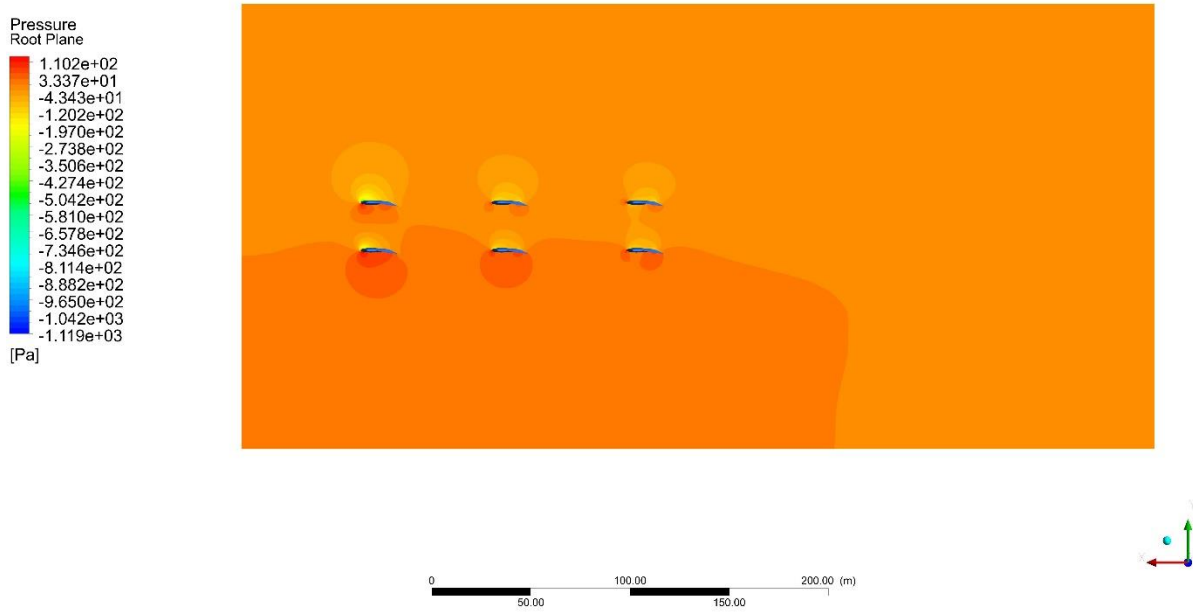
Στις Εικόνες 4.4-4.6, φαίνεται πως στα πάνω ιστία δεν αναπτύσσεται αρκετή πίεση στην κάτω τους επιφάνεια για να παραχθεί η δύναμη της άντωσης, σε αντίθεση με τα κάτω ιστία, κι αυτό καθώς τα τελευταία εμποδίζουν την ροή αέρα. Εντονότερα είναι τα φαινόμενα των αλληλεπιδράσεων στις περιπτώσεις που υπάρχουν περισσότερες από μία δυάδες εξαιτίας του απόρρου των πρώτων.



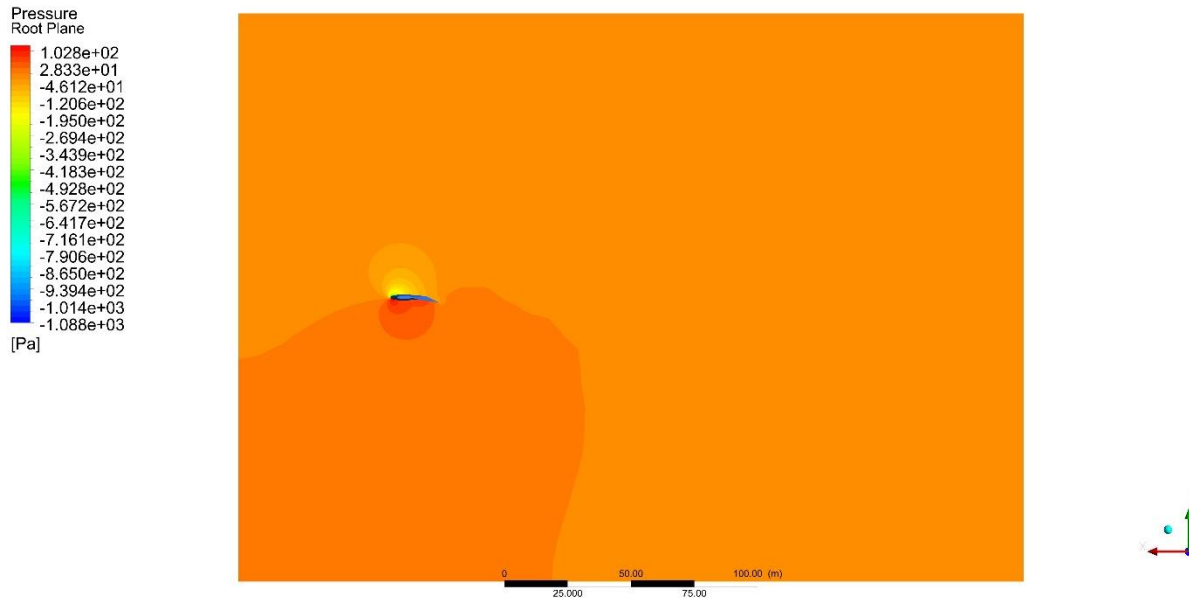
Εικόνα 4.4. Σκιαγράφιση πίεσης της 8<sup>ης</sup> διάταξης στην ρίζα της πτέρυγας σε συνθήκες αέρα 5 Beaufort και κατεύθυνση 45°



Εικόνα 4.5. Σκιαγράφιση πίεσης της 4<sup>ης</sup> διάταξης στην ρίζα της πτέρυγας σε συνθήκες αέρα 5 Beaufort και κατεύθυνση 45°



Εικόνα 4.6. Σκιαγράφιση πίεσης της 5<sup>ης</sup> διάταξης στην ρίζα της πτέρυγας σε συνθήκες αέρα 5 Beaufort και κατεύθυνση 45°



Εικόνα 4.7. Σκιαγράφιση πίεσης του μονού ιστίου της 5<sup>ης</sup> διάταξης στην ρίζα της πτέρυγας σε συνθήκες αέρα 5 Beaufort και κατεύθυνση 45°

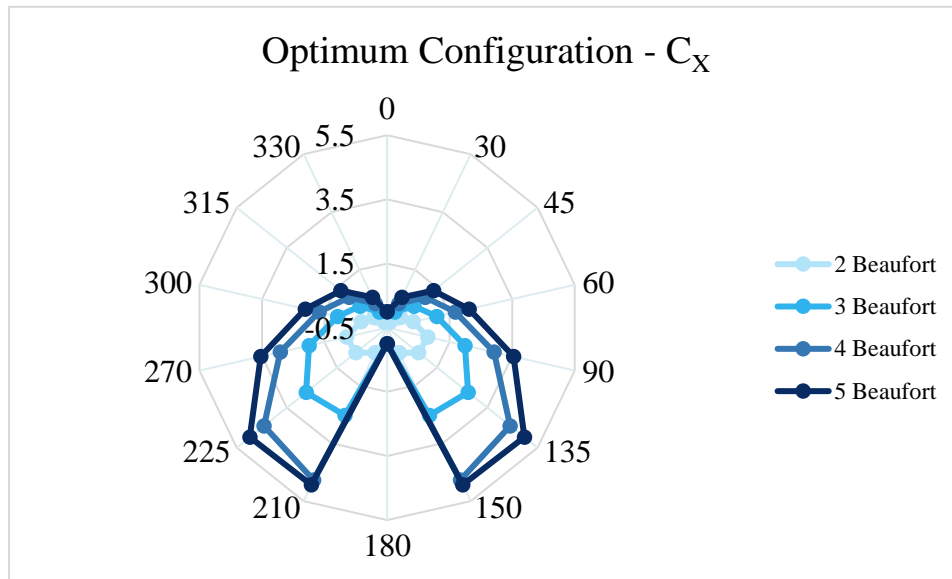
Στα 5 Beaufort ανέμου και κατεύθυνση 45°, το μονό ιστίο παρήγαγε 44,652 N ώσης και 119,624 N πλάγιας δύναμης ενώ το Configuration 5 στις ίδιες συνθήκες παρήγαγε 142,533 N και 530,441 N αντίστοιχα. Δηλαδή το μονό wingsail παρήγαγε περίπου το 30% του thrust που παρήγαγαν και τα 6 wingsail της 5<sup>ης</sup> διάταξης μαζί. Εάν είχε υπεραπλουστευθεί το πρόβλημα και είχαν μελετηθεί μονές πτέρυγες και ύστερα γινόταν υπέρθεση των αποτελεσμάτων ανάλογα με το πόσα ιστία έχει η κάθε διάταξη, όπως έγινε για παράδειγμα στην μελέτη [39], το Configuration 5 θα έπρεπε να παράγει 267,912 N ώσης και 717,744 N πλάγιας δύναμης, οδηγώντας σε υπερεκτίμηση των πραγματικών τιμών κατά 88% και 35%, αντίστοιχα.

## 4.6 Βέλτιστη Διάταξη

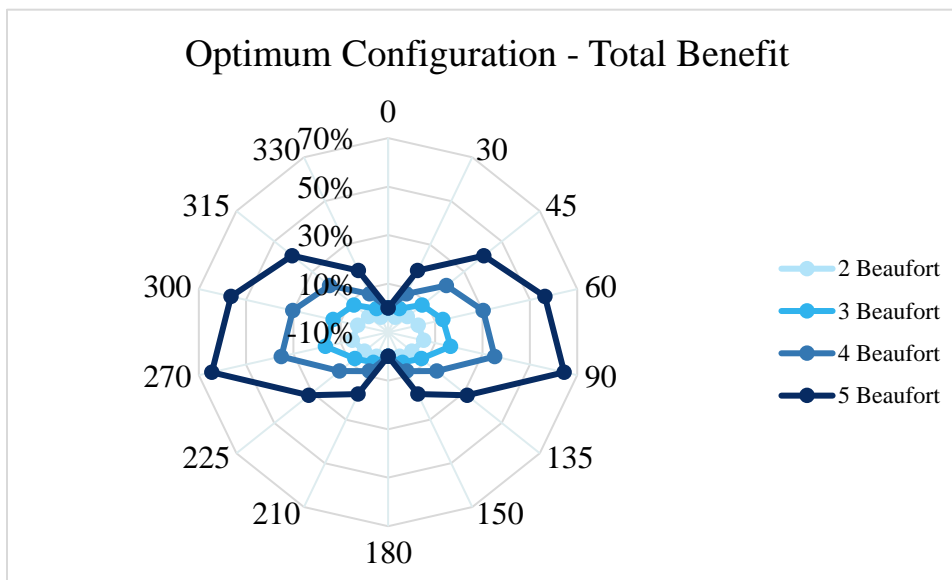
Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν στο Υποκεφάλαιο: Στατιστικές Αναλύσεις, το βέλτιστο για παραγωγή ώσης Configuration είναι εκείνο που έχει παραμέτρους σχεδίασης  $AR = 3.5$ ,  $\lambda = 0.5$  και 3 δυνάδες ιστίων. Στο Διάγραμμα 4.16 παρουσιάζεται ο συντελεστής ώσης του συναρτήσεως της πραγματικής ταχύτητας και γωνίας ανέμου.

Το μέσο κέρδος του είναι **16.87%**, ενώ το μέγιστο κέρδος είναι **64.49%** και παρουσιάζεται στα 5 Beaufort και 90°. Αναλυτικότερα, για όλες τις μελετηθείσες γωνίες και ταχύτητες ανέμου, τα κέρδη παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 4.17.





Διάγραμμα 4.16. Πολικό διάγραμμα του συντελεστή ώσης της βέλτιστης διάταξης ιστίων



Διάγραμμα 4.17. Πολικό διάγραμμα του κέρδους της βέλτιστης διάταξης



Εικόνα 4.8. Το Aegean Marathon με εγκατεστημένη την βέλτιστη διάταξη ιστίων

### 4.7 Προσομοίωση ταξιδιού

Για να ληφθεί στην πραγματικότητα μία τάξη μεγέθους για την εξοικονόμηση καυσίμου με εγκατάσταση της βέλτιστης διάταξης wingsail, λαμβάνονται δεδομένα ανέμου για μία διαδρομή που διήνυσε το Aegean Marathon.

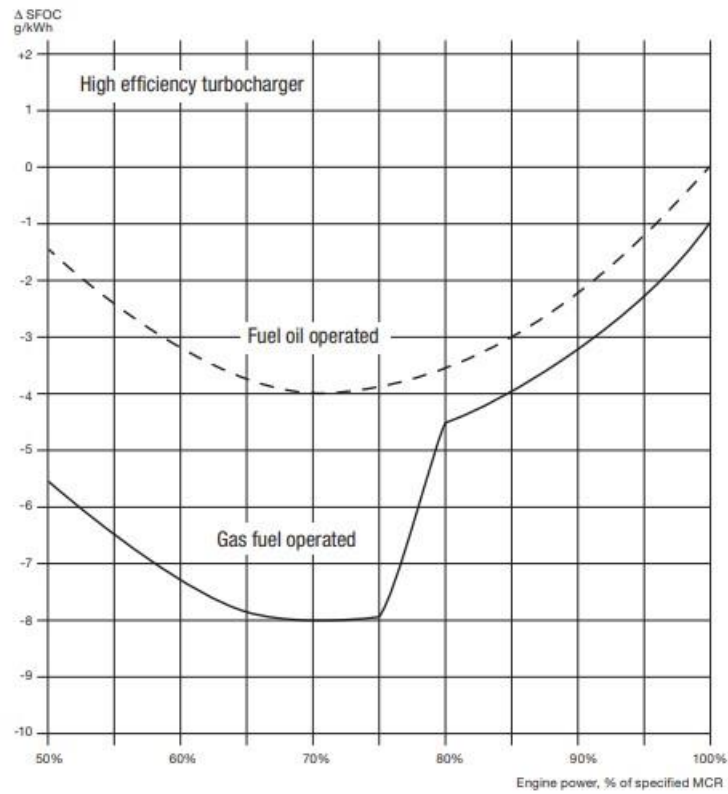
Πίνακας 4.16. Ταχύτητα, κατεύθυνση και χρονική διάρκεια ανέμου σχετικά με το Aegean Marathon σε ταξίδι που πραγματοποιήσε το 2020

Wind Velocity (bf)	Relative Wind Direction & Duration (hrs)				
	0°	45°	90°	135°	180°
2	1.63	1.65	2.95	9.57	-
3	-	6.00	5.50	19.50	2.05
4	2.05	47.32	25.90	95.92	50.30
5	6.63	35.98	55.23	38.08	24.00

Το πραγματικό κέρδος σε ώση που θα είχε το πλοίο είναι 23.12% λαμβάνοντας υπόψιν τα αναλυτικά δεδομένα της βέλτιστης διάταξης από τις προσομοιώσεις CFD που διεξήχθησαν. Εάν απλοποιητικά θεωρηθεί πως η μείωση της ώσης έχει γραμμική εξάρτηση με την κατανάλωση καυσίμου του κινητήρα, το κέρδος σε καύσιμου θα ήταν περίπου της τάξης του 20% με εγκατεστημένη την βέλτιστη διάταξη των ιστίων.

Σημειώνεται πως η σωστότερη τεχνική για να ποσοτικοποιηθεί το κέρδος σε καύσιμο θα ήταν από την επίλυση των εξισώσεων κίνησης να λαμβάνονταν οι μειωμένες στροφές του κινητήρα και να υπολογιζόταν η κατανάλωση καυσίμου σύμφωνα με αυτές τις στροφές από τον κατασκευαστή του κινητήρα.

Η μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου ( $\Delta SFOC$ ) του εγκατεστημένου κινητήρα B&W 6G70ME-C 9.2, συναρτήσει του φορτίου του παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.9.



Εικόνα 4.9. Μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης καυσίμου συναρτήσει του φορτίου του κινητήρα του πλοίου

## Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα

Συμπεραίνοντας, η παρούσα μελέτη είχε ως σκοπό την σχεδίαση μίας διάταξης ιστίων που θα συνεισφέρουν στην ώση του πλοίου Aegean Marathon μειώνοντας έτσι τους εκλυόμενους αέριους ρύπους. Χρησιμοποιώντας μία DOE προσέγγιση, και ειδικότερα την μέθοδο Taguchi, διερευνήθηκαν 3 κύριοι σχεδιαστικοί παράγοντες, ονομαστικά: το διάταμα, ο λόγος εγκλεισμού και ο αριθμός των ιστίων. Οι συγκρίσεις μεταξύ των διατάξεων έγιναν βάσει των αεροδυναμικών τους φορτίων, υπολογισμένα με μεθόδους υψηλής ανάλυσης (CFD). Το σχεδιαστικό χωρίο διερευνήθηκε πλήρως παρόλο που τα πειράματα ήταν μειωμένα.

Τα κύρια συμπεράσματα της μελέτης συνοψίζονται παρακάτω:

- Η μέθοδος Taguchi μείωσε κατά περίπου **70%** τον αριθμό των πειραμάτων που διεξάχθηκαν συγκριτικά με μία πλήρη μελέτη.
- Η στατιστική μελέτη ANOVA για τους λόγους SNR των παραμέτρων αξιολόγησης έδειξε πως κύρια επιρροή έχει ο αριθμός των δυάδων των ιστίων που θα τοποθετηθούν, ενώ ο λόγος εγκλεισμού  $\lambda$  έχει την μικρότερη επιρροή στα αποτελέσματα.
- Η βέλτιστη διάταξη για μεγιστοποίηση της παραγόμενης ώσης, αγνοώντας την συμπεριφορά του πλοίου είναι εκείνη που έχει τα μεγαλύτερα και περισσότερα ιστία, δηλαδή η  $A_3B_3C_3$  με  $AR = 3.5$ ,  $\lambda = 0.5$  και 3 δυάδες wingsail.
- Το μέσο κέρδος της βέλτιστης διάταξης προέκυψε **16.87%**, ενώ το μέγιστο παρατηρήθηκε πως είναι **64.49%** σε συνθήκες αέρα 5 Beaufort και γωνία  $90^\circ$ .
- Το πραγματικό κέρδος στην προσομοίωση του ταξιδιού που διεξάχθηκε από το Aegean Marathon θα ήταν της τάξης του **20%** στην κατανάλωση καυσίμου.
- Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ιστίων είναι πολύ σημαντικές και είναι αναγκαίο να ληφθούν υπόψιν ώστε να εξασφαλιστεί η ορθότητα των αποτελεσμάτων. Αποδείχθηκε πως αν δεν λαμβάνονταν υπόψιν οι αλληλεπιδράσεις στην 5<sup>η</sup> διάταξη, θα γινόταν υπερεκτίμηση κατά **88%** της ώσης και **35%** της πλάγιας δύναμης.

## Κεφάλαιο 6 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας είναι αδύνατον να μελετηθούν όλοι οι παράγοντες σχεδιασμού των wingsail και για τον λόγο αυτό έγιναν μία σειρά από παραδοχές και απλοποιήσεις του προβλήματος.

Μερικά αντικείμενα κλειδιά που χρήζουν μελλοντική έρευνα με σκοπό να διαπιστωθεί εάν η εγκατάσταση των wingsail είναι εφικτή και βιώσιμη, είναι:

- Πολλές παράμετροι, όπως μεγέθη που σχετίζονται με τις αλληλεπιδράσεις του κύτους με το πηδάλιο και την προπέλα ή τα υδροδυναμικά παράγωγα του κύτους, λήφθηκαν είτε από εμπειρικές-στατιστικές σχέσεις είτε από μελέτες άλλων συγγραφέων σε παρεμφερή πλοία. Για να ληφθούν ακριβή στοιχεία για το εκάστοτε πλοίο, στην προκειμένη περίπτωση το Aegean Marathon, είναι αναγκαίο να δημιουργηθεί η τρισδιάστατη γεωμετρία του και να προσομοιωθεί σε λογισμικό, ή για ακόμη ακριβέστερα δεδομένα, να κατασκευαστεί μοντέλο του πλοίου και να τοποθετηθεί σε κανάλι δοκιμών (υδροσήραγγα). Η μελέτη των υδροδυναμικών χαρακτηριστικών του πλοίου είναι εκτός των ορίων της παρούσας εργασίας αλλά προτείνεται να γίνει μελλοντικά με σκοπό την μετέπειτα επίλυση των εξισώσεων κίνησης και την εύρεση της συμπεριφοράς του πλοίου με εγκατεστημένα τα ιστία.
- Διερεύνηση και βελτιστοποίηση της χορδής στην ρίζα της πτέρυγας, καθώς τα 20m επιλέχθηκαν αυθαίρετα και αποτελούν την μέγιστη δυνατή διάσταση wingsail που μπορεί να τοποθετηθεί στην κουβέρτα του πλοίου χωρίς να προεξέχει σημαντικά όταν περιστρέφεται.
- Στο Υποκεφάλαιο 3.3.2, αναλύθηκαν οι λόγοι για τους οποίους τα ιστία επιλέχθηκαν να τοποθετηθούν σε πολύ συγκεκριμένες θέσεις. Κρίνεται λοιπόν σκόπιμο σε μετέπειτα μελέτη να γίνει περαιτέρω διερεύνηση των θέσεων τους, χαλαρώνοντας τους περιορισμούς που προαναφέρθηκαν.
- Εφόσον δεν τοποθετήθηκε η γεωμετρία του πλοίου στις προσομοιώσεις, δεν μελετήθηκε η επιρροή της κουβέρτας του στην αεροδυναμική συμπεριφορά των ιστίων και όπως έχει αποδειχθεί [5], χρειάζεται να μελετηθεί.
- Στην μέθοδο Taguchi μπορούν να συμπεριληφθούν και άλλοι παράγοντες σχεδιασμού, μεγαλύτερα εύρη των παραγόντων και επιπλέον περιορισμοί.

## Αναφορές

- [1] MEPC, “Fourth IMO GHG Study,” 2020.
- [2] M. Viana *et al.*, “Estimated health impacts from maritime transport in the Mediterranean region and benefits from the use of cleaner fuels,” vol. 138, 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.105670.
- [3] K. Ouchi, K. Uzawa, A. Kanai, and M. Katori, “‘Wind Challenger’ the Next Generation Hybrid Sailing Vessel,” pp. 562–567, 2013.
- [4] D. G. Díaz, “Study and analysis of the use of wind power for the propulsion of merchant,” 2020.
- [5] T. Fujiwara, G. E. Hearn, F. Kitamura, and M. Ueno, “Sail-sail and sail-hull interaction effects of hybrid-sail assisted bulk carrier,” *J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 10, no. 2, pp. 82–95, 2005, doi: 10.1007/s00773-005-0191-4.
- [6] T. Fujiwara, G. E. Hearn, F. Kitamura, M. Ueno, and Y. Minami, “Steady sailing performance of a hybrid-sail assisted bulk carrier,” *J. Mar. Sci. Technol.*, vol. 10, no. 3, pp. 131–146, 2005, doi: 10.1007/s00773-004-0189-3.
- [7] M. Traut *et al.*, “Propulsive power contribution of a kite and a Flettner rotor on selected shipping routes,” *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 362–372, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.07.026.
- [8] M. Reche-Vilanova, H. Hansen, and H. B. Bingham, “Performance Prediction Program for Wind-Assisted Cargo Ships,” *J. Sail. Technol.*, vol. 6, no. 01, pp. 91–117, 2021, doi: 10.5957/jst/2021.6.1.91.
- [9] N. van der Kolk, “Sailing Efficiency and Course Keeping Ability of Wind Assisted Ships,” *TU Delft Univ.*, 2020, doi: <https://doi.org/10.4233/uuid:8707309f-b9a3-4e09-916d-8fb64328a138>.
- [10] Y. Yoshimura, Y. Tanabe, I. Ohsugi, I. Amemiya, and H. Tatano, “On the Prediction of the Sailing Performance for a Large Sail Training Ship,” vol. 84, pp. 19–27, 1991.
- [11] K. Kijima, T. Katsuno, Y. Nakiri, and Y. Furukawa, “On the manoeuvring performance of a ship with the parameter of loading condition,” *J. Soc. Nav. Archit. Japan*, no. 168, pp. 141–148, 1990, doi: 10.2534/jjasnaoe1968.1990.168\_141.
- [12] M. Hirano and J. Takashina, “A Calculation of Ship Turning Motion Taking Coupling Effect Due to Heel into Consideration,” *Trans. WEST-JAPAN Soc. Nav. Archit.* 59, JAPAN

- Soc. Nav. Archit. Ocean Eng.*, pp. 71–81, 1980.
- [13] K. Kijima and Y. Nakiri, “On the Practical Prediction Method for Ship Manoeuvring Characteristics,” *Int. Conf. Mar. Simul. Sh. MANEUVERABILITY*, 2003, [Online]. Available: <https://nippon.zaidan.info/seikabutsu/2003/00574/contents/0305.htm>.
- [14] A. F. Molland, S. R. Turnock, and D. A. Hudson, “Wake and Thrust Deduction,” in *Ship Resistance and Propulsion*, Cambridge University Press, 2011, pp. 144–165.
- [15] Y. Yoshimura, M. Ueno, and Y. Tsukada, “Analysis of Steady Hydrodynamic Force Components and Prediction of Manoeuvring Ship Motion with KVLCC1, KVLCC2 and KCS,” 2008.
- [16] Y. Yoshimura and Y. Masumoto, “Hydrodynamic Database and Manoeuvring Prediction Method with Medium High-Speed Merchant Ships and Fishing Vessels,” 2012.
- [17] K. J. Rawson and E. C. Tupper, *Basic Ship Theory*, Fifth Edit., vol. 2. Butterworth-Heinemann, 2001.
- [18] M. Chinsell, *Chinsell on Instrument Techniques (Tips from the top series)*, First Edit. Thomas Reed Publications / Waterline Books, 1992.
- [19] C. Remani, “Numerical Methods for Solving Systems of Nonlinear Equations by,” 2013.
- [20] C. B. Barrass and D. R. Derrett, *Ship Stability for Masters and Mates*. Elsevier Ltd, 2012.
- [21] R. K. Roy, *A Primer on the Taguchi Method*, Second Edi. Society of Manufacturing Engineers, 2010.
- [22] S. Kapsalis, P. Panagiotou, and K. Yakinthos, “CFD-aided optimization of a tactical Blended-Wing-Body UAV platform using the Taguchi method,” vol. 108, 2021, doi: 10.1016/j.ast.2020.106395.
- [23] P. S. Madhav, *Quality Engineering Using Robust Design*. Prentice Hall PTR, 1989.
- [24] K. V. Vankanti and V. Ganta, “Optimization of process parameters in drilling of GFRP composite using Taguchi method,” *Integr. Med. Res.*, vol. 3, no. 1, pp. 35–41, 2013, doi: 10.1016/j.jmrt.2013.10.007.
- [25] J. D. Anderson, *Fundamentals of Aerodynamics*, Fifth. McGraw-Hill Education, 2010.
- [26] M. R. og J. O. V. Bloch and P. K. E. Hansen, *Modern Windships*. 2000.

- 
- [27] M. H. Sadraey, *Aircraft Design: A Systems Engineering Approach*. John Wiley & Sons, Ltd., 2013.
- [28] A. W. Blakeley, R. G. J. Flay, and P. J. Richards, “Design and optimisation of multi-element wing sails for multihull yachts,” *Proc. 18th Australas. Fluid Mech. Conf. AFMC 2012*, 2012.
- [29] A. M. O. Smith, “High-Lift Aerodynamics,” vol. 12, no. 6, 1975.
- [30] J. D. Anderson, *Aircraft Performance and Design*. Tata McGraw-Hill Education Private Limited, 2010.
- [31] D. P. Raymer, *Aircraft Design: A Conceptual Approach Sixth Edition*, Sixth Edit. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.
- [32] “MOL Starts New Sailing Rig Onshore Demonstration Test - Jointly Developed with MES, Can Help Reduce CO2 Emissions - | Mitsui O.S.K. Lines.” <https://www.mol.co.jp/en/pr/2013/13052.html> (accessed Sep. 11, 2021).
- [33] “ANSA pre-processor, v.21.0.1.” BETA CAE Systems, 2021.
- [34] “ANSYS CFX, Release 20.2.” ANSYS Inc, 2020.
- [35] P. R. Spalart and S. R. Allmaras, “A One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows,” 1992, doi: 10.2514/6.1992-439.
- [36] P. R. Spalart and C. L. Rumsey, “Effective Inflow Conditions for Turbulence Models in Aerodynamic Calculations,” pp. 1–14, 2019.
- [37] C. L. Rumsey and P. R. Spalart, “Turbulence Model Behavior in Low Reynolds Number Regions of Aerodynamic Flowfields,” pp. 1–19, 2008, doi: <https://doi.org/10.2514/1.39947>.
- [38] Q. Li, Y. Nihei, T. Nakashima, and Y. Ikeda, “A study on the performance of cascade hard sails and sail-equipped vessels,” *Ocean Eng.*, vol. 98, pp. 23–31, 2015, doi: 10.1016/j.oceaneng.2015.02.005.
- [39] P. C. Shukla and K. Ghosh, “Revival of the Modern Wing Sails for the Propulsion of Commercial Ships,” *Int. J. Environ. Sci. Eng.*, vol. 3, no. 3, pp. 207–212, 2009.
- [40] M. F. Silva, B. Malheiro, P. Guedes, and P. Ferreira, “Airfoil Selection and Wingsail Design for an Autonomous Sailboat,” *Adv. Intell. Syst. Comput.*, vol. 1092 AISC, pp. 305–316, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-35990-4\_25.