



ΔΠΜΣ

Διοίκηση στη Ναυτική Επιστήμη και Τεχνολογία

Διπλωματική Εργασία

“Ναυπηγικά Συστήματα Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Πλοία”

Ψώρρας Νικόλαος

A.M. ΜΝΣΝΔ 20075

Επιβλέπων: Ιωάννης Κατσάνης

Αναπληρωτής Καθηγητής Σ.Ν.Δ.

Πειραιάς

Μάρτιος 2022

## ΔΗΛΩΣΗ ΑΥΘΕΝΤΙΚΟΤΗΤΑΣ / ΖΗΤΗΜΑΤΑ COPYRIGHT

Το άτομο το οποίο εκπονεί την Διπλωματική Εργασία φέρει ολόκληρη την ευθύνη προσδιορισμού της δίκαιης χρήσης του υλικού, η οποία ορίζεται στην βάση των εξής παραγόντων: του σκοπού και χαρακτήρα της χρήσης (εμπορικός, μη κερδοσκοπικός ή εκπαιδευτικός), της φύσης του υλικού που χρησιμοποιεί (τμήμα του κειμένου, πίνακες, σχήματα, εικόνες ή χάρτες), του ποσοστού και της σημαντικότητας των πιθανών συνεπειών αυτής στην αγορά ή στη γενικότερη αξία του υπό copyright κειμένου.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΜΕΛΟΣ Α΄: Ιωάννης Κατσάνης, Αναπληρωτής Καθηγητής Σ.Ν.Δ.

ΜΕΛΟΣ Β΄: Ευθύμιος Παριώτης, Αναπληρωτής Καθηγητής Σ.Ν.Δ.

ΜΕΛΟΣ Γ΄: Θεόδωρος Ζάννης, Αναπληρωτής Καθηγητής Σ.Ν.Δ.



Ψώρρας Νικόλαος,  
‘Ναυπηγικά Συστήματα Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Πλοία’

*"Ευχαριστίες"*

*Για την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Ιωάννη Κατσάνη, και τους κ.κ. Θεόδωρο Ζάννη και Ευθύμιο Παριώτη για την καθοδήγηση που μου παρείχαν. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την αμέριστη στήριξη και συμπαράσταση κατά τη διάρκεια όλου του προγράμματος.*



## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τις νέες τεχνολογίες ναυπηγικών συστημάτων που εφαρμόζονται στα πλοία προκειμένου να περιοριστεί η ενέργεια που καταναλώνουν, και, κατ’ επέκταση, η κατανάλωση καυσίμου. Αρχικά, περιγράφεται η συνεισφορά της ναυτιλίας στο παγκόσμιο εμπόριο ως ο κύριος μεταφορέας και η επίδραση της στο παγκόσμιο κλίμα. Ακολουθεί η περιγραφή του υφιστάμενου νομικού πλαισίου όσον αφορά τους κανονισμούς του IMO για τη μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων από τα πλοία. Αυτό επιβάλλει τη λήψη διορθωτικών μέτρων και την εναρμόνιση με τους απαιτούμενους ενεργειακούς δείκτες, όπως τον EEXI και τον CII. Υπό το πρίσμα των απαιτούμενων ενεργειών που καθορίζονται από τον IMO, παρουσιάζονται οι υφιστάμενες νέες τεχνολογίες εξοικονόμησης ενέργειας που βρίσκουν εφαρμογή στα πλοία και η επίδρασή τους στην εξοικονόμηση ενέργειας. Παράδειγμα τέτοιων ναυπηγικών συστημάτων είναι το PBCF, οι αγωγοί εξισορρόπησης ροής πριν την προπέλα, η χρήση της αιολικής ενέργειας ως υποβοήθηση της πρόωσης και το Air Lubrication System. Κατά τη διαδικασία λήψης απόφασης υιοθέτησης του εκάστοτε μέτρου παρουσιάζονται τα διαθέσιμα εργαλεία, που αξιολογούν την εν γένει απόδοση του. Η λήψη απόφασης δύναται να στηριχτεί σε αποτελέσματα CFD, EFD και σε πραγματικά δεδομένα. Τέλος, παρουσιάζεται το υπολογιστικό εργαλείο EE APPRAISAL TOOL FOR IMO του νηογνώμονα DNV-GL, που χρησιμοποιεί διάφορα δεδομένα ώστε να μπορεί να εκτιμηθεί το κατά πόσο είναι εφικτή η εφαρμογή τους σε σχέση με το κόστος εγκατάστασης και την απόσβεση της επένδυσης.

## Λέξεις – Κλειδιά

Ενεργειακή Απόδοση, Εξοικονόμηση καυσίμου, Μείωση εκπομπών αέριων ρύπων



## Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	v
Πίνακας Περιεχομένων .....	vi
Πίνακας Εικόνων/Σχημάτων .....	viii
Πίνακες.....	xi
Συντμήσεις .....	xii
1. Η Ναυτιλία και η επίδραση της στο περιβάλλον .....	14
1.1 Ιστορικό πλαίσιο.....	14
1.2 Κλιματική αλλαγή .....	14
1.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ναυτιλίας.....	16
2. Περιγραφή IMO .....	17
2.1 Η Εξέλιξη του IMO.....	17
2.2 Περιγραφή κεφαλαίων του MARPOL για το θαλάσσιο περιβάλλον .....	17
2.3 MARPOL Παράρτημα VI (Μόλυνση του αέρα) .....	18
2.4 Μελέτες IMO που αφορούν τις εκπομπές GHG από τη ναυτιλία.....	20
3. Ενεργειακοί δείκτες.....	21
3.1 Δείκτης EEDI.....	21
3.2 Περιγραφή συστήματος συλλογής δεδομένων (Data Collection System (DCS)) του IMO και πλαίσιο αναφοράς .....	22
3.3 Δείκτης EEXI.....	23
3.4 Ετήσιος λειτουργικός δείκτης έντασης άνθρακα (CII) και σχέδιο διαχείρισης ενεργειακής αποδοτικότητας πλοίου (SEEMP) .....	23
4. Ναυπηγικά Συστήματα Εξοικονόμησης Ενέργειας (ESD) .....	27
4.1 Βελτιστοποίηση μορφής γάστρας .....	27
4.1.1 Βελτιστοποίηση γραμμών της μορφής της γάστρας .....	28
4.1.2 Βελτιστοποίηση ΠΡ τμήματος του πλοίου.....	32
4.1.3 Βελτιστοποίηση ΠΜ τμήματος του πλοίου .....	33
4.1.3.1 Σχεδίαση TWIN SKEG .....	33
4.2 Συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας.....	35
4.2.1 Συστήματα WED (Wake Equalizing Device) και ανακουφιστικά συστήματα διαχωρισμού ροής / Συστήματα προ-δίνης (Pre-swirl Devices) .....	35
4.2.1.1 Πτερύγια πριν την προπέλα / Πτερύγια Grothues.....	35
4.2.1.2 Αγωγός Schneekluth .....	36
4.2.1.3 Πρυμναίες σήραγγες / στάτορες με πτερύγια.....	37
4.2.2 Συστήματα μετά-δίνης (Post-swirl Devices).....	38
4.2.2.1 Πηδάλιο με στρεβλωμένα άκρα .....	38
4.2.2.2 Πηδάλιο με βολβό .....	38
4.2.2.3 Πηδάλιο με πτερύγιο ώσης .....	39
4.2.2.4 Ωθητήρες τύπου Podded και τύπου Azimuth .....	40
4.2.3 Προπέλες υψηλής αποδοτικότητας .....	41
4.2.3.1 Προπέλες με τελικές πλάκες και προπέλες Kappel.....	42
4.2.3.2 Propeller Boss Cap Fin (PBCF) .....	43
4.2.3.3 Contra Rotating Propeller και προπέλες επικάλυψης .....	43
4.2.3.4 Έλικά μέσα σε αγωγό.....	45



4.2.3.5 Προπέλες Μεταβλητού Βήματος (CPP) .....	45
4.3.1 Μείωση τριβής με φυσαλίδες (Bubble Drag Reduction (BDR)) .....	47
4.3.1.1 Mitsubishi Air Lubrication (MALS) .....	47
4.3.1.2 Μηχανική Έρευνας και Ανάπτυξης – Winged Air Induction Pipe System (WAIP) .....	48
4.3.1.3 Σύστημα Saver της Samsung Heavy Industries (SAVER Air) .....	48
4.3.1.4 Σύστημα Silverstream .....	48
4.3.2 Δημιουργία στρώματος με μικροφυσαλίδες μείωσης τριβής (Air Layer Drag Reduction (ALDR)) .....	49
4.3.3 Μείωση αντίστασης μερικής κοιλότητας (Partial Cavity Drag Reduction (PCDR)) .....	49
4.3.3.1 Σύστημα Εξοικονόμησης Ενέργειας Αεροθυλακίου από την DAMEN (Damen’s Air Chamber Energy Saving System (ACES)) .....	49
4.4 Χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας .....	51
4.4.1 Αιολική ενέργεια .....	51
4.4.1.1 Αετοί έλξης .....	52
4.4.1.2 Υποβοήθηση πρόωσης με τη χρήση πανιών .....	53
4.4.1.3 Ρότορες Flettner .....	54
4.4.2 Ηλιακή ενέργεια .....	56
5. Μέθοδοι CFD, EFD και μέθοδοι κλίμακας για την αξιολόγηση και επιλογή των ESD .....	58
5.1 Μέθοδοι CFD για ESD .....	58
5.2 Μέθοδοι EFD (Experimental Fluid Dynamic) για ESD .....	60
5.3 Δεδομένα πλήρους κλίμακας .....	64
6. Υπολογισμός MACC για ESD .....	68
7. Συμπεράσματα .....	84
Βιβλιογραφία.....	86



## Πίνακας Εικόνων/Σχημάτων

Εικόνα 1. Αλλαγές θερμοκρασίας στην επιφάνεια της γης τα τελευταία 170 χρόνια (IPCC, 2021) .....	15
Εικόνα 2. Σχεδόν γραμμική συσχέτιση ανάμεσα στις εκπομπές CO <sub>2</sub> και στην αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας της γης (IPCC, 2021) .....	15
Εικόνα 3. Σύγκριση εκπομπών CO <sub>2</sub> ανάμεσα στα μέσα μεταφοράς (ICS, 2021) .....	16
Εικόνα 4. Απαιτούμενο EEDI, παράγοντας μείωσης, όρια και φάσης (IMO, MODULE 2, SHIP ENERGY EFFICIENCY REGULATIONS AND RELATED GUIDELINES, 2016) .....	21
Εικόνα 5. Κύριοι όροι του τύπου του EEDI (ZACHARIADIS, 2011).....	21
Εικόνα 6. Τύπος υπολογισμού EEXI (DNV, 2021).....	23
Εικόνα 7. Ταξινόμηση πέντε βαθμίδων για τον δείκτη CII (BureauVeritas, 2021) .....	25
Εικόνα 8. Επίπεδα απόδοσης με κριτήριο τον δείκτη CII που έχει επιτευχθεί (BureauVeritas, 2021) .....	25
Εικόνα 9. Απόδοσης γάστρας για δεξαμενόπλοια (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021). .....	28
Εικόνα 10. Απόδοσης γάστρας για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021).....	29
Εικόνα 11. Στοιχεία της αντίστασης γάστρας σε ήρεμα ύδατα στη ταχύτητα σχεδιασμού για διάφορους τύπους πλοίων (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021). .....	31
Εικόνα 12. Βολβός σχήματος αντίστροφου αχλαδιού (reverse pear-shaped) (Khasnabis, 2021) .....	32
Εικόνα 13. TWIN SKEG (MASUKO Akira, 2011) .....	34
Εικόνα 14. Βασική αρχή λειτουργίας πτερυγίων Grothues (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021) .....	36
Εικόνα 15. Μοντέλο αγωγού Schneekluth (schneekluth.com, n.d.) .....	36
Εικόνα 16. Αγωγός πρυμναίας σήραγγας (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021) .....	37
Εικόνα 17. Στάτορας προ-δίνης μπροστά από την προπέλα (Elangovan, 2020) .....	37
Εικόνα 18. Σχηματική υποτύπωση ενός στρεβλωμένου πηδαλίου (Rob Winkel, Arno van den Bos, Ulf Weddige - European Commission, 2015).....	38
Εικόνα 19. Παράδειγμα βολβού πηδαλίου. Kawasaki RBS-F συστήματα βολβού πηδαλίου με πτερύγια (Rob Winkel, Arno van den Bos, Ulf Weddige - European Commission, 2015) .....	39
Εικόνα 20. Υψηλής αποδοτικότητας πηδάλιο της Wartsila (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021) .....	39
Εικόνα 21. HHI Thrust Fins (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021) .....	40
Εικόνα 22. SHI Port-stator (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021) .....	40
Εικόνα 23. Μεγάλος ωθητήρας τύπου κελύφους και τύπου αζιμούθιο (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021) .....	41
Εικόνα 24. MAN Alpha Propellers with Kappel Blades (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021) .....	42
Εικόνα 25. Προπέλα CLT (Japan Hamworthy & Co., 2022).....	42





Εικόνα 26. Παράδειγμα PBCF (Rob Winkel, Arno van den Bos, Ulf Weddige - European Commission, 2015) .....	43
Εικόνα 27. Αριστερά, συμβατική προπέλα. Δεξιά, CRP (Rob Winkel, Arno van den Bos, Ulf Weddige - European Commission, 2015).....	44
Εικόνα 28. Contra rotating και Overlapping propellers (Singh, 2018).....	44
Εικόνα 29. Σύστημα Ducted Propeller (Singh, 2018).....	45
Εικόνα 30. Σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος Air Lubrication (IMO, MEPC.1/Circ.815).....	46
Εικόνα 31. Γάστρα πλοίου που είναι καλυμμένη με φυσαλίδες (CHIHARU KAWAKITA, 2015) .....	47
Εικόνα 32. Σύστημα SAVER (YONHAP NEWS AGENCY, 2018).....	48
Εικόνα 33. Σύστημα Silverstream (Silverstream Technologies, 2015) .....	49
Εικόνα 34. Damen Air Cavity Ssystem (Moore, 2020) .....	50
Εικόνα 35. Τύποι πλοίων με εγκατεστημένο σύστημα Air Lubrication (ABS, Air Lubrication Technology, 2019).....	50
Εικόνα 36. Ολικό μήκος, διαγωγή και βύθισμα των πλοίων με εγκατεστημένο σύστημα Air Lubrication (ABS, Air Lubrication Technology, 2019) .....	51
Εικόνα 37. Λίστα κρουαζιερόπλοιων με ALS που παραδόθηκαν την περίοδο 2015-2019 (Mariusz Giernalczyk, 2021) .....	51
Εικόνα 38. Αετός έλξης (SkySails Propulsion, 2022).....	53
Εικόνα 39. Aquarius Eco Ship by Eco Marine Power - Sail Assisted Ship (ECOMARINEPOWER, 2022) .....	54
Εικόνα 40. Παραδείγματα εγκατεστημένων Ρότορων Flettner (Johanson, 2021).....	55
Εικόνα 41. Διάγραμμα φαινομένου Magnus για ρότορα Flettner σε πλοίο (Fabian Tillig, 2015) .....	55
Εικόνα 42. Planet Solar (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021) .....	57
Εικόνα 43. Απορρόφηση δινών πλύμνης με ένα PBCF (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2017).....	60
Εικόνα 44. Διάφοροι τύποι PBCF (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2021) .....	61
Εικόνα 45. Περίπτωση πηδαλίου τύπου ‘Gate Rudder’ (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2017) (Sasaki N, 2016).....	61
Εικόνα 46. Βολβός πηδαλίου με πτερύγιο (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2017) .....	61
Εικόνα 47. Η συσχέτιση της ιπποδύναμης και της ταχύτητας πλοίου σε κατάσταση θαλάσσης BF6 (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2017).....	62
Εικόνα 48. Μοντέλο πλοίου με ενσωματωμένο πτερύγιο στην πλώρη (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2021) .....	63
Εικόνα 49. Διαμόρφωση κάτω μέρους γάστρας για σύστημα κοιλότητας αέρα και φωτογραφία από μοντέλο δεξαμενόπλοιου (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2021) .....	63
Εικόνα 50. Φωτογραφία από μοντέλο και το σχηματικό διάγραμμα του συστήματος ψεκασμού με αέρα (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2021).....	64
Εικόνα 51. Εφαρμογή ενός PBCF (Propulsion Committee, 2011-2014).....	66
Εικόνα 52. ECO-Cap προσαρμοσμένο σε πραγματικό πλοίο (Yoshihisa Okada, 2017)....	66
Εικόνα 53. SAVER FIN (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2017)..	67
Εικόνα 54. Τιμές αργού πετρελαίου (DNV-GL , 2016).....	68



Εικόνα 55. Περιγραφή μοντέλου (DNV-GL , 2016) .....	70
Εικόνα 56. Γενική εικόνα του λογισμικού όπως αυτό εμφανίζεται στην οθόνη του υπολογιστή .....	75
Εικόνα 57. Τύπος πλοίου (DNV-GL , 2016) .....	76
Εικόνα 58. Διαφορετικά μεγέθη πλοίων βασιζόμενα στον τύπο πλοίου (DNV-GL , 2016) .....	76
Εικόνα 59. Τιμή καυσίμου για το καύσιμο που χρησιμοποιεί το πλοίο που διερευνάται (DNV-GL , 2016).....	76
Εικόνα 60. Επιλεγμένα μέτρα που θα εφαρμόζονται στο πλοίο που διερευνάται (DNV-GL , 2016) .....	77
Εικόνα 61. Η υπολογισμένη τιμή του EEOI (DNV-GL , 2016) .....	77
Εικόνα 62. Η υπολογισμένη τιμή του EEDI (DNV, 2021).....	78
Εικόνα 63. Η υπολογισμένη κατανάλωση καυσίμου (DNV-GL , 2016).....	78
Εικόνα 64. Το εκτιμώμενο μεταφερόμενο έργο για τον επιλεγμένο συνδυασμό τύπου/μεγέθους πλοίου (DNV-GL , 2016) .....	78
Εικόνα 65. Η εκτιμώμενη απόσταση που διανύθηκε για τον επιλεγμένο συνδυασμό τύπου/μεγέθους πλοίου (DNV-GL , 2016) .....	78
Εικόνα 66. Καμπύλες κόστους MAC.....	79
Εικόνα 67. Σύνοψη εξοικονόμησης .....	81
Εικόνα 68. Αποτέλεσμα υπολογισμού .....	82



## Πίνακες

Πίνακας 1. Βασικές σχεδιάσεις Δεξαμενόπλοιου – Πάνω τεταρτημόριο απόδοσης γάστρας (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021). .....	30
Πίνακας 2. Βασικές σχεδιάσεις πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων – Πάνω τεταρτημόριο απόδοσης γάστρας (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021). .....	30
Πίνακας 3. Αντίστοιχη ισχύς ανάλογα τα διαφορετικά μεγέθη του αετού (S.Marantis, 2012). .....	52
Πίνακας 4. Απόδοση εξοικονόμησης ενέργειας εγκατεστημένων αετών σε διάφορους τύπους πλοίων (Todd Chou, 2021) .....	53
Πίνακας 5. Σύνοψη της εξοικονόμησης καυσίμου όσον αφορά τη χρησιμοποίηση σταθερών πανιών (Todd Chou, 2021).....	54
Πίνακας 6. Εξοικονόμηση καυσίμου με την εφαρμογή ρότορων Flettner (Todd Chou, 2021) .....	56
Πίνακας 7. Λίστα δεδομένων από πλοία πλήρους κλίμακας (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2017).....	65
Πίνακας 8. Τομείς πλοίων και κατηγορίες που περιλαμβάνονται στο μοντέλο (DNV-GL , 2016) .....	69
Πίνακας 9. Κατάλογος μέτρων που εκτιμώνται από το λογισμικό (DNV-GL , 2016).....	70
Πίνακας 10. Αβεβαιότητα που σχετίζεται με τους αριθμούς βάσης για κάθε μέτρο (DNV-GL , 2016).....	73
Πίνακας 11. Συσχετισμοί μέτρων και η αντίστοιχη αβεβαιότητα από την εφαρμογή πολλαπλών μέτρων (Το γράμμα 'W' δηλώνει το 'warning') (DNV-GL , 2016) .....	74



## Συντμήσεις

AER	Annual Efficiency Ratio
AHEWG-TT	Ad hoc Expert Working Group on facilitation of Transfer of Technology for ships
AIS	Automatic Identification System
ALS	Air Lubricated System
CFD	Computational Fluid Dynamics
CII	Carbon Intensity Index
CLT	Contracted and Loaded Tip Propeller
CPP	Controllated Pitch Propeler
CRP	Contra Rotating Propeler
C <sub>b</sub>	Coefficiency Block
DCS	Data Collection System
DWT	Deadweight
ECA	Emission Control Areas
EEDI	Energy Efficiency Design Index
EEOI	Energy Efficiency Operation Index
EEXI	Energy Efficiency Existing Index
EFD	Experimental Fluid Dynamics
ESD	Energy Saving Device
FPP	Fixed Pitch Propeler
GHG	Green House Gases
GT	Gross Tonnage
HFO	Heavy Fuel Oil
HSFO-380	Hight Sulfur Fuel Oil (3,5%)
ICS	International Chamber of Shipping
IEA	International Energy Agency
IEEC	International Energy Efficiency Certificate
IMO	International Maritime Organization
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISM	International Safety System
LCB	Longitucional Centre of Boyancy



Ψώρρας Νικόλαος,  
‘Ναυπηγικά Συστήματα Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Πλοία’

MACC	Marginal Abatement Cost Curve
MARPOL	Maritime Pollution
MEPC	Maritime Environmental Protection Committee
MGO	Marine Gas Oil
ODS	Ozone Depleting Substances
PBCF	Propeller Boss Cap Fin
RO-PAX	Roll-On/Roll-Off passenger
RO-RO	Roll-On/Roll-Off
SEEMP	Ship Energy Efficiency Plan
TEU	Twenty-foot Equivalent Unit
ULSFO	Ultra Low Sulfur Fuel Oil (0,1%)
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
VLSFO	Very Low Sulfur Fuel Oil (0,5%)
VOC	Volatile Organic Compounds
WAPS	Wind Assisted Propulsion System
WED	Wake Equalizing Device
OHE	Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών



## 1. Η Ναυτιλία και η επίδραση της στο περιβάλλον

### 1.1 Ιστορικό πλαίσιο

Ο διάσημος οικονομολόγος Adam Smith στο βιβλίο του, ο Πλούτος των Εθνών, περιέγραψε τη μεγάλη σημασία που διαδραματίζει η θάλασσα στην οικονομική ανάπτυξη των διαφόρων περιοχών. Σήμερα, περίπου το 61% του παγκόσμιου πληθυσμού κατοικεί σε περιοχές που απέχουν έως 10 χλμ. από τις ακτές και ένα αντίστοιχο ποσοστό του παγκόσμιου ΑΕΠ προέρχεται από περιοχές που απέχουν έως 100 χλμ. (Karp, 2015). Στο γενικότερο πλαίσιο καταμερισμού της εργασίας ως κλειδί της ανάπτυξης και της αύξησης της παραγωγικότητας, περισσότερα αγαθά μπορούν να πωληθούν σε ευρύτερες αγορές. Σε αυτό συμβάλει η ναυτιλία που ιστορικά είναι το πιο αποδοτικό μέσο μεταφοράς επιτρέποντας στο εμπόριο να εξελίσσεται. Επιπρόσθετα, προκύπτει όφελος 15πλάσιο ως προς την παραγωγικότητα της εργασίας μέσω της αξιοποίησης των οικονομικών κλίμακας (Stopford, 2018).

### 1.2 Κλιματική αλλαγή

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι ένα φυσικό φαινόμενο κατά το οποίο διάφορα αέρια που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα διατηρούν τη θερμοκρασία της γης σε ικανά υψηλές τιμές ώστε να καθίσταται η ζωή στον πλανήτη βιώσιμη. Αέρια του θερμοκηπίου θεωρούνται, το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), το μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ), οι υδρατμοί ( $\text{H}_2\text{O}$ ) και το υποξείδιο του αζώτου ( $\text{N}_2\text{O}$ ) και επιτρέπουν στην ηλιακή ακτινοβολία (με μήκη κύματος κυρίως στο ορατό κομμάτι του φάσματος) να διαπερνά την ατμόσφαιρα και να φτάνει στην επιφάνεια της γης.

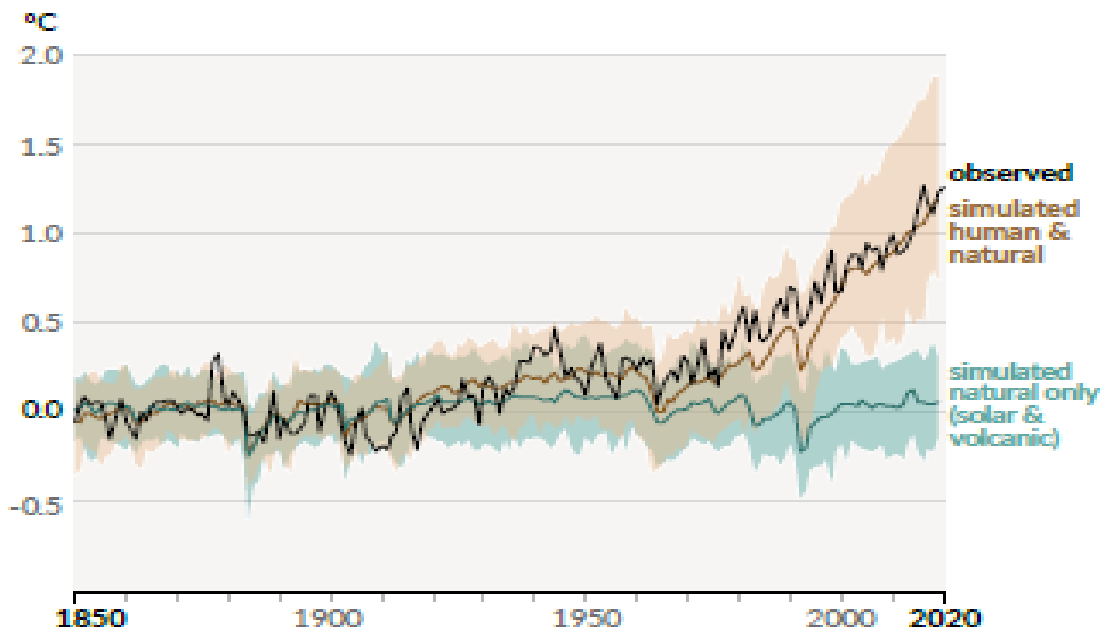
Οι ανθρώπινες δραστηριότητες, και κυρίως η καύση ορυκτών καυσίμων (πετρελαίου, λιγνίτη, φυσικού αερίου) αυξάνουν τη συγκέντρωση των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα και ενισχύουν το φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Στο πλαίσιο του ΟΗΕ, το 1988 ιδρύθηκε η Διακυβερνητική Επιτροπή για την Κλιματική Αλλαγή (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC), η οποία αποτελείται από ειδικούς επιστήμονες και σκοπό έχει να συνοψίζει την τρέχουσα, κάθε φορά, επιστημονική γνώση αναφορικά με το φαινόμενο του θερμοκηπίου και την κλιματική αλλαγή (Κοτρίκλα, 2015).

Το 2019, οι συγκεντρώσεις  $\text{CO}_2$  στην ατμόσφαιρα ήταν υψηλότερες από κάθε άλλη στιγμή, τουλάχιστον, των τελευταίων 2 εκ. χρόνων και οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις  $\text{CH}_4$  και  $\text{N}_2\text{O}$  ήταν οι υψηλότερες των τελευταίων, τουλάχιστον, 800.000 χρόνων. Η μέση αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια της γης σε σχέση με το 1850-1900 έχει αυξηθεί περίπου 1,5-2 °C εξαιτίας της ανθρώπινης παρέμβασης. Ιδιαίτερη αύξηση της μεταβολής της θερμοκρασίας έχει διαπιστωθεί από το 1970 και έπειτα (IPCC, 2021).

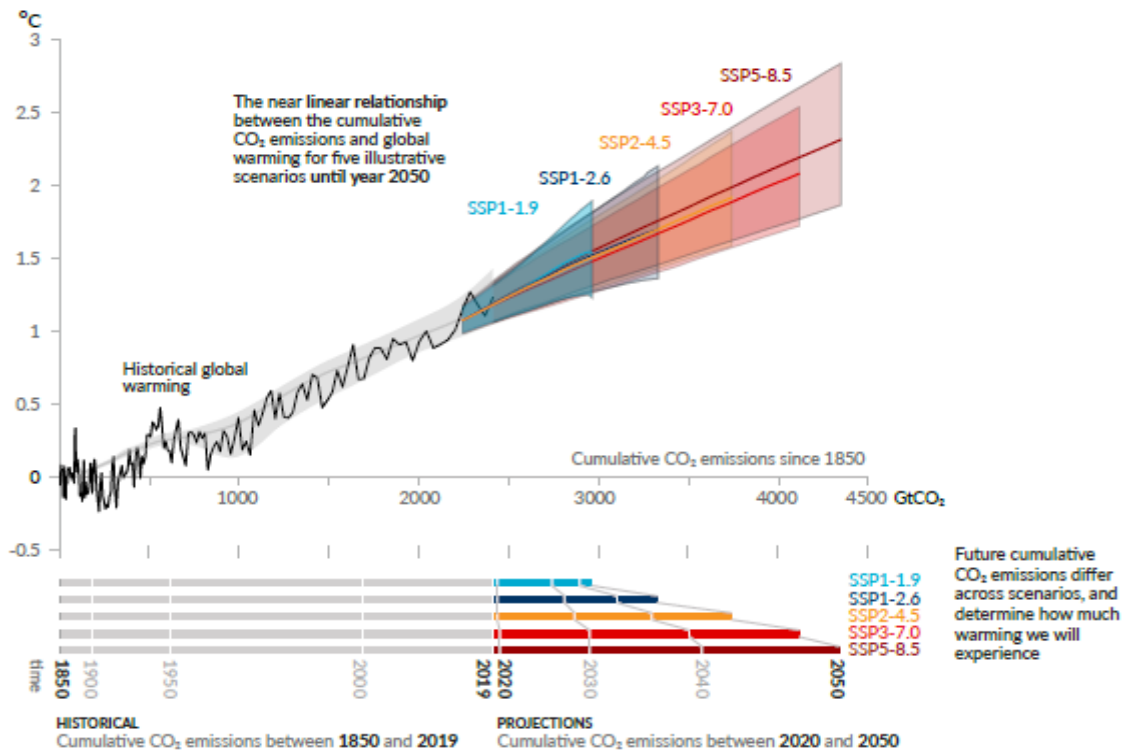


Ψώρρας Νικόλαος,  
‘Ναυπηγικά Συστήματα Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Πλοία’



Εικόνα 1. Αλλαγές θερμοκρασίας στην επιφάνεια της γης τα τελευταία 170 χρόνια (IPCC, 2021)

Global surface temperature increase since 1850-1900 (°C) as a function of cumulative CO<sub>2</sub> emissions (GtCO<sub>2</sub>)



Εικόνα 2. Σχεδόν γραμμική συσχέτιση ανάμεσα στις εκπομπές CO<sub>2</sub> και στην αύξηση της επιφανειακής θερμοκρασίας της γης (IPCC, 2021)

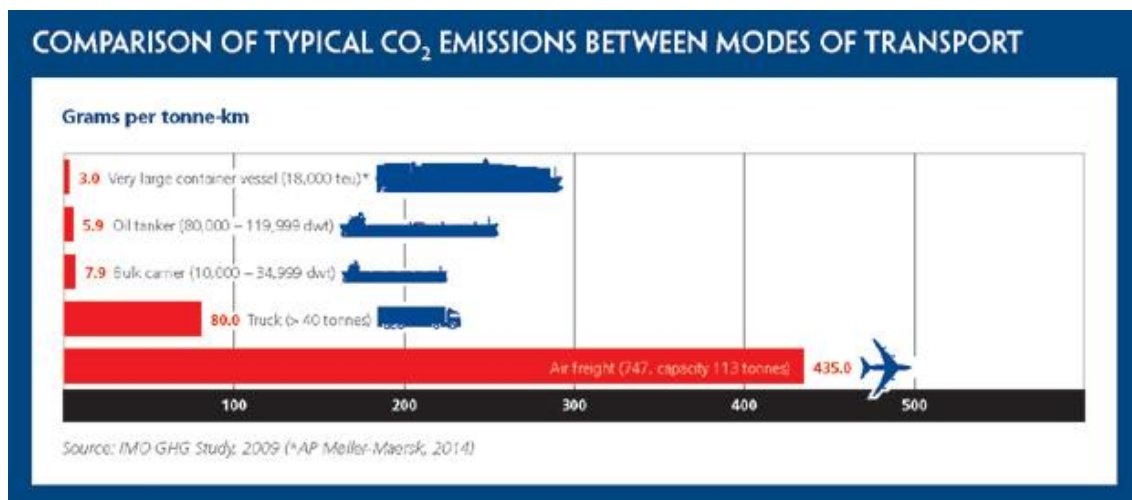
Η ναυτιλία βρίσκεται μπροστά σε μία αρκετά μεγάλη πρόκληση για να μπορέσει να αποσυνδέσει τις λειτουργίες της από τον άνθρακα σημαντικά μέσα στην επόμενη δεκαετία ως ένα μέρος του παγκόσμιου ενεργειακού μετασχηματισμού ο οποίος θα καταστήσει τον κόσμο μας βιώσιμο και για τις επόμενες γενιές.



Ένα σημαντικό μέρος της παγκόσμιας ανταπόκρισης απέναντι στην απειλή της κλιματικής αλλαγής είναι η συμφωνία του Παρισιού. Αυτή η συμφωνία, στο πλαίσιο του United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), υπογράφηκε το 2016 αφού προηγήθηκε μία σύσκεψη που διενεργήθηκε το 2015. Ο στόχος της είναι να διατηρήσει την κατά μέσο όρο αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας κάτω από 2 °C πάνω από τα προ-βιομηχανικά επίπεδα, και να συνεχιστούν οι προσπάθειες για επιτευχθεί το όριο του 1,5 °C (BureauVeritas, 2021).

### 1.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της ναυτιλίας

Σύμφωνα με τη Διεθνή Ενεργειακή Υπηρεσία (International Energy Agency (IEA)), το 2019, ο τομέας των μεταφορών, συνολικά, αντιπροσώπευε το 24% των παγκόσμιων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), με τη ναυτιλία να αντιπροσωπεύει το 11% των εκπομπών CO<sub>2</sub> του μεταφορικού τομέα, σημειώνοντας ότι το μερίδιο των εκπομπών από αυτή στις παγκόσμιες ανθρωπογενείς εκπομπές να αντιστοιχεί περίπου στο 2%. Επομένως, αν και η ναυτιλία θεωρείται το πιο αποδοτικό μέσο μεταφοράς σε όρους εκπομπών CO<sub>2</sub>/metric ton-mile όπως φαίνεται στην Εικόνα 3, υπάρχουν περιθώρια για περαιτέρω βελτίωση.



Εικόνα 3. Σύγκριση εκπομπών CO<sub>2</sub> ανάμεσα στα μέσα μεταφοράς (ICS, 2021)

Η κύρια πηγή των εκπομπών από τα πλοία είναι τα καυσαέρια των μηχανών εσωτερικής καύσης. Ανάμεσα στα αέρια που εκπέμπονται, το CO<sub>2</sub> επηρεάζει άμεσα το παγκόσμιο κλίμα, ενώ το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), τα οξείδια του θείου (SO<sub>x</sub>), τα οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>), μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) και τα αιωρούμενα σωματίδια συμπεριλαμβανομένου το μαύρο άνθρακα (BC), έχουν επίπτωση τόσο για την ανθρώπινη υγεία όσο και για το περιβάλλον.

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (International Maritime Organization (IMO)) έχει θέσει φιλόδοξους στόχους για τη μείωση των εκπομπών, με κυριότερο την ελάχιστη μείωση της τάξης του 50% των ετήσιων εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου (Green House Gas (GHG)) μέχρι το 2050, έχοντας ως βάση το έτος 2008. Για επιτευχθούν ή και να ξεπεραστούν αυτοί οι στόχοι, η ναυτιλία πρέπει να βρει τη βέλτιστη μίξη των τεχνικών, λειτουργικών μέτρων και καινοτόμων λύσεων (Jacob Teter, 2020).





## 2. Περιγραφή IMO

### 2.1 Η Εξέλιξη του IMO

Η διεθνής ναυτιλία υπόκειται σε ένα θεσμικό πλαίσιο το οποίο καθορίζεται από τον IMO, όργανο του Οργανισμού των Ηνωμένων Εθνών (ΟΗΕ). Το θεσμικό πλαίσιο αφορά διεθνείς κανονισμούς, ώστε η ναυτιλία να εναρμονίζεται με τις σύγχρονες απαιτήσεις.

Η ραγδαία ανάπτυξη της παγκόσμιας οικονομίας με τη λήξη του Β’ Παγκοσμίου Πολέμου, επέφερε την απαίτηση τεραστίων ποσοτήτων ενέργειας και, ως εκ τούτου, την αύξηση των θαλασσιών μεταφορών. Αρχικά, το 1948 ιδρύθηκε ο IMCO (Intergovernmental Maritime Consultative Organization), ο οποίος το 1982 μετονομάστηκε σε IMO.

Ναυτικά ατυχήματα που προξένησαν θαλάσσια ρύπανση, ώθησαν στη δημιουργία ενός θεσμικού πλαισίου που να καθορίζει την απόδοση ευθυνών και τη δικαιοδοσία της εκάστοτε χώρας. Οι ζυμώσεις που ακολούθησαν είχαν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία της σύμβασης MARPOL 73/78 (Maritime Pollution) και άλλων σχετικών συμβάσεων (Κοτρίκλα, 2015).

### 2.2 Περιγραφή κεφαλαίων του MARPOL για το θαλάσσιο περιβάλλον

Η σύμβαση MARPOL 73/78 περιγράφει το νομικό πλαίσιο που πρέπει να εφαρμόζεται παγκοσμίως για την αντιμετώπιση ρύπανσης της θάλασσας με πετρέλαιο, χύδην υγρές επιβλαβείς ουσίες, συσκευασμένης μορφής επιβλαβείς ουσίες, λύματα προερχόμενα από τα πλοία, απορρίμματα και ατμοσφαιρικούς ρύπους.

Στο πλαίσιο αυτής της σύμβασης υπό τον IMO, έχει συσταθεί η Επιτροπή Προστασίας Θαλασσιού Περιβάλλοντος (Marine Environmental Protection Committee – MEPC) με κύριο μέλημα την αναθεώρηση των διαφόρων διατάξεων της MARPOL ώστε να είναι εναρμονισμένη με τις σύγχρονες απαιτήσεις.

Τα τμήματα που αποτελούν τη σύμβαση είναι τα ακόλουθα:

- Διεθνής Σύμβαση του 1973 για την Πρόληψη της Θαλάσσιας Ρύπανσης από Πλοία και το Πρωτόκολλο του 1978 σχετικά με την Διεθνή Σύμβαση του 1973 για την Πρόληψη της Θαλάσσιας Ρύπανσης από Πλοία.
- Πρωτόκολλο I: Πρόβλεψη σχετικά με αναφορές για ατυχήματα που περιλαμβάνουν επιβλαβείς ουσίες.
- Πρωτόκολλο II: Διαιτησία.
- Έξι τεχνικά παραρτήματα:

1. Παράρτημα I: Κανονισμοί για την πρόληψη της ρύπανσης από πετρέλαιο. Τέθηκε σε ισχύ στις 2 Οκτωβρίου 1983.

2. Παράρτημα II: Κανονισμοί για τον έλεγχο της ρύπανσης από υγρές επιβλαβείς ουσίες χύδην. Τέθηκε σε ισχύ στις 2 Οκτωβρίου 1983.

3. Παράρτημα III: Κανονισμοί για την πρόληψη της ρύπανσης από επιβλαβείς ουσίες σε συσκευασμένη μορφή. Τέθηκε σε ισχύ στη 1 Ιουλίου 1992.



4. Παράρτημα IV: Κανονισμοί για την πρόληψη της ρύπανσης από τα λύματα των πλοίων. Τέθηκε σε ισχύ στις 27 Σεπτεμβρίου 2003.

5. Παράρτημα V: Κανονισμοί για την πρόληψη της ρύπανσης από τα απορρίμματα των πλοίων. Τέθηκε σε ισχύ στις 31 Δεκεμβρίου 1988.

6. Παράρτημα VI: Κανονισμοί για την πρόληψη της αέριας ρύπανσης από πλοία. Τέθηκε σε ισχύ στις 19 Μαΐου 2005. Αναθεωρήθηκε τον Οκτώβριο 2008 με σημαντικά πιο σφιχτά όρια εκπομπών, τα οποία τέθηκαν σε ισχύ την 1 Ιουλίου 2010 (IMO, International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL), 2021).

### 2.3 MARPOL Παράρτημα VI (Μόλυνση του αέρα)

Το Παράρτημα VI αρχικά υιοθετήθηκε το 1997 και θέτει όρια για τους κύριους ρύπους που περιέχονται στα καυσαέρια των μηχανών των πλοίων, συμπεριλαμβάνοντας τα οξειδία του θείου (SO<sub>x</sub>) και οξειδία του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και απαγορεύει τις σκόπιμες εκπομπές των ουσιών που μειώνουν το όζον (ozone depleting substances (ODS)). Επίσης, ρυθμίζει την αποτέφρωση επί του πλοίου και τις εκπομπές οργανικών πτητικών ουσιών (volatile organic compounds (VOC)) από τα δεξαμενόπλοια.

Αφού τέθηκε σε ισχύ στις 19 Μαΐου 2005, η MEPC, κατά την 53<sup>η</sup> συνεδρίαση της (Ιούλιο 2005), συμφώνησε να το αναθεωρήσει ώστε να περιορίσει τα όρια των εκπομπών, λαμβάνοντας υπόψη τις τεχνολογικές βελτιώσεις και την μέχρι στιγμής εμπειρία. Μετά από μελέτη περίπου τριών χρόνων, η MEPC 58 (Οκτώβριος 2008), υιοθέτησε το αναθεωρημένο MARPOL Παράρτημα VI και τον σχετιζόμενο τεχνικό κώδικα NO<sub>x</sub> 2008, ο οποίος τέθηκε σε ισχύ την 1 Ιουλίου 2010.

Οι κύριες αλλαγές του Παραρτήματος είναι η προοδευτική μείωση εκπομπών παγκοσμίως των SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> και των σωματιδίων και η εισαγωγή των περιοχών ελέγχου εκπομπών (Emission Control Areas (ECAs)). Κατά το αναθεωρημένο Παράρτημα, το όριο περιεκτικότητας του καυσίμου σε θείο (S) παγκοσμίως μειώθηκε από το 3,5% σε 0,5% από την 1 Ιανουαρίου 2020.

Η MEPC 70 (Οκτώβριος 2016) έλαβε υπόψη την εκτίμηση της διαθεσιμότητας του καυσίμου και αποφασίστηκε οι προδιαγραφές του καυσίμου (όριο 0,5% σε θείο) να τεθούν σε εφαρμογή την 1 Ιανουαρίου 2020. Τα όρια που εφαρμόζονται στις ECAs για τις εκπομπές SO<sub>x</sub> και σωματιδίων μειώθηκαν στο 0,1% από την 1 Ιανουαρίου 2015.

Η MEPC το 2011 υιοθέτησε ένα πακέτο τεχνικών μέτρων για τα καινούργια πλοία και λειτουργικά μέτρα για τα υπάρχοντα. Αυτό το πακέτο προστέθηκε ως ένα καινούριο Κεφάλαιο 4 του MARPOL Παράρτημα VI με τίτλο ‘Κανονισμοί στην ενεργειακή αποδοτικότητα των πλοίων’ και αναφέρεται σε δύο κύρια μέτρα:

- Το Energy Efficiency Design Index (EEDI), όπου απαιτεί από καινούρια πλοία να συμμορφωθούν με τις ελάχιστες απαιτήσεις επιπέδων ενεργειακής απόδοσης, αυξανόμενα κατά την πάροδο του χρόνου μέσω διαφορετικών φάσεων.
- Το Ship Energy Efficiency Plan (SEEMP), το οποίο καθιερώνει ένα μηχανισμό για τους πλοιοκτήτες να βελτιώσουν την ενεργειακή αποδοτικότητα των νεότευκτων και των υπάρχοντων πλοίων, χρησιμοποιώντας λειτουργικά μέτρα, όπως τη βέλτιστη πορεία του πλοίου βάση των συνθηκών του καιρού (weather



Ψώρρας Νικόλαος,  
‘Ναυπηγικά Συστήματα Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Πλοία’

routing), τη βελτιστοποίηση του βυθίσματος και της διαγωγής του πλοίου, τη χρονικά ακριβή άφιξη του πλοίου στο λιμάνι, κτλ.

Οι κανονισμοί τέθηκαν σε ισχύ την 1 Ιανουαρίου 2013 και αφορούν όλα τα πλοία άνω των 400 GT, ανεξάρτητα από το κράτος σημαίας που ανήκουν ή την ιδιοκτησία τους.

Το 2016, η MEPC 70 υιοθέτησε τροποποιήσεις καθιστώντας απαραίτητη την απαίτηση από τα πλοία άνω των 5.000 GT (που αντιστοιχούν περίπου το 85% των εκπομπών GHG των πλοίων) από την 1 Ιανουαρίου 2019 να συλλέγουν και να υποβάλουν δεδομένα κατανάλωσης καυσίμου στο κράτος σημαίας τους και με τη σειρά του το τελευταίο στον IMO. Επιπρόσθετα, ενέκρινε έναν χρονικό ορίζοντα για την ανάπτυξη μίας στρατηγικής από τον IMO για τη μείωση των εκπομπών GHG από τα πλοία, η οποία προέβλεπε την υιοθέτηση της αρχικής στρατηγικής μείωσης GHG τον Απρίλιο 2018 (IMO, ANNEX 11, ROADMAP FOR DEVELOPING A COMPREHENSIVE IMO STRATEGY ON REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS, MEPC 70/18/Add.1, Annex 22, page 1, 2021).

Η συνέλευση του IMO, το ανώτατο σώμα του οργανισμού, υιοθέτησε κατά την 30<sup>η</sup> συνεδρίαση το Δεκέμβριο 2017 μία στρατηγική κατεύθυνση με τίτλο ‘Respond to Climate Change’.

Στις 13 Απριλίου 2018, η MEPC 72 υιοθέτησε την απόφαση MEPC.304(72) για την αρχική στρατηγική του IMO που στόχευε στη μείωση των εκπομπών GHG από τα πλοία, όπου κατά την MEPC 73 (Οκτώβριος 2018) τέθηκε σε ισχύ.

Κατά την MEPC 74 (Μάιος 2019) αποφασίστηκε η επιτάχυνση της Φάσης 3 του δείκτη EEDI το 2022 (από το 2025) για συγκεκριμένους τύπους πλοίων και αύξηση του παράγοντα μείωσης για πλοία μεταφοράς αερίων άνω των 15.000 DWT, πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, πλοία γενικού φορτίου, πλοία μεταφοράς LNG και κρουαζιερόπλοια με μη συμβατική πρόωση.

Η MEPC 75 (Νοέμβριος 2020) έλαβε την απόφαση επέκτασης του δείκτη EEDI στα υπάρχοντα πλοία: Οι κανονισμοί για το δείκτη EEXI θα καθιερώσουν απαιτούμενο δείκτη για συγκεκριμένους τύπους πλοίων και έναν δείκτη που πρέπει να επιτευχθεί ώστε να υπολογίζεται για κάθε πλοίο. Ο υπολογισμός του βασίζεται στις γραμμές αναφοράς της υπάρχουσας Φάσης 0 του δείκτη EEDI με παράγοντες μείωσης. Υποχρεωτική καθίστανται επίσης και η ετήσια τιμή αποδοτικότητας (Annual Efficiency Ratio (AER)), ο δείκτης έντασης άνθρακα (Carbon Intensity Index (CII)) και το σχέδιο ενεργειακής αποδοτικότητας πλοίου (Ship energy Efficiency Management Plan (SEEMP)).

Τέλος, κατά την MEPC 76 (Ιούνιος 2021) ελήφθησαν υποχρεωτικά τεχνικά και λειτουργικά μέτρα για τη μείωση του EEXI και CII, καθώς και υπολογιστικές κατευθύνσεις για να επιτευχθούν συγκεκριμένες τιμές του δείκτη EEXI, κατευθύνσεις επιθεώρησης και πιστοποίησης για το δείκτη EEXI, κατευθύνσεις σχετικά με το σύστημα περιορισμού ισχύος στον άξονα/μηχανή (EEXI) και κατευθυντήριες οδηγίες για τον υπολογισμό του δείκτη CII, γραμμές αναφοράς, παράγοντες μείωσης και τιμές για τα πλοία (BureauVeritas, 2021).



## **2.4 Μελέτες IMO που αφορούν τις εκπομπές GHG από τη ναυτιλία**

Η τέταρτη μελέτη του IMO για τις εκπομπές GHG του 2020 (Fourth IMO GHG Study 2020) εκτίμησε ότι η ναυτιλία εξέπεμψε 1.056 εκ. τόνους CO<sub>2</sub> το 2018, που αντιστοιχεί περίπου στο 2,89% των συνολικών ανθρωπογενών εκπομπών CO<sub>2</sub> για εκείνη τη χρονιά με το μερίδιο της διεθνούς ναυτιλίας να αντιπροσωπεύει τους 740 εκ. τόνους CO<sub>2</sub>. Σύμφωνα με ένα πλήθος μακροπρόθεσμων οικονομικών και ενεργειακών σεναρίων, οι εκπομπές θα μπορούσαν να αντιπροσωπεύουν το 90-130% των εκπομπών του 2008 μέχρι το 2050. Για αυτό τον λόγο ο IMO έλαβε μέτρα με παγκόσμια προσέγγιση ώστε να βελτιώσει την ενεργειακή αποδοτικότητα των πλοίων, να αναπτύξει μέτρα μείωσης των εκπομπών GHG από αυτά, και να παρέχει τεχνική συνεργασία και δραστηριότητες όσον αφορά την ναυπήγηση νέων πλοίων (IMO, Fourth Greenhouse Gas Study 2020, 2020).

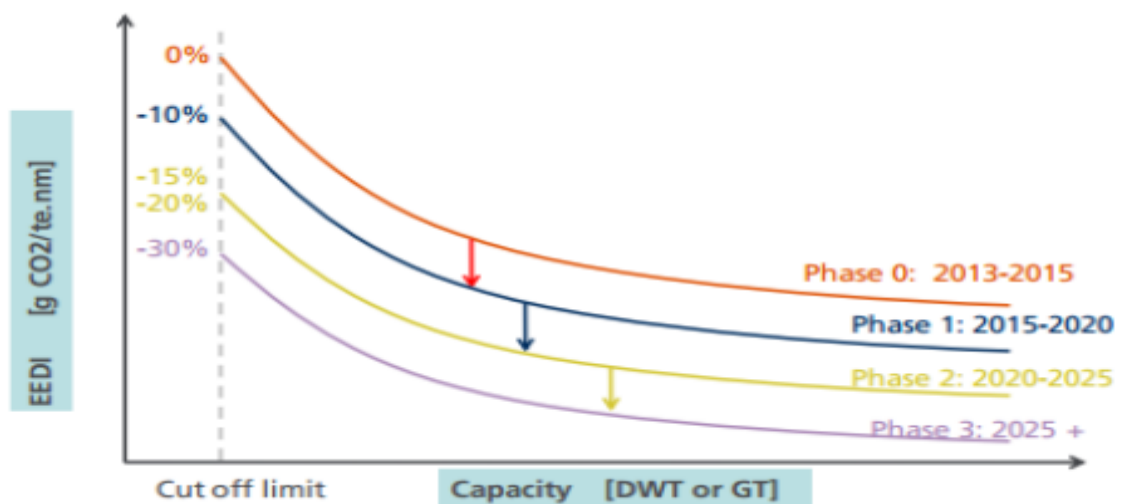


### 3. Ενεργειακοί δείκτες

#### 3.1 Δείκτης EEDI

Ο δείκτης στοχεύει στη διασφάλιση ότι τα νεότευκτα πλοία είναι σχεδιασμένα να είναι ενεργειακά αποδοτικά και καθορίζει τον αριθμό των εκπεμπόμενων γραμμαρίων CO<sub>2</sub> ανά μεταφορική ικανότητα μιλίου (π.χ. tn-nm). Καλύπτει τεχνικής σχεδίασης παραμέτρους όπως η βελτιστοποίηση των μηχανών, της γάστρας και της προπέλας και η χρησιμοποίηση μη ορυκτών καυσίμων. Ο υπολογισμός λαμβάνει υπόψη διαφορετικούς τύπους πλοίων και έχει μία σταθερή τιμή, η οποία μπορεί να αλλάξει μόνο όταν μετασκευαστεί το πλοίο.

Για κάθε καινούριο πλοίο, η τιμή του δείκτη επιτρέπεται να είναι ίση ή μικρότερη από την απαιτούμενη τιμή EEDI. Ο δείκτης εισήχθη το 2013, αρχικά για μία περίοδο 2 ετών, (Φάση 0) και το απαιτούμενο επίπεδο του μειώνεται κάθε 5 χρόνια. Έτσι, ωθείται η ναυτιλιακή βιομηχανία να επενδύσει στην εφαρμογή νέων τεχνολογιών για να καταστεί ενεργειακά αποδοτικότερη.



Εικόνα 4. Απαιτούμενο EEDI, παράγοντας μείωσης, όρια και φάσης (IMO, MODULE 2, SHIP ENERGY EFFICIENCY REGULATIONS AND RELATED GUIDELINES, 2016)

$$EEDI = \frac{\left( \prod_{j=1}^M f_j \right) \left( \sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE})}{f_i \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w} +$$

$$\frac{\left\{ \left( \prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEff(i)} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right\} - \left( \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right)}{f_i \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w}$$

Εικόνα 5. Κύριοι όροι του τύπου του EEDI (ZACHARIADIS, 2011)



Καθώς τα κριτήρια μείωσης του δείκτη επιβάλουν μείωση της τιμής στα επόμενα χρόνια, οι σχεδιαστές θα πρέπει να βελτιστοποιήσουν την ενεργειακή κατανάλωση ώστε να επιτευχθεί η απαιτούμενη τιμή. Για αυτό τον σκοπό, είναι διαθέσιμο ένα ευρύ φάσμα πιθανών τεχνικών λύσεων:

- Βελτιστοποίηση πρόωσης (CFD βελτιστοποιημένη μορφή γάστρας, μορφές βολβού, επιλογές διαγωγής, κτλ)
- Βελτιστοποίηση μηχανής / ρύθμιση / μείωση απόδοσης (λιγότερη ενεργειακή κατανάλωση στις κύριες και βοηθητικές μηχανές)
- Εναλλακτικά καύσιμα
- Συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας (πανιά, συστήματα λίπανσης γάστρας με αέρα (ALS))
- Βαφή και άλλα συναφή συστήματα.

Σύμφωνα με τις καθοριζόμενες απαιτήσεις της MEPC 254(67), ο υπολογισμός του EEDI και το σχετιζόμενο τεχνικό αρχείο πρέπει να εγκριθεί κατά τη σχεδίαση και να επικυρωθεί στη διάρκεια δοκιμών εν πλω στο πλαίσιο της αρχικής επιθεώρησης. Μόνο τότε μπορεί να εκδοθεί το διεθνές πιστοποιητικό ενεργειακής αποδοτικότητας (International Energy Efficiency Certificate (IEEC)).

Ο υπολογισμός του EEDI θα πρέπει να εκτελείται σύμφωνα με τις απαιτήσεις και να ακολουθεί το πρόγραμμα κατασκευής, την ημερομηνία συμβολαίου του ναυπηγείου και την ημερομηνία παράδοσης, όπως καθορίζεται στους κανονισμούς 20 και 21, Φάση 2 και 3 και στη προσεχή Φάση 4. Το πιστοποιητικό IEEC επιβάλλεται για όλα τα πλοία άνω των 400 GT που πρόκειται να εκτελούν διεθνή ταξίδια.

Εάν ένα πλοίο είναι εξοπλισμένο με καινοτόμες τεχνολογίες ενεργειακής αποδοτικότητας (π.χ. Air Lubrication System), θα πρέπει να εκτελείται σχετική πιστοποίηση σύμφωνα με τις κατευθύνσεις του 2013, ώστε να λαμβάνονται υπόψη οι παραπάνω τεχνολογίες για τον υπολογισμό και την επικύρωση του δείκτη που θα επιτευχθεί (IMO, MEPC.1/Circ.815).

### **3.2 Περιγραφή συστήματος συλλογής δεδομένων (Data Collection System (DCS)) του IMO και πλαίσιο αναφοράς**

Κατά τη διάρκεια της MEPC 70 (Οκτώβριος 2016) ο IMO υιοθέτησε ένα υποχρεωτικό σύστημα για τη διεθνή ναυτιλία, το Fuel Oil Data Collection System (DCS), απαιτώντας από τα πλοία άνω των 5.000 GT να συλλέγουν και να υποβάλουν στοιχεία σε μία βάση δεδομένων, ξεκινώντας από το 2019. Αυτή η διαδικασία καθορίζεται στον κανονισμό 22Α του Κεφαλαίου 4, του Παραρτήματος VI του MARPOL. Τα στοιχεία θα πρέπει να αναφέρονται στη χώρα σημαίας στην οποία το πλοίο είναι νηολογημένο στο τέλος κάθε ημερολογιακού έτους. Οι αρχές της χώρας σημαίας έπειτα θα πρέπει να υποβάλλουν στον IMO τα στοιχεία ώστε να κοινοποιηθούν ανώνυμα. Το DCS περιγράφει λειτουργικές λεπτομέρειες του πλοίου, όπως η κατανάλωση καυσίμου, η απόσταση που διανύθηκε και οι ώρες εν πλω. Το DCS απαιτείται σύμφωνα με το Part II του SEEMP και το αρχείο συμμόρφωσης θα πρέπει ανά πάσα στιγμή να βρίσκεται στο πλοίο.





Η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) έχει επίσης εισάγει νέους κανονισμούς για την παρακολούθηση, αναφορά και επικύρωση της κατανάλωσης καυσίμου (Monitoring, Reporting, Verifying (MRV)) για όλα τα εμπορικά πλοία άνω των 5.000 GT τα οποία είτε φθάνουν, είτε αναχωρούν από κάποιο λιμάνι της Ευρώπης. Ενώ το DCS του IMO είναι μία ανώνυμη βάση δεδομένων, το MRV της ΕΕ είναι μία δημόσια βάση δεδομένων όπου κοινοποιούνται τα στοιχεία.

### 3.3 Δείκτης EEXI

Ο EEXI είναι ένα υποχρεωτικό μέτρο με αντικειμενικό σκοπό την καταγραφή της πραγματικής ποσότητας εκπεμπόμενου CO<sub>2</sub> ανά μεταφερόμενο έργο. Επιβάλλεται σε όλα τα πλοία μεγέθους άνω των 400 GT, ανεξαρτήτως σχεδίασης και παραμέτρων.

Η εφαρμογή του θα ισχύσει από τον Ιανουάριο του 2023 για πλοία κατά την πρώτη ετήσια, ενδιάμεση ή ανανέωση επιθεώρησης που διενεργείται μετά την 1 Ιανουαρίου αυτού του χρόνου. Τα πλοία που εμπίπτουν στο πεδίο των απαιτήσεων του EEDI μπορούν να χρησιμοποιήσουν τον υπολογισμένο EEDI σύμφωνα με τις κατευθύνσεις του 2018. Για τα νέα πλοία (resolution MEPC 308 (73), the “EEDI Calculation Guidelines”) ως εναλλακτική για τον EEXI δεν απαιτείται επαναυπολογισμός ή επαναπιστοποίηση, εκτός αν ο EEDI που έχει επιτευχθεί για το πλοίο δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις του EEXI.

Ο EEXI που έχει επιτευχθεί θα πρέπει να έχει υπολογισθεί σύμφωνα με τον κανονισμό 20Α του Παραρτήματος VI του MARPOL (αναριθμήθηκε 23 κατά την MEPC 76). Κατά την MEPC 76 τέθηκαν οι κατευθυντήριες οδηγίες για τη μέθοδο υπολογισμού του EEXI που πρέπει να επιτευχθεί.

Η απαίτηση είναι ο EEXI που επιτυγχάνεται, να είναι μικρότερος από τον απαιτούμενο. Ο EEXI υπολογίζεται με τον ακόλουθο τύπο (DNV, 2021).

$$\frac{\left( \prod_{j=1}^n f_j \right) \left( \sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}^*) + \left( \left( \prod_{j=1}^n f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPI} P_{PI(i)} - \sum_{i=1}^{nEF} f_{eff(i)} \cdot P_{AE,eff(i)} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right) - \left( \sum_{i=1}^{nEF} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME}^{**} \right)}{f_1 \cdot f_2 \cdot f_3 \cdot Capacity \cdot f_4 \cdot V_{ref} \cdot f_5}$$

Transport work

Εικόνα 6. Τύπος υπολογισμού EEXI (DNV, 2021)

### 3.4 Ετήσιος λειτουργικός δείκτης έντασης άνθρακα (CII) και σχέδιο διαχείρισης ενεργειακής αποδοτικότητας πλοίου (SEEMP)

Τα αποτελέσματα των επόμενων συνεδριάσεων MEPC θα οριστικοποιήσουν τις κατευθύνσεις για την εφαρμογή του CII και SEEMP και θα διευκρινίσουν πώς θα εκτελείται ο υπολογισμός του CII, καθώς και το σύστημα βαθμονόμησης. Οι



## Ψώρρας Νικόλαος, ‘Ναυπηγικά Συστήματα Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Πλοία’

υπολογισμοί θα βασίζονται στα δεδομένα από το DCS, ώστε να ταξινομείται σε ετήσια βάση κάθε πλοίο σύμφωνα με το πως η τιμή του CII σχετίζεται με την εγκεκριμένη τιμή αναφοράς του CII.

Το σύστημα SEEMP είναι ένα εργαλείο διαχείρισης ενεργειακής αποδοτικότητας, παρόμοιο με τον κώδικα διεθνούς διαχείρισης ασφάλειας (ISM). Μέσα από αυτό περιγράφονται οι διαδικασίες και τα μέτρα που υιοθετούν οι πλοιοκτήτες ώστε να μειώσουν τις εκπομπές των πλοίων τους.

Εν όψει λήψης αποφάσεων από τις επόμενες MEPC, τη δεδομένη στιγμή ισχύει ότι ο ετήσιος δείκτης CII που επιτυγχάνεται για κάθε ξεχωριστό πλοίο άνω των 5.000 GT υπολογίζεται ως η τιμή της συνολικής ποσότητας CO<sub>2</sub> που εκπέμπεται, προς το συνολικό μεταφερόμενο έργο, που έχει αναληφθεί σε ένα καθορισμένο ημερολογιακό έτος.

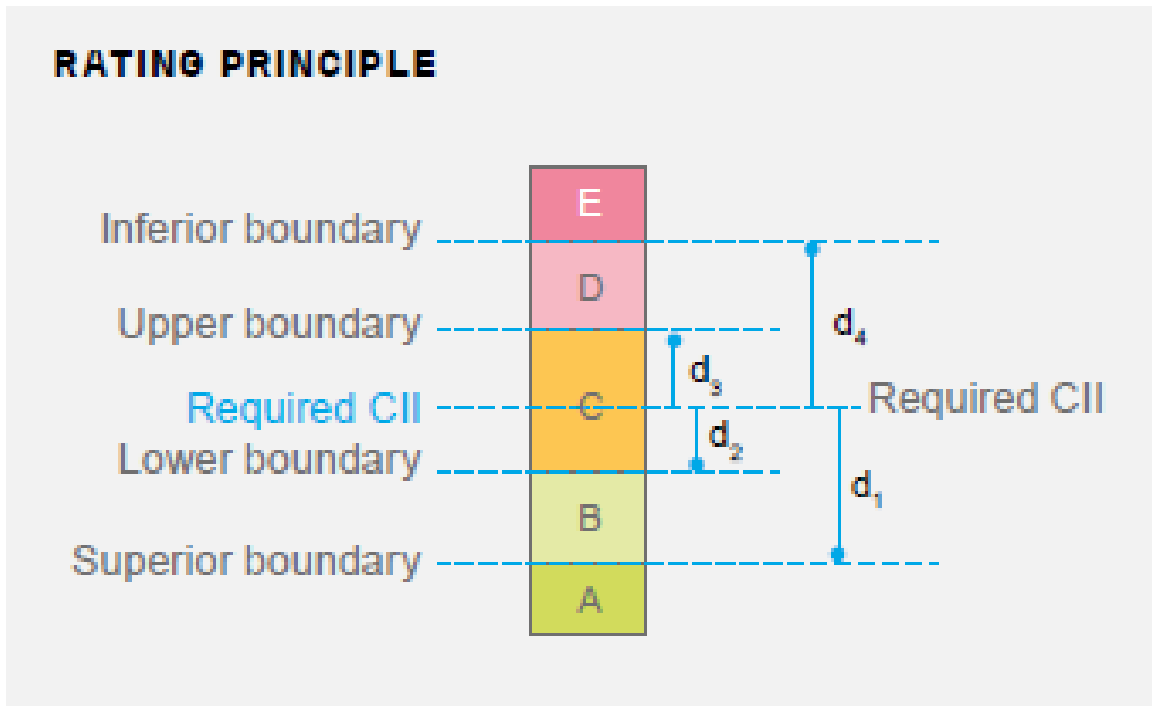
Με βάση τη διαφορετική ερμηνεία και αντίληψη του ‘μεταφερόμενου έργου’, ο IMO επεξεργάζεται δύο υπολογιστικές μεθόδους για τον δείκτη CII που επιτυγχάνεται: είτε την ετήσια τιμή αποδοτικότητας (Annual Efficiency Ratio (AER)) που θα βασίζεται στα δεδομένα του DCS του IMO ή το δείκτη λειτουργικής ενεργειακής αποδοτικότητας (Energy Efficiency Operational Index (EEOI)). Με βάση τα δεδομένα από το DCS του IMO υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού του AER, χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους της ετήσιας κατανάλωσης καυσίμου και της απόστασης που διανύθηκε, επιπρόσθετα με το νεκρό βάρος (DWT). Το AER αναφέρεται σε μονάδες γραμμαρίων CO<sub>2</sub> ανά τονο-μίλι (gr CO<sub>2</sub>/dwt-nm).

Ο δείκτης EEOI είναι ένα μέτρο έντασης άνθρακα παρόμοιο με το AER, με τη διαφορά ότι η χωρητικότητα εκφράζεται ως πραγματικό μεταφερόμενο φορτίο για κάθε ξεχωριστό ταξίδι. Τα ταξίδια που εκτελούνται με έρμα (ballast voyages) θα πρέπει να ενσωματώνονται στα σχετιζόμενα ταξίδια μεταφοράς φορτίου και ο EEOI να υπολογίζεται για ένα πλήρες ταξίδι, συμπεριλαμβάνοντας και το γυρισμό χωρίς φορτίο, μόνο με έρμα. Ο ετήσιος μέσος όρος θα πρέπει να υπολογίζεται και να αναφέρεται. Η μονάδα μέτρησης του EEOI εξαρτάται από τη μέτρηση του μεταφερόμενου φορτίου ή του μεταφερόμενου έργου, π.χ. τόνοι CO<sub>2</sub>/(τόνοι/ναυτικό μίλι), τόνοι CO<sub>2</sub>/(TEU/ναυτικό μίλι) ή τόνοι CO<sub>2</sub>/(άτομο/ναυτικό μίλι), κτλ.

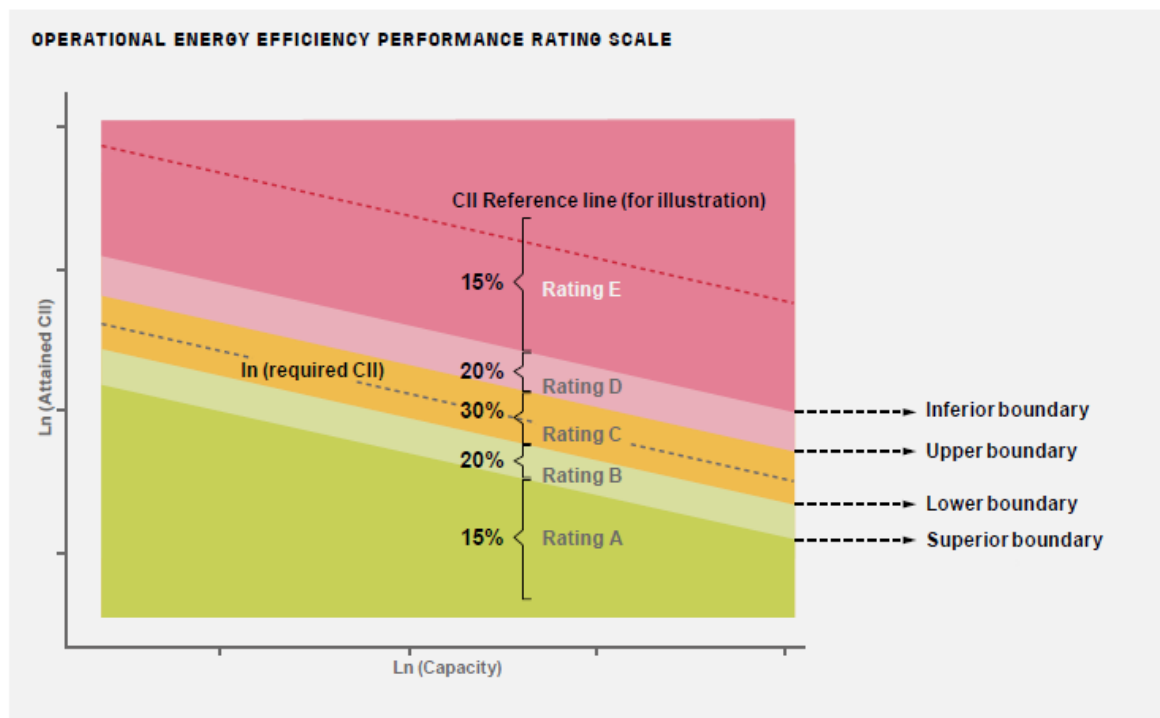
Οι κατευθύνσεις για την ταξινόμηση των πλοίων σύμφωνα με τον CII υιοθετήθηκαν κατά την MEPC 76 (MEPC.338(76)). Η ταξινόμηση λειτουργικής έντασης άνθρακα του πλοίου βασίζεται στην κατάταξη του σε μία από τις πέντε βαθμίδες (A, B, C, D και E) με κριτήριο τον δείκτη CII που έχει επιτευχθεί, υποδεικνύοντας το επίπεδο απόδοσης (major superior, minor superior, moderate, minor inferior ή inferior).

Για να διευκολυνθεί η διαδικασία ταξινόμησης, για κάθε έτος από το 2023 έως το 2030, καθορίζονται τέσσερα όρια για το μηχανισμό ταξινόμησης των πέντε βαθμίδων, το ανώτερο όριο, το πάνω όριο, το κάτω όριο και το κατώτερο όριο. Η αξιολόγηση ενός πλοίου θα πρέπει να καθορίζεται από τον CII που έχει επιτευχθεί και τα προκαθορισμένα όρια αξιολόγησης, σε σχέση με τον CII που έχει επιτευχθεί σε άλλα πλοία. Το μεσαίο σημείο της αξιολόγησης επιπέδου C είναι η τιμή που ισοδυναμεί με το απαιτούμενο ετήσιο λειτουργικό CII που έχει τεθεί από τους κανονισμούς.





Εικόνα 7. Ταξινόμηση πέντε βαθμίδων για τον δείκτη CII (Bureau Veritas, 2021)



Εικόνα 8. Επίπεδα απόδοσης με κριτήριο τον δείκτη CII που έχει επιτευχθεί (Bureau Veritas, 2021)

Ένα πλοίο που έχει αξιολογηθεί με βαθμό E ή D για τρία συνεχόμενα χρόνια πρέπει να αναπτύξει ένα σχέδιο με διορθωτικές ενέργειες για να επιτύχει τον απαιτούμενο δείκτη CII. Το SEEMP θα πρέπει να συμπεριλάβει αυτές τις διορθωτικές ενέργειες. Επιπρόσθετα, ο IMO θα πρέπει στο εξής να παρέχει καθοδήγηση για αποδεκτά σχέδια και διορθωτικές ενέργειες.



## Ψώρρας Νικόλαος, ‘Ναυπηγικά Συστήματα Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Πλοία’

Για τη βελτίωση του CII υπάρχουν διάφορες εναλλακτικές λύσεις, συμπεριλαμβανόντας αλλαγές στη σχεδίαση και στη λειτουργία, όπως:

- Σύστημα ανάκτησης αποβαλλόμενης θερμότητας (waste heat recovery system)
- Λίπανση γάστρας με αέρα (Air lubrication system (ALS))
- Εναλλακτικά καύσιμα
- Βελτιωμένη διοικητική μέριμνα
- Συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας (Energy saving device (ESD))
- Έλεγχος VFD (Variable Frequency Drive)
- Ταξίδι πλοίου βάση καιρικών συνθηκών (weather routing)
- Συστήματα υποβοήθησης πρόωσης με χρήση της αιολικής ενέργειας (Wind assisted propulsion system (WAPS))
- Φωτισμός πλοίου με λάμπες τεχνολογίας LED
- Καθαρισμός γάστρας και βαφή

Το Μέρος I του SEEMP θα πρέπει να αναπτυχθεί ως ένα πλάνο για συγκεκριμένο πλοίο και αντανακλά τις προσπάθειες βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας του. Για πλοία που υπόκεινται στον Κανονισμό 22B, το Μέρος I του SEEMP θα πρέπει επίσης να περιλαμβάνει τους υπολογισμούς και τις περιγραφές του ετήσιου CII που απαιτείται και έχει επιτευχθεί, και τη λειτουργική τιμή, με τις διορθωτικές ενέργειες εάν απαιτούνται. Είναι αξιοσημείωτο ότι για πλοία που υπόκεινται στον Κανονισμό 22B, ο στόχος που θα τεθεί έχει εθελοντική βάση και δεν υπάρχει υποχρέωση να ανακοινωθεί ο στόχος ή το αποτέλεσμα στο κοινό. Επιπρόσθετα, ούτε η εταιρεία ούτε το πλοίο υπόκεινται σε επιθεώρηση από εξωτερικό φορέα. Ο σκοπός του στόχου που θα τεθεί είναι η επικοινωνία με τους ενδιαφερόμενους φορείς που θα ενδιαφερθούν, να δημιουργήσει κίνητρα για κατάλληλη εφαρμογή και να αυξήσει την δέσμευση για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας (Bureau Veritas, 2021).



## 4. Ναυπηγικά Συστήματα Εξοικονόμησης Ενέργειας (ESD)

Τα μέτρα τόσο για τα νέα πλοία, όσο και για τη μετασκευή των ήδη υπαρχόντων είναι σημαντικά για τη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας τις επόμενες δεκαετίες. Η εξέταση του διαφορών ανάμεσα στο νεότευκτο και στον υπάρχοντα στόλο αναδεικνύει τη σημασία τους. Για παράδειγμα, το 2012 ναυπηγήθηκαν 3.655 εμπορικά πλοία παγκοσμίως, περίπου το 6% του παγκόσμιου στόλου που έφτανε τα 60.000. Συγκεκριμένα, αποτελούνταν από 4.000 επιβατηγά πλοία, 14.000 δεξαμενόπλοια, και περίπου 37.000 πλοία ξηρού φορτίου, συμπεριλαμβανομένων περίπου 5.000 μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Η μέση ηλικία του εμπορικού στόλου ήταν 19 έτη. Αν ο στόχος ήταν αποκλειστικά τα νέα πλοία, μόνο το 50% του στόλου θα ήταν αποδοτικότερο το επόμενο διάστημα. Ωστόσο, για τα υπάρχοντα πλοία διατίθενται αρκετά μέτρα μετασκευής. (Rob Winkel, Arno van den Bos, Ulf Weddige - European Commission, 2015).

Οι βασικές κατηγορίες μέτρων που ορίζονται από το AHEWG-TT<sup>1</sup> αφορούν σε:

1. Γάστρα
2. Κύρια μηχανή
3. Βοηθητικές μηχανές
4. Έλικες και πηδάλια και
5. Συστήματα ελέγχου

### 4.1 Βελτιστοποίηση μορφής γάστρας

Η βελτιστοποίηση μορφής της γάστρας αναγνωρίζεται στη ναυτιλιακή κοινότητα ως βασικός τομέας βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων. Όταν εκτιμηθεί η βελτιστοποίηση της μορφής της γάστρας, ο πλοιοκτήτης δύναται να λάβει υπόψη του τρεις διαθέσιμες εναλλακτικές:

1. Να αποδεχτεί τις υφιστάμενες προδιαγραφές μορφών γάστρας, που είναι άμεσα διαθέσιμες, και το προτεινόμενο από το ναυπηγείο σύστημα πρόωσης.
2. Να τροποποιήσει την υπάρχουσα και προτιμητέα βελτιστοποιημένη μορφή γάστρας για να καλύπτει το επιθυμητό λειτουργικό προφίλ.
3. Να αναπτύξει ένα καινούριο σχέδιο.

Η πρώτη επιλογή περιλαμβάνει το ελάχιστο κόστος κεφαλαίου και την ουσιαστική εξοικονόμηση κόστους κατασκευής του πλοίου. Πολλά από τα πρότυπα πλοία διαθέτουν βελτιστοποιημένη μορφή γάστρας και προωστήριου σκεύους, μολονότι κατά κύριο λόγο είναι βελτιστοποιημένα σε κατάσταση σχεδίασης (πλήρους φόρτωσης), και σε λιγότερο βαθμό κατά τις εκάστοτε καταστάσεις λειτουργίας. Η υδροδυναμική απόδοση διαφοροποιείται σημαντικά αναλόγως του βυθίσματος και της ταχύτητας του πλοίου.

Η δεύτερη επιλογή περιλαμβάνει τη βελτιστοποίηση στη σχεδίαση για συγκεκριμένες καταστάσεις λειτουργίας (π.χ. αναμενόμενα βυθίσματα λειτουργίας, διαγωγή και συνδυασμοί ταχύτητας με τις σχετιζόμενες διάρκειες λειτουργίας τους).

<sup>1</sup> Ad hoc Expert Working Group on facilitation of Transfer of Technology for ships (AHEWG-TT) (RESOLUTION MEPC.229(65)). Επιτροπή που βοηθάει το έργο της MEPC και σκοπό έχει να εκτιμήσει τις προοπτικές δημιουργίας νέων τεχνολογιών για τα πλοία καθώς και την επίδραση από την υιοθέτησή τους και να αναγνωρίσει τα εμπόδια μεταφοράς της τεχνολογίας κυρίως στα αναπτυσσόμενα κράτη.

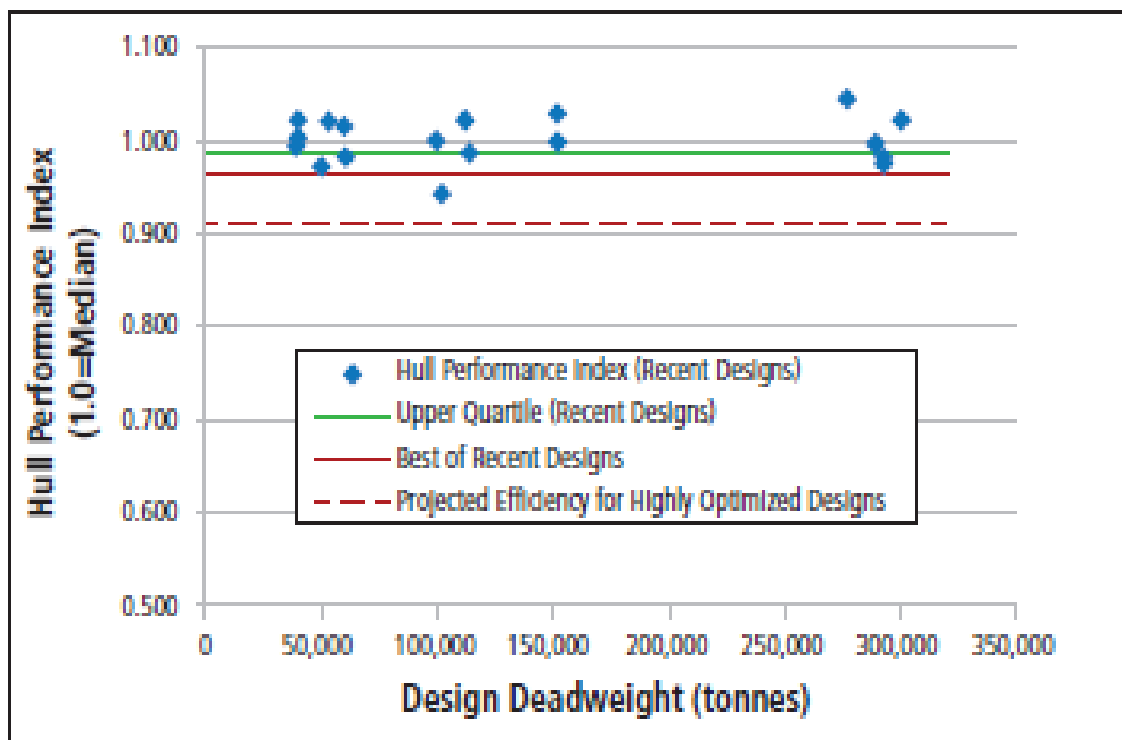


Αυτή η διαδικασία αφορά τροποποιήσεις στην αρχική σχεδίαση και μπορεί να περιλαμβάνει επεμβάσεις στο πρυμναίο τμήμα του πλοίου, ειδικότερα σε καταστάσεις υψηλής φόρτισης όπου προκαλούνται από τις μεγάλες βυθίσεις της πρύμνης.

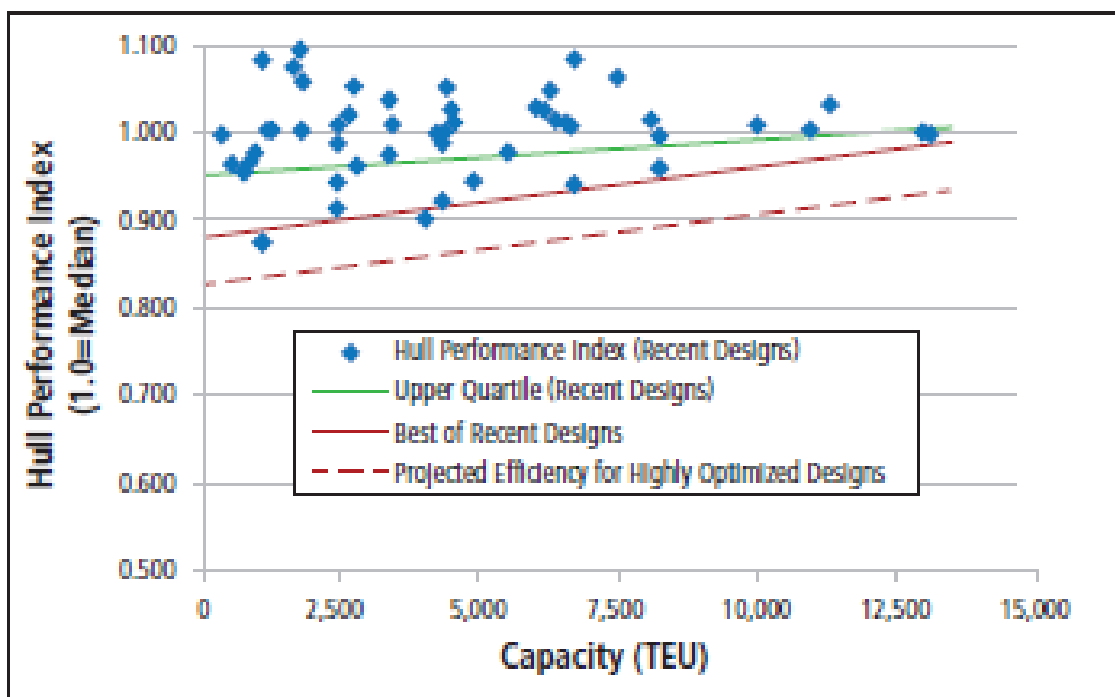
Η τρίτη επιλογή περιλαμβάνει τη βελτιστοποίηση των λεπτομερειών της γάστρας του πλοίου ώστε να είναι σε απόλυτη συμφωνία με την προωστήρια εγκατάσταση και το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι τυπικά δικαιολογημένη μόνο όταν πρόκειται να παραγγελθεί ένας μεγάλος αριθμός πλοίων, ώστε να λαμβάνεται υπόψη η ανταπόδοση από τη μείωση στο λειτουργικό κόστος ή όταν το πλοίο απαιτεί μοναδικά χαρακτηριστικά για να εξυπηρετήσει συγκεκριμένες λειτουργίες.

#### 4.1.1 Βελτιστοποίηση γραμμών της μορφής της γάστρας

Ενώ τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά σε γενικές γραμμές είναι βελτιστοποιημένα από τα ναυπηγεία, υπάρχει σημαντική μεταβλητότητα στην έκταση της μορφής της γάστρας και τη βελτιστοποίηση της προπέλας. Για την πλήρη τροποποίηση της μορφής της γάστρας, απαιτείται ένας σημαντικός αριθμός δοκιμών μοντέλου και εκτιμήσεων υπολογιστικής δυναμικής των ρευστών (CFD). Επίσης, τα ναυπηγεία τείνουν να βελτιστοποιούν ένα συγκεκριμένο σχέδιο. Μικρότερη προσοχή δίνεται στην αποδοτικότητα κατά το βύθισμα όταν το πλοίο είναι φορτωμένο μόνο με έρμα και μικρότερη, ή καθόλου, όταν είναι μερικώς φορτωμένο.



Εικόνα 9. Απόδοσης γάστρας για δεξαμενόπλοια (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021).



Εικόνα 10. Απόδοσης γάστρας για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021)

Οι Εικόνες 9 και 10 συγκρίνουν την απόδοση κατά τη σχεδίαση αντιπροσωπευτικών νεότευκτων δεξαμενοπλοίων και μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων που προσφέρουν τα κύρια ναυπηγεία τα τελευταία 10 χρόνια. Η μέθοδος Holtrop-Mennen<sup>2</sup> για την εκτίμηση της αντίστασης γάστρας και της τυποποιημένης προπέλας εφαρμόστηκε σε αδιάστατα δεδομένα απόδοσης, προσαρμόζοντας μεταβολές σε χαρακτηριστικά (LBP, πλάτος, βύθισμα, Cb) και ταχύτητα λειτουργίας. Η απόδοση περιγράφεται με βάση το 1,0 το οποίο αντιπροσωπεύει τη μέση απόδοση των εξεταζόμενων πλοίων. Για παράδειγμα, μία τιμή απόδοσης γάστρας της τάξης του 1,03 δηλώνει ότι το πλοίο απαιτεί περίπου 3% περισσότερη ισχύ από το μέσο όρο· μία τιμή της τάξης του 0,96 δηλώνει ότι η απαιτούμενη ισχύς είναι 4% λιγότερη από τη μέση τιμή. Πάνω από την πράσινη γραμμή παρουσιάζονται τα πλέον αποδοτικά πλοία που αποτελούν το 25% των υπαρχόντων πλοίων με την καλύτερη απόδοση. Επιπλέον, παρατηρείται σημαντική μεταβλητότητα στην απόδοση των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Για τα δεξαμενόπλοια, η μεταβλητότητα είναι μικρότερη, αλλά εξίσου σημαντική. (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021)

<sup>2</sup> Η μέθοδος των Holtrop και Mennen είναι η πιο δημοφιλής μέθοδος για την εκτίμηση της αντίστασης και της ισχύος πλοίων. Βασίζεται στην ανάλυση παλινδρόμησης ενός μεγάλου φάσματος δοκιμών μοντέλων και δεδομένων δοκιμών που του δίνουν ευρεία δυνατότητα εφαρμογής. Η μέθοδος Holtrop υπολογίζει τη συνολική αντίσταση όπου αναλύεται στα επιμέρους στοιχεία της (π.χ. αντίσταση τριβής, αντίσταση κυματισμού, αντίσταση λόγω βολβώδους πλήρωσης κοντά στην επιφάνεια του νερού, αντίσταση αέρα).



Ψώρρας Νικόλαος,  
 ‘Ναυπηγικά Συστήματα Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Πλοία’

		Panamax Product	Aframax Crude	Suezmax Crude	VLCC Crude
Cargo Capacity	m <sup>3</sup>	54,000	132,000	180,000	360,000
Length Overall	m	182,000	249,000	280,000	333,000
LBP	m	174,000	239,000	270,000	320,000
Beam	m	32,200	44,000	48,000	58,000
Depth	m	19,000	21,200	24,000	31,200
Design Draft	m	11.20	13.60	15.90	21.00
Summer Load Line Draft	m	12.62	15.06	17.41	22.05
Lightship	tonnes	10,052	19,310	25,819	43,258
Design Block Coefficient		0.800	0.825	0.825	0.820
Deadweight at Design Draft	tonnes	41,533	101,932	148,869	285,154
Deadweight at Load Line Draft	tonnes	49,203	116,135	166,576	303,032
Number of Screws		1	1	1	1
Sea Margin		15%	15%	15%	15%
Design Service Speed at 90% MCR	knots	14.9	14.9	15.2	15.8
Required Engine Power (100% MCR)	kW	9,085	13,746	17,976	26,722

Πίνακας 1. Βασικές σχεδιάσεις Δεξαμενόπλοιου – Πάνω τεταρτημόριο απόδοσης γάστρας (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021).

		Feeder	Panamax	Neo-Panamax	Post-Panamax	Ultra Large
Slot Capacity	TEU	1,000	4,500	4,500	8,000	12,500
Length Overall	m	145,248	295,625	280,145	333,256	388,396
LBP	m	136,000	275,000	260,600	308,000	356,000
Beam	m	23,400	32,200	34,800	42,800	48,200
Depth	m	11,750	21,000	19,300	24,500	29,850
Design Draft	m	7.60	11.80	11.80	13.00	14.20
Summer Load Line Draft	m	8.51	13.22	13.22	14.56	15.90
Lightship	tonnes	5,022	19,119	19,071	31,752	47,063
Design Block Coefficient		0.655	0.630	0.630	0.630	0.665
Deadweight at Design Draft	tonnes	11,257	48,524	50,206	79,187	119,437
Deadweight at Load Line Draft	tonnes	13,669	58,817	60,747	96,068	143,865
Number of Screws		1	1	1	1	1
Sea Margin		15%	15%	15%	15%	15%
Design Service Speed at 90% MCR	knots	18.5	24.5	24.5	25.0	25.0
Required Engine Power (100% MCR)	kW	8,355	38,121	41,664	58,966	75,705

Πίνακας 2. Βασικές σχεδιάσεις πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων – Πάνω τεταρτημόριο απόδοσης γάστρας (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021).

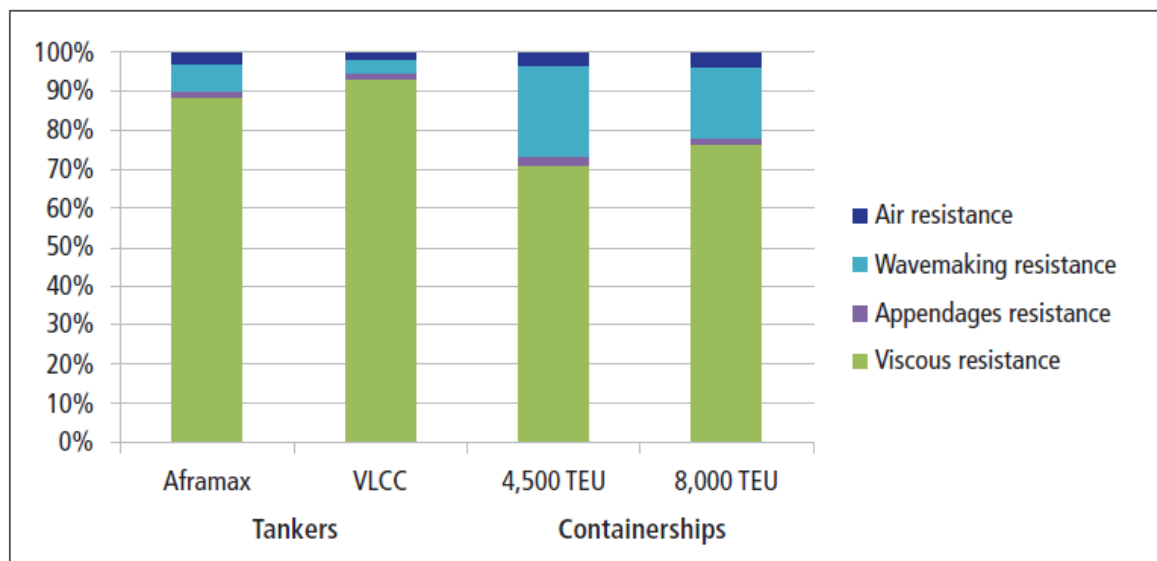
Όταν εκτιμάται η αποδοτικότητα ενός προσφερόμενου σχεδίου, είναι συχνά χρήσιμο να γίνεται σύγκριση των τυπικών σχεδίων πλοίων αντίστοιχου μεγέθους. Στους Πίνακες 1 και 2 παρουσιάζονται οι βασικές σχεδιάσεις των πιο δημοφιλών μεγεθών



δεξαμενοπλοίων και πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων με βάση των τότε πρόσφατων ναυπηγήσεων.

Στην Εικόνα 11 περιγράφονται τα επιμέρους στοιχεία της συνολικής αντίστασης γάστρας σε ήρεμη θάλασσα κατά την ταχύτητα σχεδίασης. Γίνεται αντιληπτό ότι η αντίσταση τριβής είναι το κύριο συστατικό της συνολικής αντίστασης, ως μέγεθος μεταξύ του 70-93% της συνολικής αντίστασης για τα δεξαμενόπλοια και τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Το ποσοστό της αντίστασης τριβής σε σχέση με τη συνολική αντίσταση είναι μεγαλύτερο για πιο αργά και μεγαλύτερα πλοία. Η αντίσταση κυματισμού αυξάνεται με την ταχύτητα του πλοίου και αποτελεί ένα μεγάλο ποσοστό της συνολικής αντίστασης για πλοία υψηλών ταχυτήτων συγκριτικά με πιο αργά πλοία (Υφαντής Ηλίας, Ζάννης Θεόδωρος, Κατσάνης Ιωάννης, 2013).

Όταν αναπτύσσεται μία πλήρης μορφή γάστρας ενός πλοίου, όπως ένα δεξαμενόπλοιο, δίνεται έμφαση στη μείωση της βρεχάμενης επιφάνειας, καθώς η αντίσταση τριβής είναι το κύριο στοιχείο της συνολικής αντίστασης. Επιπλέον πρέπει να ληφθεί υπόψη η ομαλή και σταδιακή μετάβαση της γάστρας προς την περιοχή της πρύμνης και την προπέλα, για να αποφευχθεί ο διαχωρισμός της ροής στην πρύμνη.



Εικόνα 11. Στοιχεία της αντίστασης γάστρας σε ήρεμα ύδατα στη ταχύτητα σχεδιασμού για διάφορους τύπους πλοίων (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021).

Η ελαχιστοποίηση του πολλαπλασιασμού των κυμάτων στο πλωραίο τμήμα είναι πιο σημαντική από τη μείωση της δημιουργίας κυματισμού. Γενικά, ενθαρρύνεται η εφαρμογή πλώρης με απότομη μορφή σε σχέση με μία πιο λεπτή. Η πλώρη με απότομη μορφή διευκολύνει την ομαλή μετάβαση. Επίσης, επιτρέπει μία μετατόπιση του όγκου από την περιοχή της μέσης του πλοίου στην περιοχή του πλωραίου τμήματος, με αποτέλεσμα την καλύτερη απόδοση ολικής αντίστασης του πλοίου.

Για μεγαλύτερες ταχύτητες, επομένως και πιο λεπτές μορφές γάστρας, τυπικά για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, η δημιουργία κυματισμού είναι πιο σημαντική (23% και 18% της συνολικής αντίστασης για τυπικά πλοία εμπορευματοκιβωτίων 4.500 και 8.000 TEU αντίστοιχα). Τέτοια πλοία θα έχουν λεπτότερες αναλογίες σε σύγκριση





με δεξαμενόπλοια, με μεγαλύτερο λόγο μήκους/πλάτους. Σε αυτή την περίπτωση, η πιο λεπτή γάστρα επιτρέπει το LCB να μετακινηθεί προς τα πρύμα, ενώ παραμένει η καλή ροή νερού προς την προπέλα. Αυτό παρέχει τη δυνατότητα για μειωμένη γωνία εισόδου και ομαλότερη πλώρη. Ο βολβός σε ένα πλοίο εμπορευματοκιβωτίων θα επιμηκυνθεί με πιο λεπτή μορφή για να μειώσει την αντίσταση κυματισμού (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021).

#### 4.1.2 Βελτιστοποίηση ΠΡ τμήματος του πλοίου

Η βελτιστοποίηση της πλώρης περιλαμβάνει τη θεώρηση της σχεδίασης του βολβού, την είσοδο στο νερό, το προωαίο τμήμα και τη μετάβαση στις καμπύλες του κύτους. Για τον σκοπό αυτό συχνά εφαρμόζεται η μέθοδος της Computational Fluid Dynamics (CFD).

Ο σωστά σχεδιασμένος βολβός πλώρης μειώνει την αντίσταση κυματισμού. Η ροή είναι πιο οριζόντια, μειώνοντας τις επιδράσεις των στροβιλισμών στο προωαίο τμήμα του σκάφους. Στη βελτιστοποίηση βολβού λαμβάνονται υπόψη φυσικοί παράγοντες, όπως το βάρος και η διαμήκης προέκταση του κέντρου βάρους. Ένας βολβός με τμήμα αντίστροφο σχήμα αχλαδιού (reverse pear-shaped) είναι κυρίως αποδοτικός σε καταστάσεις σχεδίασης, ενώ ένας βολβός με τμήμα σχήματος αχλαδιού λειτουργεί καλύτερα για βυθίσματα μικρότερα από τα βυθίσματα σχεδίασης (π.χ. βύθισμα σε κατάσταση έρματος ή βύθισμα μερικής φόρτωσης). Τέλος, ο βολβός με κυλινδρικό σχήμα προσφέρει μια συμβιβαστική λύση.



Εικόνα 12. Βολβός σχήματος αντίστροφου αχλαδιού (reverse pear-shaped) (Khasnabis, 2021)

Στη βάση του βολβού μπορεί να παρουσιαστεί πλώρη σχήματος V για να ελαχιστοποιήσει την επίδραση των φορτίων των χτυπημάτων. Σε πιο γρήγορα, πιο λεπτά πλοία, προτιμάται μεγαλύτερος όγκος και προέκταση του βολβού. Πλοία, όπως τα δεξαμενόπλοια και τα φορτηγά, συχνά διαθέτουν βολβούς με περιοχή με μεγάλο τμήμα





και είσοδο σχήματος V, που συμπεριφέρεται ως τυπικός βολβός στο βύθισμα φόρτωσης και επιμηκώνει την ίσαλο γραμμή στο βύθισμα έρματος.

Τα χαρακτηριστικά των βολβών πλήρης θα πρέπει να βρίσκονται σε ισορροπία με τη μορφή της εισόδου της πλήρης καθώς και τη μετάβαση της πλήρης προς το υπόλοιπο σκάφος. Οι βολβοί είναι πιο αποδοτικοί σε συγκεκριμένο λόγο ταχύτητας/μήκους και βυθίσματος. Αλλαγές στην ταχύτητα και το βύθισμα, επιφέρουν αλλαγές στο κύμα που δημιουργείται. Τέτοιες μειώσεις στο βύθισμα και στην ταχύτητα μπορεί να οδηγήσουν σε αύξηση της αντίστασης κυματισμού. Καθώς, μερικά εμπορικά πλοία λειτουργούν μόνο στο βύθισμα σχεδίασης, οι συμβιβασμοί στη σχεδίαση βολβού χρειάζεται να παρέχουν καλή απόδοση στο αναμενόμενο εύρος των βυθισμάτων και τις ταχύτητες λειτουργίας. Η πλήρη επηρεάζει τις κινήσεις και προσθέτει αντίσταση κυματισμού. Πλήρη σχήματος V προτιμάται από την πλήρη σχήματος U, καθώς τείνει να μειώνει την αντίσταση τριβής.

### 4.1.3 Βελτιστοποίηση ΠΜ τμήματος του πλοίου

Η βελτιστοποίηση του πρυμναίου τμήματος περιλαμβάνει τις προσπάθειες ελαχιστοποίησης των κυμάτων στην πρύμνη, βελτίωσης της ροής στην προπέλα και αποφυγής των επιπτώσεων του φαινομένου EDDY<sup>3</sup>. Μία σωστά σχεδιασμένη πρύμνη μπορεί να μειώσει την εμφάνιση και την κορυφογραμμή του κύματος σε αυτή την περιοχή. Η βελτίωση της φύσης της πρυμναίας ροής δύναται να επιφέρει βελτιωμένη απόδοση της προωστήριας εγκατάστασης. Για την εκτίμηση των επιπτώσεων του κυματισμού στο πρυμναίο τμήμα χρησιμοποιούνται μέθοδοι υπολογιστικής δυναμικής των ρευστών (CFD). Έχει σημειωθεί σημαντική πρόοδος στη μελέτη της τυρβώδους ροής, με την ανάπτυξη σύγχρονων υπολογιστικών μοντέλων CFD που εκτιμούν αποτελεσματικά την αλληλεπίδραση πηδαλίου – έλικας (TARGETS, 2014).

Το σχήμα πρυμνών με μονή έλικα μπροστά από την προπέλα μπορεί να είναι V, U ή βολβού, με το τελευταίο να συνιστά τη σύγχρονη τάση. Πλεονέκτημα του είναι ότι η ροή των ομόρρων μειώνει τη σπηλαιώση και τους κραδασμούς. Ασύμμετρες πρύμνες σχεδιάζονται για να βελτιώσουν την προωστήρια αποδοτικότητα μέσω της προ-δίνης (pre-swirl) ροής προς την προπέλα και κατ’ επέκταση περιορίζοντας την απώλεια ώσης. Η προ-δίνης ροή στην προπέλα βοηθάει τη μείωση του διαχωρισμού της ροής στο πρυμναίο τμήμα της. Σήμερα, δεν έχει αποδειχτεί ότι αυτές οι βελτιώσεις αντισταθμίζουν το επιπλέον κόστος και την πολυπλοκότητα στην κατασκευή, με την εξαίρεση κάποιων σχεδιάσεων διπλού πηδαλίου (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021).

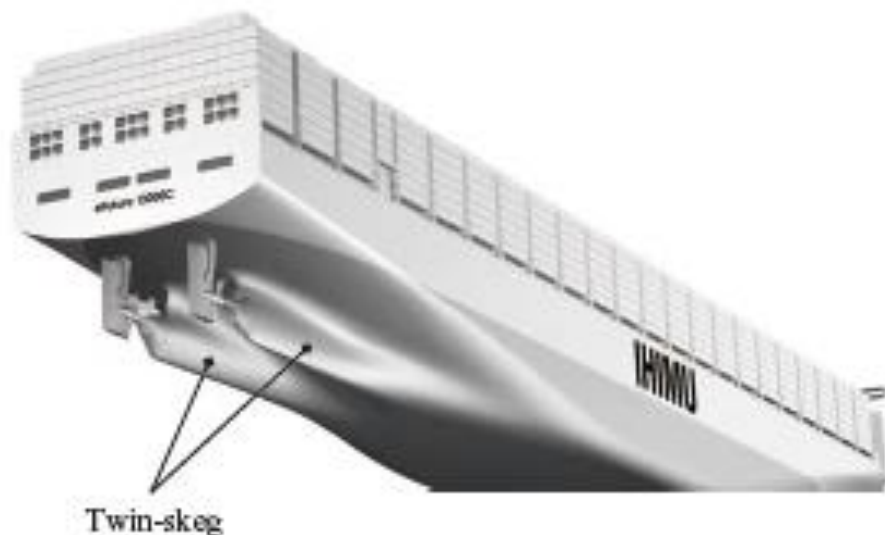
#### 4.1.3.1 Σχεδίαση TWIN SKEG

Η εγκατάσταση πρόωσης TWIN SKEG προσφέρει αυξημένη δυνατότητα ελιγμών και εναλλαξιμότητα, και, επίσης, υιοθετείται όταν η απαιτούμενη ισχύς για μία προπέλα είναι μεγάλη. Η προωστήρια ισχύς δύναται να υπερβαίνει αυτό που μπορεί να διαχειριστεί μία και μόνο προπέλα εάν, για παράδειγμα, η σχεδίαση του σκάφους είναι

<sup>3</sup> Στη ρευστοδυναμική, μια δίνη είναι ο στροβιλισμός ενός ρευστού και το αντίστροφο ρεύμα που δημιουργείται όταν το ρευστό βρίσκεται σε καθεστώς τυρβώδους ροής. Το κινούμενο ρευστό δημιουργεί έναν χώρο χωρίς ρευστό που ρέει προς την πλευρά του αντικειμένου. Το υγρό πίσω από το εμπόδιο ρέει στο κενό δημιουργώντας ένα στροβιλισμό υγρού σε κάθε άκρη του εμποδίου, ακολουθούμενο από μια σύντομη αντίστροφη ροή υγρού πίσω από το εμπόδιο που ρέει προς το πίσω μέρος του εμποδίου.



περιορισμένου βυθίσματος και η διάμετρος της προπέλας μικρότερη. Για τη σχεδίαση TWIN SKEG υπάρχει και η επιλογή αξόνων με στηρίγματα ή διπλού πηδαλίου. Ένα σκάφος με αυτή τη σχεδίαση παρουσιάζει μία βελτίωση της απόδοσης γάστρας περίπου κατά 5% σε σχέση με την αντίστοιχη μονής έλικας εξαιτίας της καλύτερης ροής του πεδίου των ομμόρων (Babicz, 2015).



Εικόνα 13. TWIN SKEG (MASUKO Akira, 2011)

Σε αυτή την περίπτωση, λαμβάνεται υπόψη και η επιπλέον αντίσταση λόγω των στηριγμάτων και των σημείων έδρασης του άξονα. Η εφαρμογή της σχεδίασης TWIN SKEG ελαχιστοποιεί την ανάγκη επιπλέον προσαρτημάτων και μπορεί να παρέχει καλύτερη υδροδυναμική απόδοση, ειδικά για σκαριά πλοίων με  $C_b < 0,70$  και αυτά με πλατιά πλώρη και/ή μικρά βυθίσματα. Για λεπτότερα, ταχύτερα πλοία η σχεδίαση αξόνων διπλής έλικας μπορεί να προτιμάται όταν απαιτούνται δύο προπέλες, επειδή η μορφή ανοιχτής πρύμνης παρέχει μικρότερη μεταβλητότητα ομόρρου, άρα λιγότερη σπηλαιώση και κραδασμούς.

Για πλήρους μορφής πλοία, η Σουηδική ναυπηγική εταιρεία SSPA κατέληξε ότι η εφαρμογή διπλού πηδαλίου παρέχει βελτίωση αποδοτικότητας 2-3% σε σχέση με σχεδιάσεις μονής έλικας με αντίστοιχα χαρακτηριστικά. Εάν η διάμετρος της προπέλας για σχεδίαση μονής έλικας δεν είναι ικανοποιητική λόγω των περιορισμών του βυθίσματος, η εγκατάσταση προπελών με διπλό πηδάλιο μπορεί να οδηγήσει σε βελτιώσεις της τάξης του 6% ή και περισσότερο.

Αυτό το όφελος στην εφαρμογή διπλού πηδαλίου αυξάνεται για τους ακόλουθους λόγους:

- Κάθε πηδάλιο μπορεί να είναι πιο λεπτό από το μονό πηδάλιο που βρίσκεται στη μέση γραμμή, στη σχεδίαση μονής έλικας, επιφέροντας λιγότερη σπηλαιώση και λιγότερους κραδασμούς.
- Το LCB μπορεί να μετατοπιστεί περισσότερο προς τα πρύμα, παρέχοντας τη δυνατότητα για πιο ομαλή γωνία εισόδου της πλώρης και σημαντική μείωση της αντίστασης κυματισμού.



- Η σχεδίαση διπλού πηδαλίου προσφέρει βελτιωμένη ευστάθεια.

Ενώ υπάρχουν βελτιώσεις στη συνολική αποδοτικότητα του σκάφους σχετικά με την κατανάλωση καυσίμου, η εφαρμογή διπλού πηδαλίου έχει και μειονεκτήματα τα οποία πρέπει να αξιολογηθούν. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι:

- Η βρεχάμενη επιφάνεια είναι τυπικά περίπου 4-5% μεγαλύτερη στη σχεδίαση διπλού πηδαλίου σε σχέση με αυτή του μονού. Όσο χαμηλότερο είναι το  $C_b$ , τόσο επιβαρυντική είναι η επίδραση στη βρεχάμενη επιφάνεια.
- Το βάρος χάλυβα της γάστρας είναι αυξημένο (περίπου 4-5% για δεξαμενόπλοια).
- Το κόστος εγκατάστασης συστημάτων διπλού πηδαλίου είναι πιο ακριβό.

Η βέλτιστη σχεδίαση και τοποθέτηση διπλού πηδαλίου πρέπει να λάβει υπόψη διάφορους παράγοντες. Είναι σημαντική η ισορροπία ανάμεσα στην εσωτερική και την εξωτερική πλευρά του πηδαλίου, η οποία επηρεάζεται από την απόσταση ανάμεσα στα πηδάλια και το σχήμα τους. Λεπτότερα, ασύμμετρα πηδάλια υπό γωνία μπορούν να βελτιώσουν την αποδοτικότητα της προπέλας αρκεί να διατηρηθούν στρωτές γραμμές και να αποτραπεί η ροή πάνω σε αυτά. Πρέπει να παρέχονται επαρκείς ελευθερίες πάνω στις προπέλες, όχι όμως σε βαθμό που να οδηγήσουν σε μειωμένη ταχύτητα νερού προς το πάνω μέρος της προπέλας (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021).

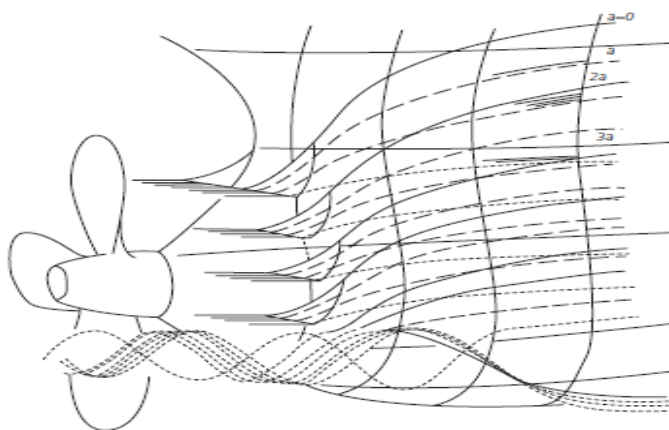
## 4.2 Συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας

### 4.2.1 Συστήματα WED (Wake Equalizing Device) και ανακουφιστικά συστήματα διαχωρισμού ροής / Συστήματα προ-δίνης (Pre-swirl Devices)

Γενικά, τα συστήματα εξισορρόπησης ροής και τα ανακουφιστικά συστήματα διαχωρισμού της ροής έχουν σκοπό να βελτιώσουν τη ροή γύρω από τη γάστρα, ώστε να λύσουν τα προβλήματα της προπέλας και την επιπρόσθετη αντίσταση που προκαλείται από τις υποβέλτιστες πρυμναίες μορφές γάστρας. Ως εκ τούτου, είναι λιγότερο αποδοτικά όταν η γεωμετρία του πλοίου έχει σχεδιαστεί σωστά, με την οπτική της βελτιστοποίησης της ροής προς την προπέλα και την αποφυγή δημιουργίας ομόρρων. Τα πιο διαδεδομένα συστήματα εξισορρόπησης και διαχωρισμού ροής είναι τα πτερύγια Grothues, οι αγωγοί Schneekluth και τα πρυμναία τούνελ.

#### 4.2.1.1 Πτερύγια πριν την προπέλα / Πτερύγια Grothues

Τα πτερύγια Grothues είναι μικρές καμπυλωτές τριγωνικές πλάκες συγκολλημένες στις πλευρές της γάστρας μπροστά από την προπέλα και πάνω από τον άξονά της. Κατευθύνουν προς τα κάτω τη ροή του νερού με σκοπό να την ανακατευθύνουν οριζοντίως προς την προπέλα. Αρχικά, προτάθηκαν για να ελαχιστοποιήσουν / αποτρέψουν το σχηματισμό δινών σε πρύμνες σχήματος U των πλοίων με πλήρες συντελεστή γάστρας ( $C_b$ ) (δεξαμενόπλοια και φορτηγά πλοία).



Εικόνα 14. Βασική αρχή λειτουργίας πτερυγίων Grothues (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021)

Ωστόσο, δοκιμές σε δεξαμενές παρείχαν ενδείξεις ότι μπορούν επίσης να βελτιώσουν την αποδοτικότητα της προπέλας από την οπτική της μεγαλύτερης ποσότητας ύδατος που καθίσταται διαθέσιμο στο πάνω μέρος της προπέλας και μικρότερη εισερχόμενη δίνη στα πτερύγια. Στην καλύτερη των περιπτώσεων, τα πτερύγια μπορούν επίσης να παρέχουν μία περιορισμένη ποσότητα επιπρόσθετης ώσης στο πλοίο, ως αποτέλεσμα της ανακατεύθυνσης της διαμήκουσ ροής στην οριζόντια κατεύθυνση (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021).

#### 4.2.1.2 Αγωγός Schneekluth

Ο σκοπός των αγωγών εξισορρόπησης ροής είναι παρόμοιος με αυτόν των πτερυγίων Grothues, εφόσον και τα δύο συστήματα ανακατευθύνουν τη ροή στο πάνω μέρος των πτερυγίων της προπέλας, και ως εκ τούτου ομογενοποιούν τη ροή και βελτιώνουν την αποδοτικότητα της γάστρας. Ωστόσο, σε αντίθεση με τα πτερύγια Grothues, οι αγωγοί Schneekluth επίσης επιταχύνουν τη ροή με την έννοια της ανύψωσης που δημιουργείται από τη μορφή του αγωγού. Επομένως, μπορούν να σχεδιαστούν έτσι ώστε να μην είναι τόσο ευαίσθητοι στις μεταβολές της γωνίας εισόδου συγκριτικά με το Grothues (schneekluth.com, n.d.).

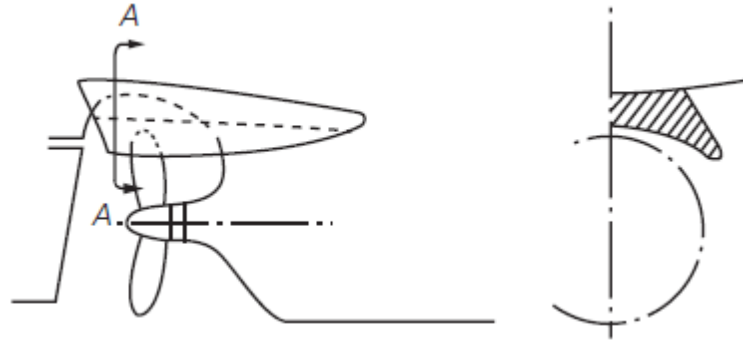


Εικόνα 15. Μοντέλο αγωγού Schneekluth (schneekluth.com, n.d.)



#### 4.2.1.3 Πρυμναίες σήραγγες / στάτορες με πτερύγια

Τα πρυμναία τούνελ είναι οριζόντιες προσθήκες στη γάστρα πάνω και μπροστά από τα πτερύγια της προπέλας που οδηγούν το νερό προς σε αυτή. Στις περισσότερες περιπτώσεις, προστίθενται κατά τη διάρκεια μετασκευών με σκοπό να μειώσουν την επίδραση των ομόρρων των πλοίων με πρύμνη σχήματος V και να μειώσουν τους κραδασμούς.



Εικόνα 16. Αγωγός πρυμναίας σήραγγας (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021)

Η ροή μετά την προπέλα μπορεί να παραμείνει στιγμιαία στην περιφερειακή κατεύθυνση, με αποτέλεσμα η προπέλα να χρειάζεται λιγότερη κινητική ενέργεια για να παραχθεί ώση (Yaser Sharifi, 2017).



Εικόνα 17. Στάτορας προ-δίνης μπροστά από την προπέλα (Elangovan, 2020)

Τα συστήματα προ-δίνης έχουν σχεδιαστεί και εγκατασταθεί τόσο σε σχεδιάσεις νέων πλοίων, όσο και σε πλοία ως μετασκευές και προσθήκες. Κανονικά, δύνανται να λειτουργήσουν σε υποβέλτιστες ροές, αλλά κυρίως αποδίδουν καλύτερα σε ήδη βελτιστοποιημένες σχεδιάσεις. Ως εκ τούτου, μπορούν να θεωρηθούν πλήρως συμβατά με άλλες συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας, με εξαίρεση τις ασύμμετρες γραμμές πρύμνης. Τα συστήματα προ-δίνης μπορούν να αποφέρουν εξοικονόμηση καυσίμου της τάξης του 2-6%.

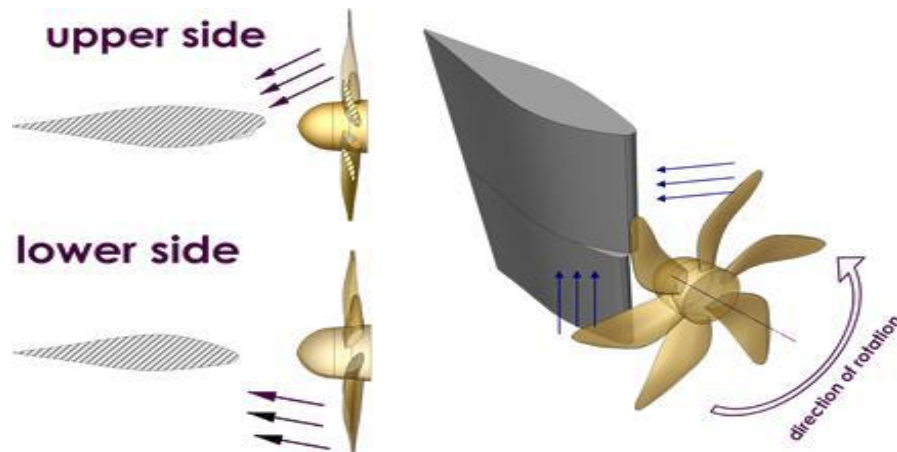




## 4.2.2 Συστήματα μετά-δίνης (Post-swirl Devices)

### 4.2.2.1 Πηδάλιο με στρεβλωμένα άκρα

Τα πηδάλια μπορούν να παίξουν ένα σημαντικό ρόλο στην επιπλέον αντίσταση τριβής. Τοποθετούνται στο πίσω μέρος της προπέλας της οποίας η περιστροφική ενέργεια επιδρά σε αυτά, δίνοντας προοπτικές ενεργειακού οφέλους.



Εικόνα 18. Σχηματική υποτύπωση ενός στρεβλωμένου πηδαλίου (Rob Winkel, Arno van den Bos, Ulf Weddige - European Commission, 2015)

Το συγκεκριμένο πηδάλιο είναι στρεβλωμένο οριζοντίως στην κάτω και πάνω πλευρά του τμήματος που είναι προέκταση του άξονα της προπέλας όπως εμφανίζεται στην Εικόνα 18. Αυτό μειώνει τη σπηλαίωση στην επιφάνεια του και βελτιώνει τη δυνατότητα ελιγμών του πλοίου. Το πηδάλιο εντοπίζεται πίσω από την προπέλα με το προφίλ του να είναι συμμετρικό ως προς το διαμήκη άξονά του. Με αυτή η διαμόρφωση μειώνεται η ισχυρή περιστροφική ροή της προπέλας προς το πτερύγιο του πηδαλίου, περιορίζοντας τη σπηλαίωση και τα σχετιζόμενα προβλήματα διάβρωσης και φθοράς.

Η τεχνολογία στρεβλωμένων άκρων παρέχει πολλαπλά οφέλη για πλοία υψηλών ταχυτήτων σε σύγκριση με τις σχεδιάσεις των συμβατικών πηδαλίων. Οι τύποι των στρεβλωμένων πηδαλίων οδηγούν σε βελτιώσεις ενεργειακής αποδοτικότητας κατά περίπου 2-4%, με μέσο όρο 3% για πλοία υψηλών ταχυτήτων και μεγάλου μεγέθους.

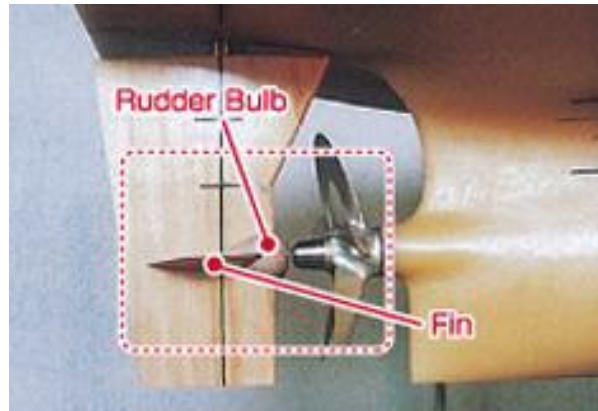
Το στρεβλωμένο πηδάλιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, πλοία ψυγεία, τύπου Ro-Pax, κρουαζιερόπλοια και πολεμικά πλοία. Στη Νότια Κορέα, αυτός ο τύπος πηδαλίου αναγνωρίζεται ως το βασικό πηδάλιο για πλοία μεγάλου μεγέθους και υψηλών ταχυτήτων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (Rob Winkel, Arno van den Bos, Ulf Weddige - European Commission, 2015).

### 4.2.2.2 Πηδάλιο με βολβό

Ο βολβός πηδαλίου επιτρέπει ομαλή ροή εισόδου από την προπέλα και μπορεί να μειώσει την αντίθετη δύναμη που δημιουργεί το πηδάλιο. Τα πτερύγια πηδαλίου παράγουν ώση από τις περιστροφικές ροές της προπέλας όπως εμφανίζεται στην Εικόνα 19. Αυτό το μέτρο μπορεί να βελτιώσει την ενεργειακή αποδοτικότητα κατά 2-5%, με μέσο όρο 4%, για καινούρια και ήδη υπάρχοντα πλοία φορτηγά, δεξαμενόπλοια,



μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και πλοία Ro-Ro με προπέλα και πηδάλιο (Rob Winkel, Arno van den Bos, Ulf Weddige - European Commission, 2015).



Εικόνα 19. Παράδειγμα βολβού πηδαλίου. Kawasaki RBS-F συστήματα βολβού πηδαλίου με πτερύγια (Rob Winkel, Arno van den Bos, Ulf Weddige - European Commission, 2015)

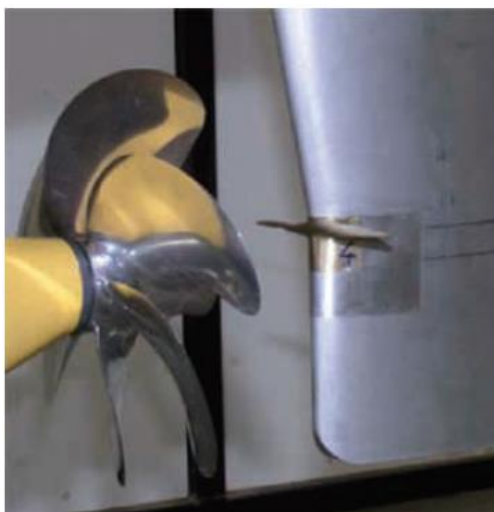
Περίπτωση τέτοιου βολβού αποτελεί ο βολβός Costa, όπου πάνω σε αυτόν τοποθετείται και η προπέλα.



Εικόνα 20. Υψηλής αποδοτικότητας πηδάλιο της Wartsila (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021)

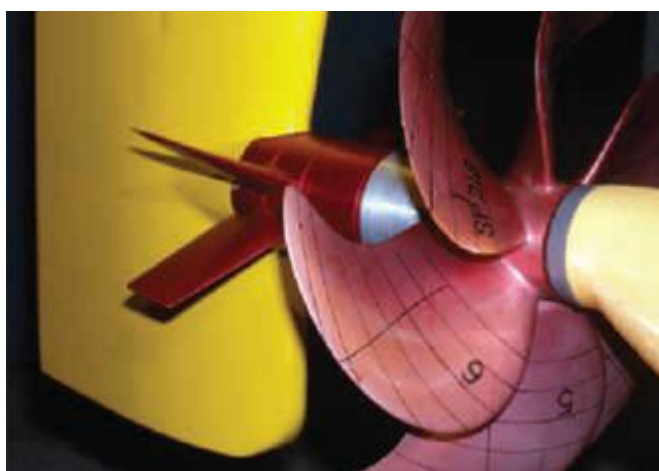
#### 4.2.2.3 Πηδάλιο με πτερύγιο ώσης

Όλα αυτά τα συστήματα προσπαθούν να εκτρέψουν τη ροή από την προπέλα και να μετατρέψουν τη περιστροφική σε χρήσιμη αξονική ροή. Αυτή η ιδέα προέρχεται από τους στάτορες πίσω από τους ρότορες των στροβιλομηχανών. Η φιλοσοφία λειτουργεί καλύτερα όταν ο στάτορας δεν είναι τοποθετημένος ακριβώς πάνω στο πηδάλιο, αλλά στην άκρη του.



Εικόνα 21. HHI Thrust Fins (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021)

Επιπρόσθετα, τα πτερύγια ώσης και οι στάτορες κάποιες φορές τοποθετούνται πλώρα του πηδαλίου και μπορεί να συνεργάζονται με μία πλύμνη προπέλας (PBCF), ένα βολβό Costa ή και τα δύο. Σε αυτή την περίπτωση, η συμπίεση της ροής που δημιουργείται από το βολβό αυξάνει τη ροή προς τα πτερύγια του στάτορα, με αποτέλεσμα τη μείωση του απαιτούμενου μεγέθους του πτερυγίου.



Εικόνα 22. SHI Port-stator (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021)

#### 4.2.2.4 Ωθητήρες τύπου Podded και τύπου Azimuth

Η ιδέα πίσω από τους ωθητήρες τύπου κελύφους (Podded) και τύπου αζιμούθιο (Azimuth) είναι ο συνδυασμός λειτουργιών πηδαλιούχησης και πρόωσης ενός πλοίου ώστε να αποκτήσει καλύτερα χαρακτηριστικά και για τις δύο λειτουργίες. Έχουν επιτευχθεί υψηλά οφέλη από την εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών, ειδικά σε όρους ικανότητας ελιγμών, αλλά η υιοθέτησή τους είναι ακόμα περιορισμένη. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το όφελος στην αποδοτικότητα που επιτυγχάνεται με αυτά αντισταθμίζεται από το υψηλότερο κόστος εγκατάστασης και ένα σημαντικό αριθμό τεχνικών προβλημάτων που συνδέεται με την πολυπλοκότητα τους.





Εικόνα 23. Μεγάλος ωθητήρας τύπου κελύφους και τύπου αζιμούθιο (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021)

Η κύρια διαφορά ανάμεσα σε αυτά τα συστήματα είναι ότι η προπέλα στους ωθητήρες τύπου κελύφους παίρνει κίνηση από έναν ηλεκτρικό κινητήρα που βρίσκεται μέσα στο κέλυφος μπροστά ή πίσω από την έλικα, ενώ στους ωθητήρες τύπου αζιμούθιο, η προπέλα κινείται από έναν άξονα σχήματος L ή Z, με τη μηχανή/κινητήρα να βρίσκεται μέσα στο πλοίο.

Ενώ τα συστήματα τύπου κελύφους έχουν ευρέως χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της περασμένης δεκαετίας σε μεγάλα επιβατηγά πλοία και σε πλοία πορθμείων, οι τύποι αζιμούθιο έχουν κυρίως χρησιμοποιηθεί σε πλωτές εγκαταστάσεις και ρυμουλκά.

#### 4.2.3 Προπέλες υψηλής αποδοτικότητας

Γενικά, μεγαλύτερης διαμέτρου προπέλες με λιγότερα πτερύγια σε χαμηλότερες στροφές ανά λεπτό (RPM), είναι πιο αποδοτικές για μία καθορισμένη απαίτηση ισχύος (Power Engine) σε σχέση με αυτές μικρότερου μεγέθους, ταχύτερων κινούμενων μερών. Ωστόσο, αυτή η γενική αρχή εξισορροπείται από την ανάγκη ύπαρξης ελευθεριών της προπέλας, την ονομαστική κατανομή ομόρου για μία καθορισμένη μορφή γάστρας και την ανάγκη για σωστή συνεργασία προπέλας και μηχανής πρόωσης, ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση.

Αυτός ο τύπος βελτιστοποίησης έχει καταστεί ρουτίνα στο στάδιο της σχεδίασης, όταν τα κυριότερα χαρακτηριστικά της προπέλας και η καθορισμένη γεωμετρία είναι βελτιστοποιημένη για να επιτευχθεί η μέγιστη απόδοση σχεδίασης ταχύτητας και βυθίσματος. Ωστόσο, μπορεί να υπάρχει ενδιαφέρον στην επανεξέταση επιλογών, οπότε πρέπει να ληφθεί υπόψη η πλεύση σε χαμηλότερη ταχύτητα για ένα συγκεκριμένο πλοίο σε μακροπρόθεσμη βάση.

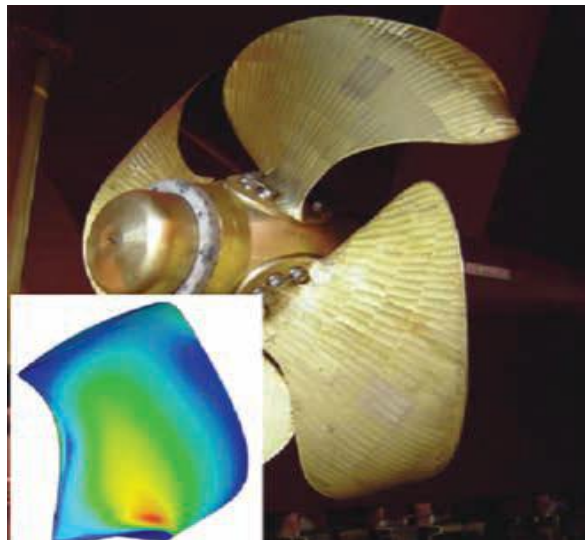
Ομοίως, όταν εξετάζεται η σχεδίαση ενός πλοίου, μπορεί να απαιτηθεί η βελτιστοποίηση τόσο της προπέλας, όσο και της απόδοσης της υδροδυναμικής της



γάστρας. Αυτό θα πρέπει να γίνει ώστε να ληφθούν υπόψη όλες εκείνες οι καταστάσεις εκτός σχεδίασης που το πλοίο ενδέχεται να συναντήσει κατά τη διάρκεια της ζωής του (Molland, 2008). Είναι προφανές ότι η βελτιστοποίηση γύρω από την ταχύτητα και το βύθισμα σχεδίασης δεν εγγυάται ότι η λειτουργία σε καταστάσεις εκτός σχεδίασης θα έχει αποδεκτή απόδοση.

#### 4.2.3.1 Προπέλες με τελικές πλάκες και προπέλες Kappel

Και οι δύο αυτοί τύποι προπελών έχουν τροποποιημένες γεωμετρίες στα άκρα των πτερυγίων με σκοπό τη μείωση ή την καταστολή δημιουργίας σπηλαίωσης σε αυτά και την αύξηση της γενικής αποδοτικότητας της προπέλας. Η κύρια διαφορά είναι ότι, ενώ οι προπέλες Kappel το επιτυγχάνουν στρεβλώνοντας το άκρο του πτερυγίου, οι προπέλες με τελικές πλάκες, γνωστές ως άκρα συγκέντρωσης φορτίου (CLT), χαρακτηρίζονται από μία φαρδιά χορδή με μία λεπτή πλάκα στο άκρο που εξέχει προς την πλευρά πίεσης του πτερυγίου.



Εικόνα 24. MAN Alpha Propellers with Kappel Blades (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021)



Εικόνα 25. Προπέλα CLT (Japan Hamworthy & Co., 2022)



Η ιδέα πίσω από αυτές τις προπέλες είναι παρόμοια με εκείνη στο τελείωμα των φτερών των αεροπλάνων, ώστε να μειωθεί η σπηλαιώση σε αυτή την περιοχή επιτρέποντας την υψηλή φόρτιση του πτερυγίου. Λόγω της αισθητά επιπρόσθετης βρεχάμενης περιοχής των πτερυγίων της προπέλας στην εξωτερική πλευρά, προκαλούνται ισχυρά φαινόμενα τριβής, που αντισταθμίζουν το όφελος στην αποδοτικότητα.

Ένα από τα ελκυστικά χαρακτηριστικά των προπελών Kappel είναι η συμβατότητα τους γενικά με ένα πλήθος άλλων συστημάτων εξοικονόμησης ενέργειας και η διαθεσιμότητά τους τόσο σε FPP όσο και CPP έλικες.

#### 4.2.3.2 Propeller Boss Cap Fin (PBCF)

Σε αυτή την περίπτωση αντικαθίσταται η πλύμνη της προπέλας από μία αντίστοιχη με πτερύγια προκειμένου να εξαλειφθούν οι στροβιλισμοί σε αυτή την περιοχή και να αποφευχθούν οι ενεργειακές απώλειες. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αύξηση ώσης κατά 1% και η μείωση ροπής του άξονα περισσότερο από 3% (S.Marantis, 2012).



Εικόνα 26. Παράδειγμα PBCF (Rob Winkel, Arno van den Bos, Ulf Weddige - European Commission, 2015)

#### 4.2.3.3 Contra Rotating Propeller και προπέλες επικάλυψης

Μια περιστρεφόμενη έλικα προκαλεί περιστροφική κίνηση στα απόνερα της. Η αντίθετα περιστρεφόμενη έλικα χρησιμοποιείται για να ανακτηθεί μέρος αυτής της ενέργειας. Σε μια αντίθετα περιστροφική διαμόρφωση, δύο έλικες βρίσκονται απέναντι η μία από την άλλη, περιστρεφόμενες σε αντίθετες κατευθύνσεις, με την πίσω έλικα να ανακτά την ενέργεια περιστροφής από την μπροστά. Για να αποφευχθούν περιπλοκές με τη σπηλαιώση, η πίσω έλικα έχει συνήθως μικρότερη διάμετρο. Το σύστημα αυτό περιλαμβάνει έναν μικρού μήκους άξονα και, γι' αυτό τον λόγο, είναι πρωτίστως κατάλληλο για σκάφη με μονή έλικα.



Εικόνα 27. Αριστερά, συμβατική προπέλα. Δεξιά, CRP (Rob Winkel, Arno van den Bos, Ulf Weddige - European Commission, 2015)

Η εξοικονόμηση από ένα τέτοιο ESD εκτιμάται να είναι της τάξης του 6-20% της κατανάλωσης ισχύος, με μέσο όρο το 13%, αν και τα υψηλότερα ποσοστά εμφανίζονται σε συγκεκριμένες περιπτώσεις. Δύο διαφορετικές μετρήσεις πλήρους κλίμακας αναφέρουν κέρδη της τάξης του 15% με 16%.

Η μηχανική εγκατάσταση των αντίθετα περιστρεφόμενων αξόνων είναι περίπλοκη και απαιτεί περισσότερη συντήρηση. Η τεχνική είναι διαθέσιμη στην αγορά, αλλά έχουν αναφερθεί προβλήματα με τους μειωτήρες και τις εδράσεις του άξονα.

Η τεχνολογία είναι ιδιαίτερος ωφέλιμη μάλλον για υψηλά φορτισμένες έλικες, όπως στα πλοία υψηλών ταχυτήτων (Ro-Ro, πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων). Μπορεί να εφαρμοστεί ως μετασκευή σε υπάρχοντα πλοία, αλλά εξαιτίας της περίπλοκης μηχανικής εγκατάστασης, προτιμάται να εκτελείται κατά τη φάση ναυπήγησης.

Αυτού του είδους οι προπέλες έχουν την προοπτική να αυξάνουν την αποδοτικότητα με την εκμετάλλευση της περιστροφικής ροής στο πάνω μέρος της έλικας, ώστε να ελέγξουν την κατάσταση των ομμόρων μπροστά από το κάτω μέρος της έλικας, όπως οι ρότορες στα συστήματα πριν την έλικα. Η διαφορά ανάμεσα στις έλικες αντίθετης περιστροφής και στις έλικες επικάλυψης είναι ότι οι δύο προπέλες δεν έχουν τον ίδιο άξονα. Αν και αυτό το χαρακτηριστικό απλουστεύει πολύ τη μηχανική του άξονα, προκαλεί σημαντική ανισορροπία ομμόρων στο πάνω μέρος της προπέλας. Για αυτό το λόγο, οι προπέλες με επικάλυψη χρησιμοποιούνται σπάνια στην πράξη.



Εικόνα 28. Contra rotating και Overlapping propellers (Singh, 2018)

Οι προπέλες αντίθετης περιστροφής ιστορικά έχουν χρησιμοποιηθεί εκεί που οι περιστροφικές δυνάμεις μίας προπέλας χρειάζεται να ισορροπήσουν. Τέτοια περίπτωση

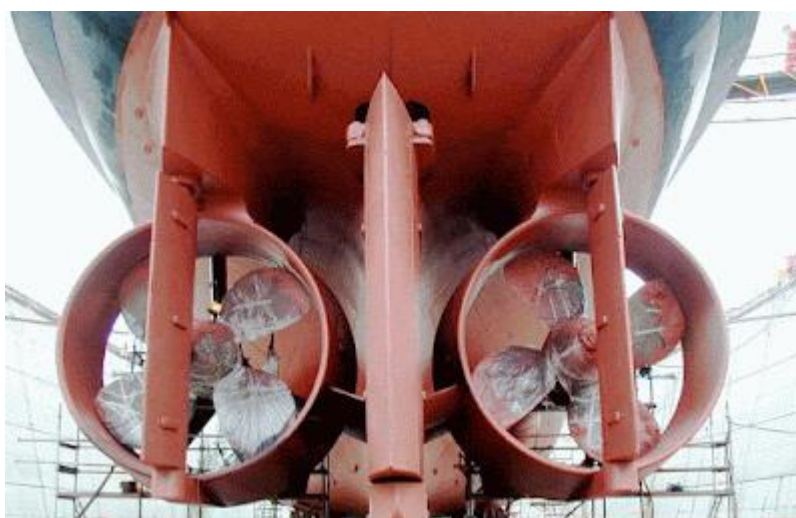




αποτελεί αυτή των τορπιλών. Ωστόσο, λόγω της πολυπλοκότητας των μηχανισμού του άξονα, δεν έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στα εμπορικά πλοία, παρά μόνο σε μερικούς τύπους ωθητήρων Azimuth και τύπου Podded. Επειδή οι προπέλες λειτουργούν σε σημαντικά διαφορετικές ροές, η γεωμετρία διαφέρει σημαντικά, συμπεριλαμβάνοντας τον αριθμό των πτερυγίων που είναι σχεδιασμένα να αποφεύγουν ανεπιθύμητες επιπτώσεις αρμονικών κραδασμών (Rob Winkel, Arno van den Bos, Ulf Weddige - European Commission, 2015).

#### 4.2.3.4 Έλικα μέσα σε αγωγό

Ο επιταχυνόμενος αγωγός έλικας, αποτελείται από μία έλικα τοποθετημένη μέσα σε ένα μη περιστρεφόμενο αγωγό. Συγκριτικά με τη συμβατική έλικα ίδιας διαμέτρου και ικανότητας ώσης, αυτή η τροποποίηση επιτρέπει μια αύξηση εισροής ύδατος στην έλικα, βελτιώνοντας τις συνθήκες λειτουργίας γύρω από αυτή.



Εικόνα 29. Σύστημα Ducted Propeller (Singh, 2018)

Ο αγωγός δημιουργεί επιπρόσθετο φορτίο ώσης. Η δυνατότητα για εξοικονόμηση ενέργειας στα σχετικά σκάφη ποικίλει ανάμεσα σε 1-20%. Η βελτίωση που επιτυγχάνεται από την υιοθέτηση αυτού του συστήματος ESD αντισταθμίζει την αρνητική επίδραση της αύξησης της αντίστασης του νερού λόγω του αγωγού. Οι έλικες μέσα σε αγωγό ταιριάζουν σε σκάφη που λειτουργούν σε υψηλά φορτία έλικας, όπως τα δεξαμενόπλοια, τα πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου και, κυρίως, τα ρυμουλκά (Rob Winkel, Arno van den Bos, Ulf Weddige - European Commission, 2015).

#### 4.2.3.5 Προπέλες Μεταβλητού Βήματος (CPP)

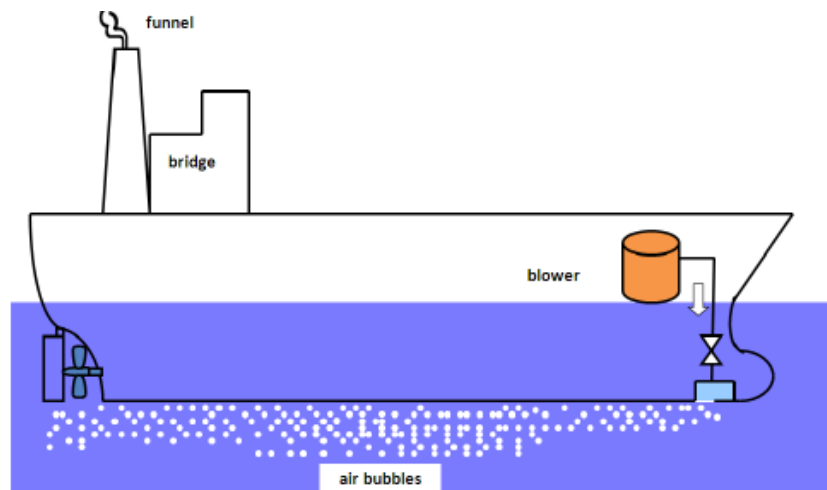
Οι προπέλες CPP συχνά συναντώνται σε συστήματα υψηλής αποδοτικότητας. Στην πράξη, έχουν σημαντικά χαμηλότερη απόδοση από τις προπέλες σταθερού βήματος (FPP) όταν χρησιμοποιούνται σε συγκεκριμένο αριθμό στροφών σε συνθήκες εκτός σχεδίασης. Σε υψηλές στροφές άξονα και σε μικρές τιμές βήματος δημιουργείται μία σημαντική υπο-βέλτιστη ροή πάνω στα πτερύγια που οδηγεί στη δημιουργία σπηλαιώσης, με αποτέλεσμα τη δημιουργία υψηλών κραδασμών και του επιπέδου του θορύβου.



Οι προπέλες CPP αποδίδουν καλύτερα σε συνθήκες εκτός σχεδίασης συγκριτικά με τις FPPs, όταν οι στροφές μεταβάλλονται για να ταιριάξουν στην καλύτερη απόδοση βήματος που έχει καθοριστεί. Σε συνθήκες εκτός σχεδίασης υπάρχει η δυνατότητα επαναπρογραμματισμού των ρυθμίσεων τους, ώστε να μεγιστοποιηθεί η αποδοτικότητα τους. Αυτό τις καθιστά κατάλληλες για πλοία που για μεγάλες περιόδους της ζωής τους ενδέχεται να λειτουργήσουν σε χαμηλότερες ταχύτητες από αυτές της σχεδίασης.

### 4.3 Μείωση της αντίστασης τριβής της γάστρας

Ένα από τα συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας που μειώνουν την αντίσταση τριβής της γάστρας είναι το Air Lubrication, το οποίο χαρακτηρίζεται από τον IMO ως κατηγορία B-1 ‘Καινοτόμες Τεχνολογίες Εξοικονόμησης Ενέργειας’ όπως περιγράφονται στη MEPC.1/Circ.815. Στην κατηγορία B ανήκουν τεχνολογίες που μειώνουν την προωστήρια ισχύ,  $P_P$ , στην ταχύτητα αναφοράς,  $V_{ref}$ , αλλά δεν παράγουν ηλεκτρική ισχύ. Η εξοικονόμηση ενέργειας λογίζεται ως  $P_{eff}$ . Στην κατηγορία B-1 ανήκουν τεχνολογίες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν οποιαδήποτε στιγμή κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του πλοίου. Ενώ στην κατηγορία B-2 ανήκουν τεχνολογίες όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, όπως οι ρότορες Flettner.



Εικόνα 30. Σχηματική αναπαράσταση ενός συστήματος Air Lubrication (IMO, MEPC.1/Circ.815)

Η επιφανειακή αντίσταση τριβής εξαρτάται από την βρεχάμενη επιφάνεια της γάστρας του πλοίου. Η τεχνολογία Air Lubrication μπορεί να επιτύχει την μείωσή της. Χωρίς λοιπόν μεγάλες αλλαγές στη μορφή της γάστρας ή στην ταχύτητα λειτουργίας, και με τα υπόλοιπα στοιχεία της αντίστασης γάστρας να παραμένουν σταθερά, μόνο η αντίσταση τριβής μειώνεται.

Η λίπανση γάστρας με αέρα επιτυγχάνεται με την έγχυση αέρα κάτω από τη γάστρα, μειώνοντας το τμήμα της επιφάνειάς της που έρχεται σε άμεση επαφή με το νερό, ή στην περίπτωση των μικρών φυσαλίδων, με την τροποποίηση της μέσης πυκνότητας στο οριακό στρώμα αέρα. Υπάρχουν τρεις κύριες κατηγορίες της τεχνολογίας Air Lubrication : Μείωση τριβής με φυσαλίδες (Bubble Drag Reduction (BDR)), Μείωση τριβής με στρώμα αέρα (Air Layer Drag Reduction (ALDR)) και Μείωση τριβής με μερική κοιλότητα (Partial Cavity Drag Reduction (PCDR)).



### 4.3.1 Μείωση τριβής με φυσαλίδες (Bubble Drag Reduction (BDR))

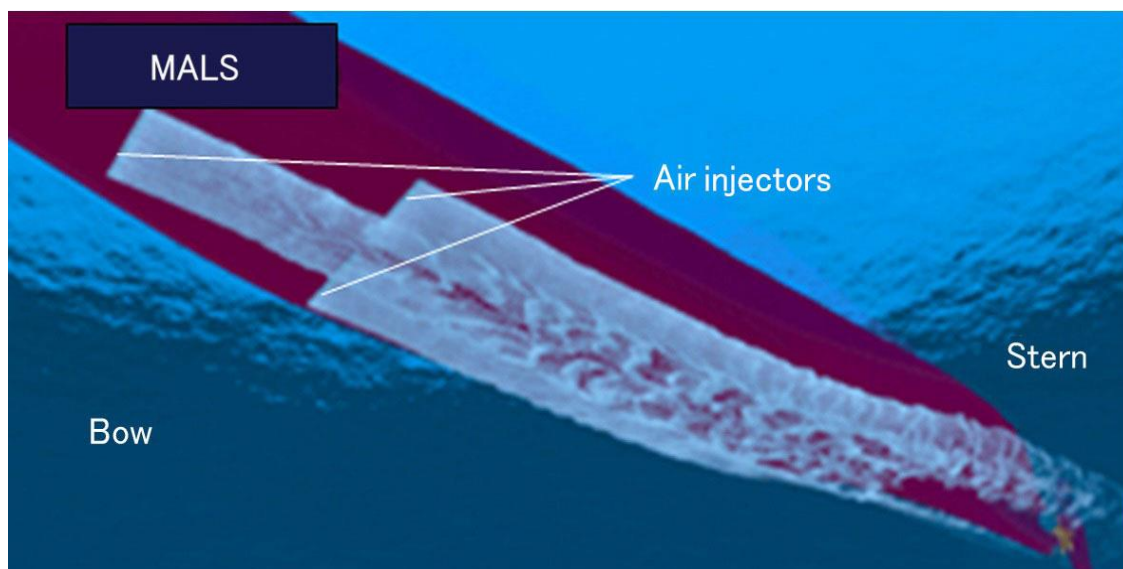
Το σύστημα Bubble Drag Reduction χρησιμοποιεί μικρο-φυσαλίδες αέρα, με μέγεθος μικρότερο από 0,1mm. Ωστόσο, καθίσταται δύσκολη η δημιουργία μικρο-φυσαλίδων σε πλοίο πλήρους κλίμακας και είναι λιγότερο αποδοτικές σε χαμηλές ταχύτητες εξαιτίας της πλευστότητας. Καθώς οι φυσαλίδες μεγαλώνουν σε μέγεθος δεν μπορούν πλέον να διατηρήσουν τη σφαιρική τους μορφή, με αποτέλεσμα να σκάνε και να καταλήξουν σε τυρβώδεις ροές.

Δεν υπάρχει ακόμα πλήρως εδραιωμένη θεωρία για τους μηχανισμούς της μείωσης της επιφανειακής τριβής από τις φυσαλίδες. Ένας μηχανισμός που φαίνεται να είναι κοινά αποδεκτός από τους ερευνητές είναι ότι με την έγχυση φυσαλίδων μειώνεται η πυκνότητα του υγρού, και ως εκ τούτου ο αριθμός Reynolds, που έχει άμεση επίδραση στη μείωση της επιφανειακής τριβής. Άλλοι δύο πιθανοί μηχανισμοί είναι :

- Μείωση της επιφανειακής τριβής μέσω του φαινομένου της συμπίεσης στροβιλώδους ροής (turbulence suppression effect), όπου σε αυτό οι φυσαλίδες καταστέλλουν την αστάθεια στο επιφανειακό στρώμα αέρα.
- Αύξησης του κενού τμήματος με τη μείωση του ιξώδους της ροής από τη δημιουργία φυσαλίδων.

#### 4.3.1.1 Mitsubishi Air Lubrication (MALS)

Το συγκεκριμένο σύστημα ήταν ένα από τα πρώτα εμπορικά συστήματα που αναπτύχθηκε στη ναυτιλία από τη γιαπωνέζικη Shipbuilder Mitsubishi Heavy Industries (MHI). Βασίστηκε στην έρευνα που είχε αναπτυχθεί από τη δεκαετία του '80 στην Ιαπωνία. Το MALS, κατοχυρωμένο ως σύστημα Air Lubrication, χρησιμοποιεί τη μέθοδο BDR. Η MHI ανέπτυξε τους δικούς της φυσητήρες, με την ονομασία Mitsubishi Turbo-blower, που χρησιμοποιούνται ειδικά για αυτό το σύστημα.



Εικόνα 31. Γάστρα πλοίου που είναι καλυμμένη με φυσαλίδες (CHIHARU KAWAKITA, 2015)

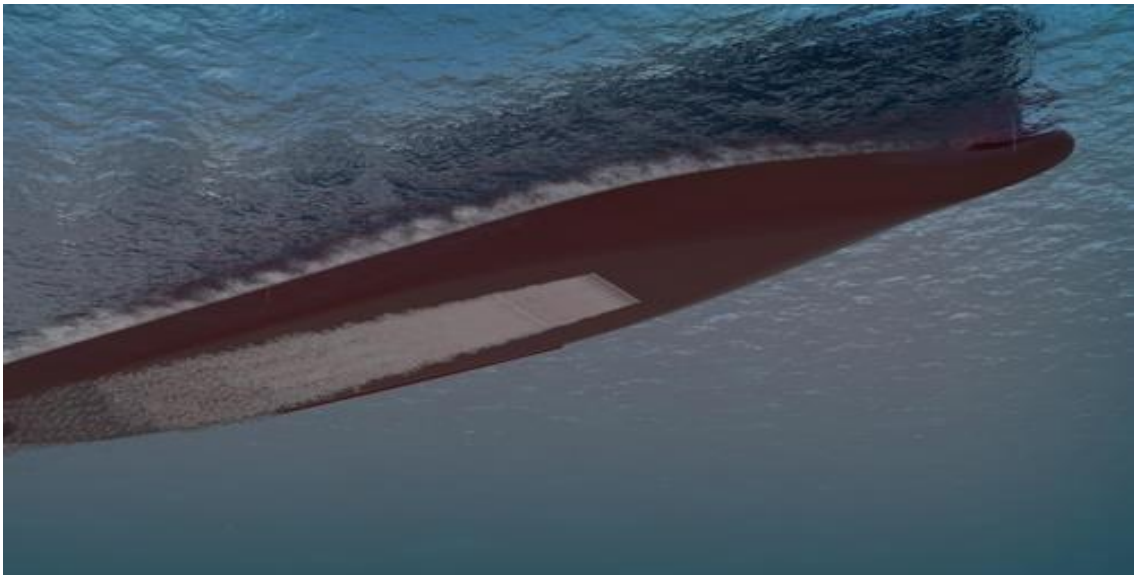


#### 4.3.1.2 Μηχανική Έρευνας και Ανάπτυξης – Winged Air Induction Pipe System (WAIP)

Το WAIP αναπτύχθηκε στην Ιαπωνία από τους Yoshiaki Takahashi και Yuichi Murai και περιλαμβάνει μία σειρά μικρών αεροθλακίων που προσαρμόζονται με ένα φύλλο στη γάστρα με σκοπό την παραγωγή πολύ λεπτών μικρο-φουσαλίδων. Το συγκεκριμένο σύστημα έχει υπάρξει θέμα διαφόρων δοκιμών και το διαχειρίζεται εμπορικά η R&D Engineering Inc.

#### 4.3.1.3 Σύστημα Saver της Samsung Heavy Industries (SAVER Air)

Η Samsung Heavy Industries (SHI) ανέπτυξε το λεγόμενο σύστημα SAVER. Χρησιμοποιεί μία σειρά εγχυτήρων αέρα που εγκαθίστανται στη βάση της γάστρας του πλοίου για να ψεκάζουν φουσαλίδες αέρα δημιουργώντας ένα στρώμα αέρα.

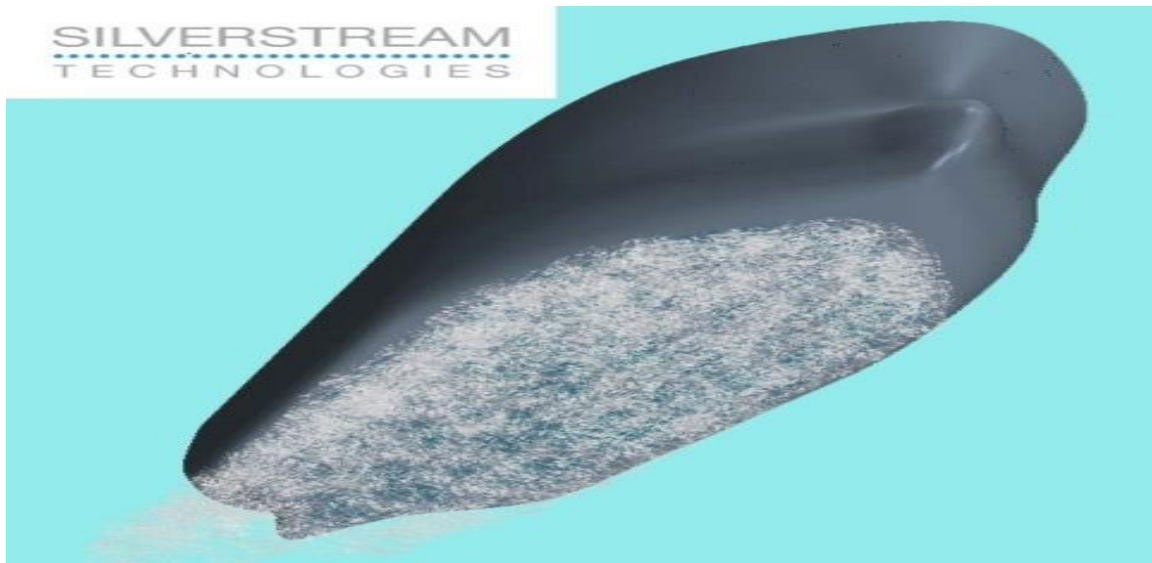


Εικόνα 32. Σύστημα SAVER (YONHAP NEWS AGENCY, 2018)

#### 4.3.1.4 Σύστημα Silverstream

Προέρχεται από την DK Group και δημιουργεί μεγάλες κοιλότητες αέρα με σκοπό τη μείωση της αντίστασης τριβής. Το σύστημα Silverstream εφαρμόζει τις πατενταρισμένες μονάδες απελευθέρωσης αέρα στη γάστρα για να δημιουργήσει ένα στρώμα μικροφουσαλίδων.





Εικόνα 33. Σύστημα Silverstream (Silverstream Technologies, 2015)

#### **4.3.2 Δημιουργία στρώματος με μικροφουσαλίδες μείωσης τριβής (Air Layer Drag Reduction (ALDR))**

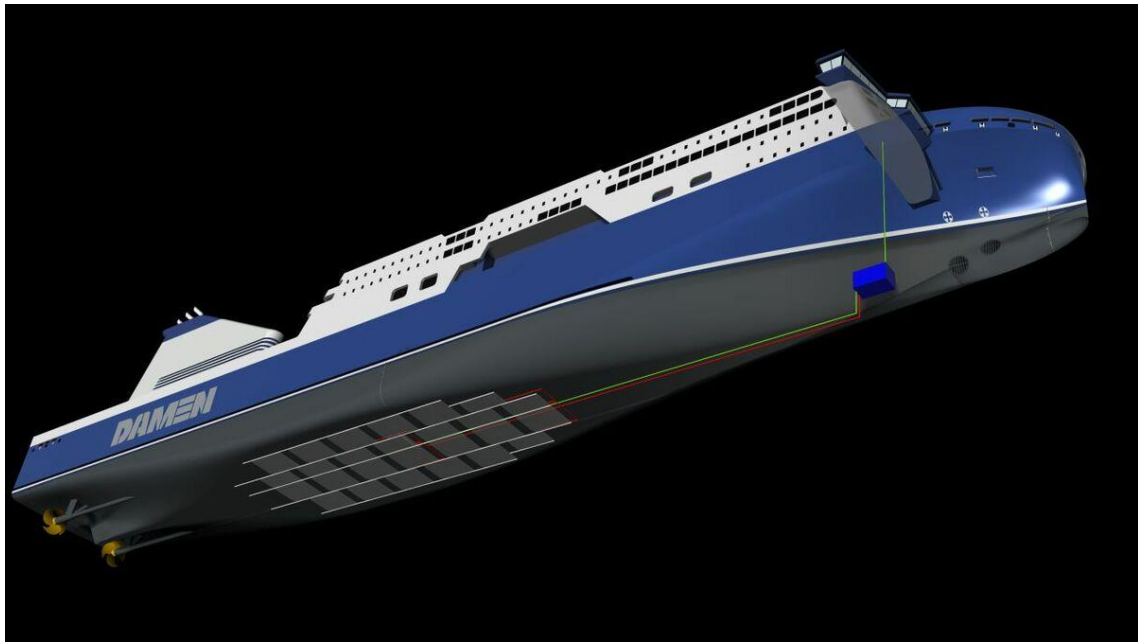
Όταν ικανοποιητική ποσότητα αέρα εγχύεται στην περιοχή οριακού τοιχώματος ενός τυρβώδους στρώματος νερού, ο αέρας που εγχύεται θα πάρει τη μορφή ενιαίου ή σχεδόν ενιαίου στρώματος, διαχωρίζοντας τη στερεή επιφάνεια από τη ροή του νερού. Με την αύξηση του αέρα που εγχύεται, το στρώμα αέρα που δημιουργείται είναι ικανό να διατηρήσει ένα πλήρες στρώμα αέρα που καλύπτει το μεγαλύτερο μέρος της βρεχάμενης επιφάνειας, και έτσι να επιτυγχάνεται η μείωση της αντίστασης τριβής.

#### **4.3.3 Μείωση αντίστασης μερικής κοιλότητας (Partial Cavity Drag Reduction (PCDR))**

Η φιλοσοφία αυτού του συστήματος είναι ότι υπάρχει μία κοιλότητα στη γάστρα στην οποία εγχύεται αέρας από το εσωτερικό της· ο αέρας που εγκλωβίζεται στην κοιλότητα αποτελεί συνέχεια της υπόλοιπης γάστρας, διαχωρίζοντας τη από το νερό, με αποτέλεσμα τη μείωση της αντίστασης τριβής. Το στρώμα αέρα στη ροή μέσα στην κοιλότητα είναι πιο παχύ σε σχέση με το στρώμα οριακού στροβιλισμού στη γάστρα του πλοίου. Συγκριτικά με το BDR ή το ALDR απαιτεί μικρότερες ποσότητες έγχυσης αέρα για τη διατήρηση του στρώματος αέρα.

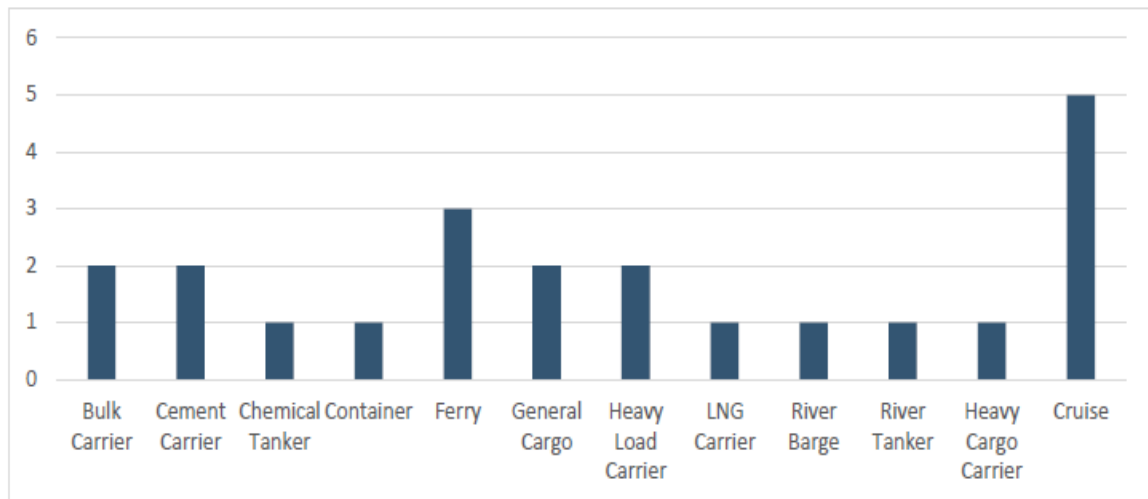
##### **4.3.3.1 Σύστημα Εξοικονόμησης Ενέργειας Αεροθυλακίου από την DAMEN (Damen’s Air Chamber Energy Saving System (ACES))**

Το σύστημα ACES είναι ένα σύστημα Air Lubrication που αναπτύχθηκε από το Ολλανδικό ναυπηγείο Damen Ship και ξεκίνησε ως PELS 2 Project. Αεροθυλάκια προσαρμόζονται στο κάτω μέρος της επίπεδης γάστρας του πλοίου εκεί όπου τροφοδοτείται αέρας για να διαχωρίσει το νερό από το κάτω μέρος της γάστρας.

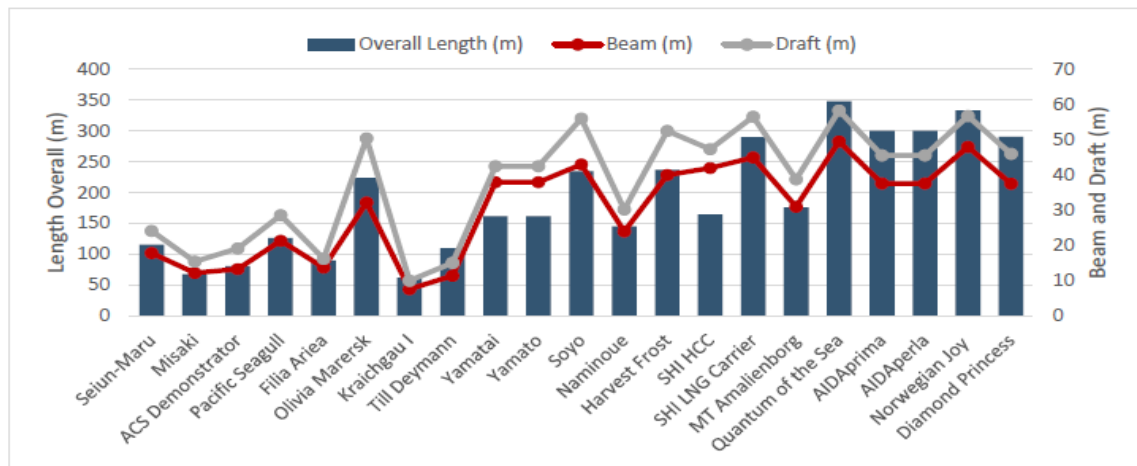


Εικόνα 34. Damen Air Cavity Ssystem (Moore, 2020)

Μέχρι το 2018, είχαν καταγραφεί 23 πλοία με εγκατεστημένο σύστημα Air Lubrication. Όπως φαίνεται και στις επόμενες εικόνες αντιπροσωπεύουν μία μεγάλη ποικιλία τύπων και μεγεθών πλοίων (ABS, Air Lubrication Technology, 2019).



Εικόνα 35. Τύποι πλοίων με εγκατεστημένο σύστημα Air Lubrication (ABS, Air Lubrication Technology, 2019)



Εικόνα 36. Ολικό μήκος, διαγωγή και βύθισμα των πλοίων με εγκατεστημένο σύστημα Air Lubrication (ABS, Air Lubrication Technology, 2019)

Τα υποσχόμενα αποτελέσματα που ελήφθησαν από τη λειτουργία πλοίων που εγκαταστάθηκε το ALS, όπως το πλοίο μεταφοράς χημικών ‘Amalienborg’ και πολλά άλλα, ενθάρρυναν πολλούς πλοιοκτήτες να το εγκαταστήσουν στα πλοία τους, ειδικά στα κρουαζιερόπλοια. Στην παρακάτω Εικόνα παρουσιάζονται τα κρουαζιερόπλοια που παραδόθηκαν με σύστημα ALS την περίοδο 2015-2019 (Mariusz Giernalczyk, 2021).

Year	Vessel Name	Type	System
2015	Quantum of the Sea	Cruise	Foreship
2016	AIDAprima	Cruise	MALS
2017	AIDAperla	Cruise	MALS
2017	Norwegian Joy	Cruise	Silverstream
2018	Diamond Princess	Cruise	Silverstream

Εικόνα 37. Λίστα κρουαζιερόπλοιων με ALS που παραδόθηκαν την περίοδο 2015-2019 (Mariusz Giernalczyk, 2021)

## 4.4 Χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

### 4.4.1 Αιολική ενέργεια

Η χρήση της αιολικής ενέργειας βρίσκεται σε διαδικασία ανάπτυξης μέσω της χρησιμοποίησης συμβατικών πανιών και σύγχρονων εναλλακτικών. Αυτές οι μέθοδοι περιλαμβάνουν τους ρότορες Flettner, τους αετούς έλξης και τα πανιά. Η συμβατότητα των διαφορετικών σχεδιάσεων διαφέρει ανάμεσα στους τύπους των πλοίων και των διαφορετικών φορτίων που διαχειρίζονται. Με τα έως τούδε δεδομένα καμία τέτοια μέθοδος δεν μπορεί να καλύψει πλήρως τις απαιτήσεις πρόωσης ενός πλοίου, ωστόσο μπορούν να εξοικονομηθούν σημαντικά ποσά ενέργειας και, κατ’ επέκταση, καύσιμα. Οι μέχρι τώρα μελέτες έχουν δείξει ότι η αιολική ενέργεια είναι αποδοτικότερη σε πλοία χαμηλών ταχυτήτων και μικρότερου μεγέθους, τα οποία αντιπροσωπεύουν περίπου το 20% των πλοίων μεταφοράς φορτίων παγκοσμίως.

Διάφορες μελέτες έχουν εκτιμήσει ότι η εξοικονόμηση καυσίμου κυμαίνεται σε ένα αρκετά μεγάλο εύρος: 2-24% για έναν απλό ρότορα Flettner, 1-32% για έναν αετό έλξης,



έως 25% για τα πανιά eConowind και μερικές εκτιμήσεις εξοικονόμησης από 10-60% σε χαμηλές ταχύτητες. Αυτά τα αποτελέσματα ώθησαν διάφορες ναυτιλιακές εταιρείες να προσθέσουν πανιά στα πλοία μεταφοράς τους, ωστόσο δεν μπορεί να προβλεφθεί η προοπτική εγκατάστασής τους έως το 2025 εξαιτίας του ότι η αγορά ακόμα δεν είναι αρκετά ώριμη. Επιπρόσθετα εμπόδια στην υιοθέτηση και εφαρμογή τέτοιων λύσεων στη ναυτιλία συνιστούν η μη εξοικείωση με τέτοιες τεχνολογίες, η ασφάλεια και οι ανησυχίες για την αξιοπιστία τους. Εξίσου σημαντικό είναι το γεγονός ότι δεν υπάρχουν δεδομένα κόστους για την εγκατάσταση τέτοιων συστημάτων υποβοήθησης της πρόωσης, καθώς είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης. Όμως, η προοπτική εξοικονόμησης καυσίμου είναι μεγάλη συναρτήσει των καταστάσεων λειτουργίας και τύπων πλοίων (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2021).

#### 4.4.1.1 Αετοί έλξης

Με την τοποθέτηση ενός αετού έλξης στην πλώρη του πλοίου υπάρχει η δυνατότητα να αξιοποιηθεί η αιολική ενέργεια, ώστε να υποβοηθήσει την προωστήρια εγκατάσταση. Το συγκεκριμένο σύστημα μπορεί να εγκατασταθεί σε πλοία με ελάχιστο μήκος 30 μέτρων και λειτουργεί καλύτερα σε πλοία με ταχύτητες λειτουργίας μικρότερες από 16 kn. Ως εκ τούτου, υπάρχει δυνατότητα εγκατάστασης του μόνο σε φορτηγά πλοία και δεξαμενόπλοια. Υπάρχει σχεδιασμός η έκταση του αετού να φτάσει τα 5.000 m<sup>2</sup>. Η αντιστοιχία μεγέθους του αετού με την υποβοήθηση ισχύος περιγράφεται στην Εικόνα 36 (S.Marantis, 2012).

Kite Area (m <sup>2</sup> )	Engine Equivalent Power (kW)
160	600
320	1200
640	2500
1280	4900
2500	9600
5000	19200

Πίνακας 3. Αντίστοιχη ισχύς ανάλογα τα διαφορετικά μεγέθη του αετού (S.Marantis, 2012).

Στο πλαίσιο αυτό έχει αναπτυχθεί ένα πρόγραμμα πρόβλεψης απόδοσης του αετού σε εμπορικά πλοία, με σκοπό να εκτιμήσει τις ικανότητες εξοικονόμησης καυσίμου. Εξήχθη το συμπέρασμα ότι, με την χρησιμοποίηση ενός αετού 320 m<sup>2</sup> σε ένα δεξαμενόπλοιο 50.000 DWT, η εξοικονόμηση καυσίμου θα ανέλθει περίπου στο 10% για κατάσταση θαλάσσης 5 Beaufort, και με προοπτική να πλησιάσει τιμές έως 50% για ταχύτητες ανέμου κατάστασης θαλάσσης 7 Beaufort (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2021).



Dimensions of the Technology	Ship Type	Route	Fuel Savings Found
1 kite: area (a) = 500 m <sup>2</sup> , length of the rope (l) = 150 m	50k dwt Tanker	N.A.	Up to 35%
1 kite: area (a) = 500 m <sup>2</sup> , length of the rope (l) = 350 m			Up to 50%
1 kite: a = 640 m <sup>2</sup> , l = 600 m	73k dwt Tanker	N.A.	40%
	7k dwt RoRo	Dunkirk–Dover	3%
	8k dwt Product Tanker	London–Milford Haven	24%
1 kite: a = 500 m <sup>2</sup> , l = 350 m	6k dwt General Cargo	Varberg–Gillingham	32%
	50k dwt Bulk Carrier	Tubarao–Grimsby	6%
	30k dwt Container Ship	Yantian–Felixstowe	1%
	5k dwt Tanker		9–15%
	90k dwt Tanker		3–4%
1 kite: a = 400 m <sup>2</sup> , l = 350m	7k dwt Bulk Carrier	Worldwide trades of each ship type according to AIS data	9–14%
	90k dwt Bulk Carrier		5–9%
	1k teu Container Ship		2–4%
	5k teu Container Ship		1–2%
1 kite: a = 320 m <sup>2</sup> , l = 300m	50k dwt Tanker	N.A.	10–50%

Πίνακας 4. Απόδοση εξοικονόμησης ενέργειας εγκατεστημένων αετών σε διάφορους τύπους πλοίων (Todd Chou, 2021)



Εικόνα 38. Αετός έλξης (SkySails Propulsion, 2022)

#### 4.4.1.2 Υποβοήθηση πρόωσης με τη χρήση πανιών

Η διερεύνηση κινείται στο πλαίσιο της απόδοσης πολλαπλών πανιών με σκοπό την επιπρόσθετη ώση για το πλοίο. Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε ένα πρόγραμμα πρόβλεψης ταχύτητας για πλοία με υποβοηθούμενη πρόωση από πανιά. Χρησιμοποιήθηκε η τιμή της ώσης ανάμεσα σε πλοίο που κινείται με προπέλα, με και χωρίς τα πανιά, ως μέτρηση της ενεργειακής αποδοτικότητας και έδειξε την εξοικονόμηση έως 10% σε ένα πλοίο τύπου VLCC2, με την κατάλληλη διεύθυνση

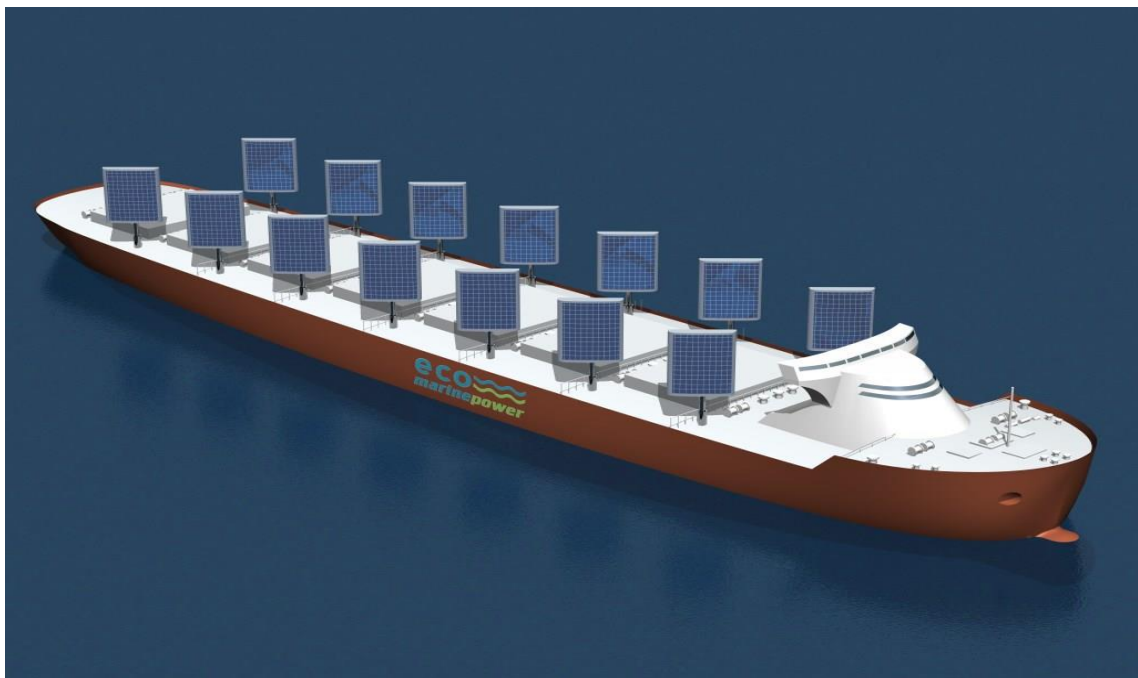




ανέμου. Επίσης, φάνηκε ότι η αποδοτικότητα των φτερών με πανιά είναι σημαντική στην επίτευξη ελάχιστης εξοικονόμησης, με προοπτική μεγάλης εξοικονόμησης όταν τα φτερά αποδίδουν στο μέγιστο (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2017). Στον Πίνακα 5 παρουσιάζεται η εξοικονόμηση που επιτεύχθηκε με την εγκατάσταση διαφόρων μεγεθών πανιών σε συγκεκριμένα πλοία.

Dimensions of the Technology	Ship Type	Route	Fuel Savings Found
9 wingsails: height (h) = 50 m, width (w) = 20 m	180k dwt Bulk Carrier	Yokohama–Seattle	20–30%
Unspecified	10K dwt Chemical Tanker	Buenos Aires–Western Approaches	20–60%
3 wingsails: h = 25 m, w = 9 m	5k dwt Tanker	Worldwide trades of each ship type according to AIS data	5–8%
5 wingsails: h = 50 m, w = 17 m	90k dwt Tanker		9–13%
3 wingsails: h = 27 m, w = 10 m	7k dwt Bulk Carrier		5–7%
5 wingsails: h = 50 m, w = 18 m	90k dwt Bulk Carrier		18–24%
1 wingsail: h = 50 m, w = 20 m	Aframax Tanker		8.8%
		Cape Lopez–Point Tupper Angra dos Reis–Rotterdam	6.1%

Πίνακας 5. Σύνοψη της εξοικονόμησης καυσίμου όσον αφορά τη χρησιμοποίηση σταθερών πανιών (Todd Chou, 2021)



Εικόνα 39. Aquarius Eco Ship by Eco Marine Power - Sail Assisted Ship (ECOMARINEPOWER, 2022)

#### 4.4.1.3 Ρότορες Flettner

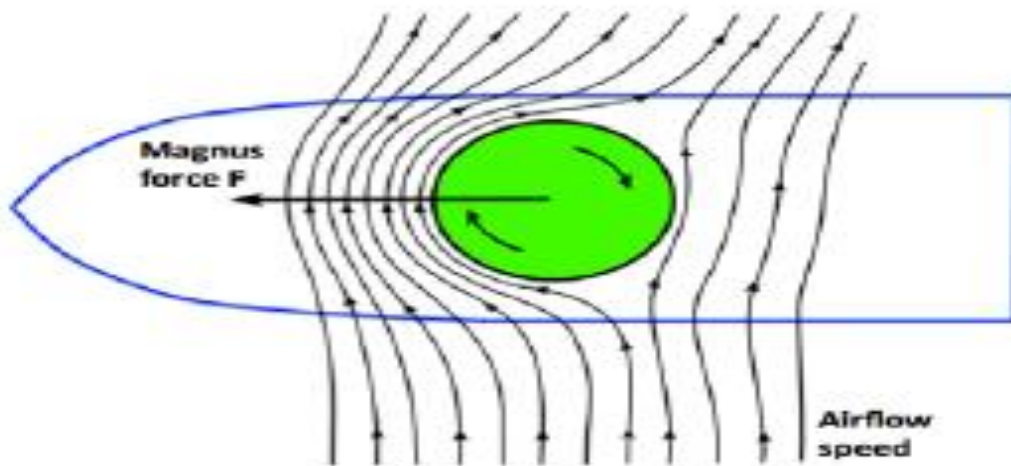
Η πιο ευρέως μελετημένη μέθοδος υποβοήθησης της πρόωσης με χρήση αιολικής ενέργειας είναι οι ρότορες Flettner. Οι τελευταίοι βασίζονται στην εφεύρεση του Anton Flettner και παράγουν ώση λόγω του φαινομένου Magnus. Το σύστημα αποτελείται από έναν ρότορα και έναν λείο κύλινδρο με δίσκο ως τελική πλάκα, ο οποίος περιστρέφεται γύρω από τον άξονα του. Όταν ο αέρας περνάει από τη μία πλευρά του, η επίδραση



Magnus προκαλεί μία δύναμη που παράγεται στην κάθετη κατεύθυνση και στους δύο άξονες, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 38 (Hüffmeier J., 2021).



Εικόνα 40. Παραδείγματα εγκατεστημένων Ρότορων Flettner (Johanson, 2021)



Εικόνα 41. Διάγραμμα φαινομένου Magnus για ρότορα Flettner σε πλοίο (Fabian Tillig, 2015)

Έπειτα από το πρωτότυπο ‘Buckau’ το οποίο φτιάχτηκε από τον Flettner, μόνο δοκιμαστικά πλοία έχουν κατασκευαστεί μέχρι σήμερα. Αξιολογώντας τα έως τούδε εγκατεστημένα συστήματα υπολογίστηκε ότι η εξοικονόμηση ενέργειας κυμαίνεται από 5-10%, με δυνατότητα να ανέλθει στο 20% σε συγκεκριμένες συνθήκες καιρού και διαδρομές (Hüffmeier J., 2021).





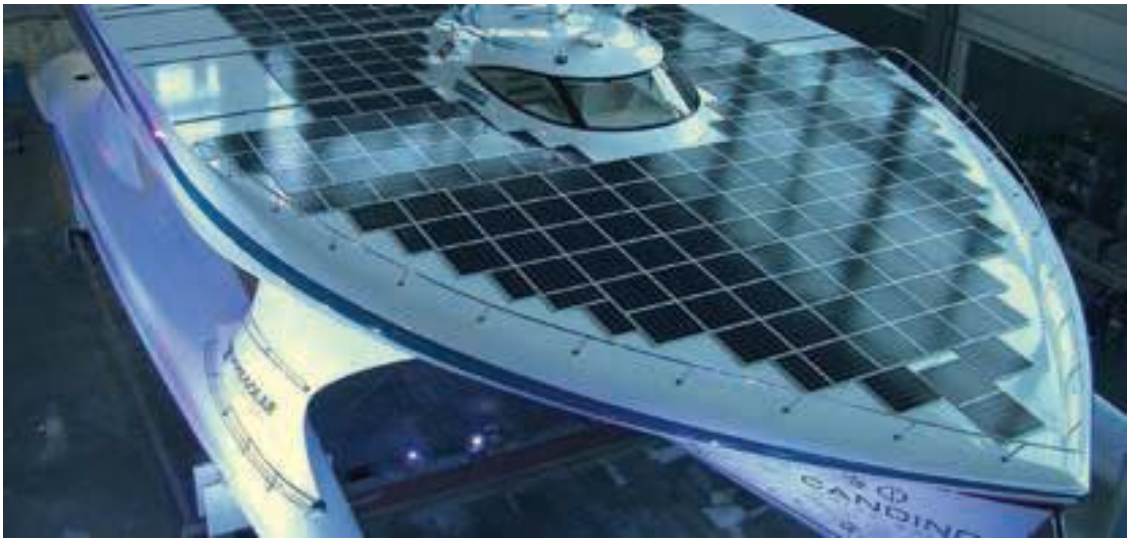
Έχει αναπτυχθεί ένα μοντέλο πλοίου με τέσσερις ανεξάρτητους ρότορες Flettner με σκοπό να προβλέψουν την απόδοση, ώστε να κάνουν μία παραμετρική μελέτη της τεχνολογίας των ρότορων Flettner. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εξοικονόμηση καυσίμου κυμαίνεται από 5,6% έως 8,9%. Επίσης, σημειώθηκε ότι η ευαισθησία των αποτελεσμάτων είναι συνάρτηση της ταχύτητας του πλοίου, της διαδρομής του ταξιδιού και των καιρικών συνθηκών (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2021).

Dimensions of the Technology	Ship Type	Route	Fuel Savings Found
Unspecified	10K dwt Chemical Tanker	Buenos Aires–Western Approaches	10–50%
	7k dwt Ro-Ro	Dunkirk–Dover	4%
1 Flettner rotor: height (h) = 0.35 m, diameter (d) = 5 m	8k dwt Product Tanker	London–Milford Haven	14%
	6k dwt General Cargo	Varberg–Gillingham	21%
	50k dwt Bulk Carrier	Tubarao–Grimsby	5%
	30k dwt Container Ship	Yantian–Felixstowe	2%
2 Flettner rotors: h = 22 m, d = 3 m	5k dwt Tanker		5–7%
3 Flettner rotors: h = 48 m, d = 6 m	90k dwt Tanker	Worldwide trades of each ship type according to AIS data	9–13%
2 Flettner rotors: h = 24 m, d = 3.5 m	7k dwt Bulk Carrier		5–7%
2 Flettner rotors: h = 48 m, d = 6 m	90k dwt Bulk Carrier		17–23%
1 Flettner rotor: h = 25 m, d = 4 m	17k dwt General Cargo	Baltimore–Wilhelmshaven	14–36%
2 Flettner rotors: h = 28 m, d = 4 m	75k dwt Product Tanker	N.A.	Up to 30%
4 Flettner rotors: h = 27 m, d = 4 m	10k dwt General Cargo/Ro-Lo	Porto–Montevideo; Eemshaven–Porto	8.3–47%
2 Flettner rotors: h = 18 m, d = 4 m	10k dwt Ro-Ro	Rotterdam–Middlesbrough	1.6–9.0%
1 Flettner rotor: h = 24 m, d = 4 m	6k dwt (2.8k pax) Passenger	Stockholm–Turku	0.4–2.8%
1 Flettner rotor: h = 18 m, d = 3 m	4k dwt General Cargo	Livorno–Mostaganem; Huelva–Alexandria	1.0–6.6%
2 Flettner rotors: h = 30 m, d = 5 m	110k dwt Tanker	Skikda–Singapore; Yeosu–Spain	1.8–4.7%
1 Flettner rotor: h = 18 m, d = 3 m	Aframax Tanker	Cape Lopez–Point Tupper	8.9%
1 Flettner rotor: h = 18 m, d = 3 m	4k dwt General Cargo	Angra dos Reis–Rotterdam	6.5%
		Unspecified	10–20%

Πίνακας 6. Εξοικονόμηση καυσίμου με την εφαρμογή ρότορων Flettner (Todd Chou, 2021)

#### 4.4.2 Ηλιακή ενέργεια

Υπάρχουν προσπάθειες να χρησιμοποιηθούν ηλιακά κάτοπτρα να κινήσουν μικρά σκάφη, όπως το 30-μέτρων μήκους catamaran Planet Solar, που σχεδιάστηκε να κάνει τον γύρο του κόσμου με μία διάταξη κάτοπτρων 500 m<sup>2</sup>. Ωστόσο, λόγω της χαμηλής ηλεκτρικής τάσης εξόδου ανά μονάδα επιφάνειας, τα ηλιακά κάτοπτρα εφαρμόζονται καλύτερα ως υποβοήθηση της απαιτούμενης ισχύος. Με αυτό το σκοπό έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί σε εμπορικά πλοία όπως το NYK φορτηγό Auriga Leader, που εξοπλίστηκε με 328 ηλιακά κάτοπτρα κόστους 1,68 εκατ. \$. Η παραγόμενη ισχύς των 40 kW από τα κάτοπτρα χρησιμοποιείται για το φωτισμό και άλλες εφαρμογές εξυπηρέτησης αναγκών του πληρώματος.



Εικόνα 42. Planet Solar (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021)

Το προφανές μειονέκτημα των ηλιακών κατόπτρων είναι το υψηλό κόστος εγκατάστασης σε σχέση με την παραγόμενη ισχύ, γιατί δεν έχουν ακόμα επιτευχθεί μεγάλες οικονομίες κλίμακας. Ευελπιστείται ότι, όπως άλλες εφαρμογές ξηράς που αυξάνουν τη ζήτηση για αυτού του τύπου την τεχνολογία, η ευρύτερη εφαρμογή στη ναυτιλία θα μπορεί να την καταστήσει βιώσιμη (ABS, Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance, 2021).



## 5. Μέθοδοι CFD, EFD και μέθοδοι κλίμακας για την αξιολόγηση και επιλογή των ESD

### 5.1 Μέθοδοι CFD για ESD

Η μέθοδος CFD χρησιμοποιεί υπολογιστικά μοντέλα ώστε να αναλύσει τη συμπεριφορά και την επίδραση διάφορων ναυπηγικών συστημάτων του πλοίου με τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών. Σε σύγκριση με τα παραδοσιακά μοντέλα δοκιμών και τη θεωρητική έρευνα πάνω στα ESD, η μέθοδος CFD μπορεί να μειώσει το χρόνο σχεδίασης και κατ’επέκταση το κόστος.

Από το 2010, η περισσότερη έρευνα CFD πάνω στα ESD έχει διεξαχθεί για να καταστήσει το μηχανισμό της εξοικονόμησης ενέργειας ξεκάθαρο, και από εκεί και πέρα να ακολουθήσουν καλύτερες δομικές σχεδιάσεις. Αυτές περιλαμβάνουν συστήματα βελτιστοποίησης ροής, συστήματα ανάκτησης ενέργειας, νέες προπέλες κ.α..

Υπάρχουν πολλά εμπορικά πακέτα λογισμικού (π.χ. FLUENT) και ελεύθερες εφαρμογές λογισμικού (π.χ. OpenFOAM) που μπορούν να εφαρμοστούν για την αξιολόγηση των ESD. Επιπρόσθετα, πολλά πανεπιστήμια και ιδρύματα έχουν αναπτύξει τα δικά τους προγράμματα στο πλαίσιο της αξιολόγησης των ESD.

Οι υπολογισμοί μοντέλων πλοίου με CFD συχνά απαιτούν χωροταξικά, την κατάλληλη τοποθέτηση του εκάστοτε συστήματος στην περιοχή του πλοίου. Ειδικά για μία μερικώς βυθισμένη προπέλα, η περιστροφή των πτερυγίων σε μικρότερα βυθίσματα θα πρέπει να καθοριστεί ακριβώς, έτσι ώστε ο συνδυασμός με το ESD να αποδώσει όπως έχει σχεδιαστεί και μελετηθεί.

Για να αποσαφηνιστεί η επίδραση του εκάστοτε ESD, είναι απαραίτητο να εξεταστεί και να μελετηθεί ως ένα ενιαίο σύστημα με το τμήμα του πλοίου που τοποθετείται. Για παράδειγμα η εφαρμογή του αγωγού πριν την προπέλα θα πρέπει να μελετηθεί ως ενιαίο τμήμα πρύμνης του πλοίου, και όχι ως ένα μεμονωμένο σύστημα. Στην αριθμητική προσομοίωση των ESD χρησιμοποιούνται μέθοδοι που βασίζονται στην εκτιμώμενη θεωρία ροής των ρευστών (flow theory) και μέθοδοι που βασίζονται στη μηχανική ιξώδους των ρευστών (viscous fluid mechanics).

Τα τελευταία χρόνια η μέθοδος CFD που βασίζεται στη μηχανική ιξώδους των ρευστών (viscous fluid mechanics), έχει αναπτυχθεί ραγδαία, παράλληλα με την ανάπτυξη των δυνατοτήτων των υπολογιστών. Με τη χρήση αυτής της μεθόδου λαμβάνεται υπόψη το ιξώδες και μπορεί καλύτερα να καθοριστεί το πεδίο των ομόρρων των συστημάτων. Έχουν αναπτυχθεί και χρησιμοποιούνται ευρέως οι μέθοδοι body force, sliding mesh, multi-reference και overset grid.

Η μέθοδος body force<sup>4</sup> έχει υψηλή ακρίβεια υπολογισμών. Με τη χρήση αυτής της μεθόδου έχει μελετηθεί για παράδειγμα η επίδραση ενός συστήματος Propeller Boss Cap Fins (PBCF) στην προπέλα και βγήκε το συμπέρασμα ότι μπορούν να περιοριστούν οι δίνες στην πλύμνη της.

---

<sup>4</sup> Η Body Force Method (BFM) είναι μια αριθμητική μέθοδος ανάλυσης τάσεων που προκαλούνται λόγω μιας απομονωμένης σημειακής δύναμης που ενεργεί σε ένα άπειρο ελαστικό σώμα (Yong, 2022).



Η μέθοδος sliding mesh συχνά χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό και τη μελέτη ασταθούς ροής (unsteady flow) και απαιτεί μεγάλη υπολογιστική δυνατότητα. Κατά την εφαρμογή αυτής της μεθόδου, ο υπολογισμός εκτελείται σε δύο τομείς. Ο πρώτος περιλαμβάνει την προπέλα που περιστρέφεται, ενώ ο δεύτερος τομέας υπολογίζει το σύστημα στατικά. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι και στις δύο επιφάνειες η ροή πρέπει να είναι όμοια, αλλιώς η διαδικασία υπολογισμού των μεγεθών θα αποκλίνει. Έχει εφαρμοστεί για την αριθμητική προσομοίωση της απόδοσης ενός συστήματος αντίστροφα περιστρεφόμενης προπέλας (Contra Rotating Propeller (CPR)) στην ανοιχτή θάλασσα.

Με τη χρήση της μεθόδου multi-reference (MRF) μελετάται το σύστημα στατικά. Έχει το πλεονέκτημα της γρήγορης προσέγγισης της ταχύτητας, αλλά παρουσιάζει χαμηλότερη ακρίβεια σε σχέση με τη μέθοδο sliding mesh. Έχει εφαρμοστεί σε περιπτώσεις για να προσομοιάσει την περιστροφή των συμβατικών προπελών και το μηχανισμό πρόωσης με hydro-jet.

Η τεχνολογία της δυναμικής overset grid ενδείκνυται για τον υπολογισμό σύνθετων συστημάτων. Με τη μέθοδο αυτή μπορεί να εκτελεστεί καλύτερα η μελέτη δύο διαφορετικών συστημάτων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, όπως για παράδειγμα μία προπέλα και ένα πηδάλιο.

Καθώς το πεδίο της ροής των ESD είναι συνήθως σύνθετο, απαιτούνται κατάλληλες μέθοδοι αριθμητικής προσομοίωσης του στροβιλισμού (turbulence). Οι πιθανές αριθμητικές τεχνικές είναι, η απευθείας αριθμητική προσομοίωση (Direct Numerical Simulation (DNS)), η Reynolds Average Navier-Stokes (RANS) και η Large Eddy Simulation (LES) (Online, 2022). Η μέθοδος DNS σπάνια χρησιμοποιείται για την προσομοίωση ESD λόγω της απαίτησης μεγάλης υπολογιστικής ισχύος, ενώ η μέθοδος RANS χρησιμοποιείται συχνότερα. Στην πράξη έχει χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του πεδίου των ομμόρων ενός αγωγού εξισορρόπησης τους (WED) τοποθετημένου σε φορτηγό πλοίο. Επιπρόσθετα, αναλύθηκε και η απόδοση της ώσης της προπέλας σε εύρος ταχυτήτων από 10-16 knots. Στην περίπτωση αυτή τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το συγκεκριμένο σύστημα μπορεί να βελτιώσει την πρόωση και να μειώσει την αντίσταση τριβής, εάν ένα πλοίο έχει μεγάλο συντελεστή γάστρας ( $C_b$ ).

Η μέθοδος LES χρησιμοποιείται για την προσομοίωση των στροβιλισμών μικρής κλίμακας, σε στροβιλισμούς μεγάλης κλίμακας. Σε αυτή την περίπτωση, η εξίσωση RANS χρησιμοποιεί μέσο όρο ή φιλτράρει τις δίνες (vortices) μικρής κλίμακας από το πεδίο ροής και εξάγεται η εξίσωση που ικανοποιεί τους στροβιλισμούς (eddy) σε κανονική κλίμακα. Με τη χρήση αυτής της μεθόδου έχει διερευνηθεί η αλληλεπίδραση προπέλας γάστρας ενός πλοίου μονής προπέλας σε κλίμακα μοντέλου, με την εγκατάσταση ενός στάτορα Pre-swirl. Η ανάλυση επικεντρώθηκε στην ασταθή επίδραση των ομόρων στην προπέλα και πώς το σύστημα επηρεάζεται από την εγκατάσταση σταθερών πτερυγίων στο πάνω μέρος της ροής νερού προς αυτή.

Κατά την σύγκριση RANS και LES φαίνεται ότι η πρώτη είναι πιο αδύναμη στην προσομοίωση ασταθούς στροβιλισμού και η LES χρειάζεται μεγάλο αριθμό πλεγμάτων (grids).



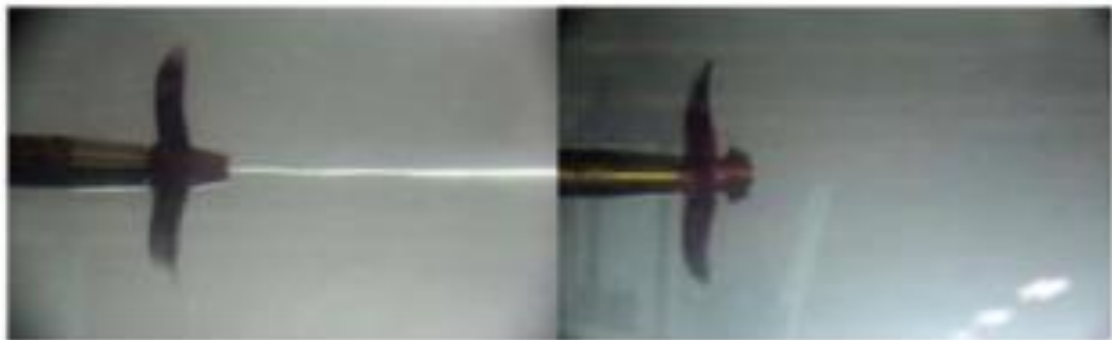
Ωστόσο, ένα ακόμα σημείο προς περαιτέρω διερεύνηση παραμένει η επίδραση της κλίμακας, αφού έως τώρα, δεν υφίσταται αναγνωρισμένη διαδικασία για την εξέταση της στα ESD (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2017).

## 5.2 Μέθοδοι EFD (Experimental Fluid Dynamic) για ESD

Από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2013 που τέθηκε σε ισχύ ο δείκτης EEDI, οι πειραματικές μέθοδοι έχουν αξιολογηθεί ως οι πιο αξιόπιστες και ακριβείς για την εκτίμηση της απόδοσης των ESD. Οι δοκιμές μοντέλου είναι περιορισμένες για τη σύγκριση μελετών με/χωρίς ESD εξαιτίας της έλλειψης δεδομένων πλήρους κλίμακας. Για παράδειγμα, ενώ απαιτούνται υποδομές για τη διεξαγωγή δοκιμής ενός στάτορα προ-δίνης με αγωγό (π.χ. Becker Mewis Duct<sup>®</sup>), το ομοίωμα της πρύμνης και το σώμα του αγωγού εγκαθίστανται ξεχωριστά. Έπειτα, οι συμβατικές και προωστήριες δοκιμές διεξάγονται με και χωρίς το ESD αντίστοιχα.

Γνωστοί μηχανισμοί εξοικονόμησης ενέργειας για τη βελτίωση της απόδοσης της πρόωσης άλλαξαν τη δομή των ομόρρων και μείωσαν τις απώλειες της περιστροφικής ενέργειας με την απορρόφηση των δινών στο κέντρο της προπέλας. Έπειτα, οι σχεδιαστές του πλοίου προσπάθησαν να βελτιστοποιήσουν τα συστήματα ESD μέσω των τυπικών δοκιμών.

Έχει μελετηθεί η απόδοση της πλύμνης προπέλας με πτερύγια (PBCF) με τη χρήση CFD και μοντέλων δοκιμών, δοκιμές εν πλω και ανάλυση δεδομένων λειτουργίας. Ωστόσο, είναι δύσκολο να επιτευχθεί ακριβής υπολογισμός της πραγματικής εκτίμησης της απόδοσης εξαιτίας της επίδρασης της κλίμακας. Το PBCF παρείχε μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας σε πλήρη κλίμακα από ό,τι σε κλίμακα μοντέλου. Αν και τα δεδομένα λειτουργίας είναι ανεπαρκή για αξιόπιστη ανάλυση, η εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να ανέλθει έως 2%, όπως διαπιστώθηκε από τις δοκιμές εν πλω.



Εικόνα 43. Απορρόφηση δινών πλύμνης με ένα PBCF (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2017)

Πλέον η χρήση της τεχνολογίας αντιγραφής 3D χρησιμοποιείται ευρέως στη βιομηχανία των ESD, μειώνοντας το κόστος κατασκευής μοντέλου, αλλά και εξοικονομώντας χρόνο συγκριτικά με τις παραδοσιακές μεθόδους. Ωστόσο, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι το υλικό που θα κατασκευαστεί το μοντέλο 3D δεν θα πρέπει να απορροφά νερό και, ως εκ τούτου, να διαστέλλεται. Επίσης, στα μοντέλα με πτερύγια, όπως το PBCF και στους στάτορες Pre-Swirl, θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στις άκρες των πτερυγίων προς αποφυγή παραμορφώσεων.





Εικόνα 44. Διάφοροι τύποι PBCF (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2021)

Στην κατηγορία ESD μετά την προπέλα ανήκουν και τα συστήματα πηδαλίου. Στο πλαίσιο αυτό έχει αναπτυχθεί με τη χρήση EFD ένα νέο σύστημα διπλού πηδαλίου, το λεγόμενο 'Gate Rudder', με ασύμμετρο τομέα πτερυγίων πίσω από την προπέλα. Το σύστημα αυτό δημιουργεί το φαινόμενο του αγωγού, με μία εκτιμώμενη εξοικονόμησης ενέργειας της τάξης του 7-8%.



Εικόνα 45. Περίπτωση πηδαλίου τύπου 'Gate Rudder' (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2017) (Sasaki N, 2016)

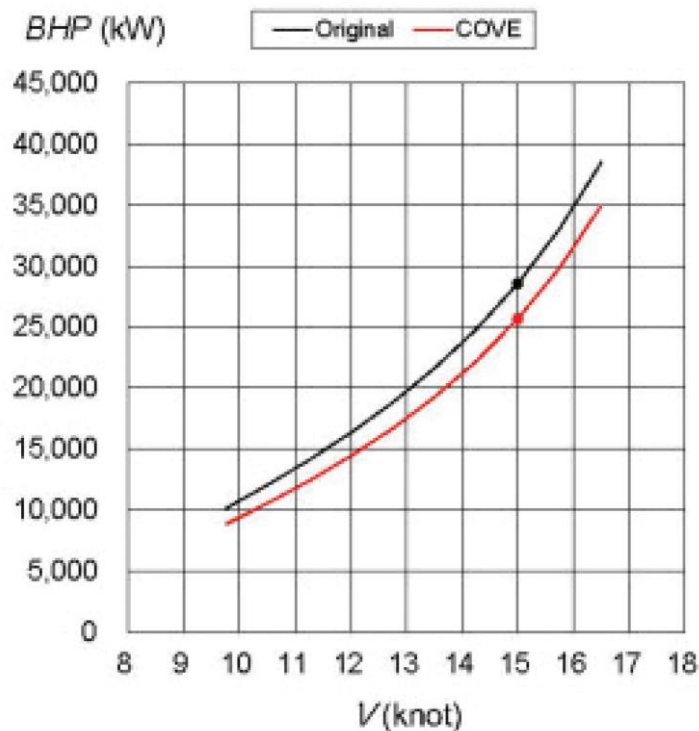
Κατά τη μελέτη πάνω σε δεξαμενόπλοιο KVLCC2 με εγκατάσταση πτερυγίων σε βολβό πηδαλίου με τις μεθόδους EFD και CFD και μετά τη βελτιστοποίηση της γωνίας του πτερυγίου, εξήχθη το συμπέρασμα ότι η εξοικονόμηση ενέργειας μπορεί να ανέλθει στο 2% (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2021).



Εικόνα 46. Βολβός πηδαλίου με πτερύγιο (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2017)



Με σκοπό τη μείωση της προστιθέμενης αντίστασης κυματισμού, έχουν γίνει πολλές προσπάθειες βελτιστοποίησης των μορφών της πλώρης. Έτσι, αναπτύχθηκε από τους Sakurada et al. μία νέα μορφή γάστρας, η επονομαζόμενη COVE. Κατά τις δοκιμές σε δεξαμενή μοντέλων διαπιστώθηκε η αντιστοιχία της επιπρόσθετης αντίστασης και της κίνησης του πλοίου στα κύματα της πλώρης. Κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι με την εφαρμογή πλώρης της μορφής COVE μειώνεται η επιπρόσθετη αντίσταση κυματισμού κατά περίπου 40% συγκριτικά με την αρχική μορφή, και ότι η COVE μπορεί να μειώσει την απαιτούμενη ισχύ περίπου κατά 10% στα 6 Bf με διεύθυνση ανέμου και κύματα από την πλώρη στους 15 kns ταχύτητα (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2017).



Εικόνα 47. Η συσχέτιση της υποδύναμης και της ταχύτητας πλοίου σε κατάσταση θαλάσσης BF6 (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2017)

Πολλοί ερευνητές επικεντρώνονται στην εξοικονόμηση ενέργειας σε ήρεμη θάλασσα, ενώ το πραγματικό πλοίο πλέει συνήθως σε καταστάσεις κυματισμού και, συνεπώς, οι τεχνολογίες μείωσης αντίστασης κυματισμού έχουν μεγαλύτερη εφαρμογή (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2017).

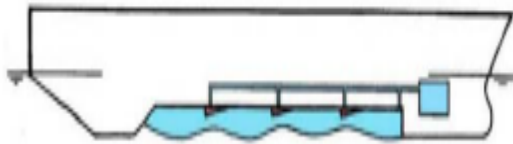
Η εγκατάσταση πτερύγιων στην πλώρη σε ένα μοντέλο πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, έδειξε εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης του 4,9% μέσω δοκιμών μοντέλου στον κυματισμό (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2021).





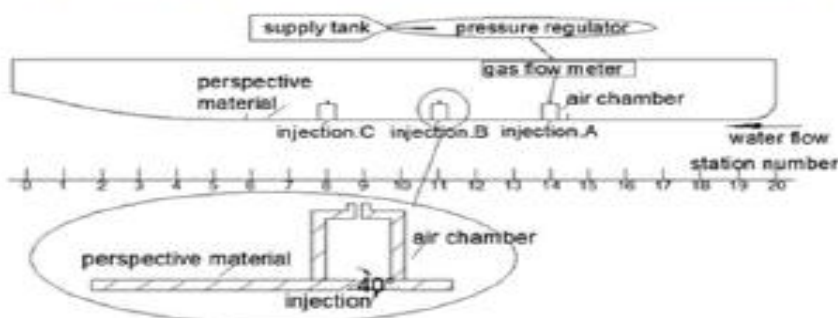
Εικόνα 48. Μοντέλο πλοίου με ενσωματωμένο περύγιο στην πλώρη (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2021)

Η μείωση της αντίστασης της γάστρας με το σύστημα Air Lubrication είναι επίσης μία ελπιδοφόρα μέθοδος εξοικονόμησης ενέργειας. Οι φυσαλίδες αέρα και το σύστημα air cavity έχει δοκιμαστεί σε καταστάσεις πλήρους κλίμακας. Έχει μελετηθεί το σύστημα ALS Silverstream<sup>®</sup> με τη χρήση δεξαμενής δοκιμών, δοκιμών πλήρους κλίμακας εν πλω και μακροπρόθεσμης παρακολούθησης απόδοσης, όπου και επετεύχθη εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης του 4%, και σε συγκεκριμένους τύπους πλοίων ακόμα και 8%. Στο ίδιο πλαίσιο έχει αναπτυχθεί μία μέθοδος με την ονομασία Air Cavity Technology, όπου μετρήθηκε μείωση της αντίστασης της τάξης του 15-25%.



Εικόνα 49. Διαμόρφωση κάτω μέρους γάστρας για σύστημα κοιλότητας αέρα και φωτογραφία από μοντέλο δεξαμενόπλοιου (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2021)

Κατά τη διεξαγωγή δοκιμών μοντέλου συστήματος λίπανσης της γάστρας με αέρα σε ένα φορηγό πλοίο εκτοπίσματος 20.000 DWT, με συνδυασμούς διαφορετικών τοποθετήσεων των προστομίων που εγχύνουν τον αέρα, διαφορετικές ταχύτητες και διαφορετικές τιμές ροής της έγχυσης, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέγιστη μείωση της αντίστασης τριβής μπορεί να φτάσει το 15,5% κατά την ταχύτητα σχεδίασης (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2021).



Εικόνα 50. Φωτογραφία από μοντέλο και το σχηματικό διάγραμμα του συστήματος ψεκασμού με αέρα (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2021)

Από πλευράς αποδοτικότητας τα πιο διαδεμένα μέτρα που έχουν υιοθετηθεί είναι οι στάτορες προ-δίνης, οι βελτιστοποιημένες προπέλες και τα πηδάλια με τα στρεβλωμένα άκρα. Η επιπρόσθετη αντίσταση από την εφαρμογή τους ισούται περίπου με το άθροισμα της αντίστασης των επιμέρους συστημάτων, ενώ η εξοικονόμηση που προκύπτει είναι λιγότερη από το άθροισμα της εξοικονόμησης που προκύπτει από την εφαρμογή των επιμέρους συστημάτων. Από πλευράς συνολικού οφέλους διαπιστώνεται ότι δεν είναι τόσο λίγο, πιθανόν λόγω του ότι η επίδραση του στάτορα προ-δίνης δεν επικαλύπτει την επίδραση της βελτιστοποιημένης προπέλας κατά τη λήψη δεδομένων από πειράματα σε πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (Joon-Hyoung Lee, 2017).

### 5.3 Δεδομένα πλήρους κλίμακας

Παρόλο που έχουν σχεδιαστεί πολλά συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας και έχουν βελτιστοποιηθεί και δοκιμαστεί σε δοκιμές μοντέλου, οι πλοιοκτήτες και οι διαχειριστές πλοίων εξακολουθούν να έχουν την αμφιβολία πώς αυτά τα συστήματα αποδίδουν στην πράξη.

Αρχικά, οι αριθμοί Reynolds είναι πολύ μεγαλύτεροι σε πλήρη κλίμακα και ο παράγοντας κλίμακα στα οριακά στρώματα είναι δύσκολο να εκτιμηθεί. Χωροταξικά το σημείο τοποθέτησης ενός συστήματος ESD παίζει πολύ σημαντικό ρόλο και κατά τη μελέτη επίδρασης του σε κλίμακα μοντέλου να μην εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα εξαιτίας του σχετικά χαμηλού αριθμού Reynolds σε σχέση με την πλήρη κλίμακα. Το κλάσμα των ομώρων θα είναι μικρότερο, και, επομένως, η συμπεριφορά του ESD θα διαφέρει.

Επιπρόσθετα, δεν είναι ξεκάθαρο ποια τιμή θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ως παράγοντας διόρθωσης επιφανειακής τριβής (Skin Friction Correction Factor) για μία



## Ψώρρας Νικόλαος, ‘Ναυπηγικά Συστήματα Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Πλοία’

γάστρα που έχει προσαρμοστεί ένα ESD. Ένα ακόμα ζήτημα είναι ότι για τα συστήματα Pre-Swirl, όπως ο αγωγός εξισορρόπησης απόνερων (WED) και τα πτερύγια πριν την προπέλα, δεν είναι εύκολο να εκτελεστούν δοκιμές στην ανοιχτή θάλασσα. Από την άλλη, συστήματα Post-Swirl, όπως τα πηδάλια με στρεβλωμένα άκρα, επηρεάζουν την απόδοση της προπέλας και δεν μπορούν να θεωρηθούν ως προσθήκες και τι επίδραση θα έχουν στην εξοικονόμηση κατά τις δοκιμές στην ανοιχτή θάλασσα.

Στον Πίνακα 7 παρουσιάζονται δεδομένα πλήρους κλίμακας που βρεθήκαν από τη βιβλιογραφία. Ο αριθμός των μελετών είναι πολύ μικρός εξαιτίας του γεγονότος ότι τα δεδομένα λειτουργίας των πλοίων δεν κοινοποιούνται εύκολα λόγω του ανταγωνισμού των ναυτιλιακών εταιρειών (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2017).

ESM	Ship type	Full scale data	Gain	Reference
Hub fin	Tanker	Sea trial	3.5-3.8%	Hans Richard Hansen et al. (2011)
Hub fin	Car ferry	Operation data	2.8%	Kenta Katayama et al. (2015)
Hub fin	Gas carrier	Sea trial (Operation data)	1.5-2.0%	Woojin Kim et al. (2016)
Fin, rudder bulb	Bulk carrier	Sea trial	7.4%	Hee Dong Lee et al. (2015)
Pre-swirl stator	Bulk carrier	Sea trial	7%	Yan Xing-Kaeding et al. (2015)
Air lubrication	Tanker	Sea trial	3.8,4.3%	Noah Silberschmidt et al. (2015)
-	ConRo-ship	PIV	-	Andre Kleinwächter et al. (2015)

Πίνακας 7. Λίστα δεδομένων από πλοία πλήρους κλίμακας (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2017)

Για το PBCF υπάρχουν περισσότερες μελέτες που έχουν εκπονηθεί ώστε να εξεταστεί η επίδραση του συγκεκριμένου συστήματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι είναι από τα πιο εύκολα εφαρμόσιμα συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας και μπορεί να τοποθετηθεί και ως μετασκευή σε ήδη υπάρχον πλοίο. Η εταιρεία Teekay εγκατέστησε ένα PBCF σε ένα δεξαμενόπλοιο Aframax για χρονικό διάστημα τριών ημερών. Επικυρώθηκε η επίδραση του συστήματος μέσω δοκιμών εν πλω, πριν και μετά την τοποθέτηση, και υπολογίστηκε η εξοικονόμηση ενέργειας στο 4%.

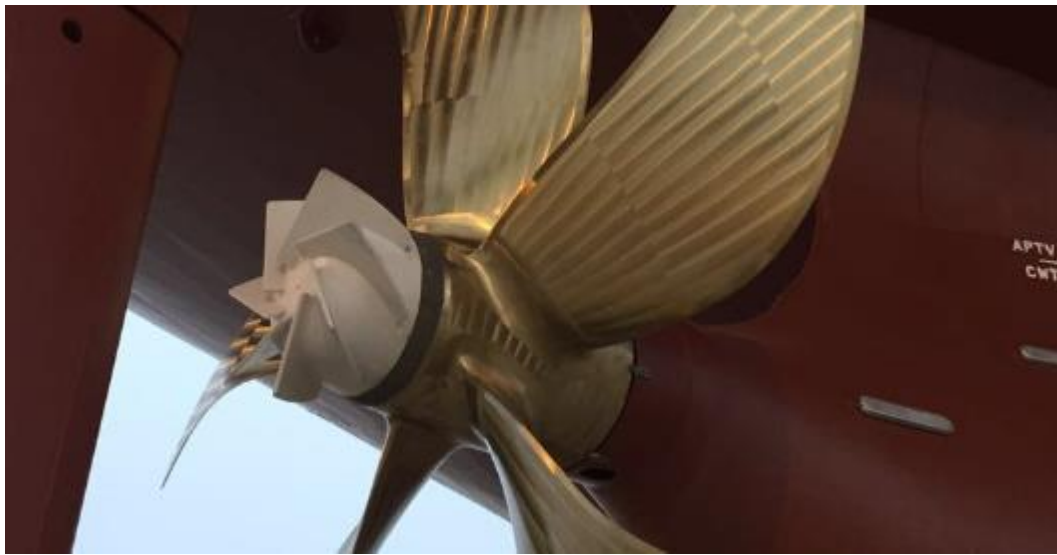


Ψώρρας Νικόλαος,  
‘Ναυπηγικά Συστήματα Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Πλοία’



Εικόνα 51. Εφαρμογή ενός PBCF (Propulsion Committee, 2011-2014)

Η Nakashima Propeller Co., Ltd επικύρωσε το δικό της σύστημα PBCF, το λεγόμενο ECO-Cap, με την εγκατάσταση του σε ένα πλοίο μεταφοράς αυτοκινήτων. Έγιναν μετρήσεις πριν και μετά την εγκατάσταση και διαπιστώθηκε μία εξοικονόμηση της τάξης του 2,8%.



Εικόνα 52. ECO-Cap προσαρμοσμένο σε πραγματικό πλοίο (Yoshihisa Okada, 2017)

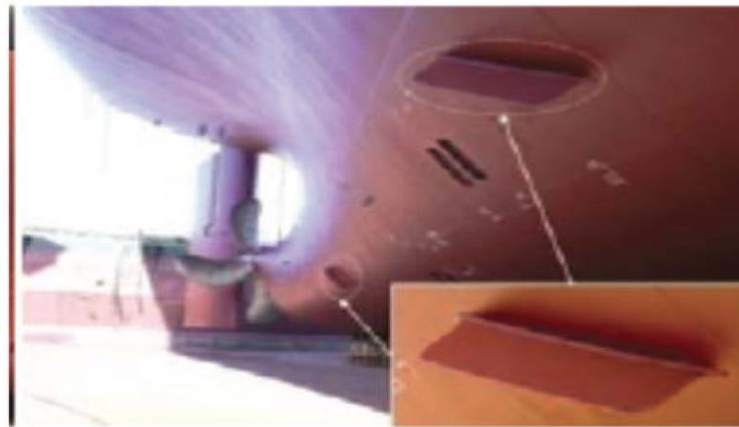
Σε μελέτες που έχουν διεξαχθεί παρατηρήθηκε αύξηση της αποδοτικότητας κατά περίπου 1,2% σε δοκιμές μοντέλου. Ωστόσο, κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων σε δοκιμές πραγματικής κλίμακας διαπιστώθηκε ότι η βελτίωση ήταν από 2 έως 3 φορές μεγαλύτερη σε σχέση με τις δοκιμές μοντέλου (Yoshihisa Okada, 2017).

Πάνω στη μελέτη επίδρασης ενός συστήματος Pre-Swirl (γνωστός ως Mewis duct) με πραγματικά δεδομένα, έχει χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα παρακολούθησης της απόδοσης του και της εξοικονόμησης καυσίμου σε ένα δεξαμενόπλοιο. Χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα LAROS για τη συλλογή δεδομένων για τρία έτη, την επεξεργασία και την ανάλυσή τους, καλύπτοντας μία περίοδο πριν και μετά την εγκατάσταση του αγωγού. Με τη σύγκριση με ένα όμοιο πλοίο χωρίς τέτοιο σύστημα,



αλλά με παρόμοιο ιστορικό καθαρισμού γάστρας και προπέλας, εξήχθη το συμπέρασμα ότι το ESD οδήγησε στην εξοικονόμηση κατανάλωσης καυσίμου κατά 3,5-5%.

Η Samsung Heavy Industries ανέπτυξε το πτερύγιο SAVER, ένα απλής μορφής πτερύγιο που τοποθετείται στα ανοίγματα της γάστρας, που χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή θάλασσας που εξυπηρετεί συστήματα του πλοίου. Για την επικύρωση των αποτελεσμάτων απόδοσης τοποθετήθηκαν σε δύο φορτηγά πλοία με και χωρίς αυτά τα πτερύγια. Τα αποτελέσματα των δοκιμών εν πλω έδειξαν μία εξοικονόμηση της τάξης του 7,4%.



Εικόνα 53. SAVER FIN (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2017)

Η Γερμανική HSVA έχει διεξάγει την υδροδυναμική σχεδίαση ενός στάτορα προδίνης για ένα φορτηγό πλοίο. Μετά την εκτέλεση εκτεταμένων δοκιμών εν πλω σε αυτό το πλοίο με και χωρίς τον στάτορα, τα αποτελέσματα έδειξαν μία μείωση ισχύος της τάξης του 7% σε αντίστοιχες ταχύτητες.

Το ALS Silverstream System εγκαταστάθηκε σε φορτηγό πλοίο 40.000 DWT. Η καθαρή εξοικονόμηση ισχύος της δοκιμής υπολογίστηκε περίπου 3,8%, σε κατάσταση πλήρους φόρτωσης και 4,3% σε κατάσταση φόρτωσης με έρμα (The Specialist Committee on Energy Saving Methods, 2017).



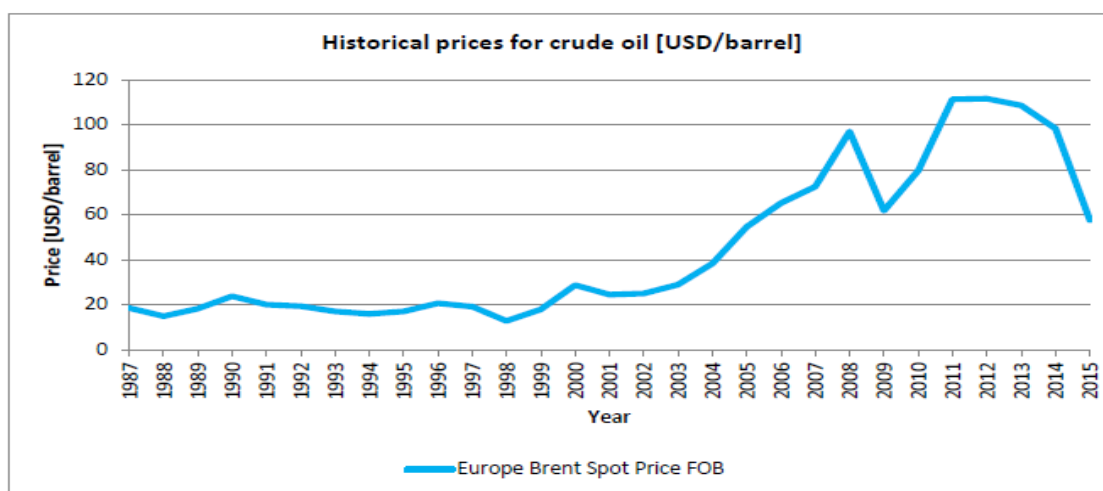


## 6. Υπολογισμός MACC για ESD

Απώτερος σκοπός υιοθέτησης των μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας είναι η μείωση κατανάλωσης καυσίμου, και κατ’ επέκταση οι εκπομπές καυσαερίων. Η ενεργειακή αποδοτικότητα μπορεί να καθοριστεί ως η συσχέτιση ανάμεσα στο όφελος που επιτυγχάνεται από την εφαρμογή ενός συστήματος και την προσδιδόμενη ενέργεια. Παρόλο που τα πλοία αποτελούν το πιο αποδοτικό μέσο μεταφοράς, η 2<sup>η</sup> Μελέτη του IMO για τις εκπομπές GHG (Second International Maritime Organization (IMO) GHG Study 2009) καθόρισε ότι υπάρχει μεγάλη προοπτική για περαιτέρω βελτιώσεις ενεργειακής αποδοτικότητας, κυρίως με την χρήση των ήδη υπαρχουσών τεχνολογιών.

Οι καμπύλες βελτίωσης οριακού κόστους (Marginal Abatement Cost Curve (MACC)) σκοπεύουν να παρουσιάσουν την συνεισφορά επιμέρους μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας στο πλοίο. Παρέχουν έναν απλό τρόπο παρουσίασης της μείωσης εκπομπών GHG σε σχέση με τις προδιαγραφές σχεδίασης, τις τεχνολογίες που μπορούν να τοποθετηθούν ως μετασκευή και τα λειτουργικά μέτρα που βελτιώνουν την ενεργειακή αποδοτικότητα του πλοίου, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος εγκατάστασής τους. Οι καμπύλες MAC είναι σημαντικό να βασίζονται σε δεδομένα που προκύπτουν από τεκμηριωμένα στοιχεία, ώστε να μπορούν να είναι όσο το δυνατόν ακριβέστερες και να αποτελούν ένα σημαντικό εργαλείο για λήψη της απόφασης υιοθέτησης κάποιου μέτρου (Tran, 2017).

Η σημασία της ενεργειακής αποδοτικότητας της ναυτιλίας ιστορικά έχει συνδεθεί με την τιμή πετρελαίου, η οποία έχει άμεση επίδραση στην τιμή καυσίμου των πλοίων. Στην Εικόνα 54 φαίνεται η αύξηση της τιμής καυσίμου στις αρχές της δεκαετίας του 2000. Παρόλο που οι τιμές καυσίμου είχαν πτωτική τάση έως το 2015, υπάρχει μία συνεχιζόμενη προσπάθεια η λειτουργία του πλοίου να γίνει αποδοτικότερη λόγω της περιβαλλοντικής ανησυχίας και της υιοθέτησης αυστηρότερων κανονισμών από τοπικούς και παγκόσμιους φορείς (DNV-GL, 2016). Στις 14 Φεβρουαρίου 2022 οι τιμές καυσίμου κινήθηκαν περίπου στα 540\$/ton για το HSFO-380, στα 700\$/ton για το VLSO 0.5%, στα 800\$/ton για το ULSFO 0.1% και στα 830\$/ton για MGO. Η τιμή εξαρτάται και από το λιμένα ανεφοδιασμού του πλοίου (PBT International NV, 2022).



Εικόνα 54. Τιμές αργού πετρελαίου (DNV-GL, 2016)



Ψώρρας Νικόλαος,  
 'Ναυπηγικά Συστήματα Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Πλοία'

Στο Κεφάλαιο αυτό θα γίνει μία περιγραφή του εργαλείου EE APPRAISAL TOOL FOR IMO (DNV-GL , 2016), του νηογνώμονα DNV-GL, ο οποίος περιλαμβάνει τα διαφορετικά ESD που μπορούν να εφαρμοστούν σε διαφορετικούς τύπους πλοίων, συνυπολογίζοντας το κόστος εγκατάστασης και την απόσβεση της επένδυσης. Καθοριστικός παράγοντας στη λήψη απόφασης αποτελεί η υφιστάμενη τιμή του καυσίμου, αλλά και μία όσο το δυνατό ρεαλιστική εκτίμηση της για το μέλλον. Ο σκοπός της δημιουργίας του εργαλείου είναι να παρουσιάσει τα σχετιζόμενα με τη ναυτιλία ESD, διερευνώντας το κόστος και την εκτιμώμενη εξοικονόμηση, και γενικά την εφικτότητα εφαρμογής τους για κάθε τύπο πλοίου.

Το εργαλείο περιλαμβάνει τους τύπους και τις κατηγορίες πλοίων που φαίνονται στον Πίνακα 8. Τα πλοία χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με τον τύπο και το μέγεθος, ομαδοποιώντας όσα έχουν παρόμοια τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά. Λόγω των χαρακτηριστικών σχεδίασης των πλοίων μεταφοράς γενικού φορτίου χρειάζεται να γίνει περιγραφή τόσο σε DWT, όσο και στη δυνατότητα μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Τα πλοία Ro-Ro περιγράφονται σε μέτρα (m), ενώ τα πλοία μεταφοράς επιβατών με την ταχύτητα λειτουργίας. Σύμφωνα με την MEPC.245(66), για τους υπολογισμούς του EEDI χρησιμοποιείται το DWT και το GT για τα πλοία Ro-Ro και μεταφοράς επιβατών αντίστοιχα.

Segment / Size	DWT = Dead Weight Tonnes					
Crude oil tankers	< 10 000	10 000 - 59 999	60 000 - 79 999	80 000 - 119 999	120 000 - 199 999	> 200 000
Product tankers	< 5 000	5 000 - 9 999	10 000 - 19 999	20 000 - 59 999	> 60 000	
Chemical tankers	< 5 000	5 000 - 9 999	10 000 - 19 999	> 20 000		
Dry bulk carriers	< 10 000	10 000 - 34 999	35 000 - 59 999	60 000 - 99 999	100 000 - 199 999	> 200 000
	DWT = Dead Weight Tonnes / TEU = Twenty-foot Equivalent Unit					
General cargo vessels	< 5 000 < 100	5 000 - 9 999 < 100	>10 000 < 100	< 5 000 ≥ 100	5 000 - 9 999 ≥ 100	> 10 000 ≥ 100
	TEU = Twenty-foot Equivalent Unit					
Container ships	< 1 000	1 000 - 1 999	2 000 - 2 999	3 000 - 4 999	5 000 - 7 999	> 8 000
	LM = Lane Meters					
Ro-Ro ships	< 2 000	≥ 2 000				
	Knots					
Passenger vessels	≥ 25	< 25				
Ro-Pax vessels	≥ 25	< 25				
	GT = Gross Tonnes					
Cruise vessels	< 2 000	2 000 - 9 999	10 000 - 59 999	60 000 - 99 999	> 100 000	

Πίνακας 8. Τομείς πλοίων και κατηγορίες που περιλαμβάνονται στο μοντέλο (DNV-GL , 2016)



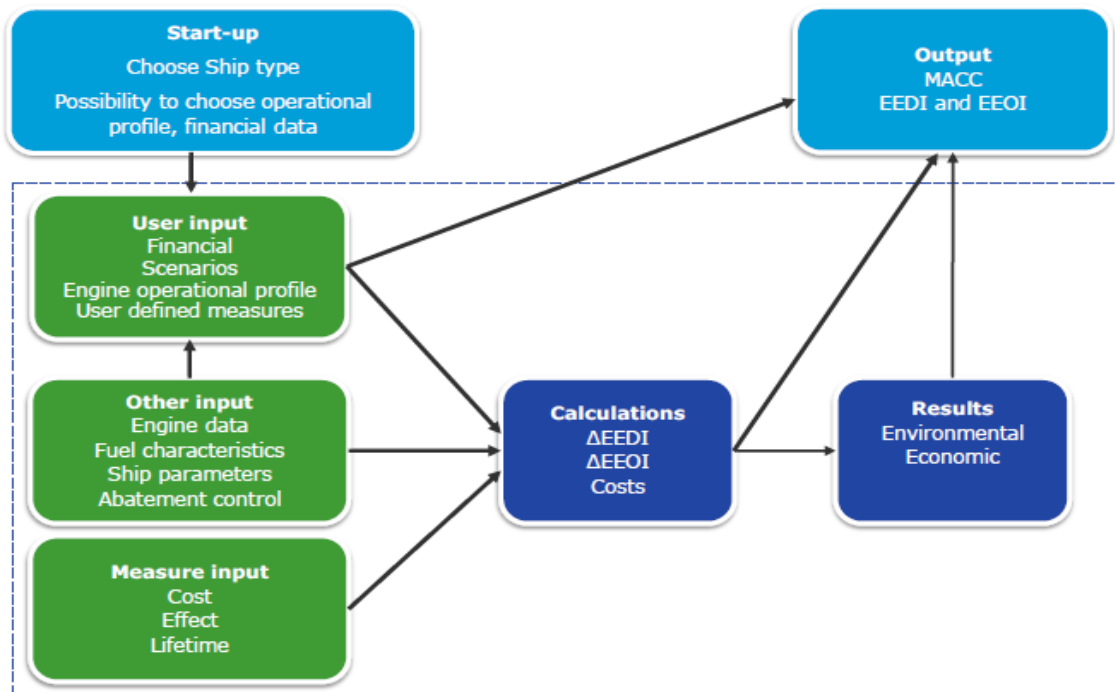


Το εργαλείο EE APPRAISAL TOOL FOR IMO περιλαμβάνει μέτρα που φαίνονται στον Πίνακα 9.

Measure category	Measure description	Measure names as described in tools
Alternative Energy Source	Kite	<i>Kite</i>
	Fixed Sails or Wings	<i>Fixed sails or wings</i>
	Solar Panels	<i>Solar Panel</i>
Technical Measures (Main Engine)	Electronic Engine Control	<i>Electronic engine control</i>
	Waste Heat Recovery	<i>Waste heat recovery</i>
	Hull Coating	<i>Hull coating condition</i>
	Air Cavity Lubrication	<i>Air cavity lubrication</i>
	Contra-Rotating Propeller	<i>Contra-rotating propeller</i>
	Propulsion Efficiency Devices	<i>Propulsion efficiency devices</i>
Technical Measures (Aux Engine)	Frequency Converters	<i>Frequency converters</i>
	Exhaust Gas Boilers	<i>EGB on AE</i>
	Efficient Lighting System	<i>Light systems</i>
Operational Improvements	Trim/Draft Optimization	<i>Trim&amp;draft optimisation</i>
	Weather Routing	<i>Weather routing</i>
	Voyage Execution	<i>Voyage execution</i>
	Steam Plant Improvements	<i>Steam plant op impr</i>
	Propeller Condition	<i>Propeller efficiency</i>

Πίνακας 9. Κατάλογος μέτρων που εκτιμώνται από το λογισμικό (DNV-GL , 2016)

Το μοντέλο αναπτύχθηκε στο MS Excel και η περιγραφή του παρουσιάζεται στην Εικόνα 55.



Εικόνα 55. Περιγραφή μοντέλου (DNV-GL , 2016)

Το εργαλείο διαθέτει δύο λειτουργίες για τα δεδομένα που εισάγει ο χρήστης στο αρχικό περιβάλλον, το ‘Normal’ και το ‘Advanced’. Στο ‘Normal’, επιλέγεται ο τύπος του πλοίου και το μέγεθος του και γίνονται οι υπολογισμοί με ένα σετ βασικών μέτρων,



κατανάλωσης καυσίμου, μεταφορικού έργου και οικονομικών δεδομένων. Στη λειτουργία ‘Advanced’ αυτοί οι τύποι δεδομένων μπορούν να συγκεκριμενοποιηθούν. Αυτή η δομή παρέχει την ευελιξία στους χρήστες να το προσαρμόσουν στις δικές τους ανάγκες και πολυπλοκότητα. Η λειτουργία ‘Normal’ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την απλή εξέταση των μέτρων, ενώ η ‘Advanced’ για μεγαλύτερη ευαισθησία ανάλυσης.

Το εργαλείο περιλαμβάνει τρεις βάσεις δεδομένων, την καταχώρηση του χρήστη, την καταχώρηση του μέτρου και άλλες καταχωρήσεις. Η πρώτη καταχώρηση περιέχει δεδομένα λειτουργικού προφίλ μηχανής, διαφορετικά σενάρια τιμής καυσίμου, φόρους εκπομπών, οικονομικά δεδομένα της τιμής μείωσης του ESD και του χρονικού ορίζοντα απόσβεσης της επένδυσης. Η βάση δεδομένων καταχώρησης ESD περιλαμβάνει δεδομένα κόστους, επίδρασης και χρόνου ζωής τους. Η πηγή αυτών των δεδομένων βασίζεται σε ερευνητικά σχέδια R&D DNV GL και από την εμπειρία που έχει αποκτηθεί από τις μελέτες ενεργειακής αποδοτικότητας περισσότερων από 25 πελατών που λειτουργούν πάνω από 900 πλοία. Η βάση δεδομένων άλλων καταχωρήσεων περιέχει τον έλεγχο μείωσης, όπου ορίζεται ποια μέτρα είναι εφαρμόσιμα για διαφορετικούς τύπους πλοίων και εάν αυτό έχει επίδραση στους δείκτες EEDI ή EEOI. Στο τμήμα υπολογισμού εκτελούνται τα εξής: Αρχικό EEDI και EEOI, νέο EEDI ή EEOI ως αποτέλεσμα του μέτρου και το κόστος του μέτρου. Το αποτέλεσμα του υπολογισμού του εργαλείου παρουσιάζεται με τη μορφή διαγράμματος (MACC) και μίας λίστας με τα εφικτά μέτρα για τον τύπο πλοίου που έχει επιλεγεί, την επίδραση του στους δείκτες EEDI και EEOI, το εκτιμώμενο κόστος επένδυσης και το χρόνο απόσβεσης της επένδυσης.

Η εφαρμογή των ESD σε ήδη υπάρχοντα πλοία δύναται να εμπεριέχει μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας. Το εργαλείο καθορίζει μέτρα που μπορούν να εφαρμοστούν για κάποιο πλοίο και συγκρίνει το κόστος και το όφελος. Έτσι, δίνεται η ευκαιρία να εκτιμηθεί ποιο μέτρο θα έχει τη μεγαλύτερη επίδραση και ποιο από αυτά θα είναι αποδοτικότερο οικονομικά. Το αποτέλεσμα του εργαλείου είναι μία λίστα από τη διαφορά στους δείκτες EEDI και EEOI (ΔEEDI και ΔEEOI) για τα εφαρμόσιμα μέτρα και τις καμπύλες MACC για τους δείκτες. Τα ΔEEDI και ΔEEOI παρουσιάζονται ξεχωριστά, και όχι ως μία συνδυαστική τιμή, καθώς λειτουργικό μέτρο όπως η βελτιστοποίηση διαγωγής έχει επίδραση μόνο στον δείκτη EEOI. Θεωρητικά, ο EEOI θα πρέπει να είναι ίδιος με τον EEDI εάν το πλοίο λειτουργεί σε συνθήκες που έχει σχεδιαστεί, καθώς ο EEDI υπολογίζεται σε συνθήκες πλήρους φόρτωσης (100% DWT) και ταχύτητα λειτουργίας (μέση κατανάλωση καυσίμου) στην οποία έχει σχεδιαστεί.

Στη λειτουργία ‘Normal’ ο χρήστης επιλέγει μόνο τον τύπο του πλοίου και οι υπολογισμοί βασίζονται στην προκαθορισμένη σχεδίαση, το λειτουργικό προφίλ, τις οικονομικούς παραμέτρους και ένα δοσμένο σετ μέτρων. Στην ‘Advanced’ λειτουργία ο χρήστης μπορεί να συγκεκριμενοποιήσει το λειτουργικό προφίλ, να προσαρμόσει τις οικονομικές παραμέτρους, την επίδραση των λειτουργικών μέτρων και να αλλάξει την επίδραση και το κόστος των τεχνολογιών που δεν είναι ακόμα ώριμες. Το εργαλείο δίνει στον χρήστη εύκολα πρόσβαση σε πολύτιμη πληροφορία στην ‘Normal’ λειτουργία και τη δυνατότητα να προσαρμόσει το μοντέλο σε συγκεκριμένες περιπτώσεις στην ‘Advanced’ λειτουργία.

Για τη δυνατότητα υπολογισμού και σύγκρισης των αλλαγών στους δείκτες EEDI και EEOI απαιτείται ένα πλοίο αναφοράς και ένα λειτουργικό προφίλ. Οι περιπτώσεις αναφοράς πρέπει να είναι ξεκάθαρα καθορισμένες, ώστε να εξασφαλιστεί η συνέπεια του



## Ψώρρας Νικόλαος, ‘Ναυπηγικά Συστήματα Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Πλοία’

εργαλείου και η διαφανής εκτίμηση κάθε μέτρου. Έτσι, χρησιμοποιούνται οι απαιτήσεις για τον EEDI του 2015 ως σχεδίαση αναφοράς και ένα μέσο όρο λειτουργικού προφίλ που βασίζεται στη βάση δεδομένων AIS για το 2014 και 2015 για κάθε τύπο πλοίου, ως βάση αναφοράς για τον EEOI. Το λειτουργικό προφίλ προέρχεται από μέσες τιμές του παγκόσμιου στόλου κατά τη λειτουργία τους το 2014 και 2015. Το προφίλ περιλαμβάνει ταχύτητες λειτουργίας, δεδομένα κατανάλωσης και αποστάσεις που έχουν διανύσει τα πλοία. Ο EEOI που χρησιμοποιεί το εργαλείο περιλαμβάνει όλους τους πιθανούς τρόπους λειτουργίας ενός πλοίου (πλήρους φόρτωσης, ταξίδι με έρμα, εν όρμω). Όλες οι μετρήσεις υπολογίζονται σε σύγκριση με το πλοίο αναφοράς και τη λειτουργία του. Αυτό δίνει τη δυνατότητα να γίνεται μία σύγκριση των μέτρων που σχετίζονται με τους περισσότερους χρήστες. Στα πλοία που καλύπτουν τις απαιτήσεις του EEDI 2015 τα μέτρα θα έχουν μικρότερη επίδραση από ό,τι υπολογίζει το εργαλείο, με δεδομένο ότι παραδίδονται ήδη βελτιστοποιημένα από τα ναυπηγεία.

Το εργαλείο περιέχει λειτουργικά, σχεδιαστικά και διάφορα μέτρα που επηρεάζουν τον EEDI και τον EEOI. Η εισαγωγή κάποιου μέτρου περιλαμβάνει την πληροφορία του κόστους, της επίδρασης και του χρόνου ζωής. Οι πηγές αυτών των δεδομένων αντλούνται από μελέτες R&D DNV GL με την πλειονότητα τους να αφορά τους τομείς των δεξαμενοπλοίων και των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Τα μέτρα ανανεώθηκαν, ούτως ώστε να αντανακλούν την επίδραση και το κόστος που θα έχουν για το πλοίο αναφοράς του 2015.

Στις εκτιμήσεις κόστους του εργαλείου δεν περιλαμβάνονται τα κρυφά κόστη, όπως αλλαγές που εμπλέκουν άλλους φορείς από το διαχειριστή πλοίου, καθώς θα ποικίλουν σημαντικά από πλοίο σε πλοίο και από εταιρεία σε εταιρεία. Λόγω αυτού οι εκτιμήσεις της επίδρασης αυτών των μέτρων είναι συντηρητικές. Μερικά από τα μέτρα που περιέχονται στο εργαλείο βασίζονται σε τεχνολογίες που είναι καινούριες στη ναυτιλία και μπορούν να χαρακτηριστούν μη ώριμες (π.χ. ηλιακά πάνελ, αετοί ρυμούλκησης). Τέτοιες τεχνολογίες συχνά έχουν υψηλό κόστος επένδυσης και αβεβαιότητα επίδρασης στην εξοικονόμηση κόστους και ενέργειας. Επιπρόσθετα, επιβαρυντικός παράγοντας στη λήψη απόφασης αποτελεί και η μη εξοικείωση με τη λειτουργία τους από το προσωπικό των πλοίων.

Οι κατηγορίες μέτρων αναφέρονται στον Πίνακα 9 και περιλαμβάνουν ένα μεγάλο εύρος, ενώ μέσα στην κάθε κατηγορία υπάρχουν διάφορες εκδοχές και τρόποι εφαρμογής τους. Το εργαλείο είναι σχεδιασμένο να υπολογίζει προσεγγιστικά την εξοικονόμηση και τα κόστη που σχετίζονται με το κάθε μέτρο και να δώσει μία ένδειξη πώς καθένα από αυτά συνεισφέρει στην συνολική εξοικονόμηση και κόστος. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι μέσα σε κάθε ομάδα πλοίων και μεγεθών υφίστανται σημαντικές διαφοροποιήσεις στο λειτουργικό προφίλ και τα χαρακτηριστικά. Έτσι, το μοντέλο εφαρμόζει ένα αντιπροσωπευτικό σετ τιμών που περιγράφει κάθε πλοίο, τη λειτουργία του, το κόστος και την επίδραση των μέτρων. Τα αποτελέσματα θα πρέπει να λαμβάνονται ως γενική καθοδήγηση και όχι ως ακριβείς μετρήσεις για ένα συγκεκριμένο πλοίο. Η Εικόνα που ακολουθεί περιγράφει την σχετιζόμενη αβεβαιότητα για κάθε προτεινόμενο μέτρο, συμπεριλαμβάνοντας το κόστος και την επίδρασή τους. Οι εναλλακτικές πηγές ενέργειας έχουν γενικά μεγάλη αβεβαιότητα εξαιτίας της περιορισμένης εφαρμογής τους στη ναυτιλία.



Measure category	Measure description	Uncertainty
Alternative Energy Source	Kite	> 30 %
	Fixed Sails or Wings	> 30 %
	Solar Panels	> 30 %
Technical Measures (Main Engine)	Electronic Engine Control	< 10 %
	Waste Heat Recovery	< 10 %
	Hull Coating	< 10 %
	Air Cavity Lubrication	10-30 %
	Contra-Rotating Propeller	10-30 %
	Propulsion Efficiency Devices	< 10 %
Technical Measures (Aux Engine)	Frequency Converters	10-30 %
	Exhaust Gas Boilers	< 10 %
	Efficient Lighting System	< 10 %
Operational Improvements	Trim/Draft Optimization	< 10 %
	Weather Routing	10-30 %
	Voyage Execution	10-30 %
	Steam Plant Improvements	< 10 %
	Propeller Condition	< 10 %

Πίνακας 10. Αβεβαιότητα που σχετίζεται με τους αριθμούς βάσης για κάθε μέτρο (DNV-GL , 2016)

Η εφαρμογή και εξέταση πολλαπλών μέτρων για το ίδιο πλοίο δύναται να οδηγήσει σε διαφορετική επίδραση του εκάστοτε μέτρου, π.χ. εφαρμόζοντας το μέτρο πλεύσης με μειωμένη ταχύτητα και τη βελτιστοποίηση της διαγωγής την ίδια χρονική περίοδο θα μπορούσε να αλλάξει την εκτιμώμενη εξοικονόμηση ενός ή περισσότερων μέτρων. Ωστόσο, τα προτεινόμενα μέτρα αυτού του εργαλείου θεωρούνται σχετικά ανεξάρτητα μεταξύ τους, με την έννοια ότι η αβεβαιότητα της επίδρασης εφαρμογής διαφόρων μέτρων στο ίδιο σκάφος δεν θα ξεπεράσει την αβεβαιότητα ανάμεσα στην κάθε κατηγορία μέτρων. Στον Πίνακα 11 περιγράφει ποια μέτρα συνδυάζονται με άλλα και ποια όχι. Έτσι, π.χ. προκύπτει ότι δεν γίνεται να συνδυαστεί ο αετός ρυμούλκησης με τα πανιά, όπως και τα μέτρα που σχετίζονται με την πρόωση και τις αντίστροφα περιστρεφόμενες προπέλες.



Measure combination	Kite	Fixed Sails or Wings	Solar Panels	Electronic Engine Control	Waste Heat Recovery	Hull Coating	Air Cavity Lubrication	Contra-Rotating Propeller	Propulsion Efficiency Devices	Frequency Converters	Exhaust Gas Boilers	Efficient Lighting System	Trim/Draft Optimization	Weather Routing	Voyage Execution	Steam Plant Improvements	Propeller Condition
Kite	x	W	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fixed Sails or Wings	W	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Solar Panels	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Electronic Engine Control	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Waste Heat Recovery	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Hull Coating	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Air Cavity Lubrication	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Contra-Rotating Propeller	-	-	-	-	-	-	-	x	W	-	-	-	-	-	-	-	-
Propulsion Efficiency Devices	-	-	-	-	-	-	-	W	x	-	-	-	-	-	-	-	-
Frequency Converters	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-	-
Exhaust Gas Boilers	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-	-
Efficient Lighting System	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-	-
Trim/Draft Optimization	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-	-
Weather Routing	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-	-
Voyage Execution	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-	-
Steam Plant Improvements	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	-
Propeller Condition	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x

Πίνακας 11. Συσχετισμοί μέτρων και η αντίστοιχη αβεβαιότητα από την εφαρμογή πολλαπλών μέτρων (Το γράμμα ‘W’ δηλώνει το ‘warning’) (DNV-GL , 2016)

Στο εργαλείο έχουν εισαχθεί οι ακόλουθες προϋποθέσεις που απαιτούνται για την παραμετροποίηση του :

- Δεδομένη τιμή έκπτωσης : 8% κάθε χρόνο (μόνο για τους υπολογισμούς ταμειακών ροών – όχι για το καύσιμο ή τις εκπομπές)
- Ορίζοντας επένδυσης : 25 χρόνια
- Περιεκτικότητα άνθρακα του HFO : 3,114 gr CO<sub>2</sub>/gr HFO

Ακολούθως περιγράφεται η ‘Normal’ λειτουργία του εργαλείου.





Ψώρρας Νικόλαος,  
‘Ναυπηγικά Συστήματα Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Πλοία’

**Output data**  
calculated based on  
the input values  
provided

**Input data**  
to change vessel  
segment,  
vessel size  
and fuel price

**Cost efficiency curves**  
for each measure  
evaluated in the  
model (ranked  
from left to right).  
Each bar represents  
a measure (color  
coded and  
numbered)  
represented in the  
table below.

The height of the bar  
indicates the cost  
efficiency of the  
measure [\$/ton CO<sub>2</sub>]  
over the lifetime of  
the vessel while the  
width represents the  
effect measured in  
ΔEEDI (left) and  
ΔEEOI (right)

**Energy Efficiency Appraisal Tool**

**Input data:** Vessel type: Dry Bulk Carrier, Vessel size: 35000-55000 Dwt, Fuel price (\$/ton): 400

**Output data:** EEDI (g CO<sub>2</sub>/ton mile): 9.8 / 8.9 / 8.8, EEOI (g CO<sub>2</sub>/ton mile): 5.1 / 4.9 / 5.0, Fuel (ton/year): 2800 / 2600 / 2600

**Reference values:** Fuel (ton/year): 304, Sailed distance (ton/year): 117 133

**Instructions:**

- Select vessel type/size from the drop down menu and enter fuel price
- Apply measures from the drop down menu or measure output.
- Press "Calculate" to run the model

**Measure selection:**

- EIS: Yes
- Foldable air wings: No
- Solar Panel: No
- Waste heat recovery: No
- Waste heat recovery in all coating condition: No
- Air cavity lubrication: No
- Controllable pitch propeller: No
- Propulsion efficiency devices: No
- Frequency converters: No
- DG on AE: No
- Light systems: No
- Trimdraft optimization: No
- Weather routing: No
- Voyage optimization: No
- Solar panel on ship: No
- Propeller efficiency: No

**Abatement summary table:**

ID	Measure	Uncertainty (%)	Type of measure	Cost efficiency (\$/ton CO <sub>2</sub> )	Fuel reduction (%)	ΔEEDI (%)	ΔEEOI (%)	CAPEX (\$)	Yearly savings (\$)	Yearly payback (\$)	Payback period (years)
1	Trimdraft optimization	-10.0%	0	-49	1.3%	0%	1.8%	20 000	18 000	0	2
2	Propulsion efficiency devices	-10.0%	7*	-44	3.4%	3.5%	3.4%	85 000	34 000	0	5
3	Voyage optimization	-10.0%	0	-38	2.1%	0%	2.1%	10 000	10 000	0	1
4	Propeller efficiency	-10.0%	0	-2	0.9%	0%	0.9%	0 000	0 000	0	1
5	Air cavity lubrication	-10.0%	7	59	5.0%	6.1%	5.8%	345 000	55 000	10 000	25+
6	Controllable pitch propeller	-10.0%	7	87	8.7%	8.1%	8.7%	88 000	32 000	20 000	20+
7	Light systems	-10.0%	7	69	0.5%	0.5%	0.5%	100 000	4 000	0	25+
8	Frequency converters	-10.0%	7	50	1.9%	1.9%	1.9%	597 000	18 000	5 000	29+
9	Waste	-10.0%	7	87	7.3%	7.9%	7.3%	889 000	60 000	74 000	28+
10	Waste heat recovery	-10.0%	0	167	1.6%	0%	1.6%	200 000	12 000	0	25+
11	Weather routing	-10.0%	0	886	0.1%	0%	0.1%	0 000	1 000	0 000	26+
12	DG on AE	-10.0%	7	879	2.3%	0.2%	0.2%	88 000	1 000	30 000	29+
13	Waste heat recovery	-10.0%	7	1 670	2.4%	2.5%	2.4%	6 620 000	18 000	10 000	25+
14	Solar Panel	-10.0%	7	8 888	0.2%	0.2%	0.2%	1 870 000	2 000	0	28+

**Reference values**  
based on the vessel  
type and size  
segment applied

**Instructions**  
providing guidance  
on how to use the  
model.

**Measure selection**  
choosing what  
measure to include in  
the model

**Resulting table**  
with more detailed  
information on each  
measure evaluated in  
the model

Εικόνα 56. Γενική εικόνα του λογισμικού όπως αυτό εμφανίζεται στην οθόνη του υπολογιστή





Η λειτουργία ‘Normal’ δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής τεσσάρων δεδομένων (σκιαγραφημένα σε κελί με γαλάζιο χρώμα).

### Input data

Select vessel type:	Dry bulk carriers
Select vessel size:	60000-99999 Dwt
Fuel price [\$ /ton]:	600

- a. Crude oil tankers
- b. Dry bulk carriers
- c. Container ships
- d. Ro-Ro ships
- e. General cargo vessels
- f. Passenger vessels
- g. Ro Pax vessels
- h. Cruise vessels
- i. Chemical tankers
- j. Product tankers

Εικόνα 57. Τύπος πλοίου (DNV-GL , 2016)

### Input data

Select vessel type:	Dry bulk carriers
Select vessel size:	60000-99999 Dwt
Fuel price [\$ /ton]:	600

Εικόνα 58. Διαφορετικά μεγέθη πλοίων βασιζόμενα στον τύπο πλοίου (DNV-GL , 2016)

### Input data

Select vessel type:	Dry bulk carriers
Select vessel size:	60000-99999 Dwt
Fuel price [\$ /ton]:	600

Εικόνα 59. Τιμή καυσίμου για το καύσιμο που χρησιμοποιεί το πλοίο που διερευνάται (DNV-GL , 2016)



Ψώρρας Νικόλαος,  
 ‘Ναυπηγικά Συστήματα Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Πλοία’

<ul style="list-style-type: none"> <li>a. Kite</li> <li>b. Fixed Sails or Wings</li> <li>c. Solar Panels</li> <li>d. Electronic Engine Control</li> <li>e. Waste Heat Recovery</li> <li>f. Hull Coating</li> <li>g. Air Cavity Lubrication</li> <li>h. Contra-Rotating Propeller</li> <li>i. Propulsion Efficiency Devices</li> <li>j. Frequency Converters</li> <li>k. Exhaust Gas Boilers</li> <li>l. Efficient Lighting System</li> <li>m. Trim/Draft Optimization</li> <li>n. Weather Routing</li> <li>o. Voyage Execution</li> <li>p. Steam Plant Improvements</li> <li>q. Propeller Condition</li> </ul>	<p><b>Instructions</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Select vessel type/size from the drop down menus and enter fuel price</li> <li>2. Apply measures from the drop down menus or measure buttons.</li> <li>3. Press "Calculate" to run the model</li> </ol> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left;">Measure</th> <th style="text-align: left;">Include?</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>Kite</td><td>Yes</td></tr> <tr><td>Fixed sails or wings</td><td>No</td></tr> <tr><td>Solar Panel</td><td>Yes</td></tr> <tr><td>Electronic engine control</td><td>No</td></tr> <tr><td>Waste heat recovery</td><td>Yes</td></tr> <tr><td>Hull coating condition</td><td>Yes</td></tr> <tr><td>Air cavity lubrication</td><td>Yes</td></tr> <tr><td>Contra-rotating propeller</td><td>Yes</td></tr> <tr><td>Propulsion efficiency devices</td><td>Yes</td></tr> <tr><td>Frequency converters</td><td>Yes</td></tr> <tr><td>EGB on AE</td><td>Yes</td></tr> <tr><td>Light systems</td><td>Yes</td></tr> <tr><td>Trim&amp;draft optimisation</td><td>Yes</td></tr> <tr><td>Weather routing</td><td>Yes</td></tr> <tr><td>Voyage execution</td><td>Yes</td></tr> <tr><td>Steam plant op impr</td><td>No</td></tr> <tr><td>Propeller efficiency</td><td>Yes</td></tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;"> <input type="button" value="Select all measures"/> <input type="button" value="Select no measures"/> </p> <p style="text-align: center; margin-top: 10px;"><input type="button" value="Calculate"/></p>	Measure	Include?	Kite	Yes	Fixed sails or wings	No	Solar Panel	Yes	Electronic engine control	No	Waste heat recovery	Yes	Hull coating condition	Yes	Air cavity lubrication	Yes	Contra-rotating propeller	Yes	Propulsion efficiency devices	Yes	Frequency converters	Yes	EGB on AE	Yes	Light systems	Yes	Trim&draft optimisation	Yes	Weather routing	Yes	Voyage execution	Yes	Steam plant op impr	No	Propeller efficiency	Yes
Measure	Include?																																				
Kite	Yes																																				
Fixed sails or wings	No																																				
Solar Panel	Yes																																				
Electronic engine control	No																																				
Waste heat recovery	Yes																																				
Hull coating condition	Yes																																				
Air cavity lubrication	Yes																																				
Contra-rotating propeller	Yes																																				
Propulsion efficiency devices	Yes																																				
Frequency converters	Yes																																				
EGB on AE	Yes																																				
Light systems	Yes																																				
Trim&draft optimisation	Yes																																				
Weather routing	Yes																																				
Voyage execution	Yes																																				
Steam plant op impr	No																																				
Propeller efficiency	Yes																																				

Εικόνα 60. Επιλεγμένα μέτρα που θα εφαρμόζονται στο πλοίο που διερευνάται (DNV-GL , 2016)

Στην ‘Normal’ λειτουργία του εργαλείου εξάγονται τρία δεδομένα που βρίσκονται σε κελιά χρώματος γκρι στον πίνακα του μοντέλου. Κάθε δεδομένο αξιολογείται για :

- Πριν : Την κατάσταση πριν την εφαρμογή του μέτρου (τιμές βάσης)
- Βέλτιστη : Στη δοσμένη κατάσταση όπου εφαρμόζονται μόνο τα κερδοφόρα μέτρα από την επιλογή
- Μετά : Την κατάσταση μετά την εφαρμογή όλων των επιλεγμένων μέτρων

Output data	Before / Optimal / All
EEOI [g CO <sub>2</sub> /ton nm]:	50,3 / 42 / 40,9
EEDI [g CO <sub>2</sub> /ton nm]:	4,1 / 3,5 / 3,4
Fuel [tonnes/year]:	25491 / 21275 / 20690

Εικόνα 61. Η υπολογισμένη τιμή του EEOI (DNV-GL , 2016)



Ψώρρας Νικόλαος,  
‘Ναυπηγικά Συστήματα Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Πλοία’

<b>Output data</b>	<b>Before / Optimal / All</b>
EEOI [g CO <sub>2</sub> /ton nm]:	50,3 / 42 / 40,9
EEDI [g CO <sub>2</sub> /ton nm]:	4,1 / 3,5 / 3,4
Fuel [tonnes/year]:	25491 / 21275 / 20690

Εικόνα 62. Η υπολογισμένη τιμή του EEDI (DNV, 2021)

<b>Output data</b>	<b>Before / Optimal / All</b>
EEOI [g CO <sub>2</sub> /ton nm]:	50,3 / 42 / 40,9
EEDI [g CO <sub>2</sub> /ton nm]:	4,1 / 3,5 / 3,4
Fuel [tonnes/year]:	25491 / 21275 / 20690

Εικόνα 63. Η υπολογισμένη κατανάλωση καυσίμου (DNV-GL , 2016)

Στη λειτουργία ‘Normal’ το εργαλείο διαθέτει δύο τιμές αναφοράς που βρίσκονται σε κελιά χρώματος γκρι στον πίνακα του μοντέλου. Αντιπροσωπεύουν τις προκαθορισμένες τιμές για επιλεγμένους τύπους/μεγέθους πλοίων ως εισηγμένες τιμές.

**Reference values**

Transport work [tons x nm/year]:	1 595 770 832
Sailed distance [nm/year]:	44 794

Εικόνα 64. Το εκτιμώμενο μεταφερόμενο έργο για τον επιλεγμένο συνδυασμό τύπου/μεγέθους πλοίου (DNV-GL , 2016)

**Reference values**

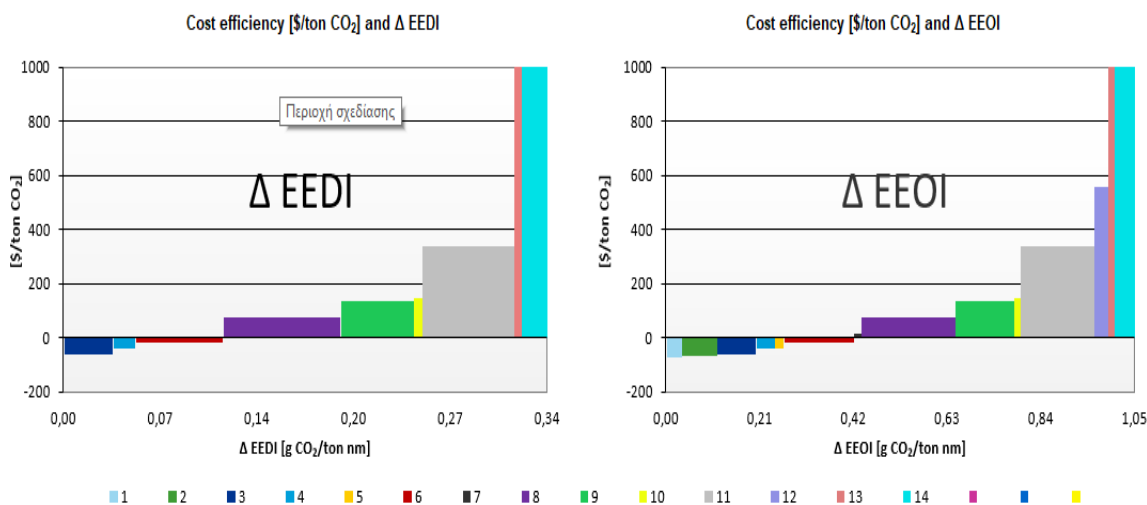
Transport work [tons x nm/year]:	1 595 770 832
Sailed distance [nm/year]:	44 794

Εικόνα 65. Η εκτιμώμενη απόσταση που διανύθηκε για τον επιλεγμένο συνδυασμό τύπου/μεγέθους πλοίου (DNV-GL , 2016)

Η ‘Normal’ λειτουργία του εργαλείου έχει δύο καμπύλες MAC όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 66.



Cost abatement curves



Εικόνα 66. Καμπύλες κόστους MAC

**ΔEEDI:** Το αριστερό γράφημα αναπαριστά την εξοικονόμηση κόστους για κάθε μέτρο που εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια ζωής του πλοίου, σε σχέση με την επίδραση του στον δείκτη EEDI. Κάθε μέτρο παρουσιάζεται με μία μπάρα, της οποίας το ύψος δείχνει την αποδοτικότητα κόστους του μέτρου (οι θετικές τιμές δείχνουν το κόστος κατά τη διάρκεια ζωής του πλοίου, ενώ οι αρνητικές τιμές δείχνουν την εξοικονόμηση). Το μεγάλο πλάτος της εκάστοτε μπάρας υποδεικνύει μεγάλη επίδραση στο EEDI, ενώ οι λεπτές μπάρες την οριακή επίδραση στον EEDI. Όλα τα μέτρα ταξινομούνται από το πιο αποδοτικό, όσον αφορά το κόστος (αριστερά) προς το λιγότερο αποδοτικό (δεξιά).

**ΔEEOI:** Το δεξιό γράφημα παρουσιάζει την προοπτική απόσβεσης κάθε εφαρμοζόμενου μέτρου κατά τη διάρκεια ζωής του πλοίου σε σχέση με την επίδραση του στον EEOI. Κάθε μέτρο παρουσιάζεται με μία μπάρα, όπου το ύψος της δείχνει την αποδοτικότητα κόστους του μέτρου (οι θετικές τιμές δείχνουν το κόστος κατά τη διάρκεια ζωής του πλοίου, ενώ οι αρνητικές τιμές δείχνουν την εξοικονόμηση). Το μεγάλο πλάτος της εκάστοτε μπάρας υποδεικνύει τη μεγάλη επίδραση στον EEOI, ενώ οι λεπτές μπάρες την οριακή επίδραση στον EEDI. Όλα τα μέτρα ταξινομούνται από το πιο αποδοτικό, όσον αφορά το κόστος (αριστερά), προς το λιγότερο αποδοτικό (δεξιά).

Η ‘Normal’ λειτουργία του εργαλείου έχει ένα συνολικό πίνακα αποτελέσματος μείωσης όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 78, συμπεριλαμβάνοντας τις ακόλουθες παραμέτρους.

1. **ID :** Το μέτρο ID χρησιμοποιείται για να συνδέσει και να αναγνωρίσει το μέτρο στο γράφημα.
2. **Μέτρο :** Το όνομα του εφαρμοζόμενου μέτρου.
3. **Αβεβαιότητα :** Η εκτιμώμενη αβεβαιότητα του κόστους ή η επίδραση του μέτρου.
4. **Τύπος του μέτρου :** Δείχνει εάν το μέτρο είναι τεχνικό (T) (σχετικό για νεότευκτα) και/ή λειτουργικό (O). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι μόνο τα τεχνικά μέτρα μπορούν να επηρεάσουν τον EEDI, ενώ τα τεχνικά και τα λειτουργικά



μπορούν να επηρεάσουν τον ΕΕΟΙ. Τα συστήματα αποδοτικότητας της προωστήριας εγκατάστασης σημειώνονται με ένα (T) λόγω του ότι είναι εφαρμόσιμα σε υπάρχοντα πλοία, αν και περιγράφονται ως τεχνικά.

**5. Αποδοτικότητα κόστους :** Η αποδοτικότητα κόστους (το ύψος της εκάστοτε μπάρας) μετράται ως καθαρό κόστος ανά ton CO<sub>2</sub> μειούμενο (πλάτος κάθε μπάρας) κατά τη διάρκεια ζωής του πλοίου ή η μέτρηση (όποιο είναι πιο μικρό) από την εφαρμογή ενός συγκεκριμένου μέτρου (εφόσον το μέτρο έχει εφαρμοστεί).

**6. Μείωση καυσίμου :** Η ποσοστιαία μείωση καυσίμου από την εφαρμογή συγκεκριμένου μέτρου με δεδομένο ότι τα παραπάνω μέτρα έχουν εφαρμοστεί.

**7. ΔΕΕΔΙ :** Η ποσοστιαία μείωση του ΕΕΔΙ από την εφαρμογή συγκεκριμένου μέτρου. ‘n/a’ παρουσιάζει μέτρα που δεν έχουν επίδραση στο ΕΕΔΙ.

**8. ΔΕΕΟΙ :** Η ποσοστιαία μείωση του ΕΕΟΙ από την εφαρμογή συγκεκριμένου μέτρου.

**9. CAPEX :** Το σχετιζόμενο κόστος επένδυσης (USD) από την εφαρμογή συγκεκριμένου μέτρου.

**10. Ετήσια εξοικονόμηση :** Η ετήσια εξοικονόμηση (USD) από την εφαρμογή συγκεκριμένου μέτρου.

**11. Ετήσια λειτουργικά κόστη :** Τα ετήσια λειτουργικά κόστη (USD) από την εφαρμογή συγκεκριμένου μέτρου.

**12. Περίοδος αποπληρωμής :** Ο χρόνος που χρειάζεται για να ανακτηθεί το κόστος της επένδυσης από την εφαρμογή συγκεκριμένου μέτρου.



## Abatement summary

ID	Measure	Uncertainty [%]	Type of measure [T/O]	Cost efficiency [\$/ton CO <sub>2</sub> ]	Fuel reduction [%]	Δ EEDI [%]	Δ EEOI [%]	CAPEX [\$]	Yearly savings [\$]	Yearly op. costs [\$]	Payback period [years]
1	Trim&draft optimisation	< 10 %	O	-46	0,5 %	n/a	0,5 %	25.000	7.000	0	4
2	Propulsion efficiency devices	< 10 %	T*	-32	1,2 %	1,2 %	1,2 %	91.000	19.000	0	6
3	Voyage execution	10-30 %	O	-23	0,7 %	n/a	0,7 %	10.000	11.000	5.000	2
4	Light systems	< 10 %	T	4	0,5 %	0,5 %	0,5 %	100.000	8.000	0	25+
5	Frequency converters	10-30 %	T	17	2,1 %	2,2 %	2,1 %	406.000	32.000	5.000	25+
6	Propeller efficiency	< 10 %	O	87	0,2 %	n/a	0,2 %	8.000	3.000	0	25+
7	Kite	> 30 %	T	264	2,2 %	2,2 %	2,2 %	989.000	32.000	74.000	25+
8	EGB on AE	< 10 %	T	290	0,2 %	0,2 %	0,2 %	64.000	3.000	10.000	25+
9	Weather routing	10-30 %	O	319	0,1 %	n/a	0,1 %	15.000	1.000	3.000	25+
10	Hull coating condition	< 10 %	O	429	0,6 %	n/a	0,6 %	261.000	8.000	0	25+
11	Waste heat recovery	< 10 %	T	3.162	0,8 %	0,8 %	0,8 %	6.575.000	12.000	10.000	25+

Εικόνα 67. Σύνοψη εξοικονόμησης

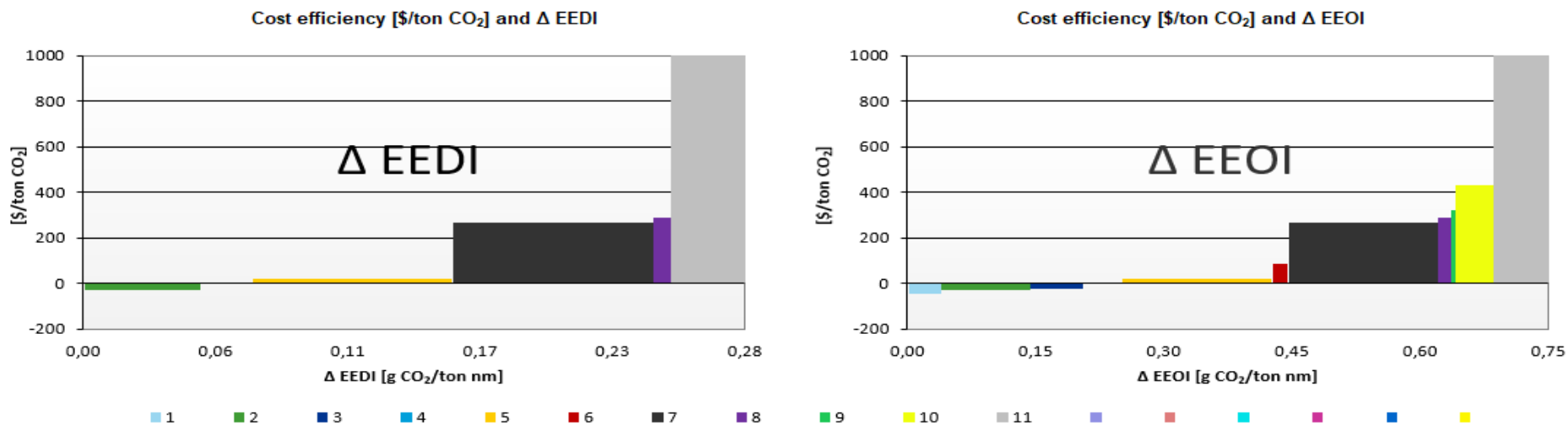




# Energy Efficiency Appraisal Tool

Input data	Output data	Before / Optimal / All	Reference values
Select vessel type: <input type="text" value="Dry bulk carriers"/>	EEOI [g CO <sub>2</sub> /ton nm]:	8,6 / 8,4 / 7,8	TW [million tons x nm/year]: <input type="text" value="1.265"/>
Select vessel size: <input type="text" value="60000-99999 Dwt"/>	EEDI [g CO <sub>2</sub> /ton nm]:	4,1 / 4 / 3,8	Sailed distance [nm/year]: <input type="text" value="112.427"/>
Fuel price [\$ /ton]: <input type="text" value="450"/>	Fuel [tonnes/year]:	3449 / 3367 / 3147	

## Cost abatement curves



Εικόνα 68. Αποτέλεσμα υπολογισμού



Στην Εικόνα 68 φαίνεται το αποτέλεσμα υπολογισμού των καμπυλών MAC με το τη χρήση του εργαλείου για ένα φορτηγό πλοίο το οποίο ανήκει στην κατηγορία εκτοπίσματος από 60.000-99.999 DWT. Ως δεδομένο τέθηκε ότι καταναλώνει καύσιμο τύπου HFO και η τιμή του καθορίζεται στα 450\$/ton. Ως μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας επιλέχθηκαν: ο αετός έλξης, η ανάκτηση αποβαλλόμενης θερμότητας, η καλή κατάσταση υφαλοχρωμάτων, τα συστήματα αποδοτικότητας πρόωσης, οι μετατροπείς συχνοτήτων (frequency converters)<sup>5</sup> (Xiaoliang, 2020), οι λέβητες καυσαερίων στις βοηθητικές μηχανές, τα συστήματα φωτισμού, η βελτιστοποίηση διαγωγής και βυθίσματος, η πλεύση σύμφωνα με τις καιρικές συνθήκες, η άφιξη του πλοίου στο λιμάνι την κατάλληλη χρονική στιγμή και η αποδοτικότητα της προπέλας.

Από την επεξεργασία των δεδομένων προκύπτει ότι για τον δείκτη EEDI πριν τη λήψη διορθωτικών μέτρων η τιμή του ανέρχεται στα 4,1 gr CO<sub>2</sub>/ton nm, η βέλτιστη τιμή του βάσει της τοποθέτησης συστημάτων εξοικονόμησης με γνώμονα το κέρδος και τον χρόνο απόσβεσης της επένδυσης ανέρχεται σε 4 gr CO<sub>2</sub>/ton nm και η τιμή συνυπολογίζοντας όλα τα διορθωτικά μέτρα ανέρχεται σε 3,8 gr CO<sub>2</sub>/ton nm. Αντίστοιχα, για τον δείκτη EEOI οι τιμές διαμορφώνονται σε 8,6 gr CO<sub>2</sub>/ton nm / 8,4 gr CO<sub>2</sub>/ton nm / 7,8 gr CO<sub>2</sub>/ton nm. Όσον αφορά την κατανάλωση καυσίμου του πλοίου σε ετήσια βάση διαμορφώνεται σε 3.449 ton/year, 3.367 ton/year και 3.147 ton/year αντίστοιχα για τις τρεις διαφορετικές καταστάσεις επιλογής λήψης διορθωτικών μέτρων με τιμές αναφοράς διανυθείσας απόστασης τα 112.427 nm/year και τη μεταφορική δυνατότητα σε 1.265 million tons x nm/year.

Από το διάγραμμα εύκολα διαπιστώνεται ότι με τα δεδομένα που ελήφθησαν για τη δημιουργία του εργαλείου (π.χ. κόστος κτήσης εκάστοτε μέτρου εξοικονόμησης, τιμή πετρελαίου, εκτιμώμενο όφελος από την τοποθέτηση του) ο χρόνος απόσβεσης της επένδυσης είναι βιώσιμος μόνο για τα τρία από τα έντεκα μέτρα εξοικονόμησης που επιλέχθηκαν. Συγκεκριμένα, ο χρόνος απόσβεσης για τη βελτιστοποίηση της διαγωγής και του βυθίσματος ανέρχεται σε 4 έτη, των συστημάτων αποδοτικότητας της πρόωσης σε 6 και του συστήματος βελτιστοποίησης της διαδρομής του ταξιδιού στα 2 έτη. Για όλα τα υπόλοιπα ο χρόνος απόσβεσης της επένδυσης ξεπερνάει τα 25 έτη.

Όπως γίνεται αντιληπτό, το γεγονός αυτό αποτελεί αντικίνητρο για έναν πλοιοκτήτη να επιλέξει ένα σύστημα εξοικονόμησης ενέργειας. Επιπρόσθετα, επιβαρυντικός παράγοντας είναι και το γεγονός ότι ανάλογα με το καθεστώς ναύλωσης του πλοίου (ναύλωση κατά ταξίδι, χρονοναύλωση και ναύλωση κατά παραχώρηση (ή γυμνού φορτίου), το όφελος από την υιοθέτηση τέτοιων μέτρων που ισοδυναμεί με εξοικονόμηση καυσίμου, μπορεί να μην το καρπώνεται ο ίδιος. Το κόστος καυσίμου το επωμίζεται ο πλοιοκτήτης μόνο στην περίπτωση της ναύλωσης κατά ταξίδι, ενώ στις άλλες δύο περιπτώσεις το κόστος των καυσίμων καταβάλλεται από τον ναυλωτή (Storford, 2018). Τέλος, στην απόφαση υιοθέτησης τέτοιων μέτρων θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και το δεδομένο ότι η μέγιστη ηλικία που μπορεί να φτάσει ένα πλοίο είναι τα 25 έτη και ότι υπάρχει και η πιθανότητα να πωληθεί ακόμα και πάνω από μία φορές στη διάρκεια της ζωής του.

---

<sup>5</sup> Αυτή η τεχνολογία δίνει τη δυνατότητα στους ηλεκτρικούς κινητήρες του πλοίου να μεταβάλλουν τις στροφές τους ανάλογα με την απαιτούμενη ζήτηση και να μην λειτουργούν όλο το χρονικό διάστημα στο πλήρες φορτίο (DNV-GL, 2016).



## 7. Συμπεράσματα

Σε παγκόσμια κλίμακα γίνονται προσπάθειες για την μείωση των εκπομπών GHG και τη λήψη μέτρων για την κλιματική αλλαγή. Οι συνέπειες της τελευταίας είναι καταστροφικές και διαφαίνεται ολοένα και περισσότερο το αποτέλεσμα των ανθρώπινων παρεμβάσεων στο κλίμα. Η ναυτιλία αποτελεί έναν καθοριστικό κρίκο της παγκόσμιας οικονομίας και παρόλο που συνιστά το αποδοτικότερο μέσο μεταφοράς, υπάρχουν πολλά περιθώρια να συμβάλει στη γενικότερη προσπάθεια μείωσης των αέριων ρύπων. Το κύριο καύσιμο που χρησιμοποιείται βασίζεται στα ορυκτά καύσιμα, των οποίων τα παράγωγα της καύσης έχουν αρνητικές επιπτώσεις για το κλίμα και την ανθρώπινη υγεία. Στο γενικότερο πλαίσιο εναρμόνισης των πλοίων με τις απαιτήσεις που καθορίζει ο IMO υπάρχουν νέες τεχνολογίες εξοικονόμησης ενέργειας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν, είτε ως μετασκευή σε ήδη υπάρχοντα πλοία, είτε σε πλοία που πρόκειται να ναυπηγηθούν.

Στη γενικότερη προσπάθεια εναρμόνισης με τις κατευθύνσεις του IMO ασκείται πίεση στο ναυπηγικό τομέα, ώστε το νεότευκτο πλοίο να είναι βελτιστοποιημένο ενεργειακά σε τομείς όπως η γάστρα, η Κύρια και Βοηθητική μηχανή, οι έλικες και τα πηδάλια. Σημαντικό είναι να σημειωθεί ότι η επίδραση των μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας είναι μεγαλύτερη σε ήδη υπάρχοντα πλοία τα οποία έχουν ναυπηγηθεί κυρίως πριν το 2010, και όχι σε νεότευκτα, τα οποία θα έχουν εφαρμόσει όλες τις διαθέσιμες τεχνολογίες κατά τη φάση ναυπήγησης τους και θα ικανοποιούν τις απαιτήσεις του EEDI 2015. Έπειτα, είναι στην ευχέρεια του εκάστοτε πλοιοκτήτη να επιλέξει μέσα από μία γκάμα ESD. Για την επιλογή κάποιου μέτρου θα πρέπει να υπάρχουν δεδομένα που θα καθορίζουν την απόδοση και την αξιοπιστία του, κάτι που επιτυγχάνεται με τη χρήση τριών εναλλακτικών τρόπων. Ο πρώτος είναι με τη χρήση CFD, με κύριο πλεονέκτημα ότι οι μετρήσεις γίνονται με υπολογιστικά μοντέλα που μπορούν να προσεγγίσουν σε ικανοποιητικό βαθμό την απόδοση του συστήματος σε πραγματικές συνθήκες. Ένα ακόμα βασικό πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι η διαδικασία εκτελείται χωρίς ιδιαίτερο κόστος και υπάρχουν διαθέσιμα αρκετά υπολογιστικά εργαλεία. Μειονέκτημα της χρήσης CFD είναι ότι δεν μπορεί να περιγράψει ακριβώς τη συμπεριφορά και την επίδραση όταν συνδυάζονται δύο ή και περισσότερα ESD. Επιπρόσθετα, δεν μπορούν να περιγραφούν επακριβώς οι επιπτώσεις και λόγω του ότι οι πραγματικές καιρικές συνθήκες ποικίλουν και ότι το πλοίο δεν κινείται πάντα σε καταστάσεις σχεδίασης. Ο δεύτερος τρόπος αξιολόγησης της απόδοσης των ESD γίνεται με τη χρήση EFD. Οι δοκιμές σε αυτήν την περίπτωση εκτελούνται στο περιβάλλον μίας μικρής δεξαμενής με μοντέλο υπό κλίμακα, με το πλεονέκτημα ότι δεν είναι κοστοβόρο και μπορούν εύκολα να ληφθούν δεδομένα. Μειονέκτημα αποτελεί ο παράγοντας κλίμακα, καθώς δεν δύναται να προβλεφθούν ούτε οι πραγματικές συνθήκες θάλασσας ούτε η ακριβής συμπεριφορά του συστήματος σε πλοίο πλήρους κλίμακας. Τέλος, ο καλύτερος τρόπος αξιολόγησης της απόδοσης ενός μέτρου αποτελεί η λήψη δεδομένων από πλοία σε λειτουργία σε πραγματικές συνθήκες. Όμως, από πλευράς ναυτιλιακών εταιρειών αποφεύγεται η δημοσιοποίηση τέτοιων στοιχείων εξαιτίας του ανταγωνισμού. Η υιοθέτηση των μέτρων επηρεάζεται από αστάθμητους παράγοντες που διαφοροποιούν την εξοικονόμηση ενέργειας ακόμα και σε όμοια πλοία, όπως η πλεύση σε διαφορετικές καταστάσεις φόρτωσης (πλήρους φόρτωσης, πλεύση μόνο με θαλάσσιο έρμα ή και ενδιάμεση κατάσταση) ή με διαφορετικές ταχύτητες από την ταχύτητα σχεδιασμού, οι καιρικές συνθήκες.



## Ψώρρας Νικόλαος, 'Ναυπηγικά Συστήματα Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Πλοία'

Μερικές τεχνολογίες δεν είναι εφαρμόσιμες σε όλα τα πλοία και επίσης το ίδιο μέτρο σε ένα μεγαλύτερο πλοίο είναι προφανώς ακριβότερο από ό,τι σε ένα μικρότερο. Ένας πλοιοκτήτης είναι ο ιδιοκτήτης ενός εμπορικού πλοίου. Είναι εκείνος που εξοπλίζει και εκμεταλλεύεται ένα πλοίο, συνήθως παραδίδοντας φορτίο για ορισμένο ναύλο. Ο πλοιοκτήτης ορίζει τις προδιαγραφές του πλοίου και τα μέτρα ενεργειακής του αποδοτικότητας, αλλά τα κέρδη της χαμηλής κατανάλωσης καυσίμων δεν είναι πάντοτε δικά του όταν το πλοίο ναυλώνεται από κάποιον άλλο. Το γεγονός αυτό αποτελεί αντικίνητρο για έναν πλοιοκτήτη να επιλέξει ένα σύστημα εξοικονόμησης ενέργειας. Το κόστος καυσίμου το επωμίζεται ο πλοιοκτήτης μόνο στην περίπτωση της ναύλωσης κατά ταξίδι, ενώ στις υπόλοιπες περιπτώσεις το κόστος των καυσίμων καταβάλλεται από τον ναυλωτή. Οι λίγες ευκαιρίες διαμοιρασμού της επένδυσης με τους ναυλωτές οδηγεί σε μια διαίρεση/διάσπαση κινήτρων: ένας πλοιοκτήτης ίσως επενδύσει το αρχικό κεφάλαιο για να τοποθετήσει τεχνολογία ενεργειακής αποδοτικότητας, αλλά στη συνέχεια δεν αποσβένει το κόστος εγκατάστασης τους από τον περιορισμό των καυσίμων, αφού ναυλώνει τα πλοία τους και το όφελος καταλήγει στους ναυλωτές. Αυτό το πρόβλημα είναι κυρίως εμφανές για βραχυπρόθεσμες ναυλώσεις. Επιπρόσθετα, στην απόφαση υιοθέτησης τέτοιων μέτρων θα πρέπει να συνεκτιμηθεί το γεγονός ότι η μέγιστη ηλικία που δύναται να φτάσει ένα πλοίο είναι τα 25 έτη και ότι ενδεχομένως να πωληθεί ακόμα και πάνω από μία φορές στη διάρκεια της ζωής του. Κάποια από τα μέτρα εξοικονόμησης όπως φάνηκε και από τα αποτελέσματα με τη χρήση του εργαλείου EE APPRAISAL TOOL FOR IMO, του νηογνώμονα DNV-GL, παρουσιάζουν μεγάλη αβεβαιότητα και ο χρόνος απόσβεσης της επένδυσης τους ξεπερνάει τα 25 χρόνια και άρα το συνολικό χρόνο ζωής του πλοίου. Επιβαρυντικός παράγοντας αποτελεί και το ότι για την εφαρμογή των περισσότερων μέτρων ESD απαιτείται δεξαμενισμός του πλοίου. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα το πλοίο να χρειαστεί να μείνει εκτός λειτουργίας για περισσότερο χρονικό διάστημα και να μην αποφέρει έσοδα για το διαχειριστή του. Ως γενικός κανόνας ισχύει ότι ένα μέτρο εξοικονόμησης ενέργειας κοστίζει περισσότερο και έχει μεγαλύτερο βαθμό αβεβαιότητας όταν είναι νέας τεχνολογίας, με το κόστος πρόσκτησης του να φθίνει με την πάροδο του χρόνου και η τεχνολογία που χρησιμοποιεί να καθίσταται πιο ώριμη. Τέτοιο παράδειγμα αποτελεί το PBCF, το οποίο δεν απαιτεί υψηλό κόστος εγκατάστασης και η τοποθέτησή του μπορεί να εκτελεστεί κατά τη διάρκεια ενός προγραμματισμένου δεξαμενισμού χωρίς μεγάλες τροποποιήσεις για το πλοίο.

Τέλος, καθοριστικός παράγοντας για τη λήψη απόφασης της υιοθέτησης κάποιου μέτρου αποτελεί η τρέχουσα τιμή του καυσίμου. Όσο το καύσιμο είναι διαθέσιμο σε χαμηλές τιμές, η απόσβεση της επένδυσης μέσω της εξοικονόμησης καυσίμου καθίσταται μη βιώσιμη. Η βιωσιμότητα της ναυτιλίας, όπως και των άλλων βιομηχανιών, εξαρτάται κατά μεγάλο ποσοστό από την ελαστικότητα της ζήτησης για την υπηρεσία και την αποδοτικότητα μέσα από την ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους. Οι τεχνολογίες εξοικονόμησης ενέργειας μπορούν να έχουν θετικό αντίκτυπο στην κατανάλωση καυσίμου και στις εκπομπές των εμπορικών πλοίων, ωστόσο η εξοικονόμηση καυσίμου που μπορεί να επιτευχθεί είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί, λόγω και της υφιστάμενης δυσπιστίας εκ μέρους των πλοιοκτητών και των διαχειριστών πλοίων ως προς τους σχετικούς τεχνικούς κινδύνους και τα κρυφά κόστη των όχι και τόσο ώριμων τεχνολογιών.



## Βιβλιογραφία

1. ABS. (2019). Air Lubrication Technology. ABS.
2. ABS. (2021, Νοέμβριος 1). Ship Energy Efficiency Measures - Status and Guidance. City Plaza Drive Spring: ABS. Ανάκτηση από eagle.org: [https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/ABS\\_Energy\\_Efficiency\\_Advisory.pdf](https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/ABS_Energy_Efficiency_Advisory.pdf)
3. Babicz, J. (2015). Encyclopedia of Ship Technology, Second Edition. Gdansk: Wartsila Corporation.
4. BureauVeritas. (2021). Reducing Ship Emissions - IMO EEXI & CII/SEEMP. Veritas, Bureau.
5. CHIHARU KAWAKITA, S. S. (2015). Application of Simulation Technology to Mitsubishi Air Lubrication System. Στο S. S. CHIHARU KAWAKITA, Mitsubishi Heavy Industries Technical Review Vol. 52 No. 1 (σσ. 50-56).
6. DNV. (2021, Νοέμβριος 1). dnv.com. Ανάκτηση από dnv.com: <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/eexi/calculation.html>
7. DNV-GL . (2016). EE appraisal tool for IMO. Hovik, Norway: DNV-GL.
8. ECOMARINEPOWER. (2022, Φεβρουάριος 24). Ανάκτηση από ecomarinepower.com: <https://www.ecomarinepower.com/en/aquarius-eco-ship>
9. Elangovan, M. (2020, Νοέμβριος 11). rspsciencehub.com. Ανάκτηση από rspsciencehub.com: [www.rspscience.com](http://www.rspscience.com)
10. Fabian Tillig, W. M. (2015). Systems modelling for energy-efficient shipping. Σουηδία: Chalmers University of Technology.
11. Hüffmeier J., J. M. (2021). State-of-the-Art Methods to Improve Energy Efficiency of Ships. Journal of Marine Science and Engineering.
12. ICS. (2021, Νοέμβριος 1). ICS-SHIPPING. Ανάκτηση από ics-shipping.org: <https://www.ics-shipping.org/shipping-fact/environmental-performance-environmental-performance/>
13. IMO. (2016). MODULE 2, SHIP ENERGY EFFICIENCY REGULATIONS AND RELATED GUIDELINES. ΛΟΝΔΙΝΟ: IMO.
14. IMO. (2020). Fourth Greenhouse Gas Study 2020. IMO.
15. IMO. (2021, Νοέμβριος). ANNEX 11, ROADMAP FOR DEVELOPING A COMPREHENSIVE IMO STRATEGY ON REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS, MEPC 70/18/Add.1, Annex 22, page 1. Ανάκτηση από imo.org: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/MEPC%2070-18-ADD.1%20\(E\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/MEPC%2070-18-ADD.1%20(E).pdf)
16. IMO. (2021, Νοέμβριος). International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL). Ανάκτηση από imo.org: [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)
17. IMO. (χ.χ.). MEPC.1/Circ.815. Λονδίνο: IMO.
18. IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Στο IPCC, Climate Change 2021, The Physical Science Basis (σσ. SPM 5-7, SPM 37). Λονδίνο: Cambridge University Press.
19. Jacob Teter, J. T. (2020, Ιούνιος). iea.org. Ανάκτηση από iea.org: <https://www.iea.org/reports/international-shipping-2>





20. Japan Hamworthy & Co., L. (2022, Φεβρουαρίου 05). japanham. Ανάκτηση από japanham.com: [https://www.japanham.com/en/service/sistemer\\_clt/](https://www.japanham.com/en/service/sistemer_clt/)
21. Johanson, J. H. (2021, Απρίλιος 20). State-of-the-Art Methods to Improve Energy Efficiency of Ships. Journal of Marine Science and Engineering, σ. 19.
22. Joon-Hyoung Lee, M.-C. K.-J.-G. (2017). Study on Performance of Combined Energy Saving Devices For Container Ship by Experiments. Espoo, Finland: Fifth International Symposium on Marine Propulsion smp'17.
23. Karp, E. (2015, 03 23). Economist. Ανάκτηση από <https://impact.economist.com/perspectives/sustainability/revisiting-wealth-nations-seas>
24. Khasnabis, S. (2021, Νοέμβριος 11). Marine Insight. Ανάκτηση από marineinsight.com: <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/nose-jobs-for-ships-reasons-behind-retrofitting-bulbous-bow/>
25. Mariusz Giermalczyk, P. K. (2021, Φεβρουάριος 14). Assessment of the Propulsion System Operation of the Ships Equipped with the Air Lubrication System. MDPI, σ. 15.
26. MASUKO Akira, S. K. (2011). Development of Environmentally-Friendly Container Carrier “eFuture 13000C”. TOKYO: IHI ENGINEERING REVIEW.
27. Molland, A. F. (2008). The Maritime Engineering Reference Book - A Guide to Ship Design, Construction and Operation. Oxford, UK: Elsevier Ltd.
28. Moore, R. (2020, Μαρτίου 13). Riviera. Ανάκτηση από rivieramm.com: <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/damen-air-cavity-system-cuts-fuel-consumption-on-ocean-cruise-shipsnbsp-58531>
29. Online, C. (2022, Φεβρουάριος 5). CFD Online. Ανάκτηση από cfd-online.com: [https://www.cfd-online.com/Wiki/K-epsilon\\_models](https://www.cfd-online.com/Wiki/K-epsilon_models)
30. PBT International NV. (2022, Φεβρουάριος 16). Ανάκτηση από pbt-international.com: <https://pbt-international.com/price-information/>
31. Propulsion Committee, I. (2011-2014). Final Report and Recommendations to the 27th ITTC. Copenhagen: ITTC.
32. Rob Winkel, Arno van den Bos, Ulf Weddige - European Commission. (2015). Study on energy efficiency technologies for ships. Λουξεμβούργο: European Commission.
33. S.Marantis, D. (2012). Diploma Thesis: Improvement of Energy Efficiency of existing ships by performing & evaluating Energy Audits onboard. Αθήνα: National Technical University of Athens.
34. Sasaki N, A. M. (2016). Advantages of twin rudder system with asymmetric wing section aside a propeller. Newcastle: Newcastle University.
35. schneekluth.com. (χ.χ.). Ανάκτηση από schneekluth.com: <https://www.schneekluth.com/en/the-wed/>
36. Silverstream Technologies. (2015, Μάρτιος 11). Ανάκτηση από ship.gr: <http://www.ship.gr/news6/silver1.htm>
37. Singh, A. K. (2018, Απριλίου 17). Learn Ship Design. Ανάκτηση από lshipdesign.blogspot.com: <https://lshipdesign.blogspot.com/2018/04/>
38. SkySails Propulsion. (2022, Φεβρουάριος 24). Ανάκτηση από skysails-marine.com: <https://skysails-marine.com/technology.html>
39. Stopford, M. (2018). Ναυτιλιακή Οικονομική. Στο M. Stopford, Ναυτιλιακή Οικονομική (σσ. 125-126). Αθήνα: Παπαζήση.
40. TARGETS. (2014). Guidelines for energy efficient ships.
41. The Specialist Committee on Energy Saving Methods. (2017, Νοέμβριος 1). Final Report and Recommendations to the 28th ITTC. WUXI: ITTC. Ανάκτηση από ittc.info: <https://ittc.info>





42. The Specialist Committee on Energy Saving Methods. (2021). Final Report and Recommendations to the 29th ITTC. Virtual: ITTC.
43. Todd Chou, V. K. (2021, Φεβρουάριος 9). A Comeback of Wind Power in Shipping: An Economic and Operational Review on the Wind-Assisted Ship Propulsion Technology. MDPI, σ. 16.
44. Tran, T. A. (2017). Reducing Greenhouse Gas Emissions from Ships through Analyzing of Marginal Abatement Cost (MAC) Curves. Global Journal of Science Frontier Research : E Marine Science, σ. 9.
45. Xiaoliang, D. (2020). Ship Energy Saving And Emission Reduction. Wuhan: Wuhan University of Technology.
46. Yaser Sharifi, H. G. (2017). Various Innovative Technologic Devices in Shipping Energy Saving and Diminish Fuel Consumption. International Journal of Physics, σσ. Vol. 5, No. 1, 21-29,.
47. Yong, C. (2022, Φεβρουάριος 20). springer.com. Ανάκτηση από SpringerLink: [https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-94-007-2739-7\\_628](https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007/978-94-007-2739-7_628)
48. YONHAP NEWS AGENCY. (2018, Σεπτέμβριος 5). Ανάκτηση από yna.co.kr: <https://en.yna.co.kr/view/AEN20180905005600320>
49. Yoshihisa Okada, K. K. (2017). The Battle Royal of Energy Saving Devices for a Ship. Espoo, Finland: Fifth International Symposium on Marine Propulsors.
50. ZACHARIADIS, P. (2011). EEDI EXPLAINED. SNAME.
51. Κοτρίκλα, Ά. Μ. (2015). Ναυτιλία και Περιβάλλον. Στο Ά. Μ. Κοτρίκλα, Ναυτιλία και Περιβάλλον (σσ. 21, 34). Αθήνα: ΣΕΑΒ.
52. Υφαντής Ηλίας, Ζάννης Θεόδωρος, Κατσάνης Ιωάννης. (2013). Βασικές Αρχές Πρόωσης Πλοίων, Translation in Greek of the MAN Diesel & Turbo paper entitled "Basic Principles of Ship Propulsion". Αθήνα: Σχολή Ναυτικών Δοκίμων - Τομέας Ναυπηγικής και Ναυτικής Μηχανολογίας.