



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΑΙΓΑΙΟΥ**
Τμήμα Ναυτιλίας και
Επιχειρηματικών Υπηρεσιών

&

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**
Τμήμα Μηχανικών Βιομηχανικής
Σχεδίασης και Παραγωγής



ΔΙΔΡΥΜΑΤΙΚΟ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΝΕΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ ΚΑΙ ΤΙΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ»

ΤΙΤΛΟΣ

**«Συμβολή των Ρυθμιστών Στροφών Κινητήρων στη βελτιστοποίηση της
Ενεργειακής Αποδοτικότητας των πλοίων»**

ΑΓΓΛΙΚΟΣ ΤΙΤΛΟΣ

**“The Contribution of Variable Speed Drives to the Optimization of Ship
Energy Efficiency”**

Όνοματεπώνυμο Σπουδαστή: Ξεροτάγαρος Κωνσταντίνος

Όνοματεπώνυμο Υπεύθυνων Καθηγητών:

Δρ. Νικητάκος Νικήτας / Δρ. Παπαχρήστος Δημήτριος

ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2020

ΤΙΤΛΟΣ

**«Συμβολή των Ρυθμιστών Στροφών Κινητήρων στη βελτιστοποίηση της
Ενεργειακής Αποδοτικότητας των πλοίων»**

ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ

Ξεροτάγαρος Κωνσταντίνος

**Μεταπτυχιακή Διατριβή που υποβάλλεται στο καθηγητικό σώμα για την μερική
εκπλήρωση των υποχρεώσεων απόκτησης του μεταπτυχιακού τίτλου του
Διδρυματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Νέες Τεχνολογίες στη
Ναυτιλία και τις Μεταφορές» του Τμήματος Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών
Υπηρεσιών του Πανεπιστημίου Αιγαίου και του Τμήματος Μηχανικών
Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.**

Δήλωση συγγραφέα διπλωματικής διατριβής

Ο/Η κάτωθι υπογεγραμμένος / ηΞΕΡΟΤΑΓΑΡΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ, τουΓΕΩΡΓΙΟΥ....., με αριθμό μητρώου95..... φοιτητής / ~~τρια~~ του. Διδρυματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Νέες Τεχνολογίες στη Ναυτιλία και τις Μεταφορές» του Τμήματος Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών Υπηρεσιών του Πανεπιστημίου Αιγαίου και του Τμήματος Μηχανικών Βιομηχανικής Σχεδίασης και Παραγωγής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής διατριβής και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην διατριβή. Επίσης έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης βεβαιώνω ότι αυτή η διατριβή προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά ειδικά για τη συγκεκριμένη μεταπτυχιακή διπλωματική διατριβή».

Ο δηλών

ΞΕΡΟΤΑΓΑΡΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Ημερομηνία

5/2/2020

Ευχαριστίες

Αφιερώνω τη παρούσα διπλωματική εργασία στους γονείς μου.

Θα ήθελα επίσης να προσφέρω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους τους καθηγητές του μεταπτυχιακού προγράμματος για τις γνώσεις που μας μεταλαμπάδευσαν κατά την διάρκεια των σπουδών μας.

Τέλος, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω τον κ. Δημήτριο Αποστολόπουλο, ο οποίος με εισήγαγε στον θαυμαστό κόσμο των ναυτλιακών αυτοματισμών καθώς και τον κ. Κωνσταντίνο Κανελλάκη για τις πολύτιμες συμβουλές του πάνω στο γνωστικό αντικείμενο των ρυθμιστών στροφών.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	
Εισαγωγή	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΩΝ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ	2
1.1 Σημασία της Ατμόσφαιρας	2
1.2 Ατμοσφαιρική Ρύπανση	4
1.3 Εκπομπές αέριων ρύπων από τη ναυτιλία	5
1.4 Επιπτώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον	8
1.5 Συνισφορά της ναυτιλίας στην ατμοσφαιρική ρύπανση και επίδραση στην κλιματική αλλαγή	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 - ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΗΣ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑ	13
2.1 IMO - Ο ρόλος του Διεθνούς Οργανισμού Ναυσιπλοΐας (International Maritime Organization)	13
2.2 Το Παράρτημα VI της MARPOL και η πρόληψη της αέριας ρύπανσης από πλοία	15
2.2.1 Εκπομπές SOx και NOx	16
2.2.2 Εκπομπές Διοξειδίου του άνθρακα (CO2)	18
2.3 EEDI - Δείκτης Αποδοτικού Ενεργειακού Σχεδιασμού (Energy Efficiency Design Index)	20
2.3.1 Γραμμή αναφοράς του Δείκτη EEDI	22
2.3.2 Περιορισμοί του Δείκτη EEDI	25
2.4 SEEMP - Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Αποδοτικότητας Πλοίου (Ship Energy Efficiency Management Plan)	25
2.4 EEOI - Δείκτης Αποδοτικής Ενεργειακής Λειτουργίας του πλοίου (Energy Efficiency Operational Indicator)	27
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 - ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΚΙΝΗΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ	29
3.1 Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις πλοίων	29
3.1.1 Κατηγοριοποίηση Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων Πλοίων	29
3.2 Γενικά στοιχεία για τους Ασύγχρονους Τριφασικούς Κινητήρες	31
3.2.1 Αρχή λειτουργίας των Ασύγχρονων Τριφασικών Μηχανών	33
3.2.2 Η έννοια της Ολίσθησης του δρομέα	34
3.2.3 Η σημασία της Ροπής σε έναν Επαγωγικό Κινητήρα	34
3.3 Πινακίδα Ασύγχρονου Τριφασικού Κινητήρα	36
3.3.1 Συνδεσμολογία Αστήρα	37
3.3.2 Συνδεσμολογία Τριγώνου	38
3.3.3 Αυτόματος διακόπτης αστήρα-τριγώνου (Y-Δ)	38
3.4 Ρύθμιση στρόφων ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα με μετατροπείς συχνότητας	40
3.4.1 Αρχή λειτουργίας μετατροπέων συχνότητας	41
3.4.2 Δομή των μετατροπέων συχνότητας	42
3.4.3 Βαθμωτός Έλεγχος	43
3.4.4 Διανυσματικός Έλεγχος με Προσανατολισμό Πεδίου	44
3.4.5 Πλεονεκτήματα Ρυθμιστών Στροφών	45
3.4.6 Συνήθεις εφαρμογές των ηλεκτρονικών ρυθμιστών στρόφων	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΛΟΙΩΝ	46
4.1 Εξοικονόμηση ενέργειας στους ανεμιστήρες του μηχανοστασίου	46
4.1.1 Σχεδιασμός Συστήματος	47
4.1.2 Υπολογισμός εξοικονόμησης ενέργειας στους ανεμιστήρες εξαερισμού μέσω του λογισμικού ABB EnergySave Calculator	55
4.2 Εξοικονόμηση ενέργειας στις αντλίες θαλασσινού νερού	60
4.2.1 Νόμοι της ομοιότητας (Affinity Laws)	60
4.2.2 Σχεδιασμός Συστήματος	62
4.2.3 Υπολογισμός εξοικονόμησης ενέργειας στις αντλίες θαλασσινού νερού μέσω του λογισμικού ABB EnergySave Calculator	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	66
Πηγές	67

Περίληψη

Διανύουμε μια εποχή, όπου η εξοικονόμηση ενέργειας και η προστασία του περιβάλλοντος αποτελεί κυρίαρχο αντικείμενο της επιστημονικής και όχι μόνο κοινότητας. Από το κομμάτι αυτό δεν θα μπορούσε να λείπει και ο τομέας της ναυτιλίας όπου βελτιώσεις σε υπάρχοντα συστήματα, μπορούν να έχουν θετικό περιβαλλοντολογικό αντίκτυπο και οικονομικά οφέλη για τις εταιρίες. Η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό την θεωρητική επισκόπηση και αξιολόγηση της τεχνολογίας των ρυθμιστών στρόφων ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων και τον τρόπο με τον οποίο οι ηλεκτρονικές αυτές διατάξεις μπορούν να αναβαθμίσουν την ενεργειακή αποδοτικότητα ενός πλοίου όταν αξιοποιούνται σε εφαρμογές όπως οι αντλίες αλμυρού νερού και οι ανεμιστήρες των μηχανοστασίων.

Εισαγωγή

Σκοπός & Ερευνητικά Ερωτήματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία χωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος περιγράφεται η αρνητική συνεισφορά της ναυτιλίας στην ατμοσφαιρική ρύπανση, γεγονός που οδήγησε στην εισαγωγή διεθνών, περιφερειακών και εθνικών κανονισμών για την αντιμετώπιση της.

Στο δεύτερο μέρος περιγράφεται η αρχή λειτουργίας των ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων και αναλύεται η τεχνολογία πίσω από τα συστήματα μετάδοσης κίνησης μεταβλητής συχνότητας.

Τα βασικά ερευνητικά ερωτήματα που τίθενται είναι τα εξής:

1. Σε τι είδους διεργασίες αξιοποιούνται οι ρυθμιστές στροφών και υπό ποιες προϋποθέσεις συμβάλλουν στην βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας ενός πλοίου και συνεπώς στον περιορισμό των εκπομπών CO₂;
2. Προκύπτουν οικονομικά οφέλη ώστε να αποτελεί η αξιοποίηση της εν λόγω τεχνολογίας μια ελκυστική και συμφέρουσα λύση;

Η απάντηση των παραπάνω ερωτημάτων γίνεται με συνδυαστική χρήση της σχετικής βιβλιογραφίας και μιας διαδραστικής υπολογιστικής εφαρμογής της ABB, του EnergySave Calculator.

1. Περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις των θαλάσσιων μεταφορών

1.1 Σημασία της Ατμόσφαιρας

Η **ατμόσφαιρα** είναι το προστατευτικό αεριώδες περίβλημα το οποίο ευθύνεται για τη συντήρηση της ζωής στον πλανήτη. Αποτελεί πηγή του διοξειδίου του άνθρακα για την φωτοσύνθεση των φυτών, πηγή οξυγόνου για την αναπνοή και επίσης παρέχει άζωτο στους οργανισμούς για τη σύνθεση των δομικών τους μορίων [1]. Το σχήμα της είναι παρόμοιο με αυτό της γης, δηλαδή σχεδόν σφαιρικό, συμπιεσμένο στους πόλους και συγκρατείται λόγω της βαρύτητας.

Η ατμόσφαιρα αποτελεί επίσης αναπόσπαστο κομμάτι του **υδρολογικού κύκλου**, ενός πολύ σημαντικού καιρικού φαινομένου που ευθύνεται για την ανακύκλωση και τη γενικότερη κυκλοφορία της υδάτινης μάζας καθ'όλες τις φάσεις και με όλους τους δυνατούς τρόπους. Πιο συγκεκριμένα, στον υδρολογικό κύκλο συγκαταλέγονται: η εξατμισοδιαπνοή, οι κατακρημνίσεις (βροχή, χιονοπτώσεις), η αποθήκευση νερού στην επιφάνεια του εδάφους (λίμνες, παγετώνες, ωκεανοί) ή εντός αυτού (κοιτάσματα νερού στο υπέδαφος) καθώς και η οριζόντια μεταφορά του από και προς μία περιοχή (ποταμοί) [2].

Στα πλαίσια του ζωτικού και προστατευτικού της ρόλου, η ατμόσφαιρα απορροφά το μεγαλύτερο μέρος των κοσμικών ακτίνων αλλά και της υπεριώδους ακτινοβολίας προφυλάσσοντας με το τρόπο αυτό τους οργανισμούς από τις καταστρεπτικές τους επιπτώσεις. Αντίθετα, επιτρέπει μονάχα την διέλευση των ραδιοκυμάτων υψηλής συχνότητας, των μικροκυμάτων χαμηλότερης συχνότητας, του φωτός και ενός συγκεκριμένου τμήματος της υπέρυθρης ακτινοβολίας, συμβάλλοντας έτσι στην σταθεροποίηση της θερμοκρασίας του πλανήτη [1],[3].

Λαμβάνοντας υπόψη τις θερμοκρασιακές μεταβολές, η κατακόρυφη διαίρεση της ατμόσφαιρας έχει ως εξής: [8],[9]

Τροπόσφαιρα

Η Τροπόσφαιρα αποτελεί την κατώτερη περιοχή της Ατμόσφαιρας και εκτείνεται από την επιφάνεια της γης μέχρι το ύψος των 12 ± 5 km. Η τιμή αυτή είναι προσεγγιστική, καθώς το ακριβές υψόμετρο εξαρτάται και από άλλους παράγοντες όπως το γεωγραφικό πλάτος και η εποχή του έτους.

Το τμήμα της τροπόσφαιρας που εκτείνεται από το έδαφος μέχρι και το ύψος των 2 km περίπου αποτελεί το στρώμα τριβής. Μέσα σε αυτό το στρώμα σημειώνονται οι περισσότερες ημερήσιες μεταβολές της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας.

Κύρια χαρακτηριστικά της τροπόσφαιρας είναι τα εξής:

- Η σχεδόν ομοιόμορφη ελαττωσή της θερμοκρασίας με το ύψος. Η μείωση αυτή κυμένεται κατά μέσο όρο σε $6.5^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ή $0,65^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ και ονομάζεται κατακόρυφη θερμοβαθμίδα.
- Η αύξηση της ταχύτητας του ανέμου με το ύψος (λόγω της σταδιακά μειούμενης επίδρασης της τριβής της επιφάνειας) μέχρις ενός ορισμένου ορίου, με τη μέγιστη ταχύτητα να σημειώνεται στα ανώτερα όρια της τροπόσφαιρας.
- Τη σημαντική περιεκτικότητα σε υδρατμούς, ιδιαίτερα στα κατώτερα στρώματα της.

Από καθαρά μετεωρολογικής άποψης, η τροπόσφαιρα αποτελεί το σημαντικότερο στρώμα της γήινης ατμόσφαιρας καθώς οι συνθήκες που επικρατούν συμβάλλουν στη δημιουργία όλων σχεδόν των ατμοσφαιρικών διαταράξεων, των εναλλαγών του καιρού και το σύνολο των περισσότερων μετεωρολογικών φαινομένων.

Η άνω οριακή περιοχή της τροπόσφαιρας ονομάζεται Τροπόπαυση. Αυτή αποτελεί περισσότερο μια μεταβατική ζώνη ανάμεσα στην τροπόσφαιρα και στο αμέσως ακόλουθο στρώμα της ατμόσφαιρας (Στρατόσφαιρα), παρά ένα συγκεκριμένο διαχωριστικό όριο. Στη τροπόπαυση δεν υφίσταται το φαινόμενο της κατακόρυφης θερμοβαθμίδας που χαρακτηρίζει την τροπόσφαιρα, με τις τιμές της θερμοκρασίας να κυμαίνονται από -70°C με -80°C πάνω από ισημερινές περιοχές και από -55°C με -60°C πάνω από περιοχές μέσων γεωγραφικών πλατών.

Στρατόσφαιρα

Η Στρατόσφαιρα βρίσκεται αμέσως μετά την μεταβατική ζώνη της Τροπόπαυσης. Βάση των φυσικών της ιδιοτήτων και κυρίως των θερμοκρασιακών μεταβολών, αυτή μπορεί να διακριθεί σε ανώτερη και κατώτερη Στρατόσφαιρα.

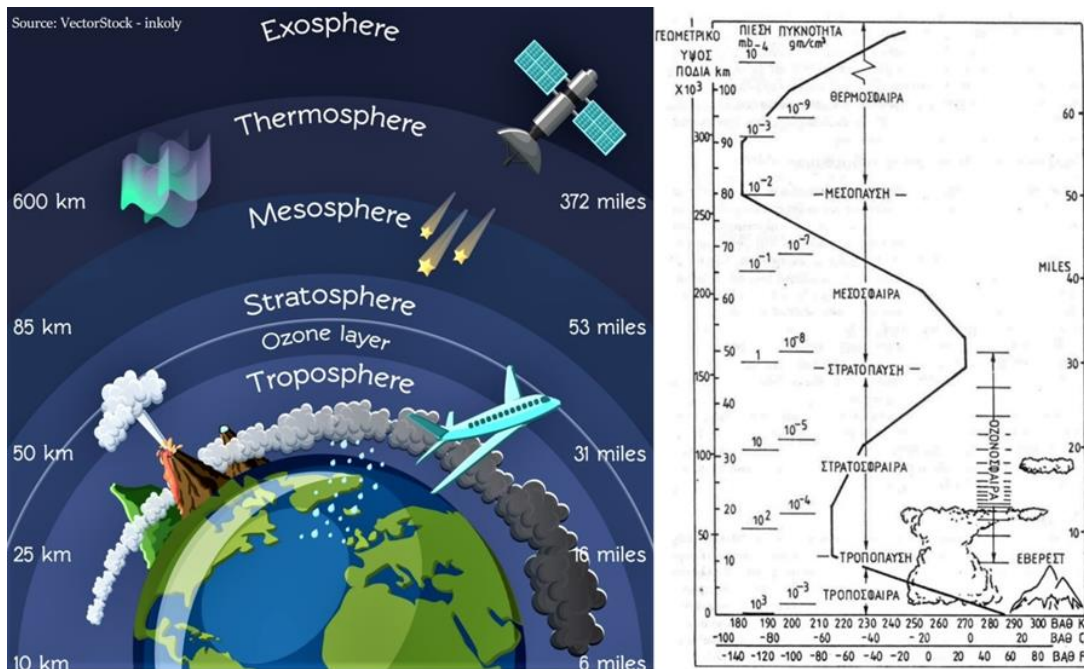
Η κατώτερη Στρατόσφαιρα χαρακτηρίζεται από μια αξιοσημείωτη ευστάθεια. Εντός αυτής της περιοχής δεν υφίσταται η μεταβολή της θερμοκρασίας ως συνάρτηση του ύψους και εκτείνεται μέχρι το υψόμετρο των 35 km. Χαρακτηριστικά γνωρίσματα της κατώτερης Στρατόσφαιρας είναι οι σχετικά χαμηλές τιμές της θερμοκρασίας και η μεγάλη ξηρασία εξαιτίας της απουσίας υδρατμών.

Στην ανώτερη Στρατόσφαιρα, δηλαδή πάνω από το ύψος των 35 km, η θερμοκρασία αυξάνεται μέχρι σχεδόν τους 0°C (στα 50km). Αυτό ουσιαστικά οφείλεται στην ύπαρξη του στρώματος όζοντος, το οποίο απορροφά τμήματα της εισερχόμενης ηλιακής ακτινοβολίας.

Η διαχωριστική μεταβατική ζώνη ανάμεσα στη Στρατόσφαιρα και στο αμέσως επόμενο ατμοσφαιρικό στρώμα καλείται Στρατόπαυση. Αυτή βρίσκεται στα 50-55 km και είναι η περιοχή στην οποία η συνεχώς αυξανόμενη τιμή της θερμοκρασίας μέσα στη Στρατόσφαιρα παίρνει τη μέγιστη τιμή της. Εντός της Στρατόπαυσης, η θερμοκρασιακή συμπεριφορά χαρακτηρίζεται σχεδόν ισοθερμική. Τέλος, από την επιφάνεια της Γης μέχρι και μέχρι το οριακό αυτό σημείο βρίσκεται συγκεντρωμένο το 99.9% της ατμοσφαιρικής μάζας.

Τα 3 τελευταία στρώματα της γήινης ατμόσφαιρας αποτελούν, κατά σειρά, η **Μεσόσφαιρα**, η **Θερμόσφαιρα** και η **Εξώσφαιρα**.

Τα καιρικά φαινόμενα, η παρουσία υδρατμών, οι ανθρώπινες δραστηριότητες και κατά συνέπεια οι εκπομπές των ατμοσφαιρικών ρύπων, λαμβάνουν χώρα στην τροπόσφαιρα. Επομένως οποιαδήποτε νομοθεσία σχετική με την ρύπανση του ατμοσφαιρικού αέρα, αφορά τον αέρα της τροπόσφαιρας σε εξωτερικούς χώρους, εξαιρουμένου του αέρα σε χώρους εργασίας (για τους οποίους ισχύουν διάφορες άλλες διατάξεις Υγιεινής & Ασφάλειας Εργασίας και στους οποίους συνήθως δεν επιτρέπεται η πρόσβαση σε μη εξουσιοδοτημένο προσωπικό) [1].



Εικόνα 1.1 - Κατακόρυφη διαίρεση της ατμόσφαιρας (VectorStock –inkoly & Μπαλαφούτης και Μαχαίρας)

1.2 Ατμοσφαιρική Ρύπανση

Ατμοσφαιρικός αέρας απαλλαγμένος από ρύπους θα υπήρχε μόνο στη περίπτωση που το ανθρώπινο είδος και οι δραστηριότητες που προέρχονται από αυτό, απουσίαζαν από τον πλανήτη. Ακόμα και αρκετούς αιώνες πριν, οι διάφορες καύσεις επιβάρυναν τον ατμοσφαιρικό αέρα με σωματίδια, διοξείδιο του άνθρακα, υδρογονάνθρακες κτλ.

Ξεκινώντας από τη Βιομηχανική Επανάσταση και καταλήγοντας στις μέρες μας, οι επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης γίνονται αισθητές σε πλανητικό πλέον επίπεδο, μέσω των όξινων βροχών, τη μείωση του στρώματος του όζοντος στην στρατόσφαιρα και κυρίως του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Το πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης εντοπίζεται στις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις παραγωγής ενέργειας για την κάλυψη των σύγχρονων αναγκών. Στα αστικά περιβάλλοντα, τα μέσα μαζικής μεταφοράς αποτελούν την βασικότερη πηγή παραγωγής ατμοσφαιρικών ρύπων με τη καύση συμβατικών ορυκτών καυσίμων να αποτελεί τη “καρδιά” του προβλήματος.

Η ατμοσφαιρική ρύπανση μπορεί να περιγραφεί σχηματικά ως εξής:

Εκπομπές → μεταφορά, διάχυση, μετατροπές στην ατμόσφαιρα → επιπτώσεις σε οργανισμούς, υλικά, οικοσυστήματα

Ως “**ρύπος**” ορίζεται οποιαδήποτε ουσία εμφανίζεται στον αέρα και δύναται να συνεισφέρει αρνητικά τόσο στην υγεία του ανθρώπου όσο και στο περιβάλλον. Ως ατμοσφαιρικοί ρύποι ορίζονται οι συγκεντρώσεις αέριων, υγρών ή στερεών αιωρούμενων σωματιδίων, ικανές να αποτελέσουν απειλή για την ομαλή διαβίωση και την υγεία των οργανισμών ή παρεμπόδιση και μεταβολή της ομαλής λειτουργίας των οικοσυστημάτων.

Οι ρύποι που εκπέμπονται από μια πηγή απευθείας στην ατμόσφαιρα, αλλοιώνοντας την ποιότητα του αέρα ονομάζονται **πρωτογενείς**. Χαρακτηριστικά παράδειγματα αποτελούν, το μονοξείδιο του άνθρακα που εκπέμπεται από τις εξατμίσεις των οχημάτων και το διοξείδιο του θείου από τις κάυσεις των γαιανθράκων (κάρβουνο – λιγνίτης)

Οι ρύποι που προκύπτουν από χημικές ή φωτοχημικές αντιδράσεις μεταξύ των υφιστάμενων πρωτογενών ρύπων ονομάζονται δευτερογενείς. Τυπικό παράδειγμα της συγκεκριμένης κατηγορίας αποτελεί το όζον.

Μερικά από τα αέρια ή τα σωματίδια που συγκαταλέγονται στους ρύπους είναι επίσης και φυσικά συστατικά της ατμόσφαιρας. Για παράδειγμα το μονοξείδιο του άνθρακα ή το διοξείδιο του θείου ενώ υπάρχουν στην ατμόσφαιρα, αρχίζουν να θεωρούνται επιβλαβή όταν οι συγκεντρώσεις τους ξεπερνούν ορισμένα επιτρεπτά όρια. Άλλα αέρια μεταβλητής σύστασης, όπως το διοξείδιο του άνθρακα και το όζον, αποτελούν επίσης φυσικά συστατικά της ατμόσφαιρας, χρωστώντας την ύπαρξη τους στον αέρα. Τα εν λόγω αέρια παίζουν κυρίαρχο ρόλο σε φυσικές διεργασίες και παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον, καθώς συνδέονται άμεσα με τις επιπτώσεις των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων σε πλανητική κλίμακα.

Από τα παραπάνω συνεπώς προκύπτει πως οι πηγές από τις οποίες εκπέμπονται ατμοσφαιρικοί ρύποι κατατάσσονται σε δύο κύριες κατηγορίες: τις ανθρωπογενείς και τις φυσικές πηγές.

Ανθρωπογενείς πηγές ρύπανσης: Όπως προκύπτει και από την ονομασία τους, στη κατηγορία αυτή εντάσσονται όλες οι πηγές ρύπανσης που είναι αποτέλεσμα της ανθρώπινης δραστηριότητας [4]. Οι ανθρωπογενείς πηγές μπορούν να διακριθούν σε επιμέρους κατηγορίες: τις σταθερές και κινητές. Στις σταθερές πηγές περιλαμβάνονται δραστηριότητες όπως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η βιομηχανία, οι κεντρικές θερμάνσεις, τα αστικά λύματα, τα στερεά απόβλητα, οι γεωργικές δραστηριότητες κ.α. Στις κινητές πηγές συγκαταλέγονται οι ρύποι που προέρχονται από τις χερσαίες, θαλάσσιες και εναέριες μεταφορές.

1.3 Εκπομπές αέριων ρύπων από τη ναυτιλία

Παραδοσιακά, η ρύπανση εξαιτίας των θαλάσσιων μεταφορών συνδέονταν κυρίως με την αλλόωση του υδάτινου στοιχείου και τη καταστροφή των θαλάσσιων οικοσυστημάτων. Το κυριότερο λόγο αποτελεί η δραματική αύξηση του παγκόσμιου στόλου και συνεπώς των δρομολογίων σε όλες τις θάλασσες και ωκεανούς ανά την υφήλιο. Υπό αυτή την έννοια, η οποιαδήποτε αναφορά σε ρύπανση προερχόμενη από πλοία αφορούσε μέχρι πρόσφοτα, κατά κύριο λόγο τη ρύπανση του θαλάσσιου χώρου/περιβάλλοντος. Ωστόσο, η απόλυτη σύνδεση των δύο αυτών εννοιών έπαψε τα τελευταία χρόνια να είναι τόσο απόλυτη, αφού στην εξίσωση μπήκε ένας ακόμη κρίσιμος, από περιβαλλοντικής σκοπιάς παράγοντας: Αυτός της ατμοσφαιρική ρύπανσης που προκαλείται από τα πλοία και των σχετικών επιπτώσεων, όχι μόνο κατά την μετακίνηση και εκτέλεση των θαλάσσιων μεταφορών, αλλά και κατά την διάρκεια που αυτά βρίσκονται προσαραγμένα εντός λιμένων, οι οποίοι στην πλειοψηφία τους γειτνιάζουν, με πολυάνθρωπα αστικά συγκροτήματα.

Έτσι, από τα παραπάνω προκύπτει πως το παραδοσιακό δίπτυχο θαλάσσιες μεταφορές-προστασία θαλάσσιου περιβάλλοντος έχει σταδιακά αρχίσει να μετεξελισσεται σε τρίπτυχο, προστιθέμενης (περιβαλλοντικά, πολιτικά και θεσμικά) της διάστασης της προστασίας της ατμόσφαιρας από τους ρύπους που εκπέμπονται από τους διάφορους τύπους πλοίων ανά τον κόσμο. [5]

Η ανάγκη προστασίας της ατμόσφαιρας από ρύπους προερχόμενους από τις θαλάσσιες μεταφορές έχει: πρώτον, παγκόσμιο χαρακτήρα λόγω των αερίων του θερμοκηπίου (κυρίως CO₂) που προστίθενται στις αντίστοιχες εκπομπές από χερσαίες πηγές (“θερμοκηπιακή ρύπανση”) και δεύτερον, περιφερειακό ή και τοπικό χαρακτήρα, όταν πρόκειται για κλειστές ή ημίκλειστες θάλασσες, σε στενά διεθνούς ναυσιπλοΐας ή εντός των λιμένων, λόγω των εκπομπών οξειδίων του θείου (SO_x), οξειδίων του αζώτου (NO_x), πτητικών οργανικών ενώσεων (VOCs) και αιωρούμενων σωματιδίων (PMs). Σε προηγούμενους θα πρέπει να συγκαταλέγονται και ρύποι, οι οποίοι λειτουργούν καταστρεπτικά για το στρατοσφαιρικό όζον (Halons, CFCs, PFCs, HCFCs). (C.C. Joyner/J. M. Mitchel)[6]

Η τροπόσφαιρα αποτελείται κυρίως από άζωτο (78%) και οξυγόνο (21%). Επίσης σε αυτή εμπεριέχονται αργό, διοξείδιο του άνθρακα και άλλα αέρια. Σε μια ναυτική μηχανή, η καύση των ναυτιλιακών καυσίμων πραγματοποιείται μέσω του οξυγόνου του αέρα και από αυτή παράγεται η απαραίτητη μηχανική ενέργεια για την κίνηση του πλοίου, ενώ ταυτόχρονα γίνεται αποβολή θερμικής ενέργειας και εκπομπή καυσαερίων.

Η σύσταση των ναυτιλιακών καυσίμων, βασίζεται κατά κύριο λόγο στον άνθρακα και το υδρογόνο (υδρογονάνθρακες πετρελαίου). Το περιεχόμενο του ναυτιλιακού πετρελαίου σε άνθρακα κυμαίνεται μεταξύ 84,9% και 87,4% (MEPC,2014). Περιέχουν επίσης προσμίξεις (πχ θείο) η περιεκτικότητα των οποίων διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος του καυσίμου (εάν είναι αποσταγματικό – MDO, MGO ή υπολειμματικό καύσιμο HFO). [7]

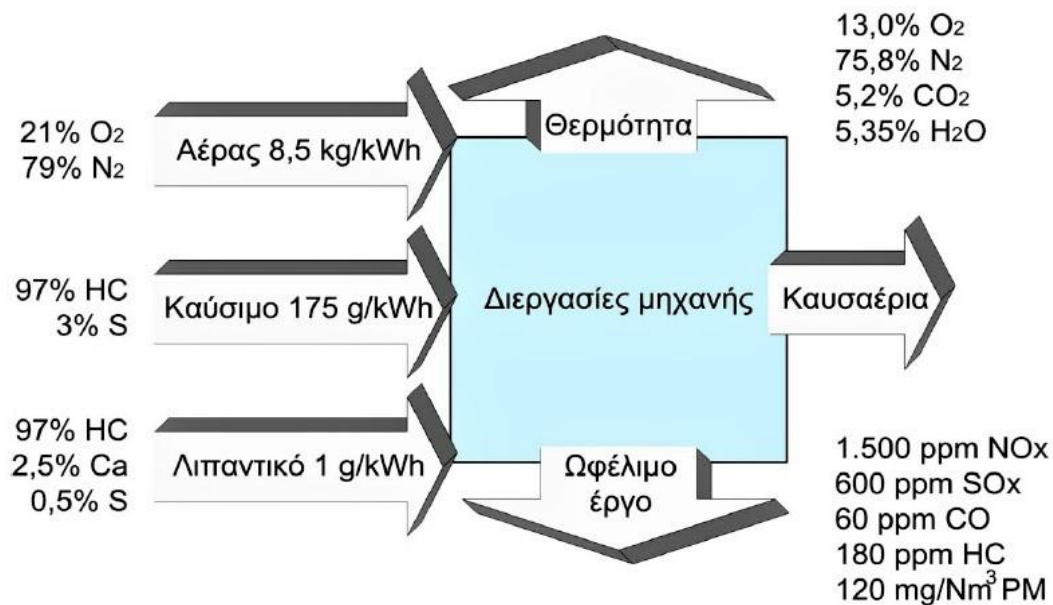
Τα καυσαέρια μιας ναυτικής μηχανής εμπεριέχουν κατά κύριο λόγο άζωτο (N₂), οξυγόνο (O₂), υδρατμούς (H₂O) και διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Επίσης, σε πολύ μικρότερο ποσοστό εμπεριέχουν οξείδια του αζώτου (NO_x), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), οξείδια του θείου (SO_x), άκαυστους υδρογονάνθρακες και αιωρούμενα σωματίδια (PM).

Το CO₂ προκύπτει από τη τέλεια καύση του άνθρακα των καυσίμων. Αντίστοιχα, από το υδρογόνο των καυσίμων απελευθερώνονται υδρατμοί (H₂O). Ωστόσο, στις μηχανές εσωτερικής καύσης δεν επιτυγχάνονται πάντα συνθήκες τέλει καύσης και από την ατελή καύση των καυσίμων μπορεί συνεπώς να προκύψει πλειάδα καυσαερίων: σωματίδια άνθρακα (αιθάλη), CO (μονοξείδιο του άνθρακα), άκαυστοι υδρογονάνθρακες ή μερικώς οξειδωμένοι υδρογονάνθρακες (Heywood, 1988).

Τα SO_x (οξείδια του θείου) οφείλονται στις υψηλές περιεκτικότητες σε θείο των ναυτιλιακών καυσίμων.

Σήμερα, τα ναυτιλιακά καύσιμα παγκοσμίως εμπεριέχουν κατά μέσο όρο 2,7% κ.β. θείο ή 27.000 ppm. Συγκριτικά, το όριο σε θείο για το πετρέλαιο κίνησης είναι 10 ppm, σύμφωνα με την οδηγία 2003/17/EK. Το θείο που περιέχουν τα καύσιμα οξειδώνεται κατά τη διάρκεια της καύσης σε οξείδια του θείου, κυρίως SO₂ και SO₃, σε τυπική αναλογία 15/1 (MAN B&W Diesel, 2004). Το SO₃ αντιδρά με την υγρασία (H₂O) και δημιουργεί σωματίδια θειικού οξέος (H₂SO₄) μικροσκοπικού μεγέθους, τα οποία αιωρούνται στην ατμόσφαιρα (αερολύματα).

Το άζωτο (N₂) της ατμόσφαιρας είναι χημικά αδρανές υπό κανονικές θερμοκρασίες και δεν αντιδρά με το οξυγόνο (O₂) του αέρα. Μέσα όμως στις μηχανές εσωτερικής καύσης, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που επικρατούν, κάνει αντιδράση με το οξυγόνο, με αποτέλεσμα να οξειδώνεται σε οξείδια του αζώτου (NO_x), μονοξείδιο του αζώτου (NO) και διοξείδιο του αζώτου (NO₂). Τα NO_x επίσης να σχηματίζονται (σε μικρότερο βαθμό) από την καύση συστατικών των καυσίμων στα οποία εμπεριέχεται άζωτο. Από τα παραπάνω προκύπτει πως σε αντίθεση με τα SO_x, ο περιορισμός των NO_x δεν γίνεται μέσω βελτιώσεων στη σύσταση των καυσίμων, αλλά με βελτιστοποίηση της διαδικασίας της ίδιας της καύσης. Τα αιωρούμενα σωματίδια (PM) αποτελούν ένα σύνθετο μίγμα οργανικών και ανόργανων ουσιών και περιλαμβάνουν ατομικό άνθρακα, στάχτη, αιθάλη, μικροσκοπικά σωματίδια καυσίμου που δεν κάηκε ή κάηκε ατελώς, άκαυστο λιπαντικό έλαιο, θειικά και υγρασία (Reynolds, 2004). Ειδικά στις εξατμίσεις των πλοίων, παράγονται κυρίως σωματίδια θειικών και αιθάλης (Agrawal et al., 2008· Moldanova et al., 2009).



Σχήμα1.1 - Είσοδος και έξοδος μιας ναυτικής μηχανής (Man & Diesel, 2004)

1.4 Επιπτώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον

Ενώσεις όπως το SO₂, τα NO_x και τα αιωρούμενα σωματίδια, έχει αποδειχτεί πως πλήττουν σοβαρά τόσο την ανθρώπινη υγεία όσο και το περιβάλλον. Το SO₂ μετατρέπεται σε θειικό οξύ, προκαλεί μείωση του pH των μετεωρολογικών κατακρημνισμάτων και καθ'αυτό το τρόπο δημιουργείται το φαινόμενο της όξινης βροχής. Η όξινη βροχή, ανάλογα με το pH και την διάρκεια, μπορεί να προκαλέσει βλάβες στους φυτικούς και ζωικούς οργανισμούς και διάβρωση / αλλοίωση των υλικών. Για παράδειγμα, όταν το μάρμαρο (CaCO₃) απορροφά SO₂, μετατρέπεται σε γύψο (CaSO₄). Ο γύψος είναι ένα υδατοδιάλυτο υλικό το οποίο χαρακτηρίζεται από μοριακό όγκο μεγαλύτερο από εκείνον του μαρμάρου, με αποτέλεσμα τη διάβρωση και τη πρόκληση ρωγμών σε μαρμάρινες κατασκευές.

Τα φαινόμενα αυτά έχουν παρατηρηθεί και σε αρχαιολογικούς χώρους της Αθήνας όπως η Ακρόπολη, και αυτό είχε ως αποτέλεσμα την προληπτική μετακίνηση αγαλμάτων από εξωτερικούς χώρους και την επιβολή μέτρων για τη μείωση του περιεχομένου θείου στο πετρέλαιο κίνησης και θέρμανσης. [7]

Τα κυριότερα οξειδία του αζώτου που παράγονται κατά την καύση είναι το μονοξείδιο και το διοξείδιο του αζώτου. Βασική επίπτωση των οξειδίων του αζώτου αποτελεί η συνεισφορά τους στον σχηματισμό του φωτοχημικού νέφους στην ατμόσφαιρα των αστικών κέντρων. Το φωτοχημικό νέφος δημιουργείται όταν τα NO_x και οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες, έπειτα από μια σειρά πολύπλοκων φωτοχημικών αντιδράσεων συνθέτουν όζον (O₃) όπως και μια πληθώρα άλλων οργανικών ενώσεων.

Το φωτοχημικό νέφος προκαλεί ερεθισμό στα μάτια και τους πνεύμονες, καταστροφή των φύλλων στα φυτά κ.ά. Τέλος τα NO_x συνεισφέρουν όπως και τα SO_x στον σχηματισμό της όξινης βροχής.

Τα αιωρούμενα σωματίδια με μέγεθος μεγαλύτερο από 10 μm παγιδεύονται στη μύτη ή τον φάρυγγα και στην συνέχεια απομακρύνονται ή καταπίνονται χωρίς να προκαλούν κάποιο ιδιαίτερο πρόβλημα υγείας. Τα μικρότερα όμως σωματίδια, και κυρίως εκείνα με διάμετρο μικρότερη των 2,5 μm εισέρχονται και παραμένουν στους πνεύμονες, με αποτέλεσμα την πρόκληση πνευμονικών δυσλειτουργιών.

Σύμφωνα με μελέτη (Corbett et al., 2007), τα αιωρούμενα σωματίδια που προέρχονται από την ναυτιλιακή βιομηχανία και μόνο, ευθύνονται για περισσότερους από 60.000 πρόωρους θανάτους ετησίως σε όλο τον πλανήτη από καρδιοαναπνευστικά προβλήματα και καρκίνο του πνεύμονα, με τα περισσότερα περιστατικά να λαμβάνουν χώρα κοντά στις ακτές της Ευρώπης, της Ανατολικής και της Νότιας Ασίας, όπου έντονη ναυτιλιακή δραστηριότητα αναπτύσσεται κοντά σε πυκνοκατοικημένες περιοχές.

Μια γενική επισκόπηση των επιπτώσεων της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

	SO ₂ , NO _x , PM, VOCs	CO ₂
Χωρική κλίμακα επιπτώσεων	Τοπική, περιφερειακή	Παγκόσμια
Χρονική κλίμακα επιπτώσεων	Βραχυπρόθεσμα, άμεσα Μακροπρόθεσμα, χρόνια	Περισσότερο μακροπρόθεσμα
Επιπτώσεις στο περιβάλλον	Όξινη βροχή Νέφος Φωτοχημικό νέφος Νέφος αιθαλομίχλης	Φαινόμενο θερμοκηπίου και παγκόσμια θέρμανση Ανοδος στάθμης της θάλασσας Ακραία καιρικά φαινόμενα Επιπτώσεις στους υδατικούς πόρους και τη γεωργία
Επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία	Ευθείες: Αναπνευστικά προβλήματα υγείων ατόμων Ερεθισμός σε μάτια, μύτη, πνεύμονες Ασθμα Χρόνια βρογχίτιδα Καρδιοπάθειες	Εμμεσες, που θα οφείλονται σε: Υψηλές θερμοκρασίες Ακραία καιρικά φαινόμενα Προβλήματα με τους υδατικούς πόρους και τη γεωργία κ.λπ.

Πίνακας 1.1 - Ατμοσφαιρική ρύπανση και οι επιπτώσεις της στην ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον [7]

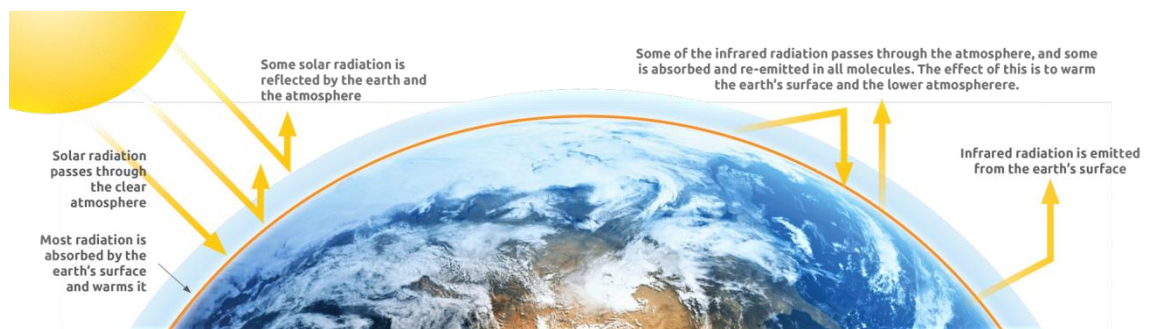
Τα επίπεδα CO₂, στις συγκεντρώσεις που παρατηρούνται στην ατμόσφαιρα, δεν ενέχουν άμεσες επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία, αποτελούν όμως το βασικό αίτιο για τη σημαντικότερη περιβαλλοντική πρόκληση της εποχής μας, το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Πιο αναλυτικά, το φως αποτελεί τμήμα της (ηλιακής) ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και αποτελείται από ένα ευρύτερο φάσμα από μήκη κύματος. Ως ορατή ακτινοβολία ορίζεται η ζώνη από το ερυθρό μέχρι το ιώδες. Ωστόσο, υπάρχει και ακτινοβολία με μεγαλύτερα μήκη κύματος, που καλύπτει τη ζώνη πέραν του ερυθρού, η λεγόμενη υπέρυθη, καθώς και με μικρότερα μήκη κύματος, που εκπέμπεται στη ζώνη πέραν του ιώδους, γνωστή και ως η υπεριώδης ακτινοβολία. Τόσο η υπέρυθη όσο και η υπεριώδης ακτινοβολία δεν συγκαταλέγονται στο ορατό φάσμα.

Ένα μέρος της ενέργειας που εκπέμπεται από το ήλιο διασχίζει την ατμόσφαιρα χωρίς να απορροφηθεί, υπό τη μορφή κυρίως ορατού φωτός, και θερμαίνει την επιφάνεια του εδάφους και της θάλασσας. Εφόσον η γη θερμαίνεται, εκπέμπει με τη σειρά της ενέργεια αυτή προς το διάστημα, με τη μορφή όμως υπέρυθρης ακτινοβολίας. Στη φυσιολογική σύσταση της ατμόσφαιρας υπάρχουν, σε πολύ μικρές ποσότητες, αέρια όπως το διοξείδιο του άνθρακα, το μεθάνιο και οι υδρατμοί τα οποία είναι διαφανή στο ορατό φως και συνεπώς δεν εμποδίζουν την ακτινοβολία του ήλιου να διασχίσει την ατμόσφαιρα. Ωστόσο, δεν ισχύει το ίδιο και για την περίπτωση της υπέρυθρης ακτινοβολίας, καθώς ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας που εκπέμπεται από τη γη απορροφάται, προτού αυτή διαφύγει στο διάστημα. [7]

Τα παραπάνω αέρια επανεκπέμπουν με την σειρά τους υπέρυθη ακτινοβολία προς τη γη, συντελώντας έτσι στην άνοδο της θερμοκρασίας. Για τον λόγο αυτό συχνά αναφέρονται και ως **θερμοκηπιακά αέρια**. Ο κύκλος αυτός, έχει ως αποτέλεσμα την διατήρηση της μέσης θερμοκρασίας της γήινης επιφάνειας στους 15°C.

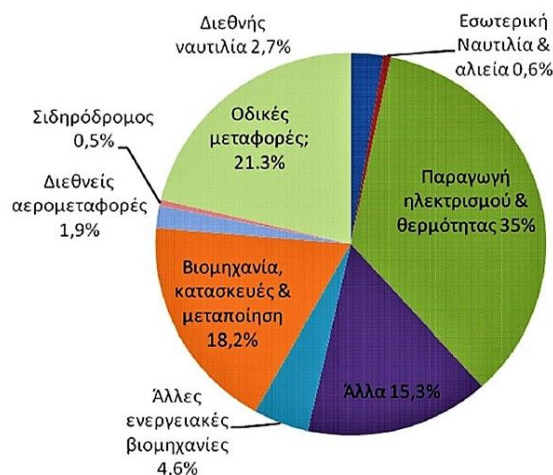
Έπειτα από μελέτες προκύπτει πως η απουσία των αέριων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα θα είχε ως συνέπεια τη μείωση της μέσης θερμοκρασίας στους -18°C . Ωστόσο, με το πέρας της Βιομηχανικής επανάστασης έως και σήμερα, η ανθρώπινη παρέμβαση (κυρίως η καύση ορυκτών καυσίμων) έχει προκαλέσει αύξηση κατά 40% των συγκεντρώσεων CO_2 σε σχέση με την προβιομηχανική εποχή (280 ppm το 1750 \rightarrow 400 ppm το 2015). Η εν λόγω αύξηση είναι άμεσα συνδεδεμένη με την υπερθέρμανση του πλανήτη και την κλιματική αλλαγή, δηλαδή με το ανθρωπογενές **φαινόμενο του θερμοκηπίου**. Επιπροσθέτως, παρατηρείται ταυτόχρονα αύξηση στις συγκεντρώσεις τουλάχιστον 146 ανθρωπογενών αερίων, πέραν του διοξειδίου του άνθρακα, τα οποία συμβάλλουν ενισχυτικά στο φαινόμενο αυτό. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν, κατά σειρά σπουδαιότητας το μεθάνιο, το υποξείδιο του αζώτου και οι χλωροφθοράνθρακες (CFCs). [7]



Εικόνα 1.2 - Φαινόμενο του Θερμοκηπίου (artisenenergy.com)

1.5 Ποσοτική εκτίμηση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τη ναυτιλία και η επίδραση της στην κλιματική αλλαγή

Σχετικά πρόσφατες εκτιμήσεις αναφέρουν πως οι συνολικές εκπομπές CO_2 από τη ναυτιλία το 2007 σε παγκόσμιο έφτασαν περίπου τους 1.045 εκατομμύρια τόνους (πίνακας 1.2), ποσότητα που αντιστοιχεί στο 3,3% των παγκόσμιων εκπομπών (σχήμα 1.2). Από την ποσότητα αυτή, 870 εκατομμύρια (ή ποσοστό 2,7%) αποδίδονται στη διεθνή ναυτιλία ενώ το υπόλοιπο μέρος στην εγχώρια ναυτιλία. Το CO_2 είναι το κυριότερο αέριο του θερμοκηπίου που εκπέμπεται από τη ναυτιλιακή δραστηριότητα τόσο ποσοτικά όσο και σε όρους συνεισφοράς στην παγκόσμια υπερθέρμανση του πλανήτη. Η συνεισφορά των υπόλοιπων θερμοκηπιακών αερίων (μεθάνιο, υποξείδιο του αζώτου και χλωροφθοράνθρακες) θεωρείται πιο περιορισμένη.

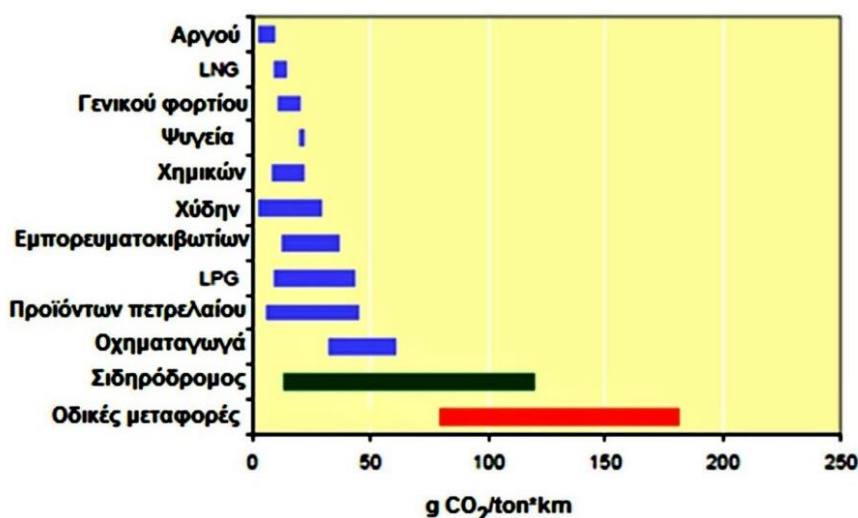


Σχήμα 1.2 - Παγκόσμιες εκπομπές CO_2 από διαφορετικούς οικονομικούς τομείς. (Πηγή: IMO, 2009)

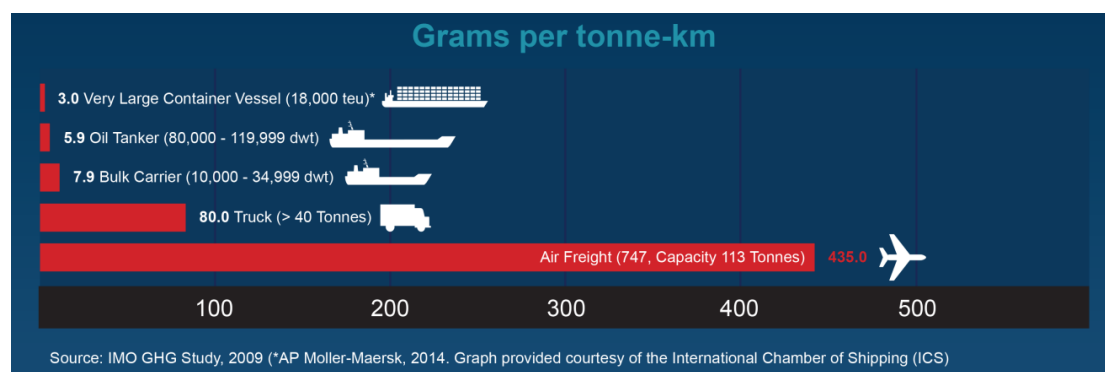
	Thlrd IMO GHG Study (million tonnes)						ICCT (million tonnes)		
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Global CO₂ Emissions	31,959	32,133	31,822	33,661	34,726	34,968	35,672	36,084	36,062
International Shipping	881	916	858	773	853	805	801	813	812
Domestic Shipping	133	139	75	83	110	87	73	78	78
Fishing	86	80	44	58	58	51	36	39	42
Total Shipping	1,100	1,135	977	914	1,021	942	910	930	932
% of global	3.5%	3.5%	3.1%	2.7%	2.9%	2.6%	2.5%	2.6%	2.6%

Πίνακας 1.2 - Ποσοστό εκπομπών CO₂ από την ναυτιλία συγκριτικά με τις συνολικές παγκόσμιες εκπομπές 2007 - 2015 (EDGAR 2017)

Μεσοπρόθεσμα σενάρια προβλέπουν ότι το 2050 και με την προϋπόθεση ότι δεν θα παρθούν μέτρα μείωσης των εκπομπών CO₂ ή των υπολοίπων θερμοκηπιακών αερίων, η ρυπαντική συνεισφορά της ναυτιλίας μέλλεται να αυξηθεί κατά 150-250% (συγκριτικά με το 2007), ως αποτέλεσμα της ραγδαίας ανάπτυξης του παγκόσμιου στόλου (IMO, 2009).



Σχήμα 1.3 - Εκπομπές CO₂ με βάση το μεταφορικό έργο, από διάφορες κατηγορίες πλοίων, οδικές και σιδηροδρομικές μεταφορές (Πηγή: IMO, 2009).



Σχήμα 1.4 – Συγκριτική απεικόνιση των εκπομπών CO₂ για διάφορους τρόπους μεταφοράς (Πηγή: IMO, 2009).

Στον αντίποδα, από το παραπάνω σχήμα προκύπτει ότι η ναυτιλία αποτελεί μια περιβαλλοντικά φιλική μέθοδος μεταφοράς αγαθών σε όρους συνεισφοράς στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, καθώς οι εκπομπές CO₂ ανά μονάδα μεταφορικού έργου είναι αισθητά χαμηλές και μπορούν να θεωρηθούν συγκρίσιμες μόνο με τις αντίστοιχες εκπομπές των σιδηροδρομικών μεταφορών.

Πέρα του CO₂, εκτιμάται ότι το 2007 η ναυτιλία εξέπεμψε περίπου 25 εκατομμύρια τόνους NO_x, 15 εκατομμύρια τόνους SO_x και 1,8 εκατομμύρια τόνους αιωρούμενων σωματιδίων.

Ρύπος	Εκπεμπόμενη ποσότητα από τη ναυτιλία (εκ. τόνοι το 2007)*	Καθαρή επίδραση στην παγκόσμια θέρμανση (φαινόμενο θερμοκηπίου)
CO ₂	1046	Ενίσχυση
NO _x	25	Αμελητέα
SO _x	15	Μείωση (τα σωματίδια θεικών)
PM	1,8	Ενίσχυση (η αιθάλη)

Πίνακας 1.3 - Ποσοτική ανάλυση και επίδραση των Θερμοκηπιακών Αερίων από την ναυτιλία (IMO 2009)

Αναφορικά με τη συνεισφορά των υπόλοιπων ρύπων της ναυτιλίας στο φαινόμενο της παγκόσμιας υπερθέρμανσης ισχύουν τα ακόλουθα: Τα NO_x από μόνα τους δεν απορροφούν, ούτε ανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία και μπορούν δηλαδή να χαρακτηριστούν κλιματικά ουδέτερα. Ωστόσο, αυτό δεν σημαίνει πως δεν συμμετέχουν σε χημικές αντιδράσεις στη τροπόσφαιρα (φωτοχημικό νέφος), δηλαδή στη έμμεση παραγωγή όζοντος (O₃), ενός δηλαδή εκ των βασικών υπεύθυνων αερίων για το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ωστόσο, απενοχοποιούνται για τη προηγούμενη αρνητική τους επίπτωση, καθώς παίρνουν μέρος σε χημικές αντιδράσεις που προκαλούν διάσπαση άρα και περιορισμό των εκπομπών μεθανίου (CH₄), ενός επίσης βασικού θερμοκηπιακού αερίου. [7] Εν τέλει, η συμβολή των NO_x στην υπερθέρμανση του πλανήτη, κρίνεται γενικώς αμελητέα.

Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη όσα αναφέρθηκαν και με γνώμονα την αρχή της προφύλαξης που ορίζει πως κάθε ενέργεια που είναι επιβλαβής για το περιβάλλον χρήζει άμεσης αντιμετώπισης, η κινητοποίηση του IMO για το περιορισμό των εκπομπών όλων των ρύπων της ναυτιλίας θα πρέπει να θεωρείται βάσιμη, τουλάχιστον μέχρι επιστημονικής αποδείξεως του εναντίου.

2. Θεσμικό πλαίσιο για την αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τη ναυτιλία

2.1 IMO - Ο ρόλος του Διεθνούς Οργανισμού Ναυσιπλοΐας (International Maritime Organization)

Η ναυτιλία αποτελεί έναν σχολαστικά ρυθμιζόμενο τομέα εμπορικής δραστηριότητας στον οποίο εφαρμόζεται ένα πολύπλοκο πλέγμα διεθνών, περιφερειακών και εθνικών κανονισμών.

Οι κανονισμοί που έχουν συγκροτηθεί δεν θα μπορούσαν παρά να ισχύουν παγκοσμίως, λόγω του παγκοσμιοποιημένου χαρακτήρα της διεθνούς ναυτιλίας. Ο πλοιοκτήτης ή ο διαχειριστής ενός πλοίου, υποχρεούνται να σέβονται τους νόμους των θαλάσσιων ζωνών των διαφορετικών χωρών στις οποίες αυτό πλέει και που συνήθως είναι διαφορετικής εθνικότητας, αφού το μεγαλύτερο διάστημα της δραστηριότητας του το πλοίο βρίσκεται μακριά από το κράτος του οποίου φέρει σημαία.

Από όσα αναφέρθηκαν προκύπτει πως η αδιαμφισβήτητη αναγκαιότητα για ρύθμιση των βασικών θεμάτων της ναυτιλίας μέσω διεθνών κανονισμών και με κατευθυντήριες γραμμές για ενιαία εφαρμογή παγκοσμίως.

Πράγματι, οι ναυτιλιακές δραστηριότητες την σήμερα ημέρα ρυθμίζονται στο μεγαλύτερο βαθμό από διεθνείς κανονισμούς, οι οποίοι διαρκώς μεταβάλλονται και εκσυγχρονίζονται, έτσι ώστε να ανταποκρίνονται στις τεχνολογικές εξελίξεις αλλά και στις ανάγκες της ναυτιλίας.

Για την επίτευξη όλων των παραπάνω έχει συγκροτηθεί ο Διεθνής Οργανισμός Ναυσιπλοΐας (International Maritime Organization) ή αλλιώς IMO. Πρόκειται για έναν πολυεθνικό, διακυβερνητικό διεθνή ναυτιλιακό οργανισμό, ο οποίος ευθύνεται για την επίβλεψη της σωστής και ασφαλούς επικοινωνίας και συνεργασίας μεταξύ των χωρών-μελών του στον ναυτιλιακό τομέα. Αποτελεί οργανισμό του ΟΗΕ, διακρατικού χαρακτήρα, που ιδρύθηκε στην Γενεύη το 1948 ως IMCO (International Maritime Cooperation Organization). Αργότερα, μετονομάστηκε σε IMO το 1982, με έδρα το Λονδίνο. [10] Απαριθμεί 174 κράτη μέλη και 3 συνεργαζόμενα μέλη. Επίσης, στον IMO συμμετέχουν, με συμβουλευτικό κυρίως ρόλο, μη κυβερνητικοί διεθνείς οργανισμοί οι οποίοι υποστηρίζουν το έργο του.

Τους τρεις βασικούς πυλώνες της δραστηριότητας του IMO αποτελούν οι τομείς: i) της ασφάλειας στη θάλασσα, ii) της προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος από ρύπανση που προκαλείται από πλοία και iii) του ανθρώπινου παράγοντα στη ναυτιλία. Στα 70 χρόνια λειτουργίας του Οργανισμού, έχουν θεσπιστεί τουλάχιστον 50 διεθνείς συνθήκες και συμφωνίες, ενώ έχει υιοθετηθεί ένας μεγάλος αριθμός πρωτοκόλλων και τροποποιήσεων. [12]

Ιστορικά σημαντικές συνθήκες στους τρεις βασικούς πυλώνες του IMO αποτελούν:

I. Η Διεθνής Σύμβαση για την Ασφάλεια της Ανθρώπινης Ζωής στη Θάλασσα, 1974, (SOLAS 74)

II. Η Διεθνής Σύμβαση για την Πρόληψη της Ρύπανσης της Θάλασσας από Πλοία του 1973, όπως τροποποιήθηκε από το Πρωτόκολλο του 1978, (MARPOL 73/78)

III. Η Διεθνής Σύμβαση περί Προτύπων Εκπαίδευσης, Έκδοσης Πιστοποιητικών και Τήρησης Φυλακών των Ναυτικών του 1978, όπως αναθεωρήθηκε το 1995 (STCW 95).

Η SOLAS 74 θεωρείται ως η σημαντικότερη και πιο ευρεία διεθνής σύμβαση στον τομέα της ασφάλειας της ναυσιπλοΐας. Κύριος σκοπός της είναι να θέτει τις ελάχιστες απαιτούμενες προδιαγραφές για την κατασκευή, τον εξοπλισμό και τη λειτουργία των πλοίων ώστε να διασφαλίζεται η ασφάλειά τους, προσαρμόζοντας αυτές τις προδιαγραφές στις εκάστοτε τεχνικές γνώσεις και τεχνολογικές εξελίξεις. Η SOLAS 74 ορίζει τις προδιαγραφές για τους διάφορους τύπους πλοίων, καθώς και την έκδοση πιστοποιητικών, τα οποία επιβεβαιώνουν ότι ένα πλοίο τηρεί τις απαιτούμενες προδιαγραφές.

Εξίσου σημαντική με τη SOLAS 74, αλλά στον τομέα της προστασίας του θαλάσσιου περιβάλλοντος από τη ρύπανση που προκαλείται από τα πλοία, είναι η MARPOL 73/78. Με τον τρόπο που έχει διευρυνθεί η σύμβαση, καθώς και με την τροποποίηση της μέσω του πρωτοκόλλου του 1978 και τα έξι παραρτήματά της, καλύπτει τον περιορισμό της ρύπανσης που προκαλείται τόσο από την καθημερινή λειτουργία ενός πλοίου όσο και από ατυχήματα θέτοντας, μεταξύ άλλων, κανόνες σχετικά με τις απορρίψεις πετρελαίου και άλλων επιβλαβών ουσιών, τα τεχνικά χαρακτηριστικά που πρέπει να διαθέτουν οι διάφοροι τύποι πλοίων ώστε να διασφαλίζεται η προστασία του θαλάσσιου περιβάλλοντος, τον τρόπο καθαρισμού των πλοίων και τις οριακές τιμές των εκπομπών ρύπων. Πιο συγκεκριμένα, τα Παραρτήματα της MARPOL 73/78 περιέχουν του παρακάτω κανονισμούς [11]:

I. Την πρόληψη της ρύπανσης από πετρελαιοειδή μίγματα και κατάλοιπα

II. Τον έλεγχο της ρύπανσης από επιβλαβείς υγρές χημικές ουσίες χύδην

III. Τη πρόληψη της ρύπανσης από επιβλαβείς ουσίες επικίνδινων συσκευασμένων φορτίων κατά την μεταφορά τους εν πλω

IV. Τη πρόληψη της ρύπανσης της θάλασσας από τα λύματα των πλοίων

V. Τη πρόληψη της ρύπανσης από στερεά απορρίμματα των πλοίων

VI. Τη πρόληψη της αέριας ρύπανσης από πλοία

Εκτός της MARPOL, το έργο του IMO συμπληρώνουν και άλλες σημαντικές διεθνείς συμβάσεις του ίδιου οργανισμού όπως η Διεθνής Σύμβαση για την ετοιμότητα, συνεργασία και αντιμετώπιση της ρύπανσης της θάλασσας από πετρέλαιο του 1990 (OPRC) και το πρωτόκολλό αυτής, το οποίο υιοθετήθηκε το 2000 ώστε να επεκτείνει το πεδίο εφαρμογής της Σύμβασης και σε περιστατικά ρύπανσης από επικίνδυνες και επιβλαβείς ουσίες (OPRC-HNS).

Στον ίδιο τομέα, ιδιαίτερα εντατικό έχει υπάρξει το νομοθετικό έργο του IMO. Ήδη από το 2001, ο οργανισμός υιοθέτησε τη διεθνή σύμβαση για τον έλεγχο επιβλαβών συστημάτων υφαλοχρωματισμού των πλοίων (Anti-fouling Systems), η οποία απαγορεύει ρητά τη χρήση βαφών για πλοία, που εμπεριέχουν επιβλαβείς χημικές ουσίες για το θαλάσσιο περιβάλλον.

Το νομοθετικό έργο του IMO συνεχίστηκε το 2007, με τη διεθνή δύμβαση για την απομάκρυνση των ναυαγίων (Wreck Removal, όπως επίσης και η σχετικά πρόσφατη Διεθνής Σύμβαση για την ασφαλή και περιβαλλοντικά φιλική ανακύκλωση των πλοίων (Ship Recycling), η οποία πήρε έγκριση το Μάιο του 2009.

Ωστόσο, όσο σημαντική και αν είναι η θέσπιση τεχνικών προδιαγραφών και κανόνων για την λειτουργία των πλοίων, πυρήνα της ναυτιλίας αποτελεί το ανθρώπινο δυναμικό της. Είναι υψίστης σημασίας να διασφαλίζεται ότι κάθε ναυτικός είναι επαρκώς εκπαιδευμένος για την εκτέλεση των καθηκόντων του, καθώς και ότι οι συνθήκες εργασίας και διαβίωσης στο πλοίο είναι οι προβλεπόμενες. Η διασφάλιση των παραπάνω αποτέλεσε αντικείμενο της STCW 95, η σπουδαιότητα της οποίας γίνεται ευκολότερα αντιληπτή, αν αναλογιστεί κανείς ότι η συντριπτική πλειοψηφία των ναυτικών ατυχημάτων οφείλονται σε ανθρώπινους λανθασμένους χειρισμούς.

Συμπερασματικά, η σύμβαση προσπαθεί να περιορίσει, κατά το μέτρο του δυνατού, τα περιθώρια ανθρώπινου λάθους, διασφαλίζοντας ότι το πλήρωμα κάθε πλοίου είναι επαρκώς εκπαιδευμένο και πιστοποιημένο, ότι του προσφέρονται οι απαραίτητες ώρες ανάπαυσης και ότι διαβιεί υπό συνθήκες κατάλληλες για την εξάσκηση του απαιτητικού επαγγέλματος του ναυτικού.

Η Ελλάδα, ως ναυτιλιακή υπερδύναμη με άμεσο ενδιαφέρον για την ύπαρξη ενιαίου διεθνούς νομοθετικού πλαισίου για τη ναυτιλία, έχει υπογράψει όλες τις βασικές συνθήκες του IMO και επιδιώκει για όλα τα διεθνή και περιφερειακά ζητήματα την ενιαία ρύθμιση των θεμάτων που σχετίζονται με την ναυτιλία μέσω του οργανισμού. Εν ολίγοις, η ελληνική ναυτιλιακή νομοθεσία ενσωματώνει στο εθνικό σύστημα το διεθνές θεσμικό πλαίσιο. Αρμόδιο για την εκπόνηση και επίβλεψη της εφαρμογής της εθνικής νομοθεσίας είναι το Υπουργείο Ναυτιλίας & Νησιωτικής Πολιτικής σε συνεργασία με το Λιμενικό Σώμα. [12]

2.2 Το Παράρτημα VI της MARPOL για το περιορισμό της αέριας ρύπανσης από τα πλοία

Το Παράρτημα VI της MARPOL υιοθετήθηκε το 1997 και τέθηκε σε ισχύ το 2005. Από τα 6 παραρτήματα που αναφέρθηκαν στη προηγούμενη παράγραφο, είναι εκείνο που αξίζει μια πιο αναλυτική αναφορά καθώς συνδέεται άμεσα με το περιορισμό των αέριων ρύπων που προέρχονται από τα πλοία. Οι διατάξεις του οριοθετούν τις εκπομπές των κύριων ρύπων στα καυσαέρια των πλοίων, δηλαδή στα οξειδία του θείου (SOx) και τα οξειδία του αζώτου (NOx), τις εκπομπές οργανικών πτητικών ενώσεων (Volatile Organic Compounds – VOCs) από τα δεξαμενόπλοια και επιπλέον απαγορεύουν τη σκόπιμη απελευθέρωση ουσιών που βλάπτουν το στρώμα του όζοντος (Ozone Depleting Substances – ODS).

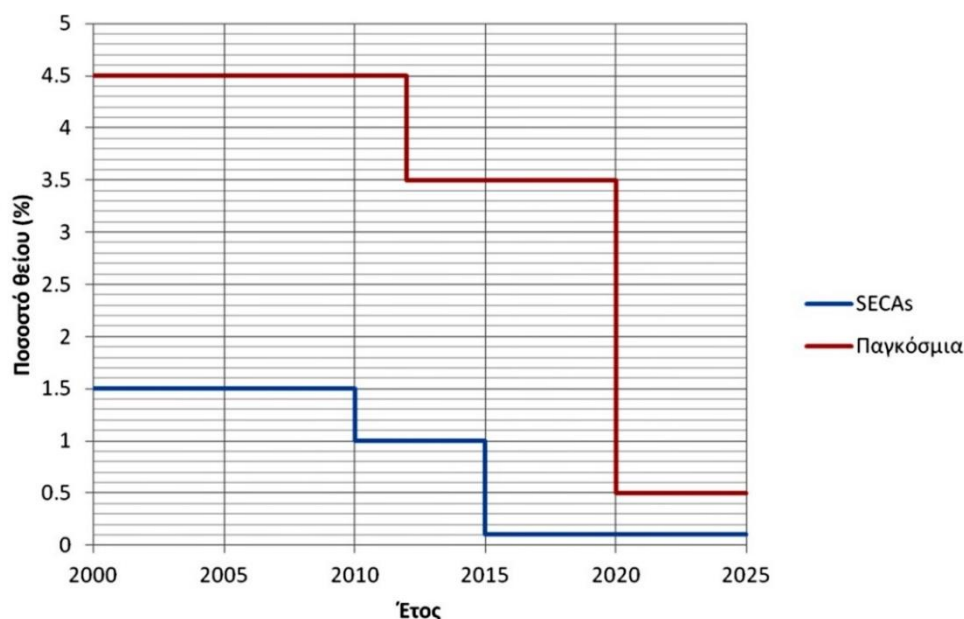
Τέλος, τον Ιούλιο του 2011 ο IMO υιοθέτησε μέτρα για τη μείωση των εκπομπών των θερμοκηπιακών αερίων, με τροποποίηση του παραρτήματος VI της MARPOL[7].

2.2.1 Εκπομπές SO_x και NO_x

Αμέσως φού τέθηκε σε ισχύ το Παραρτήματος VI της MARPOL το 2005, η MEPC (Marine Environmental Protection Committee) προχώρησε στην αναθεώρησή του, με σκοπό την αναγωγή των ορίων εκπομπών ώστε αυτά να ανταποκρίνονται και να συμβαδίζουν με τις νεότερες τεχνολογικές εξελίξεις. Το αναθεωρημένο παράρτημα και ο τεχνικός κώδικας για τα NO_x, υιοθετήθηκαν το 2008 και τέθηκαν σε ισχύ το 2010. Οι πιο κύριες τροποποιήσεις αποσκοπούν σε μια προοδευτική μείωση των εκπομπών SO_x και NO_x, συμπεριλαμβανομένης της υιοθέτησης Περιοχών Ελέγχου Εκπομπών (Emission Control Areas – ECAs), οι οποίες επίσης υποχρεώνουν για περαιτέρω μείωση των εκπομπών. Το Παράρτημα VI όριζε αρχικά ανώτατο όριο 4,5% κ.β. το περιεχόμενο σε θείο για το ναυτιλιακό πετρέλαιο. Το όριο αυτό εν συνεχεία μειώθηκε στο 3,5% (2012) και προβλέπεται να μειωθεί περαιτέρω, ακόμα και στο 0,5% μέσα στο 2020 (πίνακας 2.1, σχήμα 2.1). Το Παράρτημα VI επίσης περιλαμβάνει νομοθετική πρόβλεψη για ειδικές περιοχές, στις οποίες τα όρια εκπομπών SO₂ θα είναι αυστηρότερα (SO_x Emission Control Areas – SECAs). Πιο συγκεκριμένα, στις περιοχές αυτές το περιεχόμενο σε θείο των καυσίμων δεν έπρεπε αρχικά να ξεπερνάει το 1,5% κ.β. Το 2010, η τιμή αυτή μειώθηκε στο 1% και τελικώς ελαχιστοποιήθηκε στο 0,1% από το 2015. Εναλλακτική λύση αποτελεί η χρήση scrubbers, δηλαδή συστημάτων καθαρισμού που επιτρέπουν τη αξιοποίηση καυσίμου υψηλής περιεκτικότητας σε θείο (HSFO) (μέσω της παρακράτησης αυτού κατά τη διαδικασία εκπομπής των αερίων) ή η υιοθέτηση οποιαδήποτε άλλης τεχνολογίας, ικανής να περιορίσει τις εκπομπές SO_x στα επίπεδα των εκπομπών των καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο.

Εκτός SECA	Εντός SECA
4,50% (κ.β.) πριν την 1η Ιανουαρίου 2012	1,50% κ.β. πριν την 1η Ιουλίου 2010
3,50% (κ.β.) κατά και μετά την 1η Ιανουαρίου 2012	1,00% κ.β. κατά και μετά την 1η Ιουλίου 2010
0,50% (κ.β.) κατά και μετά την 1η Ιανουαρίου 2020*	0,10% κ.β. κατά και μετά την 1η Ιουλίου 2015

Πίνακας 2.1 - Οριοθέτηση περιεκτικότητας των καυσίμων σε θείο [16]



Σχήμα 2.1 - Όρια στην περιεκτικότητα των ναυτιλιακών καυσίμων σε θείο βάσει του Παραρτήματος VI της MARPOL (πηγή: Κάλλιπος)

Ο Κανονισμός 13 προσδιορίζει τις εκπομπές των επιτρεπτών ορίων των ποσοτήτων των NO_x ενός πλοίου ανά kWh. Οι ποσότητες αυτές σχετίζονται άμεσα με την ονομαστική ταχύτητα του κινητήρα. Ορίζονται τρία επίπεδα εκπομπών, τα Tier I, II και III. Όσο νεότερο είναι ένα πλοίο τόσο αυστηρότερα είναι τα παραπάνω όρια. Οι προβλέψεις του Επιπέδου I (Tier I) (πίνακας 2.3) αφορούν μηχανές εγκατεστημένες σε πλοία που κατασκευάστηκαν από την 1/1/2000, ενώ τα όρια εκπομπών του Επιπέδου II (Tier II) αφορούν μηχανές εγκατεστημένες σε πλοία που κατασκευάστηκαν από την 1/1/2011. Τα όρια του Επιπέδου III (Tier III) φέρουν τον μεγαλύτερο βαθμό αυστηρότητας (όντας κατά 80% αυστηρότερα συγκρητικά με τα όρια του επιπέδου Tier I) και θα ισχύσουν μόνο στις Ειδικές Περιοχές για τα NO_x (NO_x Emission Control Areas – NECAs), για μηχανές πλοίων που ναυπηγήθηκαν από την 1/1/2016. Οι NECAs αφορούν επί του παρόντος θαλάσσιες περιοχές στη Β. Αμερική και την Καραϊβική (πίνακας 2.2), χωρίς να αποκλείεται να οριστούν μελλοντικά και άλλες περιοχές ως NECA, όπως για παράδειγμα η Βόρεια θάλασσα.

Περιοχή	Ρύποι	Εφαρμόζεται από
Βαλτική	SO _x	19 Μαΐου 2006
Βόρεια θάλασσα	SO _x	22 Νοεμβρίου 2007
Ακτές της Β. Αμερικής	SO _x , PM	1 Αυγούστου 2012
	NO _x	*
Περιοχές των ΗΠΑ στην Καραϊβική (ύδατα πλησίον των ακτών του Πουέρτο Ρίκο και των Παρθένων Νήσων των ΗΠΑ)	SO _x , PM	1 Ιανουαρίου 2014
	NO _x	*

*Ένα πλοίο που κατασκευάστηκε κατά ή μετά την 1η Ιανουαρίου 2016 και λειτουργεί σε αυτές τις NECA θα πρέπει να συμμορφώνεται με τα πρότυπα Tier III για τα NO_x.

Πίνακας 2.2 - Περιοχές ECAs [7]

Επίπεδο (Tier)	Ημερομηνία κατασκευής πλοίου (κατά ή μετά την)	Όρια εκπομπών NO _x (g/kWh), n = ονομαστική ταχύτητα του κινητήρα (rpm)		
		n < 130	n = 130-1999	n ≥ 2000
I	1/1/2000	17,0	45n ^{-0,2} (π.χ. για n=720 rpm το όριο γίνεται 12,1 g/kWh)	9,8
II	1/1/2011	14,4	44n ^{-0,23} (π.χ. για n=720 rpm το όριο γίνεται 9,7 g/kWh)	7,7
III	1/1/2016 για λειτουργία σε NECA	3,4	9n ^{-0,2} (π.χ. για n=720 rpm το όριο γίνεται 2,4 g/kWh)	2,0

Πίνακας 2.3 - Όρια εκπομπών NO_x [7]

2.2.2 Εκπομές Διοξειδίου του άνθρακα (CO₂)

Το διεθνές πλαίσιο για τον περιορισμό των εκπομπών θερμοκηπιακών αερίων ορίζεται από τη σύμβαση-πλαίσιο του ΟΗΕ για την Κλιματική Αλλαγή, η οποία τέθηκε προς υπογραφή το 1992 στη διάσκεψη του Ρίο και σε ισχύ από το 1994. Για την υλοποίηση της σύμβασης, υιοθετήθηκε το Πρωτόκολλο του Κιότο (1997), μέσω του οποίου ορίστηκαν δεσμευτικές ενέργειες και χρονοδιαγράμματα για τον περιορισμό των εκπομπών CO₂. Βάση αυτών, οι αναπτυγμένες χώρες υποχρεώθηκαν να εφαρμόσουν μειώσεις στις εκπεμπόμενες ποσότητες αερίων του θερμοκηπίου της τάξης (κατά μέσο όρο) του 5,2% για την περίοδο 2008-2012 σε σύγκριση με τα επίπεδα που επικρατούσαν το 1990.

Οι χώρες που υπέγραψαν το πρωτόκολλο είχαν ως υποχρέωση την υποβολή εθνικών ετήσιων απογραφών σχετικά με τη πρόοδο στην μείωση των εκπομπών θερμοκηπιακών αερίων. Η διεθνής ναυτιλία και οι αεροπορικές μεταφορές, λόγω ακριβώς του διεθνούς τους χαρακτήρα, συμφωνήθηκε να μην συμπεριληφθούν στα συνολικά εθνικά στοιχεία των απογραφών, καθώς παρουσιάστηκαν δυσκολίες στη κατανομή και καταγραφή των εκπομπών από τις δύο αυτές πηγές.

Αρχικά, προτάθηκαν διάφορες λύσεις όπως το να αποδοθούν στη χώρα πώλησης των καυσίμων (ανάλογα με τις ποσότητες), στην χώρα αναχώρησης/προορισμού, στη χώρα του διαχειριστή, στη χώρα σημαίας (για τη ναυτιλία) ή στη χώρα στη θάλασσα επικράτεια της οποίας πραγματοποιούνται οι μετακινήσεις.

Ωστόσο, όλες οι παραπάνω λύσεις κρίθηκαν ατελείς και προβληματικές. Εν τέλει, στο Άρθρο 2.2 του Πρωτοκόλλου του Κιότο αναφέρεται αορίστως ότι οι αναπτυγμένες χώρες θα πρέπει να επιδιώξουν μειώσεις των εκπομπών θερμοκηπιακών αερίων από τη ναυτιλία και τις αεροπορικές μεταφορές συνεργαζόμενες με τον IMO και τον ICAO (International Civil Aviation Organization), τους δύο οργανισμούς του ΟΗΕ για τη ναυτιλία και τις αερομεταφορές, αντίστοιχα.

Η έναρξη των σχετικών ενεργειών από τον IMO έλαβε χώρα το 2000 με τη παρουσίαση της πρώτης μελέτης για τα αέρια του θερμοκηπίου, οπότε και αποφασίστηκε να συνταχτεί μια αρμόδια ομάδα εργασίας για την αντιμετώπιση του θέματος αυτού.

Το 2003, η ολομέλεια του IMO κάλεσε τη MEPC να αναπτύξει ένα πλαίσιο μείωσης των εκπομπών CO₂, αναγνωρίζοντάς το και επίσημα ως το κυριότερο αέριο του θερμοκηπίου από το ναυτιλιακό κλάδο. Σε αυτό ορίζεται ένας δείκτης εκπομπών CO₂ και τη σχετική γραμμή αναφοράς.

Το 2005, η MEPC 53 ενέκρινε τις προσωρινές οδηγίες για την εφαρμογή ενός εθελοντικού δείκτη εκπομπών CO₂ και κάλεσε τις χώρες να τον δοκιμάσουν και να προχωρήσουν σε υποβολή σχετικών αναφορών. Το 2006 η MEPC 55 υιοθέτησε ένα πρόγραμμα εργασιών που θα ολοκληρωνόταν το 2009, με σκοπό τη βελτίωση του δείκτη εκπομπών, την καθιέρωση των γραμμών αναφοράς και την θέσπιση τεχνικών, λειτουργικών και αγοροκεντρικών μηχανισμών για τον περιορισμό των εκπομπών CO₂. Στη MEPC 57 (Απρίλιος 2008) πάρθηκε ως απόφαση, με συντριπτική πλειοψηφία, η υιοθέτηση 9 αρχών που θα διέπουν τη συζήτηση για τις εκπομπές των θερμοκηπιακών αερίων. Ανάμεσα τους γινόταν σαφές πως οποιοδήποτε μέτρο θα πρέπει να θεωρείται αποδοτικό, όχι μόνο ως προς τη μείωση των εκπομπών, αλλά και από επιχειρηματικής σκοπιάς, έτσι ώστε να μην πλήττεται η ανάπτυξη του παγκόσμιου εμπορίου και να αποφεύγονται οι στρεβλώσεις του ανταγωνισμού.

Στο σημείο αυτό προτάθηκαν αγοροκεντρικά εργαλεία, όπως το εμπόριο ρύπων στη ναυτιλία και η καθιέρωση ενός παγκόσμιου φόρου στα ναυτιλιακά καύσιμα. Τα νεοσύστατα μέτρα θα αποτελέσουν ξεχωριστή σύμβαση του IMO και όχι κομμάτι της MARPOL.

Στη MEPC 58 (Οκτώβριος 2008) διαπιστώθηκε μεγάλη διαίρεση των κρατών πάνω στα ανωτέρω θέματα. Τέθηκε επίσης το θέμα της παροχής ευνοϊκότερης μεταχείρισης των αναπτυσσόμενων χωρών σε σχέση με τις αναπτυγμένες.

Επόμενες συνεδριάσεις της MEPC ασχολήθηκαν με τη διερεύνηση θεμάτων για κατηγορίες πλοίων που δεν είχαν συμπεριληφθεί αρχικά στην ανάλυση του EEDI, όπως τα οχηματαγωγά και επιβατικά οχηματαγωγά πλοία. Εν τέλει, ο EEDI και οι λοιπές προβλέψεις εγκρίθηκαν στην 62η Σύνοδο της MEPC, με την απόφαση MEPC.203(62).

Την 1^η Ιανουαρίου του 2013 τέθηκαν σε ισχύ οι προβλέψεις του νέου Κεφαλαίου 4 του Παραρτήματος VI της MARPOL, το οποίο θεσπίζει κανονισμούς που αποσκοπούν στη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας της ναυτιλίας και γενικότερα της μείωσης της κατανάλωσης καυσίμων και των εκπομπές CO₂. Στον Κανονισμό 21 του Κεφαλαίου 4 πρωτοεμφανίζεται ο Δείκτης Αποδοτικού Ενεργειακού Σχεδιασμού (Energy Efficiency Design Index – EEDI), ο οποίος περιλαμβάνει την επιβολή τεχνικών μέτρων και είναι υποχρεωτικός για όλες τις νέες ναυπηγήσεις. Επίσης, στον Κανονισμό 22 περιλαμβάνεται για πρώτη φορά και το υποχρεωτικό εργαλείο διαχείρισης (Ship Energy Efficiency Management Plan – SEEMP), το οποίο περιλαμβάνει λειτουργικά κυρίως μέτρα, για το σύνολο των πλοίων (νέα και υπάρχοντα). Βασική προϋπόθεση για την αποκτήση του Διεθνούς Πιστοποιητικού Ενεργειακής Αποδοτικότητας (International Energy Efficiency Certificate – IEEC) για ένα πλοίο, είναι η τήρηση των απαιτήσεων για τον EEDI και το SEEMP)[7].

2.3 EEDI - Δείκτης Αποδοτικού Ενεργειακού Σχεδιασμού (Energy Efficiency Design Index)

Ο Δείκτης Σχεδιασμού Ενεργειακής Αποδοτικότητας ή EEDI είναι το αποτέλεσμα μιας οικουμενικής ανάγκης με βασικό στόχο τον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τα πλοία.

Ως μαθηματική σχέση, εκφράζει την αναλογία μεταξύ του κόστους (δηλαδή των εκπομπών CO₂) και του κέρδους που παράγεται, το οποίο εκφράζεται ως ικανότητα μεταφοράς αγαθών, από τη λειτουργία του πλοίου. Το CO₂ εκπέμπεται τόσο από την λειτουργία της κύριων μηχανών όσο και από των βοηθητικών μηχανημάτων, εξαιρούμενων από το τελικό σύνολο, των εκπομπών που αναλογούν στην ισχύ που προσφέρεται από τη χρήση αντίστοιχων καινοτόμων τεχνολογιών. Το κέρδος που παράγεται αποτελεί το γινόμενο του μεταφερόμενου φορτίου επί την ταχύτητα του πλοίου[5].

$$EEDI = \frac{\text{Περιβαλλοντικό Κόστος}}{\text{Κοινωνικό Ύφελος}} = \frac{\text{Συνολικές Εκπομπές CO}_2[\text{gr}]}{\text{Μεταφορικό Έργο} [\text{tonnes} * \text{n. miles}]}$$

Εξίσωση 2.1: Απλουστευμένη σχέση EEDI (Πηγή: Σημειώσεις Νικητάκος, Παπαχρήστος) [13]

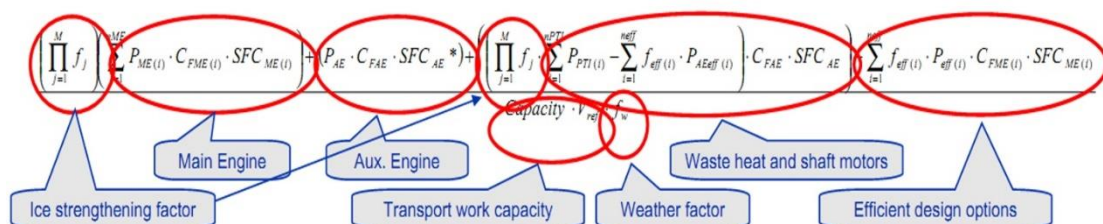
Ο EEDI, από την 1^η Ιανουαρίου 2013, είναι υποχρεωτικός για όλες τις νέες ναυπηγήσεις πλοίων ολικής χωρητικότητας 400 κόρων και άνω [15]. Εκφράζει τις εκπομπές του CO₂ ενός πλοίου κάτω από ειδικές συνθήκες (π.χ., φορτίο μηχανών, έλξη, αέρας, κύματα, κ.λπ.) σε σχέση με ένα ονομαστικό ποσοστό μεταφοράς. Ως μονάδα μέτρησης του EEDI ορίζονται τα "γραμμάρια CO₂ ανά χωρητικότητα - ναυτικό μίλι", όπου ως "χωρητικότητα" θεωρείται η ικανότητα μεταφοράς του φορτίου, για το οποίο το πλοίο έχει σχεδιαστεί να μεταφέρει. Για την πλειοψηφία των σκαφών, η "χωρητικότητα" εκφράζεται ως πρόσθετο βάρος (deadweight).

Πιο αναλυτικά, ο EEDI μπορεί να εκφραστεί από την εξίσωση 2.2. Οι όροι της εξίσωσης αναλύονται παρακάτω.

$$EEDI = \frac{P * SFC * C_F}{\text{Capacity} * V_{ref}}$$

Εξίσωση 2.2: Αναλυτικότερη μορφή EEDI [7]

Η πληρέστερη και αναλυτικότερη μορφή του EEDI [σε gr/(tonnes * n.miles)] ορίζεται μέσω της εξίσωσης 2.3 (MEPC 2014):



Εξίσωση 2.3: Πλήρης μορφή EEDI [13]

Η παραπάνω σύνθετη εξίσωση περιλαμβάνει μια σειρά από παράμετρος που αφορούν τις μηχανές του πλοίου:

P: Η ισχύς των κύριων (ME) και βοηθητικών (AE) μηχανών του πλοίου (σε kW)

PME(i): Η ισχύς των κύριων μηχανών στο 75% του MCR (Maximum Continuous Rating). Ο Κανονισμός προδιαγράφει ότι πρέπει να ληφθεί υπόψη η επίδραση του αξονικού κινητήρα (shaft motor) στην ενίσχυση της προωστήριας ισχύος (Power Take In – PTI) και της αξονικής γεννήτριας (shaft generator) στην απώλεια της προωστήριας ισχύος (Power Take Off – PTO).

PAE(i): Η ισχύς των βοηθητικών μηχανημάτων

PPTI(i): Το 75% της ισχύος κάθε εγκατεστημένου αξονικού κινητήρα

Peff(i): Το 75% της μείωσης μηχανικής ισχύος (kW) που οφείλεται σε καινοτόμες μηχανικές τεχνολογίες ενεργειακής αποδοτικότητας.

PAEeff(i): Το ποσό μείωσης της ηλεκτρικής ισχύος (kW) από την υιοθέτηση καινοτόμων τεχνολογιών εξοικονόμησης ηλεκτρικής ενέργειας.

Ακόμα περιλαμβάνονται σχεδιαστικές παράμετροι του πλοίου:

V_{ref}: Η ταχύτητα (βάση του σχεδιασμού του πλοίου) σε ναυτικά μίλια ανά ώρα (κόμβους – knots) στη μέγιστη κατάσταση φόρτωσης, θεωρώντας ως δεδομένα: βαθιά νερά, ήρεμη θάλασσα και απουσία ανέμου.

Capacity (χωρητικότητα): Ορίζεται ως: α) το DWT για πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου, δεξαμενόπλοια, υγραεριοφόρα και LNG, οχηματαγωγά, πλοία γενικού φορτίου, κατεψυγμένου φορτίου και συνδυασμένων μεταφορών, β) το 70% του DWT, για τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, γ) η ολική χωρητικότητα (Gross Tonnage) για τα επιβατικά και τα κρουαζιερόπλοια.

Επίσης υπάρχουν και παράμετροι που σχετίζονται με τις εκπομπές CO₂:

CF: Ένας αδιάστατος συντελεστής εκπομπής που σχετίζεται με το περιεχόμενο του καυσίμου σε άνθρακα (πίνακας 2.4) και εκφράζει τη ποσότητα (σε gr) CO₂ που απελευθερώνεται από την καύση μιας ποσότητας καυσίμου (επίσης σε gr)

SFC (Specific Fuel Consumption): Η Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου (σε g/kWh), με άλλα λόγια η ποσότητα καυσίμου που καταναλώνει η μηχανή ανά μονάδα ενέργειας που αποδίδει.

Τύπος καυσίμου	Αναφορά	Περιεχόμενο σε άνθρακα	C _F (tones-CO ₂ /tonnes-καυσίμου)
Ντιζέλ/GasOil	ISO 8217 Grades DMX έως DMC	0,8744	3,206
Ελαφρύ Καύσιμο Πετρέλαιο (LFO)	ISO 8217 Grades RMA έως RMD	0,8594	3,151
Βαρύ Καύσιμο Πετρέλαιο (HFO)	ISO 8217 Grades RME έως RMC	0,8493	3,114
Υγροποιημένα Αέρια Πετρελαίου (LPG)	Προπάνιο	0,8182	3,000
	Βουτάνιο	0,8264	3,030
Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (LNG)	I.	0,75	2,750

Πίνακας 2.3: Περιεχόμενο σε άνθρακα και συντελεστής εκπομπής για διάφορα ναυτιλιακά καύσιμα (Πηγή: MEPC (2014))

Τέλος, υπάρχουν παράγοντες διόρθωσης ή προσαρμογής:

fj: Αδιάστατος συντελεστής που αφορά σχεδιαστικές ιδιαιτερότητες των πλοίων οι οποίες τα οδηγούν να εμφανίζουν διαφοροποιήσεις στην εγκατεστημένη ισχύ πρόωσης (π.χ. πλοία ice-classed ή δεξαμενόπλοια shuttle).

fw: Αδιάστατος συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τη μείωση της ταχύτητας σε χαρακτηριστικές καταστάσεις θάλασσας, με συγκεκριμένο ύψος κύματος, συχνότητα κυματισμού και ταχύτητα ανέμου.

feff(i): Παράγοντας διαθεσιμότητας της κάθε καινοτόμου τεχνολογίας εξοικονόμησης ενέργειας, που εξαρτάται από το ποσοστό του χρόνου όπου η τεχνολογία είναι διαθέσιμη κατά τη διάρκεια της πλεύσης.

fi: Παράγοντας χωρητικότητας ο οποίος συνεισφέρει στο να λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί στη χωρητικότητα ενός σκάφους οι οποίοι προέρχονται από κανονισμούς και τεχνικές ιδιαιτερότητες (π.χ. πλοία ice-classed).

fc: Παράγοντας διόρθωσης για τη χωρητικότητα σε κυβικά πόδια ή κυβικά μέτρα (cubic capacity).

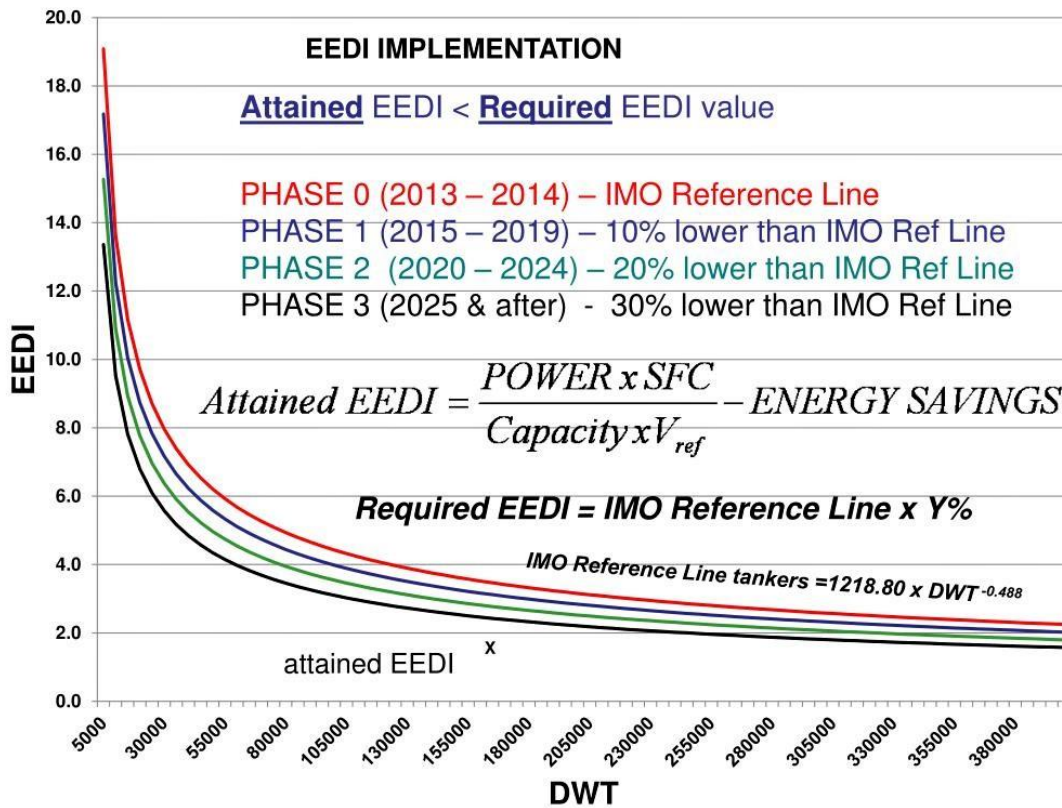
fi: παράγοντας για τα πλοία γενικού φορτίου που διαθέτουν γεραμούς και άλλα μηχανήματα φορτοεκφόρτωσης, ο οποίος αποδίδει την απώλεια DWT του πλοίου.

2.3.1 Γραμμή αναφοράς του Δείκτη EEDI

Η σταδιακή μείωση των τιμών του δείκτη EEDI από τον IMO θα λειτουργεί συνεχώς ως παρακινητικός παράγοντας για την ανάπτυξη τεχνολογιών βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας των “νεόχτιστων” πλοίων με γνώμονα την καθορισμένη γραμμή αναφοράς.

Ο IMO έχει θέσει ποσοστά μείωσης του EEDI, ανά τύπο πλοίων, από τη γραμμή αναφοράς μέχρι την περίοδο 2025 έως 2030, όπου στοχοποιείται μια απαιτούμενη μείωση κατά 30% για τις περισσότερες κατηγορίες πλοίων [14]. Το επίπεδο μείωσης στην πρώτη φάση έχει τεθεί στο 10% και θα ρυθμίζεται ανά πενταετία, ξεκινώντας από την 1/1/2015 (σχήμα 2.2).

Είναι επιθυμητό για τους εν λόγω κανονισμούς, να ωθούν τα νέα πλοία σε πρακτικά και τεχνικά επιτεύξιμες ενεργειακές τροποποιήσεις που παράλληλα θα προστατεύουν επαρκώς το περιβάλλον, δίχως υπερβολική επιείκεια αλλά και ούτε υπερβολική αυστηρότητα μέσω ενδεχομένως ανέφικτων απαιτήσεων.



Σχήμα 2.2: Γραμμή αναφοράς του δείκτη EEDI 2015 – 2025+ (πηγή: Intertanko)[17]

Για κάθε νέο πλοίο θα πρέπει να υπολογίζεται ο επιτευχθείς (attained) EEDI, ο οποίος θα πρέπει να είναι μικρότερος ή ίσος από τον απαιτούμενο (required) EEDI για την περίοδο της ναυπήγησής του. Ο επιτευχθείς EEDI υπολογίζεται και επαληθεύεται για κάθε πλοίο σύμφωνα με την εξίσωση 2.3 και μια διαδικασία που περιγράφεται από τον IMO. Ο απαιτούμενος EEDI είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του δείκτη για ένα πλοίο με συγκεκριμένο μέγεθος και κατηγορία και υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη γραμμή αναφοράς από τη σχέση:

$$\text{Απαιτούμενος EEDI} = (1 - X/100) \cdot (\text{Τιμή Γραμμής Αναφοράς})$$

Στη σχέση αυτή, το X εκφράζει τη μείωση του EEDI σε σχέση με τον EEDI των γραμμών αναφοράς και παρουσιάζεται στον πίνακα 2.4 για κάθε κατηγορία πλοίου και κλάση μεγέθους, με κριτήριο την ημερομηνία ναυπήγησής του.

Ο Επιτευχθείς EEDI θα πρέπει να ικανοποιεί την παρακάτω συνθήκη:

$$\text{Επιτευχθείς EEDI} \leq \text{Απαιτούμενος EEDI}$$

Τύπος πλοίου	Μέγεθος	Φάση 0 (1/1/2013- 31/12/2014)	Φάση 1 (1/1/2015- 31/12/2019)	Φάση 2 (1/1/2020- 31/12/2024)	Φάση 3 (1/1/2025 και μετά)
Μεταφοράς χύδην φορτίου	20.000 DWT και άνω	0	10	20	30
	10.000 – 20.000 DWT	ΔΕ*	0-10**	0-20**	0-30**
Μεταφοράς αερίου	10.000 DWT και άνω	0	10	20	30
	2.000-10.000 DWT	ΔΕ*	0-10**	0-20**	0-30**
Δεξαμενόπλοιο	20.000 DWT και άνω	0	10	20	30
	4.000-20.000 DWT	ΔΕ*	0-10**	0-20**	0-30**
Εμπορευματοκιβωτίων	15.000 DWT και άνω	0	10	20	30
	10.000-15.000 DWT	ΔΕ*	0-10**	0-20**	0-30**
Γενικού φορτίου	15.000 DWT και άνω	0	10	15	30
	3.000-15.000 DWT	ΔΕ*	0-10**	0-15**	0-30**
Μεταφοράς κατεψυγμένου φορτίου	5.000 DWT και άνω	0	10	15	30
	3.000-5.000 DWT	ΔΕ*	0-10**	0-15**	0-30**
Συνδυασμένου φορτίου	20.000 DWT και άνω	0	10	20	30
	4.000-20.000 DWT	ΔΕ*	0-10**	0-20**	0-30**

*ΔΕ: Δεν Εφαρμόζεται, **Ο συντελεστής μείωσης υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή μεταξύ των δύο ακραίων τιμών ανάλογα με το μέγεθος του σκάφους. Για τα μικρότερα σκάφη ισχύουν χαμηλότερες μειώσεις.

Πίνακας 2.4: Συντελεστής μείωσης (%) του EEDI σε σχέση με τον EEDI των γραμμών αναφοράς (Πηγή MEPC 2011, [7])

Κατά τη MEPC (2010) υπάρχουν τρεις πρακτικές προσεγγίσεις για τη βελτίωση της τιμής του EEDI:

I. Από την εξίσωση 2.3 προκύπτει πως η αύξηση του DWT προϋποθέτει παράλληλα την εγκατάσταση μηχανών μεγαλύτερης ισχύος στο πλοίο. Αξίζει να σημειωθεί ότι παρόλο που η αύξηση του DWT βελτιώνει την αποτελεσματικότητα και μειώνει τον επιτευχθέντα EEDI, είναι πιθανόν το πλοίο να υπόκειται σε μικρότερο απαιτούμενο EEDI, λόγω της επικείμενης αύξησης της χωρητικότητας.

II. Η μείωση της ταχύτητας πλεύσης (slow steaming) θεωρείται μια από της αποτελεσματικότερες μεθόδους για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του πλοίου καθώς ταυτόχρονα οδηγεί σε ελαχιστοποίηση των αναγκών ισχύος από την κύρια μηχανή. Αυτό σημαίνει μείωση της επιτευχθείσας τιμής του EEDI, κάτι που είναι και το επιθυμητό (σχέση 2.6).

III. Εφαρμογή νέων τεχνολογιών. Αναφέρεται σε τεχνικά εφικτές τεχνολογίες που μπορούν να εφαρμοστούν σε ένα πλοίο, χωρίς όμως να επηρεάζουν ή να θέτουν περιορισμούς σε λειτουργικές ή σχεδιαστικές του παραμέτρους, όπως η ταχύτητα πλεύσης και το DWT.

2.3.2 Περιορισμοί του Δείκτη EEDI

Ένας πολύ σημαντικός προβληματισμός που προκύπτει είναι πως ο τρόπος υπολογισμού του EEDI δεν είναι κατάλληλος για όλους τους τύπους πλοίων. Αυτό κυρίως αφορά πλοία που δεν είναι σχεδιασμένα για τη μεταφορά φορτίων ή για εκείνα με διάφορους εναλλακτικούς τύπους συστημάτων πρόωσης (όπως ντίζελ-ηλεκτρική πρόωση, τουρμπίνα ή υβριδικά συστήματα πρόωσης). Η επίλυση του συγκεκριμένου ζητήματος προϋποθέτει εκτενείς μελέτες για τον καθορισμό επιπρόσθετων συντελεστών διόρθωσης.

Πράγματι, η πρώτη εκδοχή του EEDI ήταν σκόπιμα μελετημένη στο να καλύπτει το μεγαλύτερο τμήμα του παγκόσμιου εμπορικού στόλου, περικλείοντας έτσι το 70% των εκπομπών των “νεόχτιστων” πλοίων και καλύπτοντας τις ακόλουθες κατηγορίες: δεξαμενόπλοια πετρελαίου και φυσικού αερίου, πλοία μεταφοράς χύδην φορτίου, πλοία μεταφοράς γενικού φορτίου, πλοία ψυγεία και πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (Hughes).

2.4 SEEMP - Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Αποδοτικότητας Πλοίου (Ship Energy Efficiency Management Plan)

Το Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Αποδοτικότητας Πλοίου είναι ένα υποχρεωτικό λειτουργικό μέτρο μέσω του οποίου καθίσταται ένας μηχανισμός βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας ενός πλοίου, με τρόπο οικονομικά αποδοτικό (Σιώτα) [9].

Η εκπόνηση του SEEMP έγινε υποχρεωτική από τον IMO για όλα τα πλοία ολικής χωρητικότητας 400 κόρων και άνω που εκτελούν διεθνείς πλόες από την 1/1/2013 και αποτελεί βασική προϋπόθεση για την έκδοση του Διεθνούς Πιστοποιητικού Ενεργειακής Αποδοτικότητας (International Energy Efficiency Certificate – IEEC). Το SEEMP δεν θα πρέπει να αντιμετωπίζεται ως μια ακόμη γραφειοκρατική διαδικασία, αλλά ως ιδανική ευκαιρία για τη μείωση των δαπανών των καυσίμων και συνεπώς την ενεργειακή αναβάθμιση του πλοίου από τον διαχειριστή.

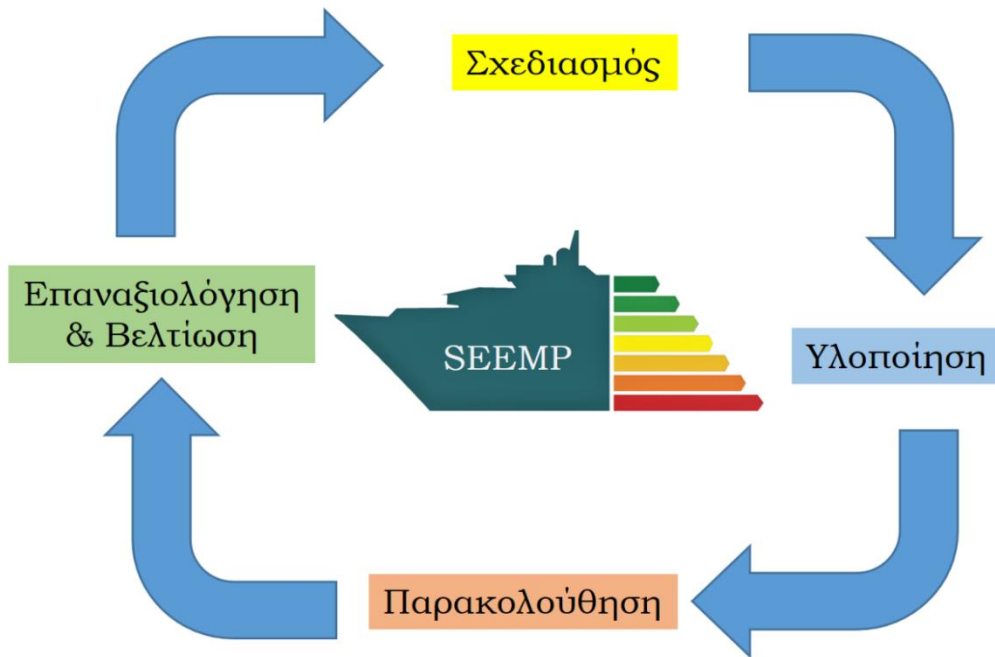
Η ανάπτυξη και εφαρμογή του SEEMP χαρακτηρίζεται από μια κυκλική διαδικασία που εμπεριέχει 4 κύρια στάδια [13]:

I. Σχεδιασμός

II. Υλοποίηση

III. Παρακολούθηση

IV. Επαναξιολόγηση και βελτίωση



Σχήμα 2.3: Τα 4 στάδια του SEEMP

Ο **Σχεδιασμός** είναι μια κρίσιμη και αρκετά χρονοβόρα διαδικασία, η οποία περιλαμβάνει τις εξής εργασίες:

- I. Την εκτίμηση της τρέχουσας ενεργειακής αποδοτικότητας του πλοίου ή του στόλου,
- II. Τον καθορισμό των μελλοντικών στόχων ενεργειακής αποδοτικότητας για το πλοίο, τον στόλο και την εταιρεία ως σύνολο
- III. Αξιολόγηση και επιλογή μέτρων ενεργειακής εξοικονόμησης για την επίτευξη των στόχων
- IV. Σχεδιασμό των αλλαγών σε διαδικασίες και εξοπλισμό για το πλοίο και τον στόλο αναλόγα με τις απαιτήσεις
- V. Καθορισμός ή ανάπτυξη των εργαλείων μέσω των οποίων θα πραγματοποιείται η μέτρηση και η παρακολούθηση της ενεργειακής αποδοτικότητας
- VI. Σύνταξη του SEEMP

Σειρά έχει το στάδιο της **Υλοποίησης** του SEEMP για το οποίο απαιτούνται τα ακόλουθα:

- I. Δημοσίευση του SEEMP
- II. Εφαρμογή των αλλαγών στις διαδικασίες και τον εξοπλισμό του πλοίου
- III. Ανάθεση αρμοδιοτήτων
- IV. Παροχή εκπαίδευσης στο πλήρωμα του πλοίου και στο προσωπικό ξηράς

Η **Παρακολούθηση** της ενεργειακής απόδοσης του πλοίου περιλαμβάνει:

I. Τη συνεχή συλλογή των απαραίτητων δεδομένων, σε όλες τις φάσεις της λειτουργίας του πλοίου. Αυτή θα πρέπει να πραγματοποιείται συνδυαστικά μέσω της αυτόματης καταγραφής και της χειροκίνητης τεκμηρίωσης, με σκοπό την ελεγχιστοποίηση του χρόνου απασχόλησης του προσωπικού.

II. Η ανάλυση των δεδομένων και υποβολή εκθέσεων

Τέλος, η φάση της **Επαναξιολόγησης** θα πρέπει να συμβαίνει τακτικά, σε περιόδους που ορίζονται από το SEEMP. Αυτή περιλαμβάνει:

I. Αξιολόγηση των ενεργειακών επιδόσεων του πλοίου ή ολόκληρου του στόλου και σύγκριση με τους προκαθορισμένους δείκτες που τέθηκαν κατά το στάδιο του σχεδιασμού.

II. Αναγνώριση των αιτιών αποκλίσεων και παρουσίαση προτεινόμενων λύσεων για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης

III. Επανεξέταση της γενικότερης αποτελεσματικότητας του SEEMP και παρουσίαση προτεινόμενων λύσεων για την βελτιστοποίηση αυτού

IV. Υλοποίηση αλλαγών και συνέχιση παρακολούθησης

2.5 ΕΕΟΙ - Δείκτης Αποδοτικής Ενεργειακά Λειτουργίας του πλοίου (Energy Efficiency Operational Indicator)

Ο ΕΕΟΙ αποτελεί έναν προαιρετικό δείκτη ο οποίος χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση του SEEMP. Επειδή συνήθως μπορεί να μεταβάλλεται σημαντικά από ταξίδι σε ταξίδι και για την εξομάλυνσή του έχει προταθεί ένας κυλιόμενος μέσος όρος π.χ. ετήσιος ή τριετής. Επίσης περιλαμβάνει τεχνικά, λειτουργικά και εμπορικά στοιχεία και είναι ένας γενικός δείκτης της απόδοσης των μεταφορών καθώς και του ανθρακικού αποτυπώματος (Νικητάκος, Παπαχρήστος)[13].

Στην πιο απλή του μορφή, ο ΕΕΟΙ ορίζεται ως ο λόγος της μάζας του CO₂ που εκπέμπεται στη διάρκεια ενός ταξιδιού ανά μονάδα μεταφορικού έργου:

$$ΕΕΟΙ = \frac{ΜCO_2}{Μεταφορικό Έργο}$$

Εξίσωση 2.4: Απλουστευμένη μορφή του δείκτη ΕΕΟΙ [4]

Όσο μικρότερες τιμές λαμβάνει ο δείκτης, τόσο πιο ενεργειακά αποδοτική θεωρείται η λειτουργία ενός πλοίου. Αναλυτικότερα, για κάποιο ταξίδι, ο ΕΕΟΙ υπολογίζεται βάσει της εξίσωσης 2.5:

$$EEOI = \frac{\sum_j * FC_j * CF_j}{m_{cargo} * D}$$

Εξίσωση 2.5: Αναλυτικότερη μορφή του δείκτη EEOI [13]

Όπου:

J: Ο τύπος καυσίμου

FC_j: Η μάζα του καυσίμου που καταναλώθηκε στο ταξίδι (σε tonnes)

CF_j: Ο συντελεστής εκπομπής που αποδίδει τη μάζα CO₂ που παράγεται από τη καύση μιας ορισμένης μάζας καυσίμου (αδιάστατο μέγεθος, σε tonnes CO₂/tonnes καυσίμου)

m_{cargo}: Το φορτίο που μεταφέρθηκε στο ταξίδι (σε tonnes) ή το έργο που επιτελέστηκε (αριθμός TEU ή επιβατών) ή το GT για τα επιβατικά πλοία

D: Η απόσταση σε ναυτικά μίλια για το φορτίο που μεταφέρθηκε στο ταξίδι ή το έργο που επιτελέστηκε

Ο δείκτης EEOI ποικίλλει ανάλογα το φορτίο που μεταφέρθηκε ή το έργο που επιτελέστηκε και εκφράζεται σε μονάδες όπως: tonnes CO₂/(tonnes·nm), tonnes CO₂/(TEU·nm), tonnes CO₂/(person·nm) κ.λπ. [7]

Όνομα και τύπος πλοίου:				
Ταξίδι ή μέρα	Κατανάλωση καυσίμου (FC) στο πλοίο και το λιμάνι (tonnes)		Δεδομένα ταξιδιού ή περιόδου	
	HFO	LFO	Φορτίο m (tonnes)	Απόσταση D (nm)
1	20	5	25.000	300
2	20	5	0	300
3	50	10	25.000	750
4	10	3	15.000	150

Πίνακας 2.5: Λειτουργικά δεδομένα του πλοίου για τον υπολογισμό του EEOI (Πηγή: Σημειώσεις Νικητάκος, Παπαχρήστος) [4]

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί πως η αξιοποίηση του EEOI ως διαχειριστικό εργαλείο υψηλού επιπέδου δεν περιορίζεται μόνο για συγκρίσεις μεταξύ πλοίων, αλλά μπορεί να χρησιμεύσει και ως δείκτης αξιολόγησης μεταξύ ναυτιλιακών εταιρειών.

3. Ηλεκτρική Κίνηση και μετατροπείς συχνότητας

3.1 Ηλεκτρικές Εγκαταστάσεις πλοίων

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται ανάλυση της τεχνολογίας και των βασικών αρχών λειτουργίας των ρυθμιστών στροφών AC κινητήρων. Ωστόσο, αρχικά θα προηγηθεί μια σύντομη περιγραφή των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων πλοίων καθώς και μια θεωρητική προσέγγιση στους επαγωγικούς κινητήρες.

Η ηλεκτρική εγκατάσταση ενός πλοίου αποτελεί ένα αυτόνομο σύστημα μέσω του οποίου πραγματοποιείται η διανομή ηλεκτρικής ισχύος στις διάφορες καταναλώσεις, όπως φορτία φωτισμού, ψυγεία, αντλίες, κινητήρες κτλ. Εδώ, αξίζει να αναφερθεί πως τα καλώδια που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά δίκτυα ενός πλοίου, οφείλουν να είναι εγκεκριμένου “ναυτικού τύπου”, πιστοποιημένα από νηογνώμονα, καθώς οι συνθήκες λειτουργίας τους διαφοροποιούνται σε σχέση με αυτές που επικρατούν σε ένα κλασικό στεριανό δίκτυο διανομής (πχ υγρασία, θερμοκρασίες περιβαλλόντων χώρων) [20]. Η παραγωγή της απαιτούμενης ηλεκτρικής ισχύος γίνεται από σύγχρονες γεννήτριες που βρίσκονται τοποθετημένες σε χώρο του μηχανοστασίου, κατά το κοινώς λεγόμενο **ηλεκτροστάσιο**.

Η ενεργοποίηση της γεννήτριας πραγματοποιείται από διάφορους τύπους κινητήριων μηχανών (κινητήρες diesel, στρόβιλοι κτλ) αναλόγως τον τύπο και την αποστολή του πλοίου.

3.1.1 Κατηγοριοποίηση Ηλεκτρικών Εγκαταστάσεων Πλοίων

Η ηλεκτρική εγκατάσταση ενός πλοίου περιλαμβάνει το σύνολο των γεννητριών, των ηλεκτρικών πινάκων και των δικτύων, που δύνανται να ικανοποιούν τις ενεργειακές ανάγκες του συστήματος καταναλώσεων. [19]

Γενικότερα, οι ηλεκτρικές εγκαταστάσεις πλοίων κατηγοριοποιούνται ως εξής:

I. Τις **κύριες εγκαταστάσεις** οι οποίες περιλαμβάνουν:

α) Το **σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος** (σύγχρονες γεννήτριες) και τους ηλεκτρικούς πίνακες.

β) Το **σύστημα διανομής ηλεκτρικής ισχύος** το οποίο με τη σειρά του περιλαμβάνει:

- Τη πρωτεύουσα διανομή: Το ηλεκτρικό δίκτυο μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η σύνδεση των κεντρικών πινάκων με τους υποσταθμούς και τους διάφορους υποπίνακες. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται η διανομή ηλεκτρικής ισχύος στα συστήματα ζωτικής σημασίας.

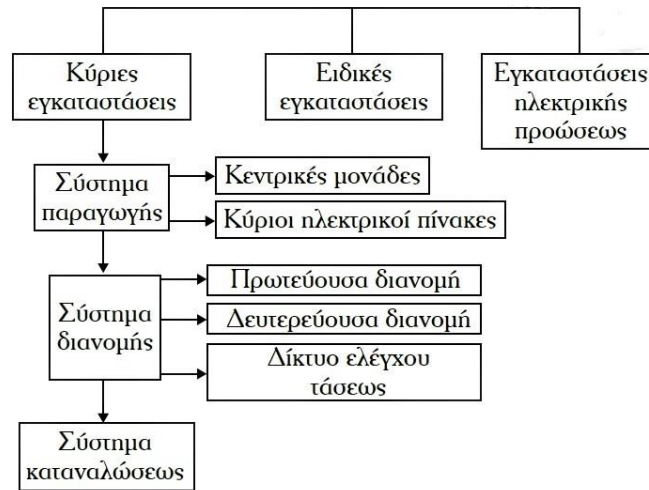
- Τη δευτερεύουσα διανομή: Το δίκτυο μέσω του οποίου τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ισχύ τα συστήματα κινήσεως και τα φορτία φωτισμού.

- Το ηλεκτρικό δίκτυο ελέγχου της τάσεως.

γ) Το **σύστημα καταναλώσεων** το οποίο περιλαμβάνει το σύνολο των καταναλωτικών συσκευών και διατάξεων.

II. Τις **ειδικές εγκαταστάσεις** στις οποίες ανήκουν οι καταναλώσεις για την τροφοδοσία των οποίων απαιτείται ηλεκτρικό ρεύμα διαφορετικού τύπου από αυτό που παράγεται από τις γεννήτριες (γυροπυξίδες, ραντάρ, τροφοδοσίες διάφορων ηλεκτρονικών συστημάτων).

III. Τις **εγκαταστάσεις ηλεκτρικής προώσεως**, δηλαδή το σύνολο των συστημάτων ηλεκτροκίνησης, μέσω των οποίων ενεργοποιούνται οι ελικοφόροι άξονες.

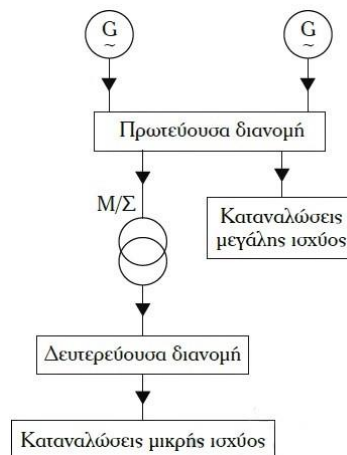


Σχήμα 3.1 - Αναλυτικό σχεδιάγραμμα ηλεκτρικών εγκαταστάσεων πλοίων (πηγή Βλάχος) [19]

Με την σειρά τους οι διανομές διακρίνονται σε:

Πρωτεύουσα διανομή: Το δίκτυο το οποίο τροφοδοτεί, μέσω του κέντρου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τον υποσταθμό μετασχηματισμού τάσεως και τις καταναλώσεις μεγάλης ισχύος. Το κέντρο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από το σύνολο των ηλεκτρογεννητριών, το κύριο πίνακα και τις συσκευές ελέγχου.

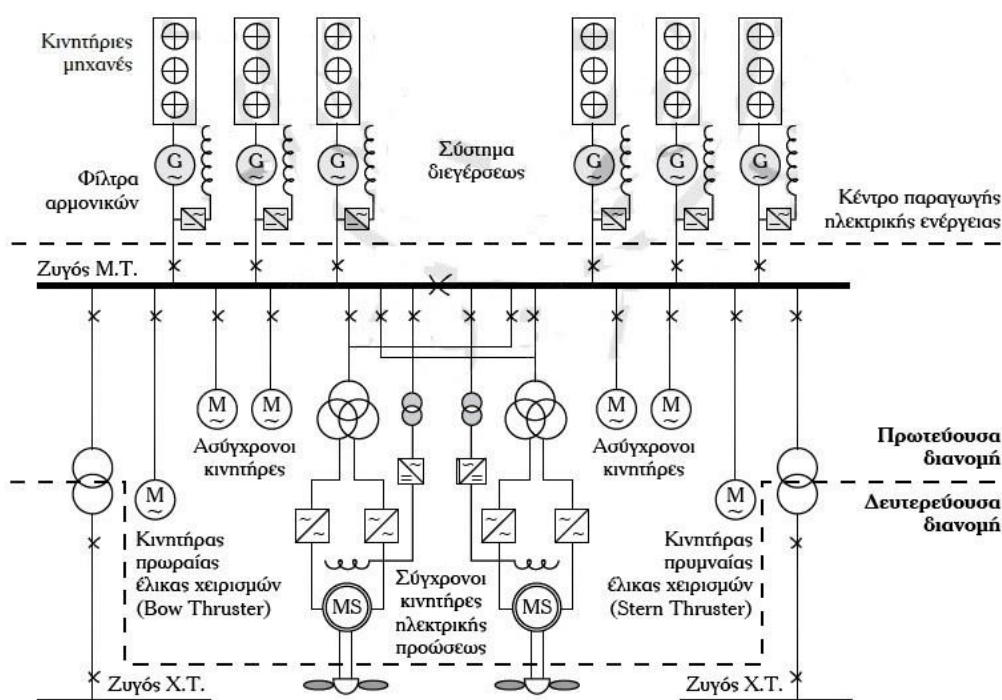
Δευτερεύουσα διανομή: Το ηλεκτρικό δίκτυο από το οποίο τροφοδοτούνται, μέσω του υποσταθμού μετασχηματισμού τάσεως, οι καταναλώσεις μικρής ισχύος.



Σχήμα 3.2 - Σχεδιάγραμμα ηλεκτρικών εγκαταστάσεων πλοίων (πηγή Βλάχος) [19]

Οι αυξημένες απαιτήσεις των φορτίων στα σύγχρονα πλοία, επέφεραν την μετάβαση σε τάσεις λειτουργίας 440V/690V. Η αύξηση του επιπέδου της τάσης δυνοδεύεται από τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Μείωση της διατομής και συνεπώς του βάρους, του όγκου και τους κόστους των αγωγών
- Μείωση των πτώσεων τάσης στους αγωγούς και περιορισμός των αντίστοιχων απωλειών.



Σχήμα 3.3 - Παράδειγμα μονογραμμικής απεικόνισης μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης Μέσης Τάσης ενός πλοίου (πηγή Βλάχος)[19]

3.2 Γενικά στοιχεία για τους Ασύγχρονους Τριφασικούς Κινητήρες

Οι τριφασικοί ασύγχρονοι κινητήρες αποτελούν τον πιο ευρέως αξιοποιήσιμο τύπο ηλεκτρικής μηχανής εναλλασσόμενου ρεύματος, στους κλάδους της βιομηχανίας και της ναυτιλίας.

Αυτό φυσικά οφείλεται σε μια σειρά από πλεονεκτήματα τα οποία προσφέρουν όπως:

- I. Η απλότητα κατασκευής
- II. Το χαμηλό κόστος κτήσης
- III. Οι ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης
- IV. Η διάθεσή τους σε ένα ευρύ φάσμα ισχύος, από τις πολύ μικρές μηχανές (με ισχύ λίγων watt), έως τις πολύ μεγάλες (εκατοντάδων kW)

Η αρχή λειτουργίας τους διατυπώθηκε από τον Νικόλα Τέσλα στα τέλη της δεκαετίας του 1880 ωστόσο, η εμπορική τους διάθεση με μορφή αντίστοιχη της σημερινής, ξεκίνησε το 1896. Έκτοτε, οι βελτιώσεις στην ποιότητα των υλικών κατασκευής τους, στις τεχνικές χύτευσης και στη μόνωση των τυλιγμάτων συνέβαλαν καθοριστικά στη δραστική μείωση του μεγέθους και του κόστους παραγωγής τους. (21)

Ο ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας αποτελείται από δυο βασικά μέρη:

I. Το σταθερό μέρος ή αλλιώς **στάτη**. Ο στάτης είναι κατασκευασμένος από χάλυβα και στηρίζει ένα κυλινδρικό σιδηροπυρήνα. Ο σιδηροπυρήνας με την σειρά του αποτελείται από μια στοίβα μονωμένων ελασμάτων που εμπεριέχουν αυλακώσεις με σκοπό τη δημιουργία χώρου για τη τοποθέτηση των τυλιγμάτων του στάτη.

II. Το κινητό μέρος που φέρει την ονομασία **ρότορας** ή **δρομέας**. Αποτελείται από δυναμοελάσματα που φέρουν αυλακώσεις για το τύλιγμα του δρομέα. (22)

Οι ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες εναλλακτικά ονομάζονται και επαγωγικοί, διότι η τάση στο δρομέα (μέσω της οποίας παράγεται το ρεύμα διέγερσης και κατ' επέκταση το μαγνητικό του πεδίο) αναπτύσσεται στο εσωτερικό της μηχανής, αναιρώντας την ανάγκη αυτή να δώθει μέσω κάποιας εξωτερικής πηγής.

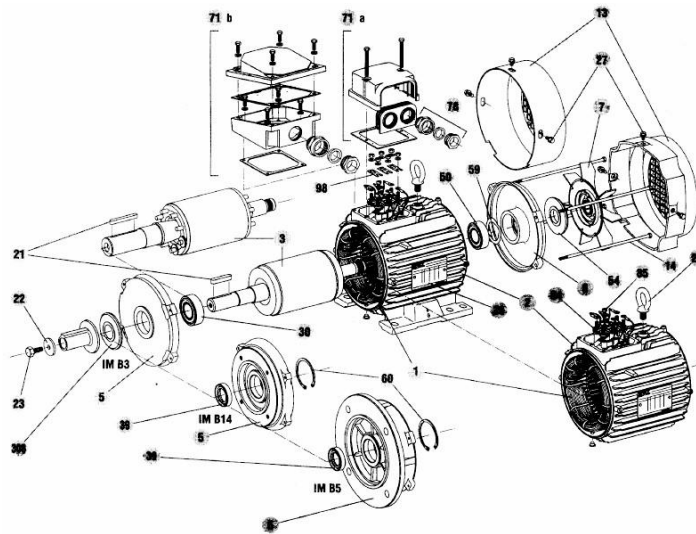
Αναλόγως το τύπο του δρομέα, οι επαγωγικοί κινητήρες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: α) σε αυτούς με **δρομέα βραχυκυκλωμένου κλωβού** και β) σε αυτούς με **δακτυλιοφόρο δρομέα**.

Ο δρομέας βραχυκυκλωμένου κλωβού φέρει αυλακώσεις στην επιφάνεια του, εντός των οποίων είναι τοποθετημένες αγωγίμοι ράβδοι. Τα άκρα των ράβδων αυτών βραχυκυκλώνονται μέσω των λεγόμενων δακτυλίων βραχυκύκλωσης.

Απεναντίας, οι δακτυλιοφόροι δρομείς φέρουν περιελίξεις όμοιες με αυτές του στάτη. Οι φάσεις τους συνδέονται κατά κύριο λόγο σε αστέρα και τα τρία ελεύθερα άκρα των αγωγών συνδέονται σε ισάριθμους δακτυλίους, πάνω στους οποίους εφάπτονται ψήκτρες. (24) Χαρακτηριστικό στοιχείο της συγκεκριμένης διάταξης αποτελεί η δυνατότητα σύνδεσης εξωτερικών αντιστάσεων στο κύκλωμα του στάτη.



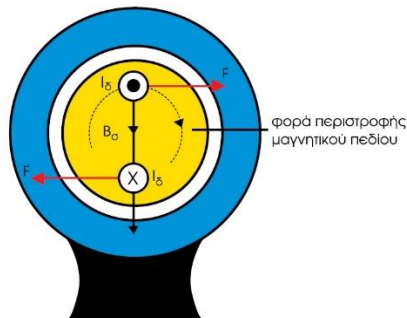
Εικόνα 3.1 - Τυπική εξωτερική δομή ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα υψηλής απόδοσης. [Siemens]



Εικόνα 3.2 - Λεπτομερής σχεδιαστική καταγραφή των επιμέρους τμημάτων του επαγωγικού κινητήρα

3.2.1 Αρχή λειτουργίας των ασύγχρονων τριφασικών μηχανών

Στους επαγωγικούς κινητήρες, ο δρομέας είναι ηλεκτρικά ανεξάρτητος από τον στάτη και η τροφοδοσία του δεν γίνεται από το δίκτυο. Όταν στα τρία τυλίγματα του στάτη διαρρέονται από τριφασικό ρεύμα, δημιουργείται ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο το οποίο τέμνει τις σπείρες του δρομέα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη επαγωγικών ρευμάτων και την δημιουργία της λεγόμενης δύναμης Laplace, η οποία προκαλεί τη περιστροφή του δρομέα.



Εικόνα 3.3 - Ανάπτυξη μαγνητικών δυνάμεων (23)

$$F = B_{\sigma} I_d \ell$$

Όπου:

F: Η μαγνητική δύναμη Laplace (N)

B_{σ} : Η μαγνητική επαγωγή του στρεφόμενου πεδίου (Tα)

I_d : Το ρεύμα του δρομέα από επαγωγή (A)

ℓ : Το μήκος αγωγού του δρομέα (m)

3.2.2 Η έννοια της Ολίσθησης του Δρομέα

Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο στρέφεται με ταχύτητα που εξαρτάται από την συχνότητα (f) του ρεύματος τροφοδοσίας και τα ζεύγη πόλων (p) του τυλίγματος του στάτη.

Η ταχύτητα αυτή ονομάζεται σύγχρονη ταχύτητα n_s .

$$n_s = \frac{60f}{p}$$

Όπου:

n_s : Η σύγχρονη ταχύτητα σε στροφές ανά λεπτό (rpm)

f: Η συχνότητα τροφοδοσίας (Hz)

p: Ο αριθμός των ζευγών μαγνητικών πόλων

Θεωρώντας πως ο δρομέας της μηχανής είναι ακίνητος, τότε η συχνότητα του ισούται με την συχνότητα του στάτη. Ωστόσο, αν ο δρομέας κινείται με τη σύγχρονη ταχύτητα, η συχνότητα της τάσης στο δρομέα θα είναι μηδενική.

Για κάθε άλλη ενδιάμεση τιμή της ταχύτητας του δρομέα, η συχνότητα στο δρομέα είναι ανάλογη της διαφοράς της ταχύτητας του πεδίου του στάτη n_s με την ταχύτητα του δρομέα n. Ο ολίσθηση υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

Η τιμή της ολίσθησης δεν είναι σταθερή και μεταβάλλεται αναλόγα με το φορτίο.

3.2.3 Η σημασία της Ροπής σε έναν επαγωγικό κινητήρα

Ένα από τα σημαντικότερα μεγέθη στη θεωρία των κινητήρων αποτελεί η ροπή που αναπτύσσουν στον άξονα τους για την περιστροφή ενός φορτίου.

Από τη θεωρία της Μηχανικής ισχύει ότι:

$$T = \frac{P_{out}}{\omega}$$

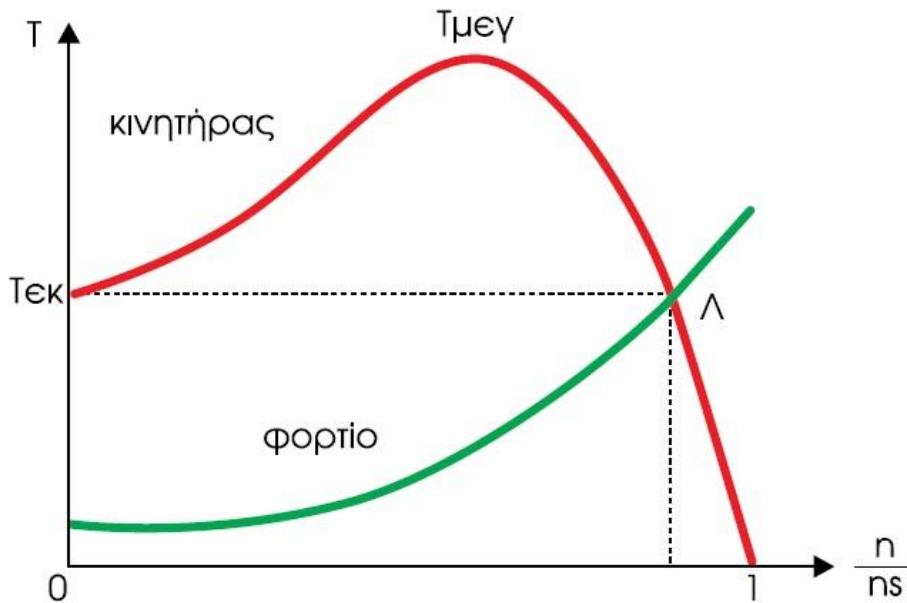
Όπου:

T: Η ροπή (Nm)

P: Η αποδιδόμενη ισχύς (W)

ω : Η γωνιακή ταχύτητα του δρομέα

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η τυπική καμπύλη ροπής – ταχύτητας ενός ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα.



Σχήμα 3.4 - Καμπύλη ροπής – ταχύτητας ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα (23)

Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η καμπύλη ροπής – στροφών του κινητήρα, η οποία χρήζει ιδιαίτερης σημασίας για τον τρόπο λειτουργίας του.

Κατά την εκκίνηση, όπου η ταχύτητα περιστροφής είναι πρακτικά μηδενική, η ροπή του κινητήρα έχει την τιμή $T_{εκ}$, γνωστή και ως **ροπή εκκίνησης**. Όσο ο κινητήρας επιταχύνει, η τιμή της ροπής αυξάνεται μέχρι όπου φτάνει την μέγιστη τιμή της $T_{μεγ}$, ή αλλιώς **ροπή ανατροπής**. Η επαγόμενη ροπή του επαγωγικού κινητήρα είναι ίση με μηδεν στη σύγχρονη ταχύτητα.

Στο σχήμα επίσης φαίνεται με πράσινο χρώμα η αντίστοιχη καμπύλη ροπής – στροφών του φορτίου. Για κάθε τιμή της ταχύτητας, η διαφορά μεταξύ της ροπής του κινητήρα και της ροπής του φορτίου ονομάζεται **ροπή επιτάχυνσης**.

Η ροπή εκκίνησης του κινητήρα πρέπει πάντα να υπερβαίνει την αντίστοιχη ροπή εκκίνησης του φορτίου και να διατηρεί μεγαλύτερη τιμή καθ' όλο το διάστημα επιτάχυνσης του κινητήρα.

Η ταχύτητα λειτουργίας και η ροπή λειτουργίας καθορίζονται από το σημείο Λ (σχήμα 3.4), που αποτελεί και το σημείο τομής των δυο καμπυλών.

Γενικότερα, η λειτουργία ενός επαγωγικού κινητήρα στο τμήμα της καμπύλης πριν την μέγιστη ροπή ($T_{μεγ}$) χαρακτηρίζεται από αστάθεια ενώ θεωρείται ευσταθής μόνο πέραν του σημείου αυτού. Η ευσταθής λειτουργία κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επιτρέπει την αυτόματη προσαρμογή στις διακυμάνσεις του φορτίου.

3.3 Πινακίδα Ασύγχρονου Τριφασικού Κινητήρα

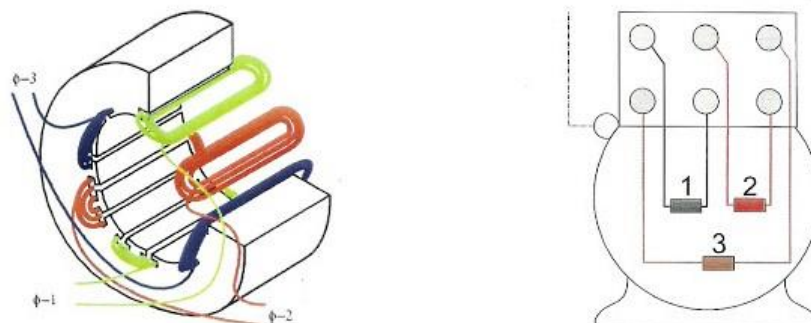
Η πινακίδα Ασύγχρονου Τριφασικού Κινητήρα αποτελεί επί της ουσίας μια ταυτότητα, αφού σε αυτή απεικονίζονται τα κυριότερα τεχνικά του χαρακτηριστικά.

3 ~ Mot BN 63B 4				No 60278000286	
Cod. 830520106				IM B5 IP 55	
V Δ / Y	I.C.L. F		S 1		cos ϕ
	Hz	kW	A Δ / Y	min-1	
230/400	50	0.18	1.23 - 0.71	1320	0.67
460	60	0.21	0.69	1630	
220/240	V Δ	1.25-1.28	A		50Hz
380/415	VY	0.72-0.74	A		
440/480	VY	0.68-0.71	A		
				60Hz	

Εικόνα 3.3 – Τυπική Πινακίδα Ασύγχρονου Τριφασικού Κινητήρα

Μερικές από τις πληροφορίες που η πινακίδα προσφέρει είναι οι εξής:

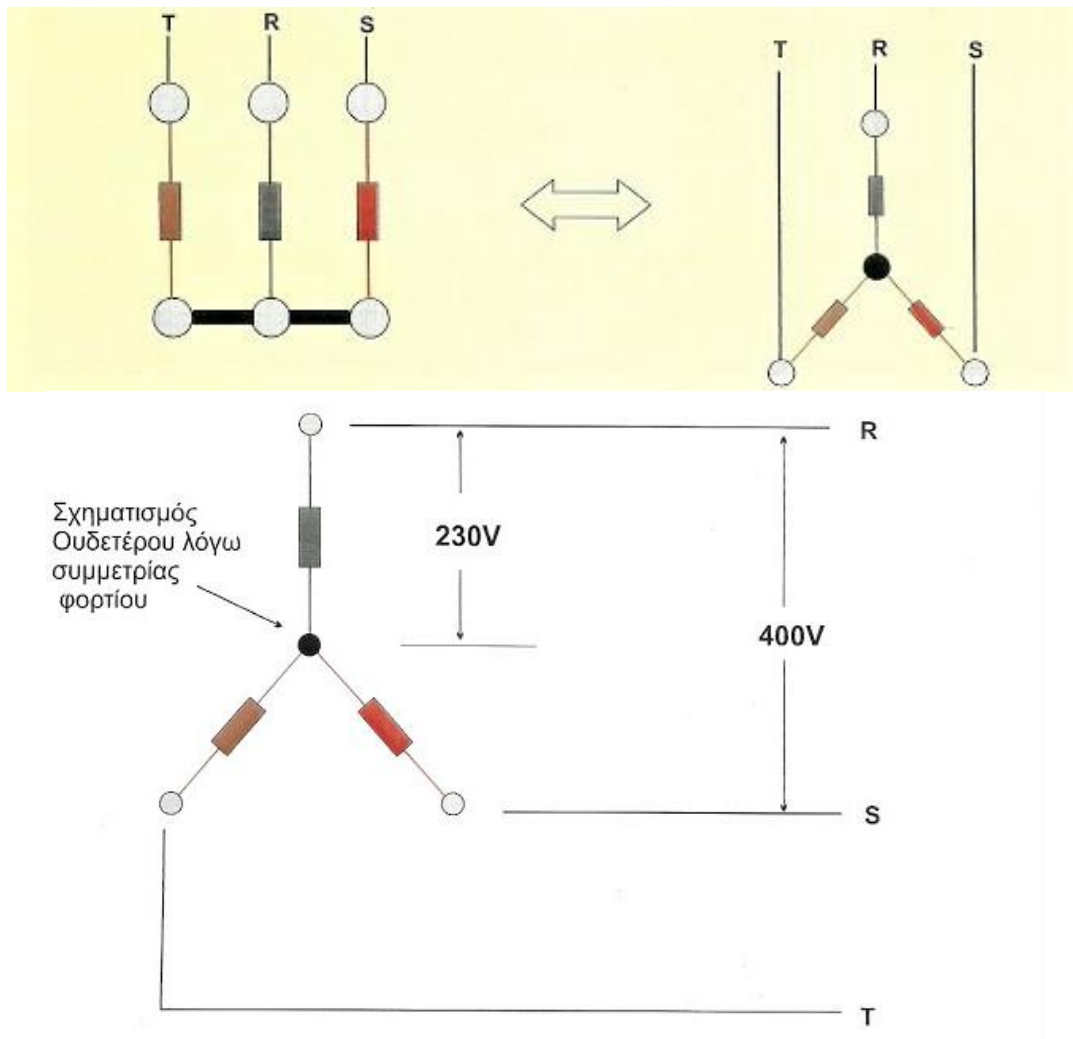
Η ισχύς του κινητήρα σε hp/kW, η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα σε στροφές ανά λεπτό, ο συντελεστής ισχύος, το βάρος του, ο τρόπος έδρασης, η τάση τροφοδοσίας του, η συχνότητα του ρεύματος, η ένταση του ρεύματος που ο κινητήρας απορροφά υπό κανονικό φορτίο ανά φάση και τέλος, ο βαθμός προστασίας του.



Εικόνα 3.4 – Εσωτερική σύνδεση πηνίων ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα [25]

Στο εσωτερικό των επαγωγικών κινητήρων βρίσκονται τρία σύνθετα πηνία. Οι ακροδέκτες των πηνίων αυτών συνδέονται με τους ακροδέκτες που βρίσκονται στο κούτι σύνδεσης του κινητήρα. Αυτό διευκολύνει την σύνδεση του κινητήρα σε συνδεσμολογία αστέρα ή τριγώνου, ανάλογα με την τάση τροφοδοσίας.

3.3.1 Συνδεσμολογία σε Αστέρα

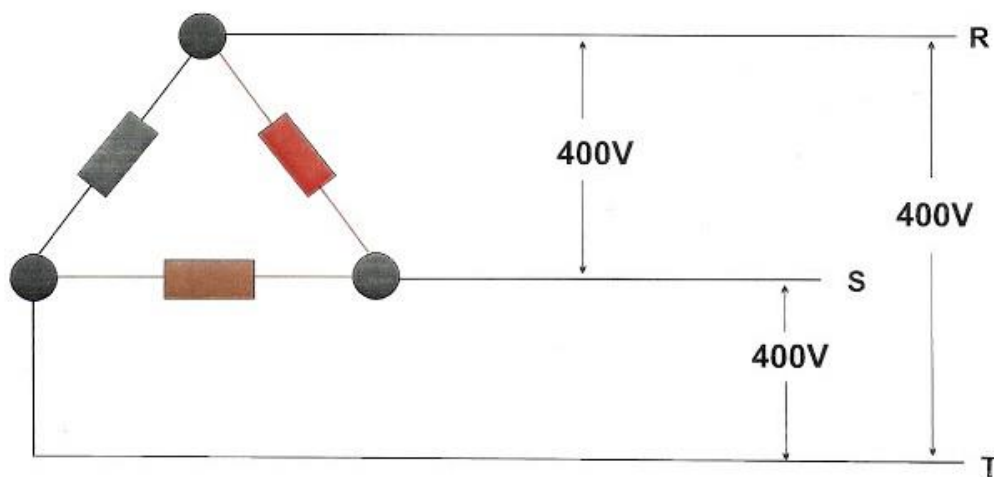
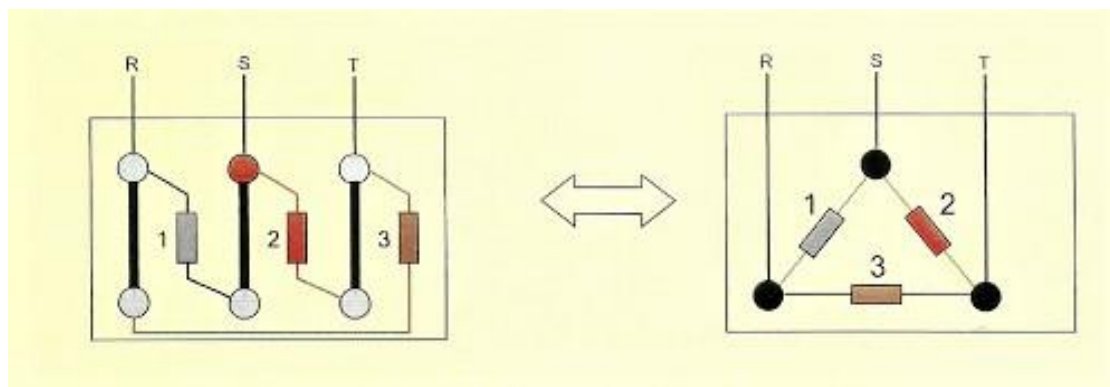


Σχήμα 3.5 – Σχηματισμός της συνδεσμολογίας αστέρα [25]

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται πως ενώ εφαρμόζεται στον κινητήρα πολική τάση 400V, τα πηνία του τροφοδοτούνται με φασική τάση 230V λόγω της συνδεσμολογίας σε αστέρα.

Μερικά από τα προβλήματα κατά την απευθείας εκκίνηση σε αστέρα είναι η αδυναμία της εκκίνησης μεγάλων φορτίων, λόγω της πολύ μειωμένης ροπής λειτουργίας. Επίσης, η μικρή ροπή επιτάχυνσης δεν επιτρέπει στον κινητήρα να περιστραφεί στις ονομαστικές του στροφές και συνεπώς να ανταπεξέλθει στο φορτίο. Η μικρή ροπή επιτάχυνσης, έχει επίσης ως αποτέλεσμα τη μεγάλη ολίσθηση του κινητήρα, η οποία επιφέρει σημαντικές απώλειες θερμότητας και καταπόνηση, άρα και πιθανή βλάβη των μονώσεων του.

3.3.2 Συνδεσμολογία σε Τρίγωνο



Σχήμα 3.6 – Σχηματισμός της συνδεσμολογίας τριγώνου [25]

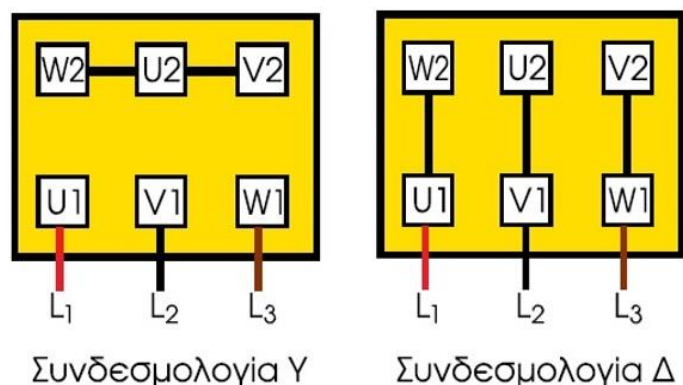
Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται πως στη συνδεσμολογία τριγώνου, η πολική τάση 400V, εφαρμόζεται το ίδιο για κάθε πηνίο. Τα πηνία αυτά είναι ειδικά κατασκευασμένα έτσι ώστε να αντέχουν την τάση τροφοδοσίας τους.

3.3.3 Αυτόματος διακόπτης αστέρα-τριγώνου (Y-Δ)

Το μεγάλο ρεύμα εκκίνησης των επαγωγικών κινητήρων βραχυκυκλωμένου δρομέα φτάνει, σε τυπικές τιμές, 4 έως 8 φορές το ονομαστικό. Για το λόγο αυτό, η απ'ευθείας εκκίνηση του κινητήρα σε συνδεσμολογία τριγώνου, που είναι η συνδεσμολογία λειτουργίας τους, δημιουργεί βυθίσεις τάσης στο δίκτυο. Οι ισχύρες αυτές πτώσεις τάσεις δεν εξαρτώνται μόνο από το ρεύμα εκκίνησης του κινητήρα, αλλά και από τις δυνατότητες του δικτύου ηλεκτροδότησης.

Για τον περιορισμό του ρεύματος εκκίνησης, αλλά και για την προστασία του κινητήρα, χρησιμοποιείται ο αυτόματος διακόπτης αστέρα-τριγώνου (Y-Δ), που για συντομία πολλές φορές αναφέρεται και ως αστεροτρίγωνο.

Στους κινητήρες αυτούς υπάρχουν τρία τυλίγματα, τα άκρα των οποίων ονομάζονται U1-U2, V1-V2 και W1-W2.



Εικόνα 3.5 – Συνδεσμολογίες Αστέρα και Τριγώνου στο κουτί σύνδεσης κινητήρα [25]

Στο ξεκίνημα του κινητήρα τα τρία τυλίγματα πρέπει να συνδεθούν σε συνδεσμολογία αστέρα. Για το σκοπό αυτό συνδέονται μεταξύ τους τα άκρα U2, V2 και W2, ενώ τα άκρα U1, V1 και W1 συνδέονται με τις τρεις φάσεις L1, L2 και L3 αντίστοιχα του δικτύου τροφοδοσίας.

Αφού ο κινητήρας λειτουργήσει για κάποιο χρονικό διάστημα, ώστε οι στρόφες του να φτάσουν σε κάποιο όριο και να μην αυξάνονται πλέον, ο αυτόματος διακόπτης αλλάζει την συνδεσμολογία του κινητήρα από αστέρα σε τρίγωνο. Αυτό γίνεται γεφυρώνοντας τα άκρα U1-W2, V1-U2 και W1-V2 των τυλιγμάτων και συνδέοντας τα αντίστοιχα στις φάσεις L1, L2, L3 του δικτύου τροφοδοσίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το ρεύμα εκκίνησης ενός κινητήρα σε συνδεσμολογία αστέρα, να είναι 3 φορές μικρότερο από το ρεύμα εκκίνησης σε συνδεσμολογία τριγώνου.

Η ρύθμιση του χρόνου μεταγωγής των τυλιγμάτων χρήζει ιδιαίτερης προσοχής. Όπως προαναφέρθηκε η μεταγωγή πρέπει να πραγματοποιείται, την στιγμή που ο κινητήρας αποκτήσει την ταχύτητα λειτουργίας του. [26]

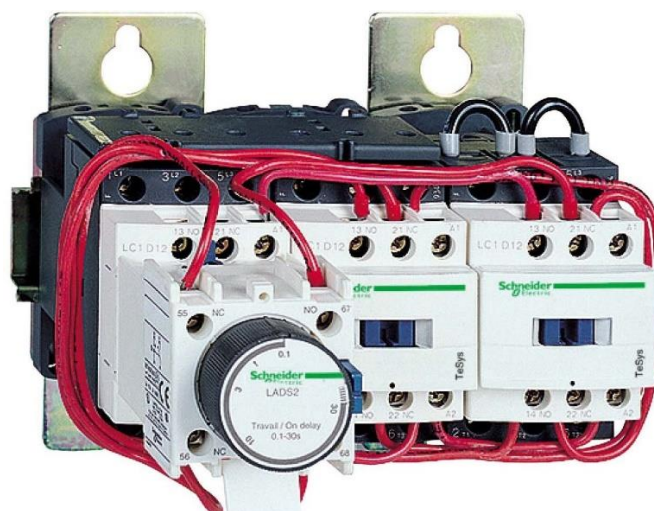
Αν η μεταγωγή συμβεί νωρίτερα, οι επαφές του ηλεκτρονόμου τριγώνου ενδέχεται να καταστραφούν μετά από έναν αριθμό εκκινήσεων.

Αν η μεταγωγή συμβεί καθυστερημένα, παρατηρείται μείωση της ισχύος και της ροπής στρέψης του κινητήρα, με όσα προβλήματα αυτά συνεπάγονται.

Ο χρόνος μεταγωγής μπορεί να υπολογιστεί εμπειρικά από τον θόρυβο που παράγει ο κινητήρας, καθώς επιταχύνεται. Ωστόσο, για μεγαλύτερη ακρίβεια, ο υπολογισμός του χρόνου μεταγωγής μπορεί να υπολογιστεί με μέτρηση το ρεύματος του κινητήρα. Η μεταγωγή πρέπει να πραγματοποιείται όταν το ρεύμα εκκίνησης, καθώς μειώνεται, μειωθεί στο διπλάσιο του ονομαστικού ρεύματος του κινητήρα. Η τιμή της έντασης του ρεύματος αυτού, μπορεί να μετρηθεί με την βοήθεια ενός αμπερομέτρου και έτσι να υπολογιστεί ο σωστός χρόνος μεταγωγής.

Ρύθμιση του θερμικού

Σκοπό της χρήσης των θερμικών αποτελεί η εξασφάλιση της προστασίας του κινητήρα από συνεχή υπερφόρτιση, η οποία είναι ικανή να καταστρέψει τα τυλίγματα του. Το ρεύμα του θερμικού ρυθμίζεται στο 0,58I_{οn} (δηλ. στο φασικό ρεύμα τριγώνου), όπου I_{οn} είναι το ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας του κινητήρα. [27]



Εικόνα 3.6 – Τυπική διάταξη εκκινητή αστέρα – τριγώνου [πηγή: Schneider Electric]

3.4 Ρύθμιση στροφών ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα βραχυκυκλωμένου δρομέα με μετατροπείς συχνότητας

Οι μετατροπείς συχνότητας είναι πλέον άρρηκτα συνδεδεμένοι με την τροφοδοσία των ηλεκτρικών κινητήρων. Για να μπορέσει ένας ηλεκτροκινητήρας να περιστραφεί και να παράξει ροπή, χρειάζεται και την αντίστοιχη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας.

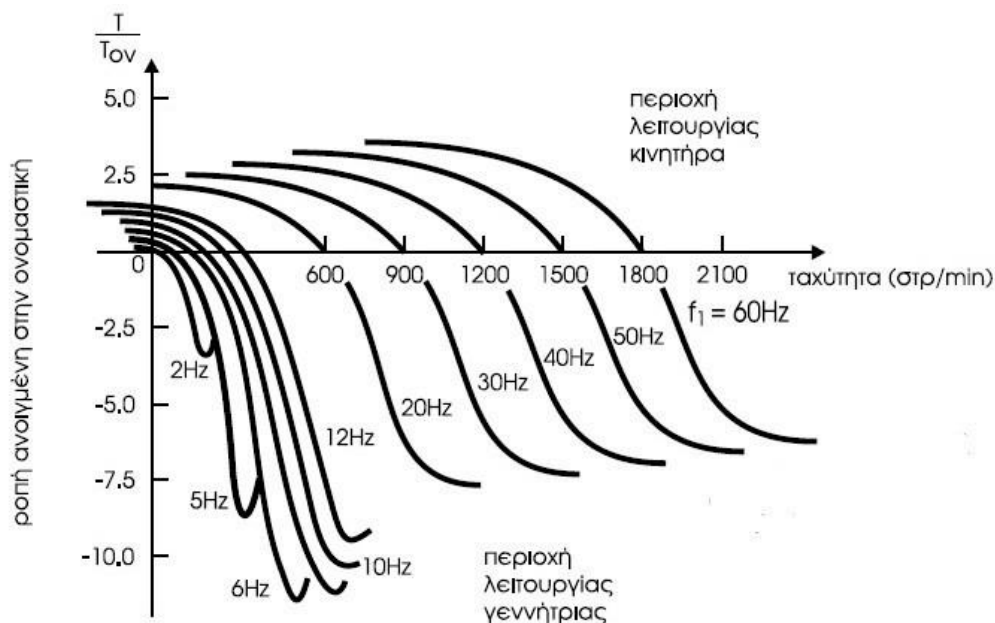
Οι μετατροπείς συχνότητας (γνωστοί και ως ρυθμιστές στροφών, drives ή inverters), παράγουν μεταβλητή συχνότητα και τάση, εξασφαλίζοντας τη λειτουργία του κινητήρα στις επιθυμητές στροφές. Έτσι, αντικαθιστούν συμβατικές και ενεργοβόρες μεθόδους, όπως για παράδειγμα, διατάξεις απόσβεσης και στραγγαλισμού, γρανάζια και μειωτήρες, αυτόματους διακόπτες αστέρα – τριγώνου κ.ο.κ. Η χρήση τους αποσκοπεί στη βελτίωση της συνολικής απόδοσης των εφαρμογών κίνησης, αφού συμβάλλουν καθοριστικά στη μείωση της καταναλισκόμενης ισχύος και τον περιορισμό των εκπομπών CO₂ στη βιομηχανία και την ναυτιλία.

3.4.1 Αρχή λειτουργίας μετατροπέων συχνότητας

Η τροφοδοσία ενός επαγωγικού κινητήρα τροφοδοτείται τάση μεταβλητής συχνότητας, έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της σύγχρονης ταχύτητας περιστροφής. Αυτό φαίνεται και από την παρακάτω σχέση:

$$n_s = \frac{60f}{p}$$

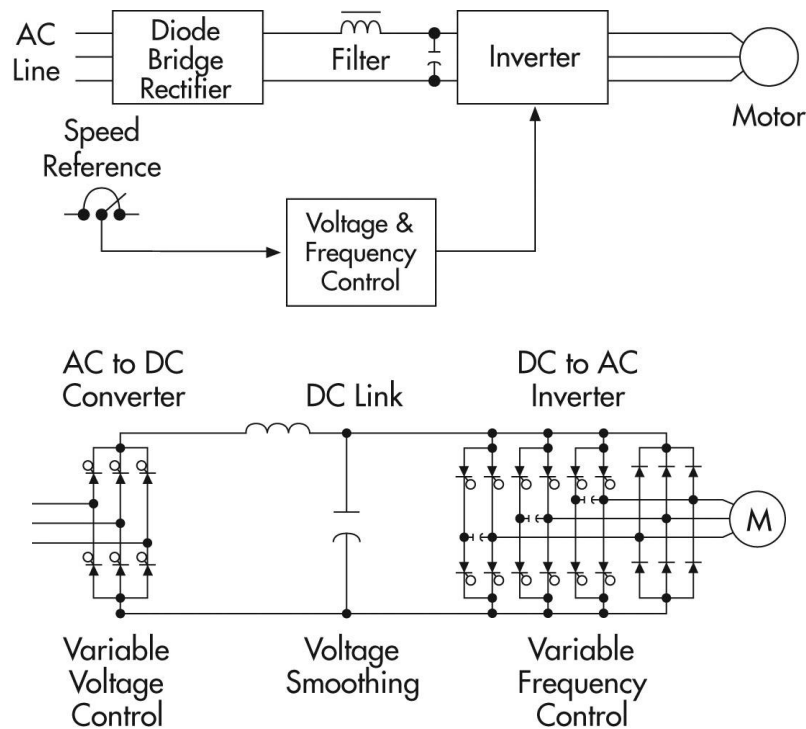
Έτσι, αυξάνοντας την συχνότητα, η καμπύλη ροπής – ταχύτητας μετατοπίζεται προς τα δεξιά. Με το τρόπο αυτό μεταβάλλεται και το σημείο λειτουργίας του κινητήρα και επιτυγχάνεται ο έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής του.



Σχήμα 3.5 Μεταβολή της καμπύλης Ροπής – Ταχύτητας Περιστροφής ενός επαγωγικού κινητήρα κατά την μεταβολή της συχνότητας λειτουργίας (23)

Η δυνατότητα παροχής ρυθμιζόμενης τάσης και συχνότητας δόθηκε χάρη στην αλματώδη ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος και ειδικότερα των ημιαγωγών διακοπών όπως τα θυρίστορ, τα διπολικά τρανζίστορ ισχύος, τα τρανζίστορ MOSFET, τα τρανζίστορ IGBT και τα θυρίστορ GTO. Μέσω αυτών των στοιχείων γίνεται εφικτός ο έλεγχος της ταχύτητας για κινητήρες έως τουλάχιστον 400kW.

3.4.2 Δομή των μετατροπέων συχνότητας



Σχήμα 3.6 Δομικό διάγραμμα και κύκλωμα ισχύος ρυθμιστή στροφών

Όπως φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα ο ρυθμιστής στροφών αποτελείται αναλυτικά από τα εξής:

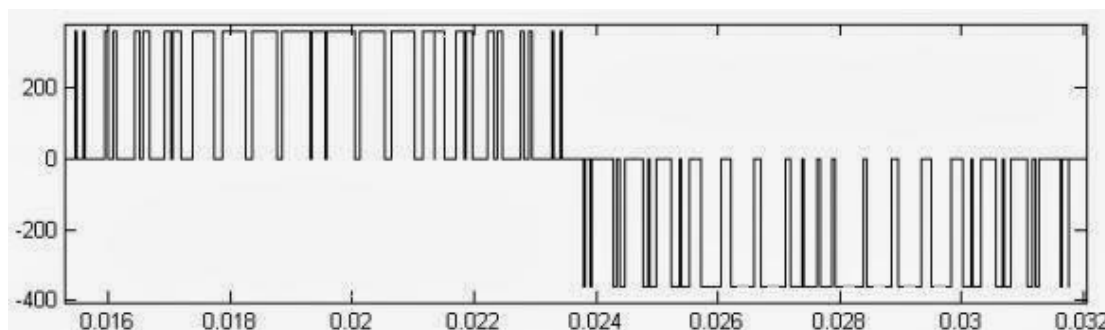
I. Την ανορθωτική διάταξη που αποτελείται από διόδους ή θυρίστορ. Αυτή αποσκοπεί στη μετατροπή της εναλλασσόμενης τάσης του δικτύου σε συνεχή με σταθερή ή ρυθμιζόμενη τιμή.

II. Η συνεχής τάση που προκύπτει από την ανορθωτική διάταξη φιλτράρεται και εξομαλύνεται. Στο φίλτρο, μέσω του οποίου πραγματοποιείται η συγκεκριμένη διαδικασία περιέχονται συστοιχίες πηνίων και πυκνωτών.

III. Η εξομαλυσμένη συνεχής τάση μεταβαίνει εν συνεχεία στον αντιστροφέα, ο οποίος με την σειρά του τη μετατρέπει σε εναλλασσόμενη μεταβλητής συχνότητας και μεταβλητού πλάτους. Ο αντιστροφέας αποτελεί επί της ουσίας την καρδιά του μετατροπέα συχνότητας. Για το λόγο αυτό, οι ρυθμιστές στροφών ασύγχρονων κινητήρων αποκαλούνται πολύ συχνά απλώς αντιστροφεείς (inverters).

Τα βασικά δομικά στοιχεία αυτού του μετατροπέα αποτελούν οι ηλεκτρονικοί ημιαγωγικοί διακόπτες. Η επιλογή των ηλεκτρονικών αυτών διακοπών είναι πολύ σημαντική καθώς επηρεάζει σημαντικά τα χαρακτηριστικά λειτουργίας, την απόδοση αλλά και την ποιότητα ενός αντιστροφέα. Ενδεικτικά αναφέρονται τα θυρίστορ (SCR), τα διπολικά τρανζίστορ ισχύος (BJT), τα MOSFET, τα IGBT και τα GTO θυρίστορ.

Σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα, η βέλτιστη επιλογή για αντιστροφείς ισχύος από 0.55 kW έως 315 kW αποτελούν τα διακοπτικά στοιχεία τεχνολογίας IGBT ενώ για ακόμα μεγαλύτερη ισχύ τα διακοπτικά στοιχεία τεχνολογίας GTO.



Σχήμα 3.7 - Κυματομορφή τάσης διαμορφωμένη κατά ημίτονο (SPWM).

Ο αντιστροφέας χρησιμοποιεί κάποιον τύπο από τα προαναφερθέντα διακοπτικά στοιχεία και παράγει στην έξοδο του μια σειρά από παλμούς. Η παλμοσειρά αυτή έχει σταθερό ύψος και μεταβλητό εύρος παλμών και η θεμελιώδης συχνότητά της είναι ίση με την επιθυμητή συχνότητα λειτουργίας του κινητήρα. Ωστόσο, ταυτόχρονα με τη θεμελιώδη συχνότητα, λόγω της διακοπτικής λειτουργίας του αντιστροφέα, παράγονται και ορισμένες άλλες συχνότητες (ανώτερες αρμονικές).

Οι αρμονικές είναι ένα φαινόμενο που μπορεί να προκαλέσει διάφορα προβλήματα (μαγνητικός θόρυβος, πρόσθετες απώλειες και ασταθής λειτουργία του κινητήρα) σε βιομηχανικές, κτιριακές και ναυτιλιακές εφαρμογές και ως εκ τούτου, δεν πρέπει να αγνοείται ή να υποτιμάται.

IV. Η μονάδα ελέγχου εποπτεύει και να ελέγχει την λειτουργία των προαναφερθέντων τριών τμημάτων. Επίσης περιέχει έναν μικροεπεξεργαστή, στη μνήμη του οποίου μπορούν να αποθηκευτούν οι επιθυμητές ρυθμίσεις παραμετροποίησης.

3.4.3 Βαθμωτός Έλεγχος

Μια από τις πλέον καθιερωμένες τεχνικές είναι ο έλεγχος με σταθερό λόγο τάσης προς τη συχνότητα τροφοδοσίας (V/f). Κύριο χαρακτηριστικό και ταυτόχρονα μειονέκτημα της μεθόδου αυτής αποτελεί το γεγονός πως η ροπή και η μαγνητική ροή διακένου ελέγχονται από κοινού, μέσω του λόγου V/f, χωρίς ωστόσο να υπάρχει η δυνατότητα ανεξάρτητου ελέγχου. Πιο συγκεκριμένα, σε έναν ελεγκτή όπου διατηρείται σταθερή η αναλογία τάσης προς συχνότητα (σταθερή μαγνητική ροή), μια απότομη αύξηση της ταχύτητας αναφοράς θα έχει ως συνέπεια την μείωση της μαγνητικής ροής. Ωστόσο, η μεταβολή της μαγνητικής ροής επηρεάζει με τη σειρά της την τάση.

Ένα θέμα που προκύπτει εδώ, είναι η μεσολάβιση ενός σημαντικού χρονικού διαστήματος μέχρι ούτε να μπορέσει ο κινητήρας να αναπτύξει ροπή και να επιταχύνει μέχρι την επιθυμητή ταχύτητα. Συνεπώς, δεν υπάρχει καλή δυναμική συμπεριφορά του συστήματος ώστε να μπορούν να επιτευχθούν αμέσως η επιτάχυνση και η επιβράδυνση του κινητήρα και για τον λόγο αυτό, δεν είναι εφικτό να ακολουθηθούν ικανοποιητικά οι μεταβολές των σημάτων αναφοράς.

Από όσα υπόθηκαν, αναδεικνύεται ουσιαστικά η αδυναμία του βαθμωτού ελέγχου να λειτουργήσει σε εφαρμογές που απαιτούν έλεγχο θέσης με υψηλή ακρίβεια (πχ γερανοί, ανυψωτικά μηχανήματα κτλ). Στις μέρες μας, ο βαθμωτός έλεγχος αξιοποιείται κυρίως σε απλές εφαρμογές όπου, εξαιτίας της εύκολης και φθηνής υλοποίησής του, υπερτερεί έναντι των άλλων μεθόδων. [28]

3.4.4 Διανυσματικός Έλεγχος με Προσανατολισμό Πεδίου

Στον διανυσματικό έλεγχο με προσανατολισμό πεδίου τα ελεγχόμενα μεγέθη εκφράζονται ως διανύσματα, συνεπώς κατά τον έλεγχο δεν προσδιορίζεται μόνο το μέτρο αλλά και η φάση τους. Η μεγάλη σπουδαιότητα του έγκειται στο γεγονός ότι υπό κατάλληλες προϋποθέσεις μπορεί να επιτευχθεί αποσύζευξη των εξισώσεων της μηχανής, με αποτέλεσμα την ευκολία, τη ταχύτητα και την μεγάλη ακρίβεια στον έλεγχο.

Μέσω της τεχνικής του διανυσματικού ελέγχου επέρχεται η επίλυση όλων των προβλημάτων του βαθμωτού ελέγχου, τα οποία οφείλονται στη συζευγμένη μορφή των εξισώσεων της μηχανής. Δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ της αναπτυσσόμενης ηλεκτρικής ροπής και της μαγνητικής ροής της μηχανής καθώς πλέον ο έλεγχος τους γίνεται ανεξάρτητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μη μεταβολή της ευαισθησίας της ηλεκτρικής ροπής ως προς την ολίσθηση, που θα είχε ως αποτέλεσμα την αργή απόκριση του συστήματος στις μεταβολές της ταχύτητας. Συνεπώς, το περιθώριο ευστάθειας του συστήματος διευρύνεται και η συμπεριφορά του επαγωγικού κινητήρα μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος.

Η επινόηση του διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμένο πεδίο έφερε επανάσταση στο τομέα του ελέγχου υψηλής ακρίβειας και απόδοσης. Τα προηγμένα χαρακτηριστικά λειτουργίας του, τον κατέστησαν γρήγορα μια ευρύτατα χρησιμοποιούμενη τεχνική ελέγχου, εκτοπίζοντας σταδιακά τη χρήση βαθμωτού ελέγχου από βιομηχανικές εφαρμογές με υψηλές απαιτήσεις ακρίβειας στον έλεγχο.

Ταυτόχρονα, ο επαγωγικός κινητήρας, που μέσω της τεχνικής του διανυσματικού ελέγχου απέκτησε συμπεριφορά όμοια με τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος, άρχισε να διακρίνεται περισσότερο, εξαιτίας των καλύτερων χαρακτηριστικών λειτουργίας του, σε εφαρμογές ελέγχου μεταβλητής ταχύτητας, τερματίζοντας την μέχρι τότε πρωτοκαθερδία των μηχανών συνεχούς ρεύματος.

Οι δυο βασικότερες μέθοδοι διανυσματικού ελέγχου με προσανατολισμό πεδίου αποτελούν, ο άμεσος και ο έμμεσος διανυσματικός έλεγχος. Και στις δυο περιπτώσεις, ο προσανατολισμός μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε σύμφωνα με την μαγνητική ροή του δρομέα, είτε με την μαγνητική ροή του διακένου, είτε ακόμα και με την μαγνητική ροή του στάτη.

Από τους παραπάνω τρόπους μόνο ο προσανατολισμός με την μαγνητική ροή του δρομέα μπορεί να εξασφαλίσει εκ φύσεως ανεξάρτητο έλεγχο, σε αντίθεση με τις άλλες δυο ροές όπου απαιτείται αλγεβρική προσέγγιση για την εξάλειψη της όποιας μορφής σύζευξης. [29]

3.4.5 Πλεονεκτήματα Ρυθμιστών Στροφών

Πέραν του ελέγχου της ταχύτητας ενός κινητήρα, η χρήση του ηλεκτρονικού ρυθμιστή στροφών προσφέρει τα παρακάτω εξίσου σημαντικά πλεονεκτήματα:

- Ομαλή εκκίνηση με πολύ μικρά και ρυθμιζόμενα ρεύματα εκκίνησης
- Ομαλή πέδηση
- Δυνατότητα αύξησης της ροπής εκκίνησης
- Δυνατότητα αυτόματης ή προγραμματιζόμενης ρύθμισης
- Απόλυτος έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής
- Σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας
- Δυνατότητα αλλαγής φοράς περιστροφής ενός κινητήρα, αναιρώντας την ανάγκη για επιπλέον διακόπτες
- Αυξημένη προστασία του κινητήρα

Η απαρίθμηση των παραπάνω και μόνο πλεονεκτημάτων, τα οποία κάποτε εθεωρούντο σενάριο επιστημονικής φαντασίας, καταδεικνύει την απόλυτη υπεροχή του ελέγχου της ταχύτητας με χρήση μετατροπέων συχνότητας έναντι όλων των άλλων παλαιότερων συμβατικών μεθόδων.

3.4.6 Συνήθεις εφαρμογές των ηλεκτρονικών ρυθμιστών στροφών

Οι ηλεκτρονικοί ρυθμιστές στροφών αξιοποιούνται σε πληθώρα εφαρμογών στη βιομηχανία και την ναυτιλία. Σε αυτό έχει συμβάλει η σημαντική βελτίωση και η αύξηση των δυνατοτήτων τους, όπως επίσης και η μείωση του κόστους απόκτησης τους.

Ενδεικτικά αναφέρονται:

- Αντλίες
- Ανεμιστήρες
- Παρασκευή και επεξεργασία χαρτιού
- Μεταφορικές ταινίες
- Επεξεργασία πρώτων υλών (ξύλεια, μάρμαρο κτλ)
- Γερανοί – ανελκυστήρες
- Συμπιεστές – αναμείκτες – αναδευτήρες



Εικόνα 3.7 Ηλεκτρονικός Ρυθμιστής Στροφών [Schneider Electric]

4. Εφαρμογή συστημάτων μετάδοσης κίνησης μεταβλητής συχνότητας σε διεργασίες πλοίων

Η βελτιώση της ενεργειακής αποδοτικότητας τόσο σε βιομηχανικές όσο και σε ναυτιλιακές εγκαταστάσεις αποτελεί μια σύγχρονη προσέγγιση στην εξοικονόμηση ενέργειας, καθώς αποφέρει σημαντικά οικονομικά οφέλη χωρίς να θυσιάζεται η απόδοση των συστημάτων.

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα διερευνηθούν τα πλεονεκτήματα της χρήσης ρυθμιστών στροφών σε εφαρμογές μεταβλητής ροπής σε πλοία και πιο συγκεκριμένα:

- I. Στους ανεμιστήρες του μηχανοστασίου
- II. Στις αντλίες θαλασσινού νερού

4.1 Εξοικονόμηση ενέργειας στους ανεμιστήρες του μηχανοστασίου

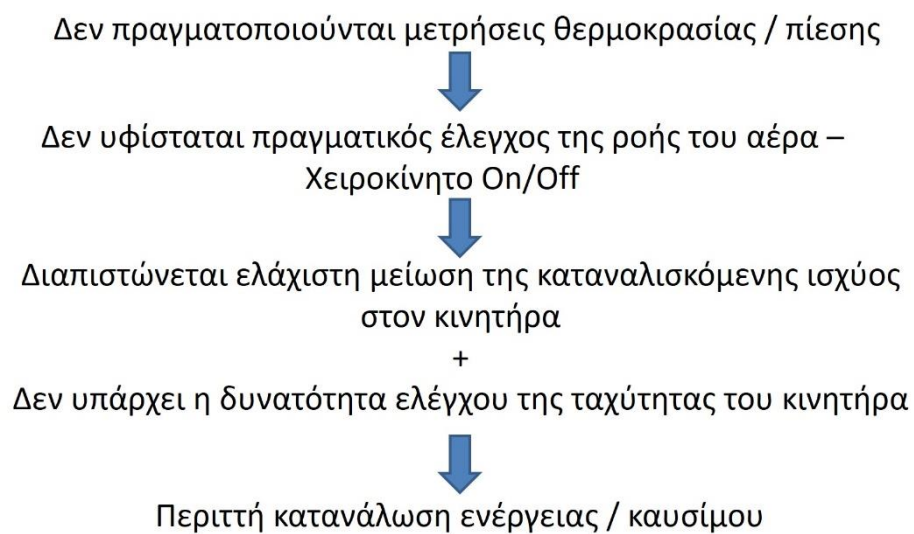
Η χρήση ανεμιστήρων στο μηχανοστάσιο του πλοίου αποσκοπεί στην εξασφάλιση παροχής αέρα που απαιτείται για την καύση κυρίως των μεγαλύτερων καταναλωτών του μηχανοστασίου (κύρια μηχανή, ηλεκτρικές γεννήτριες, λέβητας καυσίμου) ενώ ταυτόχρονα επιτυγχάνεται η απαγωγή θερμότητας από τις εν λόγω μηχανές.

Η διαστασιολόγηση των ανεμιστήρων κατά τη ναυπήγηση αποσκοπεί στην κάλυψη των αναγκών της απαιτούμενης ροής αέρα καύσης και της απαγωγής θερμότητας για το 100% του μέγιστου φορτίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχόμενη λειτουργία των κινητήρων στις ονομαστικές στροφές, κάτι που δεν αντιστοιχεί πάντοτε στις πραγματικές απαιτήσεις αέρα, οι οποίες μεταβάλλονται ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας του πλοίου. Το γεγονός αυτό καθιστά την λειτουργία τους ιδιαίτερα ενεργοβόρα. [32]

4.1.1 Σχεδιασμός Συστήματος

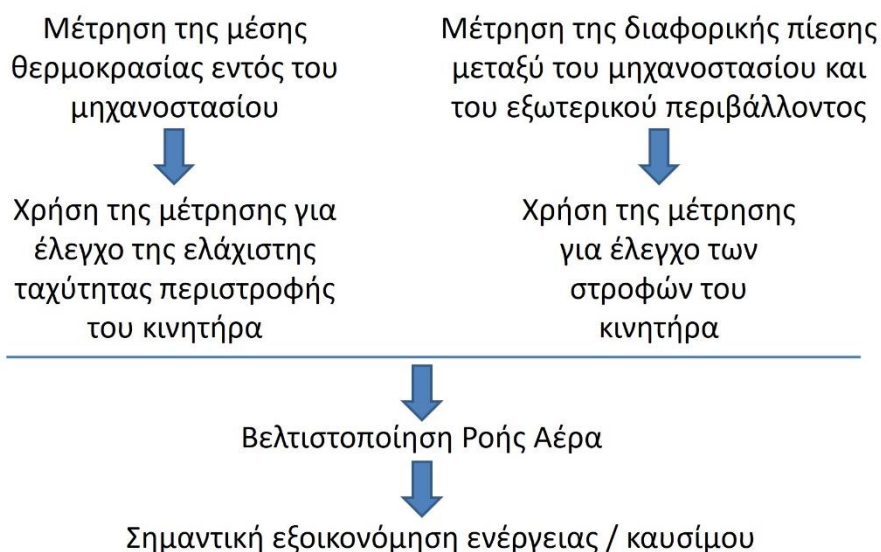
Εξαερισμός Μηχανοστασίου

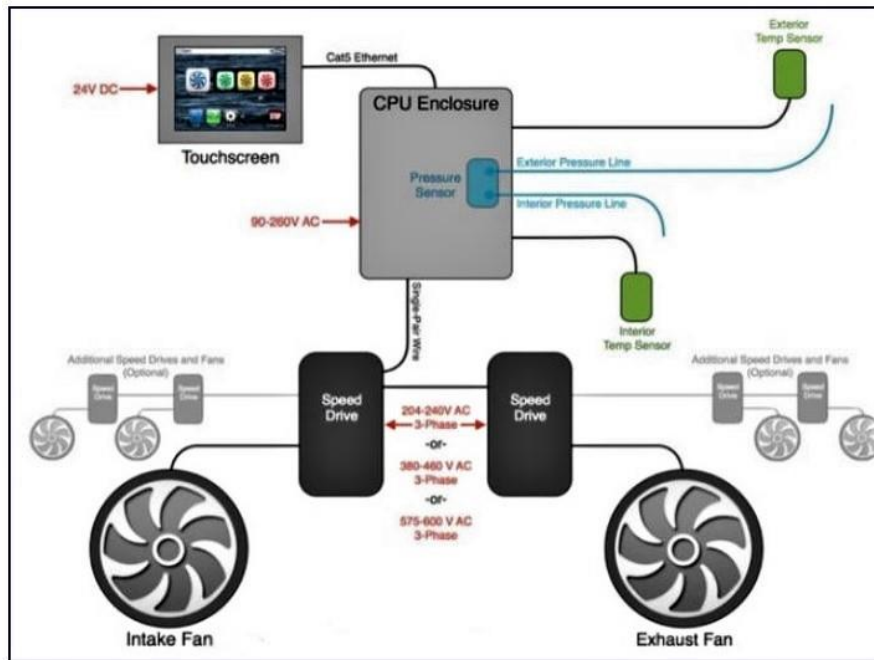
Υπάρχοντα συμβατικά συστήματα



Εξαερισμός Μηχανοστασίου

Προτεινόμενο Σύστημα Ελέγχου



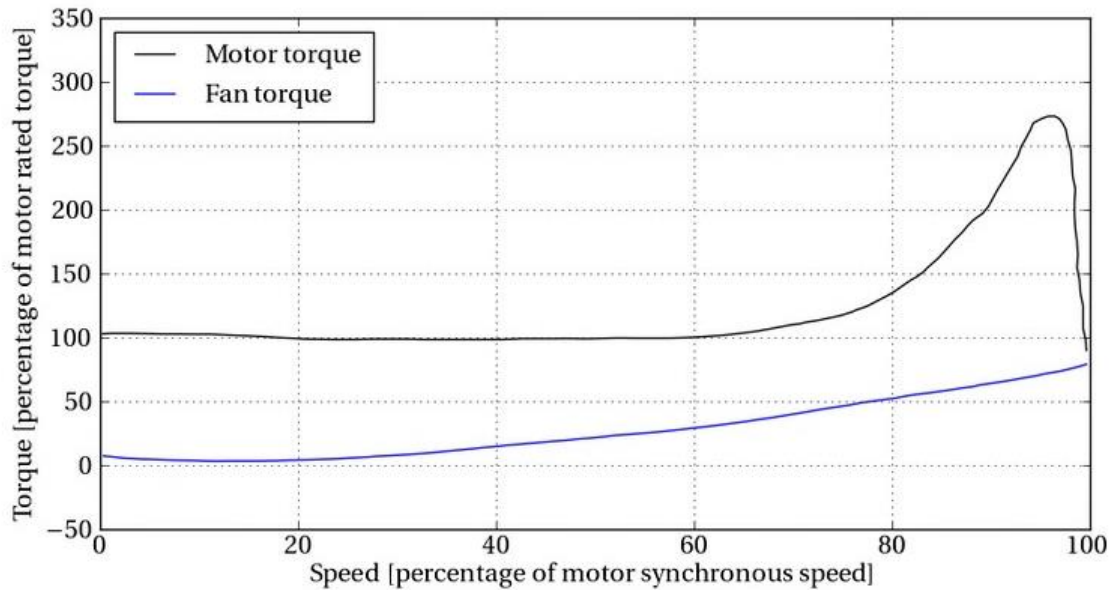


Εικόνα 4.1 – Απεικόνιση του αυτόματου συστήματος εξαερισμού του μηχανοστασίου [Πηγή: Pacific Marine & Industrial]

Η επιλογή του κατάλληλου ρυθμιστή στροφών αποτελεί συχνά μια σύνθετη διαδικασία κατά την οποία θα πρέπει να εξετάζονται σχολαστικά οι παράμετροι του συστήματος και οι απαιτήσεις της εφαρμογής.

Τα φορτία τα οποία οδηγούνται από AC μετατροπείς συχνότητας διαχωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες: α) τα φορτία μεταβλητής ροπής και β) τα φορτία σταθερής ροπής.

Ως φορτία μεταβλητής ροπής ορίζονται εκείνα για τα οποία η απαιτούμενη ροπή κατά την εκκίνηση είναι χαμηλή και αυξάνει όσο αυξάνεται η ταχύτητά τους. Οι ανεμιστήρες και οι αντλίες αποτελούν χαρακτηριστικά παράδειγμα αυτού του τύπου εφαρμογών. [34]



Σχήμα 4.1 Καμπύλη Ροπής – Ταχύτητας ανεμιστήρα [Πηγή: ResearchGate]

Στα φορτία σταθερής ροπής, η τιμή της ροπής δεν επηρεάζεται από τις μεταβολές της ταχύτητας. Τυπικές εφαρμογές, κυρίως στην βιομηχανία, αποτελούν οι συμπιεστές, οι μεταφορικές ταινίες, τα ανυψωτικά μηχανήματα κ.α. όπου η ροπή παραμένει σταθερή και η ισχύς μεταβάλλεται γραμμικά. Σε αντίθεση με τα φορτία μεταβλητής ροπής, τα φορτία σταθερής ροπής απαιτούν σχετικά υψηλά ρεύματα κατά την εκκίνηση και εξαιτίας αυτού, οι ρυθμιστές στροφών μπορεί να διαστασιολογούνται διαφορετικά για περιπτώσεις φορτίων ίδιας ισχύος αλλά διαφορετικής εφαρμογής. Στα φορτία σταθερής ροπής συμπεριλαμβάνονται επίσης και εκείνα που αλλάζει απότομα η κατάσταση τους και φορτία που έχουν μεγάλη αδράνεια κατά την εκκίνηση. [34]

Έχοντας πλέον ξεκαθαρίσει πως οι ανεμιστήρες αφορούν φορτίο μεταβλητής ροπής, όπου δεν απαιτούνται υψηλές ροπές κατά την εκκίνηση και συνεπώς δεν υπάρχει ανάγκη υπερδιαστασιολόγησης του ρυθμιστή στροφών, επιλέγεται το κατάλληλο μοντέλο βάση της ονομαστικής ισχύος του κινητήρα και του ονομαστικού του ρεύματος, σύμφωνα με την πινακίδα των ηλεκτρικών του χαρακτηριστικών.

Ratings				Type designation	Frame size
P_N (kW)	P_N (hp)	$I_{2N}^{1)}$ (A)	$I_{LD}^{2)}$ (A)		
1-phase AC supply, 200 to 240 V					
0.37	0.5	2.4	2.3	ACS310-01X-02A4-2	R0
0.75	1.0	4.7	4.5	ACS310-01X-04A7-2	R1
1.1	1.5	6.7	6.5	ACS310-01X-06A7-2	R1
1.5	2.0	7.5	7.2	ACS310-01X-07A5-2	R2
2.2	3.0	9.8	9.4	ACS310-01X-09A8-2	R2
3-phase AC supply, 200 to 240 V					
0.37	0.5	2.6	2.4	ACS310-03X-02A6-2	R0
0.55	0.75	3.9	3.5	ACS310-03X-03A9-2	R0
0.75	1.0	5.2	4.7	ACS310-03X-05A2-2	R1
1.1	1.5	7.4	6.7	ACS310-03X-07A4-2	R1
1.5	2.0	8.3	7.5	ACS310-03X-08A3-2	R1
2.2	3.0	10.8	9.8	ACS310-03X-10A8-2	R2
3.0	4.0	14.6	13.3	ACS310-03X-14A6-2	R2
4.0	5.0	19.4	17.6	ACS310-03X-19A4-2	R2
5.5	7.5	26.8	24.4	ACS310-03X-26A8-2	R3
7.5	10.0	34.1	31.0	ACS310-03X-34A1-2	R4
11.0	15.0	50.8	46.2	ACS310-03X-50A8-2	R4
3-phase AC supply, 380 to 480 V					
0.37	0.5	1.3	1.2	ACS310-03X-01A3-4	R0
0.55	0.75	2.1	1.9	ACS310-03X-02A1-4	R0
0.75	1.0	2.6	2.4	ACS310-03X-02A6-4	R1
1.1	1.5	3.6	3.3	ACS310-03X-03A6-4	R1
1.5	2.0	4.5	4.1	ACS310-03X-04A5-4	R1
2.2	3.0	6.2	5.6	ACS310-03X-06A2-4	R1
3.0	4.0	8.0	7.3	ACS310-03X-08A0-4	R1
4.0	5.0	9.7	8.8	ACS310-03X-09A7-4	R1
5.5	7.5	13.8	12.5	ACS310-03X-13A8-4	R3
7.5	10.0	17.2	15.6	ACS310-03X-17A2-4	R3
11.0	15.0	25.4	23.1	ACS310-03X-25A4-4	R3
15.0	20.0	34.1	31	ACS310-03X-34A1-4	R4
18.5	25.0	41.8	38	ACS310-03X-41A8-4	R4
22.0	30.0	48.4	44	ACS310-03X-48A4-4	R4

X within the type designation stands for E or U.

¹⁾ I_{2N} maximum continuous output current at ambient temperature of +40 °C.

No overloadability, derating 1% for every additional 1 °C up to +50 °C.

²⁾ I_{LD} continuous output current at max ambient temperature of +50 °C.
10% overloadability for one minute every ten minutes.

Εικόνα 4.2 Τυπικό Τμήμα Κατολόγου Επιλογής Ρυθμιστή Στροφών [Πηγή: ABB ACS 310 Catalog]

Πέρα από έλεγχο της ταχύτητας, οι ρυθμιστές στροφών παρέχουν προστασία στο κινητήρα από υπέρταση και υπόταση σε γραμμές τροφοδοσίας, έναντι υπερέντασης μεταξύ των φάσεων εξόδου και της γης, υπερθέρμανση, βραχυκύκλωμα μεταξύ των φάσεων του κινητήρα και από απώλεια φάσης εισόδου.

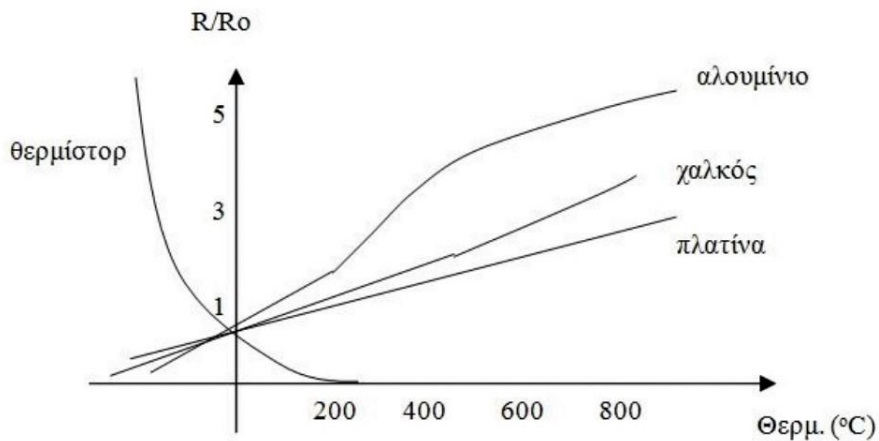
Για τη βελτιστοποίηση της ενεργειακής αποδοτικότητας των ανεμιστήρων, κρίνεται απαραίτητη, πέραν του μετραποτέα συχνότητας, η χρήση και άλλων τεχνολογιών αυτοματισμού όπως προγραμματιζόμενοι λογικοί ελεγκτές (PLC), όργανα και αισθητήρια.

Ο αισθητήρας θερμοκρασίας αποτελεί ένα πολύ κοινό μέσο μέτρησης θερμοκρασιών για ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών εφαρμογών. Πρόκειται για αισθητήρια, των οποίων η αρχή λειτουργίας βασίζεται στη μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένα, καθώς αλλάζει η θερμοκρασία του. [35]



Εικόνα 4.3 Αισθητήριο Θερμοκρασίας [Πηγή: CTi Sensors, ABB]

Στο διάγραμμα που ακολουθεί απεικονίζονται οι καμπύλες μεταβολής της αντίστασης διαφόρων υλικών, συναρτήσει της θερμοκρασίας. Στον κατακόρυφο άξονα εμφανίζεται ο λόγος R/R_0 , όπου R η αντίσταση του υλικού σε κάποια θερμοκρασία και R_0 η αντίσταση στους $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ο θερμικός συντελεστής τους εξαρτάται από τον ρυθμό μεταβολής της αντίστασης του αισθητηρίου με την θερμοκρασία. Αρνητικός θερμικός συντελεστής σημαίνει ότι η αντίσταση μειώνεται, ενώ θετικός ότι αυξάνει. Οι δημοφιλέστεροι τύποι είναι τα PTC θερμίστορ, τα NTC θερμίστορ, και τέλος τα θερμοζεύγη (thermocouples). Η επιλογή του κατάλληλου αισθητηρίου εξαρτάται από το είδος της εφαρμογής.

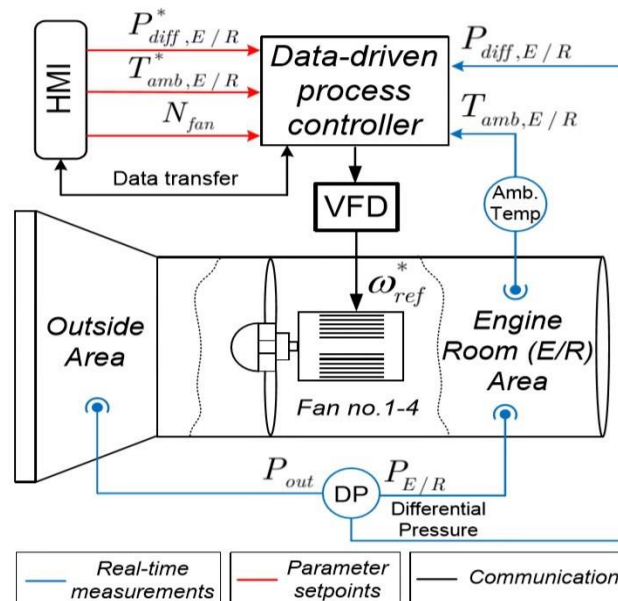


Σχήμα 4.2 καμπύλες μεταβολής της αντίστασης διαφόρων υλικών

Σκοπός του αισθητήρα είναι η μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα του μηχανοστασίου και η μετατροπή αυτής σε ένα αναλογικό ηλεκτρικό σήμα (0-10V ή 4-20mA). Ο αισθητήρας θα πρέπει να τοποθετείται μακριά από μηχανές ή εξοπλισμό που εκπέμπει μεγάλα ποσά θερμότητας, ώστε η μέτρηση να είναι αξιόπιστη και να αντιπροσωπεύει την μέση θερμοκρασία που επικρατεί στον χώρο του μηχανοστασίου. Ο χρήστης επιλέγει μια επιθυμητή θερμοκρασία αναφοράς για το μηχανοστάσιο, η οποία θα συγκρίνεται διαρκώς με την μέτρηση που θα προσφέρει το αισθητήριο, μέσω ελεγκτή PID, για την αποδοτικότερη λειτουργία των ρυθμιστών στροφών.

Ο αναλογικός-ολοκληρωτικός-παραγωγικός ελεγκτής (PID) αποτελεί ένα μηχανισμό με ανατροφοδότηση βρόχων ελέγχου που χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανικές εφαρμογές. Σκοπός του είναι η διόρθωση του σφάλματος μεταξύ μιας μεταβλητής σε μια ελεγχόμενη διαδικασία (Process Value) και ενός επιθυμητού σημείου λειτουργίας (setpoint). [37]

Επιπλέον, απαιτείται η εγκατάσταση ενός αισθητήρα διαφορικής πίεσης (Differential pressure transmitter). Μέσω αυτού υπολογίζεται η διαφορά μεταξύ της εσωτερικής πίεσης στο μηχανοστάσιο και της εξωτερικής πίεσης στο κατάστρωμα. Η μετρούμενη πίεση μετατρέπεται σε ένα αναλογικό ηλεκτρικό σήμα 0-10V ή 4-20mA. Ομοίως με τη περίπτωση του αισθητήρα θερμοκρασίας, ο χρήστης επιλέγει μια επιθυμητή πίεση αναφοράς (setpoint) για το μηχανοστάσιο, η οποία θα συγκρίνεται διαρκώς με την μέτρηση που θα προσφέρει το αισθητήριο μέσω του PID ελεγκτή.



Σχήμα 4.3 – Προτεινόμενο σύστημα εξοικονόμησης ενέργειας για τους ανεμιστήρες του μηχανοστασίου (Πηγή: Giannoutsos, Manias [36])

Indoor



Outdoor



Εικόνα 4.4 Αισθητήρια Διαφορικής Πίεσης [Πηγή: ABB]

Συνδεδετικό κρίκο μεταξύ των αισθητηρίων και των ρυθμιστών στροφών θα αποτελέσει ο εγκατεστημένος προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής.

Το PLC θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ο “εγκέφαλος” του συστήματος αφού συμβάλλει στο να πραγματοποιείται αυτόματα, ομαλά και ταυτόχρονα ενεργειακά αποδοτικά, η λειτουργία των ανεμιστήρων.

Με πολύ απλά λόγια ένα PLC αποτελείται από τέσσερα βασικά μέρη:

I. Τις εισόδους (I), δηλαδή το σύνολο των αναλογικών και ψηφιακών σημάτων

II. Τις εξόδους (Q)

III. Τη μνήμη, όπου αποθηκεύεται το πρόγραμμα

IV. Την κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU), η οποία διαβάζει τη κατάσταση των εισόδων και στη συνέχεια δίνει εντολές μέσω των εξόδων, βάση του εγκατεστημένου προγράμματος.

Εδώ, αξίζει να αναφερθεί πως το PLC θα πρέπει να καλύπτει το πλήθος και το είδος των σημάτων που απαιτούνται για την εφαρμογή.



Εικόνα 4.5 Απεικόνιση τυπικής διάταξης PLC [Πηγή: Siemens]

Ο προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής, ο ρυθμιστής στροφών καθώς και το σύνολο των υπόλοιπων υλικών αυτοματισμού και ηλεκτρολογικών υλικών ράγας τοποθετούνται εντός βιομηχανικών ερμαρίων.

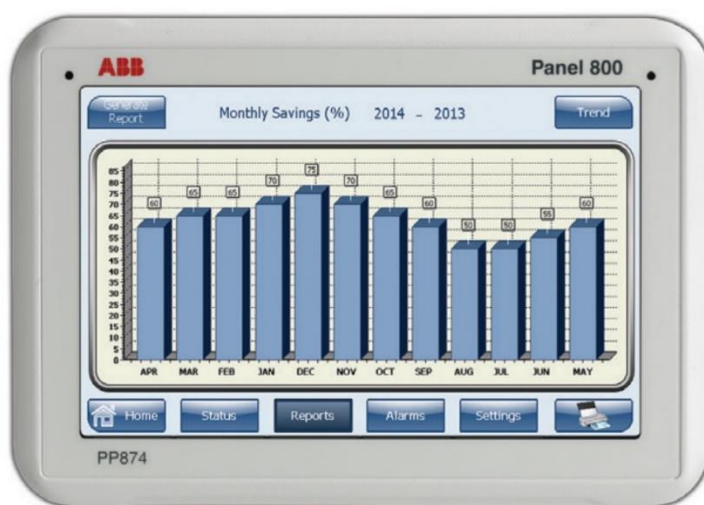
Στις πόρτες των ερμαρίων δύνανται να τοποθετούνται οθόνες HMI (Human-machine interface) οι οποίες, όπως μαρτυρά και η ονομασία τους, προσφέρουν αλληλεπίδραση και επικοινωνία μεταξύ χρήστη και μηχανής.

Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, μια τέτοια οθόνη μπορεί να προσφέρει στον χειριστή πληροφορίες όπως:

- I. Την ταχύτητα λειτουργίας (RPM) των ανεμιστήρων
- II. Η επιλογή λειτουργίας (Ρυθμιστής στροφών ή DOL)
- III. Το χρόνο λειτουργίας των ρυθμιστών στροφών
- IV. Την κατεύθυνση περιστροφής των ανεμιστήρων Forward - Reverse (δηλαδή αν παρέχουν αέρα ή αν χρησιμοποιούνται για εξαερισμό)
- V. Την εξοικονόμηση ενέργειας με την χρήση ρυθμιστών στροφών
- VI. Το σημείο αναφοράς (για τον PID ελεγκτή) και την πραγματική τιμή του αισθητήρα διαφορικής πίεσης (σε Pa)
- VII. Το σημείο αναφοράς (για τον PID ελεγκτή) και την πραγματική τιμή της θερμοκρασίας του μηχανοστασίου κτλ.

Επίσης πλέον δίνεται η δυνατότητα και άλλων χρήσιμων ενεργειών όπως:

- I. Η δημιουργία reports και η διανομή τους σε έντυπη μορφή μέσω εκτυπωτή ή μέσω mail στους ενδιαφερόμενους χρήστες, για εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων
- II. Πληροφόρηση για τα Alarms μέσω SMS
- III. Ενσωματωμένο Web Interface, δίνοντας απομακρυσμένη πρόσβαση στο χρήστη, πληκτρολογώντας απλά την διεύθυνση IP της οθόνης από οποιονδήποτε υπολογιστή με πρόσβαση στο διαδίκτυο κτλ.



Εικόνα 4.6 Οθόνη HMI [Πηγή: ABB]

4.1.2 Υπολογισμός εξοικόνμησης ενέργειας στους ανεμιστήρες εξαερισμού μέσω του λογισμικού ABB EnergySave Calculator

Το **EnergySave Calculator** αποτελεί μια διαδραστική εφαρμογή που παρέχεται δωρεάν στο διαδίκτυο από την ABB. Μέσω αυτή μπορεί να υπολογιστεί προσεγγιστικά η εξοικονόμηση ενέργειας που προσφέρουν οι ρυθμιστές στροφών έναντι των παραδοσιακών μεθόδων ελέγχου ροής.

Στα περισσότερα υπάρχοντα συστήματα, ο έλεγχος της παροχής του αέρα από τους ανεμιστήρες είτε δεν υφίσταται, είτε γίνεται σε πολύ μικρό ποσοστό με χρήση αποσβεστήρων.

Θεωρούμε δεξαμενόπλοιο μεταφοράς αργού πετρωαίλέου, στο μηχανοστάσιο του οποίου γίνεται χρήση έως και 4 ανεμιστήρων αξονικής ροής, ισχύος 18,5 kW, οι οποίοι θα λειτουργούν για 8760 ώρες ετησίως, σε 4 διαφορετικά σενάρια λειτουργίας και κόστος ενέργειας 0,11€/kWh.

Τα 4 αυτά σενάρια θα είναι:

- I. Πλεύση με υψηλες ταχύτητες – 400 ώρες
- II. Πλεύση με μειωμένη ταχύτητα (Slow Steaming) – 4000 ώρες
- III. Πλοίο ακυροβολημένο – 3800 ώρες
- IV. Εργασίες φορτοεκφόρτωσης – 560 ώρες



Εικόνα 4.7 Δεξαμενόπλοιο εν πλω [Πηγή: balticshipping.com]

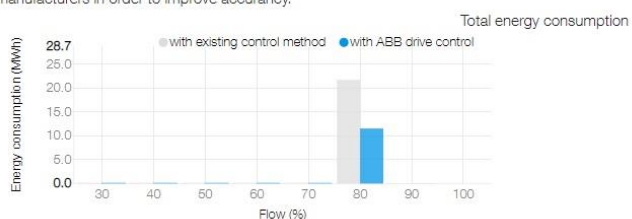
Στο πρώτο σενάριο, η πλεύση του δεξαμενόπλοιου γίνεται σε υψηλες ταχύτητες. Αυτό συμβαίνει για 400 ώρες ετησίως, με ταυτόχρονη χρήση και των 4 ανεμιστήρων του μηχανοστασίου και με ρύθμιση της παροχής αέρα στο 80% από τους ρυθμιστές στροφών.

Συνεπώς, το συνολικό φορτίο υπολογίζεται: $4 \times 18,5 \text{ kW} = 74 \text{ kW}$

Σενάριο 1: Πλεύση με υψηλες ταχύτητες

Savings calculation

The results were calculated using the ABB EnergySave Calculator. EnergySave Calculator is an interactive tool for comparing AC drive control against traditional flow control methods in applications such as fans and pumps. Over the years, the formulas behind the tool have been developed and enhanced together with pump and fan manufacturers in order to improve accuracy.



Results

Annual energy savings	13.5 MWh
Annual energy consumption with existing control method	28.7 MWh
Annual energy consumption with ABB drive control	15.2 MWh
Annual energy savings percentage	47 %
Annual electric energy savings	1 480 €
CO ₂ reduction	7 t/year

Settings

Existing flow control	No flow control
Motor power	74 kW
Motor efficiency class	IE2
Fan type	Axial Flow
Impeller type	Forward-curved blades
Annual running time	400 h
Duration curve	80% flow
Energy price	0.11 €/kWh

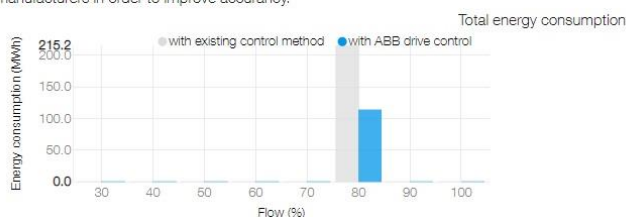
Στο δεύτερο σενάριο, η πλεύση του δεξαμενόπλοιου γίνεται με μειωμένη ταχύτητα (Slow Steaming). Θεωρώντας πως αυτό συμβαίνει προσεγγιστικά για 4000 ώρες ετησίως και χαμηλότερες απαιτήσεις παροχής αέρα, αυτή τη φορά γίνεται χρήση 3 ανεμιστήρων του μηχανοστασίου με ρύθμιση ροής στο 80% από τους ρυθμιστές στροφών.

Συνεπώς, το συνολικό φορτίο υπολογίζεται: $3 \times 18,5 \text{ kW} = 55,5 \text{ kW}$

Σενάριο 2: Πλεύση με μειωμένη ταχύτητα (Slow Steaming)

Savings calculation

The results were calculated using the ABB EnergySave Calculator. EnergySave Calculator is an interactive tool for comparing AC drive control against traditional flow control methods in applications such as fans and pumps. Over the years, the formulas behind the tool have been developed and enhanced together with pump and fan manufacturers in order to improve accuracy.



Results

Annual energy savings	100.9 MWh
Annual energy consumption with existing control method	215.2 MWh
Annual energy consumption with ABB drive control	114.2 MWh
Annual energy savings percentage	47 %
Annual electric energy savings	11 102 €
CO ₂ reduction	50 t/year

Settings

Existing flow control	No flow control
Motor power	55.5 kW
Motor efficiency class	IE2
Fan type	Axial Flow
Impeller type	Forward-curved blades
Annual running time	4000 h
Duration curve	80% flow
Energy price	0.11 €/kWh

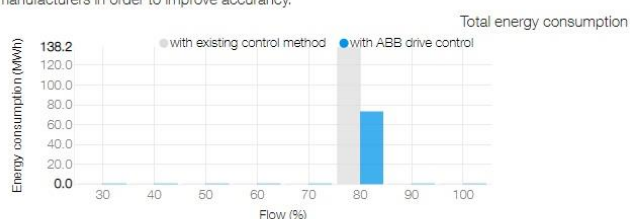
Το τρίτο σενάριο, αφορά περιπτώσεις που το πλοίο βρίσκεται αγκυροβολημένο. Θεωρώντας πως αυτό συμβαίνει προσεγγιστικά για 3800 ώρες ετησίως, αυτή τη φορά λειτουργούν μόλις 2 ανεμιστήρες του μηχανοστασίου με ρύθμιση ροής στο 80% από τους ρυθμιστές στροφών.

Συνεπώς, το συνολικό φορτίο υπολογίζεται: $2 \times 18,5 \text{ kW} = 37 \text{ kW}$

Σενάριο 3Α: Πλοίο αγκυροβολημένο

Savings calculation

The results were calculated using the ABB EnergySave Calculator. EnergySave Calculator is an interactive tool for comparing AC drive control against traditional flow control methods in applications such as fans and pumps. Over the years, the formulas behind the tool have been developed and enhanced together with pump and fan manufacturers in order to improve accuracy.



Results

Annual energy savings	64.8 MWh
Annual energy consumption with existing control method	138.2 MWh
Annual energy consumption with ABB drive control	73.4 MWh
Annual energy savings percentage	47 %
Annual electric energy savings	7 130 €
CO ₂ reduction	32 t/year

Settings

Existing flow control	No flow control
Motor power	37 kW
Motor efficiency class	IE2
Fan type	Axial Flow
Impeller type	Forward-curved blades
Annual running time	3800 h
Duration curve	80% flow
Energy price	0,11 €/kWh

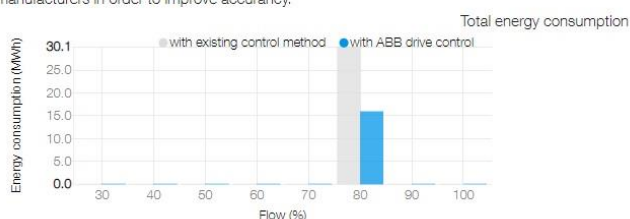
Το τετάρτο και τελευταίο σενάριο, αφορά την λειτουργία των ανεμιστήρων κατά την διάρκεια φορτοεκφόρτωσης αργού πετρελαίου. Θεωρώντας πως αυτό συμβαίνει προσεγγιστικά για τις υπολειπόμενες 560 ώρες ετησίως, στο σενάριο αυτό λειτουργούν 3 ανεμιστήρες του μηχανοστασίου με ρύθμιση ροής στο 80% από τους ρυθμιστές στροφών.

Συνεπώς, το συνολικό φορτίο υπολογίζεται: $3 \times 18,5 \text{ kW} = 55,5 \text{ kW}$

Σενάριο 4A: Φορτοεκφόρτωσης Αργού Πετρελαίου

Savings calculation

The results were calculated using the ABB EnergySave Calculator. EnergySave Calculator is an interactive tool for comparing AC drive control against traditional flow control methods in applications such as fans and pumps. Over the years, the formulas behind the tool have been developed and enhanced together with pump and fan manufacturers in order to improve accuracy.



Results

Annual energy savings	14.1 MWh
Annual energy consumption with existing control method	30.1 MWh
Annual energy consumption with ABB drive control	16.0 MWh
Annual energy savings percentage	47 %
Annual electric energy savings	1 554 €
CO ₂ reduction	7 t/year

Settings

Existing flow control	No flow control
Motor power	55.5 kW
Motor efficiency class	IE2
Fan type	Axial Flow
Impeller type	Forward-curved blades
Annual running time	560 h
Duration curve	80% flow
Energy price	0.11 €/kWh

© Copyright 2020 ABB | Contact us | Cookie and Privacy Policy

Power and productivity
for a better world™ **ABB**

Σενάριο	1	2	3	4
Αριθμός Ανεμιστήρων σε λειτουργία	4	3	2	3
Ώρες λειτουργίας	400 hours	4000 hours	3800 hours	560 hours
Εξοικονόμηση Ενέργειας (MWh)	13,5 MWh	100,9 MWh	64,8 MWh	14,1 MWh
Κατανάλωση Ενέργειας χωρίς έλεγχο της ροής (On/Off)	28,7 MWh	215,2 MWh	138,2 MWh	30,1 MWh
Κατανάλωση Ενέργειας με χρήση ρυθμιστών στροφών	15,2 MWh	114,2 MWh	73,4 MWh	16,0 MWh
Ποσοστό Εξοικονόμησης	47%	47%	47%	47%
Εξοικονόμηση Χρημάτων	1.480 €	11.102 €	7.130 €	1.554 €
Μείωση Εκπομπών CO ₂	7 t	50 t	32 t	7 t

Πίνακας 4.1 Συγκεντρωτικός πίνακας αποτελεσμάτων για τα 4 σενάρια – Ανεμιστήρες Μηχανοστασίου

Ετήσια Εξοικονόμηση Ενέργειας (MWh)	193,4 MWh
Ετήσια Κατανάλωση Ενέργειας χωρίς έλεγχο της ροής (On/Off)	412,2 MWh
Ετήσια Κατανάλωση Ενέργειας με χρήση ρυθμιστών στροφών	218,8 MWh
Ποσοστό Εξοικονόμησης	47%
Ετήσια Εξοικονόμηση Χρημάτων	21.226 €
Ετήσια Μείωση Εκπομπών CO ₂	96 t

Πίνακας 4.2 Αποτελέσματα ετήσιας εξοικονόμησης με χρήση ρυθμιστών στροφών για τον έλεγχο της ροής του αέρα

4.2 Εξοικονόμηση ενέργειας στις αντλίες θαλασσινού νερού

Το σύστημα κεντρικής ψύξης της κύριας μηχανής και των βοηθητικών μηχανημάτων ενός τυπικού πλοίου αποτελείται από το ανοιχτό σύστημα ψύξης θαλασσινού νερού και το κλειστό σύστημα ψύξης γλυκού νερού χαμηλής θερμοκρασίας, η σύνδεση των οποίων πραγματοποιείται μέσω κεντρικού εναλλάκτη θερμότητας. Η διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας στο δίκτυο επιτυγχάνεται με χρήση τρίοδης θερμοστατικής βαλβίδας στο δίκτυο ψύξης γλυκού νερού πριν τον κεντρικό εναλλάκτη θερμότητας. Με τον τρόπο αυτό ρυθμίζεται η ροή του νερού στο δίκτυο, ανάλογα με την θερμοκρασία, επιτρέποντας ταυτόχρονα την αυτόματη παράκαμψη ροής μέσω του κεντρικού εναλλάκτη θερμότητας.

Από τη στιγμή που το δίκτυο ψύξης θαλασσινού νερού αποτελεί ένα ανοικτό σύστημα, επιτρέπεται ευκολότερα η ρύθμιση της ροής από την πλευρά των αντλιών χωρίς να επηρεάζεται δυσμενώς η λειτουργικότητα του υπόλοιπου συστήματος ψύξης.

Γενικά, ο έλεγχος ροής θαλασσινού νερού, ανάλογα με την κατάσταση λειτουργίας, πραγματοποιείται χειροκίνητα με σταγαλιστική δικλείδα στη κατάθλιψη της αντλίας. Αυτό έχει ως συνέπεια την ταυτόχρονη μεταβολή στην πίεση του δικτύου, χωρίς ωστόσο να επιτυγχάνεται εξοικονόμηση ισχύος. [32]

Παρακάτω θα εξεταστεί η δυνατότητα ελέγχου ροής με ταυτόχρονη εξοικονόμηση ισχύος, ικανοποιώντας παράλληλα τους λειτουργικούς περιορισμούς του συστήματος ψύξης, με χρήση μετατροπέων συχνότητας στους κινητήρες που οδηγούν τις αντλίες ψύξης.

4.2.1 Νόμοι της ομοιότητας (Affinity Laws)

Το εγχείρημα της ενεργειακά αποδοτικότερης λειτουργίας των αντλιών και βασίζεται θεωρητικά στους νόμους της ομοιότητας.

Γενικότερα, στις φυγοκεντρικές αντλίες είναι πολύ χρήσιμο να μπορεί να αντιληφθεί κανείς το πως επηρεάζονται η παροχή, το μανομετρικό και η ισχύς μιας αντλίας, όταν μεταβάλλεται η ταχύτητα περιστροφής της. [30]

Έστω φυγοκεντρική αντλία, η οποία σε αριθμό στροφών n (rpm) δίνει παροχή Q (m³/h) και μανομετρικό H (m). Θεωρώντας μεταβολή της ταχύτητας περιστροφής από n σε n' , τότε:

α) Η παροχή της αντλίας μεταβάλλεται ανάλογα με τον αριθμό στροφών. Συνεπώς, η νέα παροχή Q' θα δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{Q}{Q'} = \frac{n}{n'}$$

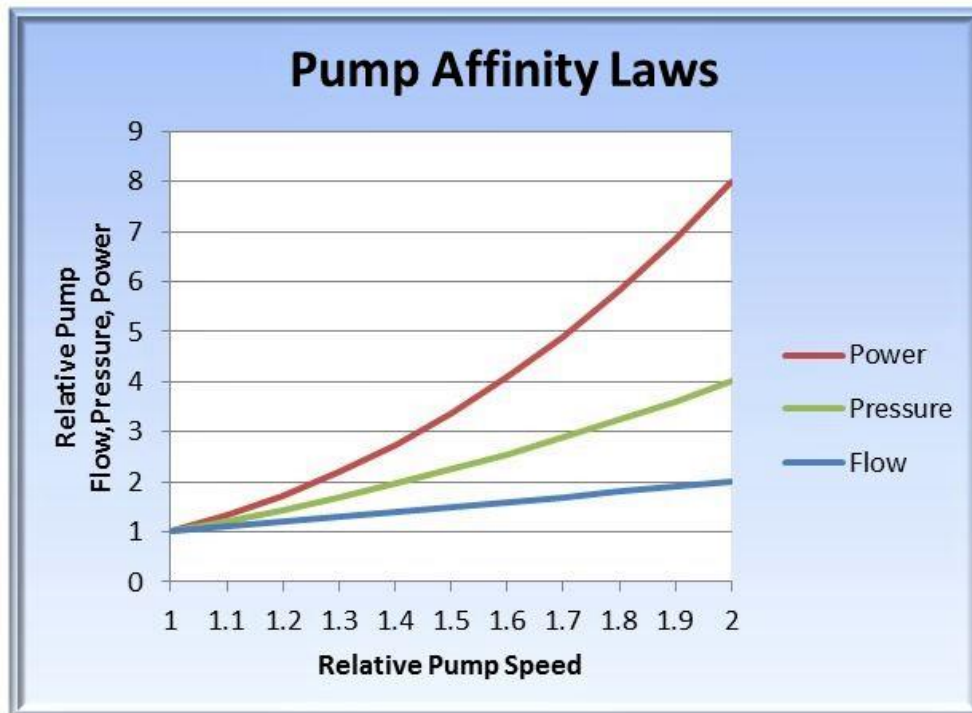
β) Το μανομετρικό της αντλίας είναι ανάλογο του τετραγώνου της ταχύτητας περιστροφής. Συνεπώς, το νέο μανομετρικό H' θα δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{H}{H'} = \left(\frac{n}{n'}\right)^2$$

γ) Η ισχύς της αντλίας μεταβάλλεται ανάλογα του κύβου της ταχύτητας περιστροφής. Συνεπώς, η νέα ισχύς P' θα δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{P}{P'} = \left(\frac{n}{n'}\right)^3$$

Έτσι, σύμφωνα με τα παραπάνω, ακόμα και μια ελάχιστη μετάβολη της ταχύτητας μπορεί να αποφέρει σημαντικές αλλαγές στις παραπάνω τρεις παραμέτρους και ιδιαίτερα στην ισχύ. Για παράδειγμα, η μείωση της ταχύτητας της αντλίας κατά 10% θα έχει ως αποτέλεσμα εξοικονόμηση της τάξης 27% στη καταναλισκόμενη ενέργεια. [31]



Σχήμα 4.4 – Νόμοι της ομοιότητας

4.2.2 Σχεδιασμός συστήματος

Ρυθμιστές στροφών θα τοποθετηθούν για τον έλεγχο των κινητήρων που οδηγούν τις αντλίες ψύξης.

Ένας αισθητήρας θερμοκρασίας (Temperature Sensor) εγκαθίσταται στην κοινή πλευρά του εναλλάκτη θερμότητας, πριν την τρίοδη θερμοστατική βαλβίδα, ο οποίος θα πραγματοποιεί τη μέτρηση της θερμοκρασίας του γλυκού νερού.



Εικόνα 4.8 – Αισθητήρας θερμοκρασίας γλυκού νερού [Πηγή: ABB]

Επιπλέον, ένας αισθητήρας πίεσης (Pressure Sensor) εγκαθίσταται με σκοπό τη μέτρηση της πίεσης που επικρατεί στην έξοδο του θαλασσινού νερού των αντλιών.

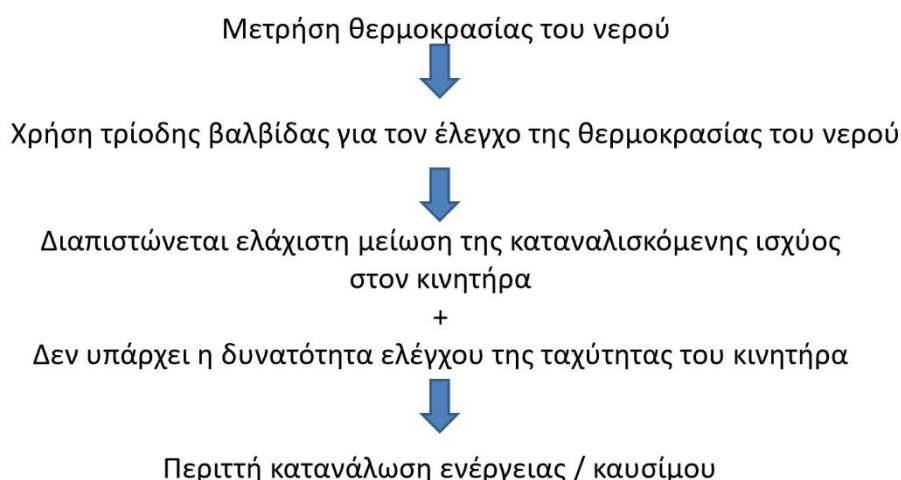


Εικόνα 4.9 – Αισθητήρας πίεσης γλυκού νερού [Πηγή: ABB]

Σκοπός του συστήματος αυτοματισμού είναι να διαβάσει τις μετρήσεις που προέρχονται από τους παραπάνω αισθητήρες και βάση αυτών να πραγματοποιείται η ανάλογη ρύθμιση της ταχύτητας των κινητήρων των αντλιών μέσω των μετατροπών συχνότητας, έτσι ώστε να διατηρείται η θερμοκρασία στο επιθυμητό προκαθορισμένο επίπεδο (PID). Το όριο της χαμηλής ταχύτητας καθορίζεται με βάση τη μετρούμενη τιμή που μεταδίδεται από τον αισθητήρα πίεσης, με τέτοιο τρόπο ώστε η πίεση του νερού να παραμένει πάντα πάνω από το επίπεδο που υπάρχει κίνδυνος χαμηλής πίεσης.

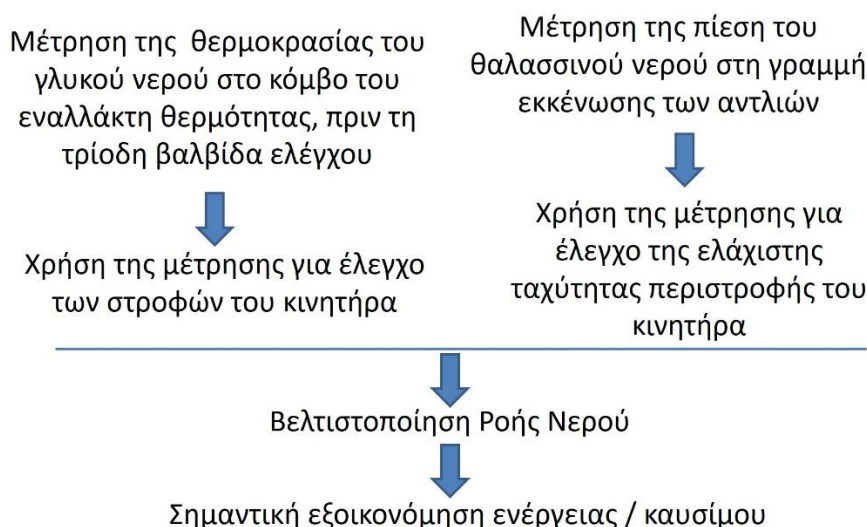
Αντλίες θαλασσινού νερού

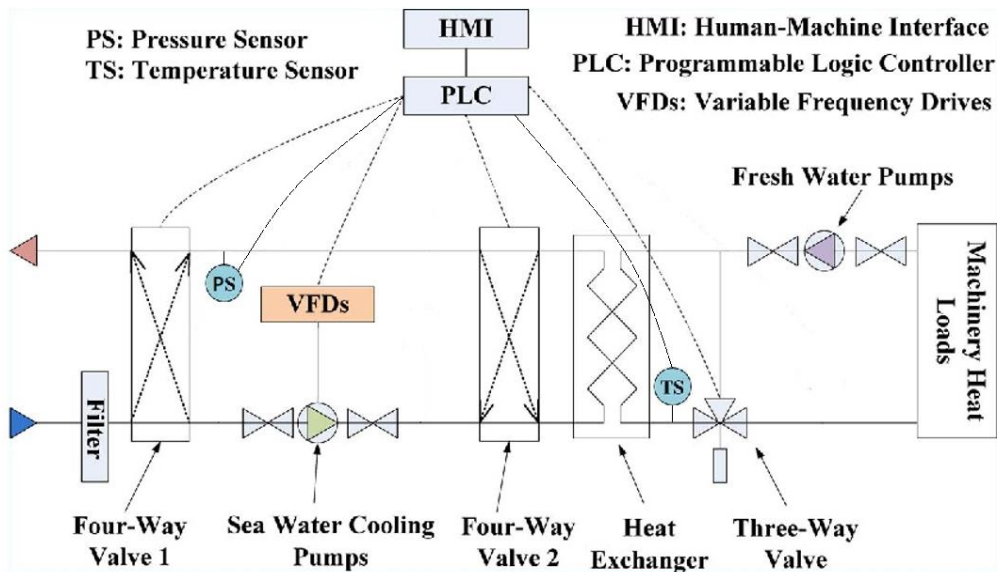
Υπάρχοντα συμβατικά συστήματα



Αντλίες θαλασσινού νερού

Προτεινόμενο Σύστημα Ελέγχου





Διάγραμμα 4.5 – Σύστημα εξοικονόμηση ενέργειας των αντλιών του συστήματος ψύξης [9]

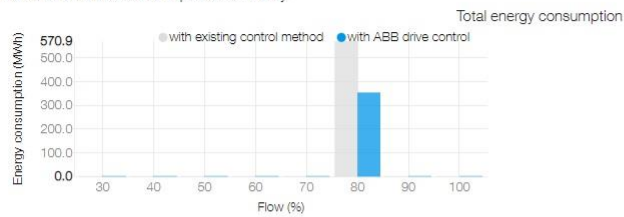
4.2.3 Υπολογισμός εξοικόνησης ενέργειας στις αντλίες θαλασσινού νερού μέσω του λογισμικού ABB EnergySave Calculator

Θεωρούμε το ίδιο δεξαμενόπλοιο μεταφοράς αργού πετρελαίου της προηγούμενης ενότητας. Για το σύστημα κεντρικής ψύξης της κύριας μηχανής και των βοηθητικών μηχανημάτων του πλοίου χρησιμοποιείται αντλία η οποία οδηγείται από κινητήρα ισχύος 75 kW. Η αντλία θα λειτουργεί για 8760 ώρες ετησίως και το εκτιμώμενο κόστος της ενέργειας είναι 0,11€/kWh.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί πως σε αντίθεση με την περίπτωση των ανεμιστήρων, εδώ δεν διερευνούνται διαφορετικά σενάρια λειτουργίας. Με τον συμβατικό τρόπο εκκίνησης με χρήση διακόπτη αστέρα - τριγώνου και ελέγχου της ροής με βαβλίδες, η αντλία λειτουργεί στο 100% των στροφών της, ακόμα και όταν το πλοίο βρίσκεται αγκυροβολημένο. Αυτό συμβαίνει καθώς, ακόμα και αν η κύρια μηχανή δεν βρίσκεται σε λειτουργία (με τις ανάγκες της για ψύξη να είναι αρκετά μειωμένες), θα πρέπει να πραγματοποιείται ανακυκλοφορία στο δίκτυο γλυκού νερού για την διατήρηση της θερμοκρασίας σε συγκεκριμένα επίπεδα (προθέρμανση). Η ροή του θαλασσινού νερού, σε αυτή τη περίπτωση, χρειάζεται για να εξυπηρετεί μέσω του κεντρικού εναλλάκτη την ψύξη των ηλεκτρογεννητριών και των λοιπών βοηθητικών μηχανημάτων. [32]

Savings calculation

The results were calculated using the ABB EnergySave Calculator. EnergySave Calculator is an interactive tool for comparing AC drive control against traditional flow control methods in applications such as fans and pumps. Over the years, the formulas behind the tool have been developed and enhanced together with pump and fan manufacturers in order to improve accuracy.



Results

Annual energy savings	216.1 MWh
Annual energy consumption with existing control method	570.9 MWh
Annual energy consumption with ABB drive control	354.8 MWh
Annual energy savings percentage	38 %
Annual electric energy savings	23 772 €
CO ₂ emission reduction	108 t/year

Settings

Flow control method	Throttling/Valve control
Motor power	75 kW
Motor efficiency class	IE2
Annual running time	8760 h
Duration curve	80% curve
Energy price	0.11 €/kWh

© Copyright 2020 ABB | [Contact us](#) | [Cookie and Privacy Policy](#)

Power and productivity
for a better world™ **ABB**

Ετήσια Εξοικονόμηση Ενέργειας (MWh)	216,1 MWh
Ετήσια Κατανάλωση Ενέργειας με χρήση βαλβίδων ελέγχου παροχής	570,9 MWh
Ετήσια Κατανάλωση Ενέργειας με χρήση ρυθμιστών στροφών	354,8 MWh
Ποσοστό Εξοικονόμησης	38%
Ετήσια Εξοικονόμηση Χρημάτων	23.772 €
Ετήσια Μείωση Εκπομπών CO ₂	108 t

Πίνακας 4. Αποτελέσματα ετήσιας εξοικονόμησης με χρήση ρυθμιστών στροφών για τον έλεγχο της παροχής του θαλασσινού νερού

5. Επίλογος – Συμπεράσματα

Σύμφωνα με όσα υπόθηκαν στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας η ναυτιλία αποτελεί μια περιβαλλοντολογικά φιλική μέθοδος μεταφοράς αγαθών σε σύγκριση με τις οδικές και εναέριες μεταφορές, αφού ευθύνεται μόλις για το 2,6% (περίπου 932 εκατ. τόνοι) των συνολικών εκπομπών CO₂.

Αυτό όμως δεν αναιρεί την αναγκαιότητα πραγματοποίησης ενεργειών για τον περιορισμό των εκπομπών CO₂, ιδιαίτερα, αν αναλογιστεί κανείς πως τη ραγδαία ανάπτυξη που παρατηρείται στις θαλάσσιες μεταφορές μέσω της αύξησης του παγκόσμιου στόλου και συνεπώς των εκτελούμενων δρομολογίων.

Βάση της άσκησης που έγινε μέσω του λογισμικού EnergySave Calculator προέκυψαν κάποια πολύ χρήσιμα συμπεράσματα για έναν από τους τρόπους μέσω των οποίων μπορεί να βελτιωθεί η ενεργειακή αποδοτικότητα ενός πλοίου.

Πιο συγκεκριμένα, αν σε ένα δεξαμενόπλοιο χρησιμοποιηθούν συστήματα αυτοματισμού με ρυθμιστές στροφών σε εφαρμογές όπως οι ανεμιστήρες του μηχανοστασίου και οι αντλίες θαλασσινού νερού, μπει αν επιτευχθεί σημαντική μείωση των εκπομπών και μάλιστα με τρόπο οικονομικά αποδοτικό αφού η εξοικονόμηση καυσίμου που επιτυγχάνεται από την βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης είναι επίσης σημαντική.

Ένα ακόμα πλεονέκτημα της συγκεκριμένης λύσης είναι πως δεν επηρεάζει, ούτε θέτει περιορισμούς σε λειτουργικές ή σχεδιαστικές παραμέτρους του πλοίου, όπως η ταχύτητα πλεύσης ή η χωρητικότητα του (DWT).

Ετήσια Εξοικονόμηση Ενέργειας (MWh) με χρήση ρυθμιστών στροφών στους ανεμιστήρες μηχανοστασίου	193,4 MWh
Ετήσια Εξοικονόμηση Ενέργειας (MWh) με χρήση ρυθμιστών στροφών στις αντλίες αλμυρού νερού	216,1 MWh
Ετήσια Συνολική Εξοικονόμηση Ενέργειας (MWh)	409,5 MWh
Ετήσια Συνολική Εξοικονόμηση Χρημάτων	44.998 €
Ετήσια Μείωση Εκπομπών CO ₂ με χρήση ρυθμιστών στροφών στους ανεμιστήρες μηχανοστασίου	96 t
Ετήσια Μείωση Εκπομπών CO ₂ με χρήση ρυθμιστών στροφών στις αντλίες αλμυρού νερού	108 t
Ετήσια Συνολική Μείωση Εκπομπών CO ₂	204 t

Από το ποσό που εξοικονομείται προκύπτει πως η απόσβεση της επένδυσης για ολόκληρο σύστημα (Ρυθμιστές Στροφών, PLC, αισθητήρια και όργανα) θα είναι σχετικά γρήγορη.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί πως οι μετρήσεις έγιναν για ρύθμιση στο 80% της ονομαστικής ταχύτητας των κινητήρων. Ωστόσο, υπάρχει περιθώριο περαιτέρω εξοικονόμησης αν για τα λιγότερο απαιτητικά σενάρια λειτουργίας (πλεύση σε μειωμένη ταχύτητα, πλοίο αγκυροβολημένο), η ρύθμιση των στροφών των κινητήρων μειωθεί, για παράδειγμα στο 60%, ή αν γίνει εγκατάσταση κινητήρων καλύτερης ενεργειακής κλάσης (IE3, IE4).

Βιβλιογραφία – Πηγές

- 1] WWF, Οδηγός για το Περιβάλλον -Αέρας και ατμοσφαιρική Ρύπανση, Εμμανουέλα Ρεμουντάκη, 2010
- [2] Τμήμα Τεχνολόγων Γεωπόνων ΤΕΙ Ηπείρου, Αρδεύσεις & Στραγγίσεις έργων πρασίνου, Δρ.Τσιρογιάννης Λ. Ιωάννης, 2015
- [3] Ηλεκτρονικό καταθετήριο Πανεπιστημίου Πειραιώς, Συγκεντρώσεις αιωρούμενων σωματιδίων σε εσωτερικούς και εξωτερικούς χώρους δημοτικών σχολείων της Αθήνας, Π. Κωνσταντινόπουλος, 2004
- [4] Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πηγές Ρύπανσης, Δρ. Γ. Τσιλιγκιρίδης, 2015
- [5] Θαλάσιες Μεταφορές και Ατμοσφαιρική Ρύπανση: Διεθνείς και Κοινοτικές Ρυθμιστικές Προσεγγίσεις, Κ. Κατσιμπάρδης, 2007
- [6] Regulating navigation through the Turkish straits: A Challenge for Modern International Environmental Law, Int. Journal of Marine & Coastal Law, vol.17, C.C. Joyner/J. M. Mitchel (2002)
- [7] Ναυτιλία και περιβάλλον, Α.Μ. Κοτρίκλα, 2015
- [8] Η γήινη Ατμόσφαιρα: ένας υπέροχος κόσμος, Μ. Καρδαμάκης, 2016
- [9] Κατακόρυφη δομή της ατμόσφαιρας, Μ. Γιάνναρος, 2018
- [10] Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός, eNautilia, 2012
- [11] Πρόληψη Ρύπανσης Θαλάσσιου Περιβάλλοντος από τα πλοία, Επιστημονική Επιτροπή Ειδικότητας Ναυπηγών Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, 2011
- [12] Θεσμικό Πλαίσιο, HELMEPA - Ελληνική Ένωση Προστασίας Θαλασσίου Περιβάλλοντος, 2009
- [13] Πράσινη Ναυτιλία, Σημειώσεις Τμήματος Ναυτιλίας και Επιχειρηματικών Υπηρεσιών & Μηχ. Αυτοματισμού ΤΕ, Ν.Νικητάκος, Δ.Παπαχρήστος, 2018
- [14] Δείκτης EEDI, Περιβάλλον και ζητήματα εφαρμογής του, Κ.Χ.Τσούμαρης. 2015
- [15] Ενεργειακή Απόδοση Φορτηγών Πλοίων, Φ.Γ. Κουλούρης, 2014
- [16] A new chapter for MARPOL Annex VI – requirements for technical and operational measures to improve the energy efficiency of international shipping, Edmund Hughes, Technical Officer, Marine Environment Division, IMO, 2013
- [17] IMO GHG Regulations, Latin American Panel – INTERTANKO, R.Tress, 2011
- [18] (EEDI & SEEMP) - Επιπτώσεις στο περιβάλλον και την Ναυτιλιακή Βιομηχανία, Α.Δ.Σιώτα, 2015

- [19] Ηλεκτρικές Μηχανές - Τόμος Δεύτερος, Ίδρυμα Ευγενίδου, Ακαδημίες Εμπορικού Ναυτικού, Α. Βλάχος, 2016
- [20] Ηλεκτρικά Δίκτυα Πλοίου, Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα ΤΕΙ Αθήνας, Παγώνης, 2015
- [21] Τριφασικοί Ασύγχρονοι Επαγωγικοί Κινητήρες, Σημειώσεις Μαθήματος, ΤΕΙ Σερρών, 2005
https://elearning.teicm.gr/file.php/318/trifasikos_asynxronos_kinitiras.pdf
- [22] Επαγωγικοί Κινητήρες, Π.Παλάντζας, 2017 <https://docplayer.gr/44409499-Dragogithni-thileiixeo-palantzas-panagthotis.html>
- [23] Ηλεκτρικές Μηχανές, Σ. Γαντζούδης, Μ.Λαγουδάκος, Α. Μπινιάρης, ΟΕΔΒ, Αθήνα, 2012
- [24] Μηχανική Ηλεκτρικής Ισχύος Ασύγχρονοι κινητήρες, Δρ. Η. Κυριακίδης, Κύπρος, 2007
- [25] Πινακίδα Ασύγχρονου Τριφασικού Κινητήρα, Σ. Τούλογλου, Ιούνιος 2017
- [26] Συστήματα Αυτοματισμών, ΟΕΔΒ, Ν.Ζούλης, Π. Καφφετσάκης, Γ. Σούλτης, 2000
- [27] Βιομηχανικές εγκαταστάσεις και υποσταθμοί, ΟΕΔΒ, Α'Τεύχος, Π.Κεμίδης, Δ. Μπαργιώτας, Χ. Σανδαλίδης, 2001
- [28] Ανάκτηση και διαχείριση ενέργειας για πρωτότυπο ηλεκτρικό όχημα, Α. Αμαργιανός, Χανιά, 2015
- [29] Συγκριτική Μελέτη Τεχνικών Ελέγχου Ηλεκτρικών Μηχανών Επαγωγής, Ι. Μανωλάς, Αθήνα, Οκτώβριος 2006
- [30] Πειραματική και υπολογιστή διερεύνηση ροϊκής συμπεριφοράς φυγοκεντρικών αντλιών: Επίδραση της γωνίας εισόδου των πτερυγίων στη σπηλαίωση και απόδοση της αντλίας, Σ.Δ. Κυπαρίσσης, Πάτρα, 2012
- [31] Συστήματα Ελέγχου τριφασικών κινητήρων, Α.Καπλάνης, Σ.Κυριαζής, Αθήνα, 2019
- [32] Ανάπτυξη τοπολογίας προσαρμοστικού ελέγχου διεργασιών πλοίων με ρυθμιστές στροφών για εξοικονόμηση ισχύος και καυσίμου γεννητριών, Σ. Γιαννούτσος, Αθήνα, 2018
- [33] Control Fan with VFD or Damper, AirPro Fan & Blower Co, 2018
- [34] Ποιά είναι η διαφορά μεταξύ φορτίων σταθερής και μεταβλητής ροπής στους AC ρυθμιστές στροφών, Schneider Electric, 2016
- [35] Συλλογή μεταφορά και έλεγχος Δεδομένων - Μέτρηση και Έλεγχος Θερμοκρασίας, Σ.Ηλιαδάκης, 2018

[36] A Data-Driven Process Control Topology for Energy Efficiency Optimization of Fan Operation in E/R Ventilation System of Marine Vessels, IEEE, S.Giannoutsos, S.Manias, 2014

[37] Τι Είναι Ο Ελεγκτής PID, Σ. Καραπαρασκευαΐδης, 2017

[38] Chun-Lien Su, Wei-Lin Chung, Kuen-Tyng Yu, An Energy-Savings Evaluation Method for Variable-Frequency-Drive Applications on Ship Central Cooling Systems, Published in IEEE Transactions on Industry Applications, 2014