

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ - ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΣΤΕΦΑΝΟΥ Ν. ΑΡΜΑΟΥ**

**ΑΜ : 2016020092**

**Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ**  
**ΜΕΤΑΒΑΣΗ**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**

**ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΠΑΣΑΔΑΚΗΣ**

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

1. Νικόλαος Πασαδάκης, Καθηγητής (Επιβλέπων)
2. Νικόλαος Καλλίθρακας-Κόντος, Καθηγητής
3. Δημήτριος Καρώνης, Καθηγητής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

**ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2024**

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....</b>	<b>4</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....</b>	<b>5</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ ΚΑΙ ΝΑΥΤΙΛΙΑ.....</b>	<b>6</b>
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	6
1.2 ΤΑ ΑΕΡΙΑ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΚΑΙ ΟΙ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΤΗΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ.....	8
1.3 ΤΟ ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΧΡΗΣΗΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ .....	9
1.4 ΟΙ ΤΥΠΟΙ ΤΩΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ.....	10
1.5 ΤΟ ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΓΙΑ ΤΑ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ .....	11
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Η ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΚΑΙ ΟΙ ΕΝΔΙΑΜΕΣΟΙ ΣΤΟΧΟΙ ΑΠΑΝΘΡΑΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ .....</b>	<b>13</b>
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	13
2.2 Η ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΤΟΥ ΔΙΕΘΝΟΥΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΟΥ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥ.....	14
2.2.1 ΔΕΙΚΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΠΛΟΙΟΥ (EEDI) .....	15
2.2.2 ΔΕΙΚΤΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΥΠΑΡΧΟΝΤΟΣ ΠΛΟΙΟΥ (EEXI).....	17
2.2.3 ΔΕΙΚΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ ΑΝΘΡΑΚΑ (CII) .....	17
2.2.4 ΣΧΕΔΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΠΛΟΙΟΥ (SEEMP) .....	19
2.2.5 ΑΝΑΘΕΩΡΗΜΕΝΗ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ 2023 ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΕΡΙΩΝ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ.....	19
2.3 Η ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗΣ ΈΝΩΣΗΣ .....	20
2.3.1 ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΜΠΟΡΙΑΣ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ (EU ETS) .....	21
2.3.2 ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΓΙΑ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΧΑΜΗΛΩΝ Η ΜΗΔΕΝΙΚΩΝ ΑΝΘΡΑΚΟΥΧΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΣΤΙΣ ΘΑΛΑΣΣΙΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ (FUEL EU MARITIME).....	23

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΑ ΕΙΔΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΧΑΜΗΛΩΝ Η ΜΗΔΕΝΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ ΚΑΙ ΟΙ ΔΙΑΘΕΣΙΜΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥΣ..... 25**

3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	25
3.2	Η ΧΡΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΤΟΝ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΣΤΟΛΟ ΣΗΜΕΡΑ .....	26
3.3	ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ (LNG) .....	27
3.4	ΜΕΘΑΝΟΛΗ .....	28
3.5	ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΑ .....	30
3.6	ΑΜΜΩΝΙΑ.....	31
3.7	ΥΔΡΟΓΟΝΟ .....	33
3.8	ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΕΣΜΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΑΝΘΡΑΚΑ (CCS) .....	34
3.9	ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟ ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ .....	35
3.10	ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΙΔΩΝ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ.....	35

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΤΩΝ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ ΚΑΙ ΟΙ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ ..... 37**

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ ΦΥΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ..... 41**

5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	41
5.2	ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΙΞΩΔΟΥΣ.....	42
5.3	ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΗΜΕΙΟΥ ΡΟΗΣ.....	44
5.4	ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΥΠΕΡΥΘΡΟΥ ΜΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ FOURIER (FTIR) .....	45
5.5	ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΥΠΕΡΙΩΔΟΥΣ – ΟΡΑΤΟΥ (UV-VIS) .....	49
5.6	ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ (FLUORESCENCE SPECTROSCOPY) .....	51
5.7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	62

### **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....63**

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή της Σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Νικόλαο Πασαδάκη που μου εμπιστεύθηκε το θέμα της παρούσης διπλωματικής εργασίας για την πολύτιμη καθοδήγησή του κατά την εκπόνησή της καθώς και για τη διάθεση των μέσων για την πραγματοποίηση των πειραμάτων φασματοσκοπίας στο Εργαστήριο του Ινστιτούτου Γεωενέργειας του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Επίσης ευχαριστώ την κα Κωνσταντίνα Σελέκου, Χημικό του Εργαστηρίου Γεωενέργειας, που διέθεσε αρκετό χρόνο για να μου εξηγήσει τη λειτουργία των φασματοσκοπικών μεθόδων και για την βοήθειά της στην διενέργεια των σχετικών πειραμάτων.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω το καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών του ΕΜΠ κ. Δημήτριο Καρώνη που με υποδέχθηκε στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Καυσίμων και Λιπαντικών της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και μου διέθεσε τα μέσα για την πραγματοποίηση τμήματος του πειραματικού μέρους της εργασίας αυτής.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται μια βιβλιογραφική επισκόπηση της τεράστιας πρόκλησης που έχει να αντιμετωπίσει η παγκόσμια ναυτιλία τα επόμενα χρόνια λόγω της κλιματικής κρίσης. Αυτή επιβάλλει τον περιορισμό της χρήσης των υπαρχόντων ναυτιλιακών (ορυκτών) καυσίμων που η καύση τους εκπέμπει αέρια του θερμοκηπίου, και τελικά την ενεργειακή μετάβαση σε εναλλακτικά καύσιμα μηδενικών εκπομπών άνθρακα δηλαδή την απανθρακοποίηση του κλάδου.

Στο πρώτο κεφάλαιο επισκοπούνται οι τύποι των ναυτιλιακών καυσίμων, το ιστορικό χρήσης τους στα πλοία και η εξέλιξη των κανονισμών για τον έλεγχο της ρύπανσης από τις εκπομπές της καύσης τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο εξετάζονται η στρατηγική και οι στόχοι του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού που είναι σε συνεχή εξέλιξη τα τελευταία χρόνια για την εφαρμογή κανονισμών μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Αναλύονται οι δείκτες μέσω των οποίων παρακολουθείται σε παγκόσμιο επίπεδο η ένταση των εκπομπών και η ενεργειακή απόδοση των πλοίων καθώς και το σύστημα εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται η τρέχουσα κατάσταση όσον αφορά τα είδη των εναλλακτικών καυσίμων (υγροποιημένο φυσικό αέριο, μεθανόλη, βιοκαύσιμα, αμμωνία, υδρογόνο, τεχνολογίες δέσμευσης άνθρακα, ηλεκτροκίνηση), η σύγκρισή τους καθώς και τα προβλήματα ή τα όρια της κάθε διαθέσιμης τεχνολογίας .

Στο τέταρτο κεφάλαιο συζητούνται τα συμπεράσματα για την προοπτική της ενεργειακής μετάβασης στην πράσινη ναυτιλία με ορίζοντα το έτος 2050 και οι τεράστιες προκλήσεις χρηματοδότησης αυτής της μετάβασης και της οργάνωσης και προετοιμασίας των εμπλεκόμενων κλάδων (προμηθευτές καυσίμων, κατασκευαστές μηχανών, ναυπηγεία, διαχειριστές λιμανιών) σε αυτή.

Τέλος στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το πειραματικό μέρος της εργασίας που αφορά μετρήσεις ιδιοτήτων και ανίχνευση συστατικών μέσω της φασματοσκοπίας δειγμάτων φυτικών ελαίων που αποτελούν την πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοκαυσίμων.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ ΚΑΙ ΝΑΥΤΙΛΙΑ

## 1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παγκόσμια ναυτιλιακή βιομηχανία μεταφέρει με τα πλοία της αγαθά που αντιστοιχούν σε ποσοστό περίπου 90% του παγκόσμιου εμπορίου αλλά δημιουργεί αρνητική επίπτωση στο κλίμα μέσω της εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου, ιδιαίτερα του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), που είναι ο κύριος μοχλός της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Στις θαλάσσιες μεταφορές οι συνολικές εκπομπές CO<sub>2</sub> ανέρχονταν σύμφωνα με τελευταία μελέτη<sup>1</sup> σε 1.056 εκατ. τόνους το 2018 που αναλογούν στο 2.9 % των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, ποσοστό που είναι χαμηλότερο από το αντίστοιχο των οδικών μεταφορών αλλά όχι αμελητέο.

Τα πλοία εκπέμπουν CO<sub>2</sub> μέσω της καύσης ορυκτών καυσίμων όπως το ντίζελ και το βαρύ μαζούτ τα οποία τροφοδοτούν τους κινητήρες εσωτερικής καύσης που δημιουργούν την πρόωση για να πλέουν στους ωκεανούς. Αυτές οι εκπομπές απελευθερώνονται απευθείας στην ατμόσφαιρα, συμβάλλοντας στη συσσώρευση αερίων του θερμοκηπίου και στην υπερθέρμανση του πλανήτη.

Εκτός από το CO<sub>2</sub>, η καύση των ορυκτών καυσίμων στα πλοία απελευθεώνει επίσης άλλους επιβλαβείς ρύπους όπως το οξείδιο του θείου (SO<sub>x</sub>) και το οξείδιο του αζώτου (NO<sub>x</sub>), που μπορεί να προκαλέσουν αναπνευστικά προβλήματα στους ανθρώπους και ρύπανση του φυσικού περιβάλλοντος μέσω της όξινης βροχής.

Επομένως η παγκόσμια ναυτιλιακή βιομηχανία λόγω του αριθμού και του μεγέθους των ποντοπόρων πλοίων δημιουργεί σημαντικό αποτύπωμα στο περιβάλλον. Τα μεγάλα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και τα τεράστια δεξαμενόπλοια μεταφοράς αργού πετρελαίου μπορούν να καίνε δεκάδες χιλιάδες τόνους καυσίμων ετησίως, με αποτέλεσμα σημαντικές εκπομπές ρύπων.

---

<sup>1</sup> 4<sup>th</sup> Greenhouse Gas Study, IMO, 2000

<https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Fourth-IMO-Greenhouse-Gas-Study-2020.aspx>

Καταβάλλονται προσπάθειες για τη μείωση του αντίκτυπου της ναυτιλιακής βιομηχανίας στην κλιματική αλλαγή, όπως η μείωση της ταχύτητας πλεύσης, οι βελτιώσεις των μηχανών για την εξοικονόμηση ενέργειας αλλά το πιο σημαντικό μακροπρόθεσμο μέτρο είναι η χρήση εναλλακτικών καυσίμων όπως τα βιοκαύσιμα, το υδρογόνο, η αμμωνία αλλά και η χρήση συστημάτων ηλεκτρικής πρόωσης και άλλων καθαρών τεχνολογιών. Ωστόσο, αυτές οι λύσεις βρίσκονται ακόμη στα αρχικά στάδια ανάπτυξης και δεν έχουν ακόμη υιοθετηθεί ευρέως.

Αλλά και η κλιματική αλλαγή έχει σημαντικές επιπτώσεις στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Οι δίαυλοι μέσω των οποίων η κλιματική αλλαγή επηρεάζει τη ναυτιλία είναι οι ακόλουθοι:

**Αύξηση της στάθμης της θάλασσας:** Καθώς οι παγκόσμιες θερμοκρασίες αυξάνονται, οι παγετώνες και τα στρώματα πάγου λιώνουν, οδηγώντας σε άνοδο της στάθμης της θάλασσας. Αυτό μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στη ναυτιλία καθώς τα λιμάνια και οι τερματικοί σταθμοί φόρτωσης μπορεί να πλημμυρίσουν από νερό, καθιστώντας δύσκολη την πλοήγηση των πλοίων.

**Ακραία καιρικά φαινόμενα:** Η κλιματική αλλαγή οδηγεί επίσης σε αύξηση των ακραίων καιρικών φαινομένων όπως οι τυφώνες, οι οποίοι μπορούν να προκαλέσουν ζημιές σε πλοία, λιμάνια και παράκτιες υποδομές και η παρατεταμένη ξηρασία που προκαλεί μείωση της διαθεσιμότητας νερού σε κανάλια όπως πρόσφατα στη διώρυγα του Παναμά. Τα φαινόμενα αυτά οδηγούν σε καθυστερήσεις στα ταξίδια των πλοίων με σημαντικό οικονομικό κόστος.

**Αλλαγές στα ωκεάνια ρεύματα:** Η κλιματική αλλαγή μεταβάλλει τα ωκεάνια ρεύματα, τα οποία μπορεί να επηρεάσουν τις ναυτιλιακές διαδρομές και τον χρόνο που απαιτείται για τη μεταφορά εμπορευμάτων. Αυτό μπορεί να έχει σημαντικές οικονομικές συνέπειες καθώς αυξάνει το κόστος μεταφοράς με πλοία και επηρεάζει ανάλογα τις αλυσίδες εφοδιασμού.

Συνολικά, η ναυτιλία μέσω της καύσης ορυκτών καυσίμων αφήνει σημαντικό αρνητικό αποτύπωμα στο περιβάλλον και συμβάλλει στην κλιματική αλλαγή αλλά και η κλιματική αλλαγή θα έχει σημαντικό αντίκτυπο στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Είναι επομένως σημαντικό ο κλάδος της παγκόσμιας ναυτιλίας να λάβει έγκαιρα μέτρα για να μετριάσει τις επιπτώσεις του στην κλιματική αλλαγή μέσω της μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

## 1.2 ΤΑ ΑΕΡΙΑ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΚΑΙ ΟΙ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΤΗΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ

Τα αέρια του θερμοκηπίου είναι αυτά που απορροφούν και εκπέμπουν υπέρυθρη ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα δημιουργώντας το φαινόμενο του θερμοκηπίου, δηλαδή τη συγκράτηση της θερμότητας με συνέπεια την αύξηση της θερμοκρασίας της γης και την κλιματική αλλαγή. Τα κύρια αέρια του θερμοκηπίου είναι το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ), το μεθάνιο ( $\text{CH}_4$ ) και το υποξείδιο του αζώτου ( $\text{N}_2\text{O}$ ) και η σημαντική αύξησή τους τον τελευταίο αιώνα οφείλεται στις ανθρώπινες δραστηριότητες.

Το διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) είναι το πιο διαδεδομένο αέριο του θερμοκηπίου και προέρχεται κύρια από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τη θέρμανση από ορυκτά καύσιμα. Οι θαλάσσιες μεταφορές συμβάλλουν επίσης στις εκπομπές άνθρακα με την καύση των ναυτιλιακών καυσίμων (κυρίως βαρέος μαζούτ και ντίζελ) στις μηχανές των πλοίων και γι' αυτό η ναυτιλία αφήνει επίσης ανθρακικό αποτύπωμα.

Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που συνδέονται με τη ναυτιλία δεν περιορίζονται μόνο κατά την πλεύση των πλοίων, αλλά περιλαμβάνουν επίσης εκπομπές από την παραμονή τους στα λιμάνια και τερματικούς σταθμούς. Καταβάλλονται προσπάθειες για τη μείωση των εκπομπών από τις λιμενικές δραστηριότητες με την προώθηση της ηλεκτροδότησης των πλοίων από τη ξηρά (χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο κατά τη διάρκεια της παραμονής στο λιμάνι) και την εφαρμογή καθαρότερων τεχνολογιών για τον εξοπλισμό του χειρισμού της φόρτωσης και εκφόρτωσης των φορτίων.

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός -ΔΝΟ- (International Maritime Organization – IMO-) είναι ο οργανισμός των Ηνωμένων Εθνών που είναι υπεύθυνος για τα μέτρα που αφορούν στη βελτίωση της ασφάλειας της ζωής στη θάλασσα και στην πρόληψη της ρύπανσης από τα πλοία. Έχει θέσει παγκόσμια πρότυπα για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τα πλοία στοχεύοντας στο μηδενισμό των εκπομπών  $\text{CO}_2$  από τη διεθνή ναυτιλία το 2050 (κλιματικά ουδέτερη ναυτιλία) με ενδιάμεσους σταθμούς τη μείωση κατά τουλάχιστον 20% έως το 2030 και κατά τουλάχιστον 70% έως το 2040, σε σύγκριση με τα επίπεδα του 2008.



Η διεθνής ναυτιλιακή βιομηχανία εργάζεται για την προσαρμογή της σε αυτούς τους στόχους μέσω της εφαρμογής βραχυπρόθεσμων μέτρων όπως η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων (μείωση κατανάλωσης καυσίμων στην ίδια ισχύ των μηχανών) και/ή η μείωση της ταχύτητας πλεύσης για τον περιορισμό της κατανάλωσης καυσίμων αλλά και με μακροπρόθεσμα μέτρα όπως η διερεύνηση της χρήσης εναλλακτικών (μη ορυκτών) καυσίμων και των σχετικών τεχνολογιών αλλά και την ανάπτυξη των αναγκαίων υποδομών για την αποθήκευσή τους στα λιμάνια προκειμένου η ναυτιλία να καταστεί κλιματικά ουδέτερη στα μέσα αυτού του αιώνα.

### 1.3 ΤΟ ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΧΡΗΣΗΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Για αιώνες τα ιστία ήταν το μέσο πρόωσης των πλοίων μέχρι την αντικατάστασή τους στις αρχές του 19ου αιώνα από ατμοστρόβιλους που έκαιγαν κάρβουνο. Στις πρώτες δεκαετίες του 20ου αιώνα το πετρέλαιο άρχισε να υποκαθιστά το κάρβουνο ως καύσιμο στα πλοία και στο δεύτερο μισό του ίδιου αιώνα οι ντιζελομηχανές ή μηχανές εσωτερικής καύσης που καίνε μαζούτ (βαρύ πετρέλαιο – Heavy Fuel Oil – HFO) και σε μικρότερο βαθμό πετρέλαιο ντίζελ (marine gasoil -MGO-) κυριάρχησαν εκτοπίζοντας πλήρως τους ατμοστρόβιλους. Από τη δεκαετία του 1970 σχεδόν όλα τα νέα πλοία ναυπηγούνται με κινητήρες εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιούν 2-3 τύπους ορυκτών καυσίμων που στη ναυτική γλώσσα ονομάζονται “bunkers”, ονομασία που ανάγεται στην εποχή που χρησιμοποιείτο το κάρβουνο και αυτό αποθηκεύονταν σε μεγάλες αποθήκες (bunkers) στα αμπάρια των πλοίων.

Ουσιαστικά η εκθετική ανάπτυξη του παγκόσμιου εμπορίου τα τελευταία 50 χρόνια στηρίχθηκε στη θαλάσσια μεταφορά ξηρών ή υγρών φορτίων μέσω φορτηγών πλοίων (bulkers), πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (container ships) ή δεξαμενόπλοιων (tankers) συνεχώς αυξανόμενης χωρητικότητας, που για την πλεύση τους στους ωκεανούς χρησιμοποιούν ορυκτά ναυτιλιακά καύσιμα που παράγονται σε όλα τα διυλιστήρια πετρελαίου και η προμήθειά τους μπορεί να γίνει σε όλα τα λιμάνια του κόσμου. Στη δεκαετία του 1970 η αγορά των ναυτιλιακών καυσίμων ήταν ένα ολιγοπώλιο μεγάλων πετρελαϊκών εταιρειών (οι γνωστές 7 αδελφές -BP, Chevron, ESSO, Gulf, Mobil, Shell, Texaco-) , αλλά στη συνέχεια κρατικές εταιρείες χωρών παραγωγών πετρελαίου του τρίτου κόσμου αλλά και ανεξάρτητες εμπορικές εταιρείες (που δεν είναι και παραγωγοί πετρελαίου) εισήλθαν στην αγορά. Σήμερα η παγκόσμια αγορά ναυτιλιακών

καυσίμων ανέρχεται στη γιγαντιαία ποσότητα των 270 εκατ. τόνων περίπου κατ' έτος και από τα διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία προκύπτει ότι ελέγχεται περίπου κατά 33 % από πολυεθνικές εμπορικές εταιρείες (Glencore, Trafigura, Vitol, Minerva κλπ. ), κατά 20 % από πολυεθνικές πετρελαϊκές εταιρείες (BP, Chevron, Shell, Total κλπ.) κατά 20 % από κρατικές πετρελαϊκές εταιρείες (Aramco Σαουδικής Αραβίας, Petrobras Βραζιλίας, YPF Αργεντινής κλπ. ) ενώ το υπόλοιπο 27 % προμηθεύουν τοπικές εμπορικές εταιρείες.

#### 1.4 ΟΙ ΤΥΠΟΙ ΤΩΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Στη ναυτιλία χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι ναυτιλιακών καυσίμων, ο καθένας με τα δικά του χαρακτηριστικά και τις δικές του περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι συνήθεις τύποι ναυτιλιακών καυσίμων περιλαμβάνουν:

**Βαρύ μαζούτ (HFO):** Το βαρύ μαζούτ είναι ένα υπολειμματικό καύσιμο που λαμβάνεται από τη διύλιση αργού πετρελαίου. Είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο καύσιμο στη ναυτιλιακή βιομηχανία λόγω του σχετικά χαμηλού κόστους του. Ωστόσο, έχει υψηλή περιεκτικότητα σε θείο, η οποία συμβάλλει στην ατμοσφαιρική ρύπανση και ρυθμίζεται από διεθνή πρότυπα.

**Marine Gas Oil (MGO):** Το Marine Gas Oil είναι ένα καύσιμο που έχει χαμηλότερη περιεκτικότητα σε θείο σε σύγκριση με το Heavy Fuel Oil. Χρησιμοποιείται σε κινητήρες που απαιτούν καθαρότερο καύσιμο, όπως μικρότερα σκάφη, παράκτια πλοία και σε περιοχές όπου επιβάλλονται αυστηρότερα όρια εκπομπών θείου.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ναυτιλιακή βιομηχανία βρίσκεται σε φάση μετάβασης προς καθαρότερα καύσιμα και αυστηρότερους περιβαλλοντικούς κανονισμούς. Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (ΔΝΟ) έχει εφαρμόσει από το 2020 κανονισμούς για τη μείωση των εκπομπών θείου από τα πλοία (μέγιστη επιτρεπόμενη περιεκτικότητα καυσίμων σε θείο κάτω από 0,50 %) και υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για εναλλακτικά καύσιμα και τεχνολογίες για την επίτευξη της απαλλαγής του τομέα από τον άνθρακα.

## 1.5 ΤΟ ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΤΟΥ ΚΑΝΟΝΙΣΤΙΚΟΥ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΓΙΑ ΤΑ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ

Το κανονιστικό πλαίσιο για τα καύσιμα πλοίων έχει εξελιχθεί με την πάροδο του χρόνου για να αντιμετωπίσει τους κινδύνους ρύπανσης της θάλασσας από τα ίδια τα καύσιμα αλλά και του αέρα από τις εκπομπές των καυσαερίων τους. Ακολουθεί μια σύντομη ιστορική αναδρομή στα βασικά ορόσημα του κανονιστικού πλαισίου για τα καύσιμα πλοίων:

**Διεθνής Σύμβαση για την πρόληψη της ρύπανσης από τα πλοία (MARPOL):** Η Σύμβαση MARPOL, η οποία εγκρίθηκε από τον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (ΔΝΟ) το 1973 και τροποποιήθηκε αργότερα το 1978, θέσπισε κανονισμούς για την πρόληψη της ρύπανσης από τα πλοία, συμπεριλαμβανομένων των κανονισμών που αφορούν τα καύσιμα πλοίων. Το παράρτημα VI της MARPOL ασχολείται ειδικά με την ατμοσφαιρική ρύπανση από τα πλοία και καθορίζει όρια για τις εκπομπές οξειδίων του θείου (SO<sub>x</sub>), οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) από τα καύσιμα πλοίων.

**Περιοχές ελέγχου εκπομπών θείου (Sulphur Emission Control Areas -SECAs-):** Το 2015, ο ΔΝΟ όρισε τη θάλασσα της Βορείου Αμερικής, τη Βαλτική Θάλασσα και τη Βόρεια Θάλασσα ως SECAs, απαιτώντας από τα πλοία που δραστηριοποιούνται στις περιοχές αυτές να χρησιμοποιούν ναυτιλιακά καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (με μέγιστη περιεκτικότητα σε θείο 0,10%) για τη μείωση των εκπομπών θείου. Αυτό αποτέλεσε τον πρώτο περιφερειακό κανονισμό για τα καύσιμα πλοίων.

**Παγκόσμιο ανώτατο όριο θείου:** Αναθεωρώντας περαιτέρω το παράρτημα VI της MARPOL το 2016, ο ΔΝΟ ενέκρινε ένα νέο κανονισμό με ισχύ από 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2020 που επέβαλλε μέγιστη περιεκτικότητα των καυσίμων σε θείο 0,50% κατά μάζα από το προηγούμενο όριο του 3,50% που ίσχυε από 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2012. Ο κανονισμός αυτός, γνωστός ως IMO 2020, <sup>2</sup>τέθηκε σε ισχύ την 1η Ιανουαρίου 2020 και ισχύει για τα πλοία που δραστηριοποιούνται παγκοσμίως, εκτός από τις καθορισμένες περιοχές ελέγχου των εκπομπών (SECAs) όπου ήδη ίσχυε μέγιστη περιεκτικότητα 0,10%. Επέτρεψε όμως στα πλοία που χρησιμοποιούν συστήματα καθαρισμού καυσαερίων (Exhaust Gas Cleaning Systems -EGCS-), τις επονομαζόμενες πλυντρίδες (scrubbers), να

---

<sup>2</sup> Cutting Sulphur Oxide emissions, IMO, 2020

<https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>

χρησιμοποιούν μαζούτ υψηλότερης περιεκτικότητας σε θείο, αφού αυτό δεσμεύεται από τα καυσαέρια με τα συστήματα αυτά και δεν εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα. Ένα σημαντικό ποσοστό πλοίων (ιδίως τα μεγαλύτερα πλοία) εξοπλίσθηκαν με αυτά τα συστήματα και έτσι στην αγορά ναυτιλιακών καυσίμων υπάρχουν πλέον τρεις τύποι μαζούτ, το υψηλής, χαμηλής και πολύ χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο (High Sulphur Fuel Oil -HSFO-, Low Sulphur Fuel Oil- LSFO- και Very Low Sulphur Oil – VLSFO-). Η διαφορά τιμής ανάμεσα στους τύπους αυτούς δικαιολογούν την επένδυση σε πλυντρίδες, ιδιαίτερα στα μεγάλα πλοία που τα καύσιμα αποτελούν σημαντικό τμήμα του λειτουργικού τους κόστους.

**Κανονισμοί ελέγχου εκπομπών αζώτου βαθμίδας I, II και III (Tier I, Tier II και Tier III) :** Αυτοί οι κανονισμοί ενσωματώθηκαν επίσης στο Παράρτημα VI της MARPOL και είναι πρότυπα σχεδίασης και κατασκευής των μηχανών εσωτερικής καύσης των πλοίων θέτοντας προοδευτικά αυστηρότερα όρια στις εκπομπές NOx με βάση τον τύπο του κινητήρα του πλοίου και την ημερομηνία ναυπήγησης. Τα πρότυπα της βαθμίδας I τέθηκαν σε ισχύ το 2000 και τα πρότυπα της βαθμίδας II το 2011. Η τελευταία βαθμίδα (Tier III) έχει εφαρμογή σε όλα τα πλοία που ναυπηγούνται μετά την 1/1/2016 και είναι πλέον από την 1/1/2021 προϋπόθεση για να μπορούν να προσεγγίζουν λιμάνια της Βορείου Αμερικής, της Βαλτικής Θάλασσας και τη Βόρειας Θάλασσας.

**Υπό διαβούλευση κανονισμοί για τον άνθρακα:** Στο πλαίσιο των ευρύτερων προσπάθειών για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής, ο IMO αναπτύσσει κανονισμούς για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (GreenHouse Gas – GHG-) από τα πλοία. Το 2018, ο ΔΝΟ ενέκρινε μια αρχική στρατηγική για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, θέτοντας ως στόχο τη μείωση της έντασης άνθρακα της διεθνούς ναυτιλίας κατά τουλάχιστον 40% έως το 2030 και την επίτευξη μείωσης των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 50% έως το 2050 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 2008. Η στρατηγική αυτή αναθεωρήθηκε το 2023 <sup>3</sup> και οι στόχοι έγιναν περισσότερο φιλόδοξοι αφού υιοθετήθηκε ο στόχος της κλιματικής ουδετερότητας το 2050 (μείωση των συνολικών εκπομπών κατά 100 % αντί 50 %).

---

<sup>3</sup> Revised CHG emission strategy for global shipping, IMO, 2023

<https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/Revised-GHG-reduction-strategy-for-global-shipping-adopted-.aspx>

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Η ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΚΑΙ ΟΙ ΕΝΔΙΑΜΕΣΟΙ ΣΤΟΧΟΙ

### ΑΠΑΝΘΡΑΚΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ

#### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σύμβαση-πλαίσιο των Ηνωμένων Εθνών για την κλιματική αλλαγή (United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC-) που υπογράφηκε στο Ρίο ντε Τζανέιρο το 1994 ήταν η πρώτη διεθνής σύμβαση στα πλαίσια του ΟΗΕ για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Επέβαλλε σε όλα τα κράτη μέλη του να δημιουργήσουν προγράμματα για τον περιορισμό των ρύπων και περιορισμό των αερίων του θερμοκηπίου.

Το Πρωτόκολλο του Κιότο, που υπογράφηκε το 1997 και ετέθη σε εφαρμογή το 2005, επέκτεινε τη σύμβαση UNFCCC και έθεσε για πρώτη φορά συγκεκριμένους στόχους για την μείωση των ρύπων έως και 5% από το 2008 έως και το 2012 σε σχέση με τις εκπομπές του 1990 και περαιτέρω την μείωση έως και 18% για από το 2013 έως και το 2022. Στη συνέχεια η Συμφωνία του Παρισιού το 2015 που υπογράφηκε από 196 χώρες-μέλη του ΟΗΕ και τέθηκε σε ισχύ το 2016, έθεσε πρωταρχικό στόχο να συγκρατήσει "την αύξηση της παγκόσμιας μέσης θερμοκρασίας σε επίπεδα πολύ κάτω των 2°C πάνω από τα προβιομηχανικά επίπεδα" και να συνεχίσει τις προσπάθειες "για τον περιορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας σε 1,5°C πάνω από τα προβιομηχανικά επίπεδα". Αυτή η δέσμευση ενισχύθηκε με το Σύμφωνο της Γλασκόβης για το κλίμα το 2021, που τόνισε την επείγουσα ανάγκη να πραγματοποιηθούν εντός της τρέχουσας δεκαετίας ισχυρές μειώσεις των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου προκειμένου να διατηρηθεί ζωντανός ο στόχος της συμφωνίας του Παρισιού για μέγιστη αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1,5 ° C.

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός σε παγκόσμιο επίπεδο και η Ευρωπαϊκή Ένωση σε επίπεδο Ευρώπης έχουν εκπονήσει αναλυτικές στρατηγικές και εφαρμόζουν ή εφαρμόζουν πολιτικές και μέτρα για την ευθυγράμμιση με τους στόχους περιορισμού της κλιματικής αλλαγής που έθεσαν οι παραπάνω συμφωνίες.

## 2.2 Η ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΤΟΥ ΔΙΕΘΝΟΥΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΟΥ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥ

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός -ΔΝΟ- ( International Maritime Organization -IMO-) είναι ο διεθνής θεσμός στα πλαίσια του ΟΗΕ με ευθύνη την ασφάλεια της παγκόσμιας ναυτιλίας και την πρόληψη της μόλυνσης της ατμόσφαιρας και της θάλασσας από του ρύπους των πλοίων. Έχει 175 χώρες-μέλη και εισήγαγε και διαχειρίζεται περίπου 50 διεθνείς συμβάσεις και/ή πρωτόκολλα για την πρόληψη της ρύπανσης από τα πλοία. Είναι εκείνος που ανέλαβε να υλοποιήσει στον κλάδο της ναυτιλίας τους στόχους των συνθηκών του Κιότο και στη συνέχεια της Συμφωνίας του Παρισιού για την κλιματική αλλαγή.

Υιοθέτησε τους πρώτους υποχρεωτικούς κανονισμούς για τις εκπομπές αερίων των πλοίων τον Ιούλιο του 2011 τροποποιώντας το 6ο Παράρτημα (Annex VI) της Διεθνούς Σύμβασης για την Πρόληψη της Ρύπανσης από Πλοία (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships –MARPOL).

Οι κανονισμοί αυτοί τέθηκαν σταδιακά σε εφαρμογή στη διάρκεια των ετών 2011-2018, οπότε ο ΔΝΟ υιοθέτησε (Απρίλιος 2018) την Αρχική Στρατηγική για τη μείωση των αερίων του Θερμοκηπίου (Initial strategy on reduction of CHG emissions from ships) <sup>4</sup>. Οι στόχοι που έβαλε είναι (α) η μείωση των συνολικών εκπομπών από τη ναυτιλία κατά 50 % το 2050 σε σύγκριση με το 2008 και (β) η μείωση της έντασης άνθρακα κατά 40% μέχρι το 2030 σε σύγκριση με το 2008 και 70% μέχρι το 2050 σε σύγκριση με το 2008.

Για να μετρηθεί η επίτευξη αυτών των στόχων έπρεπε παράλληλα να συμφωνηθεί ο τεχνικός τρόπος μέτρησής τους. Για το λόγο αυτό τον Ιούλιο 2021 συμφωνήθηκαν στο Marine Environmental Policy Committee (MEPC) 76 του ΔΝΟ <sup>5</sup> οι τιμές ορισμένων δεικτών και/ή εργαλείων και σχεδίων για τη μέτρηση της σταδιακής υλοποίησης αυτών των στόχων. Οι δείκτες αυτοί είναι ο EEDI (Energy Efficiency Design Index) που ίσχυε ήδη από το 2013 και είναι δείκτης μέτρησης της ενεργειακής απόδοσης σχεδιασμού νέου πλοίου, ο συναφής EEXI ( Energy Efficiency Existing ship

---

<sup>4</sup> Initial IMO strategy on reduction of CHG emissions from ships, IMO, 2018

[https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Resolution%20MEPC.304%2872%29\\_E.pdf](https://www.wcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Resolution%20MEPC.304%2872%29_E.pdf)

<sup>5</sup> MEPC 76 – Reduction of CHG emissions from shipping measures adopted, IMO, 2021

<https://www.imo.org/en/MediaCentre/MeetingSummaries/Pages/MEPC76meetingsummary.aspx>

Index) που αφορά τα υπάρχοντα πλοία, ο CII (Carbon Intensity Indicator) που είναι δείκτης έντασης άνθρακα και το SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan) δηλαδή σχέδιο διαχείρισης για την ενεργειακή απόδοση Πλοίου. Η προσαρμογή σε αυτούς τους δείκτες για όλα τα πλοία άνω των 400 κόρων ολικής χωρητικότητας (Gross Tonnage) αποτελούν πλέον απαίτηση βάσει των κανονισμών MARPOL Annex VI του ΔΝΟ.

### 2.2.1 Δείκτης Ενεργειακής Απόδοσης Σχεδιασμού πλοίου (Energy Efficiency Design ship Index- EEDI)

Ο EEDI είχε τεθεί σε εφαρμογή από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2013 και υπολογίζεται με βάση τις προδιαγραφές σχεδιασμού του πλοίου, συμπεριλαμβανομένου του μεγέθους, της ταχύτητας και της απόδοσης του κινητήρα, και εκφράζεται σε γραμμάρια εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά τόνο φορτίου και μίλι πλεύσης. Στην ουσία η ενεργειακή απόδοση κάθε νέου πλοίου προκύπτει από το σχεδιασμό του και μετριέται με βάση τις προδιαγραφές των μηχανών του και τη μεταφορική του ικανότητα, δηλαδή πόσα αέρια του θερμοκηπίου εκπέμπει ανά μονάδα μεταφορικού έργου (τόνο μεταφερόμενου φορτίου και ναυτικό μίλι). Όσο χαμηλότερη είναι η τιμή του EEDI, τόσο πιο ενεργειακά αποδοτικός είναι ο σχεδιασμός του πλοίου.

Ο βασικός τύπος υπολογισμού είναι :

$$EEDI = \frac{\text{Συντελεστής εκπομπών CO}_2 \times \text{κατανάλωση καυσίμου (gr/KWxh)} \times \text{ισχύς μηχανής (KW)}}{\text{Μεταφορική δυνατότητα (ton)} \times \text{Ταχύτητα (miles/h)}}$$

Όπου :

#### **- Συντελεστής εκπομπών CO<sub>2</sub>**

Εκφράζεται σε τόνους CO<sub>2</sub> ανά τόνο καυσίμου όπως ορίσθηκε από τη Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος του ΟΗΕ (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC-) για κάθε τύπο καυσίμου ως εξής : 3,206 για ντήζελ (MGO), 3,151 για ελαφρύ μαζούτ(LFO), 3,114 για βαρύ μαζούτ, 3,030 για υγροποιημένο αέριο πετρελαίου-προπάνιο (LPG), 2,750 για υγροποιημένο φυσικό αέριο (LNG), 1,375 για μεθανόλη.

## **Κατανάλωση καυσίμου**

Εκφράζεται σε γραμμάρια/KW και ώρα λειτουργίας και είναι αυτή που δίδεται από τις προδιαγραφές του κατασκευαστή των μηχανών για λειτουργία στο 75 % της ισχύος της/ων κύριας/ων μηχανής/ών και 50 % της/ων βοηθητικής/ών μηχανής/ών.

### **- Ισχύς μηχανής**

Λαμβάνεται το 75 % της εγκατεστημένης ισχύος των μηχανών

### **- Ικανότητα μεταφοράς φορτίου (capacity)**

Λαμβάνεται η μεταφορική δυναμικότητα σε τόνους φορτίου που ισούται με το νεκρό βάρος (deadweight -DWT-) του πλοίου, δηλαδή το μέγιστο συνολικό βάρος φορτίου που μπορεί να μεταφέρει ένα πλοίο εφόσον διατηρεί το βύθισμα που προβλέπεται από τους κανονισμούς για την ασφαλή πλεύση του.

### **- Ταχύτητα (σε ναυτικά μίλια ανά ώρα)**

Λαμβάνεται αυτή που προκύπτει από τις δοκιμές/σχεδιασμό του πλοίου στο 75 % της ισχύος των μηχανών και στο βύθισμα που αντιστοιχεί στην πλήρη φόρτωση του πλοίου.

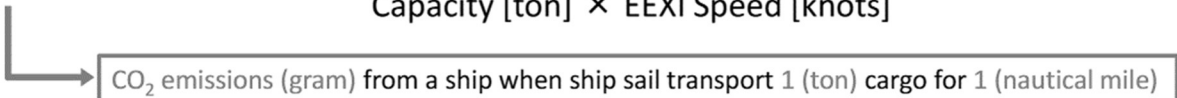
Ο EEDI έχει ως στόχο να ενθαρρύνει την ανάπτυξη και την υιοθέτηση πιο ενεργειακά αποδοτικών σχεδίων πλοίων, τα οποία μπορούν να μειώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και να βελτιώσουν τη βιωσιμότητα της ναυτιλιακής βιομηχανίας. Ο δείκτης EEDI των νέων πλοίων που θα ναυπηγούνταν από το 2015 έπρεπε να είναι 10 % κάτω από μια συγκεκριμένη γραμμή αναφοράς, η οποία βασίζεται στη μέση αποδοτικότητα των πλοίων που κατασκευάστηκαν μεταξύ 2000 και 2010.

Το ελάχιστο αυτό επίπεδο ενεργειακής απόδοσης γίνεται αυστηρότερο κάθε πέντε χρόνια σε συνάρτηση με την τεχνολογική ανάπτυξη έτσι ώστε τα πλοία που ναυπηγήθηκαν μετά το 2020 να έχουν δείκτη EEDI 20 % χαμηλότερο από την παραπάνω γραμμή αναφοράς ενώ το 2025 προβλέπεται ο δείκτης EEDI να τεθεί 30 % κάτω από τη γραμμή αναφοράς.



### 2.2.2 Δείκτης Ενεργειακής Απόδοσης Υπάρχοντος πλοίου (Energy Efficiency Existing ship Index- EEXI)

Ο τύπος υπολογισμού είναι ο ίδιος με εκείνο του EEDI αλλά αφορά τα υπάρχοντα πλοία.

$$\text{EEXI [g/ton} \cdot \text{mile]} = \frac{\text{CO}_2 \text{ Conversion factor} \times \text{SFC [g/kW} \cdot \text{h]} \times \text{Engine Power [kW]}}{\text{Capacity [ton]} \times \text{EEXI Speed [knots]}}$$


CO<sub>2</sub> emissions (gram) from a ship when ship sail transport 1 (ton) cargo for 1 (nautical mile)

όπου SFC (Specific Fuel Consumption) είναι η κατανάλωση καυσίμου ανά KW ισχύος και ώρα και κόμβος (knot) είναι ναυτικό μίλι ανά ώρα.

Στην ουσία οι δείκτες EEDI και EEXI είναι δείκτες που υπολογίζονται άπαξ για κάθε πλοίο και βασίζονται στις προδιαγραφές των μηχανών τους και τη δυναμικότητά τους.

### 2.2.3 Δείκτης Έντασης Άνθρακα (Carbon Intensity Indicator - CII)

Από την 1η Ιανουαρίου 2023 έχει γίνει υποχρεωτικό για όλα τα πλοία, πέρα από την απόδοση σε αυτά των δεικτών EEDI/EEXI, και η απολογιστική μέτρηση της ενεργειακής τους απόδοσης. Έτσι εισήχθη και ο δείκτης CII που μετρά το ετήσιο ανθρακικό αποτύπωμα κάθε πλοίου σε γραμμάρια CO<sub>2</sub> ανά τόνο φορτίου και ναυτικό μίλι, βασιζόμενος στα πραγματικά απολογιστικά στοιχεία κάθε έτους. Δηλαδή, σε αντίθεση με το EEXI το οποίο είναι μια εφάπαξ πιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης του πλοίου, το CII μετρά τις πραγματικές εκπομπές του αφού προκύπτει από τα στοιχεία κατανάλωσης καυσίμου και μιλίων που διένυσε κάθε πλοίο στη διάρκεια κάθε ημερολογιακού έτους και τα οποία έχει υποχρέωση να αναφέρει ο διαχειριστής του πλοίου σε καθορισμένη προθεσμία μετά το τέλος του έτους στη σχετική βάση δεδομένων του ΔΝΟ (IMO Data Collection System) που άρχισε να συλλέγει στοιχεία το 2019.

Ο δείκτης αυτός υπολογίζεται για τα περισσότερα πλοία με το Ετήσιο Ποσοστό Απόδοσης (Annual Efficiency Ratio) , το οποίο για κάθε πλοίο ορίζεται ως εξής :

$$\text{AER} = \frac{\text{Εκπεμφθείσα ποσότητα CO}_2 \text{ (σε gr)}}{\text{Μεταφορική ικανότητα (ton) X Διανυθέντα}}$$

Το ποσοστό υπολογίζεται σε ετήσια βάση, εκφράζεται σε γραμμάρια CO<sub>2</sub> ανά τόνο και μίλι ενώ τα πλοία θεωρούνται κατά σύμβαση ότι είναι πλήρως φορτωμένα σε όλα τα ταξίδια τους (εάν και αυτό δεν συμβαίνει πάντα).

Στη συνέχεια το ποσοστό αυτό συγκρίνεται με το απαιτούμενο CII το οποίο έχει ορισθεί ως

$$\text{Απαιτούμενο CII} = a * \text{DWT}^{-c}$$

Όπου  $a = 4.745$  και  $c = 0,622$  για πλοία ξηρού φορτίου

$a = 5.247$  και  $c = 0,61$  για δεξαμενόπλοια

$a = 1.984$  και  $c = 0,489$  για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων

DWT = μεταφορική ικανότητα σε τόνους

και τα πλοία κατατάσσονται στις βαθμίδες A, B, C, D και E όσον αφορά τη συμμόρφωσή τους με το απαιτούμενο CII. Τα πλοία που κατατάσσονται στη βαθμίδα D για 3 συνεχόμενα έτη ή στη βαθμίδα E για ένα έτος πρέπει να υποβάλλουν πρόγραμμα διορθωτικών ενεργειών στα πλαίσια του SEEMP (δείτε παρακάτω κεφάλαιο) στο νηογνώμονα (ο οποίος ελέγχει κάθε πλοίο για λογαριασμό της χώρας της σημαίας του) και αφού εγκριθεί να το εφαρμόσουν για να μπορούν να συνεχίσουν να έχουν πιστοποιητικά αξιοπλοΐας.

#### 2.2.4 Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίου (Ship Energy Efficiency Management Plan – SEEMP)

Εκτός από τους δείκτες EEDI/EEXI και CII που η μέτρησή τους αποτελεί υποχρέωση κάθε διαχειριστή πλοίου, ο ΔΝΟ απαιτεί επίσης, με έναρξη από 1 Ιανουαρίου 2023, όλα τα πλοία άνω των 5000 GT να συμμορφώνονται με το Σχέδιο Διαχείρισης Ενεργειακής Απόδοσης Πλοίων (SEEMP), το οποίο είναι ένα σύνολο επιχειρησιακών μέτρων που έχουν σχεδιαστεί για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων για τα επόμενα 3 έτη προκειμένου να επιτευχθεί η ελάχιστη αποδεκτή βαθμίδα του CII ή να βελτιωθεί ο CII με μετρήσιμους στόχους. Το Σχέδιο αυτό πρέπει επίσης να αξιολογηθεί και να γίνει αποδεκτό από το νηογνώμονα προκειμένου το πλοίο να έχει πιστοποιητικό αξιοπλοΐας.

#### 2.2.5 Αναθεωρημένη Στρατηγική 2023 για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου

Κατά την ΜΕΡC 80 τον Ιούλιο του 2023,<sup>6</sup> τα κράτη μέλη του ΔΝΟ υιοθέτησαν νέα (αναθεωρημένη σε σχέση με εκείνη του 2018) στρατηγική για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (ΑτΘ) από τα πλοία θέτοντας το φιλόδοξο στόχο της επίτευξης μηδενικών εκπομπών ΑτΘ από την παγκόσμια ναυτιλία κοντά στο 2050 με ενδιάμεσους στόχους το 2030 και 2040 αυξάνοντας την πίεση για τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων μηδενικών ή σχεδόν μηδενικών εκπομπών μέχρι το 2030. Οι άξονες της στρατηγικής αυτής είναι :

1. Μείωση της έντασης άνθρακα του πλοίου μέσω περαιτέρω βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης για νέα πλοία. Αυτός ο άξονας περιλαμβάνει επανεξέταση με στόχο τη βελτίωση των απαιτήσεων σχεδιασμού ενεργειακής απόδοσης για τα πλοία (δείκτης EEDI).
2. Μείωση της έντασης άνθρακα της παγκόσμιας ναυτιλίας μέσω της μέσης μείωσης των εκπομπών CO<sub>2</sub> ανά μονάδα μεταφορικού έργου (δείκτης CII) κατά τουλάχιστον 40 % έως το 2030 σε σύγκριση με το 2008.

---

<sup>6</sup> Revised CHG emission strategy for global shipping, IMO, 2023

<https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/Revised-GHG-reduction-strategy-for-global-shipping-adopted-.aspx>

3. Υιοθέτηση μηδενικών ή σχεδόν μηδενικών εκπομπών ΑτΘ τεχνολογιών, καυσίμων και/ή πηγών ενέργειας με στόχο τουλάχιστον το 5 % (με επιδίωξη για 10 %) της ενέργειας που χρησιμοποιείται το 2030 από την παγκόσμια ναυτιλία να προέρχεται από τις παραπάνω τεχνολογίες και/ή εναλλακτικά καύσιμα.

4. Μείωση των εκπομπών ΑτΘ της παγκόσμιας ναυτιλίας το συντομότερο δυνατό, με στόχο η ναυτιλία να γίνει ανθρακικά ουδέτερη κοντά στο 2050, λαμβάνοντας υπ' όψη τις διαφορετικές εθνικές συνθήκες.

Καθώς ο παραπάνω τέταρτος και κεντρικός άξονας θέτει ένα μακροπρόθεσμο στόχο, η νέα στρατηγική του ΔΝΟ θεσπίζει και ενδιάμεσα σημεία ελέγχου της επίτευξης του στόχου μείωσης εκπομπών ως εξής:

(α) Το έτος 2030 : στόχος μείωσης εκπομπών ΑτΘ 20 % (με επιδίωξη για 30 %) σε σχέση με το 2008.

(β) Το έτος 2040 : στόχος μείωσης εκπομπών ΑτΘ 70 % (με επιδίωξη για 80 %) σε σχέση με το 2008.

Για να επιτευχθούν οι παραπάνω ενδιάμεσοι στόχοι, η νέα στρατηγική προβλέπει την ανάπτυξη και οριστικοποίηση ενός πακέτου μέτρων που θα περιλαμβάνει ένα τεχνικό πυλώνα (πρότυπο ναυτιλιακών καυσίμων με μετρήσιμους στόχους μείωσης των εκπομπών ΑτΘ) και ένα οικονομικό πυλώνα (μηχανισμό τιμολόγησης των εκπομπών ΑτΘ). Συμφωνήθηκε επίσης ένας οδικός χάρτης για την οριστικοποίηση και εφαρμογή αυτού του πακέτου μέτρων με ορίζοντα την έγκρισή του την άνοιξη του 2026 και την εφαρμογή του από το 2027.

## 2.3 Η ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΑΙΚΗΣ ΕΝΩΣΗΣ

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας (EU Green Deal) <sup>7</sup>ενέκρινε τον Σεπτέμβριο 2020 το στόχο μείωσης των ανθρακούχων εκπομπών κατά 55 % μέχρι το 2030 σε σύγκριση με το 1990 (σε σχέση με το 40 % που ήταν μέχρι τότε) και επίτευξης μηδενικών εκπομπών έως το 2050 και πρότεινε τον Απρίλιο 2021 το γνωστό πακέτο μέτρων “Fit for 55” που περιέχει δέκα προτάσεις για την εφαρμογή πολιτικής/μέτρων προκειμένου να επιτευχθεί ο στόχος της μείωσης 55 % μέχρι το 2030 και η επίτευξη της κλιματικά ουδέτερης Ευρώπης μέχρι το 2050.

---

<sup>7</sup> COM (2019) 640 final – Ανακοίνωση της Επιτροπής για την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία, Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2019.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/HTML/?uri=CELEX:52019DC0640>

Δύο από αυτές αφορούν την απανθρακοποίηση της ναυτιλίας και είναι : α) η επέκταση του Συστήματος Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (EU Emissions Trading Scheme) και στις θαλάσσιες μεταφορές και β) ο κανονισμός για την αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων από εναλλακτικά καύσιμα με τη θέσπιση ορίων εκπομπών ΑτΘ που καλύπτουν όλο το φάσμα από της παραγωγής των εναλλακτικών καυσίμων μέχρι την τελική χρήση τους στα πλοία (Fuel EU Maritime).

### 2.3.1 Ευρωπαϊκό Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (EU Emissions Trading Scheme – ETS-)

Το Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών -ΣΕΔΕ- της Ευρωπαϊκής Ένωσης (EU Emissions Trading Scheme -ETS-) αποτελεί το κεντρικό εργαλείο της πολιτικής της ΕΕ για το κλίμα και είναι σε ισχύ από το 2005 για τις εκπομπές ενεργοβόρων βιομηχανικών κλάδων και της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ορυκτά καύσιμα και από το 2012 για τις αερομεταφορές. Το ΣΕΔΕ θέτει ανώτατο όριο στις ποσότητες CO<sub>2</sub> που μπορούν να εκπέμπουν η βιομηχανία, οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και οι αερομεταφορές εντός της ΕΕ. Ο συνολικός όγκος των επιτρεπόμενων εκπομπών διανέμεται στις εταιρείες με τη μορφή δωρεάν κατανομής δικαιωμάτων εκπομπών CO<sub>2</sub> (ένα δικαίωμα αντιστοιχεί στις εκπομπές ενός τόνου διοξειδίου του άνθρακα) τα οποία μπορούν να αποτελέσουν και αντικείμενο συναλλαγής. Έτσι οι εταιρείες των κλάδων αυτών, στο πλαίσιο της αρχής “ο ρυπαίνων πληρώνει”, είναι υποχρεωμένες να αγοράζουν δικαιώματα εκπομπής άνθρακα στην Αγορά Δικαιωμάτων Άνθρακα για να μπορούν να παράγουν προϊόντα (χαλυβουργία, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη, κλπ.) ή να προσφέρουν υπηρεσίες (αεροπορικές μεταφορές) που εκπέμπουν αέρια θερμοκηπίου πέραν της αρχικής δωρεάν κατανομής που τους αναλογεί.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση αποφάσισε πολύ πρόσφατα (Απρίλιος 2023) <sup>8</sup> την επέκταση του συστήματος αυτού και στις θαλάσσιες μεταφορές από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2024, έτσι ώστε οι ναυτιλιακές εταιρείες θα αγοράζουν από το 2024 και αυτές δικαιώματα εκπομπής άνθρακα για το 100 % των εκπομπών που εκλύουν τα πλοία άνω των 5.000 τόνων ολικής χωρητικότητας (gross tonnage) για

---

<sup>8</sup> Πρόταση για την τροποποίηση της οδηγίας σχετικά με τη θέσπιση συστήματος εμπορίας αερίων θερμοκηπίου εντός της Ένωσης, Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2021  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021PC0551>

ταξίδια μεταξύ λιμένων της Ευρωπαϊκής Ένωσης και για το 50 % των εκπομπών για ταξίδια προς ή από λιμένα της ΕΕ. Μάλιστα δεν υπάρχουν δωρεάν δικαιώματα εκπομπών για τις θαλάσσιες μεταφορές, αλλά θα κατανεμηθούν 78,4 εκατ. δικαιώματα το 2024 με δημοπρασία, δηλαδή το γνωστό “cap and trade”. Δηλαδή τα διαθέσιμα αυτά δικαιώματα θα δημοπρατούνται από την ΕΕ και οι ναυτιλιακές ή πλοιοκτήτριες εταιρείες θα μπορούν είτε να τα χρησιμοποιούν για να καλύπτουν τις εκπομπές των πλοίων τους, είτε να τα πωλούν σε άλλους πλοιοκτήτες, είτε να τα κρατούν για να καλύψουν τις εκπομπές επομένων ετών. Έτσι θα δημιουργηθεί χρηματιστηριακή αγορά δικαιωμάτων εκπομπών (EU Emission Allowances -EUEAs- ) και το σχετικό αποθετήριο δικαιωμάτων ώστε να υπάρχουν καθημερινές συναλλαγές EUEAs. Στο τέλος κάθε έτους θα γίνεται η εκκαθάριση έτσι ώστε οι πλοιοκτήτες να πρέπει να αγοράσουν δικαιώματα στην εν λόγω αγορά για να καλύψουν τυχόν έλλειμμα για τις εκπομπές του προηγούμενου έτους, δηλαδή θα πληρώνουν για τις εκπομπές CO<sub>2</sub> του 2024 το 2025, του 2025 το 2026 και ούτω καθεξής. Έχει προβλεφθεί μεταβατική περίοδος δύο ετών, δηλαδή θα πληρώνουν για τα έτη 2024 και 2025 για ποσοστά 40 % και 70 % των εκπομπών των πλοίων τους και στη συνέχεια (από το 2026) για το 100 % των εκπομπών τους.

Δεδομένου ότι η τιμή των δικαιωμάτων άνθρακα ανήλθε τα τελευταία 2-3 έτη σε 80-100 ευρώ ανά τόνο, θα υπάρχει πλέον σημαντικό οικονομικό κίνητρο για τη μείωση των εκπομπών. Δεδομένου του συντελεστή εκπομπών 3,1-3,2 για τα συμβατικά καύσιμα (βλέπε Κεφάλαιο 2.2.1), αυτό θα προσθέσει περίπου 250-320 ευρώ ανά τόνο κατανάλωσης συμβατικού καυσίμου (δηλαδή μια αύξηση 30-50 % στο κόστος ανά τόνο) για πλοίο που πλέει μεταξύ λιμανιών της ΕΕ.

Ο κανονισμός ΣΕΔΕ αρχικά θα καλύπτει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα αλλά στη συνέχεια και από το 2026 θα συμπεριληφθούν σε αυτό και οι εκπομπές του μεθανίου και του υποξειδίου του αζώτου.

Στο πλαίσιο αυτό, τροποποιήθηκε ο κανονισμός που αφορά στο σύστημα παρακολούθησης, υποβολής εκθέσεων και επαλήθευσης των εκπομπών CO<sub>2</sub> από τις θαλάσσιες μεταφορές (EU Maritime Monitoring, Reporting and Verification – MRV Regulation) <sup>9</sup>. Το MRV που είναι

---

<sup>9</sup> Κανονισμός (ΕΕ) 2015/757 του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για την παρακολούθηση, την υποβολή εκθέσεων και επαλήθευση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από θαλάσσιες μεταφορές, 2015.  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/?uri=CELEX%3A32015R0757>

υποχρεωτικό από το 2017 , όσο και το Data Collection System (DCS) του IMO – βλέπε Κεφάλαιο 2.2.3 παραπάνω – που είναι υποχρεωτικό από το 2019 για τον υπολογισμό του δείκτη CII, αποτελούν το πρώτο βήμα σε μια ευρύτερη διαδικασία συλλογής και ανάλυσης δεδομένων εκπομπών της παγκόσμιας ναυτιλίας. Μάλιστα επειδή το ETS της ΕΕ αφορά τις εκπομπές ΑτΘ εντός των χωρών της ΕΕ μόνο, έχει προβλεφθεί η ενοποίησή του με ανάλογο σύστημα που θα θεσπίσει ο IMO (ο οικονομικός πυλώνας της στρατηγικής 2023 του IMO, βλέπε Κεφάλαιο 2.2.5 παραπάνω) ώστε να υπάρξει παγκόσμια ευθυγράμμιση του συστήματος εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών για την επίτευξη των στόχων περιορισμού της κλιματικής αλλαγής μέχρι το 2030 και της κλιματικής ουδετερότητας μέχρι το 2050.

### 2.3.2 Κανονισμός για τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων χαμηλών ή μηδενικών ανθρακούχων εκπομπών στις θαλάσσιες μεταφορές (Fuel EU Maritime)

Ο κανονισμός αυτός που προβλέπεται να τεθεί σε ισχύ από την 1<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2025 (δεν έχει ακόμα εγκριθεί από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο) <sup>10</sup>θέτει όρια στην εκπομπή αερίων θερμοκηπίου για το σύνολο της ενέργειας που χρησιμοποιείται από τα πλοία που πλέουν μεταξύ λιμένων της ΕΕ και για το 50 % της ενέργειας σε πλόες μεταξύ της ΕΕ και τρίτων χωρών, δηλαδή για πλόες με αναχώρηση από ή άφιξη σε λιμένα ΕΕ.

Τα όρια αυτά τίθενται σε σχέση με την τιμή αναφοράς που θα υπολογισθεί ως η μέση ένταση αερίων θερμοκηπίου (Greenhouse Gas Intensity) ανά πλοίο για το έτος 2020 σε γραμμάρια CO<sub>2</sub> ανά MJ ενέργειας που χρησιμοποιείται επί του πλοίου και τα όρια αυτά θα πρέπει να μειώνεται ανά πενταετία έως το 2050 ως εξής :

- 2 % μέχρι την 01/01/2025
- 6 % μέχρι την 01/01/2030
- 14,5 % μέχρι την 01/01/2035
- 31 % μέχρι την 01/01/2040

---

<sup>10</sup> Κανονισμός του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου για τη χρήση ανανεώσιμων καυσίμων και καυσίμων χαμηλών ανθρακούχων εκπομπών στις θαλάσσιες μεταφορές, Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2021  
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/HTML/?uri=CELEX:52021PC0562>

- 62 % μέχρι την 01/01/2045
- 80 % μέχρι την 01/01/2050.

Το χαρακτηριστικό είναι ότι οι μετρήσεις των εκπομπών δεν θα περιορίζονται μόνο στην καύση των καυσίμων επί του πλοίου αλλά θα επεκτείνονται και στις εκπομπές για την παραγωγή του τύπου καυσίμου που καταναλώνεται επί του πλοίου, δηλαδή “από την εγκατάσταση εξόρυξης έως τη δεξαμενή του πλοίου” και “από τη δεξαμενή του πλοίου έως τα απόνερα” ώστε να καλύπτονται πλήρως και οι εκπομπές για την παραγωγή των καυσίμων. Και αυτό γιατί αλλιώς θα ήταν πιθανό η υιοθέτηση εναλλακτικών καυσίμων παραγόμενων από μη ανανεώσιμες πηγές (π.χ. αμμωνία ή υδρογόνο από ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ορυκτά καύσιμα) να μειώσει τις εκπομπές της ναυτιλίας μετατοπίζοντάς τις σε άλλους βιομηχανικούς κλάδους.

Επίσης τίθεται η υποχρέωση χρήσης ηλεκτρικής τροφοδότησης από τη ξηρά για κάθε ελλιμενισμένο πλοίο σε λιμένα της ΕΕ ώστε να υπάρχουν μηδενικές εκπομπές από την ενέργεια που χρησιμοποιείται επί του πλοίου.

Κάθε πλοιοκτήτης/διαχειριστής θα υποβάλλει στοιχεία για την κατανάλωση καυσίμων και τις εκπομπές αερίων για κάθε έτος και θα ελέγχεται από εξωτερικό ελεγκτή η συμμόρφωσή του με τα όρια εκπομπών. Σε περίπτωση μη συμμόρφωσης θα επιβάλλεται χρηματική ποινή σε κάθε ελλιμενισμό σε λιμένα ΕΕ. Η έκδοση δε του σχετικού πιστοποιητικού συμμόρφωσης Fuel EU θα είναι προϋπόθεση για να προσεγγίσει λιμένα ΕΕ.

Τα μειούμενα όρια εκπομπών και η υποχρεωτική συμμόρφωση των ναυτιλιακών εταιρειών/πλοίων με αυτά αποσκοπούν να αυξηθεί σταδιακά η χρήση ανανεώσιμων καυσίμων και καυσίμων χαμηλών ανθρακούχων εκπομπών από τα πλοία αρχικά σε πλόες εντός της ΕΕ και σταδιακά σε όλο τον κόσμο αφού εκτιμάται ότι και ο ΔΝΟ θα ακολουθήσει την πολιτική της ΕΕ στα επόμενα 2-3 χρόνια.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΑ ΕΙΔΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΧΑΜΗΛΩΝ Η ΜΗΔΕΝΙΚΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΑΝΘΡΑΚΑ ΚΑΙ ΟΙ ΔΙΑΘΕΣΙΜΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΟΥΣ

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Είναι κοινά παραδεκτό ότι οι στόχοι απανθρακοποίησης της ναυτιλίας που θέτουν οι διεθνείς οργανισμοί είναι τόσο φιλόδοξοι που δεν μπορούν να επιτευχθούν μόνο με μέτρα αύξησης της ενεργειακής απόδοσης των μηχανών και των προπελών των πλοίων ή με μείωση της ταχύτητας πλεύσης τους. Αυτά τα μέτρα υποστηριζόμενα με ψηφιακά εργαλεία ελέγχου και βελτιστοποίησης της λειτουργίας των μηχανών πρόωσης και/ή της υδροδυναμικής σχεδίασης των πλοίων μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση καυσίμων και κατ' επέκταση τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 5 % έως και 20 %. Πέρα από αυτό το όριο, απαιτείται μια ευρείας κλίμακας μετάβαση από τα ορυκτά συμβατικά καύσιμα σε εναλλακτικά καύσιμα χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών άνθρακα.

Η μετάβαση αυτή είναι ανάλογης σημασίας με τη μετάβαση από τα ιστία στο κάρβουνο/ατμοστρόβιλους στις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα και από τον ατμό στο πετρέλαιο/μηχανές εσωτερικής καύσης στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Ενώ όμως οι προηγούμενες ιστορικές μεταβάσεις ήταν προς μια νέα τεχνολογία και ένα νέο καύσιμο, φαίνεται ότι η μετάβαση του 21ου αιώνα θα έχει πολλές ταχύτητες δεδομένου ότι τα εναλλακτικά καύσιμα είναι αρκετά, τα περισσότερα από αυτά έχουν περιορισμούς στη χρήση τους ενώ οι διαθέσιμες τεχνολογίες είναι ακόμα ανώριμες. Οι απαιτούμενες επενδύσεις για την ωρίμανση των τεχνολογιών χρήσης και τη δημιουργία των υποδομών αποθήκευσής τους είναι κολοσσιαίες, ενώ η αβεβαιότητα όσον αφορά τα καύσιμα/τεχνολογία πρόωσης των πλοίων φαίνεται να αναστέλλει την παραγγελία πλοίων με συμβατικά καύσιμα.

Πολλές μελέτες έχουν παραχθεί τα τελευταία χρόνια για τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθε τύπου εναλλακτικού καυσίμου καθώς και για τον οδικό χάρτη της απανθρακοποίησης. Φαίνεται όμως ότι οι περισσότερες συγκλίνουν ότι οι δυνητικά βιώσιμες επιλογές είναι τα καύσιμα χαμηλών ανθρακούχων εκπομπών (υγροποιημένο φυσικό αέριο και μεθανόλη) και τα

ανακυκλούμενα καύσιμα μηδενικών εκπομπών είτε με βιολογική προέλευση (βιοκαύσιμα) είτε με ηλεκτρική προέλευση (αμμωνία, πράσινο υδρογόνο). Παράλληλα εξετάζονται και οι τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης του άνθρακα επί των πλοίων (onboard Carbon Capture and Storage -CCS-) σε συμβατικά καύσιμα αλλά και οι καθαρές λύσεις ηλεκτρικής ενέργειας (μπαταρίες, πυρηνική ενέργεια) ή υβριδικές λύσεις (συνδυασμός μηχανών καύσης με ηλεκτρική ενέργεια), οι οποίες μπορούν να παίξουν ένα συμπληρωματικό ρόλο.

### 3.2 Η ΧΡΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΤΟΝ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΣΤΟΛΟ ΣΗΜΕΡΑ

Στον Πίνακα 1<sup>11</sup> απεικονίζεται με στοιχεία του Ιουνίου 2022 το ποσοστό του παγκόσμιου στόλου σε αριθμό πλοίων και χωρητικότητα (τονάζ) που μπορεί να λειτουργήσει με εναλλακτικά καύσιμα καθώς και τα διαθέσιμα είδη των εναλλακτικών καυσίμων. Το ποσοστό αυτό ανέρχεται σε 1,2 % και 5,5 % αντίστοιχα για το στόλο πλοίων σε λειτουργία, ενώ τα ίδια ποσοστά στα ναυπηγούμενα πλοία σε όλο τον κόσμο ανέρχονται σε 22,1 % και 33,2 % αντίστοιχα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΜΕΡΙΔΙΟ ΤΩΝ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΤΟΝ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ ΣΤΟΛΟ

#### NUMBER OF SHIPS



#### IN % OF GROSS TONNAGE



<sup>11</sup> Στοιχεία από "DNV- Maritime Forecast to 2050 : Energy Transition Outlook 2022"

### 3.3 ΥΓΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ (LNG)

Το LNG είναι φυσικό αέριο (κατά περίπου 90 % μεθάνιο –  $\text{CH}_4$  – και κατά 10 % αιθάνιο –  $\text{C}_2\text{H}_6$  – , προπάνιο –  $\text{C}_3\text{H}_8$  – και βουτάνιο –  $\text{C}_4\text{H}_{10}$  –) το οποίο μετατρέπεται σε υγρή μορφή (σε ατμοσφαιρική πίεση και σε θερμοκρασία  $-162^\circ \text{C}$ ). Ο όγκος του μεταφερόμενου LNG είναι το 1/600 εκείνου της αέριας μορφής του και έτσι η μεταφορά του με τα δεξαμενόπλοια μεταφοράς LNG (LNG carriers) είναι αποτελεσματική. Η ενεργειακή του πυκνότητα (MJoule/λίτρο) είναι περίπου 20-22 MJ/lt που ισοδυναμεί με περίπου 60 % εκείνης του ντίζελ και του μαζούτ (35-36 MJ/lt).

Η χρήση του ως καύσιμο στα πλοία (πέραν των δεξαμενόπλοιων μεταφοράς του) άρχισε το 2017. Όπως φαίνεται από τα στοιχεία του Πίνακα 1 με τα καύσιμα του παγκόσμιου στόλου τον Ιούνιο 2022, σήμερα 293 φορτηγά ή πλοία μεταφοράς containers το χρησιμοποιούν ως καύσιμο (τα υπόλοιπα 630 υπάρχοντα πλοία του Πίνακα είναι LNG carriers). Επίσης από τα 534 πλοία υπό ναυπήγηση με καύσιμο LNG, 167 είναι LNG carriers και 367 είναι πλοία άλλων τύπων για τα οποία έχει προβλεφθεί η δυνατότητα χρήσης LNG παράλληλα με συμβατικά καύσιμα. Έτσι η χρήση του LNG υπολογιζόταν ότι αντιστοιχεί στο 0.8% του συνόλου των υπάρχόντων πλοίων και στο 5.4 % της παγκόσμιας χωρητικότητας (η διαφορά στα ποσοστά οφείλεται στο ότι χρησιμοποιείται κυρίως από μεγάλα πλοία) , ενώ τα αντίστοιχα ποσοστά στα ναυπηγούμενα πλοία ανέρχονται στο 10.8% και 30.2 % αντίστοιχα. Τα παραπάνω ποσοστά περιλαμβάνουν βέβαια και τα πλοία μεταφοράς LNG τα οποία, από την κατασκευή τους, χρησιμοποιούν για την πλεύση τους το καύσιμο του φορτίου τους.

Το LNG είναι το λιγότερο επιβλαβές για το κλίμα ορυκτό καύσιμο γιατί εκπέμπει περίπου 15 % λιγότερο  $\text{CO}_2$  από τα συμβατικά καύσιμα, σύμφωνα με τους ορισμούς του IPCC, η καύση ενός τόνου LNG εκπέμπει 2,75 τόνους  $\text{CO}_2$  αντί 3,2 τόνων που εκλύει η καύση ενός τόνου πετρελαίου (βλέπε σελίδα 10). Χρειάζεται όμως 2,3 φορές περισσότερο χώρο δεξαμενών αποθήκευσης επί του πλοίου από ότι το ντίζελ, ενδεικτικά φαίνεται στον Πίνακα 2 (σύγκριση εναλλακτικών καυσίμων) ότι χρειάζεται 164 κυβικά μέτρα για την αποθήκευση του LNG που είναι απαραίτητο για ένα ταξίδι 1.000 ναυτικών μιλίων ενός φορτηγού 40.000 τόνων έναντι 73 κ.μ. που απαιτούνται για το ίδιο ταξίδι με καύσιμο ντίζελ.

Από την άποψη της ασφάλειας το LNG δεν είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο γιατί για να αναφλεγεί πρέπει πρώτα να αεριοποιηθεί και να αναμιχθεί με ατμοσφαιρικό αέρα και οι κανονισμοί/τεχνολογία είναι γνωστά και εφαρμόζονται στα πλοία μεταφοράς LNG αρκετά χρόνια χωρίς ιστορικό ατυχημάτων.

Είναι όμως ευρέως παραδεκτό ότι το LNG αποτελεί μια βραχυπρόθεσμη λύση περιορισμού των ανθρακούχων εκπομπών ως ένα μεταβατικό καύσιμο-γέφυρα, αλλά δεν αποτελεί κλιματικά ουδέτερο καύσιμο και άρα δεν συγκαταλέγεται στα εναλλακτικά καύσιμα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον ορίζοντα της κλιματικά ουδέτερης ναυτιλίας μέχρι το 2050.

### 3.4 ΜΕΘΑΝΟΛΗ

Η μεθανόλη, γνωστή και ως μεθυλική αλκοόλη με το χημικό τύπο  $\text{CH}_3\text{OH}$ , είναι στις κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος ένα ελαφρύ αλλά εύφλεκτο και τοξικό υγρό που παράγεται βιομηχανικά από το φυσικό αέριο, το διοξείδιο του άνθρακα ή ορισμένες μορφές βιομάζας (κυρίως ξύλα).

Τα πλεονεκτήματα του καυσίμου μεθανόλης για τις θαλάσσιες μεταφορές είναι :

**Μειωμένες εκπομπές:** Η καύση της μεθανόλης παράγει χαμηλότερες εκπομπές οξειδίων του θείου ( $\text{SO}_x$ ), οξειδίων του αζώτου ( $\text{NO}_x$ ) και σωματιδίων σε σύγκριση με τα παραδοσιακά ναυτιλιακά καύσιμα. Έχει επίσης τη δυνατότητα για χαμηλότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) από τα συμβατικά καύσιμα στο σύνολο της αλυσίδας από την παραγωγή της έως τα απόνερα του πλοίου που τη χρησιμοποιεί.

**Ενεργειακή πυκνότητα:** Ενώ η μεθανόλη έχει χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα πλοίων, εξακολουθεί να είναι υψηλότερη από ορισμένα άλλα εναλλακτικά καύσιμα, όπως η αμμωνία και το υδρογόνο. Αυτό την καθιστά κατάλληλη για πλοία, ιδίως όταν λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί του χώρου αποθήκευσης, χρειάζεται διπλάσιο χώρο αποθήκευσης επί του πλοίου από τον αντίστοιχο των συμβατικών καυσίμων (βλέπε Πίνακα 2).

**Υπάρχουσα υποδομή:** Η μεθανόλη μπορεί να παραχθεί με τη χρήση καθιερωμένων τεχνολογιών και υφιστάμενων υποδομών. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί δυνητικά να αξιοποιήσει την υπάρχουσα υποδομή για την αποθήκευση, το χειρισμό και τη μεταφορά, μειώνοντας την ανάγκη για

εκτεταμένες τροποποιήσεις. Είναι διαθέσιμη σε μερικά λιμάνια για ανεφοδιασμό καθώς επίσης είναι και βιοδιασπώμενη έχοντας μικρό αντίκτυπο στο περιβάλλον όσο αφορά διαρροή. Επίσης αποθηκεύεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος οπότε δεν υπάρχει και η ανάγκη για ψύξη κατά την αποθήκευσή της.

Στον Πίνακα 1 φαίνεται ότι υπάρχουν 11 πλοία που μπορούν να κινηθούν με μεθανόλη (είναι δεξαμενόπλοια μεταφοράς μεθανόλης που τη χρησιμοποιούν και ως καύσιμο), ενώ από τα 35 πλοία υπό ναυπήγηση, 14 είναι επίσης δεξαμενόπλοια μεθανόλης ενώ 21 είναι πλοία μεταφοράς containers, τα περισσότερα εκ των οποίων είναι κατασκευασμένα ως πλοία διπλού καυσίμου (πετρελαίου και μεθανόλης).

Υπάρχουν όμως οι παρακάτω προκλήσεις και προβληματισμοί για τη χρήση της μεθανόλης :

**Τοξικότητα και ασφάλεια:** Η μεθανόλη είναι τοξική και εγκυμονεί κινδύνους για την ασφάλεια εάν δεν γίνεται σωστός χειρισμός. Πρέπει να υπάρχουν κατάλληλα μέτρα και πρωτόκολλα ασφαλείας για να διασφαλιστεί η ασφαλής αποθήκευση, ο χειρισμός και η μεταφορά καυσίμων μεθανόλης.

**Υποδομή και συμβατότητα:** Η μεθανόλη έχει διαφορετικές απαιτήσεις αποθήκευσης και χειρισμού σε σύγκριση με τα παραδοσιακά ναυτιλιακά καύσιμα. Τα πλοία θα χρειαστούν τροποποιήσεις ή νέα σχέδια για να φιλοξενήσουν συστήματα καυσίμων μεθανόλης και να εξασφαλίσουν τη συμβατότητα με την υπάρχουσα υποδομή.

**Παραγωγή μεθανόλης:** Η μεθανόλη μπορεί να παραχθεί από ορυκτά καύσιμα, γεγονός που εγείρει ανησυχίες σχετικά με τις σχετικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Για τον μετριασμό αυτού του προβλήματος, θα ήταν απαραίτητη η παραγωγή ανανεώσιμης μεθανόλης από βιώσιμες πηγές ή μέσω τεχνολογιών δέσμευσης και αξιοποίησης του άνθρακα.

**Αποδοτικότητα καυσίμου:** Η μεθανόλη έχει χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με τα συμβατικά ναυτιλιακά καύσιμα, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερη κατανάλωση καυσίμου. Τα πλοία θα πρέπει να βελτιστοποιηθούν για την καύση μεθανόλης ώστε να μεγιστοποιηθεί η αποδοτικότητα και να ελαχιστοποιηθεί ο αντίκτυπος στη συνολική απόδοση του πλοίου.

**Ρυθμιστικό πλαίσιο:** Η χρήση της μεθανόλης ως ναυτιλιακού καυσίμου απαιτεί την ανάπτυξη κατάλληλων κανονισμών και προτύπων για να εξασφαλιστεί η ασφαλής και βιώσιμη υιοθέτησή της. Αυτό περιλαμβάνει κατευθυντήριες γραμμές για την παραγωγή, την αποθήκευση, τον χειρισμό και τις εργασίες δεξαμενισμού καυσίμων.

Αν και όπως φαίνεται στον Πίνακα 1 υπάρχουν ήδη 11 πλοία που μπορούν να χρησιμοποιήσουν μεθανόλη ως καύσιμο και άλλα 35 υπό ναυπήγηση, πρόκειται στην πραγματικότητα για πιλοτικά πλοία στα πλαίσια ερευνητικών πρωτοβουλιών για την αξιολόγηση της σκοπιμότητας και της πρακτικότητάς της. Η συνεργασία μεταξύ των ενδιαφερόμενων ναυτιλιακών εταιρειών, των ρυθμιστικών φορέων και των φορέων ανάπτυξης της σχετικής τεχνολογίας είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχή εφαρμογή της μεθανόλης ως καυσίμου για τη ναυτιλία, διασφαλίζοντας παράλληλα την ασφάλεια, τα περιβαλλοντικά οφέλη και τη μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα.

### 3.5 ΒΙΟΚΑΥΣΙΜΑ

Τα βιοκαύσιμα παράγονται από τη βιομάζα, δηλαδή από οργανικά φυτικά προϊόντα ή απόβλητα ανθρώπινων δραστηριοτήτων. Κατά την καύση τους παράγουν ανθρακούχες εκπομπές αλλά επειδή είναι οργανικής προέλευσης ο άνθρακας τον οποίο περιέχουν έχει δεσμευθεί από την ατμόσφαιρα κατά την ανάπτυξη της οργανικής ύλης και επιστρέφει σε αυτήν κατά την καύση της, οπότε θεωρητικά το ισοζύγιο εκπομπών CO<sub>2</sub> είναι μηδενικό, στην πράξη βέβαια αυτό σπανίως συμβαίνει.

Υπάρχουν τα πρώτης γενιάς βιοκαύσιμα γνωστά ως SVO (Straight Vegetable Oil) που παράγονται από φυτικά έλαια (πρώτη ύλη οι σπόροι αραβοσίτου, βαμβακιού, σακχαρότευτλων, σόγιας, ελαιοκράμβης, ηλίανθου, σησαμιού κλπ.), τα δεύτερης γενιάς βιοκαύσιμα γνωστά ως FAME (Fatty Acid Methyl Ester) και HVO (Hydro-treated Vegetable Oil) που παράγονται από επεξεργασία υπολειμμάτων/αποβλήτων φυτικών ελαίων και ζωικών λιπών και τα τρίτης γενιάς που παράγονται από μικροοργανισμούς όπως οι άλγες (φύκια). Δεδομένου ότι η μαζική παραγωγή βιοκαυσίμων πρώτης γενιάς είναι ανταγωνιστική προς την ικανοποίηση της ανθρώπινης ανάγκης για διατροφή, η τεχνολογία στρέφεται κυρίως στα δεύτερης και τρίτης γενιάς.

Τα βιοκαύσιμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν αντί των ορυκτών καυσίμων ή να αναμιχθούν με αυτά στους κινητήρες εσωτερικής καύσης των πλοίων. Οι εκπομπές από την καύση τους ποικίλλουν ανάλογα με τη βιομάζα από την οποία προέρχονται και τον κύκλο ζωής της. Γενικά η μείωση των εκπομπών άνθρακα μπορεί να είναι έως και 50 % σε σχέση με το πετρέλαιο αλλά οι εκπομπές NOx μπορεί να είναι ίδιες ή και οριακά υψηλότερες από εκείνες του ντίζελ.

Επειδή τα βιοκαύσιμα έχουν περίπου την ίδια ενεργειακή πυκνότητα και τις ίδιες απαιτήσεις για χώρο αποθήκευσης επί των πλοίων με τα υπάρχοντα ναυτιλιακά καύσιμα ενώ η τεχνολογία καύσης τους είναι γνωστή, θα μπορούσαν να υποκαταστήσουν τα συμβατικά καύσιμα. Το βασικό πρόβλημά τους είναι όμως η ύπαρξη της αναγκαίας βιώσιμης βιομάζας για την παραγωγή τους και η διαθεσιμότητά τους στα διάφορα λιμάνια. Το πιο πιθανό σενάριο είναι διάφοροι τύποι βιοκαυσίμων (όπως το βιοντίζελ (bio-MGO) ή το bio-LNG) να χρησιμοποιούνται σε ανάμιξη με ορυκτά καύσιμα και γι' αυτό δεν αναμένεται να αποτελέσουν μακροπρόθεσμη λύση για την κατάργηση των ανθρακούχων εκπομπών της ναυτιλίας.

### 3.6 ΑΜΜΩΝΙΑ

Η αμμωνία (χημικός τύπος  $\text{NH}_3$ ) έχει κερδίσει την προσοχή ως δυνητικό καύσιμο για τη ναυτιλία λόγω της δυνατότητάς της να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Ως εναλλακτική λύση στα παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα, η αμμωνία έχει πολλά πλεονεκτήματα, όπως η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, η ευκολία παραγωγής και η καθιερωμένη υποδομή για το χειρισμό και τη μεταφορά καθώς και ταχύτητα και ευκολία ανεφοδιασμού. Τα πλεονεκτήματα του καυσίμου αμμωνίας για τη ναυτιλία είναι:

**Μειωμένες εκπομπές:** Η αμμωνία δεν περιέχει άνθρακα και, όταν καίγεται, παράγει μόνο άζωτο και νερό ως παραπροϊόντα, πράγμα που σημαίνει ότι δεν εκπέμπει διοξείδιο του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) ή άλλα αέρια του θερμοκηπίου που ευθύνονται για την κλιματική αλλαγή.

**Μέτρια ενεργειακή πυκνότητα:** Ενώ υστερεί σε ενεργειακή πυκνότητα του LNG και της μεθανόλης, έχει υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με το υδρογόνο, γεγονός που την καθιστά βιώσιμη επιλογή για μεταφορές μεγάλων αποστάσεων όπου η ενεργειακή πυκνότητα

είναι ζωτικής σημασίας ( η ενεργειακή της πυκνότητα είναι ισοδύναμη με περίπου 50 % εκείνης του ντίζελ – 18 MJ/λίτρο έναντι 36 MJ/λίτρο).

**Εγκατεστημένη υποδομή:** Η υπάρχουσα υποδομή για την παραγωγή, αποθήκευση και μεταφορά αμμωνίας που χρησιμοποιείται στην χημική βιομηχανία μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για τον ανεφοδιασμό των πλοίων με καύσιμα, μειώνοντας ενδεχομένως την ανάγκη για σημαντικές επενδύσεις σε υποδομές. Τέλος για την αποθήκευση της χρειάζεται μόνο ψύξη.

Υπάρχουν όμως και προκλήσεις και προβληματισμοί σε σχέση με τη χρήση της αμμωνίας :

**Ασφάλεια:** Η αμμωνία είναι τοξική και μπορεί να είναι επικίνδυνη για το χειρισμό και τη μεταφορά. Θα πρέπει να υπάρχουν επαρκή μέτρα και πρωτόκολλα ασφαλείας για να διασφαλιστεί η ασφαλής αποθήκευση, χειρισμός και μεταφορά καυσίμων αμμωνίας.

**Παραγωγή αμμωνίας:** Οι σημερινές διαδικασίες παραγωγής αμμωνίας βασίζονται κυρίως στο LNG, άρα μπορούν να οδηγήσουν σε σημαντικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Η παραγωγή πράσινης ή ουδέτερης ως προς τον άνθρακα αμμωνίας με ηλεκτρόλυση είναι τεχνολογικά εφικτή αλλά δεν είναι ακόμη οικονομικά βιώσιμη.

**Αποθήκευση και υποδομές:** Η αμμωνία έχει διαφορετικές απαιτήσεις αποθήκευσης και χειρισμού σε σύγκριση με τα παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα. Η μετασκευή υφιστάμενων πλοίων ή η κατασκευή νέων πλοίων ικανών να αποθηκεύουν και να χρησιμοποιούν με ασφάλεια καύσιμα αμμωνίας θα απαιτούσε σημαντικές επενδύσεις και τροποποιήσεις υποδομών καθώς χρειάζεται 4 φορές μεγαλύτερο χώρο αποθήκευσης από τα αντίστοιχης ενέργειας συμβατικά καύσιμα.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η χρήση πράσινης αμμωνίας ως καυσίμου για τη ναυτιλία βρίσκεται ακόμη σε φάση έρευνας και ανάπτυξης, δεδομένου ότι δεν υπάρχει ακόμη σε εμπορική λειτουργία μηχανές εσωτερικής καύσης αμμωνίας. Βέβαια αρκετά πιλοτικά έργα και πρωτοβουλίες βρίσκονται σε εξέλιξη για τη διερεύνηση της σκοπιμότητας, της ασφαλείας και της πρακτικότητας της χρήσης της αμμωνίας ως ναυτιλιακού καυσίμου. Τα ρυθμιστικά πλαίσια, τα διεθνή πρότυπα και η συνεργασία του κλάδου είναι απαραίτητα για να διασφαλιστεί η ασφαλής και βιώσιμη υιοθέτηση του καυσίμου αμμωνίας στη ναυτιλία.



### 3.7 ΥΔΡΟΓΟΝΟ

Η καύση του υδρογόνου ως καύσιμο στις μηχανές εσωτερικής καύσης παράγει μηδενικές εκπομπές άνθρακα και, στο βαθμό που η παραγωγή του δεν προέρχεται από ορυκτά καύσιμα (άνθρακα ή φυσικό αέριο) αλλά από την ηλεκτρόλυση του νερού με χρήση ανανεώσιμης ηλεκτρικής ενέργειας, είναι κλιματικά ουδέτερο. Επίσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κυψέλες καυσίμου, όπου το υδρογόνο μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια με μια σχετικά ώριμη τεχνολογία.

Ενώ το υδρογόνο έχει τεράστιες δυνατότητες ως καύσιμο μηδενικών εκπομπών άνθρακα, υπάρχουν προκλήσεις και προβληματισμοί που αποτρέπουν για την ευρεία υιοθέτησή του ως εναλλακτικό καύσιμο στη ναυτιλία:

**Αποθήκευση και υποδομές:** Το υδρογόνο έχει χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα κατ' όγκο, πράγμα που σημαίνει ότι απαιτεί μεγάλες δεξαμενές αποθήκευσης ή συστήματα συμπιεσμένης αποθήκευσης. Η κατασκευή και η συντήρηση της απαραίτητης υποδομής υδρογόνου, συμπεριλαμβανομένων των εγκαταστάσεων αποθήκευσης, των δικτύων διανομής και των σταθμών ανεφοδιασμού, μπορεί να είναι εξαιρετικά δαπανηρή και δύσκολη καθώς χρειάζεται 8 φορές μεγαλύτερο όγκο για παραγωγή ίδιας ποσότητας ενέργειας με τα ορυκτά καύσιμα και η αποθήκευσή σε υγρή μορφή γίνεται με κρυογενική ψύξη στους -253 βαθμούς Κελσίου (βλέπε Πίνακα 2 της σύγκρισης των εναλλακτικών καυσίμων).

**Παραγωγή και προμήθεια:** Η κλιμάκωση της παραγωγής υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της βιωσιμότητάς του. Η καθιέρωση αξιόπιστων και οικονομικά αποδοτικών μεθόδων παραγωγής και η εξασφάλιση σταθερής προμήθειας ανανεώσιμου υδρογόνου είναι ουσιώδεις παράγοντες.

**Ασφάλεια:** Το υδρογόνο είναι εξαιρετικά εύφλεκτο και απαιτεί ειδικά μέτρα ασφαλείας κατά το χειρισμό, την αποθήκευση και τη μεταφορά. Πρέπει να αναπτυχθούν και να τηρηθούν τα κατάλληλα πρότυπα και κανονισμοί ασφαλείας για να διασφαλιστούν οι ασφαλείς λειτουργίες.

Αρκετές πρωτοβουλίες και πιλοτικά προγράμματα βρίσκονται σε εξέλιξη για τη διερεύνηση της χρήσης του υδρογόνου στη ναυτιλία. Για παράδειγμα, ήδη λειτουργεί ακτοπλοϊκό πλοίο μεταφοράς επιβατών και αυτοκινήτων στη Νορβηγία το οποίο πλέει με συστοιχία κυψελών καυσίμου υδρογόνου και υπάρχουν άλλα δύο υπό ναυπήγηση (βλέπε Πίνακα 1). Τα προγράμματα αυτά έχουν ως στόχο να καταδείξουν τη σκοπιμότητα και τις επιδόσεις του υδρογόνου ως ναυτιλιακού καυσίμου για ταξίδια μικρών αποστάσεων (λόγω των περιορισμών αποθήκευσης του υδρογόνου δεν μπορεί να υποστηρίξει τα ποντοπόρα πλοία μεγάλης διάρκειας ταξιδιών) και να συγκεντρώσουν πολύτιμα δεδομένα για τη βελτιστοποίηση των σχεδίων και των λειτουργιών.

Η υιοθέτηση του υδρογόνου ως ναυτιλιακού καυσίμου απαιτεί επίσης υποστηρικτικά ρυθμιστικά πλαίσια και πολιτικές. Οι κυβερνήσεις και οι διεθνείς οργανισμοί διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στην παροχή κινήτρων, στην προώθηση της έρευνας και της ανάπτυξης και στη θέσπιση προτύπων και κανονισμών για τη διευκόλυνση της πράσινης μετάβασης της ναυτιλίας με βάση το υδρογόνο.

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ενώ το υδρογόνο υπόσχεται πολλά ως εναλλακτικό καύσιμο, η εφαρμογή του σε μεγάλη κλίμακα στη ναυτιλία βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο. Απαιτούνται περαιτέρω τεχνολογικές εξελίξεις, ανάπτυξη υποδομών και συνεργατικές προσπάθειες για να ξεπεραστούν οι προκλήσεις και να ξεκλειδωθεί το πλήρες δυναμικό του υδρογόνου ως ναυτιλιακού καυσίμου.

### 3.8 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΔΕΣΜΕΥΣΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΑΝΘΡΑΚΑ (CCS)

Οι τεχνολογίες αυτές αποσκοπούν στο διαχωρισμό του διοξειδίου του άνθρακα από τα άλλα αέρια κατά την παραγωγή του με χημικές διεργασίες, τη δέσμευσή του επί του πλοίου και την μετέπειτα μεταφορά του με πλοίο ή μέσω χερσαίου αγωγού από το λιμάνι εκφόρτωσής του σε τοποθεσία αποθήκευσής του που συνήθως γίνεται μέσω έγχυσής του σε υπεράκτιο εξαντλημένο υπόγειο κοίτασμα πετρελαίου ή φυσικού αερίου ή σε γεωλογικούς σχηματισμούς (αλατούχοι υδροφόροι ορίζοντες) μεγάλου βάθους. Το δεσμευθέν CO<sub>2</sub> μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου ή στη χημική βιομηχανία αντί να αποθηκευτεί μόνιμα, οπότε τότε μιλάμε για τεχνολογίες δέσμευσης και χρησιμοποίησης άνθρακα (Carbon Capture Utilization and Storage – CCUS).

Αν και οι τεχνολογίες αυτές είναι γνωστές από τη δεκαετία του 1980 και έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί για τη δέσμευση του άνθρακα σε βιομηχανίες και τη μετέπειτα χρησιμοποίησή του σε εγκαταστάσεις ανάκτησης πετρελαίου σε πετρελαιοπηγές στις Ηνωμένες Πολιτείες (λειτουργούν συνολικά 21 τέτοιες εγκαταστάσεις παγκοσμίως), η ανάπτυξή τους σε πλοίο ώστε να επιτρέπεται η συνέχιση της χρήσης συμβατικού ναυτιλιακού καυσίμου σε συνδυασμό με τη δέσμευση του παραγόμενου CO<sub>2</sub> επί του ίδιου του πλοίου (αναφέρεται συχνά ως χρήση μπλέ καυσίμων) δεν έχει ακόμα γίνει δυνατή. Επιπλέον οι τεχνολογίες αυτές είναι πολύ ευαίσθητες στην περιεκτικότητα των ναυτιλιακών καυσίμων, ενώ απαιτείται κατανάλωση επιπρόσθετης ενέργειας για τη δέσμευση του συνόλου των εκπομπών. Παράλληλα απαιτείται επάρκεια χώρου για την αποθήκευση του CO<sub>2</sub> επί του πλοίου που δεν είναι διαθέσιμος στα περισσότερα είδη πλοίων.

### 3.9 ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟ ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ

Η κίνηση πλοίων με καθαρή ηλεκτρική ενέργεια μέσω μπαταριών είναι λύσεις που εφαρμόζονται κύρια σε μικρά σκάφη και ενδείκνυνται για ταξίδια μικρών αποστάσεων. Στον Πίνακα 1 της χρήσης εναλλακτικών καυσίμων από υπάρχοντα πλοία και πλοία υπό ναυπήγηση, φαίνεται ότι 396 πλοία λειτουργούσαν ήδη τον Ιούνιο 2022 με αυτή την τεχνολογία και άλλα 417 ήταν υπό ναυπήγηση, αλλά η σημασία τους σε όρους ολικής χωρητικότητας είναι αμελητέος (0.06 % και 0.02 % του συνόλου αντίστοιχα). Πρόκειται κύρια για ακτοπλοϊκά φέρρις μεταφοράς επιβατών από/σε νησιά της Σκανδιναβίας που λειτουργούν σε αυστηρότατο “πράσινο” κανονιστικό περιβάλλον, όπου η ηλεκτροκίνηση έχει επεκταθεί και σε ορισμένες περιπτώσεις εξετάζεται και η χρήση κυψελών υδρογόνου ως καυσίμου.

### 3.10 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΙΔΩΝ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

Στον παρακάτω Πίνακα 2 παρουσιάζεται σχηματικά η σύγκριση των κύριων εναλλακτικών καυσίμων όσον αφορά βασικά χαρακτηριστικά τους, όπως είναι η θερμοκρασία, ο απαιτούμενος χώρος αποθήκευσης, τα διαθέσιμα ή υπό ανάπτυξη πρωτόκολλα ασφαλείας και η δυνατότητα εφαρμογών τους στη βάση τεχνολογιών που είναι σήμερα ώριμες ή προβλέπεται να ωριμάσουν τα επόμενα 5-7 χρόνια (μέχρι το 2030).

ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΕΙΔΩΝ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ

	Ναυτιλιακό Ντίζελ (Marine Gasoil - MGO)	Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο (LNG)	Μεθανόλη	Πράσινη Αμμωνία	Πράσινο Υδρογόνο
Ανθρακούχες εκπομπές καυσίμου	Ορυκτό καύσιμο, υψηλές εκπομπές CO <sub>2</sub>	Ορυκτό καύσιμο, υψηλές εκπομπές CO <sub>2</sub>	Χαμηλές εκπομπές CO <sub>2</sub>	Μηδενικές εκπομπές CO <sub>2</sub>	Μηδενικές εκπομπές CO <sub>2</sub>
Θερμοκρασία για υγρή αποθήκευση	Περιβάλλοντος	-162° C	Περιβάλλοντος	-34° C	-253 ° C
Απαιτούμενος όγκος αποθήκευσης για πλεύση 1.000 ν.μιλίων για ένα φορτηγό 40.000 τόνων	73 κυβικά μέτρα	164 κυβικά μέτρα (2,3 φορές X MGO)	169 κυβικά μέτρα (2,3 φορές X MGO)	299 κυβικά μέτρα (4,1 φορές X MGO)	555 κυβικά μέτρα (7,6 φορές X MGO)
Ασφάλεια χρήσης/Πρωτόκολλα για χρήση στα πλοία	Σχετικά ασφαλές	Σχετικά ασφαλές	Ασφαλές υπό προϋποθέσεις	Υπό ανάπτυξη πρωτόκολλα ασφαλείας	Δεν υπάρχουν πρωτόκολλα ασφαλείας
Ενδεδειγμένη εφαρμογή	Μικρά και ποντοπόρα ταξίδια	Μικρά και ποντοπόρα ταξίδια	Μικρά και ποντοπόρα ταξίδια	Μικρά και ποντοπόρα ταξίδια	Μικρά ταξίδια

Υψηλής απόδοσης
  Αποδεκτό
  Προβληματικό

Προκύπτει έτσι σαφώς η προβλεπόμενη σειρά ωρίμανσης της χρήσης εναλλακτικών καυσίμων, με τη μεθανόλη να είναι σαφώς πιο ώριμη από ότι η αμμωνία και το υδρογόνο. Αυτή όμως η σύγκριση δε λαμβάνει υπ' όψη της μια άλλη σημαντική παράμετρο που είναι οι διαθέσιμες υποδομές για την αποθήκευση και διανομή των καυσίμων αυτών στα διάφορα λιμάνια του κόσμου καθώς και τις χρηματοοικονομικές απαιτήσεις για την ανάπτυξή τους που συνδέονται ευθέως με τη στενά οικονομική αποδοτικότητα της χρήσης τους, δηλαδή τις προβλεπόμενες τελικές τιμές διάθεσής τους στα πλοία και τις πολιτικές επιδοτήσεων (μέσω κινήτρων και αντικινήτρων) που θα εφαρμοσθούν σε ευρωπαϊκό και παγκόσμιο επίπεδο.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΟΠΤΙΚΗ ΤΩΝ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ ΚΑΙ ΟΙ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ ΤΗΣ ΠΑΓΚΟΣΜΙΑΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΚΗΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ

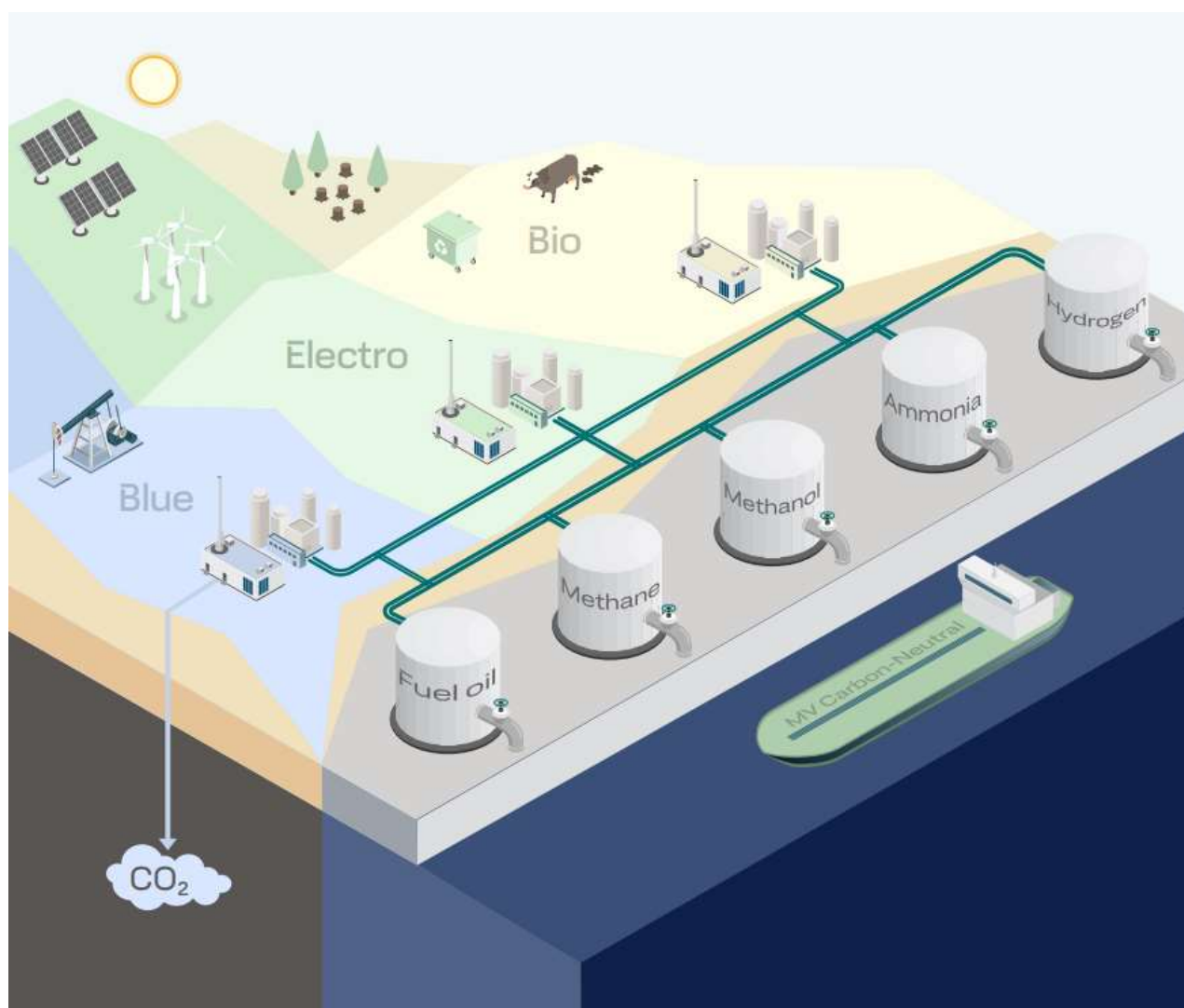
Με βάση την ώθηση που δίνουν οι σταδιακά εφαρμοζόμενοι νέοι κανονισμοί του ΔΝΟ και της ΕΕ, η μετάβαση στην πράσινη ναυτιλία (που είναι στην ουσία της ενεργειακή και τεχνολογική μετάβαση) φαίνεται ότι έχει αρχίσει. Οι περισσότερες πλέον παραγγελίες για νέες ναυπηγήσεις ποντοπόρων πλοίων περιλαμβάνουν τη δυνατότητα των μηχανών τους να λειτουργούν, πέραν του πετρελαίου, με εναλλακτικό καύσιμο (κυρίως με LNG), ενώ οι μεγαλύτεροι παίκτες της παγκόσμιας ναυτιλίας αρχίζουν να δεσμεύουν σημαντικά ποσά για την έρευνα και ανάπτυξη ασφαλών και οικονομικά αποδοτικών κλιματικά ουδέτερων (με μηδενικές ανθρακούχες εκπομπές) καυσίμων και των σχετικών τεχνολογιών. Αυτές οι επενδύσεις δεν αρκούν όμως όσο δεν αντιμετωπίζεται και το πρόβλημα της ευρείας διαθεσιμότητας των εναλλακτικών καυσίμων τουλάχιστον στα λιμάνια της υφηγίου με τις συχνότερες προσεγγίσεις πλοίων. Ήδη συζητείται η προώθηση πράσινων ναυτιλιακών διαδρόμων που θα επιτρέπουν τη λειτουργία της πράσινης ναυτιλίας μεταξύ λιμανιών που θα υποστηρίζουν τη χρήση εναλλακτικών καυσίμων.

Οι λύσεις στο ολιστικό πρόβλημα της προώθησης της πράσινης ναυτιλίας με ορίζοντα το 2050, δεδομένων των κολοσσιαίων επενδύσεων που θα απαιτηθούν, δεν μπορεί να προέλθουν παρά μόνο από τη συνεργασία της ναυτιλιακής βιομηχανίας με την παγκόσμια ενεργειακή βιομηχανία, δεδομένου ότι τα βιώσιμα εναλλακτικά καύσιμα (τα οποία θα παράγονται είτε από βιομάζα, είτε από ηλεκτρική ενέργεια που θα προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές, είτε θα είναι ορυκτά καύσιμα που θα δεσμεύουν και θα αποθηκεύουν το εκλυόμενο CO<sub>2</sub>) πρέπει να διοχετευθούν/κατανεμηθούν στους κλάδους εκείνους της παγκόσμιας βιομηχανίας με κριτήριο τη μέγιστη μείωση της εκπομπής αερίων θερμοκηπίου.

Υπολογίζεται από μελέτες ότι το 5% της ενέργειας που θα καταναλώνει η ναυτιλία το 2030 θα προέρχεται από εναλλακτικά καύσιμα μηδενικών εκπομπών άνθρακα, το οποίο απαιτεί τεράστιες επενδύσεις σε τεχνολογίες επί του πλοίου αλλά και σε χερσαίες υποδομές. Το ποσοστό αυτό θα αυξάνεται πηγαίνοντας προς το 2050 έτσι ώστε να φθάσει (ή να πλησιάσει) την πλήρη

απανθρακοποίηση της ναυτιλίας το 2050. Στον Πίνακα 3 <sup>12</sup> βλέπουμε το πιθανό μίγμα κλιματικά ουδέτερων καυσίμων/τεχνολογιών που προβλέπεται να χρησιμοποιεί η παγκόσμια ναυτιλία το 2050. Σε αυτόν φαίνεται ότι ουσιαστικά το μίγμα των καυσίμων θα περιέχει τρεις κατηγορίες/οικογένειες εναλλακτικών καυσίμων ανάλογα με τις πηγές/τεχνολογίες παραγωγής τους : βιώσιμη παροχή βιομάζας για την παραγωγή βιοκαυσίμων, ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές για την παραγωγή μεθανόλης/αμμωνίας/υδρογόνου (ηλεκτροκαυσίμων) και τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα για την παραγωγή μπλέ καυσίμων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3: Η ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΦΟΔΙΑΣΤΙΚΗ ΑΛΥΣΙΔΑ ΚΛΙΜΑΤΙΚΑ ΟΥΔΕΤΕΡΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ



<sup>12</sup> Στοιχεία από "DNV- Maritime Forecast to 2050 : Energy Transition Outlook 2022"

Ανεξάρτητα από την πηγή παραγωγής, οι μέθοδοι παραγωγής ποικίλλουν για κάθε τύπο εναλλακτικού καυσίμου, ακόμη και εάν προέρχονται από την ίδια πηγή. Έτσι ένα πλοίο μπορεί να προμηθεύεται τον ίδιο τύπο καυσίμου που θα έχει παραχθεί με διαφορετικές τεχνολογίες από διαφορετικές πηγές. Πέρα από την παραγωγή του, κάθε εναλλακτικό καύσιμο πρέπει να μεταφερθεί και να αποθηκευτεί στα λιμάνια και/ή σε τερματικούς σταθμούς με διαφορετικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Επομένως οι εφοδιαστικές αλυσίδες θα είναι πολλές και πολύπλοκες (όπως απεικονίζονται σχηματικά στον Πίνακα 3) αντί των δύο απλών σημερινών αλυσίδων για το ντίζελ/μαζούτ (άντληση πετρελαίου στην πετρελαιοπηγή, επεξεργασία του στο διυλιστήριο και μεταφορά των 2-3 τύπων καυσίμων στις δεξαμενές των λιμανιών-κόμβων διακίνησης καυσίμων) και για το LNG (εξαγωγή φυσικού αερίου από το κοίτασμα, επεξεργασία υγροποίησής του και μεταφορά του με πλοία στον τερματικό σταθμό διανομής).

Οι ίδιες μελέτες<sup>13</sup> υπολογίζουν ότι χρειάζονται ετήσιες επιπρόσθετες επενδύσεις 10-30 δις. δολαρίων σε πλοία (πέραν των ετήσιων επενδύσεων σε πλοία που ανήλθαν κατά μέσο όρο σε 85 δις. δολάρια την τελευταία δεκαετία) και περίπου 20-90 δις. δολαρίων σε χερσαίες υποδομές για την παραγωγή εναλλακτικών καυσίμων, την αποθήκευση και διανομή τους στα λιμάνια τα επόμενα 25 χρόνια ώστε να επιτευχθεί ο στόχος της πλήρους απανθρακοποίησης της ναυτιλίας μέχρι το 2050. Παράλληλα υπολογίζουν ότι το ετήσιο κόστος των καυσίμων για την παγκόσμια ναυτιλία από περίπου 150 δις. δολάρια σήμερα θα αυξηθεί στα 250-300 δις. δολάρια, δηλαδή θα αυξηθεί μεταξύ 70 και 100 %. Είναι πλέον απόλυτα σαφές ότι η πράσινη και βιώσιμη ναυτιλία θα είναι και ακριβή ναυτιλία.

Εάν σκεφθούμε ότι από τις παραπάνω εναλλακτικές πηγές/τεχνολογίες θα απαιτηθεί ετήσια παράδοση στα πλοία περίπου 270 εκατ. τόνων διαφόρων τύπων καυσίμων, αντιλαμβανόμαστε τη γιγαντιαία πρόκληση τόσο σε χρηματοδοτικό όσο και σε επίπεδο οργάνωσης που έχει μπροστά της η παγκόσμια ναυτιλία και όλοι οι κλάδοι που συνεργάζονται στην εφοδιαστική αλυσίδα της – παραγωγοί ενέργειας, προμηθευτές καυσίμων, ναυπηγεία, κατασκευαστές μηχανών πλοίων, πλοιοκτήτες και ναυλωτές πλοίων, τράπεζες και λοιποί χρηματοδότες της ναυτιλίας, διαχειριστές λιμανιών και τερματικών σταθμών -. Δεν είναι τυχαίο ότι ήδη έχουν σχηματισθεί συμμαχίες

---

<sup>13</sup> Στοιχεία από "DNV- Maritime Forecast to 2050 : Energy Transition Outlook 2022"

ισχυρών παικτών γύρω από σχέδια για την πράσινη ναυτιλία (π.χ. η Συμμαχία Getting to Zero Coalition με πάνω από 150 ναυτιλιακές εταιρείες) ενώ η ΕΕ έχει ήδη διακηρύξει ότι θα προωθήσει μέσω των εσόδων του Συστήματος Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών τη δημιουργία Ταμείου που θα χρηματοδοτήσει τα κράτη μέλη για τη στήριξη με επιδοτήσεις και/ή δάνεια των επενδύσεων αυτών.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΕΞΕΤΑΣΗ ΦΥΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ

### 5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο Κεφάλαιο 3.5 της εργασίας γίνεται αναφορά στα πρώτης γενιάς βιοκαύσιμα, όπως το βιοντίζελ που παράγεται από διάφορους τύπους φυτικών ελαίων. Τα φυτικά έλαια αποτελούνται κατά κύριο λόγο από ένα μείγμα εστέρων των λιπαρών οξέων γνωστών ως τριγλυκερίδια σε ποσοστό 96 - 98%, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό 2 - 4 % αποτελείται από σύνθετα μείγματα δευτερευουσών ενώσεων, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως μη σαπωνοποιήσιμα υλικά. Αυτή η ομάδα των δευτερευόντων συστατικών περιλαμβάνει φωσφολιπίδια, τοκοφερόλες, στερόλες, ρητίνες, υδατάνθρακες, πρωτεΐνες, ιχνοστοιχεία, καθώς και ορισμένες χρωστικές ουσίες, όπως η χλωροφύλλη και τα καροτενοειδή.

Για να επιτευχθεί η παραγωγή βιοντίζελ τα φυτικά έλαια (σογιέλαιο, αραβοσιτέλαιο, βαμβάκέλαιο κλπ.) μετατρέπονται σε εστέρες μέσω μιας διαδικασίας που αποκαλείται μετεστεροποίηση των τριγλυκεριδίων. Η μετεστεροποίηση είναι η αντίδραση κατά την οποία τα τριγλυκερίδια με την προσθήκη αλκοόλης και ενός κατάλληλου καταλύτη μετατρέπονται σε αλκοολεστέρες λιπαρών οξέων (βιοντίζελ) και γλυκερίνη (παραπροϊόν).<sup>14</sup>

Στα πλαίσια μελέτης των φυτικών ελαίων ως προς βασικές ιδιότητές τους (πυκνότητα, ιξώδες, σημείο ροής) και ως προς τα συστατικά τους μέσω φασματοσκοπίας πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές μετρήσεις σε οκτώ (8) δείγματα φυτικών ελαίων (πυρηνέλαιο, σογιέλαιο, αραβοσιτέλαιο, φοινικέλαιο, βαμβάκέλαιο, ελαιοκράμβη, σησαμέλαιο, ηλιέλαιο) στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Καυσίμων και Λιπαντικών της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και στο Εργαστήριο του Ινστιτούτου Γεωενέργειας του Πολυτεχνείου Κρήτης.

---

<sup>14</sup> **Ν.Μπαράκος :** "Κάθετη αξιοποίηση βιομάζας για την παραγωγή βιοντίζελ", Παρουσίαση Agroenergy S.A.  
[http://www.agroenergy.gr/sites/default/files/collaborations/presentation\\_agroenergy\\_biodiesel\\_280713.pdf](http://www.agroenergy.gr/sites/default/files/collaborations/presentation_agroenergy_biodiesel_280713.pdf)

## 5.2 ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΙΞΩΔΟΥΣ

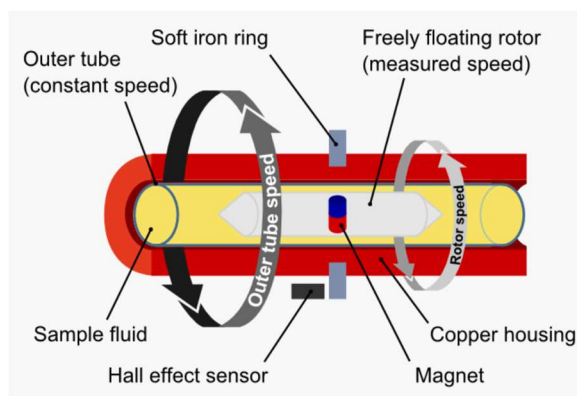
Η μέτρηση της πυκνότητας και του ιξώδους έγιναν με βάση τις πρότυπες μεθόδους EN ISO 12185 και EN ISO 3104 αντίστοιχα και με χρήση της συσκευής SVM 3000 Stabinger Viscometer της Anton Paar. Η συσκευή SVM 3000 προσδιορίζει την τιμή της πυκνότητας σε g/cm<sup>3</sup>, την τιμή του δυναμικού ιξώδους σε milliPascal/sec (centipoise - cP) και μπορεί να υπολογίσει και την τιμή του κινηματικού ιξώδους σε mm<sup>2</sup>/sec (centistokes - cSt).

Ο προσδιορισμός της πυκνότητας δίνει πληροφορίες απαραίτητες στη βιομηχανία, οι οποίες σχετίζονται την απόδοση του παραγόμενου καυσίμου, την ασφάλεια και την προστασία του κινητήρα εσωτερικής καύσης. Ειδικότερα υψηλότερης πυκνότητας βιοκαύσιμα παρέχουν περισσότερη ενέργεια ανά όγκο και άρα υψηλότερη απόδοση, ενώ παράλληλα έχουν υψηλότερο σημείο ανάφλεξης καθιστώντας τα πιο ασφαλή. Αντίθετα χαμηλής πυκνότητας βιοκαύσιμα μπορεί να οδηγήσουν σε προβλήματα καύσης και μειωμένη απόδοση του κινητήρα εσωτερικής καύσης.

Το δυναμικό ιξώδες αποτελεί ένα μέτρο της αντίστασης ενός ρευστού στην παραμόρφωση κατά την κίνηση. Αντίστοιχα το κινηματικό ιξώδες σχετίζεται με την μέτρηση της αντίστασης ενός καυσίμου κατά την διάρκεια της κίνησης, αποτελώντας ένα σημαντικό παράγοντα στην απόδοση των μηχανών εσωτερικής καύσης.

Η μέτρηση της πυκνότητας των φυτικών ελαίων γίνεται με τη βοήθεια ψηφιακού αναλυτή που χρησιμοποιεί ταλαντούμενο σωλήνα σχήματος U, μέσα στον οποίο εισέρχεται το δείγμα, και ένα σύστημα ηλεκτρονικής διέγερσης και μέτρησης της πυκνότητας. Η πυκνότητα προσδιορίζεται σε g/cm<sup>3</sup>.

Η μέτρηση του ιξώδους γίνεται επίσης στην ίδια συσκευή (κελί ιξώδους) που αποτελείται από δυο περιστρεφόμενους ομοαξονικούς κυλίνδρους, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα. Ο εξωτερικός κύλινδρος περιστρέφεται με σταθερή και γνωστή περιστροφική ταχύτητα, ενώ ο εσωτερικός κύλινδρος (ρότορας) παραμένει σταθερός στον άξονα στη διαμήκη θέση του με την βοήθεια ενός μαγνήτη και ενός δαχτυλιδιού από μαλακό σίδηρο.



Τα αποτελέσματα των μετρήσεών μας της πυκνότητας (density) στη θερμοκρασία των 15° C και του κινηματικού ιξώδους (kinematic viscosity) σε διάφορες θερμοκρασίες των οκτώ δειγμάτων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα :

ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΤΙΜΕΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΩΝ ΣΤΟΥΣ 15ο C ΚΑΙ ΚΙΝΗΜΑΤΙΚΟΥ ΙΞΩΔΟΥΣ ΣΕ ΕΥΡΟΣ

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΩΝ

ΔΕΙΓΜΑ ΦΥΤΙΚΟΥ ΕΛΑΙΟΥ	ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ g/cm <sup>3</sup> 15°C	ΙΞΩΔΕΣ 15 °C	ΙΞΩΔΕΣ 20 °C	ΙΞΩΔΕΣ 40 °C	ΙΞΩΔΕΣ 60 °C	ΙΞΩΔΕΣ 80 °C	ΙΞΩΔΕΣ 100 °C
ΠΥΡΗΝΕΛΑΙΟ	0,9180	119,20	91,815	40,470	21,238	12,851	8,576
ΣΟΓΙΕΛΑΙΟ	0,9234	86,906	69,073	32,241	17,820	11,172	7,643
ΑΡΑΒΟΣΙΤΕΛΑΙΟ	0,9227	89,041	70,843	32,773	18,089	11,321	7,763
ΦΟΙΝΙΚΕΛΑΙΟ	0,9153	121,55	94,310	40,753	21,359	12,800	8,482
ΒΑΜΒΑΚΕΛΑΙΟ	0,9218	90,669	74,822	33,142	18,319	11,375	7,738
ΕΛΑΙΟΚΡΑΜΒΗ	0,9202	98,311	76,887	35,452	19,364	12,013	8,133
ΣΗΣΑΜΕΛΑΙΟ	0,9231	98,304	76,669	35,169	19,228	11,863	8,024
ΗΛΙΕΛΑΙΟ	0,9224	90,171	71,161	33,259	18,418	11,529	7,864

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει σαφώς ότι το ιξώδες κάθε ελαίου εξαρτάται από τη θερμοκρασία και συγκεκριμένα μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία.

### 5.3 ΜΕΤΡΗΣΗ ΣΗΜΕΙΟΥ ΡΟΗΣ

Ο προσδιορισμός του σημείου ροής διεξάγεται σύμφωνα με τις διαδικασίες της πρότυπης μεθόδου ASTM D 97 σε ειδική συσκευή. Το δείγμα αφού προηγουμένως θερμανθεί, ψύχεται υπό καθορισμένες συνθήκες και δοκιμάζεται κατά διαστήματα που αντιστοιχούν σε πτώση της θερμοκρασίας κατά 3oC (5oF), για να διαπιστωθεί εάν ρέει. Η κατώτατη θερμοκρασία στην οποία το καύσιμο εξακολουθεί να ρέει, αναφέρεται ως σημείο ροής (pour point).

Η διαδικασία προσδιορισμού του σημείου ροής αποτελείται από τα ακόλουθα βήματα:

1. Το δείγμα εισάγεται στο δοκιμαστικό σωλήνα της συσκευής μέχρι ύψους 51-57 mm. Όπου στη συνέχεια ο σωλήνας πωματίζεται με φελλό που φέρει θερμόμετρο σε κατακόρυφη θέση στο κέντρο του. Το θερμόμετρο βυθίζεται τόσο στο δείγμα ώστε η αρχή του τριχοειδούς να βρίσκεται 3 cm κάτω από την επιφάνεια του δείγματος.
2. Έπειτα ο δοκιμαστικός σωλήνας τοποθετείται μέσα σε λουτρό ψύξης. Όταν το έλαιο έχει ψυχθεί αρκετά και έχει αρχίσει ο σχηματισμός κρυστάλλων παραφίνης, πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή ώστε να μην αναταραχθεί το δείγμα, ούτε να κουνηθεί το θερμόμετρο. Οποιαδήποτε ανατάραξη του σπογγώδους πλέγματος της παραφίνης οδηγεί σε ανακριβή αποτελέσματα.
3. Για την θερμοκρασία των 11 °C πάνω από το αναμενόμενο σημείο ροής και για κάθε 3 °C, ο δοκιμαστικός σωλήνας ανασκώνεται από την θέση του λουτρού, και τίθεται ελαφρά σε κλίση για να παρατηρηθεί εάν το έλαιο εξακολουθεί να ρέει. Όλη αυτή η διαδικασία πρέπει να γίνεται σε λιγότερο από 3 sec. Μόλις το καύσιμο σταματήσει να ρέει, ο δοκιμαστικός σωλήνας τίθεται σε οριζόντια θέση για 5 sec και παρατηρείται προσεκτικά. Εάν το έλαιο κινηθεί μέσα στα 5 sec, τότε ο δοκιμαστικός σωλήνας επανατοποθετείται μέσα στο λουτρό και επαναλαμβάνεται η δοκιμή μόλις η θερμοκρασία πέσει κατά 3 °C.

4. Η δοκιμή επαναλαμβάνεται κατ' αυτόν τον τρόπο, μέχρι το έλαιο να σταματήσει τελείως να κινείται, καθώς ο σωλήνας βρίσκεται σε οριζόντια θέση για 5 sec ακριβώς. Τότε καταγράφεται η ένδειξη του θερμομέτρου και αναφέρεται ως σημείο ροής η θερμοκρασία που είναι κατά 3 °C μεγαλύτερη από τη ένδειξη του θερμομέτρου.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεών μας του σημείου ροής των δειγμάτων παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα :

ΠΙΝΑΚΑΣ 5: ΣΗΜΕΙΑ ΡΟΗΣ ΤΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΦΥΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ

ΔΕΙΓΜΑ ΦΥΤΙΚΟΥ ΕΛΑΙΟΥ	ΣΗΜΕΙΟ ΡΟΗΣ
ΠΥΡΗΝΕΛΑΙΟ	$(-11+3)=-8^{\circ}\text{C}$
ΣΟΓΙΕΛΑΙΟ	$(-12+3)=-9^{\circ}\text{C}$
ΑΡΑΒΟΣΙΤΕΛΑΙΟ	$(-12+3)=-9^{\circ}\text{C}$
ΦΟΙΝΙΚΕΛΑΙΟ	$(-7+3)=-4^{\circ}\text{C}$
ΒΑΜΒΑΚΕΛΑΙΟ	$(-5+3)=-2^{\circ}\text{C}$
ΕΛΑΙΟΚΡΑΜΒΗ	$(-23+3)=-20^{\circ}\text{C}$
ΣΗΣΑΜΕΛΑΙΟ	$(-7+3)=-4^{\circ}\text{C}$
ΗΛΙΕΛΑΙΟ	$(-11+3)=-8^{\circ}\text{C}$

Από τον παραπάνω πίνακα φαίνεται ότι τα σημεία ροής των δειγμάτων είναι παρεμφερή εκτός της ελαιοκράμβης που είναι σημαντικά χαμηλότερο.

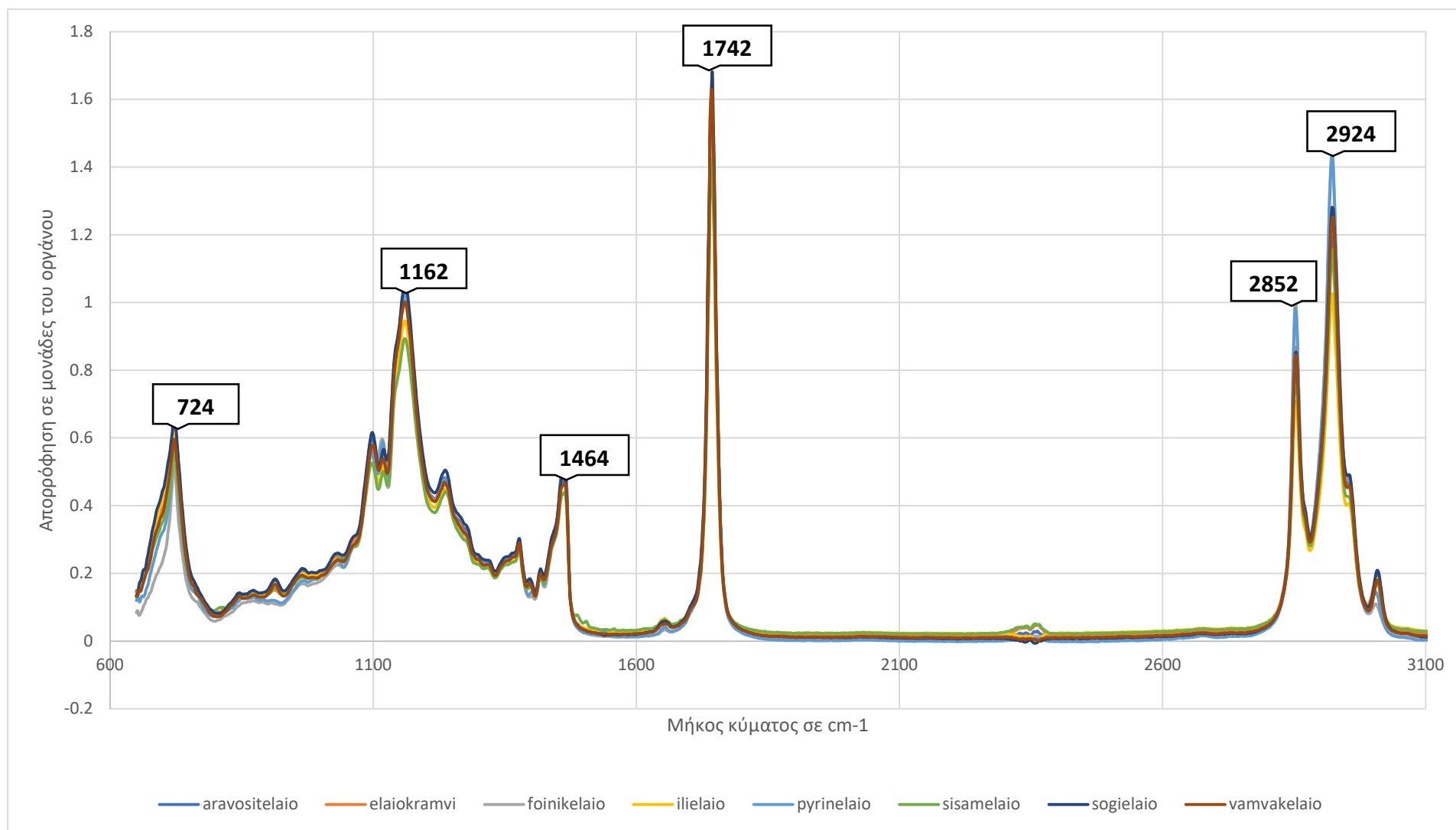
#### 5.4 ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΥΠΕΡΥΘΡΟΥ ΜΕ ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟ FOURIER (FOURIER TRANSFORM INFRARED – FTIR)

Η μέθοδος FTIR χρησιμοποιεί έναν ανιχνευτή υπέρυθρου που καταγράφει την απορρόφηση υπέρυθρου ακτινοβολίας από το δείγμα. Η ακτινοβολία υπέρυθρου είναι χαρακτηριστική των διαφορετικών χημικών δεσμών και λειτουργικών ομάδων (πέραν των τριγλυκεριδίων) που υπάρχουν στα διάφορα έλαια που αν και απαντώνται σε πολύ μικρές ποσότητες (2- 4 % του

βάρους) έχουν μεγάλη σημασία για την ποιότητά τους. Ο αναλυτής Fourier Transform χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του υπέρυθρου φάσματος, προσφέροντας υψηλή ανάλυση και ευαισθησία. Η ανάλυση FTIR μπορεί να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη σύνθεση και την ποιότητα των φυτικών ελαίων.

Η διαδικασία ανάλυσης του ελαίου περιλαμβάνει την τοποθέτηση του υγρού δείγματος απευθείας στο κελί του οργάνου. Καθώς το υπέρυθρο φως διαπερνά το δείγμα, ορισμένοι δεσμοί απορροφούν την ενέργεια σε συγκεκριμένα μήκη κύματος. Η απορρόφηση του υπέρυθρου φωτός από το δείγμα καταγράφεται από τον ανιχνευτή. Η αντίδραση του δείγματος σε διάφορες συχνότητες υπέρυθρων δίνει πληροφορίες σχετικά με τη σύνθεση και τη δομή των χημικών δεσμών. Στη συνέχεια, τα δεδομένα που λαμβάνονται από τον ανιχνευτή υποβάλλονται σε μετασχηματισμό Fourier, που επιτρέπει την ανάλυση της συνιστώσας συχνότητας και την ανάκτηση του υπέρυθρου φάσματος.

Τα αποτελέσματα στα δείγματα των φυτικών ελαίων παρουσιάζονται στο παρακάτω Διάγραμμα 1, το οποίο αποτελεί γραφική παράσταση της έντασης της απορρόφησης (αυθαίρετες μονάδες από 0 έως 2 του αναλυτικού οργάνου) σε σχέση με το μήκος κύματος (wavelength) της ακτινοβολίας σε  $\text{cm}^{-1}$ :



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1: ΦΑΣΜΑΤΑ FTIR ΤΩΝ ΦΥΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ ΟΠΩΣ ΑΥΤΑ ΔΟΘΗΚΑΝ ΑΠΟ ΤΟ ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΟΡΓΑΝΟ**

Για να ερμηνεύσουμε τα αποτελέσματα του FTIR, θα πρέπει πρώτα να προσδιορίσουμε τις λειτουργικές ομάδες εξετάζοντας τις κορυφές στο φάσμα. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, κάθε κορυφή αντιστοιχεί σε έναν συγκεκριμένο τρόπο δόνησης σε ένα μόριο και η ανάλυση της θέσης και του σχήματος των κορυφών μπορεί να παρέχει πληροφορίες σχετικά με την ταυτότητα και τη δομή της ένωσης.

Από τα φάσματα φαίνεται ότι και τα οκτώ δείγματα των φυτικών ελαίων δίδουν τις ίδιες οξείες κορυφές καθιστώντας τα όμοια όσο αφορά τη δομή τους.

Οι μεγαλύτερες σε απορρόφηση κορυφές που σημειώνονται στο Διάγραμμα 1 συσχετίστηκαν με τα είδη των ενώσεων που αντιστοιχούν σύμφωνα με τη βιβλιογραφία <sup>15</sup>. Ο συσχετισμός αυτός εμφανίζεται στον παρακάτω Πίνακα 6.

**ΠΙΝΑΚΑΣ 6: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΕΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΕΙΣ ΤΩΝ ΦΥΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ**

<b>Απορρόφηση (cm-1)</b>	<b>Χαρακτηριστική ομάδα στην οποία αντιστοιχεί</b>
<b>724</b>	δεσμός C-H των αλκινίων ( $-C\equiv C-H$ )
<b>1162</b>	δεσμός C-O των εστέρων
<b>1464</b>	δεσμός C-H των αλκανίων
<b>1742</b>	δεσμός C=O των αλδεϋδών των κετονών και των καρβοξυλικών οξέων
<b>2852</b>	δεσμός C-H των αλκανίων
<b>2924</b>	δεσμός C-H των αλκανίων

<sup>15</sup> Β.Σινάνογλου, Π.Ζουμπουλάκης, Σ.Μπρατάκος : “Φασματοσκοπία Υπερύθρου”, Εργαστήριο Ανάλυσης ΤΕΙ Αθένas, 2016-2017



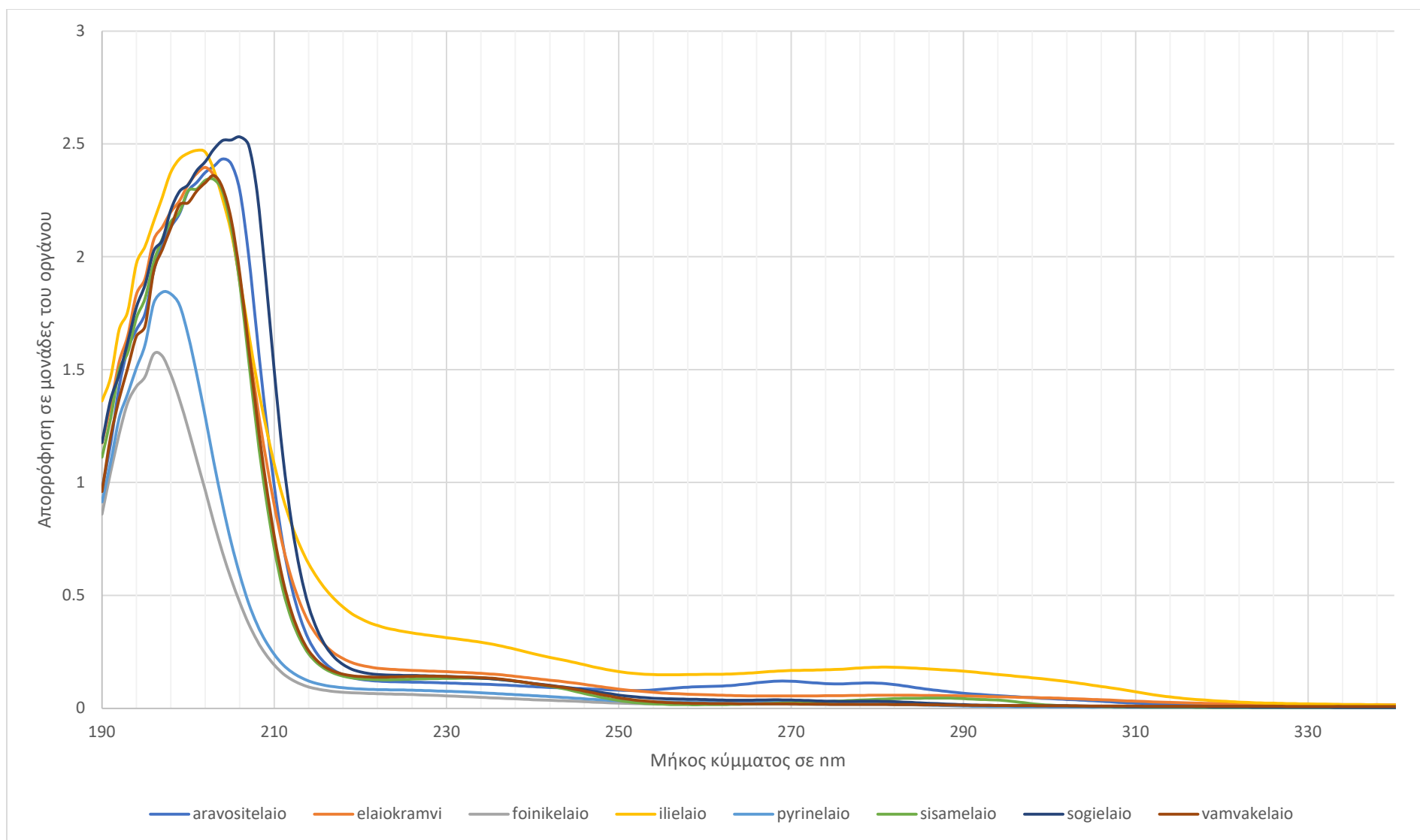
## 5.5 ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΥΠΕΡΙΩΔΟΥΣ – ΟΡΑΤΟΥ (UV-VIS)

Η φασματοσκοπική μέθοδος υπεριώδους (Ultra Violet- UV)- ορατού (Visible- VIS) είναι μια αναλυτική τεχνική που χρησιμοποιεί το εύρος των ορατών και υπεριωδών ακτινών του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος για να μετρήσει την απορρόφηση φωτός από μια ουσία. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της σύνθεσης ενός δείγματος, για τη μελέτη των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων ενός δείγματος και για τον προσδιορισμό της δομής ενός δείγματος. Ο διαλύτης που χρησιμοποιείται στη φασματοσκοπία UV εξαρτάται από τη φύση του δείγματος που αναλύεται και για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, στην περίπτωση μας χρησιμοποιήθηκε το κανονικό εξάνιο. Σημειώνεται ότι ο χρησιμοποιούμενος διαλύτης πρέπει να μην απορροφά στην περιοχή του φάσματος όπου απορροφά το δείγμα. Το υπεριώδες φως (UV) αναλύεται σε μήκη κύματος (wavelength) από 10 nm έως 400 nm, ενώ το ορατό φως (Vis) σε μήκος κύματος από 400 έως 800 nm. ( $1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ μέτρα}$  ή  $1 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-1}$ ).

Χρησιμοποιήσαμε το φασματόμετρο UV-Vis 1900i της εταιρείας Shimadzu. Αυτό αποτελείται από την πηγή ακτινοβολίας η οποία περνά από ένα μονοχρωμάτορα που επιλέγει τα διάφορα μήκη κύματος και συνδέεται άμεσα με το καταγραφικό (ηλεκτρονική οθόνη) του οργάνου ανάλυσης. Η δέσμη του φωτός με τα μονοχρωμάτορα περνά από τη κυψέλη του δείγματος που περιέχει το διάλυμα του ελαίου στο διαλύτη.

Η απορρόφηση της ακτινοβολίας προκαλείται από τη μετάβαση ηλεκτρονίων από τη θεμελιώδη σε διεγερμένες καταστάσεις. Η ποσότητα ενέργειας όμως αυτής της μετάβασης και το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που απορροφάται είναι χαρακτηριστική ιδιότητα των ατόμων μιας ομάδας και όχι μόνο των ηλεκτρονίων των δεσμών. Αλλαγές στη δομή των ατόμων μιας ομάδας προκαλεί μεταβολή της ενέργειας που απορροφάται και της έντασης της απορρόφησης και επομένως μπορούν να ανιχνευθούν διαφορετικές ομάδες οργανικών ενώσεων (χρωμοφόρες ομάδες).

Τα φάσματα των φυτικών ελαίων όπως αυτά δόθηκαν από το όργανο ανάλυσης δίνονται στο Διάγραμμα 2 που παρουσιάζει το διάγραμμα (φάσμα) της έντασης απορρόφησης (αυθαίρετη κλίμακα του οργάνου από 0-3) σε σχέση με το μήκος κύματος (wavelength) σε nm.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2: ΦΑΣΜΑΤΑ ΥΠΕΡΙΩΔΟΥΣ – ΟΡΑΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ (UV-VIS)

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι και στα οκτώ δείγματα των φυτικών ελαίων η μέγιστη απορρόφηση υπεριώδους ακτινοβολίας (UV) παρατηρείται στα μήκη κύματος 190-210 nm. Άρα συμπεραίνουμε ότι και τα οκτώ δείγματα έχουν παρόμοιες χρωμοφόρες ομάδες που δίνουν πανομοιότυπα φάσματα απορρόφησης UV-VIS.

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία <sup>16</sup> η απορρόφηση αυτή προέρχεται κυρίως από δύο συστατικά των ελαίων, τις χλωροφύλλες και τα καροτενοειδή. Η χρήση της φασματοσκοπίας UV-VIS στην ανάλυση φυτικών ελαίων είναι ευρέως διαδεδομένη για τον προσδιορισμό διάφορων συστατικών που επηρεάζουν τις ιδιότητες των ελαίων. Οι συνήθεις εφαρμογές της μεθόδου UV-VIS στα φυτικά έλαια περιλαμβάνουν τον προσδιορισμό των χρωστικών ουσιών που περιέχονται στα φυτικά έλαια όπως τα καροτενοειδή, την παρουσία χλωροφύλλης, καθώς και άλλα συστατικά όπως τα οξείδια που υπάρχουν σε ορισμένα φυτικά έλαια. Η μέθοδος UV-VIS προσφέρει γρήγορα και σχετικά απλά αποτελέσματα, επιτρέποντας την ποσοτική και ποιοτική ανάλυση των συστατικών αυτών σε δείγματα φυτικών ελαίων.

## 5.6 ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ (FLUORESCENCE SPECTROSCOPY)

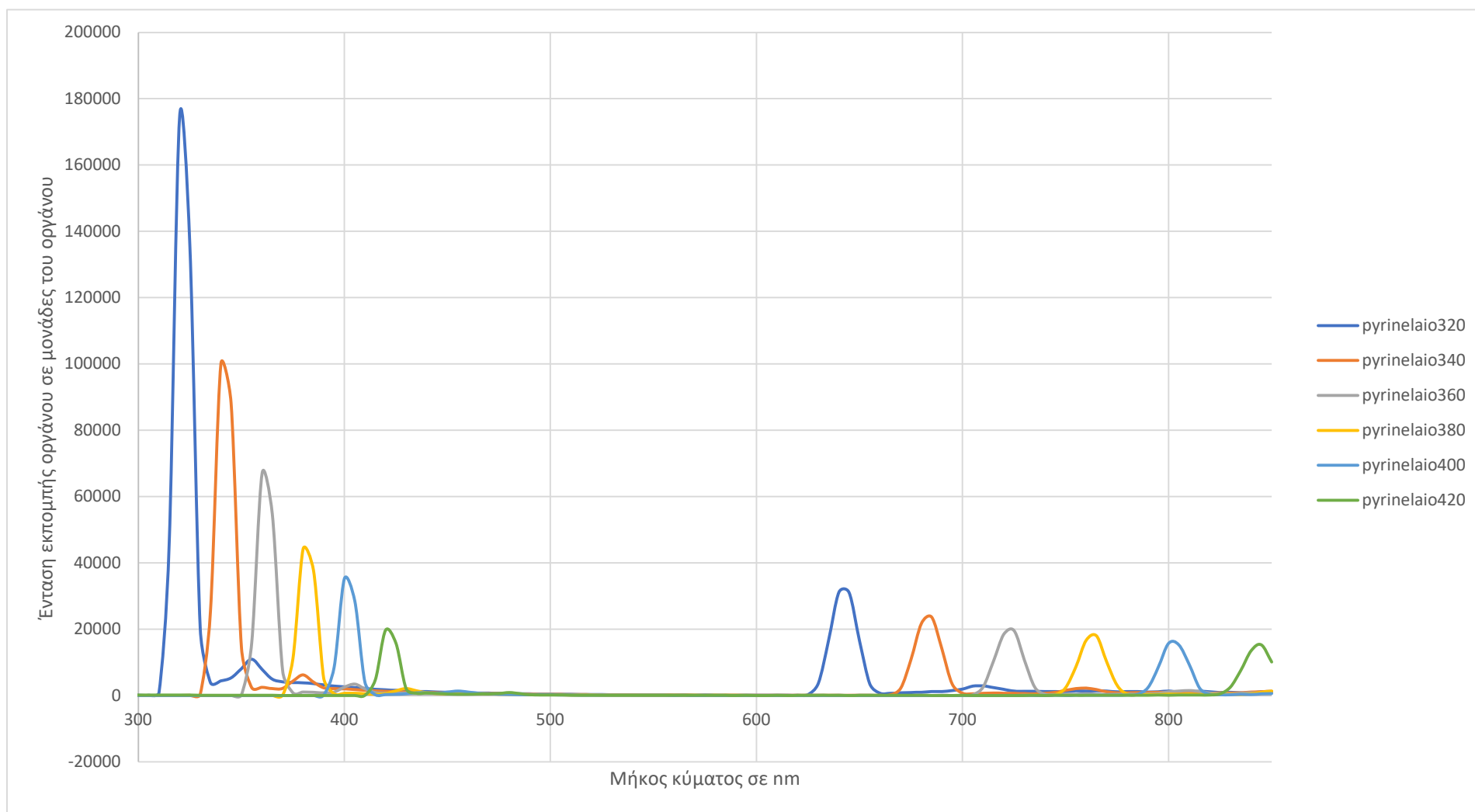
Η φασματοσκοπία φθορισμού είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό και τη μέτρηση του φθορισμού ενός υλικού. Ο φθορισμός είναι η διαδικασία κατά την οποία τα ηλεκτρόνια ενός μορίου απορροφούν ενέργεια και μεταπίπτουν σε μια κατάσταση υψηλότερης ενεργειακής κατάστασης και στη συνέχεια εκπέμπουν αυτήν την ενέργεια ως φως όταν επιστρέφουν στη βασική τους κατάσταση. Στην περίπτωση των φυτικών ελαίων, η φασματοσκοπία φθορισμού εκμεταλλεύεται την παρουσία φυσικών φθοριζόντων συστατικών σε αυτά και χρησιμοποιείται για την ανίχνευσή τους. Αυτά τα συστατικά που εκπέμπουν φως κατά τη διαδικασία του φθορισμού είναι η χλωροφύλλη, τα καροτενοειδή και άλλες ουσίες όπως οι φαινόλες, οι τοκοφερόλες και οι φαιοφυτίνες.

---

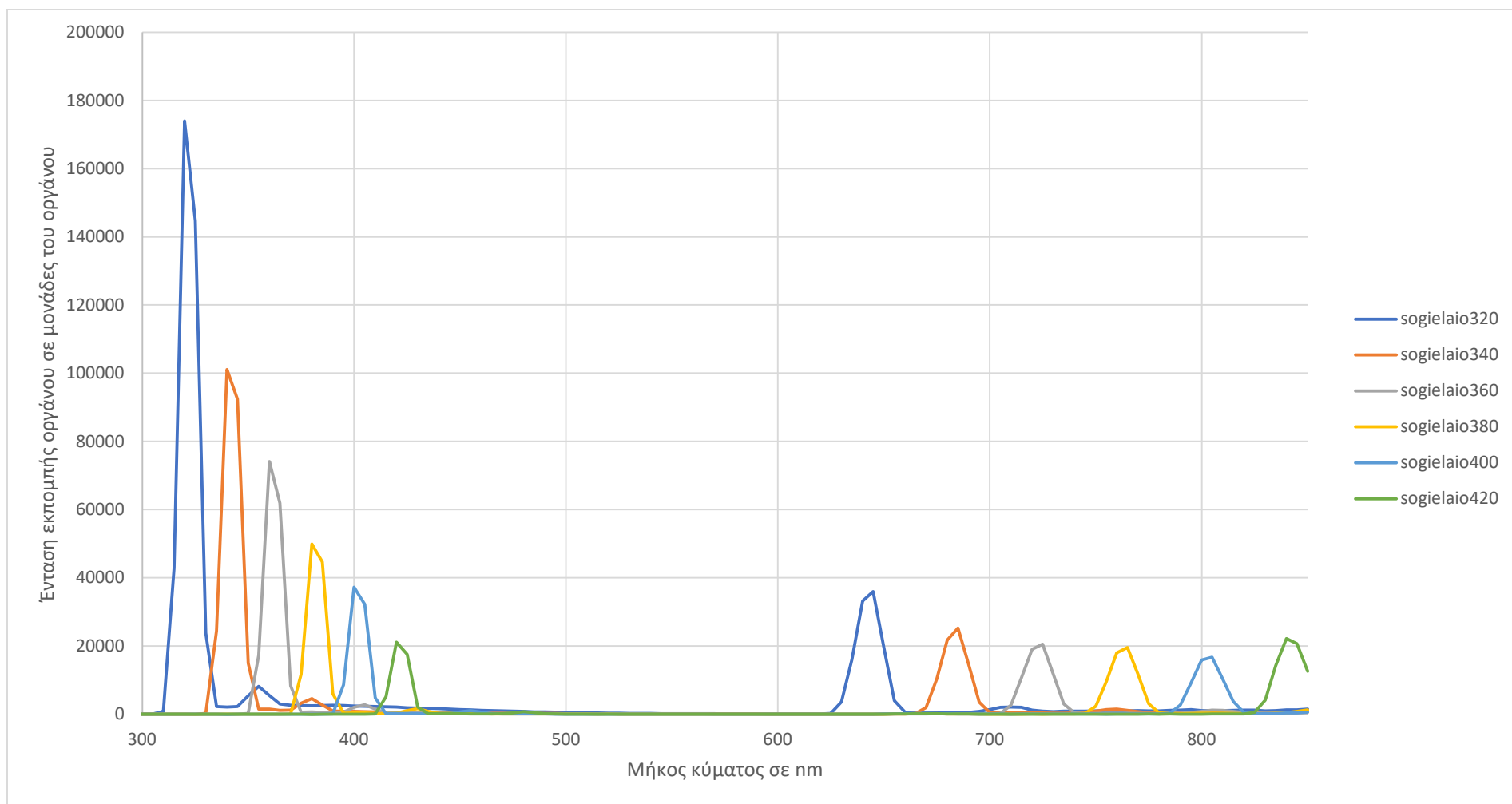
<sup>16</sup> School of Erath Sciences, The Ohio State University, Petroleum Research Center, Kuwait Institute for Scientific Research "Detection of olive oil adulteration by low-field NMR relaxometry and UV-Vis spectroscopy upon mixing olive oil with various edible oils", Grasas y Aceites 68, January-March 2017

Αρχικά το φυτικό έλαιο εκτίθεται σε υπεριώδες φως σε περιοχή UV όπου μπορεί να προκληθεί φθορισμός. Έτσι ορισμένα συστατικά όπως η χλωροφύλλη και τα καροτενοειδή μπορούν να απορροφήσουν το υπεριώδες φως και να εκπέμψουν φως σε υψηλότερη κύμανση κατά τη διαδικασία φθορισμού. Έπειτα ένας ανιχνευτής - φωτοπολλαπλασιαστής (R928)- καταγράφει το φως που εκπέμπεται κατά την διαδικασία του φθορισμού. Τα δεδομένα μετατρέπονται σε ένα φασματογράφημα φθορισμού που μας παρέχει πληροφορίες σχετικά με τα φωτοχημικά χαρακτηριστικά των φυτικών ελαίων.

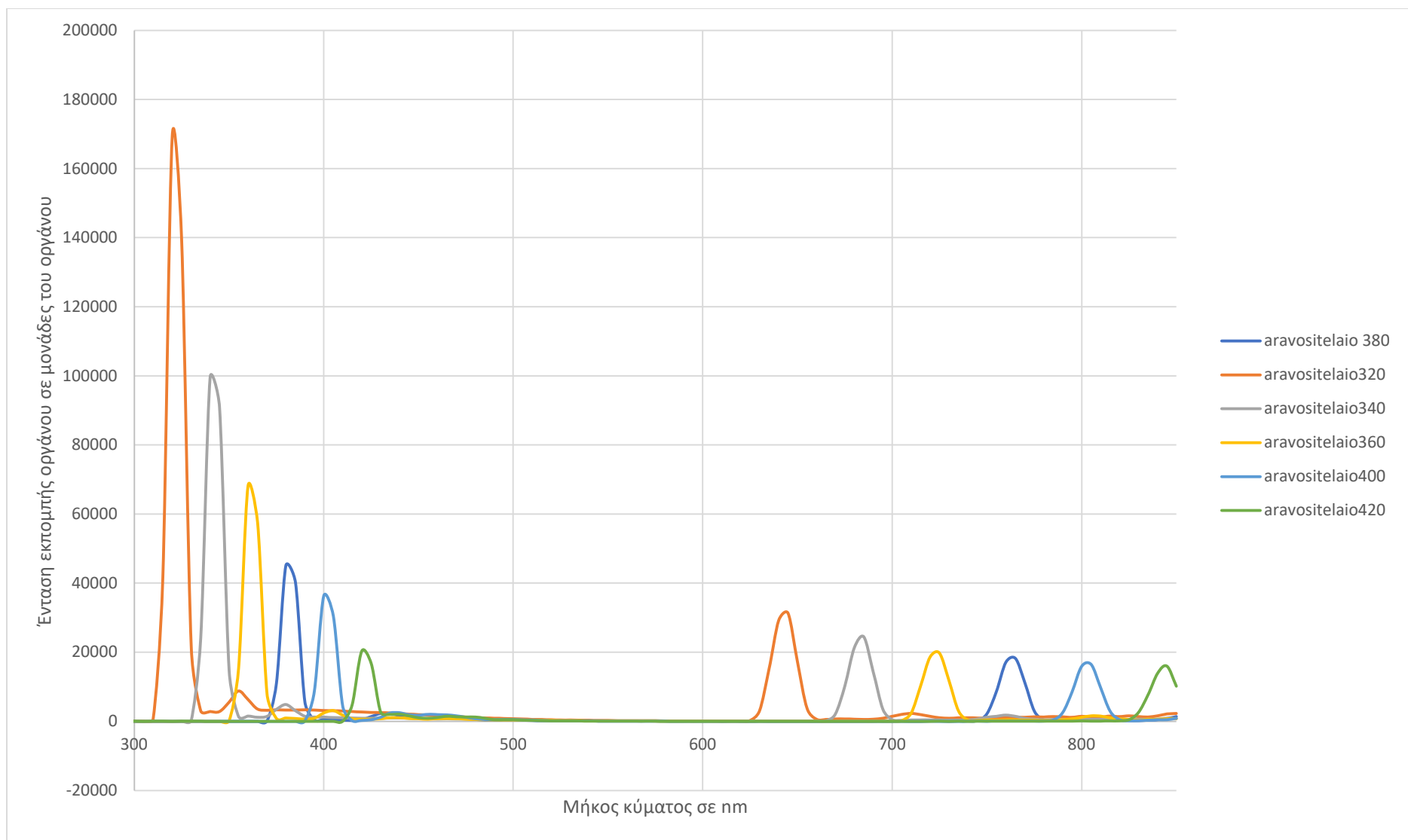
Χρησιμοποιήσαμε το φασματόμετρο φθορισμού RF 6000 της εταιρείας Shimadzu για τις μετρήσεις μας. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα παρακάτω Διαγράμματα (φάσματα) 3-10 ανά δείγμα φυτικού ελαίου :



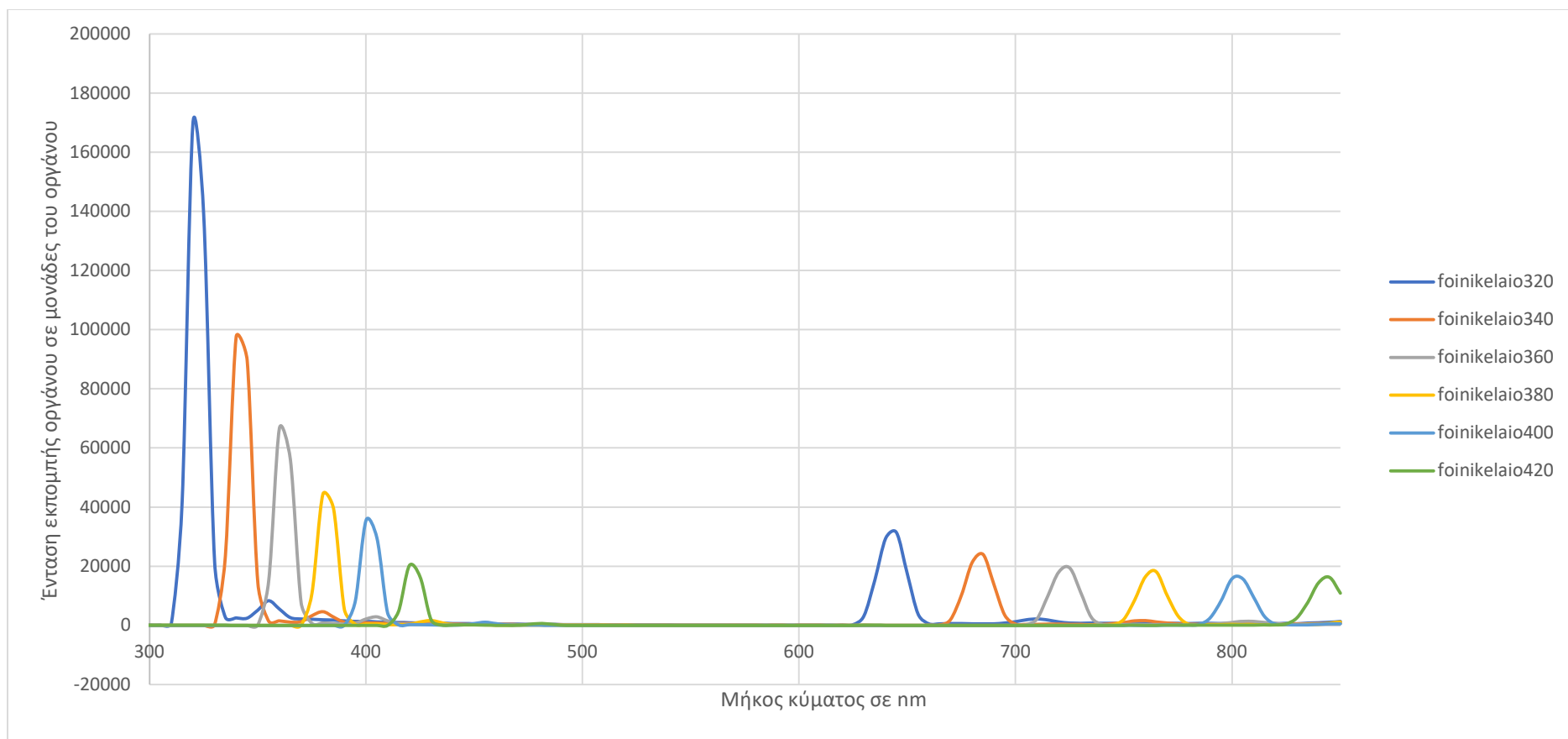
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3: ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ ΠΥΡΗΝΕΛΑΙΟΥ



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4: ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ ΣΟΓΙΕΛΑΙΟΥ

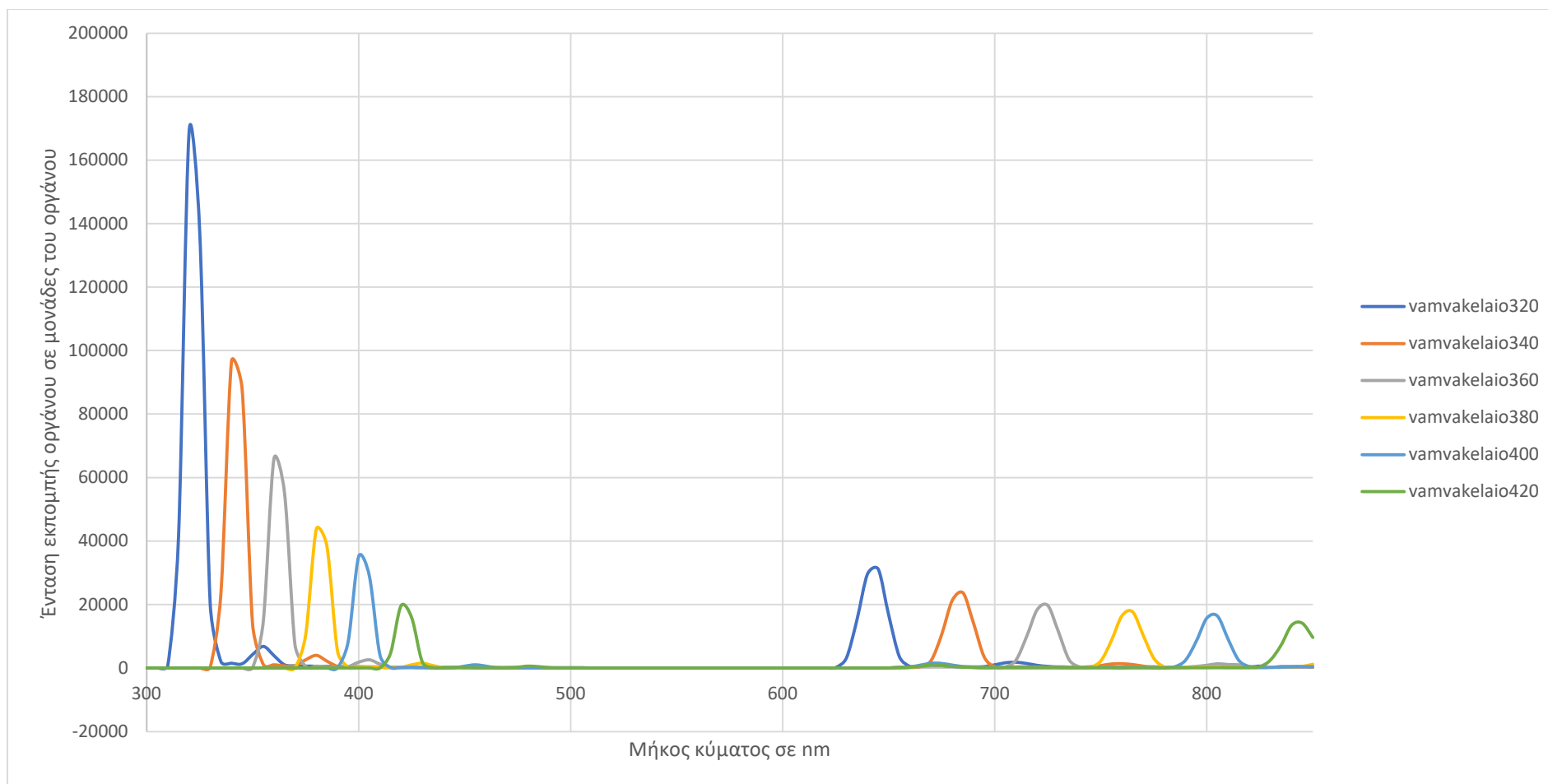


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5: ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ ΑΡΑΒΟΣΙΤΕΛΑΙΟΥ

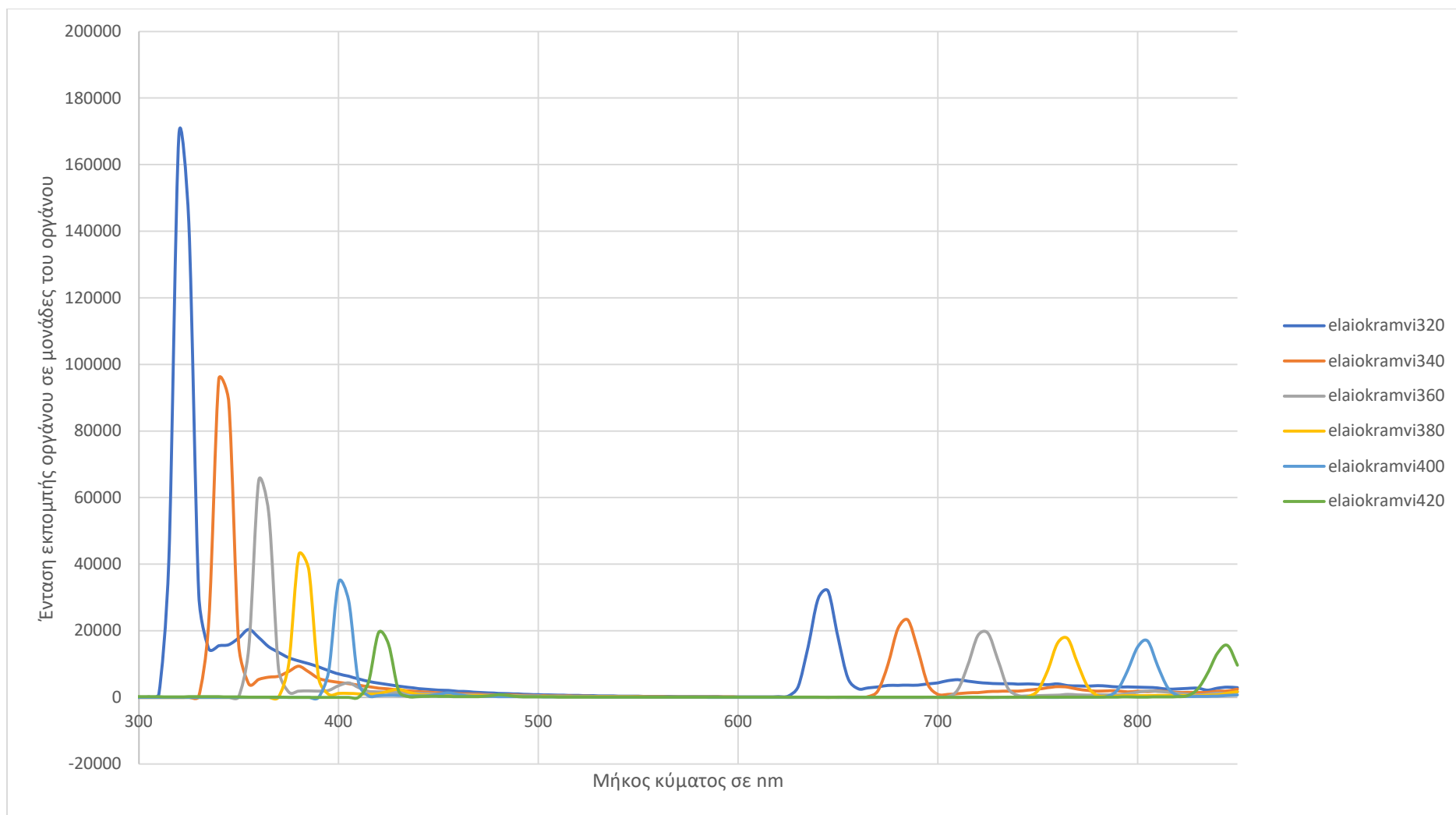


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6: ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ ΦΟΙΝΙΚΕΛΑΙΟΥ

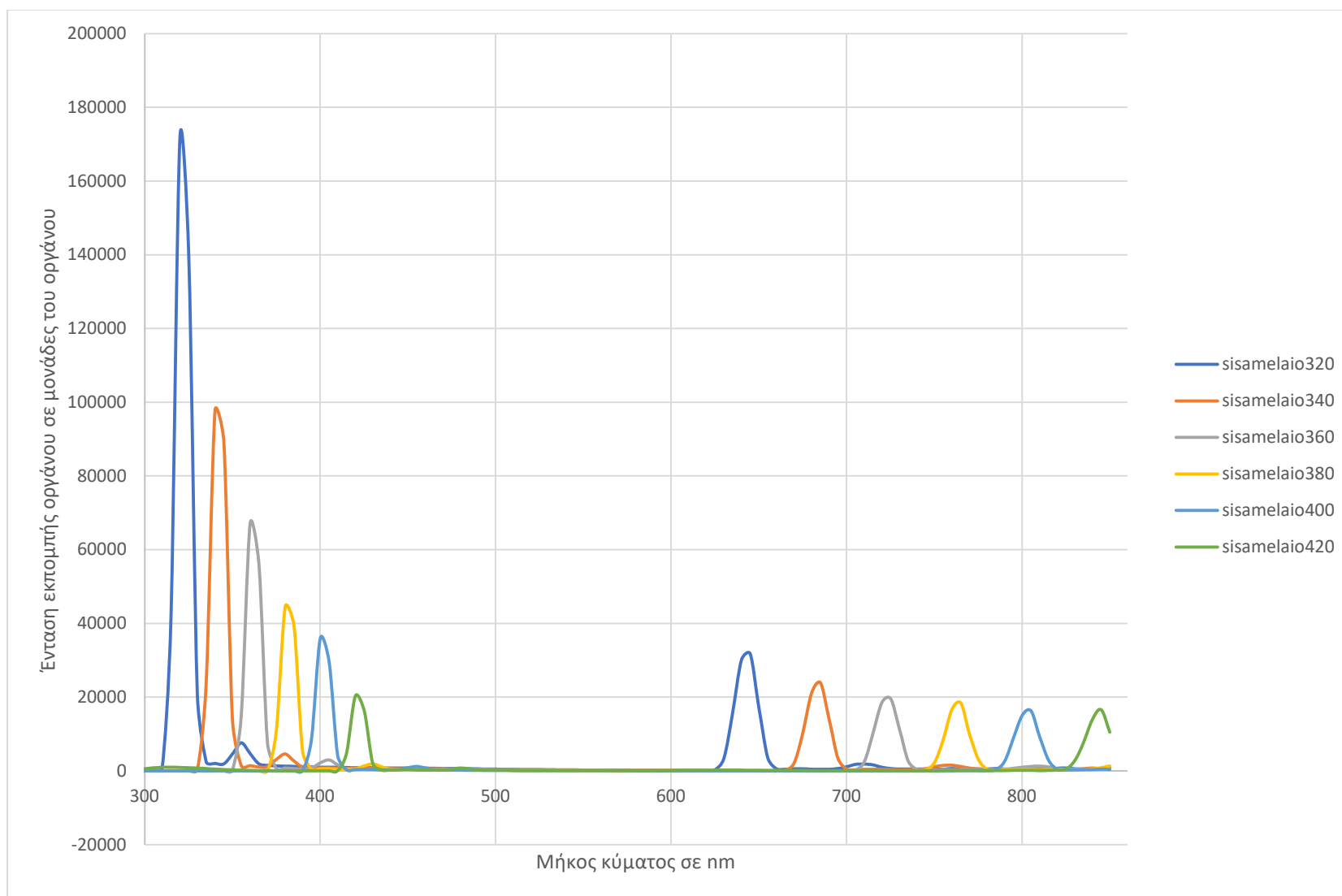




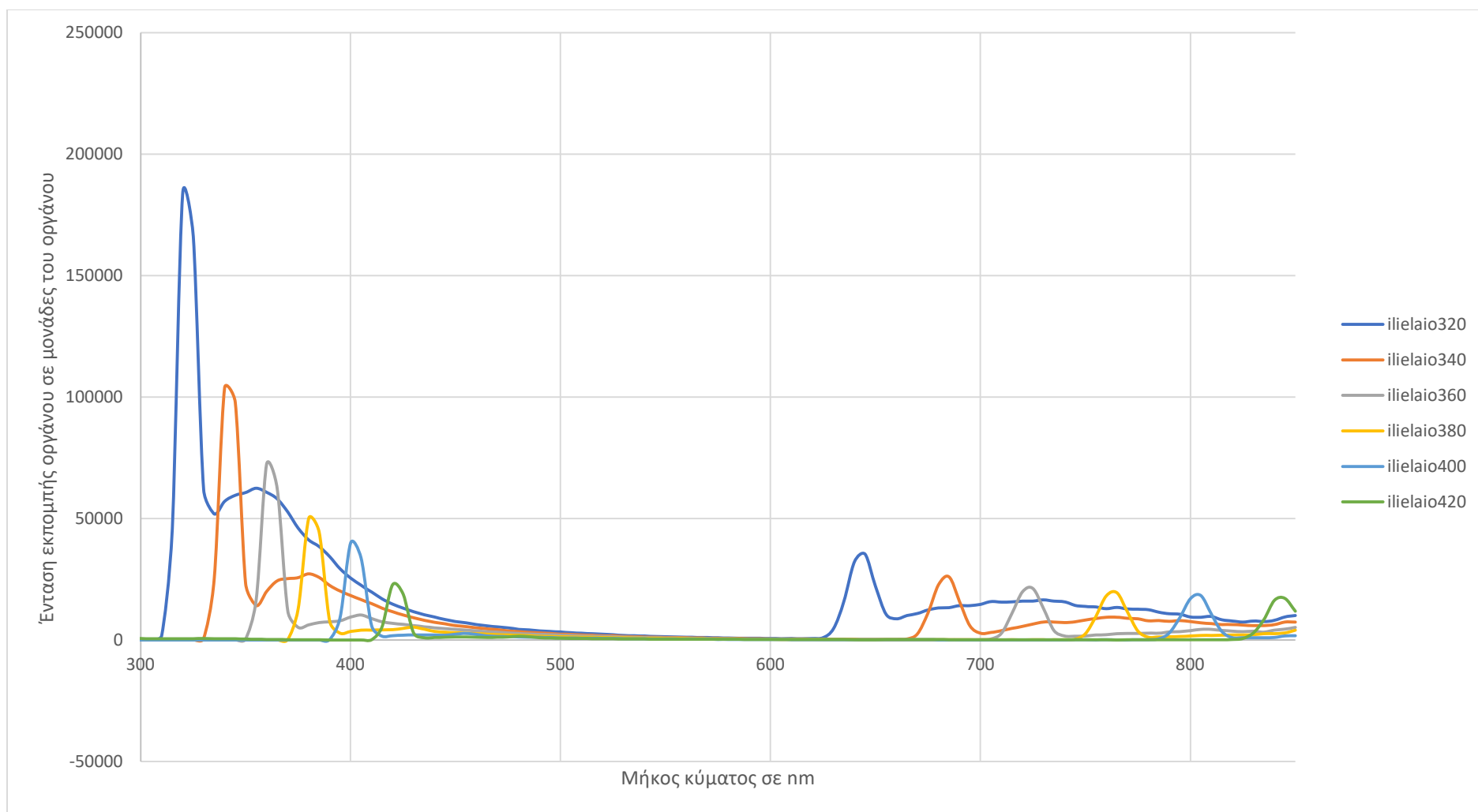
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7: ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ ΒΑΜΒΑΚΕΛΑΙΟΥ



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8: ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ ΕΛΑΙΟΚΡΑΜΒΗΣ



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9: ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ ΣΗΣΑΜΕΛΑΙΟΥ**



**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10: ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΑ ΦΘΟΡΙΣΜΟΥ ΗΛΙΕΛΑΙΟΥ**

Από τις αναλύσεις προέκυψε ότι τα φάσματα φθορισμού όλων των φυτικών ελαίων είναι παρόμοια μεταξύ τους. Εμφανίζουν μια μεγάλης έντασης κορυφή φθορισμού κοντά στα 300 nm, μικρότερης έντασης κορυφές φθορισμού μεταξύ 350-450 nm και ασθενείς κορυφές φθορισμού στην περιοχή μεταξύ 600 και 700 nm. Στη βιβλιογραφία <sup>17</sup> αναφέρεται ότι η έντονη κορυφή του φάσματος κοντά στα 300 nm αποδίδεται στις τοκοφερόλες, ενώ η χαμηλής έντασης κορυφή που εμφανίζεται σε μεγάλο μήκος κύματος (600 -700 nm) αποδίδεται στο φθορισμό της χλωροφύλλης. Τα φάσματα που παράγονται από τη φασματοσκοπία φθορισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για την παρακολούθηση επιλεγμένων συστατικών των ελαίων ή για τον προσδιορισμό των γενικών χαρακτηριστικών του δείγματος αποτελώντας στην ουσία το φασματικό αποτύπωμα του φυτικού ελαίου.

Η φασματοσκοπία φθορισμού δεν παρέχει πληροφορίες όσον αφορά τα μη-φθορίζοντα συστατικά των ελαίων, δηλαδή τα τριγλυκερίδια που αποτελούν τα κύρια συστατικά τους σε ποσοστό 96 - 98 % του βάρους τους. Αντίθετα είναι εξαιρετικά χρήσιμη στην ανίχνευση του υπολοίπου 2 - 4 % που αποτελείται από σύνθετα μίγματα δευτερευουσών ενώσεων ενός ευρέος φάσματος, συμπεριλαμβανομένων των λιπαρών αλκοολών, κηρών, εστέρων, υδρογονανθράκων, πτητικών, χρωστικών και φαινολικών ενώσεων, γλυκεριδικών ενώσεων, φωσφολιπιδίων και τριτερπενικών οξέων. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται για την αναγνώριση και πιστοποίηση αυτών των δευτερευουσών ενώσεων των φυτικών ελαίων, οι οποίες μπορεί να είναι χαρακτηριστικές της ποιότητάς τους. Είναι μια μέθοδος σχετικά απλή που χωρίς να απαιτεί διαχωρισμό αυτών των ενώσεων, παρέχει υψηλή ευαισθησία στην αναγνώρισή τους.

Γενικά τόσο η φασματοσκοπία υπεριώδους-ορατού όσο και η φασματοσκοπία φθορισμού χρησιμοποιούνται εκτεταμένα για τον έλεγχο της νοθείας της ανώτερης ποιότητας φυτικών ελαίων (κυρίως του ελαιολάδου) με φυτικά έλαια κατώτερης ποιότητας, την ταυτοποίηση της προέλευσής τους και τον έλεγχο της οξείδωσης και ποιοτικής υποβάθμισής τους.

---

<sup>17</sup> Saud Abdullah, Muhammad Asif, Hina Ali, Raheel Ali, Muhammad Saleem: "Characterization of corn oil using fluorescence spectroscopy", *Journal of Fluorescence* 32, 2022.

## 5.7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το βιοντίζελ έχει το βασικό πλεονέκτημα ως εναλλακτικό καύσιμο ότι μπορεί να αντικαταστήσει άμεσα το συμβατικό ντίζελ στις υπάρχουσες μηχανές εσωτερικής καύσης με ελάχιστες ή καθόλου μετατροπές. Παράλληλα οι υπάρχουσες προδιαγραφές ασφάλειας χρήσης των συμβατικών ορυκτών καυσίμων (ντίζελ) στη ναυτιλία μπορούν να ισχύσουν σχεδόν αυτούσιες για τη χρήση του βιοντίζελ. Για το λόγο αυτό οι μεγάλες εταιρείες προμήθειας ναυτιλιακών καυσίμων στα λιμάνια της Βόρειας Ευρώπης είναι ήδη σήμερα και προμηθευτές βιοντίζελ.

Βέβαια η παραγωγή βιοντίζελ από εξευγενισμένα φυτικά έλαια (όπως αυτά των οκτώ δειγμάτων των εργαστηριακών μετρήσεών μας) μέσω της μεστεροποίησης είναι μια παραγωγική διαδικασία υψηλού κόστους δεδομένου ότι προϋποθέτει τον εξευγενισμό των φυτικών ελαίων ή τη χρήση φυτικών ελαίων υψηλής ποιότητας. Οι εργαστηριακές μετρήσεις μέσω της φασματοσκοπίας μας επιτρέπουν να διαπιστώσουμε τις δευτερεύουσες ενώσεις των φυτικών ελαίων και να πιστοποιήσουμε την ποιότητά τους.

Από την άλλη μεριά όμως η απευθείας χρήση ακατέργαστων φυτικών ελαίων χαμηλής ποιότητας δημιουργεί σοβαρά προβλήματα στις μηχανές εσωτερικής καύσης. Αυτά οφείλονται στο υψηλό ιξώδες των φυτικών ελαίων (έως και 10 φορές υψηλότερο εκείνου του συμβατικού ντίζελ) και της μεγάλης περιεκτικότητάς τους σε υγρασία που προκαλούν ατελή καύση αλλά και στα περιεχόμενα σε αυτά λιπαρά οξέα (υψηλή οξύτητα) που είναι υπεύθυνα για τη διάβρωση του μετάλλου του θαλάμου καύσης των μηχανών. Για τους λόγους αυτούς έχει αποκλεισθεί η χρήση ακατέργαστων φυτικών ελαίων ως βιοκαύσιμο στη ναυτιλία.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Ε.Λόης, Φ.Ζαννίκος, Δ.Καρώνης :'' Τεχνολογία Καυσίμων και Λιπαντικών'' , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών, Εργαστήριο Τεχνολογίας Καυσίμων και Λιπαντικών, Αθήνα, 2014.
2. Σ.Στούρνας, Ε.Λόης, Φ.Ζαννίκος : '' Τεχνολογία Καυσίμων και λιπαντικών'', Αθήνα, 1997.
3. S.Bezergianni, A.Dimitriadis : '' Comparison between different types of renewable diesel'', Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.21, 2013, pp. 110-116.
4. A.D.Korberg, S.Brynolf, M.Grahn, I.R.Skav : ''Techo-economic assessment of advanced fuels and propulsion systems in future fossil-free ships'', Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.142, 2021.
5. E.A.Bourman,E.Lindstad, A.I.Rialland, A.H.Stromman : '' State-of-the-art technologies, measures and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review'' , Transportation Research Part D: Transport and Environment'', Vol.52, Part A, 2017, pp 408-421.
6. Det Norske Veritas (DNV): ''Maritime Forecast to 2050 – Energy Transition Outlook 2022'', September 2022.
7. Ι.Σούκα, Ν. Μάντζαρης : ''Τάσεις στο Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών στην Ευρωπαϊκή Ένωση και την Ελλάδα 2005-2022'', The Green Tank – Λύσεις πολιτικής για ένα βιώσιμο μέλλον, Αθήνα 2023.
8. Nippon Kaiji Kyokai (ClassNK): ''Outlines of EEXI regulation'', EEDI Section of Marine GHG Certification Department'', December 2021.
9. International Maritime Organization (IMO): Resolution MEPC.308(73) - ''2018 Guidelines on the method of calculation of the attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for new ships'', October 2018.
10. Shell International B.V. : ''Decarbonising Shipping : All Hands on Deck 2.0'', 2023.
11. International Maritime Organization (IMO): ''Fourth IMO Greenhouse Gas study'', February 2023.
12. International Maritime Organization (IMO): Resolution MEPC.377(80) - ''2023 IMO Strategy on Reduction of CHG Emissions from Ships'', October 2023.

13. European Union (EU) : "Regulation (EU) 2023/1805 of the European parliament and of the Council of 13 September 2023 on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport, and amending Directive 2009/16", October 2023.
14. Ν.Βέττας, Κ.Βαλάσκας, Γ.Μανιάτης, Η. Ντεμιάν, Ν.Παρατσιώκας, S.Danchev : "Η συμβολή της ναυτιλίας στην ελληνική οικονομία. Προοπτικές και Προκλήσεις", Ίδρυμα Οικονομικών & Βιομηχανικών Ερευνών, Οκτώβριος 2023.
15. Ν.Μπαράκος : "Κάθετη αξιοποίηση βιομάζας για την παραγωγή βιοντίζελ", Παρουσίαση Agroenergy S.A.
16. Π.Βαλαβανίδης : "Φασματοσκοπία οργανικών ενώσεων", Τμήμα Χημείας, Εθνικό Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, 2006.
17. Β.Σινάνογλου, Π.Ζουμπουλάκης, Σ.Μπρατάκος : "Φασματοσκοπία Υπερύθρου", Εργαστήριο Ανάλυσης ΤΕΙ Αθήνας, 2016-2017.
18. School of Earth Sciences, The Ohio State University, Petroleum Research Center, Kuwait Institute for Scientific Research "Detection of olive oil adulteration by low-field NMR relaxometry and UV-Vis spectroscopy upon mixing olive oil with various edible oils", Grasas y Aceites 68, January-March 2017.
19. Saud Abdullah, Muhammad Asif, Hina Ali, Raheel Ali, Muhammad Saleem: "Characterization of corn oil using fluorescence spectroscopy", Journal of Fluorescence 32, 2022.
20. Ελ. Μπιστογιαννάκη : "Μελέτη προέλευσης ελαιολάδου με φασματοσκοπία φθορισμού", ΤΕΙ Πελοποννήσου, Τμήμα Τεχνολογίας Τροφίμων, Ιούνιος 2016.