

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΔΙΟΙΚΗΤΙΚΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΚΟΙΝΩΝΙΚΩΝ**  
**ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

**ΤΜΗΜΑ ΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΧΡΗΜΑΤΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ**



**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ**  
**«ΧΡΗΜΑΤΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΤΗΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ»**

**Διπλωματική Εργασία**

**«Βελτιστοποίηση Διαδρομής στη Ναυτιλία Βάσει του Λογισμικού**  
**IBM ILOG CPLEX Optimization Studio»**

**Φοιτητής: Πατσός Διονύσιος**

**A.M.: mfs362020**

**Επιβλέπων καθηγητής: Παραβάντης Ιωάννης**

**ΑΘΗΝΑ 2023**



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**

**SCHOOL OF ADMINISTRATIVE ECONOMICS AND SOCIAL  
SCIENCES**

**POSTGRADUATE PROGRAMME «SHIPPING FINANCE»**



**Bachelor's thesis:**

**«Route Optimization in Shipping Based on IBM ILOG CPLEX  
Optimization Studio Software»**

**Student: Patsos Dionissios**

**Registration Number: mfs362020**

**Supervisor: Ioannis Paravantis**

**ATHENS 2023**

ΜΕΛΗ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ

Παραβάντης Ιωάννης

Πανάγου Βασίλειος

Χαλικιάς Μιλτιάδης

## Περίληψη - Λέξεις κλειδιά

Τα σύγχρονα συστήματα σχεδιασμού διαδρομής επιτρέπουν τη χρήση παγκόσμιων προβλέψεων για τη δημιουργία βέλτιστων διαδρομών. Το βασικό σημείο είναι η κατασκευή μιας διαδρομής λαμβάνοντας υπόψη τον απαιτούμενο χρόνο άφιξης. Η ιδανική διαδρομή θα ήταν αυτή που θα επέτρεπε στο πλοίο να αποφύγει την υπερβολική αλλαγή ταχύτητας ώστε να διατηρεί σταθερή ισχύ. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή της πιο οικονομικής διαδρομής μπορεί να είναι οι τιμές των καυσίμων και η ταχύτητα εντός και εκτός των περιοχών ελέγχου εκπομπών, παράμετροι οι οποίες παίζουν εξίσου σημαντικό ρόλο στο κόστος ενός ταξιδιού. Στόχος της εργασίας ήταν η επιλογή των κατάλληλων κεντρικών νησιώτικων λιμανιών για την από θαλάσσης σύνδεσή τους με τον κεντρικό λιμένα της ηπειρωτικής Χώρας μέσω επιβατηγού πλοίων, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος μεταφοράς, καλύπτοντας την επιβατική ζήτηση των 30 επιμέρους νησιών με τη χρήση μικρότερων πλοιαρίων. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως τα επιβατικά πλοία τα οποία αποφασίζεται να δρομολογηθούν είναι τα: Λ1 - Εξυπηρετεί τα νησιά «N9», «N19», «N21» και «N29», Λ4 - Εξυπηρετεί τα νησιά «N5», «N20», «N25», Λ5 - Εξυπηρετεί τα νησιά «N1», «N6», «N12», «N13», «N15», «N23» και «N27», Λ6 - Εξυπηρετεί τα νησιά «N2», «N16», «N17» και «N24», Λ7 - Εξυπηρετεί τα νησιά «N7» και «N14», Λ8 - Εξυπηρετεί τα νησιά «N4», «N8», «N10», «N28» και «N30» και Λ9 - Εξυπηρετεί τα νησιά «N3», «N11», «N18», «N22» και «N26».

Το συνολικό κόστος δρομολόγησης των παραπάνω 7 επιβατηγών πλοίων είναι: 2.460 χρηματικές μονάδες ενώ το κόστος μεταφοράς των επιβατών προς τα περιφερειακά νησιά ανέρχεται σε 26.038,40 χρηματικές μονάδες, επομένως η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ελαχιστοποιείται στην τιμή: 28.498,40 χρηματικές μονάδες.

**Λέξεις κλειδιά:** γραμμικός προγραμματισμός, βελτιστοποίηση, θαλάσσιες μεταφορές, καύσιμα, ταχύτητα.



## Abstract - key words

Modern route planning systems allow the use of global forecasts to create optimal routes. The key point is to construct a route taking into account the required arrival time. The ideal path would be one that would allow the ship to avoid too much speed change to maintain constant power. Other factors may also influence which route is more economical are fuel prices and speed in and out of emission control areas, parameters which play an important role in the cost of a trip. The aim of the work the selection of suitable central island ports for their connections by sea to the mainland's main port via frigates in order to minimize the total cost of the transport, covering the passenger demand of the 30 individual islands with the use of smaller vessels. The results showed that the frigates decided to be launched are: L1 - Serves the islands "N9", "N19", "N21" and "N29", L4 - Serves the islands "N5", "N20", "N25", L5 - Serves the islands "N1", "N6", "N12", "N13", "N15", "N23" and "N27", L6 - Serves the islands "N2", "N16", "N17" and "N24", L7 - Serves the islands "N7" and "N14", L8 - Serves the islands "N4", "N8", "N10", "N28" and "N30" and L9 - Serves the islands "N3", "N11", "N18", "N22" and "N26".

The total cost of routing the above 7 frigates is: 2,460 monetary units while the cost of transporting passengers to the peripheral islands amounts to 26,038.40 monetary units, therefore the value of the objective function is minimized at the price: 28,498.40 monetary units.

**Keywords:** linear programming, optimization, sea transport, fuel, speed.





## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

|  |    |
|--|----|
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....  | 12 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....  | 14 |
| 2.1 Εισαγωγή.....  | 14 |
| 2.2 Δρομολόγηση θαλάσσιων αποθεμάτων .....   | 14 |
| 2.3 Βελτιστοποίηση ταχύτητας .....   | 15 |
| 2.4 Κατανάλωση καυσίμου .....  | 17 |
| 2.5 Απόδοση πλοίου .....   | 20 |
| 2.6 Μοντέλα παλινδρόμησης .....  | 20 |
| 2.6.1 Μοντέλο υπολογισμού αντιστάσεων .....  | 20 |
| 2.6.2 Πρόβλεψη κατανάλωσης καυσίμου .....  | 22 |
| 2.6.3 Συνδυασμός μοντέλου υπολογισμού αντιστάσεων - πρόβλεψης κατανάλωσης καυσίμου | 24 |
| 2.7 Σχεδιασμός βέλτιστης διαδρομής.....  | 25 |
| 2.7.1 Σχεδιασμός διαδρομής .....   | 25 |
| 2.7.2 Γραμμικός προγραμματισμός για την βελτιστοποίηση των διαδρομών .....         | 28 |
| 2.7.3 Γραμμικός προγραμματισμός για την ελαχιστοποίηση του κόστους .....           | 30 |
| 2.8 Στρατηγικές διαχείρισης .....  | 33 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ .....   | 38 |
| 3.1 Ερευνητικά ερωτήματα.....  | 38 |
| 3.2 Λογισμικό επίλυσης .....   | 38 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ .....  | 40 |
| 4.1 Παρουσίαση του προβλήματος .....   | 40 |
| 4.2 Μοντελοποίηση του προβλήματος.....   | 42 |
| 4.1.1 Παράμετροι .....   | 42 |
| 4.1.2 Μεταβλητές απόφασης .....  | 43 |
| 4.1.3 Περιορισμοί.....   | 43 |
| 4.1.4 Αντικειμενική συνάρτηση .....  | 44 |
| 4.1.5 Επίλυση .....  | 44 |
| 4.1.6 Αποτελέσματα .....   | 45 |
| ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....  | 48 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....  | 50 |

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1. Εβδομαδιαία επιβατική ζήτηση (σε πλήθος επιβατών) για κάθε νησί.. 40

Πίνακας 4.2. Μέγιστη χωρητικότητα για τη μεταφορά επιβατών και κόστος δρομολόγησης επιβατηγών πλοίων από το κεντρικό λιμένα της ηπειρωτικής Χώρας προς τους κεντρικούς λιμένες της νησιωτικής Χώρας..... 41

Πίνακας 4.3. Κόστος μεταφοράς επιβατών προς κάθε περιφερειακό νησί από τα αντίστοιχα κεντρικά ..... 42



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ναυτιλιακή βιομηχανία συνδέεται με περίπου τα τρία τέταρτα του παγκόσμιου εμπορίου (Karlsson et al., 2020). Τα τελευταία χρόνια, η αειφορία της ναυτιλίας έχει γίνει ένα δημόσιο μέλημα και διάφοροι κανονισμοί ελέγχου των εκπομπών για τη μείωση των ρύπων και των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (GHG) από τα πλοία έχουν προταθεί και εφαρμοστεί παγκοσμίως. Αυτοί οι κανονισμοί στοχεύουν να οδηγήσουν τη ναυτιλιακή βιομηχανία σε μια κατεύθυνση χαμηλών εκπομπών άνθρακα και χαμηλής ρύπανσης, παρακινώντας τη να στραφεί σε πιο αποδοτικούς τύπους καυσίμων και να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας. Ταυτόχρονα, η κυκλική ύφεση της παγκόσμιας οικονομίας και οι υψηλές τιμές καυσίμων καθιστούν απαραίτητο και επείγον για τη ναυτιλιακή βιομηχανία να λειτουργεί με πιο οικονομικά αποδοτικό τρόπο, ενώ παράλληλα να ικανοποιεί τη ζήτηση του παγκόσμιου εμπορίου. Καθώς η κατανάλωση καυσίμων (π.χ. βαρύ μαζούτ [HFO], υγροποιημένο φυσικό αέριο [LNG]) είναι η κύρια πηγή εκπομπών και το κόστος των καυσίμων αντιπροσωπεύει μεγάλο μέρος του λειτουργικού κόστους, οι ναυτιλιακές εταιρείες καταβάλλουν άνευ προηγουμένου προσπάθειες για τη βελτιστοποίηση του πλοίου ενεργειακής απόδοσης. Το κλειδί για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων είναι η ανάπτυξη ακριβών μοντέλων για την πρόβλεψη των ρυθμών κατανάλωσης καυσίμου των πλοίων κάτω από διαφορετικά σενάρια (Yan et al., 2021).

Τα προβλήματα δρομολόγησης θαλάσσιου αποθέματος περιλαμβάνουν τον καθορισμό βέλτιστων διαδρομών για ποντοπόρα πλοία μεταξύ λιμένων, ενώ διαχειρίζονται το απόθεμα κάθε λιμένα. Κανονικά, τέτοια προβλήματα εξετάζονται με τα πλοία που λειτουργούν με σταθερές ταχύτητες πλεύσης. Ωστόσο, η ταχύτητα των σκαφών μπορεί συνήθως να ρυθμιστεί εντός ενός διαστήματος και η πραγματική κατανάλωση καυσίμου εξαρτάται τόσο από το φορτίο όσο και από την ταχύτητα του σκάφους. Για να αξιολογηθεί η σημασία τους λαμβάνονται υπόψη ότι τόσο οι ταχύτητες όσο και τα επίπεδα φορτίου επηρεάζουν το κόστος καυσίμου, οι λύσεις που προκύπτουν αντιπαραβάλλονται με λύσεις από την περίπτωση όπου οι ταχύτητες και το κόστος ταξιδιού λαμβάνονται ως σταθερές, καθώς και η

περίπτωση όπου η ταχύτητα είναι μια απόφαση, αλλά το κόστος θεωρείται ότι είναι ανεξάρτητο από το φορτίο. Για οποιαδήποτε από αυτές τις περιπτώσεις, η βελτιστοποίηση ταχύτητας ανάλογα με το φορτίο μπορεί να προστεθεί ως βήμα μετά την επεξεργασία. Υπολογιστικά πειράματα δείχνουν ότι ο συνδυασμός ταχύτητας και φορτίου έχει αντίκτυπο στην επιλογή των διαδρομών στα προβλήματα δρομολόγησης του θαλάσσιου αποθέματος και ότι η σωστή μοντελοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου μπορεί να μειώσει σημαντικά το κόστος απόπλου (Eide et al., 2020).

Στο πρώτο και παρόν κεφάλαιο έγινε μια εισαγωγή αναφορικά με το μελετώμενο θέμα που απασχολεί τη ναυτιλιακή βιομηχανία ώστε να πετύχει τα μέγιστα δυνατά αποτελέσματα στη δρομολόγηση και τη βελτιστοποίηση φορτίου, ταχύτητας, καυσίμων. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση. Προσεγγίζεται το θεωρητικό πλαίσιο των εξής: δρομολόγηση των θαλάσσιων αποθεμάτων, βελτιστοποίηση της ταχύτητας, κατανάλωση καυσίμου, απόδοση πλοίου, μοντέλα παλινδρόμησης, σχεδιασμός βέλτιστης διαδρομής και τέλος στρατηγικές διαχείρισης. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία της εργασίας όπου αναλύεται το ερευνητικό πρόβλημα της καθώς και το λογισμικό επίλυσης του. Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής, η μοντελοποίηση του προβλήματος, δηλαδή οι παράμετροι, οι μεταβλητές απόφασης, οι περιορισμοί, η επίλυση και τα αποτελέσματα αυτής. Στο πέμπτο κεφάλαιο καταγράφονται τα συμπεράσματα της εργασίας συνολικά και τέλος παρουσιάζονται αναλυτικά οι βιβλιογραφικές αναφορές.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

#### 2.1 Εισαγωγή

Στο δεύτερο αυτό κεφάλαιο παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση. Προσεγγίζεται το θεωρητικό πλαίσιο των εξής: δρομολόγηση των θαλάσσιων αποθεμάτων, κατά κύριο λόγο το κόστος μεταφοράς, το κόστος καυσίμων, το κόστος λειτουργίας. Βελτιστοποίηση της ταχύτητας, όπου ο στόχος είναι να καθοριστεί ποιο φορτίο θα παραλάβει, ποια διαδρομή πρέπει να ακολουθήσει κάθε σκάφος και την ταχύτητα που πρέπει να έχουν τα σκάφη σε κάθε σκέλος για να μεγιστοποιηθεί το κέρδος. Κατανάλωση καυσίμου, καθώς το κόστος των καυσίμων αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο κόστους στη ναυτιλία. Απόδοση πλοίου, καθώς η διαδικασία αναγνώρισης και απομόνωσης ανωμαλιών των συνθηκών και των δεδομένων μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην έκβαση της απόδοσης του πλοίου και της παρακολούθησης της ναυσιπλοΐας. Μοντέλα παλινδρόμησης, καθώς στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης/κόστους καυσίμου. Σχεδιασμός βέλτιστης διαδρομής, όπου χρειάζεται η πλήρης παρακολούθηση, σε περίπτωση παρεκκλίσεων από τη διαδρομή, καθώς και σε πραγματικό χρόνο της απόδοσης του σκάφους. Τέλος παρουσιάζονται οι στρατηγικές διαχείρισης, όπου η κύρια συσχέτιση τους με την κατανάλωση του καυσίμου ενός πλοίου είναι πώς να μειωθεί η επίδραση της ανακρίβειας των μοντέλων πρόβλεψης κατανάλωσης καυσίμου στο επόμενο μοντέλο λειτουργικής βελτιστοποίησης του πλοίου.

#### 2.2 Δρομολόγηση θαλάσσιων αποθεμάτων

Το κόστος αποστολής περιλαμβάνει κατά κύριο λόγο το κόστος μεταφοράς, το κόστος καυσίμων, το κόστος λειτουργίας, το κόστος μίσθωσης κ.λπ. Για να ληφθούν υπόψη οι εκπομπές άνθρακα και να τεθεί το ζήτημα της βιωσιμότητας στις ναυτιλιακές δραστηριότητες, υπάρχει ανάγκη να συνδυαστούν οι δαπάνες εκπομπής άνθρακα και ναυτιλίας. Σε επιχειρησιακό πλαίσιο, η βελτιστοποίηση της ταχύτητας του σκάφους είναι μια ιδανική στρατηγική για τη μείωση των εκπομπών και της κατανάλωσης καυσίμου για μια βιώσιμη περιβαλλοντική συνθήκη. Οι τιμές των καυσίμων συνεχίζουν να κυμαίνονται από καιρό σε καιρό καθώς εξαρτώνται

από την αγορά. Οι ναυτιλιακές εταιρείες εστιάζουν όλο και περισσότερο στην μείωση των εκπομπών αερίων και ρύπων των πλοίων και της κατανάλωσης καυσίμων. Το κόστος των καυσίμων έχει γίνει ένα από τα πιο σημαντικά μέρη του συνολικού κόστους που σχετίζεται με τις θαλάσσιες μεταφορές. Οι αναμενόμενοι χρόνοι άφιξης και αναχώρησης του πλοίου ρυθμίζονται με βάση το χρονοδιάγραμμα αποστολής και διαταράσσονται λόγω συμφόρησης στο λιμάνι. Ως εκ τούτου, για τη διατήρηση του κατάλληλου συντονισμού μεταξύ των ναυτιλιακών γραμμών και των λιμανιών, η βελτιστοποίηση της ταχύτητας των σκαφών μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ιδανικό επιχειρησιακό μέτρο (Christiansen & Fagerholt, 2009).

### **2.3 Βελτιστοποίηση ταχύτητας**

Στα παραδοσιακά προβλήματα δρομολόγησης και προγραμματισμού πλοίων, η ταχύτητα των πλοίων είναι σταθερή και δίνεται ο ρυθμός κατανάλωσης καυσίμου για κάθε σκάφος (Norstad et al., 2011).

Οι Norstad et al. (2011) παρουσίασαν ένα πρόβλημα δρομολόγησης και προγραμματισμού τραμπ πλοίων (tramp trade) με βελτιστοποίηση ταχύτητας, όπου η ταχύτητα των σκαφών αναπαρίσταται ως μεταβλητή απόφασης και εφαρμόζεται μια ευρετική τοπική αναζήτηση πολλαπλών εκκινήσεων για την επίλυση του προβλήματος. Για τον προσδιορισμό των επιπέδων ταχύτητας, αναπτύχθηκε μια εξειδικευμένη μέθοδος που αργότερα αποδείχθηκε ότι υπολογίζει τις βέλτιστες ταχύτητες (Hvattum et al., 2013). Είναι σύνηθες να χρησιμοποιείται μια διαδοχική προσέγγιση κατά τον σχεδιασμό δρομολογίων πλοίων, όπου οι διαδρομές αρχικά καθορίζονται σαν κάθε σκάφος να πλέει με μια δεδομένη ταχύτητα και στη συνέχεια οι ταχύτητες πλεύσης βελτιστοποιούνται για τις δεδομένες διαδρομές.

Οι Andersson et al. (2015) πρότειναν μια νέα προσέγγιση μοντελοποίησης για την ενσωμάτωση της βελτιστοποίησης ταχύτητας στον προγραμματισμό των δρομολογίων και χρησιμοποίησαν έναν ευρετικό κυλιόμενο ορίζοντα για την επίλυση του συνδυασμένου προβλήματος. Η εργασία τους θεωρήθηκε ένα πραγματικό πρόβλημα ανάπτυξης και δρομολόγησης στην αποστολή roll-on roll-off.

Οι Wen et al. (2016) ανέλυσαν την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της δρομολόγησης και της ταχύτητας πλεύσης στη ναυτιλία με βάση τον έλεγχο πλήρους φορτίου. Το πρόβλημα συνίσταται σε διαφορετικά φορτία που πρέπει να μεταφερθούν από τα λιμάνια φόρτωσης απευθείας στα λιμάνια εκφόρτωσης. Υπάρχει ένας ετερογενής στόλος πλοίων, με πλοία να έχουν διαφορετικά εύρη ταχύτητας και κατανάλωση καυσίμου ανάλογα με το φορτίο. Ο στόχος είναι να καθοριστεί ποιο φορτίο θα παραλάβει, ποια διαδρομή πρέπει να ακολουθήσει κάθε σκάφος και την ταχύτητα που πρέπει να έχουν τα σκάφη σε κάθε σκέλος για να μεγιστοποιηθεί το κέρδος. Ενώ εξέτασαν μια συνάρτηση κατανάλωσης καυσίμου που εξαρτάται από το φορτίο, τα πλοία είναι είτε γεμάτα είτε άδεια, που σημαίνει ότι το φορτίο είναι σταθερό για ένα δεδομένο σκέλος ιστιοπλοΐας.

Οι Norlund & Gribkovskaia (2017) εξέτασαν τον τρόπο με τον οποίο αποδίδουν οι στρατηγικές βελτιστοποίησης ταχύτητας όταν υπολογίζονται οι ποικίλες καιρικές συνθήκες. Ανέπτυξαν ένα εργαλείο προσομοίωσης-βελτιστοποίησης για την εκτίμηση της κατανάλωσης καυσίμου των εβδομαδιαίων δρομολογίων για πλοία ανεφοδιασμού που εξυπηρετούν υπεράκτιες εγκαταστάσεις πετρελαίου και φυσικού αερίου. Η κατανάλωση καυσίμου με μια σταθερή ταχύτητα είναι υψηλότερη σε δύσκολες καιρικές συνθήκες παρά σε ήρεμη θάλασσα. Η ταχύτητα βελτιστοποιείται χρησιμοποιώντας μια παρόμοια διαδικασία όπως στο (Norstad et al., 2011) και αποδεικνύεται ότι η βελτιστοποίηση ταχύτητας εξακολουθεί να είναι πολύτιμη υπό την αβεβαιότητα του καιρού.

Οι Psaraftis & Kontovas (2013) παρουσίασαν μια έρευνα και μια ταξινόμηση μοντέλων στις θαλάσσιες μεταφορές όπου η ταχύτητα είναι μια από τις μεταβλητές απόφασης. Συζήτησαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της μείωσης της ταχύτητας των πλοίων, που σχετίζονται τόσο με το κόστος όσο και με τις εκπομπές. Περιγράφονται διαφορετικές λειτουργίες κατανάλωσης καυσίμου και οι συγγραφείς δίνουν παραδείγματα για το πώς το κόστος του αποθέματος μπορεί να επηρεάσει τη βέλτιστη ταχύτητα. Η ταξινόμηση των διαφορετικών μοντέλων βασίζεται σε προκαθορισμένες παραμέτρους, όπως αν το μοντέλο μπορεί ή όχι να βρει τη βέλτιστη ταχύτητα ως συνάρτηση του ωφέλιμου φορτίου.



Οι Psaraftis & Kontonvas (2014) επικεντρώθηκαν στην αποσαφήνιση ζητημάτων σε γενικά προβλήματα βελτιστοποίησης ταχύτητας στη δρομολόγηση θαλάσσιων αποθεμάτων και στη συνέχεια παρουσίασαν μοντέλα που βελτιστοποιούν την ταχύτητα ενός σκάφους για διαφορετικά σενάρια δρομολόγησης. Στα μοντέλα ενσωματώθηκαν θεμελιώδεις παράμετροι και εκτιμήσεις, όπως η τιμή των καυσίμων, ο ναύλος, το κόστος αποθέματος του φορτίου και η εξάρτηση της κατανάλωσης καυσίμου από το ωφέλιμο φορτίο. Οι συγγραφείς εξέτασαν τη διαφορά μεταξύ λύσεων που βελτιστοποιούν την οικονομική απόδοση και λύσεων που βελτιστοποιούν την περιβαλλοντική απόδοση. Η κύρια συνεισφορά αυτής της έρευνας σε σχέση με την κατάσταση της τεχνολογίας είναι η ενσωμάτωση εκείνων των θεμελιωδών παραμέτρων σε σχέση με την ταχύτητα του πλοίου καθώς και την απόφαση δρομολόγησης, όπου απαιτείται. Αυτά είναι (α) η τιμή του καυσίμου, (β) η κατάσταση της αγοράς (ναύλος), (γ) το κόστος απογραφής του φορτίου και (δ) η εξάρτηση της κατανάλωσης καυσίμου από το ωφέλιμο φορτίο. Η έρευνα επιβεβαίωσε ότι οι λύσεις για βέλτιστη περιβαλλοντική απόδοση δεν είναι απαραίτητα ίδιες με εκείνες για βέλτιστη οικονομική απόδοση. Επίσης, οι πολιτικές που μπορεί να φαίνονται εκ πρώτης όψεως βέλτιστες από περιβαλλοντική άποψη μπορεί στην πραγματικότητα να μην είναι βέλτιστες. Για παράδειγμα, η επιβολή φόρου στα καύσιμα θα αύξανε τεχνητά τις τιμές των καυσίμων και θα μείωνε περαιτέρω τις εκπομπές αερίων και ρύπων.

Οι Bialystocki & Kononvessis (2016) πρότειναν μια προσέγγιση για την κατασκευή μιας ακριβούς καμπύλης κατανάλωσης καυσίμου και ταχύτητας. Παρουσιάστηκαν και ελήφθησαν υπόψη διάφοροι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την κατανάλωση καυσίμου. Ένας αλγόριθμος εισήχθη και αποδείχθηκε απλός και ακριβής κατά την εκτίμηση της κατανάλωσης καυσίμου.

## **2.4 Κατανάλωση καυσίμου**

Υπάρχουν κυρίως τρεις τρόποι με τους οποίους οι ναυτιλιακές εταιρείες μπορούν να επιτύχουν τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς ECA (Περιοχών Ελέγχου Εκπομπών-Emission control area), δηλαδή αλλαγή καυσίμου, scrubber και χρήση

υγροποιημένου φυσικού αερίου LNG (Liquefied natural gas) ως καύσιμο (Fagerholt et al., 2015):

- i. Για πλοία που λειτουργούν τόσο εντός όσο και εκτός ECA, η αλλαγή καυσίμου είναι μια απλή εναλλακτική συμμόρφωσης. Αυτό σημαίνει ότι τα πλοία καίνε πετρέλαιο εσωτερικής καύσης MGO (Marine Gas Oil) εντός των ECA, ενώ ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος και φθηνότερος τύπος καυσίμου, το βαρύ μαζούτ HFO (Heavy fuel oil), χρησιμοποιείται έξω. Η δυνατότητα αλλαγής καυσίμων είναι απαραίτητη για τα πλοία βαθέν υδάτων που περνούν μέσα και έξω από ECA, επομένως αυτά τα πλοία πρέπει να διατηρούν δύο σετ χωριστών δεξαμενών καυσίμων, μία για HFO και άλλη για MGO. Ο διαχωρισμός των δεξαμενών καυσίμου θα συνεπαγόταν τον εκ των υστέρων εξοπλισμό του σκάφους. Τροποποιήσεις θα πρέπει επίσης να γίνουν στο σύστημα αντλίας καυσίμου και θα περιλαμβάνουν επίσης την εγκατάσταση ενός διακόπτη καυσίμου και ενός ψυγείου, καθώς το HFO προθερμαίνεται ενώ το MGO πρέπει να ψεκάζεται κρύο. Το αντίστοιχο επενδυτικό κόστος εξαρτάται από το πλοίο, αλλά σε κάθε περίπτωση είναι περίπου μια τάξη μεγέθους χαμηλότερο σε σύγκριση με τις άλλες δύο επιλογές συμμόρφωσης.
- ii. Η δεύτερη επιλογή είναι να εγκατασταθεί ένα scrubber, το οποίο είναι ένα σύστημα φιλτραρίσματος/καθαρισμού για την αφαίρεση του θείου από την εξάτμιση. Αυτό επιτρέπει στο πλοίο να χρησιμοποιεί HFO σε ECA. Τέτοιες λύσεις χρησιμοποιούνται από ορισμένες εταιρείες εκμετάλλευσης πορθμείων μικρών αποστάσεων, όπως για παράδειγμα η DFDS Seaways, η οποία έχει ξεκινήσει ένα τεράστιο πρόγραμμα εγκατάστασης scrubber, με κόστος επένδυσης περίπου 125 εκατομμυρίων USD για 21 πλοία. Οι λύσεις scrubber συνήθως δεν θεωρούνται οικονομικά αποδοτικές για πλοία βαθέν υδάτων, καθώς το τμήμα του χρόνου που περνούν σε ECA είναι χαμηλό.
- iii. Η τρίτη εναλλακτική περιλαμβάνει τη χρήση υγροποιημένου φυσικού αερίου (LNG) ως καυσίμου. Αυτό μειώνει τις εκπομπές θείου και ενδεχομένως πολλών άλλων ουσιών όπως τα οξείδια του αζώτου. Αυτό συνεπάγεται υψηλές επενδύσεις για τη μετασκευή του πλοίου, ώστε να μπορεί να αποθηκεύει και

να καίει LNG, καθώς και να διασφαλίζει ότι υπάρχουν κατάλληλες παράκτιες εγκαταστάσεις προμήθειας LNG στα λιμάνια στα οποία θα ανεφοδιαστεί το πλοίο.

Το κόστος των καυσίμων έχει γίνει ένα σημαντικό στοιχείο κόστους στη ναυτιλία, αντιπροσωπεύοντας μερικές φορές περισσότερο από το 50% του συνολικού λειτουργικού κόστους. Τα καύσιμα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο είναι σημαντικά πιο ακριβά από τα κανονικά καύσιμα και οι νέοι κανονισμοί της ECA θα επηρεάσουν τη διεθνή ναυτιλία με διάφορους τρόπους (Lehtoranta et al., 2019).

Για παράδειγμα, υπάρχει ελάχιστος ή καθόλου χώρος στα τρέχοντα περιθώρια κέρδους των ναυτιλιακών εταιρειών μικρών αποστάσεων για την απορρόφηση αυτού του πρόσθετου κόστους και επομένως πρέπει να αναμένονται σημαντικές αυξήσεις ναύλων. Σε αντίθεση με το αντίστοιχο του βαθέων υδάτων, στις θαλάσσιες μεταφορές μικρών αποστάσεων μια τέτοια αύξηση των ναύλων μπορεί να αναγκάσει τους φορτωτές να χρησιμοποιήσουν χερσαίες εναλλακτικές λύσεις (κυρίως οδικές). Μια αντίστροφη μετατόπιση φορτίου θα ήταν αντίθετη με την πολιτική της ΕΕ για μετατόπιση της κυκλοφορίας από ξηρά σε θάλασσα για τη μείωση της συμφόρησης και θα μπορούσε τελικά (υπό ορισμένες συνθήκες) να αυξήσει το συνολικό επίπεδο εκπομπών CO<sub>2</sub> (Carbon Dioxide) σε ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού. Αυτό το πρόβλημα είναι ήδη μια σοβαρή πηγή ανησυχίας όχι μόνο για τους φορείς εκμετάλλευσης RO-RO στη Βαλτική και τη Βόρεια Θάλασσα, που έχουν ή σκέφτονται κλείσιμο ορισμένων δρομολογίων ως ασύμφορων (φορείς όπως η DFDS και η Stena έχουν ήδη κλείσει ορισμένα από τα δρομολογία τους), αλλά και σε μεταποιητικές, μεταλλευτικές και δασικές βιομηχανίες της περιοχής. Ο φόβος είναι ότι πολλές από αυτές τις βιομηχανίες μπορεί να αναγκαστούν να μετεγκατασταθούν λόγω των παρενεργειών τέτοιων λειτουργικών και κανονιστικών αλλαγών. Αυτή η απώλεια επιχειρηματικής δραστηριότητας θα μπορούσε να αναγκάσει τους οριακά βιώσιμους φορείς εκμετάλλευσης πλοίων και λιμένων να σταματήσουν τις δραστηριότητές τους, διοχετεύοντας ακόμη περισσότερα φορτία προς χερσαίες μεταφορές (Brynolf et al., 2014).

## **2.5 Απόδοση πλοίου**

Η ακρίβεια των δεδομένων σχετίζεται με την ποιότητα της απόδοσης του πλοίου και τις παραμέτρους πλοήγησης που λαμβάνονται από το ενσωματωμένο IoT (internet of things). Το βιομηχανικό IoT μπορεί να εισάγει διάφορες ανωμαλίες οι οποίες αναφέρονται παρακάτω, όπως σφάλματα αισθητήρα, στις μετρημένες παραμέτρους απόδοσης και πλοήγησης του πλοίου και αυτό μπορεί να υποβαθμίσει το αποτέλεσμα της αντίστοιχης ανάλυσης δεδομένων (Perera & Mo, 2020). Επομένως, η διαδικασία αναγνώρισης και απομόνωσης τέτοιων ανωμαλιών δεδομένων μπορεί να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην έκβαση της απόδοσης του πλοίου και της παρακολούθησης της ναυσιπλοΐας. Γενικά, αυτές οι ανωμαλίες δεδομένων μπορούν να χωριστούν σε σφάλματα αισθητήρα και απόκτησης δεδομένων και ανώμαλα συμβάντα συστήματος. Απαιτείται εξειδικευμένη γνώση για τον εντοπισμό και την ταξινόμηση τέτοιων ανωμαλιών δεδομένων, επομένως τα επίπεδα ανίχνευσης ανωμαλιών δεδομένων προτείνονται σε αυτήν τη μελέτη για τον ίδιο σκοπό. Αυτά τα επίπεδα ανίχνευσης ανωμαλιών δεδομένων χωρίζονται σε διάφορα επίπεδα: προκαταρκτικά και προχωρημένα επίπεδα (Perera & Mo, 2018).

## **2.6 Μοντέλα παλινδρόμησης**

### **2.6.1 Μοντέλο υπολογισμού αντιστάσεων**

Στα μοντέλα υπολογισμού αντιστάσεων (MYA), η βασική διαδικασία κατασκευής του μοντέλου είναι ο υπολογισμός των αντιστάσεων που συναντά ένα πλοίο από διαφορετικές πηγές με βάση τις αρχές της φυσικής και τους νόμους της υδροδυναμικής. Η συνολική αντίσταση αποτελείται από την αντίσταση στο ήρεμο νερό και την πρόσθετη αντίσταση που παρουσιάζεται από τον άνεμο, τα κύματα, τα ρηγά νερά και άλλους εξωτερικούς παράγοντες. Μόλις μοντελοποιηθεί η συνολική συνθήκη αντίστασης, μπορεί να υπολογιστεί η ισχύς του κινητήρα που απαιτείται για την οδήγηση του πλοίου σε μια ορισμένη ταχύτητα και ο αντίστοιχος ρυθμός κατανάλωσης καυσίμου (Haranen et al., 2016).

Οι εκπομπές από τα πλοία, συμπεριλαμβανομένων εκείνων διαφόρων ρύπων και αερίων του θερμοκηπίου, μπορούν στη συνέχεια να υπολογιστούν με βάση την ισχύ

του κινητήρα και την κατανάλωση καυσίμου από τα αποτελέσματα του ΜΥΑ. Τα περισσότερα από τα ΜΥΑ βασίζονται σε δεδομένα λειτουργίας πλοίου και μηχανικά δεδομένα και βασίζονται επίσης σε δεδομένα θαλάσσης και καιρού. Εκτός από την πρόβλεψη κατανάλωσης καυσίμου, σχεδόν τα μισά μοντέλα προβλέπουν επίσης εκπομπές πλοίων, συμπεριλαμβανομένων ρύπων όπως SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, μονοξείδιο του άνθρακα (CO), PM και GHG, όπως CO<sub>2</sub>. Δύο μελέτες των Moreno- Gutierrez et al. (2015 και 2019) συγκρίνουν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα διαφορετικών τύπων ΜΥΑ και αναπτύσσουν ένα βελτιωμένο ΜΥΑ. Εξετάζουν γενικότερα μοντέλα βελτιστοποίησης διπλού στόχου που ελαχιστοποιούν ταυτόχρονα την κατανάλωση καυσίμου και μεγιστοποιούν τη μείωση του κόστους διαδρομής, ελαχιστοποιούν το λειτουργικό κόστος του πλοίου ή αυξάνουν την ακρίβεια άφιξης. Η ταχύτητα πλεύσης του πλοίου επιλέγεται ως μεταβλητή απόφασης και μπορεί επίσης να λαμβάνεται υπόψη η ισχύς του κινητήρα του πλοίου και η ταχύτητα του κύριου κινητήρα όπως και στην μελέτη των Paravantis et al., (2006).

Το κύριο πλεονέκτημα των ΜΥΑ είναι ότι μπορούν να εφαρμοστούν στο αρχικό στάδιο του σχεδιασμού του πλοίου και κατά τη διάρκεια δοκιμών στη θάλασσα, καθώς η δομή και οι παράμετροι του μοντέλου είναι πλήρως γνωστές από εκ των προτέρων γνώσεις και θεωρητικές γνώσεις που βασίζονται σε νόμους φυσικής και υδροδυναμικής, αρχές ναυτικής αρχιτεκτονικής. μέθοδοι υπολογιστικής δυναμικής ρευστών και δοκιμές μοντέλων πλοίου. Επιπλέον, καθώς τα ΜΥΑ αναπτύσσονται με βάση τις αρχές της φυσικής, είναι διαφανή και εξηγήσιμα και επομένως χρησιμοποιούνται ευρέως στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Παρά αυτά τα πλεονεκτήματα, υπάρχουν ορισμένα σαφή μειονεκτήματα των ΜΥΑ. Πρώτον, τα ΜΥΑ χρησιμοποιούν διάφορες υποθέσεις από τη δομή του μοντέλου μέχρι την εκτίμηση παραμέτρων και η απόδοσή τους επηρεάζεται έντονα από αυτές τις παραδοχές. Τα στοιχεία αντίστασης πλοίου αντιμετωπίζονται χωριστά και οι αλληλεπιδράσεις τους αγνοούνται, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε ασυνέπειες στα ΜΥΑ που αναπτύχθηκαν (Haranen et al., 2016).

Ως αποτέλεσμα, η καταλληλότητα και η γενίκευση των ΜΥΑ μπορεί να είναι κακή (Haranen, 2016; Yang et al., 2019). Δεύτερον, όσο χρειάζεται εκ των προτέρων γνώση για ολόκληρο το σύστημα του σκάφους για τη βαθμονόμηση των ΜΥΑ, η

ανάπτυξη και η εφαρμογή τους μπορεί να περιοριστεί, επειδή αυτή η γνώση μπορεί να είναι δύσκολο να κατανοηθεί από έναν μη ειδικό. Τρίτον, καθώς τα ΜΥΑ είναι ντετερμινιστικά μοντέλα, πράγμα που σημαίνει ότι η δομή και οι παράμετροί τους δίνονται και καθορίζονται και επομένως δεν μπορεί να συμπεριληφθεί τυχαιότητα για να επιτρέψει τη μοντελοποίηση της αβεβαιότητας των δεδομένων. Κατά συνέπεια, είναι δύσκολο να βελτιωθούν οι επιδόσεις τους δεδομένου ότι τα δεδομένα συσσωρεύονται κατά τη λειτουργία του πλοίου. Επιπλέον, η ντετερμινιστική ιδιότητα καθιστά επίσης τα ΜΥΑ ευάλωτα σε θορυβώδη δεδομένα, τα οποία είναι κοινά στην πράξη.

### **2.6.2 Πρόβλεψη κατανάλωσης καυσίμου**

Τα μοντέλα πρόβλεψης κατανάλωσης καυσίμου (ΠΚΚ) που βασίζονται σε μοντέλα παλινδρόμησης είναι ένας τύπος κλασικού μοντέλου που χρησιμοποιείται ευρέως σε μελέτες για την πρόβλεψη κατανάλωσης καυσίμου πλοίων. Η διαδικασία ξεκινά με την απόκτηση χαρακτηριστικών/δεδομένων και την προεπεξεργασία. Στη συνέχεια, γίνονται λογικές υποθέσεις και επιλέγονται κατάλληλα μοντέλα παλινδρόμησης. Στη συνέχεια, οι παράμετροι του μοντέλου εκτιμώνται χρησιμοποιώντας πραγματικά ή προσομοιωμένα επιχειρησιακά δεδομένα πλοίου και, τέλος, η προσαρμογή του μοντέλου και επικυρώνονται οι ικανότητες γενίκευσης.

Ένα από τα ΠΚΚ βασίζεται σε στατιστική μοντελοποίηση για την πρόβλεψη κατανάλωσης καυσίμου, η οποία στοχεύει κυρίως στον εντοπισμό της σχέσης μεταξύ κατανάλωσης καυσίμου και ταχύτητας πλεύσης, καθώς πιστεύεται ευρέως από ερευνητές και επαγγελματίες ότι η ταχύτητα πλεύσης του πλοίου είναι ο πιο σημαντικός καθοριστικός παράγοντας της κατανάλωσης καυσίμου πλοίου. Ο ρυθμός κατανάλωσης καυσίμου ενός πλοίου στη θάλασσα συνήθως αντιμετωπίζεται ως ανάλογος της ταχύτητας πλεύσης του σε ισχύ  $\alpha$ . Ο κυβικός νόμος, ο οποίος υιοθετεί  $\alpha = 3$ , είναι ιδιαίτερα γνωστός (Du et al., 2019).

Στην πράξη, ωστόσο, το  $\alpha$  μπορεί να είναι μικρότερο ή μεγαλύτερο από 3 ανάλογα με πολλούς παράγοντες, όπως τον τύπο του πλοίου, την πραγματική ταχύτητα πλεύσης και τη γύρω θάλασσα και τις καιρικές συνθήκες (Wang and

Meng, 2012). Αν και η σχέση κυβικού νόμου μεταξύ της ταχύτητας πλεύσης ενός πλοίου και του ρυθμού κατανάλωσης καυσίμου είναι ευρέως αποδεκτή, οι Notteboom and Cariou (2009) διεξήγαγαν μια πρωτοποριακή μελέτη χρησιμοποιώντας ανάλυση παλινδρόμησης στα λειτουργικά και μηχανικά δεδομένα των πλοίων που εξάγονται από τη βάση δεδομένων Fairplay του Lloyd και εκτίμησαν μια εμπειρική σχέση μεταξύ ταχύτητα πλεύσης και εγκατεστημένη ισχύς για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Έκτοτε, πολυάριθμες μελέτες εκτιμούν τη σχέση μεταξύ της ταχύτητας πλεύσης του πλοίου και των αντίστοιχων ρυθμών κατανάλωσης καυσίμου για διαφορετικές κατηγορίες πλοίων υπό διάφορες συνθήκες. Πολλές μελέτες χρησιμοποιούν δεδομένα λειτουργίας πλοίου και μηχανικά δεδομένα για τη βαθμονόμηση των καμπυλών ταχύτητας-κατανάλωσης καυσίμου, αλλά οι περισσότερες δεν λαμβάνουν ρητά υπόψη την επίδραση της γύρω θάλασσας και των καιρικών συνθηκών.

Οι Adland et al. (2018, 2020) ενσωματώνουν διάφορες τέτοιες συνθήκες, όπως άνεμο, διόγκωση, ρεύμα και κύματα, στα στατιστικά μοντέλα πρόβλεψης κατανάλωσης καυσίμου. Οι Adland et al. (2018) επικεντρώνονται επίσης στην επίδραση του περιοδικού καθαρισμού του κύτους και των εργασιών ξηρού ελλιμενισμού στην ενεργειακή απόδοση των σκαφών και αργότερα (Adland et al. 2020) μελέτησαν εις βάθος τις καμπύλες κατανάλωσης καυσίμου-ταχύτητας, που και οι δύο θέτουν σημαντικά αλλά και προκλητικά ζητήματα στην πρόβλεψη και τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης καυσίμου των σκαφών. Πιο εξελιγμένα μοντέλα λαμβάνουν υπόψη εκτός από λειτουργικούς και μηχανικούς, παράγοντες όπως θαλάσσιες και καιρικές συνθήκες και δεδομένα συντήρησης πλοίων. Μεταξύ των στατιστικών μοντέλων για την πρόβλεψη κατανάλωσης καυσίμου, τα μοντέλα απλής και πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, είναι δημοφιλή. Για παράδειγμα, οι Adland et al. (2018) χρησιμοποιούν μεσημεριανές αναφορές για στόλο 8 πανομοιότυπων δεξαμενόπλοιων αργού πετρελαίου μεγέθους Aframax και για στόλο 10 δεξαμενόπλοιων προϊόντων πετρελαίου Aframax και 6 Σκάφη Suezmax (Adland et al., 2020) για τον εντοπισμό των σχέσεων μεταξύ των διαφόρων παραγόντων που επηρεάζουν και τις συνθήκες κατανάλωσης καυσίμου του σκάφους.

Οι Le et al. (2020) χρησιμοποιούν τα αρχεία ταξιδιών περισσότερων από 100 πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων για να υπολογίσουν την κατανάλωση καυσίμου. Αναπτύσσονται επίσης μοντέλα λειτουργικής βελτιστοποίησης πλοίων που στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης/κόστους καυσίμου. Μπορεί να κατασκευαστεί μια συνάρτηση που ελαχιστοποιεί την κατανάλωση καυσίμου και μεγιστοποιεί τη συμφωνία επιπέδου εξυπηρέτησης μέσω ενός συστήματος υποστήριξης αποφάσεων, με στόχο να υποστηρίξει τους λήπτες αποφάσεων που δεν είναι ειδικοί στην πρόβλεψη και τη μαθηματική μοντελοποίηση και ανάλυση (Lee et al., 2018). Ωστόσο, οι μεταβλητές απόφασης ποικίλλουν. Μπορεί να εξετάζεται μόνο η ταχύτητα πλεύσης ή και συνδυαστικά η ταχύτητα πλεύσης και το λιμάνι ανάπτυξης/καυσίμων του πλοίου.

### **2.6.3 Συνδυασμός μοντέλου υπολογισμού αντιστάσεων - πρόβλεψης κατανάλωσης καυσίμου**

Υπάρχουν δύο τύποι συνδυασμών στη βιβλιογραφία. Στον πρώτο τύπο, δηλαδή ο διαδοχικός συνδυασμός, αναπτύσσονται δύο ή περισσότερα μοντέλα σε μια σειρά, συμπεριλαμβανομένων τουλάχιστον ενός ΜΥΑ και ενός ΠΚΚ, και στη συνέχεια τα συνδυάζονται για να σχηματίσουν ένα ενιαίο μοντέλο. Για παράδειγμα, ένα ΠΚΚ αναπτύσσεται για την επεξεργασία των πρωτογενών δεδομένων και τα αρχικά αποτελέσματα πρόβλεψης τροφοδοτούνται στη συνέχεια σε ένα ΜΥΑ ή αντίστροφα (Leifesson et al., 2008; Coraddu et al., 2017).

Ο άλλος τύπος είναι τα παράλληλα μοντέλα. Σε μια τέτοια περίπτωση, ένα ΜΥΑ εγκαθίσταται αρχικά με βάση τις θεωρητικές αρχές και τους φυσικούς νόμους και στη συνέχεια οι άγνωστες παράμετροι εκτιμώνται από τα ΠΚΚ από πειραματικά δεδομένα (Meng et al., 2016; Yang et al., 2019).

Σε μια άλλη περίπτωση, η *a priori* γνώση (που χρησιμοποιείται σε ΜΥΑ) ενσωματώνεται σε ένα ΠΚΚ εισάγοντας την τακτοποίηση μοντέλων (Coraddu et al., 2017 και 2018). Επί του παρόντος, υπάρχουν λίγα συνδυαστικά μοντέλα για την πρόβλεψη κατανάλωσης καυσίμου πλοίου. Τα μοντέλα που αναπτύσσονται για την πρόβλεψη κατανάλωσης καυσίμου χρησιμοποιούν λειτουργικά δεδομένα πλοίου, δεδομένα θαλάσσης και καιρού, και τα περισσότερα χρησιμοποιούν επίσης



μηχανικά δεδομένα πλοίου. Ωστόσο, τα δεδομένα συντήρησης πλοίων δεν χρησιμοποιούνται σε αυτά τα μοντέλα. Όσον αφορά τη δομή των ανεπτυγμένων συνδυαστικών μοντέλων, αναπτύσσονται τόσο διαδοχικά όσο και παράλληλα και τα περισσότερα από τα άλλα αναπτύσσονται. Ένα πλεονέκτημα αυτών είναι ότι μπορούν να συνδυάσουν ΜΥΑ, τα οποία είναι εξηγήσιμα και βασίζονται σε στέρεες φυσικές γνώσεις, με ΠΚΚ, τα οποία έχουν υψηλή ακρίβεια.

Θεωρητικά, επομένως, η απόδοσή τους θα πρέπει να είναι καλύτερη από αυτή των ΠΚΚ και επίσης εν μέρει εξηγήσιμη ακόμη και με λιγότερα ιστορικά δεδομένα εκπαίδευσης (Yang et al., 2019). Αυτό θα πρέπει να αποτρέπει σε μεγάλο βαθμό τα παράλογα αποτελέσματα πρόβλεψης που έρχονται σε αντίθεση με τη γνώση του τομέα και να εγγυάται την ακρίβεια της πρόβλεψης.

## **2.7 Σχεδιασμός βέλτιστης διαδρομής**

### **2.7.1 Σχεδιασμός διαδρομής**

Κατασκευάζεται μια προκαταρκτική διαδρομή στο σύστημα σχεδιασμού διαδρομής, στην οποία λαμβάνει επίσης τις συστάσεις για τη βέλτιστη ταχύτητα εκτός από την ίδια τη διαδρομή. Σε περίπτωση που είναι απαραίτητο να φτάσει σε μια συγκεκριμένη ώρα RTA (Απαιτούμενη ώρα άφιξης, Required Time of Arrival), ορισμένοι σχεδιαστές δρομολογίων μπορούν να δείξουν μια κατά προσέγγιση κατανάλωση καυσίμου. Το σκάφος παρακολουθείται πλήρως σε περίπτωση παρεκκλίσεων από τη διαδρομή και ισχυρών αποκλίσεων ταχύτητας. Τα σύγχρονα συστήματα σχεδιασμού διαδρομής επιτρέπουν τη χρήση παγκόσμιων μετεωρολογικών προβλέψεων για τη δημιουργία βέλτιστων διαδρομών. Τέτοια εργαλεία χρησιμοποιούν μοντέλα για να βοηθήσουν τους διαχειριστές της ναυτιλιακής εταιρείας να προγραμματίσουν εκ των προτέρων και τον καπετάνιο να αποφασίσει επί τόπου ποια διαδρομή θα βοηθήσει τελικά το πλοίο να επιτύχει τον πρωταρχικό του στόχο - να φτάσει με ασφάλεια και έγκαιρα στο λιμάνι προορισμού (Grifoll et al., 2018).

Για τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, το βασικό σημείο είναι η κατασκευή μιας διαδρομής λαμβάνοντας υπόψη τον απαιτούμενο χρόνο άφιξης. Για ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, η ιδανική διαδρομή θα ήταν αυτή

που θα επέτρεπε στο πλοίο να αποφύγει την υπερβολική αλλαγή ταχύτητας ώστε να διατηρεί σταθερή ισχύ. Άλλοι παράγοντες μπορεί επίσης να επηρεάσουν ποια διαδρομή είναι πιο οικονομική. Οι τιμές των ναύλων και η ταχύτητα εντός και εκτός των περιοχών ελέγχου εκπομπών παίζουν εξίσου σημαντικό ρόλο στο κόστος ενός ταξιδιού με το κόστος των καυσίμων. Παλαιότερες προσεγγίσεις δρομολόγησης απλώς συνιστούν το πλοίο να πηγαίνει πολύ γρήγορα για το πρώτο μέρος του ταξιδιού και στη συνέχεια να το επιβραδύνει μόλις μπορέσει να εκτελέσει άνετα RTA. Όμως η επίδραση πολλών εξωτερικών παραγόντων, συμπεριλαμβανομένης της μεταβλητότητας του καιρού, συμβάλλει στις ιδιαιτερότητές τους. Ο προσχεδιασμός του RTA είναι κυρίως για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, αλλά μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για γεωτρήσεις και δεξαμενόπλοια, ενώ δεν είναι πάντα αποτελεσματικός (Aslam et al., 2020).

Προτού δοθούν πληροφορίες, πρέπει να είναι γνωστός ο τύπος και το μέγεθος του σκάφους. Για παράδειγμα, ένα πλοίο μεταφοράς χύδην φορτίου Panamax ή ένα εξαιρετικά μεγάλο πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων σε συνθήκες έντονων καιρικών συνθηκών ελέγχονται πολύ διαφορετικά από, για παράδειγμα, το Handymax. Είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη οι συνθήκες φόρτωσης και ο τύπος φορτίου. Ένα σχεδόν άδειο πλοίο θα λειτουργούσε διαφορετικά από ένα φορτωμένο πλοίο και ένα φορτωμένο πλοίο με ευαίσθητο φορτίο, όπως φάρμακα, θα χρειαζόταν μια διαφορετική διαδρομή από μια διαδρομή με περισσότερο φορτίο χύδην. Μόλις συλλεχθούν αυτά τα δεδομένα, μπορεί να καθοριστεί ποιο είδος προσχεδιασμού είναι κατάλληλο για το σκάφος (Muzhoffar et al., 2022).

Για το ρεαλιστικό σχεδιασμό των λειτουργιών του πλοίου, είναι απαραίτητο να μοντελοποιηθεί η εξάρτηση μεταξύ των παραμέτρων που σχετίζονται με το πλοίο και άλλων κατάλληλων μεταβλητών. Ειδικά, οι επιπτώσεις της ταχύτητας στην κατανάλωση καυσίμου είναι σημαντικές για δύο λόγους. Πρώτον, η κατανάλωση καυσίμου αποτελεί μεγαλύτερο μέρος των λειτουργικών εξόδων και ένας δεύτερος λόγος είναι ότι όλοι οι υπολογισμοί για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα βασίζονται στην κατανάλωση καυσίμων. Η ταχύτητα πλεύσης των σκαφών επηρεάζει άμεσα την κατανάλωση καυσίμου. Με άλλα λόγια, η αύξηση της ταχύτητας έχει οδηγήσει σε αυξημένη κατανάλωση καυσίμου και κόστος. Από την

άλλη πλευρά, η μείωση του ρυθμού ταχύτητας επηρεάζει το χρονοδιάγραμμα του πλοίου. Η κατανάλωση καυσίμου σταδιακά αυξάνεται με την αύξηση της ταχύτητας και η ανοδική τάση συνεχίζει να επεκτείνεται (Lashgari et al., 2021).

Τα συστήματα πλοήγησης εξελίσσονται τώρα και βελτιώνουν την ασφάλεια της ναυσιπλοΐας και την οικονομική αποδοτικότητα της χρήσης του πλοίου. Διακρίνονται τα πιο διάσημα συστήματα σχεδιασμού διαδρομής: "Navi-Planner" της Tranzas, "PassageManager" της ChartCo, "Bon Voyage System" της StormGeo, "Ship Performance Optimization" System" της MeteoGroup, "Commercial Marine Vessel Routing" της Jeppesen, Navtor (Veretennik et al., 2022). Αυτά τα συστήματα έχουν μια σειρά λειτουργιών και περιορισμούς στον αριθμό των προσφερόμενων υπηρεσιών, συμπεριλαμβανομένου του καιρού. Για τη χρήση συστημάτων σχεδιασμού διαδρομής με μέγιστη αποτελεσματικότητα, τα συστήματα σχεδιασμού διαδρομής απαιτούν σύνδεση με τον διακομιστή της εταιρείας και ενημέρωση πληροφοριών δύο ή περισσότερες φορές την ημέρα. Σε αυτή την περίπτωση, η διαδρομή ενημερώνεται για να ληφθούν υπόψη οι αλλαγές στη ναυσιπλοΐα και οι υδρομετεωρολογικές πληροφορίες. Ως πρόσθετα χαρακτηριστικά που μπορούν να συμπεριληφθούν στη λειτουργικότητα των συστημάτων σχεδιασμού διαδρομής, προσφέρονται σύγχρονες δυνατότητες επεξεργασίας πληροφοριών από ψηφιακούς και αναλογικούς αισθητήρες και χρησιμοποιούνται επίσης για τη βελτιστοποίηση της κίνησης του σκάφους πρόσθετες δυνατότητες σύγχρονου εξοπλισμού πλοήγησης πλοίων (Felski & Zwolak, 2020).

Έτσι, η χρήση της μηχανικής εκμάθησης σε λύσεις Marine Digital FOS (Fuel Optimization System) που επεξεργάζονται δεδομένα σχετικά με διάφορους παράγοντες που επηρεάζουν την ασφαλή μεταφορά, επιτρέπει τη δημιουργία μιας διαδρομής με διάφορους βαθμούς οικονομίας, ταχύτητας και το ελάχιστο επίπεδο ασφάλειας και άνεσης και λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες του σκάφους με μεγαλύτερη ακρίβεια. Το Marine Digital FOS συλλέγει και επεξεργάζεται δεδομένα για την κατάσταση του σκάφους και το περιβάλλον του, επιτρέποντάς μια πιο λεπτομερή πρόβλεψη και λήψη με μεγαλύτερη ακρίβεια του αντίκτυπου του περιβάλλοντος στο σκάφος κατά την κατασκευή της βέλτιστης διαδρομής στη θάλασσα. Μπορούν να διαμορφωθούν 4 λύσεις που είναι κατάλληλες για

ναυλώσεις, πλοιοκτήτες και διαχειριστές στόλου διαφορετικών τύπων πλοίων για (Chen, 2022):

1. Δρομολόγηση καιρού και βελτιστοποίηση ταξιδιού
2. Παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο της απόδοσης του σκάφους
3. Προβλεπτική συντήρηση του εξοπλισμού επί του σκάφους
4. Μείωση κατανάλωσης καυσίμου και εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

### **2.7.2 Γραμμικός προγραμματισμός για την βελτιστοποίηση των διαδρομών**

Οι Cho & Perakis (1996) δημιούργησαν ένα σύνολο υποψήφιων διαδρομών και εφάρμοσαν τον γραμμικό προγραμματισμό για να επιλέξουν το βέλτιστο σύνολο διαδρομών για πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων.

Ο Fagerholt (1999) πρότεινε ένα μοντέλο διαχωρισμού συνόλου για τον προσδιορισμό του βέλτιστου μεγέθους του στόλου και των αντίστοιχων εβδομαδιαίων δρομολογίων.

Οι Bendall & Stent (2001) ανέπτυξαν ένα μοντέλο προγραμματισμού για μια υπηρεσία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων υψηλής ταχύτητας. Έδωσαν έναν νέο αλγόριθμο για την επίλυση του προβλήματος προγραμματισμού των εμπορευματοκιβωτίων.

Οι Chen & Zeng (2010) πρότειναν μια μέθοδο βασισμένη σε γενετικό αλγόριθμο δύο επιπέδων για την επίλυση της βελτιστοποίησης του δικτύου ναυτιλίας εμπορευματοκιβωτίων και των λειτουργιών του υπό μεταβαλλόμενη ζήτηση φορτίου και ναύλων, η οποία ήταν ένα πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού μικτού ακέραιου αριθμού με στόχο τη μεγιστοποίηση του μέσου κέρδους μονάδας πλοίου σε τρία στάδια.

Οι Reinhardt & Pisinger (2012) αντιμετώπισαν τα προβλήματα σχεδιασμού δικτύου και αναθέσεων του στόλου και καθιέρωσαν ένα μικτό ακέραιο γραμμικό μοντέλο προγραμματισμού για να ελαχιστοποιήσουν το συνολικό κόστος. Για να αντικατοπτρίζουν καλύτερα την πραγματική κατάσταση, έλαβαν υπόψη το κόστος της μεταφόρτωσης και τις χωρητικότητες που εξαρτώνται από τη διαδρομή. Όταν

πρόκειται για το πρόβλημα βελτιστοποίησης δρομολόγησης πλοίων σε ένα δίκτυο hub-and-spoke, οι περισσότερες έρευνες επικεντρώθηκαν κυρίως στη μεταφορά τακτικών γραμμών.

Οι Hsieh & Chang (2001) ερεύνησαν τη δρομολόγηση των τακτικών γραμμών πλοίων χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο δικτύου hub-and-spoke. Οι Sambracos et al. (2004) χρησιμοποίησαν τη διατύπωση VRP (vehicle routing problem) για τις επιχειρησιακές ανάγκες ενός στόλου πλοίων επιτρέποντας τη διερεύνηση προβλημάτων υψηλότερων διαστάσεων σε σχέση με το μέγεθος του στόλου, τις τοποθεσίες ζήτησης και τα φορτία και έδωσαν μια πιο ολοκληρωμένη αναφορά σε σχέση με το κόστος και την αποδοτικότητα και τη χρήση του στόλου.

Οι Hsu & Hsieh (2007) διατύπωσαν ένα μοντέλο δύο στόχων για τον προσδιορισμό της βέλτιστης δρομολόγησης της γραμμής, το μέγεθος του πλοίου και τη συχνότητα πλεύσης ελαχιστοποιώντας το κόστος αποστολής και το κόστος αποθέματος. Το μοντέλο τους όχι μόνο παρείχε ένα εργαλείο για την ανάλυση της αντιστάθμισης μεταξύ του κόστους αποστολής και του κόστους αποθέματος, αλλά παρείχε επίσης την ευελιξία στη λήψη αποφάσεων για τους μεταφορείς εμπορευματοκιβωτίων.

Οι Tuljak-Suban & Twrdy (2008) έδωσαν μια λεπτομερή ανάλυση των θαλάσσιων μεταφορών μεταξύ του λιμένα κόμβου στη Μεσόγειο και των τροφοδοτών του στη βόρεια Αδριατική. Καθιέρωσαν ένα μοντέλο προγραμματισμού δύο επιπέδων με παραλαβή και παράδοση για την προσομοίωση του συστήματος τροφοδοσίας στη βόρεια Αδριατική.

Οι Takano & Arai (2009) πρότειναν έναν γενετικό αλγόριθμο για το σχεδιασμό ενός δικτύου hub-and-spoke για τη μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων. Το πρόβλημα βασιζόταν σε έναν σταθερό αριθμό διανομέων και κάθε ακτίνα συνδέθηκε σε έναν μόνο διανομέα. Οι τοποθεσίες των λιμένων κόμβων ήταν μέρος της απόφασης. Δοκίμασαν μερικές διαφορετικές τιμές για τον αριθμό των θυρών hub. Χρησιμοποίησαν τη μέθοδό τους σε 16 ασιατικά λιμάνια επιπλέον του Ρότερνταμ και του Λος Άντζελες.

Οι Gelareh et al., (2010) πρότειναν μια διαμόρφωση μικτού ακέραιου προγραμματισμού για δίκτυο hub-and-spoke σε ένα ανταγωνιστικό περιβάλλον. Έλυσαν το μοντέλο συνδυάζοντας μια μέθοδο Lagrangian (μια διαδικασία για την εύρεση μέγιστων και ελάχιστων τιμών μιας συνάρτησης πολλών μεταβλητών όταν οι μεταβλητές περιορίζονται από πρόσθετους όρους) με μια ευρετική μέθοδο. Προκειμένου να βελτιστοποιηθεί ένα σύστημα ναυτιλίας τακτικών γραμμών και να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις της υπηρεσίας τακτικών γραμμών με σταθερά χρονοδιαγράμματα, οι Yang et al. (2011) καθιέρωσαν ένα μη γραμμικό μοντέλο μικτού ακέραιου για τον σχεδιασμό του στόλου.

Οι Andersson et al. (2011) θεώρησαν ένα πρόβλημα παραλαβής και παράδοσης στη θάλασσα με χρονικά παράθυρα και διάσπαση. Πρότειναν μια μέθοδο λύσης που βασίζεται σε χρονοδιαγράμματα μεμονωμένων πλοίων σχεδιασμένα εκ των προτέρων και δύο εναλλακτικών μοντέλων ροής διαδρομής που ασχολούνται με την επιλογή χρονοδιαγραμμάτων πλοίων και την ανάθεση ποσοτήτων φορτίου στα χρονοδιαγράμματα. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέθοδος μπορεί να παρέχει βέλτιστες λύσεις σε μικρές ρεαλιστικές περιπτώσεις σχεδιασμού. Παρείχαν ένα σημαντικό σημείο εκκίνησης για έρευνα σχετικά με άλλες μεθόδους ακριβούς λύσης για το πρόβλημα παραλαβής και παράδοσης στη θάλασσα με χρονικά παράθυρα και χωριστά φορτία.

Οι Meng & Wang (2011) πρότειναν ένα πρόβλημα σχεδιασμού δικτύου υπηρεσιών ναυτιλιακής γραμμής με συνδυασμένες λειτουργίες κόμβου και ακτίνας και κλήσης πολλαπλών θυρών και επανατοποθέτηση κενού εμπορευματοκιβωτίου και στη συνέχεια ανέπτυξαν ένα μοντέλο προγραμματισμού μικτού ακέραιου για το ρεαλιστικό πρόβλημα λειτουργίας της ναυτιλίας σε Ασία-Ωκεανία, και έδειξαν ότι το προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να επιλυθεί αποτελεσματικά με το CPLEX.

### **2.7.3 Γραμμικός προγραμματισμός για την ελαχιστοποίηση του κόστους**

Ο Khan (2014) ανέφερε πως βελτιστοποίηση σημαίνει χρήση πόρων και υπάρχουσας τεχνολογίας με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Ο καλύτερος σχεδιασμός και η εκτέλεσή του έχει ως αποτέλεσμα τη βελτιστοποίηση πολλών προβλημάτων. Τα ποσοτικά μοντέλα και τα μαθηματικά εργαλεία όπως ο γραμμικός

προγραμματισμός επιτρέπουν καλύτερα αποτελέσματα και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σύγχρονος υπολογιστικός εξοπλισμός για το σκοπό αυτό. Τα διάφορα προβλήματα λειτουργικού σχεδιασμού για προβλήματα μεταφοράς επιλύονται με μαθηματικές μεθόδους. Η μέθοδος γραμμικού προγραμματισμού χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση των περισσότερων από αυτά τα προβλήματα μεταφοράς. Ένα πρόβλημα μεταφοράς που περιλαμβάνει τη μεταφορά εμπορεύματος από την αποθήκη της εταιρείας στην αποθήκη του διανομέα μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας γραμμικό προγραμματισμό προκειμένου να βρεθεί το βέλτιστο κόστος μεταφοράς. Το Excel Solver έχει χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση και την επίλυση αυτού του προβλήματος. Αν και αυτό το μοντέλο έχει κάποιους περιορισμούς, ο Khan (2014) πρότεινε πως εάν η εταιρεία εφαρμόσει τη λύση που επιτεύχθηκε μέσω αυτής της μελέτης, θα μπορέσει να ελαχιστοποιήσει το κόστος μεταφοράς, γεγονός που θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της κερδοφορίας. Στο μέλλον ανέφερε επίσης, πως θα μπορούσε να αναπτυχθεί ένα πιο βελτιστοποιημένο μοντέλο αυτού του προβλήματος, απαλλαγμένο από τους περιορισμούς του τρέχοντος.

Η μελέτη των Krishnan & Masrom (2022) στόχευε στην ανασκόπηση των μεθόδων γραμμικού προγραμματισμού που χρησιμοποιεί ο Karsh R. Shah για την επίλυση του προβλήματος μεταφοράς που αντιμετωπίζει η MITCO Labuan Company Limited (MLCL). Στη μελέτη του Karsh R. Shah, υιοθετήθηκε η μέθοδος Vogel's Approximation Method (VAM) και η μέθοδος Modified Distribution (MODI) για τον προσδιορισμό του καλύτερου σχεδίου διανομής πολυμερών υλικών που δίνει το βέλτιστο κόστος αποστολής από τέσσερα εργοστάσια παραγωγής Petronas σε τέσσερις προορισμούς ζήτησης. Η τρέχουσα μελέτη δημιούργησε εκ νέου την αναπαράσταση δικτύου, το μαθηματικό μοντέλο και τα μοντέλα υπολογιστικών φύλλων ως συγκρίσεις. Για τον προσδιορισμό της αρχικής βασικής εφικτής λύσης, χρησιμοποιήθηκαν η μέθοδος North West Corner Method (NWCN) και η VAM. Στη συνέχεια, η ανάλυση ευαισθησίας χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση της επίδρασης της αβεβαιότητας του κόστους αποστολής ανά μονάδα στο συνολικό κόστος μεταφοράς της εταιρείας. Σε σύγκριση με τη VAM, το κόστος αποστολής της αρχικής βασικής εφικτής λύσης μέσω του NWCN ήταν το χαμηλότερο, επομένως,

ελέγχθηκε για βέλτιστη χρήση με τη μέθοδο simplex (χρησιμοποιώντας το Excel Solver). Η ανάλυση ευαισθησίας που αναπτύχθηκε σε αυτή τη μελέτη θα μπορούσε να βοηθήσει περαιτέρω την εταιρεία στον εντοπισμό της ισορροπίας και του εύρους της παραγωγικής ικανότητας, χωρίς να επηρεάσει τη βέλτιστη λύση. Τελικά, αυτή η μελέτη απέδειξε ότι η εφαρμογή του γραμμικού προγραμματισμού σε έναν οργανισμό αυξάνει την αποτελεσματικότητα και την αποδοτικότητα των λειτουργιών του, επιτρέποντας στους οργανισμούς να μεγιστοποιούν τα κέρδη ελαχιστοποιώντας το κόστος.

Ο κύριος σκοπός της εργασίας των Prifti et al., (2020) ήταν να εξετάσει λεπτομερώς το πρόβλημα του γραμμικού προγραμματισμού εξετάζοντας ένα παράδειγμα και να προσπαθήσει να λύσει το πρόβλημα. Ο σκοπός του προβλήματος των μεταφορών στην περίπτωσή αυτή ήταν η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους μεταφοράς από την προέλευση στον προορισμό με την τήρηση των ορίων προσφοράς και ζήτησης, προκειμένου να αυξηθεί το κέρδος από τις πωλήσεις. Αυτή η εργασία στόχευε στο να προσδιορίσει το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης του συνολικού κόστους μεταφοράς με τον προσδιορισμό της βέλτιστης διανομής του προϊόντος, από τις 2 περιοχές παραγωγής στους 9 μεγάλους διανομείς που είναι γεωγραφικά διασκορπισμένοι. Η Επιστήμη της Διαχείρισης και η Επιχειρησιακή Έρευνα χρησιμοποιήθηκαν για την εύρεση της καλύτερης λύσης για το πρόβλημα των μεταφορών. Η εργασία εξέτασε ένα πραγματικό πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού με λεπτομέρεια παίρνοντας ένα παράδειγμα σε μια εταιρεία της Αλβανίας. Για την υπό εξέταση εταιρεία το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης του κόστους μεταφοράς επιλύθηκε με την επίλυση 3 μεθόδων: Την μέθοδο NWCM, την μέθοδο Least Cost Method και την VAM. Οι υπολογισμοί έδειξαν ότι με βάση τη ζήτηση από τις 9 γεωγραφικές τοποθεσίες (προορισμούς) και τη χωρητικότητα που προσφέρουν τα δύο εργοστάσια παραγωγής (πηγές), αποδείχθηκε ότι η βέλτιστη λύση προκύπτει με τη μέθοδο VAM και με ελάχιστο κόστος 386893,17. Τέλος, η ζήτηση για τις 3 γεωγραφικές περιοχές καλύπτεται από το εργοστάσιο παραγωγής S1, ενώ για τις υπόλοιπες 6 περιοχές από το εργοστάσιο παραγωγής S2.



Τα στενά και τα κανάλια χρησίμευαν πάντα ως βασικοί κόμβοι στα ναυτιλιακά δίκτυα. Η φραγή ενός στενού ή καναλιού θα οδηγήσει σε παρεκκλίσεις του πλοίου και αυξημένο κόστος μεταφοράς. Για να μετρήσουν αυτόν τον αντίκτυπο στον κινεζικό στόλο, η μελέτη των Gao & Lu (2019) ανέπτυξε ένα μαθηματικό μοντέλο που βασίστηκε σε μια διατύπωση προγραμματισμού. Κάθε στενό ή κανάλι θεωρείται ότι είναι φραγμένο με τη σειρά του και το κόστος μεταφοράς για τον κινεζικό στόλο σε διαφορετικά σενάρια υπολογίζεται και συγκρίνεται χρησιμοποιώντας την προτεινόμενη διαμόρφωση προγραμματισμού προκειμένου να μετρηθεί ο αντίκτυπος του αποκλεισμένου στενού ή καναλιού στον κινεζικό στόλο. Οι μεγαλύτερες αυξήσεις στο κόστος μεταφοράς έχουν μεγαλύτερες επιπτώσεις στον στόλο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η φραγή του Στενού του Ορμούζ θα είχε τον μεγαλύτερο αντίκτυπο από την φραγή κάθε άλλου στενού ή καναλιού και θα προκαλούσε απώλεια μέρους των εισαγωγών και των εξαγωγών καθώς ένα τέτοιο μπλοκάρισμα δεν θα μπορούσε να αντιμετωπιστεί μέσω παρεκκλίσεων της πορείας των πλοίων. Με βάση το αυξημένο κόστος μεταφοράς, τα τέσσερα στενά ή κανάλια που θα είχαν τον μεγαλύτερο αντίκτυπο σε περίπτωση αποκλεισμού τους ήταν τα στενά Mandeb Strait, the Suez Canal, the Sunda Strait and the English Channel.

## **2.8 Στρατηγικές διαχείρισης**

Η συσχέτιση με τις στρατηγικές διαχείρισης κατανάλωσης καυσίμου ενός πλοίου είναι πώς να μειωθεί η επίδραση της ανακρίβειας των μοντέλων πρόβλεψης κατανάλωσης καυσίμου αναφορικά με τη λειτουργική βελτιστοποίηση του πλοίου. Ένας τρόπος είναι να μειωθεί σε πρώτο στάδιο η ανακρίβεια του μοντέλου πρόβλεψης κατανάλωσης καυσίμου, ωστόσο μπορεί να είναι δύσκολο να βελτιωθεί περαιτέρω η ακρίβεια της πρόβλεψης δεδομένης της περιορισμένης ποιότητας και ποσότητας δεδομένων. Ως εκ τούτου, άλλοι τρόποι για τη μείωση τέτοιων δυσμενών επιδράσεων, ιδίως λαμβάνοντας υπόψη τη σχέση μεταξύ των μοντέλων πρόβλεψης κατανάλωσης καυσίμου και διαχείρισης, είναι άξιοι διερεύνησης. Ένα άλλο ερώτημα είναι πώς εξετάζεται η διακύμανση των παραγόντων με αβεβαιότητα στο μοντέλο λειτουργικής βελτιστοποίησης του πλοίου, όπως οι συνεχώς μεταβαλλόμενες θαλάσσιες και καιρικές συνθήκες, οι τιμές των καυσίμων και οι

ναύλοι. Λίγες μελέτες (μία εξαίρεση είναι οι Wang & Meng (2012) συνδυάζουν μοντέλα πρόβλεψης κατανάλωσης καυσίμου πλοίων που βασίζονται σε δεδομένα με σχεδιασμό δικτύων τακτικών γραμμών. Τα μοντέλα πρόβλεψης κατανάλωσης καυσίμου που αναπτύχθηκαν από πειραματικά ή επιχειρησιακά δεδομένα είναι επίσης άξια διερεύνησης, καθώς μπορούν να αποτελέσουν κατευθυντήρια γραμμή για τις καθημερινές λειτουργίες του σκάφους.

Εκτός από τους αυστηρότερους κανονισμούς για τις εκπομπές αερίων και ρύπων, οι υψηλές τιμές καυσίμων που εμφανίζονται στη ναυτιλιακή αγορά έχουν επίσης ωθήσει τη ναυτιλιακή βιομηχανία να υιοθετήσει μέτρα για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και συνεπώς τη μείωση των εκπομπών αερίων και ρύπων (Beşikçi et al., 2016).

Επί του παρόντος, δύο κύριες λύσεις εφαρμόζονται για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης των πλοίων: τεχνικές λύσεις και λειτουργικές λύσεις (Theocharis et al., 2019). Οι τεχνικές λύσεις περιλαμβάνουν την αναβάθμιση της προπέλας, τη βελτιστοποίηση του μεγέθους του σκάφους και το σχεδιασμό του σχήματος του κύτους για τη μείωση της αντίστασης του πλοίου, τη χρήση ελαφρών υλικών για τη μείωση του βάρους του σκάφους, την επιλογή αποδοτικών συστημάτων και μηχανημάτων ισχύος, την ανάκτηση της μέρους της χαμένης ενέργειας του κινητήρα και τη χρήση ηλιακής ή αιολικής ενέργειας (Wan et al. 2018).

Τα κοινά επιχειρησιακά μέτρα που υιοθετούνται στη ναυτιλιακή βιομηχανία περιλαμβάνουν τη βελτίωση της συνέπειας των διαδρομών (έγκαιρη άφιξη) με τη χρήση εργαλείων βελτιστοποίησης διαδρομής, τη μείωση των σφαλμάτων στη δρομολόγηση, τη μείωση των περιττών κινήσεων του σκάφους για την ελαχιστοποίηση των ζημιών του πλοίου και του φορτίου, την αύξηση της άνεσης του πληρώματος, τη μείωση της δομικής συντήρησης του πλοίου και τη βελτιστοποίηση δρομολόγησης λαμβάνοντας υπόψη τη διαχείριση – κατανάλωση των καυσίμων, όπως αναφέρθηκε από τον Ballou (2013).

Δεδομένου ότι η υψηλή αστάθεια της ναυτιλιακής αγοράς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τα έσοδα των ναυτιλιακών φορέων, υιοθετείται συνήθως μια χαμηλότερη ταχύτητα πλεύσης (slow steaming) και τα κύρια αποτελέσματα ταξινομούνται από τους Cariou et al. (2019) σε τρεις κατηγορίες: οικονομικές επιπτώσεις, περιβαλλοντικές επιπτώσεις και επιπτώσεις που σχετίζονται με τις υπηρεσίες.

Μια τέτοια ανάλυση παρέχει πολύτιμες γνώσεις σχετικά με τη διαχείριση των πλοίων τόσο για την ακαδημαϊκή έρευνα όσο και για τη ναυτιλιακή βιομηχανία. Ωστόσο, έχει επισημανθεί από τους Wan et al. (2018) ότι τα τεχνικά μέτρα που είναι διαθέσιμα επί του παρόντος κατευθύνουν τη ναυτιλιακή βιομηχανία σε μια ενεργειακά αποδοτική και με χαμηλές εκπομπές άνθρακα κατεύθυνση, επειδή η εφαρμογή τους όχι μόνο απαιτεί μηχανική καινοτομία, αλλά έχει επίσης ένα βαρύ τίμημα: το μέσο κόστος ανά τόνο μείωσης CO<sub>2</sub> κυμαίνεται από 50 έως 200 δολάρια ΗΠΑ, ενώ η τιμή εμπορίας στις Ηνωμένες Πολιτείες είναι 5 έως 15 δολάρια ΗΠΑ ανά τόνο (Eide et al., 2011). Αντίθετα, τα επιχειρησιακά μέτρα για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης έχουν πολύ μικρότερο κόστος και δεν απαιτούν αρχική επένδυση καθώς οι καλά σχεδιασμένες λειτουργικές λύσεις μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας (Wan et al., 2018). Ωστόσο, η εφαρμογή αποτελεσματικών και αποδοτικών λειτουργικών λύσεων είναι σημαντική, καθώς διάφοροι παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν την πραγματική κατανάλωση καυσίμου ενός πλοίου στην πράξη όπως ο σχεδιασμός του πλοίου (π.χ. κύριες διαστάσεις, σχεδιασμός προπέλας, δομή και διάταξη φορτίου), επιχειρησιακή απόδοση του σκάφους (π.χ. ταχύτητα πλεύσης, βύθιση, επένδυση) και οι περιβαλλοντικές συνθήκες. Έτσι η σχέση μεταξύ των παραγόντων που επηρεάζουν και του ρυθμού κατανάλωσης καυσίμου αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία.

Ένα άλλο εμπόδιο ενδεχομένως στην εφαρμογή των λειτουργικών αλλαγών είναι ότι η ίδια η ναυτιλιακή βιομηχανία δυσκολεύεται στο να υιοθετήσει μέτρα ενεργειακής απόδοσης. Αυτό οφείλεται κυρίως σε μια σειρά ζητημάτων στην ανάπτυξη και εφαρμογή στρατηγικών διαχείρισης της κατανάλωσης καυσίμου, συγκεκριμένα κίνητρα στα ενδιαφερόμενα μέρη, ανεπαρκείς πληροφορίες σχετικά με την ενεργειακή απόδοση, αβεβαιότητα πληροφοριών και αποφάσεις που λαμβάνονται για βραχυπρόθεσμο κέρδος (Poulsen & Sornn-Friese 2015).

Επομένως, χρειάζεται να προταθούν και να προωθηθούν πιο αποτελεσματικά και εφαρμόσιμα μέτρα διαχείρισης καυσίμων των πλοίων για τη μείωση της κατανάλωσης του καυσίμου και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης. Είναι ευρέως αποδεκτό ότι η βάση τέτοιων μέτρων είναι η ακριβής εκτίμηση της σχέσης μεταξύ της κατανάλωσης του καυσίμου ενός πλοίου και των καθοριστικών παραγόντων όπως οι μηχανικοί και οι περιβαλλοντικοί παράγοντες χρησιμοποιώντας κατάλληλους αλγόριθμους πρόβλεψης πριν ή και κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού (Soner et al., 2018; Meng et al., 2016; Yang et al., 2019; Farag & Ölçer, 2020).



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3**

### **ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ**

#### **3.1 Ερευνητικά ερωτήματα**

Η μελέτη που έγινε αποσκοπούσε στον προσδιορισμό ενός κατάλληλου μοντέλου μαθηματικού προγραμματισμού για την επιλογή των κατάλληλων κεντρικών νησιώτικων λιμανιών για την από θαλάσσης σύνδεσή τους με τον κεντρικό λιμένα της ηπειρωτικής Χώρας μέσω επιβατηγών πλοίων, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος μεταφοράς, καλύπτοντας την επιβατική ζήτηση των 30 επιμέρους νησιών με τη χρήση μικρότερων πλοιαρίων με την προϋπόθεση ότι η εθνική αρχή μεταφορών, δεσμεύει την GreenJet Maritime S.A. να καλύψει την επιβατική ζήτηση σε όλα τα νησιά.

#### **3.2 Λογισμικό επίλυσης**

Για τον προσδιορισμό ενός κατάλληλου μοντέλου μαθηματικού προγραμματισμού επιλέχθηκε το IBM ILOG CPLEX Optimization Studio, το οποίο χρησιμοποιεί τεχνολογία βελτιστοποίησης αποφάσεων για να βελτιστοποιήσει τις επιχειρηματικές αποφάσεις, να αναπτύξει γρήγορα μοντέλα βελτιστοποίησης και να δημιουργήσει εφαρμογές του πραγματικού κόσμου που μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά τα επιχειρηματικά αποτελέσματα. Το IBM ILOG CPLEX Optimization Studio είναι μια προδιαγραφική λύση ανάλυσης που επιτρέπει την ταχεία ανάπτυξη μοντέλων βελτιστοποίησης αποφάσεων χρησιμοποιώντας μαθηματικό προγραμματισμό και προγραμματισμό περιορισμών. Το CPLEX, επιτρέπει τη βελτιστοποίηση αποφάσεων για τη βελτίωση της αποδοτικότητας, τη μείωση του κόστους και την αύξηση της κερδοφορίας. Το λογισμικό είναι διαθέσιμο μέσω του site <https://www.ibm.com/>.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

### ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

#### 4.1 Παρουσίαση του προβλήματος

Η εταιρεία θαλάσσιων μεταφορών GreenJet Maritime S.A. αναλαμβάνει την κάλυψη της μεταφοράς επιβατών σε 30 «απομακρυσμένους» προορισμούς της νησιωτικής Χώρας, μέσω της μεταφοράς τους αρχικά σε 10 κεντρικά νησιωτικά λιμάνια με μεγάλα επιβατηγά πλοία και μετεπιβίβασής τους σε μικρότερα πλοία. Για το λόγο αυτό πραγματοποίησε έρευνα για την εβδομαδιαία επιβατική ζήτηση του εκάστοτε νησιού. Η μέση εβδομαδιαία ζήτηση σε επιβάτες ανά νησί παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.1.

*Πίνακας 4.1. Εβδομαδιαία επιβατική ζήτηση (σε πλήθος επιβατών) για κάθε νησί*

| <b>Νησί</b> | <b>Επιβατική ζήτηση</b> | <b>Νησί</b> | <b>Επιβατική ζήτηση</b> |
|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|
| <b>N1</b>   | 567                     | <b>N16</b>  | 664                     |
| <b>N2</b>   | 689                     | <b>N17</b>  | 754                     |
| <b>N3</b>   | 432                     | <b>N18</b>  | 573                     |
| <b>N4</b>   | 582                     | <b>N19</b>  | 672                     |
| <b>N5</b>   | 312                     | <b>N20</b>  | 739                     |
| <b>N6</b>   | 304                     | <b>N21</b>  | 553                     |
| <b>N7</b>   | 668                     | <b>N22</b>  | 736                     |
| <b>N8</b>   | 595                     | <b>N23</b>  | 364                     |
| <b>N9</b>   | 697                     | <b>N24</b>  | 719                     |
| <b>N10</b>  | 712                     | <b>N25</b>  | 443                     |
| <b>N11</b>  | 622                     | <b>N26</b>  | 515                     |
| <b>N12</b>  | 446                     | <b>N27</b>  | 658                     |
| <b>N13</b>  | 712                     | <b>N28</b>  | 722                     |
| <b>N14</b>  | 411                     | <b>N29</b>  | 703                     |
| <b>N15</b>  | 334                     | <b>N30</b>  | 334                     |

Για την κάλυψη της ζήτησης εξασφαλίστηκαν πόροι για την δρομολόγηση έως και 10 επιβατηγών πλοίων από το κεντρικό λιμάνι της ηπειρωτικής Χώρας προς πιθανά κεντρικά λιμάνια της νησιωτικής χώρας με κόστος μεταφοράς και μέγιστη χωρητικότητα τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.



**Πίνακας 4.2. Μέγιστη χωρητικότητα για τη μεταφορά επιβατών και κόστος δρομολόγησης επιβατηγών πλοίων από το κεντρικό λιμένα της ηπειρωτικής Χώρας προς τους κεντρικούς λιμένες της νησιωτικής Χώρας**

|            | Κόστος δρομολόγησης<br>επιβατηγών πλοίων<br>(χρηματικές μονάδες) | Μέγιστη χωρητικότητα<br>για τη μεταφορά<br>επιβατών |
|------------|--|---|
| <b>Λ1</b>  | 300  | 3100  |
| <b>Λ2</b>  | 530  | 3600  |
| <b>Λ3</b>  | 410  | 4500  |
| <b>Λ4</b>  | 395  | 5200  |
| <b>Λ5</b>  | 400  | 4000  |
| <b>Λ6</b>  | 350  | 3200  |
| <b>Λ7</b>  | 285  | 3500  |
| <b>Λ8</b>  | 310  | 4500  |
| <b>Λ9</b>  | 420  | 3300  |
| <b>Λ10</b> | 480  | 5500  |

Για τη μεταφορά επιβατών από τα κεντρικά νησιωτικά λιμάνια σε κάθε ένα από τα υπόλοιπα νησιά, θα χρησιμοποιηθούν μικρότερα πλοία, ενώ το κόστος παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.3.

Η εθνική αρχή μεταφορών, δεσμεύει την GreenJet Maritime S.A. να καλύψει την επιβατική ζήτηση σε όλα τα νησιά. Η παρακάτω μελέτη αποσκοπεί στον προσδιορισμό ενός κατάλληλου μοντέλου μαθηματικού προγραμματισμού για την επιλογή των κατάλληλων κεντρικών νησιωτικών λιμανιών για την από θαλάσσης σύνδεσή τους με τον κεντρικό λιμένα της ηπειρωτικής Χώρας μέσω επιβατηγών πλοίων, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος μεταφοράς, καλύπτοντας την επιβατική ζήτηση στα 30 νησιά με τη χρήση μικρότερων πλοιαρίων. Το πρόβλημα μαθηματικού προγραμματισμού επιλύεται με τη χρήση του εργαλείου IBM ILOG CPLEX Optimization Studio.

**Πίνακας 4.3. Κόστος μεταφοράς επιβατών προς κάθε περιφερειακό νησί από τα αντίστοιχα κεντρικά**

|            | Λ1  | Λ2  | Λ3  | Λ4  | Λ5  | Λ6  | Λ7  | Λ8  | Λ9  | Λ10 |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <b>N1</b>  | 1.5 | 2.4 | 2.1 | 3.9 | 1.3 | 3.8 | 2.3 | 3.4 | 2.9 | 4.6 |
| <b>N2</b>  | 3.2 | 3.8 | 4.3 | 4.5 | 3.8 | 2.4 | 4.7 | 4.4 | 4.9 | 4.8 |
| <b>N3</b>  | 2.9 | 2.3 | 3.3 | 4.1 | 2.3 | 2   | 4.5 | 5   | 1.8 | 4.5 |
| <b>N4</b>  | 4.4 | 3.5 | 2   | 2.6 | 3.5 | 5   | 4.9 | 1   | 1.9 | 3.5 |
| <b>N5</b>  | 2.5 | 1.7 | 4.7 | 1.3 | 2.5 | 2.4 | 4.4 | 4.3 | 2.1 | 4.6 |
| <b>N6</b>  | 4.8 | 4.3 | 2.6 | 3.7 | 1.2 | 1.4 | 3.9 | 4.4 | 3.2 | 4.5 |
| <b>N7</b>  | 3.5 | 2.6 | 3.8 | 4.2 | 4   | 4.4 | 2.5 | 4.7 | 3.7 | 3.9 |
| <b>N8</b>  | 2.9 | 2.8 | 4.6 | 2.4 | 1.8 | 1.2 | 1.8 | 1.1 | 5   | 4.6 |
| <b>N9</b>  | 1   | 1.6 | 1.3 | 2.8 | 2.9 | 4.8 | 4   | 4.6 | 2.8 | 5   |
| <b>N10</b> | 1.8 | 3   | 3.4 | 2.9 | 3.9 | 4.9 | 1.7 | 1.2 | 5   | 3.9 |
| <b>N11</b> | 2.4 | 2.6 | 2.9 | 4.6 | 3.6 | 2.9 | 4   | 2.7 | 2.5 | 4.4 |
| <b>N12</b> | 3.9 | 4.9 | 4.3 | 4.8 | 2.1 | 4.8 | 3.6 | 2.4 | 3   | 3.3 |
| <b>N13</b> | 3.3 | 3.8 | 2.6 | 4.3 | 1   | 4.4 | 3.9 | 3.2 | 1.9 | 2.4 |
| <b>N14</b> | 4.5 | 2.1 | 1.9 | 2.8 | 2   | 4.6 | 1.5 | 1.6 | 5   | 1.2 |
| <b>N15</b> | 4.3 | 4.6 | 2.4 | 4.6 | 1.2 | 2.1 | 5   | 3.9 | 4.5 | 3.1 |
| <b>N16</b> | 5   | 3   | 4.2 | 4   | 2.3 | 1.1 | 2.5 | 1.5 | 4.1 | 3.5 |
| <b>N17</b> | 2.8 | 1   | 4.4 | 1.4 | 3.1 | 1.4 | 3.5 | 4.2 | 4.5 | 4.6 |
| <b>N18</b> | 4.7 | 2.2 | 3.7 | 3.3 | 3.2 | 2.2 | 5   | 3.2 | 1.7 | 2   |
| <b>N19</b> | 1.7 | 2.3 | 4.4 | 1.8 | 2.9 | 4.3 | 3.9 | 2.5 | 2.3 | 4.6 |
| <b>N20</b> | 4.8 | 4.6 | 1.1 | 1.6 | 4.8 | 2.5 | 3.1 | 4.4 | 3.3 | 2.3 |
| <b>N21</b> | 1.9 | 3.6 | 4.1 | 4.6 | 4.9 | 3.1 | 3.3 | 4.7 | 3.7 | 3.3 |
| <b>N22</b> | 1.3 | 3.1 | 2.1 | 1.8 | 1.8 | 1.2 | 3.1 | 1.8 | 1.1 | 4.8 |
| <b>N23</b> | 2   | 4.1 | 4.5 | 4.7 | 1.3 | 4.6 | 2.1 | 4.3 | 4.8 | 4.1 |
| <b>N24</b> | 2.2 | 2.7 | 2.8 | 4.8 | 2.4 | 1.6 | 2.2 | 2.5 | 3.5 | 2.8 |
| <b>N25</b> | 5   | 3.6 | 3   | 1.5 | 4.2 | 4.9 | 3.3 | 4.7 | 2.7 | 2.7 |
| <b>N26</b> | 2.6 | 4.4 | 2.8 | 3.3 | 2.1 | 3.3 | 2.7 | 4.5 | 1.6 | 3.7 |
| <b>N27</b> | 4   | 4.7 | 2.4 | 3.2 | 1.8 | 2.9 | 2   | 3   | 3   | 2.9 |
| <b>N28</b> | 5   | 2.9 | 1.9 | 1.6 | 2.2 | 3   | 1.2 | 1.1 | 2.7 | 2.8 |
| <b>N29</b> | 1.4 | 3.6 | 4.1 | 2.6 | 4.2 | 4.7 | 4.3 | 2.1 | 2.1 | 1.7 |
| <b>N30</b> | 2.4 | 3.7 | 3.2 | 3.3 | 4.5 | 3.7 | 3.1 | 1.2 | 1.6 | 3.7 |

## 4.2 Μοντελοποίηση του προβλήματος

### 4.1.1 Παράμετροι

1. *Vessel*: Δρομολόγηση επιβατηγού πλοίου για τη μεταφορά επιβατών από το κεντρικό λιμάνι της ηπειρωτικής χώρας(Λ1-Λ10) – Τύπος μεταβλητής: Χαρακτήρας
2. *Island*: Όνομα Περιφερειακού Νησιού για την κάλυψη της ζήτησης(N1-N30) – Τύπος μεταβλητής: Χαρακτήρας

3. *Routing\_cost [Vessel]*: Κόστος δρομολόγησης επιβατηγού πλοίου από την ηπειρωτική Χώρα προς κεντρικό λιμάνι της νησιωτικής Χώρας – Τύπος μεταβλητής: Πραγματικός αριθμός
4. *Capacity [Vessel]*: Μέγιστη χωρητικότητα επιβατηγού πλοίου – Τύπος μεταβλητής: Ακέραιος
5. *Transportation\_cost [Island][Vessel]*: Κόστος μεταφοράς επιβατών από το κεντρικό νησιωτικό λιμάνι προς τα περιφερειακά με μικρότερα πλοiάρια – Τύπος μεταβλητής: Πραγματικός αριθμός
6. *Demand [Island]*: Επιβατική ζήτηση κάθε νησιού – Τύπος μεταβλητής: Ακέραιος

#### 4.1.2 Μεταβλητές απόφασης

1. *Connect [Island][Vessel]: in0..1*: Κάλυψη της ζήτησης του νησιού *Island* από τη μονάδα *Vessel* – Τύπος μεταβλητής: Ακέραιος
2. *Decision\_for\_Routing [Vessel]: in0..1*: Απόφαση δρομολόγησης επιβατηγού πλοίου από το κεντρικό λιμάνι της ηπειρωτικής Χώρας προς κεντρικό λιμάνι της νησιωτικής Χώρας – Τύπος μεταβλητής: Δυαδική

#### 4.1.3 Περιορισμοί

1. Για όλα τα  $c$  στο *Vessel*,

$$\sum_{d \in \text{Island}} (\text{Connect}[d][c]/30) \leq \text{Decision\_for\_Routing}(c)$$

(Το περιφερειακό λιμάνι *Island* συνδέεται με το κεντρικό, εάν έχει δρομολογηθεί το επιβατηγό πλοίο *Vessel* που το συνδέει με το κεντρικό λιμάνι της ηπειρωτικής Χώρας)

2. Για όλα τα  $c$  στο *Vessel*,

$$\sum_{d \in \text{Island}} (\text{Connect}[d][c] \times \text{Demand}[d]) \leq \text{Capacity}[c]$$

(Η ζήτηση που θα καλυφθεί από το κεντρικό νησιωτικό λιμάνι προς τα περιφερειακά μέσω μικρών πλοιαρίων δεν πρέπει να ξεπερνά τη χωρητικότητας του επιβατηγού πλοίου που εξυπηρετεί το κεντρικό λιμάνι)

3. Για όλα τα  $d$  στο  $Island$ ,

$$\sum_{c \in Vessel} (Connect[d][c]) = 1$$

(Κάθε περιφερειακό νησί  $Island$  εξυπηρετείται από μοναδικό κεντρικό νησί  $Vessel$ )

4.1.4 Αντικειμενική συνάρτηση

$\min\{Obj\}$

$$Obj = \sum_{c_1 \in Vessel} (Decision\_for\_Routing[c_1]) \times Routing\_cost[c_1] + \sum_{d_2 \in Island} Connect[d_2][c_2] \times Transportation\_cost[d_2][c_2] \times Demand[d_2]$$

Ελαχιστοποίηση του κόστους δρομολόγησης επιβατηγού πλοίου  $Vessel$  από το κεντρικό λιμάνι της ηπειρωτικής Χώρας και του κόστους κάλυψης της ζήτησης των περιφερειακών Νησιών  $Island$  από το επιβατηγό πλοίο  $Vessel$ .

4.1.5 Επίλυση

```
{string} Vessel = ...;
{string} Island = ...;

float Routing_Cost[Vessel] = ...; //Routing cost of Vessel
int Capacity[Vessel] = ...; //Capacity of Vessel
float Transportation_cost[Island][ Vessel] = ...; // Transportation cost
from Vessel to Island
int Demand[Island] = ...; //Demand for Island

dvar int Connect[Island][Vessel] in 0..1; //Is Island Connected through
Vessel
```

```

dvar int Decision_for_routing [Vessel] in 0..1; //The Vessel will be
routed

minimize (sum( c1 in Vessel)(Decision_for_routing [c1])*
Routing_Cost[c1])//sum of Routing costs and transportation costs
+sum(d2 in Island, c2 in Vessel)
(Connect[d2][c2]*Transportation_cost[d2][c2]*Demand[d2]);

subject to {

// If demand will be covered from the Vessel, then it will be routed
forall (c in Vessel)

sum (d in Island)Connect[d][c]/30 <= Decision_for_routing [c];

// Each Vessel's capacity shall not be exceeded
forall (c in Vessel)

sum (d in Island)Connect[d][c]*Demand[d] <= Capacity[c];

// Each Island should be served from unique Vessel
forall (d in Island)

sum (c in Vessel)Connect[d][c]==1;

};

```

#### 4.1.6 Αποτελέσματα

Τα επιβατηγά πλοία τα οποία αποφασίζεται να δρομολογηθούν είναι τα:

- Λ1 - Εξυπηρετεί τα νησιά «N9», «N19», «N21» και «N29»
- Λ4 - Εξυπηρετεί τα νησιά «N5», «N20», «N25»
- Λ5 - Εξυπηρετεί τα νησιά «N1», «N6», «N12», «N13», «N15», «N23» και «N27»
- Λ6 - Εξυπηρετεί τα νησιά «N2», «N16», «N17» και «N24»
- Λ7 - Εξυπηρετεί τα νησιά «N7» και «N14»
- Λ8 - Εξυπηρετεί τα νησιά «N4», «N8», «N10», «N28» και «N30»
- Λ9 - Εξυπηρετεί τα νησιά «N3», «N11», «N18», «N22» και «N26»

Το συνολικό κόστος δρομολόγησης των παραπάνω 7 επιβατηγών πλοίων είναι: 2.460 χρηματικές μονάδες ενώ το κόστος μεταφοράς των επιβατών προς τα περιφερειακά νησιά ανέρχεται σε 26.038,40 χρηματικές μονάδες, επομένως η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ελαχιστοποιείται στην τιμή: 28.498,40 χρηματικές μονάδες.

```
// solution (optimal) with objective 28498.4
// Quality Incumbent solution:
// MILP objective                2.8498400000e+04
// MILP solution norm |x| (Total, Max)  3.70000e+01  1.00000e+00
// MILP solution error (Ax=b) (Total, Max)  9.71445e-17  1.38778e-17
// MILP x bound error (Total, Max)        0.00000e+00  0.00000e+00
// MILP x integrality error (Total, Max)   0.00000e+00  0.00000e+00
// MILP slack bound error (Total, Max)    0.00000e+00  0.00000e+00
//
```

```
Decision_for_routing = [1
                        0 0 1 1 1 1 1 0];
Connect = [[0 0 0 0 1 0 0 0 0]
           [0 0 0 0 0 1 0 0 0]
           [0 0 0 0 0 0 1 0 0]
           [0 0 0 1 0 0 0 0 0]
           [0 0 0 0 1 0 0 0 0]
           [0 0 0 0 0 1 0 0 0]
           [0 0 0 0 0 0 1 0 0]
           [1 0 0 0 0 0 0 0 0]
           [0 0 0 0 0 0 0 1 0]
           [0 0 0 0 1 0 0 0 0]
           [0 0 0 0 1 0 0 0 0]
           [0 0 0 0 0 1 0 0 0]
           [0 0 0 0 1 0 0 0 0]
           [0 0 0 0 0 0 1 0 0]
           [0 0 0 0 0 0 0 1 0]
           [1 0 0 0 0 0 0 0 0]
           [0 0 0 1 0 0 0 0 0]
           [1 0 0 0 0 0 0 0 0]
           [0 0 0 0 0 0 0 1 0]
           [0 0 0 0 1 0 0 0 0]
           [0 0 0 0 0 1 0 0 0]
           [0 0 0 1 0 0 0 0 0]
           [0 0 0 0 0 0 0 1 0]
           [0 0 0 0 1 0 0 0 0]
           [0 0 0 0 0 0 1 0 0]
           [1 0 0 0 0 0 0 0 0]
           [0 0 0 0 0 0 0 1 0]];
```



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### **ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

Σκοπός της παρούσας μελέτης ήταν η δημιουργία ενός κατάλληλου μοντέλου μαθηματικού προγραμματισμού για τη βελτιστοποίηση της θαλάσσιας σύνδεσης μέσω επιβατηγών πλοίων, κεντρικών νησιώτικων λιμανιών με τον κεντρικό λιμένα της ηπειρωτικής Χώρας και τη σύνδεση αυτών με τα μικρότερα νησιά μέσω μικρότερων πλοιαρίων.

Βρέθηκε πως το συνολικό κόστος δρομολόγησης των επιβατηγών πλοίων είναι: 2.460 χρηματικές μονάδες ενώ το κόστος μεταφοράς των επιβατών προς τα περιφερειακά νησιά με μικρότερα πλοίαρτα ανέρχεται σε 26.038,40 χρηματικές μονάδες, επομένως η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ελαχιστοποιείται στην τιμή των 28.498,40 χρηματικών μονάδων. Επίσης, εκ των αποτελεσμάτων προέκυψε ότι για την κάλυψη της ζήτησης των μικρότερων νησιών δεν χρειάστηκε να αποπλεύσουν επιβατηγά πλοία προς όλους τους κεντρικούς λιμένες παρά μόνο σε επτά από τους δέκα κάτι το οποίο ήταν αναμενόμενο.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί πως στο κόστος δρομολόγησης κάθε επιβατηγού πλοίου και στο κόστος μεταφοράς επιβατών προς κάθε περιφερειακό νησί από τα αντίστοιχα κεντρικά συμπεριλαμβάνεται το κόστος του καυσίμου. Το κόστος του καυσίμου, το οποίο αποτελεί σημαντική παράμετρο του συνολικού κόστους, θα μπορούσε να αποτελέσει συνάρτηση των δυο προαναφερθέντων επιμέρους μεγεθών, όμως δεν παραμετροποιήθηκε, καθώς θα αυξανόταν σημαντικά ο υπολογιστικός χρόνος και η απαιτούμενη υπολογιστική ισχύς της επίλυσης.





## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Adland, R., Cariou, P., Jia, H., & Wolff, F. C. (2018). The energy efficiency effects of periodic ship hull cleaning. *Journal of Cleaner Production*, 178, 1-13.
- Adland, R., Cariou, P., & Wolff, F. C. (2020). Optimal ship speed and the cubic law revisited: Empirical evidence from an oil tanker fleet. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 140, 101972.
- Andersson, H., Christiansen, M., & Fagerholt, K. (2011). The maritime pickup and delivery problem with time windows and split loads. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 49(2), 79-91.
- Andersson, H., Fagerholt, K., & Hobbesland, K. (2015). Integrated maritime fleet deployment and speed optimization: Case study from RoRo shipping. *Computers & Operations Research*, 55, 233-240.
- Aslam, S., Michaelides, M. P., & Herodotou, H. (2020). Internet of ships: A survey on architectures, emerging applications, and challenges. *IEEE Internet of Things journal*, 7(10), 9714-9727.
- Baker, B. M., & Ayechev, M. (2003). A genetic algorithm for the vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 30(5), 787-800.
- Ballou, P. J. (2013). Ship energy efficiency management requires a total solution approach. *Marine Technology Society Journal*, 47(1).
- Bendall, H. B., & Stent, A. F. (2001). A scheduling model for a high speed containership service: A hub and spoke short-sea application. *International Journal of Maritime Economics*, 3(3), 262-277.
- Beşikçi, E. B., Arslan, O., Turan, O., & Ölçer, A. I. (2016). An artificial neural network based decision support system for energy efficient ship operations. *Computers & Operations Research*, 66, 393-401.
- Bialystocki, N., & Konovessis, D. (2016). On the estimation of ship's fuel consumption and speed curve: A statistical approach. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 1(2), 157-166.

- Brynolf, S., Magnusson, M., Fridell, E., & Andersson, K. (2014). Compliance possibilities for the future ECA regulations through the use of abatement technologies or change of fuels. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 28, 6-18.
- Cariou, P., Ferrari, C., Parola, F., & Tei, A. (2019). Slow steaming in the maritime industry. *The Routledge Handbook of Maritime Management*, 140.
- Chen, Q. (2022). Research on Marine Economic Development Information Management System Based on Supply Chain Technology. *Journal of Interconnection Networks*, 2144009.
- Chen, C., & Zeng, Q. (2010). Designing container shipping network under changing demand and freight rates. *Transport*, 25(1), 46-57.
- Cho, S. C., & Perakis, A. N. (1996). Optimal liner fleet routeing strategies. *Maritime policy and management*, 23(3), 249-259.
- Christiansen, M., & Fagerholt, K. (2009). Maritime Inventory Routing Problems. *Encyclopedia of optimization*, 2, 1947-1955.
- Coraddu, A., Oneto, L., Baldi, F., & Anguita, D. (2017). Vessels fuel consumption forecast and trim optimisation: A data analytics perspective. *Ocean Engineering*, 130, 351-370.
- Coraddu, A., Oneto, L., Baldi, F., & Anguita, D. (2018). Vessels fuel consumption: A data analytics perspective to sustainability. In *Soft computing for sustainability science* (pp. 11-48). Springer, Cham.
- Du, Y., Meng, Q., Wang, S., & Kuang, H. (2019). Two-phase optimal solutions for ship speed and trim optimization over a voyage using voyage report data. *Transportation Research Part B: Methodological*, 122, 88-114.
- Eide, L., Årdal, G. C. H., Evsikova, N., Hvattum, L. M., & Urrutia, S. (2020). Load-dependent speed optimization in maritime inventory routing. *Computers & Operations Research*, 123, 105051.

- Eide, M. S., Longva, T., Hoffmann, P., Endresen, Ø., & Dalsøren, S. B. (2011). Future cost scenarios for reduction of ship CO<sub>2</sub> emissions. *Maritime Policy & Management*, 38(1), 11-37.
- Fagerholt, K. (1999). Optimal fleet design in a ship routing problem. *International transactions in operational research*, 6(5), 453-464.
- Fagerholt, K., Gausel, N. T., Rakke, J. G., & Psaraftis, H. N. (2015). Maritime routing and speed optimization with emission control areas. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 52, 57-73.
- Farag, Y. B., & Ölçer, A. I. (2020). The development of a ship performance model in varying operating conditions based on ANN and regression techniques. *Ocean Engineering*, 198, 106972.
- Felski, A., & Zwolak, K. (2020). The ocean-going autonomous ship—Challenges and threats. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(1), 41.
- Gao, T., & Lu, J. (2019). The impacts of strait and canal blockages on the transportation costs of the Chinese fleet in the shipping network. *Maritime Policy & Management*, 46(6), 669-686.
- Gelareh, S., Nickel, S., & Pisinger, D. (2010). Liner shipping hub network design in a competitive environment. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(6), 991-1004.
- Grifoll, M., Martínez de Osés, F. X., & Castells, M. (2018). Potential economic benefits of using a weather ship routing system at Short Sea Shipping. *WMU Journal of Maritime Affairs*, 17(2), 195-211.
- Haranen, M., Pakkanen, P., Kariranta, R., & Salo, J. (2016, April). White, grey and black-box modelling in ship performance evaluation. In *1st Hull performance & insight conference (HullPIC)* (pp. 115-127).
- Hsieh, S. H., & Chang, F. R. (2001). Applications of the hub-and-spoke network model in routing liner ships. *Transportation Planning Journal*, 30(4), 871-890.

- Hsu, C. I., & Hsieh, Y. P. (2007). Routing, ship size, and sailing frequency decision-making for a maritime hub-and-spoke container network. *Mathematical and Computer Modelling*, 45(7-8), 899-916.
- Hvattum, L. M., Norstad, I., Fagerholt, K., & Laporte, G. (2013). Analysis of an exact algorithm for the vessel speed optimization problem. *Networks*, 62(2), 132-135.
- Karlsson, I., Rootzén, J., & Johnsson, F. (2020). Reaching net-zero carbon emissions in construction supply chains—Analysis of a Swedish road construction project. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109651.
- Khan, M. A. (2014, December). Transportation cost optimization using linear programming. In *International conference on mechanical, industrial and energy engineering* (pp. 2241-2245).
- Krishnan, U., & Masrom, M. (2022). Optimizing Transportation Cost Using Linear Programming: A Malaysian Case Study. *Open International Journal of Informatics*, 10(1), 1-12.
- Lashgari, M., Akbari, A. A., & Nasersarraf, S. (2021). A new model for simultaneously optimizing ship route, sailing speed, and fuel consumption in a shipping problem under different price scenarios. *Applied Ocean Research*, 113, 102725.
- Lee, H., Aydin, N., Choi, Y., Lekhavat, S., & Irani, Z. (2018). A decision support system for vessel speed decision in maritime logistics using weather archive big data. *Computers & Operations Research*, 98, 330-342.
- Le, L. T., Lee, G., Kim, H., & Woo, S. H. (2020). Voyage-based statistical fuel consumption models of ocean-going container ships in Korea. *Maritime Policy & Management*, 47(3), 304-331.
- Lehtoranta, K., Aakko-Saksa, P., Murtonen, T., Vesala, H., Ntziachristos, L., Rönkkö, T., ... & Timonen, H. (2019). Particulate mass and nonvolatile particle number emissions from marine engines using low-sulfur fuels, natural gas, or scrubbers. *Environmental science & technology*, 53(6), 3315-3322.

- Leifsson, L. Þ., Sævarsdóttir, H., Sigurðsson, S. Þ., & Vésteinsson, A. (2008). Grey-box modeling of an ocean vessel for operational optimization. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 16(8), 923-932.
- Meng, Q., Du, Y., & Wang, Y. (2016). Shipping log data based container ship fuel efficiency modeling. *Transportation Research Part B: Methodological*, 83, 207-229.
- Meng, Q., & Wang, S. (2011). Liner shipping service network design with empty container repositioning. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(5), 695-708.
- Moreno-Gutiérrez, J., Calderay, F., Saborido, N., Boile, M., Valero, R. R., & Durán-Grados, V. (2015). Methodologies for estimating shipping emissions and energy consumption: A comparative analysis of current methods. *Energy*, 86, 603-616.
- Moreno-Gutiérrez, J., Pájaro-Velázquez, E., Amado-Sánchez, Y., Rodríguez-Moreno, R., Calderay-Cayetano, F., & Durán-Grados, V. (2019). Comparative analysis between different methods for calculating on-board ship's emissions and energy consumption based on operational data. *Science of the Total Environment*, 650, 575-584.
- Muzhoffar, D. A. F., Hamada, K., Wada, Y., Miyake, Y., & Kawamura, S. (2022). Basic Ship-Planning Support System Using Big Data in Maritime Logistics for Simulating Demand Generation. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(2), 186.
- Norlund, E. K., & Gribkovskaia, I. (2017). Environmental performance of speed optimization strategies in offshore supply vessel planning under weather uncertainty. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 57, 10-22.
- Norstad, I., Fagerholt, K., & Laporte, G. (2011). Tramp ship routing and scheduling with speed optimization. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 19(5), 853-865.

- Notteboom, T., & Cariou, P. (2009, June). Fuel surcharge practices of container shipping lines: Is it about cost recovery or revenue making. In *Proceedings of the 2009 international association of maritime economists (IAME) conference* (pp. 24-26). Copenhagen, Denmark: IAME.
- Paravantis, J. A., Giziakis, K., Michalochrista, M., & Tsapara, A. (2006, September). Optimal Operation of Passenger Shipping in the Aegean”. In *International Conference: Shipping in the Era of Social Responsibility, Greece* (pp. 14-16).
- Perera, L. P., & Mo, B. (2018, June). An overview of data veracity issues in ship performance and navigation monitoring. In *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering* (Vol. 51333, p. V11BT12A004). American Society of Mechanical Engineers.
- Perera, L. P., & Mo, B. (2020). Ship performance and navigation information under high-dimensional digital models. *Journal of Marine Science and Technology*, 25(1), 81-92.
- Poulsen, R. T., & Sornn-Friese, H. (2015). Achieving energy efficient ship operations under third party management: How do ship management models influence energy efficiency?. *Research in transportation business & management*, 17, 41-52.
- Prifti, V., Dervishi, I., Dhoska, K., Markja, I., & Pramono, A. (2020, December). Minimization of transport costs in an industrial company through linear programming. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 909, No. 1, p. 012040). IOP Publishing.
- Psaraftis, H. N., & Kontovas, C. A. (2013). Speed models for energy-efficient maritime transportation: A taxonomy and survey. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 26, 331-351.
- Psaraftis, H. N., & Kontovas, C. A. (2014). Ship speed optimization: Concepts, models and combined speed-routing scenarios. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 44, 52-69.

- Reinhardt, L. B., & Pisinger, D. (2012). A branch and cut algorithm for the container shipping network design problem. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 24(3), 349-374.
- Sambracos, E., Paravantis, J. A., Tarantilis, C. D., & Kiranoudis, C. T. (2004). Dispatching of small containers via coastal freight liners: The case of the Aegean Sea. *European Journal of Operational Research*, 152(2), 365-381.
- Soner, O., Akyuz, E., & Celik, M. (2018). Use of tree based methods in ship performance monitoring under operating conditions. *Ocean Engineering*, 166, 302-310.
- Sun, X., Yan, X., Wu, B., & Song, X. (2013). Analysis of the operational energy efficiency for inland river ships. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 22, 34-39.
- Takano, K., & Arai, M. (2009). A genetic algorithm for the hub-and-spoke problem applied to containerized cargo transport. *Journal of Marine Science and Technology*, 14(2), 256-274.
- Theocharis, D., Rodrigues, V. S., Pettit, S., & Haider, J. (2019). Feasibility of the Northern Sea Route: The role of distance, fuel prices, ice breaking fees and ship size for the product tanker market. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 129, 111-135.
- Tuljak-Suban, D., & Twrdy, E. (2008). Decision support for optimal repositioning of containers in a feeder system. *Promet-Traffic&Transportation*, 20(2), 71-77.
- Veretennik, A., Kulyeshov, I., & Mikhailov, S. (2022). Navigation's safety improving by efficiently analysis of the ship's power Plant energy flows interconnection. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 16.
- Wan, Z., El Makhoulfi, A., Chen, Y., & Tang, J. (2018). Decarbonizing the international shipping industry: Solutions and policy recommendations. *Marine pollution bulletin*, 126, 428-435.



- Wang, S., & Meng, Q. (2012). Sailing speed optimization for container ships in a liner shipping network. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(3), 701-714.
- Wen, M., Ropke, S., Petersen, H. L., Larsen, R., & Madsen, O. B. (2016). Full-shipload tramp ship routing and scheduling with variable speeds. *Computers & Operations Research*, 70, 1-8.
- Yan, R., Wang, S., & Psaraftis, H. N. (2021). Data analytics for fuel consumption management in maritime transportation: Status and perspectives. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 155, 102489.
- Yang, L., Chen, G., Rytter, N. G. M., Zhao, J., & Yang, D. (2019). A genetic algorithm-based grey-box model for ship fuel consumption prediction towards sustainable shipping. *Annals of Operations Research*, 1-27.
- Yang, Q., Xie, X., & Pei, G. (2011). Modeling and simulation of fleet planning for liner shipping. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 46(6), 1046-1054.