ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΕΡΙΟΧΗ ΘΑΛΑΣΣΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

«ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΛΟΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ»

Διπλωματική Εργασία

Λουκάς Παναγιώτης

Ιούλιος 2012

ΑΘΗΝΑ

Λουκάς Παναγιώτης

«ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΛΟΙΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΟΚΙΒΩΤΙΩΝ»

Ιούλιος 2012

Διπλωματική Εργασία

Σχολή Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών

Συγγραφέας: Παναγιώτης Ι. Λουκάς

Επιβλέπων: Δημήτριος Β. Λυρίδης

ΑΘΗΝΑ

ΣΥΝΟΨΗ

Το παγκόσμιο δίκτυο εμπορίου στηρίζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό στην διεθνή ναυτιλία. Η οικονομική κρίση των προηγούμενων χρόνων και το πρόσφατο δυσχερές οκονομικό πλαίσιο που έχει διαμορφωθεί, έχουν ως αποτέλεσμα οι δραστηριότητες και τα κέρδη στην αγορά των μεταφορών να έχουν μειωθεί αισθητά. Παράλληλα, οι εκπομπές ρύπων από την διεθνη ναυτιλία αποτελούν αντικείμενο έντονης πίεσης από την διεθνή κοινότητα και τους αρμόδιους φορείς με σκοπό την λήψη απαραίτητων μέτρων. Μεταξύ των τύπων πλοίων που πρωτοστατούν στην κατανάλωση καυσίμου και επομένως στην ατμοσφαιρική ρύπανση είναι τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Κύριος λόγος είναι η υψηλή ταχύητητα πλεύσης τους. Το τρέχον οικονομικό περιβάλλον, χαρακτηρίζεται από υψηλές τιμές καυσίμου.Η μείωση της ταχύτητας πλεύσης αποτελεί το πλέον διαδεδομένο επιχειρησιακό μέτρο για την μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και άρα του κόστους καυσίμου. Ταυτόχρονα, περιορίζονται σημαντικά και οι εκπομπές ρύπων, όντας ανάλογες της ποσότητας καυσίμου που καίγεται.

Αναλογιζόμενοι τα παραπάνω δεδομένα, στην παρούσα διπλωματική εργασία, επιχειρείται η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου προσδιορισμού του ετήσιου λειτουργικού κόστους για την αξιολόγηση και βελτιστοποίηση ενός συστήματος μίας εταιρείας πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, που δρατηριοποιείται στην ναυλαγορά liner στο δίκτυο Transpacific. Παράλληλα, με δεδομένο ότι το κόστος καυσίμου αποτελεί κύρια συνιστώσα του συνολικού κόστους, είναι δυνατός ο υπολογισμός των εκπομπών των βασικών αερίων ρύπων των πλοίων, CO_2, NO_x, SO_x, ακολουθώντας την ενδεδειγμένη μεθοδολογία σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες του IMO αναφορικά με το συγκεκριμένο ζήτημα.

Αρχικά, παρουσιάζεται το μέγεθος του προβλήματος της ρύπανσης που προέρχεται από την ποντοπόρο ναυτιλία, αναλύοντας τους κύριους ρύπους που εκπέμπει ο εν λόγω χώρος και παραθέτοντας μέτρα που έχουν λάβει ή προτίθενται να λάβουν οι εμπλεκόμενοι φορείς για την αντιμετώπιση του προβλήματος.Στην συνέχεια, αναπτύσσεται συνολικά το πλαίσιο μέσα στο οποίο παρατηρείται το επιχειρησιακό μέτρο της μείωσης της ταχύτητας πλεύσης των πλοίων. Ακολουθεί η περιγραφή της κατασκευής και λειτουργίας του μαθηματικού μοντέλου βάσει του οποίου αναπτύσσεται το κεντρικό θέμα της βελτιστοποίησης (ελαχιστοποίησης) του λειτουργικού κόστους. Έπεται η περιγραφή της διαδικασίας και των εργαλείων βελτιστοποίησης, όπως επίσης και το μαθηματικό πλαίσιο της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης πάνω στο οποίο στηρίζεται η όλη διαδικασία. Έχοντας κατασκευάσει, περιγράψει και εξηγήσει το τρόπο λειτουργίας του μοντέλου μας, ακολουθεί η παράθεση των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης, η χάραξη του αποτελεσματικού μετώπου ετήσιου λειτουργικού κόστος - εκπομπών CO_2 που καθορίζει πλήρως το προφίλ της εταιρείας και εναλλακτικά σενάρια εφικτών λύσεων φιλικών προς το περιβάλλον, συνοδευόμενα απο βασικούς δείκτες απόδοσης, απαραίτητους για συγκρίσεις. Τα παραπάνω συμπληρώνονται

με ανάλυση ευαισθησίας στην τιμή του καυσίμου και αποτελέσματα που αφορούν τα χαρακτηριστικά του μοντέλου και των πλοίων που δρστηριοποιούνται στο μελετούμενο δίκτυο. Τέλος παρατίθενται συμπεράσματα και παρατηρήσεις που προκύπτουν από την όλη διαδικασία, παρέχοντας μία ολοκληρωμένη εικόνα που σαν στόχο έχει να καθορίσει και να αξιολογήσει σφαιρικώς τον τρόπο λειτουργίας ενός συστήματος πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και να συμβάλλει στην συζήτηση λήψης αποφάσεων του σύνθετου προβλήματος βέλτιστου συνδυασμού για την μείωση του κόστους και των περιορισμό των εκπομπών ρύπων μίας ναυτιλιακής εταιρείας, υπό το πρίσμα μελλοντικών περιβαλλοντικών απαιτήσεων.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ *(KEYWORDS)*

1. Εκπομπές Ρύπων *(Ship Air Pollution)*
2. Λειτουργικό μέτρο μείωσης ταχύτητας πλεύσης *(Slow steaming)*
3. Μαθηματική Μοντελοποίηση *(Mathematical Formulation- Network Design)*
4. Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση *(Multi-Objective Optimization)*
5. Βασικοί Δείκτες Απόδοσης *(Key performance indicator – KPI's)*
6. Μονόδρομη ανάλυση ευαισθησίας *(One - way sensitivity analysis)*

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ…….....1

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ……..1

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ…….....……...5

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^{ο} : ΕΙΣΑΓΩΓΗ…….....8

1.1 ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....8

1.2 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ.....10

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^{ο} : ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑ…12

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ……...12

2.1.1 Ιστορική αναδρομή……....12

2.1.2 Παρουσίαση του προβλήματος……13

2.2 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ.....14

2.2.1 Ιστορική εξέλιξη και προβλέψεις για το μέλλον…….….....14

2.2.2 Κατηγορίες ρύπων…….....16

2.2.3 Εκπομπές SO_x, NO_x και μέτρα για την μείωσή τους…….....17

2.2.4 Εκπομπές CO_2 από την ναυτιλία…….....23

2.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ…….....27

2.3.1 Αξιολόγηση των εκπομπών άνθρακα……27

2.3.2 Το κοινωνικό κόστος του άνθρακα……...29

2.3.3 Οριακό κόστος του άνθρακα……....29

2.3.4 Τιμή αγοράς του άνθρακα……32

2.4 ΜΕΤΡΑ & ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑ……....34

2.4.1 Περιγρφή του πλαισίου συζήτησης……....34

2.4.2 Προτάσεις για τον έλεγχο των εκπομπών…….....35

2.4.3 Δείκτες αξιολόγησης ενεργειακής αποδοτικότητας πλοίων……...37

2.4.4 Λειτουργικά και τεχνικά μέτρα μείωσης των εκπομπών CO_2……....38

2.4.5 Η Ελληνική θέση……...41

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^{ο} : ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ (SLOW STEAMING).....43

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ……..43

3.2 ΚΙΝΗΤΡΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ……....45

3.2.1 Οι τιμές των καυσίμων……45

3.2.2 Εξοικονόμηση από τρέχοντα κόστη…….....47

3.2.3 Πτώση ναύλων και υπερπροσφορά.……...48

3.2.4 Υποχρεωτικοί κανονισμοί που σχετίζονται με τις εκπομπές ρύπων από τα πλοία……52

3.2.5 Εθελούσια μέτρα μείωσης εκπομπών που λαμβάνονται από τις εταιρείες.53

3.3 ΤΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΠΡΑΞΗ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΙΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO_2…….....54

3.4 ΘΕΜΑΤΑ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΦΥΣΕΩΣ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΝ ΑΠΟ ΤΟ SLOW STEAMING……...58

3.5 ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΤΑΞΙΔΙΩΝ……..….61

3.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ……..…….62

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο : ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....64

4.1 ΒΑΣΙΚΑ ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ……...64

4.1.1 Green Maritime Logistics…….....64

4.1.2 Η ναυλαγορά liner…….....……65

4.1.3 Πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων…….....……67

4.2 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ…….……70

4.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ…72

4.3.1 Γενική περιγραφή…….....72

4.3.2 Μεταβλητές εισόδου…….....73

4.3.3 Μεταβλητές απόφασης…….....75

4.3.4 Αντικειμενική συνάρτηση……....……...75

4.3.5 Περιορισμοί βελτιστοποίησης……..……....79

4.4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ……...81

4.5 ΠΙΝΑΚΕΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ – ΠΡΟΟΡΙΣΜΟΥ…….83

4.6 Η ΕΤΑΙΡΕΙΑ APL, ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΠΟΨΗΦΙΩΝ ΠΛΟΙΩΝ & ΔΙΚΤΥΟ ΕΞΥΠΗΡΕΡΗΣΗΣ….....85

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο : ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ.....93

5.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΩΝ ΠΛΟΙΩΝ.....93

5.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ – ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ PENALTY.....98

5.3 ΠΙΝΑΚΕΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ – ΠΡΟΟΡΙΣΜΟΥ.....105

5.4 ΡΟΕΣ ΦΟΡΤΙΩΝ.....109

5.5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΩΝ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....111

5.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΧΡΟΝΟΥ.....113

5.7 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΚΟΣΤΟΥΣ.....120

5.8 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO_2, NO_x, SO_x.....128

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ.....131

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο : ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....133

6.1 ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ.....133

6.1.1 Εισαγωγή.....133

6.1.2 Δομή και τρόπος λειτουργίας.....135

6.1.3 Πλεονεκτήματα έναντι άλλων μεθόδων.....139

6.2 ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ.....141

6.2.1 Εισαγωγή.....141

6.2.2 Η έννοια των Pareto βέλτιστων λύσεων.....142

6.2.3 Λήψη Απόφασης και η έννοια της καλύτερα συμβιβαστικής λύσης.....144

6.3 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ – ΤΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....147

6.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....150

6.5 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΤΗΣΙΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ-ΕΚΟΜΠΩΝ CO_2.....156

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^{ο} : ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....159

7.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΛΟΙΩΝ.....159

7.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....171

7.3 ΧΑΡΑΞΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ – ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO_2.....176

7.4 ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ (KPI's).....180

7.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΤΙΜΗ ΤΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ....201

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^{ο} : ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....214

8.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....214

8.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....218

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....221

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....228

Παράρτημα I.....229

Παράρτημα II.....231

Παράρτημα III.....237

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1 *: Επιπτώσεις απο τις εκπομπές ρύπων των πλοίων και κλιματική αλλαγή, (Source: 2nd IMO greenhouse gas study,2009…….17*

Σχήμα 2.2 *: Περιοχές ελέγχου εκπομπών SO_x (SO_x Emission Control Areas-SECAs)..... 19*

Σχήμα 2.3 *: Υπάρχουσες και πιθανές μελλοντικές περιοχές ελέγχου εκπομπών (Emission Control Areas – ECAs)…….....23*

Σχήμα 2.4 *: Καμπύλη οριακού κόστους μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου (Source: Enkvist et al., 2007)……..30*

Σχήμα 2.5 *: Κόστος αποφυγής εκπομπών ανά τόνο διοξειδίου του άνθρακα για τον παγκόσμιο στόλο (Source: DNV, 2009)……31*

Σχήμα 4.1 *: Κύρια εμπορικά δίκτυα πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (Source: Containerisation International and MDS Transmodal)……..……..67*

Σχήμα 6.1 *: Ρυθμίσεις παραμέτρων, Evolver (Palisade Corporation, 2009)……...148*

Σχήμα 6.2 *: Ρυθμίσεις βελτιστοποίησης, Evolver (Palisade Corporation, 2009)……....149*

Σχήμα 6.3 *: Παράθυρο ορισμού προβλήματος βελτιστοποίησης, Evolver (Palisade Corporation, 2009)…….……..149*

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1 *: Παραρτήματα της MAPPOL (Source : imo.org)……18*

Πίνακας 2.2 *: Χρονοδιάγραμμα ορίων περιεκτικότητας σε θείο (Source : imo.org)……....21*

Πίνακας 2.3 *: Λειτουργικά και τεχνολογικά μέτρα μείωσης των εκπομπών CO_2 (Buhaug et al., 2009)……..39*

Πίνακας 3.1 *: Οικονομικά αποτελέσματα του 2009 για τις 20 μεγαλύτερες εταιρείες μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. (Source:Dynamar B.V)…….....48*

Πίνακας 3.2 *: Επίδραση ‘’slow steaming’’ στην ετήσια κατανάλωση καυσίμου ανά πλοίο (2008-2010), (Source :P.Cariou)……....54*

Πίνακας 3.3 *: Κύρια χαρακτηριστικά υπηρεσιών στα κυριότερα εμπορικά δίκτυα και ‘’slow steaming’’ (Ιανουάριος 2010) (Source :P.Cariou, Alphaliner)……..56*

Πίνακας 3.4 *: Επίδραση του ‘’slow steaming’’ στις εκπομπές CO_2 στα κυριότερα εμπορικά δίκτυα (2008-2010)(Source :P.Cariou, Alphaliner,LRF)…….57*

Πίνακας 3.5 *: Τεχνικά θέματα που ανακύπτουν από το ‘’slow steaming’’(Source:Maersk).59*

Πίνακας 4.1 *: Χρονική αύξηση του παγκόσμιου στόλου πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων(Source: UNCTAD)……....69*

Πίνακας 4.2 *: Οι 20 μεγαλύτερες εταιρείες μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (Source: www. Alphaliner.com)……70*

Πίνακας 4.3 *: Παράδειγμα πίνακα Προέλευσης-Προορισμού κυκλικού ταξιδιού βοηθητικής γραμμής……84*

Πίνακας 4.4 *: Παράδειγμα εισροής- εκροής φορτίου σε κάθε λιμάνι και πλήθος συσσωρευμένων εμπορευματοκιβωτίων στο πλοίο…….84*

Πίνακας 4.5 *: Στόλος πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων της εταιρείας NOL (Μαρτιος 2011), (Source:http://www.nol.com)…….....88*

Πίνακας 4.6 *: Επιλεγμένα πλοία μεταφορας εμπορευματοκιβωτίων για το μοντέλο……..90*

Πίνακας 4.7 *: Κύρια γραμμή (Transpacific Line - PCE Line)…….....91*

Πίνακας 4.8 *: 1η Βοηθητική ενδοασιατική γραμμή (Feeder 1 – SKX Line)…….....91*

Πίνακας 4.9 *: 2η Βοηθητική ενδοασιατική γραμμή (Feeder 2 – NKX Line)…….....92*

Πίνακας 5.1 *: Χαρακτηριστικά επιλεγμένων πλοίων στόλου……96-97*

Πίνακας 5.2 *: Κατανομή πλοίων και συχνότητα παροχής υπηρεσιών ανά γραμμή……...99*

Πίνακας 5.3 *: Ετήσια μεταφορική ζήτηση και μεταφορική ικανότητα ανά γραμμή……101*

Πίνακας 5.4 *: Ψευδομεταβλητές και περιορισμοί ταχύτητας και μεταφορικής ικανότητας.....103-104*

Πίνακας 5.5 *: Ετήσιοι πίνακες Προέλευσης-Προορισμού……106-108*

Πίνακας 5.6 *: Ροές μεταφερόμενου φορτίου (TEUs) ετησίως και ανά περίοδο παροχής προσφερόμενων υπηρεσιών……..110*

Πίνακας 5.7 *: Χαρακτηριστικά κυκλικού ταξιδιού……112*

Πίνακας 5.8 *: Χρονική διάρκεια κυκλικού ταξιδιού σε κάθε γραμμή ανά δρομολόγιο.....114*

Πίνακας 5.9 : *Χρόνος πρόσδεσης και απομάκρυνσης από τον λιμένα……..115*

Πίνακας 5.10 : *Χρόνος φορτοεκφόρτωσης ανά εμπορευματοκιβώτιο ανά λιμένα……116*

Πίνακας 5.11 *: Χρόνος φορτοεκφόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων ανα λιμένα ανά κυκλικό ταξίδι……..117*

Πίνακας 5.12 *: Χρόνος αδράνειας ανά γραμμή……..118*

Πίνακας 5.13 *: Συνολικός χρόνος ανά γραμμή ανά κυκλικό ταξίδι……119*

Πίνακας 5.14 : *Κόστος φορτοεκφόρτωσης ανά εμπορευματοκιβώτιο ανά λιμένα…….122*

Πίνακας 5.15 *: Ετήσιο κόστος φορτοεκφόρτωσης……123*

Πίνακας 5.16 *: Ετήσιο κόστος καυσίμου για κάθε γραμμή……124*

Πίνακας 5.17 *: Ετήσιο κόστος ελλιμενισμού για κάθε γραμμή……125*

Πίνακας 5.18 *: Συνολικό κόστος για κάθε γραμμή……126*

Πίνακας 5.19 *: Ετήσιο κόστος ναύλωσης /Ετήσιο κόστος κεφαλαίου ανάλογα με την ιδιοκτησιακή κατάσταση του πλοίου για κάθε γραμμή……127*

Πίνακας 5.20 *: Ετήσιο λειτουργικό κόστος (συμπεριλαμβάνονται επιπρόσθετα κόστη από «συναρτήσεις penalty»)……127*

Πίνακας 5.21 : *Συγκριτικός πίνακας συντελεστών υπολογισμού εκπομπών CO_2 (kg CO_2/kg fuel), (Source: IMO,2009)……128*

Πίνακας 5.22 : *Συντελεστλες υπολογιμού εκπομπών NO_x (kg NO_x/tone fuel), (Source: Buhaug et al.,2009)……129*

Πίνακας 5.23 : *Συγκριτικός πίνακας συντελεστών υπολογιμού εκπομπών NO_x (kgNO_x /kg fuel), (Source : Buhaug et al.,2009)……129*

Πίνακας 6.1 *: Υπηρεσίες μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων στο δίκτυο(Source: Transpacific, Dynamar B.V, 2010)……153*

Πίνακας 6.2 *: Περιορισμοί του μοντέλου κατά την βελτιστοποίηση……155*

Πίνακας 7.1 *: Χαρακτηριστικές τιμές κόστους καυσίμου, κατανάλωσης καυσίμου ανά μέρα……162-163*

Πίνακας 7.2 *: Χαρακτηριστικές τιμές κόστους καυσίμου, κατανάλωσης καυσίμου εν πλω ανά μέρα……164-165*

Πίνακες 7.3-7.5 *: Κατανομή πλοίων σε αρχικές και βέλτιστες λύσεις για τα υποσυστήματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης……172*

Πίνακας 7.6 *: Χαρακτηριστικά υποβέλτιστων λύσεων και βέλτιστης λύσης συστήματος…….173*

Πίνακας 7.7 *: Σημεία αποτελεσματικού μετώπου λειτουργικού κόστους – εκπομπών CO_2....178*

Πίνακας 7.8 : *Τιμές εκπομπών NO_x , SO_x που αντιστοιχούν στα σημεία του αποτελεσματικού μετώπου……178*

Πίνακας 7.9 *: Συνολικές εκπομπές ρύπων (ανά κυκλικό ταξίδι, ανα χρόνο) και δείκτες απόδοσης εκπομπών πριν και μετά την βελτιστοποίηση……182*

Πίνακας 7.10 *: Εκπομπές ρύπων εν πλω (ανά κυκλικό ταξίδι, ανα χρόνο) και δείκτες απόδοσης εκπομπών πριν και μετά την βελτιστοποίηση……183*

Πίνακας 7.11 *: Εκπομπές ρύπων στο λιμάνι (ανά κυκλικό ταξίδι, ανα χρόνο) και δείκτες απόδοσης εκπομπών πριν και μετά την βελτιστοποίηση……184*

Πίνακας 7.12 *: Συνολικές τιμές κόστους και δείκτης απόδοσης κόστους πριν και μετά την βελτιστοποίηση……188*

Πίνακας 7.13 *: Βασικοί δείκτες απόδοσης ανά ταξίδι μεταξύ δύο διαδοχικών λιμένων σε κάθε γραμμή πρίν και μετά την βελτιστοποίηση……190*

Πίνακας 7.14 *: Κόστος καυσίμου ανά ταξίδι μεταξύ διαδοχικών λιμένων σε κάθε γραμμή πρίν και μετά την βελτιστοποίηση……198*

Πίνακας 7.15 *: Συνολικό κόστος καυσίμου ανά γραμμή……199*

Πίνακας 7.16 *: Κατηγορίες ''slow steaming''(Source:Dynamar B.V)……202*

Πίνακες 7.17-7.19 *: Υποβέλτιστες λύσεις ετήσιου λειτουργικού κόστους ανα πλήθος πλοίων στην κύρια για τις διάφορες τιμές καύσίμου……203-204*

Πίνακας 7.20 *: Βέλτιστες λύσεις ετήσιου λειτουργικού κόστους για τις διάφορες τιμές καυσίμου……205*

Πίνακας 7.21 *: Λύσεις ετήσιου λειτουργικού κόστους για περιπτώσεις μείωσης της ταχύτητας πλεύσης χωρίς την προσθήκη επιπλέον πλοίων……209*

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 2.1 *: Ιστορική εξέλιξη των εκπομπών CO_2 από τα πλοία, (Source: 2nd IMO greenhouse gas study,2009)…….15*

Διάγραμμα 2.2 *: Μειώσεις στις εκπομπές NO_x χάρη στις τροποποιήσεις του Παραρτήματος VI (Source: 2nd IMO greenhouse gas study,2009)…….22*

Διάγραμμα 2.3 *: Πηγές εκπομπών CO_2 (Source: 2nd IMO greenhouse gas study,2009).....24*

Διαγράμματα 2.4-2.5 *: Συνολικές εκπομπές για όλους τους τύπους πλοίων (Source: Psaraftis, Kontovas (2008). "Ship Emissions Study")……25*

Διάγραμμα 2.6 *: Εκπομπές πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (Source: Psaraftis, Kontovas (2008). "Ship Emissions Study")……26*

Διάγραμμα 2.7 *: Καμπύλη συνολική μείωσης εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα για τον παγκόσμιο στόλο…….....32*

Διάγραμμα 2.8 *: Αποζημειώσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Α.Ε.Ε) (European Union Allowances -EUAs)…….....……33*

Διάγραμμα 3.1 *: Εξέλιξη τιμών καυσίμου 2005-2011 (Source: Bunker World)……47*

Διάγραμμα 3.2 *: Ιστορική εξέλιξη παραδόσεων και παραγγελιών αριθμού πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (Source: Clarkson Research)…….....……49*

Διάγραμμα 3.3 *: Ύψος παραδόσεων και παραγγελιών το 2010-2011, (Source:BIMCO, Clarkson Research)…….……50*

Διάγραμμα 3.4 *: Μεταφορική ικανότητα παγκόσμιου στόλου πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και ύψος παροπλισμένου στόλου (Source: Alphaliner)……51*

Διάγραμμα 3.5 *: Απορρόφηση μεταφορικής ικανότητας από το "slow steaming" 2009-2010 (Source : Alphaliner)……..52*

Διάγραμμα 4.1 *: Παγκόσμιο εμπόριο εμπορευματοκιβωτίων (TEUs και ετήσια ποσοστιαία αλλαγή), (Source: Drewry Shipping Consultants)…….69*

Διάγραμμα 4.2 *: Συνιστώσες συνολικού κόστους μοντέλου……78*

Διάγραμμα 4.3 *: Απεικόνιση της μεταφορικής ικανότητας των πλοίων συναρτήσει του έτους κατασκευής…….....……89*

Διάγραμμα 5.1 *: Ετήσια διακύμανση στην τιμή ($/mt) του IFO 380 cst (Source:bunkerworld.com)……..……120*

Διάγραμμα 6.1 *: Γεωμετρική ερμηνεία της κυριαρχίας κατά Pareto…….....……143*

Διάγραμμα 6.2 *: Γεωμετρική απεικόνηση του συνόρου Pareto…….....144*

Διάγραμμα 6.3 *: Περιπτώσεις σύγκλισης στο σύνορο Pareto…….....146*

Διάγραμμα 6.4 *: Διάγραμμα ροής μοντέλου για το συνολικό κόστος…….....……...151*

Διάγραμμα 7.1 *: Ημερήσια κατανάλωση καυσίμου εν πλω χρησιμοποιούμενων στο μοντέλο πλοίων για διάφορες ταχύτητες…….....……166*

Διάγραμμα 7.2 *: Ποσοστιαίες μειώσεις σε κατανάλωση καυσίμου, κόστους καυσίμου, εκπομπές CO_2 για το APL Arabia…….....…168*

Διάγραμμα 7.3 *: Μείωση κόστος καυσίμου σε USD τον χρόνο…….....……169*

Διάγραμμα 7.4*: Κόστος καυσίμου ανά TEU-slot(εν πλω).....170*

Διάγραμμα 7.5 *: Συγκριτική απεικόνιση σε USD σε ετήσια βάση μεταξύ αρχικής εφικτής λύσης και βέλτιστης λύσης συστήματος…….....……175*

Διαγραμμα 7.6*: Συγκριτική απεικόνιση σε USD σε ετήσια βάση των βέλτιστων λύσεων του συστήματος για 5,6, 7 πλοία στην κύρια γραμμή.....175*

Διάγραμμα 7.7 *: Απεικόνιση σημείων λειτουργίας της εταιρείας……176*

Διάγραμμα 7.8 *: Καμπύλη αποτελεσματικού μετώπου Ετήσιου λειτουργικού κόστους-Εκπομπών CO_2.....177*

Διάγραμμα 7.9 *: Μείωση συνολικών εκπομπών CO_2 σε τόνους πριν και μετά την βελτιστοποίηση……185*

Διάγραμμα 7.10 *: Μείωση συνολικών εκπομπών NO_x, SO_x σε τόνους πριν και μετά την βελτιστοποίηση…….....185*

Διαγράμματα 7.11-7.13 *: Βασικοί Δείκτες Απόδοσης CO_2 , NO_x , SO_x σε γραμμάρια ανά TEUμίλια πριν και μετά την βελτιστοποίηση……...186*

Διάγραμμα 7.14 *: Δείκτης Απόδοσης σε δολάρια ανά TEUμίλια πριν και μετά την βελτιστοποίηση…….....…189*

Διαγράμματα 7.15-7.18 *: Βασικοί Δείκτες Απόδοσης ταξιδιών μεταξύ διαδοχικών λιμένων της κύριας γραμμής του συστήματος Transpacific Line πριν και μετά την βελτιστοποίηση…….....…192*

Διαγράμματα 7.19-7.22 *: Βασικοί Δείκτες Απόδοσης για τα ταξίδια μεταξύ διαδοχικών λιμένων της Feeder Line 1 γραμμής του συστήματος πριν και μετά την βελτιστοποίηση……...…194*

Διαγράμματα 7.23-7.26 *: Βασικοί Δείκτες Απόδοσης για τα ταξίδια μεταξύ διαδοχικών λιμένων της Feeder Line 2 γραμμής του συστήματος πριν και μετά την βελτιστοποίηση……....196*

Διάγραμμα 7.27 *: Κόστος καυσίμου ανά μεταφερόμενο εμπορευματοκιβώτιο στις τρεις γραμμές του συστήματος πριν και μετά την βελτιστοποίηση…….....….200*

Διάγραμμα 7.28 *: Διακύμανση ελάχιστου ετήσιου λειτουργικού κόστους για τις διάφορες τιμές καυσίμου…….....207*

Διαγράμματα 7.29-7.30 *: Διακύμανση ελάχιστου ετήσιου λειτουργικού κόστους για περιπτώσεις μειωμένης ταχύητας πλεύσης α) 21kn και β) 20 kn χωρίς την προσθήκη πλοίων συγκριτικά με περιπτώσεις προσθήκης 1,2 πλοίων για τη διατήρηση συχνότητας…….....……210-211*

Διάγραμμα 7.31 *: Συγκριτικοί δείκτες απόδοσης κόστους για τις διάφορες τιμές καύσιμου..213*

1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο 1ο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής πραγματοποιείται μία σύντομη εισαγωγή που στοχεύει στην αποσαφήνιση του γενικότερου ναυτιλιακού, οικονομικού πλαισίου, μέσα στο οποίο αναπτύσσονται όσα πρόκειται να ακολουθήσουν στα επόμενα κεφάλαια. Επίσης, παρατίθεται μία συνοπτική περιγραφή της δομής της διπλωματικής εργασίας και του περιεχομένου που πραγματεύεται το κάθε κεφάλαιο ξεχωριστά.

1.1 ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τις τελευταίες δεκαετίες, οι εταιρείες που δραστηριοποιούνται στο διεθνές εμπόριο με πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, είχαν ως προτεραιότητα να μεταφέρουν τα προϊόντα τους όσο το δυνατόν ταχύτερα και αυτήν την διαμορφωμένη τάση δεν ήταν ικανό να την ανακόψουν, ούτε οι ολοένα ανοδικές τιμές καυσίμου. Οι προκύπτουσες δαπάνες αντισταθμίζονταν από τα αυξανόμενα έσοδα που ήταν αποτέλεσμα της αυξανόμενης ζήτησης σε μεταφορική ικανότητα παγκοσμίως. Ωστόσο, οι επιπτώσεις της οικονομικής κρίσης των προηγούμενων χρόνων στην παγκόσμια αγορά, είχαν ως αποτέλεσμα οι δραστηριότητες και τα κέρδη στον τομέα των μεταφορών να μειωθούν δραματικά. Όχι μόνο η μεταφορική ζήτηση συρρικνώθηκε με τρόπο αναπάντεχο, αλλά επιπλέον η προσφορά αυξήθηκε υπερβολικά γρήγορα. Ο φαύλος αυτός κύκλος παρ'όλα αυτά δεν είναι κάτι ασυνήθιστο, αφού η ναυτιλία έχει μεγάλο παρελθόν όσον αφορά οικονομικούς κύκλους. Σε περιόδους οικονομικής έξαρσης, οι ναυτιλιακές εταιρείες αυξάνουν την μεταφορικής τους ικανότητα, μεγάλος αριθμός πλοίων ή/και πλοία με μεγάλη μεταφορική ικανότητα παραγγέλνονται, τα οποία τελικώς παραδίδονται αργότερα, πιθανόν σε μία φάση ύφεσης που έχει διαδεχτεί την έξαρση. Σε συνδυασμό με την τάση για κατασκευή όλο και μεγαλύτερων πλοίων και την μειωμένη ζήτηση σαν

αποτέλεσμα της ύφεσης, ο κύκλος μοιραία οδηγεί σε αναντιστοιχία ανάμεσα στην προσφορά και την ζήτηση σε μεταφορική ικανότητα. Ως επακόλουθο αυτού, οι ναύλοι πέφτουν. Ένας τρόπος αντιμετώπισης μίας τέτοιας μη ευνοϊκης κατάστασης είναι η μείωση του λειτουργικού κόστους, δένοντας έναν αριθμό πλοίων με το ελάχιστο δυνατό πλήρωμα για απαραίτητο χρόνο, έως ότου νέο φορτίο είναι διαθέσιμο προς μεταφορά. Έτσι, είναι σύνηθες φαινόμενο σε καιρους κρίσης ο αριθμός των παροπλισμένων πλοίων να αυξάνεται.

Ένας πρόσθετος τρόπος αντιμετώπισης του φαινομένου για τις εταιρείες, είναι η επιλογή, τα πλοία τους να ταξιδεύουν με χαμηλότερη ταχύτητα. Η βασική ιδέα του επιχειρησιακού μέτρου της μείωσης ταχύτητας δεν είναι κάτι καινούργιο αφού όπως είναι γνωστό, η κατανάλωση καυσίμου μεγάλων πλοίων αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της ταχύτητας του πλοίου. Βάσει αυτού του δεδομένου, πλοία ταξίδευαν σε χαμηλότερες ταχύτητες και στο παρελθόν, αλλά συγκρινόμενα με το τι συμβαίνει στις μέρες μας, πότε δεν εφαρμόστηκε η συγκεκριμένη πρακτική σε τόσο μεγάλο μέρος του παγκόσμιου στόλου. Έτσι, ακόμα και σήμερα που η κρίση στον τομέα των μεταφορών έχει σχεδόν τελειώσει, η μείωση της ταχύτητας πλεύσης παραμένει συχνή πρακτική στα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Παράλληλα, το γεγονός ότι οι εκπομπές ρύπων είναι ευθέως ανάλογες με την κατανάλωση καυσίμου, σημαίνει πως μείωση στην ταχύτητα πλεύσης συνεπάγεται λιγότερες εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων από τα πλοία.

Όσον αφορά την παρούσα κατάσταση, το 2011 αποδείχτηκε μία από τις πιο ευμετάβλητες και πολυτάραχες χρονίες για το διεθνές ναυτιλιακό περιβάλλον. Τρία γεγονότα ξεχώρισαν την χρονιά που πέρασε: μια νέα πιθανή οικονομική κρίση φαίνεται στον ορίζοντα, η κοινωνική αναστάτωση στην Μέση Ανατολή, γνωστή ως Αραβική Άνοιξη, πήρε σημαντικές διαστάσεις, και οι φυσικές καταστροφές, σεισμός και τσουνάμι στην Ιαπωνία, αποτέλεσαν γεγονοτα ιδιαιτέρως σημαντικά που μόνο ανεπηρέαστη δεν θα μπορούσαν να αφήσουν την ναυτιλία. Στην αγορά των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, οι μέσοι ναύλοι αυξήθηκαν μέσα στο 2011, αλλά οι επιδόσεις της αγοράς συνολικά χαρακτηρίστηκαν από αστάθεια. Οι συνθήκες ήταν ευνοϊκές για το πρώτο μισό του προηγούμενου έτους, αλλά διαφοροποιήθηκαν στην συνέχεια από την συνεχιζόμενη οικονομική ύφεση σε Ευρώπη και Αμερική. Ο κόσμος παραμένει εκτεθειμένος σε ένα πιθανό τρίτο πετραλαϊκό σοκ, αφού γεοπολιτικοί κίνδυνοι ελοχεύουν σε μία σφιχτή πετρελαϊκή αγορά. Συνεπώς το 2012 αναμένται να είναι άλλη μία δύσκολη χρονία για την διεθνη ναυτιλία.

1.2 ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται μία σύντομη εισαγωγή, ως πρόλογος, που στοχεύει στην αποσαφήνιση του γενικότερου ναυτιλιακού, οικονομικού πλαισίου, μέσα στο οποίο αναπτύσσονται όσα πρόκειται να ακολουθήσουν στα επόμενα κεφάλαια. Επίσης, παρατίθεται μία συνοπτική περιγραφή της δομής της διπλωματικής εργασίας και του περιεχομένου που πραγματεύεται το κάθε κεφάλαιο ξεχωριστά.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια συνοπτική αλλά περιεκτική παρουσίαση του ρόλου της ναυτιλίας στην ανάπτυξη του φαινομένου του θερμοκηπίου και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης εν γένει. Αναλύονται οι κύριοι ρύποι που εκπέμπει ο χώρος της ναυτιλίας, δίνοντας ιδαίτερη έμφαση στο διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Παρουσιάζεται η υπάρχουσα νομοθεσία, αλλά και πιθανά μελλοντικά μέτρα και προτάσεις που βρίσκονται στο τραπεζί των διαπραγματεύσεων μεταξύ των φορέων-οργανισμών για την μείωση των εκπομπών από την ναυτιλία, όπως και η ελληνική θέση πάνω σε αυτό το φλέγον ζήτημα.

Το τρίτο κεφάλαιο επικεντρώνεται στο φαινόμενο της μείωσης της ταχύτητας στα πλοία, γνωστό με τον ναυτιλιακό όρο ‘’slow steaming’’, που αποτέλεσε και συνεχίζει να αποτελεί κύρια πρακτική των εταιρειών σε εποχές οικονομικής κρίσης, όπου η ζήτηση πέφτει και η τιμή των καυσίμων ανεβαίνει. Ξεκινώντας με μία εισαγωγή με σκοπό την παρουσίαση του οικονομικού περιβάλλοντος όπου παρατηρείται το συγκεκριμένο φαινόμενο, παρουσιάζονται στην συνέχεια τα κίνητρα που οδηγούν εταιρείες και πλοιοκτήτες προς την υιοθέτηση αυτής της, λειτουργικού χαρακτήρα, απόφασης. Έπειτα παρουσιάζονται αναλυτικά στοιχεία που αποκαλύπτουν τον ρόλο του στην μείωση των εκπομπών ρύπων στην ναυτιλία, τεχνικής φύσεσως προβλήματα που μπορεί να προκύψουν από αυτό, ενώ τέλος γίνεται αναφορά στην εφαρμογή και την σημασία που μπορεί να έχει στο μέλλον.

Το τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζει το κύριο θέμα της παρούσας διπλωματικής,την ανάπτυξη δηλαδή ενός μαθηματικού μοντέλου για τον υπολογιμό του ετήσιου λειτουργικού κόστους μιας ναυτιλιακής εταιρείας πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Αρχικά, επιχειρείται μια εισαγωγή στο γενικότερο ναυτιλιακό πλαίσιο πάνω στο οποίο βασίζεται η κατασκευή του μοντέλου και στην συνέχεια παρουσιάζεται η γενική δομή του πολυπαραμετρικού προβλήματος. Ακολούθως, αναλύεται η διαδικασία που ακολουθείται για την αντιμετώπισή του, και παρουσιάζονται οι μεταβλητές, οι παράμετροι και οι συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του μοντέλου, όπως επίσης οι περιορισμοί και οι ιδιότητες του. Τέλος, περιγράφονται οι πίνακες προέλευσης-προορισμού και οι ροές φορτίου, η διάρθρωση του στόλου και το δίκτυο των εξυπηρετούμενων λιμένων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του μοντέλου.

Το πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζει σε πινακοποιημένη μορφή το μοντέλο που έχει αναπτυχθεί καθώς και το μαθηματικό πλαίσιο πάνω στο οποίο στηρίχθηκε. Παρατίθενται πίνακες που περιλαμβάνουν: χαρακτηριστικά των πλοίων που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο, ανάλυση των περιορισμών, πίνακες προέλευσης-προορισμού, χαρακτηριστικά των κυκλικών ταξιδιών, υπολογισμούς χρόνου και κόστους του μοντέλου, υπολογισμούς εκπομπών ρύπων CO_2, NO_x, SO_x. Τέλος, στην ενότητα που κλείνει το κεφάλαιο, επισημαίνεται το σύνολο των παραδοχών,υποθέσεων και απλουστεύσεων που έχουν πραγματοποιηθεί για να καταστεί δυνατή η μαθηματική μοντελοποίηση.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία βελτιστοποίησης του μοντέλου που αναλύθηκε και παρουσιάστηκε στα δύο προηγούμενα κεφάλαια. Περιγράφεται το θεωρητικό πλαίσιο των γενετικών αλγορίθμων, βάσει των οποίων γίνεται η βελτιστοποίηση του συστήματος, τα εργαλεία της βελτιστοποίησης και το περιβάλλον στο οποίο αυτή υλοποιείται. Αναλύεται το μαθηματικό υπόβαθρο της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, για την εύρεση των βέλτιστων κατά Pareto λύσεων και του αντίστοιχου μετώπου (Pareto front) που προκύπτει. Εξηγείται ο τρόπος με τον οποίο ορίζεται το πρόβλημα, τα βήματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης και περιγράφεται ο τρόπος χάραξης του αποτελεσματικού μετώπου.

Στο έβδομο κεφάλαιο, το κεφάλαιο παράθεσης των αποτελεσμάτων των διαδικασιών που περιγράφηκαν παραπάνω, εξετάζονται ζητήματα που σκιαγραφούν πλήρως το οικονομικό προφίλ της εταιρείας. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται α) στοιχεία που αφορούν τα χαρακτηριστικά των πλοίων που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο, β) τα αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης και η απεικόνηση του αποτελεσματικού μετώπου,γ) βασικοί δείκτες απόδοσης και τέλος δ) μονόδρομη ανάλυση ευαισθησίας στην τιμή του καυσίμου και μία σειρά απο συγκριτικά σενάρια, που έχουν ώς τελικό στόχο να προτείνουν έναν βέλτιστο τρόπο λειτουργίας του δικτύου που μελετάμε.

Στο όγδοο και τελευταίο κεφάλαιο, αντί επιλόγου, καταγράφονται και αναπτύσσονται συμπερασμάτα που εξάγονται από την διαδικασία κατασκευής και βελτιστοποίησης του μοντέλου. Επίσης, παρατίθενται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα, επισημαίνοντας πιθανές βελτιώσεις στο παρόν μοντέλο και προτείνοντας εναλακτικούς τρόπους διαχείρισης και προσέγγισης του μελετούμενου προβλήματος.

Στο τέλος της παρούσας διπλωματικής παρατίθεται ελληνική και ξενόγλωσση βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την συγγραφή αυτής της εργασίας, όπως επίσης και παράρτημα με συμπληρωματικά στοιχεία.

2

ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑ

.....

Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί μια συνοπτική αλλά περιεκτική παρουσίαση του ρόλου της ναυτιλίας στην ανάπτυξη του φαινομένου του θερμοκηπίου και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης εν γένει. Αναλύονται οι κύριοι ρύποι που εκπέμπει ο χώρος της ναυτιλίας, δίνοντας ιδαίτερη έμφαση στο διοξείδιο του άνθρακα (CO_2). Παρουσιάζεται η υπάρχουσα νομοθεσία, αλλά και πιθανά μελλοντικά μέτρα και προτάσεις που βρίσκονται στο τραπέζι των διαπραγματεύσεων μεταξύ των φορέων-οργανισμών για την μείωση των εκπομπών από την ναυτιλία, όπως και η ελληνική θέση πάνω σε αυτό το φλέγον ζήτημα.

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

2.1.1 Ιστορική αναδρομή

Για περισσότερο από 200 χρόνια , η καύση ορυκτών καυσίμων όπως άνθρακας και πετρέλαιο, η αποψίλωση των δασών και άλλες ενέργειες έχουν ως αποτέλεσμα η συγκέντρωση αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα να έχει αυξηθεί δραματικά..Αυτά τα αέρια σχηματίζουν ένα «στρώμα» πάνω από το έδαφος της Γης σε ένα ορισμένο ύψος, ώστε αφού επιτρέψουν να εισέλθει η υπέρυθρη ακτινοβολία του ήλιου, αυτή απορροφάται κατά ένα μέρος από τη Γη και την ατμόσφαιρα.

Το φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι απαραίτητο για να υπάρξει ζωή στον πλανήτη. Χωρίς αυτό, η θερμοκρασία της γήινης επιφάνειας θα ήταν σε παγκόσμια και ετήσια βάση περίπου -18°C. Ωστόσο, όσο η συσσώρευση τέτοιων αερίων αυξάνεται στην ατμόσφαιρα, τα επίπεδα θερμοκρασίας στην Γη θα μεγαλώνουν. Σύμφωνα με στοιχεία της NASA, η μέση θερμοκρασία του πλανήτη έχει αυξηθεί 0.6 ± 0.2 °C από τα τέλη του 19ου αιώνα και η αύξηση αυτή οφείλεται σημαντικά στην ανθρώπινη δραστηριότητα των τελευταίων 50 ετών. Τα δέκα πιο θερμά έτη που έχουν

ιστορικά καταγραφεί από το 1850 και μετά σημειώνονται όλα τα τελευταία 13 χρόνια (Environmental Protection Agency 2009).

Σύμφωνα με επιστημονικές έρευνες της IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change)*, η θερμοκρασία της Γης ενδέχεται να αυξηθεί κατά 1.4 - 5.8 °C εντός της χρονικής περιόδου 1990 και 2100. Οι συνέπειες μίας τέτοιας ενδεχόμενης αύξησης, επεκτείνονται και σε άλλου είδους μεταβολές, όπως αύξηση της στάθμης των θαλασσών ή δημιουργία ακραίων καιρικών φαινομένων όπως πλημμύρες, τυφώνες ή εξαφάνιση βιολογικών ειδών. Αν και το φαινόμενο της παγκόσμιας θέρμανσης αναμένεται να αυξήσει την ένταση και την συχνότητα τέτοιων μεταβολών, θεωρείται δύσκολο να συνδεθεί κάθε μεμονωμένο γεγονός ως άμεσο αποτέλεσμα της.

Σχετικά με τις κλιματικές μεταβολές που αναμένονται μελλοντικά, επικρατεί ένα σημαντικό ποσοστό αβεβαιότητας σε επίπεδο επιστημονικών προβλέψεων, ενώ το θέμα αποτελεί επιπλέον ένα αμφιλεγόμενο πολιτικό ζήτημα, που σχετίζεται με την ανάγκη λήψης πολιτικών μέτρων αντιμετώπισης του προβλήματος της παγκόσμιας θέρμανσης, εκ μέρους των κυβερνήσεων.

2.1.2 Παρουσίαση του προβλήματος

Αν και στην ατμόφαιρα της Γης συναντούμε κυρίως οξυγόνο και άζωτο, κανένα από τα δύο δεν πάιζει σημαντικό ρόλο στην δημιουργία του φαινομένου του θερμοκηπίου, αφού και τα δύο είναι διαπερατά από την ανακλώμενη ακτινοβολία από το έδαφος. Το φαινόμενο του θερμοηπίου οφείλεται κυρίως στην παρουσία υδρατμών (H_2O), διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και νεφών. Οι υδρατμοί αποτελούν το πλέον ενεργό συστατικό, κατά ποσοστό 60%, ενώ μικρότερη συνεισφορά έχουν και τα αέρια μεθανίου (CH_4), υποξείδιο του αζώτου (N_2O) και όζοντος (O_3) (περίπου 8%).

Οι οδικές,εναέριες και θαλάσσιες μεταφορές κατέχουν όλο και σημαντικότερο μερίδιο στις παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Ο τομέας των μέσων μεταφοράς οφείλει να συνεισφέρει στην μείωση των εκπομπων ρύπων. Το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής είναι ένα μείζον πρόβλημα που αφορά τους πάντες αφού το περιβάλλον είναι δημόσιο αγαθό. Εως και πριν 25 χρόνια, η απουσία κεντρικής εξουσίας που να μπορεί να επιβάλλει και να ενισχύει πολιτικές που θα είχαν ως στόχο την αντιμετώπιση του φαινομένου ήταν εμφανής . Οι πρώτοι που άρχισαν να κρούουν τον κώδωνα του κινδύνου για την κλιματική μεταβολή που οφείλεται σε ανθρωπογενείς αιτίες ήταν οι επιστήμονες. Στοιχεία από τις δεκαετίες του 1960 και 1970 έδειχναν ότι οι συγκεντρώσεις CO_2 στην ατμόσφαιρα αυξάνονταν σημαντικά, γεγονός που οδήγησε τους κλιματολόγους αρχικά και στη συνέχεια και άλλους επιστήμονες να πιέσουν για δράση. Δυστυχώς, πήρε πολλά χρόνια στη διεθνή κοινότητα για να ανταποκριθεί στο αίτημα αυτό. Το **Πρωτόκολλο του Κιότο** αποτελεί έναν «οδικό χάρτη», στον οποίο περιλαμβάνονται τα απαραίτητα βήματα για τη μακροπρόθεσμη αντιμετώπιση της αλλαγής του κλίματος που προκαλείται

λόγω της αύξησης των ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Σύμφωνα με αυτό, τα κράτη που το έχουν συνυπογράψει δεσμεύονται να ελαττώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου την πρώτη περίοδο ανάληψης υποχρεώσεων (2008-2012) κατά ένα συγκεκριμένο στόχο σε σχέση με τις εκπομπές του 1990 (ή του 1995 για ορισμένα αέρια). Ωστόσο δεν είναι λίγοι αυτοί που έχουν εκφραστεί επικριτικά γι'αυτήν την προσπάθεια. Οι κύριοι άξονες της κριτικής είναι οι εξής:

- Η περιορισμένη κάλυψη των παγκόσμιων εκπομπών ρύπων.Οι χώρες που έχουν υπαχθεί στο Πρωτόκολλο καλούνται να κάνουν βαθιές περικοπές για να πιάσουν τους στόχους,ενώ άλλες όπως η Αμειρκή ή ο Καναδάς ο οποίος αποσύρθηκε τον Δεκέμβιο του 2011, δεν χρειάζεται να καταβάλλουν προσπάθεια περικοπών τουλάχιστον στα πλαίσια του Πρωτοκόλλλου.
- Η επιμονή σε Συστήματα Εμπορίας εκπομπών (Cap-and-Trade Systems) αντί στην καθιέρωση Φορολογίας στα καύσιμα (Carbon Tax).
- Οι ενέργειες του στοχεύουν κυρίως στον στενό περιορισμό των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα χωρίς να μεθοδεύεται μια γενικότερη προσέγγιση η οποία επιπλέον θα έδινε κίνητρα για ανάπτυξη και υιοθέτηση αντιρρυπαντικών τεχνολογιών.

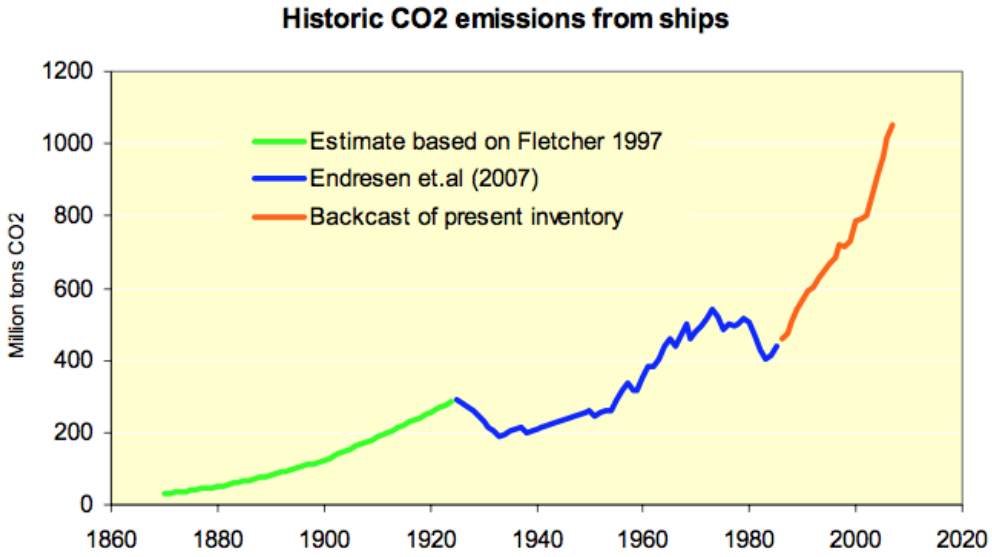
Οσον αφορά την ναυτιλία, η ατμοσφαιρική ρύπανση απο πλοία και κυρίως οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα είναι κεντρικό θέμα στην αντζέντα της διεθνούς ναυτιλιακής κοινότητας. Το Πρωτόκολλο του Κιότο (UNFCCC, 1997) ανέθεσε στον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO), για τον οποίο θα μιλήσουμε αναλυτικότερα στην επόμενη ενότητα, την εφαρμογή ενός πλαισίου με σκοπό την μείωση των εκπομπών των καυσίμων.Αν και έχουν ήδη θεσπιστεί όπως θα δούμε παρακάτω κανονισμοί που αναφέρονται σε άλλους ατμοσφαιρκούς ρύπους, όπως τα NO_x και τα SO_x, εντούτοις μέχρι σήμερα, δεν έχει συμφωνηθεί κανένα μέτρο για την μείωση των παγκόσμιων εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα και των άλλων αερίων του θερμοκηπίου.

2.2 Ο ΡΟΛΟΣ ΤΗΣ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ

2.2.1 Ιστορική εξέλιξη και προβλέψεις για το μέλλον

Η ναυτιλική δραστηριότητα έχει αυξηθεί σηματικά τα τελευταία χρόνια με αποτέλεσμα η συμβολή της στις παγκόσμιες εκπομπές ρύπων και αερίων του θερμοκηπίου μόνο αμελητέα δεν είναι.Παρ'ολα αυτά, οι πληροφορίες σχετικά με την ιστορική ανάπτυξη της ενεργειακής κατανάλωσης και εκπομπών ρύπων είναι περιορισμένες, με ελάχιστα στοιχεία να έχουν καταγραφεί πριν το 1950, ενώ μεγάλες είναι και οι αποκλίσεις στους υπολογιμούς αυτών τις τρεις τελευταίες δεκαετίες.Οι εκπομπές CO_2 από πλοία παγκοσμίως ήταν 30 Mt (CO_2) το 1870, ενώ έφθασαν

περίπου τα 206 Mt το 1913. Η κύρια ανάπτυξη κατά την διάρκεια εκείνης της περιόδου ήταν η εξέλιξη από τα ιστιοφόρα στα ατμόπλοια. Σύμφωνα με τις πωλήσεις καυσίμων, οι εκπομπές CO_2 υπολογίστηκαν να είναι 229 Mt το 1925. Το 2002 σχεδόν τριπλασσιάστηκαν φτάνοντας περίπου τα 634 Mt. Οι αντίστοιχες εκπομπές SO_2 υπολογίστηκαν περίπου 2.5 Mt (SO_2) το 1925 και 8.5 Mt το 2002.Η κύρια καινοτομία κατά την διάρκεια εκείνης της περιόδου είναι η αντικατάσταση του κάρβουνου από το πετρέλαιο, οπως και η χρήση αργότερα ντηζελομηχανών.



***Διάγραμμα 2.1**: Ιστορική εξέλιξη των εκπομπών CO_2 από τα πλοία, (Source: 2nd IMO greenhouse gas study,2009)*

Η πλειονότητα των εκπομπών ρύπων σήμερα λαμβάνει χώρα στο βόρειο ημισφαίριο και σε σε ένα καλά ορισμένο σύστημα διεθνών δρομολογίων. Πρόσφατες έρευνες έδειξαν ότι οι εκπομπές CO_2, NO_x, SO_2 από πλοία αντιστοιχούν σε 2% με 3%(ή ακόμα και 4%), 10% με 15% και 4% με 9 % των συνολικών ανθρωπογενών εκπομπών αντίστοιχα. Σχετικές προβλέψεις με ορίζοντα το 2020 υπολογίζουν μια αύξηση στις εκπομπές της τάξης του 30%. Για το έτος 2050, μελέτες υπολογίζουν τις εκπομπές αυτών των ρύπων να κυμαίνονται μεταξύ 1308 σε 2271 Mt CO_2 , 17 με 28 Mt NO_x και 2 με 12 Mt SO_2. Τέτοιου είδους μελέτες που χρησιμοποιούν μοντέλα υπολογισμού του αντίκτυπου των εκπομπών ρύπων από την ναυτιλία στο μέλλον, είναι βασισμένες σε σενάρια που χρησιμοποιούνται σαν βάση για τον υπολογιμό αυτών των εκπομπών. Οι περισσότερες προβλέψεις για τα επόμενα 10-20 χρόνια δείχνουν ότι μια αύξηση πλοίων και δρομολογίων θα οδηγήσει παγκοσμίως σε σημαντική άνοδο των εκπομπών από την ναυτιλία.Τέλος η συμβολή της σε ρύπους, όπως όζον,NO_2 και PM, θα αυξηθεί κυρίως σε περιοχές όπως η Αρκτική και η Νοτιο-Ανατολική Ασία.

2.2.2 Κατηγορίες ρύπων

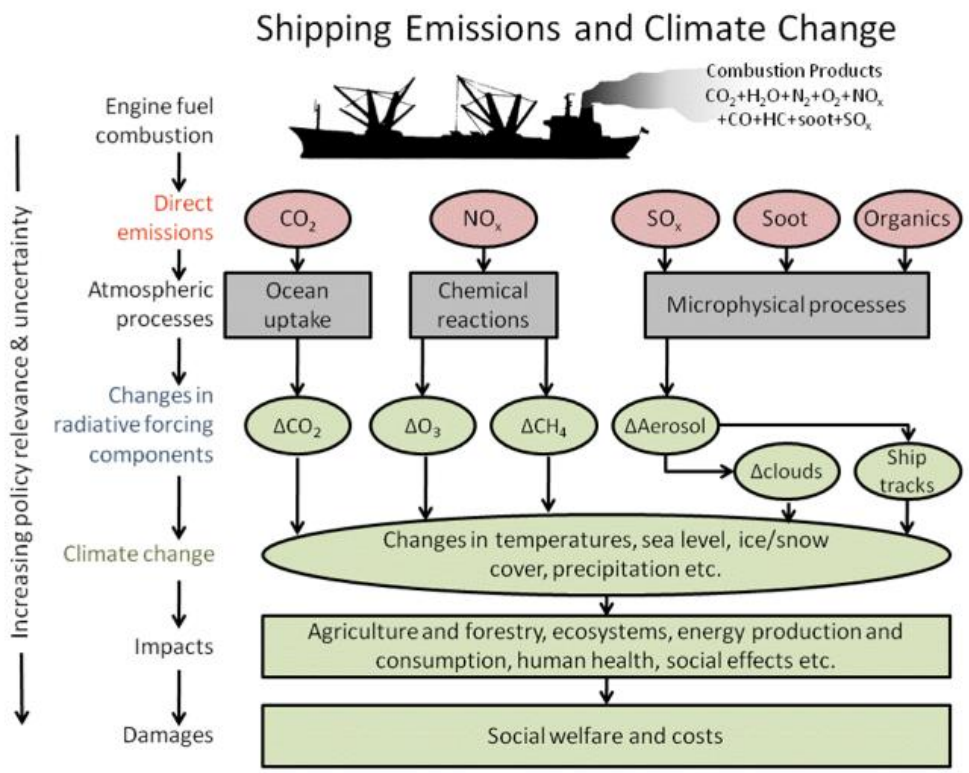
Οι εκπομπές ρύπων από τα πλοία μπορούν να χωριστούν σε δύο ευρύτερες κατηγορίες. Κάθε μία απαιτεί διαφορετικούς χειρισμούς για τον περιορισμό της (για παράδειγμα, η χρήση καυσίμου με χαμηλά επίπεδα θείου δεν μειώνει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου).

- Εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG).

  Αυτά είναι: διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), υδροφθοράνθρακες (HFC), μεθάνιο (CH_4), υποξείδιο του αζώτου (N_2O), *υπερφθοράνθρακες* (PFC) και το εξαφθοριούχο θείο (SF6). Το CO_2, που αποτελεί το 85% των αερίων του θερμοκηπίου (GHG), έπιδρά σημαντικά στο πρόβλημα της παγκόσμιας αύξησης της θερμοκρασίας (*global warming).* Οι εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου, τα οποία είναι ορατά σε ομίχλη, είναι προιόν κάθε καύσης (coal and oil) και φυσικά αυτής που συμβαίνει στις μηχανές των πλοίων.

- Εκπομπές NO_x (οξείδια του αζώτου),SO_x (οξείδια του θείου) και PM (αιωρούμενα σωματίδια).
  - Η ρύπανση από NO_x αυξάνει την ποσότητα του τροποσφαιρικού όζοντος,που είναι και αυτό αέριο του φυσικού φαινομένου του θερμοκηπίου και έτσι συμβάλλει στο φαινόμενο της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Ωστόσο, μειώνει τον χρόνο ζωής του μεθανίου, με αποτέλεσμα την ψύχρανση του κλίματος. Επιπλέον, τα οξείδια του αζώτου είναι βλαβερά σαν αέριοι ρύποι και μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στην υγεία.
  - Τα SO_x προκαλούν ψύχρανση του κλίματος εξαιτίας της επίδρασης τους σε αιωρούμενα σωματίδια και στα σύννεφα, ενώ είναι και αυτά βλαβεροί σαν ρύποι.
  - PM, υδρογονάνθρακες, νιτρώδες οξείδιο,αλογόνα και μέταλα επίσης απελευθερώνονται από τα πλοία. Ολα τους έχουν επίδραση στο περιβάλλον.

Τα NO_x, SO_x, PM είναι οι πιο σημαντικοί ρύποι που οδηγούν στο σχηματισμό της όξινης βροχής. Το ***Σχήμα 2.1*** αναπαριστά όσα προαναφέρθηκαν.



Σχήμα 2.1:*Επιπτώσεις απο τις εκπομπές ρύπων των πλοίων και κλιματική αλλαγή, (Source: 2nd IMO greenhouse gas study,2009)*

2.2.3 Εκπομπές SO_x , NO_x και μέτρα για την μείωσή τους

Ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO, International Maritime Organization) είναι ένας εξειδικευμένος οργανισμός στα πλαίσια του ΟΗΕ, με αντικείμενο τη θέσπιση μέτρων για τη βελτίωση της ασφάλειας στη διεθνή ναυτιλία και την αποφυγή της μόλυνσης του περιβάλλοντος από πλοία. Το Πρωτόκολλο του Κιότο (UNFCCC, 1997) ανέθεσε στον Διεθνή Ναυτιλιακό Οργανισμό (IMO) την εφαρμογή ενός πλαισίου με σκοπό την μείωση των εκπομπών των καυσίμων. Επιπλέον, είναι αρμόδιος για νομικά θέματα που αφορούν στην απόδοση ευθυνών και στην καταβολή αποζημιώσεων σε περιπτώσεις ναυτιλιακών ατυχημάτων, καθώς επίσης και για τη διευκόλυνση της διεθνούς ναυτιλιακής κίνησης. Ο IMO συστάθηκε με τη διεθνή σύμβαση, που υιοθετήθηκε υπό την αιγίδα του ΟΗΕ στη Γενεύη το 1948, και αριθμεί σήμερα περισσότερα από 169 Κράτη-Μέλη.

Δύο από τις σημαντικότερες συμβάσεις, που έχουν υιοθετηθεί από τα κράτη-μέλη στα πλαίσια του IMO είναι η σύμβαση για την ασφάλεια της διεθνούς ναυτιλίας SOLAS (Safety Of Life At Sea) του 1974, που αναθεωρήθηκε και επεκτάθηκε το 1995, καθώς και η σύμβαση για την πρόληψη της μόλυνσης του περιβάλλοντος από πλοία MARPOL (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships), η οποία υιοθετήθηκε το 1973 και αναθεωρήθηκε το 1978 (MARPOL 73/78)

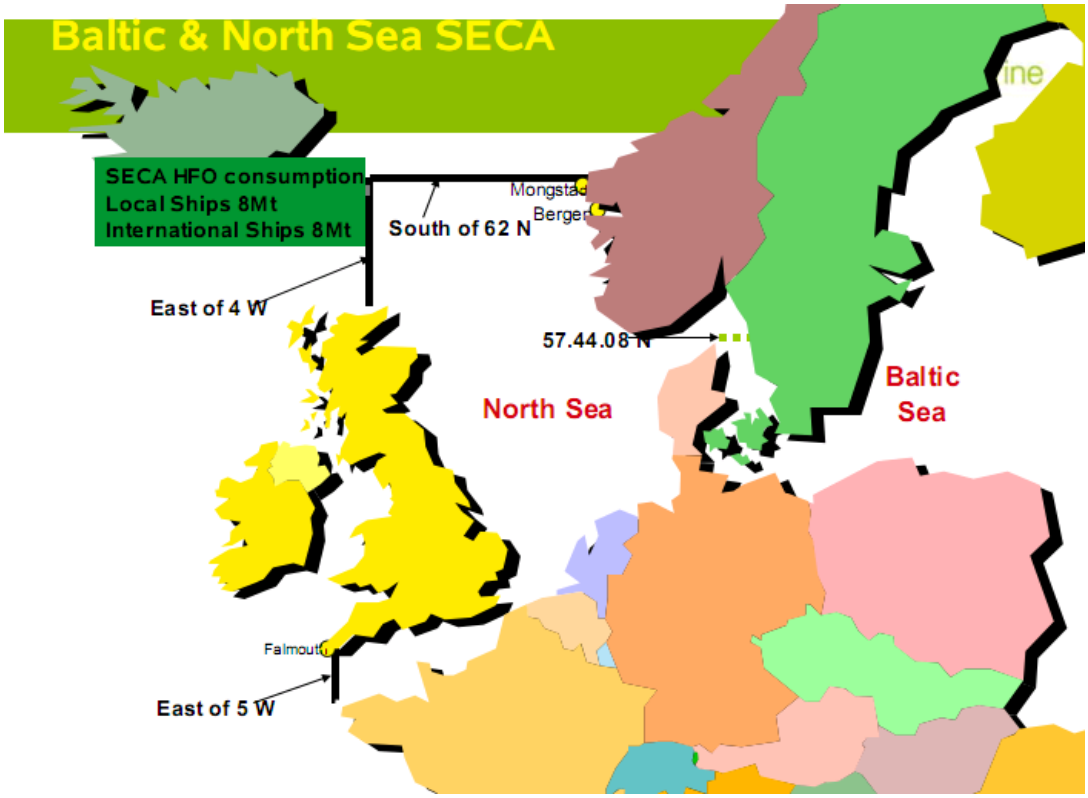
και αποτελείται από 6 παραρτήματα, που το καθένα καλύπτει διαφορετικές κατηγορίες ρύπανσης από τα πλοία.

Annex no.	Pollution segment	Entered into force
Annex I	Oil pollution	2 October 1983
Annex II	Pollution by noxious liquid substances	2 October 1983
Annex III	Harmful substances in packaged form	1 July 1992
Annex V	Garbage	31 December 1988
Annex IV	Sewage	27 September 2003
Annex VI	Air pollution (adopted in September 1997)	19 May 2005

Πίνακας 2.1 : *Παραρτήματα της MAPPOL (Source : imo.org)*

Το παράρτημα VI (Annex VI), θέτει όρια στις εκπομπές SO_x και NO_x:

- Με τον Κανονισμό αυτό καθιερώνεται ως ανώτατο όριο περιεκτικότητας σε θείο, οποιουδήποτε καυσίμου πετρελαίου, το **4,5%** κατά βάρος. Αυστηρότερες απαιτήσεις ισχύουν για τα πλοία που κινούνται εντός περιοχών ελέγχου εκπομπών SO_x (SO_x Emission Control Area-SECA), δηλαδή εντός θαλασσίων περιοχών που πληρούν τα κριτήρια και τις διαδικασίες καθορισμού, που περιγράφονται στο Προσάρτημα III του Παραρτήματος του εν λόγω Πρωτοκόλλου. Επί του παρόντος, ως περιοχές SECA έχουν καθορισθεί, η Βαλτική θάλασσα, η Βόρειος Θάλασσα και το Στενό της Μάγχης.



Σχήμα 2.2 : *Περιοχές ελέγχου εκπομπών SO_x (SO_x Emission Control Areas-SECAs)*

Για τα πλοία που βρίσκονται εντός των προαναφερόμενων περιοχών SECA , θα πρέπει η περιεκτικότητα του θείου στο καύσιμο πετρέλαιο να μην υπερβαίνει το **1,5% κ.β**. Εναλλακτικά, τα πλοία πρέπει να διαθέτουν σύστημα καθαρισμού καυσαερίων που εφαρμόζεται στη μηχανή του πλοίου, συμπεριλαμβανομένων των κύριων ή βοηθητικών μηχανών πρόωσης, για τη μείωση των ολικών εκπομπών οξειδίων του θείου. Το συνολικό βάρος εκπομπής διοξειδίου του θείου δεν θα υπερβαίνει τα 6 γραμμάρια ανά κιλοβατώρα (συνολικό βάρος εκπομπής ≤ 6,0 g SOx/KWh) ή θα πρέπει να εφαρμόζεται οποιαδήποτε άλλη ισοδύναμη τεχνολογική μέθοδος για τον περιορισμό των εκπομπών SOx, εντός των παραπάνω ορίων, εγκεκριμένη από την Αρμόδια Αρχή.

- Σχετικά με τις εκπομπές NO_x από μηχανές ντίζελ, ο IMO ανέπτυξε έναν υποχρεωτικό Τεχνικό Κώδικα. Σε αυτόν υπόκειται:

  Κάθε μηχανή ντίζελ με ισχύ μεγαλύτερη από 130 KW, η οποία εγκαθίσταται σε ένα πλοίο το οποίο κατασκευάστηκε μετά την $1^{η}$ Ιανουαρίου του 2000 και κάθε μηχανή ντίζελ με ισχύ μεγαλύτερη από 130 KW, η οποία υπόκειται σε μετασκευή ευρείας έκτασης μετά την $1^{η}$ Ιανουαρίου 2000.

Ο Κανονισμός αυτός δεν εφαρμόζεται σε :

Μηχανές ντίζελ έκτακτης ανάγκης (ηλεκτρογεννήτριες-Emergency diesel generator), μηχανές πρόωσης σωσίβιων λέμβων και σε οποιαδήποτε συσκευή ή εξοπλισμό που χρησιμοποιείται αποκλειστικά σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης.

Η λειτουργία κάθε μηχανής ντίζελ, στην οποία εφαρμόζεται αυτός ο Κανονισμός, επιτρέπεται εφόσον οι εκπομπές NOx βρίσκονται κάτω από τα ακόλουθα όρια :

- 17,0 g/KWh όταν οι στροφές λειτουργίας n είναι μικρότερες από 130 rpm,

- 45,0 x n-0,2 g/KWh όταν οι στροφές λειτουργίας n είναι μεγαλύτερες ή ίσες από 130 αλλά μικρότερες από 2000 rpm,

- 9,8 g/KWh όταν οι στροφές λειτουργίας n είναι ίσες ή μεγαλύτερες από 2000 rpm.

  n = η ονομαστική ταχύτητα της μηχανής (περιστροφές στροφαλοφόρου ανά λεπτό).

Η λειτουργία μιας μηχανής diesel επιτρέπεται επίσης όταν λειτουργεί ένα σύστημα καθαρισμού καυσαερίων, εγκεκριμένο σύμφωνα με τον Τεχνικό Κώδικα NO_x ή εφαρμόζεται οποιαδήποτε άλλη ισοδύναμη μέθοδος για τη μείωση των εκπομπών NOx στο πλοίο, τουλάχιστον μέσα στα όρια που προαναφέρθηκαν.

Τον Απρίλιο του 2008 η Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (MEPC) του Διεθνούς Ναυτιλιακού Οργανισμού (IMO) ενέκρινε τις προτεινόμενες τροποποιήσεις στο παράρτημα VI (MARPOL), σχετικά με τους κανονισμούς για την μείωση των επιβλαβών εκπομπών από τα πλοία. Οι βασικές αλλαγές είναι:

- Σταδιακή μείωση των εκπομπών οξειδίων θείου (SO_x) από τα πλοία, με το παγκόσμιο όριο του θείου να μειώνεται αρχικά σε 3,50% (από το τρέχον 4,50%), από την 1η Ιανουαρίου 2012, και έπειτα σταδιακά σε 0,50 %, από την 1η Ιανουαρίου 2020, υπό τον όρο ότι μία μελέτη σκοπιμότητας θα έχει ολοκληρωθεί το αργότερο έως το 2018. Από την 1η Ιουλίου 2010 τα εφαρμόσιμα όρια στις περιοχές ελέγχου εκπομπής θείου (SECA's) θα μειωθούν στο 1,00%, (από τα τρέχοντα 1,50 %) και στο 0,10%, από την 1η Ιανουαρίου 2015.Ο ακόλουθος πίνακας είναι ενδεικτικός.

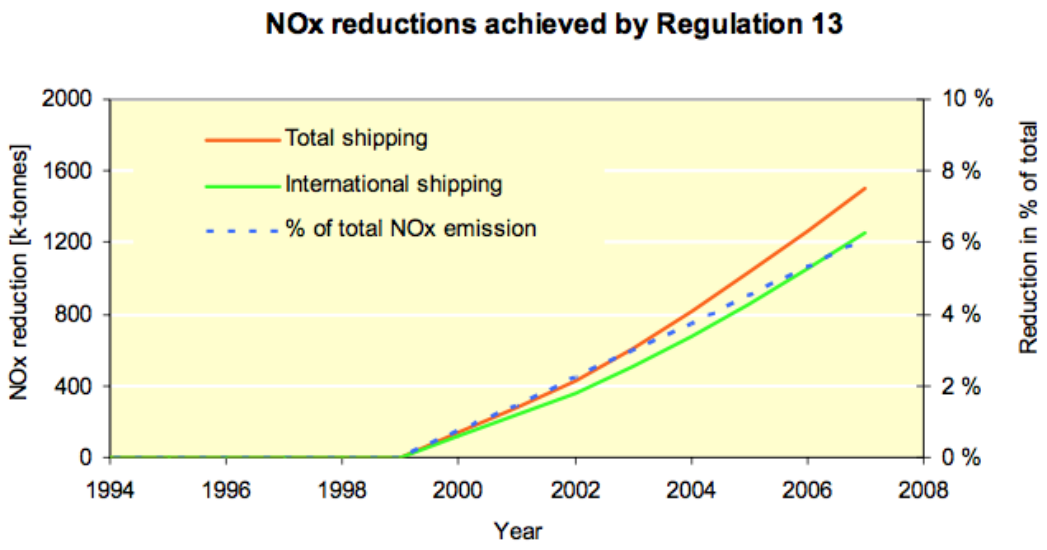
Low Sulfur Timeline

Date	What
19/05/2005	Worldwide maximum sulfur limit 4.5%
11/08/2006	Baltic designated SECA, maximum 1.5% sulfur
01/11/2007	North Sea & Channel designated SECA, maximum 1.5% sulfur
01/01/2008	0.1% sulfur Gas Oil compulsory in ports and territorial waters in the EU
01/07/2010	Sulfur limit for SECA's decreases from 1.5% to 1.0%
01/01/2010	Mandatory use of 0.1 sulfur marine fuel in all EU ports (calls of more than 2 hours)
01/01/2012	Worldwide maximum sulfur limit from 4.5% to 3.5%
01/01/2012	230-mile zone around US and Canada shorelines to be declare SECA
01/01/2015	Sulfur limit for SECA's decreases from 1.0% to 0.1%
2018	Feasibility review on introduction worldwide 0.5% sulfur limit
01/01/2020	Worldwide maximum sulfur limit from 3.5% to 0.5% (earliest date)
01/01/2025	Worldwide maximum sulfur limit from 3.5% to 0.5% (latest date)

Πίνακας 2.2 : *Χρονοδιάγραμμα ορίων περιεκτικότητας σε θείο (Source : imo.org)*

- Αυστηρότερα όρια εκπομπής NO_x για τις νέες μηχανές ανάλογα με την ημερομηνία της εγκατάστασής τους (Annex VI, Regulation 13).
    - Η σειρά I (Tier I), ισχύει για μια μηχανή ντίζελ που εγκαθίσταται σε ένα σκάφος που κατασκευάζεται από την 1ης Ιανουαρίου 2000 και πριν από την 1η Ιανουαρίου 2011, και αντιπροσωπεύει τα πρότυπα 17,0 g/kWh που ορίζονται στο υπάρχον παράρτημα VI.
    - Για τη σειρά II (Tier II), τα επίπεδα εκπομπής NOx για μια μηχανή ντίζελ που εγκαθίσταται σε ένα σκάφος που κατασκευάζεται από την 1η Ιανουαρίου 2011 και μετά θα μειώνονται σε 14,4 g/kWh.
    - Για τη σειρά III (Tier III), τα επίπεδα εκπομπής NOx για μια μηχανή ντίζελ που εγκαθίσταται σε ένα σκάφος που κατασκευάζεται από την 1ης Ιανουαρίου 2016 και μετά θα μειώνονται σε 3,4 g/kWh, όταν το πλοίο κινείται σε μια οριζόμενη περιοχή ελέγχου εκπομπής. Έξω από μια οριζόμενη περιοχή ελέγχου εκπομπής, ισχύει το όριο της σειράς II.
    - Επίσης, η MEPC συμφώνησε σε όριο εκπομπής NO_x 17,0 g/kWh για μια μηχανή diesel με ισχύ μεγαλύτερη από 5.000 kW και

εκτόπισμα 90 λίτρα ανά κύλινδρο ή περισσότερο, που εγκαταστάθηκε σε ένα πλοίο κατασκευής 1ης Ιανουαρίου 1990 και μετά, αλλά πριν από την 1η Ιανουαρίου 2000.



Διάγραμμα 2.2 : *Μειώσεις στις εκπομπές NO_x χάρη στις τροποποιήσεις του Παραρτήματος VI (Source: 2nd IMO greenhouse gas study,2009)*

Τεχνικός κώδικας NOx :

Το τροποποιημένο σχέδιο του τεχνικού κώδικα NO_x, περιλαμβάνει ένα νέο κεφάλαιο 7 βασισμένο στη συμφωνηθείσα προσέγγιση για τον κανονισμό NO_x υπαρχουσών (προ-2000) μηχανών που καθιερώνονται στο τροποποιημένο σχέδιο MARPOL παράρτημα VI. Το τροποποιημένο σχέδιο κώδικα NO_x περιλαμβάνει τις διατάξεις για τις άμεσες μεθόδους μέτρησης και ελέγχου των εκπομπών, μια διαδικασία πιστοποίησης για τις υπάρχουσες μηχανές και τους κύκλους δοκιμής που εφαρμόζονται στις σειρές μηχανών II και III.

Τέλος το τροποποιημένο παράρτημα VI επιτρέπει την σύσταση μία περιοχής ελέγχου εκπομπών (Emission Control Area – ECA) SO_x , PM ή NO_x , ή και των τριών τύπων εκπομπών από πλοία, ύστερα από συμφωνία των εμπλεκόμενων μερών στο Παράρτημα.

Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι περισσότερες περιοχές ελέγχου εκπομπών (ECA's) θα οριστούν τα επόμενα χρόνια:

- ✓ Η Ιρλανδική Θάλασσα, η Μεσόγειος και αργότερα η Μαύρη Θάλασσα.
- ✓ Ο IMO έχει ήδη συμφωνήσει ότι οι Η.Π.Α και ο Καναδάς θα θέσουν σε ισχύ μία ECA 230 μιλίων στις ακτογραμμές τους από την 1η Αυγούστου 2012.

- ✓ Την 1η Ιανουαρίου του 2013 τίθεται σε ισχύ ECA στην Καραϊβική Θάλασσα (The United States Caribbean Sea), όπου στα διερχόμενα πλοία δίνεται περίοδος χάριτος μέχρι την 1η Ιανουαρίου του 2014.
- ✓ Από τον Ιανουάριο του 2007, η Καλιφόρνια (Pacific Coast) έχει θέσει όριο περιεκτικότητας σε θειάφι 0.5% στις εκπομπές των κυρίων μηχανών πρόωσης, των βοηθητικών γεννητριών και των βραστήρων στα ποντοπόρα πλοία που ταξιδεύουν εντός 24 μιλίων από τις ακτές της (0.1% από την 1η Ιανουαρίου 2010).
- ✓ Αλλες μελλοντικές ECA's είναι χωρικά ύδατα σε Νορβηγία, Σιγκαμπούρη, Χονγκ Κονγκ, Τόκυο (Bay) και Αυστραλία.

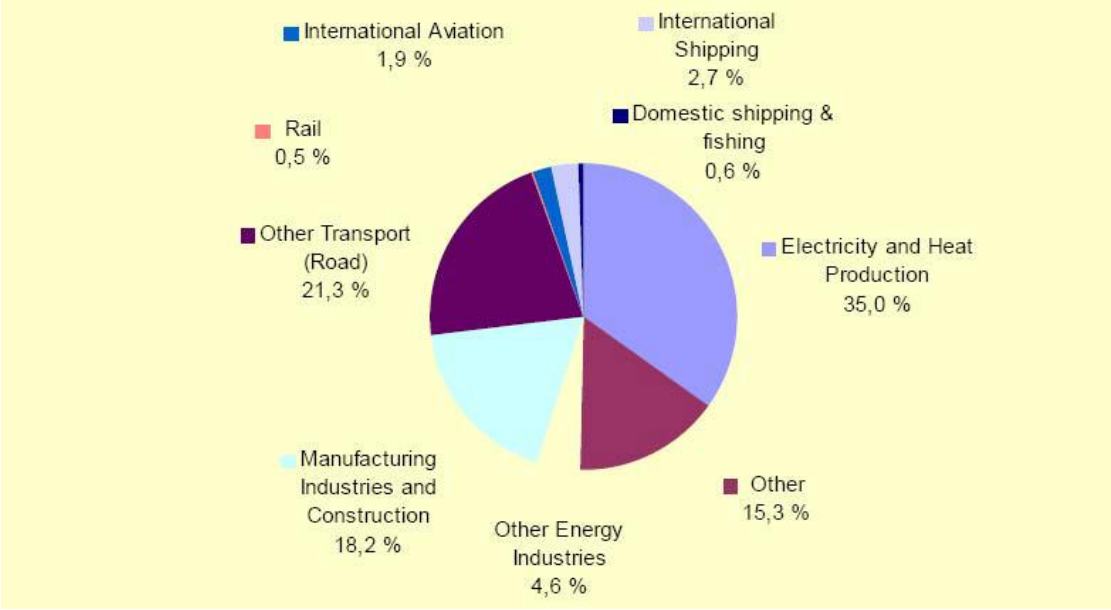
Σχήμα 2.3 *: Υπάρχουσες και πιθανές μελλοντικές περιοχές ελέγχου εκπομπών (Emission Control Areas – ECAs)*

2.2.4 Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από την ναυτιλία

Οπως έχουμε ήδη αναφέρει, ο κύριος παράγοντας μόλυνσης από τις ναυτιλιακές δραστηριότητες, είναι οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα απο τα πλοία. Σχετικά με την ποσότητα του διοξειδίου του άνθρακα που παράγεται, αυτή είναι ανάλογη της κατανάλωσης καυσίμου και της περιεκτικότητας άνθρακα στα καύσιμα.

Σύμφωνα με την δεύτερη έρευνα του IMO για τις εκπομπές αερίων από την ναυτιλία (IMO GHG study 2009) που κατατέθηκε στην Επιτροπή Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (MEPC), οι μεταφορές παράγουν σχεδόν το 27.7% των συνολικών εκπομπών CO_2, όπου απ'αυτό το ποσοστό, το 21.3% αντιστοιχεί στις

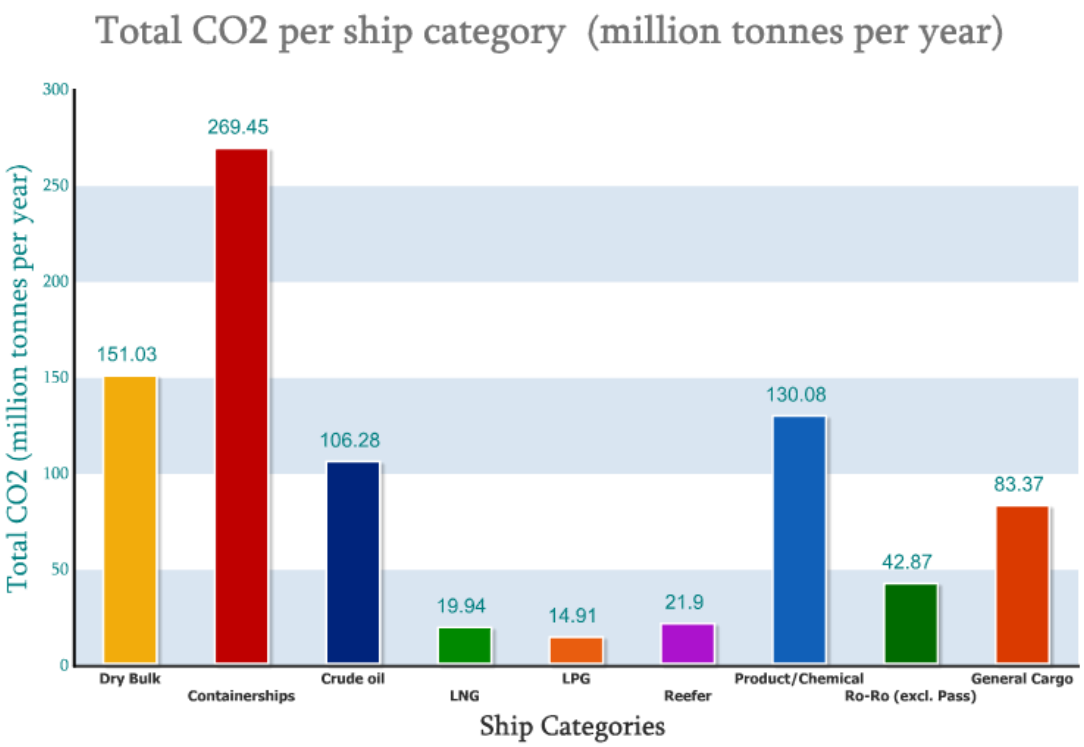
οδικές μεταφορές, το 2.6% στις εναέριες, το 0.5% στις σιδηροδρομικές, ενώ **3.3% είναι το ποσοστό που αντιστοιχεί σε όλες τις θαλλάσιες μεταφορές.** Μεταφέροντας πάνω από το 90% του παγκοσμίου εμπορίου, η ποντοπόρος ναυτιλία συμβάλει μόλις σε ποσοστό 2.7% των συνολικών ρυπογόνων εκπομπών σε παγκόσμια κλίμακα., όπως φαίνεται στο σχήμα ***Διάγραμμα 2.3***.

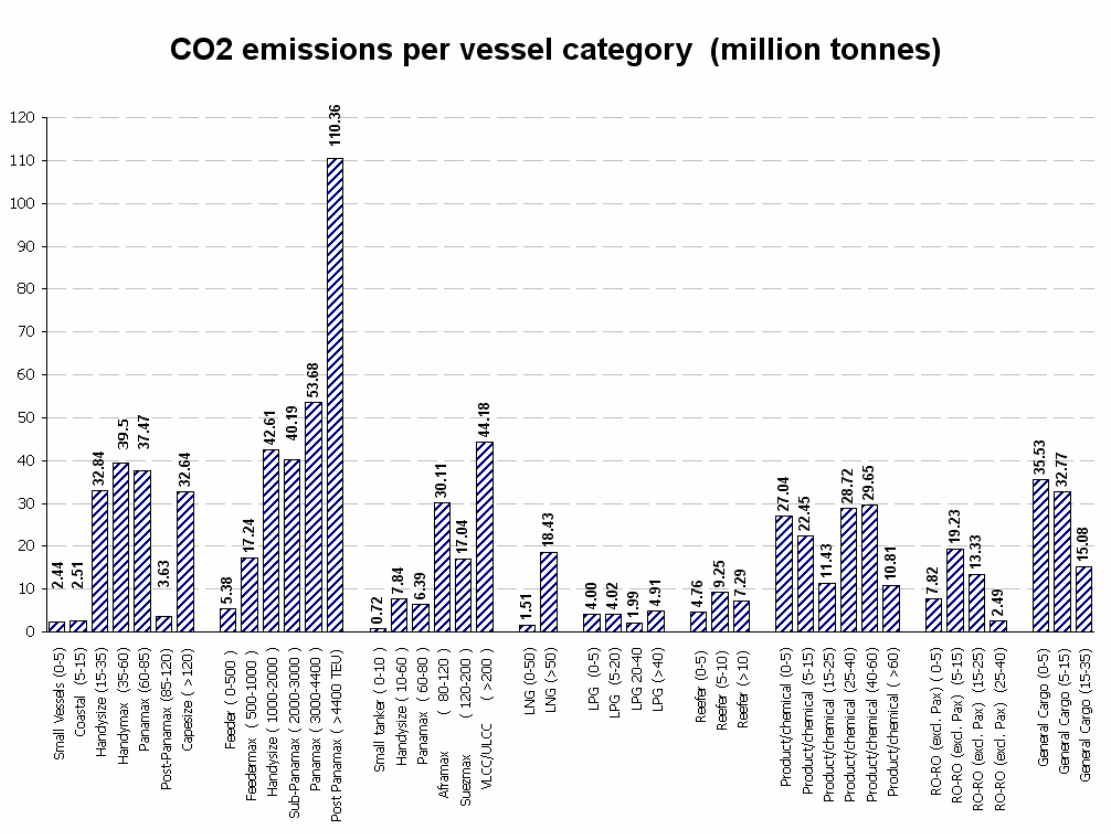


Διάγραμμα 2.3 : *Πηγές εκπομπών CO_2 (Source: 2nd IMO greenhouse gas study,2009)*

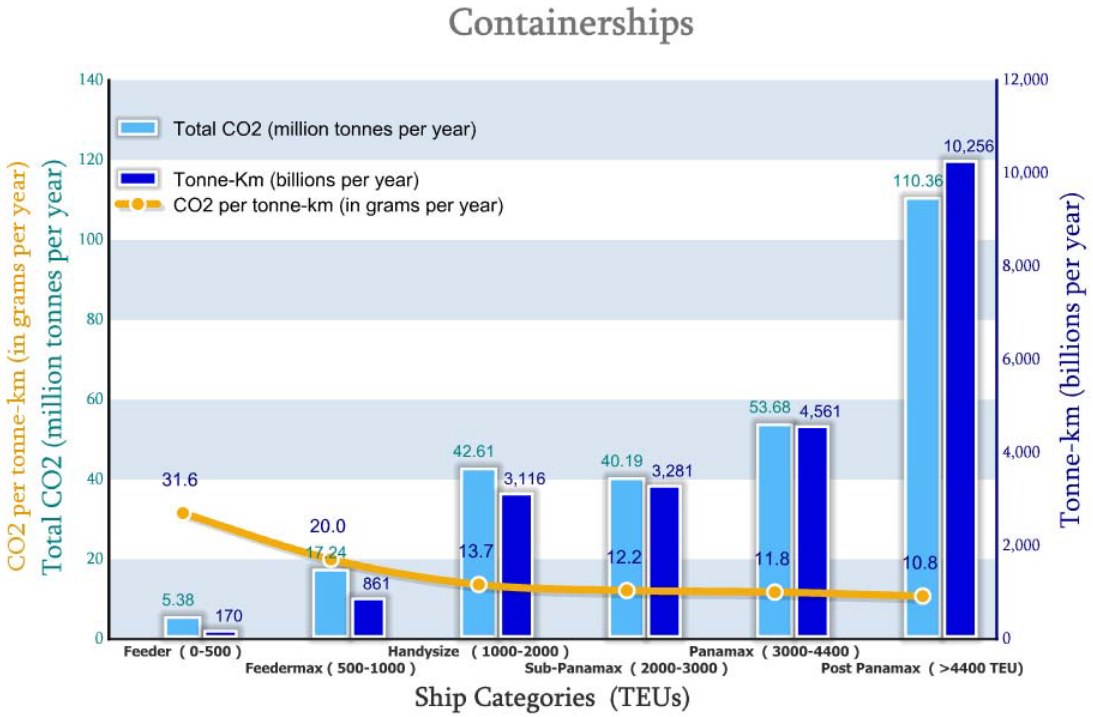
Πιο αναλυτικά, οι συνολικές εκπομπές CO_2 από την ναυτιλία (ποντοπόρος και εγχώρια) υπολογίζονται σε 1,046 εκ .τόνους (το 2007), ή όπως είπαμε το 3.3% των συνολικών εκπομπων CO_2 παγκοσμίως.

Αναφορικά με αυτές τις εκπομπές, πρωταρχικο ρόλο παίζει και ο τύπος του φορτίου και το μέγεθος του πλοίου που μεταφέρει αυτό το φορτίο. Στο ***Διάγραμμα 2.4*** δίνονται σαφείς πληροφορίες για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για όλους τους τύπους των πλοίων, ενώ το ***Διάγραμμα 2.5*** δείχνει πως κατανέμονται αυτές οι εκπομπές στις υποκατηγορίες τους. Το ***Διάγραμμα 2.6*** αναφέρεται στα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (containerships), μιας και αυτά εξετάζει η παρούσα διπλωματική, παρουσιάζοντας μεγέθη όπως οι συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα,τα γραμμάρια εκπομπών ανά τόνο-χιλιόμετρο και άλλα. Τα αποτελέσματα που φανερώνουν τα παρακάτω διαγράμματα προκύπτουν από σχετική έρευνα του LMT (Laboratory for Maritime Transport) βασισμένη σε βάση δεδομένων πλοίων του Lloyds που καλύπτει το σύνολο του παγκόσμιου στόλου (Lloyds Maritime Information Services, 2007).





Διαγράμματα 2.4-2.5 : *Συνολικές εκπομπές για όλους τους τύπους πλοίων (Source: Psaraftis, Kontovas (2008). "Ship Emissions Study")*



Διάγραμμα 2.6 : *Εκπομπές πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (Source: Psaraftis, Kontovas (2008). "Ship Emissions Study")*

Οσον αφορά το μέλλον, τα συνολικά τονομίλια αναμένεται να αυξηθούν κατά 30%-46% μέχρι το 2020 και κατά 150% με 300% έως το 2050 (Buhaug et al.'s - 2008). Η δραστηριότητα των εμπορευματοκιβωτίων προβλέπεται να αυξηθεί σε σημαντικό βαθμό: 65% με 95% μέχρι το έτος 2020 και 425% με 800% έως το 2050.Η αύξηση αυτή, αν πραγματοποιηθούν οι προβλέψεις, θα έχει πολύ σημαντικές επιπτώσεις στην χρήση των καυσίμων από τα πλοία και στις εκπομπές CO_2, απο τη στιγμή που τα containerships έχουν πιο ισχυρές μηχανές και λειτουργούν σε ταχύτητες μεγαλύτερες από τα περισσότερα πλοία.

Οι προβλέψεις του IMO υποθέτουν μειώσεις στις εκπομπές CO_2, που απορρέουν από αλλαγές στο μέσο μέγεθος και στην σχεδίαση των πλοίων (τα μεγαλύτερα πλοία είναι πιο αποδοτικά ενεργειακά, συγκριτικά με τα μικρότερα όπως φαίνεται και στο ***Διάγραμμα 2.6***), μειώσεις στην ταχύτητα και τεχνικές βελτιώσεις στα καινούργια πλοία. Ωστόσο, αν και τα παραπάνω μέτρα όπως και άλλα τεχνολογικής φύσεως ή η συστηματική χρήση καυσίμων μικρής περιεκτικότητας σε άνθρακα είναι ικανά να μειώσουν τις εκπομπές CO_2,οι προβλέψεις δείχνουν ότι οι εκπομπές CO_2 από την ποντοπόρο ναυτιλία θα αυξηθούν μεταξύ 10% και 26% έως το 2020 και μεταξύ 126% και 218% το 2050.

Με βάση λοιπόν τα παραπάνω, αποδεικνύεται ότι η ναυτιλία παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με άλλου είδους μεταφορές. Ωστόσο μέχρι σήμερα, δεν έχει συμφωνηθεί κανένα άμεσο μέτρο για την μείωση των παγκόσμιων εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα. Η ναυτιλιακή κοινότητα καλείται λοιπόν, να λάβει μέτρα που εξασφαλίζουν τη προστασία του περιβάλλοντος και ταυτόχρονα δεν επιφέρουν αρνητικές συνέπειες στην ομαλή ροή του εμπορίου στις θάλασσες.

2.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

2.3.1 Αξιολόγηση των εκπομπών άνθρακα

Συχνά αναφερόμαστε στην τιμή του άνθρακα για ένα τόνο διοξείδιου του άνθρακα που μειώνεται. Αυτό το κόστος ανά μονάδα παίζει σημαντικό ρόλο στον υπολογισμό του κέρδους αποφυγής εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου ή στον υπολογισμό της ζημίας που προκαλείται όταν αυτά εκλύονται. Η οικονομική αξιολόγηση του άνθρακα είναι αναγκαία για διάφορους σκοπούς, όπως η χάραξη περιβαλλοντικής πολιτικής για την εφαρμογή φορολογίας στα καύσιμα και η εκτίμηση της οικονομικής αποδοτικότητας προτάσεων που τίθενται στο τραπέζι των διαπραγματεύσεων

Προκειμένου να οδηγηθούμε στην σύσταση σχετικών κανονισμών, εξετάζοντας πιθανά εναλλακτικά μέτρα ,αποκλείοντας αυτά που δεν είναι οικονομικά αποδοτικά, και τελικά υποστηρίζοντας τις νομοθετικές απόφασεις, οι εκπομπές CO_2 πρέπει να μετρηθούν και να αξιολογηθούν.

Ο IMO όπως έχουμε ήδη τονίσει δέχεται έντονη πίεση να υιοθετήσει μέτρα με σκοπό τον περιορισμό των ρύπων. Τα μέτρα λοιπόν που καλείται να θεσπίσει, πρέπει να είναι ικανά να μειώσουν τις εκπομπές των καυσίμων και ταυτόχρονα οικονομικά αποδοτικά για την κοινωνία..Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το κόστος ρύθμισης αυτών των μέτρων πρέπει να είναι μικρότερο από το όφελος στην κοινωνία. Συνεπώς, η μεγαλύτερη πρόκληση είναι η επιτυχής κοστολόγηση των εκπομπών ρύπων, ώστε να μπει μια χρηματική αξία σε αυτές. Ήδη σε μερικές βιομηχανίες χρησιμοποιούνται τέτοιες πρακτικές, στα πλαίσια μιας διευρυμένης ανάλυσης κόστους- κέρδους, ώστε να εκτιμηθεί αν μία συγκεκριμένη πολιτική που εφαρμόζεται αναμένεται να συμβάλει ή όχι στην ευημερία της κοινωνίας. Η ανάλυση πρέπει να περιλαμβάνει όλα τα σχετικά κόστη και κέρδη, συμπεριλαμβανομένων των επιπτώσεων στην κλιματική αλλαγή από τις μειωμένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Ωστόσο, το περιβαλλοντικό κόστος των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα δεν μπορεί να καθοριστεί με ακρίβεια καθώς δεν είναι καθόλου εύκολη υπόθεση η κοστολόγησή του. Η μεγαλύτερη δυσκολία όσον αφορά την αξία του άνθρακα έγκειται στο γεγονός ότι τα περιβαλλοντικά οφέλη που προκύπτουν δεν έχουν τιμή καθώς δεν είναι εμπορεύσιμα. Ενας από τους πιθανούς τρόπους μείωσης των εκπομπών, είναι η χρήση Αγορακεντρικών Μέτρων (Market Based Measures),όπως για παράδειγμα η εφαργμογή του Συστήματος Εμπορίας Εκπομπών (Emission Trading Scheme). Το σύστημα αυτό, το οποίο εφαρμόζεται σε αρκετές βιομηχανίες στην Ευρωπαική Ένωση, στηρίζεται στην δημιουργία μιας αγοράς στην οποία αντικείμενο διαπραγμάτευσης είναι μονάδες που επιτρέπουν την εκπομπή αερίων, δημιουργώντας έτσι μια τιμή αγοράς που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αναλύσεις κόστους- αποδοτικότητας. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα κοστολόγησης του διοξειδίου του άνθρακα, ανάγεται σε μέθοδο προσδιορισμού της αποδοτικότητας των ενεργειών μείωσης των εκπομπών, αλλά και σε τρόπο μέτρησης των κερδών από τα μέτρα περιορισμού αντισταθμίζοντας τις οικονομικές απώλειες της κοινωνίας από τις εκπομπές.

Με βάση λοιπόν αυτό το σκεπτικό, εισάγεται η έννοια της τιμής άνθρακα, η οποία αναφέρεται στο κόστος ανά μονάδα μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Πρόκειται δηλαδή για μια μονάδα μέτρησης, βάσει της οποίας, μπορούν να εκτιμηθούν τα αποτελέσματα της έκλυσης ή της μη έκλυσης στο περιβάλλον διάφορων αερίων θερμοκηπίου. Πιο συγκεκριμένα, η τιμή άνθρακα αντιστοιχεί στο ποσό που πρέπει να πληρωθεί σε κάποια θεσμοθετημένη αρχή ως φόρος για εκπομπές ενός τόνου διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Σε ορισμένες μοντελοποιήσεις, η τιμή άνθρακα αντικατοπτρίζει το κοινωνικό κόστος που προκύπτει από την αποφυγή ενός τόνου εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, ή ακόμα μπορεί και να ισούται με τη σκιώδη τιμή ενός επιπλεόν τόνου εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που εκλύεται.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία οι κύριοι τρόποι αξιολόγησης των εκπομπών άνθρακα είναι οι εξής:

- Κοινωνικό Κόστος του Άνθρακα ή Κόστος Ζημιάς (Social Cost of Carbon-SCC or Damage Cost)
- Οριακό Κόστος Μείωσης του Άνθρακα ή Κόστος Αποφυγής (Marginal Abatement Cost of Carbon-MAC or Avoidance Cost)
- Τιμή Αγοράς (Market Prices)

Στην περίπτωση του περιβάλλοντος, προκειμένου να ποσοτικοποιηθούν οι περιβαλλοντικές απώλειες, οι οικονομολόγοι παραλληλίζουν τις περιβαλλοντικές πηγές με αγοραστικά αγαθά ή αναπτύσσουν μια υποθετική αγορά στην οποία ο κόσμος καλείται να πληρώσει τις πηγές αυτές.

2.3.2 Το κοινωνικό κόστος του άνθρακα

Το κοινωνικό κόστος του άνθρακα, ορίζεται ως το μέτρο του συνολικού αποτελέσματος της εκπομπής ενός επιπλέον τόνου αερίου του θερμοκηπίου, που πραγματοποιείται σήμερα και γίνεται αντιληπτό από σήμερα μέχρι και το αόριστο μέλλον. Σε άλλες αναφορές το κοινωνικό κόστος ορίζεται ως το μειωμένο νομισματοποιημένο ποσό των ετήσιων καθαρών απωλειών που προκαλούνται από την εκπομπή ενός τόνου άνθρακα που εκπέμπεται σήμερα. Σύμφωνα με την οικονομική θεωρία, το κοινωνικό κόστος του άνθρακα προσδιορίζει μια βέλτιστη τιμή άνθρακα στην οποία τα σχετιζόμενα με την μείωση οριακά κόστη θα είναι ίσα με τα οριακά κέρδη από αυτή τη μείωση.

Για τον υπολογισμό του κόστους ζημιών, πρέπει να εκτιμηθεί ο χρόνος παραμονής του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα καθώς και η επίδραση του στην κλιματολογική αλλαγή. Τα αποτέλεσματα των συνεπειών κάθε έξτρα τόνου πρέπει να μετατραπούν σε ισοδύναμα αποτελέσματα την χρονική περίοδο που πραγματοποιείται η εκπομπή του τόνου του διοξειδίου του άνθρακα, ενώ με την πάροδο του χρόνου θα πρέπει να έχουν τάση εξασθένησης.

Σύμφωνα με τις αναθεωρημένες εκτιμήσεις της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Αλλαγή του Κλίματος για το 2005, το κοινωνικό κόστος έχει μέση αξία *12$* ανά τόνο διοξειδίου του άνθρακα. Επίσης το 2009, η Κομισιόν θεώρησε την μέση τιμή άνθρακα στα *39€* ανά τόνο διοξειδίου του άνθρακα, ενώ τον ίδιο χρόνο ειδική ομάδα επιστημόνων για λογαριασμό της κυβέρνησης των Ηνωμένων Πολιτειών την εκτίμησε μεταξύ *5$* και *65$* ανά τόνο διοξειδίου του άνθρακα, με μέση αξία τα *21$*.

Το μεγάλο εύρος των εκτιμήσεων εξηγείται από την μεγάλη αβεβαιότητα που χαρακτηρίζει την επιστήμη της κλιματικής αλλαγής και ειδικότερα από τις ενδεχόμενες καταστροφικές συνέπειες που συνδέονται με αυτήν και τις εκάστοτε αποφάσεις αξιολόγησης του κοινωνικού κόστους. Δεδομένου ότι το κοινωνικό κόστος είναι η σημερινή μειωμένη τιμή του μελλοντικού κόστους που προκύπτει από την σημερινή εκπομπή ενός τόνου διοξειδίου του άνθρακα, τα μελλοντικά κόστη είναι μειωμένα, γι'αυτό υπάρχει μια τάση για χαμηλές τιμές. Ως αποτέλεσμα, δίνεται μικρή σημασία σε τέτοιες πολιτικές, που σημαίνει ότι δεν υπάρχει καμία αξιόλογη πρόταση.

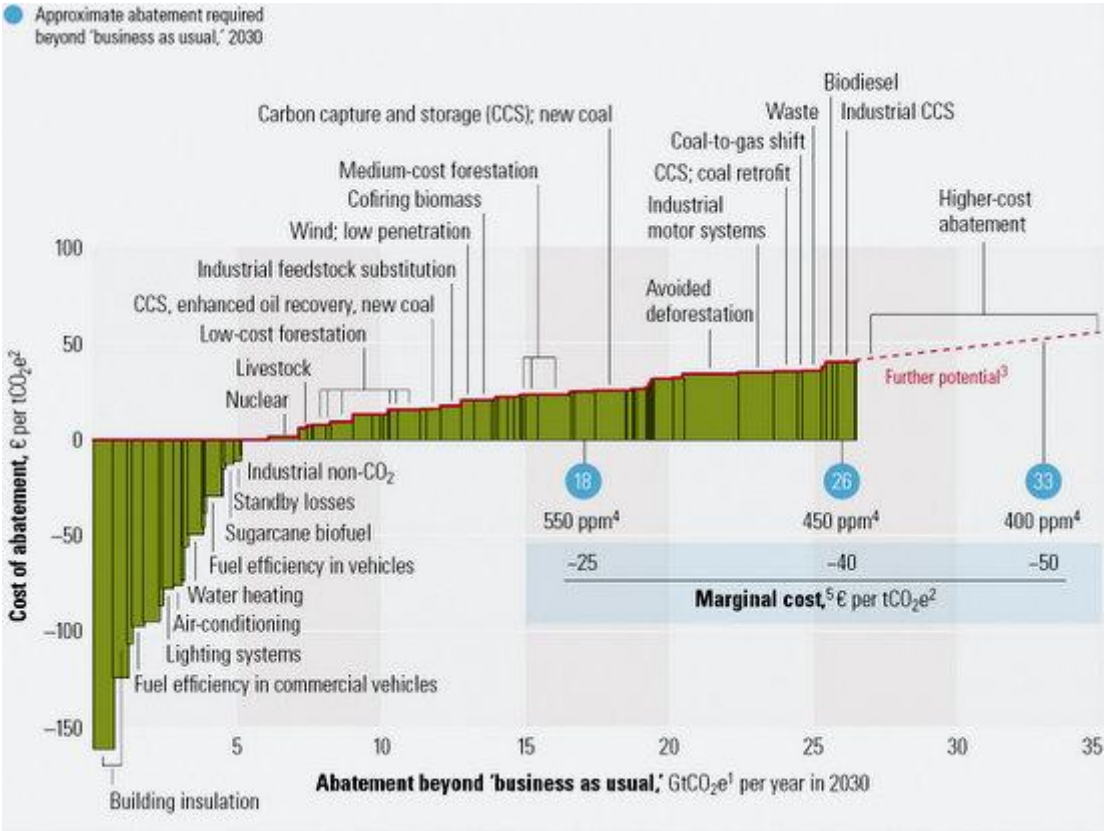
2.3.3 Οριακό Κόστος Άνθρακα

Μια διαφορετική προσέγγιση, η οποία δεν χαρακτηρίζεται από το μεγάλο εύρος του κοινωνικού κόστους, είναι ο υπολογιμός του κόστους μείωσης των εκπομπών. Το κόστος αυτό αναφέρεται ως κόστος αποφυγής εκπομπών ή ως οριακό κόστος και ο υπολογισμός βασίζεται στην ανάλυση αποτελεσματικότητας του κόστους η οποία

προσδιορίζει το ελάχιστο κόστος ώστε να επιτύχουμε συγκεκριμένη μείωση εκπομπής αερίων θερμοκηπίου.

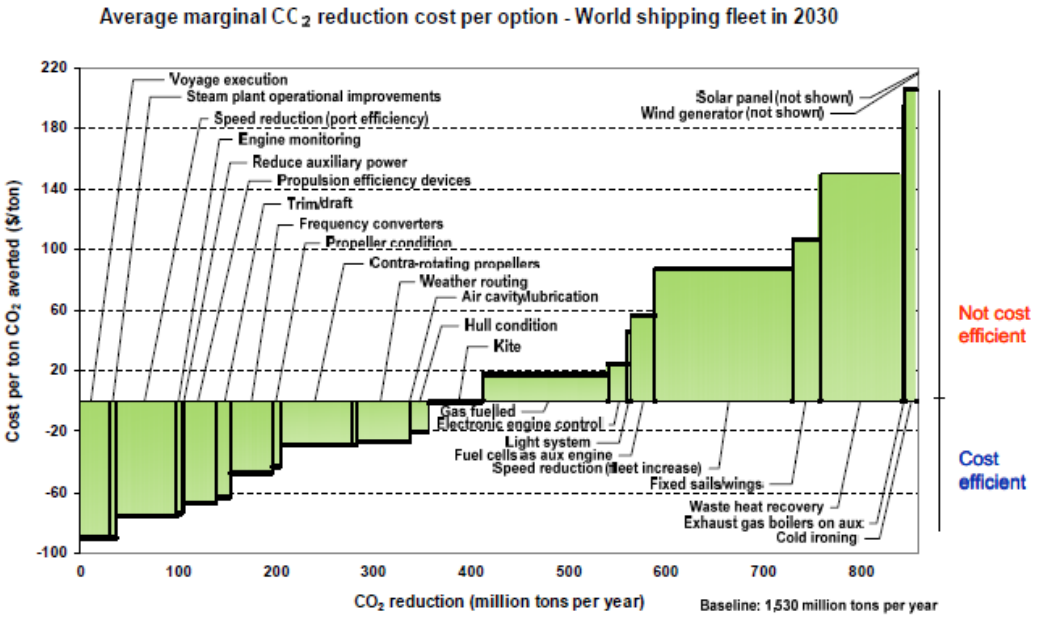
Στο ***Σχήμα 2.4***, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα καμπύλης οριακού κόστους μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου. Στο σχήμα, φαίνεται η αναγκαία ετήσια μείωση ώστε να επιτύχουμε μια σταθερή συγκέντρωση αερίων θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα γύρω στα 500 pm (ανά εκατομμύριο), 450 pm και 400 pm CO_2 (ισοδύναμα του CO_2). Για παράδειγμα, μια παγκόσμια ετήσια μείωση της τάξης των 26 Gtons CO_2e, θα σταθεροποιούσε την συγκέντρωση των CO_2e στα 450pm. Μια τέτοια μείωση έχει κόστος *40€* για κάθε τόνο CO_2e.

Μια πολύ ενδιαφέρουσα παρατήρηση που προκύπτει από το ***Σχήμα 2.4***, είναι ότι το ποιο αποτελεσματικό μέτρο είναι η επένδυση της κατασκευής με μόνωση. Βέβαια, υπάρχουν μέτρα που έχουν αρνητικό κόστος μείωσης, κάτι που σημαίνει ότι δεν απαιτούν κόστος για την χρησιμοποίησή τους. Παρ'όλα αυτά, τα φτηνά μέτρα είναι μεν αποδοτικά αλλά όχι αρκετά ώστε να μειώσουν ικανοποιητικά τις εκπομπές. Οι πολιτικές που υιοθετούνται, θα πρέπει να επιβάλλουν πιο προηγμένη, άρα και πιο ακριβή τεχνολογία, ώστε να επιτευχθεί η ζητούμενη σταθερή συγκέντρωση των αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα.



Σχήμα 2.4 *: Καμπύλη οριακού κόστους μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου (Source: Enkvist et al., 2007)*

Με ένα παρόμοιο τρόπο πραγματοποιείται και η εκτίμηση για το οριακό κόστος μείωσης για την ναυτιλία. Για παράδειγμα, στο ***Σχήμα 2.5***, παρουσιάζεται το κόστος αποφυγής εκπομπών ανά τόνο διοξειδίου του άνθρακα για τον παγκόσμιο στόλο, ανάλογα με τον τρόπο που επιτυγχάνεται αυτό μέχρι το 2030. Παρόμοιες καμπύλες μπορούν να αναπτυχθούν και για τα τμήματα του στόλου. Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε, πολλά μέτρα μείωσης παρουσιάζουν αρνητικό κόστος. Αυτά, όπως είναι φυσικό, προτιμούνται από τις εταιρείες και ίσως θα έπρεπε η εφαρμογή τους να γίνει υποχρεωτική.

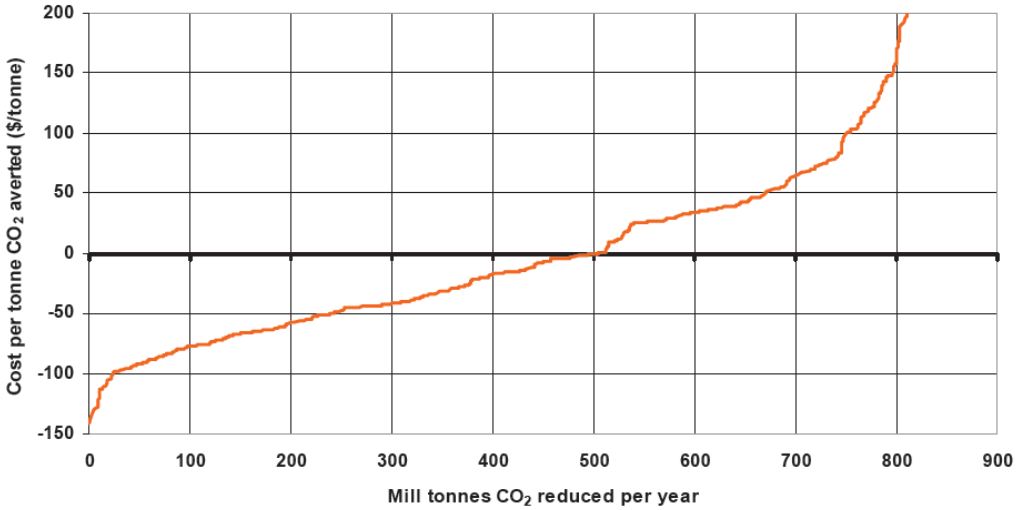


Σχήμα 2.5*: Κόστος αποφυγής εκπομπών ανά τόνο διοξειδίου του άνθρακα για τον παγκόσμιο στόλο (Source: DNV, 2009)*

Στο ***Σχήμα 2.5***, συνοψίζονται όλα τα τεχνικά και λειτουργικά μέτρα που αποσκοπούν στη μείωση των εκπομπών απο τα πλοία έως το 2030. Το υψηλότερο σημείο της κάθε μπάρας αποτελεί το μέσο όρο του οριακού κόστους για την αποφυγή ενός τόνου διοξειδίου του άνθρακα, δεδομένου ότι όλα τα μέτρα που βρίσκονται αριστερά έχουν εφαρμοσθεί. Το πλάτος αντιπροσωπεύει, τις δυνατότητες του κάθε μέτρου για να μειωθούν οι εκπομπές. Ακόμα μια φορά παρατηρούμε το αρνητικό κόστος μερικών μέτρων. Επιπλέον, η μείωση της ταχύτητας από την αύξηση της αποτελεσματικότητας των λιμένων, φαίνεται να είναι το πιο υποσχόμενο μέτρο ανάμεσα σε αυτά που έχουν αρνητικό κόστος.

Σε αντίθεση με το προηγούμενο σχήμα όπου παρουσιάζεται η δυνατότητα μείωσης εκπομπών των μεμονωμένων μέτρων, στο ***Διάγραμμα 2.7*** παρουσιάζονται οι συνολικές μειώσεις που μπορούν να επιτευχθούν με την πάροδο του χρόνου από το σύνολο των μέτρων.

Figure 2 – Detailed Abatement curves for world shipping fleet 2030



***Διάγραμμα 2.7**: Καμπύλη συνολική μείωσης εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα για τον παγκόσμιο στόλο*

Η καμπύλη οριακού κόστους μείωσης επιτρέπει τον υπολογισμό της τιμής κόστους του άνθρακα ,τον συνδιασμό του πρϋπολογισμού της εκάστοτε εταιρείας με τις απαιτήσεις των κυβερνήσεων, αλλά και τη δυνατότητα σύγκρισης των μέτρων μεταξύ τους. Άλλωστε, οι εταιρείες πρέπει να υιοθετούν μέτρα ανάλογα με τον πρϋπολογισμό τους, αναφορικά δηλαδή με το κόστος των μέτρων αυτών σε συνδυασμό με τους στόχους που έχουν για την μείωση των εκπομπών.

Παρ'όλα αυτά, οι εκτιμήσεις με βάση το οριακό κόστος μείωσης έχουν κάποια αδύναμα σημεία. Πρώτα απ'όλα, οι τιμές που προκύπτουν από τη μέθοδο αυτή εξαρτώνται άμεσα από τους στόχους που τίθενται ως προς την μείωση των εκπομπών και την σταθεροποίηση τους σε συγκεκριμένα επίπεδα, ενώ διαφέρουν από τομέα σε τομέα κι από χώρα σε χώρα. Επίσης αλλάζουν δραστικά μέσα στο χρόνο, καθώς δημιουργούνται συνεχώς νέα, πιο αποδοτικά μέτρα.

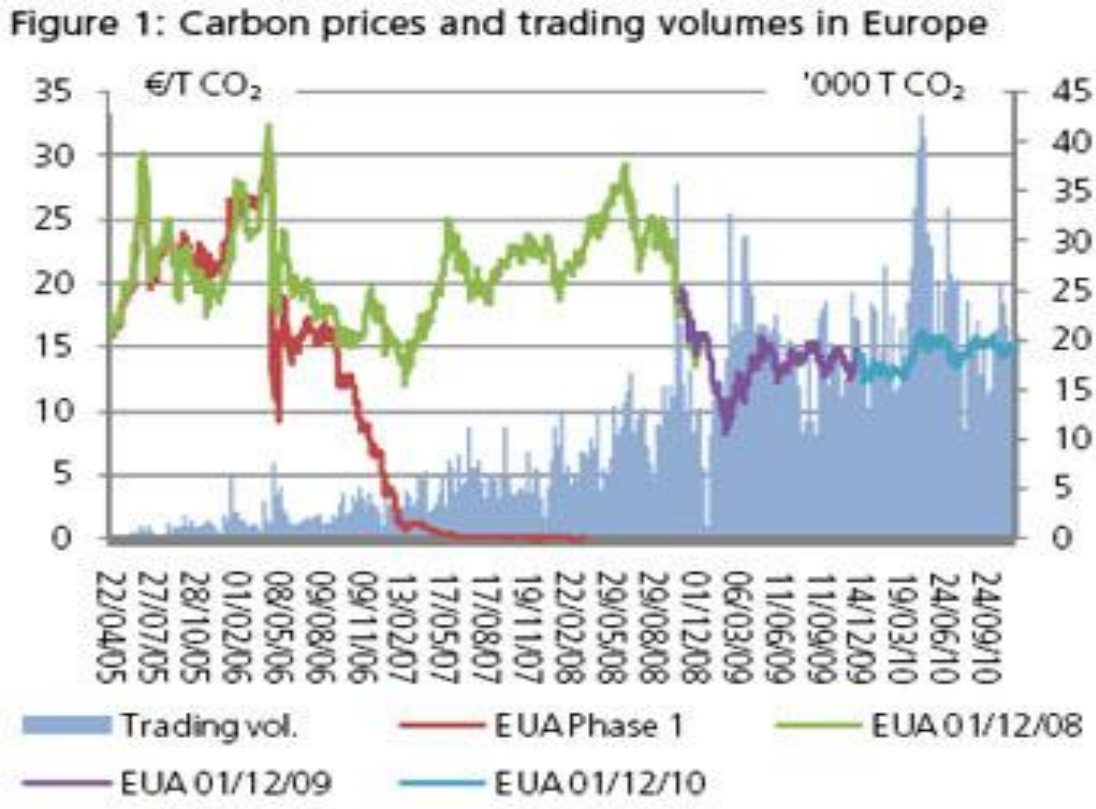
2.3.4 Τιμή αγοράς CO_2

Το πλεονέκτημα της χρήσης της τιμής αγοράς προκύπτει από το γεγονός ότι η συγκεκριμένη προσέγγιση είναι ιδιαίτερα ρεαλιστική, καθώς λαμβάνει υπόψιν τις υπάρχουσες τιμές αγοράς, όπως για παράδειγμα την τιμή του άνθρακα, όπως αυτή ορίζεται από το Σύστημα Εμπορίας Εκπομπών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, που αναφέραμε προηγουμένως. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου έγκειται στο γεγονός ότι η τιμή αγοράς στηρίζεται σε συγκεκριμένους τομείς και σε συγκεκριμένες χώρες και γι'αυτό δεν καλύπτει την παγκόσμια οικονομία.

Γενικότερα, ο τομέας της οικονομίας του άνθρακα και κυρίως το κομμάτι της ανταλλαγής του άνθρακα είναι αρκετά περίπλοκο. Σήμερα υπάρχουν περίπου 20

πρωτοβουλίες εκ των οποίων 11 είναι ήδη ενεργείς. Εντοπίζονται σε όλες τις γεωγραφικές περιοχές και ποικίλουν από την απλή αντιστοιχία αγοραστή και πωλητή (Αυστραλιανή Κλιματική Ανταλλαγη), μέχρι τις δημοπρασίες (Ανταλλαγή Άνθρακα Ασίας), αλλά και σε αυτές που οριοθετούνται από την Ευρωπαϊκή Ένωση και το Πρωτόκολλο του Κιότο, όπως η Ευρωπαϊκή Κλιματική Ανταλλαγή.

Οι Αποζημειώσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Α.Ε.Ε) (European Union Allowances -EUAs) είναι πιστώσεις άνθρακα που εκδίδονται από το Σύστημα Εμπορίας Εκπομπών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, για τις εγκαταστάσεις που εκπέμπουν διοξείδιο του άνθρακα και βρίσκονται στη φάση (2008-2012) (***Διάγραμμα 2.8***). Από την άλλη πλευρά, τα προϊόντα Πιστοποιημένης Μείωσης Εκπομπών (Kyoto Protocol Certified Emission Reductions - CERs), επιτυγχάνουν τη διανομή των μονάδων της, δηλαδή πιστώσεις που προέρχονται από τα προγράμματα εκπομπής αερίων θερμοκηπίου και εμπίπτουν στον Μηχανισμο Καθαρής Ανάπτυξης (Clean Development Mechanism-CDM) που καθορίστηκε στο άρθρο 12 από το Πρωτόκολλο του Κιότο.



Διάγραμμα 2.8*: Αποζημειώσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Α.Ε.Ε) (European Union Allowances -EUAs)*

Γενικά οι Α.Ε.Ε (EUAs) είναι πιο ακριβές από τις CERs μονάδες και οι μελλοντικές τιμές είναι πιο ακριβές από τις ημερήσιες (spot) τιμές. Η τιμή των EUAs ξεκίνησε να αυξάνεται ήδη από το 2005 κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και

έφτασε στη μέγιστη τιμή των *30€* ανά τόνο. Παρ'όλα αυτά, λίγο μετά την δημοσίευση των πραγματικών στοιχείων για πρώτη φορά τον Απρίλιο του 2006, η τιμή έπεσε σε δύο ημέρες από τα *30€* κάτω από τα *10€* ανά τόνο. Η άποψη που κυριαρχεί είναι ότι το ανώτερο όριο που ορίστηκε κατά την φάση 1, ήταν πιο αυστηρό από τις πραγματικές εκπομπές και για αυτό δεν χρειαζόταν περαιτέρω επιδότηση με αποτέλεσμα τελικά να φτάσει η τιμή κοντά στο 0. Γι'αυτό και η φάση 1 αποτέλεσε αποτυχία (***Διάγραμμα 2.8***).

Αν χρησιμοποιήσουμε Α.Ε.Ε τιμή σε μη Α.Ε.Ε τομείς, αυτό έχει ως αποτέλεσμα μικρότερη μείωση εκπομπών από την απαιτούμενη και από την άλλη μεριά οι εταιρείες θα έπρεπε να δεχτούν τη χρήση της ίδιας τιμής σε όλους τους τομείς της οικονομίας. Είναι φανερό ότι η τιμή του διοξειδίου του άνθρακα χαρακτηρίζεται από σημαντική αβεβαιότητα, ενώ και οι αγορές του άνθρακα είναι ιδιαίτερα ασταθείς.

2.4 ΜΕΤΡΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΙΩΣΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΝΑΥΤΙΛΙΑ

2.4.1 Περιγραφή του πλασίου συζήτησης

Όπως έχει ήδη σημειωθεί και προηγουμένως, παρά το γεγονός ότι η Ναυτιλία αποτελεί το πλέον αποδοτικό ενεργειακά μέσο μαζικής μεταφοράς με σχετικά χαμηλή συνεισφορά (2,7 % το 2009) στις συνολικές εκπομπές CO_2, η αύξηση της ναυτιλιακής δραστηριότητας λόγω της παγκοσμιοποίησης της οικονομίας οδηγεί σε σημαντική αύξηση των προερχόμενων από αυτή αερίων ρύπων. Όπως επισημάνθηκε και παραπάνω, μέχρι σήμερα δεν έχει συμφωνηθεί κανένα μέτρο για την μείωση του διοξειδίου του άνθρακα και των άλλων αερίων του θερμοκηπίου. Αν και έχουν συμφωνηθεί μέτρα για αέριους ρύπους (non GHGs) όπως SO_x και NO_x, ο τομέας της ναυτιλίας δεν έχει συμπεριληφθεί στους στόχους για την μείωση εκπομπών των GHGs που προβλέπει το Πρωτόκολλο του Κιότο και όπως γίνεται αντιληπτό υπάρχει πλεόν έντονη πίεση προς τον ΙΜΟ να υιοθετήσει μέτρα προς αυτήν τηυν κατεύθυνση.

Οι πολιτικές για το περιβάλλον που αναμένεται να εφαρμοστούν πρέπει να δίνουν οικονομικά κίνητρα στην ναυτιλία να επενδύσει στην κατασκευή και εφαρμογή αποδοτικότερων πλοίων και τεχνολογιών αντίστοιχα, καθώς και να την ωθήσουν προς ενεργειακά αποδοτικότερη λειτουργία των πλοίων. Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι τα Μέτρα/Εργαλεία Αγοράς (MBM/MBI), όπως για πράδειγμα χρεώσεις στις εκπομπές, εμπορία εκπομπών και προδιαγραφές εκπομπών αερίων, έχουν τις μεγαλύτερες δυνατότητες για την μείωση των εκπομπών ρύπων και αυτός είναι ο

λόγος που μονοπωλούν την συζήτηση στα πλαίσια του IMO. Οι οικονομολόγοι είναι συνήθως υπέρμαχοι των Μέτρων/Εργαλείων Αγοράς και κυρίως αυτού της φορολογίας στα καύσιμα (Carbon Tax) λόγω της απλότητας του σαν μέτρο. Ωστόσο ο χώρος της ναυτιλίας εμφανίζει αρκετές ιδιαιτερότητες. Επικαλούμενες την αρχή της ίσης αντιμετώπισης για όλα τα πλοία, οι ανεπτυγμένες χώρες προτείνουν όλα τα Κράτη-Μέλη του IMO να υιοθετήσουν τους κανονισμούς εκπομπών ρύπων που θα προκύψουν από την εφαρμογή Εργαλείων Αγοράς, υποστηρίζοντας ότι το μεγαλύτερο μέρος του παγκόσμιου τονάζ είναι δηλωμένο σε χώρες που δεν είναι μέλη του Παραρτήματος Ι των Ηνωμένων Εθνών. Από την άλλη πλευρά, αναπτυσσόμενες χώρες όπως η Κίνα, η Βραζιλία, η Ινδία και άλλες, έχουν ξεκάθαρα δηλώσει την αντίθεση τους ως προς τα MBIs. Υποστηρίζουν ότι ο IMO θα πρέπει να εφαρμόσει την ‘’Αρχή των Κοινών αλλά Διαφοροποιημένων Ευθυνών’’ (Common But Differentiated Responsibilities- CBDR), αρχή που εφαρμόζεται στο Πρωτόκολλο του Κιότο. Είναι ξεκάθαρο πως πρέπει να επιτευχθεί ισορροπία ανάμεσα σε αυτή την αρχή και στην αρχή της μη ευνοϊκής μεταχείρησης που υποστηρίζει ο IMO, αν αναλογιστεί κανείς ότι στην ναυτιλία, ένα πλοίο εύκολα μπορεί να αλλάξει την σημαία του με αυτήν μιας χώρας που δεν συμμετέχει στο Παράρτημα Ι με σκοπό να μην υπαχθεί σε σχετικούς κανονισμούς. Είναι όμως προφανές ότι οι δύο αυτές αρχές δεν είναι μεταξύ τους συμβατές.

2.4.2 Προτάσεις για τον έλεγχο των εκπομπών

Οι περιβαλλοντικές πολιτικές που βασίζονται στην παροχή κινήτρων προϋποθέτουν ότι οι δημόσιες αρχές θέτουν τους στόχους και τους κανόνες για τις μειώσεις των εκπομπών ρύπων και στη συνέχεια ως επακόλουθο οι εταιρείες καλούνται να υιοθετήσουν αποδοτικά μέτρα ελέγχου αυτών των εκπομπών. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες τέτοιων πολιτικών : (1) οι χρεώσεις στις εκπομπές και (2) οι εμπορεύσιμες άδειες εκπομπών, και όπως γίνεται κατανοητό αποτελούν κεντρικό θέμα στην αντζέντα του IMO.

Όσον αφορά τις χρεώσεις, αυτές εφαρμόζονται είτε μέσω φορολογίας στα καύσιμα είτε μέσω τελών που επιβάλλονται στις εκπομπές. Οι περισσότεροι οικονομικοί αναλυτές είναι υπέρ ενός συστήματος φορολογίας στα καύσιμα, υποστηρίζοντας ότι το να χρεώνεις κάθε μονάδα εκπομπών που εκλύεται, είναι ο πιο άμεσος τρόπος ώστε οι εταιρείες να μειώσουν τις εκπομπές τους. Βέβαια το να συγκεντρωθούν όλες οι απαραίτητες πληροφορίες με σκοπό να εφαρμοστεί ένα ιδανικό σύστημα φορολογίας είναι κάτι αρκετά δαπανηρό, αλλά και επί του πρακτέου αυτοί που καθορίζουν το ποσό της χρέωσης βασίζονται στην αξιολόγηση του αρχικού τρόπου λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος και εν συνεχεία κρίνοντας την επιτυχή ή μη λειτουργία του, προβαίνουν στις απαραίτητες αλλαγές (trial-and-error process).Το μεγαλύτερο πρόβλημα ενός τέτοιου συστήματος έγκειται στο κατά πόσο είναι δυνατή η αποτελεσματική παρακολούθηση και ο έλεγχός του. Από την άλλη πλευρά, οι εμπορεύσιμες άδειες εκπομπών επιτρέπουν την εθελούσια μεταβίβαση του

δικαιώματος των εκπομπών από μια εταιρεία σε μία άλλη, αναπτύσσοντας έτσι μια αγορά αδειών που επιτρέπει αγοροπωλησίες μεταξύ των εταιρειών.

Θα μπορούσαμε να πούμε ότι αυτά τα δύο συστήματα οδηγούν σε ισοδύναμα αποτελέσματα μακροπρόθεσμα, αλλά με διαφορετικο βαθμό αβεβαιότητας ως προς την έκβασή τους. Η φορολογία παρέχει βεβαιότητα απο πλευράς κόστους. Το κόστος είναι σταθερό λόγω του καθορισμένου φόρου. Οι εμπορεύσιμες άδειες από την άλλη, παρέχουν βεβαιότητα ως προς την εκπλήρωση των στόχων για το περιβάλλον.Με άλλα λόγια, αυτό που είναι σταθερό είναι το όριο που βασίζεται στην εκτίμηση των επιπέδων των εκπομπών που δικαιούται να έχει μια εταιρεία με σκοπό την προστασία του περιβάλλοντος. Υπό αυτήν την έννοια, αν αυτό το όριο είναι πολύ υψηλό, όπως συνέβη στα πρώτα στάδια εφαρμογής του Συστήματος της Εμπορίας Εκπομπών της Ευρωπαϊκής ‘Ενωσης (Emission Trading Scheme- ETS), τότε οι τιμές των αδειών θα είναι χαμηλές και τα κίνητρα για τις εταιρείες αδύναμα. Αν από την άλλη το όριο έχει τεθεί χαμηλά, αυτές οι τιμές θα είναι πολύ υψηλές και αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει το εμπόριο και την οικονομία σε αποδιοργάνωση.

Σχετικά με την εφαρμογή αυτών των Μέτρων Αγοράς (MBM) στην ναυτιλία, κατατέθηκε στον IMO μία πρόταση από την Δανία και υποστηριζόμενη από την Κύπρο, τα Νησιά Μάρσαλ και την Νιγηρία που περιγράφει ένα σύστημα φορολογίας για τα αέρια του θερμοκηπίου. Αν και η Δανία το αποκαλεί συμβολή, η καταθετημένη πρόταση της, *“International Fund for Greenhouse Gas emissions from ships (GHG Fund)’’* είναι ουσιαστικά η καθιέρωση φόρου στα καύσιμα, όπου υπέυθυνη για την πληρωμή του είναι η πλευρά (πλοϊοκτήτης ή ναυλωτής) που αγοράζει τα καύσιμα. Σύμφωνα με την πρόταση, όλα τα πλοία με χωρητικότητα μεγαλύτερη από 400 GT που συμμετέχουν στο διεθνές εμπόριο, θα υπόκεινται στο σύστημα εισφορών με ένα δεδομένο επίπεδο κόστους ανα τόνο καυσίμου. Οι προμηθευτές καυσίμων θα μεταφέρουν τις «συμβολές» στο ταμείο και από κει αυτές θα διατίθενται για σκοπούς σύμφωνους με τους στόχους του Πρωτοκόλλου του Κιότο.

Από την άλλη πλευρά, σχετικά με την εφαρμογή ενός συστήματος εμπορίας εκπομπών στην ναυτιλία, τα πράγματα είναι πιο περίπλοκα. Η πρόταση της Νορβηγίας, *‘’The Global Emission Trading System (ETS) for International Shipping’’* όπως και παρόμοιες προτάσεις από την Γερμανία και την Γαλλία ή η πρόταση του Ηνωμένου Βασίλειου υποστηρίζουν ένα τέτοιο σχέδιο. Οι μειώσεις εκπομπών ρύπων μπορούν να επιτευχθούν θέτοντας ένα όριο στις εκπομπές από την ποντοπόρο ναυτιλία και στη συνέχεια μέσω της εμπορίας των δικαιωμάτων εκπομπής, ο στόχος για μείωση μπορεί να επιτευχθεί ως εξής: οι εταιρείες που εμπλέκονται στον μηχανισμό, έχουν το διακίωμα να εκπέμπουν έναν ορισμένο αριθμό τόνων διοξειδίου του άνθρακα. Αν η εταιρεία εκπέμπει λιγότερους τόνους διοξειδίου του άνθρακα από αυτούς που έχει δικαίωμα, τότε μπορεί να πουλήσει το πλεόνασμά της σε εταιρεία εντός της ναυτιλίας ή άλλου τομέα. Δηλαδή,υπάρχει αγοραπωλησία αδειών για εκπομπές (εκτός ορίου ΔΕΝ υπάρχει αγοραπωλησία). Ο αυστηρός καθορισμός των ορίων και των στόχων μείωσης των εκπομπών είναι αναγκαίος σε ένα τέτοιο

σύστημα. Επίσης τα όρια των εκπομπών επηρεάζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό την μεταβλητότητα των τιμών αυτού του χρηματιστηρίου ρύπων που είναι άλλο ένα μειονέκτημα του συστήματος εμπορίας εκπομπών, αφού ενώ το σύστημα φορολογίας στα καύσιμα ελέγχει άμεσα την τιμή των εκπομπών, αυτό ελέγχει την ποσότητα των εκπομπών, αλλά με μεγαλύτερη αβεβαιότητα λόγω της διακύμανσης των άμεσα σχετιζόμενων με την ενέργεα τιμών.

2.4.3 Δείκτες αξιολόγησης ενεργειακής αποδοτικότητας πλοίων

Εκτός από τα παραπάνω μέτρα στον IMO, υπό συζήτηση βρίσκονται και δείκτες αξιολόγησης της περιβαλλοντικής αποδοτικότητας των πλοίων.

Σχεδιαστικός Δείκτης Ενεργειακής Αποδοτικότητας (Energy Efficiency Design Index) (EEDI) (gr CO_2/Ton mile)

Ο Σχεδιαστικός Δείκτης Ενεργειακής Αποδοτικότητας (Energy Efficiency Design Index-EEDI) είναι ένα μέτρο της αποδοτικότητας της σχεδίασης ενός νέου πλοίου σε σχέση με τις εκπομπές CO_2. Μετριέται σε ποσότητα (γραμμάρια) που εκπέμπεται στο περιβάλλον ανά μονάδα μεταφερόμενου φορτίου (tonne) και μονάδα απόστασης (nautical mile) που μεταφέρεται το φορτίο. Εκφράζει δηλαδή κατά κάποιο τρόπο το περιβαλλοντολογικό κόστος σε σχέση με το όφελος για την κοινωνία. Υιοθετίθηκε από την τελευταία διάσκεψη της Επιτροπής Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (IMO MEPC 62- July 2011) και τίθεται σε ισχύ από την 1η Ιανουαρίου του 2013. Αφορά τα πλοία που πρόκειται να κατασκευαστούν και έτσι οι δυνατότητές του για περιορισμό των βραχυπρόθεμων εκπομπών είνα περιορισμένες.

$$\frac{\left(\prod_{j=1}^{M} f_j\right)\left(\sum_{i=1}^{nME} C_{FMEi}\ SFC_{MEi}\ P_{MEi}\right) + P_{AE} C_{FAE} SFC^{*}_{AE} + \left(\sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTIi} - \sum_{i=1}^{nWHR} P_{WHRi}\right) C_{FAE} SFC_{AE} - \left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff} P_{eff} C_{FMEi} SFC_{MEi}\right)}{fi\ Capacity\ \ V_{ref}\ \ f_W}$$

Η τελική του μορφή όπως παρουσιάζεται παραπάνω, φαίνεται ιδιαίτερα σύνθετη, αλλά η βασική ίδεα είναι ότι ο αριθμητής αντιπροσωπεύει τις εκπομπές CO_2 από την κύρια και τις βοηθητικές μηχανές με μία μείωση από τα συστήματα εξοικονόμησης ενέργειας που βελτιώνουν την αποδοτικότητα του καυσίμου, ενώ ο παρονομαστής την χωρητικότητα (Capacity) και την ταχύτητα του πλοίου (V_{ref}). Στην περίπτωση που ο δείκτης καταστεί υποχρεωτικός ανά τύπο και μέγεθος πλοίου, μια αρχική τιμή (baseline) θα χρησιμοποιηθεί σαν όριο για τα νέα σχέδια και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των πλοίων. Με δεδομένο ότι ο πιο προφανής τρόπος να μεταβληθεί η τιμή του EEDI είναι να μειωθεί η εγκατεστημένη ισχύς της κύριας μηχανής και έτσι να μειωθεί η ταχύτητα σχεδίασης, ο EEDI πιθανόν να υποδηλώνει ένα όριο ισχύος για τα νεοσύστατα πλοία.

Λειτουργικος Δείκτης Ενεργειακής Αποδοτικότητας (Energy Efficiency Operational Indicator) (EEOI) (gr CO_2/cargo mile)

Ο Λειτουργικος Δείκτης Ενεργειακής Αποδοτικότητας (EEOI) υποδηλώνει την αποδοτικότητα των πλοίων σε σχέση με τις εκπομπές CO_2 ανά μονάδα μεταφορικού φορτίου και εκφράζεται ως:

$$EEOI = \frac{\sum_i FC_i \times C_{Fi}}{m_{cargo} \times D}$$

όπου *FC* είναι η κατανάλωση καυσίμου, *C* ο συντελεστής εκπομπών που μετατρέπει την κατανάλωση καυσίμου σε ποσότητα εκπομπών CO_2, *m* το μεταφερόμενο φορτίο και *D* η απόσταση.Ο EEOI ορίζεται ως ο λόγος της εκλυόμενης ποσότητας CO_2 ανά μονάδα μεταφορικού φορτίου και μετράει την ενεργειακή αποδοτικόητα του πλοίου σύμφωνα με το λειτουργικό του προφίλ. Ο EEOI μέχρι τώρα είναι προαιρετικός. Χρησιμοποιείται σαν εργαλείο για τον καθορισμό της κατανάλωσης καυσίμου και καθιστά δυνατή την σύγκριση των τιμών κατανάλωσης μεταξύ των πλοίων ενός στόλου. Βοηθάει τις εταιρείες να σχηματίσουν καλύτερη εικόνα σχετικά με τις τάσεις της απόδοσης του στόλου τους, κατανοώντας τις μορφές κατανάλωσης καυσίμου και διακρίνοντας τα τεχνικά και λειτουργικά μέτρα που θα οδηγήσουν όχι μόνο σε περιορισμό των εκπομπών αλλά και σε μείωση του κόστους των καυσίμων.

Σχέδιο Διαχείρησης Ενεργειακής Αποδοτικότητας Πλοίου (Ship Energy Efficieny Management Plan)(SEEMP)

Αποτελεί ένα επιχειρησικό μέτρο που έγινε υποχρεωτικό μετά την 62η διάσκεψη της Επιτροπής Προστασίας Θαλάσσιου Περιβάλλοντος (IMO MEPC 62- July 2011), το περιεχόμενο του παραμένει όμως προαιρετικό. Σχετίζεται με τις βέλτιστες πρακτικές στο θέμα απόδοσης των καυσίμων και τη λειτουργία του πλοίου, τον βέλτιστο τρόπο χειρισμού του πλοίου και την καλύτερη διανομή του στόλου. Μέρος του αποτελεί και ο EEOI.

2.4.4 Λειτουργικά και τεχνικά μέτρα μείωσης των εκπομπών CO_2

Όπως επισημάνθηκε στην Δεύτερη Μελέτη του IMO για τα αέρια του θερμοκηπίου (Second IMO GHG study- Buhaug 2009), υπάρχουν αρκετά τεχνολογικά μέτρα και πρακτικές που έχουν μεγάλη δυναμική να μειώσουν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, όπως φαίνεται και στον ***Πίνακα 2.3***. Για παράδειγμα, η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως αιολική ή ηλιακή ενέργεια, ή εναλλακτικά καύσιμα όπως τα βιοκαύσιμα και το φυσικό αέριο θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψιν σε προγράμματα Έρευνας και Ανάπτυξης (R&D projects) και να αντιμετωπίζονται ως πιθανές μελλοντικές λύσεις.

DESIGN (New Ships)	***Saving (%) of CO2/(Tonne*Mile)***	***Combined***	***Combined***
Concept, speed & capability	2-50	10-50%+	25-75%+
Hull and superstructure	2-20		
Power and propulsion Systems	5-15		
Low-carbon fuels	5-15		
Renewable energy	1-10		
Exhaust gas CO2 reduction	0		
OPERATION (All ships)			
Fleet management, logistics & incentives	5-50+	10-50%+	
Voyage Optimization	1-10		
Energy Managament	1-10		

+ Reductions at this level would require reductions of speed

Πίνακας 2.3 *: Λειτουργικά και τεχνολογικά μέτρα μείωσης των εκπομπών CO_2 (Buhaug et al., 2009)*

Όπως δείχνει ο παραπάνω πίνακας, λειτουργικά μέτρα όπως η μείωση της ταχύτητας μπορούν να επιφέρουν σημαντική μείωση στις εκπομπές. Ωστόσο όπως θα δούμε και στο ***Κεφάλαιο 3***, η μείωση της ταχύτητας είναι σύνθετο θέμα: μειώνοντας την ταχύτητα, μειώνεται η κατανάλωση καυσίμου, το οποίο σημαίνει λιγότερα έξοδα για τον διαχειριστή του πλοίου και λιγότερες, επίσης, εκπομπές προς το περιβάλλον. Με μία πρώτη ματιά, η μείωση της ταχύτητας φαίνεται αρκετά αποδοτική λύση. Βέβαια μειωμένη ταχύτητα συνεπάγεται και ένα κόστος από την αύξηση του χρόνου παραμονής ενός πλοίου εν πλω, πράγμα που είναι πιθανό να προκαλέσει στρεβλώσεις στην αγορά αφού περισσότερα πλοία θα χρειαστεί να χρησιμοποιηθούν για να μεταφέρουν το ίδιο φορτίο ανά έτος. Από την άλλη περισσότερα πλοία δεν σημαίνει κατ' ανάγκη περισσότερες συνολικές εκπομπές. Περισσότερα πάνω σε αυτό το ερώτημα αναφέρονται στο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής.

Θέμα ιδιαίτερης σημασίας είναι και το εξής: οι άμεσα ενδιαφερόμενοι, πλοιοκτήτες και ρυθμιστές διατάξεων και προδιαγραφών, να συνεργαστούν στενά με τους κατασκευαστές, με σκοπό την βελτίωση την ενεργειακής αποδοτικότητας των μηχανών των πλοίων, αφού όπως έχει αποδειχτεί από την εξέλιξη στον τομέα οι νέες μηχανές με την εφαρμογή ολοένα και πιο προηγμένων τεχνολογιών μπορούν να γίνουν ενεργειακά αποδοτικότερες.

Παρακάτω παρατίθενται ενδεικτικά μέτρα.

Λειτουργικά μέτρα (μέτρα που δεν απαιτούν τεχνικές μεταροπές πάνω στο πλοίο)

- Μείωση ταχύτητας
- Βελτιστοποίηση ποσότητας θαλασσίου έρματος και διαγωγής
- Οικονομία μεγέθους
- Προσαρμογή ταχύτητας / πορείας ανάλογα με καιρικές συνθήκες
- Βελτιστοποίηση χρήσης αυτόματου πιλότου
- Αυξηση ευαισθητοποίησης στο θέμα της κατανάλωσης ενέργειας
- Συντήρηση / καθαρισμός προπέλας
- Συντήρηση / καθαρισμός επιφάνειας γάστρας

Τεχνικά μέτρα

- Χρήση ελαφρών συνθετικών η μεταλλικών υλικών
- Βελτιστοποίηση κυρίων διαστάσεων
- Οικονομία μεγέθους
- Χρήση βελτιωμένων / ειδικών χρωμάτων για την βρεχόμενη επιφάνεια της γάστρας
- Βελτιστοποίηση ανοιγμάτων γάστρας
- Μείωση προβλεπόμενης υπηρεσιακής ταχύτητας
- Βελτιστοποίηση συνεργασίας σκάφους – προπέλας
- Χρησιμοποίηση συστήματος air lublication σε βρεχόμενη επιφάνεια γάστρας
- Βελτιστοποίηση συστήματος πρόωσης
- Βελτιστοποίηση επί μέρους συστημάτων κύριας μηχανής
- Εγκατάσταση συστημάτων ανάκτησης θερμικής ενέργειας απο τα καυσαέρια
- Χρησιμοποίηση αιολικής ενέργειας
- Υβριδική παραγωγή ενέργειας
- Χρησιμοποίηση ηλιακής ενέργειας
- Βελτιστοποίηση χρήσης ενεργειακών καταναλωτών πάνω στο πλοίο
- Έλεγχος ταχύτητας αντλιών και ανεμιστήρων
- Χρησιμοποίηση συστήματος καθαρισμού καυσαερίων (scrubber)
- Χρήση λεβήτων παραγωγής ατμού βελτιωμένης απόδοσης
- Χρήση εναλλακτικών καυσίμων

Βέβαια γίνεται κατανοητό, πως τα περισσότερα από τα παραπάνω μέτρα μπορούν να εφαρμοστούν μόνο σε καινούργια πλοία και έτσι κάθε μείωση εκπομπών που μπορεί να

προέλθει από αυτά είναι δυνατή μετά από ένα εύλογο χρονικό διάστημα. Από την άλλη , λειτουργικά μέτρα που αναφέρονται παραπάνω είναι ικανά να μειώσουν τις εκπομπές βραχυπρόθεσμα. Έτσι λοιπον, αφού τα λειτουρικά μέτρα μπορούν να αποφέρουν αποτελέσματα άμεσα θα πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψιν η εφαρμογή τους, ενώ παράλληλα ερευνητικά-αναπτυξιακά προγράμματα θα πρέπει να στοχεύουν στην κατασκευή αποδοτικότερων μηχανών και στην προώθηση καινοτόμων τεχνολογιών.

Συνοψίζοντας, γίνεται κατανοητό πως τεχνολογικά και λειτουργικά μέτρα είναι δυνατόν μακροπρόθεσμα να μπορούν να πετύχουν μεγαλύτερες μειώσεις εκπομπών απ'ότι τα Εργαλεία Αγοράς.

2.4.5 Η Ελληνική θέση

Η Ελλάδα σταθερά υποστηρίζει πως κάθε προσέγγιση επίλυσης του προβλήματος της μείωσης των εκπομπών ρύπων από την ναυτιλία θα πρέπει να είναι πολυδιάστατη. Για να είναι επιτυχής μια τέτοια προσπάθεια, θα πρέπει να λαμβάνει υπόψιν της τη διαθέσιμη τεχνολογία, τις οικονομικές συνθήκες κάτω από τις οποίες διεξάγεται το διεθνές εμπόριο και φυσικά να ενθαρρύνει την καινοτομία. Θα πρέπει επίσης να αποφευχθούν φαινόμενα αύξησης τον εκπομπων του διοξειδίου του άνθρακα από την προσπάθεια μείωσης άλλων ρύπων (NO_x,SO_x).

Η χώρα μας αν και δεν έχει καταθέσει δική της πρόταση, έχει μελετήσει όλες τις προτάσεις που βρίσκονται στο τραπέζι των διαπραγματεύσεων του IMO, κάνοντας χρήσιμα σχόλια, παρεμβαίνοντας σε τυχόν ασάφειες και συγκρίνοντας τις προοπτικές της κάθε πρότασης. Θεωρεί πως όλες πρέπει να διατηρηθούν στο τραπέζι των διαπραγματεύσεων έως ότου αποσαφηνιστούν και οριστικοποιηθούν οι παράμετροι τους, όπως στην περίπτωση των υβριδικών προτάσεων της Ιαπωνίας,Leverage Incentive Scheme (LIS), των Ηνωμένων Πολιτειών, Ship Efficiency and Credit Trading (SECT) και του Παγκόσμιου Συμβουλίου Ναυτιλίας (World Shipping Council- WSC),Vessel Efficiency System (VES) στις οποίες περιλαμβάνεται ο EEDI.

Σε περίπτωση που ο IMO αποφασίσει να ακολουθήσει λύσεις που σχετίζονται με Εργαλεία Αγοράς (Market Based Measures) για να μειώσει τις εκπομπές ρύπων από την ναυτιλία, η Ελλάδα τίθεται υπέρ ενός Συστήματος Φορολογίας (Levy Scheme) αντί ενός Συστήματος Εμπορίας Εκπομπών (Emission Trading Scheme-ETS). Συνοπτικά, η χώρα μας υποστηρίζει ότι ένα Σύστημα Φορολογίας καταφέρνει να ενσωματώσει το κοινωνικό κόστος των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα. Οικονομικοί αναλυτές, υποστηρίζουν εδώ και καιρό σχετικά με το πρόβλημα της μόλυνσης του περιβάλλοντος, πως ο πιο αποδοτικός τρόπος για να ελέγξεις αυτό το πρόβλημα είναι να το κοστολογήσεις. Μέσω λοιπόν της εφαρμογής ενός τέτοιου συστήματος και ανεξάρτητα από τα επίπεδα μείωσης των εκπομπών που μπορεί να επιτευχθούν, αυτά θα επιτευχθούν με ελάχιστο κόστος για την κοινωνία και με την ελάχιστη απώλεια πόρων. Ένα Συστημα Φορολογίας είναι ο απλούστερος και πιο

αποδοτικός τρόπος να μειωθούν οι εκπομπές CO_2, αφού αποφεύγει πληθώρα προβλήμάτων που σχετίζονται με άλλες προστάσεις και συγκεκριμένα με συστήματα εμπορίας εκπομπών, ενώ είναι και εναρμονισμένο με την αρχή ‘’ο ρυπαίνων πληρώνει’’. Την θέση της Ελλάδας ενισχύουν και αρκετές έρευνες που έχουν διεξαχθεί πάνω στο συγκεκριμένο ζήτημα από εγκεκριμένους οργανισμούς, όπου συγκλίνουν υπέρ των χρεώσεων αντί της εμπορίας εκπομπών. Επιπλέον όπως ήδη αναφέραμε, ένα σύστημα φοροσειφορών προσδίδει σταθερότητα στις σχετικές τιμές αφού το ύψος του φόρου στα καύσιμα διατηρείται σταθερό για μεγάλη χρονική περίοδο σε σχέση με ένα συστημα εμπορίας στο οποίο έχει περισσότερη σημασία η ποσότητα και τα όρια (cap) εκπομπών με αποτέλεσμα οι τιμές στις δημοπρασίες να είναι πιο ρευστές, ενώ είναι και το μόνο Μέτρο Αγοράς που μπορεί να δώσει κίνητρα για την μείωση των ταχυτήτων στα πλοία, το λεγόμενο slow steaming, στο οποίο θα αναφερθούμε αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο. Τέλος ένα Σύστημα Φορολογίας εγγυάται λόγω, κυρίως, της διαχειριστικής του απλότητας σε σχέση με ένα Συστήματος Εμπορίας Εκπομπών λιγότερες παρατυπίες και απάτες.

3

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ (SLOW STEAMING)

.....

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει το φαινόμενο της μείωσης της ταχύτητας στα πλοία, γνωστό με τον ναυτιλιακό όρο ‘’slow steaming’’, που αποτέλεσε και συνεχίζει να αποτελεί κύρια πρακτική των εταιρειών σε εποχές οικονομικής κρίσης, όπου η ζήτηση πέφτει και η τιμή των καυσίμων ανεβαίνει. Ξεκινώντας με μία εισαγωγή με σκοπό την παρουσίαση του οικονομικού περιβάλλοντος όπου παρατηρείται το συγκεκριμένο φαινόμενο, παρουσιάζονται στην συνέχεια τα κίνητρα που οδηγούν εταιρείες και πλοιοκτήτες προς την υιοθέτηση αυτής της, λειτουργικού χαρακτήρα, απόφασης. Έπειτα παρουσιάζονται αναλυτικά στοιχεία που αποκαλύπτουν τον ρόλο του στην μείωση των εκπομπών στην ναυτιλία, τεχνικής φύσεως προβλήματα που μπορεί να προκύψουν από αυτό, ενώ τέλος, γίνεται αναφορά στην εφαρμογή και την σημασία που μπορεί να έχει το λειτουργικό μέτρο της μείωσης της ταχύτητας πλεύσης στο μέλλον.

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ναυτιλία έχει μακρά ιστορία, που χαρακτηρίζεται από κυκλικές συμπεριφορές όπως άλλωστε και οι περισσότεροι τομείς του εμπορίου και της οικονομίας. Οι ναυτιλιακές εταιρείες είναι συνηθισμένες σε οικονομικά φαινόμενα μεταβολής των σχετιζόμενων με την ναυτιλία μεγεθών.Αν και πολλοί ήταν αυτοί που περίμεναν κάποιου είδους ύφεση ως επακόλουθο της έξαρσης που χαρακτηρίστηκε από αυξημένη ζήτηση και ανέργεση νέων πλοίων και διήρκησε έως το τέλος του 2008, η κρίση που ακολούθησε ήταν ένα πραγματικό σοκ για την ναυτιλία.

Στα τέλη του 2008, ο πλανήτης ήρθε αντιμέτωπος με μία ανεξέλεκτη οικονομική κρίση η οποία είχε ως αποτέλεσμα η παγκόσμια παραγωγή να φτάσει σε ιστορικό χαμηλό από την δεκαετία του 30. Το ακαθάριστο εγχώριο προϊόν (GDP) κατά μέσο όρο ανά χώρα έπεσε κατά 1.9%. Συν τοις άλλοις, η Διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών για το Εμπόριο και την Ανάπτυξη (*UNCTAD-2011*) υπολόγισε πως ο συνολικός *όγκος εξαγωγών παγκοσμίως* μειώθηκε κατακόρυφα κατά 13,7%. Αναπόφευκτα, ο συνολικός όγκος των συναλλαγών στο εμπόριο θαλάσσης έπεσε κατά 4,5%. Ωστόσο, η κρίση στην ναυτιλία δεν προήλθε μόνο εξαιτίας χαμηλής ζήτησης. Το 2007 και 2008 παρατηρήθηκε τεράστια αύξηση στις παραγγελίες πλοίων κατά την διάρκεια της έξαρσης της ζήτησης, λίγο πριν ξεσπάσει η κρίση. Στην αρχή, δεν ένοιωσαν όλοι οι τύποι πλοίων στον ίδιο βαθμό την ύφεση που είχε αρχίσει να εμφανίζεται στην ναυτιλία. Από αυτήν κυρίως επηρεάστηκαν τα bulk carriers και τα containerships, ενώ τα tankers σε μικρότερο βαθμό. Από την αρχή του 2011, φαίνεται ότι η κατάσταση ομαλοποιείται. Στις μεταφορές εμπορευματοκιβωτίων ειδικότερα, η κατάσταση έχει αντιστραφεί χάρη στις εμπορικές συναλλαγές με την ζώνη της *Ασίας και την πλεύση σε μικρότερες ταχύτητες, το λεγόμενο "slow steaming"*. Ωστόσο οι τιμές στα καύσιμα ανεβαίνουν ξανά τους τελευταίους μήνες και η πρακτική του ''*slow steaming*'' που δοκιμάστηκε κατά την κρίση, φαίνεται ότι είναι εδώ για να μείνει.

Η λέξη ''*steaming*'' στην αγγλική γλώσσα αναφέρεται στον τρόπο που λειτουργεί ένα ατμόπλοιο. Ο όρος συνηθίζεται πλέον να χρησιμοποιείται γενικότερα, ακόμα και για μηχανές ντίζελ και για άλλα μηχανικά μέσα πρόωσης. Ουσιαστικά η χρήση της λέξης "*steaming"* έχει ευρέως αντικαταστήσει το συνώνυμο της ''*sailing*''.

Το "*slow steaming*" σε καμία περίπτωση δεν επινοήθηκε ή χρησιμοποιήθηκε πρόσφατα. Εφαρμοζόταν στα πλαίσια του Συμφώνου Ναύλων (Charter Party) και σε ειδικές περιπτώσεις για την υπηρεσιακή ταχύτητα των πλόιων, συμπεριλαμβανομένων:

- χωρικών υδάτων και εκβολών ποταμών
- σε δρομολόγια επιστροφής (ballast leg)
- και γενικότερα σε περιόδους χαμηλών ναύλων

Δεν είναι όμως ούτε η πρώτη φορά που το "*slow steaming*" εμφανίζεται στο πλαίσιο που το μελετάμε τώρα. Πλοία ταξίδευαν σε χαμηλότερες ταχύτητες και κατα την διάρκεια των πετρελαϊκών κρίσεων του 1973 και 1979. Σύμφωνα με την σημερινή χρήση του, ο όρος ''*slow steaming*'' περιλαμβάνει περισσότερα από την κυριολεκτική σημασία του. Η ταχύτητα των πλοίων ναι μεν επιβραδύνεται και τα πλοία πραμένουν εν πλω περισσότερο χρόνο, αλλά οι υπηρεσίες που παρέχουν γίνεται προσπάθεια να μην αποκλίνουν από την αρχική τους συχνότητα. Αυτό συνήθως επιτυγχάνεται με την προσθήκη ενός ή περισσοτέρων επιπλέον πλοίων(πανομοιότυπων κατα προτίμηση για μεγαλύτερη αποδοτικότητα), ανάλογα με το ποσοστό μείωσης της ταχύτητας που αποφασίζεται ή με μειώσεις του χρόνου παραμονής στα λιμάνια. Αυτό λοιπόν είναι το γενικότερο πλαίσιο στο οποίο

αναφέρεται ο συγκεκριμένος όρος. (Λέγοντας λοιπόν λειτουργικό μέτρο μείωσης ταχύτητας πλεύσης, όρος που χρησιμοποιείται συχνά από εδώ και στο εξής, εννοούμε την σκοπιμη μείωση ταχύτητας με σκοπό την μείωση του κόστους καυσίμου, και όχι κάποιο μέτρο που επιβολής.)

3.2 ΚΙΝΗΤΡΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ

Ο κύριοι λόγοι που οι εταιρείες επιλέγουν για τα πλοία τους να πλέουν σε χαμηλότερες ταχύτητες είναι δύο: το κόστος των καυσίμων και οι εκπομπές ρύπων. Με δεδομένο ότι αυτά μεταξύ τους είναι ανάλογα (και τα δύο είναι ευθέως ανάλογα με την ποσότητα του καυσίμου που χρησιμοπιείται), είναι προφανές ότι η μείωση των εκπομπων και του κόστους ταυτόχρονα καθιστά την μείωση της ταχύτητας πλεύσης λύση πολύ αποδοτική, όπως θα δούμε και παρακάτω, για τις εταιρείες.

Στην θεωρία, η επιλογή αυτή οφείλεται και σε άλλους λόγους.Τα βασικά κίνητρα λοιπόν για την μείωση της ταχύτητας πλεύσης είνα τα εξής:

1. Οι υψηλές ή ευμετάβλητες τιμές καυσίμων που οδηγούν σε αύξηση του κόστους καυσίμων.
2. Το υψηλό κόστος καυσίμων που προκύπτει από την υποχρέωση χρήσης του πιο ακριβού LSFO (low sulfur fuel oil), σε περιπτώσεις πλεύσης σε Περιοχές Ελέγχου εκπομπών SO_x (SO_x Emission Control Areas-SECAs).
3. Η εξοικονόμηση από άλλα τρέχοντα κόστη όπως λιμενικά τέλη και τοπικοί φόροι.
4. Η πλεονάζουσα προσφορά πλοίων(overcapacity) με αποτέλεσμα την μείωση των ναύλων.
5. Οι υποχρεωτικοί κανονισμοί που σχετίζονται με τις εκπομπές ρύπων από τα πλοία.
6. Εθελούσια μέτρα μείωσης εκπομπών ρύπων που υιοθετούνται συνήθως από εταιρείες με στόχο την ενίσχυση του περιβαλλοντικού-κοινωνικού τους προφίλ.

Στα επόμενα, τα παραπάνω παρουσιάζονται αναλυτικά.

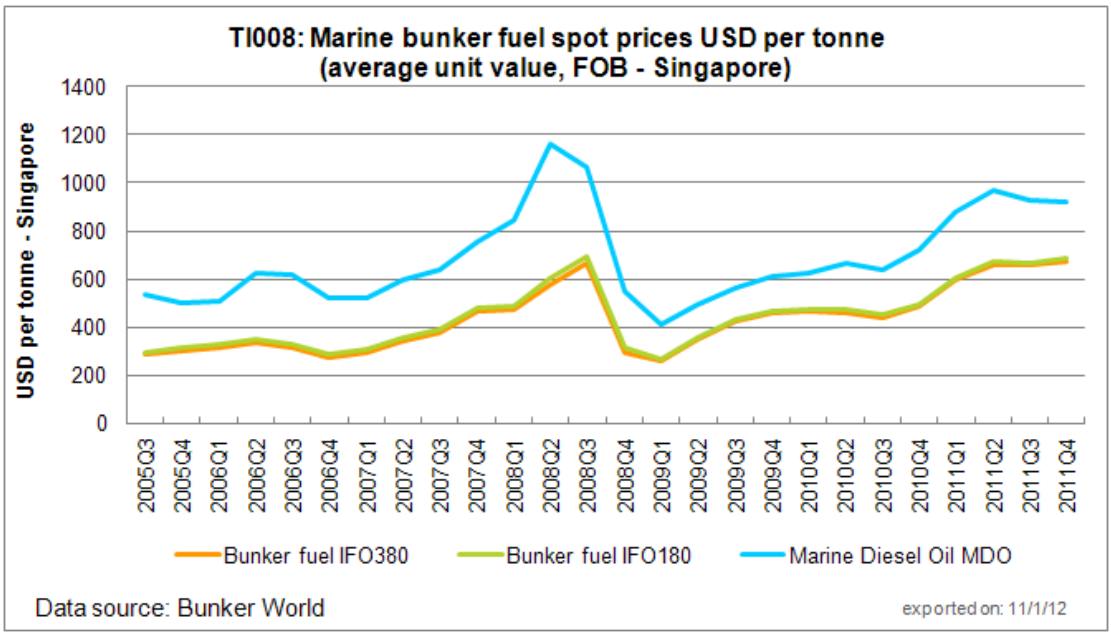
3.2.1 Οι τιμές των καυσίμων

Η ώθηση στην εφαρμογή του "*slow steaming"* από τις αυξήσεις στις τιμές των καυσίμων δεν είναι όπως ήδη αναφέραμε κάτι καινούργιο. Παραδείγματα αύξησης στις τιμές των καυσίμων όπως προείπαμε είναι οι πετρελαϊκές κρίσεις που συνέβησαν

στο παρελθόν. Το 1972, λίγο πριν ξεσπάσει η πετρελαϊκή κρίση του 1973, η τιμή του αργού πετρελαίου ήταν *3$* το βαρέλι. Όταν άρχισε ο αραβοϊσραηλινός πόλεμος του Γιομ Κιπούρ στις 5 Οκτοβρίου του 1973, αρκετά αραβικά κράτη επέβαλαν εμπάργκο στις εξαγωγές πετρελαίου προς χώρες που υποστήριξαν το Ισραήλ. Σαν αποτέλεσμα, η τιμή του αργού πετρελαίου είχε τετραπλασιαστεί σε *12$* μέχρι το τέλος του 1974. Παρομοίως, η δεύτερη πετρελαϊκή κρίση του 1979 σε συνδυασμό με την Ιρανική επανάσταση(1978) και τον Πόλεμο μεταξύ Ιράν-Ιράκ που άρχισε το 1980 είχε σαν αποτέλεσμα η τιμή του πετρελαίου να αυξηιεί από *14$* το 1978 σε *34$* το βαρέλι το 1981. Πιθανές μελλοντικές εντάσεις στην ευρύτερη περιοχή της Μέσης Ανατολής θα έχουν παρόμοιες συνέπειες στις τιμές των καυσίμων.

Ακόμα και σε μη ευμετάβλητες αγορές, το κόστος καυσίμων αυξάνεται από την υποχρέωση προς τα πλοία να χρησιμοποιούν πιο ακριβά καύσιμα, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση του LSFO, σε περιπτώσεις πλεύσης σε Περιοχές Ελέγχου εκπομπών SO_x(SECAs).Όπως είδαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο IMO (58th session) ομόφωνα υιοθέτησε τροποποιήσεις στους κανονισμούς του Παραρτήματος VI της MARPOL, σύμφωνα με του οποίους σταδιακές μειώσεις στις εκπομπές SO_x προβλέπονται μέχρι το 2020. Παρόμοιες περιπτώσεις αποτελούν το Συμβούλιο Ατμοσφαιρικών Πόρων της Καλιφόρνιας (Californian Air Resource Board-CARB) που από την $1^{η}$ Ιουλίου του 2009 έχει επιβάλλει την χρήση MDO(marine diesel oil) ή MGO(marine gas oil) και οι οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, που από το 2010 για την αγκυροβόληση πλοίων σε λιμάνια της, προυποθέτει την χρήση καυσίμων με ποσοστό σε θείο που να μην ξεπερνά το 0.1%..Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις καθαρότερα καύσιμα με μικρότερη περιεκτικότητα σε θείο σημαίνει και ακριβότερα καύσιμα.

Οι υψηλές τιμές καυσίμων πάντα θα αναγκάζουν εταιρείες και πλοιοκτήτες να εξετάζουν πιθανούς τρόπους μείωσης της κατανάλωσης καυσίμου στα πλοία τους. Σε κάθε περίπτωση, η επιλογή μείωσης της ταχύτητας πλεύσης αποτελεί την πιο εύλογη λύση. Βέβαια η αποδοτικότητα της εφαρμογής της διαφέρει από περίπτωση σε περίπτωση. Ωστόσο, σύμφωνα με πρόσφατους υπολογισμούς, μεταξύ αυτών και του Lloyd’s Marine Intelligence Unit (LMIU), οι τιμές των καυσίμων(bunker prices) δεν πρέπει να πέφτουν κάτω από *300$* ανά τόνο για τη διασφάλιση της μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας του “*slow steaming”*.



Διάγραμμα 3.1: *Εξέλιξη τιμών καυσίμου 2005-2011 (Source: Bunker World)*

3.2.2 Εξοικονόμηση από τρέχοντα κόστη

Τα δύο πιο πολυσύχναστα λιμάνια της Αμερικής, του Long Beach (POLB) και του Los Angeles (POLA), που και τα δύο βρίσκονται στην Νότια Καλιφόρνια έχουν θεσπίσει την εφαρμογή εθελοντικών προγραμμάτων που βασίζονται σε κίνητρα (incentive-based programs) που δίνουν στις ναυτιλιακές εταιρείες. Τον Μάρτιο του 2008 τα λιμάνια αυτά ενέκριναν ένα πρόγραμμα, το "Low-Sulfur Vessel Main Engine Fuel Incentive program", με σκοπό να ενθαρρύνουν πλοιοκτήτες και διαχειριστές να χρησιμοποιούν καθαρότερα καύσιμα σε απόσταση 40 ή 20 ναυτικά μίλια από το Point Fermin. Το πρόγραμμα αποζημειώνει τις εταιρείες που θα συμφωνήσουν να χρησιμοποιούν καύσιμο σε περιεκτικότητα θείου μικρότερη από 0.2% με την διαφορά της τιμής του καυσίμου αυτού από το συνηθισμένο IFO 380. Επιπλέον, τα δύο λιμάνια προσφέρουν έκπτωση 15% σε τέλη ελλιμενισμού στα πλοία που οικειοθελώς αποδέχονται το πρόγραμα μείωσης ταχύτητας "SPBP-OGV1 vessel speed reduction program" και μειώνουν την ταχύτητά τους σε 12 knots εντός 20 nm από το Point Fermin, ενώ εισέρχονται ή φεύγουν από τα λιμάνια.Το τελευταίο επίσης είναι γνωστό και ως "Green Flag Incentive" program.

Τα μειωμένα λιμενικά τέλη δεν είναι καινούργια τακτική κινήτρων. Σε αυτό το πλαίσιο, ευρέως γνωστό είναι το πιστοποιητικό που απονέμεται στις εταιρείες, το λεγόμενο "Green Award". Στις μέρες μας το Green Award έχει εξελιχθεί σε ανεξάρτητο ίδρυμα. Οι πλοιοκτήτες/ναυλωτές που έχουν εκπληρώσει συγκεκριμένες προαδιαγραφές ασφαλείας και περιβάλλοντος, μέσω αυτού, όχι μόνο ενισχύουν τη θετική εικόνα και το κοινωνικό προφίλ της εταιρείας τους, αλλά κερδίζουν και κάποιες ελαφρύνσεις όπως μειωμένα λιμενικά τέλη. Παραδείγματα αποτελούν το Port

Metro Vancouver που προσφέρει 21% έκπτωση στα βασικά τέλη, Πορτογαλικά λιμάνια που δίνουν ελαφρύνσεις 5%, τα ολανδικά λιμάνια του Rotterdam και της Zeeland που δίνουν 6% κ.α

Τέλος, υπάρχουν αρκετοί τοπικοί κανονισμοί που αφορούν φόρους σε εκπομπές ρύπων. Για παράδειγμα, το Νοέμβριο του 2006, το Νορβηγικό κοινοβούλιο αποφάσισε την εφαρμογή νέου φόρου στις εκπομπές NO_x από πλοία που εκτελούν δρομολόγια σε νορβηγικά λιμάνια. Ο σκοπός αυτού του φόρου είναι να μειωθούν οι ετήσιες εκπομπές NO_x στην Νορβηγία, σύμφωνα με τις υποχρεώσεις που θέτει το Πρωτόκολλο του Γκέτεμποργκ. Αυτός ο φόρος υπολογίζεται με βάση την καταναλώμενη ποσότητα καυσίμου σε τόνους, ετσι κάθε μείωση της ταχύτητας πλεύσης σε εγχώρια ύδατα συνεπάγεται και χαμηλότερους φόρους.

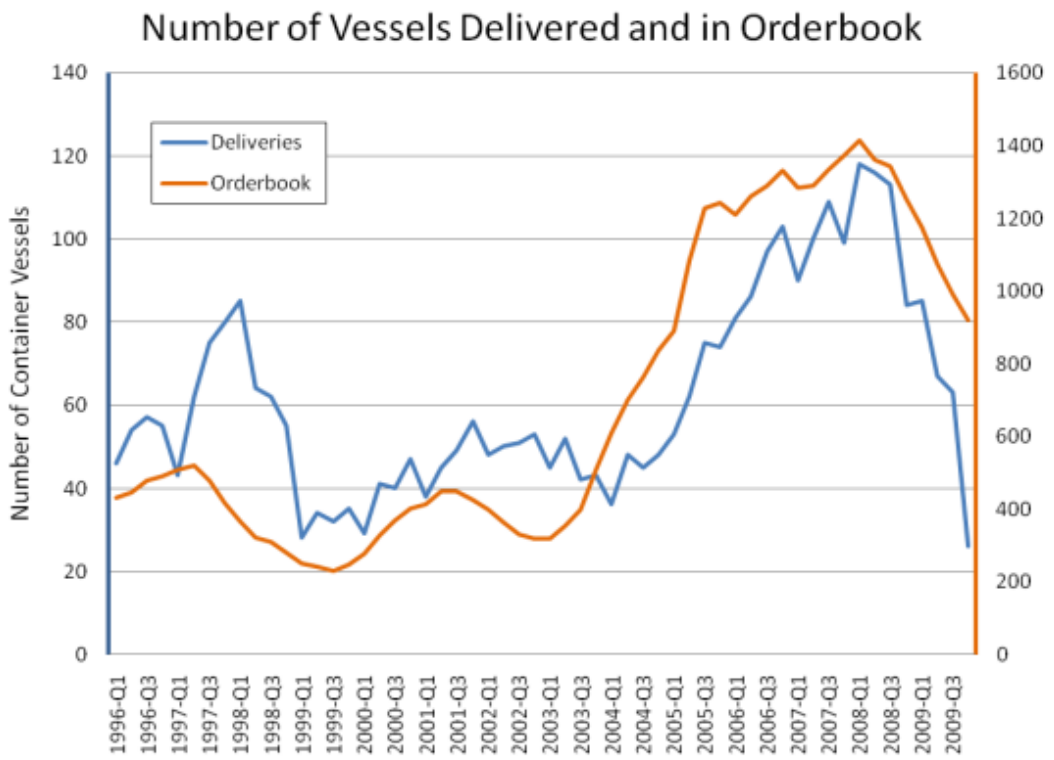
3.2.3 Πτώση ναύλων και υπερπροσφορά

Σε αντίθεση με το 2007 και 2008, όταν τα πρώτα πλοία μείωσαν ταχύτητα στα δρομολόγια Ευρώπη-Άπω Ανατολή, το 2009 είχε καταστεί επιτατακτική ανάγκη για εξοικονόμηση από οπουδήποτε, αφού οι συνέπειες της κρίσης ήταν πολύ βαθύτερες από το αναμενόμενο. Παρακάτω ο πίνακας είναι διαφωτιστικός της κατάστασης:

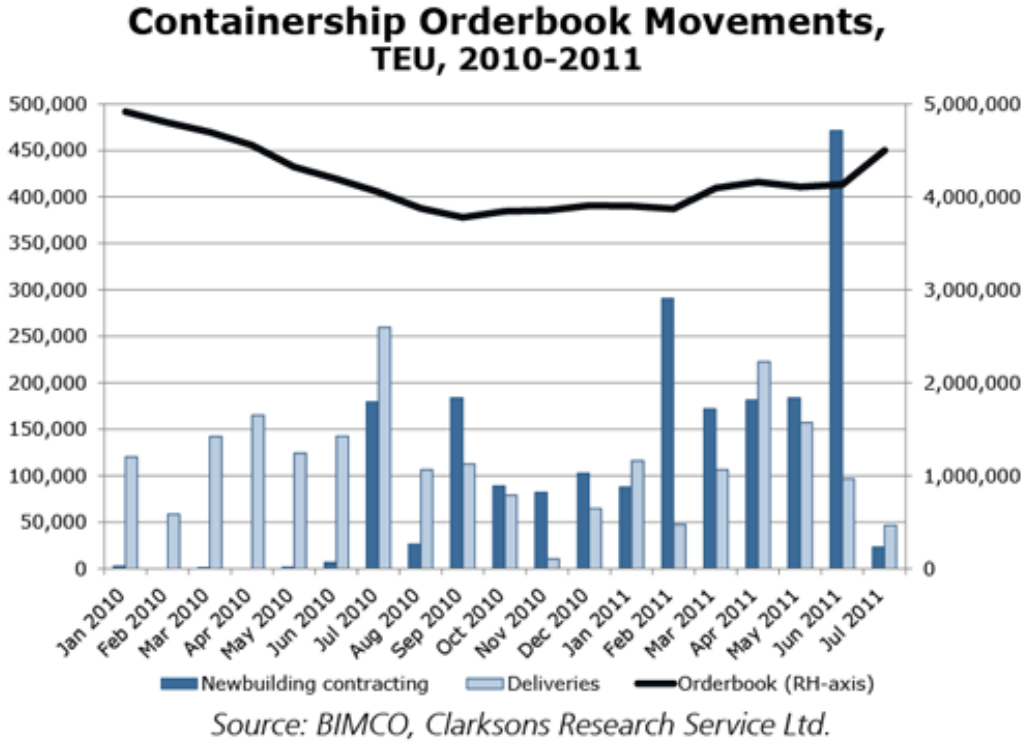
	Turnover		Profit	Carryings		Result
Rank/Carrier	'09/'08	USD	USD	'09/'08	TEU	USD/TEU
4 APL	-31%	5,490	-731	-7.0%	4,600	-159
9 China Shipping	-43%	2,890	-951	-4.0%	6,742	-141
3 CMA CGM	-30%	10,500	-1,425	-9.0%	7,882	-181
7 Coscon	-39%	2,600	-1,140	-9.6%	5,233	-218
10 CSAV	-38%	3,030	-669	-18.6%	1,790	-374
5 Evergreen	-	-	-310	-	-	-
14 Hamburg Sud	-29%	4,300	-	-	-	-
8 Hanjin	-35%	4,431	-652	-6.0%	3,220	-202
6 Hapag-Lloyd	-28%	6,000	-964	-16.3%	4,637	-208
18 Hyundai	-24%	5,280	-488	-5.4%	2,510	-194
15 "K" Line	-30%	3,900	-718	-0.7%	3,081	-233
1 Maersk Line	-28%	20,611	-2,088	-1.0%	13,800	-151
11 MOL	-32%	4,900	-610	-	-	-
2 MSC	-	11,000	-	-2.0%	10,289	-
13 NYK	-37%	4,050	-595	-	-	-
12 OOCL	-35%	3,800	-401	-14.0%	4,158	-96
25 RCL	-27%	442	-116	-18.0%	2,365	-49
21 Wan Hai	-26%	1,490	-52	-	-	-
17 Yang Ming	-46%	2,815	-500	-	-	-
16 ZIM	-43%	2,449	-432	-28.5%	1,800	-240
19 Carriers	-	99,978	-	-	-	-
18 Carriers	-	-	-12,842	-	-	-
14 Carriers	-	-	-	-	72,107	-
20 Averages	-33%	5,262	-713	-10.0%	5,151	-188

Πίνακας 3.1: *Οικονομικά αποτελέσματα του 2009 για τις 20 μεγαλύτερες εταιρείες μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. (Source:Dynamar B.V) (USD*1 million; TEU*1,000) (Turnover and Carryings % = year-on-year differences).(The turnover, profit and carryings totals only reflect those for the number of carriers stated; averages have been calculated in a similar way).*

Δεν είναι σύμπτωση ότι οι μειώσεις στις ταχύτητες παρατηρούνται εντονότερα στην αγορά των containers. Η αύξηση του στόλου των containerships των εταιρειών εν καιρώ κρίσης, υπερέβη την μεταφορική ζήτηση, με αποτέλεσμα η υπερποσφορά να επιφέρει μείωση των ναύλων. Αυτή η υπερπροσφορά έγινε προσπάθεια να αντιμετωπιστεί με την μείωση της ταχύτητας πλεύσης, πολλά πλοία έμειναν παροπλισμένα(lay-up) ενώ άλλα διαλύθηκαν(scrapping).Το ***Διάγραμμα 3.2*** δείχνει των αριθμό των πλοίων που παραδόθηκαν και παραγγέλθηκαν στην αρχή κάθε τετραμήνου από το 1996 έως το 2009,ενώ το ***Διάγραμμα 3.3*** την πτώση στις παραγγελίες και την ομαλοποίηση προς το τέλος του 2010.

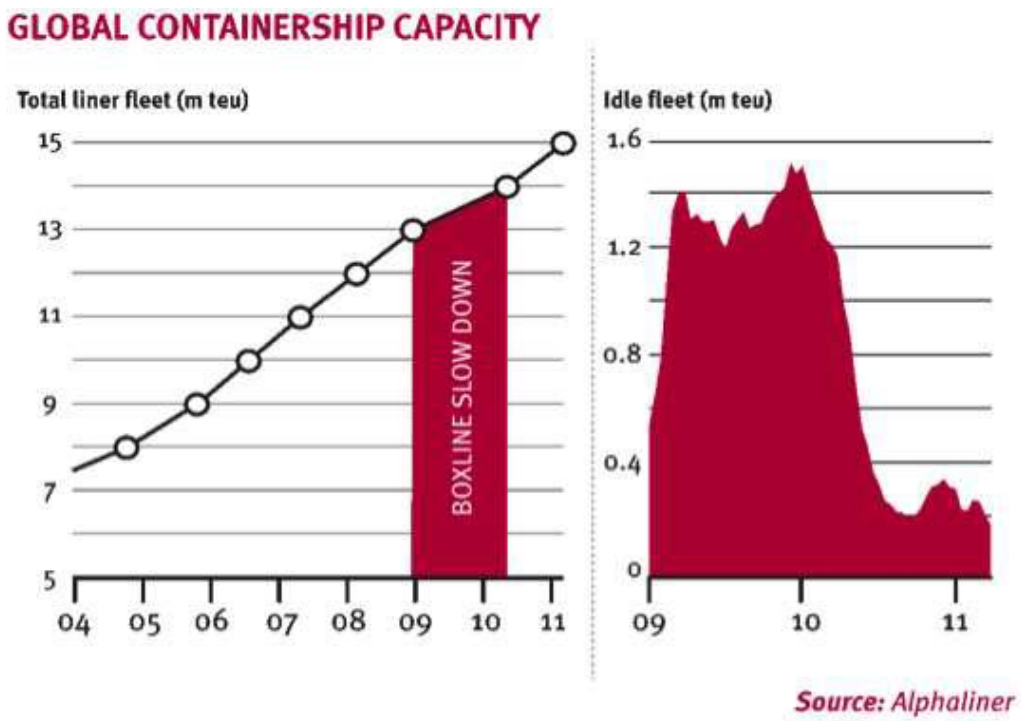


Διάγραμμα 3.2: *Ιστορική εξέλιξη παραδόσεων και παραγγελιών αριθμού πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (Source: Clarkson Research)*



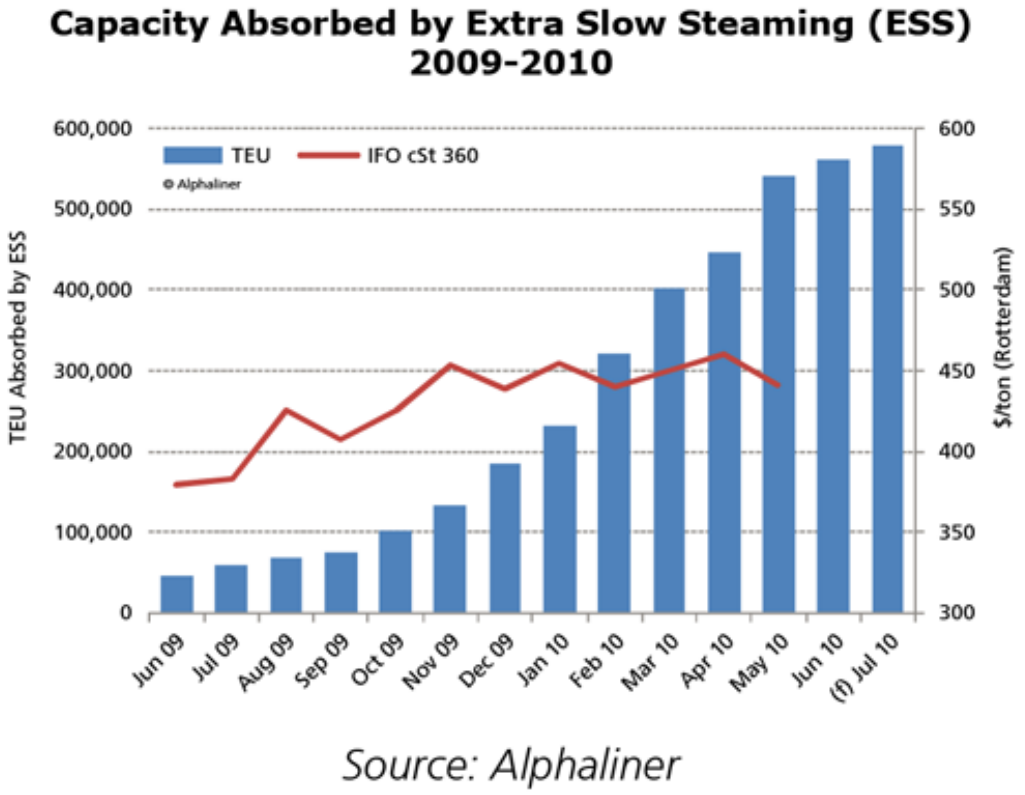
Διάγραμμα 3.3*: Ύψος παραδόσεων και παραγγελιών το 2010-2011, (Source:BIMCO, Clarkson Research)*

Το 2011, 129 πλοία συνολικής χωριτικότητας 270,000 TEU παρέμειναν αδρανή (Alphaliner at mid-September), το 1,8% του συνολικού στόλου των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Ο ενεργός στόλος των containerships αυξήθηκε κατά 6,5% το 2011, καθώς 966.000 TEU παραδόθηκαν, ενώ μειώθηκε μόνο κατά 30.517 TEU από διάλυση πλοίων (25 σκάφη - 1.221 TEU κατά μέσο όρο).



Διάγραμμα 3.4*: Μεταφορική ικανότητα παγκόσμιου στόλου πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και ύψος παροπλισμένου στόλου (Source: Alphaliner)*

Οι τελευταίες παραδόσεις έχουν φέρει το σύνολο του στόλου των containerships πέρα από το όριο των 15 εκατ. TEU, μόλις 11 μήνες απο τη στιγμή που ο στόλος πέρασε τα 14 εκατ. TEU. Μετά τις άστατες χρονιές του 2009 και του 2010, η προσφορά στα containerships ομαλοποιείται, όπως ήδη αναφέραμε, σε μεγέθη πριν από την κρίση του 2006-2008, με επίπεδα εισροής 1.3-1.4 εκ. TEU ετησίως για την περίοδο 2011-2013. Με μαζικές αναβολές των προγραμματισμένων (2010 και 2011) παραδόσεων και τα 1 ½ χρόνια απουσίας από παραγγελίες κατά τη διάρκεια της χρηματοπιστωτικής κρίσης, πλοιοκτήτες και ναυπηγεία σε συνεργασία κατάφεραν να εξομαλύνουν τις προγραμματισμένες παραδόσεις και να αποφύγουν το σενάριο τρόμου της μαζικής παράδοσης 2 εκατ. TEU από την αρχή της περιόδου αυτής.Επιχειρησιακά, το “slow steaming” ήταν η αντίδραση τους στο πρόβλημα (***Διάγραμμα 3.5***).



Διάγραμμα 3.5*:Απορρόφηση μεταφορικής ικανότητας από το "slow steaming" 2009-2010 (Source : Alphaliner)*

3.2.4 Υποχρεωτικοί κανονισμοί που σχετίζονται με τις εκπομπές ρύπων από τα πλοία

Όπως αναφέρθηκε εκτεταμένα και στο ***Κεφάλαιο 2***, αν και υπάρχουν κανονισμοί που αφορούν τις εκπομπές ρύπων όπως SO_x, NO_x, η ναυτιλία δεν έχει συμπεριληφθεί στο Πρωτόκολλο του Κιότο, το οποίο έχει αναθέσει στον IMO την λήψη αποφάσεων για την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου των πλοίων. Παρ'ολα αυτά και εν αντιθέσει με την πρόοδο που έχει συντελεστεί σχετικά με τους κανονισμούς των NO_x, SO_x,τα πράγματα εξελίσσονται αργά και δεν έχουν παρθεί αποφάσεις για τον περιορισμό των GHG's , με τις διαφορές ανάμεσα σε αναπτυγμένα και αναπτυσσόμενα κράτη μέλη του IMO να είναι σημαντικές.

Δεν υπάρχει καμία αμφιβολία ότι στο άμεσο μέλλον θα εφαρμοστούν κανονισμοί που σχετίζονται με την μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, με την μείωση της ταχύτητας να φαντάζει ως το πιο εύκολο μέτρο να συμβαδίσει με αυτούς. Ο IMO είναι έτοιμος να οριστικοποιήσει την υποχρεωτική εφαρμογή του Σχεδιαστικού Δείκτη Ενεργειακής Αποδοτικότητας (Energy Efficiency Design Index-EEDI) (***Κεφάλαιο 2****, 2.4.3*), ένα μέτρο αποδοτικότητας της σχεδίασης ενός νέου πλοίου σε σχέση με τις εκπομπές CO_2. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση του

Λειτουργικού Δείκτη Ενεργειακής Αποδοτικότητας (Energy Efficiency Operational Indicator-EEOI), που θα καταστεί εφαρμόσιμος σε όλα τα πλοία. Και οι δύο δείκτες αποτελούν λόγους, στους οποίους ο αριθμητής είναι μια συνάρτηση της συνολικής ενέργειας που καταναλώνει το πλοίο και ο παρονομαστής το γινόμενο της χωριτικοτητας(capacity)/μεταφερόμενου φορτίου με την υπηρεσιακή ταχύτητα του πλοίου. Το γεγονός ότι η ταχύτητα είναι στον παρονομαστή, συνεπάγεται ότι όσο πιο αργά ταξιδεύει ένα πλοίο, τόσο πιο μεγάλοι θα είναι οι δείκτες αυτοί και επομένως θα κατατάσσεται υψηλότερα όσον αφορά την ενεργειακή αποδοτικότητα,σχεδιαστική και λειτουργική.

3.2.5 Εθελούσια μέτρα μείωσης εκπομπών που λαμβάνονται από τις εταιρείες

Δεν θα πρέπει να μας προκαλέι εντύπωση το γεγονός πως αρκετές εταιρείες λαμβάνουν προαιρετικά μέτρα μείωσης των εκπομπών ρύπων. Τελευταία πολλές εταιρείες προσπαθούν να βελτιώσουν την δημόσια εικόνα τους κοινοποιώντας πολιτικές που σχετίζονται με το περιβάλλον και δημοσιεύοντας συστηματικά κοινωνικές και περιβαλλοντικές εκθέσεις, μεταξύ αυτών οι A.P Moller - Maersk Group, Wallenius Wilhemsen, NYK Line Japan. Δεν είναι σύμπτωση, ότι οι πιο δραστήριες σε αυτόν τον τομέα εταιρείες είναι αυτές που δραστηριοποιούνται στην αγορά Container και αυτό εξηγείται εύκολα από το γεγονός ότι τα containerships θεωρούνται οι μεγαλύτεροι ρυπαντές μεταξύ των τύπων πλοίων στην ναυτιλία. Όλες αυτές οι πρακτικές εμπίπτουν στην λεγόμενη “Εταιρική κοινωνική ευθύνη”.

Η Εταιρική κοινωνική ευθύνη (Corporate Social Responsibility- CSR) αναφέρεται στις ενέργειες των επιχειρήσεων που αποσκοπούν στην συμβολή της αντιμετώπισης περιβαλλοντικών και κοινωνικών ζητημάτων. Συγκεκριμένα, οι επιχειρήσεις αποτελούν οντότητες οι οποίες είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με το κοινωνικό σύνολο μέσα στο οποίο δραστηριοποιούνται, επηρεάζοντας και επηρεαζόμενες από τα δεδομένα της εποχής και του χώρου δράσης τους. Οφείλουν επομένως να αναγνωρίζουν την ευθύνη που τους αναλογεί, απέναντι στην κοινωνία και το περιβάλλον. Η CSR, ωστόσο έχει δεχτεί σκληρή κριτική τελευταία. Εταιρείες κατηγορούνται ότι συμμετέχουν σε προγράμματα μόνο και μόνο για να βελτιώσουν την φήμη τους και την εμπορικότητά τους. Όπως και να χει, σημασία έχει πως κάθε μέτρο περιορισμού των επιπτώσεων στο περιβάλλον από πλευράς ναυτιλιακών εταιρειών, εθελοντικό ή μη, θα πρέπει να είναι καλοδεχούμενο.

3.3 ΤΟ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΣΤΗΝ ΠΡΑΞΗ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΙΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ

Όπως επισημάνθηκε στην Δεύτερη Μελέτη του IMO για τα αέρια του θερμοκηπίου (Second IMO GHG study- Buhaug 2009), λειτουργικά μέτρα όπως η μείωση της ταχύτητας μπορούν να επιφέρουν σημαντική μείωση στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Η επίδραση της μείωσης της ταχύτητας στη κατανάλωση καυσίμου εξαρτάται από το μέγεθος αυτής της μείωσης.Αν υποθέσουμε ότι οι μειώσεις της ταχύτητας είναι μικρές, της τάξης του 10-15%, σαν γενικό κανόνα, θα μπορούσαμε να πούμε ότι η ισχύς σχετίζεται με την ταχύτητα με τρίτη δύναμη.Έτσι, μείωση της ταχύτητας κατά 10% ισοδυναμεί περίπου σε μείωση της αξονικής ισχύος κατά 27% και εξοικονόμηση ενέργειας ύψους 19% ανά τονομίλι. Οι μειώσεις στην ταχύτητα είναι ακριβές, διότι επηρεάζουν άμεσα το φορτίο του πλοίου και ως εκ τούτου, τα έσοδα του πλοίου. Ωστόσο, όταν οι ναύλοι είναι χαμηλοί και οι τιμές των καυσίμων είναι υψηλές, η μείωση της ταχύτητας είναι επικερδές μέσο. Το “slow steaming” δεν εφαρμόζεται μόνο σε πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων αν και σε αυτά η εφαρμογή του έχει περισσότερο νόημα λόγω των υψηλών ταχυτήτων τους. Εφαρμόζεται σε κάθε αγορά και ειδικότερα στο άφορτο σκέλος του ταξιδιού(ballast leg).

Σύμφωνα με σχετική μελέτη *[Is slow steaming a sustainable mean for reducing liner shipping CO_2 emissions?(Pierre Cariou,2010)]* τον Ιανουάριο του 2010, 42,9% των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων ταξίδευαν με μειωμένες ταχύτητες, ένα ποσοστό που μεγάλωνε με την αύξηση του μεγέθους του πλοίου (75,5% για 8000+ TEU containerships ,.***Πίνακας 3.2)***.

	A. Characteristics of the 2,051 vessels*				B. Days at sea		C. Ship Average fuel oil consumption (in 000 tons per year)		
Vessel size	Number of vessels	% in SS	Mean size in teu	Design speed sk	2007** and 2008	This work (2010)	2007**	This work (2008)	This work (2010)
1000-2000	278	19.4	1481	19.5	241	244	9,700	8,977	8,759
2000-3000	398	22.6	2542	21.7	247	250	15,600	15,409	14,666
3000-5000	677	37.2	4087	23.6	250	255	25,200	24,698	22,789
5000-8000	432	65.7	5948	24.9	251	260	37,500	36,695	31,541
8000+	266	75.5	9175	24.6	259	270	46,400	46,727	38,777

* calculation from Alphaliner (2010), ** from Buhaug et al. (2009, p. 195 and 214)

Πίνακας 3.2 : *Επίδραση ‘’slow steaming’’ στην ετήσια κατανάλωση καυσίμου ανά πλοίο (2008-2010), (Source :P.Cariou)*

Το 2008, η συνολική κατανάλωση καυσίμου για τα 2051 containers ήταν σύμφωνα με υπολογισμούς 53,6 εκ.τόνοι. Πάρα την χρήση 137 επιπλέον πλοίων σαν αποτέλεσμα του “slow steaming”, είχαμε μείωση της τάξης του 11,1% (47,6 εκ τόνοι) το 2010 και όπως είναι φυσικό και των εκπομπών CO_2.

Αναλυτικότερα αποτελέσματα εμφανίζονται στον ***Πίνακα 3.3***, όπου παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά 387 υπηρεσιών στους 8 κύριους εμπορικούς δρόμους, με την επιπλέον κατηγορία των Multi-trades. Οπως φαίνεται, τον Ιανουάριο του 2008 στο 78.6% των διαδρομών Europe/Far East παρατηρήθηκαν χαμηλές ταχύτητες πλεύσης, όπως και στο 58.7% των Multi-trades. Αυτά τα αποτελέσματα, συμπίπτουν με το γεγονός ότι μεγαλύτερα σε μέγεθος πλοία χρησιμοποιούνται σε αυτούς τους εμπορικούς δρόμους, με μέσο μέγεθος 7720 TEU και 5994 TEU αντίστοιχα.

	Number of services	% of services Under slow steaming	Number of Vessels	% of vessels under slow steaming	Total Capacity teu	Vessel Number	Rotation days	Port call	Size Teu	Speed kt
Multi-trades	63	57.1	539	64.2	3,230,508	8.6	72	16	5,994	24.0
Europe / Far East	28	78.6	115	74.8	887,769	4.1	66	14	7,720	24.8
Asia / North America	52	42.3	323	47.1	1,661,017	6.2	50	10	5,142	24.3
North Atlantic	22	22.7	98	30.6	339,966	4.5	40	10	3,469	22.2
Australia / Oceania	17	23.5	96	27.1	335,002	5.6	44	10	3,490	23.1
Latin America/Carib. related	73	20.5	314	24.2	886,568	4.4	47	13	2,823	21.8
Mid-East/South Asia related	87	23.0	342	25.7	1,300,282	3.9	39	11	3,802	22.7
South Africa/East Africa related	16	31.3	97	29.9	291,649	5.7	50	9	3,007	21.7
West Africa related	29	20.7	127	37.8	267,517	4.4	53	9	2,106	20.7
Total	387	35.4	2,051	42.9	9,200,278	5.3	53	12	4,485	23.1

Source: form Alphaliner database (January 2010)

Πίνακας 3.3 : *Κύρια χαρακτηριστικά υπηρεσιών στα κυριότερα εμπορικά δίκτυα και ''slow steaming'' (Ιανουάριος 2010) (Source :P.Cariou, Alphaliner)* .

Τέλος, ο ***Πίνακας 3.4*** συγκρίνει τις εκπομπές CO_2 ανά δίκτυο διαδρομών και μέγεθος πλοίων (by trade and vessel size) το 2008 και το 2010 που εφαρμόζεται το "slow steaming". Η μείωση στις εκπομπές υπολογίζεται σε 11.1% από 170 εκ. τόνους CO_2 το 2008, σε 151 εκ. με αιχμή τα πλοία με 8000+ TEU (17% μείωση), και τα δίκτυα Multi-trades (16.5%) και Europe/Far East (16.4%). Αυτά τα αποτελέσματα έρχονται σε αντίθεση με τα αντίστοιχα στους μικρότερους εμπορικούς δρόμους, που παρατηρείται εμφανώς λιγότερο το "slow steaming".

	Baseline - 2008 Pre slow steaming 000 tons CO2	**January 2010 – Slow steaming era 000 tons** CO2	**% Reduction 2008-2010**
	By trade		
Multi-trades	56,900	47,500	-16.5
Europe / Far East	15,500	12,900	-16.4
Asia / North America	32,600	29,400	-9.7
North Atlantic	6,191	5,778	-6.7
Australia / Oceania	6,544	6,275	-4.4
Latin America/Carib. related	17,000	16,200	-4.8
Mid-East/South Asia related	24,600	22,900	-6.7
South Africa/East Africa related	5,800	5,460	-5.9
West Africa related	4,963	4,510	-9.1
	By vessel size		
1000-2000	7,929	7,719	-2,6
2000-3000	24,000	18,500	-4,8
3000-5000	53,000	48,900	-7,7
5000-8000	50,300	43,200	-14,0
8000+	39,400	32,700	-17,0
Total	170,097	150,921	-11.2

Source: Alphaliner database (January 2010) and LRF (2010)

Πίνακας 3.4:*Επίδραση του ''slow steaming'' στις εκπομπές CO_2 στα κυριότερα εμπορικά δίκτυα (2008-2010)(Source :P.Cariou, Alphaliner,LRF)*

Από τα παραπάνω γίνεται φανερό ότι το λειτουργικό μέτρο μείωσης της ταχύτητας πλεύσης είναι μια αποδοτική επιλογή μείωσης των εκπομπών CO_2 βραχυπρόθεσμα, με μειώσεις της τάξης του 11% την διετία 2008-2010 σύμφωνα με την παραπάνω έρευνα.Συνοψίζοντας, οι αλλαγές σε ναύλους, τιμές καυσίμων, λειτουργικά κόστη και κόστη αποθεμάτων, παίζουν τον ρόλο τους στην μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα του "slow steaming" σαν μέσο μείωσης των εκπομπών CO_2.Αν οι τιμές των καυσίμων πέσουν στο μέλλον αλλά οι ναύλοι και το κόστος αποθεμάτων αυξηθούν, θα *ανακύψουν αμφιβολίες για το αν το μέτρο αυτό είναι όντως αποδοτικό. Επειδή όμως αργά η γρήγορα οι ναύλοι θα ανέβουν, η μόνη ευκαιρία για να παραμείνει μακροπρόθεσμα βιώσιμη λύση το "slow steaming" είναι οι τιμές των καυσίμων να*

παραμείνουν σε υψηλά επίπεδα ή/και να εφαρμοστούν Εργαλεία Αγοράς όπως το Σύστημα Φορολογίας και το Σύστημα Εμπορίας Εκπομπών, τα οποία θα βοηθήσουν σε αυτή την κατεύθυνση.

3.4 ΘΕΜΑΤΑ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΦΥΣΕΩΣ ΠΟΥ ΠΡΟΚΥΠΤΟΥΝ ΑΠΟ ΤΟ SLOW STEAMING

Εξετάζοντας το τεχνικό μέρος της εφαρμογής του "slow steaming" στα πλοία, ένα πλοίο που ταξιδεύει με μειωμένη ταχύτητα, θα λέγαμε ότι δεν λειτουργεί σε συνθήκες αρχικού σχεδιασμού ή καλύτερα θα λέγαμε ότι λειτουργεί σε «off-design conditions».Αυτό συνεπάγεται πιθανά μειονεκτήματα όπως:

- Τα συστήματα ανάκτησης θερμότητας χάνουν πιθανόν την αποτελεσματικότητά τους. Π.χ. η απόδοση του λέβητα καυσαερίου μπορεί να μην είναι επαρκής και ως εκ τούτου ένας λέβητας πετρελαίου, πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να δημιουργήσει επαρκή θερμότητα στο πλοίο.
- Απώλεια της απόδοσης του turbogharger.
- Απώλεια της απόδοσης της έλικας.
- Αυξημένες ακαθαρσίες στην γάστρα και στην έλικα λόγω της μειωμένης ταχύτητας και κατά συνέπεια μειωμένες ταχύτητες ροής. Μερικά αντιρρυπαντικά συστήματα προϋποθέτουν μίνιμουμ ταχύτητες για το «ξέπλυμα» της ρύπανσης.
- Βοηθητικά συστήματα μπορεί να χρειαστεί να λειτουργήσουν σε off-design conditions για να αντισταθμίσουν π.χ. την απώλεια ανάκτησης θερμότητας των turbochargers. Συχνά αυτά τα συστήματα δεν είναι σχεδιασμένα για συνεχή λειτουργία και έτσι οι ανάγκες συντήρησης είναι αυξημένες, ενω είναι πιθανές περιπτώσεις βλάβης.
- Αυξημένες απαιτήσεις για λύπανση
- Λόγω της πλεύσης σε off-design conditions , τα επίπεδα των δονήσεων μπορεί να αυξηθούν.
- Στις προπέλες μεταβλητού βήματος αυξάνονται οι πιθανότητες σπηλαίωσης στην πλευρά πίεσης της έλικας

Τα περισσότερα από τα παραπάνω μπορούν να ξεπεραστούν με τροποποιήσεις. Κάποια μπορούν να αμεληθούν αφού δεν θα προκαλέσουν ζημιές ή δεν θέτουν θέμα ασφαλούς λειτουργίας του πλοίου, ενώ άλλα πρέπει να μελετηθούν σοβαρά. Τον Μάρτιο του 2009 η Maersk Line με μία έκθεση, προσδιόρισε τεχνικά θέματα που προκύπτουν από το slow steaming,βασισμένη στην εμπειρία από την εφαρμογή του σε 110 από τα πλοία του στόλου της, προτείνοντας τρόπους επίλυσης του κάθε θέματος ξεχωριστά, όπως φαίνεται στο πίνακα που ακολουθεί.

No	Concern	Experience	Comments, recommendations
1	Loss of turbo charger (TC) efficiency	Propeller efficiency is typically reduced by around 3% when not running at optimal speed	By far counterweighted by the reduced power requirement at lower speed
2	Increased compensatory fuel consumption of auxiliary engines & boilers to supplement loss of heat recovery capability	-	Voyage planning tools used to ensure that Slow Steaming is done in a way that realises savings on the total fuel oil consumption
3	Increased cylinder lubrication oil (LO) consumption	Specific LO consumption [g/kWh] increases, but the absolute consumption decreases as propulsion energy reduction is larger	Cylinder LO dosing is adjusted to avoid overdosing when possible. Piston underside and drains checked regularly and cleaned
4	Scavening air space requiring increased cleaning	Scavenging space require more frequent cleaning when slow steaming especially on mechanical engines	Frequent inspection and cleaning
5	Scavenging air non return flaps damages	Observed to some extent, but not only related to slow speed steaming	Frequent inspection and exchange of flaps
6	Auxiliary blowers not designed for continuous operation	More frequent failures on blower motor and impeller experienced	Spare blower motor and impeller to be kept onboard
7	Possible increased vibration levels and detrimental effects	Only relevant for vessels having barred speed area	Operate vessel only above or below barred speed area
8	Cold corrosion of exhaust gas boilers due to low gas temperatures at exit exhaust gas boilers	For some waste heat recovery (WHR) vessels corrosion of funnel parts not sufficiently insulated has been observed	Water tube boilers: bypass exhaust gas when exhaust temperatures are low Smoke tube boilers: maintain pressure in boiler using oil fired boiler to keep boiler surface temp. sufficiently high
9	Loss of fresh water production capacity	Observed especially on feeder vessels having many subsequent short voyages	Alternative heating means: steam or electric heaters, or: purchase water

Πίνακας 3.5: *Τεχνικά θέματα που ανακύπτουν από το ''slow steaming''(Source:Maersk)*

Οι μηχανές δεν μπορούν να λειτουργήσουν σε οποιοδήποτε φορτίο χωρίς τις απαραίτητες τροποποιήσεις. Το ελάχιστο φορτίο που μπορούν να λειτουργήσουν εξαρτάται από τις τεχνικές προδιαγραφές του κατασκευαστή για κάθε μηχανή. Η εμπειρία λοιπόν από την πλεύση σε μειωμένες ταχύτητες μας έχει δείξει τα εξής σημαντικά προβλήματα που προκύπτους όσον αφορά τις μηχανές:

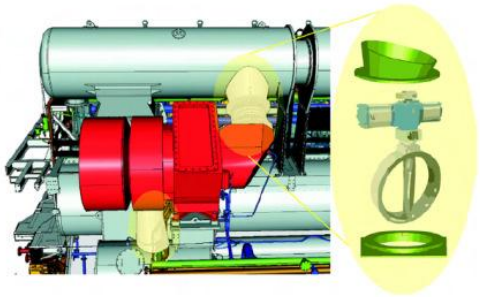
- Αυξημένη ρύπανση από τον εξοικονομητή καυσαερίων(exhaust gas economizer) λόγω αυξημένης εμφάνισης αιθάλης(σπίθες).
- Αύξηση των ακκαθαρσιών του turbocharger.
- Η αντλία καυσίμου και ο εγχυτήρας (μπεκ) φθείρονται εξαιτίας της λειτουργίας σε off-design conditions.
- Τα ελατήρια του εμβόλου κολλάνε στο πάνω σκέλος.
- Ανάγκη για καλύτερο καθαρισμό και συντήρηση όλης της μηχανής,

Τα παραπάνω προβλήματα που έχουν παρατηρηθεί στο παρελθόν, είναι προϊόν εμπειρίας σε 'normal' "slow steaming" και όχι αποκλειστικά σε φορτίο κάτω από το ελάχιστο. Οπως είναι προφανές, οι πιθανές συνέπειες αυξάνονται σημαντικά στην περίπτωση που η μηχανή λειτουργεί κάτω απο το ελάχιστο φορτίο της, πράγμα για το οποίο προειδοποιούν οι κατασκευαστές στις οδηγίες.

Δοκιμές έχουν δείξει ότι για τις 2-χρονες μηχανές το όριο μπορεί να τεθεί περίπου στο 40% χωρίς μόνιμη χρήση των βοηθητικών φυσητήρων(auxiliary blowers), ενώ για τις 4-χρονες μηχανές το όριο είναι χαμηλότερο, ίσως στο 10% του MCR. Η ηλεκτρονικά ελεγχόμενες μηχανές έχουν καλύτερη απόδοση σε πιο χαμηλά φορτία από ότι η μηχανικά ελεγχόμενες μηχανές, όπως βεβαιώνουν και οι δύο μεγαλύτεροι κατασκευαστές μηχανών:

- MAN Diesel:
  - *Owners and operators of MAN B&W two-stroke marine diesel engines type MC/MC-C and ME/ME-C are advised that long-term load operation down to 10% engine load is generally possible with appropriate precautions and without major modifications*
- Wärtsilä:
  - Wärtsilä *2-stroke engines are optimised for operation in the load range above approximately 60% CMCR. Continuous running at lower loads down to CMCR is possible, but with special care*

Για μείωση της ταχύτητας κάτω από αυτά τα επίπεδα,υπάρχουν συσκευές που διευκολύνουν και επιτρέπουν χαμηλότερα φορτία και ταχύτητες, πετυχαίνοντας ταυτόχρονα εξοικονόμηση καυσίμων. Οι συσκευές της Wärtsilä “Slow Steaming upgrade kit” και της MAN Diesel “Turbocharger cut-out” (Εικόνες αντίστοιχα) επιτρέπουν στις μηχανές να λειτουργούν συνεχώς σε οποιαδήποτε ισχύ στην περιοχή του 100% έως και 10% κάτω από το σύνολο της εγκατεστημένης ισχύος τους. Αυτό ανταποκρίνεται στην απαίτηση για διαφορετικές ταχύτητες, κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού. Επιπλέον, μειώνουν και την κατανάλωση καυσίμου ανά ισχύ ανά ώρα (Brake specific fuel consumption - BSFC). Οι τιμές αυτών των συσκευών αναβάθμισης εξαρτώνται κατά πολύ και από τα χαρακτηριστικά της μηχανής του εκάστοτε πλοίου. Οι δαπάνες γι’αυτή την αναβάθμιση μπορεί να φτάσουν τις *$130,000* για σύγχρονες ηλεκτρονικά ελεγχόμενες μηχανές και τις *$600,000* για παλαιότερες μηχανικά ελεγχόμενες μηχανές.



3.5 ΕΠΑΝΑΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΤΑΞΙΔΙΩΝ

Οι εταιρείες που αποφασίζουν να εφαρμόσουν το λειτουργικό μέτρο του "slow steaming" μπορούν να κρατήσουν την συχνότητα του συστήματός τους σταθερή και να προσθέσουν ένα ή περισσότερα πλοία ανάλογα με το ποσοστό μείωσης της ταχύτητας και τους οικονομικούς στόχους της εταιρείας.

Στην πραγματικότητα, μια τέτοια λειτουργική αλλαγή συνεπάγεται ανασχεδιασμό του συστήματος εξυπηρέτησης:

- Η ακολουθία των λιμανιών θα πρέπει να βελτιστοποιηθεί σύμφωνα με τη νέα ταχύτητα (ή αντίστροφα).
- Μια εταιρεία μπορεί να διατηρήσει την ταχύτητα σε συγκεκριμένα επίπεδα καθ'όλη την διάρκεια ενός κυκλικού ταξιδιού, ενώ μια άλλη μπορεί να επιλέξει ένα πρόγραμμα με διαφορετικές ταχύτητες μεταξύ λιμένων. Μεγάλες εταιρείες containerships όπως η Maersk Line και η APL ακολουθούν διαφορετική τακτική στο συγκεκριμένο θέμα. Η Maersk εφαρμόζει διαφορετικές ταχύτητες μεταξύ λιμένων,ενώ η APL επιλέγει την πρώτη λύση.
- Διαφορετικές ταχύτητες συνηθίζονται και μεταξύ των σκελών του ταξιδιού (laden leg και ballast leg), η ταχύτητα των οποίων μεταβάλλεται με την εφαρμογή του slow steaming.

Η μείωση της ταχύτητας προσφέρει ευελιξία στις εταιρείες σε σύγκριση με την πλεύση του στόλου τους σε υπηρεσιακές ταχύτητες, αφού τους δίνεται η δυνατότητα να αντιμετωπίσουν πιθανές καθυστερήσεις στα χρονοδιάγραμμα των ταξιδιών που προκαλούνται από συμφόρηση στα λιμάνια, προβλήματα τεχνικής φύσεως και κακές καιρικές συνθήκες.Από την άλλη όπως είναι λογικό, επηρεάζει και τον χρόνο ταξιδιού (transit time). Το κατά πόσο, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την στρατηγική της εταιρείας. Σαν γενικό κανόνα, θα λέγαμε πως μείωση της ταχύτητας κατά 10% έχει ως αποτέλεσμα 11% περισσότερο χρόνο κάλυψης της δεδομένης διαδρομής. Για παράδειγμα, σε δρομολόγια North Europe- Far East η αύξηση από 8 πλοία που χρησιμοποιούνται συνήθως, σε 9, μετά την μείωση της ταχύτητας πλέυσης θα αύξανε τον transit time 3 με 4 ημέρες κατα μέσο όρο, ενω σε δρομολόγια Transpacific που χρησιμοποιούνται συνήθως 5 ή 6 πλοία, ένα επιπλέον πλοίο θα είχε ως αποτέλεσμα transit time από 1 έως 3 μέρες περισσότερο. Ειδικότερα με ένα παράδειγμα, στόχος της Maersk στα δρομολόγια North Europe- Far East είναι ο στόλος της να ταξιδεύει αργά (slow-16 knots) έως πολύ αργα (super slow-14 knots) κατευθυνόμενος ανατολικά (the backhaul to Asia) και αργά (17 knots) προς κανονικά (19 knots) κατευθυνόμενος προς την Ευρώπη.Με αυτόν τον τρόπο πετυχαίνει μικρή αύξηση μόλις 2 ημερών στον transit time στο σκέλος της διαδρομής προς την Ευρώπη, με συνολική μέση ταχύτητα 16.5 knots.

Αν και η προσθήκη ενός ή περισσοτέρων πλοίων είναι ο πιο συνηθισμένος τρόπος διατήρησης της συχνότητας των υπηρεσιών,εναλλακτικά αυτό μπορεί να επιτευχθεί επίσης παραλείποντας κάποια ταξίδια ανά εβδομάδες ή λιμάνια. Επιπρόσθετα, ιδανικός τρόπος προσπάθειας διατήρησης της συχνότητας είναι και το λεγόμενο 'booking by rendez vous'(Κοντόβας-Ψαραύτης,2010), κατά το οποίο μια εταιρεία κλείνει προκαταβολικά υπηρεσίες ελλιμενισμού εξασφαλίζοντας γρήγορη εξυπηρέτηση και μειώνοντας τον χρόνο αναμονής.

3.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Εξ'ορισμού, όλες οι εταιρείες έχουν ως στόχο το κέρδος. Έτσι κάθε εταιρεία εξετάζει κάθε πιθανή λύση αύξησης της αποδοτικότητας των καυσίμων με σκόπό να ελαχιστοποιήσει το κόστος τους, που αποτελεί και το μεγαλύτερο μέρος του κόστους ταξιδιού. Ένα από τα πιο εύκολα εφαρμόσιμα και ταυτόχρονα οικονομικά λειτουργικά μέτρα προς αυτή την κατεύθυνση είναι η μείωση της ταχύτητας πλεύσης, το λεγόμενο "slow steaming". Αν και ο τομέας που επιδίδεται κυρίως στην εφαρμογή του slow "steaming" είναι αυτός των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, αργά και σταθερά εφαρμόζεται μετά την οικονομική κρίση και σε άλλους τύπους πλοίων. Παράδειγμα αποτελεί ο διεθνής ναυτιλιακός οργανισμός BIMCO (Baltic and International Maritime Council) που προσπαθεί να αναπτύξει μια συνθήκη στις ναυτιλιακές συμβάσεις, σχετικά με το "slow steaming", που χρησιμοποιούνται στα δεξαμενόπλοια και στα πλοία ξηρού φορτίου, λαμβάνοντας υπόψιν και τις περιβαλλοντικές διαστάσεις του θέματος σχετικά με τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου.

Επιπλέον, οι εταιρείες φαίνονται πρόθυμες να υιοθετήσουν πρωτοβουλίες που ακούγονται λογικές και σχετίζονται με πρακτικά προβλήματα όπως για παράδειγμα η συμφόρηση στα λιμάνια. Μειώνοντας την ταχύτητα πλεύσης και φτάνοντας στο λιμάνι σε προκαθορισμένο πλαίσιο χρόνου σε αντίθεση με ότι συμβαίνει μέχρι τώρα που τα πλοία πολλές φορές φτάνουν νωρίς και περιμένουν σημαντικό χρόνο για την εξυπηρέτησή τους, τα πλοία μπορούν να μειώσουν λειτουργικά κόστη και ταυτόχρονα να περιορίσουν ουσιαστικό μέρος των ρύπων που εκπέμπουν. Παραδείγματα τέτοιων πρακτικών είναι το "booking by rendez vous", που αναφέραμε στην προηγούμενη ενότητα και το λεγόμενο "Virtual Arrival", που έχει χρησιμοποιηθεί από δεξαμενόπλοια, με σκοπό την διαχείρηση του χρόνου άφιξης των πλοίων βάσει της εμπειρίας των καθυστερήσεων σε ορισμένα λιμάνια εκφόρτωσης, μειώνοντας έτσι την κατανάλωση καυσίμου και τελικά τις εκπομπές ρύπων από την εφαρμογή μιας κοινώς συμφωνημένης μείωσης στην ταχύτητα, με σκοπό να επιτευχθεί η έγκαιρη άφιξη στο εκάστοτε λιμάνι.

Ως εκ τούτου, τα διδάγματα της εφαρμογής του “slow steaming” κατά τη διάρκεια της ύφεσης θα είναι πολύτιμα στο μέλλον για τα μείζονα θέματα του περιορισμού των εκπομπών αερίων και της εξοικονόμησης του κόστους καυσίμων, που απασχολούν και θα απασχολήσουν τους άμεσα εμπλεκόμενους τα χρόνια που έρχονται.

4

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

.....

Το κεφάλαιο αυτό, παρουσιάζει το κύριο θέμα της παρούσας διπλωματικής,την ανάπτυξη δηλαδή ενός μαθηματικού μοντέλου για τον υπολογιμό του ετήσιου λειτουργικού κόστους μιας ναυτιλιακής εταιρείας πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων. Αρχικά, επιχειρείται μια εισαγωγή στο γενικότερο ναυτιλιακό πλαίσιο πάνω στο οποίο βασίζεται η κατασκευή του μοντέλου και στην συνέχεια παρουσιάζεται η γενική δομή του πολυπαραμετρικού προβλήματος. Ακολούθως, αναλύεται η διαδικασία που ακολουθείται για την αντιμετώπισή του, και παρουσιάζονται οι μεταβλητές, οι παράμετροι και οι συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του μοντέλου, όπως επίσης οι περιορισμοί και οι ιδιότητες του. Τέλος, περιγράφονται οι πίνακες προέλευσης-προορισμού και οι ροές φορτίου, η διάρθρωση του στόλου και το δίκτυο των εξυπηρετούμενων λιμένων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή του μοντέλου.

4.1 ΒΑΣΙΚΑ ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

4.1.1 Green Maritime Logistics

Ο όρος “Green” είναι η λέξη κλειδί για μία σειρά περιβαλλοντικών πρωτοβουλιών. Χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει ένα βαθμό συμβατότητας με το περιβάλλον. Όπως τα logistics έτσι και ο όρος “Green” θεωρείται κάτι επωφελές για τον άνθρωπο και το κοινωνικό σύνολο. Ο συνδυασμός των δύο όρων υποδηλώνει μία δραστηριότητα (π.χ. μεταφορά, διανομή κλπ) που είναι φιλική προς το περιβάλλον και ταυτόχρονα οικονομικά αποτελεσματική. Η Πράσινη Εφοδιαστική (Green Logistics) θα μπορούσαμε να πούμε γενικά πως έχει ως στόχο την εύρεση μιας

περιβαλλοντικά αποδεκτής λύσης για την συνδυασμένη εφοδιαστική αλυσίδα, με σεβασμό στα οικονομικά κριτήρια.

Όσον αφορά την ναυτιλία η συζήτηση επικεντρώνεται στην μείωση των εκπομπών από τα πλοία.Τυπικά προβλήματα του αντικειμένου των maritime logistics αποτελούν τα πρακάτω ή συνδυασμοί αυτών(σε παρένθεση οι αγγλικοί όροι):

- Βέλτιστη ταχύτητα πλοίου (*Optimal ship speed*)
- Βέλτιστο μέγεθος του πλοίου (*Optimal ship size*)
- Δρομολόγηση και προγραμματισμός (*Routing and scheduling*)
- Κατανομή στόλου (*Fleet deployment*)
- Μεγέθος και χαρακτηριστικά του στόλου (*Fleet size and mix*)
- Πορειογράφηση πλοίων (*Weather routing*)
- Σχεδιασμός δικτύου συνδυασμένων μεταφορών (*Intermodal network design*)
- Διανομή του όγκου μεταφορών σε διαφορετικά μέσα μεταφοράς (*Modal split*)
- Σύστημα μεταφορτώσεων (*Transshipment*)
- Σύστημα εξυπηρέτησης (*Queuing at ports*)
- Διαχείριση Τερματικών Σταθμών διακίνησης προϊόντων (*Terminal management*)
- Κατανομή ελλιμενισμού (*Berth allocation*)
- Διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας (*Supply chain management*)

Οι παραδοσιακές αναλύσεις των προβλημάτων αυτών είναι αναλύσεις ανταποδοτικότητας κόστους για την πλευρά του πλοιοκτήτη, του ναυλωτή, ή κάποιου τελικού χρήστη. Μια τέτοια ανάλυση αγνοεί συνήθως περιβαλλοντικά ζητήματα. Τα “green maritime logistics εισάγουν” την περιβαλλοντική διάσταση στο πρόβλημα, και συγκεκριμένα το θέμα της μείωσης των εκπομπών ρύπων, με στόχο την επίτευξη ισορροπίας περιβαλλοντικών και οικονομικών κριτηρίων και την διερεύνυση της ύπαρξης συνολικά καλών λύσεων.

4.1.2 Η ναυλαγορά liner

Η ναυτιλιακή αγορά δεν αποτελεί μια ενιαία αγορά, αλλά ένα σύνολο ανεξάρτητων αγορών κάθε μία απο τις οποίες εμφανίζει ξεχωριστά χαρακτηριστικά και ιδιαιτερότητες ως προς την δομή, το είδος των προσφερόμενων υπηρεσιών και του εμπορεύματος, τον τύπο των πλοίων και τον γεωγραφικό καταμερισμό.

Το μοντέλο υπολογισμού του ετήσιου λειτουργικού κόστους που αναλύεται στην παρούσα διπλωματική αφορά πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (containerships). Τα containerships αποτελούν την πιο αντιπροσωπευτική περίπτωση ναυλαγοράς liner, συνεπώς είναι χρήσιμη η αναφορά των κυρίων χαρακτηριστικών της συγκεκριμένης ναυλαγοράς.

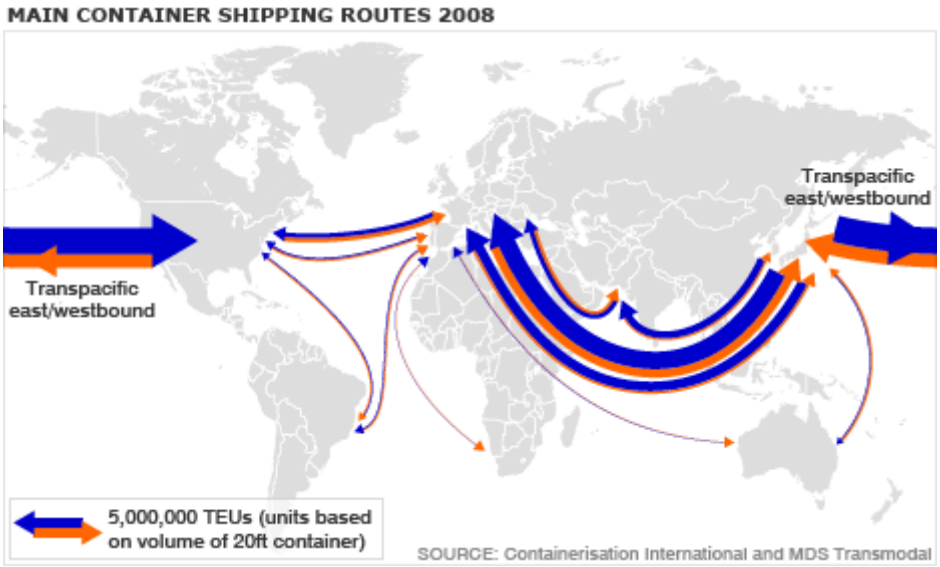
Στη ναυλαγορά liner, τα πλοία κάνουν τακτά δρομολόγια σε δεδομένες, προκαθορισμένες διαδρομές (εξ ου και ο όρος «πλοία της γραμμής»), με σαφώς προσδιορισμένες ημερομηνίες άφιξης-αναχώρησης και σαφώς προσδιορισμένα μέρη που θα επισκεφθουν. Τα κύρια δίκτυα διαδρομών, είναι μεταξύ των βιομηχανικών κέντρων της Βόρειας Αμερικής, Δυτικής Ευρώπης και Ασίας. Στη συγκεκριμένη αγορά, έτσι τουλάχιστον όπως αυτή έχει λειτουργήσει ιστορικά, δεν υπάρχει ανταγωνισμός υπό την έννοια συνθηκών τέλειου ανταγωνισμού που παρατηρείται στις ναυλαγορά charter. Οι εταιρείες εδώ οργανώνονται σε καρτέλ που ονομάζονται κοινοπραξίες (conferences). Οι κοινοπραξίες εξυπηρετούν δεδομένα δρομολόγια, καθορίζουν συλλογικά το ναύλο για κάθε είδος εμπορεύματος στις διαδρομές. Δηλαδή, εδώ έχουμε ένα είδος μονοπωλίου (ή ολιγοπωλίου) όπου ο πωλητής ελέγχει κατά μεγάλο ποσοστό την αγορά. Σε αντίθεση με τη ναυλαγορά charter όπου η είσοδος στην αγορά είναι σχετικά ελεύθερη, η είσοδος στη ναυλαγορά liner έχει σημαντικά εμπόδια. Η τάση που επικρατεί τα τελευταία χρόνια είναι η φιλελευθεροποίηση και η αύξηση του ανταγωνισμού. Η διείσδυση ανεξάρτητων εταιρειών (εκτός κοινοπραξίας) στην αγορά ήταν και είναι ένα σημαντικό πρόβλημα, το οποίο δεν φαίνεται να απέρχεται, ιδίως με την τάση περισσότερης φιλελευθεροποίησης που υπάρχει. Στον αντίποδα του τελευταίου προβλήματος, υπάρχει τελευταία η τάση για περισσότερη συγκέντρωση, με τη σταδιακή συρρίκνωση μικρών εταιριών και την αύξηση του μεριδίου των μεγάλων, ενώ υπάρχουν συγχωνεύσεις ακόμα και σε επίπεδο μεγάλων εταιρειών, όπως στην περίπτωση της αγοράς της P&O Nedlloyd από την Maersk.

Το μεγαλύτερο ποσοστό του στόλου που δραστηριοποιείται στην αγορά liner απαρτίζεται από πλοία γενικού φορτίου, που μπορούν να μεταφέρουν πολλές χιλιάδες διαφορετικά εμπορεύματα σε κάθε ταξίδι, αλλά και από ειδικά πλοία, όπως containerships, φορτηγά αυτοκίνητα (RO-RO) και επιβατηγά. Η ταχύτητά τους είναι σχετικά υψηλή,περί τους 20 κόμβους, με τα containerships να μπορούν να πιάσουν τους 25, ενώ τα συμβόλαια αναφέρονται στη μεταφορά συγκεκριμένου εμπορεύματος σε συγκεκριμένο χρόνο από το ένα μέρος στο άλλο. Βασικό μέλημα είναι η ασφάλεια του φορτίου έναντι ζημιών και ο χρόνος παράδοσης.

Τα μεταφερόμενα εμπορεύματα είναι υψηλής ειδικής αξίας και σπάνια ομοιογενή (βιομηχανικά, γεωργικά, κρέατα, όχι χύδην αλλά συσκευασμένα σε «πακέτα»). Τα «μοναδοποιημένα φορτία», φορτία δηλαδή που μεταφέρονται μέσα σε εμπορευματοκιβώτια (containers) ή μέσα σε σε φορτηγά αυτοκίνητα (σε πλοία RO/RO) είναι τα πιο συχνά εμπορεύματα στην κατηγορία αυτή. Τέλος, παρόλο που το ποσοστό της ποσότητας των προϊόντων που μεταφέρονται μέσω της ναυλαγοράς liner είναι της τάξης του 25-30% της συνολικής ποσότητας μεταφερόμενων φορτίων μέσω θαλάσσης, η αξία τους φτάνει το 85% της συνολικής αξίας των μεταφερόμενων προϊόντων.

4.1.3 Πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων

Τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων αριθμούν πάνω από 50 χρόνια ιστορίας, πρωταγωνιστούν τις τελευταίες δεκαετίες στην παγκόσμια ναυτιλιακή σκηνή και όπως τονίσαμε και παραπάνω αποτελούν την πιο αντιπροσωπευτική περίπτωση οργάνωσης ναυλαγοράς liner. Διαχειρίζονται από μεγάλες ναυτιλιακές εταιρείες, εξυπηρετώντας λιμένες σε υψηλά βιομηχανοποιημένες περιοχές ανά τον κόσμο, αποτελώντας αναπόσταστο κομμάτι σε αυτό που ονομάζουμε συνδιασμένες μεταφορές. Στην ***Σχήμα 4.1*** φαίνονται τα κύρια δίκτυα διαδρομών containerships.



Σχήμα 4.1*: Κύρια εμπορικά δίκτυα πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (Source: Containerisation International and MDS Transmodal)*

Η διακίνηση των εμπορευματοκιβωτίων απαιτεί μεγάλες επενδύσεις κεφαλάιων, σε πλοία, εγκαταστάσεις και εξοπλισμό στους διάφορους σταθμούς, καθώς απαιτούνται ειδικά συστήματα διαχείρισης και μεταφοράς των εμπορευματοκιβωτίων στην ενδοχώρα. Έτσι, η ανάγκη επίτευξης μεγαλύτερων οικονομιών κλίμακας μέσω της χρήσης μεγαλύτερων πλοίων, αλλά και παροχής συχνότερων υπηρεσιών, ανάγκασε, στα μέσα της δεκαετίας του 1990, κυρίως μεσαίες εταιρείες που δραστηριοποιούνται σε αυτήν την αγορά να οργανώνονται σε σχήματα συνεργασίας(alliances,consortium). Οι συμφωνίες αυτές, ενσωματώνουν τις επιχειρησιακές πτυχές των υπηρεσιών του κάθε μέλους, αφήνοντας τις εμπορικές δραστηριότητες στα χέρια του κάθε συμμετέχοντος. Έτσι, οι συμμαχίες καλύπτουν κοινές λειτουργικές υπηρεσίες στα κύρια δίκτυα θαλασσίων μεταφορών, ναυλώσεις σκαφών, κοινούς τερματικούς σταθμούς, συγκέντρωση εμπορευματοκιβωτίων, τροφοδότηση και μεταφορά στην ενδοχώρα, όπου είναι δυνατόν. Ωστόσο, αν και υπάρχει συχνά πλήρης λειτουργική ενοποίηση, κάθε μέλος διατηρεί την εταιρική του ταυτότητα και την εκτελεστική διαχείριση του στόλου του, συμπεριλαμβανομένων

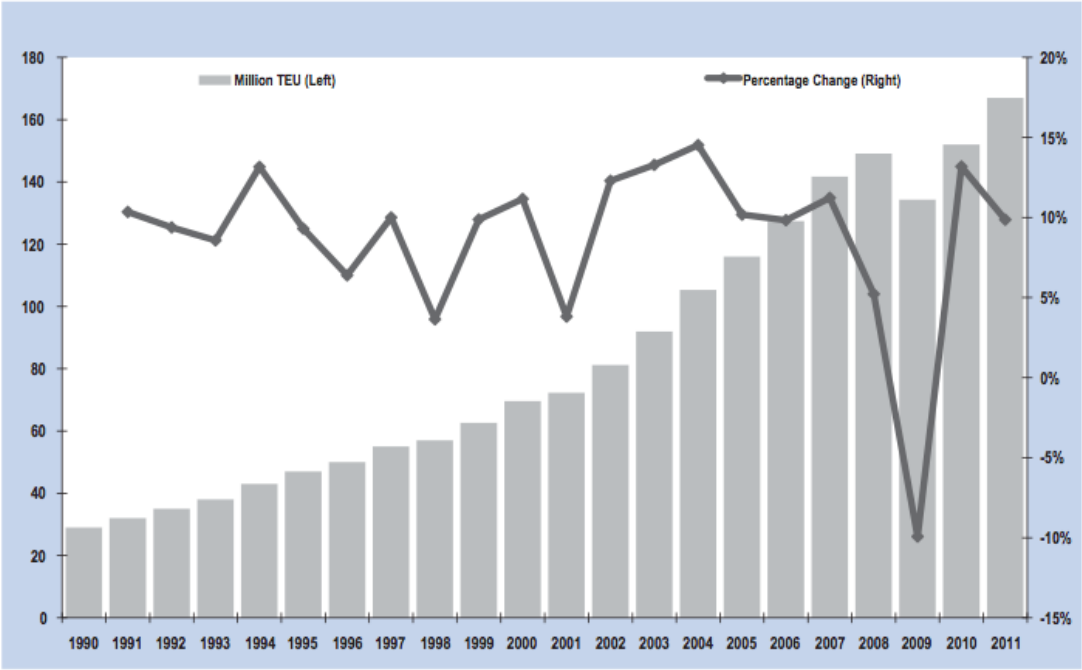
των πωλήσεων, του μάρκετινγκ, της τιμολόγησης, της φορτωτικής, της ιδιοκτησίας των πλοίων και της συντήρησης.

Τα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων μετρούνται σε TEUs (Twenty- Foot Equivalent Units) και είναι σχεδιασμένα για την αποκλειστική μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων, γι'αυτό και οι διαστάσεις τους είναι πολλαπλάσιες των διαστάσεων των εμπορευματοκιβωτίων. Κατηγοριοποιούνται σε γενιές ως προς την χωριτικότητα τους σε TEU. Οι κατηγορίες μεγεθών: είναι *small feeder* (μέχρι 1.000 TEU), *feeder* (1.001-2.000 TEU) και *feedermax* (2.001-3.000 TEU), που εκτελούν κοντινές συνήθως διαδρομές και φορτώνουν εμπορευματοκιβώτια από δευτερεύοντα λιμάνια μεταφέροντάς τα σε κεντρικούς τερματικούς σταθμούς για να φορτωθούν σε μεγαλύτερα πλοία. Συνήθως φέρουν γερανούς. *Panamax* (3.001 – 5.000), *Post panamax* (5.101–10,000) και *New panamax* (10.000–14.500 TEU), πλοία με μεταφορική ικανότητα μεγαλύτερη των 3.000 TEUs, που δρομολογούνται στα κύρια διηπειρωτικά δίκτυα. Η ονομασία τους προέρχεται από τα όρια πλάτους, μήκους και βυθίσματος που πρέπει να έχουν τα πλοία ώστε να περάσουν μέσα από την Διώρυγα του Παναμά, πράγμα πολύ σημαντικό, αφού επηρεάζει, ορίζοντας ξεκάθαρους περιορισμούς, την κατασκευή των πλοίων. Έτσι ιστορικά, ο όρος panamax αναφέρεται σε πλοίο που μπορεί να πλεύσει μέσω της διώρυγας ενώ post panamax σε πλοίο που υπερβαίνει αυτά τα όρια. Ωστόσο μετά τα σχέδια επέκτασης (Panama Canal expansion project) που θα ολοκληρωθούν το 2014 και τα new panamax θα είναι σε θέση πλεύσουν διαμέσου της διώρυγας. Τέλος, μπορούμε να αναφέρουμε σαν κατηγορία μεγέθους τα *Ultra Large Container Ships (ULCS)* (14.501 and higher), πλοία της εταιρείας *Maersk Line*, σαφώς μεγαλύτερα από τα new panamax.

Σήμερα τα μεγαλύτερα πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων είναι 7 αδελφά πλοία που ανήκουν στην σειρά *E class* της μεγαλύτερης διαχειρίστριας εταιρείας containerships *Maersk Line* μεταφορικής ικανότητας έως και 15.500 TEU, ενώ η ίδια εταιρεία έχει προαναγγείλει την ανάθεση κατασκευής 20 containerships με ονομασία σειράς *Triple-E class* που θα έχουν μεταφορική ικανότητα 18.000 TEU, ταχύτητα 23 knots και τα πρώτα από αυτά αναμένεται να παραδοθούν μέσα στο 2013.

Η ταχεία ανάπτυξη του εμπορίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων που παρατηρείται τα τελευταία 20 χρόνια (***Διάγραμμα 4.1***) είναι αποτέλεσμα συνδυασμού παραγόντων όπως η δημιουργία πλοίων αποκλειστικά για μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων, η κατασκεύη μεγαλύτερων πλοίων για την επίτευξη θετικών οικονομιών κλίμακας σε κόστη κεφαλαίου και λειτουργικά κόστη και η βελτίωση των εγκαταστάσεων στα λιμάνια. Μεταξύ 2010 και 2011 είχαμε αύξηση της μεσης μεταφορικής ικανότητας ανά πλοίο της τάξης του 5.5 %. Από τα πλοία που παραδόθηκαν το 2010, 29 από αυτά είχαν μεταφορική ικανότητα μεγαλύτερη από 10.000 TEU, συμπεριλαμβανομένουν 7 πλοίων με 14.000 TEU της ελβετικής MSC. Η μέση μεταφορική ικανότητα των συνόλου των νέων πλοίων για το 2010 ήταν 4.810 TEUs, μια αύξηση 20% από το 2009. Η συνολική μεταφορική ικανότητα δε, του στόλου των containerships παγκοσμίως ξεπέρασε τα 14 εκατομμύρια TEUs το 2011,

ενώ ο αριθμός των πλοίων έφτασε τα πλησιάζει τα 5000 όπως δείχνει ο συγκριτικός ***Πίνακας 4.1***.



Διάγραμμα 4.1*: Παγκόσμιο εμπόριο εμπορευματοκιβωτίων(TEUs και ετήσια ποσοστιαία αλλαγή), (Source: Drewry Shipping Consultants)*

World total	1987	1997	2007	2008	2009	2010	2011	Growth 2011/2010 (per cent)
Number of vessels	1 052	1 954	3 904	4 276	4 638	4 677	4 868	4.08
TEU capacity	1 215 215	3 089 682	9 436 377	10 760 173	12 142 444	12 824 648	14 081 957	9.80
Average vessel size (TEU)	1 155	1 581	2 417	2 516	2 618	2 742	2 893	5.50

Πίνακας 4.1*: Χρονική αύξηση του παγκόσμιου στόλου πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (Source: UNCTAD)*

Τέλος, όσον αφορά την συγκέντρωση του διατιθέμενου στόλου, η αγορά πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων παρουσιάζει φαινόμενα συγχώνευσης εταιρειών για τους παραπάνω λόγους που αναφέραμε. Επακόλουθο αυτού, είναι η συγκέντρωση που παρουσιάζει η αγορά, με τις 20 μεγαλύτερες, όπως φαίνεται στον ***Πίνακα 4.2,*** να κατέχουν περισσότερο από 75% του συνόλου της.

Alphaliner - Top 20 : Operated fleets as per 20 February 2012												
		Total			Owned		Chartered			Orderbook		
Rnk	Operator	TEU	Ships	Share	TEU	Ships	TEU	Ships	% Chart	TEU	Ships	% existing
1	APM-Maersk	2.573.841	669	16.1%	1.202.390	221	1.371.451	448	53.3%	501.654	44	19.5%
2	Mediterranean Shg Co	2.188.527	487	13.7%	1.003.027	204	1.185.500	283	54.2%	426.620	37	19.5%
3	CMA CGM Group	1.334.786	393	8.3%	500.943	93	833.843	300	62.5%	61.679	7	4.6%
4	Hapag-Lloyd	639.492	145	4.0%	290.409	62	349.083	83	54.6%	132.000	10	20.6%
5	COSCO Container L.	637.667	148	4.0%	348.841	96	288.826	52	45.3%	244.168	32	38.3%
6	APL	617.199	143	3.9%	180.693	43	436.506	100	70.7%	280.740	27	45.5%
7	Evergreen Line	603.358	163	3.8%	323.311	86	280.047	77	46.4%	308.000	35	51.0%
8	CSCL	518.489	143	3.2%	344.012	78	174.477	65	33.7%	145.748	18	28.1%
9	Hanjin Shipping	492.174	103	3.1%	220.895	37	271.279	66	55.1%	243.864	30	49.5%
10	MOL	441.426	99	2.8%	215.352	36	226.074	63	51.2%	104.015	10	23.6%
11	NYK Line	413.716	104	2.6%	308.892	58	104.824	46	25.3%	57.370	5	13.9%
12	Hamburg Süd Group	409.656	112	2.6%	196.410	41	213.246	71	52.1%	196.828	31	48.0%
13	OOCL	398.534	84	2.5%	292.956	48	105.578	36	26.5%	132.576	12	33.3%
14	CSAV Group	351.389	79	2.2%	48.178	10	303.211	69	86.3%	36.000	4	10.2%
15	K Line	346.042	79	2.2%	113.372	21	232.670	58	67.2%	36.160	4	10.4%
16	Yang Ming Marine Tr. Corp.	337.289	79	2.1%	203.361	47	133.928	32	39.7%	89.038	14	26.4%
17	Zim	320.809	90	2.0%	158.129	34	162.680	56	50.7%	153.216	13	47.8%
18	Hyundai M.M.	316.139	63	2.0%	100.646	17	215.493	46	68.2%	142.983	14	45.2%
19	PIL (Pacific Int. Line)	266.856	140	1.7%	172.127	96	94.729	44	35.5%	71.030	20	26.6%
20	UASC	262.072	57	1.6%	152.930	28	109.142	29	41.6%	80.820	6	30.8%

***Πίνακας 4.2**: Οι 20 μεγαλύτερες εταιρείες μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (Source: www. Alphaliner.com)*

4.2 ΓΕΝΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Σε αυτά που θα ακολουθήσουν, παρουσιάζεται το θεωρητικό και μαθηματικό πλαίσιο που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη ενός μοντέλου υπολογισμού του ετήσιου λειτουργικού κόστους μιας ναυτιλιακής εταιρείας που δραστηριοποιείται στην ναυλαγορά liner με πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (containerships), και εν συνεχεία του υπολογισμού των εκπομπών ρύπων CO_2, NO_x, SO_x από τα πλοία της. Η μεθοδολογία που περιγράφεται, βασίζεται στην καταγραφή και ανάλυση στοιχείων της ναυτιλιακής εταιρείας Neptune Orient Lines (NOL), και πιο συγκεκριμένα της θυγατρικής της, American President Lines (APL). Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική και αφορούν τις παραπάνω εταιρείες προέρχονται ως επί το πλείστον από τις ιστοσελίδες των εταιρειών. Κατά

την ανάπτυξη του συγκεκριμένου μοντέλου προσομοίωσης της λειτουργίας μιας ναυτιλιακής εταιρείας, η κυριότερη δυσκολία εντοπίζεται στην επίλυση του προβλήματος κατανομής των πλοίων του στόλου της εταιρείας (*fleet deployment*) στα θαλάσσια δίκτυα στα οποία αυτή δραστηριοποιείται. Το πρόβλημα της κατανομής των πλοίων αφορά στρατηγικές βέλτιστης δρομολόγησης των πλοίων στις θαλάσσιες γραμμές τις οποίες καλείται η εταιρεία να εξυπηρετήσει,καλύπτοντας ταυτόχρονα τη ζήτηση μεταφοράς φορτίου, με στόχο την ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους της.

Σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε διαφορετικές ταχύτητες πλεύσης για τα προσφερόμενα πλοία.Τα δρομολόγια είναι προκαθορισμένα και ένα ή περισσότερα πλοία μπορούν να χρησιμοποιούνται πολλές φορές σε κάθε δρομολόγιο στο υπό μελέτη χρονικό διάστημα. Δεν επιτρέπεται όμως ένα πλοίο που επιλέγεται για ένα δρομολόγιο, να αλλάζει δρομολόγια κατά την διάρκεια του υπο μελέτη χρονικού διαστήματος. Κάθε δρομολόγιο, ορίζεται από έναν αρχικό και έναν τελικό λιμένα. Κάθε κυκλικό ταξίδι (round trip) σε αυτό το δρομολόγιο, είναι μια ακολουθία εναλλαγών λιμένων, ξεκινώντας από τον λιμένα στον οποίο το πλοίο φορτώνει το πρώτο φορτίο του, και καταλήγωντας στον λιμένα στον οποίο ξεφορτώνει το τελευταίο φορτίο του και γίνεται ξανά άδειο. Είναι λοιπόν προφανές, ότι ένα ταξίδι (voyage), περιλαμβάνει πολλούς λιμένες φορτοεκφόρτωσης.

Ωστόσο, αυτό που δεν αναφέρεται συχνά στην βιβλιογραφία, είναι ότι η λειτουργία ενός τέτοιου μοντέλου, καθορίζεται σε μεγάλο βαθμο από την περίπτωση που κάθε φορά εξετάζεται, από τα διαθέσιμα δεδομένα και τον τρόπο με τον οποίο το εκάστοτε μοντέλο κόστους πρόκειται να χρησιμοποιηθεί, για να λάβει στη συνέχεια χώρα η διαδικασία βελτιστοποίησης. Κατά την διαδικασία συγκέντρωσης πληροφοριών και μελέτης για την προσέγγιση του πραγματικού προβλήματος, γίνεται άμεσα φανερό ότι το πραγματικό πρόβλημα περιλαμβάνει ένα μεγάλο πλήθος παραμέτρων και περιορισμών, μερικοί από του οποίους είναι ιδιαίτερα δύσκολο έως αδύνατο να συμπεριληφθούν στο υπό κατασκευή μαθηματικό μοντέλο. Για παράδειγμα, σε περιπτώσεις ύφεσης της παγκόσμιας οικονομίας δεν είναι καθόλου ξεκάθαρη και προδιαγεγραμμένη η πολιτική που θα ακολουθήσει κάθε εταιρεία προκειμένου να ανταπεξέλθει στα νέα δεδομένα που παρουσιάζονται. Η τιμολόγηση των υπηρεσιών, η ναύλωση πλοίων άλλων εταιρειών, η επαναδιαμόρφωση των παγκόσμιων δικτύων θαλασσίων μεταφορών και διάφορες άλλες στρατηγικές επιλογές μπορεί να είναι ζητήματα τα οποία κανένα μοντέλο δεν μπορεί να ενσωματώσει και κανείς μελετητής να συμπεριλάβει κατά τον αρχικό σχεδιασμό.

Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψη την παραπάνω ανάλυση και αξιοποιώντας τα δεδομένα και τις πληροφορίες που έχουν συλλεχθεί, η ανάπτυξη του μοντέλου που έπεται, επικεντρώνεται στις ροές φορτίου από την Ανατολική Ασία προς την Βόρεια Αμερική, αναπτύσσοντας όμως ένα γενικό μοντέλο κόστους λειτουργίας της εταιρείας, το οποίο είναι δυνατόν να εφαρμοστεί και στις άλλες γραμμές δραστηριοποίησης της εταιρείας, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους του

συνόλου του συστήματος της APL, το οποίο αποτελείται από πληθώρα υποσυστημάτων, κύριων (main) και βοηθητικών (feeder) γραμμών.

4.3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

4.3.1 Γενική περιγραφή

Στην παρούσα διπλωματική, το μοντέλο που αναπτύσσεται, περιλαμβάνει μια κύρια γραμμή που λειτουργεί στην περιοχή του Ειρηνικού Ωκεανού (Transpacific Line – PCE Line), όπου και διακινείται ο κύριος όγκος των μεταφερόμενων φορτίων, και δύο βοηθητικές ενδοασιατικές γραμμές (Feeder1 - SKX Line, Feeder 2 – NKX Line), που συνδέουν δευτερεύοντες λιμένες της Ασίας, τροφοδοτώντας την κύρια γραμμη.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης που ακολουθείται είναι ευρετική και αποτελείται από 3 κύρια βήματα:

- *Βήμα 1. Εύρεση εναλλακτικών εφικτών σεναρίων δικτύου:* Πραγματοποιείται ανάλυση των ροών φορτίου, της τρέχουσας κατάστασης του οικονομικού περιβάλλοντος, των μελλοντικών τάσεων της αγοράς, της χωρητικότητας των πλοίων του στόλου και αξιολογούνται διάφορα εφικτά σενάρια δρομολόγησης πλοίων. Ο στόχος είναι να προκύψει ένα σύνολο πιθανών εναλλακτικών λύσεων, ικανών να καλύψουν τις απαιτήσεις της ζήτησης μεταφοράς φορτίου και να ικανοποιήσουν τους περιορισμούς.
- *Βήμα 2. Βελτιστοποίηση σεναρίων δικτύου χρησιμοποιώντας Γενετικούς Αλγορίθμους:* Για την επίλυση του προβλήματος ελαχιστοποίησης της συνάρτησης κόστους, χρησιμοποιούμε Γενετικούς Αλγορίθμους, οπότε προκύπτει μια εφικτή βέλτιστη λύση για κάθε σενάριο.
- *Βήμα 3. Εύρεση της βέλτιστης λύσης:* Συγκρίνοντας την καλύτερη λύση κάθε σεναρίου, καταλήγουμε σε μια ευρύτερη – γενική βέλτιστη λύση για το σύστημα μεταφορών που εξετάζουμε.

Μετά την αξιολόγηση των εφικτών σεναρίων για το υπο εξέταση σύστημα μεταφορών (1° βήμα), αυτά υποδιαιρούνται σε υποσυστήματα, καθένα από τα οποία αποτελεί μία εμπορική γραμμή:

- Υποσύστημα 1: Γραμμή 1
- Υποσύστημα 2: Γραμμή 2
- ....
- Υποσύστημα k: Γραμμή k

Οι γραμμές 1,2,..,k αντιπροσωπεύουν τις κύριες και βοηθητικές γραμμές του δικτύου λειτουργίας της εταιρείας και κάθε μία από αυτές εξετάζεται ξεχωριστά. Η προσέγγιση με το πραγματικό πρόβλημα, επιτυγχάνεται με χρήση κατάλληλων ποσοτικών δεδομένων, τα οποία χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου του μοντέλου (π.χ ροές φορτίου,πίνακες Προέλευσης-Προορισμού(OD tables),χρονική ρύθμιση δρομολογίων κλπ.)

Η γενική ιδέα για την ανάπτυξη του μοντέλου κόστους, είναι να παραχθούν συναρτήσεις κόστους για κάθε υποσύστημα, οι οποίες να αποδίδουν τις δαπάνες που προκύπτουν από την λειτουργία των πλοίων της εταιρείας στην εκάστοτε γραμμή, υπολογίζοντας έτσι το συνολικό κόστος από το ακόλουθο σύστημα εξισώσεων:

Συνολικό Κόστος Συστήματος = Κόστος Υποσυστήματος 1 + Κόστος Υποσυστήματος 2+....+ Κόστος Υποσυστήματος k

4.3.2 Μεταβλητές εισόδου

Ο καθορισμός των μεταβλητών εισόδου για το μοντέλο έχει ως εξής:

- $D_p^{out,k}$: Το μεφερόμενο φορτίο σε TEU που ξεφορτώνεται σε ένα λιμένα p της γραμής k *(TEU/ time unit).*

- $D_p^{in,k}$: Το μεφερόμενο φορτίο σε TEU που φορτώνεται σε ένα λιμένα p της γραμής k *(TEU/ time unit).*

- $Capacity_j$: Η χωρητικότητα ενός πλοίου j εκφρασμένη σε TEU. Είναι η μεταφορική ικανότητα σε φορτίο για κάθε πλοίο. Η τιμή αυτή πρέπει να υπερβαίνει την ελάχιστη απαιτούμενη μεταφορική ικανότητα φορτίου για όλα τα πλοία που κατανέμονται σε μιά γραμμή.

- F : Η συχνότητα του συστήματος. Η τιμή αυτή εκφράζει πόσο συχνά εκτελείται ένα κυκλικό ταξίδι. Μπορεί να μετατραπεί και σε περιοδικότητα προσφερόμενων υπηρσεσιών , που χρησιμοποιείται εκτενώς στο μοντέλο κόστους, εκφράζοντας την ίδια έννοια σε μέρες, π.χ μία γραμμή μπορεί να έχει πλοία τα οποία επισκέπτονται κάθε λιμένα 5,6,7 κλπ μέρες.

- C_f : Το κόστος φορτοεκφόρτωσης σε κάθε λιμάνι. Για λόγους απλοποίησης δεχόμαστε ότι αυτή η τιμή είναι ίδια για όλους τους λιμένες *($/TEU).*

- C_{kj}^{ct}: Το σταθερό κόστος ανά κυκλικό ταξίδι ενός κατανεμημένου πλοίου j (ιδιόκτητο ή ναυλωμένο) στην γραμμή k (λιμενικά τέλη, τέλη διέλευσης από διώρυγες κλπ). *($)*

- TCE_j: Το κόστος ναύλωσης για κάθε ναυλωμένο πλοίο j. *($/ time unit)*

- CV_j^v: Το μεταβλητό κόστος για ένα επιλεγμένο πλοίο j, το οποίο είναι ανεξάρτητο της ταχύτητας πλεύσης του. Σχετίζεται με το κόστος πληρώματος, το κόστος συντήρησης, το κόστος ασφάλειας και το κόστος κεφαλαίου για τα ιδιόκτητα πλοία. *($/time unit)*

- K_j: Η κατανάλωση καυσίμου ένος πλοίου j (ιδιόκτητου ή ναυλωμένου) στη θάλασσα. Η κατανάλωση καυσίμου έχει υποτεθεί ότι είναι συνάρτηση της μορφής $K_j U^3$, στην περιοχή λειτουργίας γύρω από την ταχύτητα υπηρεσίας σύμφωνα με τους νόμους της υδροδυναμικής. Αυτή η κυβική σχέση δεν ισχύει απαραιτήτως, αφού πρόσφατες μελέτες εμφανίζουν μεγαλύτερους εκθέτες σε κάποιες περιπτώσεις.Η χρήση διαφορετικής δύναμης στον εκθέτη, είναι δυνατόν να εφαρμοστεί στο παρόν μοντέλο. *(tons/ day)*

- B_j: Η κατανάλωση καυσίμου ένος πλοίου j (ιδιόκτητου ή ναυλωμένου) στο λιμένα (ποσότητα καυσίμου/ μονάδα χρόνου). Εκφράζεται σε *(tons/day)*

- P: Η σταθερά κόστος καυσίμου ($/ ποσότητα καυσίμου). Εκφράζεται σε *($/ton)*

- R : Η αναλογία φορτοεκφόρτωσης πλοίων στους λιμένες. *(TEU/ time unit)*

- L_k : Το μήκος δρομολογίου της γραμμής k. Εκφράζεται σε ναυτικά μίλια. *(NM)*

- W : Το πλήθος λιμένων στην γραμμή k.

- Z : Το πλήθος υποψήφιων ιδιόκτητων πλοίων του στόλου.

- Y : Το πλήθος υποψήφιων ναυλωμένων πλοίων του στόλου.

4.3.3 Μεταβλητές απόφασης

Οι μεταβλητές απόφασης εκφράζουν ουσιαστικά τους αγνώστους του προβλήματος και είναι οι μεταβλητές που ελέγχει ο αποφασίζων, ο αρχικός καθορισμός των τιμών τους γίνεται δηλαδή από τον χρήστη του μοντέλου.Έτσι, η εύρεση μίας αρχικά καλής εφικτής λύσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από αυτόν. Η διαδικασία βελτιστοποίησης ουσιαστικά στοχεύει στην εύρεση εκείνων των τιμών για τις μεταβλητές απόφασης οι οποίες βελτιστοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση.

Οι μεταβλητές απόφασης του προβλήματος είναι:

- U_k: Η ταχύτητα λειτουργίας ενός πλοίου στην γραμμή k. Εκφράζεται σε κόμβους. (knots)
- X_{ij}^{o} : Ψευδομεταβλητή (dummy variable){0,1}, οι οποία λαμβάνει τιμές 0 ή 1, ανάλογα με τη χρησιμοποίηση ή όχι, ενός ιδιόκτητου πλοίου j σε μία γραμμή k.
- X_{ij}^{c}: Ψευδομεταβλητή (dummy variable){0,1}, οι οποία λαμβάνει τιμές 0 ή 1, ανάλογα με τη χρησιμοποίηση ή όχι, ενός ναυλωμένου πλοίου j σε μία γραμμή k.

- $T_j^{k,idle}$: Ο χρόνος αδράνειας (idle time) για ένα πλοίο μεταξύ δύο διαδοχικών θαλάσσιων ταξιδιών στην γραμμή k. Υποθέτουμε ότι είναι ίδιος για όλα τα πλοία που κατανέμονται σε μία γραμμή, σαν προσέγγιση στην αρχή των υπολογισμών, στην συνέχεια όμως μπορεί να διαφοροποιηθεί από πλοίο σε πλοίο, προκειμένου να επιτευχθεί ίδια διάρκεια κυκλικού ταξιδιού για όλα τα πλοία. Εκφράζεται σε ώρες (hours).

4.3.4 Αντικειμενική συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση αποτελεί τη μαθηματική σχέση των μεταβλητών του μοντέλου που εκφράζει το κριτήριο της βελτιστοποίησης. Στην περίπτωση του μοντέλου μας, στόχος είναι η ελαχιστοποίησή της, δηλαδή η ελαχιστοποίηση του ετήσιου λειτουργικού κόστους.

Για τον καθορισμό της αντικειμενικής συνάρτησης, οι ακόλουθοι δείκτες κόστους είναι σημαντικοί για το υπό κατασκευή μοντέλο:

- Το κόστος κυκλικού ταξιδιού για κάθε πλοίο που δραστηριοποιείται σε κάθε γραμμή,
- Το συνολικό ετήσιο κόστος κάθε γραμμής,
- Το συνολικό ετήσιο κόστος όλων των γραμμών.

Επίσης σημαντικά και τα επιμέρους κόστη:

- Τέλη ελλιμενισμού και τέλη διέλευσης διωρύγων
- Κόστος καυσίμου στο λιμάνι ή κατά τη διάρκεια του ταξιδιού στη θάλασσα
- Διάφορες δαπάνες για το πλοίο σε ετήσια βάση
    - Κόστος συντήρησης
    - Κόστος πληρώματος
    - Κόστος ναύλωσης για ναυλωμένα πλοία
    - Ετήσιο κόστος για ιδιόκτητα πλοία, βάσει της αξίας του πλοίου, αποσβέσεις και κόστος κεφαλαίου της εταιρείας (εξαρτάται από το κόστος ευκαιρίας και το κόστος δανεισμού)

Προκειμένου να υπολογίσουμε τα παραπάνω επιμέρους κόστη, πρέπει να υπολογιστούν με ακρίβεια διάφορες συνιστώσες του χρόνου:

- *Χρόνος αδράνειας σε κάθε γραμμή* : μεταβλητές απόφασης που χρησιμοποιούνται για να διευκολύνουν οποιουσδήποτε χρονικούς περιορισμούς απαιτούνται στο μοντέλο
- *Χρόνος ταξιδιού σε κάθε γραμμή* : συνάρτηση της ταχύτητας του πλοίου (μεταβλητή απόφασης) και του μήκους της διαδρομής
- *Χρόνος φορτοεκφόρτωσης των πλοίων σε κάθε λιμένα για κάθε γραμμή*
- *Χρόνος αγκυροβόλησης και απομάκρυνσης από λιμένα (mooring and unmooring time)*

Με βάση τα παραπάνω, η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος ελαχιστοποίησης, υπολογίζεται ως εξής:

C_k = {λιμενικά κόστη} + {κόστος πλοίων}

C_k = {κόστος φορτοεκφότωσης} + {κόστος ιδιόκτητων πλοίων}

+ { κόστος ναυλωμένων πλοίων}

C_k = {κόστος φορτοεκφότωσης} + {μεταβλητό κόστος ιδιόκτητων πλοίων}

+ {σταθερό κόστος ιδιόκτητων πλοίων} + {κόστος ναύλωσης}

+ {μεταβλητό κόστος ναυλωμένων πλοίων}

+ {σταθερό κόστος ναυλωμένων πλοίων}

C_k = {κόστος φορτοεκφότωσης} + {διάφορα μεταβλητά κόστη ιδιόκτητων πλοίων}

+ {κατανάλωση ιδιόκτητων πλοίων στην θάλασσα}

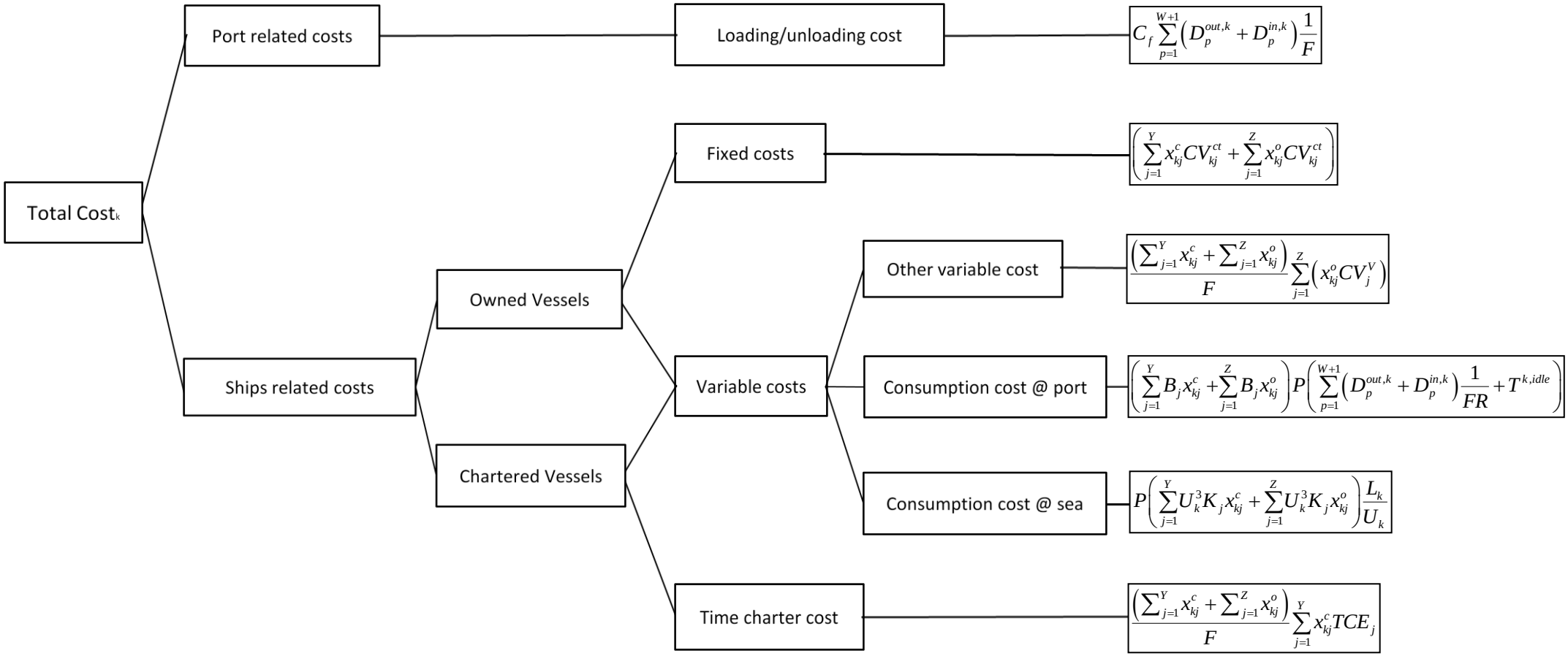
+ {κατανάλωση ιδιόκτητων πλοίων στον λιμένα}

+ {σταθερό κόστος ναυλωμένων πλοίων} + {κόστος ναύλωσης}

+ {κατανάλωση ναυλωμένων πλοίων στην θάλασσα}

+ {κατανάλωση ναυλωμένων πλοίων στον λιμένα} + {σταθερό κόστος ναυλωμένων πλοίων}

Το διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζει σχηματικά την ανάλυση στις διάφορες συνιστώσες του κόστους.



Διάγραμμα 4.2: *Συνιστώσες συνολικού κόστους μοντέλου*

Έτσι, η εξίσωση κόστους για το υποσύστημα k είναι η εξής:

$$C_k = C_f \sum_{p=1}^{W+1} (D_p^{out,k} + D_p^{in,k}) \frac{1}{F} + \left(\sum_{j=1}^{Y} x_{kj}^c CV_{kj}^{ct} + \sum_{j=1}^{Z} x_{kj}^o CV_{kj}^{ct} \right)$$

$$+ \frac{\left(\sum_{j=1}^{Y} x_{kj}^c + \sum_{j=1}^{Z} x_{kj}^o \right)}{F} \sum_{j=1}^{Z} \left(x_{kj}^o CV_j^V \right)$$

$$+ \left(\sum_{j=1}^{Y} B_j x_{kj}^c + \sum_{j=1}^{Z} B_j x_{kj}^o \right) P \left(\sum_{p=1}^{W+1} \left(D_p^{out,k} + D_p^{in,k} \right) \frac{1}{FR} + T^{k,idle} \right)$$

$$+ P \left(\sum_{j=1}^{Y} U_k^3 K_j x_{kj}^c + \sum_{j=1}^{Z} U_k^3 K_j x_{kj}^o \right) \frac{L_k}{U_k}$$

$$+ \frac{\left(\sum_{j=1}^{Y} x_{kj}^c + \sum_{j=1}^{Z} x_{kj}^o \right)}{F} \sum_{j=1}^{Y} x_{kj}^c TCE_j$$

Η συνολική συνάρτηση κόστους, προκύπτει από την πρόσθεση όλων των υποσυστημάτων της συνάρτησης κόστους. Αυτή θα είναι και η τελική συνάρτηση κατά την διαδικασία ελαχιστοποίησης. Αξίζει να σημειωθεί, ότι στην παραπάνω μαθηματική εξίσωση υπολογιμού του συνολικού κόστους, δεν έχει εφαρμοστεί καμία παράμετρος «καλής φήμης» (*goodwill function*), ως ποσοτικοποιημένη επίδραση της ποιότητας υπηρεσιών στη συνάρτηση του συνολικού κόστους.Είναι άλλωστε πιθανό, ότι η εκτέλεση της διαδικασίας βελτιστοποίησης από την πλευρά του διαχειριστή του πλοίου, μπορεί να οδηγήσει σε υποβάθμιση των παρεχόμενων υπηρεσιών (συχνότητα υπηρεσιών, αξιοπιστία, διάρκεια ταξιδιού κ.α), με σκοπό την επίτευξη οικονομιών κλίμακας για την διατήρηση του λειτουργικού κόστους της εταιρείας σε χαμηλά επίπεδα. Ο υπολογισμος τέτοιου είδους παραμέτρων, αποτελεί σύνθετο πρόβλημα αφού απαιτεί ανάλυση και έρευνα αγοράς. Το επόμενο βήμα θα ήταν η ανάπτυξη και ο υπολογιμός συναρτήσεων χρησιμότητας για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, με σκοπό την λογιστική περιγραφή της ποιόητας των υπηρεσιών, κάτι που ωστόσο ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας μελέτης.

4.3.5 Περιορισμοί βελτιστοποίησης

Για να έχουμε εφικτές λύσεις, οι μεταβλητές απόφασης του συστήματος πρέπει να συμμορφώνονται σε ορισμένους περιορισμούς. Αυτοί είναι:

- $$\frac{1}{F_k} = \frac{L_k}{U} + \sum_{p=1}^{W+1}\left(D_p^{out,k} + D_p^{in,k}\right)\frac{1}{FR} + T^{k,idle}$$

  Ο χρόνος που έχει παρέλθει μεταξύ δύο διαδοχικών επισκέψεων των πλοίων σε έναν λιμένα. Απαιτούμε όλα τα πλοία να έχουν την ίδια περιοδικότητα στα κυκλικά τους ταξίδια.

- $F_1 = F_2 = ... = F_k$. Κοινή συχνότητα σε κάθε γραμμή.Θεωρούμε μια κοινή συχνότητα για όλες τις γραμμές (=7). Αυτή η συχνότητα μπορεί να τεθεί a priori, αποτελώντας σταθερά του συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι οι χρήστες καθορίζουν την τιμή της συχνότητας του συστήματος, ανάλογα με τις ανάγκες της εταιρείας. Μπορεί επίσης να είναι και αντικείμενο της βελτιστοποίησης, με την προϋπόθεση να κυμαίνεται πάντα μέσα σε προκαθορισμένα όρια. Έπιπροσθέτως, κατά τη διάρκεια της βελτιστοποίησης, η συχνότητα μπορεί να παίρνει τιμές διαφορετικές απο αυτή που θεωρούμε σταθερά τους συστήματος, όμως η απόκλιση που θα προκύπτει πρέπει να κυμαίνεται εντός των επιτρεπόμενων ορίων που τίθενται από τον χρήστη. Μπορούμε προαιρετικά, να ορίσουμε και μία λειτουργία-«συνάρτηση penalty», ώστε αυτή η απόκλιση της πραγματικής συχνότητας γραμμής από την επιθυμητή συχνότητα γραμμής, να μεταφράζεται σε οικονομική απώλεια για την εταιρεία. Αυτή η «συνάρτηση penalty» (η οποία είναι μια θεωρητική συνιστώσα του κόστους) θα συνυπολογίζεται στο ετήσιο συνολικό κόστος του συστήματος. Με αυτόν τον τρόπο, το μοντέλο του κόστους καθίσταται περισσόρερο ευέλικτο στις διαφορετικές εκδοχές της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

- $$Capacity_y > CummulativeTEUonboard_k^{U,F} = MAX_{b=1}^{w+1}\left\{\sum_{j=b}\left(D_j^{in,k} - D_j^{out,k}\right)\right\}$$

  Η μεταφορική ικανότητα κάθε πλοίου y που κατανέμεται στη γραμμή k με πλήθος λιμένων w, πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το μέγιστο συσσωρευμένο φορτίο, το οποίο μεταφέρεται στο κυκλικό δρομολόγιο της γραμμής k, για δεδομένη ταχύτητα U και συχνότητα συστήματος F. Το συσσωρευμένο φορτίο σε κάθε λιμάνι που πρέπει να φορτωθεί και να μεταφερθεί από τα πλοία που δραστηριοποιούνται σε αυτή τη γραμμή, εξαρτάται από την περιοδικότητα της παροχής της υπηρεσίας. Επομένως, κάθε πλοίο που λειτουργεί στη γραμμή, πρέπει να έχει επαρκή μεταφορική ικανότητα, ώστε να μπορεί να δεχτεί όλα τα εμπορευματοκιβώτια που έχουν συσσωρευθεί στον λιμένα, για δεδομένη συχνότητα, που έχει προκαθοριστεί στο μοντέλο κόστους. Υποθέτουμε ότι ο ρυθμός άφιξης των εμπορευματοκιβωτίων τα οποία πρέπει να μεταφερθούν είναι σταθερός, έτσι ώστε όσο μεγαλύτερη είναι η περιοδικότητα των δρομολογίων, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ποσότητα φορτίου που συγκεντρώνεται προς μεταφορά. Καθορίζουμε μία ελάχιστη απαιτούμενη μεταφορική ικανότητα των πλοίων επεξεργαζόμενοι τον πίνακα Προέλευσης – Προορισμού (Origin-Destination table) της κυκλικής διαδρομής της εν λόγω γραμμής. Υπολογίζουμε πόσο φορτίο έχει

συσσωρευθεί επί του πλοίου για μία δεδομένη περιοδικότητα σε κάθε προορισμό, προτού αυτό αναχωρήσει πάλι και έτσι το υψηλότερο επίπεδο συσσώρευσης καθορίζει την ελάχιστη απαιτούμενη μεταφορική ικανότητα των πλοίων. Έτσι, απαιτούμε ότι το σύνολο του συσσωρευμένου φορτίου θα φορτωθεί στο πλοίο. Αυτό σημαίνει ότι αποκλείουμε την περίπτωση ένα μεγαλύτερο πλοίο να πάρει μέρος του φορτίου που δεν έχει φορτωθεί από ένα μικρότερο πλοίο που προηγήθηκε, αφού αυτό θα σήμαινε ενίοτε μεγαλύτερους χρόνους αναμονής και θα συνέβαινε αν κατανέμαμε πλοία με σημαντικά διαφορετική μεταφορική ικανότητα στην ίδια γραμμή. Παρ' όλα αυτά, η προϋπόθεση αυτή μπορεί να καμφθεί, αν επιτρέψουμε μεταβλητούς χρόνους αναμονής στους λιμένες και προσαρμόσουμε εντός της ίδιας γραμμής, την αλληλουχία των πλοίων που επισκέπτονται κάθε λιμένα σύμφωνα με την μεταφορική τους ικανότητα.

- Ο αριθμός των πλοίων συγκεκριμένου τύπου που κατανέμονται σε όλες τις γραμμές, δεν πρέπει να υπερβαίνει τον αριθμό των διαθέσιμων πλοίων αυτού του τύπου. Στην πράξη, για την ανάπτυξη του μοντέλου κόστους, οι ψευδομεταβλητές για την κατανομή των πλοίων σε μία γραμμή μπορούν να πάρουν ακέραιες τιμές (όχι μόνο 0 ή 1), με σκοπό την μείωση της πολυπλοκότητας του προβλήματος.

- Η ταχύτητα του ταξιδιού σε κάθε γραμμή πρέπει να είναι ίδια για κάθε πλοίο που κατανέμεται σε αυτήν, ώστε να μην παρατηρείται καμία προσπέραση.

- Η ταχύτητα του ταξιδιού σε κάθε γραμμή για κάθε κατανεμημένο σε αυτήν πλοίο, δεν πρέπει να υπερβαίνει την ταχύτητα που μπορεί το κάθε πλοίο να αναπτύξει.

4.4 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

Το υπό ανάπτυξη μοντέλο ετήσιου κόστους λειτουργίας μιας ναυτιλιακής εταιρείας είναι ένα πολύπλοκο μαθηματικό μοντέλο με χαρακτηριστικά που περιλαμβάνουν:

- ***Μη γραμμικούς όρους:*** δευτέρου και τρίτου βαθμού πολυώνυμα, εξαιτίας των μη γραμμικών ιδιοτήτων στη σχέση μεταξύ της ταχύτητας του πλοίου και της κατανάλωσης καυσίμου, σε συνδυασμό με τις ψευτομεταβλητές για την δραστηριοποίηση ενός πλοίου συγκεκριμένου τύπου σε μία γραμμή.

- ***Μεταβλητές απόφασης στους παρονομαστές***, π.χ μεταβλητές ταχύτητας και χρόνοι αδράνειας για τον υπολογισμό της διάρκειας των κυκλικών ταξιδιών ετησίως.

- ***Ασυνεχείς όρους***, εξαιτίας των ακέραιων περιορισμών των μεταβλητών για την δραστηριοποίηση ενός πλοίου συγκεκριμένου τύπου σε μία γραμμή.

Για να υπολογισθεί μια εφικτή λύση,πλήρως συμβατή με τους περιορισμούς του μαθηματικού μοντέλου, πρέπει

- Να ορίσουμε αρκετά πλοία στις ψευδομεταβλητές, προκειμένου να καλυφθούν οι ετήσιες ανάγκες ροής φορτίου, η απαιτούμενη συχνότητα υπηρεσιών του συστήματος, οι περιορισμοί μεταφορικής ικανότητας των πλοίων. Όπως προαναφέρθηκε, οι ψευδομεταβλητές μπορούν να πάρουν ακέραιες τιμές μέχρι ένα όριο που ορίζει ο χρήστης.

- Να ρυθμίσουμε τον χρόνο αδράνειας (idle time) σε κάθε γραμμή. Αν υπάρχουν διαφορές μεταξύ των χρόνων για διαφορετικούς τύπων πλοίων, πρέπει να ορίσουμε διαφορετικούς χρόνους μεταξύ των πλοίων διαφορετικών τύπων τα οποία δραστηριοποιούνται στην ίδια γραμμή, με σκοπό να επιτύχουμε την απαιτούμενη συχνότητα υπηρεσιών σε κάθε γραμμή. Κατά την εκτέλεση της διαδικασίας βελτιστοποίησης, ο χρόνος αδράνειας (idle time) σε κάθε γραμμή ανά κυκλικό ταξίδι δεν μπορεί να υπερβαίνει ένα όριο που ορίζει ο χρήστης.(Όπως θα δούμε στην συνέχεια, ο χρόνος αδράνειας παύει να αποτελεί μεταβλητή απόφασης του συστήματος μας και λαμβάνεται εκ παραδοχής ίσος με μηδέν, για λόγους που εξηγούνται αναλυτικά).

- Να ρυθμίσουμε την ταχύτητα των πλοίων για όλες τις γραμμές και για όλους τους τύπους αναλογικά. Για την εκτέλεση της διαδικασίας βελτιστοποίησης, η ταχύτητα πλεύσης των πλοίων σε κάθε γραμμή κυμαίνεται μεταξύ του εύρους 11 έως 24 κόμβων.

Τα παραπάνω αποτελούν όπως ήδη έχουμε πεί τις μεταβλητές απόφασης του μοντέλου.Στο ***Κεφάλαιο 6*** γίνεται περιγραφή της διαδικασίας βελτιστοποίησης, και αναφέρονται αναλυτικά οι αριθμητικοί περιορισμοί που χρησιμοποιήθηκαν.

Η εύρεση μιας αρχικής εφικτής λύσης είναι ένα απαραίτητο βήμα για να μπορέσει να ξεκινήσει η διαδικασία βελτιστοποίησης. Μια επιλογή είναι να ξεκινήσει η διαδικασία, με διάφορες εναλλακτικές αρχικές εφικτές λύσεις, καθώς με αυτό τον τρόπο η διαδικασία βελτιστοποίησης οδηγείται στην εξέταση διαφόρων εναλλακτικών κατευθύνσεων και σεναρίων.

Υπάρχουν ορισμένοι λογικοί ευρετικοί κανόνες κατά την αναζήτηση μιας αρχικής εφικτής λύσης, που προκύπτουν από την εμπειρία του χρήστη:

- Αρχίζουμε με την εξάντληση όλων των διαθέσιμων υποψήφιων πλοίων, ξεκινώντας από εκείνα που παρουσιάζουν χαμηλότερο ετήσιο συνολικό κόστος (διαιρούμενο με την μεταφορική ικανότητα του πλοίου). Με άλλα λόγια, επιλέγουμε τα πλοία με τον μικρότερο λόγο κόστους προς μεταφορική

ικανότητα, για την περίπτωση τόσο των ναυλωμένων όσο και των ιδιόκτητων πλοίων.

- Ειδικότερα, χρησιμοποιούμε ενεργειακά αποδοτικότερα πλοία, βάσει των στοιχείων που έχουμε στην διάθεση μας, αφού έτσι περιορίζεται το επίπεδο του κόστους καυσίμων και κατ'επέκταση το συνολικό κόστος.

- Στην περίπτωση χαμηλής ταχύτητας υπηρεσίας για τα πλοία,πρέπει να σημειώσουμε ότι με αυτόν τον τρόπο περιορίζουμε τον αριθμό των κυκλικών ταξιδιών τον οποίο μπορεί ένα πλοίο να εκτελέσει ετησίως, και πιθανόν να χρειαστεί να δρομολογήσουμε περισσότερα πλοία στην γραμμή, προκειμένου να διατηρήσουμε την απαιτούμενη συχνότητα εκτέλεσης των δρομολογίων. Από την άλλη πλευρά όμως, με αυτό τον τρόπο συγκρατούμε την κατανάλωση καυσίμου (και κατα συνέπεια περιορίζουμε τις εκπομπές ρύπων), μια πρακτική, η οποία και στην πραγματικότητα εφαρμόζεται από τις περισσότερες εταιρείες, ιδιαίτερα μάλιστα σε περιόδους έντονης οικονομικής ύφεσης.

4.5 ΠΙΝΑΚΕΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ ΠΡΟΟΡΙΣΜΟΥ

Γενικότερα, το θέμα της συμφόρησης και της βέλτιστης εξυπηρέτησης των πλοίων στα λιμάνια είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι ναυτιλιακές εταιρείες. Τα περισσότερα προβλήματα που σχετίζονται με τις μεταφορές είναι περίπλοκα. Οι Πίνακες Προέλευσης-Προορισμού αποτελούν εργαλείο λήψης δεδομένων, σημαντικό κομμάτι του επιχειρησιακού πλάνου και προϊόν έρευνας, απαραίτητο για την κατανόηση της σχέσης προσφοράς και ζήτησης πριν από την υλοποίηση οποιασδήποτε στρατηγικής. Επίσης συνεισφέρουν σημαντικά, στην βελτιστοποίηση του δικτύου γραμμών.

Ένας πίνακας Προέλευσης-Προορισμού (*Origin-Destination table- O/D table*) αποτελεί μια δυσδιάστατη μαθηματική αναράσταση της μεταφορικής ζήτησης μεταξύ δεδομένων σημείων προέλευσης και προορισμού σε σειρές και στήλες αντίστοιχα. Είναι δηλαδή, ένας πίνακας n x m, όπου n είναι ο αριθμός των κόμβων προέλευσης και m ο αριθμός των κόμβων προορισμού. Αν ισχύει n=m, τότε προφανώς προκύπτει ένας τετραγωνικός πίνακας Προέλευσης-Προορισμού.

Στο παρόν μοντέλο, οι πίνακες αυτοί αναπαριστούν ροές μεταφερόμενου φορτίου σε εμπορευματοκιβώτια (TEUs) μεταξύ λιμένων προέλευσης *(Port of Origin)* και λιμένων προορισμού *(Port of destination)* σε ετήσια βάση για κάθε μία γραμμή *(Transpacific Line & Feeder Lines)* του συστήματος ξεχωριστά. Προσδιορίζουν δηλαδή, την κινητικότητα των πλοίων και την εισροή/εκροή φορτίου στον αρχικό και

στους ενδιάμεσους λιμένες του κυκλικού ταξιδιού, αποδίδοντας με αυτό τον τρόπο τις απαιτήσεις ζήτησης των μεταφορικών υπηρεσιών.

Στον πίνακα Προέλευσης-Προορισμού που ακολουθεί, παρουσιάζεται ένα επεξηγηματικό σενάριο ενός κυκλικού δρομολογίου για μία εκ των δύο βοηθητικών γραμμών, με σκοπό την κατανόηση της λειτουργίας των πινάκων. Τα ποσά που αναγράφονται είναι υποθετικά. Στο ***Κεφάλαιο 5*** γίνεται αναλυτική παρουσίαση των πινάκων Προέλευσης-Προορισμού που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο κόστους.

SKX FEEDER LINE 1								
		1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
		BUSAN	**HAKATA**	**SHIBUSHI**	**HIROSHIMA**	**OITA**	**UBE**	**BUSAN**
1	**BUSAN**	-	1	1	1	1	1	-
2	**HAKATA**	-	-	1	1	1	1	1
3	**SHIBUSHI**	-	-	-	1	1	1	1
4	**HIROSHIMA**	-	-	-	-	1	1	1
5	**OITA**	-	-	-	-	-	1	1
6	**UBE**	-	-	-	-	-	-	1
7	**BUSAN**	-	-	-	-	-	-	-

Πίνακας 4.3 *Παράδειγμα πίνακα Προέλευσης-Προορισμού κυκλικού ταξιδιού βοηθητικής γραμμή*

		INCOMING TEUs MOVEMENTS PER NODE	**OUTGOING TEUs MOVEMENTS PER NODE**	**CUMULATIVE NUMBER OF TEUs ON BOARD PER NODE**
1	**BUSAN**	5	0	5
2	**HAKATA**	5	1	9
3	**SHIBUSHI**	4	2	11
4	**HIROSHIMA**	3	3	11
5	**OITA**	2	4	9
6	**UBE**	1	5	5
7	**BUSAN**	0	5	0
SUM				**50**

Πίνακας 4.4 *Παράδειγμα εισροής- εκροής φορτίου σε κάθε λιμάνι και πλήθος συσσωρευμένων εμπορευματοκιβωτίων στο πλοίο*

Επεξηγηματικά, τα εισερχόμενα (προς φόρτωση) εμπορευματοκιβώτια σε κάθε πλοίο σε κάθε λιμένα, προκύπτουν από την πρόσθεση των δεδομένων κάθε γραμμής του πίνακα Προέλευσης – Προορισμού (***Πίνακας 4.3***), ενώ τα εξερχόμενα εμπορευματοκιβώτια προκύπτουν από την πρόσθεση των δεδομένων κάθε στήλης του πίνακα. Για τον υπολογισμό του συσσωρευμένου φορτίου σε κάθε κόμβο, βρίσκουμε την διαφορά του συνόλου των εισερχόμενων από το σύνολο των εξερχόμενων εμπορευματοκιβωτίων. Το αποτέλεσμα που προκύπτει το προσθέτουμε στο συσσωρευμένο φορτίο που προυπάρχει στο πλοίο από τον προηγούμενο κόμβο, επαναλαμβάνοντας την διαδικασία μέχρι την ολοκλήρωση του κυκλικού ταξιδιού. Έτσι η μέγιστη τιμή του συσσωρευμένου φορτίου, βρίσκεται στον κόμβο που συγκεντρώνονται τα περισσότερα εμπορευματοκιβώτια στο πλοίο, προσδιορίζοντας τον μέγιστο αριθμό εμπορευματοκιβωτίων που πρέπει να μεταφερθέι από ένα λίμάνι στο αμέσως επόμενο στο συγκεκριμένο δρομολόγιο. Ο αριθμός αυτός, υποδεικνύει και την ελάχιστη απαιτούμενη μεταφορική ικανότητα που οφείλουν να έχουν τα πλοία που κατανέμονται στην εκάστοτε γραμμή.

Η παραπάνω διαδικασία απεικονίζεται στον ***Πινακα 4.4***, όπου παρουσιάζεται αθροιστικά η κίνηση των εισερχόμενων και εξερχόμενων εμπορευματοκιβωτίων, καθώς και το ύψος του συσσωρευμένου φορτίου που βρίσκεται στο πλοίο σε κάθε κόμβο/λιμένα.

4.6 Η ΕΤΑΙΡΕΙΑ APL, ΕΠΙΛΟΓΗ ΥΠΟΨΗΦΙΩΝ ΠΛΟΙΩΝ & ΔΙΚΤΥΟ ΕΞΥΠΗΡΕΤΗΣΗΣ

Όπως έχουμε αναφέρει, το υπο ανάπτυξη μοντέλο βασίζεται σε καταγραφή και ανάλυση στοιχείων της διεθνούς εταιρείας μεταφορών με έδρα την Σιγκαμπούρη, *Neptune Orient Lines (NOL)*, και πιο συγκεκριμένα της θυγατρικής της ναυτιλιακής εταιρείας *American President Lines (APL)*. Η APL είναι η έκτη μεγαλύτερη εταιρεία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων παγκοσμίως και ο στόλος της αποτελέιται απο 147 containreships. Η μέση ηλικία των πλοίών της δεν ξεπερνά τα 9 χρόνια και κάθε πλοίο της ακολουθεί τις τελευταίες προδιαγραφές του «Διεθνή Κώδικα Διαχείρησης για την ασφαλή λειτουργία των πλοίων και την πρόληψη της ρύπανσης».(*I.S.M - International Management Code for the Safe Operation of Ships and for Pollution Prevention*).

Αναφορικά με το δίκτυο γραμμών παροχής υπηρεσιών της, η APL με περισσότερες από 80 γραμμές εξυπηρέτησης εβδομαδιαίως (36 κύριες και 46 δευτερεύουσες), καλύπτει με τις υπηρεσίες της περισσότερα από 25.000 σημεία σε 140 χώρες παγκοσμίως.Τα κύρια δίκτυα διαδρομών που δραστηριοποιούνται τα πλοία της είναι τα εξής:

- Ασία - Αυστραλία (Asia - Australia)
- Ασία – Ευρώπη (Asia - Europe)
- Ενδοασιατικά (Intra - Asia)
- Ενδοευρωπαϊκά (Intra - Europe)
- Λατινική Αμερική (Latin America)
- Μέση Ανατολή (Middle East)
- Ευρώπη – Βόρεια Αμερική (Trans - Atlantic)
- Ασία – Βόρεια Αμερική (Trans - Pacific)

,ενώ μετράει και 10 terminals: Los Angeles (USA), Oakland (USA), Seattle (USA), Alaska (USA), Kaohsiung (Taiwan), Yokohama (Japan), Qingdao (China), Kobe (Japan), Ho Chi Minh City (Vietnam), Laem Chabang (Thailand).

Η APL ανανεώνοντας τον στόλο της προσπαθεί να τηρεί τις περιβαλλοντικές της δεσμεύσεις. Οι προσθήκες των νέων πλοίων στον υπάρχοντα στόλο, ενσωματώνουν όλες τις πρόσφατες φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες. Παράλληλα με τις υπηρεσίες της, συμμετέχει και υποστηρίζει προγράμματα που έχουν ως στόχο την μείωση της επιβάρυνσης του περιβάλλοντος από αυτές. Αυτά περιλαμβάνουν:

- Χρήση καυσίμων με χαμηλή περιεκτικοτητα σε θείο στα λιμάνια των Δυτικών Η.Π.Α και στα λιμάνια New York, New Jersey, Hong Kong ,Singapore.
- Slow-steaming για την μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών ρύπων.
- Εθελοντική μείωση ταχύτητας στα χωρικά ύδατα της Νότιας Καλιφόρνια.
- Cold-ironing στα πλοία κατά την αγκυροβόληση τους στο λιμάνι του Oakland από το 2011. Το Cold-ironing είναι η δυνατότητα ηλεκτροδότησης από λιμενικές εγκαταστάσεις, σβήνοντας τις γεννήτριες του πλοίου.

Στον ***Πίνακα 4.5*** που ακολουθεί, παρουσιάζεται αλφαβητικά ο στόλος της εταιρείας (Μαρτιος 2011).

Linehaul and feeder vessels		*Capacity*	
Vessel Name	*Year Built*	*DWT*	*TEU*
America Feeder	*1997*	*7,233*	*584*
APL Agate	*1997*	*64,156*	*5,404*
APL Alexandrite	*1992*	*59,603*	*3,821*
APL Almandine	*1993*	*59,560*	*3,821*
APL Amazonite	*1993*	*59,499*	*3,821*
APL Amman	*2002*	*40,955*	*3,316*
APL Arabia	*2000*	*67,318*	*4,890*
APL Argentina	*2001*	*52,300*	*4,038*
APL Atlanta	*2008*	*56,464*	*4,730*
APL Austria	*2007*	*72,807*	*6,350*
APL Bahrain	*2009*	*52,316*	*4,308*
APL Balboa	*1998*	*10,748*	*713*
APL Bangkok	*2006*	*42,147*	*3,534*
APL Beijing	*2004*	*67,052*	*5,024*
APL Belgium	*2002*	*67,987*	*5,508*
APL Bogota	*2004*	*8,015*	*657*

APL Brisbane	2006	44,239	3,388
APL Cairo	2001	33,937	2,478
APL California	2008	72,912	6,350
APL Canada	2001	68,025	5,762
APL Chennai	2007	37,978	2,702
APL Chicago	2007	44,239	3,388
APL Chile	2000	52,272	4,038
APL China	1995	66,520	5,108
APL Chiwan	1995	63,440	4,706
APL Colima	2007	18,700	1,296
APL Colombia	2003	57,240	4,713
APL Colorado	2009	84,550	6,966
APL Coral	1998	64,156	5,404
APL Costa Rica	1995	62,441	4,565
APL Cyprine	1997	64,156	5,404
APL Dalian	2002	33,937	2,478
APL Dallas	2008	42,147	3,534
APL Denmark	2002	68,025	5,762
APL Denver	2008	56,464	4,730
APL Doha	2010	52,316	4,308
APL Dubai	2010	85,523	6,574
APL Egypt	2000	67,318	4,890
APL England	2001	67,987	5,508
APL Finland	2008	90,466	8,110
APL Florida	2008	72,912	6,350
APL Garnet	1995	66,647	4,553
APL Germany	2003	67,009	5,896
APL Guangzhou	2007	44,239	3,388
APL Hamburg	2009	72,665	6,350
APL Hibiscus	1991	7,843	453
APL Holland	2001	67,987	5,508
APL Hong Kong	2002	67,009	5,928
APL Illinois	2009	84,550	6,966
APL India	2002	68,025	5,762
APL Indonesia	2010	50,000	4,256
APL Iolite	1997	62,693	5,174
APL Ireland	2003	67,009	5,928
APL Iris	1998	62,693	5,174
APL Jade	1995	66,647	4,553
APL Japan	1995	66,520	5,108
APL Jeddah	2001	33,937	2,478
APL Kaohsiung	2001	52,272	4,038
APL Kennedy	1988	54,665	4,816
APL Korea	1995	66,370	5,108
APL Liberty	1996	68,413	5,711
APL Lilac	1992	7,843	453

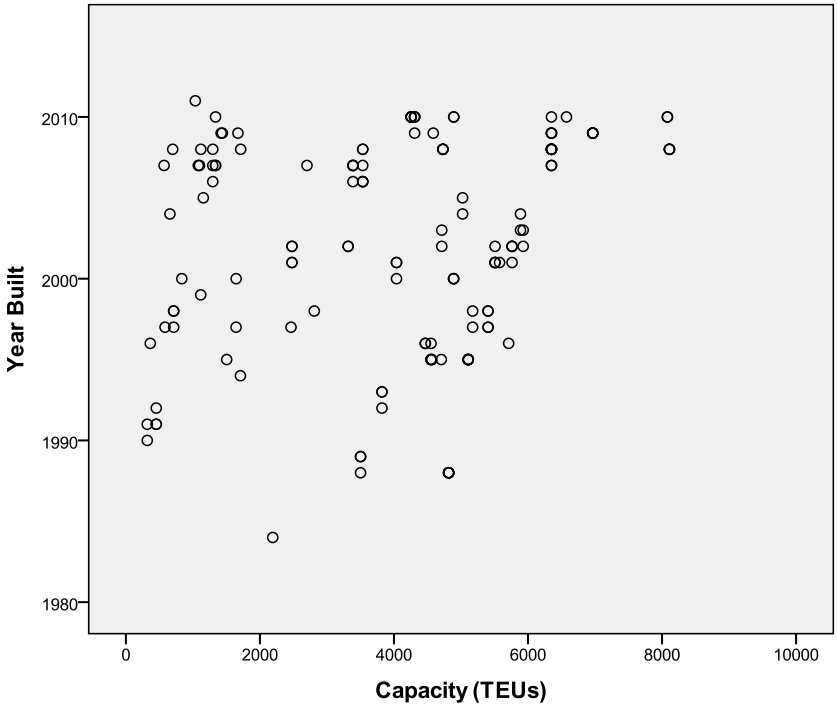
APL Lima	2007	17,350	1,338
APL London	2008	72,982	6,350
APL Los Angeles	2008	56,464	4,730
APL Malaysia	2000	67,318	4,890
APL Managua	2006	18,700	1,296
APL Melbourne	2010	50,000	4,256
APL Mendoza	1998	10,748	713
APL Minneapolis	2008	42,201	3,534
APL Minnesota	2008	72,912	6,350
APL New Jersey	2008	72,912	6,350
APL Ningbo	2010	90,414	8,080
APL Norway	2007	72,807	6,350
APL Oakland	2008	56,464	4,730
APL Oman	2010	63,272	4,892
APL Oregon	2010	72,912	6,350
APL Pearl	1998	64,156	5,404
APL Peru	2002	57,240	4,713
APL Philippines	1995	66,370	5,108
APL Poland	2008	90,634	8,110
APL Pusan	2002	34,122	2,478
APL Qatar	2010	63,272	4,892
APL Riyadh	2010	52,316	4,308
APL Rotterdam	2008	72,665	6,350
APL Ruby	1988	51,534	3,502
APL Russia	2008	90,634	8,110
APL Sardonyx	1995	66,647	4,553
APL Scotland	2001	67,987	5,508
APL Seattle	2007	44,239	3,388
APL Seoul	2010	52,316	4,308
APL Shanghai	2010	50,000	4,256
APL Sharjah	2002	40,995	3,316
APL Shenzhen	2006	42,147	3,534
APL Singapore	1995	66,370	5,108
APL Sokhna	2007	42,147	3,534
APL Spain	2004	67,009	5,888
APL Spinel	1996	66,647	4,553
APL Sri Lanka	2010	50,000	4,256
APL Sweden	2002	68,025	5,762
APL Sydney	2006	42,147	3,534
APL Tennessee	2009	84,550	6,966
APL Texas	2009	85,713	6,966
APL Thailand	1995	66,520	5,108
APL Tokyo	2009	72,655	6,350
APL Topaz	1989	51,534	3,502
APL Tourmaline	1996	60,323	4,468
APL Turkey	2009	72,912	6,350

APL Turquoise	1996	60,323	4,468
APL Vietnam	2005	67,052	5,024
APL Washington	2009	85,760	6,966
APL Xiamen	2001	67,170	5,576
APL Xingang	2009	59,187	4,586
APL Zeebrugge	2010	90,500	8,080
APL Zircon	1989	51,534	3,502
AS Florentia	2011	13,031	1,036
Capella	2007	13,760	1,098
Colombo	1990	6,491	319
E.R. Fremantle	1998	35,848	2,811
Eagle Excellence	1995	23,300	1,504
Elysee	2009	17,892	1,421
Empire	2009	20,250	1,440
Fiducia	1997	20,983	1,644
Frida Schulte	2000	21,150	1,645
Henry Schulte	2000	11,400	834
HS Puccini	2007	17,350	1,338
Ice Runner	2008	8,021	698
Jurong Bebaru	1997	10,748	713

Mondena	1999	12,048	1,117
National Glory	2007	13,864	570
Northern Harmony	1994	20,252	1,709
Pacific Hawk	2008	13,760	1,118
Paul Russ	2010	17,127	1,338
President Adams	1988	54,665	4,816
President Jackson	1988	54,665	4,816
President Polk	1988	54,665	4,816
President Truman	1988	54,665	4,816
Rio Lawrence	2005	13,852	1,155
Sagamore	1996	5,280	364
SP5 Eric G. Gibson	1984	33,625	2,191
Stadt Gotha	2008	18,700	1,296
Tiger Ocean	1991	7,866	453
Tiger River	1991	6,491	319
Tiger Speed	1997	33,290	2,464
Vinalines Diamond	2007	13,760	1,080
William Strait	2009	23,600	1,672
X-Press Dhaulagiri	2008	22,314	1,713

***Πίνακας 4.5**: Στόλος πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων της εταιρείας NOL (Μαρτιος 2011), (Source:http://www.nol.com)*

Το διάγραμμα που ακολουθεί, παρουσιάζει γραφικά την μεταφορική ικανότητα του στόλου της APL συναρτήσει του έτους κατασκευής κάθε πλοίου.’Οπως είναι φανερό, διαπιστώνεται μια σταθερά αυξανόμεη τάση αναφορικά με την μεταφορική ικανότητα των πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, κάτι που ενισχύεται και από το γεγονός ότι βρίσκονται υπό ναυπήγηση και θα προστεθούν μεταξύ του 2012 και 2014 στον στόλο της APL 32 νέα πλοία με μεταφορική ικανότητα 8,000 TEU και μεγαλύτερη.



Διάγραμμα 4.3*: Απεικόνιση της μεταφορικής ικανότητας των πλοίων συναρτήσει του έτους κατασκευής*

Από τον ***Πίνακα 4.5*** και το ***Διάγραμμα 4.3*** μπορεί κανείς να παρατηρήσει ότι αρκετά από τα πλοία του στόλου της APL έχουν ακριβώς την ίδια, ή περίπου την ίδια μεταφορική ικανότητα, DWT, χρονολογία ναυπήγησης, (αλλά και χαρακτηριστικα όπως κύριες διαστάσεις,κοινή μηχανή και ταχύτητα σχεδίασης μεταξύ τους) είναι με άλλα λόγια αδελφά πλοία ή μπορούν να παρέχουν με την ίδια αποτελεσματικότητα συγκεκριμένες υπηρεσίες. Η παραπάνω παρατήρηση μας δίνει την δυνατότητα να απλοποιήσουμε την διαδικασία βελτιστοποίησης του κόστους στο μοντέλο μας. Όπως αναφέραμε και στις προηγούμενες ενότητες του κεφαλαίου, εισάγουμε ψευδομεταβλητές για την κατανομή των πλοίων ανά γραμμή, οι οποίες πέρα από τις τιμές 0 και 1, μπορούν να πάρουν και άλλες ακέραιες τιμές, ανάλογα με την ύπαρξη και την διαθεσιμότητα πλοίων παρόμοιων μεταξύ τους. Λαμβάνοντας λοιπόν υπόψιν τα πραγματικά χαρακτηριστικά των υποψήφιων πλοίων μπορούμε να τα ομαδοποιήσουμε με βάση τα πραγματικά τους χαρακτηριστκά. Έτσι μπορούμε να πετύχουμε στο μοντέλο την χρησιμοποίηση ενός πλοίου «συγκεκριμένου τύπου» περισσότερες από μία φορές.

Στην πράξη, επιλέχθηκαν 9 πλοία από τα 147 του στόλου, , με σκοπό την απλοποίηση της διαδικασίας βελτιστοποίησης και την μείωση της πολυπλοκότητας του μοντέλου. Η επιλογή αυτή έγινε με γνώμωνα την κάλυψη όλου του εύρους τιμών της μεταφορικής ικανότητας των πλοίων, αλλά και με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία που είχαμε στην κατοχή μας σχετικά με τα πλοία της APL. Στη συνέχεια

αποφασίστηκε, οι ψευδομεταβλητές για την κατανομή των επιλεγμένων πλοίων ανά γραμμή, να μπορούν να πάρουν ακέραιες τιμές μέχρι το 100, αμελώντας ουσιαστικά τον περιορισμό που περιγράψαμε παραπάνω και που τίθεται για το αν υφίσταται στην πραγματικότητα ή όχι ο συγκεκριμένος αριθμός κοινών πλοίων.Έτσι ο περιορισμός που εφαρμόζουμε σχετικά με την κατανομή των πλοίων στις διάφορες γραμμές, προβλέπει ότι το αριθμός των πλοίων κάθε τύπου που κατανέμονται και στις τρεις γραμμές δεν μπορεί να υπερβαίνει αθροιστικά τα 100 πλοία. Οι παραπάνω παραδοχές εξασφαλίζουν την σωστή λειτουργία του μοντέλου. Στην πράξη ο συνολικός αριθμός πλοίων που δραστηριοποιούνται και στις 3 γραμμές,βάσει των περιορισμών που καθορίζουν το μοντέλο στη συγκεκριμένη μελέτη και όπως διαπιστώθηκε από πλήθος δοκιμών για την έλεγχο της ορθότητας των αποτελεσμάτων, δεν ξεπερνούν τα 10.

Τα πλοία που επιλέχθηκαν και θεωρήθηκαν αντιπροσωπευτικά του στόλου της APL, έχοντας ταυτόχρονα αδελφά πλοία για την επίτευξη ρεαλισμού σε ικανοποιητικό βαθμό, είναι τα εξής:

		Capacity	
Vessel Name	**Year Built**	**DWT**	**TEU**
APL France	2007	90.630	8.110
APL Bogota	2004	8.015	657
APL Germany	2003	67.009	5.896
APL Amazonite	1993	59.499	3.821
APL Arabia	2000	67.318	4.890
APL Argentina	2001	52.272	4.038
APL Atlanta	2008	56.464	4.730
APL Austria	2007	72.807	6.350
APL Colima	1998	18.700	1.296

Πίνακας 4.6: Επιλεγμένα πλοία μεταφορας εμπορευματοκιβωτίων για το μοντέλο

Με βάση λοιπόν όσα αναφέρθηκαν συνολικά, δομείται το μοντέλο κόστους. Εχοντας πλήρη επίγνωση της έκτασης και της πολυπλοκότητας ενός δικτύου γραμμών παροχής υπηρεσιών όπως αυτού της APL, το μοντέλο μας περιορίζεται στην μελέτη τριών εκ των 82 συνολικά γραμμών της εταιρείας. Το υπό μελέτη σύστημα αποτελείται από 3 γραμμές όπως έχουμε ήδη αναφέρει, μία κύρια γραμμή στο δίκτυο εξυπηρέτησης Ασίας - Βόρειας Αμερικής *(Trans-Pacific – Linehaul PCE Line)* και δύο βοηθητικές ενδοασιατικές γραμμές *(Feeder 1- SKX Line, Feeder 2 – NKX Line).* Το BUSAN είναι ο κεντρικός λιμένας και των τριών γραμμών, όπου παραγματοποιούνται οι ανταποκρίσεις των πλοίων, ενώ με σκοπό την απλοποίηση

του συστήματος αντιμετωπίζουμε την κύρια γραμμή του δικτύου σαν κυκλική διαδρομή, ενώνοντας ουσιαστικά τις *eastbound και westbound* γραμμές σε μία ενιαία. Στους ***Πίνακες 4.7-4.9*** που ακολουθούν, παρουσιάζεται το σύνολο των λιμένων που εξυπηρετούνται ανά γραμμή, καθώς και οι αποστάσεις μεταξύ αυτών, ενω στο ***Παράρτημα Ι***, παρατίθενται επεξηγηματικοί γεωγραφικοί χάρτες ,που δείχνουν την πορεία των κυκλικών ταξιδιών ανά γραμμή.

PCE TRANSPACIFIC LINE		
Port Name		Route Length (nm)
1	QINGDAO	476
2	BUSAN	813
3	YOKOHAMA	4834
4	LOS ANGELES	360
5	OAKLAND	2062
6	DUTCH HARBOR	2550
7	YOKOHAMA	813
8	BUSAN	476
9	QINGDAO	0,0
		12384

Πίνακας 4.7*: Κύρια γραμμή (Transpacific Line - PCE Line)*

SKX FEEDER LINE 1		
Port Name		Route Length (nm)
1	BUSAN	113
2	HAKATA	263
3	SHIBUSHI	216
4	HIROSHIMA	86
5	OITA	80
6	UBE	150
7	BUSAN	0,0
		908

Πίνακας 4.8*: 1η Βοηθητική ενδοασιατική γραμμή (Feeder 1 – SKX Line)*

SKX FEEDER LINE 2		
Port Name		Route Length (nm)
1	**BUSAN**	546
2	**NAHA**	535
3	**MOJI**	119
4	**BUSAN**	0,0
		1200

***Πίνακας 4.9**: 2η Βοηθητική ενδοασιατική γραμμή (Feeder 2 – NKX Line)*

5

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗΣ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

.....

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει σε πινακοποιημένη μορφή το μοντέλο που έχει αναπτυχθεί καθώς και το μαθηματικό πλαίσιο πάνω στο οποίο στηρίχθηκε. Παρατίθενται πίνακες που περιλαμβάνουν: χαρακτηριστικά των πλοίων που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο, ανάλυση των περιορισμών, πίνακες προέλευσης-προορισμού, χαρακτηριστικά των κυκλικών ταξιδιών, υπολογισμούς χρόνου και κόστους του μοντέλου, υπολογισμούς εκπομπών ρύπων CO_2, NO_x, SO_x. Τέλος, στην ενότητα που κλείνει το κεφάλαιο, επισημαίνεται το σύνολο των παραδοχών,υποθέσεων και απλουστεύσεων που έχουν πραγματοποιηθεί για να καταστεί δυνατή η μαθηματική μοντελοποίηση.

5.1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΩΝ ΠΛΟΙΩΝ

Η μαθηματική μοντελοποίηση που παρουσιάζεται στα επόμενα, έχει αναπτυχθεί σε υπολογιστικά φύλλα του προγράμματος *Microsoft Office Excel 2007*. Δεδομένα που αναπαρίστανται στους πίνακες που παρατίθενται όπως, χαρακτηριστικά των πλοίων και εισροή- εκροή μεταφερόμενων εμπορευματοκιβωτίων, παρασχέθηκαν από την εταιρεία ή ανευρέθησαν στην ιστοσελίδα της. Τα υπόλοιπα δεδομένα αποτελούν μια αρχική εφικτή λύση που είναι προϊόν τυχαίας επιλογής των μεταβλητών απόφασης (ταχύτητες πλοίων στην κύρια και στις βοηθητικές γραμές, ψευδομεταβλητές για την κατανομή των πλοίων σε αυτές, χρόνοι αδράνειας). Όλα αυτά παρουσιάζονται αναλυτικά στις ενότητες που ακολουθούν.

Όπως αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, επιλέξαμε για το μοντέλο 9 πλοία από το σύνολο των 147 του στόλου της APL, που καλύπτουν ως προς την μεταφορική τους ικανότητα το σύνολο του στόλου της.

Ανάλογα με την ιδιοκτησιακή κατάσταση κάθε πλοίου (ιδιόκτητο ή ναυλωμένο), τα πάγια ετήσια κόστη του υπολογίζονται με βάση το ετήσιο κόστος χρονοναύλωσης (σύμφωνα με ναυτιλικές πηγές, π.χ Clarksons). Στην περίπτωση των ιδιόκτητων πλόιων το ετήσιο κόστος χρονοναύλωσης αντιπροσωπεύει το κόστος ευκαιρίας του πλοιοκτήτη αν διαθέσει το πλοίο του στη ναυλαγορά, αντί να το δέσει και σε αυτό προστίθενται επιμέρους κόστη, όπως το κόστος πληρώματος, το κόστος ασφάλισης, το κόστος συντήρησης, το κόστος διαχείρησης κ.α.

Για τον υπολογισμό του ετήσιου κόστους χρονοναύλωσης (annual time charter cost) χρησιμοποιούμε μια εμπειρική σχέση ανάλογα με το ιδιοκτησιακή κατάσταση κάθε πλοίου :

- Ετσι για ναυλωμένα πλοία :

*Ετήσιο κόστος χρονοναύλωσης πλοίου = 4*360*Μεταφορική Ικανότητα σε TEUs*

- Για ιδιόκτητα πλοία :

*Ετήσιο κόστος χρονοναύλωσης πλοίου = 2*360*Μεταφορική Ικανότητα σε TEUs*

Ο ***Πίνακας 5.1*** παρουσιάζει τα βασικά χαρακτηριστικά των επιλεγμένων για την ανάπτυξη του μοντέλου πλοίων.

Vessel Name	APL France	APL Bogota	APL Germany	APL Amazonite	APL Arabia	APL Argentina	APL Atlanta	APL Austria	APL Balboa
Length Over All (LOA) (m)	316,00	132,57	278,94	288,31	294,00	260,65	267,20	295,18	166,00
Max Beam (B) (m)	45,60	19,20	40,00	32,20	32,20	32,20	32,20	40,00	25,00
Draft (m)	14,50	7,22	14,02	13,04	13,57	12,52	13,00	14,02	7,60
DWT (tonnes)	90630,00	8.015,00	67.009,00	59.499,00	67.318,00	52.272,00	56.464,00	72.807,00	18.700,00
GRT	86692,00	6.704,00	66.332,00	49.716,00	54.562,96	40.306,00	41.823,00	71.867,00	15.375,00
Service Speed (Kn)	25,25	17,50	25,70	24,50	24,00	24,00	25,00	26,00	19,00
Capital Value ($mil)									
Main Engine Type and Model (eg. 4 MAN B&W 8L58/64)	MHI-SULZER 11RT-flex96C	MAK 7M 43	12K90MC	Mitsui B&W 9K90MC	Hyundai B&W 7K98MC	Hyundai-Sulzer 9RTA84C	Man B&W 8K98MC-C	Mitsui Man B&W 11K98MC	MAN 8 L58/64
Gennerator Type and Model		2 x Volvo Penta 370 kW	4 x Yanmar 6N330L-EV, 2354 kW @ 720 rpm	3 sets x Yanmar 6N280L-EN, 1400 kW	2 x MAN B&W 8L 27/38 AT 2400 KW EA, 1 X MAN B&W 6L 27/38 AT 1800 KW	2 X 1770KW + 1 X 1580 KW	4 x ZJMD MAN B&W 8L28/32H, 1600 kW @ 720 rpm	YANMAR 6N330L-EV x 4 sets, 2,354 kW @ 720 rpm	
Installed Main Engines Power (kW)	62.920	6.300	54.840	36.672	54.460	36.460	45.680	62.920	11.200
Consumption at Sea (t/h)	9,40	6,00	8,44	5,63	6,54	6,25	7,90	9,40	6,00
Main Engines Fuel Type	HFO - 380 cst		HFO - 380 cst	HFO - 380 cst	HFO - 380 cst	HFO - 380 cst	HFO - 380 cst	HFO - 380 cst	
Coefficient K Fnew /F = (Vnew /V)3 , or, F1=k1V3, F2=k2V3, where k1 and k2	0,0006	0,0011	0,0005	0,0004	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0009

Vessel Name	APL France	APL Bogota	APL Germany	APL Amazonite	APL Arabia	APL Argentina	APL Atlanta	APL Austria	APL Balboa
Consuption at Port (t/h)	1,000	0,300	0,979	0,830	0,830	0,500	0,600	1,000	0,400
Gennerator Fuel Type	HFO		HFO	HFO	HFO	HFO	HFO	HFO	
Special Engine Consuption (g/kWh)									
Capacity	8110,00	657,00	5896,00	3821,00	4890,00	4038,00	4730,00	6350,00	1296,00
Crew Cost		0,00	0,00	1.000.000					
Vessel Management Cost ($/year) *				1.500.000					
Insurance Cost ($/year)				700.000					
Average Maintenance Cost ($/year)									
Capital Cost ($/day)									
Other Cost ($/year) **				600.000					
	Time Chartered	Time Chartered	Time Chartered	Owned	Time Chartered	Time Chartered	Time Chartered	Time Chartered	Time Chartered
Annual Time Charter Cost	**11.678.400**	**946.080**	**8.490.240**	**2.751.120**	**7.041.600**	**5.814.720**	**6.811.200**	**9.144.000**	**1.866.240**
* Vessel Management Cost - Payment to NSSPL / AML (includes crewing / consumables / Maintainance / Lub oil / Management fees etc)									
** Other Cost : Drydock / Major Spares / Support									
Annual Ship Cost	**11.678.400**	**946.080**	**8.490.240**	**5.551.120**	**7.041.600**	**5.814.720**	**6.811.200**	**9.144.000**	**1.866.240**
Overall Ship Cost	**57.343.600**								

***Πίνακας 5.1**: Χαρακτηριστικά επιλεγμένων πλοίων στόλου*

5.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ – ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ PENALTY

Στον ***Πίνακα 5.2*** παρουσιάζεται μία τυχαία κατανομή πλοίων (*ship allocation*) στους 9 χρησιμοποιούμενους τύπους πλοίου στις 3 γραμμές του μοντέλου, ενώ όπως έχουμε αναφέρει και στο ***Κεφαλαίο 4***, εισάγουμε περιορισμό στο πλήθος των πλοίων κάθε τύπου που μπορεί να δρστηριοποιηθεί σε κάθε γραμμή,ίσο με 100. Επιπλέον στον ίδιο πίνακα παρατίθενται και πληροφορίες που σχετίζονται με την συχνότητα παροχής υπηρεσιών για κάθε μία από τις 3 γραμμές (line frequency actual). Έχουμε υποθέσει ως σταθερά του συστήματος, συχνότητα εκτέλεσης δρομολογίων ίση με 7 μέρες για κάθε γραμμή, χρόνο δηλαδή που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών αφίξεων πλοίων σε κάθε προορισμό. Με σκοπό την ευελιξία του συστήματος, η τιμή αυτή επιδέχεται αποδεκτή απόκλιση, έτσι ορίζουμε περιορισμό με όρια ±0,3 , όπως αναφέρουμε λεπτομερώς στο κεφάλαιο που ακολουθεί. Παράλληλα για την ανάγκη χάραξης του αποτελεσματικού μετώπου του συνόλου των εφικτών λύσεων, ορίζουμε θεωρητική «συνάρτηση penalty», ώστε για περιπτώσεις όπου η συχνότητα εκτέλεσης δρομολογιών υπερβαίνει τα όρια περιορισμού, η προκύπτουσα απόκλιση να μεταφράζεται σε οικονομική απώλεια για την εταιρεία:

> *"εάν η συχνότητα της γραμμής διαφέρει από την προκαθορισμένη τιμή περισσότερο από 0,3, τότε το επιπλέον κόστος που προκύπτει είναι 20,000,000$ επί το χρονικό διάστημα της διαφοράς."*

Vessel Name	APL France	APL Bogota	APL Germany	APL Amazonite	APL Arabia	APL Argentina	APL Atlanta	APL Austria	APL Balboa	
Ship Allocation										Overall ships
TRANSPACIFIC LINE 1	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0	2,0	1,0	1,0	0,0	6,0
FEEDER LINE 1	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
FEEDER LINE 2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0
SUM	0,0	0,0	1,0	1,0	1,0	2,0	1,0	1,0	1,0	
SHIP QUANTITY CONSTRAINT	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	
SHIP QUANTITY CONSTRAINT-SUM	100,0	100,0	99,0	99,0	99,0	98,0	99,0	99,0	99,0	

	Overall ships	Line Frequency (Actual)	Deviation	Penalty - Soft Constraints
TRANSPACIFIC LINE 1	6,0	7,200	0,200	0,0
FEEDER LINE 1	1,0	7,100	0,100	0,0
FEEDER LINE 2	1,0	7,000	0,000	0,0
	8,0			0,0

Πίνακας 5.2 : *Κατανομή πλοίων και συχνότητα παροχής υπηρεσιών ανά γραμμή*

Ανάλογα, στον ***Πίνακα 5.3*** παρατίθενται οι επιμέρους πίνακες που καθορίζουν την μεταφορική ζήτηση αλλά και την μεταφορική ικανότητα στο μοντέλο σε κάθε μία από τις 3 γραμμές (transporting constraints).Οι υπολογισμοί εκτελούνται σε ετήσια βάση και προκύπτουν ως το γινόμενο του αριθμού των κατανεμημένων πλοίων, της μεταφορικής ικανότητας κάθε πλοίου και του αριθμού των ετήσιων κυκλικών ταξιδιών που εκτελούνται (transporting capacity).

Όπως και στην περίπτωση της συχνότητας παροχής υπηρεσιών, εισάγουμε θεωρητική «συνάρτηση penalty», η οποία αυτή τη φορά σχετίζεται με την μεταφορική ικανότητα των πλοίων και την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών.Υποθέτουμε ότι το 100% του φορτίου που διατίθεται προς μεταφορά σε ετήσια βάση (maximum throughput capacity constraint), μπορεί να μεταφερθεί στον προορισμό του. Έτσι σε περίπτωση που δεν ισχύει η παραπάνω υπόθεση, υπολογίζοντας την διαφορά μεταξύ της ετήσιας μεταφορικής ικανότητας των πλοίων του στόλου και της ετήσιας ροής φορτίου για κάθε μία από τις 3 γραμμές του δικτύου έχουμε:

> *“ για κάθε εμπορευματοκιβώτιο το οποίο δεν μεταφέρεται στον προορισμό του και παραμένει στον λιμένα,το επιπλέον κόστος που προκύπτει είναι 5,000$/εμπορευματοκιβώτιο”*

Transporting Capacity										Overall Capacity
TRANSPACIFIC LINE 1	0,0	0,0	49.911,0	0,0	41.395,0	68.365,0	40.041,0	53.754,0	0,0	253.466
FEEDER LINE 1	0,0	0,0	0,0	196.910,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	196.910
FEEDER LINE 2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	68.047,0	68.047
SUM	0,0	0,0	49.911,0	196.910,0	41.395,0	68.365,0	40.041,0	53.754,0	68.047,0	**518.423,0**

Overall Capacity	Maximum Throughput Capacity Constraint	Deviation	Penalty - Soft Constraints
253.466	204.341	49.125	0,000
196.910	75.018	121.892	0,000
68.047	49.298	18.749	0,000
			0,00

Πίνακας 5.3 : *Ετήσια μεταφορική ζήτηση και μεταφορική ικανότητα ανά γραμμή*

Στον ***Πίνακα 5.4*** παρατίθενται οι πίνακες του μοντέλου σχετικά με την χρήση των ψευδομεταβλητών (dummy variables) για την κατανομή των πλοίων του στόλου, όπως επίσης και πίνακες αναφορικά με τους περιορισμούς ταχύτητας πλεύσης (speed constraints) και μεταφορικής ικανότητας (capacity constraints) των διατιθέμενων πλοίων.

Αναλυτικότερα, οι ψευδομεταβλητές μπορούν να πάρουν ακέραιες τιμές (όχι μόνο 0 ή 1), προκειμένου να μειωθεί η πολυπλοκότητα του προβλήματος, ενώ όσον αφορά τους περιορισμούς στην ταχύτητα του ταξιδιού σε κάθε γραμμή για κάθε πλοίο που κατανέμεται σε αυτήν, αποκλείουν την υπέρβαση της ταχύτητας που μπορεί το κάθε πλοίο να αναπτύξει. Όπως φαίνεται και στον αντίστοιχο πίνακα, οι προκύπτουσες τιμές αποτελούν σε κάθε κελί το γινόμενο του αριθμού των πλοίων επί την διαφορά της ταχύτητας που μπορεί να αναπτύξει ένα πλοίο από την ταχύτητα της γραμμής. Έτσι οι τιμές αυτές πρέπει να είναι θετικές, ώστε να ικανοποιείται η παραπάνω απαίτηση. Αναλόγως, η μεταφορική ικανότητα κάθε πλοίου που κατανέμεται σε μία γραμμή, πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το μέγιστο συσσωρευμένο φορτίο που προκύπτει στο κυκλικό ταξίδι της γραμμής αυτής για καθορισμένη ταχύτητα πλεύσης και συχνότητα συστήματος. Το συσσωρευμένο αυτό φορτίο σε κάθε λιμένα, το οποίο πρέπει να φορτωθεί και να μεταφερθεί από τα πλοία που δραστηριοποιούνται στη γραμμή αυτή, καθορίζεται από την περιοδικότητα παροχής υπηρεσιών. Έτσι, κάθε κατανεμημενο πλοίο σε κάθε γραμμή του συστήματος, πρέπει να έχει επαρκή μεταφορική ικανότητα, ώστε να είναι ικανό να μεταφέρει όλα τα εμπορευματοκιβώτια που συγκεντρώνονται σε κάθε λιμένα των τριών γραμμών του μοντέλου.

		Dummy Variables								
	Vessel Name	APL France	APL Bogota	APL Germany	APL Amazonite	APL Arabia	APL Argentina	APL Atlanta	APL Austria	APL Balboa
PCE LINE	TRANSPACIFIC LINE 1	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0	2,0	1,0	1,0	0,0
	QINGDAO	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0	2,0	1,0	1,0	0,0
	BUSAN	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0	2,0	1,0	1,0	0,0
	YOKOHAMA	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0	2,0	1,0	1,0	0,0
	LOS ANGELES	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0	2,0	1,0	1,0	0,0
	OAKLAND	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0	2,0	1,0	1,0	0,0
	DUTCH HARBOR	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0	2,0	1,0	1,0	0,0
	YOKOHAMA	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0	2,0	1,0	1,0	0,0
	BUSAN	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0	2,0	1,0	1,0	0,0
	QINGDAO	0,0	0,0	1,0	0,0	1,0	2,0	1,0	1,0	0,0
SKX LINE	FEEDER LINE 1	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	BUSAN	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	HAKATA	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	SHIBUSHI	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	HIROSHIMA	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	OITA	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	UBE	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	BUSAN	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NKX LINE	FEEDER LINE 2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
	BUSAN	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
	NAHA	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
	MOJI	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
	BUSAN	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0

(A)

Speed Constraints									
Vessel Name	APL France	APL Bogota	APL Germany	APL Amazonite	APL Arabia	APL Argentina	APL Atlanta	APL Austria	APL Balboa
Service Speed (Kn)	**25,3**	**17,5**	**25,7**	**24,5**	**24,0**	**24,0**	**25,0**	**26,0**	**19,0**
TRANSPACIFIC LINE 1	0,000	0,000	8,200	0,000	6,500	13,000	7,500	8,500	0,000
FEEDER LINE 1	0,000	0,000	0,000	11,500	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
FEEDER LINE 2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	7,000

Capacity Constraints									
Vessel Name	APL France	APL Bogota	APL Germany	APL Amazonite	APL Arabia	APL Argentina	APL Atlanta	APL Austria	APL Balboa
Capacity (TEU)	**8.110**	**657**	**5.896**	**3.821**	**4.890**	**4.038**	**4.730**	**6.350**	**1.296**
TRANSPACIFIC LINE 1	0,0	0,0	1.966,0	0,0	960,0	216,0	800,0	2.420,0	0,0
FEEDER LINE 1	0,0	0,0	0,0	2.378,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
FEEDER LINE 2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	348,0

(B)

Πίνακας 5.4: *Ψευδομεταβλητές και περιορισμοί ταχύτητας και μεταφορικής ικανότητας*

5.3 ΠΙΝΑΚΕΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ – ΠΡΟΟΡΙΣΜΟΥ

Οπως αναφέραμε και στην ***Ενότητα 4.5*** οι πίνακες Προέλευσης- Προορισμού που παρατίθενται παρακάτω, ***Πίνακας 5.5,*** παριστάνουν ρόες μεταφερόμενου φορτίου (TEU) σε κάθε μία από τις 3 γραμμές του συστήματος σε ετήσια βάση, απόδίδοντας με αυτόν τον τρόπο τις απαιτήσεις ζήτησης σε αυτές τις γραμμές.

Επεξηγηματικά, τα εισερχόμενα (προς φόρτωση) εμπορευματοκιβώτια σε κάθε πλοίο σε κάθε λιμένα, προκύπτουν από την πρόσθεση των δεδομένων κάθε γραμμής των πινάκων Προέλευσης – Προορισμού, ενώ τα εξερχόμενα εμπορευματοκιβώτια προκύπτουν από την πρόσθεση των δεδομένων κάθε στήλης του πίνακα. Για τον υπολογισμό του συσσωρευμένου φορτίου σε κάθε κόμβο, βρίσκουμε την διαφορά του συνόλου των εισερχόμενων από το σύνολο των εξερχόμενων εμπορευματοκιβωτίων. Το αποτέλεσμα που προκύπτει το προσθέτουμε στο συσσωρευμένο φορτίο που προυπάρχει στο πλοίο από τον προηγούμενο κόμβο, επαναλαμβάνοντας την διαδικασία μέχρι την ολοκλήρωση του κυκλικού ταξιδιού. Έτσι η μέγιστη τιμή του συσσωρευμένου φορτίου, βρίσκεται στον κόμβο που συγκεντρώνονται τα περισσότερα εμπορευματοκιβώτια στο πλοίο, προσδιορίζοντας τον μέγιστο αριθμό εμπορευματοκιβωτίων που πρέπει να μεταφερθεί από ένα λιμάνι στο αμέσως επόμενο στο συγκεκριμένο δρομολόγιο. Ο αριθμός αυτός, υποδεικνύει και την ελάχιστη απαιτούμενη μεταφορική ικανότητα που οφείλουν να έχουν τα πλοία που κατανέμονται στην εκάστοτε γραμμή.

		PCE LINE TRANSPACIFIC								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
		QINGDAO	PUSAN	YOKOHAMA	LOS ANGELES	OAKLAND	DUTCH HARBOR	YOKOHAMA	PUSAN	QINGDAO
1	QINGDAO	-	19.106	27.413	28.789	21.138	10.683	-	-	-
2	BUSAN	-	-	34.192	39.818	29.661	12.647	-	-	-
3	YOKOHAMA	-	-	-	24.104	22.140	11.061	-	-	-
4	LOS ANGELES	-	-	-	-	15.846	10.448	12.841	10.248	10.851
5	OAKLAND	-	-	-	-	-	5.694	9.560	9.155	9.671
6	DUTCH HARBOR	-	-	-	-	-	-	5.169	5.796	4.957
7	YOKOHAMA	-	-	-	-	-	-	-	8.155	8.641
8	BUSAN	-	-	-	-	-	-	-	-	12.376
9	QINGDAO	-	-	-	-	-	-	-	-	-
INCOMING PER NODE		0,0	19.106	61.605	92.711	88.785	50.533	27.570	33.354	46.496

		INCOMING TEUs MOVEMENTS PER NODE	OUTGOING TEUs MOVEMENTS PER NODE	CUMULATIVE NUMBER OF TEUs ON BOARD PER NODE
1	QINGDAO	107.129	0,0	107.129
2	BUSAN	116.318	19.106	204.341
3	YOKOHAMA	57.305	61.605	200.041
4	LOS ANGELES	60.234	92.711	167.564
5	OAKLAND	34.080	88.785	112.859
6	DUTCH HARBOR	15.922	50.533	78.248
7	YOKOHAMA	16.796	27.570	67.474
8	BUSAN	12.376	33.354	46.496
9	QINGDAO	0,0	46.496	0,0
				984.152

(A)

		SKX FEEDER LINE 1						
		1	2	3	4	5	6	7
		PUSAN	HAKATA	SHIBUSHI	HIROSHIMA	OITA	UBE	PUSAN
1	BUSAN	-	3.654	2.776	3.168	3.548	4.037	-
2	HAKATA	-	-	2.846	3.115	3.215	3.841	11.785
3	SHIBUSHI	-	-	-	3.560	4.020	3.614	14.210
4	HIROSHIMA	-	-	-	-	3.892	3.294	13.746
5	OITA	-	-	-	-	-	3.961	16.530
6	UBE	-	-	-	-	-	-	17.486
7	BUSAN	-	-	-	-	-	-	-
INCOMING PER NODE		0,0	3.654	5.622	9.843	14.675	18.747	73.757

INCOMING TEUs MOVEMENTS PER NODE	OUTGOING TEUs MOVEMENTS PER NODE	CUMULATIVE NUMBER OF TEUs ON BOARD PER NODE
17.183	0,0	17.183
24.802	3.654	38.331
25.404	5.622	58.113
20.932	9.843	69.202
20.491	14.675	75.018
17.486	18.747	73.757
0,0	73.757	0,0
		331.604

(B)

		NKX FEEDER LINE 2			
		1	2	3	4
		PUSAN	NAHA	MOJI	PUSAN
1	BUSAN	-	15.325	17.457	-
2	NAHA	-	-	12.379	19.462
3	MOJI	-	-	-	20.314
4	BUSAN	-	-	-	-
INCOMING PER NODE		0,0	15.325	29.836	39.776

INCOMING TEUs MOVEMENTS PER NODE	*OUTGOING TEUs MOVEMENTS PER NODE*	*CUMULATIVE NUMBER OF TEUs ON BOARD PER NODE*
32.782	**0,0**	**32.782**
31.841	**15.325**	**49.298**
20.314	**29.836**	**39.776**
0,0	**39.776**	**0,0**
		121.856

(Γ)

Πίνακας 5.5 : *Ετήσιοι πίνακες Προέλευσης-Προορισμού*

5.4 ΡΟΕΣ ΦΟΡΤΙΩΝ

Ο ***Πίνακας 5.6*** παρουσιάζει αθροιστικά τις ροές φορτίου σε κάθε γραμμή σε ετήσια βάση και ανά περίοδο παρόχης υπηρεσιών, στην περίπτωσή μας 7 μέρες. Προβάλλονται τα συγκεντρωτικά δεδομένα για την κίνηση των εισερχόμενων (incoming) και εξερχόμενων (outgoing) εμπορευματοκιβωτίων ανά λιμένα, το σύνολο το μεταφερόμενων εμπορευματοκιβωτίων εβομαδιαίως και ετησίως καθώς και ο μέγιστος αριθμός συσσωρευμένων εμπορευματοκιβωτίων που παραμένουν ταυτόχρονα στο πλοίο ανά περίοδο, πράγμα που όπως είπαμε καθορίζει τις απαιτήσεις ελάχιστης μεταφορικής ικανότητας για τα πλοία που κατανέμονται σε κάθε μία από τις 3 γραμμές του συστήματος.

PCE LINE	TRANSPACIFIC LINE 1	INCOMING TEUs ANNUALLY	OUTGOING TEUs ANNUALLY	TRANSPORTED TEUs WITH SHIPS ANNUALLY	INCOMING TEUs PER SERVICE PERIOD	OUTGOING TEUs PER SERVICE PERIOD	TRANSPORTED TEUs WITH SHIPS PER SERVICE PERIOD
	QINGDAO	107.129	0,0	107.129	2.060	0,0	2.060
	BUSAN	116.318	19.106	204.341	2.237	367	3.930
	YOKOHAMA	57.305	61.605	200.041	1.102	1.185	3.847
	LOS ANGELES	60.234	92.711	167.564	1.158	1.783	3.222
	OAKLAND	34.080	88.785	112.859	655	1.707	2.170
	DUTCH HARBOR	15.922	50.533	78.248	306	972	1.505
	YOKOHAMA	16.796	27.570	67.474	323	530	1.298
	BUSAN	12.376	33.354	46.496	238	641	894
	QINGDAO	0,0	46.496	0,0	0,0	894	0,0

SKX LINE	FEEDER LINE 1	INCOMING TEUs ANNUALLY	OUTGOING TEUs ANNUALLY	TRANSPORTED TEUs WITH SHIPS ANNUALLY	INCOMING TEUs PER SERVICE PERIOD	OUTGOING TEUs PER SERVICE PERIOD	TRANSFERRED WITH SHIPS PER SERVICE PERIOD (TEU)
	BUSAN	17.183	0,0	17.183	330	0,0	330
	HAKATA	24.802	3.654	38.331	477	70	737
	SHIBUSHI	25.404	5.622	58.113	489	108	1.118
	HIROSHIMA	20.932	9.843	69.202	403	189	1.331
	OITA	20.491	14.675	75.018	394	282	1.443
	UBE	17.486	18.747	73.757	336	361	1.418
	BUSAN	0,0	73.757	0,0	0,0	1.418	0,0

NKX LINE	FEEDER LINE 2	INCOMING TEUs ANNUALLY	OUTGOING TEUs ANNUALLY	TRANSPORTED TEUs WITH SHIPS ANNUALLY	INCOMING TEUs PER SERVICE PERIOD	OUTGOING TEUs PER SERVICE PERIOD	TRANSFERRED WITH SHIPS PER SERVICE PERIOD (TEU)
	BUSAN	32.782	0,0	32.782	630	0,0	630
	NAHA	31.841	15.325	49.298	612	295	948
	MOJI	20.314	29.836	39.776	391	574	765
	BUSAN	0,0	39.776	0,0	0,0	765	0,0

Πίνακας 5.6: *Ροές μεταφερόμενου φορτίου (TEUs) ετησίως και ανά περίοδο παροχής προσφερόμενων υπηρεσιών*

5.5 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΩΝ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στον ***Πίνακα 5.7*** που ακολουθεί, παρουσιάζονται αναλυτικά στοιχεία σχετικά με τα δρομολόγια των γραμμών του συστήματος. Η ταχύτητα πλεύσης των πλοίων, η διάρκεια του κυκλικού ταξιδιού ανά γραμμή (round trip time), ο αριθμός των συνολικών κυκλικών ταξιδιών ετησίως (annual number of roundtrips), η απόσταση μεταξύ λιμένων που εξυπηρετεί η κάθε γραμμή, το συνολικό μήκος δρομολογίου σε κάθε γραμμή (route length), αλλά και ο ετήσιος αριθμός εμπορευματοκιβτίων προς μεταφορά ανά γραμμή (annual maximum cargo volume), είναι στοιχεία που περιέχονται στον παρακάτω πίνακα.

LINE SPEED (kn)	TRANSPACIFIC LINE 1	FEEDER LINE 1	FEEDER LINE 2
	17,5	13,0	12,0

PROPERTIES OF LINE	ROUND TRIP TIME (HOURS)	LINE SPEED (kn)	ANNUAL NUMBER OF ROUNDTRIPS	ANNUAL MAXIMUM CARGO VOLUME (TEU)	ROUTE LENGTH (MILES)
TRANSPACIFIC LINE 1	**1.034,82**	**17,5**	**8,5**	**204.341**	**12.384**
QINGDAO	68,90	17,5	8,5		476
BUSAN	99,04	17,5	8,5		813
YOKOHAMA	322,47	17,5	8,5		4.834
LOS ANGELES	79,89	17,5	8,5		360
OAKLAND	165,57	17,5	8,5		2.062
DUTCH HARBOR	171,77	17,5	8,5		2.550
YOKOHAMA	64,02	17,5	8,5		813
BUSAN	45,28	17,5	8,5		476
QINGDAO	17,88	17,5	8,5		0,00
FEEDER LINE 1	**169,99**	**13,0**	**51,5**	**75.018**	**908**
BUSAN	15,79	13,0	51,5		113
HAKATA	31,67	13,0	51,5		263
SHIBUSHI	29,06	13,0	51,5		216
HIROSHIMA	18,96	13,0	51,5		86
OITA	20,17	13,0	51,5		80
UBE	25,98	13,0	51,5		150
BUSAN	28,36	13,0	51,5		0
FEEDER LINE 2	**166,84**	**12,0**	**52,5**	**49.298**	**1200**
BUSAN	58,60	12,0	52,5		546
NAHA	63,22	12,0	52,5		535
MOJI	29,72	12,0	52,5		119
BUSAN	15,30	12,0	52,5		0

Πίνακας 5.7 : *Χαρακτηριστικά κυκλικού ταξιδιού*

5.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΧΡΟΝΟΥ

Οι ***Πίνακες 5.8 – 5.13*** παρουσιάζουν τους υπολογιμούς των χρονικών διαστημάτων που είναι απαραίτητοι για τον καθορισμό ενός κυκλικού ταξιδιού. Τα χρονικά διαστήματα που θεωρεί το μοντέλο μας για τον υπολογισμό του ετήσιου λειτουργικού κόστους είναι τα εξής:

- ✓ Χρόνος ταξιδιού ανά κυκλικό ταξίδι *(voyage time per round trip)*, όπου έχοντας θεωρήσει την ταχύτητα πλεύσης σταθερή και κοινή για όλα τα πλοία εντός της ίδιας γραμμής, ισοδυναμεί με το πηλίκο του μήκους της διαδρομής προς την ταχύτητα πλεύσης, ***Πίνακας 5.8***.
- ✓ Χρόνος πρόσδεσης και απομάκρυνσης *(mooring and unmooring time per round trip)* για κάθε πλοίο σε κάθε λιμάνι, θεωρούμενος εκ παραδοχής ίσος με *0,5 ώρες*, ***Πίνακας 5.9***.
- ✓ Χρόνος φορτοεκφόρτωσης *(loading & unloading time per round trip)* για κάθε πλοίο σε κάθε λιμάνι,υπολογίζεται ως το γινόμενο του αθροίσματος των εισερχόμενων και εξερχόμενων εμπορευματοκιβωτίων επί τον χρόνο φορτοεκφόρτωσης ανά εμπορευματοκιβώτιο. Ο χρόνος φορτοεκφόρτωσης θεωρούμε εκ παραδοχής ότι είναι ίσος μέ *0,02 ώρες/μονάδα εμπορευματοκιβωτίου,* ***Πίνακες 5.10 – 5.11***.
- ✓ Χρόνος αδράνειας ανά κυκλικό ταξίδι *(idle time per round trip)*, λαμβάνεται εκ παραδοχής ίσος με 0 για κάθε γραμμή του συστήματος, ***Πίνακας 5.12***.
- ✓ Συνολικός χρόνος κυκλικού ταξιδιού *(total time per roundtrip)* ανά γραμμή, προκύπτει ώς άθροισμα των τεσσάρων συνιστωσών που αναφέρθηκαν παραπάνω, ***Πίνακας 5.13***

	Voyage Time per Round Trip									
	Vessel Name	APL France	APL Bogota	APL Germany	APL Amazonite	APL Arabia	APL Argentina	APL Atlanta	APL Austria	APL Balboa
TRANSPACIFIC LINE 1	QINGDAO	27,20	27,20	27,20	27,20	27,20	27,20	27,20	27,20	27,20
	BUSAN	46,46	46,46	46,46	46,46	46,46	46,46	46,46	46,46	46,46
	YOKOHAMA	276,23	276,23	276,23	276,23	276,23	276,23	276,23	276,23	276,23
	LOS ANGELES	20,57	20,57	20,57	20,57	20,57	20,57	20,57	20,57	20,57
	OAKLAND	117,83	117,83	117,83	117,83	117,83	117,83	117,83	117,83	117,83
	DUTCH HARBOR	145,71	145,71	145,71	145,71	145,71	145,71	145,71	145,71	145,71
	YOKOHAMA	46,46	46,46	46,46	46,46	46,46	46,46	46,46	46,46	46,46
	BUSAN	27,20	27,20	27,20	27,20	27,20	27,20	27,20	27,20	27,20
	QINGDAO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
FEEDER LINE 1	BUSAN	8,69	8,69	8,69	8,69	8,69	8,69	8,69	8,69	8,69
	HAKATA	20,23	20,23	20,23	20,23	20,23	20,23	20,23	20,23	20,23
	SHIBUSHI	16,62	16,62	16,62	16,62	16,62	16,62	16,62	16,62	16,62
	HIROSHIMA	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62	6,62
	OITA	6,15	6,15	6,15	6,15	6,15	6,15	6,15	6,15	6,15
	UBE	11,54	11,54	11,54	11,54	11,54	11,54	11,54	11,54	11,54
	BUSAN	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
FEEDER LINE 2	BUSAN	45,50	45,50	45,50	45,50	45,50	45,50	45,50	45,50	45,50
	NAHA	44,58	44,58	44,58	44,58	44,58	44,58	44,58	44,58	44,58
	MOJI	9,92	9,92	9,92	9,92	9,92	9,92	9,92	9,92	9,92
	BUSAN	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Πίνακας 5.8 *: Χρονική διάρκεια κυκλικού ταξιδιού σε κάθε γραμμή ανά δρομολόγιο*

	Mooring Time per Round Trip									
	Vessel Name	APL France	APL Bogota	APL Germany	APL Amazonite	APL Arabia	APL Argentina	APL Atlanta	APL Austria	APL Balboa
TRANSPACIFIC LINE 1	QINGDAO	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	BUSAN	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	YOKOHAMA	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	LOS ANGELES	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	OAKLAND	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	DUTCH HARBOR	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	YOKOHAMA	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	BUSAN	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	QINGDAO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
FEEDER LINE 1	BUSAN	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	HAKATA	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	SHIBUSHI	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	HIROSHIMA	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	OITA	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	UBE	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	BUSAN	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
FEEDER LINE 2	BUSAN	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	NAHA	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	MOJI	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	BUSAN	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Πίνακας 5.9 *: Χρόνος πρόσδεσης και απομάκρυνσης από τον λιμένα*

	Loading Time per UNIT										
	Vessel Name	Loading & Unloading TEUs	APL France	APL Bogota	APL Germany	APL Amazonite	APL Arabia	APL Argentina	APL Atlanta	APL Austria	APL Balboa
TRANSPACIFIC LINE 1	QINGDAO	2.060	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	BUSAN	2.604	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	YOKOHAMA	2.287	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	LOS ANGELES	2.941	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	OAKLAND	2.362	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	DUTCH HARBOR	1.278	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	YOKOHAMA	853	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	BUSAN	879	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	QINGDAO	894	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
FEEDER LINE 1	BUSAN	330	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	HAKATA	547	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	SHIBUSHI	597	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	HIROSHIMA	592	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	OITA	676	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	UBE	697	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	BUSAN	1.418	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
FEEDER LINE 2	BUSAN	630	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	NAHA	907	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	MOJI	965	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	BUSAN	765	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Πίνακας 5.10 *:Χρόνος φορτοεκφόρτωσης ανά εμπορευματοκιβώτιο ανά λιμένα*

	Loading Time per Round Trip									
	Vessel Name	APL France	APL Bogota	APL Germany	APL Amazonite	APL Arabia	APL Argentina	APL Atlanta	APL Austria	APL Balboa
TRANSPACIFIC LINE 1	QINGDAO	41,20	41,20	41,20	41,20	41,20	41,20	41,20	41,20	41,20
	BUSAN	52,08	52,08	52,08	52,08	52,08	52,08	52,08	52,08	52,08
	YOKOHAMA	45,74	45,74	45,74	45,74	45,74	45,74	45,74	45,74	45,74
	LOS ANGELES	58,82	58,82	58,82	58,82	58,82	58,82	58,82	58,82	58,82
	OAKLAND	47,24	47,24	47,24	47,24	47,24	47,24	47,24	47,24	47,24
	DUTCH HARBOR	25,56	25,56	25,56	25,56	25,56	25,56	25,56	25,56	25,56
	YOKOHAMA	17,06	17,06	17,06	17,06	17,06	17,06	17,06	17,06	17,06
	BUSAN	17,58	17,58	17,58	17,58	17,58	17,58	17,58	17,58	17,58
	QINGDAO	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9
FEEDER LINE 1	BUSAN	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60	6,60
	HAKATA	10,94	10,94	10,94	10,94	10,94	10,94	10,94	10,94	10,94
	SHIBUSHI	11,94	11,94	11,94	11,94	11,94	11,94	11,94	11,94	11,94
	HIROSHIMA	11,84	11,84	11,84	11,84	11,84	11,84	11,84	11,84	11,84
	OITA	13,52	13,52	13,52	13,52	13,52	13,52	13,52	13,52	13,52
	UBE	13,94	13,94	13,94	13,94	13,94	13,94	13,94	13,94	13,94
	BUSAN	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4
FEEDER LINE 2	BUSAN	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60	12,60
	NAHA	18,14	18,14	18,14	18,14	18,14	18,14	18,14	18,14	18,14
	MOJI	19,30	19,30	19,30	19,30	19,30	19,30	19,30	19,30	19,30
	BUSAN	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3

Πίνακας 5.11 *: Χρόνος φορτοεκφόρτωσης εμπορευματοκιβωτίων ανα λιμένα ανά κυκλικό ταξίδι*

	Idle Time per Round Trip									
	Vessel Name	APL France	APL Bogota	APL Germany	APL Amazonite	APL Arabia	APL Argentina	APL Atlanta	APL Austria	APL Balboa
TRANSPACIFIC LINE 1	QINGDAO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	BUSAN	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	YOKOHAMA	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	LOS ANGELES	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	OAKLAND	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	DUTCH HARBOR	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	YOKOHAMA	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	BUSAN	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	QINGDAO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
FEEDER LINE 1	BUSAN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	HAKATA	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	SHIBUSHI	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	HIROSHIMA	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	OITA	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	UBE	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	BUSAN	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
FEEDER LINE 2	BUSAN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	NAHA	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	MOJI	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	BUSAN	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Πίνακας 5.12 *: Χρόνος αδράνειας ανά γραμμη*

		Total Time per Round Trip								
	Vessel Name	APL France	APL Bogota	APL Germany	APL Amazonite	APL Arabia	APL Argentina	APL Atlanta	APL Austria	APL Balboa
TRANSPACIFIC LINE 1	QINGDAO	68,90	68,90	68,90	68,90	68,90	68,90	68,90	68,90	68,90
	BUSAN	99,04	99,04	99,04	99,04	99,04	99,04	99,04	99,04	99,04
	YOKOHAMA	322,47	322,47	322,47	322,47	322,47	322,47	322,47	322,47	322,47
	LOS ANGELES	79,89	79,89	79,89	79,89	79,89	79,89	79,89	79,89	79,89
	OAKLAND	165,57	165,57	165,57	165,57	165,57	165,57	165,57	165,57	165,57
	DUTCH HARBOR	171,77	171,77	171,77	171,77	171,77	171,77	171,77	171,77	171,77
	YOKOHAMA	64,02	64,02	64,02	64,02	64,02	64,02	64,02	64,02	64,02
	BUSAN	45,28	45,28	45,28	45,28	45,28	45,28	45,28	45,28	45,28
	QINGDAO	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9
		1034,82	**1034,82**	**1034,82**	**1034,82**	**1034,82**	**1034,82**	**1034,82**	**1034,82**	**1034,82**
FEEDER LINE 1	BUSAN	15,79	15,79	15,79	15,79	15,79	15,79	15,79	15,79	15,79
	HAKATA	31,67	31,67	31,67	31,67	31,67	31,67	31,67	31,67	31,67
	SHIBUSHI	29,06	29,06	29,06	29,06	29,06	29,06	29,06	29,06	29,06
	HIROSHIMA	18,96	18,96	18,96	18,96	18,96	18,96	18,96	18,96	18,96
	OITA	20,17	20,17	20,17	20,17	20,17	20,17	20,17	20,17	20,17
	UBE	25,98	25,98	25,98	25,98	25,98	25,98	25,98	25,98	25,98
	BUSAN	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4
		169,99	**169,99**	**169,99**	**169,99**	**169,99**	**169,99**	**169,99**	**169,99**	**169,99**
FEEDER LINE 2	BUSAN	58,60	58,60	58,60	58,60	58,60	58,60	58,60	58,60	58,60
	NAHA	63,22	63,22	63,22	63,22	63,22	63,22	63,22	63,22	63,22
	MOJI	29,72	29,72	29,72	29,72	29,72	29,72	29,72	29,72	29,72
	BUSAN	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3	15,3
		166,84	**166,84**	**166,84**	**166,84**	**166,84**	**166,84**	**166,84**	**166,84**	**166,84**

Πίνακας 5.13 *: Συνολικός χρόνος ανά γραμμή ανά κυκλικό ταξίδι*

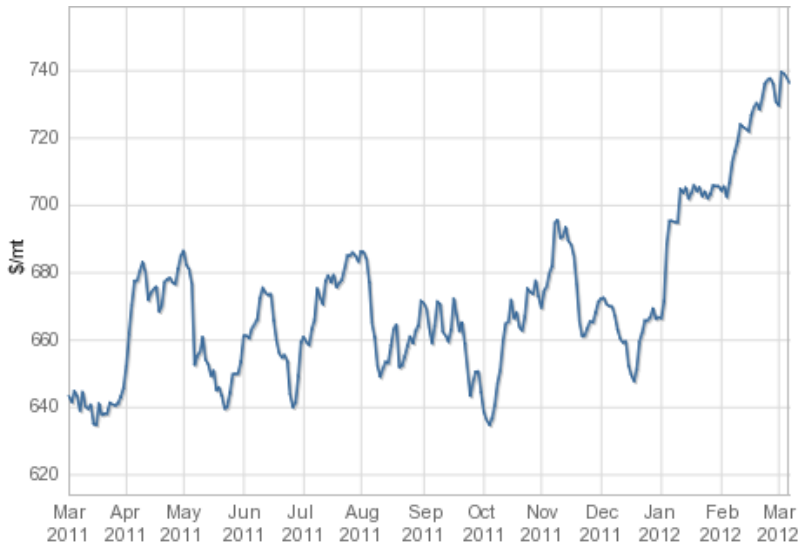
5.7 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΚΟΣΤΟΥΣ

Οι παρακάτω πίνακες παρουσιάζουν αναλυτικά τα επιμέρους κόστη που έχουν υπολογιστεί στο υπό ανάπτυξη μοντέλο. Φυσικά όπως όλοι οι πίνακες που έχουν αναπτυχθεί στο λογιστικό φύλλο του excel και όχι μόνο του κόστους, στηρίζονται σε υπολογισμούς που έχουν προηγηθεί σε προηγούμενους πίνακες.

Οι συνιστώσες λοιπόν του κόστους που θεωρήθηκαν για τον υπολογισμό του ετήσιου συνολικού κόστους έχουν ως εξής:

- ✓ Κόστος φορτοεκφόρτωσης *(loading & unloading cost).* Το κόστος φορτοεκφόρτωσης ανά μονάδα εμπορευματοκιβωτίου *($/TEU)* θεωρείται εκ παραδοχής ίσο με *200 $/TEU* στην κύρια γραμμή και *80$/TEU* στις δευτερεύουσες γραμμές, ύστερα από έρευνα που έγινε όσον αφορά το κόστος φόρτωσης στους λιμένες που τις αποτελούν. Στους ***Πίνακες 5.14 – 5.15*** παρουσιάζεται το κόστος φορτοεκφόρτωσης για τα χρησιμοποιούμενα πλοία ανά κυλικό ταξίδι σε κάθε γραμμή και το ετήσιο κόστος φορτοεκφόρτωσης του συστήματος.

- ✓ Κόστος καυσίμου *(fuel cost).*Το κόστος καυσίμου ανά τόνο καυσίμου θεωρείται, λαμβάνοντας υπόψιν την διακύμανση στις τιμές καυσίμου των τελευταίων μηνών, ίσο με *680 $/ton* ***(Διάγραμμα 5.1)***. Στον ***Πίνακα 5.16***, παρουσιάζονται το κόστος καυσίμου των χρησιμοποιούμενων πλοίων ανά κυκλικό ταξίδι σε κάθε μία γραμμή, καθώς και το ετήσιο κόστος καυσίμου του συστήματος συνολικά. Προκύπτει ως το άθοισμα του κόστους κατανάλωσης καυσίμου σε θάλασσα και λιμάνι για κάθε πλοίο, όπως έχουμε παρουσιάσει αναλυτικά στο ***Κεφάλαιο 4***.



Διάγραμμα 5.1*: Ετήσια διακύμανση στην τιμή ($/mt) του IFO 380 cst (Source:bunkerworld.com)*

- ✓ Λιμενικά τέλη *(port fees cost)*.Τα λιμενικά τέλη έχουν θεωρηθεί ίδια για όλους τους λιμένες,για όλους τους τύπους των πλοίων και καθορίζονται από τον χρόνο παραμονής στον εκάστοτε λιμένα.Το κόστος αυτό εκ παραδοχής ορίζεται ως *20.000$/ μέρα παραμονής στο λιμένα* για την κύρια γραμμή και *12.000$/ μέρα παραμονής στο λιμένα* για τις δευτερεύουσες γραμμές.Οι τιμές αυτές προκύπτουν ως μέσος όρος ύστερα από έρευνα που έγινε για τα λιμάνια που απαρτίζουν τις γραμμές του συστήματος με στοιχεία που βασίζονται σε δεδομένα από τις ιστοσελίδες των λιμένων. Έτσι, στον ***Πίνακα 5.17*** παρουσιάζεται, το κόστος ελλιμενισμού για κάθε χρησιμοποιούμενο πλοίο σε κάθε λιμένα, το κόστος ελλιμενισμού ανά κυκλικό ταξίδι σε κάθε γραμμή και το ετήσιο κόστο ελλιμενισμού του συστήματος.

- ✓ Συνολικό κόστος για κάθε χρησιμοποιούμενο πλοίο σε κάθε γραμμή *(total cost for used ships)*. Προκύπτει ως το άθροισμα των τριων συνιστωσών κόστους που περιγράφηκαν παραπάνω, χωρίς να συμπεριλαμβάνονται επιπρόσθετα κόστη, ***Πίνακας 5.18***.

- ✓ Ετήσιο κόστος ναύλωσης πλοίων ή ετήσιο κόστος κεφαλαίου ανάλογα με την ιδιοκτησιακή κατάσταση κάθε πλοίου *(ship cost)*.Προκύπτει με αναγωγή για κάθε πλοίο, του ετήσιου κόστους ναύλωσης ως προς το συνολικό χρόνο δραστηριοποίησης του σε κάθε κυκλικό ταξίδι ανά γραμμή, ***Πίνακας 5.19***.

- ✓ Ετήσιο συνολικό κόστος του συστήματος, συμπεριλαμβανομένου και των επιπρόσθετων κοστών που προκύπτουν θεωρητικά από τους περιορισμούς για την λειτουργία του μοντέλου *(total cost and constraints)*, ***Πίνακας 5.20***.

Να σημειωθεί πως στους παρακάτω πίνακες εμφανίζονται τιμές μόνο για τα χρησιμοποιούμενα πλοία στο αρχικό σενάριο/παράδειγμα που παρουσιάζεται, έχουν όμως προηγηθεί υπολογισμοί για το σύνολο των υποψήφιων πλοίων,πριν γίνει η επιλογή αυτών.

	Loading Cost per UNIT (TEU)										
	Vessel Name	Loading & Unloading TEUs	APL France	APL Bogota	APL Germany	APL Amazonite	APL Arabia	APL Argentina	APL Atlanta	APL Austria	APL Balboa
TRANSPACIFIC LINE 1	QINGDAO	2.060	200	200	200	200	200	200	200	200	200
	PUSAN	2.604	200	200	200	200	200	200	200	200	200
	YOKOHAMA	2.287	200	200	200	200	200	200	200	200	200
	LOS ANGELES	2.941	200	200	200	200	200	200	200	200	200
	OAKLAND	2.362	200	200	200	200	200	200	200	200	200
	DUTCH HARBOR	1.278	200	200	200	200	200	200	200	200	200
	YOKOHAMA	853	200	200	200	200	200	200	200	200	200
	PUSAN	879	200	200	200	200	200	200	200	200	200
	QINGDAO	894	200	200	200	200	200	200	200	200	200
FEEDER LINE 1	PUSAN	330	80	80	80	80	80	80	80	80	80
	HAKATA	547	80	80	80	80	80	80	80	80	80
	SHIBUSHI	597	80	80	80	80	80	80	80	80	80
	HIROSHIMA	592	80	80	80	80	80	80	80	80	80
	OITA	676	80	80	80	80	80	80	80	80	80
	UBE	697	80	80	80	80	80	80	80	80	80
	PUSAN	1.418	80	80	80	80	80	80	80	80	80
FEEDER LINE 2	PUSAN	630	80	80	80	80	80	80	80	80	80
	NAHA	907	80	80	80	80	80	80	80	80	80
	MOJI	965	80	80	80	80	80	80	80	80	80
	PUSAN	765	80	80	80	80	80	80	80	80	80

Πίνακας 5.14 *: Κόστος φορτοεκφόρτωσης ανά εμπορευματοκιβώτιο ανά λιμένα*

	Loading Cost for Used Ships per Round Trip										Overall Loading Cost for Used Ships per Round Trip	Overall Loading Cost for Used Ships per Year
	Vessel Name	APL France	APL Bogota	APL Germany	APL Amazonite	APL Arabia	APL Argentina	APL Atlanta	APL Austria	APL Balboa		
TRANSPACIFIC LINE 1	QINGDAO	0,0	0,0	412.000,0	0,0	412.000,0	824.000,0	412.000,0	412.000,0	0,0	19.389.600	164.138.077,1
	PUSAN	0,0	0,0	520.800,0	0,0	520.800,0	1.041.600,0	520.800,0	520.800,0	0,0		
	YOKOHAMA	0,0	0,0	457.400,0	0,0	457.400,0	914.800,0	457.400,0	457.400,0	0,0		
	LOS ANGELES	0,0	0,0	588.200,0	0,0	588.200,0	1.176.400,0	588.200,0	588.200,0	0,0		
	OAKLAND	0,0	0,0	472.400,0	0,0	472.400,0	944.800,0	472.400,0	472.400,0	0,0		
	DUTCH HARBOR	0,0	0,0	255.600,0	0,0	255.600,0	511.200,0	255.600,0	255.600,0	0,0		
	YOKOHAMA	0,0	0,0	170.600,0	0,0	170.600,0	341.200,0	170.600,0	170.600,0	0,0		
	PUSAN	0,0	0,0	175.800,0	0,0	175.800,0	351.600,0	175.800,0	175.800,0	0,0		
	QINGDAO	0,0	0,0	178.800,0	0,0	178.800,0	357.600,	178.800,0	178.800,0	0,0		
		0,0	0,0	3.231.600	0,0	3.231.600,0	6.463.200,0	3.231.600,0	3.231.600,0	0,0		
FEEDER LINE 1	PUSAN	0,0	0,0	0,0	26.400,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0	388.560	20.023.899,1
	HAKATA	0,0	0,0	0,0	43.760,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0		
	SHIBUSHI	0,0	0,0	0,0	47.760,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0		
	HIROSHIMA	0,0	0,0	0,0	47.360,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0		
	OITA	0,0	0,0	0,0	54.080,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0		
	UBE	0,0	0,0	0,0	55.760,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0		
	PUSAN	0,0	0,0	0,0	113.440,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0		
		0,0	0,0	0,0	388.560,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0		
FEEDER LINE 2	PUSAN	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	50.400,0	261.360	13.722.809,9
	NAHA	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	72.560,0		
	MOJI	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	77.200,0		
	PUSAN	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	61.200,0		
		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	261.360,0		
Overall Loading Cost for Used Ships											20.039.520	197.884.786,1

Πίνακας 5.15 *: Ετήσιο κόστος φορτοεκφόρτωσης*

	Fuel Cost for Used Ships per Round Trip										Overall Fuel Cost for Used Ships per Round Trip	Overall Fuel Cost for Used Ships per Year
	Vessel Name	APL France	APL Bogota	APL Germany	APL Amazonite	APL Arabia	APL Argentina	APL Atlanta	APL Austria	APL Balboa		
TRANSPACIFIC LINE 1	QINGDAO	0,0	0,0	112.816,13	0,0	103.160,74	173.013,33	98.423,84	119.163,42	0,0	12.480.046,93	105.646.888,29
	PUSAN	0,0	0,0	174.783,21	0,0	161.017,01	277.214,96	157.132,92	185.240,20	0,0		
	YOKOHAMA	0,0	0,0	780.860,82	0,0	738.333,96	1.384.365,31	775.940,56	837.494,52	0,0		
	LOS ANGELES	0,0	0,0	112.402,59	0,0	100.978,80	158.510,76	91.034,40	117.783,93	0,0		
	OAKLAND	0,0	0,0	360.232,19	0,0	337.959,80	618.246,49	347.624,08	384.972,28	0,0		
	DUTCH HARBOR	0,0	0,0	413.316,06	0,0	390.668,74	731.702,85	410.178,00	443.221,16	0,0		
	YOKOHAMA	0,0	0,0	140.498,63	0,0	131.950,41	242.194,96	136.120,92	150.220,20	0,0		
	PUSAN	0,0	0,0	89.692,15	0,0	83.556,14	149.393,33	84.251,84	95.543,42	0,0		
	QINGDAO	0,0	0,0	17.504,52	0,0	14.840,40	17.880,0	10.728,0	17.880,0	0,0		
		0,0	0,0	2.202.106,28	0,0	2.062.465,99	3.752.521,98	2.111.434,56	2.351.519,13	0,0		
FEEDER LINE 1	PUSAN	0,0	0,0	0,0	12.782,48	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0	139.320,62	7.179.694,45
	HAKATA	0,0	0,0	0,0	26.080,90	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0		
	SHIBUSHI	0,0	0,0	0,0	23.872,75	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0		
	HIROSHIMA	0,0	0,0	0,0	15.386,36	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0		
	OITA	0,0	0,0	0,0	16.392,91	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0		
	UBE	0,0	0,0	0,0	21.266,42	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0		
	PUSAN	0,0	0,0	0,0	23.538,80	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0		
		0,0	0,0	0,0	139.320,62	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0		
FEEDER LINE 2	PUSAN	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	73.817,37	177.295,06	9.308.947,11
	NAHA	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	74.647,75		
	MOJI	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	22.709,94		
	PUSAN	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6.120,0		
		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	177.295,06		
Overall Fuel Cost for Used Ships											12.796.662,61	122.135.529,84

Πίνακας 5.16 *: Ετήσιο κόστος καυσίμου για κάθε γραμμή*

	Port Fees Cost for Used Ships per Round Trip										Overall Port Fees for Used Ships per Round Trip	Overall Port Fees for Used Ships per Year
	Vessel Name	APL France	APL Bogota	APL Germany	APL Amazonite	APL Arabia	APL Argentina	APL Atlanta	APL Austria	APL Balboa		
TRANSPACIFIC LINE 1	QINGDAO	0,00	0,00	34.333,33	0,00	34.333,33	68.666,67	34.333,33	34.333,33	0,00	1.615.800,00	13.678.173,09
	PUSAN	0,00	0,00	43.400,00	0,00	43.400,00	86.800,00	43.400,00	43.400,00	0,00		
	YOKOHAMA	0,00	0,00	38.116,67	0,00	38.116,67	76.233,33	38.116,67	38.116,67	0,00		
	LOS ANGELES	0,00	0,00	49.016,67	0,00	49.016,67	98.033,33	49.016,67	49.016,67	0,00		
	OAKLAND	0,00	0,00	39.366,67	0,00	39.366,67	78.733,33	39.366,67	39.366,67	0,00		
	DUTCH HARBOR	0,00	0,00	21.300,00	0,00	21.300,00	42.600,00	21.300,00	21.300,00	0,00		
	YOKOHAMA	0,00	0,00	14.216,67	0,00	14.216,67	28.433,33	14.216,67	14.216,67	0,00		
	PUSAN	0,00	0,00	14.650,00	0,00	14.650,00	29.300,00	14.650,00	14.650,00	0,00		
	QINGDAO	0,00	0,00	14.900,00	0,00	14.900,00	29.800,00	14.900,00	14.900,00	0,00		
		0,00	0,00	269.300,00	0,00	269.300,00	538.600,00	269.300,00	269.300,00	0,00		
FEEDER LINE 1	PUSAN	0,00	0,00	0,00	3.300,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	48.570,00	2.502.987,39
	HAKATA	0,00	0,00	0,00	5.470,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
	SHIBUSHI	0,00	0,00	0,00	5.970,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
	HIROSHIMA	0,00	0,00	0,00	5.920,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
	OITA	0,00	0,00	0,00	6.760,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
	UBE	0,00	0,00	0,00	6.970,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
	PUSAN	0,00	0,00	0,00	14.180,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
		0,00	0,00	0,00	48.570,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
FEEDER LINE 2	PUSAN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6.300,00	32.670,00	1.715.351,23
	NAHA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9.070,00		
	MOJI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9.650,00		
	PUSAN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	7.650,00		
		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	32.670,00		
Overall Port Fees Cost for Used Ships											1.697.040,00	17.896.511,72

Πίνακας 5.17 *: Ετήσιο κόστος ελλιμενισμού για κάθε γραμμή*

	Total Cost for Used Ships per Round Trip										Overall Total Cost for Used Ships per Round Trip	Overall Total Cost for Used Ships per Year
	Vessel Name	APL France	APL Bogota	APL Germany	APL Amazonite	APL Arabia	APL Argentina	APL Atlanta	APL Austria	APL Balboa		
TRANSPACIFIC LINE 1	QINGDAO	0,00	0,00	559.149,46	0,00	549.494,07	1.065.680,00	544.757,17	565.496,75	0,00	3.284.577,45	283.463.138,51
	PUSAN	0,00	0,00	738.983,21	0,00	725.217,01	1.405.614,96	721.332,92	749.440,20	0,00	4.340.588,29	
	YOKOHAMA	0,00	0,00	1.276.377,49	0,00	1.233.849,63	2.375.398,64	1.271.457,23	1.333.011,19	0,00	7.490.094,17	
	LOS ANGELES	0,00	0,00	749.619,26	0,00	738.195,47	1.432.944,09	728.251,07	755.000,59	0,00	4.404.010,48	
	OAKLAND	0,00	0,00	871.998,86	0,00	849.726,46	1.641.779,83	859.390,75	896.738,94	0,00	5.119.634,84	
	DUTCH HARBOR	0,00	0,00	690.216,06	0,00	667.568,74	1.285.502,85	687.078,00	720.121,16	0,00	4.050.486,80	
	YOKOHAMA	0,00	0,00	325.315,29	0,00	316.767,08	611.828,29	320.937,59	335.036,87	0,00	1.909.885,11	
	PUSAN	0,00	0,00	280.142,15	0,00	274.006,14	530.293,33	274.701,84	285.993,42	0,00	1.645.136,87	
	QINGDAO	0,00	0,00	211.204,52	0,00	208.540,40	405.280,00	204.428,00	211.580,00	0,00	1.241.032,92	
		0,00	0,00	5.703.006,28	0,00	5.563.364,99	10.754.321,98	5.612.334,56	5.852.419,13	0,00	33.485.446,93	
FEEDER LINE 1	PUSAN	0,00	0,00	0,00	42.482,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	42.482,48	29.706.580,98
	HAKATA	0,00	0,00	0,00	75.310,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	75.310,90	
	SHIBUSHI	0,00	0,00	0,00	77.602,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	77.602,75	
	HIROSHIMA	0,00	0,00	0,00	68.666,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	68.666,36	
	OITA	0,00	0,00	0,00	77.232,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	77.232,91	
	UBE	0,00	0,00	0,00	83.996,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	83.996,42	
	PUSAN	0,00	0,00	0,00	151.158,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	151.158,80	
		0,00	0,00	0,00	576.450,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	576.450,62	
FEEDER LINE 2	PUSAN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	130.517,37	130.517,37	24.747.108,22
	NAHA	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	156.277,75	156.277,75	
	MOJI	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	109.559,94	109.559,94	
	PUSAN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	74.970,00	74.970,00	
		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	471.325,06	471.325,06	
Overall Total Cost for Used Ships											34.533.222,61	337.916.827,70

Πίνακας 5.18 *: Συνολικό κόστος για κάθε γραμμή*

	Ship Cost for Used Ships per Round Trip									Overall Total Cost for Used Ships per Round Trip	Overall Total Cost for Used Ships per Year
Line Name	APL France	APL Bogota	APL Germany	APL Amazonite	APL Arabia	APL Argentina	APL Atlanta	APL Austria	APL Balboa		
TRANSPACIFIC LINE 1	0,00	0,00	1.002.950,45	0,00	831.822,88	1.373.783,55	804.605,77	1.080.178,99	0,00	5.093.341,63	43.116.480,00
FEEDER LINE 1	0,00	0,00	0,00	107.718,44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	107.718,44	5.551.120,00
FEEDER LINE 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	35.543,78	35.543,78	1.866.240,00
Overall Ship Cost for Used Ships										5.236.603,84	50.533.840,00

Πίνακας 5.19 *: Ετήσιο κόστος ναύλωσης /Ετήσιο κόστος κεφαλαίου ανάλογα με την ιδιοκτησιακή κατάσταση του πλοίου για κάθε γραμμή*

Total Cost for Used Ships per Round Trip										Overall Total Cost for Used Ships per RoundTrip	Overall Total Cost for Used Ships per Year
Line Name	APL France	APL Bogota	APL Germany	APL Amazonite	APL Arabia	APL Argentina	APL Atlanta	APL Austria	APL Balboa		
TRANSPACIFIC LINE 1	0,00	0,00	6.705.956,72	0,00	6.395.187,86	12.128.105,53	6.416.940,33	6.932.598,12	0,00	**38.578.788,55**	**326.579.618,51**
FEEDER LINE 1	0,00	0,00	0,00	684.169,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	**684.169,06**	**35.257.700,98**
FEEDER LINE 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	506.868,84	**506.868,84**	**26.613.348,22**
										39.769.826,45	**388.450.667,70**

Total Cost & Constraints	**388.450.667,70**
% of Total Cost & Constraints is Overall Fuel Cost	**0%**

Πίνακας 5.20 *: Ετήσιο λειτουργικό κόστος (συμπεριλαμβάνονται επιπρόσθετα κόστη από «συναρτήσεις penalty»)*

5.8 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO_2, NO_x, SO_x

Εκπομπές CO_2 (Carbon Dioxide emissions)

Για τον υπολογισμό των εκπομπών CO_2, πολλαπλασιάζουμε τους συνολικούς τόνους καυσίμου με έναν κατάλληλο συντελεστή, F_{co_2}, η τιμή του οποίου εξαρτάται από τον τύπο του χρησιμοποιούμενου καυσίμου. Αρχικά, χρησιμοποιόταν ευρεώς ένας εμπειρικός συντελεστής με τιμή 3,17 που ήταν ανεξάρτητος του τύπου καυσίμου. Ωστόσο στη δεύτερη μελέτη του IMO για τις εκπομπές ρύπων αερίων του θερμοκηπίου από τα πλοία (Second IMO GHG study, 2009), χρησιμοποιούνται ελαφρώς χαμηλότεροι συντελεστές, που διαφέρουν ανά τύπο καυσίμου. Με σκοπό, λοιπόν, την εναρμόνιση των συντελεστών εκπομπών CO_2, που χρησιμοποιούνται από τα μέρη εντός του Πλαισίου των Ηνωμένων Εθνών για την Κλιματική Αλλαγή *(United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC)* και του Πρωτόκολλου του Κιότο, οι συντελεστές που χρησιμοποιούνται από τον IMO θα πρέπει να συμφωνούν με αυτούς που χρησιμοποιούνται από την Διακυβερνητική Επιτροπή για την Αλλαγή του Κλίματος (*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC)*.Τα παραπάνω συνοψίζονται στον ***Πίνακα 5.21***.

FUEL TYPE	GHG-WG 1/3/1	IPCC 2006 Guidelines			Revised 1996 Guidelines
		Default	Lower	Upper	
Marine diesel and marine gas oils (MDO/MGO)	3.082	3.19	3.01	3.24	3.212
Low Sulphur Fuel Oils (LSFO)	3.075	3.13	3.00	3.29	
High Sulphur Fuel Oils (HSFO)	3.021				

Πίνακας 5.21*:Συγκριτικός πίνακας συντελεστών υπολογιμού εκπομπών CO_2 (kg CO_2/kg fuel), (Source: IMO,2009)*

Για τον υπολογισμό των ετήσιων εκπομπών CO_2 στο μοντέλο χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση και επιλέγεται τιμή του F_{co_2} ίση με 3,13 :

$$CO_2 \text{ emissions tonnes } CO_2 = F_{co_2}\left[\frac{\text{tonnes } CO_2}{\text{tonnes fuel}}\right] \times F\left[\text{tonnes fuel}\right] =$$

$$= 3.13 \times \left(\frac{\text{Overall Fuel Cost For Used Shipsper Year } (\$)}{\text{Fuel Price Coefficient } \left(\$/\text{ton}\right)}\right)$$

Εκπομπές NO_x (Nitrogen oxides emissions)

Οι εκπομπές NO_x εξαρτώνται από τον τρόπο που καίγεται το καύσιμο στην μηχανη του πλοίου. Έτσι, ο αντίστοιχος συντελεστής εξαρτάται κυρίως από το είδος της μηχανής. Οι συντελεστές είναι διαφορετικοί για μηχανές SSD (slow speed Engines) και MSD (medium speed Engines).Όπως αναφέραμε και στο ***Κεφάλαιο 2,*** οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου περιέχονται στον Κανονισμό 13 του Παραρτήματος VI της MARPOL.

Η πρώτη βαθμίδα (Tier I) για τις εκπομπές NO_x αφορά μηχανές που κατασκευάστηκαν πριν την 1 Ιανουαρίου του 2000., με τους συντελεστές να παίρνουν τιμές 0,087 για SSD μηχανές και 0,057 για MSD.

SSD	MSD	Source
87	57	Lloyd's Marine Emissions study (1995) [5]
89*	65*	Combination of IVL and Lloyd's data presented in "Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community" 2002 [6]
90 [a]	60 [b]	Data compiled for this IMO study

* It is possible that some engines were built after 1 January 2000.
[a] 25 engines, including seven engines from Lloyd's Marine Emissions study.
[b] 96 engines, including 19 engines from Lloyd's Marine Emissions study.

Πίνακας 5.22 *:Συντελεστλες υπολογιμού εκπομπών NO_x (kg NO_x/tone fuel), (Source: Buhaug et al.,2009)*

Η δεύτερη βαθμίδα (Tier II) για τις εκπομπες NO_x αφορά μηχανές που κατασκευάστηκαν μετά την 1 Ιανουαρίου του 2000, με τους συντελεστές να παίρνουν τιμές 0,078 για SSD μηχανές και 0,051 για MSD.

	SSD	MSD
Tier 0 average NO_x factor (kg/tonne of fuel)	89.5	59.6
Tier I average NO_x factor (kg/tonne of fuel)	78.2	51.4
Power installed post-2000 (% total kW)	40.4%	
2007 NO_x (kg/tonne of fuel)	84.9	56.3
2000–2006 NO_x emission factor	Linear interpolation for each year*	

Πίνακας 5.23*: Συγκριτικός πίνακας συντελεστών υπολογιμού εκπομπών NO_x (kgNO_x /kg fuel), (Source : Buhaug et al.,2009)*

Για τον υπολογισμό των ετήσιων εκπομπών NO_x στο μοντέλο χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$$NO_x \text{ emissions tonnes } NO_x = F_{No_x}\left[\frac{\text{tonnes } NO_x}{\text{tonnes fuel}}\right] \times F\left[\text{tonnes fuel}\right]$$

Επιλέγουμε συντελεστή F_{No_x} ίσο με 0,078 αφού τα πλοία μας έχουν κατά πλειοψηφία SSD μηχανές κατασκευασμένες μετά το 2000.

Εκπομπές SO_x (Sulfur dioxide emissions)

Οι εκπομπές οξειδίων του θείου αναφέρονται στον Κανονισμό 14 του Παραρτήματος VI της MARPOL, όπου το όριο εκπομπών ρύπων τίθεται από το 4.50% στο 3.50% από την 1/1/2012 και φυσικά λιγότερο στις SECAs, όπως έχουμε αναφέρει αναλυτικά στο ***Κεφάλαιο 2***.

Σχετικά με το SO_2,οι εκπομπές εξαρτώνται από τον τύπο του χρησιμοποιούμενου καυσίμου και προκύπτουν πολλαπλασιάζοντας τους συνολικούς τόνους καυσίμου με το ποσοστό της περιεκτικότητας σε θείο του καυσίμου (π.χ 4%, 1.5%, 0.5% ή άλλο) και την σταθερά 0.02 που προέρχεται από την χημική αντίδραση του θείου με το οξυγόνο.

Για τον υπολογισμό των ετήσιων εκπομπών SO_2 στο μοντέλο χρησιμοποιείται η ακόλουθη σχέση:

$SO_2 \text{ emissions tonnes } SO_2 = 0.02 \times S\left(\%wt\right) \times F\left[\text{tonnes fuel}\right]$, όπου S είναι η περιεκτικότητα σε θείο του καυσίμου.

Στην παραπάνω σχέση, λόγω απουσίας πληροφοριών για την περιεκτικότητα του χρησιμοποιούμενου καυσίμου σε θείο, έχουμε θεωρήσει αυτήν την περιεκτικόττηα ίση με 3%.

Στον ***Πίνακα 5.24*** που ακολουθεί, παρατίθενται οι εκπομπές ρύπων που αντιστοιχούν στην τυχαία αρχική εφικτή λύση που έχει χρησιμοποιηθεί σαν παράδειγμα.

Annual Emissions (tons)		
CO_2 Emissions	**NO_x Emissions**	**SO_x Emissions**
382.284,208	**9.526,571**	**7.328,132**

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

Στην παρούσα ενότητα παρατίθενται συνοπτικά υποθέσεις και παραδοχές που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο, σαν ένα μικρό συγκεντρωτικό παράρτημα των όσων προηγήθηκαν. Συγκεκριμένα, ισχύουν τα εξής:

- Στο μοντέλο, χρησιμοποιούνται 9 πλοία και όχι ολόκληρος ο στόλος της εταιρείας APL, ο οποίος περιλαμβάνει 147 πλοία.

- Ανάλογα με την ιδιοκτησιακή κατάσταση κάθε πλοίου, δηλαδή ναυλωμένο ή ιδιόκτητο, τα πάγια ετήσια κόστη του, υπολογίζονται με βάση το ετήσιο κόστος χρονοναύλωσης. Στην περίπτωση ιδιόκτητου πλοίου, στην προαναφερθείσα τιμή (θεωρείται ως κόστος ευκαιρίας έναντι των εσόδων από την ναύλωση του πλοίου σε τρίτους) για τα πάγια ετήσια κόστη συμπεριλαμβάνονται και άλλα επιμέρους κόστη, όπως το ετήσιο κόστος πληρώματος, το κόστος συντήρησης, το κόστος ασφάλισης, το κόστος διαχείρισης. Αναφορικά με το υπολογιμό του ετήσιου κόστους κάθε πλοίου, εφαρμόζεται μία εμπειρική σχέση, προκειμένου να προσεγγιστεί το ετήσιο κόστος χρονοναύλωσης. Συγκεκριμένα ισχύει:

  - Για ναυλωμένα πλοία :

  *Ετήσιο κόστος χρονοναύλωσης πλοίου = 4*360*Μεταφορική Ικανότητα σε TEUs*

  - Για ιδιόκτητα πλοία :

  *Ετήσιο κόστος χρονοναύλωσης πλοίου = 2*360*Μεταφορική Ικανότητα σε TEUs*

- Υποθέτουμε ότι η συχνότητα εκτέλεσης των δρομολογίων είναι 7 ημέρες για κάθε γραμμή. Δηλαδή ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών αφίξεων πλοίων σε κάθε λιμένα για κάθε γραμμή δεν ξεπερνά τις 7 ημέρες. Σε περιπτώσεις όπου η συχνότητα αυτή είναι διαφορετική των 7 ημερών, εφαρμόζεται «συνάρτηση penalty», ώστε αυτή η απόκλιση της πραγματικής συχνότητας γραμμής από την επιθυμητή, να μεταφράζεται σε οικονομική απώλεια για την εταιρεία:

  "εάν η συχνότητα της γραμμής διαφέρει από την προκαθορισμένη τιμή περισσότερο από 0,3, τότε το επιπλέον κόστος που προκύπτει είναι 20,000,000$ επί το χρονικό διάστημα της διαφοράς."

- Υποθέτουμε, ότι το 100% του φορτίου που διατίθεται προς μεταφορά σε ετήσια βάση, μπορέι να μεταφερθεί στον προορισμό του. Σε περιπτώσεις ,όπουαυτή η υπλοθεση παραβιάζεται, εφαρμόζουμε «συνάρτηση penalty» η οποία σχετίζεται με την μεταφορική ικανότητα των πλοίων και την ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών. Συγκεκριμένα ισχύει:

"Για κάθε εμπορευματοκιβώτιο, το οποίο δεν μεταφέρεται στον προορισμό του και παραμένει στο λιμένα, το επιπλέον κόστος που προκύπτει είναι $5.000."

- Ο χρόνος πρόσδεσης και απομάκρυνσης (mooring & unmooring time) για κάθε πλοίο σε κάθε λιμάνι θεωρείται ίση με 0,5 ώρες.
- Ο χρόνος φορτοεκφόρτωσης (loading/unloading time) για κάθε ένα εμπορευματοκιβώτιο, σε κάθε λιμάνι, για όλους τους τύπους πλοίων, θεωρείται ίσος με 0,02 ώρες/μονάδα εμπορευματοκιβωτίου.
- Ο χρόνος αδράνειας (idle time) λαμβάνεται εκ παραδοχής ίσος με μηδέν για όλες τις γραμμές του συστήματος.
- Η τιμή του καυσίμου σύμφωνα με τις τρέχουσες διεθνείς τιμές επιλέχθηκε στα 680$/ton.
- Το κόστος φορτοεκφόρτωσης (loading/unloading cost) για κάθε ένα εμπορευματοκιβώτιο, σε κάθε λιμένα, για όλους τους τύπους πλοίων, έχουν θεωρηθεί ίσα με *200$/TEU* στην κύρια γραμμή και *80$/TEU* στις δευτερεύουσες γραμμές.
- Τα κόστος ελλιμενισμού (port charges) έχει θεωρηθεί ίδιο για όλους τους λιμένες, για όλους τους τύπους πλοίων και καθορίζεται από το χρόνο παραμονής στο λιμένα. Έτσι το κόστος εκ παραδοχής ορίζεται ως *20.000$/ μέρα παραμονής στο λιμένα* για την κύρια γραμμή και *12.000$/ μέρα παραμονής στο λιμένα* για τις δευτερεύουσες γραμμές.
- Για τον υπολογισμό των εκπομπών ρύπων θεωρούμε συντελεστές υπολογισμού 3,13 , 0,078 και 0,03 για CO_2, NO_x , και SO_x αντίστοιχα.

6

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

.....

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η διαδικασία βελτιστοποίησης του μοντέλου που αναλύθηκε και παρουσιάστηκε στα δύο προηγούμενα κεφάλαια. Στα επόμενα, περιγράφεται το θεωρητικό πλαίσιο των γενετικών αλγορίθμων, βάσει των οποίων γίνεται η βελτιστοποίηση του συστήματος, τα εργαλεία της βελτιστοποίησης και το περιβάλλον στο οποίο αυτή υλοποιείται. Αναλύεται το μαθηματικό υπόβαθρο της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, για την εύρεση των βέλτιστων κατά Pareto λύσεων και του αντίστοιχου μετώπου (Pareto front) που προκύπτει. Εξηγείται ο τρόπος με τον οποίο ορίζεται το πρόβλημα, τα βήματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης και περιγράφεται ο τρόπος χάραξης του αποτελεσματικού μετώπου.

6.1 ΓΕΝΕΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

6.1.1 Εισαγωγή

Η βελτιστοποίηση είναι σήμερα ένας χώρος με ραγδαία εξέλιξη και τεράστιες ανάγκες για επαρκή υποστήριξη από υπολογιστικές μηχανές. Το κύριο πρόβλημα που, ως επί το πλείστον, παρουσιάζεται σε αυτό το πεδίο είναι η εύρεση των βέλτιστων τιμών για μια σειρά παραμέτρων, ικανοποιώντας ταυτόχρονα ένα σύνολο περιορισμών. Η εργασία αυτή είναι συνήθως δύσκολη και χρονοβόρα και απαιτεί μεγάλη υπολογιστική ισχύ και σημαντικούς πόρους. Τα συστήματα που έχουν αναπτυχθεί για την εξυπηρέτηση αυτών των αναγκών είναι αξιόλογα, αλλά, επειδή συχνά οι χώροι αναζήτησης είναι τεράστιοι, η προσπάθεια βελτίωσης των τεχνικών είναι διαρκής.

Τα τελευταία τριάντα χρόνια, παρατηρείται ένα συνεχώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη συστημάτων επίλυσης προβλημάτων βασισμένων στις αρχές της Φυσικής Εξέλιξης. Τα συστήματα αυτού του είδους, λειτουργούν διατηρώντας έναν πληθυσμό κωδικοποιημένων πιθανών λύσεων του προβλήματος που προσπαθούμε να επιλύσουμε εφαρμόζοντας πάνω σε αυτόν διάφορες διαδικασίες εμπνευσμένες από τη βιολογική εξέλιξη. Έτσι, περνώντας από γενιά σε γενιά, τα συστήματα αυτά δημιουργούν συνεχώς νέους πληθυσμούς πιθανών λύσεων εξελίσσοντας τους προηγούμενους πληθυσμούς.

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms) είναι ένα παράδειγμα τέτοιου συστήματος που μαζί με τον Εξελικτικό Προγραμματισμό (Evolutionary Programming.), τις Στρατηγικές Εξέλιξης (Evolution Strategies), τα Συστήματα Ταξινόμησης (Classifier Systems) και το Γενετικό Προγραμματισμό (Genetic Programming) αποτελούν μια κατηγορία συστημάτων επίλυσης προβλημάτων που είναι ευρύτερα γνωστή με τον όρο Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms).

Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, το ενδιαφέρον για τις διαδικασίες βελτιστοποίησης έχει αυξηθεί τόσο πολύ, ώστε να υπάρχουν πολύπλοκα και με πολύ αυστηρούς περιορισμούς προβλήματα, που να μπορούν να λυθούν μόνο προσεγγιστικά από τους σημερινούς υπολογιστές. Οι ΓΑ αποσκοπούν στην εξυπηρέτηση τέτοιου είδους προβλημάτων. Εάν και ανήκουν στην κατηγορία των στοχαστικών αλγορίθμων, διαφέρουν σε πολύ μεγάλο βαθμό από τους αλγόριθμους που εφαρμόζουν τυχαίες μεθόδους αναζήτησης και βελτιστοποίησης, αφού είναι σε θέση να συνδυάζουν στοιχεία και από άμεσες, και από στοχαστικές τεχνικές αναζήτησης. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος για τον οποίο οι ΓΑ θεωρούνται πιο εύρωστοι από τις υπάρχουσες μεθόδους άμεσης αναζήτησης. Ένα άλλο εξίσου σημαντικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι διατηρούν έναν πληθυσμό πιθανών λύσεων πάνω στον οποίο πειραματίζονται, σε αντίθεση με όλες τις άλλες μεθόδους αναζήτησης που επεξεργάζονται ένα μόνο σημείο του διαστήματος αναζήτησης. Ένας ΓΑ πραγματοποιεί αναζήτηση σε πολλές κατευθύνσεις με το να διατηρεί έναν πληθυσμό από πιθανές λύσεις και να υποστηρίζει καταγραφή και ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ αυτών των κατευθύνσεων. Η βασική ιδέα που κρύβεται πίσω από τους Γ.Α. είναι η μίμηση των μηχανισμών της βιολογικής εξέλιξης που απαντώνται στη φύση. Ο πληθυσμός υφίσταται μια προσομοιωμένη γενετική εξέλιξη. Σε κάθε γενιά, οι σχετικά «καλές» λύσεις αναπαράγονται, ενώ οι σχετικά «κακές» αφαιρούνται. Ο διαχωρισμός και η αξιολόγηση των διαφόρων λύσεων γίνεται με την βοήθεια μιας *αντικειμενικής συνάρτησης* ή *συνάρτησης καταλληλότητας (objective ή fitness function)*, η οποία παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο εξελίσσεται ο πληθυσμός.

Στόχος της διαδικασίας βελτιστοποίησης του μοντέλου κόστους που μελετάται στην παρούσα διπλωματική, είναι ο υπολογισμός βέλτιστων σεναρίων για την κατανομή των πλοίων και των ταχυτήτων τους ανά γραμμή για δεδομένες ροές

φορτίου με βάση μία αρχική εφικτή λύση. Όπως θα γίνει κατανοητό από όσα αναφέρονται σε αυτήν την ενότητα, οι Γ.Α αποτελούν την καταλληλότερη και πιο εύχρηστη μέθοδο για την εύρεση βέλτιστων εναλλακτικών σεναρίων για κάθε διαφορετική διάταξη του μοντέλου κόστους, λαμβάνοντας υπόψιν τις ιδαιτερότητες και τα χαρακτηριστικά του.

6.1.2 Δομή και τρόπος λειτουργίας

Η πρώτη εμφάνιση των Γ.Α. χρονολογείται στις αρχές του 1950, όταν διάφοροι επιστήμονες από το χώρο της βιολογίας αποφάσισαν να χρησιμοποιήσουν υπολογιστές στην προσπάθειά τους να προσομοιώσουν πολύπλοκα βιολογικά συστήματα. Η συστηματική τους ανάπτυξη όμως, που οδήγησε στην μορφή με την οποία είναι γνωστοί σήμερα, πραγματοποιήθηκε στις αρχές του 1970 από τον John Holland και τους συνεργάτες του στο Πανεπιστήμιο του Michigan.

Η δομή ενός απλού Γ.Α. έχει σε γενικές γραμμές ως εξής: Κατά την διάρκεια μιας γενιάς, ο Γ.Α. διατηρεί ένα πληθυσμό (population) από πιθανές λύσεις.Κάθε άτομο στον πληθυσμό ονομάζεται χρωμόσωμα (chromosome), αναπαριστώντας μία λύση στο πρόβλημα. Ένα χρωμόσωμα είναι μία αλυσίδα (string) από σύμβολα και είναι συνήθως (όχι πάντα) μια συμβολοσειρά από δυαδικά bit. Κάθε λύση αποτιμάται και δίνει ένα μέτρο της καταλληλότητας και ορθότητάς του. Αφού ολοκληρωθεί η αποτίμηση όλων των μελών του πληθυσμού, δημιουργείται ένας νέος πληθυσμός που προκύπτει από την επιλογή των πιο κατάλληλων στοιχείων του πληθυσμού της προηγούμενης γενιάς. Μερικά μέλη από τον καινούργιο αυτό πληθυσμό υφίστανται αλλαγές με την βοήθεια των γενετικών διαδικασιών της *διασταύρωσης και* της *μετάλλαξης* σχηματίζοντας νέες πιθανές λύσεις. Η διασταύρωση συνδυάζει τα στοιχεία των χρωμοσωμάτων δύο γονέων για να δημιουργήσει νέους απογόνους ανταλλάσσοντας κομμάτια από τους γονείς. Διαισθητικά μπορούμε να πούμε ότι η διασταύρωση εξυπηρετεί την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ διαφορετικών πιθανών λύσεων. Η διαδικασία της μετάλλαξης από την άλλη, αλλάζει αυθαίρετα ένα ή περισσότερα γονίδια ενός συγκεκριμένου χρωμοσώματος. Πραγματοποιείται με τυχαία αλλαγή γονιδίων με πιθανότητα ίση με το *ρυθμό μετάλλαξης (mutation rate).* Έτσι, μπορούμε να πούμε ότι η μετάλλαξη εξυπηρετεί την εισαγωγή νέων πιθανών λύσεων, διαφορετικών από τις υπάρχουσες, στον ήδη υπάρχοντα πληθυσμό.

Στην ουσία, ένας τυπικός ΓΑ περιλαμβάνει απλές λειτουργίες, που όμως κρύβουν μέσα τους μεγάλη ισχύ. Αυτός ο συνδυασμός απλοϊκότητας και ισχύος είναι το μεγαλύτερο θέλγητρο της τεχνικής τους. Στα παρακάτω, παρουσιάζονται τα βασικά στοιχεία, που πρέπει να έχει ένας αλγόριθμος, ώστε να θεωρείται γενετικός.

Αρχικά σε έναν ΓΑ πρέπει να υπάρχουν στοιχεία που θα τον συνδέουν με το πρόβλημα που επιλύει. Η κωδικοποίηση και η αντικειμενική συνάρτηση επιτελούν αυτό το σκοπό και είναι απαραίτητα συστατικά για έναν ΓΑ.

κωδικοποίηση

Η κωδικοποίηση αφορά ένα σύνολο πιθανών λύσεων του προβλήματος. Η αναπαράσταση των λύσεων πρέπει να γίνει με ένα μαθηματικό, φορμαλιστικό τρόπο, ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία από τον υπολογιστή. Εξάλλου, κωδικοποίηση υπάρχει και στο φυσικό μοντέλο (χρωμοσώματα) και μάλιστα όλες οι αλλαγές που παρατηρούνται στους οργανισμούς γίνονται πάνω στα κωδικοποιημένα χαρακτηριστικά των χρωμοσωμάτων. Κύριος στόχος της κωδικοποίησης είναι να αναπαριστά με ικανοποιητικό τρόπο τα επιμέρους χαρακτηριστικά των λύσεων, ώστε να διευκολύνει τις επόμενες λειτουργίες του αλγορίθμου (κυρίως την επιλογή). Αποτέλεσμα της κωδικοποίησης πρέπει να είναι η ύπαρξη ομοιοτήτων ανάμεσα στα άτομα με σκοπό την κατάλληλη εκμετάλλευση τους, διότι οι ομοιότητες βοηθούν την κατεύθυνση του ψαξίματος. Το σίγουρο είναι ότι η κωδικοποίηση είναι ένα κρίσιμο βήμα στην εφαρμογή του ΓΑ και, αν δεν είναι προσεκτική, πιθανότατα θα αποβεί μοιραία για την επιτυχία του. Η καταλληλότητα της κωδικοποίησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαίσθηση και την πείρα του σχεδιαστή.

αντικειμενική συνάρτηση

Το δεύτερο βασικό στοιχείο σύνδεσης ενός ΓΑ με το πρόβλημα που λύνει είναι η αντικειμενική συνάρτηση. Αυτή παίρνει ως είσοδο μια αποκωδικοποιημένη συμβολοσειρά και επιστρέφει μια τιμή, που είναι ανάλογη του πόσο καλά λύνει το πρόβλημα η συγκεκριμένη συμβολοσειρά. Η τιμή αυτή αποτελεί και τον καθοριστικό παράγοντα επιβίωσης και πολλαπλασιασμού ή όχι του ατόμου. Η αντικειμενική συνάρτηση παίζει το ρόλο του περιβάλλοντος στο μοντέλο. Ουσιαστικά, είναι η μόνη πληροφορία που δέχεται ο αλγόριθμος για το πρόβλημα που λύνει. Είναι σημαντικό αυτή η συνάρτηση να είναι εύκολα υπολογίσιμη, ώστε να μην επιβραδύνει τους ρυθμούς της διαδικασίας. Με τον καθορισμό της κωδικοποίησης και της αντικειμενικής συνάρτησης, πλέον, ορίζεται το πρόβλημα και ολοκληρώνεται το πρώτο στάδιο εφαρμογής ενός ΓΑ. Αξίζει να σημειωθεί η αυτονομία και ανεξαρτησία αυτού του σταδίου από τα επόμενα μέρη. Οι λειτουργίες που ακολουθούν από εδώ και πέρα δεν εξαρτώνται από το πώς γίνεται η αναπαράσταση των ατόμων στο τεχνητό περιβάλλον και με ποιο τρόπο αξιολογούνται οι ικανότητές τους. Αυτό είναι σπουδαίο χαρακτηριστικό, διότι επιτρέπει την διαπραγμάτευση πολλών προβλημάτων με μια απλή αλλαγή στην αντικειμενική συνάρτηση, ίσως και στην κωδικοποίηση. Η φάση ορισμού της κωδικοποίησης και της αντικειμενικής συνάρτησης υπάρχουν πάντα σε κάθε ΓΑ, ανεξαρτήτως του προβλήματος.

Γενετικές διαδικασιές

Στο επόμενο στάδιο περιλαμβάνονται λειτουργίες που ανήκουν στη φάση τρεξίματος του ΓΑ. Εδώ γίνεται ο κύριος όγκος της εργασίας και παράγεται το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης. Η δομή ενός ΓΑ αποτελείται από τα παρακάτω βήματα:

1. Αρχικοποίηση (Initialization)
2. Αποκωδικοποίηση (Decoding)
3. Υπολογισμός ικανότητας ή αξιολόγηση (Fitness calculation ή evaluation)
4. Αναπαραγωγή (Reproduction)
I. Επιλογή (Selection)
II. Διασταύρωση (Crossover ή mating)
III. Μετάλλαξη (Mutation)
5. Επανάληψη από το βήμα (2) μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού του ΓΑ(επίτευξη προκαθορισμένων γενεών,εξάντληση διατιθέμενου χρόνου,εντοπισμός καλύτερης λύσης, χειροκίνητος τερματισμός)

Η αρχικοποίηση είναι το βήμα στο οποίο ορίζεται ο αρχικός πληθυσμός, πάνω στον οποίο θα λάβουν χώρα οι λειτουργίες του ΓΑ. Ο πληθυσμός αυτός διαλέγεται με τυχαίο τρόπο ανάμεσα σε όλες τις δυνατές τιμές των μεταβλητών του προβλήματος, ενώ το μέγεθός του ορίζεται από το χρήστη. Σε μερικές υλοποιήσεις, η επιλογή των αρχικών σημείων γίνεται με ευρετικές μεθόδους, δίνοντας εξαρχής ένα πλεονέκτημα στην αναζήτηση. Αφού προκύψει η πρώτη γενιά, ο ΓΑ εισέρχεται στο επαναληπτικό μέρος του. Ο πληθυσμός πρέπει να αξιολογηθεί, δηλαδή να μετρηθεί η ικανότητα επιβίωσης του κάθε ατόμου χωριστά. Για να συμβεί αυτό πρέπει να γίνει αποκωδικοποίηση χαρακτηριστικών και έπειτα υπολογισμός της απόδοσης των ατόμων.

Ανάλογος είναι και ο ρόλος της αποκωδικοποίησης. Σε αντιστοιχία με το φυσικό μοντέλο, το ρόλο του γονότυπου (το σύνολο των «ορατών» χαρακτηριστικών και της συμπεριφοράς ενός ατόμου) παίζει η δομή της συμβολοσειράς με τα δυαδικά ψηφία ως αντίστοιχα των γονιδίων. Ο φαινότυπος (το σύνολο των «ορατών» χαρακτηριστικών και της συμπεριφοράς του ατόμου, που καθορίζονται από τις πληροφορίες των γονιδίων) αναφέρεται στην παρατηρήσιμη εμφάνιση μιας συμβολοσειράς, στο πώς φαίνεται στο περιβάλλον της. Περιβάλλον, όμως, θεωρείται η αντικειμενική συνάρτηση, άρα ο φαινότυπος μιας συμβολοσειράς αντιστοιχεί στην αποκωδικοποιημένη τιμή της, που ανήκει στο σύνολο ορισμού της αντικειμενικής συνάρτησης.

Σκοπός της λειτουργίας αξιολόγησης είναι να υπολογιστεί για κάθε άτομο του πληθυσμού η ικανότητα του για επιβίωση. Στη φύση οι ικανότητες των ατόμων δεν είναι προσδιορίσιμες με αυστηρό τρόπο. Είναι, όμως, καθορισμένες από το γενετικό υλικό των χρωμοσωμάτων τους.

αναπαραγωγή

Η σημαντικότερη λειτουργία του ΓΑ, είναι η αναπαραγωγή. Εδώ λαμβάνει χώρα ο κύριος όγκος της εργασίας του αλγορίθμου. Η δομή της αναπαραγωγικής διαδικασίας είναι σύνθετη. Περιλαμβάνει τα εξής μέρη: διασταύρωση και μετάλλαξη. Πριν την αναπαραγωγή, εκτελείται η διαδικασία της επιλογής.

✓ *επιλογή*

Με την επιλογή, βρίσκει εφαρμογή στα πλαίσια του αλγορίθμου, ο νόμος της επιβίωσης του ικανότερου. Μέσω αυτής της διαδικασίας, καθορίζεται ποια άτομα από τον υπάρχοντα πληθυσμό θα έχουν την ευκαιρία να λάβουν μέρος στην αναπαραγωγή και να κληροδοτήσουν στην επόμενη γενιά μέρος ή το σύνολο των χαρακτηριστικών τους. Στόχος της λειτουργίας της επιλογής είναι να επιτρέπει εκθετική αύξηση των ικανοτέρων ατόμων και τελικά, μετά από αναπαραγωγή αρκετών γενεών, την επικράτησή τους. ΓΑ χωρίς επιλογή στην αναπαραγωγική του διαδικασία ισοδυναμεί με τυχαίο ψάξιμο.

✓ *διασταύρωση*

Ο προσωρινός πληθυσμός που προέκυψε από τη διαδικασία της επιλογής πρέπει να περάσει από τη διαδικασία ζευγαρώματος για να πραγματοποιηθεί ένα είδος γονιμοποίησης, όπως συμβαίνει και στη φύση. Η διασταύρωση είναι μια απαραίτητη λειτουργία που συμβάλει αποφασιστικά στην επίδοση ενός ΓΑ. Στόχος της διασταύρωσης είναι η νέα γενιά που θα προκύψει μετά την εφαρμογή της να περιλαμβάνει άτομα που θα διαφέρουν από τους γονείς τους και θα φέρουν συνδυασμό των καλύτερων χαρακτηριστικών τους. Ένα ενδεικτικό της χρησιμότητας της διασταύρωσης είναι η ανακατεύθυνση του ψαξίματος σε νέες «απάτητες» περιοχές του χώρου αναζήτησης. Έτσι διευρύνεται το πεδίο δράσης του αλγορίθμου και αυξάνουν οι πιθανότητες επιτυχίας του. Επίσης, τα νέα άτομα περιλαμβάνουν συνδυασμούς χαρακτηριστικών των γονέων τους και με αυτό τον τρόπο μπορούν να προκύψουν επιτυχημένοι συνδυασμοί υψηλής ικανότητας. Υπάρχει, βέβαια, το ενδεχόμενο η διασταύρωση να δώσει χειρότερα παιδιά από τους γονείς, αλλά αυτά δεν θα έχουν μεγάλη πιθανότητα πολλαπλασιασμού στον επόμενο αναπαραγωγικό κύκλο, λόγω μικρής απόδοσης. Στην πράξη, η διασταύρωση χρησιμοποιείται με παραμετροποιημένη μορφή, δηλαδή λαμβάνει χώρα με πιθανότητα, την λεγόμενη *πιθανότητα διασταύρωσης (crossover probability)*, που καθορίζεται από το χρήστη του ΓΑ Συνήθως, αυτή η πιθανότητα ποικίλει από πρόβλημα σε πρόβλημα, ενώ είναι δυνατό και να αλλάζει κατά τον χρόνο τρεξίματος. Επίσης, πρέπει να αναφέρουμε ότι η τιμή αυτής της πιθανότητας επηρεάζει το χρόνο τρεξίματος του αλγορίθμου, δηλαδή τη σύγκλισή του.

✓ *μετάλλαξη*

Τελευταία στον κύκλο αναπαραγωγικής διαδικασίας και, ίσως, λιγότερο σημαντική, είναι η μετάλλαξη. Η λειτουργία της είναι απλή: Ενεργεί σε ένα μόνο οργανισμό κάθε φορά. Καθώς αντιγράφονται δυαδικά ψηφία από τον γονέα στον απόγονο, επιλέγεται τυχαία με μικρή πιθανότητα, τη λεγόμενη *πιθανότητα μετάλλαξης (mutation probability)*, ένα ψηφίο και αντιστρέφεται (από 0 σε 1 ή το αντίστροφο). Είναι πολύ σημαντικό η πιθανότητα να πραγματοποιηθεί η μετάλλαξη να είναι αρκετά μικρή

(περίπου μία μετάλλαξη σε κάθε χίλια ψηφία που αντιγράφονται), γιατί σε αντίθετη περίπτωση ο ΓΑ εκφυλίζεται σε τυχαίο ψάξιμο. Η μετάλλαξη λειτουργεί ως ασφαλιστική δικλείδα για τις περιπτώσεις, κατά τις οποίες η επιλογή και η διασταύρωση, ενδεχομένως, χάσουν κάποιες πολύτιμες γενετικές πληροφορίες. Όταν συμβαίνει, επιφέρει ποικιλία στον πληθυσμό, ανακατευθύνει την αναζήτηση και εξασφαλίζει ότι κανένα σημείο του χώρου αναζήτησης δεν αποκλείεται από τη διαδικασία του ψαξίματος. (*Σ.Λυκοθανάσης (2001), Γενετικοί Αλγόριθμοι και Εφαρμογές, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών*)

6.1.3 Πλεονεκτήματα έναντι άλλων μεθόδων

Όπως αναφέρθηκε, οι Γ.Α. πλεονεκτούν αισθητά στη λύση προβλημάτων αναζήτησης και βελτιστοποίησης από τις παραδοσιακές μεθόδους. Αυτό συμβαίνει, διότι διαφέρουν θεμελιωδώς από αυτές. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά που τους διαφοροποιούν, αλλά και τους δίνουν υπεροχή :

1) Κάνουν αναζήτηση σε πολλά σημεία ταυτόχρονα και όχι μόνο σε ένα. Σε πολλές μεθόδους βελτιστοποίησης, η επεξεργασία γίνεται βήμα προς βήμα, πηγαίνοντας προσεκτικά από σημείο σε σημείο του πεδίου ορισμού του προβλήματος. Αυτό το βήμα προς βήμα ενέχει αρκετούς κινδύνους, ο κυριότερος από τους οποίους είναι να περιοριστεί η αναζήτηση σε μια περιοχή τοπικού ακρότατου, που δεν είναι ολικό. Οι Γ.Α. εξαλείφουν αυτόν τον κίνδυνο ενεργώντας ταυτόχρονα πάνω σε ένα ευρύ σύνολο σημείων. Επίσης έχουν από τη φύση τους το στοιχείο του παραλληλισμού. Σε κάθε τους βήμα επεξεργάζονται μεγάλες ποσότητες πληροφορίας, αφού κάθε άτομο θεωρείται αντιπρόσωπος πολλών άλλων. Είναι, λοιπόν, προφανές ότι μπορούν να καλύψουν με αποδοτικό ψάξιμο μεγάλους χώρους σε μικρούς χρόνους.

2) Χρησιμοποιούν μόνο την αντικειμενική συνάρτηση και καμία επιπρόσθετη πληροφορία. Πολλές μέθοδοι αναζήτησης απαιτούν αρκετές βοηθητικές πληροφορίες για τη συνάρτηση που επεξεργάζονται. Τέτοιου είδους πληροφορίες δεν προαπαιτούνται από τους Γ.Α. Το ψάξιμό τους είναι κατά κάποιο τρόπο "τυφλό". Αξιοποιούν μόνο όση πληροφορία περιέχεται στην αντικειμενική συνάρτηση πράγμα που τους προσδίδει μεγάλη ευελιξία.

3) Χρησιμοποιούν πιθανοθεωρητικούς κανόνες μετάβασης και όχι ντετερμινιστικούς: Η χρήση πιθανοτικών κανόνων μετάβασης είναι κυρίαρχο γνώρισμα των Γ.Α., χωρίς αυτό να σημαίνει ότι η όλη διαδικασία βαδίζει στην τύχη.

4) Μπορούν να επιλύουν δύσκολα προβλήματα γρήγορα και αξιόπιστα. Ένας από τους σημαντικούς λόγους χρήσης των Γ.Α. είναι η μεγάλη τους αποδοτικότητα. Τόσο η θεωρία, όσο και η πράξη έχουν δείξει ότι προβλήματα που έχουν πολλές, δύσκολα προσδιορισμένες λύσεις μπορούν να αντιμετωπιστούν καλύτερα από Γ.Α. Είναι δε

αξιοσημείωτο ότι συναρτήσεις που παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις και καθιστούν ανεπαρκείς άλλες μεθόδους στην εύρεση των ακρότατών τους, για τους Γ.Α. δεν αποτελούν σημεία δυσχέρειας.

5) Μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με τα υπάρχοντα μοντέλα και συστήματα. Οι Γ.Α. προσφέρουν το σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης τους με προσθετικό τρόπο στα μοντέλα που χρησιμοποιούνται σήμερα, μη απαιτώντας την επανασχεδίασή τους. Μπορούν εύκολα να συνεργαστούν με τον υπάρχοντα κώδικα, χωρίς μεγάλο κόπο. Αυτό συμβαίνει γιατί δουλεύουν με μια κωδικοποίηση του συνόλου τιμών που μπορούν να λάβουν οι μεταβλητές και όχι με τις ίδιες τις μεταβλητές του προβλήματος. Επίσης μπορούν να συμμετέχουν σε υβριδικές μορφές με άλλες μεθόδους. Αν και η ισχύς των Γ.Α. είναι μεγάλη, σε μερικές ειδικές περιπτώσεις προβλημάτων, όπου άλλες μέθοδοι συμβαίνει να έχουν πολύ υψηλή αποδοτικότητα, λόγω εξειδίκευσης, υπάρχει η δυνατότητα χρησιμοποίησης ενός υβριδικού σχήματος Γ.Α. με άλλη μέθοδο.

6) Εφαρμόζονται σε πολύ περισσότερα πεδία από κάθε άλλη μέθοδο. Το χαρακτηριστικό που τους εξασφαλίζει αυτό το πλεονέκτημα είναι η ελευθερία επιλογής των κριτηρίων που καθορίζουν την επιλογή μέσα στο τεχνικό περιβάλλον.
Δεν απαιτούν περιορισμούς στις συναρτήσεις που επεξεργάζονται. Ο κύριος λόγος που καθιστά τις παραδοσιακές μεθόδους δύσκαμπτες και ακατάλληλες για πολλά προβλήματα είναι η απαίτησή τους για ύπαρξη περιορισμών, όπως ύπαρξη παραγώγων, συνέχεια, όχι "θορυβώδεις" συναρτήσεις κ.τ.λ. Τέτοιου είδους ιδιότητες είναι αδιάφορες για τους Γ.Α. πράγμα που τους κάνει κατάλληλους για μεγάλο φάσμα προβλημάτων.

7) Είναι μία μέθοδος που κάνει ταυτόχρονα εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης και εκμετάλλευση της ήδη επεξεργασμένης πληροφορίας. Ο συνδυασμός αυτός σπάνια συναντάται σε οποιαδήποτε άλλη μέθοδο. Οι Γ.Α. επιτυγχάνουν το βέλτιστο συνδυασμό εξερεύνησης και εκμετάλλευσης, πράγμα που τους κάνει ιδιαίτερα αποδοτικούς και ελκυστικούς. (*Σ.Λυκοθανάσης (2001), Γενετικοί Αλγόριθμοι και Εφαρμογές, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών*)

8) Τέλος, είναι εύκολα επεκτάσιμοι και εξελίξιμοι. Δεν αντιστέκονται σε αλλαγές, επεκτάσεις και μετεξελίξεις, ανάλογα με την κρίση του χρήστη.

Κατ' αντιστοιχία στο μοντέλο μας, όπως θα δούμε παρακάτω, οι μεταβλητές απόφασης σχετίζονται με την κατανομή των επιλεγμένων τύπων πλοίων στις τρεις γραμμές του συστήματος, παίζοντας τον ρόλο των χρωμοσωμάτων.Η αντικειμενική συνάρτηση καθορίζεται από τη γενετική αναπαράσταση και μετρά την ποιότητα της εκάστοτε λύσης, επιστρέφει δηλαδή μια τιμή, που είναι ανάλογη του πόσο καλά λύνει το πρόβλημα μια συγκεκριμένη μεταβλητή εισόδου.

6.2 ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

6.2.1 Εισαγωγή

Ο χώρος της βελτιστοποίησης στα εφαρμοσμένα μαθηματικά αναφέρεται στην αναζήτηση βέλτιστων παραμέτρων ενός - συνήθως περίπλοκου - συστήματος. Προβλήματα βελτιστοποίησης απαντώνται σε τομείς όπως η μηχανική, η οικονομία, η επιχειρησιακή έρευνα, αλλά και στους περισσότερους, αν όχι σε όλους, τους επιστημονικούς τομείς.

Στα μαθηματικά, ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης διατυπώνεται σαν πρόβλημα ελαχιστοποίησης ή μεγιστοποίησης μιας συνάρτησης μίας μεταβλητής ή πολλών μεταβλητών. Ενώ στην ελαχιστοποίηση (ή μεγιστοποίηση) συναρτήσεων μίας μεταβλητής μπορούν να χρησιμοποιηθούν αναλυτικές και αλγεβρικές μέθοδοι για τον ακριβή ορισμό ελάχιστων (ή μέγιστων), στη μελέτη συναρτήσεων πολλών μεταβλητών χρησιμοποιούνται κυρίως αριθμητικές μέθοδοι για έναν προσεγγιστικό ορισμό ελάχιστων (ή μέγιστων) σημείων. Στις περισσότερες περιπτώσεις ενασχόλησης με προβλήματα βελτιστοποίησης σε σύγχρονες εφαρμογές, εκείνα που παρουσιάζουν μια μεταβλητή τείνουν να αποτελέσουν την εξαίρεση παρά τον κανόνα. Έτσι, καλούμαστε στην πλειονότητα των περιπτώσεων να επιλύσουμε προβλήματα με πολλά και συνήθως αντικρουόμενα κριτήρια.

Και αν στην απλή περίπτωση συναρτήσεων μίας μεταβλητής ο υπολογισμός μιας ιδανικής λύσης είναι δυνατός, σε περιπτώσεις βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων τα πράγματα περιπλέκονται σημαντικά. Σε αυτά, ο χώρος αναζήτησης είναι μερικώς διατεταγμένος *(partially ordered)* , με αποτέλεσμα να καθίσταται δυνατή η πλήρης διάταξη όλων των εναλλακτικών λύσεων που προκύπτουν. Σε τέτοιες περιπτώσεις που τα κριτήρια λήψης αποφάσεων είναι αντικρουόμενα προκύπτουν τα εξής ερωτήματα: μπορεί να προσδιοριστεί μια επιλογή που να είναι αντικειμενικά βέλτιστη; Υπάρχει δυνατότητα συστηματικού διαχωρισμού των ικανοποιητικών από τις μη ικανοποιητικές επιλογές; Με ποια υπολογιστική διαδικασία είναι δυνατή η εύρεση εναλλακτικών ικανοποιητικών επιλογών;

Όπως γίνεται κατανοητό, το πρόβλημα της κατάταξης των λύσεων σχετίζεται με την αδυναμία αξιολόγησης δύο εφικτών λύσεων που συμπεριφέρονται με τρόπο διαφορετικό σε σχέση με τα διάφορα κριτήρια, μιας και η μία λύση υπερτερεί ως προς το ένα κριτήριο και υστερεί ως προς το άλλο, σε αντίθεση με την άλλη που συμπεριφέρεται αντιστρόφως. Σε τέτοιες καταστάσεις για τον χειρισμό ενός προβλήματος ταυτόχρονης βελτιστοποίησης πολλαπλών και αντικρουόμενων κριτηρίων, απαιτείται ο καθορισμός μιας διαδικασίας αξιολόγησης - σύγκρισης λύσεων, όπου η επιλογή της βέλτιστης λύσης μπορεί να είναι εντελώς υποκειμενική και να έγκειται στην κρίση και στην εμπειρία του χρήστη, ή αλλιώς μπορεί να

βασίζεται σε κάποια επιπλέον πληροφορία, όπως η ενσωμάτωση της έννοιας της «*σπουδαιότητας*» ή «βαρύτητας» του κάθε κριτηρίου.

Εφόσον λοιπόν λαμβάνονται υπόψιν περισσότερα του ενός κριτήρια, τα προβλήματα βελτιστοποίησης χαρακτηρίζονται από ένα σύνολο βέλτιστων λύσεων, γνωστές ως *Pareto βέλτιστες λύσεις (Pareto Optimal)*, προς τιμήν του V.Pareto (1848-1923), του οποίου η συνεισφορά στην οικονομία είναι σημαντική, τόσο στη μελέτη της κατανομής του εισοδήματος και στην ανάλυση των ατομικών επιλογών όσο και σε προβλήματα βελτιστοποίησης με πολλές αντικειμενικές συναρτήσεις, παρουσιάζοντας το πρόβλημα των ανταγωνιστικών κριτηρίων σε διάφορα οικονομικά προβλήματα. Οι *βέλτιστες Pareto λύσεις* είναι το υποσύνολο των λύσεων εκείνων στις οποίες δεν κυριαρχεί καμία άλλη.

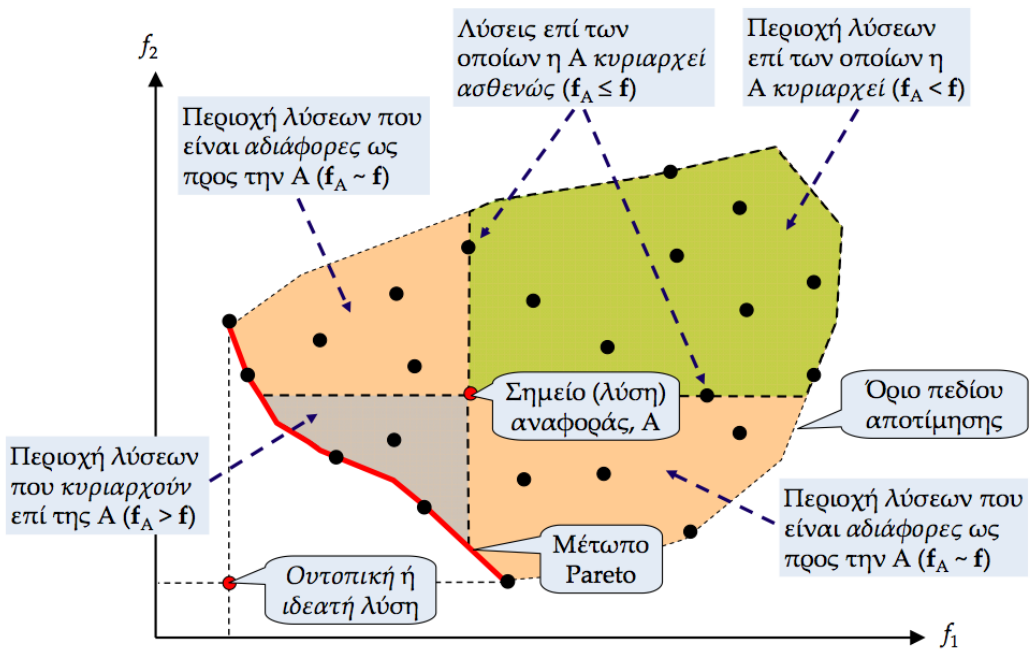
6.2.2 Η έννοια των Pareto βέλτιστων λύσεων

Στα μονοκριτηριακά προβλήματα, το εφικτό σύνολο είναι πλήρως διατεταγμένο με βάση την αντικειμενική συνάρτηση $\boldsymbol{f}$. Αν σε ένα βαθμωτό πρόβλημα ελαχιστοποίησης θεωρηθούν δύο εναλλακτικά εφικτά σημεία $\mathbf{x_1}$, $\mathbf{x_2} \in X_f$., το $\mathbf{x_1}$ υπερτερεί σε σχέση με το $\mathbf{x_2}$ εφόσον $f(\mathbf{x_1}) < f(\mathbf{x_2})$. Κατά συνέπεια, ως ολικά βέλτιστο θεωρείται το σημείο για το οποίο ισχύει $f(\mathbf{x}^*) < f(\mathbf{x})$ για κάθε $\mathbf{x} \in X_f$.

Στην περίπτωση που εμπλέκονται περισσότερα του ενός κριτήρια, τα πράγματα διαφοροποιούνται σημαντικά. Γενικά, στα προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων, το εφικτό σύνολο X_f δεν είναι πλήρως διατεταγμένο, αλλά μερικώς. Για την αντιμετώπιση λοιπόν, τέτοιου είδους καταστάσεων, εφαρμόζεται η θεωρία της ***κυριαρχίας κατά Pareto*** , όσον αφορά την σχέση μεταξύ δύο τυχαίων λύσεων ενός προβλήματος:

Έστω σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων δύο εφικτές λύσεις $\mathbf{x}_1$ και $\mathbf{x}_2$. Εφόσον $\mathbf{f}(\mathbf{x}_1) < \mathbf{f}(\mathbf{x}_2)$, η επιλογή 1 **κυριαρχεί ισχυρώς** έναντι της επιλογής 2, ενώ αν $\mathbf{f}(\mathbf{x}_1) \leq \mathbf{f}(\mathbf{x}_2)$, η επιλογή 1 **κυριαρχεί ασθενώς** έναντι της επιλογής 2. Στην περίπτωση που ισχύει $f_i(\mathbf{x}_1) \leq f_i(\mathbf{x}_2)$ για ορισμένα κριτήρια και $f_i(\mathbf{x}_1) > f_i(\mathbf{x}_2)$ για τα υπόλοιπα κριτήρια, τότε οι επιλογές $\mathbf{f}(\mathbf{x}_1)$ και $\mathbf{f}(\mathbf{x}_2)$ θεωρούνται **αδιάφορες** (indifferent) μεταξύ τους, σχέση που συμβολίζεται ως $\mathbf{f}(\mathbf{x}_1) \sim \mathbf{f}(\mathbf{x}_2)$.

Το ***Διάγραμμα 6.1*** που ακολουθεί για μία τυχαία λύση **A**, είναι άκρως επεξηγηματικό.



***Διάγραμμα 6.1**: Γεωμετρική ερμηνεία της κυριαρχίας κατά Pareto*

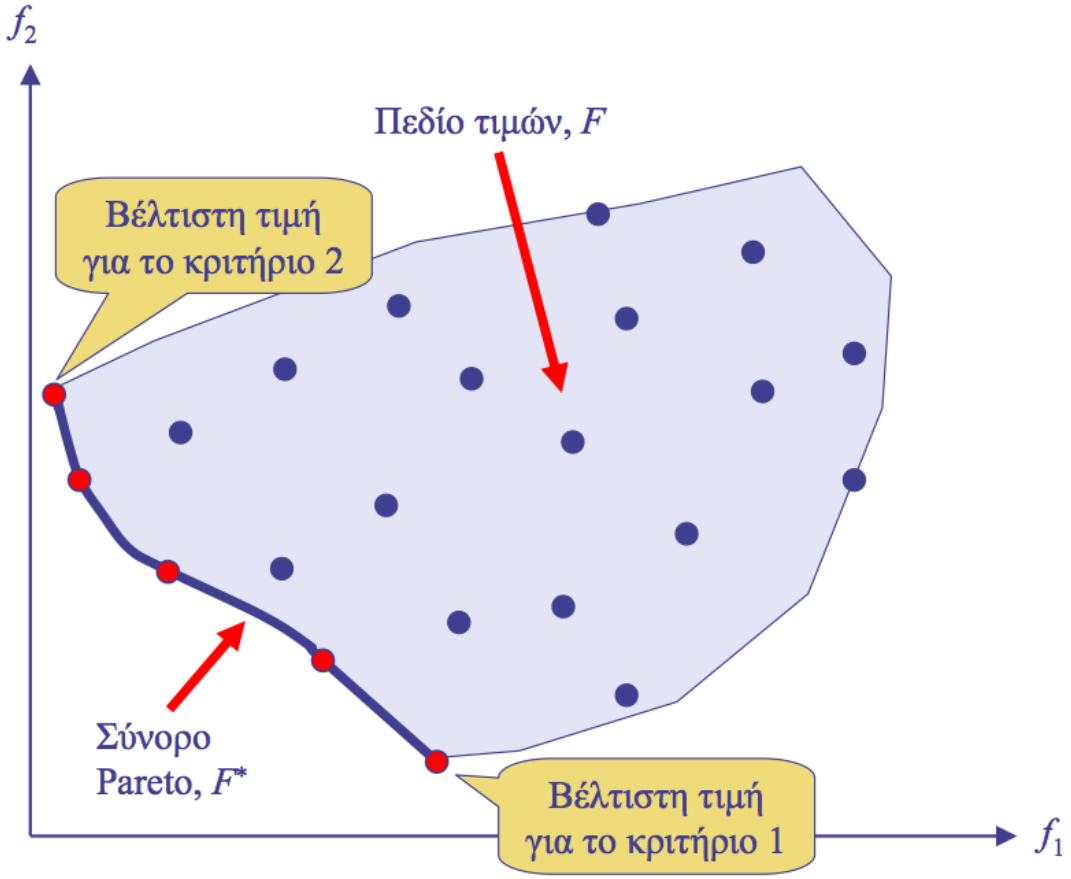
Η λύση που απεικονίζεται σπό το σημείο **Α** είναι καλύτερη από τη λύσεις που βρίσκονται εντός του πράσινου χωρίου, αφού παρουσιάζει μικρότερη τιμή και για τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις f_1 και f_2. Επίσης, μία λύση θεωρείται καλύτερη από μια άλλη λύση ακόμη και στην περίπτωση που βελτιώνει την τιμή του ενός μόνο κριτηρίου, οπως στις λύσεις επί των οποίων η Α κυριαρχεί ασθενώς. Από την άλλη, η γκρι περιοχή περιλαμβάνει τα αντικειμενικά διανύσματα $\boldsymbol{f(x)}$,τα οποία αντιστοιχούν σε λύσεις $\boldsymbol{x} \in X_f$, οι οποίες κυριαρχούν της λύσης που απεικονίζεται από το σημείο **Α**. Τέλος, όλες οι υπόλοιπες σκιασμένες περιοχές, δεν μπορούν να συγκριθούν με τη λύση που απεικονίζεται από το σημείο **Α**.

Σύμφωνα λοιπόν με την κυριαρχία κατά Pareto, προκύπτουν οι ακόλουθοι ορισμοί της ***βελτιστοποίησης κατά Pareto*** *(Pareto Optimality)* ενός πολυκριτηριακού προβλήματος (θεωρείται πρόβλημα ελαχιστοποίησης των κριτηρίων) :

- *Ορισμός 1* : Ένα εφικτό σημείο $\mathbf{x}^* \in X$ είναι βέλτιστο εφόσον δεν κυριαρχείται από κανένα άλλο σημείο του εφικτού χώρου , δηλαδή δεν υπάρχει άλλο εφικτό σημείο $\mathbf{x} \in X$ τέτοιο ώστε $\mathbf{f}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{f}(\mathbf{x}^*)$.
- *Ορισμός 2* : Ένα εφικτό σημείο $\mathbf{x}^* \in X$ είναι βέλτιστο, εφόσον δεν υπάρχει διάνυσμα $\mathbf{x} \in X$ που να μπορεί να βελτιώσει κάποιο κριτήριο f_i χωρίς ταυτόχρονα να χειροτερέψει τουλάχιστον ένα άλλο κριτήριο f_j.

Οι παραπάνω ορισμοί οδηγούν σε ένα σύνολο εφικτών λύσεων $\mathbf{x}^*$ που καλούνται *βέλτιστες Pareto* ή *μη κατώτερες* (non-inferior) ή *μη κυριαρχούμενες* (non-dominated), συμβολίζεται με X^* και καλείται *σύνολο Pareto* (Pareto set). Η απεικόνισή του, F^*,

ορίζει ένα υποσύνολο του πεδίου αποτίμησης F $(F^* \subseteq F)$, που καλείται *μέτωπο(σύνορο) Pareto* (Pareto front) (***Διάγραμμα 6.2***).



Διάγραμμα 6.2*: Γεωμετρική απεικόνηση του συνόρου Pareto*

Τα βέλτιστα Pareto σημεία μιας διανυσματικής συνάρτησης είναι *μαθηματικά ισοδύναμα·* στην πράξη, εφόσον απαιτείται η επιλογή μιας μοναδικής λύσης, προκύπτει η ανάγκη προσδιορισμού του *καλύτερα συμβιβαστικού* (bestcompromise) εξ αυτών, είτε κατά την κρίση του αναλυτή ή βάσει ενός βαθμωτού μέτρου συνάθροισης των κριτηρίων, που καλείται *συνάρτηση χρησιμότητας* (utility function). Ωστόσο, η έννοια της συνάρτησης χρησιμότητας ξεφεύγει των ορίων της παρούσας μελέτης.

6.2.3 Λήψη Απόφασης και η έννοια της καλύτερα συμβιβαστικής λύσης

Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές, είναι αναγκαία η επιλογή μίας και μοναδικής λύσης, που θεωρείται, όπως τονίσαμε παραπάνω, ως ο καλύτερος συμβιβασμός και επιλέγεται σύμφωνα με την υποκειμενική κρίση του αναλυτή. Κατά την προσπάθεια επίλυσης πολυκριτηριακών προβλημάτων, ο χρηστης καλείται να αντιμετωπίσει δύο ειδών δυσκολίες: την *αναζήτηση λύσεων και τη λήψη απόφασης (decision making)***.** Η αναζήτηση λύσεων, αναφέρεται στη διαδικασία

βελτιστοποίησης όπου διερευνάται ο εφικτός χώρος προκειμένου να προκύψουν οι *βέλτιστες κατά Pareto* λύσεις και όπως είναι φυσικό μεγάλοι και σύνθετοι χώροι αναζήτησης δυσχεραίνουν τον εντοπισμό τους. Από την άλλη, η λήψη απόφασης σχετίζεται με το πρόβλημα επιλογής από το σύνολο των βέλτιστων κατά Pareto λύσεων, μιας κατάλληλης συμβιβαστικής λύσης. Με βάση λοιπόν τον τρόπο με τον οποίο συνδυάζονται η βελτιστοποίηση και η διαδικασία της επιλογής, οι μέθοδοι βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων χωρίζονται σε τρεις γενικές κατηγορίες:

- ***Επιλογή πριν την αναζήτηση.*** Τα επιμέρους κριτήρια σταθμίζονται σε μία ενιαία αριθμητική έκφραση, που συναντά την αντικειμενική συνάρτηση ενός προβλήματος βαθμωτής βελτιστοποίησης. Συνεπώς, η βέλτιστη λύση του βαθμωτού προβλήματος ταυτίζεται με την καλύτερη συμβιβαστική λύση του πολυκριτηριακού προβλήματος βελτιστοποίησης.

- ***Επιλογή μετά την αναζήτηση.*** Διατυπώνεται μία διανυσματική αντικειμενική συνάρτηση, συνιστώσες της οποίας είναι τα επιμέρους κριτήρια, και επιλύεται το πολυκριτηριακό πρόβλημα για τον εντοπισμό του συνόλου των βέλτιστων κατά Pareto λύσεων. Ακολούθως, επιλέγεται μία εξ' αυτών, με βάση την υποκειμενική κρίση του αναλυτή.

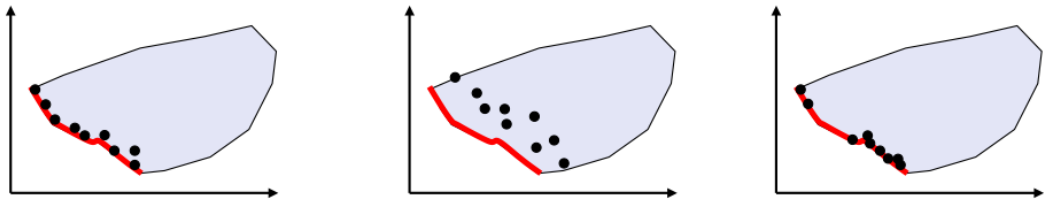
- ***Επιλογή κατά την αναζήτηση.*** Η βελτιστοποίηση γίνεται κατά τρόπο διαδραστικό, ώστε να ενημερώνεται ο αναλυτής για την εξέλιξη της διαδικασίας αναζήτησης λύσεων και να παρεμβαίνει σε αυτήν. Αξιολογώντας τα αποτελέσματα, ο αναλυτής μπορεί να αναπροσαρμόσει τις προτιμήσεις του ή και να ενσωματώσει νέα κριτήρια, καθοδηγώντας τη διαδικασία αναζήτησης προς την επιθυμητή γι' αυτόν κατεύθυνση. *(Α. Ευστρατιάδης και Δ. Κουτσογιάννης (2004), Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, ΕΜΠ)*

Όσον αφορά τα παραπάνω, οι κλασικές τεχνικές πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης όπως η *μέθοδος των βαρών* (αντικειμενική συνάρτηση ως γραμμικός συνδυασμός των επιμέρους κριτηρίων, με χρήση προεπιλεγμένων συντελεστών βάρους), η *μέθοδος προγραμματισμού στόχων(*εισάγονται τιμές-στόχοι για κάθε κριτήριο υπό την μορφή «συναρτήσεων penalty») και η *μέθοδος περιορισμών* (βελτιστοποιείται ένα πρωτεύον κριτήριο, θεωρώντας τα υπόλοιπα ως μαθηματικούς περιορισμούς που φράσσονται από επιτρεπόμενα όρια), μειώνουν τον χώρο αναζήτησης και διευκολύνουν σημαντικά το πρόβλημα, ιδαίτερα σε περιπτώσεις περίπλοκων προβλημάτων όπως αυτού της βελτιστοποίησης που πραγματεύεται η παρουσα διπλωματική,. Ωστόσο προκύπτουν προβλήματα όπως:

- Αυθαίρετες διατυπώσεις που δεν αποκλείουν την «καθοδήγηση» της διαδικασίας σε μια προαποφασισμένη επιλογή,
- βήμα-προς-βήμα προσέγγιση του μετώπου Pareto (υπολογιστικός φόρτος).
- αριθμητικές δυσχέρειες (ευαισθησία στο σχήμα του μετώπου Pareto, αδυναμία εντοπισμού μη κυρτών περιοχών του, προβλήματα κλίμακας λόγω μη συμμετρούμενων κριτηρίων, εισαγωγή περιορισμών, κτλ.),

– αδυναμία αναγνώρισης των ανταγωνισμών των κριτηρίων.

Με πολλά από τα παραπάνω προβλήματα ήρθαμε αντιμέτωποι κατά την διαδικασία βελτιστοποίησης και όπως είναι κατανοητό η υποκειμενική κρίση και η εμπειρία έπαιξαν σημαντικό ρόλο. Ωστόσο, η διαδικασία αναζήτησης θα πρέπει να αποσκοπεί στον εντοπισμό όχι μιας μεμονωμένης λύσης αλλά ενός συνόλου (πληθυσμού) σημείων, αντιπροσωπευτικών του συνόλου Pareto, και αυτό ακριβώς κάνουν σύγχρονες εξελικτικές τεχνικές, όπως αυτή των γενετικών αλγορίθμων που χρησιμοποιούμε στο μοντέλο μας. Δεδομένου ότι σε ένα πρόβλημα συνεχών μεταβλητών οι Pareto βέλτιστες λύσεις είναι άπειρες, κριτήρια επιτυχίας της διαδικασίας αναζήτησης είναι η σύγκλιση του τελικού πληθυσμού προς το σύνορο Pareto και η κατά το δυνατόν πιο ομοιόμορφη κάλυψη του συνόρου Pareto (***Διάγραμμα 6.3***).



α) ***β)*** ***γ)***

Διάγραμμα 6.3*: Περιπτώσεις σύγκλισης στο σύνορο Pareto.α) Ο πληθυσμός έχει συγκλίνει ομοιόμορφα στο σύνορο Pareto, β) Ο πληθυσμός δεν έχει συγκλίνει στο πραγματικό σύνορο Pareto, γ) Τα σημεία δεν είναι καλά κατανεμημένα στο σύνορο Pareto*

Συμπερασματικά, εφόσον το μέτρο επίδοσης ενός συστήματος περιλαμβάνει πολλαπλά, αντικρουόμενα μεταξύ τους, κριτήρια, δεν είναι δυνατή η εύρεση μιας εφικτής επιλογής που να βελτιστοποιεί ταυτόχρονα το σύνολο των κριτηρίων. Από την άλλη, δεν υπάρχει αντικειμενικός τρόπος προσδιορισμού της πλέον συμβιβαστικής λύσης. Η τελική επιλογή είναι ζήτημα προσωπικής κρίσης, διαίσθησης και εμπειρίας.

Στις ενότητες που ακολουθούν, το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης του λειτουργικού κόστους ορίζεται μέσα σε ένα πλαίσιο, παρόμοιο με αυτό που περιγράφηκε παραπάνω. Στόχος είναι, αφενός το πρόβλημα να οριστεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να περιορίζεται σε κάποιο αναγκαίο βαθμό ο τεράστιος όγκος των πιθανών εφικτών λύσεων και αφετέρου οι βέλτιστες κατά Pareto λύσεις να απεικονιστούν με όσο το δυνατόν μικρότερες αποκλίσεις εξαιτίας της πολυπλοκότητας του προβλήματος, με σκοπό την ορθή χάραξη του αποτελεσματικού μετώπου ετήσιου λειτουργικού κόστους- εκπομπών ρύπων.

6.3 ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ – ΤΑ ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Το μοντέλο ελαχιστοποίησης του ετήσιου λειτουργικού κόστους αναπτύσσεται σε λογιστικό φύλλο Microsoft – Excel 2007. Τα αποτελέσματα που θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο εξάγονται με την χρήση ενός πακέτου προγραμμάτων που λειτουργούν μέσω του Excel ως add-ins, της σουϊτας ***The Decision Tools Suite*** της εταιρείας ***Palisade***. Πιο συγκεκριμένα δύο εξ'αυτών, τα ***Evolver 5.5*** και ***TopRank 5.5***, χρησιμοποιούνται για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

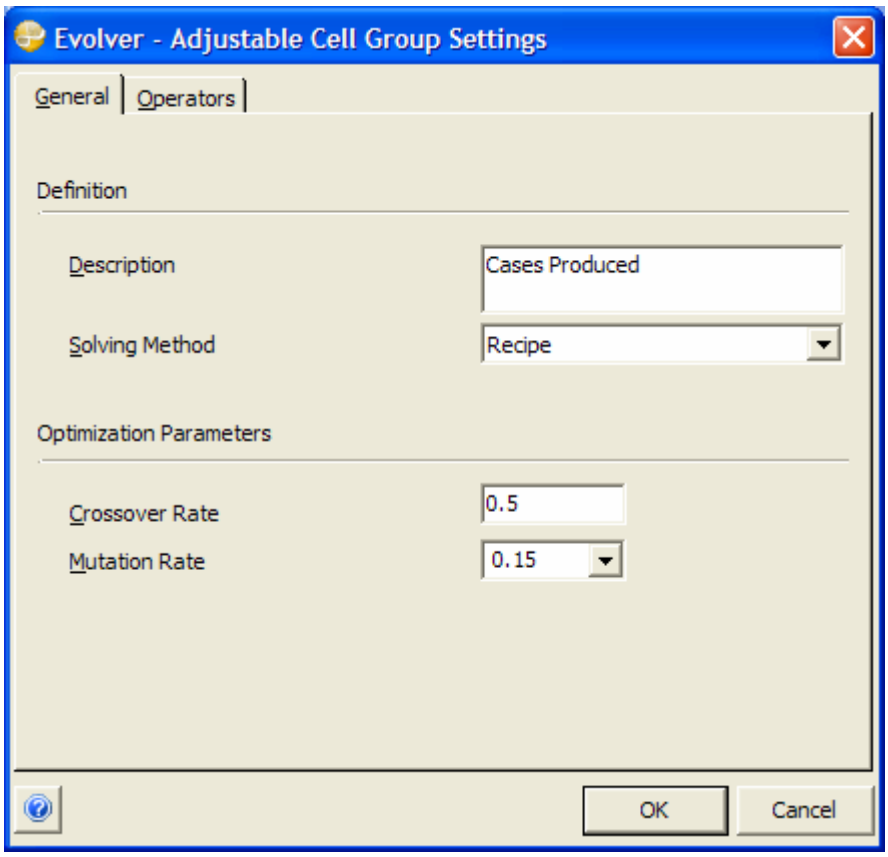
Η μηχανή των Γενετικών Αλγορίθμων του ***Evolver 5.5***, στην προσπάθεια εύρεσης των βέλτιστων λύσεων, χρησιμοποιεί διαδικασίες για την κωδικοποίηση των μεταβλητών απόφασης σε χρωμοσώματα και την περαιτέρω διασταύρωση (crossover) και μετάλλαξη (mutation) τους σύμφωνα με όσα περιγράψαμε στην προηγούμενη ενότητα. Λειτουργώντας ως add-in του Excel, το ***Evolver*** επιτρέπει την πλήρη χρήση όλων των εργαλείων του Excel, τύπους, συναρτήσεις, μακροεντολές, καθιστώντας εφικτή την δημιουργία όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικών μοντέλων για κάθε πρόβλημα.

Σε αντίθεση με άλλα εργαλεία βελτιστοποίησης που οδηγούν τους χρήστες σε υποθέσεις σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρονται οι μεταβλητές ενός προβλήματος, με αποτέλεσμα την κατασκευή απλοϊκών ή μη ρεαλιστικών μοντέλων για το εκάστοτε πρόβλημα, το ***Evolver***, μπορεί όχι μόνο να λύσει απλούς γραμμικούς ή μη γραμμικούς τύπους προβλημάτων, αλλά και πολυάριθμα συνδυαστικά προβλήματα, όπου οι μεταβλητές απόφασης πρέπει να μεταβάλλονται ή να συνδυάζονται μεταξύ τους, όπως ακριβώς συμβαίνει και στο δικό μας πρόβλημα, επιτρέποντας έτσι την ρεαλιστική βελτιστοποίηση ποικίλων προβλημάτων, διαφορετικού βαθμού πολυπλοκότητας.

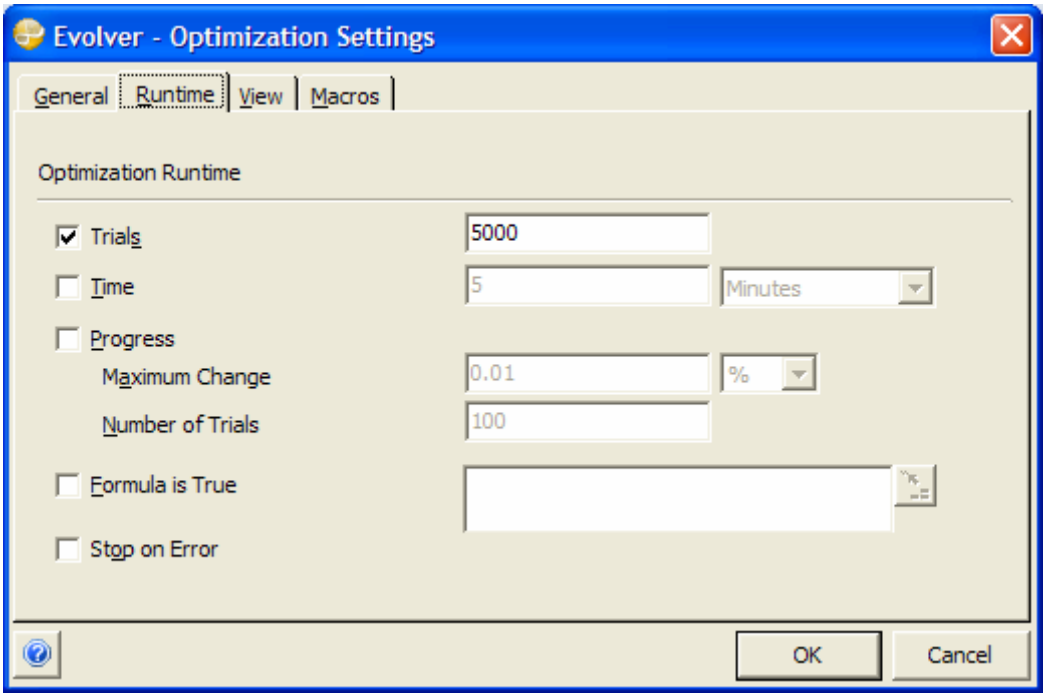
Επιπλέον, ένα ακόμα πλεονέκτημα του Evolver είναι η δυνατότητα να αναζητεί λύσεις σε όλο το διάστημα της αναζήτησης, σύμφωνα με τις αρχές των γενετικών αλγορίθμων, επιχειρώντας με αυτόν τον τρόπο την εύρεση μιας λύσης που κυριαρχεί έναντι των τοπικών λύσεων. Αντιθέτως, τα περισσότερα προγράμματα βελτιστοποίησης (όπως το *ILOG CPLEX Optimizer* της IBM, πρόγραμμα με το οποίο έγινε προσπάθεια για βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης του ομολογουμένως σύνθετου προβλήματός μας, πριν καταλήξουμε στην χρήση του ***Evolver***), λειτουργούν καθαρά μαθηματικά για την εύρεση των βέλτιστων λύσεων, περιορίζόμενα στην χρήση μιας δοθείσας εφικτής λύσης, αναζητώντας μια βελτιστοποιημένη λύση στην περιοχή της προηγούμενης, με αποτέλεσμα πολλές φορές η τοπική λύση να βρίσκεται αρκετά μακριά από την βέλτιστη λύση.

Δεν έχουμε λεπτομερή πληροφόρηση για τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί η μηχανή των γενετικών αλγορίθμων στο ***Evolver***. Ο χρήστης μορεί να παρέμβει στην

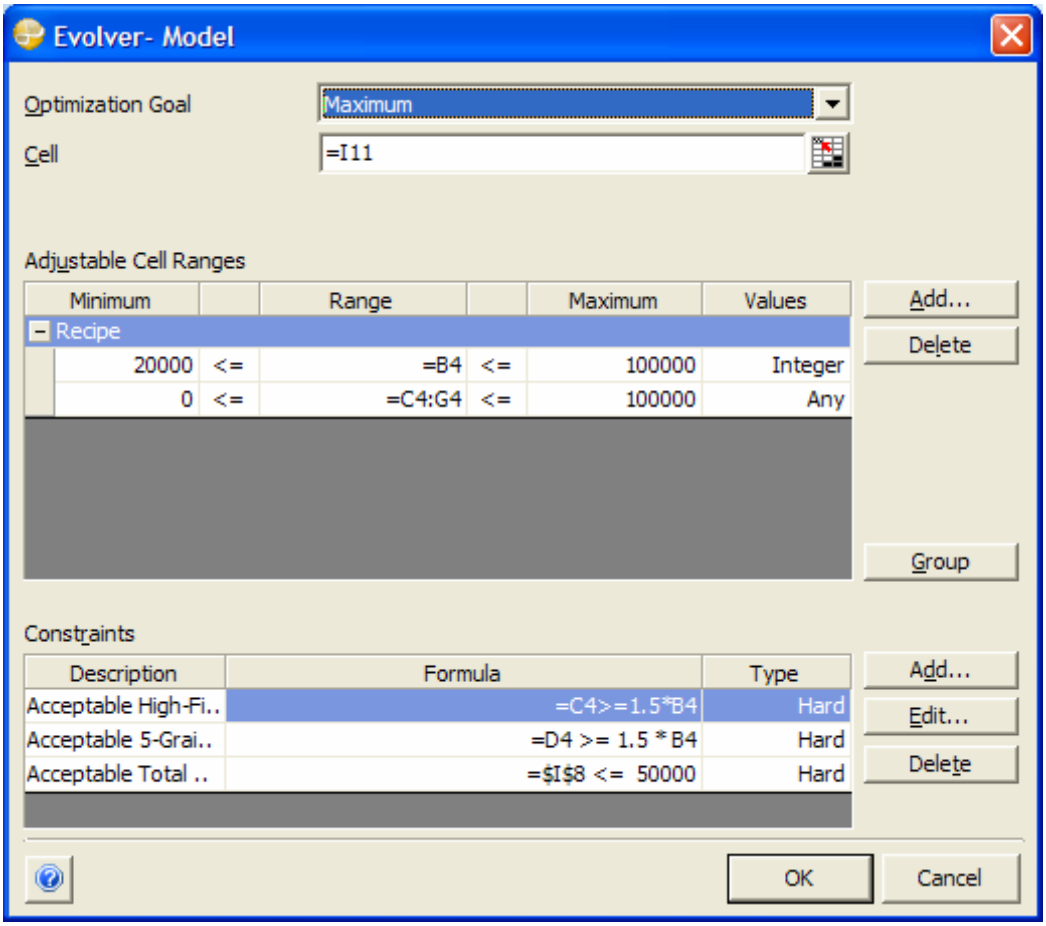
διαδικασία μόνο μέσω τριών μεταβλητών: του ρυθμού διασταύρωσης (crossover rate), του ρυθμού μετάλλαξης (mutation rate) και του μεγέθους του πληθυσμού (population size) για κάθε γενιά χρωμοσώματος. Μόνο μέσω της εμπειρίας, ο χρήστης του μοντέλου μπορεί να κατανοήσει σε πιο βαθμό επηρεάζουν οι τιμές αυτών των μεταβλητών την λειτουργία του μοντέλου, με στόχο την επίτευξη ταχύτερης και καλύτερης σύγκλισης σε ένα σετ βέλτιστων λύσεων.Παρακάτω παρατίθενται εικόνες από το περιβάλλον του λογισμικού.



***Σχήμα 6.1**: Ρυθμίσεις παραμέτρων, Evolver (Palisade Corporation, 2009)*



***Σχήμα 6.2**: Ρυθμίσεις βελτιστοποίησης, Evolver (Palisade Corporation, 2009)*



***Σχήμα 6.3**:Παράθυρο ορισμού προβλήματος βελτιστοποίησης, Evolver (Palisade Corporation, 2009)*

Το ***TopRank 5.5***, μέρος του πακέτου της Palisade, δίνει την δυνατότητα στους χρήστες να «τρέξουν» What-If analysis («τι συμβαίνει αν») και sensitivity analysis(ανάλυση ευαισθησίας).Η ανάλυση What-If αποτελεί σημαντικό μέρος της διαδικασίας λήψης αποφάσεων ύστερα από την μοντελοποίηση ενός προβλήματος. Προσδιορίζει ποιες μεταβλητές επηρεάζουν τα αποτελέσματά(outputs) περισσότερο και παρουσιάζει τους παράγοντες στους οποίους θα πρέπει να δοθεί περισσότερη προσοχή για την βελτίωση του μοντέλου αλλά και την εφαρμογή της κατάστασης που περιγράφεται σε αυτό. Η ανάλυση ευαισθησίας είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει πώς διαφορετικές τιμές μιας ανεξάρτητης μεταβλητής επηρεάζουν μια συγκεκριμένη εξαρτημένη μεταβλητή κάτω από ένα δεδομένο σύνολο των υποθέσεων.

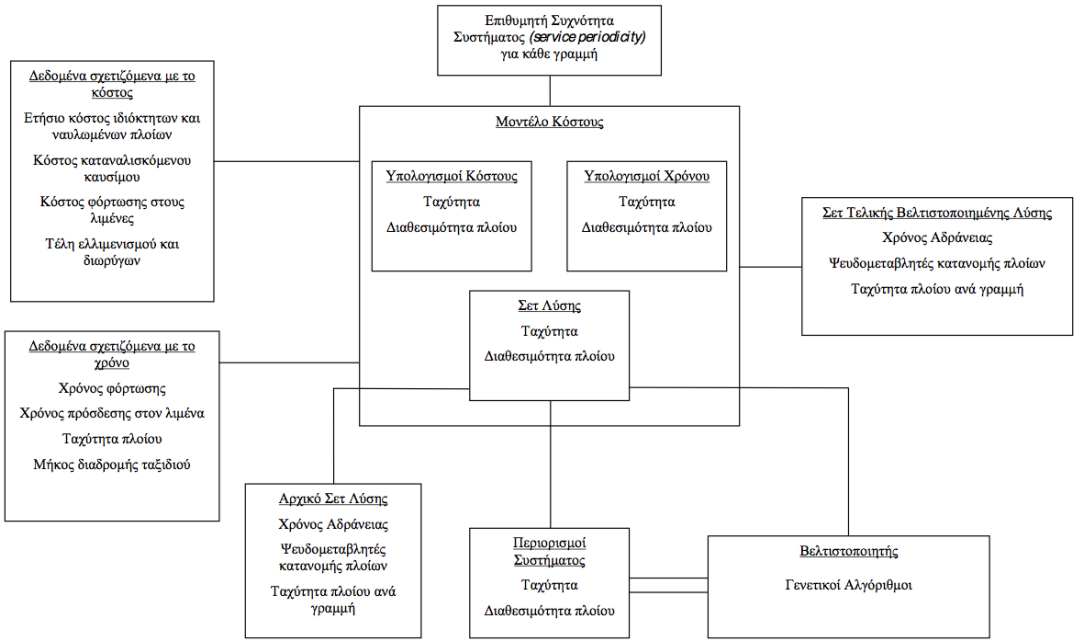
Στην περρίπτωση μας, χρησιμοποιούμε μόνο μία συσκεκριμένη λειτουργία του ***TopRank***, την Multi-Way What-If analysis, για την παραγωγή του αποτελεσματικού μετώπου με την συμμετοχή όλων των πιθανών συνδυασμών των μεταβλητών για την εξαγωγή εφικτών λύσεων.Η ανάλυση Multi-Way What-If, υπολογίζει όλους του πιθανούς συνδυασμούς των μεταβλητών εισόδου που έχουμε ορίσει στο πρόβλημα μας, εξάγωντας ταυτόχρονα τα αντίστοιχα αποτελέσματα αυτών.Έτσι μας δίνεται η δυνατότητα να κάνουμε ταξινόμηση (ranking), όλων των πιθανών συνδυασμών κατά αύξουσα ή φθίνουσα σειρά, ως προς τα outputs που μας ενδιαφέρουν (στην περίπτωση μας το ετήσιο λειτουργικό κόστος και οι εκπομπές ρύπων).

6.4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Το υπό ανάπτυξη μοντέλο αποτελεί μια προσπάθεια μοντελοποίησης του ετήσιου λειτουργικού κόστους της ναυτιλιακής εταιρείας APL που δραστηριοποιείται στην ναυλαγορά liner με πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, με σκοπό την διερεύνηση και την βελτιστοποίηση της λειτουργίας ενός δικτύου 3 γραμμών της εταιρείας.Όπως έχουμε ήδη επισημάνει, το δίκτυο μας αποτελείται από μία κύρια γραμμή (Transpacific line -PCE) και δύο δευτερεύουσες (Feeder lines, SKX, NKX). Το παρόν μοντέλο, δεδομένου ότι εξετάζει ένα πρόβλημα στο οποίο τα οικονομικά δεδομένα είναι ευμετάβλητα, αποτελεί μία απλοποίηση του πραγματικού δικτύου της APL.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης που επιχειρείται στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής έχει σαν στόχο την εύρεση εκείνης της λύσης για την οποία η λειτουργία της εταιρίας ως προς το δίκτυο που μελετούμε γίνεται οικονομικότερη.Σε δεύτερο στάδιο, εξετάζοντας τις εκπομπές ρύπων που αντιστοιχούν στα διάφορα σενάρια κόστους, σκοπός μας είναι μέσω της παραγωγής ενός αποτελεσματικού

μετώπου να αποσαφηνίσουμε το εύρος των εκπομπών ρύπων που αντιστοιχούν στο υπο μελέτη δίκτυο, αλλά και να φανούν ξεκάθαρα οι δυνατότητες μείωσης αυτών των εκπομπών στα πλαίσια ενός προφίλ λειτουργίας που θα παραμένει συμφέρον για την εταιρεία αλλά ταυτόχρονα θα γίνεται φιλικότερο προς το περιβάλλον.



***Διάγραμμα 6.4**: Διάγραμμα ροής μοντέλου για το συνολικό κόστος*

Βελτιστοποίηση μοντέλου κόστους

Στο σενάριο που μελετάμε, αυτό δηλαδή της ελαχιστοποίησης του λειτουργικού κόστους, θεωρούμε ένα αρχικό σετ τιμών για τις μεταβλητές απόφασης, όπως αυτές ορίστηκαν στο ***Κεφάλαιο 4***. Οι τιμές των μεταβλητών αυτών, είναι τέτοιες ούτως ώστε να συγκροτούν μία αρχική εφικτή λύση, που συμμορφώνεται πλήρως με τους περιορισμούς που έχουμε θέσει εξ'αρχής στο σύστημα μας.Η διαδικασία βελτιστοποίησης που ακολουθεί ύστερα από τον ορισμό της αρχικής εφικτής λύσης, αποτελεί τυπικό πρόβλημα βελτιστοποίησης κατανομής στόλου.

Το πρόβλημα εξ'αρχής χαρακτηρίζεται από πολυπλοκότητα. Μία επιλογή θα ήταν να αρχίσουμε την διαδικασία βελτιστοποίησης με διάφορες εναλλακτικές αρχικές εφικτές λύσεις, αφού αυτό θα οδηγούσε την μηχανή βελτιστοποίησης του ***Evolver***, στο να εξετάσει βέλτιστα σενάρια σε διαφορετικές κατευθύνσεις και περιοχές. Η κύρια δυσκολία έγκειται στο γεγονός ότι προκύπτει μεγάλος πλήθος μεταβλητών

απόφασης κατά την ανάθεση ***x*** πλοίων ενός δεδομένου τύπου ***i*** σε μία γραμμή του δικτύου ***j*** ,παρά τον περιορισμό στον συνολικό αριθμό πλοίων ενός δεδομένου τύπου ***i*** σε όλες τις γραμμές. Ωστόσο με αυτό τον τρόπο δεν είναι σίγουρο ότι οι διάφορες αρχικές εφικτές λύσεις θα μας οδηγήσουν στην συνολική βέλτιστη λύση του συστήματος.

Για να αναζητήσουμε την συνολική βέλτιστη λύση, επιλέγουμε να μειώσουμε τον όγκο του προβλήματος χωρίς αυτό να χάνει την ορθότητά του. Αυτό γίνεται υιοθετώντας τις εξής παραδοχές.:

- Η ταχύτητα των πλοίων σε κάθε γραμμή δεν παίρνει συνεχείς τιμές, αλλά διακριτές με βήμα 0,1.
- Ο χρόνος αδράνειας (idle time) θεωρείται μηδενικός σε κάθε γραμμή. Η συγκεκριμένη επιλογή αποτελεί εν μέρει εξιδανίκευση. Προϋποθέτει ένα δίκτυο πλήρως συγχρονισμένο και ταυτόχρονα δεν παίρνει υπόψιν εξωτερικές συνθήκες, όπως π.χ καθυστερήσεις. Επιλέγουμε δηλαδή τα πλοία σε κάθε γραμμή να ταξιδεύουν με χαμηλές ταχύτητες από το να έχουμε χρονο αδράνειας. Αποτελεί επιλογή βελτιστοποίησης, ενώ μας δίνει την δυνατότητα να μειώσουμε αισθητά τον όγκο του προβλήματος.
- Το αθροισμα των πλοίων που δραστηριοποιούνται στην κύρια γραμμή είναι μεταξύ 5 και 7. Ύστερα από έρευνα που έγινε σε εταιρείες που παρέχουν υπηρεσίες στο δίκτυο Transpacific, όλες χρησιμοποιούν 5 ή 6 πλοία που σε περιόδους χαμηλής ζήτησης και υψηλών τιμών καυσίμου μπορεί να φτάσουν μέσω του slow steaming τα 7 ή 8.Φυσικά ο αριθμός πλοίων που δραστηριοποιούνται σε μία γραμμή εξαρτάται και από το πλήθος των λιμένων που αυτά πρόκειται να επισκεφθούν. Ο παρακάτω πίνακας είναι άκρως διαφωτιστικός για την επιλογή μας.

Carrier	Service	South East Asia	North East Asia	US South Pacific	US North Pacific	Canada WC	Mexico WC	Central America WC	Port calls	Current vessels	Total TEU	Ø TEU	Standard vessels	Slow Steaming ships	Total TEU	Ø TEU
China Shipping	ANW1	-	6	-	1	1	-	-	8	6	28,200	4,700	5	1	4,300	4,300
China Shipping	AAC	-	5	2	-	-	-	-	7	6	47,400	7,900	5	1	4,600	4,600
CMA CGM/4, Maersk Line/2	TP8	-	4	2	-	-	-	-	6	6	50,400	8,400	5	1	8,400	8,400
Evergreen	TW	-	4	2	-	-	-	-	6	5	39,500	7,900	5	0	0	7,900
Evergreen	TPS	-	4	2	1	-	-	-	7	6	29,400	4,900	5	1	4,900	4,900
Evergreen/2, China Shipping/2	CPS2	-	3	2	-	-	-	-	5	5	21,000	4,200	5	0	0	4,200
GA (HL/3), ZIM/4	PNX	2	7	-	1	1	-	-	11	7	58,100	8,300	6	1	8,300	8,300
GA (NYK)	SCX	3	9	2	-	-	-	-	14	8	52,000	6,500	7	1	6,200	6,200
GA (NYK/3, OOCL/2)	CCX	-	5	2	-	-	-	-	7	5	30,000	6,000	5	0	0	6,000
GA (OOCL)	SSX	-	7	1	-	-	-	-	8	6	46,200	7,700	5	1	5,800	5,800
Green ("K" Line)	PSW	-	5	2	-	-	-	-	7	6	28,200	4,700	6	0	0	4,700
Green ("K" Line/2), NWA (MOL/3)	PSW3	-	5	2	-	-	-	-	7	5	24,000	4,800	5	0	0	4,800
Green ("K" Line/5), NWA (MOL/1)	PNW	-	10	-	1	1	-	-	12	6	33,600	5,600	6	0	0	5,600
Green (Coscon)	CES	-	3	1	-	-	-	-	4	5	25,500	5,100	4	1	5,100	5,100
Green (Coscon/2, Hanjin/3)	PNW	-	5	-	1	1	-	-	7	5	26,500	5,300	5	0	0	5,300
Green (Coscon/2, Hanjin/3)	PNS	-	4	-	1	2	-	-	7	6	33,600	5,600	5	1	5,100	5,100
Green (Coscon/4, Hanjin/1)	SEA	-	5	2	-	-	-	-	7	5	27,000	5,400	5	0	0	5,400
Green (Coscon/6)	CEN	-	6	2	-	1	-	-	9	6	46,800	7,800	6	0	0	7,800
Green (Hanjin)	PNW	-	6	2	1	-	-	-	9	5	37,500	7,500	5	0	0	7,500
Green (Hanjin)	CAX	-	4	1	-	-	1	-	6	5	27,500	5,500	5	0	0	5,500
Green (Hanjin/5), Wan Hai	SJX	3	7	2	-	-	-	-	12	6	25,200	4,200	6	0	0	4,200
Green (Yang Ming)	PSW2	-	6	2	-	-	-	-	8	6	30,000	5,000	5	1	5,000	5,000
Green (Yang Ming)	PSW4	-	5	2	1	-	-	-	8	5	28,000	5,600	5	0	0	5,600
Hapag-Lloyd	AME1	-	5	-	-	-	4	-	9	7	33,600	4,800	6	1	4,800	4,800
Horizon/5, Maersk Line	TP1	-	3	3	1	-	-	-	7	5	14,000	2,800	5	0	0	2,800
Maersk Line	TP5	-	6	2	1	-	-	-	9	5	22,000	4,400	5	0	0	4,400
Maersk Line	AC2	-	6	-	-	-	1	1	8	7	56,700	8,100	7	0	0	8,100
Maersk Line	AC3	-	3	-	-	-	1	1	5	7	31,500	4,500	7	0	0	4,500
Matson	CHINA-LB	-	3	2	1	-	-	-	6	5	13,500	2,700	5	0	0	2,700
MSC/3, Maersk Line/2, CMA CGM/1	Eagle	-	5	1	-	-	-	-	6	6	39,000	6,500	5	1	6,500	6,500
MSC/6, CMA CGM	PEARL	-	4	2	-	-	-	-	6	6	48,600	8,100	5	1	8,100	8,100
NWA	PNW	-	8		3	1	-	-	12	5	32,500	6,500	5	0	0	6,500
NWA (APL)	SAX	1	6	1	-	-	-	-	8	7	46,200	6,600	6	1	6,600	6,600
NWA (APL)	PS1	3	6	-	1	1	-	-	11	8	42,400	5,300	6	2	9,800	4,900
NWA (APL)	PS2	-	8	3	-	-	2	-	13	7	39,900	5,700	6	1	5,500	5,500
NWA (APL)	PS5	-	4	2	1	-	-	-	7	5	26,000	5,200	5	0	0	5,200
NWA (APL/1, MOL/6)	PSX	2	6	2	-	-	-	-	10	7	42,700	6,100	6	1	5,000	5,000
NWA (APL/7)	PCE	-	6	2	-	-	-	-	8	7	34,300	4,900	5	2	8,800	4,400
NWA (Hyundai)	PCX	-	6	2	-	-	-	-	8	5	34,000	6,800	5	0	0	6,800
NWA (Hyundai)	PSW	-	7	2	-	-	-	-	9	5	23,500	4,700	5	0	0	4,700
PIL	CTP	-	5	1	-	-	-	-	6	6	9,600	1,600	5	1	1,600	1,600
TCC	Great Dragon		1	1	-	-	-	-	2	4	11,600	2,900	4	0	0	2,900
Total number of services/calls	42	14	223	59	16	9	9	2	332	245	1,397,200	5,700	224	21	114,400	5,400

***Πίνακας 6.1**:Υπηρεσίες μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων στο δίκτυο(Source: Transpacific, Dynamar B.V, 2010)*

- Η συχνότητα του συστήματος επιλέγεται να είναι ίση ή μικρότερη του 7,3.Η συγκεκριμένη τιμή δεν επιλέγεται τυχαία.Υστερα από έρευνα στις μεγαλύτερες εταιρείες μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων ως προς το τι θεωρεί η κάθε μία *''on time performance''*, επιλέγεται να υπάρχει ελαστικότητα 7

περίπου ωρών στην σταθερή συχνότητα εξυπηρέτησης κάθε λιμένα που είναι οι 7 μέρες. Για παράδειγμα, η APL θεωρεί *''on time performance''* έως και 4 ώρες απόκλιση από την προγραμματισμένη ώρα άφιξης ενός πλοίου της, ενώ άλλες εταιρείες όπως η COSCO θεωρούν έως και τις 7 ώρες. Η συγκεκριμένη παραδοχή μας δίνει την δυνατότητα ***να υπολογίσουμε το ύψος του ετήσιου λειτουργικού κόστους διατηρώντας την συχνότητα παροχής υπηρεσιών*** στο δίκτυο που μελετάμε, σε αντίθεση με το να δίναμε στο σύστημα μας μεγαλύτερη ελαστικότητα στη συχνότητα μέσω μίας θεωρητικής συνάρτησης penalty, η οποία ναι μεν θα μας έδινε πιθανόν οικονομικά καλύτερες λύσεις (ανάλογα βέβαια με τον τρόπο που θα την ορίζαμε) και ταυτόχρονα ενεργειακά αποδοτικότερες, αλλά θα αγνοούσε τις πραγματικές συνθήκες του δικτύου, ακυρώνονταςς την αξιοπιστία στην διατήρηση της συχνότητας παροχής υπηρεσιών. Η απόφαση αυτή εναρμονίζεται με το γεγονός πως σε πρώτη φάση μας ενδιαφέρει η έυρεση της βέλτιστης λύσης του συστήματος διατηρώντας την συχνότητα παροχής υπηρεσιών. Σε δεύτερο στάδιο, για την παραγωγή του αποτελεσματικού μετώπου, θα εισάγουμε μια θεωρητική συνάρτηση penalty στη συχνότητα του συστήματος, για να αποκτήσουμε μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα του τρόπου λειτουργίας του μοντέλου. Τέλος, σε περίπτωση που είχαμε εισάγαγει μία *συνάρτηση χρησιμότητας,*η προσέγγιση μας θα ήταν πιο ρεαλιστική αφού θα λάμβανε υπόψιν και την ποιότητα των υπηρεσιών και το σενάριο που μόλις απορρίψαμε θα είχε ιδιαίτερο συγκριτικό ενδιαφέρον, αλλά αυτό ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής.

Οι παραπάνω παραδοχές μειώνουν αισθητά τον χρόνο που χρειάζεται η μηχανή βελτιστοποίησης του ***Evolver*** για να βρει την βέλτιστη λύση όπως επίσης και τον αριθμό των επαναλήψεων που χρειάζονται. Έτσι, επιλέγοντας με την βοήθεια της εμπειρίας μας μία αρχική «καλή» εφικτή λύση, μπορούμε να είμαστε βέβαιοι ότι θα υπολογίσουμε την συνολική βέλτιστη λύση του συστήματος.

Όσον αφορά το εύρος των τιμών που μπορεί να πάρει η ταχύτητα σε κάθε γραμμή ισχύουν τα εξής: Όπως έχουμε ήδη αναφέρει και στο ***Κεφάλαιο 4*** θεωρούμε σταθερή την ταχύτητα σε κάθε γραμμή.Αυτό φυσικά δεν ισχύει σε κανένα μέρος του ταξιδιού.Το πλοία συνήθως στο laden leg (έμφορτο μέρος) του ταξιδιού τους πλέουν με μεγαλύτερη ταχύτητα από ότι στο ballast leg. Επίσης καθυστερήσεις σε λιμάνια ή δύσκολες καιρικές συνθήκες, αναγκάζουν τα πλοία να επιταχύνουν για να διατηρήσουν τους προκαθορισμένους χρόνους άφιξης και την ποιότητα των υπηρεσιών.Οπότε, η τιμή των ταχυτήτων, μπορεί να θεωρηθεί ώς ένας μέσος όρος που λαμβάνει τα παράπανω υπόψιν. Έτσι το εύρος των ταχυτήτων ορίζεται ως εξής (συχνότητα έως 7,3) :

- *Για την κύρια γραμμή : {13,13.1,.....,24.9,25}*
- *Για τις δευτερεύουσες γραμμές : {10,10.1,.....,16,9,17}*

Οι περιορισμοί του συστήματός μας συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ		***Τύπος***
Ο αριθμός των πλοίων που δραστηριοποιούνται σε όλες τις γραμμές, δεν πρέπει να υπερβαίνει τον αριθμό των διαθέσιμων πλοίων αυτού του τύπου	***Διαθέσιμα πλοία ≥ Χρησιμοποιούμενα πλοία***	*Hard Constraint*
Η ταχύτητα πλεύσης σε κάθε γραμμή για κάθε πλοίο που δραστηριοποιείται σε αυτήν, δεν πρέπει να υπερβαίνει την ταχύτητα που μπορεί κάθε πλοίο να αναπτύξει	***Υπηρεσιακή ταχύτητα ≥ Ταχύτητα πλεύσης***	*Hard Constraint*
Το άθροισμα των πλοίων που δραστηριοποιούνται στην κύρια γραμμή είναι μεταξύ 5 και 7 πλοίων	***5 ≤ Πλήθος πλοίων που χρησιμοποιούνται στη κύρια γραμμή ≤ 7***	*Hard Constraint*
Σε κάθε μία από τις δευτερεύουσες γραμμές δραστηριοποιείται ένα πλοίο	***Πλήθος πλοίων που χρησιμοποιούνται στις δευτερεύουσες γραμμές = 1***	*Hard Constraint*
Η συχνότητα των γραμμών είναι κοινή, και δεν μπορεί να ξεπερνά τις 7,3 μέρες	***Συχνότητα ≤ 7,3***	*Hard Constraint*
Η μεταφορική ικανότητα πλοίου που δραστηριοποιείται σε μία γραμμή, πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το μέγιστο συσσωρευμένο φορτίο το οποίο πρέπει να μεταφερθεί στην διαδρομή της γραμμής για καθορισμένη ταχύτητα και συχνότητα συστήματος *για κάθε εμπορευματοκιβώτιο το οποίο δεν μεταφέρεται στον προορισμό του και παραμένει στον λιμένα,το επιπλέον κόστος που προκύπτει είναι 5,000$/εμπορευματοκιβώτιο*	***Διαθέσιμη χωρητικότητα πλοίου ≥ Μέγιστο συσσωρευμένο φορτίο*** *Εάν μεταφορική ικανότητα πλοίου < μέγιστο συσσωρευμένο φορτίο τότε* *Penalty = 5.000 * πλήθος μη μεταφερόμενων εμπορευματοκιβωτίων*	*Soft Constraint*
Το ετήσιο λειτουργικό κόστος πρέπει να είναι μικρότερο από μια συγκεκριμένη αρχική τιμή που επιλέγεται κάθε φορά από τον χρήστη.	***Λειτουργικό Κόστος < Αρχική τιμή π.χ $ 420,000,000***	*Hard Constraint*

Πίνακας 6.2 *: Περιορισμοί του μοντέλου κατά την βελτιστοποίηση*

6.5 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ΕΤΗΣΙΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ-ΕΚΟΜΠΩΝ CO_2

Η χάραξη του αποτελεσματικού μετώπου ετήσιου λειτουργικού κόστους-εκπομπών CO_2 βασίζεται στην γεωμετρική απεικόνηση του συνόρου Pareto, του συνόλου των βέλτιστων λύσεων κατά Pareto, όπως αυτό περιγράφηκε παραπάνω.

Το αποτελεσματικό μέτωπο είναι στην περίπτωση μας, όπως παρουσιάζεται στο ***Κεφάλαιο 7*** , μία κυρτή καμπύλη στον χώρο του διαγράμματος λειτουργικού κόστους- εκπομπών CO_2, η οποία περικλεί στο εσωτερικό της όλα τα σημεία που μπορούν να προκύψουν ως πιθανές λύσεις από το μοντέλο. Κάθε σημείο εντος της κυρτής καμπύλης, παριστάνει ένα συγκεκριμένο προφίλ λειτουργίας, τα οριακά σημεία που συνθέτουν την καμπύλη είναι σενάρια ελάχιστου κόστους, ελάχιστων εκπομπών CO_2, αλλά και σενάρια πολύ καλών συνδυαστικών λύσεων, ενώ τα σημεία εκτός καμπύλης είναι είτε ανέφικτα είτε μη ιδανικά.Η χάραξη του αποτελεσματικού μετώπου, είναι ιδαίτερα σημαντική καθώς έτσι επιτυγχάνεται η διαμόρφωση του συνολικού προφίλ λειτουργίας της εταιρείας, καθορίζοντας κάθε φορά την βέλτιστη κατανομή των παραμέτρων του συστήματος, ώστε η εταιρεία να είναι σε θέση να λειτουργεί αποδοτικά και παράλληλα να μπορεί να ανταποκριθεί σε τυχόν νέες απαιτήσεις, όπως μείωση της μεταφορικής ζήτησης ,διακυμάνσεις στην τιμή του πετρελαίου αλλά και πιθανή μελλοντική επιβολή περιβαλλοντικών τελών ή φόρου στα καύσιμα.

Για την παραγωγή των σημείων που συνθέτουν αλλά και βρίκονται εντός της καμπύλης του αποτελεσματικού μετώπου χρησιμοποιήσαμε όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα το πρόγραμμα ***TopRank***, μέσω του οποίου μας δίνεται η δυνατότητα να εξάγουμε ένα πολύ μεγάλο μέρος από το σύνολο των δυνατών λύσεων.Για την εξαγωγή αυτών των λύσεων κάναμε μία προσθήκη στον τρόπο παραγωγής των πινάκων του excel που παρουσιάσαμε στο ***Κεφάλαιο 5***.

Οι λύσεις παράχθηκαν σε 2 στάδια:

- Στο 1° στάδιο, το σύνολο όλων των δυνατών συνδυασμών (τύπος πλοίου σε κάθε γραμμή,αριθμός πλοίων σε κάθε γραμμή και τιμές ταχυτήτων) για πλοία ενός τύπου σε κάθε γραμμή. (Λέγοντας τύπο πλοίου εννοούμε, όπως εξηγήσαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, ότι από τα 9 πλοία που χρησιμοποιούμε υπάρχουν και άλλα των ίδιων χαρρακτηριστικών με αυτά,αδελφά πλοία, αφού είναι αδύνατον να λύσουμε το πρόβλημα της κατανομής στόλου μελετώντας το σύνολο του στόλου της APL)
- Στο 2° στάδιο, λύσεις που περιέχουν συνδυασμό τύπων πλοίου σε κάθε γραμμή.Επειδή το πλήθος των συνδυασμών υπερβαίνει το ένα εκαταμμύριο,

μιας και το ***TopRank*** υπολογίζει όχι μόνο δυνατές λύσεις, αλλά και λύσεις που δεν υπακούουν στους περιορισμούς και που εμφανίζονται κατόπιν δικής μας εντολής ως ***FALSE***, μειώσαμε τον όγκο των υπολογισμών χρησιμοποιώντας 5 τύπους πλοίων στην κύρια γραμμή και από 3 τύπους πλοίων στις δύο δευτερεύουσες γραμμές.Η επιλογή αυτή έγινε με γνώνομα την εξαγωγή όσο το δυνατών καλύτερων λύσεων από πλευράς κόστους, αφαιρώντας εκείνους τους τύπους πλοίων που δίνουν μη συμφέροντα σενάρια κατανομής πλοίων, με σκοπό την ελάττωση του αριθμού τον υπολογισμών. Άλλωστε έχοντας παραγάγει στο 1^{ο} στάδιο το σύνολο των σεναρίων που αποτελούνται απο πλοία ίδιου τύπου σε κάθε γραμμή και όχι συνδυασμό τύπων πλοίων, καλύπτουμε το εύρος όλων των λύσεων,από την καλύτερη έως την χειρότερη. Αναλυτικότερα, όπως γίνεται κατανοητό, αν ένας από τους 9 τύπους πλοίων αποτελεί την χείριστη επιλογή για τη εταιρεία, τότε το να κατανείμουμε πχ. 5 πλοία αυτού του τύπου είναι χειρότερο οικονομικά από τα να κατανείμουμε 4 + 1 διαφορετικού τύπου, για δεδομένη συχνότητα και ταχύτητα.

Οι περιορισμοί που θέτουμε στο σύστημα μας είναι ίδιοι με αυτούς που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα, με μία όμως σημαντική διαφορά στον τρόπο που ορίζεται η συχνότητα του συστήματος και μία άλλη που απορρέι από αυτήν. Εισάγουμε στο σύστημα μας συνάρτηση penalty, παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιούμε στην περίπτωση του μέγιστου συσσωρευμένου φορτίου ως εξής:

Η συχνότητα των γραμμών είναι κοινή και ισούται με 7 *εάν η συχνότητα της γραμμής διαφέρει από την προκαθορισμένη τιμή περισσότερο από 0,3, τότε το επιπλέον κόστος που προκύπτει είναι 20,000,000$ επί το χρονικό διάστημα της διαφοράς.*	***Συχνότητα = 7*** *Εάν ABS(πραγματική συχνότητα– προκαθορισμένη συχνότητα)>0,301 τότε* *Penalty = 20.000,000$ * το χρονικό διάστημα της διαφοράς*
Το άθροισμα του κόστους των συναρτήσεων penalty δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερο από το 10% του ετήσιου συνολικού λειτουργικού κόστους	***Κόστος συναρτήσεων penalty ≤ 10% * ετήσιο λειτουργικό κόστος***

Οι παραπάνω προσθήκες μας εξασφαλίζουν μεγαλύτερη ελαστικότητα στο σύστημα και λύσεις οι οποίες μπορεί ναι μεν να αποκλίνουν από την συχνότητα παροχής υπηρεσιών, αλλά σε βαθμό που παραμένει όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστική αυτή η απόκλιση, δίνοντας μας μια σαφή εικόνα για το εύρος των τιμών του λειτουργικού κόστους και των εκπομπων CO_2 που ενδέχεται να παρουσιάσει το δίκτυό μας κάτω από απρόβλεπτες συνθήκες (π.χ καθυστερήσεις) μιας έτσι και αλλιώς ευμετάβλητης αγοράς. Τελείωνοντας, θα πρέπει να τονίσουμε, ότι ο τρόπος με τον οποίο είναι ορισμένη η συνάρτηση penalty είναι τελείος θεωρητικός και αποτελεί προσπάθεια εμπλουτισμού του συστήματος λόγω της δυσκολίας προσομοίωσης των

πραγματικών συνθηκών του προβλήματος. Έχει χρησιμοποιηθεί εξισορροπιστικά με τέτοιο τρόπο ώστε να μην αλλοιώνει τα χαρακτηριστικά της βέλτιστης λύσης που βρέθηκε και αυτή να παραμένει σταθερή. Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζεται το Αποτελεσματικό Μέτωπο λειτουργικού κόστους- εκπομπών CO_2.

7

ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

.....

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάζονται ζητήματα που σκιαγραφούν πλήρως το οικονομικό προφίλ της εταιρείας. Συγκεκριμένα παρουσιάζονται α) στοιχεία που αφορούν τα χαρακτηριστικά των πλοίων που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο, β) τα αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης και η απεικόνιση του αποτελεσματικού μετώπου,γ) βασικοί δείκτες απόδοσης και τέλος δ) μονόδρομη ανάλυση ευαισθησίας στην τιμή του καυσίμου και μία σειρά απο συγκριτικά σενάρια , που έχουν ώς τελικό στόχο να προτείνουν έναν βέλτιστο τρόπο λειτουργίας του δικτύου που μελετάμε.

7.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΛΟΙΩΝ

Έχοντας συζητήσει στο ***Κεφάλαιο 3*** ένα πλήθος θεμάτων που σχετίζονται με το επιχειρησιακό μέτρο της μείωσης της ταχύτητας πλεύσης (Slow Steaming), στα επόμενα καταγράφονται σημαντικές παρατηρήσεις για το πως μπορεί να μεταφραστεί σε αριθμούς το μέτρο στο μοντέλο που μελετάμε στην παρούσα διπλωματική, παρουσιάζοντας την επίδραση που έχει τόσο από οικονομικής πλευράς, όσο και απο ενεργειακής.

Οι ***Πίνακες 7.1*** και ***7.2*** που ακολουθούν είναι διαφωτιστικοί όσον αφορά την μείωση της κατανάλωσης καυσίμου, αλλά και της εξοικονόμησης στο κόστος καυσίμου, όπως προκύπτει από την μείωση της ταχύτητας. Τα στοιχεία που παρουσιάζονται, αναφέρονται στα 9 πλοία (‘’9 τύποι πλοίων’’), που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο που έχουμε κατασκευάσει. Για κάθε πλοίο εμφανίζονται τα εξής:

- Ταχύτητα σε κόμβους.
- Κόστος καυσίμου ανά μέρα στην αντίστοιχη ταχύτητα.
- Κατανάλωση καυσίμου σε τόνους ανά μέρα.
- Ποσοστό μείωσης κατανάλωσης καυσίμου από την ταχύτητα σχεδίασης. Η μέγιστη ταχύτητα που χρησιμοποιείται στον πίνακα δεν είναι κατ'ανάγκη η μέγιστη ταχύτητα κάθε πλοίου.
- Και τέλος κόστος καυσίμου ανά TEU-slot ανά μέρα.

Στον ***Πίνακα 7.1*** τα μεγέθη αναφέρονται στο συνολικό κόστος καυσίμου κάθε πλοίου, ενώ στον ***Πίνακα 7.2*** στο κόστος καυσίμου εν πλω. Οι υπολογισμοί έχουν γίνει για την τιμή καυσίμου που έχει χρησιμοποιηθεί συνολικά στο σύστημα και είναι η τρέχουσα, *680$/ton*. Οι τιμές για τα μικρά πλοία *APL Bogota (657 TEU), APL Balboa (1296 TEU),*δίνονται πληροφοριακά.Αυτά κυρίως δραστηριοποιούνται σε μικρότερες τοπικές διαδρομές.Στα επόμενα της παρούσας ενότητας γίνεται ενδεικτικός σχολιασμός όσων παρουσιάζονται στους 2 πίνακες.

Vessel	knots	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
APL France	fuel cost per day	16.383	19.705	23.441	27.609	32.225	37.304	42.860	48.906	55.453	62.514	70.097	78.215	86.874
8110 TEU	fuel consumption(ton per day)	25	30	36	42	49	57	65	75	85	96	108	121	135
	consumption reduction	81%	78%	73%	69%	64%	58%	52%	44%	37%	29%	20%	10%	0%
	fuel cost per TEU-slot per day	2,02	2,43	2,89	3,40	3,97	4,60	5,28	6,03	6,84	7,71	8,64	9,64	10,71
APL Bogota	fuel cost per day	4.760	5.440	6.800	8.160	9.520	10.880	-	-	-	-	-	-	-
657 TEU	fuel consumption(ton per day)	7	8	10	12	14	16	-	-	-	-	-	-	-
	consumption reduction	56%	50%	38%	25%	13%	0%	-	-	-	-	-	-	-
	fuel cost per TEU-slot per day	7,25	8,28	10,35	12,42	14,49	16,56	-	-	-	-	-	-	-
APL Germany	fuel cost per day	14.446	17.305	20.516	24.093	28.051	32.402	37.159	42.331	47.930	53.965	60.445	67.379	74.773
5896 TEU	fuel consumption(ton per day)	22	26	30	35	41	48	55	63	71	80	90	101	112
	consumption reduction	80%	77%	73%	69%	63%	57%	51%	44%	37%	29%	20%	10%	0%
	fuel cost per TEU-slot per day	2,45	2,93	3,48	4,09	4,76	5,50	6,30	7,18	8,13	9,15	10,25	11,43	12,68
APL Amazonite	fuel cost per day	11.411	13.629	16.117	18.886	21.947	25.310	28.985	32.979	37.300	41.956	46.955	52.301	58.002
3821 TEU	fuel consumption(ton per day)	16	19	22	26	31	36	41	48	54	61	69	77	86
	consumption reduction	81%	78%	74%	70%	64%	58%	52%	44%	37%	29%	20%	10%	0%
	fuel cost per TEU-slot per day	2,99	3,57	4,22	4,94	5,74	6,62	7,59	8,63	9,76	10,98	12,29	13,69	15,18
APL Arabia	fuel cost per day	13.351	16.047	19.078	22.460	26.204	30.323	34.829	39.731	45.039	50.763	56.911	63.491	70.510
4890 TEU	fuel consumption(ton per day)	20	24	28	33	39	45	51	58	66	75	84	93	104
	consumption reduction	81%	77%	73%	68%	63%	57%	51%	44%	37%	28%	19%	11%	0%
	fuel cost per TEU-slot per day	2,73	3,28	3,90	4,59	5,36	6,20	7,12	8,12	9,21	10,38	11,64	12,98	14,42
APL Argentina	fuel cost per day	11.621	14.127	16.956	20.122	23.638	27.514	31.761	36.389	41.408	46.826	52.650	58.889	65.550
4038 TEU	fuel consumption(ton per day)	17	21	25	30	35	40	47	54	61	69	77	87	96
	consumption reduction	82%	78%	74%	69%	64%	58%	51%	44%	36%	28%	20%	9%	0%
	fuel cost per TEU-slot per day	2,88	3,50	4,20	4,98	5,85	6,81	7,87	9,01	10,25	11,60	13,04	14,58	16,23

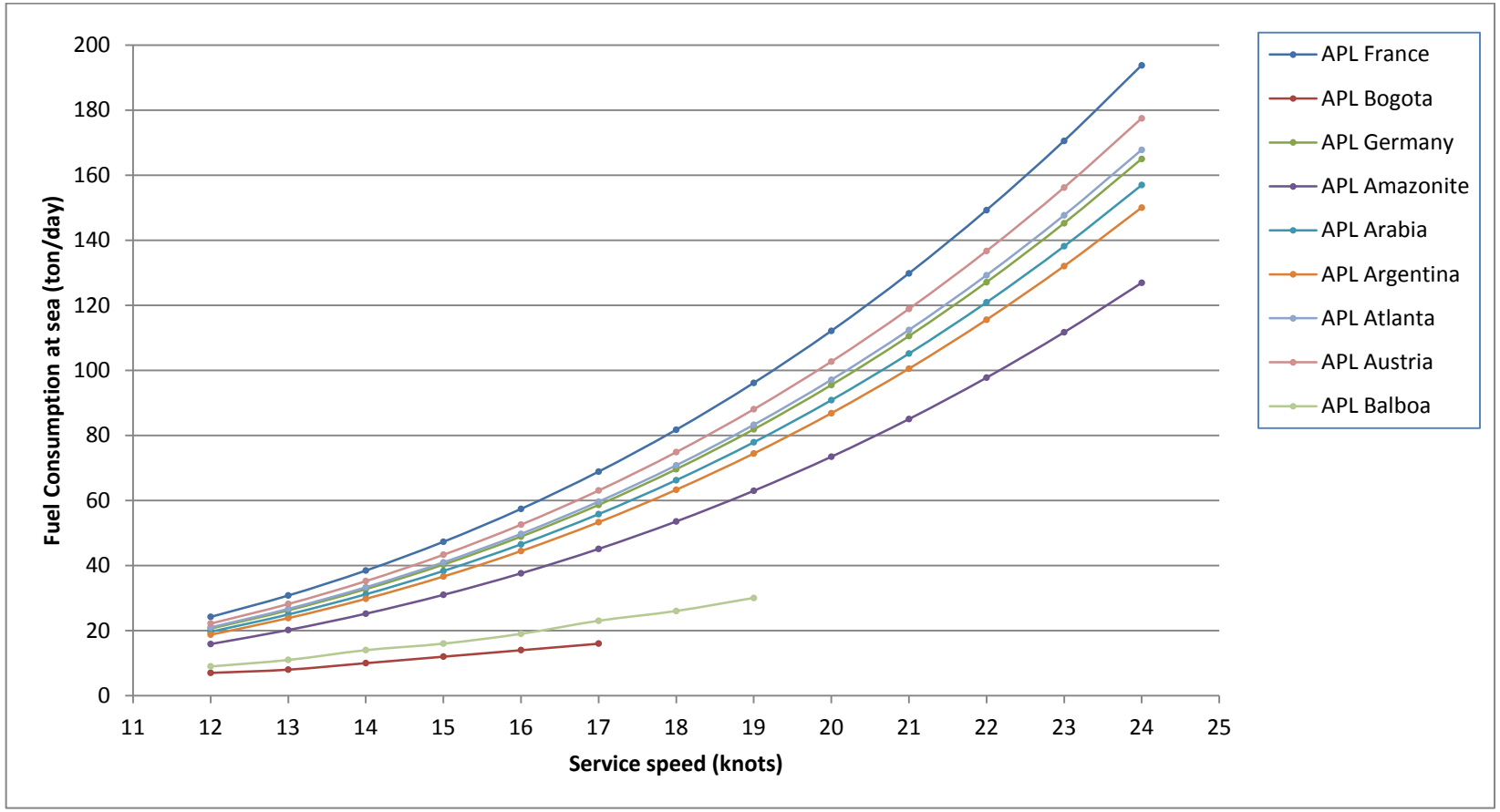
Vessel	knots	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
APL Atlanta	fuel cost per day	13.154	15.967	19.140	22.690	26.630	30.973	35.731	40.915	46.535	52.601	59.121	66.105	73.560
4730 TEU	fuel consumption(ton per day)	19	23	28	33	39	46	53	60	68	77	87	97	108
	consumption reduction	82%	78%	74%	69%	64%	58%	51%	44%	37%	28%	20%	10%	0%
	fuel cost per TEU-slot per day	2,78	3,38	4,05	4,80	5,63	6,55	7,55	8,65	9,84	11,12	12,50	13,98	15,55
APL Austria	fuel cost per day	15.332	18.395	21.836	25.673	29.919	34.588	39.694	45.247	51.260	57.742	64.703	72.152	80.097
6350 TEU	fuel consumption(ton per day)	23	28	33	39	45	52	60	69	78	88	99	111	124
	consumption reduction	81%	77%	73%	69%	64%	58%	52%	44%	37%	29%	20%	10%	0%
	fuel cost per TEU-slot per day	2,41	2,90	3,44	4,04	4,71	5,45	6,25	7,13	8,07	9,09	10,19	11,36	12,61
APL Balboa	fuel cost per day	6.120	7.480	9.520	10.880	12.920	15.640	17.680	20.400	-	-	-	-	-
1296 TEU	fuel consumption(ton per day)	9	11	14	16	19	23	26	30	-	-	-	-	-
	consumption reduction	70%	63%	53%	47%	37%	23%	13%	0%	-	-	-	-	-
	fuel cost per TEU-slot per day	4,72	5,77	7,35	8,40	9,97	12,07	13,64	15,74	-	-	-	-	-

Πίνακας 7.1: *Χαρακτηριστικές τιμές κόστους καυσίμου, κατανάλωσης καυσίμου ανά μέρα*

Vessel	knots	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
APL France	fuel cost per day	16.467	20.936	26.149	32.162	39.032	46.818	55.575	65.362	76.235	88.251	101.469	115.944	131.734
8110 TEU	fuel consumption(ton per day)	24	31	38	47	57	69	82	96	112	130	149	171	194
	consumption reduction	88%	84%	80%	76%	70%	64%	58%	50%	42%	33%	23%	12%	0%
	fuel cost per TEU-slot per day	2,03	2,58	3,22	3,97	4,81	5,77	6,85	8,06	9,40	10,88	12,51	14,30	16,24
APL Bogota	fuel cost per day	4.760	5.440	6.800	8.160	9.520	10.880	-	-	-	-	-	-	-
657 TEU	fuel consumption(ton per day)	7	8	10	12	14	16	-	-	-	-	-	-	-
	consumption reduction	56%	50%	38%	25%	13%	0%	-	-	-	-	-	-	-
	fuel cost per TEU-slot per day	7,25	8,28	10,35	12,42	14,49	16,56	-	-	-	-	-	-	-
APL Germany	fuel cost per day	14.022	17.828	22.266	27.387	33.237	39.867	47.324	55.658	64.916	75.149	86.403	98.729	112.175
5896 TEU	fuel consumption(ton per day)	21	26	33	40	49	59	70	82	95	111	127	145	165
	consumption reduction	88%	84%	80%	76%	70%	64%	58%	50%	42%	33%	23%	12%	0%
	fuel cost per TEU-slot per day	2,38	3,02	3,78	4,64	5,64	6,76	8,03	9,44	11,01	12,75	14,65	16,75	19,03
APL Amazonite	fuel cost per day	10.787	13.714	17.129	21.068	25.568	30.668	36.405	42.816	49.938	57.810	66.468	75.950	86.294
3821 TEU	fuel consumption(ton per day)	16	20	25	31	38	45	54	63	73	85	98	112	127
	consumption reduction	88%	84%	80%	76%	70%	64%	58%	50%	42%	33%	23%	12%	0%
	fuel cost per TEU-slot per day	2,82	3,59	4,48	5,51	6,69	8,03	9,53	11,21	13,07	15,13	17,40	19,88	22,58
APL Arabia	fuel cost per day	13.342	16.963	21.186	26.058	31.625	37.932	45.028	52.957	61.767	71.503	82.211	93.939	106.733
4890 TEU	fuel consumption(ton per day)	20	25	31	38	47	56	66	78	91	105	121	138	157
	consumption reduction	88%	84%	80%	76%	70%	64%	58%	50%	42%	33%	23%	12%	0%
	fuel cost per TEU-slot per day	2,73	3,47	4,33	5,33	6,47	7,76	9,21	10,83	12,63	14,62	16,81	19,21	21,83
APL Argentina	fuel cost per day	12.750	16.211	20.247	24.902	30.222	36.250	43.031	50.609	59.028	68.332	78.566	89.774	102.000
4038 TEU	fuel consumption(ton per day)	19	24	30	37	44	53	63	74	87	100	116	132	150
	consumption reduction	88%	84%	80%	76%	70%	64%	58%	50%	42%	33%	23%	12%	0%
	fuel cost per TEU-slot per day	3,16	4,01	5,01	6,17	7,48	8,98	10,66	12,53	14,62	16,92	19,46	22,23	25,26

Vessel	knots	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
APL Atlanta	fuel cost per day	14.258	18.128	22.642	27.848	33.798	40.539	48.122	56.596	66.011	76.416	87.861	100.395	114.067
4730 TEU	fuel consumption(ton per day)	21	27	33	41	50	60	71	83	97	112	129	148	168
	consumption reduction	88%	84%	80%	76%	70%	64%	58%	50%	42%	33%	23%	12%	0%
	fuel cost per TEU-slot per day	3,01	3,83	4,79	5,89	7,15	8,57	10,17	11,97	13,96	16,16	18,58	21,23	24,12
APL Austria	fuel cost per day	15.082	19.176	23.950	29.458	35.751	42.882	50.903	59.867	69.826	80.832	92.939	106.197	120.660
6350 TEU	fuel consumption(ton per day)	22	28	35	43	53	63	75	88	103	119	137	156	177
	consumption reduction	88%	84%	80%	76%	70%	64%	58%	50%	42%	33%	23%	12%	0%
	fuel cost per TEU-slot per day	2,38	3,02	3,77	4,64	5,63	6,75	8,02	9,43	11,00	12,73	14,64	16,72	19,00
APL Balboa	fuel cost per day	6.120	7.480	9.520	10.880	12.920	15.640	17.680	20.400	-	-	-	-	-
1296 TEU	fuel consumption(ton per day)	9	11	14	16	19	23	26	30	-	-	-	-	-
	consumption reduction	70%	63%	53%	47%	37%	23%	13%	0%	-	-	-	-	-
	fuel cost per TEU-slot per day	4,72	5,77	7,35	8,40	9,97	12,07	13,64	15,74	-	-	-	-	-

Πίνακας 7.2: *Χαρακτηριστικές τιμές κόστους καυσίμου, κατανάλωσης καυσίμου εν πλω ανά μέρα*



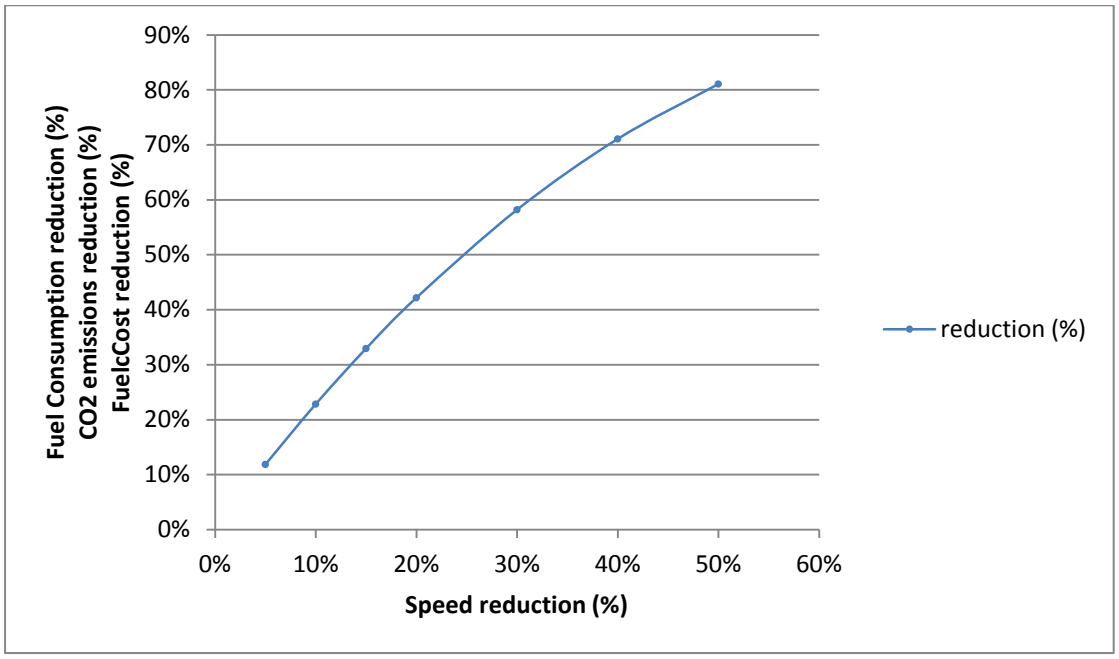
Διάγραμμα 7.1: *Ημερήσια κατανάλωση καυσίμου εν πλω χρησιμοποιούμενων στο μοντέλο πλοίων για διάφορες ταχύτητες*

Οι τιμές που παρουσιάζονται στον ***Πίνακα 7.1*** αναφέρονται στο συνολικό κόστος καυσίμου ανά μέρα και όπως φαίνεται είναι ελαφρώς μικρότερες από τις αντίστοιχες εν πλω. Αυτό είναι απολύτως λογικό αφού προσμετράται και η κατανάλωση καυσίμου στους λιμένες η οποία είναι κατα πολύ μικρότερη σε σχέση με την αντίστοιχη στην θάλασσα.Το μοντέλο που έχουμε κατασκευάσει έχει ως σκοπό να αναδείξει τα οικονομικά χαρακτηριστικά και μεγέθη του δικτύου και όχι τα καθ'εαυτά χαρακτηριστικα κάθε πλοίου. Έτσι θεωρεί σταθερό χρόνο παραμονής σε κάθε λιμένα, ανεξαρτήτως μεγέθους πλοίου(π.χ όσο πιο μεγάλη μεταφορική ικανότητα έχει ένα πλοίο και για δεδομένη πληρότητα,τόσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος φορτοεκφόρτωσης και άρα ο χρόνος παραμονής σε έναν λιμένα) και χρόνου ταξιδιού. Ωστόσο οι τιμές που περιγράφονται στον ***Πίνακα 7.1*** είναι ενδεικτικές και γι'αυτό παρατίθενται.

Το ***Διάγραμμα 7.1*** αποτελεί γραφική απεικόνιση μέρους αυτών που παραουσιάζονται στον ***Πίνακα 7.2***, αναδεικνύοντας την σχέση ανάμεσα στην ημερήσια κατανάλωση καυσίμου και την ταχύτητα με εύρος {12,....,24} για τα 9 πλοία που χρησιμοποιήθηκαν στο παρόν μοντέλο. Γίνεται φανερό ότι μία αύξηση λίγων κόμβων στην υπηρεσιακή ταχύτητα έχει ως αποτέλεσμα δραματική αύξηση στην κατανάλωση καυσίμου. Για παράδειγμα, αύξηση από 21 σε 24 knots για ένα πλοίο μεταφορικής ικανότητας περίπου 8000 TEU όπως το *APL France(8110 TEU)* αυξάνει την κατανάλωση καυσίμου περίπου 65 τόνους την μέρα. Με τις πρόσφατές τίμες καυσίμου που κυμαίνονται περίπου στα 680 $/ton, τιμή που χρησιμοποιήθηκε στην εξαγωγή των παραπάνω αποτελεσμάτων,μία τέτοια αύξηση στην ταχύτητα λοιπόν, μεταφράζεται σέ αύξηση ημερήσιου κόστους της τάξης των 43,000 $. Τέτοια τυπικά στοιχεία που μπορεί ελαφρώς να διαφέρουν από μελέτη σε μελέτη, εξαρτώνται στην πραγματικότητα σε σημαντικό βαθμό από παράγοντες όπως το βύθισμα και η διαγωγή του πλοίου, η τραχύτητα της γάστρας και η κατάσταση της προπέλας, οι ακαθαρσίες, η κατάσταση της θάλασσας , η δύναμη και η κατεύθυνση του ανέμου και τα ρεύματα. Έτσι δημοσιευμένα στοιχεία που αναφέρονται στην πραγματική κατανάλωση καυσίμου έχουν σαφώς υψηλότερες τιμές από τις αντίστοιχες προβλέψεις που γίνονται από θεωρητικά μοντέλα.

Μία ακόμα ενδιαφέρουσα παρατήρηση είναι το γεγονός ότι η κατανάλωση καυσίμου σε τόνους ανά μέρα και κατά συνέπεια η σειρά των καμπυλών που εμφανίζονται στο ***Διάγραμμα 7.1***, είναι ανάλογη του μεγέθους του πλοίου.Οπως είναι λογικό ένα μεγαλύτερο πλοίο καταναλώνει περισσότερους τόνους καυσίμου ποσοτικά ανά μέρα , αφού έχει μηχανή μεγαλύτερης εγκατεστημένης ισχύος, χωρίς αυτό να έχει γενική ισχύ αφού πλοία παρόμοια σε μέγεθος εμφανίζουν σημαντικές διαφορές όσον αφορά την ενεργειακή επίδοσή τους εξαιτίας διαφορών στην σχεδίασή τους. Στο σύστημα μας, το *APL Atlanta,*πλοίο με υψηλή κατανάλωση στην θάλασσα όπως προκύπτει και από τα στοιχεία που συλλέξαμε απο την εταιρεία για κάθε πλοίο και παραθέσαμε στην ενότητα 5.1 του ***Κεφαλαίου 5***,αποτελεί παραφωνία και χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτού που περιγράφουμε.

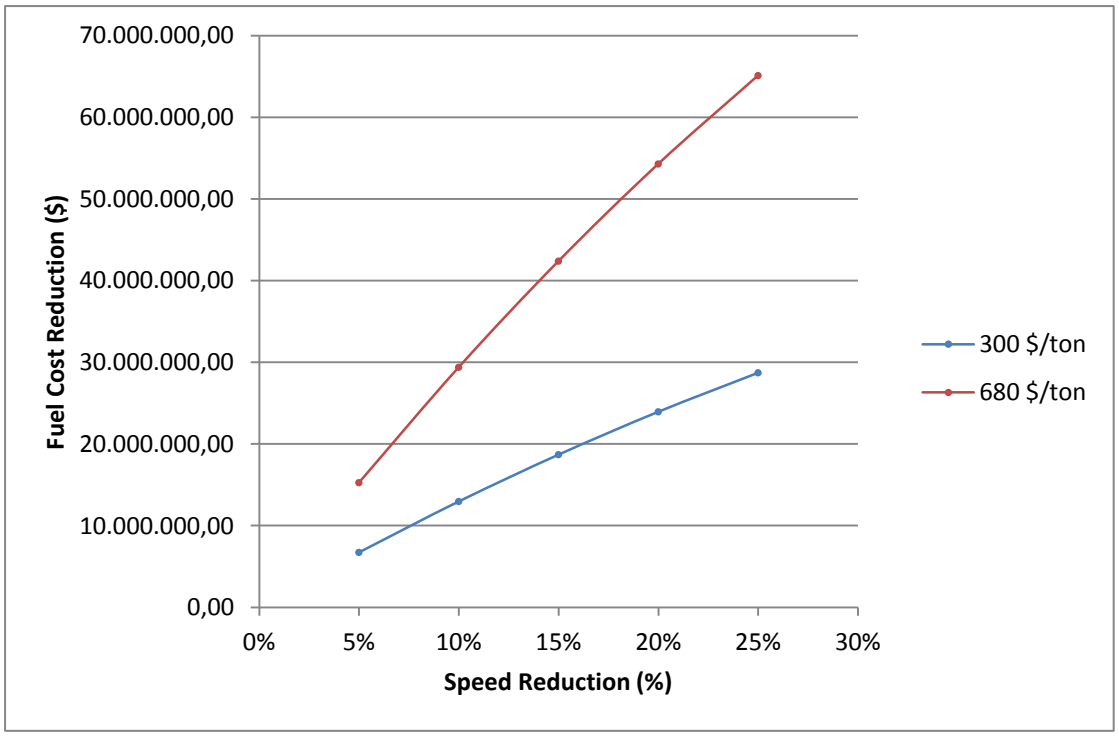
Παραμένοντας στο θέμα της κατανάλωσης καυσίμου που αναπτύξαμε παραπάνω, στους πίνακες παρατίθεται και το ποσοστό μείωσης αυτής, συναρτήσει της αντίστοιχης μείωσης της ταχύτητας. Η εξοικονόμηση που παρατηρείται στην κατανάλωση είναι ιδαιτέρως σημαντική. Επιπροσθέτως, το κόστος καυσίμου, οι εκπομπές CO_2 αλλά και των άλλων ρύπων, είναι πολλαπλάσια της κατανάλωσης καυσίμου και έτσι το ποσοστό μείωσης είναι το ίδιο για όλα αυτά τα μεγέθη.Το παρακάτω διάγραμμα αποτελεί γραφική απεικόνιση της ποσοστιαίας μείωσης σε αυτά τα μεγέθη.Μείωση της ταχύτητας κατά 10% έχει σαν αποτέλεσμα μείωση όλων αυτών των μεγεθών κατά 23% περίπου όπως φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί. Για την παραγωγή του χρησιμοποιούμε τις τιμές που προκύπτουν στο μοντέλο μας για το πλοίο APL Arabia.



APL Arabia		Fuel Consumption reduction (%) CO2 emissions reduction(%) Fuel Cost Reduction (%)
Speed Reduction	Speed	
0%	24	0,00%
5%	22,8	11,87%
10%	21,6	22,85%
15%	20,4	32,95%
20%	19,2	42,19%
30%	16,8	58,21%
40%	14,4	71,08%
50%	12	81,07%

Διάγραμμα 7.2: *Ποσοστιαίες μειώσεις σε κατανάλωση καυσίμου, κόστους καυσίμου, εκπομπές CO_2 για το APL Arabia*

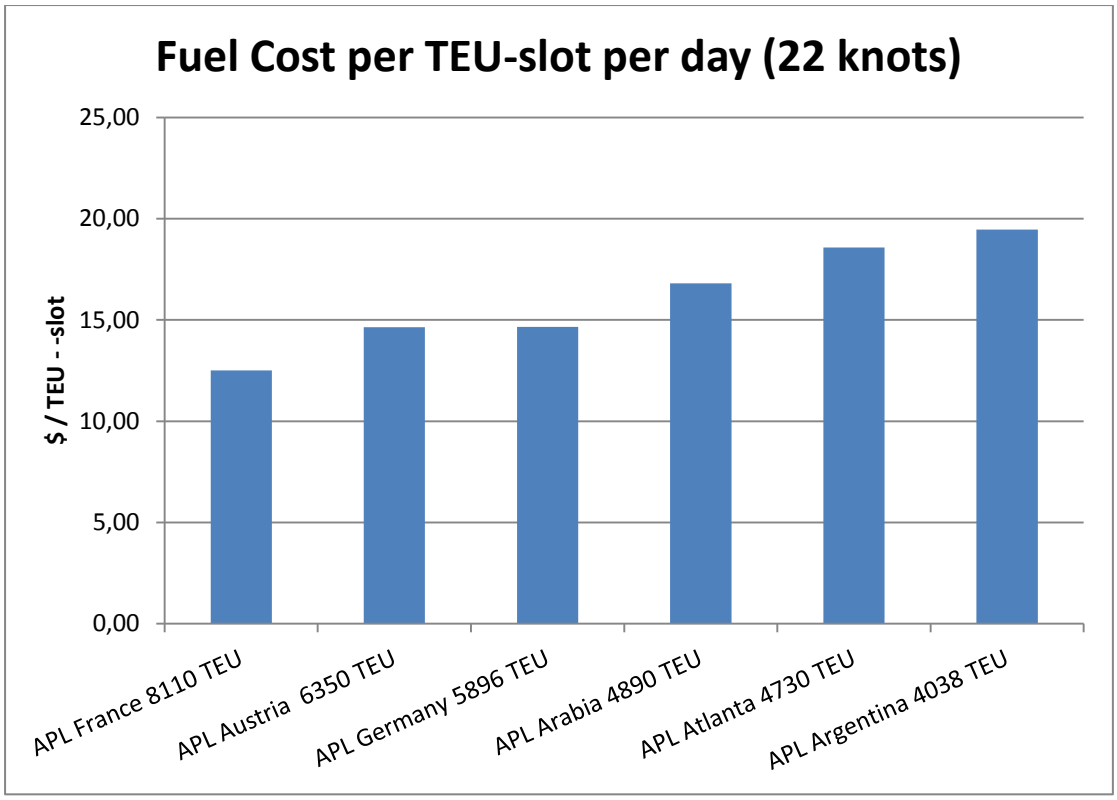
Επιπλέον, ενδιαφέρον παρουσιάζει να ερευνήσουμε πως αντιδρά το σύστημά μας στην μείωση ταχύτητας για διαφορετικές τιμές καυσίμου.Στο ***Διάγραμμα 7.3*** που ακολουθεί παρουσιάζεται ενδεικτικά μια υπόθεση σύγκρισης.Υποθέτουμε μείωση ταχύτητας έως 25% και για τιμές καυσίμου 300$/ton και 680$/ton βλέπουμε πως αντιδρά το μοντέλο μας ως προς το ετήσιο κόστος καυσίμου.Στον κάθετο άξονα παρουσιάζεται η μείωση στο κόστος καυσίμου σε *USD*. Είναι φανερό ότι όσο πιο μεγάλη είναι η τιμή καυσίμου στην αγορά τόσο πιο καθοριστικός είναι ο ρόλος της μείωσης της ταχύτητας για εξοικονόμηση. Οπως προκύπτει από το σύστημας μας, για μείωση ταχύτητας 10%, η εξοικονόμηση στο κόστος καυσίμου για την χαμηλή τιμή των 300$/ton ανέρχεται στα *$ 12.970.678,13*. Αντίστοιχα το κέρδος από μία τέτοια μείωση για την τρέχουσα τιμή των 680$/ton αγγίζει τα *$30.000.000* περίπου, αναδεικνύοντας με ένα ακόμα τρόπο την σημασία του slow steaming σε καιρούς που οι τιμές πετρελαίου είναι στα ύψη.



APL Arabia		fuel cost reduction ($) per year	
Speed Reduction	Speed	300 $/ton	680 $/ton
0%	24	0,00	0,00
5%	22,8	6.739.154,44	15.275.416,73
10%	21,6	12.970.678,13	29.400.203,77
15%	20,4	18.705.080,78	42.398.183,11
20%	19,2	23.953.756,30	54.295.180,94
25%	18	28.729.077,77	65.119.242,94

Διάγραμμα 7.3: *Μείωση κόστος καυσίμου σε USD τον χρόνο*

Τέλος, με δεδομένη την ανάγκη για εξοικονόμηση κόστους στην θάλασσα προκύπτουν οικονομίες κλίμακας. Δεν προκαλεί καθόλου εντύπωση το γεγονός πως τα σχέδια επέκτασης στόλου όλο και περισσοτέρων εταιρειών εστιάζονται κυρίως σε μεγάλα post-panamax containerships. Οικονομίες κλίμακας προκύπτουν και στο μοντέλο μας, όπως φαίνεται από τις γραμμές των ***Πινάκων 7.1*** και ***7.2*** που παρατίθεται το κόστος καυσίμου ανά TEU-slot.Για παράδειγμα, για ταχύτητα 22 knots, το κόστος καυσίμου εν πλω ενός πλοίου περίπου 4000 TEU όπως το *APL Argentina (4038 TEU)* φτάνει τα *$19.46 ανά TEU-slot*, εν αντιθέσει με το κόστος καυσίμου ενός πλοίου περίπου 8000 TEU, όπως το *APL France(8110 TEU)*, που είναι *$12.51 ανά TEU-slot* ή αντίστοιχα εξοικονόμηση κόστους σε ποσοστό 35%.



Διάγραμμα 7.4: *Κόστος καυσίμου ανά TEU-slot(εν πλω)*

Ωστόσο, το θέμα του κόστους καυσίμου γίνεται πιο περίπλοκο όταν αναφερόμαστε σε ένα συνολικό δίκτυο παροχής υπηρεσιών αντί για ένα μεμονωμένο πλοίο, όπως αυτό φαίνεται στις επόμενες ενότητες. Η εξοικονόμηση που παρατηρείται σε αυτά που συζητήσαμε στην ενότητα αυτή, βρίσκεται εντός ενός καθαρά θεωρητικού πλαισίου και δεν αντικατοπτρίζει την πραγματική λειτουργία ενός πλοίου σε μία γραμμή όπου επιπρόσθετα κόστη προκύπτουν από την μείωση της ταχύτητας.

7.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Βασικός στόχος της παρούσας διπλωματικής αποτελεί η εύρεση εκείνης της λύσης που ελαχιστοποιεί το ετήσιο λειτουργικό κόστος στο πλαίσιο που περιγράφηκε στο ***Κεφάλαιο 6***. Όπως έχουμε ήδη τονίσει η προσπάθεια βελτιστοποίησης του συστήματος μας έγινε σύμφωνα με δεδομένα που συμβαδίζουν, στο βαθμό που είναι εφικτό, με το πραγματικό πρόβλημα. Φυσικά αυτό λόγω της πολυπλοκότητας ενός δικτύου όπως αυτό που μελετάμε δεν είναι καθόλου εύκολο.Προς αυτή την κατεύθυνση λοιπόν θεωρήσαμε σωστό να περιορίσουμε το πλήθος των πλοίων που δραστηριοποιούνται στην κύρια γραμμή μεταξύ 5 και 7 και να διατηρήσουμε την συχνότητητα παροχής υπηρεσιών στο σύστημα μας σύμφωνα με τους περιορισμούς που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.Για λόγους απλούστευσης της πορείας της βελτιστοποίησης, διαιρέσαμε την διαδικασία σε 3 τμήματα, σε κάθε ένα από τα οποίο θεωρήσαμε συγκεκριμένο αριθμό πλοίων που δραστηριοποιούνται στην κύρια γραμμή, 5, 6, ή 7, δίνοντας την δυνατότητα στο πρόγραμμα να κινηθεί πιο άμεσα στην περιοχή της βέλτιστης λύσης σε κάθε ένα από αυτά. Η απόφαση αυτή στηρίζεται όπως αναλύσαμε και στο ***Κεφάλαιο 6*** με την βοήθεια του ***Πίνακα 6.1***, στην αντιμετώπιση του πραγματικού προβλήματος κατανομής πλοίων που προκύπτει για τις εταιρείες που δραστηριοποιούνται στο δίκτυο Trans-pacific. Η καταγραφή λοιπόν των βέλτιστων λύσεων για αυτά τα τρία τμήματα του προβλήματος μας δίνει δυνατότητα σύγκρισης λύσεων, που έτσι και αλλιώς αποτελούν μέρος του προφίλ της εταιρείας, όπως και του αποτελεσματικού μετώπου που παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα και που υπό συγκεκριμένες συνθήκες του παγκόσμιου οικονομικού περιβάλλοντος (τιμές καυσίμου, ναύλοι, σχέση προσφοράς-ζήτησης) μπορούν να αποτελέσουν ιδανικές επιλογές της εταιρείας. Από την άλλη σχετίζεται και με τα αποτελέσμα που παρουσιάζονται στις ενότητες που ακολουθούν.

Πριν παραθέσουμε τις αρχικές και βέλτιστες λύσεις έχει αξία να αναφέρουμε τα εξής. Η αρχική λύση που παρουσιάζεται στο σενάριο όπου στην κύρια γραμμή δραστηριοποιούνται 5 πλοία, εκτός του ότι αποτελεί μία εφικτή λύση που συμμορφώνεται πλήρως με τους περιορισμούς του συστήματος βελτιστοποίησης που περιγράψαμε στο ***Κεφάλαιο 6***, αποτελεί και επιλογή της εταιρείας σε περιόδους ευνοϊκού οικονομικού περιβάλλοντος, που είναι προς το συμφέρον της να ταξιδεύουν τα πλοία της σε υψηλές ταχύτητες.Όπως φαίνεται και από τον ***Πίνακα 6.1*** που επικαλεστήκαμε παραπάνω, η εταιρεία όταν δεν εμφανίζονται ανάγκες για πλεύση σε χαμηλότερες ταχύτητες (π.χ λόγω υψηλών τιμών καυσίμου) και επομένως χρήση περισσότερων πλοίων με σκοπό την διατήρηρηση της συχνότητα παροχής υπηρεσιών, κατανέμει στην κύρια γραμμή 5 πλοία μέσης μεταφορικής ικανότητας 4900 TEU. Η αρχική εφικτή λύση που παραθέτουμε λοιπόν, προσεγγίζει αυτή την επιλογή δεδομένου πάντα των τύπων πλοίων που χρησιμοποιούμε στο μοντέλο. Στη συνέχεια της παρουσίασης των αποτελεσμάτων αυτή η αρχική λύση θα τεθεί υπό σύγκριση με την συνολικά βέλτιστη λύση του συστήματος, που προέκυψε από την

διαδικασία ελαχιστοποίησης του κόστους . Οι αρχικές λύσεις και βέλτιστες λύσεις παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί.

	5 SHIPS					
	INITIAL			OPTIMIZATION		
Vessel Type	PCE line	SKX line	NKX line	PCE line	SKX line	NKX line
APL France	-	-	-	-	-	-
APL Bogota	-	-	-	-	-	-
APL Germany	-	-	-	1	-	-
APL Amazonite	-	1	1	-	-	-
APL Arabia	5	-	-	-	-	-
APL Argentina	-	-	-	4	1	-
APL Atlanta	-	-	-	-	-	-
APL Austria	-	-	-	-	-	-
APL Balboa	-	-	-	-	-	1

	6 SHIPS					
	INITIAL			OPTIMIZATION		
Vessel Type	PCE line	SKX line	NKX line	PCE line	SKX line	NKX line
APL France	-	-	-	-	-	-
APL Bogota	-	-	-	-	-	-
APL Germany	2	-	-	-	-	-
APL Amazonite	-	-	-	-	-	-
APL Arabia	-	-	-	1	-	-
APL Argentina	-	1	1	5	1	-
APL Atlanta	4	-	-	-	-	-
APL Austria	-	-	-	-	-	-
APL Balboa	-	-	-	-	-	1

	7 SHIPS					
	INITIAL			OPTIMIZATION		
Vessel Type	PCE line	SKX line	NKX line	PCE line	SKX line	NKX line
APL France	-	-	-	-	-	-
APL Bogota	-	-	-	-	-	-
APL Germany	-	-	-	-	-	-
APL Amazonite	-	1	-	-	-	-
APL Arabia	5	-	-	-	-	-
APL Argentina	2	-	-	7	1	-
APL Atlanta	-	-	-	-	-	-
APL Austria	-	-	-	-	-	-
APL Balboa	-	-	1	-	-	1

Πίνακες 7.3-7.5: *Κατανομή πλοίων σε αρχικές και βέλτιστες λύσεις για τα υποσυστήματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης*

No. Of ships in Transpacific line	5 SHIPS		6 SHIPS		7 SHIPS	
	INITIAL	OPTIMIZATION	INITIAL	OPTIMIZATION	INITIAL	OPTIMIZATION
Line frequency in days						
Transpacific line	7,0	7,6	7,0	7,3	6,9	7,2
Feeder line 1	6,9	7,3	6,9	7,3	6,9	7,3
Feeder line 2	7,0	7,3	7,0	7,3	7,0	7,3
Speed per line in knots						
Transpacific line	24	21	18	17	15	14
Feeder line 1	14	12	14	12	14	12
Feeder line 2	12	11	12	11	12	11
Idle time per roundtrip						
Transpacific line	0	0	0	0	0	0
Feeder line 1	0	0	0	0	0	0
Feeder line 2	0	0	0	0	0	0
Roundtrip duration in hours						
Transpacific line	843,16	916,87	1015,16	1055,63	1152,76	1211,73
Feeder line 1	165	175,81	165	175,81	165	175,81
Feeder line 2	166,84	175,93	166,84	175,93	166,84	175,93
Annual costs in dollars $						
Loading cost	202.225.504,40	186.751.425,60	201.668.550,40	193.276.499,70	206.254.138,20	195.910.668,20
Fuel cost	138.345.893,88	96.897.166,15	87.906.883,43	70.114.723,98	67.376.913,84	52.157.517,69
Total Port Charges	18.283.465,81	16.911.563,27	18.237.052,98	17.455.319,45	18.619.185,30	17.674.833,49
Ship-related cost	46.310.240,00	39.430.080,00	55.854.720,00	43.796.160,00	54.254.800,00	48.384.000,00
Total annual operating Costs	405.165.104,07	339.990.235,04	363.667.206,83	324.642.703,16	346.505.037,33	**314.127.019,40**
Emissions in tons						
CO2 Emissions	636.798,01	446.011,96	404.630,21	322.733,95	310.131,97	240.077,99
NOx Emissions	15.869,09	11.114,67	10.083,44	8.042,57	7.728,53	5.982,77
SOx Emissions	12.206,99	8.549,75	7.756,49	6.186,59	5.945,02	4.602,13

Πίνακας 7.6: *Χαρακτηριστικά υποβέλτιστων λύσεων και βέλτιστης λύσης συστήματος*

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους παραπάνω πίνακες, παρατηρούμε πως η λύση που εμφανίζει το ελάχιστο ετήσιο λειτουργικό κόστος είναι αυτή στην οποία δραστηριοποιούνται 7 πλοία στην γραμμή Transpacific με τα χαρακτηριστικά που περιγράφονται στους ***Πίνακες 7.5*** και ***7.6***.

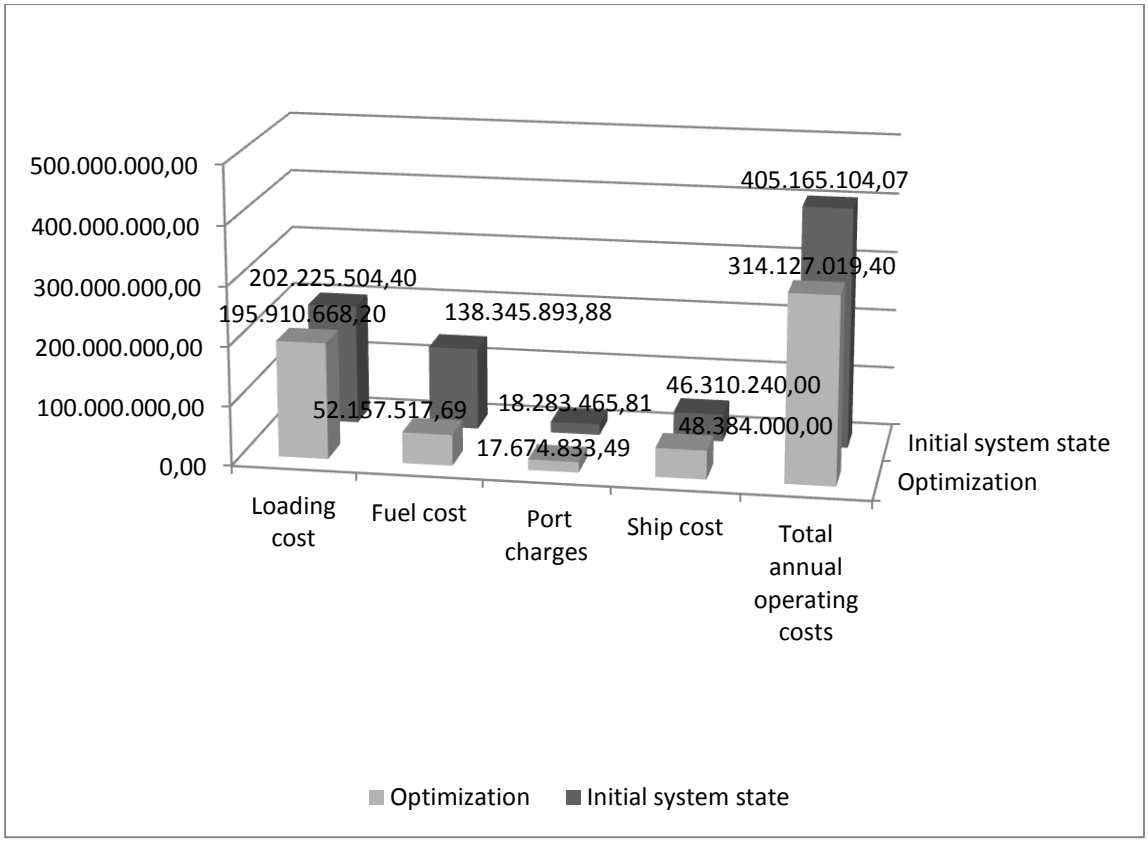
Στην περίπτωση των 5 πλοίων, δώσαμε μεγαλύτερη ελαστικότητα στην τιμή που μπορεί να πάρει η συχνότητα παροχής υπηρεσιών, όπως φαίνεται στην περιγραφή τη υποβέλτιστης λύσης, αφού η συχνότητα έχει τιμή 7,6. Αυτό έγινε για να έχουμε

συγκριτική εικόνα όσον αφορά περιπτώσεις που πλοία ναι μεν ταξιδεύουν σε χαμηλότερες ταχύτητες σε ένα δίκτυο, αλλά η εταιρεία δεν προχωρά στην προσθήκη επιπλέον πλοίων στο δίκτυο εξυπηρέτησης.Δηλαδή μία περίπτωση slow-steaming χωρίς την ανάγκη χρήσης έξτρα πλοίου.

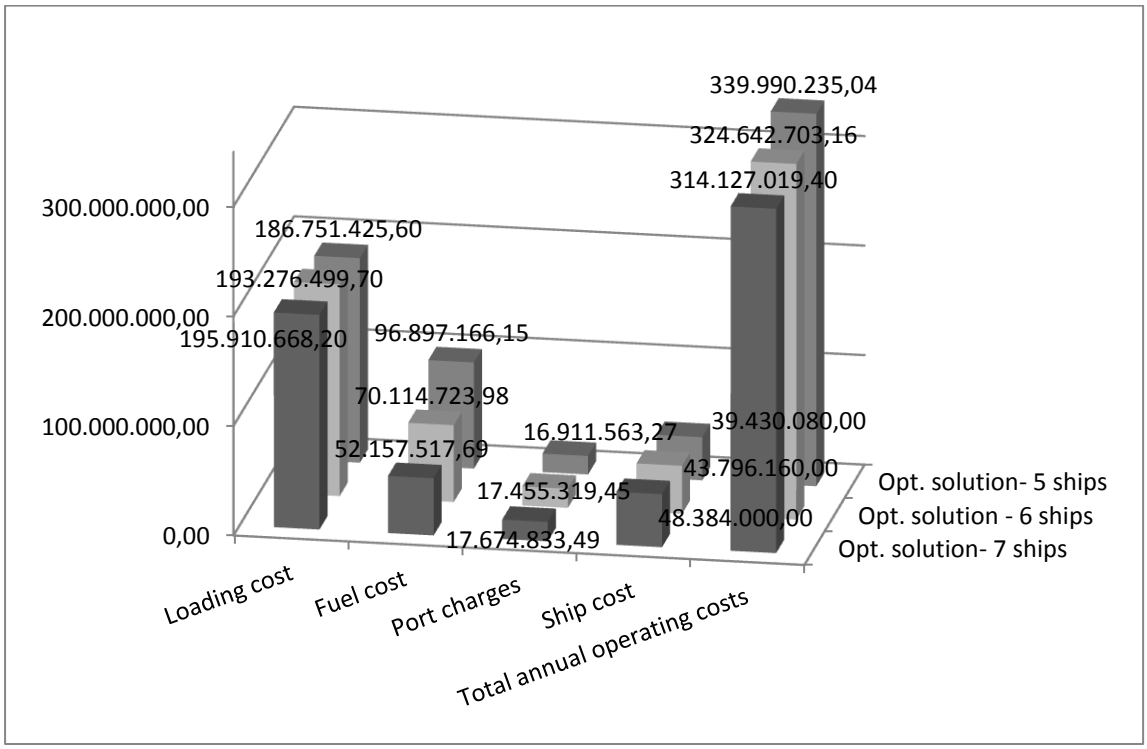
Σχολιάζοντας τα επιμέρους κόστη, την μεγαλύτερη μεταβλητότητα έτσι όπως είναι κατασκευασμένο το μοντέλο μας την εμφανίζει το κόστος καυσίμου.Αυτό που είναι ιδιαιτέρως εντυπωσιακό και άξιο σχολιασμού είναι το γεγονός ότι η επίδραση της ταχύτητας είναι τόσο καθοριστική στο ύψος του κόστος καυσίμου, που παρά την προσθήκη επιπλέον πλοίων, εξακολουθεί να υφίσταται σημαντική διαφορά μεταξύ των κόστων καυσίμου των βέλτιστων λύσεων για κάθε υποσύστημα. Αναλυτικότερα, για την περίπτωση του υποσυστήματος των 5 πλοίων στην κύρια γραμμή, η βέλτιστη λύση προκύπτει για ταχύτητα *21 knots,* και κόστος καυσίμου *$96.897.166,15* .Από την άλλη, η συνολικά βέλτιστη λύση του συστήματος στην οποία ναι μεν δραστηριοποιούνται δύο περισσοτερα πλοία, προκύπτει για *14 knots* με κοστος καυσίμου *$52.157.517,69,* σχεδόν το μισό συγκριτικά με την πρώτη περίπτωση. Στην τελευταία ενότητα του παρόντος κεφαλαίου, το συγκεκριμένο θέμα θα αναλυθεί περαιτέρω με μία σειρα βελτιστοποιήσεων για διαφορετικές τιμές καυσίμου, με στόχο να υπάρξει σαφής εικόνα όσον αφορά τον τρόπο με τον οποίο το κόστος καυσίμου επηρεάζει το ετήσιο λειτουργικό κόστος και άρα τις βέλτιστες λύσεις που προκύπτουν.

Όσον αφορά τα υπόλοιπα κόστη, οι μεταβολές που παρατηρούνται στο κόστος που σχετίζεται με την ιδιοκτησιακή κατάσταση του πλοίων, οφείλονται στο πλήθος και τον τύπο των πλοίων που κατανέμονται κάθε φορά στην κύρια γραμμή. Στο κόστος φορτοεκφόρτωσης παρατηρούνται μικρές μεταβολές μετά την διαδικάσία βελτιστοποίησης, οι οποίες αφενός οφείλονται στο πλήθος των πλοίων που δραστηριοποιούνται σε κάθε γραμμή και αφετέρου στον ετήσιο αριθμό των κυκλικών ταξιδιών που εκτελούνται στις 3 γραμμές. Τα ίδια ισχύουν και για τα λιμενικά κόστη.

Στο ***Διάγραμμα 7.5*** που ακολουθεί παρουσιάζεται σχηματικά, η μεταβολή στα επιμέρους κόστη μεταξύ της αρχικής εφικτής λύσης με 5 πλοία στην κύρια γραμμή που παρουσιάστηκε παραπάνω και της προκύπτουσας βέλτιστης λύσης του μοντέλου, ενώ στο διάγραμμα ***Διάγραμμα 7.6*** παρουσιάζονται οι υποβέλτιστες λύσεις του συστήματος, όπως αυτές παρατέθηκαν στον ***Πίνακα 7.6***.



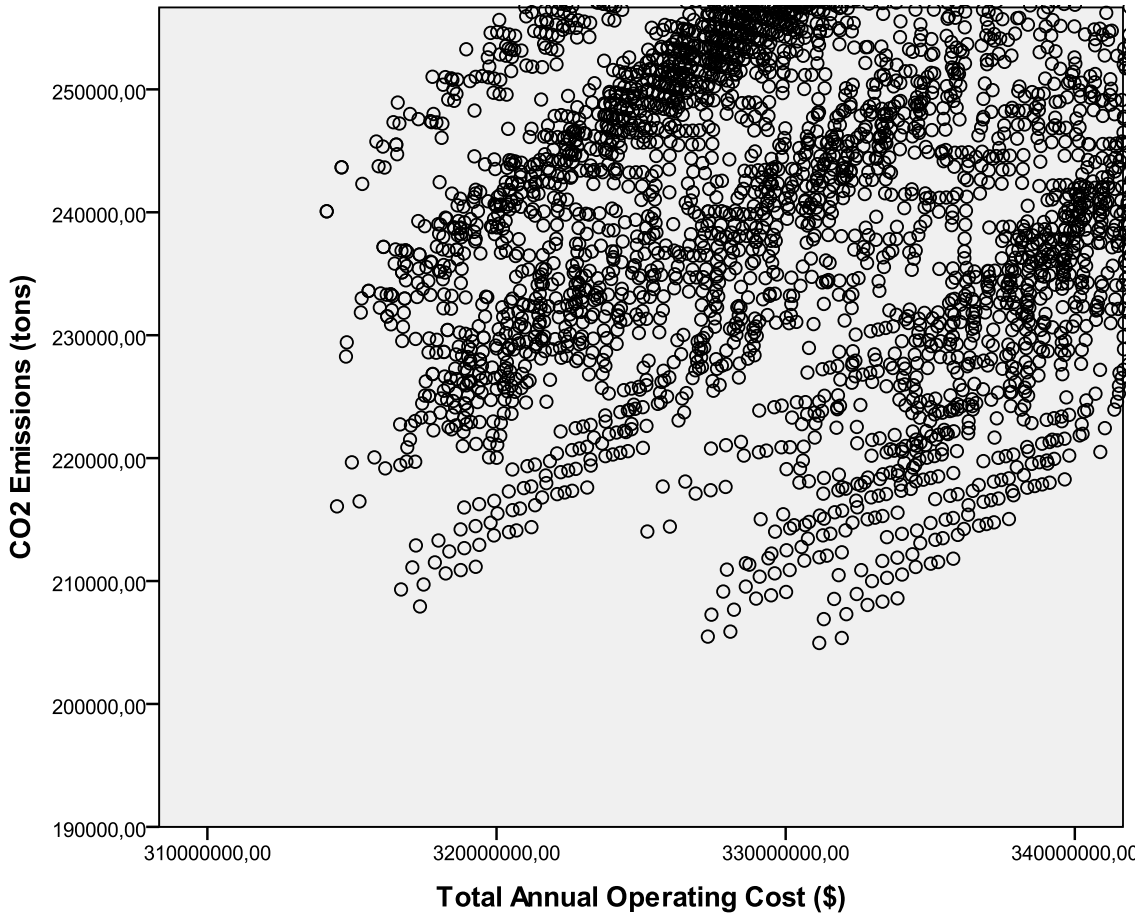
Διαγραμμα 7.5: *Συγκριτική απεικόνιση σε USD σε ετήσια βάση μεταξύ αρχικής εφικτής λύσης και βέλτιστης λύσης συστήματος*



Διαγραμμα 7.6: *Συγκριτική απεικόνιση σε USD σε ετήσια βάση των βέλτιστων λύσεων του συστήματος για 5, 6, 7 πλοία στην κύρια γραμμή*

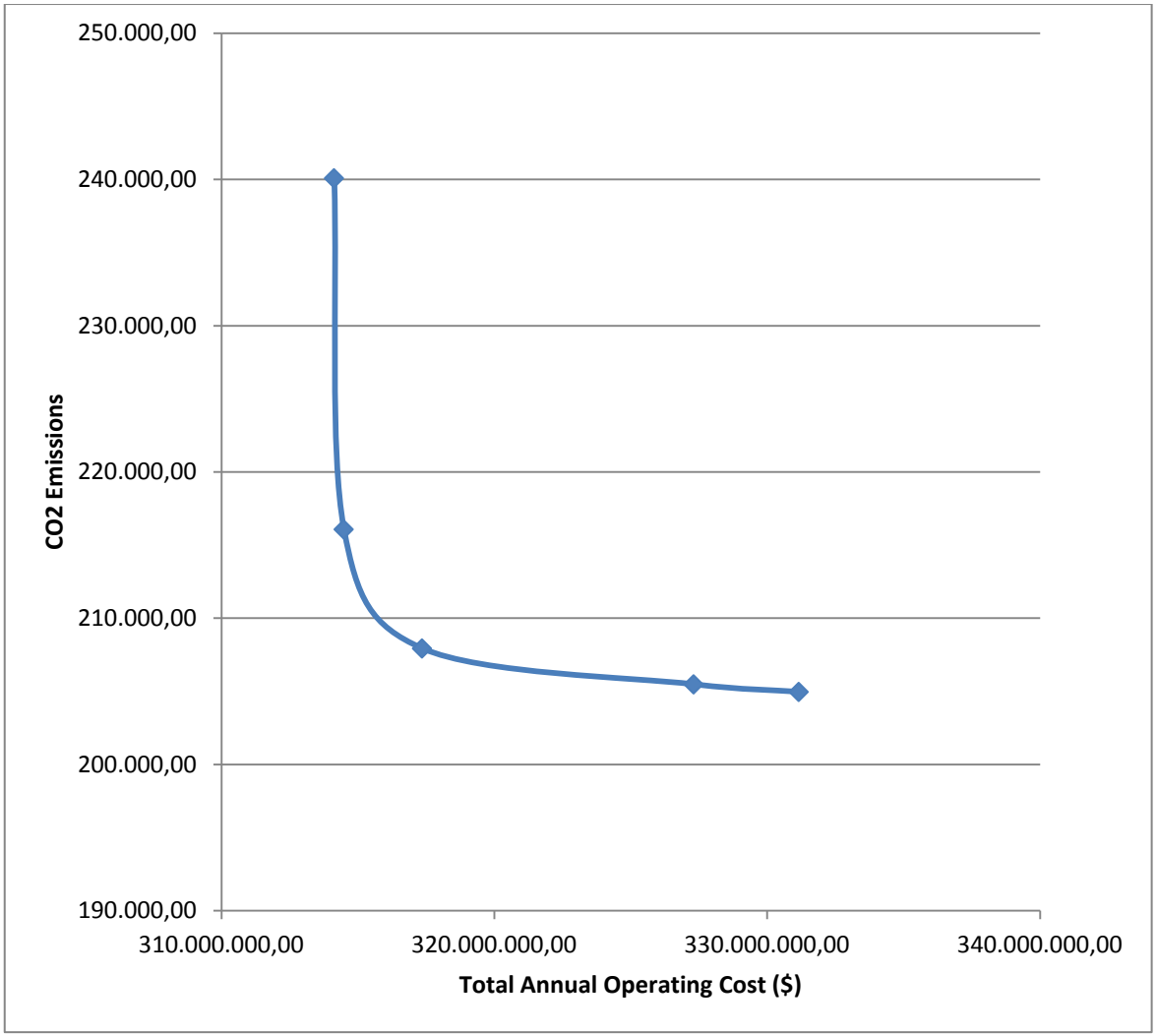
7.3 ΧΑΡΑΞΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ – ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO_2

Στο ***Διάγραμμα 7.6*** που ακολουθεί, παρουσιάζεται μέρος του συνόλου των σημείων λειτουργίας. Επείδη το πλήθος των εφικτών λύσεων που προέκυψαν κατα την διαδικασία εξαγωγής αποτελεσμάτων με την βοήθεια του προγράμματος ***TopRank***, ξεπερνά τις 50.000, το διάγραμμα εστιάζει στα «καλύτερα» σημεία λειτουργίας της εταιρείας, δηλαδή σε αυτά που συνθέτουν την καμπύλη του αποτελεσματικού μέτωπου και σε αυτά που βρίσκονται πλησίον της.



Διάγραμμα 7.7: *Απεικόνιση σημείων λειτουργίας της εταιρείας.*

Λαμβάνοντας υπόψιν την διαδικασία που περιγράφηκε στο ***Κεφάλαιο 6,*** στο ***Διάγραμμα 7.7*** παρουσιάζεται το αποτελεσματικό μέτωπο λειτουργικού κόστους-εκπομπών CO_2 της εταιρείας, ενώ στον **Πίνακα 7.7** προσδιορίζονται τα σημεία που το ορίζουν, όπως επίσης και οι τιμές των μεταβλητών απόφασης για κάθε ένα από αυτά τα σημεία.



Διάγραμμα 7.8: *Καμπύλη αποτελεσματικού μετώπου Ετήσιου λειτουργικού κόστους-Εκπομπών* CO_2

No.	ΣΗΜΕΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΥ ΜΕΤΩΠΟΥ		Main Line				Feeder line 1				Feeder line 2			
	Total Cost	CO2 Emissions	No. of Vessels	Vessels	Speed	frequency	No. of Vessels	Vessels	Speed	frequency	No. of Vessels	Vessels	Speed	frequency
1	314.127.019,40	240.077,99	7	7 *APL Argentina	14	7,2	1	APL Argentina	12	7,3	1	APL Balboa	11	7,3
2	314.482.369,69	216.075,88	7	4 *APL Argentina + 3*APL Atlanta	13	7,6	1	APL Argentina	12	7,3	1	APL Balboa	11	7,3
3	317.353.203,20	207.933,98	7	4 *APL Argentina + 3*APL Atlanta	13	7,6	1	APL Argentina	12	7,3	1	APL Argentina	11	7,3
4	327.308.813,91	205.480,38	7	4 *APL Argentina + 3*APL Atlanta	13	7,6	1	APL Argentina	11	7,6	1	APL Argentina	11	7,3
5	331.161.792,04	204.963,26	7	4 *APL Argentina + 3*APL Atlanta	13	7,6	1	APL Argentina	12	7,3	1	APL Argentina	10	7,8

Πίνακας 7.7: *Σημεία αποτελεσματικού μετώπου λειτουργικού κόστους – εκπομπών* CO_2

No.	NOx Emissions	SOx Emissions
1	5.982,77	4.602,13
2	5.384,64	4.142,03
3	5.181,74	3.985,95
4	5.120,60	3.938,92
5	5.107,71	3.929,01

Πίνακας 7.8: *Τιμές εκπομπών* NO_x , SO_x που αντιστοιχούν στα σημεία του αποτελεσματικού μετώπου

Όπως φαίνεται από το ***Διάγραμμα 7.8*** που απεικονίζει το αποτελεσματικό μέτωπο, η μορφή της προκύπτουσας καμπύλης είναι αυτή που αναμενόταν, καθώς είναι κυρτή, σχετικά ομαλή και περικλείει στο εσωτερικό της όλα τα πιθανά, εφικτά σενάρια λειτουργίας της εταιρείας. Συγκροτείται από λύσεις που κυριαρχούν έναντι αυτών εκτός καμπύλης, αλλά δεν κυριαρχούν πλήρως η μία της άλλης όσον αφορά τα δύο μελετούμενα κριτήρια, του ετήσιου λειτουργικού κόστους και των εκπομπών ρύπων. Τα ακράια σημεία της προκύπτουσας καμπύλης είναι και αυτά που ελαχιστοποιούν τα δύο κριτήρια με τιμές 314.127.019,40 $ και 204.963,26 tons CO_2, και κάθε πιθανός συνδυασμός των μεταβλητών απόφασης του συστήματος μας κινείται μεταξύ αυτών των τιμών. Το αποτελεσματικό μέτωπο οριοθετείται από μία απειρία σημείων, πέραν αυτών που έχουν υπολογιστεί και χρησιμοποιηθεί για την χάραξη του, τα οποία αποτελούν λύσεις βέλτιστης λειτουργίας για την εταιρεία.. Ετσι, η επιλογή του επιθυμητού σημείου λειτουργίας, αποφασίζεται από τον λήπτη απόφασης.

Φυσικά, θα πρέπει να τονίσουμε ότι η εικόνα του αποτελεσματικού μετώπου καθορίζεται εν πολλοίς από τους περιορισμούς που θέσαμε στο σύστημα μας.Επιπλέον,η κατανομή και η πυκνότητα των σημείων λειτουργίας εντός της καμπύλης είναι άμεσα συναρτώμενες από τον τρόπο ορισμού των μεταβλητών απόφασης, όπως για παράδειγμα από το γεγονός ότι οι τιμές των ταχυτήτων στις 3 γραμμές του συστήματος παίρνουν διακριτές και όχι συνεχείς τιμές.

Επιπλέον, παρατηρείται πυκνότητα σημείων λειτουργίας όσο πλησιάζουμε στη περιοχή ελάχιστου λειτουργικού κόστους, το οποίο είναι απολύτως λογικό, αν αναλογιστέι κανείς ότι τα σημεία που συνθέτουν το παραπάνω διάγραμμα προκύπτουν από διαδικασία βελτιστοποίησης και όχι τυχαία. Έτσι είναι αναμενόμενο να παρουσιάζουν «καλά» χαρακτηριστικά λειτουργίας. Πάντως επειδή τα παραπάνω σημεία αντιπροσωπεύεουν την λειτουργία του δικτύου της εταιρείας APL, ως υποψήφιες λύσεις πρέπει να θεωρούνται αυτές που βρίσκονται κοντά στην περιοχή του ελάχιστου λειτουργικού κόστους.

Τέλος, το συγκεκριμένο διάγραμμα έχει ως στόχο την αποσαφήνηση του εύρους λειτουργίας του μελετούμενου δικτύου, τόσο ως προς το οικονομικο σκέλος, όσο και ως προς το ενεργειακό και συγκεκριμένα το επίπεδο εκπομπών ρύπων CO_2, NO_x, SO_x του συστήματος μας. Μπορεί να φανεί ιδαιτέρως χρήσιμο σε περιπτώσεις που κρίνεται αναγκαίος ο επανασχεδιασμός των ταξιδιών σε ένα έτσι και αλλιώς ευμετάβλητο οικονομικό περιβάλλον, όπου ναύλοι και τιμές καυσίμου παρουσιάζουν συνεχείς διακυμάνσεις, όπως επίσης και σε μελλοντικές περιπτώσεις καθιέρωσης συστημάτων φορολογίας στα καύσιμα ή χρεώσεων στις εκπομπές ρύπων, όπου λύσεις ταυτόχρονα οικονομικά και περιβαλλοντικά αποδοτικές θα πρέπει να υιοθετηθούν από τις εταιρείες. Έτσι μια ναυτιλιακή εταιρεία είναι σε θέση να υπολογίσει το μέγιστο ποσό που καλείται να επενδύσει προκειμένου να εναρμονιστεί με τις εκάστοτε απαιτήσεις περιορισμού των εκπομπών. Σε τέτοιες δε περιπτώσεις Μέτρων Αγοράς (MBM) όπου θα είχαμε χρεώσεις στα καύσιμα ή στους ρύπους, η καμπύλη του μετώπου Pareto για τις ίδιες τιμές εκπομπών CO_2, θα μετακινόταν προς τα δεξιά του άξονα x, ενώ το σημείο ελαχιστοποίησης του κόστους θα κατέβαινε ταυτόχρονα προς τα κάτω στον άξονα ψ, ανάλογα φυσικά με το ύψος της χρέωσης.

7.4 ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ (KPI's)

Στα παρακάτω, παρουσιάζονται σε πινακοποιημένη μορφή οι εκπομπές ρύπων που αντιστοιχούν στην βέλτιστη λύση του συστήματος, όπως επίσης και οι τιμές βασικών δεικτών απόδοσης *(key performance indicator - KPI's)* . Οι βασικοί δέικτες απόδοσης αποτελούν τρόπο μέτρησης αποδοτικότητας και είναι ευρέως διαδεδομένοι στην βιομηχανία. Χρησιμοποιούνται κυρίως από εταιρείες για την εκτίμηση της αποδοτικότητας συγκεκριμένων δραστηριοτήτων στις οποίες συμμετέχουν, καταδεικνύοντας την αποτελεσματικότητα τους είτε με βάση την επίτευξη προόδου προς την κατεύθυνση των στρατηγικών στόχων, είτε με την σταθερή και επαναλαμβανόμενη επίτευξη συγκεκριμένων επιπέδων κάποιου επιχειρησιακού στόχου.

Οι βασικοί δείκτες απόδοσης που παρουσιάζονται είναι οι εξής:

- Emissions efficiency [g/TEUmile] : $\frac{A}{B*10^{-6}}$,

  όπου A: emitted mass of $CO_2/NO_x/SO_x$ [ton] και B: Transport work [TEUmile]

- Cost efficiency [$/TEUmile] : $\frac{C}{B}$

  ,όπου C: Cost [$] και B: Transport work [TEUmile]

Ακολουθούν πίνακες που παραθέτουν :

- αποτελέσματα εκπομπών ρύπων CO_2, NO_x, SO_x, (1) κατά την διάρκεια του ταξιδιού, (2) στους λιμένες και (3) στο σύνολό τους.
- το συνολικό κόστος του συστήματος ανά κυκλικό ταξίδι και ανά χρόνο, αλλά και αναλυτικά για κάθε μία από τις τρεις γραμμές
- Αναλυτικές τιμές κόστους καυσίμου ετησίως, ανά κυκλικό ταξίδι, αλλά και μεταξύ διαδοχικών λιμένων των τριών γραμμών που αποτελούν το σύστημα
- βασικούς δείκτες απόδοσης *(key performance indicator - KPI's)*, όπως περιγράφηκαν παραπάνω.

Τα αποτελέσματα αυτά, παρουσιάζονται με την μορφή σύγκρισης μεταξύ της βέλτιστης λύσης που προέκυψε κατά την διαδικασία ελαχιστοποίησης του ετήσιου λειτουργικού κόστους, και της αρχικής εφικτής λύσης που χρησιμοποιήσαμε στην προηγούμενη ενότητα του παρόντος κεφαλάιου για τους λόγους που αναλυτικά παραθέσαμε. Στόχος μας μέσω

αυτής της σύγκρισης, είναι να καταστεί σαφές το ύψος της μείωσης των εκπομπών ρύπων που προκύπτει ύστερα από την εφαρμογή του λειτουργικού μέτρου της μείωσης της ταχύτητας πλεύσης μέσα σε ένα περιβάλλον υψηλών τιμών καυσίμου που δεν ευνοεί για λόγους κόστους, την πλεύση σε υψηλές ταχύτητες. Παράλληλα με τους πίνακες που ακολουθούν, παρουσιάζουμε με μορφή συγκριτικών διαγραμμάτων τα μεγέθη αυτών των πινάκων που χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής.

TOTAL EMISSIONS						
	INITIAL			OPTIMIZATION		
CO2						
Line Name	**Overall CO2 emissions for Used Ships per Round trip**	**Overall CO2 emissions for Used Ships per Year**	**CO2/teumile round trip**	**Overall CO2 emissions for Used Ships per Round trip**	**Overall CO2 emissions for Used Ships per Year**	**CO2/teumile round trip**
TRANSPACIFIC LINE 1	57010,80	592313,00	338,09	27584,16	199414,85	116,84
FEEDER LINE 1	465,42	24710,22	508,54	337,05	16794,48	368,28
FEEDER LINE 2	376,62	19774,78	399,73	479,36	23868,65	508,77
Totals	57852,85	636798,01	339,35	28400,58	240077,99	119,36

NOx						
Line Name	**Overall NOx emissions for Used Ships per Round trip**	**Overall NOx emissions for Used Ships per Year**	**NOx/teumile round trip**	**Overall NOx emissions for Used Ships per Round trip**	**Overall NOx emissions for Used Ships per Year**	**NOx/teumile round trip**
TRANSPACIFIC LINE 1	1420,72	14760,52	8,43	687,40	4969,44	2,91
FEEDER LINE 1	11,60	615,78	12,67	8,40	418,52	9,18
FEEDER LINE 2	9,39	492,79	9,96	11,95	594,81	12,68
Totals	1441,70	15869,09	8,46	707,75	5982,77	2,97

SOx						
Line Name	**Overall SOx emissions for Used Ships per Round trip**	**Overall SOx emissions for Used Ships per Year**	**SOx/teumile round trip**	**Overall SOx emissions for Used Ships per Round trip**	**Overall SOx emissions for Used Ships per Year**	**SOx/teumile round trip**
TRANSPACIFIC LINE 1	1092,86	11354,24	6,48	528,77	3822,65	2,24
FEEDER LINE 1	8,92	473,68	9,75	6,46	321,94	7,06
FEEDER LINE 2	7,22	379,07	7,66	9,19	457,55	9,75
Totals	1109,00	12206,99	6,51	544,42	4602,13	2,29

Πίνακας 7.9: *Συνολικές εκπομπές ρύπων (ανά κυκλικό ταξίδι, ανα χρόνο) και δείκτες απόδοσης εκπομπών πριν και μετά την βελτιστοποίηση*

VOYAGE EMISSIONS				
	INITIAL		OPTIMIZATION	

CO2	Line Name	Overall CO2 emissions for Used Ships per RoundTrip	Overall CO2 emissions for Used Ships per Year	Overall CO2 emissions for Used Ships per RoundTrip	Overall CO2 emissions for Used Ships per Year
	TRANSPACIFIC LINE 1	52813,12	548701,19	24043,94	173821,47
	FEEDER LINE 1	213,06	11311,97	185,03	9219,51
	FEEDER LINE 2	206,88	10862,16	397,56	19795,36
	totals	53233,06	570875,32	24626,53	202836,34

NOx	Line Name	Overall NOx emissions for Used Ships per RoundTrip	Overall NOx emissions for Used Ships per Year	Overall NOx emissions for Used Ships per RoundTrip	Overall NOx emissions for Used Ships per Year
	TRANSPACIFIC LINE 1	1316,11	13673,70	599,18	4331,65
	FEEDER LINE 1	5,31	281,90	4,61	229,75
	FEEDER LINE 2	5,16	270,69	9,91	493,30
	totals	1326,57	14226,29	613,70	5054,71

SOx	Line Name	Overall SOx emissions for Used Ships per RoundTrip	Overall SOx emissions for Used Ships per Year	Overall SOx emissions for Used Ships per RoundTrip	Overall SOx emissions for Used Ships per Year
	TRANSPACIFIC LINE 1	1012,39	10518,23	460,91	3332,04
	FEEDER LINE 1	4,08	216,84	3,55	176,73
	FEEDER LINE 2	3,97	208,22	7,62	379,46
	totals	1020,44	10943,30	472,07	3888,24

Πίνακας 7.10: *Εκπομπές ρύπων εν πλω (ανά κυκλικό ταξίδι, ανα χρόνο) και δείκτες απόδοσης εκπομπών πριν και μετά την βελτιστοποίηση*

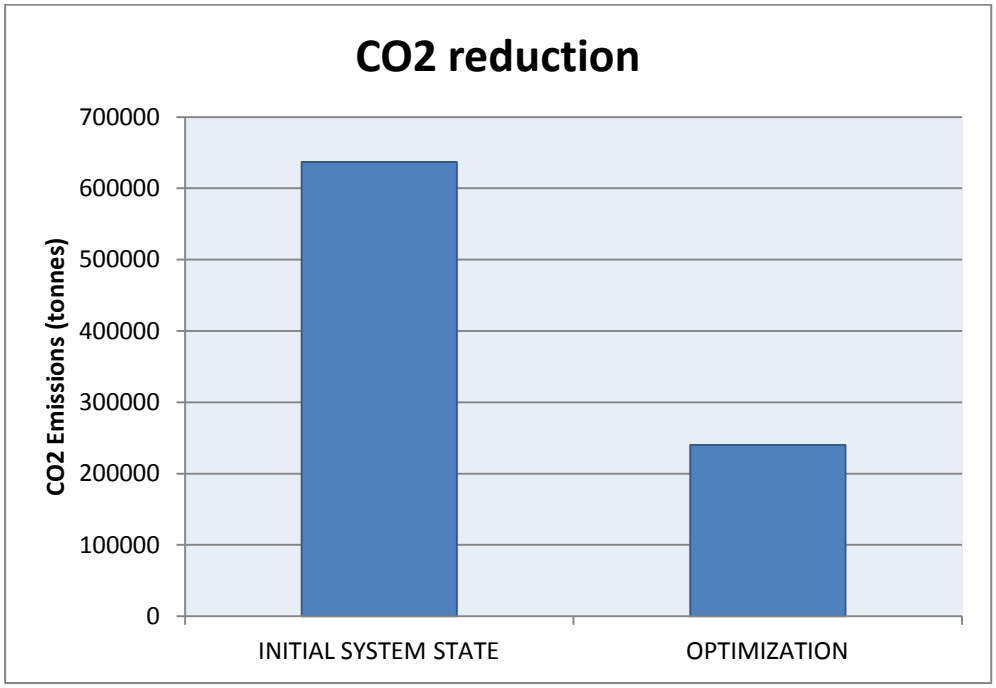
PORT EMISSIONS		
	INITIAL	OPTIMIZATION

CO2	Line Name	Overall CO2 emissions for Used Ships per RoundTrip	Overall CO2 emissions for Used Ships per Year	Overall CO2 emissions for Used Ships per RoundTrip	Overall CO2 emissions for Used Ships per Year
	TRANSPACIFIC LINE 1	4197,69	43611,81	3540,22	25593,38
	FEEDER LINE 1	252,36	13398,25	152,02	7574,98
	FEEDER LINE 2	169,75	8912,62	81,81	4073,29
	totals	4619,79	65922,69	3774,05	37241,65

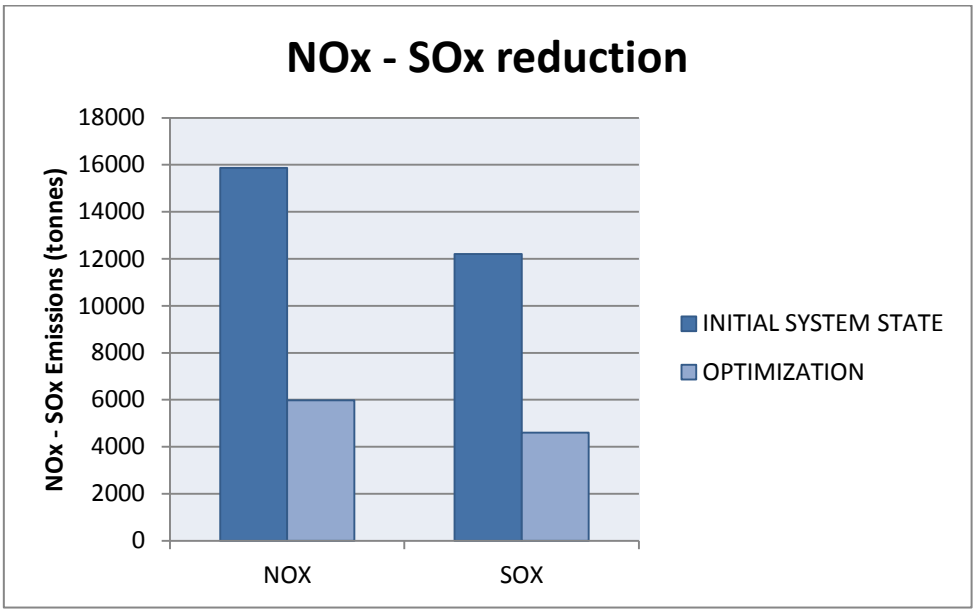
NOx	Line Name	Overall NOx emissions for Used Ships per RoundTrip	Overall NOx emissions for Used Ships per Year	Overall NOx emissions for Used Ships per RoundTrip	Overall NOx emissions for Used Ships per Year
	TRANSPACIFIC LINE 1	104,61	1086,81	88,22	637,79
	FEEDER LINE 1	6,29	333,89	3,79	188,77
	FEEDER LINE 2	4,23	222,10	2,04	101,51
	totals	115,13	1642,80	94,05	928,07

SOx	Line Name	Overall SOx emissions for Used Ships per RoundTrip	Overall SOx emissions for Used Ships per Year	Overall SOx emissions for Used Ships per RoundTrip	Overall SOx emissions for Used Ships per Year
	TRANSPACIFIC LINE 1	80,47	836,01	67,86	490,61
	FEEDER LINE 1	4,84	256,84	2,91	145,21
	FEEDER LINE 2	3,25	170,85	1,57	78,08
	totals	88,56	1263,69	72,35	713,90

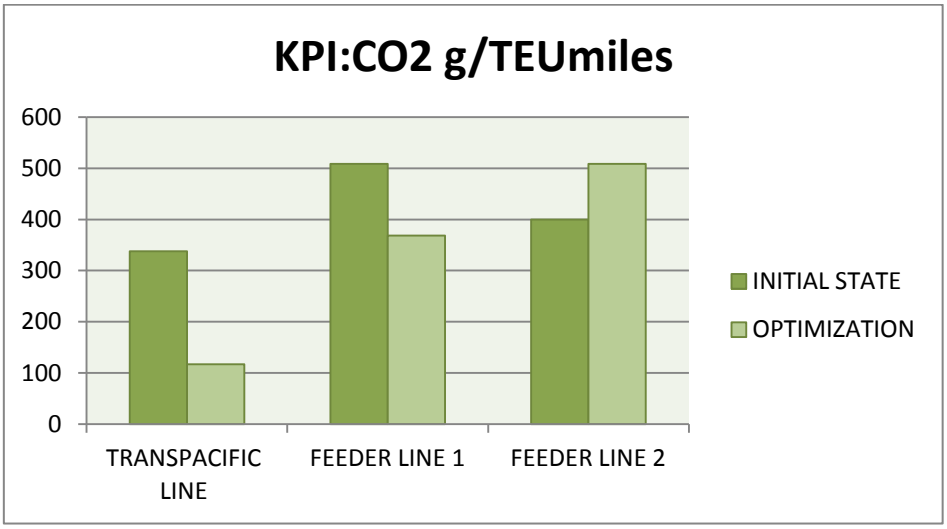
Πίνακας 7.11: *Εκπομπές ρύπων στο λιμάνι (ανά κυκλικό ταξίδι, ανα χρόνο) και δείκτες απόδοσης εκπομπών πριν και μετά την βελτιστοποίηση*

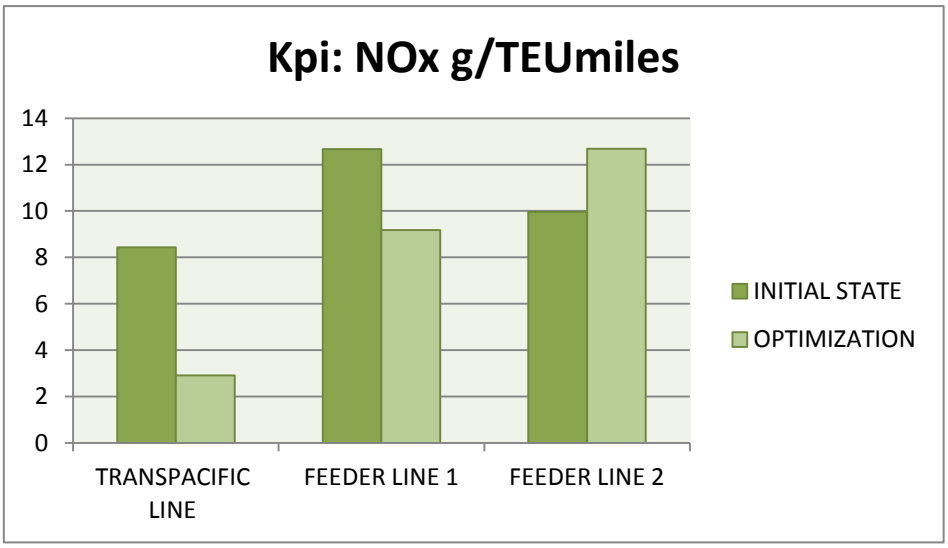


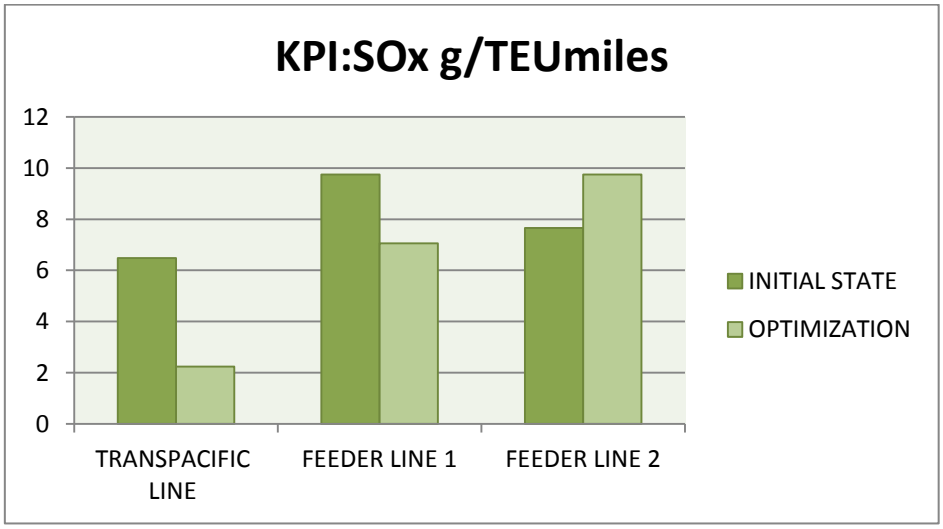
Διάγραμμα 7.9: *Μείωση συνολικών εκπομπών CO_2 σε τόνους πριν και μετά την βελτιστοποίηση*



Διάγραμμα 7.10: *Μείωση συνολικών εκπομπών NO_x SO_x σε τόνους πριν και μετά την βελτιστοποίηση*







Διαγράμματα 7.11-7.13: *Βασικοί Δείκτες Απόδοσης* CO_2 , NO_x , SO_x *σε γραμμάρια ανά ΤΕΥμίλια πριν και μετά την βελτιστοποίηση*

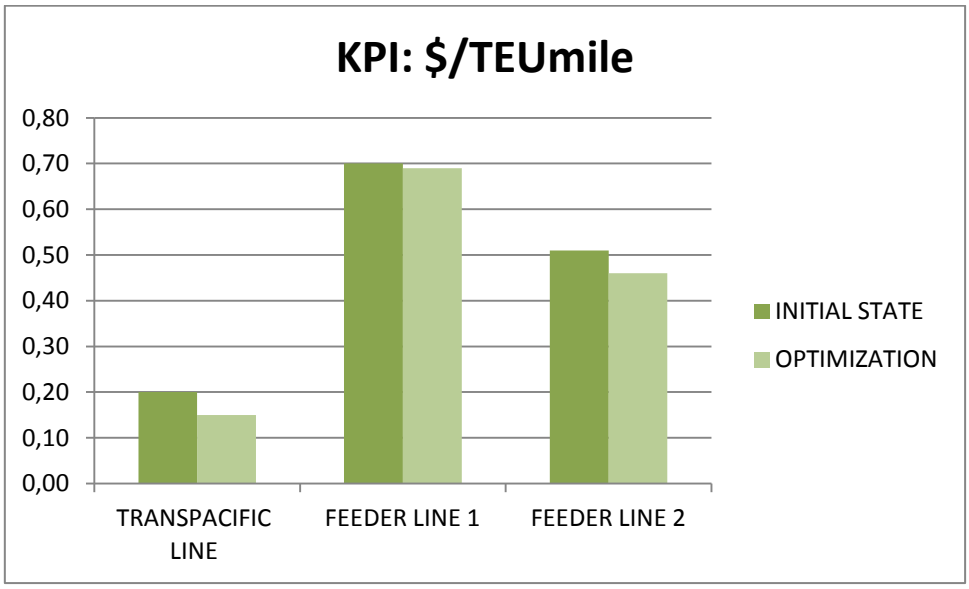
Όπως βλέπουμε αναλυτικά στους ***Πίνακες 7.9-7.11*** , αλλά και όπως καταδεικνύουν τα ***Διαγράμματα 7.9-7.10*** , η διαδικασία βελτιστοποίησης κατέληξε να δώσει λύση που όχι μόνο είναι η βέλτιστη όσον αφορά την ελαχιστοποίηση του ετήσιου λειτουργικού κόστους, αλλά μειώνει δραματικά και τις τιμές των εκπομπών ρύπων που υπολογίζει το μοντέλο μας. Το γεγονός ότι η βέλτιστη λυσή αντιστοιχεί σε ταχύτητα 14 knots(super slow steaming) στην κύρια γραμμή του μοντέλου χρησιμοποιώντας 2 έξτρα πλοία (σύνολο 7) με σκοπό την διατήρηση της συχνότητας παροχής υπηρεσιών, συγκριτικά με το αρχικό σενάριο που παρατίθεται και που 5 πλοία ταξιδεύουν σε ταχύτητες 24 knots (full steaming), έχει ως αποτέλεσμα την μείωση των εκπομπών ρύπων του μελετούμενου δικτύου κατά 62%. Φυσικά η δραματική αυτή μείωση, οφείλεται στη μείωση της ταχύτητας της κύριας γραμμής κατά 40% και άρα στην αντίστοιχη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και των εκπομπών ρύπων, μεγέθη ανάλογα μεταξύ τους. Αντιθέτως, όπως δείχνουν και οι πίνακες, το ποσοστό της μέιωσης στις εκπομπές ρύπων που αντιστοιχούν σην πρώτη δευτερεύουσα γραμμή είναι της τάξης του 32%. Σε αυτήν την περίπτωση η ταχύτητα μειώθηκε από 14 knots σε 12 knots (14%). Μικρότερης τάξης είναι η μείωση της ταχύτητας στην δεύτερη δευτερεύουσα γραμμή (από 12 knots σε 11 knots, 8%). Ωστόσο σε αυτή τη γραμμή το πλοίο APL BALBOA που ανέδειξε η διαδικασία ελαχιστοποίησης του κόστους, ως το οικονομικότερο, είναι λιγότερο αποδοτικό ενεργειακά και γι'αυτό παρατηρείται μία αύξηση στις εκπομπές ρύπων της τάξης του 21% , παρά το γεγονός ότι η ταχύτητα μειώθηκε.

Όσόν αφορά τους βασικούς δείκτες απόδοσης (KPI's) των εκπομπών ρύπων (***Διαγράμματα 7.11-7.13)***, η εικόνα που παρουσιάζεται είναι η ίδια με αυτή που περιγράφηκε παραπάνω. Όπως ήταν αναμενόμενο, οι τιμές αυτών για την κύρια γραμμή είναι αισθητά μικρότερες σε σχέση με τις δύο δευτερεύουσες γραμμές, γεγονός που εξηγείται αν αναλογιστούμε ότι τα TEUμίλια σε αυτήν είναι πολύ περισσότερα, με αποτέλεσμα ο παρονομαστής του κλάσματος να είναι αρκετά μεγαλύτερος και η τιμή των δεικτών που προκύπτουν συγκριτικά μικρότερη.

Τελειώνοντας θα πρέπει να τονίσουμε πως ο άξονας δημιουργίας του μοντέλου που έχουμε κατασκευάσει έχει ως κατεύθυνση τον συνολικό και τους επιμέρους ετήσιους υπολογισμούς κόστους. Έτσι, αν και υπολογίζουμε με την ακρίβεια που μπορεί να μας παρέχουν οι χρησιμοποιούμενοι εμπειρικοί τύποι τις εκπομπές ρύπων εν πλω, οι εκπομπές ρύπων στους λιμένες παρουσιάζουν αποκλίσεις.Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αφού το μοντέλο βασίζεται σε δεδομένους Πίνακες Προέλευσης- Προορισμού, ο χρόνος παραμονής σε κάθε λιμένα σχετίζεται κατα πολύ με τον χρόνο φορτοεκφόρτωσης συγκεκριμένου αριθμού εμπορευματοκιβωτίων ανεξαρτήτως αριθμού χρησιμοποιούμενων πλοίων.Έτσι, αν ενδεχομένως θεωρήσουμε πως 2 επιπλέον πλοία έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση του χρόνου παραμονής σε λιμένες σε ένα κυκλικό ταξίδι σαν αυτού της κύριας γραμμής του δικτύου μας κατά 2-3 μέρες, οι αντίστοιχες εκπομές ρύπων δεν προσμετρούνται.

		Overall Total Costs					
		INITIAL			OPTIMIZATION		
	teumiles	Overall Total Cost for Used Ships per Round trip	Overall Total Cost for Used Ships per Year	Overall Total Cost / TEU Miles per Round Trip	Overall Total Cost for Used Ships per Round trip	Overall Total Cost for Used Ships per Year	Overall Total Cost / TEU Miles per Round Trip
TRANSPACIFIC LINE 1							
QINGDAO	6.863.920	33.279.043,71	345.752.197,58	0.20	36.129.293,55	261.190.395,87	0,15
BUSAN	22.365.630						
YOKOHAMA	130.174.786						
LOS ANGELES	8.119.440						
OAKLAND	31.321.780						
DUTCH HARBOR	26.864.250						
YOKOHAMA	7.386.918						
BUSAN	2.978.808						
QINGDAO	0						
FEEDER LINE 1							
BUSAN	37.290	642.801,49	34.127.506,19	0.70	627.052,61	31.244.440,11	0,69
HAKATA	193.831						
SHIBUSHI	241.488						
HIROSHIMA	114.466						
OITA	115.440						
UBE	212.700						
BUSAN	0						
FEEDER LINE 2							
BUSAN	343.980	481.577,19	25.285.400,30	0.51	435.653,60	21.692.183,43	0,46
NAHA	507.180						
MOJI	91.035						
BUSAN	0						
Overall Total Cost / TEU Miles		0.201			0,156		

Πίνακας 7.12: *Συνολικές τιμές κόστους και δείκτης απόδοσης κόστους πριν και μετά την βελτιστοποίηση*



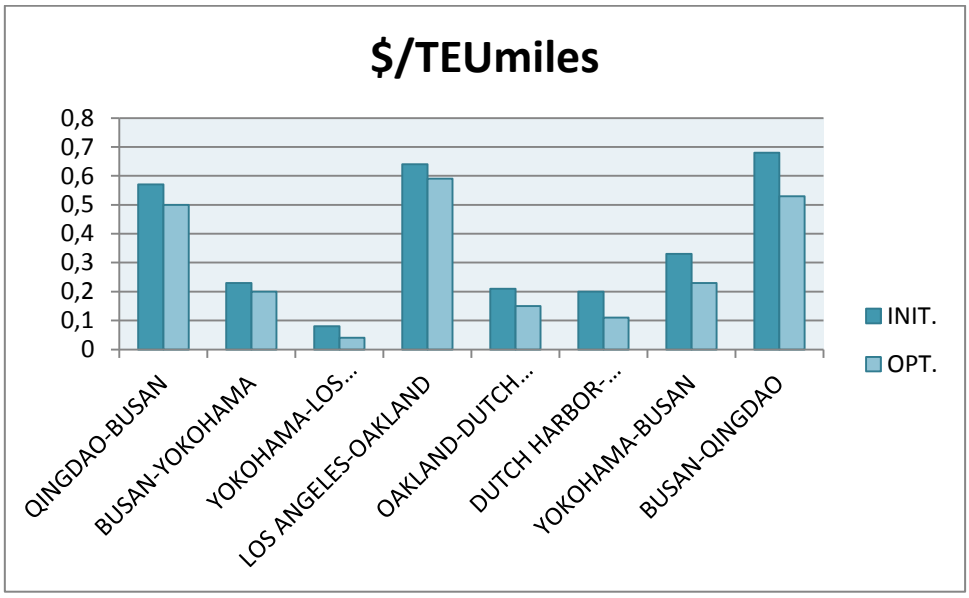
Διάγραμμα 7.14: *Δείκτης Απόδοσης σε δολάρια ανά ΤΕΥμίλια πριν και μετά την βελτιστοποίηση*

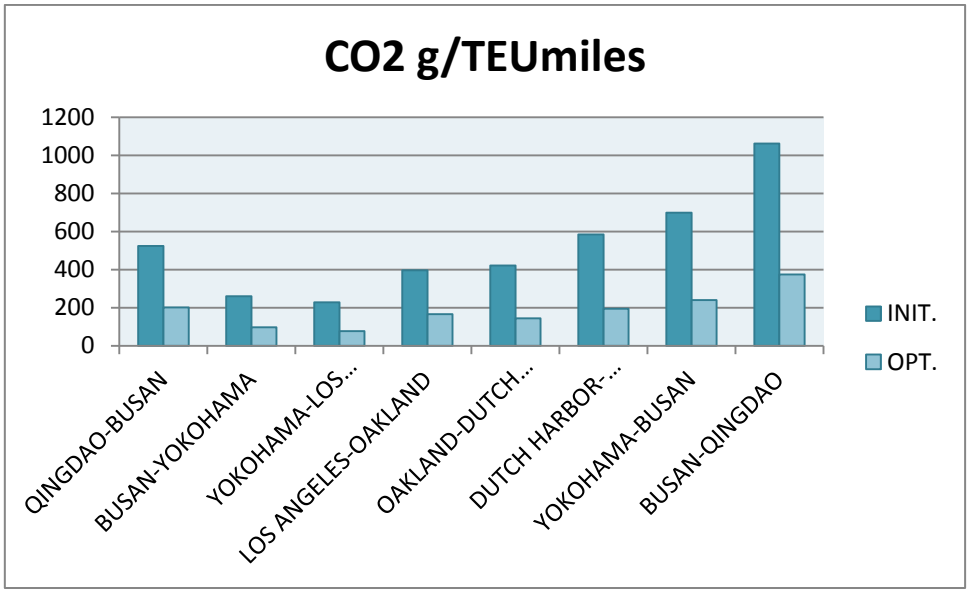
Στον ***Πίνακα 7.12*** παρουσιάζονται τα συνολικά κόστη και οι δείκτες απόδοσης κόστους *πριν και μετά την βελτιστοποίηση* για τις τρεις γραμμές του συστήματος, ετησίως και ανά κυκλικό ταξίδι. Ο αριθμός των ΤΕΥμιλίων που παρατίθεται αναλυτικά και το ετήσιο συνολικό κόστος ανά γραμμή είναι τα στοιχεία που καθορίζουν το ύψος των τιμών του δείκτη κόστους στο ***Διάγραμμα 7.14***. Το γεγονός ότι τα ΤΕΥμίλια είναι τάξης εκατομμυρίου στο σύνολό τους ετησίως στην κύρια γραμμή, εξηγεί κατα πολύ όπως και προηγουμένως την εικόνα του διαγράμματος. Ακόμα, συγκρίνοντας τις δύο δευτερεύουσες γραμμές, οι λιμένες που αποτελούν την feeder line 2 είναι μόλις τρεις και εμφανίζει μικρότερο ετήσιο κόστος. Οι αποστάσεις όμως μεταξύ τους είναι μεγαλύτερες (και τελικά τα ΤΕΥμίλια περισσότερα) από την feeder line 1 και γι'αυτό ο δείκτης κόστους της είναι μικρότερος.

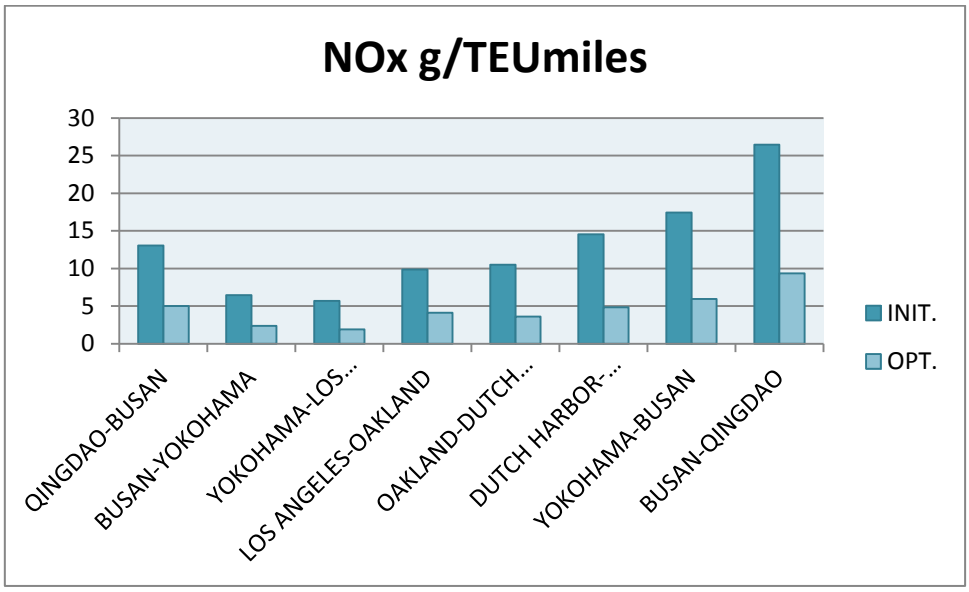
KPI's per service period												
	Ports	Transported TEU	Miles	TEUMiles	Total Cost $ / TEUmiles		CO_2 gr/TEUmiles		NO_x gr /TEUmiles		SO_x gr /TEUmiles	
					INIT.	OPT.	INIT.	OPT.	INIT.	OPT.	INIT.	OPT.
TRANSPACIFIC LINE 1	QINGDAO	2.060	476	980.560	0,57	0,50	523,20	200,40	13,04	4,99	10,03	3,84
	BUSAN	3.930	813	3.195.090	0,23	0,20	259,38	96,09	6,46	2,39	4,97	1,84
	YOKOHAMA	3.847	4.834	18.596.398	0,08	0,04	228,10	75,95	5,68	1,89	4,37	1,46
	LOS ANGELES	3.222	360	1.159.920	0,64	0,59	396,46	165,45	9,88	4,12	7,60	3,17
	OAKLAND	2.170	2.062	4.474.540	0,21	0,15	420,48	144,34	10,48	3,60	8,06	2,77
	DUTCH HARBOR	1.505	2.550	3.837.750	0,20	0,11	584,03	194,72	14,55	4,85	11,20	3,73
	YOKOHAMA	1.298	813	1.055.274	0,33	0,23	699,11	238,98	17,42	5,96	13,40	4,58
	BUSAN	894	476	425.544	0,68	0,53	1061,38	374,90	26,45	9,34	20,35	7,19
FEEDER LINE 1	BUSAN	330	113	37.290	1,05	0,99	1170,87	894,49	29,18	22,29	22,44	17,15
	HAKATA	737	263	193.831	0,36	0,33	465,02	364,82	11,59	9,09	8,91	6,99
	SHIBUSHI	1.118	216	241.488	0,30	0,28	338,33	259,65	8,43	6,47	6,49	4,98
	HIROSHIMA	1.331	86	114.466	0,56	0,53	445,02	314,98	11,09	7,85	8,53	6,04
	OITA	1.443	80	115.440	0,63	0,60	466,87	324,51	11,63	8,09	8,95	6,22
	UBE	1.418	150	212.700	0,37	0,35	335,74	246,27	8,37	6,14	6,44	4,72
FEEDER LINE 2	BUSAN	630	546	343.980	0,24	0,24	368,81	571,73	9,19	14,25	7,07	10,96
	NAHA	948	535	507.180	0,22	0,21	274,77	394,25	6,85	9,82	5,27	7,56
	MOJI	765	119	91.035	1,12	1,07	776,13	698,50	19,34	17,41	14,88	13,39

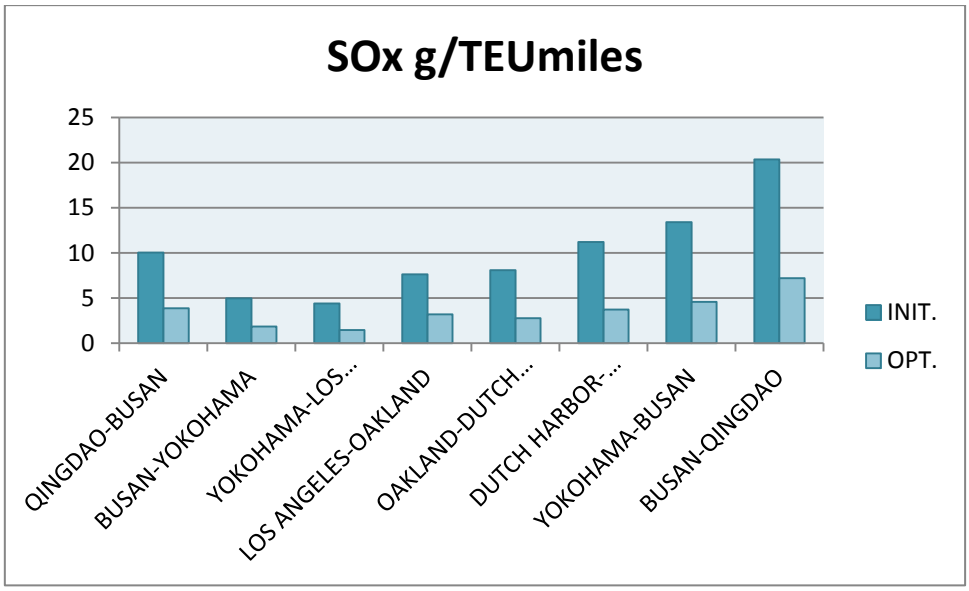
Πίνακας 7.13: *Βασικοί δείκτες απόδοσης ανά ταξίδι μεταξύ δύο διαδοχικών λιμένων σε κάθε γραμμή πρίν και μετά την βελτιστοποίηση*

Transpacific Line



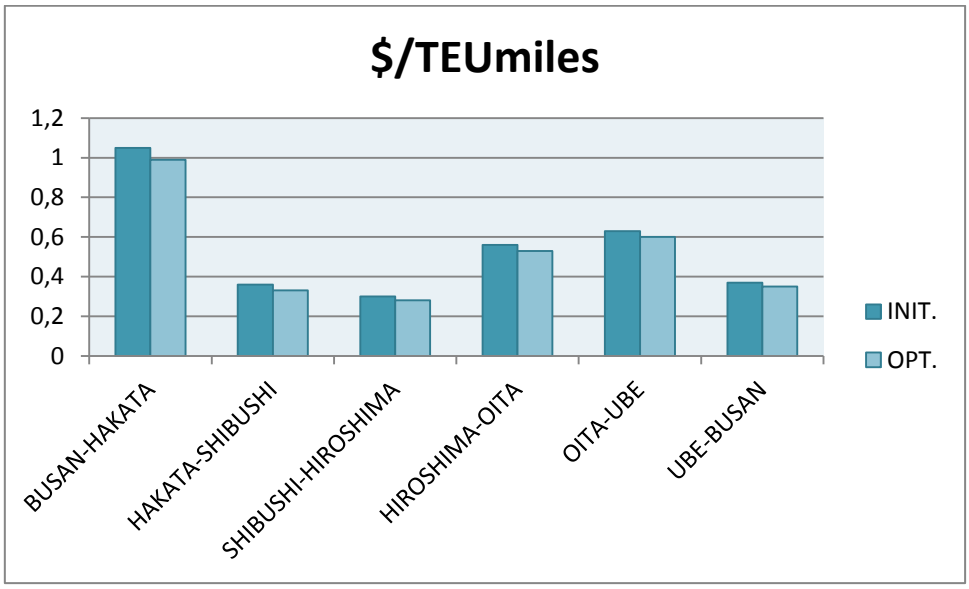


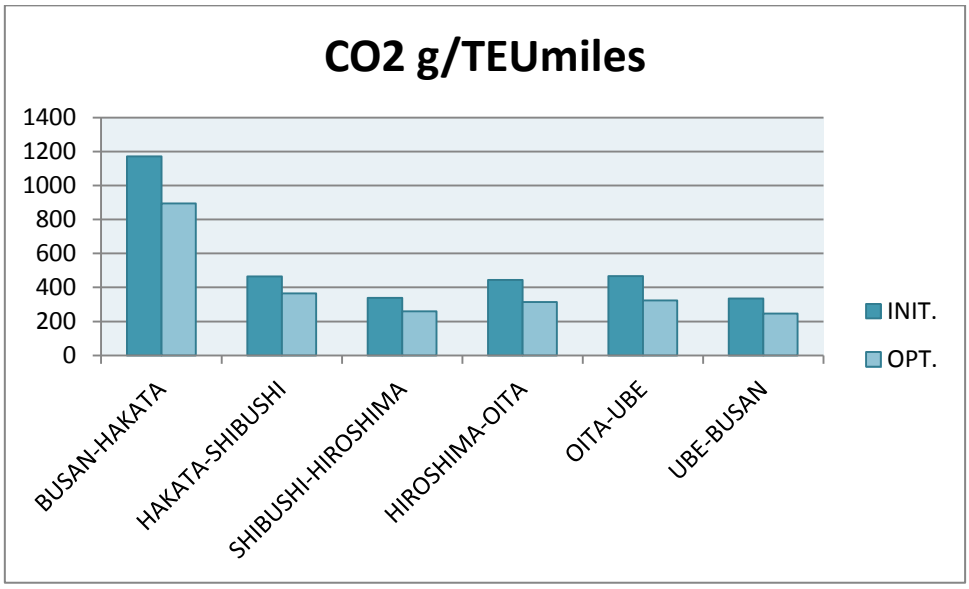


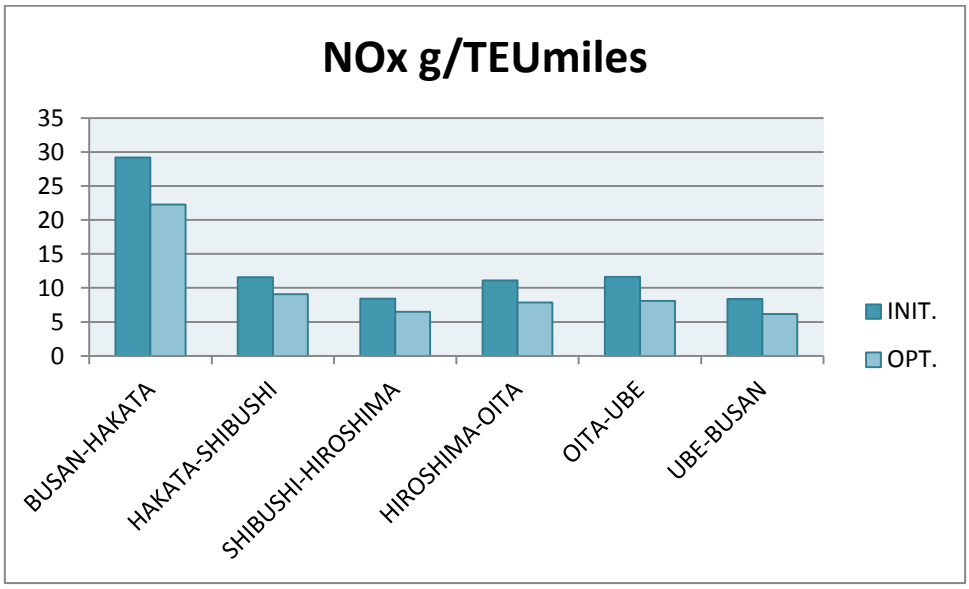


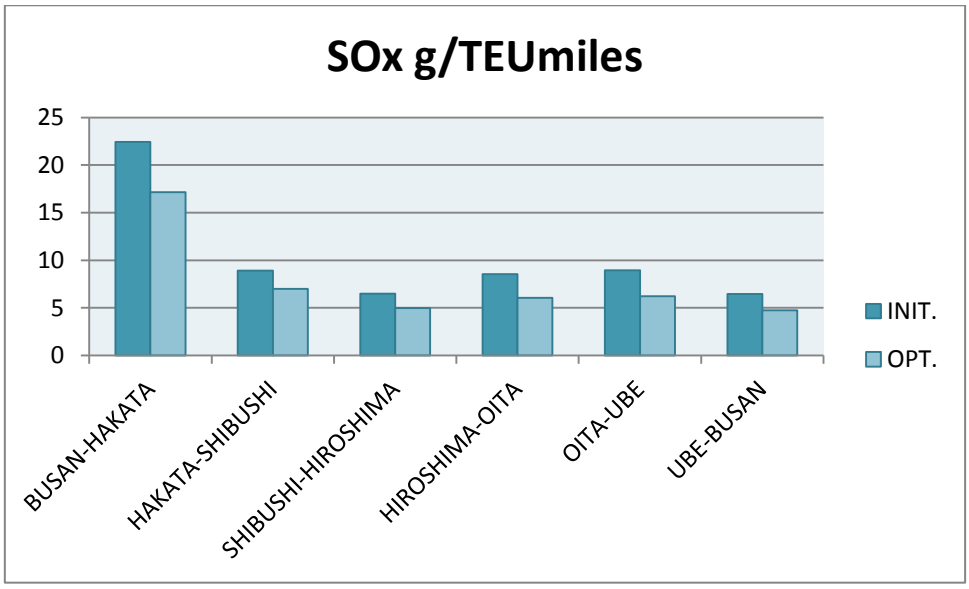
Διαγράμματα 7.15-7.18: *Βασικοί Δείκτες Απόδοσης ταξιδιών μεταξύ διαδοχικών λιμένων της κύριας γραμμής του συστήματος Transpacific Line πριν και μετά την βελτιστοποίηση*

Feeder Line 1



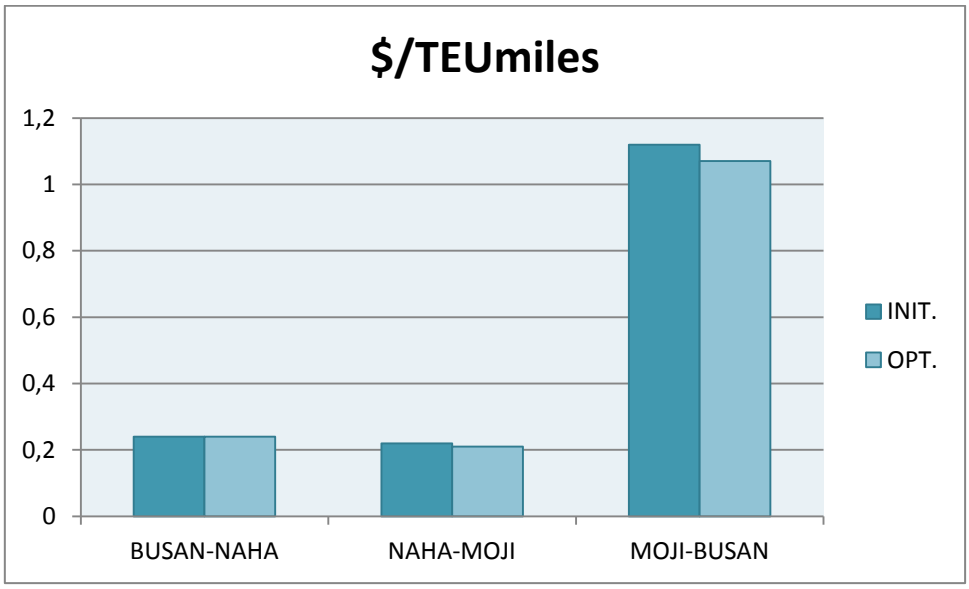


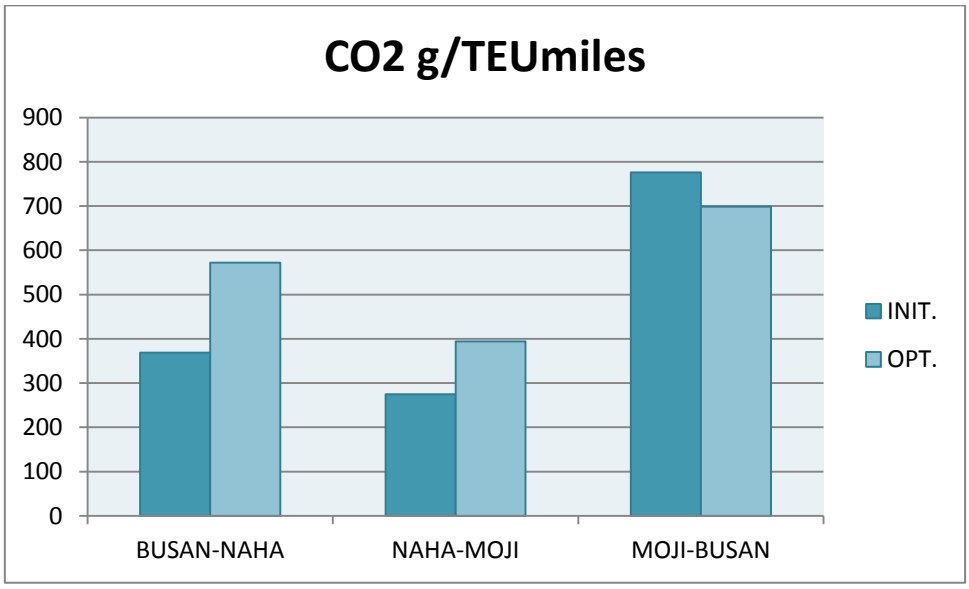


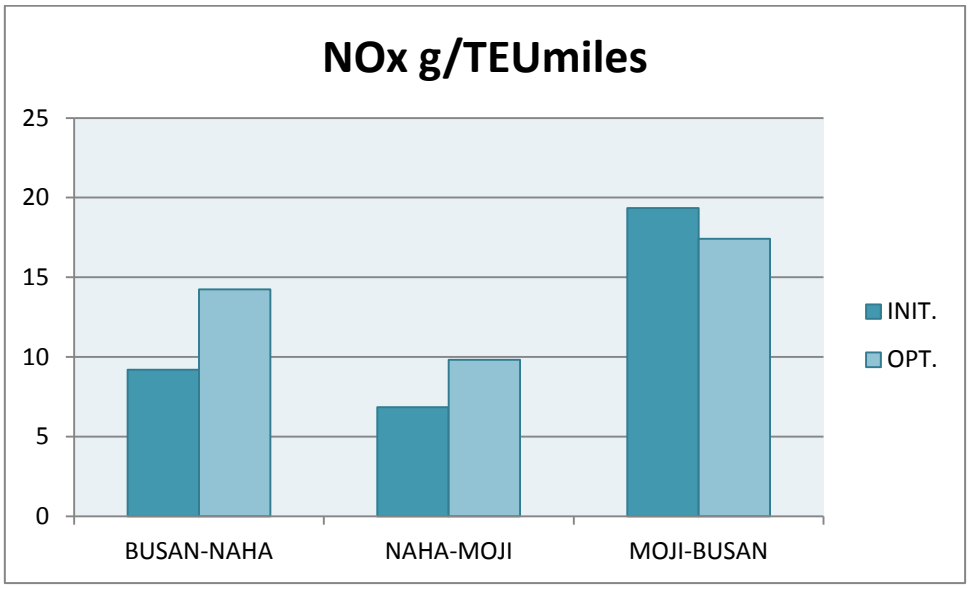


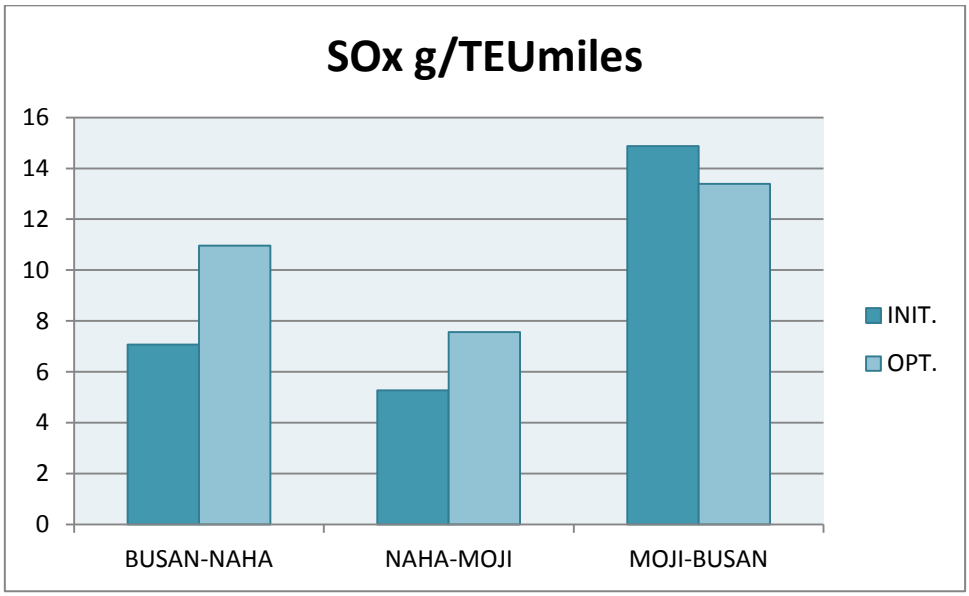
Διαγράμματα 7.19-7.22: *Βασικοί Δείκτες Απόδοσης για τα ταξίδια μεταξύ διαδοχικών λιμένων της Feeder Line 1 γραμμής του συστήματος πριν και μετά την βελτιστοποίηση*

Feeder Line 2









***Διαγράμματα 7.23-7.26**: Βασικοί Δείκτες Απόδοσης για τα ταξίδια μεταξύ διαδοχικών λιμένων της Feeder Line 2 γραμμής του συστήματος πριν και μετά την βελτιστοποίηση*

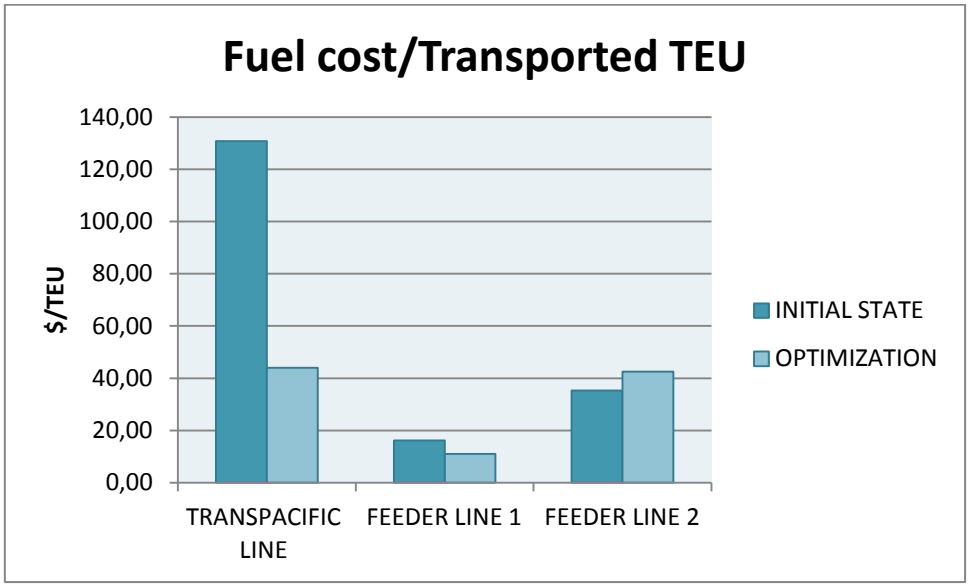
Ο ***Πίνακας 7.13*** και τα διαγράμματα που τον ακολουθούν, παρουσιάζουν τις τιμές των δεικτών απόδοσης που αντιστοιχούν στα ταξίδια μεταξύ διαδοχικών λιμένων των τριών γραμμών του συστήματος. Στον ίδιο πίνακα παρατίθενται οι αποστάσεις σε μίλια μεταξύ των λιμένων, όπως και το πλήθος των μεταφερόμενων εμπορευματοκιβωτίων μεταξύ αυτών.Τα διαγράμματα των τρίων γραμμών που αφορούν τον δείκτη κόστους είναι ιδιαιτέρως σημαντικά και είναι δυνατό να καθορίσουν την συνολική πολιτική μιάς εταιρείας όσον αφορά τον τρόπο που διαχειρίζεται τις μεταφορές της στο σύνολο τους, χερσαίες και θαλάσσιες. Έτσι μη συμφέρουσες οικονομικά θαλάσσιες μεταφορές μεταξύ δύο κόμβων θα μπορούσε να ερευνηθεί η αντικατάστασή τους όπου είναι δυνατό με χερσαίες. Τα διαγράμματα από την άλλη που παρουσίαζουν δείκτες εκπομπών ρύπων που μελετά το μοντέλο μας, έχουν νόημα σε περιπτώσεις μελοντικής επιβολής περιορισμών σε ρύπους, έτσι ώστε μία εταιρεία να έχει πλήρη και σαφή εικόνα ενεργειακής κατανάλωσης κάθε πλοίου της σε οποιοδήποτε δρομολόγιο γραμμής δραστηριοποιείται. Σε αυτό το σημείο θα πρέπει να επαναλάβουμε πως στο μοντέλο μας, έχει θεωρηθεί σταθερή ταχύτητα σε όλα τα μέρη του κυκλικού ταξιδιού για λόγους απλούστευσης.Αυτό στην πραγματικότητα δεν ισχύει, αφού τα πλοία συνηθίζεται να ταξιδεύουν σε μεγαλύτερες ταχύτητες φορτωμένα από ότι άφορτα.Έτσι, πιθανόν οι τιμές που παρουσιάζονται να φέρουν αποκλίσεις, ωστόσο μας δίνουν μια ικανή εικόνα μεγέθους ώστε να βγάλουμε συμπεράσματα

		Fuel Costs per Round Trip					
		INITIAL			OPTIMIZATION		
	Ports	Fuel Costs at sea	Fuel Costs at port	Fuel Cost total	Fuel Costs at sea	Fuel Costs at port	Fuel Cost total
TRANSPACIFIC LINE 1	QINGDAO	441.014,00	116.266,40	557.280,40	200.778,07	98.056,00	298.834,07
	BUSAN	753.244,50	146.969,76	900.214,26	342.925,56	123.950,40	466.875,96
	YOKOHAMA	4.478.701,00	129.078,28	4.607.779,28	2.038.994,07	108.861,20	2.147.855,27
	LOS ANGELES	333.540,00	165.990,04	499.530,04	151.848,96	139.991,60	291.840,56
	OAKLAND	1.910.443,00	133.311,28	2.043.754,28	869.757,09	112.431,20	982.188,29
	DUTCH HARBOR	2.362.575,00	72.130,32	2.434.705,32	1.075.596,79	60.832,80	1.136.429,59
	YOKOHAMA	753.244,50	48.143,32	801.387,82	342.925,56	40.602,80	383.528,36
	BUSAN	441.014,00	49.610,76	490.624,76	200.778,07	41.840,40	242.618,47
	QINGDAO	0,00	50.457,36	50.457,36	0,00	42.554,40	42.554,40
		11.473.776,00	**911.957,52**	**12.385.733,52**	**5.223.604,17**	**769.120,80**	**5.992.724,97**
FEEDER LINE 1	BUSAN	5.760,60	3.725,04	9.485,64	5.002,60	2.244,00	7.246,60
	HAKATA	13.407,41	6.174,54	19.581,95	11.643,23	3.719,60	15.362,83
	SHIBUSHI	11.011,41	6.738,94	17.750,35	9.562,50	4.059,60	13.622,10
	HIROSHIMA	4.384,17	6.682,50	11.066,67	3.807,29	4.025,60	7.832,89
	OITA	4.078,30	7.630,69	11.708,99	3.541,67	4.596,80	8.138,47
	UBE	7.646,81	7.867,74	15.514,55	6.640,63	4.739,60	11.380,23
	BUSAN	0,00	16.006,38	16.006,38	0,00	9.642,40	9.642,40
		46.288,71	**54.825,82**	**101.114,53**	**40.197,92**	**33.027,60**	**73.225,52**
FEEDER LINE 2	BUSAN	20.449,76	7.111,44	27.561,20	39.298,63	3.427,20	42.725,83
	NAHA	20.037,77	10.238,22	30.275,99	38.506,90	4.934,08	43.440,98
	MOJI	4.457,00	10.892,92	15.349,92	8.565,09	5.249,60	13.814,69
	BUSAN	0,00	8.635,32	8.635,32	0,00	4.161,60	4.161,60
		44.944,54	**36.877,90**	**81.822,43**	**86.370,61**	**17.772,48**	**104.143,09**

Πίνακας 7.14 : *Κόστος καυσίμου ανά ταξίδι μεταξύ διαδοχικών λιμένων σε κάθε γραμμή πρίν και μετά την βελτιστοποίηση*

	Fuel Costs Totals						
	fuel cost at port per roundtrip	*fuel cost at port per year*	*fuel cost at sea per roundtrip*	*fuel cost at sea per year*	*total fuel cost per roundtrip*	*total fuel cost per year*	*Fuel cost/transported TEU*
initial							
TRANSPACIFIC LINE 1	911.957,52	9.474.770,95	11.473.776,00	119.206.648,51	12.385.733,52	128.681.419,46	130,75
FEEDER LINE 1	54.825,82	2.910.802,82	46.288,71	2.457.552,41	101.114,53	5.368.355,23	16,19
FEEDER LINE 2	36.877,90	1.936.288,47	44.944,54	2.359.830,72	81.822,43	4.296.119,19	35,26
total	1.003.661,23	14.321.862,24	11.565.009,25	124.024.031,64	12.568.670,48	138.345.893,88	
optimization							
TRANSPACIFIC LINE 1	769.120,80	5.560.224,03	5.223.604,17	37.763.130,86	5.992.724,97	43.323.354,89	44,02
FEEDER LINE 1	33.027,60	1.645.681,48	40.197,92	2.002.960,16	73.225,52	3.648.641,65	11,00
FEEDER LINE 2	17.772,48	884.932,19	86.370,61	4.300.588,96	104.143,09	5.185.521,15	42,55
total	819.920,88	8.090.837,70	5.350.172,69	44.066.679,98	6.170.093,57	52.157.517,69	

Πίνακας 7.15: *Συνολικό κόστος καυσίμου ανά γραμμή*



Διάγραμμα 7.27: *Κόστος καυσίμου ανά μεταφερόμενο εμπορευματοκιβώτιο στις τρεις γραμμές του συστήματος πριν και μετά την βελτιστοποίηση*

Ο ***Πίνακες 7.14-7.15*** παρουσιάζουν αναλυτικά το κόστος καυσίμου σε θάλασσα και λιμένες, ανά κυκλικό ταξίδι και ετησίως, για τις τρεις γραμμές του συστήματος πριν και μετά την βελτιστοποίηση. Ο λόγος που παρατίθενται οι εν λόγω πίνακες είναι το γεγονός πως απο τις συνιστώσες του συνολικου κόστους, αυτή η οποία επιδέχεται την μεγαλύτερη μείωση μετά την διαδικασία ελαχιστοποίησης είναι το κόστος καυσίμου (***Διάγραμμα 7.5***).Δίνεται έτσι μία αναλυτικότερη παρουσίαση του βαθμού επίδρασης της βελτιστοποίησης στην αρχική εφικτή λύση.Όπως τονίσαμε και παραπάνω, το μέγεθος που καθορίζει σημαντικά την εικόνα της βέλτιστης λύσης είναι η μείωση του κόστους καυσίμου στην κύρια γραμμή του συστήματος.

Όσον αφορά το ***Διάγραμμα 7.27***, το κόστος καυσίμου ανά μεταφερόμενο εμπορευματοκιβώτιο υποτριπλασιάζεται στην κύρια γραμμή αφου μειώνεται το κόστος καυσίμου κατά 62%.Στις δύο δευτερεύουσες γραμμές, οι μεταβολές δεν είναι τόσο έντονες, ωστόσο όπως αναφέραμε και προηγουμένως, στην Feeder Line 2 ο λόγος που μελετάμε ανεβαίνει, αφου αν και ο τύπος πλοίου που προκύπτει από την διαδικασία βελτιστοποίησης έχει μικρότερο συνολικό κόστος, το κόστος καυσίμου που αντιστοιχεί σε αυτόν είναι μεγαλύτερο από το κατανεμημένο στην γραμμή πλοίο στην αρχική συγκρινόμενη λύση.

7.5 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΣΤΗΝ ΤΙΜΗ ΤΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Μία από τις κύριες μεταβλητές του μοντέλου υπολογισμού του ετήσιου λειτουργικού κόστους που έχουμε κατασκευάσει είναι η τιμή του καυσίμου.Γενικά, οι τιμές των καυσίμων έχουν υπάρξει ολοένα και πιο ασταθείς την πρόσφατη δεκαετία. Όσο αυτές ανεβαίνουν, τόσο η βέλτιστη ταχύτητα μειώνεται, η οποία καθορίζει την κατανάλωση καυσίμου και συνεπακολούθως τις εκπομπές CO_2.

Η ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis) είναι μία μέθοδος η οποία εφαρμόζεται για να προσδιορίσει την ευαισθησία της λύσης ενός προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού στις μεταβολές των παραμέτρων του. Η ευαισθησία μπορεί να μετρηθεί από την επίδραση σε μια μεταβλητή απόδοσης της αλλαγής μίας ή περισσότερων εσωτερικών μεταβλητών. Η αλλαγή αυτή μπορεί να επηρεάσει ή να μην επηρεάσει την απόφαση. Η απλούστερη μορφή ανάλυσης ευαισθησίας είναι η μεταβολή μίας μεταβλητής για δεδομένο εύρος και η εξέταση των επιπτώσεων αυτής της αλλαγής στα μελετούμενα αποτελέσματα. Είναι γνωστή ως μονόδρομη ανάλυση ευαισθησίας (one-way sensitivity analysis), αφού μία παράμετρος αλλάζει κάθε φορά. Υπό τη στενή έννοια, η ευαισθησία μιας απόφασης με βάση μία μεταβλητή, σημαίνει ότι σε κάποια τιμή αυτής της μεταβλητής, η απόφαση θα αναστραφεί.

Όπως προαναφέραμε, η συνιστώσα του κόστους η οποία δέχεται την μεγαλύτερη μεταβολή κατά την διαδικασία της βελτιστοποίησης και που εν συνεχεία καθορίζει σημαντικά την νέα τιμή του ετήσιου λειτουργικού κόστους, είναι το κόστος καυσίμου.Έτσι, προχωράμε σε μία μονόδρομη ανάλυση ευαισθησίας στην τιμή του καυσίμου, μεταβλητή που ανάλογα με την τιμή της, επηρεάζει αισθητά το τελικό αποτέλεσμα. Το μελετούμενο εύρος είναι 100-1000 $/ton και σε ενδιάμεσες τιμές αυτού, επιχειρούμε με χρήση γενετικών αλγορίθμων ελαχιστοποίηση του ετήσιου λειτουργικού κόστους για να διαλευκάνουμε την αντίδραση του μοντέλου μας ως προς αυτήν την αλλαγή. Αναλυτικότερα, μας ενδιαφέρει να εξετάσουμε τις τιμές των βασικών μεταβλητών απόφασης του μοντέλου, δηλαδή της ταχύτητας, του αριθμού και των τύπων πλοίων που κατανέμονται σε κάθε γραμμή, ενώ μελετώντας παράλληλα το φαινόμενο του λειτουργικού μέτρου μείωσης της ταχύτητας πλεύσης, στόχος μας είναι να καταδείξουμε εκείνο το εύρος των τιμών καυσίμου στο οποίο το slow steaming είναι οικονομικά αποδοτικό στην κύρια γραμμή του συστήματος, είτε μειώνοντας απλά την ταχύτητα χωρίς να διατηρούμε την συχνότητα παροχής υπηρεσιών ή προσθέτοντας επιπλέον 1 ή 2 επιπλέον πλοία με σκοπό την διατήρησή της. Τα παραπάνω παρουσιάζονται στους πίνακες και στα διαγράμματα που ακολουθούν.

Οι ***Πίνακες 7.17-7.19*** παρουσιάζουν τις επιμέρους βέλτιστες λύσεις για τρία διαφορετικά σενάρια που αντιστοιχούν στο εύρος 100-1000 $/ton τιμών καυσίμου.Τα τρία αυτά σενάρια αφορούν περιπτώσεις που διατηρείται η συχνότητα παροχής υπηρεσιών και κατά σειρά είναι:

α) ταχύτητα 23 knots β) ταχύτητα κύριας γραμμής 17 knots και επιπλέον προσθήκη ενός πλοίου για την διατήρης της συχνότητας γ) ταχύτητα κύριας γραμμής 14 knots και επιπλέον προσθήκη δύο πλοίων για την διατήρης της συχνότητας.(Θυμίζουμε ότι στο μοντέλο μας ως διατήρηση συχνότητας θεωρούμε κάθε τιμή που είναι μικρότερη ή ίση του 7.3. Ο ***Πίνακας 7.16*** είναι κατατοπιστικός.

Alphaliner Steaming Categories:	Super Slow Steaming			Extra Slow Steaming			Slow Steaming			Full Speed Steaming		
Knots per hour:	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25

CMA CGM Steaming Categories:	Super Eco Steaming			Eco Steaming		Regular Steaming						
Knots per hour:	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25

LR/Ocean Shipping Steaming Cat.	Not used	Slow Steaming							Normal Steaming			
Knots per hour:	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25

Πίνακας 7.16: *Κατηγορίες ‘’slow steaming’’(Source:Dynamar B.V)*

Σε αυτούς τους πίνακες για οικονομία χώρου οι μεταβολές στις δύο δευτερεύουσες γραμμές παραλείπονται, αφού παρουσιάζονται στις συνολικά βέλτιστες τιμές που προκύπτουν από αυτή την μονόδρομη ανάλυση ευαισθησίας στον ***Πίνακα 7.20***. Σκοπός αυτής της διεργασίας όπως θα φανεί και παρακάτω, είναι η εύρεση εκείνων των συγκεκριμένων ορίων τιμών καυσίμου για τις οποίες το λειτουργικό μέτρο της μείωσης της ταχύτητας πλεύσης είναι οικονομικά αποδοτικό, αλλά και επίσης τα όρια τιμών, που είναι συμφέρουσα για το μοντέλο μας η χρήση ενός ή δύο επιπλέον πλοίων.

FULL SPEED STEAMING	$/ton	Vessels	Speed	frequency	Total Cost	$/TEU mile	CO2 g/TEUmile	NOx g/TEUmile	SOx g/TEUmile	CO2 Emissions	NOx Emissions	SOx Emissions
	100	4ARG+1ATL	23	7,2	262.078.333,75	0,135	275,286	6,860	5,277	497.397,18	12.395,20	9.534,77
	150	4ARG+1ATL	23	7,2	270.023.975,68	0,139	275,286	6,860	5,277	497.397,18	12.395,20	9.534,77
	200	4ARG+1ARAB	23	7,2	277.962.764,45	0,143	273,073	6,805	5,235	493.684,17	12.302,67	9.463,59
	250	4ARG+1ARAB	23	7,2	285.826.765,28	0,148	272,651	6,795	5,227	490.104,36	12.213,46	9.394,97
	300	4ARG+1ARAB	23	7,2	293.655.908,36	0,152	272,651	6,795	5,227	490.104,36	12.213,46	9.394,97
	400	4ARG+1ARAB	23	7,2	309.314.194,52	0,161	272,651	6,795	5,227	490.104,36	12.213,46	9.394,97
	500	4ARG+1ARAB	23	7,2	324.972.480,67	0,169	272,651	6,795	5,227	490.104,36	12.213,46	9.394,97
	600	4ARG+1ARAB	23	7,2	340.630.766,83	0,178	272,651	6,795	5,227	490.104,36	12.213,46	9.394,97
	680	4ARG+1ARAB	23	7,2	353.157.395,76	0,185	272,651	6,795	5,227	490.104,36	12.213,46	9.394,97
	700	4ARG+1ARAB	23	7,2	356.289.052,99	0,187	272,651	6,795	5,227	490.104,36	12.213,46	9.394,97
	800	4ARG+1ARAB	23	7,2	371.947.339,15	0,196	272,651	6,795	5,227	490.104,36	12.213,46	9.394,97
	900	4ARG+1ARAB	23	7,2	387.605.625,30	0,204	272,651	6,795	5,227	490.104,36	12.213,46	9.394,97
	1000	4ARG+1ARAB	23	7,2	403.263.911,46	0,213	272,651	6,795	5,227	490.104,36	12.213,46	9.394,97

SLOW STEAMING - 1 EXTRA SHIP	$/ton	Vessels	Speed	frequency	Total Cost	$/TEU mile	CO2 g/TEUmile	NOx g/TEUmile	SOx g/TEUmile	CO2 Emissions	NOx Emissions	SOx Emissions
	100	5ARG+1ATLA	17	7,3	264.494.212,74	0,134	171,448	4,272	3,287	327.405,31	8.158,98	6.276,14
	150	5ARG+1ATLA	17	7,3	269.724.329,51	0,137	171,448	4,272	3,287	327.405,31	8.158,98	6.276,14
	200	5ARG+1ATLA	17	7,3	274.954.446,29	0,139	171,448	4,272	3,287	327.405,31	8.158,98	6.276,14
	250	5ARG+1ATLA	17	7,3	280.162.235,26	0,142	171,096	4,264	3,280	323.825,49	8.069,77	6.207,52
	300	5ARG+1ATLA	17	7,3	285.335.166,48	0,145	171,096	4,264	3,280	323.825,49	8.069,77	6.207,52
	400	5ARG+1ATLA	17	7,3	295.681.028,91	0,150	171,096	4,264	3,280	323.825,49	8.069,77	6.207,52
	500	5ARG+1ATLA	17	7,3	306.026.891,34	0,156	171,096	4,264	3,280	323.825,49	8.069,77	6.207,52
	600	5ARG+1ATLA	17	7,3	316.372.753,77	0,161	171,096	4,264	3,280	323.825,49	8.069,77	6.207,52
	680	5ARG+1ARAB	17	7,3	324.642.703,16	0,166	170,452	4,248	3,267	322.733,95	8.042,57	6.186,59
	700	5ARG+1ARAB	17	7,3	326.704.900,93	0,167	170,452	4,248	3,267	322.733,95	8.042,57	6.186,59
	800	5ARG+1ARAB	17	7,3	337.015.889,75	0,172	170,452	4,248	3,267	322.733,95	8.042,57	6.186,59
	900	5ARG+1ARAB	17	7,3	347.326.878,57	0,178	170,452	4,248	3,267	322.733,95	8.042,57	6.186,59
	1000	5ARG+1ARAB	17	7,3	357.637.867,39	0,183	170,452	4,248	3,267	322.733,95	8.042,57	6.186,59

SLOW STEAMING - 2 EXTRA SHIPS	$/ton	Vessels	Speed	frequency	Total Cost	$/TEU mile	CO2 g/TEUmile	NOx g/TEUmile	SOx g/TEUmile	CO2 Emissions	NOx Emissions	SOx Emissions
	100	7ARG	14	7,2	269.490.496,02	0,134	119,67	2,98	2,29	243.657,80	6.071,98	4.670,76
	150	7ARG	14	7,2	273.382.793,18	0,136	119,67	2,98	2,29	243.657,80	6.071,98	4.670,76
	200	7ARG	14	7,2	277.275.090,34	0,138	119,67	2,98	2,29	243.657,80	6.071,98	4.670,76
	250	7ARG	14	7,2	281.145.059,69	0,140	119,36	2,97	2,29	240.077,99	5.982,77	4.602,13
	300	7ARG	14	7,2	284.980.171,28	0,142	119,36	2,97	2,29	240.077,99	5.982,77	4.602,13
	400	7ARG	14	7,2	292.650.394,47	0,146	119,36	2,97	2,29	240.077,99	5.982,77	4.602,13
	500	7ARG	14	7,2	300.320.617,66	0,149	119,36	2,97	2,29	240.077,99	5.982,77	4.602,13
	600	7ARG	14	7,2	307.990.840,85	0,153	119,36	2,97	2,29	240.077,99	5.982,77	4.602,13
	680	7ARG	14	7,2	314.127.019,40	0,156	119,36	2,97	2,29	240.077,99	5.982,77	4.602,13
	700	7ARG	14	7,2	315.661.064,04	0,157	119,36	2,97	2,29	240.077,99	5.982,77	4.602,13
	800	7ARG	14	7,2	323.331.287,23	0,161	119,36	2,97	2,29	240.077,99	5.982,77	4.602,13
	900	7ARG	14	7,2	331.001.510,42	0,165	119,36	2,97	2,29	240.077,99	5.982,77	4.602,13
	1000	7ARG	14	7,2	338.671.733,61	0,169	119,36	2,97	2,29	240.077,99	5.982,77	4.602,13

Πίνακες 7.17-7.19: *Υποβέλτιστες λύσεις ετήσιου λειτουργικού κόστους ανα πλήθος πλοίων στην κύρια γραμμή για τις διάφορες τιμές καυσίμου*

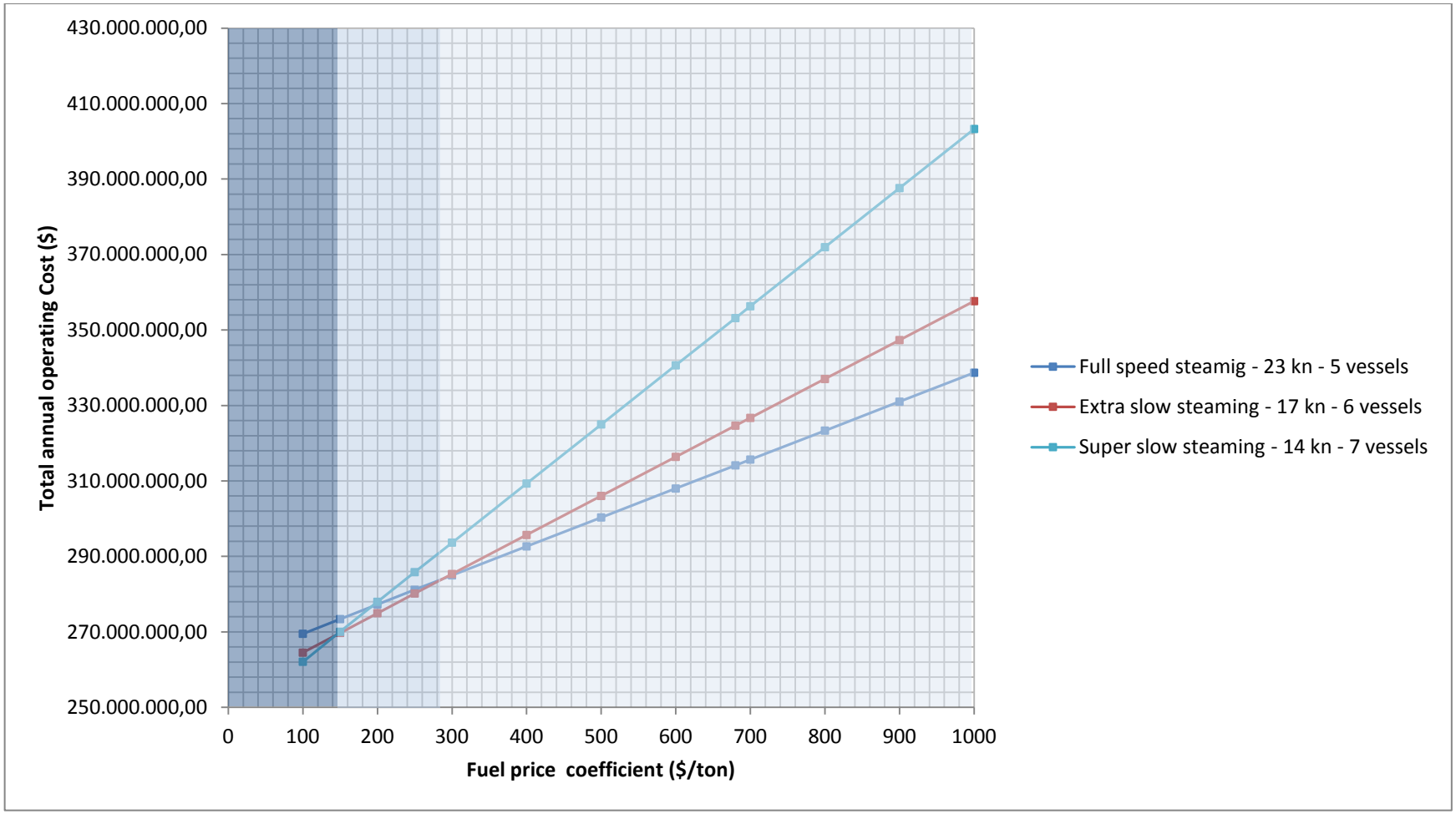
OPTIMAL SOLUTIONS for different bunker prices													
$/ton	Main Line					Feeder line 1			Feeder line 2				
	Total Cost	No. Vessels	Vessels	Speed	frequency	No. Vessels	Vessels	Speed	frequency	No. Vessels	Vessels	Speed	frequency
100	262.078.333,75	5	4ARG+1ATLA	23	7,2	1	Amazonite	12	7,3	1	Balboa	11	7,3
150	269.724.329,51	6	5ARG+1ATLA	17	7,3	1	Amazonite	12	7,3	1	Balboa	11	7,3
200	274.954.446,29	6	5ARG+1ATLA	17	7,3	1	Amazonite	12	7,3	1	Balboa	11	7,3
250	280.162.235,26	6	5ARG+1ATLA	17	7,3	1	Argentina	12	7,3	1	Balboa	11	7,3
300	284.980.171,28	7	Argentina	14	7,2	1	Argentina	12	7,3	1	Balboa	11	7,3
400	292.650.394,47	7	Argentina	14	7,2	1	Argentina	12	7,3	1	Balboa	11	7,3
500	300.320.617,66	7	Argentina	14	7,2	1	Argentina	12	7,3	1	Balboa	11	7,3
600	307.990.840,85	7	Argentina	14	7,2	1	Argentina	12	7,3	1	Balboa	11	7,3
680	314.127.019,40	7	Argentina	14	7,2	1	Argentina	12	7,3	1	Balboa	11	7,3
700	315.661.064,04	7	Argentina	14	7,2	1	Argentina	12	7,3	1	Balboa	11	7,3
800	323.331.287,23	7	Argentina	14	7,2	1	Argentina	12	7,3	1	Balboa	11	7,3
900	331.001.510,42	7	Argentina	14	7,2	1	Argentina	12	7,3	1	Balboa	11	7,3
1000	338.671.733,61	7	Argentina	14	7,2	1	Argentina	12	7,3	1	Balboa	11	7,3

$/ton	CO2 Emissions	NOx Emissions	SOx Emissions	$/TEUmile	CO2 g/TEUmile	NOx g/TEUmile	SOx g/TEUmile
100	497.397,18	12.395,20	9.534,77	0,135	275,286	6,860	5,277
150	327.405,31	8.158,98	6.276,14	0,137	171,448	4,272	3,287
200	327.405,31	8.158,98	6.276,14	0,139	171,448	4,272	3,287
250	323.825,49	8.069,77	6.207,52	0,142	171,096	4,264	3,280
300	240.077,99	5.982,77	4.602,13	0,142	119,364	2,975	2,288
400	240.077,99	5.982,77	4.602,13	0,146	119,364	2,975	2,288
500	240.077,99	5.982,77	4.602,13	0,149	119,364	2,975	2,288
600	240.077,99	5.982,77	4.602,13	0,153	119,364	2,975	2,288
680	240.077,99	5.982,77	4.602,13	0,156	119,364	2,975	2,288
700	240.077,99	5.982,77	4.602,13	0,157	119,364	2,975	2,288
800	240.077,99	5.982,77	4.602,13	0,161	119,364	2,975	2,288
900	240.077,99	5.982,77	4.602,13	0,165	119,364	2,975	2,288
1000	240.077,99	5.982,77	4.602,13	0,169	119,364	2,975	2,288

Πίνακας 7.20: *Βέλτιστες λύσεις ετήσιου λειτουργικού κόστους για τις διάφορες τιμές καυσίμου*

Στον ***Πίνακα 7.20*** παρουσιάζονται οι συνολικά βέλτιστες λύσεις ετήσιου λειτουργικού κόστους αλλά και οι αντίστοιχες τιμές των εκπομπών CO_2, NO_x, SO_x, όπως και οι βασικοί δείκτες απόδοσης που μελετά η παρούσα διπλωματική για τις διάφορες τιμές καυσίμου στο εύρος 100-1000$. Στο εύρος αυτό έχουμε τρέξει την διαδικασία βελτιστοποίησησης ανά 100 $/ton , βήμα που είναι ικανό να μας δώσει σαφή εικόνα του φαινομένου που μελετάμε. Επίσης στον πίνακα παρουσιάζονται και αντίστοιχες τιμές για τιμή καυσίμου 680 $/ton, τιμή που χρησιμοποιήσαμε ως σταθερά στο σύστημα μας, στην κύρια διαδικασία βελτιστοποίησης που παρουσιάζεται στην παρούσα μελέτη, όπως επίσης και για τιμές ενδιάμεσες όπως 150$/ton, 250$/ton, που κρίθηκαν αναγκαίες όπως θα φανεί στο διάγραμμα που ακολουθεί. Όσον αφορά την πρώτη δευτερεύουσα γραμμή (Feeder Line 1), έως την τιμή καυσίμου 200 $/ton το πλοίο APL Amazonite εμφανίζεται οικονομικότερο και απο κει και πέρα είναι το APL Argentina αυτό που παίρνει την θέση του. Γενικά όπως είναι φανερό, τρεις τύποι πλοίων είναι αυτοί που μονοπωλούν την διαδικασία της βελτιστοποίησης στην κύρια γραμμή και αυτά είναι τα APL Argentina (4038 TEU), APL Arabia (4890 TEU), APL Atlanta (4730 TEU), χωρητικότητας δηλαδή κοντά σε αυτήν που κατατάσσει η εταιρεία στην συγκεκριμένη γραμμή όπως φαίνεται στον ***Πίνακα 6.1.***

Οι τιμές των ***Πινάκων 7.17-7.19*** και ο συγκεντρωτικός ***Πίνακας 7.20*** των βέλτιστων τιμών συνοψίζονται στο ***Διάγραμμα 7.28*** που ακολουθεί. Από αυτό το διάγραμμα γίνεται σαφές πως δεδομένης της διατήρησης συχνότητας παροχής υπηρεσιών, το λειτουργικό μέτρο μείωσης της ταχύτητας πλεύσης έχει νόημα απο τα 145 $/ton. Όπως προκύπτει από το πλήθος βελτιστοποιήσεων που ενεργήσαμε στο μοντέλο μας για τιμές καυσίμου μεταξύ 145-285 $/ton το συνολικό κόστος ελαχιστοποιείται με κατανομή 6 πλοίων στην κύρια γραμμή, ενώ για τιμές μεγαλύτερες του 285 $/ton ελαχιστοποιείται με χρήση 7 πλοίων.



Διάγραμμα 7.28: *Διακύμανση ελάχιστου ετήσιου λειτουργικού κόστους για τις διάφορες τιμές καυσίμου*

Μελετώντας περιπτώσεις μείωσης της ταχύτητας πλεύσης χωρίς την προσθήκη επιπλέον πλοίων, έχουμε ως επακόλουθο την (μη διατήρηση) αύξηση της συχνότητας του συστήματος. Ωστόσο, με δεδομένο πως στο μοντέλο μας μελετούμε αμιγώς λειτουργικά κόστη, όχι όμως και κόστη που προκύπτουν από την χρήση των επιπλέον πλοίων (π.χ inventory cost), εξετάζουμε 2 σενάρια διαφορετικών ταχυτήτων 21 knots και 20 knots αντίστοιχα για την κύρια γραμμή. Κάτι τέτοιο είναι πολύ συχνό για τις εταιρείες μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, αλλά και για επιβατηγά πλοία. Τις περισσότερες φορές δε, είναι συμφέρον για μία εταιρεία να ταξιδεύουν τα πλοία της με μικρότερη ταχύτητα και μεγαλύτερη συχνότητα επίσκεψης σε κάθε λιμάνι. Σε τέτοιες περιπτώσεις αύξησης του συνολικού χρόνου του κυκλικού ταξιδιού χρησιμοποιούνται πλοία μεγαλύτερης μεταφορικής ικανότητας, ενώ σε άλλες περιπτώσεις εταιρείες αναδιαμορφώνουν το πρόγραμμα τους παραλείποντας λιμάνια.

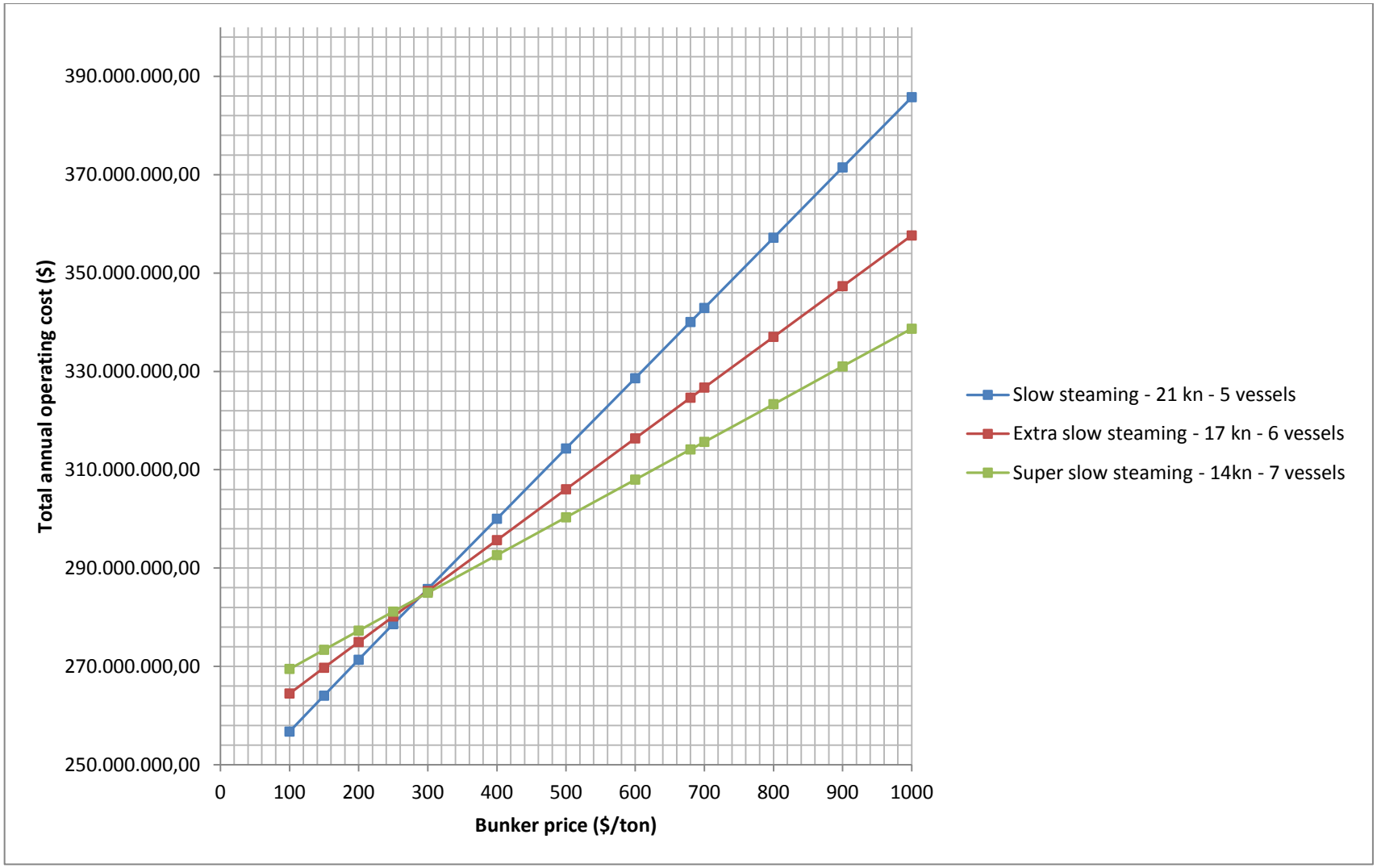
Οι πίνακες που ακολουθουν παραθέτουν όπως και παραπάνω, τα αποτελέσματα των βελτιστοποιήσεων για τις διάφορες τιμές καυσίμου και στην συνέχεια συγκρίνονται στα ***Διαγράμματα 7.29-7.30*** με τις περιπτώσεις μείωσης της ταχύτητας πλεύσης με προσθήκη 1 ή 2 πλοίων για τη διατήρηση της συχνότητας.

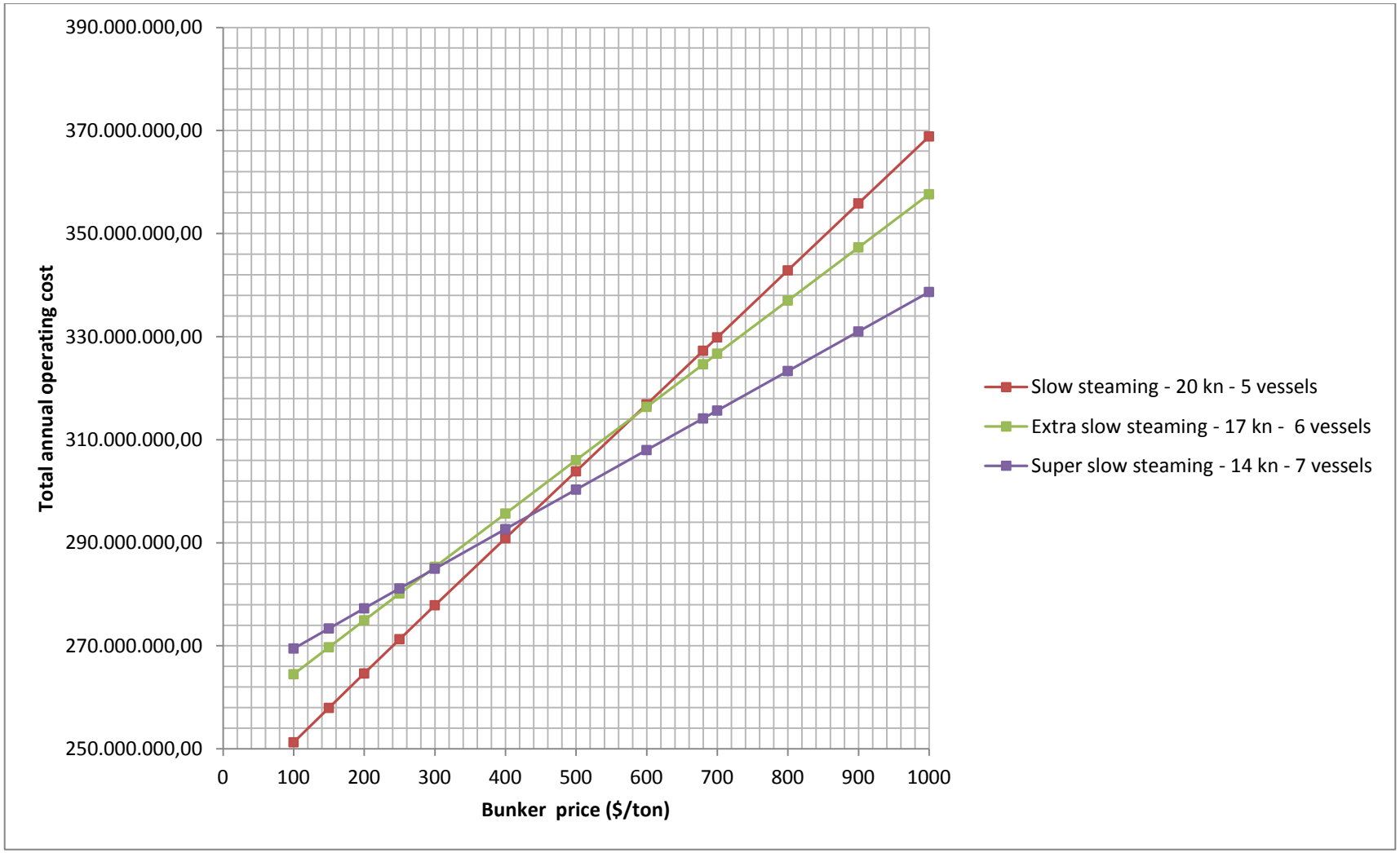
Στην πρώτη περίπτωση, η ταχύτητα στην κύρια γραμμή είναι 21 knots και αντιστοιχεί σε συχνότητα παροχής υπηρεσιών ίση με 7,6 μέρες, ενώ στην δεύτερη περίπτωση η ταχύτητα είναι 20 knots με αντίστοιχη συχνότητα 7.9. (Εξετάζουμε δηλαδή περιπτώσεις που ναι μεν δεν διατηρούν την συχνότητα, αλλά αυτή δεν ξεπερνά την 1 μέρα).Όπως φαίνεται στο ***Διάγραμμα 7.29*** για την πρώτη περίπτωση**,** μία τέτοια υπόθεση έχει νόημα για τιμές καυσίμου έως 290 $/ton, ενώ στο ***Διάγραμμα 7.30*** για την δεύτερη περίπτωση**,** έχει νόημα για τιμές καυσίμου έως 435 $/ton. Θα πρέπει να τονίσουμε βέβαια ότι σε περιπτώσεις μεγάλων καθυστερήσεων, επηρεάζεται όλη η εφοδιαστική αλυσίδα, αφού το δίκτυο μίας εταιρείας που δραστηριοποιείται στις μεταφορές αποτελεί σύστημα αλληλοσύνδεσης χερσαίων και θαλάσσιων μεταφορών. Συνοψίζοντας, βλέπουμε ότι το slow steaming σε ταχύτητες 20 kn και σε περιπτώσεις που δεν έχουμε χρήση επιπλέον πλοίων και άρα έχουμε αύξηση συχνότητας συστήματος, μπορεί να επιβιώσει χωρίς να αλλάξει το δίκτυο κόμβων της γραμμής για τιμές έως 435 $/ton στο εξεταζόμενο μοντέλο, κάτι τέτοιο όμως στην πραγματικότητα μπορεί να πλήξει την αξιοπιστία μίας εταιρείας όσον αφορά τις προσφερόμενες υπηρεσίες της. Με δεδομένο το ύψος που κυμαίνονται οι τιμές καυσίμων τον τελευταίο χρόνο, το κόστος καυσίμου είναι τόσο υψηλό που η μείωση της ταχύτητας και η χρήση πρόσθετων πλοίων κρίνεται απαραίτητη,τουλάχιστον όσον αφορά το λειτουργικό κόστος. Ο υπολογισμός βέβαια περαιτέρω κοστών που έχει μία εταιρεία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων και που δεν μελετώνται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, είναι αυτός που μπορεί να τεκμηριώσει καλύτερα την λήψη ή όχι μιας τέτοιας απόφασης.

SLOW STEAMING (21 knots) - NO EXTRA SHIPS	$/ton	Vessels	Speed	frequency	Total Cost	$/TEU mile	CO2 g/TEUmile	NOx g/TEUmile	SOx g/TEUmile	CO2 Emissions	NOx Emissions	SOx Emissions
	100	3ARG+2ATL	21	7,6	256.747.572,19	0,135	258,62	6,44	4,96	457.000,76	11.388,52	8.760,40
	150	3ARG+2ATL	21	7,6	264.047.903,84	0,139	258,62	6,44	4,96	457.000,76	11.388,52	8.760,40
	200	3ARG+2ATL	21	7,6	271.348.235,49	0,143	258,62	6,44	4,96	457.000,76	11.388,52	8.760,40
	250	3ARG+2ARAB	21	7,6	278.593.947,20	0,148	254,41	6,34	4,88	447.247,43	11.145,46	8.573,43
	300	3ARG+2ARAB	21	7,6	285.738.474,87	0,152	254,41	6,34	4,88	447.247,43	11.145,46	8.573,43
	400	3ARG+2ARAB	21	7,6	300.027.530,19	0,160	254,41	6,34	4,88	447.247,43	11.145,46	8.573,43
	500	3ARG+2ARAB	21	7,6	314.316.585,51	0,168	254,41	6,34	4,88	447.247,43	11.145,46	8.573,43
	600	3ARG+2ARAB	21	7,6	328.605.640,84	0,176	254,41	6,34	4,88	447.247,43	11.145,46	8.573,43
	680	3ARG+2ARAB	21	7,6	340.036.885,10	0,182	254,41	6,34	4,88	447.247,43	11.145,46	8.573,43
	700	3ARG+2ARAB	21	7,6	342.894.696,16	0,184	254,41	6,34	4,88	447.247,43	11.145,46	8.573,43
	800	3ARG+2ARAB	21	7,6	357.183.751,49	0,192	254,41	6,34	4,88	447.247,43	11.145,46	8.573,43
	900	3ARG+2ARAB	21	7,6	371.472.806,81	0,200	254,41	6,34	4,88	447.247,43	11.145,46	8.573,43
	1000	3ARG+2ARAB	21	7,6	385.761.862,13	0,209	254,41	6,34	4,88	447.247,43	11.145,46	8.573,43

SLOW STEAMING (20 knots) NO EXTRA SHIPS	$/ton	Vessels	Speed	frequency	Total Cost	$/TEU mile	CO2 g/TEUmile	NOx g/TEUmile	SOx g/TEUmile	CO2 Emissions	NOx Emissions	SOx Emissions
	100	3ATL+2ARG	20	7,9	251.284.884,24	0,136	242,006	6,031	4,639	417.924,93	10.414,74	8.011,34
	150	3ATL+2ARG	20	7,9	257.961.001,30	0,140	242,006	6,031	4,639	417.924,93	10.414,74	8.011,34
	200	3ATL+2ARG	20	7,9	264.637.118,36	0,144	242,006	6,031	4,639	417.924,93	10.414,74	8.011,34
	250	3ATL+2ARG	20	7,9	271.290.907,61	0,147	241,585	6,020	4,631	414.345,11	10.325,53	7.942,72
	300	3ARAB+2ARG	20	7,9	277.878.641,57	0,151	236,809	5,901	4,539	406.808,10	10.137,71	7.798,24
	400	3ARAB+2ARG	20	7,9	290.875.705,39	0,159	236,809	5,901	4,539	406.808,10	10.137,71	7.798,24
	500	3ARAB+2ARG	20	7,9	303.872.769,20	0,166	236,809	5,901	4,539	406.808,10	10.137,71	7.798,24
	600	3ARAB+2ARG	20	7,9	316.869.833,02	0,174	236,809	5,901	4,539	406.808,10	10.137,71	7.798,24
	680	3ARAB+2ARG	20	7,9	327.267.484,07	0,180	236,809	5,901	4,539	406.808,10	10.137,71	7.798,24
	700	3ARAB+2ARG	20	7,9	329.866.896,83	0,182	236,809	5,901	4,539	406.808,10	10.137,71	7.798,24
	800	3ARAB+2ARG	20	7,9	342.863.960,65	0,189	236,809	5,901	4,539	406.808,10	10.137,71	7.798,24
	900	3ARAB+2ARG	20	7,9	355.861.024,46	0,197	236,809	5,901	4,539	406.808,10	10.137,71	7.798,24
	1000	3ARAB+2ARG	20	7,9	368.858.088,28	0,204	236,809	5,901	4,539	406.808,10	10.137,71	7.798,24

Πίνακας 7.21: *Λύσεις ετήσιου λειτουργικού κόστους για περιπτώσεις μείωσης της ταχύτητας πλεύσης χωρίς την προσθήκη επιπλέον πλοίων*


390.000.000,00
370.000.000,00
350.000.000,00
330.000.000,00
310.000.000,00
290.000.000,00
270.000.000,00
250.000.000,00
Total annual operating cost ($)
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
Bunker price ($/ton)
Slow steaming - 21 kn - 5 vessels
Extra slow steaming - 17 kn - 6 vessels
Super slow steaming - 14kn - 7 vessels

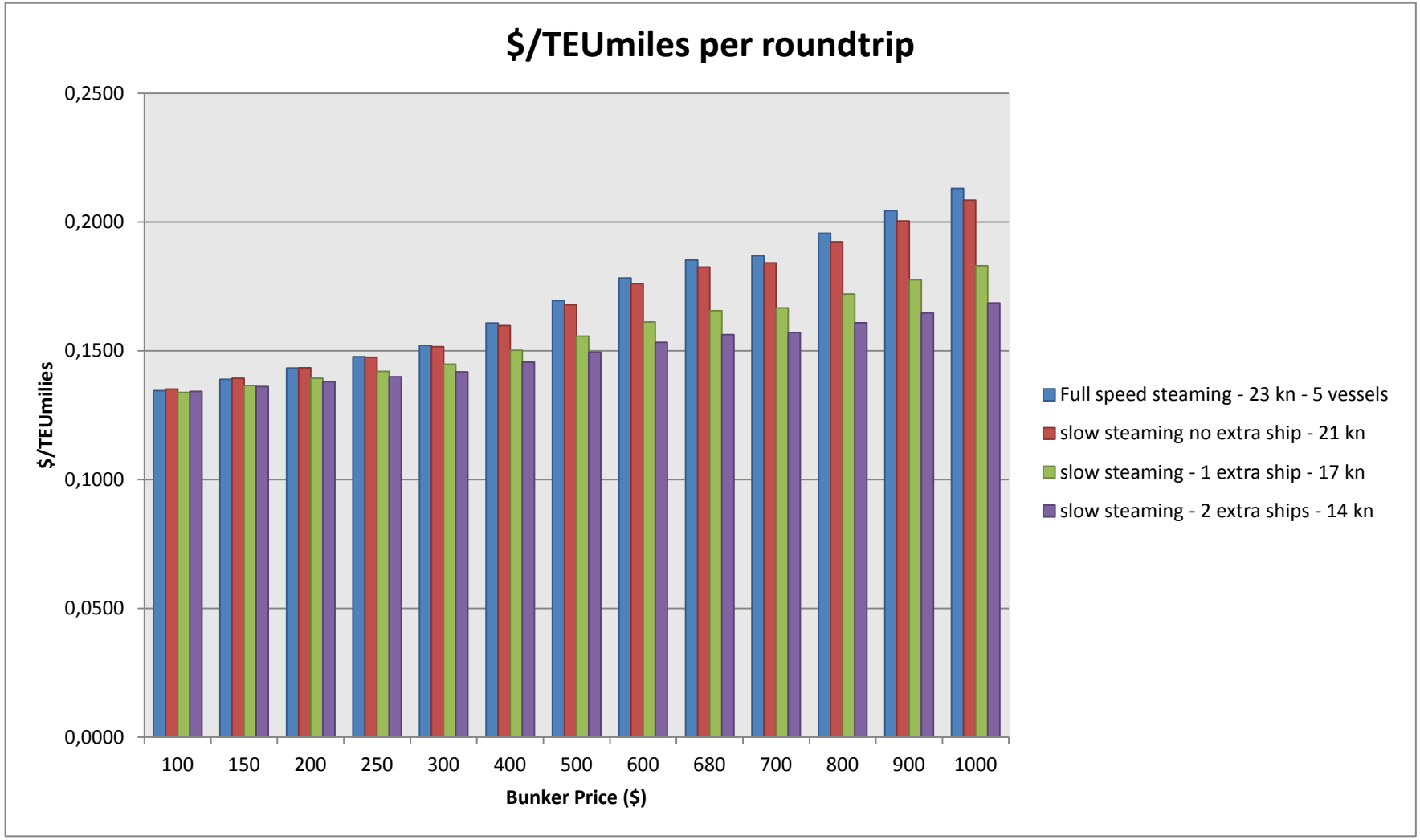


Διαγράμματα 7.29-7.30 *: Διακύμανση ελάχιστου ετήσιου λειτουργικού κόστους για περιπτώσεις μειωμένης ταχύητας πλεύσης α) 21kn και β) 20 kn χωρίς την προσθήκη πλοίων συγκριτικά με περιπτώσεις προσθήκης 1,2 πλοίων για τη διατήρηση συχνότητας*

Τέλος, στο ***Διάγραμμα 7.31*** της επόμενης σελίδας παραθέτουμε δείκτες απόδοσης κόστους για τις διάφορες τιμές κασυισίμου για 4 διαφορετικές περιπτώσεις:

- Υπηρεσιακή ταχύτητα 23 kn, με συχνότητα συστήματος 7,2
- Μειωμένη ταχύτητα 21 kn χωρίς την χρήση επιπλέον πλοίου, με συχνότητα 7,6
- Μειωμένη ταχύτητα 17 kn με την προσθήκη 1 επιπλέον πλοίου, συχνότητα 7,3
- Μειωμένη ταχύτητα 14 kn με την προσθήκη 2 επιπλέον πλοίων, συχνότητα 7,2

Οι τιμές που απεικονίζονται παρατίθενται στους πίνακες που προηγήθηκαν. Όπως βλέπουμε, οι αυξητικές τάσεις των στηλών εναρμονίζονται πλήρως με τα αποτελέσματα που παραθέσαμε παραπάνω. Είναι ενδιαφέρον να σχολιάσουμε το γεγονός ότι σε ένα κυκλικό ταξίδι που συμμετέχουν 7 πλοία τα TEUμίλια είναι περισσότερα σε σύγκριση με την περίπτωση ενός κυκλικού ταξιδιού δικτύου που καλύπτεται από 5 πλοία, ενώ παράλληλα το συνολικό κόστος ανά κυκλικό ταξίδι είναι μικρότερο, αφού λόγω χαμηλότερης ταχύτητας το κόστος καυσίμου είναι μικρότερο.Ετσι σαν αποτέλεσμα, ο μελετούμενος δείκτης κόστους είναι μικρότερος για όλο σχεδόν το εύρος τιμών καυσίμου. Στις τιμές καυσίμου έως και 150-200 $/ton που οι στήλες των δεικτών στις 4 περιπτώσεις είναι περίπου ίδιοι, η πλεύση σε υψηλές ταχύτητες της τάξης 23 kn, είναι η πλέον συμφέρουσα αφού το δίκτυο πλοίων εκτελεί μεγαλύτερο αριθμό κυκλικών ταξιδιών ανά έτος.



Διάγραμμα 7.31 : *Συγκριτικοί δείκτες αποδοσης κόστους για τις διάφορες τιμές καύσιμου*

8

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στο παρόν κεφάλαιο, αντί επιλόγου, καταγράφονται και αναπτύσσονται συμπερασμάτα που εξάγονται από την διαδικασία κατασκευής και βελτιστοποίησης του μοντέλου. Επίσης, παρατίθενται προτάσεις για περαιτέρω έρευνα, επισημαίνοντας πιθανές βελτιώσεις στο παρόν μοντέλο και προτείνοντας εναλακτικούς τρόπους διαχείρισης και προσέγγισης του μελετούμενου προβλήματος.

8.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής ήταν η μελέτη, περιγραφή και αξιολόγηση θεμάτων που σχετίζονται με τον τρόπο λειτουργίας μιας εταιρείας μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων που δραστηριοποιείται στην ναυλαγορά liner. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο, αντιπροσωπευτικό ενός σύγχρονου δικτύου πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων αποτελούμενο από μία κύρια γραμμή που δραστηριοποιείται στον εμπορικό δρόμο Trans-pacific και δύο δευτερέυουσες-βοηθητικές ενδοασιατικές γραμμές. Η μοντελοποίηση βασίστηκε σε δεδομένα της εταιρείας μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων APL, θυγατρικής της ναυτιλιακής εταιρείας NOL.

Το συνολικό προφίλ λειτουργίας έγινε προσπάθεια να καθοριστεί με την βοήθεια τεσσάρων βασικών αξόνων βάσει των οποίων κινήθηκε η διαδικασία εξαγωγής αποτελεσμάτων και οι οποίοι μοιράζονται κοινά συμπεράσματα. Συνδετικός κρίκος αυτών των κατευθύνσεων αποδείχθηκε το λειτουργικό μέτρο μείωσης της ταχύτητας πλεύσης (*slow steaming*), πρακτική όχι νέα, αλλά που παρατηρείται εντόνως από την κρίση του 2008-2009 και μετά και που όντας άμεσα συνδεόμενη με περιβαλλοντικά θέματα που τίθενται στο ευρύτερο πλαίσιο της ποντοπόρου ναυτιλίας, κερδίζει

συνεχώς έδαφος. Περιβαλλοντικά θέματα αν και αναφέρονται σε θεωρητικό επίπεδο στο Κεφάλαιο 1, παρουσιάζονται μόνο έμμεσα μέσα από τη διαδικασία εξαγωγής αποτελεσμάτων και η παρούσα εργασία δεν επικεντρώνεται σε αυτα.

Στην πρώτη φάση περιγραφής του συστήματος μας, επικεντρωθήκαμε στην ανάδειξη των ενεργειακών χαρακτηριστικών των πλοίων που επιλέξαμε ως αντιπροσωπευτικά στο μοντέλο μας. Για δεδομένο εύρος ταχυτήτων μελετήσαμε τις διακυμάνσεις της κατανάλωσης καυσίμου, του κόστους καυσίμου και των εκπομπών CO_2, αναδεικνύοντας παράλληλα περιπτώσεις οικονομίας κλίμακας όπως στην περίπτωση του λόγου "*fuel cost per TEU-slot per day*", αλλά κυρίως αναλύοντας το γεγονός πώς μία μικρή αύξηση στην υπηρεσιακή ταχύτητα έχει ως αποτέλεσμα δραματική αύξηση στην κατανάλωση του καυσίμου. Έτσι σε επιχειρησιακό επίπεδο, από τη στιγμή που το κόστος καυσίμου είναι ευθέως ανάλογο με τις εκπομπές CO_2, μείωση της ταχύτητας πλεύσης έχει ταυτόχρονα ευνοϊκό οικονομικό και περιβαλλοντικό αποτέλεσμα : μείωση του κόστους καυσίμων και των εκπομπών ρύπων διοξειδίου του άνθρακα.

Εν συνεχεία, με βασικό εργαλείο τους γενετικούς αλγορίθμους, προχωρήσαμε σε διαδικασία βελτιστοποίησης με στόχο την εύρεση της βέλτιστης λύσης, τον συνδυασμό δηλαδή των μεταβλητών απόφασης, που ελαχιστοποιεί το ετήσιο λειτουργικό κόστος του δικτύου μας για συγκεκριμένα αποδεκτά όρια στην συχνότητα παροχής υπηρεσιών.

Όπως φανερώνουν και τα αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης και έχοντας επιλέξει σαν τιμή καυσίμου τα 680 $/ton, τιμή που αποτελεί περίπου τον μέσο όρο των τρεχουσών τιμών των τελευταίων μηνών, η βέλτιστη λύση του συστήματος μας αντιστοιχεί σε ταχύτητες ιδαιτέρως χαμηλές και στις τρεις γραμμές του συστήματος. Ειδικότερα στην κύρια γραμμή, σε μία προσπάθεια να μελετήσουμε αναλυτικότερα τις περιπτώσεις που η μείωση της ταχύτητας καθιστά αναγκαία την πρόσθεση επιπλέον πλοίων για την διατήρηση της συχνότητας του συστήματος, αλλά και για να μειώσουμε την πολυπλοκότητα του μοντέλου, διαιρέσαμε την διαδικασία ελαχιστοποίησης του ετήσιου λειτουργικού κόστους σε τρία μέρη ανάλογα με τον αριθμό πλοίων που δραστηριοποιούνται στην κύρια γραμμή. Η προκύπτουσα βέλτιστη λύση μέσα από την σύγκρισή της με τις υποβέλτιστες που παρήχθησαν, αναδεικνύει το κόστος καυσίμου ως εκείνη την συνιστώσα που όντας η πιο ευμετάβλητη και πιο καθοριστική στην τιμή του συνολικού κόστους , επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τις επιχειρησιακές επιλογές και τον σχεδιασμό των ταξιδιών μίας εταιρείας. Η βέλτιστη λοιπόν λύση, η οποία αντιστοιχεί σε ταχύτητα 14 kn στην κύρια γραμμή, δείχνει με καθαρό τρόπο το πόσο οικονομικά αποδοτική μπορεί να είναι για μία εταιρεία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων η απόφαση για μειώση της ταχύτητας πλεύσης, ιδιαίτερα σε περιόδους που οι τιμές καυσίμου είναι υψηλές.

Η διαδικασία ελαχιστοποίησης του ετήσιου λειτουργικού κόστους αποτέλεσε το πρώτο βήμα για την χάραξη του αποτελεσματικού μετώπου ετήσιου λειτουργικού κόστους – εκπομπών ρύπων. Το συγκεκριμένο διάγραμμα έχει ως στόχο την

αποσαφήνηση του εύρους λειτουργίας του μελετούμενου δικτύου, τόσο ως προς το οικονομικο σκέλος, όσο και ως προς το ενεργειακό και συγκεκριμένα το επίπεδο εκπομπών ρύπων CO_2, NO_x, SO_x του συστήματος μας. Μπορεί να φανεί ιδαιτέρως χρήσιμο σε περιπτώσεις που κρίνεται αναγκαίος ο επανασχεδιασμός των ταξιδιών σε ένα έτσι και αλλιώς ευμετάβλητο οικονομικό περιβάλλον, όπου ναύλοι και τιμές καυσίμου παρουσιάζουν συνεχείς διακυμάνσεις, όπως επίσης και σε μελλοντικές περιπτώσεις καθιέρωσης συστημάτων φορολογίας στα καύσιμα ή εμπορεύσιμων αδειών εκπομπών ρύπων, όπου λύσεις ταυτόχρονα οικονομικά και περιβαλλοντικά αποδοτικές θα πρέπει να υιοθετηθούν από τις εταιρείες. Έτσι μια ναυτιλιακή εταιρεία είναι σε θέση να υπολογίσει το μέγιστο ποσό που καλείται να επενδύσει προκειμένου να εναρμονιστεί με τις εκάστοτε απαιτήσεις περιορισμού των εκπομπών ρύπων. Πρέπει να τονίσουμε ότι μέσω της βελτιστοποίησης των δύο αυτών κριτηρίων και της μορφής που παρουσιάζει η καμπύλη μας, προέκυψαν συνολικά «καλές» συμβιβαστικές λύσεις που είναι σε θέση να εκπληρώσουν τις παραπάνω ανάγκες.

Στην τρίτη φάση περιγραφής του τρόπου λειτουργίας του συστήματός μας, η εξαγωγή αποτελεσμάτων σε μορφή πινάκων και διαγραμμάτων προκύπτει από την σύγκριση μεταξύ των επιμέρους μεγεθών που προκύπτουν από την βέλτιστη οικονομικά λύση του συστήματος με μία εφικτή λύση σε συνθήκες ευνοϊκού οκονομικού περιβάλλοντος, όπου οι τιμές των καυσίμων κυμαίνονται σε χαμηλά επίπεδα και τα πλοία ταξιδεύουν με υψηλές ταχύτητες. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν τονίζουν με τον πιο ξεκάθαρο τρόπο την δραματική μείωση στις εκπομπές ρύπων έως και 60% σε περιπτώσεις όπου η ταχύτητα όπως στην περίπτωσή μας περίπου υποδιπλασιάζεται, από 24 kn σε 14 kn.

Μέρος αυτών των αποτελεσμάτων αποτελούν και αυτά που αναφέρονται σε βασικούς δείκτες απόδοσης. Οι βασικοί δέικτες απόδοσης αποτελούν τρόπο μέτρησης αποδοτικότητας των επιχειρησιακών επιλογών στο σύγχρονο ανταγωνιστικό περιβάλλον. Χρησιμοποιούνται από εταιρείες για την εκτίμηση της αποδοτικόητας συγκεκριμένων δραστηριοτήτων στις οποίες συμμετέχουν, καταδεικνύοντας την αποτελεσματικότητα τους είτε με βάση την επίτευξη προόδου προς την κατεύθυνση των στρατηγικών στόχων, είτε με την σταθερή και επαναλαμβανόμενη επίτευξη συγκεκριμένων επιπέδων κάποιου επιχειρησιακού στόχου. Το πλαίσιο των βασικών δεικτών απόδοσης, συνδέεται όπως και κάθε άλλο θέμα με το οποίο καταπιάνεται αυτή η διπλωματική, με το λειτουργικό μέτρο της μείωσης της ταχύτητας πλεύσης, ως ένας άλλος τρόπος να καταδείξουμε την αποδοτικότητα του μέτρου αυτού. Ειδικότερα μέσω της παραγωγής δεικτών για κάθε ξεχωριστό ταξίδι μεταξύ δύο διαδοχικών λιμένων ενός δικτύου, μία εταιρεία είναι σε θέση να ελέγχει τα οικονομικά δεδομένα κάθε σκέλους των υπηρεσιών της ούτως ώστε να παρεμβαίνει όπου δραστηριότητες κρίνονται μη αποδοτικές.

Στο τελευταίο μέρος της περιγραφής του τρόπου λειτουργίας ενός δικτύου πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων, παρατίθενται τα αποτελέσματα της μονόδρομης ανάλυσης ευαισθησίας (*one-way sensitivity analysis*) στην τιμή του καυσίμου. Με την βοήθεια των γενετικών αλγορίθμων και μέσω διαδικασίας βελτιστοποίησης μίας

σειράς συγκριτικών σεναριων, αποσαφηνίζονται οι βέλτισεις λύσεις του συστήματος και το προφίλ λειτουργίας στο εύρος 100-1000 $/ton, ενώ παράλληλα ελέγχεται και το ύψος της τιμής των καυσίμου πάνω από το οποίο καθίσταται βιώσιμο το slow steaming.

Αναλυτικότερα, τα πλοία (τύποι πλοίων) που εμφανίζονται συχνότερα στις «καλές» συμβιβαστικές λύσεις που βρίσκονται κοντά στο μετώπο Pareto όσον αφορά το ετήσιο λειτουργικό κόστος και τις εκπομπές CO_2, είναι τα *APL Argentina (4038 TEU), APL Arabia (4890 TEU) , APL Atlanta (4730 TEU)* για την κύρια γραμμή, τα *APL Argentina* και *APL Amazonite (3821 TEU)* για την πρώτη βοηθητική γραμμή και το πλοίο *APL Balboa (1296 TEU)* για την δεύτερη βοηθητική γραμμή. Συγκεκριμένα για την κύρια γραμμή, το παραπάνω γεγονός συμφωνεί πλήρως με το πραγματικό πρόβλημα, αφού όπως εχουμε περιγράψει στο ***Κεφάλαιο 7***, η εταιρεία κρίνει ότι είναι συμφέρον οικονομικά να κατανείμει πλοία παρόμοιου μεγέθους για την κάλυψη των αναγκών της. Ειδικότερα, το APL Argentina, εμφανίζεται το ιδανικότερο πλοίο τόσο από οικονομικής πλευράς όσο και από ενεργειακής.

Κατά την διαδικασία βελτιστοποίησης, η βέλτιστη λύση του συστήματος για πλήθος πλοίων ίσο με 7 στην κύρια γραμμή, προέκυψε και ως η συνολικά βέλτιστη λύση του συστήματος έναντι των αντίστοιχων βέλτιστων λύσεων για 5 και 6 πλοία. Η συνιστώσα του συνολικού κόστους που εμφανίζει σημαντική διαφορά μεταξύ αυτών των λύσεων είναι το κόστος καυσίμου, αφού αυτό για την περίπτωση των 7 πλοίων ισοδυναμεί με το μισό και τα 2/3 για τις περιπτώσεις των βέλτιστων λύσεων για πλήθος πλοίων 5 και 6 πλοία αντίστοιχα.Ακριβώς το ίδιο συμβάινει και για τις προκύπτουσες ανά περίπτωση εκπομπές ρύπων, αφού είναι ανάλογες νε την κατανάλωση και το κόστος καυσίμου.

Η μορφή του μετώπου Pareto είναι η αναμενόνη, αφού συγκροτείται από λύσεις που δεν κυριαρχούν πλήρως η μία της άλλης όσον αφορά τα δύο μελετούμενα κριτήρια, του ετήσιου λειτουργικού κόστους και των εκπομπών ρύπων. Τα ακράια σημεία της προκύπτουσας καμπύλης είναι και αυτά που ελαχιστοποιούν τα δύο κριτήρια με τιμές 314.127.019,40 $ και 204.963,26 tons CO_2, και κάθε πιθανός συνδυασμός των μεταβλητών απόφασης του συστήματος μας κινείται μεταξύ αυτών των τιμών.

Όσον αφορά τους δείκτες απόδοσης, η χρησιμότητα τους είναι ιδιαίτερα σημαντική αφού αναδεικνύουν αναλυτικά για κάθε ταξίδι σε κάθε γραμμή, το όφελος της διαδικασίας βελτιστοποίησης μέσα από την σύγκριση της βέλτιστης με την αρχική εφικτή λύση που χρησιμοπιείται.

Τέλος, η ανάλυση ευαισθησίας στο εύρος τιμών καυσίμου 100-1000$ έχει διπλό στόχο. Πρώτον, την αποσαφήνηση του βέλτιστου τρόπου λειτουργίας ανά τιμή καυσίμου, γεγονός πολύ σημαντικό με δεδομένο το ευμετάβλητο οικονομικό περιβάλλον. Δεύτερον, το εύρος των τιμών καυσίμου για το οποίο έχει νόημα το λειτουργικό μέτρο μείωσης της ταχύτητας πλεύσης (slow steaming) με προσθήκη

ενός ή δύο πλοίων για την διατήρηση της συχνότητας υπηρεσιών. Έτσι, όπως προκύπτει, έως 145$/ton το συνολικό κόστος ελαχιστοποιείται με 5 πλοία στην κύρια γραμμή, για 145- 285 $/ton ελαχιστοποιείται με 6 πλοία και για άνω των 285 $/ton η βέλτιστη λύση είναι αποτέλεσμα κατανομής 7 πλοιών στην κύρια γραμμή.

Συμπερασματικά, το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε και ο τρόπος που αυτό διαχειρίστηκε βασίστηκε σε διαδικασίες επιστημονικά αποδεκτές. Η μεθοδολογία με την οποία πορευτήκαμε καταφέρνει να προσομοιώσει σε σημαντικό βαθμό το πραγματικό πρόβλημα, αποτελώντας ένα χρήσιμο μαθηματικό εργαλείο. Οι ανάγκες εκσυχρονισμού και ανταγωνιστικότητας στο παγκόσμιο οικονομικό περιβάλλον οδηγούν εταιρείες να ενδυναμώνουν συνεχώς το επιστημονικό πλαίσιο πάνω στο οποίο στηρίζεται η διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Ωστόσο το πραγματικό πρόβλημα περιλαμβάνει ένα μεγάλο πλήθος παραμέτρων, πολλοί από τους οποίους είναι ιδιαίτερα δύσκολο να προβλεφθούν και τελικά να συμπεριληφθούν στο μαθηματικό μοντέλο, ενώ από την άλλη απλουστεύσεις και παραδοχές ήταν αναγκαίες για την δημιουργία του. Πρέπει λοιπόν να υπογραμμισθεί το γεγονός ότι η λειτουργία ενός τέτοιου μοντέλου θα μπορούσε να χαρακηριστεί στατική από πλευράς εύρους προβλέψεων και υπολογισμών. Καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την εκάστοτε περίπτωση που ερευνάται, από το διαθέσιμα δεδομένα και από τον τρόπο που θα χρησιμοποιηθεί σε διαδικασίες βελτιστοποίησης.

Από την άλλη πλευρά, ο τρόπος με τον οποίο είναι κατασκευασμένο δίνει την δυνατότητα να τροποποιηθεί ώστε να επιτρέψει αλλαγές σε περιορισμούς αλλά και προσθήκη νέων δεδομένων, με σκοπό την βελτίωση του τρόπου υπολογισμού του ετήσιου λειτουργικού κόστους. Επιπλέον, η μεθοδολογία που ακολουθείται μπορεί να εμπλουτισθεί με περισσότερες γραμμές αλλά και τύπους πλοίων ούτως ώστε να επεκταθεί και να καλύψει το σύνολο των δικτύων στα οποία δραστηριοποιείται μία ναυτιλιακή εταιρεία.

8.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Το παρόν μοντέλο αποτελεί ένα χρήσιμο μαθηματικό εργαλείο, βαισισμένο σε μεθοδολογία και υποθέσεις επιστημονικά αποδεκτές, το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί συμβουλευτικά από ναυτιλιακές εταιρείες στην προσπάθεια λήψης αποφάσεων στρατηγικού χαρακτήρα. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε και η δομή του μοντέλου μας επιδέχονται εσωτερικές τροποποιήσεις ανάλογα με τις ανάγκες που πρόκειται να εξυπηρετήσουν, αλλά και βελτίωση ή επέκταση με στόχο την κάλυψη παρεμφερών αλλά και ευρύτερων περιοχών έρευνας.

Προς αυτήν την κατεύθυνση θα μπορούσαν να θεωρηθούν οι προτάσεις που ακολουθούν. Το μοντέλο θα μπορούσε να ενσωνατώσει πιο ρεαλιστικές προσεγγίσεις του πραγματικού προβλήματος σε μία σειρά από παραμέτρους.

Το κόστος ναύλωσης ενός πλοίου θα μπορούσε να υπολογισθεί βάσει τιμών της πραγματικής αγοράς από διεθνείς εταιρείες αξιολόγησης και όχι από εμπειρικές σχέσεις.

Η κατανάλωση καυσίμου στη θάλασσα και στον λιμένα θα μπορούσε να προκύπτει από επεξεργασία δεδομένων.

Η ροή φορτίου σε κάθε γραμμή θα μπορούσε να προκύπτει από πραγματικά στοιχεία, κάτι που οδηγεί και στον επανασχεδιαμό των ταξιδιών. Λόγω έλλειψης δεδομένων σχετικά με την μελλοντική ζήτηση φορτίου, στο μοντέλο έχει γίνει η παραδοχή ότι η ζήτηση για τη μεταφορά φορτίου σε ετήσια βάση είναι σταθερή, θεωρώντας σταθερές ροές φορτίου.

Ο χρόνος παραμονής σε κάθε λιμάνι κάθε πλοίου του συστήματος θα μπορούσε να μην θεωρείται ίδιος ανεξαρτήτως τύπου πλοίου, αλλα να ήταν συνάρτηση πχ. του μεγέθους του πλοίου.

Η ταχύτητα των τριών γραμμών του συστήματος θα μπορούσε να μην είχε θεωρηθεί σταθερή σε όλη τη διάρκεια του κυκλικού ταξιδιού, αλλά θα μπορούσε να είχε γίνει διάκριση μεταξύ του eastbound leg και του westbound leg.

Γνωρίζοντας το είδος των μεταφερόμενων αγαθών σε κάθε δρομολογίο θα μπορούσαμε να είχαμε κάνει διάκριση στου τύπους των μεταφερόμενων εμπορευματοκιβωτίων (20 foot, 40 foot, 40 foot reefer).

Μία πιο διεξοδική ανάλυση θα απαιτούσε την εφαρμογή στην εξίσωση υπολογιμού του συνολικού κόστους παραμέτρων «καλής φήμης» (*goodwill function*), ως ποσοτικοποιημένη επίδραση της ποιότητας υπηρεσιών στη συνάρτηση του συνολικού κόστους. Το επόμενο βήμα θα ήταν η ανάπτυξη και ο υπολογιμός συναρτήσεων χρησιμότητας για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, με σκοπό την λογιστική περιγραφή της ποιότητας αυτών των υπηρεσιών.

Το μαθηματικό μοντέλο θα μπορούσε να επεκταθεί και να εμπλουτισθεί με περισσότερες ή το σύνολο των γραμμών στις οποίες δραστηριοποιείται η εταιρεία, ενσωματώνοντας όλο το στόλο της.

Η εκτέλεση της βελτιστοποίησης θα μπορούσε να υλοποιούταν με χρήση άλλου προγράμματος βελτιστοποίησης ή άλλης κατηγορίας εξελιγκτικών αλγορίθμων και όχι τους γενετικούς αλγορίθμους.

Το μοντέλο θα μπορούσε να συμπεριλάβει συνάρτηση υπολογισμού κέρδους ή να επεκταθεί πέρα των καθαρά λειτουργικών κοστών που σχετίζονται με τα πλοία και σε άλλα κόστη που έχει μια εταιρεία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτιών.

Το μοντέλο θα μπορούσε να μετεξελισσόταν σε ένα Συστήμα υποστήριξης Αποφάσεων (Decision Support System - DSS), όπου παίρνοντας υπόψιν τα χαρακτηρισικά κάθε πλοίου, θέματα “weather routing” και τις συνθήκες θαλάσσης, θα άλλαζε δραματικά από ένα στατικό προβλεπτικό και υπολογιστικό μοντέλο σε μία δυναμική “online” εφαρμογή βελτιστοποίησης. Η εφαρμογή Συστημάτων υποστήριξης Αποφάσεων (DSS) στον χώρο που δραστηριοποιούνται οι εταιρείες μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων σε συνδυαμό με θέματα κατανομής στόλου αποτελεί θέμα μελλοντικής έρευνας,. Για παράδειγμα, ένα τέτοιο σύστημα θα μπορούσε να περιλαμβάνει κύριους τεχνικούς και οικονομικούς παράγοντες, όπως χαρακτηριστικά πλοίων, ναύλοι, εκπομπές ρύπων, καιρικές συνθήκες κλπ., και στόχους όπως ελαχιστοποίηση κόστους ή εκπομπών ή μεγιστοποίηση κέρδους. Τέτοια συστήματα μπορούν να οδηγήσουν σε καλύτερες αποφάσεις σχετικά με την διαχείριση ενός πλοίου κατά τη διάρκεια ενός συγκεκριμένου ταξιδιού (ταχύτητα, διαδρομή), ιδίως με χρήση ανάλυσης ευαισθησίας για την καλύτερη εκτίμηση των επιπτώσεων των αποφάσεων σε ένα έτσι και αλλιώς αβέβαιο περιβάλλον.

Τέλος η μαθηματική μοντελοποίηση και τα εξαγόμενα αποτελέσμτα με τα οποία καταπιάστηκε η παρούσα διπλωματική ξεπερνούν το θεωρητικό πλαίσιο και την επιστημονική έρευνα και γίνονται αντικείμενο εφαρμογής, αφού οι ανάγκες για αποδοτικότητα και ο ανταγωνισμός υποχρεώνουν εταιρείες να επενδύουν όλο και περισσότερο σε μοντέλα ως εργαλεία πρόβλεψης και υπολογισμού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

<u>Ξενόγλωσση βιβλιογραφία</u>

[1] Alvarez JF (2009). *"Joint routing and deployment of a fleet of container vessels"*. Maritime Econ Logist 11: 186–208.

[2] Bergh, I. (2010) *"Optimum speed – from a shipper's perspective"*, Container ship up-date DNV, (2): 10-13.

[3] Buhaug, Ø., Corbett J., Endresen, O., Eyring, V., Faber J., Hanayama, S., Lee, D., Lindstad, H., Mjelde, A., Palsson, C., Wanquing, W., Winebrake, J. and Yoshida, K. (2009) *Second IMO greenhouse gas study*, International Maritime Organization, London

[4]Cariou, P. (2011) *"Is slow steaming a sustainable means of reducing CO2 emissions from container shipping?"*, Transportation Research Part D (16): 260-264.

[5] Cerup-Simonsen, B.(2008) "*Effects of energy cost and environmental demands on future shipping markets"*. MBA assignment no 3, The Blue MBA, Copenhagen Business School.

[6] Container Supply Review, (2011), World Shipping Council

[7] Corbett, J. J. H. W. Köhler (2003). *"Updated emissions from ocean shipping"*, Journal of Geophysical Research, 108.

[8] Corbett, J., Wang, H. and Winebrake, J. (2009) *"The effectiveness and costs of speed reductions on emissions from international shipping"*, Transportation Research Part D (14): 593-598

[9] P. Crist, (2009) *"Greenhouse Gas Emissions Reduction Potential from International Shipping"*, Joint Transport Research Centre of the OECD and the International Transport Forum Discussion Paper No. 2009-11

[10] Cullinane, K and Khanna, M (1999) *"Economies of scale in large container ships"*. Journal of Transport Economics and Policy 33(2): 185–208.

[11] Deb, K., Evolutionary algorithms for multi-criterion optimization in engineering design, in *Evolutionary Algorithms in Engineering and Computer Science*, C. Miettinen, M. M. Makella, P. Niettananmaki, and J. Pieraux (editors), Ch. 8, 135-161, John Wiley & Sons, New York, 1999b.

[12] Devanney J. (2010) *"Efficient, Safe Reduction of CO_2 Emissions from Shipping"*, Center for Tankship Excellence

[13] Devanney J.,(2010) *"CO_2 Emissions from Ships: the Case for Taking our Time"*, Center for Tankship Excellence

[14] ECCP WG Ships – Meeting 2 on 22-23 June 2011 Background Document prepared by John Maggs (Seas at Risk) 1 Speed Limits for Ships

[15] Eefsen, T. and Cerup-Simonsen, B. (2010), *"Speed, carbon emissions and supply chain in container shipping"*, Proceedings of the International Association of Maritime Economists Conference, Lisbon, 7-9 July 2010.

[16] European Commission, (October 2009), "*Terminal handling charges during and after the liner conference era"*

[17] Faber, J., Freund, M., Köpke, M. and Nelissen, D. (2010) *"Going slow to reduce emissions. Can the current surplus of maritime transport capacity be turned into an opportunity to reduce GHG emissions?"* Sea at Risk publishing, viewed August 2010, http://www.seas-at-risk.org/1mages/speed%20study_Final%20version_SS.pdf

[18] Fonseca, C. M., and P. J. Fleming, *"An overview of evolutionary algorithms in multiobjective optimization, Evolutionary Computation"*, 3(1), 1-16, (1995)

[19] Globalisation, Transport and the Environment OECD (2010)

[20] Marine Department Planning, Development and Port Security Branch, December (2006), *''Port Benchmarking for Assessing Hong Kong's Maritime Services and Associated Costs with other Major International Ports''*.

[21] Markowitz H. M., Portfolio Selection, (Blackwell, Edition 1991)

[22] Marpol 73/78 Annex VI Regulations for the Prevention of Air Pollution from Ship

[23] Mitchell, M. (2001) *"An Introduction to Genetic Algorithms"*. Cambridge, MA and London, England: The MIT Press.

[24] Notteboom, T.E. Vernimmen, B. (2009). *"The effect of high fuel costs on liner service configuration in container shipping"*. Journal of Transport Geography, 17, pp 325-337.

[25] Palisade Corporation, (2009), "*2009 Guide to Using Evolver The Genetic Algorithm Solver for Microsoft Excel Version 5.5"*

[26] Papadakis, N.A. and Perakis, A.N. (1989) *"A nonlinear approach to multi-origin, multi-destination fleet deployment problem"*. Naval Research Logistics 36: 515–528.

[27] Perakis, A.N. and Jaramillo, D.I. (1991) *"Fleet deployment optimization for liner shipping"*. Part 1. background, problem formulation and solution approaches.

[28] Maritime Policy & Management 18(3): 183–200., Part 2. implementation and results. Maritime Policy & Management 18(4): 235–262.

[29] Perakis, A.N. and Papadakis, N.A. (1987) *"Fleet deployment optimization models"*. Maritime Policy & Management 14: Part 1 :127–144, Part 2: 145–155.

[30] The Platou Report (2011), (2012), RS Platou

[31] Psaraftis, H.N., Kontovas, C.A. *"Balancing the Economic and Environmental Performance of Maritime Transportation"*, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 15, Issue 8, December 2010, Pages 458-462

[32] Psaraftis, H.N. C.A. Kontovas (2008). *"Ship Emissions Study"*. National Technical University of Athens, report to Hellenic Chamber of Shipping, http://www.martrans.org/emis/emis.htm .

[33] Psaraftis, H.N. C.A. Kontovas (2009a) *."CO_2 Emissions Statistics for the World"* Commercial Fleet. WMU Journal of Maritime Affairs 8(1), 1-25.

[34] Psaraftis, H.N. C.A. Kontovas, C.A (2009b)*."Green Maritime Logistics: Cost effectiveness of Speed Reductions and other Emissions Reduction Measures"*. MLOG 2009, The International Symposium on Maritime Logistics and Supply Chain Systems 2009, Singapore, April 23–24.

[35] Psaraftis, H.N. C.A. Kontovas, C.A. (2009c*)."Ship Emissions: Logistics and Other Tradeoffs"*. 10th Int. Marine Design Conference (IMDC 2009), Trondheim, Norway, 26-29 May.

[36] Psaraftis, H.N., Kontovas, C.A., Kakalis N. (2009) *"Speed Reduction as an Emissions Reduction Measure for Fast Ships"*,10th Int. Conference on Fast Transportation (FAST 2009), Athens, Greece, 5-8 October

[37] Harilaos N. Psaraftis Slow steaming vs. speed limits ECCP II Ships / GHG 22-23/6/ 2011

[38] Psaraftis, H.N., Kontovas, C.A. (2010), *"Ship Emissions, Costs and their Tradeoffs"*, in Advances in Maritime Logistics and Supply Chain Systems, World Scientific Publishing, Singapore.

[39]Kontovas C.A., Psaraftis H.N., (2010a),*"Reduction of Emissions Along the Intermodal Container Chain"*, Proc. 2010 Annual Conference of the International Association of Maritime Economists (IAME), July 2010, Lisbon, Portugal.

[40] Kontovas C.A., Psaraftis H.N., (2010b), *"Carbon Dioxide Emissions Valuation and its Uses"*, Proc. 3rd International Symposium on Ship Operations, Management &

Economics of the Society of Naval Architects an Marine Engineers (SNAME), 7-8 October, Athens, Greece.

[41] Kontovas, C.A., Psaraftis, H.N. (2011), *"Climate Change Policy in Shipping Focusing on Emission Standards and Technology Measures"*, Environmental Engineering and Management Journal, Volume 10, Issue 10, pp.1589-1596, October 2011.

[42] Kontovas, C.A., Psaraftis, H.N. (2011), *"The Link Between Economy and Environment in the Post-Crisis Era: Lessons Learned from Slow-Steaming"*, European Conference on Shipping, Chios, Greece, Intermodalism & Ports (ECONSHIP2011), June 22-24, 2011

[43]Review of Maritime Transport (2011), United Nations Conference on Trade and Development

[44] Ronen D., (2011) *''The effect of oil price on containership speed and fleet size''*, Journal of the Operational Research Society 62, 211 –216.

[45] Ship Speed Limits conference, Brussels, 4 October 2011:

1. Practical Issues and Ultraslow Ships Germanischer Lloyd
2. (Super) slow steaming: The Maersk experience Jan Otto de Kat Maersk Maritime technology
3. Mandatory Speed Limits: An Industry Survey *Galen Hon, Marine Program Lead ICCT*
4. Slow steaming 2011 James J. Corbett, Slow Steaming Overview of Selected US Ports Starcrest consulting group LLC

[46] *"Slow steaming, A transient fashion or here to stay?"*, August 2010 Dynamar B.V.

[47] R. Stahlbock, S. Vob,(2012) *"Slow Steaming in Container Shipping"* 2012 45th Hawaii International Conference on System Sciences

[48] Stopford, M. (2009), Maritime Economics, 3rd Edition. Routledge.

[49]Technical Brief on Slow Steaming (Mar. 2009), Maersk Line

[50] Veldman S. , Glansdorp C. , Maranbv F. , Kok R. ,(2011) *"Economies of size of large containerships based on internal and external costs"*.

[51] Wartsila Corp. Upgrade kit slow steaming RTA , RT -flex. Wartsila Engine Services,http://www.infomarine.gr/attachments/060_Wartsila Upgrade_Kit_Slow_Steaming_RTA_RT_flex.pdf, 2009. Last access June 8, 2011.

[52] P. G . Zacharioudakis , S. Iordanis , D.V. Lyridis and H . N .Psaraftis (2011) *"Liner shipping cycle cost modeling, fleet deployment optimization and what-if analysis"* , Maritime Economics & Logistics Vol. 0, 0, 1–20

Ελληνική βιβλιογραφία

Σ.Λυκοθανάσης (2001), Γενετικοί Αλγόριθμοι και Εφαρμογές, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών.

Χ Ν. Ψαραύτης (2005), Οικονομική θαλάσσιων μεταφορών.

Α. Ευστρατιάδης και Δ. Κουτσογιάννης (2004), Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, ΕΜΠ, pdf.

Ιστοσελίδες

- *www.nol.com.sg*
- *www.apl.com*
- *www.palisade.com/evolver*
- *www.alphaliner.com*
- *www.ships.gr*
- *www.martrans.com*
- *www.imo.org*
- *www.containership-info.com*
- *www.bimco.org*
- *www.clarkson.com*
- *www.wartsila.com*
- *www.mandieselturbo.com*
- *www.maerskline.com*

IMO

MEPC 58th session Agenda item 4 MEPC 58/4 4 July 2008 PREVENTION OF AIR POLLUTION FROM SHIPS Report of the outcome of the first Intersessional Meeting of the Working Group on Greenhouse Gas Emissions from Ships

IMO (2008) Report of the Drafting Group on amendments to MARPOL Annex VI and the NOx Technical Code, MEPC 58/WP.9., 2008

IMO. Liaison with the Secretariats of UNFCCC and IPCC concerning the Carbon to CO_2 conversion factor, MEPC 58/4/3. (2008).

IMO. The impact of sulphur limits on ferry operations in Northern Europe, INTERFERRY, MEPC 58/5/11. (2008).

IMO, (2009), Document MEPC 59/4/25- Positive Aspects of a Global Emission Trading Scheme for International Shipping, Submitted by France, Germany and Norway, International Maritime Organization.

IMO, (2010a), Document MEPC 60/4/8 - An International Fund for Greenhouse Gas emissions from ships, Submitted by Cyprus, Denmark, the Marshall Islands, Nigeria and IPTA, International Maritime Organization.

IMO, (2010b), Document MEPC 60/4/22 - A further outline of a Global Emission Trading System (ETS) for International Shipping, Submitted by Norway, International Maritime Organization.

IMO, (2010c), Document MEPC 60/4/26 - A global emissions trading system for greenhouse gas emissions from international shipping, Submitted by United Kingdom, International Maritime Organization.

IMO (2010d), Document MEPC 60/4/26 - Comments on the EEDI Baseline Formula, Submitted by Greece, International Maritime Organization.

REVIEW OF PROPOSED MBMs Grouping and evaluation of proposed MBMs Submitted by Greece GHG-WG 3/3 24 February 2011

MEPC 61st session Agenda item 5 MEPC 61/INF.2 13 August 2010 REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS Full report of the work undertaken by the Expert Group on Feasibility Study and Impact Assessment of possible Market-based Measures

MEPC 62 INF 7, Marginal Abatement Costs and Cost Effectiveness of Energy-Efficiency Measures, 25 March 2011

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

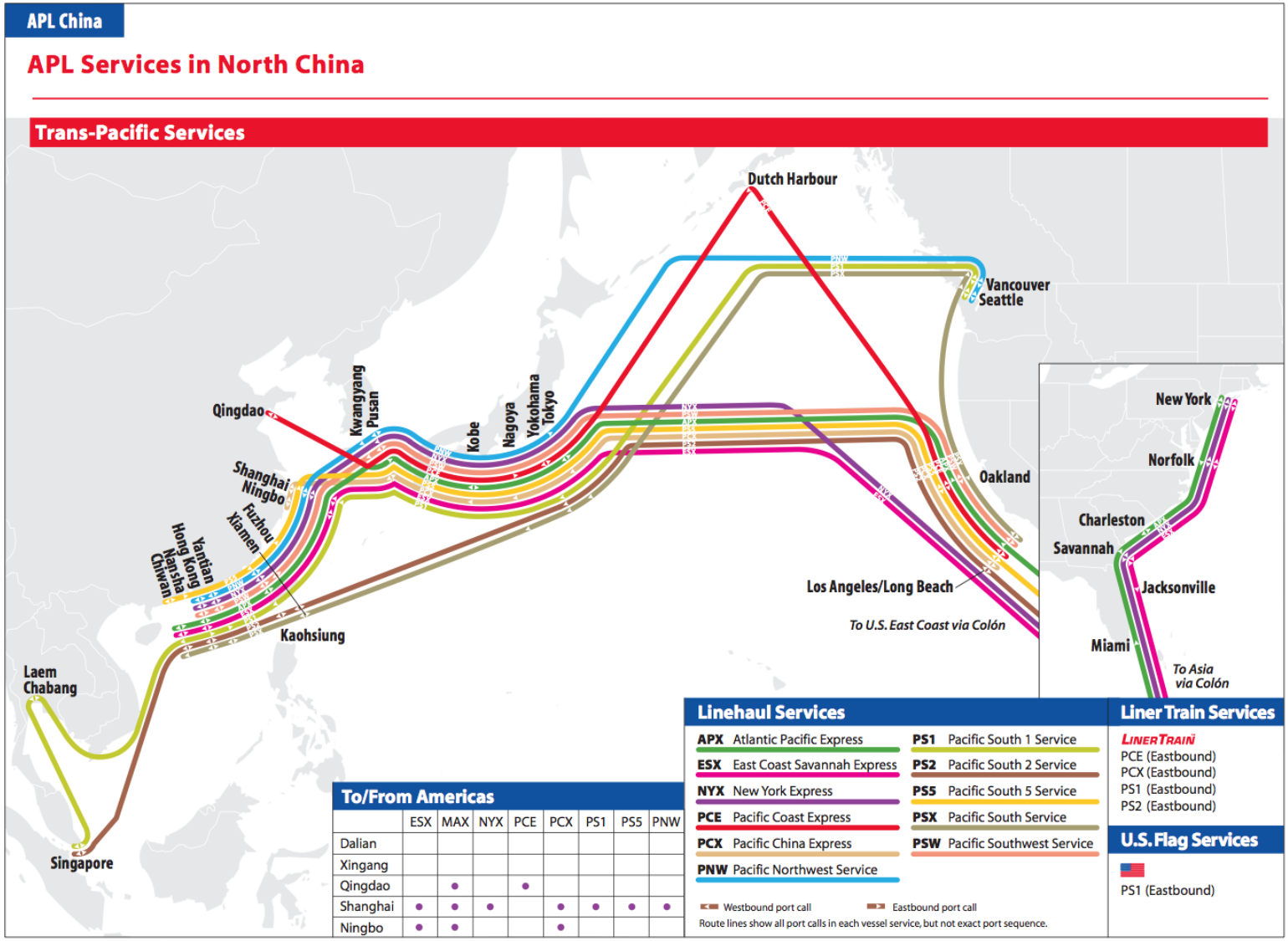
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

TopRank top 50 optimal solutions (“on time performance”)

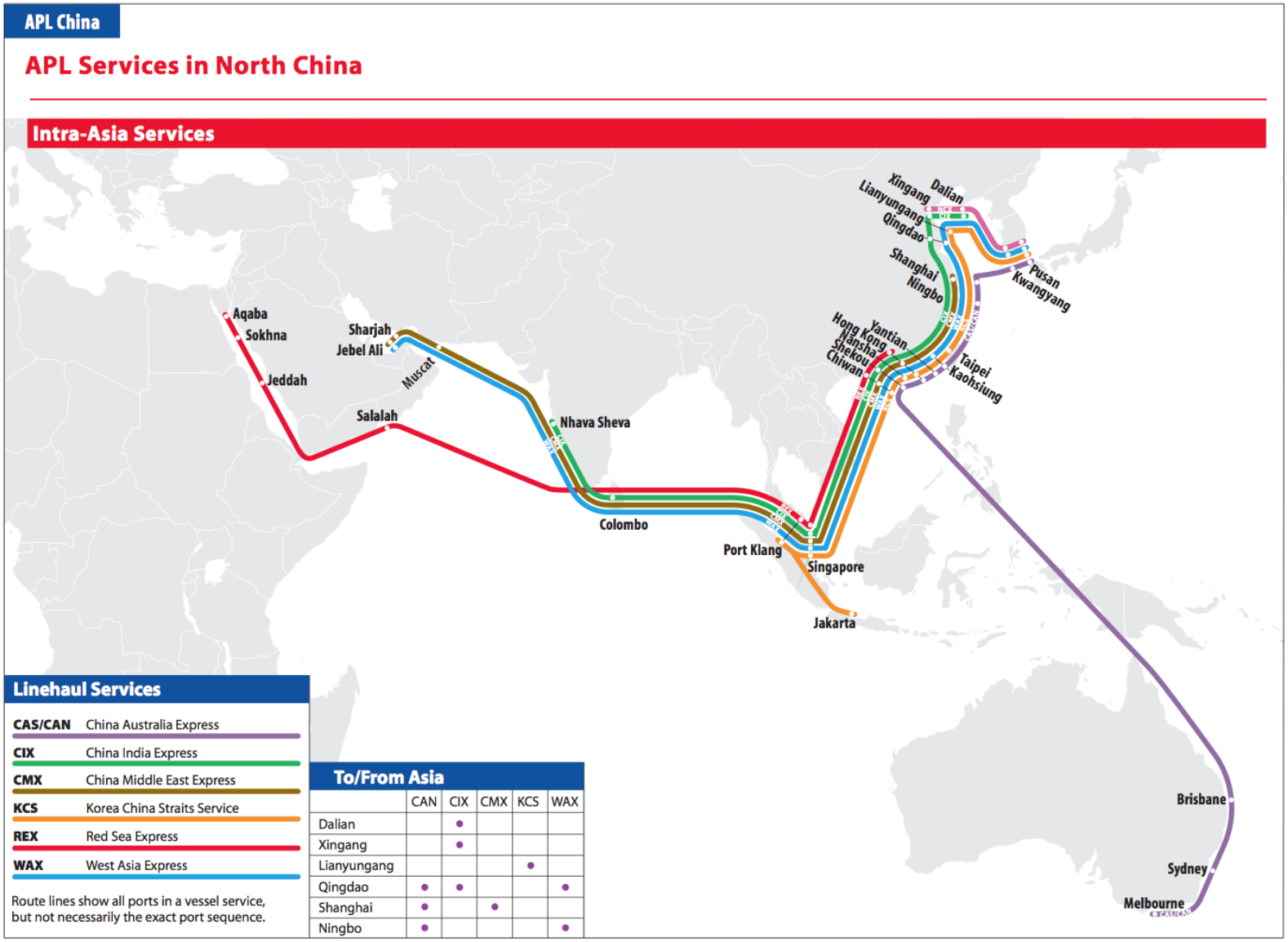
					Main Line			Feeder line 1			Feeder line 2		
#	Total Cost	CO2 Emissions	Nox Emissions	SOx Emissions	No. of Vessels	Vessels	Speed	No. of Vessels	Vessels	Speed	No. of Vessels	Vessels	Speed
1	314.127.019,40	240.077,99	5.982,77	4.602,13	7	APL Argentina	14	1	APL Argentina	12	1	APL Balboa	11
2	314.641.143,04	243.657,80	6.071,98	4.670,76	7	APL Argentina	14	1	APL Amazonite	12	1	APL Balboa	11
3	315.357.403,99	242.308,46	6.038,36	4.644,89	7	APL Argentina	14	1	APL Argentina	13	1	APL Balboa	11
4	315.575.552,49	233.604,02	5.821,44	4.478,03	6	APL Atlanta	14	1	APL Argentina	12	1	APL Balboa	11
5	315.689.598,51	242.683,71	6.047,71	4.652,08	7	APL Argentina	14	1	APL Atlanta	12	1	APL Balboa	11
6	315.842.778,05	245.755,95	6.124,27	4.710,98	7	APL Argentina	14	1	APL Amazonite	13	1	APL Balboa	11
7	315.920.593,86	243.746,96	6.074,21	4.672,47	7	6 APL Argentina + 1 APL Atlanta	14	1	APL Argentina	12	1	APL Balboa	11
8	316.069.321,12	245.346,34	6.114,06	4.703,12	7	APL Argentina	14	1	APL Argentina	12	1	APL Balboa	12
9	316.089.676,12	237.183,84	5.910,65	4.546,66	6	APL Atlanta	14	1	APL Amazonite	12	1	APL Balboa	11
10	316.128.464,70	243.643,26	6.071,62	4.670,48	7	6 APL Argentina + 1 APL Arabia	14	1	APL Argentina	12	1	APL Balboa	11
11	316.218.858,49	231.531,98	5.769,81	4.438,31	7	APL Argentina	14	1	APL Argentina	12	1	APL Argentina	11
12	316.343.062,42	233.317,02	5.814,29	4.472,53	7	APL Argentina	14	1	APL Argentina	12	1	APL Amazonite	11
13	316.434.717,50	247.326,78	6.163,41	4.741,09	7	6 APL Argentina + 1 APL Atlanta	14	1	APL Amazonite	12	1	APL Balboa	11
14	316.532.986,53	245.505,25	6.118,02	4.706,17	7	APL Argentina	14	1	APL Arabia	12	1	APL Balboa	11
15	316.563.683,26	244.725,63	6.098,59	4.691,23	7	APL Argentina	14	1	APL Argentina	14	1	APL Balboa	11
16	316.583.444,76	248.926,16	6.203,27	4.771,75	7	APL Argentina	14	1	APL Amazonite	12	1	APL Balboa	12
17	316.642.588,34	247.223,08	6.160,83	4.739,10	7	6 APL Argentina + 1 APL Arabia	14	1	APL Amazonite	12	1	APL Balboa	11
18	316.732.982,13	235.111,79	5.859,02	4.506,94	7	APL Argentina	14	1	APL Amazonite	12	1	APL Argentina	11
19	316.805.937,07	235.834,50	5.877,03	4.520,79	6	APL Atlanta	14	1	APL Argentina	13	1	APL Balboa	11
20	316.822.777,53	232.981,82	5.805,94	4.466,11	6	APL Arabia	14	1	APL Argentina	12	1	APL Balboa	11
21	316.857.186,06	236.896,83	5.903,50	4.541,15	7	APL Argentina	14	1	APL Amazonite	12	1	APL Amazonite	11
22	316.981.914,99	245.199,25	6.110,40	4.700,31	7	APL Argentina	14	1	APL Atlanta	13	1	APL Balboa	11
23	317.010.085,48	247.993,73	6.180,04	4.753,87	7	APL Argentina	14	1	APL Amazonite	14	1	APL Balboa	11
24	317.138.131,60	236.209,74	5.886,38	4.527,98	6	APL Atlanta	14	1	APL Atlanta	12	1	APL Balboa	11

25	317.291.311,14	239.281,98	5.962,94	4.586,88	6	APL Atlanta	14	1	APL Amazonite	13	1	APL Balboa	11
26	317.299.705,70	247.576,82	6.169,65	4.745,88	7	APL Argentina	14	1	APL Argentina	13	1	APL Balboa	12
27	317.336.901,17	236.561,64	5.895,15	4.534,73	6	APL Arabia	14	1	APL Amazonite	12	1	APL Balboa	11
28	317.449.243,07	233.762,45	5.825,39	4.481,07	7	APL Argentina	14	1	APL Argentina	13	1	APL Argentina	11
29	317.517.854,20	238.872,38	5.952,73	4.579,02	6	APL Atlanta	14	1	APL Argentina	12	1	APL Balboa	12
30	317.573.447,01	235.547,49	5.869,87	4.515,29	7	APL Argentina	14	1	APL Argentina	13	1	APL Amazonite	11
31	317.631.900,23	247.952,06	6.179,00	4.753,07	7	APL Argentina	14	1	APL Atlanta	12	1	APL Balboa	12
32	317.643.505,00	234.417,60	5.841,72	4.493,63	7	APL Argentina	14	1	APL Argentina	12	1	APL Argentina	12
33	317.667.391,57	225.058,01	5.608,47	4.314,21	6	APL Atlanta	14	1	APL Argentina	12	1	APL Argentina	11
34	317.699.532,73	233.760,69	5.825,35	4.481,04	7	APL Argentina	14	1	APL Argentina	12	1	APL Atlanta	11
35	317.714.168,33	247.415,94	6.165,64	4.742,80	7	5 APL Argentina + 2 APL Atlanta	14	1	APL Argentina	12	1	APL Balboa	11
36	317.720.236,27	235.984,12	5.880,75	4.523,66	7	APL Argentina	14	1	APL Argentina	12	1	APL Amazonite	12
37	317.754.949,77	247.334,23	6.163,60	4.741,23	7	APL Argentina	14	1	APL Argentina	15	1	APL Balboa	11
38	317.781.437,60	234.137,70	5.834,74	4.488,26	7	APL Argentina	14	1	APL Atlanta	12	1	APL Argentina	11
39	317.785.079,77	251.024,30	6.255,56	4.811,97	7	APL Argentina	14	1	APL Amazonite	13	1	APL Balboa	12
40	317.791.595,51	226.843,05	5.652,96	4.348,43	6	APL Atlanta	14	1	APL Argentina	12	1	APL Amazonite	11
41	317.820.431,79	247.998,38	6.180,15	4.753,96	7	APL Argentina	14	1	APL Arabia	13	1	APL Balboa	11
42	317.905.641,53	235.922,74	5.879,22	4.522,48	7	APL Argentina	14	1	APL Atlanta	12	1	APL Amazonite	11
43	317.922.039,17	247.312,24	6.163,05	4.740,81	7	5 APL Argentina + APL Arabia + APL Atlanta	14	1	APL Argentina	12	1	APL Balboa	11
44	317.934.617,14	237.209,94	5.911,30	4.547,16	7	APL Argentina	14	1	APL Amazonite	13	1	APL Argentina	11
45	317.981.519,62	239.031,29	5.956,69	4.582,07	6	APL Atlanta	14	1	APL Arabia	12	1	APL Balboa	11
46	318.012.216,34	238.251,67	5.937,26	4.567,12	6	APL Atlanta	14	1	APL Argentina	14	1	APL Balboa	11
47	318.012.432,95	235.200,96	5.861,24	4.508,64	7	6 APL Argentina + 1 APL Atlanta	14	1	APL Argentina	12	1	APL Argentina	11
48	318.031.977,84	242.452,19	6.041,94	4.647,65	6	APL Atlanta	14	1	APL Amazonite	12	1	APL Balboa	12
49	318.053.162,12	235.212,30	5.861,52	4.508,86	6	APL Arabia	14	1	APL Argentina	13	1	APL Balboa	11
50	318.058.821,07	238.994,98	5.955,79	4.581,37	7	APL Argentina	14	1	APL Amazonite	13	1	APL Amazonite	11

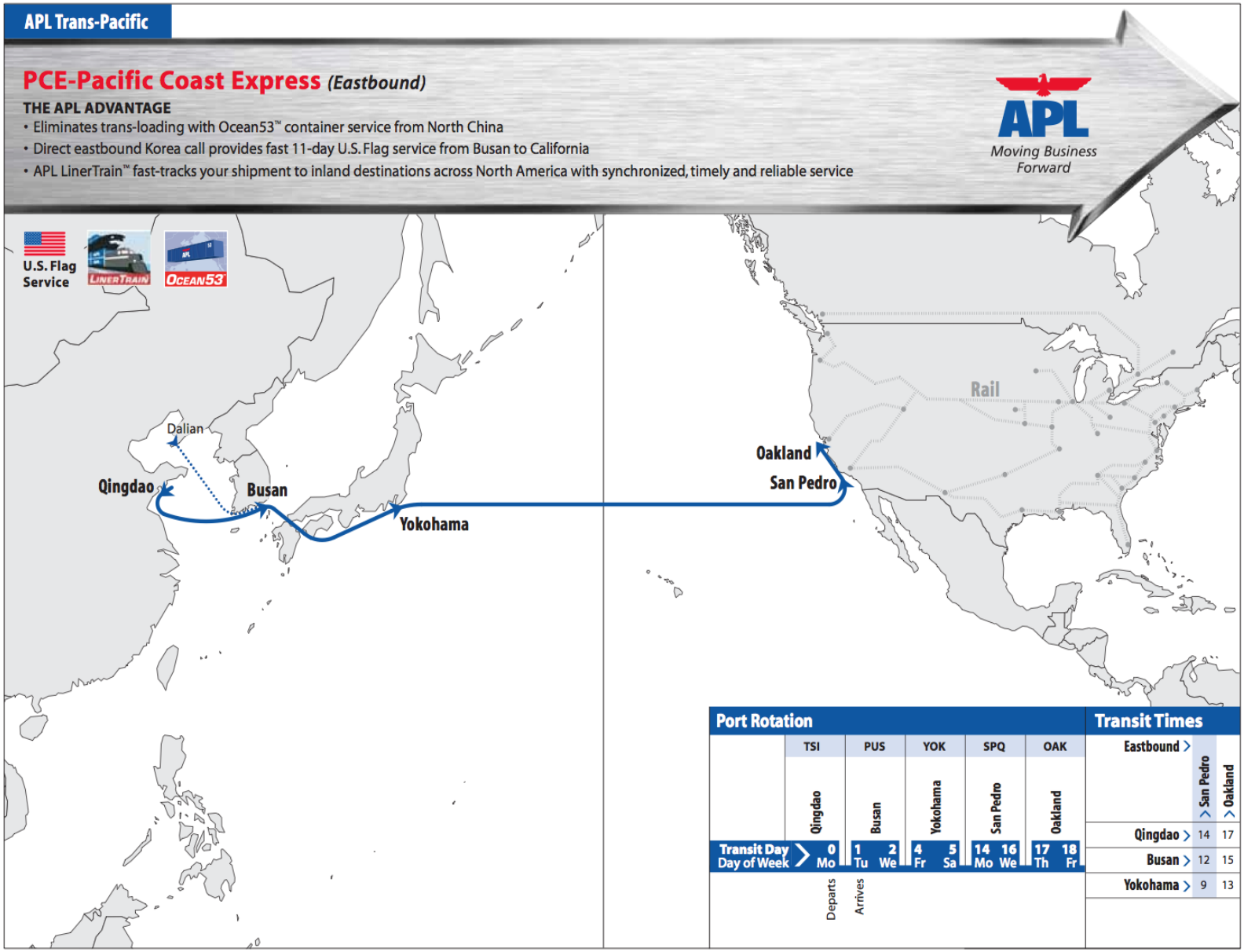
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ



Πίνακας 1 *: Overview of APL's Trans-Pacific services*



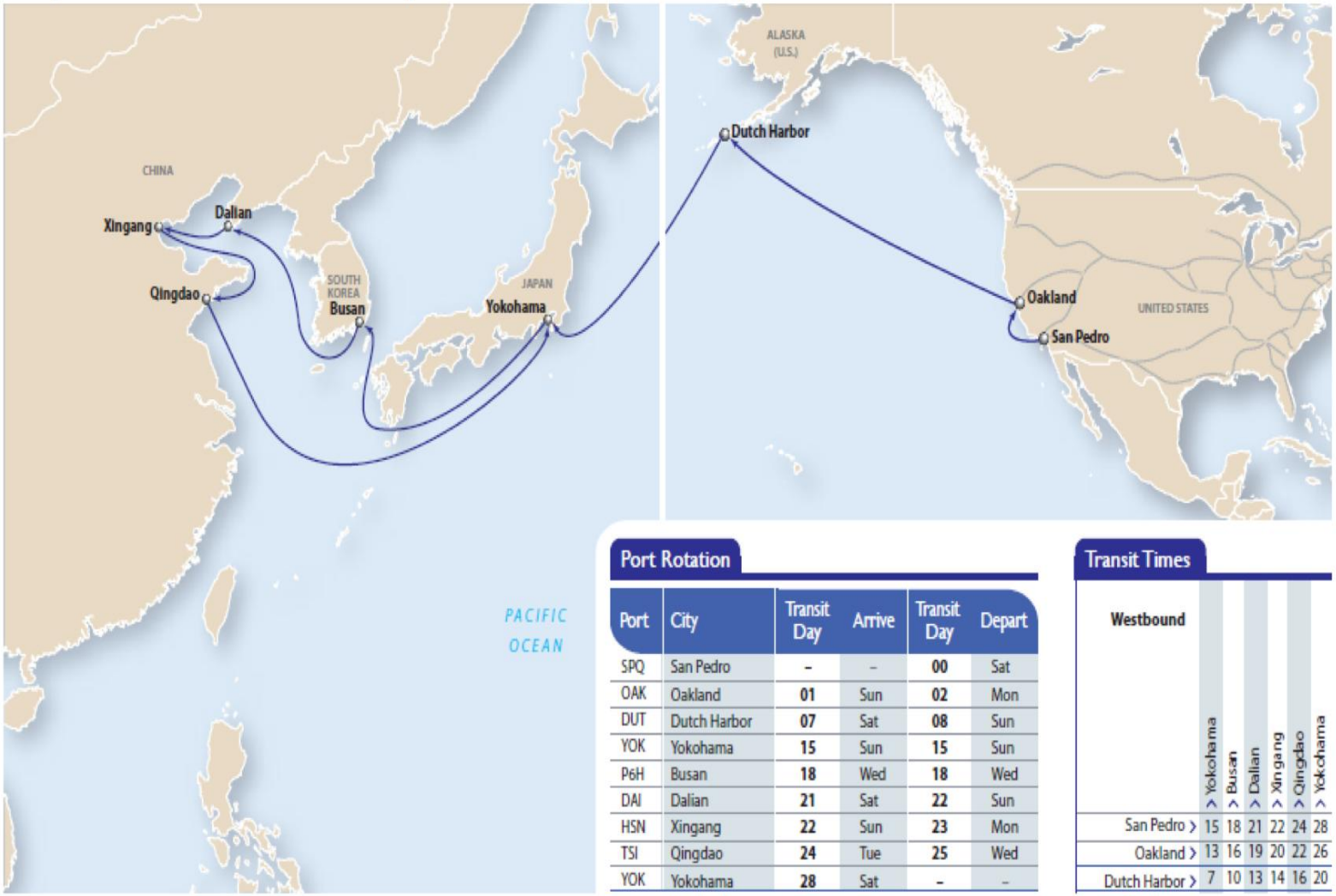
Πίνακας 2 *: Overview of Intra – Asia Linehaul Services*



Πίνακας 3 *: PCE – Pacific Coast Express (Eastbound leg)*

THE APL ADVANTAGE

- Extensive coverage to central China with our Qingdao call
- U.S. flag service with direct westbound calls in Japan
- Strong intermodal connections at both APL's Global Gateway South terminal in Los Angeles and Global Gateway Central in Oakland



Port Rotation

Port	City	Transit Day	Arrive	Transit Day	Depart
SPQ	San Pedro	–	–	00	Sat
OAK	Oakland	01	Sun	02	Mon
DUT	Dutch Harbor	07	Sat	08	Sun
YOK	Yokohama	15	Sun	15	Sun
P6H	Busan	18	Wed	18	Wed
DAI	Dalian	21	Sat	22	Sun
HSN	Xingang	22	Sun	23	Mon
TSI	Qingdao	24	Tue	25	Wed
YOK	Yokohama	28	Sat	–	–

Transit Times

Westbound	> Yokohama	> Busan	> Dalian	> Xingang	> Qingdao	> Yokohama
San Pedro >	15	18	21	22	24	28
Oakland >	13	16	19	20	22	26
Dutch Harbor >	7	10	13	14	16	20

Πίνακας 4 *: PCE – Pacific Coast Express (Westbound leg)*

THE APL ADVANTAGE

- Reliable, weekly service between Busan and major industrial ports in the Kyushu, Setouchi and Kagoshima regions
- Capable of handling a wide variety of equipment
- Weekly sailings connect to APL's global network via Busan

Transit Times

< Shibushi	< Hososhima	< Oita	< Ube	Outbound	Inbound	> Shibushi	> Hososhima	> Oita	> Ube
2	1	1	1	> Busan	Busan >	1	2	1	1
7	6	5	5	> Shanghai	Jebel Ali >	28	29	25	24
8	7	8	8	> Hong Kong	Nhava Sheva >	26	27	23	22
7	6	10	10	> Kaohsiung	Chennai >	25	26	22	21
17	16	20	20	> Laem Chabang	Calcutta >	25	26	22	21
23	22	19	19	> Ho Chi Minh City	Semerang >	18	19	15	14
15	14	14	14	> Singapore	Jakarta >	16	17	20	19
14	13	17	17	> Port Klang	Adelaide >	29	30	26	25
18	17	21	21	> Jakarta	Fremantle >	25	26	22	21
25	24	21	21	> Nhava Sheva	Melbourne >	29	30	33	32
27	26	23	23	> Jebel Ali	Kaohsiung >	9	10	13	12
34	33	32	32	> Rotterdam	Fuzhou >	12	13	9	8

Port Rotation

Port	City	Transit Day	Arrive	Transit Day	Depart
P6H	Busan	-	-	00	Sun
S4U	Shibushi	01	Mon	01	Mon
OOU	Hososhima	02	Tue	02	Tue
P6H	Busan	03	Wed	04	Thu
UBJ	Ube	04	Thu	05	Fri
JKO	Oita	05	Fri	06	Sat
P6H	Busan	06	Sat	-	-

Πίνακας 5 *: SKX – Setonai Kai Kyushu Express*

THE APL ADVANTAGE

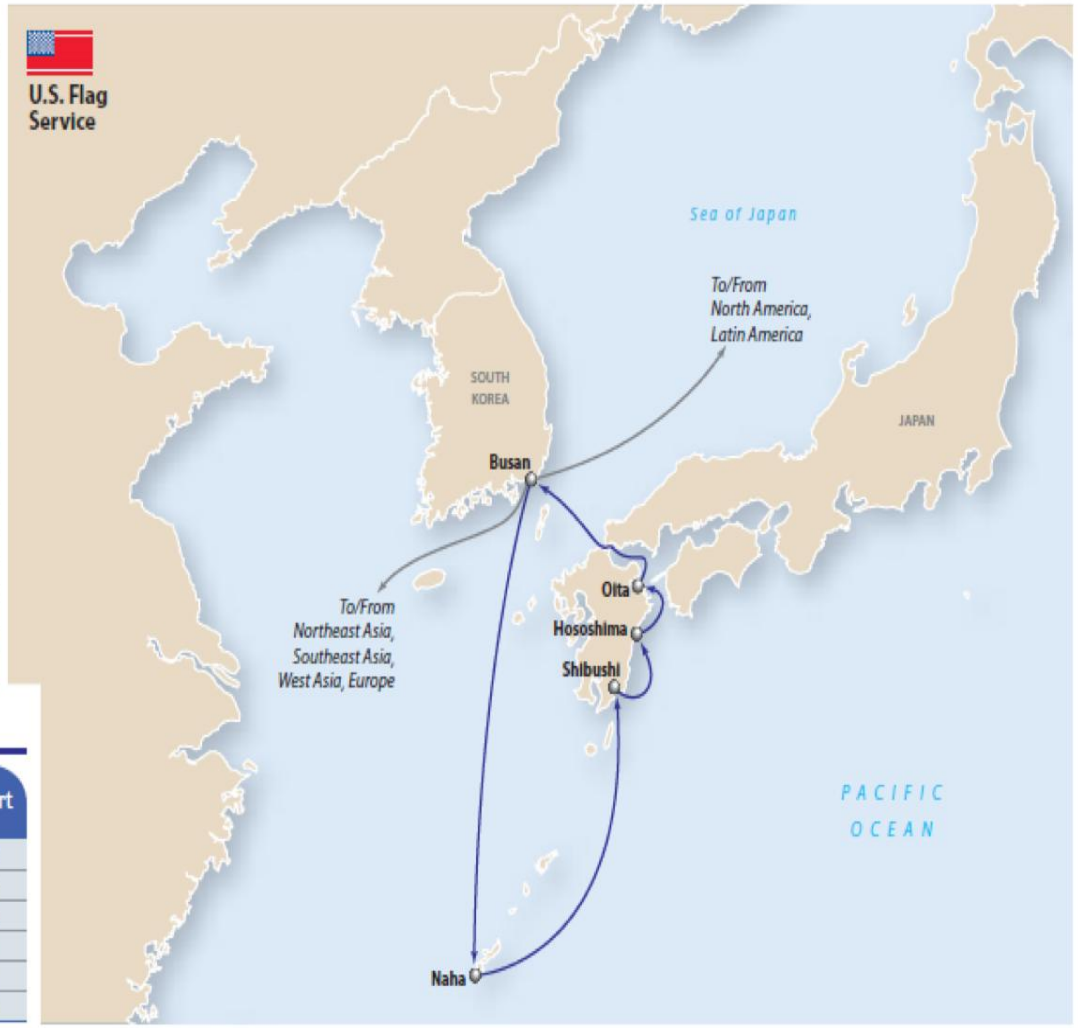
- Reliable, dedicated weekly U.S. flag service that calls directly at Busan and Naha
- Capable of handling a wide variety of equipment
- Connects to APL's global network via Busan
- Faster access to key markets such as Hong Kong and Taiwan

Transit Times

> Naha	> Shibushi	> Hososhima	> Oita	Inbound	Outbound	< Naha	< Shibushi	< Hososhima	< Oita
2	4	5	5	< Busan	Busan <	3	2	2	1
23	25	26	26	< Chennai	Fremantle <	26	25	25	24
10	12	13	13	< Chiwan	Hong Kong <	12	11	11	10
28	30	31	31	< Dammam	Jakarta <	23	22	22	21
23	25	26	26	< Fremantle	Jebel Ali <	23	22	22	21
10	12	13	13	< Hong Kong	Jeddah <	29	28	28	27
22	24	25	25	< Jebel Ali	Kaohsiung <	8	7	7	6
8	10	11	11	< Kaohsiung	Karachi <	24	23	23	22
17	19	20	20	< Port Klang	Nhava Sheva <	24	23	23	22
7	9	10	10	< Shanghai	Port Klang <	18	17	17	16
14	16	17	17	< Singapore	Qingdao <	9	8	8	7
18	20	21	21	< Surabaya	Sharjah <	27	26	26	25
					Singapore <	15	14	14	13
					Sokhna <	31	30	30	29
					Surabaya <	21	20	20	19

Port Rotation

Port	City	Transit Day	Arrive	Transit Day	Depart
PUS	Busan	-	-	00	Sun
NAH	Naha	02	Tue	02	Tue
S4U	Shibushi	04	Thu	04	Thu
OOU	Hososhima	05	Fri	05	Fri
JKO	Oita	05	Fri	05	Fri
PUS	Busan	06	Sat	06	Sat



Πίνακας 6 *: NKX – Naha Korea Express*

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ

SLOW STEAMING QUOTES*

Shippers

Whether shippers themselves actually understand the impact of Slow Steaming on their supply chains and the risk to the profitability of their businesses remains to be seen as well.
Shippers' Voice

Although most shippers would like faster transit times, they are not willing to pay above-market rates for them.
DHL

Shippers hardly took it seriously when carriers started managing capacity as they weren't convinced lines could implement this across so many different companies.
DHL

The shift to slow steaming may not be on the wish list of too many shippers.
Seeking Alpha

Slow Steaming, the popular cost cutter and environmental public relations play is not nearly so popular with shippers who see rates going up and transit times going down.
Seeking Alpha

Environment

Speed is an important parameter for shippers' transportation choice, and the environmental considerations are generally not yet a significant factor for mode of transportation.
Speed, Carbon Emissions and Supply Chain in Container Shipping

The logistical and opportunity costs for shippers having their cargo spending at least one additional week at sea lowers the quality of services and could, if a quick recovery of the world economy occurs, undermine Slow Steaming and its beneficial impact on CO2 emissions.
Pierre Cariou

More and more of our customers ask for clean, i.e. low-carbon, strings. This will probably be one of the tendencies in the years to come.
CMA CGM

Super Slow Steaming alone easily reduces the carbon footprint of a customer's whole annual supply chain by 13%.
Maersk Line

Transport by sea is still the most environmentally-friendly (or least polluting) form of transport and more cargo should be transferred from other transport modes.
N.N.

The exponential relationship between speed and fuel consumption means that even a modest reduction of a knot or two can save many tonnes of fuel a day.
Maersk Line

Logistics

There is a correlation between slower transit time and reduced reliability - on the basis that delays or the number of problems that can arise are proportional to the length of time something takes to happen.
Shipper's Voice

Slow Steaming may ultimately mean a shift from just-too-late to just-in-time.
N.N.

If you sell 100, that remains 100 to be carried, but the slower that goes, the more of the 100 will be en route at the same time.
N.N.

Longer transit times increase inventory tied up, which has a cost attached to it. In that sense, a tradeoff between slower transit times and reduced stock levels (by essentially storing on the transiting ships) does not make sense to me.
Michelin

We are committed to maintaining very precise transit times and dates of arrival in port. We realize that in exchange for lower speeds, the customer needs to have some rewards.
CMA CGM

The idea is to motivate Asian producers to ship their stuff to large logistics centres in the US and Europe, where henceforth the actual sales order will be placed.
De Lloyd

In the breakbulk times it took 10 working days before a vessel's full load of 9,000 tons of bagged cocoa beans from West Africa to Europe was discharged. The equivalent packed in some 600x 20' ventilated boxes takes less than 8 hours when using 3 ship-to-shore gantry cranes.
N.N.

When speed is reduced, the total transportation costs, including shipping and inventory costs, are generally increased.
Speed, Carbon Emissions and Supply Chain in Container Shipping

It does not help to have a very fast ship if you have a product sitting in a warehouse for a month.
N.N.

Carriers

So far, the benefits of Slow Steaming seem to be entirely skewed towards the carrier, in terms of fuel cost savings and capacity restriction, while shippers are hit with the double-whammy of having to pay more through higher rates and getting a worse standard of service.
Drewry

Container shipping is one of the few sectors of industry that believes that it can reduce service quality while simultaneously increasing prices and expect its shippers to accept this and additionally take the blame for the carriers misfortunes.
ESC

It seems that carriers are just not prepared to put their foot down on the accelerator if they fall behind schedule.
Drewry

Container lines deserve credit for cutting back global capacity and saving the industry from financial meltdown. Capacity has to fit the volumes and it is encouraging that all lines are now realising this.
UASC

Traditionally, liner ships have operated at speeds approaching their maximum. Vessels will most probably be ordered and designed during high market conditions where high speed is an important factor for maximizing profit.
Maersk Line

Carriers are keen to be seen as green.
N.N.

Fuel Consumption

Slow Steaming is here to stay and is not just a short-term response to high fuel prices.
APL

Slow steaming is a way to higher profitability.
Germanischer Lloyd

Container vessels have the most economical speed at 50% speed, which is equivalent to 10% engine load.
Maersk Line

High speed is a luxury in an expensive fuel era.
AXS-Alphaliner

In order to minimize the FO consumption and emissions per transported TEU it is important that the speed flexibility of the fleet is maximized.
Maersk Line

Future

It is reasonable to assume that the carbon emissions of transportation could in future be an important parameter for a shipper's transportation choice. In this case container ships with lower speeds than today's practice are an option, especially for low-value commodities.
Speed, Carbon Emissions and Supply Chain in Container Shipping

*Dynamar B.V (August 2010), *"Slow steaming, A transient fashion or here to stay?"*.