

Δίκτυο Ναυτιλίας Τακτικών Γραμμών

**Διπλωματική Εργασία
Προς
Εξεταστική Επιτροπή**

απο

Αρέκ Κεσίζ Αμπνούσι

**ΔΠΜΣ
ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΕΣ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ**

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΜΑΙΟΣ 2018**

COPYRIGHT © 2018 BY AREK KESIZ ABNOUSI



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ

ΔΠΜΣ «ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΕΣ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“Δίκτυο Ναυτιλίας Τακτικών Γραμμών”

Liner Shipping Network

AREK KESIZ ABNOUSI

Επιβλέπων Καθηγητής: Κολέτσος Ιωάννης,

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Εξεταστική Επιτροπή

Κολέτσος Ιωάννης

Κοκκίνης Βασίλειος

Καρώνη Χρυσής

Επίκουρος Καθηγητής

Επίκουρος Καθηγητής

Καθηγήτρια

Αθήνα, Μάιος 2018

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας κ. Κολέτσο Ιωάννη για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον αντικείμενο όπως και για την αμέριστη συμπαράσταση του, καθ' όλη τη διάρκεια υλοποίησής της παρούσας εργασίας.

Επίσης ευχαριστώ τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής, τον Επίκουρο Καθηγητή Κοκκίνη Βασίλειο και την Καθηγήτρια Καρώνη Χρυσή, για την αποτελεσματική συνεργασία και συμβολή τους στην ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τον αδερφό μου για την διαχρονική συμπαράσταση τους.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	4
Abstract.....	5
Κεφάλαιο 1^ο - Βασικές Έννοιες Ναυτιλίας Τακτικών Γραμμών.....	6
1.1 Η Εμπορική Ναυτιλία.....	6
1.2 Ναυτιλία Τακτικών Γραμμών–liner shipping.....	7
1.3 Μεγέθη Εμπορευματοκιβωτίων και Πλοίων.....	10
1.4 Η Αρχή της Ναυτιλίας Εμπορευματοκιβωτίων.....	12
1.5 Εταιρείες ναυτιλίας τακτικών γραμμών.....	13
1.6 Χώρες και ιδιοκτησία πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων.....	17
1.7 Πλεονεκτήματα Ναυτιλίας Τακτικών Γραμμών.....	18
Κεφάλαιο 2^ο Σχεδιασμός δικτύων.....	20
2.1 Το πρόβλημα Σχεδιασμού Δικτύου στην Ναυτιλία Τακτικών Γραμμών.....	20
2.2 Δίκτυα.....	23
2.2.1 Πρόβλεψη κατά το σχεδιασμό δικτύου.....	24
2.2.2 Παραδείγματα δικτύων.....	24
2.2.3 Η Ανάπτυξη ενός δικτύου ναυτιλίας τακτικών γραμμών.....	28
2.3 Περιουσιακά στοιχεία και υποδομή.....	30
2.3.1 Παράμετροι κατά την μεταφορά.....	30
2.3.2 Κόστος Μεταφοράς.....	32
2.3.3 Βελτιστοποίηση ταχύτητας.....	37
2.3.4 Λιμένας.....	38

2.3.5 Διώρυγες.....	39
2.3.6 Ζήτηση – Έσοδα και Σαμποτάζ.....	40
Κεφάλαιο 3ο Αλγόριθμοι και Μέθοδοι Βελτιστοποίησης.....	43
3.1 Μέθοδοι λύσης προβλημάτων βελτιστοποίησης.....	43
3.2 Υπολογιστική πολυπλοκότητα.....	45
3.3 Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός (MIP).....	48
3.3.1 Μέθοδος Διακλάδωσης και Οριοθέτησης (Branch-and-Bound) και MIP.....	50
3.4 Πρόβλημα Ροής Πολλαπλών Αγαθών–(MultiCommodity Flow Problem,MCFP).....	51
3.5 Μέθοδοι εσωτερικού σημείου (Interior point methods)	53
3.6 Many-to-Many Shortest Path Problem.....	54
3.7 Μέθοδος παραγωγής στήλης (Column Generation).....	55
3.8 Tabu search.....	57
Κεφάλαιο 4ο Μαθηματική μοντελοποίηση και επίλυση προβλήματος Ναυτιλίας Τακτικών Γραμμών.....	61
4.1 Εισαγωγή στο Μοντέλο	61
4.2 Μαθηματική Μοντελοποίηση.....	62
4.3 Τεχνική Επίλυσης.....	71
4.4 Δείκτης αναφοράς απόδοσης (Performance Benchmark).....	77
4.5 Συμπεράσματα.....	82
Βιβλιογραφία.....	83

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζεται και αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας της ναυτιλίας τακτικών γραμμών. Αρχικά, εισάγονται βασικές έννοιες της ναυτιλίας. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται οι τρόποι λειτουργίας και τα είδη διάφορων δικτύων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή δρομολογίων καθώς και οι παράμετροι που καθορίζουν την μορφή δικτύων μιας εταιρείας ναυτιλίας τακτικών γραμμών. Έπειτα αναλύονται ορισμένοι αλγόριθμοι που χρησιμεύουν στην λύση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Τέλος, παρουσιάζεται ένα ολοκληρωμένο μαθηματικό μοντέλο ναυτιλίας τακτικών γραμμών για την μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων το οποίο προέρχεται από το επιστημονικό άρθρο του Alvarez.

Αναλυτικότερα, στο **Κεφάλαιο 1** παρουσιάζουμε τους βασικούς τρόπους θαλάσσιας μεταφοράς εμπορευμάτων. Έπειτα επικεντρωνόμαστε σε έναν από αυτούς τους τρόπους που είναι και το αντικείμενο της εργασίας, την ναυτιλία τακτικών γραμμών. Αναφέρουμε τα είδη και τα μεγέθη των πλοίων και εμπορευματοκιβωτίων που χρησιμοποιούνται, τις πιο γνωστές εταιρείες ναυτιλίας και τα πλεονεκτήματα Ναυτιλίας Τακτικών Γραμμών.

Επιπρόσθετα, στο **Κεφάλαιο 2** ορίζουμε τα είδη περίπλοκων δικτύων όπως (line-bundling, hub-and-spoke, pendulum, butterfly κτλ.) και τα βήματα για τον τρόπο σχεδίασης δρομολογίων. Επιπλέον, παρουσιάζονται οι λειτουργίες, η δομή και οι παράμετροι κατά την μεταφορά, μιας εταιρείας ναυτιλίας τακτικών γραμμών.

Στο **Κεφάλαιο 3** ορίζουμε τις βασικές μαθηματικές έννοιες και αλγορίθμους από το χώρο της Επιχειρησιακής έρευνας και της επιστήμης των υπολογιστών. Αυτές οι μέθοδοι χρησιμοποιούνται στο επόμενο κεφάλαιο.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 4**, παρουσιάζουμε ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο καθορίζει το βέλτιστο δρομολόγιο. Παράλληλα, γίνεται ανάπτυξη του βέλτιστου εμπορικού στόλου για την μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων. Εν συνεχεία, παρουσιάζουμε μια τεχνική επίλυσης του μοντέλου μέσω μιας ευρετικής μεθόδου. Τέλος υλοποιούνται τρία πειράματα προκειμένου να συγκρίνουμε την απόδοση της ευρετικής μεθόδου με έναντι ενός γνωστού ακριβή αλγόριθμου, branch and bound, και ερμηνεύονται τα αποτελέσματα που βρέθηκαν.

Λέξεις Κλειδιά : Ναυτιλία τακτικών γραμμών, Μαθηματικός προγραμματισμός Σχεδιασμός δικτύων

Abstract

This thesis presents the functions of Liner shipping networks. It primarily introduces the basic concepts of liner shipping. Next, we introduce some network designs, as well as the parameters which are defining the formulation of a Liner Shipping Network. Afterwards we analyze algorithms which are useful in such solving optimization problems. Lastly, we present and analyze a remarkable design of a liner shipping network which was introduced by Alvarez.

In more detail, in **Chapter 1** we present the basic modes of maritime freight transport. We focus on one of those modes of operations, the liner shipping, which is also the scope of this thesis. We introduce the size and types of vessels and containers, the worldwide known liner shipping companies and the advantages of a liner shipping.

In **Chapter 2** we define different types of complex bundling networks (i.e. line-bundling, hub-and-spoke, pendulum, butterfly, etc.). These are the foundational concepts wherein we discuss the basic steps in order to design shipping networks, their planning horizons, their structure and the parameters which are defining the optimal routes of a liner shipping company.

In **Chapter 3** we define some essential mathematical programming concepts, which are used in the field of operational research and computer science. We will use these methods in the next chapter.

Finally, in **Chapter 4** we introduce a mathematical model in liner shipping network. This model aims to address two problems jointly. First, determining the optimal routing and deployment of a fleet of container vessels. Second, optimize this problem with specific solution techniques. Finally, we perform three sets of experiments in order to demonstrate the performance of our proposed heuristic algorithm against a known exact branch and bound algorithm, by using a benchmark. Ultimately, we discuss and interpret the results.

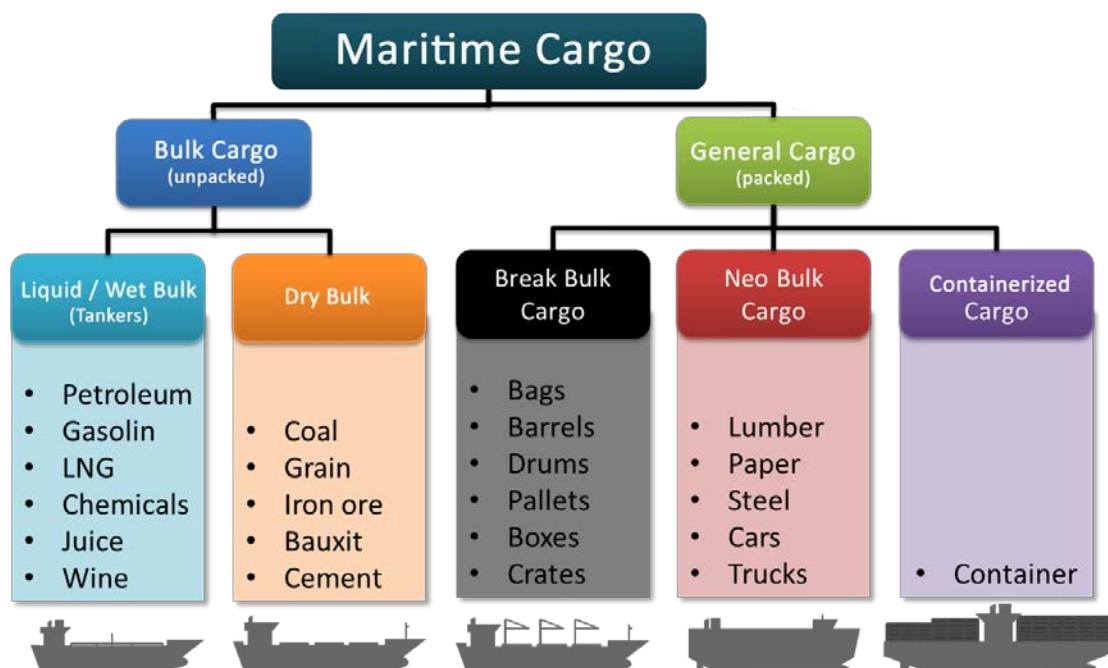
Keywords: Liner Shipping, Mathematical Programming, Network Design

Κεφάλαιο 1

Βασικές Έννοιες Ναυτιλίας Τακτικών Γραμμών

1.1 Η Εμπορική Ναυτιλία

Στην εποχή μας το μεγαλύτερο ποσοστό εμπορίου πραγματοποιείται μέσω της εμπορικής ναυτιλίας. Το 90% του παγκόσμιου εμπορίου γίνεται μέσω της ναυτιλιακής βιομηχανίας (Πηγή: ICS- Shipping International Chamber of Shipping). Στην παρακάτω εικόνα παρατηρούμε ορισμένα από τα φορτία που μεταφέρονται. Τα προϊόντα χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με το εάν είναι συσκευασμένα φορτία ή χύμα και έπειτα σε υποκατηγορίες ανάλογα με το είδος προϊόντος.



Εικόνα 1.1: Βασική δομή των διάφορων τύπων φορτίου που μεταφέρονται με θαλάσσιες μεταφορές.

Πάνω από το 50 % της αξίας του ναυτιλιακού εμπορίου μεταφέρεται μέσω εμπορευματοκιβωτίων (Containerized Cargo). Τα εμπορευματοκιβώτια μεταφέρουν κυρίως αγαθά που είναι απαραίτητα για την επιβίωση του ανθρώπου, και συμβάλουν στην βελτίωση του βιοτικού επιπέδου του.

Κύριος λόγος που το εμπόριο με την χρήση εμπορευματοκιβωτίων είναι κυρίαρχος τρόπος μεταφοράς αγαθών είναι η αποδοτικότητα του. Σαφέστερα, τα πλοία που μεταφέρουν εμπορευματοκιβώτια έχουν πολύ μεγάλη χωρητικότητα με αποτέλεσμα σε ένα μόνο ταξίδι να πραγματοποιείται η μεταφορά έως και 21 χιλιάδων εμπορευματοκιβωτίων. Η μεταφορά τόσο μεγάλης ποσότητας προϊόντων σε σχετικά μικρό χώρο είναι το κλειδί που το κάνει τόσο αποδοτικό τρόπο εμπορίου.

Επιπλέον, το μέγεθος εμπορευματοκιβωτίων είναι προκαθορισμένο παγκοσμίως. Επομένως, διευκολύνεται η άμεση φόρτωση και εκφόρτωση χωρίς την σπατάλη επιπλέον χρόνου. Παράλληλα, όπως θα δούμε στην συνέχεια, ο συγκεκριμένος τρόπος μεταφοράς είναι φιλικότερος προς το περιβάλλον σε σύγκριση με άλλους.

Το θαλάσσιο εμπόριο συνεχίζει να επεκτείνεται, επομένως οι προοπτικές για την ανάπτυξη του κλάδου συνεχίζουν να είναι μεγάλες. Στην εποχή μας υπάρχουν πάνω από 50.000 διεθνώς καταχωρημένα εμπορικά πλοία τα οποία μεταφέρουν κάθε είδος φορτίου σε πάνω από 150 χώρες, ενώ τα πλοία είναι επανδρωμένα με πάνω από 1 εκατομμύριο ναυτικούς, σχεδόν κάθε εθνικότητας.

1.2 Ναυτιλία Τακτικών Γραμμών – liner shipping

Οι δραστηριότητες θαλάσσιας μεταφοράς εξαρτώνται κυρίως από τις υπηρεσίες που έχει την δυνατότητα να προσφέρει ο εμπορικός στόλος. Γενικά υπάρχουν τρεις τρόποι μεταφοράς εμπορευμάτων μέσω πλοίων. Industrial, Tramp και **liner (τακτικές γραμμές)** (Lawrence, 1972).

Στην Industrial μεταφορά, ο ιδιοκτήτης του φορτίου έχει τον έλεγχο του πλοίου που μεταφέρει τα εμπορεύματα. Επομένως οι βιομηχανικοί φορείς είναι υπεύθυνοι για τη μεταφορά των φορτίων τους με το ελάχιστο δυνατό κόστος και να παραμένουν ταυτόχρονα κερδοφόρες. Ο δεύτερος τρόπος είναι η Tramp μεταφορά (Φορτηγά

πλοία). Αυτός ο τρόπος λειτουργεί σαν τα ταξί, αφού τα πλοία ακολουθούν τα διαθέσιμα φορτία. Μια ναυτιλιακή εταιρεία που ασχολείται με την ναυσιπλοΐα με ελεύθερα φορτηγά (Tramp Shipping) θα πρέπει να έχει έναν συγκεκριμένο αριθμό φορτίων που έχει δεσμευτεί να μεταφέρει, και παράλληλα θα πρέπει να μεγιστοποιήσει το κέρδος της με την μεταφορά προαιρετικών φορτίων (Christiansen et al., 2004). Αυτή η μέθοδος συνήθως χρησιμοποιείται για την μεταφορά άνθρακα, υγρών, υγροποιημένου φυσικού αερίου ή αργού πετρελαίου (Storford, 2009). Ο τρίτος τρόπος λειτουργίας, ναυτιλία τακτικών γραμμών (Liner shipping) αποτελεί το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.

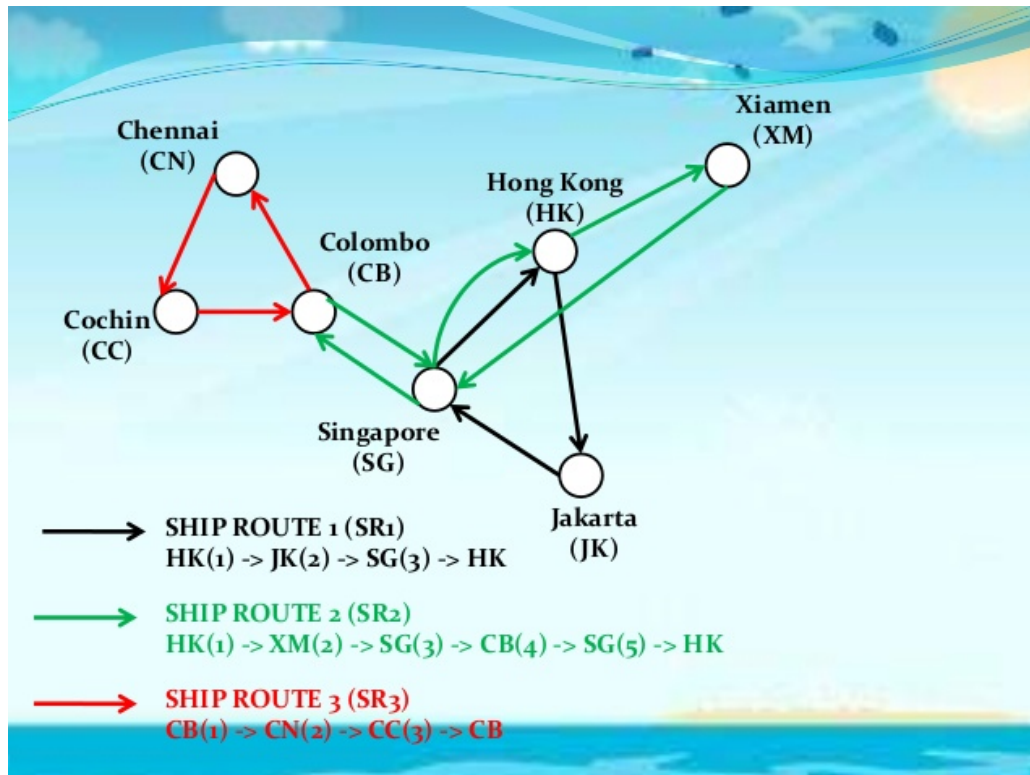
Η ναυτιλία τακτικών γραμμών (Liner shipping) περιλαμβάνει κυρίως την μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων (containerized cargo) (Εικόνα 1.2).



Εικόνα 1.2: Πλοίο τακτικών γραμμών μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (Liner container ship)

Όσον αφορά το τρόπο λειτουργίας της είναι ανάλογη με «λεωφορεία της θάλασσας». Λειτουργούν σύμφωνα με ένα χρονοδιάγραμμα, και ένα προκαθορισμένο δρομολόγιο. Ένα τέτοιο δρομολόγιο συνήθως διαρκεί 6 έως 8 εβδομάδες. Το μεγαλύτερο μέρος από αυτές κάνουν εβδομαδιαίες αναχωρήσεις ή ανά 15 μέρες. Τα δρομολόγια ναυτιλίας τακτικών γραμμών είναι υπηρεσίες μεταφοράς αγαθών σε πολύ μεγάλες

ποσότητες. Σήμερα υπάρχουν περίπου 400 υπηρεσίες τακτικών γραμμών (Liner services) σε λειτουργία (Πηγή : WSC – World Shipping Council)



Εικόνα 1.3: Κυκλικές διαδρομές εμπορευματοκιβωτίων στην ναυτιλία με τακτικές γραμμές. Παρουσιάζονται τρεις διαφορετικές διαδρομές από τρία διαφορετικά πλοία.

Οι τρεις μέθοδοι που περιγράψαμε (industrial , tramp , liner) δεν είναι ασυμβίβαστοι μεταξύ τους. Ένα πλοίο μπορεί να αλλάξει από μια μέθοδο μεταφοράς σε άλλο. Κατόπιν, μια ναυτιλιακή εταιρεία μπορεί να χρησιμοποιεί τα εμπορικά της πλοία με διαφορετικούς μεθόδους.

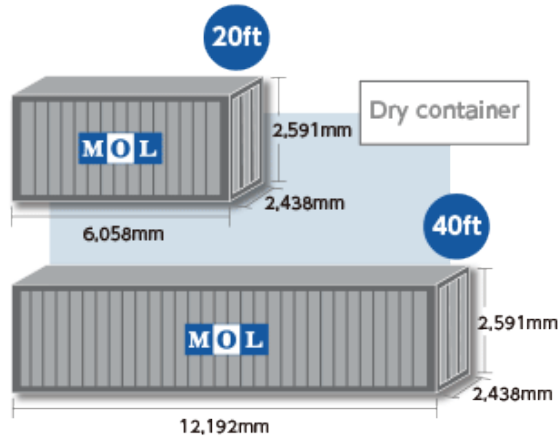
1.3 Μεγάθη Εμπορευματοκιβωτίων και Πλοίων

Σήμερα, πάνω από το 50 % της αξίας του ναυτιλιακού εμπορίου μεταφέρεται σε εμπορευματοκιβώτια (containers).



Εικόνα 1.4: Πάνω από την μισή αξία του παγκόσμιου ναυτιλιακού εμπορίου μεταφέρεται μέσω εμπορευματοκιβωτίων (Lloyd's Maritime Intelligence Unit)

Οπότε είναι πολύ σημαντικό να ορίσουμε τον τρόπο μέτρησης του μεγέθους πλοίων και εμπορευματοκιβωτίων. Η συνήθης μονάδα μέτρησης μεγέθους εμπορευματοκιβωτίων είναι το TEU. Ο όρος TEU προέρχεται από τις λέξεις «Twenty-Foot Equivalent Unit» (20ft) και είναι η μονάδα μέτρησης που προσδιορίζει το μέγεθος του εμπορευματοκιβωτίου. Όμως εκτός από το TEU, χρησιμοποιείται και η μονάδα μέτρησης μεγέθους «FEU» (Forty-Foot Equivalent Unit – 40ft), για τα εμπορευματοκιβώτια. Όπως παρουσιάζουμε στην κάτωθι Εικόνα 1.5, τα FEU έχουν ίδιο πλάτος και ύψος με τα TEU αλλά διπλάσιο μήκος. Συνεπώς, η χωρητικότητα ενός εμπορευματοκιβωτίου FEU ισούνται με 2 TEU.



Εικόνα 1.5: Βασικά μεγέθη εμπορευματοκιβωτίων (Πηγή: International Organization for Standardization, ISO)

Η χωρητικότητα ενός πλοίου μετρείται πάντα σε TEU. Για παράδειγμα, εάν ένα πλοίο έχει χωρητικότητα 500 TEU, αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να τοποθετήσουμε σε αυτό έως και 500 TEU εμπορευματοκιβώτια ή αντίστοιχα 250 FEU εμπορευματοκιβώτια.

Μέχρι τώρα ορίσαμε τον τρόπο μέτρησης της χωρητικότητας ενός πλοίου. Τώρα θα αναφέρουμε τις κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται τα πλοία που μεταφέρουν εμπορευματοκιβώτια, με βάση της χωρητικότητας τους. Τα πλοία που μεταφέρουν εμπορευματοκιβώτια διακρίνονται σε 7 κατηγορίες, όπως παρουσιάζουμε στον Πίνακα 1.1.

Name	Capacity (TEU)
Ultra Large Container Vessel (ULCV)	14,501 and higher
New panamax	10,000–14,500
Post panamax	5,101–10,000
Panamax	3,001 – 5,100
Feedermax	2,001 – 3,000
Feeder	1,001 – 2,000
Small feeder	Up to 1,000

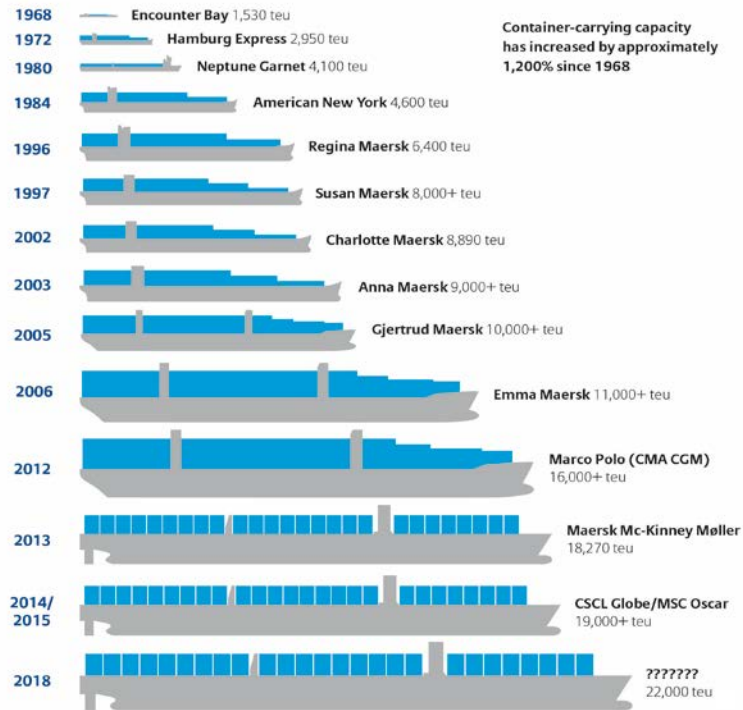
Πίνακας 1.1: Κατηγορίες πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων βάση της χωρητικότητας τους σε TEU (Stopford, 2009, σελ. 584).

Τα πλοία με χωρητικότητα (Capacity) 3000 TEU συνήθως ονομάζονται Feeders. Ορισμένες φορές τα πλοία Feeders εφοδιάζονται με φορτία από μικρότερα λιμάνια και τα μεταφέρουν σε μεγαλύτερα λιμάνια, έτσι ώστε να γίνει μεταφορά αυτών των φορτίων σε μεγαλύτερα πλοία.

1.4 Η Αρχή της Ναυτιλίας Εμπορευματοκιβωτίων

Η ναυτιλία με τακτικές γραμμές ήταν και είναι ένας σημαντικός τρόπος μεταφοράς εμπορευμάτων που εμφανίστηκε με την δημιουργία των ατμόπλοιων στο τέλος του 19ου αιώνα (Stopford, 2009). Η σύγχρονη ναυτιλία εμπορευματοκιβωτίων (Containerized Cargos) ξεκίνησε το 1961, όταν δημιουργήθηκε ένα διεθνές πρότυπο για το μέγεθος του εμπορευματοκιβωτίου (TEU). Έκτοτε αυτός ο τρόπος μεταφοράς αγαθών είχε σταθερή ανάπτυξη. Έτσι υπήρχε αύξηση του αριθμού των ναυτιλιακών εταιριών που εφάρμοζαν αυτό το τρόπο εμπορίου. Από το 1968 όταν ξεκίνησαν να λειτουργούν οι τακτικές γραμμές ναυτιλίας παρατηρήθηκε ραγδαία αύξηση της χωρητικότητας των πλοίων μεταφοράς κατά 1200%. Ο λόγος αυτής της αύξησης οφείλεται στο γεγονός ότι η αύξηση χωρητικότητας δημιουργεί αυξημένη λειτουργική απόδοση, παράλληλα είναι πιο φιλική προς το περιβάλλον.

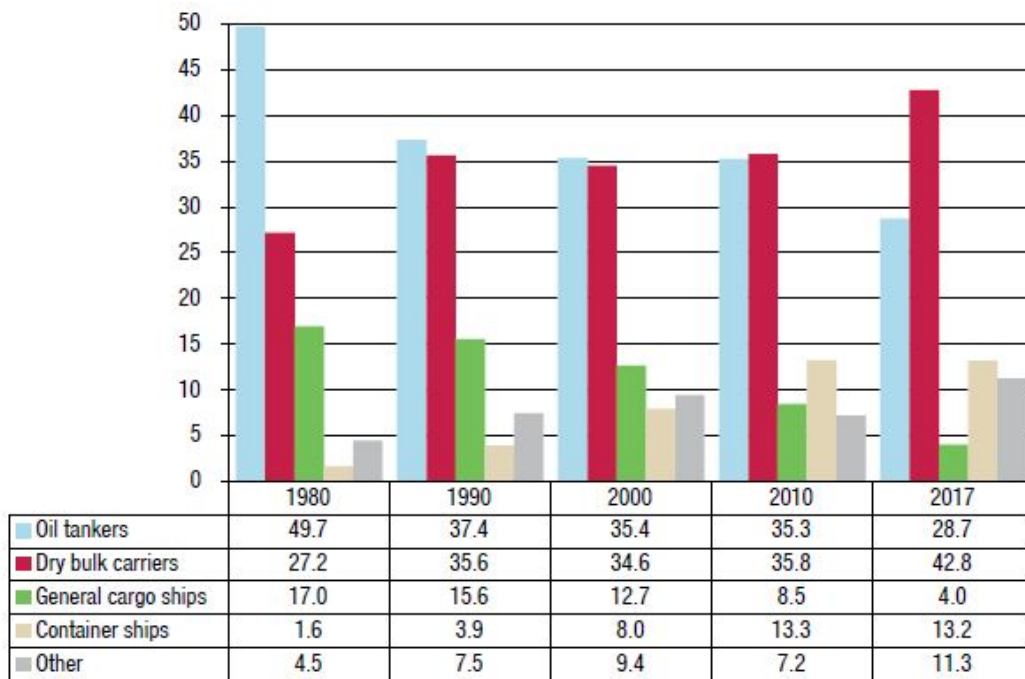
50 years of Container Ship Growth



Graphic: Allianz Global Corporate & Specialty.
Approximate ship capacity data: Container-transportation.com

Εικόνα 1.6: Η αύξηση της χωρητικότητας των πλοίων που μεταφέρουν εμπορευματοκιβώτια από το 1968 έως σήμερα (World Shipping Council, 2018).

Αυτό όπως είναι λογικό αύξησε το συνολικό ποσοστό βάρους των πλοίων που μεταφέρουν εμπορευματοκιβώτια. Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει το συνολικό ποσοστό βάρους των πλοίων που μεταφέρουν εμπορευματοκιβώτια σε σύγκριση με τις άλλες κατηγορίες πλοίων που κάνουν εμπόριο. Παρατηρούμε ότι το 1980, τα πλοία που μετέφεραν εμπορευματοκιβώτια κάλυπταν μόνο το 1.6 % του συνολικού βάρους των εμπορικών πλοίων ενώ το 2017 το 13.2 % του συνολικού βάρους .



Διάγραμμα 1.1: Ποσοστό παγκόσμιου συνολικού βάρους μεταφοράς βάση το τύπο σκάφους, 1980-2017 Πηγή: United Nations Conference on Trade And Development (UNCTAD)

1.5 Εταιρείες ναυτιλίας τακτικών γραμμών

Οι συγχωνεύσεις και εξαγορές στην βιομηχανία ναυτιλίας τακτικών γραμμών είχαν ως αποτέλεσμα τον έλεγχο του κλάδου ναυτιλίας τακτικών γραμμών (liner shipping) από έναν μικρό αριθμό εταιρειών. Παρατηρήθηκε μια συγκέντρωση της αγοράς, με λίγους κυρίαρχους μεταφορείς (Storford 2009). Όπως παρουσιάζουμε στο Πίνακα 1.2, οι 15 μεγαλύτερες εταιρείες της ναυτιλίας τακτικών γραμμών καλύπτουν το 85.4 % της συνολικής χωρητικότητας TEU των εμπορευμάτων που μεταφέρονται παγκοσμίως, ενώ οι πέντε μεγαλύτεροι μεταφορείς καλύπτουν το 61.3% .

Χωρητικότητα

Κατάταξη	Εταιρεία	TEU	%	Σ %
1	APM-Maersk	4,230,583	19.4	19.4
2	Mediterranean Shipping Company	3,190,790	14.7	34.1
3	CMA CGM Group	2,520,635	11.6	45.7
4	COSCO Shipping Co Ltd	1,856,725	8.5	54.2
5	Hapag-Lloyd	1,548,198	7.1	61.3
6	Evergreen Line	1,072,157	4.9	66.2
7	OOCL	698,747	3.2	69.4
8	Yang Ming Marine Transport Corp.	599,620	2.8	72.2
9	MOL	591,550	2.7	74.9
10	NYK Line	557,781	2.6	77.5
11	PIL (Pacific Int. Line)	395,644	1.8	79.3
12	Zim	377,315	1.7	81
13	K Line	368,559	1.7	82.7
14	Hyundai M.M.	343,663	1.6	84.3
15	Wan Hai Lines	246,786	1.1	85.4

Πίνακας 1.2: Οι 15 μεγαλύτεροι μεταφορείς εμπορευματοκιβωτίων τακτικών γραμμών , το Φεβρουάριο 2018. Το ποσοστό βασίζεται στο παγκόσμιο εμπορικό στόλο των **6,073** πλοίων και έχουν συνολική χωρητικότητα **21,778,499 TEU**, (<http://www.alphaliner.com/top100>).

Οι 15 μεγαλύτερες εταιρείες προέρχονται από 10 διαφορετικές χώρες. Παρακάτω στο Πίνακα 1.3, βλέπουμε την συνολική ποσότητα σε TEU που ελέγχει η κάθε χώρα. Παρατηρούμε ότι η APM-Maersk, εταιρεία Δανικής προέλευσης, διαθέτει την μεγαλύτερη χωρητικότητα από τις εταιρείες που μεταφέρουν εμπορευματοκιβώτια με το τρόπο τακτικών γραμμών. Ακολουθεί η Ελβετική Mediterranean Shipping Company. Μετά έρχονται οι Κινέζικες εταιρείες COSCO και Yang Ming Marine

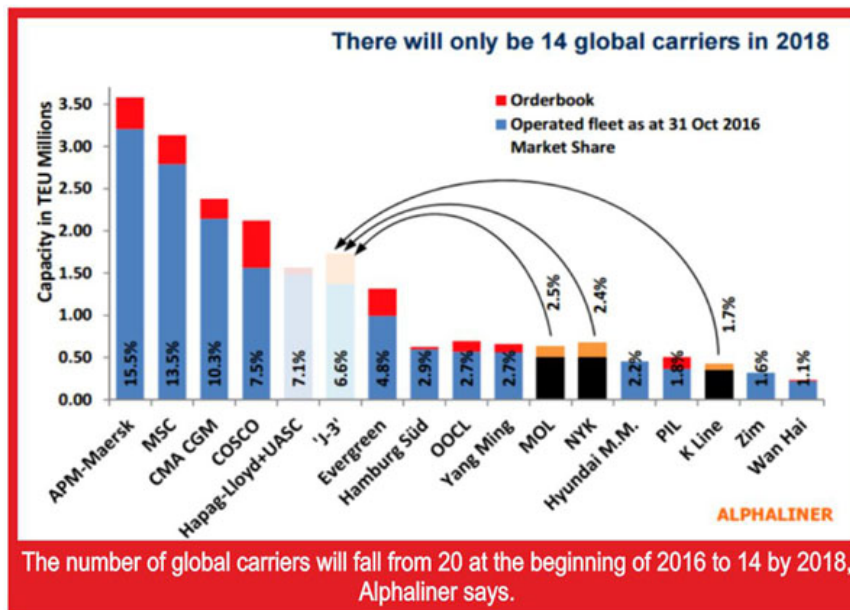
Transport Corp. Έπειτα σειρά έχει η Γαλλική CMA CGM Group που καλύπτει το 11.6% της παγκόσμιας χωρητικότητας .

Χωρητικότητα

Χώρα	TEU	%
Δανία	4,230,583	19.4
Ελβετία	3,190,790	14.7
Κίνα	2,555,472	11.7
Γαλλία	2,520,635	11.6
Ταϊβάν	1,918,563	8.8
Γερμανία	1,548,198	7.1
Ιαπωνία	1,517,890	7
Σιγκαπούρη	395,644	1.8
Ισραήλ	377,315	1.7
Νότια Κορέα	246,786	1.6

Πίνακας 1.3: Η συνολική χωρητικότητα που μεταφέρεται μέσω εταιριών της κάθε χώρας με την ναυτιλία τακτικών γραμμών. Οι 10 χώρες με τον μεγαλύτερο μέγεθος μεταφοράς σε TEU Φεβρουάριος 2018, (Πηγή: <http://www.alphaliner.com/top100>)

Όμως μέσα στο 2018 αναμένεται να υπάρξει μια συγχώνευση των τριών Ιαπωνικών εταιριών, K Line , NYK Line και MOL, και αυτή η νέα εταιρεία ναυτιλίας τακτικών γραμμών θα ονομάζεται J-3. Η J-3 θα ξεκινήσει την λειτουργία της το 2018 (πηγη-Alphaliner 2016). Σύμφωνα με τα σημερινά μας δεδομένα η J-3 θα διαθέτει συνολική χωρητικότητα μεταφοράς 1,517,890 TEU και θα καλύπτει το 7 % της παγκόσμιας χωρητικότητας των πλοίων ναυτιλίας τακτικών γραμμών. Θα προσπεράσει την Ταϊβανική Evergreen Line και θα γίνει ο 6ος μεγαλύτερος μεταφορέας εμπορευματοκιβωτίων τακτικών γραμμών. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η πρόβλεψη που είχε γίνει το 2016.



Διάγραμμα 1.2: Συγχώνευση τριών Ιαπωνικών εταιριών ναυτιλίας τακτικών γραμμών. Διαμόρφωση ποσοστού της καινούργια εταιρείας J-3 σύμφωνα με τα δεδομένα του έτους 2016.(Πηγή: Daily Shipping Times 03-11-2016)

Όλες οι μεγάλες ναυτιλιακές εταιρείες τακτικών γραμμών έχουν σχεδιάσει τα δίκτυα τους έτσι ώστε να έχουν την δυνατότητα να εξυπηρετούν σχεδόν όλες τις περιοχές του κόσμου.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να επισημανθεί η πολυπλοκότητα που υπάρχει στην διαχείριση αυτών των πλοίων που μεταφέρουν εμπορευματοκιβώτια μέσω τακτικών γραμμών. Μια εταιρεία πρέπει να λαμβάνει υπόψη της πολλούς παράγοντες για να πετύχει το βέλτιστο αποτέλεσμα, και να χρησιμοποιεί συγκεκριμένες στρατηγικές ώστε να πετύχει το στόχο της. Για παράδειγμα, μια εταιρεία έχει την δυνατότητα να μειώσει την ταχύτητα των πλοίων της και να αύξηση το μέγεθος των πλοίων της, και ανάλογα με αυτές τις αλλαγές να σχεδιάσει το δίκτυο της για να πετύχει το μέγιστο δυνατό κέρδος.

1.6 Χώρες και ιδιοκτησία πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων

Σε αυτό το σημείο να ξεκαθαρίσουμε ότι οι χώρες που έχουν στην κατοχή τους την μεγαλύτερη χωρητικότητα σε TEU σε πλοία για την μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων (Container ship owners) είναι η Γερμανία, ακολουθεί η Κίνα και η Ελλάδα, όπως βλέπουμε και στο Πίνακα 1.4.

	20-foot equivalent units	Market share (percentage)	Number of ships
Germany	4 795 085	21.46	2 106
China	2 098 655	9.39	871
Greece	1 815 265	8.13	563

Πίνακας 1.4: Οι 3 χώρες με την μεγαλύτερη ιδιοκτησία χωρητικότητας πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων κατά το 2017 (Πηγή : United Nations Conference on Trade And Development (UNCTAD)

Όμως για να μην υπάρξει σύγχυση να διευκρινίσουμε ότι οι Γερμανικές και Ελληνικές ναυτιλιακές που έχουν στην κατοχή τους πλοία μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (container ships) στην πλειονότητα τους χρεώνουν τα πλοία τους σε άλλες ναυτιλιακές, στην περίπτωση μας σε ναυτιλιακές τακτικών γραμμών και παρέχουν μια συγκεκριμένη υπηρεσία θαλάσσιας μεταφοράς. Δηλαδή είναι εταιρείες ναύλωσης πλοίων. Αυτό εξηγεί το γεγονός γιατί η Ελλάδα δεν βρίσκεται στην λίστα του Πίνακα 1.3 με τις χώρες με το μεγαλύτερο συνολικό αριθμό χωρητικότητας TEU στο εμπόριο με τακτικά δρομολόγια ενώ έχει τόσο μεγάλο αριθμό πλοίων για την μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων. Αναλυτικότερα η Δανική APM- Maersk , Ελβετική Mediterranean Shipping Company, η Γαλλική CMA CGM Group και οι περισσότερες ναυτιλιακές εταιρείες τακτικών γραμμών έχουν στην ιδιοκτησία τους περίπου τα μισά από τα πλοία με τα οποία κάνουν εμπόριο, ενώ το υπόλοιπο 50% είναι ναυλωμένα πλοία (chartered) – (Πηγή : United Nations Conference on Trade And Development (UNCTAD)). Έτσι δικαιολογείται πως η Δανία και η Ελβετία βρίσκονται στην πρώτη και δεύτερη θέση αντίστοιχα με τους μεγαλύτερους αριθμούς χωρητικότητας για χρήση εμπορίου στην ναυτιλία τακτικών γραμμών (Πίνακας 1.3) ενώ σαν χώρες δεν κατέχουν τόσο μεγάλο αριθμό πλοίων μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων.

1.7 Πλεονεκτήματα Ναυτιλίας Τακτικών Γραμμών

Ανάγκες και κοινωνία

Τα τακτικά πλοία (liner ships) έχουν πολύ μεγάλη χωρητικότητα . Η μεγάλη χωρητικότητα τους έχει ως αποτέλεσμα κάθε ταξίδι για την μεταφορά εμπορευμάτων να είναι αποδοτικό και αποτελεσματικό. Η χωρητικότητα του πλοίου μπορεί να φτάνει έως και τα 22000 TEU. Όπως είναι λογικό η μεταφορά μιας τόσο μεγάλης ποσότητας αναγκαίων εμπορευμάτων θα ωφελήσει πολλά άτομα. Τα τακτικά πλοία έχουν συμβάλει στην πρόοδο του βιοτικού επιπέδου του παγκόσμιου πληθυσμού. Χωρίς αυτήν πολλές χώρες δεν θα είχαν στην διάθεση τους πολλά απαραίτητα τρόφιμα. Συμπερασματικά, είναι ένας αξιόπιστος και αποδοτικός τρόπος μεταφοράς εμπορευμάτων λόγω της μεγάλης χωρητικότητας και του χαμηλού κόστους μεταφοράς από την βιομηχανία. Επιπλέον η διεθνής ναυτιλία τακτικών γραμμών προσφέρει πάνω από ένα εκατομμύριο θέσεις εργασίας.



Εικόνα 1.7: Διανομή τροφίμων

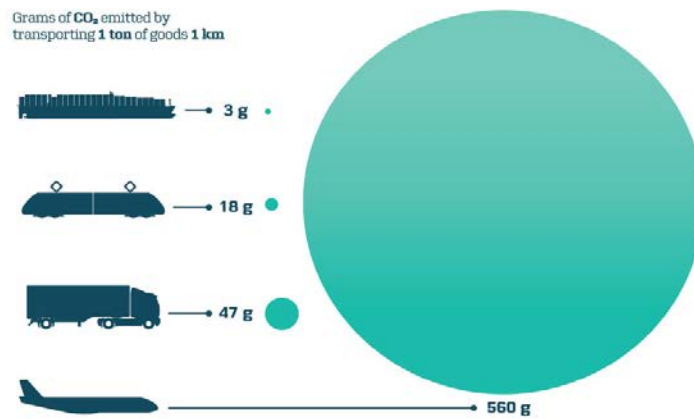
Περιβάλλον

Η θαλάσσια ναυτιλία είναι ο πιο αποδοτικός τρόπος μεταφοράς και από πλευράς εκπομπών καυσαερίων. Όπως βλέπουμε και από την παρακάτω Εικόνα 1.8, η μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων με πλοία παράγει λιγότερα γραμμάρια καυσαερίων σε σύγκριση με τις αεροπορικές, σιδηροδρομικές ή οδικές μεταφορές. Βλέπουμε ότι για την μεταφορά απόστασης ενός χιλιομέτρου ενός φορτίου με βάρος ενός τόνου. Τα μοντέρνα πλοία μεταφοράς εκπέμπουν 3 γραμμάρια CO₂ (διοξειδίου του άνθρακα), ενώ τα τρένα εκπέμπουν 6 φορές αυτή την ποσότητα, τα φορτηγά εκπέμπουν 15 φορές περισσότερο CO₂ , τέλος τα αεροπλάνα 560 γραμμάρια CO₂

Smart transport

Different modes of transport have different climate impact. Carbon distance reflects the difference in climate impact among different modes of transport between two locations.

Maersk StarFlower™ makes it possible to transport cut flowers by sea rather than by air, cutting the relevant CO₂ emissions by 98%.



Εικόνα 1.8: Γραμμάτια Διοξειδίου του άνθρακα **CO₂** που παράγονται με την μεταφορά ενός τόνου εμπορεύματος σε απόσταση ενός χιλιομέτρου χρησιμοποιώντας (πλοίο , τρένο , φορτηγό και αεροπλάνο)

Τέλος, όλα τα εμπορευματοκιβώτια που χρησιμοποιούνται παγκοσμίως είναι 98% ανακυκλώσιμα.

Κεφάλαιο 2

Σχεδιασμός δικτύων

Είναι πολύ σημαντικό ένα δίκτυο ναυτιλίας τακτικών γραμμών να είναι αποδοτικό. Η αποδοτικότητα είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη μειωμένη οικονομική δαπάνη και με τον βαθμό ρύπανσης του περιβάλλοντος. Επομένως είναι ξεκάθαρο ότι η διαδικασία σχεδίασης δικτύων σε μια τέτοιου είδους εταιρεία παίζει σπουδαίο ρόλο, καθώς η βέλτιστη σχεδίαση την καθιστά αυτομάτως ανταγωνιστική και ικανή να επιβιώσει στο χώρο της μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων.

Σε αυτό το κεφάλαιο αρχικά θα αναφέρουμε τον γενικό τρόπο σχεδιασμού μιας ναυτιλιακής εταιρείας τακτικών γραμμών, και τα επιμέρους προβλήματα που πρέπει να λυθούν. Στην συνέχεια θα αναφέρουμε τα διάφορα είδη δικτύων που έχει μια εταιρεία την δυνατότητα να επιλέξει για το τρόπο μεταφοράς των φορτίων της. Τέλος, θα αναλύσουμε το κόστος μιας τέτοιας εταιρείας αλλά και το τρόπο λειτουργίας της στην αγορά.

2.1 Το πρόβλημα Σχεδιασμού Δικτύου στην Ναυτιλία Τακτικών Γραμμών

Το δίκτυο ναυτιλίας τακτικών γραμμών περιλαμβάνει την λήψη αποφάσεων σε τρία επίπεδα: **Strategic** (Στρατηγικής), **Tactical** (Τακτικής) και **Operational** (Λειτουργίας) Διάγραμμα 2.1.

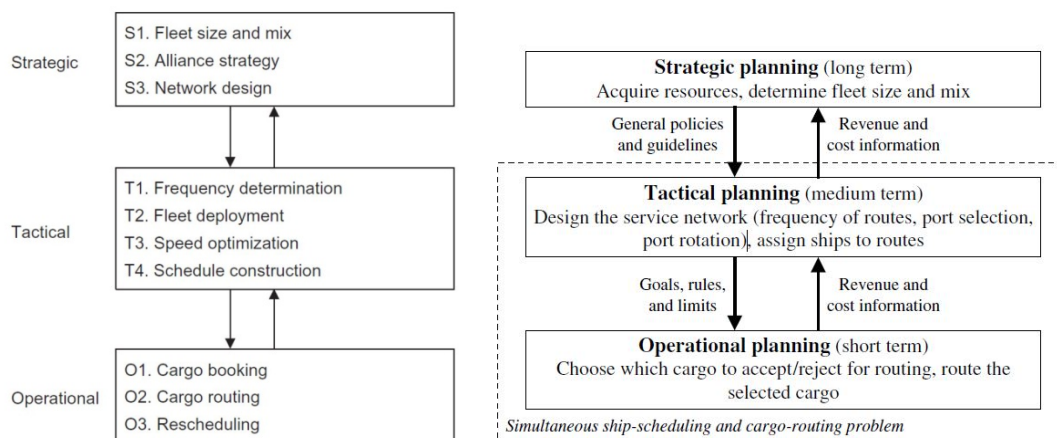
Οι Στρατηγικές αποφάσεις (Strategic planning decisions) έχουν ισχύ για σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα, 2 έως 5 χρόνια και καθορίζουν το πεδίο δράσης των Τακτικών προβλημάτων (Tactical planning problems) τα οποία λύνονται κάθε 6-24 μήνες (Kjeldsen 2011 , Schmids and Wilhelm 2000). Τέλος τα Λειτουργικά προβλήματα (Operational planning problems) συνήθως λύνονται καθημερινά ή εβδομαδιαία στο πλαίσιο των αποφάσεων τακτικού σχεδιασμού.

● **Επίπεδο 1** : Στην φάση Στρατηγικού σχεδιασμού (Strategic Planning) λύνονται τα μακροπρόθεσμα προβλήματα (Long term) (Διάγραμμα 2.1). Καθορίζονται τα μεγέθη και είδη των πλοίων. Αυτό είναι ορθολογικό, καθώς τα πλοία που μεταφέρουν εμπορευματοκιβώτια έχουν διάρκεια λειτουργίας από 15 έως 26 χρόνια (Πηγή : World Shipping Council (2014)). Δεδομένου ότι η ιδιοκτησία ενός πλοίου μεταφοράς συνεπάγεται μια τεράστια επένδυση κεφαλαίου (συνήθως εκατομμύρια δολάρια) και το κόστος κατοχής ενός πλοίου σε αδρανείς κατάσταση φτάνει τα 25 χιλιάδες δολάρια ανά ημέρα, οι αποφάσεις στρατηγικού επιπέδου είναι πολύ σημαντικές. Μια άλλη μακροπρόθεσμη απόφαση είναι η Γεωγραφική Περιοχή στην οποία θα εστιάσει η εταιρεία. Ενώ ο σχεδιασμός δικτύων τακτικών γραμμών ή αλλιώς «Πρόβλημα δρομολόγησης πλοίων» (Liner Shipping network design problem / vessel routing problem) διαρκεί από μερικούς μήνες έως και μερικά χρόνια, για αυτό το λόγο σε ορισμένες επιστημονικές δημοσιεύσεις (Διάγραμμα 2.1) την κατηγοριοποιούν στην φάση «Στρατηγικού Σχεδιασμού» (Meng et al. (2014)) όπως βλέπουμε στο Διάγραμμα 2.1 (α) ενώ άλλοι ερευνητές στο «Τακτικό Σχεδιασμό» Agarwal and Ergun (2008) όπως παρουσιάζουμε στο Διάγραμμα 2.1 (β).

● **Επίπεδο 2**: Ο «Τακτικός σχεδιασμός» (Tactical planning) αναφέρεται σε ενέργειες που πρέπει να πραγματοποιηθούν στο μεσοπρόθεσμο ορίζοντα (Medium term) (Διάγραμμα 2.1). Σε αυτή την φάση πρέπει να αναπτυχθεί ένας συγκεκριμένος εμπορικός στόλος για τις υπηρεσίες. Επιπλέον θα πρέπει να γίνει επανατοποθέτηση του εμπορικού στόλου έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η εναλλαγή μεταξύ δυο δικτύων (Tierney and Jensen (2012)). Άλλες λειτουργίες που πρέπει να πραγματοποιηθούν στο πλαίσιο του τακτικού σχεδιασμού (Tactical Planning) είναι οι ακόλουθες. Πρέπει να καθοριστεί η ταχύτητα με την οποία πλέουν τα πλοία μεταφοράς φορτίων κατά την μεταφορά μεταξύ λιμανιών. Στο Tactical planning , πρέπει να γίνει σχεδιασμός χρονοδιαγράμματος (Schedule Construction – Ship scheduling problem) Διάγραμμα 2.1. Συνήθως οι εταιρείες μεταφοράς έχουν ως στόχο να παρέχουν στους πελάτες τους τα φορτία σε τακτά προγραμματισμένα χρονικά διαστήματα έτσι ώστε να διατηρήσουν την πελατειακή τους βάση. Συνεπώς, οι εταιρείες πρέπει να σχεδιάσουν το πρόγραμμα τους έτσι ώστε ο αριθμός των πλοίων που μεταφέρει φορτία με κυκλικές διαδρομές (κυκλική διαδρομή είναι η μεταφορά ενός φορτίου από τον αρχικό λιμένα προς την διαδρομή εξυπηρέτησης, και έπειτα να επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία) να είναι τουλάχιστον ίσος με τον αριθμό των εβδομάδων που διαρκεί μέχρις ότου να

πραγματοποιηθεί η ολοκλήρωση μιας κυκλικής διαδρομής. Έτσι θα υπάρχει τουλάχιστον μια αναχώρηση φορτίου σε κάθε λιμάνι κάθε βδομάδα.

● **Επίπεδο 3:** Η 3^η και τελευταία φάση είναι το «**Operational Planning**» ή αλλιώς «Λειτουργικός Σχεδιασμός» και αναφέρεται στις βραχυπρόθεσμες αποφάσεις (short term) (Διάγραμμα 2.1). Ένας μεταφορέας (Carrier) λαμβάνει αποφάσεις σχετικά με την αποδοχή ή την απόρριψη των φορτίων που επιθυμεί να μεταφέρει και την διαδρομή που θα χρησιμοποιήσει κατά την μεταφορά των φορτίων. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται Cargo Routing Problem. Ο μεταφορέας ίσως να αποφασίσει να μην μεταφέρει ορισμένα φορτία, είτε επειδή μπορεί να μην είναι επικερδής για αυτήν, είτε επειδή υπάρχει, άλλο φορτίο σε άλλα λιμάνια όπου η μεταφορά τους είναι πιο επικερδής.



(α) Πηγή: Meng et al. (2014) κατηγοριοποίηση του σχεδιασμού δικτύου ως στρατηγικό πρόβλημα

(β) Πηγή: Agarwal and Ergun (2008) κατηγοριοποίηση του σχεδιασμού δικτύου ως ένα τακτικό πρόβλημα

Διάγραμμα 2.1: Επίπεδα λήψης αποφάσεων στη ναυτιλία τακτικών γραμμών. Επιπλέον το διάγραμμα χωρίζεται στον (α) και στο (β) αναλόγως με το εάν το πρόβλημα σχεδιασμού δικτύου θεωρείται ένα στρατηγικό (Strategic) ή τακτικό (Tactical) πρόβλημα.

Σε αυτό το σημείο να προσθέσουμε ότι οι αποφάσεις που λαμβάνονται σε ένα επίπεδο επηρεάζουν την διαμόρφωση της απόφασης στα άλλα επίπεδα του σχεδιασμού. Οι αποφάσεις στο στρατηγικό επίπεδο **Strategic level** καθορίζουν τις γενικές πολιτικές και κατευθυντήριες γραμμές των αποφάσεων που λαμβάνονται στο **Tactical level** και **Operational level**. Παρόμοια, οι αποφάσεις στο Tactical level καθορίζουν τους

περιορισμούς χωρητικότητας και την δομή του δικτύου του Operational level. Ενώ όπως παρατηρούμε και από το Διάγραμμα 2.1 (β) οι πληροφορίες σχετικά με τα έσοδα (revenue) και το κόστος (cost) δοθέντος τις καθορισμένες παραμέτρους παρέχουν την αναγκαία αναπληροφόρηση (feedback), για την λήψη αποφάσεων σε ιεραρχικά υψηλότερο επίπεδο ↑.

2.2 Δίκτυα

Όπως αναφέραμε στην εισαγωγή του κεφαλαίου ένα δίκτυο θα πρέπει να είναι **ανταγωνιστικό** και **αποδοτικό**. Ένα ανταγωνιστικό δίκτυο θα πρέπει να έχει την δυνατότητα να προσφέρει πολλά διαφορετικά δρομολόγια, τα οποία ξεκινάνε από το ίδιο αρχικό (origin) σημείο και φτάνουν στο ίδιο τελικό προορισμό (destination) όμως διαφέρουν στο χρόνο μεταφοράς και στο κόστος. Όπως είναι λογικό οι περισσότερες παγκόσμιες ναυτιλιακές τακτικών γραμμών παρέχουν διάφορα δρομολόγια τα οποία ξεκινούν από τον ίδιο αρχικό σημείο και έχουν τον ίδιο προορισμό.

Ένα δίκτυο θεωρείτε **ανταγωνιστικό** (competitive) όταν προσφέρει χαμηλούς χρόνους μεταφοράς των φορτίων (low transit times) και χαμηλούς αριθμούς μεταφορτώσεων (Transshipments) εμπορευμάτων. Επιπλέον ένα ανταγωνιστικό δίκτυο θα πρέπει να εξυπηρετεί τα λιμάνια μια περιοχής ανά τακτά χρονικά διαστήματα και να είναι συνδεδεμένο με το βέλτιστο δυνατό τρόπο με τα άλλα λιμάνια τροφοδοσίας (Feeder ports) έχοντας αξιόπιστο χρονοδιάγραμμα.

Ένα **αποδοτικό** (efficient) δίκτυο διευκολύνει τις μεταφορτώσεις (Transshipments) ενός πλοίου στους τερματικούς σταθμούς, έχοντας παραγωγικούς γερανούς και τα κατάλληλα εμπορευματοκιβώτια προκειμένου ώστε να ελαχιστοποιείται ο χρόνος χειρισμού (handling time) του φορτίου από τον γερανό. Τέλος, τα άδεια εμπορευματοκιβώτια θα πρέπει να επανατοποθετούνται με αποτελεσματικό τρόπο για να βεβαιώνουν την διαθεσιμότητα των εμπορευματοκιβωτίων που βρίσκονται στην αρχή του πλοίου.

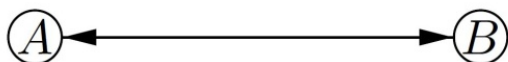
2.2.1 Πρόβλεψη κατά το σχεδιασμό δικτύου

Η πρόβλεψη ζήτησης των καταναλωτών διαδραματίζει σημαίνοντα κατά τη σχεδίαση ενός δικτύου. Σε ένα ιδανικό δίκτυο έχει τέλεια προσαρμογή μεταξύ ζήτησης και χωρητικότητας (Stopford, 2009). Το σχέδιο (design) ενός δικτύου συνήθως αλλάζει κατά την διάρκεια ενός έτους. Για παράδειγμα, τα Χριστούγεννα θα υπάρξει αύξηση της ζήτησης παγκοσμίως, συνεπώς η δομή του δικτύου αλλά και του εμπορικού στόλου θα αλλάξει. Ο αρχικός σχεδιασμός του δικτύου συνήθως αλλάζει με την αλλαγή της εποχής, έτσι ώστε να καλύψει τις ανάγκες των καταναλωτών, δηλαδή παρουσιάζει «εποχικότητα». Εκτός από την αλλαγή ζήτησης λόγω εποχικότητας, υπάρχουν παράγοντες που είναι απρόβλεπτοι, όπως η οικονομία και η οικονομική κρίση.

2.2.2 Παραδείγματα δικτύων

- Point-to-Point

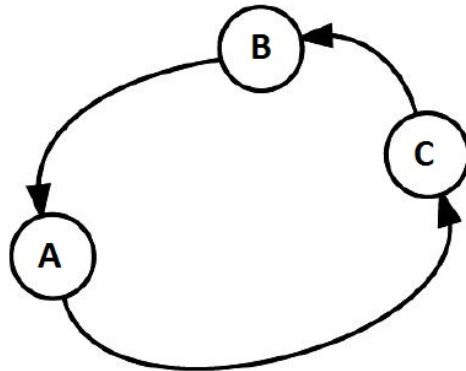
Είναι η άμεση σύνδεση μεταξύ δυο λυμένων A και B.



Εικόνα 2.1: Σύνδεση point-to-point/end-to-end , όπου A είναι ένας λιμένας ενώ το B ένας άλλος.

- Cyclic ή Simple route

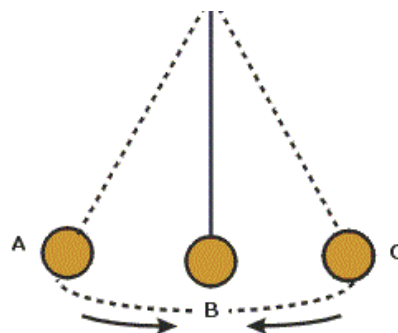
Αυτό το δίκτυο αποτελείται από τουλάχιστον 3 λιμάνια και το πλοίο δεν επισκέπτεται ένα λιμάνι πάνω από 1 φορά ανά κυκλικό ταξίδι.



Εικόνα 2.2: κυκλική σύνδεση, όπου A,B,C είναι τρία διαφορετικά λιμάνια.

- Pendulum

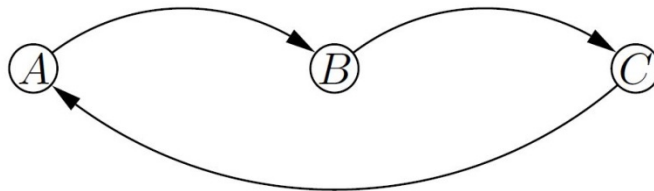
Αυτό το δίκτυο , παρουσιάζετε σαν μια διαδρομή στην οποία ένα πλοίο κινείται εμπρός και πίσω, σαν ένα εκκρεμές. Για παράδειγμα κινείται ως εξής στις παρακάτω τρεις χώρες: Νορβηγία → Σουηδία → Φιλανδία → Σουηδία → Νορβηγία όπως στην εικόνα 2.3.



Εικόνα 2.3: Το παραπάνω δίκτυο περιγράφετε από την κίνηση που κάνει ένα εκκρεμές, όπου A,B,C τρία διαφορετικά λιμάνια.

- Line Bundled

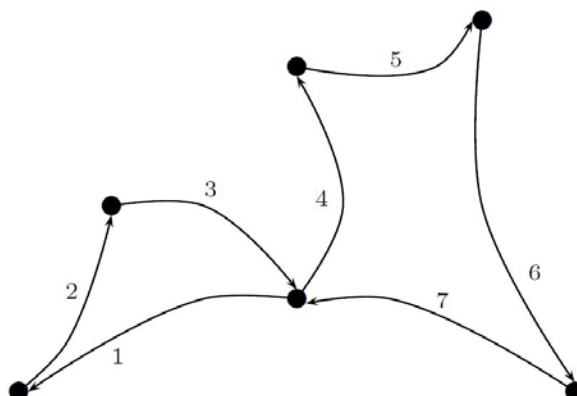
Αυτό το δίκτυο, παρουσιάζεται σαν μια διαδρομή στην οποία ένα πλοίο ξεκινάει το ταξίδι από ένα αρχικό σημείο A και επισκέπτεται ένα σύνολο λιμανιών που εμπεριέχονται σε ένα βρόχο (loop). Το σημείο A είναι η αρχή του βρόχου.



Εικόνα 2.4: Απεικονίζεται ένα δίκτυο με σύνδεση της μορφής “Line Bundled” όπου το σημείο A είναι η αρχή ενός βρόχου και ολοκληρώνεται μια επανάληψη όταν περάσει ένα πλοίο από το σύνολο το λιμανιών B και C και επιστρέψει στο αρχικό A.

- Butterfly

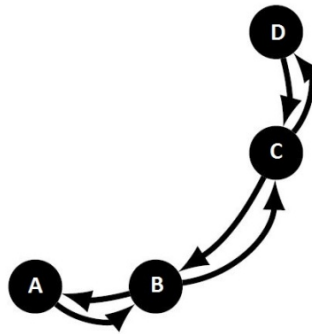
Σε αυτό το δίκτυο παρουσιάζονται πολλαπλοί κύκλοι επικεντρωμένοι γύρω από ένα λιμάνι. Κάθε κύκλος επισκέπτεται μια εναλλασσόμενη ακολουθία λιμανιών. Ένας κύκλος μπορεί να είναι υποσύνολο ενός άλλου.



Εικόνα 2.5: Παρουσιάζεται ένα δίκτυο σε μορφή που ονομάζεται Butterfly.

- Conveyor belt

Αυτό το δίκτυο αποτελείται από δυο λιμάνια και πάνω, και ένα πλοίο που επισκέπτεται πάνω από 2 φορές ένα λιμάνι σε κάθε ταξίδι. Συνήθως συνδέουν περιφερειακούς κόμβους που έχουν σχεδιαστεί για μεταφορτώσεις μεταξύ ηπείρων σε σημεία διέλευσης των εμπορικών λωρίδων.

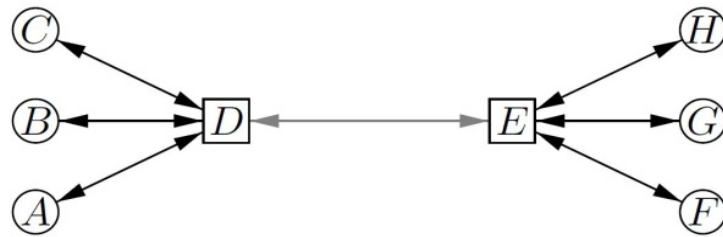


Εικόνα 2.6: Παρουσιάζεται μια μορφή δικτύου που ονομάζεται Conveyor belt, όπου οι κύκλοι A,B,C,D συμβολίζουν 4 διαφορετικά λιμάνια.

→ Τα πλεονεκτήματα που έχουν τα δυο τελευταία δίκτυα που παρουσιάσαμε, **Butterfly** και **Conveyor belt**, είναι η μεγάλη χωρητικότητα που διαθέτουν σε μεμονωμένες συνδέσεις μεταξύ δυο λιμένων. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα είναι οι μειωμένοι χρόνοι που απαιτούνται για την μεταφορά εμπορευμάτων κατά ένα ταξίδι (Improved transit times).

- Hub-and-spoke

Αυτό το δίκτυο χρησιμοποιείται σε θαλάσσιες μεταφορές στις οποίες τροφοδοτικά πλοία (Feeder ships) μεταφέρουν εμπορευματοκιβώτια από διάφορα λιμάνια σε ένα κεντρικό τερματικό σταθμό με σκοπό να γίνει η φόρτωση αυτών των εμπορευματοκιβωτίων σε μεγαλύτερα πλοία. Σε αυτό το παράδειγμα όπως φαίνεται, οι δυο τερματικοί μας είναι οι κόμβοι D και E ενώ οι κύκλοι A, B, C, H, G, F είναι λιμάνια από τα οποία τα μικρότερα τροφοδοτικά περνούν τα εμπορευματοκιβώτια για να τα μεταφέρουν στους τερματικούς D και E.



Εικόνα 2.7: παρουσιάζεται ένα δίκτυο μορφής Hub-and-spoke που αποτελείται από ένα σύνολο άμεσων υπηρεσιών τροφοδοσίας (A,B,C,H,G,F) και δυο τερματικούς κόμβους D και E.

2.2.3 Η Ανάπτυξη ενός δικτύου ναυτιλίας τακτικών γραμμών

Η ανάπτυξη ενός δικτύου τακτικών γραμμών διαμορφώνεται κυρίως από την ζήτηση για την μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων. Όπως αναλύσαμε στην προηγούμενη παράγραφο, έχουν αναπτυχθεί διάφοροι σύνθετοι τύποι δικτύων (π.χ. Pendulum, Butterfly, Conveyor belt, Hub-and-spoke κτλ) οι οποίες πλέον χρησιμοποιούνται σαν εναλλακτικές της απλής Point-to-Point/End-to-End μεθόδου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων.

- Τα **πλεονεκτήματα** αυτών των σύνθετων δικτύων είναι τα εξής. Ο συνολικός αριθμός δρομολογίων που απαιτούνται για την εξυπηρέτηση του δικτύων μειώνεται δραματικά. Κατά συνέπεια, αφού θα έχουμε μικρότερο αριθμό δρομολογίων οι ναυτιλιακές θα προσφέρουν υψηλότερη συχνότητα και θα υπάρχει η δυνατότητα εξυπηρέτησης περισσότερων προορισμών χωρίς να μειωθεί η αποδοτικότητα τους. Επιπλέον, προσφέρεται η δυνατότητα μεγαλύτερης ποσότητας φόρτωσης και η χρήση μεγαλύτερων πλοίων σε χωρητικότητα TEU (Π.χ. συγκέντρωση από διάφορα spoke σε ένα Hub και από εκεί μεταφορά σε ένα spoke).

- Όμως υπάρχουν και **μειονεκτήματα** κατά την χρήση των σύνθετων δικτύων. Ένα μειονέκτημα είναι η ανάγκη περισσότερων χειριστών εμπορευματοκιβωτίων σε ενδιάμεσους τερματικούς σταθμούς (λιμάνια). Επιπλέον, μειονέκτημα είναι επίσης οι μεγαλύτερες αποστάσεις μεταφοράς και η μεγαλύτερη εξάρτηση από την ποιότητα

των υπηρεσιών και το συγχρονισμό τους. Τα παραπάνω στοιχεία φέρουν επιπλέον κόστος και θα μπορούσαν να αντισταθμίσουν τα πλεονεκτήματα της μείωσης του κόστους που οφείλονται στην δυνατότητα μεγαλύτερης ποσότητας φόρτωσης και την χρήση μεγαλύτερων πλοίων.

Μετά την ολοκλήρωση του προηγούμενου σταδίου, δηλαδή όταν η ναυτιλιακή αποφασίσει το τύπο της δομής του δικτύου, ξεκινάει το στάδιο επιλογής λιμένων. Η επιλογή λιμανιού γίνεται με βάση τα παρακάτω οκτώ κριτήρια.

- (1) Η φυσική και τεχνική υποδομή του λιμανιού.
 - a. Π.χ. Η ναυτική πρόσβαση η υποδομή και ο εξοπλισμός του τερματικού σταθμού και η προσβασιμότητα της στην ενδοχώρα
- (2) Η γεωγραφική περιοχή.
- (3) Η αποτελεσματικότητα του λιμένα.
 - a. Π.χ. Ο χρόνος ολοκλήρωσης της φόρτωσης και εκφόρτωσης (Load&Unload) του λιμανιού , το κόστος αποδοτικότητας.
- (4) Διασύνδεση του λιμένα.
 - a. Π.χ. Η συχνότητα απόπλου σε διεπειρωτικούς οδούς και υπηρεσίες τροφοδοσίας πλοίου.
- (5) Η αξιοπιστία , χωρητικότητα , συχνότητα και κόστος των υπηρεσιών της ενδοχώρας.
- (6) Αποδοτικότητα και τα έξοδα διαχείρισης των λιμένων.
- (7) Διαθεσιμότητα , η ποιότητα και το κόστος προστιθέμενης αξίας από την επιμέλεια δραστηριοτήτων.
- (8) Στρατηγικές εκτιμήσεις της σχετικής ναυτιλιακής γραμμής.
 - a. Π.χ. Είσοδος στην αγορά , στρατηγικές της δομής της συμμαχίας.

Κατά συνέπεια, η επιλογή ενός λιμένα (port) γίνεται, κατά κύριο λόγο, λαμβάνοντας υπόψιν το συνολικό κόστος του δικτύου άλλα και τις αποδόσεις του λιμένα.

Οι γραμμές μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων λειτουργούν σε όλο και πιο ανταγωνιστικό περιβάλλον και καθοδηγούνται από τις παγκόσμιες τάσεις μιας συγκεντρωμένης αγοράς στο χώρο της ναυτιλιακής βιομηχανίας. Ως εκ τούτου, έκτος από την μείωση του κόστους της ναυτιλίας, οι μεταφορείς εμπορευματοκιβωτίων

βελτιώνουν την ποιότητα των υπηρεσιών τους. Η βελτίωση των υπηρεσιών περιλαμβάνει πολλές αναχωρήσεις των πλοίων (απόπλους) και υψηλότερο επίπεδο αξιοπιστίας. Αυτό έχει ως στόχο να ικανοποιήσει τα συμφέροντα των Φορτωτών (Shippers), λόγω της ελαχιστοποίησης του κόστους αποστολής και απογραφής, και της υψηλής αξιοπιστίας. Η ισορροπία (συμβιβασμός) μεταξύ της ζήτησης των πελατών και των στρατηγικών των ναυτιλιακών γραμμών έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη ποικίλων σχεδιασμών δικτύων.

2.3 Περιουσιακά στοιχεία και υποδομή

Αρχικά θα ορίσουμε τις ορολογίες Shipper και Carrier.

Ο **φορτωτής (Shipper)** είναι το πρόσωπο ή η εταιρεία που είναι συνήθως ο προμηθευτής ή ο ιδιοκτήτης των εμπορευμάτων που αποστέλλονται. **Μεταφορέας (Carrier)** είναι ένα πρόσωπο ή η εταιρεία που μεταφέρει αγαθά για οποιαδήποτε εταιρεία και είναι υπεύθυνη για τυχόν απώλειες των αγαθών κατά τη μεταφορά.

2.3.1 Παράμετροι κατά την μεταφορά

Κατά την μεταφορά ενός εμπορευματοκιβωτίου από έναν λιμένα Α σε έναν λιμένα Β γνωστοποιούνται στοιχεία ορισμένων παραμέτρων στον πελάτη. Ο πελάτης στην περίπτωση μας είναι ο φορτωτής (Shipper), οι πληροφορίες αυτές γνωστοποιούνται από τον μεταφορέα (Carrier). Τα στοιχεία αφορούν τις παρακάτω παραμέτρους:

- Τιμή (Price)
 - Γνωστοποιείται μια τιμή, η οποία υπόκειται σε πρόσθετους φόρους και προσαυξήσεις.
- Συντελεστής Προσαρμογής Καυσίμων (Bunker Adjustment Factor, BAF)
 - Είναι μια τιμή η οποία είναι μεταβλητή και εξαρτάται από την τιμή καυσίμων. Δίνει την δυνατότητα στον μεταφορέα (Carrier) να μοιράζεται τον κίνδυνο της μεταβλητότητας των τιμών του πετρελαίου με τον φορτωτή (Shipper).

- Χρόνοι μεταφοράς (Transit Time)
 - Είναι ο χρόνος που απαιτείται για την μεταφορά ενός εμπορευματοκιβωτίου από τον λιμένα Α στον λιμένα Β.
- Μεταφορτώσεις (Transshipments)
 - Το φορτίο ενός πλοίου μεταφορτώνεται σε ένα άλλο πλοίο. Η απευθείας μεταφορά συνήθως προτιμάται λόγω του μειωμένου ρίσκου να χαθεί κάποια σύνδεση κατά την μεταφορά.
- Συχνότητα (Frequency)
 - Συνήθως μια εβδομαδιαία υπηρεσία μεταφοράς εμπορευμάτων είναι προτιμότερη από μια 15 πενήμερη λόγω της προσαρμοστικότητας της.
- Αξιοπιστία (Reliability)
 - Καθορίζεται ο βαθμός αξιοπιστίας από τις υπηρεσίες που προσφέρονται. Σε κάθε υπηρεσία ο μεταφορέας (Carrier) έχει διαφορετικό βαθμό αξιοπιστίας.
- Έγγραφα (Paperwork)
 - Απαιτούνται έγγραφα ως τεκμήριο και τρόπο διαχείρισης . Κάθε μεταφορέας (Carrier) απαιτεί διαφορετικό έγγραφο, προσθέτοντας επιπλέον πολυπλοκότητα στον φορτωτή (Shipper).
- Εξοπλισμός (Equipment)
 - Ο φορτωτής (Shipper) πριν χρησιμοποιήσει ένα εμπορευματοκιβώτιο που προσφέρεται από τον μεταφορέα (Carrier) πρέπει να το επιθεωρήσει για να βεβαιωθεί ότι είναι καθαρό και κατάλληλο για το είδος του φορτίου που μεταφέρει. Ο φορτωτής (Shipper) έχει το δικαίωμα να απορρίψει οποιοδήποτε εμπορευματοκιβώτιο που δεν είναι ικανοποιητικό πριν την χρήση του.
- Ημέρες
 - Ένα πλοίο που αναχωρεί την Παρασκευή μπορεί να είναι προτιμότερο από ένα που αναχωρεί την Δευτέρα καθώς μπορεί να συντομεύσει την αλυσίδα εφοδιασμού κατά δυο ημέρες για ένα εργοστάσιο που είναι κλειστό το Σαββατοκύριακο.

Όλες οι παραπάνω παράμετροι είναι σημαντικοί για έναν φορτωτή (Shipper) και συνήθως οι παράμετροι της τιμής και του χρόνου μεταφοράς παίζουν το σπουδαιότερο ρόλο.

2.3.2 Κόστος Μεταφοράς

Το κόστος δικτύου για έναν μεταφορέα (Carrier) χωρίζεται στο **Κόστος Εμπορικού Στόλου (Fleet Cost)**, στο **Κόστος Διαχείρισης Φορτίου (Cargo Handling Cost)** και υπάρχει και το **Κόστος Διοίκησης (Administration Cost)**.

A. Κόστος Εμπορικού Στόλου (Fleet Cost)

1. Κόστος Καυσίμου (Bunker Cost)

- a. Αφορά τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται ανά πλοίο κατά την μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων.

2. Κόστος Κεφαλαίου (Capital Cost)

- a. Αφορά το κόστος απόκτησης ή χρηματοδότησης ενός πλοίου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων.

3. Κάλεσμα στον λιμένα (Portial Cost)

- a. Αφορά το κόστος καλέσματος ενός πλοίου από έναν τερματικό λιμένα.

4. Κόστος Διώρυγας (Canal Cost)

- a. Αφορά το κόστος διάσχισης μιας διώρυγας με ένα συγκεκριμένο πλοίο μεταφοράς.

5. Λειτουργικό κόστος (Operational Cost)

- a. Αφορά το λειτουργικό κόστος ενός πλοίου μεταφοράς συμπεριλαμβανόμενου του πληρώματος, την συντήρηση και την ασφάλιση του πλοίου.

Αναλυτικότερα από το βιβλίο του Stopford (2009) παίρνουμε το Πίνακα 2.1 από τον οποίο εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα. Παρατηρούμε ότι το κόστος καυσίμων Συνολικά, το κόστος εμπορικού στόλου καλύπτει περίπου το 42% του συνολικού κόστους του πλοίου. Το κόστος καυσίμου (Bunker Cost) καλύπτει το 38-48% του συνολικού κόστους του εμπορικού στόλου, το κόστος κεφαλαίου (Capital Cost)

καλύπτει το 31-43%, το επιχειρησιακό κόστος καλύπτει το 7-16% (Operating Cost) και το κάλεσμα στον λιμένα (Port Cost) καλύπτει το 9-14%. Διαπιστώνουμε από το Πίνακα 2.1 ότι γενικά το κόστος καυσίμων υπερβαίνει το κόστος κεφαλαίου έκτος από την περίπτωση που το πλοίο είναι αρκετά μεγάλο σε χωρητικότητα (TEU).

Το κόστος καυσίμων εξαρτάται από το τύπο του πλοίου που χρησιμοποιείται, την ταχύτητα του ταξιδιού, το πραγματικό μέγεθος του φορτίου που μεταφέρει το πλοίο, από τον αριθμό των εμπορευματοκιβωτίων που τροφοδοτούνται (Ψύξη) από τον κινητήρα του πλοίου και από τις καιρικές συνθήκες κατά την διάρκεια του ταξιδιού.

Η κατανάλωση των καυσίμων ενός πλοίου ισούται με την κυβική συνάρτηση της ταχύτητας. Το κόστος κεφαλαίου και το λειτουργικό κόστος εξαρτώνται από τη συνολική χωρητικότητα του πλοίου. Ενώ το κόστος καλέσματος στον λιμένα (Port Cost) και το κόστος διώρυγας υπολογίζονται με παρόμοιο τρόπο, για παράδειγμα το κόστος καλέσματος στον λιμένα είναι τα τέλη που πληρώνονται σε έναν τερματικό σταθμό. Αυτά τα τέλη εξαρτώνται από το μέγεθος του πλοίου. Το κόστος διώρυγας εξαρτάται από το μέγεθος του πλοίου και από το μέγεθος του φορτίου που μεταφέρει.

B. Κόστος Διαχείρισης Φορτίου (Cargo Handling Cost)

1. Κόστος Φόρτωσης και εκφόρτωσης είναι το κόστος διαχείρισης φορτίου σε έναν λιμένα
2. Κόστος Μεταφόρτωσης (Transshipment Cost)
 - a. Αφορά το κόστος μεταφόρτωσης ενός φορτίου σε έναν λιμένα.
3. Κόστος Εξοπλισμού (Equipment Cost)
 - a. Αφορά το κόστος κατοχής ή εκμίσθωσης εμπορευματοκιβωτίων.

Vessel size (TEU)	1,200	2,600	4,300	6,500	8,500	11,000
	\$000s					
1. Cost of the ship on the voyage						
1.1 Operating costs	179	206	207	232	265	307
1.2 Capital costs	343	616	824	1,134	1,485	1,896
1.3 Bunker costs	426	696	1,139	1,562	1,662	1,734
1.4 Port costs	154	203	245	301	420	455
1.5 Total ship costs	1,102	1,721	2,415	3,229	3,832	4,392
1.6 Ship costs, % of total costs	54%	46%	42%	39%	37%	34%
2. Costs of the containers on voyage						
2.1 Cost of supplying containers	32	65	104	162	225	314
2.2 Cost of container maintenance	34	74	123	185	242	314
2.3 Total container cost	66	139	226	347	467	628
2.4 Container cost, % of total cost	3%	4%	4%	4%	4%	5%
3. Administration cost						
3.1 Administrative cost per voyage	146	317	524	792	1,036	1,341
	7%	9%	9%	10%	10%	10%
4. Cargo handling and onward transport						
4.1 Terminal costs for container handling	301	652	1,078	1,630	2,132	2,759
4.2 Refrigeration cost for reefer containers	11	23	39	59	77	99
4.3 Inland intermodal transport cost	343	744	1,230	1,859	2,431	3,146
4.4 Interzone repositioning	58	125	206	312	408	528
4.5 Cargo claims	47	101	168	254	332	429
4.6 Total handling & onward transport	713	1,544	2,553	3,860	5,047	6,532
4.7 Handling and onward transport, % of total cost	35%	41%	45%	47%	49%	51%

Πίνακας 2.1: Στον πίνακα αναγράφονται τα διάφορα κόστη (σε χιλιάδες δολάρια, \$000s) που έχει ένα πλοίο κατά την μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων ανά ταξίδι. Επιπλέον, παρατηρούμε πως μεταβάλλονται τα διάφορα κόστη με την αλλαγή της συνολικής χωρητικότητας του πλοίου Vessel size από 1,200 έως 11,000 (TEU). Μπορούμε να διακρίνουμε το Κόστος Εμπορικού Στόλου (Fleet Cost), Διαχείρισης Φορτίου (Cargo Handling Cost) και το Κόστος διοίκησης (Administration Cost).

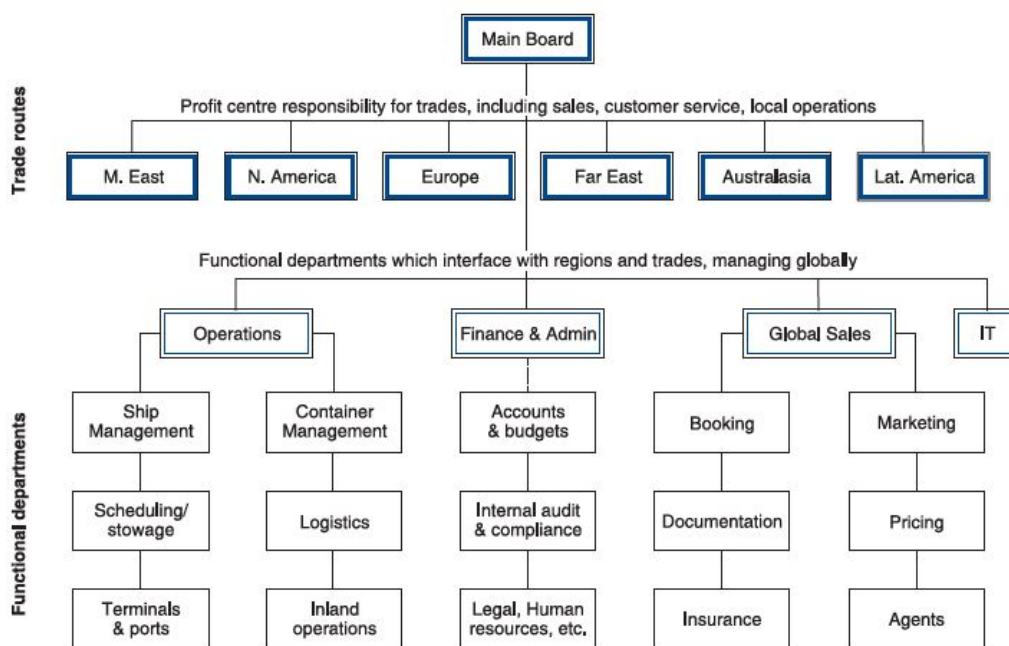
Αναλυτικότερα, το κόστος διαχείρισης φορτίου μπορεί να είναι μια μη γραμμική συνάρτηση καθώς ορισμένοι τερματικοί σταθμοί έχουν κόστος εξαρτώμενο από τον όγκο. Στο Πίνακα 2.1 μπορούμε να ελέγξουμε το Κόστος Διαχείρισης Φορτίου.

Το Κόστος Φόρτωσης και Εκφόρτισης (Load & Unload) είναι σταθερός (Fixed), δεν εξαρτάται από άλλες παραμέτρους. Όμως το κόστος μεταφόρτωσης (Transshipment Cost) εξαρτάται από την δρομολόγηση (routing) του προϊόντος, και ως εκ τούτου από τον συνολικό αριθμό μεταφορτώσεων. Το Κόστος Εξοπλισμού (Equipment Cost) είναι το κόστος των εμπορευματοκιβωτίων. Συνήθως ο μεταφορέας (Carrier) κατέχει την πλειοψηφία των εμπορευματοκιβωτίων με την επιλογή της μίσθωσης (leasing) (Stopford, 2009).

C. Κόστος Διοίκησης (Administration Cost)

Το «Κόστος Διοίκησης» αποτελείται από τέσσερα λειτουργικά τμήματα, το κάθε ένα είναι υπεύθυνο για μια συγκεκριμένη δραστηριότητα. Μπορούμε να διακρίνουμε το Κόστος διοίκησης στο Πίνακα 2.1. Επίσης υπάρχει και ένα οργανόγραμμα (Διάγραμμα 2.2) για το κόστος διοίκησης μιας επιχείρησης που λειτουργεί στο χώρο της ναυτιλίας τακτικών γραμμών. Αναλυτικότερα, το «Κόστος Διοίκησης» αποτελείται από:

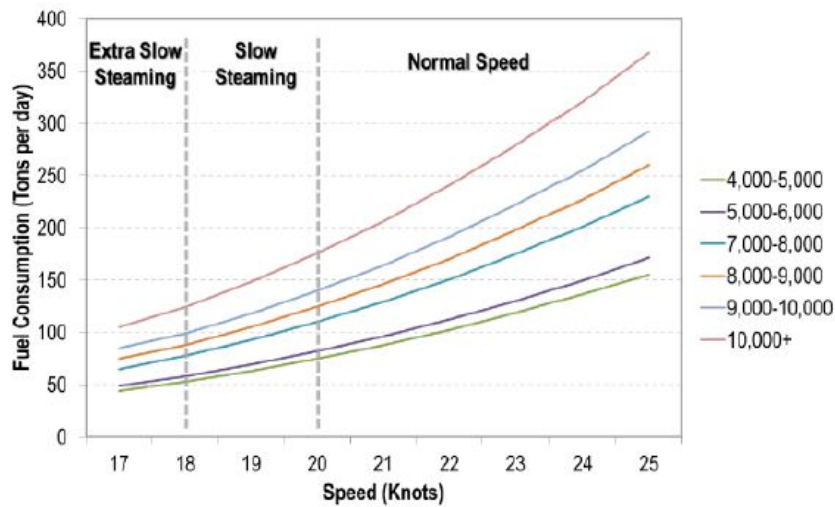
- 1. Λειτουργίες και διοικητική μέριμνα (Operations and logistics)**
 - a. Αυτή η λειτουργία καλύπτει την διαχείριση (Management) των πλοίων, του προγραμματισμού (Scheduling), της φόρτωσης φορτιών και του τερματικού. Επιπλέον είναι υπεύθυνη για την συνολική συντήρηση και τον έλεγχο του εμπορικού στόλου της εταιρείας, των κατεχόμενων εμπορευματοκιβωτίων αλλά και μισθωμένων (leased).
- 2. Finance and Admin**
 - a. Είναι μια σημαντική λειτουργία, που συμπεριλαμβάνει την διαχείριση λογαριασμών και του προϋπολογισμού, λογαριασμούς ταξιδιών (Για παράδειγμα: κράτηση, αξιολόγηση, παρακολούθηση, χρέωση), διεύθυνση ανθρώπινου δυναμικού, συμμόρφωση και γενική διοίκηση.
- 3. Παγκόσμιες Πωλήσεις (Global Sales):**
 - a. Αυτή η λειτουργία καλύπτει την κράτηση και τα έγγραφα του φορτίου, αντιμετωπίζει τις ασφαλίσσεις και τις συνεδρίες, κοστολόγηση, συμφωνίες παροχής υπηρεσιών, δημόσιες σχέσεις και διαφημίσεις.
- 4. Τεχνολογία Πληροφοριών (IT)**
 - a. Αυτό το λειτουργικό τμήμα είναι ζωτικής σημασίας για την λειτουργία μιας μοντέρνας παγκόσμιας επιχείρησης, έχει ως στόχο την διαχείριση και την ανάπτυξη της επικοινωνίας και των υπολογιστικών συστημάτων.



Διάγραμμα 2.2: Οργανόγραμμα μιας εταιρείας ναυτιλίας τακτικών γραμμών που παρουσιάζει τις κύριες περιφερειακές και λειτουργικές δραστηριότητες.

2.3.3 Βελτιστοποίηση ταχύτητας

Μια βασική απόφαση κατά την λειτουργία ενός δικτύου ναυτιλίας είναι η ταχύτητα με την οποία ταξιδεύει ένα πλοίο μεταξύ λιμένων εξυπηρέτησης. Κατά την διάρκεια ενός ταξιδιού ένα πλοίο μπορεί να πλεύσει με διαφορετικές ταχύτητες μεταξύ λιμένων. Το πλοίο έχει την δυνατότητα να ταξιδεύει με επιβραδυνόμενη-χαμηλή ταχύτητα (Slow Steam) έτσι ώστε να εξοικονομήσει καύσιμα, αφού όπως βλέπουμε από το Διάγραμμα 2.3, όσο πιο χαμηλή είναι η ταχύτητα κατά την διάρκεια ταξιδιού ενός πλοίου τόσο λιγότερα καύσιμα χρησιμοποιεί και ισχύει το αντίστροφο αν αυξήσει την ταχύτητα. Μια επιπλέον επιλογή που έχει η ναυτιλιακή είναι να αυξήσει την ταχύτητα του πλοίου για να ελαττώσει το χρόνο μετακίνησης από έναν λιμένα σε έναν άλλο, δηλαδή να μεταφέρει τα προϊόντα σε μικρότερο χρόνο (Reduced Transit Time). Η ταχύτητα μπορεί να περιοριστεί λόγω των δύσκολων καιρικών συνθηκών ή από την πλοήγηση σε περιοχές που χρειάζονται επιπλέον προσοχή.



Διάγραμμα 2.3: Το διάγραμμα απεικονίζει τη σχέση ταχύτητας και κατανάλωσης καυσίμων ανάλογα με την συνολική χωρητικότητα του πλοίου σε TEU. Φαίνεται ότι η κατανάλωση καυσίμων επηρεάζεται σημαντικά από την ταχύτητα με την οποία πλέει ένα πλοίο ανεξαρτήτως του μεγέθους του. Παρατηρούμε ότι η κατανάλωση καυσίμων αυξάνει όταν το πλοίο ταξιδεύει με μεγαλύτερη ταχύτητα, ενώ όσο πιο αργά πλέει ένα πλοίο ανεξαρτήτως μεγέθους τόσο λιγότερα καύσιμα χρησιμοποιεί. Επιπλέον, όπως είναι λογικό βλέπουμε ότι ένα πλοίο μικρής χωρητικότητας χρειάζεται λιγότερη ενέργεια για την μεταφορά του σε σύγκριση με ένα μεγαλύτερο.

2.3.4. Λιμένας (Port)

Ένας λιμένας μπορεί να αποτελείται από πολλούς τερματικούς σταθμούς. Ένα πλοίο μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων εισέρχεται και εξέρχεται από το λιμένα οδηγούμενο από έναν πιλότο που απασχολείται από στις λιμενικές αρχές. Σε μερικούς τερματικούς σταθμούς υπάρχει κρατημένος χώρος για τα πλοία πριν από την άφιξη τους, ενώ άλλοι εξυπηρετούν τα πλοία με την μέθοδο First-Come-First-Serve (FCFS) δηλαδή αυτός που έρχεται πρώτος εξυπηρετείται και πρώτος. Για να εισέλθει ένα πλοίο στο λιμένα πρέπει να πληρώσει ένα ποσό, το ποσό εξαρτάται από τις προδιαγραφές του πλοίου. Το προαναφερόμενο ποσό καλύπτει τις δαπάνες που δημιουργούνται από την εξυπηρέτηση των πιλότων, από τα ρυμουλκά (Tugboats), τις λιμενικές αρχές και τον τερματικό σταθμό. Μόλις το πλοίο εισέλθει στον τερματικό θα ξεκινήσει η εκφόρτωση και η φόρτωση του φορτίου. Μια διαδικασία μεταφόρτωσης (Transshipment) συνήθως κοστίζει λιγότερο από την φόρτωση και εκφόρτωση μαζί. Τέλος, ο χρόνος διαμονής

εντός λιμανιού εξαρτάται από την ποσότητα φορτίου που φορτώνεται και εκφορτώνεται.



Εικόνα 2.8: Γερανός (Crane) που χρησιμοποιείται για την μετακίνηση ενός εμπορευματοκιβωτίου.

2.3.5. Διώρυγες (Canals)

Για να διασχίσει ένα πλοίο μια διώρυγα είναι απαραίτητη η πληρωμή ενός ποσού. Οι διώρυγες προσφέρουν αρκετά ταχύτερους χρόνους διέλευσης και επίσης μειωμένο λειτουργικό κόστος λόγω της μείωσης της αναγκαίας απόστασης πλεύσης.

Δυο γνωστές διώρυγες είναι η διώρυγα του Panama και του Suez οι οποίες επιτρέπουν την γρήγορη μεταφορά μεταξύ ηπείρων. Στην Ελλάδα υπάρχει η διώρυγα της Κορίνθου, είναι μια διώρυγα που συνδέει τον κόλπο της Κορίνθου με τον Σαρωνικό κόλπο στο Αιγαίο πέλαγος. Έχει μήκος 6.4 χιλιόμετρα και πλάτος μόλις 21.4 μετρά γεγονός που το καθιστά αδιάβατο από τα περισσότερα σύγχρονα πλοία.



Εικόνα 2.9: Διώρυγα Κορίνθου

2.3.6. Ζήτηση – Έσοδα και Σαμποτάζ

- Ζήτηση

Το μέγεθος παραγωγής και η κατανάλωση ορισμένων προϊόντων ποικίλουν ανάλογα με την περίοδο του έτους, για παράδειγμα μετά από την εποχή συγκομιδής, μετά από διακοπές, φεστιβάλς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στη μεταβλητότητα της ζήτησης. Ορισμένες γιορτές, αργίες και καταστάσεις επηρεάζουν την ζήτηση σε παγκόσμιο επίπεδο ενώ άλλες όχι. Το μεγαλύτερο γεγονός που αλλάζει την ζήτηση είναι η περίοδος των Χριστουγέννων. Οι γιορτές των Χριστουγέννων έχουν ως αποτέλεσμα να δημιουργηθεί μια περίοδος αιχμής στο τρίτο τρίμηνο του έτους (1 Ιουλίου – 30 Σεπτεμβρίου), καθιστώντας την πλήρωση των αποθηκών πριν από τα ψώνια των Χριστουγέννων. Μια επιπλέον περίοδος αιχμής είναι η περίοδος του Κινέζικου νέου έτους, καθώς τα κινέζικα εργοστάσια εξάγουν τα προϊόντα τους πριν κλείσουν για γιορτές.



Εικόνα 2.10 : Εικόνα από το Κινέζικο νέο έτος.

- Έσοδα

Τα έσοδα ενός φορτίου συνδέονται στενά με την ισορροπία μεταξύ ζήτησης και προσφοράς του όγκου του φορτίου που πρέπει να μεταφερθεί και την προσφερόμενη χωρητικότητα από τους μεταφορείς (Carriers).

Καθώς η ζήτηση δεν είναι συμμετρική (Π.χ. Η Ασία εξάγει πολύ περισσότερο από ότι εισάγει), ενώ η προσφορά είναι συμμετρική (Τα πλοία επιστέφουν στην Ασία για να επαναφορτισθούν) επομένως ούτε τα έσοδα θα είναι συμμετρικά. Η μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων από την Ασία στην Ευρώπη μπορεί να κοστίσει έως και τρεις φορές περισσότερο από το αντίστροφο (Πηγή: Alpaliner).

- Σαμποτάζ και Εμπάργκο

Ως αποτέλεσμα εμπορικών πολιτικών (trade policies) ενδέχεται να υπάρχουν διάφοροι κανόνες σαμποτάζ (sabotage) μεταξύ των χωρών που περιορίζουν εσωτερικές μεταφορές εντός της χώρας, σε πλοία που φέρουν σημαία συγκεκριμένης χώρας και σε πλοία που ανήκουν σε μια χώρα. Το σαμποτάζ ισχύει για τις μεταφορτώσεις που προορίζονται εντός χώρας και μπορεί να υπάρχει και εμπάργκο , δηλαδή μια χώρα Α να κάνει εμπάργκο σε μια χώρα Β, έτσι ένα φορτίο από ή προς την Β δεν θα μπορεί να μεταφορτωθεί στην χώρα Α.

Κεφάλαιο 3

Αλγόριθμοι και Μέθοδοι Βελτιστοποίησης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφέρουμε συνοπτικά ορισμένες μεθόδους και αλγόριθμους, οι οποίες θα μας βοηθήσουν να κατανοήσουμε το επόμενο κεφάλαιο, το οποίο αναφέρεται στην κατασκευή ενός μαθηματικού μοντέλου για την ναυτιλία τακτικών γραμμών.

3.1 Μέθοδοι Λύσης προβλημάτων βελτιστοποίησης

Όταν έχουμε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, μπορούμε να επιλέξουμε να τη λύσουμε με: Ακριβείς αλγόριθμους (Exact algorithms), Ευρετικές μεθόδους (Heuristic methods) και Μέτα-Ευρετικές μεθόδους (Meta-heuristics). Θα αναλύσουμε αυτούς τους τρεις τρόπους βελτιστοποίησης.

- Ακριβείς αλγόριθμοι (Exact algorithms)

Οι ακριβείς αλγόριθμοι είναι σχεδιασμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζουν ότι θα βρεθεί η βέλτιστη λύση σε ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα. Ωστόσο, για πολύ δύσκολα προβλήματα βελτιστοποίησης (π.χ. NP-hard) αυτό το "πεπερασμένο χρονικό διάστημα" μπορεί να αυξηθεί εκθετικά ανάλογα με τις διαστάσεις του προβλήματος.

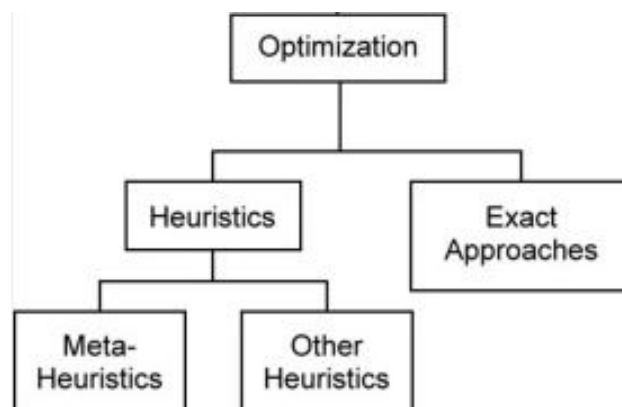
- Ευρετικές μέθοδοι (Heuristic methods)

Οι ευρετικές μέθοδοι (Heuristic methods) παρέχουν ένα αποτέλεσμα που είναι "αρκετά καλό" σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα. Οι ευρετικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την ταχύτητά τους αφού οι άλλοι μέθοδοι μπορεί να είναι πιο ακριβείς. Επομένως, εξισορροπείται η ποιότητα του αποτελέσματος με το χρόνο που δαπανάται για τον υπολογισμό της λύσης, δηλαδή μειώνετε η ποιότητα λύσης αλλά η λύση επέρχεται σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Οι ευρετικές μέθοδοι είναι τεχνικές που εξαρτώνται από το πρόβλημα (Problem-Dependent Techniques). Ως εκ τούτου, συνήθως προσαρμόζονται στο πρόβλημα και προσπαθούν να αξιοποιήσουν πλήρως τις

ιδιαιτερότητες του προβλήματος. Ωστόσο, επειδή συχνά είναι πολύ *άπληστοι* (Greedy Algorithms), συνήθως παγιδεύονται σε ένα τοπικό ακρότατο και, ως εκ τούτου, αποτυγχάνουν, γενικά, να συγκλίνουν στο ολικό ακρότατο.

- **Μετα-Ευρετικές μέθοδοι (Meta-heuristics)**

Οι μετα-ευρετικές μέθοδοι (Meta-heuristics), από την άλλη πλευρά, είναι τεχνικές ανεξάρτητες από το πρόβλημα (Problem-Independent Techniques). Έτσι, δεν επωφελούνται από οποιαδήποτε ιδιαιτερότητα του προβλήματος και, ως εκ τούτου, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μαύρα κουτιά. Σε γενικές γραμμές, δεν είναι *άπληστοι* (not greedy). Αντιθέτως, μπορούν ακόμη και να δεχτούν μια προσωρινή επιδείνωση της λύσης (για παράδειγμα όπως η simulated-annealing), που τις επιτρέπει να διερευνήσουν διεξοδικότερα το χώρο λύσης και έτσι να βρουν μια καλύτερη λύση (που μερικές φορές θα συμπίπτει με ολικό ακρότατο). Παρόλο που μια μετα-ευρετική μέθοδος είναι τεχνική ανεξάρτητη από το πρόβλημα, είναι απαραίτητο να γίνει κάποια τελειοποίηση των εγγενών παραμέτρων της, προκειμένου να προσαρμοστεί η τεχνική στο πρόβλημα. Στην πραγματικότητα, μια μετα-ευρετική είναι παράλληλα και ευρετική (Heuristic), αλλά πιο ισχυρή, αφού σε κάθε καλή μετα-ευρετική υπάρχει ένας μηχανισμός για να αποφευχθεί η παγίδευση σε ένα τοπικό ακρότατο.



Εικόνα 3.1: Πρόβλημα βελτιστοποίησης και οι μέθοδοι λύσης του.

3.2 Υπολογιστική πολυπλοκότητα

P, NP, NP-Complete, NP-Hard

Στην θεωρία υπολογιστικής πολυπλοκότητας είναι οι τάξεις πολυπλοκότητας που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή ορισμένων τύπων προβλημάτων λήψης αποφάσεων.

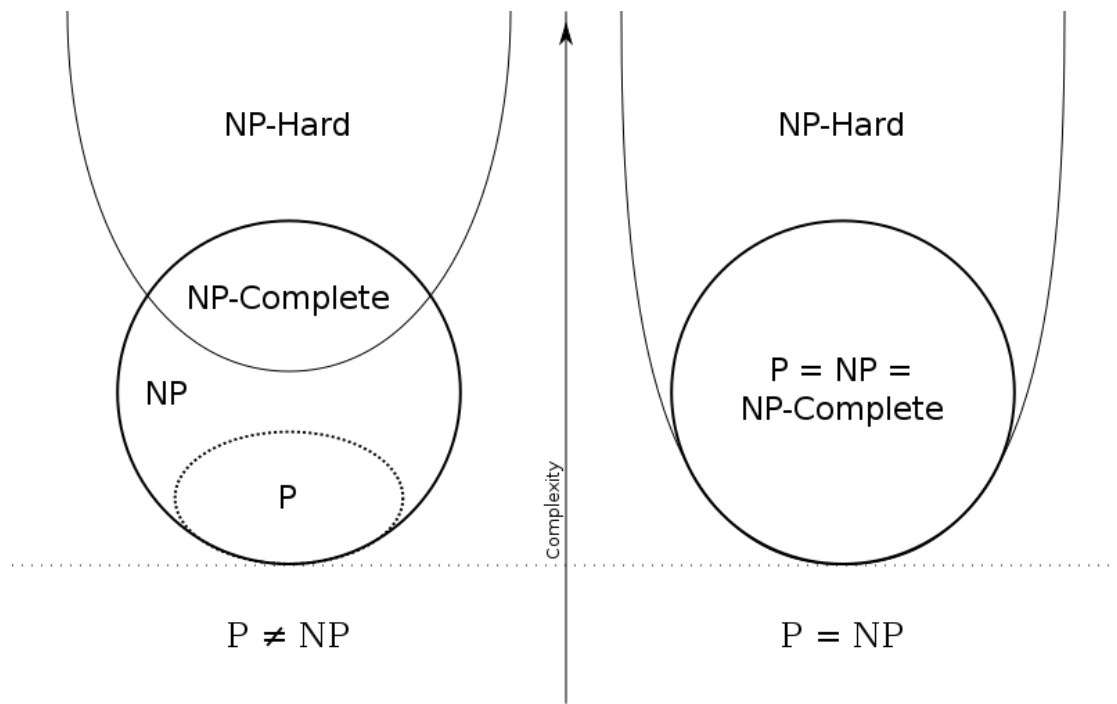
- P:

Περιέχει όλα τα προβλήματα αποφάσεων που μπορούν να επιλυθούν από μια ντετερμινιστική μηχανή Turing σε πολυωνυμικό χρόνο.

- NP:

Στη θεωρία υπολογιστικής πολυπλοκότητας, η NP (**N**ondeterministic **P**olynomial time) είναι μια κλάση πολυπλοκότητας που χρησιμοποιείται για την περιγραφή ορισμένων τύπων προβλημάτων λήψης αποφάσεων. Ο τυπικός ορισμός του NP αναφέρει ότι είναι το σύνολο των προβλημάτων απόφασης που επιλύονται σε πολυωνυμικό χρόνο από μια θεωρητική μη-ντετερμινιστική μηχανή Turing. Ανεπίσημα, το NP είναι το σύνολο όλων των προβλημάτων απόφασης για τα οποία οι περιπτώσεις όπου η απάντηση είναι "ναι" έχουν επαληθευμένες αποδείξεις. Πιο συγκεκριμένα, αυτές οι αποδείξεις πρέπει να είναι επαληθεύσιμες με ντετερμινιστικούς υπολογισμούς που μπορούν να εκτελεστούν σε πολυωνυμικό χρόνο. Αυτό σημαίνει ότι αν κάποιος μας δώσει ένα πρόβλημα και ένα πιστοποιητικό για την απάντηση που μας υποδεικνύει ότι είναι "ναι", μπορούμε να ελέγξουμε ότι είναι σωστό σε πολυωνυμικό χρόνο.

Η τάξη πολυπλοκότητας P περιέχεται στο NP (Εικόνα 3.2), αλλά το NP περιέχει πολλά σημαντικά προβλήματα, τα πιο δύσκολα από τα οποία ονομάζονται προβλήματα NP-Πλήρης (NP-complete), των οποίων οι λύσεις επαρκούν για την αντιμετώπιση οποιουδήποτε άλλου προβλήματος NP σε πολυωνυμικό χρόνο.



Εικόνα 3.2 : Διάγραμμα Euler για το σύνολο των προβλημάτων P, NP, NP-πλήρη, και NP-σκληρό . Η αριστερή πλευρά ισχύει με την παραδοχή ότι $P \neq NP$, ενώ η δεξιά πλευρά είναι έγκυρη υπό την προϋπόθεση ότι $P = NP$.

- NP-Complete (NP-πλήρη):

Στη θεωρία της υπολογιστικής πολυπλοκότητας, ένα πρόβλημα λήψης απόφασης NP-πλήρη είναι ένα που ανήκει τόσο στις τάξεις NP όσο και στο NP-hard. Παρόλο που οποιαδήποτε δεδομένη λύση σε ένα NP-πλήρη πρόβλημα μπορεί να επαληθευτεί (Verified) γρήγορα (σε πολυωνυμικό χρόνο), δεν υπάρχει γνωστός αποτελεσματικός τρόπος για την εξεύρεση λύσης (Solution) που είναι το πρώτο στάδιο κατά την επίλυση οποιουδήποτε προβλήματος. Το πιο αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό των NP-πλήρη προβλημάτων είναι ότι δεν υπάρχει γρήγορη λύση σε αυτά. Ο χρόνος που απαιτείται για την επίλυση του προβλήματος χρησιμοποιώντας οποιονδήποτε γνωστό αλγόριθμο αυξάνεται πολύ γρήγορα όταν αυξάνεται το μέγεθος του προβλήματος. Τα NP-πλήρη προβλήματα αντιμετωπίζονται συχνά χρησιμοποιώντας ευρετικές μεθόδους και αλγόριθμους προσέγγισης.

Το NP-Complete είναι μια κλάση πολυπλοκότητας που αντιπροσωπεύει το σύνολο όλων των προβλημάτων X στο NP για τα οποία είναι δυνατόν να αναχθεί οποιοδήποτε άλλο πρόβλημα NP από το Y σε X σε πολυωνυμικό χρόνο.

- NP-Hard:

Ένα πρόβλημα είναι NP-hard αν ένας αλγόριθμος για την επίλυσή του μπορεί να μεταφραστεί σε έναν για την επίλυση κάθε προβλήματος NP (Non-deterministic Polynomial time). Αυτά είναι τα προβλήματα που είναι τουλάχιστον τόσο σκληρά (hard) όσο τα NP-πλήρη προβλήματα. Τα NP-Hard προβλήματα δεν είναι απαραίτητο να βρίσκονται στο NP (Εικόνα 3.2), και δεν είναι αναγκαίο να είναι προβλήματα λήψης αποφάσεων.

Ο ακριβής ορισμός είναι ότι ένα πρόβλημα X είναι NP-Hard, εάν υπάρχει ένα NP-Complete πρόβλημα Y , τέτοιο ώστε το Y είναι αναγώγιμο στο X σε πολυωνυμικό χρόνο.

Problem Type	Verifiable in P time	Solvable in P time	Increasing Difficulty
P	Yes	Yes	 V
NP	Yes	Yes or No *	
NP-Complete	Yes	Unknown	
NP-Hard	Yes or No **	Unknown ***	

Πίνακας 3.1: Ο πίνακας μας δείχνει τις κατηγορίες των προβλημάτων που αναλύσαμε και αν έχουμε την δυνατότητα να λύσουμε και να εξακριβώσουμε την λύση μας σε πολυωνυμικό χρόνο. Επιπλέον όσο κατεβαίνουμε τόσο πιο δύσκολο είναι το πρόβλημα.

Όπου P= Polynomial (πολυωνυμικό). Παρακάτω είναι οι σημειώσεις για τους αστερίσκους στα Yes , No και Unknown:

- * Ένα πρόβλημα NP το οποίο είναι και P μπορεί να λυθεί σε P χρόνο (**Solvable in P time**).
- ** Ένα πρόβλημα NP-Hard το οποίο είναι και NP-Complete είναι εξακριβώσιμο σε P χρόνο (**Verifiable in P time**).
- *** Τα προβλήματα NP-Complete (όλα τα οποία αποτελούν ένα υποσύνολο του.

Τα υπόλοιπα προβλήματα του NP-Hard δεν είναι.

Το πρόβλημα σχεδιασμού δικτύων ναυτιλίας τακτικών γραμμών είναι **NP-hard** (Agarwal and Ergun, 2010).

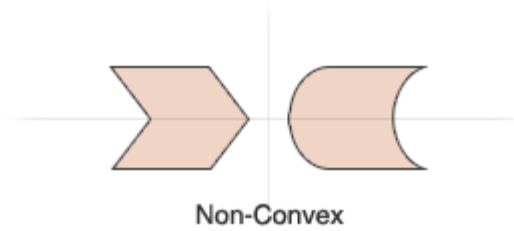
3.3 Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός (MIP) και μέθοδος Branch-and-Bound

- **Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός** (Mixed-Integer Programming, MIP)

Πρόβλημα μικτού-ακέραιου προγραμματισμού (MIP) είναι εκείνο στο οποίο κάποιες από τις μεταβλητές απόφασης είναι περιορισμένες να είναι ακέραιες τιμές, δηλαδή η βέλτιστη λύση μιας τέτοιας μεταβλητής έχει την δυνατότητα να είναι μόνο ακέραια τιμή (δηλαδή -1, 0, 1, 2 κ.λπ.).

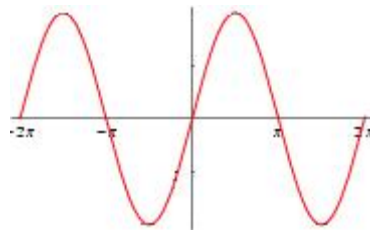
Μια σημαντική ειδική περίπτωση είναι όταν μία μεταβλητή απόφασης π.χ. X_1 έχει την δυνατότητα να λαμβάνει μόνο δύο τιμές σαν λύση, τις 0 ή 1. Τέτοιες μεταβλητές ονομάζονται 0-1 ή δυαδικές μεταβλητές και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μοντελοποίηση αποφάσεων τύπου ναι / όχι, για παράδειγμα αν θα γίνει επιλογή ενός πλοίου με χωρητικότητα 20,000 TEU ή αν θα αγοραστεί ένα κομμάτι εξοπλισμού. Ωστόσο, οι ακέραιες μεταβλητές καθιστούν ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης **μη κυρτό (non-convex)** και επομένως πολύ πιο δύσκολο να λυθεί. Ο χρόνος λύσης και η χωρητικότητα της μνήμης μπορούν να αυξηθούν εκθετικά με την προσθήκη καινούργιων ακέραιων μεταβλητών.

Ένα μη κυρτό πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι οποιοδήποτε πρόβλημα όπου η αντικειμενική συνάρτησης ή οποιοσδήποτε από τους περιορισμούς είναι μη κυρτός. Παρακάτω φαίνεται ένα διάγραμμα μη κυρτού προβλήματος.



Διάγραμμα 3.1: Μή κυρτές περιοχές

Ένα τέτοιο πρόβλημα μπορεί να έχει πολλαπλές εφικτές περιοχές και πολλαπλά τοπικά ακρότατα σε κάθε περιοχή. Μια μη κυρτή συνάρτηση "καμπυλώνει προς τα πάνω και προς τα κάτω" - δεν είναι ούτε κυρτή ούτε κοίλη. Ένα οικείο παράδειγμα είναι η συνάρτηση ημίτονου :



Διάγραμμα 3.2: Γραφική Παράσταση Ημίτονου

Ακόμα και με εξαιρετικά εξελιγμένους αλγόριθμους και σύγχρονους υπερυπολογιστές, υπάρχουν μοντέλα με μερικές εκατοντάδες ακέραιες μεταβλητές που δεν έχουν επιλυθεί ποτέ με βέλτιστο τρόπο. Αυτό συμβαίνει επειδή πολλοί συνδυασμοί συγκεκριμένων ακέραιων τιμών για τις μεταβλητές πρέπει να δοκιμαστούν και κάθε συνδυασμός απαιτεί τη λύση ενός γραμμικού ή μη γραμμικού προβλήματος βελτιστοποίησης. Ο αριθμός των συνδυασμών μπορεί να αυξηθεί εκθετικά με το μέγεθος του προβλήματος.

Ένα κλασικό μικτό ακέραιο πρόγραμμα μπορεί να γραφτεί ως εξής :

Αντικειμενική Συνάρτηση : $max Z = cx + dy$

subject to: $Ax + By \leq b \quad (1)$

$$x \in \mathbb{Z}_+^n, y \in \mathbb{R}_+^m$$

Όπου x είναι μια ακέραια μεταβλητή ενώ η y είναι μια συνεχής μεταβλητή. $c \in \mathbb{R}^n$ και $d \in \mathbb{R}^m$ είναι οι αντικειμενικοί συντελεστές για το x και το y αντίστοιχα. $A \in \mathbb{R}^{k \times n}$ είναι ένας $k \times n$ πίνακας συντελεστών για τις ακέραιες μεταβλητές x και ανάλογα $B \in \mathbb{R}^{k \times m}$ είναι $k \times m$ πίνακας συντελεστών για τις συνεχείς μεταβλητές y . $b \in \mathbb{R}^k$ είναι το διάνυσμα των περιορισμών.

3.3.1 Μέθοδος Διακλάδωσης και Οριοθέτησης (Branch-and-Bound) και MIP

Τα μικτά προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού (MIP) εφόσον αποφασίσουμε να χρησιμοποιήσουμε ακριβείς αλγόριθμους (Exact algorithms) γενικά επιλύονται χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο branch-and-bound για γραμμικό προγραμματισμό.

Δεδομένου ότι οι MIP είναι μη κυρτές, πρέπει να επιλυθούν με κάποια συστηματική και εξαντλητική αναζήτηση. Η "κλασική" μέθοδος για την επίλυση αυτών των προβλημάτων ονομάζεται Μέθοδος Διακλάδωσης και Οριοθέτησης ή Branch and Bound. Η βασική μέθοδος branch-and-bound βάσει το γραμμικό προγραμματισμό (Linear Programming (LP)-based branch-and-bound) μπορεί να περιγραφεί ως εξής. Ξεκινάμε με το αρχικό MIP. Αν δεν γνωρίζουμε πώς να λύσουμε αυτό το πρόβλημα άμεσα, αφαιρούμε όλους τους περιορισμούς ακεραιότητας. Ο προκύπτων LP ονομάζεται linear-programming relaxation της αρχικής MIP διότι χαλαρώσαμε τους περιορισμούς. Μπορούμε λοιπόν να λύσουμε αυτό το LP. Όταν λύσουμε αυτό το καινούργιο χαλαρωμένο πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού εάν στην λύση μας οι μεταβλητές απόφασης με ακέραιους περιορισμούς έχουν ακέραιες τιμές, τότε δεν απαιτείται κάτι περαιτέρω, όμως εάν μία ή περισσότερες ακέραιες μεταβλητές έχουν μη ακέραιες λύσεις, η μέθοδος Branch και Bound επιλέγει μία από αυτές τις μεταβλητές και την "διακλαδώνει" ("branches") (Εικόνα 3.3), δημιουργώντας δύο νέα υπο-προβλήματα όπου η τιμή αυτής της μεταβλητής είναι πιο περιορισμένη. Αυτά τα δευτερεύοντα προβλήματα λύνονται και η διαδικασία επαναλαμβάνεται, μέχρις ότου βρεθεί μια λύση που ικανοποιεί όλους τους ακέραιους περιορισμούς.

Ορισμός μεταβλητών του προβλήματος MCFP

- $G = (N, A)$ είναι ένα κατευθυνόμενο γράφημα.
- Χωρητικότητα u_{ij} για κάθε $i, j \in V$: εάν $(i, j) \notin A$ τότε $u_{ij} = 0$.
- K είναι ένα σύνολο αγαθών.
- c_{ij}^k το κόστος αποστολής μιας μονάδας αγαθού k μέσω (i, j) .
- x_{ij}^k η ροή του αγαθού k μέσω (i, j) .
- Η ζήτηση (ή η προσφορά) σε κάθε κόμβο $i \in N$ για εμπορεύμα k ορίζεται ως b_i^k , όπου $b_i^k \geq 0$ δηλώνει έναν κόμβο προσφοράς και $b_i^k < 0$ δηλώνει έναν κόμβο ζήτησης.
- Η συνολική ποσότητα ροής από όλα τα αγαθά που μπορούν να αποσταλούν σε κάθε σύνδεσμο δεν μπορεί να είναι παραπάνω από u_{ij} .

Το πρόβλημα μπορεί να διαμορφωθεί ως ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού ως εξής:

$$\text{Minimize} \quad \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij}^k x_{ij}^k$$

$$\text{Subject to} \quad \sum_{k \in K} x_{ij}^k \leq u_{ij} \quad (i, j) \in A \quad (\text{Χωρητικότητα})$$

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^k - \sum_{(j,i) \in A} x_{ji}^k = b_i^k \quad i \in N, k \in K \quad (\text{Ισορροπία})$$

$$x_{ij}^k \geq 0 \quad (i, j) \in A, k \in K$$

Σε αυτή τη διατύπωση του προβλήματος, οι περιορισμοί (χωρητικότητα) περιορίζουν τη συνολική ροή σε όλα τα αγαθά σε κάθε τόξο. Οι περιορισμοί (ισορροπία) εξασφαλίζουν ότι η ροή των εμπορευμάτων που εξέρχονται από κάθε κόμβο προσφοράς και εισέρχονται σε κάθε κόμβο ζήτησης είναι ισορροπημένη.

3.5 Μέθοδοι εσωτερικού σημείου (Interior point methods)

Μέθοδοι εσωτερικού σημείου (IP methods) είναι μια κατηγορία αλγορίθμων που επιλύουν γραμμικά και μη γραμμικά κυρτά προβλήματα βελτιστοποίησης.

Το 1984, Ο Narendra Karmarkar ανέπτυξε μια μέθοδο γραμμικού προγραμματισμού που ονομάστηκε αλγόριθμος Karmarkar. Ο αλγόριθμος Karmarkar εκτελείται σε πολυωνυμικό χρόνο και είναι πολύ αποτελεσματικός. Συγκλίνει στην βέλτιστη λύση σε πολυωνυμικό χρόνο. Παρέχει λύσεις γραμμικών προβλημάτων προγραμματισμού που είναι πέρα από τις δυνατότητες της μεθόδου simplex. Σε αντίθεση με τη μέθοδο simplex, φτάνει στην καλύτερη λύση διασχίζοντας το εσωτερικό της εφικτής περιοχής. Η μέθοδος μπορεί να γενικευθεί για προβλήματα που αφορούν τον κυρτό προγραμματισμό με την χρήση μιας αυτοσυμπληρούμενης λειτουργίας φραγμού (self-concordant barrier function) που χρησιμοποιείται για την κωδικοποίηση του κυρτού συνόλου.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ενώ ο Karmarkar ισχυρίστηκε ότι η εφαρμογή του ήταν πολύ πιο αποτελεσματική από τη μέθοδο simplex, οι πλήρεις δυνατότητες της μεθόδου εσωτερικού σημείου καθιερώθηκαν αργότερα. Μέχρι το 1994, υπήρχαν περισσότερα από 1.300 δημοσιευμένα επιστημονικά άρθρα σχετικά με τις μεθόδους εσωτερικού σημείου.

Οι αλγόριθμοι εσωτερικού σημείου χρησιμοποιούνται και για την επίλυση προβλημάτων Ροής Πολλαπλών Αγαθών (Multi-Commodity Flow Problem, MCFP) σε πολυωνυμικό χρόνο. Οι Karoor και Vaidya [1989] πρότειναν μία μέθοδο για τη λύση προβλημάτων πολύ-παραγοντικής ροής. Ο αλγόριθμος του Tardos [1986] έχει την δυνατότητα να λύσει προβλήματα ροής πολλαπλών αγαθών (MCFP) σε πολυωνυμικό χρόνο.

3.6 Many-to-Many Shortest Path Problem

Λαμβάνοντας υπόψη τα μεγάλα οδικά δίκτυα, μας ενδιαφέρει να βρούμε τις ταχύτερες συνδέσεις μεταξύ συγκεκριμένων τοποθεσιών S και T ή αλλιώς μεταξύ μιας Πηγής (**Source**) και ενός στόχου (**Target**). Ο υπολογισμός ενός τέτοιου πίνακα απόστασης ονομάζεται many-to-many Πρόβλημα της Συντομότερης Διαδρομής ή **many-to-many shortest path problem**. Για πολλά προβλήματα στον τομέα της εφοδιαστικής (logistics), αυτό είναι ένα σημαντικό υπο-πρόβλημα. Για παράδειγμα, για προβλήματα δρομολόγησης οχημάτων (vehicle routing problems, VRP) απαιτείται να εισαχθούν αυτά τα δεδομένα. Επίσης, οι πίνακες απόστασης χρησιμοποιούνται ως βοηθητικό εργαλείο (auxiliary tool) σε διάφορα προβλήματα που αφορούν τον ακριβή (exact) και ευρετικό (heuristic) υπολογισμό της μικρότερης διαδρομής.

Για την επίλυση του προβλήματος many-to-many shortest path problem, μπορεί κανείς να εκτελέσει απλώς τον γνωστό αλγόριθμο της Συντομότερης Διαδρομής του Dijkstra για κάθε κόμβο Πηγή (Source). Λαμβάνοντας υπόψη τα τεράστια γραφήματα που υπάρχουν, για να λυθεί το πρόβλημα με αυτή τη προσέγγιση απαιτείται πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα.

Αυτό το πρόβλημα μπορεί να οριστεί πιο επίσημα ως εξής:

Δοθέντος ένα σύνολο από πηγές (**Sources**) $\mathbf{S} = \{s_i: 0 \leq i < |S|\} \subset V$ και ένα σύνολο στόχων (**Targets**) $\mathbf{T} = \{t_j: 0 \leq j < |T|\} \subset V$ θέλουμε να υπολογίσουμε μια μήτρα απόστασης $d_{i,j} = D \in \mathbb{R}^{|S| \times |T|}$ έτσι ώστε $d_{i,j} = d(s_i, t_j)$ να είναι το μήκος της μικρότερης διαδρομής από s_i προς το t_j . Θα αναφερόμαστε σε αυτή την διαδικασία ως many-to-many shortest path problem. Αν $|S| = |T|$ ονομάζουμε την D τετραγωνική μήτρα απόστασης, αλλιώς ασύμμετρη μήτρα.

3.7 Μέθοδος παραγωγής στήλης (Column Generation)

Αρχικά θα ορίσουμε σύντομα την έννοια δυϊκών τιμών ή αλλιώς σκιωδών τιμών αφού θα χρησιμοποιηθεί για να ορίσουμε την μέθοδο παραγωγής στηλών (Column Generation)

▪ Δυϊκές ή σκιώδεις τιμές Dual Prices (a.k.a. Shadow Prices)

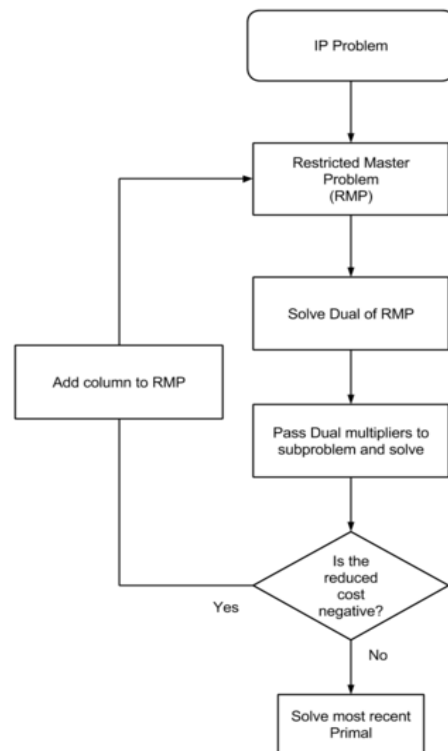
Οι δυϊκές τιμές ή αλλιώς σκιώδεις τιμές είναι μερικές από τις πιο ενδιαφέρουσες τιμές κατά την λύση ενός γραμμικού προγράμματος. Για κάθε περιορισμό αναφέρεται μια δυϊκή τιμή. Η δυϊκή τιμή δίνει τη βελτίωση της αντικειμενικής συνάρτησης εάν ένας περιορισμός χαλαρώσει κατά μία μονάδα.

▪ Μέθοδος παραγωγής στήλης (Column Generation)

Οι αλγόριθμοι παραγωγής στήλης χρησιμοποιούνται για προβλήματα Μικτού Ακέραιου Προγραμματισμού (MIP). Η διατύπωση αρχικά προτάθηκε από τους Ford και Fulkerson το 1958. Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου δημιουργίας στήλης είναι ότι δεν είναι απαραίτητο να απαριθμούνται όλες οι δυνατές περιπτώσεις σε έναν κύριο αλγόριθμο βελτιστοποίησης (Master Problem). Αντί αυτού, το πρόβλημα διατυπώνεται αρχικά ως ένα περιορισμένο κύριο πρόβλημα (Restricted Master Problem, RMP). Αυτό το περιορισμένο κύριο πρόβλημα έχει όσο το δυνατόν λιγότερες μεταβλητές και οι νέες μεταβλητές εισάγονται στη βάση, παρόμοια με τη μέθοδο Simplex. Όπως και στην μέθοδο Simplex, αυτό σημαίνει ότι αν μπορεί να βρεθεί μια στήλη με αρνητικό μειωμένο κόστος (negative reduced cost), προστίθεται στο περιορισμένο κύριο πρόβλημα και η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου να μην μπορούν να προστεθούν άλλες στήλες στο περιορισμένο κύριο πρόβλημα.

Το πρόβλημα που επιλύεται χωρίζεται σε δύο τμήματα: στο περιορισμένο κύριο πρόβλημα και στο υποπρόβλημα. Το περιορισμένο κύριο πρόβλημα είναι το κύριο πρόβλημα αλλά περιορισμένο αφού εξετάζετε μόνο ένα υποσύνολο των μεταβλητών. Το υποπρόβλημα είναι ένα νέο πρόβλημα που δημιουργήθηκε για να προσδιορίσει μια νέα μεταβλητή. Η αντικειμενική συνάρτηση του υποπροβλήματος είναι το μειωμένο κόστος της νέας μεταβλητής σε σχέση με τις τρέχουσες δυϊκές μεταβλητές που απαιτούνται να υπακούνε περιορισμούς.

Η διαδικασία λειτουργεί ως εξής. Το (περιορισμένο) κύριο πρόβλημα επιλύεται, από αυτή τη λύση είμαστε σε θέση να αποκτήσουμε δυϊκές τιμές (ή σκιάδες τιμές) για κάθε έναν από τους περιορισμούς του (περιορισμένου) κύριου προβλήματος. Αυτές οι πληροφορίες στη συνέχεια χρησιμοποιούνται στην αντικειμενική συνάρτηση του υποπροβλήματος. Το υποπρόβλημα λύνεται. Εάν η αντικειμενική τιμή του υποπροβλήματος είναι αρνητική, εντοπίστηκε μια μεταβλητή με αρνητικό μειωμένο κόστος. Αυτή η μεταβλητή προστίθεται έπειτα στο (περιορισμένο) κύριο πρόβλημα και το (περιορισμένο) κύριο πρόβλημα επιλύεται εκ νέου. Η επανεπίλυση του (περιορισμένου) κύριου προβλήματος θα δημιουργήσει μια νέα σειρά δυϊκών τιμών και η διαδικασία θα επαναληφθεί έως ότου εντοπιστούν μη αρνητικές μειωμένες μεταβλητές κόστους. Το υποπρόβλημα επιστρέφει μια λύση με μη αρνητικό μειωμένο κόστος, και τότε μπορούμε να καταλήξουμε στο ότι η λύση στο κύριο πρόβλημα είναι βέλτιστη.



Εικόνα 3.4: Ένα απλό διάγραμμα ροής μεθόδου παραγωγής στήλης

Οι αλγόριθμοι παραγωγής στήλης (Column generation algorithms) είναι πολύ χρήσιμοι όταν ασχολούμαστε με μεγάλο αριθμό μεταβλητών. Είναι αποτελεσματικοί επειδή αποφεύγουν να απαριθμήσουν όλα τα πιθανά στοιχεία ενός παραδοσιακού προβλήματος Μικτού Ακέραιου Προγραμματισμού (MIP) και αντί αυτού αξιολογούν μόνο τις μεταβλητές που είναι αναγκαίες. Αυτό επιτυγχάνεται φέρνοντας στήλες στο Περιορισμένο Κύριο Πρόβλημα (Restricted Master Problem, RMP) όταν το μειωμένο κόστος είναι αρνητικό. Όπως αναφέραμε προηγουμένως η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου βρεθεί μη αρνητικό μειωμένο κόστος και στη συνέχεια μπορεί να λυθεί το πιο πρόσφατο πρωτεύον για να οριστεί ένα όριο για το πρόβλημα MIP. Η χρήση ενός αλγορίθμου δημιουργίας στήλης εξοικονομεί πολύτιμο χρόνο.

3.8 Tabu search

Η αναζήτηση Tabu, δημιουργήθηκε από τον Fred W. Glover το 1986 και επισημοποιήθηκε το 1989, είναι μια Μέτα-Ευρετική μέθοδος αναζήτησης (metaheuristic search method) που χρησιμοποιεί τοπικές μεθόδους αναζήτησης (Local Search Methods) με σκοπό τη μαθηματική βελτιστοποίηση. Η αναζήτηση Tabu ξεκινάει σαν τις απλές μεθόδους αναζήτησης ακρότατου, συνεχίζοντας επαναληπτικά από ένα σημείο (λύση) σε ένα άλλο μέχρι ένα επιλεγμένο τερματισμό.

Το Tabu Search (TS) είναι μια επέκταση των κλασικών μεθόδων τοπικής αναζήτησης (Local Search, LS). Στην πραγματικότητα, τα βασικά TS μπορούν να θεωρηθούν απλά ως συνδυασμός LS με την προσθήκη βραχυπρόθεσμης μνήμης.

Αρχικά θα ορίσουμε την έννοια **LS (Local Search)**: μπορεί να χαρακτηριστεί συνοπτικά ως μια επαναληπτική διαδικασία αναζήτησης, η οποία ξεκινώντας από μια αρχική εφικτή λύση, την βελτιώνει σταδιακά εφαρμόζοντας μια σειρά τοπικών τροποποιήσεων (moves).

Για να μην παγιδευτεί, σταματήσει και αρκεστεί σε μια λύση τοπικού ακρότατου, ο αλγόριθμος TS έχει ορισμένες προσθήκες που υπολείπονται από το απλό LS. Η βασική αρχή του Tabu Search είναι να ακολουθήσει (LS) κάθε φορά που συναντά ένα τοπικό ακρότατο όμως η επιστροφή σε λύσεις που έχει είδη επισκεφθεί η διαδικασία έχει

πλέον απαγορευτεί (cycling is prevented) με την χρήση μια μνήμης, η μνήμη αυτή ονομάζεται Tabu list. Το Tabu list καταγράφει το πρόσφατο ιστορικό της αναζήτησης. Τα Tabus είναι ένα από τα κύρια στοιχεία που διακρίνει το Tabu Search (TS) από ένα απλό Local Search (LS), αφού όπως αναφέραμε τα Tabus χρησιμοποιούνται με σκοπό να αποτρέψουν την κυκλική επανάληψη λύσεων όταν απομακρύνονται από τοπικά ακρότατα με κινήσεις που δεν βελτιώνουν την διαδικασία.

Σε κάθε επανάληψη του LS ή του TS, μπορούν να εφαρμοστούν τοπικοί μετασχηματισμοί στην τρέχουσα λύση, που δηλώνονται ως S , ορίζουν ένα σύνολο γειτονικών λύσεων στον χώρο αναζήτησης, που ονομάζεται $N(S)$ (the neighborhood of S). Το $N(S)$ είναι ένα υποσύνολο του χώρου αναζήτησης που ορίζεται ως:

$N(S) = \{\text{λύσεις που λαμβάνονται με την εφαρμογή ενός μοναδικού τοπικού μετασχηματισμού στο } S\}$

Τα tabus μερικές φορές είναι πολύ ισχυροί: μπορεί να απαγορεύσουν ελκυστικές κινήσεις, ακόμη και όταν δεν υπάρχει κίνδυνος επανάληψης (cycling) ή μπορεί να οδηγήσουν σε γενική στασιμότητα της διαδικασίας αναζήτησης. Επομένως, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν αλγοριθμικές διαδικασίες που θα επιτρέψουν σε κάποιον να ακυρώσει tabus. Αυτά ονομάζονται κριτήρια προσδοκίας (**Aspiration criteria**). Το πιο απλό και συνηθέστερα χρησιμοποιούμενο κριτήριο προσδοκίας (Aspiration criteria) (που βρίσκεται σε όλες σχεδόν τις υλοποιήσεις TS) επιτρέπει μια κίνηση, ακόμα και αν είναι tabu, εάν καταλήξει σε μια λύση με μια αντικειμενική τιμή καλύτερη από την μέχρι πρότινος βέλτιστη γνωστή λύση.

• Υπόδειγμα απλής αναζήτησης Tabu

Είμαστε πλέον σε θέση να δώσουμε έναν γενικό αλγόριθμο για την TS, ενσωματώνοντας τα στοιχεία που έχουμε δει μέχρι στιγμής. Υποθέτουμε ότι προσπαθούμε να ελαχιστοποιήσουμε μια συνάρτηση $f(S)$ σε κάποιο πεδίο ορισμού και εφαρμόζουμε την αποκαλούμενη "best improvement" έκδοση του TS, δηλαδή την έκδοση στην οποία κάποιος επιλέγει σε κάθε επανάληψη την καλύτερη δυνατή κίνηση (αυτή είναι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη έκδοση του TS).

Αρχικά θα ορίσουμε ορισμένους συμβολισμούς που θα χρησιμοποιήσουμε στον αλγόριθμο:

- ο S , η τρέχουσα λύση,
- ο S^* , η βέλτιστη-γνωστή λύση ,
- ο f^* , η τιμή της S^* .
- ο $N(S)$, the neighborhood of S (γειτονιά της λύσης S) ,
- ο $\tilde{N}(S)$, το "αποδεκτό" υποσύνολο του $N(S)$ (δηλαδή, μη-tabu ή το επιτρεπτό από κριτήριο προσδοκίας (Aspiration criteria)).

Αρχικοποίηση

Επιλογή (κατασκευή) μιας αρχικής λύσης S_0 .

Ορίζουμε $S := S_0$, $f^* := f(S_0)$, $S^* := S_0$, $T := \emptyset$.

Αναζήτηση

While (εφόσον το κριτήριο τερματισμού δεν έχει ικανοποιηθεί εκτέλεσε) **do**

- ο *Select S in $\operatorname{argmin} [f(S')]$; (Best candidate/ solution)*

$$S' \in \tilde{N}(S)$$

- ο *if $f(S) < f^*$, then set $f^* := f(S)$, $S^* := S$;*
- ο *κατάγραψε το Tabu για την τρέχουσα κίνηση στο T*

(διάγραψε την παλαιότερη καταχώρηση εάν είναι απαραίτητο);

endwhile.

• Κριτήριο τερματισμού

Θεωρητικά, η αναζήτηση θα μπορούσε να συνεχιστεί για πάντα, εκτός εάν η βέλτιστη τιμή του προβλήματος είναι εκ των προτέρων γνωστή. Στην πράξη, προφανώς, η αναζήτηση πρέπει να σταματήσει σε κάποιο σημείο. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα κριτήρια διακοπής στην TS είναι:

- Μετά από έναν σταθερό αριθμό επαναλήψεων (ή ένα σταθερό ποσό χρόνου CPU).
- Μετά από κάποιο αριθμό επαναλήψεων χωρίς βελτίωση της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης (αυτό το κριτήριο που χρησιμοποιείται στις περισσότερες εφαρμογές).
- Όταν η αντικειμενική συνάρτηση φτάσει σε μια προκαθορισμένη τιμή κατωφλίου.

Σε σύνθετα σχέδια *tabu*, η αναζήτηση συνήθως σταματά μετά την ολοκλήρωση μιας ακολουθίας φάσεων, με τη διάρκεια της κάθε φάσης να καθορίζεται από ένα από τα παραπάνω κριτήρια.

Κεφάλαιο 4

Μαθηματική μοντελοποίηση και επίλυση προβλήματος ναυτιλίας τακτικών γραμμών

Οι εταιρείες ναυτιλίας τακτικών γραμμών αντιμετωπίζουν ένα σύνθετο πρόβλημα το οποίο αποτελείται από το καθορισμό του βέλτιστου δρομολογίου (determining the optimal Routing) και την ανάπτυξη του βέλτιστου εμπορικού στόλου για την μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων (deployment of a fleet of container vessels). Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε ένα μαθηματικό μοντέλο Μικτού Ακέραιου Προγραμματισμού (MIP) για την παράλληλη αντιμετώπιση των δύο παραπάνω προβλημάτων. Θα αναπτύξουμε έναν ευρετικό αλγόριθμο για την επίλυση της παραπάνω μοντελοποίησης και θα εξετάσουμε την αποδοτικότητα του αλγόριθμου. Η μαθηματική μοντελοποίηση έγινε από τον Jose Fernando Alvarez το 2009 και δημοσιεύθηκε στο επιστημονικό του άρθρο με τίτλο “ Joint routing and deployment of a fleet of container vessels ”.

4.1 Εισαγωγή στο Μοντέλο

Πιο αναλυτικά , σε αυτό το κεφάλαιο θα μοντελοποιήσουμε ένα πρόβλημα ναυτιλίας τακτικών γραμμών, η μαθηματική μοντελοποίηση θα γίνει μέσω του Μικτού Ακέραιου Προγραμματισμού (MIP). Στην συνέχεια θα επιλύσουμε το MIP που μοντελοποιήσαμε με μια ευρετική μέθοδο την οποία θα την αναλύσουμε. Έπειτα για να εξετάσουμε την αποτελεσματικότητα αυτής της ευρετικής μεθόδου θα χρησιμοποιήσουμε και έναν δεύτερο τρόπο επίλυσης του αρχικού προβλήματος MIP , η δεύτερη μέθοδος είναι κλασική και γνωστή, λύνεται με την χρήση ακριβούς αλγορίθμου (exact algorithm) Branch and Bound. Τέλος, κάνοντας τρία πειράματα, θα εξετάσουμε την αποτελεσματικότητα του ευρετικού αλγορίθμου που σχεδιάσαμε (Heuristic Algorithm) συγκρίνοντας την με τα αποτελέσματα του γνωστού ακριβή αλγορίθμου (Exact Algorithm).

Το κύριο χαρακτηριστικό αυτής της μαθηματικής μοντελοποίησης που την ξεχωρίζει από τις άλλες είναι η δημιουργία ενός μοντέλου που έχει τη δυνατότητα να αντιμετωπίσει ταυτόχρονα δυο προβλήματα, το πρόβλημα καθορισμού βέλτιστου δρομολογίου πλοίων μεταφοράς και το πρόβλημα ανάπτυξης του κατάλληλου εμπορικού στόλου για την μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων. Οι περισσότερες δημοσιεύσεις έχουν αντιμετωπίσει αυτά τα δυο ζητήματα ξεχωριστά αλλά όχι ταυτόχρονα.

Το προτεινόμενο μοντέλο επιτρέπει την χρήση πολλών διαφορετικών τύπων πλοίου, με κάθε ένα να έχει διαφορές στην κατανάλωση καυσίμου, στο ημερήσιο κόστος λειτουργίας και της χωρητικότητας μεταφοράς. Το μοντέλο επιτρέπει την μεταφόρτωση εμπορευματοκιβωτίων, είτε σε συγκεκριμένους λιμένες που έχουν επιλεγεί από τον χρήστη είτε σε λιμένες που προτείνονται από το μοντέλο. Επίσης η ταχύτητα πλεύσης για κάθε υπηρεσία μεταφοράς προσδιορίζεται εντός του μαθηματικού μοντέλου.

Το κεφάλαιο έχει οργανωθεί ως εξής. Η επόμενη ενότητα παρέχει ένα μαθηματικό μοντέλο του προβλήματος δρομολόγησης πλοίων και ανάπτυξης εμπορικού στόλου, καταγράφει τις βασικές αποφάσεις τακτικού επιπέδου και τα έξοδα που αντιμετωπίζει ένας παγκόσμιος μεταφορέας εμπορευματοκιβωτίων. Στη συνέχεια παρουσιάζουμε έναν ευρετικό αλγόριθμο για την επίλυση πολλών περιπτώσεων του προτεινόμενου μοντέλου (MIP). Έπειτα, χρησιμοποιώντας τρεις περιπτώσεις προβλημάτων συγκρίνουμε την απόδοση του ευρετικού αλγορίθμου (Heuristic Algorithm) συγκρίνοντας την με έναν κλασικό ακριβή αλγόριθμο (Exact Algorithm) . Τέλος εξάγουμε και αναφέρουμε χρήσιμα συμπεράσματα.

4.2 Μαθηματική Μοντελοποίηση

Σκοπός του συγκεκριμένου μαθηματικού μοντέλου είναι η ελαχιστοποίηση των λειτουργικών εξόδων κατά τον ορίζοντα του τακτικού σχεδιασμού μιας εταιρείας ναυτιλίας τακτικών γραμμών. Το συγκεκριμένο μοντέλο δεν εξετάζει το στρατηγικό ζήτημα της αγοράς και της απόσυρσης πλοίων αφού ο ορίζοντας σχεδιασμού για αυτές τις αποφάσεις είναι συνήθως αρκετά μεγάλος. Επομένως, υποθέτουμε ότι η εταιρεία ναυτιλίας τακτικών γραμμών διαθέτει ήδη έναν εμπορικό στόλο πλοίων, και έχει ήδη δεσμευτεί την εξόφληση της κύριας τιμής των πλοίων. Αυτές οι πληρωμές πρέπει να γίνουν ανεξάρτητα από το εάν τα πλοία χρησιμοποιούνται στις υπηρεσίες της εταιρείας ή αν είναι ανενεργά, για αυτό το λόγο δεν συμπεριλαμβάνονται στο μοντέλο μας. Όμως αντιπροσωπεύεται μια εναλλακτική στο προτεινόμενο μοντέλο, αυτή της προσωρινής ναύλωσης ορισμένων πλοίων.

Αντί να εισάγουμε στο μοντέλο όλα τα λειτουργικά χαρακτηριστικά όλων των δυνατών πλοίων, εντάσσουμε τα πλοία που έχουν παρόμοια χαρακτηριστικά σε κοινές ομάδες. Έτσι, έχουμε μικρό αριθμό συγκεκριμένων τύπων πλοίου. Τα χαρακτηριστικά σύμφωνα με τα οποία γίνεται η ομαδοποίηση των πλοίων αφορούν τα εξής: Την μέγιστη δυνατή χωρητικότητα μεταφοράς σε (TEU), την κατανάλωση καυσίμου ως συνάρτηση της ταχύτητας και του ημερήσιου κόστους λειτουργίας (Daily Running Costs ,DRC), τις επισκευές και την συντήρηση, τα λάδια και τα λιπαντικά, την εγγύηση αποζημίωσης και τις προμήθειες. Κάθε τύπος πλοίου έχει ένα συγκεκριμένο σύνολο δυνατών ταχυτήτων λειτουργίας. Το μοντέλο μας επιλέγει μια ταχύτητα για κάθε πλοίο και θεωρείται ότι το πλοίο διατηρεί αυτή την ταχύτητα σε όλο το χρονικό διάστημα της υπηρεσίας του.

Υποθέτουμε ότι η εταιρεία ναυτιλίας τακτικών γραμμών έχει προδηλωμένη ζήτηση για την μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων μεταξύ των λιμένων παγκοσμίως. Αυτή η ζήτηση εμφανίζεται με σταθερό ρυθμό καθόλη τη διάρκεια της περιόδου προγραμματισμού. Στην πραγματικότητα όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο 2, σε ορισμένες χρονικούς περιόδους κατά την διάρκεια του έτους υπάρχουν διακυμάνσεις στην ζήτηση. Επομένως, υποθέτουμε ότι ο χρονικός ορίζοντας που εξετάζεται στο μοντέλο περιορίζεται σε μια περίοδο όπου η ζήτηση για μεταφορά είναι σταθερή.

Αντί να υποθέσουμε την πραγματική προέλευση και το προορισμό των εμπορευμάτων στην ενδοχώρα, συγκεντρώνουμε όλη τη ζήτηση για μεταφορά στο θαλάσσιο λιμάνι που εξυπηρετεί την σχετική ενδοχώρα.

Υποθέτουμε ότι η εταιρεία ναυτιλίας τακτικών γραμμών έχει την δυνατότητα να επιλέξει να μην μεταφέρει κανένα μέρος της ζήτησης, αλλά μια τέτοια απόφαση θα έχει ως αποτέλεσμα η εταιρεία να χάσει ένα μέρος των εσόδων της και ίσως να της επιβληθεί μια χρηματική ποινή (ως υποκατάστατο της απώλειας της φήμης και καλής πελατείας της) για κάθε μία μονάδα προδηλομένης ζήτησης που αρνείται να μεταφέρει. Προκειμένου να υποστηρίξουμε μερικούς ευρετικούς μηχανισμούς αναζήτησης, ομαδοποιούμε τα λιμάνια σε έναν μικρό αριθμό περιοχών. (για παράδειγμα στη Δυτική Μεσόγειο, στη Δυτική Ακτή της Βόρειας Αμερικής κ.ο.κ.). Το κόστος φόρτωσης και εκφόρτωσης ενός TEU σε κάθε λιμένα του μοντέλου είναι γνωστό. Ο χρόνος πλεύσης μεταξύ οποιωνδήποτε δύο λιμένων θεωρείται ντετερμινιστικός. Ο χρόνος που δαπανά κάθε πλοίο σε κάθε λιμένα μπορεί να εκτιμηθεί με λογική ακρίβεια.

Το παρόν μοντέλο μπορεί να υποστηρίξει διαδρομές που προτείνονται εξωτερικά από έναν προγραμματιστή καθώς και διαδρομές που δημιουργούνται εσωτερικά από τη λύση του αλγορίθμου. Δεν επιβάλλουμε περιορισμούς στις διαδρομές που προτείνονται από τον προγραμματιστή και μόνο ελάχιστους περιορισμούς στους τύπους διαδρομών που έχει την δυνατότητα να δημιουργήσει ο αλγόριθμος. Κάθε διαδρομή που παράγεται από τον αλγόριθμο πρέπει να είναι βρόχος, με την έννοια ότι κάθε πλοίο το οποίο έχει ανατεθεί να κάνει ένα συγκεκριμένο δρομολόγιο θα επισκεφθεί με την ίδια σειρά τα λιμάνια κατά την διάρκεια κάθε θαλάσσιου ταξιδιού. Επίσης επιβάλλουμε όρια στο μέγιστο μήκος των διαδρομών που παράγονται από τον αλγόριθμο. Πέρα από αυτούς τους δύο περιορισμούς, επιτρέπουμε στο μοντέλο να χρησιμοποιεί οποιαδήποτε διαδρομή που θα έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του λειτουργικού κόστους. Για παράδειγμα ένα δίκτυο hub-and-spoke θα χρησιμοποιείται μόνο εάν και όπου οδηγεί στην μείωση του συνολικού κόστους.

Στο μοντέλο υποθέτουμε ότι ένας απεριόριστος αριθμός εμπορευματοκιβωτίων μπορεί να μεταφορτωθεί σε οποιοδήποτε λιμάνι. Το μοντέλο θα επιλέξει τις τοποθεσίες μεταφόρτωσης που οδηγούν σε χαμηλότερο συνολικό κόστος. Όταν μια εταιρεία τακτικών γραμμών έχει ήδη υπάρχουσες συμφωνίες με συγκεκριμένους λιμένες

μεταφόρτωσης, τα χαμηλότερα κόστη ανύψωσης εμπορευματοκιβωτίων και οι βελτιωμένοι χρόνοι καλέσματος σε αυτές τις περιοχές είναι λογικό να παρακινούν το μοντέλο να διαλέξει αυτές για τις μεταφορτώσεις της. Εάν είναι απαραίτητο, οι όγκοι μεταφόρτωσης σε οποιοδήποτε λιμένα μπορούν να ελέγχονται με την επιβολή ανώτατων ορίων στις μεταβλητές ροής.

Για να είναι δυνατή η πρόσβαση του πλοίου που θα επιλεχτεί να εισέλθει σε έναν λιμένα πολλές φορές είναι αναγκαία η εκχώρηση ορισμένων περιορισμών στο μοντέλο, που αφορούν το μέγιστο μήκος και πλάτος που έχουν την δυνατότητα να υποστηρίξουν οι συγκεκριμένοι λιμένες.

• **Ανάπτυξη Μοντέλου ΜΙΡ (Μικτού Ακέραιου Προγραμματισμού)**

Σε αυτήν την ενότητα, το τακτικό πρόβλημα ανάπτυξης του κατάλληλου εμπορικού στόλου και δρομολογίου έχει μοντελοποιηθεί ως πρόβλημα Μικτού Ακέραιου Προγραμματισμού (ΜΙΡ). Ορίζουμε ως **εκτέλεση (run)** έναν συνδυασμό (τύπου πλοίου, ταχύτητας και εξυπηρέτησης).

- Τα ακόλουθα σύνολα χρησιμοποιούνται στη ανάπτυξη του μοντέλου:

Π : Όλοι οι λιμένες στο μοντέλο.

Λ : Όλες οι περιοχές στο μοντέλο.

Ξ : Όλες οι εκτελέσεις (runs) στο μοντέλο.

Δ : Το σύνολο όλων των εκτελέσεων που πραγματοποιήθηκαν στην διαδρομή $arc(i, j)$.

Ξ_{ij} : Σύνολο όλων των πιθανών διαδρομών στο μοντέλο, $\Pi \times \Pi$.

Δ_r : Σύνολο των διαδρομών που χρησιμοποιούνται στην εκτέλεση r .

Υ : Τύποι πλοίων στο μοντέλο.

• Οι ακόλουθες παράμετροι αντιπροσωπεύουν τα γνωστά δεδομένα του πρόβληματος :

v_r : Είδος πλοίου που χρησιμοποιήθηκε στην εκτέλεση (run) r .

S_r : Η ταχύτητα όλων των πλοίων που χρησιμοποιήθηκαν στην εκτέλεση (run) r .

c^v : Χωρητικότητα (σε TEU) των πλοίων τύπου v .

f^v : Καθημερινά έξοδα λειτουργίας (DRC) για πλοία τύπου v κατά την διάρκεια ολόκληρου του ορίζοντα σχεδιασμού.

a^v : Κόστος ή έσοδα από τον αποκλεισμό πλοίου τύπου v από τις λειτουργίες. Αυτά μπορεί να είναι τα έσοδα από την ναύλωση του πλοίου σε ολόκληρο τον ορίζοντα σχεδιασμού ή το κόστος απο το ρεμετζάρισμα ή την αγκυροβολία του πλοίου (κράτηση πλοίου χωρίς την χρήση του), ανάλογα με τις συνθήκες της αγοράς της μεταφοράς.

g^{vs} : Κατανάλωση καύσιμου (τόνοι ανά μίλι) για πλοία τύπου v που κινούνται με ταχύτητα s .

h^v : Κατανάλωση καύσιμου (τόνοι ημερησίως) για πλοία τύπου v όταν είναι αδρανής στο λιμάνι.

e : Τιμή καυσίμων ανά τόνο.

z^v : Αριθμός διαθέσιμων πλοίων τύπου v .

l_{ij}^v : Μήκος σε ναυτικά μίλια μιας απευθείας πλευσης από το λιμάνι i στο λιμάνι j με την χρήση ενός πλοίου τύπου v . Οι περιορισμοί του πλάτους της διώρυγας θα έχουν ως αποτέλεσμα να έχουμε διαφορετικό μήκος ταξιδιού για πλατύτερα πλοία.

b_r : Μήκος (ναυτικά μίλια) της εκτέλεσης (run) r , $b_r = \sum_{(i,j) \in A_r} l_{ij}^v$.

m_r : Αριθμός ταξιδιών μετ'επιστροφής που εκτελούνται από ένα πλοίο σε μια εκτέλεση (run) r κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού. Δεν επιβάλλουμε περιορισμό ακεραιότητας σε αυτήν την παράμετρο, αφού υποθέτουμε ότι ένα τμήμα του ταξιδιού μπορεί να ολοκληρωθεί στην αρχή της επόμενης περιόδου προγραμματισμού.

p_j^v : Χρόνος στο λιμένα j για πλοίο τύπου v .

w_r : Συνολικός χρόνος παραμονής εντός λιμανιού κατά την εκτέλεση (run) r ,

$$w_r = \sum_{(i,j) \in \Delta_r} p_j^v$$

u_j : Κόστος ανύψωσης ενός TEU στο λιμένα j .

K_{od} : Συνολική ζήτηση (σε TEU) που υπάρχει για την εταιρεία ναυτιλίας τακτικών γραμμών για τη μεταφορά από το o στο d κατά την περίοδο προγραμματισμού.

q_{od} : Έσοδα από τη μεταφορά ενός TEU από το o στο d .

n_{od} : Ποινή για την μη μεταφορά ενός TEU από το o στο d

- Τέλος, οι μεταβλητές απόφασης που χρησιμοποιούνται στο πρόβλημα MIP είναι:

X_{ijd}^r : Αριθμός εμπορευματοκιβωτίων που ταξιδεύουν στον τελικό τους προορισμό στο λιμένα d μέσω της διαδρομής $arc(i,j)$ στην r εκτέλεση (run) .

L_{id}^r : Αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων που πρόκειται να μεταφερθούν στο λιμένα d , φορτώνονται στην εκτέλεση(run) r στο λιμένα i . Αυτό περιλαμβάνει τα εμπορευματοκιβώτια που εισέρχονται στο δίκτυο για πρώτη φορά, καθώς και τα εμπορευματοκιβώτια που επανα-φορτώνονται στην εκτέλεση r μετά την μεταφόρτωση τους από μια άλλη διαδρομή.

U_{id}^r : Αριθμός εμπορευματοκιβωτίων που μεταφέρονται στο λιμένα d τα οποία έχουν εκφορτωθεί από την εκτέλεση (run) r για να γίνει μεταφόρτωση στο λιμάνι i .

W_d^r : Αριθμός εμπορευματοκιβωτίων που ταξιδεύουν στο λιμένα d και φτάνουν στον τελικό προορισμό τους χρησιμοποιώντας την εκτέλεση (run) r .

V_{od} : Η ζήτηση από το λιμένα o στο λιμένα d που εξυπηρετείται από την εταιρεία ναυτιλίας τακτικών γραμμών.

O_{od} : Η ζήτηση από το λιμένα o στο λιμένα d που δεν θα εξυπηρετηθεί από την εταιρεία ναυτιλίας τακτικών γραμμών.

Y^r : Ο αριθμός των πλοίων που έχει ανατεθεί στην εκτέλεση (run) r .

• **Το μοντέλο MIP** παρουσιάζεται παρακάτω, ακολουθούμενο από μια επεξήγηση της αντικειμενικής συνάρτησης και όλων των περιορισμών

- όπου τα αρχικά VRD προέρχονται από την ονομασία (Vessels Routing and Deployment)

(VRD) Minimize

$$\begin{aligned}
Z_{MP} = & \sum_{r \in \Xi} Y^r f^{v_r} + \sum_{v \in \Upsilon} a^v \left(z^v - \sum_{r \in \Xi: v_r=v} Y^r \right) \\
& + \sum_{r \in \Xi} Y^r \cdot e \cdot m_r (g^{v_r s_r} b_r + h^{v_r} w_r) \\
& + \sum_{o \in \Pi} \sum_{d \in \Pi} n_{od} O_{od} - q_{od} V_{od} \\
& + \sum_{i \in \Pi} \sum_{r \in \Xi} u_i \cdot \left(W_i^r + \sum_{d \in \Pi} (L_{id}^r + U_{id}^r) \right)
\end{aligned} \tag{1}$$

Περιορισμοί :

$$\sum_{j:(j,n) \in \Delta_r} X_{jnd}^r + L_{nd}^r = \sum_{j:(n,j) \in \Delta_r} X_{njd}^r + U_{nd}^r \quad \forall n, d \in \Pi \quad n \neq d \quad r \in \Xi \tag{2}$$

$$\sum_{j:(j,n) \in \Delta_r} X_{jnn}^r = W_n^r \quad \forall n \in \Pi \quad r \in \Xi \tag{3}$$

$$\sum_{n \in \Pi} O_{nd} + \sum_{r \in \Xi} W_d^r = \sum_{n \in \Pi} k_{nd} \quad \forall d \in \Pi \tag{4}$$

$$\sum_{r \in \Xi} L_{nd}^r = \sum_{r \in \Xi} U_{nd}^r + V_{nd} \quad \forall n, d \in \Pi \quad n \neq d \tag{5}$$

$$O_{nd} + V_{nd} = K_{nd} \quad \forall n, d \in \Pi \tag{6}$$

$$\sum_{d \in \Pi} X_{ijd}^r \leq c^{v_r} \cdot Y^r \cdot m_r \quad \forall r \in \Xi \quad (i, j) \in \Delta_r \tag{7}$$

$$\sum_{r \in \Xi: v_r = v} Y^r \leq z^v \quad \forall v \in Y \quad (8)$$

$$X_{ija}^r, L_{id}^r, U_{id}^r, W_d^r \in \mathbb{R}^+ \quad \forall r \in \Xi (i, j) \in \Delta_r \quad d \in \Pi \quad (9)$$

$$O_{nd}, V_{nd} \in \mathbb{R}^+ \quad \forall n, d \in \Pi \quad (10)$$

$$Y^r \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall r \in \Xi \quad (11)$$

Αρχικά θα αναλύσουμε την **αντικειμενική συνάρτηση**. Η **πρώτη γραμμή** της αντικειμενικής συνάρτησης φανερώνει το σταθερό κόστος από την λειτουργία του εμπορικού στόλου, συμπεριλαμβανόμενου των πλοίων που είναι ρεμετζαρισμένα ή αγκυροβολημένα και δεν έχουν ανατεθεί σε καμία εκτέλεση. Η **δεύτερη γραμμή** της αντικειμενικής συνάρτησης εξάγει το συνολικό κόστος των καυσίμων από όλα τα ενεργά πλοία, περιλαμβάνει το κόστος χρήσης καυσίμων από την χρήση ενέργειας για την κίνηση του πλοίου αλλά και το κόστος καυσίμου όταν είναι ανενεργό. Η **τρίτη γραμμή** της αντικειμενικής συνάρτησης εξάγει τα συνολικά έσοδα από την μεταφορά εμπορευμάτων, και τις ποινές που επιβάλλονται στην ναυτιλιακή από την απόρριψη αιτήσεων μεταφοράς. Ο **τελευταίος όρος** της αντικειμενικής συνάρτησης υπολογίζει τα έξοδα από την φόρτωση και εκφόρτωση των εμπορευματοκιβωτίων, κατά την αφετήρια του ταξιδιού, κατά το τελικό προορισμό και σε σημεία μεταφόρτωσης.

Τώρα θα αναλύσουμε τους δέκα περιορισμούς του μοντέλου. Οι **περιορισμοί (2)** εξισορροπούν την ροή των εμπορευματοκιβωτίων που φορτώνονται και εκφορτώνονται από την κάθε εκτέλεση (run) σε όλα τα σημεία έκτος του τελικού προορισμού. Κάθε εμπορευματοκιβώτιο που δεν προορίζεται για το εν λόγω λιμάνι πρέπει είτε να συνεχίσει την ίδια εκτέλεση (run) είτε να μεταφορτωθεί σε άλλη εκτέλεση (run). Οι **περιορισμοί (3)** αντιπροσωπεύουν την ροή των εμπορευματοκιβωτίων που έγιναν αποδεκτά για μεταφορά και έφτασαν στον τελικό τους προορισμό. Κάθε εμπορευματοκιβώτιο που φτάνει στον τελικό προορισμό του εκφορτώνεται και στοιβάζεται πάνω σε ένα άλλο. Οι **περιορισμοί (4)** υπολογίζουν την μεταφορά που φτάνει σε κάθε ένα λιμάνι. Αυτό εξασφαλίζει ότι το ποσό της απόρριψης μεταφοράς, συν το ποσό μεταφοράς που όντως μεταφέρεται στο λιμάνι, ισούται με την δηλωμένη ζήτηση για μεταφορά σε κάθε λιμάνι. **Περιορισμοί (5)** ο συνολικός αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων που εξέρχονται από το λιμάνι πρέπει ισούται με την μεταφορά που εισέρχεται στο δίκτυο από την ενδοχώρα αυτού του λιμάνι, συν

τυχόν εμπορευματοκιβώτια που είχαν προηγουμένως εκφορτωθεί για μεταφόρτωση. Οι **περιορισμοί (6)** είναι ανάλογοι με τους περιορισμούς (4), αλλά καταγράφουν την μεταφορά από την οπτική γωνία της αρχικής ενδοχώρας. **Περιορισμοί (7)** επιβάλλουν περιορισμούς στον συνολικό αριθμό των εμπορευματοκιβωτίων που μπορεί να μεταφερθεί από κάθε δρομολόγιο σε μια εκτέλεση (run). Το σύνολο που μπορεί να μεταφερθεί είναι περιορισμένο από τον αριθμό των πλοίων που έχουν ανατεθεί στην εκτέλεση, την συνολική χωρητικότητα (σε TEU) αυτών των πλοίων και τον αριθμό των ταξιδιών που πραγματοποιούν τα πλοία κατά τον ορίζοντα προγραμματισμού. Οι **περιορισμοί (8)** εξασφαλίζουν ότι ο αριθμός των πλοίων που αναπτύσσεται δεν υπερβαίνει τα διαθέσιμα πλοία του κάθε τύπου. Τέλος, οι **περιορισμοί (9), (10)** και **(11)** επιβάλλουν περιορισμούς μη αρνητικότητας και ακεραιότητας στις αντίστοιχες μεταβλητές.

4.3. Τεχνική Επίλυσης

Οι ρεαλιστικές περιπτώσεις του προβλήματος VRD θέτουν ένα δύσκολο υπολογιστικό πρόβλημα. Ο κύριος λόγος που η επίλυση αυτού του προβλήματος είναι δύσκολη είναι λόγω της παρουσίας μεταβλητών και περιορισμών που απαρτίζουν το σύνολο Ξ (Όλες οι εκτελέσεις (runs) στο μοντέλο). Σε προβλήματα μεγάλου μεγέθους, ο αριθμός των πιθανών εκτελέσεων (πιο συγκεκριμένα, ο αριθμός των πιθανών διαδρομών) θα είναι τόσο υψηλός που μπορεί να μην είναι πρακτικό να τις απαριθμήσουμε, πόσο μάλλον να τις συμπεριλάβουμε σε ένα πρόβλημα Μικτού Ακέραιου Προγραμματισμού (MIP). Δεύτερον, δεδομένου ότι τα μεγαλύτερα πλοία είναι πιο οικονομικά και αποδοτικά ανα TEU, η γραμμική χαλάρωση (linear programming relaxation) του προβλήματος VRD θα ευνοήσει τη χρήση μέρους των μεγαλύτερων διαθέσιμων πλοίων, και δεν θα γίνεται χρήση των μικρότερων πλοίων. Επιπλέον, η χαλάρωση του γραμμικού προγραμματισμού είναι πιθανό να δημιουργήσει λύσεις που χρησιμοποιούν μεγάλο αριθμό άμεσων υπηρεσιών τύπου point to point (είδος δικτύου που αναφέραμε στο κεφάλαιο 2). Αυτές οι χαλαρώσεις ως εκ τούτου, αποτελούν πολύ κακές προσεγγίσεις εφικτών λύσεων, και μειώνουν την αποτελεσματικότητα των τεχνικών παραδοσιακής λύσης με ακριβείς αλγόριθμους (Exact algorithms), όπως είναι η μέθοδος branch and bound. Προκειμένου να επιλύσουμε το πρόβλημα VRD, ξεκινάμε σημειώνοντας ότι, εάν καθορίσουμε (fix) τις

τιμές όλων των μεταβλητών Y^r , μπορούμε να εξαλείψουμε τους περιορισμούς (8) και (11) από το πρόβλημα VRD. Επιπλέον, καθορίζοντας τις τιμές όλων των μεταβλητών Y^r , καθορίζουμε τη δεξιά πλευρά (right-hand side) του περιορισμού (7). Με αυτές τις αλλαγές, το πρόβλημα VRD γίνεται ένα καθαρό Πρόβλημα Ροής Πολλαπλών Αγαθών – (Multi-Commodity Flow Problem , MCFP). Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης Μεθόδων Εσωτερικού Σημείου (interior point algorithms) που αναφέραμε στο κεφάλαιο 3, μπορούν να λύσουν πολύ γρήγορα μεγάλες περιπτώσεις προβλημάτων Ροής Πολλαπλών Αγαθών (MCFP).

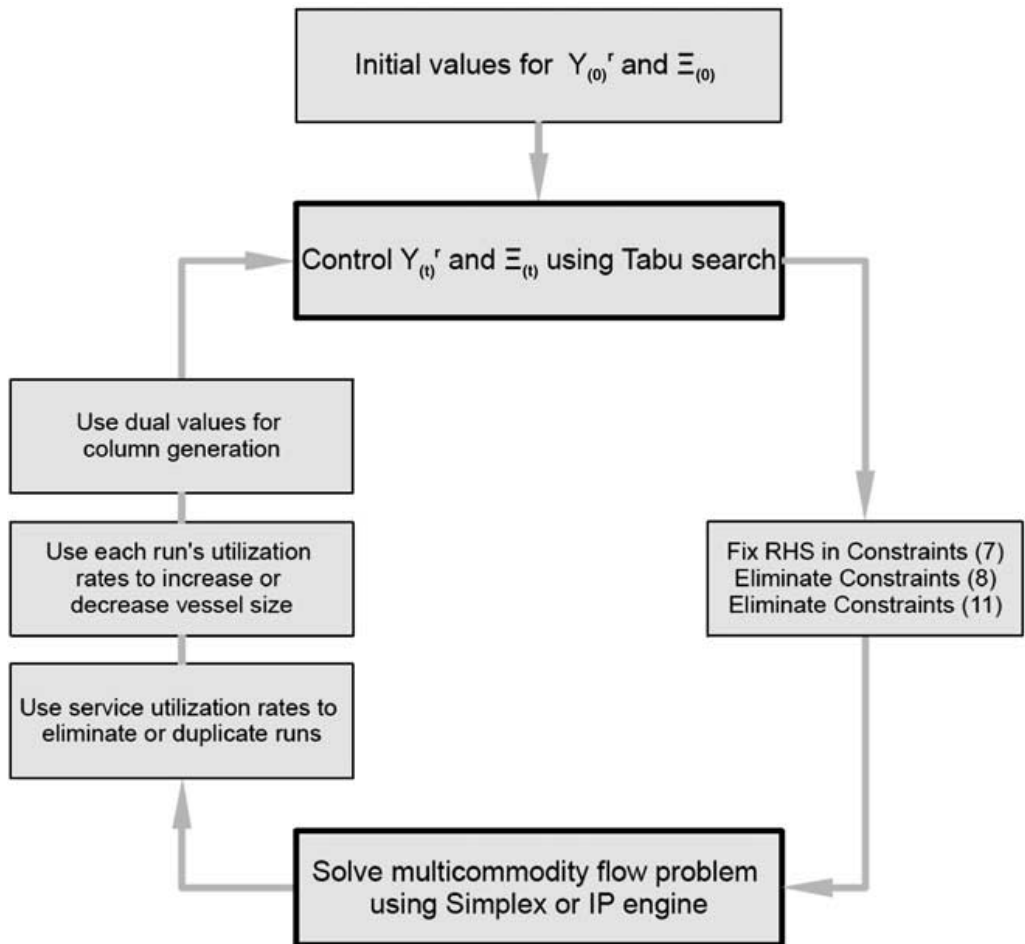
Η προηγούμενη συζήτηση υποδεικνύει μια προσέγγιση λύσης δύο επιπέδων με την οποία, σε κάθε επανάληψη t , ένα σύνολο εκτελέσεων $\mathcal{E}_{(t)}$ και η αντίστοιχη ανάπτυξη πλοίων $Y_{(t)}^r$ εγκαθίστανται στην υψηλότερη βαθμίδα (Higher Tier) χρησιμοποιώντας την αναζήτηση tabu (Glover and Laguna, 1997) αναφέραμε στο κεφάλαιο 3.

Ο μηχανισμός tabu αναγνωρίζει κάθε εκτέλεση βάζοντας, σε αλφαβητική σειρά, τα ονόματα των λιμένων που επισκέπτονται από την εκτέλεση (run). Κατατάσσοντας τα λιμάνια των απαγορευμένων εκτελέσεων σε αλφαβητική σειρά, επεκτείνουμε τον περιορισμό tabu σε οποιοδήποτε εκτέλεση που αποτελείται από μια μετάθεση (permutation) των ίδιων λιμένων. Μια εκτέλεση που έχει τροποποιηθεί πρόσφατα δεν μπορεί να τροποποιηθεί ξανά εφόσον εμφανίζεται στη λίστα tabu. Μια εκτέλεση θεωρείται ότι τροποποιείται από τις ακόλουθες λειτουργίες: δημιουργία, διαγραφή, αλλαγή τύπου πλοίου ή αλλαγή ταχύτητας πλοίου.

Χρησιμοποιώντας την αναζήτηση tabu για να ελέγξουμε τις μεταβλητές Y^r μας επιτρέπεται να ερμηνεύσουμε εκ νέου τις προαναφερθείσες παραμέτρους στο πρόβλημα κατώτερης βαθμίδας MCFP ($\mathcal{E}_{(t)}, Y_{(t)}^r$). Χρησιμοποιώντας πληροφορίες που έχουν ληφθεί από τη λύση κάθε προβλήματος MCFP ($\mathcal{E}_{(t)}, Y_{(t)}^r$), μπορούμε να λάβουμε ένα βελτιωμένο σύνολο εκτελέσεων $\mathcal{E}_{(t+1)}$ και ανάπτυξη των εμπορικού στόλου $Y_{(t+1)}^r$ στην υψηλότερη βαθμίδα . Το σχήμα (4.1) παρέχει μια σχηματική αναπαράσταση της λύσης δύο επιπέδων.

Σε κάθε επανάληψη t του αλγορίθμου, λύνουμε το πρόβλημα MCFP ($\mathcal{E}_{(t)}, Y_{(t)}^r$), και αναλύουμε προσεκτικά δύο σύνολα αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη λύση: το ποσοστό χρησιμοποίησης της δυναμικότητας σε κάθε εκτέλεση (run), και τις σκιδώεις τιμές στους περιορισμούς (7). Η συνολική ροή των εμπορευματοκιβωτίων με τη χρήση εκτέλεσης r στην διαδρομή $arc(i, j)$ δίνεται από το άθροισμα $\sum_{d \in \Pi} X_{ijd}^r$. Παρόμοια , η εγκατεστημένη χωρητικότητα της εκτέλεσης r σε κάθε μια από τις

αποτελούμενες διαδρομές της δίνεται από $c^{vr} \cdot Y^r \cdot m_r$. Παρατηρώντας την αναλογία μεταξύ της χρησιμοποιούμενης χωρητικότητας και της εγκατεστημένης χωρητικότητας, μπορούμε να προσδιορίσουμε ποιες εκτελέσεις υπέρ ή υπό λειτουργούν. Οι εκτελέσεις που υπολειτουργούν (under-utilised) είναι καλοί υποψήφιοι για τη μείωση του αριθμού των πλοίων που χρησιμοποιούν ή για την εξάλειψη τους από το σύνολο $\Xi_{(t+1)}$. Εναλλακτικά, μπορούμε να μειώσουμε το μέγεθος ή την ταχύτητα ορισμένων πλοίων που χρησιμοποιούνται σε αυτή την εκτέλεση. Οι εκτελέσεις που υπερλειτουργούν (Over-utilised) είναι καλοί υποψήφιοι για αύξηση του αριθμού, του μεγέθους και της ταχύτητας των πλοίων που χρησιμοποιούνται σε αυτές.



Σχήμα 4.1 : Σχηματική απεικόνιση της λύσης δύο επιπέδων.

Οι σκιάδεις τιμές (δυϊκές τιμές) ρ_{ij}^r που συνδέονται με κάθε περιορισμό (7) δείχνουν την δυνατή επίπτωση που θα έχει στην αντικειμενική συνάρτηση η αύξηση μιας μονάδας της δεξιά πλευράς (right-hand side) του περιορισμού (7). Αν θέλαμε να προσθέσουμε ένα νέο πλοίο στην εκτέλεση r , η δεξιά πλευρά (right-hand side) κάθε περιορισμού (7) που σχετίζεται με τις περιπτώσεις σύνδεσης στην εκτέλεση r θα αυξανόταν κατά $c^v r_{m_r}$. Τα δυνατά οφέλη που πηγάζουν από αυτήν την πρόσθετη χωρητικότητα υπολογίζονται από το άθροισμα $\sum_{(i,j) \in \Delta_r} \rho_{ij}^r c^v r_{m_r}$. Επομένως, μπορούμε να εκτιμήσουμε τα συνολικά οφέλη από την προσθήκη αυτού του πλοίου στην εκτέλεση συγκρίνοντας την προαναφερθείσα ποσότητα με το κόστος που απαιτείται για την εγκατάσταση ενός νέου πλοίου τύπου v_r .

Στην πραγματικότητα, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μια παρόμοια ιδέα για να εκτιμήσουμε το όφελος από την προσθήκη μιας εντελώς νέας εκτέλεσης (run) r' . Προκειμένου να γίνει αυτό, προσθέτουμε την εικονική εκτέλεση (dummy run) a σε κάθε πρόβλημα MCFP. Αυτή η εικονική εκτέλεση έχει μηδενικές μονάδες χωρητικότητας κατά μήκος κάθε διαδρομής του δικτύου, αλλά χρησιμεύει ως σύμβολο υποκατάστασης (placeholder) για τις σκιάδεις τιμές των διαδρομών, στις οποίες διαδρομές την προκειμένη στιγμή δεν λειτουργεί καμιά υπηρεσία. Στη συνέχεια σχεδιάζουμε τη διαδρομή $\Delta_{r'}$ της νέας υπηρεσίας και εκτιμούμε τα οφέλη που πηγάζουν από την χωρητικότητα της νέας εκτέλεσης μέσω του αθροίσματος $\sum_{(i,j) \in \Delta_{r'}} \rho_{ij}^a c^{N_{r'}} m_{r'}$.

Χρησιμοποιούμε μία μέθοδο που αναφέραμε στο κεφάλαιο 3 για να παραγάγουμε ένα πλήθος πιθανών νέων εκτελέσεων, αυτή η μέθοδος ονομάζεται παραγωγή στήλης (**column generation**). Αναλυτικότερα, για κάθε πλοίο τύπου v και ταχύτητας s , επιδιώκουμε να λύσουμε το πρόβλημα $AUX(vs)$, η οποία καθορίζει την σύνθεση μιας στήλης με αρνητικό μειωμένο κόστος (negative reduced cost) στο πρόβλημα $MCFP(\mathcal{E}(t), Y(t))$. Υπάρχουν πολλές δυσκολίες που μας εμποδίζουν να αντιμετωπίσουμε απευθείας αυτό το πρόβλημα. Πρώτον, δεδομένου ότι δεν είναι γνωστή η διαδρομή που πρέπει να ακολουθηθεί στην εκτέλεση (run) r' , η τιμή της παραμέτρου $m_{r'}$ (ο αριθμός των κυκλικών ταξιδιών που θα πραγματοποιήσει ένα πλοίο σε αυτή την εκτέλεση) είναι και αυτή άγνωστη. Εισάγοντας και θεωρώντας αυτή την παράμετρο ως μια μεταβλητή απόφασης του προβλήματος θα προσθέσει μια ανεπιθύμητη μη-γραμμικότητα.

Μπορούμε να παρακάμψουμε αυτό το πρόβλημα αναζητώντας νέες στήλες που έχουν αρνητικό μειωμένο κόστος (negative reduced cost) **ανά ταξίδι**. Αλλάζοντας την εστίαση της διαδικασίας παραγωγής στήλης (column generation) από το συνολικό αντίκτυπο που έχει στην αντικειμενική συνάρτησης σε αντίκτυπο ανά ταξίδι, δεν αποκλείουμε τυχόν έγκυρες στήλες.

Η δεύτερη δυσκολία απορρέει από την πρόθεση μας να κατασκευάσουμε υπηρεσίες που είναι βρόχοι. Δυστυχώς, αυτό εισάγει την πιθανότητα ότι πολλές από τις στήλες που παράγονται (column generation) από το μοντέλο να περιέχουν μη-συνδεδεμένες υπο – περιοδείες ή αλλιώς disjoint subtours .

Η εξάλειψη αυτών των ταξιδιών από τις προτεινόμενες λύσεις αποτελεί μια υπολογιστική πρόκληση, παρόμοια με αυτήν που εμφανίζεται στο πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή (travelling salesman problem).

Προτείνουμε μια απλή ευρετική μέθοδο λύσης για την απόρριψη λύσεων που περιέχουν μη-συνδεδεμένες υπο – περιοδείες (disjoint subtours). Ξεκινάμε θέτοντας ένα όριο i^{vs} για τα έσοδα που θα προκύψουν από κάθε νέα προτεινόμενη εκτέλεση που χρησιμοποιεί ένα πλοίο τύπου v ταξιδεύοντας με ταχύτητα s . Αρχικά, θέτουμε $i^{vs} = -\infty$. Μετά την επίλυση της $AUX(vs)$, εάν η προκύπτουσα λύση δεν περιέχει μη-συνδεδεμένες υπο – περιοδείες (subtours) , αποδεχόμαστε την υποψήφια εκτέλεση. Διαφορετικά, ορίζουμε $i^{vs} = Z_{AUX(vs)} + \delta$, με $\delta \geq 0$, και λύνουμε ξανά το πρόβλημα. Το αποτέλεσμα αυτής της προσαρμογής είναι να αποφευχθεί η πιο πρόσφατη λύση να εμφανιστεί ξανά. Συνεχίζουμε με αυτό τον τρόπο μέχρι να λάβουμε μια έγκυρη εκτέλεση ή μέχρις ότου το μέγεθος της i^{vs} γίνει πολύ μικρό, υποδεικνύοντας ότι δεν υπάρχουν αξιόλογες εκτελέσεις.

▪ Παρουσιάζουμε τον βοηθητικό αλγόριθμο $AUX (vs)$ που περιγράψαμε . Αρχικά ορίζουμε ορισμένες παραμέτρους:

i^{vs} : Το κατώτερο όριο των εσόδων που πρέπει να προκύψει από κάθε νέα εκτέλεση που χρησιμοποιεί πλοίο τύπου v και ταχύτητα ταξιδιού s . Εναλλακτικά το κατώτερο όριο για το χρηματικό όφελος που προκύπτει από την προσθήκη της νέας εκτέλεσης.

ρ_{ij} : δυϊκή τιμή που σχετίζεται με τον περιορισμό (7) για την διαδρομή $arc(i, j)$ αναφέρεται στην πιο πρόσφατη λύση του προβλήματος MCFP. Όταν δεν γίνεται εκτέλεση στην διαδρομής $arc(i, j)$ στην επανάληψη t , χρησιμοποιούμε ρ_{ij}^a .

m_{min} : ελάχιστος αριθμός ταξιδιών που απαιτούνται στον ορίζοντα προγραμματισμού.

T : διάρκεια του ορίζοντα προγραμματισμού.

▪ Οι μεταβλητές απόφασης που χρησιμοποιούνται στο πρόβλημα $AUX(vs)$ είναι οι εξής:

A_{ij}^{vs} : δυαδική μεταβλητή, δηλώνει αν η διαδρομή $arc(i, j)$ αποτελεί μέρος της νέας εκτέλεσης.

μ^{vs} : το αντίστροφο του αριθμού των ταξιδιών που πρέπει να ολοκληρωθούν στην νέα εκτέλεση κατά τη διάρκεια ολόκληρου ορίζοντα προγραμματισμού.

ω^{vs} : εκτιμημένο κόστος ανά ταξίδι της νέας εκτέλεσης στην αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος MCFP $(\Xi_{(t)}, Y_{(t)}^r)$.

Ακολουθεί ο βοηθητικός αλγόριθμος για την παραγωγή στήλης (column generation)

$AUX(vs)$ Minimize

$$Z_{AUX(vs)} = \omega^{vs} \quad (12)$$

Περιορισμοί :

$$\omega^{vs} = \mu^{vs} (f^v - a^v) + \sum_{(i,j) \in \Delta} A_{ij}^{vs} (e \cdot h^v p_j^v + e \cdot g^{vs} l_{ij}^v - \rho_{ij} c^v) \quad (13)$$

$$T \cdot \mu^{vs} = \sum_{(i,j) \in \Delta} A_{ij}^{vs} \left(p_j^v + \frac{l_{ij}^v}{s} \right) \quad (14)$$

$$\sum_{j \in \Delta} A_{jn}^{vs} = \sum_{j \in \Delta} A_{nj}^{vs} \quad \forall n \in \Pi \quad (15)$$

$$i^{vs} \leq \omega^{vs} \quad (16)$$

$$\mu^{vs} \leq \frac{1}{m_{min}} \quad (17)$$

$$A_{ij}^{vs} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in \Delta \quad (18)$$

Οι **περιορισμοί (13)** και **(14)** χρησιμεύουν για τον καθορισμό των τιμών των ω^{vs} και μ^{vs} . Οι **περιορισμοί (15)** απαιτούν κάθε υποψήφια διαδρομή να αποτελείται από κλειστούς βρόχους. Για την εξάλειψη των υποπεριοδίων (subtours) ο ευρετικός αλγόριθμος χρησιμοποιεί τον **περιορισμό (16)**, αυτός ο περιορισμός επιβάλλει ένα όριο στο όφελος που είναι δυνατόν να αποκτηθεί από τη νέα υπηρεσία. Ο **περιορισμός (17)** περιορίζει τη διάρκεια κάθε ταξιδιού της νέας υπηρεσίας έτσι ώστε συμμορφωθεί με τους επιχειρηματικούς κανόνες και τις απαιτήσεις του προσωπικού. Ένα βασικό χαρακτηριστικό αυτού του συστήματος παραγωγής στήλης (column generation) είναι ότι έχει την δυνατότητα να παράγει οποιοδήποτε τύπου δρομολόγια που παρουσιάσαμε στο κεφάλαιο 2 όπως pendulum, butterfly, conveyor belt, κ.τ.λ, ή ακόμα και συνδυασμών αυτών.

4.4 Δείκτης αναφοράς απόδοσης (Performance Benchmark)

Σε αυτή την ενότητα, συγκρίνουμε την απόδοση του προτεινόμενου ευρετικού αλγόριθμου με έναν ακριβή αλγόριθμο branch and bound. Ο αλγόριθμος branch and bound εφαρμόστηκε απευθείας στο πρόβλημα VRD, με το σύνολο Ξ (όλες οι εκτελέσεις του μοντέλου) να αποτελείται από μια πλήρη απαρίθμηση όλων των πιθανών υπηρεσιών σε μια δεδομένη περίπτωση. Για αυτές τις δοκιμές, εξετάζουμε μόνο υπηρεσίες ενιαίου βρόχου, δηλαδή ένα πλοίο πρέπει να επιστρέψει στον αρχικό λιμένα της υπηρεσίας πριν μπορέσει να επισκεφθεί για δεύτερη φορά οποιοδήποτε από τα άλλα λιμάνια. Για τον ευρετικό αλγόριθμο, δημιουργήσαμε αρχικές λύσεις, αναθέτοντας κάθε ένα από τα διαθέσιμα πλοία σε τυχαία παραγόμενη υπηρεσία.

Πραγματοποιήθηκαν **τρία πειράματα**. Κάθε ένα από τα τρία πειράματα είχε διαφορετικό αριθμό διαθέσιμων λιμένων για επιλογή, το πρώτο είχε πέντε λιμάνια, το δεύτερο έξι λιμάνια και το τελευταίο επτά λιμάνια. Η πλειονότητα των δεδομένων σε κάθε περίπτωση δημιουργήθηκε τυχαία, συμπεριλαμβανομένης της γεωγραφικής

θέσης των λιμένων, της ζήτησης για μεταφορά μεταξύ λιμένων, τους χρόνους φόρτωσης των λιμένων, του κόστους φόρτωσης και εκφόρτωσης και ο αριθμός διαθέσιμων πλοίων κάθε τύπου.

Δημιουργήθηκε ένας κατάλογος πλοίων με βάση την ιστοσελίδα μιας παγκόσμιας εταιρείας ναυτιλίας τακτικών γραμμών. Για κάθε κατηγορία πλοίου, έχει δοθεί η χωρητικότητα του, η σχεδιασμένη ταχύτητα (design speed) και η ισχύ του κινητήρα έχοντας την αντίστοιχη σχεδιασμένη ταχύτητα. Για κάθε πλοίο δημιουργήθηκε προφίλ κόστους και κατανάλωσης καυσίμων χρησιμοποιώντας τους τύπους και τα δεδομένα από το βιβλίο του Alderton (2005). Εκτιμήσαμε την κατανάλωση καυσίμου έχοντας μια συγκεκριμένη ταχύτητα υπηρεσίας η οποία προκύπτει βάση την ισχύ που παράγεται από τον κινητήρα κάθε πλοίου, και υποθέσαμε μια συγκεκριμένη κατανάλωση 125 g /brake ιπποδύναμης (bhp)/ ώρα. Υπολογίσαμε την κατανάλωση καυσίμου (**Consumption**) με μια χαμηλότερη ταχύτητα (80% της σχεδιασμένης ταχύτητας) ως εξής (cube law):

$$Cons_{80} = Cons_{design} \cdot (Speed_{80} / Speed_{design})^3$$

Ορισμένες χρήσιμες ιδιότητες των πλοίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1. Αυτές δεν μεταβληθήκαν μεταξύ περιπτώσεων του προβλήματος.

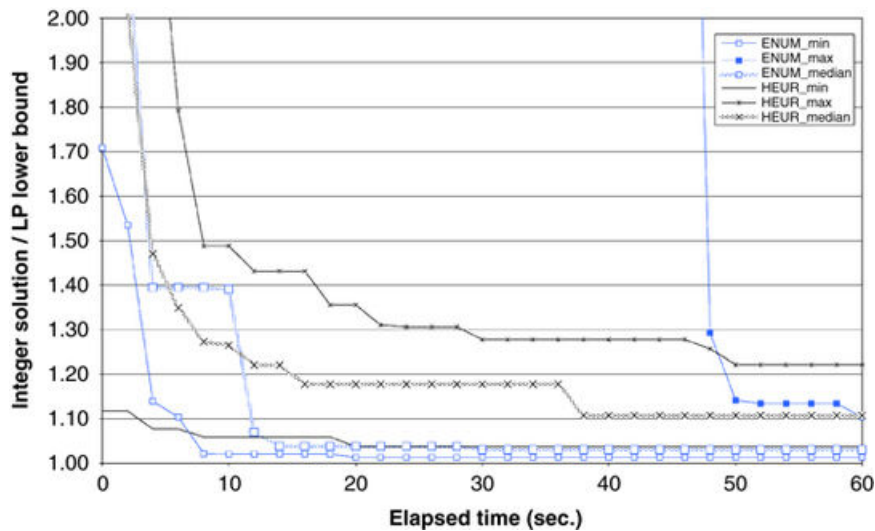
Vessel type	Cap. [TEU]	Idle cons [t/dy]	Low speed		Design speed	
			knots	Cons [ton/day]	knots	Cons [ton/day]
SuperPPmx	8400	2.5	20.0	157	25.4	305
PostPmx	4900	2.0	19.2	97	24.0	188
Panamax	3200	1.7	16.8	59	21.6	114
feeder2	2100	1.3	15.2	33	19.7	64
feeder1	1000	1.0	14.8	26	18.5	51

Πίνακας 4.1: Διαθέσιμοι τύποι πλοίων

Για την εκτέλεση του πειράματος για την ευρετική μέθοδο λύσης εφαρμόστηκαν οι εξής τρεις αλγόριθμοι, ο MCFP $(E_{(t)}, Y_{(t)}^r)$, ο βοηθητικός αλγόριθμος $AUX(vs)$ και ο κύριος αλγόριθμος μας ελέγχει την μετα-ευρετική μέθοδο *tabu* και καλεί τα προηγούμενα δυο μοντέλα που αναφέραμε. Ενώ για την μέθοδο λύσης με την χρήση ακριβή αλγόριθμο (Exact Algorithm) χρησιμοποιήσαμε την μέθοδο branch and bound. Παρακάτω ακολουθεί η σύγκριση αποτελεσμάτων των δυο μεθόδων λύσεις.

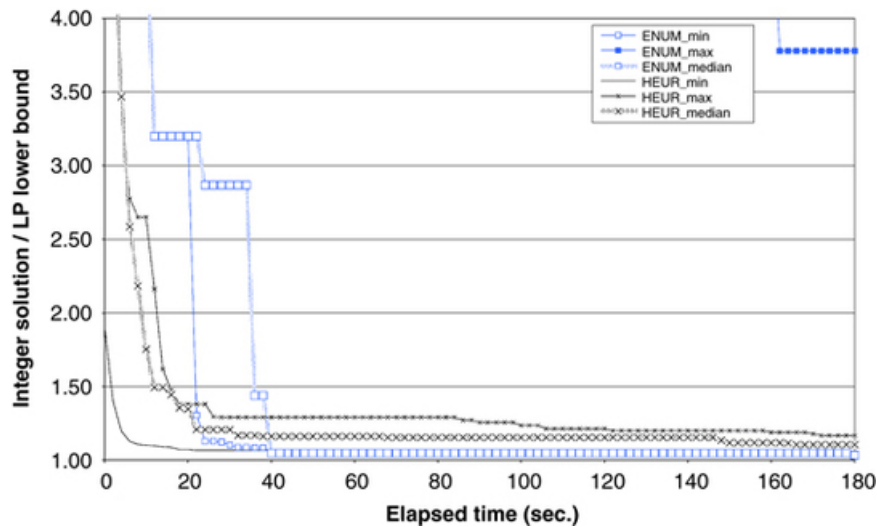
- Ακολουθούν οι συγκρίσεις αποτελεσμάτων των δυο μεθόδων λύσεις για κάθε ένα από τα τρία πειράματα

- Το **πρώτο** σύνολο πειραμάτων πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας πέντε λιμένες και ένα σύνολο 84 πιθανών υπηρεσιών. Πραγματοποιήθηκαν 100 εκτελέσεις, επιτρέποντας σε κάθε εκτέλεση κάθε αλγορίθμου (ευρετικού και ακριβή) να τρέχει για 60 δευτερόλεπτα σε κάθε μία από τις 100 εκτελέσεις. Το διάγραμμα 4.1 συγκρίνει την απόδοση των δύο αλγορίθμων για το μέγεθος αυτού προβλήματος. Παρουσιάζουμε τρεις καμπύλες για κάθε αλγόριθμο οι οποίες δείχνουν: τις καλύτερες, μέσες (median) και χειρότερες λύσεις σε όλες τις εκτελέσεις. Η μεσαία (median) λύση που παράγεται από τον ακριβή αλγόριθμο είναι εντός 4 % του κατώτερου ορίου. Η μεσαία λύση που παράγεται από τον ευρετικό αλγόριθμο είναι 7 % πάνω από αυτό που παράγεται από τον ακριβή αλγόριθμο. Στη χειρότερη περίπτωση, ο ευρετικός αλγόριθμος παράγει μια λύση που είναι εντός 22 % του κάτω ορίου.



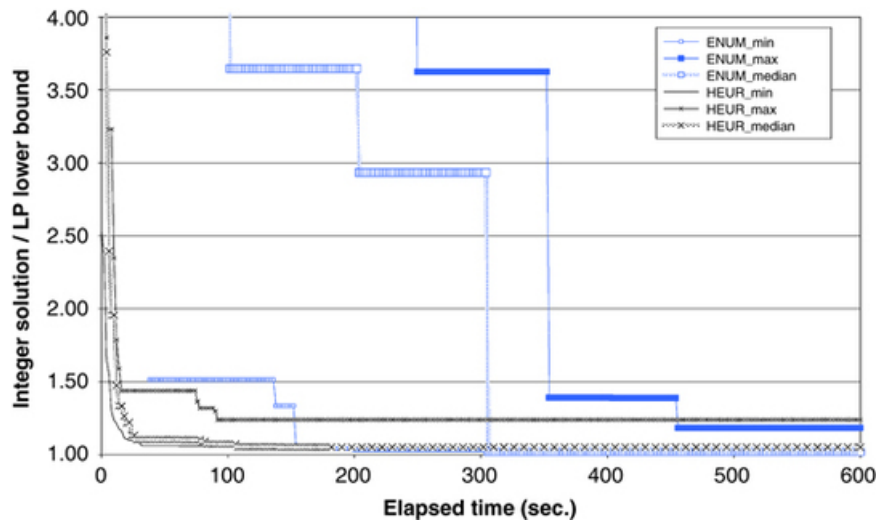
Διάγραμμα 4.1: Συγκρίσεις αποτελεσμάτων για τους πέντε λιμένες. Όπου ENUM_min η βέλτιστη λύση του ακριβή αλγόριθμου (Exact Algorithm) , ενώ όπου HEUR_max η χειρότερη λύση για του ευρετικού αλγορίθμου (Heuristic Algorithm).

- Το **δεύτερο** σύνολο πειραμάτων πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας έξι λιμένες και 409 πιθανές υπηρεσίες. Πραγματοποιήθηκαν 20 εκτελέσεις, με κάθε αλγόριθμο να τρέχει για 3 λεπτά σε κάθε εκτέλεση. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 4.2. Στην χειρότερη περίπτωση, βλέπουμε ότι ο ακριβής αλγόριθμος δεν είναι αποδοτικός, αλλά ο ευρετικός αλγόριθμος παρέχει λύσεις εντός του 16 % του βέλτιστου. Μέσα σε 40 δευτερόλεπτα, η μεσαία λύση του ακριβούς αλγορίθμου είναι εντός του 5 % της βέλτιστης λύσης , και ο ευρετικός αλγόριθμος είναι εντός 15 % . Οι τελικές λύσεις που παρέχονται από το ευρετικό αλγόριθμο βρίσκονται εντός 5 % σε σχέση με αυτές που παράγονται από τον ακριβή αλγόριθμο.



Διάγραμμα 4.2: Συγκρίσεις αποτελεσμάτων για τους έξι λιμένες.

▪ Το **τρίτο** σύνολο πειραμάτων πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας επτά λιμένες και 720 πιθανές υπηρεσίες. Σε αυτό το σημείο να επισημάνουμε ότι οι πιθανές δυνατές υπηρεσίες ήταν 2365, όμως δεν ήταν δυνατόν να καταλήξουμε σε ακέραια λύση σε λογικό χρονικό διάστημα χρησιμοποιώντας τον ακριβή αλγόριθμο, έτσι δεν θα ήταν δυνατόν να γίνει καμιά σύγκριση, για αυτό το λόγο περιοριστικό ο αριθμός των διαδρομών σε 720. Πραγματοποιήθηκαν 10 εκτελέσεις, με κάθε αλγόριθμο να τρέχει για 10 λεπτά σε κάθε εκτέλεση. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο διάγραμμα 4.3. Η μεσαία λύση που παράγεται από τον ευρετικό αλγόριθμο, συγκλίνει στο 5% της βέλτιστης λύσης μέσα σε 110 δευτερόλεπτα. Αντίθετα, ο ακριβής αλγόριθμος δεν παράγει εφικτές λύσεις μέχρι να περάσουν 300 δευτερόλεπτα και οι τελικές λύσεις που παρέχονται από τον ευρετικό αλγόριθμο βρίσκονται εντός 3% σε σχέση με αυτές που παράγονται από τον ακριβή αλγόριθμο.



Διάγραμμα 4.3: Συγκρίσεις αποτελεσμάτων για τους επτά λιμένες.

Είναι σαφές ότι η προτεινόμενη ευρετική μέθοδος έχει τη δυνατότητα να βρίσκει λύσεις καλής ποιότητας σε σύντομο χρονικό διάστημα. Καθώς αυξάνεται η διάσταση του προβλήματος, ο αριθμός των πιθανών υπηρεσιών αυξάνεται εκθετικά. Ο προτεινόμενος ευρετικός παράγει νέες υπηρεσίες μόνο όταν αυτές απαιτούνται, καθιστώντας την πιο αποτελεσματική όταν αυξάνεται ο όγκος του προβλήματος, αφού διατηρεί καλύτερες επιδόσεις.

Σε αυτά τα μικρά πειράματα, η ευρετική μέθοδος λύσης ξοδεύει το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου του παράγοντας νέες διαδρομές ενώ το MCFP κατώτερης βαθμίδας λύνεται σχεδόν άμεσα. Καθώς διάσταση του προβλήματος μεγαλώνει, η κατάσταση αντιστρέφεται και ο αλγόριθμος δαπανά το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου του επιλύοντας τα MCFP.

4.5 Συμπεράσματα

Παρουσιάσαμε μια μαθηματική μοντελοποίηση για την από κοινού αντιμετώπιση δυο προβλημάτων. Αυτά τα προβλήματα είναι η δρομολόγηση και η ανάπτυξη εμπορικού στόλου για την μεταφορά εμπορευματοκιβωτίων. Αυτό το πρόβλημα είναι αρκετά σύνθετο αφού συνδυάζει μαθηματικές, επιχειρηματικές και υπολογιστικές μεθόδους και προοπτικές.

Η μεθοδολογία που προτείνεται εδώ συνδυάζει ακριβής μαθηματικούς αλγόριθμους και έναν μετα-ευρετικό μηχανισμό καθοδήγησης. Όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο 3 , η μοντελοποίηση ενός ευρετικού στοιχείου (Heuristic) προσφέρει στο μοντέλο ορισμένες βελτιώσεις ταχύτητας, αλλά δεν εγγυάται τον τερματισμό σε ένα βέλτιστο σημείο (ολικό ακρότατο).

Τα αποτελέσματα των συγκρίσεων που κάναμε στην προηγούμενη υποενότητα μας δείχνουν ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος μπορεί να φτάσει σε πολύ καλής ποιότητας λύσεις σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Για την λύση του προβλήματος μας χρησιμοποιείται και ένας γενικός αλγόριθμος εσωτερικού σημείου, πιο συγκεκριμένα για την επίλυση Υποπροβλημάτων Ροής Πολλαπλών Αγαθών (MCFP). Για περιπτώσεις μεγάλων διαστάσεων, ο αλγόριθμος εσωτερικού σημείου φαίνεται καλύτερος από τους κώδικες simplex. Αυτό είναι πιθανό εξαιτίας της αραιότητας (sparsity) στις στήλες του προβλήματος MCFP. Από την επιχειρηματική προοπτική, πρέπει να τονίσουμε ότι το προτεινόμενο μοντέλο θα πρέπει να προσαρμοστεί στα πλαίσια μιας συγκεκριμένης εταιρείας ναυτιλίας τακτικών γραμμών. Κάθε εταιρεία έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά κατευθυντήριες γραμμές για το σχεδιασμό των υπηρεσιών της. Τα μοντέλα και οι αλγόριθμοι που προτείνονται εδώ θα πρέπει να προσαρμοστούν αναλόγως

Βιβλιογραφία

1. Κολέτσος Ιωάννης, Στογιάννης Δημήτρης, “Εισαγωγή στην Επιχειρησιακή Έρευνα”, 3^η Έκδοση, 2017. ISBN: 978-960-9400-62-6, Εκδόσεις Συμμεών
2. J. F. Alvarez. Joint routing and deployment of a fleet of container vessels. *Maritime Economics & Logistics*, 11(2):186, 2009.
3. R. Agarwal and O. Ergun. Ship scheduling and network design for cargo routing in liner shipping. *Transportation Science*, 42(2):175–196, 2008.
4. Gordon Wilmsmeier and Theo Notteboom Determinants of liner shipping network configuration: a two-region comparison *GeoJournal* (2011) Vol. 76, No. 3 (2011), pp. 213-228
5. M. Stopford. *Maritime Economics*. Routledge, third edition, 2009. ISBN 0203442660.
6. M. Christiansen, K. Fagerholt, and D. Ronen. Ship routing and scheduling: Status and perspectives. *Transportation Science*, 38(1):1–18, 2004.
7. B.D. Brouer, J.F. Alvarez, C.E.M Plum, D. Pisinger, and M.M. Sigurd. A base integer programming model and benchmark suite for liner shipping network design. Conditionally accepted at *Transportation Science*, 2012
8. Glover, F. and Laguna, M. (1997) *Tabu Search*. Boston: Kluwer Academic.
9. R.K. Ahuja, T.L. Magnanti, and J.B. Orlin. *Network Flows - Theory, Algorithms and Applications*.
10. Sebastian Knopp. *Efficient Computation of Many-to-Many Shortest Paths*
11. S.A. Lawrence. "International sea transport: the years ahead". Lexington Books Lexington, Mass, 1972.
12. P. Alderton. *Reeds Sea Transport — Operations and Economics*. Motorbooks Intl, 2005. ISBN 0713669446.
13. Brouer, Berit Dangaard; Jepsen, Mads Kehlet; Plum, Christian Edinger Munk; Desaulniers, Guy ; Pisinger, David; Sigurd, Mikkel M. *A Path Based Model for a Green Liner Shipping Network Design*. 2012.
14. UNCTAD. *Review of maritime transport 2017*
http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2017_en.pdf , 2017. United Nations Conference on Trade And Development.

15. K.H. Kjeldsen. Classification of ship routing and scheduling problems in liner shipping. INFOR -special issue on maritime transportation, 49(2):139–152, 2011.
16. ICS- Shipping International Chamber of Shipping. <http://www.ics-shipping.org/>
17. WSC –World Shipping Council. <http://www.worldshipping.org/>
18. Lloyd’s Maritime Intelligence Unit. <https://www.lloydslistintelligence.com/>
19. Alphaliner. <https://www.alphaliner.com/>