

# Ανάπτυξη και Υλοποίηση Αλγορίθμων Βελτιστοποίησης σε Προβλήματα Ναυτιλιακής Εφοδιαστικής Αλυσίδας

Διδακτορική Διατριβή

υπό

Ελευθέριο Τσακιράκη

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης  
Πολυτεχνείο Κρήτης  
Χανιά

©Ελευθέριος Τσακιράκης, 2024

## Υποτροφία



Η ερευνητική εργασία υποστηρίχτηκε από το Ελληνικό Ίδρυμα Έρευνας και Καινοτομίας (ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ.) στο πλαίσιο της «2ης Προκήρυξης ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. για Υποψήφιους/ες Διδάκτορες» (Αριθμός Υποτροφίας: 1330)

# ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Τίτλος (ελληνικά/αγγλικά): Ανάπτυξη και Υλοποίηση Αλγορίθμων Βελτιστοποίησης  
σε Προβλήματα Ναυτιλιακής Εφοδιαστικής Αλυσίδας.

## ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ονοματεπώνυμο διδάκτορα : Ελευθέριος Τσακιράκης

### ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

1. Ιωάννης Μαρινάκης (Επιβλέπων)
2. Αθανάσιος Μυγδαλάς
3. Νικόλαος Ματσατσίνης

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την: 13 / 3 / 2024

1. Καθηγητής Ιωάννης Μαρινάκης

Ioannis  
Marinakis

Digitally signed by  
Ioannis Marinakis  
Date: 2024.03.13  
16:37:47 +02'00'

(υπογραφή)

2. Καθηγητής Αθανάσιος Μυγδαλάς



3. Καθηγητής Νικόλαος Ματσατσίνης

Nikolaos  
Matsatsinis

Digitally signed by  
Nikolaos Matsatsinis  
Date: 2024.03.14  
17:16:48 +02'00'

4. Καθηγητής Γεώργιος Σταυρουλάκης

GEORGIOS STAVROULAKIS  
14/03/2024 12:52

5. Καθηγητής Γεώργιος Δούνιας



6. Αναπληρωτής Καθηγητής Γεώργιος Ατσαλάκης

Georgios Atsalakis

Georgios Atsalakis  
13.03.2024 21:05

7. Αναπληρωτής Καθηγητής Ευστράτιος Ιωαννίδης

Efstratios Ioannidis

Digitally signed by Efstratios  
Ioannidis  
Date: 2024.03.15 00:02:17 +02'00'

## Περίληψη

Η διαχείριση της ναυτιλιακής εφοδιαστικής αλυσίδας και η επίλυση των επιμέρους προβλημάτων της αποτελεί πρόκληση για επαγγελματίες και ερευνητές. Η παρούσα διδακτορική διατριβή εξετάζει τα προβλήματα της θαλάσσιας μεταφοράς των φορτίων μέσω της δρομολόγησης των πλοίων και τον ελλιμενισμό των πλοίων στους λιμένες, για τα οποία αναπτύσσονται καινοτόμοι και πρωτότυποι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης για την αντιμετώπισή τους σε πραγματικό χρόνο. Για την επίλυση των συγκεκριμένων προβλημάτων επιλέγονται μία σειρά από μεθοδολογίες της τεχνητής νοημοσύνης και πιο συγκεκριμένα από την κατηγορία των αλγόριθμων εμπνευσμένων από φυσικές διαδικασίες. Για το πρόβλημα ελλιμενισμού εξετάζονται δύο διαφορετικές προσεγγίσεις με βάση τη δυναμική άφιξη των πλοίων στα λιμάνια. Αντίστοιχα, για το πρόβλημα της θαλάσσιας μεταφοράς φορτίων εξετάζονται η βιομηχανική και η ελεύθερη δρομολόγηση των πλοίων. Στους προτεινόμενους αλγόριθμους ανταπτύσσονται καινούργιες τεχνικές για τη δημιουργία και βελτίωση των παραγόμενων λύσεων με στόχο τη συνολική αύξηση της αποτελεσματικότητας και της απόδοσής τους. Τα ληφθέντα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα της βιβλιογραφίας αποδεικνύοντας την δυναμική και την επιτυχημένη εφαρμογή των προτεινόμενων αλγόριθμων στα επιμέρους προβλήματα της ναυτιλιακής εφοδιαστικής αλυσίδας.



# Ευχαριστίες

Αρχικά ευχαριστώ τους γονείς μου, τον πατέρα μου Νικόλαο Τσακιράκη και την μητέρα μου Μαρία Μαχά για την διαρκή στήριξη τους. Χωρίς αυτούς δεν θα μπορούσε να εκπονηθεί και να ολοκληρωθεί η συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή.

Στην συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω εκείνους και εκείνες για την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν κατά την διάρκεια της διδακτορικής διατριβής. Ο καθένας και η καθεμιά γνωρίζουν το πόσο σημαντική και πολύτιμη ήταν η συνεισφορά τους προς εμένα όλο αυτό το διάστημα. Οι κυρίες και οι κύριοι είναι οι εξής:

- Αθανασοπούλου Αργυρώ
- Αλμπάνης Βαγγέλης
- Βαγιωνάκης Νίκος
- Βουτσάκης Μανώλης
- Ελισσαίος Θοδωρής
- Καλιβούρης Γιώργος
- Κοκκινάκη Μαρία
- Λαλούσης Κώστας
- Μαλανδράκης Γιάννης
- Μανιατέας Σταύρος
- Μαργώνης Φοίβος
- Μυγιάκης Ματθαίος
- Νακόπουλος Νίκος
- Ντελμπίζης Αστέρης
- Πατεράκης Αντώνης
- Πετρίδης Πρόδρομος
- Σκευοφύλακας Παναγιώτης
- Ταξίδου Ανδρομάχη

- Τσουλιάς Νίκος
- Ψύχας Δημήτρης
- Ψύχας Κώστας

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κα. Μάγδα Μαρινάκη και τον κ. Γιάννη Μαρινάκη για την αγάπη, την βοήθεια, την καθοδήγηση, την συνεργασία και βεβαίως την υπομονή τους όλη αυτήν την περίοδο. Ήταν ένα ιδιαίτερο διάστημα της ζωής μου και χωρίς εσάς οτιδήποτε άλλο και αν έκανα, είμαι σίγουρος ότι δεν θα ήταν τόσο ξεχωριστό όσο όλα αυτά που περάσαμε μαζί. Η συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή αφιερώνεται ειδικά σε εσάς.

Γιάννη και Μάγδα, Μάγδα και Γιάννη σας ευχαριστώ ολόψυχα.

# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Βιβλιογραφική Ανασκόπηση</b>	<b>4</b>
2.1	Εισαγωγή στην Ναυτιλιακή Εφοδιαστική Αλυσίδα . . . . .	4
2.2	Δρομολόγηση Πλοίων . . . . .	9
2.2.1	Δρομολόγηση Πλοίων Τακτικών Γραμμών - Liner Ship Routing	12
2.2.2	Βιομηχανική Δρομολόγηση Πλοίων - Industrial Ship Routing .	13
2.2.3	Ελεύθερη Δρομολόγηση Πλοίων - Tramp Ship Routing . . . .	14
2.3	Οργάνωση και Διαχείριση των Θαλάσσιων Τερματικών Σταθμών . . . .	15
2.3.1	Χερσαία Περιοχή - Landside Section . . . . .	20
2.3.1.1	Ανάθεση Οχημάτων - Vehicle Dispatching (VD) . . .	22
2.3.1.2	Οργάνωση Λειτουργίας Πυλών - Gate Operations Planning (GOP) . . . . .	24
2.3.2	Εσωτερική Περιοχή - Yard Section . . . . .	25
2.3.2.1	Χρονοπρογραμματισμός Γερανών Εδάφους - Yard Crane Scheduling (YCS) . . . . .	27
2.3.2.2	Χωροθέτηση Εμπορευματοκιβωτίων - Container Storage (CS) . . . . .	27
2.3.3	Θαλάσσια Περιοχή - Seaside Section . . . . .	29
2.3.3.1	Ανάθεση Γερανών Φ/Ε - Quay Crane Assignment Problem (QCAP) . . . . .	30
2.3.3.2	Χρονοπρογραμματισμός Γερανών Φ/Ε - Quay Crane Scheduling Problem (QCSP) . . . . .	31
2.3.3.3	Στοιβάξη Εμπορευματοκιβωτίων - Stowage Planning (SP)	32
2.3.3.4	Ελλιμενισμός Πλοίων - Berth Allocation Problem . .	34
<b>3</b>	<b>Μοντελοποιήσεις</b>	<b>49</b>
3.1	Εισαγωγή . . . . .	49

3.2	Μοντελοποιήσεις προβλημάτων δρομολόγησης πλοίων - Shipping . . . .	50
3.2.1	Μοντέλο τακτικής γραμμής σχεδιασμού δικτύου δρομολόγησης πλοίων - Linear network design model (ND) . . . . .	50
3.2.2	Μοντέλο τακτικών γραμμών ανάπτυξης στόλου - Liner fleet deployment model (FD) . . . . .	52
3.2.3	Μοντέλο δρομολόγησης πλοίων βιομηχανικού και ελεύθερου φορτίου - Industrial and Tramp ship routing and scheduling model (ITSRSP) . . . . .	55
3.3	Μοντελοποιήσεις για προβλήματα ελλιμενισμού πλοίων - Berth Allocation	58
3.3.1	Μοντέλα για το Δυναμικό Πρόβλημα Ελλιμενισμού των Πλοίων (Imai et al.[117]) . . . . .	59
3.3.1.1	Μικτού Ακέραιου Προγραμματισμού - MIP . . . . .	59
3.3.1.2	Δρομολόγηση Οχημάτων με Πολλαπλές Αποθήκες και Χρονικά Παράθυρα - MDVRPTW . . . . .	61
3.3.1.3	Γενικευμένη Διαχώριση Συνόλων - GSPP . . . . .	64
3.3.1.4	Δρομολόγηση Ετερογενή Οχημάτων με Χρονικά Παράθυρα - HVRPTW . . . . .	66
3.3.1.5	Χρονικού Δείκτη ή Ευρετηρίου - TI . . . . .	69
3.3.1.6	Ροής Τόξου - AF . . . . .	70
3.3.2	Μοντέλα για το Δυναμικό Πρόβλημα Ελλιμενισμού των Πλοίων με Γεωμετρικούς Περιορισμούς (Prencipe and Marinelli[222]) .	72
3.3.2.1	Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός - MILP	72
3.3.2.2	Δρομολόγηση Οχημάτων με Πολλαπλές Αποθήκες και Χρονικά Παράθυρα - MDVRPTW . . . . .	75
<b>4</b>	<b>Ελλιμενισμός πλοίων (Berth Allocation)</b>	<b>80</b>
4.1	Εισαγωγή . . . . .	80
4.2	Δεδομένα προβλημάτων DBAP . . . . .	81
4.3	Υπάρχουσες μεθοδολογίες επίλυσης . . . . .	82
4.3.1	Honey Bees Mating Optimization - HBMO . . . . .	83
4.3.2	Bumble Bees Mating Optimization - BBMO . . . . .	83
4.3.3	Monarch Butterfly Optimization - MBO . . . . .	84
4.3.4	Firefly Mating Algorithm - FMA . . . . .	84
4.4	Δημιουργία αρχικών λύσεων . . . . .	85
4.5	Μέθοδοι τοπικής αναζήτησης . . . . .	88
4.6	Προτεινόμενοι αλγόριθμοι επίλυσης . . . . .	92

4.6.1	Αλγόριθμος Ζευγαρώματος Πυγολαμπίδων . . . . .	93
4.6.2	Αλγόριθμος Ζευγαρώματος Μελισσών . . . . .	99
4.6.3	Αλγόριθμος Ζευγαρώματος Μπούμπουρων . . . . .	104
4.6.4	Αλγόριθμος Πεταλούδας Μονάρχη . . . . .	107
4.7	Αποτελέσματα προσέγγισης DBAP . . . . .	111
4.7.1	Σύγκριση αποτελεσμάτων με την βιβλιογραφία . . . . .	113
4.8	Αποτελέσματα προσέγγισης DDBAP . . . . .	125
4.8.1	Σύγκριση αποτελεσμάτων με την βιβλιογραφία . . . . .	125
<b>5</b>	<b>Δρομολόγηση πλοίων (Shipping)</b>	<b>129</b>
5.1	Εισαγωγή . . . . .	129
5.2	Δεδομένα προβλήματος ITSRSP . . . . .	130
5.3	Μεθοδολογίες επίλυσης . . . . .	131
5.3.1	Particle Swarm Optimization - PSO . . . . .	131
5.3.2	Artificial Bee Colony - ABC . . . . .	132
5.4	Δημιουργία αρχικών λύσεων . . . . .	133
5.5	Μέθοδοι τοπικής αναζήτησης . . . . .	136
5.6	Προτεινόμενοι αλγόριθμοι επίλυσης . . . . .	139
5.6.1	Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων . . . . .	139
5.6.2	Αλγόριθμος Τεχνητής Αποικίας Μελισσών . . . . .	144
5.6.3	Αλγόριθμος Πυγολαμπίδας . . . . .	147
5.6.4	Αλγόριθμος Πεταλούδας Μονάρχη . . . . .	150
5.7	Αποτελέσματα για ITSRSP . . . . .	153
5.7.1	Σύγκριση αποτελεσμάτων με την βιβλιογραφία . . . . .	155
<b>6</b>	<b>Επίλογος - Μελλοντική Έρευνα</b>	<b>165</b>
6.1	Συμπεράσματα . . . . .	165
6.1.1	Πρόβλημα Ελλιμενισμού Πλοίων . . . . .	166
6.1.2	Πρόβλημα Δρομολόγησης Πλοίων . . . . .	166
6.2	Μελλοντική Έρευνα . . . . .	167
6.2.1	Δρομολόγηση Πλοίων . . . . .	168
6.2.2	Χρονοπρογραμματισμός Γερανών Φ/Ε και Εδάφους . . . . .	169
6.2.3	Οργάνωση Λειτουργίας Πυλών . . . . .	170
<b>7</b>	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>171</b>

# Κατάλογος Πινάκων

2.1	Βιβλιογραφική ανασκόπηση για τα προβλήματα δρομολόγησης πλοίων . . . . .	11
2.2	Προβλήματα σχεδιασμού με βάση την κάθε περιοχή των θαλάσσιων τερ- ματικών σταθμών . . . . .	18
2.3	Χαρακτηριστικά ταξινόμησης των BAP προβλημάτων . . . . .	35
2.4	Κατηγορίες και μέθοδοι των BAP προβλημάτων . . . . .	39
2.5	Κατηγορίες και μέθοδοι των BAP προβλημάτων (Συνέχεια) . . . . .	40
3.1	Μοντελοποιήσεις για το δυναμικό BAP στην βιβλιογραφία . . . . .	59
4.1	Πειραματικά δεδομένα για την προσέγγιση DBAP . . . . .	112
4.2	Αλγόριθμοι στην βιβλιογραφία για την προσέγγιση DBAP . . . . .	113
4.3	Αποτελέσματα μικρού και μεσαίου συνόλου παραδειγμάτων . . . . .	119
4.4	Αποτελέσματα μεγάλου συνόλου παραδειγμάτων . . . . .	120
4.5	Αποτελέσματα πολύ μεγάλου συνόλου παραδειγμάτων . . . . .	120
4.6	Στατιστικά μικρού και μεσαίου συνόλου παραδειγμάτων 1 . . . . .	121
4.7	Στατιστικά μεγάλου συνόλου παραδειγμάτων 1 . . . . .	122
4.8	Στατιστικά πολύ μεγάλου συνόλου παραδειγμάτων 1 . . . . .	122
4.9	Στατιστικά μικρού και μεσαίου συνόλου παραδειγμάτων 2 . . . . .	123
4.10	Στατιστικά μεγάλου συνόλου παραδειγμάτων 2 . . . . .	124
4.11	Στατιστικά πολύ μεγάλου συνόλου παραδειγμάτων 2 . . . . .	124
4.12	Πειραματικά δεδομένα για την προσέγγιση DDBAP . . . . .	125
4.13	Αποτελέσματα Πίνακας . . . . .	127
4.14	Στατιστικά Πίνακας 1 . . . . .	127
4.15	Στατιστικά Πίνακας 2 . . . . .	128
5.1	Πειραματικά δεδομένα για το ITSRSRSP . . . . .	154
5.2	Αποτελέσματα DEEP SEA . . . . .	161
5.3	Αποτελέσματα DEEP SEA (Συνέχεια) . . . . .	162
5.4	Αποτελέσματα DEEP SEA (Συνέχεια 2) . . . . .	163

5.5	Αποτελέσματα DEEP SEA (Συνέχεια 3) . . . . .	164
5.6	Συνολικά Αποτελέσματα . . . . .	164

# Κατάλογος Σχημάτων

2.1	Περιοχές και προβλήματα σχεδιασμού των θαλάσσιων τερματικών σταθμών	17
2.2	Απεικόνιση των τριών διαφορετικών τύπων ελλιμενισμού των πλοίων (Rodrigues και Agra[226]) . . . . .	40
4.1	Απεικόνιση εξυπηρέτησης πλοίων κατά τον ελλιμενισμό τους στους τερματικούς σταθμούς (Dulebenets[59]) . . . . .	111
5.1	Απεικόνιση δρομολογίου εξυπηρέτησης φορτίων (Li et. al[160]) . . . . .	153
6.1	Απεικόνιση διάταξης λιμένα (Naeem et. al[203]) . . . . .	168



# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

Η ναυτιλία και κυρίως οι θαλάσσιες μεταφορές αποτελούν έναν από τους βασικότερους τρόπους μεταφοράς παγκοσμίως, καθώς διαμέσου των πλωτών αξόνων επιτυγχάνονται οι μετακινήσεις φορτίων και επιβατών. Παράλληλα θεωρούνται το ιδανικό και κυρίαρχο μέσο εμπορίου και ανταλλαγής εμπορευμάτων μεταξύ κρατών εξαιτίας της απόδοσης και της οικονομίας, τις οποίες προσφέρουν κατά τη μεταφορά μεγάλου όγκου αγαθών σε διεθνές επίπεδο. Η συνεχής ανάπτυξη του συγκεκριμένου κλάδου ανέδειξε την ανάγκη δημιουργίας ευφών και ευέλικτων συστημάτων εφοδιασμού για τη βελτίωση του συντονισμού διαφόρων δραστηριοτήτων, οι οποίες αφορούν τις θαλάσσιες μεταφορές εμπορευμάτων. Βασικά χαρακτηριστικά προβλήματα της αλυσίδας εφοδιασμού θεωρούνται η δρομολόγηση των πλοίων, η αποθήκευση των φορτίων και η διαχείριση των εμπορευμάτων. Εξαιτίας της πολυπλοκότητας αυτών των προβλημάτων, κρίνεται απολύτως αναγκαία η βελτιστοποίηση και οργάνωση της δομής της εφοδιαστικής αλυσίδας για τη διασφάλιση της μεταφοράς των αγαθών. Συνεπώς, ο κλάδος της ναυτιλίας με τη συνεχή ανάπτυξή του στοχεύει στη βελτίωση της λειτουργίας των θαλάσσιων υποδομών, στην αύξηση της ασφάλειας των μεταφορών μέσω των πλοίων και βεβαίως στην παροχή υπηρεσιών εφοδιαστικής αλυσίδας (logistics).

Η τεράστια ζήτηση της θαλάσσιας εφοδιαστικής αλυσίδας οφείλεται στην αδιάκοπη και συνεχή ανάπτυξη των θαλάσσιων μεταφορών στο πλαίσιο της διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας. Ειδικότερα, οι ιδιωτικοί οργανισμοί παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τις υπηρεσίες logistics και πραγματοποιούν ειδικές ενέργειες, όπως την ενίσχυση του μετοχικού τους κεφαλαίου και την επιλογή επιπρόθετων δαπανών στο συνολικό προϋπολογισμό τους, με στόχο την αναβάθμιση της οργάνωσης και του σχεδιασμού της αλυσίδας εφοδιασμού τους. Η σύνδεση της δυναμικής των ναυτιλιακών εταιρειών με την ανάπτυξη ενός πλάνου διαχείρισης της ναυτιλιακής εφοδιαστικής αλυσίδας (Maritime supply chain management) καθορίζεται από την ποιότητα των παρεχόμενων θαλάσσιων

υπηρεσιών εφοδιαστικής αλυσίδας. Επομένως, ένα ολοκληρωμένο και πλήρες σύστημα διαχείρισης της ναυτιλιακής εφοδιαστικής αλυσίδας, σύμφωνα με το οποίο πραγματοποιούνται οι απαραίτητες δραστηριότητες στον περιβάλλοντα χώρο των λιμένων, αλλά και κατά την εν πλω δρομολόγηση και πλοήγηση των πλοίων, περιλαμβάνει μια σειρά από κρίσιμες λειτουργίες. Γι' αυτό το λόγο η ενσωμάτωση της τεχνητής νοημοσύνης στον κλάδο της ναυτιλίας θεωρείται απαραίτητη χάρη στην πολυεπίπεδη και σημαντική συνεισφορά της, καθώς συμβάλλει ταυτόχρονα στην εξοικονόμηση του λειτουργικού κόστους, στη βελτίωση της επιχειρησιακής απόδοσης και βεβαίως στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα.

Ξεχωριστά από τον κλάδο της ναυτιλίας, η διαχείριση της θαλάσσιας εφοδιαστικής αλυσίδας αποτελεί έναν πολυσύνθετο τομέα, ο οποίος δεν περιορίζεται μόνο στη μεταφορά των εμπορευμάτων. Πρόκειται για μία αλληλουχία δραστηριοτήτων και εργασιών, οι οποίες λαμβάνουν χώρα κυρίως στους λιμένες και αντιμετωπίζονται μέσω των υπηρεσιών εφοδιαστικής αλυσίδας. Συνεπώς, η ολοένα αυξανόμενη ζήτηση για παροχή υπηρεσιών εφοδιαστικής αλυσίδας στηρίζεται στην ανάπτυξη των αυτοματοποιημένων διαδικασιών και φυσικά στον εκσυγχρονισμό των τεχνολογικών μέσων. Σε συνδυασμό με την άνθιση της τεχνολογίας, η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να αποτελέσει ένα ισχυρό εργαλείο για την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας και της ασφάλειας της θαλάσσιας εφοδιαστικής αλυσίδας. Ειδικότερα, η υλοποίηση ευφύων αλγορίθμων και η εφαρμογή καινοτόμων τεχνικών συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση των δρομολογίων των πλοίων, στη μείωση του χρόνου μεταφοράς των εμπορευμάτων και κατά επέκταση στη συνολική βελτίωση της διαχείρισης της ναυτιλιακής εφοδιαστικής αλυσίδας. Επομένως, η δημιουργία αλγοριθμικών λογισμικών με την αρωγή και χρήση της τεχνητής νοημοσύνης καθίσταται αναγκαία, η ύπαρξη αυτών των συστημάτων συνεισφέρουν στον εντοπισμό πιθανών κινδύνων και, τέλος γίνεται μία προσπάθεια για την εύρεση εφικτών και λύσεων που είναι κοντά στο βέλτιστο για την επίλυση των συγκεκριμένων προβλημάτων σε πραγματικό χρόνο.

Σπανίως δημοσιεύονται διατριβές και ερευνητικές εργασίες, οι οποίες συνδυάζουν την εφοδιαστική αλυσίδα με τον κλάδο της ναυτιλίας. Η παρούσα διδακτορική διατριβή στοχεύει τόσο στην ανάδειξη των βασικών προβλημάτων της ναυτιλιακής εφοδιαστικής αλυσίδας, όσο και στη βέλτιστη επίλυση τους μέσω της υλοποίησης νέων προτεινόμενων αλγορίθμων από την τεχνητή νοημοσύνη. Οι νέες μεθοδολογίες τροποποιούνται καταλλήλως, ώστε να ανταποκρίνονται στις ανάγκες και τους περιορισμούς του κάθε προβλήματος ξεχωριστά. Επιπρόσθετα, οι προτεινόμενες αλγοριθμικές μέθοδοι εφαρμόζονται για πρώτη φορά σε προβλήματα αυξημένης πολυπλοκότητας και οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι διακρίνονται από καινοτόμα χαρακτηριστικά, καθώς αντλούν πλήθος νέων και πρωτότυ-

πων τεχνικών από την επιστημονική βιβλιογραφία. Η ερευνητική διαδικασία ήταν αρκετά επίπονη και η διάρκειά της αρκετά μακροσκελής λόγω των πολλών πειραμάτων τα οποία πραγματοποιήθηκαν με συχνές αλλαγές στη δομή των αλγορίθμων για την συλλογή ποιοτικότερων αποτελεσμάτων. Τα τελικά αποτελέσματα αποδεικνύουν την δυναμική και την ισχύ των προτεινόμενων μεθοδολογιών καθιστώντας άκρως επιτυχημένη την εφαρμογή τους στα προβλήματα της ναυτιλιακής εφοδιαστικής αλυσίδας.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή επικεντρώνεται στη δημιουργία και εφαρμογή καινοτόμων και πρωτότυπων εργαλείων και μεθόδων με στόχο την επιτυχή αντιμετώπιση και επίλυση των προβλημάτων της ναυτιλιακής εφοδιαστικής αλυσίδας. Η δομή της διατριβής οργανώνεται σε επτά κεφάλαια. Ξεκινά με την εισαγωγή, στην οποία πραγματοποιείται μία σύντομη αναφορά στο περιεχόμενό της. Αμέσως μετά στο δεύτερο κεφάλαιο ακολουθεί η βιβλιογραφική ανασκόπηση των προβλημάτων της θαλάσσιας εφοδιαστικής αλυσίδας, όπως παρουσιάζονται στην επιστημονική βιβλιογραφία. Στην συνέχεια στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται οι προτεινόμενες μαθηματικές μοντελοποιήσεις για τα κύρια προβλήματα, με τα οποία ασχολείται η διδακτορική διατριβή. Τα επόμενα δύο κεφάλαια αποτελούν τον πυρήνα της διατριβής, καθώς σε αυτά αναλύονται και επιλύονται τα δύο βασικά προβλήματα της ναυτιλιακής εφοδιαστικής αλυσίδας. Πιο συγκεκριμένα, το κεφάλαιο τέσσερα εστιάζει στο πρόβλημα του ελλιμενισμού των πλοίων, ενώ το πέμπτο επικεντρώνεται στο πρόβλημα της δρομολόγησης των πλοίων. Στο κεφάλαιο έξι συνοψίζονται τα συμπεράσματα από την ερευνητική διαδικασία της διδακτορικής διατριβής και η μελλοντική έρευνα, η οποία θα πραγματοποιηθεί σε μεταγενέστερα στάδια. Τέλος, στο έβδομο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται όλες οι βιβλιογραφικές πηγές, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την συγγραφή της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

## Κεφάλαιο 2

# Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

### 2.1 Εισαγωγή στην Ναυτιλιακή Εφοδιαστική Αλυσίδα

Στη σύγχρονη εποχή οι θαλάσσιες μεταφορές αγαθών και εμπορευμάτων αποτελούν τον κινητήριο μοχλό του παγκόσμιου εμπορίου. Επηρεάζουν καταλυτικά την λειτουργία της αλυσίδας εφοδιασμού των επιχειρήσεων και οργανισμών, με άμεση επίδραση στις οικονομίες όλων των κρατών. Τις τελευταίες δεκαετίες η σημαντικότητα των θαλάσσιων μεταφορών για τις ναυτιλιακές εταιρίες και ομίλους αντικατροπτίζεται στην διάθεση και το ενδιαφέρον τους για οικονομικές επενδύσεις, καθώς η ορθή διαχείριση της θαλάσσιας αλυσίδας εφοδιασμού (Maritime Supply Chain) και η συνολική οργάνωση των λιμένων θεωρούνται βασικοί πυλώνες ανάπτυξης και ευημερίας. Το επενδυτικό ενδιαφέρον για την αναβάθμιση των υπηρεσιών εφοδιαστικής αλυσίδας και για τον εκσυγχρονισμό στο σύνολο της ναυτιλιακής εφοδιαστικής αλυσίδας εστιάζεται τόσο στην αγορά σύγχρονων πλοίων για τη μεταφορά προϊόντων, όσο και στην κατασκευή θαλάσσιων τερματικών σταθμών σε στρατηγικές περιοχές για την προώθηση των αγαθών.

Ειδικότερα στις θαλάσσιες μεταφορές, η μετακίνηση των εμπορευμάτων κατά κύριο λόγο πραγματοποιείται από φορτηγά πλοία (Tankers, Containers Ships), αφού πρωτίστως αυτά έχουν κατάλληλα συσκευαστεί και αποθηκευτεί σε ειδικά διαμορφωμένα κιβώτια, τα οποία είναι γνωστά ως εμπορευματοκιβώτια (Containers). Τα φορτηγά πλοία κατασκευάζονται με ειδικές προδιαγραφές ανάλογα με τις ανάγκες και τις απαιτήσεις των ναυτιλιακών εταιριών με πρώτιστο στόχο την ασφαλή μεταφορά των εμπορευματοκιβωτίων. Επομένως, η αγορά συγκεκριμένου τύπου πλοίων καθίσταται ζωτικής σημασίας τόσο για τη λειτουργικότητα της θαλάσσιας αλυσίδας εφοδιασμού, όσο και για την οικονομική «επιβίωση» επαγγελματιών και επιχειρήσεων. Εκτός από τα πλωτά

μέσα για τη μεταφορά των εμπορευματοκιβωτίων, εξίσου απαραίτητος και καθοριστικός θεωρείται ο ρόλος των τερματικών σταθμών στους λιμένες, καθώς διαμέσου των συγκεκριμένων σταθμών επιτυγχάνεται ένα σύνολο απαραίτητων δραστηριοτήτων για την ορθή διαχείρισή τους. Κύριος στόχος των τερματικών σταθμών αποτελεί η εξυπηρέτηση των φορτηγών πλοίων και πιο συγκεκριμένα οι εργασίες φόρτωσης/εκφόρτωσης των εμπορευματοκιβωτίων ανεξάρτητα από την καταλαμβανόμενη έκταση και τον διαθέσιμο εξοπλισμό τους. Στη συνέχεια μετά τον ελλιμενισμό των πλοίων, εντός των σταθμών διενεργούνται οι απαραίτητες ενέργειες για την προσωρινή αποθήκευση των εμπορευματοκιβωτίων, έως ότου παραληφθούν από κάποιο μέσο μεταφοράς για τον τελικό προορισμό τους. Ένας θαλάσσιος τερματικός σταθμός εμπορευματοκιβωτίων (Maritime Container Terminal) οργανώνεται σε μία ή περισσότερες περιοχές στον διαθέσιμο χώρο των λιμένων. Θεωρείται μία ιδιαίτερα σημαντική υποδομή, καθώς σε αυτόν επιτυγχάνεται η διασύνδεση των θαλάσσιων και χερσαίων μεταφορών. Τα κύρια μέσα μεταφοράς, τα οποία χρησιμοποιούνται στους τερματικούς σταθμούς είναι εκτός από τα πλοία, τα χερσαία οχήματα (φορτηγά) και τα τρένα. Λόγω των διαφορετικών μέσων μεταφοράς, η διαμόρφωση του περιβάλλοντα χώρου των θαλάσσιων σταθμών ορίζεται με βάση το είδος της επεξεργασίας των εμπορευματοκιβωτίων. Η διαφορετική διαχείρισή τους, δηλαδή, με δραστηριότητες, οι οποίες αφορούν την άφιξή τους (φόρτωση/εκφόρτωση, στοίβαξη), την παραμονή τους (αποθήκευση, φύλαξη) ή τη μετάβασή τους στον τελικό προορισμό τους, καθορίζουν την οργάνωση, τη λειτουργικότητα και την πολυπλοκότητα των τερματικών σταθμών.

Συνηθέστερα παρατηρείται ότι, η διάταξη ενός τερματικού σταθμού εμπορευματοκιβωτίων περιλαμβάνει δομικές περιοχές ανάλογα με τις επιχειρησιακές λειτουργίες, οι οποίες πραγματοποιούνται στους συγκεκριμένους χώρους και με τη χρησιμοποίηση ειδικού εξοπλισμού. Ειδικότερα στην επιστημονική βιβλιογραφία τονίζεται ότι, ένας θαλάσσιος τερματικός σταθμός διαχωρίζεται σε τρεις (Bierwirth και Meisel[12]) βασικές περιοχές. Σύμφωνα με την εργασία των Bierwirth και Meisel[12] και με την αναφορά στο βιβλίο των Marti, Pardalos και Resende[187], η **Θαλάσσια Περιοχή** (Seaside Area), η **Εσωτερική-Κεντρική Περιοχή** (Yard Area) και η **Χερσαία Περιοχή** (Landside Area) αποτελούν τις περιοχές, στις οποίες οργανώνονται οι σύγχρονοι θαλάσσιοι τερματικοί σταθμοί εμπορευματοκιβωτίων. Η **Θαλάσσια Περιοχή** περιλαμβάνει τις δραστηριότητες, οι οποίες αφορούν κυρίως την εξυπηρέτηση των πλοίων (π.χ. τον ελλιμενισμό τους, τη στοίβαξη των εμπορευματοκιβωτίων) και τη διαχείριση των εμπορευματοκιβωτίων από και προς σε αυτά με την χρησιμοποίηση ειδικού εξοπλισμού (π.χ. φόρτωση/εκφόρτωση με γερανούς). Όπως φαίνεται από την ονομασία της, η **Εσωτερική-Κεντρική Περιοχή** αποτελεί το ενδιάμεσο τμήμα ανάμεσα στη

θάλασσα και την ξηρά. Στη συγκεκριμένη περιοχή εντάσσονται δραστηριότητες, οι οποίες εστιάζουν στην αποθήκευση και μετακίνηση των εμπορευματοκιβωτίων εντός των χωρικών ορίων των τερματικών σταθμών. Η **Χερσαία Περιοχή** αποτελεί την τρίτη και τελευταία περιοχή στους θαλάσσιους τερματικούς σταθμούς. Για την περιοχή της ξηράς, θεωρείται ο χώρος άφιξης και αναμονής των οχημάτων φόρτωσης και των τρένων, καθώς σε αυτόν πραγματοποιούνται οι απαραίτητες ενέργειες για τη διασφάλιση της ασφαλούς μεταφοράς των εμπορευματοκιβωτίων στους προορισμούς τους. Πιο αναλυτικά, σύμφωνα με την επιστημονική βιβλιογραφία, οι θαλάσσιοι τερματικοί σταθμοί εμπορευματοκιβωτίων διαχωρίζονται στις ακόλουθες περιοχές:

- **Θαλάσσια Περιοχή:** Το τμήμα του θαλάσσιου τερματικού σταθμού, το οποίο στοχεύει στην εξυπηρέτηση των εισερχόμενων πλοίων. Ειδικότερα, εδώ πραγματοποιούνται κατάλληλες διεργασίες μεταξύ των πλοίων και του τερματικού σταθμού.
- **Εσωτερική-Κεντρική Περιοχή:** Ο χώρος του θαλάσσιου τερματικού σταθμού, στον οποίο προσωρινά αποθηκεύονται τα εμπορευματοκιβώτια. Η συγκεκριμένη περιοχή καταλαμβάνει περισσότερο από το 50% του συνολικού χώρου του τερματικού σταθμού, καθώς τα εμπορευματοκιβώτια στοιβάζονται σε συστάδες.
- **Χερσαία Περιοχή:** Η περιοχή του θαλάσσιου τερματικού σταθμού, στην οποία πραγματοποιούνται οι αναγκαίες επαφές με τους εξωτερικούς παραλήπτες (π.χ. φορτηγά, τρένα) των εμπορευματοκιβωτίων. Η διέλευση των οχημάτων παραλαβής ελέγχεται στις πύλες εισόδου/εξόδου του τερματικού σταθμού.

Ανεξάρτητα από την οργάνωση των θαλάσσιων τερματικών σταθμών, ο μεγάλος αριθμός παροχής υπηρεσιών εφοδιαστικής αλυσίδας αποτελούν πρόκληση για επαγγελματίες, εταιρείες και ερευνητές. Η λεπτομερής προσέγγιση και αποτελεσματική αντιμετώπισή τους επηρεάζουν την ορθή διαχείριση της ναυτιλιακής εφοδιαστικής αλυσίδας. Η επιστημονική κοινότητα εντάσσει τα προβλήματα βελτιστοποίησης της ναυτιλιακής εφοδιαστικής αλυσίδας σε επιμέρους κατηγορίες εξαιτίας του εύρους και της πολυπλοκότητας των διεργασιών, οι οποίες πραγματοποιούνται εντός των θαλάσσιων τερματικών σταθμών και κατά επέκταση στο σύνολο της περιοχής του εκάστοτε λιμένα. Ο Hennessey[111] πρότεινε τον διαχωρισμό των προβλημάτων, τα οποία παρατηρούνται στους τερματικούς σταθμούς, σε τέσσερις βασικές κατηγορίες, οι οποίες διακρίνονται ανάλογα με τη διαχείριση των εμπορευματοκιβωτίων. Οι κατηγορίες αφορούν τη μετακίνησή τους από τα πλοία προς τον τερματικό σταθμό (**Πλοίο-Τερματικός** - Ship to Shore), τη μεταφορά τους εντός του εσωτερικού χώρου του λιμένα (**Μεταφορά** - Transfer), την αποθήκευσή τους (**Αποθήκευση** - Storage) και τη διανομή τους στον τελικό προορισμό

τους (**Διανομή** - Delivery). Επιπροσθέτως, σε πιο πρόσφατη ερευνητική εργασία, η οποία παρουσιάζεται στο βιβλίο των Marti, Pardalos και Resende[187], πραγματοποιείται συγχώνευση των δύο κατηγοριών **Μεταφορά και Διανομή** σε μία ενιαία κατηγορία **Μεταφορά και Διανομή** (Transfer and Delivery), καθώς τα επιμέρους προβλήματα βελτιστοποίησης παρουσιάζουν πολλά κοινά και όμοια χαρακτηριστικά μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα, στην κατηγορία **Πλοίο-Τερματικός** εντάσσονται τα προβλήματα, τα οποία στοχεύουν στη φόρτωση/εκφόρτωση των εμπορευματοκιβωτίων από/προς τη θάλασσα στους τερματικούς σταθμούς. Η κατηγορία **Μεταφορά και Διανομή** εστιάζει σε προβλήματα σχετικά με τη μετακίνηση των εμπορευματοκιβωτίων από τη χερσαία περιοχή του λιμένα (αποβάθρα) προς τους χώρους αποθήκευσης/φύλαξής τους και αντιστρόφως. Η τρίτη και τελευταία κατηγορία **Αποθήκευση** αφορά κυρίως προβλήματα μεταφοράς των αποθηκευμένων εμπορευματοκιβωτίων με σκοπό την εξυπηρέτησή τους είτε για την εν πλώ μεταφορά τους από φορτηγά πλοία είτε τη δρομολόγησή τους στην ενδοχώρα διαμέσου τρένων ή φορτηγών. Στη συνέχεια παρατίθενται συνοπτικά τα ενδεικτικότερα προβλήματα βελτιστοποίησης της ναυτιλιακής εφοδιαστικής αλυσίδας από τις προαναφερθείσες επιμέρους κατηγορίες:

- **Πλοίο-Τερματικός:**

- Δρομολόγηση Πλοίων (Ship Routing): Η δημιουργία των βέλτιστων πλωτών αξόνων για τη δρομολόγηση των πλοίων με στόχο τη διανομή και παραλαβή των εμπορευματοκιβωτίων από ένα σύνολο λιμένων (Korsvik et al.[140])
- Στοιβάξη Εμπορευματοκιβωτίων (Stowage Planning): Ο προσδιορισμός των βέλτιστων θέσεων στοιβάξης των εμπορευματοκιβωτίων πάνω σε ένα φορτηγό πλοίο (Monaco et al.[201])
- Ελλιμενισμός Πλοίων (Berth Allocation): Ο προσδιορισμός της βέλτιστης αλληλουχίας ελλιμενισμού των πλοίων κατά την άφιξη τους στους τερματικούς σταθμούς των λιμένων (Bierwirth και Meisel[12])
- Ανάθεση Γερανών Φόρτωσης/Εκφόρτωσης (Quay Crane Assignment): Ο καθορισμός του κατάλληλου αριθμού γερανών φόρτωσης/εκφόρτωσης σύμφωνα με το χρόνο εξυπηρέτησης των πλοίων κατά τον ελλιμενισμό τους (Meisel και Bierwirth[195])
- Χρονοπρογραμματισμός Γερανών Φόρτωσης/Εκφόρτωσης (Quay Crane Scheduling): Ο καθορισμός των χρονοδιαγραμμάτων των γερανών φόρτωσης/εκφόρτωσης κατά τη διάρκεια των εργασιών εξυπηρέτησης των ελλιμενισμένων πλοίων (Meisel και Bierwirth[14])

- **Μεταφορά και Διανομή:**

- Ανάθεση Οχημάτων (Vehicle Dispatching): Η κατανομή των εργασιών στα οχήματα εντός των λιμένων με στόχο την ελαχιστοποίηση του χρόνου παραμονής των ελλιμενισμένων πλοίων (Angeloudis και Bell[3])
- Οργάνωση Λειτουργίας Πυλών (Gate Operations Planning): Ο έλεγχος της διέλευσης των οχημάτων στους λιμένες σύμφωνα με τους χρόνους άφιξης/αναχώρησης των ελλιμενισμένων πλοίων (Chen et al.[28])

- **Αποθήκευση:**

- Χρονοπρογραμματισμός Γερανών Εδάφους (Yard Crane Scheduling): Ο προγραμματισμός των εργασιών αποθήκευσης και μεταφοράς των εμπορευματοκιβωτίων από τους γερανούς εδάφους (Gharehgozli et al.[76])
- Χωροθέτηση Εμπορευματοκιβωτίων (Container Storage): Ο καθορισμός των δραστηριοτήτων αποθήκευσης, ανάκτησης και επανατοποθέτησης για τη μετακίνηση των εμπορευματοκιβωτίων εντός της περιοχής των λιμένων (Caserta et al.[24])

Διαχωρίζοντας τις βασικές κατηγορίες και ταξινομώντας τα προβλήματα βελτιστοποίησης δύο από τις κύριες δραστηριότητες, ο καθορισμός των πλωτών αξόνων για την εν πλω διέλευση του στόλου των πλοίων και ο κατάλληλος ελλιμενισμός των εισερχόμενων πλοίων στους τερματικούς σταθμούς των λιμένων, συμβάλλουν στην επιτυχημένη λειτουργία της ναυτιλιακής εφοδιαστικής αλυσίδας. Η παρούσα διδακτορική διατριβή εστιάζει στην σημαντικότητα των προβλημάτων βελτιστοποίησης της ναυτιλιακής εφοδιαστικής αλυσίδας και ασχολείται με την επίλυση των προβλημάτων Δρομολόγησης Πλοίων και του Ελλιμενισμού Πλοίων.

Το κεφάλαιο της βιβλιογραφικής ανασκόπησης οργάνωνεται σε δύο υποκεφάλαια. Στο πρώτο, το οποίο ακολουθεί, περιγράφονται οι διαδικασίες για τη διαχείριση και την πλεύση του στόλου των πλοίων. Πιο συγκεκριμένα, η δρομολόγηση των πλοίων ακολουθεί ειδικά μοντέλα για τις εν πλω μεταφορές, τα οποία επεξηγούνται λεπτομερώς και ταξινομούνται με βάση τα ξεχωριστά χαρακτηριστικά τους. Το δεύτερο υποκεφάλαιο εστιάζει στα προβλήματα της οργάνωσης και του σχεδιασμού των θαλάσσιων τερματικών σταθμών. Ειδικότερα, τονίζεται η διαχώριση των λιμένων σε επιμέρους περιοχές ανάλογα με το είδος των προβλημάτων σχεδιασμού στους τερματικούς σταθμούς, τα οποία περιγράφονται αναλυτικά με βάση την σημαντικότητά τους. Και για τις δύο περιπτώσεις προβλημάτων πραγματοποιείται εκτενής αναφορά στην επιστημονική βιβλιογραφία τόσο



για τα γενικά, όσο και για τα επιμέρους προβλήματα της θαλάσσιας εφοδιαστικής αλυσίδας, στα οποία επικεντρώνεται περισσότερο η παρούσα διδακτορική διατριβή.

## 2.2 Δρομολόγηση Πλοίων

Η αποτελεσματική λειτουργία και οργάνωση της ναυτιλιακής εφοδιαστικής αλυσίδας οφείλεται σε μέγιστο βαθμό στις θαλάσσιες μεταφορές και πιο συγκεκριμένα στα εν πλω δρομολόγια των πλοίων. Όλες οι απαραίτητες διεργασίες και ενέργειες επικεντρώνονται στη δημιουργία ισχυρών στόλων από πλοία για την βελτίωση των υπηρεσιών θαλάσσιου εφοδιασμού και κατ' επέκταση του συνολικού ναυτιλιακού τομέα. Η βιομηχανία της ναυτιλίας στηρίζεται ολόκληρη στις μεταφορές των εμπορευμάτων μέσω των θαλάσσιων δρομολογίων των πλοίων. Περισσότερο από το 80% των αγαθών και των προϊόντων του παγκόσμιου εμπορίου πραγματοποιείται διαμέσου των θαλάσσιων μεταφορών. Αυτό οφείλεται στους στόλους εταιρειών και ιδιωτών, καθώς στοχεύουν στον καθορισμό των βέλτιστων δρομολογίων για κάθε ένα από τα πλοία τους. Φυσιολογικά, οι πλοιοκτήτριες και οι ναυτιλιακές εταιρείες μεταβάλλουν σταδιακά το μέγεθος του στόλου τους, καθώς λαμβάνουν σημαντικές αποφάσεις για το είδος, τη δομή και τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των ιδιόκτητων πλοίων τους. Επομένως, ο διαρκής εκσυγχρονισμός του στόλου των πλοίων συμβάλλει στην ποιοτική αναβάθμιση των υπηρεσιών κατά τη διαδικασία της θαλάσσιας μεταφοράς των εμπορευμάτων.

Στην επιστημονική βιβλιογραφία η διαχείριση του στόλου για την δρομολόγηση και την πλεύση των πλοίων διακρίνεται σε τρεις βασικές κατηγορίες, οι οποίες είναι οι παρακάτω:

- Δρομολόγηση Πλοίων Τακτικών Γραμμών - Liner Ship Routing: Σε αυτή την κατηγορία δρομολόγησης τα πλοία εκτελούν καθορισμένα δρομολόγια μέσα σε αυστηρά χρονοδιαγράμματα, καθώς οι διαχειριστές ελέγχουν τόσο τα εμπορεύματα, όσο και τα πλοία κατά την εν πλω πλεύση τους. Η συγκεκριμένη κατηγορία παρομοιάζεται με τις γραμμές των δημόσιων λεωφορείων, στις οποίες πραγματοποιούνται σταθερά δρομολόγια.
- Βιομηχανική Δρομολόγηση Πλοίων - Industrial Ship Routing: Σε αυτήν την περίπτωση οι διαχειριστές θεωρούνται πλοιοκτήτες, δηλαδή κατέχουν έναν ιδιόκτητο στόλο πλοίων. Συνεπώς αξιοποιούν τα πλοία τους με στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους μεταφοράς των φορτίων, ακριβώς όπως συμβαίνει και με ένα ιδιόκτητο στόλο ενοικιαζόμενων οχημάτων. Για αυτό το λόγο οι πλοιοκτήτες

διαθέτουν ένα μέρος από τον διαθέσιμο στόλο τους, ώστε να εξυπηρετήσουν όλα τα φορτία με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

- Ελεύθερη Δρομολόγηση Πλοίων - Tramp Ship Routing: Σε αυτόν τον τρόπο δρομολόγησης τα πλοία μεταφέρουν ένα συνδυασμό από δεσμευμένα (υποχρεωτική μεταφορά κατόπιν συμφωνίας ή σύναψης σύμβασης μεταφοράς εμπορευμάτων) και ελεύθερα φορτία. Ο συγκεκριμένος τρόπος παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με τις υπηρεσίες των ταξί. Ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των φορτίων στην αγορά, οι διαχειριστές των πλοίων επιλέγουν τον αριθμό των ελεύθερων φορτίων για μεταφορά με στόχο τη μεγιστοποίηση του συνολικού κέρδους.

Τα τρία διαφορετικά είδη δρομολόγησης πλοίων θεωρούνται ανεξάρτητα μεταξύ τους. Πρακτικά όμως στην αγορά διακρίνονται περιπτώσεις, στις οποίες η πλεύση των πλοίων αλλάζει από μία κατηγορία σε κάποια άλλη, καθώς οι ναυτιλιακές εταιρείες επιλέγουν συνειδητά τα χαρακτηριστικά των δρομολογίων του κάθε πλοίου τους ξεχωριστά. Ειδικότερα στη βιβλιογραφία παρατηρείται μία ταύτιση των κατηγοριών της βιομηχανικής και της ελεύθερης δρομολόγησης των πλοίων, καθώς οι δύο κατηγορίες παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες στο κομμάτι της εξυπηρέτησης των δεσμευμένων φορτίων. Ωστόσο, στον τομέα της ναυτιλίας διακρίνονται ως υπηρεσίες ναύλωσης ελεύθερων και τακτικών γραμμών πλοίων. Συνοπτικά, οι διαφορές των δύο υπηρεσιών δρομολόγησης πλοίων εστιάζονται στα χαρακτηριστικά των δρομολογίων των πλοίων, στο είδος και τον όγκο των μεταφερόμενων φορτίων.

Στη βιβλιογραφία οι πρώτες εργασίες για την βελτιστοποίηση της δρομολόγησης των πλοίων παρατηρούνται από τη δεκαετία 1970-1980. Η πιο χαρακτηριστική μελέτη εκείνης της περιόδου αποτελεί αυτή του Ronen[230] στην οποία παρατείνεται ένα πλήρες σύστημα ταξινόμησης των προβλημάτων δρομολόγησης και προγραμματισμού της εν πλω πορείας των πλοίων. Με το πέρασμα των δεκαετιών η δρομολόγηση των πλοίων και ο κλάδος των θαλάσσιων μεταφορών απέκτησαν ολοένα αυξανόμενο επιστημονικό ενδιαφέρον εξαιτίας της ραγδαίας ανάπτυξης και άνθισης του τομέα της ναυτιλίας, το οποίο παρατηρείται στις βιβλιογραφικές αναφορές και έρευνες των Christiansen et al.[42, 43] και των Christiansen και Fagerholt[44]. Στις επόμενες τρεις υποενότητες πραγματοποιείται η απαραίτητη βιβλιογραφική ανασκόπηση για τις βασικές κατηγορίες προβλημάτων δρομολόγησης των πλοίων. Οι εργασίες από τη βιβλιογραφία περιέχονται συνοπτικά στον Πίνακα 2.1, στον οποίο αναφέρονται τα ονόματα των αρθρογράφων, το έτος δημοσίευσης, η κατηγορία, ο στόχος και η μέθοδος επίλυσης του επιλεγμένου προβλήματος.

Πίνακας 2.1: Βιβλιογραφική ανασκόπηση για τα προβλήματα δρομολόγησης πλοίων

Άρθρο	Έτος	Κατηγορία	Στόχος	Μέθοδος
Perakis και Jaramillo[215]	1991	Liner	Ελαχιστοποίηση κόστους	Γραμμικός Προγραμματισμός
Jaramillo και Perakis[125]	1991	Liner	Ελαχιστοποίηση κόστους	Γραμμικός Προγραμματισμός
Powell και Perakis[221]	1997	Liner	Ελαχιστοποίηση κόστους	Ακέραιος Προγραμματισμός
Gelareh και Meng[74]	2010	Liner	Ελαχιστοποίηση κόστους	Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός
Meng και Wang[198]	2010	Liner	Ελαχιστοποίηση κόστους	Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός
Wang et al.[270]	2011	Liner	Ελαχιστοποίηση κόστους	Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός
Wang και Meng[271]	2012	Liner	Ελαχιστοποίηση κόστους	Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός
Zacharioudakis et al.[280]	2011	Liner	Ελαχιστοποίηση κόστους	Γενετικός Αλγόριθμος
Ting και Tzeng[250]	2003	Liner	Ελαχιστοποίηση κόστους	Δυναμικός Προγραμματισμός
Shintani et al.[239]	2007	Liner	Ελαχιστοποίηση κόστους	Γενετικός Αλγόριθμος
Sambracos et al.[236]	2007	Liner	Ελαχιστοποίηση κόστους	Μέθοδος Αποδοχής Κατωφλίου
Karlaftis[132]	2009	Liner	Ελαχιστοποίηση κόστους	Γενετικός Αλγόριθμος
Gelareh et al.[75]	2010	Liner	Ελαχιστοποίηση κόστους	Lagrangian Χαλάρωση (Lagrangian Relaxation)
Yan et al.[277]	2009	Liner	Ελαχιστοποίηση κόστους	Lagrangian Χαλάρωση (Lagrangian Relaxation)
Christiansen et al.[45]	2004	Industrial	Ελαχιστοποίηση κόστους	Διαμερισμός συνόλου (Set Partitioning)
Bausch et al.[10]	1998	Industrial	Ελαχιστοποίηση κόστους	Διαμερισμός συνόλου (Set Partitioning)
Bremer και Perakis[19]	1992	Industrial	Ελαχιστοποίηση κόστους	Διαμερισμός συνόλου (Set Partitioning)
Brown et al.[22]	1987	Industrial	Ελαχιστοποίηση κόστους	Διαμερισμός συνόλου (Set Partitioning)
Cho και Perakis[36]	2001	Industrial	Ελαχιστοποίηση κόστους	Ακέραιος Προγραμματισμός
Christiansen και Fagerholt[40]	2002	Industrial	Ελαχιστοποίηση κόστους	Διαμερισμός συνόλου (Set Partitioning)
Fagerholt[62]	2001	Industrial	Ελαχιστοποίηση κόστους	Διαμερισμός συνόλου (Set Partitioning)
Fagerholt και Christiansen[63]	2000	Industrial	Ελαχιστοποίηση κόστους	Διαμερισμός συνόλου (Set Partitioning)
Perakis και Bremer[216]	1992	Industrial	Ελαχιστοποίηση κόστους	Διαμερισμός συνόλου (Set Partitioning)
Ronen[229]	1986	Industrial	Ελαχιστοποίηση κόστους	Ακέραιος Προγραμματισμός
Sherali et al.[238]	1999	Industrial	Ελαχιστοποίηση κόστους	Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός
Vukadinovic και Teodorovic[265]	1994	Industrial	Ελαχιστοποίηση κόστους	Ασαφή Λογική (Fuzzy Logic)
Vukadinovic et al.[266]	1994	Industrial	Ελαχιστοποίηση κόστους	Ασαφή Λογική (Fuzzy Logic)
Appelgren[4]	1971	Tramp	Μεγιστοποίηση κέρδους	Αλγόριθμος Dantzig-Wolfe (DW Decomposition)
Appelgren[5]	1969	Tramp	Μεγιστοποίηση κέρδους	Αλγόριθμος Dantzig-Wolfe (DW Decomposition)
Bronmo et al.[21]	2007	Tramp	Μεγιστοποίηση κέρδους	Ευρετικός Αλγόριθμος
Korsvik et al.	2010	Tramp	Μεγιστοποίηση κέρδους	Αλγόριθμος Περιορισμένη Αναζήτηση (Tabu Search)
Malliappi et al.[175]	2011	Tramp	Μεγιστοποίηση κέρδους	Μεταβλητής Γειτονιάς Αναζήτηση (VNS)
Korsvik et al.[141]	2011	Tramp	Μεγιστοποίηση κέρδους	Υβριδικός Ευρετικός Αλγόριθμος
Hemmati et al.[105]	2014	Tramp	Ελαχιστοποίηση κόστους	Ευρετικός Αλγόριθμος
Borthen et al.[16]	2017	Tramp	Μεγιστοποίηση κέρδους	Υβριδικός Γενετικός Αλγόριθμος
Homs et al.[113]	2020	Tramp	Ελαχιστοποίηση κόστους	Υβριδικός Μεθευρετικός Αλγόριθμος
Christiansen[41]	1999	Tramp	Ελαχιστοποίηση κόστους	Αλγόριθμος Dantzig-Wolfe (DW Decomposition)
Fagerholt[64]	2004	Tramp	Μεγιστοποίηση κέρδους	Ευρετικός Αλγόριθμος
Kim και Lee[139]	1997	Tramp	Μεγιστοποίηση κέρδους	Διαμερισμός συνόλου (Set Partitioning)
Fagerholt και Lindstad[65]	2007	Tramp	Μεγιστοποίηση κέρδους	Ευρετικός Αλγόριθμος

### 2.2.1 Δρομολόγηση Πλοίων Τακτικών Γραμμών - Liner Ship Routing

Στην υποενότητα 2.2.1 παρουσιάζονται οι βασικές εργασίες από τη βιβλιογραφία για τη δρομολόγηση των πλοίων τακτικών γραμμών (Liner Ship Routing ή Liner Shipping). Κύριο χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης κατηγορίας προβλημάτων δρομολόγησης των πλοίων αποτελεί η αυστηρή τήρηση των δρομολογίων μεταφοράς των εμπορευμάτων με στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους πλεύσης του στόλου. Εναλλακτικά στον ευρύτερο τομέα των θαλάσσιων μεταφορών, η δρομολόγηση των πλοίων τακτικών γραμμών αναφέρεται με διαφορετικές ονομασίες ανάλογα με τον τρόπο αντιμετώπισης του συγκεκριμένου προβλήματος. Λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορετικές μαθηματικές προσεγγίσεις και το αλγοριθμικό ενδιαφέρον για την επίλυσή του, στην επιστημονική βιβλιογραφία ονομάζεται δρομολόγηση πλοίων τακτικών γραμμών. Στην περίπτωση της αγοράς και ιδιαίτερα στη ναυτιλιακή βιομηχανία συναντάται με τον όρο ναυτιλία τακτικών γραμμών.

Στην βιβλιογραφία η δρομολόγηση πλοίων τακτικών γραμμών διακρίνεται σε δύο προσεγγίσεις. Η πρώτη αφορά τον σχεδιασμό του δικτύου πλεύσης των πλοίων (network design), ενώ η δεύτερη επικεντρώνεται περισσότερο στα χαρακτηριστικά και τη δυναμική του στόλου (fleet deployment). Αναφορικά με την πρώτη προσέγγιση για τον σχεδιασμό ενός δικτύου πλεύσης λαμβάνονται υπόψη ειδικά χαρακτηριστικά, όπως ο αριθμός των λιμένων, η αλληλουχία (σειρά) και η συχνότητα επισκεψιμότητας (εξυπηρέτησής) τους από τα διαθέσιμα πλοία. Συνηθέστερα στη βιβλιογραφία η διαφοροποίηση των εργασιών πραγματοποιείται με το κριτήριο της επισκεψιμότητας, το οποίο διακρίνεται σε δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη τα δρομολόγια των πλοίων θεωρούνται απευθείας (routes with transshipment), δηλαδή ολοκληρώνουν την πορεία προς τον τελικό προορισμό τους χωρίς ενδιάμεσες στάσεις. Χαρακτηριστικές για αυτήν την περίπτωση αποτελούν οι εργασίες Ting και Tzeng[250], Shintani et al.[239] και Sambracos et al.[236]. Σε αντίθεση με την πρώτη, στη δεύτερη περίπτωση τα δρομολόγια των πλοίων καθορίζονται από μία ή περισσότερες αφίξεις σε ενδιάμεσους λιμένες (hub ports), καθώς σε αυτούς πραγματοποιούνται όλες οι απαραίτητες διεργασίες για τη διαχείριση των εμπορευμάτων. Ενδεικτικά, στη συγκεκριμένη περίπτωση αναφέρονται οι εργασίες των Karlaftis et al.[132], Gelareh et al.[75] και Yan et al.[277].

Η δεύτερη προσέγγιση εστιάζει στη σύνθεση του στόλου (fleet deployment) και στην ανάθεση των θαλάσσιων δρομολογίων στα κατάλληλα πλοία. Οι Powell και Perakis[221] στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση του κόστους πλεύσης των πλοίων στην εργασία τους, η οποία αποτελεί προέκταση των δύο προηγούμενων εργασιών των Perakis και

Jaramillo[215, 125]. Οι Gelareh και Meng[74] παρουσιάζουν ένα μαθηματικό μοντέλο για το πρόβλημα σύνθεσης του στόλου, το οποίο επιλύουν με χρήση ενός εμπορικού προγράμματος Μικτού Ακεραίου Προγραμματισμού. Μια προέκταση του προηγούμενου μοντέλου προτείνεται από τους Meng και Wang[198], οι οποίοι εισάγουν καινούργιους περιορισμούς απόφασης για τη διασφάλιση της ικανοποίησης των δρομολογίων από τα διαθέσιμα πλοία του στόλου. Σε μεταγενέστερη εργασία των Wang et al.[270] παρουσιάζεται ένα βελτιωμένο μοντέλο επίλυσης του προβλήματος σύνθεσης του στόλου, στο οποίο λόγω της αύξησης της υπολογιστικής απόδοσης ελαχιστοποιούνται τα λειτουργικά κόστη. Εναλλακτικά, η ανάθεση των πλοίων για την εξυπηρέτηση των θαλάσσιων δρομολογίων εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Συγκεκριμένα αυτοί είναι οι ενδιάμεσες στάσεις σε λιμένες (για την μετακίνηση των φορτίων από ένα πλοίο σε κάποιο άλλο για την ολοκλήρωση του δρομολογίου στον τελικό προορισμό) και η ταχύτητα πλεύσης των πλοίων, οι οποίοι μελετούνται από τους Wang και Meng[271] και τους Zacharioudakis et al.[280] αντίστοιχα.

## **2.2.2 Βιομηχανική Δρομολόγηση Πλοίων - Industrial Ship Routing**

Η δεύτερη κατηγορία δρομολόγησης πλοίων ορίζεται ως βιομηχανική δρομολόγηση (Industrial Ship Routing ή Industrial Shipping). Ο καθορισμός των θαλάσσιων δρομολογίων και ο έλεγχος των φορτίων αποτελούν χαρακτηριστικά γνωρίσματα αυτής της κατηγορίας, καθώς συμβάλλουν στη διασφάλιση της μεταφοράς τους από τα αρχικά σημεία παραλαβής μέχρι τους τελικούς προορισμούς. Κύριος στόχος του κλασικού προβλήματος της βιομηχανικής δρομολόγησης των πλοίων θεωρείται η ελαχιστοποίηση των συνολικού κόστους πλεύσης του στόλου. Η συγκεκριμένη κατηγορία δρομολόγησης διαθέτει την μικρότερη έκταση στην επιστημονική βιβλιογραφία, καθώς οι διαφορές της με την αντίστοιχη της ελεύθερης δρομολόγησης θεωρούνται πρακτικά μικρές και εξαρτώνται από την προσέγγιση του κάθε ερευνητή. Σε μεταγενέστερες έρευνες οι δύο κατηγορίες ενοποιούνται σε μια ευρύτερη.

Αναφορικά με την επιστημονική βιβλιογραφία, οι περισσότεροι ερευνητές εφαρμόζουν τη μέθοδο διαμερισμού συνόλου ή παραλλαγές αυτής για την επίλυση των προβλημάτων δρομολόγησης των πλοίων. Ειδικότερα, οι Christiansen et al.[45] παρουσιάζουν ένα μαθηματικό μοντέλο για τη βιομηχανική δρομολόγηση, στο οποίο χρησιμοποιούν τη συγκεκριμένη μέθοδο. Μία παραλλαγή της προηγούμενης μαθηματικής μοντελοποίησης προτείνουν οι Brown et al.[22], την οποία ακολουθούν στην εργασία τους οι Bremer και Perakis[19]. Στην εργασία των Brown et al.[22] στηρίζονται οι Bausch et al.[10],

καθώς αναπτύσσουν ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων, το οποίο εφαρμόζουν σε πραγματικές καταστάσεις. Τέλος, μαθηματικά μοντέλα για τη δρομολόγηση των πλοίων, τα οποία αφορούν πραγματικές συνθήκες, μελετούνται στις εργασίες των Cho και Perakis[36], των Christiansen και Fagerholt[40, 63], του Fagerholt[62], των Sherali et al.[238], των Vukadinovic και Teodorovic[265] και των Vukadinovic et al.[266].

### 2.2.3 Ελεύθερη Δρομολόγηση Πλοίων - Tramp Ship Routing

Η ελεύθερη δρομολόγηση των πλοίων (Tramp Ship Routing ή Tramp Shipping) αποτελεί την τελευταία κατηγορία δρομολόγησης πλοίων και στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται οι κυριότερες εργασίες από την επιστημονική βιβλιογραφία. Ειδικότερα, στην αγορά παρατηρείται με τον όρο ελεύθερα ή αδρομολόγητα πλοία, καθώς αυτά δεν ακολουθούν κάποιο αυστηρά καθορισμένο δρομολόγιο. Γενικώς, η συγκεκριμένη κατηγορία εστιάζει στο πρόβλημα σχεδιασμού της δρομολόγησης ενός στόλου πλοίων για τη μεταφορά ενός καθορισμένου συνόλου εμπορευμάτων (αγαθά, εμπορευματοκιβώτια, προϊόντα κ.ά.). Βασικός στόχος θεωρείται η μεγιστοποίηση των συνολικών κερδών από την εξυπηρέτηση τόσο των δεσμευμένων, όσο και των ελεύθερων φορτίων. Ωστόσο, στη βιβλιογραφία συχνά παρατηρούνται εργασίες, οι οποίες στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους πλεύσης του στόλου με την επιτυχημένη ολοκλήρωση των θαλάσσιων δρομολογίων.

Οι πρώτες αναφορές στην επιστημονική βιβλιογραφία για την ελεύθερη δρομολόγηση των πλοίων περιγράφονται στις εργασίες του Appelgren[4, 5]. Μία από τις αντιπροσωπευτικότερες μαθηματικές μοντελοποιήσεις για το συγκεκριμένο πρόβλημα παρουσιάζεται από τους Bronmo et al.[21], οι οποίοι χρησιμοποιούν μία σειρά από κατάλληλους ευρετικούς αλγορίθμους για την επίλυσή του. Σε αυτό το μοντέλο στηρίζονται οι εργασίες των Korsvik et al.[140] και Malliappi et al.[175], οι οποίοι για την επίλυση της δρομολόγησης των πλοίων πρότεινουν τον αλγόριθμο της περιορισμένης αναζήτησης και της μεταβλητής γειτονίας αναζήτησης αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, η εφαρμογή ευρετικών και μεθευρετικών αλγορίθμων αυξάνεται στα προβλήματα δρομολόγησης των πλοίων, αλλά και σε παραλλαγές αυτών. Χαρακτηριστικά παραδείγματα μεθόδων επίλυσης αποτελούν ο υβριδικός ευρετικός των Korsvik et al.[141], ο ευρετικός των Hemmati et al.[105], ο υβριδικός γενετικός των Borthen et al.[16] και ο υβριδικός μεθευρετικός των Homsy et al.[113]. Τέλος, αρκετοί ερευνητές επικεντρώνονται στη δημιουργία ευφυών συστημάτων υποστήριξης αποφάσεων (decision support systems) με χρήση αλγοριθμικών μεθοδολογιών για τη δρομολόγηση των πλοίων, όπως διακρίνεται στις εργασίες

της Christiansen[41], του Fagerholt[64], των Kim και Lee[139] και των Fagerholt και Lindstad[65].

## 2.3 Οργάνωση και Διαχείριση των Θαλάσσιων Τερματικών Σταθμών

Η διαχείριση της ναυτιλιακής εφοδιαστικής αλυσίδας περιλαμβάνει ένα σύνολο από αναγκαίες δραστηριότητες, που εκτός από την δρομολόγηση των πλοίων εστιάζει και στην οργάνωση των θαλάσσιων τερματικών σταθμών. Κύριος στόχος των τερματικών σταθμών θεωρείται η άμεση εξυπηρέτηση των φορτηγών πλοίων και η ασφαλέστερη διαχείριση των εμπορευματοκιβωτίων στην περιοχή των θαλάσσιων τερματικών σταθμών. Για την επίτευξη του παραπάνω βασικού στόχου απαιτούνται δύο διαφορετικά είδη ενεργειών, τα οποία χαρακτηρίζονται σε θεωρητικό επίπεδο με τη λήψη των κατάλληλων αποφάσεων και σε πρακτικό επίπεδο με την εφαρμογή τους.

Στην πρώτη φάση πραγματοποιείται η λήψη των απαραίτητων στρατηγικών αποφάσεων για θέματα, τα οποία διαρκούν για μακρές χρονικές περιόδους ή αφορούν μακροχρόνιους σχεδιασμούς, όπως π.χ. η δομή των εγκαταστάσεων και το είδος του τεχνικού εξοπλισμού στους τερματικούς σταθμούς. Στη δεύτερη φάση εκτελούνται οι αναγκαίες δραστηριότητες σε πραγματικό χρόνο, οι οποίες αποσκοπούν στη διαχείριση των εμπορευματοκιβωτίων. Ειδικότερα, οι κύριες δραστηριότητες για τη διαχείρισή τους επικεντρώνονται τόσο κατά τη τοποθέτησή τους εντός των περιοχών αποθήκευσης, όσο και κατά την μετακίνησή τους εκτός των τερματικών σταθμών που επιτυγχάνεται ανάλογα με την χωροταξία και τις υποδομές του κάθε λιμένα διαμέσου οδικών, σιδηροδρομικών και θαλάσσιων οδών.

Στους θαλάσσιους τερματικούς σταθμούς, η αποθήκευση και η προώθηση των εμπορευματοκιβωτίων πραγματοποιείται με διαφορετικού τύπου οχήματα ή με χρήση ειδικών μηχανημάτων ανάλογα με την περιοχή ή το τμήμα του λιμένα, στο οποίο έχουν τοποθετηθεί. Με δεδομένη την ύπαρξη των κατάλληλων υποδομών και τη χρήση ειδικά εξειδικευμένου εξοπλισμού και σε συνδυασμό με μία σειρά από κρίσιμες αποφάσεις σε στρατηγικό επίπεδο παρατηρείται σημαντική βελτίωση στη συνολική λειτουργία των τερματικών σταθμών. Ειδικότερα, η αποτελεσματικότητά τους ως προς την άμεση και επιτυχημένη εξυπηρέτηση των πλοίων και τη μεταφορά των εμπορευματοκιβωτίων προϋποθέτει την ύπαρξη ενός επιχειρησιακού πλάνου, στο οποίο δίδεται ιδιαίτερη έμφαση στην διάκριση των προβλημάτων σχεδιασμού (Planning problems). Η δημιουργία ενός επιχειρησιακού πλάνου καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τον σχεδιασμό και τον τρόπο λειτουργίας

των θαλάσσιων τερματικών σταθμών, καθώς σε αυτό περιέχονται όλα τα βασικά και δομικά προβλήματα. Η διαχώριση των προβλημάτων σχεδιασμού επιτυγχάνεται με διάφορους τρόπους. Συνηθέστερα πραγματοποιείται με κριτήρια το είδος των αποφάσεων, οι οποίες αφορούν τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα των προβλημάτων (δηλαδή το χρονικό αντίκτυπο της κάθε απόφασης), ή με τη διαμόρφωση του χώρου των θαλάσσιων τερματικών σταθμών (δηλαδή, το πώς οργανώνεται η εσωτερική διάταξή τους).

Στην επιστημονική βιβλιογραφία προτείνονται διάφοροι και εναλλακτικοί τρόποι ταξινόμησης των προβλημάτων σχεδιασμού ενός θαλάσσιου τερματικού σταθμού. Η πλειοψηφία των ερευνητών διαχωρίζει τα προβλήματα σχεδιασμού ανάλογα με τον χρονικό ορίζοντα αντιμετώπισής τους. Πιο συγκεκριμένα, με την έννοια του χρονικού ορίζοντα ορίζεται το χρονικό διαστήμα, στο οποίο θα παρθούν οι αποφάσεις και θα πραγματοποιηθούν οι διαδικασίες επίλυσης των προβλημάτων σχεδιασμού. Ανάλογα με τη χρονική διάρκεια, οι επιμέρους αποφάσεις διακρίνονται σε στρατηγικές και επιχειρησιακές. Σε στρατηγικό επίπεδο οι αποφάσεις αφορούν κυρίως διευρυμένα χρονοδιάγραμμα σχεδιασμού και διαρκούν αρκετά χρόνια, όπως π.χ. για τη δημιουργία και το εύρος ενός νέου τερματικού σταθμού, καθώς και το είδος του εξοπλισμού, το οποίο θα διατεθεί και θα τοποθετηθεί σε αυτόν. Αντιθέτως, σε επιχειρησιακό επίπεδο η χρονική περίοδος για τη λήψη των αποφάσεων διαρκεί από κάποια λεπτά μέχρι ελάχιστες μέρες, καθώς συσχετίζεται π.χ. με την εξυπηρέτηση των πλοίων στα λιμάνια. Παρόμοια συστήματα ταξινόμησης των προβλημάτων σχεδιασμού, τα οποία ακολουθούν τη διαχώριση με βάση το είδος των αποφάσεων, παρουσιάζονται στις εργασίες των Günther και Kim[98], Steenken et al.[243] και Vacca et al.[258]. Επιπροσθέτως, σε πιο πρόσφατες ερευνητικές μελέτες και συγκεκριμένα του Meisel[196] προτείνονται εναλλακτικοί τρόποι ταξινόμησης για τα προβλήματα σχεδιασμού στους τερματικούς σταθμούς, οι οποίοι στηρίζονται στη διαμόρφωση και στις υποδομές του εκάστοτε λιμένα.

Ειδικότερα, στο βιβλίο του Meisel[196] παρουσιάζεται ένα παράδειγμα επιχειρησιακού πλάνου διαχώρισης των προβλημάτων σχεδιασμού για τους θαλάσσιους τερματικούς σταθμούς. Στο προτεινόμενο πλάνο περιγράφεται η διαχώριση των προβλημάτων σχεδιασμού με βάση τη διαμόρφωση του χώρου των τερματικών σταθμών. Η διάταξη ενός θαλάσσιου τερματικού σταθμού εμπορευματοκιβωτίων διαχωρίζεται σε λειτουργικές περιοχές, στις οποίες ανάλογα με το τμήμα του σταθμού πραγματοποιούνται διαφορετικές επιχειρησιακές δραστηριότητες. Οι περιοχές των λιμένων χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, οι οποίες είναι η **Θαλάσσια Περιοχή** (Seaside), η **Εσωτερική-Κεντρική** (Yard) και η **Χερσαία Περιοχή** (Landside). Η διαχώριση των τριών περιοχών απεικονίζεται στο Σχήμα 2.1, όπως παρουσιάζεται από τον Meisel[196]. Η **Θαλάσσια Περιοχή** καταλαμβάνει το παράκτιο κομμάτι των τερματικών σταθμών, στο οποίο εκτε-



λούνται όλες οι σχετικές διεργασίες αναφορικά με την εξυπηρέτηση των εισερχόμενων πλοίων. Αντιθέτως, η **Χερσαία Περιοχή** αποτελεί το εξωτερικό τμήμα του τερματικού σταθμού, στο οποίο πραγματοποιούνται οι απαραίτητες εργασίες για τη μετακίνηση των εμπορευματοκιβωτίων από και προς την ενδοχώρα. Το τμήμα του τερματικού σταθμού ανάμεσα σε αυτές τις δύο περιοχές ονομάζεται **Εσωτερική-Κεντρική Περιοχή** και σε αυτό περιλαμβάνονται οι δραστηριότητες, οι οποίες αφορούν την αποθήκευση και διαχείριση των εμπορευματοκιβωτίων.

Σχήμα 2.1: Περιοχές και προβλήματα σχεδιασμού των θαλάσσιων τερματικών σταθμών



Σε κάθε περιοχή αντιστοιχίζεται συγκεκριμένος αριθμός προβλημάτων προς αντιμετώπιση. Παρατηρείται ότι, τα προβλήματα της Διαχείρισης του Ανθρώπινου Δυναμικού και της Επιλογής του Εξοπλισμού αντιστοιχούν σε περισσότερες από μία περιοχές, καθώς επηρεάζουν συνολικά τη λειτουργικότητα των τερματικών σταθμών. Τα επιμέρους προβλήματα σχεδιασμού των θαλάσσιων τερματικών σταθμών, όπως παρουσιάζονται από τον Meisel[196], συγκεντρώνονται στον Πίνακα 2.2. Ο Πίνακας 2.2 χωρίζεται σε δύο στήλες, όπου στην πρώτη αναφέρονται οι περιοχές των θαλάσσιων τερματικών σταθμών και στην δεύτερη παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά προβλήματα σχεδιασμού τους. Ακολουθεί μία σύντομη αναφορά των τριών περιοχών, αλλά και των δύο βασικών προβλημάτων σχεδιασμού, τα οποία επηρεάζουν το σύνολο των θαλάσσιων τερματικών σταθμών:

Πίνακας 2.2: Προβλήματα σχεδιασμού με βάση την κάθε περιοχή των θαλάσσιων τερματικών σταθμών

Τμήμα Τερματικού Σταθμού	Προβλήματα Σχεδιασμού
Θαλάσσια Περιοχή	Ελλιμενισμός πλοίων Ανάθεση γερανών φόρτωσης/εκφόρτωσης Χρονοπρογραμματισμός γερανών φόρτωσης/εκφόρτωσης Στοιβάξη εμπορευματοκιβωτίων Διαχείριση ανθρώπινου δυναμικού Επιλογή εξοπλισμού
Εσωτερική-Κεντρική Περιοχή	Διαχείριση χώρου αποθήκευσης Χρονοπρογραμματισμός γερανών εδάφους Διαχείριση οχημάτων εδάφους Διαχείριση ανθρώπινου δυναμικού Επιλογή εξοπλισμού
Χερσαία Περιοχή	Έλεγχος πύλης εισόδου/εξόδου Ανάθεση οχημάτων Επιλογή εξοπλισμού

#### 1. Θαλάσσια Περιοχή (Seaside Section):

- Ελλιμενισμός πλοίων (Berth Allocation): Πριν την αναμενόμενη άφιξη των πλοίων κατανέμεται ο απαιτούμενος χώρος ελλιμενισμού τους στους τερματικούς σταθμούς.
- Ανάθεση γερανών Φ/Ε (Quay Crane Assignment): Κατά την διαδικασία του ελλιμενισμού καθορίζεται ο απαραίτητος αριθμός των γερανών για την εξυπηρέτηση των εισερχόμενων πλοίων.
- Χρονοπρογραμματισμός γερανών Φ/Ε (Quay Crane Scheduling): Κατά τη διαδικασία της φόρτωσης των εμπορευματοκιβωτίων στα πλοία επιχειρούν σε αυτά κατάλληλοι γερανοί Φ/Ε. Ανάλογα με τη διαθεσιμότητα και τη λειτουργικότητά τους, ο κάθε γερανός αντιστοιχίζεται σε διαφορετικό τμήμα του πλοίου.
- Στοιβάξη εμπορευματοκιβωτίων (Stowage Planning): Τα εμπορευματοκιβώτια φορτώνονται στα πλοία και με βάση κάποια χαρακτηριστικά τους (π.χ. βάρος, είδος φορτίου) τοποθετούνται σε στοιβάδες (stacks). Λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά τους στοιβάζονται στις ειδικές θέσεις εντός των πλοίων (slots).

#### 2. Εσωτερική-Κεντρική Περιοχή (Internal or Yard Section):

- Διαχείριση χώρου αποθήκευσης (Yard Management): Ο χώρος αποθήκευσης προϋποθέτει ένα σύνολο διεργασιών, οι οποίες αφορούν τη διαχείριση

των εμπορευματοκιβωτίων. Οι διεργασίες αυτές επικεντρώνονται στον έλεγχο της διαθέσιμης χωρητικότητας (yard capacity) της περιοχής κατά την εξυπηρέτηση ενός πλοίου, στην επιλογή του χώρου αποθήκευσής τους (storage location) για την προσωρινή παραμονή τους και στην ανακατανομή τους (yard remarshalling), εφόσον τα εμπορευματοκιβώτια δεν έχουν τοποθετηθεί αρχικά στους καθορισμένους χώρους (reserved areas) στοίβαξής τους.

- Χρονοπρογραμματισμός γερανών εδάφους (Yard Crane Scheduling): Η διασφάλιση της υψηλής απόδοσης ενός τερματικού σταθμού επιτυγχάνεται με τον καθορισμό των κατάλληλων χρονοδιαγραμμάτων εργασίας των γερανών εδάφους. Οι εργασίες σχετικά με τη διαχείριση των γερανών περιλαμβάνουν τις δραστηριότητες της φόρτωσης (loading), της αποθήκευσης (storage), της ανάκτησης (retrieval) και της επανατοποθέτησης (relocation) των εμπορευματοκιβωτίων.
- Διαχείριση οχήματων εδάφους (Horizontal Transport Operations): Ο καθορισμός των μετακινήσεων των οχημάτων εδάφους διευκολύνει τη μεταφορά των εμπορευματοκιβωτίων εντός του τερματικού σταθμού. Ο ακριβής συντονισμός ανάμεσα στα εσωτερικά οχήματα μεταφοράς (internal or yard trucks) και στους γερανούς διασφαλίζει την μείωση των «άδειων» δρομολογίων (empty vehicle movements) των εσωτερικών οχημάτων (δηλαδή τη μετακίνηση λιγότερων ή καθόλου φορτίων με βάση τη μέγιστη χωρητικότητά τους) και την αύξηση της παραγωγικότητας των γερανών.

### 3. Χερσαία Περιοχή (Landside Section):

- Έλεγχος πύλης εισόδου/εξόδου (Gate Operations Planning): Ο έλεγχος της διέλευσης και η ρύθμιση της κυκλοφορίας των εξωτερικών μέσων μεταφοράς περιορίζουν σε μεγάλο βαθμό την κυκλοφοριακή συμφόρηση στις πύλες εισόδου/εξόδου και συμβάλλουν στην αποδοτικότερη λειτουργία του τερματικού σταθμού.
- Ανάθεση οχημάτων (Vehicle Dispatching): Η μετακίνηση των εμπορευματοκιβωτίων από τα πλοία μέχρι τα εξωτερικά μέσα μεταφοράς και αντιστρόφως επιτυγχάνεται με την κατάλληλη ανάθεση των εσωτερικών οχημάτων μεταφοράς. Για κάθε εσωτερικό όχημα καθορίζεται το δρομολόγιο το οποίο θα ακολουθήσει και το φορτίο το οποίο θα παραλάβει.

### 4. Επιλογή εξοπλισμού (Equipment selection): Η επιλογή του τεχνικού εξοπλισμού καθορίζεται από τις διαθέσιμες εγκαταστάσεις των τερματικών σταθμών.

Διαφορετικού τύπου μηχανήματα χρησιμοποιούνται είτε για την εξυπηρέτηση των πλοίων (π.χ. γερανοί Φ/Ε) είτε για τη διαχείριση των εμπορευματοκιβωτίων (π.χ. εσωτερικά οχήματα). Συνήθως ο τεχνικός εξοπλισμός διαφέρει ως προς τον βαθμό αυτοματοποίησης και την απόδοσή τους.

5. **Διαχείριση ανθρώπινου δυναμικού** (Workforce Planning): Σε ένα σύγχρονο τερματικό σταθμό εκτελούνται μια σειρά από ζωτικής σημασίας διεργασίες χάρη στο κατάλληλο εργατικό δυναμικό. Η διαχείριση του ανθρώπινου δυναμικού βασίζεται στις ικανότητες των εργατών (π.χ. για τον χειρισμό εξοπλισμού) και στην κατανομή των διεργασιών σε αυτούς (π.χ. σε γερανούς Φ/Ε ή εδάφους) με βάση την κάθε περιοχή του τερματικού σταθμού.

Οι επόμενες υποενότητες οργανώνονται με βάση τις τρεις επιχειρησιακές περιοχές των θαλάσσιων τερματικών σταθμών. Στην πρώτη υποενότητα παρουσιάζεται η **Χερσαία Περιοχή** με τα επιμέρους προβλήματα βελτιστοποίησης της Ανάθεσης Οχημάτων και της Οργάνωσης Λειτουργίας Πυλών. Ακολουθεί η υποενότητα με την **Εσωτερική-Κεντρική Περιοχή**, όπου περιγράφονται τα προβλήματα Χρονοπρογραμματισμού Γερανών Εδάφους και Χωροθέτηση Εμπορευματοκιβωτίων. Η τρίτη και τελευταία υποενότητα αφορά τη **Θαλάσσια Περιοχή** στην οποία περιλαμβάνονται η Ανάθεση και Χρονοπρογραμματισμός Γερανών Φόρτωσης/Εκφόρτωσης, η Στοίβαξη Εμπορευματοκιβωτίων και ο Ελλιμενισμός των Πλοίων. Στις τρεις υποενότητες περιγράφονται λεπτομερώς οι βασικές επιχειρησιακές λειτουργίες της κάθε περιοχής ενός θαλάσσιου τερματικού σταθμού. Επιπροσθέτως ακολουθεί αναλυτική βιβλιογραφική ανασκόπηση για κάθε πρόβλημα βελτιστοποίησης της ναυτιλιακής εφοδιαστικής αλυσίδας. Τονίζεται ότι για το πρόβλημα του Ελλιμενισμού των Πλοίων δίδεται ιδιαίτερη έμφαση στην ανάλυσή του, καθώς η παρούσα διδακτορική διατριβή εστιάζει σε αυτό στα επόμενα κεφάλαια.

### 2.3.1 Χερσαία Περιοχή - Landside Section

Ένας σύγχρονος θαλάσσιος τερματικός σταθμός εξυπηρέτησης εμπορευματοκιβωτίων διαθέτει τις κατάλληλες υποδομές (π.χ. ειδικός εξοπλισμός, πύλες εισόδου/εξόδου, σιδηροδρομικούς σταθμούς κ.ά.) για τη διεπαφή και επικοινωνία με την εξωτερική ενδοχώρα (ενδοχώρα ορίζεται συνηθέστερα ένα ευρύ αστικό κέντρο ή μία πολυπληθής πόλη). Ειδικότερα αποτελεί μία από τις τρεις βασικές περιοχές των τερματικών σταθμών η οποία αναφέρεται ως **Χερσαία Περιοχή** (Landside Section) καθώς καταλαμβάνει ένα σημαντικό κομμάτι ξηράς στον εσωτερικό χερσαίο τομέα των λιμένων. Ανάλογα με τις

δυνατότητες των εγκαταστάσεων του κάθε θαλάσσιου σταθμού συνήθως ο συγκεκριμένος χώρος αποτελεί την υποδοχή από και προς την ενδοχώρα για τα εξωτερικά οχήματα και τα τρένα, καθώς με την ελεγχόμενη είσοδο τους αποσκοπούν στην παραλαβή των εμπορευματοκιβωτίων με κύριο σκοπό την ασφαλή διανομή τους στους τελικούς προορισμούς τους. Εντός της συγκεκριμένης περιοχής παρατηρείται η παρουσία εξειδικευμένου εξοπλισμού και ειδικά διαμορφωμένων οχημάτων για την ασφαλέστερη διαχείριση των εμπορευματοκιβωτίων. Η ύπαρξη ειδικού τεχνικού εξοπλισμού και η διάθεση των κατάλληλων μηχανημάτων ποικίλει και διαφέρει στην κάθε περιοχή του θαλάσσιου τερματικού σταθμού. Πιο συγκεκριμένα για τη **Χερσαία Περιοχή**, η μετακίνηση των εμπορευματοκιβωτίων μεταξύ των περιοχών των θαλάσσιων τερματικών σταθμών πραγματοποιείται από εσωτερικά φορτηγά (Yard Trucks) ή αυτοματοποιημένα καθοδηγούμενα οχήματα (Automated Guided Vehicles (AGVs)). Η χρησιμοποίηση ιδιαίτερα εξειδικευμένου εξοπλισμού αποτελεί συχνό φαινόμενο για την κάλυψη περισσότερων από μίας ανάγκης στους τερματικούς σταθμούς, όπως παραδείγματος χάρη θεωρούνται και τα αυτοματοποιημένα ανυψωτικά οχήματα (Automated Lifting Vehicles (ALVs)) τα οποία, εκτός από τη μετακίνηση, συμβάλλουν και στις εργασίες στοίβαξης των εμπορευματοκιβωτίων στις θέσεις αποθήκευσής τους. Επιπρόσθετα, η ορθή τοποθέτηση των εμπορευματοκιβωτίων στα εξωτερικά μέσα μεταφοράς επιτυγχάνεται μέσω της λειτουργίας διαφόρων τύπου γερανογεφυρών (Gantry Cranes). Με τον συνδυασμό και την εφαρμογή αντίστοιχων μηχανημάτων υψηλής τεχνολογίας, η φόρτωση των εμπορευματοκιβωτίων ολοκληρώνεται επιτυχώς στα εξωτερικά οχήματα μεταφοράς. Ειδικότερα, τα φορτηγά οχήματα ελέγχονται στις πύλες εισόδου/εξόδου καθώς από αυτές κατευθύνονται στις κατάλληλες περιοχές στάθμευσης, ώστε να εξυπηρετηθούν από τα εσωτερικά φορτηγά ή τα αυτοματοποιημένα καθοδηγούμενα οχήματα. Ταυτόχρονα με τα οχήματα, στους τερματικούς σταθμούς, οι οποίοι διαθέτουν σιδηροδρομικές γραμμές για την πρόσβαση των τρένων, τοποθετούνται τα εμπορευματοκιβώτια απευθείας στα βαγόνια των τρένων κυρίως με την χρήση των γερανογεφυρών.

Αναφορικά με τη σημασία της λειτουργίας για τη **Χερσαία Περιοχή**, η χρησιμοποίηση ειδικών μηχανημάτων συμβάλλει άμεσα στην ομαλή λειτουργία των θαλάσσιων τερματικών σταθμών συνολικά, αλλά και στην αλληλεπίδραση με το εξωτερικό περιβάλλον. Η επιλογή του κατάλληλου τεχνικού εξοπλισμού θεωρείται απολύτως και εξίσου αναγκαία με την λήψη στρατηγικών και επιχειρησιακών αποφάσεων (Meisel[196]), οι οποίες αφορούν και επηρεάζουν την λειτουργικότητα των τερματικών σταθμών σε επίπεδο διαχείρισης των εμπορευματοκιβωτίων. Στην επιστημονική βιβλιογραφία τονίζεται η αναγκαιότητα του σχηματισμού ενός επιχειρησιακού πλάνου (Meisel[196]), το οποίο περιλαμβάνει όλες τις ειλημμένες αποφάσεις σχετικά με τον τρόπο διαχείρισης των τερ-

ματικών σταθμών και ειδικότερα την εφαρμογή του διαθέσιμου τεχνικού εξοπλισμού. Συνοπτικά ακολουθεί ένα αντιπροσωπευτικό σύνολο των δραστηριοτήτων, όπως παρουσιάζεται στο βιβλίο των Lee και Meng[148], οι οποίες αφορούν την **Χερσαία Περιοχή** και ιδιαιτέρως τη διαχείριση και την οργάνωση των οδικών και σιδηροδρομικών μεταφορών εντός αυτής:

- Συλλογή των πληροφοριών από τους αποστολείς των εμπορευματοκιβωτίων, συμπεριλαμβανομένων των δελτίων/λιστών με τους παραλήπτες (επαγγελματίες, εταιρείες, οργανισμοί)
- Επιλογή τεχνικού εξοπλισμού με ειδικές προδιαγραφές για τη μετακίνηση και αποθήκευση των εμπορευματοκιβωτίων
- Καθορισμός των χρονοδιαγραμμάτων εργασίας για καθένα μηχάνημα από τον τεχνικό εξοπλισμό (π.χ. γερανογέφυρες, αυτοματοποιημένα ανυψωτικά οχήματα)
- Ασφάλεια στην τοποθέτηση των εμπορευματοκιβωτίων από και προς τις περιοχές του τερματικού σταθμού με ειδικά εσωτερικά οχήματα (Internal trucks)
- Έλεγχος της καταλληλότητας των βαγονιών ή/και των φορτηγών οχημάτων για την παραλαβή και διανομή των εμπορευματοκιβωτίων

Το εξωτερικό τμήμα ή η **Χερσαία Περιοχή** του θαλάσσιου τερματικού σταθμού θεωρείται και ως προσωρινός χώρος αποθήκευσης των εμπορευματοκιβωτίων μέχρι τη μετακίνησή τους από τα εξωτερικά μέσα μεταφοράς. Στην επιστημονική βιβλιογραφία η συγκεκριμένη περιοχή αναφέρεται και ως **Περιοχή Φορτηγών και Τρένων** (Truck and Train Area), καθώς σε αυτή πραγματοποιούνται οι απαραίτητες διεργασίες για την εξυπηρέτηση των εξωτερικών φορτηγών και των τρένων. Επιπρόσθετα, ως αντιπροσωπευτικά και δημοφιλή προβλήματα βελτιστοποίησης της ναυτιλιακής εφοδιστικής αλυσίδας, τα οποία αναφέρονται στην επιστημονική βιβλιογραφία και εντοπίζονται στην **Χερσαία Περιοχή** των τερματικών σταθμών, θεωρούνται η Ανάθεση Οχημάτων (Vehicle Dispatching) και Οργάνωση Λειτουργίας Πυλών (Gate Operations Planning).

#### **2.3.1.1 Ανάθεση Οχημάτων - Vehicle Dispatching (VD)**

Κάθε θαλάσσιος τερματικός σταθμός διαθέτει ένα σύνολο από εσωτερικά οχήματα (internal trucks), τα οποία συμβάλλουν στην μεταφορά των εμπορευματοκιβωτίων για την ολοκλήρωση απαραίτητων διεργασιών, όπως η φόρτωσή τους σε κάποιο εισερχόμενο πλοίο ή η φύλαξή τους σε κάποιο αποθηκευτικό χώρο. Η αποστολή του κάθε οχήματος ανάλογα με την περιοχή ή/και το είδος της εργασίας καθορίζεται διαμέσου ενός

συστήματος με υποστηρικτικό λογισμικό (supporting software system), με το οποίο διατίθενται οι απαραίτητες πληροφορίες στους οδηγούς των οχημάτων. Σκοπός του προβλήματος αποτελεί η αποστολή του κάθε εσωτερικού οχήματος για την εκτέλεση μιας εργασίας φόρτωσης/εκφόρτωσης αμέσως μετά την ολοκλήρωση της προηγούμενης. Το ιδανικότερο σενάριο θεωρείται η ανάθεση του κάθε οχήματος ανάλογα με την αναγκαιότητα της κάθε εργασίας. Χαρακτηριστική περίπτωση αποτελεί η χρήση των γερανογέφυρων (query gantry cranes - QCs), όταν τα συγκεκριμένα μηχανήματα μετακινούν αυτόνομα τα εμπορευματοκιβώτια από έναν αποθηκευτικό χώρο σε έναν άλλο και δεν απαιτείται η οποιαδήποτε ανάθεση κάποιου οχήματος.

### **Βιβλιογραφία**

Η βιβλιογραφία περιέχει μεγάλο αριθμό από ερευνητικές εργασίες για το πρόβλημα ανάθεσης των οχημάτων, οι οποίες επικεντρώνονται στην ανακατεύθυνση των αυτοματοποιημένων καθοδηγούμενων οχημάτων (Automated Guided Vehicles (AGVs)) εντός των περιοχών των θαλάσσιων τερματικών σταθμών. Ειδικότερα, οι ερευνητές Bae και Kim[9], Chen et al.[30], Vis et al.[263] και Cheng et al.[31] προτείνουν ένα μοντέλο αθέρατου προγραμματισμού σε συνδυασμό με την υλοποίηση ευρετικών μεθοδολογιών για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος. Την ανάθεση των οχημάτων AGV μέσω ενός ευρετικού συστήματος διαδικτυακά εκτός σύνδεσης (offline pattern based heuristic) παρουσιάζουν οι Grunow et al.[91], το οποίο αποδεικνύεται αποδοτικότερο από το αντίστοιχο εντός σύνδεσης (online). Τη μαθηματική μοντελοποίηση του μικτού αθέρατου γραμμικού προγραμματισμού χρησιμοποιούν οι GNguyen και Kim[206] με στόχο την βέλτιστη ολοκλήρωση των εργασιών από τα AGV οχήματα παραλαβής. Οι Angeloudis και Bell[3] παρουσιάζουν στην εργασία τους τον καθορισμό των εργασιών με κατάλληλο έλεγχο των AGV σε πραγματικό χρόνο υπό διαφορετικές συνθήκες αβεβαιότητας. Το μοντέλο βελτιστοποίησης του μικτού αθέρατου γραμμικού προγραμματισμού και δύο ευρετικούς αλγόριθμους προτείνουν οι Xing et al.[274] με το οποίο συνδυάζουν την αποστολή οχημάτων με την ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων στην παραγωγική διαδικασία των γερανών φ/ε. Οι Kavesghar και Huynh[133] εντάσσουν στο μικτό αθέρατο προγραμματισμού μοντέλο τους τα προβλήματα βελτιστοποίησης του χρονοπρογραμματισμού γερανών φ/ε με την ανάθεση οχημάτων για την ταυτόχρονη επίλυσή τους σε πραγματικές συνθήκες.

### 2.3.1.2 Οργάνωση Λειτουργίας Πυλών - Gate Operations Planning (GOP)

Η συνεχής ροή των εισερχόμενων πλοίων και η ολοένα αυξανόμενη διαχείριση των εμπορευματοκιβωτίων συνέβαλλαν στη δημιουργία μεγάλων κυκλοφοριακών ουρών από εξωτερικά οχήματα στις πύλες των θαλάσσιων τερματικών σταθμών. Ως αποτέλεσμα η κυκλοφοριακή συμφόρηση επιδρά αρνητικά στη λειτουργικότητα των τερματικών σταθμών, καθώς μειώνεται η παραγωγικότητα τους και αυξάνεται η ατμοσφαιρική ρύπανση. Συνηθέστερα για την αντιμετώπιση και επίλυση του φαινομένου αυτού εφαρμόζονται δύο προσεγγίσεις. Η πρώτη προσέγγιση αφορά την επέκταση της χωρητικότητας των πυλών (gate capacity expansion - GCE), ενώ η δεύτερη εστιάζει στην διαχείριση των αφίξεων των εξωτερικών οχημάτων (truck arrival management - TAM). Εξαιτίας των εδαφικών περιορισμών και των διαθέσιμων οικονομικών πόρων η προσέγγιση GCE καθίσταται μη ρεαλιστική και συνεπώς η δημιουργία συστημάτων ελέγχου των κυκλοφοριακών ροών TAM θεωρείται αναγκαία και απαραίτητη τόσο από επαγγελματίες όσο και από τους ερευνητές. Σε κάθε περίπτωση η ελεγχόμενη διέλευση των εξωτερικών οχημάτων και η οργάνωση της λειτουργίας των πυλών εισόδου/εξόδου των τερματικών σταθμών συμβάλλουν στην αποσυμφόρηση της κυκλοφορίας και στη μείωση των εκπομπών ρύπων.

#### **Βιβλιογραφία**

Στην βιβλιογραφία επισημαίνεται η σημαντικότητα της διαχείρισης και της οργάνωσης της λειτουργίας των πυλών εισόδου/εξόδου, καθώς το συγκεκριμένο πρόβλημα λαμβάνει ιδιαίτερη προσοχή ως προς την αντιμετώπιση των κυκλοφοριακών ροών από την επιστημονική κοινότητα. Για την επίλυσή του ως προς την προσέγγιση TAM προτείνονται δύο στρατηγικές. Οι Dekker et al.[51] παρουσιάζουν την έννοια της ανταλλαγής εισαγόμενων/εξαγόμενων εμπορευματοκιβωτίων (Chassis Exchange Terminal - CET), η οποία στηρίζεται στην κατασκευή ξεχωριστού χώρου αποθήκευσης εκτός των τερματικών σταθμών. Η δημιουργία της συγκεκριμένης υποδομής αποσκοπεί στην αποσυμφόρηση της κυκλοφοριακής ροής των εξωτερικών οχημάτων κατά την παραλαβή των εμπορευματοκιβωτίων την ημέρα στις ώρες αιχμής. Ωστόσο, οι Guan και Liu[95] θεωρούν ότι η εφαρμογή της συγκεκριμένης στρατηγικής καθίσταται δύσκολη εξαιτίας των γεωγραφικών περιορισμών και αποτρεπτική σε κάποιες περιπτώσεις εξαιτίας της άφιξης υπερβολικού αριθμού οχημάτων. Αντιθέτως, η πολιτική ελέγχου του ρυθμού άφιξης των οχημάτων (Terminal Appointment System - TAS) θεωρείται καταλληλότερη από την CET, διότι η ροή των οχημάτων διατηρείται σταθερή και αποφεύγεται το φαινόμενο της κυκλοφοριακής συμφόρησης. Η συγκεκριμένη στρατηγική εφαρμόζεται σε αρκετές πε-



ριπτώσεις με διαφορετικές επεκτάσεις και προτείνεται από τους Huynh et al.[115], Zhao και Goodchild[285], Namboothiri και Erera[204]. Εφαρμογές των συστημάτων TAS σε πραγματικές συνθήκες και καστάσεις παρουσιάζονται στις εργασίες των Chen et al.[29], Giuliano και O'Brien[80].

### 2.3.2 Εσωτερική Περιοχή - Yard Section

Η διαχείριση των εμπορευματοκιβωτίων με στόχο την ορθή ανακατεύθυνσή τους είτε προς τους τελικούς παραλήπτες τους (π.χ. ναυτιλιακές εταιρείες, ιδιωτικοί οργανισμοί, κ.ά.) είτε προς τα ελλιμενισμένα πλοία πραγματοποιείται στο εσωτερικό τμήμα ενός θαλάσσιου τερματικού σταθμού. Συνήθως αποτελεί το μεγαλύτερο κομμάτι της έκτασης ενός λιμένα, καθώς σε αυτό παρατηρούνται ειδικά διαμορφωμένες εγκαταστάσεις για την αποθήκευση των εμπορευματοκιβωτίων. Κατά τη διάρκεια παραμονής τους στους χώρους αποθήκευσης εκτελούνται οι απαραίτητες εργασίες ελέγχου και προετοιμασίας για την ακολουθούμενη μετακίνηση, όπως αυτές της φύλαξης και της συντήρησής τους. Ειδικότερα, τα εισαγόμενα εμπορευματοκιβώτια (import containers) παραμένουν σε ειδικά διαμορφωμένους χώρους αποθήκευσης μέχρι την παραλαβή τους από τα εξωτερικά όχηματα (external trucks) για την μεταφορά τους στην ενδοχώρα. Παράλληλα, τα εξαγόμενα (export containers) αποθηκεύονται προσωρινά και σε μεταγενέστερο χρόνο φορτώνονται στα πλοία για την εν πλω αναχώρησή τους. Η ενδιαμέση περιοχή ενός θαλάσσιου τερματικού σταθμού (yard area ή yard section) ονομάζεται και ως **Εσωτερική - Κεντρική Περιοχή**, διότι βρίσκεται ανάμεσα στην **Θαλάσσια Περιοχή** και στην **Χερσαία Περιοχή**.

Η διαμόρφωση του αποθηκευτικού χώρου και η διαχείριση των τεχνικών υποδομών (π.χ. εγκαταστάσεις, μηχανήματα, οχήματα) της **Εσωτερικής - Κεντρικής Περιοχής** διαφέρει για κάθε τερματικό σταθμό. Ειδικότερα, αυτό εξαρτάται από το περιεχόμενο και από τις προδιαγραφές των εμπορευματοκιβωτίων, καθώς απαιτείται διαφορετικός χώρος αποθήκευσής τους αναλόγα με το είδος του φορτίου, όπως π.χ. ξηρό (dry cargo), υγρό (liquid cargo), ή επικίνδυνο φορτίο (hazardous cargo), και παράλληλα ειδικός τεχνικός εξοπλισμός για την κατάλληλη διαχείρισή τους. Οι χώροι αποθήκευσής τους διακρίνονται σε τμήματα ή μπλοκ (yard blocks), τα οποία μεταξύ τους διαχωρίζονται από τις λωρίδες κυκλοφορίας. Κάθε μπλοκ διαθέτει παράλληλες σειρές από θέσεις αποθήκευσης εμπορευματοκιβωτίων, οι οποίες μεταξύ τους είναι κατά μήκος διατεταγμένες. Αναφορικά με τον διαθέσιμο τεχνικό εξοπλισμό, τα εμπορευματοκιβώτια τοποθετούνται σε πολλαπλές στοίβες. Για την μετακίνηση σε διαφορετικό μπλοκ ή την επανατοποθέτησή τους σε άλλη θέση αποθήκευσης χρησιμοποιούνται οι γερανοί εδάφους (yard cranes)

ή οι γερανογέφυρες (gantry cranes).

Σε ένα σύγχρονο θαλάσσιο τερματικό σταθμό παρατηρούνται ειδικά διαμορφωμένες εγκαταστάσεις για υποδοχή και αποθήκευση των εμπορευματοκιβωτίων. Για τον σχεδιασμό του χώρου αποθήκευσης (yard planning) χρησιμοποιούνται αυτόματοποιημένες διαδικασίες, οι οποίες εστιάζουν στην ακριβή τοποθέτηση των εμπορευματοκιβωτίων κατά την διαδικασία της στοίβαξης τους και στην εύρεση των καταλληλότερων θέσεων αποθήκευσής τους κατά την φόρτωση/εκφόρτωση τους από τα πλοία. Επιπρόσθετα, στην αύξηση της παραγωγικότητας και στην επιτάχυνση των εργασιών στην συγκεκριμένη περιοχή συμβάλλουν οι διεργασίες για την αξιοποίηση και τον έλεγχο των αποθεμάτων στους αποθηκευτικούς χώρους, αλλά και η ορθή διαχείριση του ανθρώπινου δυναμικού. Ενδεικτικά, χαρακτηριστικές δραστηριότητες για την **Εσωτερική-Κεντρική Περιοχή** θεωρούνται οι εξής:

- Καθορισμός διαδικασιών για την αποθήκευση και στοίβαξη των εμπορευματοκιβωτίων
- Διαχώριση εμπορευματοκιβωτίων για μεταφορά ή παραλαβή
- Επιλογή κατάλληλων θέσεων αποθήκευσης των εμπορευματοκιβωτίων
- Κατανομή του φόρτου εργασίας κατά την φόρτωση/εκφόρτωση των πλοίων
- Φύλαξη και ασφάλεια κατά την παραμονή και μεταφορά
- Καταχώρηση πληροφοριών ανθρώπινου δυναμικού
- Καθορισμός χρονοδιαγράμματος εργασιών και ωραρίου
- Κατανομή διαθέσιμου προσωπικού σε τμήματα του λιμένα με αυξημένο φόρτο εργασίας
- Διαχώριση καθηκόντων και ρόλων του προσωπικού

Οι βασικές διεργασίες στην **Εσωτερική - Κεντρική Περιοχή** εστιάζουν στην μείωση των μετακινήσεων μεταξύ του αποθηκευτικού χώρου και των ελλιμενισμένων πλοίων, στην ελάττωση του αριθμού των επανατοποθετήσεων των εμπορευματοκιβωτίων και στην ελαχιστοποίηση της χρήσης των γερανών εδάφους. Στη βιβλιογραφία εντοπίζονται δύο κύρια προβλήματα προς επίλυση, τα οποία ελκύουν το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας και παρατείνονται στις επόμενες υποενότητες. Στα προβλήματα βελτιστοποίησης της ναυτιλιακής εφοδιαστικής αλυσίδας για την **Εσωτερική - Κεντρική Περιοχή** εντάσσονται ο Χρονοπρογραμματισμός των Γερανών Εδάφους (Yard Crane Scheduling) και η Χωροθέτηση των εμπορευματοκιβωτίων (Container Storage).

### **2.3.2.1 Χρονοπρογραμματισμός Γερανών Εδάφους - Yard Crane Scheduling (YCS)**

Η εξυπηρέτηση μεγάλου αριθμού εμπορευματοκιβωτίων επηρεάζει άμεσα την απόδοση των θαλάσσιων τερματικών σταθμών. Η διαχείριση του τεχνικού εξοπλισμού και πιο συγκεκριμένα των γερανών εδάφους αποτελεί μία από τις βασικότερες λειτουργίες, καθώς συμβάλλει στην αύξηση της παραγωγικότητάς τους. Ειδικότερα, ο χρονοπρογραμματισμός των γερανών εδάφους αποσκοπεί στην εκτέλεση ενός συνόλου αιτημάτων αποθήκευσης και ανάκτησης σε ένα τμήμα ή μπλοκ εμπορευματοκιβωτίων. Στόχος του συγκεκριμένου προβλήματος θεωρείται η επιτυχής ολοκλήρωση όλων των αιτήματων με την ελάχιστη συνολική χρήση των γερανών εδάφους. Ως αποτέλεσμα, με τη μείωση του χρόνου εφαρμογής τους, ελαχιστοποιείται τόσο ο χρόνος εξυπηρέτησης των εισερχόμενων πλοίων όσο και ο χρόνος αναμονής των εξωτερικών οχημάτων.

### **Βιβλιογραφία**

Τα προβλήματα του χρονοπρογραμματισμού των γερανών εδάφους στηρίζονται στην στρατηγική της ελαχιστοποίησης των μετακινήσεων των εμπορευματοκιβωτίων από τα σημεία εισόδου/εξόδου (input/output points - I/O) ενός χώρου ή μπλοκ αποθήκευσης τους. Στη βιβλιογραφία παρατηρούνται διαφορετικές μαθηματικές μοντελοποιήσεις για το συγκεκριμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης με στόχο την επίλυσή του, καθώς οι Gharehgozli et al.[76] προτείνουν μία επέκταση του ασύμμετρου προβλήματος του πλανόδιου πωλητή (asymmetric traveling salesman problem - ATSP), ενώ οι Vis και Roodbergen[264] στηρίζονται στο πρόβλημα του κινέζου ταχυδρόμου (Chinese postman problem). Η διαχείριση των αιτημάτων ανάκτησης των εμπορευματοκιβωτίων από ένα γερανό εδάφους μελετάται στις εργασίες των De Koster et al.[49], Van Den Berg και Gademann[261], Kim και Kim[136] και Narasimhan και Palekar[205]. Εναλλακτικά, αλγόριθμοι βελτιστοποίησης για την εκτέλεση των εργασιών ταυτόχρονα με περισσότερους από έναν γερανούς εδάφους προτείνονται από τους Cheung et al.[35], Dorndorf και Schneider[55], Li et al.[161], Vis και Carlo[262] και Wan et al.[267].

### **2.3.2.2 Χωροθέτηση Εμπορευματοκιβωτίων - Container Storage (CS)**

Η διαχείριση των εμπορευματοκιβωτίων από και προς τους χώρους ή τα μπλοκ αποθήκευσής τους πραγματοποιείται διαμέσου των γερανών εδάφους. Η κατάλληλη τοποθέτησή τους σε στοίβες στοχεύει στη μείωση πιθανών μελλοντικών μετακινήσεων στο ίδιο ή σε διαφορετικό σημείο αποθήκευσής, αλλά και στην ελαχιστοποίηση του χρόνου χρήσης των γερανών μετά την αποθήκευσή τους. Τα συγκεκριμένα προβλήματα εστιάζουν σε

καταστάσεις μετά τη στοίβαξη των εμπορευματοκιβωτίων (post-stacking situations). Πιο συγκεκριμένα βασίζονται είτε στη χωροθέτηση ή επανατοποθέτησή τους (remarshalling/premarshalling movements) σε κάποια εναλλακτική θέση εντός των χώρων αποθήκευσής τους είτε στην ανάκτηση ή μετακίνησή τους (retrieval/relocation movements) σε κάποιο πλοίο ή εξωτερικό όχημα. Κατά την υποδοχή των εμπορευματοκιβωτίων σε κάποιο μπλοκ θεωρούνται ως δεδομένα τόσο τα εισαγόμενα/εξαγόμενα εμπορευματοκιβώτια (incoming/outgoing containers) όσο και οι χρόνοι άφιξης/ανάκτησης τους (arrival/retrieval times). Στόχος του προβλήματος αποτελεί η χωροθέτηση των εμπορευματοκιβωτίων μέσω ενός γερανού εδάφους με βάση τους χρόνους άφιξης και ανάκτησής τους.

### **Βιβλιογραφία**

Το πρόβλημα της χωροθέτησης των εμπορευματοκιβωτίων αντιμετωπίζεται με διάφορες προσεγγίσεις από τους ερευνητές και πιο συγκεκριμένα στη βιβλιογραφία διακρίνεται σε τρεις περιπτώσεις. Η πρώτη εστιάζει στην πολιτική στοίβαξης (stacking policy) με στόχο τον καθορισμό των θέσεων των εμπορευματοκιβωτίων στους χώρους αποθήκευσής τους. Ειδικότερα, οι εργασίες των Dekker et al.[52], Kang et al.[129], Kozan και Preston[142], Bazzazi et al.[11], Kim[138] και Park εστιάζουν σε εναλλακτικές πολιτικές στοίβαξης για την εύρεση της βέλτιστης στρατηγικής αποθήκευσης των εμπορευματοκιβωτίων. Η δεύτερη προσέγγιση αφορά την αναδιαμόρφωση ή αναδιάταξη του χώρου αποθήκευσής (marshalling problems) των εμπορευματοκιβωτίων για την αποφυγή άσκοπων ή την ελαχιστοποίηση επιπρόσθετων μελλοντικών μετακινήσεων τους κατά την διαδικασία της φόρτωσης/εκφόρτωσης. Η περίπτωση αυτή διακρίνεται σε δύο κατηγορίες στην απλή (premarshalling problem - PMP), η οποία μελετάται από τους Lee και Hsu[154], Lee και Chao[153], Caserta και Voß[25], και στην σύνθετη (remarshalling problem - RMP), η οποία εξετάζεται από τους Choe et al.[37], Park et al.[212], Kang et al.[128], Kim και Bae[135]. Στην τρίτη προσέγγιση εντάσσονται τα προβλήματα ανάκτησης και επανατοποθέτησης των εμπορευματοκιβωτίων από ένα ή περισσότερα μπλοκ αποθήκευσής τους (blocks relocation problem - BRP) σε κάποιο εισερχόμενο πλοίο και αντίστροφα. Αναφορικά με την τρίτη περίπτωση των προβλημάτων χωροθέτησης προτείνονται κατάλληλοι αλγόριθμοι επίλυσής τους από τους Tanaka και Mizuno[245], Petering και Hussein[218], Feillet et al.[67] και Galle et al.[71].

### 2.3.3 Θαλάσσια Περιοχή - Seaside Section

Η **Θαλάσσια Περιοχή** αποτελεί το τμήμα του θαλάσσιου τερματικού σταθμού, το οποίο στοχεύει στην άμεση εξυπηρέτηση των εισερχόμενων πλοίων. Ειδικότερα, αυτός θεωρείται ο χώρος υποδοχής των εισαγόμενων εμπορευματοκιβωτίων (imported containers), στον οποίο πραγματοποιούνται οι απαραίτητες διαδικασίες για τη μετακίνησή τους στους χώρους αποθήκευσης στην **Εσωτερική - Κεντρική Περιοχή**. Κατά τη διαδικασία του ελλιμενισμού τους απαιτείται η χρήση ειδικών και κατάλληλων μηχανημάτων. Εξαιτίας της σημαντικότητας των εργασιών ελλιμενισμού, σε αυτό τον τομέα περιέχεται ο ακριβότερος εξοπλισμός σε σχέση με τον υπόλοιπο χώρο του λιμένα και πιο συγκεκριμένα αφορά τους γερανούς φόρτωσης/εκφόρτωσης (Quay Cranes) των εμπορευματοκιβωτίων. Διαμέσου των συγκεκριμένων μηχανημάτων επιτυγχάνονται οι διαδικασίες φόρτωσης/εκφόρτωσης των εμπορευματοκιβωτίων από τα πλοία είτε σε ειδικά διαμορφωμένα φορτηγά για την μετακίνησή τους εκτός του λιμένα είτε σε αυτοματοποιημένα οχήματα (Automated Guided Vehicles) με κατεύθυνση την **Εσωτερική-Κεντρική Περιοχή** και σε κάποιο χώρο αποθήκευσης του τερματικού σταθμού.

Στη βιβλιογραφία τα αντιπροσωπευτικά προβλήματα σχεδιασμού και βελτιστοποίησης, τα οποία αφορούν την **Θαλάσσια Περιοχή** των τερματικών σταθμών, διαχωρίζονται ως εξής :

1. Ανάθεση Γερανών Φόρτωσης/Εκφόρτωσης (Quay Crane Assignment Problem)
2. Χρονοπρογραμματισμός Γερανών Φόρτωσης/Εκφόρτωσης (Quay Crane Scheduling Problem)
3. Στοίβαξη Εμπορευματοκιβωτίων (Stowage planning)
4. Ελλιμενισμός των πλοίων (Berth Allocation Problem)

Στις επόμενες τέσσερις υποενότητες πραγματοποιείται αναλυτική περιγραφή των τεσσάρων επιμέρους προβλημάτων σχεδιασμού της θαλάσσιας περιοχής των λιμένων. Αρχικώς στις πρώτες δύο υποενότητες συμπεριλαμβάνονται τα δύο προβλήματα, τα οποία αφορούν τους γερανούς φόρτωσης/εκφόρτωσης, αφού στην βιβλιογραφία συνηθίζεται η ταυτόχρονη μελέτη τους. Η τρίτη υποενότητα ασχολείται εντατικά με το πρόβλημα της στοίβαξης των εμπορευματοκιβωτίων στα πλοία. Η τέταρτη και τελευταία υποενότητα περιλαμβάνει το πρόβλημα ελλιμενισμού των πλοίων, η οποία διαθέτει διευρυμένο εύρος σε σχέση με τις τρεις προηγούμενες, καθώς το συγκεκριμένο πρόβλημα αποτελεί ένα από τα βασικά ως προς μελέτη και προσδίδεται σε αυτό ιδιαίτερη έμφαση στην παρούσα διδακτορική διατριβή.

### 2.3.3.1 Ανάθεση Γερανών Φ/Ε - Quay Crane Assignment Problem (QCAP)

Κατά την άφιξη των πλοίων και τον καθορισμό των θέσεων για τον ελλιμενισμό τους πραγματοποιείται ένα σύνολο από απαραίτητες ενέργειες, οι οποίες αφορούν την διαχείριση των γερανών φόρτωσης/εκφόρτωσης. Οι συγκεκριμένες δραστηριότητες στοχεύουν στην εξυπηρέτηση του εισαγόμενου ή εξαγόμενου φορτίου των πλοίων με την κατάλληλη ανάθεση των γερανών φ/ε. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα εστιάζεται η ακριβής εκχώρηση του αριθμού των γερανών φ/ε για καθένα από τα ελλιμενισμένα πλοία με στόχο τη μετακίνηση των εμπορευματοκιβωτίων από και προς τον χώρο του λιμένα. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος της ανάθεσης των γερανών φ/ε καθορίζονται οι διαθέσιμοι γερανοί για κάθε πλοίο, καθώς ο αριθμός τους παραμένει αμετάβλητος κατά τη διαδικασία εξυπηρέτησης των πλοίων. Ειδικότερα, για κάθε γερανό ξεχωριστά εξετάζεται η παραγωγική του δυνατότητα (crane capacity), η οποία σχετίζεται με τα τεχνικά χαρακτηριστικά (π.χ. ταυτόχρονη ανύψωση πολλών ή σε μορφή στοίβας εμπορευματοκιβωτίων, παράλληλη ή κάθετη μετακίνηση σε σχέση με τις θέσεις ελλιμενισμού των πλοίων κ.ά.), τα οποία εάν διαθέτει, τότε εκχωρείται σε κάποιο πλοίο. Βασικός στόχος με την κατάλληλη ανάθεση των γερανών αποτελεί η αύξηση της παραγωγικότητάς τους, η οποία επιτυγχάνεται με την ελαχιστοποίηση του χρόνου χρήσης τους για την μεταφορά των εμπορευματοκιβωτίων και στη συνέχεια με την μείωση του χρόνου παραμονής των πλοίων στους λιμένες.

### *Βιβλιογραφία*

Το πρόβλημα της ανάθεσης των γερανών φ/ε θεωρείται λιγότερα πολύπλοκο από τα υπόλοιπα προβλήματα, τα οποία εντοπίζονται στην **Θαλάσσια Περιοχή** του τερματικού σταθμού και για τον λόγο αυτό δεν έχει μελετηθεί σχεδόν καθόλου ως ανεξάρτητο από την επιστημονική κοινότητα. Ωστόσο, στην βιβλιογραφία εξετάζεται ταυτόχρονα και συνδυάζεται με διάφορα προβλήματα, όπως αυτά του ελλιμενισμού των πλοίων και του χρονοπρογραμματισμού των γερανών φ/ε. Οι εργασίες των Giallombardo et al.[78], Liang et al.[165], Imai et al.[121], Vacca et al.[257] και Lalla-Ruiz et al.[146] ενσωματώνουν το συγκεκριμένο πρόβλημα με τη διακριτή προσέγγιση του προβλήματος του ελλιμενισμού των πλοίων. Παράλληλα η συνεχή προσέγγιση σε συνδυασμό με την ανάθεση των γερανών φ/ε έχει μελετηθεί από τους Oguz et al.[210], Meisel et al.[193, 194], Park και Kim[214], Salido et al.[234, 235] και Zhang et al.[283]. Και για τις δύο προσεγγίσεις, τα προτεινόμενα μοντέλα βελτιστοποίησης εστιάζουν στην εξυπηρέτηση των εισερχόμενων πλοίων με τον ακριβή καθορισμό του αριθμού των γερανών

φ/ε. Επιπρόσθετα, μαθηματικές μοντελοποιήσεις, στις οποίες συσχετίζονται τα προβλήματα της ανάθεσης και του χρονοπρογραμματισμού των γερανών φ/ε, παρουσιάζονται στις εργασίες των Daganzo[47], Peterkofsky και Daganzo[219], Tavakkoli et al.[247], Lu et al.[173], Unsal και Oguz[255], Meisel και Bierwirth[195] και Rodriguez-Molins et al.[228].

### 2.3.3.2 Χρονοπρογραμματισμός Γερανών Φ/Ε - Quay Crane Scheduling Problem (QCSP)

Μετά την άφιξη των πλοίων στους τερματικούς σταθμούς εκτελούνται μία σειρά από δραστηριότητες για την ομαλή υποδοχή και μετακίνηση των εισαγόμενων φορτίων. Η διαχείριση των επιμέρους δραστηριοτήτων, οι οποίες αφορούν την μεταφορά των εμπορευματοκιβωτίων από και προς τα πλοία, πραγματοποιείται κυρίως από τους γερανούς φόρτωσης/εκφόρτωσης. Οι δραστηριότητες αυτές αντιπροσωπεύουν ένα σύνολο εργασιών, οι οποίες δρομολογούνται στο επάνω μέρος ή/και στο αμπάρι των πλοίων κατά την εξυπηρέτηση τους από ένα σύνολο προκαθορισμένων ή εκχωρημένων γερανών φ/ε (assigned cranes). Κατά την εκτέλεση της κάθε εργασίας ορίζονται οι απαραίτητοι περιορισμοί προτεραιότητας (precedence relations) για καθεμία ξεχωριστά, οι οποίοι διασφαλίζουν ότι η διαδικασία της εκφόρτωσης προηγείται της φόρτωσης και ότι η τοποθέτηση των εμπορευματοκιβωτίων καθορίζεται σύμφωνα με τον σχεδιασμό στοίβαξης τους (stowage plan). Ως εργασία (task) ορίζεται ο φόρτος εργασίας (workload) κατά την διαδικασία της εξυπηρέτησης του πλοίου, ενώ η διαθεσιμότητα των γερανών (crane availability) καθορίζεται με τη συχνότητα χρήσης τους (crane movement speed) για την ολοκλήρωση των καθορισμένων εργασιών. Ειδικότερα, η κάθε εργασία εκτελείται μία φορά από έναν καθορισμένο γερανό, ενώ παράλληλα ο κάθε γερανός ξεχωριστά εκτελεί αυστηρά μία εργασία τη φορά. Επιπρόσθετα, για τη λειτουργικότητα των γερανών λαμβάνονται υπόψη περιορισμοί σχετικά με την υποδομή, στην οποία βρίσκονται τοποθετημένοι. Συνηθέστερα οι γερανοί τοποθετούνται πάνω σε ειδικές ράγες (rail mounted), οπότε για την αποφυγή πιθανών συγκρούσεων διατηρείται μία επιβεβλημένη απόσταση ασφαλείας (safety margin) κατά την εκτέλεση των εργασιών. Η επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος πραγματοποιείται με τη δημιουργία ενός χρονοδιαγράμματος γερανών φ/ε (quay crane schedule), στο οποίο ορίζονται οι χρονικές στιγμές έναρξης των εργασιών για κάθε γερανό ξεχωριστά. Στόχος του χρονοδιαγράμματος αποτελεί η ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου χρήσης των γερανών φ/ε (makespan, turnaround time) για την ολοκλήρωση των εργασιών μεταφοράς των εμπορευματοκιβωτίων.

## Βιβλιογραφία

Το πρόβλημα του χρονοπρογραμματισμού των γερανών φ/ε (QCSP) ανήκει στην κατηγορία των  $\mathcal{NP}$ -Hard προβλημάτων βελτιστοποίησης εξαιτίας της σύνθετης πολυπλοκότητας του κατά τη διαδικασία της επίλυσης του. Στη βιβλιογραφία το συγκεκριμένο πρόβλημα προσωμοιώνεται από τον Pinedo[220] και ως πρόβλημα ελαχιστοποίησης του χρόνου επεξεργασίας περισσότερων από δύο παράλληλων και ιδίου τύπου μηχανών (δηλαδή, γερανών) με περιορισμούς προτεραιότητας ως προς τη σειρά εξυπηρέτησης των εργασιών. Σε αντίθεση με το πρόβλημα της ανάθεσης του αριθμού των γερανών φ/ε (QCAP), στο QCSP δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στο σύνολο των εργασιών (tasks), τις οποίες θα εκτελέσουν ο καθένας γερανός ξεχωριστά. Στην βιβλιογραφία παρατηρείται ότι, οι εργασίες εξετάζονται με διαφορετικούς τρόπους ανάλογα με το φόρτο εργασίας ενός πλοίου (workload of a vessel), ο οποίος εξαρτάται από το πλάνο στοίβαξης των εμπορευματοκιβωτίων (stowage plan). Οι υπάρχουσες προσεγγίσεις στη βιβλιογραφία διακρίνονται με βάση τις εργασίες φ/ε είτε κατά μήκος του πλοίου (areas) είτε σε μία μεμονωμένη περιοχή του πλοίου (bays) και με τον τρόπο οργάνωσης των εμπορευματοκιβωτίων επάνω στο πλοίο σε στοίβες (stacks), σε ομάδες (groups) ή ως ξεχωριστά εμπορευματοκιβώτια (containers). Αναφορικά με την προσέγγιση areas, σε αυτήν εστιάζουν οι μαθηματικές μοντελοποιήσεις των Steenken et al.[244] και Lu et al.[174], ενώ η προσέγγιση bays μελετάται από τους Lim et al.[169], Liu et al.[171], Boysen et al.[17] και Fu et al.[70]. Επιπρόσθετα, τα μαθηματικά μοντέλα των Zhang και Kim[284], Pap et al.[211] και Lee et al.[149] αφορούν τις εργασίες φ/ε σε stacks, ενώ τα αντίστοιχα των Meisel και Wichmann[197], Tang et al.[246] και Choo et al.[38] εστιάζουν αυτές σε εμπορευματοκιβώτια. Εναλλακτικά σε σχέση με τους δύο προηγούμενους τρόπους, οι εργασίες φ/ε για την τοποθέτηση των εμπορευματοκιβωτίων σε groups εστιάζεται στα μοντέλα βελτιστοποίησης των Moccia et al.[199], Jung et al.[126], Meisel.[196], Song et al.[241], Guo et al.[92], Legato et al.[157] και Nguyen et al.[207].

### 2.3.3.3 Στοίβαξη Εμπορευματοκιβωτίων - Stowage Planning (SP)

Ακόμα μία σημαντική διεργασία εντός της **Θαλάσσιας Περιοχής** θεωρείται η ασφαλής και η κατάλληλη τοποθέτηση των εμπορευματοκιβωτίων στα πλοία. Ο σχεδιασμός της φόρτωσης τους αποτελεί τον πυρήνα του συνολικού πλάνου εξυπηρέτησης (δηλαδή, οι διαδικασίες για τον ελλιμενισμό και την εφαρμογή των γερανών φ/ε) των εισερχόμενων πλοίων, καθώς εξασφαλίζει την σταθερότητα τους κατά τη διάρκεια του δρομολογίου τους. Για τον λόγο αυτόν, οι πλοιοκτήτριες εταιρείες λαμβάνουν μία σειρά από στρατηγικές αποφάσεις για τη διαμόρφωση του πλάνου στοίβαξης των εμπορευματοκιβωτίων.



Ειδικότερα, ο σχεδιασμός στοίβαξης τους καθορίζει τις θέσεις (slots) εντός του πλοίου, στις οποίες θα τοποθετηθούν με βάση την κατηγορία ή τα χαρακτηριστικά των εμπορευματοκιβωτίων (container categories or attributes). Στις επιμέρους κατηγορίες ή στα χαρακτηριστικά τους ανήκουν οι διαστάσεις (μέγεθος), το είδος (εμπόρευμα), το βάρος και το λιμάνι προορισμού τους. Με την επιλογή των κατάλληλων θέσεων στοίβαξης τους αξιοποιείται σε μέγιστο βαθμό η χωρητικότητα του πλοίου και επιταχύνεται η εξυπηρέτηση του, καθώς μειώνεται ο χρόνος παραμονής του στον τερματικό σταθμό.

## **Βιβλιογραφία**

Ο σχεδιασμός της στοίβαξης των εμπορευματοκιβωτίων αποτελεί μια διαδικασία βελτιστοποίησης, η οποία οργανώνεται από ένα αυτόματοποιημένο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων (automated decision support system). Στη βιβλιογραφία οι περισσότερες ερευνητικές εργασίες εστιάζουν στη βελτίωση αυτών των συστημάτων υποστήριξης με τη χρήση των κατάλληλων εργαλείων και μεθοδολογιών βελτιστοποίησης. Οι Sculli και Hui[237] διερευνούν τις επιπτώσεις από τη στοίβαξη και τη διανομή των εμπορευματοκιβωτίων με διαφορετικά χαρακτηριστικά, ώστε να αξιολογηθεί η απόδοση της συγκεκριμένης πολιτικής στοίβαξης. Τα αποτελέσματα της έρευνας αποδεικνύουν ότι η συγκεκριμένη πολιτική αποφέρει σημαντικά ωφέλη, καθώς με την κατάλληλη τοποθέτηση τους παρέχεται η δυνατότητα επιπρόσθετου αποθηκευτικού χώρου. Οι Avriel et al.[7, 8] στοχεύουν με την κατάλληλη στοίβαξη των εμπορευματοκιβωτίων στην ελαχιστοποίηση των προσωρινών και χρονοβόρων επανατοποθετήσεων τους σε κάποιο ενδιάμεσο λιμένα πριν τον τελικό προορισμό τους. Ειδικότερα, το πρόβλημα μοντελοποιείται ως γραμμικό πρόβλημα και επιλύεται με την υλοποίηση ενός ευρετικού αλγορίθμου. Επιπρόσθετα, οι Giemisch και Jellinghaus[79] προτείνουν μία επέκταση του μοντέλου των Avriel et al.[7, 8], καθώς προσεγγίζουν το πρόβλημα με τη μέθοδο του μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού. Μια εναλλακτική προσέγγιση για την πολιτική στοίβαξης προτείνουν οι Wilson και Roach[272, 273]. Η προτεινόμενη πολιτική τους βασίζεται σε δύο υποπρόβληματα, όπου στο πρώτο ορίζεται ο ακριβής αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων για την φόρτωση τους στα πλοία, ενώ στο δεύτερο υπόπρόβλημα εστιάζει στον καθορισμό των θέσεων στοίβαξης τους σε αυτά. Παρόμοια προσέγγιση για το πρόβλημα στοίβαξης των εμπορευματοκιβωτίων παρουσιάζουν οι Kang et al.[127], καθώς υλοποιούν δύο διαφορετικούς ευρετικούς αλγορίθμους για την επίλυση του κάθε υποπρόβληματος ξεχωριστά. Οι Dubrovsky et al.[58] χρησιμοποιούν τους γενετικούς αλγορίθμους με στόχο την ελαχιστοποίηση των επανατοποθετήσεων των εμπορευματοκιβωτίων κατά τη διαδικασία φόρτωσης τους.

#### 2.3.3.4 Ελλιμενισμός Πλοίων - Berth Allocation Problem

Το πρόβλημα του ελλιμενισμού των πλοίων στους τερματικούς σταθμούς των λιμένων (Berth Allocation Problem - BAP) αποτελεί το αντιπροσωπευτικότερο πρόβλημα στη διαχείριση και οργάνωση των τερματικών σταθμών διαχείρισης εμπορευματοκιβωτίων. Το BAP χαρακτηρίζεται ως πρόβλημα συνδυαστικής βελτιστοποίησης με ιδιαίτερη πολυπλοκότητα, καθώς κατατάσσεται στην κατηγορία των  $\mathcal{NP}$ -Hard προβλημάτων βελτιστοποίησης. Για την εφικτή αντιμετώπιση και προσέγγιση του προβλήματος BAP θεωρείται απαραίτητη η διάταξη του χώρου των τερματικών σταθμών και το σύνολο του διαθέσιμου στόλου των πλοίων, τα οποία θα εξυπηρετηθούν. Βασικός σκοπός του BAP αποτελεί ο καθορισμός της βέλτιστης θέσης και του χρόνου εξυπηρέτησης των εισερχόμενων πλοίων κατά τον ελλιμενισμό τους εντός ενός ορισμένου χρονικού ορίζοντα (χρονικός ορίζοντας θεωρείται το ανώτατο επιτρεπτό χρονικό όριο για τον εφικτό ελλιμενισμό των πλοίων). Ειδικότερα, για τα πλοία παρέχονται πρόσθετες πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά τους, (π.χ. ο χρόνος άφιξης, οι διαστάσεις, ο χρόνος εξυπηρέτησης, κ.ά.), τα οποία θα καθορίσουν τη θέση και τον χρόνο παραμονή τους στους τερματικούς σταθμούς. Τονίζεται ότι, κατά την παραμονή των πλοίων στα λιμάνια, οι εργασίες εξυπηρέτησης τους πραγματοποιούνται σε ένα τερματικό σταθμό. Ωστόσο, η συνεχής ανάπτυξη των εγκαταστάσεων στους λιμένες έχει επηρεάσει και τον ελλιμενισμό των πλοίων στους τερματικούς σταθμούς, γεγονός το οποίο προκαλεί την ύπαρξη καινούργιων περιορισμών και οδηγεί τους ερευνητές στη δημιουργία ποικίλων μαθηματικών μοντέλων για το πρόβλημα BAP.

Το πρόβλημα ελλιμενισμού των πλοίων στους τερματικούς σταθμούς προτάθηκε στη βιβλιογραφία αρχικώς από τους Lin et al.[170]. Στη συνέχεια με την παρουσίαση του προβλήματος, το διαρκές και αυξανόμενο ενδιαφέρον από την επιστημονική κοινότητα συνέβαλε στη δημιουργία σύνθετων μαθηματικών μοντελοποιήσεων και στην υλοποίηση κατάλληλων μεθολογιών για την εφικτή επίλυση του BAP. Εξαιτίας του αυξημένου εύρους των προτεινόμενων μοντέλων για το BAP στην βιβλιογραφία, η ύπαρξη νέων χαρακτηριστικών και περιορισμών γύρω από το πρόβλημα θεωρείται αναμενόμενη και δεδομένη. Για τη διευκόλυνση ως προς τη διαχώριση των προβλημάτων ελλιμενισμού με βάση τα χαρακτηριστικά τους, οι Bierwirth και Meisel[12, 13] πρότειναν ένα λεπτομερές σύστημα ταξινόμησης των προβλημάτων BAP, το οποίο περιλαμβάνει ένα σύνολο από πιθανούς περιορισμούς. Η ταξινόμηση των προβλημάτων πραγματοποιείται με βάση τέσσερα κριτήρια, τα οποία διακρίνονται σε αυτά του χώρου (**Χωρικός περιορισμός**), του χρόνου (**Χρονικός περιορισμός**), του είδους της διαχείρισης του πλοίου (**Χρόνος εξυπηρέτησης πλοίου**) και του είδους της εξυπηρέτησης του πλοίου (**Μέτρο απόδοσης**). Στη συνέχεια παρουσιάζεται λεπτομερώς η κάθε μια κατηγο-

ρία περιορισμών. Επιπρόσθετα, στον Πίνακα 2.3 παρουσιάζονται συνοπτικά οι τέσσερις βασικές κατηγορίες περιορισμών μαζί με τα επιμέρους χαρακτηριστικά, τα οποία εντοπίζονται στις μοντελοποιήσεις BAP στην βιβλιογραφία. Ο Πίνακας 2.3 οργανώνεται σε τέσσερις στήλες, όπου η πρώτη αναφέρει τις κατηγορίες των περιορισμών, η δεύτερη και η τρίτη περιλαμβάνουν τη συντομογραφία και τα χαρακτηριστικά των περιορισμών, όπως αυτά αναγράφονται στα αγγλικά στη βιβλιογραφία, ενώ η τελευταία στήλη περιέχει μία σύντομη περιγραφή του κάθε χαρακτηριστικού. Ακολουθούν οι κατηγορίες των περιορισμών σύμφωνα με την ταξινόμηση των προβλημάτων BAP από τους Bierwirth και Meisel[12, 13]:

Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικά ταξινόμησης των BAP προβλημάτων

Περιορισμοί	Συντομογραφία	Χαρακτηριστικό	Περιγραφή
1.Χωρικός περιορισμός	disc cont hybr draft	discrete continuous hybrid vessel draft	Η διάταξη της διακριτής προκυμαίας υποδοχής είναι ειδικά διαχωρισμένη για τον ελλιμενισμό των πλοίων Η διάταξη της συνεχής προκυμαίας υποδοχής επιτρέπει ελεύθερα τον ελλιμενισμό των πλοίων Η υβριδική προκυμαία συνδυάζει την διακριτή με την συνεχή διάταξη Ειδικά διαμορφωμένες θέσεις με ελεγχόμενο βύθισμα στην προκυμαία για τον ελλιμενισμό των πλοίων
2.Χρονικός περιορισμός	stat dyn cycl stoch due	static dynamic cyclic stochastic due dates	Στις στατικές αφίξεις των πλοίων δεν υποβάλλονται περιορισμοί ανάλογα με τους χρόνους ελλιμενισμού τους Στις δυναμικές αφίξεις των πλοίων υποβάλλονται περιορισμοί ανάλογα με τους χρόνους ελλιμενισμού τους Στις κυκλικές αφίξεις ο ελλιμενισμός των πλοίων πραγματοποιείται σε επαναλαμβανόμενα χρονικά διαστήματα Στις σταχαστικές αφίξεις ο ελλιμενισμός των πλοίων ορίζεται από στοχαστικές διαδικασίες Ο ελλιμενισμός των πλοίων προκαθορίζεται από τον χρόνο αναχώρησής τους
3.Χρόνος εξυπηρέτησης πλοίου	fix pos QCAP QCSP stoch	fixed times position QC assignment QC scheduling stochastic	Οι χρόνοι χειρισμού των πλοίων είναι καθορισμένοι Οι χρόνοι χειρισμού των πλοίων εξαρτώνται από τις θέσεις του ελλιμενισμού τους Οι χρόνοι εξυπηρέτησης των πλοίων σχετίζονται με τον αριθμό των QC γερανών Οι χρόνοι εξυπηρέτησης των πλοίων βασίζονται στα χρονοδιαγράμματα εργασιών από τους QC γερανούς Οι χρόνοι χειρισμού των πλοίων ορίζονται από στοχαστικές διαδικασίες
4.Μέτρο απόδοσης	wait hand compl speed tard order rej res pos misc	waiting times handling times completion times speed tardiness order rejection resource position miscellaneous	Ο χρόνος αναμονής του πλοίου στον λιμένα Ο χρόνος χειρισμού του πλοίου Ο χρόνος πλήρους εξυπηρέτησης του πλοίου Η άφιξη πλοίου πραγματοποιείται πριν τον αναμενόμενο χρόνο άφιξης του στον λιμένα Η καθυστέρηση στην άφιξη του πλοίου στον λιμένα από την προκαθορισμένη ημερομηνία Ο καθορισμός των άφιξεων πλοίων σε σχέση με την προγραμματισμένη σειρά εξυπηρέτησής τους Η αδυναμία εξυπηρέτησης πλοίου από τον τερματικό σταθμό Η χρήση επιπρόσθετων μηχανημάτων ή εργατών στον τερματικό σταθμό Ο ελλιμενισμός του πλοίου πραγματοποιείται σε διαφορετική θέση από την προκαθορισμένη Εναλλακτικό μέτρο απόδοσης εξυπηρέτησης των πλοίων

1. **Χωρικός περιορισμός (Spatial attribute):** Οι περιορισμοί χώρου αφορούν την διαμόρφωση της διάταξης ή του χώρου των θαλάσσιων τερματικών σταθμών, στον οποίο ελλιμενίζονται τα εισερχόμενα πλοία.

- **Διακριτή διάταξη (Discrete layout):** Ο χώρος του λιμένα διαχωρίζεται σε τμήματα, τα οποία ονομάζονται προβλήτες ή προκυμαίες. Η διάταξη τους διαμορφώνονται κατάλληλα, ώστε να εξυπηρετείται ένα πλοίο την φορά.
- **Συνεχής διάταξη (Continuous layout):** Ο χώρος του λιμένα δεν διαχωρίζεται σε προβλήτες. Ο ελλιμενισμός των πλοίων πραγματοποιείται σε τυχαίες θέσεις κατά μήκος και εντός των ορίων του λιμένα. Στη συνεχή διάταξη, ο ελλιμενισμός των πλοίων δυσκολεύεται αρκετά σε σχέση με τη διακριτή, καθώς περιορίζεται σημαντικά ο ωφέλιμος χώρος για την εξυπηρέτησή τους.

- Υβριδική διάταξη (Hybrid layout): Αντιστοίχως με την διακριτή, η υβριδική διάταξη διαχωρίζεται σε προβλήτες. Επιπρόσθετα, παρέχεται η δυνατότητα εξυπηρέτησης των πλοίων σε περισσότερες από μία προβλήτες
- Διάταξη ελεγχόμενης βύθισης (Draft layout restrictions): Στην περίπτωση της διάταξης του λιμένα με περιορισμένο όριο βυθίσματος (κατώτατο όριο με επαρκές βάθος νερού), επιπρόσθετοι χωρικοί περιορισμοί διασφαλίζουν ότι, τα πλοία κατά τη διαδικασία του ελλιμενισμού τους θα καταλαμβάνουν κατάλληλες θέσεις με επαρκές βάθος βύθισης.

2. **Χρονικός περιορισμός (Temporal attribute):** Οι περιορισμοί χρόνου αφορούν τους χρόνους άφιξης και αναχώρησης των πλοίων από τους θαλάσσιους τερματικούς σταθμούς.

- Στατική άφιξη (Static arrival): Τα εισερχόμενα πλοία περιμένουν στον λιμάνι και η εξυπηρέτηση τους ξεκινάει αμέσως, καθώς οι χρόνοι άφιξης τους δεν θεωρούνται δεδομένοι. Για κάθε πλοίο έχει οριστεί ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (χρονικά παράθυρα), στο οποίο θα εξυπηρετηθεί από τον θαλάσσιο τερματικό σταθμό.
- Δυναμική άφιξη (Dynamic arrival): Για κάθε εισερχόμενο πλοίο προκαθορίζεται ο χρόνος άφιξης του στον λιμάνι. Τα πλοία εξυπηρετούνται αμέσως μετά την άφιξη τους από τον θαλάσσιο τερματικό σταθμό. Όπως και στην στατική περίπτωση κάθε πλοίο αντιστοιχίζεται με ένα ορισμένο χρονικό διάστημα εξυπηρέτησης.
- Κυκλική άφιξη (Cyclic arrival): Τα εισερχόμενα πλοία εξυπηρετούνται περισσότερες από μία φορές, καθώς η άφιξη τους στο λιμάνι πραγματοποιείται σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα.
- Στοχαστική άφιξη (Stochastic arrival): Οι χρόνοι άφιξης των πλοίων ακολουθούν στοχαστικές διαδικασίες.
- Άφιξη σε συνδυασμό με την αναχώρηση (Due dates arrival): Σε αυτή την περίπτωση η εξυπηρέτηση των εισερχόμενων πλοίων πραγματοποιείται με βάση τον χρόνο αναχώρησης τους από το λιμάνι.

3. **Χρόνος εξυπηρέτησης πλοίου (Vessel handling times):** Οι περιορισμοί εξυπηρέτησης των πλοίων εξετάζουν το είδος διαχείρισης των πλοίων κατά τον ελλιμενισμό τους σε ένα ανάλογο (απροσδιόριστο, καθορισμένο, τυχαίο) χρονικό διάστημα.

- Καθορισμένος χρόνος εξυπηρέτησης (Fixed times): Ο χρόνος εξυπηρέτησης του κάθε πλοίου είναι γνωστός και προκαθορισμένος.
- Χρόνος θέσης ελλιμενισμού (Position times): Ο χρόνος εξυπηρέτησης του κάθε πλοίου εξαρτάται από την θέση ελλιμενισμού του στον τερματικό σταθμό.
- Χρόνος ανάθεσης QC γερανών (QC assignment times): Ο χρόνος εξυπηρέτησης του κάθε πλοίου εξαρτάται από τον αριθμό των QC γερανών, οι οποίοι έχουν ανατεθεί ξεχωριστά για κάθε πλοίο.
- Χρόνος καθορισμού εργασιών QC γερανών (QC scheduling times): Ο χρόνος εξυπηρέτησης του κάθε πλοίου εξαρτάται από τον χρονοπρογραμματισμό των εργασιών φόρτωσης/εκφόρτωσης των QC γερανών.
- Στοχαστικός χρόνος (Stochastic times): Ο χρόνος εξυπηρέτησης του κάθε πλοίου ορίζεται από στοχαστικές διαδικασίες

4. **Μέτρο απόδοσης (Performance measure):** Ο στόχος του εφικτού ελλιμενισμού των πλοίων καθορίζεται από το είδος και την ταχύτητα της εξυπηρέτησης των πλοίων στους θαλάσσιους τερματικούς σταθμούς. Στη συγκεκριμένη κατηγορία περιορισμών, τα επιμέρους χαρακτηριστικά λειτουργούν αντιπροσωπευτικά ως μέτρα απόδοσης για την ελαχιστοποίηση ή τη μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης σε προβλήματα βελτιστοποίησης.

- Χρόνος αναμονής (Waiting times): Η τιμή **wait** επιλέγεται στην περίπτωση της μείωσης του χρόνου αναμονής των πλοίων στον τερματικό σταθμό.
- Χρόνος εξυπηρέτησης (Handling times): Η τιμή **hand** αντιπροσωπεύει την ελαχιστοποίηση του χρόνου παραμονής των πλοίων στον τερματικό σταθμό.
- Χρόνος ολοκλήρωσης (Completion times): Η ένδειξη **compl** συμβολίζει τη συντομότερη πιθανή αναχώρηση (ή τη γρηγορότερη εξυπηρέτηση) των πλοίων από τον τερματικό σταθμό.
- Ταχύτητα (Speed): Το χαρακτηριστικό **speed** τοποθετείται στην περίπτωση την πρώιμης άφιξης (νωρίτερα από τον αναμενόμενο χρόνο ελλιμενισμού) των πλοίων στο λιμάνι.
- Καθυστέρηση (Tardiness): Για τη βραδύτερη άφιξη (μεταγενέστερα από τον προκαθορισμένο χρόνο ελλιμενισμού) των πλοίων στο λιμάνι επιλέγεται το χαρακτηριστικό **tard**.

- Σειρά προτεραιότητας (Order): Με το χαρακτηριστικό **order** επιδιώκεται η μείωση της απόκλισης μεταξύ του χρόνου άφιξης των πλοίων με τη σειρά προτεραιότητας για την εξυπηρέτησή τους.
- Απόρριψη εξυπηρέτησης (Rejection): Η ένδειξη **rej** τοποθετείται όταν τα πλοία δεν μπορούν να εξυπηρετηθούν εντός των προκαθορισμένων χρονικών παραθύρων και ανακατευθύνονται σε άλλο τερματικό σταθμό.
- Αξιοποίηση πόρων (Resource): Για την αξιοποίηση επιπρόσθετων πόρων (π.χ. τεχνικός εξοπλισμός, ανθρώπινο δυναμικό) λαμβάνεται η τιμή **res**
- Θέση ελλιμενισμού (Position): Ο περιορισμός **pos** χρησιμοποιείται στην περίπτωση της επιλεγμένης θέσης ελλιμενισμού των πλοίων, όταν αυτή προσεγγίζει όσο το δυνατόν περισσότερο την ιδανική (επιθυμητή) θέση στον τερματικό σταθμό.
- Εναλλακτικό μέτρο απόδοσης (Miscellaneous): Εάν κανένα από τα παραπάνω χαρακτηριστικά δεν χρησιμοποιείται στην περιγραφή μίας μοντελοποίησης BAP, τότε τοποθετείται η τιμή **misc** ως μέτρο απόδοσης.

Το πρόβλημα BAP θεωρείται αρκετά δημοφιλές στην επιστημονική κοινότητα, καθώς στην βιβλιογραφία εντοπίζεται σε διάφορες παραλλαγές ή/και συνδυασμούς με άλλα προβλήματα βελτιστοποίησης της ναυτιλιακής εφοδιαστικής αλυσίδας. Εξαιτίας του τεράστιου πλήθους από εργασίες και μελέτες, η βιβλιογραφική ανασκόπηση για το BAP καθιστάται ιδιαίτερα απαιτητική και σύνθετη. Για λόγους απλότητας και συνοχής, η βιβλιογραφία διαχωρίζεται σε τρεις υποενότητες, οι οποίες βασίζονται στον **Χωρικό περιορισμό** και διακρίνονται σε Διακριτή, Συνεχή και Υβριδική προσέγγιση του BAP προβλήματος. Στους Πίνακες 2.4 και 2.5 παρουσιάζονται οι ερευνητικές εργασίες, οι οποίες έχουν δημοσιευτεί στην βιβλιογραφία. Οι δύο Πίνακες 2.4, 2.5 οργανώνονται σε τέσσερις στήλες, όπου κατά μήκος των στηλών αναφέρονται στην πρώτη (Περιγραφή) τα χαρακτηριστικά των προβλημάτων BAP, στη δεύτερη (Άρθρο) τα ονόματα των συγγραφέων, στην τρίτη (Μέθοδος) τις προτεινόμενες μεθοδολογίες επίλυσης και στην τέταρτη (Έτος) η χρονολογία δημοσίευσής τους.

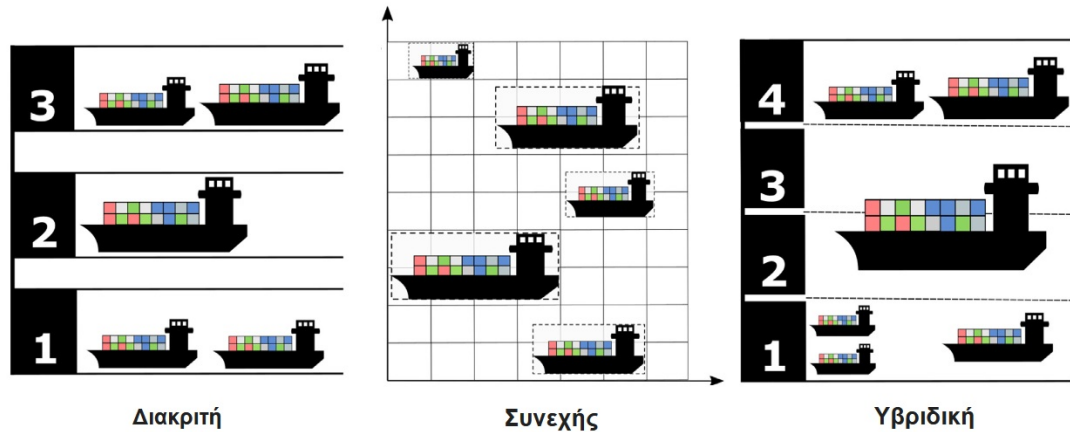
Πίνακας 2.4: Κατηγορίες και μέθοδοι των BAP προβλημάτων

Περιγραφή	Άρθρο	Μέθοδος	Έτος
$disc stat fix \sum(pos)$	Safaei et al.[232]	Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός	2010
$disc stat pos \sum(wait + hand)$	Imai et al.[117]	Λαγκρανζιανή συνάρτηση	2001
$disc stat pos \sum(wait + hand)$	Hansen, Oguz[102]	Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός	2003
$disc stat pos \sum(wait + hand + order)$	Imai et al.[116]	Ουγγρική μέθοδος (Hungarian method)	1997
$disc stat pos max(compl)$	Emde et al.[61]	Διαβάδωσης και Οριοθέτησης (B&B)	2014
$disc stat, due pos \sum(rej)$	Imai et al.[118]	Γενετικός αλγόριθμος	2008
$disc stat pos, QCSP \sum(wait + hand)$	Lee et al.[152]	Γενετικός αλγόριθμος	2006
$disc stat pos, QCSP \sum(wait + hand)$	Song et al.[241]	Γενετικός αλγόριθμος	2012
$disc dyn pos \sum(wait + hand)$	Imai et al.[117]	Λαγκρανζιανή συνάρτηση	2001
$disc dyn pos \sum(wait + hand)$	Hansen, Oguz[102]	Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός	2003
$disc dyn pos \sum(wait + hand)$	Monaco, Sammarra[200]	Λαγκρανζιανή συνάρτηση	2007
$disc dyn pos \sum(wait + hand)$	Imai et al.[118]	Γενετικός αλγόριθμος	2003
$disc dyn pos \sum(wait + hand)$	Theofanis et al.[248]	Γενετικός αλγόριθμος	2007
$disc dyn pos \sum(wait + hand)$	Arango et al.[6]	Γενετικός αλγόριθμος	2011
$disc dyn pos \sum(wait + hand)$	Golias et al.[83]	Γενετικός αλγόριθμος	2009
$disc dyn pos \sum(wait + hand)$	Golias et al.[84]	Μη Αριθμητική Μέθοδος Κατάταξης	2010
$disc dyn pos \sum(wait + hand)$	Golias et al.[85]	Γενετικός αλγόριθμος	2014
$disc dyn pos \sum(wait + hand)$	Saharidis al.[233]	Γενετικός αλγόριθμος	2010
$disc dyn pos \sum(wait + hand)$	Golias et al.[86]	Γενετικός αλγόριθμος	2010
$disc dyn pos \sum(wait + hand)$	Ting et al.[249]	Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων	2014
$disc dyn pos \sum(wait + hand)$	Lin και Ting[170]	Προσομοιωμένη Ανόπτηση	2014
$disc dyn pos \sum(wait + hand)$	Buhrkal et al.[23]	Γενικευμένη Διαχώριση Συνόλων	2011
$disc dyn pos \sum(wait + hand)$	Lalla-Ruiz et al.[144]	Περιορισμένη Αναζήτηση	2011
$disc dyn pos \sum(wait + hand) + res$	Silva et al.[240]	Γενετικός Αλγόριθμος	2011
$disc dyn pos \sum(wait + tard)$	Golias et al.[87]	Γενετικός Αλγόριθμος	2009
$disc dyn pos \sum(wait + tard + pos)$	Hansen et al.[103]	Μεταβλητής Γειτονιάς Αναζήτησης (VNS)	2008
$disc dyn pos \sum(tard)$	Golias et al.[88]	Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός	2007
$disc dyn pos \sum(tard)$	Imai et al.[119]	Γενετικός Αλγόριθμος	2007
$disc dyn pos, stoch \sum(wait + hand), misc$	Golias[89]	Γενετικός Αλγόριθμος	2010
$disc dyn pos, stoch \sum(wait + hand), misc$	Golias[90]	Γενετικός Αλγόριθμος	2011
$disc dyn pos, stoch \sum(wait + hand), misc$	Karafa et al.[131]	Εξελικτικός Αλγόριθμος	2013
$disc dyn, due pos \sum(wait + hand)$	Cordeau et al.[46]	Περιορισμένη Αναζήτηση (Tabu Search)	2005
$disc dyn, due pos \sum(wait + hand)$	Mauri et al.[189]	Υβριδικός Γενετικός Αλγόριθμος	2008
$disc dyn, due pos \sum(wait + hand)$	Mauri et al.[189]	Αλγόριθμος Ομαδοποιημένης Αναζήτησης	2008
$disc dyn, due pos \sum(wait + hand)$	Lin και Pang[189]	Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός	2011
$disc dyn, due pos \sum(wait + hand)$	Lalla et al.[144]	Υβριδικός Αλγόριθμος Περιορισμένης Αναζήτησης	2012
$disc dyn, due pos \sum(wait + hand)$	Mauri et al.[188]	Ομαδοποιημένη Αναζήτηση CS	2016
$disc dyn, due pos \sum(wait + hand)$	de Oliveira et al.[50]	Προσαρμοσμένη Ευρίας Γειτονιάς Αναζήτησης ALNS	2012
$disc dyn, due pos \sum(wait + hand)$	Lin et al.[170]	Προσομοιωμένη Ανόπτηση	2014
$disc dyn, due pos \sum(wait + hand)$	Lalla-Ruiz et al.[145]	Μεθευρετικός Αλγόριθμος	2016
$disc dyn, due pos \sum(wait + hand)$	Nishi et al.[208]	Μεθευρετικός Αλγόριθμος	2020
$disc dyn, due pos \sum(wait + hand)$	Lin et al.[162]	Ευρετικός Αλγόριθμος	2014
$disc, draft dyn pos \sum(wait + hand)$	Han et al.[99]	Γενετικός Αλγόριθμος	2006
$disc, draft dyn, due pos \sum(wait)$	Zhou et al.[289]	Γενετικός Αλγόριθμος	2006
$disc, draft dyn, due pos \sum(wait + hand)$	Prencipe και Marinelli[222]	Αλγόριθμος Αποικίας Μελισσών	2021
$disc cycl fix \sum(wait + res + misc)$	Imai et al.[120]	Λαγκρανζιανή συνάρτηση	2014
$disc dyn, due QCAP \sum(hand) + \sum(res)$	Ursavas[256]	Διαβάδωσης και Τομής (B&C)	2014
$disc dyn QCAP \sum(res + pos)$	Giallombardo et al.[77]	Περιορισμένης Αναζήτησης	2010
$disc dyn QCAP \sum(res + pos)$	Lalla-Ruiz et al.[146]	Γενετικός Αλγόριθμος	2014
$disc dyn pos, QCAP \sum(wait + hand)$	Imai et al.[121]	Γενετικός Αλγόριθμος	2008
$disc dyn QCAP \sum(wait + hand + tard)$	Liang et al.[163]	Υβριδικός Γενετικός Αλγόριθμος	2008
$disc dyn QCAP \sum(wait + hand + tard)$	Liang et al.[164]	Υβριδικός Γενετικός Αλγόριθμος	2012
$disc dyn, due QCAP \sum(res + pos)$	Giallombardo et al.[78]	Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός	2008
$disc dyn, due QCAP \sum(wait + pos)$	Vacca et al.[257]	Διαβάδωσης και Αντίκτου (B&P)	2013
$disc, draft dyn fix \sum(wait + hand)$	Xu et al.[275]	Ευρετικός Αλγόριθμος	2012
$disc, draft dyn fix \sum(wait + hand)$	Xu et al.[276]	Ευρετικός Αλγόριθμος	2012
$disc, draft stoch pos, stoch \sum(wait)$	Guldogan et al.[97]	Αλγόριθμος Τεχνητής Αποικίας Μελισσών (ABC)	2012
$disc, draft stoch QCAP, stoch \sum(wait + hand + tard)$	Han et al.[100]	Γενετικός Αλγόριθμος	2010
$disc, draft due, stoch QCAP, stoch \sum(wait)$	Zhou και Kang [290]	Γενετικός Αλγόριθμος	2008
$cont stat fix max(compl)$	Lin et al.[170]	Ευρετικός Αλγόριθμος	1998
$cont stat fix \sum(compl)$	Guan al.[93]	Ευρετικός Αλγόριθμος	2001
$cont stat QCAP max(compl)$	Blazewicz et al.[15]	Ευρετικός Αλγόριθμος	2011
$cont stat QCAP \sum(wait + speed + tard + pos)$	Park και Kim[214]	Λαγκρανζιανή συνάρτηση	2003
$cont stat stoch misc$	Guan και Yang[93]	Ευρετικός Αλγόριθμος	2010
$cont dyn fix \sum(wait + hand)$	Guan και Cheung[95]	Ευρετικός Αλγόριθμος	2004
$cont dyn fix \sum(wait + hand)$	Guanxai Yang[94]	Άπληστη Τυχατοποιημένη Προσαρμοστική Αναζήτηση (GRASP)	2010
$cont dyn fix \sum(wait + pos, misc)$	Zhen και Chang[286]	Ευρετικός Αλγόριθμος	2012
$cont dyn fix \sum(wait + pos + rej)$	Wang και Lim[269]	Μεθευρετικός Αλγόριθμος	2007
$cont dyn fix \sum(tard + pos)$	Moon[202]	Ευρετικός Αλγόριθμος	2011
$cont dyn fix \sum(tard + pos)$	Briano et al.[20]	Γραμμικός Προγραμματισμός	2005
$cont dyn fix \sum(tard + pos)$	Kim και Moon[137]	Προσομοιωμένη Ανόπτηση	2003
$cont dyn fix tard, misc$	Du et al.[57]	Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός	2011
$cont dyn fix max(res)$	Lim[167]	Ευρετικός Αλγόριθμος	1998
$cont, draft dyn fix max(res)$	Lim[168]	Ευρετικός Αλγόριθμος	1999
$cont, draft dyn fix max(res)$	Tong et al.[251]	Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Αποικίας Μυρμηγκιών	1999
$cont, draft dyn fix max(res)$	Goh και Lim[82]	Περιορισμένη Αναζήτηση (Tabu Search)	2000

Πίνακας 2.5: Κατηγορίες και μέθοδοι των BAP προβλημάτων (Συνέχεια)

Περιγραφή	Άρθρο	Μέθοδος	Έτος
$cont, draft dyn pos  \sum wait + hand$	Chang et al.[26]	Ευρετικός Αλγόριθμος	2008
$cont dyn pos  \sum wait + hand$	Imai et al.[124]	Γενετικός Αλγόριθμος	2005
$cont dyn pos  \sum wait + hand$	Ganji et al.[72]	Γενετικός Αλγόριθμος	2010
$cont dyn QCAP  \sum res$	Meisel και Bierwirth[193]	Ευρετικός Αλγόριθμος	2006
$cont dyn QCAP  \sum speed + tard + res$	Meisel και Bierwirth[194]	Μεθευρετικός Αλγόριθμος	2009
$cont dyn QCAP  \sum speed + tard + res$	Meisel και Bierwirth[195]	Ευρετικός Αλγόριθμος	2013
$cont dyn QCAP  \sum wait$	Salido et al.[235]	Άπληστη Τυχαιοποιημένη Προσαρμοστική Αναζήτηση (GRASP)	2012
$cont dyn QCAP  \sum wait, \sum tard$	Salido et al.[234]	Άπληστη Τυχαιοποιημένη Προσαρμοστική Αναζήτηση (GRASP)	2011
$cont dyn QCAP  \sum wait + hand$	Yang et al.[279]	Εξελικτικός Αλγόριθμος	2012
$cont dyn QCAP  \sum wait + tard, \sum pos, \sum res$	Chang et al.[27]	Γενετικός Αλγόριθμος	2010
$cont dyn QCAP  \sum wait + tard, \sum pos, \sum res$	He et al.[104]	Γενετικός Αλγόριθμος	2009
$cont dyn QCAP  \sum pos + tard + res$	Zeng et al.[281]	Περιορισμένη Αναζήτηση	2011
$cont dyn QCAP  \sum pos + tard + res$	Zeng et al.[282]	Περιορισμένη Αναζήτηση	2011
$cont dyn QCAP  \sum pos + wait + tard$	Hu et al.[114]	Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός	2014
$cont dyn QCAP  \sum pos + tard + res$	Zeng et al.[282]	Περιορισμένη Αναζήτηση	2011
$cont dyn QCAP, QCSP max(tard)$	Liu et al.[171]	Ευρετικός Αλγόριθμος	2006
$cont dyn QCAP  \sum pos + tard + res$	Meier και Schumann[192]	Γενετικός Αλγόριθμος	2007
$cont dyn QCAP  \sum pos + wait + tard$	Rodriguez-Molins et al.[227]	Άπληστη Τυχαιοποιημένη Προσαρμοστική Αναζήτηση (GRASP)	2014
$cont dyn, due QCAP max(res)$	Hendriks et al.[108]	Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός	2008
$cont dyn, due QCAP  \sum hand + res$	Legato et al.[156]	Ευρετικός Αλγόριθμος	2008
$cont dyn, due QCAP  \sum hand + pos + res$	Raa et al.[223]	Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός	2011
$cont cycl fix  \sum pos$	Hendriks et al.[110]	Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός	2013
$cont cycl QCAP max(res)$	Hendriks et al.[109]	Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός	2010
$cont cycl, due QCAP  \sum speed + tard + pos$	Zhen et al.[287]	Ευρετικός Αλγόριθμος	2011
$cont stoch stoch  \sum wait + pos + misc$	Zhen et al.[288]	Μεθευρετικός Αλγόριθμος	2011
$cont, draft dyn pos, QCAP  \sum speed + tard + res$	Elwany και Abouelseoud[60]	Ευρετικός Αλγόριθμος	2013
$hybr dyn fix  \sum (wait + pos)$	Dai et al.[48]	Προσομοιωμένη Ανόπτηση	2008
$hybr dyn pos  \sum (wait + hand)$	Imai et al.[122]	Γενετικός Αλγόριθμος	2007
$hybr dyn pos  \sum (wait + hand)$	Imai et al.[123]	Γενετικός Αλγόριθμος	2013
$hybr dyn pos  \sum (wait + hand + tard)$	Mauri et al.[191]	Μιμητικός Αλγόριθμος	2011
$hybr dyn pos  \sum (misc)$	Lee et al.[151]	Περιορισμένη Αναζήτηση	2012
$hybr dyn QCAP  \sum (pos + wait + tard)$	Turkogullari et al.[253]	Διακλάδωσης και Τομής	2014
$hybr cycl QCAP  \sum (misc + res)$	Hendriks et al.[107]	Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός	2012
$hybr, draft dyn pos  \sum (wait + hand)$	Nishimura et al.[209]	Γενετικός Αλγόριθμος	2001
$hybr, draft dyn pos compl \sum (wait + pos)$	Cheong et al.[32]	Εξελικτικός Αλγόριθμος	2007
$hybr, draft dyn pos  \sum (wait + hand)$	Robenek et al.[225]	Διακλάδωσης και Αντίτιμου	2014
$hybr, draft dyn pos  \sum (wait + hand)$	Umag et al.[254]	Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός	2013
$hybr, draft dyn pos  \sum (wait + hand), \sum (tard)$	Cheong και Tan.[33]	Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Αποκίας Μυρμηγκιών	2008
$hybr, draft dyn pos max(compl), \sum (wait + order)$	Cheong et al.[34]	Εξελικτικός Αλγόριθμος	2010

Σχήμα 2.2: Απεικόνιση των τριών διαφορετικών τύπων ελλιμενισμού των πλοίων (Rodrigues και Agra[226])





## Βιβλιογραφία

### Διακριτή (disc) προσέγγιση του BAP

Οι Safaei et al.[232] προσέγγισαν το BAP σε συνδυασμό με το πρόβλημα κατανομής αποθηκευτικού χώρου (Space Storage Allocation Problem - SSAP) με στόχο τον ελλιμενισμό των πλοίων σε σχέση με τη διαχείριση του αποθηκευτικού χώρου των εμπορευματοκιβωτίων στους τερματικούς σταθμούς. Για την επίλυση των δύο προβλημάτων χρησιμοποιήθηκε μία προσέγγιση δύο επιπέδων (Two-level approach), η οποία επιλύεται με την μέθοδο του μικτού αθέρατου προγραμματισμού. Οι Imai et al.[117] πρότειναν μία στατική παραλλαγή για το δυναμικό πρόβλημα ελλιμενισμού των πλοίων στους λιμένες. Ειδικότερα στην εργασία τους συσχέτισαν το κόστος ελλιμενισμού των πλοίων με τους χρόνους αναμονής και εξυπηρέτησης τους στους τερματικούς σταθμούς. Για την επίλυση του προβλήματος εφάρμοσαν την Λαγκρανζιανή συνάρτηση (Lagrangian relaxation). Για το προαναφερθέν πρόβλημα οι Hansen και Oguz[102] ασχολήθηκαν και παρουσίασαν μία εναλλακτική μέθοδο μέσω του Μικτού Αθέρατου Προγραμματισμού. Για τη δυναμική και στατική προσέγγιση του BAP, οι Imai et al.[116] χρησιμοποίησαν την Ουγγρική Μέθοδο (Hungarian method), ώστε να συνδυάσουν την σειρά άφιξης των πλοίων με την εξυπηρέτηση τους στους τερματικούς σταθμούς. Οι Emde et al.[61] αντιμετωπίζουν το BAP ως ένα σημαντικό πρόβλημα απόφασης για την αποτελεσματική διαχείριση των εμπορευματοκιβωτίων στους λιμένες. Λαμβάνοντας υπόψη την προαναφερθείσα κατάσταση, ενσωματώνουν στο προτεινόμενο μοντέλο τους εσωτερικά κινητά κρηπιδώματα (Mobile Quay Walls - MQWs) στις αποβάθρες των τερματικών σταθμών. Τα κινητά κρηπιδώματα MQWs αποτελούν πλωτές πλατφόρμες με παραπάνω από έναν ενσωματωμένους γερανούς, τα οποία συμβάλλουν στην ομαλή αγκυροβόληση και άνετη εξυπηρέτηση του πλοίου. Για την αντιμετώπιση και παροχή κατάλληλων λύσεων του συγκεκριμένου προβλήματος αναπτύχθηκε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης Διακλάδωσης και Οριοθέτησης (Branch & Bound). Στην εργασία των Imai et al.[118] εφαρμόζεται ένας γενετικός αλγόριθμος για την απόρριψη της εξυπηρέτησης των πλοίων, τα οποία υπερβαίνουν το μέγιστο επιτρεπτό χρονικό όριο αναμονής στους τερματικούς σταθμούς. Επιπρόσθετα, οι Lee et al.[152] και Song et al.[241] συνδυάζουν το BAP με το πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού των γερανών φόρτωσης/εκφόρτωσης (Quay Crane Scheduling Problem - QCSP) των εμπορευματοκιβωτίων στους λιμένες. Και στις δύο εργασίες εφαρμόζονται γενετικοί αλγόριθμοι για την επίτευξη αρχικώς ενός εφικτού πλάνου ελλιμενισμού των πλοίων και στη συνέχεια η ανάθεση τους στους κατάλληλους γερανούς φόρτωσης/εκφόρτωσης.

Λαμβάνοντας υπόψη την δυναμική προσέγγιση του διακριτού προβλήματος για ελ-

λιμενισμό των πλοίων παρατηρείται ότι, καταλαμβάνει το ευρύτερο μέρος της βιβλιογραφίας, καθώς περιλαμβάνεται σε αυτή μεγάλη ποικιλία ως προς τις παραλλαγές και τους αλγόριθμους βελτιστοποίησης. Ειδικότερα, με την ελαχιστοποίηση του χρόνου αναμονής και εξυπηρέτησης των πλοίων στους τερματικούς σταθμούς ασχολούνται οι εργασίες των Imai et al.[117], Hansen και Oguz[102], Monaco και Sammarra[200], Imai et al.[118], Theofanis et al.[248], Arango et al.[6], Golias et al.[83, 84, 85, 86], Saharidis et al.[233], Ting et al.[249], Lin και Ting [170], Buhrkal et al.[23] και Lalla-Ruiz et al.[144]. Οι Silva et al.[240] ανέπτυξαν την προτεινόμενη μοντελοποίηση τους λαμβάνοντας υπόψη τόσο τον χρόνο εξυπηρέτησης όσο και το περιεχόμενο των φορτίων των πλοίων κατά τον ελλιμενισμό τους. Γενετικό αλγόριθμο εφαρμόζουν οι Golias et al.[87] για το μαθηματικό μοντέλο τους, στο οποίο εστιάζουν στην αντιστοιχία μεταξύ της ταχύτητας πλεύσης και της κατανάλωσης καυσίμου από τα πλοία κατά την άφιξη και την παραμονή τους στους λιμένες. Οι Hansen et al.[103] αναπτύσσουν τον αλγόριθμο Μεταβλητής Γειτονιάς Αναζήτησης (Variable Neighbourhood Search - VNS) για να ελαχιστοποιήσουν τα κόστη ελλιμενισμού από την ταχύτητα εξυπηρέτησης των πλοίων στους τερματικούς σταθμούς. Δύο μοντελοποιήσεις, οι οποίες εστιάζουν στον χρόνο αναχώρησης των πλοίων για την αύξηση της ταχύτητας εξυπηρέτησης των τερματικών σταθμών, προτείνονται από τους Golias et al.[88] και Imai et al.[119]. Στα μαθηματικά μοντέλα των Golias[89, 90] και Karafa et al.[131] οι χρόνοι άφιξης και εξυπηρέτησης των πλοίων ορίζονται ως στοχαστικές μεταβλητές.

Οι Cordeau et al.[46] πρόσθεσαν εκτός από τους χρόνους εξυπηρέτησης και τους χρόνους άφιξης/αναχώρησης των πλοίων στο μαθηματικό μοντέλο τους, το οποίο προσομοιώθηκε ως πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με πολλαπλές αποθήκες και χρονικά παράθυρα (Multi-Depot VRP with Time Windows). Για την παραγωγή εφικτών λύσεων αναπτύχθηκε ένα σύνολο παραδειγμάτων (ερευνητικών πειραμάτων), στα οποία εφαρμόστηκε με επιτυχία ο αλγόριθμος Περιορισμένης Αναζήτησης. Για το προαναφερθέν προτεινόμενο σύνολο παραδειγμάτων από τους Cordeau et al.[46], οι Mauri et al.[189] υλοποίησαν ένα υβριδικό γενετικό αλγόριθμο, ο οποίος ξεπέρασε σε αποτελεσματικότητα αυτόν της Περιορισμένης Αναζήτησης. Για τον αποτελεσματικότερο συντονισμό των τερματικών σταθμών, οι Lin και Pang[170] προτείνουν ένα μοντέλο μικτού ακέραίου γραμμικού προγραμματισμού, με το οποίο επιτυγχάνουν τη μείωση του συνολικού κόστους λειτουργίας των λιμένων σε διαφορετικού τύπου σενάρια ελλιμενισμού των πλοίων. Βασιζόμενοι στο μοντέλο των Buhrkal et al.[23] για το δυναμικό BAP πρόβλημα, οι Lalla-Ruiz et al.[144] υλοποίησαν τον Υβριδικό Αλγόριθμο Περιορισμένης Αναζήτησης (Hybrid Tabu Search), ο οποίος εφαρμόστηκε στα παραδείγματα των Cordeau et al.[46] επιτυγχάνοντας ποιοτικότερα αποτελέσματα από τον αντίστοιχο αλγόριθμο

της Περιορισμένης Αναζήτησης. Επιπρόσθετα, οι Lalla-Ruiz et al.[144] σε συνέχεια της εργασίας τους, παρουσίασαν ένα νέο σύνολο παραδειγμάτων, ώστε να αποδείξουν περαιτέρω την ευρωστία της προτεινόμενης μεθοδολογίας τους. Λαμβάνοντας υπόψη το συγκεκριμένο σύνολο παραδειγμάτων υλοποιήθηκαν καινοτόμοι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης για την αποτελεσματική επίλυση του προβλήματος BAP, οι οποίοι παρουσιάζονται στις εργασίες των de Oliveira et al.[50], Mauri et al.[188], Lin et al.[170, 162], Lalla-Ruiz et al.[145] και Nishi et al.[208]. Οι Han et al.[99], Zhou et al.[289], Prencipe και Marinelli[222] εστίασαν στο διακριτό BAP με έμφαση στους περιορισμούς ανάλογα με το βάθος των τερματικών σταθμών και τη δυνατότητα βυθίσματος των πλοίων αναπτύσσοντας κατάλληλους γενετικούς αλγόριθμους για την επίλυση τους. Στο διακριτό πρόβλημα BAP με αδυναμία εξυπηρέτησης των πλοίων από τους τερματικούς σταθμούς οι Wang και Lim[269] προτείνουν ένα μεθευρετικό αλγόριθμο για την ελαχιστοποίηση των ποινών από τα μη ελλιμενισμένα πλοία παράλληλα με εκείνα, τα οποία εξυπηρετήθηκαν πλήρως.

Οι Imai et al.[120] στη μοντελοποίηση τους θεωρούν ότι, στους τερματικούς σταθμούς των λιμένων δημιουργείται ένα στρατηγικό πλάνο αποφάσεων σχετικά με την αποδοχή ή την απόρριψη της εξυπηρέτησης του κάθε πλοίου. Για την ομαλή διαχείριση ενός πιθανά διευρυμένου μεγέθους εισερχόμενου στόλου για ελλιμενισμό, οι Imai et al.[120] χρησιμοποιούν την Λαγκρανζιανή Συνάρτηση με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους εξυπηρέτησης, του χρόνου αναμονής και τις κυρώσεις των πλοίων, τα οποία ανεπιτυχώς ελλιμενίστηκαν εξαιτίας την ανεπαρκούς διαθεσίμότητας των τερματικών σταθμών. Ο Ursavas[256] στην εργασία του εισάγει ένα σύστημα λήψης αποφάσεων (Decision Support System - DSS) συνδυάζοντας διαφορετικούς τύπους γερανών φόρτωσης/εκφόρτωσης (Quay Crane Assignment Problem - QCAP) με το διακριτό πρόβλημα BAP. Ειδικότερα, τρία διαφορετικά μοντέλα γερανών επιλέγονται, ώστε να πραγματοποιήσουν τις απαιτούμενες ενέργειες μεταξύ των επιτρεπτών περιοχών στους τερματικούς σταθμούς. Για την επιτυχή λειτουργία του προτεινόμενου DSS συστήματος υλοποιείται ο αλγόριθμος Διακλάδωσης και Τομής (Branch&Cut - B&C). Επιπροσθέτως με τους γερανούς φόρτωσης/εκφόρτωσης, οι Imai et al.[121], Liang et al.[163] και Giallombardo et al.[78] παρουσιάζουν διαφορετικές προσεγγίσεις για το διακριτό πρόβλημα BAP. Στην εργασία των Imai et al.[121] υλοποιείται ένας Γενετικός Αλγόριθμος για την ανάθεση συγκεκριμένου αριθμού γερανών για κάθε πλοίο. Οι Liang et al.[163] υποστηρίζουν στο μοντέλο τους ότι ο καθορισμός των γερανών στους τερματικούς σταθμούς συνδέεται με τους χρόνους άφιξης των πλοίων σε αυτούς, το οποίο επιτυγχάνουν με την εφαρμογή ενός Υβριδικού Γενετικού Αλγορίθμου. Σύμφωνα με τους Giallombardo et al.[78], η προτεινόμενη μοντελοποίηση του Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού στο-

χεύει στην ελαχιστοποίηση του κόστους εξυπηρέτησης των πλοίων στους τερματικούς σταθμούς διαμέσου της μέγιστης λειτουργίας των γερανών. Οι Liang et al.[164] προτείνουν την μείωση κόστους μεταφοράς των εμπορευματοκιβωτίων με χρήση κατάλληλων γερανών μετακίνησης από πλοίο σε πλοίο, λαμβάνοντας υπόψην τόσο τον χρόνο εξυπηρέτησης για τον ελλιμενισμό, όσο και τον αριθμό των γερανών. Με την υλοποίηση ενός Γενετικού Αλγορίθμου επιταχύνεται η άμεση εξυπηρέτηση των πλοίων στους λιμένες. Οι Giallombardo et al.[77], Vacca et al.[257] και Lalla-Ruiz et al.[146] επιλύουν το διακριτό BAP σε συνδυασμό με το πρόβλημα ανάθεσης γερανών φόρτωσης/εκφόρτωσης (Quay Crane Scheduling Problem - QCAP) υλοποιώντας τον αλγόριθμο Περιορισμένης Αναζήτησης, την μέθοδο Διακλάδωσης και Αντίτιμου (Branch&Price - B&P) και έναν Γενετικό Αλγόριθμο αντίστοιχα. Οι Xu et al[275, 276] περιλαμβάνουν και υδάτινους περιορισμούς (π.χ. στάθμη παλίρροιας) στο διακριτό μοντέλο τους για το BAP πρόβλημα. Ειδικότερα, τα εισερχόμενα πλοία στους λιμένες θα εξυπηρετούνται σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους από τους τερματικούς σταθμούς, στις οποίες η στάθμη της θάλασσας θα επιτρέπει τον ασφαλή ελλιμενισμό τους. Το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο βασίζεται στο πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού παράλληλων μηχανών (Parallel Machine Scheduling Problem - PMSP), το οποίο επιλύεται με εφαρμογή Ευρετικών Αλγορίθμων. Στοχαστικές προσεγγίσεις για το διακριτό πρόβλημα BAP παρουσιάζονται στα μαθηματικά μοντέλα των Guldogan et al.[97], Han et al.[100], Zhou και Kang[290], στα οποία προτείνονται ο αλγόριθμος Τεχνητής Αποικίας Μελισσών (Artificial Bee Colony - ABC) και δύο Γενετικοί Αλγόριθμοι για την επίλυση τους.

### **Συνεχής (cont) προσέγγιση του BAP**

Οι Lin et al.[170] μοντελοποίησαν το συνεχές και στατικό BAP ως πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού και πιο συγκεκριμένα ως πρόβλημα πολλαπλών εργασιών ανάθεσης σε έναν επεξεργαστή (Multiple-Job-On-One-Processor). Για την εφικτή επίλυση του χρησιμοποιήθηκε ένας Ευρετικός Αλγόριθμος με στόχο την ελαχιστοποίηση του χρόνου εξυπηρέτησης του κάθε πλοίου. Αντίστοιχα για το ίδιο πρόβλημα και με την υλοποίηση μιας ευρετικής μεθόδου, οι Guan et al.[93] επιτυγχάνουν τη συνολική ελαχιστοποίηση του χρόνου εξυπηρέτησης από το σύνολο των ελλιμενισμένων πλοίων. Οι Park και Kim[213] συνδυάζουν τον χρόνο εξυπηρέτησης των πλοίων με τις θέσεις ελλιμενισμού τους στους τερματικούς σταθμούς και τον καθορισμό του συνόλου των γερανών για την φόρτωση/εκφόρτωση τους. Ειδικότερα, στην προτεινόμενη μοντελοποίηση καθορίζεται τόσο ο αριθμός όσο και ο χρόνος λειτουργίας του κάθε γερανού με στόχο την ελαχιστοποίηση του χρόνου εξυπηρέτησης των πλοίων. Οι Guan και Yang[93] τονίζουν την αναγκαιότητα ύπαρξης ενός κέντρου επιθεώρησης για τη συνεχή επίβλεψη των δραστη-

ριοτήτων, οι οποίες διενεργούνται για την ασφαλή μεταφορά των εμπορευματοκιβωτίων μεταξύ των πλοίων. Συνεπώς, αφού το κέντρο επιθεώρησης αναλαμβάνει τον έλεγχο καταστάσεων ζωτικής σημασίας στους λιμένες, θεωρείται αναμενόμενη η ύπαρξη σημαντικών εμποδίων κατά την διαδικασία του ελλιμενισμού των πλοίων και ειδικότερα, εάν η εξυπηρέτηση τους πραγματοποιείται ταυτόχρονα στους τερματικούς σταθμούς. Στην προτεινόμενη μαθηματική μοντελοποίηση των Guan και Yang[93], ο χρόνος εξυπηρέτησης των πλοίων εξετάζεται ως στοχαστική μεταβλητή, καθώς εξαρτάται από το ποσοστό λειτουργίας (ή ρυθμό λειτουργίας) των γερανών και του κέντρου επιθεώρησης. Αναφορικά με την παραλλαγή του συνεχούς και δυναμικού προβλήματος BAP με προκαθορισμένους τους χρόνους άφιξης των πλοίων, οι Guan και Cheung[95] και οι Guan[94] και Yang υλοποίησαν ένα Ευρετικό Αλγόριθμο και τη διαδικασία της Άπληστης Τυχαιοποιημένης Προσαρμοστικής Αναζήτησης (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure - (GRASP)) αντίστοιχα, για την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους ελλιμενισμού των πλοίων. Οι Zhen και Chang[286] στην προτεινόμενη μοντελοποίηση τους εξετάζουν το BAP ως προς την ελαχιστοποίηση του χρόνου αναμονής και παραμονής των πλοίων στους λιμένες με στόχο την δημιουργία ενός εύρωστου πλάνου διαχείρισης ελλιμενισμού (Robust Berth Allocation framework). Η επίτευξη ενός πλαισίου ευρωστίας για την δρομολόγηση των πλοίων επιτυγχάνεται με την υλοποίηση Ευρετικών Αλγορίθμων. Οι εργασίες των Moon[202], Briano et al.[20], Kim και Moon[137] ασχολούνται με το χρόνο άφιξης και παραμονής των πλοίων στους τερματικούς σταθμούς, στις οποίες εφαρμόζονται ο Ευρετικός Αλγόριθμος, ο Γραμμικός Προγραμματισμός και η Προσομοιωμένη Ανόπτηση αντίστοιχα, ως μέθοδοι επίλυσης. Επιπρόσθετα, οι Du et al.[57] ενσωματώνουν στο μαθηματικό μοντέλο τους την κατανάλωση καυσίμων από τα πλοία κατά την αναμονή τους στους λιμένες, το οποίο επιλύουν με την εφαρμογή του Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού. Στο προτεινόμενο BAP μοντέλο του Lim[167], ο ελλιμενισμός των πλοίων καθορίζεται σύμφωνα με τις διαστάσεις των τερματικών σταθμών με στόχο την εύρεση της κατάλληλης θέσης στον λιμένα και την ελαχιστοποίηση του χρόνου εξυπηρέτησης τους. Επιπροσθέτως, στην προαναφερθέντα μοντελοποίηση για το συνεχές πρόβλημα BAP βασίζονται οι εργασίες των Lim[168], Tong et al.[251], Goh και Lim[82]. Η προσέγγιση του συνεχούς προβλήματος BAP, στην οποία οι χρόνοι εξυπηρέτησης των πλοίων εξαρτώνται με τις θέσεις ελλιμενισμού τους, εξετάζεται από τους Imai et al.[124] και Chang et al.[26]. Ειδικότερα, οι Imai et al.[124] ελαχιστοποιούν τον συνολικό χρόνο εξυπηρέτησης των πλοίων αναζητώντας την βέλτιστη περιοχή κατά μήκος των τερματικών σταθμών, ενώ οι Chang et al.[26] λαμβάνουν υπόψη και τις διαστάσεις τόσο των πλοίων, όσο και των τερματικών σταθμών για την εύρεση της καταλληλότερης θέσης ελλιμενισμού τους. Οι Ganji et al.[72] υποστηρίζουν στο συνεχές

BAP μαθηματικό μοντέλο τους ότι, η κατάλληλη κατανομή των θέσεων ελλιμενισμού στους τερματικούς σταθμούς για τα εισερχόμενα πλοία συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση του χρόνου εξυπηρέτησης τους από την άφιξη μέχρι την αναχώρησή τους, η οποία επιτυγχάνεται με την υλοποίηση ενός Γενετικού Αλγορίθμου.

Το συνεχές πρόβλημα BAP σε συνδυασμό με την ανάθεση γερανών φόρτωσης και εκφόρτωσης (Quay Crane Assignment Problem - QCAS) προτάθηκε από τους Park και Kim[214]. Στην προτεινόμενη μοντελοποίηση η αντιμετώπιση του προβλήματος BAP πραγματοποιείται σε δύο φάσεις. Σε πρώτο επίπεδο υπολογίζονται οι χρόνοι και οι θέσεις εξυπηρέτησης των πλοίων, ενώ σε δεύτερο επίπεδο καθορίζεται ο αριθμός των γερανών, οι οποίοι αντιστοιχούν για κάθε πλοίο. Για την επίλυση των δύο φάσεων, αρχικώς εφαρμόζεται η Λαγκρανζιανή Συνάρτηση και έπεται στη συνέχεια η μέθοδος του Δυναμικού Προγραμματισμού. Οι Blazewicz et al.[15] εξετάζουν το στατικό πρόβλημα BAP με την ανάθεση κρηπιδωτών γερανών στους τερματικούς σταθμούς των λιμένων. Με την υλοποίηση κατάλληλων Ευρετικών Αλγορίθμων επιτυγχάνεται η επιθυμητή ανάθεση των γερανών για την εξυπηρέτηση του κάθε πλοίου κατά τον ελλιμενισμό του. Αναφορικά με την αποτελεσματικότερη χρήση των γερανών, οι Meisel και Bierwirth[193] εστιάζουν στην δημιουργία ενός κανόνα προτεραιότητας για τον καθορισμό τόσο του χρόνου και της θέσης ελλιμενισμού των πλοίων όσο και της δημιουργίας ενός σχεδίου ανάθεσης των γερανών για κάθε πλοίο. Σε μεταγενέστερες εργασίες των Meisel και Bierwirth[194, 195] υποστηρίζεται ότι, η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους εξυπηρέτησης των πλοίων επιτυγχάνεται με την αποφυγή της μείωσης της παραγωγικότητας των γερανών, η οποία τις περισσότερες φορές οφείλεται τόσο στην ακατάλληλη θέση του ελλιμενισμού τους, όσο και από την καθυστερημένη άφιξη ή/και αναχώρησή τους από τους τερματικούς σταθμούς. Μια ιδιαίτερη προσέγγιση για το συνεχές BAP παρουσιάζεται από τους Salido et al.[234, 235], καθώς στην προτεινόμενη μοντελοποίηση τους ενσωματώνουν το πρόβλημα στοίβαξης κιβωτίων (Container Stacking Problem - CSP). Οι Yang et al.[279] αντιμετωπίζουν το συνεχές BAP και την ανάθεση γερανών φόρτωσης/εκφόρτωσης (QCAP) ως δύο ξεχωριστά προβλήματα, στα οποία υλοποιούν ένα Εξελικτικό Αλγόριθμο για την ταυτόχρονη επίλυση τους. Αναφορικά με τη διαχείριση των εμπορευμάτων στους τερματικούς σταθμούς από τους γερανούς, οι Chang et al.[27] και He et al.[104] επιτυγχάνουν με την εφαρμογή των Γενετικών Αλγορίθμων την ελαχιστοποίηση της μεταφοράς των εμπορευματοκιβωτίων μεταξύ των περιοχών αποθήκευσης τους και των θέσεων ελλιμενισμού των πλοίων. Από την άφιξη μέχρι την αναχώρησή των πλοίων από τους τερματικούς σταθμούς των λιμένων πραγματοποιούνται μία σειρά από δραστηριότητες για τον επιτυχή ελλιμενισμό τους. Οι Zeng et al.[281, 282] εισάγουν ένα πρότυπο διαχείρισης διαταραχών (Disruption Management Model) με σκοπό την α-

νάκτηση και την ομαλή λειτουργία του πλάνου του ελλιμενισμού των πλοίων από πιθανές ενέργειες, οι οποίες θα προκαλέσουν περαιτέρω προβλήματα στις δραστηριότητες των λιμένων. Στην προτεινόμενη μαθηματική μοντελοποίηση για το συνεχές BAP με τους γερανούς φόρτωσης/εκφόρτωσης των Hu et al.[114] εισάγονται ως επιπλέον περιορισμοί η κατανάλωση καυσίμων και οι εκμπομπές ρύπων από τα πλοία κατά τον ελλιμενισμό τους.

Η ανάθεση και ο χρονοπρογραμματισμός (Quay Crane Assignment and Scheduling Problem - QCAS/QCSP) των γερανών φόρτωσης/εκφόρτωσης συχνά εντάσσεται σε μοντελοποιήσεις για το συνεχές πρόβλημα ελλιμενισμού των πλοίων. Ο συνδυασμός των BAP με τα QCAS/QCSP παρατηρείται στις εργασίες των Liu et al.[171], Meier και Schumann[192] και Rodriguez-Molins et al.[227]. Αναφορικά με τον ελλιμενισμό των πλοίων υπό των περιορισμό των χρονικών παραθύρων, παρατείνονται οι μαθηματικές μοντελοποιήσεις για το συνεχές BAP από τους Hendriks et al.[108], Legato et al.[156] και Raa et al.[223]. Οι μαθηματικές μοντελοποιήσεις για το συνεχές BAP με πολλαπλή(ή κυκλική) εξυπηρέτηση των πλοίων από τους τερματικούς σταθμούς των λιμένων παρουσιάζονται στις εργασίες των Hendriks et al.[109, 110] και Zhen et al.[287]. Στην εργασία των Zhen et al.[287] εξετάζονται οι περιορισμοί του χρόνου άφιξης και της εξυπηρέτησης των πλοίων ως στοχαστικές μεταβλητές, ενώ στην αντίστοιχη των Elwany και Abouelseoud[60] εντάσσονται οι διαστάσεις των πλοίων και τερματικών σταθμών ως περιορισμοί στο προτεινόμενο μοντέλο.

### **Υβριδική (hybr) προσέγγιση του BAP**

Οι Dai[48] μέσω του προτεινόμενου υβριδικού BAP μοντέλου καθορίζουν τις ακριβείς θέσεις κατά την άφιξη των πλοίων στους λιμένες με στόχο την επίτευξη της μέγιστης δυνατής εξυπηρέτησης από τους τερματικούς σταθμούς. Για την επιτυχή διαχείριση των θέσεων ελλιμενισμού στους τερματικούς σταθμούς αναπτύχθηκε ο αλγόριθμος της Προσομοιωμένης Ανόπτης. Οι Imai et al.[122] εξετάζουν το υβριδικό πρόβλημα BAP ως προς την εξυπηρέτηση περισσότερων του ενός φορτηγών πλοίων σε ένα τερματικό σταθμό, εφόσον οι διαστάσεις των πλοίων τηρούν τους απαραίτητους περιορισμούς για τον επιτρεπτό ελλιμενισμό τους. Η πιο πρόσφατη εργασία των Imai et al.[123] εστιάζεται στην αποτελεσματικότερη λειτουργία των τερματικών σταθμών, όταν τα ελλιμενισμένα πλοία βρίσκονται σε αναμονή με σκοπό να εξυπηρετηθούν. Οι Mauri al.[191] υλοποιούν έναν Μιμητικό Αλγόριθμο για τον υβριδικό ελλιμενισμό των πλοίων, με τον οποίο υπολογίζεται ο χρόνος εξυπηρέτησης και η θέση ελλιμενισμού στους τερματικούς σταθμούς. Ο αλγόριθμος Περιορισμένης Αναζήτησης υλοποιείται από τους Lee et al.[151] για την αποτελεσματικότερη αλληλεπίδραση των τερματικών σταθμών με στόχο τον κατάλληλο

καθορισμό των θέσεων ελλιμενισμού των πλοίων και την ασφαλή μεταφορά των εμπορευματοκιβωτίων. Οι Turkogullari et al.[253] μέσα από την εργασία τους επιχειρούν το σχεδιασμό ενός ολοκληρωμένου πλάνου διαχείρισης για τους τερματικούς σταθμούς στους λιμένες. Ειδικότερα, παρουσιάζουν το BAP σε συνδυασμό με το πρόβλημα χρονοπρογραμματισμού των γερανών φόρτωσης/εκφόρτωσης (Quay Crane Scheduling Problem - QCAP), το οποίο επιλύεται αποτελεσματικά με τον αλγόριθμο Διακλάδωσης και Τομής (Branch & Cut - B&C). Το υβριδικό BAP μοντέλο των Hendriks et al.[107] εξετάζει την περίπτωση του κυκλικού ελλιμενισμού των πλοίων, καθώς θα προσέρχονται στους τερματικούς σταθμούς περισσότερες από μία φορές σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα σύμφωνα με τα δρομολόγια τους. Βασικός στόχος του μοντέλου αποτελεί η ισορροπημένη λειτουργία των τερματικών σταθμών σε συνδυασμό με την ελαχιστοποίηση του φόρτου εργασίας των γερανών για τη μεταφορά των εμπορευματοκιβωτίων στους λιμένες. Οι Nishimura et al.[209] και Cheong et al.[32] υλοποιούν έναν Γενετικό και έναν Εξελικτικό Αλγόριθμο αντίστοιχα στις προτεινόμενες μαθηματικές μοντελοποιήσεις τους, στις οποίες ενσωματώνουν τους περιορισμούς του χρόνου αναμονής και εξυπηρέτησης, αλλά και τις διαστάσεις των πλοίων κατά τον ελλιμενισμό τους. Επιπροσθέτως σε μεταγενέστερες εργασίες, οι Cheong et al.[33, 34] εντάσσουν πρόσθετους περιορισμούς στις υβριδικές BAP μαθηματικές μοντελοποιήσεις τους, στις οποίες παρέχουν εφικτές λύσεις υλοποιώντας Εξελικτικούς Αλγορίθμους σε κάθε περίπτωση. Η εργασία των Robenek et al.[225] εστιάζει στα χαρακτηριστικά των λιμανιών, όπως τις διαστάσεις των τερματικών σταθμών και την διαθεσιμότητα των γερανών. Στόχος του προτεινόμενου μοντέλου θεωρείται η ελαχιστοποίηση του χρόνου εξυπηρέτησης των πλοίων κατά τον ελλιμενισμό τους, ο οποίος επιτυγχάνεται με την υλοποίηση του αλγορίθμου Διακλάδωσης και Αντίτιμου. Οι Umang et al.[254] σημειώνουν στο υβριδικό BAP μοντέλο την ιδιαιτερότητα των περιορισμών ως προς τις κατηγορίες των πλοίων και το περιεχόμενο των εμπορευμάτων. Ειδικότερα, οι περιορισμοί, όπως οι ποσότητες και το είδος των εμπορευμάτων, η χωρητικότητα των πλοίων και οι διαστάσεις των τερματικών σταθμών, λαμβάνονται υπόψη για την ελαχιστοποίηση των συνολικού χρόνου εξυπηρέτησης των πλοίων.



## Κεφάλαιο 3

# Μοντελοποιήσεις

### 3.1 Εισαγωγή

Η παρούσα διδακτορική διατριβή επικεντρώνεται στην επίλυση δύο κυρίως προβλημάτων, τα οποία αφορούν τη βέλτιστη οργάνωση και διαχείριση της ναυτιλιακής εφοδιαστικής αλυσίδας. Το πρώτο εστιάζεται στις θαλάσσιες μεταφορές και ειδικότερα στη δρομολόγηση των πλοίων βιομηχανικού και ελεύθερου τύπου φορτίων (Industrial and Tramp Ship Routing and Scheduling Problem - ITSRSRSP). Βασικός στόχος του ITSRSRSP είναι η άμεση και έγκυρη μεταφορά των εμπορευματοκιβωτίων από τους λιμένες παραλαβής στους αντίστοιχους παράδοσης. Το δεύτερο πρόβλημα βελτιστοποίησης αφορά την λειτουργικότητα των τερματικών σταθμών στους λιμένες και πιο συγκεκριμένα τον ελλιμενισμό των εισερχόμενων πλοίων σε αυτούς (Berth Allocation Problem - BAP). Η αποδοτικότερη προσέλευση των πλοίων σε συνάρτηση με τον ελάχιστο χρόνο παραμονής τους σε κάποιον από τους τερματικούς σταθμούς αποτελεί τον σημαντικότερο στόχο για το BAP. Στα υποκεφάλαια, τα οποία ακολουθούν, παρουσιάζονται ενδεικτικά οι προτεινόμενες μαθηματικές μοντελοποιήσεις, οι οποίες έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία, και επιλέχθηκαν για την αποτελεσματικότερη επίλυση των δύο προαναφερθέντων προβλημάτων. Πιο συγκεκριμένα, η υποενότητα 3.2 αναφέρεται στα προβλήματα δρομολόγησης των πλοίων και η υποενότητα 3.3 αφορά τα προβλήματα ελλιμενισμού των πλοίων. Για κάθε μαθηματική μοντελοποίηση παρουσιάζονται τόσο οι ορισμένες μεταβλητές, όσο και οι απαραίτητες εξισώσεις των μοντέλων με την απαραίτητη επεξήγηση τους. Τονίζεται ότι, ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στις υποενότητες 3.2.3 και 3.3.2.2, στις οποίες βασίζονται το σύνολο της ερευνητικής και πειραματικής διαδικασίας της συγκεκριμένης διατριβής. Ειδικότερα, για το πρόβλημα δρομολόγησης των πλοίων πραγματοποιείται εκτενής ανάλυση της ιδιαιτερότητας του προβλήματος και περιγραφή των παραμέτρων του στην υποενότητα 3.2.3. Επιπρόσθετα, για το πρόβλημα του ελλιμενισμού των πλο-

ίων προτείνεται στην υποενότητα 3.3.2.2 ένα καινούργιο μαθηματικό μοντέλο για την επίλυση του, το οποίο αποτελεί στοιχείο πρωτοτυπίας της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής.

## 3.2 Μοντελοποιήσεις προβλημάτων δρομολόγησης πλοίων - Shipping

Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζονται οι μαθηματικές μοντελοποιήσεις για τα προβλήματα δρομολόγησης των πλοίων και διαχωρίζονται με βάση το είδος της δρομολόγησης του στόλου και πιο συγκεκριμένα σε τακτικών γραμμών (liner), βιομηχανική (industrial) και ελεύθερη (tramp). Για την κατηγορία της δρομολόγησης τακτικών γραμμών των πλοίων παρουσιάζονται τα μαθηματικά μοντέλα, τα οποία εστιάζουν κυρίως στην δημιουργία ενός δικτύου πλεύσης του στόλου, αλλά και στην ανάθεση των κατάλληλων δρομολογίων ανάλογα με το είδος του πλοίου. Αναφορικά με τις προσεγγίσεις της βιομηχανικής και ελεύθερης δρομολόγησης των πλοίων, η προτεινόμενη μαθηματική μοντελοποίηση στοχεύει στην παραλαβή και διανομή των εμπορευματοκιβωτίων παράλληλα με την ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους των πλοίων.

### 3.2.1 Μοντέλο τακτικής γραμμής σχεδιασμού δικτύου δρομολόγησης πλοίων - Linear network design model (ND)

Ένα δίκτυο δρομολόγησης των πλοίων αποτελεί ζωτικής σημασίας για τις ναυτιλιακές εταιρείες, καθώς διαμέσου αυτού καθορίζονται τα δρομολογία του στόλου των πλοίων και στη συνέχεια η διανομή των εμπορευματοκιβωτίων στα επιλεγμένα λιμάνια. Με τη δημιουργία του δικτύου και την κατάλληλη επιλογή των δρομολογίων επιτυγχάνεται η παράδοση και παραλαβή των εμπορευματοκιβωτίων σύμφωνα με την απαιτούμενη ζήτηση του κάθε λιμένα. Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζεται η μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος του τακτικών γραμμών σχεδιασμού δικτύου δρομολόγησης των πλοίων των Christiansen et al.[43], η οποία αποτελεί μία πιο απλουστευμένη έκδοση του προτεινόμενου μοντέλου των Agarwal και Ergun[2].

Ακολουθούν οι μεταβλητές, οι οποίες χρησιμοποιούνται στην συγκεκριμένη μοντελοποίηση:

- $R$ : Το σύνολο των διαδρομών των πλοίων

- $V$ : Το σύνολο του στόλου των πλοίων
- $D$ : Το σύνολο των ημερών μιας εβδομάδας
- $r$ : Η κάθε διαδρομή από το σύνολο  $R$
- $v$ : Το κάθε πλοίο από το σύνολο  $V$
- $i, j$ : Οι ημέρες από την εβδομάδα  $D$
- $o, d$ : Τα λιμάνια προέλευσης και προορισμού αντίστοιχα
- $p$ : Τα ενδιάμεσα λιμάνια της διαδρομής μεταξύ λιμανιών προέλευσης και προορισμού
- $(o, d, i)$ : Η αποστολή των εμπορευματοκιβωτίων από το λιμάνι προέλευσης  $o$  στο λιμάνι προορισμού  $d$  την ημέρα  $i$ , οποία συμβολίζεται ως  $W$
- $D^{(o,d,i)}$ : Ο ζητούμενος αριθμός εμπορευματοκιβωτίων για την αποστολή  $W$  για κάθε εβδομάδα
- $L_{vr}$ : Οι εβδομαδιαίες αναχωρήσεις των πλοίων  $v$  με καθορισμένα δρομολόγια  $r$
- $K_v$ : Ο αποθηκευτικός χώρος εμπορευματοκιβωτίων του κάθε πλοίου  $v$
- $N_v$ : Ο ανώτατος αριθμός διαθέσιμων πλοίων σε περίπτωση έλλειψης τους
- $\mathcal{N}$ : Το σύνολο των κόμβων του γραφήματος, όπου για κάθε κόμβο ισχύει  $n \in \mathcal{N}$
- $A$ : Ο συνολικός αριθμός των τόξων του γραφήματος, όπου για κάθε τόξο ισχύει  $a \in A$
- $R^{(o,d,i)}$ : Τα έσοδα από την μεταφορά ενός εμπορευματοκιβωτίου την ημέρα  $i$  από το λιμάνι προέλευσης  $o$  στο λιμάνι προορισμού  $d$
- $C_a^C$ : Το κόστος μεταφοράς ενός εμπορευματοκιβωτίου κατά μήκος του τόξου  $a$
- $C_{vr}^V$ : Το εβδομαδιαίο κόστος εξυπηρέτησης της διαδρομής  $r$  από το πλοίο  $v$
- $x_{vr}$ : Μεταβλητή απόφασης που ισούται με άσσο, όταν το πλοίο  $v$  εξυπηρετεί την διαδρομή  $r$ , ή αλλιώς με μηδέν
- $y_a^{(o,d,i)}$ : Ο αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων, τα οποία μεταφέρονται κατά μήκος του τόξου  $a$  σύμφωνα με τη ζητούμενη ποσότητα  $D^{(o,d,i)}$

Η μαθηματική μοντελοποίηση για το σχεδιασμό του γραμμικού δικτύου δρομολόγησης των πλοίων είναι η ακόλουθη:

$$\max \sum_{(o,d,i) \in W} \sum_{j \in D} R^{(o,d,i)} y_{[n(dj),n(o,i)]}^{(o,d,i)} - \sum_{(o,d,i) \in W} \sum_{j \in D} C_a^C y_a^{(o,d,i)} - \sum_{v \in V} \sum_{r \in R} C_{vr}^V x_{vr} \quad (3.1)$$

υπό τους περιορισμούς

$$\sum_{a \in I(n)} y_a^{(o,d,i)} - \sum_{a \in O(n)} y_a^{(o,d,i)} = 0, \quad (o, d, i) \in W, n \in \mathcal{N} \quad (3.2)$$

$$\sum_{(o,d,i) \in W} y_a^{(o,d,i)} - \sum_{v \in V} \sum_{r \in K} K_v x_{vr} \leq 0, \quad a \in A \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in D} y_{[n(dj),n(o,i)]}^{(o,d,i)} \leq D^{(o,d,i)}, \quad (o, d, i) \in W \quad (3.4)$$

$$\sum_{r \in R} L_{vr} x_{vr} \leq N_v, \quad v \in V \quad (3.5)$$

$$x_{vr} \in 0, 1, \quad v \in V, r \in R \quad (3.6)$$

$$y_a^{(o,d,i)} \geq 0, \quad (o, d, i) \in W, a \in A \quad (3.7)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (3.1) εκφράζει τη διαφορά μεταξύ των εσόδων και του κόστους λειτουργίας του δικτύου δρομολόγησης των πλοίων. Για κάθε κόμβο του δικτύου διασφαλίζεται από τον περιορισμό (3.2) ότι, όσα εμπορευματοκιβώτια εισέρχονται σε κάποιο κόμβο τόσα αντίστοιχα εξέρχονται από αυτόν. Η χωρητικότητα του κάθε πλοίου καθορίζεται από τον περιορισμό (3.3). Με τον περιορισμό (3.4) καθορίζεται η απαιτούμενη ποσότητα των εμπορευματοκιβωτίων για τη μερική ή ολική εξυπηρέτηση της ζήτησης των λιμένων. Ο περιορισμός (3.5) εξασφαλίζει τη διαθεσιμότητα των πλοίων, ενώ οι περιορισμοί (3.6) και (3.7) ορίζουν την ακεραιότητα και τη λήψη μη αρνητικών τιμών για τις μεταβλητές απόφασης.

### 3.2.2 Μοντέλο τακτικών γραμμών ανάπτυξης στόλου - Liner fleet deployment model (FD)

Ένα σημαντικό πρόβλημα σχεδιασμού για τις ναυτιλιακές επιχειρήσεις αποτελεί η ανάπτυξη του στόλου των πλοίων τους. Η διαχείριση των δρομολογίων του στόλου επιτυγχάνεται διαμέσου του δικτύου δρομολόγησης των πλοίων. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα οι ναυτιλιακές εταιρείες αναθέτουν στον ιδιόκτητο (fleet owned of ships) και

τον μισθωμένο (chartering ships in) στόλο τους τα δρομολόγια, τα οποία θα ακολουθήσουν για κάποιο καθορισμένο χρονικό διάστημα (planning horizon). Ακολουθεί το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο για το πρόβλημα της γραμμικής ανάπτυξης του στόλου των πλοίων από τους Christiansen et al.[43], όπως αρχικώς προτείνεται από τους Powell και Perakis[221] και στην συνέχεια από τους Gelareh και Meng[74].

Η συγκεκριμένη μοντελοποίηση περιλαμβάνει τις εξής μεταβλητές:

- $V$ : Το σύνολο του στόλου των πλοίων
- $v$ : Το πλοίο  $v$  με  $v \in V$
- $N_v$ : Το σύνολο του διαθέσιμου στόλου από τα ιδιόκτητα πλοία
- $N_v^I$ : Το σύνολο του διαθέσιμου στόλου από τα πλοία προς προσωρινή μίσθωση από την αγορά
- $K_v$ : Η χωρητικότητα του κάθε πλοίου  $v$
- $C_v^I$ : Το κόστος μίσθωσης του πλοίου  $v$  από την αγορά
- $C_v^O$ : Το κόστος ενοικίασης του πλοίου  $v$  από τον διαθέσιμο στόλο
- $C_v^L$ : Το ημερήσιο κόστος μη ναύλωσης του πλοίου  $v$
- $R$ : Το σύνολο των καθορισμένων δρομολογίων των πλοίων
- $r$ : Το δρομολόγιο  $r$  με  $r \in R$
- $D_r$ : Η ζήτηση του κάθε δρομολογίου  $r$
- $F_r$ : Η απαιτούμενη συχνότητα εξυπηρέτησης του δρομολογίου  $r$
- $C_{vr}$ : Το κόστος του δρομολογίου  $r$  του πλοίου  $v$
- $T_{vr}$ : Ο χρόνος του δρομολογίου  $r$  του πλοίου  $v$
- $T^H$ : Η συνολική χρονική διάρκεια των διαδρομών
- $x_{vr}$ : Μεταβλητή απόφασης με τον αριθμό των πλοίων  $v$  για την εξυπηρέτηση του δρομολογίου  $r$
- $n_{vr}$ : Μεταβλητή απόφασης για τον αριθμό των ιδιόκτητων πλοίων  $v$  για την εξυπηρέτηση του δρομολογίου  $r$

- $n_{vr}^I$ : Μεταβλητή απόφασης για τον αριθμό των μισθωμένων πλοίων  $v$  για την εξυπηρέτηση του δρομολογίου  $r$
- $n_v^O$ : Μεταβλητή απόφασης για τον αριθμό των ενοικιαζόμενων πλοίων  $v$  για την εξυπηρέτηση του δρομολογίου  $r$
- $d_v$ : Μεταβλητή απόφασης για τον αριθμό των ημερών μη ναύλωσης του πλοίου  $v$

Ακολουθεί το μαθηματικό μοντέλο για το γραμμικό πρόβλημα ανάπτυξης του στόλου των πλοίων:

$$\min \sum_{v \in V} \sum_{r \in R} (C_{vr} x_{vr} + C_v^I n_{vr}^I) + \sum_{v \in V} (C_v^L d_v - C_v^O n_v^O) \quad (3.8)$$

υπό τους περιορισμούς

$$\sum_{v \in V} K_v x_{vr} \geq D_r, \quad r \in R \quad (3.9)$$

$$\sum_{v \in V} x_{vr} \geq F_r, \quad r \in R \quad (3.10)$$

$$\sum_{r \in R} n_{vr} \leq N_v, \quad v \in V \quad (3.11)$$

$$\sum_{r \in R} n_{vr}^I \leq N_v^I, \quad v \in V \quad (3.12)$$

$$n_v^O \leq N_v - \sum_{r \in R} n_{vr}, \quad v \in V \quad (3.13)$$

$$T_{vr} x_{vr} \leq T^H (n_{vr} + n_{vr}^I), \quad v \in V, r \in R \quad (3.14)$$

$$d_v = T^H N_v + \sum_{r \in R} T^H n_{vr}^I - T^H n_v^O - \sum_{r \in R} T_{vr} x_{vr}, \quad v \in V \quad (3.15)$$

$$x_{vr}, n_{vr}, n_{vr}^I \geq 0, \quad x_{vr}, n_{vr}, n_{vr}^I \in \mathbb{Z}, v \in V, r \in R \quad (3.16)$$

$$n_v^O, d_v \geq 0, \quad n_v^O, d_v \in \mathbb{Z}, v \in V \quad (3.17)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (3.8) αποτελείται από το άθροισμα του κόστους ναύλωσης για τα δρομολόγια των ιδιόκτητων και μισθωμένων πλοίων μαζί το ημερήσιο κόστος μη ναύλωσης τους, μείον τα έσοδα από τα ενοικιαζόμενα πλοία. Ο περιορισμοί (3.9) και (3.10) διασφαλίζουν την εξυπηρέτηση της ζήτησης και τη συχνότητα της επισκεψιμότητας των δρομολογίων από τα πλοία αντίστοιχα. Η διαθεσιμότητα των ιδόκτητων και των μισθωμένων πλοίων για ναύλωση διασφαλίζεται από τους περιορισμούς (3.11) και (3.12). Ο αριθμός των πλοίων προς ενοικίαση ορίζεται από τον περιορισμό (3.13). Ο

περιορισμός (3.14) καθορίζει ότι ο συνολικός χρόνος επισκεψιμότητας του κάθε δρομολογίου επιτυγχάνεται από έναν συγκεκριμένο αριθμό πλοίων. Οι ημέρες μη ναύλωσης του κάθε πλοίου υπολογίζονται από τον περιορισμό (3.15). Τέλος, οι περιορισμοί (3.16) και (3.17) διασφαλίζουν την ακεραιότητα και τη μη λήψη αρνητικών τιμών για τις μεταβλητές απόφασης.

### 3.2.3 Μοντέλο δρομολόγησης πλοίων βιομηχανικού και ελεύθερου φορτίου - Industrial and Tramp ship routing and scheduling model (ITSRSP)

Στην συγκεκριμένη υποενότητα παρουσιάζεται η μαθηματική μοντελοποίηση για το πρόβλημα της δρομολόγησης πλοίων βιομηχανικού και ελεύθερου φορτίου, η οποία αρχικώς προτείνεται από τους Bronmo et al.[21] και στη συνέχεια περιγράφεται από τους Hemmati et al.[105], Christiansen et al.[43] και Homsy et al.[113]. Εναλλακτικά στη βιβλιογραφία, το προτεινόμενο μοντέλο παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με το πρόβλημα δρομολόγησης πολλαπλών οχημάτων με ζήτηση, παραλαβή και χρονικά παράθυρα των Desrosiers et al.[54]. Σκοπός του ITSRSΡ αποτελεί η διαμόρφωση κατάλληλων δρομολογίων για τα πλοία με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους πλεύσης του ιδιοκτήτη του στόλου και παράλληλα την αποφυγή κυρώσεων στις περιπτώσεις χρησιμοποίησης ενοικιαζόμενων πλοίων ή στην αδυναμία μεταφοράς των φορτίων. Η πλεύση των πλοίων ξεκινά από καθορισμένα αρχικά σημεία και ολοκληρώνεται σε κάποιο τελικό σημείο παράδοσης, όταν έχουν εξυπηρετηθεί όλα τα διαθέσιμα φορτία. Για την εφικτότητα των δρομολογίων κατά τη δρομολόγηση του στόλου λαμβάνονται υπόψη η χωρητικότητα των πλοίων και τα προβλεπόμενα χρονικά όρια εξυπηρέτησης των φορτίων.

Για την μοντελοποίηση του συγκεκριμένου προβλήματος χρησιμοποιούνται οι παρακάτω μεταβλητές:

- $V$ : Το σύνολο του στόλου των πλοίων
- $v$ : Κάθε πλοίο  $v$  ανήκει στον στόλο  $V$ , όπου  $V = \{1, \dots, v\}$
- $Q_v$ : Η χωρητικότητα του κάθε πλοίου  $v$
- $n$ : Ο αριθμός των εμπορευματοκιβωτίων (ή κόμβων)
- $i, j$ : Εμπορευματοκιβώτια  $i, j$  διαθέσιμα για μεταφορά, όπου  $i, j \in \{1, \dots, n\}$
- $N^P$ : Το σύνολο των κόμβων παραλαβής των εμπορευματοκιβωτίων

- $N^D$ : Το σύνολο των κόμβων παράδοσης των εμπορευματοκιβωτίων
- $o(v), d(v)$ : Οι κόμβοι έναρξης και τερματισμού του δρομολογίου για κάθε πλοίο  $v$
- $N_v^P$ : Οι κόμβοι παραλαβής εμπορευματοκιβωτίων από το πλοίο  $v$
- $N_v^D$ : Οι κόμβοι παράδοσης εμπορευματοκιβωτίων από το πλοίο  $v$
- $q_i$ : Η ποσότητα φορτίου του κόμβου  $i$
- $[a_i, b_i]$ : Τα χρονικά παράθυρα επιτρεπόμενης επισκεψιμότητας για κάθε κόμβο  $i$
- $C_{ijv}$ : Το κόστος μετάβασης μεταξύ του κόμβου  $i$  και  $j$  από το πλοίο  $v$
- $T_{ijv}$ : Η διάρκεια του δρομολογίου μεταξύ του κόμβου  $i$  και  $j$  από το πλοίο  $v$
- $t_{iv}$ : Ο χρόνος εξυπηρέτησης του κόμβου  $i$  από το πλοίο  $v$
- $l_{iv}$ : Το συνολικό φορτίο του πλοίου  $v$  μετά την ολοκλήρωση της εξυπηρέτησης του κόμβου  $i$
- $x_{ijv}$ : Μεταβλητή απόφασης για τη μετακίνηση του πλοίου  $v$  από τον κόμβο  $i$  στον  $j$
- $y_i$ : Μεταβλητή απόφασης για τη μεταφορά του φορτίου  $i$  από τον διαθέσιμο στόλο
- $C_i^S$ : Επιπρόσθετο κόστος ως ποινή για αδυναμία μεταφοράς του φορτίου από τον κόμβο  $i$

Το πρόβλημα δρομολόγησης πλοίων βιομηχανικού και ελεύθερου φορτίου ορίζεται ως ένα πλήρες γράφημα  $G = (K, A)$ , όπου με  $K$  συμβολίζεται η ένωση του συνόλου των κόμβων παραλαβής  $N^P = \{1, \dots, n\}$  και των κόμβων παράδοσης  $N^D = \{1, \dots, n\}$ . Μία ναυτιλιακή εταιρεία διαθέτει τον δικό της ιδιόκτητο στόλο από  $v$  πλοία με  $V = \{1, \dots, v\}$ , με τα οποία μεταφέρει τα διαθέσιμα  $n$  φορτία (δηλ. εμπορευματοκιβώτια). Για κάθε φορτίο  $i$  καθορίζεται μια ποσότητα  $q_i$ , η οποία παραλαμβάνεται στο σημείο παραλαβής  $i \in N^P$  και μεταφέρεται στον αντίστοιχο προορισμό παράδοσης  $n + i \in N^D$ . Επιπρόσθετα, κάθε φορτίο  $i$  αντιστοιχίζεται με χρονικά παράθυρα  $[a_i, b_i]$ , τα οποία υποδεικνύουν το επιτρεπτό χρονικό διάστημα εξυπηρέτησης τους. Κάθε πλοίο  $v$  διαθέτει μία συγκεκριμένη χωρητικότητα  $Q_v$  και για κάθε μετακίνηση του σε κάποιο τόξο  $(i, j) \in A$  υπολογίζεται το κόστος μετάβασης  $C_{ijv}$  και η διάρκεια του δρομολογίου  $T_{ijv}$ . Για κάθε πλοίο  $v$  ορίζονται οι μεταβλητές απόφασης  $x_{ijv}$  και  $y_i$  για τη μετακίνηση και εξυπηρέτηση των φορτίων  $i, j$ .



Τέλος, εάν υπάρξει αδυναμία ως προς την εξυπηρέτηση του φορτίου  $i$  από τον ιδιόκτητο στόλο, τότε επιβάλλεται πρόστιμο  $C_i^S$  ως απώλεια εσόδων.

Η μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος είναι η ακόλουθη:

$$\min \sum_{v \in V} \sum_{(i,j) \in A_v} C_{ijv} x_{ijv} + \sum_{i \in N^P} C_i^S y_i \quad (3.18)$$

υπό τους περιορισμούς

$$\sum_{v \in V} \sum_{j \in N_v} x_{ijv} + y_i = 1, \quad i \in N^P \quad (3.19)$$

$$\sum_{j \in N_v} x_{o(v)jv} = 1, \quad v \in V \quad (3.20)$$

$$\sum_{j \in N_v} x_{ijv} - \sum_{j \in N_v} x_{jiv} = 0, \quad v \in V, i \in N_v \setminus \{o(v), d(v)\} \quad (3.21)$$

$$\sum_{j \in N_v} x_{jd(v)v} = 1, \quad v \in V \quad (3.22)$$

$$l_{iv} + q_j - l_{jv} \leq Q_v(1 - x_{ijv}), \quad v \in V, j \in N_v^P, (i, j) \in A_v \quad (3.23)$$

$$l_{iv} - q_j - l_{(n+j)v} \leq Q_v(1 - x_{i(j+n)v}), \quad v \in V, j \in N_v^P, (i, n+j) \in A_v \quad (3.24)$$

$$0 \leq l_{iv} \leq Q_v, \quad v \in V, i \in N_v^P \quad (3.25)$$

$$t_{iv} + T_{ijv} - t_{jv} \leq (b_i + T_{ijv})(1 - x_{ijv}), \quad v \in V, (i, j) \in A_v \quad (3.26)$$

$$\sum_{j \in N_v} x_{ijv} - \sum_{j \in N_v} x_{(n+i)jv} = 0, \quad v \in V, i \in N_v^P \quad (3.27)$$

$$t_{iv} + T_{i(n+i)v} - t_{(n+i)v} \leq 0, \quad v \in V, i \in N_v^P \quad (3.28)$$

$$a_i \leq t_{iv} \leq b_i, \quad v \in V, i \in N_v \quad (3.29)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \quad i \in N^C \quad (3.30)$$

$$x_{ijv} \in \{0, 1\}, \quad v \in V, (i, j) \in A_v \quad (3.31)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (3.18) στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας του διαθέσιμου στόλου και μείωση του κόστους μίσθωσης ή χρήσης των ενοικιαζόμενων πλοίων (spot charters). Ο περιορισμός (3.19) εξασφαλίζει ότι όλα τα φορτία, είτε θα εξυπηρετηθούν από τον διαθέσιμο στόλο είτε από κάποιο ενοικιαζόμενο πλοίο. Τα δρομολόγια των πλοίων καθορίζονται από τους περιορισμούς (3.20) - (3.22),

διασφαλίζοντας ότι όλα τα πλοία ξεκινούν από τις αρχικές τους θέσεις, φτάνουν σε κάποιο λιμάνι ενδιάμεσου προορισμού, αποχωρούν από αυτό και φτάνουν στον τελικό τους προορισμό. Το φορτίο του πλοίου κατά τη φόρτωση και εκφόρτωση, ελέγχεται από τους περιορισμούς (3.23) και (3.24) αντίστοιχα. Ο περιορισμός (3.25) ελέγχει ότι, η ποσότητα των εμπορευμάτων δεν ξεπερνάει τη χωρητικότητα του πλοίου. Η εφικτή εξυπηρέτηση του φορτίου κατά τη διάρκεια του δρομολογίου ενός πλοίου περιγράφεται από τον περιορισμό (3.26). Ο περιορισμός (3.27) εξασφαλίζει ότι, εάν το πλοίο  $v$  επισκεφτεί ένα σημείο παραλαβής φορτίων  $i$ , τότε το συγκεκριμένο πλοίο επισκέπτεται και το αντίστοιχο σημείο παράδοσης  $n + i$ . Για λόγους προτεραιότητας, η εξυπηρέτηση των φορτίων ξεκινά πρώτα από τα σημεία παραλαβής και ολοκληρώνεται σε αυτά της παράδοσης σύμφωνα με τον περιορισμό (3.28). Τα χρονικά παράθυρα ορίζονται από τον περιορισμό (3.29). Τέλος, όλες οι μεταβλητές απόφασης λαμβάνουν τιμές 0 ή 1, όπως διακρίνεται από τους περιορισμούς (3.30) και (3.31).

### 3.3 Μοντελοποιήσεις για προβλήματα ελλιμενισμού πλοίων - Berth Allocation

Οι μαθηματικές μοντελοποιήσεις για το πρόβλημα ελλιμενισμού των πλοίων κατηγοριοποιούνται στις επόμενες υποενότητες με βάση το μοντέλο των Imai et al.[117] και το αντίστοιχο των Prencipe και Marinelli[222]. Η παρούσα διδακτορική διατριβή στηρίζεται στην μοντελοποίηση των Cordeau et. al[46] (υποενότητα 3.3.1.2) για την επίλυση του δυναμικού πρόβληματος ελλιμενισμού, ενώ για το δεύτερο παρόμοιο πρόβλημα αναπτύσσεται ένα καινούργιο μαθηματικό μοντέλο για την αντιμετώπιση του (υποενότητα 3.3.2.2).

Στον Πίνακα 3.1 περιέχονται όλες οι μαθηματικές μοντελοποιήσεις για το δυναμικό πρόβλημα του ελλιμενισμού των πλοίων στους λιμένες (Dynamic Berth Allocation Problem - DBAP), οι οποίες έχουν προταθεί στην βιβλιογραφία. Ο Πίνακας 3.1 χωρίζεται σε έξι στήλες, στις οποίες περιέχονται τα βασικά χαρακτηριστικά για κάθε μία ξεχωριστά. Πιο συγκεκριμένα, στην πρώτη στήλη (Όνομα) αναγράφεται το όνομα της μοντελοποίησης. Στη δεύτερη στήλη (Αγγλ. Περιγραφή) αναφέρεται η αγγλική ονομασία, ενώ στην τρίτη (Συντομογραφία) η αγγλική συντομογραφία, όπως ακριβώς έχουν προταθεί στην επιστημονική βιβλιογραφία. Η τέταρτη στήλη (Συγγραφείς) αναφέρει ονομαστικά τους αρθρογράφους των προτεινόμενων μοντέλων. Στην τελευταία και έκτη στήλη (Ταξινόμηση) παρουσιάζονται σε κωδικοποιημένη μορφή τα χαρακτηριστικά και οι περιορισμοί των μοντέλων, όπως ταξινομούνται με βάση το σύστημα ταξινόμησης για

τα προβλήματα BAP, το οποίο προτάθηκε από τους Bierwirth et al.[12, 13].

Πιο συγκεκριμένα, για το δυναμικό πρόβλημα ελλιμενισμού των πλοίων στους τερματικούς σταθμούς των λιμένων (DBAP) προτείνονται συνολικά οκτώ μοντελοποιήσεις στην βιβλιογραφία, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς του προβλήματος τόσο το κόστος εξυπηρέτησης, όσο και τους χρόνους αναμονής, άφιξης και αναχώρησης των πλοίων, αλλά και τις διαστάσεις αυτών και των τερματικών σταθμών. Στα επόμενα υποκεφάλαια πραγματοποιείται εκτενής ανάλυση για τα προαναφερθέντα μαθηματικά μοντέλα, αλλά και λεπτομερής περιγραφή των εξισώσεων και των περιορισμών τους, αντιστοίχως για το καθένα ξεχωριστά. Ειδικότερα όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1, τα πρώτα έξι μαθηματικά μοντέλα ταξινομούνται με βάση την εξυπηρέτηση των πλοίων με εξαίρεση τα δύο τελευταία μοντέλα, στα οποία προστίθενται οι περιορισμοί βυθίσματος και χωρητικότητας για τα πλοία και τους τερματικούς σταθμούς αντίστοιχα.

Πίνακας 3.1: Μοντελοποιήσεις για το δυναμικό BAP στην βιβλιογραφία

Όνομα	Αγγλ. Περιγραφή	Συντομογραφία	Συγγραφείς	Ταξινόμηση
Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων με Πολλαπλές Αποθήκες και Χρονικά Παράθυρα	Mixed Integer Programming	MIP	Imai et. al[117]	<i>disc dyn, due pos</i>
Γενικευμένη Διαχώριση Συνόλων Ετερογενή Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων με Χρονικά Παράθυρα	Multi-Depot VRP with Time Windows Generalized Set-Partitioning	MDVRPTW GSPP	Cordeau et. al[46] Christensen and Holst[39]	<i>disc dyn, due pos</i> <i>disc dyn, due pos</i>
Χρονικού Δείκτη ή Ευρετηρίου Ροής Τόξου	Heterogeneous VRP with Time Windows Time-Indexed Arc Flow	HVRPTW TI AF	Buhrkal et al.[23] Kramer et al.[143] Kramer et al.[143]	<i>disc dyn, due pos</i> <i>disc dyn, due pos</i> <i>disc dyn, due pos</i>
Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων με Πολλαπλές Αποθήκες και Χρονικά Παράθυρα	Mixed Integer Linear Programming	MILP	Prencipe and Marinelli[222]	<i>disc, draft dyn, due pos</i>
	Multi-Depot VRP with Time Windows	MDVRPTW	Tsakirakis et. al	<i>disc, draft dyn, due pos</i>

### 3.3.1 Μοντέλα για το Δυναμικό Πρόβλημα Ελλιμενισμού των Πλοίων (Imai et al.[117])

#### 3.3.1.1 Μικτού Ακέραιου Προγραμματισμού - MIP

Το πρόβλημα DBAP μοντελοποιήθηκε ως πρόβλημα μικτού ακέραιου προγραμματισμού (Mixed Integer Programming - MIP). Παρατηρείται ως το πρώτο μοντέλο για τον δυναμικό ελλιμενισμό των πλοίων, το οποίο προτάθηκε στην βιβλιογραφία. Το μαθηματικό μοντέλο προτείνεται από τους Imai et al.[117] για την ελαχιστοποίηση του χρόνου αναμονής σε συνδυασμό με τον χρόνο εξυπηρέτησης των πλοίων στους λιμένες. Τα δεδομένα, τα οποία απαιτούνται για την αναλυτική επεξήγηση της παρακάτω μοντολοποίησης, είναι τα εξής:

- $M$ : Ο συνολικός αριθμός των τερματικών σταθμών,  $m = |M|$
- $N$ : Το πλήθος του στόλου των πλοίων,  $n = |N|$

- $P$ : Η σειρά προτεραιότητας των πλοίων στους τερματικούς σταθμούς,  $p = |P|$
- $h_i^k$ : Ο χρόνος εξυπηρέτησης του πλοίου  $i$  στον τερματικό σταθμό  $k$
- $a_i$ : Ο χρόνος άφιξης του πλοίου  $i$
- $s^k$ : Ο χρόνος έναρξης της διαθεσιμότητας του τερματικού σταθμού  $k$
- $W_k = a_i \geq s_k$ : Το σύνολο των πλοίων, στα οποία η άφιξη τους πραγματοποιείται μετά τον χρόνο έναρξης της διαθεσιμότητας του τερματικού σταθμού  $s^k$
- $P_{(p)} = \{q \in P, q < p\}$ : Το σύνολο των πλοίων, τα οποία έχουν προτεραιότητα ως προς την εξυπηρέτηση τους πριν από το  $p$  πλοίο

Επιπρόσθετα παρουσιάζονται και οι μεταβλητές απόφασης, οι οποίες απαιτούνται για MIP μοντέλο. Και αυτές είναι οι ακόλουθες:

- $x_{ip}^k$ : Το πλοίο  $i$  θα εξυπηρετηθεί ως  $p$ -οστό στον τερματικό σταθμό  $k$ ,  $\forall i \in N, p \in P, k \in M$
- $y_{ip}^k$ : Ο χρόνος αναμονής στον τερματικό σταθμό  $k$  μεταξύ του  $(p-1)$ -οστού πλοίου και του χρόνου άφιξης του  $p$ -οστού, εφόσον  $p$ -οστό πλοίο μπορεί να εξυπηρετηθεί

Το DBAP ως πρόβλημα μικτού αθέριου προγραμματισμού είναι το ακόλουθο:

$$\min \sum_{k \in M} \sum_{i \in N} \sum_{p \in P} \{(n - p + 1)h_i^k + s^k - a_i\}x_{ip}^k + \sum_{k \in M} \sum_{i \in N} \sum_{p \in P} y_{ip}^k \quad (3.32)$$

υπό τους περιορισμούς

$$\sum_{k \in M} \sum_{p \in P} x_{ip}^k = 1, \quad \forall i \in N \quad (3.33)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ip}^k = 1, \quad \forall k \in M, p \in P \quad (3.34)$$

$$\sum_{l \in N} \sum_{q \in P} (h_l^k x_{lq}^k + y_{lq}^k) + y_{lq}^k \geq (a_i - s^k)x_{ip}^k, \quad \forall i \in W_k, p \in P, k \in M \quad (3.35)$$

$$x_{ip}^k \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in N, p \in P, k \in M \quad (3.36)$$

$$y_{ip}^k \geq 0, \quad \forall i \in N, p \in P, k \in M \quad (3.37)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (3.32) ελαχιστοποιεί τον συνολικό χρόνο αναμονής και εξυπηρέτησης του κάθε πλοίου στους τερματικούς σταθμούς. Ο περιορισμός (3.33) διασφαλίζει ότι, κάθε πλοίο θα εξυπηρετηθεί μόνο μία φορά από την άφιξη του. Κατά την παραμονή τους στους λιμένες, οι τερματικοί σταθμοί θα εξυπηρετούν ένα πλοίο σε κάθε περίπτωση αποφεύγοντας τον παράλληλο ελλιμενισμό τους, σύμφωνα με τον περιορισμό (3.34). Ο περιορισμός (3.35) αναφέρεται στους χρόνους αναμονής των πλοίων. Εάν το  $i$  πλοίο φθάνει μετά τον χρόνο έναρξης της διαθεσιμότητας του τερματικού σταθμού  $k$ , τότε για να εξυπηρετηθεί επιβάλλεται να ελεγχθεί εάν το προηγούμενο πλοίο έχει εξυπηρετηθεί πλήρως (δηλαδή, ο χρόνος αναμονής είναι μηδενικός). Εάν το προηγούμενο πλοίο δεν έχει εξυπηρετηθεί πλήρως, τότε το πλοίο  $i$  παραμένει αδρανές και ο χρόνος αναμονής του αθροίζεται στο συνολικό κόστος. Ο περιορισμός (3.36) επιβάλλει στην μεταβλητή απόφασης να λαμβάνει δυαδικές τιμές. Ο περιορισμός (3.37) ελέγχει η μεταβλητή απόφασης να λαμβάνει μη-αρνητικές τιμές.

### 3.3.1.2 Δρομολόγηση Οχημάτων με Πολλαπλές Αποθήκες και Χρονικά Παράθυρα - MDVRPTW

Οι Cordeau et al.[46] πρότειναν έναν διαφορετικό τρόπο προσέγγισης του προβλήματος για τον ελλιμενισμό των πλοίων στους λιμένες. Ειδικότερα, παρατήρησαν ότι, το BAP μπορεί να μοντελοποιηθεί ως πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (Vehicle Routing Problem - VRP) και πιο συγκεκριμένα λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς των πολλαπλών αποθηκών μαζί με τα χρονικά παράθυρα (Multi-Depot Vehicle Routing Problem with Time Windows- MDVRPTW). Στην συγκεκριμένη μαθηματική μοντελοποίηση, τα πλοία αντιπροσωπεύουν τους πελάτες και οι θαλάσσιοι τερματικοί σταθμοί τις αποθήκες, στις οποίες σε καθεμία ξεχωριστά εξυπηρετείται ένα όχημα την φορά. Για κάθε αποθήκη αυτόνομα διατίθεται ένα σύνολο διαθέσιμων οχημάτων. Για καθένα από τα οχήματα η αφετηρία του δρομολογίου πραγματοποιείται από μία αποθήκη και το δρομολόγιο του ολοκληρώνεται στην συγκεκριμένη αποθήκη, από την οποία ξεκίνησε. Στην παρούσα μοντελοποίηση οι τερματικοί σταθμοί προσομοιώνονται ως πεπερασμένο σύνολο

λο θέσεων ελλιμενισμού των πλοίων. Επιπρόσθετα, οι χρόνοι άφιξης των πλοίων στους σταθμούς αντιπροσωπεύουν τα κατώτατα χρονικά όρια των παραθύρων εξυπηρέτησης τους, ενώ αντίστοιχα οι χρόνοι αναχώρησης τους θεωρούνται τα ανώτατα χρονικά όρια εξυπηρέτησης τους.

Τα δεδομένα για την MVRPTW μοντελοποίηση είναι τα ακόλουθα:

- $N$ : Το πλήθος του στόλου των πλοίων,  $n = |N|$
- $M$ : Ο συνολικός αριθμός των τερματικών σταθμών,  $m = |M|$
- $t_i^k$ : Ο χρόνος εξυπηρέτησης του πλοίου  $i$  στον τερματικό σταθμό  $k$
- $a_i$ : Ο χρόνος άφιξης του πλοίου  $i$
- $s^k$ : Ο χρόνος έναρξης της διαθεσιμότητας του τερματικού σταθμού  $k$
- $e^k$ : Ο χρόνος λήξης της διαθεσιμότητας του τερματικού σταθμού  $k$
- $b_i$ : Το άνω όριο του χρονικού παραθύρου εξυπηρέτησης για το πλοίο  $i$
- $v_i$ : Το κόστος της αντικειμενικής συνάρτησης για την συνολική εξυπηρέτηση του πλοίου  $i$

Το DBAP μοντελοποιείται ως ένα γράφημα με  $G^k = (V^k, A^k), \forall k \in M$ , όπου  $V^k = N \cup \{o(k), d(k)\}$  και  $A^k \subseteq V^k \times V^k$ . Επιπρόσθετα για την μοντελοποίηση απαιτούνται οι παρακάτω μεταβλητές απόφασης και σταθερές:

- $x_{ij}^k \in \{0, 1\}, k \in M, (i, j) \in A^k, x_{ij}^k = 1$ , εάν και μόνο εάν το πλοίο  $j$  έχει εξυπηρετηθεί μετά το πλοίο  $i$  στον τερματικό σταθμό  $k$
- $T_i^k, k \in M, i \in N$ : Η χρονική στιγμή του ελλιμενισμού του πλοίου  $i$  στον τερματικό σταθμό  $k$
- $T_{o(k)}^k, k \in M$ : Ο χρόνος έναρξης της εξυπηρέτησης του τερματικού σταθμού  $k$  από τη στιγμή άφιξης του πρώτου πλοίου
- $T_{d(k)}^k, k \in M$ : Ο χρόνος λήξης της εξυπηρέτησης του τερματικού σταθμού  $k$  από τη στιγμή αναχώρησης του τελευταίου πλοίου
- $M_{ij}^k = \max\{b_i + t_i^k - a_j, 0\}, k \in M, j \in N$

Η προτεινόμενη μοντελοποίηση των Cordeau et al.[46] ως MVRPTW είναι η α-χόλουθη:

$$\min \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} v_i (T_i^k - a_i + t_i^k \sum_{j \in N \cup \{d\}} x_{ij}^k) \quad (3.38)$$

υπό τους περιορισμούς

$$\sum_{k \in M} \sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{ij}^k = 1, \quad \forall i \in N \quad (3.39)$$

$$\sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{o(k),j}^k = 1, \quad \forall k \in M \quad (3.40)$$

$$\sum_{i \in N \cup \{o(k)\}} x_{i,d(k)}^k = 1, \quad \forall k \in M \quad (3.41)$$

$$\sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{ij}^k - \sum_{j \in N \cup \{o(k)\}} x_{ji}^k = 0, \quad \forall k \in M, i \in N \quad (3.42)$$

$$T_i^k + t_i^k - T_j^k \leq (1 - x_{ij}^k) M_{ij}^k, \quad \forall k \in M, (i, j) \in A^k \quad (3.43)$$

$$a_i \leq T_i^k, \quad \forall k \in M, i \in N \quad (3.44)$$

$$T_i^k + t_i^k \sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{ij}^k \leq b_i, \quad \forall k \in M, i \in N \quad (3.45)$$

$$s^k \leq T_{o(k)}^k, \quad \forall k \in M \quad (3.46)$$

$$T_{d(k)}^k \leq e^k, \quad \forall k \in M \quad (3.47)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}, \quad \forall k \in M, (i, j) \in A^k \quad (3.48)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (3.38) ελαχιστοποιεί τα κόστη εξυπηρέτησης των πλοίων από το σύνολο του διαθέσιμου στόλου. Ο περιορισμός (3.39) διασφαλίζει ότι, κάθε πλοίο  $i$  ελλιμενίζεται σε ακριβώς έναν τερματικό σταθμό  $k$ . Οι περιορισμοί (3.40),(3.41) καθορίζουν τον κόμβο αρχής (ή προέλευσης) και τερματισμού (ή προορισμού). Η διατήρηση της ροής στους κόμβους  $((i, j) \in A^k)$  του γραφήματος  $G^k$  επιτυγχάνεται από τον περιορισμό (3.42). Σύμφωνα με τον περιορισμό (3.43) εξασφαλίζεται η συνοχή μεταξύ του χρόνου εξυπηρέτησης των πλοίων στους λιμένες με την αλληλουχία ελλιμενισμού τους στους τερματικούς σταθμούς. Τα άνω και κάτω όρια των χρονικών παραθύρων για την άφιξη και αναχώρηση του πλοίου  $i$  διασφαλίζονται από τους περιορισμούς (3.44),(3.45). Τα χρονικά παράθυρα διαθεσιμότητας του τερματικού σταθμού  $k$  καθορίζονται από τους περιορισμούς (3.46),(3.47). Τέλος, όλες οι μεταβλητές απόφασης λαμβάνουν τις τιμές 0 ή 1, όπως απαιτεί ο περιορισμός (3.48).

### 3.3.1.3 Γενικευμένη Διαχώριση Συνόλων - GSPP

Η μέθοδος της Γενικευμένης Διαχώρισης Συνόλων (Generalized Set-Partitioning Problem - GSPP) προτείνεται από τους Christensen και Holst[39] ως μαθηματική μοντελοποίηση για την επίλυση του προβλήματος BAP. Στη βιβλιογραφία παρατηρείται η ευρεία εφαρμογή της από την επιστημονική κοινότητα και ειδικότερα διακρίνεται με την ονομασία Set-Partitioning Problem, καθώς χρησιμοποιείται για την επίλυση κυρίως προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού [73],[231], (Scheduling Problems). Για την εφικτή εφαρμογή του προαναφερθέντος μοντέλου σε προβλήματα βελτιστοποίησης απαιτείται όλες οι μεταβλητές να ανήκουν στο σύνολο των ακεραίων αριθμών.

Ακολουθούν οι μεταβλητές της συγκεκριμένης μαθηματικής μοντελοποίησης:

- $\Omega$ : Πίνακας μεταβλητών
- $c_\omega$ : Το συνολικό κόστος εξυπηρέτησης του κάθε πλοίου
- $x_\omega$ : Μεταβλητή απόφασης



- $N$ : Το σύνολο των πλοίων του στόλου
- $i$ : Το πλοίο  $i$  με  $i \in N$
- $P$ : Το σύνολο των διαθέσιμων θέσεων ελλιμενισμού των πλοίων
- $p$ : Η θέση ελλιμενισμού  $p$  με  $p \in P$
- $A_{iw}$ : Πίνακας μεταβλητών
- $B_{pw}$ : Πίνακας μεταβλητών

Βασικό στοιχείο στην GSPP μοντελοποίηση αποτελεί ο πίνακας περιορισμών (constraint matrix), του οποίου οι στήλες αντιπροσωπεύουν τον εφικτό ελλιμενισμό του κάθε ένα πλοίου ξεχωριστά για μία συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Ο αριθμός των στηλών ορίζεται ως σύνολο  $\Omega$ . Επιπροσθέτως, ορίζονται δύο ακόμη πίνακες, οι  $A$  και  $B$ , οι οποίοι απαριθμούνται με  $|\Omega|$  στήλες αντιστοίχα. Ο πίνακας  $A$  ορίζεται ως  $A = (A_{iw})$  και οι γραμμές του αντιπροσωπεύουν καθένα πλοίο από τον διαθέσιμο στόλο  $n$ . Στην περίπτωση, την οποία ένα πλοίο  $i$  έχει εξυπηρετηθεί σε έναν συγκεκριμένο τερματικό σταθμό  $k$ , τοποθετείται άσσος (1) στην θέση  $i$  και μηδέν (0) στις υπόλοιπες  $n$  θέσεις της συγκεκριμένης γραμμής. Ως  $A_{iw} = 1$  αντιπροσωπεύεται η εφικτή εξυπηρέτηση του πλοίου  $i$ . Κάθε στήλη του πίνακα  $A$  περιέχει ακριβώς ένα μη μηδενικό στοιχείο. Ο δεύτερος πίνακας ορίζεται ως  $B = (B_{pw})$  και σε κάθε γραμμή περιέχεται ο αριθμός του κάθε τερματικού σταθμού ( $k \in M$ ) μαζί με τον χρόνο διαθεσιμότητας τους ( $s_k \leq T_k \leq e_k$ ), ο οποίος ορίζεται ως  $|P| = \sum_{k \in M} (e_k - s_k)$ . Οι στήλες του πίνακα  $B_{pw}$  ισούται με άσσο, εάν ένα πλοίο ελλιμενίζεται στα χρονικά πλαίσια των παραθύρων διαθεσιμότητας ενός τερματικού σταθμού. Το κόστος της κάθε στήλης για τους δύο πίνακες ( $A, B$ ) ορίζεται ως  $c_w$  με  $w \in \Omega$  και αντιπροσωπεύει το συνολικό χρόνο εξυπηρέτησης του κάθε πλοίου.

Στην συνέχεια παρουσιάζεται η GSPP μοντελοποίηση για την επίλυση του δυναμικού BAP προβλήματος :

$$\min \sum_{w \in \Omega} c_w x_w \quad (3.49)$$

υπό τους περιορισμούς

$$\sum_{w \in \Omega} A_{iw} x_{iw} = 1, \quad \forall i \in N \quad (3.50)$$

$$\sum_{w \in \Omega} B_{pw} x_w \leq 1, \quad \forall p \in P \quad (3.51)$$

$$x_w \in \{0, 1\}, \quad \forall w \in \Omega \quad (3.52)$$

Σύμφωνα με την αντικειμενική συνάρτηση (3.49) ελαχιστοποιούνται οι χρόνοι αναμονής και εξυπηρέτησης των πλοίων στους λιμένες. Ο περιορισμός (3.50) διασφαλίζει την επιτυχή εξυπηρέτηση όλων των πλοίων από τον διαθέσιμο στόλο. Για κάθε πλοίο, το οποίο ελλιμενίζεται, θα εξυπηρετείται ένα την φορά σε κάποιο από τους διαθέσιμους τερματικούς σταθμούς, σύμφωνα με τον περιορισμό (3.51). Οι τιμές για τις μεταβλητές απόφασης της μοντελοποίησης ελέγχονται από τον περιορισμό (3.52).

#### 3.3.1.4 Δρομολόγηση Ετερογενή Οχημάτων με Χρονικά Παράθυρα - HVRPTW

Η επόμενη μαθηματική μοντελοποίηση προτείνεται από τους Buhrkal et al.[23] και εξετάζουν το DBAP ως πρόβλημα δρομολόγησης ετερογενών οχημάτων με χρονικά παράθυρα (Heterogeneous VRP with Time Windows - HVRPTW). Σύμφωνα με την εργασία των Buhrkal et al.[23] η προτεινόμενη μοντελοποίηση περιέχει αρκετές ομοιότητες με αυτήν των Cordeau et al.[46], όπως ότι τα πλοία αντιπροσωπεύουν τους πελάτες και αντίστοιχα οι τερματικοί σταθμοί τις αποθήκες. Σε αντίθεση με το MDVRPTW, το HVRPTW μοντέλο λαμβάνει υπόψη μόνο μία αποθήκη και τα οχήματα αντιπροσωπεύουν τα πλοία στους τερματικούς σταθμούς των λιμένων. Ωστόσο, η πολυπλοκότητα του προβλήματος παραμένει ίδια, παρόλο που η μοντελοποίηση HVRPTW θεωρείται περισσότερο απλοποιημένη, σύμφωνα με τους Buhrkal et al.[23].

Το HVRPTW μοντέλο αναπαριστάται ως ένας γράφος  $G = (V, A)$ , με  $V = N \cup \{o(k), d(k)\}$  και  $A \subseteq V \times V$ . Για την αναλυτική περιγραφή της συγκεκριμένης μοντελοποίησης απαιτούνται οι εξής ακόλουθες σταθερές και μεταβλητές απόφασης. Αρχικώς οι σταθερές:

- $N$ : Το πλήθος του στόλου των πλοίων
- $M$ : Ο συνολικός αριθμός των τερματικών σταθμών
- $h_i^k$ : Ο χρόνος εξυπηρέτησης του πλοίου  $i$  στον τερματικό σταθμό  $k$

- $a_i$ : Ο χρόνος άφιξης του πλοίου  $i$
- $b_i$ : Το ανώτατο χρονικό όριο του παραθύρου για την επιτρεπτή εξυπηρέτηση του πλοίου  $i$
- $s^k$ : Ο χρόνος έναρξης της διαθεσιμότητας του τερματικού σταθμού  $k$
- $e^k$ : Ο χρόνος λήξης της διαθεσιμότητας του τερματικού σταθμού  $k$
- $v_i$ : Το κόστος της αντικειμενικής συνάρτησης για τη συνολική εξυπηρέτηση του πλοίου  $i$

Και στην συνέχεια οι μεταβλητές:

- $x_{ij}^k, \forall k \in M, (i, j) \in A$ : Εάν  $x_{ij}^k = 1$ , τότε το πλοίο  $j$  ελλιμενίζεται στον τερματικό σταθμό  $k$  μετά την εξυπηρέτηση του πλοίου  $i$
- $T_i^k, \forall i \in V, k \in M$ : Η χρονική στιγμή του ελλιμενισμού του πλοίου  $i$  στον τερματικό σταθμό  $k$
- $T_o^k, k \in M$ : Ο χρόνος έναρξης της εξυπηρέτησης του τερματικού σταθμού  $k$  από τη στιγμή άφιξης του πρώτου πλοίου
- $T_d^k, k \in M$ : Ο χρόνος λήξης της εξυπηρέτησης του τερματικού σταθμού  $k$  από την στιγμή αναχώρησης του τελευταίου πλοίου
- $M_{ij}^k = \max\{b_i + h_i^k - a_j, 0\}, k \in M, (i, j) \in A$

Ακολουθεί το HVRPTW μαθηματικό μοντέλο:

$$\min \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} v_i (T_i^k - a_i + h_i^k \sum_{j \in N \cup \{d\}} x_{ij}^k) \quad (3.53)$$

υπό τους περιορισμούς

$$\sum_{k \in M} \sum_{j \in N \cup \{d\}} x_{ij}^k = 1, \quad \forall i \in N \quad (3.54)$$

$$\sum_{j \in N \cup \{d\}} x_{o,j}^k = 1, \quad \forall k \in M \quad (3.55)$$

$$\sum_{i \in N \cup \{o\}} x_{i,d}^k = 1, \quad \forall k \in M \quad (3.56)$$

$$\sum_{j \in N \cup \{d\}} x_{ij}^k = \sum_{j \in N \cup \{o\}} x_{ji}^k, \quad \forall k \in M, i \in N \quad (3.57)$$

$$T_i^k + h_i^k - T_j^k \leq (1 - x_{ij}^k) M_{ij}^k, \quad \forall k \in M, (i, j) \in A \quad (3.58)$$

$$a_i \leq T_i^k, \quad \forall k \in M, i \in N \quad (3.59)$$

$$T_i^k + h_i^k \sum_{j \in N \cup \{d\}} x_{ij}^k \leq b_i, \quad \forall k \in M, i \in N \quad (3.60)$$

$$s^k \leq T_o^k, \quad \forall k \in M \quad (3.61)$$

$$T_d^k \leq e^k, \quad \forall k \in M \quad (3.62)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}, \quad \forall k \in M, (i, j) \in A \quad (3.63)$$

$$T_i^k \in \mathbb{R}^+, \quad \forall k \in M, (i, j) \in A \quad (3.64)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (3.53) ελαχιστοποιεί τον συνολικό χρόνο εξυπηρέτησης των πλοίων. Ο περιορισμός (3.54) εξασφαλίζει όλα τα πλοία να έχουν εξυπηρετηθεί από έναν τερματικό σταθμό  $k$ . Οι περιορισμοί (3.55) και (3.56) διασφαλίζουν τον αρχικό

και τερματικό κόμβο στο γράφημα  $G$  με  $\forall k \in M$  για κάθε τερματικό σταθμό  $k$ . Η διατήρηση της ροής στους υπόλοιπους κόμβους του γραφήματος  $G$  επιτυγχάνεται από τον περιορισμό (3.57). Η συσχέτιση του χρόνου εξυπηρέτησης των πλοίων στους λιμένες και της αλληλουχίας ελλιμενισμού τους στους τερματικούς σταθμούς επιτυγχάνεται από τον περιορισμό (3.58). Οι περιορισμοί (3.59) και (3.60) υπαγορεύουν την επιβολή των χρονικών παραθύρων για κάθε πλοίο. Επιπρόσθετα, τα χρονικά όρια διαθεσιμότητας των τερματικών σταθμών ελέγχονται από τους περιορισμούς (3.61), (3.62). Σύμφωνα με τους περιορισμούς (3.63, 3.64) οριοθετείται το εύρος τιμών για τις μεταβλητές απόφασης.

### 3.3.1.5 Χρονικού Δείκτη ή Ευρετηρίου - TI

Μία εναλλακτική μαθηματική μοντελοποίηση για το δυναμικό πρόβλημα ελλιμενισμού των πλοίων στους τερματικούς σταθμούς αποτελεί αυτή του χρονικού δείκτη ή ευρετηρίου (Time-Indexed - TI), η οποία αρχικά παρουσιάζεται από τους Sousa και Wolsey[242] και στη συνέχεια προτείνεται από τους Kramer et al.[143]. Γενικότερα, η TI μοντελοποίηση εφαρμόζεται κυρίως σε προβλήματα χρονοπρογραμματισμού μηχανών σε βιομηχανικά περιβάλλοντα[260],[217] (Machine Scheduling Problem). Για τη συγκεκριμένη μαθηματική μοντελοποίηση ορίζονται οι εξής σταθερές και μεταβλητές απόφασης:

- $t_i$ : Ο χρόνος άφιξης του πλοίου  $i$
- $\rho_{ik}$ : Ο χρόνος εξυπηρέτησης του πλοίου  $i$  στον τερματικό σταθμό  $k$
- $t$ : Το σύνολο των μεταβλητών των χρόνων αναμονής μεταξύ των πλοίων κατά την διάρκεια εξυπηρέτησης τους στους τερματικούς σταθμούς
- $P$ : Η σειρά προτεραιότητας των πλοίων στους τερματικούς σταθμούς,  $p = |P|$
- $u_{ik} = \min\{t'_i, e_k\}$ ,  $\forall i \in N, k \in M$ : Ο ελάχιστος χρόνος αναμονής του πλοίου  $i$  από τη στιγμή της άφιξης του μέχρι τη χρονική στιγμή της έναρξης της διαθεσιμότητας του τερματικού σταθμού  $k$
- $l_{ik} = \max\{t_i, s_k\}$ ,  $\forall i \in N, k \in M$ : Ο μέγιστος χρόνος αναμονής του πλοίου  $i$  από τη στιγμή της άφιξης του μετά την έναρξη της διαθεσιμότητας του τερματικού σταθμού  $k$  μέχρι τη χρονική στιγμή της λήξης της διαθεσιμότητας του τερματικού σταθμού  $k$
- $x_{ikt}$ : Εάν  $x_{ikt} = 1$ , τότε το πλοίο  $i$  ελλιμενίζεται τη χρονική στιγμή  $t$  στον τερματικό σταθμό  $k$

Το προτεινόμενο μαθηματικό μοντέλο ΤΙ για την επίλυση του DBAP, το οποίο προτείνεται από τους Kramer et al.[143], είναι το ακόλουθο:

$$\min \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} \sum_{t=l_{ik}}^{u_{ik}-\rho_{ik}} p_i x_{ikt} (t + \rho_{ik} - t_i) \quad (3.65)$$

υπό τους περιορισμούς

$$\sum_{k \in M} \sum_{t=l_{ik}}^{u_{ik}-\rho_{ik}} x_{ikt} = 1, \quad \forall i \in N \quad (3.66)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{s=\max\{t_i, s_k, t+1-\rho_{ik}\}}^{\min\{t'_i-\rho_{ik}, e_k-\rho_{ik}\}} x_{iks} \leq 1, \quad \forall k \in M, t = s_k, \dots, e_k - 1 \quad (3.67)$$

$$x_{ikt} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in N, k \in M, t = l + ik, \dots, u_{ik} - \rho_{ik} \quad (3.68)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (3.65) στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου παραμονής των πλοίων, ο οποίος υπολογίζεται από το άθροισμα του χρόνου εξυπηρέτησης τους με τον χρόνο άφιξης τους στους τερματικούς σταθμούς των λιμένων. Ο περιορισμός (3.66) διασφαλίζει ότι κάθε πλοίο εξυπηρετείται ακριβώς μία φορά. Επιπρόσθετα, απαγορεύεται ο ταυτόχρονος ελλιμενισμός των πλοίων σε περισσότερους από έναν τερματικούς σταθμούς, καθώς επιτρέπεται μόνο σε ένα τη φορά, σύμφωνα με τον περιορισμό (3.67). Ο περιορισμός (3.68) εξασφαλίζει ότι οι μεταβλητές απόφασης  $x_{ikt}$  λαμβάνουν τις τιμές 1 ή 0, όταν το πλοίο  $i$  εξυπηρετείται τη χρονική στιγμή  $t$  στον τερματικό σταθμό  $k$  ή όχι.

### 3.3.1.6 Ροής Τόξου - AF

Επιπροσθέτως, οι Kramer et al.[143] πρότειναν μια διαφορετική προσέγγιση για την μοντελοποίηση του DBAP και πιο συγκεκριμένα αυτήν της ροής τόξου (Arc-Flow-AF), η οποία στηρίζεται στις εργασίες των Valério de Carvalho[259] και Delorme et al.[53]. Το μαθηματικό μοντέλο AF χρησιμοποιείται εξαιτίας της αποτελεσματικής εφαρμογής σε πρακτικά προβλήματα, όπως αυτό της χωροθέτησης[53],[18] (Bin Packing Problem) και του χρονοπρογραμματισμού πληρωμάτων[112] (Crew Scheduling Problem). Για την προαναφερθείσα μοντελοποίηση ορίζονται οι παρακάτω μεταβλητές:

- $t_i$ : Ο χρόνος άφιξης του πλοίου  $i$
- $\rho_{ik}$ : Ο χρόνος εξυπηρέτησης του πλοίου  $i$  στον τερματικό σταθμό  $k$
- $t$ : Το σύνολο των μεταβλητών των χρόνων αναμονής μεταξύ των πλοίων κατά τη διάρκεια εξυπηρέτησης τους στους τερματικούς σταθμούς
- $P$ : Η σειρά προτεραιότητας των πλοίων στους τερματικούς σταθμούς,  $p = |P|$
- $u_{ik} = \min\{t'_i, e_k\}$ ,  $\forall i \in N, k \in M$ : Ο ελάχιστος χρόνος αναμονής του πλοίου  $i$  από τη στιγμή της άφιξης του μέχρι τη χρονική στιγμή της έναρξης της διαθεσιμότητας του τερματικού σταθμού  $k$
- $l_{ik} = \max\{t_i, s_k\}$ ,  $\forall i \in N, k \in M$ : Ο μέγιστος χρόνος αναμονής του πλοίου  $i$  από τη στιγμή της άφιξης του μετά την έναρξη της διαθεσιμότητας του τερματικού σταθμού  $k$  μέχρι τη χρονική στιγμή της λήξης της διαθεσιμότητας του τερματικού σταθμού  $k$
- $x_{ikt}$ : Εάν  $x_{ikt} = 1$ , τότε το πλοίο  $i$  ελλιμενίζεται τη χρονική στιγμή  $t$  στον τερματικό σταθμό  $k$  μετά την εξυπηρέτηση του πλοίου
- $d_{kt}$ :

Ακολουθεί η μοντελοποίηση της ροής τόξου (AF):

$$\min \sum_{i \in N} \sum_{k \in M} \sum_{t=l_{ik}}^{u_{ik}-\rho_{ik}} p_i x_{ikt} (t + \rho_{ik} - t_i) \quad (3.69)$$

υπό τους περιορισμούς

$$\sum_{k \in M} \sum_{t=l_{ik}}^{u_{ik}-\rho_{ik}} x_{ikt} = 1, \quad \forall i \in N \quad (3.70)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ikt} + d_{kt} - \sum_{i \in N} x_{i,k,t-\rho_{ik}} - d_{k,t-1} = \begin{cases} 1, & \text{if } t = s_k \\ -1, & \text{if } t = e_k, \quad \forall k \in M, t = s_k, \dots, e_k \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.71)$$

$$x_{ikt}^k \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in N, k \in M, t = l + ik, \dots, u_{ik} - \rho_{ik} \quad (3.72)$$

$$0 \leq d_{kt} \leq 1, \quad \forall k \in M, t = s_k, \dots, e_k - 1 \quad (3.73)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (3.69) ελαχιστοποιεί τον συνολικό χρόνο παραμονής των πλοίων στους λιμένες αθροίζοντας τον χρόνο εξυπηρέτησης τους με τον χρόνο άφιξης τους στους τερματικούς σταθμούς. Σύμφωνα με τον περιορισμό (3.70), κάθε πλοίο από τον διαθέσιμο στόλο θα ελλιμενίζεται ακριβώς μία φορά. Οι συνθήκες για τη διατήρηση της ροής διασφαλίζονται από τον περιορισμό (3.71). Το εύρος τιμών των μεταβλητών απόφασης ελέγχεται από τους περιορισμούς (3.72) και (3.73).

### 3.3.2 Μοντέλα για το Δυναμικό Πρόβλημα Ελλιμενισμού των Πλοίων με Γεωμετρικούς Περιορισμούς (Prencipe and Marinelli[222])

#### 3.3.2.1 Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός - MILP

Η μέθοδος του μικτού ακέραιου προγραμματισμού προτείνεται ως μαθηματικό μοντέλο επίλυσης του δυναμικού προβλήματος του ελλιμενισμού των πλοίων με γεωμετρικούς περιορισμούς (DDBAP) από τους Prencipe and Marinelli[222]. Η συγκεκριμένη μοντελοποίηση περιέχει επιπλέον περιορισμούς σε σχέση με το αντίστοιχο μοντέλο των Imai et al.[117]. Συνεπώς, χαρακτηρίζεται ως επέκταση του κλασικού προβλήματος του δυναμικού ελλιμενισμού των πλοίων και πιο συγκεκριμένα χαρακτηρίζεται με αυξημένη πολυπλοκότητα εξαιτίας των επιπρόσθετων περιορισμών. Ειδικότερα, οι περιορισμοί αυτοί αφορούν τις διαστάσεις τόσο των πλοίων όσο και τερματικών σταθμών.

Ακολουθούν οι μεταβλητές του MILP μαθηματικού μοντέλου:

- $S$ : Το σύνολο των πλοίων από τον διαθέσιμο στόλο  $S = 1, 2, \dots, n_s$
- $B$ : Το σύνολο των τερματικών σταθμών  $B = 1, 2, \dots, b_s$
- $n_s$ : Ο συνολικός αριθμός των πλοίων
- $b_s$ : Ο συνολικός αριθμός των τερματικών σταθμών
- $l_i^s$ : Το μήκος του  $i$ -οστού πλοίου,  $i \in S$



- $d_i^s$ : Το βύθισμα του  $i$ -οστού πλοίου,  $i \in S$
- $l_j^b$ : Το μήκος του  $j$ -οστού τερματικού σταθμού(αποβάθρας υποδοχής),  $j \in B$
- $d_j^b$ : Το βάθος του  $j$ -οστού τερματικού σταθμού(αποβάθρας υποδοχής),  $j \in B$
- $t_i^a$ : Ο χρόνος άφιξης του  $i$ -οστού πλοίου,  $i \in S$
- $t_i^h$ : Ο χρόνος εξυπηρέτησης του  $i$ -οστού πλοίου,  $i \in S$
- $t_{ij}^b$ : Ο χρόνος προσέγγισης/αναχώρησης του  $i$ -οστού πλοίου στον  $j$ -οστό τερματικό σταθμό,  $i \in S, j \in B$
- $M$ : Μεγάλος θετικός αριθμός
- $x_{ij}$ : Μεταβλητή απόφασης με  $x_{ij} = 1$ , εάν το  $i$ -οστό πλοίο εξυπηρετείται στον  $j$ -οστό τερματικό σταθμό,  $i \in S, j \in B$
- $t_{ij}^w$ : Μεταβλητή απόφασης για τον χρόνο αναμονής του  $i$ -οστού πλοίου στον  $j$ -οστό τερματικό σταθμό,  $i \in S, j \in B$
- $t_i^B$ : Μεταβλητή απόφασης για τον χρόνο αναχώρησης του  $i$ -οστού πλοίου,  $i \in S$
- $t_{ij}^s$ : Μεταβλητή απόφασης για τον χρόνο εξυπηρέτησης του  $i$ -οστού πλοίου στον  $j$ -οστό τερματικό σταθμό,  $i \in S, j \in B$
- $t_{ij}^t$ : Μεταβλητή απόφασης για το κόστος παραμονής του  $i$ -οστού πλοίου στον  $j$ -οστό τερματικό σταθμό,  $i \in S, j \in B$
- $s_i$ : Μεταβλητή απόφασης για τον χρόνο αναχώρησης του  $i$ -οστού πλοίου,  $i \in S$

Η MILP μαθηματική μοντελοποίηση για το DDBAP είναι η ακόλουθη:

$$\min \sum_{i=1}^{n_s} t_i^t \quad (3.74)$$

υπό τους περιορισμούς

$$\sum_{j=1}^{n_b} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in B \quad (3.75)$$

$$s_i = t_i^w + t_i^a, \quad \forall i \in S \quad (3.76)$$

$$s_i \geq t_i^a, \quad \forall i \in S \quad (3.77)$$

$$s_i + M(1 - x_{ij}) \geq s_k + t_k^h + t_{kj}^b - M(1 - x_{kj}), \quad \forall i \in S, k \in S, j \in B, k > i \quad (3.78)$$

$$l_i^s x_{ij} \leq l_j^b, \quad \forall i \in S, j \in B \quad (3.79)$$

$$d_i^s x_{ij} \leq d_j^b, \quad \forall i \in S, j \in B \quad (3.80)$$

$$t_i^B \geq t_{ij}^b, \quad \forall i \in S, j \in B \quad (3.81)$$

$$t_i^t = t_i^a + t_i^h + t_i^B + t_i^w, \quad \forall i \in S \quad (3.82)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in S, j \in B \quad (3.83)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (3.74) στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου παραμονής των πλοίων στους λιμένες. Ο περιορισμός (3.75) εξασφαλίζει τη μοναδικότητα ως προς την εξυπηρέτηση του κάθε πλοίου. Ο χρόνος αναχώρησης του κάθε πλοίου ορίζεται από τον περιορισμό (3.76). Οι περιορισμοί (3.77) και (3.78) διασφαλίζουν τη συνέπεια μεταξύ των χρόνων άφιξης και αναχώρησης των πλοίων από τους λιμένες. Η συμβατότητα των διαστάσεων (μήκους, βυθίσματος) μεταξύ πλοίων και τερματικών σταθμών επιτυγχάνεται μέσω των περιορισμών (3.79) και (3.80). Με τον περιορισμό (3.81) οριοθετούνται οι χρόνοι άφιξης και αναχώρησης για την εφικτή εξυπηρέτηση του  $i$ -οστού πλοίου στον  $j$ -οστό τερματικό σταθμό. Τέλος, καθορίζεται ο υπολογισμός του συνολικού χρόνου παραμονής των πλοίων στη μεταβλητή απόφασης  $t_i^t$  από τον περιορι-

σμό (3.82) και ορίζεται το εύρος τιμών για τη μεταβλητή απόφασης  $x_{ij}$  από τον (3.83) αντίστοιχα.

### 3.3.2.2 Δρομολόγηση Οχημάτων με Πολλαπλές Αποθήκες και Χρονικά Παράθυρα - MDVRPTW

Στη συγκεκριμένη υποενότητα παρουσιάζεται το καινούργιο μαθηματικό μοντέλο για την επίλυση του προβλήματος του δυναμικού ελλιμενισμού των πλοίων με γεωμετρικούς περιορισμούς. Θεωρείται ένα πρωτότυπο μοντέλο για την επίλυση ενός συνδυαστικού προβλήματος βελτιστοποίησης με εφαρμογή σε πραγματικές καταστάσεις και αποτελεί ένα από σημαντικότερα σημεία της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Η προτεινόμενη μαθηματική μοντελοποίηση βασίζεται στην αντίστοιχη των Cordeau et al.[46], η οποία εξετάζει στο πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με πολλαπλές αποθήκες και χρονικά παράθυρα. Πιο συγκεκριμένα, ο στόλος των εισερχόμενων πλοίων αντιπροσωπεύει τους πελάτες, οι οποίοι εξυπηρετούνται σύμφωνα με την σειρά προτεραιότητας ή την χρονική διαθεσιμότητα τους, καθώς οι τερματικοί σταθμοί αποτελούν τα οχήματα, τα οποία επισκέπτονται τους πελάτες. Επιπρόσθετα, από το προτεινόμενο μοντέλο αντλούνται οι απαραίτητοι γεωμετρικοί περιορισμοί, σύμφωνα με την εργασία των Prencipe and Marinelli[222], οι οποίοι αφορούν τις διαστάσεις τόσο των πλοίων όσο των τερματικών σταθμών. Ειδικότερα, οι συγκεκριμένες εξισώσεις περιγράφουν τα απαραίτητα χαρακτηριστικά, τα οποία διαθέτουν τα πλοία, ώστε να ελλιμενιστούν στις κατάλληλες θέσεις στους τερματικούς σταθμούς, όπως ακριβώς συμβαίνει κατά τον έλεγχο των εισερχόμενων πλοίων στους λιμένες σε πραγματικές καταστάσεις. Βασικός στόχος του προβλήματος αποτελεί η εξυπηρέτηση των πλοίων στις κατάλληλες θέσεις ελλιμενισμού τους παράλληλα με την ελάχιστη παραμονή τους σε αυτές στους τερματικούς σταθμούς.

Ακολουθούν οι βασικές μεταβλητές και οι σταθερές για την επεξήγηση του προτεινόμενου μαθηματικού μοντέλου:

- $N$ : Το σύνολο του στόλου των πλοίων
- $i, j$ : Τα πλοία  $i, j$  από τον διαθέσιμο στόλο με  $(i, j) \in N$
- $K$ : Το σύνολο των τερματικών σταθμών
- $k$ : Ο τερματικός σταθμός  $k$  με  $k \in K$
- $T_i^k$ : Ο χρόνος παραμονής του πλοίου  $i$  στον τερματικό σταθμό  $k$
- $Ht_i^k$ : Ο συνολικός χρόνος εξυπηρέτησης του πλοίου  $i$  στον τερματικό σταθμό  $k$

- $ht_i^k$ : Ο χρόνος εξυπηρέτησης του πλοίου  $i$  στον τερματικό σταθμό  $k$
- $Wt_i^k$ : Ο χρόνος αναμονής του πλοίου  $i$  στον τερματικό σταθμό  $k$
- $t_i^k$ : Ο χρόνος προσέγγισης/αναχώρησης του πλοίου  $i$  στον/από τον τερματικό σταθμό  $k$
- $At_i$ : Το κάτω όριο του χρονικού παραθύρου εξυπηρέτησης του πλοίου  $i$
- $Bt_i$ : Το άνω όριο του χρονικού παραθύρου εξυπηρέτησης για το πλοίο  $i$
- $s^k$ : Ο χρόνος έναρξης της διαθεσιμότητας του τερματικού σταθμού  $k$
- $e^k$ : Ο χρόνος λήξης της διαθεσιμότητας του τερματικού σταθμού  $k$
- $l_i$ : Το μήκος του πλοίου  $i$
- $d_i$ : Το βύθισμα του πλοίου  $i$
- $l_k$ : Το μήκος του τερματικού σταθμού  $k$
- $d_k$ : Το βάθος του τερματικού σταθμού  $k$
- $M$ : Μεγάλος θετικός αριθμός
- $x_{ij}^k$ : Μεταβλητή απόφασης με  $x_{ij}^k = 1$ , εάν το πλοίο  $j$  έχει εξυπηρετηθεί μετά το πλοίο  $i$  στον τερματικό σταθμό  $k$

Το μοντέλο DDBAP περιγράφεται ως ένα γράφημα με  $G = (V, A)$ , όπου το σύνολο των κορυφών του γραφήματος  $V = N \cup \{o, d\}$  αποτελείται από το σύνολο των πλοίων  $N$  και  $(o, d)$  αντιπροσωπεύουν τους κόμβους προέλευσης και προορισμού για οποιαδήποτε διαδρομή στο γράφημα. Ως  $A = V \times V$  συμβολίζεται το σύνολο των τόξων του γραφήματος. Κάθε πλοίο  $i$  διαθέτει καθορισμένες διαστάσεις  $l_i, d_i$  (μήκος, βάθος) και αντιστοιχίζεται με καθορισμένα χρονικά παράθυρα άφιξης και αναχώρησης  $[a_i, b_i]$  προς και από τους λιμένες. Κατά τον ελλιμενισμό του πλοίου  $i$  υπολογίζονται ο χρόνος αναμονής  $Wt_i^k$ , ο χρόνος προσέγγισης/αναχώρησης  $t_i^k$  και ο χρόνος εξυπηρέτησης  $ht_i^k$  του στον τερματικό σταθμό  $k$ . Ο συνολικός χρόνος εξυπηρέτησης του πλοίου  $i$  στον τερματικό σταθμό  $k$  συμβολίζεται με  $Ht_i^k$ . Η έναρξη και ολοκλήρωση των διαδικασιών εξυπηρέτησης στον τερματικό σταθμό  $k$  αποτυπώνονται από τις μεταβλητές  $T_{o(k)}^k$  και  $T_{d(k)}^k$  αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, οι χρονικές περιόδους διαθεσιμότητας  $[s_k, e_k]$  και οι διαστάσεις  $l_k, d_k$  (μήκος, βάθος) διαφέρουν για κάθε τερματικό σταθμό  $k$ . Τέλος, ο επιτυχημένος ελλιμενισμός των πλοίων  $i, x$  εκφράζεται από την μεταβλητή απόφασης  $x_{ij}^k$ , ενώ ο χρόνος

παραμονής του κάθε πλοίου  $i$  στον τερματικό σταθμό  $k$  περιγράφεται από την μεταβλητή  $T_i^k$ .

Η προτεινόμενη μοντελοποίηση για το δυναμικό πρόβλημα του ελλιμενισμού των πλοίων με γεωμετρικούς περιορισμούς (DDBAP) είναι η ακόλουθη:

$$\min \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} (T_i^k - At_i + Ht_i^k \sum_{j \in N \cup \{d\}} x_{ij}^k) \quad (3.84)$$

υπό τους περιορισμούς

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{ij}^k = 1, \quad \forall i \in N \quad (3.85)$$

$$\sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{o(k),j}^k = 1, \quad \forall k \in K \quad (3.86)$$

$$\sum_{i \in N \cup \{o(k)\}} x_{i,d(k)}^k = 1, \quad \forall k \in K \quad (3.87)$$

$$\sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{ij}^k - \sum_{j \in N \cup \{o(k)\}} x_{ji}^k = 0, \quad \forall k \in K, i \in N \quad (3.88)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} l_i x_{ij}^k \leq l_k, \quad \forall i \in N \quad (3.89)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} d_i x_{ij}^k \leq d_k, \quad \forall i \in N \quad (3.90)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} d_i x_{ij}^k + d_i x_{ij}^k \leq l_k + d_k, \quad \forall i \in N \quad (3.91)$$

$$Wt_i^k = \max\{0, -At_i + \sum_{j=i-1}^1 t_j^k x_{jk}\}, \quad \forall i \in N, \forall k \in K \quad (3.92)$$

$$Ht_i^k = Wt_i^k + t_i^k + ht_i^k + t_i^k, \quad \forall i \in N, \forall k \in K \quad (3.93)$$

$$T_i^k + Ht_i^k - T_j^k \leq (1 - x_{ij}^k)M_{ij}^k, \quad \forall k \in K, (i, j) \in A \quad (3.94)$$

$$At_i \leq T_i^k, \quad \forall k \in K, i \in N \quad (3.95)$$

$$T_i^k + Ht_i^k \sum_{j \in N \cup \{d(k)\}} x_{ij}^k \leq Bt_i, \quad \forall k \in K, i \in N \quad (3.96)$$

$$s^k \leq T_{o(k)}^k, \quad \forall k \in K \quad (3.97)$$

$$T_{d(k)}^k \leq e^k, \quad \forall k \in K \quad (3.98)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\}, \quad \forall k \in K, (i, j) \in A \quad (3.99)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (3.84) στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του χρόνου παραμονής στους τερματικούς σταθμούς των λιμένων. Ο περιορισμός (3.85) εξασφαλίζει την εξυπηρέτηση του κάθε πλοίου από έναν τερματικό σταθμό. Οι περιορισμοί (3.86) και (3.87) καθορίζουν τον αρχικό και τελικό κόμβο της διαδρομής, ενώ η διατήρηση της ροής στις υπόλοιπες κορυφές του γραφήματος δίδεται από τον περιορισμό (3.88). Οι περιορισμοί (3.89)-(3.91) αφορούν τους γεωμετρικούς περιορισμούς (μήκος, βάθος) των

πλοίων και τερματικών σταθμών. Ο χρόνος αναμονής των πλοίων πριν την εξυπηρέτηση τους από κάποιον τερματικό σταθμό απεικονίζεται στον περιορισμό (3.92). Ο συνολικός χρόνος εξυπηρέτησης ενός πλοίου σε έναν τερματικό σταθμό υπολογίζεται από τον περιορισμό (3.93). Η συνέπεια των μεταβλητών για τον χρόνο εξυπηρέτησης των πλοίων και για την αλληλουχία των θέσεων ελλιμενισμού στους τερματικούς σταθμούς διασφαλίζεται από τον περιορισμό (3.94). Τα χρονικά παράθυρα εξυπηρέτησης των πλοίων καθορίζονται από τους περιορισμούς (3.95) και (3.96), ενώ οι χρόνοι διαθεσιμότητας των τερματικών σταθμών παρουσιάζονται από τους περιορισμούς (3.97) και (3.98). Τέλος, η μεταβλητή απόφασης  $x_{ij}^k$  λαμβάνει δυαδικές τιμές σύμφωνα με τον περιορισμό (3.99)

## Κεφάλαιο 4

# Ελλιμενισμός πλοίων (Berth Allocation)

### 4.1 Εισαγωγή

Το Κεφάλαιο 4 εστιάζει στο πρόβλημα του ελλιμενισμού των πλοίων και πιο συγκεκριμένα σε δύο παραλλαγές της δυναμικής προσέγγισης αυτού. Το κεφάλαιο ξεκινά με την περιγραφή των δεδομένων από τις δύο προσεγγίσεις του προβλήματος, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στη μετέπειτα πειραματική διαδικασία. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τέσσερις βασικοί αλγόριθμοι, στους οποίους στηρίζονται οι προτεινόμενες μεθοδολογίες επίλυσης της παρούσας διατριβής. Ακολουθούν τρία υποκεφάλαια με την δομή και το περιεχόμενο των μεθοδολογιών αυτών. Ειδικότερα, στο υποκεφάλαιο 4.4 περιγράφεται η διαδικασία για τη δημιουργία των αρχικών λύσεων. Το υποκεφάλαιο 4.5 οργανώνεται με την περιγραφή των υλοποιημένων μεθόδων τοπικής αναζήτησης. Το 4.6 υποκεφάλαιο αποτελεί τη σημαντικότερη ενότητα του κεφαλαίου, καθώς σε αυτό παρουσιάζονται οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι και αναλύονται λεπτομερώς οι αλλαγές και οι τροποποιήσεις αυτών για την επιτυχημένη εφαρμογή τους στα προβλήματα ελλιμενισμού των πλοίων. Τέλος στις υποενότητες 4.7 και 4.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την εφαρμογή των προτεινόμενων μεθόδων για την επίλυση των προβλημάτων του ελλιμενισμού των πλοίων. Για καθεμιά από τις δύο προσεγγίσεις παρατείνονται οι συγκρίσεις των τιμών από την πειραματική διαδικασία σε σχέση με τις αντίστοιχες από την επιστημονική βιβλιογραφία για την ανάδειξη της δυναμικής και της ευρωστίας των υλοποιημένων αλγορίθμων.



## 4.2 Δεδομένα προβλήματων DBAP

Στους περισσότερους λιμένες παγκοσμίως, οι θαλάσσιοι τερματικοί σταθμοί οργανώνονται και οριοθετούνται κατάλληλα για την αποτελεσματικότερη εξυπηρέτηση των πλοίων κατά την διαδικασία της φόρτωσης και εκφόρτωσης των εμπορευματοκιβωτίων. Η ανάθεση και η εκχώρηση των εισερχόμενων πλοίων κατά τον ελλιμενισμό τους στους τερματικούς σταθμούς ονομάζονται ως διακριτό πρόβλημα ελλιμενισμού των πλοίων (Discrete Berth Allocation Problem) στην επιστημονική βιβλιογραφία. Στόχος του συγκεκριμένου προβλήματος αποτελεί η ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου παραμονής των πλοίων στα λιμάνια.

Όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2 με την λεπτομερή ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, το πρόβλημα του ελλιμενισμού με βάση τους χρονικούς περιορισμούς συνηθέστερα διακρίνεται και επιλύεται σε δύο από τις βασικές υποκατηγορίες, αυτές της δυναμικής και της στατικής άφιξης των πλοίων. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή εξετάζεται η δυναμική υποκατηγορία και ειδικότερα δύο προσεγγίσεις αυτής. Οι δύο προσεγγίσεις αποτελούν παραλλαγές του κλασικού προβλήματος του ελλιμενισμού των πλοίων, καθώς αφορούν την δυναμική και διακριτή έκδοση του. Η πρώτη από τις δύο προτάθηκε στην βιβλιογραφία από τους Lalla-Ruiz et al.[144] με ακρωνύμιο ως DBAP. Αναφορικά με την δεύτερη προσέγγιση του συγκεκριμένου προβλήματος παρουσιάστηκε από τους Prencipe and Marinelli[222] και συμβολίζεται με DDBAP.

Η προσέγγιση DBAP παρατηρείται στις εργασίες των Lalla-Ruiz et al.[144] και των Kramer et al.[143], από τις οποίες αντλούνται τα πειραματικά δεδομένα για την εφαρμογή των προτεινόμενων αλγοριθμικών μεθόδων. Οι συγκεκριμένες εργασίες παρέχουν συνολικά 110 παραδείγματα (90+20), τα οποία περιέχουν απαραίτητα χαρακτηριστικά για τον συνολικό αριθμό των εισερχόμενων πλοίων και των τερματικών σταθμών, τον χρόνο άφιξης και τον χρόνο εξυπηρέτησης του κάθε πλοίου σε κάθε ένα τερματικό σταθμό και το κατώτατο και το ανώτατο χρονικό όριο διαθεσιμότητας του κάθε τερματικού σταθμού. Η δημιουργία αυτού του ρεαλιστικού συνόλου παραδειγμάτων βασίζεται σε πραγματικά δεδομένα από την εργασία των Cordeau et al.[46], οι οποίοι άντλησαν τα δεδομένα από πραγματικές συνθήκες και πιο συγκεκριμένα στο λιμάνι Gioia Tauro της Ιταλίας.

Η επόμενη προσέγγιση DDBAP παρατείνεται από τους Prencipe and Marinelli[222]. Στην συγκεκριμένη προσέγγιση, οι αρθρογράφοι προτείνουν μία νέα παράμετρο για το πρόβλημα του ελλιμενισμού, αυτή του χρόνου προετοιμασίας για την άφιξη/αναχώρηση του εισερχόμενου πλοίου σε κάποιο τερματικό σταθμό, η οποία δεν έχει προταθεί μέχρι στιγμής από κάποιον άλλον ερευνητή. Το σύνολο των παραδειγμάτων αριθμείται σε δέκα (10). Ειδικότερα, στα χαρακτηριστικά των δεδομένων περιλαμβάνονται ο ακριβής

αριθμός των εισερχόμενων πλοίων και των τερματικών σταθμών, οι χρόνοι άφιξης και εξυπηρέτησης των πλοίων, καθώς και ο χρόνος προετοιμασίας για άφιξη/αναχώρηση από κάθε τερματικό σταθμό. Παρόλο τον λιγοστό αριθμό πειραματικών δεδομένων, στην προσέγγιση DDBAP λαμβάνονται υπόψη επιπρόσθετοι περιορισμοί σε αντίθεση με την DBAP. Για κάθε πλοίο και τερματικό σταθμό ορίζονται οι απαραίτητες διαστάσεις τους (γεωμετρικοί περιορισμοί), οι οποίες αφορούν το μήκος (η έκταση τους υπολογισμένη σε μέτρα) και το βάθος (καθορίζεται το βύθισμα του πλοίου, ενώ το μέγιστο επιτρεπτό βάθος για τον τερματικό σταθμό υπολογισμένα σε μέτρα). Όπως και στην προηγούμενη προσέγγιση, οι Prencipe and Marinelli[222] εξήγαγαν τα δεδομένα από πραγματικές καταστάσεις και ειδικότερα από την περιοχή του λιμανιού Livorno στην Ιταλία.

### 4.3 Υπάρχουσες μεθοδολογίες επίλυσης

Τα περισσότερα προβλήματα μαθηματικής φύσεως χαρακτηρίζονται από αυξημένη πολυπλοκότητα, καθώς απαιτείται η χρησιμοποίηση υπολογιστικών συστημάτων για την εύρεση των βέλτιστων λύσεων. Το πρόβλημα ελλιμενισμού των πλοίων αποτελεί ένα σύνθετο πρόβλημα συνδυαστικής βελτιστοποίησης. Εξαιτίας της ιδιαιτερότητας του συγκεκριμένου προβλήματος, οι δύο προσεγγίσεις (DBAP, DDBAP) ανήκουν στην κατηγορία των  $\mathcal{NP}$ -Hard προβλημάτων. Επομένως, για την δημιουργία εφικτών λύσεων σε ρεαλιστικό υπολογιστικό χρόνο συνηθίζεται η υλοποίηση ευρετικών ή/και μεθευρετικών αλγορίθμων. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα επιλέγονται τέσσερις βασικές αλγοριθμικές μεθοδολογίες, οι οποίες τροποποιούνται κατάλληλα για την αποτελεσματική επίλυση του. Οι επιλεγμένοι αλγόριθμοι από την επιστημονική βιβλιογραφία είναι οι εξής:

- Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Ζευγαρώματος Μελισσών - Honey Bees Mating Optimization (HBMO)
- Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Ζευγαρώματος Μπάμπουρων - Bumble Bees Mating Optimization (BBMO)
- Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Πεταλούδας Μονάρχη - Monarch Butterfly Optimization (MBO)
- Αλγόριθμος Ζευγαρώματος Πυγολαμπίδων - Firefly Mating Optimization (FMA)

Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζονται οι τέσσερις αλγόριθμοι σε μία σύντομη περιγραφή και περιεκτική παρουσίαση των βασικών χαρακτηριστικών τους, όπως έχουν προταθεί στην επιστημονική βιβλιογραφία.

### 4.3.1 Honey Bees Mating Optimization - HBMO

Στην κατηγορία των μεθευρετικών αλγορίθμων και ειδικότερα σε αυτή των αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους εντάσσεται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης Ζευγαρώματος Μελισσών (Honey Bees Mating Optimization - HBMO). Όπως διακρίνεται από την ονομασία της, η μεθοδολογία επίλυσης στηρίζεται σε μία από τις σημαντικότερες διαδικασίες για τις μέλισσες, αυτή του ζευγαρώματος, καθώς διασφαλίζεται διαμέσου αυτής η επιβίωσή τους. Για αυτό το λόγο ο συγκεκριμένος τύπος μελισσών θεωρείται από τους πιο ευφυείς και οργανωτικούς στην οικογένεια των ιπτάμενων εντόμων, καθώς κάθε μέλισσα διαθέτει συγκεκριμένο ρόλο και σκοπό μέσα στην κυψέλη. Η αποικία των μελισσών οργανώνεται σε τρία διαφορετικά είδη, τα οποία διακρίνονται στην βασίλισσα, τις εργάτριες και τους κηφήνες. Για κάθε είδος μέλισσας ανατίθεται διαφορετικός ρόλος κατά την διαδικασία του ζευγαρώματος. Η προσομείωση της λειτουργίας της κυψέλης και πιο συγκεκριμένα η διαδικασία του ζευγαρώματος των μελισσών αποτελεί τον αλγόριθμο HBMO, ο οποίος προτείνεται από τον Abbass[1]. Ο HBMO θεωρείται αρκετά δημοφιλής ως μέθοδος επίλυσης συνδιαστικών προβλημάτων, καθώς προσφέρει ευελιξία κατά την εφαρμογή σε διακριτά και συνεχή προβλήματα βελτιστοποίησης. Ο αλγόριθμος HBMO διαθέτει δύο βασικές λειτουργίες, οι οποίες στηρίζονται στο ζευγάρι των κηφήνων με την βασίλισσα και στην πτήση της βασίλισσας κατά την διάρκεια του ζευγαρώματος. Η διαδικασία του ζευγαρώματος των κηφήνων πραγματοποιείται με κάποια πιθανότητα, ενώ η πτήση της βασίλισσας στον χώρο καθορίζεται από την ενέργεια και την ταχύτητα της. Με τη δημιουργία των νεογνών κηφήνων αξιολογείται η ποιότητά τους και οι ισχυρότεροι επιλέγονται για ζευγάρι κατά τη νέα πτήση της βασίλισσας.

### 4.3.2 Bumble Bees Mating Optimization - BBMO

Στην κατηγορία αλγορίθμων νοημοσύνης σμήνους ανήκει ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης Ζευγαρώματος Μπάμπουρων (Bumble Bees Mating Optimization - BBMO), ο οποίος προτείνεται από τους Marinakis et al.[183, 184]. Αντίστοιχα με τη μεθοδολογία HBMO των μελισσών, ο αλγόριθμος BBMO βασίζεται στον μηχανισμό του ζευγαρώματος των μπάμπουρων με στόχο την επιβίωση της αποικίας τους. Εντός της κυψέλης διακρίνονται τριών ειδών διαφορετικοί ρόλοι για κάθε μέλος της και πιο συγκεκριμένα σε αυτούς των βασιλισσών, των εργατριών και των κηφήνων. Το πλήθος των μπάμπουρων αποτελεί των αριθμό των λύσεων ενός προβλήματος, οι βασίλισσες θεωρούνται οι κυρίαρχες λύσεις, ενώ οι εργάτριες και οι κηφήνες παίζουν ενεργό και σημαντικό ρόλο στην παραγωγική διαδικασία των νέων λύσεων σε αντίθεση με τον HBMO. Για την δημιουργία των απογόνων χρησιμοποιείται ο τελεστής διασταύρωσης μεταξύ βασιλισσών και κηφήνων

για την παραγωγή νέων βασιλισσών, καθώς και ο τελεστής μετάλλαξης μεταξύ βασιλισσών και εργατριών για την παραγωγή νέων κηφήνων. Από τη συγκεκριμένη διαδικασία επιλέγονται για ζευγάρωμα οι ισχυρότεροι νέοι κηφήνες με τις νέες βασίλισσες, όπως ακριβώς πραγματοποιείται στον HBMO. Ο αλγόριθμος BBMO εφαρμόζεται σε πολυσύνθετα προβλήματα βελτιστοποίησης, καθώς η ύπαρξη πολλών διαφορετικών παραμέτρων προσφέρει ιδιαίτερη αποτελεσματικότητα στην παραγωγή εφικτών λύσεων.

### 4.3.3 Monarch Butterfly Optimization - MBO

Μία ακόμα μεθοδολογία επίλυσης προβλημάτων αυξημένης πολυπλοκότητας θεωρείται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης Πεταλούδας Μονάρχη (Monarch Butterfly Optimization Algorithm - MBO). Η συγκεκριμένη αλγοριθμική μέθοδος λαμβάνει το όνομά της από την πεταλούδα Μονάρχη, η οποία εντοπίζεται στον Καναδά και στις Η.Π.Α και ζει και μεταναστεύει σε σμήνος (πλήθος από πεταλούδες). Ο MBO προτείνεται από τους Wang et al.[268] ως ένας διαφορετικός και πρωτότυπος αλγόριθμος συνδυαστικής βελτιστοποίησης, ο οποίος εντάσσεται στην κατηγορία των μεθευρετικών αλγορίθμων και πιο συγκεκριμένα στον αλγόριθμο εμπνευσμένων από τη φύση. Πρόκειται για μία καινούργια και ανερχόμενη μέθοδο με καινοτόμες τεχνικές, οι οποίες προσομοιώνουν την διαδικασία της μετανάστευσης των πεταλούδων (butterfly migration operation). Στον MBO, ο πληθυσμός των πεταλούδων αντιπροσωπεύει τις λύσεις ενός προβλήματος. Κατά τη διαδικασία της μετανάστευσης διαχωρίζεται ο κύριος πληθυσμός σε δύο ισόποσους υποπληθυσμούς. Για κάθε υποπληθυσμό εφαρμόζονται δύο ξεχωριστές εξισώσεις πιθανότητας με στόχο την δημιουργία ενός νέου και ποιοτικότερου πληθυσμού πεταλούδων. Η ευκολία στην υλοποίηση και στην εφαρμογή του σε διακριτά και συνεχή προβλήματα βελτιστοποίησης καθιστά τον MBO ιδιαίτερα δημοφιλή στην επίλυση σύνθετων μαθηματικών και μηχανολογικών προβλημάτων. Και αυτό παρατηρείται στην επιστημονική βιβλιογραφία από την ποικιλία εργασιών με διαφορετικές τροποποιήσεις του κλασικού MBO αλγορίθμου. Ενδεικτικά προτείνεται η εργασία των Feng et al.[68], η οποία περιέχει εναλλακτικές προσεγγίσεις και εφαρμογές του MBO.

### 4.3.4 Firefly Mating Algorithm - FMA

Ο αλγόριθμος Ζευγαρώματος Πυγολαμπίδας (Firefly Algorithm - FMA) ανήκει στην κατηγορία των μεθευρετικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης, ο οποίος βασίζεται στη συμπεριφορά των πυγολαμπίδων. Η συγκεκριμένη μέθοδος επίλυσης προτείνεται από τους Ritthipakdee et al.[224]. Οι πυγολαμπίδες διαθέτουν ειδικούς μηχανισμούς για την έλξη συντρόφου, όπως η βιοφωταύγεια (bioluminescence) και η φερομόνη. Ο πρώτος

μηχανισμός χρησιμοποιείται από τα αρσενικά, η οποίος βασίζεται στην λάμψη του φωτός, ενώ ο δεύτερος από τα θηλυκά, την οποία τα ίδια παράγουν. Τόσο η ένταση του φωτός, όσο και της φερομόνης παίζει σημαντικό ρόλο στη διαδικασία επιλογής και προσέλκυσης του συντρόφου. Κάθε θηλυκή πυγολαμπίδα μετακινείται στην περιοχή με τις πιο φωτεινές αρσενικές πυγολαμπίδες, καθώς η λάμψη του φωτός αντιπροσωπεύει την ελκυστικότητα του πιθανού συντρόφου. Επιπρόσθετα, κάθε αρσενική πυγολαμπίδα ελκύεται από την ένταση της φερομόνης των θηλυκών, η οποία υποδεικνύει την ποιότητα του πιθανού συντρόφου. Η διαδικασία του ζευγαρώματος διαρκεί όσο τα αρσενικά διαθέτουν σπέρμα και η σπερματοθήκη των θηλυκών δεν έχει γεμίσει. Βασικά πλεονεκτήματα του αλγόριθμου βελτιστοποίησης της πυγολαμπίδας αποτελούν η απλότητα και η ευκολία στην εφαρμογή του, καθώς θεωρείται εξαιρετικά αποτελεσματικός στη βελτιστοποίηση τόσο συνεχών όσο και διακριτών προβλημάτων βελτιστοποίησης.

## 4.4 Δημιουργία αρχικών λύσεων

Η επίλυση των προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης επιτυγχάνεται μέσα από την υλοποίηση μία σειράς συγκεκριμένων βημάτων. Για την αρχική αντιμετώπιση του κάθε προβλήματος προϋποτίθεται η δημιουργία των αρχικών λύσεων. Συνηθέστερα, για την δημιουργία τους εφαρμόζονται μεθοδολογίες από τις κατηγορίες των ευρετικών ή των μεθυρετικών αλγορίθμων. Μία από τις πιο γνωστές αλγοριθμικές μεθόδους θεωρείται η Διαδικασία Άπληστης Τυχαιοποιημένης Προσαρμοστικής Αναζήτησης (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure - GRASP), η οποία εντάσσεται στην κατηγορία των μεθυρετικών αλγορίθμων και προτείνεται από τους Feo και Resende[69]. Η κατασκευή των λύσεων επιτυγχάνεται μέσα από μία επαναληπτική διαδικασία, κατά την οποία επιλέγονται άπληστα και τυχαία οι υποψήφιοι αριθμητικές τιμές με στόχο την αποφυγή τοπικών ελαχίστων ή βέλτιστων, ανάλογα με την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος. Σε κάθε βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας πραγματοποιείται η επιλογή των αριθμητικών στοιχείων μέσα από μία λίστα περιορισμένων υποψηφίων (restricted candidate list), στην οποία όλα τα στοιχεία κατατάσσονται με βάση μία συνάρτηση βαθμολόγησης. Στην συνέχεια επιλέγεται τυχαία κάποιο υποψήφιο στοιχείο από την λίστα για εισαγωγή του στην μη ολοκληρωμένη λύση. Ο τερματισμός της μεθόδου επιτυγχάνεται με την ολοκλήρωση της λύσης από τα εναπομείναντα υποψήφια στοιχεία.

Η Διαδικασία Άπληστης Τυχαιοποιημένης Προσαρμοστικής Αναζήτησης ή GRASP θεωρείται ιδιαίτερα διαδεδομένη μέθοδος στην επιστημονική βιβλιογραφία εξαιτίας του διευρυσμένου εύρους εφαρμογής της σε διάφορα επιστημονικά πεδία και προβλήματα. Αυτό οφείλεται στην ευελιξία της ως μέθοδος, καθώς συνδυάζει τόσο τη διάχυση, όσο

την εντατικοποίηση στον χώρο των λύσεων βελτιώνοντας επαναληπτικά τις κατασκευασμένες λύσεις. Ειδικότερα, η ευκολία στην υλοποίηση της και η δυνατότητα επιπρόσθετης μετατροπής της βασικής της δομής ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε προβλήματος αποτέλεσαν τα κυριότερα χαρακτηριστικά στην επιλογή του GRASP ως τη μέθοδο για την δημιουργία των αρχικών λύσεων στις δύο προσεγγίσεις των προβλημάτων ελλιμενισμού. Πιο συγκεκριμένα, η προτεινόμενη μέθοδος GRASP διαχωρίζεται σε δύο φάσεις, όπου η πρώτη περιλαμβάνει τις διαδικασίες δημιουργίας των αρχικών λύσεων, ενώ η δεύτερη εστιάζει στην επιδιόρθωσή τους. Στην συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή, κατά την πειραματική διαδικασία παρατηρήθηκε με αυξημένη συχνότητα η αδυναμία της δημιουργίας εφικτών αρχικών λύσεων, καθώς στις περισσότερες λύσεις καθίστατο αδύνατη η εισαγωγή όλων των πλοίων σε κάποιον από τους διαθέσιμους τερματικούς σταθμούς. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στην ιδιαίτερη πολυπλοκότητα και στους αυστηρούς περιορισμούς των προβλημάτων ελλιμενισμού. Συνεπώς, η προτεινόμενη μέθοδος GRASP υλοποιείται σε δύο βασικά στάδια. Χαρακτηριστικά, η υλοποιημένη μέθοδος περιγράφεται στον ψευδοκώδικα Αλγόριθμος 1, καθώς και η αναλύση της ακολουθεί στην επόμενη παράγραφο.

Για την εκκίνηση της μεθόδου δίδονται ως δεδομένα ο αριθμός των αρχικών λύσεων ( $s$ ), ο αριθμός των πλοίων ( $v$ ), τα οποία αποτελούν τη λύση, καθώς και ο αριθμός των τερματικών σταθμών ( $t$ ), στους οποίους θα εισαχθούν τα πλοία. Το πρώτο στάδιο (Στάδιο 1, γραμμές 4-19) επικεντρώνεται στη δημιουργία των αρχικών λύσεων του προβλήματος. Πριν την έναρξη της βασικής επαναληπτικής διαδικασίας της μεθόδου απαιτείται η αρχικοποίηση της λίστας των περιορισμένων υποψηφίων ( $l$ ). Το μέγεθος της λίστας εξαρτάται από τον συνολικό αριθμό των τερματικών σταθμών, το οποίο παραμένει σταθερό μέχρι την ολοκλήρωση της πρώτης φάσης. Εάν π.χ. ο συνολικός αριθμός των τερματικών ισούται με τέσσερα, τότε αντίστοιχα το εύρος της λίστας των θα καθοριστεί με τέσσερα (δηλαδή,  $t = l = 4$ ). Κατά τη διάρκεια της επαναληπτικής διαδικασίας, για κάθε λύση ταξινομούνται με αύξουσα σειρά τα πλοία με βάση τον χρόνο άφιξης τους και στην συνέχεια επιλέγονται αυτά με τον νωρίτερο χρόνο (δηλαδή, το ελάχιστο χρονικό παράθυρο) ως υποψήφια για εισαγωγή στη λίστα  $l$ . Ακολουθεί η επιλογή ενός από τους διαθέσιμους τερματικούς σταθμούς, στον οποίο θα εκχωρηθεί κάποιο από τα πλοία της λίστας. Η επιλογή του υποψήφιου πλοίου πραγματοποιείται με ίση πιθανότητα και εφόσον η εισαγωγή του επιλέξιμου πλοίου πληροί όλους τους βασικούς περιορισμούς, τότε καταχωρείται επιτυχώς στην λύση. Στην περίπτωση της παραβίασης ενός από τους περιορισμούς, η εξυπηρέτηση του σε κάποιο τερματικό σταθμό κρίνεται ανεπιτυχής με αποτέλεσμα την αποθήκευση του στη λίστα μη εξυπηρετημένων υποψηφίων ( $u$ ) και την αναμονή του για επαναληπτική εισαγωγή στη δεύτερη φάση της μεθόδου.

Το δεύτερο στάδιο (Στάδιο 2, γραμμές 21-26) της μεθόδου GRASP εστιάζεται στην επιδιόρθωση των λύσεων με την εισαγωγή των μη εξυπηρετημένων πλοίων από το αντίστοιχο πρώτο. Διευκρινίζεται ότι, όταν στη λίστα μη εξυπηρετημένων υποψηφίων ( $u$ ) δεν έχει εισαχθεί κάποιο υποψήφιο πλοίο (δηλαδή είναι κενή), τότε η δεύτερη φάση παραλείπεται, καθώς οι αρχικές λύσεις έχουν κατασκευαστεί επιτυχώς στην πρώτη φάση και η μέθοδος ολοκληρώνεται. Το δεύτερο στάδιο περιλαμβάνει μία επαναληπτική διαδικασία εισαγωγής των εναπομείναντων υποψηφίων πλοίων, η οποία ολοκληρώνεται με την αφαίρεση τους από την λίστα των μη εξυπηρετημένων υποψηφίων. Εφόσον οι αρχικές λύσεις κατασκευάστηκαν επιτυχώς σε κάποιο ποσοστό, η μέθοδος αναζητεί τη βέλτιστη θέση σε κάποιο διαθέσιμο τερματικό σταθμό και τοποθετεί τα υποψήφια πλοία ανάμεσα στα αντίστοιχα ήδη ελλιμενισμένα. Με την επιλογή ενός νέου τερματικού σταθμού και την αφαίρεση του επιλεγμένου πλοίου από την λίστα  $u$  πραγματοποιείται η εισαγωγή του στη λύση. Με τη δημιουργία όλων των αρχικών λύσεων  $s$  ολοκληρώνεται το δεύτερο στάδιο και τερματίζεται η μέθοδος GRASP.

---

### Αλγόριθμος 1 GRASP

---

- 1: **Δεδομένα** : Αρχικές λύσεις  $s$ , Αριθμός πλοίων  $v$ , Αριθμός τερματικών σταθμών  $t$
  - 2: **Μεταβλητές** : Πλοίο  $u^*$  όπου κάθε  $u^* \in v$ , Τερματικός σταθμός  $t^*$  όπου κάθε  $t^* \in t$ , Λίστα περιορισμένων υποψηφίων  $l$ , Λίστα μη εξυπηρετημένων υποψηφίων  $u$ , Αριθμός επαναλήψεων  $i$
  - 3:
  - 4: Στάδιο 1 : Δημιουργία αρχικών λύσεων
  - 5: Αρχικοποίηση λίστας  $l$  με εύρος όσο ο συνολικός αριθμός των σταθμών  $t$
  - 6: **Για** κάθε λύση  $s^* \in s$
  - 7:     **Για** κάθε επανάληψη  $i$
  - 8:         Ταξινόμηση των πλοίων  $v$  με βάση χρόνο άφιξης τους
  - 9:         Εισαγωγή των υποψηφίων πλοίων  $v$  στην λίστα  $l$
  - 10:        Επιλογή ενός τερματικού σταθμού  $t^*$
  - 11:        Επιλογή ενός υποψήφιου πλοίου  $u^*$  για εισαγωγή στον τερματικό  $t^*$  στη λύση  $s^*$
  - 12:        Έλεγχος περιορισμών πριν την εισαγωγή στη λύση  $s^*$
  - 13:        **Αν** επιτυχής ο έλεγχος των περιορισμών
  - 14:              $s^* \leftarrow u^*$
  - 15:        Υπολογισμός κόστους λύσης  $s^*$
  - 16:        **Αλλιώς** ανεπιτυχής εισαγωγή
  - 17:              $u \leftarrow v^*$
  - 18:        **Τέλος αν**
  - 19:     **Τέλος για**
-

---

**Αλγόριθμος 2 GRASP(Συνέχεια)**

---

20: Σταδιο 2 : Επιδιόρθωση λύσεων  
21:     **Για** κάθε πλοίο  $v^*$  στην λίστα  $u$   
22:         Επιλογή ενός νέου τερματικού σταθμού  $t^*$   
23:         Εισαγωγή πλοίου  $v^*$  στην κατάλληλη θέση του τερματικού σταθμού  $t^*$   
24:         Υπολογισμός κόστους λύσης  $s^*$   
25:     **Τέλος για**  
26: **Τέλος για**  
27: Δημιουργία αρχικών εφικτών λύσεων  $s$   
28:  
29: **Έξοδος** :  $s$

---

## 4.5 Μέθοδοι τοπικής αναζήτησης

Οι μέθοδοι τοπικής αναζήτησης αποτελούν ουσιαστικά διαδικασίες βελτιστοποίησης, οι οποίες εξερευνούν επαναληπτικά μια γειτονιά από το χώρο των λύσεων και αναζητούν ποιοτικότερες λύσεις από την τρέχουσα λύση. Οι μεθοδολογίες αυτές θεωρούνται ιδιαίτερα αποτελεσματικές και αποδοτικές κατά την εφαρμογή τους σε προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης σε διάφορους επιστημονικούς τομείς, καθώς διαθέτουν μία σειρά από ειδικές και ευέλικτες τεχνικές, οι οποίες συμβάλλουν στην εντατικοποίηση της αναζήτησης των βέλτιστων λύσεων. Οι συγκεκριμένες διαδικασίες θεωρούνται κατάλληλες για την επίλυση των σύνθετων προβλημάτων της ναυτιλιακής εφοδιαστικής αλυσίδας, καθώς συμβάλλουν στη βελτίωση των πλωτών δρομολογίων των πλοίων και στον καθορισμό του βέλτιστου ελλιμενισμού τους στα λιμάνια. Λαμβάνοντας υπόψη επιπλέον παράγοντες, όπως η χωρητικότητα των πλοίων, η διαθεσιμότητα των τερματικών σταθμών και οι χρονικοί περιορισμοί της παραλαβής/παράδοσης των εμπορευμάτων, η κατάλληλη εφαρμογή των τεχνικών τοπικής αναζήτησης θεωρείται κομβική, καθώς η οποιαδήποτε βελτίωση στις τρέχουσες λύσεις επηρεάζει θετικά τη συνολική απόδοση της ναυτιλιακής εφοδιαστικής αλυσίδας.

Στην επιστημονική βιβλιογραφία παρατηρούνται κλασικές και εναλλακτικές τεχνικές αλλά και συνδυασμοί των ήδη υπαρχουσών μεθόδων τοπικής αναζήτησης. Ειδικότερα για τη βέλτιστη επίλυση των προβλημάτων ελλιμενισμού επιλέχθηκαν δύο κλασικές μέθοδοι και μία συνδυαστική τεχνική. Πιο συγκεκριμένα, οι επιλεγμένες τεχνικές αναζήτησης αποτελούνται από την Επανατοποθέτηση 1-0 (Relocate 1-0), την Ευρείας Κλίμακας σε Γειτονιά Αναζήτησης (Large Scale Neighbourhood Search - LSNS) και την Ανταλλαγή 1-1 (Exchange 1-1). Οι τρεις μεθοδολογίες ακολουθούν στις επόμενες υποενότητες με την σειρά αναφοράς τους.



## Επανατοποθέτηση 1-0

Η Επανατοποθέτηση 1-0 αποτελεί μία από τις δημοφιλέστερες και κλασικότερες μεθόδους τοπικής αναζήτησης εξαιτίας της απλότητας στην εφαρμογή της και της αποτελεσματικότητας στην παροχή ποιοτικών λύσεων. Ο σκοπός της με την επανατοποθέτηση στοιχείων από την τρέχουσα λύση συμβάλλει στην διεύρυνση της αναζήτησης σε μία καθορισμένη γειτονιά του χώρου των λύσεων. Στην διαδικασία επίλυσης των προβλήματων ελλιμενισμού εφαρμόζεται πρώτη από τις άλλες δύο μεθόδους και αμέσως μετά την κύρια αλγοριθμική διαδικασία. Χαρακτηριστικά, η μέθοδος της Επανατοποθέτησης 1-0 απεικονίζεται στον ψευδοκώδικα Αλγόριθμος 3. Η μέθοδος της επανατοποθέτησης βασίζεται σε μία επαναληπτική διαδικασία, στην οποία πραγματοποιούνται αλλαγές σε όλες τις λύσεις με στόχο την βελτίωση της τρέχουσας επιλεγμένης λύσης και τερματίζεται μετά την ολοκλήρωση ενός καθορισμένου αριθμού επαναλήψεων. Ως δεδομένα εισάγονται η λύση του προβλήματος ( $s$ ), ο αριθμός των πλοίων ( $v$ ) και των τερματικών σταθμών ( $t$ ), καθώς και ο αριθμός των επαναλήψεων ( $i$ ), ο οποίος ορίζεται πριν την εκκίνηση της διαδικασίας. Σε κάθε επανάληψη της μεθόδου επιλέγονται οι δύο τερματικοί σταθμοί, από τους οποίους θα μετακινηθεί ένα υποψήφιο πλοίο. Πιο συγκεκριμένα, από τον πρώτο τερματικό σταθμό  $t_1^*$  επιλέγεται το πλοίο  $v^*$ , το οποίο θα εισαχθεί στον τερματικό σταθμό  $t_2^*$ . Μετά την αφαίρεση του από τον  $t_1^*$  και την εισαγωγή του στον  $t_2^*$  ακολουθεί ο υπολογισμός του νέου κόστους της λύσης ( $s'$ ). Εάν υπάρχει βελτίωση, η λύση  $s'$  αποθηκεύεται στη θέση της  $s$ , αλλιώς η μέθοδος συνεχίζει στην επόμενη επανάληψη χωρίς καμία αλλαγή.

---

### Αλγόριθμος 3 Επανατοποθέτηση 1-0

---

- 1: **Δεδομένα** : Λύση  $s$ , Αριθμός πλοίων  $v$ , Αριθμός τερματικών σταθμών  $t$
  - 2: **Μεταβλητές** : Βελτιωμένη λύση  $s'$ , Πλοίο  $v^*$  όπου κάθε  $v^* \in v$ , Τερματικός σταθμός  $t^*$  όπου κάθε  $t^* \in t$ , Αριθμός επαναλήψεων τοπικής αναζήτησης  $i$
  - 3:
  - 4: **Για** κάθε επανάληψη  $i$
  - 5:     Επιλογή τερματικών σταθμών  $t_1^*, t_2^*$  από λύση  $s$
  - 6:     Επιλογή πλοίου  $v^*$  για επανατοποθέτηση από τερματικό  $t_1^*$  σε τερματικό  $t_2^*$
  - 7:     Αφαίρεση πλοίου  $v^*$  από τερματικό  $t_1^*$  και εισαγωγή του σε τερματικό  $t_2^*$
  - 8:     Υπολογισμός νέου κόστους  $s'$
  - 9:     **Αν**  $s' < s$
  - 10:          $s = s'$
  - 11:     **Τέλος αν**
  - 12: **Τέλος για**
  - 13:
  - 14: **Έξοδος**:  $s$
-

## Αναζήτηση Ευρείας Κλίμακας σε Γειτονιά λύσεων

Η δεύτερη μέθοδος τοπικής αναζήτησης ονομάζεται Αναζήτηση Ευρείας Κλίμακας σε Γειτονιά λύσεων. Θεωρείται μια καινούργια μεθοδος σε σχέση με άλλες πιο κλασικές, καθώς η εφαρμογή της παρατηρείται σχετικά πρόσφατα σε μεγάλη συχνότητα σε προβλήματα με ιδιαίτερα αυξημένη πολυπλοκότητα. Η απόδοσή της ποικίλει ανάλογα με την υλοποίησή της, καθώς συνδυάζει τη διάχυση στον χώρο λύσεων με την εντατικοποίηση της αναζήτησης ποιοτικότερων λύσεων. Στα προβλήματα ελλιμενισμού η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόζεται για τη διεύρυνση της ποιότητας των λύσεων και κυρίως για την εξερεύνηση σε διαφορετικές περιοχές του χώρου των λύσεων, όταν η αναζήτηση περιορίζεται σε μία συγκεκριμένη γειτονιά λύσεων. Η δομή της μεθόδου παρουσιάζεται στον ψευδοκώδικα Αλγόριθμος 4. Για δεδομένα θεωρούνται η λύση του προβλήματος ( $s$ ), ο αριθμός των πλοίων ( $v$ ) και των τερματικών σταθμών ( $t$ ), καθώς και ο συνολικός αριθμός των επαναλήψεων ( $i$ ) της μεθόδου. Σε κάθε επανάληψη επιλέγονται δύο τερματικοί σταθμοί, από τους οποίους θα μετακινηθούν εκατέρωθεν περισσότερα από ένα πλοία. Πιο συγκεκριμένα, ο αριθμός των επιλεγμένων πλοίων για μετακίνηση μεταξύ δύο τερματικών σταθμών μπορεί να παραμένει ίδιος ή να διαφέρει. Μετά την εισαγωγή των πλοίων σε κάθε ένα τερματικό σταθμό ακολουθεί ο υπολογισμός του νέου κόστους της λύσης  $s'$ , και η σύγκριση με την προηγούμενη λύση  $s$  για την αποθήκευσή της ή όχι. Με αυτή την τεχνική τοπικής αναζήτησης διευρύνεται η εντατικοποίηση της αναζήτησης ποιοτικών λύσεων σε λιγότερο εξερευνημένες περιοχές του χώρου λύσεων.

---

### Αλγόριθμος 4 Αναζήτηση Ευρείας Κλίμακας σε Γειτονιά λύσεων

---

- 1: **Δεδομένα** : Λύση  $s$ , Αριθμός πλοίων  $v$ , Αριθμός τερματικών σταθμών  $t$
  - 2: **Μεταβλητές** : Βελτιωμένη λύση  $s'$ , Τερματικός σταθμός  $t^*$  όπου κάθε  $t^* \in t$ , Πλοία  $v^*_{\dots, x}$  όπου  $x$  ο τερματικός σταθμός ελλιμενισμού τους  $t^*_x$  για κάθε  $v^* \in v$ , Αριθμός επαναλήψεων τοπικής αναζήτησης  $i$
  - 3:
  - 4: **Για** κάθε επανάληψη  $i$
  - 5:     Επιλογή τερματικών σταθμών  $t^*_1, t^*_2$  από λύση  $s$
  - 6:     Επιλογή αριθμού πλοίων  $v^*_{\dots, 1}$  για εισαγωγή από τερματικό  $t^*_1$  σε τερματικό  $t^*_2$
  - 7:     Επιλογή αριθμού πλοίων  $v^*_{\dots, 2}$  για εισαγωγή από τερματικό  $t^*_2$  σε τερματικό  $t^*_1$
  - 8:     Υπολογισμός νέου κόστους  $s'$
  - 9:     **Αν**  $s' < s$
  - 10:          $s = s'$
  - 11:     **Τέλος αν**
  - 12: **Τέλος για**
  - 13:
  - 14: **Έξοδος**:  $s$
-

## Ανταλλαγή 1-1

Για τρίτη και τελευταία μέθοδος τοπικής αναζήτησης εφαρμόζεται η Ανταλλαγή 1-1. Θεωρείται από τις πιο αποδοτικές διαδικασίες εύρεσης βέλτιστων λύσεων, καθώς η υλοποίησή της παρατηρείται σε διάφορους επιστημονικούς κλάδους και σε πολυσύνθετα προβλήματα βελτιστοποίησης. Αυτό οφείλεται στο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της, το οποίο αφορά τη διεύρυνση της αναζήτησης σε περισσότερες από μία γειτονιές του χώρου των λύσεων. Λαμβάνοντας υπόψη αυτή την ιδιαίτερη δυνατότητά της, η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόζεται τρίτη κατά σειρά από τις άλλες δύο στην προσπάθεια εύρεσης της ολικά ελάχιστης λύσης των προβλημάτων ελλιμενισμού. Στον ψευδοκώδικα Αλγόριθμος 5 περιγράφεται η μέθοδος ανταλλαγή 1-1. Η μέθοδος αποτελείται από μία βασική επαναληπτική διαδικασία, της οποίας ο αριθμός των επαναλήψεων ( $i$ ) καθορίζεται κατά έναρξη της κύριας αλγοριθμικής διαδικασίας. Στα απαιτούμενα δεδομένα δίδονται η λύση του προβλήματος ( $s$ ), ο αριθμός των πλοίων ( $v$ ) και των τερματικών σταθμών ( $t$ ), ενώ με την ολοκλήρωση της διαδικασίας αποθηκεύονται οι αλλαγές στη βελτιωμένη λύση ( $s'$ ). Από τη λύση  $s$  επιλέγονται οι δύο τερματικοί σταθμοί  $t_1^*, t_2^*$ , από τους οποίους θα πραγματοποιηθεί η ανταλλαγή μεταξύ δύο πλοίων (ένα προς ένα από τον κάθε  $t^*$  ξεχωριστά). Με τον καθορισμό των δύο επιλέξιμων πλοίων  $v_1^*, v_2^*$  επιτυγχάνεται η μετακίνησή τους στους νέους τερματικούς σταθμούς. Ακολουθεί ο υπολογισμός της βελτιωμένης λύσης  $s'$ . Εάν υπάρξει μείωση στο κόστος ελλιμενισμού από την ανταλλαγή, τότε μόνο αποθηκεύονται οι νέες αλλαγές στη θέση της προηγούμενης λύσης  $s$ .

---

### Αλγόριθμος 5 Ανταλλαγή 1-1

---

- 1: **Δεδομένα** : Λύση  $s$ , Αριθμός πλοίων  $v$ , Αριθμός τερματικών σταθμών  $t$
  - 2: **Μεταβλητές** : Βελτιωμένη λύση  $s'$ , Πλοίο  $v^*$  όπου κάθε  $v^* \in v$ , Τερματικός σταθμός  $t^*$  όπου κάθε  $t^* \in t$ , Αριθμός επαναλήψεων τοπικής αναζήτησης  $i$
  - 3:
  - 4: **Για** κάθε επανάληψη  $i$
  - 5:     Επιλογή τερματικών σταθμών  $t_1^*, t_2^*$  από λύση  $s^*$
  - 6:     Επιλογή πλοίου  $v_1^*$  για εισαγωγή από τερματικό  $t_1^*$  σε τερματικό  $t_2^*$
  - 7:     Επιλογή πλοίου  $v_2^*$  για εισαγωγή από τερματικό  $t_2^*$  σε τερματικό  $t_1^*$
  - 8:     Υπολογισμός νέου κόστους  $s'$
  - 9:     **Αν**  $s' < s$
  - 10:          $s = s'$
  - 11:     **Τέλος αν**
  - 12: **Τέλος για**
  - 13:
  - 14: **Έξοδος**:  $s$
-

## 4.6 Προτεινόμενοι αλγόριθμοι επίλυσης

Εκτός από τις μεθόδους για την δημιουργία των αρχικών λύσεων και την τοπική αναζήτηση για την βελτίωσή τους απαιτείται η κατάλληλη επιλογή αλγοριθμικών διαδικασιών για την παροχή εφικτών λύσεων στα προβλήματα ελλιμενισμού των πλοίων. Οι επιλεγμένοι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης ανήκουν στην κατηγορία των μεθευρετικών αλγορίθμων και πιο συγκεκριμένα σε αυτή των αλγορίθμων εμπνευσμένων από την φύση. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή αναπτύσσονται και εφαρμόζονται για τις δύο προσεγγίσεις του δυναμικού και διακριτού πρόβληματος του ελλιμενισμού των πλοίων οι τέσσερις ακόλουθοι αλγόριθμοι:

- Αλγόριθμος Ζευγαρώματος Πυγολαμπίδων
- Αλγόριθμος Ζευγαρώματος Μελισσών
- Αλγόριθμος Ζευγαρώματος Μπούμπουρων
- Αλγόριθμος Πεταλούδας Μονάρχη

Οι τέσσερις προτεινόμενοι αλγόριθμοι ακολουθούν στη δομή και τη φιλοσοφία των κλασικών αλγορίθμων, όπως αυτοί παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία. Πιο συγκεκριμένα, οι αλγόριθμοι των πυγολαμπίδων, των μελισσών, των μπούμπουρων και των πεταλούδων βασίζονται στις εργασίες των Ritthipakdee et al.[224], Abbass[1], Marinakis et al.[183, 184] και των Wang et al.[268] αντίστοιχα. Ο κάθε αλγόριθμος ξεχωριστά διαθέτει μία σειρά από λειτουργίες, οι οποίες προσομοιώνουν πραγματικές καταστάσεις από φυσικές διαδικασίες. Ωστόσο παρατηρείται ότι, οι συγκεκριμένοι αλγορίθμοι εφαρμόζονται κυρίως σε συνεχή και όχι διακριτά προβλήματα βελτιστοποίησης, όπως αυτά του ελλιμενισμού των πλοίων. Συνεπώς, στους προτεινόμενους αλγορίθμους υλοποιούνται μια σειρά από καινοτόμες τεχνικές με σκοπό την μετατροπή τους από συνεχείς σε διακριτές μεθόδους επίλυσης για αντιμετώπιση των συγκεκριμένων προβλημάτων. Ειδικότερα, οι μετατροπές αυτές αντλούνται από τεχνικές των γενετικών αλγορίθμων, οι οποίοι φημίζονται για την αποτελεσματικότητά τους σε διακριτά προβλήματα βελτιστοποίησης. Διευκρινίζεται ότι, όλες οι αλλαγές και οι τροποποιήσεις στην βασική δομή των αλγορίθμων πραγματοποιούνται για την αποτελεσματικότερη εφαρμογή τους στα προβλήματα ελλιμενισμού των πλοίων και κατά επέκταση για την παροχή ποιοτικότερων λύσεων. Στη συνέχεια ακολουθούν τα υποενόητες με την ανάλυση και την παρουσίαση των προτεινόμενων αλγορίθμων.

#### 4.6.1 Αλγόριθμος Ζευγαρώματος Πυγολαμπίδων

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης ζευγαρώματος πυγολαμπιδων (Firefly Mating Algorithm - FMA) παρουσιάζεται ως επέκταση του κλασικού αλγορίθμου των πυγολαμπίδων και η εφαρμογή του προτείνεται σε συνεχή προβλήματα βελτιστοποίησης. Ο FMA θεωρείται κατάλληλος για την εφαρμογή στα προβλήματα ελλιμενισμού των πλοίων, καθώς διαθέτει ένα ευρύ πλήθος μεταβλητών, το οποίο επιτρέπει την υλοποίηση διαφόρων αλλαγών και καινοτόμων τροποποιήσεων στην κύρια δομή του αλγορίθμου. Χαρακτηριστικά, οι νέες μεταβλητές  $R, D$  εισάγονται για την διαδικασία υπολογισμού ενός συστήματος κατάταξης των λύσεων, ενώ οι  $\delta, \omega$  χρησιμοποιούνται ως δείκτες επιλογής των κατάλληλων συντρόφων για την διαδικασία του ζευγαρώματος και αντιπροσωπεύουν την λειτουργία του σπέρματος των αρσενικών και της σπερματοθήκης των θηλυκών.

Με την έναρξη του αλγορίθμου των πυγολαμπίδων δίδονται ως δεδομένα ο συνολικός αριθμός των πλοίων  $v$  και των τερματικών σταθμών  $t$ , οι οποίοι παραμένουν σταθεροί σε όλη την διάρκεια της αλγοριθμικής διαδικασίας. Σταθερές και καθορισμένες από την αρχή ορίζονται οι μεταβλητές του αριθμού των συνολικών λύσεων  $s$  και επαναλήψεων  $i$  του αλγορίθμου. Στην συνέχεια αρχικοποιούνται μία σειρά από μεταβλητές, οι οποίες χρησιμοποιούνται στην δημιουργία των αρχικών λύσεων, στη βασική φάση του αλγορίθμου και στις διαδικασίες της τοπικής αναζήτησης.

Αμέσως μετά ακολουθεί η διαδικασία της δημιουργίας των αρχικών λύσεων με την εφαρμογή της μεθόδου GRASP, όπως περιγράφεται αναλυτικά σε προηγούμενη ενότητα. Με την υλοποίηση σε δύο στάδια, οι κατασκευασμένες λύσεις ικανοποιούν τους περιορισμούς του προβλήματος και ο αλγόριθμος συνεχίζει με την κύρια λειτουργία του.

Η φάση του ζευγαρώματος στον αλγόριθμο FMA πραγματοποιείται με την εφαρμογή ενός γενετικού τελεστή και πιο συγκεκριμένα αυτόν της μετάλλαξης. Για την διαδικασία της μετάλλαξης υλοποιείται ένα σύστημα κατάταξης των δύο πληθυσμών με στόχο την ποιοτικότερη επιλογή συντρόφου (δηλαδή ποιο αρσενικό ταιριάζει με ποιο θηλυκό και αντίστροφα). Για την κατάταξή τους χρησιμοποιούνται δύο μεταβλητές, οι οποίες συμβολίζονται με  $P$  για τις θηλυκές λύσεις και με  $A$  αντίστοιχα για τις αρσενικές. Ο υπολογισμός τους επιτυγχάνεται από δύο ξεχωριστές εξισώσεις με διαφορετικά ορίσματα για κάθε μία μεταβλητή ξεχωριστά. Για τον υπολογισμό του  $A$  ισχύει:

$$A = m * e^{(-\gamma * R)}$$

Η μεταβλητές  $m, \gamma$  και  $R$  αντιπροσωπεύουν το κόστος της αρσενικής λύσης, μια τυχαία συνεχή μεταβλητή με εύρος τιμών στο διάστημα  $(0,1)$  και μία μεταβλητή υπολογισμού απόστασης αντίστοιχα. Ο υπολογισμός της μεταβλητής  $R$  πραγματοποιείται με

τον εξής τρόπο:

$$F = 1 \ 6 \ 8 \ 2 \ 4 \ 7 \ 3 \ 5 \ 10 \ 9$$

$$M = 7 \ 6 \ 2 \ 3 \ 4 \ 1 \ 10 \ 5 \ 8 \ 9$$

Επιλέγονται δύο λύσεις ως παράδειγμα, οι οποίες αντιπροσωπεύουν η πρώτη τον θηλυκό ( $F$ ) πληθυσμό και η δεύτερη τον αρσενικό ( $M$ ) αντίστοιχα. Λαμβάνοντας υπόψη την παραπάνω κωδικοποίηση των λύσεων ακολουθεί ο υπολογισμός του  $R$ :

$$R = \underbrace{|1-7|}_6 + \underbrace{|6-6|}_0 + \underbrace{|2-8|}_6 + \underbrace{|3-2|}_1 + \underbrace{|4-4|}_0 + \underbrace{|1-7|}_6$$

$$+ \underbrace{|10-3|}_7 + \underbrace{|5-5|}_0 + \underbrace{|8-10|}_2 + \underbrace{|9-9|}_0 = 28$$

Αντίστοιχα για την κατάταξη των θηλυκών λύσεων, η μεταβλητή  $P$  υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$P = f * (W * D)$$

Ως ορίσματα της παραπάνω εξίσωσης ορίζονται οι  $f$ ,  $W$  και  $D$  μεταβλητές, οι οποίες αντιστοιχίζονται με το κόστος της θηλυκής λύσης, μια τυχαία συνεχή μεταβλητή με εύρος τιμών στο διάστημα  $(0,1)$  και μια μεταβλητή υπολογισμού απόστασης. Όπως προηγουμένως στην περίπτωση της  $R$ , η μεταβλητή  $D$  υπολογίζεται με τον διαφορετικό τρόπο, ο οποίος ακολουθεί:

$$F = 1 \quad \underbrace{6}_{\checkmark} \quad 8 \quad 2 \quad \underbrace{4}_{\checkmark} \quad 7 \quad 3 \quad \underbrace{5}_{\checkmark} \quad 10 \quad \underbrace{9}_{\checkmark}$$

$$M = 7 \quad \underbrace{6}_{\checkmark} \quad 2 \quad 3 \quad \underbrace{4}_{\checkmark} \quad 1 \quad 10 \quad \underbrace{5}_{\checkmark} \quad 8 \quad \underbrace{9}_{\checkmark}$$

Αντίστοιχα με την περίπτωση της  $R$  επιλέγονται μία λύση από τον θηλυκό πληθυσμό ( $F$ ) και μία από τον αρσενικό ( $M$ ). Ο υπολογισμός της μεταβλητής  $D$  επιτυγχάνεται από το άθροισμα των όμοιων στοιχείων στις ίδιες θέσεις του διανύσματος των δύο λύσεων. Στο ακριβώς παραπάνω παράδειγμα χρωματίζονται με κόκκινο τα στοιχεία, τα οποία βρίσκονται σε όμοιες θέσεις, καθώς ισχύει  $D = 4$ .

Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας υπολογισμού των  $P$  και  $A$  για κάθε θηλυκό και αρσενικό αντίστοιχα ακολουθεί η κατάταξη των δύο πληθυσμών λύσεων με βάση τις συγκεκριμένες μεταβλητές. Π.χ. εάν οι πληθυσμοί  $f, m = 5$ , τότε μία πιθανή κατάταξη των πέντε αρσενικών λύσεων για πρώτο θηλυκό θα είναι η ακόλουθη:

- Αρσενικό 1:  $P = 227,53$

- Αρσενικό 2:  $P = 193,47$
- Αρσενικό 3:  $P = 231,67$
- Αρσενικό 4:  $P = 223,39$
- Αρσενικό 5:  $P = 205,12$

Ακολουθώντας μετά τους υπολογισμούς της μεταβλητής  $P$ , η κατάταξη των αρσενικών λύσεων για πρώτο θηλυκό σε αύξουσα σειρά είναι 2,5,4,1,3. Πιο συγκεκριμένα, το δεύτερο αρσενικό λαμβάνει την μικρότερη τιμή, ενώ το πέμπτο την μεγαλύτερη. Για την επιλογή του κατάλληλου αρσενικού χρησιμοποιείται η μεταβλητή  $\omega$ , η οποία λειτουργεί σαν δείκτης, λαμβάνει διακριτές τιμές και υποδεικνύει τον υποψήφιο αρσενικό σύντροφο για το πρώτο θηλυκό ανάλογα με τη λειψυθείσα τιμή του. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, οι πιθανές τιμές της μεταβλητής  $\omega$  κυμαίνονται στο διακριτό εύρος  $[1,5]$ . Εάν π.χ. επιλεγεί η τιμή 2, τότε διαλέγεται το δεύτερο αρσενικό για καταλληλότερος σύντροφος από τα υπόλοιπα τέσσερα. Αντίστοιχα η διαδικασία προχωρά και για τα υπόλοιπα θηλυκά, ωστόσο τους ανατεθούν οι κατάλληλοι σύντροφοι. Επιπρόσθετα, με τον ίδιο ακριβώς τρόπο λειτουργεί και η μεταβλητή  $\delta$  ως δείκτης για την επιλογή του επικρατέστερου θηλυκού συντρόφου για κάθε ένα αρσενικό. Και οι δύο δείκτες λαμβάνονται υπόψη για την επιλογή του κατάλληλου συντρόφου για την ακόλουθη διαδικασία της μετάλλαξης.

Αφού ολοκληρώθηκε η κατάταξη των λύσεων των δύο πληθυσμών  $m, f$ , ο αλγόριθμος συνεχίζει στην επόμενη φάση αυτή της μετάλλαξης. Για κάθε μία λύση έχει καθοριστεί το ταίρι με βάση τους δείκτες  $\delta$  και  $\omega$  αντίστοιχα. Στην καινούργια λύση επιλέγονται ένας ή περισσότεροι κόμβοι (δηλαδή πλοία) για εισαγωγή σε αυτή. Η διαδικασία της μετάλλαξης ακολουθεί τρεις βασικούς κανόνες, με τους οποίους δημιουργούνται οι νέες λύσεις του προβλήματος. Αυτοί οι κανόνες είναι οι εξής:

1. Λαμβάνονται υπόψη οι μοναδικοί κόμβοι
2. Δεν ξαναεισάγονται όμοιοι κόμβοι στη λύση
3. Αφαιρούνται οι διπλοί κόμβοι, εάν υπάρχουν

Από τον έλεγχο με βάση τους παραπάνω τρεις κανόνες προκύπτουν ο υποψήφιος ή οι υποψήφιοι κόμβοι για εισαγωγή στη νέα λύση. Στην περίπτωση τους ενός υποψηφίου θεωρείται αυτόματα επιλέξιμος για την συνέχεια της διαδικασίας, αλλιώς σε διαφορετική περίπτωση διαλέγεται με ίση πιθανότητα από το πλήθος των υπόλοιπων υποψηφίων. Στη συνέχεια, επιλέγεται ένας διαθέσιμος τερματικός σταθμός και σε αυτόν αναζητείται ο κόμβος με τον μέγιστο χρόνο εξυπηρέτησης (handling time) για την αντικατάστασή

του με τον επιλέξιμο υποψήφιο. Ο αριθμός των μεταλλάξεων στην νέα λύση ισούνται με τον συνολικό αριθμό των τερματικών σταθμών. Επομένως, εάν οι τερματικοί σταθμοί ισούται με τέσσερα, τότε η συγκεκριμένη διαδικασία θα πραγματοποιηθεί τέσσερις φορές. Η διαδικασία της μετάλλαξης ολοκληρώνεται με τους μη εξυπηρετημένους κόμβους, οι οποίοι εισάγονται στη νέα λύση. Η εισαγωγή τους πραγματοποιείται στους τερματικούς σταθμούς με τον λιγότερο χρόνο εξυπηρέτησης (δηλαδή με το ελάχιστο κόστος). Σε αυτούς εισάγονται μετά την εύρεση των καταλληλότερων θέσεων ελλιμενισμού, οι οποίες εντοπίζονται σύμφωνα με το χρόνο άφιξης του κάθε μη εξυπηρετημένου κόμβου.

Για την κατανόηση της λειτουργίας της μετάλλαξης και των κανόνων εφαρμογής της ακολουθεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα. Στο ακόλουθο παράδειγμα απεικονίζεται η λειτουργία της μετάλλαξης για τον αλγόριθμο FMA στα προβλήματα ελλιμενισμού των πλοίων. Έστω οι παρακάτω λύσεις με δέκα πλοία  $v = \{1, \dots, 10\}$  και δύο τερματικοί σταθμοί  $t = \{1, 2\}$ :

$$F = \underbrace{1 \ 6 \ 8 \ 2 \ 4}_{t_1^F} | \underbrace{7 \ 3 \ 5 \ 10 \ 9}_{t_2^F}$$

$$M = \underbrace{7 \ 6 \ 2 \ 3}_{t_1^M} | \underbrace{4 \ 1 \ 10 \ 5 \ 8 \ 9}_{t_2^M}$$

Για την οπτική διαφοροποίηση των τερματικών σταθμών χρωματίζονται με κόκκινο και μπλε για κάθε λύση  $(F, M)$ . Εφόσον ο συνολικός αριθμός των τερματικών ισούται με δύο, η διαδικασία της μετάλλαξης θα εφαρμοστεί δύο φορές. Στην πρώτη φάση επιλέγονται οι δύο πρώτοι τερματικοί σταθμοί από κάθε λύση  $(t_1^F, t_1^M)$  για την εύρεση του υπόψηφιο κόμβου. Παρατηρείται ότι, οι μοναδικοί υποψήφιοι μεταξύ  $t_1^F, t_1^M$  είναι οι κόμβοι 7 και 3, καθώς οι υπόλοιποι κόμβοι 2 και 6 ήδη υπάρχουν. Συνεπώς απομένει η εύρεση του κόμβου με τον μέγιστο χρόνο εξυπηρέτησης στον  $t_1^F$ . Για τους λόγους του παραδείγματος επιλέγεται ο κόμβος 8, ο οποίος αντικαθίσταται από τον κόμβο 7.

$$S = \underbrace{1 \ 6 \ 7 \ 2 \ 4}_{t_1^S} | \underbrace{7 \ 3 \ 5 \ 10 \ 9}_{t_2^S}$$

Στην δεύτερη φάση επιλέγονται οι δύο δεύτεροι τερματικοί σταθμοί  $(t_2^F, t_2^M)$  από κάθε λύση. Πριν τη διαδικασία επιλογής νέου υποψήφιο κόμβου παρατηρείται ότι, στον πρώτο τερματικό σταθμό της νέας λύσης  $(t_1^S)$  και στον δεύτερο της προηγούμενης λύσης  $(t_2^F)$  υπάρχει ο κόμβος 7, οπότε σύμφωνα με τον τρίτο κανόνα αφαιρείται ο συγκεκριμένος κόμβος από τον τερματικό της νέας λύσης  $(t_2^S)$ .



$$S = \underbrace{1 \ 6 \ 7 \ 2 \ 4}_{t_1^S} | \underbrace{3 \ 5 \ 10 \ 9}_{t_2^S}$$

Στη συνέχεια ακολουθεί η επιλογή νέου υποψήφιου κόμβου για την διαδικασία της μετάλλαξης. Εξαιρούμενοι κόμβοι θεωρούνται οι 5,9 και 10, καθώς υπάρχουν ήδη στον δεύτερο νέο τερματικό σταθμό  $t_2^S$ . Επομένως, οι διαθέσιμοι κόμβοι περιορίζονται στους 1,4 και 8. Ωστόσο, οι 1 και 4 αποκλείονται ως πιθανοί υποψήφιοι, καθώς εντοπίζονται στον πρώτο νέο τερματικό σταθμό  $t_1^S$ . Ο κόμβος 8 εισάγεται στον  $t_2^S$  και αντικαθιστά τον κόμβο 10. Οπότε η νέα λύση διαμορφώνεται ως εξής:

$$S = \underbrace{1 \ 6 \ 7 \ 2 \ 4}_{t_1^S} | \underbrace{3 \ 5 \ 8 \ 9}_{t_2^S}$$

Μετά την δεύτερη διαδοχική μετάλλαξη, η νέα λύση  $S$  αποκτά την παραπάνω μορφή, όπου οι νέοι κόμβοι διακρίνονται με πράσινο χρώμα. Ωστόσο, η διαδικασία δεν ολοκληρώνεται, καθώς η νέα λύση θεωρείται μη εφικτή, διότι ο κόμβος 10 δεν έχει εξυπηρετηθεί. Για λόγους ευκολίας του παραδείγματος, ο κόμβος 10 εισάγεται στη νέα λύση και πιο συγκεκριμένα στο δεύτερο τερματικό σταθμό με πορτοκαλί χρώμα. Επομένως, η τελική νέα λύση  $S$  είναι ως εξής:

$$S = \underbrace{1 \ 6 \ 7 \ 2 \ 4}_{t_1^S} | \underbrace{10 \ 3 \ 5 \ 8 \ 9}_{t_2^S}$$

Με την ολοκλήρωση της κύριας φάσης του αλγορίθμου ακολουθεί η τοπική αναζήτηση για τη βελτίωση της ποιότητας των νέων λύσεων. Για κάθε μία νέα λύση εφαρμόζονται τρεις διαφορετικές μέθοδοι τοπικής αναζήτησης και πιο συγκεκριμένα η Επανατοποθέτηση 1-0, η Αναζήτηση Ευρίας Κλίμακας σε Γειτονιά λύσεων και η Ανταλλαγή 1-1. Και οι τρεις μέθοδοι παρουσιάζονται αναλυτικά σε προηγούμενες υποενότητες. Στη συνέχεια, στον νέο βελτιωμένο πληθυσμό λύσεων ( $s'$ ) αναζητείται η βέλτιστη λύση ( $q'$ ) για τη διαδικασία σύγκρισης με την ολικά βέλτιστη λύση ( $Q$ ). Εάν ισχύει  $q' < Q$ , τότε η νέα βέλτιστη λύση αποθηκεύεται ως η ολικά βέλτιστη λύση. Η αλγοριθμική διαδικασία συνεχίζεται μέχρι την ολοκλήρωση όλων των επαναλήψεων. Με τον τερματισμό του αλγορίθμου ζευγαρώματος πυγολαμπίδων FMA παρουσιάζεται η βέλτιστη λύση. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος των πυγολαμπίδων αναφέρεται στον ψευδοκώδικα Αλγόριθμος 6.

---

**Αλγόριθμος 6** Αλγόριθμος Ζευγαρώματος Πυγολαμπίδων

---

- 1: **Δεδομένα** : Αριθμός πλοίων  $v$ , Αριθμός τερματικών σταθμών  $t$
  - 2: **Μεταβλητές** : Αριθμός λύσεων  $s$ , Τρέχουσες λύσεις  $s^*$ , Βελτιωμένες λύσεις  $s'$ , Αρσενικές λύσεις  $m$ , Θηλυκές λύσεις  $f$ , Δείκτης επιλογής θηλυκού συντρόφου  $\delta$ , Δείκτης επιλογής αρσενικού συντρόφου  $\omega$ , Μεταβλητή κατάταξης αρσενικών λύσεων  $A$ , Μεταβλητή κατάταξης θηλυκών λύσεων  $P$ , Πλοίο  $v^*$  όπου κάθε  $v^* \in v$ , Τερματικός σταθμός  $t^*$  όπου κάθε  $t^* \in t$ , Τρέχουσα βέλτιστη λύση  $q$ , Ολικά βέλτιστη λύση  $Q$ , Αριθμός επαναλήψεων αλγορίθμου  $i$
  - 3:
  - 4: Αρχικοποίηση μεταβλητών
  - 5: Καθορισμός αριθμού συνολικών λύσεων  $s$  και αριθμού συνολικών επαναλήψεων  $i$
  - 6:
  - 7: Εφαρμογή GRASP ▷ Δημιουργία αρχικών λύσεων
  - 8: Στάδιο 1: Δημιουργία λύσεων  $s^*$
  - 9: Στάδιο 2: Επιδίiorθωση λύσεων  $s^*$
  - 10:
  - 11: Εύρεση βέλτιστης λύσης  $q$  από  $s^*$
  - 12: Αρχικοποίηση ολικά βέλτιστης λύσης με  $Q = q$
  - 13:
  - 14: **Για** κάθε επανάληψη  $i$  ▷ Αρχή κύριου αλγορίθμου
  - 15:
  - 16: Διαχωρισμός λύσεων  $s^*$  σε αρσενικό  $m$  και θηλυκό  $f$  πληθυσμό λύσεων
  - 17:     **Για** κάθε  $m, f$
  - 18:         Υπολογισμός  $A$  για κατάταξη των  $m$
  - 19:         Υπολογισμός  $P$  για κατάταξη των  $f$
  - 20:         Εφαρμογή τελεστή μετάλλαξης μεταξύ λύσεων  $m, f_\delta$  με βάση το δείκτη  $\delta$
  - 21:         Εφαρμογή τελεστή μετάλλαξης μεταξύ λύσεων  $f, m_\omega$  με βάση το δείκτη  $\omega$
  - 22:         Δημιουργία νέων λύσεων  $s'$
  - 23:         Υπολογισμός κόστους νέων λύσεων  $s'$
  - 24:     **Τέλος για**
  - 25:
  - 26: Εφαρμογή τοπικής αναζήτησης ▷ Βελτίωση λύσεων
  - 27:     **Για** κάθε  $s'$
  - 28:         Εφαρμογή επανατοποθέτησης 1-0
  - 29:         Εφαρμογή ευρετικού LSNS
  - 30:         Εφαρμογή ανταλλαγής 1-1
  - 31:     **Τέλος για**
  - 32:     Εύρεση τρέχουσας βέλτιστης λύσης  $q$  από  $s'$
  - 33:     **Αν**  $q' < Q$
  - 34:         Αντικατάσταση νέας βέλτιστης λύσης με  $Q = q'$
  - 35:     **Τέλος αν**
  - 36:     Επιλογή ποιοτικότερων λύσεων από  $s^*, s'$  για την επόμενη επανάληψη  $i$
  - 37:
  - 38: **Τέλος για** ▷ Τέλος κύριου αλγορίθμου
  - 39: **Έξοδος** :  $Q$
-

#### 4.6.2 Αλγόριθμος Ζευγαρώματος Μελισσών

Ο αλγόριθμος ζευγαρώματος μελισσών (Honey Bees Mating Optimization - HBMO) προσομοιώνει την δομή μιας αποικίας μελισσών, αλλά και την βασική λειτουργία της για την επιβίωσή τους. Η συγκεκριμένη αποικία μελισσών διαθέτει τρία είδη: την βασίλισσα, τους κηφήνες και τις εργάτριες. Για κάθε ρόλο ανατίθενται συγκεκριμένες λειτουργίες, οι οποίες περιγράφονται από μια σειρά μαθηματικών εξισώσεων και μεταβλητών. Στο κομμάτι των προβλημάτων βελτιστοποίησης, ο αλγόριθμος των μελισσών εφαρμόζεται με ιδιαίτερη αποτελεσματικότητα σε συνεχή προβλήματα. Ωστόσο, για την εφαρμογή του HBMO στα προβλήματα ελλειμενισμού των πλοίων πραγματοποιούνται μία σειρά από αλλαγές και κυρίως στην διαδικασία του ζευγαρώματος. Η βασίλισσα θεωρείται η βέλτιστη λύση ( $Q$ ) του προβλήματος, οι κηφήνες αποτελούν τις υπόλοιπες λύσεις, οι οποίες συμμετέχουν στην διαδικασία του ζευγαρώματος με την βασίλισσα, ενώ οι εργάτριες καταλαμβάνουν τον ρόλο της τοπικής αναζήτησης.

Πριν την κύρια φάση του αλγόριθμου προηγείται η αρχικοποίηση των βασικών μεταβλητών του προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα, ορίζεται ο ακριβής αριθμός των λύσεων ( $s$ ) και των επαναλήψεων ( $i$ ), οι οποίοι παραμένουν σταθεροί σε όλη την διάρκεια του αλγόριθμου. Επιπρόσθετα, ως δεδομένα του προβλήματος θεωρούνται ο συνολικός αριθμός των πλοίων ( $v$ ) και των τερματικών σταθμών ( $t$ ). Αμέσως μετά εφαρμόζεται η μέθοδος GRASP για την δημιουργία των αρχικών λύσεων του προβλήματος. Οι βασικές λειτουργίες του GRASP περιγράφονται σε προηγούμενη εποενοότητα. Με την ολοκλήρωση των αρχικών λύσεων αναζητείται η βέλτιστη λύση ( $q$ ) και αποθηκεύεται προσωρινά ως η ολικά βέλτιστη λύση ( $Q$ ) για τις επόμενες φάσεις του αλγόριθμου.

Ακολουθεί η διαδικασία του ζευγαρώματος, στην οποία εφαρμόζεται μία παραλλαγή του κλασικού γενετικού τελεστή της διασταύρωσης (crossover). Η καινούργια γενετική τεχνική ονομάζεται πολυγονεϊκός τελεστής διασταύρωσης, καθώς επιλέγονται περισσότεροι από ένας γονείς για την δημιουργία των απογόνων. Στη συγκεκριμένη διαδικασία επιλέγεται η ολικά βέλτιστη λύση  $Q$  ως ο βασικός γονέας. Στην συνέχεια ορίζονται οι επιλέξιμοι γονείς. Ο αριθμός των επιλέξιμων γονέων για διασταύρωση με την  $Q$  ισούται με τον αριθμό των τερματικών σταθμών  $t$ . Επομένως, εάν  $t = 3$ , τότε θα επιλεγούν τρεις υποψήφιοι γονείς από τον πληθυσμό των λύσεων. Η διαδικασία της πολυγονεϊκής διασταύρωσης ακολουθεί τρία βασικά βήματα για την δημιουργία των νέων λύσεων:

1. Επιλογή υποψήφιων γονέων
2. Υπολογισμός σημείου διασταύρωσης για κάθε γονέα (crossover point)

### 3. Αφαίρεση όμοιων κόμβων από τη νέα λύση

Αρχικά επιλέγονται οι υποψήφιοι γονείς (κηφήνες) για διασταύρωση με την κυρίαρχη λύση  $Q$  (βασίλισσα). Η διασταύρωση πραγματοποιείται μεταξύ του πρώτου τερματικού σταθμού της βασίλισσας με τον αντίστοιχο πρώτο από τον πρώτο επιλέξιμο κηφήνα. Η διαδικασία συνεχίζεται μεταξύ της βασίλισσας και των υπόλοιπων επιλέξιμων κηφήνων από τον δεύτερο μέχρι τον τελευταίο τερματικό σταθμό αντίστοιχα. Στη συνέχεια, υπολογίζονται τα σημεία διασταύρωσης, τα οποία υποδεικνύουν το ποσοστό των κόμβων στις λύσεις της βασίλισσας και των υποψήφιων κηφήνων, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για διασταύρωση. Ο υπολογισμός τους επιτυγχάνεται με χρήση μεταβλητών, οι οποίοι λειτουργούν ως δείκτες και λαμβάνουν συνεχείς τιμές μεταξύ του διαστήματος  $(0,1)$ . Κατά τη διάρκεια της διασταύρωσης αφαιρούνται οι όμοιοι κόμβοι και πραγματοποιούνται οι απαραίτητοι υπολογισμοί για τη δημιουργία της νέας λύσης. Η διαδικασία της διασταύρωσης συνεχίζεται με την εισαγωγή των μη εξυπηρετημένων κόμβων στη νέα λύση. Από αυτή υπολογίζονται οι χρόνοι εξυπηρέτησης όλων των τερματικών σταθμών και σε αυτόν με τον ελάχιστο χρόνο εισάγεται ο μη εξυπηρετημένος κόμβος. Η κατάλληλη θέση για τον μη εξυπηρετημένο κόμβο υπολογίζεται με βάση το χρόνο άφιξης του και τοποθετείται αμέσως μετά τον κόμβο με νωρίτερο χρόνο άφιξης από αυτόν. Η κύρια φάση του αλγόριθμου ολοκληρώνεται με την εισαγωγή όλων των κόμβων στην νέα λύση.

Το παρακάτω παράδειγμα παρουσιάζει την διαδικασία της διασταύρωσης με περισσότερους από έναν γονείς. Π.χ. έστω δέκα πλοία  $v = \{1, \dots, 10\}$  και δύο τερματικούς σταθμούς  $t = \{1, 2\}$ . Η κυρίαρχη λύση  $Q$  αποτελεί την βασίλισσα ως ο βασικός γονέας και οι λύσεις  $D1, D2$  αντιπροσωπεύουν τους κηφήνες ως οι επιλεγμένοι γονείς.

$$\begin{aligned}
 Q &= \underbrace{1 \ 6 \ 8 \ 2 \ 4}_{t_1^Q} | \underbrace{7 \ 3 \ 5 \ 10 \ 9}_{t_2^Q} \\
 D1 &= \underbrace{7 \ 6 \ 4 \ 3}_{t_1^{D1}} | \underbrace{2 \ 9 \ 10 \ 5 \ 8 \ 1}_{t_2^{D1}} \\
 D2 &= \underbrace{10 \ 2 \ 6 \ 1 \ 9 \ 3}_{t_1^{D2}} | \underbrace{7 \ 8 \ 5 \ 4}_{t_2^{D2}}
 \end{aligned}$$

Ο αριθμός των διασταυρώσεων ισούται με τον αριθμό των τερματικών σταθμών. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα θα πραγματοποιηθούν δύο διασταυρώσεις για τη δημιουργία της νέας λύσης. Οι δύο φάσεις της διασταύρωσης είναι οι εξής:

$$t_1^S = \underbrace{1 \ 6 \ 8 \ 2 \ 4}_{t_1^Q} | \underbrace{7 \ 6 \ 4 \ 3}_{t_1^{D1}}$$

$$t_2^S = \underbrace{7 \ 3 \ 5 \ 10 \ 9}_{t_2^Q} | \underbrace{7 \ 8 \ 5 \ 4}_{t_2^{D2}}$$

Για την πρώτη διασταύρωση επιλέγονται οι τερματικοί σταθμοί  $t_1^Q, t_1^{D1}$  και στη συνέχεια υπολογίζεται το ποσοστό της λύσης για κάθε τερματικό, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στην διασταύρωση. Για το συγκεκριμένο παράδειγμα, ο μετρητής για τη λύση  $Q$  υπολογίζεται  $c^Q = 0,6$  και για τη λύση  $D1$  ισούται  $c^{D1} = 0,5$ . Αυτό σημαίνει ότι, οι τρεις πρώτοι κόμβοι 1,6,8 (60% του  $t_1^Q$ ) και οι δύο τελευταίοι 4,3 (50% του  $t_1^{D1}$ ) θα περιλαμβάνονται στη λύση μετά τη διασταύρωση. Ωστόσο, ο κόμβος 4 αφαιρείται σύμφωνα με το τρίτο βήμα της διαδικασίας, διότι εμφανίζεται και στους δύο τερματικούς σταθμούς. Επομένως, το πρώτο κομμάτι της λύσης διαμορφώνεται ως εξής:

$$t_1^S = 1 \ 6 \ 8 \ 3$$

Αντίστοιχα όπως στην πρώτη περίπτωση, στην δεύτερη διασταύρωση χρησιμοποιούνται οι τερματικοί σταθμοί  $t_2^Q, t_2^{D2}$ . Στην συνέχεια, λαμβάνουν τιμές οι μετρητές  $c^Q = 0,8$  και  $c^{D2} = 0,6$ . Αυτό σημαίνει ότι οι κόμβοι 7,3,5,10 (80% του  $t_2^Q$ ) και οι κόμβοι 8,5,4 ( $t_2^{D2}$ ) επιλέγονται για εισαγωγή στην νέα λύση. Ωστόσο, οι κόμβοι 3,8 και 5 παραλείπονται εξαιτίας των περιορισμών.

$$t_2^S = 7 \ 5 \ 10 \ 4$$

Συνεπώς, η νέα λύση διαθέτει οκτώ κόμβους, εκ των οποίων έξι (κόκκινο) προέρχονται από την βασίλισσα, ένας (μπλε) από τον πρώτο κηφήνα και ένας (πράσινο) από τον δεύτερο αντίστοιχα. Η τελική νέα λύση μετά την διαδικασία της διασταύρωσης θα έχει της εξής μορφή:

$$S = \underbrace{1 \ 6 \ 8 \ 3}_{t_1^S} | \underbrace{7 \ 5 \ 10 \ 4}_{t_2^S}$$

Η ολοκλήρωση της νέας λύσης πραγματοποιείται με την εισαγωγή των μη εξυπηρετημένων κόμβων από την διαδικασία της διασταύρωσης. Με την εισαγωγή των κόμβων 9 και 2 (πορτοκαλί), η τελική νέα λύση έχει την εξής μορφή:

$$S = \underbrace{1 \ 9 \ 6 \ 8 \ 2 \ 3}_{t_1^S} | \underbrace{7 \ 5 \ 10 \ 4}_{t_2^S}$$

Μετά την δημιουργία των νέων λύσεων ( $s'$ ) ακολουθεί η φάση της τοπικής αναζήτησης. Για την βελτίωση της ποιότητας των  $s'$  εφαρμόζονται οι μέθοδοι της Επανατοποθέτησης 1-0, της Αναζήτησης Ευρείας Κλίμακας σε Γειτονιά λύσεων και της Ανταλλαγής 1-1. Και οι τρεις διαδικασίες τοπικής αναζήτησης αναλύθηκαν λεπτομερώς σε προηγούμενη εποενότητα. Με την ολοκλήρωση των διαδικασιών της τοπικής αναζήτησης πραγματοποιείται η εύρεση της ποιοτικότερης λύσης ( $q'$ ) από τις  $s'$ . Εάν η ποιότητα της  $q'$  από την ολικά βέλτιστη λύση, τότε αποθηκεύεται στην θέση της  $Q$ . Ο αλγόριθμος τερματίζεται μετά την ολοκλήρωση όλων των επαναλήψεων  $i$ . Ο προτεινόμενος αλγόριθμος των μελισσών περιγράφεται στον ψευδοκώδικα Αλγόριθμος 7.

---

**Αλγόριθμος 7** Αλγόριθμος Ζευγαρώματος Μελισσών

---

- 1: **Δεδομένα** : Αριθμός πλοίων  $v$ , Αριθμός τερματικών σταθμών  $t$
  - 2: **Μεταβλητές** : Αριθμός λύσεων  $s$ , Τρέχουσες λύσεις  $s^*$ , Βελτιωμένες λύσεις  $s'$ ,  
Πλοίο  $v^*$  όπου κάθε  $v^* \in v$ , Τερματικός σταθμός  $t^*$  όπου κάθε  $t^* \in t$ , Τρέχουσα  
βέλτιστη λύση  $q$ , Ολικά βέλτιστη λύση  $Q$ , Αριθμός επαναλήψεων αλγορίθμου  $i$
  - 3:
  - 4: Αρχικοποίηση μεταβλητών
  - 5: Καθορισμός αριθμού συνολικών λύσεων  $s$  και αριθμού συνολικών επαναλήψεων  $i$
  - 6:
  - 7: Εφαρμογή GRASP ▷ Δημιουργία αρχικών λύσεων
  - 8: Στάδιο 1: Δημιουργία λύσεων  $s^*$
  - 9: Στάδιο 2: Επιδιόρθωση λύσεων  $s^*$
  - 10:
  - 11: Εύρεση βέλτιστης λύσης  $q$  από  $s^*$
  - 12: Αρχικοποίηση ολικά βέλτιστης λύσης με  $Q = q$
  - 13:
  - 14: **Για** κάθε επανάληψη  $i$  ▷ Αρχή κύριου αλγορίθμου
  - 15:
  - 16: Εφαρμογή πολυγονεϊκού τελεστή διασταύρωσης ▷ Multi-parent crossover
  - 17:   Επιλογή λύσεων  $s^*$  για διασταύρωση με  $Q$
  - 18:   Δημιουργία νέων λύσεων  $s'$
  - 19:   Υπολογισμός κόστους νέων λύσεων  $s'$
  - 20:
  - 21: Εφαρμογή τοπικής αναζήτησης ▷ Βελτίωση λύσεων
  - 22:   **Για** κάθε  $s'$
  - 23:     Εφαρμογή επανατοποθέτησης 1-0
  - 24:     Εφαρμογή ευρετικού LSNS
  - 25:     Εφαρμογή ανταλλαγής 1-1
  - 26:   **Τέλος για**
  - 27:   Εύρεση τρέχουσας βέλτιστης λύσης  $q$  από  $s'$
  - 28:   **Αν**  $q' < Q$
  - 29:     Αντικατάσταση νέας βέλτιστης λύσης με  $Q = q'$
  - 30:   **Τέλος αν**
  - 31:   Επιλογή ποιοτικότερων λύσεων από  $s^*$ ,  $s'$  για την επόμενη επανάληψη  $i$
  - 32:
  - 33: **Τέλος για** ▷ Τέλος κύριου αλγορίθμου
  - 34:
  - 35: **Έξοδος** :  $Q$
-

### 4.6.3 Αλγόριθμος Ζευγαρώματος Μπούμπουρων

Ο αλγόριθμος ζευγαρώματος μπάμπουρων (Bumble Bees Mating Optimization - BBMO) διαθέτει αρκετά παρόμοια χαρακτηριστικά με τον αντίστοιχο των μελισσών. Η αποικία των μπάμπουρων διακρίνεται για την ανάθεση καθορισμένων διεργασιών σε κάθε μέλος της. Πιο συγκεκριμένα, η αποικία περιλαμβάνει την βασίλισσα, τους κηφήνες και τις εργάτριες. Σε αντίθεση με τον αλγόριθμο των μελισσών, στη διαδικασία του ζευγαρώματος συμβάλλουν τόσο οι κηφήνες, όσο και οι εργάτριες για την δημιουργία απογόνων με την βασίλισσα. Η εφαρμογή του BBMO στα προβλήματα ελλιμενισμού των πλοίων διαφέρει από τον κλασικό αλγόριθμο της βιβλιογραφίας, καθώς αυτός υλοποιείται συχνά σε συνεχή και όχι διακριτά προβλήματα βελτιστοποίησης. Για τις κύριες διεργασίες του προτεινόμενου αλγόριθμου λαμβάνονται υπόψη η βασίλισσα ως βέλτιστη λύση ( $Q$ ) και οι υπόλοιπες λύσεις ( $s^*$ ) του προβλήματος αντιπροσωπεύουν τους κηφήνες ( $d$ ) και τις εργάτριες ( $w$ ). Επιπρόσθετα, η διαδικασία του ζευγαρώματος πραγματοποιείται με την εφαρμογή δύο διαφορετικών γενετικών τελεστών.

Ο αλγόριθμος ξεκινά με την αρχικοποίηση των βασικών μεταβλητών, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στις μεταγενέστερες φάσεις του. Η αρχικοποίηση των μεταβλητών περιλαμβάνει τον συνολικό αριθμό των λύσεων ( $s$ ) και των αλγοριθμικών επαναλήψεων ( $i$ ). Στην συνέχεια ακολουθεί η δημιουργία του αρχικού πληθυσμού των λύσεων ( $s^*$ ), η οποία επιτυγχάνεται με την εφαρμογή της μεθόδου GRASP. Η συγκεκριμένη μέθοδος περιλαμβάνει δύο στάδια, όπου το πρώτο εστιάζει στην κατασκευή των  $s^*$  και το δεύτερο επιδιόρθωσή τους. Όλες οι λεπτομέρειες για την λειτουργία της μεθόδου GRASP περιγράφονται σε προηγούμενη εποενοότητα. Πριν την μετάβαση στην κύρια λειτουργία του αλγόριθμου αναζητείται η βέλτιστη λύση  $q$  από τον αρχικό πληθυσμό λύσεων  $s^*$  και αποθηκεύεται ως η ολικά βέλτιστη λύση  $Q$ .

Με την δημιουργία των αρχικών λύσεων και τον καθορισμό της ολικά βέλτιστης λύσης ακολουθεί το κύριο μέρος του αλγόριθμου. Η διαδικασία του ζευγαρώματος επιτυγχάνεται με την υλοποίηση δύο γενετικών τελεστών και πιο συγκεκριμένα της διασταύρωσης (crossover) και της μετάλλαξης (mutation). Στην συγκεκριμένη φάση του αλγόριθμου δημιουργούνται δύο νέοι υποπληθυσμοί από τις αρχικές λύσεις ( $s^*$ ). Ο πρώτος υποπληθυσμός αντιπροσωπεύει τους κηφήνες ( $d$ ) και ο δεύτερος τις εργάτριες ( $w$ ), στους οποίους θα εφαρμοστούν η μέθοδος της διασταύρωσης και της μετάλλαξης αντίστοιχα. Και στις δύο τεχνικές ως πρώτος γονέας ορίζεται η βασίλισσα  $Q$ , ενώ ως δεύτερος επιλέγεται ένας υποψήφιος κηφήνας ή μία υποψήφια εργάτρια ανάλογα τον υποπληθυσμό. Διευκρινίζεται ότι, η διασταύρωση και η μετάλλαξη ακολουθούν μία καθορισμένη σειρά από κανόνες, οι οποίοι περιγράφονται στους αλγορίθμους των πυγολαμπίδων και μελισσών αντίστοιχα στις δύο προηγούμενες υποενοότητες. Μετά την



διαχώριση του αρχικού πληθυσμού  $s^*$  σε δύο ισόποσους υποπληθυσμούς, η βασίλισσα  $Q$  ζευγαρώνει με κάθε ένα μέλος από τους κηφήνες και τις εργάτριες με στόχο τη δημιουργία του καθορισμένου αριθμού των νέων απογόνων ( $s'$ ). Με τον υπολογισμό του κόστους για κάθε απόγονο ολοκληρώνεται η διαδικασία του ζευγαρώματος και η αλγόριθμος συνεχίζει στην επόμενη φάση του.

Στη συνέχεια, για την βελτίωση του νέου πληθυσμού λύσεων ( $s'$ ) εφαρμόζονται οι διαδικασίες της τοπικής αναζήτησης. Κάθε μία λύση υποβάλλεται σε τρεις μεθόδους. Οι μέθοδοι αυτοί αποτελούνται από την Επανατοποθέτηση 1-0, την Αναζήτηση Ευρείας Κλίμακας σε Γειτονία λύσεων και την Ανταλλαγή 1-1. Η λειτουργία της καθεμιάς διαδικασίας τοπικής αναζήτησης παρουσιάζεται σε προηγούμενη υποένοντητα. Από τον βελτιωμένο πληθυσμό  $s$  εντοπίζεται η βέλτιστη λύση ( $q$ ). Εάν η λύση  $q$  θεωρείται ποιοτικότερη από την  $Q$ , τότε αντικαθιστάται ως η νέα ολικά βέλτιστη λύση. Η δομή του προτεινόμενου αλγόριθμου των μπάμπουρων παρουσιάζεται στον ψευδοκώδικα Αλγόριθμος 8.

---

**Αλγόριθμος 8** Αλγόριθμος Ζευγαρώματος Μπούμπουρων

---

- 1: **Δεδομένα** : Αριθμός πλοίων  $v$ , Αριθμός τερματικών σταθμών  $t$
  - 2: **Μεταβλητές** : Αριθμός λύσεων  $s$ , Τρέχουσες λύσεις  $s^*$ , Βελτιωμένες λύσεις  $s'$ , Πληθυσμός κηφήνων  $d$  όπου  $d \in s$ , Πληθυσμός εργατριών  $w$  όπου  $w \in s$ , Πλοίο  $v^*$  όπου κάθε  $v^* \in v$ , Τερματικός σταθμός  $t^*$  όπου κάθε  $t^* \in t$ , Τρέχουσα βέλτιστη λύση  $q$ , Ολικά βέλτιστη λύση  $Q$ , Αριθμός επαναλήψεων αλγορίθμου  $i$
  - 3:
  - 4: Αρχικοποίηση μεταβλητών
  - 5: Καθορισμός αριθμού συνολικών λύσεων  $s$  και αριθμού συνολικών επαναλήψεων  $i$
  - 6:
  - 7: Εφαρμογή GRASP ▷ Δημιουργία αρχικών λύσεων
  - 8: Στάδιο 1: Δημιουργία λύσεων  $s^*$
  - 9: Στάδιο 2: Επιδιόρθωση λύσεων  $s^*$
  - 10:
  - 11: Εύρεση βέλτιστης λύσης  $q$  από  $s^*$
  - 12: Αρχικοποίηση ολικά βέλτιστης λύσης με  $Q = q$
  - 13:
  - 14: **Για** κάθε επανάληψη  $i$  ▷ Αρχή κύριου αλγορίθμου
  - 15:
  - 16: Διαχωρισμός λύσεων  $s^*$  σε πληθυσμό κηφήνων  $d$  και εργατριών  $w$
  - 17: Επιλογή κηφήνων  $d$  για διασταύρωση με  $Q$
  - 18: Επιλογή εργατριών  $w$  για μετάλλαξη με  $Q$
  - 19: Δημιουργία νέων λύσεων  $s'$
  - 20: Υπολογισμός κόστους νέων λύσεων  $s'$
  - 21:
  - 22: Εφαρμογή τοπικής αναζήτησης ▷ Βελτίωση λύσεων
  - 23: **Για** κάθε  $s'$
  - 24: Εφαρμογή επανατοποθέτησης 1-0
  - 25: Εφαρμογή ευρετικού LSNS
  - 26: Εφαρμογή ανταλλαγής 1-1
  - 27: **Τέλος για**
  - 28: Εύρεση τρέχουσας βέλτιστης λύσης  $q$  από  $s'$
  - 29: **Αν**  $q' < Q$
  - 30: Αντικατάσταση νέας βέλτιστης λύσης με  $Q = q'$
  - 31: **Τέλος αν**
  - 32: Επιλογή ποιοτικότερων λύσεων από  $s^*$ ,  $s'$  για την επόμενη επανάληψη  $i$
  - 33:
  - 34: **Τέλος για** ▷ Τέλος κύριου αλγορίθμου
  - 35:
  - 36: **Έξοδος** :  $Q$
-

#### 4.6.4 Αλγόριθμος Πεταλούδας Μονάρχη

Ο αλγόριθμος της πεταλούδας μονάρχη (Monarch Butterfly Optimization - MBO) προσομοιώνει τη διαδικασία της μετανάστευσης της συγκεκριμένης κατηγορίας πεταλούδων, η οποία αποτελεί τη βασική λειτουργία για την επιβίωσή τους. Ο MBO διαφέρει από τις τρεις προηγούμενες προτεινόμενες μεθόδους, καθώς δεν περιλαμβάνει πολλές μαθηματικές εξισώσεις για την περιγραφή των διεργασιών, αλλά διαθέτει μια σειρά από μεταβλητές για την εξυπηρέτηση των λειτουργιών του. Στη βιβλιογραφία, ο αλγόριθμος των πεταλούδων προτείνεται για συνεχή προβλήματα βελτιστοποίησης. Ωστόσο, το πλήθος των μεταβλητών του παρέχει την δυνατότητα δημιουργίας νέων λύσεων με τη χρήση γενετικών αλγορίθμων. Για την εφαρμογή του συγκεκριμένου αλγορίθμου στα προβλήματα ελλιμενισμού των πλοίων αναπτύσσεται μια παραλλαγή των κλασσικού τελεστή διασταύρωσης για τη δημιουργία εφικτών λύσεων.

Με τον καθορισμό των τιμών για τις βασικές μεταβλητές ξεκινά η πρώτη φάση του αλγορίθμου. Η αρχικοποίηση των μεταβλητών περιλαμβάνει τον αριθμό των λύσεων ( $s$ ) και των συνολικών επαναλήψεων ( $i$ ) του αλγορίθμου. Στην συνέχεια, εφαρμόζεται η επιλεγμένη μεθοδολογία για την δημιουργία των αρχικών λύσεων ( $s^*$ ). Για αυτή την διαδικασία επιλέγεται η μέθοδος GRASP, η οποία πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Στο πρώτο κατασκευάζονται οι λύσεις  $s^*$  με μία σειρά από καθορισμένες διεργασίες, ενώ στο δεύτερο πραγματοποιούνται οι απαραίτητοι έλεγχοι για την επιδιόρθωσή τους. Η δομή και όλες οι διεργασίες της συγκεκριμένης μεθοδολογίας αναλύονται σε προηγούμενη εποενοότητα. Η συγκεκριμένη φάση ολοκληρώνεται με την εύρεση και την αποθήκευση της βέλτιστης λύσης ( $q$ ) ως ολικά βέλτιστη ( $Q$ ), καθώς χρησιμοποιείται στη συνέχεια του αλγορίθμου.

Η διαδικασία της μετανάστευσης των πεταλούδων αποτελεί το βασικό στάδιο του αλγορίθμου, καθώς σε αυτή ο αρχικός πληθυσμός διασπάται σε δύο υποπληθυσμούς με στόχο την διαφοροποίηση των λύσεων ανάμεσα στις περισσότερες και λιγότερο ποιτικές. Σε αυτή τη φάση πραγματοποιείται η υλοποίηση μιας παραλλαγής του γενετικού τελεστή της διασταύρωσης. Πιο συγκεκριμένα εφαρμόζεται ο ομοιόμορφος τελεστής διασταύρωσης (uniform crossover). Η συγκεκριμένη τεχνική θεωρείται ιδανική στον αλγόριθμο των πεταλούδων, καθώς στη δημιουργία των νέων λύσεων συμμετέχουν διαφορετικά μέλη και από τους δύο υποπληθυσμούς. Για την διαδικασία της ομοιόμορφης διασταύρωσης ακολουθούνται τα εξής βήματα:

1. Επιλογή λύσης ως πρώτος γονέας από ένα υποπληθυσμό ( $s_1^*$  ή  $s_2^*$ )
2. Επιλογή δεύτερου γονέα (δύο περιπτώσεις)

- (α') Εάν πρώτος γονέας από υποπληθυσμό  $s_1^*$  με δύο επιλογές
- i. Λύση από υποπληθυσμό  $s_1^*$
  - ii. Λύση από υποπληθυσμό  $s_2^*$
- (β') Εάν πρώτος γονέας από υποπληθυσμό  $s_2^*$  με τρεις επιλογές
- i. Η ολικά βέλτιστη λύση  $Q$
  - ii. Λύση από υποπληθυσμό  $s_2^*$
  - iii. Τυχαία λύση (random)

### 3. Αφαίρεση όμοιων κόμβων από την νέα λύση

Στον πρώτο υποπληθυσμό ( $s_1^*$ ) για την διαδικασία της διασταύρωσης, ο πρώτος γονέας ορίζεται από κάποιο μέλος του  $s_1^*$  και ο δεύτερος επιλέγεται με ισόποση πιθανότητα ανάμεσα σε κάποιο μέλος του  $s_1^*$  και του δεύτερου  $s_2^*$ . Αντίθετα για τον δεύτερο υποπληθυσμό ( $s_2^*$ ) στη διαδικασία της διασταύρωσης υπάρχουν τρεις περιπτώσεις για την επιλογή του δεύτερου γονέα. Στην πρώτη ορίζεται ως δεύτερος γονέας η ολικά βέλτιστη λύση  $Q$ , στην δεύτερη κάποιο άλλο μέλος από τον υποπληθυσμό  $s_2^*$ , ενώ στην τρίτη και τελευταία δημιουργείται μία τυχαία λύση. Η διαδικασία της διασταύρωσης ολοκληρώνεται με τη δημιουργία του νέου πληθυσμού λύσεων ( $s^*$ ) και τον υπολογισμό του κόστους του κάθε μέλους ξεχωριστά.

Η λειτουργία του τελεστή διασταύρωσης για τη δημιουργία των νέων λύσεων αναλύεται στο ακόλουθο παράδειγμα. Π.χ. έστω δέκα πλοία  $v = \{1, \dots, 10\}$  και δύο τερματικούς σταθμούς  $t = \{1, 2\}$ . Οι παρακάτω δύο λύσεις  $B1, B2$  αντιπροσωπεύουν τους γονείς για την διαδικασία της διασταύρωσης.

$$\begin{aligned}
 B1 &= \underbrace{1 \ 6 \ 8 \ 2 \ 4}_{t_1^{B1}} | \underbrace{7 \ 3 \ 5 \ 10 \ 9}_{t_2^{B1}} \\
 B2 &= \underbrace{7 \ 6 \ 2 \ 3}_{t_1^{B2}} | \underbrace{4 \ 1 \ 10 \ 5 \ 8 \ 9}_{t_2^{B2}}
 \end{aligned}$$

Ο συνολικός αριθμός των διασταυρώσεων ισούται με δύο, όσο και το πλήθος των τερματικών σταθμών. Στην πρώτη, επιλέγονται οι τερματικοί σταθμοί  $t_1^{B1}, t_1^{B2}$ . Στην συνέχεια υπολογίζονται οι πιθανότητες ( $P\%$ ) επιλογής του κάθε κόμβου για εισαγωγή στη νέα λύση. Εάν η τιμή της πιθανότητας  $P\%$  δεν υπερβαίνει το 50%, τότε επιλέγεται ο κόμβος από τον πρώτο τερματικό σταθμό, αλλιώς από τον δεύτερο. Συνεπώς, ο πρώτος τερματικός της νέας λύσης ( $t_1^S$ ) υπολογίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
t_1^{B1} &= 1 \quad 6 \quad 8 \quad 2 \quad 4 \\
t_1^{B2} &= 7 \quad 6 \quad 2 \quad 3 \\
P_{\%} &= 0.32 \quad 0.71 \quad 0.24 \quad 0.83 \quad 0.52 \\
t_1^S &= 1 \quad 6 \quad 8 \quad 3
\end{aligned}$$

Οι κόμβοι 1,8 (κόκκινο) και 6,3 (μπλε) προέρχονται από τον πρώτο και δεύτερο τερματικό σταθμό αντίστοιχα. Εάν σε κάποια θέση ενός τερματικού δεν υπάρχει κάποιος επιλέξιμος κόμβος, τότε η θέση στον νέο τερματικό παραμένει κενή. Αντίστοιχα για τον δεύτερο τερματικό σταθμό της νέας λύσης ακολουθείται η ίδια διαδικασία και προκύπτει ο δεύτερος τερματικό σταθμός ( $t_2^S$ ) της νέας λύσης.

$$\begin{aligned}
t_1^{B1} &= 7 \quad 3 \quad 5 \quad 10 \quad 9 \\
t_1^{B2} &= 4 \quad 1 \quad 10 \quad 5 \quad 8 \quad 9 \\
P_{\%} &= 0.69 \quad 0.11 \quad 0.84 \quad 0.29 \quad 0.91 \quad 0.66 \\
t_2^S &= 4 \quad 3 \quad 10 \quad 10 \quad 8 \quad 9
\end{aligned}$$

Οι κόμβοι 3,10 (κόκκινο) και 4,10,8,9 (μπλε) προέρχονται από τον πρώτο και δεύτερο τερματικό σταθμό αντίστοιχα. Ωστόσο, οι κόμβοι 10,8 και 3 αφαιρούνται, καθώς ο 10 εισήχθει δύο φορές, ενώ οι 3,8 υπάρχουν στον  $t_1^S$  από την πρώτη διασταύρωση. Συνεπώς η νέα λύση  $S$  διαμορφώνεται ως εξής:

$$S = 1 \quad 6 \quad 8 \quad 3|4 \quad 9$$

Ωστόσο η λύση  $S$  θεωρείται μη εφικτή, καθώς δεν έχουν εισαχθεί όλοι οι κόμβοι σε αυτή. Επομένως, οι μη εξυπηρετημένοι κόμβοι 2,5,7 και 10 (πορτοκαλί) εισάγονται στις κατάλληλες θέσεις της νέας λύσης  $S$ , η οποία έχει την εξής τελική μορφή:

$$S = \underbrace{1 \quad 7 \quad 6 \quad 10 \quad 8 \quad 3 \quad 5}_{t_1^S} | \underbrace{2 \quad 4 \quad 9}_{t_2^S}$$

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας της διασταύρωσης εκκινείται η φάση της τοπικής αναζήτησης. Για τη βελτίωση της ποιότητας των νέων λύσεων εφαρμόζονται η Αντιμέταθεση 1-0, η Αναζήτηση Ευρείας Κλίμακας σε Γειτονία λύσεων και η Ανταλλαγή 1-1. Οι λειτουργίες των μεθόδων τοπικής αναζήτησης αναλύονται σε προηγούμενη ενότητα. Μετά τη βελτίωση των νέων λύσεων αναζητείται η βέλτιστη  $q$  από αυτές και αντικαθιστά την ολικά βέλτιστη λύση  $Q$ , εφόσον αξιολογηθεί ως ποιοτικότερη. Ο αλγόριθμος των πεταλούδων παρουσιάζεται στον ψευδοκώδικα Αλγόριθμος 9.

---

**Αλγόριθμος 9** Αλγόριθμος Πεταλούδας Μονάρχη

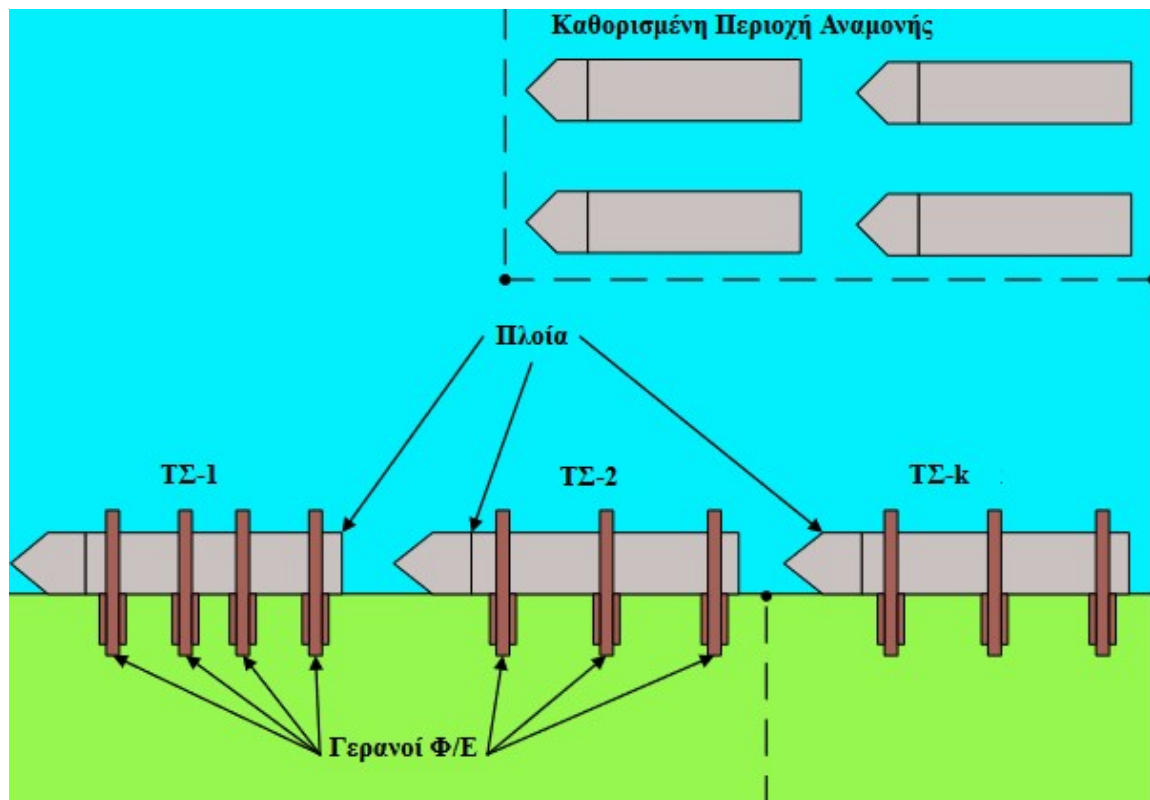
---

- 1: **Δεδομένα** : Αριθμός πλοίων  $v$ , Αριθμός τερματικών σταθμών  $t$
  - 2: **Μεταβλητές** : Αριθμός λύσεων  $s$ , Τρέχουσες λύσεις  $s^*$ , Βελτιωμένες λύσεις  $s'$ ,  
Πλοίο  $v^*$  όπου κάθε  $v^* \in v$ , Τερματικός σταθμός  $t^*$  όπου κάθε  $t^* \in t$ , Τρέχουσα  
βέλτιστη λύση  $q$ , Ολικά βέλτιστη λύση  $Q$ , Αριθμός επαναλήψεων αλγορίθμου  $i$
  - 3:
  - 4: Αρχικοποίηση μεταβλητών
  - 5: Καθορισμός αριθμού συνολικών λύσεων  $s$  και αριθμού συνολικών επαναλήψεων  $i$
  - 6:
  - 7: Εφαρμογή GRASP ▷ Δημιουργία αρχικών λύσεων
  - 8: Στάδιο 1: Δημιουργία λύσεων  $s^*$
  - 9: Στάδιο 2: Επιδίωξη λύσεων  $s^*$
  - 10:
  - 11: Εύρεση βέλτιστης λύσης  $q$  από  $s^*$
  - 12: Αρχικοποίηση ολικά βέλτιστης λύσης με  $Q = q$
  - 13:
  - 14: **Για** κάθε επανάληψη  $i$  ▷ Αρχή κύριου αλγορίθμου
  - 15:   Ταξινόμηση λύσεων  $s^*$  με βάση το κόστος
  - 16:   Διαχωρισμός λύσεων  $s^*$  σε υποπληθυσμούς πεταλούδων  $s_1^*, s_2^*$
  - 17:   Επιλογή λύσεων από  $s_1^*, s_2^*$
  - 18:   Εφαρμογή ομοιόμορφου τελεστή διασταύρωσης ▷ Uniform crossover
  - 19:   Δημιουργία νέων λύσεων  $s'$
  - 20:   Υπολογισμός κόστους νέων λύσεων  $s'$
  - 21:
  - 22:   Εφαρμογή τοπικής αναζήτησης ▷ Βελτίωση λύσεων
  - 23:   **Για** κάθε  $s'$
  - 24:     Εφαρμογή επανατοποθέτησης 1-0
  - 25:     Εφαρμογή ευρετικού LSNS
  - 26:     Εφαρμογή ανταλλαγής 1-1
  - 27:   **Τέλος για**
  - 28:   Εύρεση τρέχουσας βέλτιστης λύσης  $q$  από  $s'$
  - 29:   **Αν**  $q' < Q$
  - 30:     Αντικατάσταση νέας βέλτιστης λύσης με  $Q = q'$
  - 31:   **Τέλος αν**
  - 32:   Αντικατάσταση λύσεων  $s^*$  με  $s'$  για την επόμενη επανάληψη  $i$
  - 33:
  - 34: **Τέλος για** ▷ Τέλος κύριου αλγορίθμου
  - 35:
  - 36: **Έξοδος** :  $Q$
-

## 4.7 Αποτελέσματα προσέγγισης DBAP

Οι τέσσερις προτεινόμενοι αλγόριθμοι εφαρμόζονται για το δυναμικό και διακριτό πρόβλημα ελλιμενισμού των πλοίων, το οποίο αρχικά προτάθηκε από τους Lalla-Ruiz et al.[144] στην επιστημονική βιβλιογραφία. Για το συγκεκριμένο πρόβλημα παρέχεται ένα σύνολο παραδειγμάτων από ενενήντα (90) πειραματικά δεδομένα, τα οποία κατηγοριοποιούνται σε τρεις ομάδες τη μικρή, τη μεσαία και τη μεγάλη ομάδα παραδειγμάτων. Τα παραδείγματα διαχωρίζονται ανάλογα με το συνολικό αριθμό των πλοίων. Ειδικότερα για τη μικρή, τη μεσαία και τη μεγάλη κατηγορία υπάρχουν τριάντα (30), σαράντα (40) και είκοσι (20) παραδείγματα αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, οι Kramer et al.[143] μεταγενέστερα πρότειναν επιπλέον είκοσι (20) πειραματικά δεδομένα ως ένα νέο σύνολο παραδειγμάτων, τα οποία χαρακτηρίζονται με ιδιαίτερα αυξημένη πολυπλοκότητα, καθώς διαθέτουν μεγαλύτερο συνολικό αριθμό από πλοία και τερματικούς σταθμούς. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ο τρόπος, με τον οποίο ελλιμενίζονται τα πλοία κατά την εξυπηρέτησή τους σε κάποιο τερματικό σταθμό.

Σχήμα 4.1: Απεικόνιση εξυπηρέτησης πλοίων κατά τον ελλιμενισμό τους στους τερματικούς σταθμούς (Dulebenets[59])



Τα αποτελέσματα για κάθε πειραματικό δεδομένο από όλους τους αλγορίθμους παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.3 - 4.5 και κάθε παράδειγμα διαθέτει με την εξής ονομασία  $f(\text{αριθμός1})x(\text{αριθμός2})-(\text{αριθμός3})$ , όπου ο αριθμός1, αριθμός2 και αριθμός3 δηλώνουν τον αριθμό των πλοίων, τον αριθμό των τερματικών σταθμών και τον αριθμό του κάθε παραδείγματος αντίστοιχα. Π.χ. το πειραματικό δεδομένο  $f30x3-01$  αντιστοιχεί στο πρώτο παράδειγμα από την μικρή ομάδα παραδειγμάτων με τριάντα (30) πλοία και τρεις (3) τερματικούς σταθμούς. Αναλυτικά τα χαρακτηριστικά όλων των πειραματικών δεδομένων για το πρόβλημα DBAP παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Πειραματικά δεδομένα για την προσέγγιση DBAP

#	Αρθρογράφος	Σύνολο	Πλοία	Σταθμοί	Ομάδα
1	Lalla-Ruiz et al.[144]	30	30, 40	3, 5, 7	Μικρή
2	Lalla-Ruiz et al.[144]	40	40, 55	5, 7, 10	Μεσαία
3	Lalla-Ruiz et al.[144]	20	60	5, 7	Μεγάλη
4	Kramer et al.[143]	20	200, 250	15, 20	Πολύ μεγάλη

Στην επιστημονική βιβλιογραφία παρατηρούνται διάφορες μέθοδοι για την παροχή εφικτών λύσεων για το πρόβλημα DBAP. Οι περισσότερες μεθοδολογίες επίλυσης ανήκουν στην κατηγορία των ευρετικών και μεθευρετικών αλγορίθμων, καθώς χρησιμοποιούν ποικίλες στρατηγικές και τεχνικές για την εύρεση των βέλτιστων αποτελεσμάτων. Χαρακτηριστικά, οι αλγόριθμοι επίλυσης για το πρόβλημα ελλιμενισμού των πλοίων κατά την προσέγγιση DBAP (Lalla-Ruiz et al.[144]) είναι οι εξής:

- Tabu Search
- Tabu Search\* (plus)
- Tabu Search with Path Relinking
- Clustering Search
- Adaptive Large Neighbourhood Search
- Simulated Annealing with restarting strategy
- Iterated Greedy Heuristic
- Partial Optimization Metaheuristic Under Social Intensification Conditions
- Iterated Enhanced Dynasearch
- Metaheuristic Algorithm



- Honey Bees Mating Optimization
- Bumble Bees Mating Optimization
- Monarch Butterfly Optimization
- Firefly Mating Algorithm

Στη βιβλιογραφία παρατίθενται δέκα αλγόριθμοι βελτιστοποίησης και μαζί με τους τέσσερις προτεινόμενους αλγόριθμους της παρούσας διδακτορικής διατριβής αποτελούν συνολικά δεκατέσσερις μεθοδολογίες επίλυσης για το δυναμικό και διακριτό πρόβλημα ελλιμενισμού των πλοίων. Τα αποτελέσματα από την πειραματική διαδικασία των τεσσάρων αλγόριθμων παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.3 - 4.5. Οι Πίνακες 4.3 και 4.4 οργανώνονται σε δεκαέξι στήλες, καθώς περιέχουν όλες τις μεθοδολογίες από την βιβλιογραφία. Αντίθετως, ο Πίνακας 4.5 διαθέτει επτά στήλες, καθώς υπάρχει μόνο μία μέθοδος επίλυσης στη βιβλιογραφία για την πολύ μεγάλη ομάδα παραδειγμάτων. Για κάθε πίνακα, οι δύο πρώτες στήλες αντιστοιχούν στο όνομα του παραδείγματος (#) και στη βέλτιστη τιμή στη βιβλιογραφία (BKS). Οι επόμενες στήλες των Πινάκων 4.3 - 4.5 περιέχουν τους αλγόριθμους από την βιβλιογραφία, ενώ στις τέσσερις τελευταίες στήλες τοποθετούνται οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι με την εξής σειρά *HBMO*, *BBMO*, *MBO* και *FMA*. Τέλος, τα χαρακτηριστικά όλων των μεθοδολογιών για την προσέγγιση DBAP (Lalla-Ruiz et al.[144]) περιλαμβάνονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Αλγόριθμοι στην βιβλιογραφία για την προσέγγιση DBAP

#	Αρθρογράφος	Αλγόριθμος	Συνοτομογραφία	Χρονολογία
1	Lalla-Ruiz et al.[144]	Tabu Search	$T^2S$	2012
2	Lalla-Ruiz et al.[144]	Tabu Search	$T^2S^*$	2012
3	Lalla-Ruiz et al.[144]	Tabu Search with Path Relinking	$T^2S^* + PR$	2012
4	de Oliveira et al.[50]	Clustering Search	$Cs$	2012
5	Mauri et al.[188]	Adaptive Large Neighborhood Search	$ALNS$	2016
6	Lin et al.[170]	Simulated Annealing with restarting strategy	$SA_{RS}$	2014
7	Lin et al.[162]	Iterated Greedy Heuristic	$IG$	2014
8	Lalla-Ruiz et al.[145]	Partial Optimization Metaheuristic Under Special Intensification Conditions	$POPMUSIC$	2016
9	Nishi et al.[208]	Iterated Enhanced Dynasearch	$IED$	2020
10	Kramer et al.[143]	Metaheuristic Algorithm	$MH$	2019
11	Tsakirakis et al.[252]	Honey Bees Mating Optimization	$HBMO$	2020
12	Tsakirakis et al.[252]	Bumble Bees Mating Optimization	$BBMO$	2022
13	Tsakirakis et al.	Monarch Butterfly Optimization	$MBO$	2024
14	Tsakirakis et al.	Firefly Mating Algorithm	$FMA$	2024

#### 4.7.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων με την βιβλιογραφία

Οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι στην παρούσα διδακτορική διατριβή συγκρίνονται με τις αποτελεσματικότερες μεθόδους από την επιστημονική βιβλιογραφία. Η απόδοση των προτεινόμενων αλγόριθμων ελέγχεται κατά την εφαρμογή τους στο πρόβλημα ελλιμενισμού των πλοίων για την δυναμική και διακριτή προσέγγιση DBAP. Κατά την πειραματική διαδικασία, ο καθένας αλγόριθμος εφαρμόστηκε ξεχωριστά δέκα φορές για κάθε

παράδειγμα από όλα τα σύνολα παραδειγμάτων. Επιπρόσθετα, μαζί με τα αποτελέσματά τους παρέχονται οι χρόνοι υπολογισμού και η μέση τιμή των επιδόσεων εξίσου για κάθε παράδειγμα. Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν 4400 ( $4 \times 110 \times 10$ ) πειράματα συνολικά από τους τέσσερις αλγόριθμους. Στη διάρκεια της διεξαγωγής των πειραμάτων επιλέχθησαν διάφορες τιμές για τις μεταβλητές των αλγορίθμων με στόχο τον εντοπισμό των καταλληλότερων τιμών και την αποφυγή αρνητικών επιπτώσεων στη λειτουργία των υπολογιστικών προγραμμάτων. Χαρακτηριστικά, η επιλογή της κατάλληλης τιμής του αριθμού των λύσεων καθόριζε σε μεγάλο βαθμό την αλγοριθμική διαδικασία ως προς την απόδοση και τον συνολικό χρόνο εκτέλεσης του προγράμματος. Για αυτό το λόγο ορίστηκε το εύρος τιμών της από πέντε (ελάχιστο) μέχρι δέκα (μέγιστο) λύσεις ανάλογα με το πλήθος των δεδομένων του κάθε παραδείγματος. Σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση, οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι απαιτούν περισσότερο υπολογιστικό χρόνο, καθώς όχι μόνο επιβραδύνουν την εκτέλεση των βασικών λειτουργιών, αλλά και δεν εγγυώνται την παροχή ποιοτικών αποτελεσμάτων μετά το τέλος των κριτηρίων τερματισμού τους. Τα ληφθέντα αποτελέσματα από τους προτεινόμενους αλγόριθμους παράλληλα με τις μεθοδολογίες της επιστημονικής βιβλιογραφίας παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.3-4.5. Επιπρόσθετα, τα στατιστικά στοιχεία για κάθε προτεινόμενο αλγόριθμο απεικονίζονται στους Πίνακες 4.6-4.8 και 4.9-4.11, στους οποίους παρουσιάζονται σειριακά η αποκλίση σε ποσοστό από τις βέλτιστες τιμές (%), ο χρόνος υπολογισμού ( $t$ ), η μέση τιμή των αποτελεσμάτων ( $\bar{x}$ ) και η τυπική απόκλιση ( $\sigma$ ).

### Αλγόριθμος Ζευγαρώματος Πυγολαμπίδων

Ο αλγόριθμος ζευγαρώματος των πυγολαμπίδων (FMA) στο δυναμικό και διακριτό πρόβλημα ελλειμενισμού των πλοίων DBAP ανέρχεται πρώτος ανάμεσα στους τέσσερις προτεινόμενους αλγορίθμους και μαζί με τον *IG* θεωρούνται οι αποτελεσματικότερες μεθοδολογίες της βιβλιογραφίας. Πιο συγκεκριμένα, για το σύνολο των πειραματικών δεδομένων των Lalla-Ruiz et al.[144] (Πίνακας 4.4), ο FMA πετυχαίνει 89 από τα 90 βέλτιστα αποτελέσματα, του οποίου το ποσοστό της συνολικής απόδοσης ανέρχεται στο 98,89% και ο μέσος χρόνος εκτέλεσης υπολογίζεται στα 61,08 δευτερόλεπτα. Αντιστοίχως, στο σύνολο των Kramer et al.[143] κατατάσσεται πρώτος επιτυγχάνοντας συνολική απόκλιση 1,95% (Πίνακας 4.11).

Για το μικρό σύνολο παραδειγμάτων, ο FMA επιτυγχάνει την απόλυτη δυνατή απόδοση, καθώς όλα τα ληφθέντα αποτελέσματα παρουσιάζουν 0% απόκλιση από τις βέλτιστες τιμές. Ο υπολογιστικός χρόνος δεν ξεπερνάει τα είκοσι δευτερόλεπτα στα περισσότερα παραδείγματα, ενώ στην πλειοψηφία αυτών υπολογίζεται κάτω από ένα λεπτό αλγοριθμικού χρόνου εκτέλεσης. Επιπρόσθετα, ο μέσος χρόνος υπολογισμού είναι αρκετά

χαμηλός στα 46,6 δευτερόλεπτα, ο οποίος θεωρείται αρκετά ικανοποιητικός για σύνολο παραδειγμάτων με την χαμηλότερη πολυπλοκότητα. Στο μεσαίο σύνολο παραδειγμάτων επιτυγχάνεται η βέλτιστη απόδοση με μηδενική απόκλιση για κάθε ένα παράδειγμα. Ο μέσος χρόνος υπολογισμού δεν ξεπερνάει τα εβδομήντα δευτερόλεπτα, ενώ ο βραδύτερος χρόνος υπολογίζεται στο παράδειγμα f55x10-10 στα 123,41 δευτερόλεπτα. Η μέση τυπική απόκλιση από τις ληφθείσες τιμές υπολογίζεται σε 3,8490, η οποία θεωρείται αρκετά χαμηλή δεδομένου της πολυπλοκότητας των παραδειγμάτων.

Το τρίτο σύνολο περιέχει είκοσι πειραματικά δεδομένα, στα οποία ο προτεινόμενος αλγόριθμος των πυγολαμπίδων πετυχαίνει όλα τα βέλτιστα αποτελέσματα εκτός από το παράδειγμα f60x7-03. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, η απόκλιση υπολογίζεται μόλις μία μονάδα από την βέλτιστη τιμή (4274 από 4273) και με ποσοστό 0,023%. Παράλληλα, η συνολική απόκλιση των τιμών του αλγόριθμου σε αυτό το σύνολο παραδειγμάτων υπολογίζεται σε 0,002%. Η μέση τιμή για τον υπολογιστικό χρόνο είναι 66,01 σε δευτερόλεπτα και η τιμή για την τυπική απόκλιση των αποτελεσμάτων ανέρχεται 4,4575 μονάδες. Τόσο ο χρόνος, όσο και η απόκλιση των τιμών του αλγόριθμου θεωρούνται ιδιαίτερα χαμηλές σε αυτό το σύνολο δεδομένων με αυξημένη πολυπλοκότητα. Τέλος για το τέταρτο σύνολο πειραματικών δεδομένων, ο μέσος υπολογιστικός χρόνος κυμαίνεται κοντά στα τρία λεπτά, ενώ η μέση τυπική απόκλιση υπολογίζεται περίπου στις 30 μονάδες.

### **Αλγόριθμος Ζευγαρώματος Μελισσών**

Ο αλγόριθμος ζευγαρώματος των μελισσών (HBMO) βρίσκεται στη δεύτερη θέση μεταξύ των προτεινόμενων αλγορίθμων και στην έβδομη ανάμεσα στις μεθοδολογίες της βιβλιογραφίας για το πρόβλημα ελλιμενισμού των πλοίων DBAP. Σχετικά με το σύνολο παραδειγμάτων των Lalla-Ruiz et al.[144], ο HBMO επιτυγχάνει 60 βέλτιστες τιμές από τις συνολικά 90 με ποσοστό απόδοσης στο 66,67% (Πίνακας 4.4) και συνολικό μέσο χρόνο εκτέλεσης 68,54 δευτερόλεπτα. Ακολούθως για τα δεδομένα των Kramer et al.[143], η συνολική απόκλιση από τις βέλτιστες τιμές υπολογίζεται στο 3,06% (Πίνακας 4.11).

Στο πρώτο σύνολο παραδειγμάτων, ο HBMO λαμβάνει σχεδόν όλα τα βέλτιστα αποτελέσματα εκτός των παραδειγμάτων f40x5-02 και f40x5-09. Χαρακτηριστικά σε αυτά, η απόκλιση από τις βέλτιστες τιμές παρατηρείται ιδιαίτερος μικρή, καθώς η διαφορά των αποτελεσμάτων από αυτές ισούται με μία και τρεις μονάδες αντίστοιχα. Η συνολική απόκλιση στο συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων είναι ελάχιστη με μόλις 0,006% , ενώ ο μέσος χρόνος εκτέλεσης υπολογίζεται στα 29,35 δευτερόλεπτα. Αντίθετα στο δεύτερο σύνολο παραδειγμάτων, το ποσοστό της απόκλισης των αποτελεσμάτων υπολογίζεται αυξημένο, καθώς λαμβάνει το ποσοστό του 0,107%. Αυτό συμβαίνει διότι, ο αλγόριθμος

επιτυγχάνει 21 βέλτιστες τιμές από τα 40 διαθέσιμα παραδείγματα. Σε κάποια από αυτά παρατηρείται ότι η απόσταση των αποτελεσμάτων από τις βέλτιστες τιμές προσεγγίζει το 0,5%, ενώ στο παράδειγμα f55x7-10 υπερβαίνει ελάχιστα το συγκεκριμένο ποσοστό. Σε αυτό το σύνολο παραδειγμάτων, ο υπολογιστικός χρόνος υπολογίζεται στα 73,16 δευτερόλεπτα, ενώ η διακύμανση των τιμών είναι στις 5,0812 μονάδες.

Στο μεγάλο σύνολο δεδομένων επιτυγχάνονται 11 βέλτιστα αποτελέσματα σε σύνολο 20 παραδειγμάτων με ποσοστό απόκλισης 0,097%. Η μέγιστη απόκλιση παρατηρείται στο παράδειγμα f60x7-07 με 20 μονάδες απόσταση από τη βέλτιστη τιμή. Ο μέσος υπολογιστικός χρόνος κυμαίνεται κοντά στα δύο λεπτά, ενώ η μέση διακύμανση δεν υπερβαίνει τις 6 μονάδες. Αναφορικά με το τελευταίο και πολύ μεγάλο σύνολο παραδειγμάτων, ο μέσος χρόνος εκτέλεσης και η τυπική απόκλιση των αποτελεσμάτων υπολογίζονται στα 161,98 δευτερόλεπτα και στις 60,9151 μονάδες αντίστοιχα.

### **Αλγόριθμος Ζευγαρώματος Μπάμπουρων**

Ο αλγόριθμος ζευγαρώματος των μπάμπουρων (BBMO) στην προσέγγιση DBAP του προβλήματος του ελλιμενισμού των πλοίων κατατάσσεται τρίτος ανάμεσα στους τέσσερις προτεινόμενους αλγορίθμους και συνολικά ενδέκατος από τους αλγορίθμους της βιβλιογραφίας αναφορικά με την συνολική απόδοσή του. Ειδικότερα, για το σύνολο παραδειγμάτων των Lalla-Ruiz et al.[144] (Πίνακας 4.4) καταλαμβάνει 38 από τις 90 βέλτιστες τιμές με ποσοστό επιτυχίας 42,22%. Επιπρόσθετα, στο σύνολο παραδειγμάτων των Kramer et al.[143] (Πίνακας 4.5) βρίσκεται στην τρίτη θέση από τους προτεινόμενους αλγορίθμους με συνολική απόκλιση 3,17% (Πίνακας 4.11) από τις βέλτιστες τιμές.

Στο μικρό σύνολο παραδειγμάτων επιτυγχάνεται σχεδόν η απόλυτη απόδοση από τον BBMO, καθώς μόνο σε τέσσερις περιπτώσεις δεν λαμβάνονται οι βέλτιστες τιμές με συνολική απόκλιση από αυτές σε ποσοστό 0,021%. Στο δεύτερο σύνολο δεδομένων, η απόδοση του αλγορίθμου σημειώνει πτώση με 10 βέλτιστα αποτελέσματα σε 40 συνολικά παραδείγματα. Ωστόσο, η λήψη των συνολικών αποτελεσμάτων πραγματοποιείται σε λιγότερο από ένα λεπτό με μέσο χρόνο εκτέλεσης τα 55,21 δευτερόλεπτα.

Για τρίτο και μεγάλο σύνολο δεδομένων, ο BBMO αποδίδει σε βέλτιστο βαθμό σε μόλις τέσσερα από συνολικά είκοσι παραδείγματα. Ωστόσο, το ποσοστό απόκλισης από τις βέλτιστες λύσεις υπολογίζεται στο 0,260% και ο μέσος χρόνος υπολογισμού τους στα 49,40 δευτερόλεπτα. Στο τελευταίο σύνολο παραδειγμάτων, η μέση απόκλιση των τιμών του υπολογίζεται στο 3,17%, ενώ ο μέσος χρόνος εκτέλεσης υπερβαίνει τα 220 δευτερόλεπτα.

## Monarch Butterfly Optimization - MBO

Για την προσέγγιση DBAP του προβλήματος του ελλιμενισμού των πλοίων, ο MBO καταλαμβάνει την τέταρτη θέση ανάμεσα στους προτεινόμενους αλγόριθμους τόσο στο σύνολο παραδειγμάτων των Lalla-Ruiz et al.[144], όσο και στον Kramer et al.[143], καθώς επιτυγχάνει την ελάχιστη δυνατή απόδοση στην συγκεκριμένη προσέγγιση. Πιο συγκεκριμένα, στα πειραματικά δεδομένα των Lalla-Ruiz et al.[144] προσεγγίζει 34 βέλτιστες τιμές από τις 90 συνολικά με ποσοστό 37,78% (Πίνακας 4.4) και ανέρχεται δωδέκατος σε απόδοση μπροστά μόνο από την μέθοδο της περιορισμένης αναζήτησης. Επιπρόσθετα, η συνολική διαφορά από τις βέλτιστες στα παραδείγματα των Kramer et al.[143] υπολογίζεται σε ποσοστό της τάξης του 3,77% (Πίνακας 4.11).

Ο MBO επιτυγχάνει 21 βέλτιστες τιμές στα 30 παραδείγματα στο μικρό σύνολο από αυτά. Παρατηρείται ότι, η μέση απόκλιση των τιμών είναι ιδιαίτερα μικρή με ποσοστό 0,052%. Αντιθέτως, στο δεύτερο σύνολο δεδομένων, η απόδοση του αλγόριθμου ελαττώνεται, καθώς επιτυγχάνονται μόλις 9 βέλτιστα αποτελέσματα στα 40 συνολικά παραδείγματα. Επιπρόσθετα, ο μέσος χρόνος εκτέλεσης υπερβαίνει τα 80 δευτερόλεπτα, ενώ η μέση τυπική απόκλιση υπολογίζεται στις 3,1860 μονάδες.

Στο μεγάλο σύνολο παραδειγμάτων, η απόδοση του αλγόριθμου παραμένει σε χαμηλά επίπεδα. Από τα είκοσι παραδείγματα λαμβάνονται μόνο τέσσερα βέλτιστα αποτελέσματα και η συνολική μέση διακύμανση των τιμών κυμαίνεται σε ποσοστό 0,204%. Τέλος στο πολύ μεγάλο σύνολο δεδομένων, ο χρόνος υπολογισμού και η τυπική απόκλιση των αποτελεσμάτων υπολογίζονται στα 244,94 δευτερόλεπτα και στις 50,7720 μονάδες αντίστοιχα.

## Γενικά Συμπεράσματα

Η υλοποίηση των τεσσάρων προτεινόμενων αλγορίθμων στο πρόβλημα ελλιμενισμού των πλοίων DBAP έχει διπλό στόχο. Πρώτον, την παροχή ποιοτικών και όσο το δυνατόν περισσότερων βέλτιστων αποτελεσμάτων σε όλα τα σύνολα παραδειγμάτων. Δεύτερον, την παραγωγή εφικτών λύσεων σε ρεαλιστικό υπολογιστικό χρόνο. Τα ληφθέντα αποτελέσματα από την πειραματική διαδικασία αποδεικνύουν τη διαφορά δυναμικότητας της κάθε μεθόδου ως προς την αποτελεσματικότητά τους. Επιπρόσθετα, η κατάταξή τους σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθοδολογίες της βιβλιογραφίας δείχνει τη διακύμανση στην επιτυχημένη εφαρμογή τους στα συγκεκριμένα προβλήματα, καθώς παρατηρείται εμφανής διαφορά στα ποσοστά των αποτελεσμάτων τους από τις βέλτιστες τιμές. Ωστόσο, το κομμάτι της απόδοσης των τεσσάρων αλγορίθμων κρίνεται ιδιαίτερα επιτυχημένο, καθώς η απόσταση των ληφθέντων αποτελεσμάτων από τις βέλτιστες τιμές παρατηρείται

σχετικά μικρή σε όλα τα σύνολα παραδειγμάτων.

Αναφορικά με την κύρια λειτουργία και την επίδραση των αλλαγών στη δομή των αλγορίθμων, η ποιότητα των παραγόμενων αποτελεσμάτων παρουσιάζει το ποσοστό επιτυχίας της κάθε καινούργιας και καινοτόμας τεχνικής στις προτεινόμενες μεθοδολογίες. Σε κάποιους απο αυτούς συνέβαλαν στην αύξηση της συνολικής απόδοσης τους, ενώ σε άλλους δεν επιτεύχθηκαν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Το σύστημα κατάταξης των λύσεων και η διαδικασία της μετάλλαξης στον FMA αποτέλεσαν ένα εξαιρετικό συνδυασμό στην παραγωγή νέων λύσεων με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός από τους πιο ανταγωνιστικούς αλγόριθμους της βιβλιογραφίας. Η εφαρμογή του τελεστή της διασταύρωσης με έναν πρωτότυπο τρόπο συνέβαλε στην αύξηση της αποτελεσματικότητας του HBMO. Ωστόσο, η ταυτόχρονη χρησιμοποίηση δύο γενετικών τελεστών δεν απέδωσαν σε μεγάλο βαθμό με αποτέλεσμα τη χαμηλή απόδοση του BBMO. Τέλος, η παραλλαγή του κλασσικού τελεστή της διασταύρωσης δεν απέδωσε σε ικανοποιητικό βαθμό στην παραγωγή ποιοτικών λύσεων, καθώς η απόδοση του MBO κυμάνθηκε συνολικά χαμηλότερα από τους υπόλοιπους τέσσερις προτεινόμενους αλγόριθμους.

Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα μικρού και μεσαίου συνόλου παραδειγμάτων

#	BKS	T <sup>2</sup> S	T <sup>2</sup> S*	T <sup>2</sup> S* + PR	Cs	ALNS	SA <sub>RS</sub>	IG	POPMUSIC	IED	MH	HBMO	BBMO	MBO	FMA
f30x3-01	1763	1763	1763	1763	1763	1763	1763	1763	1763	1763	1763	1763	1763	1763	1763
f30x3-02	2090	2090	2090	2090	2090	2090	2090	2090	2090	2090	2090	2090	2090	2090	2090
f30x3-03	2186	2188	2186	2186	2186	2186	2186	2186	2186	2186	2186	2186	2186	2186	2186
f30x3-04	1538	1544	1538	1538	1538	1538	1538	1538	1538	1538	1538	1538	1538	1538	1538
f30x3-05	2114	2114	2114	2114	2114	2114	2114	2114	2114	2114	2114	2114	2114	2114	2114
f30x3-06	2185	2187	2187	2185	2185	2185	2185	2185	2185	2185	2185	2185	2185	2185	2185
f30x3-07	1845	1849	1847	1845	1845	1845	1845	1845	1845	1845	1845	1845	1847	1845	1845
f30x3-08	1271	1278	1271	1271	1271	1271	1271	1271	1271	1271	1271	1271	1271	1271	1271
f30x3-09	1595	1595	1595	1595	1595	1595	1595	1595	1595	1595	1595	1595	1595	1595	1595
f30x3-10	2195	2197	2195	2195	2195	2195	2195	2195	2195	2195	2195	2195	2195	2195	2195
f30x5-01	1149	1153	1149	1149	1149	1149	1149	1149	1149	1149	1149	1149	1150	1151	1149
f30x5-02	1475	1480	1476	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1475	1476	1475	1475	1475	1475
f30x5-03	1542	1547	1542	1542	1542	1542	1542	1542	1542	1542	1542	1542	1542	1542	1542
f30x5-04	1075	1077	1075	1075	1075	1075	1075	1075	1075	1075	1075	1075	1075	1078	1075
f30x5-05	1463	1475	1463	1463	1463	1463	1463	1463	1463	1463	1463	1463	1464	1464	1463
f30x5-06	1580	1587	1581	1580	1580	1580	1580	1580	1580	1580	1580	1580	1580	1580	1580
f30x5-07	1276	1279	1276	1276	1276	1276	1276	1276	1276	1276	1276	1276	1276	1276	1276
f30x5-08	870	877	870	870	870	870	870	870	870	870	870	870	870	870	870
f30x5-09	1134	1156	1153	1134	1134	1134	1134	1134	1134	1134	1144	1134	1134	1134	1134
f30x5-10	1527	1536	1527	1527	1527	1527	1527	1527	1527	1527	1527	1527	1527	1529	1527
f40x5-01	2301	2317	2307	2303	2301	2301	2301	2301	2303	2301	2303	2301	2301	2301	2301
f40x5-02	2829	2839	2835	2834	2829	2829	2829	2829	2829	2829	2829	2830	2836	2836	2829
f40x5-03	2880	2886	2880	2880	2880	2880	2880	2880	2880	2880	2881	2880	2880	2881	2880
f40x5-04	2001	2033	2001	2001	2001	2001	2001	2001	2001	2001	2001	2001	2001	2001	2001
f40x5-05	2815	2834	2815	2815	2815	2815	2815	2815	2815	2815	2815	2815	2815	2815	2815
f40x5-06	2934	2945	2934	2934	2934	2934	2934	2934	2934	2934	2934	2934	2934	2938	2934
f40x5-07	2632	2656	2632	2632	2632	2632	2632	2632	2632	2632	2634	2632	2632	2632	2632
f40x5-08	1835	1852	1836	1835	1835	1835	1835	1835	1835	1835	1836	1835	1835	1836	1835
f40x5-09	2086	2119	2095	2089	2086	2086	2086	2086	2086	2086	2094	2089	2091	2095	2086
f40x5-10	2962	2976	2964	2962	2962	2962	2962	2962	2962	2962	2962	2962	2962	2962	2962
f40x7-01	1458	1489	1467	1460	1460	1458	1458	1458	1458	1458	1464	1460	1465	1464	1458
f40x7-02	1375	1423	1381	1375	1399	1375	1375	1375	1375	1375	1378	1375	1380	1375	1375
f40x7-03	2119	2149	2119	2119	2119	2119	2119	2119	2119	2119	2134	2127	2133	2132	2119
f40x7-04	1591	1618	1600	1597	1595	1591	1591	1591	1591	1591	1601	1591	1596	1597	1591
f40x7-05	1847	1885	1849	1847	1869	1847	1847	1847	1847	1847	1849	1847	1860	1860	1847
f40x7-06	2080	2104	2080	2080	2080	2080	2080	2080	2080	2080	2080	2080	2080	2085	2080
f40x7-07	1841	1863	1845	1841	1841	1841	1841	1841	1841	1841	1842	1841	1841	1846	1841
f40x7-08	2025	2040	2026	2026	2044	2025	2025	2025	2025	2025	2025	2026	2027	2026	2025
f40x7-09	1880	1901	1888	1880	1880	1880	1880	1880	1880	1880	1880	1880	1880	1880	1880
f40x7-10	1883	1922	1905	1892	1888	1883	1884	1883	1883	1883	1890	1887	1890	1887	1883
f55x5-01	4689	4701	4693	4689	4690	4689	4689	4689	4689	4689	4689	4689	4689	4689	4689
f55x5-02	5467	5496	5483	5467	5467	5467	5467	5467	5467	5467	5467	5467	5479	5471	5467
f55x5-03	5499	5523	5499	5499	5517	5499	5499	5499	5499	5499	5499	5499	5499	5499	5499
f55x5-04	4165	4249	4189	4179	4200	4165	4165	4165	4165	4165	4165	4165	4165	4168	4165
f55x5-05	5478	5590	5484	5478	5478	5478	5478	5478	5478	5478	5478	5478	5478	5478	5478
f55x5-06	5595	5609	5599	5595	5595	5595	5595	5595	5595	5595	5597	5595	5595	5595	5595
f55x5-07	4870	4914	4902	4882	4878	4870	4870	4870	4870	4870	4878	4884	4884	4880	4870
f55x5-08	3552	3585	3565	3552	3561	3552	3552	3552	3552	3552	3552	3552	3556	3556	3552
f55x5-09	4273	4301	4277	4275	4285	4273	4273	4273	4273	4273	4277	4277	4279	4283	4273
f55x5-10	5739	5831	5739	5739	5739	5739	5739	5739	5739	5739	5739	5739	5739	5745	5739
f55x7-01	2846	2871	2846	2846	2855	2846	2846	2846	2846	2846	2846	2853	2861	2861	2846
f55x7-02	2883	2941	2887	2883	2913	2883	2883	2883	2883	2883	2894	2883	2893	2891	2883
f55x7-03	3825	3853	3840	3833	3830	3825	3831	3825	3825	3825	3844	3832	3842	3842	3825
f55x7-04	2951	3022	2977	2971	2963	2955	2953	2951	2951	2951	2967	2955	2973	2965	2951
f55x7-05	3797	3845	3803	3801	3801	3799	3797	3797	3797	3797	3803	3801	3807	3801	3797
f55x7-06	3783	3833	3783	3783	3783	3783	3783	3783	3783	3783	3783	3783	3783	3783	3783
f55x7-07	3774	3844	3774	3774	3774	3774	3774	3774	3774	3774	3774	3774	3779	3774	3774
f55x7-08	3862	3893	3864	3863	3865	3862	3862	3862	3862	3862	3862	3868	3876	3875	3862
f55x7-09	3591	3627	3597	3591	3591	3591	3591	3591	3591	3591	3597	3591	3601	3601	3591
f55x7-10	3623	3699	3658	3635	3635	3623	3630	3623	3623	3623	3654	3643	3642	3634	3623
f55x10-01	2742	2777	2745	2745	2756	2745	2744	2742	2742	2742	2754	2747	2751	2750	2742
f55x10-02	2527	2577	2549	2534	2534	2527	2527	2527	2527	2527	2531	2531	2543	2534	2527
f55x10-03	2544	2570	2545	2545	2546	2544	2544	2544	2544	2544	2547	2556	2552	2552	2544
f55x10-04	3315	3351	3315	3315	3315	3315	3315	3315	3315	3315	3315	3315	3324	3320	3315
f55x10-05	3109	3157	3147	3123	3121	3109	3111	3109	3109	3109	3118	3122	3131	3125	3109
f55x10-06	2283	2293	2283	2283	2283	2283	2283	2283	2283	2283	2283	2283	2283	2283	2283
f55x10-07	2144	2172	2146	2146	2146	2144	2144	2144	2144	2144	2150	2144	2152	2150	2144
f55x10-08	2720	2783	2743	2726	2730	2720	2720	2720	2720	2720	2723	2730	2739	2725	2720
f55x10-09	2149	2212	2162	2162	2153	2149	2152	2149	2149	2149	2162	2151	2157	2155	2149
f55x10-10	2814	2894	2815	2815	2814	2814	2814	2814	2814	2814	2814	2815	2826	2831	2814

Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα μεγάλου συνόλου παραδειγμάτων

#	<i>BKS</i>	<i>T<sup>2</sup>S</i>	<i>T<sup>2</sup>S*</i>	<i>T<sup>2</sup>S* + PR</i>	<i>Cs</i>	<i>ALNS</i>	<i>SARs</i>	<i>IG</i>	<i>POPMUSIC</i>	<i>IED</i>	<i>MH</i>	<i>HBMO</i>	<i>BBMO</i>	<i>MBO</i>	<i>FMA</i>
f60x5-01	5753	5763	5761	5753	5755	5753	5753	5753	5753	5753	5753	5753	5759	5753	5753
f60x5-02	6884	6932	6884	6884	6892	6884	6884	6884	6884	6884	6884	6884	6888	6891	6884
f60x5-03	6780	6795	6782	6780	6780	6780	6780	6780	6780	6780	6780	6780	6780	6784	6780
f60x5-04	5092	5172	5105	5105	5105	5092	5092	5092	5092	5092	5092	5092	5100	5092	5092
f60x5-05	6715	6747	6715	6715	6715	6715	6715	6715	6715	6715	6715	6715	6715	6715	6715
f60x5-06	6616	6637	6618	6616	6616	6616	6616	6616	6616	6616	6616	6616	6626	6622	6616
f60x5-07	6011	6073	6011	6011	6017	6011	6011	6011	6011	6011	6011	6011	6011	6011	6011
f60x5-08	4385	4415	4406	4385	4385	4385	4385	4385	4385	4385	4385	4385	4385	4395	4385
f60x5-09	5235	5263	5235	5235	5241	5235	5235	5235	5235	5235	5239	5235	5245	5241	5235
f60x5-10	7255	7350	7281	7281	7279	7255	7255	7255	7255	7255	7255	7263	7260	7260	7255
f60x7-01	3707	3735	3724	3715	3717	3707	3709	3707	3707	3707	3725	3711	3731	3719	3707
f60x7-02	4146	4279	4191	4172	4166	4148	4150	4147	4146	4147	4168	4162	4164	4160	4146
f60x7-03	4273	4291	4290	4281	4280	4275	4275	4273	4273	4274	4290	4287	4300	4290	4274
f60x7-04	3910	3926	3916	3916	3917	3913	3911	3910	3910	3910	3915	3910	3924	3924	3910
f60x7-05	4251	4294	4264	4261	4261	4252	4251	4251	4251	4251	4253	4261	4269	4260	4251
f60x7-06	5727	5741	5731	5729	5736	5729	5727	5727	5727	5727	5727	5735	5743	5737	5727
f60x7-07	3719	3825	3749	3743	3743	3733	3721	3719	3719	3719	3744	3737	3745	3745	3719
f60x7-08	4582	4735	4600	4586	4586	4583	4582	4582	4582	4582	4600	4584	4596	4592	4582
f60x7-09	3979	4049	4011	4004	4014	3979	3985	3979	3979	3979	3994	3979	3989	3991	3979
f60x7-10	4107	4222	4125	4115	4121	4111	4107	4107	4107	4107	4121	4111	4125	4123	4107
Total	-	4/90	34/90	55/90	48/90	79/90	78/90	89/90	88/90	88/90	50/90	60/90	38/90	34/90	89/90
Per. (%)	-	4.44%	37.78%	61.11%	53.33%	87.78%	86.67%	98.89%	97.78%	97.78%	55.56%	66.67%	42.22%	37.78%	98.89%
Rank	-	14	12	8	10	5	6	1	3	3	9	7	11	12	1

Πίνακας 4.5: Αποτελέσματα πολύ μεγάλου συνόλου παραδειγμάτων

#	<i>BKS</i>	<i>MH</i>	<i>HBMO</i>	<i>BBMO</i>	<i>MBO</i>	<i>FMA</i>
f200x15-01	12604	12709	12866	12856	12872	12753
f200x15-02	10319	10407	10593	10581	10601	10450
f200x15-03	11296	11558	11904	11895	12054	11716
f200x15-04	15441	15647	15860	15866	15930	15835
f200x15-05	18166	18352	18723	18734	18873	18452
f200x15-06	16869	16961	17305	17323	17381	17172
f200x15-07	13025	13226	13500	13584	13589	13322
f200x15-08	14182	14537	14858	14888	14900	14709
f200x15-09	18118	18198	18496	18398	18535	18274
f200x15-10	17102	17263	17427	17447	17481	17405
f250x20-01	15633	15769	16055	16086	16191	15905
f250x20-02	15776	15915	16242	16252	16479	16051
f250x20-03	16519	16724	16986	16998	17021	16784
f250x20-04	16423	16509	16766	16785	16923	16607
f250x20-05	15661	15837	16172	16188	16449	16006
f250x20-06	20060	20193	20555	20579	20544	20381
f250x20-07	14284	14514	14780	14808	14948	14593
f250x20-08	16305	16498	16772	16808	17027	16590
f250x20-09	15864	16121	16586	16609	16760	16332
f250x20-10	16283	16428	16786	16894	16874	16522



Πίνακας 4.6: Στατιστικά μικρού και μεσαίου συνόλου παραδειγμάτων 1

#	BKS	HBMO	%	t	$\bar{x}$	$\sigma$	BBMO	%	t	$\bar{x}$	$\sigma$
f30x3-01	1763	1763	0,0000%	22,51	1763,0	0,0000	1763	0,0000%	12,46	1763	0,0000
f30x3-02	2090	2090	0,0000%	13,02	2090,0	0,0000	2090	0,0000%	29,12	2090	0,0000
f30x3-03	2186	2186	0,0000%	18,33	2186,0	0,0000	2186	0,0000%	38,48	2186	0,0000
f30x3-04	1538	1538	0,0000%	22,13	1538,0	0,0000	1538	0,0000%	59,06	1538	0,0000
f30x3-05	2114	2114	0,0000%	15,48	2114,0	0,0000	2114	0,0000%	40,12	2114	0,0000
f30x3-06	2185	2185	0,0000%	19,52	2185,0	0,0000	2185	0,0000%	57,35	2185	0,0000
f30x3-07	1845	1845	0,0000%	21,37	1847,8	2,2804	1845	0,0000%	22,29	1845	0,0000
f30x3-08	1271	1271	0,0000%	16,26	1271,0	0,0000	1271	0,0000%	25,07	1271	0,0000
f30x3-09	1595	1595	0,0000%	23,02	1595,0	0,0000	1595	0,0000%	45,58	1595	0,0000
f30x3-10	2195	2195	0,0000%	12,43	2195,0	0,0000	2195	0,0000%	67,14	2195	0,0000
f30x5-01	1149	1149	0,0000%	42,18	1151,4	1,5166	1150	0,0870%	39,09	1152,8	2,1679
f30x5-02	1475	1475	0,0000%	16,26	1475,0	0,0000	1475	0,0000%	53,07	1478	2,7386
f30x5-03	1542	1542	0,0000%	18,42	1542,0	0,0000	1542	0,0000%	44,51	1542	0,0000
f30x5-04	1075	1075	0,0000%	9,57	1075,0	0,0000	1075	0,0000%	51,36	1075	0,0000
f30x5-05	1463	1463	0,0000%	12,24	1463,0	0,0000	1464	0,0684%	78,58	1468,4	2,6077
f30x5-06	1580	1580	0,0000%	23,08	1580,0	0,0000	1580	0,0000%	50,39	1580	0,0000
f30x5-07	1276	1276	0,0000%	19,35	1276,0	0,0000	1276	0,0000%	18,03	1276	0,0000
f30x5-08	870	870	0,0000%	13,48	870,0	0,0000	870	0,0000%	35,48	870	0,0000
f30x5-09	1134	1134	0,0000%	28,21	1134,0	0,0000	1134	0,0000%	70,04	1135,2	2,6833
f30x5-10	1527	1527	0,0000%	45,27	1530,0	1,8708	1527	0,0000%	42,01	1529	1,4142
f40x5-01	2301	2301	0,0000%	34,11	2301,0	0,0000	2301	0,0000%	77,39	2308	4,0620
f40x5-02	2829	2830	0,0353%	58,37	2835,6	3,5777	2836	0,2474%	12,58	2838,8	2,6833
f40x5-03	2880	2880	0,0000%	48,23	2883,2	3,0332	2880	0,0000%	43,46	2880	0,0000
f40x5-04	2001	2001	0,0000%	27,48	2003,0	3,0822	2001	0,0000%	54,29	2005	3,0000
f40x5-05	2815	2815	0,0000%	99,42	2821,4	6,4265	2815	0,0000%	28,37	2824,4	6,2690
f40x5-06	2934	2934	0,0000%	40,38	2937,4	1,3416	2934	0,0000%	53,32	2936	2,4495
f40x5-07	2632	2632	0,0000%	58,4	2636,4	4,3359	2632	0,0000%	35,14	2632,4	0,8944
f40x5-08	1835	1835	0,0000%	38,06	1840,4	5,5946	1835	0,0000%	39,29	1835	0,0000
f40x5-09	2086	2089	0,1438%	35,4	2093,2	4,0249	2091	0,2397%	41,58	2099,2	6,1806
f40x5-10	2962	2962	0,0000%	34,03	2967,2	7,6616	2962	0,0000%	35,17	2974	7,9687
f40x7-01	1458	1460	0,1372%	36,32	1468,4	6,8775	1465	0,4801%	53,47	1470,6	5,6391
f40x7-02	1375	1375	0,0000%	49,09	1380,4	5,7706	1380	0,3636%	35,29	1381,8	2,0494
f40x7-03	2119	2127	0,3775%	145,25	2130,0	2,1213	2133	0,6607%	53,1	2138,2	5,1672
f40x7-04	1591	1591	0,0000%	39,98	1597,6	4,0988	1596	0,3143%	88,33	1597	1,2247
f40x7-05	1847	1847	0,0000%	118,5	1853,2	8,2583	1860	0,7038%	30,37	1865,2	5,0695
f40x7-06	2080	2080	0,0000%	15,12	2081,6	1,5166	2080	0,0000%	67,57	2083,8	2,1679
f40x7-07	1841	1841	0,0000%	19,92	1844,2	3,3466	1841	0,0000%	48,31	1841,4	0,8944
f40x7-08	2025	2026	0,0494%	22,18	2026,0	0,0000	2027	0,0988%	64,38	2030,6	3,5071
f40x7-09	1880	1880	0,0000%	75,85	1885,8	3,7683	1880	0,0000%	49,32	1880	0,0000
f40x7-10	1883	1887	0,2124%	41,05	1892,6	3,7148	1890	0,3717%	62,47	1897,8	5,6303
f55x5-01	4689	4689	0,0000%	27,45	4692,6	3,2863	4689	0,0000%	77,16	4693	4,0000
f55x5-02	5467	5467	0,0000%	29,04	5476,4	6,8411	5479	0,2195%	18,48	5482,8	2,4900
f55x5-03	5499	5499	0,0000%	23,56	5503,0	3,1623	5499	0,0000%	46,07	5501	2,4495
f55x5-04	4165	4165	0,0000%	35,41	4170,8	5,1186	4165	0,0000%	68,02	4170,6	6,2690
f55x5-05	5478	5478	0,0000%	64,45	5483,2	3,8987	5478	0,0000%	50,01	5484,8	4,6043
f55x5-06	5595	5595	0,0000%	36,53	5599,0	4,0000	5595	0,0000%	55,59	5600,6	5,1769
f55x5-07	4870	4884	0,2875%	47,21	4890,0	7,0711	4884	0,2875%	65,39	4888,4	4,3359
f55x5-08	3552	3552	0,0000%	81,37	3555,2	3,0332	3556	0,1126%	58,47	3560	4,3012
f55x5-09	4273	4277	0,0936%	92,06	4280,6	3,2863	4279	0,1404%	43,1	4287,4	6,8411
f55x5-10	5739	5739	0,0000%	115,56	5749,4	8,2946	5739	0,0000%	59,33	5747,4	7,0922
f55x7-01	2846	2853	0,2460%	133,5	2860,6	5,3198	2861	0,5271%	52,23	2871,4	6,8775
f55x7-02	2883	2883	0,0000%	117,21	2890,6	7,5366	2893	0,3469%	82,17	2897,4	3,2863
f55x7-03	3825	3832	0,1830%	88,29	3843,8	9,4710	3842	0,4444%	40,25	3857,2	11,1669
f55x7-04	2951	2955	0,1355%	98,09	2962,2	8,3487	2973	0,7455%	78,42	2985,4	11,6103
f55x7-05	3797	3801	0,1053%	90,4	3805,4	4,5607	3807	0,2634%	49,56	3811,2	3,0332
f55x7-06	3783	3783	0,0000%	54,31	3791,0	4,8990	3783	0,0000%	33,09	3790,8	5,2154
f55x7-07	3774	3774	0,0000%	40,39	3778,8	5,0695	3779	0,1325%	41,56	3784,4	3,9749
f55x7-08	3862	3868	0,1554%	51,17	3872,2	4,4385	3876	0,3625%	87,01	3876,8	0,8367
f55x7-09	3591	3591	0,0000%	61	3594,6	3,2863	3601	0,2785%	71,32	3607,8	6,4187
f55x7-10	3623	3643	0,5520%	156,32	3653,4	9,6073	3642	0,5244%	52,22	3653,6	7,2664
f55x10-01	2742	2747	0,1823%	81,07	2750,0	2,2361	2751	0,3282%	36,46	2755,8	3,9623
f55x10-02	2527	2531	0,1583%	165,1	2539,2	4,9193	2543	0,6332%	33,57	2547,2	3,7014
f55x10-03	2544	2556	0,4717%	112,36	2566,4	8,0808	2552	0,3145%	64,27	2564,6	11,1265
f55x10-04	3315	3315	0,0000%	68,3	3321,6	8,0498	3324	0,2715%	26,32	3327,2	2,1679
f55x10-05	3109	3122	0,4181%	201,54	3126,6	2,7019	3131	0,7076%	64,38	3141	6,0000
f55x10-06	2283	2283	0,0000%	60,03	2286,2	2,9496	2283	0,0000%	43,23	2287,4	2,7019
f55x10-07	2144	2144	0,0000%	14,33	2145,6	0,8944	2152	0,3731%	57,54	2157,2	7,9498
f55x10-08	2720	2730	0,3676%	93,56	2735,8	4,6043	2739	0,6985%	87,34	2742,8	3,4928
f55x10-09	2149	2151	0,0931%	52,43	2155,2	5,0200	2157	0,3723%	39,13	2171,4	8,7920
f55x10-10	2814	2815	0,0355%	71,37	2829,2	13,7913	2826	0,4264%	74,11	2837,2	9,2574

Πίνακας 4.7: Στατιστικά μεγάλου συνόλου παραδειγμάτων 1

#	BKS	HBMΟ	%	t	$\bar{x}$	$\sigma$	BBMO	%	t	$\bar{x}$	$\sigma$
f60x5-01	5753	5753	0,0000%	93,23	5757,2	4,1473	5759	0,1043%	22,4	5760,6	1,6733
f60x5-02	6884	6884	0,0000%	63,45	6887,6	3,2863	6888	0,0581%	35,41	6899	8,1548
f60x5-03	6780	6780	0,0000%	133,11	6786,6	5,3666	6780	0,0000%	37,04	6786,8	5,7619
f60x5-04	5092	5092	0,0000%	150,42	5094,8	2,6833	5100	0,1571%	46,11	5111,2	9,2033
f60x5-05	6715	6715	0,0000%	34,01	6726,4	7,8613	6715	0,0000%	24,57	6727,4	7,7974
f60x5-06	6616	6616	0,0000%	116,38	6622,2	3,8987	6626	0,1511%	19,03	6634,4	7,5366
f60x5-07	6011	6011	0,0000%	123,25	6017,4	11,0815	6011	0,0000%	71,43	6024,6	8,1731
f60x5-08	4385	4385	0,0000%	141,39	4391,0	4,2426	4385	0,0000%	55,57	4389,6	6,1887
f60x5-09	5235	5235	0,0000%	50,37	5240,4	5,5498	5245	0,1910%	59,48	5249	5,4772
f60x5-10	7255	7263	0,1103%	54,54	7278,6	10,1390	7260	0,0689%	43,54	7278,2	11,5629
f60x7-01	3707	3711	0,1079%	122,01	3721,2	5,9330	3731	0,6474%	55,27	3734	3,0822
f60x7-02	4146	4162	0,3859%	186,5	4167,0	4,3589	4164	0,4342%	95	4181,2	13,4611
f60x7-03	4273	4287	0,3276%	176,13	4289,2	1,9235	4300	0,6319%	40,4	4304,8	3,1145
f60x7-04	3910	3910	0,0000%	75,01	3918,6	6,4265	3924	0,3581%	44,32	3926	2,3452
f60x7-05	4251	4261	0,2352%	51,04	4271,2	11,8828	4269	0,4234%	65,37	4282,2	10,7331
f60x7-06	5727	5735	0,1397%	36,46	5745,8	8,1976	5743	0,2794%	85,03	5756,6	8,6487
f60x7-07	3719	3737	0,4840%	220,28	3743,2	3,8987	3745	0,6991%	62,18	3763,6	12,1573
f60x7-08	4582	4584	0,0436%	239,01	4589,8	5,4037	4596	0,3055%	54,04	4600,8	2,8636
f60x7-09	3979	3979	0,0000%	77,42	3988,4	7,7653	3989	0,2513%	28,58	3995,8	6,8702
f60x7-10	4107	4111	0,0974%	212,18	4116,4	3,1305	4125	0,4383%	43,38	4127,8	3,3466
Total			0,0708%	68,543	3218,02	4,0575		0,1927%	49,96	3222,5	4,2335

Πίνακας 4.8: Στατιστικά πολύ μεγάλου συνόλου παραδειγμάτων 1

#	BKS	HBMΟ	%	t	$\bar{x}$	$\sigma$	BBMO	%	t	$\bar{x}$	$\sigma$
f200x15-01	12604	12866	2,08%	101,45	12884,4	14,48447445	12856	2,00%	220,19	12892,4	24,42949038
f200x15-02	10319	10593	2,66%	121,43	10652	39,13438386	10581	2,54%	145,22	10607,2	16,58915308
f200x15-03	11296	11904	5,38%	98,14	11997,2	79,66931655	11895	5,30%	227,38	11987,8	57,75119046
f200x15-04	15441	15860	2,71%	93,56	16000,2	115,8801105	15866	2,75%	166,41	16162,8	167,6848234
f200x15-05	18166	18723	3,07%	96,02	18781,6	53,20056391	18734	3,13%	171,03	18861,4	83,28145052
f200x15-06	16869	17305	2,58%	98,31	17627,2	37,81137395	17323	2,69%	221,17	17514,2	107,9546201
f200x15-07	13025	13500	3,65%	128,25	13622	74,81978348	13584	4,29%	167,46	13622,8	24,23220997
f200x15-08	14182	14858	4,77%	121,08	15071	192,3434428	14888	4,98%	229,39	15178,8	163,5212524
f200x15-09	18118	18496	2,09%	127,12	18529,6	34,94710288	18398	1,55%	118,27	18476,4	91,2376019
f200x15-10	17102	17427	1,90%	116,53	17531,4	74,02904835	17447	2,02%	120,34	17513,4	40,14722905
f250x20-01	15633	16055	2,70%	154,09	16107,6	13,0690474	16086	2,90%	180,48	16113,4	32,85270156
f250x20-02	15776	16242	2,95%	211,38	16350,2	93,07899871	16252	3,02%	319,46	16374,4	106,8728216
f250x20-03	16519	16986	2,83%	196,58	17066,6	57,86017629	16998	2,90%	245,59	17070	58,85575588
f250x20-04	16423	16766	2,09%	249,53	16789,2	17,00588134	16785	2,20%	314,17	16908,2	74,81443711
f250x20-05	15661	16172	3,26%	250,15	16226,8	77,61894099	16188	3,37%	282,34	16276,6	52,32876838
f250x20-06	20060	20555	2,47%	211,04	20616,8	48,11132923	20579	2,59%	176,42	20677,4	57,53520661
f250x20-07	14284	14780	3,47%	227,09	14879,2	27,00370345	14808	3,67%	316,35	14908,6	66,08933348
f250x20-08	16305	16772	2,86%	276,4	16883,6	71,82826742	16808	3,08%	350,18	16944,2	85,25373892
f250x20-09	15864	16586	4,55%	183,17	16701,2	89,25077703	16609	4,70%	276,47	16650,2	33,65560875
f250x20-10	16283	16786	3,09%	178,44	16795,2	7,155417528	16894	3,75%	219,12	16973,8	94,478569
Total			3,06%	161,988	16055,65	60,91510667		3,17%	223,372	16085,7	71,97829813

Πίνακας 4.9: Στατιστικά μικρού και μεσαίου συνόλου παραδειγμάτων 2

#	BKS	MBO	%	t	$\bar{x}$	$\sigma$	FMA	%	t	$\bar{x}$	$\sigma$
f30x3-01	1763	1763	0,0000%	22,36	1763	0,0000	1763	0,0000%	12,46	1763	0,0000
f30x3-02	2090	2090	0,0000%	29,12	2090	0,0000	2090	0,0000%	29,12	2090	0,0000
f30x3-03	2186	2186	0,0000%	45,22	2186	0,0000	2186	0,0000%	38,48	2186	0,0000
f30x3-04	1538	1538	0,0000%	33,29	1538	0,0000	1538	0,0000%	59,06	1538	0,0000
f30x3-05	2114	2114	0,0000%	29,08	2114	0,0000	2114	0,0000%	40,12	2114	0,0000
f30x3-06	2185	2185	0,0000%	57,44	2185	0,0000	2185	0,0000%	57,35	2185	0,0000
f30x3-07	1845	1845	0,0000%	26,53	1845	0,0000	1845	0,0000%	22,29	1845	0,0000
f30x3-08	1271	1271	0,0000%	32,17	1271	0,0000	1271	0,0000%	25,07	1271	0,0000
f30x3-09	1595	1595	0,0000%	55,28	1595	0,0000	1595	0,0000%	45,58	1595	0,0000
f30x3-10	2195	2195	0,0000%	44,19	2195	0,0000	2195	0,0000%	67,14	2195	0,0000
f30x5-01	1149	1151	0,1741%	25,33	1153,6	2,5100	1149	0,0000%	39,09	1149,6	0,5477
f30x5-02	1475	1475	0,0000%	20,20	1479	2,5495	1475	0,0000%	53,07	1477	2,7386
f30x5-03	1542	1542	0,0000%	33,02	1545,2	2,6833	1542	0,0000%	44,51	1542	0,0000
f30x5-04	1075	1078	0,2791%	36,46	1078,8	1,0954	1075	0,0000%	51,36	1075	0,0000
f30x5-05	1463	1464	0,0684%	25,58	1468	2,3452	1463	0,0000%	82,23	1466,4	2,8810
f30x5-06	1580	1580	0,0000%	18,50	1582,2	2,1679	1580	0,0000%	50,39	1580	0,0000
f30x5-07	1276	1276	0,0000%	20,03	1276	0,0000	1276	0,0000%	18,03	1276	0,0000
f30x5-08	870	870	0,0000%	62,12	870	0,0000	870	0,0000%	35,48	870	0,0000
f30x5-09	1134	1134	0,0000%	51,29	1138,4	4,3359	1134	0,0000%	70,04	1135,2	2,6833
f30x5-10	1527	1529	0,1310%	44,03	1529,8	1,0954	1527	0,0000%	42,01	1528,6	1,6733
f40x5-01	2301	2301	0,0000%	110,39	2303	2,8284	2301	0,0000%	71,27	2307,2	4,1473
f40x5-02	2829	2836	0,2474%	94,04	2836,6	0,8944	2829	0,0000%	53,11	2835	3,4641
f40x5-03	2880	2881	0,0347%	72,58	2881,6	0,5477	2880	0,0000%	43,46	2880	0,0000
f40x5-04	2001	2001	0,0000%	66,43	2003,2	2,9496	2001	0,0000%	54,29	2003	3,0822
f40x5-05	2815	2815	0,0000%	126,03	2817,6	5,8138	2815	0,0000%	61,47	2818,6	3,3615
f40x5-06	2934	2938	0,1363%	71,47	2941,8	3,8341	2934	0,0000%	53,32	2936	2,4495
f40x5-07	2632	2632	0,0000%	77,09	2636,8	5,0200	2632	0,0000%	35,14	2632,4	0,8944
f40x5-08	1835	1836	0,0545%	99,13	1836,6	0,8944	1835	0,0000%	39,29	1835	0,0000
f40x5-09	2086	2095	0,4314%	81,28	2099,4	2,9665	2086	0,0000%	67,11	2088,4	1,8166
f40x5-10	2962	2962	0,0000%	68,07	2963,8	1,7889	2962	0,0000%	38,39	2970,8	5,8481
f40x7-01	1458	1464	0,4115%	98,58	1468	4,0000	1458	0,0000%	89,12	1464,4	3,8471
f40x7-02	1375	1375	0,0000%	77,36	1377,4	2,3022	1375	0,0000%	39,54	1379,8	3,4928
f40x7-03	2119	2132	0,6135%	100,41	2137,6	3,2094	2119	0,0000%	38,56	2123,4	2,8810
f40x7-04	1591	1597	0,3771%	107,59	1597,8	1,0954	1591	0,0000%	103,48	1596	3,0000
f40x7-05	1847	1860	0,7038%	83,15	1863,2	4,0866	1847	0,0000%	99,51	1854,4	6,3087
f40x7-06	2080	2085	0,2404%	56,19	2087	2,1213	2080	0,0000%	67,57	2082,8	2,5884
f40x7-07	1841	1846	0,2716%	48,36	1847	0,7071	1841	0,0000%	48,31	1841,8	1,0954
f40x7-08	2025	2026	0,0494%	83,42	2027,6	1,5166	2025	0,0000%	64,38	2026,8	1,4832
f40x7-09	1880	1880	0,0000%	95,07	1881,8	1,6432	1880	0,0000%	49,32	1880	0,0000
f40x7-10	1883	1887	0,2124%	81	1890	2,2361	1883	0,0000%	62,47	1885,8	2,3875
f55x5-01	4689	4689	0,0000%	103,17	4691,8	4,1473	4689	0,0000%	77,16	4696,2	4,3818
f55x5-02	5467	5471	0,0732%	110	5479,2	8,0436	5467	0,0000%	52,36	5474,6	6,3875
f55x5-03	5499	5499	0,0000%	71,03	5500,6	1,6733	5499	0,0000%	46,07	5502,2	2,6833
f55x5-04	4165	4168	0,0720%	59,36	4171,6	3,3615	4165	0,0000%	68,02	4175,6	7,5366
f55x5-05	5478	5478	0,0000%	63,19	5482	3,7417	5478	0,0000%	50,01	5484	4,2426
f55x5-06	5595	5595	0,0000%	47,12	5598,2	3,3466	5595	0,0000%	73,06	5598,6	2,1909
f55x5-07	4870	4880	0,2053%	62,56	4883,2	3,3466	4870	0,0000%	65,39	4881,2	7,5631
f55x5-08	3552	3556	0,1126%	46,39	3559,6	3,2863	3552	0,0000%	58,47	3557	3,3166
f55x5-09	4273	4283	0,2340%	50,42	4283,8	1,0954	4273	0,0000%	43,1	4276,6	2,6077
f55x5-10	5739	5745	0,1045%	93,1	5747	2,7386	5739	0,0000%	59,33	5747,4	7,0922
f55x7-01	2846	2861	0,5271%	106,51	2867,4	4,0988	2846	0,0000%	83,49	2852,6	4,9800
f55x7-02	2883	2891	0,2775%	114,36	2893,4	2,1909	2883	0,0000%	82,17	2889,8	5,7619
f55x7-03	3825	3842	0,4444%	87,55	3846,8	3,1937	3825	0,0000%	40,25	3830,8	3,5637
f55x7-04	2951	2965	0,4744%	97,44	2971,4	3,8471	2951	0,0000%	96,34	2955,2	3,1937
f55x7-05	3797	3801	0,1053%	100,29	3803,4	3,2863	3797	0,0000%	49,56	3800,6	2,9665
f55x7-06	3783	3783	0,0000%	33,14	3785,8	2,6833	3783	0,0000%	73,49	3790,8	5,2154
f55x7-07	3774	3774	0,0000%	71,23	3777,2	2,2804	3774	0,0000%	41,56	3776,2	2,2804
f55x7-08	3862	3875	0,3366%	62,38	3879	4,1833	3862	0,0000%	87,01	3868,6	5,0299
f55x7-09	3591	3601	0,2785%	39,42	3603,8	3,0332	3591	0,0000%	71,32	3594,8	2,8636
f55x7-10	3623	3634	0,3036%	54,04	3638,2	3,0332	3623	0,0000%	86,22	3627,2	3,7014
f55x10-01	2742	2750	0,2918%	106,17	2752,4	2,5100	2742	0,0000%	101,17	2751,8	5,9749
f55x10-02	2527	2534	0,2770%	86,36	2537,2	2,1679	2527	0,0000%	93,58	2530	2,2361
f55x10-03	2544	2552	0,3145%	77,03	2555	3,1623	2544	0,0000%	88,06	2547,6	3,2094
f55x10-04	3315	3320	0,1508%	93,49	3324	4,2426	3315	0,0000%	26,32	3321,4	4,2190
f55x10-05	3109	3125	0,5146%	88,46	3130,2	4,3243	3109	0,0000%	94,49	3114,2	3,1145
f55x10-06	2283	2283	0,0000%	72,18	2286,8	3,4928	2283	0,0000%	105,35	2286	2,2361
f55x10-07	2144	2150	0,2799%	150,39	2154,8	5,3572	2144	0,0000%	56,26	2147,8	2,6833
f55x10-08	2720	2725	0,1838%	68,21	2729,2	2,9496	2720	0,0000%	56,12	2725,2	3,1145
f55x10-09	2149	2155	0,2792%	124,06	2159	3,1623	2149	0,0000%	66,04	2154,2	4,1473
f55x10-10	2814	2831	0,6041%	71,09	2835,6	6,5422	2814	0,0000%	123,41	2823,4	8,3845

Πίνακας 4.10: Στατιστικά μεγάλου συνόλου παραδειγμάτων 2

#	BKS	MBO	%	t	$\bar{x}$	$\sigma$	FMA	%	t	$\bar{x}$	$\sigma$
f60x5-01	5753	5753	0,0000%	52,19	5758,6	5,8992	5753	0,0000%	22,4	5756,6	3,2863
f60x5-02	6884	6891	0,1017%	128,08	6892,6	1,6733	6884	0,0000%	88,39	6887,8	2,8636
f60x5-03	6780	6784	0,0590%	38,14	6788,8	3,8987	6780	0,0000%	51,04	6783,2	3,0332
f60x5-04	5092	5092	0,0000%	111,3	5098,8	6,8702	5092	0,0000%	56,35	5098,4	6,0663
f60x5-05	6715	6715	0,0000%	77,44	6721,6	4,0988	6715	0,0000%	72,35	6719	2,4495
f60x5-06	6616	6622	0,0907%	98	6628,4	6,2290	6616	0,0000%	43,09	6619,2	2,2804
f60x5-07	6011	6011	0,0000%	78	6027	12,0830	6011	0,0000%	78,06	6014,2	3,0332
f60x5-08	4385	4395	0,2281%	104,25	4397	3,4641	4385	0,0000%	55,57	4395,6	8,6197
f60x5-09	5235	5241	0,1146%	105	5248,2	6,4187	5235	0,0000%	65,28	5240,2	3,6332
f60x5-10	7255	7260	0,0689%	62,08	7271,4	8,5029	7255	0,0000%	40,04	7268	13,8924
f60x7-01	3707	3719	0,3237%	60,33	3729	6,7823	3707	0,0000%	85,19	3710	2,2361
f60x7-02	4146	4160	0,3377%	72,58	4172	10,8628	4146	0,0000%	103,55	4151,2	4,1473
f60x7-03	4273	4290	0,3978%	51,23	4295,6	3,7815	4274	0,0234%	40,4	4276,8	2,3875
f60x7-04	3910	3924	0,3581%	116,47	3928,4	4,0988	3910	0,0000%	80,15	3913	2,9155
f60x7-05	4251	4260	0,2117%	97,59	4268	6,7454	4251	0,0000%	95,15	4257	4,9497
f60x7-06	5727	5737	0,1746%	83,19	5744,4	5,7271	5727	0,0000%	42,57	5733,4	6,2290
f60x7-07	3719	3745	0,6991%	132,04	3760,8	10,3537	3719	0,0000%	99,29	3724,2	4,1473
f60x7-08	4582	4592	0,2182%	100,39	4594	1,8708	4582	0,0000%	101,04	4587,6	5,1769
f60x7-09	3979	3991	0,3016%	96,26	3993,8	4,1473	3979	0,0000%	44,17	3986	4,6904
f60x7-10	4107	4123	0,3896%	105,42	4127	3,0822	4107	0,0000%	56,29	4114,2	3,1145
Total			0,1662%	73,21	3219,71	3,2261		0,0003%	61,08	3214,90	3,0967

Πίνακας 4.11: Στατιστικά πολύ μεγάλου συνόλου παραδειγμάτων 2

#	BKS	MBO	%	t	$\bar{x}$	$\sigma$	FMA	%	t	$\bar{x}$	$\sigma$
f200x15-01	12604	12872	2,13%	71,46	12904	24,07280623	12753	1,18%	91,50	12773,8	16,17714437
f200x15-02	10319	10601	2,73%	161,57	10678,8	72,78873539	10450	1,27%	98,07	10474,8	16,09968944
f200x15-03	11296	12054	6,71%	124,18	12090,8	23,53083084	11716	3,72%	172,17	11754	27,32215218
f200x15-04	15441	15930	3,17%	221,09	16080	114,5665745	15835	2,55%	148,56	15838,8	15,31992167
f200x15-05	18166	18873	3,89%	152,17	18963	80,95369047	18452	1,57%	119,58	18499	35,70714214
f200x15-06	16869	17381	3,04%	198,32	17542	91,59967249	17172	1,80%	138,07	17213,6	39,94120679
f200x15-07	13025	13589	4,33%	154,21	13749,8	172,4331755	13322	2,28%	109,57	13389,6	55,73867598
f200x15-08	14182	14900	5,06%	228,07	15096,8	118,4744698	14709	3,72%	131,28	14767,8	35,59072913
f200x15-09	18118	18535	2,30%	133,45	18589	55,92852582	18274	0,86%	233,54	18299	19,30025907
f200x15-10	17102	17481	2,22%	150,39	17553,8	47,8560341	17405	1,77%	174,54	17444,2	38,79046275
f250x20-01	15633	16191	3,57%	223,07	16206,6	13,29661611	15905	1,74%	264,07	15962	41,89868733
f250x20-02	15776	16479	4,46%	310,39	16502,6	22,52332125	16051	1,74%	196,14	16080	17,4642492
f250x20-03	16519	17021	3,04%	277,48	17036,2	14,18449858	16784	1,60%	200,28	16801,8	14,11382301
f250x20-04	16423	16923	3,04%	244,33	16933,4	8,876936408	16607	1,12%	204	16638,2	33,89985251
f250x20-05	15661	16449	5,03%	176,18	16462,2	9,859006035	16006	2,20%	244,11	16055,6	30,82693627
f250x20-06	20060	20544	2,41%	233,14	20554,4	8,876936408	20381	1,60%	190,21	20415,4	36,57594838
f250x20-07	14284	14948	4,65%	310,45	14958	11,83215957	14593	2,16%	210,29	14646,6	44,80848134
f250x20-08	16305	17027	4,43%	372,26	17059,8	25,2031744	16590	1,75%	192,15	16637,2	36,0305426
f250x20-09	15864	16760	5,65%	288,04	16816	61,6076294	16332	2,95%	286,47	16363	26,05762844
f250x20-10	16283	16874	3,63%	237	16935,2	36,97566767	16522	1,47%	187,35	16567,2	36,40329655
Total			3,77%	244,94	16135,62	50,77202305		1,95%	179,60	15831,08	30,90334146

## 4.8 Αποτελέσματα προσέγγισης DDBAP

Η προσέγγιση των Prencipe και Marinelli[222] για το δυναμικό και διακριτό πρόβλημα ελλιμενισμού των πλοίων θεωρείται από τις πιο πρόσφατες στην επιστημονική βιβλιογραφία. Για αυτό τον λόγο δεν έχουν δημοσιευτεί αρκετές διαθέσιμες μεθοδολογίες επίλυσης μέχρι την τωρινή χρονική περίοδο. Οι συγγραφείς υπολογίζουν τα βέλτιστα αποτελέσματα με την εφαρμογή του υπολογιστικού πακέτου CPLEX, το οποίο χρησιμοποιούν με ανώτατο χρονικό όριο τις δύο ώρες ως χρόνο υπολογισμού για την εύρεση των βέλτιστων τιμών. Τα πειραματικά δεδομένα αποτελούνται από 16 παραδείγματα, τα οποία χωρίζονται σε τέσσερις ομάδες ανάλογα με τον συνολικό αριθμό των πλοίων. Το κάθε παράδειγμα περιγράφεται με την κωδικοποίηση R(αριθμός πλοίων)-(αριθμός τερματικών σταθμών). Οι τέσσερις προτεινόμενοι αλγόριθμοι εφαρμόζονται στο συγκεκριμένο πρόβλημα και συγκρίνονται με τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης αποικίας μελισσών (Bee Colony Optimization - BCO), ο οποίος προτείνεται από τους Prencipe και Marinelli[222]. Στην διάρκεια της ερευνητικής διαδικασίας διεξήχθησαν συνολικά 640 ( $16 \cdot 10 \cdot 4$ ) πειράματα για την λήψη των συγκεκριμένων αποτελεσμάτων από τις προτεινόμενες αλγοριθμικές μεθοδολογίες. Τα δεδομένα του προβλήματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.12.

Πίνακας 4.12: Πειραματικά δεδομένα για την προσέγγιση DDBAP

#	Σύνολο Παραδειγμάτων	Πλοία	Τερματικοί Σταθμοί
1	4	25	5, 10, 15, 20
2	4	50	5, 10, 15, 20
3	4	75	5, 10, 15, 20
4	4	100	5, 10, 15, 20

### 4.8.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων με την βιβλιογραφία

#### Αλγόριθμος Ζευγαρώματος Πυγολαμπίδων

Ο αλγόριθμος ζευγαρώματος των πυγολαμπίδων (FMA) κατατάσσεται πρώτος από τους τέσσερις προτεινόμενους αλγόριθμους, καθώς επιτυγχάνει 0,34% συνολική μέση απόκλιση από τις βέλτιστες τιμές. Λαμβάνοντας υπόψη καθένα από τα τέσσερα σύνολα παραδειγμάτων, η μέση απόκλιση φθίνει με την αύξηση του αριθμού των πλοίων. Πιο συγκεκριμένα, το σύνολο δεδομένων με 25 πλοία (R25) παρουσιάζει μέση απόκλιση 0,72%, ενώ για τα 100 πλοία (R100) υπολογίζεται σε 0,08%. Επιπρόσθετα, η απόδοση του αλγόριθμου στο παράδειγμα R100-5 θεωρείται ιδιαίτερα επιτυχημένη, καθώς λαμβάνει

χαμηλότερη τιμή από το αντίστοιχο βέλτιστο αποτέλεσμα με ποσοστό -0,26%. Τέλος, ο μέσος χρόνος υπολογισμού και η μέση τιμή της τυπικής απόκλισης των λύσεων υπολογίζονται σε 134,31 δευτερόλεπτα και 218,8186 μονάδες αντίστοιχα.

### **Αλγόριθμος Ζευγαρώματος Μελισσών**

Ο αλγόριθμος ζευγαρώματος των μελισσών (HBMO) ταξινομείται δεύτερος αναφορικά με τη μέση απόκλιση από τα βέλτιστα αποτελέσματα μεταξύ των τεσσάρων υλοποιημένων αλγορίθμων. Ωστόσο, η συνολική διαφορά στην απόδοσή του και των BBMO, MBO παρατηρείται ιδιαίτερα μικρή. Πιο συγκεκριμένα, η μέση απόκλιση των τιμών για κάθε αποτέλεσμα ανέρχεται σε ποσοστό 0,39%, ενώ για τους άλλους δύο υπολογίζεται σε 0,40% και 0,42% αντίστοιχα. Το ποιοτικότερο παράδειγμα βρίσκεται στα πειραματικά δεδομένα με συνολικό αριθμό πλοίων 100 και τερματικών σταθμών 5, στο οποίο η απόκλιση είναι 0,04% (R100-5). Για τον χρόνο εκτέλεσης κάθε παραδείγματος υπολογίζεται η μέση τιμή στα 115,07 δευτερόλεπτα.

### **Αλγόριθμος Ζευγαρώματος Μπάμπουρων**

Ο αλγόριθμος ζευγαρώματος των μπάμπουρων (BBMO) καταλαμβάνει την τρίτη θέση ανάμεσα στους προτεινόμενους αλγόριθμους για το πρόβλημα ελλιμενισμού των πλοίων. Αυτό διακρίνεται από την τιμή της μέσης απόκλισης των αποτελεσμάτων κατά την πειραματική διαδικασία, η οποία υπολογίζεται σε ποσοστό 0,40%. Τα ποιοτικότερα αποτελέσματα του αλγορίθμου εντοπίζονται στα παραδείγματα R50-5, R100-5, R100-10 με ποσοστά 0,17%, 0,05% και 0,18% αντίστοιχα. Αντίθετα το παράδειγμα R25-5 διαθέτει τη μεγαλύτερη απόκλιση με σχεδόν 1%. Ο μέσος υπολογιστικός χρόνος για κάθε παράδειγμα υπολογίζεται σε 109,69 δευτερόλεπτα.

### **Αλγόριθμος Πεταλούδας Μονάρχη**

Ο αλγόριθμος των πεταλούδων (MBO) ανέρχεται τέταρτος σε απόδοση σε σχέση με τους υπόλοιπους προτεινόμενους αλγόριθμους. Πιο συγκεκριμένα, η μέση απόκλιση των τιμών του υπολογίζεται σε 0,42% ελαφρώς αυξημένη σε σχέση από τους HBMO και BBMO. Στο πρώτο σύνολο παραδειγμάτων εντοπίζεται το αποτέλεσμα με τη μεγαλύτερη απόκλιση, το οποίο περιέχει 25 πλοία και 5 τερματικούς (R25-5) με ποσοστό 0,98%. Αντίθετα, το παράδειγμα R100-5 διαθέτει την μικρότερη απόσταση από την βέλτιστη τιμή με 2091 μονάδες και ποσοστό απόκλισης 0,13%. Τέλος, ο μέσος χρόνος εκτέλεσης υπολογίζεται 89,54 δευτερόλεπτα, ο οποίος αποτελεί τον χαμηλότερο μέσο όρο από τους υπολοίπους αλγορίθμους.

Πίνακας 4.13: Αποτελέσματα Πίνακας

#	<i>BKS</i>	<i>BCO</i>	<i>HBMO</i>	<i>BBMO</i>	<i>MBO</i>	<i>FMA</i>
R25-5	137130	137130	138456	138472	138474	138448
R25-10	139051	139051	140145	140199	140217	140123
R25-15	142138	142138	143028	143050	143106	142968
R25-20	143725	143812	144594	144636	144644	144554
R50-5	467341	469253	468123	468139	468213	468087
R50-10	460408	460656	462195	462162	462258	462123
R50-15	462711	463021	464737	464795	464809	464541
R50-20	469892	470264	471885	471911	472239	471749
R75-5	970215	973526	972728	973154	973333	971331
R75-10	958576	958997	961594	961620	961687	961366
R75-15	969749	970420	972483	972483	972559	972263
R75-20	969021	969639	971675	971701	972107	971551
R100-5	1650677	1657824	1651277	1651482	1652768	1646460
R100-10	1643871	1644913	1646827	1646893	1646940	1646584
R100-15	1638401	1639266	1641995	1642279	1642335	1641893
R100-20	1641994	1642888	1645668	1645792	1646060	1645438

Πίνακας 4.14: Στατιστικά Πίνακας 1

#	<i>BKS</i>	<i>HBMO</i>	%	t	$\bar{x}$	$\sigma$	<i>BBMO</i>	%	t	$\bar{x}$	$\sigma$
R25-5	137130	138456	0,97%	63,39	138461,2	7,949842766	138472	0,98%	42,29	138480	7,348469228
R25-10	139051	140145	0,79%	45,08	140156,2	7,429670248	140199	0,83%	39,56	140204,6	5,899152482
R25-15	142138	143028	0,63%	65,54	143036	9,16515139	143050	0,64%	43,44	143060,8	12,29634095
R25-20	143725	144594	0,60%	56,22	144601,2	8,197560613	144636	0,63%	48,14	144644,8	12,0498963
R50-5	467341	468123	0,17%	98,38	468175,8	69,60747095	468139	0,17%	96,01	468254,8	110,7280453
R50-10	460408	462195	0,39%	121,29	462229,6	31,75373974	462162	0,38%	110,51	462227,8	63,9077461
R50-15	462711	464737	0,44%	117,18	464760,2	21,24146888	464795	0,45%	119,35	464808,6	14,92648653
R50-20	469892	471885	0,42%	114,56	471917	29,39387691	471911	0,43%	116,39	471951	36,74234614
R75-5	970215	972728	0,26%	138,44	972809,8	80,1011857	973154	0,30%	127,19	973587,8	398,0605481
R75-10	958576	961594	0,31%	136,57	961602	13,56465997	961620	0,32%	131,07	961641,2	30,58103988
R75-15	969749	972483	0,28%	140,24	972502,2	30,11976096	972483	0,28%	129,53	972527,4	40,60541896
R75-20	969021	971675	0,27%	142,06	971691	25,0998008	971701	0,28%	134,17	971778,6	75,08861464
R100-5	1650677	1651277	0,04%	154,18	1651527,4	251,0304758	1651482	0,05%	154,22	1652008,6	590,0256772
R100-10	1643871	1646827	0,18%	153,52	1646948,6	118,8898642	1646893	0,18%	158,59	1647327,4	471,3160296
R100-15	1638401	1641995	0,22%	156,39	1642180,2	187,5558589	1642279	0,24%	155,3	1642338	62,43396512
R100-20	1641994	1645668	0,22%	138,1	1645685,6	22,33383084	1645792	0,23%	149,26	1645837,6	57,45258745
Total			0,39%	115,07125	806142,75	57,08963867		0,40%	109,69	806292,4375	124,3413978

Πίνακας 4.15: Στατιστικά Πίνακας 2

#	<i>BKS</i>	<i>MBO</i>	%	t	$\bar{x}$	$\sigma$	<i>FMA</i>	%	t	$\bar{x}$	$\sigma$
R25-5	137130	138474	0,98%	47,05	138490	27,16615541	138448	0,96%	49,15	138449,6	3,577708764
R25-10	139051	140217	0,84%	38,59	140246,6	34,73902703	140123	0,77%	52,36	140136,6	12,44186478
R25-15	142138	143106	0,68%	45,17	143137,2	19,00526245	142968	0,58%	55,49	142989,6	20,51341023
R25-20	143725	144644	0,64%	47,38	144665,2	32,51461211	144554	0,58%	58,54	144568,4	14,31083503
R50-5	467341	468213	0,19%	89,53	468318,2	127,022439	468087	0,16%	105,42	468101,4	19,71801207
R50-10	460408	462258	0,40%	88,1	462301	31,99218655	462123	0,37%	96,33	462153	32,5499616
R50-15	462711	464809	0,45%	81,21	464821,4	12,52198067	464541	0,40%	110,39	464629,4	93,99361674
R50-20	469892	472239	0,50%	83,44	472255	18,60107524	471749	0,40%	114,56	471818	52,91502622
R75-5	970215	973333	0,32%	100	973543,4	441,5912137	971331	0,12%	171,05	971644,2	325,0010768
R75-10	958576	961687	0,32%	102,33	961710,6	23,50106381	961366	0,29%	166,59	961517,4	133,66675
R75-15	969749	972559	0,29%	105,11	972601	56,60388679	972263	0,26%	160,57	972381,2	71,16319239
R75-20	969021	972107	0,32%	107,48	972136,6	27,21764134	971551	0,26%	157,08	971656,2	77,22499564
R100-5	1650677	1652768	0,13%	125,5	1653427,6	675,5784927	1646460	-0,26%	214,35	1648685,8	2347,992164
R100-10	1643871	1646940	0,19%	126,27	1647377,8	492,1119793	1646584	0,17%	210,44	1646679,4	94,02286852
R100-15	1638401	1642335	0,24%	128,19	1642484,4	179,8187971	1641893	0,21%	209,28	1641997,4	92,29463584
R100-20	1641994	1646060	0,25%	117,36	1646092,8	43,69439547	1645438	0,21%	217,38	1645608,2	109,7118963
Total			0,42%	89,54	806475,55	140,230013		0,34%	134,31	805813,4875	218,8186259



## Κεφάλαιο 5

# Δρομολόγηση πλοίων (Shipping)

### 5.1 Εισαγωγή

Το Κεφάλαιο 5 επικεντρώνεται στην ανάλυση του προβλήματος της δρομολόγησης των πλοίων και στην διαδικασία επίλυσης του με την υλοποίηση των κατάλληλων μεθόδων βελτιστοποίησης. Αρχικά πραγματοποιείται μια σύντομη περιγραφή του προβλήματος και πιο συγκεκριμένα αναφέρεται ο βασικός στόχος, τα δεδομένα και οι περιορισμοί του προβλήματος στο υποκεφάλαιο 5.2. Στην συνέχεια, στο υποκεφάλαιο 5.3 περιγράφονται συνοπτικά οι μεθοδολογίες επίλυσης που χρησιμοποιήθηκαν στο συγκεκριμένο πρόβλημα, όπως περιγράφονται στην βασική τους μορφή στην επιστημονική βιβλιογραφία. Οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι επιλέγονται εξαιτίας της ευρείας εφαρμογής τους σε παρόμοια προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης με αντίστοιχη υπολογιστική πολυπλοκότητα. Στην συνέχεια, στο υποκεφάλαιο 5.4 περιγράφεται η δημιουργία των αρχικών λύσεων του προβλήματος. Οι επιλεγμένες διαδικασίες βελτίωσης των λύσεων περιγράφονται μέσω των μεθόδων τοπικής αναζήτησης στο υποκεφάλαιο 5.5. Οι προτεινόμενες αλγοριθμικές μέθοδοι επίλυσης της παρούσας διδακτορικής διατριβής παρουσιάζεται και αναλύεται λεπτομερώς στο υποκεφάλαιο 5.6. Χαρακτηριστικά σε αυτό αναφέρονται οι ιδιαίτερες αλλαγές και τροποποιήσεις, οι οποίες αναπτύσσονται και υλοποιούνται για την επιτυχή εφαρμογή του αλγορίθμου στα προβλήματα δρομολόγησης των πλοίων. Τέλος, στο υποκεφάλαιο 5.7 συνοψίζονται τα αποτελέσματα από την ερευνητική και πειραματική διαδικασία. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος συγκρίνεται με τις υπάρχουσες μεθοδολογίες της βιβλιογραφίας με στόχο την ανάδειξη της αποτελεσματικότητας και της ευρωστίας του.

## 5.2 Δεδομένα προβλήματος ITSRSRSP

Στα προβλήματα δρομολόγησης των πλοίων, οι ναυτιλιακές εταιρείες δεσμεύουν τον στόλο τους για την μεταφορά των εμπορευμάτων. Πρακτικά, η εξυπηρέτηση των φορτίων επιτυγχάνεται μέσω μακροπρόθεσμων συμφωνιών, οι οποίες συνάπτονται από τους πλοιοκτήτες και τους ιδιοκτήτες αυτών. Για κάθε φορτίο ξεχωριστά ανατείθεται ένα συγκεκριμένο χρονογιάγραμμα, στο οποίο αναφέρονται ο λιμένας παραλαβής για την φόρτωση, η χρονική διάρκεια της μεταφοράς από κάποιο πλοίο και ο λιμένας παράδοσης για την εκφόρτωση. Επιπρόσθετα, οι διαδικασίες της φόρτωσης/εκφόρτωσης των φορτίων καθορίζονται από αυστηρά χρονικά όρια, εντός των οποίων απαιτείται η ολοκλήρωσή τους. Συνεπώς, οι ναυτιλιακές εταιρείες σχεδιάζουν κατάλληλα τα δρομολόγια των πλοίων τους τόσο από τα σημεία εκκίνησης τους, όσο και κατά την διάρκεια αυτών μετά κάποια επιτυχή μεταφορά φορτίου. Αποστολή των εταιρειών αυτών αποτελεί η μείωση του συνολικού κόστους πλεύσης με την δημιουργία κατάλληλων δρομολογίων (constructing routes) και η αύξηση των κερδών μέσω της μεταφοράς των περισσότερων επικερδών φορτίων (optional cargoes).

Στο Κεφάλαιο 2 πραγματοποιείται η αναλυτική βιβλιογραφική ανασκόπηση για τα προβλήματα δρομολόγησης των πλοίων και πιο συγκεκριμένα για τις τρεις κατηγορίες αυτών. Η παρούσα διδακτορική διατριβή εμβαθύνει σε δύο από αυτές, την βιομηχανική (industrial) και την ελεύθερη (tramp) δρομολόγηση. Οι δύο κατηγορίες παρουσιάζουν διαφορές, αλλά ο βασικός στόχος τους διαθέτει αρκετά όμοια στοιχεία. Αυτό αναλύεται στην εργασία των Hemmati et al.[105] με ακρωνύμιο ως ITSRSRSP, από την οποία πήραμε τα δεδομένα για την πειραματική διαδικασία της διδακτορικής διατριβής.

Τα δεδομένα του πρόβληματος ITSRSRSP διακρίνονται με βάση δύο κριτήρια. Το πρώτο αφορά το εύρος των αποστάσεων, τις οποίες διανύουν τα πλοία. Σε προβλήματα θαλασσιών μεταφορών μικρών αποστάσεων (short sea), η πλεύση των πλοίων πραγματοποιείται σε συγκεκριμένες περιοχές (π.χ. στη Μεσόγειο θάλασσα), ενώ στων μεγάλων αποστάσεων (deep sea) επεκτείνονται σε υπερωκεάνεια δρομολόγια. Το δεύτερο κριτήριο εστιάζει στην χωρητικότητα των πλοίων. Πιο συγκεκριμένα, ανάλογα με τις δυνατότητες του κάθε πλοίου φορτώνονται σε αυτά ένα ή περισσότερα διαφορετικά είδη φορτίων. Η περίπτωση μεταφοράς πολλαπλών εμπορευμάτων ταυτοχρόνως ονομάζεται μικτού φορτίου (mixed load), ενώ κατά την μεταφορά ενός χαρακτηρίζεται ως πλήρες φορτίου (full load). Συνολικά παρέχονται 240 παραδείγματα συνδυάζοντας τα χαρακτηριστικά του προβλήματος από τις τέσσερις προηγούμενες περιπτώσεις. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή εξετάζεται η κατηγορία των μεγάλων αποστάσεων με πλήρες φορτίο.

## 5.3 Μεθοδολογίες επίλυσης

Η κατάλληλη και εφικτή επίλυση των προβλημάτων με σύνθετη πολυπλοκότητα επιτυγχάνεται με την εφαρμογή των αλγορίθμων και μεθόδων βελτιστοποίησης. Μία από τις πιο συνηθισμένες μοντελοποιήσεις αυτών θεωρούνται οι μαθηματικοί γράφοι. Η πλειοψηφία των προβλημάτων, τα οποία μοντελοποιούνται ως γραφήματα, εντοπίζονται στους τομείς του χρονοπρογραμματισμού (scheduling) και της δρομολόγησης (routing). Πιο συγκεκριμένα, τα δημοφιλέστερα προβλήματα δρομολόγησης θεωρούνται αυτά των οχημάτων (vehicle routing problem - VRP). Σαφέστατα, στην κατηγορία της δρομολόγησης ανήκει το ITS-RSP, καθώς περιλαμβάνει αρκετά βασικά στοιχεία από το VRP και μοντελοποιείται ως ένα πλήρες γράφημα, το οποίο παρουσιάζεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3. Επομένως, για την δημιουργία εφικτών λύσεων στα προβλήματα δρομολόγησης πλοίων απαιτείται η υλοποίηση μεθοδολογιών με υψηλή αποτελεσματικότητα. Οι επιλεγμένες αλγοριθμικές μέθοδοι από την επιστημονική βιβλιογραφία είναι οι εξής:

- Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων - Particle Swarm Optimization - PSO
- Αλγόριθμος Τεχνητής Αποικίας Μελισσών - Artificial Bee Colony - ABC
- Αλγόριθμος Πυγολαμπίδας - Firefly Algorithm - FA
- Αλγόριθμος Πεταλούδας Μονάρχη - Monarch Butterfly Optimization - MBO

Οι τέσσερις αλγόριθμοι βελτιστοποίησης θεωρούνται από τους πιο αποτελεσματικούς και ευέλικτους αλγορίθμους, καθώς υλοποιούνται σε πολλαπλές παραλλαγές και εφαρμόζονται σε διάφορους επιστημονικούς τομείς. Αυτό οφείλεται στην δομή τους, καθώς διαθέτουν μία σειρά από μαθηματικές εξισώσεις και παραμέτρους με στόχο την εύρεση της ολικά βέλτιστης λύσης στο χώρο λύσεων. Λόγω των προαναφερθέντων δυνατοτήτων τους επιλέγονται ως οι προτεινόμενες μέθοδοι επίλυσης για τα προβλήματα δρομολόγησης των πλοίων. Στις επόμενες υποενότητες αναφέρονται οι βασικές λεπτομέρειες και λειτουργίες των PSO και ABC, όπως παρουσιάζονται στην επιστημονική βιβλιογραφία. Οι αλγόριθμοι FA και MBO παραλείπονται, καθώς περιγράφονται αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο.

### 5.3.1 Particle Swarm Optimization - PSO

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization - PSO) αποτελεί τον πιο δημοφιλή μεθυσρετικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης της επιστημονικής βιβλιογραφίας. Η συγκεκριμένη αλγοριθμική μέθοδος προτείνεται από τους

Kennedy και Eberhart[134] και βασίζεται σε πληθυσμό λύσεων, καθώς προσομοιώνει την συλλογική συμπεριφορά των πτηνών σε σμήνη και των ψαριών σε κωπάδια. Η φιλοσοφία του αλγορίθμου βασίζεται στην κοινωνικότητα των ατόμων ή των σωματιδίων μίας ομάδας, δηλαδή πόσο δραστήρια ή ενεργά θεωρούνται το κάθε ένα ξεχωριστά και πως επηρεάζουν συνολικά την ομάδα. Κατά την διαδικασία της βελτιστοποίησης, η κάθε πιθανή λύση αναπαριστάται ως σωματίδιο και κάθε ένα από αυτά κινείται στο χώρο των λύσεων με στόχο την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Η επίτευξη της βέλτιστης λύσης στηρίζεται σε δύο μαθηματικές εξισώσεις, οι οποίες αντιπροσωπεύουν την θέση και την ταχύτητα του κάθε σωματιδίου. Η θέση του κάθε σωματιδίου στο χώρο των λύσεων αξιολογείται μέσω μίας συνάρτησης κόστους, η οποία υποδεικνύει την ποιότητα της κάθε λύσης. Η ταχύτητα του κάθε σωματιδίου ανανεώνεται σε κάθε αλγοριθμική επανάληψη λαμβάνοντας υπόψη την προηγούμενη ταχύτητα του, την τρέχουσα θέση του, και την θέση του βέλτιστου σωματιδίου. Ακολουθώντας αλλάζει και η θέση του κάθε σωματιδίου με βάση την τρέχουσα θέση και την καινούργια ταχύτητα τους. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την ολοκλήρωση όλων των αλγοριθμικών επαναλήψεων.

### 5.3.2 Artificial Bee Colony - ABC

Ο αλγόριθμος της τεχνητής αποικίας μελισσών (Artificial Bee Colony - ABC) θεωρείται ένας μεθευρετικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης, ο οποίος ανήκει στην κατηγορία των αλγορίθμων βασισμένων στην νοημοσύνη του σμήνους. Ο αλγόριθμος λειτουργεί επαναληπτικά εξερευνώντας τον χώρο των λύσεων με συγκεκριμένο τρόπο, ο οποίος βασίζεται στον ρόλο των μελισσών. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία επίλυσης προτείνεται από τους Karaboga και Basturk[130], στην οποία προσομοιώνεται η συμπεριφορά των μελισσών κατά την διαδικασία αναζήτησης πηγών τροφής. Οι πηγές τροφής αντιπροσωπεύονται με τις πιθανές λύσεις του προβλήματος, ενώ οι μέλισσες αντιπροσωπεύουν καθορισμένες διαδικασίες για την εύρεση αυτών. Η αποικία των μελισσών αποτελείται από τρία διαφορετικά είδη αυτών, τις εξερευνήτριες (employed bees), τις θεατές (on-lookers bees) και τις ανιχνεύτριες (scout bees). Οι εξερευνήτριες μέλισσες αναζητούν μία νέα πηγή τροφής στο χώρο των λύσεων τροποποιώντας την τρέχουσα λύση και στη συνέχεια μοιράζουν τις πληροφορίες με τις θεατές μέλισσες αναφορικά με την νέα λύση. Οι θεατές μέλισσες παραμένουν στην κυψέλη και αναζητούν με κάποια πιθανότητα μια νέα πηγή τροφής χρησιμοποιώντας τις πληροφορίες από τις εξερευνήτριες μέλισσες. Οι ανιχνεύτριες αναλαμβάνουν τον εντοπισμό νέων πηγών τροφής γύρω από την κυψέλη, δηλαδή στον υπόλοιπο χώρο των λύσεων, ο οποίος δεν εξερευνήθηκε ούτε από τις εξερευνήτριες ούτε από τις θεατές μέλισσες. Ο αλγόριθμος ολοκληρώνεται όταν πληρείται

κάποιο από τα κριτήρια τερματισμού του.

## 5.4 Δημιουργία αρχικών λύσεων

Η διαδικασία επίλυσης των προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης ξεκινά με την δημιουργία των αρχικών λύσεων. Ο αριθμός αυτών των λύσεων ποικίλει ανάλογα με τον επιλεγμένο αλγόριθμο επίλυσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι μεθευρετικοί μέθοδοι από την κατηγορία των αλγορίθμων εμπνευσμένων από την φύση απαιτούν περισσότερες από μία λύσεις για υλοποίηση των βασικών λειτουργιών τους. Ειδικότερα, το πλήθος των αρχικών λύσεων ονομάζεται πληθυσμός. Στην βιβλιογραφία παρατηρείται ευρεία ποικιλία από μεθοδολογίες κατασκευής πληθυσμού λύσεων τόσο σε ευρετικούς, όσο και σε μεθευρετικούς αλγορίθμους. Ωστόσο, τα πρόβλήματα δρομολόγησης των πλοίων διαθέτουν πολλούς περιορισμούς προς διαχείριση, το οποίο καθιστά απαγορευτική την εφαρμογή μεθόδων με τυχαιοποιημένες διαδικασίες. Συνεπώς για την αποφυγή δύσκολα διαχειρίσιμων μεθοδολογιών, η επιλεγμένη τεχνική δημιουργίας των αρχικών λύσεων ανήκει στην κατηγορία των ευρετικών και ονομάζεται ως εισαγωγή (insertion).

Η εισαγωγή θεωρείται μία απλή ως προς την υλοποίηση μέθοδο, η οποία προσφέρει πολλές δυνατότητες ευελιξίας ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε προβλήματος. Στο πρόβλημα ITSRSP, η δημιουργία των αρχικών λύσεων διαχωρίζεται σε δύο μέρη, οι οποίες ονομάζονται φάση εισόδου (entry phase) και φάση αναπλήρωσης (refill phase). Σε κάθε μία από αυτές υλοποιείται μία επαναληπτική διαδικασία, στην οποία εισέρχονται τα φορτία στα καθορισμένα πλοία. Στην πρώτη φάση επιτυγχάνεται η εισαγωγή των φορτίων σε κάποιο από τα διαθέσιμα πλοία, ενώ στη δεύτερη λειτουργεί συμπληρωματικά για τα μη εξυπηρετημένα φορτία, τα οποία δεν τοποθετήθηκαν σε κάποιο πλοίο.

Η εκκίνηση της πρώτης φάσης πραγματοποιείται με την είσοδο των δεδομένων του προβλήματος. Χαρακτηριστικά δίδονται ο αριθμός των αρχικών λύσεων ( $s$ ), ο αριθμός των πλοίων ( $v$ ), τα οποία αντιπροσωπεύουν τη λύση του προβλήματος, καθώς και ο αριθμός των φορτίων ( $c$ ), τα οποία θα πρέπει να εξυπηρετηθούν από κάποιο διαθέσιμο πλοίο. Κάθε πλοίο  $v$  αντιστοιχίζεται με μία λίστα εξυπηρέτησης ( $l$ ) από υποψήφια φορτία, τα οποία θα εξυπηρετήσουν στην διάρκεια των δρομολογίων τους. Σε κάθε φορτίο  $c$  ανατίθεται μία ποινή κόστους ( $p$ ), η οποία προστίθεται στο συνολικό κόστος σε περίπτωση αδυναμίας εξυπηρέτησης του από κάποιο πλοίο. Η επαναληπτική διαδικασία ξεκινά με την ταξινόμηση των πλοίων με βάση το εύρος της λίστας εξυπηρέτησης τους. Αυτό πραγματοποιείται διότι, τα πλοία με διευρυμένες λίστες επιλογών διαθέτουν περισσότερα υποψήφια φορτία για εισαγωγή, γεγονός το οποίο μειώνει την πιθανότητα μη εξυπηρέτησης κάποιων φορτίων. Συνεπώς, η σειρά επιλογής των πλοίων για εισαγωγή

των φορτίων είναι η εξής:

1. Πλοία με λίστα εξυπηρέτησης με τουλάχιστον το 80% των συνολικών φορτίων
2. Πλοία με λίστα εξυπηρέτησης περισσότερα από το 30% των συνολικών φορτίων
3. Πλοία με λίστα εξυπηρέτησης κάτω από το 30% των συνολικών φορτίων

Αμέσως μετά την επιλογή του πλοίου αναζητείται το κατάλληλο φορτίο από την λίστα εξυπηρέτησης. Από τα διαθέσιμα φορτία της λίστας επιλέγεται εκείνο, το οποίο το λιμάνι παραλαβής βρίσκεται κοντινότερα στο επιλεγμένο πλοίο. Αφού επισκευτεί και το λιμάνι παράδοσης το επιλεγμένο πλοίο, η διαδικασία προχωρά με τον έλεγχο των περιορισμών με στόχο την επιτυχή εξυπηρέτηση του φορτίου. Εφόσον τηρούνται οι περιορισμοί του προβλήματος, το δρομολόγιο του πλοίου εκχωρείται στη λύση. Σε διαφορετική περίπτωση, το φορτίο παραμένει διαθέσιμο προς εξυπηρέτηση από κάποιο άλλο πλοίο του στόλου. Εάν κάποιο ή κάποια φορτία δεν αντιστοιχιστούν σε κάποιο δρομολόγιο ενός πλοίου, τότε η ποινή μη μεταφοράς τους προστίθεται στο συνολικό κόστος της λύσης.

Η δεύτερη φάση επικεντρώνεται στην εισαγωγή των μη εξυπηρετημένων φορτίων στη λύση τους προβλήματος. Τονίζεται ότι, όταν όλα τα φορτία έχουν αντιστοιχιστεί σε κάποιο δρομολόγιο ενός πλοίου, τότε το δεύτερο κομμάτι παραλείπεται, καθώς δεν απαιτείται κάποια διορθωτική ενέργεια στη λύση του προβλήματος. Σε διαφορετική περίπτωση πραγματοποιείται μία επαναληπτική διαδικασία, στην οποία υλοποιούνται διορθωτικές αλλαγές για την εισαγωγή περισσότερων φορτίων στη λύση. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε μη εξυπηρετημένο φορτίο επιλέγεται το πλοίο με το μικρότερο κόστος μεταφοράς. Στην συνέχεια, αναζητείται η κατάλληλη θέση στο δρομολόγιο του επιλεγμένου πλοίου λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς από τα λιμάνια παραλαβής και παράδοσης. Εάν η εισαγωγή του φορτίου κριθεί επιτυχής, τότε αποθηκεύεται το νέο δρομολόγιο στη λύση. Αλλιώς, το φορτίο δεν συμπεριλαμβάνεται σε κάποιο άλλο δρομολόγιο και το κόστος μη εξυπηρέτησης του προστίθεται στο συνολικό κόστος της λύσης.

---

**Αλγόριθμος 10** Εισαγωγή - Φάση Εισόδου

---

- 1: **Δεδομένα** : Αρχικές λύσεις  $s$ , Αριθμός πλοίων  $v$ , Αριθμός φορτίων  $c$ , Λίστες εξυπηρέτησης φορτίων  $l$ , Ποινή μη εξυπηρέτησης φορτίων  $p$
  - 2: **Μεταβλητές** : Πλοίο  $v^*$  όπου κάθε  $v^* \in v$ , Φορτίο  $c^*$  όπου κάθε  $c^* \in c$
  - 3:
  - 4: **Φάση Εισόδου** : Εισαγωγή φορτίων στα πλοία
  - 5: **Για** κάθε λύση  $s^* \in s$
  - 6:     Ταξινόμηση των πλοίων  $v$  με βάση το εύρος της λίστας εξυπηρέτησης  $l$
  - 7:     **Για** κάθε πλοίο  $v$
  - 8:         Επιλογή πλοίου  $v^*$
  - 9:         Επιλογή υποψήφιου φορτίου  $c^*$  σύμφωνα με την λίστα  $l_{c^*}$
  - 10:         Εισαγωγή φορτίου  $c^*$  στο πλοίο  $v^*$
  - 11:         Έλεγχος περιορισμών πριν την εισαγωγή στη λύση  $s^*$
  - 12:         **Αν** επιτυχής ο έλεγχος των περιορισμών
  - 13:              $s^* \leftarrow v^*$
  - 14:         **Αλλιώς** ανεπιτυχής εισαγωγή
  - 15:              $l_{c^*} \leftarrow c^*$
  - 16:         **Τέλος αν**
  - 17:     **Τέλος για**
  - 18:     **Αν**  $l \neq \emptyset$
  - 19:          $s \leftarrow p_{c^*}$  ▷ Ποινή για κάθε μη εξυπηρετημένο φορτίο
  - 20:     **Τέλος αν**
  - 21: **Τέλος για**
  - 22:
  - 23: **Έξοδος** :  $s$
-

---

**Αλγόριθμος 11** Εισαγωγή - Φάση Αναπλήρωσης

---

- 1: **Δεδομένα** : Αρχικές λύσεις  $s$ , Αριθμός πλοίων  $v$ , Αριθμός φορτίων  $c$ , Λίστες εξυπηρέτησης φορτίων  $l$ , Ποινή μη εξυπηρέτησης φορτίων  $p$
  - 2: **Μεταβλητές** : Πλοίο  $v^*$  όπου κάθε  $v^* \in v$ , Φορτίο  $c^*$  όπου κάθε  $c^* \in c$
  - 3:
  - 4: Φάση Αναπλήρωσης : Εισαγωγή με εξυπηρετημένων φορτίων στα πλοία
  - 5: Για κάθε λύση  $s^* \in s$
  - 6:     **Για** κάθε μη εξυπηρετημένο φορτίο  $c^*$  στην λίστα  $l$
  - 7:         Επιλογή ενός νέου πλοίου  $v^*$
  - 8:         Εισαγωγή φορτίου  $c^*$  στην κατάλληλη θέση του πλοίου  $v^*$
  - 9:         **Αν** επιτυχής η εισαγωγή του φορτίου  $c^*$
  - 10:              $s^* \leftarrow v^*$
  - 11:         **Αλλιώς** ανεπιτυχής εισαγωγή
  - 12:              $s \leftarrow p_{c^*}$  ▷ Ποινή για κάθε μη εξυπηρετημένο φορτίο
  - 13:     **Τέλος αν**
  - 14:     **Τέλος για**
  - 15: **Τέλος για**
  - 16:
  - 17: **Έξοδος** :  $s$
- 

## 5.5 Μέθοδοι τοπικής αναζήτησης

Η εύρεση ποιοτικών λύσεων και ιδιαίτερα των ολικά βέλτιστων λύσεων αποτελεί μία απαιτητική και χρονοβόρα διαδικασία για τα υπολογιστικά συστήματα. Για αυτό το λόγο, οι μέθοδοι τοπικής αναζήτησης εφαρμόζονται με μεγάλη συχνότητα σε σύνθετα προβλήματα βελτιστοποίησης, καθώς συμβάλλουν στην εύρεση ποιοτικότερων λύσεων σε ελάχιστο υπολογιστικό χρόνο. Η πλειοψηφία αυτών στοχεύουν στην βελτίωση των δημιουργημένων λύσεων, η οποία επιτυγχάνεται μέσω επαναληπτικών διαδικασιών. Επιπρόσθετα, η συνεισφορά των μεθόδων αυτών διακρίνεται στην εντατικοποίηση της αναζήτησης στον χώρο των λύσεων, καθώς ανάλογα με την υλοποίηση τους παρέχουν ποικίλες δυνατότητες για την αντιμετώπιση των περιορισμών του κάθε προβλήματος. Και αυτό κυρίως συμβαίνει, διότι τα περισσότερα προβλήματα βελτιστοποίησης διαθέτουν πολλούς περιορισμούς καθιστώντας την επίλυση τους ιδιαίτερα δύσκολη. Αντίστοιχα, προβλήματα με αυξημένη πολυπλοκότητα θεωρούνται τα προβλήματα διαχείρισης της ναυτιλιακής εφοδιαστικής αλυσίδας. Ειδικότερα, η δημιουργία των δρομολογίων των πλοίων απαιτεί την διαχείριση πολλών περιορισμών για την παροχή ποιοτικών λύσεων. Συνεπώς, για την βελτίωση αυτών των λύσεων στα προβλήματα δρομολόγησης των πλοίων εφαρμόζονται δύο κατάλληλα τροποποιημένοι μέθοδοι τοπικής αναζήτησης και πιο συγκεκριμένα αυτή της επανατοποθέτησης και της ανταλλαγής.



## Επανατοποθέτηση 1-0

Η Επανατοποθέτηση 1-0 αποτελεί μία σταθερά αποτελεσματική μέθοδο τοπικής αναζήτησης, καθώς προσφέρει την δυνατότητα διεύρυνσης της αναζήτησης νέων λύσεων σε μία καθορισμένη γειτονιά του χώρου των λύσεων. Ουσιαστικά, μέσω της κύριας λειτουργίας της μετακινείται κάποιο στοιχείο από μία αρχική λύση σε μία δεύτερη. Στην επιστημονική βιβλιογραφία παρατηρείται σε διαφορετικές παραλλαγές και χρησιμοποιείται ως προέκταση στις αλγοριθμικές διαδικασίες για την βελτίωση των λύσεων. Η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιείται για αποφυγή τοπικά βέλτιστων καταστάσεων, όταν η κύρια αλγοριθμική διαδικασία εξαντλεί κάθε περιθώριο αναζήτησης σε μία συγκεκριμένη γειτονιά λύσεων. Ως δεδομένα δίδονται η λύση του προβλήματος ( $s$ ), ο αριθμός των πλοίων ( $v$ ), ο αριθμός των φορτίων ( $c$ ), οι λίστες εξυπηρέτησης των φορτίων ( $l$ ) και ο συνολικός αριθμός επαναλήψεων της μεθόδου ( $i$ ). Στην αρχή της επαναληπτικής διαδικασίας επιλέγονται δύο πλοία  $v_1^*, v_2^*$ , των οποίων οι λίστες εξυπηρέτησης τους  $l_1^*, l_2^*$  περιέχουν κοινά φορτία. Στην συνέχεια, το επιλεγμένο φορτίο  $c^*$  αφαιρείται από το πλοίο  $v_1^*$  και τοποθετείται στο πλοίο  $v_2^*$ . Μετά την επιτυχή επανατοποθέτηση του φορτίου  $c^*$  υπολογίζεται το κόστος της νέας λύσης ( $s'$ ). Εφόσον η λύση  $s'$  υπολογίζεται ποιοτικότερη από την τρέχουσα βέλτιστη λύση  $s$ , τότε αντικαθιστάται στην θέση της ως νέα βέλτιστη λύση.

---

### Αλγόριθμος 12 Επανατοποθέτηση 1-0

---

- 1: **Δεδομένα** : Λύση  $s$ , Αριθμός πλοίων  $v$ , Αριθμός φορτίων  $c$ , Λίστες εξυπηρέτησης φορτίων  $l$
  - 2: **Μεταβλητές** : Βελτιωμένη λύση  $s'$ , Πλοίο  $v^*$  όπου κάθε  $v^* \in v$ , Φορτίο  $c^*$  όπου κάθε  $c^* \in c$ , Αριθμός επαναλήψεων τοπικής αναζήτησης  $i$
  - 3:
  - 4: **Για** κάθε επανάληψη  $i$
  - 5:     Επιλογή πλοίων  $v_1^*, v_2^*$  από λύση  $s$
  - 6:     Αναζήτηση κοινού υποψήφιου φορτίου  $c^*$  στις λίστες των πλοίων  $l_1^*, l_2^*$
  - 7:     Επιλογή φορτίου  $c^*$  για επανατοποθέτηση από πλοίο  $v_1^*$  σε πλοίο  $v_2^*$
  - 8:     Αφαίρεση φορτίου  $c^*$  από πλοίο  $v_1^*$
  - 9:     Εύρεση κατάλληλης θέσης στο πλοίο  $v_2^*$
  - 10:    Εισαγωγή φορτίου  $c^*$  στο πλοίο  $v_2^*$
  - 11:    Υπολογισμός νέου κόστους  $s'$
  - 12:    **Αν**  $s' < s$
  - 13:        $s = s'$
  - 14:    **Τέλος αν**
  - 15: **Τέλος για**
  - 16:
  - 17: **Έξοδος**:  $s$
-

## Ανταλλαγή 1-1

Ως δεύτερη μέθοδος τοπικής αναζήτησης επιλέγεται η Ανταλλαγή 1-1. Η συγκεκριμένη τεχνική παρέχει υψηλή αποτελεσματικότητα κατά την εφαρμογή της σε προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης. Και αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι η αναζήτηση νέων ποιοτικότερων λύσεων δεν περιορίζεται μόνο σε μία γειτονιά, αλλά διευρύνεται σε όλο το χώρο των λύσεων. Στην επιστημονική βιβλιογραφία ποικίλει ο τρόπος υλοποίησης της, καθώς εξαρτάται από τα δεδομένα και τους περιορισμούς του κάθε προβλήματος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση και στα προβλήματα δρομολόγησης των πλοίων, η μέθοδος της ανταλλαγής εστιάζει στην μετακίνηση των φορτίων μεταξύ των διαθέσιμων πλοίων λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς με σκοπό την δημιουργία δρομολογίων με το ελάχιστο δυνατό κόστος μεταφοράς. Στην εκκίνηση της μεθόδου δίνονται η λύση του προβλήματος ( $s$ ), ο αριθμός των πλοίων ( $v$ ), ο αριθμός των φορτίων ( $c$ ), οι λίστες εξυπηρέτησης των φορτίων ( $l$ ) και ο συνολικός αριθμός επαναλήψεων της μεθόδου ( $i$ ). Με την έναρξη της επαναληπτικής διαδικασίας πραγματοποιείται η επιλογή δύο πλοίων  $v_1^*, v_2^*$  από την τρέχουσα λύση  $s$ . Στην συνέχεια επιλέγονται τα υποψήφια φορτία  $c_1^*, c_2^*$  λαμβάνοντας υπόψη τις λίστες εξυπηρέτησης  $l_1^{c_1^*}, l_2^{c_2^*}$  του κάθε πλοίου. Με την εύρεση της κατάλληλης θέσης εισάγονται τα φορτία  $c_2^*, c_1^*$  στα πλοία  $v_1^*, v_2^*$  αντίστοιχα. Η νέα λύση  $s'$  αντικαθιστά την τρέχουσα λύση  $s$ , εφόσον υπολογιστεί με μικρότερο κόστος.

---

### Αλγόριθμος 13 Ανταλλαγή 1-1

---

- 1: **Δεδομένα** : Λύση  $s$ , Αριθμός πλοίων  $v$ , Αριθμός φορτίων  $c$ , Λίστες εξυπηρέτησης φορτίων  $l$
  - 2: **Μεταβλητές** : Βελτιωμένη λύση  $s'$ , Πλοίο  $v^*$  όπου κάθε  $v^* \in v$ , Φορτίο  $c^*$  όπου κάθε  $c^* \in c$ , Αριθμός επαναλήψεων τοπικής αναζήτησης  $i$
  - 3:
  - 4: **Για** κάθε επανάληψη  $i$
  - 5:     Επιλογή πλοίων  $v_1^*, v_2^*$  από λύση  $s$
  - 6:     Αναζήτηση κοινών υποψήφιων φορτίων  $c_1^*, c_2^*$  στις λίστες των πλοίων  $l_1^{c_1^*}, l_2^{c_2^*}$
  - 7:     Επιλογή φορτίου  $c_1^*$  για εισαγωγή από πλοίο  $v_1^*$  στο πλοίο  $v_2^*$
  - 8:     Εύρεση κατάλληλης θέσης στο πλοίο  $v_2^*$
  - 9:     Επιλογή φορτίου  $c_2^*$  για εισαγωγή από πλοίο  $v_2^*$  σε πλοίο  $v_1^*$
  - 10:    Εύρεση κατάλληλης θέσης στο πλοίο  $v_1^*$
  - 11:    Υπολογισμός νέου κόστους  $s'$
  - 12:    **Αν**  $s' < s$
  - 13:        $s = s'$
  - 14:    **Τέλος αν**
  - 15: **Τέλος για**
  - 16:
  - 17: **Έξοδος**:  $s$
-

## 5.6 Προτεινόμενοι αλγόριθμοι επίλυσης

Η επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης περιλαμβάνει συνήθως τρία στάδια. Το πρώτο αφορά την δημιουργία των αρχικών λύσεων, στο δεύτερο εφαρμόζεται η κύρια αλγοριθμική μέθοδος και βεβαίως το τρίτο στοχεύει στην βελτίωση των λύσεων μέσω των διαδικασιών της τοπικής αναζήτησης. Λαμβάνοντας υπόψη την πολυπλοκότητα των προβλημάτων της ναυτιλιακής εφοδιαστικής αλυσίδας, οι επιλεγμένοι αλγόριθμοι επίλυσης εντάσσονται στην κατηγορία των αλγορίθμων εμπνευσμένων από τη φύση. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή αναπτύσσονται τέσσερις αλγόριθμοι βελτιστοποίησης για το πρόβλημα της βιομηχανικής και ελεύθερης δρομολόγησης των πλοίων, οι οποίοι είναι οι εξής:

- Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων
- Αλγόριθμος Τεχνητής Αποικίας Μελισσών
- Αλγόριθμος Πυγολαμπίδας
- Αλγόριθμος Πεταλούδας Μονάρχη

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος σμήνους σωματιδίων στηρίζεται στην δομή και στην φιλοσοφία του κλασσικού PSO, όπως αυτός προτείνεται από τους Kennedy και Eberhart[134] στην επιστημονική βιβλιογραφία. Θεωρείται μία μεθοδολογία ολικής βελτιστοποίησης, η οποία εφαρμόζεται σε προβλήματα με συνεχείς τιμές. Επομένως, αναπτύσσονται οι απαραίτητες τεχνικές για την μετατροπή των λύσεων από διακριτό σε συνεχές επίπεδο με στόχο την υλοποίηση της βασικής λειτουργίας του PSO. Τονίζεται ότι, οι καινοτόμες αλλαγές και μετατροπές στον αλγόριθμο του σμήνους σωματιδίων πραγματοποιούνται με στόχο την κατάλληλη εφαρμογή του και την παροχή εφικτών λύσεων σε διακριτά προβλήματα βελτιστοποίησης. Ακολουθεί η υποενότητα με τον προτεινόμενο αλγόριθμο επίλυσης.

### 5.6.1 Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization - PSO) αποτελεί μία από δημοφιλέστερες μεθοδολογίες επίλυσης συνδυαστικών προβλημάτων στην επιστημονική βιβλιογραφία. Η εφαρμογή του παρατηρείται περισσότερο σε συνεχή από ότι σε διακριτά προβλήματα βελτιστοποίησης. Και αυτό συμβαίνει διότι, οι κύριες λειτουργίες του βασίζονται σε δύο μαθηματικές εξισώσεις αυτές της θέσης ( $x$ )

και της ταχύτητας κίνησης ( $v$ ) των σωματιδίων στο χώρο αναζήτησης. Στον προτεινόμενο αλγόριθμο υλοποιείται μία τεχνική μετατροπής των λύσεων, η οποία διευκολύνει τον υπολογισμό των δύο εξισώσεων. Με αυτό τον μηχανισμό επιτυγχάνεται η δημιουργία εφικτών λύσεων στα προβλήματα δρομολόγησης των πλοίων.

Με την εκκίνηση του αλγορίθμου του σμήνους σωματιδίων αρχικοποιούνται οι βασικές μεταβλητές του προβλήματος, των οποίων οι τιμές τους παραμένουν σταθερές μέχρι την ολοκλήρωση του αλγορίθμου. Πιο συγκεκριμένα, ορίζονται οι τιμές για τον αριθμό των λύσεων ( $s$ ) και τον αριθμό των συνολικών επαναλήψεων του αλγορίθμου ( $i$ ). Ως δεδομένα του προβλήματος θεωρούνται ο αριθμός των πλοίων ( $v$ ), ο αριθμός των φορτίων ( $c$ ) και η λίστα εξυπηρέτησης φορτίων ( $l$ ) του κάθε πλοίου.

Στη συνέχεια, ακολουθεί η διαδικασία της δημιουργίας των αρχικών λύσεων. Ειδικότερα, υλοποιείται μία παραλλαγή της κλασσικής μεθόδου εισαγωγής (insertion), η οποία διαχωρίζεται σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση (entry phase) περιλαμβάνει την δημιουργία των λύσεων  $s^*$  με την εισαγωγή των φορτίων στα διαθέσιμα πλοία. Η δεύτερη φάση (refill phase) αφορά την επιδιόρθωση των λύσεων  $s^*$ , η οποία στόχευει στην εξυπηρέτηση των εναπομείναντα φορτίων. Η ανάλυση των λειτουργιών της μεθόδου εισαγωγής περιγράφεται σε προηγούμενη υποενότητα. Με την δημιουργία του αρχικού πληθυσμού λύσεων ξεκινά το κύριο μέρος του αλγορίθμου.

Κατά την έναρξη του βασικού σταδίου του αλγορίθμου αναζητείται η βέλτιστη λύση  $B_p$  από τον αρχικό πληθυσμό των σωματιδίων και αποθηκεύεται ως η ολικά βέλτιστη λύση  $G_p$  για την χρησιμοποίηση της στην συνέχεια της αλγοριθμικής διαδικασίας. Για τον εφικτό υπολογισμό των εξισώσεων θέσης και ταχύτητας κάθε σωματίδιου απαιτείται η μετατροπή των λύσεων  $s^*$  από διακριτές σε συνεχείς τιμές. Αυτό θεωρείται απαραίτητο, διότι ο υπολογισμός των μαθηματικών εξισώσεων πραγματοποιείται μόνο με συνεχείς τιμές. Συνεπώς, απαιτείται μία τεχνική μετατροπής των λύσεων, της οποίας η λειτουργίας παρουσιάζεται στο ακόλουθο παράδειγμα.

Στο παρακάτω παράδειγμα παρουσιάζεται η φάση της μετατροπής των λύσεων από διακριτές σε συνεχείς. Ως δεδομένα δίνονται τρία πλοία  $V_1, V_2, V_3$  με αντίστοιχες λίστες εξυπηρέτησης φορτίων  $L_1, L_2, L_3$  και οχτώ διαθέσιμα φορτία. Σύμφωνα με τις λίστες εξυπηρέτησης, τα  $V_1$  (μπλε),  $V_2$  (πράσινο) και  $V_3$  (πορτοκαλί) αντιστοιχίζονται με δύο, τρία και ένα φορτία αντίστοιχα. Τα μη εξυπηρετημένα φορτία  $C_{uns}$  αποτελούνται από δύο φορτία. Τα δεδομένα του παραδείγματος είναι ως εξής:

$$\begin{aligned}
V_1 &= 1 \quad 4, & L_1 &= 1 \quad 4 \quad 6 \quad 7 \\
V_2 &= 8 \quad 6 \quad 7, & L_2 &= 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6 \quad 7 \quad 8 \\
V_3 &= 3, & L_3 &= 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6 \quad 7 \quad 8 \\
C_{uns} &= 2 \quad 5
\end{aligned}$$

Το σωματιδίου έχει τη μορφή διανύσματος και περιέχει όλα τα φορτία. Η Εισαγωγή τους πραγματοποιείται με βάση τη σειρά των πλοίων. Τα μη εξυπηρετημένα φορτία εισάγονται στο τέλος του διανύσματος. Λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς του προβλήματος, το σωματίδιο και κατά επέκταση η λύση του προβλήματος διαμορφώνεται ως εξής:

$$\begin{aligned}
P &= \quad 1 \quad \quad 4 \quad \quad 8 \quad \quad 6 \quad \quad 7 \quad \quad 3 \quad \quad 2 \quad \quad 5 \\
Cal\% &= 0.1250 \quad 0.5000 \quad 1.0000 \quad 0.7500 \quad 0.8750 \quad 0.3750 \quad 0.2500 \quad 0.6250
\end{aligned}$$

Στην συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία της μετατροπής της λύσης. Για την μετατροπή των τιμών από διακριτές σε συνεχείς πραγματοποιείται με την διαίρεση της κάθε τιμής του διανύσματος με την μεγαλύτερη τιμή. Με τον υπολογισμό των ποσοστών  $Cal\%$  εφαρμόζονται οι μαθηματικές εξισώσεις της ταχύτητας  $v_P(t)$  και της θέσης  $x_P(t)$  για το σωματίδιο  $P$ .

$$\begin{aligned}
v_P(t+1) &= v_P(t) + c_1 rand_1(pbest_P - x_P(t)) + c_2 rand_2(gbest_P - x_P(t)) \\
x_P(t+1) &= x_P(t) + v_P(t+1)
\end{aligned}$$

Μετά την εφαρμογή των δύο εξισώσεων, το διάνυσμα της λύσης αποκτά νέα μορφή. Έστω ότι, το νέο σωματίδιο διαμορφώνεται με τις εξής αλλαγές:

$$P = \quad 1 \quad \quad 6 \quad \quad 7 \quad \quad 3 \quad \quad 8 \quad \quad 4 \quad \quad 2 \quad \quad 5$$

Παρατηρείται ότι, τα περισσότερα φορτία αλλάζουν θέση στο διάνυσμα. Στο τέλος του διανύσματος εισέρχονται τα μη εξυπηρετημένα φορτία. Για την διαμόρφωση της τελικής λύσης ελέγχονται σειριακά τα φορτία κατά την εισαγωγή τους στα πλοία με βάση της λίστες εξυπηρέτησης τους. Η εισαγωγή ολοκληρώνεται με την επιτυχή είσοδο όλων των εξυπηρετημένων φορτίων στη λύση. Επομένως, μία πιθανή λύση για το σωματίδιο  $P$  είναι η ακόλουθη:

$$P = \quad 1 \quad \quad 6 \quad \quad 7 \quad \quad 3 \quad \quad 8 \quad \quad 4 \quad \quad 2 \quad \quad 5$$

$$V_1 = 1 \quad 6 \quad 7, \quad L_1 = 1 \quad 4 \quad 6 \quad 7$$

$$V_2 = 3, \quad L_2 = 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6 \quad 7 \quad 8$$

$$V_3 = 8 \quad 4, \quad L_3 = 1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6 \quad 7 \quad 8$$

$$C_{uns} = 2 \quad 5$$

Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας της μετατροπής της λύσης, το σωματίδιο  $P$  αλλάζει μορφή, καθώς τα περισσότερα φορτία τοποθετούνται σε διαφορετικά πλοία. Χαρακτηριστικά, ο αριθμός των φορτίων για το πλοίο  $V_1$  αυξήθηκε, ενώ στα πλοία  $V_2, V_3$  μειώθηκε. Με αυτό το τρόπο επιτυγχάνεται η διαδικασία της μετατροπής της λύσης  $s^*$  από διακριτή σε συνεχή και αντίστροφα.

Αμέσως μετά εφαρμόζονται οι δύο διακασίες της τοπικής αναζήτησης για την βελτίωση της  $s^*$ . Αρχικώς υλοποιείται η επανατοποθέτηση 1-0 και στην συνέχεια η ανταλλαγή 1-1. Και οι δύο μέθοδοι περιγράφονται σε προηγούμενη ενότητα. Η βελτίωση των λύσεων ολοκληρώνεται με την εισαγωγή των μη εξυπηρετημένων φορτίων στις κατάλληλες θέσεις σε κάποια από τα διαθέσιμα πλοία, εφόσον αυτά ανήκουν στις λίστες εξυπηρέτησης τους και δεν παραβιάζονται οι υπόλοιποι περιορισμοί του προβλήματος. Ακολουθεί ο υπολογισμός του κόστους της νέας λύσης  $s'$ . Εάν κριθεί ποιοτικότερη από την ολικά βέλτιστη λύση  $G_p$ , τότε μόνο αντικαθιστάται στη θέση της. Το τελευταίο στάδιο του αλγορίθμου ονομάζεται φάση ενίσχυσης (boost phase), το οποίο στοχεύει στην επιπρόσθετη βελτίωση της ολικά βέλτιστης λύσης  $G_p$  από τις προηγούμενες διαδικασίες. Η λειτουργία επικεντρώνεται στην εξυπηρέτησης όλων των φορτίων  $c^*$ . Η αδυναμία εισαγωγής αρκετών φορτίων από τις προηγούμενες διαδικασίες ισοδυναμεί με την παραγωγή μη ποιοτικής τελικής λύσης. Η φάση αυτή περιλαμβάνει την εισαγωγή των μη εξυπηρετημένων φορτίων  $c^*$  και στις δύο μεθόδους τοπικής αναζήτησης. Όσο η λύση  $s'$  βελτιώνεται, τόσο περισσότερο διαρκεί η συγκεκριμένη διαδικασία. Όταν η βελτίωση της σταματά, τότε ολοκληρώνεται η τελευταία φάση του αλγορίθμου και παρουσιάζεται η ολικά βέλτιστη λύση  $G_p$ . Ο προτεινόμενος αλγόριθμος σμήνους σωματιδίων παρουσιάζεται στον ψευδοκώδικα Αλγόριθμος 14.

---

**Αλγόριθμος 14** Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων

---

- 1: **Δεδομένα** : Αριθμός πλοίων  $v$ , Αριθμός φορτίων  $c$ , Λίστα εξυπηρέτησης φορτίων  $l$
  - 2: **Μεταβλητές** : Αριθμός λύσεων  $s$ , Τρέχουσες λύσεις  $s^*$ , Βελτιωμένες λύσεις  $s'$ , Πλοίο  $v^*$  όπου κάθε  $v^* \in v$ , Φορτίο  $c^*$  όπου κάθε  $c^* \in c$ , Τρέχουσα βέλτιστη λύση  $B_p$ , Ολικά βέλτιστη λύση  $G_p$ , Αριθμός επαναλήψεων αλγορίθμου  $i$
  - 3:
  - 4: Αρχικοποίηση μεταβλητών
  - 5: Καθορισμός αριθμού συνολικών λύσεων  $s$  και αριθμού συνολικών επαναλήψεων  $i$
  - 6:
  - 7: Εφαρμογή Insertion ▷ Δημιουργία πληθυσμού λύσεων
  - 8: Φάση Εισόδου: Δημιουργία λύσεων  $s^*$
  - 9: Φάση Αναπλήρωσης: Επιδίωξη λύσεων  $s^*$
  - 10: Εύρεση βέλτιστης λύσης  $B_p$  από  $s^*$
  - 11: Αρχικοποίηση ολικά βέλτιστης λύσης με  $G_p = B_p$
  - 12:
  - 13: Εφαρμογή PSO
  - 14: **Για** κάθε επανάληψη  $i$  ▷ Αρχή κύριου αλγορίθμου
  - 15:     **Για** κάθε λύση  $s^*$
  - 16:         Μετατροπή λύσης  $s^*$  από διακριτή σε συνεχή
  - 17:         Υπολογισμός εξίσωσης ταχύτητας για λύση  $s^*$
  - 18:         Υπολογισμός εξίσωσης θέσης για λύση  $s^*$
  - 19:         Μετατροπή λύσης  $s^*$  από συνεχή σε διακριτή
  - 20:         Εφαρμογή επανατοποθέτησης 1-0
  - 21:         Εφαρμογή ανταλλαγής 1-1
  - 22:         Εισαγωγή μη εξυπηρετημένων φορτίων  $c^*$  στη λύση  $s^*$
  - 23:         Υπολογισμός κόστους νέας λύσης  $s'$
  - 24:         **Αν**  $s' < G_p$
  - 25:             Αντικατάσταση νέας βέλτιστης λύσης με  $G_p = s'$
  - 26:         **Τέλος αν**
  - 27:     **Τέλος για**
  - 28: **Τέλος για**
  - 29:
  - 30: Φάση Ενίσχυσης: Βελτίωση ολικά βέλτιστης λύσης  $G_p$
  - 31: **Όσο**  $G_p$  βελτιώνεται **επανάλαβε**
  - 32:     Εισαγωγή μη εξυπηρετημένων φορτίων  $c^*$  στη λύση  $s'$
  - 33:     Εφαρμογή επανατοποθέτησης 1-0
  - 34:     Εφαρμογή ανταλλαγής 1-1
  - 35:     **Αν**  $s' < G_p$
  - 36:         Αντικατάσταση νέας βέλτιστης λύσης με  $G_p = s'$
  - 37:     **Τέλος αν**
  - 38: **Τέλος όσο** ▷ Τέλος κύριου αλγορίθμου
  - 39:
  - 40: **Έξοδος** :  $G_p$
-

### 5.6.2 Αλγόριθμος Τεχνητής Αποικίας Μελισσών

Ο αλγόριθμος της τεχνητής αποικίας μελισσών (Artificial Bee Colony - ABC) βασίζεται στην συμπεριφορά των μελισσών κατά τη διάρκεια της αναζήτησης τροφής. Σε αντίθεση με τους περισσότερους αλγορίθμους συμπεριφορών των μελισσών, ο ABC προσομοιώνει τις μέλισσες ως διαδικασίες επίλυσης του προβλήματος και όχι ως λύσεις αυτού, τις οποίες αντιπροσωπεύουν οι πηγές τροφής των μελισσών. Στην συγκεκριμένη αποικία μελισσών διακρίνονται τρία διαφορετικά είδη, αυτά των εξερευνητριών, των θεατών και των ανιχνευτριών μελισσών. Σε καθένα είδος ανατίθεται μια καθορισμένη διαδικασία με στόχο την εύρεση νέων ποιοτικότερων λύσεων. Για την επιτυχή εφαρμογή του ABC στα προβλήματα δρομολόγησης πλοίων υλοποιείται μια τεχνική μετατροπής των λύσεων από διακριτές σε συνεχείς με στόχο την εφικτή λειτουργία των βασικών εξισώσεων του προτεινόμενου αλγόριθμου.

Η αλγοριθμική διαδικασία ξεκινά με την αρχικοποίηση των μεταβλητών του προβλήματος και τη δημιουργία του αρχικού πληθυσμού λύσεων. Αρχικά ορίζονται οι τιμές για τον αριθμό των λύσεων ( $s$ ) και τον αριθμό των επαναλήψεων του αλγορίθμου ( $i$ ), ενώ ο αριθμός των πλοίων ( $v$ ), ο αριθμός των φορτίων ( $c$ ) και η λίστα εξυπηρέτησης φορτίων ( $l$ ) αποτελούν τα δεδομένα του προβλήματος. Στη συνέχεια ακολουθεί η διαμόρφωση του αρχικού πληθυσμού λύσεων ( $s^*$ ) με χρήση μιας τροποποιημένης μεθόδου εισαγωγής. Η συγκεκριμένη μέθοδος διαθέτει δύο στάδια, αυτά της φάσης εισόδου και της φάσης αναπλήρωσης των λύσεων  $s^*$ . Η λειτουργία της μεθόδου εισαγωγής αναλύεται σε προηγούμενη ενότητα. Με την ολοκλήρωση των δύο φάσεων δημιουργούνται οι αρχικές λύσεις.

Για την εφαρμογή των βασικών μαθηματικών εξισώσεων του προτεινόμενου αλγόριθμου απαιτούνται λύσεις με συνεχείς τιμές. Η τεχνική μετατροπής των λύσεων από διακριτές σε συνεχείς ακολουθεί την διαδικασία, η οποία περιγράφεται στον προτεινόμενο αλγόριθμο PSO. Αμέσως μετά την μετατροπή των λύσεων ακολουθεί η εφαρμογή των τριών διαδικασιών των μελισσών. Αρχικά χρησιμοποιούνται οι εξερευνητρίες μέλισσες, οι οποίες για την παραγωγή μιας νέας λύσης συνδυάζουν την ποιότητα της τρέχουσας λύσης με κάποια νέα από κάποια τοπική περιοχή του χώρου των λύσεων. Αυτό επιτυγχάνεται με την ακόλουθη εξίσωση:

$$v_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij}(x_{ij} - x_{kj})$$

Η μεταβλητή  $v_{ij}$  αντιπροσωπεύει τη νέα πηγή τροφής. Η νέα λύση λαμβάνει υπόψη την τιμή της προηγούμενης λύσης  $x_{ij}$  σε σύγκριση με μια τυχαία λύση  $x_{kj}$  στην τοπική περιοχή του χώρου των λύσεων. Η μεταβλητή  $\phi_{ij}$  λαμβάνει τιμές στο διάστημα τιμών



[0,1] με στόχο την αναζήτηση νέων λύσεων στην τοπική περιοχή της λύσης  $x_{ij}$ . Ακολούθως εφαρμόζεται η διαδικασία των θεατών μελισσών. Η μέλισσα θεατής επιλέγει μέσω μιας πιθανότητας την επόμενη πηγή τροφής ως νέα λύση. Η επιλογή της πηγής τροφής υπολογίζεται από τον παρακάτω μαθηματικό τύπο:

$$p_i = \frac{cost_i}{\sum_{n=1}^s (cost_n)}$$

Η τιμή  $cost_i$  υποδεικνύει το κόστος της τρέχουσας λύσης  $i$  και ανάλογα με την τιμή της πιθανότητας  $p_i$  επιλέγεται η αντίστοιχη λύση  $x_i$ . Στη συνέχεια ενημερώνεται η επιλεγμένη πηγή τροφής από τη θεατή μέλισσα μέσω της προηγούμενης εξίσωσης  $v_{ij}$ . Για την αναζήτηση νέων πηγών τροφής και κατ' επέκταση νέων λύσεων σε περισσότερες περιοχές του χώρου των λύσεων εφαρμόζονται οι ανιχνεύτριες μέλισσες. Η εύρεση νέων πηγών τροφής από τις ανιχνεύτριες ορίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$x_i^j = x_j^{min} + \phi(x_j^{max} - x_j^{min})$$

Οι μεταβλητές  $x_j^{min}$  και  $x_j^{max}$  αποτελούν το κατώτατο και το ανώτατο όριο του εύρους αναζήτησης στον χώρο των λύσεων. Με αυτό τον τρόπο διευρύνεται η αναζήτηση νέων πηγών τροφής σε περισσότερες περιοχές, καθώς η μεταβλητή  $x_i^j$  λαμβάνει τιμές στο διάστημα  $[x_j^{min}, x_j^{max}]$ , δηλαδή από όλο τον επιτρεπτό χώρο των λύσεων. Με την ολοκλήρωση των τριών διαδικασιών με τις μέλισσες ακολουθεί η μετατροπή των νέων λύσεων  $s^*$  από συνεχείς σε διακριτές για την εφαρμογή των δύο μεθόδων τοπικής αναζήτησης. Η βελτίωση των  $s^*$  επιτυγχάνεται με την επανατοποθέτηση 1-0 και την ανταλλαγή 1-1, οι οποίες αναφέρονται αναλυτικά σε προηγούμενη ενότητα. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η εισαγωγή των μη εξυπηρετημένων φορτίων  $c^*$  με στόχο την επιπλέον βελτίωση της λύσης  $s'$ . Εάν η  $s'$  είναι ποιοτικότερη της ολικά βέλτιστης λύσης  $G_p$ , τότε αντικαθιστάται ως νέα ολικά βέλτιστη λύση. Πριν την ολοκλήρωση του αλγορίθμου χρησιμοποιείται η φάση της ενίσχυσης (boost phase), η οποία στοχεύει στην βελτίωση των παραγώμενων λύσεων. Η συγκεκριμένη φάση περιγράφεται στον προτεινόμενο αλγόριθμο PSO. Ο αλγόριθμος τερματίζεται με τη μη επιπλέον βελτίωση της λύσης  $s'$ . Ο προτεινόμενος αλγόριθμος της τεχνητής αποικίας μελισσών αναφέρεται στον ψευδοκώδικα Αλγόριθμος 15.

---

**Αλγόριθμος 15** Αλγόριθμος Τεχνητής Αποικίας Μελισσών

---

- 1: **Δεδομένα** : Αριθμός πλοίων  $v$ , Αριθμός φορτίων  $c$ , Λίστα εξυπηρέτησης φορτίων  $l$
  - 2: **Μεταβλητές** : Αριθμός λύσεων  $s$ , Τρέχουσες λύσεις  $s^*$ , Βελτιωμένες λύσεις  $s'$ , Πλοίο  $v^*$  όπου κάθε  $v^* \in v$ , Φορτίο  $c^*$  όπου κάθε  $c^* \in c$ , Τρέχουσα βέλτιστη λύση  $B_p$ , Ολικά βέλτιστη λύση  $G_p$ , Αριθμός επαναλήψεων αλγορίθμου  $i$
  - 3:
  - 4: Αρχικοποίηση μεταβλητών
  - 5: Καθορισμός αριθμού συνολικών λύσεων  $s$  και αριθμού συνολικών επαναλήψεων  $i$
  - 6:
  - 7: Εφαρμογή Insertion ▷ Δημιουργία πληθυσμού λύσεων
  - 8: Φάση Εισόδου: Δημιουργία λύσεων  $s^*$
  - 9: Φάση Αναπλήρωσης: Επιδίωρθωση λύσεων  $s^*$
  - 10: Εύρεση βέλτιστης λύσης  $B_p$  από  $s^*$
  - 11: Αρχικοποίηση ολικά βέλτιστης λύσης με  $G_p = B_p$
  - 12:
  - 13: Εφαρμογή ABC
  - 14: **Για** κάθε επανάληψη  $i$  ▷ Αρχή κύριου αλγορίθμου
  - 15:     **Για** κάθε λύση  $s^*$
  - 16:         Μετατροπή λύσης  $s^*$  από διακριτή σε συνεχή
  - 17:         Φάση εξερευνήτριων μελισσών
  - 18:         Φάση θεατών μελισσών
  - 19:         Φάση ανιχνευτριών μελισσών
  - 20:         Μετατροπή λύσης  $s^*$  από συνεχή σε διακριτή
  - 21:         Εφαρμογή επανατοποθέτησης 1-0
  - 22:         Εφαρμογή ανταλλαγής 1-1
  - 23:         Εισαγωγή μη εξυπηρετημένων φορτίων  $c^*$  στη λύση  $s^*$
  - 24:         Υπολογισμός κόστους νέας λύσης  $s'$
  - 25:         **Αν**  $s' < G_p$
  - 26:             Αντικατάσταση νέας βέλτιστης λύσης με  $G_p = s'$
  - 27:         **Τέλος αν**
  - 28:     **Τέλος για**
  - 29: **Τέλος για**
  - 30:
  - 31: Φάση Ενίσχυσης: Βελτίωση ολικά βέλτιστης λύσης  $G_p$
  - 32: **Όσο**  $G_p$  βελτιώνεται **επανάλαβε**
  - 33:     Εισαγωγή μη εξυπηρετημένων φορτίων  $c^*$  στη λύση  $s'$
  - 34:     Εφαρμογή επανατοποθέτησης 1-0
  - 35:     Εφαρμογή ανταλλαγής 1-1
  - 36:     **Αν**  $s' < G_p$
  - 37:         Αντικατάσταση νέας βέλτιστης λύσης με  $G_p = s'$
  - 38:     **Τέλος αν**
  - 39: **Τέλος όσο** ▷ Τέλος κύριου αλγορίθμου
  - 40:
  - 41: **Έξοδος** :  $G_p$
-

### 5.6.3 Αλγόριθμος Πυγολαμπίδας

Ο αλγόριθμος των πυγολαμπίδων (Firefly Algorithm - FA) ανήκει στην κατηγορία των μεθευρετικών αλγορίθμων και οι βασικές λειτουργίες του υιοθετούν την κοινωνική συμπεριφορά των πυγολαμπίδων. Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος λαμβάνει υπόψη ένα πληθυσμό πυγολαμπίδων, καθεμία από τις οποίες αντιπροσωπεύει μια πιθανή λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Επιπρόσθετα, η ελκυστικότητα της κάθε πυγολαμπίδας βασίζεται στην ένταση του φωτός, η οποία εκπέμπει και αποτελεί την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος. Συνεπώς, ο FA προσομοιώνει τον μηχανισμό λάμψης των πυγολαμπίδων με στόχο την μετακίνηση τους προς την λαμπερότερη πυγολαμπίδα και κατ' επέκταση στη ποιοτικότερη λύση του προβλήματος. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος των πυγολαμπίδων χρησιμοποιεί τις βασικές μαθηματικές εξισώσεις για την παραγωγή εφικτών λύσεων για τα προβλήματα δρομολόγησης πλοίων. Οι εξισώσεις αυτές απαιτούν λύσεις με συνεχείς τιμές. Για αυτό το λόγο υλοποιείται μια τεχνική μετατροπής των λύσεων για την εφικτή εφαρμογή των λειτουργιών του αλγορίθμου.

Για την εκκίνηση του αλγορίθμου απαιτείται η αρχικοποίηση των βασικών μεταβλητών του προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα λαμβάνουν τιμές οι μεταβλητές του αριθμού των λύσεων ( $s$ ) του προβλήματος και του αριθμού των επαναλήψεων του αλγορίθμου ( $i$ ). Ως δεδομένα του προβλήματος παρέχονται ο αριθμός των πλοίων ( $v$ ), ο αριθμός των φορτίων ( $c$ ) και η λίστα εξυπηρέτησης φορτίων ( $l$ ). Αμέσως μετά, η αλγοριθμική διαδικασία συνεχίζεται με τη δημιουργία του αρχικού πληθυσμού λύσεων ( $s^*$ ). Οι αρχικές λύσεις κατασκευάζονται μέσω μιας παραλλαγής της κλασσικής μεθόδου της εισαγωγής, η οποία διαχωρίζεται σε δύο φάσεις. Τόσο η φάση εισόδου όσο και η φάση της αναπλήρωσης περιγράφονται αναλυτικά σε προηγούμενη ενότητα. Με την εφαρμογή της μεθόδου εισαγωγής δημιουργούνται οι αρχικές λύσεις και ο αλγόριθμος συνεχίζει στην επόμενο στάδιο. Για την εφαρμογή των βασικών μαθηματικών εξισώσεων του αλγορίθμου απαιτούνται λύσεις με συνεχείς τιμές. Επομένως, υλοποιείται η κατάλληλη διαδικασία μετατροπής των λύσεων από τις διακριτές τιμές του προβλήματος σε συνεχείς για την επιτυχή λειτουργία των αλγοριθμικών διαδικασιών.

Στον αλγόριθμο FA λαμβάνονται υπόψη δύο παράμετροι αυτοί της έντασης του φωτός και της ελκυστικότητας της κάθε πυγολαμπίδας. Η ένταση του φωτός της πυγολαμπίδας αντιπροσωπεύει τη λύση του προβλήματος και συμβολίζεται με  $I$ . Η ελκυστικότητα των πυγολαμπίδων αποτελεί τον τρόπο μετακίνησης τους στον χώρο των λύσεων, καθώς όσο πιο λαμπερό είναι το φως τόσο περισσότερο κινούνται προς αυτό. Ο υπολογισμός της διακύμανσης του φωτός της κάθε πυγολαμπίδας υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$I = I_0 e^{-\gamma r_{ij}^2}$$

Η μεταβλητή  $I_0$  και η παράμετρος  $\gamma$  αντιπροσωπεύουν την αρχική λάμψη της πυγολαμπίδας και τον συντελεστή απορρόφησης του φωτός αντίστοιχα. Η μεταβλητή  $r_{ij}$  αποτελεί την απόσταση της πυγολαμπίδας  $i$  από την πυγολαμπίδα  $j$  στις θέσεις  $x_i, x_j$  στο χώρο των λύσεων και υπολογίζεται από γνωστό μαθηματικό τύπο της Καρτεσιανής απόστασης  $r_{ij}^2 = (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2$ . Αναφορικά με την ελκυστικότητα των πυγολαμπίδων θεωρείται ανάλογη με την ένταση του φωτός που εκπέμπουν. Για την εύρεση της ελκυστικότερης πυγολαμπίδας απαιτείται ο υπολογισμός της λάμψης του φωτός, ο οποίος συμβολίζεται με  $\beta$ . Η λάμψη της κάθε πυγολαμπίδας υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r_{ij}^2}$$

Η μεταβλητή  $\beta_0$  υποδεικνύει την ελκυστικότητα, όταν η απόσταση μεταξύ της πυγολαμπίδας  $i$  από την πυγολαμπίδα  $j$  ισούται με μηδέν ( $r = 0$ ). Η παράμετρος  $\gamma$  αποτελεί τον συντελεστή απορρόφησης του φωτός, ο οποίος ελέγχει τη μείωση της έντασης του φωτός. Η μετακίνηση προς την ελκυστικότερη πυγολαμπίδα καθορίζεται από τον εξής μαθηματικό τύπο:

$$x_i = x_i + \beta(x_j - x_i) + \alpha \epsilon_i$$

Ο πρώτος όρος ( $x_i$ ) αντιπροσωπεύει τη θέση της πυγολαμπίδας  $i$ . Ο δεύτερος όρος υποδεικνύει την ελκυστικότητας της λάμψης του φωτός της πυγολαμπίδας  $i$  σε σχέση με τις γειτονικές πυγολαμπίδες. Ο τρίτος όρος αποτελεί μια διαδικασία τυχαιοποίησης, η οποία περιλαμβάνει μία τυχαία μετακίνηση της πυγολαμπίδας  $i$  στο χώρο των λύσεων. Οι παράμετροι  $\alpha$  και  $\epsilon_i$  λαμβάνουν τυχαίες τιμές από το διάστημα  $[0,1]$  και από την κατανομή Gauss αντίστοιχα.

Με την ολοκλήρωση των εξισώσεων λάμψης και κίνησης για τον πληθυσμό των πυγολαμπίδων ακολουθεί η μετατροπή των λύσεων από συνεχείς τιμές σε διακριτές για την εφαρμογή των μεθόδων τοπικής αναζήτησης. Οι διαδικασίες τοπικής αναζήτησης αποτελούνται από την επανατοποθέτηση 1-0 και την ανταλλαγή 1-1, οι οποίες αναλύονται σε προηγούμενη ενότητα. Για τη επιπρόσθετη βελτίωση της ποιότητας της λύσης  $s'$  εισέρχονται σε αυτή τα μη εξυπηρετημένα φορτία  $c^*$ . Η  $s'$  αντικαθιστά την ολικά βέλτιστη λύση του προβλήματος, εφόσον ισχύει η ανισότητα  $s' < G_p$ . Ο FA ολοκληρώνεται με την φάση ενίσχυσης, η οποία αναλύεται στον προτεινόμενο αλγόριθμο PSO. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος των πυγολαμπίδων παρουσιάζεται στον ψευδοκώδικα Αλγόριθμος 16.

---

**Αλγόριθμος 16** Αλγόριθμος Πυγολαμπίδας

---

- 1: **Δεδομένα** : Αριθμός πλοίων  $v$ , Αριθμός φορτίων  $c$ , Λίστα εξυπηρέτησης φορτίων  $l$
  - 2: **Μεταβλητές** : Αριθμός λύσεων  $s$ , Τρέχουσες λύσεις  $s^*$ , Βελτιωμένες λύσεις  $s'$ , Πλοίο  $v^*$  όπου κάθε  $v^* \in v$ , Φορτίο  $c^*$  όπου κάθε  $c^* \in c$ , Τρέχουσα βέλτιστη λύση  $B_p$ , Ολικά βέλτιστη λύση  $G_p$ , Αριθμός επαναλήψεων αλγορίθμου  $i$
  - 3:
  - 4: Αρχικοποίηση μεταβλητών
  - 5: Καθορισμός αριθμού συνολικών λύσεων  $s$  και αριθμού συνολικών επαναλήψεων  $i$
  - 6:
  - 7: Εφαρμογή Insertion ▷ Δημιουργία πληθυσμού λύσεων
  - 8: Φάση Εισόδου: Δημιουργία λύσεων  $s^*$
  - 9: Φάση Αναπλήρωσης: Επιδίωξη λύσεων  $s^*$
  - 10: Εύρεση βέλτιστης λύσης  $B_p$  από  $s^*$
  - 11: Αρχικοποίηση ολικά βέλτιστης λύσης με  $G_p = B_p$
  - 12:
  - 13: Εφαρμογή FA
  - 14: **Για** κάθε επανάληψη  $i$  ▷ Αρχή κύριου αλγορίθμου
  - 15:     **Για** κάθε λύση  $s^*$
  - 16:         Μετατροπή λύσης  $s^*$  από διακριτή σε συνεχή
  - 17:         Υπολογισμός εξίσωσης λάμψης για λύση  $s^*$
  - 18:         Υπολογισμός εξίσωσης θέσης για λύση  $s^*$
  - 19:         Μετατροπή λύσης  $s^*$  από συνεχή σε διακριτή
  - 20:         Εφαρμογή επανατοποθέτησης 1-0
  - 21:         Εφαρμογή ανταλλαγής 1-1
  - 22:         Εισαγωγή μη εξυπηρετημένων φορτίων  $c^*$  στη λύση  $s^*$
  - 23:         Υπολογισμός κόστους νέας λύσης  $s'$
  - 24:         **Αν**  $s' < G_p$
  - 25:             Αντικατάσταση νέας βέλτιστης λύσης με  $G_p = s'$
  - 26:         **Τέλος αν**
  - 27:     **Τέλος για**
  - 28: **Τέλος για**
  - 29:
  - 30: Φάση Ενίσχυσης: Βελτίωση ολικά βέλτιστης λύσης  $G_p$
  - 31: **Όσο**  $G_p$  βελτιώνεται **επανάλαβε**
  - 32:     Εισαγωγή μη εξυπηρετημένων φορτίων  $c^*$  στη λύση  $s'$
  - 33:     Εφαρμογή επανατοποθέτησης 1-0
  - 34:     Εφαρμογή ανταλλαγής 1-1
  - 35:     **Αν**  $s' < G_p$
  - 36:         Αντικατάσταση νέας βέλτιστης λύσης με  $G_p = s'$
  - 37:     **Τέλος αν**
  - 38: **Τέλος όσο** ▷ Τέλος κύριου αλγορίθμου
  - 39:
  - 40: **Έξοδος** :  $G_p$
-

#### 5.6.4 Αλγόριθμος Πεταλούδας Μονάρχη

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της πεταλούδας μονάρχη (Monarch Butterfly Optimization - MBO) εμπνέεται από την συμπεριφορά των πεταλούδων μονάρχη κατά την διαδικασία της μετανάστευσης τους. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος λειτουργεί με ένα βασικό πληθυσμό πεταλούδων, ο οποίος αντιπροσωπεύει τις λύσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης. Ο πληθυσμός των πεταλούδων διασπάται σε δύο ισόποσους υποπληθυσμούς κατά την διαδικασία της μετανάστευσης τους. Για καθένα υποπληθυσμό εφαρμόζονται διαφορετικές μαθηματικές εξισώσεις για την δημιουργία νέων ποιοτικότερων λύσεων. Η εφαρμογή των εξισώσεων αυτών απαιτεί λύσεις με συνεχείς τιμές, καθώς οι λύσεις των προβλημάτων δρομολόγησης πλοίων διακρίνονται με διακριτές τιμές. Για αυτό το λόγο υλοποιείται μια διαδικασία μετατροπής των λύσεων από διακριτές σε συνεχείς με στόχο την εφικτή εφαρμογή των μαθηματικών εξισώσεων του προτεινόμενου αλγορίθμου.

Η εκκίνηση του αλγορίθμου πραγματοποιείται με τον καθορισμό των αρχικών τιμών των μεταβλητών του προβλήματος. Ειδικότερα ορίζονται οι τιμές για τον αριθμό των λύσεων του προβλήματος ( $s$ ) και τον αριθμό των συνολικών επαναλήψεων του αλγορίθμου ( $i$ ). Επιπρόσθετα, κατά την αλγοριθμική διαδικασία λαμβάνονται υπόψη τα δεδομένα τα προβλήματος, όπως ο αριθμός των πλοίων ( $v$ ), ο αριθμός των φορτίων ( $c$ ) και η λίστα εξυπηρέτησης φορτίων ( $l$ ). Μετά την αρχικοποίηση των μεταβλητών ακολουθεί η δημιουργία του αρχικού πληθυσμού ( $s^*$ ). Για τη δημιουργία των αρχικών λύσεων εφαρμόζεται μια παραλλαγή της ευρετικής μεθόδου της εισαγωγής. Η συγκεκριμένη μέθοδος διαθέτει τη φάση της εισόδου των φορτίων  $c$  και τη φάση της αναπλήρωσης των λύσεων  $s^*$ . Αναλυτικά η προτεινόμενη μέθοδος της εισαγωγής παρουσιάζεται αναλυτικά σε προηγούμενη ενότητα. Μη την δημιουργία των αρχικών λύσεων ταξινομούνται σε φθίνουσα σειρά με βάση το κόστος τους, αναζητείται η ποιοτικότερη λύση  $B_p$  και αποθηκεύεται ως η ολικά βέλτιστη λύση  $G_p$  του προβλήματος, η οποία θα χρησιμοποιηθεί στην επόμενη φάση του αλγορίθμου.

Στη συνέχεια ο αλγόριθμος εισέρχεται στη φάση της μετανάστευσης και ακολουθεί ο διαχωρισμός του κύριου πληθυσμού των λύσεων σε δύο ισόποσους υποπληθυσμούς ( $P_1, P_2$ ). Για καθένα από τους υποπληθυσμούς εφαρμόζονται διαφορετικές μαθηματικές εξισώσεις, οι οποίες υπολογίζουν την κίνηση των πεταλούδων στο χώρο των λύσεων. Πιο συγκεκριμένα, για τον πρώτο υποπληθυσμό  $P_1$  χρησιμοποιείται ο τελεστής μετανάστευσης (migration operator), ο οποίος στοχεύει στην ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των δύο υποπληθυσμών, αλλά και εντός του  $P_1$ . Η μεταφορά της πληροφορίας στις νέες λύσεις καθορίζεται από μια παράμετρο  $p$ . Η κίνηση της κάθε πεταλούδας υπολογίζεται από τον παρακάτω μαθηματικό τύπο:

$$x_i(t+1) = \begin{cases} x_{r_1}(t) & \text{αν } r \leq p \\ x_{r_2}(t) & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

Η μεταβλητή  $x_i(t+1)$  υποδεικνύει τη νέα θέση της πεταλούδας  $i$  την χρονική στιγμή  $(t+1)$ . Οι παράμετροι  $r_1, r_2$  αποτελούν δείκτες των υποπληθυσμών  $P_1, P_2$  και λαμβάνουν ακέραιες τιμές. Η μεταβλητή  $r$  υπολογίζεται από το γινόμενο  $r = rand * peri$ , όπου  $rand$  είναι ένας τυχαίος πραγματικός αριθμός στο διάστημα τιμών  $[0,1]$  και η μεταβλητή  $peri$  αντιπροσωπεύει την διάρκεια της μεταναστευτικής περιόδου. Εφόσον ισχύει η ανισότητα  $r \leq p$  η κίνηση των νέων πεταλούδων προέρχεται από τον υποπληθυσμό  $P_1$ , ενώ σε διαφορετική περίπτωση από τον  $P_2$ . Αντίστοιχα, στον δεύτερο υποπληθυσμό  $P_2$  εφαρμόζεται ο τελεστής μεταβολής των πεταλούδων (butterfly adjusting operator), ο οποίος καθορίζει το κίνηση των πεταλούδων στο χώρο των λύσεων. Για τον δεύτερο υποπληθυσμό λύσεων  $P_2$  η εξίσωση κίνησης για την κάθε πεταλούδα υπολογίζεται ως εξής:

$$x_i(t+1) = \begin{cases} x_{r_{best}}(t) & \text{αν } r \leq p \\ x_{r_2}(t) & \text{αν } r > p \wedge r \leq BAR \\ x_{r_{random}}(t) & \text{αν } r > p \wedge r > BAR \end{cases}$$

Η νέα θέση της πεταλούδας  $i$  από τον  $P_2$  διαμορφώνεται με τρεις τρόπους. Εφόσον ισχύει η πρώτη περίπτωση, τότε η πεταλούδα  $i$  κινείται προς την ολικά βέλτιστη λύση του προβλήματος. Όταν δεν ισχύει η ανισότητα  $r \leq p$ , η μεταβλητή  $BAR$  καθορίζει την κίνηση της πεταλούδας  $i$ . Αν η παράμετρος  $r$  υπολογιστεί μικρότερη ή ίση της  $BAR$ , τότε η πεταλούδα  $i$  μεταβαίνει προς μία τυχαία πεταλούδα του υποπληθυσμού  $P_2$  σύμφωνα με τον δείκτη  $r_2$ . Σε διαφορετική περίπτωση κινείται σε μία τυχαία θέση στο χώρο των λύσεων. Με τον υπολογισμό των εξισώσεων κίνησης για τους δύο υποπληθυσμούς ολοκληρώνεται η φάση της μετανάστευσης και ακολουθεί η μετατροπή των τιμών των λύσεων  $s^*$  από συνεχείς σε διακριτές. Στη συνέχεια ακολουθούν οι διαδικασίες της τοπικής αναζήτησης αυτές της επανατοποθέτησης 1-0 και της ανταλλαγής 1-1. Και οι δύο διαδικασίες περιγράφονται αναλυτικά σε προηγούμενη ενότητα. Για επιπλέον βελτίωση των λύσεων  $s^*$  εισάγονται τα μη εξυπηρετημένα φορτία  $c^*$ . Η αλγοριθμική διαδικασία ολοκληρώνεται με την φάση της ενίσχυσης, η οποία αποσκοπεί στην επιπρόσθετη βελτίωση της ποιότητας της  $s'$ . Οι λειτουργίες αυτής της φάσης αναφέρονται στον προτεινόμενο αλγόριθμο PSO. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος των πεταλούδων μονάρχη παρουσιάζεται στον ψευδοκώδικα Αλγόριθμος 17.

---

**Αλγόριθμος 17** Αλγόριθμος Πεταλούδας Μονάρχη

---

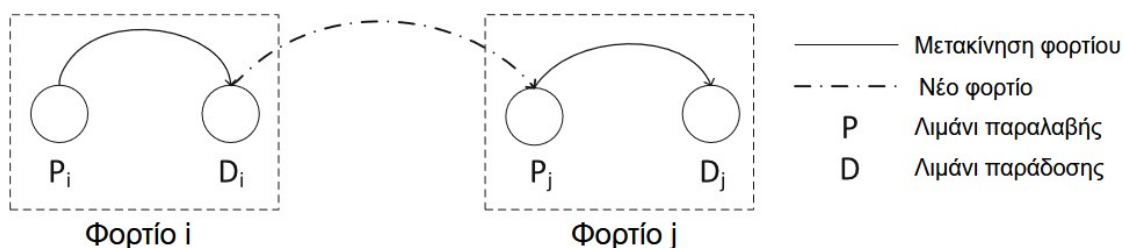
- 1: **Δεδομένα** : Αριθμός πλοίων  $v$ , Αριθμός φορτίων  $c$ , Λίστα εξυπηρέτησης φορτίων  $l$
  - 2: **Μεταβλητές** : Αριθμός λύσεων  $s$ , Τρέχουσες λύσεις  $s^*$ , Βελτιωμένες λύσεις  $s'$ , Πλοίο  $v^*$  όπου κάθε  $v^* \in v$ , Φορτίο  $c^*$  όπου κάθε  $c^* \in c$ , Τρέχουσα βέλτιστη λύση  $B_p$ , Ολικά βέλτιστη λύση  $G_p$ , Αριθμός επαναλήψεων αλγορίθμου  $i$
  - 3:
  - 4: Αρχικοποίηση μεταβλητών
  - 5: Καθορισμός αριθμού συνολικών λύσεων  $s$  και αριθμού συνολικών επαναλήψεων  $i$
  - 6:
  - 7: Εφαρμογή Insertion ▷ Δημιουργία πληθυσμού λύσεων
  - 8: Φάση Εισόδου: Δημιουργία λύσεων  $s^*$
  - 9: Φάση Αναπλήρωσης: Επιδίωρθωση λύσεων  $s^*$
  - 10: Εύρεση βέλτιστης λύσης  $B_p$  από  $s^*$
  - 11: Αρχικοποίηση ολικά βέλτιστης λύσης με  $G_p = B_p$
  - 12:
  - 13: Εφαρμογή MBO
  - 14: **Για** κάθε επανάληψη  $i$  ▷ Αρχή κύριου αλγορίθμου
  - 15:   Ταξινόμηση λύσεων  $s^*$  με βάση το κόστος
  - 16:   Διαχωρισμός πληθυσμού λύσεων σε δύο υποπληθυσμούς  $P_1, P_2$
  - 17:   Μετατροπή λύσης  $s^*$  από διακριτή σε συνεχή
  - 18:   Υπολογισμός εξίσωσης κίνησης για λύση  $s^*$  από  $P_1$
  - 19:   Υπολογισμός εξίσωσης κίνησης για λύση  $s^*$  από  $P_2$
  - 20:   Μετατροπή λύσης  $s^*$  από συνεχή σε διακριτή
  - 21:   Εφαρμογή επανατοποθέτησης 1-0
  - 22:   Εφαρμογή ανταλλαγής 1-1
  - 23:   Εισαγωγή μη εξυπηρετημένων φορτίων  $c^*$  στη λύση  $s^*$
  - 24:   Υπολογισμός κόστους νέας λύσης  $s'$
  - 25:   **Αν**  $s' < G_p$
  - 26:     Αντικατάσταση νέας βέλτιστης λύσης με  $G_p = s'$
  - 27:   **Τέλος αν**
  - 28: **Τέλος για**
  - 29:
  - 30: Φάση Ενίσχυσης: Βελτίωση ολικά βέλτιστης λύσης  $G_p$
  - 31: **Όσο**  $G_p$  βελτιώνεται **επανάλαβε**
  - 32:   Εισαγωγή μη εξυπηρετημένων φορτίων  $c^*$  στη λύση  $s'$
  - 33:   Εφαρμογή επανατοποθέτησης 1-0
  - 34:   Εφαρμογή ανταλλαγής 1-1
  - 35:   **Αν**  $s' < G_p$
  - 36:     Αντικατάσταση νέας βέλτιστης λύσης με  $G_p = s'$
  - 37:   **Τέλος αν**
  - 38: **Τέλος όσο** ▷ Τέλος κύριου αλγορίθμου
  - 39:
  - 40: **Έξοδος** :  $G_p$
-



## 5.7 Αποτελέσματα για ITSRSP

Οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι εφαρμόζονται στο πρόβλημα της βιομηχανικής και ελεύθερης δρομολόγησης πλοίων (ITSRSP), όπως προτείνεται από τους Hemmati et al.[105] στην επιστημονική βιβλιογραφία. Το ITSRSP θεωρείται επέκταση του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων παραλαβής και παράδοσης με χρονικά παράθυρα (PDTWVRP), καθώς διαθέτει ετερογενή στόλο, διαφορετικά σημεία έναρξης και χρόνους εκκίνησης για τα πλοία και επιλεκτική εξυπηρέτηση των φορτίων με ποινές. Η εξυπηρέτηση των φορτίων στο συγκεκριμένο πρόβλημα απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα.

Σχήμα 5.1: Απεικόνιση δρομολογίου εξυπηρέτησης φορτίων (Li et. al[160])



Η πειραματική διαδικασία βασίζεται στα δεδομένα για το συγκεκριμένο πρόβλημα από τις εργασίες των Hemmati et al.[105, 106] και Homsi et al.[113], τα οποία αντλούνται από πραγματικές καταστάσεις σε διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές. Το συγκεκριμένο σύνολο παραδειγμάτων περιέχει 60 πειραματικά δεδομένα, τα οποία χωρίζονται σε 12 ομάδες ανάλογα με το μέγεθος των τιμών τους. Χαρακτηριστικά, τα παραδείγματα διαθέτουν έως 100 φορτία και 50 πλοία. Τα ληφθέντα αποτελέσματα από την πειραματική διαδικασία παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.2, 5.3, 5.4 και 5.5. Το κάθε πειραματικό δεδομένο κωδικοποιείται ως *DS\_FUN\_C*(αριθμός1)-*V*(αριθμός2)-*HE*-(αριθμός3), όπου οι τιμές αριθμός1, αριθμός2, αριθμός3 τον υποδεικνύουν τον αριθμό των φορτίων, τον αριθμό των πλοίων και τον αριθμό του κάθε παραδείγματος αντίστοιχα. Π.χ. το παράδειγμα *DS\_FUN\_C13\_V5\_HE\_2* περιέχει δεκατρία (13) φορτία, πέντε (5) πλοία και αντιστοιχεί στο δεύτερο πειραματικό δεδομένο (*HE\_2*). Τα βασικά χαρακτηριστικά του προβλήματος ITSRSP παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Πειραματικά δεδομένα για το ITSRS

#	Δεδομένα	Σύνολο Παραδειγμάτων	Φορτία	Πλοία
1	DS_FUN_C8_V3	5	8	3
2	DS_FUN_C11_V4	5	11	4
3	DS_FUN_C13_V5	5	13	5
4	DS_FUN_C16_V6	5	16	6
5	DS_FUN_C17_V13	5	17	13
6	DS_FUN_C20_V6	5	20	6
7	DS_FUN_C25_V7	5	25	7
8	DS_FUN_C35_V13	5	35	13
9	DS_FUN_C50_V20	5	50	20
10	DS_FUN_C70_V30	5	70	30
11	DS_FUN_C90_V40	5	90	40
12	DS_FUN_C100_V50	5	100	50

Στην επιστημονική βιβλιογραφία παρατηρείται περιορισμένος αριθμός αλγόριθμων επίλυσης για το πρόβλημα ITSRS. Χαρακτηριστικά, εντοπίζονται οι δύο μεθόδευτικοί αλγόριθμοι από τις εργασίες των Hemmati et al.[105, 106] και Homsi et al.[113]. Μαζί με τους τέσσερις προτεινόμενους αλγόριθμους ακολουθούν οι μέθοδοι επίλυσης:

- Adaptive Large Neighbourhood Search - ANLS
- Hybrid Genetic Search - HGS
- Particle Swarm Optimization - PSO
- Artificial Bee Colony - ABC
- Firefly Algorithm - FA
- Monarch Butterfly Optimization - MBO

Οι Πίνακες των αποτελεσμάτων 5.2, 5.3, 5.4, και 5.5 οργανώνονται σε επτά, δεκα, έξι και έξι στήλες αντίστοιχα. Οι δύο πρώτες αντιστοιχούν στο όνομα του παραδείγματος (#) και στην βέλτιστη τιμή στην βιβλιογραφία (*BKS*). Στις στήλες τους παρουσιάζονται οι αλγόριθμοι από την βιβλιογραφία (*ANLS*, *HGS*) και προτεινόμενοι αλγόριθμοι *PSO*, *ABC*, *FA*, *MBO* μαζί με την απόκλιση (%) από την βέλτιστη τιμή, τη μέση τιμή ( $\overline{x\%}$ ) και το μέσο χρόνο υπολογισμού ( $T_{sec}$ ) σε δευτερόλεπτα.

### 5.7.1 Σύγκριση αποτελεσμάτων με την βιβλιογραφία

Οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι της παρούσας διδακτορικής διατριβής εφαρμόζονται στο πρόβλημα βιομηχανικής και ελεύθερης δρομολόγησης πλοίων (ITSRSP) και οι αποδόσεις τους συγκρίνονται με τις αποτελεσματικότερες μεθόδους από την επιστημονική βιβλιογραφία. Κατά τη διάρκεια διεξαγωγής της πειραματικής διαδικασίας, οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι εφαρμόστηκαν ξεχωριστά σε όλα τα παράδειγμα και εκτελέστηκε δέκα φορές σε καθένα από αυτά. Συγχρόνως, μαζί με τα ληφθέντα αποτελέσματα υπολογίζονται οι χρόνοι υπολογισμού και η απόκλιση από τις βέλτιστες τιμές για κάθε παράδειγμα. Συνολικά, πραγματοποιήθηκαν 2400 ( $4 \times 60 \times 10$ ) πειράματα από τους συγκεκριμένους αλγόριθμους επίλυσης. Για την παροχή εφικτών λύσεων σε ρεαλιστικό υπολογιστικό χρόνο συντελεί η επιλογή των κατάλληλων τιμών για τις μεταβλητές του αλγορίθμου. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές τιμές σε διάφορες μεταβλητές, όπως ο αριθμός των λύσεων του προβλήματος, οι παράμετροι  $c_1, c_2$  των μαθηματικών εξισώσεων του PSO, η μεταβλητή  $\phi$  στον ABC, οι παράμετροι  $\beta, \gamma$  του FA και ο τελεστής μετανάστευσης  $p$  στον MBO. Χαρακτηριστικά, ο μεγάλος αριθμός πληθυσμού λύσεων και οι ακραίες τιμές για τις υπόλοιπες παραμέτρους επηρεάζουν αρνητικά την συνολική απόδοση των αλγορίθμων. Συγκεκριμένα, ένας μεγάλος πληθυσμός (π.χ. πάνω από 20 λύσεις) επιβραδυντικά στην ολοκλήρωση των βασικών αλγοριθμικών λειτουργιών, καθώς απαιτείται πρόσθετος υπολογιστικός χρόνος για την εκτέλεση τους. Συνεπώς, κατά την πειραματική διαδικασία οι ιδανικές τιμές για τον πληθυσμό των λύσεων θεωρήθηκαν οι τιμές 10 και 15 ως οι συνολικές λύσεις του προβλήματος ανάλογα με το μέγεθος των παραδειγμάτων. Επιπρόσθετα, οι προβληματικές τιμές των μεταβλητών των αλγορίθμων μειώνουν την πιθανότητα εύρεσης μιας ποιοτικής λύσης. Ενδεικτικά, οι τιμές 0.1 ή 0.9 για τις παραμέτρους  $c_1, c_2$  βοηθούν στη σύγκλιση του PSO σε κάποια τοπικά ελάχιστα στη λύση μετά από ελάχιστο αριθμό επαναλήψεων. Επομένως, το επικρατέστερο εύρος τιμών για τις παραμέτρους των προτεινόμενων αλγορίθμων κυμάνθηκε από 0.4 έως 0.6 ( $[0.4, 0.6]$ ). Τα ληφθέντα αποτελέσματα παρατείνονται στους Πίνακες 5.2, 5.3, 5.4 και 5.5. Επιπρόσθετα, τα γενικά στατιστικά στοιχεία για κάθε μέθοδο επίλυσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.6, στον οποίον στις στήλες του αναγράφονται τα ονόματα των παραδειγμάτων (#), η μέση απόκλιση από τις βέλτιστες τιμές (%) και μέσος χρόνος υπολογισμού ( $T_{min}$ ) σε λεπτά.

## Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (PSO) στο πρόβλημα βιομηχανικής και ελεύθερης δρομολόγησης πλοίων κατατάσσεται τρίτος ως προς την απόδοση και έκτος ως προς τον υπολογιστικό χρόνο εκτέλεσης σε σχέση με τους υπόλοιπους προτεινόμενους αλγορίθμους και αυτούς της επιστημονικής βιβλιογραφίας. Πιο συγκεκριμένα, η συνολική μέση απόδοση του υπολογίζεται στο 1,84% από τις βέλτιστες λύσεις του προβλήματος και ο μέσος χρόνος υπολογισμού τους καταγράφεται σε 0,72 λεπτά.

Στα πρώτα τρία σύνολα παραδειγμάτων με 8,11 και 13 φορτία, ο προτεινόμενος αλγόριθμος PSO επιτυγχάνει όλα τα βέλτιστα αποτελέσματα σε καθένα από τα δεκαπέντε (15) παραδείγματα. Ο μέσος χρόνος εκτέλεσης για τα σύνολα παραδειγμάτων με 8 και 13 φορτία αποτελεί από τους ταχύτερους σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους με τιμή 0,01 σε λεπτά. Ο βραδύτερος χρόνος υπολογισμού παρατηρείται στο τρίτο παράδειγμα με έντεκα φορτία (11) και πέντε (4) πλοία και υπολογίζεται στα 4,93 δευτερόλεπτα.

Στα επόμενα τρία σύνολα παραδειγμάτων, ο αλγόριθμος επιτυγχάνει δεκατρία (13) από τα δεκαπέντε (15) βέλτιστα αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, η τιμή στο τρίτο παράδειγμα με δεκαεφτά (17) φορτία και δεκατρία (13) πλοία απέχει μόλις 0,23% από την αντίστοιχη βέλτιστη. Επιπρόσθετα, στο πέμπτο παράδειγμα με είκοσι (20) φορτία και δεκατρία (6) πλοία υπολογίζεται σε 1,14%. Στα 31,34 δευτερόλεπτα καταγράφεται ο μεγαλύτερος χρόνος υπολογισμού και εντοπίζεται στο σύνολο παραδειγμάτων με δεκαεφτά (17) φορτία και δεκατρία (13) πλοία.

Σε δύο από τα τρία σύνολα παραδειγμάτων με τα περισσότερα φορτία (35, 50), η μέση απόκλιση από τα βέλτιστα αποτελέσματα υπολογίζεται άνω του 1%, ενώ μόνο σε αυτό με τα λιγότερα φορτία (20) παραμένει κάτω από το 1%. Και αυτό συμβαίνει στα παραδείγματα με αυξημένο αριθμό πλοίων (13, 20), καθώς η κατάλληλη επιλογή πλοίου για την εξυπηρέτηση των φορτίων καθίσταται πιο συνθήκη. Πιο συγκεκριμένα, διακρίνονται κάποια παραδείγματα, στα οποία οι τιμές τους ξεπερνούν το 2% από τις αντίστοιχες βέλτιστες. Ειδικότερα, στο πέμπτο παράδειγμα με τριαπέντε (35) φορτία και δεκατρία (13) πλοία υπολογίζεται η μέγιστη απόκλιση με 6,68%. Λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητας, ο χρόνος υπολογισμού αυξάνεται για την επίτευξη εφικτών λύσεων. Ενδεικτικά, ο βραδύτερος χρόνος υπολογισμού καταγράφεται στο στα τρίτο παράδειγμα με τριαπέντε (35) φορτία και δεκατρία (13) με 151,34 δευτερόλεπτα.

Στα τελευταία τρία σύνολα παραδειγμάτων παρατηρούνται οι μεγαλύτερες αποκλίσεις από τις βέλτιστες τιμές. Τόσο ο αριθμός των φορτίων, όσο και των πλοίων αυξάνεται σημαντικά καθιστώντας την εξυπηρέτηση όλων των φορτίων αρκετά πιο δύσκολη. Επιπρόσθετα, αυτό διακρίνεται και στους χρόνους υπολογισμού των παραδειγμάτων, καθώς σχεδόν σε όλα ξεπερνούν το ένα λεπτό, ενώ σε κάποια υπερβαίνουν τα δύο λεπτά. Οι

μεγαλύτερες αποκλίσεις από τα βέλτιστα αποτελέσματα παρατηρούνται στα παραδείγματα με ενενήντα (90) και εκατό (100) φορτία. Πιο συγκεκριμένα, το δεύτερο παράδειγμα με ενενήντα (90) φορτία και σαράντα (40) πλοία υπολογίζεται με 7,19% την μεγαλύτερα από όλα τα υπόλοιπα παραδείγματα.

### **Αλγόριθμος Τεχνητής Αποικίας Μελισσών**

Ο αλγόριθμος της τεχνητής αποικίας μελισσών (ABC) βρίσκεται σε τέταρτη θέση ανάμεσα στους προτεινόμενους αλγόριθμους και αυτούς της βιβλιογραφίας αναφορικά με την συνολική απόδοση του, η οποία υπολογίζεται στο 2,34%. Επιπρόσθετα, παρατηρείται από τους πιο γρήγορους στην διαδικασία παραγωγής λύσεων, καθώς είναι τρίτος με μέσο χρόνο υπολογισμού λύσεων τα 0,45 λεπτά.

Για τα πρώτα τρία σύνολα παραδειγμάτων από 8 έως 13 φορτία λαμβάνονται δώδεκα (12) βέλτιστες τιμές από τα δεκαπέντε (15) παραδείγματα με μέση απόκλιση στο 0,25%. Η μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται στο τέταρτο παράδειγμα με δεκατρία (13) φορτία και έξι (6) πλοία και υπολογίζεται 2,46% με χρόνο υπολογισμού στα 5,35 δευτερόλεπτα. Στο ίδιο σύνολο αλλά στο δεύτερο παράδειγμα περιέχεται η μεγαλύτερη τιμή χρόνου υπολογισμού με 5,56 δευτερόλεπτα.

Στα επόμενα τρία σύνολα παραδειγμάτων επιτυγχάνονται έξι (6) βέλτιστα αποτελέσματα από τα συνολικά δεκαπέντε (15). Ωστόσο, παρατηρείται ότι, η μέση απόκλιση δεν ξεπερνά το 0,35%, καθώς οι αποκλίσεις των τιμών σε κάποια παραδείγματα υπολογίζεται κάτω από 0,25% αντίστοιχες βέλτιστες. Επιπλέον, η μεγαλύτερη απόκλιση βρίσκεται στο δεύτερο παράδειγμα με είκοσι (20) φορτία και έξι (6) πλοία με τιμή 2,18%, η οποία είναι μικρότερη από την αντίστοιχη μεγαλύτερη (2,46%) των τριών προηγούμενων συνόλων παραδειγμάτων.

Σε αυτά τα τρία σύνολα παραδειγμάτων με 25, 35 και 50 φορτία αυξάνεται η πολυπλοκότητα του προβλήματος με αποτέλεσμα την αδυναμία λήψης πολλών βέλτιστων αποτελεσμάτων. Χαρακτηριστικά, η δυσκολία λήψης ποιοτικών τιμών διακρίνεται στο πέμπτο παράδειγμα με τριανταπέντε (35) φορτία και δεκατρία (13) πλοία με 7,30% απόκλιση από τις βέλτιστες τιμές. Αντιθέτως, το βέλτιστο αποτέλεσμα βρίσκεται στο τέταρτο παράδειγμα με εικοσιπέντε (25) φορτία και επτά (7) πλοία και υπολογίζεται στα 28,71 δευτερόλεπτα. Επιπρόσθετα, η αμέσως ποιοτικότερη τιμή επιτυγχάνεται στο τέταρτο παράδειγμα με πενήντα (50) φορτία και είκοσι (20) πλοία και με χρόνο υπολογισμού του στα 41,52 δευτερόλεπτα.

Στα σύνολο παραδειγμάτων με τα περισσότερα φορτία και πλοία παρατηρούνται οι μεγαλύτερες αποκλίσεις από τις βέλτιστες τιμές. Αντίθετα, η μέση διάρκεια λήψης των αποτελεσμάτων στα παραδείγματα με την μεγαλύτερη πολυπλοκότητα υπολογίζε-

ται στα 64,95 δευτερόλεπτα. Το γεγονός αυτό παρατηρείται, καθώς οι περισσότερες τιμές λαμβάνονται σε υπολογιστικό χρόνο κάτω του ενός λεπτού, ενώ μόνο στο τέταρτο παράδειγμα με εκατό (100) φορτία και πενήντα (50) πλοία ξεπερνά το ενάμιση λεπτό. Επιπρόσθετα, η μεγαλύτερη απόκλιση από τις βέλτιστες τιμές υπολογίζεται στο 11,56% και βρίσκεται στο δεύτερο παράδειγμα με ενενήντα (90) φορτία και σαράντα (0) πλοία.

### **Αλγόριθμος Πυγολαμπίδας**

Ο αλγόριθμος πυγολαμπίδας (FA) ανέρχεται πέμπτος με κριτήριο την απόδοση του στο ITS-RSP σε σχέση με τους προτεινόμενους αλγόριθμους και αυτούς της επιστημονικής βιβλιογραφίας. Πιο συγκεκριμένα, η συνολική απόκλιση από τις βέλτιστες τιμές βρίσκεται στο 2,43%, η οποία τον καθιστά τρίτο ανάμεσα στους προτεινόμενους αλγόριθμους στην συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή. Επιπρόσθετα, παρατηρείται ως η πιο γρήγορη στην λήψη αποτελεσμάτων από τις υπόλοιπες μεθόδους, καθώς ο συνολικός μέσος χρόνος υπολογισμού αυτών υπολογίζεται μόλις 0,26 λεπτά.

Ο αλγόριθμος στα πρώτα τρία σύνολα παραδειγμάτων με την μικρότερη υπολογιστική πολυπλοκότητα επιτυγχάνει δεκατρείς (13) βέλτιστες τιμές στα δεκαπέντε (15) συνολικά παραδείγματα. Με 1,20% και 0,13% υπολογίζονται οι αποκλίσεις από τα βέλτιστα αποτελέσματα στο δεύτερο και το τέταρτο παράδειγμα με έντεκα (11) φορτία και τέσσερα (4) πλοία. Η μέση απόκλιση για αυτά τα τρία σύνολα παραδειγμάτων είναι 0,10%.

Στα επόμενα τρία σύνολα παραδειγμάτων με 16,17 και 20 φορτία επιτυγχάνονται πέντε (5) βέλτιστα αποτελέσματα στα δεκαπέντε (15) συνολικά παραδείγματα. Ειδικότερα παρατηρείται ότι, οι υπόλοιπες ληφθείσες τιμές δεν ξεπερνούν το 1% σε απόκλιση από τις αντίστοιχες βέλτιστες παρά μόνο σε δύο περιπτώσεις. Χαρακτηριστικά, οι αποκλίσεις στο δεύτερο και στο πέμπτο παράδειγμα με είκοσι (20) φορτία και έξι (6) πλοία υπολογίζονται με 2,13% και 1,14% αντίστοιχα.

Τα σύνολα παραδειγμάτων από 25 έως 50 φορτία διακρίνονται με αυξημένη πολυπλοκότητα, καθώς παρατηρείται διακύμανση στις τιμές των αποτελεσμάτων. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος παράγει ποιοτικές λύσεις αλλά όχι τις βέλτιστες. Πιο συγκεκριμένα, η ποιοτικότερη λύση παρουσιάζεται στο τέταρτο παράδειγμα με είκοσιπεντε (25) φορτία και επτά (7) πλοία με μόλις 0,09%. Αντίθετα, η μεγαλύτερη απόκλιση βρίσκεται στο πέμπτο παράδειγμα με τριάνταπεντε (35) φορτία και δεκατρία (13) πλοία με το υψηλό ποσοστό του 7,96%. Η μέση απόκλιση των αποτελεσμάτων από τις βέλτιστες τιμές υπολογίζεται στο 2,72%.

Στα τρία τελευταία σύνολα παραδειγμάτων με 70,90 και 100 φορτία παρατηρούνται οι μεγαλύτερες αποκλίσεις από τις βέλτιστες τιμές στα ληφθέντα αποτελέσματα του προτεινόμενου αλγόριθμου. Χαρακτηριστικά, μέση απόκλιση των τιμών του αλγόριθμου υπο-

λογίζεται στο 6,57%, ενώ ο μέσος χρόνος υπολογισμού δεν ξεπερνά τα 35 δευτερόλεπτα. Όπως και στον προτεινόμενο αλγόριθμο ABC, η μεγαλύτερη απόκλιση παρουσιάζεται στο ίδιο παράδειγμα με τη διαφορά ότι, στον FA υπολογίζεται ελαφρώς χαμηλότερη με 10,56%.

### **Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Πεταλούδας Μονάρχη**

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης πεταλούδας μονάρχη (MBO) καταλαμβάνει την έκτη θέση αναφορικά με την συνολική απόδοση του στα προβλήματα δρομολόγησης πλοίων, η οποία υπολογίζεται στο 2,68%. Ανάμεσα στους προτεινόμενους αλγόριθμους κατατάσσεται τέταρτος, καθώς σε αυτόν παρατηρούνται οι περισσότερες και μεγαλύτερες αποκλίσεις από τις βέλτιστες τιμές. Αναφορικά με τον χρόνο εκτέλεσης καταλαμβάνει την τέταρτη θέση ανάμεσα σε όλες τις μεθόδους, καθώς ο μέσος χρόνος υπολογισμού είναι 0,49 λεπτά.

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος στα σύνολα παραδειγμάτων με 8,11 και 13 φορτία λαμβάνει δώδεκα (12) βέλτιστες τιμές σε δεκαπέντε (15) διαφορετικά παραδείγματα. Ενδεικτικά, η μεγαλύτερη απόκλιση των αποτελεσμάτων παρουσιάζεται στο τέταρτο παράδειγμα με δεκατρία (13) φορτία και έξι (6) πλοία και υπολογίζεται 2,46% με χρόνο υπολογισμού στα 6,97 δευτερόλεπτα.

Στα δεύτερα σύνολα παραδειγμάτων από 16 έως 20 φορτία επιτυγχάνονται λιγότερα βέλτιστα αποτελέσματα από ότι στα προηγούμενα. Πιο συγκεκριμένα, ο προτεινόμενος αλγόριθμος λαμβάνει βέλτιστες τιμές σε τέσσερα (4) από τα δεκαπέντε (15) συνολικά παραδείγματα. Επιπρόσθετα, η μέση απόκλιση παρατηρείται αρκετά χαμηλή και υπολογίζεται στο 0,48%. Η μεγαλύτερη απόκλιση βρίσκεται στο δεύτερο παράδειγμα με είκοσι (20) φορτία και έξι (6) πλοία με 2,18%.

Στα επόμενα τρία σύνολα παραδειγμάτων παρατηρείται αύξηση των αποκλίσεων των ληφθέντα αποτελεσμάτων από τις βέλτιστες τιμές. Αυτό θεωρείται φυσιολογικό, καθώς τα συγκεκριμένα παραδείγματα διακρίνονται από αυξημένη πολυπλοκότητα εξαιτίας του μεγάλου πλήθους των φορτίων και των πλοίων. Χαρακτηριστικά, η μέση απόκλιση υπολογίζεται στο 3,11%, η οποία θεωρείται αρκετά χαμηλή σε σχέση με κάποια παραδείγματα, των οποίων οι τιμές τους υπερβαίνουν το 4%. Ενδεικτικά, η μεγαλύτερη απόκλιση παρουσιάζεται στο πέμπτο παράδειγμα με τριάνταπέντε (35) φορτία και δεκατρία (13) πλοία με 10,27%.

Όπως και στους τρεις προηγούμενους προτεινόμενους αλγόριθμους, οι ληφθείσες τιμές για τα παραδείγματα των τριών τελευταίων συνόλων παρουσιάζουν με τις μεγαλύτερες αποκλίσεις από τα βέλτιστα αποτελέσματα. Σε αυτά τα σύνολα παραδειγμάτων παρατηρούνται αποκλίσεις στα αποτελέσματα μεγαλύτερες του 10% σε παραπάνω από

ένα παράδειγμα σε αντίθεση με τους άλλους τρεις προτεινόμενους αλγόριθμους. Η διακύμανση των αποτελεσμάτων διακρίνεται από την μέση απόκλιση και τον μέσο χρόνο υπολογισμού, οι οποίοι υπολογίζονται σε 6,88% και 61,91 δευτερόλεπτα.

### **Γενικά Συμπεράσματα**

Για την εφικτή αντιμετώπιση του προβλήματος ITSRSΡ αναπτύχθηκαν τέσσερις αλγόριθμοι βελτιστοποίησης νοημοσύνης σμήνους. Σε αντίθεση με τις άλλες δύο μεθοδολογίες επίλυσης της βιβλιογραφίας, οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι στηρίζεται σε διαδικασίες παραγωγής συνεχών λύσεων. Για αυτό το λόγο υλοποιήθηκαν οι κατάλληλες τεχνικές διακριτοποίησης αυτών για την επιτυχή εφαρμογή τους στα διακριτά προβλήματα δρομολόγησης πλοίων. Η επίτευξη της βέλτιστης λύσης απαιτεί την εξυπηρέτηση όλων των φορτίων από κάποιο πλοίο το στόλου. Ωστόσο, παρατηρείται διακύμανση στις απόδοσεις των αλγορίθμων ανάλογα με το μέγεθος των παραδειγμάτων. Αυτό συμβαίνει διότι, εξαιτίας των σύνθετων περιορισμών (π.χ. χρονικά παράθυρα, επιλεκτική εξυπηρέτηση) καθίσταται δυσκολότερη η εξυπηρέτηση όλων των φορτίων με αποτέλεσμα την πρόσθεση των ποινών στο συνολικό κόστος. Συνεπώς, κρίθηκε απαραίτητη η υλοποίηση της φάσης ενίσχυσης για την αντιμετώπιση αυτής της προβληματικής κατάστασης. Η επίτευξη των βέλτιστων αποτελεσμάτων στα παραδείγματα με μικρό πλήθος δεδομένων και η παροχή ποιοτικών τιμών στα αντίστοιχα με μεγάλο πλήθος δεδομένων ανέδειξε την αναγκαιότητα και την σημαντικότητα της διαδικασίας της ενίσχυσης. Συνολικά, η εφαρμογή των προτεινόμενων αλγορίθμων σε αυτό το είδος προβλημάτων θεωρείται απολύτως ικανοποιητική και βεβαίως υπάρχουν πολλά περιθώρια βελτίωσης για την ενίσχυση των αποδόσεων τους.



Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα DEEP SEA

#	BKS	ANLS	HGS	PSO	%	$\bar{x}_{\%}$	$T_{sec}$
DEEPSEA_FUN_C8_V3.HE.1	9584863	9584863	9584863	9584863	0,00%	0,00%	0,00
DEEPSEA_FUN_C8_V3.HE.2	9369654	9369654	9369654	9369654	0,00%	0,00%	0,00
DEEPSEA_FUN_C8_V3.HE.3	4596681	4596681	4596681	4596681	0,00%	0,00%	0,14
DEEPSEA_FUN_C8_V3.HE.4	6899730	6899730	6899730	6899730	0,00%	0,00%	0,00
DEEPSEA_FUN_C8_V3.HE.5	6815253	6815253	6815253	6815253	0,00%	0,00%	0,20
DEEPSEA_FUN_C11_V4.HE.1	34854819	34854819	34854819	34854819	0,00%	0,00%	0,00
DEEPSEA_FUN_C11_V4.HE.2	25454434	25454434	25454434	25454434	0,00%	0,00%	3,30
DEEPSEA_FUN_C11_V4.HE.3	29627143	29627143	29627143	29627143	0,00%	0,00%	4,93
DEEPSEA_FUN_C11_V4.HE.4	33111680	33111680	33111680	33111680	0,00%	0,00%	0,52
DEEPSEA_FUN_C11_V4.HE.5	28175914	28175914	28175914	28175914	0,00%	0,00%	0,23
DEEPSEA_FUN_C13_V5.HE.1	11629005	11629005	11629005	11629005	0,00%	0,00%	0,87
DEEPSEA_FUN_C13_V5.HE.2	11820655	11820655	11820655	11820655	0,00%	0,00%	0,23
DEEPSEA_FUN_C13_V5.HE.3	9992593	9992593	9992593	9992593	0,00%	0,00%	0,55
DEEPSEA_FUN_C13_V5.HE.4	12819619	12819619	12819619	12819619	0,00%	0,00%	0,90
DEEPSEA_FUN_C13_V5.HE.5	10534892	10534892	10534892	10534892	0,00%	0,00%	0,36
DEEPSEA_FUN_C16_V6.HE.1	51127590	51127590	51127590	51127590	0,00%	0,00%	6,34
DEEPSEA_FUN_C16_V6.HE.2	44342796	44342796	44342796	44342796	0,00%	0,00%	0,94
DEEPSEA_FUN_C16_V6.HE.3	45391842	45391842	45391842	45391842	0,00%	0,00%	0,29
DEEPSEA_FUN_C16_V6.HE.4	39687114	39687114	39687114	39687114	0,00%	0,00%	4,45
DEEPSEA_FUN_C16_V6.HE.5	42855603	42855603	42855603	42855603	0,00%	0,00%	5,42
DEEPSEA_FUN_C17_V13.HE.1	17316720	17316720	17316720	17316720	0,00%	0,00%	17,83
DEEPSEA_FUN_C17_V13.HE.2	12194861	12194861	12194861	12194861	0,00%	0,00%	31,34
DEEPSEA_FUN_C17_V13.HE.3	12091554	12091554	12091554	12119704	0,23%	0,23%	27,43
DEEPSEA_FUN_C17_V13.HE.4	12847653	12847653	12847653	12847653	0,00%	0,00%	20,88
DEEPSEA_FUN_C17_V13.HE.5	13213406	13213406	13213406	13213406	0,00%	0,00%	22,09
DEEPSEA_FUN_C20_V6.HE.1	16406738	16406738	16406738	16406738	0,00%	0,00%	17,05
DEEPSEA_FUN_C20_V6.HE.2	16079401	16079401	16079401	16079401	0,00%	0,00%	6,72
DEEPSEA_FUN_C20_V6.HE.3	17342200	17342200	17342200	17342200	0,00%	0,00%	1,17
DEEPSEA_FUN_C20_V6.HE.4	16529748	16529748	16529748	16529748	0,00%	0,00%	15,80
DEEPSEA_FUN_C20_V6.HE.5	17449378	17449378	17449378	17648163	1,14%	1,14%	5,12
DEEPSEA_FUN_C25_V7.HE.1	22773158	22773158	22773158	22773158	0,00%	0,00%	7,24
DEEPSEA_FUN_C25_V7.HE.2	20206329	20206329	20206329	20206329	0,00%	0,00%	41,39
DEEPSEA_FUN_C25_V7.HE.3	19108952	19108952	19108952	19108952	0,00%	0,00%	10,06
DEEPSEA_FUN_C25_V7.HE.4	22668675	22668675	22668675	22668675	0,00%	0,00%	10,41
DEEPSEA_FUN_C25_V7.HE.5	23036603	23036603	23036603	23474362	1,90%	3,58%	8,58
DEEPSEA_FUN_C35_V13.HE.1	86951609	86951609	86951609	90031391	3,54%	5,18%	83,74
DEEPSEA_FUN_C35_V13.HE.2	83422071	83422071	83422071	85899158	2,97%	4,08%	111,89
DEEPSEA_FUN_C35_V13.HE.3	83898591	83898591	83898591	88187646	5,11%	7,80%	151,34
DEEPSEA_FUN_C35_V13.HE.4	91970481	91970481	91970481	96468791	4,89%	6,57%	33,11
DEEPSEA_FUN_C35_V13.HE.5	91123040	91130154	91123040	97394320	6,88%	9,62%	78,16
DEEPSEA_FUN_C50_V20.HE.1	41310946	41398100	41310946	41988576	1,64%	2,43%	53,94
DEEPSEA_FUN_C50_V20.HE.2	37784994	37872273	37784994	38311676	1,39%	4,10%	113,82
DEEPSEA_FUN_C50_V20.HE.3	39841724	39916853	39841724	40372174	1,33%	2,83%	78,02
DEEPSEA_FUN_C50_V20.HE.4	43941098	43941098	43941098	44235878	0,67%	1,84%	78,48
DEEPSEA_FUN_C50_V20.HE.5	41947437	41971890	41947437	42449467	1,20%	3,70%	92,56
DEEPSEA_FUN_C70_V30.HE.1	142679953	142923793	142679953	151841749	6,42%	7,51%	77,46
DEEPSEA_FUN_C70_V30.HE.2	135031988	135766719	135031988	140853270	4,31%	7,14%	68,01
DEEPSEA_FUN_C70_V30.HE.3	162759203	162903901	162759203	166359440	2,21%	3,34%	59,47
DEEPSEA_FUN_C70_V30.HE.4	155855123	156541043	155855123	164141399	5,32%	6,80%	67,05
DEEPSEA_FUN_C70_V30.HE.5	156557723	157037323	156557723	162040865	3,50%	4,71%	63,68
DEEPSEA_FUN_C90_V40.HE.1	190627186	191675120	190627186	196733405	3,20%	3,96%	79,65
DEEPSEA_FUN_C90_V40.HE.2	189770977	191143649	189770977	203407060	7,19%	10,72%	88,97
DEEPSEA_FUN_C90_V40.HE.3	211038412	212152967	211038412	225678120	6,94%	8,83%	72,75
DEEPSEA_FUN_C90_V40.HE.4	210449287	211046180	210449287	215546400	2,42%	4,01%	97,12
DEEPSEA_FUN_C90_V40.HE.5	197804917	198625224	197804917	211374061	6,86%	8,65%	116,74
DEEPSEA_FUN_C100_V50.HE.1	205826535	207105715	205826535	216102072	4,99%	6,48%	132,83
DEEPSEA_FUN_C100_V50.HE.2	207809147	208540820	207809147	222518309	7,08%	8,57%	128,13
DEEPSEA_FUN_C100_V50.HE.3	217000928	218438412	217000928	230479185	6,21%	8,06%	233,08
DEEPSEA_FUN_C100_V50.HE.4	220879632	221248187	220879632	236545596	7,09%	7,39%	103,09

Πίνακας 5.3: Αποτελέσματα DEEP SEA (Συνέχεια)

#	BKS	ABC	%	$\overline{x\%}$	$T_{sec}$	FA	%	$\overline{x\%}$	$T_{sec}$
DEEPSEA_FUN_C8.V3.HE.1	9584863	9584863	0,00%	0,00%	0,00	9584863	0,00%	0,00%	0,00
DEEPSEA_FUN_C8.V3.HE.2	9369654	9369654	0,00%	6,29%	3,26	9369654	0,00%	0,00%	0,00
DEEPSEA_FUN_C8.V3.HE.3	4596681	4596681	0,00%	0,00%	2,74	4596681	0,00%	0,00%	0,00
DEEPSEA_FUN_C8.V3.HE.4	6899730	6899730	0,00%	0,00%	0,48	6899730	0,00%	0,00%	0,00
DEEPSEA_FUN_C8.V3.HE.5	6815253	6815253	0,00%	16,98%	1,45	6815253	0,00%	8,49%	2,43
DEEPSEA_FUN_C11.V4.HE.1	34854819	34854819	0,00%	0,00%	2,61	34854819	0,00%	0,00%	3,82
DEEPSEA_FUN_C11.V4.HE.2	25454434	25759174	1,20%	1,21%	4,74	25759174	1,20%	1,86%	5,68
DEEPSEA_FUN_C11.V4.HE.3	29627143	29627143	0,00%	0,16%	3,02	29627143	0,00%	0,00%	4,37
DEEPSEA_FUN_C11.V4.HE.4	33111680	33156278	0,13%	0,13%	4,32	33156278	0,13%	0,13%	4,71
DEEPSEA_FUN_C11.V4.HE.5	28175914	28175914	0,00%	0,00%	2,28	28175914	0,00%	0,00%	4,98
DEEPSEA_FUN_C13.V5.HE.1	11629005	11629005	0,00%	0,00%	5,17	11629005	0,00%	0,16%	6,17
DEEPSEA_FUN_C13.V5.HE.2	11820655	11820655	0,00%	0,00%	5,56	11820655	0,00%	0,00%	5,20
DEEPSEA_FUN_C13.V5.HE.3	9992593	9992593	0,00%	0,00%	4,41	9992593	0,00%	0,00%	5,73
DEEPSEA_FUN_C13.V5.HE.4	12819619	13135553	2,46%	2,59%	5,35	12819619	0,00%	1,48%	5,96
DEEPSEA_FUN_C13.V5.HE.5	10534892	10534892	0,00%	0,00%	4,37	10534892	0,00%	0,00%	8,47
DEEPSEA_FUN_C16.V6.HE.1	51127590	51155888	0,06%	0,48%	5,96	51155888	0,06%	0,06%	7,22
DEEPSEA_FUN_C16.V6.HE.2	44342796	44342796	0,00%	0,02%	6,03	44342796	0,00%	0,00%	7,62
DEEPSEA_FUN_C16.V6.HE.3	45391842	45391842	0,00%	0,00%	5,66	45391842	0,00%	0,00%	7,26
DEEPSEA_FUN_C16.V6.HE.4	39687114	40037355	0,88%	4,38%	6,82	40037355	0,88%	0,90%	6,56
DEEPSEA_FUN_C16.V6.HE.5	42855603	42855603	0,00%	0,00%	7,4	42855603	0,00%	0,00%	6,68
DEEPSEA_FUN_C17.V13.HE.1	17316720	17316720	0,00%	0,09%	7,22	17357939	0,24%	0,48%	6,19
DEEPSEA_FUN_C17.V13.HE.2	12194861	12217022	0,18%	0,77%	5,69	12217022	0,18%	0,58%	5,56
DEEPSEA_FUN_C17.V13.HE.3	12091554	12119704	0,23%	0,27%	6,74	12119704	0,23%	0,56%	6,94
DEEPSEA_FUN_C17.V13.HE.4	12847653	12870749	0,18%	0,23%	6,48	12870749	0,18%	0,18%	8,24
DEEPSEA_FUN_C17.V13.HE.5	13213406	13213406	0,00%	0,06%	8,11	13213406	0,00%	0,03%	14,26
DEEPSEA_FUN_C20.V6.HE.1	16406738	16406738	0,00%	0,01%	12,21	16406738	0,00%	0,06%	13,99
DEEPSEA_FUN_C20.V6.HE.2	16079401	16430698	2,18%	2,19%	16,58	16421246	2,13%	2,16%	11,76
DEEPSEA_FUN_C20.V6.HE.3	17342200	17347580	0,03%	1,43%	21,23	17347879	0,03%	0,71%	16,54
DEEPSEA_FUN_C20.V6.HE.4	16529748	16567870	0,23%	0,57%	20,62	16531759	0,01%	0,13%	13,82
DEEPSEA_FUN_C20.V6.HE.5	17449378	17648163	1,14%	1,52%	19,21	17648163	1,14%	1,14%	10,8
DEEPSEA_FUN_C25.V7.HE.1	22773158	22807397	0,15%	0,34%	22,97	22817119	0,19%	0,30%	15,52
DEEPSEA_FUN_C25.V7.HE.2	20206329	20378920	0,85%	2,99%	23,01	20377734	0,85%	1,55%	11,42
DEEPSEA_FUN_C25.V7.HE.3	19108952	19189469	0,42%	0,52%	22,08	19197364	0,46%	1,26%	10,31
DEEPSEA_FUN_C25.V7.HE.4	22668675	22668675	0,00%	0,16%	28,71	22688320	0,09%	0,21%	20,08
DEEPSEA_FUN_C25.V7.HE.5	23036603	24019940	4,27%	4,35%	25,11	23922190	3,84%	4,09%	10,87
DEEPSEA_FUN_C35.V13.HE.1	86951609	90042103	3,55%	3,87%	34,89	89804189	3,28%	3,51%	17,54
DEEPSEA_FUN_C35.V13.HE.2	83422071	85899158	2,97%	3,77%	24,51	85939451	3,02%	3,34%	19,32
DEEPSEA_FUN_C35.V13.HE.3	83898591	88306683	5,25%	5,89%	25,93	88090109	5,00%	5,69%	13,45
DEEPSEA_FUN_C35.V13.HE.4	91970481	96426557	4,85%	5,42%	32,07	96462579	4,88%	4,98%	16,5
DEEPSEA_FUN_C35.V13.HE.5	91123040	97778674	7,30%	7,88%	38,51	98374738	7,96%	8,42%	17,83
DEEPSEA_FUN_C50.V20.HE.1	41310946	42071550	1,84%	2,13%	40,48	42205259	2,16%	2,28%	21,48
DEEPSEA_FUN_C50.V20.HE.2	37784994	38880391	2,90%	3,15%	38,73	39120194	3,53%	3,77%	17,18
DEEPSEA_FUN_C50.V20.HE.3	39841724	40770528	2,33%	2,73%	27,56	40781979	2,36%	2,41%	19,84
DEEPSEA_FUN_C50.V20.HE.4	43941098	44183525	0,55%	0,84%	41,52	44366239	0,97%	1,75%	17,92
DEEPSEA_FUN_C50.V20.HE.5	41947437	42779231	1,98%	2,40%	30,56	42880987	2,23%	2,66%	23,19
DEEPSEA_FUN_C70.V30.HE.1	142679953	152784920	7,08%	7,23%	57,08	152635079	6,98%	7,29%	25,57
DEEPSEA_FUN_C70.V30.HE.2	135031988	143873191	6,55%	7,19%	54,62	144838340	7,26%	7,52%	29,42
DEEPSEA_FUN_C70.V30.HE.3	162759203	168420469	3,48%	3,76%	57,29	169515433	4,15%	4,24%	23,29
DEEPSEA_FUN_C70.V30.HE.4	155855123	163610983	4,98%	5,71%	61,29	165165332	5,97%	6,20%	26,99
DEEPSEA_FUN_C70.V30.HE.5	156557723	162347994	3,70%	3,98%	51,16	163259409	4,28%	4,65%	26,26
DEEPSEA_FUN_C90.V40.HE.1	190627186	197900359	3,82%	4,15%	71,1	198990530	4,39%	4,78%	28,87
DEEPSEA_FUN_C90.V40.HE.2	189770977	211707034	11,56%	11,86%	63,15	209815016	10,56%	11,05%	34,69
DEEPSEA_FUN_C90.V40.HE.3	211038412	225426218	6,82%	6,94%	52,24	227771800	7,93%	8,29%	26,93
DEEPSEA_FUN_C90.V40.HE.4	210449287	215938379	2,61%	2,79%	76,93	218420541	3,79%	4,15%	28,62
DEEPSEA_FUN_C90.V40.HE.5	197804917	211274875	6,81%	6,93%	46,35	212186011	7,27%	7,57%	25,11
DEEPSEA_FUN_C100.V50.HE.1	205826535	217442946	5,64%	6,02%	69,08	218843175	6,32%	6,54%	33,68
DEEPSEA_FUN_C100.V50.HE.2	207809147	222798574	7,21%	7,32%	78,36	223190550	7,40%	7,71%	33,86
DEEPSEA_FUN_C100.V50.HE.3	217000928	238676383	9,99%	10,12%	74,48	238412129	9,87%	10,84%	70,97
DEEPSEA_FUN_C100.V50.HE.4	220879632	235852233	6,78%	7,27%	97,7	235982966	6,84%	7,28%	46,84
DEEPSEA_FUN_C100.V50.HE.5	223265017	235574209	5,51%	5,74%	63,44	235485134	5,47%	6,06%	45,75

Πίνακας 5.4: Αποτελέσματα DEEP SEA (Συνέχεια 2)

#	BKS	MBO	%	$\overline{x\%}$	$T_{sec}$
DEEPSEA_FUN_C8_V3_HE_1	9584863	9584863	0,00%	0,00%	0,00
DEEPSEA_FUN_C8_V3_HE_2	9369654	9369654	0,00%	0,00%	0,00
DEEPSEA_FUN_C8_V3_HE_3	4596681	4596681	0,00%	0,00%	0,00
DEEPSEA_FUN_C8_V3_HE_4	6899730	6899730	0,00%	0,00%	0,00
DEEPSEA_FUN_C8_V3_HE_5	6815253	6815253	0,00%	12,74%	2,81
DEEPSEA_FUN_C11_V4_HE_1	34854819	34854819	0,00%	0,00%	3,11
DEEPSEA_FUN_C11_V4_HE_2	25454434	25759174	1,20%	1,21%	4,90
DEEPSEA_FUN_C11_V4_HE_3	29627143	29627143	0,00%	0,00%	5,72
DEEPSEA_FUN_C11_V4_HE_4	33111680	33156278	0,13%	0,13%	5,34
DEEPSEA_FUN_C11_V4_HE_5	28175914	28175914	0,00%	0,00%	5,01
DEEPSEA_FUN_C13_V5_HE_1	11629005	11629005	0,00%	0,00%	9,20
DEEPSEA_FUN_C13_V5_HE_2	11820655	11820655	0,00%	0,00%	7,28
DEEPSEA_FUN_C13_V5_HE_3	9992593	9992593	0,00%	0,00%	6,53
DEEPSEA_FUN_C13_V5_HE_4	12819619	13135553	2,46%	2,46%	6,97
DEEPSEA_FUN_C13_V5_HE_5	10534892	10534892	0,00%	0,00%	11,00
DEEPSEA_FUN_C16_V6_HE_1	51127590	51127590	0,00%	0,05%	8,93
DEEPSEA_FUN_C16_V6_HE_2	44342796	44392103	0,11%	0,30%	11,02
DEEPSEA_FUN_C16_V6_HE_3	45391842	45391842	0,00%	0,00%	9,40
DEEPSEA_FUN_C16_V6_HE_4	39687114	40037355	0,88%	0,92%	10,49
DEEPSEA_FUN_C16_V6_HE_5	42855603	42855603	0,00%	0,49%	8,04
DEEPSEA_FUN_C17_V13_HE_1	17316720	17342474	0,15%	0,70%	7,96
DEEPSEA_FUN_C17_V13_HE_2	12194861	12321198	1,04%	1,15%	7,22
DEEPSEA_FUN_C17_V13_HE_3	12091554	12128731	0,31%	0,74%	9,06
DEEPSEA_FUN_C17_V13_HE_4	12847653	12870749	0,18%	0,25%	14,42
DEEPSEA_FUN_C17_V13_HE_5	13213406	13213513	0,00%	0,19%	21,14
DEEPSEA_FUN_C20_V6_HE_1	16406738	16408866	0,01%	0,05%	23,74
DEEPSEA_FUN_C20_V6_HE_2	16079401	16430008	2,18%	2,54%	14,38
DEEPSEA_FUN_C20_V6_HE_3	17342200	17543205	1,16%	1,32%	26,37
DEEPSEA_FUN_C20_V6_HE_4	16529748	16531759	0,01%	0,80%	24,43
DEEPSEA_FUN_C20_V6_HE_5	17449378	17648163	1,14%	1,40%	23,6
DEEPSEA_FUN_C25_V7_HE_1	22773158	22841339	0,30%	0,46%	30,75
DEEPSEA_FUN_C25_V7_HE_2	20206329	20377734	0,85%	2,77%	29,53
DEEPSEA_FUN_C25_V7_HE_3	19108952	19187261	0,41%	1,31%	27,86
DEEPSEA_FUN_C25_V7_HE_4	22668675	22681859	0,06%	0,14%	26,64
DEEPSEA_FUN_C25_V7_HE_5	23036603	23922190	3,84%	4,09%	28,65
DEEPSEA_FUN_C35_V13_HE_1	86951609	90622197	4,22%	4,73%	41,82
DEEPSEA_FUN_C35_V13_HE_2	83422071	86312125	3,46%	4,68%	36,8
DEEPSEA_FUN_C35_V13_HE_3	83898591	88883142	5,94%	6,73%	38,44
DEEPSEA_FUN_C35_V13_HE_4	91970481	96754602	5,20%	5,63%	43,18
DEEPSEA_FUN_C35_V13_HE_5	91123040	100478609	10,27%	10,77%	43,71
DEEPSEA_FUN_C50_V20_HE_1	41310946	42288899	2,37%	3,00%	46,13
DEEPSEA_FUN_C50_V20_HE_2	37784994	38771028	2,61%	3,33%	39,19
DEEPSEA_FUN_C50_V20_HE_3	39841724	40993213	2,89%	3,63%	38,1
DEEPSEA_FUN_C50_V20_HE_4	43941098	44720770	1,77%	1,85%	38,29
DEEPSEA_FUN_C50_V20_HE_5	41947437	42960049	2,41%	3,52%	40,19
DEEPSEA_FUN_C70_V30_HE_1	142679953	152784920	7,08%	7,08%	59,7
DEEPSEA_FUN_C70_V30_HE_2	135031988	146298072	8,34%	8,58%	84,98
DEEPSEA_FUN_C70_V30_HE_3	162759203	169099776	3,90%	4,23%	47,2
DEEPSEA_FUN_C70_V30_HE_4	155855123	166689846	6,95%	7,51%	61,58
DEEPSEA_FUN_C70_V30_HE_5	156557723	162398671	3,73%	4,80%	60,27

Πίνακας 5.5: Αποτελέσματα DEEP SEA (Συνέχεια 3)

#	<i>BKS</i>	<i>MBO</i>	%	$\overline{x\%}$	$T_{sec}$
DEEPSEA_FUN_C90_V40_HE_1	190627186	201150821	5,52%	5,71%	54,04
DEEPSEA_FUN_C90_V40_HE_2	189770977	211143203	11,26%	12,10%	66,38
DEEPSEA_FUN_C90_V40_HE_3	211038412	226901730	7,52%	8,16%	68,29
DEEPSEA_FUN_C90_V40_HE_4	210449287	217451647	3,33%	4,39%	59,93
DEEPSEA_FUN_C90_V40_HE_5	197804917	213455147	7,91%	8,17%	48,92
DEEPSEA_FUN_C100_V50_HE_1	205826535	218855603	6,33%	6,77%	60,28
DEEPSEA_FUN_C100_V50_HE_2	207809147	224450587	8,01%	8,35%	55,24
DEEPSEA_FUN_C100_V50_HE_3	217000928	239753120	10,48%	11,48%	67,79
DEEPSEA_FUN_C100_V50_HE_4	220879632	237194654	7,39%	7,93%	75,85
DEEPSEA_FUN_C100_V50_HE_5	223265017	235407836	5,44%	5,61%	58,22

Πίνακας 5.6: Συνολικά Αποτελέσματα

#	ANLS		HGS		PSO		ABC		FA		MBO	
	%	$T_{min}$	%	$T_{min}$	%	$T_{min}$	%	$T_{min}$	%	$T_{min}$	%	$T_{min}$
DEEPSEA_FUN_C8_V3	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
DEEPSEA_FUN_C11_V4	0.00	0.05	0.00	0.02	0.00	0.03	0.27	0.05	0.27	0.07	0.27	0.08
DEEPSEA_FUN_C13_V5	0.00	0.06	0.00	0.04	0.00	0.01	0.49	0.08	0.00	0.10	0.49	0.13
DEEPSEA_FUN_C16_V6	0.03	0.10	0.00	0.04	0.00	0.06	0.97	0.10	0.19	0.11	0.35	0.15
DEEPSEA_FUN_C17_V13	0.00	0.13	0.00	0.05	0.05	0.40	0.12	0.11	0.17	0.13	0.33	0.19
DEEPSEA_FUN_C20_V6	0.01	0.16	0.00	0.05	0.23	0.15	0.72	0.29	0.66	0.22	0.90	0.37
DEEPSEA_FUN_C25_V7	0.41	0.26	0.00	0.07	0.38	0.26	1.14	0.40	1.09	0.22	1.09	0.47
DEEPSEA_FUN_C35_V13	1.03	0.59	0.00	0.21	4.68	1.50	4.79	0.51	4.83	0.28	5.82	0.67
DEEPSEA_FUN_C50_V20	0.61	1.41	0.00	0.45	1.25	1.38	1.92	0.59	2.25	0.33	2.41	0.67
DEEPSEA_FUN_C70_V30	0.59	3.55	0.00	1.02	4.35	1.11	5.16	0.93	5.73	0.43	6.00	1.04
DEEPSEA_FUN_C90_V40	1.10	7.01	0.00	2.20	5.32	1.51	6.32	1.03	6.79	0.48	7.11	0.99
DEEPSEA_FUN_C100_V50	1.07	9.85	0.00	3.13	5.88	2.25	7.03	1.27	7.18	0.77	7.53	1.05
Total	0.41	1.93	0.00	0.61	1.84	0.72	2.34	0.45	2.43	0.26	2.68	0.49

## Κεφάλαιο 6

# Επίλογος - Μελλοντική Έρευνα

### 6.1 Συμπεράσματα

Τα προβλήματα της ναυτιλιακής εφοδιαστικής αλυσίδας αποτελούν πρόκληση για την αποτελεσματική επίλυσή τους. Η παρούσα διδακτορική διατριβή εστιάζει στην αντιμετώπισή τους μέσω της ανάπτυξης και υλοποίησης καινοτόμων αλγόριθμων βελτιστοποίησης. Ο σχεδιασμός των προτεινόμενων αλγόριθμων στηρίζεται σε δύο σκέλη. Στο πρώτο ακολουθούν την βασική δομή των αποτελεσματικότερων μεθοδολογιών της επιστημονικής βιβλιογραφίας. Στο δεύτερο τροποποιούνται κατάλληλα για τις ανάγκες των προβλημάτων και εισάγονται καινούργιες τεχνικές βελτιστοποίησης για την εύρεση και παροχή των βέλτιστων λύσεων. Αυτή η στρατηγική οδηγεί στην δημιουργία πέντε νέων αλγόριθμων βελτιστοποίησης οι οποίοι εφαρμόζονται για πρώτη φορά και με ιδιαίτερη επιτυχία στα προβλήματα ελλιμενισμού και δρομολόγησης των πλοίων. Οι πειραματικές διαδικασίες κρίνονται απαιτητικές και επίπονες για τα δύο προβλήματα τόσο από τη συχνότητα των δοκιμών όσο και από την εφαρμογή διαφόρων αλλαγών στις προτεινόμενες μεθόδους. Τα ληφθέντα αποτελέσματα θεωρούνται ικανοποιητικά, αποδεικνύουν την επιτυχημένη εφαρμογή των αλγόριθμων στα συγκεκριμένα προβλήματα βάση της αποτελεσματικότητάς τους και συγκρίνεται η δυναμική τους σε σχέση με άλλες μεθόδους επίλυσης από την βιβλιογραφία. Με την ολοκλήρωση της συγκεκριμένης διατριβής αποδεικνύεται ότι η ανάπτυξη καινοτόμων εργαλείων και μεθόδων, οι οποίες προέρχονται από την τεχνητή νοημοσύνη, συμβάλλουν στην δημιουργία βέλτιστων λύσεων για την ορθή αντιμετώπιση και επίλυση πραγματικών καταστάσεων των επιμέρους προβλημάτων της ναυτιλιακής εφοδιαστικής αλυσίδας.

### 6.1.1 Πρόβλημα Ελλιμενισμού Πλοίων

Στο πρόβλημα ελλιμενισμού των πλοίων υλοποιήθηκαν τέσσερις αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, οι οποίοι εφαρμόστηκαν σε δύο διαφορετικές προσεγγίσεις του προβλήματος αυτού. Η επιτυχημένη εφαρμογή τους στα συγκεκριμένα προβλήματα αποδείχτηκε από την ανάπτυξη και δημιουργία τεσσάρων νέων παραλλαγών των κλασικών λειτουργιών από τους γενετικούς αλγόριθμους, οι οποίοι χρησιμοποιούνται με μεγάλη συχνότητα σε διακριτά προβλήματα βελτιστοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, στις τέσσερις προτεινόμενες μεθοδολογίες αναπτύχθηκαν διαφορετικές γενετικές τεχνικές με στόχο την αντικατάσταση των βασικών λειτουργιών τους κατά την διαδικασία εφαρμογή τους στα συγκεκριμένα προβλήματα. Η καθεμία γενετική τεχνική προσέφερε διαφορετική δυναμική στην διαδικασία παραγωγής νέων λύσεων στους προτεινόμενους αλγόριθμους. Για τον αλγόριθμο των πυγολαμπίδων, το σύστημα κατάταξης για την επιλογή των λύσεων σε συνδυασμό με τον τελεστή της μετάλλαξης συνέβαλαν στην δημιουργία μιας μεθόδου επίλυσης από τις πιο αποδοτικές της βιβλιογραφίας με βάση τα ληφθέντα αποτελέσματα. Αντίστοιχα, ο πολυγονεϊκός τελεστής διασταύρωσης στον αλγόριθμο των μελισσών απέδωσε ιδιαίτερα θετικά με βάση την απόδοσή του. Ο αλγόριθμος των μπάμπουρων συνδύασε τη διασταύρωση και τη μετάλλαξη στην ίδια διαδικασία επίλυσης. Επιπροσθέτως, η ταυτόχρονη εφαρμογή των δύο γενετικών τεχνικών συνέβαλε στην αύξηση της απόδοσης της συγκεκριμένης μεθόδου. Στον αλγόριθμο των πεταλούδων ο ομοιόμορφος τελεστής διασταύρωσης δεν απέδωσε τα αναμενόμενα λόγω της διαδικασίας της τυχαιότητας, η οποία επηρέασε αρνητικά την διαδικασία δημιουργίας των νέων λύσεων και στη συνέχεια την απόδοσή του. Συνολικά οι τέσσερις προτεινόμενες μέθοδοι πέτυχαν τον σκοπό τους, καθώς οι καινοτόμες αλλαγές και οι γενετικές τεχνικές απέδωσαν σε ικανοποιητικό βαθμό, γεγονός το οποίο επιτρέπει την εφαρμογή τους και σε άλλα συνδυαστικά προβλήματα βελτιστοποίησης.

### 6.1.2 Πρόβλημα Δρομολόγησης Πλοίων

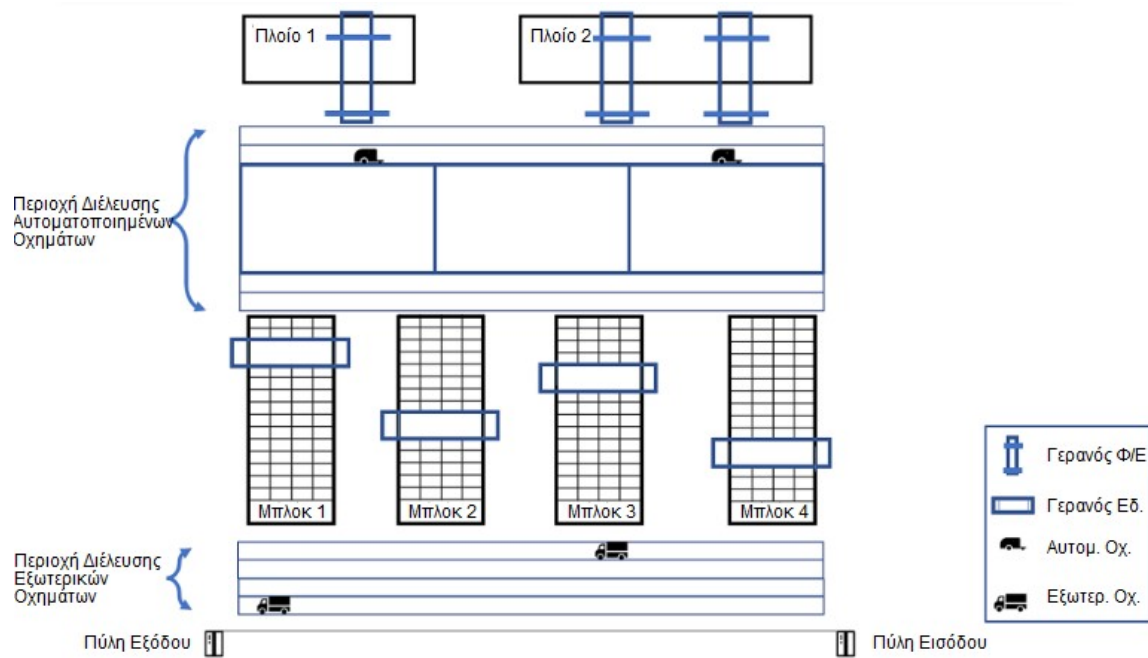
Για το πρόβλημα δρομολόγησης πλοίων αναπτύχθηκαν τέσσερις αλγόριθμοι βελτιστοποίησης νοημοσύνης σμήνους. Οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι βασίζονται στους αλγόριθμους βελτιστοποίησης του σμήνους σωματιδίων, της τεχνητής αποικίας μελισσών, των πυγολαμπίδων και πεταλούδων μονάρχη. Τα συγκεκριμένα προβλήματα θεωρούνται αρκετά σύνθετα ως προς την παροχή εφικτών και ποιοτικών λύσεων εξαιτίας της ύπαρξης των χρονικών παραθύρων. Σε συνδυασμό με την παρουσία πρόσθετων περιορισμών, όπως π.χ. η επιλεκτική εξυπηρέτηση, καθίσταται η διαδικασία επίλυσης τους ιδιαίτερα πολύπλοκη και χρονοβόρα. Για τον λόγο αυτό, στους προτεινόμενους αλγόριθμους

πραγματοποιήθηκαν μία σειρά από τροποποιήσεις με στόχο τη παροχή ποιοτικών λύσεων σε ελάχιστο υπολογιστικό χρόνο. Πρωτίστως, η δημιουργία των αρχικών λύσεων βασίστηκε σε μία παραλλαγή της κλασικής μεθόδου της εισαγωγής. Στη συνέχεια η χρησιμοποίηση των βασικών μαθηματικών εξισώσεων των αλγόριθμων επιτεύχθηκε με την υλοποίηση μίας τεχνικής της διακριτοποίησης. Η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιήθηκε για την μετατροπή των τιμών των λύσεων από διακριτές σε συνεχείς. Στο τελικό στάδιο της κάθε αλγοριθμικής μεθόδου εισήχθη μία νέα διαδικασία για πρόσθετη βελτίωση της ποιότητας των λύσεων. Τα ληφθέντα αποτελέσματα απέδειξαν την ικανοποιητική εφαρμογή των προτεινόμενων αλγόριθμων στα συγκεκριμένα προβλήματα, καθώς επιτεύχθηκαν αρκετά ποιοτικά και βέλτιστα αποτελέσματα σε ρεαλιστικό υπολογιστικό χρόνο. Συμπερασματικά, η επιτυχής εφαρμογή αλγορίθμων με συνεχείς διαδικασίες επίλυσης σε προβλήματα διακριτής βελτιστοποίησης απαιτεί την υλοποίηση πολλών διαφορετικών τεχνικών, όπως πραγματοποιήθηκαν στους τέσσερις προτεινόμενους αλγόριθμους.

## 6.2 Μελλοντική Έρευνα

Η μελλοντική έρευνα θα στηριχθεί στην υλοποίηση καινοτόμων αλγοριθμικών μεθόδων και στην εφαρμογή τους σε προβλήματα βελτιστοποίησης, τα οποία αφορούν κυρίως τη δρομολόγηση των πλοίων και την διαχείριση των θαλάσσιων τερματικών σταθμών. Πιο συγκεκριμένα, η δημιουργία εφικτών δρομολογίων πλεύσης των πλοίων θεωρείται ιδιαίτερα απαιτητική διαδικασία, εξαιτίας της αντιμετώπισης πολλών περιορισμών. Αυτό διαπιστώνεται από τη μικρή ποικιλία μεθόδων επίλυσης στην επιστημονική βιβλιογραφία σε σχέση με άλλα ναυτιλιακά προβλήματα βελτιστοποίησης. Επομένως αποτελεί ιδανική ευκαιρία για περεταίρω υλοποίηση πρωτότυπων αλγοριθμικών μεθόδων με στόχο την αποτελεσματική επίλυση προβλημάτων δρομολόγησης των πλοίων. Επιπρόσθετα, η διαχείριση των θάλασσιων τερματικών σταθμών προσφέρει την δυνατότητα ποιοτικής έρευνας και ενασχόλησης με ένα ή και περισσότερα προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης. Ειδικότερα, λόγω της πρακτικότητας των προβλημάτων σε πραγματικές καταστάσεις, οι εφαρμογές των γερανών στην Θαλάσσια και την Κεντρική-Εσωτερική Περιοχή και η οργάνωση λειτουργίας των πυλών εισόδου/εξόδου των τερματικών σταθμών τυγχάνουν ολοένα και αυξανόμενου επιστημονικού ενδιαφέροντος. Επομένως, η παροχή καινούργιων εργαλείων και μεθοδολογιών επίλυσης θα αποτελεί μελλοντική πρόκληση για την αντιμετώπιση προβλημάτων διαχείρισης της ναυτιλιακής εφοδιαστικής αλυσίδας. Στις επόμενες υποενότητες ακολουθούν τα προβλήματα βελτιστοποίησης, τα οποία θα αποτελούν το βασικό αντικείμενο της μελλοντικής έρευνας. Στη παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ένας λιμένας με τα προαναφερθέντα προβλήματα βελτιστοποίησης.

Σχήμα 6.1: Απεικόνιση διάταξης λιμένα (Naeem et. al[203])



### 6.2.1 Δρομολόγηση Πλοίων

Ο καθορισμός των θαλάσσιων δρομολογίων των πλοίων αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό πρόβλημα για τους τομείς των logistics και των μεταφορών, καθώς η αποτελεσματική αντιμετώπιση και επίλυσή τους συμβάλλει στην εξοικονόμηση του κόστους πλεύσης των πλοίων και στην βελτίωση των υπηρεσιών μεταφοράς εμπορευμάτων των ναυτιλιακών εταιρειών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα θεωρείται η δρομολόγηση των πλοίων βιομηχανικού και ελεύθερου φορτίου (Industrial and Tramp ship routing and scheduling model - ITSRSRSP), όπως μελετάται στην παρούσα διδακτορική διατριβή στα προηγούμενα κεφάλαια. Το ITSRSRSP ανήκει στην κατηγορία των προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης, αφού όλα τα προβλήματα δρομολόγησης (routing) όπως και αυτά των πλοίων χαρακτηρίζονται από αυξημένη πολυπλοκότητα και απαιτούνται ιδιαίτερες αλγοριθμικές μέθοδοι για την επίλυσή τους. Ο στόχος των προβλημάτων δρομολόγησης των πλοίων βασίζεται στην δημιουργία βέλτιστων διαδρομών και στον καθορισμό αυστηρών χρονοδιαγραμμάτων πλεύσης. Ο σκοπός της μελλοντικής έρευνας θα επικεντρωθεί στην περεταίρω στη ανάλυση και μελέτη αντίστοιχων προβλημάτων δρομολόγησης πλοίων με στόχο την δημιουργία κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων και αλγόριθμων επίλυσής τους, στα οποία θα λαμβάνονται υπόψη σύνθετοι παράμετροι, όπως τα χαρακτηριστικά των πλοίων, χρονικοί περιορισμοί, καιρικές συνθήκες, κ.ά.



## 6.2.2 Χρονοπρογραμματισμός Γερανών Φ/Ε και Εδάφους

Ένα από τα βασικότερα επιχειρησιακά προβλήματα των θαλάσσιων τερματικών σταθμών αποτελεί ο χρονοπρογραμματισμός των γερανών  $\varphi/\epsilon$  και εδάφους. Η λειτουργικότητά τους συμβάλλει στην επιτάχυνση των διαδικασιών μεταφοράς εμπορευμάτων, καθώς επηρεάζει άμεσα την συνολική απόδοση του λιμένα. Οι γερανοί  $\varphi/\epsilon$  εντοπίζονται στην Θαλάσσια Περιοχή, ενώ οι αντίστοιχοι εδάφους βρίσκονται στην Κεντρική-Εσωτερική Περιοχή των τερματικών σταθμών. Και τα δύο προβλήματα χαρακτηρίζονται από αυξημένη υπολογιστική πολυπλοκότητα, καθώς ανήκουν στην κατηγορία των  $\mathcal{NP}$ -Hard προβλημάτων. Επομένως η εφαρμογή αλγόριθμων βελτιστοποίησης κρίνεται απαραίτητη για την αποτελεσματική επίλυσή τους.

Ο χρονοπρογραμματισμός των γερανών  $\varphi/\epsilon$  (Quay Crane Scheduling Problem - QCSP) ανήκει στην κατηγορία των προβλημάτων της εφοδιαστικής αλυσίδας και των logistics, στη διαχείριση των εμπορευματοκιβωτίων στους θαλάσσιους τερματικούς σταθμούς. Βασικά το πρόβλημα επικεντρώνεται στην λειτουργία των γερανών και πιο συγκεκριμένα στις κινήσεις (ονομάζονται movements) αυτών, καθώς απαιτείται η λεπτεπίλεπτη χρήση τους εξαιτίας του ογκώδους μεγέθους τους. Βασικός στόχος του προβλήματος αποτελεί η βέλτιστη διαχείριση των γερανών κατά την διαδικασία της φορτοεκφόρτωσης των εμπορευμάτων από τα πλοία. Ωστόσο, το QCSP θεωρείται ιδιαίτερα πολύπλοκο πρόβλημα, καθώς λαμβάνονται υπόψη πολλαπλοί περιορισμοί απόφασης κατά την διαδικασία της βελτιστοποίησης, όπως ο χρόνος εξυπηρέτησης των πλοίων, τα χαρακτηριστικά των εμπορευμάτων, ο αριθμός των διαθέσιμων γερανών κ.ά. Στα πλαίσια της μελλοντικής έρευνας θα αναπτυχθούν μαθηματικά μοντέλα επίλυσης προβλημάτων με αντίστοιχους περιορισμούς, τα οποία θα καθιστούν αποτελεσματικότερη την χρήση των γερανών  $\varphi/\epsilon$  με στόχο την βέλτιστη απόδοση των τερματικών σταθμών.

Αντιστοίχως με το QCSP, το πρόβλημα του χρονοπρογραμματισμού των γερανών εδάφους (Yard Crane Scheduling Problem - YCSP) θεωρείται εξίσου σημαντικό πρόβλημα διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας και των logistics. Το πρόβλημα εστιάζεται στην αποτελεσματική λειτουργικότητα των γερανών για τη μετακίνηση των εμπορευματοκιβωτίων σε διαφορετικές περιοχές εντός των θαλάσσιων τερματικών σταθμών. Έχοντας ως δεδομένο ένα σύνολο από εισερχόμενα και εξερχόμενα εμπορεύματα απαιτείται η σωστή διαχείριση τους από έναν περιορισμένο αριθμό διαθέσιμων γερανών. Ως βασικός στόχος του YCSP θεωρείται η ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου χρήσης των γερανών εδάφους για τη βέλτιστη μετακίνηση όλων των εμπορευματοκιβωτίων. Το συγκεκριμένο πρόβλημα περιέχει ιδιαίτερα σύνθετα χαρακτηριστικά κατά τη βέλτιστη αντιμετώπισή του, καθώς συνήθως οι γερανοί εξυπηρετούν μόνο ένα εμπόρευμα τη φορά, ενώ τα εμπορευματοκιβώτια διαθέτουν πολλαπλά χαρακτηριστικά (π.χ. δια-

στάσεις, σειρά προτεραιότητας, προορισμό κ.ά.). Σε μελλοντική έρευνα τα προτεινόμενα μαθηματικά μοντέλα θα εστιάζουν στο χρόνο μετακίνησης των γερανών και στην σειρά εξυπηρέτησης των εμπορευμάτων για την επιτυχή επίλυση YCSP προβλημάτων.

### 6.2.3 Οργάνωση Λειτουργίας Πυλών

Η οργάνωση λειτουργίας των πυλών εισόδου/εξόδου (Gate Operations Planning - GOP) στους λιμένες αποτελεί εξίσου ένα πρόβλημα διαχείρισης της αλυσίδας εφοδιασμού και ανήκει στην κατηγορία των προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης, καθώς απαιτούνται σύνθετες αλγοριθμικές μεθοδολογίες για την εφικτή επίλυσή του. Πρόκειται για το λιγότερα δημοφιλέστερο πρόβλημα των θαλάσσιων τερματικών σταθμών, καθώς λαμβάνει το μικρότερο ερευνητικό ενδιαφέρον από την επιστημονική κοινότητα σε σχέση με τα υπόλοιπα προβλήματα των θαλάσσιων τερματικών σταθμών. Η πολυπλοκότητα του συγκεκριμένου προβλήματος διακρίνεται από τον σχεδιασμό των λειτουργιών των πυλών, καθώς διαμέσου αυτών καθορίζονται οι πορείες των εισερχόμενων/εξερχόμενων φορτηγών για την ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων κατά την παραλαβή των εμπορευματοκιβωτίων και την αποφυγή της κυκλοφοριακής συμφόρησης εντός και εκτός των τερματικών σταθμών. Ο κυρίαρχος στόχος του GOP θεωρείται η μείωση του χρόνου αναμονής και η ελάττωση της ουράς των εισερχόμενων οχημάτων σε συνδυασμό με την αποτελεσματική κυκλοφοριακή ροής τους στην περιοχή των λιμένων. Η μελλοντική ερευνητική διαδικασία θα στηριχθεί στην δημιουργία των κατάλληλων μαθηματικών μοντέλων με εφαρμογή καινοτόμων αλγορίθμων, τα οποία θα παρέχουν τη δυνατότητα βελτίωσης της απόδοσης της λειτουργίας των πυλών εισόδου/εξόδου σε συνδυασμό με τη μείωση της κυκλοφοριακής συμφόρησης εντός των θαλάσσιων τερματικών σταθμών.

## Κεφάλαιο 7

## Βιβλιογραφία

# Βιβλιογραφία

- [1] Abbass, H. A. (2001, May). MBO: Marriage in honey bees optimization-A haplometrosis polygynous swarming approach. In *Proceedings of the 2001 congress on evolutionary computation (IEEE Cat. No. 01TH8546)* (Vol. 1, pp. 207-214). IEEE.
- [2] Agarwal, R., Ergun, Ö. (2008). Ship scheduling and network design for cargo routing in liner shipping. *Transportation Science*, 42(2), 175-196.
- [3] Angeloudis, P., Bell, M. G. (2010). An uncertainty-aware AGV assignment algorithm for automated container terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(3), 354-366.
- [4] Appelgren, L. H. (1971). Integer programming methods for a vessel scheduling problem. *Transportation Science*, 5(1), 64-78.
- [5] Appelgren, L. H. (1969). A column generation algorithm for a ship scheduling problem. *Transportation Science*, 3(1), 53-68.
- [6] Arango, C., Cortés, P., Muñuzuri, J., Onieva, L. (2011). Berth allocation planning in Seville inland port by simulation and optimisation. *Advanced Engineering Informatics*, 25(3), 452-461.
- [7] Avriel, M., Penn, M., Shpirer, N. (2000). Container ship stowage problem: complexity and connection to the coloring of circle graphs. *Discrete Applied Mathematics*, 103(1-3), 271-279.
- [8] Avriel, M., Penn, M., Shpirer, N., Witteboon, S. (1998). Stowage planning for container ships to reduce the number of shifts. *Annals of Operations Research*, 76, 55-71.
- [9] Bae, J. W., Kim, K. H. (2000). A pooled dispatching strategy for automated guided vehicles in port container terminals. *Management Science and Financial Engineering*, 6(2), 47-67.

- [10] Bausch, D. O., Brown, G. G., Ronen, D. (1998). Scheduling short-term marine transport of bulk products. *Maritime Policy & Management*, 25(4), 335-348.
- [11] Bazzazi, M., Safaei, N., Javadian, N. (2009). A genetic algorithm to solve the storage space allocation problem in a container terminal. *Computers & Industrial Engineering*, 56(1), 44-52.
- [12] Bierwirth, C., Meisel, F. (2010). A Survey of Berth Allocation and Quay Crane Scheduling Problems in Container Terminals. *European Journal of Operational Research*, 202(3), 615-627.
- [13] Bierwirth, C., Meisel, F. (2015). A Follow-up Survey of Berth Allocation and Quay Crane Scheduling Problems in Container Terminals. *European Journal of Operational Research*, 244, 675-689.
- [14] Bierwirth, C., Meisel, F. (2009). A fast heuristic for quay crane scheduling with interference constraints. *Journal of Scheduling*, 12(4), 345-360
- [15] Blazewicz, J., Cheng, T. E., Machowiak, M., Oguz, C. (2011). Berth and quay crane allocation: a moldable task scheduling model. *Journal of the Operational Research Society*, 62(7), 1189-1197.
- [16] Borthen, T., Loennechen, H., Wang, X., Fagerholt, K., & Vidal, T. (2018). A genetic search-based heuristic for a fleet size and periodic routing problem with application to offshore supply planning. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 7(2), 121-150.
- [17] Boysen, N., Emde, S., Flidner, M. (2012). Determining crane areas for balancing workload among interfering and noninterfering cranes. *Naval Research Logistics (NRL)*, 59(8), 656-662.
- [18] Brandao, F., Pedroso, J. P. (2016). Bin packing and related problems: General arc-flow formulation with graph compression. *Computers & Operations Research*, 69, 56-67.
- [19] Bremer, W. M., Perakis, A. N. (1992). An operational tanker scheduling optimization system: model implementation, results and possible extensions. *Maritime Policy & Management*, 19(3), 189-199.
- [20] Briano, C., Briano, E., Bruzzone, A. G., Revetria, R. (2005, June). Models for support maritime logistics: a case study for improving terminal planning. In

*Proceedings of the 19th European Conference on Modeling and Simulation–ECMS* (pp. 199-203). Riga: European Council for Modelling and Simulation

- [21] Bronmo, G., Christiansen, M., Fagerholt, K., Nygreen, B. (2007). A multi-start local search heuristic for ship scheduling—a computational study. *Computers & Operations Research*, 34(3), 900-917.
- [22] Brown, G. G., Graves, G. W., Ronen, D. (1987). Scheduling ocean transportation of crude oil. *Management Science*, 33(3), 335-346.
- [23] Buhrkal, K., Zuglian, S., Ropke, S., Larsen, J., Lusby, R., (2011). Models for the Discrete Berth Allocation Problem: A Computational Comparison. *Transportation Research, Part E*, 47, 461-473
- [24] Caserta, M., Schwarze, S., Voß, S. (2011). Container rehandling at maritime container terminals. In *Handbook of terminal planning* (pp. 247-269). Springer, New York, NY.
- [25] Caserta, M., Voß, S. (2009, April). A corridor method-based algorithm for the premarshalling problem. *Workshops on Applications of Evolutionary Computation* (pp. 788-797). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [26] Chang, D., Yan, W., Chen, C. H., Jiang, Z. (2008). A berth allocation strategy using heuristics algorithm and simulation optimisation. *International Journal of Computer Applications in Technology*, 32(4), 272-281.
- [27] Chang, D., Jiang, Z., Yan, W., He, J. (2010). Integrating berth allocation and quay crane assignments. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(6), 975-990.
- [28] Chen, G., Govindan, K., Yang, Z. (2013). Managing truck arrivals with time windows to alleviate gate congestion at container terminals. *International Journal of Production Economics*, 141(1), 179-188.
- [29] Chen, X., Zhou, X., List, G. F. (2011). Using time-varying tolls to optimize truck arrivals at ports. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(6), 965-982.
- [30] Chen, Y., Leong, Y. T., Ng, J. W. C., Demir, E. K., Nelson, B. L., Simchi Levi, D. (1998). Dispatching automated guided vehicles in a mega container terminal. *INFORMS Montreal*, 5(2), 102-111.

- [31] Cheng, Y. L., Sen, H. C., Natarajan, K., Teo, C. P., Tan, K. C. (2005). Dispatching automated guided vehicles in a container terminal. *Supply chain optimization* (pp. 355-389). Springer, Boston, MA.
- [32] Cheong, C. Y., Lin, C. J., Tan, K. C., Liu, D. K. (2007, September). A multi-objective evolutionary algorithm for berth allocation in a container port. In *2007 IEEE Congress on evolutionary computation* (pp. 927-934). IEEE.
- [33] Cheong, C. Y., Tan, K. C. (2008). A multi-objective multi-colony ant algorithm for solving the berth allocation problem. In *Advances of computational intelligence in industrial systems* (pp. 333-350). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [34] Cheong, C. Y., Tan, K. C., Liu, D. K., Lin, C. J. (2010). Multi-objective and prioritized berth allocation in container ports. *Annals of Operations Research*, 180(1), 63-103.
- [35] Cheung, R. K., Li, C. L., Lin, W. (2002). Interblock crane deployment in container terminals. *Transportation Science*, 36(1), 79-93.
- [36] Cho, S. C., Perakis, A. N. (2001). An improved formulation for bulk cargo ship scheduling with a single loading port. *Maritime Policy & Management*, 28(4), 339-345.
- [37] Choe, R., Park, T., Oh, M. S., Kang, J., Ryu, K. R. (2011). Generating a rehandling-free intra-block remarshaling plan for an automated container yard. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 22(2), 201-217.
- [38] Choo, S., Klabjan, D., Simchi-Levi, D. (2010). Multiship crane sequencing with yard congestion constraints. *Transportation Science*, 44(1), 98-115.
- [39] Christensen, C. G., Holst, C. T. (2008). Berth allocation in container terminals Master's Thesis Department of Informatics and Mathematical Modelling Technical University of Denmark.
- [40] Christiansen, M., Fagerholt, K. (2002). Robust ship scheduling with multiple time windows. *Naval Research Logistics (NRL)*, 49(6), 611-625.
- [41] Christiansen, M. (1999). Decomposition of a combined inventory and time constrained ship routing problem. *Transportation science*, 33(1), 3-16.
- [42] Christiansen, M., Fagerholt, K., Nygreen, B., Ronen, D. (2007). Maritime transportation. *Handbooks in operations research and management science*, 14, 189-284.

- [43] Christiansen, M., Fagerholt, K., Nygreen, B., Ronen, D. (2013). Ship routing and scheduling in the new millennium. *European Journal of Operational Research*, 228(3), 467-483.
- [44] Christiansen, M., Fagerholt, K. (2014). Chapter 13: Ship routing and scheduling in industrial and tramp shipping. In *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications, Second Edition* (pp. 381-408). Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [45] Christiansen, M., Fagerholt, K., Ronen, D. (2004). Ship routing and scheduling: Status and perspectives. *Transportation science*, 38(1), 1-18.
- [46] Cordeau, J. F., Laporte, G., Legato, P., Moccia, L., (2005). Models and Tabu Search Heuristics for the Berth Allocation Problem. *Transportation Science*, 39, 526-538.
- [47] Daganzo, C. F. (1989). The crane scheduling problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 23(3), 159-175.
- [48] Dai, J., Lin, W., Moorthy, R., Teo, C. P. (2008). Berth allocation planning optimization in container terminals. In *Supply chain analysis* (pp. 69-104). Springer, Boston, MA.
- [49] De Koster, M. B. M., Balk, B. M., Van Nus, W. T. I. (2009). On using DEA for benchmarking container terminals. *International Journal of Operations & Production Management*.
- [50] de Oliveira, R. M., Mauri, G. R., Lorena, L. A. N. (2012). Clustering search for the berth allocation problem. *Expert Systems with Applications*, 39(5), 5499-5505.
- [51] Dekker, R., van der Heide, S., van Asperen, E., Ypsilantis, P. (2013). A chassis exchange terminal to reduce truck congestion at container terminals. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 25(4), 528-542.
- [52] Dekker, R., Voogd, P., Asperen, E. V. (2007). Advanced methods for container stacking. *Container terminals and cargo systems* (pp. 131-154). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [53] Delorme, M., Iori, M., Martello, S. (2016). Bin packing and cutting stock problems: Mathematical models and exact algorithms. *European Journal of Operational Research*, 255(1), 1-20.



- [54] Desrosiers, J., Dumas, Y., Solomon, M. M., Soumis, F. (1995). Time constrained routing and scheduling. *Handbooks in operations research and management science*, 8, 35-139.
- [55] Dorndorf, U., Schneider, F. (2010). Scheduling automated triple cross-over stacking cranes in a container yard. *OR spectrum*, 32(3), 617-632.
- [56] Dorigo, M., Birattari, M., Stutzle, T. (2006). Ant colony optimization. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 1(4), 28-39.
- [57] Du, Y., Chen, Q., Quan, X., Long, L., Fung, R. Y. (2011). Berth allocation considering fuel consumption and vessel emissions. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(6), 1021-1037.
- [58] Dubrovsky, O., Levitin, G., Penn, M. (2002). A genetic algorithm with a compact solution encoding for the container ship stowage problem. *Journal of Heuristics*, 8(6), 585-599.
- [59] Dulebenets, M. A. (2020). An Adaptive Island Evolutionary Algorithm for the berth scheduling problem. *Memetic Computing*, 12(1), 51-72.
- [60] Elwany, M. H., Ali, I., Abouelseoud, Y. (2013). A heuristics-based solution to the continuous berth allocation and crane assignment problem. *Alexandria Engineering Journal*, 52(4), 671-677.
- [61] Emde, S., Boysen, N., Briskorn, D. (2014). The berth allocation problem with mobile quay walls: problem definition, solution procedures, and extensions. *Journal of Scheduling*, 17(3), 289-303.
- [62] Fagerholt, K. (2001). Ship scheduling with soft time windows: An optimisation based approach. *European Journal of Operational Research*, 131(3), 559-571.
- [63] Fagerholt, K., Christiansen, M. (2000). A combined ship scheduling and allocation problem. *Journal of the operational research society*, 51(7), 834-842.
- [64] Fagerholt, K. (2004). A computer-based decision support system for vessel fleet scheduling—experience and future research. *Decision Support Systems*, 37(1), 35-47.
- [65] Fagerholt, K., & Lindstad, H. (2007). TurboRouter: An interactive optimisation-based decision support system for ship routing and scheduling. *Maritime Economics & Logistics*, 9, 214-233.

- [66] Faheem, M., Butt, R. A., Raza, B., Alquhayz, H., Ashraf, M. W., Raza, S., Ngadi, M. A. B. (2020). FFRP: Dynamic Firefly Mating Optimization Inspired Energy Efficient Routing Protocol for Internet of Underwater Wireless Sensor Networks. *IEEE Access*, 8, 39587-39604.
- [67] Feillet, D., Parragh, S. N., Tricoire, F. (2019). A local-search based heuristic for the unrestricted block relocation problem. *Computers & Operations Research*, 108, 44-56.
- [68] Feng, Y., Deb, S., Wang, G. G., Alavi, A. H. (2021). Monarch butterfly optimization: a comprehensive review. *Expert Systems with Applications*, 168, 114418.
- [69] Feo, T. A., Resende, M. G. (1995). Greedy randomized adaptive search procedures. *Journal of global optimization*, 6, 109-133.
- [70] Fu, Y. M., Diabat, A., Tsai, I. T. (2014). A multi-vessel quay crane assignment and scheduling problem: Formulation and heuristic solution approach. *Expert Systems with Applications*, 41(15), 6959-6965.
- [71] Galle, V., Barnhart, C., Jaillet, P. (2018). A new binary formulation of the restricted container relocation problem based on a binary encoding of configurations. *European Journal of Operational Research*, 267(2), 467-477.
- [72] Seyedalizadeh Ganji, S. R., Babazadeh, A., Arabshahi, N. (2010). Analysis of the continuous berth allocation problem in container ports using a genetic algorithm. *Journal of marine science and technology*, 15(4), 408-416.
- [73] Garfinkel, R. S., Nemhauser, G. L. (1969). The set-partitioning problem: set covering with equality constraints. *Operations Research*, 17(5), 848-856.
- [74] Gelareh, S., Meng, Q. (2010). A novel modeling approach for the fleet deployment problem within a short-term planning horizon. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(1), 76-89.
- [75] Gelareh, S., Nickel, S., & Pisinger, D. (2010). Liner shipping hub network design in a competitive environment. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(6), 991-1004.
- [76] Gharehgozli, A. H., Yu, Y., de Koster, R., Udding, J. T. (2014). An exact method for scheduling a yard crane. *European Journal of Operational Research*, 235(2), 431-447

- [77] Giallombardo, G., Moccia, L., Salani, M., Vacca, I. (2010). Modeling and solving the tactical berth allocation problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 44(2), 232-245.
- [78] Giallombardo, G., Moccia, L., Salani, M., Vacca, I. (2008). The Tactical Berth Allocation Problem (TBAP) with quay crane assignment and transshipment-related quadratic yard costs. In *European transport conference* (No. CONF).
- [79] Giemisch, P., Jellinghaus, A. (2004). Optimization models for the containership stowage problem. *Operations Research Proceedings*, 2003 (pp. 347-354). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [80] Giuliano, G., O'Brien, T. (2007). Reducing port-related truck emissions: The terminal gate appointment system at the Ports of Los Angeles and Long Beach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12(7), 460-473.
- [81] Glover, F., Laguna, M., Marti, R. (2003). Scatter Search and Path Relinking: Advances and Applications, *Handbook of Metaheuristics*, Glover, F., Kochenberger, G.A. (Eds.), Kluwer Academic Publishers, Boston, 1-36.
- [82] Goh, K. S., Lim, A. (2000, November). Combining various algorithms to solve the ship berthing problem. In *Proceedings 12th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence*. ICTAI 2000 (pp. 370-375). IEEE.
- [83] Golias, M. M., Boile, M., Theofanis, S. (2009). Berth scheduling by customer service differentiation: A multi-objective approach. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(6), 878-892.
- [84] Golias, M. M., Boilé, M., Theofanis, S., Taboada, H. A. (2012). A multi-objective decision and analysis approach for the berth scheduling problem. In *Project Management Techniques and Innovations in Information Technology* (pp. 1-20). IGI Global.
- [85] Golias, M., Portal, I., Konur, D., Kaisar, E., Kolomvos, G. (2014). Robust berth scheduling at marine container terminals via hierarchical optimization. *Computers & Operations Research*, 41, 412-422.
- [86] Golias, M. M., Boile, M., Theofanis, S. (2010). A lamda-optimal based heuristic for the berth scheduling problem. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(5), 794-806.

- [87] Golias, M. M., Saharidis, G. K., Boile, M., Theofanis, S., Ierapetritou, M. G. (2009). The berth allocation problem: Optimizing vessel arrival time. *Maritime Economics & Logistics*, 11(4), 358-377.
- [88] Golias, M., Boile, M., Theofanis, S. (2007). *The berth allocation problem: a formulation reflecting time window service deadlines* (No. 1428-2016-118593).
- [89] Golias, M. M. (2011, March). A simulation based approach to optimize berth throughput under uncertainty at marine container terminals. In *Selected Papers and Presentations Presented at MODSIM World 2010 Conference and Expo*.
- [90] Golias, M. M. (2011). A bi-objective berth allocation formulation to account for vessel handling time uncertainty. *Maritime economics & logistics*, 13(4), 419-441.
- [91] Grunow, M., Günther, H. O., Lehmann, M. (2005). Dispatching multi-load AGVs in highly automated seaport container terminals. *Container Terminals and Automated Transport Systems* (pp. 231-255). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [92] Guo, P., Cheng, W., Wang, Y. (2014). A modified generalized extremal optimization algorithm for the quay crane scheduling problem with interference constraints. *Engineering Optimization*, 46(10), 1411-1429.
- [93] Guan, Y., Xiao, W. Q., Cheung, R. K., Li, C. L. (2002). A multiprocessor task scheduling model for berth allocation: heuristic and worst-case analysis. *Operations Research Letters*, 30(5), 343-350.
- [94] Guan, Y., Yang, K. H. (2010). Analysis of berth allocation and inspection operations in a container terminal. *Maritime Economics & Logistics*, 12(4), 347-369.
- [95] Guan, C., Liu, R. R. (2009). Container terminal gate appointment system optimization. *Maritime Economics & Logistics*, 11(4), 378-398.
- [96] Guan, Y., Cheung, R. K. (2004). The berth allocation problem: models and solution methods. *Or Spectrum*, 26(1), 75-92.
- [97] Guldogan, E. U., Bulut, O., Tasgetiren, M. F. (2011, August). A dynamic berth allocation problem with priority considerations under stochastic nature. In *International Conference on Intelligent Computing* (pp. 74-82). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [98] Günther, H. O., Kim., K., H. (2005). Container terminals and automated transport systems. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- [99] Han, M., Li, P., Sun, J. (2006, December). The algorithm for berth scheduling problem by the hybrid optimization strategy GASA. In *2006 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision* (pp. 1-4). IEEE.
- [100] Han, X. L., Lu, Z. Q., Xi, L. F. (2010). A proactive approach for simultaneous berth and quay crane scheduling problem with stochastic arrival and handling time. *European Journal of Operational Research*, 207(3), 1327-1340.
- [101] Hansen, P., Mladenovic, N., (2001). Variable Neighborhood Search: Principles and Applications. *European Journal of Operational Research*, 130, 449-467.
- [102] Hansen, P., Oguz, C. (2003). A note on formulations of static and dynamic berth allocation problems. *Les Cahiers du GERAD ISSN*, 711, 2440.
- [103] Hansen, P., Oğuz, C., Mladenović, N. (2008). Variable neighborhood search for minimum cost berth allocation. *European journal of operational research*, 191(3), 636-649.
- [104] He, J., Mi, W., Chang, D., Yan, W. (2009). An investigation into berth allocation and quay crane assignment based on hybrid parallel genetic algorithm. In *2009 international conference on artificial intelligence and computational intelligence* (Vol. 2, pp. 48-53). IEEE.
- [105] Hemmati, A., Hvattum, L. M., Fagerholt, K., Norstad, I. (2014). Benchmark suite for industrial and tramp ship routing and scheduling problems. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, 52(1), 28-38.
- [106] Hemmati, A., Hvattum, L. M. (2017). Evaluating the importance of randomization in adaptive large neighborhood search. *International Transactions in Operational Research*, 24(5), 929-942.
- [107] Hendriks, M. P. M., Armbruster, D., Laumanns, M., Lefebvre, E., Udding, J. T. (2012). Strategic allocation of cyclically calling vessels for multi-terminal container operators. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 24(3), 248-273.
- [108] Hendriks, M. P. M., Laumanns, M., Lefebvre, E., Udding, J. T. (2008). Robust periodic berth planning of container vessels. In *Proceedings of the Third German Korean Workshop on Container Terminal Management: IT-based Planning and Control of Seaport Container Terminals and Transportation Systems* (pp. 1-13).

- [109] Hendriks, M., Laumanns, M., Lefebvre, E., Udding, J. T. (2010). *Robust cyclic berth planning of container vessels*. *OR spectrum*, 32(3), 501-517.
- [110] Hendriks, M. P. M., Lefebvre, E., Udding, J. T. (2013). Simultaneous berth allocation and yard planning at tactical level. *OR spectrum*, 35(2), 441-456.
- [111] Henessey, L. (2006). Overview of transshipment operations and simulation. *Med-Trade conference*, Malta, April (pp. 6-7).
- [112] Hoffmann, K., Buscher, U. (2019). Valid inequalities for the arc flow formulation of the railway crew scheduling problem with attendance rates. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 1143-1152.
- [113] Homsy, G., Martinelli, R., Vidal, T., Fagerholt, K. (2020). Industrial and tramp ship routing problems: Closing the gap for real-scale instances. *European Journal of Operational Research*, 283(3), 972-990.
- [114] Hu, Q. M., Hu, Z. H., Du, Y. (2014). Berth and quay-crane allocation problem considering fuel consumption and emissions from vessels. *Computers & Industrial Engineering*, 70, 1-10.
- [115] Huynh, N., Walton, C. M., Davis, J. (2004). Finding the number of yard cranes needed to achieve desired truck turn time at marine container terminals. *Transportation research record*, 1873(1), 99-108.
- [116] Imai, A., Nagaiwa, K., Tat, C.W., (1997). Efficient Planning of Berth Allocation for Container Terminals in Asia. *Journal of Advanced Transportation*, 31(1), 75-94.
- [117] Imai, A., Nishimura, E., Papadimitriou, S., (2001). The Dynamic Berth Allocation Problem for a Container Port. *Transportation Research Part B*, 35, 401-417.
- [118] Imai, A., Nishimura, E., Papadimitriou, S. (2008). Berthing ships at a multi-user container terminal with a limited quay capacity. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(1), 136-151.
- [119] Imai, A., Nishimura, E., Hattori, M., Papadimitriou, S. (2007). Berth allocation at indented berths for mega-containerships. *European Journal of Operational Research*, 179(2), 579-593.
- [120] Imai, A., Yamakawa, Y., Huang, K. (2014). The strategic berth template problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 72, 77-100.

- [121] Imai, A., Chen, H. C., Nishimura, E., Papadimitriou, S. (2008). The simultaneous berth and quay crane allocation problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(5), 900-920.
- [122] Imai, A., Nishimura, E., Hattori, M., Papadimitriou, S. (2007). Berth allocation at indented berths for mega-containerships. *European Journal of Operational Research*, 179(2), 579-593.
- [123] Imai, A., Nishimura, E., Papadimitriou, S. (2013). Marine container terminal configurations for efficient handling of mega-containerships. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 49(1), 141-158.
- [124] Imai, A., Sun, X., Nishimura, E., Papadimitriou, S. (2005). Berth allocation in a container port: using a continuous location space approach. *Transportation Research Part B: Methodological*, 39(3), 199-221.
- [125] Jaramillo, D. I., Perakis, A. N. (1991). Fleet deployment optimization for liner shipping Part 2. Implementation and results. *Maritime Policy and Management*, 18(4), 235-262.
- [126] Jung, D. H., Park, Y. M., Lee, B. K., Kim, K. H., Ryu, K. R. (2006, November). A quay crane scheduling method considering interference of yard cranes in container terminals. *Mexican International Conference on Artificial Intelligence* (pp. 461-471). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [127] Kang, J. G., Kim, Y. D. (2002). Stowage planning in maritime container transportation. *Journal of the Operational Research Society*, 53(4), 415-426.
- [128] Kang, J., Oh, M. S., Ahn, E. Y., Ryu, K. R., Kim, K. H. (2006, June). Planning for intra-block remarshalling in a container terminal. *International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems* (pp. 1211-1220). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [129] Kang, J., Ryu, K. R., Kim, K. H. (2006). Deriving stacking strategies for export containers with uncertain weight information. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 17(4), 399-410.
- [130] Karaboga, D., & Basturk, B. (2008). On the Performance of Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm. *Applied Soft Computing*, 8(1), 687-697.

- [131] Karafa, J., Golias, M. M., Ivey, S., Saharidis, G. K., & Leonardos, N. (2013). The berth allocation problem with stochastic vessel handling times. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65(1), 473-484.
- [132] Karlaftis, M. G., Kepaptsoglou, K., & Sambracos, E. (2009). Containership routing with time deadlines and simultaneous deliveries and pick-ups. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(1), 210-221.
- [133] Kaveshgar, N., Huynh, N. (2015). Integrated quay crane and yard truck scheduling for unloading inbound containers. *International Journal of Production Economics*, 159, 168-177.
- [134] Kennedy, J., Eberhart, R. (1995). Particle Swarm Optimization. *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks* (Vol. 4, pp. 1942-1948). IEEE.
- [135] Kim, K. H., Bae, J. W. (1998). Remarshaling export containers in port container terminals. *Computers & Industrial Engineering*, 35(3-4), 655-658.
- [136] Kim, K. H., Kim, K. Y. (1999). An optimal routing algorithm for a transfer crane in port container terminals. *Transportation science*, 33(1), 17-33.
- [137] Kim, K. H., Moon, K. C. (2003). Berth scheduling by simulated annealing. *Transportation Research Part B: Methodological*, 37(6), 541-560.
- [138] Kim, K. H., Park, K. T. (2003). A note on a dynamic space-allocation method for outbound containers. *European Journal of Operational Research*, 148(1), 92-101.
- [139] Kim, S. H., Lee, K. K. (1997). An optimization-based decision support system for ship scheduling. *Computers & industrial engineering*, 33(3-4), 689-692.
- [140] Korsvik, J. E., Fagerholt, K., Laporte, G. (2010). A tabu search heuristic for ship routing and scheduling. *Journal of the Operational Research Society*, 61(4), 594-603.
- [141] Korsvik, J. E., Fagerholt, K., & Laporte, G. (2011). A large neighbourhood search heuristic for ship routing and scheduling with split loads. *Computers & Operations Research*, 38(2), 474-483.
- [142] Kozan, E., Preston, P. (2007). Mathematical modelling of container transfers and storage locations at seaport terminals. *Container Terminals and Cargo Systems* (pp. 87-105). Springer, Berlin, Heidelberg.



- [143] Kramer, A., Lalla-Ruiz, E., Iori, M., Voß, S. (2019). Novel formulations and modeling enhancements for the dynamic berth allocation problem. *European journal of operational research*, 278(1), 170-185.
- [144] Lalla-Ruiz, E., Melin-Batista, B., Moreno-Vega, J. M. (2012). Artificial Intelligence Hybrid Heuristic based on Tabu Search for the Dynamic Berth Allocation Problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(6), 1132-1141.
- [145] Lalla-Ruiz, E., Voss, S. (2016). POPMUSIC as a matheuristic for the berth allocation problem. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, 76(1), 173-189.
- [146] Lalla-Ruiz, E., González-Velarde, J. L., Melián-Batista, B., Moreno-Vega, J. M. (2014). Biased random key genetic algorithm for the tactical berth allocation problem. *Applied Soft Computing*, 22, 60-76.
- [147] Lee, C. Y., Meng, Q. (Eds.). (2014). *Handbook of ocean container transport logistics: making global supply chains effective* (Vol. 220). Springer.
- [148] Lee, C. Y., Meng, Q. (Eds.). (2014). *Handbook of ocean container transport logistics: making global supply chains effective* (Vol. 220). Springer.
- [149] Lee, C. Y., Liu, M., Chu, C. (2015). Optimal algorithm for the general quay crane double-cycling problem. *Transportation Science*, 49(4), 957-967.
- [150] Lee, D. H., Chen, J. H., Cao, J. X. (2010). The continuous berth allocation problem: A greedy randomized adaptive search solution. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(6), 1017-1029.
- [151] Lee, D. H., Jin, J. G., Chen, J. H. (2012). Terminal and yard allocation problem for a container transshipment hub with multiple terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(2), 516-528.
- [152] Lee, D. H., Song, L., Wang, H. (2006). *Bilevel programming model and solutions of berth allocation and quay crane scheduling* (No. 06-1386).
- [153] Lee, Y., Chao, S. L. (2009). A neighborhood search heuristic for premarshalling export containers. *European Journal of Operational Research*, 196(2), 468-475.
- [154] Lee, Y., Hsu, N. Y. (2007). An optimization model for the container premarshalling problem. *Computers & operations research*, 34(11), 3295-3313.

- [155] Legato, P., Monaco, F., Tigani, N. (2001). Berth planning at Gioia Tauro's maritime terminal by logistic distribution models. In *Annual Conference Of Italian Operational Research Society* (Vol. 32, p. 2001). Cagliari: AIRO.
- [156] Legato, P., Gullì, D., Trunfio, R. (2008, June). The quay crane deployment problem at a maritime container terminal. In *Submitted to the 22th European Conference on Modelling and Simulation*.
- [157] Legato, P., Mazza, R. M., Trunfio, R. (2010). Simulation-based optimization for discharge/loading operations at a maritime container terminal. *OR spectrum*, 32(3), 543-567.
- [158] Li, C. L., Cai, X., Lee, C. Y. (1998). Scheduling with multiple-job-on-one-processor pattern. *IIE transactions*, 30(5), 433-445.
- [159] Li, C. L. Pang, K. W. (2011). An integrated model for ship routing and berth allocation. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 3(3), 245-260.
- [160] Li, M., Fagerholt, K., Schütz, P. (2020). Analyzing the impact of the Northern Sea Route on tramp ship routing with uncertain cargo availability. In *Computational Logistics: 11th International Conference, ICCL 2020, Enschede, The Netherlands, September 28-30, 2020, Proceedings 11* (pp. 68-83). Springer International Publishing.
- [161] Li, W., Wu, Y., Goh, M. (2015). A continuous-time model for multiple yard crane scheduling with last-minute job arrivals. In *Planning and Scheduling for Maritime Container Yards* (pp. 53-83). Springer, Cham.
- [162] Lin, S. W., Ying, K. C., & Wan, S. Y. (2014). Minimizing the total service time of discrete dynamic berth allocation problem by an iterated greedy heuristic. *The Scientific World Journal*, 2014.
- [163] Liang, C., Huang, Y., Yang, Y. (2009). A quay crane dynamic scheduling problem by hybrid evolutionary algorithm for berth allocation planning. *Computers & Industrial Engineering*, 56(3), 1021-1028.
- [164] Liang, C., Hwang, H., Gen, M. (2012). A berth allocation planning problem with direct transshipment consideration. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(6), 2207-2214

- [165] Liang, C., Huang, Y., Yang, Y. (2009). A quay crane dynamic scheduling problem by hybrid evolutionary algorithm for berth allocation planning. *Computers & Industrial Engineering*, 56(3), 1021-1028.
- [166] Lichtblau D. (2002). Discrete Optimization using Mathematica. In *World Multi-conference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI 2002)*, International Institute of Informatics and Systemics, 16, 169-174.
- [167] Lim, A. (1998). The berth planning problem. *Operations research letters*, 22(2-3), 105-110.
- [168] Lim, A. (1999, July). An effective ship berthing algorithm. In *IJCAI* (Vol. 99, pp. 594-605).
- [169] Lim, A., Rodrigues, B., Xiao, F., Zhu, Y. (2004). Crane scheduling with spatial constraints. *Naval Research Logistics* (NRL), 51(3), 386-406.
- [170] Lin, S. W., Ting, C. J. (2014). Solving the dynamic berth allocation problem by simulated annealing. *Engineering Optimization*, 46(3), 308-327.
- [171] Liu, J., Wan, Y. W., Wang, L. (2006). Quay crane scheduling at container terminals to minimize the maximum relative tardiness of vessel departures. *Naval Research Logistics* (NRL), 53(1), 60-74.
- [172] Lourenco, H.R., Martin, O., Stützle, T. (2002). Iterated Local Search. *Handbook of Metaheuristics. Vol. 57 of Operations Research and Management Science*, Kluwer Academic Publishers, 321-353.
- [173] Lu, Z., Han, X., Xi, L. (2011). Simultaneous berth and quay crane allocation problem in container terminal. *Advanced Science Letters*, 4(6-7), 2113-2118.
- [174] Lu, Z., Han, X., Xi, L., Erera, A. L. (2012). A heuristic for the quay crane scheduling problem based on contiguous bay crane operations. *Computers & Operations Research*, 39(12), 2915-2928.
- [175] Malliappi, F., Bennell, J. A., Potts, C. N. (2011). A variable neighborhood search heuristic for tramp ship scheduling. In *Computational Logistics: Second International Conference, ICCL 2011, Hamburg, Germany, September 19-22, 2011. Proceedings 2* (pp. 273-285). Springer Berlin Heidelberg.

- [176] Marinaki, M., Marinakis, Y. (2016). A Bumble Bees Mating Optimization Algorithm for the Feature Selection Problem, *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 7(4), 519-538.
- [177] Marinakis, Y., Marinaki, M. (2011). Bumble Bees Mating Optimization Algorithm for the Vehicle Routing Problem. In *Handbook of Swarm Intelligence - Concepts, Principles and Applications, Series on Adaptation, Learning, and Optimization*, Panigrahi, B.K., Shi, Y., Lim, M.H. (Eds.), 8, 347-369, Springer -Verlag, Berlin, Heidelberg.
- [178] Marinakis, Y., Marinaki, M. (2013). Combinatorial Neighborhood Topology Particle Swarm Optimization Algorithm for the Vehicle Routing Problem. *EvoCOP 2013, LNCS 7832*, M. Middendorf and C. Blum (Eds.), 133-144.
- [179] Marinakis, Y., Marinaki, M. (2014). A Bumble Bees Mating Optimization Algorithm for the Open Vehicle Routing Problem. *Swarm and Evolutionary Computation*, 15, 80-94.
- [180] Marinakis, Y., Marinaki, M. (2014). An Adaptive Bumble Bees Mating Optimization Algorithm for the Hierarchical Permutation Flowshop Scheduling Problem, *ANTS 2014, LNCS 8667*, M. Dorigo et al. (Eds.) 282-283.
- [181] Marinakis, Y., Marinaki, M. (2015). Combinatorial neighborhood topology bumble bees mating optimization for the vehicle routing problem with stochastic demands. *Soft Computing*, 19, 353-373.
- [182] Marinakis, Y., Marinaki, M., Dounias, G. (2011). Honey Bees Mating Optimization Algorithm for the Euclidean Traveling Salesman Problem. *Information Sciences*, 181(20), 4684-4698.
- [183] Marinakis, Y., Marinaki, M., Matsatsinis, N. (2009). A Hybrid Bumble Bees Mating Optimization-GRASP Algorithm for Clustering. In *HAIS 2009, LNAI*, 5572, Corchado, E., Wu, X., Oja, E., Herrero, A., Baroque, B. (Eds.), 549-556, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- [184] Marinakis, Y., Marinaki, M., Matsatsinis, N. (2010). A Bumble Bees Mating Optimization Algorithm for Global Unconstrained Optimization Problems. *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization - NICSO 2010, Studies in Computational Intelligence*, 284, Gonzalez, J.R, Pelta, D.A., Cruz, C., Terrazas, G., Krasnogor, N. (Eds.), 305-318, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

- [185] Marinakis, Y., Marinaki, M., Migdalas, A. (2017). An Adaptive Bumble Bees Mating Optimization Algorithm, *Applied Soft Computing*, 55, 13-30.
- [186] Marinakis, Y., Migdalas, A., Pardalos, P.M. (2005). Expanding Neighborhood GRASP for the Traveling Salesman Problem, *Computational Optimization and Applications*, 32(3), 231-257.
- [187] Marti, R., Pardalos, P. M., Resende, M. G. (2018). Local search. *Handbook of heuristics*. Springer.
- [188] Mauri, G. R., Ribeiro, G. M., Lorena, L. A. N., Laporte, G. (2016). An adaptive large neighborhood search for the discrete and continuous berth allocation problem. *Computers & Operations Research*, 70, 140-154.
- [189] Mauri, G. R., Oliveira, A., Lorena, L. A. N. (2008, March). A hybrid column generation approach for the berth allocation problem. In *European Conference on Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization* (pp. 110-122). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [190] de Oliveira, R. M., Mauri, G. R., Lorena, L. A. N. (2012). Clustering search for the berth allocation problem. *Expert Systems with Applications*, 39(5), 5499-5505
- [191] Mauri, G. R., de Andrade, L. N., Lorena, L. A. N. (2011, October). A Memetic Algorithm for a Continuous Case of the Berth Allocation Problem. In *IJCCI (ECTA-FCTA)* (pp. 105-113).
- [192] Meier, L., Schumann, R. (2007). Coordination of interdependent planning systems, a case study. *Informatik 2007–Informatik trifft Logistik–Band 1*.
- [193] Meisel, F., Bierwirth, C. (2006). Integration of berth allocation and crane assignment to improve the resource utilization at a seaport container terminal. In *Operations research proceedings 2005* (pp. 105-110). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [194] Meisel, F., Bierwirth, C. (2009). Heuristics for the integration of crane productivity in the berth allocation problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(1), 196-209.
- [195] Meisel, F., Bierwirth, C. (2013). A framework for integrated berth allocation and crane operations planning in seaport container terminals. *Transportation Science*, 47(2), 131-147.

- [196] Meisel, F. (2009). *Seaside operations planning in container terminals*. Berlin: Physica-Verlag.
- [197] Meisel, F., Wichmann, M. (2010). Container sequencing for quay cranes with internal reshuffles. *OR spectrum*, 32(3), 569-591.
- [198] Meng, Q., Wang, T. (2010). A chance constrained programming model for short-term liner ship fleet planning problems. *Marit. Pol. Mgmt.*, 37(4), 329-346.
- [199] Moccia, L., Cordeau, J. F., Gaudioso, M., Laporte, G. (2006). A branch and cut algorithm for the quay crane scheduling problem in a container terminal. *Naval Research Logistics (NRL)*, 53(1), 45-59.
- [200] Monaco, M.F., Sammarra, M., (2007). The Berth Allocation Problem: a Strong Formulation Solved by a Lagrangean Approach. *Transportation Science*, 41(2), 265-280.
- [201] Monaco, M. F., Sammarra, M., Sorrentino, G. (2014). The terminal-oriented ship stowage planning problem. *European Journal of Operational Research*, 239(1), 256-265.
- [202] Moon, K. C. (2000). A mathematical model and a heuristic algorithm for berth planning. *Brain Korea*, 21.
- [203] Naeem, D., Gheith, M., & Eltawil, A. (2023). A comprehensive review and directions for future research on the integrated scheduling of quay cranes and automated guided vehicles and yard cranes in automated container terminals. *Computers & Industrial Engineering*, 109149.
- [204] Namboothiri, R., Erera, A. L. (2008). Planning local container drayage operations given a port access appointment system. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(2), 185-202.
- [205] Narasimhan, A., Palekar, U. S. (2002). Analysis and algorithms for the transtainer routing problem in container port operations. *Transportation science*, 36(1), 63-78.
- [206] Nguyen, V. D., Kim, K. H. (2009). A dispatching method for automated lifting vehicles in automated port container terminals. *Computers & Industrial Engineering*, 56(3), 1002-1020.

- [207] Nguyen, S., Zhang, M., Johnston, M., Tan, K. C. (2013). Hybrid evolutionary computation methods for quay crane scheduling problems. *Computers & Operations Research*, 40(8), 2083-2093.
- [208] Nishi, T., Okura, T., Lalla-Ruiz, E., Voß, S. (2020). A dynamic programming-based matheuristic for the dynamic berth allocation problem. *Annals of Operations Research*, 286(1), 391-410.
- [209] Nishimura, E., Imai, A., Papadimitriou, S. (2001). Berth allocation planning in the public berth system by genetic algorithms. *European Journal of Operational Research*, 131(2), 282-292.
- [210] Oguz, C., Blazewicz, J., Cheng, E. T. C., Machowiak, M. (2004). Berth allocation as a moldable task scheduling problem. *International Workshop on Project Management and Scheduling*.
- [211] Pap, E., Bojanić, V., Bojanić, G., Georgijević, M. (2013). Quay crane scheduling for river container terminals. *Intelligent Systems: Models and Applications* (pp. 285-300). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [212] Park, K., Park, T., Ryu, K. R. (2009, March). Planning for remarshaling in an automated container terminal using cooperative coevolutionary algorithms. *Proceedings of the 2009 ACM symposium on Applied Computing* (pp. 1098-1105).
- [213] Park, K. T., Kim, K. H. (2002). Berth scheduling for container terminals by using a sub-gradient optimization technique. *Journal of the operational research society*, 53(9), 1054-1062.
- [214] Park, Y. M., Kim, K. H. (2005). A scheduling method for berth and quay cranes. In *Container terminals and automated transport systems* (pp. 159-181). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [215] Perakis, A. N., Jaramillo, D. I. (1991). Fleet deployment optimization for liner shipping Part 1. Background, problem formulation and solution approaches. *Maritime Policy and Management*, 18(3), 183-200.
- [216] Perakis, A. N., Bremer, W. M. (1992). An operational tanker scheduling optimization system: background, current practice and model formulation. *Maritime Policy & Management*, 19(3), 177-187.

- [217] Pessoa, A., Uchoa, E., De Aragão, M. P., Rodrigues, R. (2010). Exact algorithm over an arc-time-indexed formulation for parallel machine scheduling problems. *Mathematical Programming Computation*, 2(3), 259-290.
- [218] Petering, M. E., Hussein, M. I. (2013). A new mixed integer program and extended look-ahead heuristic algorithm for the block relocation problem. *European Journal of Operational Research*, 231(1), 120-130.
- [219] Peterkofsky, R. I., Daganzo, C. F. (1990). A branch and bound solution method for the crane scheduling problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 24(3), 159-172.
- [220] Pinedo, M., 2002. Scheduling – Theory Algorithms and Systems. *2nd edition*. Prentice- Hall, Englewood Cliffs, NJ
- [221] Powell, B. J., Perkins, A. N. (1997). Fleet deployment optimization for liner shipping: An integer programming model. *Maritime Policy and Management*, 24(2), 183-192.
- [222] Prencipe, L. P., Marinelli, M. (2021). A novel mathematical formulation for solving the dynamic and discrete berth allocation problem by using the Bee Colony Optimisation algorithm. *Applied Intelligence*, 51(7), 4127-4142.
- [223] Raa, B., Dullaert, W., Van Schaeren, R. (2011). An enriched model for the integrated berth allocation and quay crane assignment problem. *Expert Systems with Applications*, 38(11), 14136-14147.
- [224] Ritthipakdee, A., Thammano, A., Premasathian, N., & Jitkongchuen, D. (2017). Firefly mating algorithm for continuous optimization problems. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2017.
- [225] Robenek, T., Umang, N., Bierlaire, M., Ropke, S. (2014). A branch-and-price algorithm to solve the integrated berth allocation and yard assignment problem in bulk ports. *European Journal of Operational Research*, 235(2), 399-411.
- [226] Rodrigues, F., & Agra, A. (2022). Berth allocation and quay crane assignment/scheduling problem under uncertainty: A survey. *European Journal of Operational Research*, 303(2), 501-524.
- [227] Rodriguez-Molins, M., Salido, M. A., Barber, F. (2014). A GRASP-based meta-heuristic for the Berth Allocation Problem and the Quay Crane Assignment Problem by managing vessel cargo holds. *Applied intelligence*, 40(2), 273-290.



- [228] Rodriguez-Molins, M., Ingolotti, L., Barber, F., Salido, M. A., Sierra, M. R., Puente, J. (2014). A genetic algorithm for robust berth allocation and quay crane assignment. *Progress in Artificial Intelligence*, 2(4), 177-192.
- [229] Ronen, D. (1986). Short-term scheduling of vessels for shipping bulk or semi-bulk commodities originating in a single area. *Operations Research*, 34(1), 164-173.
- [230] Ronen, D. (1983). Cargo ships routing and scheduling: Survey of models and problems. *European Journal of Operational Research*, 12(2), 119-126.
- [231] Ryan, D. M. (1992). The solution of massive generalized set partitioning problems in aircrew rostering. *Journal of the operational research society*, 43(5), 459-467.
- [232] Safaei, N., Bazzazi, M., Assadi, P. (2010). An integrated storage space and berth allocation problem in a container terminal. *International Journal of Mathematics in Operational Research*, 2(6), 674-693.
- [233] Saharidis, G. K. D., Golias, M. M., Boile, M., Theofanis, S., Ierapetritou, M. G. (2010). The berth scheduling problem with customer differentiation: a new methodological approach based on hierarchical optimization. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 46(1), 377-393
- [234] Salido, M. A., Rodriguez-Molins, M., Barber, F. (2011). Integrated intelligent techniques for remarshaling and berthing in maritime terminals. *Advanced Engineering Informatics*, 25(3), 435-451.
- [235] Salido, M. A., Rodriguez-Molins, M., Barber, F. (2012). A decision support system for managing combinatorial problems in container terminals. *Knowledge-Based Systems*, 29, 63-74.
- [236] Sambracos, E., Paravantis, J. A., Tarantilis, C. D., & Kiranoudis, C. T. (2004). Dispatching of small containers via coastal freight liners: The case of the Aegean Sea. *European Journal of Operational Research*, 152(2), 365-381.
- [237] Sculli, D., Hui, C. F. (1988). Three dimensional stacking of containers. *Omega*, 16(6), 585-594.
- [238] Sherali, H. D., Al-Yakoob, S. M., Hassan, M. M. (1999). Fleet management models and algorithms for an oil-tanker routing and scheduling problem. *IIE transactions*, 31(5), 395-406.

- [239] Shintani, K., Imai, A., Nishimura, E., & Papadimitriou, S. (2007). The container shipping network design problem with empty container repositioning. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43(1), 39-59.
- [240] Silva, V. M. D., Novaes, A. G., Coelho, A. S. (2011). Resolution of the berth allocation problem through a heuristic model based on genetic algorithms. In *Dynamics in Logistics* (pp. 469-480). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [241] Song, L., Cherrett, T., Guan, W. (2012). Study on berth planning problem in a container seaport: Using an integrated programming approach. *Computers & Industrial Engineering*, 62(1), 119-128.
- [242] Sousa, J. P., Wolsey, L. A. (1992). A time indexed formulation of non-preemptive single machine scheduling problems. *Mathematical programming*, 54(1), 353-367.
- [243] Steenken, D., Voß, S., Stahlbock, R. (2004). Container terminal operation and operations research a classification and literature review. *OR spectrum*, 26(1), 3-49.
- [244] Steenken, D., Winter, T., Zimmermann, U. T. (2001). Stowage and transport optimization in ship planning. *Online optimization of large scale systems* (pp. 731-745). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [245] Tanaka, S., Mizuno, F. (2018). An exact algorithm for the unrestricted block relocation problem. *Computers & Operations Research*, 95, 12-31.
- [246] Tang, L., Zhao, J., Liu, J. (2014). Modeling and solution of the joint quay crane and truck scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 236(3), 978-990.
- [247] Tavakkoli-Moghaddam, R., Makui, A., Salahi, S., Bazzazi, M., Taheri, F. (2009). An efficient algorithm for solving a new mathematical model for a quay crane scheduling problem in container ports. *Computers & Industrial Engineering*, 56(1), 241-248.
- [248] Theofanis, S., Boile, M., Golias, M. (2007). An optimization based genetic algorithm heuristic for the berth allocation problem. In *2007 IEEE congress on evolutionary computation* (pp. 4439-4445). IEEE.
- [249] Ting, C.J., Wu, K.C., Chou, H., (2014). Particle Swarm Optimization Algorithm for the Berth Allocation Problem. *Expert Systems with Applications*, 41(4), 1543-1550.

- [250] Ting, S. C., & Tzeng, G. H. (2003). Ship scheduling and cost analysis for route planning in liner shipping. *Maritime Economics & Logistics*, 5, 378-392.
- [251] Tong, C. J., Lau, H. C., Lim, A. (1999, December). Ant colony optimization for the ship berthing problem. In *Annual Asian Computing Science Conference* (pp. 359-370). Springer, Berlin, Heidelberg.
- [252] Tsakirakis, E., Marinaki, M., Matsatsinis, N., Marinakis, Y. (2020). Honey Bees Mating Optimization Algorithm for the Berth Allocation Problem. *Proceedings of the XIV Balcan Conference on Operational Research*, 377-381. (Virtual Balcor - 30 September - 3 October 2020).
- [253] Turkogullari, Y. B., Taskin, Z. C., Aras, N., Altinel, I. K. (2014). Optimal berth allocation and time-invariant quay crane assignment in container terminals. *European Journal of Operational Research*, 235(1), 88-101.
- [254] Umang, N., Bierlaire, M., Vacca, I. (2013). Exact and heuristic methods to solve the berth allocation problem in bulk ports. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 54, 14-31.
- [255] Unsal, O., Oguz, C. (2013). Constraint programming approach to quay crane scheduling problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 59, 108-122.
- [256] Ursavas, E. (2014). A decision support system for quayside operations in a container terminal. *Decision Support Systems*, 59, 312-324.
- [257] Vacca, I., Salani, M., Bierlaire, M. (2013). An exact algorithm for the integrated planning of berth allocation and quay crane assignment. *Transportation Science*, 47(2), 148-161.
- [258] Vacca, I., Bierlaire, M., Salani, M. (2007). Optimization at container terminals: status, trends and perspectives. In *Swiss Transport Research Conference* (No. CONF).
- [259] Valerio de Carvalho, J. M. (1999). Exact solution of bin packing problems using column generation and branch and bound. *Annals of Operations Research*, 86, 629-659.
- [260] Van den Akker, J. M., Hurkens, C. A., Savelsbergh, M. W. (2000). Time-indexed formulations for machine scheduling problems: Column generation. *INFORMS Journal on Computing*, 12(2), 111-124.

- [261] Van Den Berg, J. P., Gademann, A. J. R. M. (1999). Optimal routing in an automated storage/retrieval system with dedicated storage. *IIE transactions*, 31(5), 407-415.
- [262] Vis, I. F., Carlo, H. J. (2010). Sequencing two cooperating automated stacking cranes in a container terminal. *Transportation Science*, 44(2), 169-182.
- [263] Vis, I. F., De Koster, R., Roodbergen, K. J., Peeters, L. W. (2001). Determination of the number of automated guided vehicles required at a semi-automated container terminal. *Journal of the Operational research Society*, 52(4), 409-417.
- [264] Vis, I. F., Roodbergen, K. J. (2009). Scheduling of container storage and retrieval. *Operations Research*, 57(2), 456-467.
- [265] Vukadinovic, K., Teodorovic, D. (1994). A fuzzy approach to the vessel dispatching problem. *European Journal of Operational Research*, 76(1), 155-164.
- [266] Vukadinovic, K., Teodorovic, D., Pavkovic, G. (1997). A neural network approach to the vessel dispatching problem. *European journal of operational research*, 102(3), 473-487.
- [267] Wan, Y. W., Liu, J., Tsai, P. C. (2009). The assignment of storage locations to containers for a container stack. *Naval Research Logistics (NRL)*, 56(8), 699-713.
- [268] Wang, G. G., Deb, S., Cui, Z. (2019). Monarch butterfly optimization. *Neural computing and applications*, 31(7), 1995-2014.
- [269] Wang, F., Lim, A. (2007). A stochastic beam search for the berth allocation problem. *Decision support systems*, 42(4), 2186-2196.
- [270] Wang, S., Wang, T., Meng, Q. (2011). A note on liner ship fleet deployment. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 23, 422-430.
- [271] Wang, S., & Meng, Q. (2012). Liner ship fleet deployment with container transshipment operations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(2), 470-484.
- [272] Wilson, I. D., Roach, P. A. (1999). Principles of combinatorial optimization applied to container-ship stowage planning. *Journal of Heuristics*, 5(4), 403-418.

- [273] Wilson, I. D., Roach, P. A. (2000). Container stowage planning: a methodology for generating computerised solutions. *Journal of the Operational Research Society*, 51(11), 1248-1255.
- [274] Xing, Y., Yin, K., Quadrifoglio, L., Wang, B. X. (2012). Dispatch problem of automated guided vehicles for serving tandem lift quay crane. *Transportation research record*, 2273(1), 79-86.
- [275] Xu, D., Li, C. L., Leung, J. Y. T. (2012). Berth allocation with time-dependent physical limitations on vessels. *European Journal of Operational Research*, 216(1), 47-56.
- [276] Xu, Y., Chen, Q., Quan, X. (2012). Robust berth scheduling with uncertain vessel delay and handling time. *Annals of Operations Research*, 192(1), 123-140
- [277] Yan, S., Chen, C. Y., Lin, S. C. (2009). Ship scheduling and container shipment planning for liners in short-term operations. *Journal of marine science and technology*, 14, 417-435.
- [278] Yang, X. S. (2009). Firefly algorithms for multimodal optimization. In *Stochastic Algorithms: Foundations and Applications: 5th International Symposium, SAGA 2009, Sapporo, Japan, October 26-28, 2009. Proceedings 5* (pp. 169-178). Springer Berlin Heidelberg.
- [279] Yang, C., Wang, X., Li, Z. (2012). An optimization approach for coupling problem of berth allocation and quay crane assignment in container terminal. *Computers & Industrial Engineering*, 63(1), 243-253
- [280] Zacharioudakis, P. G., Iordanis, S., Lyridis, D. V., & Psaraftis, H. N. (2011). Liner shipping cycle cost modelling, fleet deployment optimization and what-if analysis. *Maritime Economics & Logistics*, 13, 278-297.
- [281] Zeng, Q., Hu, X., Wang, W., Fang, Y. (2011). Disruption management model and its algorithms for berth allocation problem in container terminals. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 7(5), 2130-2142.
- [282] Zeng, Q., Yang, Z., Hu, X. (2011). Disruption recovery model for berth and quay crane scheduling in container terminals. *Engineering Optimization*, 43(9), 967-983.
- [283] Zhang, C., Zheng, L., Zhang, Z., Shi, L., Armstrong, A. J. (2010). The allocation of berths and quay cranes by using a sub-gradient optimization technique. *Computers & Industrial Engineering*, 58(1), 40-50.

- [284] Zhang, H., Kim, K. H. (2009). Maximizing the number of dual-cycle operations of quay cranes in container terminals. *Computers & Industrial Engineering*, 56(3), 979-992.
- [285] Zhao, W., Goodchild, A. V. (2010). The impact of truck arrival information on container terminal rehandling. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(3), 327-343.
- [286] Zhen, L., Chang, D. F. (2012). A bi-objective model for robust berth allocation scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, 63(1), 262-273.
- [287] Zhen, L., Chew, E. P., Lee, L. H. (2011). An integrated model for berth template and yard template planning in transshipment hubs. *Transportation Science*, 45(4), 483-504.
- [288] Zhen, L., Lee, L. H., Chew, E. P. (2011). A decision model for berth allocation under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 212(1), 54-68.
- [289] Zhou, P., Kang, H., Lin, L. (2006, June). A dynamic berth allocation model based on stochastic consideration. In *2006 6th World congress on intelligent control and automation* (Vol. 2, pp. 7297-7301). IEEE.
- [290] Zhou, P. F., Kang, H. G. (2008). Study on berth and quay-crane allocation under stochastic environments in container terminal. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 28(1), 161-169