



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΓΙΑ
ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΕΚΤΑΚΤΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ

υπό

Ταξίδου Ανδρομάχη

Διατριβή που υπεβλήθει για τη μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων για την απόκτηση
Διδακτορικού διπλώματος

Χανιά, 2023

“ Η υλοποίηση της διδακτορικής διατριβής συγχρηματοδοτήθηκε από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό κοινωνικό ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος “ Ανάπτυξη ανθρώπινου δυναμικού, Εκπαίδευση και δια βίου μάθηση ”, 2014 – 2020, στο πλαίσιο της πράξης “ Ενίσχυση του ανθρώπινου δυναμικού μέσω της υλοποίησης διδακτορικής έρευνας Υπόδραση 2 : Πρόγραμμα χορήγησης υποτροφιών ΙΚΥ σε υποψήφιους διδάκτορες των ΑΕΙ της Ελλάδας ”.



Επιχειρησιακό Πρόγραμμα
Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού,
Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Στους γονείς μου
Μενέλαος και Ευαγγελία

Στον σύζυγο μου Γιάννη
και στην κόρη μας Μαρία

Η διατριβή της Ανδρομάχης Ταξίδου εγκρίνεται:

1. Ιωάννης Μαρινάκης
2. Αθανάσιος Μυγδαλάς
3. Νικόλαος Ματσατσίνης
4. Γεώργιος Σταυρουλάκης
5. Άγγελος Σιφαλέρας
6. Γεώργιος Ατσαλάκης
7. Ευστράτιος Ιωαννίδης

Περιεχόμενα

Σύντομο βιογραφικό	i
Ευχαριστίες	iii
Περίληψη	vii
1 Εισαγωγή	1
2 Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας	7
2.1 Μοντελοποιήσεις προβλημάτων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας	12
2.1.1 Πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με μηχανισμό εμπορίας άνθρακα .	12
2.1.2 Πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με οχήματα πολλαπλών διαμερισμάτων	18
2.1.3 Πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με κατανομή αποθέματος	21
2.1.4 Δι-αντικειμενικό πρόβλημα χωροθέτησης εγκαταστάσεων και δρομολόγησης οχημάτων χαμηλών εκπομπών άνθρακα	25
2.1.5 Πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων βασιζόμενο στην ελάχιστη απώλεια	28
2.1.6 Πράσινο πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων	31
2.1.7 Πράσινο πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων για φρέσκα αγροτικά αγαθά	35
2.1.8 Χρονοεξαρτώμενο πράσινο πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων	39
2.1.9 Πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με οχήματα ετερογενούς στόλου για τη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα	43
2.1.10 Άλλες μοντελοποιήσεις	48
2.2 Ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα των εμβολίων	52

Περιεχόμενα

3	Ανάλυση μεθόδων επίλυσης	57
3.0.1	Ευρετικές μέθοδοι	57
3.0.2	Μεθευρετικές μέθοδοι	57
3.0.3	Αλγόριθμοι Εμπνευσμένοι από τη φύση	61
3.0.4	Γενετικοί αλγόριθμοι (Genetic algorithm (GA))	63
3.0.5	Εξελικτικοί αλγόριθμοι	65
4	Μοντελοποίηση του προτεινόμενου προβλήματος	66
4.1	Πράσινο πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων για έκτακτες καταστάσεις στην ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα (Emergency green vehicle routing problem in cold supply chain (E-GVRP-CSC))	66
5	Αλγοριθμική επίλυση	74
5.1	Αλγόριθμοι εμπνευσμένοι από τη φύση	76
5.1.1	Αλγόριθμος του γκριζού λύκου (Grey Wolf Optimization (GWO))	76
5.1.2	Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων(Particle Swarm Optimization (PSO))	80
5.1.3	Αλγόριθμος βελτιστοποίησης πεταλούδας μονάρχη (Monarch butterfly optimization (MBO))	84
5.1.4	Αλγόριθμος βελτιστοποίησης φάλαινας (The Whale Optimization Algorithm (WOA))	87
5.1.5	Αλγόριθμος βελτιστοποίησης της νυχτοπεταλούδας(σκόρου) (Moth flame Optimization (MFO))	92
5.2	Τοπική αναζήτηση	95
5.2.1	1 – 1 Αντικατάσταση (1 – 1 Exchange)	95
5.2.2	2 – 2 Αντικατάσταση (2 – 2 Exchange)	96
5.2.3	1 – 0 Επανατοποθέτηση (1 – 0 Relocate)	97
5.2.4	2 – 0 Επανατοποθέτηση (2 – 0 Relocate)	98
5.2.5	2-Opt	99

Περιεχόμενα

5.2.6	Αλγόριθμος Μεταβλητής Γειτονιάς Αναζήτησης (Variable Neighborhood Search (VNS))	100
6	Αποτελέσματα	102
6.1	Δεδομένα	102
6.2	Αποτελέσματα αλγορίθμων	105
6.2.1	Αλγόριθμος βελτιστοποίησης του γκριζου λύκου (GWO)	105
6.2.2	Αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (PSO)	107
6.2.3	Αλγόριθμος βελτιστοποίησης της πεταλούδας μονάρχη (MBA)	108
6.2.4	Αλγόριθμος βελτιστοποίησης της φάλαινας (WOA)	110
6.2.5	Αλγόριθμος βελτιστοποίησης της νυχτοπεταλούδας (MFOA)	111
6.3	Σύγκριση των μεθόδων	112
7	Συμπεράσματα	119

Σύντομο βιογραφικό

Η Ταξίδου Ανδρομάχη γεννήθηκε στη Θεσσαλονίκη το έτος 1988. Έλαβε πτυχίο Μαθηματικών από τη Σχολή Θετικών Επιστημών του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης το 2011. Εν συνεχεία απέκτησε διατμηματικό μεταπτυχιακό δίπλωμα στην Ιατρική πληροφορική της Ιατρικής Σχολής και των τμημάτων Ηλεκτρολόγων Μηχανικών – Μηχανικών Υπολογιστών και Πληροφορικής το 2014, από το ίδιο ίδρυμα, και το 2017 μεταπτυχιακό δίπλωμα στην Επιχειρησιακή Έρευνα από τη Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Από το 2017 μέχρι το 2023 είναι υποψήφια διδάκτορας, και υπότροφος του Ιδρύματος κρατικών υποτροφιών (ΙΚΥ) το χρονικό 5/22 – 2/23, στη σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης με επιβλέποντα καθηγητή τον καθηγητή κ. Ιωάννη Μαρινάκη.

Το χρονικό διάστημα 2011 – 2013 διετέλεσε εργαστηριακός βοηθός του καθηγητή κ. Παναγιώτη Μπαμίδη στο προπτυχιακό μάθημα της Ιατρικής και Οδοντιατρικής σχολής του Α.Π.Θ, Ιατρική Πληροφορική 1 του πρώτου εξαμήνου σπουδών. Το χρονικό διάστημα 2012 – 2015 συμμετείχε στο Ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα **Discover** στο σχεδιασμό και την ανάπτυξη εκπαιδευτικού περιεχομένου της ηλεκτρονικής πλατφόρμας εκπαίδευσης για περιθάλποντες, με χρήση εργαλείων ηλεκτρονικής εκπαίδευσης. Το χρονικό διάστημα 2019 – 2021 διετέλεσε εργαστηριακός βοηθός του καθηγητή κ. Ιωάννη Μαρινάκη στο μάθημα Σχεδιασμός και Βελτιστοποίηση της Εφοδιαστικής Αλυσίδας του ένατου εξαμήνου της σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης και στο ίδιο διάστημα του μαθήματος Θεωρία Παιγνίων του τέταρτου εξαμήνου. Επίσης από το έτος 2018

Κεφάλαιο 0. Σύντομο βιογραφικό

διατελεί reviewer στο διεθνές επιστημονικό περιοδικό 'Expert systems with applications'.

Τα σχολικά έτη 2020 – 2022 εργάστηκε ως καθηγήτρια σε γυμνάσιο των Χανίων. Τον Μάρτιο του 2023 διορίστηκε στη Διεύθυνση δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης στο Ηράκλειο Κρήτης, όπου εργάζεται στο 1 γυμνάσιο και στο 13 λύκειο Ηρακλείου.

Το ερευνητικό της έργο εστιάζεται στη βελτιστοποίηση των προβλημάτων δρομολόγησης οχημάτων με χρήση αλγορίθμων εμπνευσμένων από την φύση. Οι σχετικές δημοσιεύσεις είναι οι εξής:

1. A. Taxidou, I. Karafyllidis, D. Trachanatzi, M. Rigakis, M. Marinaki and Y. Marinakis (2018), “A firefly algorithm for the permutation flowshop scheduling problem”, Proceedings of the 7th International Symposium 29th National Conference on Operational Research, 137 – 141, 14 – 16 June 2018, Chania, Greece.
2. A. Taxidou, I. Karafyllidis, M. Marinaki, Y. Marinakis and A. Migdalas (2018), “A hybrid firefly - VNS algorithm for the permutation flowshop scheduling problem”, 6th International Conference on Variable Neighborhood Search, 4 – 7 October 2017, Sithonia, Chalkidiki, Greece.
3. Dimitra Trachanatzi, Manousos Rigakis, Andromachi Taxidou, Magdalene Marinaki, Yannis Marinakis, and Nikolaos Matsatsinis. “A novel solution encoding in the Differential Evolution Algorithm for optimizing Tourist Trip Design Problems”. 13th LION Learning and Intelligent Optimization Conference May 27–31, 2019 Chania Crete Greece.
4. M. Marinaki, A. Taxidou, Y. Marinakis (2023), A Hybrid Dragonfly Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands, Intelligent Systems with Applications, 18, 200225.

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά και να δείξω την εκτίμηση μου και την ευγνωμοσύνη μου στους σεβαστούς μου καθηγητές κύριο Ιωάννη Μαρινάκη και στην κυρία Μαγδαληνή Μαρινάκη για την αμέριστη στήριξη και εμπιστοσύνη, την ακούραστη συμπαράσταση και διαρκή βοήθεια, ατελείωτη κατανόηση, υπομονή και επιμονή που απλόχερα μου προσέφεραν. Επίσης τους ευχαριστώ θερμά για τη διαρκή και υψηλού επιπέδου επιστημονική καθοδήγηση, το άριστο κλίμα συνεργασίας, τις επιστημονικές ευκαιρίες και την ειλικρινή και ανιδιοτελή στήριξη και ενθάρρυνση σε όλες τις πολλές δύσκολες στιγμές που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής κ. Νικόλαο Ματσατσίνη και κ. Μυγδαλά Αθανάσιο όπως και τα μέλη της επταμελούς εξεταστικών επιτροπής κ. Αθανάσιο Μυγδαλά, κ. Νικόλαο Ματσατσίνη, κ. Γεώργιο Σταυρουλάκη, κ. Άγγελο Σιφαλέρα, κ. Γεώργιο Ατσαλάκη, κ. Ευστράτιο Ιωαννίδη για τον χρόνο που αφιέρωσαν για το διάβασμα της παρούσας εργασία .

Η παρούσα διδακτορική διατριβή δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί χωρίς την απεριόριστη αγάπη, στήριξη, υποστήριξη, ανοχή, υπομονή και ενθάρρυνση με όλους τους πιθανούς τρόπους από την οικογένεια μου. Αρχικά των σεβαστών μου γονέων, Μενέλαος Ταξίδης και Ευαγγελία Γιαρτζά, που στέκονται πάντα δίπλα μου σε κάθε βήμα της ζωής μου, που μου καλλιέργησαν και μου μεταλαμπάδευσαν, εκτός των άλλων αρετών, την συνεχή αναζήτηση της γνώσης με επιμονή και υπομονή, των αγαπημένων μου αδελφών, Ηώ και Ιωάννης, καθώς και του συζύγου μου, Ιωάννη Καραφυλλίδη, και της μονάκριβης Μαρίας μας. Ένα μεγάλο ευχαριστώ δεν είναι αρκετό για να τους ευχαριστήσω για όλα!

Κεφάλαιο 0. Ευχαριστίες

Δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω για την ουσιαστική στήριξη και συμπαράσταση τους φίλους Αθηνά-Γεωργία Λεονταρίδου, Γεωργία και Νίκος Τσομπάνογλου, Άννα Συμμεωνίδου, Ιωάννα Καραγιαννάκη, Ειρήνη Παρισίδου και Πέτρος Χατζηανίδης, Νεοφύτου Άννα, Σταυρούλα Παπανικολοπούλου, Δήμητρα Παπαδογιωργάκη, Χρήστος Αναστασόπουλος Μαντίντα Σκουλά καθώς και τις συναδέλφισσες και φίλες Θεοδώρα Βαρβαρίγου, Νίκη Μπακατσιά, Βουρεξάκη Αθηνά και για την στήριξη και την ενθάρρυνση που μου παρείχαν. Επίσης δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω θερμά τον διευθυντή του 1 Γυμνασίου Ηρακλείου κ. Σμαρδά όπως και τους υποδιευθυντές κ. Κουρτελάκη και κ. Νιωτάκη, και τη διευθύντρια του 13 Λυκείου Ηρακλείου κ. Μικράκη και τον υποδιευθυντή κ. Παξιμαδάκη όπως και τους συλλόγους των σχολείων αυτών, που αν και συνεργαστήκαμε για μικρό χρονικό διάστημα η διευκόλυνση και η υποστήριξη που μου παρήχαν αποτέλεσαν κρίσιμο παράγοντα για την ολοκλήρωση της διδακτορικής διατριβής.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω για ακόμα μια φορά τους συμφοιτητές και φίλους μου από το ΠΡΟΜΕΣΙΠ, Βαχανελίδου Εμιλία, Κάτια Τσιρώνη, Γήτα Παναγιώτη και ειδικά τον Καρτσίδα Παναγιώτη, για την ενθάρρυνση τη στήριξη και την άμεση βοήθεια τους καθόλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

Στη διάρκεια της εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής γνώρισα αξιόλογους ανθρώπους, όλοι διδακτορικοί φοιτητές του κ. Μαρινάκη, τους Νικόλαο Κυριακάκη, Εμμανουέλα Ραπανάκη, Μανούσο Ριγάκη, Δήμητρα Τραχανατζή, Λευτέρη Τσακινάκη, και τον Θεμιστοκλή Σταμαδιάνο, τους οποίους ευχαριστώ για την καλλιέργεια καλού κλίματος συνεργασίας, για τη στήριξη και τη βοήθεια τους. Ειδικά τους Νικόλαο Κυριακάκη και Θεμιστοκλή Σταμαδιάνο θα ήθελα θερμά να ευχαριστήσω καθώς σε κρίσιμες στιγμές κατά τη διάρκεια της εκπόνησης του διδακτορικού, προσέφεραν απλόχερα και ουσιαστικά και τη βοήθεια τους με μεγάλη προθυμία!

Κατάλογος Πινάκων

5.1	Διαδρομή με διακριτές τιμές	75
5.2	Διαδρομή με συνεχείς τιμές	75
5.3	Τελική διαδρομή με συνεχείς τιμές	76
5.4	Τελική διαδρομή με διακριτές τιμές	76
5.5	1 – 1 Αντικατάσταση	96
5.6	1 – 1 Αντικατάσταση σε διαφορετικές διαδρομές.	96
5.7	2 – 2 Αντικατάσταση	97
5.8	2 – 2 Αντικατάσταση σε διαφορετικές διαδρομές.	97
5.9	1 – 0 Επανατοποθέτηση	98
5.10	1 – 0 επανατοποθέτηση σε διαφορετικές διαδρομές.	98
5.11	2 – 0 Επανατοποθέτηση.	99
5.12	2 – 0 επανατοποθέτηση σε διαφορετικές διαδρομές.	99
5.13	2 – 0 opt.	100
6.1	Ετήσιο προκαθορισμένο κόστος.	105
6.2	Κόστος μεταφοράς.	105
6.3	Κόστος ζημείας.	105
6.4	Μέση τιμή του αλγορίθμου	106
6.5	Ελάχιστη τιμή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης του Γκρίζου Λύκου	107
6.6	Τυπική απόκλιση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης του Γκρίζου Λύκου	107
6.7	Αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων	107
6.8	Μέση τιμή αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων	108
6.9	Ελάχιστη τιμή αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων	108

Κατάλογος Πινάκων

6.10	Τυπική απόκλιση αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων	108
6.11	Αλγόριθμος βελτιστοποίησης της πεταλούδας μονάρχη	109
6.12	Μέση τιμή αλγορίθμου βελτιστοποίησης της πεταλούδας μονάρχη	109
6.13	Ελάχιστη τιμή αλγορίθμου βελτιστοποίησης της πεταλούδας μονάρχη	109
6.14	Τυπική απόκλιση αλγορίθμου βελτιστοποίησης της πεταλούδας μονάρχη . . .	109
6.15	Αλγόριθμος βελτιστοποίησης της φάλαινας	110
6.16	Μέση τιμή αλγορίθμου βελτιστοποίησης της φάλαινας	110
6.17	Ελάχιστη τιμή αλγορίθμου βελτιστοποίησης της φάλαινας	111
6.18	Τυπική απόκλιση αλγορίθμου βελτιστοποίησης της φάλαινας	111
6.19	Αλγόριθμος βελτιστοποίησης της νυχτοπεταλούδας	112
6.20	Μέση τιμή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης της νυχτοπεταλούδας	112
6.21	Ελάχιστη τιμή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης της νυχτοπεταλούδας	112
6.22	Τυπική απόκλιση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης της νυχτοπεταλούδας . . .	112
6.23	Σύγκριση αλγορίθμων	113
6.24	Μέση τιμή των τρεξιμάτων όλων των αλγορίθμων	115
6.25	Σύγκριση αλγορίθμων	115

Περίληψη

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή επιλύσαμε μια καινοτόμα προσέγγιση για το πρόβλημα της δρομολόγησης οχημάτων για έκτακτες καταστάσεις. Η μοντελοποίηση του πραγματοποιήθηκε μέσω ενός νέου προτεινόμενου μοντέλου και επιλύθηκε με υβριδοποίηση αλγορίθμων εμπνευσμένων από τη φύση. Το προτεινόμενο πρόβλημα αποσκοπεί στην εύρεση του ελάχιστου κόστους που προκύπτει από τη δρομολόγηση οχημάτων για παράδοση προϊόντων ή αγαθών σε πελάτες. Οι αλγόριθμοι επίλυσης βασίζονται στη νοημοσύνη σμήνους και μελετάνε στοιχεία της κοινωνικής συμπεριφοράς ζώων και οργανισμών, όπως η εύρεση τροφής, η πλοήγηση, η μετανάστευση, ο τρόπος κίνησης, κ.α. Στη συνέχεια οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι, σε συνδυασμό με αλγορίθμους τοπικής αναζήτησης εφαρμόστηκαν σε παραδείγματα αναφοράς με σκοπό να εξαχθούν σχετικά αποτελέσματα και να εξακριβωθεί ποιος είναι ο αποτελεσματικότερος.

1 Εισαγωγή

Η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας συντελεί στη βελτίωση του επιπέδου διαβίωσης, με συνέπεια να υπάρχει αυξανόμενη ζήτηση για μεταφορά φρέσκων προϊόντων [1] ή άλλων αγαθών, όπως τα εμβόλια, που προϋποθέτουν για τη μεταφορά τους μεταφορικά μέσα με μηχανισμό ψύξης. Αυτά τα προϊόντα δεν μπορούν να διατηρηθούν και να μεταφερθούν σε θερμοκρασία δωματίου, συνεπώς η εφαρμογή της ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τη βέλτιστη διανομή και διατήρηση συγκεκριμένων προϊόντων [2]. Επιπλέον καθώς προκύπτουν έκτακτες και απρόβλεπτες καταστάσεις όλο και συχνότερα τα τελευταία χρόνια, που αφορούν καιρικά φαινόμενα, εμφάνιση πανδημιών, πολέμων, φυσικών καταστροφών, παρατηρήθηκε μεγάλη αναγκαιότητα για μεταφορά ευπαθών αγαθών όπως τρόφιμα, φάρμακα, εμβόλια, κ.α καθώς και παροχή υπηρεσιών όπως ασθενοφόρα πυροσβεστικά οχήματα, διασωστικά, κ.α.

Ως ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα μπορούμε να ορίσουμε ένα σύνολο διαδικασιών που λαμβάνουν υπόψη την ψύξη και οι οποίες εξασφαλίζουν την ποιότητα και την ασφάλεια προϊόντων διατροφής [3] και κατ' επέκταση αγαθών που απαιτούν ψύξη για τη μεταφορά τους. Περιλαμβάνει τις διαδικασίες προ-ψύξης, συσκευασίας, αποθήκευσης και την τελική διανομή των αγαθών και υπηρεσιών [4].

Η υπερθέρμανση του πλανήτη και γενικά η κλιματική αλλαγή αποτελούν ένα από τα βασικότερα και σοβαρά περιβαλλοντικά ζητήματα που έχουν ανακύψει τα τελευταία χρόνια. Συνεπώς εγείρεται μεγάλο παγκόσμιο ενδιαφέρον για την προσπάθεια μείωσης των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, που εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα και αποτελεί το βασικό παράγοντα για το φαινόμενο του θερμοκηπίου [5], [6]. Η κύρια αιτία εκπομπής διοξειδίου

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

του άνθρακα είναι οι μεταφορές, και κυρίως οι οδικές μεταφορές, που ενοχοποιούνται για τα τρία τέταρτα της συνολικής εκπομπής του διοξειδίου του άνθρακα [7] , [8]. Ειδικότερα τα οχήματα που μεταφέρουν αγαθά, που απαιτούν συγκεκριμένη θερμοκρασία για την ασφαλή μεταφορά και διατήρηση τους, εκπέμπουν μεγαλύτερη ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα [9] και συγκεκριμένα 30% περισσότερο από τα οχήματα που δεν έχουν σύστημα ψύξης [10]. Από σχετικές μελέτες προκύπτει ότι το 40% των τροφίμων που μεταφέρονται χρειάζονται ψύξη κατά τη μεταφορά τους. Συνεπώς για τη σωστή διατήρηση-συντήρηση των αγαθών αυτών, καταναλώνεται ένα μεγάλο ποσοστό ενέργειας και συγκεκριμένα το 53 % της συνολικής ενέργειας των μεταφορών [11].

Η ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς των προϊόντων, μειώνοντας τη φθορά του φορτίου [12], [13]. Πολλά προτεινόμενα μοντέλα εφαρμόζουν διαφορετικές σχετικές προσεγγίσεις με στόχο την βέλτιστη επίλυση του προβλήματος της δρομολόγησης οχημάτων στη ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα. Η έγκαιρη απόκριση σε έκτακτες καταστάσεις που απαιτούν τη μεταφορά αγαθών σε συγκεκριμένο σημείο αποτελεί κομβικό παράγοντα για την αποτελεσματική αντιμετώπιση αυτών.

Η δρομολόγηση οχημάτων διαδραματίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα, και μπορεί να συμβάλλει στην έγκαιρη μεταφορά ευπαθών αγαθών, που δύναται να περιορίσει δυσμενή περιστατικά και δυνητικούς κινδύνους όπως για παράδειγμα μεταφορά τροφίμων κατά την εξέλιξη ή μετά το πέρας φυσικών καταστροφών, ή μεταφορά εμβολίων μετά από ξεσπάσματα επιδημιών. Η χρήση της μοντελοποίησης της ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας ως πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων, δύναται να συνεισφέρει σε μέγιστο βαθμό όταν προκύψει μια έκτακτη κατάσταση και να συμβάλλει αποτελεσματικά στην ελαχιστοποίηση των δυσμενών συνεπειών [14].

Η λήψη αποφάσεων σε αυτές τις περιπτώσεις, δηλαδή ο τρόπος που θα δρομολογηθούν τα οχήματα για να εξυπηρετήσουν τους πελάτες, αποτελεί κομβικό σημείο για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των έκτακτων καταστάσεων.

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Ο στόχος της προτεινόμενης μελέτης είναι να αναπτύξουμε ένα νέο, καινοτόμο και αποτελεσματικό μοντέλο ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας που να επιλύει το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με υβριδοποίηση αλγορίθμων εμπνευσμένων από τη φύση, εκτελώντας σχετικές διερευνήσεις για την εύρεση εφικτών λύσεων.

Τα ερωτήματα που θέτει η παρούσα εργασία είναι τα εξής:

- Ποιά είναι η καλύτερη διαδρομή που απαιτείται να διανύσουν τα φορτηγά-ψυγεία ώστε να εξυπηρετήσουν τους προκαθορισμένους πελάτες;
- Ποιά κόστη απαιτείται να ληφθούν υπόψιν για την ελαχιστοποίηση του σχετικού κόστους;
- Ποιοι είναι οι κατάλληλοι αλγόριθμοι επίλυσης του προβλήματος της δρομολόγησης οχημάτων για την ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα;
- Ποια μέθοδος είναι πιο αποτελεσματική για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής;
- Ποιες είναι οι κατάλληλες διερευνήσεις για την βελτιστοποίηση του τελικού κόστους;

Για μια τελέσφορη δρομολόγηση οχημάτων στην ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα απαιτείται να λαμβάνονται υπόψιν διάφοροι παράγοντες που επηρεάζουν το συνολικό κόστος της διαδρομής, την ποιότητα των αγαθών και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Στην παρούσα διδακτορική έρευνα τροποποιήθηκε το Πράσινο Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων (**Green Vehicle Routing Problem-GVRP**), μετασχηματίζοντας το βασικό στόχο της ελαχιστοποίησης της διανυόμενης απόστασης, σε ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους, συμπεριλαμβάνοντας του συνολικού προκαθορισμένου κόστους, του συνολικού κόστους μεταφοράς, του συνολικού κόστους ζημείας, του συνολικού κόστους ψύξης και του συνολικού κόστους των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα. Για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος προτείνεται στην παρούσα έρευνα η επίλυση της προτεινόμενης παραλλαγής του **GVRP** με τη χρήση πέντε εξελικτικών αλγορίθμων.

Το **GVRP** αποτελεί μια παραλλαγή του κλασικού **VRP (Vehicle Routing Problem)** και ανήκει στην γενική κατηγορία των μη-πολυωνυμικών δύσκολων προβλημάτων (**NP— hard problems**). Για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος διαχρονικά έχουν αναπτυχθεί

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

και χρησιμοποιηθεί πάρα πολλοί αλγόριθμοι. Μία από αυτές τις κατηγορίες αλγορίθμων είναι και οι εξελικτικοί και οι εμπνευσμένοι από τη φύση αλγόριθμοι. Οι εξελικτικοί και οι εμπνευσμένοι από τη φύση αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται ευρέως για την επίλυση προβλημάτων συνεχών μεταβλητών. Όμως το **VRP** μοντελοποιείται ως ένα διακριτό πρόβλημα. Για αυτόν τον λόγο, οι αλγόριθμοι επίλυσης θα πρέπει να τροποποιηθούν κατάλληλα, ώστε να εφαρμόζονται κατάλληλα στο σχετικό προτεινόμενο πρόβλημα.

Για την αποτελεσματική προσέγγιση και επίλυση του προτεινόμενου προβλήματος έχουν υλοποιηθεί κατάλληλοι αλγόριθμοι εμπνευσμένοι από τη φύση, πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης του γκρίζου λύκου, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της φάλαινας, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της πεταλούδας μονάρχη και ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης του σκόρου. Οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι συγκρίνονται με βάση την αποτελεσματικότητά τους σε τροποποιημένα παραδείγματα αναφοράς της βιβλιογραφίας.

Σχετικά με την εφοδιαστική αλυσίδα των εμβολίων έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα που εξετάζουν διαφορετικές συνθήκες-περιορισμούς. Η διαδικασία της μεταφοράς των εμβολίων έχει αυξήσει την πολυπλοκότητα στην ήδη επιβαρυνμένη και περίπλοκη σχετική διαδικασία και κατ' επέκταση στην ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα [15].

Η εφοδιαστική αλυσίδα των εμβολίων διαφέρει σημαντικά από την ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα για μεταφορά άλλων αγαθών, λόγω της σημαντικότητας της λήψης αποφάσεων, της επιρροής των πολιτικών αποφάσεων στην κατανομή των εμβολίων, και της έγκαιρης δράσης και απόκρισης των εμπλεκόμενων οργανισμών [16].

Για να διατηρηθεί η αποτελεσματικότητα των εμβολίων, απαιτείται να διατηρούνται σε αυστηρά ελεγχόμενα καθορισμένα όρια θερμοκρασίας [17] καθ' όσον έχουν παρατηρηθεί δυσμενή περιστατικά κατά τη μεταφορά αυτών, διότι εκτέθηκαν σε μη σωστή θερμοκρασία [18]. Οι συνθήκες μεταφοράς και αποθήκευσης πρέπει να είναι τέτοιες ώστε να αποτρέπουν αλλοιώσεις των φαρμάκων-εμβολίων, που θα έχει αρνητική επίδραση στη δραστηριότητά τους [19] και κατά συνέπεια στην αποτελεσματικότητά τους.

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

Η ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα των εμβολίων συμβάλλει στην διατήρηση της ποιότητας των συστατικών των εμβολίων από τη στιγμή της κατασκευής μέχρι και το σημείο χορήγησης, διασφαλίζοντας ότι τα εμβόλια μεταφέρονται και αποθηκεύονται εντός των απαιτούμενων θερμοκρασιών και συνθηκών. Οι διαφορετικές μέθοδοι ανάπτυξης εμβολίων απαιτούν και διαφορετικές συνθήκες διατήρησης [20], [21].

Η ανάπτυξη των εμβολίων είναι το πρώτο βήμα για την εξάλειψη των διάφορων ασθενειών, και πανδημιών όπως για παράδειγμα του **COVID-19**. Η παραγωγή και η διανομή τους αποτελούν κρίσιμα στάδια για τα προγράμματα μαζικού εμβολιασμού και ανοσοποίησης του πληθυσμού και απαιτούν τον κατάλληλο σχεδιασμό λόγω των τεράστιων απαιτήσεων που προϋποθέτουν για την αποτελεσματική τελική χρήση τους [22].

Τα προγράμματα μαζικού εμβολιασμού αποτελούν τεράστιο επίτευγμα για την δημόσια υγεία. Οι φαρμακευτικές εταιρείες αναπτύσσουν νέα εμβόλια παραθέτοντας την αποτελεσματικότητά τους, καθώς και τα πρωτόκολλα ασφαλείας. Το ξέσπασμα του **COVID-19**, προκάλεσε παγκόσμια πολιτική αστάθεια και κατάφερε να ακρωτηριάσει τα συστήματα υγειονομικής περίθαλψης [23].

Κεφάλαιο 1. Εισαγωγή

γ

2 Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

Σε αυτή την ενότητα αναλύονται οι μοντελοποιήσεις των προβλημάτων δρομολόγησης οχημάτων για την ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα και οι διάφορες παραλλαγές αυτών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μέθοδοι επίλυσης 3 των προβλημάτων αυτών.

Στη διεθνή βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα μοντέλων τα οποία προτείνουν διάφορες προσεγγίσεις ή συνδυασμό αυτών. Τα μοντέλα αυτά έχουν ίδιους ή διαφορετικούς στόχους, με τελικό σκοπό την αποτελεσματική προσέγγιση για το εκάστοτε πρόβλημα ή πρόκληση, που προκύπτει στην ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα. Για παράδειγμα οι προσεγγίσεις που αναλύονται στα άρθρα [24], [6], εξετάζουν διαφορετικές προσεγγίσεις και στόχους όπως για παράδειγμα την επίδραση διαφορετικών παραγόντων, την ταχύτητα του ταξιδιού, το βάρος του οχήματος, ο τύπος της μηχανής, οι ατομικές συνήθειες οδήγησης κ.α.

Πολλά άρθρα προτείνουν μοντέλα που αναλύουν τη μεταφορά φρούτων και λαχανικών [25], [26], [27]. Υπάρχουν όμως και μοντέλα που μελετούν ένα συγκεκριμένο τρόφιμο, για παράδειγμα την μεταφορά του φρέσκου γάλακτος [28], ενώ άλλα μοντέλα εστιάζουν στη λήψη αποφάσεων [29].

Επιπλέον υπάρχουν μοντέλα που λαμβάνουν υπόψιν τους και την ικανοποίηση των πελατών [30]. Όλα τα μοντέλα κατά κύριο λόγο στοχεύουν στην μείωση του τελικού κόστους [31], [32], [33], [34].

Υπάρχουν προσεγγίσεις όπως αυτή στο άρθρο [35], που προτείνουν την παρακολούθηση της διαδικασίας της ψύξης, μέσω ειδικών συσκευών-αισθητήρων για τη διασφάλιση της ποιότητας των προϊόντων.

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

Το πρόβλημα της δρομολόγησης οχημάτων (**VRP**) αποτελεί έναν βασικό παράγοντα στη διαχείριση της ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας, διότι συνεισφέρει στην επίλυση διαφόρων προβλημάτων που αντιμετωπίζουν οι εταιρείες. Η επίλυση τέτοιων προβλημάτων αποτελεί βασικό παράγοντα για την βιωσιμότητα των εταιρειών αυτών.

Για την διατήρηση της ποιότητας των υπηρεσιών, προκειμένου να διασφαλισθούν όλες οι υποθέσεις του προβλήματος, θα πρέπει οι εταιρείες να διαθέτουν ένα κατάλληλο σύστημα διαχείρισης ποιότητας.

Το πρόβλημα της δρομολόγησης οχημάτων μπορεί να περιγραφεί με τη μορφή ενός γραφήματος $G = (V, A)$, με ένα σύνολο κόμβων V , όπου $V = \{0, \dots, N\}$. Επιπλέον το $A = \{(i, j) : i, j \in V, i \neq j\}$ αποτελεί το σύνολο των τόξων. Τα οχήματα ξεκινούν τη διαδρομή τους από την αποθήκη ή το κέντρο διαλογής που θεωρείται ότι είναι ο κόμβος 0. Όλοι οι άλλοι κόμβοι θεωρούνται πελάτες. Το μη αρνητικό κόστος που προκύπτει από την μετακίνηση από τον κόμβο i στον κόμβο j συμβολίζεται με c_{ij} . Εάν ισχύει ότι $c_{ij} = c_{ji}$ τότε πρόκειται για συμμετρικό πρόβλημα. Κάθε πελάτης που βρίσκεται σε έναν προκαθορισμένο κόμβο εξυπηρετείται ακριβώς μια φορά. Με τον όρο εξυπηρετείται θεωρείται ότι ικανοποιείται η ζήτηση του πελάτη που συμβολίζεται με d_i .

Υπάρχουν διαθέσιμα οχήματα $u = 1, \dots, NV$ που διαθέτουν μέγιστη χωρητικότητα Q , τα οποία διανύουν μια απόσταση, με αφετηρία και τελικό προορισμό την ίδια αποθήκη. Ο τελικός στόχος του σχετικού προβλήματος είναι η εύρεση της διαδρομής με το ελάχιστο κόστος, που αντιπροσωπεύει την ελάχιστη διανυσθείσα απόσταση [36]. Επιπλέον υπάρχουν και μεταβλητές απόφασης

$$x_{iju} = \begin{cases} 1, & \text{εάν το όχημα } u \text{ εξυπηρετεί τον πελάτη } j \text{ αμέσως μετά τον πελάτη } i \\ 0, & \text{σε άλλη περίπτωση} \end{cases}$$

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

$$y_{ju} = \begin{cases} 1, & \text{εάν ο κόμβος } j \text{ εξυπηρετείται από το όχημα } u \\ 0, & \text{σε άλλη περίπτωση} \end{cases}$$

Η μορφοποίηση του προβλήματος σύμφωνα με τον Golden et al. [37] είναι:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{u=1}^{NV} c_{ij} x_{ij}^u \quad (2.1)$$

υπό τους ακόλουθους περιορισμούς. Οι δυο πρώτοι περιορισμοί εξασφαλίζουν ότι κάθε κόμβος εξυπηρετείται από ακριβώς ένα όχημα

$$\sum_{i=1}^n \sum_{u=1}^{NV} x_{ij}^u = 1 \quad j = 2, \dots, n \quad (2.2)$$

$$\sum_{j=1}^n \sum_{u=1}^{NV} x_{ij}^u = 1 \quad i = 2, \dots, n \quad (2.3)$$

Ο επόμενος περιορισμός παρουσιάζει τη διαδικασία της δρομολόγησης ως συνεχόμενη διαδικασία, δηλαδή αν ένα όχημα εξυπηρετήσει έναν κόμβο, θα πρέπει να αποχωρήσει και από αυτόν.

$$\sum_{i=1}^n x_{ip}^u - \sum_{j=1}^n x_{pj}^u = 0 \quad u = 1, \dots, NV \quad p = 1, \dots, n \quad (2.4)$$

Ο επόμενος περιορισμός αφορά τον περιορισμό στην χωρητικότητα του οχήματος

$$\sum_{i=1}^n d_i \sum_{j=1}^n x_{ij}^u \leq Q_u \quad u = 1, \dots, NV \quad (2.5)$$

όπου Q_u είναι η μέγιστη χωρητικότητα του οχήματος.

Υπάρχουν και χρονικοί περιορισμοί

$$\sum_{i=1}^n t_i^u \sum_{j=1}^n t_{ij}^u + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij}^u x_{ij}^u \leq Q_u \quad u = 1, \dots, NV \quad (2.6)$$

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

Οι επόμενοι δυο περιορισμοί εξασφαλίζουν ότι δεν θα ξεπεραστεί ο αριθμός των διαθέσιμων οχημάτων.

$$\sum_{j=2}^n x_{1j}^u \leq 1 \quad u = 1, \dots, NV \quad (2.7)$$

$$\sum_{i=2}^n x_{i1}^u \leq 1 \quad u = 1, \dots, NV \quad (2.8)$$

και επιπλέον ισχύει

$$x_{ij}^u = 0 \quad \eta' \quad 1 \quad (2.9)$$

Το πρόβλημα της δρομολόγησης οχημάτων για την ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα παρουσιάζει πολλές παραλλαγές και διάφορες προσεγγίσεις. Η περιγραφή του βασικού προβλήματος της ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας αναλύεται ως εξής:

Υπάρχουν οχήματα ίδιου τύπου, εκτός και αν ορίζεται το αντίθετο, που διαθέτουν σύστημα ψύξης (ψυγείο ή κατάψυξη). Ξεκινάνε από την ίδια αποθήκη και κατευθύνονται προς τους πελάτες, που έχουν διαφορετική ζήτηση ο καθένας. Για την αποτελεσματική εξυπηρέτηση των πελατών κατασκευάζεται η διαδρομή που θα ακολουθήσει κάθε όχημα (μονοπάτι), με στόχο την βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος, λαμβάνοντας υπόψη διάφορα είδη κόστους. Αρχικά το προκαθορισμένο κόστος, το κόστος ζημίας του φορτίου, το κόστος κατανάλωσης καυσίμου και το κόστος ψύξης.

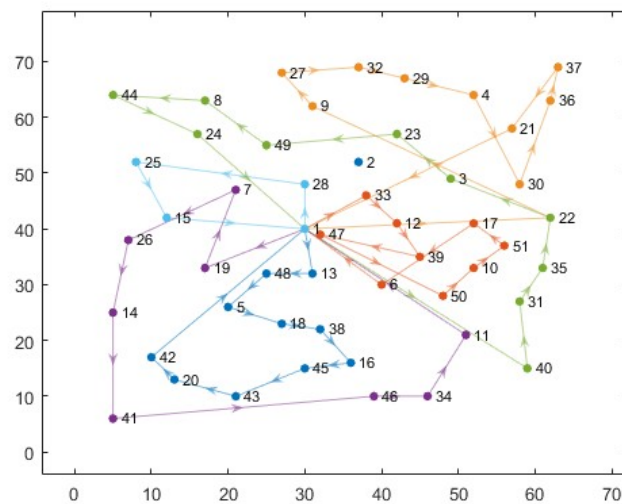
Επιπλέον υπάρχουν οι εξής παραδοχές:

1. Υπάρχει μόνο μια αποθήκη, με γνωστή τοποθεσία, με επάρκεια αγαθών (έλλειψη αγαθών δεν επιτρέπεται).
2. Όλα τα οχήματα είναι του ίδιου τύπου, με ίδια χωρητικότητα και διαθέτουν λειτουργία ψύξης, η οποία δύναται να προσαρμοστεί στη ζητούμενη θερμοκρασία κάθε φορά.
3. Τα οχήματα ξεκινάνε και καταλήγουν το δρομολόγιο τους στην αποθήκη και δεν επιστρέφουν κατά τη διάρκεια του δρομολογίου.

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

4. Τα αγαθά είναι του ίδιου είδους, φάρμακα, εμβόλια, κ.α [18], [38], που απαιτούν συγκεκριμένη θερμοκρασία κατά τη μεταφορά τους και η απώλεια της ποιότητας σχετίζεται μόνο με τον χρόνο.
5. Κάθε πελάτη τον εξυπηρετεί ένα και μόνο όχημα και κάθε όχημα μπορεί να εξυπηρετήσει πολλαπλούς πελάτες [38].

Πολλές μελέτες τροποποιούν κάποιες από τις παραδοχές του προβλήματος ή προσθέτουν κάποιες επιπλέον παραδοχές, όπως για παράδειγμα υπολογίζονται κόστη που αφορούν την ικανοποίηση των πελατών, κ.α ώστε να καταλήξουν σε μια καλύτερη λύση, δηλαδή στην ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης [6]. Επίσης έχει παρατηρηθεί το γεγονός κάποιες μελέτες να μην λαμβάνουν υπόψη τους κάποιους βασικούς παράγοντες κόστους [10], όπως το κόστος της ψύξης [10], ή την μείωση της θερμοκρασίας που παρατηρείται όταν ανοίγει η πόρτα της συσκευής ψύξης [39].



Σχήμα 2.1: Αναπαράσταση διαδρομών του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

2.1 Μοντελοποιήσεις προβλημάτων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

Καθώς η διδακτορική διατριβή στοχεύει στην ανάπτυξη ενός νέου μοντέλου για την ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα και στην εύρεση του κατάλληλου ή των κατάλληλων αλγορίθμων για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος, παρουσιάζουμε στη συνέχεια αυτής της ενότητας μια εκτενή βιβλιογραφική έρευνα, πρώτα για τα μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί έως τώρα στη διεθνή βιβλιογραφία και στη συνέχεια τις σχετικές μεθόδους επίλυσης.

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις που μοντελοποιούν τη ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα λαμβάνοντας υπόψιν διάφορες αντικειμενικές συναρτήσεις και περιορισμούς. Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν αναλυτικά ορισμένες μοντελοποιήσεις.

2.1.1 Πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με μηχανισμό εμπορίας άνθρακα

Στο άρθρο [12] αναπτύσσεται ένα μοντέλο πράσινου προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων (Joint distribution-Green vehicle routing problem (JD-GVRP)), όπου κάθε εταιρεία έχει τα δικά της οχήματα, εξυπηρετεί τους δικούς της πελάτες και επιπλέον δεν υπάρχει καμία επικοινωνία μεταξύ των εταιρειών. Στην αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου προτείνονται έξι είδη κόστους. Το τελικό κόστος προκύπτει από την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης. Τα σχετικά κόστη είναι τα εξής:

1. Το σταθερό-προκαθορισμένο κόστος C_1
2. Το κόστος μεταφοράς C_2
3. Το κόστος ζημίας C_3
4. Το κόστος ψύξης C_4
5. Το κόστος ποινής C_5
6. Το κόστος των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα C_6

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

Οι εξισώσεις που αφορούν τα παραπάνω κόστη αναλύονται παρακάτω:

Το σταθερό-προκαθορισμένο κόστος το οποίο περιλαμβάνει τα καθημερινά έξοδα του οχήματος καθώς και τον μισθό των οδηγών.

$$C_1 = F_1 K \quad (2.10)$$

όπου F_1 είναι το προκαθορισμένο κόστος για κάθε όχημα, και K είναι ο αριθμός των οχημάτων.

Το κόστος μεταφοράς, το οποίο περιλαμβάνει το κόστος που προκύπτει από τη φθορά του οχήματος, και την κατανάλωση των καυσίμων.

$$C_2 = F_2 \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{j=1}^{m+n} \sum_{k=1}^K x_{ijk} d_{ij} \quad (2.11)$$

όπου F_2 είναι το κόστος μεταφοράς ανά μονάδα απόστασης, m είναι ο αριθμός των αποθηκών, n είναι ο αριθμός των πελατών, x_{ijk} είναι οι μεταβλητές του προβλήματος και παίρνουν τιμές 0 – 1, και συγκεκριμένα $x_{ijk} = 1$ όταν το όχημα παραδίνει εμπόρευμα στον κόμβο j εξερχόμενο από τον κόμβο i , αλλιώς παίρνουν την τιμή 0.

Το κόστος της ζημιάς, το οποίο εξαρτάται από δύο παράγοντες, την μείωση της φρεσκάδας των προϊόντων κατά τη διάρκεια του δρομολογίου

$$C_{31} = F_3 \sum_{i=1}^m \sum_{j=m+1}^{m+n} \sum_{k=1}^K y_{ijk} q_j (1 - \epsilon_1 e^{-\theta(t_{jk}-t_{dp})}) \quad (2.12)$$

όπου το y_{ijk} παίρνει τιμές 0 – 1. Όταν το φορτηγό ψυγείο παραδίδει εμπόρευμα παίρνει την τιμή 1 αλλιώς παίρνει την τιμή 0. F_3 είναι η τιμή της μονάδας των προϊόντων της ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας, q_j είναι η ζήτηση του πελάτη j , ϵ_1 το ποσοστό αλλοίωσης της φρεσκάδας των προϊόντων κατά τη διάρκεια της διαδρομής, θ είναι ένας παράγοντας ευαισθησίας των προϊόντων, t_{jk} είναι η χρονική στιγμή όταν το όχημα k φτάνει στον πελάτη j , t_{dp} είναι η χρονική στιγμή που όλα τα οχήματα ξεκινούν από την αποθήκη.

Ο δεύτερος παράγοντας είναι η αλλοίωση που μπορεί να προκύψει στα προϊόντα, καθώς

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

μπορεί να ανοίξει η πόρτα του οχήματος διαταρράσσοντας την ψύξη [40], [41], [42], [43].

Το αντίστοιχο κόστος δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_{32} = F_3 \sum_{i=1}^m \sum_{j=m+1}^{m+n} \sum_{k=1}^K y_{ijk} Q_{in} (1 - \epsilon_2 e^{-\theta(\frac{q_j}{v_2})}) \quad (2.13)$$

όπου Q_{in} είναι η ποσότητα των προϊόντων που έχουν απομείνει στο όχημα τη στιγμή που έχει αποχωρήσει από τον πελάτη j , ϵ_2 το ποσοστό αλλοίωσης της φρεσκάδας των προϊόντων κατά τη διάρκεια της μεταφόρτωσης, $\frac{q_j}{v_2}$ είναι ο χρόνος εξυπηρέτησης του πελάτη j και v_2 είναι η ταχύτητα της μεταφόρτωσης.

Άρα το τελικό κόστος ζημιάς προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_3 = C_{31} + C_{32} = F_3 \sum_{i=1}^m \sum_{j=m+1}^{m+n} \sum_{k=1}^K y_{ijk} [q_j (1 - \epsilon_1 e^{-\theta(t_{jk} - t_{dp})}) + Q_{in} (1 - \epsilon_2 e^{-\theta(\frac{q_j}{v_2})})] \quad (2.14)$$

Το κόστος της ψύξης, το οποίο περιλαμβάνει την κατανάλωση ενέργειας που απαιτεί η σχετική ψύξη κατά την παράδοση και την εκφόρτωση των προϊόντων [44], [45].

Το κόστος ψύξης κατά την παράδοση δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_{41} = F_4 \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{j=1}^{m+n} \sum_{k=1}^K x_{ijk} \alpha_1 \frac{d_{ij}}{v_1} \quad (2.15)$$

όπου το F_4 αντιπροσωπεύει την τιμή της μονάδας του καυσίμου, α_1 αντιπροσωπεύει την κατανάλωση καυσίμου που προκύπτει από τον εξοπλισμό ψύξης ανά μονάδα χρόνου κατά τη διάρκεια της διαδρομής.

Το επιπλέον κόστος που προκύπτει κατά τη διάρκεια της μεταφόρτωσης προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_{42} = F_4 \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{j=1}^{m+n} \sum_{k=1}^K x_{ijk} \alpha_2 \frac{q_j}{v_2} \quad (2.16)$$

όπου α_2 αντιπροσωπεύει την κατανάλωση καυσίμου του εξοπλισμού ψύξης κατά τη διάρκεια

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

της μεταφόρτωσης. Άρα το συνολικό κόστος ψύξης δίνεται από την εξίσωση:

$$C_4 = C_{41} + C_{42} = F_4 \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{j=1}^{m+n} \sum_{k=1}^K x_{ijk} \left(\alpha_1 \frac{d_{ij}}{v_1} + \alpha_2 \frac{q_j}{v_2} \right) \quad (2.17)$$

Το κόστος ποινής, το οποίο περιλαμβάνει μια ποινή αν το όχημα φτάσει στον προορισμό εκτός των προκαθορισμένων από τους πελάτες χρονικών παραθύρων. [46], [42], [47].

$$C_5 = \begin{cases} F_5 \sum_{j=m+1}^{m+n} \sum_{k=1}^K \max(T_1 - t_{jk}, 0) & , \quad \text{εάν } t_{jk} < T_1 \\ 0 & , \quad \text{εάν } T_1 \leq t_{jk} \leq T_2 \\ F_6 \sum_{j=m+1}^{m+n} \sum_{k=1}^K \max(t_{jk} - T_2, 0) & , \quad \text{εάν } t_{jk} > T_2 \end{cases} \quad (2.18)$$

Τελικά η παραπάνω εξίσωση μετασχηματίζεται:

$$C_5 = \sum_{j=m+1}^{m+n} \sum_{k=1}^K [F_5 \max(T_1 - t_{jk}, 0) + F_6 \max(t_{jk} - T_2, 0)] \quad (2.19)$$

όπου F_5 είναι ο χρόνος αναμονής που οφείλεται σε ενωρίτερη άφιξη από τη ζητούμενη και F_6 είναι το κόστος της ποινής για αργοπορημένη άφιξη [12].

Το κόστος κατανάλωσης καυσίμου το οποίο περιλαμβάνει το κόστος των καυσίμων που σχετίζεται με τα καύσιμα που χρειάζεται ένα όχημα για τη μεταφορά και το επιπλέον κόστος που προκύπτει από τις συσκευές ψύξης [12].

Αναλυτικότερα το κόστος κατανάλωσης καυσίμου ανά μονάδα απόστασης υπολογίζεται από την παρακάτω διαδικασία. Αρχικά πρέπει να υπολογιστεί η κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα απόστασης. Για τον υπολογισμό στα [44], [48], [49] προτείνεται:

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

$$\rho(X) = \rho_0 + \frac{\rho^* - \rho_0}{Q} X \quad (2.20)$$

όπου το ρ_0 είναι η κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα απόστασης όταν το όχημα δεν μεταφέρει καθόλου εμπόρευμα, το ρ^* είναι η κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα απόστασης όταν το όχημα είναι με πλήρες φορτίο, Q είναι η μέγιστη χωρητικότητα του οχήματος και X είναι το βάρος του φορτίου.

Άρα η κατανάλωση καυσίμου του οχήματος υπολογίζεται από:

$$FC_1 = \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{j=1}^{m+n} \sum_{k=1}^K x_{ijk} \rho(Q_{ij}) d_{ij} = \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{j=1}^{m+n} \sum_{k=1}^K x_{ijk} \left(\rho_0 + \frac{\rho^* - \rho_0}{Q} Q_{ij} \right) d_{ij} \quad (2.21)$$

όπου το Q_{ij} είναι η ποσότητα των προϊόντων που μεταφέρονται από τον κόμβο i στον κόμβο j

Το επόμενο βήμα για τον υπολογισμό του κόστους είναι να υπολογιστεί η κατανάλωση καυσίμου που σχετίζεται με τον εξοπλισμό ψύξης, δηλαδή προκύπτει από την ενέργεια που χρειάζεται να καταναλώσει η συσκευή ή οι συσκευές ψύξης και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$FC_2 = \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{j=1}^{m+n} \sum_{k=1}^K x_{ijk} \left(\alpha_1 \frac{d_{ij}}{v_1} + \alpha_2 \frac{q_j}{v_2} \right) \quad (2.22)$$

Επομένως το τελικό κόστος καυσίμων υπολογίζεται:

$$FC = FC_1 + FC_2 = \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{j=1}^{m+n} \sum_{k=1}^K x_{ijk} \left[\left(\rho_0 + \frac{\rho^* - \rho_0}{Q} Q_{ij} \right) d_{ij} + \left(\alpha_1 \frac{d_{ij}}{v_1} + \alpha_2 \frac{q_j}{v_2} \right) \right] \quad (2.23)$$

Για τον ακριβή υπολογισμό του κόστους θα πρέπει να ληφθούν υπόψιν και οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα στο περιβάλλον που δίνονται από την παρακάτω εξίσωση:

$$EM = \eta \cdot FC \quad (2.24)$$

όπου το η είναι ο συντελεστής εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα.

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

Το τελικό κόστος καυσίμου υπολογίζεται από:

$$C_6 = F_7(\eta \cdot FC - T_q) = F_7\left\{\eta \sum_{i=1}^{m+n} \sum_{j=1}^{m+n} \sum_{k=1}^K x_{ijk} \left[\left(\rho_0 + \frac{\rho^* - \rho_0}{Q} Q_{ij} \right) d_{ij} + \left(\alpha_1 \frac{d_{ij}}{v_1} + \alpha_2 \frac{q_j}{v_2} \right) \right] - T_q \right\} \quad (2.25)$$

όπου F_7 είναι η τιμή διαπραγμάτευσης του άνθρακα και T_q είναι το ποσοστό των εκπομπών του άνθρακα και αποτελεί τη μεγαλύτερη εκπομπή που δύναται να παράγει δωρεάν η κάθε εταιρεία.

Για τη μοντελοποίηση του παραπάνω προβλήματος ο βασικός στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή:

$$\min C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 \quad (2.26)$$

υπό των περιορισμών:

1. Κάθε πελάτης μπορεί να εξυπηρετηθεί μόνο μία φορά από ένα μόνο όχημα

$$\sum_{i=1}^{m+n} \sum_{m=1}^m \sum_{k=1}^K x_{ijkm} = 1, \quad j \in \{m+1, m+2, \dots, m+n\} \quad (2.27)$$

2. Οι επόμενοι δύο περιορισμοί δηλώνουν ότι τα οχήματα ξεκινάνε από την αποθήκη-αφετηρία και δεν χρειάζεται να επιστρέψουν σε αυτή μετά την εξυπηρέτηση και του τελευταίου πελάτη

$$\sum_{i=m+1}^{m+n} \sum_{j=1}^m \sum_{m=1}^m x_{ijkm} = 1, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (2.28)$$

$$\sum_{i=m+1}^{m+n} \sum_{j=m+1}^{m+n} \sum_{m=1}^m x_{ijkm} = 1, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (2.29)$$

3. Ο επόμενος περιορισμός δηλώνει ότι ένα όχημα δεν μπορεί να μεταβεί από τη μία

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

αποθήκη κατευθείαν προς μια άλλη αποθήκη

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{m=1}^m x_{ijkm} = 0, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (2.30)$$

4. Ο τελευταίος περιορισμός δηλώνει ότι δεν επιτρέπεται η υπερφόρτωση του οχήματος

$$\sum_{i=1}^{m+n} \sum_{j=m+1}^{m+n} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^m q_i x_{ijkm} \leq Q, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (2.31)$$

5. Η τελευταία εξίσωση χαρακτηρίζει την διαδικασία της δρομολόγησης ως συνεχής

$$t_{jk} = t_{ik} + \frac{d_{ij}}{v_1} + \frac{q_i}{v_2} \quad (2.32)$$

2.1.2 Πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με οχήματα πολλαπλών διαμερισμάτων

Σε άλλη προσέγγιση που αναλύεται στο άρθρο [50], προτείνεται σχετικό μοντέλο για μια ρεαλιστική εφαρμογή δρομολόγησης οχημάτων με πολλαπλά διαμερίσματα και χρονικά παράθυρα, (multi-compartment vehicle routing problem with time windows (MC-VRPTW)). Τα χρονικά παράθυρα περιορίζουν χρονικά τον χρόνο εξυπηρέτησης, δηλαδή ο πελάτης δηλώνει ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, το χρονικό παράθυρο, που μπορεί εξυπηρετηθεί. Αυτός ο περιορισμός δύναται να είναι πολύ περιοριστικός και αυστηρός. Πιο συγκεκριμένα αν το όχημα φτάσει νωρίτερα απαιτείται να περιμένει μέχρι την νωρίτερη επιτρεπόμενη έναρξη εξυπηρέτησης. Η δεύτερη περίπτωση αφορά και πάλι τον περιορισμό των χρονικών παραθύρων, δηλαδή δύναται να είναι πιο χαλαρός όπου μπορεί να παραβιαστεί ο χρονικός περιορισμός με κάποια ποινή [51], [52].

Για τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης του προτεινόμενου μοντέλου, [50] λαμβάνονται υπόψη τα παρακάτω κόστη:

1. Προκαθορισμένο κόστος οχήματος
2. Κόστος διαδρομής

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

3. Κόστος καυσίμου κατά τη διάρκεια του δρομολογίου
4. Κόστος καυσίμου κατά τη διάρκεια αναμονής του οχήματος (φορτοεκφόρτωση-αναμονή κατά τη διάρκεια του δρομολογίου)

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος προκύπτει από την ελαχιστοποίηση των παραπάνω κοστών:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } D = \text{Min}(D_1 + D_2 + D_3 + D_4) = \\
 f \sum_{j \in N_0} \sum_{k \in K} x_{0jk} + \sum_{i,j \in N} \sum_{k \in K} c_{ij} x_{ijk} + \\
 + c_0 \sum_{i,j \in N} \sum_{k \in K} F(P_{ij}^k) l_{ij} x_{ijk} + c_0 \epsilon \sum_{i \in N} \sum_{k \in K} P_i^k w_i
 \end{aligned} \tag{2.33}$$

όπου f είναι το προκαθορισμένο κόστος για την χρήση του οχήματος, c_{ij} είναι το κόστος διαδρομής από τον πελάτη i στον j , c_0 είναι το κόστος της κατανάλωσης ανά μονάδα καυσίμου, x_{ijk} είναι μεταβλητή όπου παίρνει την τιμή 1 αν το k όχημα εξυπηρετεί τον κόμβο j αμέσως μετά από τον κόμβο i , αλλιώς παίρνει την τιμή 0, το w_i είναι ο χρόνος αναμονής στον κόμβο i . F είναι ο ρυθμός κατανάλωσης καυσίμων και υπολογίζεται από την σχέση

$$F(P) = F_0 + \frac{F^* - F_0}{q} P \tag{2.34}$$

όπου q είναι η χωρητικότητα του οχήματος, F^* είναι ο ρυθμός κατανάλωσης καυσίμου όταν το όχημα είναι πλήρως φορτωμένο, F_0 είναι ο ρυθμός κατανάλωσης καυσίμων όταν το όχημα είναι άδειο. Το $F(P_{ij}^k)$ είναι ο ρυθμός κατανάλωσης καυσίμων του οχήματος k όταν το όχημα μεταβαίνει από τον κόμβο i στον κόμβο j , P_i^k είναι το φορτίο του οχήματος k στον κόμβο i , πριν την εξυπηρέτησή του

Σχετικά με τους περιορισμούς του συγκεκριμένου προβλήματος, υπάρχουν οι εξής:

1. Ο παρακάτω περιορισμός εξασφαλίζει ότι κάθε πελάτης εξυπηρετείται από ένα όχημα ακριβώς μία φορά.

$$\sum_{j \in N} \sum_{k \in K} x_{ijk} = 1, \quad \forall i \in N_0 \tag{2.35}$$

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

2. Τίθεται περιορισμός που αφορά τη ροή του δικτύου και εξασφαλίζει ότι αν το όχημα k αποχωρήσει από τον πελάτη j , πριν αποχωρήσει θα έχει εξυπηρετήσει τον πελάτη j

$$\sum_{i \in N} \sum_{i \neq j} x_{ijk} = \sum_{i \in N} \sum_{i \neq j} x_{jik}, \quad \forall j \in N_0, \quad \forall k \in K \quad (2.36)$$

3. Ο επόμενος περιορισμός εξασφαλίζει ότι κάθε όχημα ξεκινάει και τερματίζει το δρομολόγιο του στην αποθήκη

$$\sum_{j \in N_0} x_{0jk} = \sum_{j \in N_0} x_{j0k}, \quad \forall k \in K \quad (2.37)$$

4. Επιπλέον υπάρχει περιορισμός των πελατών που δύναται να εξυπηρετήσει κάθε όχημα

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N_0} x_{jik} \leq T, \quad \forall k \in K \quad (2.38)$$

5. Το φορτίο στον h διαμέρισμα στο k όχημα δεν μπορεί να υπερβαίνει την χωρητικότητα του οχήματος

$$\sum_{i \in N_0} \sum_{j \in N} d_{hi} x_{ijk} \leq q_h, \quad \forall h \in H, \quad k \in K \quad (2.39)$$

6. Πριν την παράδοση των αγαθών, υπολογίζεται το βάρος κάθε οχήματος

$$P_j^k = \sum_{i \in N} x_{ijk} (P_i^k - \sum_{h \in H} d_{hi}), \quad \forall j \in N_0, \quad \forall k \in K \quad (2.40)$$

7. Το βάρος του οχήματος πρέπει να υπολογιστεί και όταν το όχημα βρίσκεται στην αποθήκη

$$P_0^k = \sum_{j \in N} \sum_{i \in N_0} \sum_{h \in H} x_{jik} d_{hi}, \quad \forall k \in K \quad (2.41)$$

8. Το βάρος κάθε οχήματος στο τόξο (i, j) υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση

$$P_{ij}^k = P_j^k x_{ijk}, \quad \forall i \in N, \quad \forall j \in N_0, \quad \forall k \in K \quad (2.42)$$

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

9. Ο επόμενος περιορισμός καθιερώνει τη σχέση μεταξύ του χρόνου αναχώρησης από έναν πελάτη και του αμέσως επόμενου του.

$$t_j \geq t_i + w_i + s_i + t_{ij} + (x_{ijk} - 1)M, \forall i, j \in N_{0'}, \quad k \in K \quad (2.43)$$

10. Ο επόμενος περιορισμός εξασφαλίζει ότι η παράδοση των αγαθών θα πραγματοποιηθεί μέσα στο χρονικό παράθυρο.

$$E_i \leq t_i + w_i \leq L_i \quad \forall i \in N_{0'} \quad (2.44)$$

11. Ο χρόνος αναμονής στον πελάτη i υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση

$$w_i = \max\{(E_i - t_i), \quad 0\}, \quad \forall i \in N_0 \quad (2.45)$$

12. Ο τελευταίος περιορισμός ορίζει την ιδιότητα των μεταβλητών απόφασης

$$x_{ijk} = 0 \quad \text{ή} \quad 1, \quad s_i \geq 0, \quad t_i \geq 0 \quad \forall i, j \in N, \forall k \in K \quad (2.46)$$

2.1.3 Πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με κατανομή αποθέματος

Στο άρθρο [32] παρουσιάζεται το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με κατανομή αποθεμάτων για την ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα (vehicle routing with inventory allocation (IVRPCSC)), τριών φάσεων, ξεκινώντας από πολλαπλούς προμηθευτές με ετερογενή οχήματα, διάφορους τύπους ψυγείων-καταψυκτών με πολλαπλά σημεία παράδοσης και καταναλωτές. Για τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης, της ελαχιστοποίησης του κόστους του προτεινόμενου μοντέλου λαμβάνονται υπόψη:

1. Το κόστος μεταφοράς που περιλαμβάνει τα αγαθά ψύξης και βαθειάς κατάψυξης

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

2. Το κόστος ποινής

3. Το κόστος διατήρησης και αποθήκευσης απούλητων εμπορευμάτων χρησιμοποιώντας:

- μεταβλητές αποφάσεων
- μεταβλητές παραλαβής
- μεταβλητές παράδοσης
- μεταβλητές κατανάλωσης
- μεταβλητές καταγραφής προϊόντων
- μεταβλητές απόκλισης
- δυαδικές μεταβλητές [32].

Τα ανωτέρω συνοψίζονται στις παρακάτω εξισώσεις: Η αντικειμενική συνάρτηση:

$$\begin{aligned}
 Min \sum_{c \in C} \sum_{i \in N^D} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} a_{ci}^{TR} Q_{civt}^{DR} + \sum_{c' \in C'} \sum_{i \in N^D} \sum_{v \in V} \sum_{t \in T} a_{c't}^{TF} Q_{c'ivt}^{DF} + \\
 \sum_{c \in C} \sum_{i \in N^D} \sum_{t \in T} a_{ci}^{PR} U_{cit}^R + \sum_{c' \in C'} \sum_{i \in N^D} \sum_{t \in T} a_{c'i}^{PF} I_{c'it}^F + \\
 \sum_{c \in C} \sum_{i \in N^D} \sum_{t \in T} a_{ci}^{HR} I_{cit}^R + \sum_{c' \in C'} \sum_{i \in N^D} \sum_{t \in T} a_{c'i}^{HF} I_{c'it}^F
 \end{aligned} \quad (2.47)$$

όπου C είναι το σύνολο των εμπορευμάτων ψύξης, N_D , είναι το σύνολο των κόμβων ζήτησης, V είναι το σύνολο των κόμβων, T είναι το σύνολο των χρονικών περιόδων, a_{ci}^{TR} είναι το κόστος μεταφοράς της μονάδας ψυκτικού εμπορεύματος, τα Q_{civt}^{DR} και $Q_{c'ivt}^{DF}$ είναι μεταβλητές παράδοσης και περιγράφουν τις ποσότητες των εμπορευμάτων που παραδίδονται ανάλογα με τη ζήτηση των κόμβων για κάθε όχημα, C' είναι το σύνολο των κατεψυγμένων αγαθών, $a_{c'i}^{HF}$, είναι το κόστος ποινής ανά μονάδα ανικανοποίητου τύπου εμπορεύματος βαθειάς κατάψυξης, a_{ci}^{PR} είναι το κόστος ποινής ανά μονάδα μη ικανοποιημένου εμπορεύματος ψύξης, U_{cit}^R και $I_{c'it}^F$ είναι μεταβλητές απόκλισης και ορίζουν τις ποσότητες των μη εκπληρώσιμων απαιτήσεων που ζητούνται από τους πελάτες για κάθε φορά. Επιπλέον $a_{c'i}^{PF}$ είναι το κόστος μεταφοράς ανά μονάδα των βαθιά κατεψυγμένων αγαθών, a_{ci}^{HR} είναι το κόστος διατήρησης εμπορευμάτων

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

ψύξης και $a_{c'i}^{HF}$ είναι το κόστος διατήρησης εμπορευμάτων βαθιάς κατάψυξης. I_{cit}^R και C_{cit}^F είναι οι μεταβλητές του αποθέματος των εμπορευμάτων που καθορίζουν τις ποσότητες και των δύο εμπορευμάτων που παραμένουν στα καταστήματα των πελατών και των επιπλέον ποσοτήτων εμπορευμάτων που παραδίδονται στον πελάτη ή αφορά τις απούλητες ποσότητες του διαθέσιμου αποθέματος. Το παραπάνω πρόβλημα διέπεται από τους ακόλουθους περιορισμούς:

1. Κάθε όχημα μπορεί να επισκεφθεί κάθε κόμβο ακριβώς μία φορά.

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N, i \neq j \neq d_v} x_{ijvt} \leq 1 \quad \forall v \in V, t \in T \quad (2.48)$$

2. Οι επόμενοι δύο περιορισμοί εξασφαλίζουν ότι κάθε όχημα δεν δύναται να αποχωρεί και να επιστρέφει στην αποθήκη πολλές φορές, πιο συγκεκριμένα η επιστροφή στην αποθήκη επιτρέπεται με το πέρας του δρομολογίου.

$$\sum_{i \in N, i \neq d_v} \sum_{t \in T} x_{d_v i vt} = 1 \quad \forall v \in V \quad (2.49)$$

$$\sum_{i \in N, i \neq d_v} \sum_{t \in T} x_{i d_v vt} = 1 \quad \forall v \in V \quad (2.50)$$

3. Ο παρακάτω περιορισμός απαγορεύει κάθε όχημα να φτάσει σε οποιονδήποτε κόμβο στην περίπτωση που δεν μεταφέρει καθόλου φορτίο.

$$\sum_{t \in T_{vd_v i}} x_{i d_v vt} = 0 \quad \forall v \in V, i \in N, i \neq d_v \quad (2.51)$$

4. Επιπλέον θα πρέπει να διασφαλιστεί ότι το όχημα εκτελεί εφικτές και συνεχείς κινήσεις, το οποίο αποτυπώνεται στον παρακάτω περιορισμό.

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

$$\sum_{i \in N, i \neq d_v, i \neq k} \sum_{r \in T, r + \tau_{vjk} \leq t} x_{ijvr} \geq x_{jkvt} \quad \forall v \in V, j \in N, k \in N, j \neq d_v$$

$$\text{ή } j \neq k \neq d_v, t \in T \quad (2.52)$$

5. Για να είναι δυνατόν να συμβεί το ανωτέρω ο παρακάτω περιορισμός ισορροπεί το μοντέλο και διατηρεί την εφικτότητα των διαδρομών.

$$\sum_{s \in T, s \leq t} \sum_{i \in N, i \neq d_v} x_{ijvs} \geq \sum_{k \in N} \sum_{r \in T, k \neq j \neq d_v, t + \tau_{vjk} \geq r} x_{jkvr}$$

$$\forall v \in V, \quad \forall j \in N, \quad j \neq d_v, \quad t \in T \quad (2.53)$$

6. Επιπλέον κάθε όχημα πρέπει να επιστρέφει στην αποθήκη πριν τελειώσει ο μέγιστος επιτρεπόμενος χρόνος της διαδρομής του.

$$t \sum_{i \in N, i \neq d_v} x_{id_vt} \leq |T| \quad \forall v \in V, t \in T \quad (2.54)$$

7. Η διάκριση της συσκευής ψύξης σε ψυγείο ή καταψύκτη αποτελεί κομβικό σημείο στην μοντελοποίηση του προβλήματος.

$$y_v + x_v = 1 \quad v \in V \quad (2.55)$$

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

όπου y_v και x_v είναι δυαδικές μεταβλητές που ανάλογα με την τιμή που παίρνουν η συσκευή ψύξης λειτουργεί ως ψυγείο $y_v = 1$, ή καταψύκτης αν $x_v = 1$. [32]

2.1.4 Δι-αντικειμενικό πρόβλημα χωροθέτησης εγκαταστάσεων και δρομολόγησης οχημάτων χαμηλών εκπομπών άνθρακα

Το πρόβλημα χωροθέτησης εγκαταστάσεων και δρομολόγησης οχημάτων (**Location routing problem (LPR)**) είναι ένα συνδυαστικό πρόβλημα εφοδιαστικής αλυσίδας, όπου αρχικά προτείνονται οι τοποθεσίες που θα εγκατασταθούν οι αποθήκες και στη συνέχεια για τις προτεινόμενες αποθήκες επιλύεται ένα πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων. [53], [54].

Στο άρθρο [55] επιλύεται το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων και χωροθέτησης εγκαταστάσεων (**Biobjective low-carbon location-routing problem**), με δύο στόχους. Ο πρώτος στόχος αφορά το κόστος και περιλαμβάνει το γενικό κόστος, δηλαδή το συνολικό κόστος των οχημάτων, των μισθών, το κόστος κατανάλωσης καυσίμων, κ.α. Ο δεύτερος στόχος αφορά τον χρόνο αναμονής των πελατών και των οχημάτων, την ικανοποίηση των πελατών, και την συνολική αποτελεσματικότητα του δικτύου. Στην συγκεκριμένη προσέγγιση πραγματοποιείται η μεταφορά διάφορων τύπων φορτίου από ένα είδος οχημάτων.

Για τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης υπάρχουν τα παρακάτω είδη κόστους:

1. το προκαθορισμένο κόστος (C_1) που περιλαμβάνει το ενοίκιο οχημάτων και αποθηκών
2. το μεταβλητό κόστος (C_2) ανά ώρα που περιλαμβάνει την απόσβεση των οχημάτων σε συνάρτηση με τον χρόνο του κάθε δρομολογίου
3. Μισθοί των οδηγών (C_3)
4. Κόστος ζημίας (C_4) που περιλαμβάνει το κόστος που προκύπτει από κάποια ζημιά του οχήματος, το κόστος που αυξάνεται όταν ανοίγει η πόρτα του ψυγείου/καταψύκτη, διότι απαιτείται μεγαλύτερη κατανάλωση καυσίμου για τη σωστή διατήρηση της θερμοκρασίας στο εσωτερικό που βρίσκονται τα ευπαθή αγαθά

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

5. Το κόστος καυσίμων και το κόστος εκπομπών του άνθρακα στην ατμόσφαιρα (C_5)

Τα παραπάνω κόστη δίνονται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$C_1 = \sum_{i \in M} FD_i y_i + \sum_{i \in M} \sum_{j \in N} \sum_{h \in H} FV_h x_{ijh} \quad (2.56)$$

όπου y_i παίρνει την τιμή 1 αν η αποθήκη i ανήκει στο \mathbf{M} , σε κάθε άλλη περίπτωση παίρνει την τιμή 0. Το x_{ijh} παίρνει την τιμή 1 αν το όχημα τύπου h ανήκει στο \mathbf{H} και βρίσκεται στο τόξο (i, j) που ανήκει στο \mathbf{E} , σε κάθε άλλη περίπτωση παίρνει την τιμή 0. FD_i είναι το κόστος ενοικίου. FV_h είναι το προκαθορισμένο κόστος κάθε οχήματος.

$$C_2 = \sum_{j \in M} \sum_{h \in H} CVC_h AT_{jh} \quad (2.57)$$

όπου CVC_h είναι το μεταβλητό κόστος ανά ώρα για κάθε όχημα. Το AT_{jh} δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$AT_{jh} = (\max\{AT_{ih}, e_i\} + st_i + \frac{D_{ij}}{SP_{ij}})x_{ijh}, i \in V, j \in V, h \in H \quad (2.58)$$

όπου το AT_{jh} είναι η χρονική στιγμή όπου το όχημα τύπου $h \in H$ φτάνει στον κόμβο $j \in V$.

Το κόστος που αντιστοιχεί στους μισθούς των οδηγών δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_3 = \sum_{j \in M} \sum_{h \in H} ds_h AT_{jh} \quad (2.59)$$

όπου ds_h είναι ο μισθός του ενός οδηγού. Το κόστος ζημίας προέρχεται από το άθροισμα τεσσάρων επιμέρους παραγόντων.

$$C_{41} = p \sum_{i \in N} \sum_{h \in H} d_i y_{ih} (1 - e^{-a_1 (\max\{AT_{ih}, e_i\} - \sum_{j \in \zeta_i} st_j)}) \quad (2.60)$$

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

$$C_{42} = p \sum_{i \in N} \sum_{h \in H} d_i y_{ih} (1 - e^{-a_2 \sum_{j \in \zeta_i} st_j}) \quad (2.61)$$

$$C_{43} = p \sum_{i \in N} \sum_{h \in H} p_i y_{ih} (1 - e^{-a_1 (AT_{|\xi|} - \sum_{j \in \xi \setminus \zeta_i \setminus i} st_j)}) \quad (2.62)$$

$$C_{44} = p \sum_{i \in N} \sum_{h \in H} p_i y_{ih} (1 - e^{-a_2 \sum_{j \in \xi \setminus \zeta_i \setminus i} st_j}) \quad (2.63)$$

Άρα το συνολικό κόστος ζημίας υπολογίζεται από:

$$C_4 = C_{41} + C_{42} + C_{43} + C_{44} \quad (2.64)$$

$$C_5 = (c_{fs} + c_{cc} \cdot \beta) \left(\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{h \in H} FC1_{ijh} x_{ijh} + \sum_{i \in N} \sum_{h \in H} FC2_{ih} \right) \quad (2.65)$$

όπου $FC1_{ijh}$ αποτελεί το μοντέλο της κατανάλωσης καυσίμου και το $FC2_{ih}$ είναι το κόστος της κατανάλωσης καυσίμου κατα την αναμονή ή κατά την διάρκεια της εξυπηρέτησης των πελατών. Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος ελαχιστοποιεί το άθροισμα από τα παραπάνω κόστη, δηλαδή:

$$\min TC = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 \quad (2.66)$$

υπό τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

1. Αρχικά ισχύουν οι βασικοί περιορισμοί του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων και χωροθέτησης εγκαταστάσεων (**Location Routing problem**).
Επιπλέον ισχύουν οι περιορισμοί.
2. Δεν επιτρέπονται τα υπο-δρομολόγια:

$$x_{ijh} + x_{jih} \leq \forall i, j \in N, h \in H \quad (2.67)$$

3. Οι μη επιλεγμένες αποθήκες δεν πρέπει να εκχωρούν οχήματα:

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

$$\sum_{j \in N} x_{ijh} \leq y_i \quad \forall i \in M, h \in H \quad (2.68)$$

4. Για να ανοίξει μια αποθήκη θα πρέπει να εκχωρήσει οχήματα για την εξυπηρέτηση των πελατών:

$$\sum_{i \in N} \sum_{h \in H} x_{ijh} \geq y_i \quad \forall j \in M \quad (2.69)$$

5. Επιπλέον υπάρχουν όρια που σχετίζονται με τον αριθμό των εκχωρημένων οχημάτων, συμπεριλαμβανομένων των άνω και κάτω ορίων:

$$[\max\{\sum_{i \in N} d_i, \sum_{i \in N} p_i\} / \max\{CV\}] \leq \sum_{i \in M} \sum_{j \in N} \sum_{h \in H} x_{ijh} \leq |N| \quad (2.70)$$

6. Ο αριθμός των αποθηκών που πρέπει να ανοίξουν καθορίζεται από τον παρακάτω περιορισμό, ο οποίος δεν είναι πάντα εφικτός:

$$\sum_{j \in N} x_{ijh} + \sum_{j \in N} x_{jgh} \leq 1, \quad \forall j, g \in M, j \neq g, h \in H \quad (2.71)$$

2.1.5 Πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων βασιζόμενο στην ελάχιστη απώλεια

Το πρόβλημα της δρομολόγησης οχημάτων της ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας που βασίζεται στην ελάχιστη απώλεια μπορεί συνοπτικά να περιγραφεί ως εξής [38]. Από μία αποθήκη ή αλλιώς κέντρο διανομής ξεκινάνε οχήματα-ψυγεία, ενός είδους, με στόχο να εξυπηρετήσουν πελάτες με διαφορετική ζήτηση ο καθένας με βασικό στόχο την ελαχιστοποίηση της απώλειας, λαμβάνοντας υπόψη τα παρακάτω κόστη

1. Το κόστος της κατανάλωσης καυσίμου
2. Το κόστος ψύξης
3. Το κόστος ζημίας

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

Τα παραπάνω συνοψίζονται στις ακόλουθες εξισώσεις:

Το κόστος καυσίμου δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_1 = \sum_{k=1}^k \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ij}^k (C_{11} + P_k(C_{12} - C_{11})) \quad (2.72)$$

όπου το C_{1K} δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_{1k} = C_{11} + P_k(C_{12} - C_{11}) \quad (2.73)$$

όπου C_{11} είναι η κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα απόστασης όταν δεν υπάρχει φορτίο στο όχημα, και C_{12} όταν το όχημα μεταφέρει το μέγιστο δυνατό φορτίο του, και C_{1k} είναι η αντίστοιχη κατανάλωση του k -στου οχήματος και P_k είναι ο πραγματικός ρυθμός φορτίου και δίνεται από:

$$P_k = \frac{Q_k}{Q} \quad (2.74)$$

όπου του Q_k δίνεται από την εξίσωση:

$$Q_k = \sum_{i=1}^n x_i^k q_i \quad (2.75)$$

Το κόστος ψύξης δίνεται από:

$$C_2 = \sum_{k=1}^K x_i^k \left(\sum_{i=0}^n C_{21}(T_i - T_{i-1}) + \sum_{j=1}^n C_{22}T_s \right) \quad (2.76)$$

όπου C_{21} είναι το κόστος της μονάδας ψύξης κατά τη μεταφορά και C_{22} είναι το κόστος ψύξης κατά το ξεφόρτωμα και T_i είναι η χρονική στιγμή που εξυπηρετείται ο πελάτης i .

Το τελικό κόστος της ζημίας του φορτίου υπολογίζεται από:

$$C_3 = \sum_{k=1}^K x_i^k p \left(\sum_{i=0}^n \theta_1 Q_i (T_i - T_{i-1}) + \sum_{i=1}^n \theta_2 (Q_i - q_i) T_s \right) \quad (2.77)$$

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

όπου θ_1 είναι ο συντελεστής ζημιάς του φορτίου ανά μονάδα χρόνου και μονάδα βάρους κατά τη μεταφορά, θ_2 είναι ο συντελεστής ζημιάς του φορτίου ανά μονάδα χρόνου και μονάδα βάρους κατά τη διάρκεια της εκφόρτωσης. Η αντικειμενική συνάρτηση αποτελείται από την ελαχιστοποίηση των παραπάνω, δηλαδή:

$$\min z_2 = C_1 + C_2 + C_3 \quad (2.78)$$

Υπό των παρακάτω περιορισμών

1. Ο παρακάτω περιορισμός δείχνει ότι η τελική ζήτηση κάθε πελάτη δεν δύναται να είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη χωρητικότητα του οχήματος

$$\sum_{k=1}^K x_i^k q_i \leq Q, \forall k \in K \quad (2.79)$$

2. Ο επόμενος περιορισμός εξασφαλίζει ότι κάθε πελάτης εξυπηρετείται από ένα ακριβώς όχημα

$$\sum_{k=1}^K x_i^k = 1, \forall i \in N \quad (2.80)$$

3. Κάθε όχημα ξεκινάει το δρομολόγιο από το κέντρο διαλογής

$$\sum_{j=1}^K x_{ij}^k = \sum_{j=1}^K x_{ij}^k \leq 1, i = 0, \forall k \in K \quad (2.81)$$

4. Οι επόμενοι δύο περιορισμοί είναι μεταβλητές του προβλήματος

$$x_i^k = \begin{cases} 1, & \text{εάν στο σημείο } i \text{ πραγματοποιείται παράδοση από το όχημα } k \\ 0, & \text{σε άλλη περίπτωση} \end{cases} \quad (2.82)$$

$$x_{ij}^k = \begin{cases} 1, & \text{Το όχημα } k \text{ εκτελεί το δρομολόγιο από το σημείο } i \text{ στο } j \\ 0, & \text{σε άλλη περίπτωση} \end{cases} \quad (2.83)$$

2.1.6 Πράσινο πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων

Στη συγκεκριμένη προσέγγιση του πράσινου προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων (**green vehicle routing problem (GVRP)**) για την ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα [10] εκτός από τις βασικές αρχές του **VRP** που πρέπει να ικανοποιούνται, δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα ώστε όλη η διαδικασία να προκαλεί τη λιγότερη δυνατή οικολογική καταστροφή. Η αντικειμενική συνάρτηση της σχετικής προσέγγισης αποτελείται από την ελαχιστοποίηση των παρακάτω ειδών κόστους.

1. Κόστος λειτουργίας οχήματος
2. Κόστος απώλειας ποιότητας
3. Κόστος απώλειας φρεσκάδας
4. Κόστος ποινής
5. Κόστος κατανάλωσης ενέργειας
6. Κόστος φαινομένου θερμοκηπίου

Το κόστος λειτουργίας του οχήματος δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_1 = \sum_{y=1}^Y F_1 \cdot a_y \quad (2.84)$$

Κατά τη διάρκεια του δρομολογίου ενδέχεται να προκληθεί απώλεια στην ποιότητα των αγαθών και για αυτό τον λόγο υπάρχει και το ανάλογο κόστος το οποίο μπορεί να προκύψει είτε κατά τη διανομή

$$C_{21} = \sum_{y=1}^Y \sum_{i=0}^x b_i^y F_2 q_i (1 - K_1 e^{-\theta(t_i^y - t_0^y)}) \quad (2.85)$$

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

είτε κατά την εκφόρτωση

$$C_{22} = \sum_{y=1}^Y \sum_{i=0}^x b_i^y F_2 Q_i (1 - K_2 e^{-\theta q_j / xh}) \quad (2.86)$$

Άρα το τελικό κόστος απώλειας ποιότητας προκύπτει από την:

$$C_2 = C_{21} + C_{22} \quad (2.87)$$

όπου F_1 το κόστος λειτουργίας του οχήματος, F_2 είναι η τιμή της μονάδας των αγαθών της ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας, q_i , b_i^y είναι μεταβλητές που παίρνουν τιμές ανάλογα αν το όχημα κατευθύνεται από τον κόμβο i στον κόμβο j , Q_i είναι η ποσότητα των προϊόντων που έχουν απομείνει στο όχημα όταν έχει φύγει από τον κόμβο i και κατευθύνεται στον κόμβο j , K_1 και K_2 είναι συνεχείς μεταβλητές της ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας κατά τη διάρκεια του δρομολογίου ή κατά την εκφόρτωση αντίστοιχα.

Επιπλέον προκύπτει και κόστος που σχετίζεται με την απώλεια της φρεσκάδας των αγαθών το οποίο προκύπτει από τις παρακάτω εξισώσεις. Αρχικά από το ανάλογο σχετικό κόστος που προκύπτει κατά την διάρκεια του δρομολογίου:

$$C_{31} = \sum_{y=1}^Y \sum_{i=0}^x \sum_{j=0}^x c_{ij}^y t d_{ij}^y F_3 \quad (2.88)$$

όπως και κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της φορτοεκφόρτωσης:

$$C_{32} = \sum_{y=1}^Y \sum_{i=0}^x \sum_{j=0}^x b_i^y \frac{q_j}{xh} F_3 \quad (2.89)$$

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

Το τελικό κόστος απώλειας φρεσκάδας προκύπτει:

$$C_3 = C_{31} + C_{32} \quad (2.90)$$

όπου c_{ij}^y είναι μεταβλητή που παίρνει την τιμή 1 εάν το όχημα-ψυγείο μεταφέρει αγαθά από τον κόμβο i στον κόμβο j , F_3 είναι η μονάδα κόστους της μονάδας ψύξης κατά την διάρκεια της διαδρομής. F_3 είναι η μονάδα κόστους της μονάδας ψύξης κατά τη διάρκεια της φορτοεκφόρτωσης, Y είναι ο αριθμός των οχημάτων, b_i^y είναι μια μεταβλητή που παίρνει την τιμή 1 εάν το όχημα-ψυγείο παραδίδει αγαθά στον κόμβο i , q_j είναι η ζήτηση του κόμβου j , xh είναι η ταχύτητα εκφόρτωσης.

Επιπλέον στο συγκεκριμένο πρόβλημα προκύπτει και το κόστος ποινής το οποίο προκύπτει:

$$C_4 = \begin{cases} F_5 \sum_{y=1}^Y \sum_{i=0}^x \max(T_1 - t_i^y, 0), & t_i^y < T_1 \\ 0, & T_1 \leq t_i^y \leq T_2 \\ F_6 \sum_{y=1}^Y \sum_{i=0}^y \max(t_i^y - T_2, 0), & t_i^y > T_2 \end{cases} \quad (2.91)$$

όπου F_5 είναι η μονάδα κόστους όταν το όχημα φτάσει τον πελάτη εγκαίρως και F_6 είναι η μονάδα κόστους όταν το όχημα φτάσει στον πελάτη με καθυστέρηση, t_i^y είναι ο χρονική στιγμή κατά την οποία το όχημα y φτάνει στον κόμβο j .

Κατά τη διάρκεια των δρομολογίων τα οχήματα όπως και οι συσκευές ψύξης καταναλώνουν ενέργεια το κόστος της οποίας προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_5 = \sum_{y=1}^Y \sum_{i=0}^x \sum_{j=0}^x c_{ij}^y F_7 ([d_{ij} \cdot U(Q)] + [a_1(t_j^y - t_i^y) + a_2 \cdot \frac{q_j}{xh}]) \quad (2.92)$$

όπου F_7 είναι η μονάδα κόστους του καυσίμου, d_{ij} είναι η απόσταση μεταξύ των πελατών i και j , a_1 είναι η κατανάλωση καυσίμου της συσκευής ψύξης ανά μονάδα χρόνου κατά τη διάρκεια της μεταφοράς, a_2 είναι η κατανάλωση καυσίμου της συσκευής ψύξης ανά μονάδα χρόνου κατά τη διάρκεια της φορτοεκφόρτωσης, t_j^y είναι η χρονική στιγμή όταν το όχημα

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

φτάνει από τον πελάτη j , t_i^y είναι η χρονική στιγμή όταν το όχημα φτάνει από τον πελάτη i και q_j είναι η ζήτηση του πελάτη j . Στην συγκεκριμένη προσέγγιση προτείνεται και το κόστος του φαινομένου του θερμοκηπίου, το οποίο υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_6 = \sum_{y=1}^Y \sum_{i=0}^x \sum_{j=0}^x c_{ij}^y F_8(\text{NVC} \cdot ([d_{ij} \cdot U(Q)] + [a_1(t_j^y - t_i^y) + a_2 \frac{q_j}{xh}])) \cdot \text{CC} \cdot \text{OF} \cdot \frac{12}{44} + \sum d_{ij} \cdot 10^{-9} (EF_{CH_4} \cdot GWP_{CH_4} + EF_{N_2O} \cdot GWP_{N_2O}) \quad (2.93)$$

όπου EF_{N_2O} και EF_{CH_4} είναι οι εκπομπές των N_2O , CH_4 αντίστοιχα, GWP_{N_2O} , GWP_{CH_4} είναι η τάση υπερθέρμανσης του πλανήτη για το N_2O και το CH_4 αντίστοιχα, FC είναι η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων από τα οχήματα.

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος αποτελείται από την ελαχιστοποίηση των παραπάνω κοστών λαμβάνοντας υπόψιν και τις βλαβερές εκπομπές αερίων στο περιβάλλον.

Οι περιορισμοί του προβλήματος είναι οι εξής:

1. Αρχικά υπάρχει περιορισμός στον αριθμό των διαδρομών που μπορεί να εκτελέσει το κάθε όχημα.

$$\sum_{j=1}^x \sum_{y=1}^Y c_{ij}^y = Y, \quad i = 0 \quad (2.94)$$

2. Επιπλέον κάθε πελάτης μπορεί να εξυπηρετηθεί μόνο από ένα όχημα.

$$\sum_{y=1}^x b_i^y = 1, \quad i = 1, 2, 3, \dots, x \quad (2.95)$$

3. Η χωρητικότητα κάθε οχήματος δεν δύναται να είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη χωρητικότητα που ορίζεται από το πρόβλημα.

$$\sum_{i=1}^x b_i^y q_i \leq Q, \quad y = 1, 2, 3, \dots, Y \quad (2.96)$$

4. Το όχημα πρέπει να επιστρέψει στην αποθήκη από όπου ξεκίνησε.

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

$$\sum_{j=1}^x c_{ij}^y = \sum_{j=1}^x c_{ji}^y \leq 1, \quad i = 0, y = 1, 2, \dots, Y \quad (2.97)$$

5. Επιπλέον πρέπει να αναφερθεί ότι η διαδικασία της διανομής είναι συνεχής.

$$t_j^y = t_i^y + \frac{q_i}{xh} + td_{ij}^y \quad (2.98)$$

2.1.7 Πράσινο πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων για φρέσκα αγροτικά αγαθά

Το πράσινο πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων **GVRP** παρουσιάζεται με πολλές παραλλαγές, εστιάζοντας κάθε φορά σε συγκεκριμένο παράγοντα διατηρώντας όμως πάντα τη βασική του αρχή, να μειωθεί η περιβαλλοντική ζημιά όσο το δυνατόν περισσότερο.

Μια τέτοια σχετική προσέγγιση είναι και αυτή στο άρθρο [56], που αφορά το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με χρονικά παράθυρα (**VRPTW**), με την παραδοχή ότι επιτρέπεται η ενωρίτερη και η αργότερη άφιξη.

Το κέντρο διαλογής διαθέτει ένα μόνο είδος οχημάτων, επαρκή σε αριθμό, με συγκεκριμένη χωρητικότητα. Η ζήτηση του κάθε πελάτη δεν δύναται να υπερβαίνει τη μέγιστη χωρητικότητα των οχημάτων. Στη συγκεκριμένη προσέγγιση τίθεται και θέμα επιλογής οχήματος με βάση τη χωρητικότητά του και την επιθυμία του πελάτη, αν παραβιάζονται και οι δύο παραπάνω περιορισμοί το όχημα επιστρέφει στο κέντρο διαλογής. Τα κόστη που λαμβάνονται υπόψιν για τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης είναι τα εξής:

1. Προκαθορισμένο κόστος
2. Κόστος κατανάλωσης καυσίμου
3. Κόστος ψύξης
4. Κόστος ζημίας
5. Κόστος ποινής

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

Αρχικά το προκαθορισμένο κόστος

$$C_1 = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N x_{0ik} f_k \quad (2.99)$$

όπου x_{0ik} είναι μια μεταβλητή που παίρνει την τιμή 1 όταν μια εταιρεία αναθέτει το δρομολόγιο σε ένα όχημα, σε οποιαδήποτε άλλη περίπτωση παίρνει την τιμή 0, και f_k είναι το προκαθορισμένο κόστος του κάθε οχήματος, K είναι ο αριθμός των οχημάτων και N ο αριθμός των πελατών. Το κόστος κατανάλωσης καυσίμου και εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα εξαρτάται από την χωρητικότητα του οχήματος όπως και από την απόσταση που έχει να διανύσει.

$$C_2 = (c_{fuel} + u \cdot w) \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{ijk} \cdot \rho(Q_{ij}) d_{ij} \quad (2.100)$$

όπου c_{fuel} είναι η τιμή της μονάδας των καυσίμων, u είναι ο φόρος του διοξειδίου του άνθρακα που καλούνται να πληρώσουν οι εταιρίες, w είναι ένας παράγοντας του διοξειδίου του άνθρακα, x_{ijk} είναι μια μεταβλητή που παίρνει την τιμή 1 όταν το όχημα μεταβαίνει από τον κόμβο i στον κόμβο j , σε κάθε άλλη περίπτωση παίρνει την τιμή 0, $\rho(Q_{ij})$ είναι ο ρυθμός κατανάλωσης καυσίμου όταν το όχημα ταξιδεύει κατευθείαν από τον κόμβο i στον κόμβο j , d_{ij} είναι η απόσταση από τον κόμβο i στον κόμβο j .

Επιπλέον υπάρχει και το κόστος ψύξης το οποίο δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_3 = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N [(\alpha + C_f \frac{Q_{ij}}{100}) t_{ij}^k x_{ijk} + (b + C_f \frac{Q_{ij}}{100}) T_i y_{ik}] \quad (2.101)$$

όπου C_f είναι το κόστος διατήρησης των αγροτικών προϊόντων ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα βάρους, Q_{ij} είναι η χωρητικότητα του οχήματος διανύοντας το τόξο (i, j) , t_{ij}^k είναι ο χρόνος που απαιτείται όταν το k όχημα μεταβαίνει από τον κόμβο i στον κόμβο j , b είναι ο συντελεστής κατανάλωσης της συσκευής ψύξης κατά τη διαδικασία εκφόρτωσης του οχήματος, C_f είναι το κόστος διατήρησης φρεσκάδας των νωπών αγροτικών προϊόντων που επενδύει η επιχείρηση ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα βάρους κατά τη διαδικασία διανομής, T_i είναι ο χρόνος εξυπηρέτησης του πελάτη i , y_{ik} είναι μια μεταβλητή που παίρνει

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

την τιμή 1, αν ικανοποιηθεί η ζήτηση του πελάτη i από το όχημα k .

Όπως έχει αναφερθεί και σε άλλες περιπτώσεις είναι βασικό να υπολογίζεται το κόστος που προκύπτει από ενδεχόμενη ζημιά του φορτίου και το οποίο στη συγκεκριμένη περίπτωση δίνεται από:

$$C_4 = \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^N y_{ik} P[q_i(1 - e^{-\frac{\eta_1}{1 + \beta_f C_f}(t_i^k - t_0^k)}) + Q_{in}(1 - e^{-\frac{\eta_2}{1 + \beta_f C_f} T_i})] \quad (2.102)$$

όπου β_f , είναι η ελάχιστη τιμή του συντελεστή εξασθένησης της φρεσκάδας των αγροτικών αγathών, η_1 , είναι ο συντελεστής εξασθένησης της φρεσκάδας των νωπών αγροτικών προϊόντων κατά τη διάρκεια που το όχημα βρίσκεται σε κίνηση [57], t_i^k , είναι η χρονική στιγμή που το όχημα k φεύγει από τον πελάτη i , t_0^k είναι η χρονική στιγμή που το όχημα φεύγει από το κέντρο διανομής, Q_{in} είναι το βάρος του εμπορεύματος όταν το όχημα φεύγει από τον κόμβο j , η_2 είναι ο συντελεστής εξασθένησης της φρεσκάδας των νωπών αγροτικών προϊόντων κατά τη διάρκεια της εκφόρτωσης.

Το κόστος ποινής δίνεται από την εξίσωση

$$C_5 = \epsilon_1 \sum_{i=1}^N \max\{L_i - t_i, 0\} + \sum_{i=1}^N \max\{t_i - R_i, 0\} \quad (2.103)$$

όπου ϵ_1 είναι ο προεπιλεγμένος παράγοντας κόστους αν το όχημα φτάσει νωρίτερα από το κάτω όριο που ορίζει το χρονικό παράθυρο, ϵ_2 είναι ο προεπιλεγμένος παράγοντας κόστους αν το όχημα φτάσει αργότερα από το πάνω όριο που ορίζει το χρονικό παράθυρο, L_i , R_i είναι το κάτω και άνω όριο του χρονικού παραθύρου αντίστοιχα.

Η αντικειμενική συνάρτηση δίνεται από:

$$\min Z_1 = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 \quad (2.104)$$

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

υπό τους παρακάτω περιορισμούς:

1. Αρχικά τίθεται ο περιορισμός απαίτησης των πελατών για τη φρεσκάδα των αγαθών

$$F_i > F_d \quad \forall i \quad (2.105)$$

2. Η ζήτηση κάθε πελάτη δίνεται από τον περιορισμό

$$\sum_{i=1}^N q_i y_{ik} \leq Q_k, \quad \forall k \quad (2.106)$$

3. Κάθε πελάτης εξυπηρετείται πλήρως από ένα μόνο όχημα

$$\sum_{k=1}^K y_{ik} = 1 \quad (2.107)$$

4. Τα οχήματα πρέπει να ξεκινήσουν το δρομολόγιο τους από το κέντρο διανομής. Αφού τελειώσουν το δρομολόγιο τα οχήματα πρέπει να επιστρέψουν στο κέντρο διανομής.

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=0}^N x_{0jk} = \sum_{k=1}^K \sum_{j=0}^N x_{j0k} \quad (2.108)$$

5. Οι επόμενοι δύο περιορισμοί εξασφαλίζουν ότι κάθε πελάτης εξυπηρετείται μόνο από ένα όχημα.

$$\sum_{j=0}^N x_{ijk} = y_{jk}, \quad \forall i, k \quad (2.109)$$

$$\sum_{i=0}^N x_{ijk} = y_{ik}, \quad \forall j, k \quad (2.110)$$

6. Επιπλέον υπάρχει περιορισμός για την εξάλειψη των υποδιαδρομών στη διαδικασία της διανομής.

$$\sum_{i,j \in S \times S} x_{ijk} \leq |S| - 1, \quad S \subset \{1, 2, \dots, N\} \quad (2.111)$$

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

7. Ο παρακάτω περιορισμός εξασφαλίζει ότι η διαδικασία πραγματοποιείται με συνεχή τρόπο

$$t_j = t_i + T_i + t_{ij}, \quad \forall i, j \quad (2.112)$$

8. Τέλος ισχύει ότι

$$x_{ijk}, y_{ik} = 0 \quad \text{ή} \quad 1, \quad \forall k, i, j \quad (2.113)$$

2.1.8 Χρονοεξαρτώμενο πράσινο πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων

Σε άλλη προσέγγιση, που αναλύεται στο άρθρο [2], υλοποιείται το χρονοεξαρτώμενο πράσινο πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (time-depend green vehicle routing problem (TD-GVRP)) για τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης υπολογίζονται τα παρακάτω κόστη:

1. Προκαθορισμένο κόστος
2. Κόστος ψύξης
3. Κόστος κατανάλωσης καυσίμου
4. Κόστος ποινής
5. Κόστος ζημίας

Το προκαθορισμένο κόστος δίνεται από την εξίσωση:

$$C_1 = \sum_{k=1}^n v_k C_k \quad (2.114)$$

όπου το v_k είναι μια μεταβλητή που παίρνει την τιμή 1 εάν το όχημα k χρησιμοποιείται, αλλιώς παίρνει την τιμή 0 και C_k είναι το προκαθορισμένο κόστος του οχήματος της ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας.

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

Επιπλέον υπάρχει και το κόστος ψύξης, που περιλαμβάνει και το επιπλέον κόστος που προκύπτει όταν η πόρτα της συσκευής ψύξης παραμένει ανοιχτή κατά την φορτοεκφόρτωση. Το τελικό κόστος ψύξης δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_2 = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \sum_{k=1}^n x_{ij}^k P_f \frac{P_1(t_j^A - t_i^L)}{E} - x_{i0}^k P_f \frac{P_1(t_0^A - t_i^L)}{E} + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n y_j^k P_f \frac{P_2(t_j^L - t_j^A)}{E} \quad (2.115)$$

όπου x_{ij}^k είναι μια μεταβλητή που παίρνει τη τιμή 1 αν το όχημα k μεταβαίνει στον κόμβο j από τον κόμβο i , P_f είναι η τιμή της μονάδας του καυσίμου (πετρελαίου **diesel**), P_1 είναι η μονάδα ισχύς της ανεξάρτητης συσκευής ψύξης κατά τη διάρκεια που το όχημα βρίσκεται σε κίνηση, P_2 είναι η μονάδα ισχύς της ανεξάρτητης συσκευής ψύξης κατά τη διάρκεια της φορτοεκφόρτωσης, t_i^A είναι η χρονική στιγμή που το όχημα φτάνει στην μπροστινή αποθήκη i , t_i^L είναι η χρονική στιγμή που το όχημα αποχωρεί από στην μπροστινή αποθήκη i , E είναι την παραγωγή ενέργειας ανά λίτρο καυσίμου (πετρελαίου **diesel**), y_j^k είναι τα αγαθά που παραδίδονται από το όχημα k από την μπροστινή αποθήκη i .

Στη συγκεκριμένη προσέγγιση υπάρχει και το κόστος κατανάλωσης καυσίμου το οποίο δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_3 = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \sum_{k=1}^n x_{ij}^k P_f \left(\frac{\phi^* - \phi_0}{Q} Q_1 + \phi_0 \right) d_{ij} \quad (2.116)$$

όπου ϕ^* είναι ο ρυθμός της κατανάλωσης καυσίμου όταν το όχημα είναι φορτωμένο με το μέγιστο φορτίο, και όταν έχει μηδενικό φορτίο συμβολίζεται με ϕ_0 , Το Q_1 είναι μια συγκεκριμένη ποσότητα φορτίου και τέλος d_{ij} είναι η απόσταση από τον κόμβο i στον κόμβο j .

Επιπλέον για τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης λαμβάνεται υπόψιν και το κόστος για την εκπομπή του διοξειδίου του άνθρακα, λαμβάνοντας υποψη και την κυκλοφοριακή κίνηση. Το τελικό κόστος του διοξειδίου του άνθρακα υπολογίζεται από:

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

$$C_4 = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \sum_{k=1}^n x_{ij}^k C_{t\omega} \left(\frac{P_1(t_j^A - t_i^L)}{E} + \left(\frac{\phi^* - \phi_0}{Q} Q_1 + \phi_0 \right) d_{ij} \right) - \\ - x_{i0}^k C_{t\omega} \frac{P_1(t_0^A - t_i^L)}{E} + \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n y_j^k C_{t\omega} \frac{P_2(t_j^L - t_j^A)}{E} \quad (2.117)$$

Καθώς εξελίσσεται το δρομολόγιο υπάρχει η περίπτωση κάποιο όχημα να φτάσει στον προορισμό του εκτός των προκαθορισμένων χρονικών ορίων. Το αποτέλεσμα είναι να επιβάλλεται ένα κόστος ποινής το οποίο προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_5 = \sum_{i=1}^m (C_{et} \max\{ET_i - t_i^A, 0\} + C_{lt} \max\{t_i^A - LT, 0\} + C_{lt}^* \max\{t_0^A - LT_0, 0\}) \quad (2.118)$$

όπου $[ET_i, LT_i]$ είναι το χρονικό παράθυρο που μπορεί να εξυπηρετηθεί ο πελάτης.

Όπως συμβαίνει με όλα τα αγαθά που διατηρούνται μόνο σε συνθήκες ψύξης πολλές φορές δύναται να προκύψουν αλλοιώσεις, οι οποίες μπορεί να συμβούν είτε κατά τη διάρκεια του δρομολογίου είτε κατά τη διάρκεια της φορτοεκφόρτωσης, που επιφέρουν το αντίστοιχο κόστος. Το συνολικό κόστος ζημίας υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_6 = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n P_p Q_i^L (1 - e^{-\theta_1(t_j^A - t_i^L)}) + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n P_p Q_i^L (1 - e^{-\theta_2(t_i^L - t_i^A)}) \quad (2.119)$$

όπου θ είναι ο ρυθμός αλλοίωσης των αγαθών και συγκεκριμένα θ_1 είναι όταν αλλοιώνονται κατά τη διάρκεια του δρομολογίου, και θ_2 κατά τη διάρκεια της φορτοεκφόρτωσης [7], [2].

Η αντικειμενική συνάρτηση προκύπτει από την ελαχιστοποίηση των παραπάνω:

$$\min TC = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 \quad (2.120)$$

υπό τους παρακάτω περιορισμούς.

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

1. Κάθε όχημα εξυπηρετεί έναν μόνο πελάτη:

$$\sum_{k=1}^n \sum_{j=0}^m x_{ji}^k = \sum_{k=1}^n y_i^k = 1, i \in N \quad (2.121)$$

2. Κάθε όχημα έχει συγκεκριμένη χωρητικότητα:

$$\sum_{i=1}^m q_i y_i^k \leq Q \quad (2.122)$$

3. Κάθε όχημα ξεκινάει και επιστρέφει στην ίδια αποθήκη:

$$\sum_{j=1}^m x_{ij}^k = \sum_{j=1}^m x_{ji}^k \leq 1, i = 0 \quad (2.123)$$

4. Επιπλέον κάθε όχημα μπορεί να αποχωρήσει από έναν κόμβο αφού πρώτα έχει εξυπηρετήσει τον κόμβο αυτό:

$$\sum_{i=0}^m x_{ij}^k - \sum_{i=0}^m x_{ji}^k = 0, j \neq 0 \quad (2.124)$$

5. Επιπλέον τίθεται περιορισμός που αφορά τη μείωση του φορτίου κάθε οχήματος καθώς εξελίσσεται το δρομολόγιο, και η οποία κάθε φορά ισούται με τη ζήτηση του εκάστοτε κόμβου:

$$\sum_{i=1}^m (Q_i^A - Q_i^L) = q_i \quad (2.125)$$

6. Τέλος το κέντρο διανομής παρέχει μπροστινές αποθήκες:

$$\sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n y_j^k = m \quad (2.126)$$

2.1.9 Πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με οχήματα ετερογενούς στόλου για τη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα

Υπάρχουν προσεγγίσεις όπως αυτή που αναφέρεται στο άρθρο [58], που επιλύει το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με ετερογενή στόλο οχημάτων δύο επιπέδων και με μεικτά χρονικά παράθυρα, με στόχο τη χαμηλή εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα για την ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα (Low-Carbon Two-Echelon Heterogeneous-Fleet Vehicle Routing for Cold Chain Logistics under Mixed Time Window (LC-2EHVRP)).

Η εξυπηρέτηση των πελατών μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε εντός του χρονικού παραθύρου, είτε εκτός από αυτό με κάποια ποινή. Κάθε αποθήκη διαθέτει έναν συγκεκριμένο αριθμό ιδίων οχημάτων ψυγείων, και κάθε περιφερειακή αποθήκη έχει επίσης έναν αριθμό ιδίων μεταξύ τους οχημάτων. Ως περιφερειακές αποθήκες στην συγκεκριμένη προσέγγιση ορίζονται οι ενδιάμεσες αποθήκες μεταξύ της βασικής αποθήκης και των πελατών. Το φορτίο παραδίδεται από την κεντρική αποθήκη στις περιφερειακές αποθήκες και αυτή η διαδικασία ονομάζεται πρώτο επίπεδο, έπειτα το φορτίο μεταφέρεται από τις περιφερειακές αποθήκες στους πελάτες και αυτή η διαδικασία ονομάζεται δεύτερο επίπεδο .

Πιο συγκεκριμένα η αντικειμενική συνάρτηση του αποτελείται από τα παρακάτω κόστη:

1. Το προκαθορισμένο κόστος
2. Κόστος φθοράς
3. Κόστος κατανάλωσης ενέργειας
4. Κόστος διοξειδίου του άνθρακα

Αρχικά το προκαθορισμένο κόστος:

$$C_1 = \sum_{i \in D} \sum_{j \in S} \sum_{k_1 \in K_1} x_{ijk_1} f_{k_1} + \sum_{i \in S} \sum_{j \in C} \sum_{k_2 \in K_2} y_{ijk_2} f_{k_2} \quad (2.127)$$

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

όπου D είναι το σύνολο των υποψηφίων αποθηκών, S το σύνολο των υποψήφιων περιφερειακών αποθηκών, K_1 είναι ο αριθμός των οχημάτων του πρώτου επιπέδου, K_2 είναι ο αριθμός των οχημάτων του δεύτερου επιπέδου, x_{ijk_1} είναι μια μεταβλητή που παίρνει την τιμή 1 όταν το όχημα k_1 διανύει το τόξο (i, j) και 0 σε κάθε άλλη περίπτωση, f_{k_1} είναι το προκαθορισμένο κόστος του πρώτου επιπέδου, f_{k_2} είναι το προκαθορισμένο κόστος του δεύτερου επιπέδου, y_{ijk_2} είναι μια μεταβλητή που παίρνει την τιμή 1 όταν το όχημα k_2 διανύει το τόξο (i, j) και 0 σε κάθε άλλη περίπτωση.

Επιπλέον του προκαθορισμένου κόστους, υπάρχει και το κόστος φθοράς που δίνεται από την εξίσωση:

$$C_2 = p \left[\sum_{i \in N_1} \sum_{j \in N_1} \sum_{k_1 \in K_1} x_{ijk_1} Q_{ijk_1} (1 - e^{-\theta_1 \frac{d_{ij}}{v_1}}) + \sum_{i \in N_1} \sum_{j \in N_2} \sum_{k_2 \in K_2} y_{ijk_2} Q_{ijk_2} (1 - e^{-\theta_1 \frac{d_{ij}}{v_2}}) + \right. \\ \left. \sum_{i \in N_1} \sum_{j \in N_1} \sum_{k_1 \in K_1} x_{ijk_1} Q_{ijk_1} (1 - e^{-\theta_2 t s_i}) + \sum_{i \in N_2} \sum_{j \in N_2} \sum_{k_2 \in K_2} y_{ijk_2} Q_{ijk_2} (1 - e^{-\theta_2 t s_i}) \right] \quad (2.128)$$

Η ενέργεια που απαιτείται για τη διεκπεραίωση όλων των διαδικασιών μπορεί να υπολογιστεί με τον υπολογισμό επιμέρους κοστών. Το κόστος των καυσίμων συμπεριλαμβάνει το κόστος ενέργειας και το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις.

$$C_{31} = P_f F_1 \quad (2.129)$$

όπου P_f είναι η τιμή της μονάδας του καυσίμου

$$F_1 = \rho_1 \sum_{i \in N_1} \sum_{j \in N_1} \sum_{k_1 \in K_1} x_{ijk_1} \frac{d_{ij}}{v_1} + \rho'_1 \sum_{i \in N_2} \sum_{j \in N_2} \sum_{k_2 \in K_2} y_{ijk_2} \frac{d_{ij}}{v_2} + \\ + \rho_2 \sum_{i \in N_1} \sum_{j \in N_1} \sum_{k_1 \in K_1} x_{ijk_1} d_{ij} v_1^2 + \rho'_2 \sum_{i \in N_2} \sum_{j \in N_2} \sum_{k_2 \in K_2} y_{ijk_2} d_{ij} v_2^2 + \quad (2.130) \\ + \rho_3 \sum_{i \in N_1} \sum_{j \in N_1} \sum_{k_1 \in K_1} x_{ijk_1} (\mu + Q_{ijk_1}) d_{ij} + \rho'_3 \sum_{i \in N_2} \sum_{j \in N_2} \sum_{k_2 \in K_2} y_{ijk_2} (\mu' + Q_{ijk_2}) d_{ij}$$

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

όπου ρ_1, ρ_2, ρ_3 , είναι παράγοντες που αναλύονται εκτενέστερα στο άρθρο [58].

Το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_{32} = P_{el} F_2 \quad (2.131)$$

όπου P_{el} είναι η μονάδα της τιμής της ενέργειας και το F_2 δίνεται από την εξίσωση

$$F_2 = \Gamma \left[\sum_{i \in N_1} \sum_{j \in N_1} \sum_{k_1 \in K_1} x_{ijk_1} G_{k_1} \left(\frac{d_{ij}}{v_1} \right) + \sum_{i \in N_2} \sum_{j \in N_2} \sum_{k_2 \in K_2} y_{ijk_2} G_{k_2} \left(\frac{d_{ij}}{v_2} \right) + \right. \\ \left. \sum_{i \in N_2} \sum_{j \in N_2} \sum_{k_1 \in K_1} x_{ijk_1} G'_{k_1}(ts_j) + \sum_{i \in N_2} \sum_{j \in N_2} \sum_{k_2 \in K_2} y_{ijk_2} G'_{k_2}(ts_j) \right] \quad (2.132)$$

όπου τα G_{K_1}, G_{K_2} αντιπροσωπεύουν το θερμικό φορτίο μεταφοράς. Άρα το συνολικό κόστος ενέργειας προκύπτει από το άθροισμα των δύο παραπάνω κοστών δηλαδή:

$$C_3 = C_{31} + C_{32} \quad (2.133)$$

Επιπλέον λαμβάνεται υπόψιν και το κόστος που προκύπτει από τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα και δίνεται από την εξίσωση:

$$C_e = P_c \cdot (F_c - Q) \quad (2.134)$$

όπου P_c είναι η τιμή της εμπορίας του άνθρακα ανά μονάδα εκπομπών του άνθρακα. Επιπλέον η ικανοποίηση των πελατών, που θεωρείται πολύ σημαντική για την συγκεκριμένη προσέγγιση, δίνεται από την εξίσωση:

$$s(t_{ik2}) = \begin{cases} 1, & t_{ik2} \in [e_i, l_i] \\ \left(\frac{t_{ik2} - e'_i}{e_i - e'_i} \right)^\theta, & t_{ik2} \in [e'_i, e_i] \\ \left(\frac{l'_i - t_{ik2}}{l'_i - l_i} \right)^\theta, & t_{ik2} \in [l_i, l'_i] \\ 0, & t_{ik2} \notin [e'_i, l'_i] \end{cases} \quad (2.135)$$

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

όπου $[e_i, l_i]$ αποτελούν το χρονικό παράθυρο για την εξυπηρέτηση των πελατών. Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος είναι η ακόλουθη:

$$\min \frac{C_1 + C_2 + C_3 + C_e}{\sum_{i \in C} \sum_{k_2 \in K_2} s(t_{ik_2})} \quad (2.136)$$

υπό τους παρακάτω περιορισμούς:

1. Κάθε όχημα του δευτέρου επιπέδου εξυπηρετείται μόνο μία φορά.

$$\sum_{i \in N_2} \sum_{k_2 \in K_2} y_{ijk_2} = 1, \quad \forall j \in C \quad (2.137)$$

2. Οι επόμενοι δύο περιορισμοί εξασφαλίζουν ότι όλα τα οχήματα ξεκινούν από ένα σημείο εκκίνησης.

$$\sum_{i \in D} \sum_{j \in N_1} x_{ijk_1} \leq 1, \quad \forall k_1 \in K_1 \quad (2.138)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in N_2} y_{ijk_2} \leq 1, \quad \forall k_2 \in K_2 \quad (2.139)$$

3. Οι επόμενοι δύο περιορισμοί εξασφαλίζουν ότι δεν μπορεί να παραβιαστεί η μέγιστη χωρητικότητα οποιουδήποτε τύπου οχήματος.

$$\sum_{j \in N_1} x_{ijk_1} Q_{ijk_1} \leq q_1 \quad \forall i \in D, \quad \forall k_1 \in K_1 \quad (2.140)$$

$$\sum_{j \in N_2} y_{ijk_2} Q_{ijk_2} \leq q_2, \quad \forall i \in S, \forall k_2 \quad (2.141)$$

4. Επιπλέον πρέπει να τηρείται η μέγιστη χωρητικότητα της αποθήκης.

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

$$\sum_{j \in N_1} \sum_{k \in K_1} x_{ijk_1} Q_{ijk_1} \leq M_i, \quad \forall i \in N_1 \quad (2.142)$$

$$\sum_{j \in N_2} \sum_{k \in K_2} y_{ijk_2} Q_{ijk_2} \leq M_i, \quad \forall i \in S \quad (2.143)$$

5. Οι επόμενοι δύο περιορισμοί εξασφαλίζουν ότι δεν πραγματοποιούνται υπο-διαδρομές.

$$\sum_{i \in S'} \sum_{j \in S'} x_{ijk_1} \leq |S'| - 1, \quad \forall k_1 \in K_1, S' \subseteq S, |S'| \geq 2 \quad (2.144)$$

$$\sum_{i \in C'} \sum_{j \in C'} y_{ijk_2} \leq |C'| - 1, \quad \forall k_2 \in K_2, C' \subseteq C, |C'| \geq 2 \quad (2.145)$$

6. Οι επόμενοι περιορισμοί αφορούν τον περιορισμό του χρόνου που υπάρχει για κάθε όχημα.

$$t_{jk_1} = \sum_{k_1 \in K_1} x_{ijk_1} (T_{ik_1} + ts_i + \frac{d_{ij}}{v_1}) \quad \forall i, j \in N_1 \quad (2.146)$$

$$t_{jk_2} = \sum_{k_2 \in K_2} x_{ijk_2} (t_{ik_2} + ts_i + \frac{d_{ij}}{v_2}) \quad \forall i, j \in N_2 \quad (2.147)$$

7. Ο επόμενος περιορισμός εξασφαλίζει την ποιότητα των αγαθών που παραδίνονται ώστε να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις της ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας.

$$\sum_{i \in D} \sum_{j \in N_1} \sum_{k_1 \in K_1} x_{ijk_1} Q_{ijk_1} = \sum_{i \in S} \sum_{j \in N_2} \sum_{k_2 \in K_2} y_{ijk_2} Q_{ijk_2} = \sum_{j \in C} D_j \quad (2.148)$$

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

8. Ο επόμενος περιορισμός εξασφαλίζει ότι η ποιότητα των αγαθών του κάθε οχήματος κατά τη διάρκεια της παράδοσης ικανοποιούν τις απαιτήσεις των πελατών.

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in N_2} y_{ijk_2} Q_{ijk_2} = \sum_{(i,j) \in N_2} \sum_{(i,j) \in N_2} y_{ijk_2} D_j, \forall k_2 \in K_2 \quad (2.149)$$

9. Επιπλέον δεν επιτρέπεται η απευθείας μετακίνηση από αποθήκη σε αποθήκη.

$$\sum_{k_1 \in K_1} x_{ijk_1} = 0, \quad \forall i, j \in D \quad (2.150)$$

10. Οι επόμενοι δύο περιορισμοί εξασφαλίζουν τη ροή ισορροπίας μεταξύ δύο επιπέδων.

$$\sum_{i \in N_1} \sum_{k_1 \in K_1} x_{ijk_1} Q_{ijk_1} - \sum_{i \in N_1} \sum_{k_1 \in K_1} x_{jik_1} Q_{jik_1} = \sum_{i \in N_2} \sum_{k_2 \in K_2} y_{jik_2} Q_{jik_2}, \quad \forall j \in S \quad (2.151)$$

$$\sum_{i \in N_2} \sum_{k_2 \in K_2} y_{ijk_2} Q_{ijk_2} - \sum_{i \in N_2} \sum_{k_2 \in K_2} y_{jik_2} Q_{jik_2} = D_j, \quad \forall j \in C \quad (2.152)$$

11. Επιπλέον οι μεταβλητές απόφασης και όλες οι παράμετροι του προβλήματος είναι θετικοί αριθμοί.

2.1.10 Άλλες μοντελοποιήσεις

Εκτός από τις βασικές προτεινόμενες προσεγγίσεις, υπάρχει πληθώρα άλλων στη διαθέσιμη βιβλιογραφία που εξετάζουν διάφορες παραμέτρους. Υπάρχουν προσεγγίσεις που ενώ

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

προτείνουν μοντέλα για τη μεταφορά ευπαθών προϊόντων, δεν εξετάζουν καθόλου τους περιορισμούς και γενικά τη θερμοκρασία και την ποιότητα των τροφίμων [59].

Στη προσέγγιση που αναλύεται στο άρθρο [31], επιλύεται το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με χρονικά παράθυρα (**Time windows vehicle routing problem (VRPTW)**) λαμβάνοντας υπόψη την κατανάλωση καυσίμου. Επιπλέον ισχύουν οι παρακάτω παραδοχές. Υπάρχουν οχήματα με διαφορετική κατανάλωση καυσίμου όπως συμβαίνει άλλωστε στις ρεαλιστικές καταστάσεις. Επιπρόσθετα, εκτός από τους βασικούς περιορισμούς του **VRP**, υπάρχει περιορισμός που σχετίζεται με χρονικά παράθυρα για την εξυπηρέτηση των πελατών, δηλαδή δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί κάποιος πελάτης εκτός χρονικών παραθύρων, καθώς και περιορισμός που αφορά αρνητικά σχόλια σε σχέση με την ικανοποίηση των πελατών. Στη συγκεκριμένη προσέγγιση μοντελοποιείται ως πολυαντικειμενικό πρόβλημα με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους και των αρνητικών σχολίων που αφορούν την ικανοποίηση των πελατών. Στόχος του παραπάνω προβλήματος είναι η ελαχιστοποίηση του τελικού κόστους και η μεγιστοποίηση της ικανοποίησης των πελατών. [31]

Το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων και χωροθέτησης εγκαταστάσεων προσεγγίζεται στο άρθρο [60] για την μεταφορά ευπαθών προϊόντων με στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους.

Στο άρθρο [61] προτείνεται ένα μοντέλο ταυτόχρονης δρομολόγησης οχημάτων και αποθεματοποίησης (**inventory routing problem (IRP)**). Η βασική αλλαγή που παρατηρείται από την κλασική περίπτωση, είναι η εκχώρηση ενός χρονικού ορίου στη διαδρομή και εξαρτάται από τους πελάτες. Αν ένας πελάτης βρίσκεται σε απομακρυσμένη τοποθεσία από την αποθήκη, θα πρέπει το χρονικό όριο να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να είναι εφικτή η εξυπηρέτηση του και μπορεί πρακτικά να εξυπηρετηθεί από εξωτερικούς συνεργάτες. Ο στόχος της συγκεκριμένης προσέγγισης είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους που περιλαμβάνει το κόστος καυσίμων, το κόστος λειτουργίας των συσκευών ψύξης, το κόστος διαδρομής, το κόστος αποθήκευσης του καυσίμου, το προκαθορισμένο κόστος και το κόστος ποινής έλλειψης αποθεμάτων.

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

Στο άρθρο [62] αναλύεται μια δι- αντικειμενική προσέγγιση για την επίλυση του δύο επιπέδων προβλήματος χωροθέτησης εγκαταστάσεων και δρομολόγησης οχημάτων με χρονικά παράθυρα (**two-echelon location-routing problem with time-windows (2E-LRPTW)**) με στόχους την ελαχιστοποίηση του κόστους και την προστασία του περιβάλλοντος.

Στο άρθρο [63] προτείνεται μια προσέγγιση για την επίλυση του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων της ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας με στόχο την ποιότητα σε συνδυασμό με αποφάσεις παραγωγής (**quality-driven cold chain vehicle routing problem coupled with manufacturing re-manufacturing decisions (QDCCVRP-MR)**). Το μοντέλο που προτείνεται θεωρείται ως πολυ-αντικειμενικό με στόχο το τελικό κόστος και την ποιότητα στην παρασκευή και στην διανομή των αγαθών.

Στο άρθρο [26] επιλύεται μια επέκταση του προβλήματος της δρομολόγησης οχημάτων με χρονικά παράθυρα (**VRPTW**) στο στοχαστικό πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με χρονικά παράθυρα (**stochastic vehicle routing problem with time-windows (SVRPTW)**). Ο στόχος της σχετικής προσέγγισης είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους της διαδρομής χωρίς παραβίαση των χρονικών παραθύρων.

Στο άρθρο [64] αναπτύσσεται ένα μοντέλο για την επίλυση του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων με περιορισμό στη χωρητικότητα και στη ψύξη (**refrigerated capacitated vehicle routing problem (RCVRP)**). Ο στόχος του είναι η ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας.

Στο άρθρο [65] προτείνεται μια προσέγγιση για το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με πολλούς περιορισμούς (**rich vehicle routing problem (RVRP)**) με βασικό στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους διαδρομής.

Υπάρχουν μοντελοποιήσεις που προσεγγίζουν το πρόβλημα δυναμικά, καθώς εξελίσσεται σε πραγματικό χρόνο. Στο άρθρο [66] προτείνεται μια τέτοια προσέγγιση που επιλύει το

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

δυναμικό πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (**Dynamic vehicle routing problem (DVRP)**) . Στόχος του προβλήματος είναι η μείωση του συνολικού κόστους.

Στο άρθρο [67] επιλύεται το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με αυστηρά χρονικά παράθυρα και στοχαστικό χρόνο εξυπηρέτησης (**vehicle routing problem with hard time windows and a stochastic service time (VRPTW-ST)**). Ο στόχος της σχετικής προσέγγισης είναι η ελαχιστοποίηση της διανυθείσας απόστασης και του αριθμού των οχημάτων.

Στο άρθρο [68] προτείνεται το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με ταυτόχρονη παράδοση και παραλαβή αγαθών (**vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up (VRPSDP)**) με στόχο τη μείωση της φθοράς του φορτίου και άλλων κόστων της εφοδιαστικής αλυσίδας λαμβάνοντας ιδιαίτερα υπόψιν την εξωτερική θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Στο άρθρο [69] προτείνεται το **VRPTW** με στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους διαδρομής δίνοντας βαρύτητα στη διατήρηση των αγαθών.

Στο άρθρο [70] προτείνεται ένας συνδυασμός προκαθορισμένης σειράς και χρονοεξαρτώμενου προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων με χρονικά παράθυρα για ευαίσθητα αγαθά (**order selection and time-dependent vehicle routing problem with time window for perishable product delivery (COSTDVRPTW)**) με στόχο τη μεγιστοποίηση των εσόδων του παρόχου με βάση έναν σχεδιασμό για σταθερό αριθμό διαδρομών. Επιπλέον εξετάζεται η ζήτηση και το χρονικό διάστημα που μπορεί να αποθηκευτεί ένα εμπόρευμα χωρίς να καταστεί ακατάλληλο για χρήση. Επιπλέον εξετάζονται τα χρονικά παράθυρα και τα ασταθή χρονικά παράθυρα, που σημαίνει ότι τα αγαθά πρέπει να παραδοθούν πριν αλλοιωθεί η ποιότητά τους. Η ώρα αναχώρησης κρίνεται πολύ σημαντική και απαραίτητη καθώς η ενωρίτερη αναχώρηση από την αποθήκη δύναται να είναι αναποτελεσματική καθώς ο χρόνος έναρξης εξυπηρέτησης των πελατών μπορεί να είναι μεταγενέστερος. Επιπλέον η χρονοεξαρτώμενη ροή της κυκλοφοριακής κίνησης λαμβάνεται υπόψιν καθώς διαδραματίζει σημαντικό ρόλο για τις παρεχόμενες υπηρεσίες. Στόχος της συγκεκριμένης προσέγγισης είναι η μεγιστοποίηση του τελικού οφέλους λαμβάνοντας υπόψιν τις πιθανές απορρίψεις παραγγελιών.

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

Στο άρθρο [71] επιλύεται το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με χρονικά παράθυρα και ετερογενή στόλο, λαμβάνοντας υπόψη την ικανοποίηση των πελατών, για τη μεταφορά ευαίσθητων αγαθών, με στόχο τη μείωση του τελικού κόστους και τη μεγιστοποίηση της ικανοποίησης των πελατών.

Στην προσέγγιση που αναλύεται στο άρθρο [72] προτείνεται ένα πολυαντικειμενικό μοντέλο για την επίλυση του **VRP** με χρονικά παράθυρα για τη μεταφορά και παράδοση ιδιαίτερα ευπαθών προϊόντων, ικανοποιώντας όλους τους περιορισμούς του προβλήματος και επιπλέον επιδιώκεται η μεγιστοποίηση της φρεσκάδας των προϊόντων. Πραγματοποιήθηκαν διάφορα σενάρια, ώστε να διαπιστωθεί ποιο φέρνει τα καλύτερα αποτελέσματα, χρησιμοποιώντας δύο μεθόδους.

Στη μεταφορά λαχανικών, που αποτελούν ένα πολύ ευαίσθητο τρόφιμο ως προς τη μεταφορά του έχει προταθεί ένα μοντέλο **VRP** με χρονικά παράθυρα και χρονοεξαρτόμενο, δηλαδή, ο χρόνος της διαδρομής μεταξύ των δύο πελατών εξαρτάται και από την απόσταση και από την ώρα της ημέρας. Με το συγκεκριμένο μοντέλο αποτυπώνεται η επίπτωση στη διατήρηση των λαχανικών κατά τη διαδικασία μεταφοράς [27].

Στο άρθρο [73] παρουσιάζεται το σύνθετο πρόβλημα χωροθέτησης εγκαταστάσεων και αποθεματοποίησης και δρομολόγησης οχημάτων χρησιμοποιώντας ένα σύστημα δύο επιπέδων. Στόχος του προβλήματος είναι η εύρεση μιας στρατηγικής διατήρησης αποθεμάτων, ο αριθμός και η θέση των αποθηκών και οι σχετικές αποφάσεις για την δρομολόγηση των οχημάτων με ή χωρίς να ληφθεί υπόψη η ικανοποίηση των πελατών.

2.2 Ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα των εμβολίων

Υπάρχει και μια άλλη κατηγορία εφαρμογών της ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας, και είναι η ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα έκτακτων καταστάσεων. Βασικό στοιχείο αποτελεί η διαβεβα-

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

ίωση για σταθερή και αξιόπιστη ποιότητα αγαθών. Η ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα έκτακτων καταστάσεων περιλαμβάνει τη διαδικασία της μεταφοράς και διανομής αγαθών όταν τεθεί σε λειτουργία ένας μηχανισμός αντιμετώπισης εκτάκτων αναγκών ή καταστάσεων έκτακτης ανάγκης. Έχει μελετηθεί εκτενώς από πολλές οπτικές, ποια πρέπει να είναι τα χαρακτηριστικά της, πως θα μοντελοποιηθεί το σύστημα του μηχανισμού προστασίας κ.α [74], [75].

Εκτός από μεταφορά τροφίμων, η ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα περιλαμβάνει και τη μεταφορά εμβολίων, τα οποία είναι εξαιρετικά ευαίσθητα στη θερμοκρασία [19]. Η εφοδιαστική αλυσίδα των εμβολίων ορίζεται από τον Lee [76], ως ένα σύνθετο σύστημα που αποτελείται από τοποθεσίες, εξοπλισμού αποθήκευσης, οχήματα, διαδρομές για την μεταφορά των οχημάτων και ανθρώπινο δυναμικό που διαχειρίζεται τα εμβόλια από το στάδιο της παραγωγής μέχρι το σημείο παράδοσης-χορήγησης. Η αβεβαιότητα που υπάρχει, οι κίνδυνοι που ελλοχεύουν και οι διαταραχές που σχετίζονται με την εφοδιαστική αλυσίδα των εμβολίων την καθιστούν μια περίπλοκη διαδικασία. Ως εκ τούτου ο σχεδιασμός και η μοντελοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας των εμβολίων απαιτούν προσεκτικό και λεπτομερή σχεδιασμό και εφαρμογή [76].

Ορμώμενοι από το γεγονός της διακίνησης του μεγάλου όγκου εμβολίων, ειδικά μετά το ξέσπασμα του **COVID-19**, πολλοί επιστήμονες άρχισαν την εντατική μελέτη σχετικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης, με στόχο την αποτελεσματική διαχείριση της μεταφοράς και της διανομής των εμβολίων [77], [78].

Συγκεκριμένα τα εμβόλια κατά του **COVID-19** έχουν ειδικές απαιτήσεις σε όλες τις εκφάνσεις της εφοδιαστικής αλυσίδας, από την κατασκευή, τη μεταφορά, την αποθήκευση και τελικά μέχρι τη διανομή στις εγκαταστάσεις υγειονομικής περίθαλψης. Ως εκ τούτου, επιβάλλεται να εφαρμόζονται αποτελεσματικά οι πρακτικές της ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας, που να υποστηρίζονται από τεχνολογία παρακολούθησης θερμοκρασίας, ώστε να διασφαλίζεται η διατήρηση της παραγωγής και να ελαχιστοποιείται η σπατάλη πόρων και ενέργειας [20].

Ειδικότερα τα εμβόλια του **COVID-19** ανάλογα με την τεχνολογία που είναι κατασκευα-

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

σμένα απαιτούν και διαφορετικές συνθήκες διατήρησης. Για παράδειγμα το εμβόλιο της **Pfizer** απαιτεί τις πιο αυστηρές συνθήκες, και συγκεκριμένα πρέπει να διατηρείται στους -70 βαθμούς Κελσίου. Αυτό το γεγονός αποτελεί μεγάλη πρόκληση για την επιστημονική κοινότητα και ειδικά για τον τρόπο που θα γίνει η μεταφορά του [20].

Τα περισσότερα εμβόλια διατηρούνται στο ψυγείο σε θερμοκρασίες μεταξύ 2 και 8 βαθμών Κελσίου [79]. Σχετικά με τη θερμοκρασία των σχετικών εμβολίων διαφορετικών εταιρειών ισχύουν τα εξής:

- **Pfizer**

Το εμβόλιο της **Pfizer** απαιτεί τις πιο αυστηρές συνθήκες αποθήκευσης, σε υπερ κρύο καταψύκτη στους -70 βαθμούς Κελσίου. Μόλις το εμβόλιο φτάσει από τη **Pfizer** στον τελικό προορισμό πρέπει να μεταφερθεί σε υπερ κρύο καταψύκτη εντός 5 λεπτών.

- **Monderna**

Το εμβόλιο της **Monderna** πρέπει να μεταφερθεί στο ψυγείο αμέσως μετά την παραλαβή του. Δύναται να διατηρηθεί στο ψυγείο σε θερμοκρασίες μεταξύ 2 και 8 βαθμών Κελσίου για 30 μέρες .

- **Johnson and Johnson**

Το εμβόλιο της **Johnson and Johnson** πρέπει να μεταφερθεί στο ψυγείο κατά την άφιξη στον τελικό προορισμό. Δύναται να διατηρηθεί στο ψυγείο σε θερμοκρασίες μεταξύ 2 και 8 βαθμών Κελσίου για 3 μήνες.

- **AstraZeneca**

Το εμβόλιο της **AstraZeneca** πρέπει να μεταφερθεί στο ψυγείο κατά την άφιξη στον τελικό προορισμό. Δύναται να διατηρηθεί στο ψυγείο σε θερμοκρασίες μεταξύ 2 και 8 βαθμών Κελσίου έως 6 μήνες. Θα πρέπει να προστατεύεται από το φως [21].

Υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις που παρουσιάζουν συγκεκριμένα μοντέλα για την μοντελοποίηση της ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας που αφορά την μεταφορά εμβολίων. Συγκεκριμένα έχουν αναπτυχθεί αρκετοί αλγόριθμοι που επιλύουν το **VRP** με στόχο την βελτίωση

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

των διάφορων λειτουργιών της ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας [31].

Στο άρθρο [80] επιλύεται το πολυαντικειμενικό πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με στοιχεία ενός ραδγαία αναπτυσσόμενου αρθρωτού δικτύου εφοδιαστικής αλυσίδας, απομακρυσμένης διαχείρισης, που ενεργοποιείται από βιομηχανικές ψηφιακές τεχνολογίες, με στόχο τη μείωση του συνολικού κόστους της διαδρομής. Στην συγκεκριμένη προσέγγιση προτείνονται δύο αντικειμενικές συναρτήσεις. Η πρώτη αφορά την μείωση του συνολικού κόστους διαδρομής και η δεύτερη περιλαμβάνει το άθροισμα του συνολικού κόστους ενωρίτερης άφιξης, καθυστερημένης άφιξης και το συνολικό κόστος αποζημείωσης.

Παρόμοια προσέγγιση προτείνεται στο άρθρο [81], όπου επιλύεται ένα πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων, που παρέχει τη δυνατότητα ικανοποίησης άμεσων αναγκών, με στόχο τη συνολική μείωση του κόστους διαδρομής.

Στο άρθρο [82] προτείνεται μια προσέγγιση για την επίλυση του προβλήματος **VRPTW** για τη μεταφορά εμβολίων με στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους.

Στο άρθρο [83] επιλύεται με πολυαντικειμενική προσέγγιση το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με περιορισμό χωρητικότητας με επείγον χαρακτήρα (**vehicle routing problem with urgency (CVRP-U)**). Ο πρώτος στόχος του σχετίζεται με το χρόνο παράδοσης και ο δεύτερος σχετίζεται με τη μολυσματικότητα της εκάστοτε κατάστασης.

Στο άρθρο [84] αναλύεται το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων για μεταφορά εμβολίων (**vaccine distribution routing model (VDRM)**) με στόχο την ελαχιστοποίηση της απόστασης. Η συγκεκριμένη προσέγγιση βασίζεται στη χρήση οχημάτων που διαθέτουν μηχανισμό ψύξης. Το ανοσοβιολογικό φορτίο συσκευάζεται σε ειδικούς ψύκτες διογκωμένης πολυστερίνης με ανακυκλώσιμα στοιχεία πάγου στο κάτω μέρος και στα πλαϊνά του τοιχώματος του κουτιού συσκευασίας.

Κεφάλαιο 2. Ανάλυση μοντελοποιήσεων ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας

Στο [85], ο μόνος περιορισμός που λαμβάνεται υπόψιν είναι η μέγιστη χωρητικότητα, χωρίς να υπάρχει στους περιορισμούς η διατήρηση της θερμοκρασίας και δεν υπάρχει επιπλέον καμία ποινή. Επιπλέον έχουν προταθεί και μοντέλα που συνδυάζουν **VRP** με το πρόβλημα χωροθέτησης εγκαταστάσεων, τα οποία έχουν λάβει μεγάλη προσοχή τον τελευταίο καιρό [86], [22].

3 Ανάλυση μεθόδων επίλυσης

Υπάρχουν πολλές προσεγγίσεις επίλυσης του **VRP** της ψυχρής αλυσίδας που χρησιμοποιούνται ευρετικούς, μεθευρετικούς, γενετικούς, εξελικτικούς ή αλγόριθμους εμπνευσμένους από τη φύση, κ.α. Η επιλογή του αλγόριθμου επίλυσης αποτελεί κομβικό στοιχείο στην αποτελεσματική προσέγγιση του προβλήματος, καθώς ορισμένοι αλγόριθμοι παράγουν βέλτιστα αποτελέσματα για τα συγκεκριμένα προβλήματα. Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται οι αλγόριθμοι επίλυσης για τις προσεγγίσεις που αναλύθηκαν και παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2.

3.0.1 Ευρετικές μέθοδοι

Στο άρθρο [26], που αναφέρεται στην ενότητα 2.1.10 για την επίλυση του σχετικού προβλήματος προτείνεται μια απλή ευρετική προσέγγιση, μια επέκταση του αλγόριθμου του πλησιέστερου γείτονα με προσανατολισμό χρόνου (**Time-Oriented Nearest-Neighbor Heuristic**) όπου πραγματοποιήθηκε μια προσαρμογή στα όρια των χρονικών παραθύρων για την καλύτερη προσαρμογή στο πρόβλημα που επιλύεται.

3.0.2 Μεθευρετικές μέθοδοι

Πολλές φορές οι αλγόριθμοι τοπικής αναζήτησης συγκλίνουν σε κάποιο τοπικό ελάχιστο και δεν μπορούν να ξεκολλήσουν από αυτό ή να δώσουν καλύτερο αποτέλεσμα. Για αυτόν τον λόγο εφαρμόζονται μεθευρετικοί αλγόριθμοι οι οποίοι βοηθούν να ξεπεραστεί το παραπάνω πρόβλημα. Υπάρχουν πολλοί μεθευρετικοί αλγόριθμοι καθώς και υβριδικές μορφές αυτών. Παρακάτω παρουσιάζονται οι μεθευρετικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιήθηκαν για

Κεφάλαιο 3. Ανάλυση μεθόδων επίλυσης

την επίλυση των σχετικών προβλημάτων που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2.

Μηχανισμός αναζήτησης γειτονιάς (**Neighborhood search mechanism**)

Στο άρθρο [63], που αναφέρεται στην ενότητα 2.1.10, προτείνεται μια ευρετική προσέγγιση, (**modified version of the Variable Neighborhood Search (VNS)**) για την επίλυση του σχετικού προβλήματος. Το μοντέλο που παρουσιάζεται δύναται να διαιρεθεί σε δύο φάσεις. Αρχικά στη φάση της κατασκευής-επανακατασκευής και στη φάση της δρομολόγησης του οχήματος.

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος αποτελεί μία τροποποίηση της μεθόδου της μεταβλητής γειτονιάς αναζήτησης, έχει την ικανότητα να αλλάζει την γειτονιά αναζήτησης της λύσης, δηλαδή να πραγματοποιεί αναζήτηση σε ένα σύνολο από γειτονιές μέσω των αλγορίθμων τοπικής αναζήτησης [87].

Στο άρθρο [55] που έχει αναλυθεί στο υποκεφάλαιο 2.1.4 χρησιμοποιήθηκε ο παραπάνω αλγόριθμος. Εφαρμόστηκαν 9 ειδών τελεστές, 2-opt, swap, insert, segment-based swap, segment-based insert, add, decompose, insert+, swap+ κινήσεις.

Προσαρμοστική αναζήτηση μεγάλης γειτονιάς (**Adaptive large neighborhood search- ALNS**)

Ο αλγόριθμος της προσαρμοστικής αναζήτησης μεγάλης γειτονιάς (**ALNS**) αποτελεί μία μέθοδο η οποία καταστρέφει και δημιουργεί νέες λύσεις μέσα στην ίδια αναζήτηση με στόχο μια καλύτερη λύση. Σε κάθε καταστροφή και δημιουργία νέας λύσης, εκχωρείται μια μεταβλητή βάρους η οποία διενεργεί έλεγχο για το πόσο συχνά εφαρμόζεται η παραπάνω μέθοδος κατά την διαδικασία της αναζήτησης. Καθώς εξελίσσεται η διαδικασία τα βάρη προσαρμόζονται δυναμικά. Η επιλογή της γειτονιάς που θα εφαρμοστεί η παραπάνω διαδικασία ελέγχεται και αυτή δυναμικά με κριτήριο την καταγεγραμμένη απόδοση που παρουσιάζει η κάθε γειτονιά [88].

Κεφάλαιο 3. Ανάλυση μεθόδων επίλυσης

Ο παραπάνω αλγόριθμος εφαρμόστηκε στο άρθρο [50] που αναλύεται στο υποκεφάλαιο 2.1.2. Στο άρθρο [65], που αναφέρεται στην ενότητα 2.1.10, προτείνεται ο βασικός αλγόριθμος προσαρμοστικής αναζήτησης μεγάλης γειτονιάς (Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS)).

Άπληστη τυχαιοποιημένη αναζήτηση

(Greedy Random search)

Η άπληστη τυχαιοποιημένη αναζήτηση (Greedy Random search) αποτελεί μια τυχαιοποιημένη τεχνική δύο φάσεων που παρέχει μια εφικτή λύση σε κάθε επανάληψη. Στην πρώτη φάση κατασκευάζεται μια εφικτή αρχική λύση και έπειτα στην δεύτερη φάση εφαρμόζεται τοπική αναζήτηση με στόχο την εύρεση μιας καλύτερης λύσης [37].

Ο παραπάνω αλγόριθμος εφαρμόστηκε στην προσέγγιση που αναλύεται στο άρθρο [32] που αναλύθηκε στην υποενότητα 2.1.3.

Άπληστη τυχαιοποιημένη προσαρμοστική αναζήτηση

(Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP))

Ο αλγόριθμος GRASP αποτελεί μια διαδικασία με πολλές αρχικές λύσεις που κάθε επανάληψη αποτελείται από δύο φάσεις, μια φάση κατασκευής κατά την οποία παράγεται μια εφικτή λύση, και έπειτα μια φάση τοπικής αναζήτησης κατά την οποία αναζητείται μια καινούρια λύση. Η συνολικά καλύτερη λύση διατηρείται ως το τελικό αποτέλεσμα [89].

Στο άρθρο [84], που αναφέρεται την ενότητα 2.2, εφαρμόζεται ο αλγόριθμος GRASP με χρήση του αλγορίθμου καθόδου μεταβλητής γειτονιάς (Variable Neighborhood Descent (VND)), θεωρώντας διαφορετικούς τελεστές βελτίωσης.

Κεφάλαιο 3. Ανάλυση μεθόδων επίλυσης

Προσομειωμένη ανόπτηση

(**Simulated annealing(SA)**)

Η προσομειωμένη ανόπτηση είναι ένας μεθευρετικός αλγόριθμος για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Η μέθοδος μοντελοποιεί τη φυσική διαδικασία της θέρμανσης ενός υλικού, μέχρι μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, και στη συνέχεια τη σταδιακή του ψύξη, με αποτέλεσμα την μείωση της ενέργειας του συστήματος [90], [91].

Στην προσέγγιση που αναλύεται στο άρθρο [12] χρησιμοποιείται η βασική μορφή της προσομειωμένης ανόπτησης για την επίλυση του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων με μηχανισμό εμπορίας άνθρακα που αναλύεται στο υποκεφάλαιο 2.1.1.

Σε άλλη προσέγγιση, που περιγράφεται στο άρθρο [2] που αναλύεται στην υποενότητα 2.1.8, χρησιμοποιείται ένας υβριδικός αλγόριθμος προσομειωμένης ανόπτησης, (**Hybrid simulated annealing and tempering algorithm (HSATA)**) για την επίλυση του χρονοεξαρτώμενου πράσινου προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων χρησιμοποιώντας για τοπική αναζήτηση τον αλγόριθμο της μεγάλης γειτονιάς αναζήτησης που εφαρμόζει τελεστή αφαίρεσης και τελεστή επανατοποθέτησης αποφεύγοντας να πέσει σε τοπικό βέλτιστο. Επιπλέον ο υβριδικός αλγόριθμος προσομειωμένης ανόπτησης χρησιμοποιεί δύο κριτήρια τερματισμού που αφορούν τη θερμοκρασία καθώς παρατηρήθηκε ότι δεν είναι εύκολα εφικτό να πέσει η θερμοκρασία κάτω από το όριο που έχει ορισθεί [2].

Περιορισμένη αναζήτηση (**Tabu search**)

Στην προσέγγιση που προτείνεται στο άρθρο [64], που αναφέρεται στην ενότητα 2.1.10, επιλέγεται ο αλγόριθμος περιορισμένης αναζήτησης (**granular tabu search (GTS)**).

Στο άρθρο [27], που αναφέρεται στην ενότητα 2.1.10 προτείνεται μια διαδικασία που βασίζεται στην περιορισμένη αναζήτηση (**tabu search**) [27].

3.0.3 Αλγόριθμοι Εμπνευσμένοι από τη φύση

Αλγόριθμος τεχνητού σμήνους ψαριών (**Artificial Fish-Swarm Algorithm-(AFSA)**)

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος συγκαταλέγεται στους καλύτερους αλγορίθμους νοημοσύνης σμήνους και έχει εμπνευστεί τόσο από τον τρόπο που κολυμπούν τα ψάρια σε σμήνος, όσο και από την κοινωνική τους συμπεριφορά. Τα ψάρια προσπαθούν να διατηρούν τις αποικίες τους και για αυτό τον λόγο κολυμπούν με συγκεκριμένες συλλογικές κινήσεις. Επιπλέον η κοινωνική τους συμπεριφορά εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η εύρεση τροφής, η μετανάστευση, η αντιμετώπιση κινδύνων κ.α [92].

Στο άρθρο [31], που αναλύεται στην υποενότητα 2.1.10, για την επίλυση του σχετικού προβλήματος έχει χρησιμοποιηθεί μια κανονικοποίηση του αλγορίθμου τεχνητού σμήνους ψαριών. Στην συγκεκριμένη προσέγγιση προτείνεται μια διακριτή περίπτωση με δύο ειδών τελεστές διασταύρωσης που επιλέγονται τυχαία.

Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Αποικίας Μυρμηγκιών (**Ant Colony Optimization-(ACO)**)

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος μιμείται τον τρόπο που συμπεριφέρονται τα μυρμήγκια κατά τη διάρκεια της διαδικασίας που ακολουθούν για να βρουν τροφή. Τα μυρμήγκια έχουν αναπτύξει ένα μηχανισμό ώστε να μπορούν να βρουν ποια είναι η συντομότερη διαδρομή από την φωλιά τους μέχρι το σημείο που βρίσκεται η τροφή τους και αντίστροφα. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μιας ορμόνης που αφήνουν πίσω τους και την ακολουθούν τα επόμενα στη σειρά μυρμήγκια που με τη σειρά τους και αυτά αφήνουν μια ποσότητα ορμόνης για τα επόμενα και με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται η διαδρομή που είναι η συντομότερη [37].

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος έχει χρησιμοποιηθεί στην προσέγγιση [38] που έχει αναλυθεί στην υποενότητα 2.1.5.

Με βάση τον αλγόριθμο αποικίας μυρμηγκιών έχουν προταθεί πολλές παραλλαγές αυτού για την επίλυση του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων. Μια από αυτές είναι ο Βελτιωμένος αλγόριθμος αποικίας μυρμηγκιών (**Improved Ant-Colony Optimization (IACO)**) [56],

Κεφάλαιο 3. Ανάλυση μεθόδων επίλυσης

για το πρόβλημα που αναλύεται στην υποενότητα 2.1.7. Σε αυτή την προσέγγιση δεν λαμβάνεται υπόψιν μόνο η απόσταση των δύο πελατών, όπως συμβαίνει στο βασικό αλγόριθμο, αλλά υπάρχει και ένας ευρετικός παράγοντας που θεωρεί την απόσταση των πελατών και το φορτίο των οχημάτων. Επιπλέον πραγματοποιούνται βελτιώσεις στον τρόπο που αναπροσαρμόζεται η φερομόνη με την πάροδο των επαναλήψεων του αλγορίθμου.

Στο άρθρο [69], για το πρόβλημα που αναφέρεται στην ενότητα 2.1.10, προτείνεται ένας υβριδικός αλγόριθμος αποικίας μυρμηγκιών (**Hybrid ant colony optimization (HACO)**) με βασική διαφοροποίηση την κατασκευή καλύτερης αρχικής λύσης, με κατανομή περισσότερης αρχικής φερομόνης. Στο άρθρο [70], για το πρόβλημα που αναφέρεται στην ενότητα 2.1.10, προτείνεται ένας υβριδικός αλγόριθμος αποικίας μυρμηγκιών με διαφοροποίηση από τον βασικό αλγόριθμο στην εφαρμογή δύο τελεστών ώστε να αποφευχθεί να πέσει ο αλγόριθμος σε τοπικό βέλτιστο.

Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (**Particle Swarm Optimization Optimization (PSO)**)

Ο Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων προσομοιώνει την κοινωνική συμπεριφορά ζωντανών οργανισμών που πετάνε με τη μορφή σμήνους όπως τα πουλιά ή την ομαδική κίνηση των ψαριών. Πιο συγκεκριμένα μελετάει τους κανόνες που ακολουθούν οι ζωντανοί οργανισμοί καθώς μετακινούνται σε σμήνος και αλλάζουν ξαφνικά κατεύθυνση χωρίς να χαλάει ο σχηματισμός τους [93]. Οι κινήσεις αυτές επηρεάζονται πολύ από τα διπλανά σωματίδια-άτομα [37].

Στην προσέγγιση [10], για το πρόβλημα που αναλύεται στην υποενότητα 2.1.6 προτείνεται μια μεθοδολογία ώστε ο τροποποιημένος αλγόριθμος σμήνους σωματιδίων (**Modified Particle Swarm Optimization Optimization**) να μην πέσει σε τοπικό βέλτιστο. Η μεθοδολογία αυτή περιγράφεται παρακάτω. Αρχικά ορίζεται ο αριθμός των σωματιδίων και πραγματοποιείται τυχαία δημιουργία της αρχικής λύσης και των σχετικών παραμέτρων. Ορίζεται η θέση και η τροχιά όλων των σωματιδίων τυχαία. Έπειτα ορίζεται και η ταχύτητά τους, και υπολο-

Κεφάλαιο 3. Ανάλυση μεθόδων επίλυσης

γίνεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε σωματίδιο. Η καλύτερη τιμή που θα προκύψει αποτελεί και το ολικό βέλτιστο. Αν κάποιο σωματίδιο παραβεί κάποιον από τους κανόνες του προβλήματος του επιβάλλεται ποινή. Η θέση και η τροχιά των σωματιδίων επαναπροσδιορίζεται μέχρι να βρεθεί η βέλτιστη λύση για κάθε σωματίδιο. Ως τοπική αναζήτηση χρησιμοποιείται η περιορισμένη αναζήτηση (Tabu Search) [10]. Μια διακριτή μορφή του συγκεκριμένου αλγορίθμου **DPSO**, έχει χρησιμοποιηθεί και στο άρθρο [73], για το πρόβλημα που αναλύεται στην υποενότητα 2.1.10. Ο **DPSO** χρησιμοποιεί πολλαπλούς πληθυσμούς για να αντιμετωπίσει τους πολλαπλούς στόχους του προβλήματος.

Στο άρθρο [62], για το πρόβλημα που αναφέρεται στην ενότητα 2.1.10, προτείνεται μία υβριδική πολυαντικειμενική μεθευρετική προσέγγιση (**multi-objective hybrid metaheuristic (MHPV)**) που περιλαμβάνει έναν πολυαντικειμενικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (**multi-objective particle swarm optimization (MOPSO)**) σε συνδυασμό με έναν προσαρμοστικό αλγόριθμο πολυαντικειμενικής μεταβλητής γειτονιάς αναζήτησης (**Adaptive multi-objective variable neighborhood search (AMOVNS)**).

3.0.4 Γενετικοί αλγόριθμοι (**Genetic algorithm (GA)**)

Οι γενετικοί αλγόριθμοι βασίζονται στις διάφορες βιολογικές διαδικασίες ακολουθώντας την εξέλιξη των ειδών χρησιμοποιώντας τελεστές διασταύρωσης και μετάλλαξης [37].

Στο άρθρο [82], για το πρόβλημα που αναφέρεται στην ενότητα 2.2 το σχετικό πρόβλημα επιλύεται με γενετικό αλγόριθμο με χρήση της μεγάλης γειτονιάς αναζήτησης (**large neighborhood search (LNS)**). Στο άρθρο [71], για το πρόβλημα που αναφέρεται στην ενότητα 2.1.10 χρησιμοποιείται η βασική μορφή γενετικού αλγορίθμου.

Ο **GA** τροποποιεί έναν πληθυσμό χρωμοσωμάτων που αποτελούν τις επιμέρους λύσεις του προβλήματος με στόχο την βελτίωση των σχετικών λύσεων. Σε κάθε γενιά, δηλαδή κάθε επανάληψη του προβλήματος, χρησιμοποιούνται τυχαία τα χρωμοσώματα ως γονείς και με τη διαδικασία της διασταύρωσης και της μετάλλαξης δημιουργούνται τα παιδιά ως η επόμενη γενιά. Στο άρθρο [61], για το πρόβλημα που αναφέρεται στην ενότητα 2.1.10 χρησιμοποιείται γενετικός αλγόριθμος για την επίλυση του σχετικού προβλήματος.

Κεφάλαιο 3. Ανάλυση μεθόδων επίλυσης

Προσαρμοστικός Γενετικός αλγόριθμος (**Adaptive Genetic algorithm**)

Στην προσέγγιση [58], για το πρόβλημα που αναλύεται στην υποενότητα 2.1.9 ο αρχικός πληθυσμός δημιουργείται με τυχαίο τρόπο. Οι τελεστές διασταύρωσης εφαρμόζονται με χρήση πιθανοτήτων και έπειτα και οι τελεστές μετάλλαξης εφαρμόζονται σε κάθε λύση. Σε κάθε επανάληψη επιλέγεται η λύση με την καλύτερη τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση. Ο αλγόριθμος τερματίζει όταν ο αριθμός των γενεών είναι μεγαλύτερος από το προκαθορισμένο αριθμό επαναλήψεων.

Υβριδικός γενετικός αλγόριθμος

(**Hybrid genetic algorithm**)

Το άρθρο [60] για το πρόβλημα που αναφέρεται στην υποενότητα 2.1.4 χρησιμοποιεί έναν υβριδικό γενετικό αλγόριθμο χρησιμοποιώντας ευρετικές πληροφορίες.

Βελτιωμένος γενετικός αλγόριθμος (**Improved genetic algorithm**)

Επιπλέον μια βελτιωμένη μορφή του έχει χρησιμοποιηθεί και στο άρθρο [94] για το πρόβλημα που αναλύεται στην υπο-ενότητα 2.1.10. Ο αρχικός πληθυσμός πρέπει να είναι πάντα εφικτή λύση του προβλήματος και η εξέλιξη του αλγορίθμου εξαρτάται από την ανατροφοδότηση του σχετικού προβλήματος που επιλύει.

Στό άρθρο [66], για το πρόβλημα που αναφέρεται στην ενότητα 2.1.10, προτείνεται ένας υβριδικός χαοτικός γενετικός αλγόριθμος με μεταβλητή αναζήτηση γειτονιάς (**hybrid chaotic genetic algorithm with variable neighborhood search (HCGAVNS)**) που βασίζεται σε πραγματικά στοιχεία της κυκλοφοριακής κίνησης. Η μελέτη του χάους σκοπεύει να αποκαλύψει τον τρόπο και τους νόμους που διέπουν πολύπλοκα προβλήματα, τυχαία χαοτικά και διαταραγμένα φαινόμενα. Στην σχετική προσέγγιση η αρχική λύση δημιουργείται τυχαία με βάση των νόμων του χάους (καθώς η ζήτηση των πελατών δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων), και η λύση βελτιώνεται με τη χρήση του αλγορίθμου VNS. Παρόμοια προσέγγιση προτείνεται και

Κεφάλαιο 3. Ανάλυση μεθόδων επίλυσης

στο [67], για το πρόβλημα που αναφέρεται στην ενότητα 2.1.10, και περιλαμβάνει χαοτική αναζήτηση (chaotic search και tabu search).

Στο άρθρο [68], για το πρόβλημα που αναφέρεται στην ενότητα 2.1.10, προτείνεται μια βελτιωμένη προσέγγιση του GA που αφορά την κωδικοποίηση φυσικών αριθμών στην κωδικοποίηση των χρωμοσωμάτων.

Στο άρθρο [83], για το πρόβλημα που αναφέρεται στην ενότητα 2.2, ένας μη κυριαρχούμενος γενετικός αλγόριθμος (nondominated sorting genetic algorithm (NSGAII)).

3.0.5 Εξελικτικοί αλγόριθμοι

Στο άρθρο [80] για το πρόβλημα που αναφέρεται στην ενότητα 2.2 προτείνεται ένας υβριδικός πολυαντικειμενικός εξελεγκτικός αλγόριθμος (Hybrid Multi-Objective Evolutionary Algorithm (HMOEA)). Παρόμοια προσέγγιση προτείνεται στο άρθρο [81], για το πρόβλημα που αναφέρεται στην ενότητα 2.2.

Στο άρθρο [72], για το πρόβλημα που αναφέρεται στην ενότητα 2.1.10, χρησιμοποιείται επίσης ένας πολυαντικειμενικός εξελικτικός αλγόριθμος.

4 Μοντελοποίηση του προτεινόμενου προβλήματος

Το Πράσινο πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (**Green Vehicle Routing Problem (GVRP)**) αποτελεί επέκταση του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους των διαδρομών σε συνάρτηση με τη μείωση των περιβαλλοντικών ρύπων [95]. Καθώς υπάρχει μια αυξανόμενη τάση για προστασία του περιβάλλοντος από κυβερνήσεις, ΜΚΟ, και ιδιωτικές εταιρείες, έχουν προταθεί πολλά μοντέλα για την μείωση των ατμοσφαιρικών ρύπων στις μεταφορές. Ήδη η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει λάβει αυστηρά μέτρα για την μείωση των ατμοσφαιρικών ρύπων, ειδικά για αυτούς που προέρχονται από τα οχήματα [96], [97].

Η προτεινόμενη προσέγγιση της συγκεκριμένης διδακτορικής διατριβής αναλύεται σε αυτό το κεφάλαιο. Αρχικά παρουσιάζεται και αναλύεται το εξεταζόμενο πρόβλημα συνοδευόμενο από τη μαθηματική μοντελοποίηση.

4.1 Πράσινο πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων για έκτακτες καταστάσεις στην ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα (**Emergency green vehicle routing problem in cold supply chain (E-GVRP-CSC)**)

Το βασικό πρόβλημα που μοντελοποιείται και επιλύεται σε αυτή τη διδακτορική εργασία, είναι ένα καινοτόμο πράσινο πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων για έκτακτες καταστάσεις στην ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα (**emergency green vehicle routing problem in cold supply chain (E-GVRP-CSC)**), με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους των δρομολογίων που εκτελούν φορτηγά οχήματα εξυπηρέτησης πελατών σε συνάρτηση με τη μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης. Ακολουθούνται και εφαρμόζονται όλες οι βασικές αρχές του **GVRP**

Κεφάλαιο 4. Μοντελοποίηση του προτεινόμενου προβλήματος

[98].

Το προτεινόμενο μοντέλο δύναται να εφαρμοστεί σε πραγματικές συνθήκες μεταφοράς ευπαθών προϊόντων. Η εφαρμογή του μοντέλου σε πραγματικές συνθήκες δύναται να συνεισφέρει στην έγκαιρη και αποτελεσματική διανομή διαφόρων αγαθών, όπως εμβόλια ή τρόφιμα που απαιτούν συνθήκες ψύξης κατά τη μεταφορά τους. Η τροποποιημένη μορφή του προβλήματος, που προτείνεται σε αυτή τη μελέτη, σχετίζεται με τη μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης η οποία απαρτίζεται από επιμέρους εξισώσεις κόστους, που εφαρμόζονται στην ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα και δύναται να χρησιμοποιηθούν σε μοντέλα που προσομοιώνουν μεταφορά αγαθών για έκτακτες καταστάσεις, όπως επιπλέον σχετίζεται με τους αλγορίθμους επίλυσης που εφαρμόζονται και αναλύονται σε επόμενο κεφάλαιο.

Το προτεινόμενο πράσινο πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων αναλύεται ως εξής: Αρχικά ο στόχος του προβλήματος είναι να βρεθεί η βέλτιστη εφικτή διαδρομή λαμβάνοντας σχετικές παραμέτρους που αναλύονται στη συνέχεια. Το προτεινόμενο μοντέλο ακολουθεί τις παρακάτω υποθέσεις:

1. Υπάρχουν πελάτες τοποθετημένοι σε συγκεκριμένη γνωστή τοποθεσία.
2. Οι πελάτες έχουν συγκεκριμένη γνωστή ζήτηση αγαθών.
3. Υπάρχουν οχήματα ίδιου είδους με μηχανισμό ψύξης.
4. Όλα τα οχήματα ξεκινούν από την αποθήκη ταυτόχρονα.
5. Κάθε πελάτης εξυπηρετείται ακριβώς μια φορά από ένα όχημα.
6. Υπερφόρτωση του οχήματος κατά τη διάρκεια της διαδρομής δεν επιτρέπεται.
7. Δεν υπάρχει κυκλοφοριακή κίνηση και τα οχήματα κινούνται με συνεχόμενη ταχύτητα.
8. Τα οχήματα δεν επιστρέφουν αναγκαστικά στην αποθήκη που ξεκίνησαν μετά το πέρας της εξυπηρέτησης του τελευταίου πελάτη.
9. Δεν επιτρέπεται οι πελάτες να πάρουν οι ίδιοι αγαθά από την αποθήκη.

Κεφάλαιο 4. Μοντελοποίηση του προτεινόμενου προβλήματος

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος αποτελείται από την ελαχιστοποίηση των παρακάτω συναρτήσεων κόστους:

Αρχικά το προκαθορισμένο κόστος (*Fixed cost* – C_1) που περιλαμβάνει την ημερήσια συντήρηση του κάθε οχήματος, το κόστος της απόσβεσης και τους μισθούς των οδηγών και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_1 = F_1 \cdot num_v \quad (4.1)$$

όπου F_1 είναι το προκαθορισμένο κόστος κάθε οχήματος και το num_v είναι ο αριθμός των οχημάτων ψύξης.

Το κόστος μεταφοράς (*transportation cost* – C_2), είναι μεταβλητό κόστος, το οποίο περιλαμβάνει το κόστος που προκύπτει από τη φθορά του οχήματος, και την κατανάλωση των καυσίμων. Επιπλέον συμπεριλαμβάνει το κόστος εργασίας, που αντιπροσωπεύει το σύνολο των δαπανών που πραγματοποιούν οι εργοδότες για την απασχόληση των εργαζομένων. Αντιπροσωπεύουν ένα κόστος του μισθωτού εργατικού δυναμικού, γι' αυτό μερικές φορές αναφέρονται ως μισθολογικό κόστος [99].

$$C_2 = F_2 \sum_{i=1}^{M+n} \sum_{j=1}^{M+n} \sum_{k=1}^K x_{ijk} d_{ij} \quad (4.2)$$

όπου F_2 είναι το κόστος μεταφοράς ανά μονάδα απόστασης, M είναι ο αριθμός των αποθηκών, που στην περίπτωση μας είναι ίσος με 1, άρα $M=1$. (Στις εξισώσεις που ακολουθούν αφήνουμε το m , καθώς το μοντέλο μπορεί να επιλυθεί και για παραπάνω από μία αποθήκες), n είναι ο αριθμός των πελατών, x_{ijk} είναι μια μεταβλητή που δίνεται από την εξίσωση:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{όταν το όχημα } k \text{ εξυπηρετεί μετά τον κόμβο } i \text{ τον κόμβο } j \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (4.3)$$

Το κόστος της ζημιάς (*Damage cost* – C_3), το οποίο εξαρτάται από δύο παράγοντες, την μείωση της φρεσκάδας των προϊόντων κατά τη διάρκεια του δρομολογίου,

Κεφάλαιο 4. Μοντελοποίηση του προτεινόμενου προβλήματος

$$C_{31} = F_3 \sum_{i=1}^M \sum_{j=m+1}^{M+n} \sum_{k=1}^K y_{ijk} q_j (1 - \epsilon_1 e^{-\theta(t_{jk} t_{dp})}) \quad (4.4)$$

όπου το y_{ijk} είναι μια μεταβλητή που δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$y_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{όταν το όχημα } k \text{ παραδίδει εμπόρευμα} \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (4.5)$$

F_3 είναι η τιμή της μονάδας των προϊόντων της ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας, q_j είναι η ζήτηση του πελάτη j , ϵ_1 το ποσοστό αλλοίωσης της φρεσκάδας των προϊόντων κατά τη διάρκεια της διαδρομής, θ είναι ένας παράγοντας ευαισθησίας των προϊόντων, t_{jk} είναι η χρονική στιγμή όταν το όχημα k φτάνει στον πελάτη j , t_{dp} είναι η χρονική στιγμή που όλα τα οχήματα φεύγουν από την αποθήκη-αφετηρία [12].

Ο δεύτερος παράγοντας είναι η αλλοίωση που μπορεί να προκύψει στα προϊόντα, καθώς μπορεί να ανοίξει η πόρτα του οχήματος διαταράσσοντας την ψύξη [40], [41], [42], [43].

Το αντίστοιχο κόστος δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_{32} = F_3 \sum_{i=1}^M \sum_{j=m+1}^{M+n} \sum_{k=1}^K y_{ijk} Q_{in} (1 - \epsilon_2 e^{-\theta(\frac{q_j}{v_2})}) \quad (4.6)$$

όπου Q_{in} είναι η ποσότητα των προϊόντων που έχουν απομείνει στο όχημα τη στιγμή που έχει αποχωρήσει από τον πελάτη j , ϵ_2 το ποσοστό αλλοίωσης της φρεσκάδας των προϊόντων κατά τη διάρκεια της μεταφόρτωσης, $\frac{q_j}{v_2}$ είναι ο χρόνος εξυπηρέτησης του πελάτη j και v_2 είναι η ταχύτητα της μεταφόρτωσης σε τόνους ανά ώρα [12].

Άρα το τελικό κόστος ζημιάς προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_3 = C_{31} + C_{32} = F_3 \sum_{i=1}^M \sum_{j=m+1}^{M+n} \sum_{k=1}^K y_{ijk} [q_j (1 - \epsilon_1 e^{-\theta(t_{jk} t_{dp})}) + Q_{in} (1 - \epsilon_2 e^{-\theta(\frac{q_j}{v_2})})] \quad (4.7)$$

Το κόστος της ψύξης, το οποίο περιλαμβάνει την κατανάλωση ενέργειας που απαιτεί η

Κεφάλαιο 4. Μοντελοποίηση του προτεινόμενου προβλήματος

σχετική ψύξη κατά την παράδοση και την εκφόρτωση των προϊόντων [44], [45].

Το κόστος ψύξης κατά την παράδοση δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_{41} = F_4 \sum_{i=1}^{M+n} \sum_{j=1}^{M+n} \sum_{k=1}^K x_{ijk} \alpha_1 \frac{d_{ij}}{v_1} \quad (4.8)$$

όπου το F_4 αντιπροσωπεύει την τιμή της μονάδας του καυσίμου, α_1 αντιπροσωπεύει την κατανάλωση καυσίμου που προκύπτει από τον εξοπλισμό ψύξης ανά μονάδα χρόνου κατά τη διάρκεια της διαδρομής [12].

Το κόστος που προκύπτει κατά τη διάρκεια της μεταφόρτωσης προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_{42} = F_4 \sum_{i=1}^{M+n} \sum_{j=1}^{M+n} \sum_{k=1}^K x_{ijk} \alpha_2 \frac{Q - q_j}{v_2} \quad (4.9)$$

όπου α_2 αντιπροσωπεύει την κατανάλωση καυσίμου του εξοπλισμού ψύξης κατά τη διάρκεια της μεταφόρτωσης [12]. Άρα το συνολικό κόστος ψύξης δίνεται από την εξίσωση:

$$C_4 = C_{41} + C_{42} = F_4 \sum_{i=1}^{M+n} \sum_{j=1}^{M+n} \sum_{k=1}^K x_{ijk} \left(\alpha_1 \frac{d_{ij}}{v_1} + \alpha_2 \frac{Q - q_j}{v_2} \right) \quad (4.10)$$

Το v_1 είναι η ταχύτητα των οχημάτων και v_2 είναι η ταχύτητα φορτοεκφόρτωσης σε τόνους ανά ώρα [12].

Το κόστος του διοξειδίου του άνθρακα το οποίο περιλαμβάνει το κόστος των καυσίμων που σχετίζεται με τα καύσιμα που χρειάζεται ένα όχημα για τη μεταφορά και το επιπλέον κόστος που προκύπτει από τις συσκευές ψύξης [12].

Αναλυτικότερα το κόστος κατανάλωσης καυσίμου ανά μονάδα απόστασης υπολογίζεται

Κεφάλαιο 4. Μοντελοποίηση του προτεινόμενου προβλήματος

από την παρακάτω διαδικασία. Αρχικά πρέπει να υπολογιστεί η κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα απόστασης. Για τον υπολογισμό στα [44], [48], [49] προτείνεται:

$$\rho(x) = \rho_0 + \frac{\rho^* - \rho_0}{Q} X \quad (4.11)$$

όπου το ρ_0 είναι η κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα απόστασης όταν το όχημα δεν μεταφέρει καθόλου εμπόρευμα, σε λίτρα ανά χιλιόμετρο, το ρ^* είναι η κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα απόστασης όταν το όχημα είναι με πλήρες φορτίο, Q είναι η μέγιστη χωρητικότητα του οχήματος και X είναι το βάρος του φορτίου.

Άρα το κόστος κατανάλωσης καυσίμου του οχήματος υπολογίζεται από:

$$FC_1 = \sum_{i=1}^{M+n} \sum_{j=1}^{M+n} \sum_{k=1}^K x_{ijk} \rho(Q_{ij}) d_{ij} = \sum_{i=1}^{M+n} \sum_{j=1}^{M+n} \sum_{k=1}^K x_{ijk} \left(\rho_0 + \frac{\rho^* - \rho_0}{Q} Q_{ij} \right) d_{ij} \quad (4.12)$$

όπου το Q_{ij} είναι η ποσότητα των προϊόντων που μεταφέρονται από τον κόμβο i στον κόμβο j

Το επόμενο βήμα για τον υπολογισμό του κόστους είναι να υπολογιστεί το κόστος κατανάλωσης καυσίμου που σχετίζεται με τον εξοπλισμό ψύξης, δηλαδή προκύπτει από την ενέργεια που χρειάζεται να καταναλώσει η συσκευή ή οι συσκευές ψύξης και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$FC_2 = \sum_{i=1}^{M+n} \sum_{j=1}^{M+n} \sum_{k=1}^K x_{ijk} \left(\alpha_1 \frac{d_{ij}}{v_1} + \alpha_2 \frac{q_j}{v_2} \right) \quad (4.13)$$

Επομένως το τελικό κόστος καυσίμων υπολογίζεται:

$$FC = FC_1 + FC_2 = \sum_{i=1}^{M+n} \sum_{j=1}^{M+n} \sum_{k=1}^K x_{ijk} \left[\left(\rho_0 + \frac{\rho^* - \rho_0}{Q} Q_{ij} \right) d_{ij} + \left(\alpha_1 \frac{d_{ij}}{v_1} + \alpha_2 \frac{q_j}{v_2} \right) \right] \quad (4.14)$$

Για να είναι ακριβής ο υπολογισμός του κόστους θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η ατμοσφαιρική ρύπανση που προκύπτει από τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα στο περιβάλλον

Κεφάλαιο 4. Μοντελοποίηση του προτεινόμενου προβλήματος

μέσω του συντελεστή εκπομπής η , ο οποίος δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$EM = \eta \cdot FC \quad (4.15)$$

Το τελικό κόστος καυσίμου υπολογίζεται από:

$$C_5 = F_5(\eta \cdot FC - T_q) = F_5 \left\{ \eta \sum_{i=1}^{M+n} \sum_{j=1}^{M+n} \sum_{k=1}^K x_{ijk} \left[(\rho_0 + \frac{\rho^* - \rho_0}{Q} Q_{ij}) d_{ij} + (\alpha_1 \frac{d_{ij}}{v_1} + \alpha_2 \frac{q_j}{v_2}) \right] - T_q \right\} \quad (4.16)$$

όπου F_5 είναι η τιμή διαπραγμάτευσης του άνθρακα, και T_q είναι το ποσοστό της εκπομπής του άνθρακα και αποτελεί τη μεγαλύτερη εκπομπή που δύναται να παράγει δωρεάν η κάθε εταιρεία [10].

Για τη μοντελοποίηση του παραπάνω προβλήματος ο βασικός στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή:

$$\min \quad C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 \quad (4.17)$$

υπό των παρακάτω περιορισμών:

1. Κάθε πελάτης μπορεί να εξυπηρετηθεί μόνο μία φορά από ένα μόνο όχημα

$$\sum_{i=1}^{M+n} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K x_{ikm} = 1, \quad j \in \{M+1, M+2, \dots, M+n\} \quad (4.18)$$

2. Οι επόμενοι δύο περιορισμοί δηλώνουν ότι τα οχήματα αναχωρούν από την αποθήκη και επιστρέφουν σε αυτή με το πέρας της εξυπηρέτησης και του τελευταίου πελάτη

$$\sum_{i=m+1}^{M+n} \sum_{j=1}^M \sum_{m=1}^M x_{ijkm} = 1, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (4.19)$$

$$\sum_{i=m+1}^{M+n} \sum_{j=m+1}^{M+n} \sum_{m=1}^M x_{ijkm} = 1, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (4.20)$$

Κεφάλαιο 4. Μοντελοποίηση του προτεινόμενου προβλήματος

3. Ένα όχημα δεν μπορεί να επιστρέψει στην αποθήκη χωρίς να έχει εξυπηρετήσει πρώτα κάποιους πελάτες

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \sum_{m=1}^M x_{ijkm} = 0, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (4.21)$$

4. Δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί φόρτωση του οχήματος μεγαλύτερη από τη μέγιστη χωρητικότητα του

$$\sum_{i=1}^{M+n} \sum_{j=m+1}^{M+n} \sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^M q_i x_{ijkm} \leq Q, \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (4.22)$$

5. Κάθε όχημα δεν μπορεί να εκτελεί δρομολόγια περισσότερη ώρα από τη μέγιστη επιτρεπόμενη:

$$\sum_{i=1}^n t_{ik} \sum_{j=1}^n x_{ijk} + \sum_{i=1}^n \sum_{i=1}^n t_{ijk} x_{ijk} \leq T_u \quad k = 1, \dots, K \quad (4.23)$$

όπου T_u είναι ο μέγιστος χρόνος που επιτρέπεται ένα όχημα να βρίσκεται στη διαδρομή και αποτελείται από το άθροισμα του χρόνου που απαιτείται ένα όχημα να παραδώσει ποσότητα προϊόντος σε έναν πελάτη $\sum_{i=1}^n t_{ik}$, δηλαδή ο χρόνος εξυπηρέτησης, και από το άθροισμα του χρόνου που απαιτείται για τη μετάβαση από κόμβο σε κόμβο. Το t_{ijk} είναι ο χρόνος που χρειάζεται ένα όχημα να μεταβεί από τον κόμβο i στον κόμβο j .

6. Η παρακάτω εξίσωση χαρακτηρίζει την διαδικασία της δρομολόγησης ως συνεχής

$$t_{jk} = t_{ik} + \frac{d_{ij}}{v_1} + \frac{q_i}{v_2} \quad (4.24)$$

5 Αλγοριθμική επίλυση

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται η επίλυση του προτεινόμενου μοντέλου E-GVRP-CSC. Οι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν εντάσσονται στην κατηγορία των εξελικτικών αλγορίθμων και συγκεκριμένα των αλγορίθμων εμπνευσμένων από τη φύση. Οι αλγόριθμοι αυτοί βασίζονται στη νοημοσύνη του σμήνους, σε βιολογικά και χημικά συστήματα. Συγκεκριμένα οι αλγόριθμοι που βασίζονται στη νοημοσύνη του σμήνους επικεντρώνονται σε διάφορες διεργασίες ζώων και οργανισμών που συμβαίνουν στη φύση, όπως για παράδειγμα η διαδικασία εύρεσης τροφής και καταφυγίου, είτε σε διεργασίες πλοήγησης και επικοινωνίας [100], [101].

Η δομή των αλγορίθμων περιγράφεται ως εξής. Αρχικά υπάρχει ένας αρχικός πληθυσμός εφικτών λύσεων και πάνω σε αυτόν πραγματοποιούνται διάφορες μετατροπές—κινήσεις εντός του πεδίου των λύσεων με στόχο να βρεθεί η βέλτιστη λύση. Πιο συγκεκριμένα εφαρμόζονται επαναληπτικές διαδικασίες για έναν ορισμένο αριθμό επαναλήψεων. Καθώς οι διαδικασίες αυτές εφαρμόζονται από επανάληψη σε επανάληψη έχουν ως στόχο να προκύπτουν καλύτερες λύσεις [102], [103].

Στην παρούσα διδακτορική εργασία, έχουν αναπτυχθεί σχετικοί αλγόριθμοι. Στην συνέχεια παρουσιάζουμε τη γενική μορφή των αλγορίθμων αυτών και μετέπειτα τις παραλλαγές που πραγματοποιήσαμε, υβριδοποιώντας τους.

Πριν την παρουσίαση των αλγορίθμων απαιτείται να διευκρινιστεί ότι οι αλγόριθμοι που αναπτύξαμε αναπαράστουν τα μέλη του πληθυσμού ως θέσεις μέσα στο χώρο των λύσεων. Επιπλέον οι σχετικοί αλγόριθμοι εφαρμόζονται κυρίως σε συνεχή προβλήματα βελτιστοποίησης. Όμως το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων, το οποίο επιλύουμε, είναι ένα διακριτό

Κεφάλαιο 5. Αλγοριθμική επίλυση

πρόβλημα. Για να μπορεί να επιλυθεί το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με αλγόριθμους νοημοσύνης σμήνους πραγματοποιήθηκε μία διαδικασία μετατροπής των λύσεων από συνεχείς σε διακριτές. Επιλύσαμε το πρόβλημα με διακριτές τιμές, και εφόσον βρέθηκαν οι τελικές λύσεις ακολουθήσαμε την αντίστροφη διαδικασία δηλαδή μετατρέψαμε τις διακριτές τιμές σε συνεχείς.

Πιο συγκεκριμένα η διαδικασία που ακολουθήσαμε είναι η εξής. Επιλέξαμε κάθε διαδρομή και υπολογίσαμε τον αριθμό των πελατών που βρίσκονται σε κάθε διαδρομή. Στη συνέχεια διαιρούμε κάθε αριθμό που αντιπροσωπεύει την θέση του πελάτη στη διαδρομή με τον συνολικό αριθμό των πελατών. Οι τιμές έχουν μετατραπεί σε συνεχείς. Αφού ολοκληρώθηκε η εφαρμογή των αλγορίθμων, για να προχωρήσει η διαδικασία της τοπικής αναζήτησης, θα πρέπει εκ νέου να μετατραπούν οι τιμές σε διακριτές. Θεωρούμε ότι η μικρότερη τιμή αντιστοιχεί στον πρώτο πελάτη, η δεύτερη μικρότερη στον δεύτερο πελάτη κ.ο.κ. Η διαδικασία αυτή φαίνεται στο παρακάτω παράδειγμα.

Έστω ότι έχουμε την παρακάτω διαδρομή

Αρχική διαδρομή					
1	2	4	3	5	1

Πίνακας 5.1: Διαδρομή με διακριτές τιμές

Διαιρούμε όλες τις τιμές με τον αριθμό των κόμβων της διαδρομής, δηλαδή τον αριθμό 5 και προκύπτει η παρακάτω διαδρομή

Αρχική διαδρομή					
0.2	0.4	0.8	0.6	1	0.2

Πίνακας 5.2: Διαδρομή με συνεχείς τιμές

Εφαρμόζουμε τους σχετικούς αλγορίθμους και έστω ότι η διαδρομή που προκύπτει είναι αυτή που φαίνεται στον πίνακα 5.3

Στη συνέχεια αντιστοιχίζουμε την μικρότερη τιμή με τον πρώτο πελάτη κ.ο.κ

Κεφάλαιο 5. Αλγοριθμική επίλυση

Τελική διαδρομή					
0.31	0.35	0.6	0.32	0.45	0.31

Πίνακας 5.3: Τελική διαδρομή με συνεχείς τιμές

Τελική διαδρομή					
1	3	5	2	4	1

Πίνακας 5.4: Τελική διαδρομή με διακριτές τιμές

5.1 Αλγόριθμοι εμπνευσμένοι από τη φύση

5.1.1 Αλγόριθμος του γκρίζου λύκου (**Grey Wolf Optimization (GWO)**)

Ο πρώτος αλγόριθμος που επιλύσαμε βασίζεται στη βασική μορφή του αλγορίθμου του γκρίζου λύκου. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης του γκρίζου λύκου προτάθηκε από τον Mirjalili το 2013. Ο αλγόριθμος μελετάει την κοινωνική συμπεριφορά των γκρίζων λύκων και συγκεκριμένα εστιάζει στον τρόπο που μια αγέλη λύκων προσεγγίζει το θήραμα της, με βάση την ιεραρχία της αγέλης.

Ο γκρίζος λύκος ή όπως επίσημα ονομάζεται *Canis lupus*, ανήκει στην κατηγορία των κυνίδων που αποτελούν οικογένεια σαρκοφάγων θηλαστικών. Οι γκρίζοι λύκοι ανήκουν στα ανώτερα αρπακτικά, και τοποθετούνται στην κορυφή της τροφικής πυραμίδας. Ζούνε σε αγέλες, με 5-12 άτομα σε κάθε μια. Διατηρούν μια πολύ αυστηρή και συγκεκριμένη ιεραρχία η οποία αριθρώνεται ως εξής: Στην κορυφή της ιεραρχίας βρίσκονται ένας αρσενικός και ένας θηλυκός λύκος και ονομάζονται άλφα λύκοι (**alpha wolves**), και είναι υπεύθυνοι για την λήψη αποφάσεων που σχετίζονται με το κυνήγι, την τοποθεσία ύπνου της αγέλης, την ώρα αφύπνισης, κ.α. Οι αποφάσεις των άλφα λύκων είναι δεσμευτικές για τα υπόλοιπα μέλη της αγέλης [104].

Υπάρχει μια μικρή μορφή δημοκρατικής συμπεριφοράς κατά την οποία οι άλφα λύκοι ακολουθούν την υπόλοιπη αγέλη. Στις συγκεντρώσεις-συναντήσεις των λύκων, οι άλφα λύκοι αναγνωρίζονται από όλους τους άλλους και αυτή η αναγνώριση και ο σεβασμός των υπόλοιπων μελών της αγέλης, φαίνεται από το γεγονός ότι κρατάνε τις ουρές τους κάτω οι υπόλοιποι

Κεφάλαιο 5. Αλγοριθμική επίλυση

λύκοι στην παρουσία των άλφα λύκων.

Οι άλφα λύκοι επιτρέπεται να ζευγαρώσουν μόνο με λύκους μέσα στην αγέλη. Είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον το γεγονός ότι άλφα λύκος δεν είναι πάντα ο δυνατότερος αλλά αυτός που είναι καλύτερος στη διαχείριση της αγέλης και την επιβίωση της, και από αυτό διαφαίνεται ότι η πειθαρχία και η οργάνωση της αγέλης είναι σημαντικότερα από την δύναμη της.

Καθώς προχωράμε προς τα κάτω στην ιεραρχία των γκρίζων λύκων συναντάμε τους βήτα λύκους (*beta wolves*) οι οποίοι βοηθούν τους άλφα λύκους στη λήψη αποφάσεων και σε άλλα σημαντικά ζητήματα της αγέλης. Οι βήτα λύκοι δύναται να είναι είτε αρσενικός είτε θηλυκός λύκος. Οι βήτα λύκοι μπορούν να αντικαταστήσουν τους άλφα λύκους σε περίπτωση που πεθάνουν ή λόγω γηρατειών δεν μπορούν να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις της θέσης τους. Επιπλέον οι βήτα λύκοι μπορούν να δίνουν εντολές στους υπόλοιπους λύκους που βρίσκονται χαμηλότερα στην ιεραρχία.

Στη βάση της πυραμίδας βρίσκονται οι ωμέγα λύκοι (*omega*) και κατέχουν τον ρόλο του αποδιοπομπαίου τράγου. Πρέπει να υποτάσσονται σε όλους τους άλλους λύκους και είναι οι τελευταίοι που θα φάνε. Αν και τελευταίοι στην ιεραρχία, φαίνεται να διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο μέσα στην αγέλη, καθώς έχει παρατηρηθεί ότι με την απώλεια ενός ωμέγα γκρίζου λύκου δημιουργούνται προβλήματα στην αγέλη.

Εάν ένας λύκος δεν ανήκει σε κάποια από τις ανωτέρω κατηγορίες τότε ονομάζεται υποδεέστερος ή σε ορισμένες περιπτώσεις δέλτα λύκοι (*delta wolves*) οι οποίοι υποτάσσονται στους άλφα και βήτα αλλά κυριαρχούν στους ωμέγα λύκους. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι πρόσκοποι οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την παρακολούθηση των ορίων της επικράτειας της αγέλης και ειδοποιούν σε περίπτωση κινδύνου. Άλλη κατηγορία των δέλτα λύκων είναι οι φρουροί οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την ασφάλεια της αγέλης. Επιπλέον υπάρχουν οι γέροντες που είναι πρώην άλφα ή βήτα λύκοι. Οι κυνηγοί βοηθούν και παρέχουν τροφή στην αγέλη.

Κεφάλαιο 5. Αλγοριθμική επίλυση

Τελευταία κατηγορία είναι οι φροντιστές που παρέχουν φροντίδα στους αδύναμους, στους άρρωστους και στους τραυματισμένους λύκους της αγέλης. Η ιεραρχία της αγέλης αποτελεί μια μορφή κοινωνικής συμπεροφοράς των λύκων, όπως και το κυνήγι [105]. Οι κύριες φάσεις σύμφωνα με το άρθρο [106] του είναι

1. παρακολούθηση
2. κυνήγι
3. προσέγγιση θηράματος

Η μαθηματική μοντελοποίηση του αλγορίθμου διαφθώνεται ως εξής. Από τη λύση του προβλήματος προκύπτει η καλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Η λύση που αντιστοιχεί στην καλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (α) είναι οι άλφα λύκοι. Η δεύτερη καλύτερη λύση (β) και η τρίτη καλύτερη λύση (δ) καλύτερη λύση είναι οι βήτα και οι δέλτα λύκοι αντίστοιχα. Οι υπόλοιπες υποψήφιες λύσεις (X) είναι οι ωμέγα λύκοι και ακολουθούν τους υπόλοιπους.

Οι γκρίζοι λύκοι κατά τη διάρκεια του κυνηγιού περικυκλώνουν το θήραμα τους. Αυτή η κυκλική κίνηση μοντελοποιείται με μαθηματικές εξισώσεις ως εξής:

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot X_P(t) - X(t)| \quad (5.1)$$

$$X(t+1) = X_P(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (5.2)$$

όπου t είναι η τρέχουσα επανάληψη, \vec{A} και \vec{C} είναι διανύσματα-συντελεστές, X_P είναι το διάνυσμα θέσης του θηράματος και \vec{X} είναι το διάνυσμα θέσης του γκρίζου λύκου. Ισχύει:

$$\vec{A} = 2 \cdot \vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (5.3)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (5.4)$$

Κεφάλαιο 5. Αλγοριθμική επίλυση

όπου το \vec{a} μειώνεται γραμμικά από το 2 στο 0 μέχρι το τέλος των προκαθορισμένων επαναλήψεων και \vec{r}_1 και \vec{r}_2 είναι τυχαία διανύσματα στο διάστημα $[0, 1]$.

Στην δεύτερη φάση του αλγορίθμου περιλαμβάνεται το κυνήγι, λαμβάνεται υπόψιν ότι οι λύκοι αναγνωρίζουν τη θέση του θηράματος τους και στη συνέχεια το περικυκλώνουν. Τις σχετικές οδηγίες τις δίνει ο άλφα λύκος. Περιστασιακά συμμετέχουν στη διαδικασία του κυνηγιού και οι βήτα και δέλτα λύκοι. Υποθέτουμε ότι οι άλφα και βήτα λύκοι διαθέτουν καλύτερη γνώση για την τοποθεσία του θηράματος. Οι θέσεις των μελών της αγέλης ενημερώνονται σε σχέση με αυτή του αρχηγού, και με αυτές που κατείχαν σε προηγούμενες χρονικές στιγμές τα υψηλόβαθμα μέλη της αγέλης. Ισχύουν τα ακόλουθα:

$$\begin{aligned}\vec{D}_\alpha &= |\vec{C}_1 * \vec{X}_\alpha - \vec{X}| \\ \vec{D}_\beta &= |\vec{C}_2 * \vec{X}_\beta - \vec{X}| \\ \vec{D}_\delta &= |\vec{C}_3 * \vec{X}_\delta - \vec{X}|\end{aligned}\tag{5.5}$$

$$\begin{aligned}\vec{X}_1 &= \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1(\vec{D}_\alpha) \\ \vec{X}_2 &= \vec{X}_\beta - \vec{A}_2(\vec{D}_\beta) \\ \vec{X}_3 &= \vec{X}_\delta - \vec{A}_3(\vec{D}_\delta)\end{aligned}\tag{5.6}$$

$$X(\vec{t} + 1) = \frac{(\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3)}{3}\tag{5.7}$$

Ο ψευδοκώδικας του παραπάνω αλγορίθμου παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Algorithm 1: Αλγόριθμος βελτιστοποίησης του γκριζου λύκου

Αρχικοποίηση του πληθυσμού των λύκων
Αρχικοποίηση των A, α, C
Υπολογισμός της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε λύκο θηρευτή
 X_a = ο καλύτερος λύκος θηρευτής
 X_β = ο δεύτερος καλύτερος λύκος θηρευτής
 X_δ = ο τρίτος καλύτερος λύκος θηρευτής
while $t \leq$ μέγιστος αριθμός επαναλήψεων **do**
 for Για κάθε θηρευτή **do**
 Ενημέρωση της νέας θέσης για κάθε θηρευτή χρησιμοποιώντας τη σχέση 5.7
 Ενημέρωση των A, α, C
 Υπολογισμός της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης για όλους τους λύκους
 Ενημέρωση των X_a, X_β, X_δ

5.1.2 Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (**Particle Swarm Optimization (PSO)**)

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων είναι ένας αλγόριθμος που μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλά μηχανολογικά και τεχνολογικά προβλήματα με αξιοσημείωτη επιτυχία. Ο αλγόριθμος παρουσιάστηκε πρώτη φορά το 1995 [107] και από τότε έχουν προταθεί πολλές παραλλαγές ώστε να πετύχει καλύτερα αποτελέσματα [108].

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων βασίζεται στη συμπεριφορά διάφορων ειδών και προσπαθεί να μιμηθεί την συμπεριφορά τους σε διάφορες βιολογικές διαδικασίες [109].

Ο αλγόριθμος αποτελείται αρχικά από έναν αριθμό λύσεων, και κάθε λύση αποτελεί ένα σωματίδιο. Τα βασικά χαρακτηριστικά του κάθε σωματιδίου είναι η συγκεκριμένη θέση που βρίσκεται και η ταχύτητα του. Η θέση του στην ουσία είναι η τοποθεσία του σωματιδίου στον χώρο των λύσεων και η ταχύτητα του, σχετίζεται με την κατεύθυνση που πρέπει να κινηθεί το κάθε σωματίδιο. Σε κάθε επανάληψη υπολογίζεται εκ νέου η θέση και η ταχύτητα κάθε σωματιδίου [110].

Σε κάθε επαναληπτική διαδικασία, η καλύτερη θέση που κατέχει κάθε σωματίδιο ονομάζεται **pbest** και η τιμή του καλύτερου σωματιδίου, δηλαδή το σωματίδιο με την καλύτερη

Κεφάλαιο 5. Αλγοριθμική επίλυση

τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, ονομάζεται **gbest**. Αυτά τα δύο χαρακτηριστικά επηρεάζουν την θέση και την ταχύτητα των σωματιδίων. Αυτό συμβαίνει γιατί στη φύση τα μέλη ενός σμήνους ακολουθούν τη συμπεριφορά του καλύτερου μέλους [107].

Τα βασικά διανύσματα του κάθε σωματιδίου όπως έχει αναφερθεί είναι η θέση και η ταχύτητα. Η θέση του συμβολίζεται με x_{ij} όπου $i = 1, \dots, N$, N είναι το μέγεθος του σμήνους και $j = 1, \dots, d$ όπου d η διάσταση του προβλήματος. Το διάνυσμα της τροχιάς είναι το v_{ij} και αντιπροσωπεύει την αλλαγή στη θέση του.

Η αντικειμενική συνάρτηση του κάθε σωματιδίου συμβολίζεται με $f(x)$ και αντιπροσωπεύει την απόδοση του κάθε σωματιδίου. Κάθε σωματίδιο δύναται να πραγματοποιήσει τρεις πιθανές κινήσεις μέσα στο χώρο των λύσεων. Η πρώτη είναι να ακολουθήσει μια τυχαία δική του πορεία. Η δεύτερη είναι να πραγματοποιήσει μια αναζήτηση μέσα στον χώρο των λύσεων και να επιστρέψει την καλύτερη θέση που είχε αν η επόμενη θέση που βρήκε είναι χειρότερη. Η τρίτη επιλογή είναι να ακολουθήσει τα γειτονικά σωματίδια.

Κάθε σωματίδιο αποτελεί μια υποψήφια λύση και είναι τοποθετημένο στο χώρο με τυχαίο τρόπο. Η αρχική τιμή της θέσης για κάθε σωματίδιο δίνεται από την παρακάτω εξίσωση

$$x_{ij}(0) = x_{min,j} + r_j(x_{max,j} - x_{min,j}) \quad (5.8)$$

όπου $x_{min,j}$ είναι η ελάχιστη τιμή της λύσης στον χώρο των λύσεων και $x_{max,j}$ αντίστοιχα η μέγιστη τιμή της λύσης στον χώρο των λύσεων, r_j είναι ένας τυχαίος αριθμός στο διάστημα $(0, 1)$ [111].

Στο τέλος της κάθε επανάληψης ενημερώνονται το **pbest** κάθε σωματιδίου και το **gbest** ολόκληρου του σμήνους. Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου εφαρμόζεται η παρακάτω διαδικασία. Χρησιμοποιούνται δύο διανύσματα, της τωρινής θέσης και της προσωπικής καλύτερης θέσης για κάθε σωματίδιο σε όλες τις επαναλήψεις. Κάθε σωματίδιο προσαρμόζει την τροχιά του στην καλύτερη δική του θέση $pbest_{ij}$ και στην καλύτερη θέση του σμήνους $gbest_{ij}$.

Κεφάλαιο 5. Αλγοριθμική επίλυση

Η ταχύτητα των σωματιδίων ανανεώνεται με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$v_{ij}(t+1) = v_{ij}(t) + c_1 rand_1(pbest_{ij} - x_{ij}(t)) + c_2 rand_2(gbest_j - x_{ij}(t)) \quad (5.9)$$

Η θέση των σωματιδίων ανανεώνεται με βάση τον παρακάτω τύπο:

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (5.10)$$

όπου t είναι ο μετρητής των επαναλήψεων, c_1 και c_2 είναι συντελεστές επιτάχυνσης και μπορούν να πάρουν σταθερές τιμές ή να προσαρμόσουν τις τιμές τους κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων. Επίσης $rand_1$ και $rand_2$ είναι δύο τυχαίοι αριθμοί στο διάστημα $(0, 1)$ [112].

Τα c_1 και c_2 δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$c_1 = c_{1,min} + \frac{c_{1,max} - c_{1,min}}{iter_{max}} \cdot t \quad (5.11)$$

$$c_2 = c_{2,min} + \frac{c_{2,max} - c_{2,min}}{iter_{max}} \cdot t \quad (5.12)$$

όπου $iter_{max}$ είναι ο μέγιστος αριθμός των επαναλήψεων και $c_{1,min}$, $c_{1,max}$, $c_{2,min}$, $c_{2,max}$ είναι η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή των c_1 και c_2 αντίστοιχα [111].

Σχετικά με την ταχύτητα των σωματιδίων έχουν προταθεί πολλές προσεγγίσεις. Οι πιο σημαντικές είναι οι εξής:

1. Βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων αδράνειας [113]

$$v_{ij}(t+1) = wv_{ij}(t) + c_i rand_1(pbest_{ij} - x_{ij}(t)) + c_2 rand_2(gbest - x_{ij}(t)) \quad (5.13)$$

Κεφάλαιο 5. Αλγοριθμική επίλυση

όπου το βάρος αδράνειας w δίνεται από τον τύπο:

$$w = w_{max} - \frac{w_{max} - w_{min}}{iter_{max}} \cdot t \quad (5.14)$$

2. Η δεύτερη παραλλαγή [114] αποτελεί τη βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων *Constriction* όπου η ταχύτητα δίνεται από:

$$v_{ij}(t+1) = \chi(v_{ij}(t) + c_1 rand_1(pbest_{ij} - x_{ij}(t)) + c_2 rand_2(gbest_j - x_{ij}(t))) \quad (5.15)$$

$$\chi = \frac{2}{|2 - c - \sqrt{c^2 - 4c}|} \quad (5.16)$$

και επιπλέον πρέπει να ισχύει:

$$c = c_1 + c_2, c > 4 \quad (5.17)$$

Η ενημέρωση των καλύτερων σωματιδίων καθώς και του καλύτερου σωματιδίου δίνεται από την εξίσωση:

$$pbest_{ij} = \begin{cases} X_{ij}(t+1), & \text{όπου } f(X_{ij}(t+1)) \leq f(X_{ij}(t)) \\ pbest_{ij}, & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (5.18)$$

Τη χρονική στιγμή t η βέλτιστη θέση όλου του σμήνους δίνεται από την εξίσωση:

$$gbest_j\{pbest_{1j}, pbest_{2j}, pbest_{N_j}|f(gbest_j)|\} = \min\{f(pbest_{1j}), f(pbest_{2j}), \dots, f(pbest_{N_j})\} \quad (5.19)$$

Ο ψευδοκώδικας του συγκεκριμένου αλγορίθμου παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα

Algorithm 2: Αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων

Αρχικοποίηση του πληθυσμού των σωματιδίων

do

for για κάθε σωματίδιο στη θέση x_p **do**

if (x_p) είναι καλύτερο από το $pbest$ **then**

$Pbest = x_p$

 Ορισμός του $gbest$ ως το καλύτερο σωματίδιο του πληθυσμού

for για κάθε σωματίδιο **do**

 Ενημέρωση των u_p, x_p

$U_p \leftarrow$ ταχύτητα ($x_p, pbest_p, gbest_p$)

$x_p \leftarrow$ ενημέρωση των θέσεων (x_p, U_p)

while ένα κριτήριο τερματισμού να ικανοποιείται;

5.1.3 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης πεταλούδας μονάρχη (**Monarch butterfly optimization (MBO)**)

Ο αλγόριθμος προτάθηκε το 2015 από τους Wang, Deb, Zhihua [115]. Ο αλγόριθμος έχει βασιστεί στη διαδικασία μετανάστευσης της πεταλούδας μονάρχη. [116] Η πεταλούδα μονάρχης ζει σε μέρη της βορείου Αμερικής και είναι γνωστή για την ικανότητα της να μεταναστεύει κάθε καλοκαίρι χιλιάδες μίλια μακριά από τις ΗΠΑ και τον Καναδά στο Μεξικό. Αυτή η κίνηση προς τα νότια αρχίζει τον Αύγουστο και τελειώνει όταν εμφανίζονται τα πρώτα κρύα. Κατά τη διάρκεια της άνοιξης λαμβάνει χώρα η αντίθετη διαδικασία [117]. Οι θηλυκές πεταλούδες γεννούν τα αυγά τους κατά τη διαδικασία αυτή. Επιπλέον έχει παρατηρηθεί ότι πολλές πεταλούδες εκτελούν Levy κινήσεις [118].

Η διαδικασία της μετανάστευσης πρέπει να διέπεται από κάποιους βασικούς κανόνες: διευκρινίζεται ότι οι περιοχές των ΗΠΑ και του Καναδά ονομάζονται περιοχή₁ και το Μεξικό ονομάζεται περιοχή₂

1. Όλες οι πεταλούδες μονάρχης, δηλαδή όλος ο πληθυσμός, πρέπει να είναι τοποθετημένες στην περιοχή₁ ή στην περιοχή₂
2. κάθε απόγονος-παιδί δημιουργείται από έναν τελεστή μετανάστευσης από μονάρχη πεταλούδα στην περιοχή₁ ή στην περιοχή₂

Κεφάλαιο 5. Αλγοριθμική επίλυση

3. Για να μην υπάρξει μεταβολή στο μέγεθος του πληθυσμού θεωρείται ότι μια πεταλούδα μονάρχης πεθαίνει μόνο όταν μια πεταλούδα μονάρχης γεννιέται
4. Η πεταλούδα μονάρχης με την καλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης περνάει άμεσα στην επόμενη γενιά και δεν μεταβάλλεται από κανέναν τελεστή. Αυτό εξασφαλίζει ότι διατηρείται η ποιότητα της αποτελεσματικότητας του αλγορίθμου και δεν θα χειροτερεύουν οι λύσεις καθώς εξελίσσονται οι γενιές.

Ο αριθμός των μελών των δύο πληθυσμιακών ομάδων υπολογίζεται από:

$$NP_1 = \text{ceil}(p \cdot NP) \quad NP_2 = NP - NP_1 \quad (5.20)$$

όπου NP_1 είναι ο αριθμός των μελών της πρώτης πληθυσμιακής ομάδας, NP_2 αντίστοιχα της δεύτερης, NP ο αριθμός του συνολικού πληθυσμού, το p είναι η αναλογία πεταλούδας μονάρχης στην περιοχή₁, ceil είναι ο πλησιέστερος ακέραιος μεγαλύτερος ή ίσος του x .

Βασικό ρόλο στον συγκεκριμένο αλγόριθμο παίζει ο τελεστής μετανάστευσης με δεδομένο ότι η πεταλούδα μονάρχης μεταναστεύει από περιοχή₁ στην περιοχή₂ κατά τη διάρκεια του Απριλίου και μεταναστεύει από την περιοχή₂ στην περιοχή₁ τον Σεπτέμβριο. Η μαθηματική έκφραση αυτής της διαδικασίας φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$x_{i,k}^{t+1} = x_{r1,k}^t \quad (5.21)$$

όπου $x_{i,k}^{t+1}$ είναι το k στοιχείο του x_i στη γενιά $t + 1$ που αντιπροσωπεύουν τη θέση της πεταλούδας μονάρχης i . Αντίστοιχα το $x_{r1,k}^t$ είναι το k στοιχείο του x_{r1} στη γενιά t που αντιπροσωπεύουν τη νέα θέση της πεταλούδας μονάρχης r_1 , η οποία επιλέγεται τυχαία από τον υπο-πληθυσμό₁ όπου αν $r \leq p$ τότε η νέα γενιά πεταλούδας μονάρχης προκύπτει από την εξίσωση 5.21. Το r προκύπτει από την παρακάτω εξίσωση:

$$r = \text{rand} \cdot \text{peri} \quad (5.22)$$

όπου peri είναι η περίοδος μετανάστευσης και στην κλασική εκδοχή του αλγορίθμου παίρνει την τιμή 1.2 και rand είναι ένας τυχαίος αριθμός από την ομοιόμορφη κατανομή. Στην

Κεφάλαιο 5. Αλγοριθμική επίλυση

περίπτωση που $r > p$ το k στοιχείο που δημιουργήθηκε δίνεται από την εξίσωση:

$$x_{i,k}^{t+1} = x_{r2,k}^t \quad (5.23)$$

όπου $x_{r2,k}^t$ είναι το k - *στο* στοιχείο του x_{r2} όπου είναι η νέα θέση που δημιουργήθηκε από τη μονάρχη πεταλούδα r_2 η οποία τυχαία επιλέγεται από τον υπο-πληθυσμό $_2$.

Πρέπει να τονιστεί ότι αποτελεί σημαντικό παράγοντα η αναλογία p για τον συντελεστή μετανάστευσης. Αν το p είναι αρκετά μεγάλο, τότε θα επιλεγούν περισσότερες πεταλούδες από τον υπο-πληθυσμό₁, αντίστοιχα αν το p είναι αρκετά μικρό τότε θα επιλεγούν περισσότερες πεταλούδες από τον υπο-πληθυσμό₂.

Για τη μαθηματική προσέγγιση της διαδικασίας εισάγεται διαδικασία μετακίνησης που σχετίζεται με την μετακίνηση των πεταλούδων από μια περιοχή σε μία άλλη και σχετίζεται με το καλύτερο άτομο του πληθυσμού.

$$x_{j,k}^{t+1} = x_{best}^t \quad (5.24)$$

Η παραπάνω διεργασία εκτελείται όταν ένας τυχαίος αριθμός είναι μεγαλύτερος από τον λόγο μετανάστευσης. Στην περίπτωση που αυτό δεν συμβαίνει τότε για τη διαδικασία μετακίνησης επιλέγει ένα τυχαίο μέλος από τη δεύτερη ομάδα πληθυσμού ($r3 \in \{1, 2, 3, \dots, NP_2\}$).

$$x_{j,k}^{t+1} = x_{r3,k}^t \quad (5.25)$$

Εκτός από τον συντελεστή μετανάστευσης, υπάρχει και ο συντελεστής προσαρμογής **BAR**. Στην περίπτωση που ένας τυχαίος αριθμός είναι μεγαλύτερος από τον συντελεστή προσαρμογής, τότε εφαρμόζεται η σχέση μεταβολής της θέσης ενός ατόμου του πληθυσμού και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$x_{j,k}^{t+1} = x_{j,k}^{t+1} + \alpha \cdot (dx_k - 0.5) \quad (5.26)$$

$$dx_k = \text{Levy}(x_j^t) \quad (5.27)$$

όπου dx_k είναι το βήμα αναζήτησης για τη θέση που θα βρεθεί το άτομο εκτελώντας κινήσεις Levy.

$$\alpha = \frac{Smax}{t^2} \quad (5.28)$$

όπου το α είναι ο συντελεστής βαρύτητας και το $Smax$ είναι το μέγιστο βήμα αναζήτησης. Ο χώρος της αναζήτησης των λύσεων μεγαλώνει όσο μεγαλύτερες τιμές παίρνει το $Smax$.

Ο ψευδοκώδικας του παραπάνω αλγορίθμου παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα [115]:

5.1.4 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης φάλαινας

(The Whale Optimization Algorithm (WOA))

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της φάλαινας προτάθηκε από τον Mirjalili [119] και μιμείται την κοινωνική συμπεριφορά των καμπουροφαλαινών και έχει εμπνευστεί από την στρατηγική κυνηγιού με μηχανισμό δικτύου φυσαλίδων.

Οι φάλαινες είναι φανταχτερά πλάσματα. Θεωρούνται τα μεγαλύτερα θηλαστικά στον πλανήτη μας και θεωρούνται ως επί το πλείστον αρπακτικά. Δεν κοιμούνται ποτέ γιατί πρέπει να αναπέσουν στην επιφάνεια των ωκεανών, αν και στην πραγματικότητα κοιμάται ο μισός τους εγκέφαλος. Θεωρούνται ζώα με υψηλό δείκτη νοημοσύνης. Επιπλέον παρουσιάζουν πολλές συμπεριφορές παρόμοιες με του ανθρώπου [120]. Επίσης ζούν σε ομάδες ή μόνες τους.

Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό τους που αφορά και τον σχετικό αλγόριθμο είναι ο τρόπος που κυνηγούν το θήραμα τους. Η συμπεριφορά που παρουσιάζουν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αναζήτησης τροφής [121] παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Πιο αναλυτικά μόλις εντοπίσουν το θήραμα τους καταδύονται 12 μέτρα κάτω από την επιφάνεια εκτελώντας μια σπειροειδή κίνηση γύρω από το θήραμα του με στόχο να του προκαλέσουν σύγχυση για να μην καταλάβει τον τρόπο που σκοπεύουν να κινηθούν. Έπειτα ανοίγουν το στόμα τους

Algorithm 3: Αλγόριθμος βελτιστοποίησης της πεταλούδας μονάρχη

Αρχικοποίηση του πληθυσμού των πεταλούδων $Land_1, Land_2(NP_1, NP_2)$

Ορισμός των $S_{max}, BAR, peri, p$

Υπολογισμός της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε πεταλούδα μονάρχη

while $t \leq$ μέγιστος αριθμός επαναλήψεων **do**

 Ταξινόμηση των ατόμων με κριτήριο την τιμή της αντικειμενικής τους συνάρτησης

 Διάρθρωση του πληθυσμού για τοποθέτηση τους στις περιοχές περιοχή₁ και περιοχή₂ σύμφωνα με την εξίσωση 5.20

for $i = 1 : NP_1$ **do**

for $k = 1 : NP_2$ **do**

 Δημιουργία ενός τυχαίου αριθμού $r = rand * peri$

if $r \geq p$ **then**

 Τυχαία επιλογή πεταλούδας από την περιοχή περιοχή₁

 Μετανάστευση χρησιμοποιώντας τη σχέση 5.21

else

 Τυχαία επιλογή πεταλούδας από την περιοχή₂

 Μετανάστευση χρησιμοποιώντας τη σχέση 5.23

for $i = 1 : NP_1$ **do**

for $i = 1 : NP_2$ **do**

 Δημιουργία ενός τυχαίου αριθμού

if $rand \leq p$ **then**

 Μετανάστευση χρησιμοποιώντας τον τελεστή 5.24

else

 Τυχαία επιλογή πεταλούδας από την περιοχή₂

 Μετανάστευση χρησιμοποιώντας τη σχέση 5.25

if $rand \leq BAR$ **then**

 Προσαρμογή της θέσης της πεταλούδας χρησιμοποιώντας την εξίσωση 5.26

 Συνδυασμός των περιοχών με περιοχή₂ για όλο τον πληθυσμό

 Υπολογισμός της αντικειμενικής συνάρτησης του νέου πληθυσμού

$t = t + 1$

Κεφάλαιο 5. Αλγοριθμική επίλυση

και καταπίνουν όσο μεγαλύτερη ποσότητα ψαριών μπορούν τα οποία έχουν συγκεντρωθεί μέσα στον σπειροειδή ιστό τους.

Η αρχική θέση του θηράματος θεωρείται ως βέλτιση με την εκκίνηση του αλγορίθμου. Η θέση των φαλαινών ανανεώνεται σε συνάρτηση με τη θέση του καλύτερου θηρευτή. Οι παρακάτω εξισώσεις σχετίζονται με τις θέσεις και τις κινήσεις των φαλαινών.

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot X^*(t) - X(t)| \quad (5.29)$$

$$X(t+1) = X^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (5.30)$$

όπου \vec{A} , \vec{C} είναι διανύσματα συντελεστών κίνησης $X(t)$ είναι η θέση της καλύτερης φάλαινας κυνηγού. Τα \vec{A} και \vec{D} προκύπτουν από τις παρακάτω εξισώσεις.

$$\vec{A} = 2 \cdot \vec{a} \cdot \vec{r} - \vec{a} \quad (5.31)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r} \quad (5.32)$$

Το \vec{a} μειώνεται γραμμικά στο διάστημα $[2, 0]$ μέχρι το τέλος των επαναλήψεων του αλγορίθμου ώστε η σπειροειδής κίνηση να πραγματοποιείται με επιτυχία. Το \vec{r} παίρνει τυχαίες τιμές στο $[0, 1]$. Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα οι φάλαινες δημιουργούν έναν πλέγμα από φυσσαλίδες ώστε να παγιδέψουν μέσα σε αυτό τα θηράματά τους, και δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$X(t+1) = \vec{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\phi l) + X^*(t) \quad (5.33)$$

όπου d είναι μια σταθερά και l ένας τυχαίος αριθμός στο $[-1, 1]$, και \vec{D}' είναι η απόσταση της κάθε φάλαινας από την καλύτερη φάλαινα του πληθυσμού η οποία δίνεται από την εξίσωση:

$$\vec{D}' = |x^*(t) - X(t)| \quad (5.34)$$

Κεφάλαιο 5. Αλγοριθμική επίλυση

Καθώς ο στόχος των φαλαινών είναι να περικυκλώσουν όσα περισσότερα ψάρια μπορούν, πραγματοποιούν σχετική σπειροειδή κίνηση δυο αντίθετων κατευθύνσεων. Τα μέλη του πληθυσμού των φαλαινών που πραγματοποιούν τη σχετική κίνηση δεν βρίσκονται όλα σε ένα σημείο αλλά σε διαφορετικές θέσεις ώστε η κίνηση αυτή να είναι πιο αποδοτική. Για να γίνει η επιλογή της θέσης του κάθε μέλους χρησιμοποιείται η παρακάτω εξίσωση:

$$X(t+1) = \begin{cases} X^*(t) - \vec{A} \cdot \vec{D}, & p \leq 0.5 \\ \vec{D}' \cdot e^{bl} \cdot \cos(2\phi l) + X^*(t), & p > 0.5 \end{cases} \quad (5.35)$$

Η τελευταία εξίσωση στην ουσία μας δείχνει ότι είτε επιλέγεται σπειροειδής κίνηση σε σχέση με το καλύτερο μέλος του πληθυσμού, είτε επιλέγεται μια απλή μετακίνηση σε σχέση με το καλύτερο μέλος του πληθυσμού.

Εφόσον είναι γνωστή η κίνηση που θα πραγματοποιήσει κάθε μέλος του πληθυσμού, θα πρέπει να διευκρινιστεί πως θα πραγματοποιηθεί η αναζήτηση της τροφής. Αυτή η διαδικασία φαίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις οι οποίες πραγματοποιούνται σε σχέση με ένα τυχαίο μέλος του πληθυσμού:

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot X_{rand} - X(t)| \quad (5.36)$$

$$X(t+1) = X_{rand} - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (5.37)$$

Ο στόχος των παραπάνω εξισώσεων είναι να διερευνηθούν νέες θέσεις για τα μέλη του πληθυσμού ώστε να αποφυγεί το τοπικό ελάχιστο. Σημαντικό ρόλο παίζουν οι τιμές των συντελεστών των εξισώσεων.

Κεφάλαιο 5. Αλγοριθμική επίλυση

Ο ψευδοκώδικας του παραπάνω αλγορίθμου παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα [119]:

Algorithm 4: Αλγόριθμος βελτιστοποίησης της φάλαινας

```
Αρχικοποίηση του πληθυσμού των φαλαινών
Υπολογισμός της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε φάλαινα–θηρευτή
 $X^* = H$  καλύτερη φάλαινα–θηρευτής
while  $t \leq$  μέγιστος αριθμός επαναλήψεων do
    for για κάθε θηρευτή φάλαινα do
        Ενημέρωση των  $a, A, C, l, p$ 
        if  $p \leq 0.5$  then
            if  $|A| \leq 1$  then
                | Ενημέρωση της θέσης χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 5.29,5.30
            else
                | Επιλογή τυχαίου θηρευτή
                | Ενημέρωση της θέσης χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 5.36, 5.37
        else
            | Ενημέρωση θέσης χρησιμοποιώντας τον τύπο 5.33
    Υπολογισμός της αντικειμενικής συνάρτησης της κάθε φάλαινας– θηρευτή
    Ενημέρωση  $X^* =$ 
Επιστροφή  $X^*$ 
```

5.1.5 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης της νυχτοπεταλούδας(σκόρου) (**Moth flame Optimization (MFO)**)

Ο αλγόριθμος της νυχτοπεταλούδας προτάθηκε από τον Mirjalili [122]. Οι νυχτοπεταλούδες ή αλλιώς όπως είναι γνωστές ως σκόρος, είναι έντομα που ανήκουν στην κατηγορία των πεταλούδων. Ο βασικός σκοπός τους χωρίζεται σε δύο υποστόχους. Ο πρώτος είναι η δημιουργία προνυμφών και ο άλλος η ενήλικη ζωή τους. Ο αλγόριθμος μελετάει τον τρόπο που πλοηγούνται οι νυχτοπεταλούδες. Αυτό συμβαίνει κατά τις βραδινές ώρες και οδηγούνται με βάση το φως του φεγγαριού.

Ο μηχανισμός που χρησιμοποιούν για να πραγματοποιήσουν αυτές τις διεργασίες ονομάζεται εγκάρσιος προσανατολισμός πλοήγησης. Πιο συγκεκριμένα όταν μια νυχτοπεταλούδα πετάει το βράδυ διατηρεί μια σταθερή γωνία με άξονα το φεγγάρι. Λόγω της μεγάλης απόστασης του φεγγαριού και της νυχτοπεταλούδας το πέταγμα της πραγματοποιείται σε ευθεία γραμμή. Όμως όταν παρατηρούμε την κίνηση της νυχτοπεταλούδας συμπεραίνουμε ότι πετάει με σπειροειδή κίνηση γύρω από τις τεχνητές πηγές φωτός. Αυτό συμβαίνει διότι μπερδεύονται από τις τεχνητές πηγές φωτός και στην όχι μεγάλη αποτελεσματικότητα του εγκάρσιου προσανατολισμού, ο οποίος λειτουργεί ικανοποιητικά μόνο όταν η κίνηση πραγματοποιείται σε ευθεία γραμμή και η πηγή φωτός βρίσκεται πολύ μακριά. Τελικά η νυχτοπεταλούδα συγχλίνει στο φως. Η μαθηματική μοντελοποίηση αυτής της συμπεριφοράς προτείνεται στον αλγόριθμο της νυχτοπεταλούδας (**Moth-Flame Optimization (MFO)**).

Κάθε μια λύση του προβλήματος αναπαριστά και μια πηγή φωτός. Σε κάθε επανάληψη οι νυχτοπεταλούδες πλησιάζουν την πιο φωτεινή πηγή φωτός και με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται σμήνος από νυχτοπεταλούδες που με σπειροειδή κίνηση πλησιάζουν την πηγή φωτός (λύση). Αυτό συμβαίνει όσο μια λύση θεωρείται η καλύτερη δηλαδή πιο φωτεινή. Εάν υπάρξει άλλη λύση φωτεινότερη τότε οι νυχτοπεταλούδες προσεγγίσουν αυτή με τον προαναφερθέντα τρόπο.

Κεφάλαιο 5. Αλγοριθμική επίλυση

Με την προϋπόθεση ότι ισχύουν οι παρακάτω τρεις υποθέσεις μπορεί να εφαρμοστεί η λογαριθμική σπειροειδής συνάρτηση. Αρχικά το αρχικό σημείο της σχετικής κίνησης θα πρέπει να ξεκινάει από την νυχτοπεταλούδα και το τελικό σημείο να είναι η πηγή του φωτός. Τέλος η διακύμανση του εύρους της σπείρας δεν θα πρέπει να υπερβαίνει το χώρο της αναζήτησης. Άρα εφόσον ικανοποιούνται οι παραπάνω περιορισμοί μπορούμε να εφαρμόσουμε τη λογαριθμική σπειροειδή συνάρτηση.

$$S(M_i, F_j) = D_i \cdot e^{bt} \cdot \cos(2\phi t) + F_j \quad (5.38)$$

όπου D_i είναι η απόσταση της i νυχτοπεταλούδας από την j πηγή φωτός, b είναι μια μεταβλητή που καθορίζει το σχήμα της λογαριθμικής σπείρας και t είναι ένας τυχαίος αριθμός στο $[-1, 1]$. Το D υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$D_i = |F_j - M_i| \quad (5.39)$$

όπου M_i δείχνει την i πεταλούδα, το F_j αντιπροσωπεύει την j πηγή φωτός. Η κάθε κίνηση της νυχτοπεταλούδας πραγματοποιείται σε αντιστοιχία με την πηγή φωτός. Η παράμετρος t ορίζει πόσο κοντά στην πηγή φωτός μπορεί να βρεθεί η νυχτοπεταλούδα σε κάθε κίνηση. Πιο συγκεκριμένα όσο το t πλησιάζει στο -1 τόσο πιο κοντά βρίσκεται στην πηγή φωτός και όσο πλησιάζει προς το 1 τόσο απομακρύνεται από αυτήν. Ως εκ τούτου μπορεί να θεωρηθεί ότι δημιουργείται μια υπερ-έλλειψη γύρω από την πηγή φωτός προς όλες τις κατευθύνσεις. Με την σχετική κίνηση αυτή η εκμετάλευση του χώρου αναζήτησης πραγματοποιείται με επιτυχία. Καλύτερες λύσεις παρατηρούνται όταν οι νυχτοπεταλούδες βρίσκονται κοντά στην πηγή φωτός.

Ένας ακόμα παράγοντας που πρέπει να οριστεί είναι η ενημέρωση της θέσης των νυχτοπεταλούδων σε συνάρτηση με τις διαφορετικές θέσεις στο χώρο της αναζήτησης. Προτείνεται ένας προσαρμοστικός μηχανισμός για τον προσδιορισμό των αριθμών των πηγών φωτός.

$$flames_{no} = round(N - l \cdot \frac{N - 1}{T}) \quad (5.40)$$

Κεφάλαιο 5. Αλγοριθμική επίλυση

όπου l είναι ο αριθμός της επανάληψης, N είναι ο μέγιστος αριθμός των πηγών φωτός, και T είναι ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων.

Ο ψευδοκώδικας του παραπάνω αλγορίθμου παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Algorithm 5: Αλγόριθμος βελτιστοποίησης της νυχτοπεταλούδας

Αρχικοποίηση του πληθυσμού των πεταλούδων

Υπολογισμός της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε νυχτοπεταλούδα

Υπολογισμός πηγής φωτός - ταξινόμηση πληθυσμού

while $t \leq$ μέγιστος αριθμός επαναλήψεων **do**

for $i = 1 : n$ **do**

for $j = 1 : d$ **do**

 Ενημέρωση θέσης των r, t

 Υπολογισμός της απόστασης για κάθε νυχτοπεταλούδα χρησιμοποιώντας την εξίσωση 5.39

 Ενημέρωση (S, D) χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 5.38, 5.40

Υπολογισμός της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης για τον νέο πληθυσμό

Ορισμός πηγής φωτός - ταξινόμηση πληθυσμού

$t=t+1$

5.2 Τοπική αναζήτηση

Για την καλύτερη και αποδοτικότερη αναζήτηση και εξερεύνηση του χώρου των λύσεων εφαρμόσαμε σχετικούς αλγορίθμους τοπικής αναζήτησης. Ο στόχος της τοπικής αναζήτησης είναι η δημιουργία καλύτερων λύσεων ώστε να βελτιωθεί η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος. Αυτό επιτυγχάνεται με ανακίνηση του συστήματος, δηλαδή με τροποποίηση των διανυσμάτων των αρχικών λύσεων με συγκεκριμένες μεθοδολογίες που αλλάζουν την αλληλουχία των αρχικών λύσεων. Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιείται ανταλλαγή θέσης, εξαγωγή ενός κόμβου ή περισσότερων και η επανατοποθέτηση τους σε άλλη θέση μέσα στο διάνυσμα λύσης, μετατόπιση ενός ή παραπάνω κόμβων αλλάζοντας την αλληλουχία του εύρους ή την αντιστροφή του εύρους.

Οι αλλαγές που πραγματοποιήσαμε εφαρμόζονται είτε σε μια διαδρομή μόνο είτε και σε διαφορετικές διαδρομές, αναλόγως με τη δυνατότητα εφαρμογής κάθε αλγορίθμου. Σε κάθε περίπτωση οι νέες διαδρομές που προκύπτουν θα πρέπει να είναι εφικτές διαδρομές, δηλαδή να μην παραβιάζουν κανέναν περιορισμό του προτεινόμενου μοντέλου. Σε περίπτωση που η νέα λύση είναι καταρχάς εφικτή και επιπλέον καλύτερη από την προηγούμενη, τότε αυτή η λύση αποθηκεύεται, σε αντίθετη περίπτωση απορρίπτεται. Οι αλγόριθμοι τοπικής αναζήτησης που εφαρμόσαμε αναλύονται παρακάτω.

5.2.1 1 – 1 Αντικατάσταση (1 – 1 **Exchange**)

Στον συγκεκριμένο αλγόριθμο πραγματοποιείται ανταλλαγή θέσης μεταξύ δύο κόμβων σε μια κυκλική διαδρομή, δηλαδή σε μια διαδρομή που ξεκινάει και καταλήγει στην αποθήκη. Πιο συγκεκριμένα επιλέγουμε τυχαία δύο διαφορετικούς κόμβους της διαδρομής και αλλάζουμε τις μεταξύ τους θέσεις μέσα στη διαδρομή. Για παράδειγμα, αν έχουμε την παρακάτω διαδρομή

1	3	5	7	8	1
---	---	---	---	---	---

αν επιλεγούν τυχαία οι κόμβοι 3 και 8 τότε η νέα διαδρομή θα είναι η παρακάτω:

Κεφάλαιο 5. Αλγοριθμική επίλυση

Αρχική διαδρομή					
1	3	5	7	8	1
Τελική διαδρομή					
1	8	5	7	3	1

Πίνακας 5.5: 1 – 1 Αντικατάσταση

Για τη νέα διαδρομή υπολογίζουμε το κόστος της. Αν είναι καλύτερο από το κόστος της λύσης πριν την αλλαγή κρατάμε τη νέα λύση ως καλύτερη λύση μέχρι τώρα. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή αν η νέα λύση έχει μεγαλύτερο κόστος, την απορρίπτουμε και κρατάμε την προηγούμενη λύση ως καλύτερη λύση μέχρι τώρα. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος εφαρμόζεται και σε πολλαπλές διαδρομές.

Για την κίνηση 1 – 1 αντικατάσταση σε διαφορετικές διαδρομές, επιλέγουμε τυχαία από κάθε διαδρομή έναν κόμβο. Έστω ότι από την πρώτη διαδρομή επιλέγουμε τυχαία τον κόμβο 5 και από την δεύτερη διαδρομή τον κόμβο 10. Με την εφαρμογή της σχετικής κίνησης πραγματοποιείται αντικατατάσταση των δυο τυχαία επιλεγόμενων κόμβων.

Αρχικές διαδρομές					
1	4	5	3	2	1
1	6	7	9	10	1
Τελικές διαδρομές					
1	4	10	3	2	1
1	6	7	9	5	1

Πίνακας 5.6: 1 – 1 Αντικατάσταση σε διαφορετικές διαδρομές.

5.2.2 2 – 2 Αντικατάσταση (2 – 2 **Exchange**)

Στο συγκεκριμένο αλγόριθμο πραγματοποιείται η ίδια διαδικασία με τον 1 – 1 **Exchange** με την μόνη αλλαγή ότι δεν γίνεται η αλλαγή μεταξύ δύο κόμβων αλλά μεταξύ δύο τόξων. Για παράδειγμα στη διαδρομή αν επιλεγούν τυχαία τα τόξα (3, 5) και (10, 15) μεταφέρουμε στη θέση του τόξου (3, 5) το τόξο (10, 15) και αντίθετα.

Ανάλογα όπως στην εφαρμογή του 1 – 1 **Exchange** υπολογίζουμε το κόστος, αν είναι

Κεφάλαιο 5. Αλγοριθμική επίλυση

Αρχική διαδρομή										
1	3	5	7	2	4	9	10	15	12	1
Τελική διαδρομή										
1	10	15	7	2	4	9	3	5	12	1

Πίνακας 5.7: 2 – 2 Αντικατάσταση

καλύτερο κρατάμε αυτή τη διαδρομή ως την καλύτερη λύση μέχρι τώρα, αλλιώς την απορρίπτουμε και κρατάμε την αρχική λύση, πριν την αλλαγή, ως την καλύτερη λύση μέχρι τώρα. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος εφαρμόζεται και σε πολλαπλές διαδρομές.

Για την κίνηση 2 – 2 αντικατάσταση σε διαφορετικές διαδρομές, επιλέγουμε τυχαία από κάθε διαδρομή δύο τόξα. Έστω ότι από την πρώτη διαδρομή επιλέγουμε τυχαία το τόξο (4, 5) και από τη δεύτερη το τόξο (6, 7). Με την εφαρμογή της σχετικής κίνησης πραγματοποιείται αντικατατάσταση μεταξύ των δυο τυχαία επιλεγόμενων κόμβων κάθε διαδρομής.

Αρχικές διαδρομές						
1	4	5	3	2	8	1
1	6	7	11	9	10	1
Τελικές διαδρομές						
1	6	7	3	2	8	1
1	4	5	11	9	10	1

Πίνακας 5.8: 2 – 2 Αντικατάσταση σε διαφορετικές διαδρομές.

5.2.3 1 – 0 Επανατοποθέτηση (1 – 0 **Relocate**)

Σε αυτόν τον αλγόριθμο επιλέγεται τυχαία ένας κόμβος και επανατοποθετείται μέσα στην ίδια διαδρομή σε μια άλλη θέση. Για τον προσδιορισμό της θέσης που θα επανατοποθετηθεί επιλέγουμε τυχαία πάλι ένα κόμβο της διαδρομής και τον επανατοποθετούμε μετά από αυτόν. Για παράδειγμα, αν επιλέξουμε τυχαία τον κόμβο 4 σημαίνει ότι αυτός ο κόμβος θα αφαιρεθεί από την θέση του και θα τοποθετηθεί μετά από έναν άλλον τυχαία επιλεγόμενο κόμβο για παράδειγμα τον κόμβο 7. Άρα ο κόμβος 4 θα τοποθετηθεί μετά τον κόμβο 7.

Κρατάμε ή απορρίπτουμε τη νέα διαδρομή με ακριβώς την ίδια διαδικασία που ακολου-

Κεφάλαιο 5. Αλγοριθμική επίλυση

Αρχική διαδρομή								
1	2	4	6	3	7	8	9	1
Αρχική διαδρομή								
1	2	6	3	7	4	8	9	1

Πίνακας 5.9: 1 – 0 Επανατοποθέτηση

θήσαμε και στους παραπάνω αλγορίθμους τοπικής αναζήτησης. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος εφαρμόζεται και σε πολλαπλές διαδρομές.

Για την κίνηση 1 – 0 επανατοποθέτηση σε διαφορετικές διαδρομές υποθέτουμε ότι από την πρώτη διαδρομή επιλέγεται τυχαία ο κόμβος 5, άρα θα διαγραφεί ο επιλεγόμενος κόμβος και θα επανατοποθετηθεί μετά από έναν τυχαία επιλεγόμενο κόμβο της δεύτερης διαδρομής, για παράδειγμα τον κόμβο 9.

Αρχικές διαδρομές						
1	4	5	3	2	1	
1	6	7	9	10	1	
Τελικές διαδρομές						
1	4	3	2	1		
1	6	7	9	5	10	1

Πίνακας 5.10: 1 – 0 επανατοποθέτηση σε διαφορετικές διαδρομές.

5.2.4 2 – 0 Επανατοποθέτηση (2 – 0 **Relocate**)

Σε αυτόν τον αλγόριθμο επιλέγεται τυχαία ένα τόξο και επανατοποθετείται μέσα στην ίδια διαδρομή σε μια άλλη θέση. Για τον προσδιορισμό της θέσης που θα επανατοποθετηθεί επιλέγουμε τυχαία έναν κόμβο της διαδρομής και επανατοποθετούμε το τόξο μετά από αυτόν. Για παράδειγμα, στην παρακάτω διαδρομή αν επιλέξουμε τυχαία τους κόμβους 4, 6 σημαίνει ότι αυτό το τόξο, θα αφαιρεθεί από την θέση του και θα τοποθετηθεί μετά από έναν άλλον κόμβο που επιλέγεται τυχαία για παράδειγμα τον κόμβο 7. Άρα το τόξο (4, 6) θα τοποθετηθεί μετά τον κόμβο 7 και η νέα διαδρομή που θα προκύψει είναι:

Κρατάμε ή απορρίπτουμε τη νέα διαδρομή με ακριβώς την ίδια διαδικασία που ακολου-

Κεφάλαιο 5. Αλγοριθμική επίλυση

Αρχική διαδρομή								
1	2	4	6	3	7	8	9	1
Τελική διαδρομή								
1	2	3	7	4	6	8	9	1

Πίνακας 5.11: 2 – 0 Επανατοποθέτηση.

θήσαμε και στους παραπάνω αλγορίθμους τοπικής αναζήτησης. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος εφαρμόζεται και σε πολλαπλές διαδρομές.

Η διαδικασία της τοπικής αναζήτησης μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε σε μια διαδρομή είτε σε πολλαπλές διαδρομές. Σε κάθε περίπτωση, σε κάθε επανάληψη πραγματοποιείται μία μόνο αλλαγή, από την οποία αν έχει προκύψει καλύτερο αποτέλεσμα την κρατάμε ως την καλύτερη λύση μέχρι τώρα, αλλιώς την απορρίπτουμε.

Για την κίνηση 2 – 0 επανατοποθέτηση σε διαφορετικές διαδρομές υποθέτουμε ότι από την πρώτη διαδρομή επιλέγεται να διαγραφεί το τόξο (4, 5) και να επανοποθετηθεί μετά από έναν τυχαία επιλεγόμενο κόμβο της δεύτερης διαδρομής, για παράδειγμα τον κόμβο 7.

Αρχικές διαδρομές							
1	4	5	3	2	1		
1	6	7	9	10	1		
Τελικές διαδρομές							
1	3	2	1				
1	6	7	4	5	9	10	1

Πίνακας 5.12: 2 – 0 επανατοποθέτηση σε διαφορετικές διαδρομές.

5.2.5 2-Opt

Στο συγκεκριμένο αλγόριθμο διαγράφονται δύο τόξα και συνδέονται εκ νέου ώστε να δημιουργηθεί μια νέα διαδρομή. Ο τρόπος που συνδέονται είναι αλλάζοντας την κατεύθυνση του διανύσματος που έχει προκύψει καθώς διαγράφηκαν τα σχετικά τόξα. Για παράδειγμα, αν επιλέξουμε τα τόξα τα τόξα (3, 4) και (7, 9) τότε η νέα διαδρομή που θα προκύψει είναι

Κεφάλαιο 5. Αλγοριθμική επίλυση

Αρχική διαδρομή								
1	2	3	4	6	8	7	9	1
Τελική διαδρομή								
1	2	3	7	8	6	4	9	1

Πίνακας 5.13: $2 - 0 \text{ opt.}$

Ο αλγόριθμος αυτός μπορεί να εφαρμοστεί μόνο μέσα σε μία διαδρομή.

5.2.6 Αλγόριθμος Μεταβλητής Γειτονιάς Αναζήτησης (**Variable Neighborhood Search (VNS)**)

Στη συνέχεια περιγράφεται ο τρόπος που εφαρμόστηκαν οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι στη διδακτορική διατριβή. Ακολουθήσαμε τη διαδικασία της Μεταβλητής Γειτονιάς Αναζήτησης (**Variable Neighborhood Search (VNS)**). Ο τρόπος που την εφαρμόσαμε ήταν: αρχικά ξεκινούσαμε με μία τοπική αναζήτηση μεταξύ πολλών διαδρομών και όταν γινόταν μία επιτυχημένη αλλαγή εφαρμόζαμε τοπική αναζήτηση μέσα στην ίδια διαδρομή για να δούμε αν η ανταλλαγή που έγινε μεταξύ διαφορετικών διαδρομών, τοποθέτησε βέλτιστα τους κόμβους (ή τα τόξα) που συμμετείχαν στην ανταλλαγή, στις καινούριες τους διαδρομές.

Όπως αναφέρθηκε προηγούμενα άλλοι αλγόριθμοι τοπικής αναζήτησης είναι κατάλληλοι για να εφαρμοστούν αποτελεσματικά σε μία διαδρομή και άλλοι είναι κατάλληλοι να εφαρμοστούν μεταξύ πολλαπλών διαδρομών.

1. Τοπική αναζήτηση σε μία διαδρομή

Η τοπική αναζήτηση μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μια διαδρομή κάθε φορά και δεν μεταβάλλεται ο αριθμός των κόμβων της αρχικής λύσης. Το μόνο στοιχείο που αλλάζει είναι η τελική αλληλουχία των κόμβων, δηλαδή η σειρά που θα εξυπηρετήσει κάθε όχημα τον αντίστοιχο πελάτη. Όλοι οι μέθοδοι τοπικής αναζήτησης χρησιμοποιήθηκαν για την τοπική αναζήτηση σε μία διαδρομή ανάλογα με τι θα επιλεγόταν από τη **VNS** σε κάθε επανάληψη.

Κεφάλαιο 5. Αλγοριθμική επίλυση

2. Τοπική αναζήτηση σε πολλαπλές διαδρομές

Στη συγκεκριμένη διαδικασία επιλέγονται δύο διαδρομές από την αρχική λύση. Σε αυτή την περίπτωση διαταράσσεται η κάθε διαδρομή καθώς αλλάζουν οι κόμβοι των διαδρομών και όχι μόνο η αλληλουχία των κόμβων. Ο στόχος μας στη συγκεκριμένη διαδικασία ήταν να μειωθούν οι διαδρομές. Οι αλγόριθμοι που εφαρμόστηκαν σε πολλαπλές διαδρομές είναι οι 1 – 1 Αντικατάσταση, 2 – 2 Αντικατάσταση, 1 – 0 Επανατοποθέτηση, 2 – 0 Επανατοποθέτηση.

Η μορφή της VNS που έχουμε εφαρμόσει στο συγκεκριμένο πρόβλημα ακολουθεί τη λογική της προσπάθειας της όσο το δυνατόν περισσότερο μείωσης των διαδρομών. Ο λόγος είναι ότι το μοντέλο είναι αρκετά πολύπλοκο και οδηγούσε στις αρχικές του λύσεις στη δημιουργία πολλών διαδρομών. Έτσι οι 4 μέθοδοι τοπικής αναζήτησης που μπορούν να χρησιμοποιηθούν μεταξύ 2 διαδρομών επιλεγόταν αρχικά με τυχαίο τρόπο και όταν γινόταν επιτυχής κίνηση εφαρμόζοταν άμεσα μία τοπική αναζήτηση μέσα στην κάθε διαδρομή με στόχο να τοποθετηθούν βέλτιστα οι κόμβοι που συμμετείχαν. Αν κάποια τοπική αναζήτηση μεταξύ διαδρομών δεν έδινε βελτίωση της λύσης για ένα αριθμό επαναλήψεων τότε με τη διαδικασία της VNS επιλεγόταν μία από τις άλλες 3 μεθόδους τοπικής αναζήτησης για να συνεχιστεί η διαδικασία. Η διαδικασία αλοκληρώνεται όταν δεν μπορεί πλέον η λύση να βελτιωθεί άλλο.

6 Αποτελέσματα

6.1 Δεδομένα

Στο προτεινόμενο μοντέλο χρησιμοποιήσαμε προσαρμοσμένα τα παραδείγματα αναφοράς που έχουν προταθεί από τους **Christofides, Mingozzi, Toth** το 1979 για το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με περιορισμό χωρητικότητας και χρόνους εξυπηρέτησης πελατών. Εφαρμόστηκαν εφτά παραδείγματα με χωρητικότητα από 160 μέχρι 200 μονάδες και ο χρόνος εξυπηρέτησης από 0 μέχρι 90 μονάδες χρόνου. Ο αριθμός των κόμβων είναι από 51 μέχρι 200 [123].

Αρχικά πρέπει να πραγματοποιηθεί η εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα και αρχικοποίηση παραμέτρων. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα κάθε πελάτης βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία τοποθετημένη στο χώρο, που μπορούμε να υποθέσουμε ότι είναι ένα ορθοκανονικό σύστημα συντεταγμένων, και κάθε πελάτης βρίσκεται σε ένα σημείο με συντεταγμένες (x, y) . Αυτό το σημείο το θεωρούμε ως κόμβο που τον επισκέπτεται ένα όχημα. Θα πρέπει να υπολογιστεί και να αποθηκευτεί σε έναν πίνακα η απόσταση των πελατών. Η απόσταση υπολογίζεται με βάση τον τύπο της ευκλείδειας απόστασης που δίνεται από τον παρακάτω τύπο [124].

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (6.1)$$

όπου d_{ij} είναι η απόσταση των δύο κόμβων και (x_i, y_i) και (x_j, y_j) είναι οι συντεταγμένες των δύο κόμβων.

Κάθε πελάτης έχει μια συγκεκριμένη ανάγκη για μονάδες προϊόντος για να εξυπηρετηθεί και κάθε όχημα διαθέτει συγκεκριμένη χωρητικότητα όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα 4 και υπολογίζεται το συνολικό κόστος κάθε διαδρομής μέσω του προτεινόμενου μοντέλου που

Κεφάλαιο 6. Αποτελέσματα

έχει αναλυθεί στην ενότητα 4.1.

Από τα διαθέσιμα δεδομένα που αντλήσαμε από τη βιβλιογραφία, κατασκευάσαμε νέα δεδομένα που να αντιστοιχούν στην μοντελοποίηση του προτεινόμενου προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό του F_1 που αντιστοιχεί στο προκαθορισμένο κόστος για κάθε όχημα, του F_2 που αντιστοιχεί στο κόστος μεταφοράς ανά μονάδα απόστασης, του F_3 που αντιστοιχεί στην τιμή της μονάδας των προϊόντων της ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας, του F_4 που αντιστοιχεί στην τιμή της μονάδας των καυσίμων και τέλος του F_5 που αντιστοιχεί στην τιμή του άνθρακα. Ενώ υπάρχουν δεδομένα εναρμονισμένα στη διεθνή βιβλιογραφία, στη συγκεκριμένη διδακτορική έρευνα αντλήσαμε δεδομένα από επίσημους φορείς όπως Eurostat [125], από την επίσημη σελίδα του ελληνικού κράτους [126], όπως επίσης και από την ελληνική βιβλιογραφία [127], [128] και κατασκευάσαμε δεδομένα που να αντιστοιχούν στα ελληνικά δεδομένα και τιμολογιακές πολιτικές.

Πιο συγκεκριμένα στον πίνακα 6.1 παρουσιάζεται το συνολικό ετήσιο προκαθορισμένο κόστος κάθε φορτηγού με μηχανισμό ψύξης. Με αναγωγή σε ημερήσιο προκαθορισμένο κόστος κάθε οχήματος, έχει οριστεί προσεγγιστικά με $F_1 = 127,28$ ευρώ ανά δρομολόγιο. Τα δεδομένα αντλήθηκαν από την ελληνική βιβλιογραφία [127], [128], από την επίσημη σελίδα του ελληνικού κράτους [126], και την τιμολογιακή πολιτική των ελληνικών ασφαλιστικών εταιρειών.

Το κόστος μεταφοράς, έχει οριστεί $F_2 = 1,58$ [127] ευρώ ανά χιλιόμετρο διανυθείσας απόστασης, επηρεάζει άμεσα το Labor cost ή κόστος εργασίας [129] και αντιπροσωπεύει το σύνολο των δαπανών που πραγματοποιούν οι εργοδότες για την απασχόληση εργαζομένων και την κατανάλωση του καυσίμου [99], [12].

Το κόστος της κατανάλωσης καυσίμου F_4 ορίζεται από το υπουργείο ανάπτυξης και ανταγωνιστικότητας κατά μέσο όρο σε 1,347 ευρώ ανά λίτρο πετρελαίου κίνησης [130].

Κεφάλαιο 6. Αποτελέσματα

Σχετικά με το κόστος ζημίας, έχουμε ορίσει ως $F_3 = 678$ ευρώ ανά τόνο αγαθών, το ρυθμό φθοράς των προϊόντων κατά τη μεταφορά με $\epsilon_1 = 1$, το ρυθμό φθοράς των προϊόντων κατά την εκφόρτωση με $\epsilon_2 = 0.9$, ο συντελεστής ευαισθησίας προϊόντων της ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας με $\theta = 0.002$ και την ταχύτητα εκφόρτωσης v_2 με 3.6 σε τόνους ανά ώρα [12].

Σχετικά με το κόστος ψύξης έχουμε ορίσει την κατανάλωση καυσίμου του ψυκτικού εξοπλισμού ανά μονάδα χρόνου κατά τη μεταφορά $a_1 = 2$ λίτρα ανά ώρα, την κατανάλωση καυσίμου του ψυκτικού εξοπλισμού ανά μονάδα χρόνου κατά την εκφόρτωση $a_2 = 2.5$ λίτρα ανά ώρα [12], την ταχύτητα του οχήματος $v_1 = 50$ χιλιόμετρα ανά ώρα όπως ορίζεται από την ελληνική νομοθεσία στο άρθρο 20 του νόμου 2696/1999 και η ταχύτητα φορτοεκφόρτωσης $v_2 = 3.6$ τόνοι ανά ώρα όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφία [12].

Για το κόστος του CO_2 , έχει οριστεί ως η κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα απόστασης με κενό φορτίο r_0 σε 0.165 λίτρα ανά χιλιόμετρο, και η κατανάλωση καυσίμου ανά μονάδα απόστασης με πλήρες φορτίο r^* σε 0.377 λίτρα ανά χιλιόμετρο, η μέγιστη χωρητικότητα του οχήματος Q σε 2 τόνους [12].

Για το κόστος καυσίμου έχουμε ορίσει την τιμή του συντελεστή των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα $h = 2.63$ κιλά ανά λίτρο σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία [12]. Η τιμή του CO_2 , έχει οριστεί σε $F_5 = 88$ ευρώ ανά τόνο σύμφωνα με τα οικονομικά στοιχεία της Ευρώπης [131], και η αναλογία των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα $T_q = 100$ κιλά [12].

Πιο συγκεκριμένα το προκαθορισμένο κόστος αποτελείται από επιμέρους κόστη και αυτά με τη σειρά τους επι-επιμέρους κόστη τα οποία φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Κεφάλαιο 6. Αποτελέσματα

Προκαθορισμένο κόστος (ετήσιο) σε ευρώ		
Μισθός	Αμοιβή	10.800
Κόστος απόσβεσης	Κόστος αγοράς	12.950
	Άδεια κυκλοφορίας	14.000
Συντήρηση	Ασφάλεια οχήματος	1.000
	Ασφάλεια φορτίου	600
	ΚΤΕΟ	70
	Τέλη κυκλοφορίας	1.092
	Ασφαλιστικές εισφορές	4.800
	Λοιπά έξοδα	700
	Κόστος στάθμευσης	540

Πίνακας 6.1: Ετήσιο προκαθορισμένο κόστος.

Κόστος μεταφοράς (ευρώ ανά χιλιόμετρο διανυσθείσας απόστασης)	
Κόστος κατανάλωσης καυσίμου	1.58
<i>Labourcost</i>	29.1

Πίνακας 6.2: Κόστος μεταφοράς.

Κόστος ζημείας (ευρώ ανα τόνο αγαθών)	
Κόστος ζημείας	678

Πίνακας 6.3: Κόστος ζημείας.

6.2 Αποτελέσματα αλγορίθμων

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα των αλγορίθμων επίλυσης με στόχο την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των προτεινόμενων αλγορίθμων, που εφαρμόστηκαν σε τροποποιημένα παραδείγματα της βιβλιογραφίας. Κάθε ένα από τα παραδείγματα επιλύθηκε δέκα ανεξάρτητες φορές.

6.2.1 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης του γκρίζου λύκου (**GWO**)

Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου βελτιστοποίησης του γκρίζου λύκου αποτυπώνονται στους παρακάτω πίνακες. Σε κάθε ένα από τους αλγορίθμους που υλοποιήσαμε σε αυτή τη διδακτορική διατριβή, παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα σε 4 διαφορετικούς πίνακες. Στην πρώτη σειρά του κάθε πίνακα δίνεται το όνομα του παραδείγματος όπως αυτό φαίνεται στη

Κεφάλαιο 6. Αποτελέσματα

βιβλιογραφία. Πρέπει όμως να τονιστεί ότι τα παραδείγματα έχουν τροποποιηθεί κατάλληλα για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας των αλγορίθμων στο συγκεκριμένο πρόβλημα. Οι διαστάσεις των προβλημάτων έχουν παραμείνει οι ίδιες με τα κλασικά παραδείγματα, δηλαδή κυμαίνονται από 50 έως 200 κόμβους.

Στον πρώτο πίνακα παρουσιάζουμε αναλυτικά τα αποτελέσματα των 10 ανεξάρτητων τρεξιμάτων για κάθε ένα από τα παραδείγματα. Στο δεύτερο πίνακα παρουσιάζουμε την μέση τιμή, στον τρίτο δίνουμε την ελάχιστη τιμή και στον τελευταίο την τυπική απόκλιση. Παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης του Γκρίζου Λύκου έχει πολλές διακυμάνσεις στην απόδοση του και ενώ κάποιες φορές βρήκε λύσεις κοντά στην βέλτιστη τιμή που βρήκαμε, άλλες φορές η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ήταν πολύ μεγαλύτερη. Ο λόγος που έγινε αυτό ήταν ότι χρησιμοποιούταν πολλά αυτοκίνητα και η δομή του αλγορίθμου, εμποδίζε ακόμα και τη VNS να οδηγήσει σε μείωση των οχημάτων.

Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης του Γκρίζου Λύκου						
<i>CMT1</i>	<i>CMT2</i>	<i>CMT3</i>	<i>CMT4</i>	<i>CMT5</i>	<i>CMT11</i>	<i>CMT12</i>
1730000	2699900	4963400	7759000	10753000	8770700	3842500
1760000	2802600	4868900	8022100	10602000	8877900	3938500
1650000	2819300	4772900	7986100	10751000	8827100	3722900
1690000	2714500	4914000	7696100	10669000	8925500	3744700
1730000	2735100	4945600	7964500	10716000	8983000	3747100
1730000	2654500	4985600	7983600	10721000	8780900	3863600
1760000	2788800	4858700	8120500	10619000	8977000	3764400
1750000	2809000	4899700	7888900	10779000	8761000	3839600
1690000	2780400	4873000	7869500	10849000	8768200	3968000
1760000	2704400	4944300	7849800	10738000	8939400	3538600

Μέση τιμή						
<i>CMT1</i>	<i>CMT2</i>	<i>CMT3</i>	<i>CMT4</i>	<i>CMT5</i>	<i>CMT11</i>	<i>CMT12</i>
1725000	2750850	4902610	7914010	10719700	8861070	3796990

Πίνακας 6.4: Μέση τιμή του αλγορίθμου

Κεφάλαιο 6. Αποτελέσματα

Ελάχιστη τιμή						
<i>CMT1</i>	<i>CMT2</i>	<i>CMT3</i>	<i>CMT4</i>	<i>CMT5</i>	<i>CMT11</i>	<i>CMT12</i>
1650000	2654500	4772900	7696100	10602000	8761000	3538600

Πίνακας 6.5: Ελάχιστη τιμή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης του Γκρίζου Λύκου

Τυπική απόκλιση						
<i>CMT1</i>	<i>CMT2</i>	<i>CMT3</i>	<i>CMT4</i>	<i>CMT5</i>	<i>CMT11</i>	<i>CMT12</i>
37193,18	56435,31	62425,99	126998,68	73965,53	90224,11	122987,46

Πίνακας 6.6: Τυπική απόκλιση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης του Γκρίζου Λύκου

6.2.2 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (PSO)

Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων αποτυπώνονται στους παρακάτω πίνακες. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων έδωσε πάρα πολύ καλά αποτελέσματα. Όπως θα φανεί και στη συνέχεια και από τις συγκρίσεις των αλγορίθμων μεταξύ τους, η διαφορά μεταξύ του **PSO** και των άλλων αλγορίθμων είναι αισθητή. Αυτό είναι λογικό, γιατί ο **PSO** είναι ο καλύτερος, αντικειμενικά, αλγόριθμος αυτής της κατηγορίας και ο οποίος σχεδόν όπου έχει εφαρμοστεί, ανεξάρτητα από τη δομή του προβλήματος, δίνει από πολύ καλά έως τα βέλτιστα αποτελέσματα.

Αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων						
<i>CMT1</i>	<i>CMT2</i>	<i>CMT3</i>	<i>CMT4</i>	<i>CMT5</i>	<i>CMT11</i>	<i>CMT12</i>
694580	1526800	2695800	5317900	8007200	4327800	2312900
597540	1565000	2679200	5248400	8204400	3930100	2219800
618340	1485400	2709000	5209300	8070200	4338200	2142500
642550	1587100	2594700	5329200	8253500	4183300	2317300
591450	1528200	2612400	5281000	8153300	4320100	2281800
573890	1620000	2471600	5447700	8169100	4239800	2236400
626170	1583200	2490900	5430000	8077100	4336000	2163800
602060	1489900	2537100	5071900	8091300	4305900	2226400
634590	1495400	2607400	5367000	8146100	4249900	2261900
591400	1615900	2607900	5273400	8194400	4234800	2208700

Πίνακας 6.7: Αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων

Κεφάλαιο 6. Αποτελέσματα

Μέση τιμή						
<i>CMT1</i>	<i>CMT2</i>	<i>CMT3</i>	<i>CMT4</i>	<i>CMT5</i>	<i>CMT11</i>	<i>CMT12</i>
617257	1549690	2600600	5297580	8136660	4246590	2237150

Πίνακας 6.8: Μέση τιμή αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων

Ελάχιστη τιμή						
<i>CMT1</i>	<i>CMT2</i>	<i>CMT3</i>	<i>CMT4</i>	<i>CMT5</i>	<i>CMT11</i>	<i>CMT12</i>
573890	1485400	2471600	5071900	8007200	3930100	2142500

Πίνακας 6.9: Ελάχιστη τιμή αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων

Τυπική απόκλιση						
<i>CMT1</i>	<i>CMT2</i>	<i>CMT3</i>	<i>CMT4</i>	<i>CMT5</i>	<i>CMT11</i>	<i>CMT12</i>
34696,49	51343,40	81630,93	109699,58	74367,18	123049,49	58055,20

Πίνακας 6.10: Τυπική απόκλιση αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων

6.2.3 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης της πεταλούδας μονάρχη (MBA)

Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου βελτιστοποίησης της πεταλούδας μονάρχη αποτυπώνονται στους παρακάτω πίνακες. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος ήταν ο αλγόριθμος ο οποίος τερμάτισε στην 3_h θέση μεταξύ των αλγορίθμων που δοκιμάστηκαν. Η μορφή του αλγορίθμου αυτού, ο οποίος δεν είναι σχεδόν καθόλου δοκιμασμένος στη βιβλιογραφία σε αντίστοιχα προβλήματα, δίνει στον αλγόριθμο πολλές δυνατότητες. Έχει τους 2 υποπληθυσμούς όπου ανταλλάσσουν μεταξύ τους λύσεις και συνδυάζουν λύσεις και έτσι μπορεί εύκολα να ξεκολλήσει από κάποιο τοπικό βέλτιστο. Το βασικό πρόβλημα του αλγορίθμου είναι ότι δεν δημιουργούνται εύκολα καινούριες λύσεις πέρα από το πως εξελίσσονται οι αρχικές λύσεις του πληθυσμού και αυτό τον οδηγεί σε βραδύτερη σύγκλιση και πολλές φορές σε τοπικά βέλτιστα. Όμως είναι ένας αλγόριθμος που μπορεί να εφαρμοστεί αποτελεσματικά σε προβλήματα αυτής της κατηγορίας. Πρέπει να τονιστεί γενικά ότι στο συγκεκριμένο πρόβλημα οι αποκλίσεις μεταξύ των αλγορίθμων φαίνονται τεράστιες. Αυτό οφείλεται στη συνάρτηση κόστους που χρησιμοποιήθηκε και ιδιαίτερα στον πρώτο παράγοντα της αντικειμενικής συνάρτησης που μας δείχνει το κόστος χρήσης των οχημάτων. Έτσι αν προστεθεί ένα επιπλέον όχημα, που δεν καταφέρει η VNS να διώξει, τότε το κόστος αυξάνεται. Οι τιμές του συγκεκριμένου αλγορίθμου είναι κάπου ενδιάμεσα σε σχέση με τον καλύτερο αλγόριθμο που είναι ο PSO

Κεφάλαιο 6. Αποτελέσματα

και το χειρότερο αλγόριθμο που είναι ο **GWO**

Αλγόριθμος βελτιστοποίησης της πεταλούδας μονάρχη						
<i>CMT1</i>	<i>CMT2</i>	<i>CMT3</i>	<i>CMT4</i>	<i>CMT5</i>	<i>CMT11</i>	<i>CMT12</i>
906930	1889000	3217200	5965400	8783500	5236900	3137300
884600	1922800	3076100	6150000	8576900	5049700	3086800
1110900	1795300	3233700	5669300	8672200	4873400	3005300
938850	1871600	3158000	6074700	8444000	4985500	2871500
1074800	1882000	3253100	6150000	8581600	4654200	3137300
990330	1935600	3370900	6074200	8759700	4912400	2934600
901680	2010000	3314600	6150000	7793200	5117500	3097700
931050	1974200	3356600	6141800	8597400	4840900	3137300
1051600	1841100	3531600	6150000	8834500	4917300	3062700
964920	1924600	3321200	6150000	8608600	5403000	3062700

Πίνακας 6.11: Αλγόριθμος βελτιστοποίησης της πεταλούδας μονάρχη

Μέση τιμή						
<i>CMT1</i>	<i>CMT2</i>	<i>CMT3</i>	<i>CMT4</i>	<i>CMT5</i>	<i>CMT11</i>	<i>CMT12</i>
975566	1904620	3283300	6067540	8565160	4999080	3053320

Πίνακας 6.12: Μέση τιμή αλγορίθμου βελτιστοποίησης της πεταλούδας μονάρχη

Ελάχιστη τιμή						
<i>CMT1</i>	<i>CMT2</i>	<i>CMT3</i>	<i>CMT4</i>	<i>CMT5</i>	<i>CMT11</i>	<i>CMT12</i>
884600	1795300	3076100	5669300	7793200	4654200	2871500

Πίνακας 6.13: Ελάχιστη τιμή αλγορίθμου βελτιστοποίησης της πεταλούδας μονάρχη

Τυπική απόκλιση						
78916,09	62775,98	126266,46	152255,67	295043,55	213551,91	90604,91

Πίνακας 6.14: Τυπική απόκλιση αλγορίθμου βελτιστοποίησης της πεταλούδας μονάρχη

Κεφάλαιο 6. Αποτελέσματα

6.2.4 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης της φάλαινας (WOA)

Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου βελτιστοποίησης της φάλαινας αποτυπώνονται στους παρακάτω πίνακες. Ο αλγόριθμος της φάλαινας ήταν ο δεύτερος καλύτερος αλγόριθμος για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Είναι ένας αλγόριθμος που η δομή του έχει τη λογική ότι κυνηγάει η φάλαينا το θύμα της και κάνει μία σπειροειδή κύνηση και προσπαθεί μέσα σε αυτή την κίνηση να παγιδεύσει το θύμα. Οπότε σε αναλογία με το πρόβλημα μας κινούμαστε με ένα σπειροειδή τρόπο γύρω από το πιθανώς βέλτιστο και ψάχνουμε σε αυτή την περιοχή για τη βέλτιστη λύση. Αυτό σημαίνει ότι αν έχουμε μία ομάδα καλών αρχικών λύσεων θα μπορούσαμε να κυκλώσουμε το βέλτιστο και να φτάσουμε κάποια στιγμή σε αυτό. Δυστυχώς, η δομή του προβλήματος και η ανάγκη που έχουμε λόγω των εξισώσεων της φάλαινας να μετατρέπουμε τις λύσεις από συνεχείς σε διακριτές και αντίστροφα, πολλές φορές κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων οι λύσεις απομακρύνονταν λίγο από τις καλύτερες τιμές. Έτσι ναι μεν πήραμε πολύ καλές λύσεις, τις δεύτερες καλύτερες, από όλους τους αλγορίθμους, αλλά η πιο στρωτή δομή του ΠΣΟ οδηγούσε πιο εύκολα στις καλύτερες τιμές.

Αλγόριθμος βελτιστοποίησης της φάλαινας						
<i>CMT1</i>	<i>CMT2</i>	<i>CMT3</i>	<i>CMT4</i>	<i>CMT5</i>	<i>CMT11</i>	<i>CMT12</i>
779230	1591300	2878000	5612600	8016100	4594600	2445000
719340	1571900	2922100	5462000	8121000	4518000	2364400
781360	1596300	2827900	5559100	8105800	4519200	2335900
759900	1688800	2833900	5642900	8291800	4684100	2450300
701040	1627100	2821900	5675600	8158800	4686000	2642000
768370	1579300	2849600	5422700	8176300	4529700	2530000
659740	1588100	2930400	5322400	8153200	4608900	2300500
646100	1547700	2726200	5549100	8155800	4553100	2442600
646100	1469000	2818100	5386600	7976700	4686800	2658000
708360	1515800	2897100	5554900	8055700	4379600	2488000

Πίνακας 6.15: Αλγόριθμος βελτιστοποίησης της φάλαινας

Μέση τιμή						
<i>CMT1</i>	<i>CMT2</i>	<i>CMT3</i>	<i>CMT4</i>	<i>CMT5</i>	<i>CMT11</i>	<i>CMT12</i>
716954	1577530	2850520	5518790	8121120	4576000	2465670

Πίνακας 6.16: Μέση τιμή αλγορίθμου βελτιστοποίησης της φάλαινας

Κεφάλαιο 6. Αποτελέσματα

Ελάχιστη τιμή						
<i>CMT1</i>	<i>CMT2</i>	<i>CMT3</i>	<i>CMT4</i>	<i>CMT5</i>	<i>CMT11</i>	<i>CMT12</i>
646100	1469000	2726200	5322400	7976700	4379600	2300500

Πίνακας 6.17: Ελάχιστη τιμή αλγορίθμου βελτιστοποίησης της φάλαινας

Τυπική απόκλιση						
<i>CMT1</i>	<i>CMT2</i>	<i>CMT3</i>	<i>CMT4</i>	<i>CMT5</i>	<i>CMT11</i>	<i>CMT12</i>
6453914,77	59633,93	60132,92	116018,25	89584,80	97366,38	119393,27

Πίνακας 6.18: Τυπική απόκλιση αλγορίθμου βελτιστοποίησης της φάλαινας

6.2.5 Αλγόριθμος βελτιστοποίησης της νυχτοπεταλούδας (**MFOA**)

Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου βελτιστοποίησης της νυχτοπεταλούδας αποτυπώνονται στους παρακάτω πίνακες. Παρουσιάζουμε στη συνέχεια ένα αλγόριθμο, που έβγαλε χειρότερα αποτελέσματα από ό,τι περιμέναμε. Η παρουσίαση των αλγορίθμων είναι με τη σειρά που τους υλοποιήσαμε και έτσι, όταν υλοποιούσαμε τον **MFOA** είχαμε δει τα πρώτα αποτελέσματα από τον **WOA**. Γιατί τώρα μας ενδιαφέρει ιδιαίτερα ο **WOA**. Οι δύο αυτοί αλγόριθμοι έχουν την ίδια σπειροειδή κίνηση, έχουν και οι 2 αρχικά προταθεί από την ίδια ομάδα ερευνητών (όπως και ο **GWO** αλλά αυτός έχει διαφορετική λογική), και έτσι περιμέναμε αντίστοιχα αποτελέσματα με τον **WOA**. Αντίθετα τα αποτελέσματα του είναι και πολύ χειρότερα και χωρίς μεγάλη ευστάθεια. Αυτό έγινε γιατί, όπως παρατηρήσαμε μετά, οι αρχικές λύσεις που προέκυπταν δεν ήταν τόσο καλές, οπότε ο αλγόριθμος δεν μπορούσε να συγκλίνει εύκολα σε μία ανταγωνιστική λύση με τον **WOA**.

Κεφάλαιο 6. Αποτελέσματα

Αλγόριθμος βελτιστοποίησης της νυχτοπεταλούδας						
<i>CMT1</i>	<i>CMT2</i>	<i>CMT3</i>	<i>CMT4</i>	<i>CMT5</i>	<i>CMT11</i>	<i>CMT12</i>
1230700	2244300	3828200	6744000	9516100	5946500	3407900
1233100	2246000	3810400	6757700	9513000	5904300	3413100
1231000	2257000	3776600	6672000	9540700	5954700	3399900
1244400	2243300	3839600	6701100	9555600	5878400	3418400
1250700	2235100	3862800	6729700	9435000	5910200	3420100
1246000	2252500	3832500	6745500	9545200	5915300	3398900
1247600	2259100	3811500	6720600	9552200	5944900	3402800
1261300	2247300	3811100	6756900	9528300	5960300	3407500
1224400	2219500	3818000	6723500	9473000	5961400	3432600
1251900	2257000	3843100	6684200	9533000	5935000	3435700

Πίνακας 6.19: Αλγόριθμος βελτιστοποίησης της νυχτοπεταλούδας

Μέση τιμή						
<i>CMT1</i>	<i>CMT2</i>	<i>CMT3</i>	<i>CMT4</i>	<i>CMT5</i>	<i>CMT11</i>	<i>CMT12</i>
1242110	2246110	3823380	6723520	9519210	5931100	3413690

Πίνακας 6.20: Μέση τιμή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης της νυχτοπεταλούδας

Ελάχιστη τιμή						
<i>CMT1</i>	<i>CMT2</i>	<i>CMT3</i>	<i>CMT4</i>	<i>CMT5</i>	<i>CMT11</i>	<i>CMT12</i>
1224400	2219500	3776600	6672000	9435000	5878400	3398900

Πίνακας 6.21: Ελάχιστη τιμή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης της νυχτοπεταλούδας

Τυπική απόκλιση						
<i>CMT1</i>	<i>CMT2</i>	<i>CMT3</i>	<i>CMT4</i>	<i>CMT5</i>	<i>CMT11</i>	<i>CMT12</i>
11722,95	11966,01	23546,72	29692,49	38148,23	27793,84	12931,39

Πίνακας 6.22: Τυπική απόκλιση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης της νυχτοπεταλούδας

6.3 Σύγκριση των μεθόδων

Μελετώντας τους πίνακες που παρουσιάστηκαν στην παραπάνω ενότητα, όπως επίσης και τον πίνακα που παρουσιάζεται σε αυτή την ενότητα και δίνει τις καλύτερες τιμές του κάθε αλγορίθμου σε κάθε παράδειγμα όπως επίσης και την βέλτιστη τιμή όλων των παραδειγμάτων (best solution-BS), στην τελευταία γραμμή (Πίνακας 6.23), παρατηρούμε για κάθε παράδειγμα τα εξής. Στο παράδειγμα **CMT1** ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων

Κεφάλαιο 6. Αποτελέσματα

παρουσιάζει την βέλτιστη τιμή και πλησιάζει στο βέλτιστο ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της φάλαινας. Ακολουθούν ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της πεταλούδας μονάρχη, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της νυχτοπεταλούδας και τέλος ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης του γκρίζου λύκου.

	<i>CMT1</i>	<i>CMT2</i>	<i>CMT3</i>	<i>CMT4</i>	<i>CMT5</i>	<i>CMT11</i>	<i>CMT12</i>
<i>GWO</i>	1650000	2654500	4772900	7696100	10602000	8761000	3538600
<i>PSO</i>	573890	1485400	2471600	5071900	8007200	3930100	2142500
<i>MBA</i>	884600	1795300	3076100	5669300	7793200	4654200	2871500
<i>WOA</i>	646100	1469000	2726200	5322400	7976700	4379600	2300500
<i>MFOA</i>	1224400	2219500	3776600	6672000	9435000	5878400	3398900
<i>BS</i>	573890	1469000	2471600	5071900	7793200	3930100	2142500

Πίνακας 6.23: Σύγκριση αλγορίθμων

Παρατηρούμε από το πρώτο παράδειγμα αυτό που αναλύσαμε στις προηγούμενες παραγράφους, σχετικά με τη συμπεριφορά όλων των μεθόδων που υλοποιήθηκαν για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Οι τρεις αλγόριθμοι (**PSO**, **WOA**, **MBA**) δίνουν πολύ καλά αποτελέσματα (σημειώνουμε ότι οι μεγάλες διαφορές οφείλονται στις τιμές των παραμέτρων F που χρησιμοποιήσαμε), ενώ οι άλλοι δύο (**MFOA**, **GWO**) δεν κατάφεραν να μειώσουν τον αριθμό των οχημάτων και έτσι έδωσαν κατώτερα αποτελέσματα.

Στο παράδειγμα **CMT2**, καλύτερη τιμή παρουσιάζει ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της φάλαινας, και με ελάχιστη διαφορά ακολουθεί ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων. Στην συνέχεια ακολουθούν ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της πεταλούδας μονάρχη, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της νυχτοπεταλούδας και τέλος ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης του γκρίζου λύκου.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα παρατηρούμε ότι ο **WOA** αποδίδει καλύτερα από τον **PSO**, αυτό μας δείχνει ότι οι 2 αλγόριθμοι είναι απολύτως ανταγωνιστικοί μεταξύ τους και είναι οι δύο πιο αποτελεσματικοί αλγόριθμοι από αυτούς που χρησιμοποιήσαμε.

Στο παράδειγμα **CMT3**, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων παρουσιάζει

Κεφάλαιο 6. Αποτελέσματα

την βέλτιστη τιμή και πλησιάζει στο βέλτιστο ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της φάλαινας. Ακολουθούν ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της πεταλούδας μονάρχη και με μικρή διαφορά ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της νυχτοπεταλούδας. Τέλος με αρκετή διαφορά ακολουθεί ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης του γκριζου λύκου. Για αυτό το παράδειγμα υπάρχει η ίδια ακριβώς κατάταξη όπως και στο πρώτο παράδειγμα με τη διαφορά ότι ο **MFOA**, ναι μεν είναι στην τέταρτη θέση αλλά είναι ανταγωνιστικός με τον **MBA** αλγόριθμο.

Στο παράδειγμα νούμερο **CMT4**, την καλύτερη τιμή παρουσιάζει ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων και ακολουθεί ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της φάλαινας. Έπονται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της πεταλούδας μονάρχη και με διαφορά ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της νυχτοπεταλούδας και τέλος με αρκετή διαφορά ακολουθεί ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης του γκριζου λύκου.

Στο παράδειγμα νούμερο 5, την καλύτερη τιμή παρουσιάζει ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της πεταλούδας μονάρχη, ακολουθεί με μικρή διαφορά ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της φάλαινας και στην τρίτη θέση βρίσκεται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων. Στις δύο τελευταίες θέσεις βρίσκονται με μεγάλη διαφορά ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της νυχτοπεταλούδας και ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης του γκριζου λύκου. Είναι η πρώτη φορά όπου ο αλγόριθμος της πεταλούδας μονάρχη δίνει την καλύτερη λύση από όλες τις άλλες μεθόδους. Αυτός είναι και ο λόγος που σε προηγούμενη παράγραφο αναφέραμε ότι ο συγκεκριμένος αλγόριθμος θεωρείται, στο πρόβλημα που μελετάμε, ανταγωνιστικός με τους άλλους 2 αλγορίθμους (**PSO**, **WOA**).

Στο παράδειγμα νούμερο **CMT11** η καλύτερη τιμή προκύπτει από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων και ακολουθεί ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της φάλαινας. Έπονται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της πεταλούδας μονάρχη και με διαφορά ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της νυχτοπεταλούδας και τέλος με μεγάλη διαφορά ακολουθεί ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης του γκριζου λύκου.

Κεφάλαιο 6. Αποτελέσματα

Στο παράδειγμα νούμερο **CMT12** η καλύτερη τιμή προκύπτει από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων και ακολουθεί με μικρή διαφορά ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της φάλαινας. Έπονται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της πεταλούδας μονάρχη και με διαφορά ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της νυχτοπεταλούδας και τέλος με μικρή διαφορά ακολουθεί ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης του γκριζου λύκου.

Άρα συμπερασματικά τα καλύτερα αποτελέσματα συνολικά κατά μέσο όρο τα δίνει ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων και με μικρή διαφορά ακολουθεί ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της φάλαινας. Ακολουθεί σχετικά κοντά σε απόδοση με τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης της φάλαινας, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της πεταλούδας μονάρχη και έπειτα ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της νυχτοπεταλούδας. Τελευταίος με διαφορά από τους προηγούμενους αλγορίθμους βρίσκεται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης του γκριζου λύκου. Αυτό παρατηρείται και από τον Πίνακα 6.24 όπου οι μέσες τιμές των 10 τρεξιμάτων όλων των αλγορίθμων παρουσιάζονται συγκεντρωτικά.

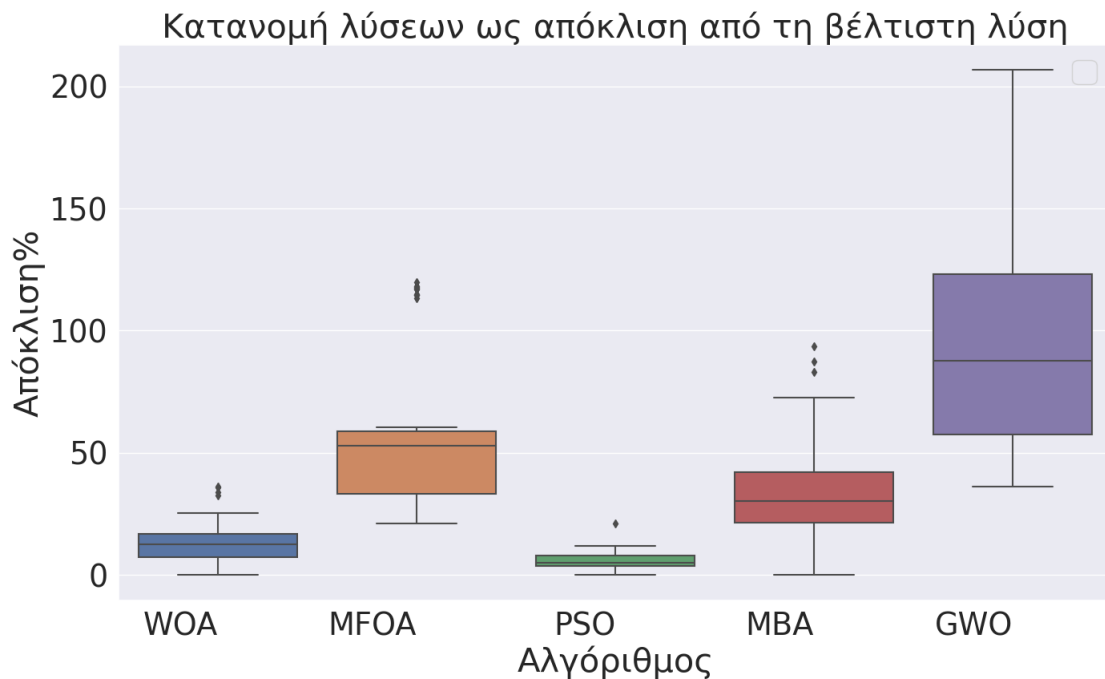
	<i>CMT1</i>	<i>CMT2</i>	<i>CMT3</i>	<i>CMT4</i>	<i>CMT5</i>	<i>CMT11</i>	<i>CMT12</i>
<i>GWO</i>	1725000	2750850	4902610	7914010	10719700	8861070	3796990
<i>PSO</i>	617257	1549690	2600600	5297580	8136660	4246590	2237150
<i>MBA</i>	975566	1904620	3283300	6067540	8565160	4999080	3053320
<i>WOA</i>	716954	1577530	2850520	5518790	8121120	4576000	2465670
<i>MFOA</i>	1242110	2246110	3823380	6723520	9519210	5931100	3413690
<i>BS</i>	617257	1549690	2600600	5297580	8121120	4246590	2237150

Πίνακας 6.24: Μέση τιμή των τρεξιμάτων όλων των αλγορίθμων

<i>Algorithm</i>	$Gap_{Avg}(C_{Avg})\%$	$Gap_{Avg}(C_{Best})\%$	$Gap_{Best}(C_{Best})\%$
<i>GWO</i>	97.497143	91.025714	36.04
<i>MBA</i>	33.104286	23.577143	0.00
<i>MFOA</i>	55.568571	54.010000	21.07
<i>PSO</i>	5.657143	0.552857	0.00
<i>WOA</i>	13.168571	6.997143	0.00

Πίνακας 6.25: Σύγκριση αλγορίθμων

Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνουμε τα εξής: Ο **PSO** παρουσιάζει τη μικρότερη διασπορά και ακολουθεί ο **WOA**, μετά ακολουθεί ο **MBA**, μετά ο **MFOA** και τέλος ο **GWO**. Ο



Σχήμα 6.1: Θηκογράμματα αλγορίθμων

αλγόριθμος **GWO**, εκτός από τη μεγαλύτερη διασπορά, παρουσιάζει και τα χειρότερα αποτελέσματα από όλους τους αλγορίθμους και αυτό αποδίδεται κυρίως στον τρόπο που λειτουργεί αυτός ο αλγόριθμος και πιο συγκεκριμένα, στον τρόπο που γίνεται η αναζήτηση, αφού η αναζήτηση πραγματοποιείται μόνο από τρεις ομάδες λύκων και αν αυτοί ακολουθήσουν λάθος δρόμο, θα τους ακολουθήσουν και οι επόμενοι λύκοι. Σε αντίθεση με τον **PSO** που πραγματοποιεί αναζήτηση γύρω από την καλύτερη λύση του κάθε σωματιδίου αλλά και τη καλύτερη λύση όλου του σμήνους.

Σχετικά με τη μέση τιμή, στον αλγόριθμο **MFOA**, οι περισσότερες παρατηρήσεις βρίσκονται κάτω από τη μέση τιμή ενώ στους **PSO**, **MBA** και **GWO** βρίσκονται πάνω από τη μέση τιμή. Ενώ ο **WOA** παρουσιάζει μεγαλύτερη συμμετρικότητα.

Γενικά, ο αλγόριθμος **GWO** δεν παρουσιάζει καμία ακραία τιμή που οφείλεται στο γεγονός ότι έχει μεγάλη διασπορά. Οι υπόλοιποι αλγόριθμοι παρουσιάζουν λίγες μεγάλες ακραίες τιμές και αυτό οφείλεται ότι σε κάποια παραδείγματα, λόγω δομής των παραδειγμάτων, δεν

Κεφάλαιο 6. Αποτελέσματα

αποδίδουν καλώς.

Στον Πίνακα 6.25, στην πρώτη στήλη δίνονται οι αλγόριθμοι, στην δεύτερη στήλη δίνεται η μέση απόκλιση της μέσης τιμής, στην τρίτη στήλη είναι η μέση απόκλιση της μέσης λύσης και στην τελευταία στήλη είναι η βέλτιστη απόκλιση της βέλτιστης λύσης. Από τον πίνακα αυτό παρατηρούμε ότι οι τρεις, από τους πέντε αλγορίθμους, και πιο συγκεκριμένα οι αλγόριθμοι **MBA**, **PSO** και **WOA**, απέδωσαν πολύ καλύτερα από τους άλλους δύο αλγορίθμους.

Το γενικό συμπέρασμα είναι ότι οι δύο αλγόριθμοι, οι **GWO** και **MFOA**, πέρα του ότι έδωσαν χειρότερα αποτελέσματα, δεν είχαν και τόσο μεγάλη σταθερότητα στις λύσεις, οπότε θεωρούμε ότι δεν είναι τόσο αποτελεσματικοί για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος. Από την άλλη πλευρά, οι άλλοι τρεις αλγόριθμοι, που στηρίζονται σε τρεις διαφορετικές φιλοσοφίες, έδωσαν τα καλύτερα αποτελέσματα. Για τον **PSO** ήταν αναμενόμενο γιατί είναι ένας αλγόριθμος που έχει δοκιμασθεί σε πάρα πολλά προβλήματα και πάντοτε δίνει πολύ καλά αποτελέσματα. Ο **MBA** είναι και αυτός ένα πάρα πολύ καλός αλγόριθμος, όχι τόσο δοκιμασμένος όσο ο **PSO**, αλλά η δομή του που έχει τους δύο υποπληθυσμούς που συνδυάζουν και ανταλλάσσουν μεταξύ τους λύσεις, απέδειξε για άλλη μία φορά ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά σε αυτού του είδους τα προβλήματα. Θεωρούμε ότι, αν και σε μερικά παραδείγματα υστερούσε από τον **PSO**, η δυναμική του συγκεκριμένου αλγορίθμου είναι πάρα πολύ καλή και θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε κάθε πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων αποτελεσματικά. Η έκπληξη για εμάς ήταν **WOA**, ο οποίος έχει προταθεί από την ίδια ομάδα ερευνητών με τον **GWO** και τον **MFOA**, και θα περίμενε κάποιος, ότι αφού στηρίζονται στην ίδια φιλοσοφία, δηλαδή σε σπειροειδή κίνηση γύρω από το στόχο, θα έβγαζε αντίστοιχα αποτελέσματα. Όμως, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος επέδειξε μία σταθερότητα στην απόδοση του και ταυτόχρονα, τα αποτελέσματά του ήταν καλύτερα από όλους τους αλγορίθμους εκτός του **PSO**.

Κάποιος θα μπορούσε να πει ότι οι διαφορές των αλγορίθμων στηρίζονται στην στοχαστικότητα των αλγορίθμων και στη διαφορετική δομή, όμως ο **WOA** υπερέχει των δύο

Κεφάλαιο 6. Αποτελέσματα

άλλων αλγορίθμων εντυπωσιακά που δεν δικαιολογείται μόνο από αυτά τα δύο χαρακτηριστικά. Οπότε, ως γενικό συμπέρασμα μπορούμε να πούμε ότι ο WOA είναι, τουλάχιστον για τη συγκεκριμένη κατηγορία προβλημάτων, ένας πολύ αποτελεσματικός αλγόριθμος και ο οποίος είναι ο ένας από τους δύο προτεινόμενους αλγόριθμους για το συγκεκριμένο πρόβλημα.

7 Συμπεράσματα

Σκοπός της συγκεκριμένης διδακτορικής έρευνας είναι η μελέτη του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων που αφορά έκτακτες καταστάσεις για την ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα και η επίλυση του με την ανάπτυξη κατάλληλων αλγορίθμων. Το σχετικό πρόβλημα ανήκει στην γενική κατηγορία των προβλημάτων δρομολόγησης οχημάτων (VRP) και συγκεκριμένα ανήκει στην κατηγορία του πράσινου προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων (GVRP), με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους της διαδρομής λαμβάνοντας υπόψιν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Στόχος της σχετικής έρευνας είναι η επίλυση του GVRP λαμβάνοντας υπόψιν τα διάφορα είδη κόστους που προκύπτουν κατά τη μεταφορά ευπαθών αγαθών και επιπλέον το κόστος που προκύπτει από την εκπομπή του διοξειδίου του άνθρακα. Η επίλυση του προβλήματος αφορά την εύρεση του βέλτιστου κόστους, δηλαδή τη διαδρομή που πρέπει να ακολουθήσει κάθε όχημα εξυπηρετώντας πελάτες, που ελαχιστοποιεί το κόστος της διαδρομής ταυτόχρονα με άλλα κόστη που προκύπτουν από τη δομή του προβλήματος.

Ειδικότερα θεωρήσαμε μια εφαρμογή με οχήματα που διαθέτουν μηχανισμό ψύξης, τα οποία μεταφέρουν αγαθά όπως τρόφιμα ή εμβόλια, τα οποία απαιτούν συγκεκριμένες συνθήκες για την ασφάλή τους μεταφορά. Για αυτό τον λόγο, πραγματοποιήθηκε εκτενής σχετική βιβλιογραφική έρευνα ώστε να διαπιστωθεί τι έχει μελετηθεί μέχρι τώρα και ποιες είναι οι προτεινόμενες προσεγγίσεις.

Για την προσομοίωση των διαδρομών που ακολουθούν τα οχήματα με μηχανισμό ψύξης, χρησιμοποιήσαμε το πράσινο πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (GVRP) προσαρμόζοντας το στις ανάγκες της ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας με επιπλέον περιορισμό του μέγιστου χρόνου που μπορεί να διαρκέσει ένα δρομολόγιο. Στόχος του προβλήματος αποτελεί η εύρε-

Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα

ση της βέλτιστης διαδρομής, δηλαδή της διαδρομής με το ελάχιστο δυνατό κόστος.

Η προς ελαχιστοποίηση αντικειμενική συνάρτηση αποτελείται από πέντε είδη επιμέρους κόστους, του προκαθορισμένου κόστους, του κόστους μεταφοράς, του κόστους ζημίας, του κόστους ψύξης, και του κόστους που σχετίζεται με τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα. Το προτεινόμενο μοντέλο δύναται να καλύψει τις ανάγκες της δρομολόγησης οχημάτων που αφορούν έκτακτες καταστάσεις, μεταφέροντας με ασφάλεια όσο το δυνατόν γρηγορότερα και αποδοτικότερα τα αγαθά στον τελικό προορισμό, μειώνοντας αποτελεσματικά τις εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα, δηλαδή της περιβαλλοντικής μόλυνσης που προκύπτει κατά τις οδικές μεταφορές.

Για να επιτευχθούν ταυτόχρονα όλα τα παραπάνω προτάθηκε, το πράσινο πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων για έκτακτες καταστάσεις στην ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα (**Emergency green vehicle routing problem in cold supply chain (E-GVRP-CSC)**). Στην προτεινόμενη προσέγγιση, η αντικειμενική συνάρτηση του βασικού **GVRP** μετασχηματίζεται, έτσι ώστε να περιλαμβάνει τα προαναφερθέντα είδη κόστους που εξαρτώνται άμεσα από την απόσταση που έχει διανύσει κάθε όχημα και επιπλέον εμπλουτίζονται οι περιορισμοί του ώστε να λαμβάνεται υπόψιν και ο περιορισμός του χρόνου.

Για την επίλυση του προτεινόμενου μοντέλου έχουν χρησιμοποιηθεί πέντε εξελικτικοί αλγόριθμοι που δίνουν καλά αποτελέσματα σε αυτού του είδους τα προβλήματα. Συγκεκριμένα δημιουργήθηκαν υβριδικές παραλλαγές των βασικών αλγορίθμων, καθώς οι σχετικοί αλγόριθμοι επιλύουν συνεχή προβλήματα, ενώ το προτεινόμενο μοντέλο είναι διακριτό πρόβλημα. Για αυτό τον λόγο πραγματοποιήθηκαν διεργασίες στην μορφή των λύσεων, ώστε να μετατραπούν σε συνεχή μορφή. Επιπλέον έχουμε ενσωματώσει μέσα στους αλγορίθμους αυτούς, αλγορίθμους τοπικής αναζήτησης.

Πιο συγκεκριμένα υλοποιήθηκαν οι παρακάτω αλγόριθμοι. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της φάλαινας, ο οποίος μελετάει τον τρόπο εύρεσης τροφής που ακολουθούν οι καμπου-

Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα

ροφάλαινες. Έπειτα ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης του γκρίζου λύκου, ο οποίος μελετάει τον τρόπο που είναι διαρθρωμένη μια αγέλη λύκων και εξετάζει τον τρόπο που ακολουθούν για την εύρεση θηράματος της. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της νυχτοπεταλούδας που εξετάζει τον τρόπο που πλοηγούνται οι νυχτοπεταλούδες με σκοπό με μεταβούν σε κάποιο σημείο ενδιαφέροντος τους. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων που προσομοιώνει το πέταγμα σε μορφή σμήνους και την ομαδική κίνηση των ψαριών. Τέλος, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης της πεταλούδας μονάρχη όπου μελετάει τον τρόπο μετανάστευσης των πεταλούδων.

Επιπλέον των ανωτέρω αλγορίθμων πραγματοποιήθηκε και εφαρμογή κατάλληλων αλγορίθμων τοπικής αναζήτησης σε κάθε γενιά του πληθυσμού με σκοπό την καλύτερη εξερεύνηση του χώρου των λύσεων και για να αποφευχθεί ο βασικός αλγόριθμος να κολλήσει σε κάποιο τοπικό βέλτιστο. Στους αλγορίθμους τοπικής αναζήτησης επιλέγονται τυχαία κόμβος (κόμβοι) μιας διαδρομής ή διαφορετικών διαδρομών και στη συνέχεια επανατοποθετείται (επανατοποθετούνται) σε άλλη θέση μέσα στην ίδια ή σε διαφορετική διαδρομή και με αυτόν τον τρόπο αλλάζει η αλληλουχία των κόμβων σε μία ή σε διαφορετικές διαδρομές, στην ουσία αλλάζει η σειρά επίσκεψης κάθε οχήματος στους πελάτες. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν σε μία δομή μεταβλητής γειτονιάς αναζήτησης (Άριαβλε Νειγηβορηροδ Σεαρση ("ΝΣ» και είναι 1 – 1 Αντικατάσταση (1 – 1 Exchange), 2 – 2 Αντικατάσταση (2 – 2 Exchange), 1 – 0 Επανατοποθέτηση (1 – 0 Relocate), 2 – Opt. Σε κάθε περίπτωση οι αλγόριθμοι τοπικής αναζήτησης δέχονται μόνο καλύτερες λύσεις από αυτές που προϋπήρχαν πριν την εφαρμογή τους.

Με βάση την εφαρμογή των παραπάνω αλγορίθμων και με μετατροπές αυτών πραγματοποιήθηκε η εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων.

Ολοκληρώνοντας την ανάλυση των αλγορίθμων, και έχοντας ως δεδομένο ότι δεν μπορούσαμε λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος να υλοποιήσουμε και να επιλύσουμε το πρόβλημα με μία διαδικασία τύπου **Gurobi**, στηριζόμαστε στα αποτελέσματα μόνο των συγκεκριμένων αλγορίθμων που είναι εμπνευσμένοι από τη φύση. Επιλέξαμε να μην χρησι-

Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα

μοποιήσουμε ούτε αλγορίθμους όπως ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών (**Ant Colony Optimization (ACO)**) που στηρίζεται στη βηματική δημιουργία της λύσης, ούτε αλγορίθμους όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι ή αλγόριθμοι παρόμοιας δομής. Επιλέξαμε από την μεγάλη ποικιλία των αλγορίθμων που έχουν παρόμοια δομή με τον **PSO**. Ταυτόχρονα, θέλαμε να δούμε καινούριους αλγορίθμους και όχι αλγορίθμους που έχουν χρησιμοποιηθεί σε άλλες διατριβές από την ερευνητική μας ομάδα. Έτσι επιλέξαμε ένα κλασικό αλγόριθμο αυτής της κατηγορίας, τον **PSO**, και τέσσερις καινούριους αλγόριθμους. Το γενικό συμπέρασμα είναι ότι οι τρεις από αυτούς, ο **PSO**, ο **WOA** και ο **MBA**, είναι πολύ αποτελεσματικοί και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τέτοιου είδους προβλήματα βελτιστοποίησης με μεγάλη αποδοτικότητα. Οι άλλοι δύο δίνουν κατώτερα αποτελέσματα συγκριτικά με τους τρεις πρώτους, αλλά όχι τόσο άσχημα ώστε να μην μπορούν να εφαρμοστούν καθόλου, και σίγουρα σε κάποιο άλλο πρόβλημα βελτιστοποίησης θα μπορούσαν να αποδώσουν πολύ καλύτερα.

Η προσέγγιση του προτεινόμενου μοντέλου, δηλαδή ο συνδυασμός του σχετικού προβλήματος με τους προτεινόμενους περιορισμούς, σε συνδυασμό με τους συγκεκριμένους αλγορίθμους επίλυσης και τις παραλλαγές αυτών, δεν προτείνεται μέχρι τώρα στη βιβλιογραφία.

Εν καταλείδι στην παρούσα διδακτορική έρευνα επιλύεται το υβριδικό πράσινο πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων για έκτακτες καταστάσεις στην ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα (**Hybrid emergency green vehicle routing problem in cold supply chain (HE-GVRP-CSC)**) που αποτελεί παραλλαγή του κλασικού πράσινου προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων και ανήκει στα **NP-Hard** προβλήματα. Άρα για την βελτιστοποίηση του επιλέχθηκαν εξελικτικοί αλγόριθμοι εμπνευσμένοι από τη φύση που εξετάζουν την κοινωνική συμπεριφορά ζωντανών οργανισμών, σε συνδυασμό με αλγορίθμους τοπικής αναζήτησης. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε σύγκριση ώστε να διαπιστωθεί ποιος αλγόριθμος δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα.

Γενικά με την ολοκλήρωση αυτής της διατριβής απαντήθηκαν τα ερωτήματα που είχαμε θέσει στο ξεκίνημα, αλλά πάντα υπάρχουν προεκτάσεις που θα μας απασχολήσουν στο μέλλον. Οι προεκτάσεις θα αφορούν είτε τους αλγορίθμους επίλυσης είτε την εξέλιξη του

Κεφάλαιο 7. Συμπεράσματα

μοντέλου. Η εποχή που ζούμε μας δίνει πολλές δυνατότητες για να βελτιώσουμε αποτελεσματικά την διανομή προϊόντων και ειδικά ευπαθών προϊόντων, όπως αυτά που μελετούνται στη συγκεκριμένη διατριβή. Τα ηλεκτρικά οχήματα αναμένονται να κυριαρχήσουν στο άμεσο μέλλον, οπότε οποιοδήποτε μοντέλο θα μπορούσε να ενσωματώνει και τη χρήση ηλεκτρικών οχημάτων. Ταυτόχρονα, τα μη στελεχωμένα ιπτάμενα οχήματα θα δώσουν νέα ώθηση στις μεταφορές, όταν το νομικό πλαίσιο το επιτρέψει. Στο πρόβλημα που μελετάμε θα μπορούσε ένα όχημα να μεταφέρει τα φάρμακα στον ασθενή που δεν μπορεί να μετακινηθεί και με ένα μη στελεχωμένο ιπτάμενο όχημα να μεταφέρονται μέχρι το παράθυρο του σπιτιού του.

Βιβλιογραφία

- [1] Y.-h. Chen. «Intelligent algorithms for cold chain logistics distribution optimization based on big data cloud computing analysis». In: *Journal of Cloud Computing* 9.1 (2020), pp. 1–12.
- [2] J. Chen, W. Liao, and C. Yu. «Route optimization for cold chain logistics of front warehouses based on traffic congestion and carbon emission». In: *Computers & Industrial Engineering* 161 (2021), p. 107663.
- [3] H.-M. Hoang, T. Brown, E. Indergard, D. Leducq, and G. Alvarez. «Life cycle assessment of salmon cold chains: comparison between chilling and superchilling technologies». In: *Journal of Cleaner Production* 126 (2016), pp. 363–372.
- [4] K. Li, D. Li, and D. Wu. «Carbon Transaction-Based Location-Routing-Inventory Optimization for Cold Chain Logistics». In: *Alexandria Engineering Journal* 61.10 (2022), pp. 7979–7986.
- [5] L. Shen, F. Tao, and S. Wang. «Multi-depot open vehicle routing problem with time windows based on carbon trading». In: *International journal of environmental research and public health* 15.9 (2018), p. 2025.
- [6] M. Awad, M. Ndiaye, and A. Osman. «Vehicle routing in cold food supply chain logistics: A literature review». In: *The International Journal of Logistics Management* (2020).
- [7] S. Wang, F. Tao, Y. Shi, and H. Wen. «Optimization of vehicle routing problem with time windows for cold chain logistics based on carbon tax». In: *Sustainability* 9.5 (2017), p. 694.

Βιβλιογραφία

- [8] Y. A. Huang, C. L. Weber, and H. S. Matthews. *Categorization of scope 3 emissions for streamlined enterprise carbon footprinting*. 2009.
- [9] H. M. Stellingwerf, A. Kanellopoulos, J. G. van der Vorst, and J. M. Bloemhof. «Reducing CO₂ emissions in temperature-controlled road transportation using the LDVRP model». In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 58 (2018), pp. 80–93.
- [10] Y. Li, M. K. Lim, and M.-L. Tseng. «A green vehicle routing model based on modified particle swarm optimization for cold chain logistics». In: *Industrial Management & Data Systems* (2018).
- [11] O. Adekomaya, T. Jamiru, R. Sadiku, and Z. Huan. «Sustaining the shelf life of fresh food in cold chain—A burden on the environment». In: *Alexandria Engineering Journal* 55.2 (2016), pp. 1359–1365.
- [12] G. Liu, J. Hu, Y. Yang, S. Xia, and M. K. Lim. «Vehicle routing problem in cold chain logistics: A joint distribution model with carbon trading mechanisms». In: *Resources, Conservation and Recycling* 156 (2020), p. 104715.
- [13] M. Golestani, S. H. Moosavirad, Y. Asadi, and S. Biglari. «A multi-objective green hub location problem with multi item-multi temperature joint distribution for perishable products in cold supply chain». In: *Sustainable Production and Consumption* 27 (2021), pp. 1183–1194.
- [14] A. M. Campbell, D. Vandenbussche, and W. Hermann. «Routing for relief efforts». In: *Transportation science* 42.2 (2008), pp. 127–145.
- [15] D. M. Matthias, J. Robertson, M. M. Garrison, S. Newland, and C. Nelson. «Freezing temperatures in the vaccine cold chain: a systematic literature review». In: *Vaccine* 25.20 (2007), pp. 3980–3986.
- [16] L. E. Duijzer, W. Van Jaarsveld, and R. Dekker. «Literature review: The vaccine supply chain». In: *European Journal of Operational Research* 268.1 (2018), pp. 174–192.
- [17] A. Saif and S. Elhedhli. «Cold supply chain design with environmental considerations: A simulation-optimization approach». In: *European Journal of Operational Research* 251.1 (2016), pp. 274–287.

- [18] Q. Lin, Q. Zhao, and B. Lev. «Cold chain transportation decision in the vaccine supply chain». In: *European Journal of Operational Research* 283.1 (2020), pp. 182–195.
- [19] R. H. Bishara. «Cold chain management—an essential component of the global pharmaceutical supply chain». In: *American Pharmaceutical Review* 9.1 (2006), pp. 105–109.
- [20] M. L. Fahrni, I. A.-N. Ismail, D. M. Refi, A. Almeman, N. C. Yaakob, K. M. Saman, N. F. Mansor, N. Noordin, and Z.-U.-D. Babar. «Management of COVID-19 vaccines cold chain logistics: a scoping review». In: *Journal of pharmaceutical policy and practice* 15.1 (2022), pp. 1–14.
- [21] M. R. Holm and G. A. Poland. «Critical aspects of packaging, storage, preparation, and administration of mRNA and adenovirus-vectored COVID-19 vaccines for optimal efficacy». In: *Vaccine* 39.3 (2021), p. 457.
- [22] X. Sun, E. A. Andoh, and H. Yu. «A simulation-based analysis for effective distribution of COVID-19 vaccines: A case study in Norway». In: *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives* 11 (2021), p. 100453.
- [23] C. Arnold. «The biggest logistics challenge in history». In: *New Scientist* 248.3309 (2020), pp. 36–40.
- [24] S. Elhedhli and R. Merrick. «Green supply chain network design to reduce carbon emissions». In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 17.5 (2012), pp. 370–379.
- [25] D. Ambrosino and A. Sciomachen. «A food distribution network problem: a case study». In: *IMA Journal of Management Mathematics* 18.1 (2007), pp. 33–53.
- [26] C.-I. Hsu, S.-F. Hung, and H.-C. Li. «Vehicle routing problem with time-windows for perishable food delivery». In: *Journal of food engineering* 80.2 (2007), pp. 465–475.
- [27] A. Osvald and L. Z. Stirn. «A vehicle routing algorithm for the distribution of fresh vegetables and similar perishable food». In: *Journal of food engineering* 85.2 (2008), pp. 285–295.

Βιβλιογραφία

- [28] C. Tarantilis and C. Kiranoudis. «A meta-heuristic algorithm for the efficient distribution of perishable foods». In: *Journal of food Engineering* 50.1 (2001), pp. 1–9.
- [29] M. Hariga, R. As' ad, and A. Shamayleh. «Integrated economic and environmental models for a multi stage cold supply chain under carbon tax regulation». In: *Journal of Cleaner Production* 166 (2017), pp. 1357–1371.
- [30] G. Qin, F. Tao, and L. Li. «A vehicle routing optimization problem for cold chain logistics considering customer satisfaction and carbon emissions». In: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 16.4 (2019), p. 576.
- [31] M. Song, J. Li, Y. Han, Y. Han, L. Liu, and Q. Sun. «Metaheuristics for solving the vehicle routing problem with the time windows and energy consumption in cold chain logistics». In: *Applied Soft Computing* 95 (2020), p. 106561.
- [32] N. Al Theeb, H. J. Smadi, T. H. Al-Hawari, and M. H. Aljarrah. «Optimization of vehicle routing with inventory allocation problems in Cold Supply Chain Logistics». In: *Computers & Industrial Engineering* 142 (2020), p. 106341.
- [33] C.-X. Huai, G.-H. Sun, R.-R. Qu, Z. Gao, and Z.-H. Zhang. «Vehicle Routing Problem with Multi-type Vehicles in the Cold Chain Logistics System». In: *2019 16th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM)*. IEEE. 2019, pp. 1–4.
- [34] L. PG Petroianu, Z. B. Zabinsky, M. Zameer, Y. Chu, M. M. Muteia, M. G. Resende, A. L. Coelho, J. Wei, T. Purty, A. Draiva, et al. «A light-touch routing optimization tool (RoOT) for vaccine and medical supply distribution in Mozambique». In: *International Transactions in Operational Research* 28.5 (2021), pp. 2334–2358.
- [35] S. Mejjaoui and R. F. Babiceanu. «Cold supply chain logistics: System optimization for real-time rerouting transportation solutions». In: *Computers in Industry* 95 (2018), pp. 68–80.
- [36] B. Eksioglu, A. V. Vural, and A. Reisman. «The vehicle routing problem: A taxonomic review». In: *Computers & Industrial Engineering* 57.4 (2009), pp. 1472–1483.

Βιβλιογραφία

- [37] Μαρινάκης, Μαρινάκη, Μυγδαλάς. Προβλήματα Δρομολόγησης Οχημάτων στη Διαχείριση της Εφοδιαστικής Αλυσίδας, Μοντελοποίηση και Αλγόριθμοι Επίλυσης. Αθήνα: New Tech Pub., 2019.
- [38] C. Qi and L. Hu. «Optimization of vehicle routing problem for emergency cold chain logistics based on minimum loss». In: *Physical Communication* 40 (2020), p. 101085.
- [39] S. Wang, H. Sun, J. Mou, and H. Jin. «Optimization and efficiency of multi-temperature joint distribution of cold chain products: comparative study based on cold accumulation mode and mechanical refrigeration mode». In: *Journal of Highway and Transportation Research and Development* 33.03 (2016), pp. 146–153.
- [40] Y. Zhang and X. Chen. «An optimization model for the vehicle routing problem in multi-product frozen food delivery». In: *Journal of applied research and technology* 12.2 (2014), pp. 239–250.
- [41] M. Balaji and K. Arshinder. «Modeling the causes of food wastage in Indian perishable food supply chain». In: *Resources, Conservation and Recycling* 114 (2016), pp. 153–167.
- [42] C. Chao, T. Zhihui, and Y. Baozhen. «Optimization of two-stage location–routing–inventory problem with time-windows in food distribution network». In: *Annals of Operations Research* 273.1 (2019), pp. 111–134.
- [43] B. R. Heard, M. Taiebat, M. Xu, and S. A. Miller. «Sustainability implications of connected and autonomous vehicles for the food supply chain». In: *Resources, conservation and recycling* 128 (2018), pp. 22–24.
- [44] Y. Xiao, Q. Zhao, I. Kaku, and Y. Xu. «Development of a fuel consumption optimization model for the capacitated vehicle routing problem». In: *Computers & operations research* 39.7 (2012), pp. 1419–1431.
- [45] T. Defraeye, G. Tagliavini, W. Wu, K. Prawiranto, S. Schudel, M. A. Kerisima, P. Verboven, and A. Bühlmann. «Digital twins probe into food cooling and biochemical quality changes for reducing losses in refrigerated supply chains». In: *Resources, Conservation and Recycling* 149 (2019), pp. 778–794.

- [46] S.-W. Lin, F. Y. Vincent, and C.-C. Lu. «A simulated annealing heuristic for the truck and trailer routing problem with time windows». In: *Expert Systems with Applications* 38.12 (2011), pp. 15244–15252.
- [47] J. Wang, M. K. Lim, M.-L. Tseng, and Y. Yang. «Promoting low carbon agenda in the urban logistics network distribution system». In: *Journal of cleaner production* 211 (2019), pp. 146–160.
- [48] C. Clarke, I. D. Williams, and D. A. Turner. «Evaluating the carbon footprint of WEEE management in the UK». In: *Resources, Conservation and Recycling* 141 (2019), pp. 465–473.
- [49] J. Wu, Q. Guo, J. Yuan, J. Lin, L. Xiao, and D. Yang. «An integrated approach for allocating carbon emission quotas in China’s emissions trading system». In: *Resources, Conservation and Recycling* 143 (2019), pp. 291–298.
- [50] L. Chen, Y. Liu, and A. Langevin. «A multi-compartment vehicle routing problem in cold-chain distribution». In: *Computers & Operations Research* 111 (2019), pp. 58–66.
- [51] G. Desaulniers, O. B. Madsen, and S. Ropke. «Chapter 5: The vehicle routing problem with time windows». In: *Vehicle Routing: Problems, Methods, and Applications, Second Edition*. SIAM, 2014, pp. 119–159.
- [52] M. Desrochers, J. Desrosiers, and M. Solomon. «A new optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows». In: *Operations research* 40.2 (1992), pp. 342–354.
- [53] M. Drexl and M. Schneider. «A survey of variants and extensions of the location-routing problem». In: *European Journal of Operational Research* 241.2 (2015), pp. 283–308.
- [54] J. Perl and M. S. Daskin. «A warehouse location-routing problem». In: *Transportation Research Part B: Methodological* 19.5 (1985), pp. 381–396.
- [55] L. Leng, C. Zhang, Y. Zhao, W. Wang, J. Zhang, and G. Li. «Biobjective low-carbon location-routing problem for cold chain logistics: Formulation and heuristic approaches». In: *Journal of Cleaner Production* 273 (2020), p. 122801.

Βιβλιογραφία

- [56] Q. Yao, S. Zhu, and Y. Li. «Green vehicle-routing problem of fresh agricultural products considering carbon emission». In: *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19.14 (2022), p. 8675.
- [57] J. Chen, M. Dong, and L. Xu. «A perishable product shipment consolidation model considering freshness-keeping effort». In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 115 (2018), pp. 56–86.
- [58] Z. Wang and P. Wen. «Optimization of a low-carbon two-echelon heterogeneous-fleet vehicle routing for cold chain logistics under mixed time window». In: *Sustainability* 12.5 (2020), p. 1967.
- [59] B. D. Song and Y. D. Ko. «A vehicle routing problem of both refrigerated-and general-type vehicles for perishable food products delivery». In: *Journal of food engineering* 169 (2016), pp. 61–71.
- [60] S. Wang, F. Tao, and Y. Shi. «Optimization of location–routing problem for cold chain logistics considering carbon footprint». In: *International journal of environmental research and public health* 15.1 (2018), p. 86.
- [61] C. Wei, W.-W. Gao, Z.-H. Hu, Y.-Q. Yin, and S.-D. Pan. «Assigning customer-dependent travel time limits to routes in a cold-chain inventory routing problem». In: *Computers & Industrial Engineering* 133 (2019), pp. 275–291.
- [62] K. Govindan, A. Jafarian, R. Khodaverdi, and K. Devika. «Two-echelon multiple-vehicle location–routing problem with time windows for optimization of sustainable supply chain network of perishable food». In: *International journal of production economics* 152 (2014), pp. 9–28.
- [63] A. S. Khan and A. AlArjani. «A Cold Chain Vehicle Routing Problem Embedded with Manufacturing, Re-manufacturing and Product Quality Under Multiple Constraints». In: *2021 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*. IEEE. 2021, pp. 68–72.

- [64] J. Escobar, J. Duque, and R. Garcia-Cáceres. «A granular tabu search for the refrigerated vehicle routing problem with homogeneous fleet». In: *International Journal of Industrial Engineering Computations* 13.1 (2022), pp. 135–150.
- [65] P. Amorim, S. N. Parragh, F. Sperandio, and B. Almada-Lobo. «A rich vehicle routing problem dealing with perishable food: a case study». In: *Top* 22.2 (2014), pp. 489–508.
- [66] D.-K. Hou, H.-M. Fan, Y.-C. Lv, and X.-X. Ren. «Dynamic Multicompartment Refrigerated Vehicle Routing Problem with Multigraph Based on Real-Time Traffic Information». In: *Journal of Advanced Transportation* 2022 (2022).
- [67] C. Sitompul and O. M. Horas. «A Vehicle Routing Problem with Time Windows Subject to the Constraint of Vehicles and Good's Dimensions». In: *International Journal of Technology* 12.4 (2021), pp. 865–875.
- [68] W. Chaofan and S. Yu. «An Optimization Model for Vehicle Routing in Urban Cold-Chain Logistics». In: *International Journal of Modeling and Optimization* 12.3 (2022).
- [69] S. Zhu, H. Fu, and Y. Li. «Optimization Research on Vehicle Routing for Fresh Agricultural Products Based on the Investment of Freshness-Keeping Cost in the Distribution Process». In: *Sustainability* 13.14 (2021), p. 8110.
- [70] Z.-J. Ma, Y. Wu, and Y. Dai. «A combined order selection and time-dependent vehicle routing problem with time widows for perishable product delivery». In: *Computers & Industrial Engineering* 114 (2017), pp. 101–113.
- [71] A. K. Agrawal, S. Yadav, A. A. Gupta, and S. Pandey. «A genetic algorithm model for optimizing vehicle routing problems with perishable products under time-window and quality requirements». In: *Decision Analytics Journal* 5 (2022), p. 100139.
- [72] P. Amorim and B. Almada-Lobo. «The impact of food perishability issues in the vehicle routing problem». In: *Computers & Industrial Engineering* 67 (2014), pp. 223–233.
- [73] K. Li, J. Zheng, and D. Wu. «A new discrete particle swarm optimization for location inventory routing problem in cold logistics». In: *Rev. Fac. Ing* 31 (2016), pp. 89–99.

Βιβλιογραφία

- [74] S. Tufekci and W. A. Wallace. «The emerging area of emergency management and engineering». In: *IEEE Transactions on engineering management* 45.2 (1998), pp. 103–105.
- [75] T. Kundu, J.-B. Sheu, and H.-T. Kuo. «Emergency logistics management—Review and propositions for future research». In: *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 164 (2022), p. 102789.
- [76] B. Y. Lee, L. A. Haidari, W. Prosser, D. L. Connor, R. Bechtel, A. Dipuve, H. Kassim, B. Khanlawia, and S. T. Brown. «Re-designing the Mozambique vaccine supply chain to improve access to vaccines». In: *Vaccine* 34.41 (2016), pp. 4998–5004.
- [77] G. W. Lailossa. «The new paradigm of cold chain management systems and it’s logistics on Tuna fishery sector in Indonesia». In: *Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation* 8.3 (2015), pp. 381–389.
- [78] J. Andreu-Perez, C. C. Poon, R. D. Merrifield, S. T. Wong, and G.-Z. Yang. «Big data for health». In: *IEEE journal of biomedical and health informatics* 19.4 (2015), pp. 1193–1208.
- [79] T. Comes, K. B. Sandvik, and B. Van de Walle. «Cold chains, interrupted: The use of technology and information for decisions that keep humanitarian vaccines cool». In: *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management* (2018).
- [80] J. Pasha, A. L. Nwodu, A. M. Fathollahi-Fard, G. Tian, Z. Li, H. Wang, and M. A. Dulebenets. «Exact and metaheuristic algorithms for the vehicle routing problem with a factory-in-a-box in multi-objective settings». In: *Advanced Engineering Informatics* 52 (2022), p. 101623.
- [81] J. Pasha, M. A. Dulebenets, M. Kavooosi, O. F. Abioye, H. Wang, and W. Guo. «An optimization model and solution algorithms for the vehicle routing problem with a “factory-in-a-box”». In: *Ieee Access* 8 (2020), pp. 134743–134763.
- [82] R. Yu, L. Yun, H. Fan, Y. Liu, and M. Jin. «Optimization of Vehicle Routing Problem for Vaccine Distribution». In: No. *TRBAM-22-01731* (2022).

- [83] M. Altinoz and O. T. Altinoz. «Multiobjective problem modeling of the capacitated vehicle routing problem with urgency in a pandemic period». In: *Neural Computing and Applications* (2022), pp. 1–18.
- [84] A. J. d. S. Rodrigues and G. L. Lima. «A metaheuristic to support the distribution of COVID-19 vaccines». In: *Production* 31 (2021).
- [85] F. A. O. Reynaldi and R. Oktarina. «Cold Chain Planning for COVID-19 Vaccine Distribution». In: *Proceedings of the Second Asia Pacific International Conference on Industrial Engineering and Operations Management Surakarta* (2021).
- [86] J. Lim, B. A. Norman, and J. Rajgopal. «Redesign of vaccine distribution networks». In: *International Transactions in Operational Research* 29.1 (2022), pp. 200–225.
- [87] S. Lan, W. Fan, S. Yang, P. M. Pardalos, and N. Mladenovic. «A survey on the applications of variable neighborhood search algorithm in healthcare management». In: *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence* 89.8 (2021), pp. 741–775.
- [88] D. Pisinger and S. Ropke. «Large neighborhood search». In: *Handbook of metaheuristics*. Springer, 2010, pp. 399–419.
- [89] M. G. Resende and C. Ribeiro. «Greedy randomized adaptive search procedures (GRASP)». In: *AT&T Labs Research Technical Report* 98.1 (1998), pp. 1–11.
- [90] P. J. Van Laarhoven and E. H. Aarts. «Simulated annealing». In: *Simulated annealing: Theory and applications*. Springer, 1987, pp. 7–15.
- [91] R. A. Rutenbar. «Simulated annealing algorithms: An overview». In: *IEEE Circuits and Devices magazine* 5.1 (1989), pp. 19–26.
- [92] M. Neshat, G. Sepidnam, M. Sargolzaei, and A. N. Toosi. «Artificial fish swarm algorithm: a survey of the state-of-the-art, hybridization, combinatorial and indicative applications». In: *Artificial intelligence review* 42.4 (2014), pp. 965–997.
- [93] Y. Marinakis, M. Marinaki, and G. Dounias. «A hybrid particle swarm optimization algorithm for the vehicle routing problem». In: *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 23.4 (2010), pp. 463–472.

- [94] Y. Tang and G. Huang. «Vehicle Routing Problem for perishable food in Cold Chain with Fuzzy Time Windows». In: *2018 International Conference on Mathematics, Modelling, Simulation and Algorithms (MMSA 2018)*. Atlantis Press. 2018, pp. 361–367.
- [95] M. Asghari and S. M. J. M. Al-e. «Green vehicle routing problem: A state-of-the-art review». In: *International Journal of Production Economics* 231 (2021), p. 107899.
- [96] Europa. Ατμοσφαιρική ρύπανση. [Online; accessed 15-feb-2023]. 2022. URL: <https://www.eea.europa.eu/el/themes/air/intro>.
- [97] Europa. Η ΕΕ παίρνει μέτρα για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που προκαλούν τα αυτοκίνητα. [Online; accessed 10-feb-2023]. 2022. URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/el/MEMO_17_2821.
- [98] R. Moghdani, K. Salimifard, E. Demir, and A. Benyettou. «The green vehicle routing problem: A systematic literature review». In: *Journal of Cleaner Production* 279 (2021), p. 123691.
- [99] I. national de la statistique et des études économiques. *Labour costs*. [Online; accessed 10-NOV-2022]. 2022. URL: <https://www.insee.fr/en/metadonnees/definition/c2219>.
- [100] I. Fister Jr, X.-S. Yang, I. Fister, J. Brest, and D. Fister. «A brief review of nature-inspired algorithms for optimization». In: *arXiv preprint arXiv:1307.4186* (2013).
- [101] O. Bozorg-Haddad. *Advanced optimization by nature-inspired algorithms*. Vol. 720. Springer, 2018.
- [102] A. Slowik and H. Kwasnicka. «Evolutionary algorithms and their applications to engineering problems». In: *Neural Computing and Applications* 32.16 (2020), pp. 12363–12379.
- [103] Y. Marinakis and M. Marinaki. «A hybrid genetic–Particle Swarm Optimization Algorithm for the vehicle routing problem». In: *Expert Systems with Applications* 37.2 (2010), pp. 1446–1455.

Βιβλιογραφία

- [104] L. D. Mech. «Alpha status, dominance, and division of labor in wolf packs». In: *Canadian journal of zoology* 77.8 (1999), pp. 1196–1203.
- [105] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis. «Grey wolf optimizer». In: *Advances in engineering software* 69 (2014), pp. 46–61.
- [106] C. Muro, R. Escobedo, L. Spector, and R. Coppinger. «Wolf-pack (*Canis lupus*) hunting strategies emerge from simple rules in computational simulations». In: *Behavioural processes* 88.3 (2011), pp. 192–197.
- [107] X. Hu and R. Eberhart. «Solving constrained nonlinear optimization problems with particle swarm optimization». In: *Proceedings of the sixth world multiconference on systemics, cybernetics and informatics*. Vol. 5. Citeseer. 2002, pp. 203–206.
- [108] E. Garcia-Gonzalo and J. L. Fernandez-Martinez. «A brief historical review of particle swarm optimization (PSO)». In: *Journal of Bioinformatics and Intelligent Control* 1.1 (2012), pp. 3–16.
- [109] F. Marini and B. Walczak. «Particle swarm optimization (PSO). A tutorial». In: *Chemo-metrics and Intelligent Laboratory Systems* 149 (2015), pp. 153–165.
- [110] M. I. Solihin, L. F. Tack, and M. L. Kean. «Tuning of PID controller using particle swarm optimization (PSO)». In: *Proceeding of the international conference on advanced science, engineering and information technology*. Vol. 1. 2011, pp. 458–461.
- [111] A. P. Engelbrecht. *Computational Intelligence: an introduction*. John Wiley & Sons, 2007.
- [112] Y. Shi. «Particle swarm optimization». In: *IEEE connections* 2.1 (2004), pp. 8–13.
- [113] M. Tavakoli and A. Sami. «Particle Swarm Optimization in Solving Capacitated Vehicle Routing Problem». In: *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics* 2.4 (2013), pp. 252–257.
- [114] M. Clerc and J. Kennedy. «The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space». In: *IEEE transactions on Evolutionary Computation* 6.1 (2002), pp. 58–73.

- [115] G.-G. Wang, S. Deb, and Z. Cui. «Monarch butterfly optimization». In: *Neural computing and applications* 31.7 (2019), pp. 1995–2014.
- [116] Y. Feng, S. Deb, G.-G. Wang, and A. H. Alavi. «Monarch butterfly optimization: a comprehensive review». In: *Expert Systems with Applications* 168 (2021), p. 114418.
- [117] A. B. Klots et al. «Field guide to the butterflies of North America, East of the Great Plains». In: (1951).
- [118] G. A. Breed, P. M. Severns, and A. M. Edwards. «Apparent power-law distributions in animal movements can arise from intraspecific interactions». In: *Journal of the Royal Society Interface* 12.103 (2015), p. 20140927.
- [119] S. Mirjalili and A. Lewis. «The whale optimization algorithm». In: *Advances in engineering software* 95 (2016), pp. 51–67.
- [120] P. R. Hof and E. Van der Gucht. «Structure of the cerebral cortex of the humpback whale, *Megaptera novaeangliae* (Cetacea, Mysticeti, Balaenopteridae)». In: *The Anatomical Record: Advances in Integrative Anatomy and Evolutionary Biology: Advances in Integrative Anatomy and Evolutionary Biology* 290.1 (2007), pp. 1–31.
- [121] W. A. Watkins and W. E. Schevill. «Aerial observation of feeding behavior in four baleen whales: *Eubalaena glacialis*, *Balaenoptera borealis*, *Megaptera novaeangliae*, and *Balaenoptera physalus*». In: *Journal of Mammalogy* 60.1 (1979), pp. 155–163.
- [122] S. Mirjalili. «Moth-flame optimization algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm». In: *Knowledge-based systems* 89 (2015), pp. 228–249.
- [123] N. Christofides and A. Mingozzi. «The Vehicle Routing Problem». In: *Combinatorial Optimization, John Wiley and Sons, London* (1979).
- [124] S. Venkatesan, D. Logendran, and D. Chandramohan. «Optimization of capacitated vehicle routing problem using PSO». In: *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)* 3.10 (2011), pp. 7469–7477.

Βιβλιογραφία

- [125] E. Parliament. *Fact Sheets on the European Union*. [Online; accessed 15-DEC-2022]. 2022. URL: https://www.europarl.europa.eu/erpl-app-public/factsheets/pdf/en/FTU_3.4.3.pdf.
- [126] Opengovgr. Εθνική Πυθμιστική Αρχή Χερσαίων Μεταφορών. [Online; accessed 25-DEC-2022]. 2022. URL: <http://www.opengov.gr/ypoian/wp-content/uploads/downloads/2013/04/sxedio-nomou-yperastikes-odikes-metafores.pdf>.
- [127] Λιακοπούλου, Σ. Μ. «Κόστος και τιμολόγηση στις οδικές εμπορευματικές μεταφορές: Ανάπτυξη πλατφόρμας υπολογισμού του κόστους του μεταφορικού έργου ». In: *Aristotle University of Thessaloniki* No. GRI-2016-17971 (2016).
- [128] Καούκη, Χ. «Ανάλυση κόστους δρομολογίου ελληνικής οδικής εμπορευματικής διεθνούς μεταφοράς. Master's thesis.» In: (2008).
- [129] Eurostat. *Wages and labour costs*. [Online; accessed 05-NOV-2022]. 2022. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Wages_and_labour_costs.
- [130] H.republic. Παρατηρητήριο Τιμών Υγρών Καυσίμων. URL: http://www.fuelprices.gr/PriceStats?prodclass=1&nofdays=7&order_by=9. (accessed: 01.03.2023).
- [131] *EU Carbon Permits. 2023 Data - 2005-2022 Historical - 2024 Forecast - Price - Quot*. [Online; accessed 15-DEC-2022]. 2022. URL: <https://tradingeconomics.com/commodity/carbon>.