

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ



Διπλωματική Εργασία

**Αλγόριθμος Μεταβλητής Γειτονιάς Αναζήτησης για
το Ανοιχτό Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων**

Πετρίδης Αναστάσιος

Επιβλέπων καθηγητής: Μαρινάκης Ιωάννης

Χανιά
Ιανουάριος 2022

Ευχαριστίες

Σε αυτό το σημείο ευχαριστώ θερμά τον επιβλέπων καθηγητή μου, κύριο Μαρινάκη Ιωάννη για την καθοδήγηση και τις υποδείξεις του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω προσωπικά τον υποψήφιο διδάκτορα Κυριακάκη Νικόλαο για την υπομονή και την πολύτιμη συμβολή του στο πειραματικό τμήμα αυτής της μελέτης.

Τέλος, ιδιαίτερες ευχαριστίες απευθύνω στην οικογένειά μου, ενώ θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου για τη συμπαράσταση, την υπομονή και τη στήριξη τους, από την αρχή μέχρι το τωρινό σημείο της ακαδημαϊκής μου πορείας.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία υλοποιείται με σκοπό την δημιουργία ενός μεθευρετικού αλγορίθμου, για την επίλυση του ανοικτού προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων (Open Vehicle Routing Problem). Στη συγκεκριμένη παραλλαγή του διαδεδομένου πλέον στο χώρο της συνδυαστικής βελτιστοποίησης προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων (Vehicle Routing Problem), σκοπό αποτελεί αρχικά η ελαχιστοποίηση του αριθμού των οχημάτων διανομής και της συνολικής απόστασης που διανύεται από αυτά. Με αφετηρία την αποθήκη, κάθε όχημα επισκέπτεται και εξυπηρετεί ένα αριθμό διαφορετικών πελατών χωρίς να επιστρέφει σε αυτή μετά το πέρας της διαδρομής του. Οι περιορισμοί του προβλήματος ορίζουν πως η χωρητικότητα των οχημάτων δεν πρέπει να παραβιάζεται από συνολική ζήτηση που καλύπτεται από αυτά, ενώ παράλληλα η επιμέρους ζήτηση κάθε πελάτη να καλύπτεται πλήρως από ένα μόνο όχημα. Τέλος, σε διαφορετικές εκδοχές του προβλήματος, εφαρμόζεται άνω φράγμα στο συνολικό χρόνο της διαδρομής των οχημάτων.

Η δημιουργία των αρχικών λύσεων πραγματοποιείται με τη χρήση του αλγορίθμου των εξοικονομήσεων των Clarke & Wright (CW), ενώ η βελτιστοποίηση τους, μέσω μεθευρετικής διαδικασίας στην οποία εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος μεταβλητής γειτονιάς αναζήτησης (VNS). Η δημιουργία γειτονικών λύσεων πραγματοποιείται με τη χρήση αλγορίθμων τοπικής αναζήτησης (2-Opt, 1-1 Exchange, 1-0 Relocate, 2-1 Exchange, 2-2 Exchange, 2-0 Relocate, 3-3 Exchange). Τα αποτελέσματα του αλγορίθμου σε δεκατέσσερις παραλλαγές του προβλήματος, συγκρίνονται με αυτά της βιβλιογραφίας και σχολιάζεται η αποτελεσματικότητα του με βάση την ποιότητα των εξαγόμενων λύσεων, σε σχέση με τις καλύτερες ως τώρα ευρετικές μεθόδους σε πλαίσια απόδοσης, που έχουν δημοσιοποιηθεί.

Abstract

This thesis focuses in the development of a metaheuristic algorithm, in order to solve the Open Vehicle Routing Problem (OVRP). In this variant of the popular by now in the combinatory optimization field Vehicle Routing Problem (VRP), the target is initially the minimization of delivery vehicles used and the total distance covered by them. With the depot as a starting point, each vehicle visits and serves a number of different customers without returning after the completion of its route. The constraints of the problem define that vehicle capacity must not be exceeded by the total demand that is being covered by them, while individual demand of each customer is fully satisfied by only one vehicle. Finally, in different instances of the problem, an upper bound on the total route time of the vehicles is applied.

The creation of the initial solutions is carried out with the use of the Clarke & Wright (CW) savings algorithm, while their optimization, through a metaheuristic procedure in which a variable neighborhood search algorithm is applied (VNS). Neighboring solutions are created using local search operators (2-Opt, 1-1 Exchange, 1-0 Relocate, 2-1 Exchange, 2-2 Exchange, 2-0 Relocate, 3-3 Exchange). Computational results in fourteen instances of the problem are compared with those of the literature, and its efficiency is commented based on the quality of the yielding solutions, compared to the best performing heuristics that have been published.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	2
Περίληψη.....	3
Abstract.....	4
Κατάλογος Πινάκων.....	6
Κατάλογος Σχημάτων.....	6
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.1 Το πρόβλημα.....	7
1.2 Δομή της εργασίας.....	8
2. ΕΦΟΔΙΑΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΕΦΟΔΙΑΣΤΙΚΗ ΑΛΥΣΙΔΑ.....	9
2.1 Εφοδιαστική.....	9
2.2 Βασικές διεργασίες της εφοδιαστικής.....	10
2.3 Ανασκόπηση – Σκοπός της εφοδιαστικής.....	11
2.4 Η εφοδιαστική αλυσίδα.....	12
2.5 Διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας.....	15
3. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ - ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ.....	19
3.1 Το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων.....	19
3.2 Ορισμός και μαθηματική μοντελοποίηση.....	19
3.3 Περιορισμοί και βασικές προεκτάσεις.....	22
3.4 Άλλες παραλλαγές.....	27
4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ.....	29
4.1 Ακριβείς διαδικασίες.....	29
4.2 Ευρετικοί αλγόριθμοι.....	32
4.3 Μεθευρετικοί αλγόριθμοι.....	37
5. Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΚΑΙ ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΠΡΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗ.....	41
5.1 Το ανοιχτό πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων.....	41
5.1.1 Περιγραφή του προβλήματος.....	43
5.1.2 Μοντελοποίηση και στόχοι της επίλυσης.....	44
5.2 Ο αλγόριθμος των εξοικονομήσεων.....	46
5.2.1 Βήματα της εφαρμογής.....	48
5.2.2 Παράδειγμα εφαρμογής.....	49
5.3 Επιδιόρθωση αρχικών λύσεων.....	55
5.3.1 1 ^η διαδικασία επιδιόρθωσης.....	55
5.3.2 2 ^η διαδικασία επιδιόρθωσης.....	56
5.4 Ο αλγόριθμος μεταβλητής γειτονιάς αναζήτησης.....	57
5.4.1 Μηχανισμοί τοπικής αναζήτησης.....	57
5.4.2 Ανακίνηση - τοπική αναζήτηση - κίνηση.....	60
6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	65
6.1 Δεδομένα προβλημάτων.....	65
6.2 Παραμετροποίηση και εφαρμογή.....	68
6.3 Αποτελέσματα.....	69
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	72
Βιβλιογραφία.....	74

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4-1. Κατηγοριοποίηση μεθευρετικών αλγορίθμων	40
Πίνακας 5-1. Μεταβλητές και παράμετροι μοντελοποίησης του OVRP	44
Πίνακας 5-2. Πίνακας αποστάσεων C_{ij}	50
Πίνακας 5-3. Πίνακας ζήτησης d_i	50
Πίνακας 5-4. Αρχικοποίηση διαδρομών R_i	50
Πίνακας 5-5. Αρχικοποίηση εξοικονομήσεων S_{ij}	50
Πίνακας 5-6. Εφαρμογή του αλγορίθμου Clarke & Wright: Σύγκριση λύσεων	54
Πίνακας 6-1. Περιορισμοί και χαρακτηριστικά προβλήματος C6.....	66
Πίνακας 6-2. Συντεταγμένες κόμβων προβλήματος C6.....	66
Πίνακας 6-3. Ζήτηση κόμβων προβλήματος C6	67
Πίνακας 6-4. Περιορισμοί και χαρακτηριστικά προβλημάτων C1-C14	68
Πίνακας 6-5. Παραμετροποίηση του VNS.....	69
Πίνακας 6-6. Αποτελέσματα του VNS για τα προβλήματα C1-C14.....	70
Πίνακας 6-7. Ακολουθίες εξυπηρέτησης πελατών του προβλήματος C6.....	71

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1. Γραμμικά μοντέλα αλυσίδων εφοδιασμού. (Πηγή: [24])	13
Σχήμα 2-2. Δίκτυο αλυσίδας εφοδιασμού. (Πηγή: Lambert και Cooper, 2000)	14
Σχήμα 4-1. Χώρος αναζήτησης λύσεων προβλημάτων ελαχιστοποίησης: τοπικά και ολικά βέλτιστες λύσεις. (Πηγή: Hosny, 2012)	38
Σχήμα 5-1. Σύγκριση λύσεων: VRP-OVRP. (Πηγή: [33])	42
Σχήμα 5-2. Η έννοια των εξοικονομήσεων για το OVRP.....	47
Σχήμα 5-3. 1η διαδικασία επιδιόρθωσης αρχικών λύσεων: 1 ^ο βήμα.....	55
Σχήμα 5-4. 1η διαδικασία επιδιόρθωσης αρχικών λύσεων: 2 ^ο βήμα.....	56
Σχήμα 5-5. 2η διαδικασία επιδιόρθωσης αρχικών λύσεων.....	56
Σχήμα 5-6. Αναπαράσταση 2-Opt.....	58
Σχήμα 5-7. Αναπαράσταση 1-1 Exchange.....	58
Σχήμα 5-8. Αναπαράσταση 1-0 Relocate.....	58
Σχήμα 5-9. Αναπαράσταση 2-1 Exchange.....	59
Σχήμα 5-10. Αναπαράσταση 2-2 Exchange.....	59
Σχήμα 5-11. Αναπαράσταση 2-0 Relocate.....	59
Σχήμα 5-12. Αναπαράσταση 3-3 Exchange.....	60
Σχήμα 5-13. Βήματα του αλγορίθμου Μεταβλητής Γειτονιά Αναζήτησης (VNS).	61
Σχήμα 5-14. Βήματα του σχεδίου ανακίνησης του VNS.	62
Σχήμα 5-15. Βήματα του σχεδίου τοπικής αναζήτησης του VNS.....	64
Σχήμα 6-1. Απεικόνιση λύσης του προβλήματος C6.....	71

1.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Το πρόβλημα

Με την ανάδειξη των παγκόσμιων δικτύων αγορών και την ανάπτυξη διεθνών οδών μεταφοράς προϊόντων, έχει δημιουργηθεί πρόσφατα έντονο ενδιαφέρον για τον τομέα της διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας, τόσο σε θεωρητικό αλλά και πρακτικό επίπεδο. Η υψηλή πολυπλοκότητα των διεργασιών παραγωγής, παραλαβής και διανομής αγαθών, καθώς και ο αυξανόμενος αριθμός των φορέων που εμπλέκονται σε αυτές, δημιουργούν την ανάγκη για αποτελεσματικά συστήματα υποστήριξης αποφάσεων, με σκοπό την αντιμετώπιση των προβλημάτων που παρουσιάζονται.

Το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (Vehicle Routing Problem) ή εν συντομία VRP αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στα πεδία της διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας, της πληροφορικής, των μεταφορών και γενικότερα, της επιχειρησιακής έρευνας και της συνδυαστικής βελτιστοποίησης [41]. Με την μοντελοποίηση του για πρώτη φορά, από τους Dantzig και Ramser το 1959, έχουν πραγματοποιηθεί συστηματικές ενέργειες επίλυσης του με τη χρήση ενός μεγάλου αριθμού διαφορετικών αλγορίθμων.

Στη κύρια παραλλαγή του προβλήματος, ένας ομογενής στόλος οχημάτων εξυπηρετεί ένα σύνολο πελατών με αφετηρία και πέρας την αποθήκη. Έτσι, η επίλυση του έχει σκοπό την εύρεση του ελάχιστου αριθμού οχημάτων διανομής για την εξυπηρέτηση όλων των πελατών, με την ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση της απόστασης που διανύεται από αυτά.

Η σημαντικότητα του προβλήματος σε πρακτικό επίπεδο φανερώνεται όταν με την επίλυση του, παρουσιάζεται το βέλτιστο σύνολο διαδρομών των οχημάτων διανομής με αποτέλεσμα τον περιορισμό του κόστους και την αύξηση της αποδοτικότητας της εφοδιαστικής αλυσίδας. Επιπλέον, η μοντελοποίηση του μπορεί να πραγματοποιηθεί με βάση ρεαλιστικούς περιορισμούς, οι οποίοι σχετίζονται με τα τεχνικά στοιχεία που

το διαμορφώνουν όπως είναι τα οχήματα, η αποθήκη και οι πελάτες, καθιστώντας δυνατή τη προσομοίωση του και την επίλυση του σε ρεαλιστικές συνθήκες.

Η διαμόρφωση του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων με βάση περιορισμούς που ανταποκρίνονται ολόένα και περισσότερο στις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας της εφοδιαστικής αλυσίδας, δημιουργεί τις ανάγκες για την επίλυση διαφορετικών παραλλαγών του. Έτσι, μια βασική παραλλαγή αποτελεί το ανοιχτό πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (Open Vehicle Routing Problem) ή αλλιώς OVRP. Όπως και στη κύρια εκδοχή του, περιλαμβάνεται ο καθορισμός διαδρομών ελαχίστου κόστους με αφετηρία την αποθήκη για την εξυπηρέτηση ενός συνόλου πελάτων, χωρίς επιστροφή σε αυτή μετά το πέρας των διαδρομών.

Σε πλήρη ομοιότητα με το VRP, το OVRP αποτελεί ένα πρόβλημα συνδυαστικής βελτιστοποίησης το οποίο υπόκειται σε περιορισμούς που ορίζουν πως το συνολικό κόστος των επιμέρους διαδρομών δεν επιτρέπεται να ξεπεράσει ένα προβλεπόμενο ανώτατο όριο, η συνολική τους ζήτηση περιορίζεται από τη χωρητικότητα των οχημάτων και τέλος πως η εξυπηρέτηση κάθε πελάτη πραγματοποιείται πλήρως από ένα μοναδικό όχημα, μία μόνο φορά.

1.2 Δομή της εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από επτά κεφάλαια. Στο πρώτο, πραγματοποιείται μια γενική εισαγωγή στο πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων και παρουσιάζεται η σημαντικότητα της επίλυσης του. Στο δεύτερο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι έννοιες της εφοδιαστικής και της εφοδιαστικής αλυσίδας, όπου κύριες δραστηριότητες τους αποτελεί ο χειρισμός και η παράδοση αγαθών, στην οποία εστιάζει η επίλυση του OVRP. Στο τρίτο κεφάλαιο, δίνεται η περιγραφή του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων, με την παρουσίαση μιας γενικής μοντελοποίησης του, των περιορισμών που το μορφοποιούν και μέσω των οποίων δημιουργούνται οι διάφορες παραλλαγές του. Μια σύνοψη των τεχνικών επίλυσης του τοποθετείται στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζοντας τις κύριες κατηγορίες αλγορίθμων εξαγωγής λύσεων. Στο πέμπτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται αναλυτικά οι αλγόριθμοι και μηχανισμοί που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του OVRP. Η εφαρμογή και τα αποτελέσματα του αλγορίθμου παρουσιάζονται στο έκτο κεφάλαιο, ενώ στο τελευταίο και έβδομο, τοποθετούνται τα συμπεράσματα της μελέτης.

2.

ΕΦΟΔΙΑΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΕΦΟΔΙΑΣΤΙΚΗ ΑΛΥΣΙΔΑ

2.1 Εφοδιαστική

Ο όρος “*Logistics*” ή αλλιώς σε ακριβή μετάφραση “*Εφοδιαστική*” αναφέρεται ευρέως στις διαδικασίες σχεδιασμού, διαχείρισης και ελέγχου της κανονικής και αντίστροφης ροής αγαθών και πληροφοριών, στα πλαίσια μιας επιχείρησης ή ακόμα και κατά μήκος της εφοδιαστικής αλυσίδας. Έτσι, η εφοδιαστική περιλαμβάνει τη συνολική διαδικασία παραλαβής, αποθήκευσης και μεταφοράς των αγαθών αυτών και των συναφών τους πληροφοριών από και προς τον τελικό τους προορισμό με επάρκεια, αποσκοπώντας στην αύξηση της αποδοτικότητας.

Ως αποτέλεσμα της διεθνοποίησης των αγορών, των ταχέων τεχνολογικών εξελίξεων και της ασταθούς συμπεριφοράς των τελικών καταναλωτών οι ανταγωνιστικές σχέσεις μεταξύ επιχειρήσεων παύουν να υφίστανται και διευρύνονται σε μεγέθη εφοδιαστικής αλυσίδας (Zhang, 2006). Για το λόγο αυτό η αύξηση της αποδοτικότητας είναι αναγκαία όχι μεμονωμένα, αλλά σε όλα τα στοιχεία που απαρτίζουν μια αλυσίδα εφοδιασμού. Συνεπώς, η εφοδιαστική εφαρμόζεται σε δύο επίπεδα (Chatzidakis, 2017), με το πρώτο να είναι αυτό της επιχείρησης και το δεύτερο αυτό της αλυσίδας.

Στο πρώτο επίπεδο, μέσω της εφοδιαστικής πραγματοποιείται ο έλεγχος στη κίνηση της εισερχόμενης, εσωτερικής και εξερχόμενης ροής αποθεμάτων και προμηθειών. Επιπλέον, καθορίζονται οι ανάγκες λειτουργίας της επιχείρησης, η προέλευση των αγαθών καθώς και οι μέθοδοι απόκτησης τους. Τέλος, περιλαμβάνεται η διατμηματική κίνηση και αποθήκευση αγαθών με σκοπό την επίτευξη του βέλτιστου επιπέδου αναλογίας μεταξύ προσφοράς και ζήτησης, αποσκοπώντας στη μείωση του κόστους.

Στο δεύτερο επίπεδο, με την εφοδιαστική εφαρμόζονται οι ίδιες αρχές διαχείρισης προϊόντων και υπηρεσιών σε όλες τις επιχειρήσεις και οργανισμούς, από την παραγωγή πρώτων υλών ως τον τελικό καταναλωτή, εξασφαλίζοντας έτσι την αποτελεσματική οργάνωση και διαχείρισή της ροής και των πληροφοριών των αγαθών.

2.2 Βασικές διεργασίες της εφοδιαστικής

- **Προμήθεια – Αγορές**

Οι ενέργειες που πραγματοποιούνται στα πλαίσια της προμήθειας και των αγορών μιας επιχείρησης αφορούν κυρίως την απόκτηση αναγκαίων αγαθών και υπηρεσιών από εξωτερικούς συνεργάτες, δηλαδή προμηθευτές. Πιο συγκεκριμένα, οι ενέργειες αυτές αποσκοπούν στην αγορά πρώτων υλών, ανταλλακτικών εξαρτημάτων, λειτουργικών και βοηθητικών προμηθειών για τη λειτουργία διαδικασιών παραγωγής προϊόντων. Επιπλέον, περιλαμβάνεται η αποθήκευση, η οργάνωση και η αποστολή των υλικών αυτών από και προς την αποθήκη. Επίσης, καθορίζονται οι πολιτικές επιλογής προϊόντων, οι κατάλληλοι προμηθευτές, εξασφαλίζοντας επαρκή επικοινωνία, τους όρους και τις προϋποθέσεις συνεργασίας, και τέλος στρατηγικές αγορών για τον περιορισμό του κόστους προμηθειών.

- **Αποθήκευση**

Στις σημαντικότερες διεργασίες της εφοδιαστικής συγκαταλέγεται η αποθήκευση προϊόντων. Ο όρος της αποθήκευσης περικλείει όλες τις ενέργειες που σχετίζονται με την παραλαβή, τη μετακίνηση και την κατάλληλη τοποθέτηση προμηθειών εντός μιας αποθήκης ή ενός λογιστικού κέντρου. Οι ενέργειες αυτές εξασφαλίζουν την εύκολη και ταχεία πρόσβαση στα αγαθά, την ασφάλεια και τη διατήρηση τους, ενώ παράλληλα επιτρέπουν τη διαχείριση τους για την προετοιμασία, τη συσκευασία και την αποστολή στον τελικό τους προορισμό.

- **Διαχείριση αποθεμάτων**

Ο έλεγχος και η διαχείριση αποθεμάτων μιας επιχείρησης αποτελούν διεργασίες οι οποίες πραγματοποιούνται με τη βοήθεια της εφοδιαστικής. Οι τεχνικές διαχείρισης επιτρέπουν τον καθορισμό του βέλτιστου χρόνου και ύψους των ανεφοδιασμών, καθώς και του κατάλληλου επιπέδου αποθεμάτων προς αποθήκευση. Η διατήρηση ενός κατάλληλου επιπέδου αποθεμάτων, πρώτων υλών και εξοπλισμού επιτρέπει την απρόσκοπτη λειτουργία της λογιστικής διαδικασίας για την κάλυψη των αναγκών παραγωγής προϊόντων καθώς και αυτών των τελικών καταναλωτών, αυξάνοντας έτσι την αποδοτικότητα της επιχείρησης.

- **Διανομή – Μεταφορά**

Η εφοδιαστική στο επίπεδο της διανομής και της μεταφοράς αποτελεί το συνδεδετικό κρίκο για τη ροή της μεταφοράς αγαθών μεταξύ των σταδίων της παραγωγής και της αγοράς. Σχηματίζει το σύνολο των αναγκαίων ενεργειών για τη τοποθέτηση των προϊόντων σε κατάλληλο τόπο και χρόνο, με αφετηρία τις επιχειρήσεις παραγωγής και πέρας τους πελάτες. Οι πελάτες μπορεί να αποτελούν τελικούς καταναλωτές, διανομείς, ακόμα και φορείς επεξεργασίας στα ενδιάμεσα στάδια της ροής των προϊόντων. Με το κόστος μετακίνησης να καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το κόστος λειτουργίας μιας επιχείρησης, η λήψη αποφάσεων για τον καθορισμό των οχημάτων, και των συντομότερων δρόμων μεταφοράς και διανομής, συγκαταλέγεται στις ευθύνες της εφοδιαστικής.

2.3 Ανασκόπηση – Σκοπός της εφοδιαστικής

Σύμφωνα με το συμβούλιο των ειδικών στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας (CSCMP, 2013), η εφοδιαστική είναι υπεύθυνη για το σχεδιασμό, την εφαρμογή και τον έλεγχο της αποτελεσματικής αποθήκευσης και ροής αγαθών, υπηρεσιών και συναφών πληροφοριών από την αρχή της διαδρομής τους έως τον τελικό καταναλωτή με σκοπό την κάλυψη των αναγκών του. Οι στόχοι της εφοδιαστικής χαρακτηρίζονται από υποκειμενικότητα καθώς μπορεί να διαφέρουν μεταξύ επιχειρήσεων. Επί το πλείστων όμως, μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τις ανάγκες της επιχείρησης για έγκαιρη παράδοση υψηλής ποιότητας αγαθών, μείωση του λειτουργικού κόστους και δαπανών, επάρκεια στην εξυπηρέτηση, ελαστικότητα και ταχεία ανταπόκριση σε αλλαγές της αγοράς (Omotuyi, 2020). Για το λόγο αυτό οι στόχοι της εφοδιαστικής μπορούν να διαχωριστούν πρώτα για τον περιορισμό του συνολικού κόστους λειτουργίας και δεύτερον για την εξασφάλιση ποιότητας υπηρεσιών (Chatzidakis, 2017). Έτσι η εφοδιαστική σε πρώτο επίπεδο στοχεύει στον περιορισμό του κόστους:

- Μεταφοράς
- Αποθήκευσης
- Συσκευασίας
- Διατήρησης/Ελέγχου αποθέματος
- Πάγιων στοιχείων
- Διαχείρισης υλικών και πληροφοριών

Σε δεύτερο επίπεδο τοποθετούνται οι στόχοι για την επίτευξη συγκεκριμένων ποιοτικών χαρακτηριστικών ενός συστήματος εφοδιαστικής. Η μεγιστοποίηση της ποιότητας των προϊόντων και των υπηρεσιών προϋποθέτει την διατήρηση κάποιων βασικών στοιχείων όπως:

- **Συνέπεια**

Η έγκαιρη παράδοση των ενδεδειγμένων προϊόντων, σε κατάλληλη κατάσταση για την ικανοποίηση των απαιτήσεων του πελάτη.

- **Δυναμικότητα**

Ταχύτητα στην ολοκλήρωση των παραγγελιών.

- **Διαθεσιμότητα**

Η διατήρηση κατάλληλου ύψους αποθέματος για την κάλυψη των αναγκών παραγωγής και εξυπηρέτησης πελατών οποιαδήποτε χρονική στιγμή.

Η κατηγοριοποίηση των στόχων της εφοδιαστικής που προηγείται, δηλαδή σε στόχους για τη μείωση του συνολικού κόστους και για την εξασφάλιση της ποιότητας υπηρεσιών, συνοψίζεται εύκολα με μια λίστα επτά κριτηρίων σε μορφή κανόνων. Συνεπώς, με απλοποιημένους όρους, στόχο της εφοδιαστικής αποτελεί η εξασφάλιση των επόμενων:

- Σωστό προϊόν
- Σωστό χρόνο
- Σωστή ποσότητα
- Σωστή ποιότητα
- Σωστή τιμή
- Σωστό πελάτη
- Σωστή τοποθεσία [3]

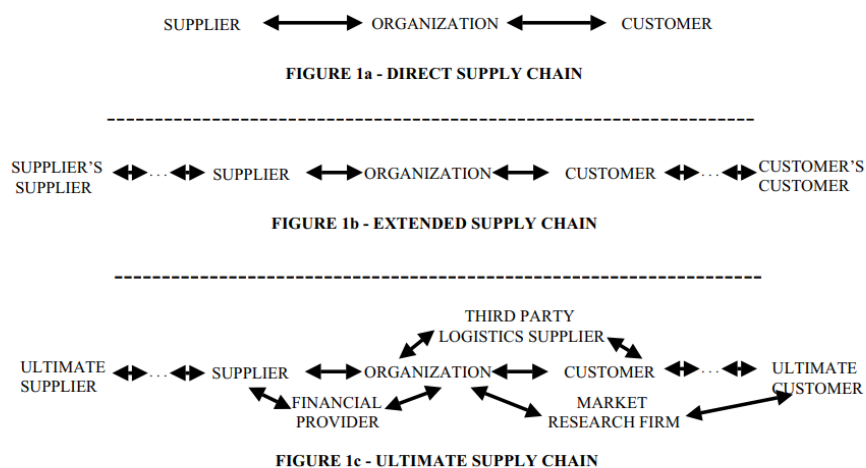
2.4 Η εφοδιαστική αλυσίδα

Στη σύγχρονη βιβλιογραφία υφίστανται πολλαπλοί ορισμοί για τις έννοιες της αλυσίδας εφοδιασμού και της διαχείρισης της. Ένας από τους ευρύτερους ορισμούς, περιγράφει την εφοδιαστική αλυσίδα ως ένα σύνολο επιχειρήσεων και οργανισμών που δραστηριοποιούνται στη προώθηση αγαθών στην αγορά (La Londe και Masters, 1994). Συνήθως όμως, αρκετές ανεξάρτητες επιχειρήσεις και οργανισμοί που διαφέρουν μεταξύ τους σε είδος και λειτουργία, εμπλέκονται στις διαδικασίες παραγωγής και διανομής προϊόντων. Αυτοί οι φορείς μπορεί να αποτελούν παραγωγούς πρώτων υλών

και εξαρτημάτων, συναρμολογητές, εμπόρους και πωλητές, καθώς και επιχειρήσεις μεταφοράς.

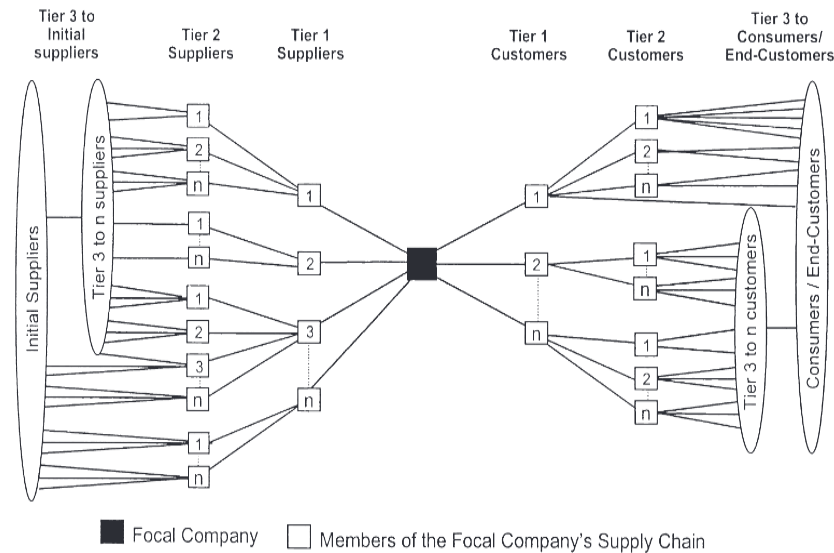
Για το λόγο αυτό, αποδίδονται εκτενέστεροι ορισμοί στην έννοια της εφοδιαστικής αλυσίδας, οι οποίοι περιγράφουν το πλήρες φάσμα των εμπλεκόμενων στοιχείων. Έτσι, σύμφωνα με τους Chow και Heaven το 1999, η εφοδιαστική αλυσίδα αποτελεί “Το σύνολο των κατασκευαστών, προμηθευτών, διανομών, πωλητών, μεταφορέων, διαβιβαστών πληροφοριών και άλλων παρόχων υπηρεσιών της εφοδιαστικής, οι οποίοι δραστηριοποιούνται στην προώθηση αγαθών σε πελάτες”. [23]

Με βάση τους ορισμούς που προηγούνται, οι εφοδιαστικές αλυσίδες φαίνεται να αναγνωρίζονται συχνά ως μονοδιάστατα συστήματα τα οποία απεικονίζονται από γραμμικές διατάξεις επιχειρήσεων και οργανισμών, που αλληλοεπιδρούν μέσω δυαδικών αμφίδρομων σχέσεων.



Σχήμα 2-1. Γραμμικά μοντέλα αλυσίδων εφοδιασμού. (Πηγή: [24])

Βέβαια, αυτή η θεωρία της γραμμικότητας των αλυσίδων εφοδιασμού, υπεραπλουστεύει τη μορφή της και δεν προσεγγίζει την πραγματική έκταση της λειτουργίας της. Έτσι, μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση στον ορισμό της εφοδιαστικής αλυσίδας, περιγράφει την τελευταία σαν ένα δίκτυο κόμβων και διεργασιών. Ο Christopher το 1992 ορίζει την εφοδιαστική αλυσίδα ως “Το δίκτυο των αμφίδρομα συνδεδεμένων οργανισμών-επιχειρήσεων που λαμβάνουν μέρος σε διάφορες διεργασίες και ενέργειες, παράγοντας έργο υπό τη μορφή αγαθών και υπηρεσιών, για την εξυπηρέτηση των τελικών καταναλωτών”. [24]



Σχήμα 2-2. Δίκτυο αλυσίδας εφοδιασμού. (Πηγή: Lambert και Cooper, 2000)

Τα δίκτυα εφοδιασμού αποτελούν προέκταση της ιδέας η οποία περιγράφει τις σχέσεις μεταξύ προμηθευτών, επιχειρήσεων και πελατών ως συναλλαγές υλικών και πληροφοριών σε γραμμική διάταξη υπό τη μορφή αλυσίδων. Οι εμπλεκόμενοι οργανισμοί και επιχειρήσεις συχνά αποτελούν μέλη πολλαπλών δικτύων, με ίδιο ή διαφορετικό εύρος και είδος λειτουργίας εντός τους. Για το λόγο αυτό, τα δίκτυα εφοδιαστικών αλυσίδων προσεγγίζουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τις σύνθετες σχέσεις αλληλεξάρτησης των επιμέρους φορέων, καθώς και την πραγματική έκτασή τους.

Συνολικά, οι εφοδιαστικές αλυσίδες αποτελούν συστήματα τα οποία ενοποιούν και συγχρονίζουν διεπιχειρησιακές λειτουργίες και ενέργειες, με σκοπό (1) την απόκτηση πρώτων υλών και εξαρτημάτων, (2) τη μετατροπή τους σε τελειοποιημένα προϊόντα, (3) την προσθήκη αξίας σε αυτά, (4) τη διανομή και τη προώθηση τους σε πωλητές ή πελάτες και τέλος, (5) την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των στοιχείων που τις απαρτίζουν (Min και Zhou, 2002). Οι συναλλαγές μεταξύ των φορέων που δραστηριοποιούνται, μπορεί να χαρακτηρίζονται από παροδικότητα ή και από πιο σταθερές και διαρκείς επαγγελματικές σχέσεις στα πλαίσια στρατηγικής συνεργασίας. Ωστόσο, η μελέτη και ο σχεδιασμός των ενεργειών των επιμέρους μελών χρειάζεται να πραγματοποιηθεί ολιστικά και όχι μεμονωμένα, καθώς η εφοδιαστική αλυσίδα χαρακτηρίζεται από κοινούς στόχους στο σύνολο της.

2.5 Διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας

Ο ορισμός της διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας έχει αποτελέσει εγχείρημα πολλαπλών ερευνητών τα τελευταία τριάντα χρόνια. Με την τεράστια αύξηση της δημοτικότητας του πεδίου των αλυσίδων εφοδιασμού, είναι εύκολο να θεωρηθεί πως έχουν πραγματοποιηθεί επιτυχείς ενέργειες, όσο αναφορά των ακριβή ορισμό της διαχείρισης τους. Ωστόσο, έχει σημειωθεί πως οι προσπάθειες για κάτι τέτοιο χρησιμοποιούν συχνά πολύπλοκους και σύνθετους όρους, περιορίζοντας την ικανότητα των αναγνωστών στην επαρκή κατανόηση του αντικειμένου (Ross, 1998).

Το 2001, πραγματοποιήθηκε μια συλλογική προσπάθεια από σημαντικούς ερευνητές του συγκεκριμένου πεδίου [24] για τη σύνοψη και τη κατηγοριοποίηση των ορισμών για τη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας. Στο έργο των ερευνητών προτείνεται κατηγοριοποίηση των ορισμών σε πεδία, στα οποία περιγράφεται σα (1) φιλοσοφία διαχείρισης, (2) σαν εφαρμογή της φιλοσοφίας διαχείρισης και σαν (3) ένα σύνολο διεργασιών διαχείρισης.

Η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας ως φιλοσοφία, στηρίζεται σε ιδέες οι οποίες προτείνουν πως η αλυσίδα εφοδιασμού, αποτελεί *ενιαία οντότητα*, η οποία λειτουργεί με τις *συγχρονισμένες ενέργειες* των εμπλεκόμενων επιχειρήσεων και οργανισμών, με ιδιαίτερη έμφαση και προσανατολισμό στην *ικανοποίηση του πελάτη*.

Από την δημοσίευση των [24], οι Monczka, Trent και Handfield (1998) ορίζουν τους στόχους αυτής της φιλοσοφίας. *“Η ενοποίηση, και η διαχείριση των διεργασιών προμήθειας, της ροής και του ελέγχου υλικών, με τη χρήση ενός ολιστικού συστήματος που λειτουργεί με πολλαπλές διεργασίες, σε πολλαπλά επίπεδα προμηθευτών.”* Επιπλέον, οι Langley και Holcomb (1992) προτείνουν πως η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας θα πρέπει να στηρίζεται σε μεθόδους οι οποίες επιτρέπουν την ανάπτυξη καινοτόμων και εξατομικευμένων υπηρεσιών για την ικανοποίηση των πελατών.

Στη δημοσίευση το έτος 2001 [24], θεωρείται πως για την επιτυχή εφαρμογή αυτής της φιλοσοφίας διαχείρισης, τα μέλη της εφοδιαστικής αλυσίδας χρειάζεται να τροποποιήσουν ή να δημιουργήσουν εκ νέου τα πλαίσια λειτουργίας και συνεργασίας τους ανάλογα. Έτσι, επιτυγχάνεται ένας διαφορετικός τρόπος ορισμού της διαχείρισης

της εφοδιαστικής αλυσίδας, σύμφωνα με τον οποίο είναι αναγκαίο να εφαρμοστεί ένα σύνολο συντονισμένων ενεργειών, που αποσκοπεί στην πλαισίωση της τελευταίας φιλοσοφίας. Τα βασικά στοιχεία διαχείρισης της αλυσίδας εφοδιασμού, σύμφωνα με τον τελευταίο ορισμό βασίζονται στις ακόλουθες ιδέες:

- *Συνάφεια στην επιχειρησιακή συμπεριφορά*
- *Αμοιβαία ανταλλαγή πληροφοριών*
- *Αμοιβαία ανάληψη ρίσκου και κέρδους*
- *Διεπιχειρησιακή συνεργασία*
- *Πανομοιότυποι στόχοι στην ικανοποίηση πελατών*
- *Ενοποίηση επιχειρησιακών διεργασιών*
- *Πολιτικές στρατηγικής συνεργασίας*

Η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας ως φιλοσοφία και ως εφαρμογή, στοχεύει, πέρα από την ικανοποίηση των πελατειακών αναγκών, στη δημιουργία επιχειρησιακού πλεονεκτήματος σε κάθε επίπεδο με απώτερο σκοπό το συνολικό οικονομικό κέρδος. Ακολουθούν ορισμοί της βιβλιογραφίας συναφείς στο συγκεκριμένο πλαίσιο.

“Η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας αποτελεί την ενοποίηση των διεργασιών της αλυσίδας. Αυτό, πραγματοποιείται μέσω ενός συνόλου συντονισμένων σχέσεων μεταξύ όλων των σημείων της (προμηθευτές πρώτων υλών, κατασκευαστές, διανομείς, πωλητές) με σκοπό τη δημιουργία πλεονεκτήματος για όλα τα μέλη της.”(Handfield και Nichols, 2003).

“Η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας είναι η ενοποίηση των βασικών επιχειρησιακών διεργασιών, από τον καταναλωτή ως τον αρχικό προμηθευτή με σκοπό την παροχή προϊόντων, υπηρεσιών και πληροφοριών, προσδίδοντας αξία στους πελάτες και στην ίδια την εταιρεία”. (Lambert, Cooper και Pagh, 1998)

Στις προσεγγίσεις των ερευνητών αναφέρεται πολύ συχνά ο όρος *“Ενοποίηση”* ή σε μετάφραση, *“Integration”*. Ο όρος αυτός περιγράφει γενικά τη διαδικασία επαναπροσδιορισμού και σύνδεσης των τμημάτων ενός συνόλου, για τη δημιουργία ενός νέου. Μια ενοποιημένη αλυσίδα εφοδιασμού αποτελεί μια οργάνωση πελατών, και προμηθευτών οι οποίοι με τη χρήση μεθόδων και τεχνικών διαχείρισης,

συνεργάζονται με σκοπό τη μεγιστοποίηση της συλλογικής απόδοσης στα πλαίσια της παραγωγής, της διανομής και της μετά-πώλησης, υποστήριξης προϊόντων.

Η αποτελεσματική ενοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας καθορίζεται από το ποιόν της συνεργασίας μεταξύ αρχικών κατασκευαστών, των προμηθευτών και των πελατών, καθώς και από την επίγνωση τους στις βασικές δραστηριότητες που εκτελούνται σε κάθε επίπεδο της αλυσίδας. Συνεπώς, η διαδικασία αυτή προαπαιτεί την προσεκτική εφαρμογή τεχνικών και τεχνολογιών διαχείρισης, για τη σύζευξη βασικών λειτουργιών και δυνατοτήτων των μελών της αλυσίδας, έτσι ώστε να εκμεταλλευτούν οι διαθέσιμες ευκαιρίες της αγοράς.

Με την πρόοδο που πραγματοποιείται στις τεχνολογίες και στα συστήματα πληροφοριών, οι επιχειρήσεις, απέκτησαν τη δυνατότητα να επαναπροσδιορίσουν και να σχεδιάσουν με μεγαλύτερη αποδοτικότητα τις διεργασίες λειτουργίας τους. Έτσι, με την ιδέα της ενοποίησης της εφοδιαστικής αλυσίδας να λαμβάνει περισσότερη προσοχή τα τελευταία χρόνια, οι επιχειρήσεις άρχισαν να δημιουργούν στενότερες σχέσεις με τους πελάτες τους, ενώ παράλληλα δίνεται εντονότερη έμφαση στην διαρρύθμιση των σχέσεων τους με τους προμηθευτές τους. Οι παράγοντες που ωθούν τις σύγχρονες επιχειρήσεις να λειτουργήσουν σε αυτά τα πιο εντατικά πλαίσια συνεργασίας, αντιπροσωπεύουν την επιθυμία των μελών της αλυσίδας να *επεκτείνουν τον έλεγχο και το μεταξύ τους συντονισμό* σε όλο το μήκος της.

Συνοψίζοντας, σύμφωνα με το άρθρο που δημοσιεύτηκε από τον Stevens (1989) μια πλήρως ενοποιημένη αλυσίδα εφοδιασμού κατέχει τα εξής ποιοτικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά:

- Επίγνωση των διεργασιών και των συστημικών λειτουργιών στην πλήρη έκταση της αλυσίδας, από όλα τα μέλη της.
- Εκτενής χρήση λογισμικών διαμοίρασης και ανταλλαγής πληροφοριών με σκοπό την αύξηση της ταχύτητας ανταπόκρισης, στην αλλαγή πελατειακών αναγκών.
- Διεπιχειρησιακές σχέσεις στα πλαίσια στρατηγικής συνεργασίας και σε βάθος χρόνου.
- Ανταπόκριση στις ανάγκες του πελάτη, και διαμόρφωση των συνόλου των λειτουργιών της αλυσίδας, με επίκεντρο αυτόν.

Επιπλέον, στενές σχέσεις συνεργασίας χαρακτηρίζουν τα αρχικά τα στάδια σχεδιασμού των προϊόντων, και συμπεριλαμβάνονται στη διαχείριση των ενεργειών όλων των επιπέδων της αλυσίδας, στην ανταλλαγή πληροφοριών σχετικών με αλλαγές των διεργασιών της αλυσίδας, των προϊόντων και των προδιαγραφών τους, και τέλος στην ανταλλαγή τεχνολογικών υποδομών.

Οι αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν για την αντιμετώπιση των βασικών προβλημάτων της διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας, σχετίζονται με τον καθορισμό του σχεδιασμού, του πλάνου παραγωγής και διανομής προϊόντων, των παραγγελιών προμηθειών και του ελέγχου αποθέματος, καθώς και των στρατηγικών συνεργασίας που υιοθετείται από τα μέλη της. Με βάση τη συχνότητα με την οποία λαμβάνονται και την επίδραση τους σε πλαίσια χρόνου, είναι δυνατόν να κατηγοριοποιηθούν στα ακόλουθα επίπεδα:

- Στο **στρατηγικό επίπεδο** εξετάζονται αποφάσεις στρατηγικής φύσεως, έχοντας μακροχρόνιες επιδράσεις στη λειτουργία των επιχειρήσεων. Περιλαμβάνεται ο καθορισμός του αριθμού, και της τοποθεσίας των παραγωγικών μονάδων, των αποθηκών και των λογιστικών κέντρων. Επιπλέον, σχεδιάζονται τα χαρακτηριστικά της ροής των αγαθών και των πληροφοριών εντός του δικτύου της εφοδιαστικής, και επιλέγονται οι κατάλληλες πλατφόρμες διαμοίρασης και διαχείρισης πληροφοριών.
- Στο **τακτικό επίπεδο** πραγματοποιούνται αποφάσεις σε τακτά χρονικά διαστήματα, το εύρος των οποίων μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το είδος και τη λειτουργία της εκάστοτε επιχείρησης. Με βάση τα χαρακτηριστικά της λειτουργίας της αλυσίδας εφοδιασμού που προσδιορίστηκαν στο προηγούμενο επίπεδο, εδώ περιλαμβάνονται αποφάσεις σχετικά με τις πολιτικές αγορών υλικών και παραγωγής, τη μορφοποίηση πλάνων διαχείρισης αποθεμάτων με βάση τη τρέχουσα ζήτηση, καθώς και στρατηγικές μεταφοράς και διανομής προϊόντων.
- Τέλος, στο **επιχειρησιακό επίπεδο** προσδιορίζονται παράμετροι που αφορούν την διεκπεραίωση των παραγγελιών, όπως η προετοιμασία των αγαθών, η μέθοδος αποστολής τους, η φόρτωση και η εκφόρτωση των οχημάτων, η διαδρομή και ο χρόνος παράδοσης. Οι σχετικές αποφάσεις μπορεί να λαμβάνονται συχνά, δηλαδή σε εβδομαδιαία ή ημερήσια χρονικά πλαίσια, ακόμα και σε διαστήματα μικρότερα της ώρας.

3.

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ - ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

3.1 Το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων

Το Περιορισμένης Χωρητικότητας Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων (Capacitated Vehicle Routing Problem) ή πιο απλά, πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων, επιλύεται με σκοπό τον καθορισμό των βέλτιστων διαδρομών συλλογής ή διανομής, που διέρχονται από τις τοποθεσίες ενός συνόλου γεωγραφικά διασκορπισμένων πελατών με αφετηρία και πέρας μια κεντρική αποθήκη. Πολλαπλοί διανομείς παγκοσμίως, καλούνται να λάβουν αποφάσεις σε καθημερινή βάση για τη σχεδίαση των διαδρομών η οποία μπορεί να υπόκειται για παράδειγμα σε περιορισμούς χωρητικότητας οχημάτων, μήκους, χρονικών παραθύρων, και σχέσεων ακολουθίας μεταξύ πελατών.

Το συγκεκριμένο πρόβλημα μελετήθηκε για πρώτη φορά από τους Dantzig και Ramser, το 1959. Εντάσσεται στα γενικότερα πλαίσια των προβλημάτων καθορισμού διαδρομών και διανομής, με την επίλυση του να αποσκοπεί στη μείωση των δαπανών μεταφοράς και συνεπώς στην αύξηση του κέρδους της επιχείρησης. Έτσι, συνολικά, ο κύριος σκοπός της επίλυσης του προβλήματος είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους μεταφοράς προϊόντων στους πελάτες χρησιμοποιώντας τον ελάχιστο αναγκαίο αριθμό οχημάτων μεταφοράς, τα οποία κινούνται σε διαδρομές ελάχιστης αναγκαίας έκτασης.

3.2 Ορισμός και μαθηματική μοντελοποίηση

Ως NP-Hard (Non-deterministic Polynomial-time Hard) πρόβλημα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού, η επεξεργαστική ισχύς αναγκαία για την επίλυση του αυξάνεται εκθετικά σε συνάρτηση με το μέγεθος του προβλήματος (Lenstra και Rinnooy Kan, 1981) . Ωστόσο, ανεξάρτητα του μεγέθους και των περιορισμών του, οι στόχοι της επίλυσης του δεν μεταβάλλονται.

Σύμφωνα με τα όσα προηγούνται, σε ένα βασικό πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με δεδομένα, τον αριθμό των πελατών προς εξυπηρέτηση (1), την επιμέρους ζήτηση

τους (2), τον αριθμό των διαθέσιμων οχημάτων διανομής (3), οι στόχοι επίλυσης συγκεντρώνονται στα επόμενα τέσσερα βασικά σημεία:

- Η δημιουργία ενός συνόλου διαδρομών χαμηλού κόστους, το οποίο προκύπτει από την εύρεση των πορειών ελαχιστοποίησης της απόστασης που διανύεται, ή του χρόνου παράδοσης των προϊόντων.
- Η χρήση του ελάχιστου μεγέθους στόλου οχημάτων και διαθέσιμων οδηγών που δεσμεύονται για την εξυπηρέτηση του συνόλου των πελατών.
- Ο σχεδιασμός διαδρομών με έμφαση στη μεταξύ τους ισορροπία, όσο αναφορά τα επιμέρους φορτία τους, και τους αναγκαίους χρόνους για τη μεταφορά των αγαθών μέσω αυτών.
- Ο καθορισμός των διαδρομών για την αποφυγή της μερικής ικανοποίησης των πελατών, ελαχιστοποιώντας τις σχετικές ποινές.

Δεδομένου του πλήθους των σημείων της βιβλιογραφίας για τη μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος, επιλέγεται η παρουσίαση του μέσω της μοντελοποίησης που βασίζεται στο διαμερισμό συνόλου (Set Partitioning). Στη δημοσίευση των Munari, Dollevoet και Spliet (2017) προτείνεται η μοντελοποίηση του προβλήματος ως εξής:

Θεωρείται ένα σύνολο πελατών $C = \{1, \dots, n\}$, το οποίο συσχετίζεται με μία τιμή θετικής ζήτησης για κάθε πελάτη $i \in C$. Για την εξυπηρέτησή τους, απαιτείται ο καθορισμός διαδρομών του στόλου των διαθέσιμων οχημάτων του οποίου το μέγεθος ορίζεται ως K . Όπως ορίζουν τα χαρακτηριστικά του προβλήματος, η έναρξη των διαδρομών του ομογενούς στόλου των οχημάτων πραγματοποιείται στην αποθήκη, τα οποία εξυπηρετούν τους πελάτες και επιστρέφουν σε αυτή. Κάθε όχημα κατέχει χωρητικότητα Q , περιορίζοντας τον αριθμό των πελατών που μπορεί να εξυπηρετήσει πριν την επιστροφή του. Τέλος, σημειώνεται πως όλοι οι πελάτες εξυπηρετούνται από ένα μοναδικό όχημα, ακριβώς μια φορά.

Το πρόβλημα αναπαρίσταται μέσω ενός γραφήματος $G(N,E)$, όπου $N = C \cup \{0, n+1\}$ το σύνολο στο οποίο περιέχονται οι κόμβοι που συσχετίζονται με τις τοποθεσίες των πελατών του συνόλου C , και των κόμβων της αποθήκης $0, n+1$. Η τοποθεσία της αποθήκης αντιπροσωπεύεται με τους τελευταίους κόμβους, επιβάλλοντας την έναρξη

όλων των διαδρομών από τον κόμβο 0, και την ολοκλήρωση τους στον κόμβο $n+1$. Υποθέτοντας ένα πλήρες γράφημα, στο σύνολο E περιέχονται τα τόξα (i, j) για κάθε ζεύγος κόμβων i, j του συνόλου N . Κάθε κόμβος αντιστοιχίζεται με μία θετική τιμή ζήτησης η οποία συμβολίζεται με q_i , με την εξαίρεση αυτών της αποθήκης όπου οι τιμές της ζήτησης ορίζονται ως $q_{n+1} = q_0 = 0$. Τέλος, το κόστος του κάθε τόξου $(i, j) \in E$ αναπαρίσταται μέσω του συμβολισμού c_{ij} , ικανοποιώντας τη σχέση της τριγωνικής ανισότητας: $c_{ik} + c_{kj} \geq c_{ij} \quad \forall i, j, k \in C$.

Υποθέτοντας πως στο σύνολο R τοποθετούνται όλες οι διαδρομές που ικανοποιούν τα χαρακτηριστικά του προβλήματος που διατυπώθηκαν, και λ_r δυαδική μεταβλητή απόφασης, ίση με 1 μόνο στη περίπτωση όπου επιλέγεται η συγκεκριμένη διαδρομή $r \in R$, η μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος είναι η ακόλουθη:

$$\min \sum_{r \in R} c_r \lambda_r \quad (3.1)$$

υπό

$$\sum_{r \in R} a_{ri} \lambda_r = 1, i \in C, \quad (3.2)$$

$$\sum_{r \in R} \lambda_r \leq K, \quad (3.3)$$

$$\lambda_r \in \{0,1\}, r \in R. \quad (3.4)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση (3.1) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους των επιλεγμένων διαδρομών. Δεδομένου μιας διαδρομής $r \in R$, μέσω της οποίας πραγματοποιείται η διαδοχική εξυπηρέτηση των πελατών i_0, i_1, \dots, i_p με $p > 0$, το συνολικό της κόστος υπολογίζεται μέσω του κόστους των τόξων c_{ij} , ως εξής:

$$c_r = \sum_{j=0}^{p-1} c_{i_j i_{j+1}} \quad (3.5)$$

Κάθε στήλη $\alpha_r = (\alpha_{r1}, \dots, \alpha_{rn})^T$ αποτελεί ένα δυαδικό διάνυσμα όπου τα στοιχεία του α_{ri} λαμβάνουν τιμή ίση με 1 μόνο όταν ο πελάτης i εξυπηρετείται από το όχημα της διαδρομής r . Τέλος, οι περιορισμοί (2.11) και (2.12) επιβάλλουν την εξυπηρέτηση των

πελατών ακριβώς μία φορά και ορίζουν τον μέγιστο αριθμό διαθέσιμων οχημάτων στην αποθήκη αντίστοιχα.

3.3 Περιορισμοί και βασικές προεκτάσεις

Η επίλυση των προβλημάτων δρομολόγησης συχνά πραγματοποιείται υπό την παρουσία περιορισμών, οι οποίοι σχετίζονται με τις διαδρομές και τα χαρακτηριστικά των οχημάτων διανομής, τα προϊόντα προς παράδοση, τις τοποθεσίες των λογιστικών κέντρων και των αποθηκών της επιχείρησης, των πολιτικών διαχείρισης πελατών και τέλος με τις εξατομικευμένες ανάγκες και απαιτήσεις τους. Η παρουσία των περιορισμών αυτών σε πρακτικό επίπεδο, δημιουργεί την ανάγκη για τη μοντελοποίηση παραλλαγών του προβλήματος με σκοπό την αποτελεσματική αντιμετώπιση του. Δεδομένου του μεγάλου αριθμού των διαφορετικών προεκτάσεων, σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται και αναλύονται οι σημαντικότερες παραλλαγές του προβλήματος και οι περιορισμοί που το μορφοποιούν.

- **Το Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων με Χρονικά Παράθυρα (Vehicle Routing Problem with Time Windows - (VRPTW))**

Το VRPTW αποτελεί μια σημαντική παραλλαγή του κλασικού προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων, προσομοιώνοντας σχέδια διανομής με βάση ρεαλιστικούς περιορισμούς. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, η έναρξη της διαδικασίας εξυπηρέτησης των πελατών πραγματοποιείται εντός ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος, το οποίο ορίζεται ως *χρονικό παράθυρο*. Τα χρονικά παράθυρα χαρακτηρίζονται ως ελαστικά όταν η παραβίαση τους σχετίζεται με την ύπαρξη κάποιων σχετικών ποινών, ενώ χαρακτηρίζονται ως αυστηρά όταν είναι αναγκαίο να μην παραβιαστούν. Πιο συγκεκριμένα, στη τελευταία περίπτωση, η άφιξη ενός οχήματος στη τοποθεσία του πελάτη πριν την έναρξη του προκαθορισμένου χρονικού παραθύρου, συνεπάγεται την παραμονή του μέχρι την έναρξη του διαστήματος, ενώ τέλος, απαγορεύεται η αργοπορημένη εξυπηρέτηση του. [14]

Το VRPTW χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση διάφορων στοιχείων στα πλαίσια της αλυσίδας εφοδιασμού, καθώς εφαρμόζεται σε προβλήματα τα οποία σχετίζονται με παραδόσεις σε τράπεζες και ταχυδρομεία, τη δρομολόγηση σχολικών οχημάτων για τη

μεταφορά μαθητών, υπηρεσίες ασφάλειας μέσω περιπόλων, καθώς και με διανομή εφημερίδων σε αστικά κέντρα.

Όπως και το κλασσικό VRP, το VRPTW χαρακτηρίζεται συνήθως από ένα στόλο οχημάτων με κοινά χαρακτηριστικά. Κάθε όχημα κατέχει την ίδια χωρητικότητα, ενώ κάθε πελάτης συσχετίζεται με μια θετική ζήτηση. Επιπλέον, ο χαρακτηριστικός περιορισμός του προβλήματος επιβάλλει την ανάθεση ενός χρονικού παραθύρου εξυπηρέτησης $[a_i, b_i]$ σε κάθε πελάτη i του συνόλου $C = \{1, \dots, n\}$. Είναι αναγκαίο να σημειωθεί πως στη μοντελοποίηση του προβλήματος η αποθήκη χαρακτηρίζεται από κάποιο χρονικό παράθυρο $[a_0, b_0]$. Το χρονικό διάστημα αυτό ορίζεται ως ο *χρονικός ορίζοντας* του σχεδίου δρομολόγησης των οχημάτων, σύμφωνα με τον οποίο, απαγορεύεται η έναρξη των δρομολόγιων από την αποθήκη πριν τον ενωρίτερο χρόνο a_0 , και η επιστροφή τους σε αυτή μετά τον χρόνο b_0 .

Συνολικά, ο στόχος για την επίλυση του VRPTW είναι ο σχεδιασμός ενός συνόλου διαδρομών ελαχίστου κόστους με βάση στοιχεία που ορίζουν πως:

- Η εξυπηρέτηση του κάθε πελάτη πραγματοποιείται μόνο μία φορά.
- Κάθε διαδρομή έχει ως σημείο έναρξης και πέρας την αποθήκη.
- Τα χρονικά παράθυρα κάθε πελάτη και οι περιορισμοί χωρητικότητας των οχημάτων λαμβάνονται υπόψη.

- **Το Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων με Παραλαβές (Vehicle Routing Problem with Backhauls - (VRPB))**

Σε αυτή τη προέκταση του VRP, περιλαμβάνεται η σχεδίαση διαδρομών για τη διανομή καθώς και για τη παραλαβή προϊόντων. Η μοντελοποίηση του VRPB βρίσκει εφαρμογή σε πολλές ρεαλιστικές περιπτώσεις για το σχεδιασμό πλάνων διανομής και ανεφοδιασμού. Για παράδειγμα, μια επιχείρηση δραστηριοποιείται σε μια περιοχή στην οποία εδρεύουν πελάτες και προμηθευτές της, των οποίων οι τοποθεσίες βρίσκονται σε εγγύτητα. Στη περίπτωση αυτή, σε κοινό χρονικό ορίζοντα είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί η παράδοση παραγγελιών καθώς και η προμήθεια αναγκαίων στοιχείων για τη λειτουργία της επιχείρησης. Χαρακτηριστικά παραδείγματα επιχειρήσεων που χρησιμοποιούν το VRPB για τη μοντελοποίηση των πλάνων διανομής και ανεφοδιασμού τους, είναι αλυσίδες καταστημάτων λιανικού εμπορίου, και βιομηχανίες παραγωγής. [9]

Αρχικά, για τη διαμόρφωση της λύσης του προβλήματος χρησιμοποιούνται δεδομένα για τις τοποθεσίες των σημείων διανομής και παραλαβής προϊόντων των οποίων οι ποσότητες είναι γνωστές και προκαθορισμένες. Πιο συγκεκριμένα, στα σημεία διανομής πραγματοποιείται η παράδοση των αγαθών στους πελάτες, ενώ στα σημεία παραλαβής λαμβάνει χώρα η φόρτωση των οχημάτων με σκοπό τη μεταφορά αγαθών πίσω στην αποθήκη. Βασικό χαρακτηριστικό του προβλήματος αποτελεί η ανάγκη ολοκλήρωσης όλων των παραγγελιών που σχετίζονται με τη διανομή, πριν να λάβει χώρα η δρομολόγηση των οχημάτων για την παραλαβή αγαθών μεταφέροντας τα στην αποθήκη. Το τελευταίο είναι αποτέλεσμα της φόρτωσης των αγαθών προς διανομή στα οχήματα με φορά από μπροστά προς στα πίσω, και της αδυναμίας χωρικής αναδιάταξης τους στα σημεία παραλαβής.

Συνολικά, δεδομένου ενός ομογενούς στόλου οχημάτων με κοινά χαρακτηριστικά χωρητικότητας, μια εφικτή λύση του VRPB αποτελεί ο σχεδιασμός ενός συνόλου διαδρομών ελαχίστου μήκους του οποίου στις επιμέρους, όλες οι διανομές προϊόντων πραγματοποιούνται πριν από τις παραλαβές. Η επίσκεψη των προκαθορισμένων κόμβων λαμβάνει χώρα μία μόνο φορά, χωρίς την παραβίαση των περιορισμών φορτίου.

- **Το Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων με Εξυπηρέτηση Πελατών με Παραπάνω από Ένα Οχήματα (Split Delivery Vehicle Routing Problem - (SDVRP))**

Στο SDVRP η ζήτηση ενός πελάτη μπορεί να διαμοιραστεί μεταξύ πολλαπλών διαδρομών. Ένα σύνολο διαθέσιμων οχημάτων ίδιας χωρητικότητας είναι υπεύθυνο για την εξυπηρέτηση ενός συνόλου πελατών. Σε αντίθεση όμως με το κλασσικό VRP, στο συγκεκριμένο πρόβλημα επιτρέπεται η εξυπηρέτηση των πελατών πάνω από μια φορά, καθώς η επιμέρους ζήτηση τους μπορεί να κατέχει τιμή μεγαλύτερη από τη χωρητικότητα του οχήματος. (Chen, Golden και Wasil 2007)

Αυτή η παραλλαγή του VRP προτάθηκε σε βιβλιογραφικά πλαίσια πριν από περίπου είκοσι χρόνια, καθώς σχετικοί ερευνητές του αντικειμένου προώθησαν τη μελέτη του, επιβεβαιώνοντας την ύπαρξη σημαντικών μειώσεων κόστους στη δρομολόγηση οχημάτων με πολλαπλές εξυπηρετήσεις. Σημαντικές μελέτες περιπτώσεων αποτελούν έργα στα οποία το SDVRP χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση προβλημάτων

διανομής προμήθειων σε κτηνοτροφία, και μεταφοράς πληρωμάτων εργαζομένων σε πλατφόρμες πετρελαίου.

Όπως και στα κλασσικά VRP, η επίλυση του προβλήματος υπόκειται σε περιορισμούς χωρητικότητας οχημάτων, και στη συνθήκη επιστροφής των δρομολογίων στην αποθήκη. Στόχος της επίλυσης αποτελεί ο σχεδιασμός διαδρομών των οποίων τα χαρακτηριστικά υπόκεινται στους περιορισμούς διατυπώθηκαν, με τη χρήση του ελάχιστου αναγκαίου αριθμού οχημάτων, τα οποία καλύπτουν την ελάχιστη δυνατή απόσταση. Τέλος, απαιτείται η εξυπηρέτηση όλων των πελατών η οποία όμως μπορεί να πραγματοποιηθεί με παραπάνω από ένα οχήματα, δημιουργώντας ευέλικτα διαθέσιμα πλάνα διανομής για τους αποφασίζοντες, όσο αναφορά τη διεκπεραίωση των παραγγελιών.

- **Το Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων με Πολλαπλές Αποθήκες (Multidepot Vehicle Routing Problem - (MDVRP))**

Συχνά, επιχειρήσεις οι οποίες δραστηριοποιούνται σε μεγάλα αστικά κέντρα ή γεωγραφικές εκτάσεις μεγάλου εύρους, πραγματοποιούν την αποθήκευση και την αποστολή των προϊόντων τους με τη χρήση πολλαπλών αποθηκών. Με βάση την κατανομή των διαθέσιμων οχημάτων ανά αποθήκη και των τοποθεσιών των πελατών προς εξυπηρέτηση, η διαμόρφωση των σχεδίων διανομής μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους.

Αρχικά, σημειώνεται πως η εξαγωγή των λύσεων του προβλήματος πραγματοποιείται σε δύο σκέλη. Στο πρώτο, ο διαμοιρασμός του συνόλου των πελατών επιβάλλει την ανάθεση του κάθε ενός, στις κατάλληλες αποθήκες για την κάλυψη της ζήτησης του. Ομοίως, με βάση τα αποτελέσματα της ομαδοποίησης, αναθέτεται ο κατάλληλος αριθμός οχημάτων στις επιμέρους αποθήκες. Στο δεύτερο σκέλος λαμβάνει χώρα η δρομολόγηση των οχημάτων. [12]

Σε πρακτικό επίπεδο με βάση τις αποφάσεις έχουν ληφθεί, τα επιμέρους δρομολόγια των οχημάτων μπορούν να έχουν κοινά ή διαφορετικά σημεία εκκίνησης και τερματισμού. Στη πρώτη περίπτωση, η επίλυση του MDVRP απλοποιείται και ανάγεται σε πολλαπλά VRP. Στη δεύτερη περίπτωση, κάθε όχημα ξεκινά από την αποθήκη στην οποία ανατεθεί, ενώ τερματίζει στη πλησιέστερη με βάση τη τοποθεσία του τελευταίου

σημείου εξυπηρέτησης. Και στις δύο όμως περιπτώσεις, η επίλυση του προβλήματος σκοπεύει στον σχεδιασμό διαδρομών που ελαχιστοποιούν τη διανυθείσα απόσταση και των αριθμό των δρομολογίων, με σεβασμό στους περιορισμούς χωρητικότητας, για την εξυπηρέτηση όλων των σημείων ζήτησης, μια φορά από ένα μόνο όχημα.

- **Το Περιοδικό Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων (Periodic Vehicle Routing Problem - (PVRP))**

Στο PVRP, ο σχεδιασμός των δρομολογίων είναι συνεχής, και καταλαμβάνει κάποια προκαθορισμένη χρονική έκταση στην οποία πελάτες εξυπηρετούνται σε διαφορετικές συχνότητες. Όπως και στο κλασσικό VRP, οι τοποθεσίες των σημείων εξυπηρέτησης είναι γνωστές, και σχετίζονται με μία συνάρτηση περιοδικής ζήτησης για την κάλυψη τους, μέσω ενός συνόλου οχημάτων περιορισμένης χωρητικότητας.

Η μοντελοποίηση του PVRP χρησιμοποιείται συχνά για τη διαμόρφωση περιοδικών πλάνων λειτουργίας επιχειρήσεων, τα οποία μπορεί να σχετίζονται με επαναλαμβανόμενες διεργασίες συντήρησης, και τη παράδοση ή παραλαβή αγαθών σε τακτά χρονικά διαστήματα. Μελέτες περιπτώσεων με χρήση της συγκεκριμένης παραλλαγής του VRP, περιγράφουν την περιοδική συντήρηση ανελκυστήρων σε διαφορετικές τοποθεσίες, τη συλλογή αποβλήτων και τη τακτική παράδοση προϊόντων αίματος σε νοσοκομεία. (Coene, Arnout και Spieksma, 2010)

Ως πολύ-επίπεδο πρόβλημα συνδυαστικής βελτιστοποίησης, η επίλυση του PVRP πραγματοποιείται εντός ενός χωρισμένου σε ίσα τμήματα χρονικού ορίζοντα, και τη δημιουργία δύο επιπέδων όσο αναφορά την κατασκευή των λύσεων. Στο πρώτο, η τμηματοποίηση που προηγείται επιτρέπει την ανάθεση των πελατών, στα επιμέρους χρονικά διαστήματα που δημιουργήθηκαν, καθορίζοντας τη συχνότητα εξυπηρέτησης τους. Στο δεύτερο επίπεδο, ακολουθεί ο σχεδιασμός της δρομολόγησης των οχημάτων για κάθε χρονικό διάστημα, με τη χρήση κλασσικών τεχνικών επίλυσης.

Αυτή η δύο επιπέδων προσέγγιση, επεκτείνει το πρόβλημα ανάθεσης πελατών με τη χρήση μεθόδων καθορισμού διαδρομών. Μια εφικτή λύση του προβλήματος αποτελείται από ένα πλήθος συνόλων διαδρομών για κάθε τμήμα του χρονικού ορίζοντα, το οποίο συνολικά ικανοποιεί τους περιορισμούς ζήτησης και συχνότητας που προσδιορίστηκαν στο πρώτο επίπεδο. Συνολικά, σκοπό αποτελεί η

ελαχιστοποίηση των οχημάτων και της έκτασης των δρομολογίων υπό τους περιορισμούς χωρητικότητας, ξεκινώντας και τερματίζοντας στην αποθήκη στην ίδια χρονική περίοδο. Τέλος, οι πελάτες εξυπηρετούνται τουλάχιστον μια φορά εντός του χρονικού ορίζοντα του πλάνου διανομής.

3.4 Άλλες παραλλαγές

Περαιτέρω προεκτάσεις του Προβλήματος Δρομολόγησης Οχημάτων παρουσιάζονται συνοπτικά:

- **Το Δυναμικό Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων (Dynamic Vehicle Routing Problem - (DVRP))**

Η συγκεκριμένη κατηγορία προβλημάτων χαρακτηρίζεται από μεταβολές στα δεδομένα του προβλήματος σε πραγματικό χρόνο, δηλαδή κατά τη διάρκεια εκτέλεσης δρομολογίων. Οι μεταβολές αυτές μπορεί να αφορούν το σύνολο των πελατών προς εξυπηρέτηση, τους χρόνους μεταφοράς των προϊόντων και εξυπηρέτησης, ή τη διαθεσιμότητα των οχημάτων.

- **Το Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων με Ταυτόχρονη Διανομή και Παραλαβή Προϊόντων (Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery - (VRPSPD))**

Στο VRPSPD, πέρα από τη παράδοση, περιλαμβάνεται και η παραλαβή καθορισμένης ποσότητας επιστρεφόμενων προϊόντων κατά την εξυπηρέτηση των πελατών. Η πολυπλοκότητα του προβλήματος έτσι αυξάνεται, καθώς η επάρκεια χώρου των οχημάτων είναι αναγκαία για την επιστροφή των προϊόντων στην αποθήκη.

- **Το Ετερογενούς Στόλου Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων (Heterogenous Fleet Vehicle Routing Problem - (HVRP))**

Το HVRP αποτελεί βασική προέκταση του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων, και η μοντελοποίηση του επιβάλλει την διεκπεραίωση παραγγελιών μέσω ενός ετερογενούς στόλου οχημάτων, τα οποία μπορεί να κατέχουν διαφορετικές χωρητικότητες, σταθερά και μεταβλητά κόστη δρομολόγησης.

- **Το Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων με Κέρδη (Vehicle Routing Problem with Profits - (VRPPs))**

Αρκετές φορές, η εξυπηρέτηση ολόκληρου του συνόλου των πελατών χαρακτηρίζεται μη πραγματοποιήσιμη λόγω περιορισμών χωρητικότητας, συνολικής ζήτησης, πλήθους οχημάτων και χρονικής διάρκειας διαδρομών. Στη περίπτωση του VRPPs, μέσω μιας συνάρτησης κέρδους προσδιορίζεται η ελκυστικότητα για την εξυπηρέτηση του κάθε πελάτη, και επιλέγονται από το σύνολο προς εξυπηρέτηση αυτοί που χαρακτηρίζονται από το μεγαλύτερο προσδοκώμενο κέρδος.

- **Το Χρονικώς Εξαρτώμενο Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων (Time Dependent Vehicle Routing Problem - (TDVRP))**

Η υπόθεση σταθερών και αιτιοκρατικών χρόνων μετάβασης, αποτελεί μια προσέγγιση των ρεαλιστικών συνθηκών για τη δρομολόγηση οχημάτων. Στη περίπτωση του TDVRP, οι τιμές του χρόνου για τη μεταφορά προϊόντων μεταξύ δύο σημείων, αποτελεί συνάρτηση όχι μόνο της μεταξύ τους απόστασης, αλλά και της χρονικής στιγμής του υπολογισμού τους. Για παράδειγμα μεταβολές σε κυκλοφοριακές συνθήκες μπορεί να έχουν ως αποτέλεσμα διακυμάνσεις στις ταχύτητες των οχημάτων, καθιστώντας τα δεδομένα του προβλήματος δυναμικά μεταβαλλόμενα.

- **Το Ανοιχτό Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων (Open Vehicle Routing Problem - (OVRP))**

Η μοντελοποίηση του OVRP, δεν επιβάλλει την επιστροφή των οχημάτων στην αποθήκη με την εξυπηρέτηση του τελευταίου πελάτη της καθορισμένης διαδρομής τους. Η συγκεκριμένη παραλλαγή βρίσκει εφαρμογή σε πρακτικό επίπεδο στις υπηρεσίες διανομής κατ' οίκων παραγγελιών και εφημερίδων όπου εξωτερικοί συνεργάτες της επιχείρησης διανομής χρησιμοποιούν δικά τους οχήματα για την ολοκλήρωση των παραγγελιών, και δεν επιστρέφουν στην αποθήκη.

Κεντρικό θέμα της εργασίας αποτελεί η επίλυση της συγκεκριμένης παραλλαγής του VRP. Περισσότερες λεπτομέρειες τοποθετούνται στο πέμπτο κεφάλαιο, όπου θα πραγματοποιηθεί η αναλυτική παρουσίαση του προβλήματος και των περιορισμών του, μαζί με τη μαθηματική μοντελοποίηση του.

4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο αποσκοπεί στη παρουσίαση των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων. Όπως αναφέρθηκε στη δεύτερη ενότητα του τρίτου κεφαλαίου, το VRP ανήκει στη κατηγορία των προβλημάτων που χαρακτηρίζονται ως NP-Hard. Η προσέγγιση του μέσω κάποιας ακριβής διαδικασίας (Exact Procedure), προϋποθέτει την εύρεση όλων των εφικτών διαδρομών με βάση τα δεδομένα του εκάστοτε προβλήματος, των οποίων το σύνολο αυξάνεται εκθετικά συναρτήσει του μέγεθός του. Ως εκ τούτου, κρίνεται αναποτελεσματική για την εξαγωγή λύσεων σε λογικά χρονικά πλαίσια για μεγάλα προβλήματα.

Για το λόγο αυτό, η σύγχρονη έρευνα επικεντρώθηκε στο σχεδιασμό αλγορίθμων, οι οποίοι παραχωρούν την ικανότητα εύρεσης απόλυτης βέλτιστης λύσης, με αντάλλαγμα όμως την ικανοποιητική προσέγγιση της σε μικρό χρόνο. Οι σημαντικότερες οικογένειες μεθόδων που χαρακτηρίζονται από αυτή την ιδιότητα είναι αυτές των ευρετικών (Heuristics) και μεθευρετικών αλγορίθμων (Metaheuristics).

4.1 Ακριβείς διαδικασίες

Οι αλγόριθμοι που βασίζονται σε ακριβείς διαδικασίες (Exact Algorithms), υπόσχονται την εύρεση την βέλτιστης λύσης για κάθε πεπερασμένου μεγέθους παραλλαγή ενός προβλήματος συνδυαστικής βελτιστοποίησης, εντός πεπερασμένου χρόνου, ανάλογου του μεγέθους του. (Dimitrescu και Stützle, 2003). Η σημαντικότερη κατηγορία ακριβών διαδικασιών επίλυσης τέτοιων προβλημάτων, συμπεριλαμβανομένου αυτό της δρομολόγησης οχημάτων, είναι αυτή του ακέραιου μαθηματικού προγραμματισμού (Integer Programming-(IP)).

Ο IP ως ακριβής διαδικασία, αποτελεί μια κατηγορία μεθόδων επίλυσης όπου η προς μελέτη μεταβλητές απόφασης λαμβάνουν ακέραιες τιμές, με την εφαρμογή του σε προβλήματα δρομολόγησης να χαρακτηρίζεται πειραματικά από μεγάλη επιτυχία.

Ωστόσο, η χρήση των αλγόριθμων ακέραιου προγραμματισμού περιορίζεται συχνά από το μέγεθος του προβλήματος προς επίλυση, καθώς στη περίπτωση μεγάλου μεγέθους δεδομένων VRP, οι χρόνοι εξαγωγής λύσεων αυξάνονται δραματικά.

Επιπλέον προβλήματα που χαρακτηρίζουν τους IP αλγόριθμους αποτελούν: (1) Η δέσμευση μεγάλων ποσών υπολογιστικής μνήμης, με αποτέλεσμα τον πρόωρο τερματισμό της λειτουργίας τους. (2) Η δυσκολία προσαρμογής τους σε επεκτάσεις προβλημάτων, τα οποία κατέχουν διαφορετικές παραμέτρους μοντελοποίησης. (3) Τα μεγάλα ποσά χρόνου αναγκαία για την υλοποίηση τους, καθώς αποτελούν πολύπλοκες και εξειδικευμένες δομές για την επίλυση προβλημάτων συγκεκριμένων προδιαγραφών.

Παρά τα μειονεκτήματα τους λόγω της φύσης του σχεδιασμού τους, οι IP αλγόριθμοι κατέχουν σημαντικά πλεονεκτήματα όσο αναφορά την επίλυση προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης μικρού μεγέθους. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η επιτυχής ολοκλήρωση τους συνεπάγεται την εύρεση της βέλτιστης λύσης του προβλήματος, ενώ ακόμα και σε περίπτωση πρόωρου τερματισμού, λαμβάνονται σημαντικά δεδομένα σχετικά με τα ανώτερα και κατώτερα όρια της. Τέλος, η μοντελοποίηση τους επιτρέπει την αποφυγή του χώρου αναζήτησης όπου τοποθετούνται μη βέλτιστες λύσεις.

Στα πλαίσια της επίλυσης του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων, χαρακτηριστικά παραδείγματα ακριβών αλγορίθμων ακέραιου προγραμματισμού είναι οι μέθοδοι Branch-and-Bound, Cutting Planes και Branch-and-Cut, που θα παρουσιαστούν συνοπτικά στη συνέχεια της ενότητας.

- **Αλγόριθμοι Branch-and-Bound - (B&B)**

Οι αλγόριθμοι βασισμένοι στη μέθοδο Branch-and-Bound, χαρακτηρίζονται από επαναληπτικές διαδικασίες διαμοιρασμού ενός αρχικού συνόλου εφικτών λύσεων (Branching), με σκοπό τη δημιουργία υποπροβλημάτων του αρχικού προβλήματος προς επίλυση. Σε προβλήματα ελαχιστοποίησης ακέραιου προγραμματισμού, όπως θα μπορούσε να μοντελοποιηθεί ένα VRP, η εξαγωγή λύσεων στα επιμέρους υποπροβλήματα με ακρίβεια ή και προσεγγιστικά, επιτρέπει τη απόκτηση των κατώτερων ορίων της εξαγόμενης λύσης.

Η ισχύς αυτού του τύπου αλγορίθμων, με βάση τη δημοσίευση των Lee και Mitchell (2008) είναι αποτέλεσμα της ακόλουθης συνθήκης: Αν το κατώτερο όριο της λύσης ενός υποπροβλήματος, είναι μεγαλύτερο από τη τιμή μια τυχαίας λύσης που τοποθετείται στο εφικτό σύνολο, τότε η βέλτιστη λύση του αρχικού προβλήματος αποκλείεται να τοποθετείται στο υποσύνολο των λύσεων που σχετίζεται με το συγκεκριμένο υποπρόβλημα (Bounding).

Έτσι, τα κατώτερα όρια των λύσεων του συνόλου των υποπροβλημάτων, χρησιμοποιούνται για τον καλύτερο προσδιορισμό της περιοχής αναζήτησης της βέλτιστης λύσης, χωρίς τη χρήση εκτενών και χρονοβόρων μεθόδων αναζήτησης.

- **Αλγόριθμοι Cutting Planes – (CP)**

Η λειτουργία αυτής της κατηγορίας αλγορίθμων βασίζεται στη διαδοχική επίλυση προβλημάτων ακέραιου προγραμματισμού, τα οποία προκύπτουν από τη “χαλάρωση” του αρχικού προβλήματος. Οι διαδικασίες αυτές χρησιμοποιούνται για την επίλυση αρκετών προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης μορφοποιημένα με τη χρήση ακέραιου προγραμματισμού, όπως είναι το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή του οποίου προέκταση αποτελεί το VRP. Στη δημοσίευση του Mitchell (2008), η λειτουργία των αλγορίθμων της συγκεκριμένης κατηγορίας περιγράφεται ως εξής:

Υποθέτοντας ένα αρχικό πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού, μια “χαλάρωση” του προβλήματος, αποτελεί ο επαναπροσδιορισμός του αγνοώντας τους περιορισμούς ακεραιότητας των μεταβλητών απόφασης. Η επίλυση του προβλήματος στη νέα του μορφή έχει συνεπώς την εξαγωγή λύσεων εκτός της εφικτής ακέραιας περιοχής. Για το λόγο αυτό, πραγματοποιείται επαναληπτικά η εφαρμογή περιορισμών ανισοτήτων στις μεταβλητές απόφασης, λειτουργώντας ως επίπεδα αποκοπής (Cutting Planes).

Σκοπός της εφαρμογής των επιπέδων αποκοπής είναι ο περιορισμός του χώρου αναζήτησης και η εξαγωγή κάποιας λύση εντός της ακέραιας περιοχής εφικτότητας. Τέλος, στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να σημειωθεί πως μία εφικτή εξαγόμενη λύση θεωρείται βέλτιστη για το αρχικό πρόβλημα ακέραιου προγραμματισμού, καθώς αποτελεί τη βέλτιστη λύση μιας “χαλάρωσης” του.

- **Αλγόριθμοι Branch-and-Cut – (B&C)**

Η λειτουργία των μεθόδων Branch-and-Cut βασίζεται στο συνδυασμό των χαρακτηριστικών των αλγορίθμων που παρουσιάστηκαν νωρίτερα στην ενότητα. Όπως και οι CP αλγόριθμοι, οι B&C διαδικασίες προσεγγίζουν προβλήματα ακέραιου προγραμματισμού αρχικά με τη διαδοχική επίλυση γραμμικών “χαλαρώσεων”. Επίπεδα αποκοπής εφαρμόζονται για τη καλύτερη προσέγγιση του ακέραιου προβλήματος, ενώ στη συνέχεια εντός της ίδιας αλγοριθμικής δομής χρησιμοποιούνται B&B προσεγγίσεις με σκοπό την υποδιαίρεση του σε επιμέρους.

Ο συνδυασμός αυτών των διαδικασιών πραγματοποιείται με σκοπό την ενίσχυση των διαδικασιών των CP, καθώς αρκετές φορές με τη χρήση μόνο των τελευταίων η επίλυση προγραμμάτων ακέραιου προγραμματισμού χαρακτηρίζεται μη αποτελεσματική (Mitchell, 2008). Επιπλέον, η ενσωμάτωση δομών CP σε απόλυτες Branch-and-Bound διαδικασίες στα αρχικά ή και στα ενδιάμεσα στάδια του αλγορίθμου, έχει ως αποτέλεσμα την επιτάχυνση της διαδικασίας εξαγωγής λύσεων.

4.2 Ευρετικοί αλγόριθμοι

Οι ευρετικοί αλγόριθμοι αποτελούν διαδικασίες οι οποίες εξάγουν εφικτές λύσεις προσεγγιστικά, ενεργώντας σε περιορισμένο χώρο αναζήτησης και σε μικρούς χρόνους, συναρτήσει πάντα του μεγέθους του εξεταζόμενου προβλήματος. Ο παράγοντας της ταχύτητας στις διαδικασίες εύρεσης λύσεων λαμβάνει σημαντική βαρύτητα. Σε πρακτικό επίπεδο, οι εφαρμογές ευρετικών αλγορίθμων στην αντιμετώπιση καθημερινών προβλημάτων πρέπει να χαρακτηρίζεται από μικρούς χρόνους ανταπόκρισης σε αλλαγές.

Για παράδειγμα, σε μια πραγματική εφαρμογή ενός VRP, και στη περίπτωση ατυχήματος ή αλλαγής των δεδομένων της ζήτησης των πελατών, κατά τη διαδικασία δρομολόγησης, ο επαναπροσδιορισμός μέρους της λύσης σε μικρούς χρόνους είναι αναγκαίος για τη διατήρηση της ομαλής λειτουργίας της διαδικασίας εξυπηρέτησης. Έτσι, η χρήση ευρετικών αλγορίθμων υποδεικνύεται για την αντιμετώπιση καταστάσεων με ανάγκη σε ταχείες αλλαγές προγραμματισμού διεργασιών, καθώς και για προβλήματα μεγάλου μεγέθους. (Rørke, 2006)

Πέρα από ταχύτητα στην εξαγωγή λύσεων, οι ευρετικοί αλγόριθμοι χαρακτηρίζονται και από άλλα σημαντικά προτερήματα. Αρχικά, η ελαστικότητα στη μορφοποίηση τους

έναντι των ακριβών διαδικασιών, δημιουργεί τη δυνατότητα μοντελοποίησης διάφορων και πολύπλοκων προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης. Επιπλέον, το τελευταίο αυτό χαρακτηριστικό επιτρέπει των συνδυασμό και τη συσσωμάτωση τους σε ενοποιημένες δομές, μεγεθύνοντας την αποτελεσματικότητά τους στην εύρεση ικανοποιητικών λύσεων.

Δεδομένου του μεγέθους της βιβλιογραφίας σχετικής με τα προτερήματα, τα μειονεκτήματα και τα γενικότερα χαρακτηριστικά των ευρετικών αλγορίθμων, θεωρείται άσκοπη η αναλυτική παρουσίαση τους στο συγκεκριμένο σημείο της εργασίας. Για το λόγο αυτό, στη παρούσα ενότητα πραγματοποιείται η κατηγοριοποίηση τους με βάση τις γενικές αρχές της λειτουργίας τους, παρουσιάζοντας εν συντομία χαρακτηριστικά παραδείγματα.

Ο Rørke (2006), προτείνει το διαχωρισμό των ευρετικών αλγορίθμων σε τρεις κατηγορίες. Σε αυτή των *κατασκευαστικών αλγορίθμων* (Construction Heuristics), των *αλγορίθμων βελτίωσης λύσεων* (Improvement Heuristics), και στη κατηγορία *μεθευρετικών αλγορίθμων* (Metaheuristics). Η σπουδαιότητα και η εκτεταμένη χρήση των μεθευρετικών αλγορίθμων σε προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης, απαιτεί τη παρουσίαση τους σε ξεχωριστή ενότητα. Έτσι, αυτή η ενότητα εστιάζει στις πρώτες δύο κατηγορίες προσεγγίσεων, χρησιμοποιώντας το θεωρητικό υπόβαθρο του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων για την ευκολότερη κατανόηση βασικών εννοιών.

- **Κατασκευαστικοί αλγόριθμοι - (Construction Heuristics)**

Η λειτουργία των κατασκευαστικών διαδικασιών βασίζεται στη σταδιακή ανάπτυξη μιας εφικτής λύσης όσο το δυνατό μικρότερου κόστους, χωρίς όμως τη παρουσία ενεργειών βελτίωσης της, εντός της αλγοριθμικής δομής. Αποτελούν μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν στις πρώτες προσπάθειες αντιμετώπισης του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων, ενώ επιστρατεύονται ακόμα και τώρα για την υλοποίηση της βάσης συνδυαστικών αλγορίθμων επίλυσης, που εφαρμόζονται σε γενικότερα προβλήματα δρομολόγησης. [6]

Ακολουθώντας την εκκίνηση τους από μια άδεια λύση, πραγματοποιείται η σταδιακή ανάπτυξη της, εισάγοντας επαναληπτικά πελάτες σε αυτή, με κριτήριο τερματισμού τη

πλήρη κάλυψη του συνόλου προς εξυπηρέτηση. Οι κατασκευαστικοί αλγόριθμοι μπορούν προσδιοριστούν πλήρως από τρεις παραμέτρους [6]. Συγκεκριμένα, από ένα κριτήριο αρχικοποίησης της λύσης, ένα κριτήριο με βάση το οποίο επιλέγεται ο πελάτης προς εισαγωγή στη δομή της λύσης, και τέλος ένα κριτήριο σχετικό με το σημείο της τοποθέτησης του εντός της.

Η συγκεκριμένη κατηγορία αλγορίθμων χρησιμοποιείται συνήθως για τη δημιουργία μιας αρχικής λύσης, με σκοπό τη βελτίωση της μέσω μιας άλλης ενδεδεδειγμένης, σειριακά εφαρμοζόμενης προγραμματιστικής δομής. Πριν όμως παρουσιαστούν οι αλγόριθμοι που εφαρμόζονται για τη βελτίωση αρχικών λύσεων, είναι σημαντικό να πραγματοποιηθεί ο διαχωρισμός των κατασκευαστικών αλγορίθμων με βάση τις γενικές αρχές λειτουργίας τους.

Οι **αλγόριθμοι εισαγωγής** κόμβων (Insertion Heuristics) δημιουργούν λύσεις με την επαναληπτική προσθήκη πελατών. Οι διαδικασίες προσθήκης μπορούν να εκτελεστούν σειριακά (Sequential Insertion Heuristics) ή παράλληλα (Parallel Insertion Heuristics) δημιουργώντας μεμονωμένες ή πολλαπλές διαδρομές αντίστοιχα [6]. Η διαφοροποίηση τους οφείλεται στον προσδιορισμό των κριτηρίων που σχετίζονται με την επιλογή και το σημείο της τοποθέτησης των πελατών, που αναφέρθηκαν νωρίτερα.

Ένα παράδειγμα αυτής της κατηγορίας αλγορίθμων είναι αυτός της σειριακής προσθήκης πελατών, των Mole και Jameson. Ο υπολογισμός της διαφοράς στο κόστος διαδρομής, κατά την τοποθέτηση ενός μη δρομολογημένου πελάτη k μεταξύ δύο διαδοχικών i, j , χρησιμοποιείται ως κριτήριο καθορισμού των κόμβων προς εισαγωγή και του σημείου τοποθέτησης τους. Το επιπλέον κόστος ορίζεται ως $a(i,k,j) = c_{ik} + c_{kj} - \lambda c_{ij}$, με λ μεταβλητή παράμετρο προς απόφαση.

Οι **αλγόριθμοι εξοικονομήσεων** (Saving Heuristics) βασίζονται στη κατασκευή μια αρχικής λύσης η οποία αποτελείται από διαδρομές ίσες σε αριθμό με αυτό των πελατών. Μια για κάθε ένα από αυτούς. Σε δεύτερο επίπεδο, ακολουθεί η ένωση των επιμέρους διαδρομών με βάση προκαθορισμένα κριτήρια. Τα κριτήρια αυτά σχετίζονται με το μέγεθος της εξοικονόμησης που προκύπτει από την ένωση τους, καθώς και από τον τρόπο όπου επιτυγχάνεται, αποτελώντας και εδώ τη βάση της μεταξύ τους διαφοροποίησης. Στα πλαίσια του VRP, η απλούστερη διαδικασία συγχώνευσης

υλοποιείται με τη διαγραφή μιας ακμής μεταξύ διαδοχικών πελάτων για κάθε μια από τις δύο διαδρομές προς ένωση, και με τη προσθήκη μιας ακμής μεταξύ των πελατών παρακείμενων πλέον σε μόνο μία.

Η έννοια των εξοικονομήσεων στην εφαρμογή των κατασκευαστικών αλγορίθμων παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τους Clarke και Wright το 1964. Ο ομώνυμος αλγόριθμος αποτελεί ίσως τη πιο διαδομένη και χρησιμοποιημένη προσέγγιση για την επίλυση προβλημάτων δρομολόγησης οχημάτων, με εφαρμογή σε αυτά όπου το μέγεθος του στόλου διανομής αποτελεί μεταβλητή απόφασης, διατηρώντας την αποτελεσματικότητα του στις περιπτώσεις προβλημάτων προσανατολισμένου και μη, δικτύου κόμβων [19]. Η αναλυτική περιγραφή της λειτουργίας του αλγορίθμου, και η εφαρμογή του στο ανοιχτό πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων πραγματοποιείται στο πέμπτο κεφάλαιο.

Το βασικό χαρακτηριστικό των **αλγορίθμων συσταδοποίησης** (Clustering Heuristics) αποτελεί η εκτέλεση τους σε δύο σκέλη. Στο πρώτο, ο διαμοιρασμός του συνόλου των πελατών προς εξυπηρέτηση, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία υποσυνόλων όπου σε κάθε ένα από αυτά αναθέτεται μια διαδρομή. Στο δεύτερο σκέλος, δημιουργούνται οι διαδρομές για κάθε υποσύνολο. Σε μεθόδους όπου πραγματοποιείται ιεραρχικά η ομαδοποίηση των πελατών και η δρομολόγηση των οχημάτων (Cluster-First-Route-Second), οι πελάτες αρχικά συγκεντρώνονται σε συστάδες ενώ έπειτα, καθορίζονται οι επιμέρους διαδρομές σχεδιάζοντας τη κατάλληλη ακολουθία εξυπηρέτησης των πελατών για κάθε υποσύνολο. Αξίζει να σημειωθεί πως ένα τρίτο σκέλος μπορεί να εφαρμοστεί στη λειτουργία αυτών των αλγορίθμων, με σκοπό την επισκευή της λύσης σε περίπτωση δημιουργίας μη εφικτών διαδρομών για την εξυπηρέτηση των πελατών της κάθε συστάδας [31].

Χαρακτηριστικό παράδειγμα των αλγορίθμων συσταδοποίησης αποτελεί η πρόταση των Fisher και Jaikumar η οποία παρουσιάστηκε το 1981. Με προκαθορισμένο μέγεθος στόλου των οχημάτων ίσο με K , επιλέγεται ένας αριθμός κεντρικών πελατών (Seed Customers) k , από το αρχικό σύνολο. Για κάθε εναπομείναντα πελάτη i , υπολογίζεται η τιμή μιας συνάρτησης κόστους σύνδεσης του πελάτη i με κάποιο κεντρικό k , ως d_{ik} . Ακολουθεί η επίλυση ενός γενικευμένου προβλήματος ανάθεσης βάση των αποστάσεων αυτών, με αποτέλεσμα τη δημιουργία K συστάδων πελατών των οποίων

η εξυπηρέτηση κρίνεται εφικτή υπό τους εκάστοτε περιορισμούς του προβλήματος. Τέλος, για την εξαγωγή των λύσεων σχεδιάζεται η δρομολόγηση των οχημάτων με ένα προς ένα αναλογία μεταξύ αυτών και των επιμέρους συστάδων.

- **Αλγόριθμοι βελτίωσης λύσεων - (Improvement Heuristics)**

Οι αλγόριθμοι βελτίωσης λύσεων γνωστοί και ως *αλγόριθμοι τοπικής αναζήτησης* (Local Search Heuristics), χρησιμοποιούν μια δεδομένη αρχική λύση μετατρέποντας τη μέσω μιας σειράς μηχανισμών, με σκοπό τη δημιουργία μιας νέας βελτιωμένης. Οι μηχανισμοί αυτοί λειτουργούν με την ανταλλαγή τόξων ή και τη μετακίνηση πελατών, στοχεύοντας στην προσέγγιση γειτονικών λύσεων πιθανώς βελτιωμένου κόστους. [6]

Βασική έννοια στη λειτουργία των αλγορίθμων της συγκεκριμένης κατηγορίας είναι αυτή της τρέχουσας λύσης. Προσδιορίζοντας τη μεταβολή που υφίσταται κατά τη μετάβαση από την τρέχουσα σε μια προτεινόμενη, η λύση εξισώνεται με τη τελευταία εάν ικανοποιούνται ορισμένα κριτήρια. Πιο συγκεκριμένα, αν μια από τις αλλαγές οδηγεί σε μια νέα βελτιωμένη και εφικτή, η τρέχουσα λύση αντικαθίσταται, με τη διαδικασία αυτή να εκτελείται επαναληπτικά. Προηγμένες διαδικασίες τοπικής αναζήτησης επιτρέπουν τροποποιήσεις που οδηγούν σε προσωρινή χειροτέρευση των λύσεων, με σκοπό αποφυγή τοπικών ελαχίστων και τη εξαγωγή αποτελεσμάτων που προσεγγίζουν το βέλτιστο στα τελευταία στάδια της εκτέλεσης τους. [31] Περισσότερες λεπτομέρειες αυτών των χαρακτηριστικών τοποθετούνται στην επόμενη ενότητα.

Στα πλαίσια του VRP, οι αλγόριθμοι τοπικής αναζήτησης μπορούν να εφαρμοστούν σε μεμονωμένες ή και πολλαπλές διαδρομές, δημιουργώντας μικρότερες ή μεγαλύτερες γειτονίες λύσεων αντίστοιχα. Στη πρώτη περίπτωση, οι συνηθέστεροι μηχανισμοί βελτίωσης της λύσης είναι οι λ-opt διαδικασίες, όπου λ σε αριθμό ακμές αφαιρούνται από τη δομή της λύσης και τα εναπομείναντα λ τμήματα της αναδιοργανώνονται με όλους τους δυνατούς τρόπους. Η εξέταση όλων των εφικτών εναλλακτικών αναδιοργάνωσης της λύσης δημιουργεί δύο στρατηγικές εκτέλεσης των αλγορίθμων τοπικής αναζήτησης. Πιο συγκεκριμένα, με βάση τους σκοπούς της επίλυσης του προβλήματος μπορεί είτε να επιλεγθεί η πρώτη μετατροπή η οποία βελτιώνει την λύση (First Improving), είτε να επιλεγθεί αυτή που αποφέρει τη βέλτιστη επιθυμητή μεταβολή στη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (Best Improving). [19]

Η χρήση μηχανισμών τοπικής αναζήτησης πολλαπλών διαδρομών, είναι απαραίτητη για την εξερεύνηση του χώρου των λύσεων με επάρκεια και την εξαγωγή ικανοποιητικών αποτελεσμάτων [20]. Μια διαδεδομένη τεχνική βελτίωσης των λύσεων αυτής της κατηγορίας, αποτελεί η αφαίρεση ενός αριθμού διαδοχικών πελατών από τη διαδρομή στην οποία έχουν εισαχθεί, και η επανατοποθέτηση τους σε κάποια άλλη (Relocate). Άλλες διαδικασίες εκτελούνται με την ανταλλαγή διαδοχικών πελατών μεταξύ δύο διαδρομών (Exchange), ή την αφαίρεση ενός αριθμού τόξων από πολλαπλές διαδρομές, και την επανασύνδεση τους με διαφορετικό τρόπο (Opt*).

Ο Van Breedam (1994), προσδιορίζει τις παραμέτρους που επηρεάζουν τη συμπεριφορά των αλγορίθμων τοπικής αναζήτησης. Το σύνολο αυτών των παραμέτρων αποτελεί, (1) η ποιότητα της αρχικής λύσης ανάλογα τα δεδομένα που μορφοποιούν το πρόβλημα. (2) Ο αριθμός των πελατών, των οποίων η θέση μεταβάλλεται κατά τη διαδικασία βελτίωσης της λύσης και τέλος, (3) η στρατηγική εφαρμογής τους (First Improving ή Best Improving). Επιπλέον, ο ίδιος συνοψίζει τις διάφορες κινήσεις των μηχανισμών τοπικής αναζήτησης ως εξής:

- **Ανταλλαγή (String Exchange):** Ένας αριθμός διαδοχικών πελατών ανταλλάσσεται μεταξύ δύο διαδρομών της λύσης.
- **Διασταύρωση (String Cross):** Διαδοχικοί πελάτες ανταλλάσσονται με τη διασταύρωση δύο τόξων από δύο επιμέρους διαδρομές.
- **Επανατοποθέτηση (String Relocation):** Επανατοποθέτηση ενός ή μιας ακολουθίας πελατών από μια επιμέρους διαδρομή, σε μια άλλη.

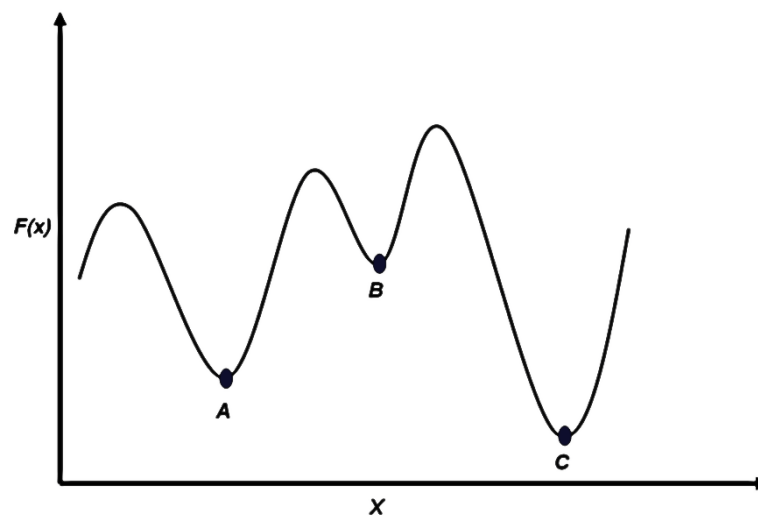
Για τη καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας αυτών των μηχανισμών, παρουσιάζονται στο πέμπτο κεφάλαιο εξειδικευμένα παραδείγματα αλγορίθμων τοπικής αναζήτησης, που χρησιμοποιήθηκαν για την επίλυση του ανοιχτού προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων.

4.3 Μεθευρετικοί αλγόριθμοι

Οι ευρετικοί αλγόριθμοι της προηγούμενης ενότητας αποτελούν απλές προσεγγίσεις για την εξαγωγή λύσεων σε όλα τα προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης, συμπεριλαμβανομένου του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων. Λειτουργούν επαναληπτικά, και χαρακτηρίζονται από *μυωπική συμπεριφορά* (Voß, 2001) . Με την

έναρξη της εκτέλεσης τους από μια εφικτή ή μη εφικτή λύση, σε κάθε επανάληψη τους προσδιορίζεται το πλήθος των εναλλακτικών κινήσεων για τη μετατροπή της τρέχουσας λύσης. Από αυτό το σύνολο των διαθέσιμων μετατροπών, λόγω της *αρχής της απληστίας* στην οποία βασίζεται η λειτουργία τους, επιλέγεται συνήθως η εναλλακτική η οποία προσφέρει το καλύτερο αποτέλεσμα με βάση ένα προκαθορισμένο μέτρο αξιολόγησης της λύσης, το οποίο αποτελεί συχνά η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος. Η διαδικασία εκτελείται επαναληπτικά μέχρι το σημείο της εξάντλησης αυτών των κινήσεων.

Με την εφαρμογή αυτής της άπληστης στρατηγικής επιλογής εναλλακτικών (Steepest Descent), εκτελείται σε κάθε επανάληψη η βέλτιστη διαθέσιμη κίνηση, με τη διαδικασία αναζήτησης συχνά να συναντά μια *τοπικά βέλτιστη* λύση. Στη περίπτωση όπου η τιμή αυτού του τοπικού βέλτιστου είναι μη ικανοποιητική, μηχανισμοί καθοδήγησης της αναζήτησης θεωρούνται αναγκαίοι για να ξεπεραστεί αυτό το φράγμα που δημιουργείται ως αποτέλεσμα της φύσης των ευρετικών αλγορίθμων. (Blum και Roli 2001)



Σχήμα 4-1. Χώρος αναζήτησης λύσεων προβλημάτων ελαχιστοποίησης: τοπικά και ολικά βέλτιστες λύσεις. (Πηγή: Hosny, 2012)

Στη σύγχρονη βιβλιογραφία τοποθετείται ένα μεγάλο πλήθος ορισμών των μεθευρετικών αλγορίθμων. Η συγκέντρωση και η παρουσίαση του συνόλου τους από διάφορες πηγές, τοποθετείται εκτός το αντικείμενου της διπλωματικής εργασίας. Ωστόσο, στα επόμενα σημεία υλοποιείται μια προσπάθεια παρουσίασης των αρχών της λειτουργίας τους και των χαρακτηριστικών που τους καθιστούν σημαντικούς και ευρέως

διαδεδομένους για την επίλυση προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης. Τέλος, πραγματοποιείται η κατηγοριοποίηση τους και δίνονται σημαντικά παραδείγματα. Από τη δημοσίευση των Blum και Roli (2001), συγκεντρώνονται τα επόμενα σημεία σχετικά τη φύση των μεθευρετικών αλγορίθμων.

Σύμφωνα με τον Stützle (1999), οι μεθευρετικοί αλγόριθμοι αποτελούν ανώτερες στρατηγικές οι οποίες καθοδηγούν τη λειτουργία υποκείμενων εξειδικευμένων ευρετικών διαδικασιών. Βασικό στόχο κατά την εφαρμογή τους σε προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης, αποτελεί η αποφυγή των μειονεκτημάτων των προσεγγίσεων της επαναληπτικής βελτίωσης λύσεων, δημιουργώντας τη δυνατότητα απεγκλωβισμού από τοπικά βέλτιστες λύσεις. Αυτό πραγματοποιείται με την αποδοχή κινήσεων που καθιστούν τη νέα λύση χειρότερη, ή με τη δημιουργία νέων λύσεων προς βελτίωση με πιο “έξυπνο” τρόπο, συγκριτικά με τη χρήση τυχαίων παραμέτρων για τη παραγωγή τους.

Ο Voß (1999) περιγράφει τους μεθευρετικούς αλγόριθμους ως μια ανώτερη επαναληπτική διαδικασία, η οποία καθοδηγεί και χειρίζεται τη λειτουργία υφιστάμενων ευρετικών αλγορίθμων, με σκοπό την αποτελεσματική εξαγωγή λύσεων υψηλής ποιότητας. Η διαδικασίες αυτές επιπλέον, κατέχουν την ικανότητα τροποποίησης μοναδικών ή και πολλαπλών λύσεων σε κάθε επανάληψη, ανεξάρτητα από το αν χαρακτηρίζονται ολοκληρωμένες ή ελλιπείς. Τέλος, οι υφιστάμενοι ευρετικοί αλγόριθμοι μπορεί να αποτελούν λειτουργίες υψηλής ή χαμηλής πολυπλοκότητας, όπως είναι ένας μηχανισμός τοπικής αναζήτησης ή μια κατασκευαστική μέθοδος.

Το Metaheuristics Network Website (2000), περιγράφει τους μεθευρετικούς αλγόριθμους αναδεικνύοντας την ικανότητα προσαρμογής τους σε διαφορετικά προβλήματα διαφορετικών παραμέτρων μοντελοποίησης. Πιο συγκεκριμένα, οι μεθευρετικοί αλγόριθμοι βασίζονται σε έννοιες οι οποίες χαρακτηρίζουν ευρετικές διαδικασίες, κατάλληλες για εφαρμογή σε διαφορετικά προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης. Αποτελούν ένα εύπλαστο πλαίσιο λειτουργίας αλγοριθμικών δομών, το οποίο μπορεί να διαμορφωθεί εύκολα, και με λίγες μετατροπές είναι ικανό να προσαρμοστεί ανάλογα, για την αντιμετώπιση εξειδικευμένων προβλημάτων.

Συμπληρωματικά, παρουσιάζονται τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των μεθευρετικών αλγοριθμικών δομών σύμφωνα με τους Blum και Roli (2001):

- Οι μεθευρετικοί αλγόριθμοι αποτελούν στρατηγικές ανωτέρου επιπέδου για την “καθοδήγηση” της διαδικασίας αναζήτησης.
- Σκοπό της εφαρμογής τους αποτελεί η αποτελεσματική εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης, για την όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση των βέλτιστων λύσεων.
- Η μοντελοποίηση τους περιλαμβάνει μηχανισμούς για την αποφυγή εγκλωβισμού σε τμήματα του χώρου αναζήτησης περιορισμένης έκτασης.
- Αποτελούν προσεγγιστικές διαδικασίες μη ντετερμινιστικού χαρακτήρα.
- Μορφοποιούνται εύκολα, κατέχοντας την ικανότητα αναπροσαρμογής για την επίλυση προβλημάτων διαφορετικής μοντελοποίησης.
- Οι τεχνικές που συντελούν τη βάση της λειτουργίας τους, εκτείνονται από απλούς μηχανισμούς τοπικής αναζήτησης, έως και πολύπλοκες διαδικασίες μάθησης βασιζόμενες σε δεδομένα προηγούμενου χρόνου με σκοπό τον έλεγχο της τροχιάς αναζήτησης.

Ερευνητές έχουν προτείνει τον διαχωρισμό και τη περιγραφή των μεθευρετικών αλγορίθμων με διάφορους τρόπους. Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά που εξετάζονται, δημιουργείται η δυνατότητα ανάλογης κατηγοριοποίησης. Λόγω του μεγάλου αριθμού των προτάσεων, επιλέγεται η παρουσίαση τους με βάση τη δημοσίευση των Gendreau και Potvin (2005).

Βάση του πλήθους των λύσεων που εξάγεται επαναληπτικά οι μεθευρετικοί αλγόριθμοι διακρίνονται σε αυτούς που χειρίζονται μεμονωμένες λύσεις (Single Solution Metaheuristics) και σε αυτούς που χειρίζονται ένα πληθυσμό λύσεων (Population Metaheuristics). Ακολουθούν παραδείγματα μεθευρετικών αλγορίθμων με ευρύ φάσμα εφαρμογής στο πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων. (Laporte, Røpke και Vidal, 2014)

<i>Πίνακας 4-1. Κατηγοριοποίηση μεθευρετικών αλγορίθμων</i>	
<i>Single Solution Metaheuristics</i>	<i>Population Metaheuristics</i>
Simulated Annealing (SA)	Ant Colony Optimization (ACO)
Deterministic Annealing (DA)	Genetic Algorithms (GAs)
Tabu Search (TS)	Scatter Search (SS)
Variable Neighborhood Search (VNS)	Path Relinking (PR)

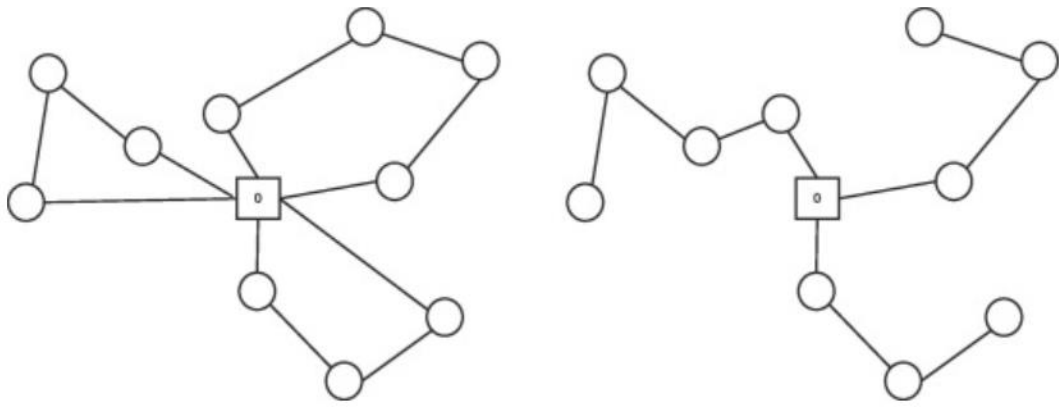
5. Ο ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΚΑΙ ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΠΡΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗ

Το συγκεκριμένο κεφάλαιο όπως και αυτά που ακολουθούν, παρουσιάζουν το πειραματικό τμήμα της μελέτης που εκπονήθηκε για την επίλυση του Ανοιχτού Προβλήματος Δρομολόγησης Οχημάτων (OVRP). Έτσι, στο σημείο αυτό δίνεται η περιγραφή του, ενώ παράλληλα πραγματοποιείται η μοντελοποίηση και παρουσιάζονται οι στόχοι της επίλυσης του στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας. Επιπλέον, παρουσιάζεται το σύνολο των αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκε για την εξαγωγή των λύσεων, περιγράφεται η λειτουργία τους, και δίνονται κάποια παραδείγματα της εκτέλεσης τους για τη καλύτερη κατανόηση του αναγνώστη.

5.1 Το ανοιχτό πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων

Όπως και στο κλασικό πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων, μελετάται ο βέλτιστος σχεδιασμός των διαδρομών ενός στόλου οχημάτων, με σκοπό την εξυπηρέτηση ενός συνόλου πελατών οι οποίοι χαρακτηρίζονται από γνωστές γεωγραφικές τοποθεσίες και τιμές ζήτησης. Κάθε διαδρομή αποτελείται από διαδοχικές στάσεις και παραδόσεις προϊόντων, με σημείο εκκίνησης την αποθήκη και πέρας τη τοποθεσία ενός πελάτη από το σύνολο προς εξυπηρέτηση.

Στα πλαίσια των προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης, η βασική διαφορά μεταξύ του κλασσικού CVRP και του OVRP έγκειται στη λύση του τελευταίου με το σχεδιασμό δρομολογίων τα οποία αντιπροσωπεύουν ανοικτές και όχι κλειστές διαδρομές Χάμιλτον (Hamiltonian Path). Η διαφορά αυτή οφείλεται στην απουσία συνθηκών οι οποίες επιβάλλουν την επιστροφή των οχημάτων στην αποθήκη, ακολουθώντας τον τερματισμό των διαδρομών τους. Σε αντίθετη περίπτωση, εντός των πλαισίων προβλημάτων στα οποία εμπλέκεται και η παραλαβή αγαθών, η επιστροφή τους σε αυτή πραγματοποιείται ακολουθώντας την ίδια διαδρομή που χρησιμοποιήθηκε για τη παράδοση των προϊόντων, αλλά με αντίθετη φορά. (Brandão, 2004)



Σχήμα 5-1. Σύγκριση λύσεων: VRP-OVRP. (Πηγή: [33])

Συχνά, η μοντελοποίηση των πλάνων διανομής προϊόντων μιας εταιρείας μέσω του OVRP, λαμβάνει χώρα όταν η ίδια δεν διαθέτει καθόλου τεχνικά στοιχεία και οχήματα για την υλοποίησή τους, ή όταν ο στόλος των διαθέσιμων οχημάτων χαρακτηρίζεται ανεπαρκής ή ακατάλληλος για την κάλυψη της ζήτησης των πελάτων (Sariklis και Powell, 2000). Έτσι, η εκάστοτε εταιρεία βρίσκεται υποχρεωμένη να συνεργαστεί με εξωτερικά μέσα για την εξ' ολοκλήρου ή τη μερική διανομή προϊόντων. Συνεπώς, τα οχήματα των συνεργατών της επιχείρησης εκτελούν δρομολόγια για την εξυπηρέτηση των πελατών, χωρίς να επιστρέφουν στην αποθήκη ή το κέντρο διανομής της.

Η ανάθεση των διαδικασιών διανομής προϊόντων σε συνεργάτες τρίτου μέρους (3rd Party Logistics Providers) αποτελεί στρατηγική αρκετών σύγχρονων εταιρειών [30]. Για παράδειγμα, στη περίπτωση μεταβαλλόμενης ζήτησης των πελατών σε βάθος χρόνου, η εφαρμογή και η επίλυση του OVRP θα έχει αποτέλεσμα την εύρεση της βέλτιστης αναλογίας μεταξύ των ιδιόκτητων και των ενοικιασμένων οχημάτων. Επιπλέον, το θεωρητικό πλαίσιο του προβλήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποτελεσματική λειτουργία επιχειρήσεων οι οποίες χαρακτηρίζονται από μεγάλα πελατολόγια. Η ενοικίαση οχημάτων συνδέεται με μεγαλύτερο χρηματικό κόστος ανά μονάδα απόστασης που διανύεται ωστόσο, σε αυτή τη περίπτωση απουσιάζουν κόστη που σχετίζονται με την απόκτηση και συντήρησή τους, καθώς και κόστη απόσβεσης.

Άλλες εφαρμογές του OVRP εντοπίζονται στο σχεδιασμό της δρομολόγησης τρένων, σχολικών οχημάτων για τη μεταφορά μαθητών, και αεροπλάνων για τη μεταφορά αλληλογραφίας. Τέλος, μελέτες περιπτώσεων χρησιμοποιούν τη μοντελοποίηση του OVRP για το σχεδιασμό της διανομής δεμάτων και εφημερίδων [30].

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί πως και το OVRP ανήκει στη κατηγορία των NP-Hard προβλημάτων. Η επίλυση τους όπως αναφέρθηκε, πραγματοποιείται με την εύρεση ανοικτών διαδρομών Χάμιλτον, ως αναγωγή των προβλημάτων εύρεσης κλειστών διαδρομών Χάμιλτον (Hamiltonian Cycle) τα οποία επίσης αποτελούν NP-Hard προβλήματα (Brandão, 2004). Για το λόγο αυτό η τελευταίες μελέτες για την επίλυση των OVRP προβλημάτων, επικεντρώνονται στη χρήση ευρετικών και μεθευρετικών αλγορίθμων. Λόγω της αύξησης της δημοσιότητας της συγκεκριμένης παραλλαγής, τα τελευταία χρόνια έχουν προταθεί πολλοί και διαφορετικοί αλγόριθμοι για την επίλυση του OVRP. Η αναλυτική παρουσίαση τους θεωρείται μη αναγκαία στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αλλά περισσότερες πληροφορίες μπορούν να βρεθούν στη δημοσίευση των [33], όπου πραγματοποιείται η πιο πλήρης και σύγχρονη σύνοψη των διάφορων μεθόδων που έχουν χρησιμοποιηθεί.

5.1.1 Περιγραφή του προβλήματος

Τα χαρακτηριστικά του προβλήματος το οποίο μελετά η παρούσα διπλωματική εργασία, συγκαταλέγονται στα ακόλουθα: Με σημείο έναρξης μια κεντρική αποθήκη, και δεδομένου ενός γεωγραφικά διασκορπισμένου σταθερού συνόλου πελατών, ένας στόλος οχημάτων αναλαμβάνει την κάλυψη της γνωστής και προκαθορισμένης ζήτησης τους, χωρίς την επιστροφή των οχημάτων στην αποθήκη. Το κόστος μετάβασης μεταξύ αυτών και της αποθήκης, καθώς και μεταξύ οποιουδήποτε ζεύγους πελατών είναι γνωστό.

Οι περιορισμοί που χαρακτηρίζουν το πρόβλημα έχουν ως εξής: Τα οχήματα διανομής κατέχουν κοινή τιμή χωρητικότητας. Ο χρόνος της διαδρομής του κάθε οχήματος χρειάζεται να μην υπερβαίνει μια ανώτατη τιμή, η οποία προσομοιάζει το νόμιμο χρόνο εργασίας του οδηγού. Η συνολική ζήτηση των πελατών προς εξυπηρέτηση σε ένα δρομολόγιο δεν μπορεί να υπερβαίνει τη χωρητικότητα του οχήματος. Τέλος, κάθε πελάτης εξυπηρετείται μια μόνο φορά από ένα μοναδικό όχημα, με τη πλήρη κάλυψη της ζήτησης του σε κοινό χρόνο εξυπηρέτησης.

Με βάση τη δημοσίευση των [33], ο καθορισμός του OVRP πραγματοποιείται μέσω ενός πλήρους γραφήματος $G = (V, A)$, όπου $V = \{0, 1, \dots, n\}$ το σύνολο το οποίο περιέχει τους κόμβους των τοποθεσιών της αποθήκης 0, και το υποσύνολο $V^+ = \{1, \dots, n\} \subset V$

μέσω του οποίου προσδιορίζονται οι τοποθεσίες των κόμβων των πελατών. Κάθε πελάτης v_i , $i = 1, \dots, n$ αντιστοιχίζεται με σταθερό χρόνο εξυπηρέτησης t , και μια θετική τιμή ζήτησης q_i προς κάλυψη. Κάθε τόξο $a = (i, j) \in A$ για τη μετάβαση από τον κόμβο i στον κόμβο j , αντιστοιχίζεται με ένα κόστος $c_{ij} > 0$, $\forall i \neq j$. Σε αυτό το σημείο σημειώνεται πως το κόστος μετάβασης ενός οχήματος μεταξύ οποιοδήποτε κόμβων, παραμένει σταθερό ανεξάρτητα από τη φορά της κίνησης, καθώς η επίλυση του OVRP στα πλαίσια της εργασίας θεωρεί τη συμμετρία αποστάσεων ($c_{ij} = c_{ji}$, $\forall i \neq j$).

Όπως προαναφέρθηκε, η συνολική ζήτηση των επιμέρους διαδρομών χρειάζεται να μην υπερβαίνει το κοινό όριο χωρητικότητας των οχημάτων $Q > 0$, ενώ ο αντίστοιχος χρόνος διαδρομής να μην παραβιάζει το ανώτερο φράγμα που τοποθετείται και συμβολίζεται με $T_m > 0$. Έτσι, σε μια εφικτή λύση του OVRP περιέχεται ένα σύνολο ανοικτών διαδρομών $R \subset A$ με σημείο εκκίνησης τον κόμβο της αποθήκης v_0 , οι οποίες ικανοποιούν τους περιορισμούς χωρητικότητας και μέγιστου χρόνου διαδρομής.

5.1.2 Μοντελοποίηση και στόχοι της επίλυσης

Στόχο της επίλυσης του OVRP στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η ελαχιστοποίηση της δύο επιπέδων αντικειμενικής συνάρτησης της μοντελοποίησης του. Έτσι αρχικά, η κατασκευή των αρχικών λύσεων αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του αριθμού των αναγκαίων διαδρομών, με την υπόθεση πως τα οχήματα διανομής εκτελούν ένα μοναδικό δρομολόγιο. Σε δεύτερο επίπεδο, δεδομένου πλέον ενός αριθμού διαθέσιμων οχημάτων, ελαχιστοποιείται η συνολική απόσταση που διανύεται από αυτά χωρίς την παραβίαση των περιορισμών που διατυπώθηκαν προηγουμένως. Ακολουθεί η μοντελοποίηση του με σκοπό την ελαχιστοποίηση της συνολικής διανυθείσας απόστασης όπου σύμφωνα με το σύγγραμμα των [41], θεωρούνται οι ακόλουθες μεταβλητές και παράμετροι:

Πίνακας 5-1. Μεταβλητές και παράμετροι μοντελοποίησης του OVRP	
K : Αριθμός διαθέσιμων οχημάτων	T_m : Μέγιστος χρόνος διαδρομής
n : Αριθμός κόμβων	q_i : Ζήτηση στον κόμβο i
Q : Χωρητικότητα οχημάτων	t_i^k : Χρόνος εξυπηρέτησης στον κόμβο i
t_{ij}^k : Χρόνος μετάβασης από τον κόμβο i στον j	c_{ij}^k : Κόστος μετάβασης από τον κόμβο i στον j
$x_{ij}^k = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$	Αν το όχημα k μεταβαίνει από τον κόμβο i στον j Αλλιώς

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^K c_{ij} x_{ij}^k \quad (5.1)$$

υπό

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^K x_{ij}^k = 1, \quad j = 2, \dots, n \quad (5.2)$$

$$\sum_{j=2}^n \sum_{k=1}^K x_{ij}^k = 1, \quad i = 2, \dots, n \quad (5.3)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ii1}^k - \sum_{j=2}^n x_{i1j}^k = 0, \quad \begin{matrix} k = 1, \dots, K \\ i_1 = 1, \dots, n \end{matrix} \quad (5.4)$$

$$\sum_{j=2}^n q_i \sum_{i=1}^n x_{ij}^k \leq Q, \quad k = 1, \dots, K \quad (5.5)$$

$$\sum_{j=2}^n t_i^k \sum_{i=1}^n x_{ij}^k + \sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^n t_{ij}^k x_{ij}^k \leq T_m, \quad k = 1, \dots, K \quad (5.6)$$

$$\sum_{j=2}^n x_{1j}^k \leq 1, \quad k = 1, \dots, K \quad (5.7)$$

$$\sum_{i=2}^n x_{i1}^k = 0, \quad k = 1, \dots, K \quad (5.8)$$

$$X \in S \quad (5.9)$$

$$x_{ij}^k \in [0,1], \quad \forall i, j, k \quad (5.10)$$

Η συνολική απόσταση που διανύεται από το σύνολο των οχημάτων εκφράζεται από την αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση (5.1), ενώ η συνθήκη εξυπηρέτησης του κάθε πελάτη από ένα μοναδικό όχημα επιβάλλεται από το συνδυασμό των εξισώσεων (5.2) και (5.3). Η συνθήκη διατήρησης της “ροής” των οχημάτων εξασφαλίζεται από την εξίσωση (5.4). Έτσι, αν ένα όχημα επισκεφθεί ένα κόμβο, θεωρείται αναγκαστική η αναχώρηση του από το ίδιο σημείο. Οι εξισώσεις (5.5) και (5.6) αντιπροσωπεύουν τους περιορισμούς χωρητικότητας και μέγιστου χρόνου διαδρομής των οχημάτων

αντίστοιχα. Τέλος οι συνθήκες μέσω των οποίων αποφεύγεται η παραβίαση της διαθεσιμότητας των οχημάτων, επιβάλλονται από τις εξισώσεις (5.7) και (5.8).

Με την επίλυση του προβλήματος θα παρουσιαστεί ο *ελάχιστος αριθμός αναγκαίων οχημάτων*, καθώς και οι αντίστοιχες *διαδρομές ελάχιστης έκτασης* που θα ακολουθήσουν για την εξυπηρέτηση ενός συνόλου πελατών. Ο διαδικασία εξαγωγής των λύσεων αντιμετωπίζοντας το πρόβλημα της διπλωματικής εργασίας, δομείται σε δύο σκέλη. Στο πρώτο, με σκοπό τη κατασκευή αρχικών λύσεων και την ελαχιστοποίηση του αριθμού των αναγκαίων οχημάτων, χρησιμοποιείται ένας άπληστος ευρετικός αλγόριθμος βασισμένος στην έννοια των *εξοικονομήσεων* που παρουσιάστηκε στο τέταρτο κεφάλαιο. Στο δεύτερο σκέλος, δεδομένου ενός αριθμού διαθέσιμων οχημάτων, υλοποιείται ένας μεθευρετικός αλγόριθμος με σκοπό την βελτίωση των αρχικών λύσεων. Αποτελεί το σημαντικότερο τμήμα της συγκεκριμένης μελέτης του OVRP, με στόχο της εφαρμογής του την ελαχιστοποίηση της έκτασης που καλύπτεται από τις διαδρομές που δημιουργήθηκαν στο πρώτο σκέλος της λύσης.

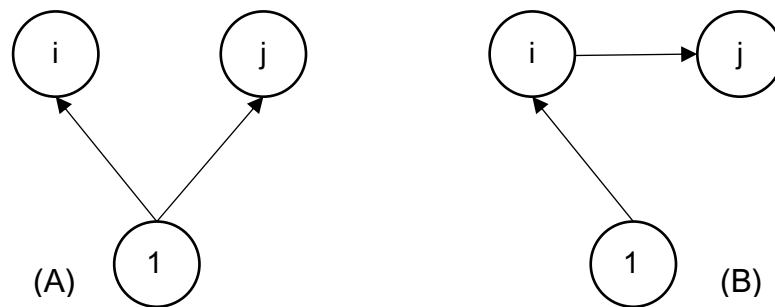
5.2 Ο αλγόριθμος των εξοικονομήσεων

Ο ευρετικός αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για τη κατασκευή των αρχικών λύσεων, είναι αυτός των Clarke & Wright (CW). Βασίζεται στην έννοια των εξοικονομήσεων η οποία παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1964, και περιγράφει την επαναληπτική συνένωση διαδρομών μέχρι κάποιο κριτήριο τερματισμού. Χαρακτηρίζεται από εύρος εφαρμογών για την επίλυση προβλημάτων δρομολόγησης, ενώ λόγω της απλότητας και της ταχύτητας του στην εξαγωγή λύσεων αποτελεί τη βάση πολλών εμπορικών πακέτων βελτιστοποίησης δρομολόγησης οχημάτων.

Ο λειτουργία του συγκεκριμένου αλγορίθμου βασίζεται σε ευρετικές προσεγγίσεις για την επίλυση των προβλημάτων δρομολόγησης, με αποτέλεσμα την απόκλιση από τη βέλτιστες δυνατές λύσεις. Ωστόσο, λόγω της δυνατότητας του στην παροχή ικανοποιητικών αρχικών λύσεων, αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία εφαρμόζεται ο μεθευρετικός αλγόριθμος που υλοποιείται στη συγκεκριμένη μελέτη με σκοπό τη βελτιστοποίηση τους.

Στα πλαίσια του OVRP, η βασική έννοια των εξοικονομήσεων περιγράφεται από τη μείωση του κόστους μετάβασης που δημιουργείται από την συνένωση δύο ανοικτών

διαδρομών όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2, όπου ο κόμβος 1 αντιπροσωπεύει τη τοποθεσία της αποθήκης.



Σχήμα 5-2. Η έννοια των εξοικονομήσεων για το OVRP.

Αρχικά στο Σχήμα 5.2(A) οι πελάτες i και j εξυπηρετούνται σε διαφορετικές διαδρομές. Εναλλακτικά, υπάρχει η επιλογή της εξυπηρέτησης τους σειριακά με τη χρήση ενός μόνο οχήματος όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2(B). Δεδομένου του κόστους μετάβασης μεταξύ οποιουδήποτε ζεύγους κόμβων, είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός της εξοικονόμησης κόστους συγκρίνοντας τις δύο επιλογές που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.2. Με κόστος μετάβασης μεταξύ δύο σημείων i και j ως c_{ij} , το συνολικό κόστος δρομολόγησης στα Σχήματα 5.2(A) και 5.2(B) αντίστοιχα υπολογίζονται ως εξής: $C_a = c_{1i} + c_{1j}$, $C_b = c_{1i} + c_{ij}$. Έτσι, η εξοικονόμηση του κόστους ως αποτέλεσμα τη συνένωσης των δύο διαδρομών, υπολογίζεται με την αφαίρεση των C_a και C_b .

$$S_{ij} = C_a - C_b = c_{1j} - c_{ij} \quad (5.11)$$

Η αρχικοποίηση του αλγορίθμου περιγράφει την εξυπηρέτηση των πελατών από ξεχωριστά οχήματα. Είναι προφανές πως το τελευταίο δεν αποτελεί εφικτή λύση, καθώς ένας στόλος n οχημάτων είναι απαραίτητος, με αναλογία ένα προς ένα για την εξυπηρέτηση του κάθε πελάτη. Έτσι, οι αρχικές διαδρομές συνδυάζονται επαναληπτικά με κριτήριο την εξοικονόμηση του κόστους που προκύπτει από την εξυπηρέτηση του ίδιου συνόλου πελατών με τη χρήση ενός οχήματος αντί για δύο. Σε κάθε επανάληψη πραγματοποιείται η εφικτή συνένωση δύο διαδρομών οι οποίες οδηγούν στη μεγαλύτερη τιμή εξοικονόμησης κόστους του πλάνου δρομολόγησης. Τέλος, η ευρετική διαδικασία τερματίζεται όταν εξαντλείται η δυνατότητα συνένωσης δύο διαδρομών που οδηγεί σε κάποια εξοικονόμηση ($S_{ij} > 0$).

5.2.1 Βήματα της εφαρμογής

Η υλοποίηση του αλγορίθμου των Clarke και Wright για το OVRP πραγματοποιείται σε δύο εκδοχές. Η ακολουθητική εκδοχή εστιάζει στη κατασκευή ακριβώς μιας λύσης επαναληπτικά, ενώ στη παράλληλη εκδοχή μελετάται η κατασκευή πολλαπλών διαδρομών. Η αναλυτική περιγραφή των δύο εκδοχών κρίνεται μη αναγκαία, ωστόσο για τους σκοπούς της παρουσίασης της ιδέας του αλγορίθμου, δίνονται τα βήματα της γενικής εφαρμογής του σύμφωνα με το σύγγραμμα των [41].

Βήματα εφαρμογής του αλγορίθμου Clarke & Wright

Βήμα 1^ο

Για όλα τα ζεύγη κόμβων i, j όπου $i \neq j$ υπολογίζεται η τιμή της εξοικονόμησης χρησιμοποιώντας την εξίσωση 5.11.

Βήμα 2^ο

Οι τιμές των εξοικονομήσεων κατατάσσονται σε μία λίστα κατά φθίνουσα σειρά.

Βήμα 3^ο

Επιλέγεται ο δεσμός που περιγράφεται από την εξοικονόμηση που τοποθετείται στη κορυφή της λίστας.

Παράλληλη εκδοχή

Βήμα 4^ο

Εξετάζεται η ένωση που έχει επιλεχθεί. Πιο συγκεκριμένα διερευνάται η παραβίαση των περιορισμών υπό των οποίων λύνεται το πρόβλημα δρομολόγησης. Στη περίπτωση όπου ικανοποιούνται, ο δεσμός γίνεται αποδεκτός, αλλιώς απορρίπτεται.

Βήμα 5^ο

Εξετάζεται ο επόμενος δεσμός της λίστας και επαναλαμβάνεται το 4^ο βήμα μέχρι το σημείο της εξάντλησης όλων των πιθανών ενώσεων που οδηγούν σε κάποια εξοικονόμηση κόστους.

Ακολουθητική εκδοχή

Βήμα 4^ο

Εντοπίζεται ο πρώτος εφικτός δεσμός ο οποίος περιγράφεται από τη λίστα των εξοικονομήσεων με σκοπό τη επέκταση της διαδρομής που επιλέγεται στο 3^ο βήμα.

Βήμα 5^ο

Ελέγχεται η εφικτότητα της περεταίρω επέκτασης της τρέχουσας διαδρομής. Στη περίπτωση της αδυναμίας επέκτασης, η διαδρομή ολοκληρώνεται και επιλέγεται ο πρώτος εφικτός δεσμός της λίστας για τη δημιουργία μιας νέας διαδρομής.

Βήμα 6^ο

Το 4^ο και το 5^ο βήμα επαναλαμβάνονται μέχρι το σημείο της εξάντλησης όλων των πιθανών δεσμών για την εξοικονόμηση κόστους.

Για τη καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του αλγόριθμου παρουσιάζεται ένα παράδειγμα της εφαρμογής του. Το παράδειγμα αυτό περιγράφει αναλυτικά τη διαδικασία που ακολουθείται για τη κατασκευή των αρχικών λύσεων της συγκεκριμένης μελέτης του OVRP.

5.2.2 Παράδειγμα εφαρμογής

Πριν από τη παρουσίαση του παραδείγματος, είναι αναγκαίο να διευκρινιστούν κάποια σημαντικά σημεία. Η αρχικοποίηση του αλγορίθμου πραγματοποιείται με τη δημιουργία ενός αριθμού ανοιχτών διαδρομών εξυπηρέτησης, μια για κάθε πελάτη. Στη συνέχεια, υπολογίζονται τα μεγέθη των εξοικονομήσεων που προκύπτουν από τη συνένωση κάθε ζεύγους ανοικτών διαδρομών σε ένα τετραγωνικό πίνακα. Ο υπολογισμός των εξοικονομήσεων με αυτόν τον τρόπο διαφέρει από τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε νωρίτερα, ωστόσο χρησιμοποιείται η ίδια εξίσωση (5.11), όπου σε αυτή τη περίπτωση οι πελάτες i, j αποτελούν τα άκρα των επιμέρους διαδρομών οι οποίοι θα τοποθετηθούν διαδοχικά μετά από τη συνένωση τους.

Επιπλέον, είναι αναγκαίο να διευκρινιστεί το κριτήριο επιλογής της μεθόδου της ένωσης. Στη περίπτωση δρομολογίων με παραπάνω από ένα πελάτη, δύο επιμέρους διαδρομές διαμορφώνονται ως εξής: $1 - \dots - i$, $1 - \dots - j$. Η ένωση τους πραγματοποιείται μέσω μιας διαδρομής υπό τη μορφή: $1 - \dots - i - j - \dots$, είτε με τη δημιουργία μιας $1 - \dots - i - \dots - j$ διαδρομής. Σε κάθε περίπτωση, οι αντίστοιχες εξοικονομήσεις υπολογίζονται, και υλοποιείται η συμφέρουσα ένωση. Ακολουθούν τα αριθμητικά δεδομένα του παραδείγματος.

- Αριθμός κόμβων: $n = 6$, Χρόνος εξυπηρέτησης: $t = 10$ (Μονάδες χρόνου)
- Χωρητικότητα οχημάτων: $Q = 80$ (Μονάδες χωρητικότητας)
- Μέγιστος χρόνος διαδρομής: $T_m = 90$ (Μονάδες χρόνου)

Πίνακας 5-2. Πίνακας αποστάσεων C_{ij}						
C_{ij}	1	2	3	4	5	6
1	0	13.89	21.02	32.56	17.20	14.14
2	13.89	0	12.37	19.21	31.06	22.20
3	21.02	12.37	0	15.30	37.01	21.02
4	32.56	19.21	15.30	0	49.68	36.06
5	17.20	31.06	37.01	49.68	0	20.40
6	14.14	22.20	21.02	36.06	20.40	0

Πίνακας 5-3. Πίνακας ζήτησης d_i						
i	1	2	3	4	5	6
d_i	0	7	30	16	9	21

Όπως προαναφέρθηκε, η εκκίνηση του αλγορίθμου πραγματοποιείται με τη δημιουργία ενός αριθμού διαδρομών, μια για κάθε πελάτη. Με την αποθήκη στον κόμβο $i = 1$, ακολουθεί η αρχικοποίηση των διαδρομών και των εξοικονομήσεων κάθε ζεύγους.

Πίνακας 5-4. Αρχικοποίηση διαδρομών R_i		
R_i		
1	1	2
2	1	3
3	1	4
4	1	5
5	1	6

Πίνακας 5-5. Αρχικοποίηση εξοικονομήσεων S_{ij}					
S_{ij}	1	2	3	4	5
1	-	8.65	13.35	-13.86	-8.06
2	1.52	-	17.26	-19.81	-6.88
3	-5.32	5.72	-	-32.48	-21.92
4	-17.17	-15.99	-17.1213	-	-6.26
5	-8.31	0	-3.50	-3.2	-

1^η Επανάληψη

Εξετάζεται η ένωση των διαδρομών η οποία προσδιορίζεται από τις συντεταγμένες του στοιχείου μέγιστης εξοικονόμησης. Έτσι, το στοιχείο $S_{23} = 17.26$ προσδιορίζει την ένωση της δεύτερης και τρίτης διαδρομής, R_2 και R_3 αντίστοιχα, ως τη κίνηση με το μεγαλύτερο όφελος στο συγκεκριμένο στάδιο κατασκευής της λύσης. Σε αυτό το σημείο σημειώνεται πως η ένωση των R_2 και R_3 παράγει διαφορετική τιμή εξοικονόμησης από αυτή των R_3 και R_2 , με αποτέλεσμα τη δημιουργία του μη συμμετρικού πίνακα εξοικονομήσεων. Για σκοπούς διευκρίνησης, ακολουθεί ο αναλυτικός υπολογισμός των στοιχείων S_{23} και S_{32} .

$$S_{23} = C_{13} + C_{14} - (C_{13} + C_{34}) = C_{14} - C_{34} = 32.56 - 15.30 = 17.26$$

$$S_{32} = C_{14} + C_{13} - (C_{14} + C_{43}) = C_{13} - C_{43} = 21.02 - 15.30 = 5.72$$

Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου, η εφικτότητα των εξεταζόμενων ενώσεων ελέγχεται βάση των δεδομένων της ζήτησης των πελατών, και των μεταξύ τους αποστάσεων. Έτσι, η ένωση των R_2 και R_3 θα έχει αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας νέας ανοικτής διαδρομής $1 \rightarrow 3 \rightarrow 4$, με τη συνολική ζήτηση του δρομολογίου να ανέρχεται σε $d_1 + d_3 + d_4 = 0 + 30 + 16 = 46 < Q$, και το συνολικό χρόνο της εκτέλεσης του ίσο με $C_{13} + t + C_{34} + t = 21.02 + 10 + 15.30 + 10 = 56.32 < T_m$. Συνεπώς, η εφικτότητα της ένωσης επιβεβαιώνεται και ακολουθώντας την υλοποίηση της νέας διαδρομής, ανανεώνονται οι πίνακες των διαδρομών και εξοικονομήσεων.

R_i			
1	1	2	
2	1	3	4
3	1	5	
4	1	6	

S_{ij}	1	2	3	4
1	-	8.65	-13.86	-8.06
2	-5.32	-	-32.48	-21.92
3	-17.17	-15.99	-	-6.26
4	-8.31	0	-3.20	-

2^η Επανάληψη

Με όμοιο τρόπο εξετάζεται η ένωση δύο διαδρομών χρησιμοποιώντας ως κριτήριο το μέγιστο στοιχείο των εξοικονομήσεων. Το στοιχείο $S_{12} = 8.65$ περιγράφει την εξοικονόμηση της ένωσης των διαδρομών R_1 και R_2 . Η δεύτερη διαδρομή όμως, εξυπηρετεί πλέον παραπάνω από ένα πελάτη. Για το λόγο αυτό, εξετάζονται οι δύο πιθανοί τρόποι υλοποίησης της ένωσης. Διευκρινίζοντας, ακολουθεί ο αναλυτικός υπολογισμός του στοιχείου S_{12} .

$$S_{12} = \text{Max}\{C_{12} + C_{13} + C_{34} - (C_{12} + C_{23} + C_{34}), C_{12} + C_{13} + C_{34} - (C_{12} + C_{24} + C_{43})\}$$

$$S_{12} = \text{Max}\{C_{13} - C_{23}, C_{13} - C_{24}\} = \text{Max}\{8.65, 1.81\} = 8.65$$

Η νέα ανοικτή διαδρομή $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ χαρακτηρίζεται από συνολική ζήτηση ίση με $d_1 + d_2 + d_3 + d_4 = 0 + 7 + 30 + 16 = 53 < Q$ και από συνολικό χρόνο εκτέλεσης $C_{12} + t + C_{23} + t + C_{34} + t = 13.89 + 10 + 12.37 + 10 + 15.30 + 10 = 71.56 < T_m$.

Με την υλοποίηση της ένωσης, ανανεώνονται οι πίνακες των διαδρομών και εξοικονομήσεων.

R_i				
1	1	2	3	4
2	1	5		
3	1	6		

S_{ij}	1	2	3
1	-	-32.48	-21.92
2	-17.17	-	-6.26
3	-8.31	-3.20	-

3^η Επανάληψη

Σε αυτό το σημείο η εκτέλεση του κλασσικού αλγορίθμου των Clarke & Wright θα τερματιζόταν καθώς απουσιάζουν θετικές τιμές εξοικονομήσεων. Έτσι, υποδεικνύεται πως η ένωση οποιουδήποτε ζεύγους διαδρομών αδυνατεί να δημιουργήσει περεταίρω εξοικονομήσεις στο κόστος δρομολόγησης. Ωστόσο, σκοπό της εφαρμογής του αλγορίθμου στη συγκεκριμένη μελέτη, αποτελεί η ελαχιστοποίηση των αναγκών

οχημάτων. Συνεπώς το κριτήριο τερματισμού της εκτέλεσης του συναντάται όταν η υλοποίηση περεταίρω ενώσεων χαρακτηρίζεται αδύνατη λόγω των *περιορισμών χωρητικότητας και μέγιστου χρόνου διαδρομής*.

Η αρνητική τιμή του μέγιστου στοιχείου του πίνακα εξοικονομήσεων $S_{32} = -3.20$, υποδεικνύει πως η ένωση των διαδρομών R_3 και R_2 θα συμβάλλει στην αύξηση του κόστους δρομολόγησης, περιγράφοντας την εξυπηρέτηση των πελατών 6 και 5 σε ξεχωριστά δρομολόγια και όχι σε ένα, ως τη κίνηση με το μεγαλύτερο όφελος.

$$S_{32} = C_{16} + C_{15} - (C_{16} + C_{56}) = C_{15} - C_{56} = 17.20 - 20.40 = -3.20$$

Ωστόσο η νέα διαδρομή $1 \rightarrow 6 \rightarrow 5$ εκτελείται με τη συνολική ζήτηση του δρομολογίου ίση με $d_1 + d_6 + d_5 = 0 + 21 + 9 = 30 < Q$ και το χρόνο περάτωσης της να ανέρχεται σε $C_{16} + t + C_{65} = 14.15 + 10 + 20.40 + 10 = 54.54 < T_m$. Έτσι, η ένωση υλοποιείται και ακολουθεί η ανανέωση του πίνακα διαδρομών και εξοικονομήσεων.

R_i				
1	1	2	3	4
2	1	6	5	

S_{ij}	1	2
1	-	-21.92
2	-17.17	-

4^η Επανάληψη

Με τον ίδιο τρόπο εξετάζεται η ένωση των διαδρομών R_2 και R_1 καθώς το στοιχείο S_{21} κατέχει τη μεγαλύτερη τιμή στον πίνακα εξοικονομήσεων. Η υποψήφια προς δημιουργία διαδρομή $1 \rightarrow 6 \rightarrow 5 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4$ χαρακτηρίζεται από συνολική ζήτηση ίση με $d_1 + d_6 + d_5 + d_2 + d_3 + d_4 = 0 + 21 + 9 + 7 + 30 + 16 = 83 < Q$, καθώς και από συνολικό χρόνο εκτέλεσης: $C_{16} + t + C_{65} + t + C_{52} + t + C_{23} + t + C_{34} + t = 14.14 + 10 + 20.40 + 10 + 31.06 + 10 + 12.37 + 10 + 15.30 + 10 = 143.27 > T_m$.

Η παραβίαση του περιορισμού μέγιστου χρόνου διαδρομής οδηγεί στην απόρριψη της ένωσης και στην ανανέωση του πίνακα εξοικονομήσεων.

S_{ij}	1	2
1	-	-21.92
2	-	-

5^η Επανάληψη

Τέλος, η τελευταία προς εξέταση ένωση περιγράφει την ένωση των διαδρομών R_1 και R_2 . Έτσι, η ζήτηση της διαδρομής $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 6 \rightarrow 5$ αποτελεί το άθροισμα της ζήτησης όλων των πελατών ισό με 83 μονάδες $< Q$. Ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης του: $C_{12} + t + C_{23} + t + C_{34} + t + C_{46} + t + C_{65} + t = 13.89 + 10 + 12.37 + 10 + 15.30 + 10 + 36.06 + 10 + 20.40 + 10 = 148.02 > T_m$ παραβιάζει τον περιορισμό του μέγιστου χρόνου διαδρομής, με αποτέλεσμα την απόρριψη της ένωσης και τον τερματισμού του αλγορίθμου.

Πίνακας 5-6. Εφαρμογή του αλγορίθμου Clarke & Wright: Σύγκριση λύσεων							
Αρχικοποίηση			Τερματισμός				
R_i			R_i				
1	1	2	1	1	2	3	4
2	1	3					
3	1	4	2				
4	1	5		1	6	5	
5	1	6					
Αριθμός οχημάτων		5	Αριθμός οχημάτων		2		
Κόστος λύσης		98.81	Κόστος λύσης		76.10		

Τα κόστη των λύσεων κατά την αρχικοποίηση και τον τερματισμό του αλγορίθμου, υπολογίζονται αντίστοιχα από τα αθροίσματα που ακολουθούν:

$$C_{12} + C_{13} + C_{14} + C_{15} + C_{16} = 13.89 + 21.02 + 32.56 + 17.20 + 14.14 = 98.81$$

$$C_{12} + C_{23} + C_{34} + C_{16} + C_{65} = 13.89 + 12.37 + 15.30 + 14.14 + 20.40 = 76.10$$

Η διαφορά του κόστους μεταξύ των λύσεων, θεωρείται αμελητέα, ωστόσο η εφαρμογή του αλγορίθμου είχε ως αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση του αριθμού των αναγκαίων οχημάτων. Συνολικά, ο αλγόριθμος των εξοικονομήσεων χαρακτηρίζεται από ικανοποιητική συμπεριφορά στη κατασκευή αρχικών λύσεων, και για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται ως εναρκτήρια προσέγγιση για την επίλυση του OVRP.

5.3 Επιδιόρθωση αρχικών λύσεων

Όπως προαναφέρθηκε, η εφαρμογή του αλγορίθμου των εξοικονομήσεων στοχεύει στη δημιουργία αρχικών λύσεων και τη παράλληλη ελαχιστοποίηση των αναγκάων οχημάτων διανομής. Σε κάποιες όμως περιπτώσεις προβλημάτων (Κεφάλαιο 6) μέσω των οποίων διερευνάται η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου μεταβλητής γειτονιάς αναζήτησης, ο αριθμός των διαδρομών που δημιουργούνται με την εκτέλεση του Clarke & Wright, αποκλίνει και είναι μεγαλύτερος από τον ελάχιστο δυνατό βάσει των δεδομένων του εκάστοτε προβλήματος. Για το λόγο αυτό, όπου κρίνεται αναγκαίο, εφαρμόζονται σειριακά δύο διαδικασίες στις αντίστοιχες περιπτώσεις, οι οποίες αποσκοπούν στη περεταίρω μείωση του αριθμού των δρομολογίων. Ακολουθεί η περιγραφή των διαδικασιών επιδιόρθωσης των αρχικών λύσεων χρησιμοποιώντας ένα θεωρητικό παράδειγμα με $n = 25$ πελάτες.

5.3.1 1^η διαδικασία επιδιόρθωσης

Με τη κατασκευή της αρχικής λύσης μέσω του Clarke & Wright, επιλέγονται και αποσυντίθενται τα δρομολόγια που χαρακτηρίζονται από τις μεγαλύτερες τιμές συνολικής ζήτησης. Ο αριθμός των δρομολογίων προς διαγραφή προκαθορίζεται με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε μετά την απομάκρυνση τους από την αρχική δομή, να επιτευχθεί το επιθυμητό μέγεθος λύσης όσο αναφορά των αριθμό των οχημάτων διανομής. Οι πελάτες των διαδρομών που αφαιρούνται, τοποθετούνται σε μια δεξαμενή και κατατάσσονται με φθίνουσα σειρά βάση της αντίστοιχης τιμής ζήτησης τους. Οι εναπομείναντες διαδρομές της αρχικής λύσης κατατάσσονται και αυτές με αύξοντα τρόπο δεδομένου της συνολικής ζήτησης που καλύπτουν.

Διαδρομές					Φορτίο		Εναπομείναντες διαδρομές					Φορτίο	
1 → 9 → 21 → 10 → 6 → 26 → 15					122		1 → 23 → 7 → 25 → 3 → 12					86	
1 → 23 → 7 → 25 → 3 → 12					86								
1 → 18 → 16 → 19 → 20 → 4 → 24					110		1 → 17 → 2 → 11 → 13					97	
1 → 8 → 14 → 5 → 22					105		1 → 8 → 14 → 5 → 22					105	
1 → 17 → 2 → 11 → 13					97								
Δεξαμενή πελατών													
Πελάτες	20	9	6	19	26	4	10	21	15	24	16	18	
Ζήτηση	40	31	24	23	21	18	17	15	14	13	11	5	

Σχήμα 5-3. 1^η διαδικασία επιδιόρθωσης αρχικών λύσεων: 1^ο βήμα.

Στο θεωρητικό αυτό παράδειγμα ο επιθυμητός αριθμός δρομολογίων για την επίλυση του προβλήματος ανέρχεται σε τρία δρομολόγια. Έτσι, η πρώτη και τρίτη κατά σειρά διαδρομή διαγράφονται από την αρχική λύση. Με τη δημιουργία της δεξαμενής πελατών των αντίστοιχων διαδρομών, ο πρώτος κατά σειρά πελάτης επιλέγεται προς τοποθέτηση στη πρώτη κατά σειρά από τις εναπομείναντες διαδρομές. Οι περιορισμοί χωρητικότητας και μέγιστου χρόνου διαδρομής εξετάζονται σε όλα τα πιθανά σημεία, με τον πελάτη να τοποθετείται με εφικτό τρόπο στο σημείο που αυξάνει κατά το ελάχιστο το κόστος δρομολόγησης της επιλεγμένης διαδρομής. Η διαδικασία εκτελείται σειριακά με την εξέταση όλων των πιθανών συνδυασμών τοποθέτησης μεταξύ πελατών και εναπομεινάντων διαδρομών.

Εναπομείναντες διαδρομές				Φορτίο		
1 → 23 → 7 → 20 → 25 → 3 → 18 → 12				131		
1 → 17 → 4 → 2 → 21 → 11 → 13				130		
1 → 26 → 8 → 14 → 5 → 24 → 22				139		
Δεξαμενή πελατών						
Πελάτες	9	6	19	10	15	16
Ζήτηση	31	24	23	17	14	11

Σχήμα 5-4. 1η διαδικασία επιδιόρθωσης αρχικών λύσεων: 2^ο βήμα.

5.3.2 2^η διαδικασία επιδιόρθωσης

Στη περίπτωση όπου η πρώτη διαδικασία αποτύχει στη τοποθέτηση όλων των πελατών της δεξαμενής, καλείται η δεύτερη διαδικασία επιδιόρθωσης. Οι μηχανισμοί τοπικής αναζήτησης της επόμενης ενότητας εφαρμόζονται σειριακά, αλλάζοντας τη δομή των εναπομεινάντων διαδρομών, μειώνοντας το χρόνο των δρομολογίων, λόγο του οποίου δεν επιτρέπεται περεταίρω τοποθέτηση πελατών. Στη περίπτωση κάποιας μετατροπής η οποία επιφέρει μικρότερο κόστος δρομολόγησης σε μια διαδρομή, ένας πελάτης επιλέγεται με τυχαίο τρόπο και τοποθετείται εντός της χωρίς να παραβιάζονται οι περιορισμοί χωρητικότητας και μέγιστου χρόνου διαδρομής. Η διαδικασία συνεχίζεται επαναληπτικά μέχρι το σημείο της τοποθέτησης όλων των πελατών της δεξαμενής.

Επιδιορθωμένη λύση	
1 → 7 → 21 → 15 → 25 → 19 → 16 → 12 → 3 → 6	
1 → 5 → 2 → 24 → 8 → 26 → 10 → 22 → 11	
1 → 20 → 18 → 14 → 4 → 17 → 9 → 23 → 13	

Σχήμα 5-5. 2η διαδικασία επιδιόρθωσης αρχικών λύσεων.

5.4 Ο αλγόριθμος μεταβλητής γειτονιάς αναζήτησης

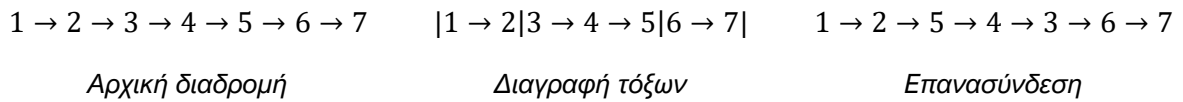
Η μεθυστική διαδικασία που υλοποιείται σε δεύτερο στάδιο για τη βελτιστοποίηση των λύσεων, αποτελείται από ένα αλγόριθμο μεταβλητής γειτονιάς αναζήτησης. Η ιδέα της δυναμικής αναζήτησης λύσεων σε γειτονιές μεταβλητού μεγέθους (Variable Neighborhood Search – (VNS)) προτάθηκε από τους Hansen και Mladenović (2001), και λόγω του μεγάλου αριθμού των βαθμών ελευθερίας του αλγορίθμου, υπάρχει η δυνατότητα τροποποίησης του με σκοπό τη δημιουργία διαφορετικών, πιο εξειδικευμένων παραλλαγών. (Blum και Roli, 2001)

Κατά την αρχικοποίηση του αλγορίθμου, χαρακτηρίζεται αναγκαίως ο προσδιορισμός του συνόλου των δομών που περιγράφουν τις γειτονιές αναζήτησης λύσεων. Οι γειτονιές των λύσεων μπορούν να οριστούν αυθαίρετα, ωστόσο στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιείται μια ακολουθία γειτονιών $|N_1| < |N_2| < \dots |N_{kmax}|$, αυξανόμενης πληθικότητας. Ακολουθώντας το προσδιορισμό αυτών των δομών, ο αλγόριθμος εκτελείται για ένα προκαθορισμένο αριθμό επαναλήψεων που χαρακτηρίζονται από τρία στάδια: **ανακίνηση** (shaking), **τοπική αναζήτηση** (local search) και **κίνηση** (move). Τα στάδια του αλγορίθμου του θα παρουσιαστούν στη συνέχεια, ωστόσο απαιτείται η εκ των προτέρων περιγραφή των μηχανισμών που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία των γειτονικών λύσεων, με σκοπό τη διευκρίνιση των γενικότερων χαρακτηριστικών της λειτουργίας του.

5.4.1 Μηχανισμοί τοπικής αναζήτησης

Ο αριθμός των αλγορίθμων τοπικής αναζήτησης για την υλοποίηση του VNS ανέρχεται σε επτά και διαχωρίζονται σε μηχανισμούς επεξεργασίας *μεμονωμένων* και *πολλαπλών* διαδρομών στα πλαίσια μιας λύσης του OVRP. Η πρώτη κατηγορία αλγορίθμων επεξεργάζεται μια διαδρομή, ενώ η δεύτερη τροποποιεί ταυτόχρονα δύο διαδρομές, κατά την εκτέλεση της εκάστοτε διαδικασίας.

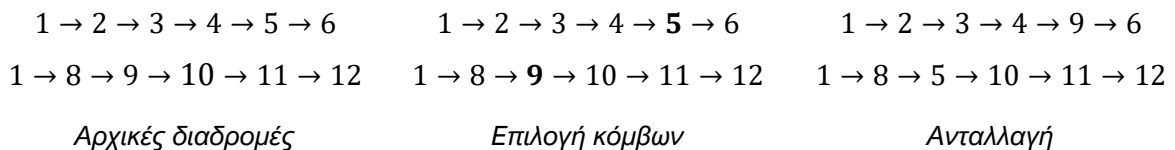
Ο αλγόριθμος **2-Opt** αποτελεί το μοναδικό μηχανισμό τοπικής αναζήτησης που χρησιμοποιείται για τη τροποποίηση μεμονωμένων διαδρομών. Δεδομένου της δομής μιας διαδρομής, η λειτουργία της μεθόδου βασίζεται στη διαγραφή δύο ακμών της και την επαναδιαμόρφωση της με διαφορετικό τρόπο. Ακολουθεί η σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του σε ένα παράδειγμα ανοικτής διαδρομής του OVRP.



Σχήμα 5-6. Αναπαράσταση 2-Opt.

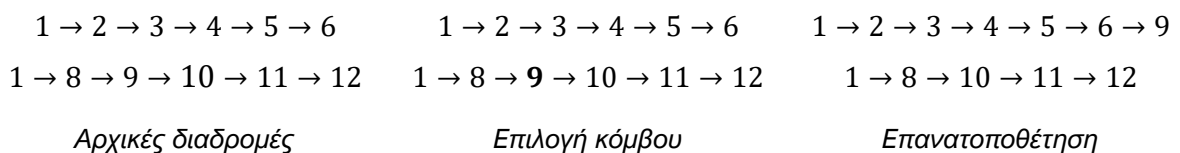
Σε αυτό το σημείο σημειώνεται πως η λειτουργία των αλγορίθμων τοπικής αναζήτησης που χρησιμοποιούνται, κατέχει ντετερμινιστικό χαρακτήρα. Η επιλογή των τόξων προς διαγραφή στη περίπτωση του αλγορίθμου 2-Opt δεν γίνεται με τυχαίο τρόπο, αλλά με βάση τη πρώτη εφικτή κίνηση που θα επιφέρει όφελος στο κόστος δρομολόγησης, με την ιδιότητα αυτή να περιγράφει όλους τους μηχανισμούς που παρουσιάζονται. Διευκρινήσεις ακολουθούν στη περιγραφή του σχεδίου *τοπικής αναζήτησης* του VNS.

Ο αλγόριθμος **1-1 Exchange** αποτελεί τον απλούστερο αλγόριθμο που χρησιμοποιείται για την ταυτόχρονη τροποποίηση δύο διαδρομών στην υλοποίηση του VNS. Η λειτουργία του βασίζεται στην ανταλλαγή ενός κόμβου μεταξύ ενός ζεύγους διαδρομών. Ακολουθεί η σχηματική αναπαράσταση του για ένα παράδειγμα ανοικτών διαδρομών.



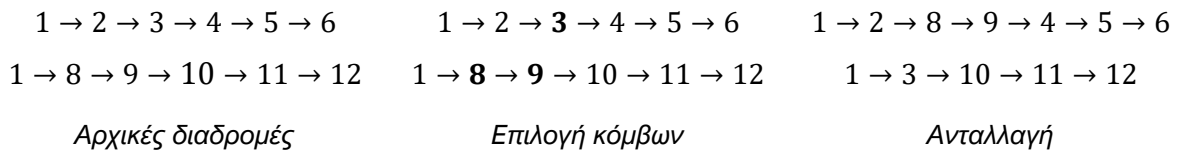
Σχήμα 5-7. Αναπαράσταση 1-1 Exchange.

Ο πρώτος μηχανισμός επανατοποθέτησης πελάτων που χρησιμοποιείται, αποτελείται από τον αλγόριθμο **1-0 Relocate**. Αυτή η απλή υφιστάμενη διαδικασία τοπικής αναζήτησης, εκτελείται με τη μεταφορά ενός κόμβου από μια διαδρομή σε μια δεύτερη δεδομένου μιας λύσης του OVRP.



Σχήμα 5-8. Αναπαράσταση 1-0 Relocate.

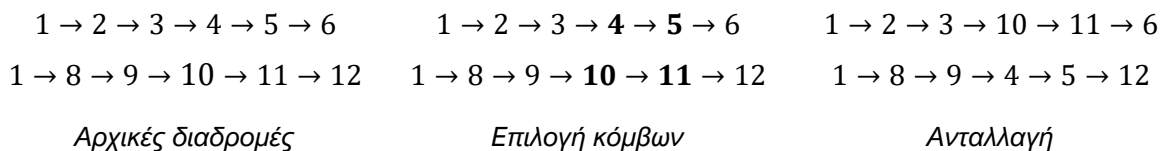
Συνεχίζοντας στα πλαίσια των μηχανισμών ανταλλαγής κόμβων, ο αλγόριθμος **2-1 Exchange** εκτελείται με τη μεταφορά ενός διαδοχικού ζεύγους πελατών από μια πρώτη διαδρομή σε μια δεύτερη, ακολουθώντας την τοποθέτηση ενός συγκεκριμένου κόμβου από την τελευταία στην αρχική.



Σχήμα 5-9. Αναπαράσταση 2-1 Exchange

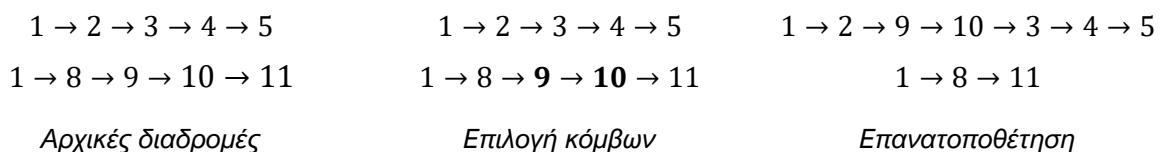
Οι επόμενοι τρεις και τελευταίοι μηχανισμοί τοπικής αναζήτησης χαρακτηρίζονται από την ικανότητα τους στη προσέγγιση μεγαλύτερων γειτονιών αναζήτησης λύσεων. Πιο συγκεκριμένα, λόγω της μεταφοράς πολλαπλών κόμβων μεταξύ δύο διαδρομών, μια λύση του OVRP μπορεί να διαφοροποιηθεί έντονα κατά την εκτέλεση τους. Η τροποποίηση της λύσης σε τέτοιο μέγεθος συνήθως οδηγεί σε υποβέλτιστα αποτελέσματα, και για το λόγο αυτό ο κύριος σκοπός της εφαρμογής τους στη συγκεκριμένη μελέτη είναι η επίτευξη ενός βαθμού αναταραχής της λύσης, για τη δημιουργία ενός νέου σημείου έναρξης τοπικής αναζήτησης. Περισσότερες λεπτομέρειες παρουσιάζονται στη περιγραφή του σχεδίου *ανακίνησης* του VNS.

Ο αλγόριθμος **2-2 Exchange** εκτελείται με την ανταλλαγή δύο ζευγών διαδοχικών πελατών μεταξύ δύο ανοικτών διαδρομών. Ακολουθεί η σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του.



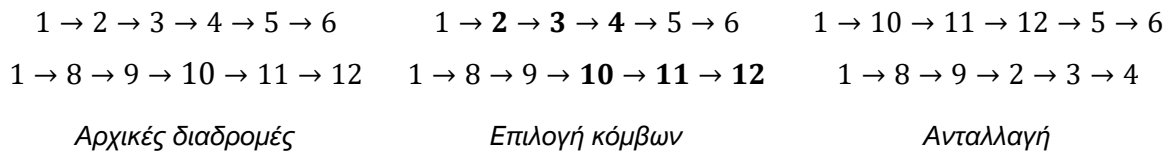
Σχήμα 5-10. Αναπαράσταση 2-2 Exchange.

Ο τελευταίος αλγόριθμος επανατοποθέτησης που χρησιμοποιείται για τη υλοποίηση του VNS, αποτελείται από ένα μηχανισμό μεταφοράς δύο διαδοχικών κόμβων από μια αρχική διαδρομή σε μια δεύτερη. Η λειτουργία του **2-0 Relocate** αναπαρίσταται στο Σχήμα 5.11 που ακολουθεί.



Σχήμα 5-11. Αναπαράσταση 2-0 Relocate.

Ο τελευταίος υφιστάμενος μηχανισμός τοπικής αναζήτησης, χαρακτηρίζεται από την μεγαλύτερη ικανότητα προσέγγισης γειτονιών ευρύτερου μεγέθους, μεταξύ όλων των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται. Έτσι, μια **3-3 Exchange** διαδικασία, εκτελείται με την ανταλλαγή τριών διαδοχικών κόμβων μεταξύ δύο διαδρομών. Ακολουθεί η αναπαράσταση της στο Σχήμα 5.12.



Σχήμα 5-12. Αναπαράσταση 3-3 Exchange.

Οι μηχανισμοί τοπικής αναζήτησης που παρουσιάστηκαν, περιγράφουν τα δομικά στοιχεία της λειτουργίας του αλγορίθμου μεταβλητής γειτονιάς αναζήτησης. Αποτελούν τις εξειδικευμένες ευρετικές διαδικασίες οι οποίες καθοδηγούνται από το σχέδιο της εκτέλεσης του VNS, για την εξερεύνηση του χώρου των λύσεων και τη βελτιστοποίηση τους. Η εφαρμογή τους χαρακτηρίζεται συστηματική ή από τυχαιότητα ανάλογα με τα στάδια της λειτουργίας του αλγορίθμου, τα οποία περιγράφονται στην επόμενη υποενότητα.

5.4.2 Ανακίνηση - τοπική αναζήτηση - κίνηση

Σε αντίθεση με άλλες μεθόδους διαδικασίες βασισμένες σε μεθόδους τοπικής αναζήτησης, κατά την εκτέλεση του VNS δεν ακολουθείται μια τροχιά μιας μεμονωμένης, αλλά πραγματοποιείται μια μεγάλου εύρους εξερεύνηση των γειτονιών της τρέχουσας λύσης (Hansen και Mladenović, 2001). Το κριτήριο αποδοχής μιας νέας λύσης σε αυτή τη μελέτη περιγράφεται από τη βελτίωση της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος, όπου στη συγκεκριμένη περίπτωση του OVRP, σκοπό αποτελεί η μείωση της έκτασης των δρομολογίων εξυπηρέτησης. Με αυτό το τρόπο ικανοποιητικά χαρακτηριστικά της τρέχουσας λύσης, όπως μεταβλητές που έχουν λάβει τη βέλτιστη δυνατή τιμή τους, διατηρούνται και χρησιμοποιούνται για τη εύρεση επιθυμητών γειτονικών λύσεων. Τέλος, ένα σχέδιο τοπικής αναζήτησης χρησιμοποιείται, επιστρατεύοντας όλους τους μηχανισμούς που παρουσιάστηκαν στη προηγούμενη υποενότητα, για την εύρεση των τοπικών ελαχίστων αυτών των γειτονικών λύσεων.

Έχοντας προσδιορίσει το σύνολο των διάφορων γειτονιών αναζήτησης μέσω των μηχανισμών που παρουσιάστηκαν $|N_1| < |N_2| < \dots |N_{kmax}|$, και τη δομή της αρχικής λύσης που δημιουργήθηκε από τον εφαρμογή του αλγορίθμου των Clarke & Wright, τα βήματα της εκτέλεσης του αλγορίθμου παρουσιάζονται μέσω ενός ψευδοκώδικα στο Σχήμα 5.13.

Αρχικοποίηση

Επέλεξε ένα σύνολο γειτονιών $N_k, k = 1, \dots, k_{max}$

Επέλεξε μια αρχική λύση s

Επανάλαβε τα ακόλουθα για ένα αριθμό επαναλήψεων:

Ανακίνηση. Μέσω της s , δημιούργησε μια τυχαία λύση s' με τη χρήση ενός σχεδίου ανακίνησης

Τοπική αναζήτηση. Εφάρμοσε ένα σχέδιο τοπικής αναζήτησης στη λύση s' , επισήμανε με s'' το τοπικό ελάχιστο που βρέθηκε

Κίνηση. Αν το τοπικό ελάχιστο υπερέχει της τρέχουσας λύσης, αντικατέστησε την ($s \leftarrow s''$)

Επέστρεψε τη βέλτιστη λύση.

Σχήμα 5-13. Βήματα του αλγορίθμου Μεταβλητής Γειτονιά Αναζήτησης (VNS).

Η διαδικασία ανακίνησης του VNS αποτελείται από τη δημιουργία μιας τυχαίας λύσης s' με την εφαρμογή των μεθόδων 2-0 Relocate, 3-3 Exchange, 2-2 Exchange και 1-0 Relocate, επαναληπτικά στην εκάστοτε τρέχουσα λύση. Σκοπό της διαδικασίας αποτελεί η αναταραχή της λύσης, για τη δημιουργία ενός επιθυμητού σημείου έναρξης του πλάνου τοπικής αναζήτησης που εφαρμόζεται στη συνέχεια. Πιο συγκεκριμένα, η λύση s' χρειάζεται να τοποθετηθεί στο σημείο της έλξης τοπικών ελαχίστων που διαφέρουν από το συγκεκριμένο, αλλά να μην διαφοροποιείται έντονα σε σχέση με την τρέχουσα λύση s , καθώς η διαδικασία ανακίνησης του αλγορίθμου με αυτό το τρόπο θα υποβαθμιζόταν σε μια τυχαιοποιημένη μέθοδο. Επιπλέον, η δημιουργία μιας λύσης s' στη γειτονιά της τρέχουσας, θα έχει πιθανώς ως αποτέλεσμα τη διατήρηση συγκεκριμένων επιθυμητών χαρακτηριστικών.

Διευκρινίζοντας, το σχέδιο ανακίνησης θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από ισορροπία μεταξύ των ιδιοτήτων διαταραχής της δομής και διατήρησης των επιθυμητών χαρακτηριστικών της λύσης. Δεδομένου μιας λύσης s για το OVRP, και των μηχανισμών ανταλλαγής και επανατοποθέτησης κόμβων που αναφέρθηκαν, ακολουθεί στο Σχήμα

5.14 ο ψευδοκώδικας του σχεδίου ανακίνησης που χρησιμοποιείται για την υλοποίηση του VNS.

Αρχικοποίηση

Επέλεξε ένα σύνολο γειτονιών για τη διαταραχή της τρέχουσας λύσης $N_l, l = 1, \dots, l_{max}$

Επέλεξε μια τρέχουσα λύση s

Επανάλαβε για ένα αριθμό επαναλήψεων

Επιλογή γειτονιάς. Μέσω μιας γεννήτριας αριθμών, διάλεξε ένα τυχαίο μηχανισμό τοπικής αναζήτησης

Επιλογή διαδρομών. Μέσω μιας γεννήτριας αριθμών, διάλεξε δύο τυχαίες διαφορετικές διαδρομές της λύσης s

Διαταραχή. Δεδομένου των επιλεγμένων διαδρομών και μηχανισμού, εφάρμοσε τη πρώτη εφικτή κίνηση στη λύση s , και αντικατέστησε την με το αποτέλεσμα s' ($s \leftarrow s'$)

Επέστρεψε τη λύση s' .

Σχήμα 5-14. Βήματα του σχεδίου ανακίνησης του VNS.

Ακολουθώντας την επιλογή μιας αρχικής λύσης δημιουργημένης μέσω του άπληστου ευρετικού αλγορίθμου των Clarke & Wright, εφαρμόζεται σε αυτή μια επανάληψη του σχεδίου τοπικής αναζήτησης που περιγράφεται αργότερα. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας επισημαίνεται ως η τρέχουσα λύση s του προβλήματος, και έτσι αρχικοποιείται το σχέδιο ανακίνησης του VNS. Όπως και ο βασικός αλγόριθμος, η περάτωση του σχεδίου ανακίνησης πραγματοποιείται μετά από την εκτέλεση ενός αριθμού επαναλήψεων. Η επιλογή αυτού του είδους συνθήκης τερματισμού επιτρέπει την εύκολη παραμετροποίηση του αλγορίθμου, διευκολύνοντας το χειρισμό των ιδιοτήτων *εντατικοποίησης* και *διαφοροποίησης* της λειτουργίας του. Περισσότερες λεπτομέρειες τοποθετούνται στο κεφάλαιο 6, με την εφαρμογή και τα αποτελέσματα του αλγορίθμου.

Με τη χρήση κατάλληλων γεννητριών αριθμών, επιτρέπεται η τυχαία επιλογή των διαφορετικών διαδρομών και των μηχανισμών δημιουργίας γειτονικών λύσεων, σε κάθε επανάληψη του σχεδίου. Σκοπό εφαρμογής αυτής της τυχαιοποιημένης μεθόδου και όχι κάποιας ντετερμινιστικού χαρακτήρα, αποτελεί η αποφυγή της επαναληπτικής επιστροφής σε λύσεις που έχουν ήδη εξεταστεί, και συνολικά τον εγκλωβισμό σε κάποιο τοπικό ελάχιστο.

Δεδομένου των επιλεγμένων διαδρομών της τρέχουσας λύσης, ο προσδιορισμός του μηχανισμού τροποποίησης τους, μεταξύ των 2-0 Relocate, 3-3 Exchange, 2-2 Exchange και 1-0 Relocate, πραγματοποιείται ισοπίθانا. Σε κάθε επανάληψη, εξετάζονται σειριακά οι δυνατές κινήσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν μεταξύ των διαδρομών με τη χρήση του προσδιορισμένου μηχανισμού. Με την εξέταση των περιορισμών χωρητικότητας και μέγιστου χρόνου διαδρομής, εφαρμόζεται κάθε φορά η πρώτη εφικτή αλλαγή που συναντάται, και ακολουθώντας το αποτέλεσμα αυτής της διαταραχής, πραγματοποιείται μια νέα επανάληψη του σχεδίου. Με την εκτέλεση του προκαθορισμένου αριθμού επαναλήψεων ως συνθήκη τερματισμού, το σχέδιο ανακίνησης της τρέχουσας λύσης περατώνεται. Το αποτέλεσμα της συνολικής διαδικασίας αποτυπώνεται στη δομή της νέας λύσης, αποτελώντας το σημείο της έναρξης του σχεδίου τοπικής αναζήτησης, μέσω του οποίου περιγράφεται η διαδικασία εύρεσης των *τοπικών ελαχίστων* των γειτονικών *s'* λύσεων που δημιουργούνται.

Το σχέδιο τοπικής αναζήτησης εφαρμόζει σειριακά όλους τους μηχανισμούς τοπικής αναζήτησης που παρουσιάστηκαν, με σκοπό τη δυναμική αναζήτηση λύσεων στις διάφορες δομές των γειτονιών $|N_1| < |N_2| < \dots |N_{kmax}|$. Η ιδέα της μετάβασης σε διαφορετικές δομές γειτονιών, οδηγεί στην επίτευξη ισχυρών δυνατοτήτων εξερεύνησης του χώρου των λύσεων. Πιο συγκεκριμένα, η επιλογή γειτονιών αυξανόμενου μεγέθους, έχει ως αποτέλεσμα τη σταδιακή διάχυση της διαδικασίας αναζήτησης σε χώρους όλο και μεγαλύτερου εύρους. Η αποτελεσματικότητα αυτής της δυναμικής στρατηγικής, βασίζεται στο γεγονός όπου διαφορετικοί μηχανισμοί τροποποίησης της λύσης οδηγούν σε διαφορετικές τοπικά βέλτιστες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος (Blum και Roli, 2001). Διευκρινίζοντας, λύσεις οι οποίες θεωρούνται βέλτιστες δεδομένου της μορφολογίας μιας γειτονιάς, πιθανώς χαρακτηρίζονται υποβέλτιστες εντός μιας άλλης, διαφορετικής δομής.

Αυτή η ιδιότητα των προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης αξιοποιείται από το σχέδιο τοπικής αναζήτησης του VNS, το οποίο βασίζεται στον αλγόριθμο μεταβλητής γειτονιάς καθόδου (Variable Neighborhood Descent-(VND)), με σκοπό την επίλυση του OVRP. Ο αλγόριθμος VND εκτελείται υβριδικά καθώς η λειτουργία του χαρακτηρίζεται από τυχαιοποιημένες και ντετερμινιστικές παραμέτρους, χρησιμοποιώντας διαδοχικά και με την ίδια σειρά που παρουσιάστηκαν, τους επτά μηχανισμούς τοπικής αναζήτησης. Σκοπό της εφαρμογής του, αποτελεί η κατάβαση πιθανώς προς το

συγκεκριμένο τοπικό ελάχιστο της λύσης s' , η οποία επιστρέφεται από το σχέδιο της ανακίνησης. Ακολουθεί ο ψευδοκώδικας του Σχήματος 5.15, στο οποίο παρουσιάζονται τα βήματα του αλγορίθμου.

Αρχικοποίηση

Επέλεξε ένα σύνολο γειτονιών που θα χρησιμοποιηθούν στη κατάβαση $N_k, k = 1, \dots, k_{max}$

Επέλεξε μια λύση s'

Επανάλαβε για ένα αριθμό επαναλήψεων

Αρχικοποίηση δείκτη. Επέλεξε τον πρώτο μηχανισμό τοπικής αναζήτησης ($k \leftarrow 1$)

Επιλογή διαδρομών. Μέσω μιας γεννήτριας αριθμών, διάλεξε δύο τυχαίες διαφορετικές διαδρομές της λύσης s'

Επανάλαβε μέχρι $k = k_{max}$

Κατάβαση. Δεδομένου των επιλεγμένων διαδρομών και μηχανισμού, εφάρμοσε τη πρώτη εφικτή κίνηση που βελτιώνει τη λύση s' , αντικατέστησε την με το αποτέλεσμα s'' ($s' \leftarrow s''$), αλλιώς άλλαξε τη γειτονιά αναζήτησης ($k \leftarrow k + 1$)

Επέστρεψε τη λύση s'' .

Σχήμα 5-15. Βήματα του σχεδίου τοπικής αναζήτησης του VNS.

Σε κάθε επανάληψη της μεθόδου προσδιορίζονται με τυχαίο τρόπο δύο διαφορετικές διαδρομές της επιλεγμένης λύσης s' . Με N_1 τη γειτονιά που δημιουργείται από τη τροποποίηση των διαδρομών μέσω του μηχανισμού 2-Opt, εξετάζονται σειριακά όλες οι αντίστοιχες κινήσεις. Στη περίπτωση εύρεσης κάποιας εφικτής βάση των περιορισμών χωρητικότητας και μέγιστου χρόνου μετατροπής, η οποία χαρακτηρίζεται από τη μείωση του συνολικού κόστους, η αλλαγή εφαρμόζεται και η αναζήτηση επαναλαμβάνεται από την αρχή. Σε αντίθετη περίπτωση, η γειτονιά αναζήτησης μεταβάλλεται και χρησιμοποιείται ο επόμενος κατά σειρά μηχανισμός. Στο σημείο της ανεπιτυχούς εύρεσης βελτιώσεων στη γειτονιά N_7 μέσω του μηχανισμού 3-3 Exchange, η διαδικασία της καθόδου τερματίζεται και ακολουθεί μια νέα επανάληψη του σχεδίου για νέες διαφορετικές διαδρομές. Όπως και στο σχέδιο ανακίνησης, η περάτωση του VND πραγματοποιείται με την εκτέλεση του προκαθορισμένου αριθμού επαναλήψεων. Το αποτέλεσμα του σχεδίου περιγράφεται από την λύση s'' , ως το τοπικό ελάχιστο της λύσης s' στη γειτονιά της τρέχουσας s . Στο τελευταίο στάδιο του VNS, η λύση s'' συγκρίνεται με την s , όπου αν το κόστος της πρώτης είναι μικρότερο, η τρέχουσα λύση αντικαθίσταται από την s'' και ακολουθεί μια νέα επανάληψη του αλγορίθμου.

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο δίνεται η δόμηση των δεδομένων των προβλημάτων μέσω των οποίων πραγματοποιείται η διερεύνηση της αποτελεσματικότητας του αλγορίθμου. Ακολουθεί η διαδικασία της προετοιμασίας τους με σκοπό την εφαρμογή του αλγορίθμου στο λογισμικό MATLAB, και γίνεται η περιγραφή των στοιχείων παραμετροποίησης του. Τέλος, τα εξαγόμενα αποτελέσματα παρουσιάζονται, σχολιάζονται και συγκρίνονται με τα καλύτερα της βιβλιογραφίας.

6.1 Δεδομένα προβλημάτων

Η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου αλγορίθμου διερευνήθηκε με την εφαρμογή του σε δεκατέσσερα OVRP προβλήματα, όπου το μέγεθος τους εκτείνεται από $n = 50$ έως $n = 199$ πελάτες. Η μορφοποίηση των προβλημάτων προτάθηκε από τους Christofides, Mingozzi και Toth το 1979, ενώ τα δεδομένα τους μπορούν να βρεθούν στο αντίστοιχο σημείο των αναφορών της εργασίας [39]. Σημειώνεται πως σε όλα τα προβλήματα υφίσταται περιορισμός στη χωρητικότητα των οχημάτων, ενώ σε εφτά από τα συνολικά εφαρμόζεται ένα ανώτερο όριο στο μέγιστο χρόνο εκτέλεσης δρομολογίων. Δεδομένου των τιμών του περιορισμού μέγιστου χρόνου διαδρομής που εφαρμόστηκε στην αρχική πρόταση των Christofides, Mingozzi και Toth, το ανώτερο αυτό όριο πολλαπλασιάζεται με 0.9 για τα αντίστοιχα προβλήματα, καθώς στη πρώτη περίπτωση δεσμεύονται αναποτελεσματικά οι λύσεις που εξάγονται.

Στα δεκατέσσερα αυτά προβλήματα που επισημαίνονται ως C1-C14, θεωρούνται ευκλείδειες και συμμετρικές αποστάσεις μεταξύ κάθε ζεύγους κόμβων. Ακολουθεί η παρουσίαση των δεδομένων του προβλήματος C6, το οποίο αποτελεί το μικρότερο πρόβλημα με περιορισμό στο μέγιστο χρόνο των δρομολογίων. Η παρουσίαση των δεδομένων του γίνεται ως παράδειγμα, με σκοπό τη περιγραφή της συνολικής διαδικασίας κατασκευής αρχικών λύσεων και της επακόλουθης βελτιστοποίησης τους.

Πίνακας 6-1. Περιορισμοί και χαρακτηριστικά προβλήματος C6

Αριθμός πελατών n	Χωρητικότητα οχημάτων Q (Μονάδες Χωρητικότητας)	Μέγιστος χρόνος διαδρομής T_m (Μονάδες Χρόνου)	Χρόνος εξυπηρέτησης t (Μονάδες Χρόνου)
50	160	180	10

Πίνακας 6-2. Συντεταγμένες κόμβων προβλήματος C6

Αριθμός κόμβου	Συντεταγμένη X	Συντεταγμένη Y	Αριθμός κόμβου	Συντεταγμένη X	Συντεταγμένη Y
1	30	40	27	27	68
2	37	52	28	30	48
3	49	49	29	43	67
4	52	64	30	58	48
5	20	26	31	58	27
6	40	30	32	37	69
7	21	47	33	38	46
8	17	63	34	46	10
9	31	62	35	61	33
10	52	33	36	62	63
11	51	21	37	63	69
12	42	41	38	32	22
13	31	32	39	45	35
14	5	25	40	59	15
15	12	42	41	5	6
16	36	16	42	10	17
17	52	41	43	21	10
18	27	23	44	5	64
19	17	33	45	30	15
20	13	13	46	39	10
21	57	58	47	32	39
22	62	42	48	25	32
23	42	57	49	25	55
24	16	57	50	48	28
25	8	52	51	56	37
26	7	38			

Πίνακας 6-3. Ζήτηση κόμβων προβλήματος C6

Αριθμός κόμβου	Ζήτηση (Μονάδες χωρητικότητας)	Αριθμός κόμβου	Ζήτηση (Μονάδες χωρητικότητας)	Αριθμός κόμβου	Ζήτηση (Μονάδες χωρητικότητας)
1	0	18	3	35	26
2	7	19	41	36	17
3	30	20	9	37	6
4	16	21	28	38	9
5	9	22	8	39	15
6	21	23	8	40	14
7	15	24	16	41	7
8	19	25	10	42	27
9	23	26	28	43	13
10	11	27	7	44	11
11	5	28	15	45	16
12	19	29	14	46	10
13	29	30	6	47	5
14	23	31	19	48	25
15	21	32	11	49	17
16	10	33	12	50	18
17	15	34	23	51	10

Με τις συντεταγμένες των κόμβων στο δισδιάστατο χώρο, του πίνακα 6.1 και τη χρήση της εξίσωσης 6.1, πραγματοποιείται ο υπολογισμός του τετραγωνικού πίνακα κόστους του προβλήματος ο οποίος περιγράφει τις ευκλείδειες αποστάσεις για κάθε ζεύγος κόμβων (i, j).

$$C_{ij} = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2} \quad (6.1)$$

Λόγω του μεγάλου μεγέθους του η παρουσίαση του πίνακα κόστους παραλείπεται, ωστόσο η μορφή του είναι η ίδια με αυτή του πίνακα 5.2 που παρουσιάστηκε νωρίτερα. Συνολικά, ο πίνακας κόστους μετάβασης ή αποστάσεων, και τα στοιχεία των πινάκων 6.1 και 6.3 αποτελούν τα αναγκαία δεδομένα βάση των οποίων πραγματοποιείται η επίλυση του προβλήματος C6. Οι περιορισμοί και τα χαρακτηριστικά των προβλημάτων C1 έως C14 συγκεντρώνονται στον πίνακα 6.4.

Πίνακας 6-4. Περιορισμοί και χαρακτηριστικά προβλημάτων C1-C14

Πρόβλημα	Αριθμός πελατών n	Χωρητικότητα οχημάτων Q (Μονάδες Χωρητικότητας)	Μέγιστος χρόνος διαδρομής T_m (Μονάδες Χρόνου)	Χρόνος εξυπηρέτησης t (Μονάδες Χρόνου)
C1	50	160	∞	-
C2	75	140	∞	-
C3	100	200	∞	-
C4	150	200	∞	-
C5	199	200	∞	-
C6	50	160	180	10
C7	75	140	144	10
C8	100	200	207	10
C9	150	200	180	10
C10	199	200	180	10
C11	120	200	∞	-
C12	100	200	∞	-
C13	120	200	648	50
C14	100	200	936	90

6.2 Παραμετροποίηση και εφαρμογή

Η υλοποίηση των αλγορίθμων για την κατασκευή αρχικών λύσεων και την επακόλουθη βελτιστοποίηση τους, πραγματοποιήθηκε εντός του υπολογιστικού περιβάλλοντος MATLAB. Η επιλογή της συγκεκριμένης γλώσσας προγραμματισμού έναντι κάποιας άλλης, οφείλεται στην ευκολία μεταφοράς και χειρισμού αριθμητικών δεδομένων. Επιπλέον, οι δομές που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση τους είναι εύκολο να επεξεργαστούν και να προσαρμοστούν στις ανάγκες της μοντελοποίησης των αλγορίθμων. Έτσι, τα αναγκαία δεδομένα για την επίλυση του εκάστοτε προβλήματος εισάγονται στο περιβάλλον εργασίας του MATLAB και αποθηκεύονται σε κατάλληλες δομές πινάκων, διανυσμάτων και μονοδιάστατων μεταβλητών, επιτρέποντας την εύκολη προσπέλαση τους.

Για την εξαγωγή αποτελεσμάτων στα προβλήματα C1-C14, ο VNS εκτελέστηκε για 7500 επαναλήψεις χρησιμοποιώντας διαφορετικούς συνδυασμούς στις τιμές παραμέτρων των σχεδίων τοπικής αναζήτησης και ανακίνησης. Η επιλογή τιμών

παραμέτρων με αυτό τον τρόπο αποσκοπεί στη επίτευξη διαφορετικού εύρους ιδιοτήτων διαφοροποίησης και εντατικοποίησης του αλγορίθμου. Μεγαλύτερος αριθμός επαναλήψεων του σχεδίου τοπικής αναζήτησης, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της πιθανότητας εύρεσης ενός τοπικού ελαχίστου στην αντίστοιχη γειτονιά λύσεων. Ομοίως, περισσότερες επαναλήψεις του σχεδίου ανακίνησης, οδηγούν στην εξερεύνηση μεγαλύτερου εύρους γειτονικών λύσεων και στην πληρέστερη εξέταση του συνολικού χώρου αναζήτησης. Στον πίνακα 6.5 δίνονται οι διαφορετικές τιμές των παραμέτρων για την εκτέλεση του VNS.

Πίνακας 6-5. Παραμετροποίηση του VNS		
Αριθμός επαναλήψεων εκτέλεσης του VNS: 7500		
Συνδυασμοί	Αριθμός επαναλήψεων σχεδίου τοπικής αναζήτησης	Αριθμός επαναλήψεων σχεδίου ανακίνησης
1.	100	10
2.	150	15
3.	200	20

6.3 Αποτελέσματα

Βασικό μέτρο προσδιορισμού της αποτελεσματικότητας του VNS αποτελεί η ποιότητα των εξαγόμενων λύσεων. Για τον υπολογισμό της, χρησιμοποιείται το μέγεθος $\%Gap$ το οποίο εκφράζει την ποσοστιαία απόκλιση των βέλτιστων λύσεων που εξάχθηκαν με την εκτέλεση του VNS, από τις γνωστές βέλτιστες των προβλημάτων. Στον πίνακα 6.6 παρουσιάζονται τα στατιστικά στοιχεία των λύσεων για όλα τα προβλήματα C1-C14. Στη πρώτη στήλη δίνεται το όνομα του προβλήματος, ενώ στη δεύτερη με ονομασία *BKS*, παρουσιάζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του OVRP για τις βέλτιστες ως τώρα γνωστές λύσεις των προβλημάτων. Σε αυτό το σημείο σημειώνεται πως οι αντίστοιχες τιμές μπορούν να βρεθούν στη δημοσίευση των [33], όπου τοποθετείται η πιο σύγχρονη σύνοψη των βέλτιστων αποτελεσμάτων για τα προβλήματα C1-C14.

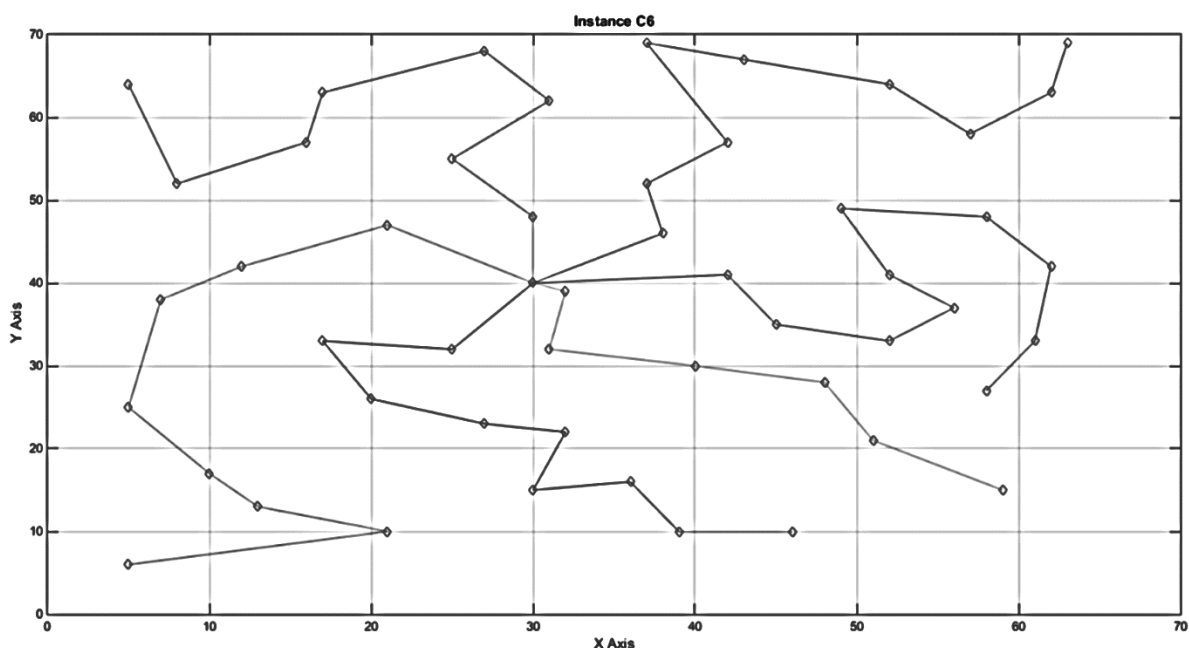
Στη τρίτη στήλη τοποθετούνται οι μικρότερες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης των λύσεων μετά από μια σειρά εκτελέσεων του VNS για κάθε πρόβλημα, ενώ στην επόμενη, ο αντίστοιχος αριθμός οχημάτων *NV* που χρησιμοποιήθηκε. Στη στήλη *Avg* παρουσιάζεται η μέση τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης των προβλημάτων για τον ίδιο αριθμό εκτελέσεων, ενώ στην στήλη *Stdv* δίνεται η αντίστοιχη τυπική απόκλιση

τους. Τέλος, στη στήλη με ονομασία $%Mdif$ τοποθετούνται οι διαφορές μεταξύ βέλτιστων και των χειρότερων λύσεων κατά την εκτέλεση του VNS, ως ποσοστό της μέσης τιμής τους, όπου $%Mdif = (Max - Min)/Avg * 100$.

Πίνακας 6-6. Αποτελέσματα του VNS για τα προβλήματα C1-C14							
Instance	BKS	VNS	NV	%Gap	Avg	Stdv	%Mdif
C1	412.96	416.06	5	0.75	417.39	1.26	0.60
C2	564.06	580.99	10	3.00	586.29	6.89	2.23
C3	639.26	650.46	8	1.75	650.62	0.24	0.07
C4	733.13	759.16	12	3.55	775.48	15.42	3.95
C5	869.00	956.42	17	10.06	961.73	8.23	1.54
C6	412.96	412.96	6	0.00	412.96	0.00	0.00
C7	567.59	569.81	11	0.39	571.44	1.93	0.66
C8	644.63	647.86	9	0.50	650.35	2.16	0.58
C9	743.51	775.74	14	4.33	777.93	3.14	0.74
C10	873.89	890.68	18	1.92	903.83	17.62	3.67
C11	676.40	686.20	7	1.45	692.71	5.65	1.47
C12	534.24	536.87	10	0.49	537.66	0.73	0.27
C13	862.74	902.36	12	4.59	908.91	7.15	1.56
C14	554.67	584.00	12	5.29	586.88	2.49	0.75

Η ικανοποιητική συμπεριφορά του αλγορίθμου μεταβλητής γειτονιάς αναζήτησης στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζεται στον πίνακα 6.6. Σε μόνο δύο από τα δεκατέσσερα προβλήματα (C5,C14), η απόκλιση των καλύτερων εξαγόμενων λύσεων, από τις βέλτιστες γνωστές ξεπερνά το 5%. Με μηδενική τη μικρότερη τιμή απόκλισης (C6) και τη μεγαλύτερη ίση με 10.06% (C5), η μέση τιμή της απόκλισης για όλα τα προβλήματα ανέρχεται στο 2.72%. Τα μέτρα διασποράς της τιμής των λύσεων τοποθετούνται μεταξύ 0.00 και 17.62 για την τυπική απόκλιση *Stdv*, και μεταξύ του μηδέν και 3.95% όσο αναφορά το μέγεθος $%Mdif$. Με μέση τιμή τυπικής απόκλισης ίση με 5.21 και αντίστοιχη μέση για το επόμενο μέγεθος ίση με 1.29%, η ακρίβεια του αλγορίθμου χαρακτηρίζεται ικανοποιητική δεδομένου των διαφορετικών συνδυασμών εκτέλεσης του, όσο αναφορά των αριθμών επαναλήψεων του σχεδίου τοπικής αναζήτησης και ανακίνησης.

Με σκοπό την παρουσίαση της μορφής των αποτελεσμάτων, ακολουθεί η απεικόνιση της λύσης στο πρόβλημα όπου συναντάται η ελάχιστη απόκλιση από τη βέλτιστη γνωστή λύση. Μέσω του λογισμικού MATLAB παρουσιάζεται η διασπορά των πελατών στο δισδιάστατο χώρο και δίνονται οι ακολουθίες εξυπηρέτησης των οχημάτων διανομής.



Σχήμα 6-1. Απεικόνιση λύσης του προβλήματος C6.

Πίνακας 6-7. Ακολουθίες εξυπηρέτησης πελατών του προβλήματος C6													
Διαδρομές		Πελάτες										Φορτίο	Χρόνος
1.	1	28	49	9	27	8	24	25	44			118	152.10
2.	1	7	15	26	14	42	20	43	41			143	160.72
3.	1	33	2	23	32	29	4	21	36	37		119	162.93
4.	1	12	39	10	51	17	3	30	22	35	31	159	177.92
5.	1	47	13	6	50	11	40					92	104.39
6.	1	48	19	5	18	38	45	16	46	34		146	154.90

Παρά την ικανοποιητική συμπεριφορά του αλγορίθμου στα προβλήματα που αντιμετωπίζονται, η διαδικασία κατασκευής των αρχικών λύσεων μέσω του αλγορίθμου των Clarke & Wright υστερεί σε σχέση με αυτές που χρησιμοποιούνται στις έρευνες που παρουσιάζονται στη δημοσίευση των [33], από όπου λαμβάνονται τα δεδομένα σύγκρισης του VNS. Σε έξι από τα δεκατέσσερα προβλήματα (C5, C7, C9, C10, C13, C14) δεν επιτυγχάνεται η μείωση του αριθμού οχημάτων διανομής στον ελάχιστο δυνατό παρά την εφαρμογή των διαδικασιών επιδιόρθωσης, με αποτέλεσμα την επίλυση τους επιστρατεύοντας ένα επιπλέον όχημα, αυξάνοντας έτσι θεωρητικά το συνολικό κόστος των λύσεων. Τέλος, η πολυπλοκότητα υπολογισμών στο λογισμικό MATLAB όπου υλοποιείται ο VNS δεν επιτρέπει την εξαγωγή αποτελεσμάτων σε σύντομο χρόνο, ενώ επιπλέον με χρόνους εκτέλεσης μεγαλύτερους της ώρας αλγόριθμος υστερεί σε ταχύτητα σε σχέση με αυτούς που συγκρίνεται.

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το οικονομικό περιβάλλον και οι σχέσεις έντονου ανταγωνισμού που υφίστανται μεταξύ των δομών σύγχρονων εφοδιαστικών αλυσίδων, δημιουργούν την ανάγκη για εξειδικευμένα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων, μέσω των οποίων βελτιστοποιούνται διαδικασίες παραλαβής, αποθήκευσης καθώς και παράδοσης αγαθών, πρόβλημα το οποίο αντιμετωπίζεται σε γενικότερα πλαίσια στη συγκεκριμένη εργασία.

Εγχείρημα της παρούσας μελέτης αποτελεί η ανάπτυξη ενός μεθευρετικού αλγορίθμου μεταβλητής γειτονιάς αναζήτησης αποσκοπώντας στην επίλυση του ανοικτού προβλήματος οχημάτων. Τα αποτελέσματα που εξάχθηκαν κατά την εφαρμογή του σε δεκατέσσερα προβλήματα της βιβλιογραφίας ικανοποιούν το στόχο της εργασίας, δηλαδή την σύγκλιση με επάρκεια στις βέλτιστες ως τώρα γνωστές λύσεις τους. Η ισχύς του αλγορίθμου στη προσέγγιση ικανοποιητικών λύσεων, έγκειται στο εκτενές σχέδιο τοπικής αναζήτησης που υλοποιείται μέσω πολλαπλών μηχανισμών τοπικής αναζήτησης, οι οποίοι αποτελούν τα βασικά στοιχεία της λειτουργίας του.

Σε αντίθεση όμως με την ποιότητα των εξαγόμενων λύσεων, η λειτουργία του αλγορίθμου υστερεί σε υπολογιστική απόδοση. Οι εκτεταμένοι χρόνοι αναγκαίοι για τη σύγκλιση σε ικανοποιητικές τιμές, ανεξάρτητα από το μέγεθος του προβλήματος, καθιστούν τη συνολική διαδικασία εξαγωγής λύσεων μη συγκρίσιμη με άλλες προσπάθειες επίλυσης του OVRP στα πλαίσια υπολογιστικής ταχύτητας. Επιπλέον, η διαδικασία κατασκευής αρχικών λύσεων μέσω του αλγορίθμου των Clarke & Wright παρά την εφαρμογή των διαδικασιών επιδιόρθωσης, οδηγεί στην επίλυση αρκετών εξεταζόμενων προβλημάτων με αριθμό δρομολογίων που αποκλίνουν από τον ελάχιστο δυνατό, βάση των δεδομένων της βιβλιογραφίας.

Συνολικά, η ιδέα της συστηματικής μεταβολής του χώρου αναζήτησης λύσεων παρά την απλότητα της, χαρακτηρίζεται από ισχυρές ιδιότητες επίλυσης NP-Hard προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης, το οποίο αποτελεί το OVRP. Μελλοντικές επεκτάσεις της μελέτης, αποσκοπώντας στην αύξηση της υπολογιστικής αποδοτικότητας της

διαδικασίας προβλέπουν την υλοποίηση του VNS σε μια ισχυρότερη γλώσσα προγραμματισμού όπως είναι η Python, και την δημιουργία αρχικών λύσεων μέσω διαφορετικών ευρετικών αλγορίθμων, διερευνώντας τις δυνατότητες εύρεσης καλύτερων εναρκτήριων δομών προς βελτιστοποίηση για την επίλυση του OVRP.

Βιβλιογραφία

1. Blum, C., Roli, A. (2001). Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison. *ACM Computing Surveys*, 35, 270-272, 279-281.
2. Brandão, J. (2004). A tabu search algorithm for the open vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 157 (3), 553.
3. Chatzidakis, P. (2017). *Vehicle Routing Problem of Tsantali Wine Company*. Master's Thesis, Department of Economics, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece.
4. Chen, S., Golden, B., Wasil, E. (2007). The Split Delivery Routing Problem: Applications Algorithms, Test Problems, and Computational Results. *Networks*, 49 (4), 318-320.
5. Coene, S., Arnout, A., Spieksma, F.C.R. (2010). On a periodic vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*, 61, 1719-1720.
6. Cordeau, J.F., Laporte, G., Savelsbergh, M.W., Vigo, D. (2005). Vehicle Routing.
7. Dimitrescu, I., Stützle, T. (2003). Combinations of local search and exact algorithms, *Lecture notes in Computer Science*, 211-212.
8. Gendreau, M., Potvin, J.-Y. (2005). Metaheuristics in Combinatorial Optimization. *Annals of Operations Research*, 140, 190-197.
9. Goetschalckx, M., Jacobs-Blecha, C. (1989). The vehicle routing problem with backhauls. *European Journal of Operational Research*, 42, 39-40.
10. Handfield, R.B., Nichols, E.L. (2003). Key Issues in Global Supply Base Management. *Industrial Marketing Management*, 33 (1), 30.
11. Hansen, P., Mladenovic, N. (2001). Variable Neighborhood search: Principles and applications. *European Journal of Operational Research*, 130 (3), 450-451.
12. Ho, W., Ho, G.T.S., Ji, P., Lau, H.C.W. (2008). A hybrid genetic algorithm for the multi-depot vehicle routing problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21 (4), 549.
13. Hosny, M.I. (2012). *Investigating Heuristic and Meta-Heuristic Algorithms for Solving Pickup and Delivery Problems*. Ph. D. Thesis, School of Computer Science & Informatics, Cardiff University, Cardiff, UK.
14. Kallehauge, B., Larsen, J., Madsen, O.B., Solomon, M.M. (2005). Vehicle Routing Problem with Time Windows. In: Desaulniers, G., Desrosiers, J., Solomon, M.M. (Eds.), *Column Generation*. Springer, Boston, MA.

15. La Londe, B.J., Masters, J.M. (1994). Emerging Logistic Strategies: Blueprints for the Next Century. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 24 (7), 35-37.
16. Lambert, D.M., Cooper, M.C. (2000). Issues in Supply Chain Management. *Industrial Marketing Management*, 29 (1), 68.
17. Lambert, D.M., Cooper, M.C., Pagh, J.D. (1998). Supply Chain Management Implementation Issues and Research Opportunities. *The International Journal of Logistics Management*, 11 (1), 1
18. Langley, C.J., Holcomb, M.C. (1992). Creating logistics customer value. *Journal of Business Logistics*, 13 (2), 11.
19. Laporte, G., Gendreau, M., Potvin, J.-Y., Semet, F. (2000). Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem. *International Transactions in Operational Research*, 7, 290-291.
20. Laporte, G., Røpke, S., Vidal, T. (2014). Chapter 4: Heuristics for the Vehicle Routing Problem. In: Toth, P., Vigo, D., *Vehicle Routing*, SIAM-MOS, Philadelphia, PA.
21. Lee, E.K., Mitchell, J.E. (2008). Integer Programming: Branch and Bound Methods. In: Floudas, C., Pardalos, P. (Eds.), *Encyclopedia of Optimization*, Springer, Boston, MA.
22. Lenstra, J.K., Rinnooy Kan, A.H.G. (1981). Complexity of Vehicle Routing and Scheduling Problems. *Networks*, 11, 1-4.
23. Mbang, A. (2011). A New Introduction to Supply Chains and Supply Chain Management: Definitions and Theories Perspective. *International Business Research*, 5 (1), 200-201.
24. Mentzer, J.T., DeWitt, W., Keebler, J.S., Min, S., Nix, N.W., Smith, C.D., Zacharia, Z.G. (2001). DEFINING SUPPLY CHAIN MANAGEMENT. *Journal of Business Logistics*, 22 (2), 3-10.
25. Min, H., Zhou, G. (2002). Supply chain modeling: past, present and future. *Computers & Industrial Engineering*, 43 (1-2), 231
26. Mitchell, J.E. (2008). Integer Programming: Branch and Cut Algorithms. In: Floudas, C., Pardalos, P. (Eds.), *Encyclopedia of Optimization*, Springer, Boston, MA.
27. Mitchell, J.E. (2008). Integer Programming: Cutting Plane Algorithms. In: Floudas, C., Pardalos, P. (Eds.), *Encyclopedia of Optimization*, Springer, Boston, MA.
28. Munari, P., Dollevoet, T., Spliet, R. (2017). *A generalized formulation for vehicle routing problems*. Working Paper, Cornell University, Ithaca, NY.

29. Omoruyi, O. (2020). LOGISTICS OBJECTIVES, CAPABILITY AND BENEFITS: THE CASE OF SMES IN EMFULENI MUNICIPAL DISTRICT. *International Journal of Business and Management Studies*, 12 (2), 1309.
30. Repoussis, P.P., Tarantilis, C.D., Bräysy, O., Ioannou, G. (2010). A hybrid evolution strategy for the open vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 37 (3), 443.
31. Røpke, S. (2006). *Heuristic and exact algorithms for vehicle routing problems*. Ph. D. Thesis, Department of Computer Science, University of Copenhagen, Copenhagen, Denmark.
32. Ross, D.F. (1998). Meeting the Challenge of Supply Chain Management. In: Ross, D.F., *Competing Through Supply Chain Management*, 2, Springer, Boston, MA.
33. Ruiz, E., Soto-Mendoza, V., Barbosa, A.E.R., Reyes, R. (2019). Solving the open vehicle routing problem with capacity and distance constraints with a biased random key genetic algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 133, 207-208.
34. Sariklis, D., Powell, S. (2000). A heuristic method for the open vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*, 51, 564.
35. Stevens, G.C. (1989). Integrating the Supply Chain. *International Journal of Physical Distribution & Materials Management*, 19 (8), 3-5.
36. Van Breedam, A. (1994). *An Analysis of the Behavior of Heuristics for the Vehicle Routing Problem for a selection of problems with Vehicle-related, Customer-related, and Time-related Constraints Contents*. Ph. D. Thesis, Antwerp Management School, Antwerp, Belgium.
37. Vitasek, K. (2013). CSCMP Supply Chain Management Definitions and Glossary. *Council of Supply Chain Management Professionals*. Retrieved from https://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx
38. Voß, S. (2001). Meta-heuristics: The State of the Art. In: Nareyek A. (Eds.) *Local Search for Planning and Scheduling. LSPS 2000. Lecture Notes in Computer Science*, 2148, Springer, Berlin, Heidelberg.
39. Xavier, I., Uchoa, E., Pecin, D., Pessoa, A., Poggi, M., Vidal, T. Subramanian, A. (2014). Christofides, Mingozzi and Toth (1979). *CVRPLIB*. Retrieved from <http://vrp.atd-lab.inf.puc-rio.br/index.php/en/>
40. Zhang, D. (2006). A network economic model for supply chain versus supply chain competition. *Omega*, 34, 283.
41. Μαρινάκης, Ι., Μαρινάκη, Μ. & Μυγδαλάς Α. (2019). *Προβλήματα Δρομολόγησης Οχημάτων στη Διαχείριση της Εφοδιαστικής Αλυσίδας Μοντελοποίηση & Αλγόριθμοι Επίλυσης*. Αθήνα, Ελλάδα: ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΝΕΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ.