ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΗΣ ΈΡΕΥΝΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΡΓΑΝΩΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Μέθοδοι Επίλυσης του Προβλήματος Δρομολόγησης Οχημάτων Αστικών Εμπορευματικών Μεταφορών και Εφαρμογή τους σε Πληροφοριακό Σύστημα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σπηλιόπουλος Σπυρίδων

Εποπτεία: Ηλίας Τατσιόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Επίβλεψη: Σωτήρης Γκαγιαλής
Δρ.,Ε.ΔΙ.Π., Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος – 2019

Περίληψη

Κύριο αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αποτελεί η ανάλυση και η αξιολόγηση των μεθόδων επίλυσης του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων για αστικές εμπορευματικές μεταφορές (όπως αυτές προτείνονται από την ερευνητική κοινότητα) ώστε να καθοριστούν οι τάσεις που ακολουθούν τα σχετικά ερευνητικά έργα και επιστημονικά άρθρα. Η εργασία αποσκοπεί επίσης και στην πρόταση των πιο κατάλληλων αλγορίθμων επίλυσης του συγκεκριμένου προβλήματος για πιθανή εφαρμογή τους σε πληροφοριακό σύστημα, το οποίο βρίσκεται στη φάση σχεδιασμού των προδιαγραφών του.

Επιπλέον, η προαναφερθέντα διαδικασία βιβλιογραφικής ανασκόπησης των τάσεων που ακολουθεί η ερευνητική κοινότητα, είχε σαν αποτέλεσμα την δημιουργία ενός επιστημονικού άρθρου που υποβλήθηκε προς δημοσίευση σε διεθνές περιοδικό.

Η παρούσα διπλωματική εργασία εντάσσεται στο πλαίσιο συμμετοχής σε ερευνητική ομάδα έργου του Τομέα Βιομηχανικής Διοίκησης και Επιχειρησιακής Έρευνας του ΕΜΠ για την διερεύνηση της ανάπτυξης ενός διαδικτυακού (web-based) λογισμικού δρομολόγησης οχημάτων. Το περιεχόμενο και τα πορίσματα της διπλωματικής αναμένεται να ενισχύσουν το στάδιο της διερεύνησης των προδιαγραφών και αναμένεται να τροφοδοτήσουν το στάδιο υλοποίησης του συστήματος.

.

Abstract

The main objectives of the present diploma thesis is, initially, to present a methodology for classifying the main variants of the Vehicle Routing Problem for freight transportation in urban environment and the trends these variants follow. Secondly, to present the algorithms and methods developed and applied for solving these variants, and finally, to present the connection/correlation between the VRP variants and the given algorithms. The research concludes by proposing/highlighting the algorithms that most efficiently solve the different variants of the problem, so as to be implemented in an Information System which is currently at the stage of the specification of its requirements.

The above process of identifying the trends in the given literature, resulted in the creation of a scientific article which was submitted for publication in the journal Annals of Operations Research.

The present diploma thesis is part of a research project conducted by the Department of Industrial Management and Operation Research of the NTUA, concerning the development of a web-based vehicle routing software. The content and findings of the present thesis are expected to contribute towards the stage of the design of the specifications of the system and the latter stage of the implementation of the system of the aforementioned project.

Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Σωτήρη Γκαγιαλή για την ανάθεση της παρούσας εργασίας και για την διαρκή παρακολούθηση της προόδου της καθώς και για την ευκαιρία που μου παρείχε για συμμετοχή σε ένα τρέχον ερευνητικό πρόγραμμα.

Επίσης τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Γ. Κωνσταντακόπουλο για την φιλική του στάση και την άμεση επικοινωνία και βοήθεια που προσέφερε σε προβλήματα που αντιμετώπισα στα επιμέρους ζητήματα της εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Ηλία Τατσιόπουλο, για την γενική του εποπτεία.

Τέλος, ευχαριστίες στην οικογένειά μου.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή 10

1.2 Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας 12

2.Πρόβλημα της Δρομολόγησης Οχημάτων 14

2.1 Ιστορική Αναδρομή 14

2.2 Ανάλυση Παραλλαγών του Προβλήματος της Δρομολόγησης 19

2.2.1 Δυναμικό και Στατικό Πρόβλημα Δρομολόγησης 20

Στατικό Πρόβλημα Δρομολόγησης 20

Δυναμικό Πρόβλημα Δρομολόγησης 20

2.2.2 Το Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων Εξαρτημένο από τον Χρόνο 21

2.2.3 Το πρόβλημα της Δρομολόγησης Περιορισμένης Χωρητικότητας 22

2.2.4 Το Πρόβλημα της Δρομολόγησης με Χρονικά Περιθώρια 22

2.2.5 Το Πρόβλημα της Δρομολόγησης από Πολλαπλές Εγκαταστάσεις 23

2.2.6 Το Πρόβλημα της Δρομολόγησης με Πολλαπλές Διαδρομές 24

2.2.7 Το Πρόβλημα Δρομολόγησης με ετερογενή στόλο οχημάτων 24

2.2.8 Το Ανοιχτό Πρόβλημα Δρομολόγησης 25

2.2.9 Το Πρόβλημα της Δρομολόγησης με Παραδόσεις και Συλλογές 25

2.2.10 Το “Πράσινο” και το “Υβριδικό” Πρόβλημα Δρομολόγησης 26

2.3 Μοντελοποίηση Προβλήματος Δρομολόγησης Οχημάτων 27

3. Αλγόριθμοι – Μέθοδοι Επίλυσης Προβλήματος Δρομολόγησης Οχημάτων 30

3.1 Ακριβείς Αλγόριθμοι (Exact Algorithms) 31

3.1.1 Αλγόριθμος Αναπαραγωγής Στηλών (Column Generation) 31

3.1.2 Δυναμικός Προγραμματισμός (Dynamic Programming) 32

3.2 Ευρετικοί Αλγόριθμοι – Heuristic Algorithms 33

3.2.1 Κατασκευαστικοί Ευρετικοί Αλγόριθμοι 33

3.2.1.1 Αλγόριθμος Πλησιέστερου Γείτονα (Nearest Neighbor Algoritm) 34

3.2.1.2 Αλγόριθμος Savings 34

3.2.2 Ευρετικοί Αλγόριθμοι Δύο Φάσεων 35

3.2.3 Ευρετικοί Αλγόριθμοι Βελτίωσης 36

3.3 Μεταευρετικοί Αλγόριθμοι 37

3.3.1 Μεταευρετικοί Αλγόριθμοι που Λειτουργούν σε Σύνολο Λύσεων 38

3.3.1.1 Γενετικός Αλγόριθμος (Genetic Algorithm - GA) 38

3.3.1.2 Μιμητικός Αλγόριθμος (Memetic Algorithm - MA) 40

3.3.1.3 Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization - ACO) 41

3.3.1.4 Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization - PSO) 42

3.3.2 Μεταευρετικοί Αλγόριθμοι που Παράγουν Ακολουθία Λύσεων 44

3.3.2.1 Προσομειωμένη Ανόπτηση (Simulated Annealing - SA) 44

3.3.2.2 Περιορισμένη αναζήτηση (Tabu Search - TS) 45

3.3.2.3 Αναζήτηση μεταβλητής Γειτονιάς (Variable Neighborhood Search - VNS) 46

3.4 Υβριδικοί Αλγόριθμοι (Hybrid Algorithm) 47

3.4.1 Υβριδικοί Μεταευρετικοί 48

4. Δομημένη Βιβλιογραφική Ανασκόπηση των Μεθόδων Επίλυσης του VRP 50

4.1 Διαδικασία Έρευνας 50

4.2 Μεθοδολογία Έρευνας 52

4.3 Ποσοτικά Στοιχεία Έρευνας 54

5. Παρουσίαση Κατάταξης Αλγορίθμων και Σύνδεση με το VRP 62

5.1 Μέθοδοι Επίλυσης Προβλήματος της Δρομολόγησης Οχημάτων Περιορισμένης Χωρητικότητας (CVRP) 62

5.2 Μέθοδοι Επίλυσης Προβλήματος της Δρομολόγησης Οχημάτων με Χρονικά Παράθυρα (VRPTW) 64

5.3 Μέθοδοι Επίλυσης Δυναμικού Προβλήματος της Δρομολόγησης (DVRP) 66

5.4 Μέθοδοι Επίλυσης Προβλήματος της Δρομολόγησης Οχημάτων με Πολλαπλές Αποθήκες (MDVRP) 66

5.5 Μέθοδοι Επίλυσης Πρόβληματος της Δρομολόγησης Οχημάτων με Παραλαβές και Παραδόσεις (VRPPD) 67

5.6 Μέθοδοι Επίλυσης Ανοιχτού Προβλήματος Δρομολόγησης (OVRP) 68

5.7 Μέθοδοι Επίλυσης Προβλήματος Δρομολόγησης με Ετερογενή Στόλο Οχημάτων (HVRP) 69

5.8 Μέθοδοι Επίλυσης Υβριδικού Προβλήματος Δρομολόγησης (Hybrid/Green VRP) 70

6. Αποτελέσματα 72

6.1 Συμπεράσματα Ανασκόπησης Βιβλιογραφίας 72

6.2 Αξιοποίηση Αλγορίθμων σε Πληροφοριακά Συστήματα Διανομής 73

6.3 Πρόταση Αλγορίθμων προς Υλοποίηση σε Πληροφοριακό Σύστημα Αστικών Εμπορευματικών Μεταφορών 75

6.3.1 Εισαγωγή στην Πρόταση Αλγορίθμων 75

6.3.2 Πρόταση του Ευρετικού Αλγορίθμου 76

Ευρετικός Αλγόριθμος Time Oriented Nearest Neighbor 77

Ευρετικοί Αλγόριθμοι Βελτίωσης Inter-route και Intra-route Node Relocation 77

6.3.3 Πρόταση του Υβριδικού Γενετικού Αλγορίθμου 79

6.3.3.1 Multi-Objective Γενετικός Αλγόριθμος 80

6.3.3.2 Κατασκευή Αρχικού Πληθυσμού Λύσεων 81

6.3.3.3 Αναπαράσταση Χρωμοσώματος 81

6.3.3.4 Τελεστές Επιλογής - Αναπαραγωγής - Μετάλλαξης 83

Τελεστής Αναπαραγωγής Best Cost route Crossover (BCRC) 83

Τελεστής Μετάλλαξης 84

6.4 Επιστημονικό Άρθρο Ανασκόπησης της Βιβλιογραφίας 85

7. Συμπεράσματα 86

8.Βιβλιογραφία 88

Παράρτημα Επιστημονικό άρθρο προς δημοσίευση 99

Λίστα Σχημάτων

Σχήμα **2.1** Το πρόβλημα του Περιοδεύοντος Πωλητή……14

Σχήμα **2.2** Παράδειγμα Προβλήματος Δρομολόγησης Οχημάτων……15

Σχήμα **2.3** Χρονική Εξέλιξη Παραλλαγών VRP……16

Σχήμα **2.4** Συσχέτιση Παραλλαγών του VRP και Αστικών Εμπορευματικών Μεταφορών……..19

Σχήμα **2.5** Παράδειγμα Δυναμικού VRP……..21

Σχήμα **2.6** Σύγκριση VRP με MDVRP ……..24

Σχήμα **2.7** Είσοδος και Έξοδος VRP……27

Σχήμα **3.1** Ταξινόμηση Κύριων Μεθόδων Επίλυσης του VRP……31

Σχήμα **3.2** Παραδείγματα Sequential και Parallel Δρομολόγησης…… 34

Σχήμα **3.3** Παράδειγμα Αλγορίθμου 2 Φάσεων…….. 36

Σχήμα **3.4** Παραδείγματα Κινήσεων Τοπικής Αναζήτηση……. 37

Σχήμα **3.5** Παράδειγμα Λειτουργίας Γενετικού Αλγορίθμου……. 39

Σχήμα **3.6** Παράδειγμα Τελεστή Αναπαραγωγής 1-point Crossover…….. 40

Σχήμα **4.1** Αριθμός Δημοσιεύσεων / Έτος……. 54

Σχήμα **6.1** Ichoua's Time Dependent Travel Function…….. 76

Σχήμα **6.2** Τελεστές Τοπικής Αναζήτησης……. 79

Σχήμα **6.3** Διάγραμμα Ροής Γενετικού Αλγορίθμου…… 80

Σχήμα **6.4** Αναπαράσταση Χρωμοσώματος Γενετικού Αλγορίθμου…….. 82

Σχήμα **6.5** Διαμερισμός του Χρωμοσώματος σε Δρομολόγια…… 82

Σχήμα **6.6** Παράδειγμα λειτουργίας Τελεστή Αναπαραγωγής…… 84

Λίστα Πινάκων

Πίνακας **2.1** Χαρακτηριστικά και Επιλογές Προβλήματος Δρομολόγησης……..……..17

Πίνακας **2.2** Συνήθεις Περιορισμοί Προβλήματος Δρομολόγησης……..……..18

Πίνακας **4.1** Πρωτόκολλο Έρευνας……..51

Πίνακας **4.2** Παραλλαγές VRP που σχετίζονται με Αστικές Εμπορευματικές Μεταφορές… 53

Πίνακας **4.3** Παραλλαγές VRP - Ποσοστά Άρθρων …….. 55

Πίνακας **4.4** Συσχέτιση των παραλλαγών VRP…….. 56

Πίνακας **4.5** Μέθοδοι Επίλυσης - Αριθμός Εμφάνισης…….. 56

Πίνακας **4.6** Μεταευρετικοί Μέθοδοι - Αριθμός Εμφάνισης…… 57

Πίνακας **4.7** Μέθοδοι Επίλυσης ανά Κατηγορία VRP…… 60

Πίνακας **4.8** Συσχέτιση Μεθόδων Επίλυσης…… 61

1. Εισαγωγή

1.1 Εμπορευματικές Μεταφορές σε Αστικές Περιοχές (Urban Freight Transportation)

Οι εμπορευματικές μεταφορές αφορούν την μεταφορά των προϊόντων από τα κέντρα διανομής στα διάφορα σημεία παράδοσης. Η κυκλοφοριακή συμφόρηση στις αστικές περιοχές, λόγω καιρικών συνθηκών, έκτακτων γεγονότων, την ώρα της ημέρας αλλά και την περίοδο του χρόνου, επηρεάζει τους χρόνους διέλευσης και συνεπώς τον προγραμματισμό των παραδόσεων και τη δρομολόγηση του στόλου των οχημάτων (Groß et al. 2015). Οι υπεύθυνοι δρομολόγησης αναθέτουν σε πολλά οχήματα πολλές παραγγελίες καθώς και την σειρά με την οποία θα εκτελούνται ώστε να συνδυάζουν τις αξιόπιστες χρονικά με τις οικονομικά αποδοτικές παραδόσεις. Για την εξισορρόπηση μεταξύ των δύο πρέπει να ληφθούν υπόψη περιορισμοί για την εύρεση της καλύτερης δυνατής λύσης, όπως είναι το βάρος ή η χωρητικότητα του οχήματος, ο διαθέσιμος χρόνος για την παράδοση, οι χρόνοι φόρτωσης και εκφόρτωσης, οι ώρες εργασίας των οδηγών, οι διαφορετικές ταχύτητες των οχημάτων, η κυκλοφοριακή συμφόρηση, οι περιορισμοί πρόσβασης και οι περιβαλλοντικοί περιορισμοί (Saeheaw & Charoenchai 2016).

Οι οδικές μεταφορές συνεχίζουν να έχουν το μεγαλύτερο μερίδιο των Ευρωπαϊκών εμπορευματικών μεταφορών μεταξύ των τριών τρόπων χερσαίων μεταφορών (οδικές, εσωτερικές πλωτές και σιδηροδρομικές) σε ποσοστό 74,9%, το 2014. Τα συγκεντρωτικά στοιχεία για τις χώρες τις Ευρωπαϊκής Ένωσης δείχνουν ότι μεταφέρθηκαν 2.236 δις τόνοι αγαθών ανά χιλιόμετρο (t/Km) στις χερσαίες μεταφορές που αντιστοιχούν σε 1.675 t/Km για το οδικό δίκτυο. Ο συνολικός κύκλος εργασιών (έσοδα) αυτών των μεταφορών κυμαίνεται από 0,8% έως 7,9% των συνολικών εσόδων των διάφορων χωρών στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Ο συνολικό τζίρος (έσοδα) που προέρχεται από τις μεταφορές του οδικού δικτύου, ανέρχεται σε 300 δις ευρώ, ποσοστό 2% του ακαθάριστου εγχώριου προϊόντος για την Ευρώπη για το 2014. Επιπλέον, τα κόστη μεταφοράς συνιστούν το 4% έως 10% της τιμής πώλησης ενός προϊόντος ανάλογα με τον κλάδο δραστηριοποίησης (Coyle et al., 1996). Συνεπώς, ο αποδοτικός προγραμματισμός των δρομολογίων των οχημάτων που μειώνει τις διανυόμενες αποστάσεις και τους χρόνους διέλευσης στο ελάχιστο, έχει σημαντική επίδραση στην κερδοφορία των εταιρειών του μεταφορικού τομέα και μεγάλο αντίκτυπο στις εθνικές οικονομίες.

Σήμερα, είναι κοινώς αποδεκτό πως η χρήση καυσίμων με βάση τον άνθρακα αποτελεί μια από τις σημαντικότερες απειλές του περιβάλλοντος λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου. Στην Ευρώπη, οι μεταφορές αντιστοιχούν στο 25% των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου (Green House Gas emission) και, συγκεκριμένα, οι οδικές μεταφορές είναι υπεύθυνες για το 70% των παραγόμενων εκπομπών που οφείλονται συνολικά στις μεταφορές, όπως αναφέρει σχετική αναφορά της Ευρωπαϊκής Επιτροπής. Έχει προβλεφθεί πως οι οδικές μεταφορές θα αυξηθούν κατά 33% τα επόμενα 30 χρόνια (Sbihi & Eglese 2007).

Καθίσταται αναγκαία, λοιπόν, η αποδοτική δρομολόγηση και ο προγραμματισμός με συνθήκες κυκλοφοριακής συμφόρησης, ώστε να μειωθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αφού οι εκπομπές CO2 είναι συνυφασμένες με τους χρόνους διέλευσης, την ταχύτητα των οχημάτων και τις διάφορες συνθήκες συμφόρησης. Στο προτεινόμενο έργο, θα εξεταστεί ενδελεχώς το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων και προγραμματισμού παραδόσεων με χρονικούς περιορισμούς σε συνδυασμό με τις εκπομπές CO2, λόγω της χρονικής εξάρτησης τους με τις ταχύτητες (Qian & Eglese 2016).

Στις αστικές περιοχές, η κυκλοφοριακή συμφόρηση είναι ο πιο ισχυρός περιοριστικός παράγοντας. Ως αποτέλεσμα της κυκλοφοριακής συμφόρησης, οι χρόνοι διέλευσης εξαρτώνται από τον χρόνο εκκίνησης. Συνεπώς, η δρομολόγηση των οχημάτων περιλαμβάνει το υπο-πρόβλημα της βελτιστοποίησης του χρόνου αναχώρησης κάθε οχήματος (από την αποθήκη και από τον πελάτη). Ένας ακόμα χρονικός περιορισμός είναι η συμμόρφωση με τους κανονισμούς του ωραρίου οδήγησης. Αν αυτός ο περιορισμός συνδυαστεί με την κυκλοφοριακή συμφόρηση, το πρόβλημα δρομολόγησης και προγραμματισμού γίνεται πολύ δύσκολο να επιλυθεί (AbdAllah et al. 2017; Wen & Eglese 2015). Τις τελευταίες δεκαετίες, τα μοντέλα δρομολόγησης στόλου οχημάτων έχουν εξελιχθεί και καθίστανται πιο ρεαλιστικά. Παρόλα αυτά, έχουν αγνοηθεί οι πραγματικοί περιορισμοί κυκλοφοριακής συμφόρησης. Πέραν των χρόνων διέλευσης, πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψη οι χρόνοι αναμονής, ειδικά για παραδόσεις με αυστηρούς χρονικούς περιορισμούς, αφού οι μεγάλοι χρόνοι αναμονής δημιουργούν υψηλά κόστη μίσθωσης των οχημάτων ή μισθοδοσίας των οδηγών των φορτηγών και κάνουν τα οχήματα μη διαθέσιμα για άλλες υπηρεσίες.

Στην Ελλάδα, η απελευθέρωση της αγοράς των μεταφορών αναμένεται να μετατρέψει το συγκεκριμένο μοντέλο των πολλών σε αριθμό ανεξάρτητων μεταφορέων σε ένα μικρότερο πλήθος οργανωμένων εταιρειών αποθήκευσης και διανομής με μεγάλους στόλους και πολύπλοκα φορτία μεταφοράς. Αυτή η νέα κατάσταση θα αυξήσει τη σημασία δημιουργίας κατάλληλων μεθόδων και εργαλείων λογισμικού που μπορούν να υποστηρίξουν τις αποφάσεις δρομολόγησης στόλου οχημάτων και προγραμματισμού παραδόσεων που εξαρτώνται από χρονικούς περιορισμούς, ειδικά στα ελληνικά αστικά κέντρα που η συμφόρηση είναι σύνηθες και απρόβλεπτο φαινόμενο.

Η κυκλοφοριακή συμφόρηση σε αστικές περιοχές δεν έχει αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά για χρονικά εξαρτώμενα προβλήματα δρομολόγησης στόλου οχημάτων και προγραμματισμού παραδόσεων, όπως προκύπτει από την ανάλυση της βιβλιογραφίας (Sohr, 2016). Εάν προστεθούν περαιτέρω χρονικοί περιορισμοί, όπως η οδήγηση και οι χρόνοι εργασίας, η βελτιστοποίηση των αναχωρήσεων και χρόνων παράδοσης γίνεται εξαιρετικά δύσκολη. Παρ' όλα αυτά, πλέον είναι πιο εύκολη η συλλογή δεδομένων πραγματικού χρόνου (μέσω κινητών τηλεφώνων, GPS) και ιδιομορφίας του οδικού δικτύου μέσω GIS (Geographical Information System) οι οποίες δίνουν την δυνατότητα πρόβλεψης των χρόνων διέλευσης στα αστικά περιβάλλοντα. Επιπλέον, οι περιορισμοί των περιβαλλοντικών επιπτώσεων άρχισαν πρόσφατα να λαμβάνονται υπόψη στα προβλήματα εμπορευματικών

μεταφορών με σκοπό να ελαχιστοποιούνται οι εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα (CO2), οι οποίες εξαρτώνται από τους χρόνους διέλευσης και τις ταχύτητες των φορτηγών (Qian & Eglese, 2016). Οι εταιρείες, λειτουργώντας σε ένα εξαιρετικά ανταγωνιστικό περιβάλλον, πρέπει να διαχειριστούν πολλούς και αντικρουόμενους στόχους σχετικά με τον προγραμματισμό της διανομής, τη μείωση του κόστους διανομής, την καλύτερη εξυπηρέτηση πελατών, τη συμμόρφωση με τους νόμους και τους κανονισμούς και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Έτσι, η έρευνα σχετικά με την κυκλοφοριακή συμφόρηση μέσω του εξαρτημένου χρονικά προβλήματος δρομολόγησης και προγραμματισμού παρουσιάζει ακαδημαϊκό ενδιαφέρον και πρακτικά απασχολεί της εταιρείες εφοδιαστικής και έχει σημαντικό αντίκτυπο στην εθνική οικονομία, που μπορεί να επωφεληθεί της έκβασης της.

1.2 Αντικείμενο Διπλωματικής Εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εκπόνηση βιβλιογραφικής ανάλυσης και επισκόπησης ώστε να καθοριστούν οι τάσεις των μεθόδων επίλυσης του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων (VRP) για εμπορευματικές μεταφορές σε αστικές περιοχές και να προταθούν οι καταλληλότερες από αυτές μέθοδοι για την επίλυση του. Οι αστικές εμπορευματικές μεταφορές παρουσιάζουν ιδιαίτερους περιορισμούς και είναι ευάλωτες στην επιρροή ποικίλων παραγόντων, όπως αυτοί αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα (κυκλοφοριακή συμφόρηση, περιβαλλοντολογικές επιπτώσεις κ.α.). Το γεγονός αυτό επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την τελική μορφή που τελικά θα λάβει το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων. Ωστόσο, ο κατάλληλος συνδυασμός διαφόρων παραλλαγών του VRP που λαμβάνουν υπόψη τους άνωθεν περιορισμούς συμβάλει στην καλύτερη δυνατή προσέγγιση των ιδιαιτεροτήτων που παρουσιάζουν οι αστικές εμπορευματικές μεταφορές.

Η έρευνα εστιάζει στους αλγορίθμους και στις μεθόδους επίλυσης επιλεγμένων παραλλαγών του προβλήματος δρομολόγησης όπως αυτοί έχουν προταθεί από την διεθνή ερευνητική κοινότητα, και ακολουθεί συγκεκριμένη και δομημένη μεθοδολογία. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται σε αλγόριθμους που μπορούν να ενσωματωθούν σε πληροφοριακά συστήματα υποστήριξης των διανομέων (εντός πόλεων).

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση που διεξήχθη αξιοποιήθηκε και πρακτικά σε ερευνητικό έργο σχετικά με την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου διαδικτυακού λογισμικού που θα παρέχεται ως υπηρεσία στους χρήστες του (SaaS) για την υποστήριξη των σύγχρονων αναγκών των ελληνικών εταιρειών εφοδιασμού και διανομής. Μέσω του συστήματος θα παρέχεται η δυνατότητα αποδοτικού προγραμματισμού των παραδόσεων και υπολογισμού των διαδρομών των οχημάτων τους υπό χρονικά εξαρτώμενους χρόνους διέλευσης. Το προτεινόμενο σύστημα θα χρησιμοποιεί μεθόδους επίλυσης προβλημάτων δρομολόγησης στόλου οχημάτων και προγραμματισμού παραδόσεων, λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω περιορισμούς και κυρίως αυτόν της κυκλοφοριακής συμφόρησης.

Ως συνέχεια της παρουσίασης των εισαγωγικών εννοιών που θα αναλυθούν και θα χρησιμοποιηθούν εκτενώς στα επόμενα κεφάλαια, είναι σημαντικό να παρουσιαστεί η δομή που θα έχει η παρούσα διπλωματική εργασία και η διαδικασία κατά την οποία θα προκύψουν συμπεράσματα και τελικές πληροφορίες, μέσω των οποίων ελπίζεται να επωφεληθούν μελλοντικές έρευνες και έργα.

Πιο συγκεκριμένα στο **Κεφάλαιο 2** αναλύεται το πρόβλημα της δρομολόγησης οχημάτων, γίνεται κάποια ιστορική αναδρομή, παρουσιάζονται οι παραλλαγές του προβλήματος που επιλέχθηκαν (οι παραλλαγές που αφορούν τις αστικές εμπορευματικές μεταφορές) καθώς και η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την επιλογή των παραλλαγών.

Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζονται αναλυτικότερα οι κύριες κατηγορίες αλγορίθμων επίλυσης του προβλήματος δρομολόγησης καθώς και οι σημαντικότεροι αλγόριθμοι από κάθε κατηγορία.

Στο **Κεφάλαιο 4** αποτυπώνεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση της διεθνής βιβλιογραφίας που πραγματοποιήθηκε ώστε να αναγνωριστούν οι τάσεις των ερευνητών ως προς τις προτεινόμενες μεθόδους επίλυσης των επιλεγμένων παραλλαγών του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων.

Στο **Κεφάλαιο 5** περιλαμβάνονται, ανά κατηγορία των προβλημάτων δρομολόγησης οχημάτων, οι σημαντικότερες μέθοδοι επίλυσης που έχουν προταθεί από τους ερευνητές όπως αυτές βρέθηκαν από την βιβλιογραφική έρευνα.

Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται τα επιμέρους συμπεράσματα που προέκυψαν από την βιβλιογραφική έρευνα και γίνεται πρόταση συγκεκριμένων μεθόδων επίλυσης ώστε να αξιοποιηθούν στο επόμενο στάδιο υλοποίησης του λογισμικού συστήματος δρομολόγησης οχημάτων.

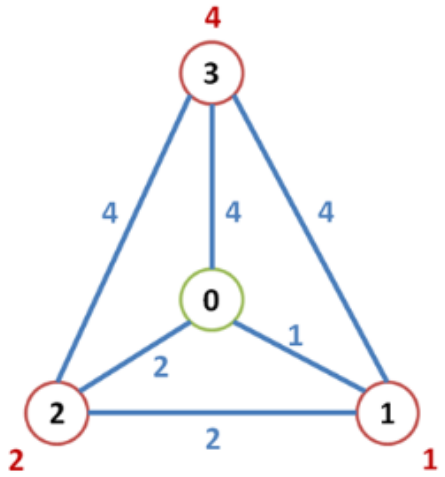
Στο **Κεφάλαιο 7** παρουσιάζονται τα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν από την έρευνα.

2. Πρόβλημα της Δρομολόγησης Οχημάτων

2.1 Ιστορική Αναδρομή

Το θεμέλιο στο οποίο στηρίχθηκε η εξέλιξη της διερεύνησης του προβλήματος της δρομολόγησης θεωρείται το πρόβλημα του περιοδεύοντος πωλητή (Traveling Salesman Problem ή TSP). Η γενική μορφή του προβλήματος αυτού εμφανίστηκε περί το 1930 από τον μαθηματικό Karl Menger (1902-1985) και αποσκοπεί στην εύρεση της συντομότερης διαδρομής η οποία ενώνει έναν συγκεκριμένο και προκαθορισμένο αριθμό περιοχών.

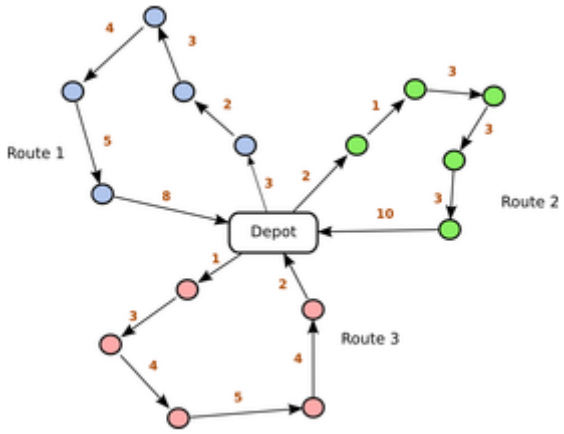
Έστω ένας πωλητής ξεκινώντας από την πόλη του πρέπει να επισκεφθεί n πελάτες σε διαφορετικές πόλεις , από τις οποίες επιθυμεί να περάσει μία μόνο φορά και να επιστρέψει πίσω στην πόλη του. Το πρόβλημα λοιπόν διατυπώνεται ως η εύρεση της συντομότερης ή χαμηλότερου κόστους διαδρομή που να ικανοποιεί τους άνω περιορισμούς. Παρακάτω στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται γραφικά το πρόβλημα με έναν πλήρη μη προσανατολισμένο γράφο στον οποίο όλοι οι κόμβοι (0, 1, 2, 3) αντιστοιχούν σε κόμβους και οι ακμές (edges) που συνδέουν τους κόμβους αντιστοιχούν στο οδικό δίκτυο μεταξύ των πόλεων.



Σχήμα 2.1 : Το πρόβλημα του Περιοδεύοντος Πωλητή

Το Πρόβλημα της Δρομολόγησης Οχημάτων (VRP – Vehicle Routing Problem) παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τους (Dantzig and Ramser, 1959) το 1959 ως το πρόβλημα της αποστολής φορτίων (Truck Dispatching Problem). Ο ορισμός του προβλήματος έλεγε ότι πρέπει «Να βρεθεί η βέλτιστη δρομολόγηση (σχεδιασμός διαδρομής), δηλαδή η ελαχιστοποίηση της συνολικά διανυόμενης απόστασης, ενός στόλου φορτηγών διανομής καυσίμου, μεταξύ ενός τερματικού σταθμού ανεφοδιασμού και ενός μεγάλου αριθμού σταθμών εξυπηρέτησης». Χρησιμοποιώντας μία μέθοδο βασισμένη στις αρχές του Γραμμικού Προγραμματισμού οι Dantzig και Ramser κατέληξαν σε μία προσεγγιστικά βέλτιστη λύση η οποία περιλάμβανε τέσσερις διαδρομές για ένα πρόβλημα δώδεκα σταθμών

εξυπηρέτησης. Όταν η χωρητικότητα ενός μόνο φορτηγού είναι αρκετή για την εξυπηρέτηση όλων των σταθμών (πελατών), τότε το πρόβλημα ταυτίζεται με αυτό του Περιοδεύοντος Πωλητή (TSP). Επομένως, το πολλαπλό πρόβλημα του Περιοδεύοντος Πωλητή (multi Travelling Salesman Problem - m- TSP) ταυτίζεται με αυτό του TDP, όπου υπάρχει ένα πλήθος οχημάτων.



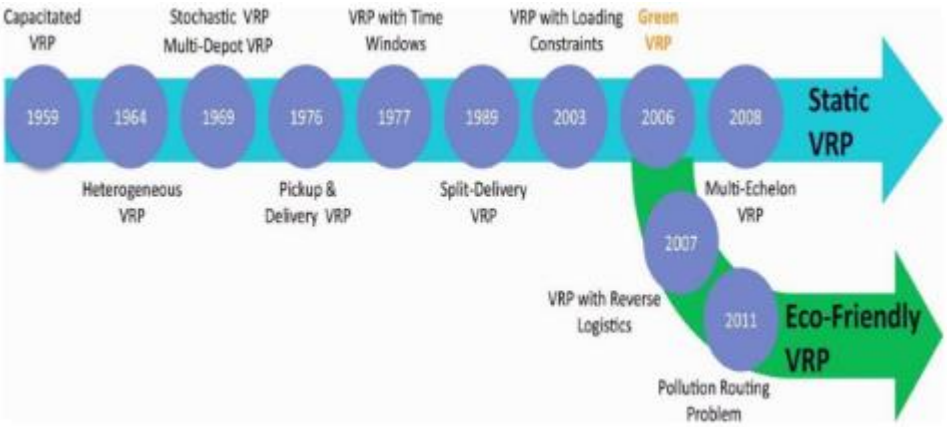
Σχήμα 2.2 : Παράδειγμα Προβλήματος Δρομολόγησης Οχημάτων

Το 1964 οι Clarke και Wright ήταν αυτοί που γενίκευσαν το πρόβλημα το οποίο συναντάται ακόμα και σήμερα στον κλάδο των logistics και μεταφορών όπου ένα σύνολο πελατών, διασκορπισμένο γύρω από μία κεντρική αποθήκη, εξυπηρετείται από ένα στόλο φορτηγών διαφορετικής χωρητικότητας το καθένα και πρότειναν έναν ευρετικό αλγόριθμο εξοικονόμησης, ο οποίος παρουσιάζει σημαντικές βελτιώσεις σε σχέση με αυτόν των Dantzing & Ramser.

Το «Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων» (Vehicle Routing Problem - VRP) ως όρος δόθηκε από τους (Golden, Magnanti and Nguyen, 1975) το 1975 σε μία μεγάλη κατηγορία προβλημάτων βελτιστοποίησης, με σκοπό το σχεδιασμό των διαδρομών βέλτιστου συνολικού κόστους για συγκεκριμένο στόλο οχημάτων με προκαθορισμένη χωρητικότητα, που ξεκινούν από μία κεντρική αποθήκη, ώστε να εξυπηρετήσουν τη ζήτηση ενός προκαθορισμένου συνόλου πελατών, ικανοποιώντας συγκεκριμένους περιορισμούς.

Στη συνέχεια διάφορες παραλλαγές του VRP άρχισαν να εμφανίζονται στη διεθνή βιβλιογραφία στην προσπάθεια των ερευνητών να εφαρμόσουν το πρόβλημα αυτό σε πρακτικά προβλήματα με διαφορετικούς περιορισμούς το κάθε ένα. Το 1984 ο Solomon παρουσίασε το VRP με χρονικά περιθώρια (VRPTW) (Solomon, 1984) και ορισμένα “προβλήματα αναφοράς” γνωστά και ως “Solomon instances”. Η έρευνα στο VRP επιταχύνθηκε τη δεκαετία του 1990 με την αλματώδη πρόοδο των ηλεκτρονικών υπολογιστών καθώς τώρα πλέον οι ερευνητές ήταν σε θέση να αναπτύξουν και να εφαρμόσουν πολύ πιο περίπλοκους αλγορίθμους επίλυσης.

Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται η πορεία των παραλλαγών του VRP και πως έχει διαμορφωθεί το πρόβλημα με το πέρασμα του χρόνου.



Σχήμα 2.3: Χρονική Εξέλιξη Παραλλαγών VRP

Στην συνέχεια παρατίθεται ένας ενδεικτικός πίνακας (Πίνακας 2.1), στον οποίο φαίνονται ορισμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά των προβλημάτων διανομής. Επιπλέον στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι επιλογές που παρέχονται κατά την διαδικασία της σχεδίασης της βέλτιστης δρομολόγησης των οχημάτων καθώς και οι διάφοροι περιορισμοί (Γκαγιαλής et al. 2007).

Χαρακτηριστικά	Επιλογές
Μέγεθος Στόλου	■ Ένα όχημα ■ Πολλά οχήματα
Σύνθεση Στόλου- Φυσικά χαρακτηριστικά	■ Όμοια οχήματα ■ Διαφορετικοί τύποι οχημάτων ■ Ειδικά χαρακτηριστικά οχημάτων
Βάση στόλου	■Μία ■Πολλαπλές
Συστατικά Κόστους	■ Κόστος δρομολογίων: κόστος setup, μεταβλητο κόστος ανά ώρα, χιλιόμετρο, αριθμό επισκέψεων κόστος διοδίων ■ Κόστος ιδιοκτησίας στόλου (σταθερό κόστος) ■ Κόστος υπηρεσιών τρίτων μεταφορέων
Φύση της ζήτησης	■ Γνωστή ζήτηση (ντερτεμινιστική) ■ Τυχαία ζήτηση όσο αφορά την ποσότητα (στοχαστική) ■ Τυχαία ζήτηση όσο αφορά τον χρόνο και την τοποθεσία (στοχαστική) ■ Δυνατότητα μερικής ικανοποίησης ζήτησης
Είδος Δρομολογίων (λειτουργίες που εκτελούνται)	■ Μόνο συλλογές ■ Μόνο παραδόσεις ■ Μικτές συλλογές και παραδόσεις ξεχωριστά
Αριθμός δρομολογίων ανά όχημα και χρονικό διάστημα	■ Ένα δρομολόγιο ■ Πολλά δρομολόγια ■ Ένα δρομολόγιο που μπορεί να εκτείνεται και πέραν του συνήθους χρονικού διαστήματος
Αντικειμενικός στόχος	■ Ελαχιστοποίηση συνολικού κόστους ■ Ελαχιστοποίηση των διανυόμενων αποστάσεων ή χρόνου εκτέλεσης δρομολογίων ■ Ελαχιστοποίηση του αριθμού των οχημάτων ■ Ελαχιστοποίηση της χρήσης οχημάτων τρίτων μεταφορέων

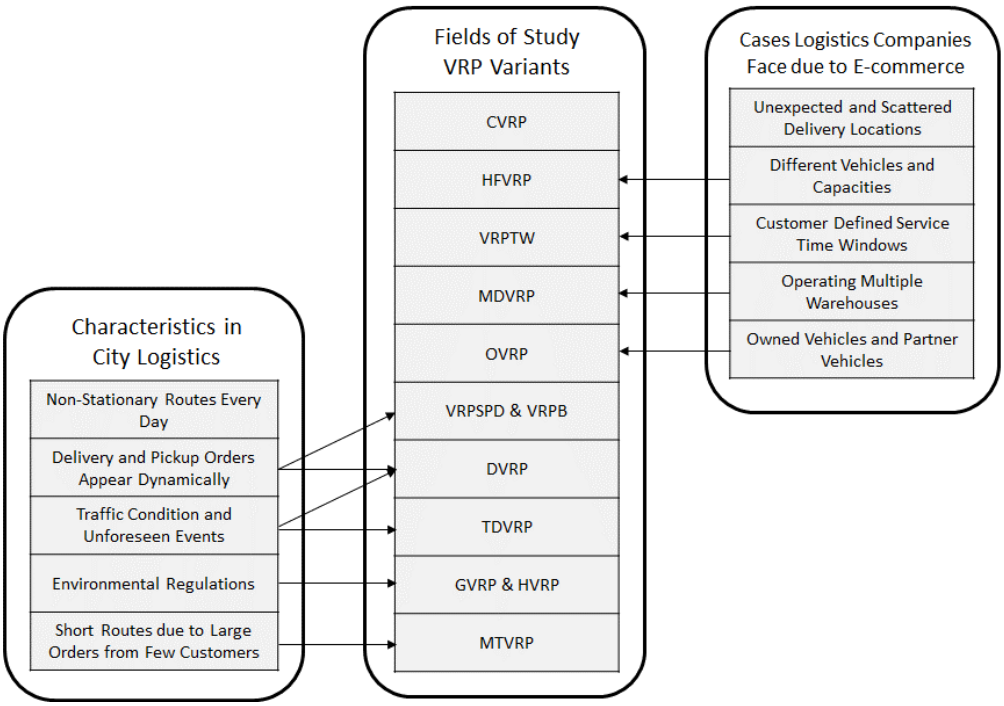
Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά και Επιλογές Προβλήματος Δρομολόγησης

Περιορισμοί	
Ικανοποίηση ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που σχετίζονται με τα οχήματα	■ Περιορισμός στη χωρητικά οχημάτων ως συνδυασμός βάρους και όγκου ■ Διαχωρισμός παραγγελιών μεταξύ οχημάτων (μερικές παραδόσεις) ■ Μεταφορές προϊόντων μεταξύ των οχημάτων ■ Οχήματα που δεν επιστρέφουν στις εγκαταστάσεις στο τέλος του δρομολογίου ■ Υποχρέωση για εκτέλεση ενός ελάχιστου μεταφορικού έργου από τρίτους μεταφορείς (βάσει συμβάσεων) ■ Άλλες ειδικές συμφωνίες με τους μεταφορείς ■ Συμβατότητα μεταξύ οχήματος - εγκατάστασης φόρτωσης ■ Συμβατότητα μεταξύ οχήματος - πελάτη ■ Συμβατότητα μεταξύ οχήματος - προϊόντος ■ Υποχρέωση πλήρους ή καθόλου χρήσης συγκεκριμένων οχημάτων ■ Ύπαρξη προκαθορισμένων δρομολογίων
Ικανοποίηση ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που σχετίζονται με τους πελάτες	■ Καθορισμένα χρονικά περιθώρια (time windows) ■ Χρόνοι φόρτωσης και εκφόρτωσης ως συνάρτηση των θέσεων των πελατών και του μεγέθους της παραγγελίας
Ικανοποίηση ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που σχετίζονται με τα προϊόντα	■ Εναλλακτικά σημεία φόρτωσης/προέλευσης των προϊόντων ■ Διαφορετικό κόστος προϊόντος για τα εναλλακτικά σημεία φόρτωσης/προέλευσης ■ Πολλοί διαφορετικοί τύποι προϊόντων σε διαφορετικά διαμερίσματα των οχημάτων
Ικανοποίηση ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που σχετίζονται με τις εγκαταστάσεις	■ Διαχωρισμός παραγγελιών μεταξύ εγκαταστάσεων ■ Εγκαταστάσεις που δεν χρησιμοποιούνται ως βάση από οχήματα ■ Ελλείψεις προϊόντων σε συγκεκριμένες εγκαταστάσεις ■ Συμφόρηση δρόμων σε συγκεκριμένες ώρες της ημέρας ■ Διαφορετικά όρια ταχύτητας ανάλογα με την κατηγορία του δρόμου ■ Διαφορετικά όρια μεταφερόμενου φορτίου για συγκεκριμένους δρόμους

Πίνακας 2.2: Συνήθεις Περιορισμοί Προβλήματος Δρομολόγησης

2.2 Ανάλυση Παραλλαγών του Προβλήματος της Δρομολόγησης

Οι διάφορες παραλλαγές του VRP περιορίζονται στην μελέτη λίγων και συγκεκριμένων χαρακτηριστικών και περιορισμών κάθε φορά ώστε να προσεγγίζουν θεωρητικώς υποπροβλήματα του γενικότερου κλάδου των μεταφορών (πχ. η παραλλαγή VRPPD ενδιαφέρεται για περιπτώσεις όπου γίνονται παραδόσεις αλλά και παραλαβές χωρίς να λαμβάνει υπόψη άλλους συνηθισμένους περιορισμούς όπως τα χρονικά παράθυρα κλπ. και χαρακτηριστικά όπως η σύσταση του στόλου οχημάτων κλπ.), ενώ δεν υπάρχει κάποια παραλλαγή που να προσεγγίζει τις απαιτήσεις του σύνθετου προβλήματος των αστικών εμπορευματικών μεταφορών.



Σχήμα 2.4 Συσχέτιση Παραλλαγών του VRP και Αστικών Εμπορευματικών Μεταφορών

Οι αστικές εμπορευματικές μεταφορές είναι σύνθετο πρόβλημα και έχουν να αντιμετωπίσουν ειδικά χαρακτηριστικά όπως συνθήκες κυκλοφοριακής συμφόρησης και απρόσμενα συμβάντα, περιβαλλοντικούς κανονισμούς, μικρές διαδρομές λόγω μεγάλων παραγγελιών από λίγους πελάτες, την ικανοποίηση χρονικών παραθύρων των πελατών, στόλος οχημάτων ίδιου ή και διαφορετικού τύπου οχημάτων κλπ. Για την θεωρητική μελέτη τους οι αστικές εμπορευματικές μεταφορές μπορούν να προσεγγιστούν από ένα σύνολο απλών παραλλαγών του VRP οι οποίες ικανοποιούν τα χαρακτηριστικά και τις πιο συνηθισμένες περιπτώσεις των αστικών μεταφορών.

Στο Σχήμα 2.4 απεικονίζεται η συσχέτιση των παραλλαγών του VRP με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των αστικών εμπορευματικών μεταφορών. Οι παραλλαγές που φαίνονται στον μεσαίο πίνακα του σχήματος είναι αυτές που προσεγγίζουν το υπό μελέτη πρόβλημα και θα αναλυθούν στην συνέχεια με περισσότερη λεπτομέρεια.

2.2.1 Δυναμικό και Στατικό Πρόβλημα Δρομολόγησης (Dynamic Vehicle Routing Problem – DVRP)

Στατικό Πρόβλημα Δρομολόγησης

Σύμφωνα με τον ορισμό του (Larsen, 2000) μπορούμε να πούμε πως ένα πρόβλημα δρομολόγησης θεωρείται στατικό όταν όλες οι πληροφορίες σχετικά με τον προγραμματισμό των διαδρομών θεωρούνται γνωστές στον αποστολέα πριν την έναρξη του σχεδιασμού της διαδρομής και οι πληροφορίες που αφορούν την δρομολόγηση δεν μεταβάλλονται μετά τον σχεδιασμό της διαδρομής.

Οι πληροφορίες οι οποίες θεωρούνται σχετικές με το πρόβλημα περιλαμβάνουν, όλα τα φυσικά χαρακτηριστικά των πελατών όπως είναι η γεωγραφική τους θέση, ο χρόνος εξυπηρέτησης του πελάτη και η ζήτηση. Επίσης θα πρέπει να είναι γνωστά από τον dispatcher και ορισμένες πληροφορίες που αφορούν το σύστημα, όπως είναι οι χρόνοι των διαδρομών μεταξύ των πελατών.

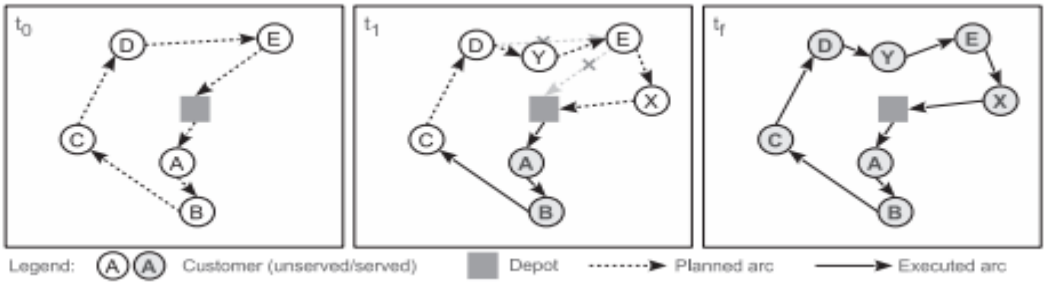
Δυναμικό Πρόβλημα Δρομολόγησης

Με τον όρο δυναμικό γενικά εννοείται ότι τα στοιχεία μεταβάλλονται με την πάροδο του χρόνου και δεν παραμένουν σταθερά. Στην περίπτωση του DVRP αυτό σημαίνει πως δεν είναι γνωστές στον αποστολέα όλες οι πληροφορίες σχετικά με τον προγραμματισμό των διαδρομών καθώς αυτός ξεκινάει να σχεδιάζει τις διαδρομές αλλά και ότι οι πληροφορίες μπορεί να αλλάξουν μετά τον σχεδιασμό της αρχικής διαδρομής (Larsen, 2000).

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα παράδειγμα του (Pillac *et al.*, 2013) στο Σχήμα 2.5 με ένα μόνο όχημα. Στην πρώτη εικόνα παρατηρούμε το δρομολόγιο του οχήματος κατά την εκτέλεση του αρχικού πλάνου δρομολόγησης (A-B-C-D-E), στη δεύτερη εικόνα απεικονίζεται η εμφάνιση δύο νέων πελατών (πελάτες X και Y) προς δρομολόγηση και στην τρίτη παρουσιάζεται η μετατροπή του αρχικού δρομολογίου του οχήματος ώστε να τους εξυπηρετήσει (A-B-C-D-Y-E-X).

Στην δυναμική δρομολόγηση, η δυνατότητα να ανακατευθύνεις ένα κινούμενο όχημα όταν δέχεσαι μία νέα αίτηση, κοντά στην παρούσα τοποθεσία του οχήματος, προσφέρει επιπρόσθετα, μείωση των εξόδων (savings). Για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο ωστόσο, απαιτούνται πραγματικά δεδομένα (real-time data) που να προσδιορίζουν την θέση του

οχήματος καθώς και η δυνατότητα επικοινωνίας με τον οδηγό ώστε να του ανατεθούν οι νέοι προορισμοί.



Σχήμα 2.5 Παράδειγμα Δυναμικού VRP (Pillac *et al.*, 2013)

Σε αντίθεση με το αντίστοιχο στατικό πρόβλημα, η δυναμική δρομολόγηση εμπλέκει νέα στοιχεία τα οποία αυξάνουν την πολυπλοκότητα των αποφάσεων (περισσότεροι βαθμοί ελευθερίας) και δημιουργούν νέες απαιτήσεις και προκλήσεις (Pillac *et al.*, 2013). Πέρα από αυτό, ένας τομέας στον οποίο διαφέρουν συνήθως είναι η αντικειμενική συνάρτηση. Στην συνηθισμένη μορφή της, στο στατικό πρόβλημα της δρομολόγησης επιλέγεται η ελαχιστοποίηση του κόστους δρομολόγησης. Αντίθετα, η δυναμική δρομολόγηση επιλέγει την βελτιστοποίηση άλλων εννοιών όπως είναι η μεγιστοποίηση του βαθμού εξυπηρέτησης και η μεγιστοποίηση των εσόδων. Η δυναμική δρομολόγηση απαιτεί αποφάσεις σε απευθείας σύνδεση η οποία συνδυάζει την αντίδραση με την ποιότητα της απόφασης.

2.2.2 Το Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων Εξαρτημένο από τον Χρόνο (Time Dependent VRP – TDVRP)

Μια άλλη εκδοχή του προβλήματος δρομολόγησης παρόμοια με το DVRP , όπου αλλάζουν συνεχώς οι χρόνοι διέλευσης, είναι αυτό του εξαρτημένου από τον χρόνο. Ωστόσο σε αυτήν την παραλλαγή, ο παράγοντας που επηρεάζει τους χρόνους διέλευσης είναι, η ώρα της ημέρας που ξεκίνησε το ταξίδι σε αυτή την διαδρομή. Οι χρόνοι αυτοί πρέπει να υπολογίζονται με μεγάλη ακρίβεια και έχουν υψηλό αντίκτυπο στην αποδοτικότητα της τελικής λύσης.

Η εκτίμηση των χρόνων διέλευσης γίνεται μέσω μαθηματικών μοντέλων. Αρχικά, οι χρόνοι διέλευσης μεταξύ δύο κόμβων υπολογίζονται είτε ντετερμινιστικά (λαμβάνοντας υπόψη κάποιες μέσες τιμές που έχουν υπολογιστεί γίνεται η εκτίμηση των χρόνων) είτε στοχαστικά. Εάν δεν είναι η αξιοπιστία ο πρωτεύον στόχος, προτιμώνται τα ντετερμινιστικά μοντέλα καθώς δεν εμπλέκουν την αβεβαιότητα στους χρόνους διέλευση ενώ όταν είναι επιθυμητή η αξιοπιστία χρησιμοποιούνται τα στοχαστικά μοντέλα υπολογισμού, καθώς παρέχουν μία συνεχή αναπαράσταση των χρόνων και των διακυμάνσεων τους. Η χρήση κατανομών βοηθάει στην παροχή αξιόπιστων πληροφοριών εφόσον η κατανομή απεικονίζει σωστά την φύση των χρόνων μεταφοράς στις αστικές περιοχές. Ενώ η περίπτωση της κανονικής κατανομής θα ήταν

ιδανική λόγω μαθηματικών και ευκολίας χρήσης και εφαρμογής, δεν απεικονίζει σωστά το πρόβλημα, σε αντίθεση με άλλες πιο σύνθετες κατανομές όπως η Burr III Type XII η οποία ωστόσο παρουσιάζει και αυτή ορισμένα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Γενικά είναι αμφιλεγόμενο εάν υπάρχει κατανομή που να είναι ιδανική για τους χρόνους διέλευσης σε αστικά περιβάλλοντα, να απεικονίζει την φύση του προβλήματος ικανοποιητικά και να είναι εφικτή για πρακτικές εφαρμογές (Groß et al. 2016; Susilawati et al. 2013).

Η βελτιστοποίηση του προβλήματος αποτελείται από την εύρεση της λύσης που ελαχιστοποιεί και τον αριθμό ταξιδιών που εκτελούν τα οχήματα και το συνολικό χρόνο διέλευσης ή το συνολικό κόστος.

2.2.3 Το πρόβλημα της δρομολόγησης Περιορισμένης Χωρητικότητας (Capacitated VRP – CVRP)

Το CVRP έχει περιγραφηθεί ως το πιο κοινό πρόβλημα διακίνησης στον τομέα των τροφίμων, των καυσίμων και στην διανομή προϊόντων λιανικής πώλησης. Σύμφωνα με τον (Toth and Vigo, 2002) η βασική έκδοση του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων (VRP) είναι αυτό της περιορισμένης χωρητικότητας πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (CVRP). Σύμφωνα με το CVRP ένας συγκεκριμένος στόλος οχημάτων διανομής, όπου κάθε όχημα έχει ορισμένη και όμοια χωρητικότητα, θα πρέπει να εξυπηρετήσει τους πελάτες οι οποίοι έχουν γνωστή ζήτηση ενός προϊόντος, από μία κοινή εγκατάσταση (αποθηκευτικό χώρο), με ελάχιστο κόστος μεταφοράς του προϊόντος (Γκαγιαλής et al. 2007). Βασικό χαρακτηριστικό του είναι ότι οι ζητήσεις είναι ντετερμινιστικές, είναι γνωστές και δεν υπάρχει αβεβαιότητα.

Κατά τους (Hasle and Kloster, 2007), το περιορισμένης χωρητικότητας πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (CVRP) είναι γενίκευση του προβλήματος του περιπλανώμενου πωλητή (TSP). Ο αντικειμενικός σκοπός του CVRP είναι η εύρεση λύσης αποτελούμενης από K διαδρομές (π.χ. μία κυκλική διαδρομή για κάθε όχημα το οποίο ξεκινάει από την αποθήκη και καταλήγει σε αυτήν με ελάχιστο συνολικό κόστος ταξιδιού). Όλοι οι πελάτες εξυπηρετούνται μόνο μία φορά και η χωρητικότητα του οχήματος δεν υπερβαίνεται.

Ο ελάχιστος αριθμός των διαδρομών υπολογίζεται μερικές φορές λύνοντας ένα «bin packing» πρόβλημα, καθώς η χωρητικότητα του οχήματος είναι ο μόνος περιορισμός που υπολογίζει αυτόν τον αριθμό. Αυτό είναι εφικτό ακόμα και με πολλούς πελάτες. Αντιθέτως με μμεταβλητές του απλού προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων (VRP) δεν ισχύει. Συνήθως τα στοιχεία που δίνονται σε ένα CVRP πρόβλημα είναι οι θέσεις των πελατών που αναπαρίστανται ως σημεία, το κόστος ταξιδιού και η ευκλείδεια απόσταση.

2.2.4 Το Πρόβλημα της Δρομολόγησης με Χρονικά Περιθώρια (VRP with Time Windows – VRPTW)

Αυτή η παραλλαγή του προβλήματος δρομολόγησης έχει επικεντρώσει το ενδιαφέρον των ερευνητών και έχει μελετηθεί περισσότερο από κάθε άλλη. Το VRPTW έχει τους ίδιους περιορισμούς με το κλασικό πρόβλημα δρομολόγησης VRP και επιπλέον την ύπαρξη χρονικού

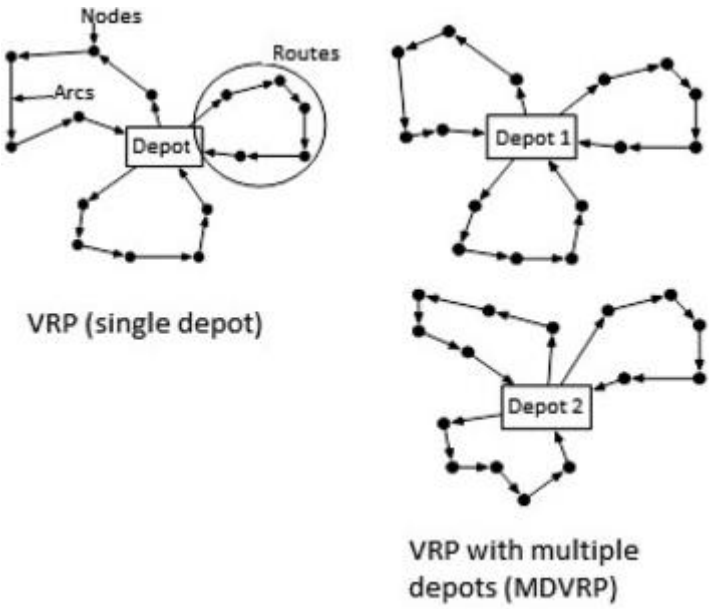
περιθωρίου στο οποίο μπορεί να εξυπηρετηθεί ο κάθε πελάτης, γεγονός που απορρέει από το γεγονός ότι μερικοί πελάτες επιβάλλουν προθεσμίες παράδοσης και κάποιο νωρίτερο χρόνο άφιξης (Solomon, 1983). Με την ύπαρξη χρονικών περιθωρίων το συνολικό κόστος δρομολόγησης πλέον περιλαμβάνει πέρα από τα κόστη της συνολικής διανυόμενης απόστασης και χρόνου αλλά και το κόστος του χρόνου αναμονής που προκύπτει όταν ένα όχημα προσέλθει πριν την έναρξη του χρόνου παράδοσης στον πελάτη

Υπάρχουν διαφορετικές εκδοχές του VRPTW, ανάλογα με το αν τα παράθυρα χρόνου των πελατών είναι αυστηρά (Hard Time Windows), όπου τα οχήματα δεν επιτρέπεται να φθάσουν σε κάποιον πελάτη μετά τη λήξη του χρονικού παραθύρου, είτε πιο χαλαρά (Soft Time Windows), όπου η εξυπηρέτηση επιτρέπεται να γίνει νωρίτερα ή αργότερα από τον προκαθορισμένο χρόνο, αλλά με το κόστος κάποιας ποινής η οποία μπορεί να είναι στην μορφή ποινικής ρήτρας η σε μείωση της εξυπηρέτησης του πελάτη (Beheshti et al., 2015).

2.2.5 Το Πρόβλημα της Δρομολόγησης από Πολλαπλές Εγκαταστάσεις (Multi-Depot VRP – MDVRP)

Οι εταιρείες που δραστηριοποιούνται στον κλάδο των logistics και των μεταφορών συνήθως διαθέτουν όχι μόνο με ένα κέντρο διανομής αλλά περισσότερα. Εάν οι πελάτες ομαδοποιούνται εύκολα γύρω από μία εγκατάσταση τότε το συγκεκριμένο πρόβλημα μετασχηματίζεται σε ένα σύνολο από κλασικά προβλήματα δρομολόγησης από μία εγκατάσταση. Το ουσιαστικό πρόβλημα της δρομολόγησης από πολλαπλές εγκαταστάσεις εμφανίζεται εάν η απόφαση για την εγκατάσταση που εξυπηρετεί κάθε πελάτη δεν είναι ξεκάθαρη (Γκαγιαλής 2007).

Ένα τέτοιο πρόβλημα απαιτεί την ανάθεση των πελατών στις διαθέσιμες αποθήκες. Σε κάθε αποθήκη υπάρχει ένας στόλος οχημάτων και κάθε όχημα που αναχωρεί από μία αποθήκη, αφού εξυπηρετήσει τους πελάτες που έχουν ανατεθεί, επιστρέφει στο σημείο απ' όπου ξεκίνησε. Αντικειμενικός στόχος είναι ελαχιστοποίηση του αριθμού των οχημάτων του στόλου και του αθροίσματος των χρόνων μετάβασης από κόμβο σε κόμβο (κόστη). Η συνολική ζήτηση των εμπορευμάτων κάθε διαδρομής εξυπηρετείται από συγκεκριμένη αποθήκη, που γνωστοποιείται αμέσως μετά την διαδικασία της ανάθεσης.



Σχήμα 2.6: Σύγκριση VRP με MDVRP (Montoya-Torres et al.2015)

2.2.6 Το Πρόβλημα της Δρομολόγησης με Πολλαπλές Διαδρομές (Multi Trip Vehicle Routing Problem – MTVRP)

Το πρόβλημα δρομολόγησης με Πολλαπλές Διαδρομές (MTVRP) είναι και αυτό παρόμοιο με το κλασσικό VRP αλλά έχει κάποιους επιπλέον περιορισμούς . Κατά την παραλλαγή αυτή θεωρείται πως ένα όχημα μπορεί να κάνει περισσότερα του ενός δρομολογίων κατά την διάρκεια της ημέρας (Brandao et al., 2014). Το MTVRP βρίσκει εφαρμογή κυρίως στις διανομές εντός των πόλεων όπου απαιτούνται μικρού μεγέθους ή ηλεκτρικά οχήματα για λόγους που έχουν ήδη περιγραφεί. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα μικρά μεγέθους οχήματα δεν έχουν χωρητικότητα η οποία να επιτρέπει την εκτέλεση μεγάλων δρομολογίων τα οποία να καλύπτουν το ωράριο εργασίας. Αντίστοιχο είναι το πρόβλημα στην περίπτωση των ηλεκτροκίνητων οχημάτων που δεν έχουν μεγάλη αυτονομία λόγω των χρησιμοποιούμενων συσσωρευτών (μπαταρίες). Οι πολλαπλές διαδρομές ωστόσο δίνουν την δυνατότητα σε τέτοιου είδους οχήματα είτε να επαναφορτώσουν προϊόντα είτε τις μπαταρίες του και να εκτελέσουν και άλλα δρομολόγια στην διάρκεια του ωραρίου εργασίας (Cattaruzza et al. 2016).

2.2.7 Το Πρόβλημα Δρομολόγησης με ετερογενή στόλο οχημάτων (Heterogenous Fleet VRP – HFVRP)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως στο κλασσικό VRP ο διαθέσιμος στόλος οχημάτων θεωρείται ομοιογενής, δηλαδή αποτελείται από οχήματα ίδιας χωρητικότητας τα οποία είναι και όλα διαθέσιμα. στο πρόβλημα δρομολόγησης με ετερογενή στόλο παύει να ισχύει αυτή η θεώρηση και ο στόλος θεωρείται πως αποτελείται από οχήματα διαφορετικής χωρητικότητας το καθένα (πχ. μεγάλα και μικρά φορτηγά) και σκοπός μας είναι να επιλέξουμε

τον αριθμό και των τύπο των οχημάτων ώστε να εξυπηρετήσουμε την ζήτηση. (Desrochers and Verhoog, 1991). Αυτό το πρόβλημα προκύπτει όταν ο αποστολέας (distributor) επιθυμεί να αναθεωρήσει την σύσταση του στόλου των οχημάτων του για να καλύπτει καλύτερα την ζήτηση των πελατών του. Στόχος μας σε αυτό το πρόβλημα είναι να ελαχιστοποιήσουμε το άθροισμα του κόστους δρομολόγησης και του κόστους χρήσης των οχημάτων. Οι καθημερινές λειτουργίες οποιουδήποτε μεταφορέα συνδέονται άρρηκτα με τη διαχείριση του στόλου. Σε πολλές περιπτώσεις η κατάλληλη διαχείριση του στόλου οχημάτων προσφέρει οικονομικά οφέλη στην μεταφορική εταιρεία αλλά και επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την ικανοποίηση των πελατών (Żak, Redmer and Sawicki, 2011).

2.2.8 Το Ανοιχτό Πρόβλημα Δρομολόγησης (Open Vehicle Routing Problem – OVRP)

Το ανοιχτό πρόβλημα δρομολόγησης αποτελείται από τον προσδιορισμό των βέλτιστων διαδρομών ενός στόλου οχημάτων τα οποία και πρέπει να ικανοποιήσουν ένα σύνολο πελατών με δεδομένη ζήτηση και τοποθεσία, και οι οποίες θα ξεκινούν από την αποθήκη και θα τερματίζουν σε κάποιον από τους πελάτες (Brandão, 2004).

Οι περιορισμοί που λαμβάνονται υπόψη στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι οι εξής: όλα τα οχήματα έχουν ίδια χωρητικότητα, ο χρόνος ταξιδιού κάθε οχήματος είναι ορισμένος, η συνολική ζήτηση των πελατών σε μία διαδρομή να μην ξεπερνάει την χωρητικότητα του οχήματος και ότι κάθε πελάτης επισκέπτεται μία φορά από ένα μόνο όχημα. Αντικειμενικός στόχος είναι πάλι η ελαχιστοποίηση του αριθμού των οχημάτων και για ένα δεδομένο αριθμό οχημάτων η ελαχιστοποίηση της συνολικής διανυόμενης απόστασης όλων των οχημάτων (Brandão, 2004). Δηλαδή, η διαδρομή του κάθε οχήματος δε σχηματίζει κύκλο Hamilton (κλειστή διαδρομή) όπως στο VRP, αντίθετα σχηματίζει μονοπάτι Hamilton (ανοιχτή διαδρομή) (W. Wang, Wu, Zhao, & Feng, 2006). Συνεπώς, το πρόβλημα OVRP ανάγεται στο πρόβλημα εύρεσης του βέλτιστου μονοπατιού Hamilton (Hamiltonian Path), μετά τον καταμερισμό των πελατών στο κάθε όχημα (P. P. Repoussis, Tarantilis, Bräysy, & Ioannou, 2010).

Το OVRP βρίσκει εφαρμογή κυρίως στις κατ' οίκον παραδόσεις δεμάτων και εφημερίδων. Συνήθως, πρόκειται για εξωτερικούς συνεργάτες οι οποίοι δεν είναι εργαζόμενοι της εκάστοτε εταιρείας και χρησιμοποιούν τα δικά τους οχήματα, με αποτέλεσμα να μην επιστρέφουν στην αποθήκη.

2.2.9 Το Πρόβλημα της Δρομολόγησης με Παραδόσεις και Συλλογές (Pickup and Delivery VRP – VRPPD)

Το κλασσικό VRP είναι συνήθως είτε μόνο πρόβλημα παραλαβής είτε μόνο παράδοσης και αγνοούν την ταυτόχρονη ύπαρξη παραλαβών και παραδόσεων (Min, 1989). Αυτή η εκδοχή λοιπόν ασχολείται με προβλήματα όπου επιθυμείτε τα προϊόντα να μην μεταφέρονται μόνο από τις κύριες αποθήκες στους πελάτες αλλά να διαμορφώνεται και το αντίστροφο

δρομολόγιο, δηλαδή από τους πελάτες προς τις αποθήκες. Το VRPPD είναι ένα πρόβλημα με πολλές εφαρμογές, κυρίως στα logistics και δη στις επιστροφές (reverse) (Wassan & Nagy 2014). Οι επιστροφές που γίνονται, οφείλονται κυρίως είτε σε λάθη, είτε λόγω ενδεχόμενης αξίας που μπορεί να έχει κάποιο προϊόν μετά την χρήση ή ακόμη και μετά την λήξη του και λόγω των περιβαλλοντικών οφελών που προέρχονται από την συλλογή ανακυκλώσιμων προϊόντων.

Βασικός περιορισμός στο πρόβλημα αυτό είναι να υπάρχει χώρος για τα υπό επιστροφή προϊόντα του πελάτη στο όχημα που τον εξυπηρετεί. Ο περιορισμός αυτός σε πολλές περιπτώσεις οδηγεί μη βέλτιστη χρήση της χωρητικότητας των οχημάτων, στον αυξημένο αριθμό οχημάτων και τελικά στην αύξηση της συνολικά διανυόμενης απόστασης και άρα και του συνολικού κόστους. Μπορεί να αντιμετωπιστεί αυτή η πρόκληση με διάφορες παραδοχές όπως να μην είναι υποχρεωτικό για κάθε πελάτη να εξυπηρετείται από ένα μόνο όχημα ή το κάθε όχημα να πραγματοποιεί αρχικά τις παραδόσεις μόνο και έπειτα τις παραλαβές.

2.2.10 Το “Πράσινο” και το “Υβριδικό” Πρόβλημα Δρομολόγησης (Green VRP) / (Hybrid VRP)

Πράσινο Πρόβλημα Δρομολόγησης

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αύξηση της κυκλοφορίας και των οδικών εμπορευματικών μεταφορών δημιουργώντας ανησυχίες για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και την μόλυνση που προκαλείται. Ειδικά οι οδικές μεταφορές είναι ο κυρίαρχος τρόπος διανομής αγαθών και καταναλώνουν παγκοσμίως τα μεγαλύτερα ποσοστά ενέργειας (76% το 2011 σύμφωνα με το World Energy Council, 2011) ενώ ο κύριος τύπος καυσίμων που χρησιμοποιούν είναι προϊόντα πετρελαίου. Η ζήτηση για τα προϊόντα αυτά αναμένεται να αυξηθεί 30-82% από το 2010 έως το 2050 αυξάνοντας επακόλουθα και τις εκπομπές καυσαερίων CO2 σε αντίστοιχα επίπεδα. Η αύξηση των εκπομπών είναι συνδεδεμένη, και σε αρκετές περιπτώσεις ανάλογη, του αριθμού των οχημάτων που κυκλοφορούν και άρα και της κατανάλωσης καυσίμου, ενώ έχει άμεσες και έμμεσες επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων αλλά και στο γενικότερο οικοσύστημα. Επομένως, είναι αναγκαία σε κάθε εμπορευματική μεταφορά, η ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και των εκπομπών ρύπων CO2. Το πρόβλημα της δρομολόγησης βασιζόμενο στην ελαχιστοποίηση των εκπομπών ονομάζεται Πράσινο Πρόβλημα Δρομολόγησης.

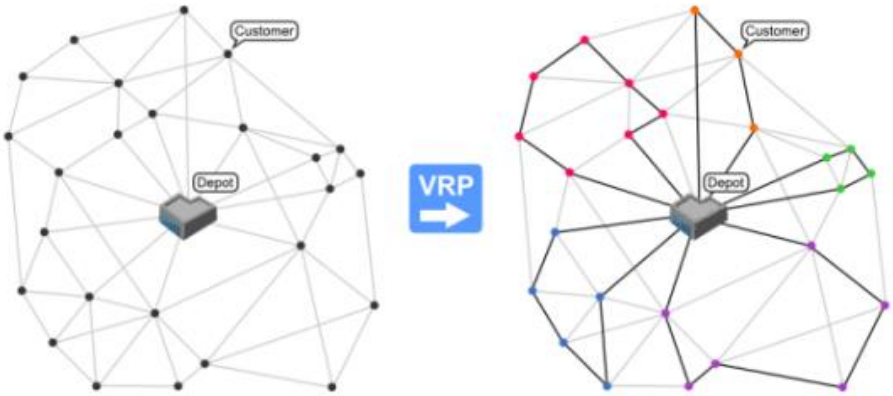
Το Green VRP χωρίζεται σε δύο κύριες κατηγορίες, όπου οι κυκλοφοριακές συνθήκες στην πρώτη κατηγορία εξαρτώνται από τον χρόνο ενώ στην δεύτερη είναι ανεξάρτητες από τον χρόνο. Στα μοντέλα ανεξάρτητα του χρόνου οι ταχύτητες των οχημάτων είναι είτε η είσοδος είτε η μεταβλητή απόφασης του προβλήματος. Αντίθετα, στα μοντέλα εξαρτώμενα από τον χρόνο, χρησιμοποιούνται οι πληροφορίες που συγκεντρώνονται από το οδικό δίκτυο, δημιουργώντας ένα οδικό χρονοδιάγραμμα (Road Timetable) το οποίο παρουσιάζει τους πιο γρήγορους χρόνους μεταξύ δύο σημείων (αφετηρία - τερματισμός), ξεκινώντας διαφορετικές ώρες της ημέρας (Eglese, Maden and Slater, 2006).

Υβριδικό Πρόβλημα Δρομολόγησης

Αντίστοιχα με το Green VRP, όπου η μείωση των αερίων που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου έχει μετατραπεί σε ένα πολιτικό, κοινωνικό και οικονομικό πρόβλημα θέτοντας νόμους και περιορισμούς ώστε να υπάρξει μείωση των ρύπων σε όλες τις ανεπτυγμένες χώρες, έτσι και στο Hybrid VRP ο στόχος παραμένει ίδιος. Ωστόσο το υβριδικό VRP διαφοροποιείται στο γεγονός ότι ο στόλος των οχημάτων περιλαμβάνει υβριδικά οχήματα που λειτουργούν και ως ηλεκτρικά αλλά και με παραδοσιακά καύσιμα (Mancini, 2017). Τα οχήματα θεωρούνται πως είναι σε θέση ανά πάσα στιγμή να αλλάξουν σύστημα ώθησης (ηλεκτρικό/με καύσιμο) και πως το κόστος της διαδρομής είναι μικρότερο όταν λειτουργεί ως ηλεκτρικό. Επίσης η ηλεκτρική μπαταρία του οχήματος έχει περιορισμένη χωρητικότητα και αφού εξαντληθεί μπορεί να επαναφορτιστεί σε κάποιο σταθμό επαναφόρτισης, ο αριθμός των οποίων θεωρείται περιορισμένος, ενώ το όχημα μπορεί να συνεχίσει την λειτουργία του με παραδοσιακά καύσιμα (Mancini 2017).

2.3 Μοντελοποίηση Προβλήματος Δρομολόγησης Οχημάτων

Όπως αναφέρθηκε το CVRP αναφέρεται στον προσδιορισμό των διαδρομών ενός στόλου οχημάτων, όπου το κάθε όχημα διασχίζει μια διαδρομή η οποία αρχίζει από ένα σημείο σταθμός (αποθήκη, χώρος στάθμευσης οχημάτων κ.α.) διέρχεται από ένα υποσυνόλων σημείων - πελατών με δεδομένες απαιτήσεις μεταφοράς και επιστρέφει ξανά στο σημείο σταθμός. Το όχημα θα πρέπει να επισκεφτεί όλους τους πελάτες που βρίσκονται εντός της διαδρομής του ακριβώς μια φορά και η συνολική ζήτηση των πελατών της διαδρομής δεν θα πρέπει να υπερβαίνει την χωρητικότητα του οχήματος. Στόχος των προβλημάτων δρομολόγησης οχημάτων είναι συνήθως η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους της διαδρομής. Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται γραφικά η “είσοδος” και η “έξοδος” του CVRP ως γράφος.



Σχήμα 2.7: Γραφική Παράσταση Εισόδου και Έξοδου CVRP με Θεωρία Γράφων

Το CVRP μπορεί να οριστεί με την θεωρία Γράφων με τον ακόλουθο τρόπο. Σύμφωνα με τους (Toth and Vigo, 2002) δίδεται ένας προσανατολισμένος γράφος $G = (V, A)$ όπου

V = $\{V_0, V_1, \ldots, V_n\}$ είναι το σύνολο των n + 1κορυφών V και

A = $(V_i, V_j \,/\, V_i, V_j \,\epsilon\, V \;;\; i \neq j)$ σύνολο των ακμών (A⊆ V x V)

Οι κορυφές j=1,...,n αντιστοιχούν στους πελάτες και η κορυφή 0 αντιστοιχεί στην αποθήκη. Στον κάθε πελάτη αντιστοιχεί ένα διάνυσμα ζήτησης qi που περιέχει τις γνωστές μη-αρνητικές ποσότητες ζήτησης των πελατών (στην αποθήκη αντιστοιχεί ζήτηση q0=0). Αν μας δίνεται ένα σύνολο πελατών S⊆V τότε η συνολική ζήτηση είναι :

$$d(S) = \sum_{j\,\epsilon S} d(j)$$

Επίσης ένα μη αρνητικό διάνυσμα κόστους c_{ij} σχετίζεται με κάθε ακμή $(i,j)\,\epsilon\, A$ που αναπαριστά το κόστος να ταξιδέψεις από μια κορυφή iσε μια κορυφή j. Γενικά η χρήση κλειστών ακμών , (i,i) δεν επιτρέπεται και αυτό επιβάλλεται ορίζοντας τα κόστη $c_{ij} = +\infty$για κάθε $i\,\epsilon\, V$. Εάν ισχύει $c_{ij} = c_{ji}$τότε το πρόβλημα ονομάζεται συμμετρικό και συχνά το σύνολο των ακμών A αντικαθίσταται από ένα σύνολο μη προσανατολισμένο άκρων E, τα στοιχεία του οποίου λαμβάνουν πλέον μια μόνο τιμή e.

Στην αποθήκη είναι διαθέσιμο ένα σύνολο K όμοιων οχημάτων, το καθένα με χωρητικότητα C. Κάθε όχημα μπορεί να εκτελέσει ένα μόνο δρομολόγιο και θεωρούμε πως το K δεν είναι μικρότερο από μια τιμή K_{min}, όπου K_{min} είναι ο ελάχιστος αριθμός οχημάτων που μπορούν να εξυπηρετήσουν όλους τους πελάτες. Επιπλέον για να εξασφαλίσουμε λύση θεωρούμε πως $d_j \leq C$για κάθε $j = 1, \ldots, n$.Όταν ο αριθμός των διαθέσιμων οχημάτων είναι μεγαλύτερος από το K_{min}, είναι πιθανό ορισμένα οχήματα να μην χρησιμοποιηθούν. Χρειάζεται έτσι να καθορίσουμε το έναν ελάχιστο αριθμό δρομολογίων. Σε αυτήν την περίπτωση προσθέτουμε κάποια επιπλέον σταθερά κόστη που σχετίζονται με την χρήση των οχημάτων. Αυτό ενσωματώνεται στο CVRP με την πρόσθεση μιας σταθερής τιμής ,που αντιπροσωπεύει το σταθερό κόστος χρήσης των οχημάτων, στο κόστος των ακμών που εγκαταλείπουν την αποθήκη.

Μεταβλητές απόφασης ορίζονται οι :

x_{ij}^{K} : παίρνει την τιμή 1 εάν το **όχημα k** οδεύει από τη θέση i στη θέση j , αλλιώς παίρνει την τιμή 0

Y_{ij} : παίρνει την τιμή 1 εάν **κάποιο** όχημα οδεύει από τη θέση i στη θέση j , αλλιώς 0

Άρα το CVRP συνίσταται στην εύρεση K απλών κυκλωμάτων, που αντιστοιχούν σε διαδρομές οχημάτων με το ελάχιστο κόστος, το οποίο ορίζεται ως το άθροισμα του κόστους των άκρων που αποτελούν κάθε κύκλωμα., έτσι ώστε :

(i) κάθε διαδρομή να επισκέπτεται την αποθήκη

(ii) κάθε κορυφή $j\epsilon\ V \setminus \{O\}$να επισκέπτεται από ένα και μόνο δρομολόγιο

(iii) το άθροισμα της ζήτησης των κορυφών που επισκέπτεται ένα δρομολόγιο να μην ξεπερνά την χωρητικότητα των οχημάτων C

Μαθηματική Διατύπωση :

Αντικειμενική συνάρτηση 1

$$\sum_{k\varepsilon K}\sum_{j\varepsilon C} x_{0j}^{k} \tag{1}$$

Αντικειμενική συνάρτηση 2

$$\sum_{k\varepsilon K}\sum_{(i,j)\varepsilon A} d_{ij}x_{ij}^{k} \tag{2}$$

Υπό τους περιορισμούς :

$$\sum_{i\in C} q_i \sum_{j\varepsilon V} x_{ij}^{k} \leq q_{max}^{k} \forall k \in K \tag{3}$$

$$\sum_{k\varepsilon K}\sum_{j\varepsilon V} x_{ij}^{k} = 1, \forall i \in N \tag{4}$$

$$\sum_{j\varepsilon V} x_{0j}^{k} = 1, \forall k \in K \tag{5}$$

$$\sum_{i\varepsilon V} x_{il}^{k} - \sum_{j\varepsilon V} x_{lj}^{k} = 0, \forall l \in N, \forall k \in K \tag{6}$$

$$\sum_{j\varepsilon V} x_{j0}^{k} = 1, \forall k \in K \tag{7}$$

$$x_{ij}^{k} \in \{0,1\},\ \forall (i,j) \in A, \forall k \in K \tag{8}$$

Όπου

- x_{ij}^{k} παίρνει την τιμή 1 όταν το όχημα k εκτελεί την διαδρομή i – j, αλλιώς 0
- d_{ij} η απόσταση μεταξύ των κόμβων i – j
- q_i ζήτηση πελάτη i
- q_{max}^{k} χωρητικότητα του οχήματος k

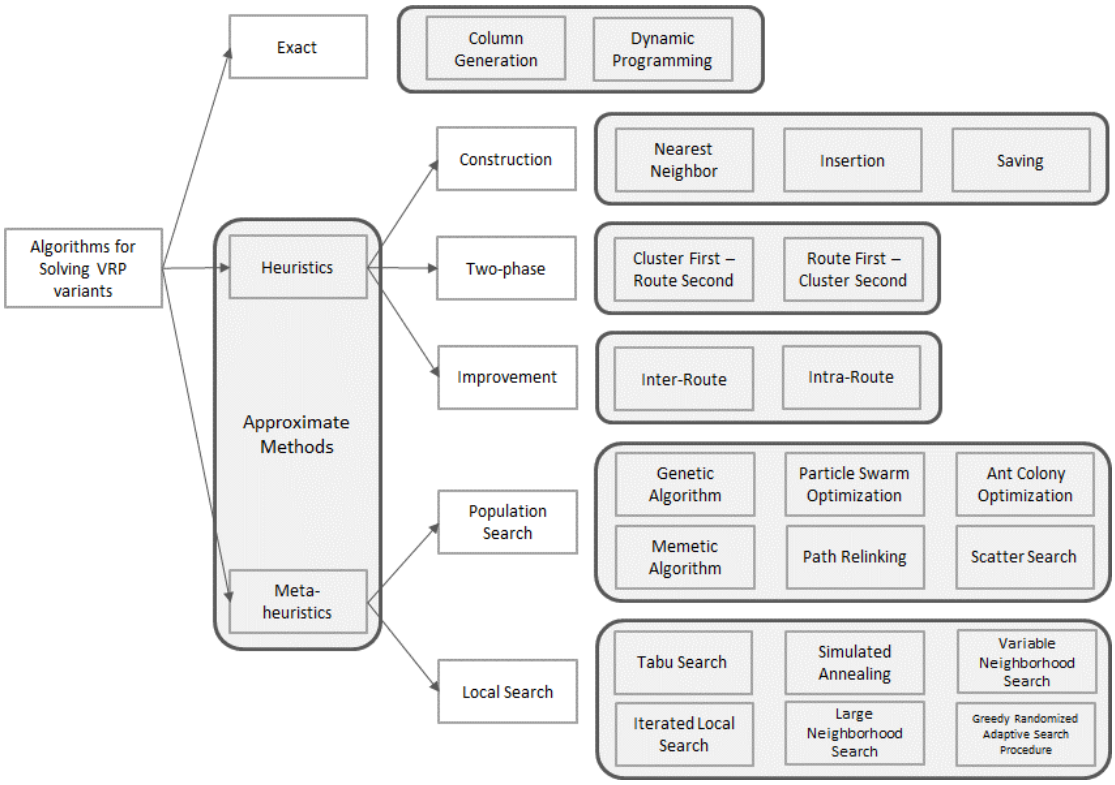
3. Αλγόριθμοι – Μέθοδοι Επίλυσης Προβλήματος Δρομολόγησης Οχημάτων

Το 1981, οι Lenstra και Rinnooy Kan απέδειξαν ότι το VRP ανήκει σε μια κλάση πολυπλοκότητας που χρησιμοποιείται για την περιγραφή ορισμένων τύπων προβλημάτων λήψης αποφάσεων που λέγονται NP-hard (Non-Polynomial time solvable). NP-hard ονομάζονται τα προβλήματα που λύνονται σε πολυωνυμικό χρόνο μόνο από θεωρητική μη ντετερμινιστική μηχανή ικανή να πραγματοποιεί άπειρους παράλληλους υπολογισμούς (Non deterministic Turing Machine). Δηλαδή η επίλυσή τους, ή και η επιβεβαίωση ύπαρξης λύσης, είναι ιδιαίτερα δύσκολη και σε πολλές περιπτώσεις ανέφικτη. Συγκεκριμένα, η διερεύνηση της ύπαρξης ή μη εφικτών λύσεων καθώς και η εύρεση μιας εφικτής λύσης σε κάποιο πρόβλημα VRP είναι προβλήματα τύπου δυσκολίας NP-Complete (Savelsbergh, 1985). Για τον λόγο αυτό αλλά και το μεγάλο πλήθος δεδομένων και αγνώστων που επεξεργάζονται πλέον οι ερευνητές έχουν αναπτυχθεί ορισμένοι αλγόριθμοι που δεν βρίσκουν την βέλτιστη λύση αλλά λύση που προσεγγίζει την βέλτιστη, παράγοντας μια ή περισσότερες ικανοποιητικές διαδρομές. Με βάση αυτό το κριτήριο οι αλγόριθμοι επίλυσης διακρίνονται σε ακριβείς και προσεγγιστικούς (approximate), με τους τελευταίους να διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, τους ευρετικούς και τους μεταευρετικούς αλγόριθμους.

Για αυτά τα προβλήματα βελτιστοποίησης , έχουν αναπτυχθεί τρεις κατηγορίες μεθόδων επίλυσης (Panagiotis P Repoussis et al., 2009):

I. Οι ακριβείς ή αναλυτικοί αλγόριθμοι που βρίσκουν τη βέλτιστη λύση αλλά είναι εφαρμόσιμοι για προβλήματα με μικρό πλήθος πελατών (<100)
II. Οι ευρετικοί αλγόριθμοι (heuristic algorithms) οι οποίοι παρέχουν συγκριτικά ταχέως μία εφικτή λύση με αποδεκτή ποιότητα
III. Οι μεταευρετικοί αλγόριθμοι (metaheuristic algorithms) οι αποτελούν μεθόδους που χρησιμοποιούν ευρετικές μεθόδους με ειδικές τακτικές ώστε να οδηγηθούν, μετά από πολλαπλά «τρεξίματα» σε καλύτερης ποιότητας λύσεις

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζεται η ταξινόμηση των κύριων αλγορίθμων επίλυσης του VRP σύμφωνα με τους (Labadie et al. 2016) και η οποία χρησιμοποιήθηκε κατά την διάρκεια της βιβλιογραφικής έρευνας για την κατηγοριοποίηση των μεθόδων επίλυσης. Οι ακριβείς μέθοδοι λόγω της μικρής πλέον εφαρμογής τους δεν αναλύθηκαν περαιτέρω σε κατηγορίες ενώ οι ευρετικές μέθοδοι διαχωρίζονται σε κατασκευαστικές μεθόδους, μεθόδους δύο φάσεων και μεθόδους βελτίωσης και οι μεταευρετικές διακρίνονται σε μεθόδους που βασίζονται σε πληθυσμό λύσεων και σε μεθόδους τοπικής αναζήτησης. Στην συνέχεια αναλύονται με περισσότερη λεπτομέρεια οι πιο συνηθισμένοι από αυτούς τους αλγόριθμους.



Σχήμα 3.1 Ταξινόμηση Κύριων Μεθόδων Επίλυσης του VRP

3.1 Ακριβείς Αλγόριθμοι (Exact Algorithms)

Οι αναλυτικές μέθοδοι (ή ακριβείς μέθοδοι) είναι συνήθως είτε αλγόριθμοι γραμμικού ή δυναμικού προγραμματισμού (linear or dynamic programming) είτε τεχνικές περιορισμού και διακλάδωσης (branch and bound techniques). Οι μέθοδοι αυτοί μπορεί να βρίσκουν πάντοτε τη βέλτιστη λύση, όμως έχουν το μειονέκτημα των μεγάλων υπολογιστικών χρόνων, ειδικά σε προβλήματα μεγάλου αριθμού πελατών, που καθιστά τη χρήση τους πολλές φορές ασύμφορη ή και αδύνατη. Οι αναλυτικές μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί είναι βασισμένες στο γραμμικό και στον ακέραιο προγραμματισμό. Οι κύριες κατευθύνσεις των αναλυτικών μεθόδων είναι ο δυναμικός προγραμματισμός, η «χαλάρωση» περιορισμών του Lagrange (Langrangian Relaxation) και η μέθοδος παραγωγής στηλών (Column Generation). Οι δύο τελευταίες κατευθύνσεις στηρίζονται στην αρχή της αποικοδόμησης (decomposition), δηλαδή το κύριο πρόβλημα διασπάται σε δύο ή περισσότερα προβλήματα για τη διευκόλυνση της επίλυσής του. Γενικά στα προβλήματα VRP εφαρμόζονται για μικρά μεγέθη πελατών (έως 100) ή συνδυαστικά με κάποια άλλη μέθοδο σε κάποιους υβριδικούς αλγορίθμους.

3.1.1 Αλγόριθμος Αναπαραγωγής Στηλών (Column Generation)

Ο Gilmore και ο Gomory το 1961, παρουσίασαν μια μέθοδο γραμμικού προγραμματισμού. Η κυρίαρχη ιδέα είναι ότι πολλά γραμμικά προγράμματα είναι πολύ μεγάλα για να εξετάσουν

ρητά όλες τις μεταβλητές. Δεδομένου ότι οι περισσότερες από τις μεταβλητές δεν θα είναι βασικές και δεν θα επιδρούν στην βέλτιστη λύση, τότε μόνο ένα υποσύνολο των μεταβλητών πρέπει να θεωρηθεί κατά την επίλυση του προβλήματος. Η αναπαραγωγή στηλών αξιοποιεί αυτή την ιδέα για να παράγει μόνο τις μεταβλητές που έχουν τη δυνατότητα να βελτιώσουν την αντικειμενική συνάρτηση - δηλαδή, να βρουν μεταβλητές με αρνητικό μειωμένο κόστος (υποθέτοντας χωρίς απώλεια γενικότητας ότι το πρόβλημα είναι ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης).

Το υπό επίλυση πρόβλημα χωρίζεται σε δύο επιμέρους προβλήματα : το κυρίως πρόβλημα (master problem-MP) και το υπο-προβλήμα (subproblem). Το κυρίως πρόβλημα είναι το αρχικό πρόβλημα όπου εξετάζονται μόνο ένα υποσύνολο των μεταβλητών ενώ το υπο-πρόβλημα είναι ένα νέο πρόβλημα που δημιουργείται ώστε να προσδιοριστεί μια νέα μεταβλητή. Αντικειμενική συνάρτηση του υπο-προβλήματος είναι το μειωμένο κόστος της νέας μεταβλητής σε σχέση με τις τρέχουσες δυαδικές μεταβλητές και οι περιορισμοί απαιτούν η μεταβλητή να υπακούει στους φυσικά υπάρχοντες περιορισμούς.

Η διαδικασία λειτουργεί ως εξής: Αρχικά επιλύεται το κυρίως πρόβλημα - από την λύση που προκύπτει, λαμβάνονται δυαδικές τιμές για κάθε περιορισμό του κυρίως προβλήματος. Αυτές οι πληροφορίες στη συνέχεια εκμεταλλεύονται από την αντικειμενική συνάρτηση του υπο-προβλήματος και επιλύεται το υπο-πρόβλημα. Εάν η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης είναι αρνητική προσδιορίζεται μια μεταβλητή με αρνητικό κόστος. Η νέα μεταβλητή προστίθεται στο κυρίως πρόβλημα το οποίο και επιλύεται ξανά. Η επίλυση του κυρίως προβλήματος δίνει ένα νέο σύνολο δυαδικών τιμών και επαναλαμβάνεται η όλη διαδικασία έως ότου το υπο-πρόβλημα να μην προσδιορίζει άλλη μεταβλητή με αρνητικό μειωμένο κόστος και βρεθεί με αυτόν τρόπο η βέλτιστη λύση.

3.1.2 Δυναμικός Προγραμματισμός (Dynamic Programming)

Ο όρος δυναμικός προγραμματισμός (ΔΠ), θεμελιώθηκε το 1953 από τον Richard Bellman. Για το VRP οι πρώτοι που εφάρμοσαν την μέθοδο ήταν οι οι (Eilon, Watson-Gandy and Christofides, 1971). Πρόκειται για μια γενική μεθοδολογία σχεδιασμού αλγορίθμων και δεν υπάρχει ένα πρότυπο διατύπωσης ή επίλυσης προβλημάτων. Αρχικά ξεκίνησε σαν μαθηματική μέθοδος για τη λήψη σειράς αλληλο-συνδεόμενων αποφάσεων (sequence of interrelated decisions) και στη συνέχεια εξελίχθηκε σε μέθοδο επίλυσης προβλημάτων με επικαλυπτόμενα (overlapping) υπο-προβλήματα. Βασική αρχή του ΔΠ είναι η υποδιαίρεση του αρχικού προβλήματος σε υπο-προβλήματα (στάδια). Το αποτέλεσμα του ΔΠ είναι μια «πολιτική» (policy) η οποία προσδιορίζει τι πρέπει να γίνει σε κάθε στάδιο. Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για γραμμικά και μη-γραμμικά προβλήματα καθώς επίσης για ντετερμινιστικά και στοχαστικά προβλήματα των οποίων οι παράμετροι είναι γνωστοί με βεβαιότητα καθώς και για στοχαστικά προβλήματα. Βασική ιδέα του ΔΠ είναι η χρήση μνήμης για να αποθηκεύονται οι λύσεις των υπο-προβλημάτων έτσι ώστε να μην είναι αναγκαία η επίλυση τους πολλαπλές φορές

3.2 Ευρετικοί Αλγόριθμοι – Heuristic Algorithms

Ως ευρετική μέθοδος ορίζεται μια λογική ακολουθία βημάτων, η οποία δε δίνει απαραίτητα τη βέλτιστη λύση, αλλά μια λύση αρκετά καλή ώστε να μπορεί να αξιοποιηθεί πρακτικά. Οι ευρετικές μέθοδοι για το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων βρίσκουν λύσεις που κατά κανόνα έχουν απόκλιση 5-25% από τη βέλτιστη ενώ χαρακτηριστικό τους πλεονέκτημά είναι η απλότητά τους, ο μικρός χρόνος εκτέλεσής τους και το γεγονός ότι μπορούν εύκολα να τροποποιηθούν για να μπορούν να αντιμετωπίσουν διάφορους περιορισμούς.

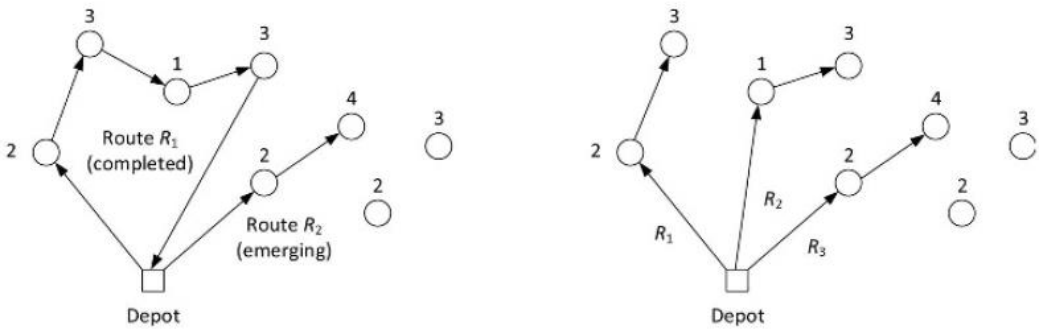
Οι ευρετικές μέθοδοι χωρίζονται σε μεθόδους που κατασκευάζουν λύσεις (Route Construction Heuristics), σε μεθόδους δύο φάσεων (2-Phase Heuristics) και σε μεθόδους τοπικής αναζήτησης (Local Search Methods) (Labadie, Prins and Prodhon, 2016). Είναι πολύ σημαντικοί για τα προβλήματα δρομολόγησης οχημάτων διότι αν και σπάνια συναντιούνται πλέον μόνοι τους είναι αναπόσπαστο κομμάτι του σχεδιασμού των σύγχρονων μεθόδων επίλυσης.

3.2.1 Κατασκευαστικοί Ευρετικοί Αλγόριθμοι

Οι Κατασκευαστικές Μέθοδοι για τα προβλήματα VRP, παίρνουν σαν είσοδο ένα σύνολο μη δρομολογημένων οχημάτων και ένα σύνολο μη δρομολογημένων πελατών και δημιουργούν μία καινούργια λύση που ικανοποιεί τους περιορισμούς του προβλήματος. Χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής της λύσης:

1. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι μέθοδοι που κατασκευάζουν κάθε διαδρομή οχήματος ξεχωριστά - σειριακά (sequential). Αυτές ξεκινούν από μία άδεια διαδρομή και προσθέτουν σε αυτήν πελάτες μέχρι να ολοκληρωθεί, δηλαδή να μη μπορεί να προστεθεί άλλος πελάτης λόγω κάποιου περιορισμού (συνήθως χωρητικότητας στο κλασικό CVRP). Αφού ολοκληρωθεί η πρώτη διαδρομή δημιουργούν δεύτερη κ.ο.κ. μέχρι να φτάσουν οι διαδρομές τον αριθμό των διαθέσιμων οχημάτων, ή μέχρι να εξυπηρετηθούν όλοι οι πελάτες. Σε αυτήν την περίπτωση είναι δύσκολο να προβλέψεις πόσα οχήματα θα χρησιμοποιηθούν ενώ το τελευταίο όχημα ενδέχεται να έχει μικρό φορτίο σε σχέση με τα υπόλοιπα. Παράδειγμα sequential δρομολόγησης παρουσιάζεται στο σχήμα 3.2 a) όπου φαίνεται να ολοκληρώνεται πρώτα ένα δρομολόγιο πριν αρχίσει να κατασκευάζεται το δεύτερο.

2. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι μέθοδοι που κατασκευάζουν παράλληλα- ταυτόχρονα τις διαδρομές των φορτηγών (parallel routing). Αυτές οι μέθοδοι ξεκινούν με τόσες διαδρομές όσες και τα οχήματα K και κατανέμουν σειριακά όλους τους πελάτες σε κάποια από αυτές. Παρόλα αυτά δεν εξασφαλίζεται ότι στο τέλος θα έχουμε K διαδρομές (όσες και τα οχήματα), διότι εάν σε κάποια επανάληψη δεν μπορεί να προστεθεί πελάτης, τότε προστίθενται επιπλέον διαδρομές όπως στην περίπτωση 1 (Παράδειγμα στο Σχήμα 3.2 b).



(a) Sequential Routing (b) Parallel Routing

Σχήμα 3.2: Παραδείγματα Sequential και Parallel Δρομολόγησης

3.2.1.1 Αλγόριθμος Πλησιέστερου Γείτονα (Nearest Neighbor Algoritm)

Το πιο απλό παράδειγμα κατασκευαστικής μεθόδου είναι ο αλγόριθμος του Πλησιέστερου Γείτονα. Ξεκινώντας από την αποθήκη μία διαδρομή συνεχώς επεκτείνεται προσθέτοντας τον πλησιέστερο κάθε φορά πελάτη ,που δεν προγραμματιστεί για κάποιο δρομολόγιο μέχρι εκείνη τη στιγμή και η ζήτηση του ικανοποιεί τον περιορισμό της διαθέσιμης χωρητικότητας του οχήματος. Όταν δεν μπορεί να προστεθεί άλλος πελάτης το όχημα επιστρέφει πίσω στην αποθήκη και δημιουργείται νέα διαδρομή.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο αρχικός αλγόριθμος «Nearest Neighbor» :

1. **όσο** *υπάρχουν μη δρομολογημένοι πελάτες* **επανέλαβε**
    a. δημιούργησε μια νέα διαδρομή
    b. θέσε την κεντρική αποθήκη ως την τρέχουσα θέση του οχήματος της διαδρομής
    c. **όσο** *υπάρχει μη δρομολογημένος πελάτης και δεν παραβιάζεται ο περιορισμός χωρητικότητας οχήματος* **επανέλαβε**
        i. πρόσθεσε τον κοντινότερο πελάτη (μη δρομολογημένο) στο τέλος της τρέχουσας διαδρομής
        ii. θέσε τον νέο πελάτη ως τρέχουσα θέση του οχήματος
2. επέστρεψε τα δρομολόγια

3.2.1.2 Αλγόριθμος Savings

Αυτή η κλασική ευρετική κατασκευαστική μέθοδος προτάθηκε από τους (Clarke and Wright, 1964) για το CVRP με ελεύθερο αριθμό οχημάτων και ανήκει στην κατηγορία Parallel Routing. Ο αλγόριθμος ξεκινά κατασκευάζοντας τόσες διαδρομές όσοι και οι πελάτες δηλαδή κάθε διαδρομή εξυπηρετεί έναν και μόνο πελάτη. Σε κάθε επόμενο βήμα συνενώνονται δύο διαδρομές αναλόγως πια θα αποφέρει το μεγαλύτερο κέρδος (savings). Η διαδικασία που ακολουθείται μπορεί να περιγραφηθεί ως εξής:

Βήμα 1 : Υπολόγισε το κέρδος (savings) $s_i = c_{i1} + c_{1j} - c_{ij}$ για κάθε $i, j = 2, \ldots\ldots, n$ και $i \neq j$Δημιούργησε $n - 1$ διαδρομές οχημάτων $(1, i, 1)$ όπου $i = 2, \ldots, n$

Βήμα 2 : Ταξινόμησε τα savings σε φθίνουσα σειρά.

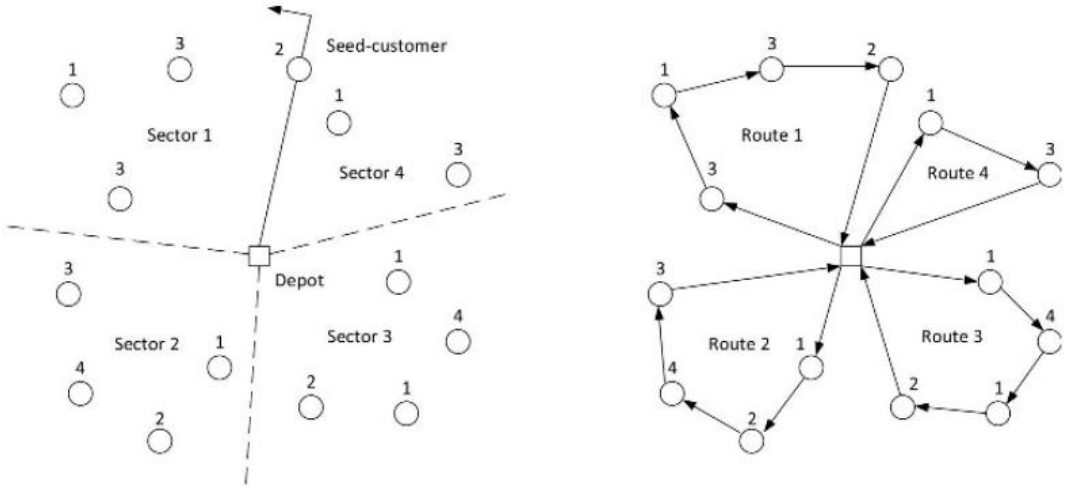
Βήμα 3: Θεώρησε δύο διαδρομές που περιέχουν τα τόξα $(i, 1)$ και $(1, j)$ αντίστοιχα. Εάν $s_{ij} > 0$ συνένωσε δοκιμαστικά αυτές τις διαδρομές εισάγοντας το τόξο (i, j) και διαγράφοντας τα τόξα $(i, 1)$ και $(1, j)$. Υλοποίησε την συνένωση εάν η προκύπτουσα διαδρομή είναι εφικτή. Επανέλαβε αυτό το βήμα έως ότου να μην είναι πιθανή άλλη βελτίωση. Stop.

Η διαδικασία αυτή χρειάζεται υπολογιστικό χρόνο $O(n^2 \, log \, n)$αλλά μπορεί να μειωθεί με χρήση κατάλληλων δομών δεδομένων (Golden, Magnanti and Nguyen, 1975). Ο αλγόριθμος Clarke και Wright αγνοεί τα σταθερά κόστη των οχημάτων και το μέγεθος του στόλου των οχημάτων. Τα σταθερά κόστη μπορούν εύκολα να ληφθούν υπόψιν με την προσθήκη αυτού του κόστους σε κάθε $c_{1j}(j = 2, \ldots . n)$ενώ λύσεις για καθορισμένο αριθμό οχημάτων μπορούν να βρεθούν επαναλαμβάνοντας το Βήμα 3 μέχρι να ληφθεί ο συγκεκριμένος αριθμός διαδρομών /οχημάτων.

3.2.2 Ευρετικοί Αλγόριθμοι Δύο Φάσεων (Two Phase Heuristics)

Η ιδέα πίσω από την μέθοδο δύο φάσεων είναι να μετασχηματίσουμε το πρόβλημα VRP σε TSP. Διακρίνονται σε Cluster-first, Route-second και σε Route-first,Cluster-second, επιτελούν δηλαδή με διαφορετική σειρά τις δύο φάσεις. Κατά την Cluster-first, Route-second σε πρώτη φάση δημιουργεί ομάδες πελατών (Clusters) των οποίων η αθροιστική ζήτηση ικανοποιεί τον περιορισμό χωρητικότητας του οχήματος και στην συνέχεια λύνει ένα πρόβλημα TSP για κάθε ομάδα, ταξινομεί σε σειρά τη συστάδα ώστε να επιτυγχάνουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Καλό παράδειγμα αυτής της μεθόδου είναι ο αλγόριθμος Sweep του (Gillett and Miller, 1974), όπου οι συστάδες ορίζονται σαν γωνιακοί τομείς με κέντρο την αποθήκη.

Η διαδικασία περιγράφεται στο παρακάτω Σχήμα 3.3 , όπου οι αριθμοί κοντά στους πελάτες υποδηλώνουν την ζήτηση τους. Κατά τη φάση της δημιουργίας ομάδων, ένας πελάτης (seed customer) επιλέγεται αυθαίρετα και σαρώνονται οι υπόλοιποι πελάτες (στο σχήμα αντιστρόφως της φοράς των δεικτών ρολογιού) για να καταλήξουμε στον πάνω αριστερά τομέα (sector 1). Κάθε τομέας ολοκληρώνεται εάν η προσθήκη επιπλέον πελάτη παραβιάζει τον περιορισμό χωρητικότητας του οχήματος (χωρητικότητα C = 10 στο παράδειγμα του σχήματος). Στη συνέχεια με έναν οποιοδήποτε αναλυτικό ή ευρετικό αλγόριθμο επιλύεται η φάση της δρομολόγησης της διαδρομής.



Σχήμα 3.3: Παράδειγμα Αλγορίθμου 2 Φάσεων

Αντίθετα οι ευρετικοί τύπου Route-first,Cluster-second "χαλαρώνουν" αρχικά την χωρητικότητα των οχημάτων ώστε να λυθεί το TSP σε ένα πρώτο βήμα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία μιας μεγάλης διαδρομής που επισκέπτεται όλους τους πελάτες. Στην συνέχεια με μια διαδικασία διαίρεσης (splitting procedure) διαχωρίζει την μεγάλη διαδρομή σε δρομολόγια CVRP.

3.2.3 Ευρετικοί Αλγόριθμοι Βελτίωσης (Improvement Heuristic Methods)

Ένας αλγόριθμος βελτίωσης ή τοπικής αναζήτησης ξεκινά από μια αρχική λύση S , η οποία συνήθως αποκτάται από κάποιον κατασκευαστικό ευρετικό, και θεωρεί ένα υποσύνολο N(S) λύσεων κοντινές στην S από άποψη δομής, που ονομάζεται γειτονιά της S (Neighborhood). Η γειτονιά επιθεωρείται ώστε να βρεθεί μια καλύτερη λύση S'. Εάν βρεθεί η S', γίνεται η καθιερωμένη λύση και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Με αυτόν τον τρόπο η αρχική λύση συνεχώς βελτιώνεται μέχρι να βρεθεί κάποιο τοπικό βέλτιστο της γειτονιάς.

Για το σχεδιασμό ενός αλγόριθμου τοπικού βέλτιστου πρέπει να καθοριστούν τα παρακάτω, δηλαδή πως βρίσκεται η αρχική λύση, με ποιο μηχανισμό γίνεται η αλλαγή του δρομολογίου, το κριτήριο αποδοχής και η δοκιμή τερματισμού. Τα αποτελέσματα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την αρχική λύση και από τον μηχανισμό επιλογής νέας γειτνίασης.

3.2.3.1 Κλασσικές Μέθοδοι

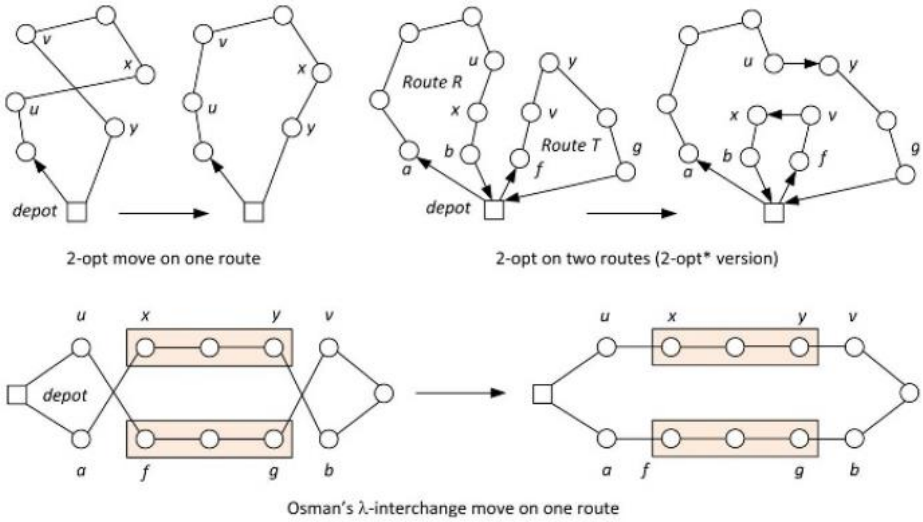
Οι πιο απλές μέθοδοι έχουν οριστεί για το TSP και μπορούν να εφαρμοστούν και στο VRP σε κάθε δρομολόγιο. Για παράδειγμα, ένας πελάτης μπορεί να αφαιρεθεί από ένα δρομολόγιο και να μετατοπιστεί σε διαφορετική θέση (node relocation) ή δύο πελάτες να ανταλλάξουν θέση (node exchange). Οι γειτονιές σε αυτές τις μεθόδους μπορούν να εξεταστούν σε χρόνο $O(n^2)$για n πελάτες.

Οι πιο συνήθεις ευρετικοί αλγόριθμοι τοπικής αναζήτησης είναι οι k-opt (Lin and Kernighan, 1973), όπου σε ένα δρομολόγιο αντικαθιστούμε k ακμές του με k άλλες ακμές. Μία λύση (ένα δρομολόγιο) που δεν μπορεί να βελτιωθεί άλλο από k-exchange, λέγεται k-optimal. Για να εξεταστούν όλες οι πιθανές k-opt κινήσεις απαιτείται χρόνος$O(n^k)$, συνεπώς για να περιοριστεί ο υπολογιστικός χρόνος προτιμώνται οι 2-opt και 3-opt μέθοδοι. 2-opt* heuristic είναι ο συνδυασμός 2 δρομολογίων έτσι ώστε οι τελευταίοι πελάτες ενός δρομολογίου εισάγονται μετά από τους πρώτους πελάτες ενός άλλου δρομολογίου έτσι ώστε να διατηρείται η φορά της διαδρομής.

Άλλη μέθοδος ανταλλαγής είναι η CROSS- Exchange κατά την οποία αφαιρούμε από μία διαδρομή 2 ακμές, το ίδιο γίνεται και σε μία δεύτερη διαδρομή. Οι ενδιάμεσες διαδρομές, που περιέχουν ένα αυθαίρετο αριθμό πελατών, ανταλλάσσονται με αποτέλεσμα τη δημιουργία 2 νέων διαδρομών.

Η μέθοδος Or-opt παρουσιάστηκε από τον Or και μεταθέτει μια σειρά από 1 έως λ πελάτες, ενώ η μέθοδος λ-interchange του Osman (Osman, 1993) ανταλλάσσει 2 σειρές το πολύ λ πελατών η καθεμία. Σε αυτές τις περιπτώσεις για την πλήρη εξερεύνηση της γειτνίασης απαιτείται υπολογιστικός χρόνος $O(\lambda n^2)$και $O(\lambda^2 n^2)$αντίστοιχα, και συνήθως προτιμάται λ=3. Η μέθοδος λ-interchange είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον καθώς υπό κάποιες συνθήκες περιλαμβάνει τις μεθόδους node relocation, node exchange, 2- opt και Or-opt moves (Labadie, Prins and Prodhon, 2016). Στο παρακάτω σχήμα 3.4 παρουσιάζονται παραδείγματα ανταλλαγής πελατών των μεθόδων 2-opt και λ-interchange σε ένα και σε δύο δρομολόγια.

Σχήμα 3.4: Παραδείγματα Κινήσεων Τοπικής Αναζήτησης



3.3 Μεταευρετικοί Αλγόριθμοι

Οι μεταευρετικοί αλγόριθμοι όπως και οι ευρετικοί δίνουν λύσεις που προσεγγίζουν την βέλτιστη λύση. Σαν όρος παρουσιάστηκε πρώτη φορά από τον (Glover, 1986). Μπορούν να

οριστούν ως γενικές μέθοδοι επίλυσης που ελέγχουν την εξερεύνηση του πεδίου των λύσεων μέσω τεχνικών, ανεξάρτητων από το πρόβλημα, με στρατηγικές υψηλότερου επιπέδου. Αυτό τους επιτρέπει να εξερευνούν το πεδίο λύσεων πιο εκτεταμένα με στόχο να μην παγιδεύονται σε τοπικά ακρότατα και άρα να βρίσκουν καλύτερες λύσεις. Οι τεχνικές αυτές περιλαμβάνουν οποιοδήποτε σχέδιο που καταφεύγει, για παράδειγμα, σε μία η περισσότερες δομές γειτονιών, σε διαδικασίες καταστροφής ή κατασκευής ή σε συνδυασμό μερών από διάφορες λύσεις (Labadie, Prins and Prodhon, 2016). Παρόλη την γενική δομή των τεχνικών αυτών, είναι απαραίτητο να προσαρμόζονται στο πρόβλημα που καλούνται να επιλύσουν με τροποποίηση των εγγενών τους παραμέτρων. Άλλη σημαντική διαφορά από τις ευρετικές μεθόδους είναι πως οι μεταευρετικοί επιτρέπουν λύσεις που χειροτερεύουν την παραγόμενη λύση ή ακόμα και μη εφικτές ενδιάμεσες λύσεις κατά την διάρκεια της διαδικασίας εξερεύνησης. Οι μεταευρετικοί αλγόριθμοι έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερα αποδοτικοί για την επίλυση πολλών τύπων σύνθετων προβλημάτων αλλά τείνουν να καταναλώνουν και περισσότερο υπολογιστικό χρόνο.

3.3.1 Μεταευρετικοί Αλγόριθμοι που Λειτουργούν σε Σύνολο Λύσεων

Αυτή η ενότητα ασχολείται με τους μεταευρετικούς αλγορίθμους που εξελίσσουν ένα αρχικό σύνολο λύσεων και δημιουργούν νέες λύσεις είτε συνδυάζοντας τις ήδη υπάρχουσες είτε ‘’κάνοντας’’ τις λύσεις να ‘’συνεργαστούν’’ μέσω μιας διαδικασίας μάθησης. Διακρίνονται σε προσεγγίσεις που συνδυάζουν λύσεις επιλεγμένες από κάποιον πληθυσμό αποθηκευμένο στην μνήμη (όπως ο γενετικός αλγόριθμος, ο μιμητικός αλγόριθμος, scatter search κλπ.) και σε μεθόδους σμήνους που βασίζονται στην συνεργασία ομογενών πρακτόρων στο περιβάλλον τους (όπως η βελτιστοποίηση αποικίας μυρμηγκιών και η βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων).

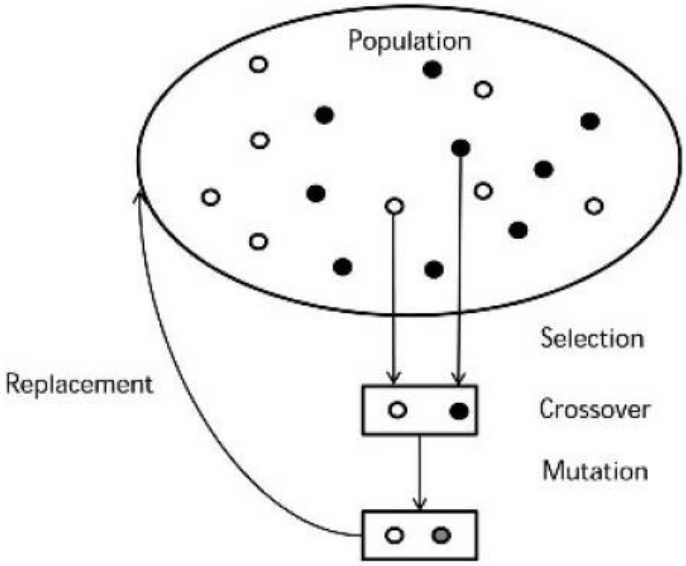
3.3.1.1 Γενετικός Αλγόριθμος (Genetic Algorithm - GA)

Ο γενετικός αλγόριθμος (ΓΑ) είναι μία τεχνική βελτιστοποίησης βασισμένη στις αρχές της φυσικής επιλογής, δηλαδή της διαδικασίας εξέλιξης των ειδών (σύνολο οργανισμών). Ο ΓΑ επανειλημμένως τροποποιεί έναν πληθυσμό, όπου κάθε άτομο αναπαριστά μια λύση. Σε κάθε βήμα ο αλγόριθμος επιλέγει τυχαία κάποια άτομα-λύσεις από τον πληθυσμό να είναι γονείς και τα χρησιμοποιεί για να παράγει παιδιά για την επόμενη γενιά. Με την πάροδο των γενεών ο πληθυσμός εξελίσσεται προς την βέλτιστη λύση Αυτή η μέθοδος αναπτύχθηκε το 1975 από τον John Holland ενώ η πρώτη εφαρμογή σε πολύπλοκα υπολογιστικά προβλήματα έγινε από τους David Goldberg, και De Jong.

Η εξελικτική διαδικασία του ΓΑ αποτελείται από τρεις βασικούς τελεστές : Επιλογή (Selection), Διασταύρωση (Crossover), και Μετάλλαξη (Mutation). Με βάση ένα πληθυσμό λύσεων που αναπαρίστανται ως χρωμοσώματα (σειρά ακέραιων αριθμών μήκους Κ), το βήμα της επιλογής συνίσταται στην επιλογή δύο γονέων-λύσεων από τον πληθυσμό με μια προτίμηση στους καλύτερους γονείς (με την καλύτερη fitness). Κατόπιν οι γονείς συνδυάζονται μέσω κάποιου τελεστή διασταύρωσης αναπαράγοντας έτσι κάποιες λύσεις-

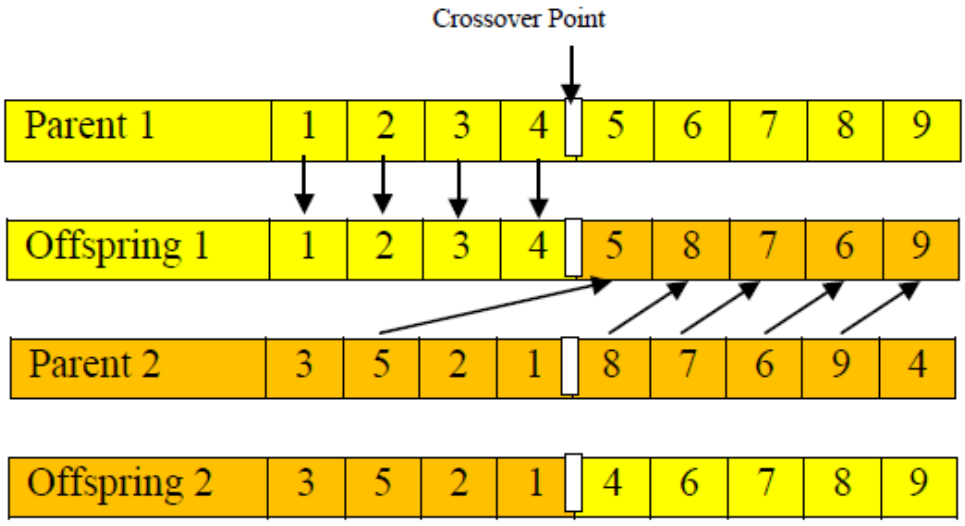
παιδιά (απογόνους). Τέλος η μετάλλαξη τροποποιεί κάποια από τα χαρακτηριστικά των απογόνων με συγκεκριμένη πιθανότητα ώστε να εξασφαλίσει την ποικιλομορφία του πληθυσμού. Οι παραπάνω τελεστές παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 3.5.

Σχήμα 3.5 Παράδειγμα Λειτουργίας Γενετικού Αλγορίθμου



Ο τελεστής διασταύρωσης ή αναπαραγωγής είναι ιδιαίτερα καθοριστικός για τον σχεδιασμό ενός αποδοτικού αλγορίθμου (Kumar 2017) και θα παρουσιαστεί συνοπτικά παρακάτω. Κατά την διασταύρωση επιλέγονται ζεύγη από χρωμοσώματα γονείς και ανταλλάσσονται τα γονίδια τους με συγκεκριμένο τρόπο ώστε να προκύψουν απόγονοι με την επιθυμητή ποικιλομορφία. Έχουν προταθεί πολλοί τελεστές αναπαραγωγής από ερευνητές στην προσπάθεια τους να βελτιώσουν την ποιότητα των απογόνων και άρα να βρίσκουν καλές λύσεις σε σχέση με την βέλτιστη, (Ombuki, Ross and Hanshar, 2006; Chand and Mohanty, 2013) κ.α.

Ο πιο απλός τελεστής αναπαραγωγής είναι ο one-point crossover. Σε αυτή τη μέθοδο επιλέγεται τυχαία ένα σημείο κοπής των χρωμοσωμάτων των γονέων χωρίζοντας τα έτσι σε δύο υποστοιχίες, μία πριν και μία μετά το σημείο κοπής . Στο παράδειγμα του σχήματος 3.6 το σημείο 4 επιλέχθηκε για σημείο κοπής το οποίο βρίσκεται ανάμεσα στα γονίδια 4 και 5 του γονέα 1 και στα γονίδια 1 και 8 του γονέα 2. Στη συνέχεια αντιγράφεται η πρώτη υποστοιχία του γονέα 1 (1,2,3,4) και εισάγεται στον απόγονο 1. Τα υπόλοιπα γονίδια του απογόνου 1 προκύπτουν αντιγράφοντας ένα προς ένα τα γονίδια του γονέα 2 παραλείποντας όσες τιμές έχουν ήδη εμφανιστεί. Τέλος οι ρόλοι των γονέων αντιστρέφονται ώστε να προκύψει και ο δεύτερος απόγονος.



Σχήμα 3.6: Παράδειγμα Τελεστή Αναπαραγωγής 1-point Crossover

Υπάρχουν δύο είδη γενετικών αλγορίθμων ανάλογα με τον τρόπο που αντικαθιστούνται οι παλιές λύσεις (γονείς) όταν δημιουργούνται καινούργιες (απόγονοι): Generational και Incremental (Goldberg and Holland, 1988). Η κλασσική μορφή είναι ο generational γενετικός αλγόριθμος, κατά την οποία σε κάθε γενεά ο αλγόριθμος δημιουργεί νέο πληθυσμό από χρωμοσώματα, ενώ αν υπάρχει ελιτίστικος μηχανισμός διατηρούνται στην επόμενη γενιά τα καλύτερα από αυτά. Κατά τον incremental γενετικό αλγόριθμο δεν δημιουργείται νέος πληθυσμός παρά προστίθενται κάθε φορά οι απόγονοι. Για να διατηρηθεί σταθερό το μέγεθος του πληθυσμού τα χρωμοσώματα που πρόκειται να αντικατασταθούν από τους απογόνους επιλέγονται μέσω κάποιας στρατηγικής αντικατάστασης.

Παρακάτω παρουσιάζεται ψευδοκώδικας που περιγράφει την βασική αρχή των incremental γενετικών αλγορίθμων.

1. δημιούργησε έναν αρχικό πληθυσμό Pop
2. **ενόσω** *το κριτήριο τερματισμού δεν ικανοποιείται* **επανέλαβε**
3. επιλογή: διάλεξε τυχαία δύο γονείς P_1 και P_2
4. αναπαραγωγή: εφάρμοσε τελεστή αναπαραγωγής για πάρεις απογόνους
5. μετάλλαξη: διατάραξε τυχαία τις λύσεις-παιδιά (με μικρή πιθανότητα)
6. αντικατάσταση: διάλεξε κάποιες λύσεις από τον πληθυσμό και αντικατέστησε τες με τις λύσεις παιδιά
7. επέστρεψε την καλύτερη λύση

3.3.1.2 Μιμητικός Αλγόριθμος (Memetic Algorithm - MA)

Οι γενετικοί αλγόριθμοι, στη μορφή που προτάθηκαν από τον Holland, δεν είναι αρκετά επιθετικοί για τα προβλήματα βελτιστοποίησης συγκριτικά με άλλους μεταευρετικούς όπως

η περιορισμένη αναζήτηση (TS). Έτσι ο Moscato το 1989 πρότεινε μια πολύ πιο ισχυρή μορφή των γενετικών αλγορίθμων, τον μιμητικό αλγόριθμο κατά τον οποίο εφαρμόζεται τεχνική τοπικής αναζήτησης σε κάθε λύση απόγονο βελτιώνοντας με αυτόν τον τρόπο την απόδοση σε πολλά προβλήματα βελτιστοποίησης. Η τοπική αναζήτηση στον μιμητικό αλγόριθμο αποφέρει εντατικοποίηση (Moscato 1989). Οι λύσεις που προκύπτουν από το στάδιο της αναπαραγωγής βελτιώνονται με μέθοδο τοπικής αναζήτησης πριν υποστούν μετάλλαξη. Παρακάτω παρουσιάζεται με χρήση ψευδοκώδικα η γενική δομή ενός incremental μιμητικού αλγόριθμου.

1. δημιούργησε έναν αρχικό πληθυσμό Pop
2. **ενόσω** *το κριτήριο τερματισμού δεν ικανοποιείται* **επανέλαβε**
3. επιλογή: διάλεξε τυχαία δύο γονείς P_1 και P_2
4. αναπαραγωγή: εφάρμοσε τελεστή αναπαραγωγής για πάρεις απογόνους
5. βελτίωση: εφάρμοσε τοπική αναζήτηση στις λύσεις παιδιά με δεδομένη πιθανότητα
6. μετάλλαξη: διατάραξε τυχαία τις λύσεις-παιδιά (με μικρή πιθανότητα)
7. αντικατάσταση: διάλεξε κάποιες λύσεις από τον πληθυσμό και αντικατέστησε τες με τις λύσεις παιδιά
8. επέστρεψε την καλύτερη λύση

3.3.1.3 Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization - ACO)

Η μέθοδος βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών (ACO) είναι εμπνευσμένη από την κοινωνική συμπεριφορά μυρμηγκιών που χρησιμοποιούν στρατηγικές βασισμένες στην φερομόνη όταν ψάχνουν για φαγητό. Τα μυρμήγκια, στο φυσικό τους περιβάλλον, αφήνουν ίχνη από φερομόνη για να ειδοποιήσουν τα υπόλοιπα μυρμήγκια σχετικά με πηγές τροφής. Μετά από κάποιο διάστημα η ποσότητα της φερομόνης σε κάποια μονοπάτια αυξάνει εάν όλο και περισσότερα μυρμήγκια τα ακολουθούν ή εξαφανίζεται εάν τα ακολουθούν λίγα μυρμήγκια. Η μέθοδος ACO είναι η πιο διαδεδομένη από τις μεθόδους αλγορίθμων βασισμένων σε συνεργασία σμήνους πρακτόρων και βρίσκει πολύ καλή εφαρμογή σε προβλήματα όπου η κατασκευή λύσης μπορεί να θεωρηθεί ως δημιουργία διαδρομών σε δεδομένο γράφο όπως στην περίπτωση προβλημάτων δρομολόγησης (η πρώτη εφαρμογή της μεθόδου ήταν για το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή).

Το γενικό πλαίσιο της μεθόδου αποτελείται από τρία στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο χρησιμοποιούνται τα τεχνητά μυρμήγκια να κατασκευάσουν λύσεις με κανόνες πιθανότητας εκμεταλλευόμενα πληροφορίες από ευρετικούς και τα μονοπάτια φερομόνης. Το δεύτερο στάδιο αποτελείται από κινήσεις που δεν μπορούν να εκτελέσουν τα μυρμήγκια από μόνα τους . Για παράδειγμα η ενεργοποίηση τοπικής αναζήτησης ή την χρήση πρόσθετης φερομόνης σύμφωνα με ολικές πληροφορίες που δεν μπορούν να συλλεχθούν από τα μυρμήγκια. Στο τελευταίο στάδιο ανανεώνονται τα μονοπάτια φερομόνης και οι τιμές των

ιχνών (φερομόνης), ενισχύονται για τα χαρακτηριστικά που περιέχονται σε καλές λύσεις ενώ μειώνονται για χαρακτηριστικά που δεν χρησιμοποιούνται πολύ. Παρακάτω παρουσιάζεται η γενική δομή ενός ACO

1. αρχικοποίηση μονοπατιών φερομόνης
2. **όσο** *το κριτήριο τερματισμού δεν ικανοποιείται* **επανέλαβε**
3. κατασκεύασε λύσεις
4. κάλεσε Daemon Action (προαιρετικά)
5. ανανέωσε τα μονοπάτια φερομόνης
6. ολική ανανέωση φερομόνης
7. επέστρεψε την καλύτερη λύση

Η κίνηση Daemon , η οποία χρησιμοποιείται συχνά ως μέθοδος τοπικής αναζήτησης, είναι προαιρετική, αλλά παρόλα αυτά οι περισσότερες προσεγγίσεις με ACO σε προβλήματα NP-hard χρησιμοποιούν τεχνικές τοπικής αναζήτησης για να βελτιώσουν την απόδοση τους. Χωρίς αυτό το συστατικό η μέθοδος τείνει να είναι λιγότερο ανταγωνιστική από τους απλούς ΓΑ. Η ολική ανανέωση φερομόνης έχει σκοπό να κάνει πιο ελκυστικά ορισμένα χαρακτηριστικά που ανήκουν σε καλές λύσεις για τις επόμενες επαναλήψεις. Αυτό ουσιαστικά επιτυγχάνεται με την χρήση δύο μηχανισμών. Ο πρώτος είναι ο μηχανισμός κατάθεσης φερομόνης, ο οποίος αυξάνει το επίπεδο φερομόνης σε συστατικών καλών λύσεων ενώ ο δεύτερος μειώνει σταδιακά την φερομόνη που έχουν αφήσει προηγουμένως τα μυρμήγκια.

Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές της μεθόδου ACO στη διεθνή βιβλιογραφία ανάλογα με τους κανόνες ανανέωσης της φερομόνης που χρησιμοποιείται. Οι πιο δημοφιλείς παραλλαγές είναι :

1. σύστημα μυρμηγκιών (ant system - AS) : χρησιμοποιεί τυχαίο αναλογικό κανόνα μετάβασης καθώς συγκεντρώνεται η φερομόνη από τα μυρμήγκια ανάλογα με την ποιότητα της λύσης
2. σύστημα αποικίας μυρμηγκιών (ant colony system - ACS) : χρησιμοποιεί ψευδο-τυχαίο κανόνα μετάβασης, και η φερομόνη συγκεντρώνεται μόνο ,και αφαιρείται, από συστατικά μέρη της καλύτερης λύσης.
3. MAX-MIN σύστημα μυρμηγκιών (MMAS) : περιλαμβάνει άνω και κάτω όρια στην φερομόνη, η οποία επιτρέπεται να συγκεντρώνεται μόνο στην καλύτερη λύση.

3.3.1.4 Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization - PSO)

Μια άλλη μέθοδος σμήνους είναι ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (PSO) και βασίζεται σε ένα πληθυσμό ατόμων που καλούνται σωματίδια. Η μέθοδος παρουσιάστηκε πρώτη φορά από τους Kennedy και Eberhart το 1985 για συνεχή προβλήματα βελτιστοποίησης. Το σωματίδιο αναπαριστά μία πιθανή λύση που κινείται στο χώρο

αναζήτησης με στόχο να φτάσει στο ολικό βέλτιστο. Η συνολική διαδικασία μάθησης του σμήνους έχει σαν αποτέλεσμα τοπικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων που αποτελούν το σμήνος. Κάθε σωματίδιο έχει μνήμη, όπου αποθηκεύει την καλύτερη λύση που έχει συναντήσει μέχρι στιγμής και την ικανότητα να επικοινωνεί με τα σωματίδια γύρω του. Από αυτήν την πληροφορία υπολογίζεται μια ταχύτητα για το κάθε σωματίδιο η οποία θα καθορίσει τις αλλαγές που θα γίνουν στην επόμενη επανάληψη.

Σε κάθε επανάληψη στην PSO, κάθε σωματίδιο μετακινείται από την θέση του σε μια καλύτερη θέση σε έναν χώρο N-διαστάσεων με κάποια ταχύτητα. Η ταχύτητα των σωματιδίων επηρεάζεται από τις προσωπικές και κοινωνικές πληροφορίες . Η προσωπική πληροφορία ενός σωματιδίου είναι η καλύτερη θέση, pbest, που έχει ήδη επισκεφθεί ενώ κοινωνική πληροφορία των σωματιδίων είναι η καλύτερη θέση που έχει βρεθεί συνολικά από το σμήνος σωματιδίων, Sbest. Στην πρώτη επανάληψη για κάθε σωματίδιο iη θέση x_i παράγεται τυχαία και η ταχύτητα v_i θεωρείται ίση με μηδέν. Στις επόμενες επαναλήψεις οι τιμή της θέσης και της ταχύτητας κάθε σωματιδίου ανανεώνονται σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$v_i^{k+1} = \omega \cdot v_i^k \quad + c_1 \cdot \alpha_1 \cdot (pbest_i - x_i^k) + c_2 \cdot \alpha_2 \cdot (sbest_i - x_i^k) \quad \text{(ταχύτητα)}$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \qquad \text{(θέση)}$$

όπου οι συντελεστές βάρους c_1, c_2 χρησιμοποιούνται για την εξισορρόπηση της κίνησης ως προς τις θέσεις $pbsest, sbest$. α_1,α_2 είναι τυχαίες μεταβλητές από ομοιόμορφη κατανομή [0,1] και ωείναι συντελεστής αδράνειας που βοηθά τον έλεγχο των φάσεων εντατικοποίησης και διαφοροποίησης της PSO. Η γενική δομή της μεθόδου PSO περιγράφεται παρακάτω :

1. αρχικοποίησε την ταχύτητα v_i και θέση x_i κάθε σωματιδίου
2. **όσο** *το κριτήριο τερματισμού δεν ικανοποιείται* **επανέλαβε**
3. ανανέωσε τις θέσεις (x_i^{k+1}) και τις ταχύτητες (v_i^{k+1})
4. ανανέωσε τις καλύτερες θέσεις
5. επέστρεψε την καλύτερη λύση

3.3.2 Μεταευρετικοί Αλγόριθμοι που Παράγουν Ακολουθία Λύσεων

Αυτή η κατηγορία μεταευρετικών μεθόδων ασχολείται με μία μόνο λύση κάθε φορά, εξελίσσοντας τη μέσα από μια ιδιαίτερη επαναληπτική διαδικασία. Αυτό το είδος εξερεύνησης απαιτεί να ορίσουμε τουλάχιστον μία γειτονιά ώστε να 'μεταπηδήσει' από μια κατεστημένη λύση σε μία άλλη κοντινή στο πεδίο λύσεων. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι αλγόριθμοι για το πρόβλημα δρομολόγησης όπως ο Simulated Annealing, Tabu Search και Neighborhood Search και κάποιες παραλλαγές του τελευταίου.

3.3.2.1 Προσομειωμένη Ανόπτηση (Simulated Annealing - SA)

Η μέθοδος Προσομοιωμένης Ανόπτησης παρουσιάστηκε από τους (Kirkpatrick et al 1983). Είναι εμπνευσμένη από ένα φυσικό φαινόμενο σχετικό με την συμπεριφορά των ατόμων (ενέργεια Ε) σε αλλαγές της θερμοκρασίας (Τ) και βάση του τύπου $e^{-E/kT}$, όπου κ η σταθερά Boltzmann. Η διεργασία της ανόπτησης μετάλλων έχει στόχο την δημιουργία τέλειας κρυσταλλικής δομής των ατόμων του μετάλλου μέσα από κατάλληλη μείωση της θερμοκρασίας του. Απότομη μείωση της θερμοκρασίας έχει ως αποτέλεσμα ατέλειες, τις οποίες οι Kirkpatrick et al συγκρίνουν με τοπικά βέλτιστα. Αντίθετα με σταδιακή μείωση της θερμοκρασίας τα άτομα έχουν χρόνο να σχηματίσουν τέλεια κρυσταλλική δομή, η οποία μπορεί να θεωρηθεί ως ολικό βέλτιστο.

Στα προβλήματα βελτιστοποίησης η εκθετική συνάρτηση είναι το βασικό εργαλείο για την αναζήτηση βέλτιστων λύσεων. Η τιμή Ε/k αντιπροσωπεύεται από την μεταβολή της αντικειμενικής συνάρτησης μετά από εκτέλεση μια κίνησης σε μια γειτονιά σε μια συγκεκριμένη 'θερμοκρασία' Τ, όπου Τ πραγματικός αριθμός. Πιο συγκεκριμένα, αξιολογείται μια τυχαία παραλλαγή της τρέχουσας λύσης. Εάν η μεταβολή, της αντικειμενικής συνάρτησης, Δf προκαλεί βελτίωση της λύσης (αρνητική μεταβολή) τότε γίνεται αποδεκτή και εκτελείται ενώ σε αντίθετη περίπτωση γίνεται αποδεκτή με πιθανότητα $e^{-\Delta f/T}$. Έτσι, για μια συγκεκριμένη θερμοκρασία, είναι πιθανότερο να πραγματοποιηθεί μια κίνηση που προκαλεί μικρότερη υποβάθμιση. Η διαδικασία της ανόπτησης προσομοιώνεται με σταδιακή μείωση της τιμής Τ κατά τις επαναλήψεις, μειώνοντας την πιθανότητα να γίνει μια κίνηση αποδεκτή που να μην βελτιώνει την λύση. Η μέθοδος σταματά όταν ο όρος Τ λάβει μια συγκεκριμένη τιμή, κοντά στο μηδέν, ή μετά από κάποιο δεδομένο αριθμό επαναλήψεων και επιστρέφει την καλύτερη λύση που έχει βρει. Παρουσιάζεται στην συνέχεια ένας ψευδοκώδικας που περιγράφει τις βασικές αρχές της μεθόδου.

1. Δημιούργησε μια αρχική λύση S
2. S^* :S
3. $T := T_{max}$
4. **ενόσω** *το κριτήριο τερματισμού δεν ικανοποιείται* **επανέλαβε**
5. S':= τυχαία παραλλαγή (S)
6. εκτίμησε Δf

7. **εάν** $\Delta f < 0$ **ή** $e^{-\Delta f/T} < U \sim (0,1)$**τότε**
8. $S := S'$
9. **εάν** S' *βελτιώνει την* S^* **τότε**
10. $S^* := S'$
11. T := α.T
12. επέστρεψε την (S^*)

όπου $U \sim (0,1)$ είναι γεννήτρια τυχαίων αριθμών ομοιόμορφης κατανομής και α σταθερά μείωσης της θερμοκρασίας (π.χ. α=0.999)

Αντίθετα με τους περισσότερους μεταευρετικούς ο αλγόριθμος SA δεν απαιτεί να κατασκευαστεί αρχική λύση καλής ποιότητας εφόσον οι υψηλές θερμοκρασίες κατά το αρχικό στάδιο του αλγορίθμου θα την καταστήσουν άχρηστη.

3.3.2.2 Περιορισμένη αναζήτηση (Tabu Search - TS)

Ο αλγόριθμος περιορισμένης αναζήτησης παρουσιάστηκε από τον (Glover, 1986) και σε αντίθεση με την προσομοιωμένη ανόπτηση είναι πλήρως ντετερμινιστική μέθοδος. Ο αλγόριθμος Tabu Search παρέχει πολύ καλές λύσεις σε πολλές περιπτώσεις και επακόλουθα είναι από μία τις πιο αποδοτικές μεθόδους επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Η βασική αρχή της μεθόδου Tabu Search είναι να συνεχίσει την τοπική αναζήτηση ακόμα και αν βρεθεί σε τοπικό βέλτιστο. Έτσι η ιδέα είναι να σαρώσει πλήρως μια γειτονιά της πιο πρόσφατης λύσης και να κάνει την καλύτερη δυνατή κίνηση, ακόμα και αν αποκλίνει η αντικειμενική συνάρτηση. Η επιστροφή σε μια λύση που έχει προηγουμένως διερευνηθεί αποτρέπεται με τη χρήση μνήμης, η οποία ονομάζεται λίστα ταμπού και καταγράφει την πρόσφατη ιστορία της αναζήτησης. Η καλύτερη λύση που βρίσκεται κατά την διάρκεια του αλγορίθμου αποθηκεύεται και επιστρέφεται στο τέλος όταν το κριτήριο τερματισμού ικανοποιηθεί. Η λίστα ταμπού βοηθά την αναζήτηση να αποφεύγει γειτονιές που έχει επισκεφθεί (cycling) κάνοντας την έτσι πιο εκτεταμένη.

Η αποθήκευση πλήρων λύσεων στη λίστα ταμπού συχνά καταναλώνει πολύ μνήμη και δεν είναι επιθυμητό. Μια επιλογή αντιμετώπισης είναι να αποθηκεύονται μόνο μερικά χαρακτηριστικά , όπως η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Επίσης η λίστα ταμπού χρησιμοποιεί και βραχυπρόθεσμη μνήμη, την παραμονή σε ταμπού. Οι κλασικές λίστες ταμπού συνήθως εφαρμόζουν κυκλικές λίστες σταθερού μήκους αλλά υπάρχει επιλογή να διαφοροποιηθεί το μήκος της λίστας ταμπού κατά την διάρκεια της αναζήτησης ή την παραγωγή τυχαίων παραμονών ταμπού κάθε κίνησης.

Ένα άλλο τυπικό χαρακτηριστικό της αναζήτησης ταμπού είναι το κριτήριο aspiration (criteria) που επιτρέπει την διερεύνηση γειτονιάς μιας απαγορευμένης λύσης (ταμπού) αν αυτή αποφέρει καλύτερη λύση. Συνηθισμένο τέτοιο κριτήριο είναι να επιτρέπεται μια κίνηση, ακόμα και αν είναι ταμπού, αν η λύση που θα βρει είναι καλύτερη από την βέλτιστη

λύση που έχει βρεθεί έως τότε. Στην συνέχεια παρουσιάζεται ένας ψευδοκώδικας που περιγράφει τις βασικές αρχές της μεθόδου.

1. Δημιούργησε μια αρχική λύση S
2. S^* :S
3. **ενόσω** *το κριτήριο τερματισμού δεν ικανοποιείται* **επανέλαβε**
4. επέλεξε την καλύτερη κίνηση στη γειτονιά
5. **εάν** *η κίνηση επιτρέπεται* **τότε**
6. *// επιτρέπεται από το aspiration (criteria) ή δεν είναι ταμπού*
7. εκτέλεσε την κίνηση στην S
8. **εάν** Sβελτιώνει την S^* **τότε**
9. S^* := S
10. επέστρεψε την S^*

3.3.2.3 Αναζήτηση μεταβλητής Γειτονιάς (Variable Neighborhood Search - VNS)

Η αναζήτηση μεταβλητής γειτονιάς (VNS) και η πιο απλή παραλλαγή της η κάθοδος μεταβλητής γειτονιάς (VND) είναι γρήγοροι και συμπαγείς μεταευρετικοί. Συχνά σχεδιάζονται να αντικαθιστούν το στάδιο τοπικής αναζήτησης ενός άλλου μεταευρετικού. Η μέθοδος VNS παρουσιάστηκε από τους (Mladenovi & Hanshen 1997). Η κεντρική ιδέα του VNS είναι εμπνευσμένη από μια απλή αρχή: συστηματική αλλαγή γειτονιάς κάθε φορά που δεν βρίσκεται βελτίωση από τον αλγόριθμο τοπικής αναζήτησης. Στην πραγματικότητα ένα τοπικό βέλτιστο μιας γειτονιάς δεν είναι δεσμευτικό πως θα είναι τοπικό βέλτιστο σε μια άλλη γειτονιά.

Τις περισσότερες φορές ο VNS διερευνά όλο και πιο απομακρυσμένες περιοχές της υφιστάμενης λύσης, γεγονός που υπονοεί ότι είναι ικανός να αξιολογεί την απόσταση μεταξύ δύο λύσεων όταν εκτελεί μια κίνηση. Ο τρόπος με τον οποίο αλλάζει γειτονιά μπορεί να γίνει με τρεις διαφορετικές επιλογές: α) ντετερμινιστικά, β) στοχαστικά, γ) ντετερμινιστικά και στοχαστικά μαζί. Με ντετερμινιστική αλλαγή γειτονιάς η μέθοδος μετατρέπεται σε VND. Αν ένα πεπερασμένο σύνολο k προεπιλεγμένων δομών γειτονιάς είναι $N = N_i$,για i =1,...,k, το σύνολο των λύσεων στην i^{η}γειτονιά του S μπορεί να γραφεί ως $N_i^i(S)$. Στη συνέχεια παρουσιάζονται με ψευδοκώδικα η βασική αρχή του VND.

1. φτιάξε μια αρχική λύση S
2. i:= 1
3. **όσο** $i \leq k$ **επανέλαβε**
4. S':= Τοπική_Αναζήτηση(N_i (S)
5. **εάν** S' βελτιώνει την S **τότε**
6. S:=S'
7. i:= 1
8. **αλλιώς**

9. i:= i+1

Όταν η τοπική αναζήτηση δεν βρει καλύτερη λύση στην τωρινή γειτονιά, εξερευνά την επόμενη και η μέθοδος συνεχίζει με αυτόν τον τρόπο και στις υπόλοιπες γειτονιές μέχρι να βρει μια κίνηση που να βελτιώνει την λύση ή ικανοποιηθεί κάποιο κριτήριο τερματισμού (στο παράδειγμα i=k). Ωστόσο όταν βρεθεί καλύτερη λύση, ο αλγόριθμος επαναξεκινά την αναζήτηση γύρω από την νέα λύση στις κοντινότερες γειτονιές (i=1) πριν διερευνήσει πιο απομακρυσμένες λύσεις. Μέσω μιας διαδικασίας , που ονομάζεται shaking, διαλέγονται, στοχαστικά, τυχαία σημεία μιας γειτονιάς N_i (S) και εφαρμόζονται στην πιο πρόσφατη λύση, με αποτέλεσμα την μειωμένη VNS (RVNS). Η μέθοδος VNS εμπλουτίζει περισσότερο την RVNS με χρήση τοπικής αναζήτησης μετά την διαδικασία shaking. Οι γειτονιές που διερευνώνται από την τοπική αναζήτηση πρέπει να είναι διαφορετικές από αυτές που ορίζονται για το shaking, αλλιώς ακυρώνεται η κίνηση.

Τις περισσότερες φορές ο αλγόριθμος VNS συνδυάζει ντετερμινιστικές και στοχαστικές αλλαγές γειτονιάς με το να αντικαθιστά την μέθοδο τοπικής αναζήτησης με ένα VND. Κριτήριο τερματισμού μπορεί να είναι ο υπολογιστικός χρόνος, ένα ανώτατο όριο επαναλήψεων ή ένα ανώτατο όριο επαναλήψεων μεταξύ δύο βελτιώσεων της λύσης. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η γενική δομή ενός αλγορίθμου VNS. Στην πράξη όπως αναφέρθηκε, η τοπική αναζήτηση (σειρά 7) είναι συχνά VND.

1. φτιάξε μια αρχική λύση S
2. S := ΤοπικήΑναζήτηση(S)
3. i:= 1
4. **όσο** *το κριτήριο τερματισμού δεν ικανοποιείται* **επανέλαβε**
5. **όσο** $i \leq k$ **επανέλαβε**
6. S':= Shaking(N_i (S))
7. S':= ΤοπικήΑναζήτηση(S')
8. **εάν** S' βελτιώνει την S **τότε**
9. S:=S'
10. i:= 1
11. **αλλιώς**
12. i:= i+1

3.4 Υβριδικοί Αλγόριθμοι (Hybrid Algorithm)

Η έρευνα στους μεταευρετικούς αλγορίθμους για συνδυαστικά προβλήματα βελτιστοποίησης, και άρα και για τα προβλήματα δρομολόγησης, στρέφεται έντονα στην μελέτη υβριδικών συστημάτων. Το κύριο κίνητρο αυτής της τάσης είναι να εκμεταλλευτούν την συμπληρωματικότητα διαφόρων μεθόδων βελτιστοποίησης και να τις κάνουν να συνεργαστούν σε συνέργεια (Blum, 2012). Δύο είναι οι κύριες κλάσεις υβριδικών αλγορίθμων: είτε ο συνδυασμός από διάφορα συστατικά ευρετικών και μεταευρετικών

μεθόδων (Υβριδικοί Μεταευρετικοί) είτε η διασταύρωση ακριβών αλγορίθμων με κάποιο μεταευρετικό (Matheuristics).

Παρ' όλα αυτά ο σχεδιασμός ενός αποδοτικού υβριδικού αλγορίθμου είναι ιδιαίτερα δύσκολος. Για να έχει πραγματικό ενδιαφέρον, η προκύπτουσα μέθοδος πρέπει να είναι αποδοτική όσον αφορά την ποιότητα λύσεων που παράγει και τον υπολογιστικό χρόνο που χρειάζεται χωρίς ωστόσο να είναι πολύ συγκεκριμένη για το πρόβλημα που επιλύει ή και δύσκολη να εφαρμοστεί. Έτσι, η επιλογή του κατάλληλου συνδυασμού μεθόδων είναι αποφασιστικής σημασίας για έναν αποδοτικό υβριδικό αλγόριθμο.

3.4.1 Υβριδικοί Μεταευρετικοί

Η πρώτη μορφή υβριδικού αλγορίθμου που παρουσιάστηκε συνδύαζε διαφορετικούς μεταευρετικούς σε έναν κεντρικό σκελετό με στόχο να αλληλοσυμπληρώνονται και να παράγουν καλύτερα αποτελέσματα από αν έτρεχαν ξεχωριστά. Ο σχεδιασμός υβριδικών μεθόδων μπορεί να βασιστεί στον εμπλουτισμό ενός συγκεκριμένου μεταευρετικού με προσθήκη κάποιας διαδικασίας επανεκκίνησης, ενός πληθυσμού λύσεων (όπως στους γενετικούς αλγόριθμους), μεταβλητές δομές γειτονιάς (VNS) κ.λ.π. Σύμφωνα με τους (Labadie, Prins and Prodhon, 2016) οι υβριδικοί μπορούν να διαχωριστούν ανάλογα τον τρόπο που συνδυάζουν τις επιμέρους μεθόδους σε τέσσερις κατηγορίες:

1) Υβριδικοί που συνίστανται στην ενσωμάτωση συγκεκριμένα χαρακτηριστικά ενός μεταευρετικού σε κάποιον άλλο. π.χ. η χρήση ενός πληθυσμού λύσεων στον οποίο εξετάζεται κάθε λύση από έναν μεταευρετικό μοναδικής λύσης(3.3.2)
2) Υβριδικοί που αντικαθιστούν ένα μέρος του πρωτότυπου μεταευρετικού με κάποιον άλλο ολόκληρο μεταευρετικό. Για παράδειγμα ο υβριδικός των Lozano and García-Martínez (Lozano and García-Martínez, 2010) που χρησιμοποιεί εξελικτικό αλγόριθμο ως τεχνική διατάραξης του μεταευρετικού Iterated Local Search (ILS)
3) Υβριδικοί που καλούν δύο ή περισσότερους μεταευρετικούς διαδοχικά, δηλαδή οι παραγόμενες λύσεις του ενός δίνονται ως εισροές στον δεύτερο ώστε να βελτιωθεί η λύση.
4) Υβριδικοί που αποδομούν το κυρίως πρόβλημα σε υπο-προβλήματα. Τα υπο-προβλήματα στην συνέχεια λύνονται από διαφορετικούς μεταευρετικούς που συνεργάζονται και ανταλλάσσουν πληροφορίες μέσα σε μια μέθοδο ανωτέρου επιπέδου για να πάρουν λύσεις υψηλής ποιότητας για ολόκληρο το πρόβλημα. Η μέθοδος ανώτερου επιπέδου πρέπει να είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε οι πλήρεις λύσεις να κληρονομούν καλά χαρακτηριστικά από τις λύσεις του υπο- προβλήματος.

3.4.2 Μαθευρετικοί (Matheuristics)

Η κατηγορία αυτή των υβριδικών στο πλαίσιο της δρομολόγησης αποτελείται από συνδυασμό κάποιας ακριβής μεθόδου με κάποιον μεταευρετικό . Σύμφωνα με το (Boschetti *et al.*, 2009) μπορεί να δοθεί ο εξής ορισμός, "ευρετικός αλγόριθμος αποτελούμενος από

μεταευρετικούς και τεχνικές μαθηματικού προγραμματισμού". Ωστόσο ο ορισμός αυτός είναι αρκετά αυστηρός καθώς κάποιοι υβριδικοί συνδυάζουν και άλλες ακριβείς τεχνικές όπως δυναμικός προγραμματισμός, αλγόριθμοι γράφων και constraint programming.

Πολλά ειδικά προβλήματα μπορούν να εξαχθούν ως υπο-προβλήματα του VRP και στη συνέχεια να επιλυθούν με βέλτιστο τρόπο χρησιμοποιώντας μια ακριβή μέθοδο. Αυτό πλέον ,μας το επιτρέπει η πρόοδος των ακριβών μεθόδων και της τεχνολογίας λογισμικών. Έτσι μειώνοντας το μέγεθος του προβλήματος με τεχνικές αποδόμησης μας επιτρέπει να λύνουμε μικρότερα και απλούστερα προβλήματα με ακριβή τρόπο. Οι κύριες τεχνικές αποδόμησης που χρησιμοποιούνται για το VRP είναι οι εξής:

1) Δομική αποδόμηση κατά την οποία επιλέγονται ορισμένες μεταβλητές του αρχικού προβλήματος να έχουν σταθερή τιμή(με κάποια κριτήρια) και κάποιες να βελτιστοποιηθούν στο μειωμένο πλέον πεδίο αναζήτησης. Η ιδέα είναι να αναγνωρίζονται τα υπο-προβλήματα που μπορούν να επιλυθούν βέλτιστα και όχι να αλλάζουν οι μεταβλητές που έχουν αρχικά θεωρηθεί σταθερές με τις επαναλήψεις.
2) Set covering και partitioning. Η ιδέα είναι να μοντελοποιηθεί το πρόβλημα ως πρόβλημα set covering/partitioning των οποίων οι στήλες αντιστοιχούν σε πιθανές διαδρομές.
3) Τεχνικές μείωσης του μεγέθους γειτονιάς γραμμικού προγραμματισμού. Δεν βασίζεται σε αποδόμηση του προβλήματος, αλλά επιλέγοντας τις τοπικές διαστάσεις του πεδίου λύσης που πρόκειται να ερευνηθεί, ένας μεταευρετικός οδηγεί την εξερεύνηση με ακριβή τρόπο.

4. Δομημένη Βιβλιογραφική Ανασκόπηση των Μεθόδων Επίλυσης του VRP

Το VRP έχει πολλαπλές πρακτικές εφαρμογές στην βιομηχανία. Η λύση του συγκεκριμένου προβλήματος μπορεί να βοηθήσει τις επιχειρήσεις να μειώσουν τα κόστη τους καθώς μεγάλο ποσοστό της τιμής ενός προϊόντος οφείλεται στις μεταφορές. Οι επιχειρήσεις επιδιώκουν την εφαρμογή λύσεων λογισμικού με τους κατάλληλους αλγορίθμους ώστε να μειώσουν κόστη μεταφορών, τις διανυόμενες αποστάσεις των οχημάτων και τους χρόνους που αυτά υλοποιούν το έργο τους ενώ παράλληλα να αυξήσουν την εξυπηρέτηση των πελατών. Ίσως η μεγαλύτερη πρόκληση για τις εταιρείες είναι οι μεταφορές σε αστικές περιοχές καθώς η κυκλοφοριακή συμφόρηση συχνά δυσκολεύει τις παραδόσεις εντός χρόνου.

Αντικείμενο της παρούσας βιβλιογραφικής ανάλυσης είναι να καθοριστούν οι τάσεις των μεθόδων επίλυσης του VRP για εμπορευματικές μεταφορές σε αστικές περιοχές (VRP for Urban Freight Transportation) και να προταθούν οι καταλληλότερες από αυτές μέθοδοι. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση αξιοποιήθηκε πρακτικά σε ερευνητικό έργο σχετικά με την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου διαδικτυακού λογισμικού που θα παρέχεται ως υπηρεσία στους χρήστες του (SaaS) για την υποστήριξη των σύγχρονων αναγκών των ελληνικών εταιρειών εφοδιασμού και διανομής, ώστε να προγραμματίζουν αποδοτικά τις παραδόσεις τους και να υπολογίζουν τις διαδρομές των οχημάτων τους υπό χρονικά εξαρτώμενους χρόνους διέλευσης. Το προτεινόμενο σύστημα θα χρησιμοποιεί μεθόδους επίλυσης προβλημάτων δρομολόγησης στόλου οχημάτων και προγραμματισμού παραδόσεων, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς της κυκλοφοριακής συμφόρησης.

Στα προηγούμενα κεφάλαια περιγράφονται οι παραλλαγές του Προβλήματος Δρομολόγησης που εξετάζονται καθώς και κύριες μέθοδοι επίλυσης, οι οποίες μελετήθηκαν και κατηγοριοποιήθηκαν στην παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση.

4.1 Διαδικασία Έρευνας

Η διαδικασία που έχει ακολουθηθεί βασίζεται στην έρευνα των (Alexander et al. 2014), (Eksioglu et al. 2009) και (Braekers et al. 2016). Αφού λοιπόν αναγνωρίζεται η ανάγκη για μία τέτοια έρευνα, στην συνέχεια καθορίζεται ένα πρωτόκολλο έρευνας καθώς και κριτήρια επιλογής και μη επιλογής τα οποία οδηγούν στο επιθυμητό αποτέλεσμα και συνεπώς στα άρθρα. Σκοπός είναι μία αποδοτική και καλά καταγεγραμμένη έρευνα η οποία θα περιέχει όλες τις απαραίτητες παραλλαγές του προβλήματος οδηγώντας πιθανές εξελίξεις και εφαρμογές. Για την συγκεκριμένη έρευνα χρησιμοποιήθηκε η βάση δεδομένων Scopus σύμφωνα με τον Πίνακα 4.1 . Είναι σημαντικό τα άρθρα που θα επιλεγούν να είναι σχετικά με το VRP for urban freight transportation και να προτείνουν κάποιο αλγόριθμο ώστε να καθοριστούν οι τάσεις.. Κάθε άρθρο ελέγχεται διεξοδικά ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή κατηγοριοποίηση και να οδηγήσει σε μία ικανοποιητική στατιστική ανάλυση.

Πίνακας 4.1: Πρωτόκολλο Έρευνας

Πρωτόκολλο Έρευνας	***Title: set of "Vehicle Routing Problem" or "VRP" AND "Algorithm"***
Βάση Δεδομένων	Scopus: Είναι μία παγκόσμια βάση δεδομένων, καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα ακαδημαϊκών δημοσιεύσεων τα οποία έχουν ελεγχθεί από ομότιμους συναδέλφους, τα οποία εκτιμώνται στα 20.000
Είδη Δημοσιεύσεων	Μόνο ελεγμένα από ομότιμους συναδέλφους άρθρα
Γλώσσα	Μοναδική γλώσσα : Αγγλικά. Παρέχει ευρύ φάσμα, ενώ δεν υπήρχε δυνατότητα μεταφράσεων
Data range	Τέθηκαν όρια από το 2000 μέχρι 2018
Πεδίο αναζήτησης	Οι όροι αναζήτησης εφαρμόστηκαν μόνο στα Titles, Abstracts και Keywords.
Όροι Αναζήτησης	TITLE-ABS-KEY ((("time windows" OR "VRPTW") OR ("Multitrip" OR "multi-trip" OR "MTVRP") OR (("hybrid" AND "vrp") OR ("green" AND "VRP")) OR ("time-dependent VRP" OR "time dependent VRP" OR "TDVRP") OR ("Capacitated VRP" OR "CVRP") OR ("Dynamic VRP" OR "DVRP") OR ("pickup and delivery" OR "VRPPD" OR "deliveries and pickups") OR ("Heterogeneous Fleet" OR "Heterogeneous" OR "HFVRP") OR ("multi depot" OR "multi-depot" OR "MDVRP") OR ("open vrp" OR "OVRP")) AND ("VRP" AND ("benchmark instances" OR "benchmark") AND ("Algorithm")) AND NOT ("mail " OR "beverages " OR "waste " OR "concrete " OR "milk " OR "postal " OR "healthcare " OR "truck and trailer " OR "cold " OR "care" OR "location-routing" OR "location routing" OR "last mile" OR "last mile delivery" OR "UAV" OR "transportation of people" OR "flying robots" OR "bus" OR "pollution-routing" OR "polution routing" OR "Asset localization" OR "inventory routing" OR "blood" OR "bike" OR "bicycle")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "cp") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "ch")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "COMP") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "DECI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "BUSI"))

Επεξήγηση Όρου Αναζήτησης	Οι κύριοι όροι αναζήτησης είναι οι εκφράσεις "Vehicle Routing Problem", "VRP" ,και όλες οι παραλλαγές του που περιγράφονται στο κεφ.2, and "Algorithm". Επιλέχθηκε να εξαιρεθούν συγκεκριμένοι κλάδοι μεταφορών, όπως milk, mail, beverages κ.λ.π., που απαιτούν ειδικούς περιορισμούς.Τα άρθρα περιορίζονται σε αυτά που η θεματική τους ενότητα είναι Computer Science, Engineering, Decision Sciences ή Business Management, εξαιρώντας τα Mathematics καθώς η έρευνά μας επικεντρώνεται στα πληροφοριακά συστήματα και όχι σε μαθηματικούς τύπους. Στην συνέχεια τα άρθρα περιορίζονται σε αυτά που ο τύπος του εγγράφου είναι Article, Book Chapter ή Review και το Source type τους είναι Journal, Book Series ή Books.
Deselection Criteria: Relevance to the research problem	Το κριτήριο μη επιλογής είναι σχετικό με την αναζήτηση. Μερικά άρθρα είναι ξεκάθαρα μη σχετικά βασιζόμενα στο τίτλο τους και την σύνοψη τους, ενώ σε άλλα μη σχετικά απαιτείται αναλυτικός έλεγχος καθώς αναφέρονται σε waste collection, cash in transit, truck and trailer, battery swap stations, location routing, food distribution and parcels and documents. Για τα υπόλοιπα άρθρα ολόκληρο το περιεχόμενο ελέγχθηκε ώστε να επιτευχθεί μία αναλυτική κατηγοριοποίηση.

Με βάση τον όρο αναζήτησης του πίνακα 4.1 προέκυψαν 171 άρθρα, όπως αυτά παρουσιάζονται στο παρακάτω σύνδεσμο:

https://www.dropbox.com/s/h0ud0j9nseabhp2/Spiliopoulos_thesis_scopusresults.pdf?dl=0

Τα 171 άρθρα στην συνέχεια αξιολογήθηκαν και με βάση τα κριτήρια αποδοχής περιορίστηκαν σε 138 άρθρα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα.

4.2 Μεθοδολογία Έρευνας

Η συγκεκριμένη έρευνα αφορά την μελέτη των μεθόδων επίλυσης του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων αστικών εμπορευματικών μεταφορών όπως παρουσιάζονται στην διεθνή βιβλιογραφία. Συνεπώς, η έρευνα θα χωριστεί σε δύο επιμέρους τμήματα, όπου το πρώτο θα περιέχει τις παραμέτρους - παραλλαγές του VRP ενώ το δεύτερο τους αλγορίθμους που χρησιμοποιούνται για να λύσουν τις επιμέρους παραμέτρους του προβλήματος.

Οι αστικές εμπορευματικές μεταφορές (ΑΕΜ) θεωρήθηκαν ως ένα σύνολο διαφόρων παραλλαγών του VRP των οποίων τα χαρακτηριστικά και οι περιορισμοί προσεγγίζουν το τις απαιτήσεις των ΑΕΜ. Στις αστικές μεταφορές η σύνθεση του στόλου μπορεί να αποτελείται από οχήματα όμοιας χωρητικότητας (κλασικό VRP) ή και διαφορετικής (HVRP) αλλά και από ειδικού τύπου οχήματα όπως υβριδικά η πράσινα οχήματα (green - hybrid VRP). Άλλο χαρακτηριστικό των ΑΕΜ είναι η ύπαρξη ενός ή πολλαπλών κέντρων διανομών (MDVRP) για την ικανοποίηση της ζήτησης των πελατών. Άλλο συνηθισμένο χαρακτηριστικό αφορά το είδος των δρομολογίων, και κατά τα οποία επιθυμείτε να υπάρχει η επιλογή να γίνονται είτε

μόνο παραλαβές ή παραδόσεις είτε συνδυασμός τους (PDVRP) αλλά και ο αριθμός των δρομολογίων που μπορεί να εκτελέσουν τα οχήματα (MTVRP) . Για τα οχήματα ακόμη επιλέγεται η δυνατότητα εκτέλεσης ενός ή και περισσοτέρων δρομολογίων. Επίσης θεωρείται ότι τα οχήματα μπορούν είτε να επιστρέφουν μετά την εκτέλεση όλων των παραγγελιών τους στην αποθήκη είτε να τερματίζουν στον τελευταίο πελάτη (OVRP). Άλλη συνηθισμένη περίπτωση είναι οι πελάτες να επιθυμούν συγκεκριμένο χρονικό παράθυρο για την παραλαβή των παραγγελιών τους (TWVRP). Η παράδοση των προϊόντων από τα κέντρα διανομής στα διάφορα τελικά σημεία (πελάτες) εντός των πόλεων αντιμετωπίζουν δυσκολίες και απρόοπτα συμβάντα, όπως η κυκλοφοριακή συμφόρηση, οι οποίες οδηγούν σε καθυστερήσεις στα προγραμματισμένα δρομολόγια των οχημάτων. Έτσι είναι σημαντικό να δοθεί έμφαση στον τρόπο που υπολογίζονται οι διάφοροι χρόνοι παράδοσης (TDVRP) και η δυνατότητα αξιοποίησης δυναμικών δεδομένων (DVRP). Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι παραλλαγές του VRP που επιλέχθηκαν.

Πίνακας 4.2: Παραλλαγές VRP που σχετίζονται με Αστικές Εμπορευματικές Μεταφορές

Πρόβλημα Δρομολόγησης Αστικών Εμπορευματικών Μεταφορών
Capacitated VRP (CVRP)
Time Windows VRP (TWVRP)
Time Dependent VRP (TDVRP)
Dynamic VRP (DVRP)
Heterogeneous fleet VRP (HVRP)
Open VRP (OVRP)
Multi Trip VRP (MTVRP)
Pickup & Delivery VRP (PDVRP)
Multi Depot VRP (MDVRP)
Green / Hybrid VRP

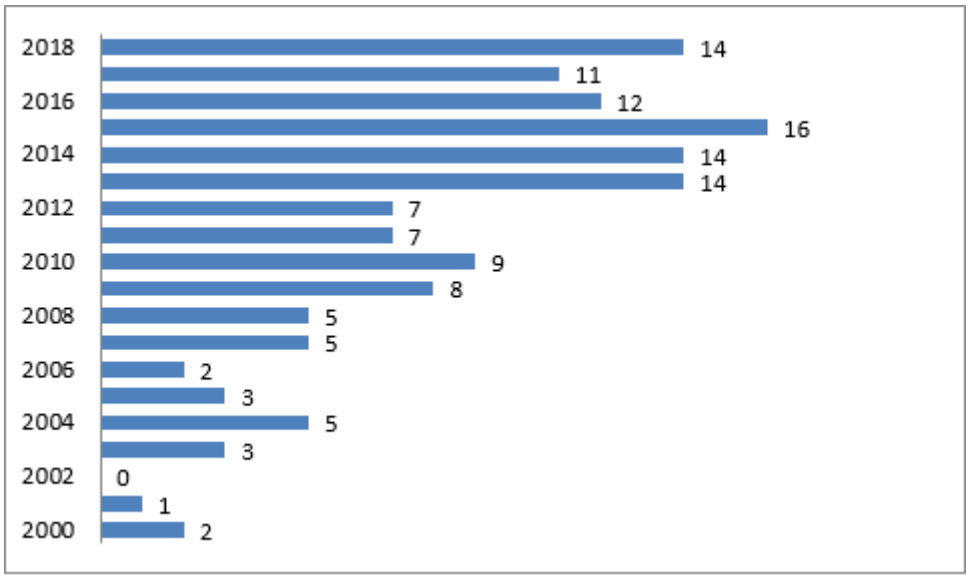
Όσον αφορά τους αλγόριθμους επίλυσης του προβλήματος δρομολόγησης ακολουθήθηκε η ταξινόμηση των (Labadie et al, 2016) όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1 . Οι αλγόριθμοι διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες, ακριβείς - ευρετικοι - μεταευρετικοί μέθοδοι και περιέχουν τους αλγορίθμους όπως περιγράφονται στο Κεφάλαιο 3

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε ανασκόπηση της διεθνής βιβλιογραφίας για άρθρα που ασχολούνται με μεθόδους επίλυσης των παραπάνω παραλλαγών του VRP, ώστε να καθοριστούν οι τάσεις της ερευνητικής κοινότητας ως προς τις μεθόδους επίλυσης. Τα άρθρα κατηγοριοποιήθηκαν ανάλογα με την παραλλαγή του VRP που μελετάνε και τις μεθόδους επίλυσης που προτείνουν. Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια ποσοτικά στοιχεία που προέκυψαν από την έρευνα αυτή.

4.3 Ποσοτικά Στοιχεία Έρευνας

Από την κατηγοριοποίηση των 138 σχετικών άρθρων παρατηρείται καταρχάς το ολοένα και αυξανόμενο ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας τα τελευταία χρόνια για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Όπως φαίνεται στον Σχήμα 4.1, παρατηρείται από το 2000 και μετά αύξηση του αριθμού των συγκεκριμένων δημοσιεύσεων με αποκορύφωμα τα τελευταία χρόνια. Από το 2013 και μετά παρατηρούμε να έχει σχεδόν διπλασιαστεί ο όγκος των άρθρων συγκριτικά με τα παλαιότερα έτη (7 άρθρα το 2012 και 14 άρθρα το 2013), γεγονός που επιβεβαιώνει την σπουδαιότητα του προβλήματος.

Σχήμα 4.1: Αριθμός Δημοσιεύσεων ανά Έτος



Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζεται ο αριθμός των δημοσιεύσεων ανά παραλλαγή VRP. Γρήγορα παρατηρείται η ευρεία εφαρμογή του CVRP, και με την οποία ασχολούνται 115 άρθρα από τα 138. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό καθώς ο περιορισμός χωρητικότητας των οχημάτων είναι ο πιο βασικός περιορισμός γενικά των προβλημάτων δρομολόγησης. Αρκετά άρθρα που προτείνουν κάποιο νέο αλγόριθμο είναι πολύ πιθανό να ασχοληθούν αποκλειστικά με το CVRP, για την δοκιμή του αλγορίθμου, ενώ συνδυάζεται με κάθε άλλη παραλλαγή λόγω του βασικού αλλά και απλοποιημένου περιορισμού ομοιόμορφης χωρητικότητας του στόλου των φορτηγών. Αρκετά σπάνιες βρέθηκαν οι περιπτώσεις όπου δεν λαμβάνεται υπόψη κανένας περιορισμός χωρητικότητας (μόλις 3 άρθρα δεν ασχολήθηκαν καθόλου με περιορισμούς χωρητικότητας). Το VRPTW είναι η επόμενη πιο μελετημένη παραλλαγή με αρκετή διαφορά από όλες τις υπόλοιπες (48 περιπτώσεις). Ο περιορισμός των χρονικών παραθύρων φαίνεται να είναι από τους πιο συνηθισμένους σε πραγματικά προβλήματα και συγκεντρώνει το ενδιαφέρον των ερευνητών. Επίσης για τις δύο αυτές παραλλαγές είναι διαθέσιμο μεγάλο πλήθος προβλημάτων αναφοράς με αποτέλεσμα να προτιμώνται για περιπτώσεις όπου επιθυμείτε η εξέταση της απόδοσης των προτεινόμενων αλγορίθμων.

Οι υπόλοιπες παραλλαγές εμφανίζονται με ρυθμό μικρότερο του 14% και θα μπορούσαν να χωριστούν σε δύο ομάδες αναλόγως αν το σχετικό ποσοστό τους είναι άνω ή κάτω του 10%. Έτσι στην μία ομάδα μπορούν να θεωρηθούν ότι ανήκουν οι παραλλαγές MDVRP, VRPPD, DVRP και το HVRP. Οι παραλλαγές αυτές έχουν σχετικά πιο ειδικούς περιορισμούς ώστε να μπορούν να επιλύουν πιο συγκεκριμένες περιπτώσεις προβλημάτων (πχ το πρόβλημα δρομολόγησης με παραλαβές και παραδόσεις - VRPPD). Το DVRP μελετάται ευρέως τα τελευταία χρόνια, πρωτίστως λόγω της τεχνολογικής ανάπτυξης, γεγονός που έχει επιτρέψει στους ερευνητές να έχουν όλο και περισσότερα δεδομένα πραγματικού χρόνου στην διάθεση τους.

Τέλος στην άλλη ομάδα ανήκουν οι υπόλοιπες παραλλαγές με σχετικό ποσοστό δημοσιεύσεων μικρότερο του 10%. Κάποιες από αυτές, όπως το Green - Hybrid VRP είναι σχετικά πρόσφατες παραλλαγές και συγκεντρώνουν τελευταία όλο και περισσότερο

Πίνακας 4.3: Παραλλαγές VRP - Ποσοστά Άρθρων

VRP Variant	Number of Articles (Total = 138)	Relative Percentage (%)
Capacitated VRP (CVRP)	122	88.40
VRP with Time Windows (VRPTW)	48	34.78
VRP with Pickup and Delivery (VRPPD)	19	13.76
Multi-Depot VRP (MDVRP)	17	12.32
Dynamic VRP (DVRP)	16	11.59
Heterogeneous Fleet VRP (HVRP)	13	9.42
Open VRP (OVRP)	9	6.52
Green-Hybrid VRP	6	4.34
Multi-Trip VRP (MTVRP)	2	1.45
Tim-Dependent VRP (TDVRP)	1	0.72

ενδιαφέρον από τους ερευνητές, ενώ άλλες όπως το MTVRP και OVRP έχουν πιο περιορισμένη πρακτική εφαρμογή. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2, στην διεθνή βιβλιογραφία σπάνια μελετώνται μεμονωμένα οι παραλλαγές του VRP. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τους ερευνητές απασχολεί ο συνδυασμός των διαφόρων εκδοχών, καθώς έτσι προσεγγίζουν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα πραγματικά προβλήματα αλλά αυξάνεται και η πολυπλοκότητα των προβλημάτων, καθιστώντας τα έτσι πιο ενδιαφέρον. Συνεπώς είναι χρήσιμο να δούμε τον τρόπο με τον οποίο αυτές συνδυάζονται στην διεθνή βιβλιογραφία. Όπως έχει ήδη αναφερθεί το CVRP και το VRPTW είναι οι πιο μελετημένες παραλλαγές αλλά περιέχουν και τους πιο βασικούς περιορισμούς και άρα είναι λογικό να συνδυάζονται περισσότερο. Όπως παρατηρούμε στον Πίνακα 4.4, ο πιο συνηθισμένος συνδυασμός είναι CVRP με VRPTW (41 περιπτώσεις) αλλά και CVRP με VRPPD (21 περιπτώσεις) ενώ οι τρεις αυτές παραλλαγές (CVRP - VRPTW - VRPPD) μελετώνται πολύ συχνά σε συνδυασμό με κάποια άλλη. Το VRPTW συνδυάζεται συχνά με το DVRP και το HVRP (5 περιπτώσεις) αλλά και με το

VRPPD (4 περιπτώσεις) ενώ το MDVRP με το OVRP (3 περιπτώσεις) και με το VRPPD (4 περιπτώσεις).

Πίνακας 4.4: Συσχέτιση των παραλλαγών VRP

	CVRP	VRPTW	TDVRP	DVRP	MTVRP	HFVRP	OVRP	GVRP & HVRP	VRPSPD & VRPB	MDVRP
CVRP	-	41	2	4	3	1	5	8	21	8
VRPTW		-	3	5	3	5	2	7	4	3
TDVRP			-			1		1		
DVRP				-		1				
MTVRP					-	1	1		1	1
HFVRP						-	1	6	2	2
OVRP							-		2	2
GVRP & HVRP								-	1	
VRPSPD & VRPB									-	5
MDVRP										-

Όσον αφορά τις μεθόδους επίλυσης των προβλημάτων δρομολόγησης είναι φανερό όπως φαίνεται από τον Πίνακα 4.5 πως οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι με μεγάλη διαφορά είναι οι μεταευρετικοί αλγόριθμοι και οι υβριδικοί μεταευρετικοί. Όπως έχει αναφερθεί τα προβλήματα δρομολόγησης οχημάτων ανήκουν στην υπολογιστική κλάση NP-Hard, δηλαδή είναι προβλήματα μεγάλης πολυπλοκότητας καθώς περιέχουν μεγάλο αριθμό δεδομένων με αποτέλεσμα οι ακριβείς μέθοδοι και οι απλοί ευρετικοί να παρουσιάζουν αδυναμία επίλυσης τέτοιων προβλημάτων. Έτσι η έρευνα γύρω από τις μεθόδους επίλυσης έχει επικεντρωθεί πλέον στους μεταευρετικούς και υβριδικούς αλγορίθμους. Συνήθως οι υβριδικές μέθοδοι συνδυάζουν διάφορες μεταευρετικές μεθόδους με κλασικούς ευρετικούς, και πιο σπάνια και ακριβείς μεθόδους, με αποτέλεσμα ο αριθμός των προτεινόμενων μεταευρετικών αλγορίθμων να είναι μεγαλύτερος από τον αριθμό των άρθρων, ενώ επίσης αρκετά άρθρα προτείνουν περισσότερες της μιας μεθόδου. Τον τελευταίο καιρό η έχουν προταθεί και κάποιες πιο σύγχρονες μέθοδοι επίλυσης, όπως αυτές της προσομοίωσης και των νευρωνικών δικτύων.

Πίνακας 4.5: Μέθοδοι Επίλυσης - Αριθμός Εμφάνισης

Applied Method	Number of Instances
Meta Heuristic	157
Hybrid	54
Heuristic	33
Exact	7
Neural Network	3
Simulation	**1**

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως οι μεταευρετικοί αλγόριθμοι είναι με διαφορά οι πιο διαδεδομένοι μέθοδοι επίλυσης του VRP και οι χρησιμοποιούνται είτε μόνοι τους είτε σε συνδυασμό με κάποια άλλη μέθοδο για να επιτύχουν λύσεις υψηλής ποιότητας σε εύλογο χρονικό διάστημα και συνεπώς θα ήταν χρήσιμο να δούμε ποιοι αλγόριθμοι προτείνονται από τους ερευνητές. Στον Πίνακα 4.6 παρουσιάζονται οι μεταευρετικοί αλγόριθμοι που προτείνονται στα άρθρα που ελέγχθηκαν. Εύκολα φαίνεται ότι οι περισσότεροι είναι μεταευρετικοί αλγόριθμοι που βασίζονται σε έναν πληθυσμό λύσεων (population based - 98 περιπτώσεις). Από αυτούς πιο συχνά συναντιούνται οι γενετικοί αλγόριθμοι (44 περιπτώσεις) και οι μέθοδοι βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών (AC0 - 27 περιπτώσεις), οι οποίοι είναι και από τους πρώτους χρονικά μεταευρετικούς αυτού του είδους. Πέρα από αυτές τις μεθόδους, οι υπόλοιπες μέθοδοι συναντήθηκαν από μια φορά μόνο με λίγες εξαιρέσεις όπως την βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων (PSO - 9 περιπτώσεις), τον μιμητικό αλγόριθμο (7 περιπτώσεις) και ένα πιο σύγχρονο, τον κβαντικό εξελικτικό αλγόριθμο (QEA - 4 περιπτώσεις).

Μεταευρετικοί αλγόριθμοι τοπικής αναζήτησης συναντήθηκαν σε 59 περιπτώσεις. Οι πρώτοι μεταευρετικοί που προτάθηκαν για το VRP και κατάφεραν να ξεπεράσουν σε απόδοση τις παλαιότερες μεθόδους είναι ο αλγόριθμος Προσομειωμένης Ανόπτησης (SA - 15 περιπτώσεις)) και η Αναζήτηση Ταμπού (TS - 12 περιπτώσεις) και είναι οι οποίοι συναντήθηκαν περισσότερο.

Πίνακας 4.6: Μεταευρετικοί Μέθοδοι - Αριθμός Εμφάνισης

Metaheuristics	**Number of Instances**
Local Search	**59**
Simulated Annealing (SA)	15
Tabu Search (TS)	12
Variable Neighborhood Search (VNS)	10
Iterated Local Search (ILS)	6
Large Neighborhood Search (LNS)	6
Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP)	3
Guided Local Search (GLS)	1
Scatter Search (SS)	1
Chemical Reaction Optimization (CRO)	1
Population Based	**98**
Genetic Algorithm (GA)	44
Ant Colony Optimization (ACO)	27
Particle Swarm Optimization (PSO)	9

Memetic Algorithm (MA)	7
Quantum Evolutionary Algorithm (QEA)	4
Artificial Bee Colony (ABC)	1
Path Relinking (PR)	1
Firefly Algorithm (FA)	1
Producer Scrounger Method (PSM)	1
Symbiotic Organisms Search (SOS)	1
Biogeography-Based Optimization (BBO)	1
Grey Wolf Optimizer (GWO)	1

Διαδεδομένες φαίνεται να είναι και οι μέθοδοι αναζήτησης γειτονιάς όπως ο Variable Neighborhood Search (10 περιπτώσεις), Iterated Local Search και Large Neighborhood Search (6 περιπτώσεις).

Στον Πίνακα 4.7 παρουσιάζεται ο αριθμός εμφάνισης κάθε μεθόδου επίλυσης ανά κατηγορία VRP στα άρθρα που μελετήθηκαν. Το VRP είναι από τα πιο πολύ μελετημένα προβλήματα βελτιστοποίησης με τους ερευνητές να προτείνουν συνεχώς είτε καινοτόμες μεθόδους είτε να βελτιώνουν την απόδοση των ήδη υπαρχόντων. Ο μεγαλύτερος αριθμός άρθρων προτείνουν υβριδικές μεθόδους επίλυσης σε όλες τις παραλλαγές του VRP δείχνοντας την τάση της ερευνητικής κοινότητας προς αυτές τις μεθόδους, με εξαίρεση το TDVRP, το οποίο είναι και το λιγότερο μελετημένο.

Παρατηρείται πως οι γενετικοί αλγόριθμοι βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή και είναι ικανοί να αντιμετωπίσουν όλες τις παραλλαγές του προβλήματος δρομολόγησης. Οι μεταευρετικοί αλγόριθμοι γενικότερα έχουν κυριαρχήσει έναντι των άλλων μεθόδων με μικρό ποσοστό άρθρων να ασχολείται αποκλειστικά με τις άλλες μεθόδους. Παρόλα αυτά οι ευρετικοί αλγόριθμοι τοπικής αναζήτησης παραμένουν δημοφιλείς και οι οποίοι χρησιμοποιούνται κατεξοχήν ως συστατικά μέρη πιο εξελιγμένων υβριδικών συστημάτων. Μικρή μερίδα άρθρων απασχολείται αποκλειστικά με ακριβείς μεθόδους και στις περιπτώσεις εμφανίζονται και αυτές ως συστατικό υβριδικών αλγορίθμων.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η πλειονότητα των άρθρων για τις μεθόδους επίλυσης του VRP προτείνουν είτε υβριδικούς αλγόριθμους κατά τους οποίους συνδυάζονται αλγόριθμοι ίδιου ή και διαφορετικού τύπου είτε προσπαθούν να βελτιώσουν γνωστές αποτελεσματικές μεθόδους. Είναι δηλαδή πλέον πολύ συνηθισμένο στη διεθνή βιβλιογραφία να συνδυάζονται αρκετοί αλγόριθμοι μεταξύ τους και επομένως είναι χρήσιμο να παρουσιαστεί ο τρόπος με τον οποίο αυτοί επιλέγονται να συνδυαστούν, όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 4.8. Όπως ήταν αναμενόμενο οι αλγόριθμοι που επιλέγονται να συνδυαστούν περισσότερο με κάποιους άλλους είναι οι μεταευρετικοί αλγόριθμοι και ειδικότερα ο γενετικός αλγόριθμος, η βελτιστοποίηση αποικίας μυρμηγκιών (ACO) και η βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων (PSO).

Ο πιο συνηθισμένος συνδυασμός μεθόδων είναι μεταξύ μεταευρετικών αλγορίθμων και ευρετικών τοπικής αναζήτησης. Με τον συνδυασμό αυτό επιτυγχάνεται βελτίωση της αρχικής λύσης που παράγει ο μεταευρετικός μέσω της ευρετικής τοπικής αναζήτησης γύρω από την λύση αυτή, χωρίς να περιπλέκεται η συνολική διαδικασία. Αρκετά συνηθισμένη είναι επίσης η χρήση μεταευρετικού τοπικής αναζήτησης με κάποιον μεταευρετικό βασιζόμενο σε πληθυσμό λύσεων για την επίτευξη του ίδιου στόχου.

Οι αλγόριθμοι που προτιμώνται είναι ο Variable Neighborhood Search, ο Large Neighborhood Search, η αναζήτηση ταμπού (TS) και η προσομοιωμένη ανόπτηση (SA). Οι προσεγγίσεις αυτές ωστόσο είναι πιο περίπλοκες από τις προηγούμενες. Συχνά συναντάται και ο συνδυασμός διαφορετικών μεταευρετικών βασισμένων σε πληθυσμό λύσεων μεταξύ τους. Για παράδειγμα η χρήση γενετικού αλγορίθμου με PSO και ACO.

Ο αναλυτικός πίνακας στον οποίο κατηγοριοποιήθηκαν τα άρθρα ως προς τις παραλλαγές του VRP καθώς και ως προς τις μεθόδους επίλυσης παρουσιάζεται στο παρακάτω link.

https://www.dropbox.com/s/clv8gjyi2nnr7n3/178%20Final.xlsm?dl=0

Πίνακας 4.7: Μέθοδοι Επίλυσης ανά Κατηγορία VRP

	Exact Algorithms	Heuristic Algorithms			Meta-heuristic Algorithms													Hybrid
		Construction	Two-Phase	Local Search	GLS	SA	NS	ILS	VNS	GRASP	LNS	TS	ACO	PR	GA	MA	PSO	
CVRP	2	2	3	13	1	4	2	4			2	4	12	1	17	3	4	26
VRPTW	2	3		4		6		1	3	3	3	6	9		18	2	2	16
TDVRP												1	1					1
DVRP		2	1	1					2		3		4	1	8	1	1	6
MT VRP				2		1									1			
HFVRP	2	1		1		3		1	2		1	1	2		1	1		4
OVRP	2			2		3		1			1		1		1			3
Green & Hybrid	1			1		1					2	1	1		2			3
VRPPD	1	1	1	2		2		1	4			3	2		6		5	10
MDVRP	2			1				1	1		1		4		9	1	1	6

Πίνακας 4.8 Συσχέτιση Μεθόδων Επίλυσης

	Exact Algorithms	Heuristic Algorithms			Meta-heuristic Algorithms													Hybrid
		Construction	Two-Phase	Local Search	GLS	SA	NS	ILS	VNS	GRASP	LNS	TS	ACO	PR	GA	MA	PSO	
Exact Algorithms				2				1					1					2
Construction													1		2		1	2
Two-Phase													1		2		1	1
Local Search						1	1					1	5		9			11
GLS												1						1
SA									1				2		2	1		6
NS															1			1
ILS													2					3
VNS													1		2		2	8
GRASP												2						3
LNS												2	2				1	4
TS													1		1			9
ACO														1	1		2	14
PR															1			
GA																	2	22
MA																		2
PSO																		6
Hybrid																		

5. Παρουσίαση Κατάταξης Αλγορίθμων και Σύνδεση με το VRP

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν οι πιο σημαντικές και πρωτοποριακές μέθοδοι επίλυσης του Προβλήματος Δρομολόγησης Οχημάτων ανά κατηγορία VRP, που έχουν προταθεί από την ερευνητική κοινότητα από το 2000 και ύστερα.

5.1 Μέθοδοι Επίλυσης Προβλήματος της Δρομολόγησης Οχημάτων Περιορισμένης Χωρητικότητας (CVRP)

Το 2003 οι (Baker & Ayechew, 2003) πρότειναν έναν απλό γενετικό αλγόριθμο καθώς και ένα μιμητικό αλγόριθμο για το CVRP , τους οποίους και σύγκριναν ώστε να μελετηθεί ο αντίκτυπος που έχει η προσθήκη μεθόδου τοπικής αναζήτησης. Προσέγγισαν το πρόβλημα με τη μέθοδο cluster-first route-second αποφεύγοντας έτσι τους περιορισμούς χωρητικότητας. Κάθε χρωμόσωμα ορίζει έναν διαχωρισμό των πελατών σε συστοιχίες (clusters) με την ανάθεση ενός δείκτη τομέα (οχήματος) σε κάθε πελάτη. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας έναν κατασκευαστικό ευρετικό επιλύεται το TSP. Για τον μιμητικό αλγόριθμο προτάθηκε ως ευρετικοί τοπικής αναζήτησης οι 2-opt kai λ-interchange. Στο ίδιο πνεύμα και οι Berger και Barkaoui (Berger & Barkaoui, 2003) παρουσίασαν έναν υβριδικό γενετικό αλγόριθμο συνδυάζοντας και αυτοί έναν απλό γενετικό αλγόριθμο με μεθόδους τοπικής αναζήτησης. Οι αλγόριθμοι αυτοί ήταν από τις πρώτες προσεγγίσεις εξελικτικών μεθόδων που κατάφεραν να είναι ανταγωνιστικοί με άλλες μοντέρνες ευρετικές τεχνικές από άποψη υπολογιστικού χρόνου και ποιότητας λύσης.

Ο Prins το 2004 πρότεινε έναν σχετικά απλό αλλά ισχυρό υβριδικό γενετικό αλγόριθμο (Prins, 2004). Ο μιμητικός αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιεί την μέθοδο route first, cluster second. Για χωρίσει τα χρωμοσώματα, τα οποία αναπαριστούν μεγάλα δρομολόγια (περιέχουν δηλαδή όλους τους πελάτες) πρότεινε την μέθοδο Split. Αυτή η διαδικασία είναι σε θέση να καθορίσει με τον βέλτιστο τρόπο τα όρια μεταξύ των διαδρομών σε σχέση με την επιβαλλόμενη ακολουθία. Ο μιμητικός αλγόριθμος του Prins ήταν ο πρώτος που κατάφερε να βρει καλύτερα αποτελέσματα από μεθόδους tabu search, οι οποίες έως τότε θεωρούνταν οι καταλληλότερες για το CVRP.

Το 2004 οι Pisinger και Ropke πρότειναν έναν αλγόριθμο ALNS (Adaptive Large Neighborhood Search) με μεγάλη απήχηση (Pisinger & Ropke, 2007). Ο ALNS είναι μια προέκταση του αλγορίθμου large neighborhood search του Shaw με ένα προσαρμοστικό επίπεδο (adaptive layer). Το επίπεδο αυτό επιλέγει προσαρμοστικά ανάμεσα σε ένα πλήθος ευρετικών αλγορίθμων για εντατικοποιήσει και να διαφοροποιήσει την αναζήτηση. Σε κάθε επανάληψη επιλέγεται ένας αλγόριθμος για να καταστρέψει την πιο πρόσφατη λύση και ένας αλγόριθμος για να την επιδιορθώσει. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει λύσεις υψηλής ποιότητας.

Το 2008 οι Toth και Tramontani παρουσίασαν έναν υβριδικό αλγόριθμο τοπικής αναζήτησης σύμφωνα με τον οποίο η εξερεύνηση μιας εκθετικής γειτονιάς γίνεται επιλύοντας ένα πρόβλημα ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (ILP). Η εξερεύνηση γίνεται σε δύο

φάσεις. Αρχικά μειώνει το μέγεθος της γειτονιάς μέσω ενός απλού ερευτικού κριτηρίου και στη συνέχεια εξερευνά την μειωμένη γειτονιά επιλύοντας την επακόλουθη ILP διατύπωση με την (ευρετική) λύση του προβλήματος αναπαραγωγής στηλών που σχετίζεται με την χαλάρωση γραμμικού προγραμματισμού. ο αλγόριθμος αυτός κατάφερε και βελτίωσε κάποιες ήδη γνωστές λύσεις προβλημάτων (Toth & Tramontani, 2008). Την ίδια χρονιά ο (F. Zhao, Dong Mei, J. Sun, & W. Liu, 2009) προτείνει έναν πρότυπο κβαντικό εξελικτικό αλγόριθμο (QEA) βασισμένο στη κβαντική θεωρία στην προσπάθεια του να εξαλείψει συνηθισμένα ελαττώματα των εξελικτικών αλγορίθμων όπως το γεγονός ότι συγκλίνουν πρώιμα και παγιδεύονται εύκολα σε τοπικά ακρότατα. Δοκιμές που έγιναν έδειξαν ότι πρόκειται για αποδοτική μέθοδο για το CVRP.

Οι Tarantilis et al το 2009 πρότεινε ένα υβριδικό αλγόριθμο που συνδύαζε στρατηγικές Tabu Search και Guided Local Search για να επιλύσει το CVRP με επιπλέον περιορισμό τα μεταφερόμενα αντικείμενα ξεφορτώνονται χειροκίνητα από τους αποθηκευτικούς χώρους των οχημάτων (Tarantilis, Zachariadis, & Kiranoudis, 2009) . Ο αλγόριθμος δοκιμάστηκε και για το απλό CVRP όπου κατάφερε να βελτιώσει αρκετές από τις βέλτιστες λύσεις που είχαν βρεθεί ως τότε σε προβλήματα αναφοράς.

Οι Wang και Lu το 2010 παρουσίασαν έναν υβριδικό γενετικό αλγόριθμο ο οποίος είναι πρακτικός και εύκολα μπορεί να αξιοποιηθεί από επιχειρήσεις. Πρόκειται για απλό γενετικό με ενισχυμένους τελεστές αναπαραγωγής και μετάλλαξης συνδυασμένο με απλές τεχνικές τοπικής αναζήτησης ο οποίος μπορεί και επιλύει ικανοποιητικά περιστάσεις μέχρι και 100 πελατών (C.-H. Wang & Lu, 2010b).

Το 2012 οι Kao, Chen και Huang συνδύασαν 2 διαδεδομένες τεχνικές νοημοσύνης σμήνους τις PSO και ACO για να επιλύσουν το CVRP. Σύμφωνα με την υβριδική αυτή μέθοδο κάθε μυρμήγκι της μεθόδου ACO επιτρέπεται να αποθηκεύει την καλύτερη λύση που έχει βρει όπως ένα σωματίδιο στην PSO. Μετά την κατασκευή λύσεων μόνο κάποια επιλεγμένα μυρμήγκια μπορούν να ανανεώνουν φερομόνη σύμφωνα με τις δικές τους καλύτερες λύσεις. Τα αποτελέσματα της μεθόδου είναι συγκρίσιμα με άλλες προσεγγίσεις τεχνικών νοημοσύνης σμήνους (Kao, Chen, & Huang, 2012).

Το 2013 οι Pop, Matei και Sitar προτείνουν έναν αποδοτικό υβριδικό αλγόριθμο χρησιμοποιώντας έναν γενετικό αλγόριθμο με τοπική και ολική προσέγγιση συνδυασμένο με ισχυρές μεθόδους τοπικής αναζήτησης. Η τοπική ολική προσέγγιση αποσκοπεί στον διαχωρισμό ανάμεσα στις ολικές συνδέσεις (συνδέσεις μεταξύ clusters) και τοπικές συνδέσεις (συνδέσεις μεταξύ κόμβων που ανήκουν σε διαφορετικά clusters. Υπολογιστικά πειράματα έδειξαν πως η μέθοδος αυτή ανταγωνιζόταν όλες τις γνωστές έως τότε μεθόδους (Pop, Matei, & Sitar, 2013).

Στην εργασία τους το 2013 οι Cui et al. παρουσίασαν έναν βελτιωμένο QEA με κβαντικά χρωμοσώματα διπλής αλυσίδας, νέα τεχνική κβαντικής περιστροφής κ.α. Για να ενισχύσουν την δυνατότητα εξερεύνησης του αλγορίθμου χρησιμοποίησαν τεχνικές τοπικής αναζήτησης

όπως 1-0 exchange και 2-OPT (Cui, Wang, Deng, & Zhang, 2013). Το ίδιο έτος οι (Fang et al., 2013) παρουσίασαν μια ευρετική μέθοδο τοπικής αναζήτησης βασισμένη στην ιδέα των γειτονιών Voronoi για να επιλύσουν προβλήματα CVRP μεγάλης κλίμακας. Ο αλγόριθμος αξιολογήθηκε σε προβλήματα αναφοράς με 200-8663 πελάτες όπου κατάφερε να βρει καλύτερες λύσεις σε λιγότερο υπολογιστικό χρόνο, ξεπερνώντας τις προηγούμενες τεχνικές για τέτοιου είδους προβλήματα.

Οι Toth et al. το 2016 παρουσιάζουν μία νέα μέθοδο τοπικής αναζήτησης η οποία μπορεί να εξερευνήσει εκθετικό αριθμό λύσεων σε ψευδο-πολυωνυμικό χρόνο (Toth & Tramontani, 2008). Η αναζήτηση πραγματοποιείται με τις κλασικές γειτονιές CVRP σε μια λύση που περιλαμβάνει όλους τους πελάτες. Στη συνέχεια ένας αποδοτικός αλγόριθμος επιλογής χρησιμοποιείται επαναληπτικά για να βρει τα βέλτιστα υπο-δρομολόγια. Η μέθοδος αυτή συγκρίθηκε υπολογιστικά με μεθόδους Local search, iterated local search και με υβριδικό ΓΑ. Τα αποτελέσματα έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς ακόμα και με απλή μέθοδο τοπικής βελτίωσης στο πρώτο τοπικό βέλτιστο που βρίσκει η συγκεκριμένη γειτονιά αποκλίνει 0.09% των βέλτιστων λύσεων που έχουν βρεθεί με τους πιο σύγχρονες μεθόδους.

Πιο πρόσφατα το 2017 οι da Silveira et al παρουσίασαν έναν νέο βελτιωμένο QEA και τον συνδύασαν με ένα παραδοσιακό γενετικό αλγόριθμο για να μπορούν μέσω των τελεστών αναπαραγωγής και μετάλλαξης να είναι σε θέση να παράγουν συνεχώς εφικτές λύσεις. Αριθμητικά αποτελέσματα σε προβλήματα μεγέθους 100 πελατών και για 1 έως 10 οχήματα έδειξαν να ξεπερνούν τους γενετικούς αλγορίθμους (da Silveira, Tanscheit, & Vellasco, 2017). Μεγάλη απήχηση γνώρισε και η εργασία των (V. F. Yu, Redi, Yang, Ruskartina, & Santosa, 2017) όπου παρουσίασαν μία υβριδική μεταευρετική μέθοδο αναζήτησης συμβιωτικών οργανισμών (SOS) για το CVRP σε συνδυασμό με ευρετικούς τοπικής αναζήτησης την ISOSSR-1. Η μέθοδος SOS προσομοιώνει τις συμβιωτικές στρατηγικές αλληλεπίδρασης που χρησιμοποιεί ένας οργανισμός για να επιβιώσει σε ένα οικοσύστημα. Ο κλασικός αλγόριθμος SOS χρησιμοποιεί τρεις στρατηγικές αλληλεπίδρασης, mutualism, commensalism και parasitism για να βελτιώσει μια υποψήφια λύση ενώ οι Yu et al πρότειναν ακόμα τις competition and amensalism. Αποτελέσματα από δοκιμές έδειξαν ο αλγόριθμος να παράγει καλές λύσεις σε εύλογο υπολογιστικό χρόνο.

Άλλες αξιοσημείωτες μέθοδοι είναι ο εξελικτικός αλγόριθμος των (C.-H. Wang & Lu, 2010a) και μία από τις πρώτες εφαρμογές μεθόδου τεχνητής νοημοσύνης, η μέθοδος νευρωνικών δικτύων Self-Organizing Map των (Steinhaus, Shirazi, & Sodhi, 2015).

5.2 Μέθοδοι Επίλυσης Προβλήματος της Δρομολόγησης Οχημάτων με Χρονικά Παράθυρα (VRPTW)

Στις αρχές τις δεκαετίας 2000 οι πιο αποδοτικός αλγόριθμος για το VRPTW ήταν, όπως και για τις άλλες παραλλαγές του VRP, ο Tabu Search. Σημαντική θεωρείται η εργασία των (Cordeau & Laporte, 2001) παρουσίασαν μια μέθοδο TS με την οποία κατάφεραν να ξεπεράσουν σε επίδοση και ποιότητα λύσεων τις υπόλοιπες ως τότε γνωστές μεθόδους. Το

2004 οι Lim et al ενσωμάτωσαν σε έναν άπληστο μεταευρετικό GRASP τεχνική δυναμικού TS παράγοντας λύσεις υψηλότερης ακρίβειας. Οι Ting και Huang πρότειναν το 2005 ένα γενετικό αλγόριθμο με ελιτίστικη στρατηγική κατά την οποία οι καλύτερες υποψήφιες λύσεις που προκύπτουν από τις τεχνικές αναπαραγωγής, διασταύρωσης και μετάλλαξης σε κάθε γενιά αντιγράφονται στην επόμενη. πέτυχαν έτσι αποτελέσματα ανταγωνιστικά με άλλες σύγχρονες μεθόδους.

Ο γενετικός αλγόριθμος των Ombuki, Ross και Hanshar (Ombuki, Ross, & Hanshar, 2006) προσέγγιζε το VRPTW ως multi-objective πρόβλημα θεωρώντας για αντικειμενική συνάρτηση τον αριθμό των οχημάτων και το συνολικό κόστος (απόσταση) αποφεύγοντας έτσι λύσεις με έφεση σε κάποια από τις δύο διαστάσεις του προβλήματος. Υποστήριξαν πως είναι πιο φυσική αυτή η θεώρηση για το VRPTW κατά την οποία τόσο τα οχήματα όσο και τα κόστη έχουν ίδια αξία, ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη. Αποτέλεσμα της έρευνας τους ήταν ένας αποδοτικός multi-objective ΓΑ που βρίσκει λύσεις ανταγωνίσιμες με τις υπόλοιπες τεχνικές αλλά και νέες λύσεις πουν δεν είναι προκατειλημμένες προς των αριθμό των οχημάτων.

Το 2010 οι (Nagata, Bräysy, & Dullaert, 2010) παρουσίασαν έναν μιμητικό αλγόριθμο όπου εισήγαγαν τον τελεστή αναπαραγωγής (edge assembly-EAX) και μια πρωτότυπη συνάρτηση ποινής για αποκλείσουν την παραβίαση των περιορισμών χρονικών περιθωρίων και χωρητικότητας των οχημάτων από τις παραγόμενες λύσεις . Η μέθοδος αυτή κατάφερε να βελτιώσει 184 από τα 356 προβλήματα αναφοράς που δοκιμάστηκε. Οι (Belmecheri, Prins, Yalaoui, & Amodeo, 2013) ασχολήθηκαν με το HVRPMBTW, έναν συνδυασμό παραλλαγών με ετερογενή στόλο οχημάτων, χρονικά παράθυρα και μεικτές παραδόσεις και παραλαβές και πρότειναν μια μέθοδο βελτιστοποίησης σμήνους (PSO) . Το 2015 οι (Jabali, Leus, van Woensel, & de Kok, 2015) προτείνουν έναν υβριδικό αλγόριθμο που συνδύαζε μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού (LP) με Tabu Search για να λύσουν το VRPTW, κατά το οποίο όμως τα χρονικά περιθώρια τα επιβάλει η εταιρεία και όχι ο πελάτης. Η ανάθεση των πελατών και δρομολόγηση τους σε οχήματα γίνεται από τον TS ενώ λεπτομερείς αποφάσεις για τον χρόνο παράγονται από το μοντέλο LP.

Το 2017 οι (D. Zhang, Cai, Ye, Si, & Nguyen, 2017) παρουσιάζουν έναν υβριδικό μεταευρετικό συνδυάζοντας Tabu Search και βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών παράγοντας καλά αποτελέσματα. Οι (Belhaiza, M'Hallah, & Brahim, 2017) την ίδια χρονιά προτείνουν και αυτοί έναν υβριδικό μεταευρετικό χρησιμοποιώντας γενετικούς τελεστές αναπαραγωγής σε μια λίστα από καλύτερους γονείς και νέες εφαρμογές τελεστών τοπικής αναζήτησης .

Άξιοι αναφοράς είναι επίσης η μέθοδος firefly algorithm των (Pan, Ye, Wang, & Cao, 2013), η μέθοδος προσομοιωμένης ανόπτησης των (Despaux & Basterrech, 2014) σχεδιασμένη να αντιμετωπίζει το VRPTW με ετερογενή στόλο και πολλαπλές διαδρομές και η ενισχυμένη μέθοδος αποικίας μυρμηγκιών των (Gupta & Saini, 2017).

5.3 Μέθοδοι Επίλυσης Δυναμικού Προβλήματος της Δρομολόγησης (DVRP)

Οι (Hanshar & Ombuki-Berman, 2007) το 2007 πρότειναν ένα γενετικό αλγόριθμο για το DVRP. Χρησιμοποίησαν το μοντέλο του Montemanni για το DVRP, θεωρώντας το δηλαδή ως επέκταση του κλασικού VRP μέσω της αποδόμησης του DVRP σε μια ακολουθία στατικών VRPs τα οποία και επιλύονται με τον ΓΑ. Με τον ΓΑ πέτυχαν καλύτερα αποτελέσματα από παρόμοιες προσεγγίσεις που το επιλύαν με ACO και TS. Οι (Elhassania, Jaouad, & Ahmed, 2014) επίσης αποδομώντας το πρόβλημα στην ίδια λογική προτείνουν έναν υβριδικό μετα ευρετικό αποτελούμενο από Ant Colony Optimization(ACO) και Large Neighborhood Search (LNS) καθώς και ένα ΓΑ εμπλουτισμένο με ευρετικούς για την δημιουργία του αρχικού πληθυσμού και για την βελτίωση της διαδικασίας αναπαραγωγής.

Το 2015 ο Schyns παρουσίασε ένα σύστημα αποικίας μυρμηγκιών (ACS) για το δυναμικό πρόβλημα δρομολόγησης με χρονικά παράθυρα και ετερογενή στόλο, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στην ανταπόκριση, δηλαδή την όσο το δυνατόν γρηγορότερη εξυπηρέτηση μιας παραγγελίας εντός των χρονικών παραθύρων ώστε το όχημα ή ο πελάτης να συνεχίσει με την δραστηριότητα του. Εφάρμοσαν την μέθοδο αυτή σε πραγματική περίπτωση μελετώντας τη δρομολόγηση φορτηγών ανεφοδιασμού καυσίμων στο αεροδρόμιο της Λιέγης (Schyns, 2015). Οι (Xu, 2018b) πρότειναν το 2018 έναν ενισχυμένο γενετικό αλγόριθμο που προσπαθεί να αυξήσει την ποικιλομορφία και την ικανότητα ολικής αναζήτησης. Χρησιμοποίησαν ευρετικούς Savings και Nearest Neighbor κατά την διαδικασία της αναπαραγωγής ώστε να βελτιώσουν την επιλογή διαδρομών. Η μέθοδος τους ξεπέρασε τις δημοσιευμένες προσεγγίσεις με βάση τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης.

Άλλες ανταγωνιστικές σύγχρονες μέθοδοι είναι ο μαθευρετικός των (Yavary & Sajedi, 2018) CLARITY που περιλαμβάνει μεταξύ άλλων μεθόδους ακέραιου προγραμματισμού και εξελικτικό αλγόριθμο. Ασχολήθηκαν τόσο με το DVRP όσο και με το DVRP με παραδόσεις και περισυλλογές παράγοντας καλά αποτελέσματα και στις δύο περιπτώσεις. Γενετικό αλγόριθμο χρησιμοποιούν και οι (Abidi, Hassine, & Mguis, 2018), το 2018 με απλό ευρετικό για να επιλύσουν το DVRPTW, και οι (Benaini & Berrajaa, 2018) σχεδίασαν νέο ΓΑ και τον εφάρμοσαν σε μονάδα επεξεργασίας γραφικών (GPU).

5.4 Μέθοδοι Επίλυσης Προβλήματος της Δρομολόγησης Οχημάτων με Πολλαπλές Αποθήκες (MDVRP)

Το 2008 οι Ting και Chen πρότειναν ένα σύστημα αποικίας μυρμηγκιών (ACS) για το MDVRP με χρονικά παράθυρα αλλά και ένα υβριδικό ACS με Simulated Annealing. Και οι δύο προσεγγίσεις είναι ανταγωνιστικές με τον υβριδικό αλγόριθμο να βελτιώνει και μερικές υπάρχουσες λύσεις προβλημάτων αναφοράς (Ting & Chen, 2008). Οι (Lau, Chan, Tsui, & Pang, 2010) πρότειναν το 2010 μια βελτιωμένη μέθοδο βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών με coarse-grain παράλληλη στρατηγική, στρατηγική βάρους για τα μυρμήγκια και τελεστές μετάλλαξης. Για την επίλυση του MDVRP θεώρησαν μια εικονική κεντρική αποθήκη ,κατά την

οποία οι αποστάσεις προς τις αποθήκες είναι ίσες με μηδέν ενώ οι αποστάσεις προς τους πελάτες είναι άπειρη (Virtual Depot VRP).

Έναν από τους πρώτους γενετικούς αλγορίθμους πρότειναν το 2009 οι (Ombuki-Berman & Hanshar, 2009). Ο ΓΑ χρησιμοποιεί έμμεση κωδικοποίηση και μια προσαρμοστική στρατηγική ανταλλαγής μετάλλαξης μεταξύ αποθηκών. Τα αποτελέσματα που επιτεύχθηκαν ήταν ανταγωνιστικά με όλες τις άλλες σύγχρονες προσεγγίσεις. Το 2010 οι Lau et al πρότειναν με τη σειρά τους και αυτοί ένα ΓΑ (FLGA) καθοδηγούμενο από μια στοχαστική μέθοδο αναζήτησης (fuzzy logic), ρόλος της οποίας είναι ο δυναμική ρύθμιση του ρυθμού μετάλλαξης και αναπαραγωγής κάθε 10 γενεές. Αποτελέσματα προσομοίωσης έδειξαν ότι ο FLGA υπερέχει άλλων δημοφιλών μεθόδων αναζήτησης.

Οι (Vidal, Crainic, Gendreau, Lahrichi, & Rei, 2012) πρότειναν έναν πολύ ισχυρό υβριδικό γενετικό αλγόριθμο για το MDVRP. Ο υβριδικός συνδυάζει το εύρος εξερεύνησης πληθυσμού των εξελικτικών αλγορίθμων, τις ιδιότητες επιθετικής βελτίωσης μεταευρετικών εξερεύνησης γειτονιάς και εξελιγμένα συστήματα διαχείρισης ποικιλομορφίας του πληθυσμού. Εκτενή υπολογιστικά πειράματα έδειξαν την υπεροχή του αλγορίθμου αυτού καθώς είτε βελτίωσε είτε βρήκε τις βέλτιστες λύσεις όλων των προβλημάτων αναφοράς για το συγκεκριμένο πρόβλημα. Την ίδια χρονιά οι (Kuo & Wang, 2012) πρότειναν ένα μεταευρετικό εξερεύνησης μεταβλητής γειτονιάς (VNS) για το MDVRP με κόστη φόρτωσης . Ο προτεινόμενος VNS αρχικά παράγει στοχαστικά μια αρχική λύση, στη συνέχεια διαλέγει τέσσερις τελεστές για την εξερεύνηση της γειτονιάς και τέλος ένα κριτήριο, όμοιο με τις μεθόδου Simulated Annealing, αποδοχής λύσης.

Το ανοιχτό MDVRP εξέτασαν οι (Liu, Jiang, & Geng, 2014) προτείνοντας έναν υβριδικό γενετικό αλγόριθμο αποτελεσματικό και αποδοτικό. Γενετικό αλγόριθμο πρότειναν και (Alaïa, Dridi, Bouchriha, Borne, & Alaia, 2015) για το MDVRP πολλαπλών οχημάτων, με χρονικά παράθυρα και παραλαβή και παράδοση (m-MDPDTW). Ο ΓΑ τους περιλαμβάνει μια διαδικασία επιλογής που χρησιμοποιεί κατάταξη με διάφορα μέτωπα Pareto και μια ελιτίστικη στρατηγική αντικατάστασης.

Οι (Opoku-Amankwaah & Ombuki-Berman, 2017) παρουσίασαν έναν ΓΑ με πολυεπίπεδη πληθυσμιακή δομή με βάση την ηλικία (ALPS-GA) και στρατηγικές μεταφοράς μεταξύ των επιπέδων παράγοντας καλά αποτελέσματα. Τέλος

5.5 Μέθοδοι Επίλυσης Πρόβληματος της Δρομολόγησης Οχημάτων με Παραλαβές και Παραδόσεις (VRPPD)

Οι (Wassan, Wassan, & Nagy, 2008) παρουσίασαν ένα αντιδραστικό Tabu Search που μπορεί να ελέγχει γρήγορα την εφικτότητα των προτεινόμενων κινήσεων και να καθοδηγεί την αναζήτηση. Ο αλγόριθμος βρήκε αρκετές νέες βέλτιστες σε σχετικά προβλήματα αναφοράς. Υβριδικό αλγόριθμο πρότειναν οι (Goksal, Karaoglan, & Altiparmak, 2013) εμπλουτίζοντας βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων (PSO) με μεθευρετική μέθοδο τοπικής αναζήτησης για

το στάδιο της τοπικής αναζήτησης του PSO. Η μέθοδος αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποδοτική καθώς βελτίωσε διάφορες βέλτιστες λύσεις προβλημάτων αναφοράς.

Οι (T. Zhang, Chaovalitwongse, & Zhang, 2014) παρουσίασαν μια υβριδική μέθοδο για το VRPPD εξαρτημένο από τον χρόνο. Η μέθοδος συνδυάζει βελτιστοποίηση αποικίας μυρμηγκιών και αναζήτηση ταμπού. Η απόδοση της υβριδικής μεθόδου συγκρίθηκε με εκείνες των μεμονωμένων αλγορίθμων ACS και TS και παρήγαγε καλύτερα αποτελέσματα και από τις δύο μεθόδους. Υβριδική μέθοδο προσαρμοστικής τοπικής αναζήτησης πρότειναν οι (Avci & Topaloglu, 2015) συνδυάζοντας τους μεθευρετικούς Simulated Annealing και Variable Neighborhood Descent. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί μια προσαρμοστική συνάρτηση περιθωρίου που του επιτρέπει να αυτοσυντονίζεται. Πειράματα έδειξαν την αποδοτικότητα της μεθόδου στο να βρίσκει καλές λύσεις σε λογικό υπολογιστικό χρόνο.

Οι Kalayci και Kaya (Kalayci & Kaya, 2016) συνδύασαν μεθόδους αποικίας μυρμηγκιών (ACS) και μεταβλητής αναζήτησης γειτονιάς (VNS). Η μέθοδος VNS είναι μια ισχυρή μέθοδος εντατικής τοπικής αναζήτησης αλλά ωστόσο δεν έχει κάποια δομή μνήμης. Για να αντιμετωπίσουν αυτήν την αδυναμία του VNS χρησιμοποίησαν την δομή μνήμης μακράς διαρκείας που προσφέρει η μέθοδος ACS. Κατά την μέθοδο αυτή ο VNS απελευθερώνει φερομόνη στα άκρα ενώ τα μυρμήγκια προσφέρουν μηχανισμό διατάραξης με το να χρησιμοποιούν τη φερομόνη για να εξερευνούν πιο μακρινά πεδία λύσεων και να μεταπηδούν από τοπικά ακρότατα. Η μέθοδος αποδείχτηκε ιδιαίτερη αποδοτική καθώς βρήκε καλύτερες ,από τις υπάρχουσες, λύσεις σχετικών προβλημάτων σε πιο γρήγορο χρόνο.

Το 2018 οι (Li, Wang, Hei, Li, & Jiang, 2018) παρουσίασαν μια μέθοδο βελτιστοποίησης χημικής αντίδρασης (Chemical Reaction Optimization) για το MDVRP με χρονικά παράθυρα. Η μέθοδος αποδομά το πρόβλημα σε υπό-προβλήματα και κάθε υπό-πρόβλημα παρίσταται από ένα χημικό μόριο. Για να ισορροπήσουν την ποικιλομορφία αλλά και την σύγκλιση της μεθόδου σχεδίασαν τελεστές τοπικής αναζήτησης, αποδόμησης και σύνθεσης. Άλλες δημοφιλείς προσεγγίσεις είναι η μέθοδος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων με αυτό-μάθηση (SLPSO) των (Chen, Hsiao, Himadeep Reddy, & Tiwari, 2016), 2016 και ο υβριδικός δύο φάσεων των (Y. Wang, Ma, Lao, Yu, & Liu, 2014).

5.6 Μέθοδοι Επίλυσης Ανοιχτού Προβλήματος Δρομολόγησης (OVRP)

Για την επίλυση του προβλήματος OVRP, οι (Tarantilis, Ioannou, Kiranoudis, & Prastacos, 2005) πρότειναν το 2005 έναν ισχυρό μεταευρετικό μιας παραμέτρου που εκμεταλλεύεται έναν κατάλογο τιμών κατωφλίου για να κατευθύνει έξυπνα μια προηγμένη τοπική αναζήτηση. Υπολογιστικά αποτελέσματα σε σύνολο προβλημάτων συγκριτικής αξιολόγησης έδειξαν ότι η προτεινόμενη μέθοδος υπερβαίνει κατά πολύ τις προηγούμενες προσεγγίσεις για το OVRP, ενώ την εφάρμοσαν και σε πραγματικά προβλήματα δρομολόγησης μεγάλου στόλου οχημάτων με επιτυχία.

Το 2010 οι (Salari, Toth, & Tramontani, 2010) παρουσίασαν μια υβριδική μέθοδο τοπικής αναζήτησης βασισμένη σε τεχνικές ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (ILP). Με

δεδομένη μια αρχική πιθανή λύση που μπορεί να βελτιωθεί, η μέθοδο ακολουθεί την τεχνική καταστροφής και επιδιόρθωσης κατά την οποία η δοσμένη λύση καταστρέφεται τυχαία (π.χ. αφαιρούνται τυχαία πελάτες από ένα δρομολόγιο) και επιδιορθώνεται λύνοντας ένα μοντέλο ILP ώστε να βρεθεί μια καλύτερη λύση. Η μέθοδος αυτή με μικρές προσαρμογές μπορεί να επιλύσει και άλλες παραλλαγές του VRP. Σε δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν η μέθοδος βελτίωσε ή βρήκε τις ήδη υπάρχων λύσεις.
Οι (V. F. Yu, Jewpanya, & Redi, 2016) ασχολήθηκαν με μια παραλλαγή του OVRP κατά την οποία πέρα από το διαθέσιμο στόλο οχημάτων υπάρχει η δυνατότητα ανάθεσης παραγγελιών σε εξωτερικό συνεργάτη. Μοντελοποίησαν το πρόβλημα με βάση τεχνικές μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού και στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους (μεταφορικά κόστη και κόστη ανάθεσης). Πρότειναν μία μέθοδο Simulated Annealing την οποία και σύγκριναν με άλλες σύγχρονες μεθόδους. Η προσέγγιση τους βρήκε βέλτιστα αποτελέσματα για μικρού και μεσαίου τύπου προβλημάτων σε λιγότερο χρόνο ενώ για περιπτώσεις μεγάλου μεγέθους βρήκε καλύτερα αποτελέσματα σε λιγότερο χρόνο.

5.7 Μέθοδοι Επίλυσης Προβλήματος Δρομολόγησης με Ετερογενή Στόλο Οχημάτων (HVRP)

Το 2004 οι (Tarantilis, Kiranoudis, & Vassiliadis, 2004) πρότειναν ένα νέο μεταευρετικό για το HVRP με σταθερό στόλο οχημάτων, τον ανάστροφο αλγόριθμο αποδοχής προσαρμοστικών ορίων. Τα αριθμητικά αποτελέσματα δείχνουν ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι ισχυρός και αποτελεσματικός καθώς βελτίωσε αρκετές υπάρχουσες λύσεις στα προβλήματα αναφοράς που δοκιμάστηκε. Οι (Penna, Subramanian, & Ochi, 2013) παρουσίασαν το 2013 μια μέθοδο βασισμένη στο μεταευρετικό επαναλαμβανόμενης τοπικής αναζήτησης (Iterated Local Search-ILS) με τεχνικές καθόδου μεταβλητής γειτονιάς (VND) και τυχαία ταξινόμηση γειτονιών. Η μέθοδος δοκιμάστηκε σε γνωστά προβλήματα 20,50,75 και 100 πελατών βρίσκοντας καλές ανταγωνιστικές λύσεις. Οι (Kritikos & Ioannou, 2013) πρώτοι ασχολήθηκαν με το HVRP με επιπλέον χρονικά παράθυρα. Μοντελοποίησαν το πρόβλημα ενσωματώνοντας τον περιορισμό του συνολικού φόρτου των δρομολογίων στην αντικειμενική συνάρτηση και το επιλύσαν με ευρετικό διαδοχικής εισαγωγής που χρησιμοποιεί συνάρτηση ποινής, επιτρέποντας του να παραβιάζει τον περιορισμό χωρητικότητας έως ένα προκαθορισμένο άνω όριο.

Οι (Wei, Zhang, & Lim, 2014) ασχολήθηκαν το 2014 με το HVRP κατά το οποίο τα φορτία αποτελούνται από ορθογώνια αντικείμενα τριών διαστάσεων (3L-HVRP). Ανέπτυξαν λοιπόν ένα μεταευρετικό αναζήτησης προσαρμοστικής μεταβλητής γειτονιάς και το εμπλούτισαν με στρατηγικές επιτάχυνσης των διαδικασιών φόρτωσης και δρομολόγησης. Ο αλγόριθμος δοκιμάστηκε σε προβλήματα αναφοράς για το 3L-HVRP, 3l-CVRP και για το απλό HVRP βρίσκοντας είτε καλύτερες (3L-HVRP) ή τις βέλτιστες έως τότε λύσεις (3l-CVRP, HVRP).

Το 2015, οι (Matei, Pop, Sas, & Chira, 2015) παρουσίασαν έναν υβριδικό γενετικό αλγόριθμο εμπλουτισμένο με τεχνικές τοπικής αναζήτησης (μιμητικός αλγόριθμος) και στρατηγική

'μετανάστευσης'. Η μέθοδος περιλαμβάνει αρκετές στρατηγικές παραγωγής αρχικού πληθυσμού και έξι τεχνικές τοπικής αναζήτησης. Σημαντικό χαρακτηριστικό της μεθόδου είναι η στρατηγική 'μετανάστευσης' η οποία επιτρέπει την διασφάλιση ποικιλομορφίας και κατά την οποία ο ρυθμός εξέλιξης του νέου ατόμων/μεταναστών αυξάνει με τη εξέλιξη του πληθυσμού. Η μέθοδος πέτυχε καλές λύσεις σε λογικό χρόνο στα προβλήματα αναφοράς που εξετάστηκε.

Οι (Pessoa, Sadykov, & Uchoa, 2018) παρουσίασαν μία ακριβή μέθοδο επίλυσης του HVRP. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει τον αλγόριθμο Branch-Cut-and-Price με κάποια ανεπτυγμένα χαρακτηριστικά των καλύτερων ακριβών μεθόδων από άποψη απόδοσης. Κάποια από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι η χρήση Extended Capacity Cuts , Rank-1 Cuts, την χρήση μνήμης εξαρτημένης από τον τύπο του οχήματος και μια νέα κατηγορία από Extended Capacity Cuts που εκμεταλλεύεται την απαρίθμηση των διαδρομών που εξαρτώνται από τον τύπο οχήματος. Η μέθοδος ξεπέρασε σε απόδοση τις προηγούμενες ακριβείς μεθόδους σε προβλήματα αναφοράς έως 200 πελάτες αλλά και για μεγαλύτερες περιπτώσεις.

5.8 Μέθοδοι Επίλυσης Υβριδικού Προβλήματος Δρομολόγησης (Hybrid/Green VRP)

Οι (Ayadi et al, 2014) ασχολήθηκαν με το πράσινο πρόβλημα δρομολόγησης , με στόχο την βελτιστοποίηση της ποσότητας των αερίων θερμοκηπίου, και πρότειναν ένα εξελικτικό αλγόριθμο για την επίλυση του. Η μέθοδος συνδυάζει ένα γενετικό αλγόριθμο με τεχνική τοπικής αναζήτησης (μιμητικός αλγόριθμος). Η απόδοση της μεθόδου αποδείχθηκε ιδιαίτερα ανταγωνιστική καθώς βρήκε πολλές νέες βέλτιστες λύσεις προβλημάτων αναφοράς. Οι (Tiwari & Chang, 2015) μελέτησαν το 2017 το GVRP με στόχο την μείωση της διανυόμενης απόστασης αλλά και των εκπομπών CO2 . Για τον υπολογισμό της εκπομπής CO2 έλαβαν υπόψη ως παράγοντα και το φορτίο των φορτηγών. Για την επίλυση του πρότειναν μέθοδο δύο φάσεων χρησιμοποιώντας ανασυνδυασμό στηλών και την σύγκριναν με εξελικτικούς αλγορίθμους όπου αποδείχτηκε ανταγωνιστική.

Ακριβή μέθοδο πρότειναν οι (Andelmin & Bartolini, 2017) για το GVRP όπου το θεώρησαν ως την βέλτιστη δρομολόγηση οχημάτων εναλλακτικής ενέργειας για την εξυπηρέτηση διασκορπισμένων πελατών, λαμβάνοντας υπόψη την αυτονομία των οχημάτων και τις τοποθεσίες ανεφοδιασμού. Για την επίλυσή του το μοντελοποίησαν ως πρόβλημα διαχωρισμού συνόλων όπου ο στήλες αναπαριστούν πιθανές λύσεις. Η μέθοδος αυτή επέλυσε βέλτιστα περιπτώσεις έως 110 πελατών. Με το υβριδικό πρόβλημα δρομολόγησης ασχολήθηκαν οι (V. F. Yu, Redi, Hidayat, & Wibowo, 2017) όπου τα οχήματα είναι υβριδικά ηλεκτρικά, και πρότειναν μέθοδο Simulated Annealing με στρατηγική επανέναρξης (SA-RS). Ο αλγόριθμος δοκιμάστηκε σε προβλήματα αναφοράς CVRP όπου βρήκε καλές λύσεις ενώ τα αριθμητικά αποτελέσματα έδειξαν την επίδραση του τύπου των οχημάτων και του αριθμού των σταθμών φόρτισης στο συνολικό κόστος.

Το 2017 επίσης οι (Jaber Jemai,M. Zekri, 2017) πρότειναν για το GVRP ελιτίστικο γενετικό αλγόριθμο πολλαπλών στόχων ο οποίος αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποδοτικός μετά από δοκιμές. Οι (Messaoud, el Bouzekri El Idrissi, & Alaoui, 2018) συνδύασαν το δυναμικό πρόβλημα με το GVRP και προσπάθησαν να ελαχιστοποιήσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε δυναμικό περιβάλλον. Πρότειναν μια υβριδική μέθοδο βασισμένη στην βελτιστοποίηση αποικίας μυρμηγκιών (ACO) και στην αναζήτηση μεγάλης γειτονιάς (LNS).

6. Αποτελέσματα

6.1 Συμπεράσματα Ανασκόπησης Βιβλιογραφίας

Στόχος της έρευνας αυτής είναι να καθοριστούν οι τάσεις της ερευνητικής κοινότητας ως προς τις μεθόδους επίλυσης συγκεκριμένων παραλλαγών του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων, οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις αστικές εμπορευματικές μεταφορές και στην συνέχεια να προταθούν οι καταλληλότεροι αλγόριθμοι για πιθανή εφαρμογή σε ερευνητικό έργο.

Το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων είναι από τα πιο μελετημένα προβλήματα βελτιστοποίησης διεθνώς και βρίσκει εφαρμογή σε πλήθος πρακτικών προβλημάτων. Κατά την έρευνα προέκυψε μεγάλος όγκος δημοσιεύσεων που ασχολούνται αποκλειστικά με την πρόταση μεθόδων επίλυσης για τις παραλλαγές του VRP ενώ παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση τέτοιων άρθρων τα τελευταία χρόνια (διπλασιασμός του αριθμού άρθρων από το 2010 και μετά). Η πλειονότητα των άρθρων αυτών ασχολούνται με τις παραλλαγές CVRP και VRPTW, μεμονωμένες ή και σε συνδυασμό με άλλες παραλλαγές. Το γεγονός αυτό δεν είναι ιδιαίτερα αναπάντεχο καθώς τα άρθρα αυτά προτείνουν νέες μεθόδους (ή βελτιώνουν υπάρχουσες μεθόδους) αλλά και για το ότι για τις παραλλαγές αυτές είναι διαθέσιμα τα περισσότερα προβλήματα αναφοράς με τα οποία οι ερευνητές είναι σε θέση να αξιολογήσουν την αποτελεσματικότητα και αποδοτικότητα των προτεινόμενων μεθόδων τους αλλά και να τις συγκρίνουν με τις υπόλοιπες μεθόδους.

Όσον αφορά τις μεθόδους επίλυσης, στις αρχές της δεκαετίας 2000 δημοφιλέστερες ήταν οι μετα-ευρετικοί αλγόριθμοι τοπικής αναζήτησης, όπως η αναζήτηση Ταμπού (TS) και η προσομοιωμένη ανόπτηση, οι οποίες είχαν επιτύχει τις καλύτερες έως τότε επιδόσεις. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η αναζήτηση ταμπού των Cordeau και Laporte (2001). Σταδιακά όμως άρχισαν να εμφανίζονται όλο και περισσότερα άρθρα που παρουσιάζουν μετα-ευρετικούς βασισμένους σε πληθυσμό λύσεων όπως γενετικούς αλγόριθμους αλλά και υβριδικές μεθόδους. Οι Baker και Ayechew (2003) ήταν από τους πρώτους που πρότειναν γενετικό αλγόριθμο για το κλασικό πρόβλημα δρομολόγησης ενώ το 2004 ο Prins πρότεινε έναν γενετικό αλγόριθμο που για πρώτη φορά ξεπερνούσε σε απόδοση τις περισσότερες μεθόδους τύπου TS. Από τότε και έως σήμερα οι ερευνητές προτιμούν τους μετα-ευρετικούς αλγορίθμους που βασίζονται σε πληθυσμό λύσεων αλλά και τον συνδυασμό διαφορετικών μεθόδων σε ένα υβριδικό πλαίσιο, γεγονός που τους επιτρέπει να ασχολούνται με προβλήματα μεγαλύτερου μεγέθους και πολυπλοκότητας.

Οι δημοφιλέστεροι μετα-ευρετικοί αλγόριθμοι βασισμένοι σε πληθυσμό λύσεων είναι ο γενετικός αλγόριθμος (GA) και η βελτιστοποίηση αποικίας μυρμηγκιών (ACO), ενώ στις περισσότερες περιπτώσεις οι μέθοδοι αυτοί συνδυάζονται με κλασικούς ευρετικούς ή και μετα-ευρετικούς αλγορίθμους τοπικής αναζήτησης για την βελτίωση της παραγόμενης λύσης.

Παρατηρήθηκε ότι έχουν προταθεί πολλές διαφορετικές μέθοδοι επίλυσης για όλες τις παραλλαγές του προβλήματος δρομολόγησης στόλου οχημάτων. Ωστόσο παρόλο που στην διεθνής βιβλιογραφία εμφανίζονται όλο και περισσότερα άρθρα που λαμβάνουν υπόψη περιορισμούς που παρατηρούνται σε πρακτικό επίπεδο, οι περισσότεροι ερευνητές προτείνουν μεθόδους σχεδιασμένες να αντιμετωπίζουν πολύ συγκεκριμένες παραλλαγές του προβλήματος, χωρίς να έχουν την δυνατότητα εφαρμογής και σε άλλες παραλλαγές, ενώ σε αρκετές περιπτώσεις φαίνεται να χειραγωγήθηκαν κάποιες παράμετροι ώστε να πετύχει ο προτεινόμενος αλγόριθμος ανταγωνιστικές λύσεις για κάποια συγκεκριμένη περίπτωση του προβλήματος. Επακολούθως, οι αλγόριθμοι που προτείνονται από τα περισσότερα άρθρα, δεν δύναται να βρίσκουν εύκολη εφαρμογή σε πραγματικά προβλήματα δρομολόγησης. Από τα άρθρα που εξετάστηκαν (148), μόνο σε δύο περιπτώσεις υπήρξε εφαρμογή του προτεινόμενου αλγορίθμου σε πραγματικό πρόβλημα (παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα), γεγονός που δείχνει πως το ενδιαφέρον των ερευνητών έχει επικεντρωθεί κυρίως στην θεωρητική μελέτη του VRP και των παραλλαγών του και όχι τόσο στην δυνατότητα πρακτικής εφαρμογής των προτεινόμενων θεωρητικών λύσεων.

Στην σχετική βιβλιογραφία, ο αριθμός των ερευνητών που παρουσίασαν κάποιο γενικό αλγόριθμο ικανό να επιλύει πολλαπλές παραλλαγές του VRP βρέθηκε σχετικά μικρός. Τέτοιοι αλγόριθμοι παρουσιάστηκαν από τους (Pisinger, D., Ropke, S. 2007), οι οποίοι και πρότειναν ένα μετα-ευρετικό αλγόριθμο αναζήτησης γειτονιάς , τον Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS), συνδυασμένο με προσαρμοστικό στρώμα για να επιλύσουν το CVRP, VRPTW, OVRP και MDVRP, καθώς και από τους (Subramanian et al 2013), οι οποίοι πρότειναν έναν υβριδικό αλγόριθμο βασισμένο στον μεταευρετικό αλγόριθμο Iterated Local Search για την επίλυση των παραλλαγών CVRP, OVRP, VRPPD και MDVRP του προβλήματος.

Εν κατακλείδι, η περαιτέρω ανάπτυξη αλγορίθμων ικανών να επιλύουν πολλαπλές παραλλαγές του προβλήματος αλλά και αλγορίθμων που να μπορούν να εφαρμόζονται άμεσα σε πρακτικά προβλήματα φαίνεται να έχει υψηλό ενδιαφέρον και προοπτικές.

6.2 Αξιοποίηση Αλγορίθμων σε Πληροφοριακά Συστήματα Διανομής

Από τα άρθρα που διερευνήθηκαν κατά την διάρκεια της έρευνας μόνο σε δύο από αυτά ο προτεινόμενος αλγόριθμος εφαρμόστηκε σε πρακτικό πραγματικό πρόβλημα. Το 2014 οι (Melián-Batista, B., De Santiago, A., Angelbello, F., Alvarez, A. 2014) παρακινήθηκαν από ένα πραγματικό πρόβλημα που αντιμετώπιζε μια εταιρεία μεταφορών στην Τενερίφη Ισπανίας κατά το οποίο με δεδομένο έναν στόλο οχημάτων πρέπει τα δρομολόγια που σχεδιάζονται να ελαχιστοποιούν την συνολική διανυόμενη απόσταση ενώ παράλληλα να εξισορροπούν του φόρτου εργασίας των οδηγών. Για την επίλυση του προβλήματος VRPTW πρότειναν ένα μοντέλο μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού και πρότειναν δύο αλγόριθμους επίλυσης βασισμένες στον μεταευρετικό αλγόριθμο τοπικής αναζήτησης scatter search, με μόνη διαφορά στη συνιστώσα συνδυασμού που χρησιμοποιείται από τον αλγόριθμο. Οι αλγόριθμοι δοκιμάστηκαν με τα δεδομένα του πραγματικού προβλήματος που τους παρείχε

η εταιρεία καταφέρνοντας να ξεπεράσουν κατά πολύ σε απόδοση τα αποτελέσματα του πληροφοριακού συστήματος της εταιρείας.

Το άλλο άρθρο που ασχολήθηκε με επίλυση πραγματικής περίπτωσης δημοσιεύτηκε το 2015 από τον (Chyns, M. 2015) και παρουσιάζει μία μέθοδο επίλυσης βασισμένη στο μεταευρετικό σύστημα αποικίας μυρμηγκιών (Ant Colony System) ικανή να αντιμετωπίζει με ένα ευρύ φάσμα δυναμικών προβλημάτων με χρονικά παράθυρα, διαχωρισμό παραδόσεων και ετερογενή στόλο οχημάτων (DVRPTWSD). Σημείο εκκίνησης αυτής της εργασίας ήταν ένα πρόβλημα που υπέβαλε το αεροδρόμιο της Λιέγης, το 8ο μεγαλύτερο αεροδρόμιο μεταφορών φορτίων της Ευρώπης, με στόχο την ανάπτυξη συστήματος αποφάσεων που να μπορεί να βελτιστοποιεί την διαδρομή των φορτηγών ανεφοδιασμού καυσίμων του αεροδρομίου. Ενώ στο κλασσικό VRP στόχος είναι η ελαχιστοποίηση της συνολικής διανυόμενης απόστασης, η μεγαλύτερη προτεραιότητα για ένα αεροδρόμιο είναι η όσο το δυνατόν συντομότερη παράδοση των καυσίμων ώστε να συνεχίσουν τα αεροσκάφη τις δραστηριότητες τους, καθώς οι αεροπορικές εταιρείες πληρώνουν για τον χρόνο διανομής των αεροσκαφών τους στο αεροδρόμιο. Κάποιοι ιδιαίτεροι περιορισμοί του συγκεκριμένου προβλήματος είναι πως τα φορτηγά πρέπει να παραδίδουν ένα τυποποιημένο προϊόν, καύσιμο, στα αεροσκάφη μέσα σε προκαθορισμένα χρονικά παράθυρα, το γεγονός ότι υπάρχουν διαφορετικοί τύποι οχημάτων, που λειτουργούν σε διαφορετικές ταχύτητες ενώ μερικά από αυτά δεν είναι σε θέση να εξυπηρετούν κάποια συγκεκριμένα μοντέλα αεροσκαφών. Για αυτό το λόγο έδωσαν ιδιαίτερη έμφαση στην ανταπόκριση (responsiveness), δηλαδή την ολοκλήρωση μιας παράδοσης το συντομότερο δυνατό, μέσα στο χρονικό παράθυρο, έτσι ώστε ο πελάτης ή το όχημα να επανεκκινήσει τις δραστηριότητές του.

Μια δεύτερη μεγάλη πρόκληση του προβλήματος είναι το αβέβαιο δυναμικό περιβάλλον, καθώς ένα αεροδρόμιο λειτουργεί συνεχώς όλη την εβδομάδα, χωρίς να υπάρχει κατάλληλη στιγμή για να ξεκινήσει ο σχεδιασμός βελτιστοποίησης ενώ συνηθισμένα είναι και απρόοπτα όπως η ακύρωση ή καθυστέρηση των πτήσεων. Για το λόγο αυτό ανέπτυξαν μια διαδραστική λύση που επιτρέπει στους αποστολείς να λαμβάνουν υπόψη νέες πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο.

Το προτεινόμενο σύστημα αποικίας μυρμηγκιών τελικά εφαρμόστηκε για μια αντιπροσωπευτική βραδιά λειτουργίας του αεροδρομίου κατά την οποία αναμένονται προς ανεφοδιασμό/εξυπηρέτηση 30 αεροσκάφη, 7 διαφορετικών τύπων εντός τριών ωρών ενώ ο ανεφοδιασμός πρέπει να διαρκεί μία ώρα με υποσχόμενα αποτελέσματα.

6.3 Πρόταση Αλγορίθμων προς Υλοποίηση σε Πληροφοριακό Σύστημα Αστικών Εμπορευματικών Μεταφορών

6.3.1 Εισαγωγή στην Πρόταση Αλγορίθμων

Στη συνέχεια θα προταθεί ένα γενικό πλαίσιο μεθόδου επίλυσης για τις υπό μελέτη παραλλαγές του VRP με απώτερο σκοπό την εφαρμογή του στο νέο πληροφοριακό σύστημα δρομολόγησης οχημάτων. Η προτεινόμενη μέθοδος αποσκοπεί στο να παράγει λύσεις υψηλής ποιότητας σε εύλογο χρονικό διάστημα για αρκετές παραλλαγές του προβλήματος και για μεγάλο αριθμό πελατών. Σημαντικότερος περιορισμός των αστικών μεταφορών είναι η ισχυρή εξάρτηση του προβλήματος της δρομολόγησης οχημάτων από τον παράγοντα της κυκλοφοριακής συμφόρησης των πιθανών διαδρομών , καθιστώντας έτσι τις παραλλαγές του VRP με χρονικά παράθυρα (VRPTW) αλλά και αυτές που είναι εξαρτημένες από το χρόνο VRP (TDVRP) ως τις βασικές παραλλαγές του VRP που θα δοθεί έμφαση, και από την μελέτη των οποίων πάνω θα προκύψει τελικά ο προτεινόμενος αλγόριθμος.

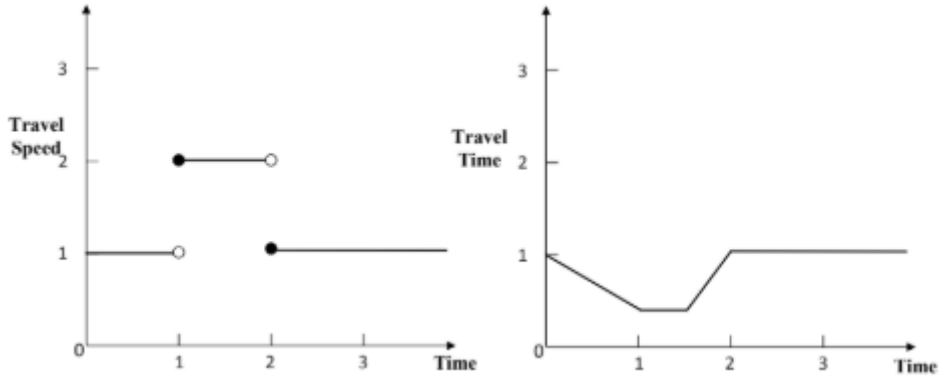
Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές αυτής της κατηγορίας προβλημάτων οι εταιρείες μεταφορών επιθυμούν τον σχετικά σύντομο υπολογισμό των βέλτιστων δρομολογίων (< μία ώρα) για μεγάλο πλήθος πελατών . Επιθυμούν επίσης την ταυτόχρονη επίλυση πολλών παραλλαγών του VRP (5-7 παραλλαγές κατά μ.ό.) Μία μέθοδος που ικανοποιεί αυτές τις προϋποθέσεις είναι ο συνδυασμός ενός κατασκευαστικού ευρετικού αλγορίθμου με έναν απλό ευρετικό τοπικής αναζήτησης. Πρόκειται για σχετικά απλές μεθόδους και με τον σωστό συνδυασμό μπορούν να υπολογίζουν καλής ποιότητας λύσεις σε σχετικά σύντομο χρόνο.

Επίσης αξία έχει να προταθεί και μια πιο εξελιγμένη μέθοδος, σε ερευνητικό επίπεδο, που να μπορεί να πετυχαίνει ακόμα καλύτερες λύσεις, ίσως και τις βέλτιστες. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο γενετικός αλγόριθμος είναι ίσως η πιο μελετημένη μέθοδος για το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων, με πολλούς από τους ερευνητές να ασχολούνται με την βελτίωση της αποτελεσματικότητας του αλλά και την εφαρμογή του σε όλο και περισσότερες παραλλαγές του προβλήματος. Ο γενετικός αλγόριθμος είναι σε θέση να επιλύσει το πρόβλημα δρομολόγησης για μεγάλο πλήθος πελατών ενώ μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί ώστε να αντιμετωπίζει διαφορετικές παραλλαγές του VRP με άλλες απαιτήσεις και περιορισμούς κάθε φορά, ενώ είναι ιδανικός για την επίλυση του VRPTW και TDVRP.

Στην απλή μορφή του βέβαια, ο αλγόριθμος δεν είναι ιδιαίτερα αξιόπιστος και αποτελεσματικός, αλλά μπορεί εύκολα να βελτιωθεί με χρήση σύγχρονων τελεστών επιλογής, αναπαραγωγής και μετάλλαξης αλλά και εμπλουτίζοντας τον με άλλες μεθόδους επίλυσης, όπως ευρετικούς τοπικής αναζήτησης κ.λ.π.. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η εντατικοποίηση της αναζήτησης και η διαφοροποίηση του πληθυσμού λύσεων, και τελικά η παραγωγή καλύτερων λύσεων από αυτές που θα έδινε ο αλγόριθμος στην απλή του μορφή .

Ωστόσο, και για τους δύο αλγορίθμους προτείνεται η χρήση ενός μοντέλο υπολογισμού ταχυτήτων/χρόνων διέλευσης από ακμή σε ακμή εξαρτημένο από τον χρόνο, το οποίο να είναι σε θέση να προσεγγίζει τους πραγματικούς χρόνους διέλευσης με ικανοποιητική

ακρίβεια. Προτείνεται επίσης προς χρήση ένα μοντέλο βασισμένο σε αυτό του Ichoua (Ichoua, Gendreau and Potvin, 2003) κατά το οποίο ο χρόνος διέλευσης αντικαθίσταται από την ταχύτητα διέλευσης. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιεί το μήκος της διαδρομής μαζί με την ταχύτητα διέλευσης σαν παράγοντες και υπολογίζει τον χρόνο διέλευσης. Κατ' αυτόν τον τρόπο ο χρόνος διέλευσης μπορεί να αλλάζει με συνεχή τρόπο και ικανοποιείται η αρχή FIFO (σύμφωνα με την οποία εξασφαλίζεται πως ένα φορτηγό Φ1 που ξεκινάει την στιγμή t από τον πελάτη i για τον πελάτη j θα φτάνει πάντα πιο νωρίς από ένα όμοιο φορτηγό Φ2 που ξεκινάει την στιγμή t+n (n>0) από τον πελάτη i για τον πελάτη j). Παρ' όλα αυτά είναι πολύ πιθανόν η συνάρτηση της ταχύτητας να είναι ασυνεχής, γεγονός τελείως διαφορετικό από την ομαλή διεξαγωγή των πραγματικών συνθηκών. Στο Σχήμα 6.1 η ταχύτητα διέλευσης εκφράζεται ως ασυνεχής συνάρτηση (a), από την οποία προέκυψε η συνεχής συνάρτηση χρόνου διέλευσης (b) και ικανοποιήθηκε το κριτήριο FIFO.



(a) Ταχύτητα Διέλευσης (b) Χρόνος Διέλευσης

Σχήμα 6.1: Ichoua's Time Dependent Time-Travel Function

Από θεωρητική σκοπιά, όσο η συνάρτηση της ταχύτητας είναι συνεχής μπορεί πάντα να υπολογίζεται ο χρόνος διέλευσης. Με αυτόν τον τρόπο προσεγγίζεται ικανοποιητικά η ταχύτητα διέλευσης σε πραγματικές συνθήκες και ικανοποιείται η αρχή FIFO.

Στην συνέχεια περιγράφονται με περισσότερη λεπτομέρεια οι δύο αυτές προτεινόμενες μέθοδοι επίλυσης.

6.3.2 Πρόταση του Ευρετικού Αλγορίθμου

Σε πρώτη φάση προτείνεται ένας μια σχετικά απλή μέθοδος επίλυσης η οποία είναι σε θέση να παράγει καλής ποιότητας λύσεις σε σύντομο χρόνο. Η ανάπτυξη ενός τέτοιου αλγορίθμου δεν είναι ιδιαίτερα απαιτητική διαδικασία ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επίλυση πλήθους πρακτικών περιστάσεων. Η μέθοδος επίλυσης θα αποτελείται από δύο στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο θα χρησιμοποιηθεί ένας απλός κατασκευαστικός ευρετικός αλγόριθμος, ο Time Oriented Nearest Neighbor και ο οποίος θα παράγει λύσεις για το εκάστοτε πρόβλημα. Η ποιότητα των λύσεων του είναι μεγάλη, ωστόσο μπορεί να

βελτιωθεί περαιτέρω με χρήση απλών ευρετικών αλγορίθμων τοπικής αναζήτησης και ειδικότερα inter-route και intra-route node relocation. Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν σύντομα οι μέθοδοι αυτοί.

Ευρετικός Αλγόριθμος Time Oriented Nearest Neighbor

Ο αλγόριθμος Time Oriented Nearest Neighbor αυτή ανήκει στους ευρετικούς κατασκευαστικούς αλγορίθμους οι οποίοι κατασκευάζουν κάθε διαδρομή οχήματος ξεχωριστά - σειριακά (sequential). Είναι παρόμοιος με την μέθοδο του πλησιέστερου γείτονα, που έχει αναλυθεί στην παράγραφο 3.2.1.1, και ξεκινά κάθε διαδρομή βρίσκοντας ένα μη προγραμματισμένο πελάτη που είναι 'πλησιέστερος' ως προς την αποθήκη. Σε κάθε επόμενη επανάληψη ο ευρετικός αναζητεί τον πλησιέστερο πελάτη ως προς τον τελευταίο πελάτη που εισήχθη στο δρομολόγιο. Η αναζήτηση αυτή πραγματοποιείται για όλους τους πελάτες που είναι πιθανόν (να μην παραβιάζουν δηλαδή περιορισμούς χωρητικότητας οχημάτων, χρονικών περιθωρίων κ.λ.π.) να προστεθούν στο τέλος του υπό κατασκευή δρομολογίου. Κάθε φορά που η αναζήτηση αποτυγχάνει να βρει άλλον πελάτη δημιουργεί νέο δρομολόγιο εκτός και αν δεν υπάρχουν άλλοι πελάτες προς δρομολόγηση.

Ο τρόπος με τον οποίο αξιολογούνται οι πλησιέστεροι πελάτες λαμβάνει υπόψη τόσο την γεωγραφική απόσταση όσο και τον χρονική απόσταση μεταξύ των πελατών. Έστω i ο τελευταίος πελάτης που προστέθηκε στο υπό εξέταση δρομολόγιο και j οποιοσδήποτε μη προγραμματισμένος πελάτης που θα μπορούσε να εξυπηρετηθεί επόμενος. Χρησιμοποιεί λοιπόν ένα μετρικό σύστημα c_{ij} το οποίο μετράει την άμεση γεωγραφική απόσταση ανάμεσα σε δύο πελάτες και άλλον έναν, d_{ij}, το χρονικό διάστημα ανάμεσα στη στιγμή που ολοκληρώνεται η εξυπηρέτηση του πελάτη i και ξεκινά η εξυπηρέτηση του j, T_{ij} και το πόσο επείγει η παράδοση του πελάτη j, u_{ij} εκφραζόμενο από τον χρόνο που απομένει μέχρι την τελευταία πιθανή στιγμή εκκίνησης του οχήματος. Οι συντελεστές αυτοί εκφράζονται ως εξής :

$T_{ij} = b_j - (b_i + s_i)$ χρονικό διάστημα ανάμεσα πελάτη i και j

$u_{ij} = l_j - (b_i + s_i + t_{ij})$ επείγον παράδοσης

$$c_{ij} = \delta_1 \cdot d_{ij} + \delta_2 \cdot T_{ij} + \delta_3 \cdot u_{ij}$$

Όπου

δ_1, δ_2 ,δ_3 βάρη που ικανοποιούν την ισότητα $\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 = 1$

Ευρετικοί Αλγόριθμοι Βελτίωσης Inter-route και Intra-route Node Relocation

Οι λύσεις που προκύπτουν από τον παραπάνω κατασκευαστικό αλγόριθμο μπορούν στην συνέχεια να βελτιωθούν περαιτέρω με χρήση απλών τεχνικών μετατόπισης κόμβων εντός ενός δρομολογίου (intra-route) ή και μεταξύ δύο δρομολογίων (inter-route). Η βασική ιδέα

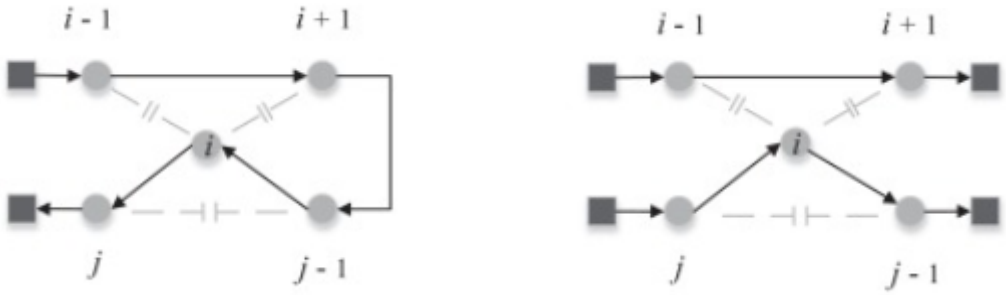
των μεθόδων τοπικής αναζήτησης είναι η επίτευξη λύσης υψηλής ποιότητας μέσω επαναληπτικής διαδικασίας κατά την οποία η υπάρχουσα λύση (s) βελτιώνεται μέσω απλών τοπικών μετατροπών, που ονομάζονται και κινήσεις. Κάθε τελεστής τοπικής αναζήτησης ορίζει έναν τύπο κίνησης και δημιουργεί μια γειτονιά της υπάρχουσας λύσης (N(s)). Αφού δημιουργηθεί η γειτονιά της τελευταίας λύσης, αξιολογείται και η τοπική αναζήτηση χρησιμοποιεί μια στρατηγική για να επιλέξει το πολύ μία λύση από την γειτονιά N(s) ώστε να γίνει η επόμενη σύγχρονη λύση.

Ο πιο συνηθισμένος τελεστής βελτιστοποίησης intra-route είναι ο k-opt και ειδικότερα ο 2-opt. Η βασική του ιδέα είναι η αφαίρεση δύο ακμών από κάποιο δρομολόγιο και η συμπλήρωση τους με δύο νέες ακμές. Παρουσιάζεται παράδειγμα μεθόδου 2-opt στο Σχήμα 6.2 α) όπου φαίνεται ο πελάτης i να αλλάζει σειρά εξυπηρέτησης. Η ίδια ιδέα μπορεί να επεκταθεί και για τρεις (3-opt) ή τέσσερις (4-opt) ακμές. Γενικά οι τελεστές intra-route έχουν στόχο την βελτίωση ενός δρομολογίου με απλή μετάθεση της σειράς εξυπηρέτησης των πελατών του δρομολογίου.

Όσον αφορά τους τελεστές intra-route, αυτοί έχουν στόχο την συνολική βελτίωση των διάφορων δρομολογίων με την μετάθεση πελατών από το ένα δρομολόγιο στο άλλο. Όπως έχουν παρουσιαστεί και στο κεφ. 3.2.3.1, οι πιο συνηθισμένοι τέτοιοι τελεστές είναι οι CROSS-exchange, λ-interchange, OR-exchange και στο Σχήμα 6.2 b) παρουσιάζεται ένα απλό παράδειγμα μιας intra-route μεθόδου.

Μια σημαντική παρατήρηση είναι πως ένα τοπικό ακρότατο για κάποιο συγκεκριμένο τελεστή δεν είναι υποχρεωτικά τοπικό ακρότατο και για κάποιον άλλο τελεστή. Για αυτό το λόγο είναι εύλογο να χρησιμοποιούνται αρκετοί διαφορετικοί τελεστές σε έναν αλγόριθμο. Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό αυτών των μεθόδων είναι η αύξηση της πολυπλοκότητας με αύξηση του μεγέθους της γειτονιάς. Όσο μεγαλύτερη είναι η γειτονιά λύσεων τόσο περισσότερες λύσεις πρέπει να δημιουργηθούν και να αξιολογηθούν. Από την άλλη μεριά, όσο μεγαλύτερη είναι μια γειτονιά τόσο μεγαλύτερη είναι και η πιθανότητα να βρεθεί καλύτερη λύση. Κατά συνέπεια πρέπει να γίνει κάποιος συμβιβασμός μεταξύ της υπολογιστικής πολυπλοκότητας και της πιθανότητας εύρεσης βελτιωμένης λύσης. Αυτός ο συμβιβασμός αποτελεί την μεγαλύτερη πρόκληση στον σχεδιασμό ενός αποδοτικού αλγορίθμου τοπικής αναζήτησης.

Οι Arnold και Sörensen (Arnold and Sörensen, 2019) υποστηρίζουν πως μια αποτελεσματική μέθοδος αναζήτησης πρέπει να περιέχει ένα μικρό αλλά με διαφορετικές ιδιότητες σύνολο καλά επιλεγμένων τελεστών τοπικής αναζήτησης για intra- και inter-route, οι οποίοι να έχουν επαρκώς μεγάλες γειτονιές, αλλά να μπορούν να βρίσκουν βελτιώσεις χωρίς να χρειάζεται να ψάξουν διεξοδικά όλη την γειτονιά. Συνεπώς προτείνονται οι κατηγορίες τελεστών που προαναφέρθηκαν για αποτελεσματική και αποδοτική τοπική αναζήτηση.

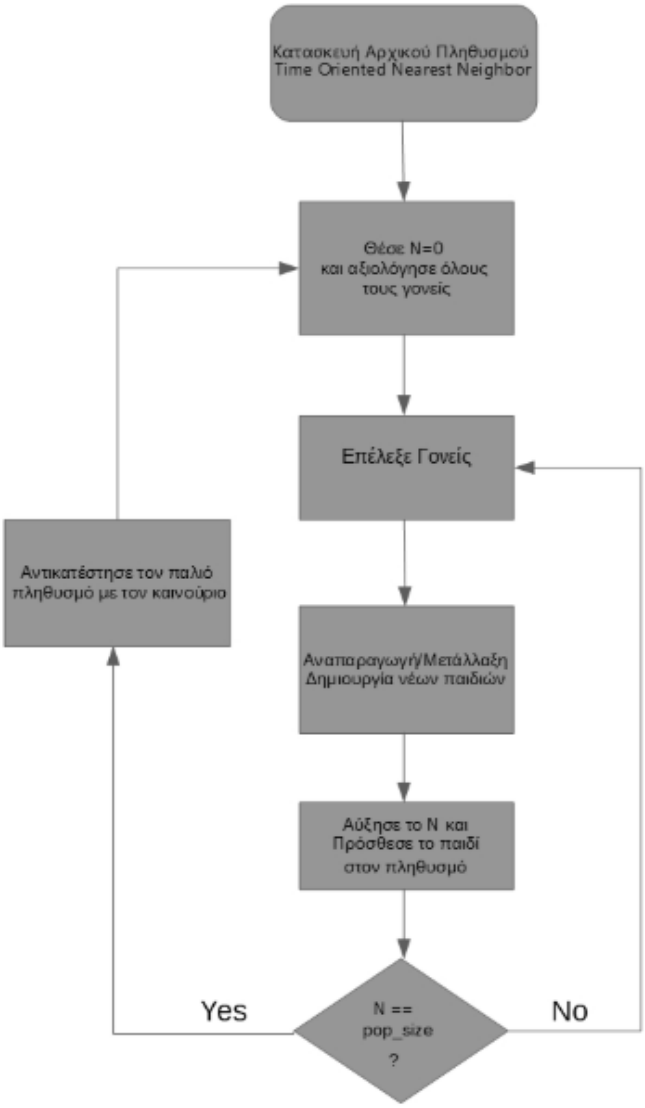


α) intra-route optimization β) inter-route optimization

Σχήμα 6.2: Τελεστές Τοπικής Αναζήτησης

6.3.3 Πρόταση του Υβριδικού Γενετικού Αλγορίθμου

Ο προτεινόμενος υβριδικός γενετικός αλγόριθμος αποτελείται από τον έναν multi-objective γενετικό αλγόριθμο, ο οποίος τροφοδοτείται με αρχικό πληθυσμό λύσεων από τον ευρετικό κατασκευαστικό αλγόριθμο Time Oriented Nearest Neighbor και οι λύσεις οι οποίες θα παράγει θα βελτιώνονται τελικά περαιτέρω μέσω μιας μεταευρετικής μεθόδου τοπικής αναζήτησης. Στο Σχήμα 6.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του προτεινόμενου γενετικού αλγορίθμου.



Σχήμα 6.3: Διάγραμμα Ροής Γενετικού Αλγορίθμου

6.3.3.1 Multi-Objective Γενετικός Αλγόριθμος

Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με πολλαπλές αντικειμενικές συναρτήσεις (Multi-Objective Optimization Problem - MOP) είναι αυτό κατά το οποίο δύο η περισσότεροι αντικειμενικοί στόχοι ή παράμετροι συνεισφέρουν στο τελικό συνολικό αποτέλεσμα. Αυτοί οι στόχοι αλληλοεπηρεάζονται με σύνθετο, μη γραμμικό τρόπο. Η πρόκληση είναι να βρεθούν οι κατάλληλες τιμές για αυτούς και οι οποίες θα αποφέρουν μια βέλτιστη λύση του συνολικού προβλήματος. Ο εξελικτικός προγραμματισμός είναι ευρέως διαδεδομένος για προβλήματα MOP's, με την επιτυχία του να βασίζεται στην ικανότητα των εξελικτικών αλγορίθμων να βρίσκουν υψηλής ποιότητας λύσης για μεγάλο πλήθος προβλημάτων με την κατάλληλη δομή

και την προσαρμοστικότητα της γενετικής αναπαράστασης και της εκτίμησης καταλληλόλητας κάθε λύσης για προβλήματα από τον κλάδο των MOP's.

Στους απλούς γενετικούς και για θέματα ταχύτητας χρησιμοποιούνται βάρη (weights) σύμφωνα με την σημαντικότητα κάθε μιας παραμέτρου. Οπότε υπάρχει μία αντικειμενική συνάρτηση η οποία εμπλέκει και τις δύο παραμέτρους. Με αυτό τον τρόπο κατευθύνουμε κατά κάποιον τρόπο τις λύσεις προς μία κατεύθυνση. Η πολύ-αντικειμενική συνάρτηση εκφράζεται ως:

$$\mathrm{F} = \mathrm{w1} * \text{αριθμός οχημάτων} + \mathrm{w2} * \text{συνολική διανυόμενη απόσταση}$$

όπου w_1, w_2: βάρη αντικειμενικής συνάρτησης (weights) όπου $w_1 + w_2 = 1$

Με την μέθοδο των βαρών το MOP πρόβλημα μετασχηματίζεται σε πρόβλημα μιας αντικειμενικής συνάρτησης. Η δυσκολία στην μέθοδο αυτή έγκειται στο γεγονός πως το σταθμισμένο άθροισμα απαιτεί την έκφραση προτίμησης τόσο για την απόδοση της αναζήτησης όσο και για την ποιότητα των παραγόμενων λύσεων. Η κατάλληλη επιλογή βαρών για τις διάφορες διαστάσεις των MOP προβλημάτων είναι δύσκολη και ad hoc και συχνά καταλήγει σε μη ικανοποιητική απόδοση και λύσεις.

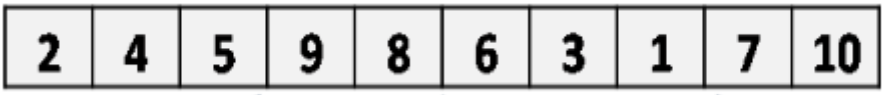
6.3.3.2 Κατασκευή Αρχικού Πληθυσμού Λύσεων

Ο γενετικός αλγόριθμος συνήθως το στάδιο κατασκευής του αρχικού πληθυσμού το επιτυγχάνει με δημιουργία τυχαίων παραλλαγών N πελατών. Αυτή η τεχνική όμως δεν εξασφαλίζει λύσεις καλής ποιότητας ούτε διαφορετικότητα μεταξύ αυτών με αποτέλεσμα ο γενετικός να αργεί ή και να μην μπορεί να συγκλίνει. Αυτή η δυσκολία μπορεί εύκολα να ξεπεραστεί με χρήση ενός απλού κατασκευαστικού ευρετικού αλγορίθμου. Ο αλγόριθμος Time Oriented Nearest Neighbor που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα είναι ιδανικός για να μας παρέχει λύσεις κοντινές στην βέλτιστη. Με αυτόν τρόπο δημιουργείται αρχικός πληθυσμός λύσεων υψηλότερης ποιότητας βοηθώντας την σύγκλιση του γενετικού αλγορίθμου.

6.3.3.3 Αναπαράσταση Χρωμοσώματος

Προκειμένου να εφαρμοστεί ο Γενετικός Αλγόριθμος σε κάποιο συγκεκριμένο πρόβλημα χρειάζεται να επιλεχθεί ο τρόπος αναπαράστασης του χρωμοσώματος (συμβολοσειράς) για το χώρο των λύσεων. Αυτή η επιλογή είναι ιδιαίτερα κρίσιμη για το κατά πόσο ο αλγόριθμος θα επιτύχει ή αποτύχει να επιλύσει το πρόβλημα. Προτείνεται λοιπόν το χρωμόσωμα να αναπαριστά μια διαμόρφωση του δικτύου και δίνεται ως μια ακέραια σειρά του μήκους N, όπου N είναι ο αριθμός των πελατών σε κάποιο συγκεκριμένο πρόβλημα. Κάθε γονίδιο σε ένα δοσμένο χρωμόσωμα υποδηλώνει τον αρχικό αριθμό κόμβου που έχει απονεμηθεί σε ένα πελάτη, ενώ η αλληλουχία των γονιδίων υποδηλώνει την σειρά εξυπηρέτησης των πελατών. Στο παρακάτω Σχήμα 6.4 φαίνεται ένα παράδειγμα αναπαράστασης χρωμοσώματος για πρόβλημα 10 πελατών.

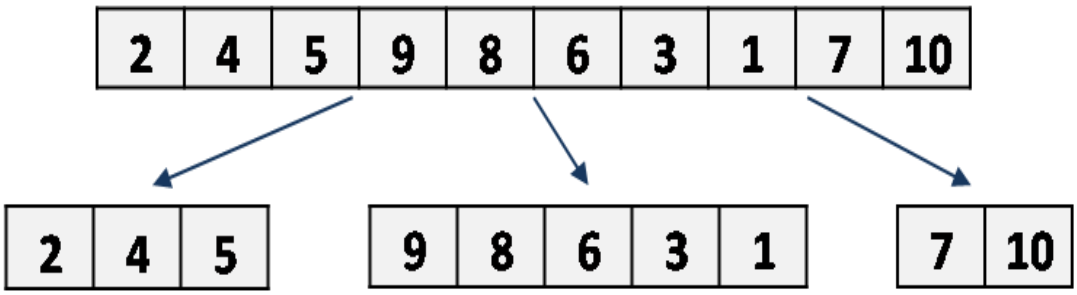
Σχήμα 6.4: Αναπαράσταση Χρωμοσώματος Γενετικού Αλγορίθμου



Η σειρά ενός χρωμοσώματος περιέχει μια αλληλουχία δρομολογίων, αλλά όχι και κάποιο οριοθέτη να υποδηλώνει την αρχή ή το τέλος κάθε δρομολογίου σε ένα δοσμένο χρωμόσωμα. Αυτό επιτυγχάνεται με ένα σχέδιο (αλγόριθμο) δρομολόγησης. Προτείνεται λοιπόν ένα αλγόριθμος δύο φάσεων που μετασχηματίζει κάθε χρωμόσωμα σε μια συστοιχία δρομολογίων. Κατά την πρώτη φάση, ένα όχημα πρέπει να ξεκινά από την αποθήκη και το πρώτο γονίδιο του χρωμοσώματος θεωρείται και ο πρώτος πελάτης που επισκέπτεται. Στην συνέχεια προστίθενται στο δρομολόγιο πελάτες με την σειρά που εμφανίζονται στο χρωμόσωμα. Η διαδικασία δρομολόγησης λαμβάνει υπόψη κατά πόσο και εάν παραβιάζονται οι περιορισμοί χωρητικότητας και χρονικών παραθύρων πριν προσθέσει άλλον πελάτη στο δρομολόγιο. Κάθε φορά που κάποιος πελάτης που δεν μπορεί να προστεθεί στο δρομολόγιο λόγω παραβίασης των περιορισμών δημιουργείται νέο δρομολόγιο. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι όλοι οι πελάτες να έχουν προγραμματιστεί για ακριβώς ένα δρομολόγιο.

Στην δεύτερη φάση εξετάζεται αν μπορεί να βελτιωθούν τα δρομολόγια που υπολογίστηκαν στην πρώτη φάση. Ο τελευταίος πελάτης κάθε διαδρομής r_i, μετατίθενται ως πρώτος πελάτης του δρομολογίου r_{i+1}. Εάν αυτή η προσθαφαίρεση ικανοποιεί τους διάφορους περιορισμούς για το δρομολόγιο r_{i+1}και η άθροιση του κόστους των δρομολογίων r_i και r_{i+1}στην δεύτερη φάση είναι μικρότερο από το άθροισμα του κόστους των r_i και r_{i+1}στην πρώτη φάση τότε η σύνθεση των δρομολογίων της δεύτερης φάσης θεωρείται έγκυρη, διαφορετικά διατηρείται η τοπολογία του δικτύου όπως υπολογίστηκε στην πρώτη φάση. Στο Σχήμα 6.5 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα διαχωρισμού του αρχικού χρωμοσώματος σε τρία δρομολόγια.

Σχήμα 6.5: Διαμερισμός του Χρωμοσώματος σε Δρομολόγια



6.3.3.4 Τελεστές Επιλογής - Αναπαραγωγής - Μετάλλαξης

Τελεστής Επιλογής Fitness-Based

Σε κάθε επανάληψη (γενεά) χρειάζεται να επιλεγούν γονείς από τον πληθυσμό χρωμοσωμάτων (λύσεων) ώστε να συνδυαστούν και να παράγουν παιδιά. Προτείνεται η στρατηγική επιλογής tournament (selection) με ελιτίστικο μοντέλο διατήρησης για να δημιουργείται ο νέος πληθυσμός. Η στρατηγική αυτή είναι ένα σχέδιο επιλογής βάση φυσικής κατάστασης (fitness). Αρχικά ένα σύνολο K ατόμων επιλέγεται τυχαία από τον πληθυσμό, γνωστό ως και tournament set. Στην συνέχεια επιλέγεται ένας τυχαίος αριθμός r, μεταξύ 0 και 1. Αν ο r είναι μικρότερος από έναν προκαθορισμένο αριθμό (έστω 0.8), ο οποίος βρίσκεται εμπειρικά, επιλέγεται το άτομο από το σύνολο με το καλύτερη fitness για να αναπαραχθεί. Σε αντίθετη περίπτωση επιλέγεται οποιοδήποτε χρωμόσωμα που ανήκει στο tournament set.

Το ελιτίστικο μοντέλο συμπεριλαμβάνεται ώστε να εξασφαλιστεί η διατήρηση των καλύτερων ατόμων του πληθυσμού στην επόμενη γενεά. Το πλεονέκτημα αυτού του μοντέλου έναντι παραδοσιακών τεχνικών πιθανοτήτων είναι ότι εξασφαλίζει πως η καλύτερη λύση από τη τελευταία γενιά θα αντιγραφεί χωρίς καμία αλλοίωση στην επόμενη γενεά. Αυτό σημαίνει ότι η καλύτερη λύση που παράγεται από το συνολικά καλύτερο χρωμόσωμα δεν μπορεί ποτέ να επιδεινωθεί από τη μία γενιά στην άλλη.

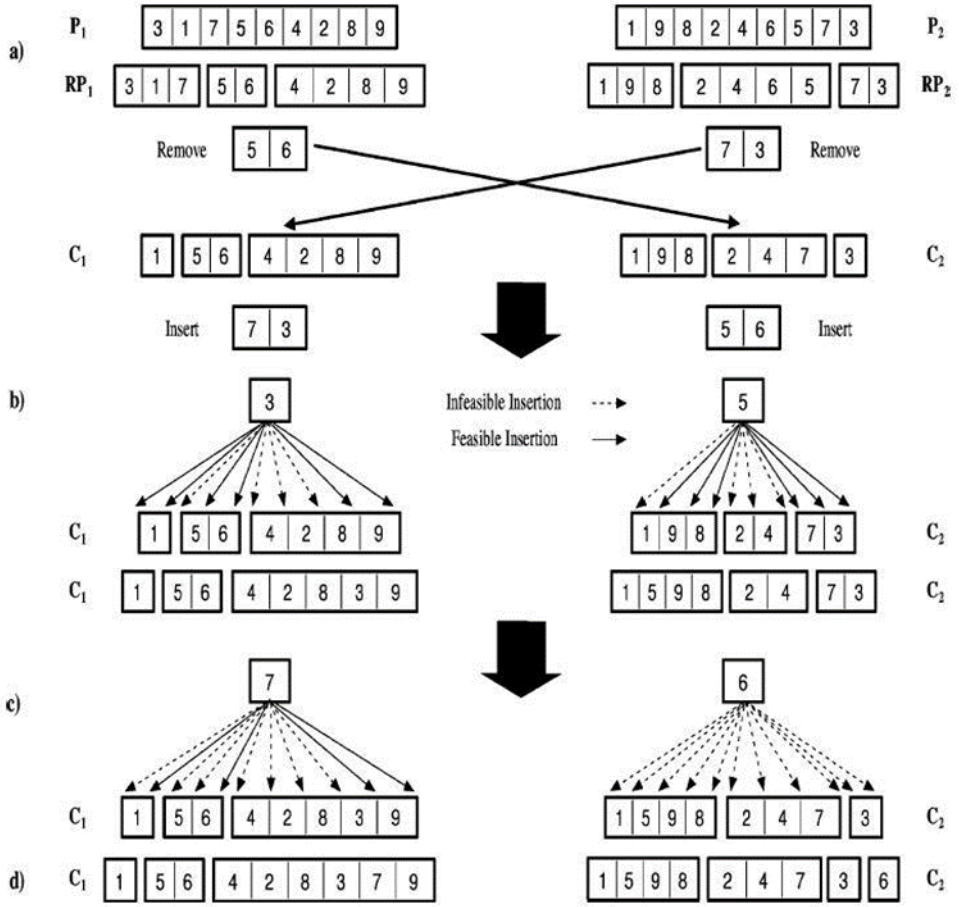
Τελεστής Αναπαραγωγής Best Cost route Crossover (BCRC)

Ο τελεστής αναπαραγωγής BCRC αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση του αριθμού των οχημάτων και του κόστους ταυτόχρονα ελέγχοντας την εφικτότητα των περιορισμών. Η διαδικασία που ακολουθεί ο προτεινόμενος τελεστής αναπαραγωγής παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.6 όπου δημιουργούνται δύο λύσεις παιδιά C1 και C2 από δύο λύσεις γονείς P1 και P2 για ένα πρόβλημα εννέα πελατών. RP1 και RP2 αναπαριστούν το σύνολο των δρομολογίων που σχετίζονται με τους γονείς P1 και P2 στην πρόσφατη επανάληψη. Για παράδειγμα ο γονέας P1 έχει τρία δρομολόγια (R1-R3) με πελάτες ως εξής : R1: 3,1,7 , R2:5,6 , R3:4,2,8,9. Στο Βήμα α επιλέγεται τυχαία ένα δρομολόγιο για κάθε γονέα. Στο παράδειγμα για τον γονέα P1 επιλέγεται η διαδρομή R2 με τους πελάτες 5 και 6, ενώ για τον γονέα P2 επιλέγεται η διαδρομή R3 με πελάτες τους 7 και 3. Στην συνέχεια, για κάποιον γονέα αφαιρούνται οι πελάτες που επιλέχθηκαν από τον άλλο γονέα. Στο Βήμα α αφαιρούνται από τον γονέα P1 οι πελάτες 7 και 3 (που ανήκουν στο δρομολόγιο που επιλέχθηκε από τον γονέα P2) δημιουργώντας έτσι το παιδί C1. Αντίστοιχα οι πελάτες 5 και 6 (του δρομολογίου που επιλέχθηκε από τον P1) αφαιρούνται από τον γονέα P2 έχοντας ως αποτέλεσμα το παιδί C2.

Καθώς κάθε χρωμόσωμα πρέπει να περιέχει όλους τους αριθμούς των πελατών (έστω για μια περίπτωση προβλήματος VRPTW), το επόμενο βήμα είναι να εντοπιστούν οι βέλτιστες θέσεις για τους πελάτες που λείπουν σε κάθε παιδί αντίστοιχα. Όπως φαίνεται στο Βήμα b, ο αλγόριθμος χρειάζεται να προσθέσει τους πελάτες 7 και 3 στο παιδί C1 και τους πελάτες 5

και 6 στο παιδί C2. Η επιλογή για το ποιος πελάτες θα προστεθεί πρώτος γίνεται τυχαία. Στο παράδειγμα επιλέχθηκε αυθαίρετα να προστεθεί πρώτος ο πελάτης 3 στην καλύτερη θέση που βρέθηκε στο C1 (βήμα b) και στη συνέχεια ο πελάτης 7 (βήμα c).

Ένα σημείο εισαγωγής (insertion point) θεωρείται εφικτό εάν προκύπτουν δρομολόγια που ικανοποιούν τους περιορισμούς χωρητικότητας οχημάτων και χρονικών παραθύρων. Το βέλτιστο σημείο εισαγωγής είναι αυτό κατά το οποίο θα προκύψουν τα ελάχιστα κόστη των δρομολογίων. Στο παράδειγμα του Σχήματος 6.6 και οι δύο πελάτες 3 και 7 βρέθηκαν να ανήκουν στο δρομολόγιο 3 του γονέα P1 (βήμα c). Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι δυνατό να μην βρεθεί εφικτό σημείο εισαγωγής και δημιουργείται νέα διαδρομή. Ο πελάτης 6 δεν ήταν δυνατό να προστεθεί σε κάποιο από τα υπάρχοντα δρομολόγια με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί νέο δρομολόγιο.



Σχήμα 6.6: Παράδειγμα λειτουργίας Τελεστή Αναπαραγωγής

Τελεστής Μετάλλαξης

Η μετάλλαξη επιτρέπει στον γενετικό αλγόριθμο να μην εγκλωβίζεται σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο στο χώρο αναζήτησης. Δεδομένου πως η μετάλλαξη μπορεί να είναι ιδιαίτερα καταστροφική για καλές προσεγγίσεις, κάθε χρωμόσωμα επιθυμείτε να έχει μικρή

πιθανότητα να υποστεί μετάλλαξη. Για τον προτεινόμενο γενετικό αλγόριθμο προτείνεται πιθανότητα μετάλλαξης 10 % για κάθε χρωμόσωμα. Η μικρή πιθανότητα μετάλλαξης είναι ιδιαίτερα χρήσιμη ειδικά για προβλήματα με σκληρούς περιορισμούς, όπως το VRPTW όπου τα χρονικά παράθυρα μπορούν πολύ εύκολα να παραβιαστούν.

Για τελεστή μετάλλαξης προτείνεται η μέθοδος Constrained Route Reversal Mutation (Ombuki 2006), η οποία είναι παραλλαγή μιας ευρέως χρησιμοποιούμενης μεθόδου μετάλλαξης, αυτήν της αντιστροφής. Κατά την μετάλλαξη αντιστροφής, εφαρμοσμένη στο πρόβλημα TSP, όπου κάθε χρωμόσωμα αναπαριστά μια παραλλαγή της σειράς εξυπηρέτησης των πελατών, έπειτα επιλέγονται δύο σημεία κοπής στο χρωμόσωμα, και τα γονίδια που περιέχονται ανάμεσα στα δύο αυτά σημεία αντιστρέφουν την σειρά τους. Ακολουθεί παράδειγμα μετάλλαξης χρωμοσώματος για απλό πρόβλημα TSP. Έστω ένα δοσμένο χρωμόσωμα TSP:

9 5 1 7 8 2 4 3

Δημιουργούνται δύο σημεία κοπής

9 5 | 1 7 8 2 4 | 3

και το γενετικό υλικό ανάμεσα στα σημεία κοπής αντιστρέφεται

9 5 4 2 8 7 1 3

Επίσης προτείνεται η μετάλλαξη να εφαρμόζεται σε μια μόνο τυχαία επιλεγμένη διαδρομή του χρωμοσώματος, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η συνολική διατάραξη των διαδρομών. Η διατήρηση όμως σκληρών περιορισμών είναι δυνατόν να διασπάσει μια διαδρομή σε πολλαπλές για να μπορέσει να ανταπεξέλθει στους περιορισμούς. Για αυτό το λόγο προτείνετε μια περιορισμένη μετάλλαξη αντιστροφής, η οποία να εφαρμόζεται για μήκος δύο έως τριών γονιδίων. Από τη στιγμή που η μικρότερη δυνατή αντιστροφή σε δρομολόγιο είναι δύο γονιδίων, εφαρμόζεται αυτό το είδος μετάλλαξης για να ξεφεύγει ο αλγόριθμος από τοπικά ακρότατα.

6.4 Επιστημονικό Άρθρο με τα Αποτελέσματα της Ανασκόπησης της Βιβλιογραφίας

Η έρευνα της βιβλιογραφίας που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, συνοψίστηκε και οδήγησε στην δημιουργία επιστημονικού άρθρου, το οποίο υποβλήθηκε για δημοσίευση στο περιοδικό Annals of Operations Research (Special Issue: Simulation and Optimization to Facilitate Sustainable Urban Freight Logistics Operations). Το άρθρο παρουσιάζεται αναλυτικά στο Παράρτημα 2.

7. Συμπεράσματα

Η δρομολόγηση οχημάτων αστικών εμπορευματικών μεταφορών είναι ένα σύνθετο και πολύπλοκο πρόβλημα (με κύριο περιορισμό την χρονική εξάρτηση των δρομολογίων από την κυκλοφοριακή συμφόρηση που συναντάται στα αστικά κέντρα) και η όσο το δυνατόν βέλτιστη επίλυσή του, αφορά, σε πρακτικό επίπεδο, μεγάλο πλήθος μεταφορικών εταιρειών. Σε θεωρητικό επίπεδο μπορεί να προσεγγιστεί σαν ένας αριθμός παραλλαγών του κλασικού προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων (με πιο σημαντικές παραλλαγές το VRPTW και TDVRP) και έπειτα μπορεί να επιλυθεί μέσω κάποιου κατάλληλου αλγορίθμου. Να αναφερθεί ότι ο τρόπος υπολογισμού των αποστάσεων μεταξύ των κόμβων, αλλά και ειδικότερα των χρόνων ταξιδιού από ένα δεδομένο σημείο σε ένα άλλο, αποτελεί την πιο σημαντική παράμετρο για την επιτυχή επίλυση του προβλήματος. Από την διενεργούσα βιβλιογραφική έρευνα για τις μεθόδους επίλυσης των επιλεγμένων παραλλαγών του VRP, προέκυψε πως ο γενετικός αλγόριθμος είναι ο πιο διαδεδομένος, αφού παράγει τα πιο ανταγωνιστικά αποτελέσματα ενώ ταυτόχρονα βρίσκει εφαρμογή σε όλες τις παραλλαγές του προβλήματος.

Αξίζει επίσης να παρατηρηθεί, σαν γενικό συμπέρασμα της βιβλιογραφικής αυτής έρευνας , το πως ο αριθμός των εξεταζόμενων άρθρων που αντιμετώπιζαν ταυτόχρονα πολλαπλές παραλλαγές του VRP ήταν μικρός και το πως ακόμα λιγότερα άρθρα έθεταν σε εφαρμογή την προτεινόμενη μέθοδο επίλυσης σε κάποιο πραγματικό πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων. Διαπιστώνεται έτσι ένα κενό ανάμεσα, στην θεωρητική προσέγγιση, μελέτη και επίλυση του προβλήματος από τη μία, και στην διερεύνηση της πρακτικής εφαρμοσιμότητας των προτεινόμενων θεωρητικών μεθόδων επίλυσης, πάνω σε πραγματικά προβλήματα των μεταφορικών εταιρειών, από την άλλη.

Τέλος, η παρούσα εργασία κατέληξε στην πρόταση δυο μεθόδων επίλυσης συγκεκριμένων παραλλαγών του προβλήματος για πιθανή χρήση σε ερευνητικό έργο, που αφορά την υλοποίηση πληροφοριακού συστήματος δρομολόγησης οχημάτων για αστικές εμπορευματικές μεταφορές. Η πρώτη μέθοδος είναι ένας σχετικά απλός και γρήγορος κατασκευαστικός αλγόριθμος, ο Time Oriented Nearest Neighbor (TONN), ο οποίος κατασκευάζει δρομολόγια ξεκινώντας από τον αρχικό κόμβο, προσθέτοντας κάθε φορά τον κοντινότερο κόμβο/πελάτη, με μέτρο σύγκρισης τον χρόνο ταξιδιού από ένα κόμβο/πελάτη σε κάποιον άλλο. Στην συνέχεια, οι παραγόμενες λύσεις βελτιώνονται περαιτέρω μέσω μιας απλής ευρετικής διαδικασίας βελτίωσης. Η μέθοδος αυτή έχει το πλεονέκτημα του μικρού χρόνου υπολογισμού των λύσεων αλλά υστερεί στην ποιότητα των λύσεων που παράγει (σε σχέση με μια πιο σύνθετη μετα-ευρετική μέθοδο). Για τον λόγο αυτό προτάθηκε επίσης ένας ισχυρός και αποτελεσματικός γενετικός αλγόριθμος (MOGA) για τις παραλλαγές των προβλημάτων με χρονική εξάρτηση. Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιεί σύγχρονους τελεστές

αναπαραγωγής, επιλογής και μετάλλαξης και είναι σε θέση να βρίσκει λύσεις πολύ κοντινές στην βέλτιστη ή ακόμα και την βέλτιστη. Υστερεί όμως στον μεγάλο υπολογιστικό χρόνο που χρειάζεται για την παραγωγή των λύσεων αυτών, επιβεβαιώνοντας έτσι την σχέση που ενυπάρχει μεταξύ της ποιότητας των λύσεων που παράγει ένας αλγόριθμος και του χρόνου υπολογισμού των λύσεων αυτών.

8. Βιβλιογραφία

Γκαγιαλής Σ. (2008) «Το Πρόβλημα της Δρομολόγησης των Οχημάτων στο Πλαίσιο της Διανομής και οι Μέθοδοι Επίλυσής του: Ένα Εργαλείο Εξοικείωσης με τις Έννοιες», 5ο Φοιτητικό Συνέδριο Διοικητικής Επιστήμης και Τεχνολογίας με Θέμα «Διοικητική Επιστήμη, Τεχνολογία και Πράσινη Οικονομία»", Μαρούσι, 8 Μαΐου 2008.

AbdAllah, A. M. F. M., Essam, D. L., & Sarker, R. A. (2017). On solving periodic re-optimization dynamic vehicle routing problems. *Applied Soft Computing*, *55*. https://doi.org/10.1016/J.ASOC.2017.01.047

Abidi, H., Hassine, K., & Mguis, F. (2018). Genetic Algorithm for Solving a Dynamic Vehicle Routing Problem with Time Windows. *2018 International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS)*. https://doi.org/10.1109/HPCS.2018.00126

Alaïa, E. ben, Dridi, I. H., Bouchriha, H., Borne, P., & Alaia, E. ben. (n.d.). Genetic Algorithm for Multi-Criteria Optimization of Multi-Depots Pick-up and Delivery Problems with Time Windows and Multi-Vehicles. In *Acta Polytechnica Hungarica* (Vol. 12, pp. 2015–2155).

Alexander, A., Walker, H., & Naim, M. (2014). Decision theory in sustainable supply chain management: a literature review. *Supply Chain Management: An International Journal*, *19*(5/6). https://doi.org/10.1108/SCM-01-2014-0007

Andelmin, J., & Bartolini, E. (2017). An Exact Algorithm for the Green Vehicle Routing Problem. *Transportation Science*, *51*(4). https://doi.org/10.1287/trsc.2016.0734

Arnold, F., & Sörensen, K. (2019). Knowledge-guided local search for the vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, *105*. https://doi.org/10.1016/J.COR.2019.01.002

Avci, M., & Topaloglu, S. (2015). An adaptive local search algorithm for vehicle routing problem with simultaneous and mixed pickups and deliveries. *Computers & Industrial Engineering*, *83*. https://doi.org/10.1016/J.CIE.2015.02.002

Baker, B. M., & Ayechew, M. A. (2003). A genetic algorithm for the vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, *30*(5). https://doi.org/10.1016/S0305-0548(02)00051-5

Beheshti, A. K., Hejazi, S. R., & Alinaghian, M. (2015). The vehicle routing problem with multiple prioritized time windows: A case study. *Computers & Industrial Engineering*, *90*(C). https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.10.005

Belhaiza, S., M'Hallah, R., & Brahim, G. ben. (2017). A new Hybrid Genetic Variable Neighborhood search heuristic for the Vehicle Routing Problem with Multiple Time

Windows. *2017 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*. https://doi.org/10.1109/CEC.2017.7969457

Belmecheri, F., Prins, C., Yalaoui, F., & Amodeo, L. (2013). Particle swarm optimization algorithm for a vehicle routing problem with heterogeneous fleet, mixed backhauls, and time windows. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *24*(4). https://doi.org/10.1007/s10845-012-0627-8

Benaini, A., & Berrajaa, A. (2018). Genetic algorithm for large dynamic vehicle routing problem on GPU. *2018 4th International Conference on Logistics Operations Management (GOL)*. https://doi.org/10.1109/GOL.2018.8378082

Berger, J., & Barkaoui, M. (2003). A new hybrid genetic algorithm for the capacitated vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*, *54*(12). https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601635

Blum, C. (2012). *Hybrid Metaheuristics in Combinatorial Optimization: A Tutorial*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33860-1_1

Boschetti, M. A., Maniezzo, V., Roffilli, M., & Bolufé Röhler, A. (2009). *Matheuristics: Optimization, Simulation and Control*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-04918-7_13

Braekers, K., Ramaekers, K., & van Nieuwenhuyse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers & Industrial Engineering*, *99*. https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.007

Brandão, J. (2004). A tabu search algorithm for the open vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, *157*(3). https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00238-8

Brandão, J., & Mercer, A. (1997). A tabu search algorithm for the multi-trip vehicle routing and scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, *100*(1). https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00010-6

Cattaruzza, D., Absi, N., & Feillet, D. (2016). Vehicle routing problems with multiple trips. 4OR: A. In *Quarterly Journal of Operations Research* (Vol. 14). Springer Verlag.

Chand, P., & Mohanty, J. R. (2013). Solving Vehicle Routing Problem with Proposed Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm and Comparison with Classical Evolutionary Algorithms. In *International Journal of Computer Applications* (Vol. 69, pp. 975–8887).

Chen, M.-C., Hsiao, Y.-H., Himadeep Reddy, R., & Tiwari, M. K. (2016). The Self-Learning Particle Swarm Optimization approach for routing pickup and delivery of multiple products with

material handling in multiple cross-docks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *91*. https://doi.org/10.1016/J.TRE.2016.04.003

Clarke, G., & Wright, J. W. (1964). Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations Research*, *12*(4). https://doi.org/10.1287/opre.12.4.568

Cordeau, J.-F., & Laporte, G. (2001). A Tabu Search Algorithm For The Site Dependent Vehicle Routing Problem With Time Windows. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, *39*(3). https://doi.org/10.1080/03155986.2001.11732443

Cui, L., Wang, L., Deng, J., & Zhang, J. (2013). A New Improved Quantum Evolution Algorithm with Local Search Procedure for Capacitated Vehicle Routing Problem. *Mathematical Problems in Engineering*, *2013*. https://doi.org/10.1155/2013/159495

da Silveira, L. R., Tanscheit, R., & Vellasco, M. M. B. R. (2017). Quantum inspired evolutionary algorithm for ordering problems. *Expert Systems with Applications*, *67*. https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2016.08.067

Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. In *Source: Management Science* (Vol. 6, pp. 80–91).

Despaux, F., & Basterrech, S. (2014). A study of the Multi-Trip vehicle routing problem with time windows and heterogeneous fleet. *2014 14th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*. https://doi.org/10.1109/ISDA.2014.7066280

Desrochers, M., & Verhoog, T. W. (1991). A new heuristic for the fleet size and mix vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, *18*(3). https://doi.org/10.1016/0305-0548(91)90028-P

Eglese, R., Maden, W., & Slater, A. (2006). A Road Timetable to aid vehicle routing and scheduling. *Computers & Operations Research*, *33*(12). https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.03.029

Eilon, Samuel., Watson-Gandy, C. D. T. (Carl D. T., & Christofides, N. (1971). Distribution management: mathematical modelling and practical analysis. In *Published in **1971** in London by Griffin* (p. 240). Griffin.

Eksioglu, B., Vural, A. V., & Reisman, A. (2009). The vehicle routing problem: A taxonomic review. *Computers & Industrial Engineering*, *57*(4). https://doi.org/10.1016/j.cie.2009.05.009

Elhassania, M., Jaouad, B., & Ahmed, E. A. (2014). Solving the dynamic Vehicle Routing Problem using genetic algorithms. *2014 International Conference on Logistics Operations Management*. https://doi.org/10.1109/GOL.2014.6887419

Fang, Z., Tu, W., Li, Q., Shaw, S.-L., Chen, S., & Chen, B. Y. (2013). A Voronoi neighborhood-based search heuristic for distance/capacity constrained very large vehicle routing problems. *International Journal of Geographical Information Science*, *27*(4). https://doi.org/10.1080/13658816.2012.707319

Fanggeng Zhao, Dong Mei, Jiangsheng Sun, & Weimin Liu. (2009). A hybrid genetic algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *2009 Chinese Control and Decision Conference*. https://doi.org/10.1109/CCDC.2009.5192035

Gillett, B. E., & Miller, L. R. (1974). A Heuristic Algorithm for the Vehicle-Dispatch Problem. *Operations Research*, *22*(2). https://doi.org/10.1287/opre.22.2.340

Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & Operations Research*, *13*(5). https://doi.org/10.1016/0305-0548(86)90048-1

Goksal, F. P., Karaoglan, I., & Altiparmak, F. (2013). A hybrid discrete particle swarm optimization for vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Computers & Industrial Engineering*, *65*(1). https://doi.org/10.1016/J.CIE.2012.01.005

Goldberg, D. E., & Holland, J. H. (1988). Genetic Algorithms and Machine Learning. *Machine Learning*, *3*(2/3). https://doi.org/10.1023/A:1022602019183

Golden, B. L., Magnanti, T. L., & Nguyen, H. Q. (1975). *Implementing Vehicle Routing Algorithms*.

Groß, P.-O., Geisinger, M., Ehmke, J. F., & Mattfeld, D. C. (2016). Interval Travel Times for More Reliable Routing in City Logistics. *Transportation Research Procedia*, *12*. https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2016.02.062

Groß, P.-O., Ulmer, M. W., Ehmke, J. F., & Mattfeld, D. C. (2015). Exploiting Travel Time Information for Reliable Routing in City Logistics. *Transportation Research Procedia*, *10*. https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2015.09.019

Gupta, A., & Saini, S. (2017). An Enhanced Ant Colony Optimization Algorithm for Vehicle Routing Problem with Time Windows. *2017 Ninth International Conference on Advanced Computing (ICoAC)*. https://doi.org/10.1109/ICoAC.2017.8441175

Hanshar, F. T., & Ombuki-Berman, B. M. (2007). Dynamic vehicle routing using genetic algorithms. *Applied Intelligence*, *27*(1). https://doi.org/10.1007/s10489-006-0033-z

Hasle, G., & Kloster, O. (2007). Industrial Vehicle Routing. In *Geometric Modelling, Numerical Simulation, and Optimization*. https://doi.org/10.1007/978-3-540-68783-2_12

Ichoua, S., Gendreau, M., & Potvin, J.-Y. (2003). Vehicle dispatching with time-dependent travel times. *European Journal of Operational Research*, *144*(2). https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00147-9

Jabali, O., Leus, R., van Woensel, T., & de Kok, T. (2015). Self-imposed time windows in vehicle routing problems. *OR Spectrum*, *37*(2). https://doi.org/10.1007/s00291-013-0348-1

Jaber Jemai,M. Zekri, K. M. (2017). Multi-objective genetic algorithms for the green vehicle routing problem: A comparative study | J. Jemai | Request PDF. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*.

Kalayci, C. B., & Kaya, C. (2016). An ant colony system empowered variable neighborhood search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Expert Systems with Applications*, *66*. https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2016.09.017

Kao, Y., Chen, M.-H., & Huang, Y.-T. (2012). A Hybrid Algorithm Based on ACO and PSO for Capacitated Vehicle Routing Problems. *Mathematical Problems in Engineering*, *2012*. https://doi.org/10.1155/2012/726564

Kirkpatrick, S., Gelatt, ; C D, & Vecchi, ; M P. (1983). Optimization by Simulated Annealing. In *New Series* (Vol. 220, pp. 671–680).

Kritikos, M. N., & Ioannou, G. (2013). The heterogeneous fleet vehicle routing problem with overloads and time windows. *International Journal of Production Economics*, *144*(1). https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2013.01.020

Kuo, Y., & Wang, C.-C. (2012). A variable neighborhood search for the multi-depot vehicle routing problem with loading cost. *Expert Systems with Applications*, *39*(8). https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2012.01.024

Labadie, N., Prins, C., & Prodhon, C. (2016). *Metaheuristics for Vehicle Routing Problems*. https://doi.org/10.1002/9781119136767

Laporte, G. (1992). The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, *59*(3). https://doi.org/10.1016/0377-2217(92)90192-C

Larsen, A. (2019). General rights The dynamic vehicle routing problem. In *Downloaded from orbit.dtu.dk on*.

Lau, H. C. W., Chan, T. M., Tsui, W. T., & Pang, W. K. (2010). Application of Genetic Algorithms to Solve the Multidepot Vehicle Routing Problem. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, *7*(2). https://doi.org/10.1109/TASE.2009.2019265

Li, H., Wang, L., Hei, X., Li, W., & Jiang, Q. (2018). A decomposition-based chemical reaction optimization for multi-objective vehicle routing problem for simultaneous delivery and pickup with time windows. *Memetic Computing*, *10*(1). https://doi.org/10.1007/s12293-016-0222-1

Lin, S., & Kernighan, B. W. (1973). An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling-Salesman Problem. *Operations Research*, *21*(2). https://doi.org/10.1287/opre.21.2.498

Liu, R., Jiang, Z., & Geng, N. (2014). A hybrid genetic algorithm for the multi-depot open vehicle routing problem. *OR Spectrum*, *36*(2). https://doi.org/10.1007/s00291-012-0289-0

Lozano, M., & García-Martínez, C. (2010). Hybrid metaheuristics with evolutionary algorithms specializing in intensification and diversification: Overview and progress report. *Computers & Operations Research*, *37*(3). https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.02.010

Mancini, S. (2017). The Hybrid Vehicle Routing Problem. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *78*(78). https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.02.004

Matei, O., Pop, P. C., Sas, J. L., & Chira, C. (2015). An improved immigration memetic algorithm for solving the heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem. *Neurocomputing*, *150*. https://doi.org/10.1016/J.NEUCOM.2014.02.074

Melián-Batista, B., de Santiago, A., AngelBello, F., & Alvarez, A. (2014). A bi-objective vehicle routing problem with time windows: A real case in Tenerife. *Applied Soft Computing*, *17*. https://doi.org/10.1016/J.ASOC.2013.12.012

Messaoud, E., el Bouzekri El Idrissi, A., & Alaoui, A. E. (2018). The green dynamic vehicle routing problem in sustainable transport. *2018 4th International Conference on Logistics Operations Management (GOL)*. https://doi.org/10.1109/GOL.2018.8378096

Min, H. (1989). The multiple vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up points. *Transportation Research Part A: General*, *23*(5). https://doi.org/10.1016/0191-2607(89)90085-X

Mladenović, N., & Hansen, P. (1997). Variable neighborhood search. *Computers & Operations Research*, *24*(11). https://doi.org/10.1016/S0305-0548(97)00031-2

Moscato, P. *On Evolution, Search, Optimization, Genetic Algorithms and Martial Arts-Towards Memetic Algorithms On Evolution, Search, Optimization, Genetic Algorithms and Martial Arts Towards Memetic Algorithms*.

Nagata, Y., Bräysy, O., & Dullaert, W. (2010). A penalty-based edge assembly memetic algorithm for the vehicle routing problem with time windows. *Computers & Operations Research*, *37*(4). https://doi.org/10.1016/J.COR.2009.06.022

Ombuki, B., Ross, B. J., & Hanshar, F. (2006). Multi-Objective Genetic Algorithms for Vehicle Routing Problem with Time Windows. *Applied Intelligence*, *24*(1). https://doi.org/10.1007/s10489-006-6926-z

Ombuki-Berman, B., & Hanshar, F. T. (2009). Using Genetic Algorithms for Multi-depot Vehicle Routing. In *Bio-inspired Algorithms for the Vehicle Routing Problem*. https://doi.org/10.1007/978-3-540-85152-3_4

Opoku-Amankwaah, A., & Ombuki-Berman, B. (2017). An age layered population structure genetic algorithm for the multi-depot vehicle problem. *2017 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*. https://doi.org/10.1109/SSCI.2017.8285385

Osman, I. H. (1993). Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problem. *Annals of Operations Research*, *41*(4). https://doi.org/10.1007/BF02023004

Pan, F., Ye, C., Wang, K., & Cao, J. (2013). Research on the Vehicle Routing Problem with Time Windows Using Firefly Algorithm. *Journal of Computers*, *8*(9). https://doi.org/10.4304/jcp.8.9.2256-2261

Penna, P. H. V., Subramanian, A., & Ochi, L. S. (2013). An Iterated Local Search heuristic for the Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem. *Journal of Heuristics*, *19*(2). https://doi.org/10.1007/s10732-011-9186-y

Pessoa, A., Sadykov, R., & Uchoa, E. (2018). Enhanced Branch-Cut-and-Price algorithm for heterogeneous fleet vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, *270*(2). https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2018.04.009

Pillac, V., Gendreau, M., Guéret, C., & Medaglia, A. L. (2013). A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, *225*(1). https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2012.08.015

Pisinger, D., & Ropke, S. (2007). A general heuristic for vehicle routing problems. *Computers & Operations Research*, *34*(8). https://doi.org/10.1016/J.COR.2005.09.012

Pop, P. C., Matei, O., & Sitar, C. P. (2013). An improved hybrid algorithm for solving the generalized vehicle routing problem. *Neurocomputing*, *109*. https://doi.org/10.1016/J.NEUCOM.2012.03.032

Prins, C. (2004). A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, *31*(12). https://doi.org/10.1016/S0305-0548(03)00158-8

Qian, J., & Eglese, R. (2016). Fuel emissions optimization in vehicle routing problems with time-varying speeds. *European Journal of Operational Research*, *248*(3). https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2015.09.009

Repoussis, Panagiotis P., Tarantilis, C. D., & Ioannou, G. (2009). Arc-Guided Evolutionary Algorithm for the Vehicle Routing Problem With Time Windows. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, *13*(3). https://doi.org/10.1109/TEVC.2008.2011740

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). https://doi.org/10.1016/J.COR.2008.11.003

Saeheaw, T., & Charoenchai, N. (2016). *Comparison of Meta-heuristic Algorithms for Vehicle Routing Problem with Time Windows*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24584-3_108

Salari, M., Toth, P., & Tramontani, A. (2010). An ILP improvement procedure for the Open Vehicle Routing Problem. *Computers & Operations Research*, *37*(12). https://doi.org/10.1016/J.COR.2010.02.010

Savelsbergh, M. W. P. (1985). Local search in routing problems with time windows. *Annals of Operations Research*, *4*(1). https://doi.org/10.1007/BF02022044

Schyns, M. (2015). An ant colony system for responsive dynamic vehicle routing. *European Journal of Operational Research*, *245*(3). https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2015.04.009

Sohr, A., Brockfeld, E., Sauerländer, A., & Melde, E. (2016). Traffic Information System for Hanoi. *Procedia Engineering*, *142*. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.02.035

Solomon, M. M. (1984). *Vehicle routing and scheduling with time window constraints : models and algorithms*.

Steinhaus, M., Shirazi, A. N., & Sodhi, M. (2015). Modified Self Organizing Neural Network Algorithm for Solving the Vehicle Routing Problem. *2015 IEEE 18th International Conference on Computational Science and Engineering*. https://doi.org/10.1109/CSE.2015.56

Subramanian, A., Uchoa, E., & Ochi, L. S. (2013). A hybrid algorithm for a class of vehicle routing problems. *Computers & Operations Research*, *40*(10). https://doi.org/10.1016/J.COR.2013.01.013

Susilawati, S., Taylor, M. A. P., & Somenahalli, S. V. C. (2013). Distributions of travel time variability on urban roads. *Journal of Advanced Transportation*, *47*(8). https://doi.org/10.1002/atr.192

Tarantilis, C. D., Ioannou, G., Kiranoudis, C. T., & Prastacos, G. P. (2005). Solving the open vehicle routeing problem via a single parameter metaheuristic algorithm. *Journal of the Operational Research Society*, *56*(5). https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601848

Tarantilis, C. D., Kiranoudis, C. T., & Vassiliadis, V. S. (2004). A threshold accepting metaheuristic for the heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, *152*(1). https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00669-0

Tarantilis, C. D., Zachariadis, E. E., & Kiranoudis, C. T. (2009). A Hybrid Metaheuristic Algorithm for the Integrated Vehicle Routing and Three-Dimensional Container-Loading Problem. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *10*(2). https://doi.org/10.1109/TITS.2009.2020187

Ting, C.-J., & Chen, C.-H. (2008). Combination of Multiple Ant Colony System and Simulated Annealing for the Multidepot Vehicle-Routing Problem with Time Windows. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, *2089*(1). https://doi.org/10.3141/2089-11

Tiwari, A., & Chang, P.-C. (2015). A block recombination approach to solve green vehicle routing problem. *International Journal of Production Economics*, *164*. https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2014.11.003

Toth, P., & Tramontani, A. (2008). An Integer Linear Programming Local Search for Capacitated Vehicle Routing Problems. In *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*. https://doi.org/10.1007/978-0-387-77778-8_13

Varun Kumar SG & Dr. R. Panneerselvam. (2017). A Study of Crossover Operators for Genetic Algorithms to Solve VRP and its Variants and New Sinusoidal Motion Crossover Operator. *International Journal of Computational Intelligence Research* , *13*.

Vidal, T., Crainic, T. G., Gendreau, M., Lahrichi, N., & Rei, W. (2012). A Hybrid Genetic Algorithm for Multidepot and Periodic Vehicle Routing Problems. *Operations Research*, *60*(3). https://doi.org/10.1287/opre.1120.1048

Wang, C.-H., & Lu, J.-Z. (2010a). An effective evolutionary algorithm for the practical capacitated vehicle routing problems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *21*(4). https://doi.org/10.1007/s10845-008-0185-2

Wang, C.-H., & Lu, J.-Z. (2010b). An effective evolutionary algorithm for the practical capacitated vehicle routing problems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, *21*(4). https://doi.org/10.1007/s10845-008-0185-2

Wang, W., Wu, B., Zhao, Y., & Feng, D. (2006). *Particle Swarm Optimization for Open Vehicle Routing Problem*. https://doi.org/10.1007/978-3-540-37275-2_126

Wang, Y., Ma, X., Lao, Y., Yu, H., & Liu, Y. (2014). A two-stage heuristic method for vehicle routing problem with split deliveries and pickups. *Journal of Zhejiang University SCIENCE C*, *15*(3). https://doi.org/10.1631/jzus.C1300177

Wassan, N. A., & Nagy, G. (2014). Vehicle Routing Problem with Deliveries and Pickups: Modelling Issues and Meta-heuristics Solution Approaches. *International Journal of Transportation*, *2*(1). https://doi.org/10.14257/ijt.2014.2.1.06

Wassan, N. A., Wassan, A. H., & Nagy, G. (2008). A reactive tabu search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pickups and deliveries. *Journal of Combinatorial Optimization*, *15*(4). https://doi.org/10.1007/s10878-007-9090-4

Wei, L., Zhang, Z., & Lim, A. (2014). An Adaptive Variable Neighborhood Search for a Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem with Three-Dimensional Loading Constraints. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, *9*(4). https://doi.org/10.1109/MCI.2014.2350933

Wen, L., & Eglese, R. (2015). Minimum cost VRP with time-dependent speed data and congestion charge. *Computers & Operations Research*, *56*. https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.10.007

Xu, H. (2018a). Solving Dynamic Vehicle Routing Problem using Enhanced Genetic Algorithm with Penalty Factors. *International Journal of Performability Engineering*. https://doi.org/10.23940/ijpe.18.04.p3.611620

Xu, H. (2018b). Solving Dynamic Vehicle Routing Problem using Enhanced Genetic Algorithm with Penalty Factors. *International Journal of Performability Engineering*. https://doi.org/10.23940/ijpe.18.04.p3.611620

Yavary, A., & Sajedi, H. (2018). Solving Dynamic Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery by CLARITY Method. *2018 IEEE 22nd International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES)*. https://doi.org/10.1109/INES.2018.8523908

Yu, V. F., Jewpanya, P., & Redi, A. A. N. P. (2016). Open vehicle routing problem with cross-docking. *Computers & Industrial Engineering*, *94*. https://doi.org/10.1016/J.CIE.2016.01.018

Yu, V. F., Redi, A. A. N. P., Hidayat, Y. A., & Wibowo, O. J. (2017). A simulated annealing heuristic for the hybrid vehicle routing problem. *Applied Soft Computing*, *53*. https://doi.org/10.1016/J.ASOC.2016.12.027

Yu, V. F., Redi, A. A. N. P., Yang, C.-L., Ruskartina, E., & Santosa, B. (2017). Symbiotic organisms search and two solution representations for solving the capacitated vehicle routing problem. *Applied Soft Computing*, *52*. https://doi.org/10.1016/J.ASOC.2016.10.006

Żak, J., Redmer, A., & Sawicki, P. (2011). Multiple objective optimization of the fleet sizing problem for road freight transportation. *Journal of Advanced Transportation*, *45*(4). https://doi.org/10.1002/atr.111

Zhang, D., Cai, S., Ye, F., Si, Y.-W., & Nguyen, T. T. (2017). A hybrid algorithm for a vehicle routing problem with realistic constraints. *Information Sciences*, *394–395*. https://doi.org/10.1016/J.INS.2017.02.028

Zhang, T., Chaovalitwongse, W. A., & Zhang, Y. (2014). Integrated Ant Colony and Tabu Search approach for time dependent vehicle routing problems with simultaneous pickup and delivery. *Journal of Combinatorial Optimization*, *28*(1). https://doi.org/10.1007/s10878-014-9741-1

Παράρτημα: Άρθρο προς Δημοσίευση στο Περιοδικό "Annals of Operational Research"

The Vehicle Routing Problem for Urban Freight Transportation: Review and Classification

Grigorios D. Konstantakopoulos[1], Spiros Spiliopoulos[1], Sotiris P. Gayialis[1]

[1] National Technical University of Athens, School of Mechanical Engineering, Sector of Industrial Management and Operational Research, 15780, Zografos Campus, Athens, Greece

Abstract

The scheduling of deliveries and the routing of the vehicles are of great importance for supply chain operations. The distribution of goods in the urban environment is being affected by multiple factors such as traffic congestion, urbanization, and unforeseen events. Simultaneously, the minimization of costs is pursued by the operating companies, thus adding one more restriction to the routing problem. These factors, stemming from the demands of transportation companies, of their customers and the influence of the external environment, led to the creation of different variants of the Vehicle Routing Problem, formulated and intensively studied by researchers. Moreover, the management of logistics and supply chain operations is being enhanced by the use of optimization methods and algorithms, integrated into information systems, enabling the optimization of the solution in real-life distribution and transportation problems. This paper presents a methodology for classifying the main variants of the Vehicle Routing Problem for freight transportation in the urban environment. The classification consists of a review of 170 papers of VRP, shorted to 106 relevant papers on the subject of urban freight transportation, aiming to the identification of the trends of the VRP variants and the applied methods (algorithms) for their solution. The correlation between the VRP variants and the methods proposed for solving these variants is also identified. In addition, the paper presents the qualitative results of the literature review and discusses scientific publications considered significant for the research community or develop/ propose algorithms that are integrated into information systems supporting freight transportation decisions in urban areas.

KEYWORDS: Vehicle Routing Problem, VRP, Vehicle Routing and Scheduling, Urban Freight Transportation, City Logistics, Supply Chain Management, Literature Review, Bibliography, VRP Algorithms.

1. INTRODUCTION

Researchers have studied routing of vehicles and scheduling of deliveries since 1959 when Dantzig and Ramser (1959) introduced the Truck Dispatching Problem. It is considered the paradigmatic case of the Vehicle Routing Problem (VRP) and refers to the distribution of goods from a central depot to geographically scattered customers. Since then, several new factors influencing the problem have been introduced, such as the variance of the capacities of the vehicles, time-related restrictions such as time windows set by customers and multiple depots and other. These, as well as other characteristics and requirements, are transformed either to constrains framing the problem or to the variables defining the problem. The objective in all cases, however, is the minimization of the total transportation costs.

In the last few years, both researchers and logistics companies have been studying and dealing with last-mile distribution. It is the last part of the supply chain operations and is responsible for the delivery of products to end-customers and retailers. The growth of e-commerce, the increase in online purchases, and urbanization are the main reasons for the increasing interest in this problem. Last-mile deliveries are inextricably linked with the urban environment since the number of end-customers and retailers is constantly increasing in cities. The fact that last-mile distribution constitutes an important part of the total transportation costs makes the problem significant for transportation companies and must be optimally handled. If in all these limitations, traffic congestion, unforeseen events, and limited parking space are added, the problem becomes even harder to solve.

Therefore, solving optimally the VRP is necessary, as it offers reduced transportation costs, improved efficiency, and more reliable deliveries.

The advances in technology and optimization methods can enhance the effort of logistics companies to face the difficulties in routing and scheduling. However, it is important for companies to adequately recognize the many variants and parameters that influence their daily operations. On this premise, the paper's main objective is first to define the most common VRP variants in city logistics and then to present the optimization methods that are used for solving the problem of vehicle routing and scheduling of deliveries **(VRPSD)**.

Concerning the VRP variants, there are those who consider the capacity of the vehicles as a factor of the problem. These variants can be distinguished into 1) the Capacitated VRP **(CVRP)** in which all vehicles are identical and have the same capacity and 2) the heterogeneous fleet of vehicles VRP **(HFVRP)**, in which multiple types of vehicles exist, each of which is determined by a different capacity, fixed and variable costs (Prins 2009). It is common for transportation companies, in their effort to serve customers cost-effectively, to use different types of vehicles. Small size vehicles mainly serve customers in city centers (last-mile distribution), while bigger size vehicles serve mainly customers and retailers separated by larger distances and requiring larger volumes of orders. This need (for last mile distribution) has arisen due to the constant increase in e-commerce and urbanization and due to the topology of city centers (restricted areas and narrow streets). In actual practice, few companies have a fleet of identical vehicles, but this does not prevent CVRP from being the most common variant of the problem. It simplifies the problem for researchers, especially when multiple variables are considered. In addition, in cases where the vehicles visit only a few customers during the trip, they have the ability to execute more than one trip during the working day, leading to multi-trip VRP **(MTVRP)** (Brandão and Mercer 1998).

Furthermore, the requirements of the customers determine to a great extent, the setting of the VRP parameters. One of the most common variants of the problem is the VRP with time windows **(VRPTW)**, where each customer determines a time interval in which the order must be delivered. If the vehicle arrives before the start of the time window, it must wait until it opens, while it cannot arrive after the end of the time window (César and Oliveira 2010). In cases such as this, the time windows are characterized as hard. Another case is for the time windows to be soft, meaning that the vehicle may arrive after the end of the time window, but at an additional cost. This variant is significant in e-commerce, as most end-customers determine a time window for the goods to be delivered.

Moreover, retailers who receive multiple deliveries from different transportation companies need to set time windows for better planning their operations. It is important to highlight that logistics operations do not end at the phase of the delivery of the goods, as the phenomenon of customers returning products is common in practice. Both the VRP with Backhauls **(VRPB)** and the VRP with simultaneous pickups and deliveries **(VRPSPD**) study the case of deliveries and pickups during the execution of the routes. In the case of VRPSPD, the goods start from the central depot and delivered to customers, while simultaneously pickups are loaded to vehicles, before returning to the depot when the execution of the route ends (Montané, Fermín, Alfredo and Galvão 2006). In every phase, both the delivery and the pickup loads must be taken into account, as the total capacity of the vehicle cannot be exceeded. On the other hand, VRPB which also involves pickups and deliveries has an extra limitation which however simplifies the problem, and that is that all pickups are to be made after the deliveries in every route (Goetschalckx and Jacobs - Blecha 1989).

Environmental pollution, especially in urban areas, has forced governments to set environmental regulations, in their effort to reduce noise, traffic, CO_2 emissions so as to improve the quality of life. The fact that a big part of CO_2 emissions comes from **road freight transportation** could not leave transportation companies unaffected. Therefore, along with minimizing transportation costs, companies need to minimize CO_2 emissions, a problem that is identified in the literature as the Green VRP **(GVRP)**. Additionally, hybrid vehicles that can operate both electrically and with traditional fuel, contribute to the minimization of pollution and CO_2 emissions, which are

the main reasons companies have turned into this direction (Mancini 2017). This version of the problem is known as Hybrid VRP **(HVRP)** and has lately attracted **companies' and researchers'** attention.

The accuracy of deliveries depends on a great extent ~~in~~ on the travel time between delivery points, pickup points, and the depots. This problem has been tackled via the use of a function, in which the departure time is the independent variable, and is known as the Time-Dependent VRP **(TDVRP)** (Andres Figliozzi 2012). This attribute is very important for the better prediction of traffic congestion and of travel time between nodes, as well as for checking the feasibility of routes. The initial routing and scheduling, where delivery and pickup orders are known before the start of the routes, can become much more reliable through this variant. However, orders and unforeseen events may appear dynamically during the execution of the route. In this case, changes in the scheduling of deliveries are made to satisfy new customer orders and to avoid delays caused by unforeseen events. The dynamic version of the problem (Dynamic VRP – **DVRP**) must be reinforced by real-time communication between the vehicles and the planners of the transportation companies, in order to face each case effectively (Pillac et al. 2013).

Finally, a variable that is highly dependent on the size of transportation and logistics companies is the number of distribution centers they own. In many cases, customers are assigned in the nearest warehouse, which contains the goods each customer needs (Renaud et al. 1996). Therefore, the multi-depot VRP **(MDVRP)** can be treated as multiple single depot problems, which is a simplification of the initial problem. With this assumption, the problem can be addressed effectively, especially in the case of e-commerce, where new customers appear every day, leading to non-fixed routes. Simultaneously, Third Party Logistics (3PL) companies, in the search for reduced fixed costs, cooperate with transport companies that have a fleet of vehicles at their disposal. Partners' vehicles do not necessarily return to the warehouse after the completion of the route. This case is recognized as the open VRP **(OVRP)** (Zachariadis and Kiranoudis 2010).

In **Figure 1**, the correlation between the characteristics of city logistics and e-commerce on the one hand and the VRP variants on the other is presented. Clearly defining the parameters of the problem (VRP variants) is significant for the research, as these are then incorporated in the research term used to refer to the specific problem of urban freight transportation.

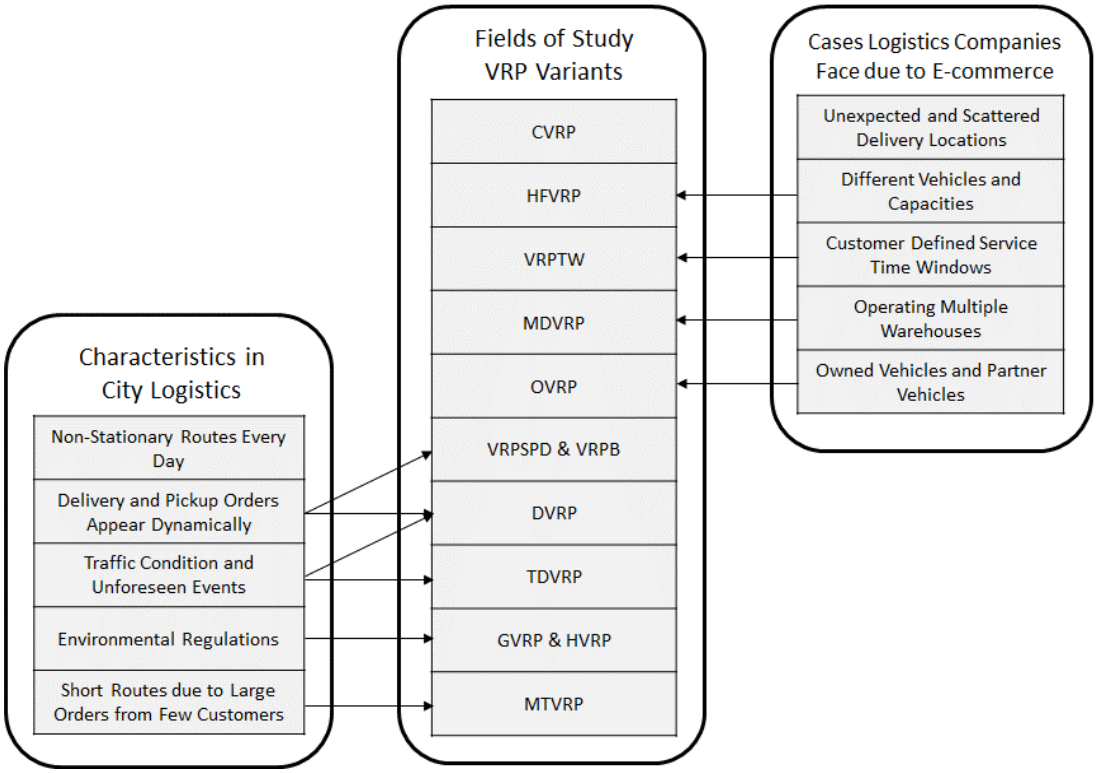


Figure 1 Correlation between VRP Variants and City Logistics and E-commerce

The existence of multiple variables and constraints forces logistics companies to find ways to optimize their operations and minimize their costs. Information Systems can strengthen this approach through the use of optimization methods and algorithms. Multiple algorithms have been developed and proposed to address the VRP. Initially, exact algorithms were proposed due to the high quality of the solutions produced, but in the case of large-scale problems (more than 100 customers), the computational time needed for an exact algorithm to find the optimum solution increases so much that it ends up being impractical. Consequently, heuristic and meta-heuristic algorithms were developed, as both offer a better balance between solution quality and computational time. The main goal is to recognize the trends that characterize the VRP variants and the algorithms offered for their solution, as well as the correlation between them.

The remaining part of this paper is organized as follows: **Section 2** presents the papers which are related to the VRP for urban freight transportation and solved by algorithms and methods through a specific research process. **Section 3** classifies those algorithms, while in **Section 4** the literature review quantitative results and the correlation between applied methods and VRP variants are presented. In **Section 5**, some of the most significant publications found in the review process are discussed. Finally, conclusions are drawn in **Section 6**.

2. LITERATURE REVIEW RESEARCH APPROACH

The VRP is a well-studied field as its variants deal with real-life cases and problems that most distribution and logistics companies face. Researchers have formed multiple variants in their effort to cover all cases and improve the routing of vehicles and scheduling of deliveries. The external environment in which logistics companies work, their size, their customers and their partners determine to a great extent the problem and the variants which must be considered. In **Section 1**, the VRP variants which are related both to the urban freight transport and e-commerce are described. However, apart from the VRP variants, emphasis must be given in the algorithms and

methods which have been developed and proposed for solving those problems. Distribution companies that consider multiple VRP variants simultaneously cannot effectively face all variants without the contribution of algorithms and Information Systems. The integration of the algorithm into the system follows it's testing and evaluation process, which is carried out through benchmark instances presented in the literature.

The need for a review that will correlate the VRP variants with the algorithms proposed for their solution emerged from the requirements of distribution in city logistics and e-commerce. Therefore, a literature review process adopted from the research of (Braekers et al. (2016), Eksioglu et al. (2009) and Gayialis et al. (2019) is followed. The research protocol is well defined as it aims at an efficient and well-recorded review which includes all the necessary VRP variants. The main goal of the present research is to identify the trends of VRP variants and the applied methods offered to tackle them, as well as their correlation. Additionally, papers which either proposes algorithms that are integrated into a software system, or papers that are considered significant and pioneer in the research community are presented. The papers having the most citations were considered as significant and they were further discussed in this review.

Scopus database was used for an advanced search, as it covers a wide range of peer-reviewed academic publications. Only articles published in English are considered. Initially, only publications containing at least one of the defined VRP variants, “algorithms” and “benchmark instances”, in their title, abstract or keywords were selected. When the focus is on the applied methods, the term “benchmark instances” is selected, as it is assumed that the proposed and developed algorithms are more reliable when tested through these instances. The fact that the VRP has been intensively studied, while this research concentrates on urban freight transportation, lead to the decision not to include terms such as "mail", "beverages", "waste", "concrete", "milk", "postal", "healthcare", "truck and trailer", "cross-dock", "location routing", "UAV", "transportation of people", "flying robots", "bus" and "inventory routing". In addition this research is limited to the Subject Ares of “Computer Science”, “Engineering”, “Mathematics”, “Decision Sciences” and “Business, Management, and Accounting”. The research of the literature is also restricted to specific journals which are considered top in the specific subject areas. The exact search term applied to the Scopus database is presented in **Table 1**.

Table 1 Search Term Applied to Scopus Database

Literature Review Search Term
TITLE-ABS-KEY ((("time windows" OR "VRPTW") OR ("Multitrip" OR "multi-trip" OR "MTVRP") OR (("hybrid" AND "vrp") OR ("green" AND "VRP")) OR ("time-dependent VRP" OR "time dependent VRP" OR "TDVRP") OR ("Capacitated VRP" OR "CVRP") OR ("Dynamic VRP" OR "DVRP") OR ("simultaneous pickups and deliveries" OR "VRPSPD" OR "backhauls" OR "VRPB") OR ("Heterogeneous Fleet" OR "Heterogeneous" OR "HFVRP") OR ("multi depot" OR "multi-depot" OR "MDVRP") OR ("open vrp" OR "OVRP")) AND ("Vehicle routing" AND ("benchmark instances" OR "benchmark") AND ("Algorithm")) AND NOT ("mail " OR "beverages " OR "waste " OR "concrete " OR "milk " OR "postal " OR "healthcare " OR "truck and trailer " OR "cold " OR "care" OR "location-routing" OR "location routing" OR "UAV" OR "transportation of people" OR "flying robots" OR "bus" OR "pollution-routing" OR "polution routing" OR "Asset localization" OR "inventory routing" OR "blood" OR "bike" OR "bicycle")) AND (LIMIT-TO (SRCTYPE , "j")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar")) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "COMP") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "MATH") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "DECI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "BUSI")) AND (LIMIT-TO (PUBYEAR , 2019) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2018) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2017) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2016) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2015) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2014) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2013) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2012) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2011) OR LIMIT-TO (PUBYEAR , 2010)) AND (LIMIT-TO (EXACTSRCTITLE , "Computers And Operations Research") OR LIMIT-TO (EXACTSRCTITLE , "European Journal Of Operational Research") OR LIMIT-TO (EXACTSRCTITLE , "Expert Systems With Applications") OR LIMIT-TO (EXACTSRCTITLE , "Applied Soft Computing Journal") OR LIMIT-TO (EXACTSRCTITLE , "Computers And Industrial Engineering") OR LIMIT-TO (EXACTSRCTITLE , "Information Sciences") OR LIMIT-TO (EXACTSRCTITLE , "International Transactions In Operational Research") OR LIMIT-TO (EXACTSRCTITLE , "Mathematical Problems In Engineering") OR LIMIT-TO (EXACTSRCTITLE , "Soft Computing") OR LIMIT-TO (EXACTSRCTITLE , "Annals Of Operations Research") OR LIMIT-TO (EXACTSRCTITLE , "Journal Of Heuristics") OR LIMIT-TO (EXACTSRCTITLE , "Journal Of The Operational Research Society") OR LIMIT-TO (EXACTSRCTITLE , "Transportation Research Part C Emerging Technologies") OR LIMIT-TO (EXACTSRCTITLE , "Transportation Science") OR LIMIT-TO (EXACTSRCTITLE , "Applied Mathematical Modelling") OR LIMIT-TO (EXACTSRCTITLE , "Engineering Optimization") OR

LIMIT-TO (EXACTSRCTITLE , "Euro Journal On Transportation And Logistics") OR LIMIT-TO (EXACTSRCTITLE , "Operations Research") OR LIMIT-TO (EXACTSRCTITLE , "Transportation Research Part B Methodological") OR LIMIT-TO (EXACTSRCTITLE , "Transportation Research Part E Logistics And Transportation Review") OR LIMIT-TO (EXACTSRCTITLE , "Applied Mathematics And Information Sciences") OR LIMIT-TO (EXACTSRCTITLE , "Journal Of Advanced Transportation"))

This specific research strategy resulted in 170 publications, each one of which was studied thoroughly in order to determine its relevance. The fact that the VRP is well studied in the literature has led to its combination with other research topics. Therefore, it was decided not to include articles which contain 2D (two-dimension) and 3D (three-dimensional) loading constraints, multi-echelon routing, the periodic and the split delivery VRP, as well as cross-docking. Following the described process and as seen in the next section, 106 articles resulted and then categorized according to the classification of the proposed algorithms. In this way, an established statistical analysis is presented.

3. CLASSIFICATION OF ALGORITHMS

The proposed research concerns the study of the methods and algorithms which optimally tackle a set of VRP variants. Their characteristics and constraints of these variants meet the requirements of urban freight transportation, as well as being the most common cases logistic companies encounter in distribution, due to the rise of e-commerce. Therefore, the taxonomy focuses on two main characteristics, the VRP variants, and the applied methods. The review of the literature deals with the methods and algorithms addressing the selected variants of the VRP and is carried out to determine the research community's trends in both cases.

More specifically, the classification of the algorithms based on the research of (Labadie et al. 2016) and (Lin et al. 2014) is shown in **Figure 2**. Exact algorithms are mainly Lagrange Relaxation methods and Column Generation but are not further analyzed due to the limited research interest. On the other hand, heuristic algorithms are separated into three main categories, Construction, Two-Phase, and Local Improvement heuristics, each one of which contains specific algorithms, as shown in **Figure 2**.

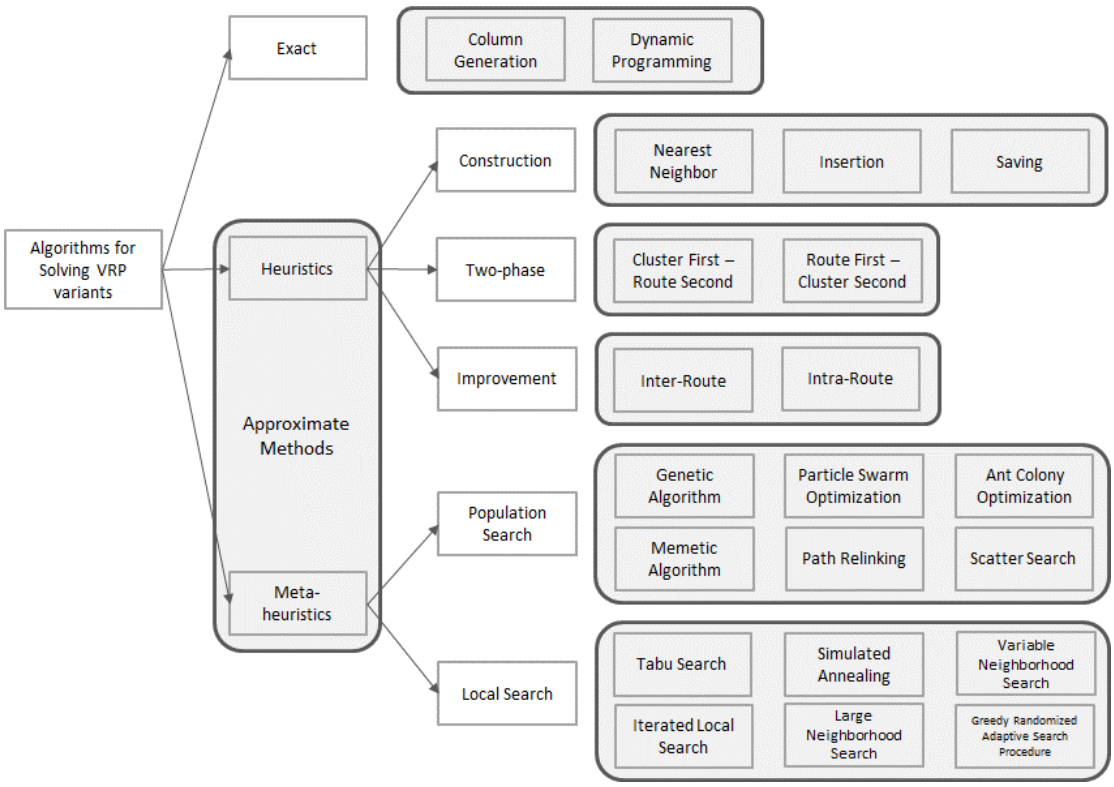


Figure 2 The Main Algorithms for VRP and Their Relation

Emphasis is given mainly to Meta-heuristic algorithms, which are more advanced procedures, and contain Population Search, Local Search, and Learning Mechanisms. Population-based meta-heuristics aim at generating a new solution from a set of solutions, by combining and pairing existing ones or by making them cooperate through a learning process. The most common procedures of this category are Genetic **(GA)** and Evolutionary Algorithms **(EA)**, Memetic Algorithms **(MA)**, Scatter Search **(SS)**, Path Relinking **(PR)**, Ant Colony Optimization **(ACO)** and Particle Swarm Optimization **(PSO)**. On the other hand, Local Search meta-heuristics aim at exploring the solution space by moving the current solution to another promising one in the neighborhood. Tabu Search **(TS)**, Simulated Annealing **(SA)**, Variable Neighborhood Search **(VNS)**, Large Neighborhood Search **(LNS)**, Greedy Randomized Adaptive Search Procedure **(GRASP)**, Guided Local Search **(GLS)** and Iterated Local Search **(ILS)** are meta-heuristics of this specific category.

Finally, researchers in their effort to optimally solve the VRP, combine algorithms to exploit the advantages of each procedure. Especially in the last few years, hybrid algorithms that combine meta-heuristics are developed in order to achieve better results. This is one attribute that is studied in the literature review to determine which methods are used in solving multiple VRP variants.

4. RESEARCH RESULTS

In this section, the numerical results that have emerged from the categorization of the relevant papers are presented. The categorization of the articles has been separated into two strands, the VRP variants (as specified in the introduction) and the applied methods for solving these variants. The present research focuses on published articles from 2010 until the middle of 2019, in order to identify the trends of the last decade. As a first step, the number of papers published over the years is presented in **Figure 3**. There is a constant interest for the VRP with some small fluctuations taking place, especially in 2018.

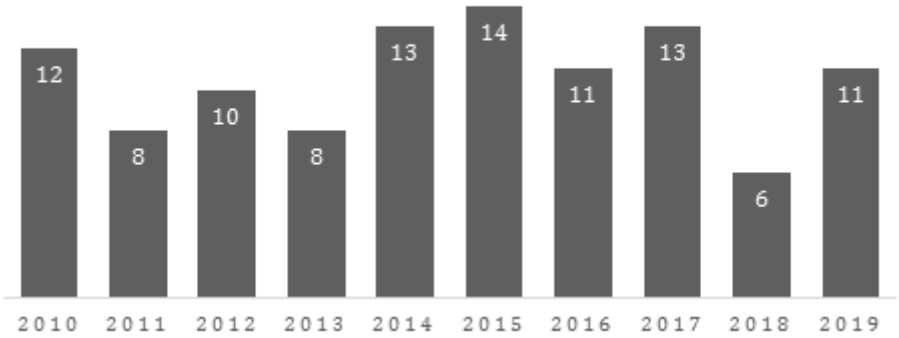


Figure 3 Number of Articles over the Last Decade

In **Table 2**, the Journals that were selected during the research approach are presented, as well as the number of publications from each journal. More specifically, the results indicate that most publications come from the journals "Computers & Operations Research", "European Journal of Operational Research", "Expert Systems with Applications", "Applied Soft Computing Journal" and "Computers & Industrial Engineering".

Table 2 Number of Articles per Journal

Journal	**Number of Articles**
Computers and Operations Research	20
European Journal of Operational Research	17
Expert Systems with Applications	12
Applied Soft Computing Journal	10
Computers and Industrial Engineering	10
Information Sciences	7
Soft Computing	4
Journal of the Operational Research Society	3
Transportation Research Part C: Emerging Technologies	3
Transportation Science	3
Mathematical Problems in Engineering	3
International Transactions in Operational Research	2
Journal of Heuristics	2
Applied Mathematical Modelling	2
Engineering Optimization	1

EURO Journal on Transportation and Logistics	1
Operations Research	1
Transportation Research Part B: Methodological	1
Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	1
Applied Mathematics and Information Sciences	1
Journal of Advanced Transportation	1
Annals of Operations Research	1

Table 3 presents the number of publications that deal with each one of the selected VRP variants. Most papers, in their effort to address real-life problems, examine more than one variant of the problem. This is the reason why the cumulative relative percentage is more than 100%. The most studied variant (with a significant difference from the others) appears to be the Capacitated VRP, which is the simplest variant and so can be easily combined with the others. Papers that do not consider the CVRP, deal instead with the heterogeneous fleet of vehicles (HFVRP). Variants that make use of time windows are significantly studied as they adequately reflect most real-life cases, and thus appear in almost half of the problems (46.36%). The Green and Hybrid VRP seem to attract the attention of researchers during the last 5 years, due to the current need for minimization of CO2 emissions and fuel consumption. Lastly, the TDVRP and the MTVRP seem to receive the least attention from the research community as both have less than 3.64% relative percentage over the years.

Table 3 VRP Variants over Years

Variants	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	Total	Relative Percentage (%)
CVRP	11	7	9	7	9	12	10	12	5	8	90	84.91%
VRPTW	6	3	5	3	6	7	6	5	2	8	51	48.11%
VRPSPD & VRPB	2	1	3	3	2	7	1		1	3	23	21.70%
HFVRP	1	1	1	1	4	2	1	1	1	4	17	16.04%
MDVRP		1	2	2	1	3				1	10	9.43%
GVRP & HVRP					1	1	3	3	1	4	13	12.26%
OVRP	2	1		1					1	1	6	5.66%
DVRP			1		1	1	1	1			5	4.72%
MTVRP	1	1					1			1	4	3.77%
TDVRP		1	1					1			3	2.83%

In **Table 4**, the numbers of papers that propose or develop each one of the algorithms of the classification shown in **Section 3**, are also presented. Construction algorithms appear more frequently as they are used both for solving the problem and for the creation of the initial solution used by meta-heuristic algorithms. Local Improvement methods are also widely used, due to their easy implementation and their ability to improve

solutions fast. GA's, SA, TS, ACO, PSO, ILS, and VNS are among the most studied methods. These methods have the ability to offer good quality solutions or even optimum results when tested in benchmark instances. Simultaneously, their computational speed improves on a par with advances in technology. These two factors guarantee that these methods will remain among the most studied methods for future research.

Table 4 Applied Method per Year

		Applied Method	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
		Exact	2	1	1	2	1	1	1	2	2	1
Heuristics		Construction	6	4	4		2	5	3	1	1	5
		Two Phase							1			
		Local Improvements	3		4	2		5	2	1	2	2
Meta-heuristics	Local Search	Simulated Annealing (SA)				1	1	3	1	2		
		Tabu Search	3	1			3	1	1	3		1
		Variable Neighborhood Search (VNS)	2		1	1	2	2	2	2	1	3
		Iterated Local Search (ILS)	2		1	2	2	2			1	2
		Large Neighborhood Search (LNS)		1	1			2	4		2	2
		Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP)				1						
		Guided Local Search (GLS)	1									
		Other Local Search Algorithms		1	1					2		
	Population Search	Genetic Algorithms (GA)	1		2	2	2	1		2		2
		Particle Swarm Optimization (PSO)		1	1	1		1		1		1
		Memetic Algorithm (MA)	1					1	1			
		Scatter Search (SS)					1					
		Path Relinking (PR)				1						
		Ant Colony Optimization (ACO)	1	2	1		2	1	2			1
		Other Swarm Intelligence Algorithms								2		
		Other Evolutionary Algorithms			1	1	1	2		1		
		Hybrid	2		3	4	3	6	5	2	1	4

As already mentioned above, the VRP variants are rarely studied individually. In most cases, researchers tackle a combination of these variants simultaneously to better approximate real case instances. **Table 5** analytically presents how the variants of the VRP are combined in the literature. The CVRP, the HFVRP, and the VRPTW are some of the most examined variants that are combined with almost all the other variants. The only exception is the combination of the CVRP with HFVRP, as these two variants present different and mutually exclusive initial parameters relating to the capacity of the vehicles used. The CVRP is combined most with other variants due to the assumption that all vehicles are identical, which simplifies the problem significantly. Therefore, the emphasis is given to the rest of the variants where the VRPTW is mainly combined with the HFVRP, the VRPSPD, the GVRP, and the MDVRP.

Table 5 Combination of VRP Variants

	CVRP	VRPTW	TDVRP	DVRP	MTVRP	HFVRP	OVRP	GVRP & HVRP	VRPSPD & VRPB	MDVRP
CVRP	-	41	2	4	3	1	5	8	21	8
VRPTW		-	3	2	3	10	2	7	8	3
TDVRP			-			1		1		
DVRP				-		1				
MTVRP					-	1	1		1	1

HFVRP		-	1	6	2	2
OVRP			-		2	2
GVRP & HVRP				-	1	
VRPSPD & VRPB					-	5
MDVRP						-

In **Table 6**, the general methods for solving the VRP are presented. It should be pointed out that hybrid algorithms were included as a separate category, including methods that were explicitly stated as a “hybrid” in the studied papers. Metaheuristic algorithms dominate the field of proposed methods with 105 number of publications, followed by Classical Heuristics and Hybrid methods. Exact methods are developed less often due to their computational complexity and their limitation of applying successfully only to small-scale problems. It is an expected outcome that heuristic and metaheuristic methods are used more often than the rest, mainly because the VRP is an NP-Hard Problem. It should be noted that the sum of the column "Number of Publications" does not equal to 106, because many of the examined papers either propose hybrid methods (26 articles) which by definition include more than one method or combine multiple methods.

Table 6 Applied Methods

Applied Method	Number of Publications (Total = 106)
Meta-Heuristics	105
Heuristics	53
Hybrid	30
Exact	14
Simulation	2

Table 6 clearly shows the domination of metaheuristic algorithms compared to other classes of methods. Moreover, **Table 7** focuses only on the metaheuristics found in the reviewed papers. It is marked that the Local Search metaheuristics are the more studied group (64 instances). The first metaheuristics proposed for the VRP, clearly surpassing other methods in solution quality, were the Simulated Annealing and Tabu Search, which are still studied by researchers. The most commonly applied method is the Variable Neighborhood Search, which is followed by the Iterated Local Search and the Large Neighborhood Search algorithms. In the category of the population-based metaheuristics, Evolutionary algorithms seem to be the most established methodology. Genetic and Memetic algorithms belong to this larger class of metaheuristics and are based on the idea of natural selection, mutation, and crossover. Ant Colony and Particle Swarm Optimization are also widely studied by researchers.

Table 7 Overview of Applied Metaheuristic Methods

Metaheuristics	Number of Instances
Local Search	64
Simulated Annealing (SA)	8
Tabu Search (TS)	13
Variable Neighborhood Search (VNS)	16
Iterated Local Search (ILS)	12
Large Neighborhood Search (LNS)	12
Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP)	1
Guided Local Search (GLS)	1
Other Local Search Algorithms (Other LS)	4

Population-Based	41
Genetic Algorithms (GA)	12
Particle Swarm Optimization (PSO)	6
Memetic Algorithm (MA)	3
Scatter Search (SS)	1
Path Relinking (PR)	1
Ant Colony Optimization (ACO)	10
Other Evolutionary Algorithms (Other EA)	2
Other Swarm Intelligence Algorithms (Other SIA)	6

In **Table 8**, the correlation between VRP variants and their solution methods is being presented. A large number of papers suggest hybrid resolving methods for almost all the variants of VRP, indicating a trend in the research community towards these methods. Construction and local improvement heuristics are involved in the solution of all VRP variants.

It is to be observed that genetic algorithms are highly applicable and can solve any of the variants of the VRP problem. Although metaheuristics have dominated the other methods, local search heuristics remain very popular and are used mainly as components of more sophisticated hybrid systems. Finally, a small part of the reviewed articles employs an exact method of problem-solving exclusively.

Table 8 Correlation Between VRP Variants and Algorithms

Variant	Exact	Heuristics			Local Search metaheuristics								Population-Based Metaheuristics								Hybrid
		Construction	Two-phase	Improvement	SA	TS	VNS	ILS	LNS	GRASP	GLS	other LS	GA	PSO	MA	SS	PR	ACO	Other SIA	Other EA	
CVRP	11	27	1	19	8	10	15	8	9	1	1	4	9	6	3	1	1	9	2	6	25
VRPTW	7	15		10	5	10	5	2	7				11	1	3	1		3	1	4	16
TDVRP		2		1									1					1			
DVRP		2		1					1					1				3			
MTVRP	2	1		1			1	1	1												1
HFVRP	3	5		2		3	1	4	4				3					1			5
OVRP	2	2		2		1	1	3			1			1							2
GVRP &HVRP	3	3		2	1	2	1		5				1								4
VRPSPD & VRPB	2	10	1	8	3	2	6	4	1			2	2	2				2			6
MDVRP	2	3		3			2	5					2	1				1			5

5. MOST SIGNIFICANT ALGORITHMS FOR EACH VRP VARIANT

In this section, the most significant algorithms proposed by researchers for each one of the selected VRP variants are presented. Additionally, this section analyzes articles which apply methods for the solution of real-life cases, as well as, articles which combine multiple variants that could be integrated into systems for the optimization of urban freight distribution problems. Combining multiple constraint and objectives for tackling real-life distribution problems have led to the emergence of the Rich VRP (RVRP) as discussed below.

5.1 Capacitated VRP

CVRP is maybe the simplest variant of the VRP, as the only considered constraint is the capacity of the vehicles which is assumed to be identical in terms of actual capacity space and costs. In most cases, the CVRP is combined with other variants (the most frequent being the CVRPTW) which add more constraints to the setting of the problem. When relaxing these constraints, the algorithm can be applied in the CVRP. Therefore, only papers which deal exclusively with the CVRP are presented. A hybrid algorithm (the SIA) based on two swarm intelligence approaches (the ACO and the PSO) is proposed by Kao et al. (2012). In this algorithm, the advantages of each method are exploited simultaneously. More specifically, ACO contributes in clustering customers and building routes, while PSO can memorize global best solutions, and so guide the search. Another article which proposes the SIA algorithm, is that of Zhou et al. (2013), where a hybrid bat algorithm with path relinking is developed.

5.2 VRP with Time Windows

The VRPTW is one of the most widely studied topics in vehicle routing, and therefore, multiple algorithms have been proposed for its solution. Ghoseiri and Ghannadpour (2010) treat the problem as multi-objective, where both the total traveled distance, and the number of vehicles must be minimized. They proposed a Genetic Algorithm which applies the Pareto ranking process in order to find the non-dominated solutions. Through this approach, possible biased solutions, either relating to the total number of vehicles or to the total traveled distance, are prevented.

Lei et al. (2011), in their research work, propose an adaptive large neighborhood heuristic. Initially, a construction heuristic is applied for providing a good solution. At each iteration, several heuristics remove customers and destroy the current solution, before insertion heuristics repair the damaged solutions. The selection of the removal and insertion heuristic in each phase is made probabilistically, while their combination offers a wide exploration of the solution space. Vidal et al. (2013) addressed a wide range of large scale VRPTW, with route-duration constraints and additional attributes involving requirements for customer assignments to particular vehicles types, depots or planning periods. For solving this large class of VRPTW they proposed a new hybrid genetic search with advanced diversity control.

Taha Yassen et al. (2015) proposed a harmony search (HS) metaheuristic with a local search (LS) algorithm with a proper balance between HS exploration and LS exploitation for solving the VRPTW. Nalepa et al. (2016) dealt with the unclear tuning of the numerous parameters, one of the main drawbacks of memetic algorithms for the VRPTW, and proposed an adaptive memetic algorithm. In this proposal, the parameters of the algorithm, such as the selection scheme, the population size and the number of child solutions generated for each pair of parents, are adjusted dynamically during the search. Hu et al. (2018) examined a more realistic variation of VRPTW that involves demand and travel time uncertainty. To tackle large instances, they designed a two-stage method based on a modified variable neighborhood search heuristic. In the first phase, the total number of vehicles is minimized while the second phase minimizes the total traveled distance.

5.3 VRP with Simultaneous Pickups & Deliveries and VRP with Backhauls

Transportation companies are not responsible only for delivering goods to customers, but also for picking goods at the same time. This need arises in reverse logistics and is tackled by multiple researchers. Çatay (2010) proposes an ACO algorithm which uses the nearest-neighbor heuristic (NNH) for the construction of the initial solution, and subsequently, a new savings-based visibility function is applied. This method considers the savings of serving customers i and j on the same route, instead of serving them separately.

Goksal et al. (2013) develop a hybrid algorithm based on PSO and Variable Neighborhood Descent (VND) for solving the VRPSPD. The initial solution set is formed both with random solutions and with solutions constructed by the NNH. The PSO algorithm uses VND algorithms as a local search procedure for improving these solutions.

Wang et al. (2015) combine the VRPSPD with the VRPTW and propose a parallel SA method for solving this problem.

5.4 Heterogenous Fleet VRP

The HVRP is a generalization of the classical capacitated VRP by assuming that the fleet of vehicles is composed of different types of vehicles each characterized by different capacities and costs. HVRP is rarely examined standalone and it is usually combined with other variants. Subramanian et al. (2012) proposed a hybrid algorithm consisting of an iterated local search based heuristic and set partitioning (SP) formulation for solving the HVRP. The SP model is solved utilizing a Mixed Integer Programming solver that interactively calls the ILS heuristic during its execution. Koç et al. (2015) tackled the HVRP with time windows and introduced a hybrid evolutionary algorithm that combined two state-of-the-art metaheuristic concepts, adaptive large neighborhood search and population-based search to great results.

Belloso et al. (2019) analyzed the HVRP with backhauls and proposed a solution based on a multi-start biased-randomized heuristic. This algorithm uses an iterative method that relies on solving smaller homogeneous instances of the problem and then using these subsolutions as partial solutions for the original heterogeneous instance.

5.5 VRP with Multiple Depots

MDVRP is an extension of the classical VRP problem by adding multiple depots that can serve the customers. B. Yu et al. (2011) added a virtual central depot, thus converting MDVRP to VRP with the virtual depot as the original. For its solution, they proposed an improved ant colony optimization process with coarse-grain parallel strategy, ant-weight strategy, and mutation operation. Juan et al. (2015) presented a hybrid approach that combined biased randomization, employed to assign customers to depots and for improving routing solutions, with the iterated local search metaheuristic. Their approach is easy to implement and can be parallelized naturally.

The research of genetic algorithms (GA) for solving the MDVRP by Karakatič and Podgorelec (2015) is worth mentioning. They claimed that the GAs are on par with other methods and are very appropriate for MDVRP, with the main advantage of a GA to be the linear scaling with the growing problem size, and thus is preferred for solving large NP problems over exact and other heuristic methods.

5.6 Green & Hybrid VRP

From this class of problems, hybrid VRP seems to get the most attention from researchers. It consists of a set of customers, a fleet of identical alternative fuel vehicles (electrical, hybrid, etc) and a set of refueling stations with the objective of minimizing the total traveled distance while also making use of the refueling stations so as to restore their autonomy. Goeke et al. (2014) tackled the hybrid VRP with time windows and a mixed fleet of vehicles in which both electric cars and internal combustion cars are used. As a solution method, they presented a hybrid heuristic that combines a variable neighborhood search algorithm with a tabu search heuristic. Goeke and Schneider (2015) deal with the same problem. They developed an adaptive large neighborhood search enhanced by a local search for intensification. Hiermann et al. (2016) solved the same problem utilizing branch-and-price as well as proposing a hybrid heuristic, which combines an Adaptive Large Neighbourhood Search with an embedded local search and labeling procedure for intensification.

V. F. Yu et al. (2017) also focused on the hybrid VRP in which all the vehicles are plugged in hybrid electrical vehicles (PHEV) and they proposed a simulated annealing algorithm with a restart strategy. Last but not least, Andelmin and Bartolini (2019) also dealt with alternative fuel vehicles and their refueling stations and offered a multigraph reformulation of the G-VRP in which refueling stations are not explicitly modeled. They exploited this

reformulation by tailoring classical local search operators to work directly on it, and by combining these operators to develop a multi-start algorithm.

5.7 OPEN VRP

OVRP is another well known combinatorial optimization problem that addresses the service of a set of customers using a homogeneous fleet of non-depot returning, capacitated vehicles. Repussis et al. (2010) developed a population-based hybrid metaheuristic consisting of the basic solution framework of evolutionary methods and memory-based trajectory local search algorithms, such as tabu search and guided local search so as to drive the local search process and to explore the solution space. Salari et al. (2010) presented a heuristic improvement procedure based on integer linear programming techniques. Given an initial feasible solution to be possibly improved, the method then destroys and repairs this solution by solving an ILP model, in the attempt of finding a new, improved feasible solution. MirHassani and Abolghasemi (2011) proposed a particle swarm optimization algorithm as well as a particular decoding method for assigning customers to routes and one point moves for improving the found solutions.

5.8 DYNAMIC VRP

In most VRP's the data is assumed to be known before the start of the routes and not being amenable to change. However, real-world routing problems are dynamic, as unforeseen events can constantly occur. Hong (2012) faces dynamic VRP with time windows (DVRPTW), which is modeled as a series of static VRPTW. Each phase has an event-trigger mechanism which in the specific case is a new request arrival during the operation. The author proposed a large neighborhood search (LNS) which utilizes the remove and reinsert procedure. The newly arrived request is considered as removed nodes and is being reinserted into the current solution. Mavrovouniotis and Yang (2015), in their article, propose an ant colony optimization algorithm with immigrants schemes, in which, three different cases are investigated, random, elitism, and memory-based. These three immigrant schemes determine the way to introduce new solutions (called immigrants) and replace a small portion in the current population.

5.9 MULTI-TRIP VRP

A variant of the classical VRP is the problem that deals with multiple uses of vehicles, that arises when customers have either great demands or when they are close to each other. Azi et al. (2010), tackle the MTVRP along with the VRPTW, through a branch-and-price approach, in which a column generation approach is also integrated. This was the first attempt for solving the MTVRP with an exact algorithm. François et al. (2016) developed and tested two Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS) algorithms in the R-MTVRP, which does not consider duration tour constraints.

5.10 TIME-DEPENDENT VRP

The time needed to travel between two points-customers depends on traffic congestion, which in turn is affected by multiple factors, such as unforeseen events, the time of the day and the weather. Balseiro et al. (2011), solve the TDVRPTW where vehicles must deliver goods to a set of customers concerning their time windows, while travel time between two points, depends on the time of departure. They propose an ACO algorithm hybridized with insertion heuristics. More specifically, the algorithm is based on the Multiple Ant Colony System framework which coordinates two colonies, one for reducing the number of routes and one for optimizing the feasible solutions found, by minimizing the total time. Since ants produce solutions with unrouted customers, insertion heuristics are further developed for incorporating customers into the solution. Andres Figliozzi (2012), faces the same VRP variants and presents an Iterative Route Construction and Improvement (IRCI) algorithm. The construction phase includes a sequential heuristic, in which an auxiliary route building

heuristic is reiterated during its execution of the construction algorithm. Since the set of the initial solutions have been generated, the improvement algorithm, based on the ruin and recreate approach presented by Schrimpf et al. (2000), is implemented in a subset of the routes.

5.11 Articles that Apply Methods to Solve Real-life Cases

Only a small percentage of the reviewed articles applied the proposed method in a real-world instance (just in 5 out of the 106 examined articles) and all of them are fairly new. Melian et al. (2014) considered a bi-objective VRPTW to minimize the total traveled distance while balancing the workload of drivers, to solve a problem posed to a logistics company in Teneriffe, Spain. They proposed a bi-objective mixed-integer linear model for the problem and a solution approach based on the scatter search metaheuristic algorithm. Results obtained on the real case instance improved the solution implemented by the company.

Schyns (2015) examined the Dynamic Capacitated VRP with Time Windows, Split delivery and Heterogeneous fleet (DVRPTWSD) and proposed an ant colony system for solving it. Their starting point was a problem submitted by Liege Airport with the goal to develop a decision system that is able to optimize the journey of the airport's refueling trucks. Gupta et al. (2017) presented a multi-objective shortest path evolutionary algorithm for comprehensive solutions to real-world manifestations of the classical vehicle routing problem. They considered constraints such as time windows, simultaneous pickup and delivery, the heterogeneous fleet of vehicles and the heterogeneity of traffic congestion levels in urban areas while trying to minimize environmental impact in addition to optimizing the overall operational costs of the routing solution. They tested their approach in both benchmark instances and in real-world industrial cases in Singapore to showcase the efficacy of their method.

Zhang et al. presented a multi-objective VRP with flexible time windows with the main objectives being the minimization of the total distribution costs (including travel costs and fixed vehicle costs), while the overall customer satisfaction is to be maximized. For solving this problem, they proposed a strategy based on ant colony optimization as well as three mutation operators, which incorporate the concept of Pareto optimality for multi-objective optimization. They tested their method in benchmark instances and for a real case scenario regarding a leading company in the vegetable and food distribution sector in China. Their case included 16 delivery points (16 supermarkets around Beilin district, Xi'an) served directly from a depot (supply base of vegetable and food). Lastly, Belhaiza et al. (2019) presented an evolutionary heuristic that uses three global multi-start strategies: ruin and recreate genetic cross-over of best parents and random restart, to solve the VRP with multiple time windows. When tested in a real case, it showed more than 16% of average cost improvement over current practice on a set of real-life instances, with some solution costs improved by more than 30%.

6. CONCLUDING REMARKS

This paper presents the results of an extensive literature review of the VRP for urban freight transportation, as it resulted from a well-defined research protocol. An initial group of 170 papers extracted from the Scopus database published between 2010 and mid-2019. The articles were further shorted to a group of 106 relevant papers after applying deselection criteria. Emphasis is given in the applied methods proposed and developed for the VRP variants. Therefore, papers that are irrelevant from an urban freight transportation perspective were excluded from the analysis.

The articles were also classified according to the VRP variant and the applied method proposed for its solution, in order to identify the trends in each case, as well as, to present their correlation. Moreover, a topic for further research relates to the fact that most variants of the VRP treated in the literature are highly tailored to specific constraints and parameters and so their applicability is thereby constrained to very specifically determined scenarios (and not to the original version of the problem). The tailored-made algorithms are making the offered

solutions problematical in its application to other more general cases of the same problem. Another topic for further investigation is the fact that a minimum number of articles treat simultaneously a combination of different versions of the VRP (as is usual in the complexity of real-life scheduling problems) with most researchers limiting their study to at most 3 variants of the VRP problem. Only Penna et al. (2019) were found to tackle a broad range of variants simultaneously, whose hybrid Variable Neighborhood algorithm manages to treat 7 variants of the problem.

The last point concerns the fact that a very few numbers of researchers apply their methodology to real life scheduling problems (the 5 of 106 papers in total), thus showing the gap between the theoretical results and their actual practical implementation.

ACKNOWLEDGMENTS

The present work is co-funded by the European Union and Greek national funds through the Operational Program "Competitiveness, Entrepreneurship and Innovation" (EPAnEK), under the call “RESEARCH-CREATE-INNOVATE” (project code: T1EDK-00527 and Acronym: SMARTRANS).

REFERENCES

Andelmin, J., & Bartolini, E. (2019). A multi-start local search heuristic for the Green Vehicle Routing Problem based on a multigraph reformulation. Computers & Operations Research, 109, 43–63. doi:10.1016/j.cor.2019.04.018

Andres Figliozzi, M. (2012). The time dependent vehicle routing problem with time windows: Benchmark problems, an efficient solution algorithm, and solution characteristics. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 48(3), 616–636. doi:10.1016/j.tre.2011.11.006

Azi, N., Gendreau, M., & Potvin, J.-Y. (2010). An exact algorithm for a vehicle routing problem with time windows and multiple use of vehicles. European Journal of Operational Research, 202(3), 756–763. doi:10.1016/j.ejor.2009.06.034

Balseiro, S. R., Loiseau, I., & Ramonet, J. (2011). An Ant Colony algorithm hybridized with insertion heuristics for the Time Dependent Vehicle Routing Problem with Time Windows. Computers & Operations Research, 38(6), 954–966. doi:10.1016/j.cor.2010.10.011

Belhaiza, S., M’Hallah, R., Ben Brahim, G., & Laporte, G. (2019). Three multi-start data-driven evolutionary heuristics for the vehicle routing problem with multiple time windows. *Journal of Heuristics, 25*(3), 485-515. doi:10.1007/s10732-019-09412-1

Belloso, J., Juan, A. A., & Faulin, J. (2019). An iterative biased-randomized heuristic for the fleet size and mix vehicle-routing problem with backhauls. INTERNATIONAL TRANSACTIONS INOPERATIONAL RESEARCH, 26, 289–301. doi:10.1111/itor.12379

Braekers, K., Ramaekers, K., & Nieuwenhuyse, I. Van. (2016). The Vehicle Routing Problem: State of the Art Classification and Review. Computers & Industrial Engineering, 99, 300–313. doi:10.1016/j.cie.2015.12.007

Brandão, J. C. S., & Mercer, A. (1998). The multi-trip vehicle routing problem. Journal of the Operational Research Society, 49(8), 799–805. doi:10.1057/palgrave.jors.2600595

Çatay, B. (2010). A new saving-based ant algorithm for the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery. Expert Systems with Applications, 37(10), 6809–6817. doi:10.1016/j.eswa.2010.03.045

César, H., & Oliveira, B. De. (2010). A hybrid search method for the vehicle routing problem with time windows. Annals of Operations Research, 180, 125–144. doi:10.1007/s10479-008-0487-y

Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. Management Science, 6(1), 80–91. doi:10.1287/mnsc.6.1.80

Eksioglu, B., Vural, A. V., & Reisman, A. (2009). The vehicle routing problem: A taxonomic review. Computers and Industrial Engineering, 57(4), 1472–1483. doi:10.1016/j.cie.2009.05.009

François, V., Arda, Y., Crama, Y., & Laporte, G. (2016). Large neighborhood search for multi-trip vehicle routing. European Journal of Operational Research, 255(2), 422–441. doi:10.1016/j.ejor.2016.04.065

Gayialis S.P., Konstantakopoulos G.D., Tatsiopoulos I.P. (2019) Vehicle Routing Problem for Urban Freight Transportation: A Review of the Recent Literature. In: Sifaleras A., Petridis K. (eds) Operational Research in the Digital Era – ICT Challenges. Springer Proceedings in Business and Economics. Springer, Cham, 89-104, doi:10.1007/978-3-319-95666-4_7.

Ghoseiri, K., & Ghannadpour, S. F. (2010). Multi-objective vehicle routing problem with time windows using goal programming and genetic algorithm. Applied Soft Computing, 10(4), 1096–1107. doi:10.1016/j.asoc.2010.04.001

Goeke, D., & Schneider, M. (2015). Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles. European Journal of Operational Research, 245(1), 81–99. doi:10.1016/j.ejor.2015.01.049

Goetschalckx, M., & Jacobs - Blecha, C. (1989). Theory and Methodology The vehicle routing problem with backhauls. European Journal of Operational Research, 42, 39–51.

Goksal, F. P., Karaoglan, I., & Altiparmak, F. (2013). A hybrid discrete particle swarm optimization for vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. Computers & Industrial Engineering, 65(1), 39–53. doi:10.1016/j.cie.2012.01.005

Gupta, A., Heng, C. K., Ong, Y. S., Tan, P. S., & Zhang, A. N. (2017). A generic framework for multi-criteria decision support in eco-friendly urban logistics systems. *Expert Systems with Applications, 71*, 288-300. doi:10.1016/j.eswa.2016.09.033

Hiermann, G., Puchinger, J., Ropke, S., & Hartl, R. F. (2016). The Electric Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations. European Journal of Operational Research, 252(3), 995–1018. doi:10.1016/j.ejor.2016.01.038

Hong, L. (2012). An improved LNS algorithm for real-time vehicle routing problem with time windows. Computers & Operations Research, 39(2), 151–163. doi:10.1016/j.cor.2011.03.006

Hu, C., Lu, J., Liu, X., & Zhang, G. (2018). Robust vehicle routing problem with hard time windows under demand and travel time uncertainty. *Computers and Operations Research, 94*, 139-153. doi:10.1016/j.cor.2018.02.006

Juan, A. A., Pascual, I., Guimarans, D., & Barrios, B. (2015). Combining biased randomization with iterated local search for solving the multidepot vehicle routing problem. International Transactions in Operational Research, 22(4), 647–667. doi:10.1111/itor.12101

Kao, Y., Chen, M., & Huang, Y. (2012). A Hybrid Algorithm Based on ACO and PSO for Capacitated Vehicle Routing Problems, 2012. doi:10.1155/2012/726564

Karakatič, S., & Podgorelec, V. (2015). A survey of genetic algorithms for solving multi depot vehicle routing problem. Applied Soft Computing, 27, 519–532. doi:10.1016/j.asoc.2014.11.005

Koç, Ç., Bektaş, T., Jabali, O., & Laporte, G. (2015). A hybrid evolutionary algorithm for heterogeneous fleet vehicle routing problems with time windows. Computers & Operations Research, 64, 11–27. doi:10.1016/j.cor.2015.05.004

Labadie, N., Prins, C., & Prodhon, C. (2016). Metaheuristics for Vehicle Routing Problems. ISTE Limited (Vol. 3). doi:10.1093/aje/kwp410

Lei, H., Laporte, G., & Guo, B. (2011). The capacitated vehicle routing problem with stochastic demands and time windows. Computers & Operations Research, 38(12), 1775–1783. doi:10.1016/j.cor.2011.02.007

Lin, C., Choy, K. L., Ho, G. T. S., Chung, S. H., & Lam, H. Y. (2014). Survey of Green Vehicle Routing Problem : Past and future trends. Expert Systems with Applications, 41, 1118–1138.

Mancini, S. (2017). The Hybrid Vehicle Routing Problem. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 78, 1–12. doi:10.1016/j.trc.2017.02.004

Mavrovouniotis, M., & Yang, S. (2015). Ant algorithms with immigrants schemes for the dynamic vehicle routing problem. Information Sciences, 294, 456–477. doi:10.1016/j.ins.2014.10.002

Melián-Batista, B., De Santiago, A., Angelbello, F., & Alvarez, A. (2014). A bi-objective vehicle routing problem with time windows: A real case in tenerife. *Applied Soft Computing Journal, 17*, 140-152. doi:10.1016/j.asoc.2013.12.012

MirHassani, S. A., & Abolghasemi, N. (2011). A particle swarm optimization algorithm for open vehicle routing problem. Expert Systems with Applications, 38(9), 11547–11551. doi:10.1016/j.eswa.2011.03.032

Montané, Fermín, Alfredo, T., & Galvão, R. D. (2006). A tabu search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery service. Computers & Operations Research, 33, 595–619. doi:10.1016/j.cor.2004.07.009

Nalepa, J., & Blocho, M. (2016). Adaptive memetic algorithm for minimizing distance in the vehicle routing problem with time windows. *Soft Computing, 20*(6), 2309-2327. doi:10.1007/s00500-015-1642-4

Penna, P. H. V., Subramanian, A., Ochi, L. S., Vidal, T., & Prins, C. (2019). A hybrid heuristic for a broad class of vehicle routing problems with heterogeneous fleet. *Annals of Operations Research, 273*(1-2), 5-74. doi:10.1007/s10479-017-2642-9

Pillac, V., Gendreau, M., Guéret, C., & Medaglia, A. L. (2013). A review of dynamic vehicle routing problems. European Journal of Operational Research, 225(1), 1–11. doi:10.1016/j.ejor.2012.08.015

Prins, C. (2009). Two memetic algorithms for heterogeneous fleet vehicle routing problems. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 22(6), 916–928. doi:10.1016/j.engappai.2008.10.006

Renaud, J., Laporte, G., & Boctor, F. F. (1996). A TABU SEARCH HEURISTIC FOR THE MULTI-DEPOT VEHICLE ROUTING PROBLEM. Computers & Operations Research, 23(3), 229–235.

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), 443–455. doi:10.1016/j.cor.2008.11.003

Salari, M., Toth, P., & Tramontani, A. (2010). An ILP improvement procedure for the Open Vehicle Routing Problem. Computers & Operations Research, 37(12), 2106–2120. doi:10.1016/j.cor.2010.02.010

Schneider, M., Stenger, A., & Goeke, D. (2014). The Electric Vehicle-Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations. Transportation Science, 48(4), 500–520. doi:10.1287/trsc.2013.0490

Schrimpf, G., Schneider, J., Stamm-wilbrandt, H., & Dueck, G. (2000). Record Breaking Optimization Results Using the Ruin and Recreate Principle, Journal of Computational Physics 159, 139–171, doi:10.1006/jcph.1999.6413

Schyns, M. (2015). An ant colony system for responsive dynamic vehicle routing. *European Journal of Operational Research, 245*(3), 704-718. doi:10.1016/j.ejor.2015.04.009

Subramanian, A., Penna, P. H. V., Uchoa, E., & Ochi, L. S. (2012). A hybrid algorithm for the Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem. European Journal of Operational Research, 221(2), 285–295. doi:10.1016/j.ejor.2012.03.016

Taha Yassen, E., Ayob, M., Ahmad Nazri, M. Z., & Sabar, N. R. (2015). Meta-harmony search algorithm for the vehicle routing problem with time windows. *Information Sciences, 325*, 140-158. doi:10.1016/j.ins.2015.07.009

Vidal, T., Crainic, T. G., Gendreau, M., & Prins, C. (2013). A hybrid genetic algorithm with adaptive diversity management for a large class of vehicle routing problems with time-windows. *Computers and Operations Research, 40*(1), 475-489. doi:10.1016/j.cor.2012.07.018

Wang, C., Mu, D., Zhao, F., & Sutherland, J. W. (2015). A parallel simulated annealing method for the vehicle routing problem with simultaneous pickup–delivery and time windows. Computers & Industrial Engineering, 83, 111–122. doi:10.1016/j.cie.2015.02.005

Yu, B., Yang, Z.-Z., & Xie, J.-X. (2011). A parallel improved ant colony optimization for multi-depot vehicle routing problem. Journal of the Operational Research Society, 62(1), 183–188. doi:10.1057/jors.2009.161

Yu, V. F., Redi, A. A. N. P., Hidayat, Y. A., & Wibowo, O. J. (2017). A simulated annealing heuristic for the hybrid vehicle routing problem. Applied Soft Computing, 53, 119–132. doi:10.1016/j.asoc.2016.12.027

Zachariadis, E. E., & Kiranoudis, C. T. (2010). An open vehicle routing problem metaheuristic for examining wide solution neighborhoods. Computers and Operations Research, 37(4), 712–723. doi:10.1016/j.cor.2009.06.021

Zhang, H., Zhang, Q., Ma, L., Zhang, Z., & Liu, Y. (2019). A hybrid ant colony optimization algorithm for a multi-objective vehicle routing problem with flexible time windows. *Information Sciences, 490*, 166-190. doi:10.1016/j.ins.2019.03.070

Zhou, Y., Xie, J., & Zheng, H. (2013). A Hybrid Bat Algorithm with Path Relinking for Capacitated Vehicle Routing Problem, *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, Article ID 392789, doi:10.1155/2013/392789.