



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Ανάπτυξη Υβριδικού Γενετικού Αλγορίθμου για την Επίλυση του Προβλήματος
Δρομολόγησης Οχημάτων με Πολλαπλές Αποθήκες

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πρατικάκης Χαρίδημος

Επιβλέπων: Μαρινάκης Ιωάννης
Επίκουρος Καθηγητής

ΧΑΝΙΑ 2017

Πρόλογος

Με αφορμή την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας και των προπτυχιακών μου σπουδών, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τον αδερφό μου για την στήριξη που μου παρείχαν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου για όλες τις όμορφες στιγμές που περάσαμε μαζί. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου και επιβλέπων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, κύριο Ιωάννη Μαρινάκη.

Περίληψη

Η διανομή των έτοιμων προϊόντων από τις αποθήκες στους πελάτες, είναι ένα πρακτικό και απαιτητικό πρόβλημα στην διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας. Καλύτερες αποφάσεις κατά τα στάδια της δρομολόγησης μπορούν να οδηγήσουν σε μεγαλύτερα επίπεδα ικανοποίησης πελατών, καθώς περισσότεροι πελάτες μπορούν να εξυπηρετηθούν σε συντομότερο χρόνο.

Το πρόβλημα της διανομής γενικά μοντελοποιείται σαν το πρόβλημα της δρομολόγησης οχημάτων (Vehicle Routing Problem – VRP), στο οποίο γίνεται η υπόθεση ότι η εταιρεία εφοδιασμού έχει μια αποθήκη. Όμως σε περιπτώσεις όπου η εταιρεία εφοδιασμού έχει παραπάνω αποθήκες το VRP δεν είναι κατάλληλο. Για να αντιμετωπισθεί αυτός ο περιορισμός, η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην επίλυση του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων με πολλαπλές αποθήκες (Multi-Depot VRP – MDVRP). Το MDVRP αποτελεί ένα NP-δύσκολο πρόβλημα, που σημαίνει ότι δεν υπάρχει κάποιος αποτελεσματικός αλγόριθμος για την βέλτιστη επίλυσή του.

Κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας αναπτύσσεται ένας υβριδικός γενετικός αλγόριθμος, που συμπεριλαμβάνει την μέθοδο εξοικονόμησης αποστάσεων των Clarke και Wright καθώς και τον ευρετικό αλγόριθμο του κοντινότερου γείτονα, για την επίλυση του προβλήματος. Η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου αλγόριθμου δοκιμάζεται μέσω υπολογιστικών μελετών σε προβλήματα διαφορετικών μεγεθών. Τέλος, τα αποτελέσματα που δίδει ο προτεινόμενος αλγόριθμος συγκρίνονται με τις καλύτερες λύσεις που υπάρχουν στη βιβλιογραφία και δίδονται προτάσεις για περαιτέρω βελτίωση του αλγόριθμου καθώς και ιδέες για μελλοντική διερεύνηση.

Abstract

The distribution of finished products from depots to customers is a practical and challenging problem in logistics management. Better routing and scheduling decisions can result in higher level of customer satisfaction because more customers can be served in a shorter time.

The distribution problem is generally formulated as the vehicle routing problem (VRP). Nevertheless, there is a rigid assumption that there is only one depot. In cases, for instance, where a logistics company has more than one depot, the VRP is not suitable. To resolve this limitation, this paper focuses on the VRP with multiple depots, or multi-depot VRP (MDVRP). The MDVRP is NP-hard, which means that an efficient algorithm for solving the problem optimally is unavailable.

During the course of this paper, a hybrid genetic algorithm is developed, that makes use of the Clarke and Wright Savings method as well as the nearest neighbor heuristic, for the solution of the above problem. The performance of the proposed algorithm is tested by carrying out computational studies in a wide range of problems. Lastly, the results obtained from the proposed algorithm are compared against benchmark data and suggestions for further improvement of the algorithm as well as ideas for future work are given.

Πίνακας Περιεχομένων

1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
2.ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΟΛΛΑΠΛΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΣ.....	3
2.1 Εφοδιαστική Αλυσίδα.....	3
2.2 Μεταφορές και Διανομή.....	4
2.3 Εφαρμογές του Προβλήματος Δρομολόγησης Οχημάτων.....	6
2.4 Μοντελοποίηση του Προβλήματος.....	6
3.ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	11
3.1 Απλοί Ευρετικοί Αλγόριθμοι.....	11
3.2 Γενετικοί Αλγόριθμοι.....	12
3.3 Αλγόριθμοι Τοπικής Αναζήτησης.....	15
4.Η ΑΠΛΟΥΣΤΕΡΗ ΜΟΡΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	17
4.1 Καθορισμός του Προβλήματος και της Μεθοδολογία Επίλυσης.....	17
4.2 Υπολογιστικές Μελέτες και Αποτελέσματα.....	24
4.3 Συμπεράσματα.....	37
5.ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΟ ΜΗΚΟΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΩΝ.....	39
5.1 Καθορισμός του Προβλήματος και της Μεθοδολογίας Επίλυσης.....	39
5.2 Υπολογιστικές Μελέτες και Αποτελέσματα.....	40
5.3 Συμπεράσματα.....	54
6.ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΜΕ ΜΙΑ ΑΠΟΘΗΚΗ.....	57
6.1 Καθορισμός του Προβλήματος και της Μεθοδολογία Επίλυσης.....	57
6.2 Υπολογιστικές Μελέτες και Αποτελέσματα.....	57
6.3 Συμπεράσματα.....	61

7.ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....63

8.ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....65

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η διανομή των έτοιμων προϊόντων από τις αποθήκες στους πελάτες είναι ένα πρακτικό και ιδιαίτερα απαιτητικό πρόβλημα στην διαχείριση εφοδιαστικής. Οι ορθότερες αποφάσεις κατά το σχεδιασμό και προγραμματισμό των δρομολογίων μπορούν να οδηγήσουν σε υψηλότερα επίπεδα ικανοποίησης των πελατών καθώς περισσότεροι πελάτες θα μπορούν να εξυπηρετηθούν σε μικρότερο χρονικό διάστημα. Το πρόβλημα της διανομής μοντελοποιείται μαθηματικά στο πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων, το οποίο έχει αρκετές ενδιαφέρουσες παραλλαγές. Στην παρούσα εργασία, εξετάζεται το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με πολλαπλές αποθήκες. Το πρόβλημα αυτό είναι NP- δύσκολο που σημαίνει ότι δεν υπάρχει ένας αποδοτικός αλγόριθμος για την βέλτιστη επίλυση του προβλήματος.

Στόχος της παρούσας εργασίας, είναι η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας για την επίλυση του προβλήματος (καθώς και διαφόρων παραλλαγών του) και η αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης μεθόδου. Αντλώντας έμπνευση από τις επιστημονικές δημοσιεύσεις “A hybrid genetic algorithm for the multi-depot vehicle routing problem” των William Ho, George T.S. Ho, Ping Ji και Henry C.W. Lau και “Using Genetic Algorithms for Multi-depot Vehicle Routing” των Beatrice Ombuki-Berman και Franklin T. Hanshar, αναπτύχθηκε μια προτεινόμενη μεθοδολογία για την απλούστερη μορφή του προς επίλυση προβλήματος και σε επόμενο στάδιο πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες αλλαγές ώστε να είναι δυνατή η επίλυση και άλλων παραλλαγών του προβλήματος με τη χρήση της. Η αποτελεσματικότητα της μεθόδου δοκιμάστηκε μέσω αριθμητικών μελετών σε διάφορα προβλήματα και πραγματοποιήθηκε σύγκριση με τις καλύτερες δυνατές λύσεις που υπάρχουν στην διεθνή βιβλιογραφία.

Η διπλωματική εργασία είναι οργανωμένη με τον ακόλουθο τρόπο. Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται μια ανάλυση των εννοιών και ορισμών που αφορούν την Εφοδιαστική Αλυσίδα, τα προβλήματα μεταφορών και διανομών και πιο συγκεκριμένα το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με πολλαπλές αποθήκες. Στο επόμενο κεφάλαιο συνεχίζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση, αναλύοντας τις οικογένειες αλγορίθμων βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται κατά την ανάπτυξη της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Γίνεται αναφορά στους απλούς ευρετικούς αλγορίθμους, στους αλγόριθμους τοπικής αναζήτησης και στους

γενετικούς αλγορίθμους. Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται ο προτεινόμενος αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την επίλυση της απλούστερης μορφής του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων με πολλαπλές αποθήκες. Περιγράφεται και επεξηγείται ο τρόπος με τον οποίο επιλέχθηκαν οι παράμετροι του αλγορίθμου και γίνεται εφαρμογή του αλγορίθμου σε διάφορα προβλήματα. Στο πέμπτο κεφάλαιο αναλύεται η πρώτη παραλλαγή που εξετάζεται, η οποία περιλαμβάνει την προσθήκη ενός περιορισμού που αφορά στο μέγιστο μήκος του δρομολογίου, δηλαδή το μέγιστο χρόνο που μπορεί να διαρκεί κάθε δρομολόγιο πριν την επιστροφή σε κάποια αποθήκη. Στο επόμενο κεφάλαιο γίνεται εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου σε προβλήματα μιας αποθήκης, δηλαδή σε προβλήματα δρομολόγησης οχημάτων περιορισμένης χωρητικότητας (Capacitated VRP – CVRP). Στο τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και οι γενικότερες παρατηρήσεις που προκύπτουν από την συνολική μελέτη του παραπάνω προβλήματος και των παραλλαγών του.

2. ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΠΟΛΛΑΠΛΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΣ

2.1 Εφοδιαστική Αλυσίδα

Η Εφοδιαστική Αλυσίδα (Supply Chain) είναι η διαδικασία του σχεδιασμού, της εφαρμογής και του ελέγχου της αποτελεσματικής ροής και αποθήκευσης πρώτων υλών, ημικατεργασμένων προϊόντων, τελικών προϊόντων και της σχετιζόμενης πληροφορίας από το σημείο προέλευσης στο σημείο κατανάλωσης με σκοπό τη συμμόρφωση στις απαιτήσεις των πελατών. Η αποστολή της εφοδιαστικής αλυσίδας είναι να μεταφερθούν τα κατάλληλα προϊόντα ή οι κατάλληλες υπηρεσίες στο κατάλληλο μέρος, την κατάλληλη ώρα και στην επιθυμητή κατάσταση και συγχρόνως να πραγματοποιείται μέγιστη απόδοση για την εταιρεία. Οι δραστηριότητες της εφοδιαστικής αλυσίδας λειτουργούν ως σύνδεσμος μεταξύ της παραγωγής και της κατανάλωσης και ουσιαδώς παρέχουν μια γέφυρα μεταξύ των τοποθεσιών παραγωγής και των τοποθεσιών που βρίσκονται οι αγοραστές ή οι προμηθευτές που χωρίζονται τοπικά και χρονικά.

Μερικές από τις πιο βασικές λειτουργίες της διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας (Supply Chain Management) είναι:

- η επιλογή των προμηθευτών (Suppliers)
 - η διαχείριση των αποθεμάτων (Inventory Management)
 - η πρόβλεψη ζήτησης (Demand Forecasting)
 - η διαχείριση των αποθηκών (Warehousing)
 - η διαχείριση των υλικών ανάμεσα σε όλες τις λειτουργίες (Material Handling)
 - η χωροθέτηση των εγκαταστάσεων (Plant and Warehouse Location)
 - η μεταφορά και διανομή (Transportation and Distribution) των πρώτων υλών και προϊόντων ανάμεσα στους προμηθευτές, τις αποθήκες, τα καταστήματα και προς τους τελικούς καταναλωτές
-

Καθώς οι πηγές των πρώτων υλών, τα εργοστάσια και τα σημεία πώλησης δεν βρίσκονται συνήθως στα ίδια σημεία, οι δραστηριότητες της εφοδιαστικής αλυσίδας επαναλαμβάνονται πολλές φορές πριν ένα προϊόν φτάσει στην αγορά. Ακόμα και τότε, οι δραστηριότητες της εφοδιαστικής αλυσίδας επαναλαμβάνονται ξανά καθώς τα χρησιμοποιημένα προϊόντα ανακυκλώνονται στο δίκτυο της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Αν και είναι εύκολο να θεωρήσουμε την εφοδιαστική αλυσίδα ως διαχείριση τη ροής των προϊόντων από τα σημεία απόκτησης στους πελάτες, για πολλές εταιρείες υπάρχει ένα αντίστροφο κανάλι της εφοδιαστικής αλυσίδας. Η ζωή ενός προϊόντος, από την οπτική γωνιά της εφοδιαστικής αλυσίδας, δεν τελειώνει με την παράδοση του προϊόντος στον πελάτη. Τα προϊόντα παλαιώνουν, παθαίνουν βλάβες, ή δεν λειτουργούν και επιστρέφονται στα σημεία προέλευσης τους για επιδιόρθωση ή για διάθεση. Το αντίστροφο κανάλι της εφοδιαστικής αλυσίδας μπορεί να χρησιμοποιηθεί όλο ή ένα μέρος από το κανάλι της εφοδιαστικής αλυσίδας, ή μπορεί να χρειάζεται και χωριστό σχεδιασμό. Η εφοδιαστική αλυσίδα ολοκληρώνεται με την τελική διάθεση του προϊόντος, και το αντίστροφο κανάλι πρέπει να θεωρηθεί ως μέρος του στόχου του σχεδιασμού και του ελέγχου της εφοδιαστικής αλυσίδας.

2.2 Μεταφορές και Διανομή

Οι μεταφορές και η διανομή είναι δραστηριότητες της εφοδιαστικής αλυσίδας με εξαιρετική σημασία για την επιχείρηση για δυο λόγους. Πρώτον, οι μεταφορές παρέχουν το σύνδεσμο μεταξύ της παραγωγής, της αποθήκευσης και της κατανάλωσης. Επίσης έχει παρατηρηθεί ότι η μεταφορά φορτίου απορροφά μεταξύ του ενός τρίτου και των δύο τρίτων του συνολικού κόστους της εφοδιαστικής αλυσίδας. Συνεπώς η διαθεσιμότητα αποτελεσματικών μεθόδων μεταφοράς αποτελεί το κύριο στοιχείο της εφοδιαστικής αλυσίδας. Οι εγκαταστάσεις, ο εξοπλισμός και οι άνθρωποι είναι τα πρωταρχικά στοιχεία οποιουδήποτε συστήματος μεταφορών. Έτσι κάποιος που ασχολείται με την εφοδιαστική αλυσίδα πρέπει να έχει μια πολύ καλή κατανόηση όλων των θεμάτων που συνδέονται με την διαχείριση των μεταφορών.

Τρεις βασικές κατηγορίες αποφάσεων εμφανίζονται στην διαχείριση μεταφορών:

1. Φυσικές, δηλαδή τα αντικείμενα που διαχειριζόμαστε.
 - Επαναχρησιμοποιούμενους πόρους: οι μεταφορές από την πλευρά της εταιρείας μεταφορών, δεν έχουν απλά ένα κόστος μεταφοράς από μια τοποθεσία σε μια άλλη. Αποτελούν μια σύνθετη δραστηριότητα η οποία κάνει χρήση
-

επαναχρησιμοποιούμενων πόρων όπως οδηγούς, φορτηγά και ρυμουλκούμενα. Συνεπώς για την εξυπηρέτηση της ζήτησης ενός πελάτη απαιτείται η χρήση διαφορετικών πόρων μιας εταιρείας που συνδυάζονται μεταξύ τους για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος.

2. Οικονομικές

- Τιμολόγηση Συμβολαίων. Η τιμολόγηση των υπηρεσιών μεταφοράς περιπλέκεται από τις επιδράσεις του δικτύου μεταφοράς και από την πρακτική ότι ο πελάτης πληρώνει μόνο όταν θα παραλάβει το προϊόν αλλά απαιτεί να είναι έτοιμο όταν το παραγγείλει.
- Σταθερή τιμολόγηση. Είναι το σταθερό κόστος που απαιτείται για τη μεταφορά κάποιου προϊόντος από την πηγή στον προορισμό.

3. Πληροφοριακές

- Ζήτηση των πελατών. Οι πελάτες εισάγουν τις παραγγελίες τους στο σύστημα τυχαία με διαφορετική πληροφόρηση.
- Διαθεσιμότητα πόρων.
- Χωρικός κατανεμημένη πληροφορία. Συνήθως πολλές πληροφορίες βρίσκονται σε διάφορα μέρη του συστήματος και δεν είναι διαθέσιμες κεντρικά. Ως αποτέλεσμα, πολλές αποφάσεις λαμβάνονται τοπικά.

Οι μεταφορές χωρίζονται σε δύο μέρη. Σε εσωτερικές που περιλαμβάνουν τη μεταφορά πρώτων υλών από τις πηγές στα εργοστάσια, μερών των τελικών προϊόντων ανάμεσα σε διάφορα εργοστάσια της εταιρείας και τελικών προϊόντων από τα εργοστάσια στις αποθήκες ή στα σημεία πωλήσεων. Σε εξωτερικές μεταφορές που περιλαμβάνουν τη μεταφορά των τελικών προϊόντων από τις αποθήκες στους πελάτες άμεσα ή διαμέσου κέντρων διανομής.

Υπάρχουν αρκετοί διαφορετικοί τρόποι για την μεταφορά των φορτίων μεταξύ δύο σημείων. Οι τρόποι αυτοί είναι σιδηροδρομικοί μεταφορείς, οδικοί μεταφορείς, θαλάσσιοι μεταφορείς, αεροπορικοί μεταφορείς και αγωγοί μεταφορών. Τα τελευταία χρόνια υπάρχει μια αυξανόμενη χρήση περισσότερο από ενός τρόπων μεταφοράς, πράγμα που έχει πλεονεκτήματα όπως ευρύτερη επιλογή δρομολογίων, καλύτερη τιμολόγηση και χειρισμό μεγαλύτερων ποσοτήτων.

Τα σημαντικότερα προβλήματα που απαιτούν επίλυση κατά το σχεδιασμό των μεταφορών περιλαμβάνουν την επιλογή του στόλου μεταφοράς (μέγεθος του στόλου καθώς και χρήση διαφορετικού τύπου οχημάτων), τη δρομολόγηση των οχημάτων (επιλογή των βέλτιστων διαδρομών), το σχεδιασμό του δικτύου διανομής (βελτίωση των δρομολογίων, του χρονοπρογραμματισμού των δρομολογίων και επιλογή διαφορετικών ενδιάμεσων αποθηκών) και την επιλογή του προσωπικού που θα πραγματοποιήσει τις διανομές (καθορισμός απαιτήσεων προσωπικού). Μερικά από τα λειτουργικά προβλήματα που περιλαμβάνονται στον όρο μεταφορά είναι το πρόβλημα του καθορισμού και του ελέγχου της διαδικασίας αποστολής των προϊόντων, όπως επίσης και ο χρονοπρογραμματισμός των πληρωμάτων και των οχημάτων που θα πραγματοποιήσουν τις μεταφορές.

2.3 Εφαρμογές του Προβλήματος Δρομολόγησης Οχημάτων

Η παρούσα εργασία αφορά την επίλυση ενός προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων και έτσι κρίνεται σκόπιμη η παρουσίαση ορισμένων εφαρμογών του προβλήματος σε αυτή τη παράγραφο.

1. Δρομολόγηση και χρονικός προγραμματισμός σχολικών λεωφορείων (School Bus routing).
2. Πρόβλημα δρομολόγησης πλοίων (ship routing problem)
3. Το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων στην βιομηχανία αποκομιδής σκουπιδιών.
4. Το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων στην βιομηχανία ποτών, τροφών και γάλακτος
5. Δρομολόγηση και διανομή στην βιομηχανία παραγωγής εφημερίδων.

2.4 Μοντελοποίηση του Προβλήματος

Το εξεταζόμενο πρόβλημα είναι μια παραλλαγή του προβλήματος καθορισμού διαδρομών, το οποίο αναφέρεται και ως πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (Vehicle Routing Problem). Για τον ορισμό ενός απλού και βασικού προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων λαμβάνουμε υπ' όψιν τις ακόλουθες πληροφορίες:

- Το οδικό δίκτυο, που χρησιμοποιείται για την μεταφορά των αγαθών, περιγράφεται γενικά από ένα γράφημα, του οποίου τα τόξα αντιπροσωπεύουν τους δρόμους του δικτύου και οι κόμβοι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις των πελατών. Τα τόξα μπορεί να

είναι προσανατολισμένα ή όχι ανάλογα αν ο δρόμος είναι διπλής κατεύθυνσης ή όχι. Κάθε τόξο συσχετίζεται με ένα κόστος και ένα χρόνο ταξιδιού.

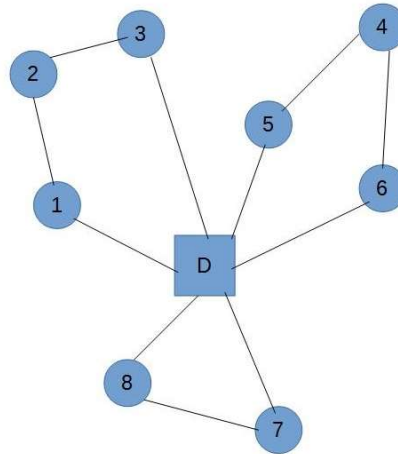
- Κάθε πελάτης βρίσκεται σε ένα κόμβο του δικτύου και απαιτεί συγκεκριμένη ποσότητα αγαθών (demand) να παραδοθεί σε αυτόν ή να συλλεχθεί από αυτόν. Η τοποθεσία στην οποία βρίσκεται, είναι γνωστή.
- Ο στόλος των οχημάτων αποτελείται από ένα αριθμό οχημάτων με όμοια ή όχι χαρακτηριστικά. Κάθε όχημα έχει συγκεκριμένη χωρητικότητα που εκφράζεται σε αριθμό προϊόντων που μπορεί να μεταφέρει. Γενικά, η συνολική ζήτηση όλων των πελατών ξεπερνά την χωρητικότητα ενός οχήματος. Έτσι χρησιμοποιούνται παραπάνω οχήματα για την ικανοποίηση της ζήτησης όλων των πελατών.
- Κάθε όχημα που χρησιμοποιείται, αναφέρεται σαν δρομολόγιο. Κάθε πελάτης εξυπηρετείται από ένα μόνο όχημα ή ανατίθεται σε ένα μόνο δρομολόγιο αντίστοιχα. Κάθε δρομολόγιο ξεκινά από την αποθήκη και τελειώνει στην αποθήκη.

Υπάρχουν αρκετοί επιπλέον περιορισμοί που αφορούν τόσο τους πελάτες όσο και τα οχήματα. Διάφορες αλλαγές πραγματοποιούνται συνήθως στο βασικό πρόβλημα ανάλογα με την παραλλαγή του προβλήματος που εξετάζεται.

Οι στόχοι που τίθενται κατά την επίλυση του προβλήματος είναι:

- Η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους μεταφοράς των προϊόντων, το οποίο εξαρτάται από τη συνολική διανυθείσα απόσταση ή από το συνολικό χρόνο που απαιτείται για τη μεταφορά των προϊόντων, και του πάγιου κόστους το οποίο σχετίζεται με τον αριθμό των οχημάτων και των οδηγών που θα χρησιμοποιηθούν για τη μοντελοποίηση του προβλήματος.
- Η ελαχιστοποίηση του αριθμού των οχημάτων ή των οδηγών που απαιτούνται για την εξυπηρέτηση όλων των πελατών.

Ένα απλό παράδειγμα δρομολόγησης οχημάτων είναι το παρακάτω, όπου με D συμβολίζεται η αποθήκη και με αριθμούς συμβολίζονται οι πελάτες.



Εικόνα 2.1: Παράδειγμα Δρομολόγησης Οχημάτων

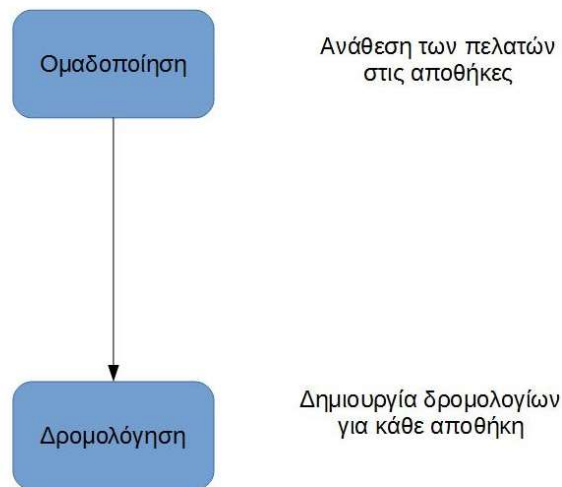
Το περιορισμένης χωρητικότητας πρόβλημα της δρομολόγησης οχημάτων (Capacitated Vehicle Routing Problem) ή απλούστερα πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων είναι στην ουσία επέκταση του προβλήματος του πλανόδιου πωλητή (Traveling Salesman Problem) στις περιπτώσεις όπου ένα μόνον όχημα δεν δύναται να επισκεφθεί όλους τους πελάτες. Σ' αυτήν την περίπτωση αναζητούνται πολλαπλοί υπόκυκλοι (κυκλικές διαδρομές), όλοι με αρχή και τέλος το ίδιο σημείο αφετηρίας, όπου έκαστος επισκέπτεται ένα υποσύνολο πελατών και όπου όλοι οι πελάτες καλύπτονται από το σύνολο των υπόκυκλων, χωρίς κάποιος πελάτης να καλύπτεται από περισσότερος του ενός υπόκυκλους.

Η παραλλαγή του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων που θα εξετασθεί στην παρούσα εργασία είναι η παραλλαγή που χρησιμοποιεί παραπάνω από μια αποθήκες. Υπάρχουν δυο τρόποι επίλυσης αυτού του προβλήματος:

1. Η ανάθεση των πελατών σε κάθε μια αποθήκη. Έτσι η κάθε αποθήκη θα έχει τα δικά της οχήματα και τον δικό της αριθμό πελατών για να εξυπηρετήσει. Σε αυτήν την περίπτωση επιλύεται στην ουσία ένας αριθμός από απλά προβλήματα δρομολόγησης οχημάτων.
2. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα, κάθε όχημα να ξεκινάει από μια αποθήκη, εξυπηρετώντας τους πελάτες της και τελικά να τερματίζει σε διαφορετική αποθήκη.

Το συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να θεωρηθεί σαν πρόβλημα ομαδοποίησης αφού ο στόχος είναι να βρεθούν οι διαδρομές των οχημάτων που ανήκουν σε κάθε μια αποθήκη. Το πρόβλημα επιλύεται επομένως σαν πρόβλημα δυο φάσεων, στην πρώτη φάση έχουμε

ανάθεση των πελατών στις αποθήκες και στην δεύτερη φάση δημιουργούνται τα δρομολόγια για κάθε μια αποθήκη και για κάθε ένα όχημα.



Εικόνα 2.2: Η ιεραρχία των αποφάσεων κατά τη λύση του προβλήματος

Η μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος είναι η ακόλουθη:

Σύνολα:

I – Σύνολο Αποθηκών

J – Σύνολο Πελατών

K – Σύνολο Οχημάτων

Παράμετροι:

N – Αριθμός Οχημάτων

C_{ij} – Απόσταση μεταξύ των σημείων i και j

V_i – Μέγιστος Αριθμός Προϊόντων που μπορεί να διαθέσει η αποθήκη I

d_i – Ζήτηση του πελάτη j

Q_k – Χωρητικότητα του οχήματος (δρομολογίου) k

Μεταβλητές Απόφασης:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{εάν ο πελάτης } i \text{ βρίσκεται πριν τον πελάτη } j \text{ στο δρομολόγιο } k \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

$$z_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{εάν ο πελάτης } j \text{ έχει ανατεθεί στην αποθήκη } i \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

U_{lk} – βοηθητική μεταβλητή για εσωτερικούς περιορισμούς απαλοιφής στο δρομολόγιο k

Μαθηματικό Μοντέλο:

$$\text{ελαχιστοποίηση} \quad \sum_{i \in I \cup J} \sum_{j \in I \cup J} \sum_{k \in K} C_{ij} x_{ijk} \quad (2.1)$$

υπό τους περιορισμούς,

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in I \cup J} x_{ijk} = 1, \quad j \in J \quad (2.2)$$

$$\sum_{j \in J} d_j \sum_{i \in I \cup J} x_{ijk} \leq Q_k, \quad k \in K \quad (2.3)$$

$$U_{lk} - U_{jk} + N x_{ijk} \leq N - 1, \quad l, j \in J, \quad k \in K \quad (2.4)$$

$$\sum_{j \in I \cup J} x_{ijk} - \sum_{j \in I \cup J} x_{jik} = 0, \quad k \in K, \quad i \in I \cup J \quad (2.5)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ijk} \leq 1, \quad k \in K \quad (2.6)$$

$$\sum_{j \in J} d_i z_{ij} \leq V_i, \quad i \in I \quad (2.7)$$

$$-z_{ij} + \sum_{u \in I \cup J} x_{iuk} + x_{ujk} \leq 1, \quad i \in I, j \in J, k \in K \quad (2.8)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \quad i \in I, j \in J, k \in K \quad (2.9)$$

$$z_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i \in I, j \in J \quad (2.10)$$

$$U_{lk} \geq 0, \quad l \in J, k \in K \quad (2.11)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση έχει στόχο την ελαχιστοποίηση της συνολικής διανυόμενης απόστασης όλων των οχημάτων και δίνεται από την εξίσωση (2.1). Η εξίσωση (2.2) ορίζει ότι κάθε πελάτης ανατίθεται σε ένα μόνο δρομολόγιο και η εξίσωση (2.3) αφορά τον περιορισμό χωρητικότητας των οχημάτων. Η εξίσωση (2.4) επιβάλλει τη μη δημιουργία υπο-δρομολογίων, ενώ η εξίσωση (2.5) επιβάλλει τους περιορισμούς ροής στο γράφημα. Η εξίσωση (2.6) ορίζει το δρομολόγιο που θα δημιουργηθεί και η (2.7) αφορά τα όρια στον αριθμό προϊόντων των αποθηκών. Η εξίσωση (2.8) επιβάλλει ότι ένας πελάτης μπορεί να ανατεθεί σε κάποια αποθήκη μόνο εφόσον υπάρχει δρομολόγιο που ενώνει τον πελάτη με την αποθήκη.

3. ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστούν οι οικογένειες αλγορίθμων βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν για τη διαμόρφωση της μεθόδου επίλυσης του προβλήματος. Χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι από την οικογένεια των απλών ευρετικών αλγορίθμων, από τους αλγόριθμους τοπικής αναζήτησης καθώς και γενετικοί αλγόριθμοι που ανήκουν στην κατηγορία των γενετικών αλγορίθμων.

3.1 Απλοί Ευρετικοί Αλγόριθμοι

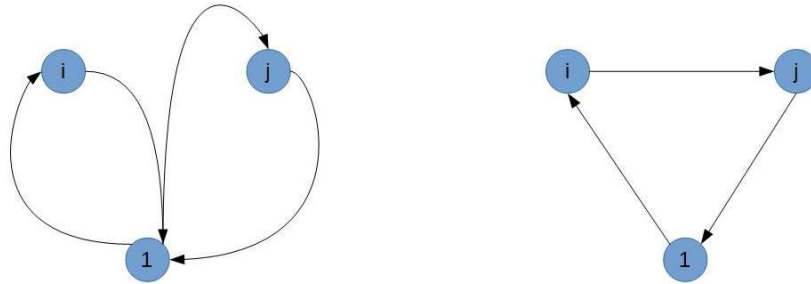
Αρχικά παρουσιάζεται ο αλγόριθμος του Πλησιέστερου Γείτονα, η διαδικασία του αλγορίθμου σε ψευδογλώσσα είναι η ακόλουθη:

- Βήμα 1.** Ξεκινώντας από οποιονδήποτε κόμβο του δικτύου σαν ξεκίνημα του μονοπατιού.
- Βήμα 2.** Εντοπίζεται ο κόμβος που είναι πλησιέστερα στον τελευταίο κόμβο που προστέθηκε στην διαδρομή. Προστίθεται αυτός ο κόμβος στο μονοπάτι.
- Βήμα 3.** Επαναλαμβάνεται το Βήμα 2 μέχρις ότου όλες οι κορυφές να βρίσκονται στο μονοπάτι.

Έγινε χρήση του παραπάνω αλγορίθμου σε όλες τις παραλλαγές του προβλήματος που εξετάστηκαν, όμως πραγματοποιήθηκαν και συγκεκριμένες αλλαγές οι οποίες θα αναλυθούν στις αντίστοιχες ενότητες.

Κατά την ανάπτυξη της προτεινόμενης μεθοδολογίας, έγινε χρήση του αλγορίθμου των εξοικονομήσεων των Clarke & Wright. Είναι ο πρώτος κατασκευαστικός αλγόριθμος που έχει προταθεί για την επίλυση του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων. Σε αυτόν τον αλγόριθμο υπολογίζονται οι εξοικονομήσεις όλων των πελατών και στην συνέχεια δημιουργούνται διαδρομές βάσει των καλύτερων εξοικονομήσεων.

- Βήμα 1.** Υπολογισμός των εξοικονομήσεων (savings) $s_{ij} = c_{ii} - c_{ij} + c_{jj}$ για όλα τα ζεύγη των πελατών i και j . Σημειώνεται ότι s_{ij} είναι η εξοικονόμηση σε κόστος αν συνδέοντας τις κορυφές i και j παράγεται η διαδρομή $(1, i, j, 1)$ αντί να υπάρχουν τα i και j σε δυο ξεχωριστές διαδρομές.



Εικόνα 3.1: Η Έννοια των Εξοικονομήσεων

- Βήμα 2.** Κατατάσσονται οι εξοικονομήσεις σε φθίνουσα σειρά.
- Βήμα 3.** Ξεκινώντας από την αρχή της λίστας εκτελείται η παρακάτω διαδικασία.
- Βήμα 4.** Εντοπίζεται ο πρώτος εφικτός δεσμός στην λίστα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προεκτείνει ένα από τα δύο άκρα της τρέχουσας διαδρομής.
- Βήμα 5.** Εάν η διαδρομή δεν μπορεί να επεκταθεί επιπλέον, ολοκληρώνεται. Επιλέγεται ο πρώτος εφικτός δεσμός στην λίστα για να ξεκινήσει μια καινούρια διαδρομή.
- Βήμα 6.** Επαναλαμβάνονται τα βήματα 4 και 5 μέχρι κανένας δεσμός να μην μπορεί να επιλεγεί.

Ο αλγόριθμος που περιγράφεται παραπάνω, αποτελεί την ακολουθητική (sequential) εκδοχή του αλγορίθμου των εξοικονομήσεων. Είναι αναγκαίο να ελέγχεται η εφικτότητα της μερικής λύσης σε κάθε βήμα, ώστε να είναι βέβαιο ότι δεν παραβιάζεται κάποιος περιορισμός. Επισημαίνεται ότι στο τέλος της διαδικασίας, υπάρχει πιθανότητα ορισμένοι πελάτες να μείνουν χωρίς διαδρομή.

3.2 Γενετικοί Αλγόριθμοι

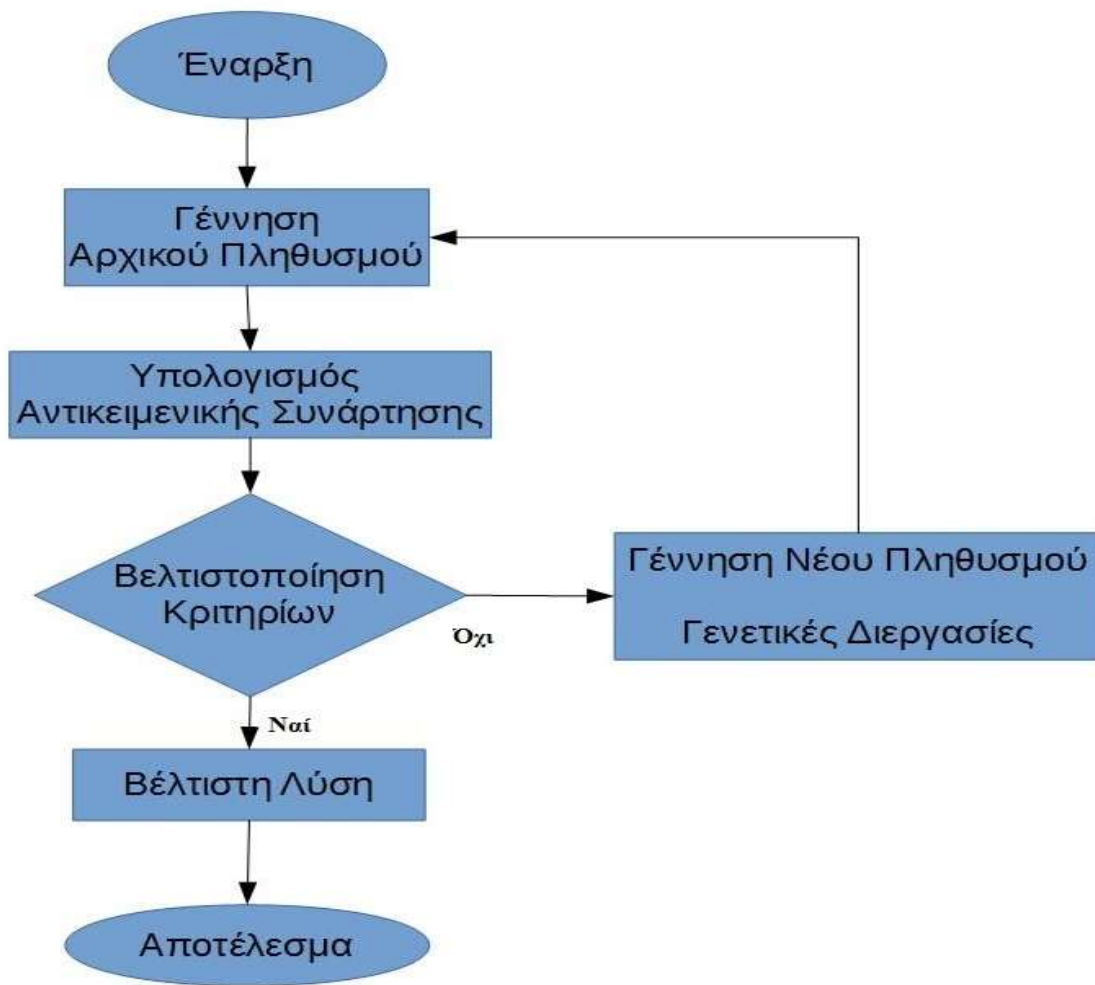
Οι πρώτοι γενετικοί αλγόριθμοι αναπτύχθηκαν από τον John H. Holland και εν συνεχεία από τον De Jong τη δεκαετία του 1960, για να δώσουν τη δυνατότητα επίλυσης δύσκολων προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης, όπως η ελαχιστοποίηση συναρτήσεων και η μηχανική μάθηση. Πρόκειται για στοχαστικούς αλγορίθμους, οι οποίοι έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία ως τεχνικές βελτιστοποίησης για την επίλυση μεγάλου εύρους προβλημάτων και μιμούνται τη διαδικασία εξέλιξης στη φύση. Η ισχύς τους οφείλεται στην ικανότητα προσαρμογής του συνόλου των πιθανών λύσεων σε κάθε επανάληψη.

Μερικές βασικές έννοιες της θεωρίας των γενετικών αλγορίθμων είναι:

- Πληθυσμός (population), ονομάζεται ο αριθμός των λύσεων που χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος σε κάθε επανάληψη του. Το μέγεθος του πληθυσμού διατηρείται σταθερό σε κάθε διαδοχική επανάληψη.
- Κάθε λύση που είναι μέλος του πληθυσμού, καλείται άτομο (individual) ή χρωμόσωμα (chromosome) και αποτελεί ένα σημείο στο χώρο αναζήτησης λύσεων. Οι δύο όροι χρησιμοποιούνται χωρίς ιδιαίτερη εννοιολογική διαφορά.
- Τα χρωμοσώματα εξελίσσονται μέσω των διαδοχικών επαναλήψεων που ονομάζονται γενιές (generation).
- Σε κάθε επανάληψη παράγονται απόγονοι (offspring) μέσω δύο διαδικασιών, της διασταύρωσης και της μετάλλαξης.
- Στην φάση διασταύρωσης (crossover), ο γενετικός αλγόριθμος παίρνει δύο χρωμοσώματα που ονομάζονται γονείς (parents) και παράγει με την ανταλλαγή τμημάτων των γονέων δύο απογόνους. Η φάση της διασταύρωσης επιταχύνει τη διαδικασία επίτευξης καλύτερων λύσεων.
- Στην φάση της μετάλλαξης (mutation), παράγεται ένας απόγονος από ένα μόνο γονέα, με στόχο τη διατήρηση ποικιλομορφίας στον πληθυσμό και την αποφυγή εγκλωβισμού σε τοπικό βέλτιστο.
- Η νέα γενιά δημιουργείται με την επιλογή των καλύτερων λύσεων, είτε απογόνων είτε γονέων, σύμφωνα με την ποιότητα (fitness) ή καταλληλότητα τους.
- Ένας γενετικός αλγόριθμος τερματίζεται όταν επιτευχθεί ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων, ή όταν σταματήσει να βελτιώνεται η λύση ή όταν μια αποδεκτή λύση έχει βρεθεί.

Σημειώνεται ότι στην προτεινόμενη μεθοδολογία χρησιμοποιείται και ο όρος κρίκος (link) για να περιγράψει το μέρος εκείνο του χρωμοσώματος που αντιστοιχεί σε κάθε αποθήκη. Δηλαδή, κάθε χρωμόσωμα έχει n κρίκους, εάν υπάρχουν n αποθήκες στο πρόβλημα που εξετάζεται.

Ένας τυπικός γενετικός αλγόριθμος ακολουθεί τα εξής βήματα (Εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2: Βασική Δομή ενός Γενετικού Αλγορίθμου

Κατά την εφαρμογή των γενετικών αλγορίθμων στο πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων, η σημαντικότερη δυσκολία που παρουσιάζεται είναι η σωστή κωδικοποίηση (encoding) των λύσεων ώστε να αντιστοιχούν σε κάποιο χρωμόσωμα. Η ύπαρξη πολλών διαδρομών, μπορεί να οδηγήσει σε μη εφικτές λύσεις κατά την εφαρμογή των γενετικών διεργασιών και ιδιαίτερα στην φάση της διασταύρωσης.

Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, στην προτεινόμενη μεθοδολογία χρησιμοποιείται η αναπαράσταση που προτάθηκε στον αλγόριθμο του Prins. Σύμφωνα με αυτόν, κάθε λύση αναπαρίσταται σαν ακολουθία κόμβων, χωρίς να χρησιμοποιούνται χαρακτηριστικά από τις διαδρομές. Με αυτόν τον τρόπο οι τελεστές διασταύρωσης μπορούν να εφαρμοστούν με ευκολία χωρίς να οδηγούν σε μη εφικτές λύσεις. Όταν έχουν ολοκληρωθεί οι γενετικές διεργασίες, μετατρέπεται ξανά η λύση στη μορφή δρομολογίων λαμβάνοντας υπ' όψιν τους περιορισμούς του προβλήματος.

3.3 Αλγόριθμοι Τοπικής Αναζήτησης

Η τοπική αναζήτηση βασίζεται στην αρχαιότερη μέθοδο βελτιστοποίησης, στην μέθοδο δοκιμής και σφάλματος. Η ιδέα είναι τόσο απλή που είναι εκπληκτικό πόσο επιτυχημένη έχει αποδειχτεί η τοπική αναζήτηση στην πράξη σε ένα πολύ μεγάλο αριθμό προβλημάτων συνδυαστικής βελτιστοποίησης.

Δοθέντος ενός προβλήματος βελτιστοποίησης και μια αρχική εφικτή λύση στο πρόβλημα, επιλέγεται η γειτονιά στην οποία εφαρμόζεται αναζήτηση για να βρεθεί καλύτερη λύση από την αρχική. Για όσο χρονικό διάστημα μια καλύτερη λύση υπάρχει, αντικαθίσταται η υπάρχουσα και συνεχίζεται η τοπική αναζήτηση μέχρι το σημείο που θα βρεθεί κάποιο τοπικό βέλτιστο και η λύση που έχει βρεθεί δεν θα βελτιώνεται παραπάνω.

Ένας από τους αλγόριθμους τοπικής αναζήτησης που χρησιμοποιήθηκε στην προτεινόμενη μεθοδολογία είναι η Επαναληπτική Διαδικασία Ανταλλαγής Κόμβων – Iterated Swap Procedure (ISP) των Ho και Ji (2003,2004). Η διαδικασία είναι παρόμοια με την τοπική αναζήτηση 2-opt, με τη διαφορά ότι δεν εξετάζονται όλες οι δυνατές ανταλλαγές, για να εξοικονομηθεί υπολογιστικός χρόνος.

Η διαδικασία του ISP σε ψευδογλώσσα είναι η ακόλουθη:

- Βήμα 1.** Επιλογή δυο κόμβων τυχαία από τον γονέα.
- Βήμα 2.** Ανταλλαγή των θέσεων των δυο κόμβων, για την παραγωγή ενός απογόνου.
- Βήμα 3.** Ανταλλαγή των γειτόνων των δύο κόμβων για το σχηματισμό τεσσάρων ακόμα απογόνων.
- Βήμα 4.** Αξιολόγηση όλων των απογόνων και εντοπισμός του καλύτερου.
- Βήμα 5.** Εάν ο καλύτερος απόγονος είναι καλύτερος από τον γονέα, αντικατάσταση του γονέα από τον απόγονο και επανάληψη της μεθόδου από το Βήμα 1.
Εάν όχι τερματισμός της διαδικασίας.

Ο ISP μπορεί να ανταλλάξει κόμβους που βρίσκονται στην ίδια διαδρομή ή κόμβους που αφορούν δρομολόγιο της ίδιας αποθήκης. Όμως μπορεί και να ανταλλάξει κόμβους από μια διαδρομή σε μια άλλη και κόμβους από μια αποθήκη σε μια άλλη. Η κάθε περίπτωση βελτίωσης που θα πραγματοποιηθεί, εξαρτάται αποκλειστικά από τους δύο κόμβους που θα επιλεγούν στο Βήμα 1.

Τυχαία Επιλογή 2 Κόμβων												
Γονέας	2	4	1	3	6	5	10	7	8	11	12	9
Απόγονος 1	2	4	1	11	6	5	10	7	8	3	12	9
Απόγονος 2	2	4	11	1	6	5	10	7	8	3	12	9
Απόγονος 3	2	4	1	6	11	5	10	7	8	3	12	9
Απόγονος 4	2	4	1	11	6	5	10	7	3	8	12	9
Απόγονος 5	2	4	1	11	6	5	10	7	8	12	3	9

Εικόνα 3.3: Η Διαδικασία του ISP

4. Η ΑΠΛΟΥΣΤΕΡΗ ΜΟΡΦΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Στο τρέχον κεφάλαιο αναλύεται η απλούστερη μορφή του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων με πολλαπλές αποθήκες και αναπτύσσεται μια προτεινόμενη μέθοδος επίλυσής του. Επίσης εξετάζεται η αποτελεσματικότητα της μεθόδου μέσω υπολογιστικών μελετών σε πειραματικά δεδομένα.

4.1 Καθορισμός του Προβλήματος και της Μεθοδολογία Επίλυσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί το πρόβλημα που επιλύεται είναι το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με πολλαπλές αποθήκες – Multiple Depot Vehicle Routing Problem (MDVRP). Ο μόνος περιορισμός που λαμβάνεται υπ' όψιν αφορά την χωρητικότητα των οχημάτων, συνεπώς πρόκειται για μία ιδιαίτερα απλή μορφή του προβλήματος και άρα κατάλληλη για την κατανόηση του.

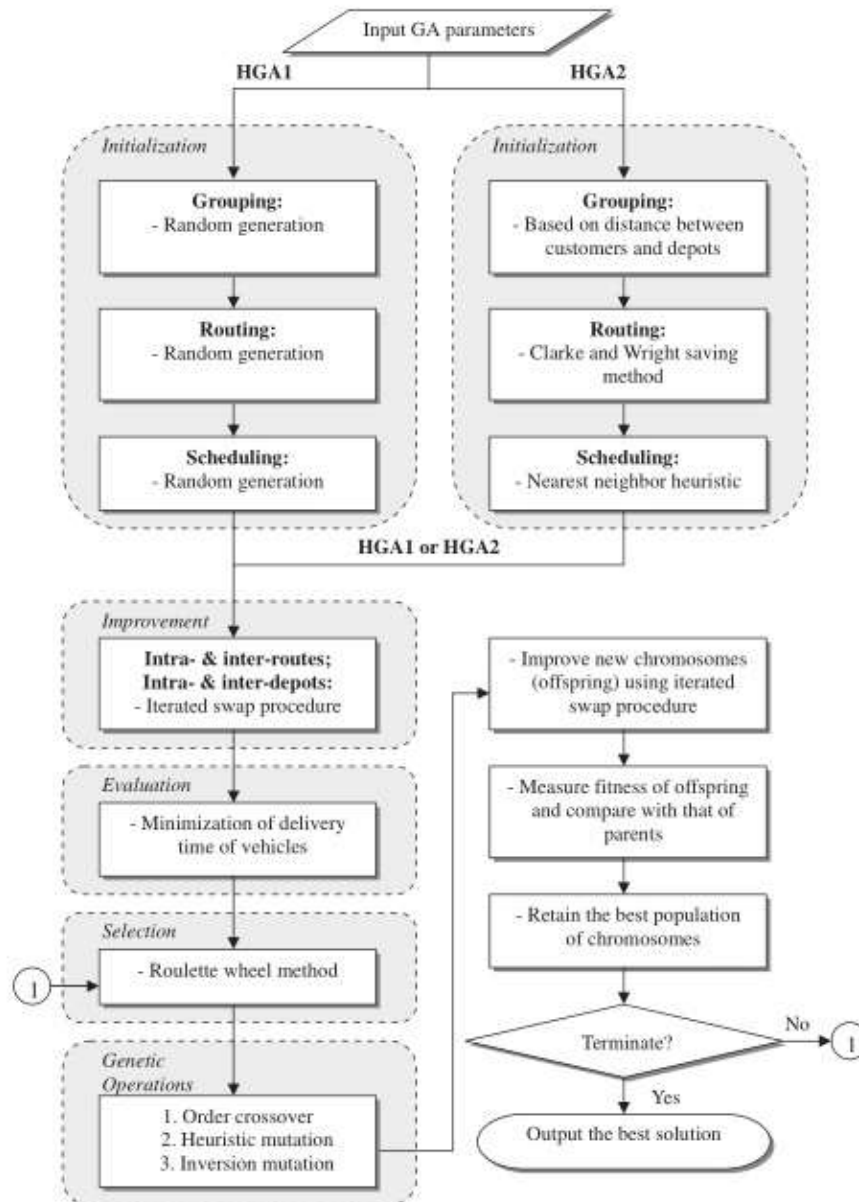
Η προτεινόμενη μεθοδολογία κάνει χρήση γενετικού αλγόριθμου που όμως είναι υβριδικός καθώς γίνεται χρήση αρκετών ευρετικών αλγορίθμων για την περαιτέρω βελτίωση της λύσης που παράγει. Αναπτύσσονται δύο υβριδικοί γενετικοί αλγόριθμοι – Hybrid Genetic Algorithms (HGA), ο HGA1 και ο HGA2 αντίστοιχα, στην εργασία των Ho, Ji και Lau.

Ο HGA1 παράγει αρχική λύση κάνοντας αρχικά ομαδοποίηση των πελατών σε κάθε αποθήκη με τυχαίο τρόπο. Σε επόμενο στάδιο τους αναθέτει σε διαδρομές πάλι με τυχαίο τρόπο, λαμβάνοντας υπ' όψιν τον περιορισμό χωρητικότητας και τέλος ο προγραμματισμός των δρομολογίων (ο καθορισμός της σειράς εξυπηρέτησης των πελατών που ανήκουν στο ίδιο δρομολόγιο) γίνεται επίσης με τυχαίο τρόπο.

Σε αντίθεση, ο HGA2 παράγει αρχική λύση κάνοντας ομαδοποίηση των πελατών στην κοντινότερη τους αποθήκη. Μετά με χρήση της μεθόδου εξοικονομήσεων των Clarke & Wright ανατίθενται οι πελάτες σε δρομολόγια, χωρίς να παραβιάζεται ο περιορισμός χωρητικότητας των οχημάτων. Τέλος χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος του πλησιέστερου γείτονα για να καθορίσει την σειρά εξυπηρέτησης των πελατών που έχουν ανατεθεί σε κάθε δρομολόγιο.

Αφού έχει παραχθεί ο προκαθορισμένος αριθμός χρωμοσωμάτων με κάποιον από τους παραπάνω αλγορίθμους, χρησιμοποιείται ο ISP για να βελτιώσει όλα τα χρωμοσώματα. Έπειτα κάθε χρωμόσωμα αξιολογείται με βάση μια συνάρτηση ποιότητας και γίνεται

χρήση της μεθόδου ρουλέτας – Roulette Wheel Selection Method, για να επιλεγούν τα χρωμοσώματα που θα υποστούν τις γενετικές διεργασίες, όπως την διασταύρωση και την μετάλλαξη. Μόλις παραχθεί κάποιος απόγονος, χρησιμοποιείται ο ISP για την βελτίωση του. Η καταλληλότητά του μετράται από την συνάρτηση ποιότητας και αν διαθέτει σχετικά καλή ποιότητα γίνεται μέλος του καινούριου πληθυσμού. Τα παραπάνω βήματα δημιουργούν μια επανάληψη, που θα επαναλαμβάνεται μέχρι να ολοκληρωθεί ο προκαθορισμένος αριθμός επαναλήψεων.



Εικόνα 4.1: Το Διάγραμμα Ροής της Προτεινόμενης Μεθόδου

Η συνάρτηση ποιότητας που χρησιμοποιείται για το MDVRP είναι ο μέγιστος χρόνος που χρειάζεται για να ολοκληρωθούν τα δρομολόγια της κάθε αποθήκης, και όχι το συνολικό άθροισμα του χρόνου που δαπανάται για την ολοκλήρωση όλων των δρομολογίων. Αυτό

συμβαίνει καθώς οι εργασίες παράδοσης ή παραλαβής προϊόντων ξεκινούν την ίδια χρονική περίοδο σε κάθε αποθήκη, έτσι κάθε αποθήκη χρειάζεται διαφορετικό χρόνο για την εξυπηρέτηση των πελατών που έχουν ανατεθεί σε αυτήν. Συνεπώς, ο μεγαλύτερος χρόνος ολοκλήρωσης των εργασιών ανάμεσα στις n αποθήκες αποτελεί την ποιότητα της λύσης. Η μαθηματική μοντελοποίηση της συνάρτησης ποιότητας στην εργασία των H_0, J_1 και L_{au} , είναι η ακόλουθη:

$$T_{dr} = \sum_{r=1}^{m_r} \{t[c(m_c), c(0)] + \sum_{i=1}^{m_c} t[c(i-1), c(i)]\}$$

$$\text{eval}(X_h) = \max(T_{1r}, T_{2r}, \dots, T_{nr})$$

$$t(a,b) = \frac{\sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2}}{V}$$

όπου:

T_{dr} ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση των δρομολογίων της αποθήκης d

$\text{eval}(X_h)$ η ποιότητα του χρωμοσώματος X_h

$t(a, b)$ ο χρόνος που απαιτείται για την μετακίνηση από τον πελάτη a στον b

V η ταχύτητα του οχήματος

$c(i)$ η θέση που βρίσκεται ο πελάτης i

$c(0)$ η θέση που βρίσκεται η αποθήκη d

m_c ο συνολικός αριθμός πελατών που υπάρχουν στο δρομολόγιο r

m_r ο συνολικός αριθμός δρομολογίων της αποθήκης d

Όπως έχει ήδη αναφερθεί για την επιλογή των χρωμοσωμάτων που θα υποστούν γενετικές διεργασίες, χρησιμοποιείται η μέθοδος της ρουλέτας του Goldberg. Η μέθοδος είναι βασισμένη στην παρατήρηση ότι η ρουλέτα έχει ορισμένη μια περιοχή για κάθε χρωμόσωμα του πληθυσμού, το μέγεθος της οποίας είναι ανάλογο της ποιότητας του χρωμοσώματος. Όσο μεγαλύτερη ποιότητα έχει το χρωμόσωμα, τόσο μεγαλύτερες πιθανότητες έχει να επιλεγεί για τις γενετικές διεργασίες. Παρόλα αυτά δεν υπάρχει κάποια εγγύηση ότι το χρωμόσωμα θα επιλεγεί, όσο μεγάλη ποιότητα και αν έχει. Το μόνο σίγουρο είναι ότι κατά μέσον όρο, ένα χρωμόσωμα θα επιλεγεί με πιθανότητα ανάλογη της καταλληλότητας ή ποιότητας του.

Η διαδικασία της ρουλέτας δοθέντος του μεγέθους του πληθυσμού (psize), είναι:

Βήμα 1. Υπολογισμός της συνολικής ποιότητας του πληθυσμού

$$F = \sum_{h=1}^{psize} eval(X_h)$$

Βήμα 2. Υπολογισμός πιθανότητας επιλογής p_h , για κάθε χρωμόσωμα X_h

$$p_h = \frac{F - eval(X_h)}{F \times (psize - 1)}, \quad h=1,2,\dots,psize$$

Βήμα 3. Υπολογισμός της αθροιστικής πιθανότητας q_h για κάθε χρωμόσωμα X_h

$$q_h = \sum_{j=1}^h p_j, \quad h=1,2,\dots,psize$$

Βήμα 4. Επιλογή ενός τυχαίου αριθμού r στο διάστημα $(0,1]$

Βήμα 5. Εάν $q_{h-1} < r \leq q_h$, τότε επιλέγεται το χρωμόσωμα X_h

Στον προτεινόμενο υβριδικό αλγόριθμο οι γενετικές διεργασίες που εφαρμόζονται είναι τρεις. Ένας τελεστής διασταύρωσης και δυο τελεστές μετάλλαξης.

- Ο τελεστής διασταύρωσης που χρησιμοποιείται είναι η κλασική διασταύρωση σειράς – classical order crossover (Gen and Cheng, 1997) και η διαδικασία που ακολουθεί είναι η εξής:

Βήμα 1. Επιλογή ενός υποσυνόλου από τον πρώτο γονέα με τυχαίο τρόπο

Βήμα 2. Παραγωγή ενός απογόνου με αντιγραφή των επιλεγμένων στοιχείων στις αντίστοιχες θέσεις του απογόνου

Βήμα 3. Διαγραφή των κόμβων του υποσυνόλου από το δεύτερο γονέα. Οι υπόλοιποι κόμβοι σχηματίζουν μια αλληλουχία.

Βήμα 4. Εισαγωγή των κόμβων στις κενές θέσεις του απογόνου, σύμφωνα με την αλληλουχία του βήματος 3.

Βήμα 5. Επανάληψη των βημάτων 1-4 για την παραγωγή ενός ακόμη απογόνου με ανταλλαγή των δύο γονέων.

Επιλεγμένο Υποσύνολο												
Γονέας 1	2	4	1	3	6	5	10	7	8	11	12	9
Γονέας 2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Απόγονος 1	1	2	3	4	6	5	10	7	8	9	11	12

Εικόνα 4.2: Η Διασταύρωση Σειράς

- Γίνεται χρήση της ευρετικής μετάλλαξης – heuristic mutation (Gen and Cheng, 1997), η οποία είναι σχεδιασμένη κάνοντας χρήση των τεχνικών γειτονιάς για να παράγει ένα καλύτερο απόγονο. Το σύνολο των χρωμοσωμάτων που δημιουργούνται από τις αλλαγές που πραγματοποιούνται στον γονέα, καλείται γειτονιά. Το καλύτερο χρωμόσωμα στην γειτονιά, είναι ο απόγονος. Πραγματοποιείται όμως μια αλλαγή για την εφαρμογή της ευρετικής μετάλλαξης στο MDVRP, σύμφωνα με την οποία όλα τα χρωμοσώματα που δημιουργούνται χρησιμοποιούνται σαν απόγονοι.

Βήμα 1. Επιλογή τριών τυχαίων κόμβων του γονέα.

Βήμα 2. Δημιουργία χρωμοσωμάτων, με την εκτέλεση όλων των δυνατών αντιμεταθέσεων μεταξύ των κόμβων. Όλα τα χρωμοσώματα που δημιουργούνται είναι απόγονοι.

- Η τελευταία γενετική διεργασία που χρησιμοποιείται είναι η μετάλλαξη αναστροφής– inversion mutation (Gen and Cheng, 1997). Γίνεται επιλογή ενός υποσυνόλου από τον γονέα και αναστρέφεται για την παραγωγή ενός απογόνου. Η μετάλλαξη αναστροφής, χρησιμοποιείται για να αυξήσει την ποικιλομορφία του πληθυσμού και όχι για να βελτιώσει την ποιότητά του.

Τυχαία Επιλογή των 3 Κόμβων												
Γονέας	2	4	1	3	6	5	10	7	8	11	12	9
Απόγονος 1	2	4	1	3	6	5	11	7	8	10	12	9
Απόγονος 2	2	4	1	10	6	5	3	7	8	11	12	9
Απόγονος 3	2	4	1	10	6	5	11	7	8	3	12	9
Απόγονος 4	2	4	1	11	6	5	3	7	8	10	12	9
Απόγονος 5	2	4	1	11	6	5	10	7	8	3	12	9

Εικόνα 4.3: Η Ευρετική Μετάλλαξη

Επιλεγμένο Υποσύνολο												
Γονέας	2	4	1	3	6	5	10	7	8	11	12	9
Απόγονος 1	2	4	1	3	7	10	5	6	8	11	12	9

Εικόνα 4.4: Η Μετάλλαξη Αναστροφής

Η επόμενη γενιά, επιλέγεται από τους καλύτερους απογόνους και γονείς ώστε το μέγεθος του πληθυσμού να παραμένει σταθερό σε κάθε επανάληψη. Πρόκειται συνεπώς για μια στρατηγική επιβίωσης των δυνατότερων (survival of the best individuals).

Σε επόμενο βήμα, γίνεται εφαρμογή της μεθόδου σε ένα πρόβλημα με τα παρακάτω δεδομένα:

Πίνακας 4-1. Δεδομένα Προβλήματος p01	
Αριθμός Αποθηκών	4
Αριθμός Πελατών	50
Αριθμός Οχημάτων σε κάθε Αποθήκη	4
Χωρητικότητα Οχημάτων	80

Η σωστή επιλογή των παραμέτρων του γενετικού αλγορίθμου για κάθε εξεταζόμενο πρόβλημα, αποτελεί ιδιαίτερα σημαντική εργασία. Πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψιν παράγοντες όπως το μέγεθος του πληθυσμού, οι τεχνικές αξιολόγησης των λύσεων, τα κριτήρια επιλογής και οι λόγοι μετάλλαξης και διασταύρωσης.

Πίνακας 4-2. Πειραματικές Παράμετροι	
Μέγεθος Πληθυσμού	25
Αριθμός Επαναλήψεων	500
Λόγος Διασταύρωσης	0.4
Λόγος Μετάλλαξης	0.2

Εκτελώντας τον αλγόριθμο, παρατηρείται ότι παρόλο που σταδιακά επιτυγχάνεται καλύτερη λύση, ο αλγόριθμος συγκλίνει χωρίς να παράγει την καλύτερη γνωστή λύση. Τόσο οι λύσεις από τον HGA1 όσο και οι λύσεις από τον HGA2 βελτιώνονται όπως είναι αναμενόμενο και επιπλέον ο HGA2 παράγει καλύτερες λύσεις, καθώς κάνει χρήση ευρετικών αλγορίθμων. Η απόκλιση της καλύτερης λύσης από την γνωστή λύση είναι της τάξης του 45%, επομένως υπάρχει μεγάλο περιθώριο βελτίωσης της προτεινόμενης μεθόδου.

Πραγματοποιείται αλλαγή στην συνάρτηση ποιότητας, ώστε η ποιότητα του κάθε χρωμοσώματος να αντιστοιχεί στην συνολική απόσταση που διανύουν τα οχήματα της κάθε αποθήκης. Με την παραπάνω αλλαγή, παρατηρείται μεγάλη βελτίωση στην αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου. Η απόκλιση της καλύτερης λύσης από την γνωστή λύση είναι της τάξης του 9%.

Εξετάζοντας την τιμή της καλύτερης λύσης σε κάθε επανάληψη, παρατηρείται ότι ο αλγόριθμος HGA2 συγκλίνει νωρίς σε κάποια συγκεκριμένη λύση, που όμως δεν είναι απαραίτητα η βέλτιστη. Αυτό εξηγείται καθώς τα χρωμοσώματα στον αρχικό πληθυσμό του αλγορίθμου έχουν τους ίδιους πελάτες σε κάθε δρομολόγιο λόγω της εφαρμογής του αλγορίθμου Clarke & Wright. Για να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου, χρησιμοποιείται αρχικός πληθυσμός αποτελούμενος από χρωμοσώματα του HGA2 σε ποσοστό 8% και τα υπόλοιπα παραγόμενα από τον HGA1 (τα οποία έχουν παραχθεί με τυχαίο τρόπο). Η παραπάνω αλλαγή δεν αποφέρει τα αναμενόμενα αποτελέσματα με συνέπεια, συνεπώς δεν γίνεται εφαρμογή της στην προτεινόμενη μεθοδολογία. Η

απόκλιση της καλύτερης λύσης από την γνωστή λύση είναι της τάξης του 7.8%. Παρόλα αυτά, γίνεται φανερή η ανάγκη για ύπαρξη ποικιλομορφίας στα χρωμοσώματα του αρχικού πληθυσμού.

Συνεχίζοντας την προσπάθεια βελτίωσης της προτεινόμενης μεθόδου, σχεδιάστηκε ένας τελεστής μετάλλαξης ο οποίος επιλέγει τυχαία έναν κόμβο και τον μεταθέτει στην καλύτερη δυνατή θέση μέσα σε ολόκληρο το χρωμόσωμα (Single Customer Re routing). Η συγκεκριμένη αλλαγή πραγματοποιήθηκε καθώς ο προτεινόμενος αλγόριθμος δεν δίνει τη δυνατότητα μεταβολής του αριθμού των πελατών που έχουν ανατεθεί αρχικά σε κάθε αποθήκη. Τα αποτελέσματα από την συγκεκριμένη τροποποίηση είναι ενθαρρυντικά καθώς προσδίδεται μια παραπάνω ευελιξία στην προτεινόμενη μέθοδο. Η απόκλιση της καλύτερης λύσης από την γνωστή λύση είναι 4.9%.

Υιοθετώντας της παραπάνω αλλαγές η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου αυξήθηκε σε σημαντικό βαθμό και επομένως σε επόμενο βήμα θα επιλυθούν περισσότερα προβλήματα.

4.2 Υπολογιστικές Μελέτες και Αποτελέσματα

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος υλοποιείται στο προγραμματιστικό περιβάλλον της MATLAB και δοκιμάζεται σε αρκετά προβλήματα δρομολόγησης οχημάτων, τα οποία είναι διαθέσιμα στο διαδίκτυο, με αριθμούς πελατών από 50 έως 360 και αριθμούς αποθηκών από 2 έως 9. Επιπλέον, πραγματοποιείται σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα καλύτερα γνωστά αποτελέσματα στην βιβλιογραφία. Τα προβλήματα που επιλύονται έχουν προταθεί από τον Cordeau.

4.2.1 Πρόβλημα p01

Πρόκειται για το πρόβλημα που χρησιμοποιείται παραπάνω για την εφαρμογή μετατροπών στον προτεινόμενο αλγόριθμο. Πρόκειται για ένα πρόβλημα με 4 αποθήκες, 50 πελάτες, 4 διαθέσιμα οχήματα σε κάθε αποθήκη και χωρητικότητα οχημάτων ίση με 80 μονάδες. Τα δρομολόγια παρουσιάζονται στον αντίστοιχο πίνακα.

Συγκρίνοντας με τη καλύτερη γνωστή λύση στην βιβλιογραφία παρατηρείται ότι έχει επιτευχθεί ο ίδιος αριθμός δρομολογίων και αρκετές ομοιότητες μεταξύ συγκεκριμένων δρομολογίων. Η καλύτερη γνωστή λύση έχει συνολικό κόστος 576.87 μονάδων, άρα η παραπάνω λύση έχει απόκλιση σε ποσοστό 4.9%.

4.2.2 Πρόβλημα p02

Πρόκειται για ένα πρόβλημα με 4 αποθήκες, 50 πελάτες, 2 διαθέσιμα οχήματα σε κάθε αποθήκη και χωρητικότητα οχημάτων ίση με 160 μονάδες. Τα δρομολόγια παρουσιάζονται στον αντίστοιχο πίνακα.

Η καλύτερη γνωστή λύση επιλύει το πρόβλημα χρησιμοποιώντας ένα λιγότερο δρομολόγιο και με συνολικό κόστος 473.53 μονάδων. Η απόκλιση είναι της τάξης του 5.2%.

Πίνακας 4-3. Δρομολόγια Προβλήματος p01			
Αποθήκη	Κόστος	Χωρητικότητα	Δρομολόγιο
1	66.5524	79	0-42-19-40-41-13-0
1	60.0638	71	0-44-45-33-15-37-17-0
1	34.6780	75	0-47-18-4-0
2	96.0123	80	0-23-24-43-7-26-48-0
2	58.2251	76	0-11-32-1-8-27-0
2	51.1873	64	0-25-14-6-0
2	40.1904	70	0-12-5-38-46-0
3	41.0298	56	0-30-39-10-49-0
3	45.4263	70	0-34-21-16-50-9-0
4	79.4434	72	0-35-36-3-28-31-22-0
4	32.4694	64	0-20-2-29-0
Συνολικό Κόστος Λύσης: 605.2781			

Πίνακας 4-4. Δρομολόγια Προβλήματος p02			
Αποθήκη	Κόστος	Χωρητικότητα	Δρομολόγιο
1	115.6816	150	0-13-41-40-19-42-44-45-33-15-37-17-0
1	52.5181	99	0-25-14-18-4-0
2	116.6558	157	0-46-32-1-8-26-7-43-24-23-48-6-27-0
2	38.7957	75	0-5-12-47-0
3	89.3104	160	0-9-38-11-16-50-21-34-30-39-10-49-0
4	85.1062	136	0-29-2-22-31-28-3-36-35-20-0
Συνολικό Κόστος Λύσης: 498.0678			

4.2.3 Πρόβλημα p03

Πρόκειται για ένα πρόβλημα με 5 αποθήκες, 75 πελάτες, 3 διαθέσιμα οχήματα σε κάθε αποθήκη και χωρητικότητα οχημάτων ίση με 140 μονάδες. Το εξεταζόμενο πρόβλημα είναι μεγαλύτερου μεγέθους, συνεπώς γίνεται αλλαγή του αριθμού επαναλήψεων σε 750. Τα δρομολόγια παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4-5. Δρομολόγια Προβλήματος p03			
Αποθήκη	Κόστος	Χωρητικότητα	Δρομολόγιο
1	34.5643	125	0-4-52-46-34-67-0
1	32.5158	75	0-6-2-68-75-0
2	92.6468	134	0-27-13-57-15-37-20-70-60-71-69-36-0
2	50.5578	134	0-5-47-21-74-30-45-29-0
2	4.4721	20	0-48-0
3	63.6106	132	0-66-65-38-10-58-7-0
3	74.1733	140	0-53-11-59-19-54-8-35-0
3	14.5602	31	0-14-0
4	102.2116	127	0-9-39-72-31-25-55-18-50-0
4	47.8608	132	0-44-32-40-12-26-17-0
4	50.1879	74	0-51-16-49-24-3-0
5	53.0411	127	0-43-41-56-23-63-33-73-1-0
5	69.0713	113	0-62-28-61-22-64-42-0
Συνολικό Κόστος Λύσης: 689.4734			

Η καλύτερη γνωστή λύση έχει συνολικό κόστος 641.19 και άρα 7.5% από την άνω.

4.2.4 Πρόβλημα p04

Το πρόβλημα p04 είναι επίσης μεγάλου μεγέθους, καθώς αποτελείται από 100 πελάτες, 2 αποθήκες, με 8 οχήματα η κάθε μια, και χωρητικότητα οχήματος 100 μονάδες. Ο αλγόριθμος εκτελείται για 1000 επαναλήψεις. Παρατηρείται ότι η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου ελαττώθηκε καθώς το μέγεθος του προβλήματος αυξήθηκε. Η απόκλιση από την καλύτερη γνωστή λύση είναι 11.7%.

4.2.5 Πρόβλημα p05

Το πρόβλημα p05 αποτελείται από 100 πελάτες, 2 αποθήκες, με 5 οχήματα η κάθε μια, και χωρητικότητα οχήματος 200 μονάδες. Η λύση του προβλήματος παρουσιάζεται στον πίνακα. Η απόκλιση της λύσης που βρέθηκε από την καλύτερη γνωστή είναι 12.2%.

Πίνακας 4-6. Δρομολόγια Προβλήματος p04			
Αποθήκη	Κόστος	Χωρητικότητα	Δρομολόγιο
1	90.0771	99	0-56-23-67-39-25-55-0
1	101.6931	100	0-44-38-86-16-17-84-60-0
1	54.8000	95	0-92-98-85-61-5-6-0
1	64.2542	97	0-72-75-4-54-26-0
1	77.8598	100	0-42-15-43-14-91-100-37-93-97-0
1	59.7247	99	0-58-53-40-21-73-74-22-41-57-0
1	34.6442	95	0-94-96-99-59-95-0
1	24.4222	56	0-2-87-13-0
2	115.6189	97	0-8-45-46-47-36-49-64-0
2	121.7564	100	0-80-24-29-34-35-71-65-66-0
2	69.9304	100	0-78-79-3-68-12-69-0
2	79.5200	100	0-89-83-82-48-19-7-0
2	65.2953	97	0-88-62-11-63-90-32-10-70-0
2	69.7422	96	0-20-51-9-81-33-77-1-0
2	80.7184	100	0-30-50-76-28-27-18-52-0
2	8.9443	27	0-31-0
Συνολικό Κόστος Λύσης: 1119			

Πίνακας 4-7. Δρομολόγια Προβλήματος p05			
Αποθήκη	Κόστος	Χωρητικότητα	Δρομολόγιο
1	145.3448	198	0-7-88-62-11-64-49-36-47-19-63-90-10-31-52-0
1	119.0876	200	0-60-6-94-95-92-42-15-43-14-38-86-44-91-100-37-98-0
1	54.3857	178	0-5-99-96-59-93-85-16-61-17-84-0
1	102.4549	177	0-87-97-13-89-18-82-48-46-8-45-83-0
2	168.7509	197	0-69-1-51-9-20-30-70-32-66-65-71-35-34-78-29-24-0
2	121.5640	196	0-72-73-2-57-41-22-74-75-56-23-67-39-25-55-0
2	84.3455	199	0-54-4-21-40-58-53-27-28-26-12-68-80-0
2	46.2481	113	0-77-3-79-81-33-50-76-0
Συνολικό Κόστος Λύσης: 842.1816			

4.2.6 Πρόβλημα p06

Το πρόβλημα p06 αποτελείται από 100 πελάτες, 3 αποθήκες, με 6 οχήματα η κάθε μια, και χωρητικότητα οχήματος 100 μονάδες. Η λύση του προβλήματος παρουσιάζεται στον αντίστοιχο πίνακα. Η καλύτερη γνωστή λύση για το παραπάνω πρόβλημα έχει κόστος 876.5 μονάδες, άρα η λύση που βρέθηκε έχει απόκλιση ίση με 8.2%.

4.2.7 Πρόβλημα p07

Το πρόβλημα αποτελείται από 100 πελάτες, 4 αποθήκες με 4 οχήματα διαθέσιμα στην κάθε μία και χωρητικότητα οχήματος ίση με 100 μονάδες. Η λύση του προβλήματος φαίνεται στον πίνακα. Σε ορισμένες αρχικές λύσεις του προβλήματος, παρατηρείται ότι δημιουργείται ένα επιπλέον δρομολόγιο για την αποθήκη 1 από τα επιτρεπτά. Επομένως οι πελάτες αυτού του δρομολογίου ανατέθηκαν σε άλλη αποθήκη (στην 2) ώστε να διατηρείται η εφικτότητα των αρχικών λύσεων. Η απόκλιση από την καλύτερη γνωστή λύση είναι ίση με 4.8%.

Πίνακας 4-8. Δρομολόγια Προβλήματος p06			
Αποθήκη	Κόστος	Χωρητικότητα	Δρομολόγιο
1	89.6806	99	0-94-6-89-18-60-83-8-46-45-17-0
1	66.0218	95	0-92-13-87-57-15-43-42-100-0
1	29.5425	98	0-37-97-95-96-99-59-98-0
1	27.6005	96	0-84-5-93-85-0
1	48.4591	90	0-86-38-14-44-91-0
1	14.4721	32	0-16-61-0
2	75.3320	99	0-25-55-24-29-68-80-12-54-0
2	65.5724	96	0-74-22-41-2-40-58-53-26-0
2	50.5299	91	0-39-67-23-56-0
2	32.5264	82	0-21-73-72-75-4-0
3	65.3422	100	0-32-20-9-81-30-70-0
3	73.2301	100	0-50-28-76-77-79-33-51-0
3	68.0805	98	0-88-7-82-48-62-63-90-0
3	88.5888	100	0-11-64-49-36-47-19-0
3	100.1871	98	0-3-78-34-35-71-65-66-0
3	53.7637	84	0-10-31-52-27-69-1-0
Συνολικό Κόστος Λύσης: 948.9296			

Πίνακας 4-9. Δρομολόγια Προβλήματος p07			
Αποθήκη	Κόστος	Χωρητικότητα	Δρομολόγιο
1	61.8674	94	0-82-48-47-36-46-8-0
1	71.4265	99	0-98-91-44-38-86-16-0
1	30.0187	99	0-5-93-59-99-96-60-0
1	48.0047	90	0-83-45-17-61-85-84-0
2	83.7101	95	0-29-24-55-25-67-39-4-0
2	67.7178	98	0-3-33-81-35-34-78-79-0
2	36.8844	96	0-80-68-12-26-54-0
2	50.2212	66	0-77-76-50-1-28-0
3	58.6767	91	0-74-75-56-23-22-41-2-0
3	68.7922	86	0-97-92-37-100-14-42-43-15-57-0
3	42.0823	86	0-58-53-40-21-72-73-0
3	34.4550	99	0-13-6-94-95-87-0
4	81.5644	95	0-51-9-71-65-66-20-0
4	86.8546	98	0-10-11-64-49-19-7-88-0
4	55.5677	81	0-62-63-90-32-30-70-0
4	50.9283	85	0-31-52-18-89-27-69-0
Συνολικό Κόστος Λύσης: 928.7721			

4.2.8 Πρόβλημα p08

Το πρόβλημα αποτελείται από 249 πελάτες και 2 αποθήκες. Κάθε αποθήκη έχει 14 διαθέσιμα οχήματα με χωρητικότητα 500 μονάδων. Λόγω του μεγάλου μεγέθους του προβλήματος, ο αλγόριθμος εκτελείται για 2000 επαναλήψεις και αρχικό πληθυσμό ίσο με 40 χρωμοσώματα. Η απόκλιση της λύσης που βρέθηκε από την καλύτερη γνωστή είναι 8.8%.

Πίνακας 4-10. Δρομολόγια Προβλήματος ρ08			
Αποθήκη	Κόστος	Χωρητικότητα	Δρομολόγιο
1	367.619	496	0-27-228-124-5-133-211-90-61-130-129-221-205-31-1-229-71-33-0
1	298.288	495	0-32-78-201-147-127-40-24-17-175-55-47-80-0
1	248.621	499	0-52-219-75-226-176-66-168-103-113-194-197-42-0
1	186.876	498	0-39-102-15-233-136-59-162-16-84-0
1	225.958	491	0-13-167-89-248-121-106-189-220-153-148-0
1	182.809	498	0-72-185-19-79-12-49-191-204-0
1	184.213	500	0-195-58-183-150-36-83-206-65-53-0
1	154.524	489	0-38-242-56-10-238-131-214-57-203-0
1	173.567	497	0-198-73-96-213-166-207-30-18-137-173-54-0
1	132.477	500	0-193-101-114-26-9-230-170-2-217-0
1	156.074	494	0-235-43-223-122-146-135-123-118-3-8-112-190-0
1	90.3499	491	0-69-177-237-62-249-157-225-241-11-82-0
1	46.9716	342	0-163-224-64-125-0
2	313.164	498	0-108-70-99-232-142-234-68-231-139-202-155-76-0
2	282.976	498	0-20-109-110-60-158-159-134-51-67-165-0
2	199.171	495	0-199-44-105-132-97-29-227-41-210-178-92-0
2	250.568	499	0-188-87-154-244-209-138-21-145-115-4-74-0
2	206.004	497	0-50-88-247-149-86-151-94-245-119-0
2	166.329	497	0-22-111-222-85-171-181-169-243-6-0
2	189.696	499	0-128-45-212-107-240-117-98-14-236-0
2	218.849	500	0-182-34-95-140-172-186-100-81-164-7-0
2	180.307	500	0-200-93-187-77-91-144-192-184-218-239-35-0

2	122.789	488	0-120-23-48-196-174-143-179-161-46-216-0
2	127.903	435	0-37-116-126-215-104-141-25-246-0
2	122.536	410	0-63-180-152-156-28-160-208-0
Συνολικό Κόστος Λύσης: 4828.64			

4.2.9 Πρόβλημα p12

Το πρόβλημα αποτελείται από 80 πελάτες, 2 αποθήκες με 5 διαθέσιμα οχήματα χωρητικότητας 60 μονάδων. Η απόκλιση από την καλύτερη γνωστή λύση είναι 12.1%.

Πίνακας 4-11. Δρομολόγια Προβλήματος p12

Αποθήκη	Κόστος	Χωρητικότητα	Δρομολόγιο
1	340.16	59	0-5-13-21-29-37-35-27-19-11-18-26-34-25-33-36-28-20-0
1	108.191	56	0-3-10-17-9-1-2-0
1	198.995	60	0-7-15-23-31-59-67-75-40-32-24-16-8-0
1	68.2843	40	0-6-14-12-4-0
2	283.467	57	0-53-61-69-77-51-58-66-74-39-22-30-38-73-65-57-41-0
2	276.989	57	0-52-54-62-70-78-63-71-79-80-72-64-56-48-0
2	140.198	59	0-44-60-68-76-49-50-42-43-0
2	62.4264	44	0-46-55-47-45-0
Συνολικό Κόστος Λύσης: 1478.71			

4.2.10 Πρόβλημα p15

Το πρόβλημα αποτελείται από 160 πελάτες και 4 αποθήκες. Κάθε αποθήκη έχει στην διάθεση της 5 οχήματα χωρητικότητας 60 μονάδων. Ο αλγόριθμος εκτελείται για 1600 επαναλήψεις, δηλαδή ανάλογα με τον αριθμό των πελατών. Η απόκλιση από την καλύτερη γνωστή λύση είναι 23.6%.

Πίνακας 4-12. Δρομολόγια Προβλήματος p15			
Αποθήκη	Κόστος	Χωρητικότητα	Δρομολόγιο
1	368.642	54	0-18-26-34-33-25-17-20-28-36-30-22-14-23-31-39-24-16-0
1	100.645	52	0-3-10-11-21-13-5-0
1	68.2843	56	0-7-8-15-6-4-0
1	74.1421	40	0-2-1-9-12-0
2	609.408	60	0-61-69-77-116-105-113-75-67-66-74-38-73-65-57-60-68-76-78-70-62-71-79-80-118-110-72-64-56-0
2	142.426	52	0-52-49-50-58-59-51-43-0
2	86.5028	56	0-44-46-54-63-55-47-0
2	76.5685	56	0-48-53-45-42-41-0
3	459.527	59	0-100-108-97-106-114-159-151-152-160-115-107-117-109-101-95-103-111-119-120-112-104-96-0
3	166.41	60	0-92-89-98-90-83-91-99-93-0
3	108.482	60	0-86-94-102-87-88-85-0
3	40	36	0-82-81-84-0
4	203.162	58	0-122-121-129-137-145-153-35-27-19-140-132-0
4	68.2843	56	0-125-128-135-127-124-0
4	288.836	60	0-133-136-144-143-134-142-150-158-40-32-29-37-156-148-126-0
4	234.985	49	0-130-138-146-154-155-147-139-157-149-141-131-123-0
Συνολικό Κόστος Λύσης: 3096.31			

4.2.11 Πρόβλημα p18

Το πρόβλημα αποτελείται από 240 πελάτες και 6 αποθήκες. Κάθε αποθήκη έχει στην διάθεση της 5 οχήματα χωρητικότητας 60 μονάδων. Ο αλγόριθμος εκτελείται για 2600 επαναλήψεις, δηλαδή ανάλογα με τον αριθμό των πελατών. Η απόκλιση από την καλύτερη γνωστή λύση είναι 22.5%

Πίνακας 4-13. Δρομολόγια Προβλήματος p18			
Αποθήκη	Κόστος	Χωρητικότητα	Δρομολόγιο
1	290.937	60	0-3-21-29-37-16-23-14-28-36-25-17-18-10-0
1	405.602	60	0-13-24-32-40-75-67-59-74-39-31-30-22-20-9-26-27-19-11-0
1	68.2843	52	0-7-15-6-12-4-0
1	62.4264	48	0-8-5-2-1-0
2	437.765	59	0-63-71-79-78-70-62-54-60-68-76-73-38-65-57-66-58-61-64-56-0
2	128.284	52	0-52-49-50-43-51-53-0
2	68.2843	56	0-47-46-55-48-45-0
2	40	36	0-42-41-44-0
3	204.853	60	0-86-94-102-110-118-80-72-69-77-116-108-100-92-84-0
3	68.2843	56	0-82-85-88-95-87-0
3	480.837	60	0-96-104-112-120-119-111-103-99-107-115-160-152-106-114-159-151-142-150-158-113-105-97-89-0
3	154.985	59	0-83-93-101-109-117-91-98-90-81-0
4	293.98	56	0-136-144-157-149-141-131-139-147-155-200-192-184-154-146-138-130-0
4	120.198	59	0-124-132-140-148-156-129-121-122-0
4	94.7871	56	0-128-127-135-143-134-126-0
4	48.2843	32	0-123-133-125-0
5	128.929	58	0-167-175-183-174-188-180-172-166-0
5	530.468	60	0-182-190-198-240-35-153-145-137-199-191-176-197-189-181-171-179-187-195-186-194-193-235-185-177-0
5	86.5028	56	0-162-170-178-169-161-164-0
5	62.4264	44	0-165-168-173-163-0
6	228.482	57	0-212-220-228-236-233-225-217-209-234-226-218-210-202-0
6	391.516	60	0-222-230-238-33-34-239-231-223-232-

			224-216-213-221-229-237-196-227-219- 211-0
6	82.4264	52	0-208-207-215-214-206-0
6	60	48	0-205-203-201-204-0
Συνολικό Κόστος Λύσης: 4538.54			

4.2.12 Πρόβλημα p21

Το πρόβλημα αποτελείται από 360 πελάτες και 9 αποθήκες. Κάθε αποθήκη έχει 5 διαθέσιμα οχήματα με χωρητικότητα 60 μονάδων. Λόγω του μεγάλου μεγέθους του προβλήματος, ο αλγόριθμος εκτελείται για 3000 επαναλήψεις και αρχικό πληθυσμό ίσο με 40 χρωμοσώματα. Η απόκλιση είναι της τάξης του 30%. Εάν και αναμένεται η μείωση της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης μεθόδου όσο αυξάνεται το μέγεθος του προβλήματος, όπως παρατηρήθηκε και σε προηγούμενα προβλήματα, στο συγκεκριμένο η αποτελεσματικότητα έχει μειωθεί υπερβολικά. Πιθανόν να απαιτείται κάποια αλλαγή στις παραμέτρους του γενετικού αλγόριθμου, όπως πχ ακόμη μεγαλύτερος αριθμός επαναλήψεων ή μεγαλύτερο μέγεθος πληθυσμού.

Πίνακας 4-14. Δρομολόγια Προβλήματος p21			
Αποθήκη	Κόστος	Χωρητικότητα	Δρομολόγιο
1	415.079	60	0-23-31-14-22-30-38-320-312-317-36-28-20-18-19-21-29-32-24-16-0
1	128.284	52	0-12-9-10-11-3-13-0
1	68.2843	56	0-6-7-15-8-5-0
1	40	36	0-4-1-2-0
2	487.541	59	0-60-68-355-73-65-39-74-66-59-67-116-77-69-61-64-56-54-62-79-71-63-0
2	142.426	52	0-52-49-57-58-50-51-43-0
2	60	60	0-47-46-44-41-42-0
2	68.2843	40	0-45-53-48-55-0
3	509.839	59	0-94-108-100-101-109-117-91-98-106-97-105-113-75-40-158-150-159-114-152-160-115-107-99-0
3	345.273	60	0-102-110-72-80-118-119-111-103-120-112-104-96-93-83-90-0
3	82.4264	52	0-92-86-95-87-88-0
3	80.645	56	0-84-89-81-82-85-0
4	424.763	58	0-143-151-134-148-156-37-27-35-153-145-137-138-146-154-139-157-149-141-144-136-0
4	200.552	60	0-130-129-140-142-135-133-131-123-0
4	60	60	0-124-126-127-128-125-0
4	54.1421	32	0-122-121-132-0
5	621.567	60	0-180-188-196-237-185-177-194-195-187-197-189-181-183-182-190-232-240-198-191-199-147-155-200-192-184-176-0
5	134.049	58	0-163-170-178-186-179-171-173-165-0
5	82.4264	52	0-167-166-174-175-168-0
5	74.1421	52	0-162-161-169-172-164-0
6	197.295	52	0-212-220-228-206-213-221-229-224-216-0
6	193.006	55	0-202-210-218-226-234-235-193-227-219-211-205-0

6	127.148	60	0-207-208-203-217-209-201-0
6	289.034	60	0-215-223-231-239-34-26-17-25-33-315- 264-272-280-238-230-222-214-204-0
7	474.296	59	0-261-269-277-236-256-263-254-252-260- 268-276-273-265-266-274-275-233-225-267- 259-0
7	150.711	52	0-243-253-251-250-258-257-249-0
7	68.2843	56	0-245-248-255-246-247-0
7	40	36	0-242-241-244-0
8	190.711	52	0-285-293-291-299-307-309-301-304-296-0
8	369.481	59	0-284-290-298-306-314-279-271-262-270- 278-313-305-297-300-308-316-318-353-310- 302-0
8	136.569	50	0-295-303-311-294-292-289-281-0
8	74.1421	60	0-286-287-288-283-282-0
9	290.226	59	0-343-351-359-358-350-342-334-348-356- 345-337-329-330-322-0
9	327.953	60	0-336-344-352-360-78-70-76-357-349-341- 331-339-347-319-354-346-338-323-0
9	68.2843	52	0-325-333-328-335-327-0
9	80.645	48	0-326-324-332-340-321-0
Συνολικό Κόστος Λύσης: 7157.51			

4.3 Συμπεράσματα

Με την ολοκλήρωση των υπολογιστικών μελετών επισημαίνονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

1. Ο προτεινόμενος γενετικός αλγόριθμος, βελτιώνει την αρχική λύση σε σημαντικό ποσοστό, άρα είναι αποτελεσματικός. Γίνεται εμφανή ή ανάγκη για σωστή ρύθμιση των παραμέτρων του γενετικού αλγόριθμου, ανάλογα με το εξεταζόμενο πρόβλημα.
2. Ο αλγόριθμος HGA2 παράγει αρχικές και τελικές λύσεις καλύτερες από τον HGA1, συνεπώς προτιμάται για την επίλυση των προβλημάτων. Αυτό είναι κάτι

αναμενόμενο, εφόσον ο HGA2 κάνει εφαρμογή τριών ευρετικών αλγορίθμων για την κατασκευή λύσεων, ενώ ο HGA1 παράγει τις αρχικές λύσεις με τυχαίο τρόπο.

3. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος δεν έχει την δυνατότητα εύρεσης της καλύτερης γνωστής λύσης ή ακόμα καλύτερης λύσης στα εξεταζόμενα προβλήματα. Παρόλα αυτά σε αρκετές περιπτώσεις επιλύει τα προβλήματα με αντίστοιχα ποιοτικές λύσεις.
 4. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος λειτουργεί με πιο αποτελεσματικό τρόπο σε προβλήματα μικρότερου μεγέθους, τόσο σε αριθμό αποθηκών όσο και σε αριθμό πελατών.
-

5. ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΟ ΜΗΚΟΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΙΩΝ

Στο τρέχον κεφάλαιο αναλύεται η πρώτη παραλλαγή του εξεταζόμενου προβλήματος, η οποία αφορά την προσθήκη ενός περιορισμού σχετικού με το μέγιστο μήκος των δρομολογίων.

5.1 Καθορισμός του Προβλήματος και της Μεθοδολογίας Επίλυσης

Στο εξεταζόμενο πρόβλημα γίνεται η προσθήκη ενός περιορισμού που αφορά το μέγιστο μήκος ή μέγιστη διάρκεια της διαδρομής. Λαμβάνεται λοιπόν υπ' όψιν ο απαιτούμενος χρόνος εξυπηρέτησης για τον κάθε πελάτη αλλά και ο χρόνος που απαιτείται για να τον επισκεφθεί το όχημα και να επιστρέψει στην αποθήκη. Εάν για παράδειγμα εξετάζεται το δρομολόγιο 0-1-2-0 τότε ο περιορισμός διαμορφώνεται ως εξής:

$$D(d,1) + ST_1 + D(1,2) + ST_2 + D(2,d) \leq M_Route_Length$$

δηλαδή η απόσταση από την αποθήκη στον πελάτη 1 συν το χρόνο εξυπηρέτησης του πελάτη 1 συν η απόσταση από τον πελάτη 1 στον πελάτη 2 συν το χρόνο εξυπηρέτησης του πελάτη 2 συν η απόσταση του πελάτη 2 έως την αποθήκη πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση από το απαιτούμενο μέγιστο μήκος διαδρομής.

Η μεθοδολογία επίλυσης παραμένει η ίδια με την προηγούμενη ενότητα σε ότι αφορά τον γενετικό αλγόριθμο. Όμως για την κατασκευή των αρχικών λύσεων χρησιμοποιείται λίγο διαφορετική μέθοδος, οι πελάτες ανατίθενται στην κοντινότερη αποθήκη και έπειτα γίνεται εφαρμογή του αλγορίθμου του κοντινότερου γείτονα για τους πελάτες κάθε αποθήκης. Αυτό γίνεται ώστε τα χρωμοσώματα να έχουν μεγαλύτερη ποικιλομορφία καθώς πλέον δεν θα βρίσκονται οι ίδιοι πελάτες σε κάθε δρομολόγιο.

Επίσης, πραγματοποιήθηκε μια αλλαγή στην συνάρτηση ποιότητας ώστε να αυξηθεί η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου. Η νέα συνάρτηση έχει την μορφή:

$$F(x) = \alpha * |V_{num}| + \beta * Cost$$

όπου V_{num} : ο αριθμός των οχημάτων ή δρομολογίων και $Cost$: η συνολική απόσταση που διανύουν τα οχήματα. Το α τίθεται εμπειρικά ίσο με 100 και το β ίσο με 0.001. Η παραπάνω συνάρτηση έχει λοιπόν σαν στόχο πρώτα την μείωση των δρομολογίων και έπειτα την μείωση της διανυόμενης απόστασης.

5.2 Υπολογιστικές Μελέτες και Αποτελέσματα

Ο προτεινόμενος αλγόριθμος υλοποιείται στο προγραμματιστικό περιβάλλον της MATLAB και εφαρμόζεται σε προβλήματα διαφόρων μεγεθών, που έχουν προταθεί από τον Cordaeu. Ακόμη πραγματοποιούνται συγκρίσεις με τα αποτελέσματα που υπάρχουν στη βιβλιογραφία για να εξετασθεί η αποτελεσματικότητά του.

5.2.1 Πρόβλημα pr01

Το πρόβλημα αποτελείται από 48 πελάτες και 4 αποθήκες. Κάθε αποθήκη έχει στην διάθεση της ένα όχημα με χωρητικότητα 200 μονάδων. Το μέγιστο μήκος δρομολογίου ισούται με 500 μονάδες χρόνου. Η απόκλιση από την καλύτερη γνωστή λύση ισούται με 8.5%

Πίνακας 5-1. Δρομολόγια Προβλήματος pr01				
Αποθήκη	Κόστος	Χωρητικότητα	Διάρκεια	Δρομολόγιο
1	193.568	129	283.568	0-37-7-41-31-44-32-9-46-42-35-0
2	244.625	143	378.625	0-22-19-27-3-6-48-45-11-10-34-0
3	308.691	194	454.691	0-16-36-26-18-17-5-29-8-13-33- 20-1-4-14-28-0
4	187.612	191	370.612	0-30-39-43-47-24-21-12-38-40- 15-25-23-2-0
Συνολικό Κόστος Λύσης: 934.497				

5.2.2 Πρόβλημα pr02

Το πρόβλημα αποτελείται από 96 πελάτες και 4 αποθήκες. Κάθε αποθήκη έχει στην διάθεση της 2 οχήματα με χωρητικότητα 195 μονάδων. Το μέγιστο μήκος δρομολογίου ισούται με 480 μονάδες χρόνου. Η απόκλιση από την καλύτερη γνωστή λύση ισούται με 23.7%.

Πίνακας 5-2. Δρομολόγια Προβλήματος pr02				
Αποθήκη	Κόστος	Χωρητικότητα	Διάρκεια	Δρομολόγιο
1	350.852	56	445.852	0-19-74-39-27-68-8-13-0
1	194.821	176	383.821	0-20-16-64-60-72-25-59-70-41- 43-86-84-81-0
2	188.937	167	355.937	0-9-69-17-44-37-73-62-55-92-38- 93-0
2	204.666	191	385.666	0-78-33-88-42-22-1-47-65-87-32- 94-5-7-0
3	212.439	193	403.439	0-67-14-18-24-80-2-10-48-6-51- 50-76-3-12-53-71-36-66-56-0
3	75.0079	53	131.008	0-96-15-85-0
4	166.763	192	341.763	0-28-54-57-95-29-58-61-63-31- 35-82-79-45-0
4	223.939	192	455.939	0-89-52-90-77-4-34-49-40-75-83- 30-23-46-91-26-21-11-0
Συνολικό Κόστος Λύσης: 1617.42				

5.2.3 Πρόβλημα pr03

Το πρόβλημα αποτελείται από 144 πελάτες και 4 αποθήκες. Κάθε αποθήκη έχει στην διάθεση της 3 οχήματα με χωρητικότητα 190 μονάδων. Το μέγιστο μήκος δρομολογίου ισούται με 460 μονάδες χρόνου. Η απόκλιση από την καλύτερη γνωστή λύση ισούται με 17.6%. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον αντίστοιχο πίνακα.

Πίνακας 5-3. Δρομολόγια Προβλήματος pr03				
Αποθήκη	Κόστος	Χωρητικότητα	Διάρκεια	Δρομολόγιο
1	254.792	190	448.792	0-12-112-50-127-121-88-52-40-69-119-110-114-27-13-1-0
1	92.8727	190	263.873	0-39-62-17-91-45-87-129-133-73-14-80-3-139-132-95-26-0
1	134.643	112	241.643	0-71-11-35-107-109-78-10-0
2	210.426	190	394.426	0-117-75-4-6-51-46-108-37-24-70-79-19-141-74-72-100-101-0
2	223.986	128	400.986	0-135-105-115-83-125-34-111-61-36-57-85-67-56-8-0
2	207.547	52	281.547	0-68-126-54-98-49-55-0
3	163.485	180	370.485	0-124-113-60-136-47-140-89-9-131-142-2-48-102-94-0
3	124.762	184	289.762	0-64-97-32-81-122-23-130-99-144-118-42-44-0
3	285.792	131	404.792	0-77-30-7-134-137-20-103-31-38-0
4	199.113	183	390.113	0-43-104-22-58-25-128-33-120-116-76-93-65-21-86-0
4	175.084	189	345.084	0-66-29-59-82-53-90-96-138-106-84-143-15-41-28-5-0
4	53.4559	59	97.4559	0-92-63-18-123-16-0
Συνολικό Κόστος Λύσης: 2125.96				

5.2.4 Πρόβλημα pr04

Το πρόβλημα αποτελείται από 192 πελάτες και 4 αποθήκες. Κάθε αποθήκη έχει 4 οχήματα με χωρητικότητα 185 μονάδων. Το μέγιστο επιτρεπτό μήκος διαδρομής ισούται με 440 μονάδες χρόνου. Ο αλγόριθμος εκτελείται για 2000 επαναλήψεις. Η απόκλιση από την καλύτερη γνωστή λύση είναι ίση με 31%.

Πίνακας 5-4. Δρομολόγια Προβλήματος pr04				
Αποθήκη	Κόστος	Χωρητικότητα	Διάρκεια	Δρομολόγιο
1	227.321	156	404.321	0-148-152-13-174-131-176-80-35-21-181-76-192-5-0
1	177.004	179	395.004	0-38-157-145-128-59-97-129-133-178-125-79-173-3-123-70-0
1	68.1282	142	227.128	0-82-104-9-177-71-50-161-68-180-154-0
2	123.231	168	239.231	0-137-188-7-72-74-155-95-60-150-81-0
2	271.95	178	438.95	0-110-25-108-122-57-138-121-67-189-15-18-115-0
2	205.443	171	345.443	0-56-42-141-32-117-65-165-89-12-0
2	284.399	147	427.399	0-58-107-111-11-73-149-142-116-183-46-172-30-2-0
3	130.517	184	315.517	0-39-47-19-109-167-190-135-62-10-98-77-113-27-0
3	165.911	185	381.911	0-22-69-36-168-187-52-85-132-162-160-53-64-24-134-93-0
3	204.228	175	347.228	0-91-186-106-66-14-139-130-55-159-127-16-34-0
3	79.7699	133	175.77	0-37-100-78-184-146-87-17-185-44-144-0
4	113.133	181	319.133	0-8-175-6-156-191-61-54-29-136-84-28-63-49-124-83-41-94-0
4	245.268	146	435.268	0-163-171-99-33-140-147-40-20-105-164-143-101-182-151-88-112-0
4	262.943	165	424.943	0-169-96-26-114-43-102-103-179-48-166-75-126-118-153-90-0
4	167.18	170	347.18	0-92-119-23-45-170-158-4-120-86-1-31-51-0
Συνολικό Κόστος Λύσης: 2726.43				

5.2.5 Πρόβλημα pr05

Το πρόβλημα αποτελείται από 240 πελάτες και 4 αποθήκες. Κάθε αποθήκη έχει 5 οχήματα με χωρητικότητα 180 μονάδων. Το μέγιστο επιτρεπτό μήκος διαδρομής ισούται με 420 μονάδες χρόνου. Τα αποτελέσματα από την εκτέλεση του αλγόριθμου φαίνονται στον αντίστοιχο πίνακα. Η απόκλιση από την καλύτερη γνωστή λύση είναι ίση με 34.5%.

5.2.6 Πρόβλημα pr06

Το πρόβλημα αποτελείται από 288 πελάτες και 4 αποθήκες. Κάθε αποθήκη έχει 6 οχήματα με χωρητικότητα 175 μονάδων. Το μέγιστο επιτρεπτό μήκος διαδρομής ισούται με 400 μονάδες χρόνου. Ο αλγόριθμος εκτελείται για 3000 επαναλήψεις και για αρχικό πληθυσμό 30 χρωμοσωμάτων. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον αντίστοιχο πίνακα. Η απόκλιση από την καλύτερη γνωστή λύση είναι ίση με 29.3%. Αξίζει να σημειωθεί ότι η λύση που παράγεται κάνει χρήση ενός επιπλέον δρομολογίου από τα διαθέσιμα. Αυτό δεν είναι εφικτό συνεπώς κάποιο όχημα θα πρέπει να επιστρέψει στην αποθήκη να κάνει ανατροφοδότηση και να εκτελέσει και δεύτερο δρομολόγιο. Είναι η πρώτη φορά που ο προτεινόμενος αλγόριθμος παραβιάζει περιορισμό δρομολογίων.

Πίνακας 5-5. Δρομολόγια Προβλήματος pr05				
Αποθήκη	Κόστος	Χωρητικότητα	Διάρκεια	Δρομολόγιο
1	268.743	180	402.743	0-161-78-93-226-149-150-189-60-84-124-11-193-0
1	78.8935	167	253.894	0-157-158-211-15-4-129-51-39-94-90-154-0
1	103.966	164	269.966	0-217-151-183-102-231-214-125-133-81-75-194-131-33-0
1	148.12	176	317.12	0-91-160-224-96-21-57-114-200-1-16-19-180-223-0
1	241.398	165	398.398	0-61-22-209-117-184-48-168-104-44-0
2	119.539	165	279.539	0-123-204-239-34-122-232-2-215-27-127-229-218-238-0
2	94.6615	177	215.662	0-142-203-55-20-80-235-187-197-177-135-29-0
2	126.166	168	283.166	0-36-18-143-17-63-163-144-65-173-210-115-165-0
2	280.929	149	401.929	0-30-221-72-153-77-112-192-222-167-191-0
2	162.922	164	316.922	0-37-28-230-83-181-116-172-82-8-195-6-74-0
3	191.136	180	357.136	0-25-69-234-169-126-152-42-111-13-107-205-10-3-0
3	116.709	178	306.709	0-156-171-236-138-140-139-175-62-146-118-108-145-5-166-0
3	231.134	159	361.134	0-12-103-186-31-219-89-38-41-199-45-206-0
3	137.164	174	287.164	0-32-120-53-9-190-66-73-24-185-170-0
3	155.625	140	339.625	0-106-137-174-113-87-49-208-128-97-136-162-121-100-207-0
4	106.107	179	308.107	0-54-59-148-188-35-101-213-141-132-79-227-105-182-85-0

4	107.588	177	251.588	0-56-212-225-64-202-198-23- 196-26-179-99-43-0
4	137.215	177	307.215	0-119-40-233-216-47-68-130-95- 134-7-14-240-201-0
4	119.229	174	265.229	0-71-50-88-164-178-176-109-70- 155-58-92-67-0
4	279.176	138	406.176	0-159-220-86-228-46-52-110-98- 76-147-237-0
Συνολικό Κόστος Λύσης: 3206.42				

Πίνακας 5-6. Δρομολόγια Προβλήματος pr06				
Αποθήκη	Κόστος	Χωρητικότητα	Διάρκεια	Δρομολόγιο
1	235.527	172	378.527	0-19-143-122-278-230-197-287-34-149-212-105-243-0
1	94.233	171	270.233	0-72-69-112-147-213-140-41-276-256-194-220-180-281-0
1	69.6494	161	260.649	0-86-285-160-265-77-172-264-60-28-277-253-39-0
1	130.049	168	278.049	0-176-125-190-118-11-117-120-186-263-44-224-0
1	167.197	175	381.197	0-218-251-185-25-266-104-248-169-131-90-8-200-20-150-273-0
1	245.926	85	345.926	0-110-275-119-136-59-142-258-0
2	51.2749	172	207.275	0-156-100-255-184-49-67-247-153-109-111-179-0
2	68.5696	174	287.57	0-38-245-221-17-146-272-288-148-198-101-114-66-177-135-282-0
2	78.6974	172	207.697	0-3-173-217-284-53-233-260-262-254-152-269-231-242-0
2	150.771	122	373.771	0-54-204-15-165-202-75-280-144-51-10-61-187-5-171-0
2	183.283	134	358.283	0-283-115-32-31-79-157-222-71-85-27-235-92-4-0
2	234.191	77	300.191	0-35-193-257-24-226-56-0
2	231.573	93	309.573	0-48-43-70-158-240-89-0
3	60.302	157	233.302	0-252-98-195-102-267-166-129-246-163-47-108-12-106-0
3	103.802	172	252.802	0-228-139-81-167-33-215-84-76-14-116-91-159-286-0
3	100.237	170	297.237	0-175-270-279-55-210-229-138-130-88-238-29-36-123-26-0
3	236.741	153	383.741	0-87-74-137-78-216-261-103-205-80-68-42-0

3	111.324	166	267.324	0-182-128-121-30-201-132-22-45-21-154-1-0
3	172.817	130	331.817	0-196-162-241-46-52-259-225-199-37-192-141-189-9-219-0
4	256.091	108	324.091	0-161-164-93-6-214-271-124-0
4	86.5616	171	216.562	0-191-223-236-133-188-249-127-99-95-16-250-151-0
4	68.2474	167	303.247	0-181-211-145-168-83-232-107-274-65-64-237-2-96-126-62-57-0
4	97.3816	174	255.382	0-40-209-58-268-18-82-203-227-239-23-0
4	201.7	170	343.7	0-155-183-170-50-206-94-7-134-244-178-97-234-0
4	85.6828	57	186.683	0-113-13-207-208-63-174-73-0
Συνολικό Κόστος Λύσης: 3521.83				

5.2.7 Πρόβλημα pr07

Το πρόβλημα αποτελείται από 72 πελάτες και 6 αποθήκες. Κάθε αποθήκη έχει 1 διαθέσιμο όχημα με χωρητικότητα 200 μονάδων. Το μέγιστο επιτρεπτό μήκος διαδρομής ισούται με 500 μονάδες χρόνου. Η απόκλιση από την καλύτερη γνωστή λύση είναι ίση με 23.1%.

Πίνακας 5-7. Δρομολόγια Προβλήματος pr07				
Αποθήκη	Κόστος	Χωρητικότητα	Διάρκεια	Δρομολόγιο
1	183.297	77	323.297	0-36-18-20-31-10-65-33-6-27-0
2	309.914	197	487.914	0-49-58-37-61-59-51-17-41-50- 47-64-1-23-26-0
3	125.659	196	272.659	0-8-45-15-16-3-56-54-22-34-44- 62-69-0
4	273.732	155	482.732	0-55-4-29-46-53-72-5-63-24-57- 28-13-52-0
5	122.984	154	312.984	0-70-60-11-9-19-42-30-66-48-21- 40-67-14-0
6	325.562	169	469.562	0-35-71-2-38-39-32-25-43-7-68- 12-0
Συνολικό Κόστος Λύσης: 1341.15				

5.2.8 Πρόβλημα pr08

Το πρόβλημα αποτελείται από 144 πελάτες και 6 αποθήκες. Κάθε αποθήκη έχει 2 διαθέσιμα οχήματα με χωρητικότητα 190 μονάδων. Το μέγιστο επιτρεπτό μήκος διαδρομής ισούται με 475 μονάδες χρόνου. Η απόκλιση από την καλύτερη γνωστή λύση είναι ίση με 38.2%.

Πίνακας 5-8. Δρομολόγια Προβλήματος pr08				
Αποθήκη	Κόστος	Χωρητικότητα	Διάρκεια	Δρομολόγιο
1	162.976	186	384.976	0-28-7-29-80-84-141-93-73-39-47-66-11-114-53-40-0
1	283.299	185	426.299	0-129-109-34-63-25-101-102-122-96-57-27-116-82-0
2	290.837	186	459.837	0-106-127-97-74-140-133-23-142-12-26-110-120-9-143-49-0
2	238.825	119	384.825	0-65-77-5-3-139-37-88-126-134-132-0
3	313.165	165	465.165	0-91-62-119-121-69-51-19-68-108-45-33-0
3	101.399	167	206.399	0-32-136-41-92-56-135-46-24-15-125-0
4	198.771	187	409.771	0-90-8-38-16-22-61-113-118-18-4-103-128-42-35-10-104-50-0
4	242.393	138	330.393	0-36-124-67-70-79-117-6-87-0
5	192.287	189	382.287	0-48-2-31-137-131-30-100-58-60-94-89-86-95-52-0
5	63.6519	181	259.652	0-138-112-14-105-76-1-85-64-83-107-21-0
6	131.259	189	337.259	0-123-44-115-13-75-78-20-98-130-111-17-71-99-0
6	83.7627	114	155.763	0-54-59-72-43-55-81-144-0
Συνολικό Κόστος Λύσης: 2302.62				

5.2.9 Πρόβλημα pr09

Το πρόβλημα αποτελείται από 216 πελάτες και 6 αποθήκες. Κάθε αποθήκη έχει 3 διαθέσιμα οχήματα με χωρητικότητα 180 μονάδων. Το μέγιστο επιτρεπτό μήκος διαδρομής ισούται με 450 μονάδες χρόνου. Η απόκλιση από την καλύτερη γνωστή λύση είναι ίση με 19% και κάνει χρήση ενός λιγότερου οχήματος.

Πίνακας 5-9. Δρομολόγια Προβλήματος pr09				
Αποθήκη	Κόστος	Χωρητικότητα	Διάρκεια	Δρομολόγιο
1	162.105	162	269.105	0-150-78-56-117-60-15-214-120-23-105-0
1	100.504	179	323.504	0-39-64-110-180-36-153-101-29-123-172-86-190-169-140-30-167-0
1	166.749	110	297.749	0-67-59-47-79-3-2-103-58-42-0
2	100.055	179	216.055	0-108-73-5-131-122-109-148-102-31-84-21-189-156-0
2	230.236	172	339.236	0-207-127-121-16-118-76-35-128-85-7-182-69-0
3	138.371	172	295.371	0-124-162-41-205-6-95-77-32-194-88-209-11-202-152-115-0
3	197.465	180	375.465	0-149-135-177-82-186-141-14-147-20-130-18-1-143-43-4-0
3	214.504	176	413.504	0-119-68-104-163-199-80-45-106-52-171-26-12-137-168-0
4	87.3283	173	293.328	0-144-157-184-83-146-139-133-126-158-151-174-13-161-216-191-178-0
4	142.221	172	307.221	0-37-98-38-100-40-70-159-62-210-193-142-27-90-192-0
4	251.755	159	350.755	0-94-198-63-28-99-66-112-213-55-129-91-10-0
5	72.9892	179	268.989	0-114-75-181-201-200-97-165-155-116-71-51-215-170-0
5	209.353	177	436.353	0-48-145-183-89-175-134-212-132-24-22-61-196-185-34-44-17-0
5	116.002	179	235.002	0-74-57-208-93-195-107-160-49-50-0
6	120.906	49	134.906	0-8-96-0
6	152.138	171	336.138	0-204-206-154-111-87-25-72-33-

				92-211-46-54-166-203-176-53- 65-0
6	98.3287	147	244.329	0-179-19-125-81-9-164-138-173- 136-197-187-113-188-0
Συνολικό Κόστος Λύσης: 2561.01				

5.2.10 Πρόβλημα pr10

Το πρόβλημα αποτελείται από 288 πελάτες και 6 αποθήκες. Κάθε αποθήκη έχει 4 διαθέσιμα οχήματα με χωρητικότητα 170 μονάδων. Το μέγιστο επιτρεπτό μήκος διαδρομής ισούται με 425 μονάδες χρόνου. Η απόκλιση από την καλύτερη γνωστή λύση είναι ίση με 31.7%.

Πίνακας 5-10. Δρομολόγια Προβλήματος pr10				
Αποθήκη	Κόστος	Χωρητικότητα	Διάρκεια	Δρομολόγιο
1	69.2009	163	206.201	0-246-54-123-14-206-80-47-83-146-164-52-0
1	128.329	161	265.329	0-62-122-98-40-51-268-288-26-55-236-96-104-0
1	242.105	148	417.105	0-64-50-229-135-113-195-33-82-210-58-107-256-57-0
1	196.428	156	385.428	0-95-24-30-187-67-217-53-272-234-197-235-138-175-0
2	182.518	165	360.518	0-226-259-119-180-153-264-219-114-25-257-127-159-271-0
2	135.158	165	252.158	0-69-161-276-179-100-108-126-86-0
2	90.1789	165	210.179	0-112-260-10-192-251-17-157-274-233-118-263-244-160-0
2	208.075	160	396.075	0-130-254-204-11-39-15-241-196-191-91-211-212-170-199-0
3	179.417	170	309.417	0-145-94-277-143-18-201-92-32-166-22-129-0
3	184.165	159	345.165	0-87-262-139-239-162-224-220-245-282-285-156-106-0
3	79.6613	162	204.661	0-29-43-134-35-249-49-205-232-28-20-141-0
3	113.93	165	256.93	0-34-151-42-275-13-23-154-36-240-178-147-142-0
4	86.1323	161	216.132	0-97-267-66-221-181-76-202-61-133-12-73-172-0
4	98.2128	169	314.213	0-163-247-8-228-216-31-270-231-136-273-227-186-218-0
4	181.544	158	374.544	0-283-137-45-5-198-194-120-183-125-252-3-214-0
4	241.182	114	373.182	0-213-284-124-269-168-225-140-37-287-176-167-0

5	198.22	162	357.22	0-110-243-63-99-132-111-41-78- 230-90-253-109-0
5	88.0655	163	237.066	0-46-131-1-21-258-2-248-208- 286-222-16-155-72-0
5	146.258	166	281.258	0-169-150-105-89-174-200-215- 59-7-71-242-0
5	269.11	148	424.11	0-101-56-68-237-121-102-74-255- 81-250-148-0
6	173.355	165	360.355	0-75-84-173-165-188-4-223-85- 149-117-261-190-0
6	165.918	166	311.918	0-65-103-184-77-266-189-280-70- 209-278-238-281-279-48-265-0
6	164.652	170	327.652	0-93-207-193-177-144-60-182- 116-19-171-9-0
6	226.209	169	358.209	0-6-88-44-38-27-203-128-152- 158-115-185-79-0
Συνολικό Κόστος Λύσης: 3848.02				

5.3 Συμπεράσματα

Με την ολοκλήρωση των υπολογιστικών μελετών επισημαίνονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

1. Ο προτεινόμενος γενετικός αλγόριθμος, βελτιώνει την αρχική λύση σε σημαντικό ποσοστό, άρα είναι αποτελεσματικός.
2. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος παράγει λύσεις με μεγαλύτερη απόκλιση από τις καλύτερες γνωστές, σε σχέση με τις αποκλίσεις που δίνει στα προβλήματα της προηγούμενης ενότητας. Αυτό οφείλεται, προφανώς, στην προσθήκη του περιορισμού.
3. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος δεν έχει την δυνατότητα εύρεσης της καλύτερης γνωστής λύσης ή ακόμα καλύτερης λύσης στα εξεταζόμενα προβλήματα. Παρόλα αυτά σε αρκετές περιπτώσεις επιλύει τα προβλήματα με αντίστοιχα ποιοτικές λύσεις.

-
4. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος λειτουργεί με πιο αποτελεσματικό τρόπο σε προβλήματα μικρότερου μεγέθους, τόσο σε αριθμό αποθηκών όσο και σε αριθμό πελατών.
-

6. ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΜΕ ΜΙΑ ΑΠΟΘΗΚΗ

Στην παρούσα ενότητα, γίνεται η υπόθεση ότι το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων περιορισμένης χωρητικότητας (CVRP), αποτελεί υποκατηγορία του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων με πολλαπλές αποθήκες (MDVRP) στην περίπτωση που υπάρχει μόνο μια αποθήκη.

6.1 Καθορισμός του Προβλήματος και της Μεθοδολογία Επίλυσης

Χρησιμοποιείται η μεθοδολογία που έχει αναπτυχθεί στις προηγούμενες ενότητες, και πιο συγκεκριμένα η συνάρτηση ποιότητας με τη μορφή σταθμισμένου μέσου και αρχικός πληθυσμός χρωμοσωμάτων που παράγεται από τον αλγόριθμο HGA2, με την εφαρμογή δηλαδή των ευρετικών του κοντινότερου γείτονα και του αλγόριθμου των Clarke & Wright. Αναμένονται θετικά αποτελέσματα, καθώς το προς επίλυση πρόβλημα είναι απλούστερο με την έννοια ότι δεν υπάρχει ανάγκη να πραγματοποιηθεί ανάθεση των πελατών σε κάποια αποθήκη.

6.2 Υπολογιστικές Μελέτες και Αποτελέσματα

Πραγματοποιήθηκε επίλυση ορισμένων προβλημάτων CVRP, ώστε να εξετασθεί η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου και σε τέτοια προβλήματα. Τα προβλήματα που επιλύθηκαν, προτάθηκαν από τους Christophides και Eilon και είναι διαθέσιμα στο διαδίκτυο.

6.2.1 Πρόβλημα E-n30-k3

Το πρόβλημα αποτελείται από 29 πελάτες και 1 αποθήκη. Η χωρητικότητα των οχημάτων είναι ίση με 4500 μονάδες. Η απόκλιση της λύσης που βρέθηκε από την καλύτερη γνωστή λύση στην βιβλιογραφία ισούται με 0.2%.

Πίνακας 6-1. Δρομολόγια Προβλήματος E-n30-k3		
Κόστος	Χωρητικότητα	Δρομολόγιο
216.82	4500	0-27-29-28-30-26-25-7-22-0
149.998	4225	0-21-4-5-2-6-3-23-0
168.979	4025	0-20-16-17-14-8-18-10-15-9-13-12-11-24-19-0
Συνολικό Κόστος Λύσης: 535.797		

6.2.2 Πρόβλημα E-n51-k5

Το πρόβλημα αποτελείται από 50 πελάτες και 1 αποθήκη. Η χωρητικότητα των οχημάτων είναι ίση με 160 μονάδες. Η απόκλιση της λύσης που βρέθηκε από την καλύτερη γνωστή λύση στην βιβλιογραφία ισούται με 8.6%.

Πίνακας 6-2. Δρομολόγια Προβλήματος E-n51-k5		
Κόστος	Χωρητικότητα	Δρομολόγιο
84.1498	159	0-12-39-17-51-35-31-10-50-6-47-0
152.181	157	0-11-40-34-46-16-45-43-20-41-42-14-0
124.181	159	0-2-9-27-49-24-8-44-25-26-15-0
128.284	156	0-23-32-29-4-37-36-21-30-22-3-33-0
77.43	146	0-28-7-19-5-18-38-13-48-0
Συνολικό Κόστος Λύσης: 566.226		

6.2.3 Πρόβλημα E-n76-k8

Το πρόβλημα αποτελείται από 75 πελάτες και 1 αποθήκη. Η χωρητικότητα των οχημάτων είναι ίση με 180 μονάδες. Η απόκλιση της λύσης που βρέθηκε από την καλύτερη γνωστή λύση είναι ίση με 11%.

Πίνακας 6-3. Δρομολόγια Προβλήματος E-n76-k8		
Κόστος	Χωρητικότητα	Δρομολόγιο
127.611	177	0-74-2-44-43-65-42-57-24-50-25-45-0
135.923	175	0-38-21-71-61-72-70-37-48-22-62-23-63-0
104.559	177	0-20-15-60-12-67-66-39-0
131.272	179	0-4-33-51-19-56-26-32-11-8-27-0
92.4616	178	0-69-46-30-6-16-58-55-14-28-53-47-0
88.0993	176	0-31-49-75-29-3-34-64-17-52-0
84.2625	164	0-9-36-54-59-73-40-10-41-13-0
52.2265	138	0-7-18-68-35-5-76-0
Συνολικό Κόστος Λύσης: 816.415		

6.2.4 Πρόβλημα E-n76-k14

Το πρόβλημα αποτελείται από 75 πελάτες και 1 αποθήκη. Η χωρητικότητα των οχημάτων είναι ίση με 100 μονάδες. Η απόκλιση της λύσης που βρέθηκε από την καλύτερη γνωστή λύση είναι ίση με 14.3%.

6.2.5 Πρόβλημα E-n101-k8

Το πρόβλημα αποτελείται από 100 πελάτες και 1 αποθήκη. Η χωρητικότητα των οχημάτων είναι ίση με 200 μονάδες. Η απόκλιση της λύσης που βρέθηκε από την καλύτερη γνωστή λύση είναι ίση με 24.2%.

Πίνακας 6-4. Δρομολόγια Προβλήματος E-n76-k14		
Κόστος	Χωρητικότητα	Δρομολόγιο
98	116.328	0-62-70-37-72-61-71-21-38-0
98	105.521	0-57-42-65-43-44-0
96	175.228	0-50-73-66-32-26-56-19-51-0
98	90.118	0-12-67-60-0
100	78.0201	0-53-14-58-16-6-3-0
99	107.902	0-7-74-23-2-64-24-25-0
93	67.7132	0-54-39-11-59-0
100	86.2962	0-30-55-20-15-36-8-0
100	68.7456	0-69-45-33-10-40-0
94	71.501	0-48-22-29-63-0
100	78.6834	0-75-34-17-4-41-0
100	53.251	0-76-31-49-46-28-0
96	43.5809	0-52-18-13-27-68-0
92	37.1896	0-9-47-35-5-0
Συνολικό Κόστος Λύσης: 1180.08		

Πίνακας 6-5. Δρομολόγια Προβλήματος E-n101-k8		
Κόστος	Χωρητικότητα	Δρομολόγιο
148.504	199	0-3-58-16-44-39-87-62-94-100-61-9-49-19-90-0
124.87	189	0-54-41-74-75-76-57-40-55-77-52-31-2-70-28-0
131.449	199	0-95-96-93-101-43-15-45-17-18-46-48-20-53-0
189.465	183	0-32-71-21-66-36-35-79-30-25-56-26-68-24-23-42-0
142.627	197	0-63-12-65-50-37-47-85-6-86-92-99-38-60-0
136.525	199	0-51-34-82-10-72-67-33-91-64-11-89-8-83-84-0
93.2036	199	0-29-13-78-4-80-69-81-5-73-22-27-0
48.7921	93	0-7-97-98-88-14-59-0
Συνολικό Κόστος Λύσης: 1015.44		

6.3 Συμπεράσματα

Με την ολοκλήρωση των υπολογιστικών μελετών επισημαίνονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

1. Ο προτεινόμενος γενετικός αλγόριθμος, βελτιώνει την αρχική λύση σε σημαντικό ποσοστό, άρα είναι αποτελεσματικός.
 2. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος παράγει λύσεις με μικρότερη απόκλιση από τις καλύτερες γνωστές, σε σχέση με τις αποκλίσεις που δίνει στα προβλήματα των προηγούμενων ενοτήτων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν απαιτείται ανάθεση των πελατών σε κάποια αποθήκη πριν την επίλυση του προβλήματος δρομολόγησης.
 3. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος δεν έχει την δυνατότητα εύρεσης της καλύτερης γνωστής λύσης ή ακόμα καλύτερης λύσης στα εξεταζόμενα προβλήματα. Παρόλα αυτά σε αρκετές περιπτώσεις επιλύει τα προβλήματα με αντίστοιχα ποιοτικές λύσεις.
 4. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος λειτουργεί με πιο αποτελεσματικό τρόπο σε προβλήματα μικρότερου μεγέθους, τόσο σε αριθμό αποθηκών όσο και σε αριθμό πελατών.
-

7. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με την ολοκλήρωση της μελέτης του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων με πολλαπλές αποθήκες και της εφαρμογής του προτεινόμενου αλγορίθμου σε διάφορα προβλήματα επισημαίνονται ορισμένα συμπεράσματα. Πρώτον, η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου περιορίζεται σημαντικά από το γεγονός ότι τα χρωμοσώματα που εκτελούν τις γενετικές διεργασίες δεν έχουν δεδομένα διαδρομών. Πιο συγκεκριμένα, κάθε χρωμόσωμα όταν εκτελεί κάποια γενετική διεργασία, αντιμετωπίζεται από τον αλγόριθμο σαν μια αλληλουχία πελατών και με την ολοκλήρωση της γενετικής διεργασίας μετατρέπεται ξανά σε λύση του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων (με την εφαρμογή των αντίστοιχων περιορισμών). Εάν κάθε λύση διατηρεί τα χαρακτηριστικά των διαδρομών της, αναμένεται να “διατηρηθούν” και οι καλές διαδρομές από γενιά σε γενιά. Η παραπάνω υπόθεση αποτελεί μια ιδέα για μελλοντική διερεύνηση.

Μια άλλη διαπίστωση είναι ότι η σωστή ανάθεση των πελατών στις αποθήκες είναι μια ιδιαίτερα δύσκολη εργασία. Η ανάθεση των πελατών στην κοντινότερη τους αποθήκη αποτελεί μια ορθολογική απόφαση, όμως στην περίπτωση των “οριακών” πελατών, δηλαδή εκείνων που βρίσκονται σχετικά κοντά σε παραπάνω από μια αποθήκες, δημιουργείται πρόβλημα και απαιτείται μια πιο πολύπλοκη διερεύνηση.

Με την ολοκλήρωση της παρούσας ενότητας, παρατίθενται στον επόμενο πίνακα τα συνοπτικά αποτελέσματα από όλα τα πειράματα που επιλύθηκαν. Η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου φαίνεται να μειώνεται με την αύξηση τόσο του αριθμού των πελατών όσο και του αριθμού των αποθηκών. Η καλύτερη λύση βρέθηκε στο πρόβλημα E-n30-k3 με απόκλιση μόλις 0.2% και η χειρότερη στο πρόβλημα r108 με απόκλιση 38.2% από την καλύτερη γνωστή λύση.

Πίνακας 7.1 – Συνοπτικά Αποτελέσματα			
Πρόβλημα	Αρ. Αποθηκών	Αρ. Πελατών	Απόκλιση Λύσης
p01	4	50	4.9%
p02	4	50	5.2%
p03	5	75	7.5%
p04	2	100	11.7%
p05	2	100	12.2%
p06	3	100	8.2%
p07	4	100	4.8%
p08	2	249	8.8%
p12	2	80	12.1%
p15	4	160	23.6%
p18	6	240	22.5%
p21	9	360	30%
pr01	4	48	8.5%
pr02	4	96	23.7%
pr03	4	144	17.6%
pr04	4	192	31%
pr05	4	240	34.5%
pr06	4	288	29.3%
pr07	6	72	23.1%
pr08	6	144	38.2%
pr09	6	216	19%
pr10	6	288	31.7%
E-n30-k3	1	29	0.2%
E-n51-k5	1	50	8.6%
E-n76-k8	1	75	11%
E-n76-k14	1	75	14.3%
E-n101-k8	1	100	24.2%

8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] William Ho, George T.S. Ho, Ping Ji, Henry C.W. Lau, A hybrid genetic algorithm for the multi-depot vehicle routing problem
 - [2] Beatrice Ombuki-Berman, Franklin T. Hanshar, Using Genetic Algorithms for Multi-depot Vehicle Routing
 - [3] Ιωάννης Μαρινάκης, Αθανάσιος Μυγδαλάς, Σχεδιασμός και Βελτιστοποίηση της Εφοδιαστικής Αλυσίδας, σ. 22-37, 123-131, 158, 172-175, 292, 301-302, 447-459
 - [4] Νικόλαος Ματσατσίνης, Συστήματα Υποστήριξης Αποφάσεων, σ. 504-512
 - [5] <http://neo.lcc.uma.es/vrp/vrp-instances/>
-