



ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΜΗ ΣΤΕΛΕΧΩΜΕΝΩΝ
ΙΠΤΑΜΕΝΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΠΑΡΑΛΑΒΕΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ
ΠΕΛΑΤΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ GRASP/VNS»

«SOLVING THE DRONE ROUTING PROBLEM FOR PICK UP AND DELIVERIES
BETWEEN CUSTOMERS USING A GRASP/VNS HYBRID ALGORITHM»

ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ ΑΡΩΝΗΣ
ΑΜ : 2017010059

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δρ. ΙΩΑΝΝΗΣ ΜΑΡΙΝΑΚΗΣ

ΧΑΝΙΑ 2022

“Η παρούσα εργασία
αφιερώνεται στην οικογένεια
μου και στους φίλους μου”

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον Αναπληρωτή καθηγητή κ. Ιωάννη Μαρινάκη για την υποστήριξη και την καθοδήγησή του καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας. Ακόμη πρέπει να ευχαριστήσω τον βοηθό του κ. Μαρινάκη, τον κ. Νικόλαο Κυριακάκη, για την καταλυτική βοήθεια του και την αστείρευτη ενέργειά του.

Τέλος, ευχαριστώ όλους τους συμφοιτητές μου και καθηγητές μου που αποτέλεσαν την κινητήριου δύναμη για εμένα όπως επίσης και τους φίλους και οικογένειά μου, που αποτελούν το στήριγμά μου για να συνεχίζω να βελτιώνομαι.

Περιεχόμενα

Περίληψη	6
ABSTRACT	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1.1) Εφοδιαστική Αλυσίδα	8
1.1.1) Ορισμός	8
1.1.2) Διαχείριση Εφοδιαστικής Αλυσίδας	10
1.2) Εφοδιαστική (Logistics)	12
1.3) ΔΕΑ και Logistics	14
1.4) Εφοδιαστική Αλυσίδα και Covid-19	16
1.5) Μη Στελεχωμένα Ιπτάμενα Οχήματα (Drones)	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Προβλήματα Δρομολόγησης	19
2.1) Πρόβλημα πλανόδιου πωλητή (TSP)	19
2.1.1) Ορισμός	19
2.1.2) Μοντελοποίηση	20
2.2) Απλό πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (VRP)	21
2.2.1) Ορισμός	21
2.2.2) Μοντελοποίηση προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων (VRP Model)	22
2.3) Παραλλαγές του προβλήματος του πλανόδιου πωλητή (TSP)	23
2.4) Παραλλαγές του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Αλγόριθμοι Επίλυσης Προβλημάτων Δρομολόγησης	28
3.1) Ευρετικοί και Μεθευρετικοί Αλγόριθμοι	28
3.2) Ευρετικοί Αλγόριθμοι	29
3.2.1) Αλγόριθμοι Απληστίας	29
3.2.2) Αλγόριθμοι Τοπικής Αναζήτησης	31
3.3) Μεθευρετικοί Αλγόριθμοι	34
3.4) Εξελικτικοί Αλγόριθμοι	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ DRONE ΓΙΑ ΠΑΡΑΛΛΑΒΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΣΗ	38
4.1) Εισαγωγή	38
4.2) Το πρόβλημα	40
4.2.1) Βάρος και Χωρητικότητα	41
4.2.2) Αντικειμενικό κριτήριο	43

4.2.3) Παράδειγμα.....	44
4.3) Μοντελοποίηση	47
4.3.1) Παραδοχές	47
4.3.2) Μαθηματικό Μοντέλο	47
4.3.3) Αλγόριθμοι και Διαδικασία Επίλυσης	50
4.3.4) Ψευδοκώδικας.....	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	57
5.1) Περιπτώσεις και Παραμετροποίηση.....	57
5.2) Πειραματικά Αποτελέσματα	58
5.2.1) Παράδειγμα 50 κόμβων	59
5.2.2) Παράδειγμα 100 κόμβων	60
5.2.3) Παράδειγμα 150 κόμβων	61
5.2.4) Παράδειγμα 200 κόμβων	62
5.2.5) Συνολικά Αποτελέσματα	63
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	67
ΑΝΑΦΟΡΕΣ	69

Περίληψη

Η παγκοσμιοποίηση και η συνεχώς αυξανόμενη ανάγκη ταχύτερων και πιο αποδοτικών μεθόδων διακίνησης αγαθών στον κόσμο έχει καταστήσει την βελτίωση της εφοδιαστικής αλυσίδας και την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών καταλυτικό παράγοντα για την κάλυψη της ανάγκης αυτής. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, είτε οι υπάρχουσες μέθοδοι βελτιώνονται είτε ανακαλύπτονται νέες μέθοδοι για την αύξηση της αποδόσεως των συστημάτων παραλαβής, διαχείρισης και μετακίνησης ώστε να μπορούν οι οικονομίες να συμβαδίζουν με τις ολοένα και αυξανόμενες απαιτήσεις της οικονομίας. Μία νέα και πολλά υποσχόμενη μέθοδος για καλύτερη διακίνηση αγαθών είναι εναερίως με την χρήση μη στελεχωμένων ιπτάμενων οχημάτων, γνωστά και ως drones. Στην παρούσα εργασία μελετάται και επιλύεται το πρόβλημα δρομολόγησης ενός στόλου από τα συγκεκριμένα αεροσκάφη για την εξυπηρέτηση των αναγκών μιας εφοδιαστικής αλυσίδας με πολλαπλούς πωλητές και αγοραστές. Στόχος του προβλήματος είναι η εύρεση της βέλτιστης διαδρομής έχοντας σαν κριτήριο την ελαχιστοποίηση την ενέργειας μετακίνησης των αεροσκαφών. Το πρόβλημα έχει ως δεδομένα τη βάση από την οποία απογειώνονται και επιστρέφουν τα αεροσκάφη, τις θέσεις των αγοραστών και των πωλητών, όπως επίσης και την σχέση μεταξύ τους, δηλαδή από ποιον πωλητή σε ποιον αγοραστή πρέπει να διακινηθεί το εκάστοτε τεμάχιο με το συγκεκριμένο βάρος, καθώς και τους περιορισμούς ενέργειας και χωρητικότητας των οχημάτων. Για την επίλυση του προβλήματος, χρησιμοποιήθηκε ένας υβριδικός μεθευρετικός αλγόριθμος που συνδυάζει τον αλγόριθμο Άπληστης τυχαιοποιημένης προσαρμοστικής αναζήτησης με τον αλγόριθμο Μεταβλητής Γειτονιάς Αναζήτησης. Ο αλγόριθμος υλοποιείται στο περιβάλλον Visual Studio με την γλώσσα C++. Τέλος, παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα του προβλήματος.

ABSTRACT

Globalization and the ongoing increase in the demand for more efficient methods to transport goods throughout the world have become the critical factor that led to the continuous improvement of the supply chain and the development of new technologies. To achieve this goal, either the existing methods are improved or new ones are created to increase the efficiency of the collective, managerial and distributional systems so that economies can co-exist with the constant increase of market demands. A new and very promising method of better distribution is through the air with the assistance of Drones. In this work, we examine and solve the routing problem of such vehicles for a supply chain with multiple sellers and buyers. We try to achieve an efficient way to connect each seller with their correspondent buyer. The goal is to determine the best route, starting from the base, that the Drones must follow in order to minimize the energy consumption of their batteries. The position of the base, that the drones start and end their route, is known. We also assume that the customer state (seller or buyer), position, their connections in the plane as well as the energy consumptions constraints for the drones are known when starting solving the problem. For the solution we use a hybrid algorithm which combines the Greedy randomized adaptive search procedure (GRASP) and the variable neighborhood search (VNS). All algorithms were created using the Visual Studio environment with the C++ language. All results are presented analytically.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1) Εφοδιαστική Αλυσίδα

1.1.1) Ορισμός

Στις μέρες, με την συνεχώς αυξανόμενη ανάπτυξη της τεχνολογίας παρατηρείται μία παράλληλη αύξηση στις απαιτήσεις τις κοινωνίας. Απαιτήσεις, οι οποίες μπορούν να εκδηλωθούν με διάφορες μορφές, με μία εκ των σημαντικότερων να είναι η ανάγκη για ταχύτερες, οικονομικότερες και πιο αποδοτικές μεθόδους παραγωγής και διακίνησης αγαθών. Οι απαιτήσεις της αγοράς χρόνο με τον χρόνο γίνονται πιο απαιτητικές, οπότε υπάρχει ανάγκη ανάπτυξης μιας πλήρους δυναμικής διεργασίες η οποία θα μπορεί να καλύψει όλες τις ανάγκες αυτές προσπαθώντας ταυτόχρονα να βελτιώσει την παραγωγική διαδικασία και όλες τις πτυχές αυτής.

Ο όρος εφοδιαστική αλυσίδα χρησιμοποιείται για να περιγράψει μία αλληλουχία διαδικασιών κατά την οποία ένα στοιχείο, όπως μία πρώτη ύλη, περισυλλέγεται, επεξεργάζεται και μετατρέπεται σε διάφορα προϊόντα και υπηρεσίες τα οποία, με την σειρά τους, διατίθεται στην παγκόσμια αγορά για κατανάλωση. Η εφοδιαστική αλυσίδα αφορά όλες τις πτυχές της άνωθεν διαδρομής ενός αγαθού και παρέχει ακριβείς πληροφορίες για τις διαδικασίες και λειτουργίες που εκτελούνται σε κάθε στάδιο (κρίκο) της, όπως το είδος της πρώτης ύλης, τις μεταβολές στις οποίες υποβάλλεται, το ανθρώπινο δυναμικό που απαιτείται κάθε στιγμή, άλλα στοιχεία που χρησιμοποιούνται (αποθήκες, κέντρα διακίνησης) όπως επίσης και όλη η γνώση που μεταφέρεται από το ένα στάδιο στο επόμενο. Η αλυσίδα αυτή απαιτεί πολλές φορές την συνεργασία αρκετών διαφορετικών οργανισμών, καθ' ένας με διαφορετική ειδικότητα (προμηθευτές, διακινητές, μονάδες επεξεργασίας κλπ.), για την επίτευξη της διάθεσης του τελικού αποτελέσματος στην αγορά. Σκοπός της είναι να μεγιστοποιεί την ευχαρίστηση του καταναλωτή ενώ ταυτόχρονα να ελαχιστοποιεί τα λειτουργικά κόστη όλων των σταδίων αυτής.

Για να γίνει καλύτερη η κατανόηση του όρου δίνεται το ακόλουθο παράδειγμα: Το ψωμί, ένα από τα πιο απλά αλλά ταυτόχρονα πιο σημαντικά αγαθά στην ιστορία της ανθρωπότητας είναι αποτέλεσμα της επιτυχούς λειτουργίας μιας εφοδιαστικής αλυσίδας η οποία ξεκινάει από τον απλό αγρότη. Αφού αυτός καλλιεργήσει επιτυχώς σιτάρι, μετά την εποχή του θερισμού πουλάει την ποσότητα του σιταριού που συνέλλεξε σε μία εταιρεία επεξεργασίας σιταριού. Για να μεταβούν τα σακιά με το σιτάρι στο εργοστάσιο επεξεργασίας χρησιμοποιείται μια μεταφορική εταιρεία ή οποία αξιοποιεί τον στόλο της (πλοία, αεροπλάνα και φορτηγά) για να φέρει σε επαφή τον αγρότη και το παραχθέν προϊόν με την εταιρεία επεξεργασίας. Εν συνεχεία, η εταιρεία επεξεργασίας μετατρέπει με κατάλληλες διεργασίες το σιτάρι σε αλεύρι, το οποίο και συσκευάζει. Μετά την συσκευασία του, το προϊόν μέσω

εταιρειών διακίνησης μεταφέρεται στα καταστήματα λιανικής, τα οποία το αγόρασαν για να το εμπορευματοποιηθούν. Από αυτά τα καταστήματα, οι απλοί καταναλωτές μπορούν να αγοράσουν το αλεύρι με το οποίο στη συνέχεια φτιάχνουν ψωμί. Όλη αυτή η διαδικασία αποτελεί ένα απλό παράδειγμα μίας εφοδιαστικής αλυσίδας.



Εικόνα 1.1 Εφοδιαστική Αλυσίδα

Παρατηρείται έτσι, ότι ακόμη και στις πιο χαμηλές και απλές βαθμίδες σ επιχειρησιακό επίπεδο, Από έναν απλό φούρναρη μέχρι και την Amazon, από την τοπική μέχρι και την παγκόσμια οικονομία, η εφοδιαστική αλυσίδα και η κατάλληλη οργάνωσή της έχουν σημαντικό ρόλο τόσο στην κερδοφορία όσο και στην ανάπτυξη των εταιρειών.

1.1.2) Διαχείριση Εφοδιαστικής Αλυσίδας

Ως Διαχείριση της Εφοδιαστικής Αλυσίδας (ΔΕΑ) νοείται η εφαρμογή τεχνικών και μεθόδων για την καλύτερη επίβλεψη, ανάλυση και βελτίωση όλων των σταδίων της εφοδιαστικής αλυσίδας. Η ΔΕΑ είναι ένα αναπόσπαστο κομμάτι κάθε επιχείρησης καθώς αποτελεί την προϋπόθεση για περεταίρω ανάπτυξη της εταιρείας και την εξασφάλιση κερδοφορίας. Εφαρμόζεται από τα αρχικά στάδια παραγωγής ενός αγαθού, όταν αυτό βρίσκεται ακόμη σε σχεδιαστικό στάδιο και υπάρχει μόνο σαν ιδέα, και το ακολουθεί σε όλες τις διεργασίες από τις οποίες θα περάσει όπως επίσης και τον τρόπο ή μέσα με τα οποία θα κινηθεί. Προσπαθεί όλες τις πτυχές αυτές να της αναλύσει ώστε να καταφέρει να εξάγει το καλύτερο δυνατό, τόσο για την επιχείρηση όσο και για τον καταναλωτή, αποτέλεσμα.

Κάθε εταιρεία πρέπει να έχει πολύ καλή γνώση όλων των πτυχών της παραγωγικής (έγκαιρες παραγγελίες, γρήγορες παραδόσεις, τυχόν βλάβες κλπ.) της διαδικασίας ώστε να μπορεί να ικανοποιήσει τον στόχο της βελτιστοποίησης. Πρέπει δηλαδή όλα να επιβλέπονται ενδελεχώς και σε πραγματικό χρόνο ώστε να γίνεται άμεσα η ανάδραση. Γι' αυτό το λόγο η ΔΕΑ συνδέεται άρρηκτα με την κατάσταση «δυναμικού» χρόνου, στην οποία ο έλεγχος και η δράση γίνονται σχεδόν άμεσα την στιγμή που συμβαίνει ένα γεγονός.

Τα στάδια που ακολουθεί συνήθως μια τυπική ΔΕΑ είναι:

- **Σχεδιασμός (Planning):** Στο στάδιο του σχεδιασμού γίνεται η μελέτη σχετικά με τις πρώτες ύλες που θα χρειαστούν όπως επίσης και όλους τους πόρους για την εκπλήρωση του στόχου της καλύψεως της ζήτησης της αγοράς. Αποτελεί το αρχικό στάδιο για την καθιέρωση της εφοδιαστικής αλυσίδας.
- **Εύρεση Πηγών (Sourcing):** Μετά το στάδιο της μελέτης ακολουθεί το στάδιο αναζήτησης των πηγών προελεύσεως των αγαθών καθώς και την καθιέρωση σχέσεων με τους προμηθευτές.
- **Παραγωγή (Manufacturing):** Στο στάδιο της παραγωγής οργανώνεται όλη η παραγωγική διαδικασία σύμφωνα με την οποία τα ακατέργαστα υλικά της πρώτης ύλης θα υποβάλλονται σε διεργασίες ώστε να μετασχηματιστούν στο τελικό προϊόν και ύστερα να υποβληθούν σε έλεγχο ποιότητας. Στο τελικό της στάδιο συσκευάζονται τα προϊόντα με προορισμό το κέντρο διανομής.
- **Διανομή (Delivery):** Στο στάδιο αυτό τα συσκευασμένα προϊόντα συλλέγονται και ετοιμάζονται για αποστολή. Πρέπει να οργανωθεί με τέτοιο τρόπο ώστε οι αποστολές να συμβαδίζουν με τις παραγγελίες και να μην δημιουργούνται καθυστερήσεις.
- **Επιστροφή (Return):** Τελικό στάδιο μετά την παράδοση των προϊόντων το οποίο είναι έτοιμο να αντιμετωπίσει τυχόν επιστροφές ανεπιθύμητων ή ελαττωματικών προϊόντων.

Γιατί είναι σημαντική η ΔΕΑ;

Η ΔΕΑ είναι απαραίτητη και ικανή συνθήκη για μία εταιρεία για την επίτευξη της ελαχιστοποίησης του χρόνου, τον αποβλήτων και του χρόνου του παραγωγικού της κύκλου. Στην σύγχρονη ψηφιακή εποχή υπάρχει η απαίτηση για άμεση (δυναμική) απόκριση στην πιθανή έλλειψη προϊόντων. Αυτό το πρόβλημα λύνεται μέσω της ΔΕΑ καθώς τα συστήματα αποθεματοποίησης είναι συνδεδεμένα με όλα τα κέντρα πώλησης έτσι ώστε κάθε πιθανή πώληση να δίνει απευθείας σήμα για μια πιθανή ετοιμασία νέας παραγγελίας πριν προκύψει έλλειμμα στην αγορά. Ακόμη δύναται και η επιλογή να προβλεφθεί αυτή η πιθανή έλλειψη μέχρι στατιστικών μεθόδων και με την χρήση τεχνητής νοημοσύνης.

Συνοπτικά η αποτελεσματική ΔΕΑ:

- **Μειώνει τα κόστη λειτουργίας της επιχείρησης:** Το συγκεκριμένο μπορεί να επιτευχθεί μειώνοντας είτε τα κόστη παραγωγής είτε το κόστος αγοράς ενός αγαθού. Το πως μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό αν στο παράδειγμα του ψωμιού, θεωρήσουμε ως μια επιχείρηση τον φούρνο που παράγει ψωμιά. Ο φούρνος μπορεί είτε να μειώσει με διάφορες τεχνικές τα κόστη παραγωγής αν ας πούμε καταφέρει να παρακάμψει τον μεσάζοντα, την εταιρεία που παράγει αλεύρι δηλαδή, και να αγοράσει αλεύρι απευθείας από κάποιον ντόπιο παραγωγό. Κόβοντας τους «τρίτους», είναι εύκολο να μειωθούν κατακόρυφα τα έξοδα.
- **Βοηθάει στο χτίσιμο συνεργασιών με στόχο την μελλοντική ανάπτυξη όλων των συνεργατών:** Αν ο φούρναρης δημιουργήσει στρατηγικές συνεργασίες με διάφορους παραγωγούς για τις πρώτες ύλες, τότε και ο φούρνος αλλά και οι παραγωγοί θα ανθήσουν σταδιακά τις επιχειρήσεις τους πετυχαίνοντας μεγαλύτερη κερδοφορία.
- **Βοηθάει στην εξισορρόπηση της ζήτησης με την προσφορά:** Ο φούρναρης πλέον εφόσον αγοράζει απευθείας από παραγωγούς έχει την δυνατότητα να διαπραγματεύεται συνεχώς και την τιμή στην οποία αγοράζει αλλά και την ποσότητα, αναλόγως με τις ανάγκες του φούρνου, χωρίς να υπάρχει κάποιο συγκεκριμένο όριο στο πότε ή στο πόσο θα αγοράζει.
- **Καθιστά πιο αποδοτική την εξυπηρέτηση πελατών:** Ο φούρναρης και κάθε επιχείρηση πλέον έχει την δυνατότητα να παραδίδει το προϊόν στον πελάτη με ακρίβεια και στους υποτιθέμενους χρόνους καθώς έχει δημιουργήσει ένα γρήγορο και με μεγάλη ανταπόκριση. Ακόμη, σε αρκετές περιπτώσεις, αγοράζοντας απευθείας από τους παραγωγούς μπορεί να οδηγήσει σε πιο ποιοτικά τελικά προϊόντα.

1.2) Εφοδιαστική (Logistics)

Πολλές φορές παρατηρείται ότι ο όρος Logistics συγχέεται και χρησιμοποιείται αντί αυτού της ΔΕΑ ή και το ανάποδο. Στην πραγματικότητα, αν και αρκετά όμοιοι μεταξύ τους, έχουν λίγο διαφορετική σημασία. Συγκεκριμένα, τα Logistics αναφέρονται στην ροή των πραγμάτων, στον τρόπο με τον οποίο κινούνται τα αγαθά από την αρχή μέχρι και το τέλος της αλυσίδας. Εταιρείες μεταφορών, κέντρα διανομής, αποθήκες κλπ. είναι μερικές πτυχές της εφοδιαστικής αλυσίδας που απασχολούν τα Logistics. Αποτελούν όπως είναι προφανές ένα υποσύνολο αυτής και δεν ενδιαφέρονται καθόλου ούτε στο πώς δημιουργείται η πρώτη ύλη ούτε και σε τι επεξεργασίες θα υποβληθεί αυτή παρά μόνο στο πώς αυτή θα κινηθεί όσο το δυνατόν πιο γρήγορα και αποτελεσματικά μέσα από την αλυσίδα.



Εικόνα 1.2 Logistics

Τα logistics αρχικά χρησιμοποιούνταν ως στρατιωτικός όρος κάνοντας αναφορά πώς το προσωπικό του στρατού αποκτούσε, αποθήκευε και μετέφερε τον εξοπλισμό και τις προμήθειές του. Από το 1960 και έπειτα, εξαιτίας της συνεχούς αύξησης της πολυπλοκότητας στον ανεφοδιασμό των επιχειρήσεων με αγαθά και την μετακίνηση των προϊόντων τους στην αγορά, ο όρος αυτός υιοθετήθηκε από τον τομέα της επιστήμης αποφάσεων και έγινε ταυτόσημος με τις επιχειρήσεις υπό τον όρο «Business Logistics».

Μία απλή ευμολογία του όρου αυτού για να γίνει πιο κατανοητός είναι η δυνατότητα ενός οργανισμού/επιχείρησης να «διαθέτει το σωστό προϊόν στην

σωστή ποσότητα, την σωστή ώρα και στην καλύτερη δυνατή ποιότητα για τον καταναλωτή». Παρατηρείται έτσι ότι μία απολύτως ικανοποιητική σχέση μεταξύ μίας εταιρείας και του καταναλωτή καθίσταται εφικτή μόνο αν η επιχείρηση διαθέτει αποτελεσματική ΔΕΑ.

Η ανάγκη αυτή έχει δημιουργήσει ένα ολόκληρο πεδίο επιστήμης και, κατ' επέκταση, πολλές νέες θέσεις εργασίας για την κάλυψη των αναγκών των επιχειρήσεων. Οι θέσεις αυτές καλύπτονται από επαγγελματίες που αναφέρονται ως «logisticians» ή στην ελληνική «Υπεύθυνους δρομολόγησης».

Η παρατεταμένη εξειδίκευση και εκπαίδευση σε θέματα ΔΕΑ ή προβλημάτων δρομολόγησης είναι μείζονος σημασίας στον τομέα διοίκησης επιχειρήσεων. Καταρχάς, οι συγκεκριμένες γνώσεις καθιστούν τον εκπαιδευόμενο ικανό να εισαχθεί επιτυχώς στην αγορά εργασίας και να βρει μια δουλειά αλλά επίσης αποτελούν και αναγκαίο κομμάτι για την συνεχή βελτίωση των προβλημάτων της εφοδιαστικής αλυσίδας και την ανάπτυξη νέων μεθόδων και τεχνολογιών για την καλύτερη διαχείρισή της. Έτσι επωφελούνται και οι ειδικευμένοι επαγγελματίες αλλά και η παγκόσμια αγορά, καθώς όλοι θα μπορούν να απολαμβάνουν περισσότερα, οικονομικότερα και πιο ποιοτικά αγαθά.

Η ουσιαστική σημασία ενός τέτοιου επαγγελματία είναι να επιβλέπει όλες τις δραστηριότητες γύρω από την μεταφορά και ροή των πραγμάτων. Εμπλέκεται σε δραστηριότητες που αφορούν την αγορά πρώτων υλών, την διαχείριση του αποθέματος και την αποτελεσματική αποθήκευσή του. Για την επίτευξη του στόχου αυτού χρησιμοποιούνται επαγγελματικά συστήματα και λογισμικά για τον σχεδιασμό της μεταφοράς των αγαθών ή ακόμη και τον εντοπισμό τους ανά πάσα στιγμή. Έτσι μπορεί με την μέγιστη αποτελεσματικότητα να επιβλέπει, προβλέπει και να μεριμνά για την ομαλή ροή όλων των αγαθών σε όλα τα στάδια της εφοδιαστικής αλυσίδας και να ενημερώνει τα υπόλοιπα τμήματα της επιχείρησης με την γνώση που αποκτά. Η ομαλή και αποδοτική λειτουργία μιας επιχείρησης έγινε ταυτόσημη με τον όρο logistics.

Συνοπτικά ένας «logistician/υπεύθυνος προβλημάτων δρομολόγησης»:

- Διευθύνει την κατανομή των προμηθειών, των υλικών και τον παραγόμενων προϊόντων.
- Χτίζει σχέσεις τόσο με τους καταναλωτές όσο και με τους προμηθευτές.
- Οργανώνει την διακίνηση των αγαθών αποδοτικά και οικονομικά.
- Βελτιώνει συνεχώς τις ήδη υπάρχουσες μεθόδους ΔΕΑ για καλύτερα αποτελέσματα.
- Καταστρώνει στρατηγικές για να κάνει την μεταφορά γρηγορότερη.

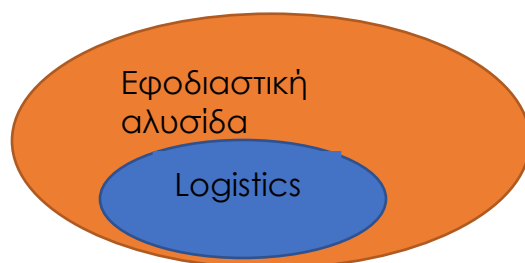
Μία κλασική περίπτωση για να γίνει κατανοητός ο όρος αυτός (logistics) είναι αυτή μιας εταιρείας παραγωγής και διακίνησης φυσικού αερίου. Το φυσικό αέριο είναι μία από τις πιο ζωτικής σημασίας μορφής ορυκτού καυσίμου το οποίο αποτελεί

την κινητήριο δύναμη για την λειτουργία ολόκληρων κρατών. Επομένως, υπάρχει άμεση ανάγκη για την καλύτερη δυνατή διανομή του σε όλες τις χώρες πελάτες τις επιχείρησης. Με τα «logistics», η εταιρεία εμπλέκεται στην διαχείριση και κατανομή των σωληνώσεων και των φορτηγών που μεταφέρουν το αέριο από το σημείο εξόρυξης στο σημείο αποθήκευσης και έπειτα στα κατάλληλα κέντρα διανομής για την μεταφορά του στο δίκτυο πελατών της εταιρείας. Η αποτελεσματική διαχείριση οδηγεί σε μείωση του κόστους και, ως αποτέλεσμα αυτού, και της τιμής του στην αγορά. Σε αντίθετη περίπτωση, μια ενδεχομένως αποτυχημένη διαχείριση μπορεί να οδηγήσει σε καθυστερημένες παραδόσεις, αδυναμία καλύψεως της ζήτησης όπως επίσης και σοβαρές ζημιές στα οικονομικά της εταιρείας.

Τα «logistics» αποτελούν και τον λόγο που στην σύγχρονη παγκόσμια αγορά, μεγάλες εταιρείες μπορούν εύκολα να υπερτερούν έναντι των μικρότερων. Ένας από τους κύριους λόγους που εταιρείες όπως η Amazon έχουν κυριαρχήσει στην αγορά είναι το γεγονός ότι έχουν καταφέρει να λύσουν το πρόβλημα της αποτελεσματικής διακίνησης των αγαθών που εμπορεύεται.

1.3) ΔΕΑ και Logistics

Μέχρι τώρα έχει αναφερθεί ότι αν και διαφορετική όροι, πολλές φορές η ΔΕΑ και τα logistics αναφέρονται εναλλαγμένα για να προσδιορίσουν το ίδιο νόημα. Είδαμε ότι αν και είναι κατανοητό το γεγονός ότι συγχέονται μεταξύ τους, η αλήθεια είναι ότι τα logistics είναι ένα μικρό κομμάτι σε αυτό το τεράστιο παζλ που λέγεται Διαχείριση Εφοδιαστικής Αλυσίδας.

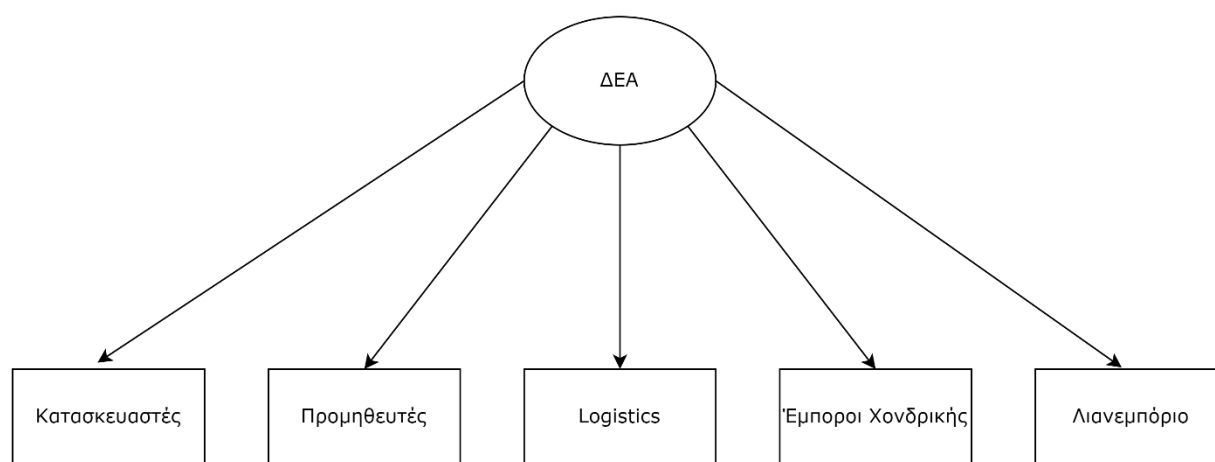


Ιστορικά ο όρος logistics να εμφανίστηκε αρκετά χρόνια νωρίτερα από την εφοδιαστική αλυσίδα, η οποία αποτελεί μία αρκετά μοντέρνα ιδέα. Η τελευταία, δημιουργήθηκε για να καλύψει το ευρύτερο φάσμα όλων των διαδρομών και διεργασιών που θα χρειαστεί να ακολουθήσει μία ύλη μέχρι να διατεθεί ως τελικό προϊόν στην αγορά. Ακόμη, έχει ήδη επισημανθεί ότι τα logistics αφορούν αποκλειστικά την ροή των πραγμάτων της ΔΕΑ και τίποτα περισσότερο. Είναι ένα αναπόσπαστο κομμάτι μιας παραγωγικής διαδικασίας που μαζί με τα υπόλοιπα στάδια συνθέτουν την ίδια την εφοδιαστική αλυσίδα.

Οι κύριες διαφορές του είναι δύο:

1. Ο τελικός στόχος: Τα logistics προσπαθούν να επιτύχουν την ικανοποίηση του πελάτη (ποιότητα, χαμηλή χρόνοι, αξιοπιστία) ενώ η ΔΕΑ προσπαθεί να αποκτήσει ανταγωνιστικό πλεονέκτημα στην αγορά έναντι των ανταγωνιστών.
2. Τα logistics αφορούν μία οντότητα σε αντίθεση με την ΔΕΑ που αφορά πολλές οντότητες μαζί (Προμηθευτές, Κατασκευαστές, Logistics, Καταστήματα Λιανικής κλπ.)

Και οι δύο αυτοί όροι είναι εξίσου σημαντική σε όλες σχεδόν τις επιχειρήσεις και οργανισμούς καθώς όπως είδαμε, η σημερινή παγκόσμια αγορά είναι αυτό που είναι χάρις στην ανάπτυξη των τομέων αυτών.



Εικόνα 1.3 Κρίκοι της ΔΕΑ

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά οι διαφορές μεταξύ ΔΕΑ και Logistics.

Μέτρο Σύγκρισης	Logistics	ΔΕΑ
Σημασία	Διαχείριση μεταφοράς των αγαθών από και προς τον οργανισμό	Οργάνωση και συντονισμός όλων των σταδίων της Εφοδιαστικής Αλυσίδας
Σκοπός	Ικανοποίηση Πελάτη	Ανταγωνιστικό Πλεονέκτημα
Χρονολογία	Αναπτύχθηκε αρκετά νωρίτερα	Είναι μοντέρνα ιδέα
Οργανισμοί που αφορά	Έναν	Πολλούς
Συσχέτιση	Είναι ένα υποσύνολο της ΔΕΑ	Είναι η εξέλιξη των logistics

Πίνακας 1.1 Διαφορές ΔΕΑ και Logistics

1.4) Εφοδιαστική Αλυσίδα και Covid-19

Την άνοιξη του 2020 ολόκληρος ο πλανήτης ήρθε σε πραγματική επαφή με την έξαρση της νόσου Covid-19. Η νόσος αυτή έπιασε προ εκπλήξεως την παγκόσμια αγορά και, κατ' επέκταση σχεδόν όλες τις επιχειρήσεις στον κόσμο. Τα lockdown και οι περιορισμοί τόσο στις μετακινήσεις όσο και στα εργασιακά περιβάλλοντα έπληξαν την παγκόσμια οικονομία και όλες τις δραστηριότητες της.

Σε αρκετές κατηγορίες η ζήτηση εξαφανίστηκε εντελώς ενώ σε άλλες κορυφώθηκε με πολύ υψηλές τιμές. Η νόσος εξέθεσε όλες τις αδυναμίες τις εφοδιαστικής αλυσίδας. Τα μοντέλα αποδείχτηκαν ότι δεν ήταν αρκετά ευέλικτα ώστε να μπορέσουν γρήγορα και αποτελεσματικά να εντοπίσουν και να αντιδράσουν στις απότομες αλλαγές στην αγορά. Οι περισσότεροι οργανισμοί δεν ήταν έτοιμοι να αντιμετωπίσουν την κρίση αυτή καθώς δεν είχαν την δυνατότητα να προσαρμοστούν με τα υπάρχοντα εφόδιά τους. Νέα μοντέλα, νέες μέθοδοι και στρατηγικές δημιουργήθηκαν για την αντιμετώπιση της κρίσης.

Οι επιβραβεύσεις ενός ανθεκτικού συστήματος ΔΕΑ έχουν τόσο κοινωνική όσο και οικονομική επίπτωση. Ο έλεγχος σε δυναμικό χρόνο της ομαλής ροής των αγαθών βοηθάει τις επιχειρήσεις να ελέγξουν καλύτερα τόσο τα λειτουργικά κόστη όσο και να φροντίσουν για την καλύτερη μέση εξερχόμενη ποιότητα προϊόντος από την παραγωγική γραμμή. Όσο για τις επιχειρήσεις, αυτές που κατάφεραν να ανταπεξέλθουν απέκτησαν πολύ μεγαλύτερο μερίδιο αγοράς έναντι των ανταγωνιστών τους. Η ανάγκη για μετάβαση στην ψηφιακή εποχή και στα ηλεκτρονικά καταστήματα συνειδητοποιήθηκε και πλέον είναι η απολύτως απαραίτητη πορεία για κάθε οργανισμό που σέβεται τον εαυτό του.

Στα κατάλοιπα της νόσου και της κρίσης που επέφερε, βρίσκουμε και τις συνεχώς αυξανόμενες επενδύσεις σε νέες τεχνολογίες παράδοσης και παραλαβής προϊόντων. Μέχρι το 2020, περίπου το 65% των μετακινήσεων των αγαθών γίνονταν μέσω φορτηγών, ενώ οι παραδόσεις των τεμαχίων γινόντουσαν σχεδόν εξολοκλήρου μέσω ΙΧ και με ανθρώπινη διεπαφή. Πλέον αναπτύσσονται ολοένα και περισσότερες τεχνολογίες οι οποίες προσπαθούν να λύσουν αυτό το πρόβλημα. Μία εκ αυτών αποτελούν και το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, τα μη στελεχωμένα ιπτάμενα οχήματα ή αλλιώς Drones.

1.5) Μη Στελεχωμένα Ιπτάμενα Οχήματα (Drones)

Τα μη στελεχωμένα ιπτάμενα οχήματα (unmanned aerial vehicles), τα οποία αναφέρονται κυρίως ως Drones είναι ρομποτικά οχήματα τα οποία είτε ελέγχονται με χειριστήριο απομακρυσμένα ή είτε είναι πλήρως αυτοματοποιημένα να κινούνται στο χώρο. Έχουν αρκετά αισθητήρια όργανα και συστήματα GPS, τα οποία σε συνεργασία με μία κάμερα στο εμπρόσθιο μέρος τους, εκπληρώνουν τις

αποτελεσματικές πτήσεις τους. Αρχικά συσχετίζονταν κυρίως με τον στρατό, καθώς έβρισκαν εφαρμογή στην μεταφορά αγαθών σε επικίνδυνες ζώνες. Πλέον καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών όπως:

- Αποστολές αναζήτησης
- Αποστολές διάσωσης
- Χαρτογράφηση
- Επίβλεψη χώρων
- Πυρόσβεση



Εικόνα 1.4 Drone

Για την επίτευξη της πτήσης τους τα οχήματα αυτά καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια η οποία είναι αποθηκευμένη στην μπαταρία την οποία φέρουν μαζί τους. Επειδή η αυτονομία τους δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη, οποιαδήποτε συνεισφορά στην μείωση της κατανάλωσης της ενέργειας τους είναι επιθυμητή. Πλέον η κατασκευή τους αποτελείται από αρκετά ελαφριά κράματα, ώστε να μειωθεί αισθητά το βάρος τους, το οποίο είναι ένας από τους καταλυτικούς παράγοντες κατανάλωσης. Στην περίπτωση των πλήρως αυτόματων οχημάτων, σημαντικό παράγοντα επίσης αποτελεί η βέλτιστη κίνηση στον χώρο, η οποία αποτελεί και το αντικείμενο μελέτης της παρούσας εργασίας. Η κίνηση αυτή θα μειώνει τόσο τις άσκοπες μετακινήσεις (χρονική καθυστέρηση) όσο και την κατανάλωση της ενέργειας λόγω περισσότερων από το επιθυμητό κινήσεων.

Η τεχνολογία των οχημάτων αυτών βρίσκει εφαρμογή στις παραδόσεις των τεμαχίων από αγορές καταναλωτών στα μεγάλα αστικά κέντρα τα οποία συνήθως χαρακτηρίζονται από την υπερβολική κυκλοφοριακή συμφόρηση. Επιπλέον, είναι

ιδιαιτέρως χρήσιμα στην διαχείριση των αποθηκών καθώς με την βοήθεια τους μπορούν να επιβλεφθούν τυχόν τυφλά σημεία ή εσοχές από τις οποίες μπορούν να υπάρχουν απώλειες προϊόντων ή τυχόν ζημιές. Πέρα από τα Logistics, τα οχήματα αυτά βρίσκουν και άλλες εφαρμογές χάρις στην ευελιξία τους όπως αναφέραμε και ενωρίτερα.



Εικόνα 1.5 Μεταφορά πακέτου με Drone

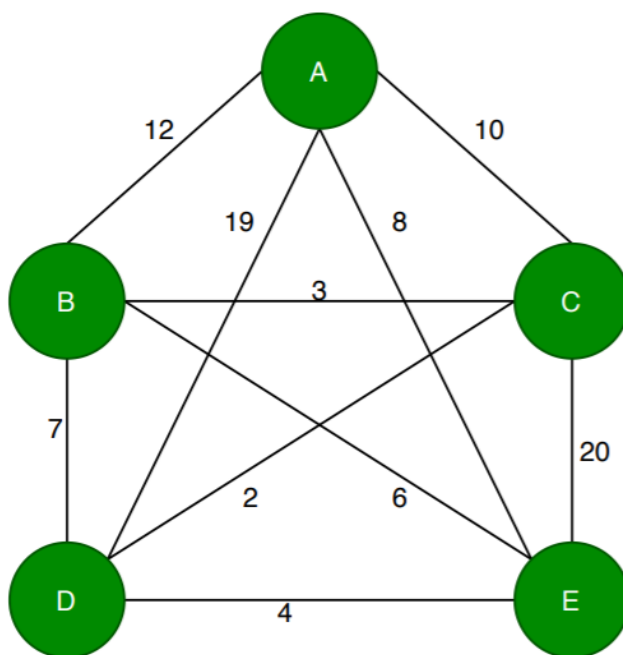
Συνοψίζοντας, τα Drones στην εφοδιαστική αλυσίδα σημαίνουν μείωση στον χρόνο παράδοσης σε περιοχές με κυκλοφοριακό πρόβλημα και μειωμένα κόστη μεταφοράς. Τέλος, έχουν και περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθώς μειώνουν αισθητά τις εκπομπές αέριων ρύπων όπως το CO₂.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Προβλήματα Δρομολόγησης

2.1) Πρόβλημα πλανόδιου πωλητή (TSP)

2.1.1) Ορισμός

Το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή είναι εκείνο το οποίο περιγράφει την ανάγκη ένας πωλητής να επισκεφθεί ένα σύνολο από πόλεις-σταθμούς, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους, και να επιστρέψει στο σημείο εκκίνησής του με τον ασφαλέστερο, γρηγορότερο και πιο οικονομικό τρόπο.



Εικόνα 2.1 Απλός γράφος

Το συγκεκριμένο πρόβλημα είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον καθώς για την ακριβή επίλυσή του (να βρεθεί το ολικό ελάχιστο με 100% σιγουριά) πρέπει να συγκριθούν όλες οι πιθανές διαδρομές μεταξύ τους για να εντοπιστεί η καλύτερη δυνατή. Για μικρά θεωρητικά προβλήματα αυτό δεν είναι ιδιαίτερα κοστοβόρο, αλλά για πραγματικά δεδομένα και προβλήματα τα οποία αποτελούνται από εκατοντάδες ή ακόμη και χιλιάδες προορισμούς που συνδέονται μεταξύ τους (δημιουργώντας εκατομμύρια ή και περισσότερες πιθανές διαδρομές) η σύγκριση όλων των διαδρομών απαιτεί πολύ υψηλούς χρόνους επίλυσης που υπερβαίνουν τις πραγματικές διορίες που συμφέρουν την εταιρεία.

Για παράδειγμα, με 7 προορισμούς υπάρχουν συνολικά 7! ή 5040 πιθανές διαδρομές. Αυτό μπορεί να επιλυθεί πραγματικά σε απειροελάχιστο χρόνο χρησιμοποιώντας υπολογιστή. Καθώς όμως αυξάνονται οι πόλεις, ο χρόνος αυξάνεται με εκθετικούς ρυθμούς. Για 11! ή 39,916,800 πιθανές διαδρομές ο χρόνος είναι 60 φορές μεγαλύτερος. Επαγωγικά μπορούμε να συμπεράνουμε τη χρονική διάρκεια που θα απαιτούσε ένα πρόβλημα χιλιάδων προορισμών. Το πως ακριβώς επιλύονται τέτοιους είδους προβλήματα θα αναφερθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

2.1.2) Μοντελοποίηση

Αρχικά, θεωρούμε ότι στο συγκεκριμένο πρόβλημα τόσο οι συντεταγμένες των σταθμών-πόλεων όσο και τα κόστη μετακίνησης από τον έναν στον άλλο είναι γνωστά. Ακόμη θεωρούμε ότι απαγορεύονται διπλότυπες μετακινήσεις όπως επίσης και ότι απαγορεύεται να επισκεφθούμε έναν κόμβο περισσότερο από μία φορές. Έχοντας αυτά μοντελοποιείται το πρόβλημα με τον εξής τρόπο:

Συμβολίζουμε με x_{ij} τις μεταβλητές απόφασης και με c_{ij} το κόστος της διαδρομής από το $i \rightarrow j$. Έτσι για n αριθμό κόμβων έχουμε:

$$x_{ij} \begin{cases} 1, \text{ εάν ο πωλητής μεταβεί από την πόλη } i \text{ στην } j \\ 0, \text{ αλλιώς, } \forall i, j \text{ με } i \neq j \end{cases}$$

και το μοντέλο γίνεται

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

υπό

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \quad (2.2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j \in \{1, \dots, n\} \quad (2.3)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subset \{1, \dots, n\} \quad (2.4)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i, \forall j, i \neq j \quad (2.5)$$

Το αντικειμενικό κριτήριο (2.1) αντιπροσωπεύει την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους μετακίνησης. Οι περιορισμοί (2.2) και (2.3) καθορίζουν ότι από κάθε κόμβο θα εισέρχεται και θα εξέρχεται μονάχα ένα τόξο από και προς έναν άλλο κόμβο. Τέλος, ο περιορισμός (2.4) εξαλείφει πλήρως τις κυκλικές διαδρομές που δεν διέρχονται από όλους τους κόμβους του υποσυνόλου S . Το $|S|$ συμβολίζει τον αριθμό των στοιχείων του συνόλου αυτού.

2.2) Απλό πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (VRP)

2.2.1) Ορισμός

Η έννοια των προβλημάτων δρομολόγησης οχημάτων εμφανίστηκε σε μία διατριβή των George Dantzig – John Ramser το 1959, όπου παρατηρούμε και την πρώτη αλγοριθμική προσέγγιση του προβλήματος. Στη συγκεκριμένη θέση ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε σε μία εταιρεία εξαγωγής πετρελαίου για την οργάνωση των παραδόσεων της.

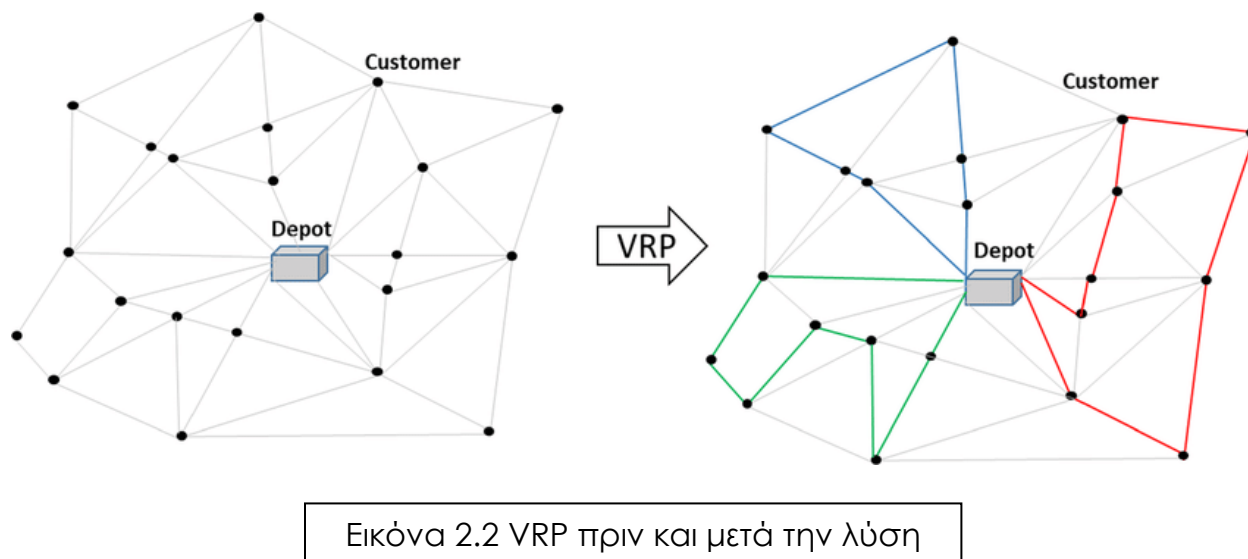
Το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (ΠΔΟ) ή Vehicle Routing Problem (VRP) είναι η ονομασία μίας ομάδας προβλημάτων στα οποία στόχος είναι να καθοριστούν ένα σύνολο διαδρομών που θα ακολουθήσει ένας στόλος οχημάτων από κέντρα διαλογής ώστε να εξυπηρετηθούν καταναλωτές γεωγραφικά πελάτες, συνήθως για την παραλαβή και παράδοση τεμαχίων. Οι διαδρομές που θα καθοριστούν πρέπει να «βέλτιστες». Με τον όρο αυτό εννοούμε τις διαδρομές εκείνες που έχουν ως αντικειμενικό κριτήριο την ελαχιστοποίηση του χρόνου μετακίνησης του στόλου και ταυτοχρόνως την ελαχιστοποίηση του κόστους που απαιτείται για να γίνουν όλες αυτές οι διαδρομές. Στην περίπτωση που ο στόλος αποτελείται αποκλειστικά από μία οντότητα, τότε ουσιαστικά βρισκόμαστε στην περίπτωση του προβλήματος του πλανόδιου πωλητή (TSP).

Σε αρκετούς τομείς των επιχειρήσεων, βελτιστοποίηση της δρομολόγησης των προϊόντων τους μπορεί να επιφέρει μείωση των εξόδων της τάξεως του 25%, αρκετά σημαντική μείωση στα λειτουργικά έξοδα της εταιρείας. Είναι έτσι προφανή τα οικονομικά οφέλη που μπορούν να αποκομίσουν από την ανάπτυξη ικανών μοντέλων για την αποδοτικότερη διακίνηση αγαθών.

Όπως αναφέρθηκε και πριν, τα προβλήματα δρομολόγησης με πραγματικά δεδομένα απαιτούν υπέρογκο υπολογιστικό χρόνο για να επιλυθούν ακόμη και με την χρήση υπολογιστή. Ωστόσο, στην σύγχρονη εποχή, η υπολογιστική ισχύ που προσφέρεται στην κοινωνία είναι ικανή να προσεγγίσει σε ικανοποιητικό βαθμό την πραγματική λύση των προβλημάτων αυτών χρησιμοποιώντας μεθευρετικούς και εξελκτικούς αλγορίθμους. Ένα ακόμη πλεονέκτημα της σύγχρονης κοινωνίας είναι ότι υπάρχει πλέον η δυνατότητα να ελέγχονται και να λύνονται τέτοιου είδους προβλήματα σε δυναμικό χρόνο συλλέγοντας σε πραγματικό χρόνο δεδομένα και επεξεργάζοντάς τα ταυτοχρόνως.

Στο απλό πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (VRP) έχουμε ένα στόλο από φορτηγά τα οποία ξεκινώντας από την αποθήκη πρέπει να φορτωθούν βέλτιστα με τα προς αποστολή τεμάχια και να κινηθούν επίσης βέλτιστα προς τους κόμβους παράδοσης και πίσω. Σε όλα τα προβλήματα δρομολόγησης συνήθως συμβολίζονται με κόμβους όλα τα σημεία των παραδόσεων (ή/και παραλαβών

αναλόγως το πρόβλημα) και με τόξα οι συνδέσεις τους που μπορεί να αποτελούν τους πραγματικούς δρόμους που μπορεί να ακολουθήσει το φορτηγό. Μετά το πέρας της επίλυσης, εμφανίζονται οι τελικές διαδρομές (με διαφορετικό χρώμα κάθε διαδρομή) την οποία θα ακολουθήσει κάθε φορτηγό.



2.2.2) Μοντελοποίηση προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων (VRP Model)

Όπως είδαμε και νωρίτερα, το απλό VRP αποτελεί ουσιαστικά την γενικότερη περίπτωση του πλανόδιου πωλητή ή αλλιώς, ο πλανόδιος πωλητής είναι μια ειδική περίπτωση απλού VRP.

Έστω:

$$x_{ijk} \begin{cases} 1, \text{ εάν το όχημα } k \text{ επισκεφθεί τον } j \text{ αμέσως μετά τον } i \\ 0, \text{ αλλιώς, } \forall i, j, k \text{ με } i \neq j \end{cases}$$

$$y_{ik} \begin{cases} 1, \text{ εάν ο πελάτης } i \text{ επισκέπτεται από το φορτηγό } k \\ 0, \text{ αλλιώς, } \forall i, k \end{cases}$$

Έτσι το πρόβλημα γίνεται:

$$\min \sum_{i=1}^n c_{ij} \sum_{j=1}^n x_{ijk} \quad (2.6)$$

υπό:

$$\sum_k y_{ik} = \begin{cases} 1, & i = 2, \dots, n \\ m, & i = 1 \end{cases} \quad (2.7)$$

$$\sum_i q_i y_{ij} \leq Q_k \quad (2.8)$$

$$\sum_j x_{ijk} = \sum_j x_{jik} = y_{ik} \quad i = 1, \dots, n \text{ και } k = 1, \dots, m \quad (2.9)$$

$$\sum_{i,j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subset \{2, \dots, n\} \quad (2.10)$$

$$y_{ik} \in \{0,1\}, \forall i, k \quad (2.11)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, \forall i, j, k \quad (2.12)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση είναι ίδια με το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή προσαρμοσμένη στα δεδομένα του απλού VRP, όπως και οι περιορισμοί (2.10), (2.11), (2.12).

Ο περιορισμός (2.7) δηλώνει ότι κάθε κόμβος επισκέπτεται από μονάχα ένα φορτηγό, με εξαίρεση την βάση επιστροφής των φορτηγών που θα περάσουν όλα τα φορτηγά. Ο (2.8) αφορά την χωρητικότητα κάθε φορτηγού η οποία δεν γίνεται να παραβιαστεί για ένα σύνολο πελατών και ο (2.9) ότι κάθε φορτηγό που θα επισκεφθεί έναν πελάτη θα αναχωρήσει και από αυτόν.

2.3) Παραλλαγές του προβλήματος του πλανόδιου πωλητή (TSP)

Το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή έχει αρκετές παραλλαγές που το επεκτείνουν και το προσαρμόζουν σε διάφορες συνθήκες ώστε να έλθει και πιο κοντά στην πραγματικότητα. Μερικά από αυτά παρουσιάζονται παρακάτω.

- Το Χρονικώς Εξαρτώμενο Πρόβλημα του Πλανόδιου Πωλητή (Time Dependent TSP)

Αποτελεί μία γενικότερη κατηγορία του απλού TSP. Στην συγκεκριμένη περίπτωση τα κόστη μετάβασης από έναν κόμβο i σε έναν κόμβο j εξαρτώνται από την θέση του πωλητή την εκάστοτε χρονική στιγμή, έχοντας έτσι μεταβαλλόμενα κόστη c_{ij}^t για κάθε στιγμή t της περιόδου T . Αν στο συγκεκριμένο πρόβλημα θεωρήσουμε ότι για κάθε στιγμή τα κόστη μετάβασης κάθε ζεύγους (i,j) είναι ίδια ($c_{ij}^1 = c_{ij}^2 = c_{ij}^3, \dots, = c_{ij}^n$) τότε το πρόβλημα μετατρέπεται σε αυτό του πλανόδιου πωλητή.

- Το εκτεταμένου Χρονικού Ορίζοντα Πρόβλημα του Πλανόδιου Πωλητή (Period TSP)

Σε αυτή την εκδοχή επεκτείνουμε ακόμη περισσότερο τον χρονικό ορίζοντα ώστε να αντιστοιχεί σε μια περίοδο k ημερών (γνωστό k) κατά τις οποίες θέλουμε ο πωλητής μας να επισκεφθεί κάθε πόλη $i=1,2,\dots,n$ έναν συγκεκριμένο αριθμό φορές πριν την λήξη της περιόδου k . Το αντικειμενικό κριτήριο είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού μήκους των διαδρομών που θα ακολουθήσει ο πωλητής μας.

- Το Πρόβλημα του Πλανόδιου Πωλητή με τη Χρήση Χρονικών Περιθωρίων (TSP with Time Windows).

Πλέον θεωρούμε ότι για κάθε ζεύγος (i, j) έχουμε ένα συγκεκριμένο κόστος μετακίνησης c_{ij} και έναν χρόνο διάσχισης του τόξου αυτού t_{ij} . Ακόμη για κάθε κόμβο i έχουμε τον χρόνο εξυπηρέτησης s_i , καθώς και το χρονικό εύρος $[a_i, b_i]$ μέσα στο οποίο πρέπει να έχει εξυπηρετηθεί ο πελάτης. Έτσι έχουμε τον περιορισμό $0 \leq s_i \leq b_i - a_i$, ο οποίος απαγορεύει την μη εξυπηρέτηση κάποιου πελάτη εκτός των χρονικών του ορίων. Ακόμη απαγορεύεται η πρόωρη εξυπηρέτηση καθώς αν ο πωλητής φτάσει στον πελάτη i πριν την χρονική στιγμή a_i θα πρέπει να περιμένει η στιγμή a_i για να τον εξυπηρετήσει. Το πρόβλημα είναι να ευρεθεί η ελάχιστη διαδρομή που να ικανοποιεί τους άνωθεν περιορισμούς.

- Το Πρόβλημα της Ταξινομημένης Ομαδοποίησης του Πλανόδιου Πωλητή (Ordered Cluster TSP)

Το σύνολο των κόμβων του γραφήματος που πρέπει να επισκεφθεί ο πωλητής έχει χωριστεί σε προκαθορισμένες ομάδες (clusters). Ο αριθμός των ομάδων όπως επίσης και τα μέλη κάθε ομάδας είναι γνωστά. Έτσι, έχουμε τις ομάδες X_i τις οποίες πρέπει να εξυπηρετήσει εξ' ολοκλήρου ο πωλητής προτού μεταβεί στην επόμενη X_{i+1} ομάδα. Το κριτήριο του προβλήματος αυτού είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού μήκους διαδρομών από την αποθήκη προς κάθε ομάδα και πίσω.

- Το Πολλαπλό Πρόβλημα του Πλανόδιου Πωλητή (The Multiple Traveling Salesman Problem (mTSP))

Αποτελεί μία ακόμη μεγαλύτερη γενίκευση του απλού TSP. Σε αυτό γίνεται χρήση όχι ενός αλλά πολλαπλών πωλητών οι οποίοι εργάζονται ταυτόχρονα για να επισκεφθούν όλες τις πόλεις του γραφήματος. Αποτελεί ένα πιο ρεαλιστικό παράδειγμα και θυμίζει περισσότερο στην μορφή του αυτήν του απλού VRP. Το συγκεκριμένο εμπεριέχει και άλλες υπο-εκδοχές του αναλόγως τα δεδομένα του

προβλήματος, όπως πολλαπλές αποθήκες, μεταβλητό αριθμό πωλητών, χρονικά περιθώρια κλπ.

Μερικές ακόμη παραλλαγές οι οποίες αναφέρονται ονομαστικά:

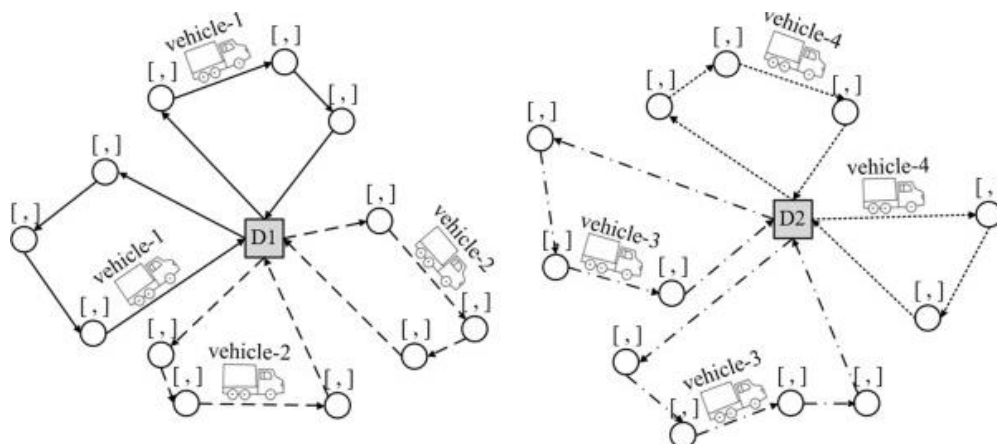
- Το Στοχαστικό Πρόβλημα του Πλανόδιου Πωλητή (Stochastic TSP)
- Το Περιορισμένων Πόρων Πρόβλημα Πλανόδιου Πωλητή (Resource Constrained TSP)
- Μετακινούμενου Στόχου Πρόβλημα Πλανόδιου Πωλητή (Moving Target TSP)
- Το Πρόβλημα Επικάλυψης Χώρου από τον Πωλητή (Covering Salesman Problem)

2.4) Παραλλαγές του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων

Όπως και στο πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή, έτσι και στην κατηγορία των προβλημάτων δρομολόγησης οχημάτων έχουμε αρκετές παραλλαγές του απλού VRP.

- Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων με Πολλαπλές Επιστροφές στην Αποθήκη (Multitrip VRP)

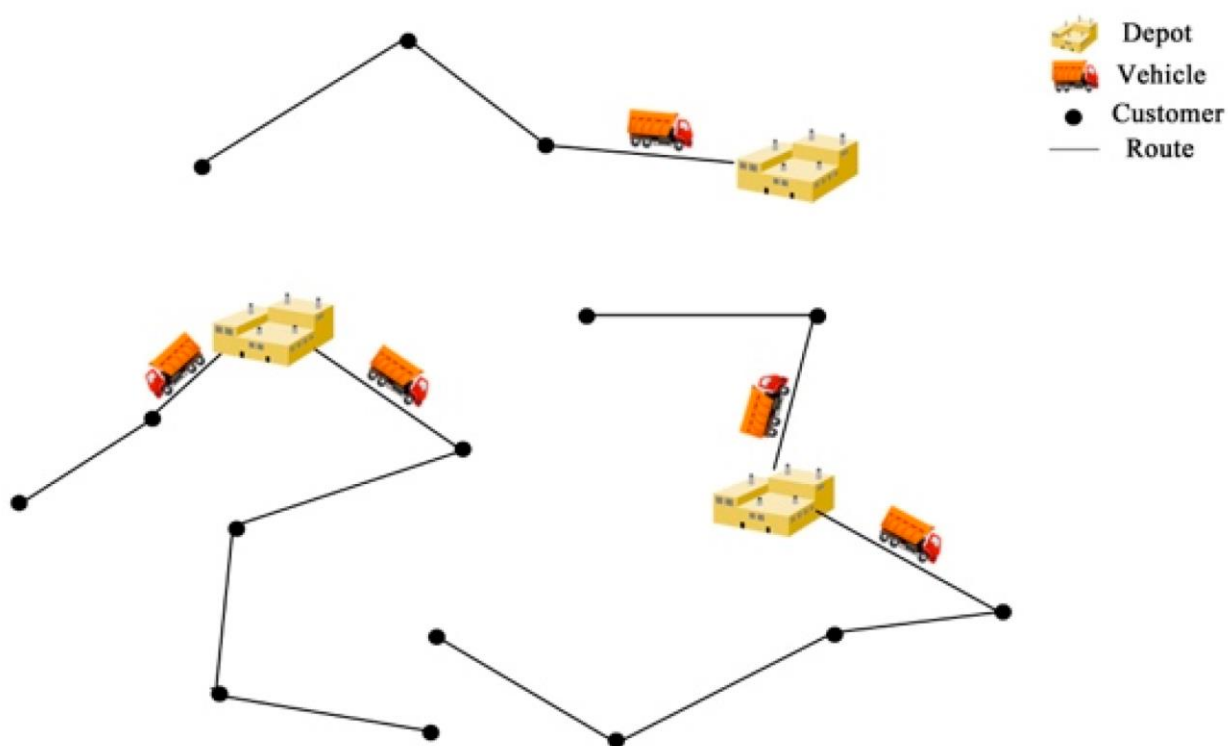
Στα περισσότερα προβλήματα δρομολόγησης, όπως και στην πραγματικότητα, τα φορτηγά μπορούν να πραγματοποιήσουν αποκλειστικά μία διαδρομή από την αποθήκη προς τους πελάτες και πίσω. Αυτό συμβαίνει καθώς οι χρονικοί περιορισμοί όπως επίσης και το γεγονός ότι η φόρτωση των φορτηγών απαιτούν αρκετό χρόνο και πόρους καθιστούν απαγορευτική την συχνή επαναφόρτωση των φορτηγών. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις, το χρονικό πλαίσιο στο οποίο πρέπει να εξυπηρετηθούν πελάτες είναι αρκετά μεγάλο. Έτσι οι χρονικοί περιορισμοί χαλαρώνουν και άρα τα φορτηγά είναι πλέον διαθέσιμα να πραγματοποιήσουν περισσότερες από μία διαδρομές γεμάτα.



Εικόνα 2.3 Πολλαπλές διαδρομές από το ίδιο όχημα

- Το Ανοιχτό Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων (Open VRP)

Αποτελεί μία απλή παραλλαγή του απλού VRP. Στο συγκεκριμένο θεωρούμε ότι η εταιρεία είτε δεν έχει επαρκές στόλο οχημάτων για να πραγματοποιήσει τις παραγγελίες είτε ότι δεν έχει καθόλου οχήματα. Και στις δύο περιπτώσεις, μισθώνονται μερικά οχήματα από άλλη εταιρεία για να εκπληρωθούν οι επιθυμητοί στόχοι. Τα οχήματα αυτά δεν έχουν λόγο μετά την εκφόρτωσή τους κατά την διάρκεια της εξυπηρέτησης να επιστρέψουν στην αποθήκη καθώς απομακρύνονται προς την βάση της εταιρείας που τα εκμισθώνει. Το πρόβλημα αυτό ελαχιστοποιεί το μήκος των διαδρομών των φορτηγών χωρίς να συμπεριλαμβάνει την επιστροφή τους στην αποθήκη.



Εικόνα 2.4 Ανοιχτό VRP

Το ίδιο πρόβλημα θα μπορούσε να θεωρηθεί και ανοικτού-κλειστού τύπου (Open-Closed VRP) θεωρώντας ότι το χρονικό πλαίσιο είναι τέτοιο που επιτρέπει (χρονικά) στα μισθωμένα οχήματα να επιστρέψουν στην αποθήκη για ανεφοδιασμό. Ωστόσο, η βέλτιστη λύση δεν συμπεριλαμβάνει την επιστροφή όλων των οχημάτων. Συνήθως αυτά που πραγματοποιούν τις συντομότερες διαδρομές έχουν το περιθώριο επιστροφής.

- Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων με Μοναδικό Περιορισμό τον Χρόνο Μετάβασης (Time constrained VRP)

Ενδιαφέρουσα εκδοχή του απλού VRP στην οποία δεν έχουμε περιορισμό ζήτησης και χωρητικότητα φορτηγού. Αντιθέτως, ο μοναδικός περιορισμός είναι ο χρόνος μετάβασης (και ίσως εξυπηρέτησης) των πελατών. Τέτοια προβλήματα συναντώνται καθημερινά με την μορφή της παροχής υπηρεσιών. Ομάδες από τεχνικούς όπως υδραυλικοί, ηλεκτρολόγοι κλπ., οι οποίοι πρέπει εντός των χρονικών πλαισίων να εξυπηρετήσουν όσους περισσότερους πελάτες γίνεται. Το πόση ώρα θα χρειαστεί για μετάβαση από πελάτη και σε πελάτη και ο χρόνος επιδιόρθωσης των ζημιών-βλάβων αποτελούν τους περιορισμούς του προβλήματος. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση των χρόνων εξυπηρέτησης ή/και η ελαχιστοποίηση του αριθμού των τεχνικών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Αλγόριθμοι Επίλυσης Προβλημάτων Δρομολόγησης

3.1) Ευρετικοί και Μεθευρετικοί Αλγόριθμοι

Από την εποχή που δημιουργήθηκε η ανάγκη επίλυσης του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων για την αποδοτικότερη λειτουργία της εφοδιαστικής αλυσίδας, έχουν δημιουργηθεί πολλές μέθοδοι και αλγόριθμοι για την επίτευξη του σκοπού αυτού. Λόγω της NP-hard (δεν λύνεται από ντετερμινιστική μηχανή σε πολυωνυμικό χρόνο) δυσκολίας αυτού, η εύρεση της βέλτιστης λύσης του ξεφεύγει υπολογιστικά από τους διαθέσιμους χρόνους που δίδονται για τέτοιους είδους προβλήματα. Έτσι, δημιουργήθηκε η ανάγκη για νέες μεθόδους που θα προσεγγίζουν σε ικανοποιητικό βαθμό την βέλτιστη λύση των προβλημάτων αυτών.

Οι πρώτοι αλγόριθμοι προσπαθούσαν να βρουν την ακριβή λύση του προβλήματος. Ωστόσο, με την αύξηση της πολυπλοκότητάς των κόμβων του γραφήματος, η εύρεση της βέλτιστης λύσης είναι σχεδόν αδύνατη (για εύλογο χρονικό διάστημα). Έπειτα ακολούθησαν οι «ευρετικοί» αλγόριθμοι, οι οποίοι ήταν αλγόριθμοι προσαρμοσμένοι στο εκάστοτε πρόβλημα και είχαν την ιδιότητα να βρίσκουν μία σχετικά ικανοποιητική λύση σε σύντομο χρονικό διάστημα, μειώνοντας έτσι τους πόρους της εταιρείας που απαιτούνταν για την λήψη αποφάσεων. Μία απλή περίπτωση ενός τέτοιου αλγορίθμου είναι αυτή της μεθόδου «δοκιμή και λάθος», όπου τυχαίες τιμές δοκιμάζονται με βάση παρόμοια προβλήματα ή εμπειρία ώστε να βρεθεί εύκολα μια καλή λύση. Το βασικό τους πρόβλημα είναι ότι εξαρτώνται από την φύση του προβλήματος και δεν είναι εύκολο να εφαρμοστούν σε παραλλαγές αυτού. Η επόμενη κατηγορία που αναπτύχθηκε είναι αυτή των μεθευρετικών αλγορίθμων. Είναι ουσιαστικά μοντέλα που δεν εξαρτώνται από τις μεταβλητές κάθε προβλήματος όπως επίσης και εφαρμόζονται σε πολλές διαφορετικές περιπτώσεις.

Οι βασικές διαφορές αυτών έγκειται:

1. Στην εφαρμογή τους: Οι ευρετικοί βρίσκουν περιορισμένη εφαρμογή σε συγκεκριμένα προβλήματα σε αντίθεση με την ευρεία εφαρμογή των μεθευρετικών.
2. Στην λύση τους: Οι ευρετικοί βρίσκουν μια ικανοποιητική λύση που δεν ξέρουμε όμως πόσο καλή είναι σε αντίθεση με τους μεθευρετικούς που μπορεί να δειχθεί η «ποιότητα» της λύσης.

3. Στην ευελιξία τους: Οι ευρετικοί τείνουν να κολλάνε σε κάποιο τοπικό ελάχιστο από το οποίο δεν μπορούν να ξεφύγουν. Αντίθετα, οι μεθευρετικοί είναι λιγότερο κοντόφθαλμοι, καθώς προσεγγίζουν το πρόβλημα από πιο ευρεία οπτική

Πλέον, λόγω της ευελιξίας τους σε όλους τους τομείς, οι μεθευρετικοί είναι αυτοί που έχουν επικρατήσει και χρησιμοποιούνται στις περισσότερες περιπτώσεις.

3.2) Ευρετικοί Αλγόριθμοι

Πολλές φορές η επίλυση των προβλημάτων δρομολόγησης σε αποδεκτά χρονικά πλαίσια είναι πρακτικά αδύνατη. Η ανάγκη για γρήγορα και αποδεκτά αποτελέσματα οδήγησε στην ανάπτυξη αλγορίθμων εύρεσης γρήγορων, εφικτών και σχετικά αξιόπιστων λύσεων. Αυτοί είναι οι απλοί ευρετικοί αλγόριθμοι έρχονται να δώσουν λύση σε αυτό το πρόβλημα.

Οι λύσεις που δίδουν γίνονται αποδεκτές στην περίπτωση πληρότητας κριτηρίων ικανοποίησης όπως η αξιοπιστία της λύσης, η ταχύτητά της, η λογική με την οποία αποκτήθηκε όπως επίσης και η απόκλιση της από την κοντινότερη βέλτιστη.

Οι κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται οι αλγόριθμοι είναι:

- Αλγόριθμοι απληστίας (Greedy algorithms), για την εύρεση αρχικών λύσεων
- Αλγόριθμοι τοπικής αναζήτησης, για την αναζήτηση καλύτερων τοπικών ελαχίστων

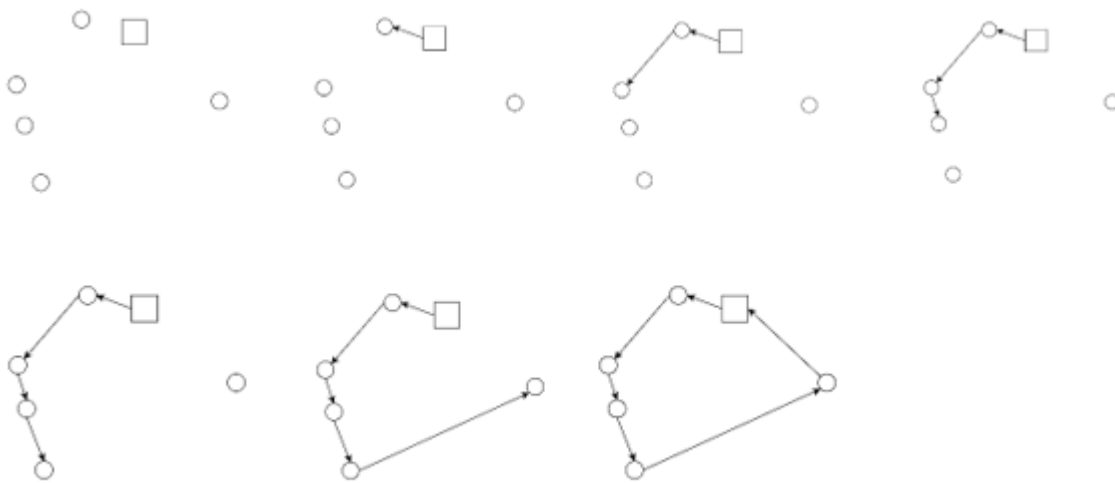
3.2.1) Αλγόριθμοι Απληστίας

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι αλγόριθμοι που προσπαθούν να οδηγήσουν σε μία αρχική εφικτή λύση του προβλήματος. Προσπαθούν να χτίσουν μία λύση κομμάτι κομμάτι, επιλέγοντας συνήθως την πιο προφανή και, εν πρώτη όψη, πιο συμφέρουσα κίνηση. Αυτή η απληστία τους είναι και ο λόγος που θεωρούνται μυωπικοί, καθώς κοιτάνε μόνο τα προς τα εμπρός βήματα και όχι το γενικότερο σύνολο. Τις περισσότερες φορές είναι αρκετά γρήγοροι και τα αποτελέσματά τους στην πλειοψηφία των περιπτώσεων είναι ικανοποιητικά. Υπάρχουν ωστόσο και περιπτώσεις στις οποίες οι λύσεις τους είναι αρκετά «μακριά» από την βέλτιστη όπως επίσης τυγχάνει να έχουν υπέρογκους χρόνους επίλυσης για συγκεκριμένες κατηγορίες προβλημάτων.

Ορισμένοι αλγόριθμοι απληστίας είναι:

- Αλγόριθμος πλησιέστερου γείτονα

Η πιο απλή και εύκολη περίπτωση άπληστου αλγορίθμου είναι αυτή του αλγορίθμου του πλησιέστερου γείτονα. Ο συγκεκριμένος βρίσκει εφαρμογή στα περισσότερα προβλήματα και βρίσκει μία σχετικά καλή λύση αρκετά γρήγορα. Η αρχή εφαρμογής του έγκειται στην απόσταση μεταξύ των γράφων. Ξεκινώντας από την βάση, εντοπίζει τον αμέσως κοντινότερο κόμβο και τον τοποθετεί στην διαδρομή που κατασκευάζει. Σε κάθε βήμα λειτουργεί επαγωγικά βρίσκοντας κάθε φορά τον πλησιέστερο κόμβο j ως προς τον κόμβο εξέτασης i και δημιουργεί το τόξο (i,j) αν η μετακίνηση αυτή επιτρέπεται από τους περιορισμούς. Αποτελεί την καλύτερη επιλογή για να φέρει σε επαφή έναν αρχάριο με την λογικής επίλυσης προβλημάτων δρομολόγησης.



Εικόνα 3.1 Κατασκευή αρχικής λύσης με Πλησιέστερο Γείτονα

- Αλγόριθμος Εγγύτερης Συγχώνευσης

Στον συγκεκριμένο αλγόριθμο ξεκινάμε την διαδικασία θεωρώντας τις μερικές κυκλικές διαδρομές οι οποίες αποτελούνται όλες από έναν κόμβο, έχουμε δηλαδή τόσες κυκλικές διαδρομές όσες και οι κόμβοι. Διαδοχικά σε κάθε βήμα συγχωνεύει ζευγάρια κυκλικών διαδρομών μεταξύ τους μέχρι να σχηματίσει μία τελική κυκλική διαδρομή που θα περιλαμβάνει όλους τους κόμβους. Το κριτήριο συγχώνευσης ικανοποιείται βρίσκοντας τον καλύτερο δυνατό συνδυασμό μερικών κυκλικών διαδρομών που ελαχιστοποιεί το κόστος διαδρομών c_{ij} .

- Αλγόριθμος Εγγύτερης Πρόσθεσης

Σε αντίθεση με τον αλγόριθμο Εγγύτερης Συγχώνευσης, αυτός της Εγγύτερης Πρόσθεσης ξεκινά θεωρώντας μία μερική κυκλική διαδρομή που αποτελείται από έναν κόμβο. Έστω ότι βρισκόμαστε σε έναν κόμβο j της ήδη υπάρχουσας κυκλικής διαδρομής και αναζητούμε τον επόμενο κόμβο πρόσθεσης k . Ο κόμβος αυτός πρέπει να ελαχιστοποιεί το κόστος c_{jk} . Μετά την επιλογή αυτού το τόξο (i, j) που πρόσκεινται στον κόμβο j αντικαθίσταται από τα τόξα (i, k) και (k, j) . Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να προστεθούν όλοι οι κόμβοι στην διαδρομή

- Αλγόριθμος Εισαγωγής Κόμβων

Στην συγκεκριμένη διαδικασία ξεκινάμε και πάλι από έναν στοιχειώδη κύκλο που αποτελείται από έναν κόμβο μόνο. Σε κάθε βήμα προσπαθούμε να καθορίσουμε τον κόμβο που θα εισαχθεί στην διαδρομή και έπειτα καθορίζουμε την θέση στην οποία θα τοποθετηθεί. Η επιλογή του κόμβου εξαρτάται από τα κριτήρια επιλογής που θα τεθούν. Στην απλή περίπτωση που το κριτήριο είναι η απόσταση, επιλέγεται ο κόμβος k που δεν είναι στην διαδρομή αλλά έχει την ελάχιστη απόσταση από κάποιον άλλο κόμβο j αυτής. Επιλέγεται και προστίθεται ανάμεσα στους κόμβους (i, j) της διαδρομής οι οποίοι ελαχιστοποιούν την σχέση $c_{ik} + c_{kj} - c_{ij}$.

- Αλγόριθμος Εξοικονομήσεων των Clarke & Wright

Αποτελεί έναν εκ των πρώτων κατασκευαστικών αλγορίθμων που βρήκαν εφαρμογή στα προβλήματα δρομολόγησης. Σε κάθε βήμα υπολογίζονται όλες οι εξοικονομήσεις όλων των πελατών και έπειτα δημιουργείται η διαδρομή βάση των καλύτερων εξοικονομήσεων. Ως εξοικονόμηση νοείται η ποσότητα s_{ij} η οποία ορίζεται ως $s_{ij} = c_{1i} - c_{ij} + c_{j1}$ για όλα τα ζεύγη πελατών. Ουσιαστικά εκφράζει την εξοικονομήσει σε κόστος που θα μας παρέχει μία πιθανή δημιουργία της διαδρομής $1 \rightarrow i \rightarrow j \rightarrow 1$ αντί των δύο υπό-διαδρομών $1 \rightarrow i \rightarrow 1$ και $1 \rightarrow j \rightarrow 1$. Επαγωγικά σε κάθε βήμα εφαρμόζεται για κάθε κόμβο και για κάθε διαδρομή που έχει δημιουργηθεί.

3.2.2) Αλγόριθμοι Τοπικής Αναζήτησης

Ιστορικά, η τοπική αναζήτηση εφαρμοζόταν από πολύ πρώιμα χρόνια. Βασίζεται σε μία ιδέα που όλοι κάπως έχουν εφαρμόσει σε κάποιο πρόβλημά τους κάποτε. Η ιδέα αυτή είναι η διαδικασία δοκιμής και λάθους, δοκιμάζοντας πολύ απλά μία στρατηγική και αν αυτή δεν προβεί σε καρποφορία δοκιμάζουμε κάποια άλλη μέχρις ότου υπάρξει κάποια βελτίωση.

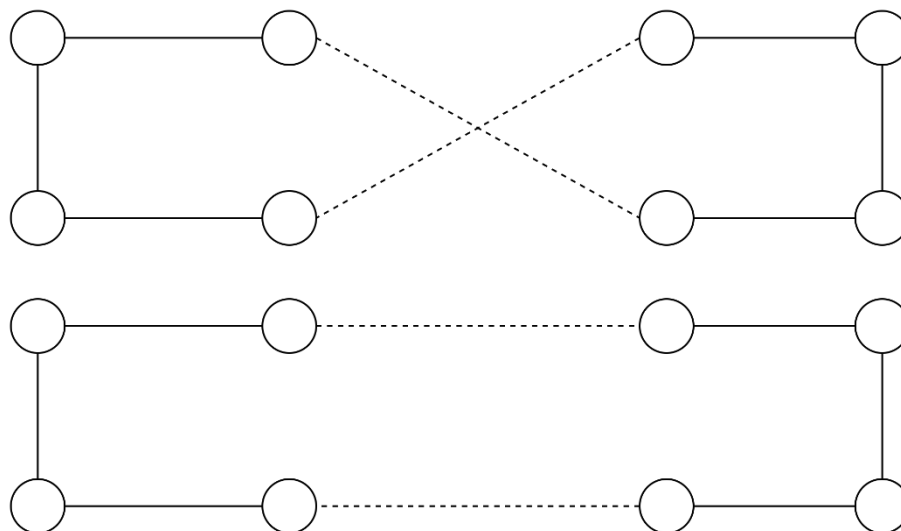
Έστω ένα πρόβλημα δρομολόγησης στο οποίο έχει βρεθεί μια αρχική εφικτή λύση. Η τοπική αναζήτηση χρησιμοποιεί την υπάρχουσα λύση και προσπαθεί μέσω δοκιμών να την βελτιώσει έως ότου επιτευχθεί η εύρεση τοπικού ελαχίστου. Η διαδικασία αυτή συνεχίζει να επαναλαμβάνεται όσο βελτιώνεται η λύση. Το βασικό πλεονέκτημά της είναι η απλότητα εφαρμογής της, όπως επίσης και το γεγονός ανεξαρτησίας της, καθώς μπορεί να ξεκινήσει από οποιονδήποτε κόμβο και να καταλήξει στο ίδιο αποτέλεσμα. Δεν εφαρμόζεται ωστόσο σε μία πλήρη διαδρομή, αλλά σε ένα υποσύνολό της, το οποίο ονομάζεται γειτονιά κόμβων.

- 2-opt

Η μέθοδος αυτή αποτελεί την πλέον βασικότερη και πιο απλή αλγοριθμική διαδικασία τοπικής αναζήτησης. Βασίζεται στην ιδέα ότι αν κάποια διαδρομή διασταυρώνεται με τον εαυτό της, τότε μπορεί να αναδιαταχθεί η σειρά των κόμβων που την αποτελούν ώστε να την βελτίωση.

Έστω μία λύση S ενός προβλήματος δρομολόγησης. Για κάθε κόμβο i εφαρμόζουμε τοπική αναζήτηση σε ένα υποσύνολο της S με την μέθοδο 2-opt ώστε να εξετασθούν όλες οι πιθανές σειριακές αλλαγές στου κόμβους της. Έτσι για κάθε κόμβο i εξετάζονται όλες οι πιθανές κινήσεις (ή ορισμένες από αυτές με βάση κάποιο κριτήριο) 2-opt σε σχέση με τους επόμενους κόμβους της έως ότου υπάρξει κάποια βελτίωση.

Το σημαντικό στη συγκεκριμένη μέθοδο είναι ότι παρότι είναι αρκετά απλή, παρέχει σημαντικές βελτιώσεις στις λύσεις των περισσότερων προβλημάτων δρομολόγησης.

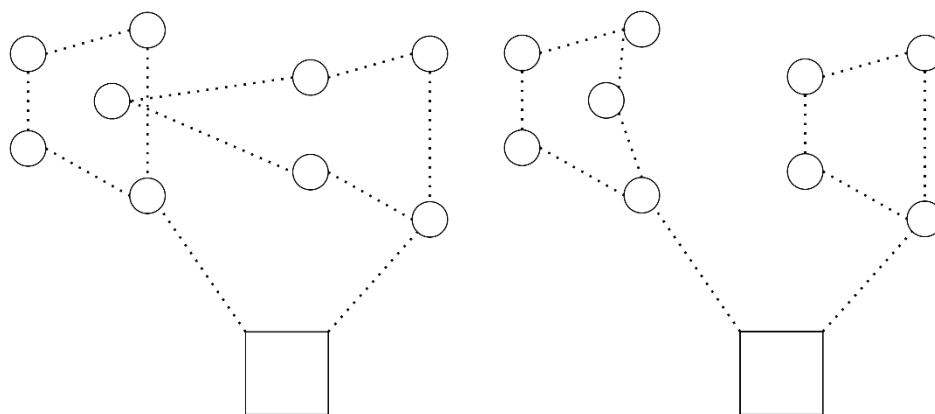


Εικόνα 3.2 2-opt

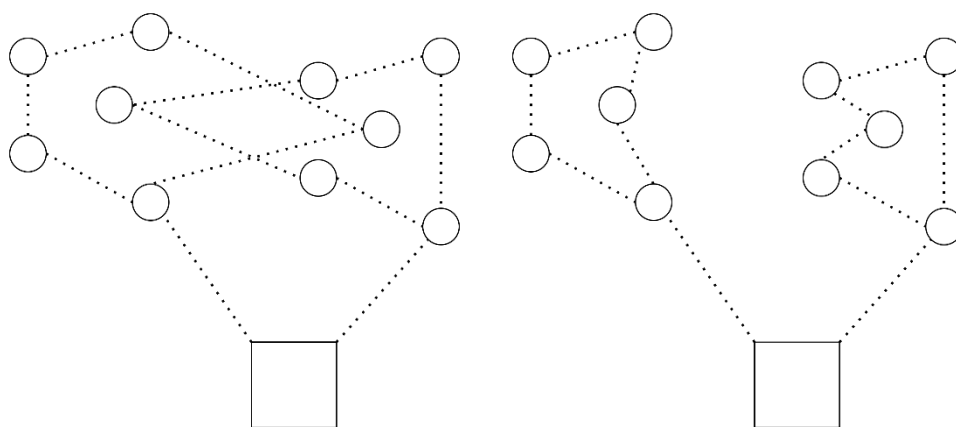
- Διαδικασίες Ανταλλαγής

Στο συγκεκριμένο πλαίσιο ανήκουν όλες εκείνες οι διαδικασίες κατά τις οποίες είτε διαγράφεται ένας αριθμός πελατών από μία διαδρομή και επανατοποθετούνται σε μία άλλη είτε έχουμε ταυτόχρονη αλλαγή πελατών μεταξύ διαδρομών.

Οι πιο απλές περιπτώσεις που συναντάμε είναι αυτές της διαδικασίας 1-0 επανατοποθέτηση (1-0 relocate) και της 1-1 ανταλλαγής (1-1 exchange). Στην 1^η διαγράφουμε έναν κόμβο από μία διαδρομή και τον προσθέτουμε σε μία άλλη και στην 2^η ανταλλάζουμε έναν κόμβο από την μία με έναν από την άλλη. Στην περίπτωση που θέλαμε να αντιμετωπίσουμε 2 κόμβους ανά μέθοδο θα είχαμε της διαδικασίες 2-0 επανατοποθέτηση (2-0 relocate) και της 2-2 ανταλλαγής (2-2 exchange).



Εικόνα 3.3 1-0 Ανταλλαγή



Εικόνα 3.4 2-2 Ανταλλαγή

3.3) Μεθευρετικοί Αλγόριθμοι

Όπως ήδη έγινε αναφορά, η προσέγγιση τέτοιων προβλημάτων με κλασικές ντετερμινιστικές τεχνικές οδηγεί στην πλειοψηφία των περιπτώσεων σε πολύπλοκους και χρονικά ασύμφορους υπολογιστικούς χρόνους. Το εν λόγω πρόβλημα έχει οδηγήσει οργανικά στην αναζήτηση νέων, πιο γρήγορων και πιο αποδοτικών μεθόδων επίλυσης με την χρήση βελτιστοποιημένων μεθευρετικών αλγορίθμων προσαρμοσίμων σε ένα μεγάλο εύρος προβλημάτων.

Το βασικό πρόβλημα των μεθόδων τοπικής αναζήτησης είναι ότι είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη στις αρχικές λύσεις. Κατ' επέκταση, η ίδια η σύγκλιση της λύσης μας με αυτήν της βέλτιστης του προβλήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα της αρχικής λύσης και αρκετές φορές κολλάει σε ένα τοπικό ελάχιστο. Οι μεθευρετικοί αλγόριθμοι είναι διαδικασίες οι οποίες βοηθούν την λύση να ξεφύγει από αυτό το τοπικό ελάχιστο και να εκτίνει την αναζήτησή της.

Οι αλγόριθμοι αυτοί χωρίζονται σε 2 κατηγορίες, σε αυτούς που χρησιμοποιούν μία λύση και την βελτιώνουν και σε αυτούς που έχουν έναν πληθυσμό από λύσεις.

Αυτοί που χρησιμοποιούν μονάχα μία λύση χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

1. Επαναληπτικές διαδικασίες που αρχίζουν από διαφορετικές αρχικές λύσεις.
2. Αλγόριθμοι που δέχονται κινήσεις που δεν βελτιώνουν τη λύση. Αυτό συμβαίνει με την λογική του σωστού αποτελέσματος με λανθασμένες τεχνικές. Μία λανθασμένη κίνηση μπορεί να οδηγήσει σε μία επόμενη σωστή.
3. Αλγόριθμοι που αλλάζουν τη γειτονιά αναζήτησης.
4. Αλγόριθμοι που αλλάζουν την αντικειμενική συνάρτηση

Ορισμένοι από τους σημαντικότερους αλγορίθμους των άνωθεν κατηγοριών είναι:

- Διαδικασία άπληστης τυχαιοποιημένης προσαρμοσμένης αναζήτησης (Greedy Randomized Adaptive Search Procedure – GRASP)

Ένας αρκετά αποτελεσματικός αλγόριθμος που αποτελείται από δύο φάσεις. Η 1^η είναι η φάση κατασκευής μιας αρχικής λύσης και η 2^η η διαδικασία τοπικής αναζήτησης. Στην αρχική φάση, με χρήση μια στρατηγικής που εφαρμόζεται σε μία συνάρτηση τυχαιοποιημένης απληστίας κατασκευάζεται μία αρχική εφικτή λύση η οποία στη συνέχεια περνάει στην επόμενη φάση κατά την οποία γίνεται τοπική αναζήτηση στην λύση που κατασκευάστηκε. Η διαδικασία αυτή είναι επαναληπτική και τερματίζεται όταν ικανοποιηθούν τα κριτήρια τερματισμού.

- Περιορισμένη Αναζήτηση (Tabu search)

Ο αλγόριθμος Περιορισμένης Αναζήτησης κάνει χρήση της έννοιας της μνήμης. Όπως είδαμε πολλές φορές είναι αρκετά εύκολο να παγιδευτεί η λύση μας σε ένα τοπικό ελάχιστο και κάθε επόμενη κίνηση να μας επιστρέφει στο ίδιο αποτέλεσμα. Αυτός είναι ο λόγος που χρησιμοποιείται η μνήμη της μεθόδου. Ουσιαστικά κάθε κίνηση η οποία πραγματοποιείται αποθηκεύεται σε ένα μνημονικό πίνακα και απαγορεύεται η πραγματοποίησή της για έναν συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων. Έτσι, αποφεύγονται οι κύκλοι γύρω από ένα τοπικό ελάχιστον και δίνεται η ευκαιρία στο πρόγραμμα να ξεφύγει από μία συγκεκριμένη γειτονιά και να δοκιμάσει άλλες κινήσεις.

- Μεταβλητή Γειτονιά Αναζήτησης (Variable Neighborhood Search)

Η βασική ιδέα της συγκεκριμένης μεθόδου βασίζεται στην αναζήτηση διαφορετικών γειτονιών για την εύρεση καλύτερων ελαχίστων. Με τον όρο γειτονιές νοούνται οι αλγόριθμοι τοπικής αναζήτησης. Γίνεται χρήση διαδοχικών γειτονιών αναζήτησης σε κατάβαση προς τοπικά ελάχιστα. Αν η διαδικασία δεν βρει κάποια καλύτερη λύση τότε αλλάζει η προς εξέταση γειτονιά N σε μία άλλη συμπληρωματικής της $N+1$ και εξετάζεται από την αρχή αυτή. Αν βρεθεί κάποια καλύτερη λύση στην γειτονιά N τότε πάλι ξεκινάει από την αρχή η διαδικασία στην ίδια γειτονιά έως ότου δεν υπάρχει διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου δεν υπάρχει περαιτέρω βελτίωση.

3.4)Εξελικτικοί Αλγόριθμοι

Εξελικτικοί ή Γενετικοί είναι κατηγορία μεθευρετικών αλγορίθμων οι οποίοι εφαρμόζουν αρχές που βρίσκονται στη φύση και μιμούνται τον τρόπο με τον οποίο εξελίσσεται αυτή για την επίλυση προβλημάτων. Η κύρια διαφορά τους με τους προηγούμενους είναι ότι οι αλγόριθμοι της συγκεκριμένης κατηγορίας αναζητούν βέλτιστες λύσεις χρησιμοποιώντας έναν πληθυσμό από λύσεις και όχι μία λύση μεμονωμένα.

Τα κύρια χαρακτηριστικά τους είναι:

- Τυχαιότητα: Τα δείγματα λύσεων τα οποία δέχονται σαν όρισμα είναι τυχαιοποιημένα. Αυτό τους καθιστά αναιτιοκρατικούς σαν μεθόδους και άρα αυξάνουν την πιθανότητά τους για εύρεση καλύτερης λύσης. Αυτό συμβαίνει καθώς ξεκινούν με τυχαίες τιμές στις μεταβλητές και όχι με συγκεκριμένες, όπως οι αιτιοκρατικοί, που θα τους οδηγήσουν κάθε φορά στο ίδιο αποτέλεσμα

- Πληθυσμός: Σε αντίθεση με τους κλασικούς αλγορίθμους βελτιστοποίησης, οι εξελικτικοί χρησιμοποιούν μία γενιά από λύσης. Από κάθε γενιά, μία λύση είναι η καλύτερη και οι υπόλοιπες αποτελούν το σημείο αναφοράς για τις γειτονιές αναζήτησης. Αυτό τους καθιστά ευέλικτους ώστε να αποφεύγουν τον εγκλωβισμό σε τοπικά ελάχιστα.
- Μετάλλαξη: Όπως και οι μεταλλάξεις στην φύση και στο ανθρώπινο DNA, έτσι και εδώ περιοδικά εφαρμόζονται τυχαίες αλλαγές σε διάφορα μέλη της γενιάς, μετατρέποντάς τους σε διαφορετικές λύσεις, είτε καλύτερες είτε χειρότερες αυξάνοντας τις πιθανότητες εύρεσης καλύτερου αποτελέσματος.
- Διασταύρωση: Όπως και στο στάδιο της ανθρώπινης αναπαραγωγής, έτσι και εδώ η διασταύρωση πραγματοποιείται μεταξύ δύο λύσεων (γονέων) συνδυάζοντας τα χαρακτηριστικά τους για την δημιουργία μίας απογόνου λύσης.
- Επιλογή: Όπως και με την φυσική επιλογή, έτσι και εδώ οι αλγόριθμοι επιλέγουν τις καλύτερες λύσεις από κάθε γενιά, τις οποίες και κρατάνε, και απορρίπτουν τις χειρότερες.

Οι δύο από τους κυριότερους εξελικτικούς αλγορίθμους είναι:

- Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Αποικίας Μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization)

Ο αλγόριθμος αυτός είναι εμπνευσμένος από τον τρόπο με τον οποίο τα μυρμηγκία δημιουργούν ένα βέλτιστο μονοπάτι από την φωλιά προς την τροφή. Στην αρχή ένας πληθυσμός μυρμηγκιών ξεκινάει να κινείται τυχαία προς όλες τις κατευθύνσεις. Κάθε ένα από αυτά αφήνει μια μορφή φερομόνης στο μονοπάτι που ακολουθεί. Αν βρει τροφή τότε γυρνάει ακολουθώντας το ίδιο μονοπάτι, αφήνοντας πάλι φερομόνη στο πέρασμά του. Όσο καλύτερη είναι η ποσότητα και η ποιότητα της τροφής, τόσο μεγαλύτερη ποσότητα της ουσίας εκκρίνει το μυρμηγκί. Έπειτα, τα επόμενα μυρμηγκία που θα βγουν για αναζήτηση τροφής θα ακολουθήσουν τα μονοπάτια με την πιο έντονη ποσότητα φερομόνης. Έτσι, αργά ή γρήγορα όλα τα μυρμηγκία θα ακολουθήσουν ένα συγκεκριμένο μονοπάτι προς τις πηγές τροφής και πίσω. Με παρόμοιο τρόπο λειτουργεί και αυτός ο αλγόριθμος. Ορίζονται η φερομόνη για κάθε τόξο και η συνάρτηση που ορίζει την επιθυμία ενός οχήματος/πωλητή να μεταβεί από έναν κόμβο i σε έναν γειτονικό j . Έπειτα χρησιμοποιείται μία συνάρτηση υπολογισμού πιθανότητας για όλες τις πιθανές μεταβάσεις του γραφήματος. Η επόμενη κίνηση επιλέγεται πιθανολογικά και η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού.

- Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization)

Αποτελεί έναν πολύ διάσημο αλγόριθμο, ο οποίος είναι εμπνευσμένος από την κίνηση σμήνους πουλιών και των ομάδων ψαριών στην θάλασσα. Χάρης στην αποτελεσματική προσομοίωση της κίνησής τους, ο αλγόριθμος είναι ιδιαίτερα ευέλικτος και είναι ικανός να προσαρμοστεί σε διάφορα πιθανά σενάρια κατά την διάρκεια της επίλυσης. Αρχικά δημιουργείται ένας πληθυσμός από σωματίδια, με το κάθε σωματίδιο να αποτελεί μια ενδεχόμενη λύση του προβλήματος. Κάθε ένα από αυτά έχει μία συγκεκριμένη θέση στο χώρο λύσεων και κινείται με συγκεκριμένη ταχύτητα. Στην 1^η φάση τοποθετούνται τυχαία όλα τα σωματίδια σε μία θέση και τους δίδεται μία ταχύτητα κίνησης. Στη συνέχεια κάθε σωματίδιο κινείται προς νέες λύσεις με τρεις διαφορετικούς τρόπους, είτε ακολουθώντας ένα δικό του μονοπάτι, είτε προς την κατεύθυνση στην οποία είχε εντοπίσει σε κάποιο βήμα την καλύτερή του λύση είτε προς την θέση της καλύτερης συνολικά λύσης που βρήκε κάποιο από τα σωματίδια. Στις περισσότερες περιπτώσεις, τα σωματίδια μετά του τέλους του αριθμού επαναλήψεων συγκλίνουν στην ίδια θέση που αποτελεί και την καλύτερη λύση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ DRONE ΓΙΑ ΠΑΡΑΛΛΑΒΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΔΟΣΗ

4.1) Εισαγωγή

Όπως είδαμε μέχρι τώρα, η διακίνηση των αγαθών της εφοδιαστικής αλυσίδας γίνεται κυρίως με συμβατικά οχήματα όπως φορτηγά, βαν και μοτοποδήλατα τα οποία εμπλέκονται σημαντικά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου καθώς εκπέμπουν υπέρογκα ποσά αερίων προϊόντων καύσης. Αυτό έχει λειτουργήσει ως η εναρκτήριος δύναμη για μία στροφή σε έναν εναλλακτικό πιο καθαρό τρόπο μεταφοράς των αγαθών. Στην παρούσα εργασία μελετάται η χρήση μη στελεχωμένων ιπτάμενων οχημάτων (ΜΣΙΟ), γνωστά και ως Drones, για την παραλαβή και παράδοση τεμαχίων προσπαθώντας ταυτόχρονα να ελαχιστοποιήσουμε την κατανάλωση της ενέργειάς τους.

Σύμφωνα με παγκόσμιες μελέτες, τα οχήματα δρόμου ευθύνονται για το 75% των εκπομπών αερίων ρύπων. Επειδή οι εφοδιαστικές αλυσίδες καταναλώνουν πόρους σε τεράστιες κλίμακες, έχουν το δυσανάλογα μεγάλο μερίδιο ευθύνης για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Συνήθως, το κόστος που έχουν αυτές σε κοινωνικό και περιβαλλοντικό επίπεδο, ξεπερνούν αυτό των λειτουργικών τους εξόδων. Οι επιπτώσεις τους ευθύνονται για περισσότερο από το 80% των εκπομπών αερίων ρύπων και περισσότερο από 90% των επιπτώσεων σε αέρα, γη, νερό και γεωλογικούς πόρους.

Πιο συγκεκριμένα, Οι εταιρείες διακίνησης συσκευασμένων αγαθών σε καταναλωτές ευθύνονται για την εκπομπή περίπου 33 γίγα-τόνων CO₂. Για να επιτευχθούν οι στόχοι που έχουν τεθεί παγκοσμίως (Συμφωνία του Παρισιού) μέχρι το 2050, οι εταιρείες αυτές θα πρέπει να μειώσουν τις εκπομπές τους κατά το ήμισυ. Σύμφωνα με περιβαλλοντικές μελέτες, περίπου 1 γίγα-τόνος, δηλαδή 1 δισεκατομμύριο μετρικοί τόνοι, μπορεί να εξοικονομηθεί αν οι εταιρείες αυτές αυξήσουν την χρήση ανανεώσιμων πόρων κατά 20%

Η αλλαγή κατεύθυνσης όσων αφορά τους ορυκτούς πόρους θα οδηγήσουν αργά ή γρήγορα όλες τις εφοδιαστικές αλυσίδες και τις εταιρείες διακίνησης των αγαθών να μεταβιβάσουν τον κύκλο λειτουργιών τους από το συμβατικό μοντέλο των οχημάτων με κινητήρες καύσεως σε ένα πιο φιλικό προς το περιβάλλον, την ηλεκτροκίνηση. Για την αλλαγή αυτή νέοι νόμοι θεσπίζονται συνεχώς ή οποίοι είτε περιορίζουν είτε απαγορεύουν και τελείως (ειδικές περιπτώσεις) την χρήση παραδοσιακών οχημάτων. Έτσι, για να μείνουν και εντός κανονισμών αλλά και εντός των νομικών πλαισίων, οι εταιρείες αναγκάζονται να επενδύσουν στην δημιουργία και ανάπτυξη νέων τεχνολογιών ηλεκτροκίνησης ώστε σιγά σιγά να επέλθει η αντικατάσταση των συμβατικών οχημάτων.

Η ανάγκη αυτή έχει οδηγήσει σε ταχύρρυθμες εξελίξεις στον τομέα της ηλεκτροκίνησης. Οι πρόοδοι των τελευταίων δεκαετιών είναι αξιοσημείωτες καθώς καθιστούν τις συγκεκριμένη τεχνολογία ολοένα και πιο αποδοτική. Ειδικότερα, η σημαντικότερη πρόοδος έχει γίνει στις τεχνολογίες των μπαταριών και των αποθηκών ενέργειας γενικότερα, κάνοντας τις πιο ελκυστικές ως προς την αγορά τους από εταιρείες. Το μεγαλύτερο πρόβλημα που με το οποίο έρχονται οι συγκεκριμένες τεχνολογίες σε σύγκρουση είναι η αυτονομία που μπορούν να έχουν τα ηλεκτρικά οχήματα. Στην αντίθετη πλευρά, τα κόστη αυτών συνεχίζουν να μειώνονται αισθητά, κάνοντάς τα διαθέσιμα σε μεγαλύτερο κύκλο εταιρειών, ειδικά όταν πλέον τα κράτη επιχορηγούν ένα μέρος της αγορά αυτών ή ακόμη και παρέχουν φοροελαφρύνσεις σε εταιρείες που χρησιμοποιούν αυτές τις νέες μεθόδους.

Όπως αναφέρθηκε, τα ηλεκτρικά οχήματα που θα μας απασχολήσουν στην παρούσα εργασία είναι τα ΜΣΙΟ. Τα οχήματα αυτά είναι πιο σύγχρονη τεχνολογία από αυτή των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, έχει ωστόσο περισσότερους περιορισμούς που τα καθιστούν λιγότερο εύχρηστα και χρήζουν βελτίωσης. Ένα μεγάλο μειονέκτημά τους είναι το βάρος των μπαταριών τους, το οποίο περιορίζει σημαντικά την αυτονομία και τον χρόνο πτήσης τους. Ακόμη, λόγω της ελαφριάς κατασκευής τους αλλά και του βάρους της μπαταρίας, έχουν σημαντικό περιορισμό τόσο στον αριθμό αλλά και στο βάρος των τεμαχίων που μπορούν να φέρουν ανά πάσα στιγμή.

Μπορεί να έχουν αρκετά προβλήματα όσων αφορά τον φόρτο που μπορούν να αντιμετωπίσουν σε κάθε χρονική στιγμή, προσφέρουν ωστόσο σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών τεχνολογιών. Αρχικά, λόγω της κατασκευής τους και του τρόπου πλοήγησης, είναι πολύ πιο ευέλικτα ως προς την διαδρομή που θα ακολουθήσουν αποφεύγοντας την κίνηση των οχημάτων ξηράς ή χαλεπές περιοχές. Ακόμη έχουν την δυνατότητα να φτάσουν σημεία που δεν θα μπορούσαν να προσεγγισθούν εύκολα με συμβατικές μεθόδους, όπως μπαλκόνια, υψηλοί όροφοι κλπ. Επιπλέον, λόγω της ελαφριάς κατασκευής τους μπορούν να μεταφέρουν πολύ πιο αποδοτικά ελαφριά αντικείμενα, καθώς δεν χρειάζεται να κινήσουν έναν όγκο τόνων όπως τα συμβατικά οχήματα, παρά μόνο έναν ολίγων κιλών. Επίσης, η αποφυγή της κίνησης έχει διπλή σημασία, καθώς όχι μόνο γίνεται πιο αποδοτικά η παράδοση των παραγγελιών αλλά επίσης δεν συμβάλουν στην δημιουργία κίνησης, αποσυμφορίζοντας τους δρόμους για τους απλούς ιδιώτες που τους χρησιμοποιούν.

Εάν λάβουμε υπόψιν όλα τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των ΜΣΙΟ, είναι εύκολο να συμπεράνουμε ότι είναι κατάλληλα για λειτουργία σε μεγάλα αστικά κέντρα. Ο συνδυασμός τις ευελιξίας τους με την υψηλή κυκλοφοριακή συμφόρηση των πόλεων κάνει μία μεγαλούπολη το ιδανικό περιβάλλον εφαρμογής τους μιας και η αποδοτικότητα τους είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν των συμβατικών

μεθόδων. Όσον αφορά το πρόβλημα της εμβέλειά τους, η χρήση οχημάτων που θα λειτουργούν ως κινητές βάσεις μπορεί σχετικά απλά να εκτίνει κατά πολύ την μέγιστη περιοχή που μπορεί να καλυφθεί από αυτά.

4.2) Το πρόβλημα

Όπως είδαμε μέχρι τώρα, τα Drone μπορεί να αποτελούν μία αποδοτική εναλλακτική, έχουν όμως πολλούς περιορισμούς ως προς την εμβέλειά τους. Γι' αυτό το λόγο αναφέραμε ότι με την χρήση κινητών βάσεων μπορούμε πολύ εύκολα να καλύψουμε μεγάλο εύρος περιοχών.

Στην παρούσα εργασία, θεωρούμε ότι στο πρόβλημά μας το φορτηγό/βάση έχει ήδη φτάσει στην τοποθεσία που θα αποτελέσει την αφετηρία και τον τερματισμό των ιπτάμενων οχημάτων μας. Έτσι, το πρόβλημα μετατρέπεται σε ένα απλούστερο, καθώς θεωρούμε ότι η θέση της βάσης είναι γνωστή και σταθερή, οπότε το μόνο που χρειάζεται είναι να καθοριστεί η βέλτιστη τροχιά που θα ακολουθήσουν από εκείνο το σταθερό σημείο τα ΜΣΙΟ για την εξυπηρέτηση των παραγγελιών. Ως κριτήριο ελαχιστοποίησης ορίζεται την κατανάλωση ενέργειας των οχημάτων. Η συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση εξαρτάται αποκλειστικά από την απόσταση και το βάρος των τεμαχίων, καθώς όσο πιο μεγάλο το συνολικό φορτίο τόσο μεγαλύτερη και η κατανάλωση ενέργειας.



Εικόνα 4.1 Σμήνος από Drones

Όσον αφορά τους περιορισμούς που θα ληφθούν υπόψιν, διακρίνονται σε 3 κατηγορίες

1. Περιορισμός ενέργειας: Κάθε όχημα ξεκινάει με ένα συγκεκριμένο ποσό ενέργειας προς κατανάλωση στην διάθεσή του το οποίο και δεν πρέπει να παραβιαστεί σε κανένα σημείο της πτήσης του.
2. Περιορισμός βάρους: Το όχημα μπορεί να σηκώσει αντικείμενα, λόγω κατασκευής, μέχρι ένα συγκεκριμένο όριο βάρους.
3. Περιορισμός τεμαχίων: Στο όχημα χωράνε συγκεκριμένος αριθμός τεμαχίων.

Στο πρόβλημα θεωρείται ότι έχουμε ένα γράφημα το οποίο αποτελεί ένα δίκτυο από πελάτες προς εξυπηρέτηση. Η εταιρεία δεν διαχειρίζεται κάποιο απόθεμα τεμαχίων, αντιθέτως λειτουργεί ως μεσάζοντας που φέρνει σε επαφή τους πελάτες μεταξύ τους. Κάθε πελάτης μπορεί είτε να θέλει να πουλήσει είτε να αγοράσει κάποιο τεμάχιο σε/από κάποιον άλλο πελάτη του γράφου και η εταιρεία πρέπει να καθορίσει την βέλτιστη διαδρομή για κάθε Drone ώστε να εξυπηρετηθούν όλοι οι πελάτες.

Τα πακέτα διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες βάρους, για να προσεγγισθεί καλύτερα η πραγματικότητα και οι συνθήκες της. Στην πραγματικότητα τα τεμάχια προς παράδοση είναι διαφόρου μεγέθους και βάρους. Η διαφορά του βάρους επιβαρύνει πολύ την αυτονομία του οχήματος, γι' αυτό το λόγο διακρίνουμε το βάρος σε κατηγορίες, ώστε να έχουμε πιο αξιόπιστα και ρεαλιστικά αποτελέσματα. Για την μελέτη και επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος χρησιμοποιήθηκε ένας υβριδικός αλγόριθμος εμπνευσμένος από την άπληστη τυχαιοποιημένη προσαρμοστική αναζήτηση (GRASP), για την γέννηση βασικών εφικτών λύσεων, και την μεταβλητή γειτονιά αναζήτησης (VNS), για την περαιτέρω βελτίωση των λύσεων μέσω αναζήτησης τοπικών ελαχίστων σε γειτονίες.

4.2.1)Βάρος και Χωρητικότητα

Ένα επαγγελματικό Drone είναι ειδικά σχεδιασμένο για την μεταφορά τεμαχίων και όχι απλά για την πλοήγηση. Για να είναι ικανά να μεταφέρουν έβραν από το δικό τους βάρος και αυτό των τεμαχίων πρέπει να είναι κατασκευασμένα με ανθεκτικά υλικά με βαρύτερο σκελετό από αυτόν των συμβατικών. Έτσι, ενώ τα συμβατικά για ιδιωτική χρήση οχήματα ανέρχονται στο μέσω βάρος των 1.2 κιλών, τα επαγγελματικά ξεκινάνε από τα 7 και μπορεί να υπερβούν και τα 100 κιλά. Το βάρος τους εξαρτάται αποκλειστικά από το είδος των αγαθών που θα μεταφέρουν. Στρατιωτικής χρήσης οχήματα που μεταφέρουν προμήθειες 15 κιλών ή και βαρύτερες, έχουν κατασκευαστικό βάρος κοντά στα 100 κιλά. Συνήθως όμως, επειδή οι εταιρείες μεταφορών ασχολούνται στην πλειοψηφία τους με μικρά τεμάχια λίγους βάρους, τα οχήματα που χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις αυτές τείνουν πιο κοντά στην κατηγορία των 10 με 15 κιλών.

Στο πρόβλημά μας θεωρούμε ότι τα τεμάχια που θα μεταφέρονται είναι συγκεκριμένου μεγέθους και βάρους. Θεωρείται ότι το όχημα μας φέρει ράφια στον σκελετό του, τα οποία χωράνε ένα τεμάχιο το καθένα. Ορίζουμε έναν αποδεκτό αριθμό ραφιών στα 3 και κατ' επέκταση, την μέγιστη χωρητικότητα 3 τεμαχίων ανά όχημα.

Για την απλούστερη και καλύτερη εφαρμογή θεωρούμε ότι τα βάρη των τεμαχίων χωρίζονται σε 3 επιμέρους κατηγορίες. Κάθε κατηγορία αντιστοιχίζεται σε έναν αριθμό βάρους οπότε οποιαδήποτε περίπτωση βάρους αντικαθίσταται με τον αριθμό αυτό της κατηγορίας. Οι κατηγορίες παρουσιάζονται παρακάτω.

Κατηγορία	Πραγματικό Βάρος	Βάρος ανάθεσης
1	(0,1]	1.0
2	(1,2]	2.0
3	(2,3]	3.0

Πίνακας 4.1 Κατηγορίες Βάρους

Ακόμη, θεωρούμε ότι τα οχήματά μας είναι ικανά να μεταφέρουν συνολικό βάρος έως 4 κιλά. Λόγω της ποικιλίας και της τυχαιότητας των βαρών των τεμαχίων, τα οχήματα θα χρειαστεί να μεταφέρουν διαφορετικό συνδυασμό τεμαχίων το καθένα. Ορίζεται ως Περίπτωση Κατηγορίας Βάρους i (PKB_i) η περίπτωση ένα τεμάχιο να έχει βάρος ανάθεσης $i = 1.0, 2.0, 3.0$. Αυτό σε συνδυασμό με το μέγιστο όριο βάρους έχει ως αποτέλεσμα τους εξής πιθανές καταστάσεις για τα οχήματα.

Περίπτωση	Συνδυασμοί			Ποσότητα Φορτίου	Βάρος Φορτίου
1	PKB1			1	1
2	PKB1	PKB1		2	2
3	PKB1	PKB1	PKB1	3	3
4	PKB1	PKB2		2	3
5	PKB1	PKB1	PKB2	3	4
6	PKB1	PKB3		2	4
7	PKB2			1	2
8	PKB2	PKB2		2	4
9	PKB3			1	3

Πίνακας 4.2 Συνδυασμοί ποσοτήτων και βάρους

4.2.2) Αντικειμενικό κριτήριο

Όπως αναφέραμε, το αντικειμενικό κριτήριο αφορά την κατανάλωση της ενέργειας των οχημάτων. Τι επηρεάζει όμως την κατανάλωσή τους. Οι παράγοντες είναι πολλοί, όπως τα επίπεδα υγρασίας στον αέρα, η αντίσταση του, καιρικά φαινόμενα όπως βροχή και χιόνι και σίγουρα ο χρόνος απόκρισης του εκάστοτε πελάτη. Ως χρόνο απόκρισης πελάτη νοείται το πόσο γρήγορα θα παραλάβει την παραγγελία ή πόσο γρήγορα θα τοποθετήσει το προς πώληση τεμάχιο στην σωστή θέση. Βέβαια, ο πιο καταλυτικός παράγοντας στην κατανάλωση ενέργειας είναι το βάρος το οποίο κουβαλάει ανά πάσα στιγμή το όχημα. Γι' αυτό το λόγο στο πρόβλημά μας θεωρούμε αμελητέες τις επιπτώσεις από τον ανθρώπινο παράγοντα και από τις καιρικές συνθήκες τις οποίες δεν μπορούμε να τις ελέγξουμε. Αντ' αυτού, το βάρος το οποίο είναι παράγοντας καθορισμένος από την εταιρεία και μπορεί να ελεγχθεί (και έχει και την μεγαλύτερη βαρύτητα) θεωρούμε ότι είναι ο μοναδικός παράγοντας με επιρροή στην κατανάλωση.

Το αντικειμενικό κριτήριο βασίζεται στην συνάρτηση κόστους διαδρομής για την ελαχιστοποίηση της ενέργειας προβλήματος δρομολόγησης που εισάχθηκε από [\[1\]](#), το οποίο αποτελεί προέκταση του νόμου παραγόμενου μηχανικού έργου ως:

$$\text{Έργο} = \text{Δύναμη} \times \text{Μετατόπιση} \quad (1)$$

Στην παρούσα περίπτωση η εξίσωση 1 για ένα κινούμενο όχημα μετατρέπεται θεωρώντας ως δύναμη το Βάρος του οχήματος, ως μετατόπιση την Απόσταση που διανύει και ως έργο την Απαιτούμενη Ενέργεια. Έτσι, η κατανάλωση είναι ανάλογη ως προς τις διανυόμενες αποστάσεις αλλά και ως προς το βάρος κάθε διαδρομής. Επειδή ως Βάρος έχουμε ορίσει αποκλειστικά το βάρος των τεμαχίων και στην περίπτωση που το όχημα είναι άδειο αυτό το μέγεθος θα είναι μηδέν και έτσι η κατανάλωση θα είναι μηδενική (γεγονός αδύνατο), προσθέτουμε σε αυτό μία μονάδα. Η μονάδα αυτή αντιπροσωπεύει το βάρος του σκελετού του οχήματος και έτσι ακόμη και άδειο θα καταναλώνει ενέργεια. Συνολικά, ο τύπος (1) για μία συγκεκριμένη διαδρομή (ή τόξο) ενός οχήματος γίνεται:

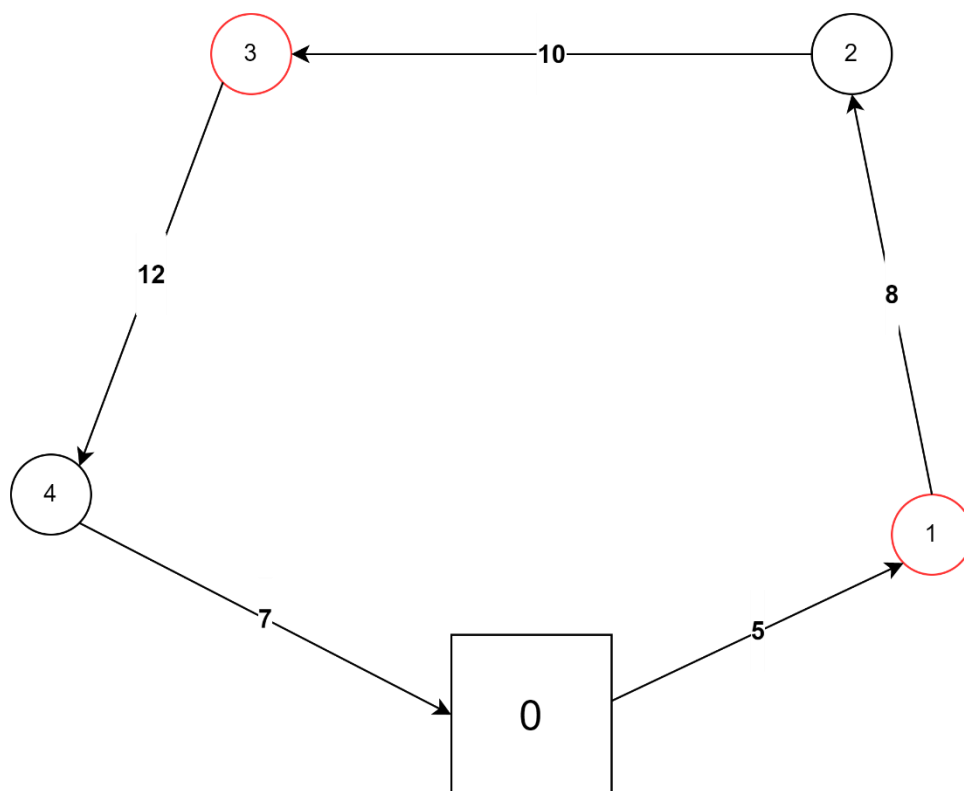
$$\text{Ενέργεια Τόξου} = (\text{Βάρος} + 1) \times \text{Μήκος Τόξου} \quad (2)$$

Η τελική κατανάλωση ενέργειας ορίζεται ως το άθροισμα όλων των τόξων που συμπληρώνουν μία κυκλική διαδρομή (από την αποθήκη προς πελάτες και πίσω). Η ενέργεια που απαιτεί κάθε τόξο μετακίνησης από έναν κόμβο $i \rightarrow j$ θα συμβολίζεται ως ec_{ij} (energy cost) και το αντικειμενικό κριτήριο θα υπολογίζεται από τον τύπο

$$\min \sum_{i,j \in \text{Route}} ec_{ij} \quad (2.0)$$

4.2.3) Παράδειγμα

Για την καλύτερη κατανόηση του προβλήματος και τον υπολογισμό του αντικειμενικού κριτηρίου, δίνεται το παρακάτω απλό παράδειγμα.



Γράφος 4.1 Παράδειγμα με 2 πωλητές και 2 παραλήπτες

Έστω ότι το όχημα/βάση που απεικονίζεται με σχήμα τετραγώνου έχει τοποθετηθεί σε γνωστές συντεταγμένες και έστω οι πελάτες κόμβοι, για τους οποίους οι αποστάσεις είναι γνωστές. Οι πελάτες 1 και 3 αποτελούν τους πωλητές (κόκκινο χρώμα) και οι 2 και 4 τους παραλήπτες (μαύρο χρώμα). Ο παραλήπτης 2 θέλει να αγοράσει από τον πωλητή 1 και ο 4 από τον 3. Ο πωλητής 1 σκοπεύει να πουλήσει ένα τεμάχιο βάρους 3 κιλών στον πελάτη 2 ενώ ο πωλητής 3 ένα τεμάχιο 1 κιλού στον πελάτη 4. Θεωρούμε ότι το όχημα θα εκπληρώσει αποκλειστικά μόνο την συγκεκριμένη διαδρομή και έπειτα θα επιστρέψει στην βάση 0.

Οι σχέσεις μεταξύ των πελατών καθώς και τα βάρη των τεμαχίων φαίνονται παρακάτω

ΠΩΛΗΤΕΣ	ΠΑΡΑΛΗΠΤΕΣ	ΒΑΡΟΣ ΤΕΜΑΧΙΟΥ
1	2	3
3	4	1

Πίνακας 4.3 Σχέσεις πελατών

Σύμφωνα με τα δεδομένα υπολογίζονται τα βάρη (B) των τεμαχίων κάθε τόξου ως εξής:

$$B_{01} = 0$$

$$B_{12} = 3$$

$$B_{23} = 0$$

$$B_{34} = 1$$

$$B_{41} = 0$$

Και οι απαιτούμενες ενέργειες ως εξής:

$$ec_{01} = d_{01} \times (B_{01} + 1) = 5 \times 1 = 5$$

$$ec_{12} = d_{12} \times (B_{12} + 1) = 8 \times (3 + 1) = 32$$

$$ec_{23} = d_{23} \times (B_{23} + 1) = 10 \times 1 = 10$$

$$ec_{34} = d_{34} \times (B_{34} + 1) = 12 \times (1 + 1) = 24$$

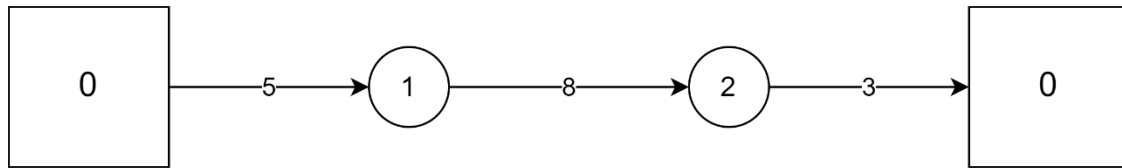
$$ec_{41} = d_{41} \times (B_{41} + 1) = 7 \times 1 = 7$$

Και η συνολική κατανάλωση ενέργειας προκύπτει από το άθροισμά τους ως:

$$\sum_{i,j \in Route} ec_{ij} = ec_{01} + ec_{12} + ec_{23} + ec_{34} + ec_{41} = 78$$

Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι εφόσον εξαρτάται όχι μόνο από τις διαδρομές αλλά και από το βάρος σε κάθε διαδρομή, σε αντίθεση με τα απλά VRP προβλήματα, αν η διαδρομή εκτελεστεί ανάποδα το αποτέλεσμα θα είναι διαφορετικό. Άρα, η φορά με την οποία θα επισκεφθούμε τους πελάτες έχει πραγματική σημασία στο πρόβλημα, και ιδιαίτερος στην τοπική αναζήτηση που θα δούμε παρακάτω.

Αυτό θα γίνει πιο κατανοητό αν θεωρήσουμε το παράδειγμα στο οποίο έχουμε ήδη φορτωθεί δύο τεμάχια και θέλουμε απλά να τα παραδώσουμε σε πελάτες. Για απλοποίηση ξεκινάμε και τελειώνουμε στην αποθήκη.



Γράφος 4.2 Απλή κυκλική διαδρομή

Το όχημα είναι φορτωμένο ήδη με δύο τεμάχιο βάρους 1 κιλού το καθένα. Τα βάρη υπολογίζονται:

$$B_{01} = 2$$

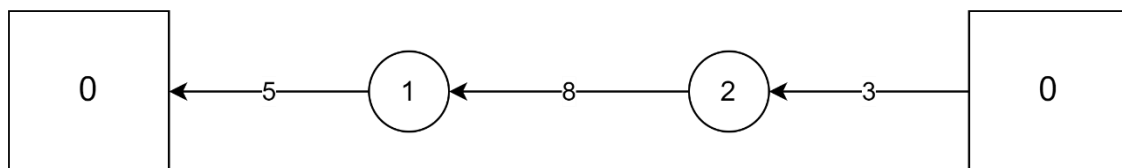
$$B_{12} = 1$$

$$B_{20} = 0$$

και το νέος κόστος της διαδρομής:

$$\sum_{i,j \in \text{Route}} ec_{ij} = ec_{01} + ec_{12} + ec_{20} = 5 * (2 + 1) + 8 * (1 + 1) + 3 * 1 = 34$$

Εξετάζουμε και την αντίστροφη περίπτωση:



Γράφος 4.3 Αντίστροφη απλή κυκλική διαδρομή

Ισχύουν ότι και έτσι έχουμε για τα βάρη:

$$B_{02} = 2$$

$$B_{21} = 1$$

$$B_{10} = 0$$

και το κόστος της αντίστροφης είναι:

$$\sum_{i,j \in Route} ec_{ij} = ec_{02} + ec_{21} + ec_{10} = 3 * (2 + 1) + 8 * (1 + 1) + 5 * 1 = 30$$

Πράγματι δείξαμε ότι η δεύτερη συνιστώσα επιρροής, το βάρος, καθιστά την αντιστροφή της διαδρομής ένα διαφορετικό χώρο λύσεων.

4.3) Μοντελοποίηση

4.3.1) Παραδοχές

Έχει γίνει ήδη αναφορά ότι κάποια φαινόμενα θεωρούνται αμελητέα όπως επίσης και γίνονται αρκετές παραδοχές ώστε να απλοποιηθεί το πρόβλημα. Όλες οι παραδοχές παρουσιάζονται παρακάτω:

- Οι παραλαβές και οι παραδόσεις γίνονται αποκλειστικά από Drones.
- Κάθε πελάτης μπορεί να πουλήσει ή να αγοράσει μόνο ένα τεμάχιο
- Κάθε πελάτης επισκέπτεται μόνο μία φορά.
- Η αφετηρία και ο τερματισμός γίνονται στο ίδιο σημείο.
- Αν δεν επαρκεί η ενέργεια για να εξυπηρετηθούν όλοι οι πελάτες, το Drone μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί.
- Πολλά Drones μπορούν να ξεκινήσουν ταυτόχρονα.
- Εξωτερικές δυνάμεις όπως τα καιρικά φαινόμενα θεωρούνται αμελητέα.
- Θεωρούμε ότι όλες οι μετακινήσεις γίνονται στιγμιαία.

Όλες οι παραδοχές αφορούν αποκλειστικά την ελαχιστοποίηση της ενέργειας των οχημάτων, όπως το γεγονός ότι η βάση είναι σταθερό σημείο και ότι μόνο τα οχήματα αυτά επιτρέπεται να εξυπηρετήσουν τους πελάτες.

4.3.2) Μαθηματικό Μοντέλο

Θεωρούμε $P = \{1, \dots, n\}$ το σύνολο των κόμβων που αποτελούν τους πωλητές και $D = \{n+1, \dots, 2n\}$ τους παραλήπτες του προβλήματος. Η ένωση των δύο συνόλων αντιπροσωπεύουν όλους τους κόμβους του προβλήματος. Οι κόμβοι 0 και $2n+1$ συμβολίζουν την τοποθεσία της βάσης από την οποία εκκινούν και τερματίζουν τα οχήματα. Η απόσταση ενός κόμβου i από έναν κόμβο j του συνόλου P συμβολίζεται ως d_{ij} . Κάθε τεμάχιο το οποίο ένας πωλητής i θέλει να παραδώσει σε έναν παραλήπτη $n+i$ έχει βάρος b_i .

Το πρόβλημα καθορίζεται από ένα προσανατολισμένο γράφο $G = (V, E)$ όπου $V = P \cup \{0, n+1\}$ και E το σύνολο των τόξων όλων των κόμβων. Κάθε όχημα k που ανήκει στο σύνολο των οχημάτων K μπορεί να μεταφέρει έως Q_k τεμάχια ταυτόχρονα,

τα οποία επιτρέπεται να έχουν βάρος έως και Wm . Κάθε όχημα φέρει μία μπαταρία η οποία έχει μέγιστη ενέργεια E . Ορίζεται ως B_{ij}^k το συνολικό φορτίο που μεταφέρει ένα drone k καθώς μεταβαίνει από τον κόμβο i στον κόμβο j . Για κάθε κόμβο i ορίζονται επίσης ως W_i και C_i το βάρος και η ποσότητα που φέρει το όχημα μετά την εξυπηρέτηση του κόμβου i . Τέλος, ορίζουμε ως t_i^k το χρόνο αναχώρησης του οχήματος k από τον κόμβο i μετά την εξυπηρέτησή του. Ορίζουμε επίσης ως c_{ij}^k την ενέργεια που καταναλώνει ένα όχημα κατά την διάσχισή του από ένα τόξο (i,j) η οποία προκύπτει από την εξίσωση παραγόμενου έργου.

Το μοντέλο που προκύπτει είναι το εξής:

$$\min \sum_{i \in PUD} \sum_{j \in PUD} \sum_{k \in K} c_{ij}^k$$

ή

$$\min \sum_{i \in PUD} \sum_{j \in PUD} \sum_{k \in K} (d_{ij} * (1 + B_{ij}^k) * x_{ij}^k) \quad (1)$$

Υπό:

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in PUD \cup \{2n+1\}} x_{ij}^k = 1, \forall i \in P \quad (2)$$

$$\sum_{j \in PUD} x_{ij}^k - \sum_{j \in PUD} x_{j,n+i}^k = 0, \forall j \in P, k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{j \in PUD} x_{0j}^k = 1, \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{i \in PUD \cup \{0\}} x_{ij}^k - \sum_{j \in PUD \cup \{2n+1\}} x_{j,n+i}^k = 0, \forall j \in P, k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in D \cup 0} x_{i,2n+1}^k = 1, \forall k \in K \quad (6)$$

$$x_{ij}^k * (T_i^k + z_i^k - T_j^k) \leq 0 \quad \forall (i,j), \forall k \in K \quad (7)$$

$$T_i^k + z_{i,n+i}^k \leq T_{n+i}^k \quad \forall i \in P, \forall k \in K \quad (8)$$

$$x_{ij}^k * (C_i^k + c_i^k - C_j^k) = 0 \quad \forall (i,j) \in E, \forall k \in K \quad (9)$$

$$c_i \leq C_i^k \leq Qm, \forall i \in P, \forall k \in K \quad (10)$$

$$0 \leq C_{n+i}^k \leq Qm - c_i, \forall (n+i) \in P, \forall k \in K (11)$$

$$C_0^k = 0, \forall k \in K (12)$$

$$x_{ij}^k * (W_i^k + w_j^k - W_j^k) = 0 \forall (i,j) \in E, \forall k \in K (13)$$

$$w_i \leq W_i^k \leq Wm, \forall i \in P, \forall k \in K (14)$$

$$0 \leq W_{n+i}^k \leq Wm - w, \forall (n+i) \in D, \forall k \in K (15)$$

$$W_0^k = 0, \forall k \in K (16)$$

$$B_{ij}^k = W_j^k - W_i^k, \forall (i,j) \in E, \forall k \in K (17)$$

$$0 \leq B_{ij}^k \leq Wm * x_{ij}^k \quad \forall (i,j) \in E, \forall k \in K (18)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} (1 + B_{ij}^k) * d_{ij} * x_{ij}^k \leq E, \forall k \in K (19)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\}, \forall (i,j) \in E, \forall k \in K (20)$$

$$c_i \begin{cases} -1, & \text{εάν } i \in D \\ 1, & \text{εάν } i \in P \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} (21)$$

$$w_i \begin{cases} -b_i, & \text{εάν } i \in D \\ b_i, & \text{εάν } i \in P \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} (22)$$

Το αντικειμενικό κριτήριο αντικατοπτρίζεται στον περιορισμό (1). Οι περιορισμοί (2) και (3) ικανοποιούν την συνθήκη της μοναδικότητας, δηλαδή ότι κάθε είδος πελάτη (πωλητής ή καταναλωτής) θα εξυπηρετηθεί ακριβώς μία φορά και έτσι αποφεύγονται οι διπλοτυπίες. Οι επόμενοι τρεις περιορισμοί, (4), (5) και (6) φροντίζουν ότι το σημείο άφιξης και αναχώρησης των οχημάτων πριν και μετά την εκπόνηση της διαδρομής τους είναι η βάση. Επειδή ένα όχημα πρέπει να επισκεφθεί πρώτα των πωλητή ενός τεμαχίου πριν το παραδώσει στον αντίστοιχο αγοραστή και όχι αντίστροφα εισήγαμε τους περιορισμούς (7) και (8). Οι (9), (10) και (11) αφορούν τους περιορισμούς χωρητικότητας και οι (13), (14) και (15) τους περιορισμούς βάρους των οχημάτων. Οι (12) και (16) διαβεβαιώνουν ότι το όχημα θα εκκινήσει χωρίς κάποιο τεμάχιο ή επιπρόσθετο βάρος από την αφετηρία. Οι (17) και (18) αφορούν τα επιτρεπτά βάρη που μπορεί να έχει το όχημα κατά την διάσχισή του από έναν κόμβο σε έναν άλλο, και ο (19) απαγορεύει το κόστος μιας διαδρομής να ξεπερνάει την συνολική ενέργεια του οχήματος. Ο (20) καθιστά την μεταβλητή απόφασης x_{ij} ως δυαδική και οι (21) και (22) αφορούν τις μεταβλητές των περιορισμών.

4.3.3) Αλγόριθμοι και Διαδικασία Επίλυσης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η προσέγγιση και η διαδικασία επίλυσης του συγκεκριμένου προβλήματος θα γίνει με την εφαρμογή ενός υβριδικού μοντέλου που αποτελείται από τους μεθευρετικούς αλγορίθμους GRASP και VNS. Ο υβριδικός αλγόριθμος λειτουργεί επαναληπτικά, δημιουργώντας σε κάθε επανάληψη μία αρχική εφικτή λύση και στη συνέχεια εφαρμόζει μία τοπική αναζήτηση με την βοήθεια της μεταβλητής γειτονιάς αναζήτησης σε αυτήν με σκοπό την περαιτέρω βελτίωσή της.

Για την χρήση του άπληστου αλγορίθμου GRASP, γίνεται εισαγωγή της έννοιας της πυκνότητας, η οποία θα λειτουργήσει ως το αντικειμενικό κριτήριο. Ξεκινώντας από κάποιο κόμβο i δημιουργείται μια ακτίνα αποδεκτής απόστασης γύρω από αυτόν. Όποιοι κόμβοι βρίσκονται μέσα σε αυτήν την σφαίρα αποδοχής αποτελούν τους προς υποψήφιους πελάτες για επίσκεψη, αν δεν παραβιάζεται φυσικά κάποιος περιορισμός. Η ακτίνα της σφαίρας αυτής ορίζεται ως:

$$r = mindist + a * (maxdist - mindist)$$

όπου $mindist$ και $maxdist$ είναι η απόσταση που απέχει ο κοντινότερος και ο μακρύτερος κόμβος ως προς τον i . Η μεταβλητή a αποτελεί παράμετρο η οποία ορίζεται από τον χρήστη για να εκφράσει το πόσο αυστηρή θα είναι η επιλογή του επόμενου κόμβου. Αντιπροσωπεύει ουσιαστικά τον βαθμό απληστίας που δίνεται στην πιθανότητα επιλογής μεγάλης απόστασης από τον κόμβο i ως την επόμενη κίνηση. Ικανοποιητικές τιμές της παραμέτρου είναι οι $\{0.4, 0.5, 0.6\}$. Από τους κόμβους της σφαίρας επιλογής, επιλέγονται αυτοί που πληρούν του περιορισμούς για την δημιουργία της περιορισμένης λίστα υποψηφίων και οι υπόλοιποι απορρίπτονται. Η περιορισμένη λίστα υποψηφίων ορίζεται ως:

$$CL = [n_1, n_2, \dots, n_k] \forall n \in \text{στη σφαίρα επιλογής και ικανοποιεί τα κριτήρια}$$

Από τους εφικτούς κόμβους επίσκεψης, επιλέγεται τυχαία μέσω μιας συνάρτησης ομοιόμορφης κατανομής αυτός που θα αποτελέσει τον επόμενο σταθμό της διαδρομής. Οι υπόλοιποι τοποθετούνται στην λίστα με τους προς επίσκεψης κόμβους και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Επειδή κάθε πελάτης μπορεί να είναι είτε παραλήπτης είτε πωλητής, υπάρχει μία περίπτωση στην οποία εμπίπτουν κάποιοι κόμβοι και επιλέγονται ανεξαρτήτως αν βρίσκονται στη σφαίρα. Στην περίπτωση που έχουμε παραλάβει κάποιο τεμάχιο το οποίο δεν έχει παραδοθεί στον αντίστοιχο παραλήπτη και η ενεργειακή κατανάλωση μη παράδοσής του είναι απίστευτα ασύμφορη, καθώς το να κουβαλάει το όχημα πλεονάζον βάρος από πελάτη σε πελάτη έχει σημαντικές επιπτώσεις στην ενέργειά του, τότε ο κόμβος τοποθετείται στους προς επιλογήν κόμβους.

Μόλις τελειώσει η διαδικασία αυτή και έχει δημιουργηθεί η αρχική εφικτή λύση, τότε ο αλγόριθμος περνάει στην τοπική αναζήτηση. Για την τοπική αναζήτηση χρησιμοποιείται ένας τροποποιημένος VNS αλγόριθμος για την καλύτερη και πιο αποδοτική βελτίωση της λύσης. Ο αλγόριθμος εξετάζει κάθε πιθανή γειτονιά και την υποβάλλει σε τρεις μεθόδους τοπικής αναζήτησης, την μέθοδο 2-opt, την 2-0 επανατοποθέτηση και την 2-2 ανταλλαγή. Κάθε μέθοδος λειτουργεί με τη λογική της 1ης αποδοχής (first acceptance), όπου μόλις βρεθεί μία βελτίωση της λύσης προχωράμε σε την επόμενη μέθοδο. Αν καμία από τις 3 δεν βρει κάποια λύση, οδηγούμαστε σε άλλη γειτονιά για εξέταση.

Η φύση του προβλήματος για άλλη μία φορά αναγκάζει την τροποποίηση των μεθόδων τοπικής αναζήτησης. Κάθε πωλητής αντιστοιχίζεται σε έναν πελάτη μόνο. Έτσι αν αλλάξουμε την διαδρομή από την οποία εξυπηρετείται κάποιος πωλητής πρέπει να αλλάξουμε διαδρομή και στον παραλήπτη που του αντιστοιχεί. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει αρκετά προβλήματα καθώς όπως είδαμε το πρόβλημα δεν εξαρτάται μόνο από την θέση του κάθε πελάτη αλλά και από τα τεμάχια που κουβαλάει το όχημα. Έτσι, σε κάθε πιθανή δοκιμή αλλαγής της θέσης κάποιου, πρέπει να σχετίζεται άμεσα και με το ταίρι του. Ακόμη πρέπει στην θέση που θα τοποθετηθεί το ζευγάρι να μην παραβιάζεται ούτε ο περιορισμός χωρητικότητας τεμαχίων ούτε ο περιορισμός βάρους. Για παράδειγμα, αν θέλουμε να αλλάξουμε ένα πελάτη θέση ή διαδρομή πρέπει να εξεταστούν τα εξής:

1. Χωράει το προς παραλαβή τεμάχιο στο όχημα εκείνη την στιγμή;
2. Υπερβαίνεται το μέγιστο βάρος του οχήματος αν τοποθετηθεί το νέο τεμάχιο;
3. Ενεργειακά υπάρχει η δυνατότητα εξυπηρέτησής τους χωρίς να ξεμείνει το όχημα από ενέργεια;

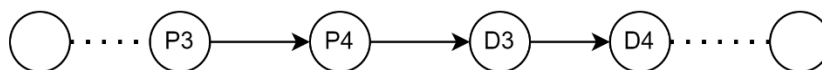
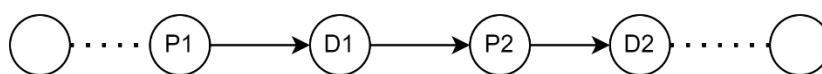
Οι παραπάνω απαιτήσεις αυξάνουν αρκετά τον υπολογιστικό χρόνο της λύσης λόγω των συνεχών ελέγχων εφικτότητας των πιθανών κινήσεων. Στις περιπτώσεις της 2-0 επανατοποθέτηση και 2-2 ανταλλαγή, τα ζευγάρια κόμβων που ανταλλάσσονται είναι πάντα ένας πωλητής με τον παραλήπτη που του αντιστοιχεί και ποτέ 2 πωλητές ή 2 παραλήπτες ταυτόχρονα.

Ο αλγόριθμος 2-opt για να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις εφαρμόζεται με 3 διαφορετικούς τρόπους. Ο 1ος και ο 2ος αφορούν την αντιστροφή διαδρομών που αποτελούνται είτε από διαδοχικούς παραλήπτες είτε από διαδοχικούς πωλητές. Η 3η περίπτωση αφορά την αλλαγή ενός ζεύγους πωλητή και παραλήπτη με κάποιο άλλο ζευγάρι της ίδιας διαδρομής που βρίσκεται όμως αργότερα στην διαδρομή από αυτούς. Αξίζει να σημειωθεί ότι δεν είναι ανάγκη να βρίσκονται σε διαδοχική σειρά τα ζευγάρια. Όλες οι αλλαγές γίνονται από και προς τις θέσεις που βρίσκονταν οι κόμβοι πριν την εξέτασή τους.

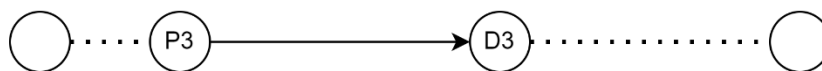
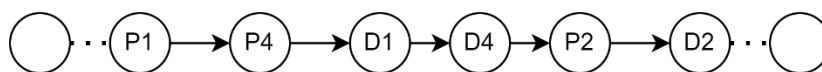
Παρακάτω παρουσιάζονται παραδείγματα των μεθόδων. Όπου P_i και D_i νοούνται τα ζευγάρια πωλητών και παραληπτών.

Η θέση τοποθέτησης των κόμβων μετά τις αλλαγές δεν είναι απόλυτες. Η θέση τους εξαρτάται από του που επιτρέπεται να τοποθετηθούν χωρίς να παραβιαστούν οι περιορισμοί.

Στο παρακάτω απλό παράδειγμα της μεθόδου 2-0 Επανατοποθέτηση επιλέγεται η μετακίνηση του πωλητή P4 από την κάτω διαδρομή στην πάνω. Για να γίνει, όμως, εφικτή αυτή η κίνηση πρέπει να μετακινήσουμε και τον παραλήπτη D4 που συνδέεται με τον P4. Η θέση τοποθέτησής του καθορίζεται από ένα κριτήριο ελαχιστοποίησης.

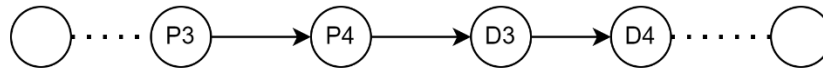
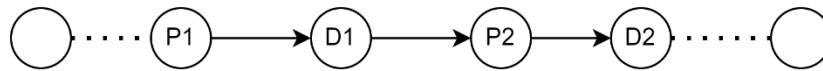


Εικόνα 4.2 Διαδρομή πριν την 2-0 Επανατοποθέτηση

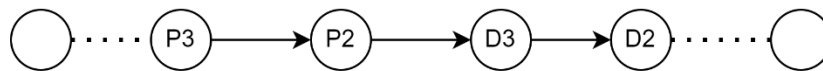
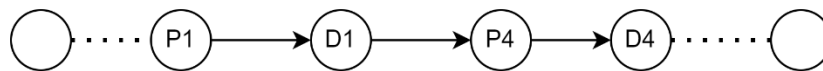


Εικόνα 4.3 Διαδρομή μετά την 2-0 Επανατοποθέτηση

Στο παράδειγμα της προηγούμενης περίπτωσης εφαρμόζεται και η μέθοδος 2-2 Ανταλλαγή και επιλέγονται 2 ζεύγη κόμβων P_i , D_i και P_j , D_j από τις δύο διαδρομές και ανταλλάσσονται μεταξύ τους. Οι θέσεις που θα καταλήξει κάθε ζεύγος είναι οι ίδιες που κατείχε το άλλο πριν την ανταλλαγή.

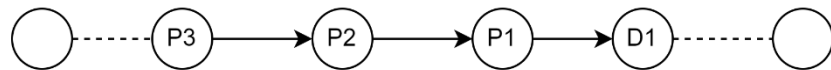
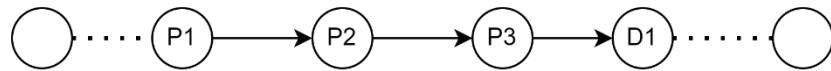


Εικόνα 4.4 Διαδρομή πριν την 2-2 Ανταλλαγή

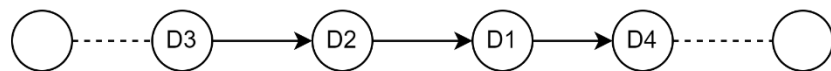
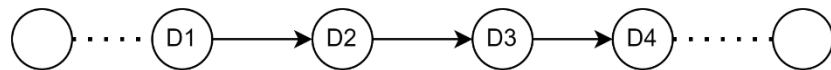


Εικόνα 4.5 Διαδρομή μετά την 2-2 Ανταλλαγή

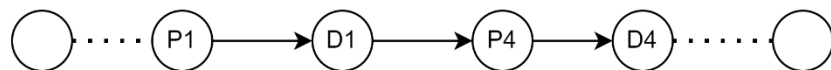
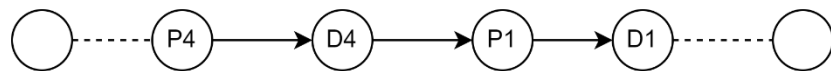
Τέλος, παρουσιάζονται οι τρεις περιπτώσεις εφαρμογής της μεθόδου 2-opt. Η πρώτη περίπτωση αφορά την αντιστροφή σειριακών πωλητών P_i , η δεύτερη την αντιστροφή σειριακών πελατών D_i και η τρίτη την αντιστροφή ζεύγους πωλητών και πελατών σε μία ζώνη που δεν παραβιάζει τους περιορισμούς.



Εικόνα 4.6 2-opt 1^η Περίπτωση



Εικόνα 4.7 2-opt 2^η Περίπτωση



Εικόνα 4.8 2-opt 3^η Περίπτωση

4.3.4) Ψευδοκώδικας

Όπως ήδη αναφέρθηκε, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται υβριδικές παραλλαγές των αλγορίθμων Άπληστης Τυχαιοποιημένης Προσαρμοσμένης Αναζήτησης (GRASP) και της Μεταβλητής Γειτονιάς Αναζήτησης (VNS), προσαρμοσμένες κατάλληλα στις παραμέτρους και στους περιορισμούς του προβλήματος. Σκοπός είναι να χρησιμοποιηθούν τα δυνατότερα πλεονεκτήματα καθενός εκ των δύο ώστε να δημιουργηθεί ο βέλτιστος και πιο αποδοτικός συνδυασμός. Για την καλύτερη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας τους δίνονται παρακάτω οι ψευδοκώδικες των δύο μεθόδων.

Ορίζονται ως :

- S μία εφικτή λύση
- x_i, y_i οι συντεταγμένες του κόμβου $i=1,2,\dots,n$
- d_{ij} η ζήτηση του κόμβου i από τον κόμβο j
- $MaxEnergy$: Μέγιστη ενέργεια οχήματος
- $MaxCapacity$: Μέγιστη χωρητικότητα τεμαχίων
- $MaxWeight$: Μέγιστο βάρος τεμαχίων
- α : Τιμή της Παραμέτρου καθορισμού πυκνότητας
- Run : Αριθμός Εξεταζόμενων Περιπτώσεων
- $VNS_itermax$: Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων αλγορίθμου VNS
- N_k : Ένα σύνολο από τελεστές που χαρτογραφούν μία λύση σε μία συγκεκριμένη δομή γειτονιάς.

Ψευδοκώδικας του αλγορίθμου GRASP

Αλγόριθμος: GRASP

Δεδομένα Εισόδου: Περίπτωση i , $x_i, y_i, d_{ij}, MaxEnergy, MaxCapacity, MaxWeight$

Αποτέλεσμα Εξόδου: S

Αρχή

 Αρχικοποίησε Πίνακα Αποστάσεων, Drone

 Για α από 0.2 μέχρι 0.5

 Για run από 0 μέχρι 500

$S \leftarrow$ Δημιούργησε Λύση

 Για $iter$ από 0 έως $iter_max$

$S' \leftarrow$ Δημιούργησε Λύση

 Εφάρμοσε $VNS(S', VNS_itermax)$

 Εάν $Κόστος(S') < Κόστος(S)$

$S \leftarrow S'$

 Τέλος Επανάληψης

 Τέλος Επανάληψης

 Τέλος Επανάληψης

 Εμφάνισε S

Τέλος

Ψευδοκώδικας του αλγορίθμου VNS

```
Αλγόριθμος VNS
Δεδομένα Εισόδου: S, VNS_itermax
Δεδομένα Εισόδου: S'
  Για iter από 0 μέχρι VNS_itermax
    Για όσο improved είναι αληθές
      Επανάλαβε
         $S' \leftarrow N_k(S)$ 
        Εάν  $\text{Κόστος}(S') < \text{Κόστος}(S)$ 
           $S \leftarrow S'$ 
        Αλλιώς
          improved  $\leftarrow$  ψευδές
      Τέλος εάν
    Τέλος Επανάληψης
  Τέλος επανάληψης
  Εμφάνισε S'
Τέλος
```


ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1) Περιπτώσεις και Παραμετροποίηση

Για να δοκιμαστεί ο υβριδικός αλγόριθμος, δημιουργήθηκαν σενάρια με μεταβλητές τον αριθμό των κόμβων και τις σχέσεις ανά μεταξύ τους. Οι περιπτώσεις αυτές χωρίζονται σε 4 βασικές κατηγορίες προβλημάτων με εύρος κόμβων που κυμαίνεται στο [50, 100, 150, 200], και σε 4 υπό-κατηγορίες που αντιπροσωπεύουν την σχέση πωλητών και παραληπτών. Στο σύνολό τους τα προβλήματα απαριθμούνται σε 16 συνολικά σενάρια (4 κατηγορίες * 4 υπό-κατηγορίες). Επιπλέον, κάθε σενάριο θα επιλυθεί για 4 τιμές της παραμέτρου α της πυκνότητας. Οι τιμές των θέσεων των κέντρων διακίνησης και των πελατών διατηρούνται σταθερές σε κάθε περίπτωση.

Οι σχέσεις των πωλητών είναι αμφιμονοσήμαντα ορισμένες έτσι ώστε κάθε πωλητής να αντιστοιχεί αποκλειστικά σε μόνο έναν παραλήπτη. Η ζήτηση για κάθε παραλήπτη αντιστοιχεί σε 1 τεμάχιο, το βάρος του οποίου όπως αναφέραμε ανάγεται σε μία εκ των 3 κατηγοριών βάρους (1.0, 2.0, 3.0).

Η ενέργεια την οποία επιτρέπεται να καταναλώσουν τα ιπτάμενα οχήματα ορίζεται στην σταθερή τιμή των 1000 Joule, τιμή η οποία αποτελεί ένα ποσοστό μικρότερο του 100% της δυνατότητάς του. Το γεγονός αυτό γίνεται καθώς υποθέτουμε πως βρισκόμαστε σε ένα απαισιόδοξο σενάριο στο οποίο λαμβάνονται υπόψιν τυχόντα προβλήματα που μπορούν να προκληθούν κατά την διάρκεια της πτήσης ενός Drone. Ακόμη, εφαρμόζεται ένα ποσό ενέργειας μικρότερο του συνολικού, ώστε να αποφεύγονται οριακές περιπτώσεις όπως η πραγματοποίηση μίας διαδρομής που απαιτεί ενέργεια $999 < E < 1000$, και άρα το όχημα θα έφτανε οριακά στην βάση.

Τέλος, τονίζεται ότι παρότι δεν εφαρμόζουμε κάποιο όριο στον αριθμό των προς χρήση οχημάτων, ο αλγόριθμος προσπαθεί παρ' αυτά να τον ελαχιστοποιήσει μέσω του υβριδικού κομματιού της μεθόδου VNS.

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι τιμές των παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε περίπτωση αντίστοιχα.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ	ΤΙΜΕΣ
W_{ij}	Βάρος τεμαχίου που αποστέλλει ο κόμβος $i \rightarrow j$	{1.0, 2.0, 3.0}
N	Αριθμός κόμβων	{50, 100, 150, 200}
E	Αρχική Ενέργεια Οχήματος	1000

MAX_WEIGHT	Μέγιστο Βάρος Μεταφοράς ανά Όχημα	4
MAX_NUM	Μέγιστος αριθμός τεμαχίων	3
MAX_ITER	Αριθμός επαναλήψεων αλγορίθμου	1000
VNS_MAX_ITER	Αριθμός επαναλήψεων Τοπικής Αναζήτησης	50
α	Τιμή της παραμέτρου πυκνότητας	{0.2, 0.3, 0.4, 0.5}

Πίνακας 5.1 Μεταβλητές προβλήματος

5.2) Πειραματικά Αποτελέσματα

Οι αλγόριθμοι υλοποιήθηκαν με χρήση της γλώσσας C++ και της έκδοσης c++14. Το λογισμικό «έτρεξε» χρησιμοποιώντας έναν i5-7400 επεξεργαστή (3.0 GHz) και 7.8 GB RAM. Κάθε περίπτωση επιλύθηκε από τον συνολικό υβριδικό αλγόριθμο 5 φορές για κάθε τιμή της παραμέτρου α . Τα αποτελέσματα θα παρουσιαστούν σε μορφή πινάκων με τις τελικές τιμές στα κόστη και στους χρόνους όπως επίσης και θα δοθούν οι γραφικές αναπαραστάσεις των καλύτερων λύσεων ανά κατηγορία αριθμού κόμβων.

Οι πίνακες αποτελεσμάτων έχουν την εξής μορφή:

- Στην 1^η στήλη έχουμε την υποκατηγορία του προβλήματος με την κάθε κατηγορία να συμβολίζεται με το γράμμα a , b , c , d όπως επίσης και τις τιμές της παραμέτρου α που εξετάζονται.
- Στην 2^η στήλη την μέση τιμή των καλύτερων λύσεων που έβγαλε ο αλγόριθμος για κάθε τιμή της α .
- Στην 3^η στήλη είναι η τιμή της ελάχιστης (σε κόστος) διαδρομής για κάθε περίπτωση.
- Στην 4^η στήλη έχουμε την μέση τιμή του χρόνου εκτέλεσης ανά RUN ανά a του αλγορίθμου.
- Με έντονη γραμματοσειρά παρατηρούνται οι βέλτιστες λύσεις για κάθε υποκατηγορία για το σύνολο τιμών του α .

Παρουσιάζονται παρακάτω οι πίνακες με τα αποτελέσματα της εφαρμογής του αλγορίθμου σε όλες τις κατηγορίες των σεναρίων του προβλήματος.

5.2.1) Παράδειγμα 50 κόμβων

Πίνακας Αποτελεσμάτων 1 : 50 Κόμβοι				
INSTANCES	Average of BEST_SOL COST	Min of BEST_SOL COST	Average of TIME ELAPSED (sec)	Drone
EMDRP_PD1_50_a	1803.63	1794.89	440.29	3
α=0.2	1803.40	1798.51	486.05	3
α=0.3	1802.88	1798.26	461.86	3
α=0.4	1802.60	1794.89	425.28	3
α=0.5	1805.62	1801.57	387.98	3
EMDRP_PD1_50_b	1748.72	1741.23	465.55	3
α=0.2	1749.64	1742.86	498.56	3
α=0.3	1750.05	1741.53	479.10	3
α=0.4	1749.06	1743.04	454.66	3
α=0.5	1746.16	1741.23	429.87	3
EMDRP_PD1_50_c	1990.17	1974.57	352.27	3
α=0.2	1986.64	1981.17	451.87	3
α=0.3	1984.98	1974.57	380.41	3
α=0.4	1994.29	1991.67	314.70	3
α=0.5	1994.79	1989.45	262.11	3
EMDRP_PD1_50_d	2153.66	2143.55	332.84	3
α=0.2	2148.86	2143.55	423.47	3
α=0.3	2150.93	2146.13	360.75	3
α=0.4	2155.55	2146.06	298.02	3
α=0.5	2159.31	2155.23	249.14	3

Από την οπτική του κόστους παρατηρούμε ότι τα πρώτα δύο σενάρια εμφανίζουν αρκετά μικρότερες λύσεις σε σχέση με τα δύο τελευταία. Αυτό μαρτυράει το γεγονός πως στα σενάρια αυτά οι πελάτες ήταν συνδεδεμένοι με αρκετά ευνοϊκές σχέσεις που ωφέλησαν στην ανάπτυξη συντομότερων διαδρομών. Ακόμη, για την περίπτωση των 50 κόμβων παρατηρούμε ότι όλες οι βέλτιστες λύσεις που προέκυψαν έχουν πετύχει τον ίδιο αριθμό οχημάτων (3), αρκετά καλύτερο από αυτόν των αρχικών λύσεων (4 ή 5). Η καλύτερη λύση (από το σύνολο των καλύτερων) που επιτεύχθηκε έχει κόστος **1741.23** και η «χειρότερη» **2143.55**.

5.2.2) Παράδειγμα 100 κόμβων

Πίνακας Αποτελεσμάτων 2 : 100 Κόμβοι				
INSTANCES	Average of BEST_SOL COST	Min of BEST_SOL COST2	Average of TIME ELAPSED (sec)	Min of Drones
EMDRP_PD3a	3200.98	3165.29	484.46	4
α=0.2	3176.87	3165.29	652.64	4
α=0.3	3192.54	3172.62	537.69	5
α=0.4	3211.46	3186.68	413.71	5
α=0.5	3223.05	3203.21	333.80	5
EMDRP_PD3b	3112.35	3073.97	513.60	4
α=0.2	3084.91	3073.97	669.15	4
α=0.3	3106.41	3080.99	561.64	5
α=0.4	3123.93	3108.28	459.17	5
α=0.5	3134.15	3115.66	364.45	5
EMDRP_PD3	4656.99	4608.19	210.42	6
α=0.2	4630.37	4608.19	254.92	6
α=0.3	4639.32	4615.91	217.73	6
α=0.4	4655.59	4617.25	195.73	6
α=0.5	4702.69	4668.38	173.28	7
EMDRP_PD3d	3911.75	3850.46	287.32	5
α=0.2	3881.00	3850.46	355.92	5
α=0.3	3920.47	3910.17	304.20	5
α=0.4	3923.90	3894.66	263.08	6
α=0.5	3921.61	3879.20	226.09	6

Στο παράδειγμα των 100 κόμβων παρατηρούμε ότι πάλι τα πρώτα δύο σενάρια έχουν τις καλύτερες λύσεις. Ωστόσο, η απόκλιση πλέον από τις 2 χειρότερες λύσεις είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή του προηγούμενου παραδείγματος (**33% έναντι 17%**). Ακόμη, σε αυτή την περίπτωση είναι πιο αισθητή και η σημασία της σύνδεσης των κόμβων και των σχέσεων μεταξύ τους, καθώς έχουμε μεγάλη διαφορά των λύσεων και στον αριθμό των οχημάτων που χρησιμοποιούνται. Το το εύρος των οχημάτων των καλύτερων λύσεων κυμαίνεται από 4 έως 6 οχήματα. Αν συμπεριλάβουμε τον αριθμό τους στο αντικειμενικό κριτήριο παρατηρούμε ότι η διαφορά των λύσεων δεν έγκειται μόνο στην διαφορά των κοστών τους αλλά και στο μέγεθος του στόλου που απαιτείται. Συνολικά οι λύσεις με το μικρότερο κόστος και τα λιγότερο οχήματα υπερισχύουν από αυτές των με τα περισσότερα οχήματα.

5.2.3) Παράδειγμα 150 κόμβων

Πίνακας Αποτελεσμάτων 3 : 150 Κόμβοι				
INSTANCES	Average of BEST_SOL COST	Min of BEST_SOL COST2	Average of TIME ELAPSED (sec)	Drones
EMDRP_PD4a	5071.75	4948.93	349.64	7
	$\alpha=0.2$	4975.52	4948.93	7
	$\alpha=0.3$	5062.33	5024.14	7
	$\alpha=0.4$	5104.66	5018.89	7
	$\alpha=0.5$	5144.48	5093.91	8
EMDRP_PD4b	5121.72	4980.7	352.23	7
	$\alpha=0.2$	5032.77	4980.7	7
	$\alpha=0.3$	5087.66	5068	7
	$\alpha=0.4$	5166.85	5121.5	7
	$\alpha=0.5$	5199.60	5110.87	8
EMDRP_PD4c	7085.39	6964.06	193.43	9
	$\alpha=0.2$	7030.61	6964.06	9
	$\alpha=0.3$	7068.67	7021.86	9
	$\alpha=0.4$	7078.66	7024.53	9
	$\alpha=0.5$	7163.62	7128.24	10
EMDRP_PD4d	7698.97	7553.33	173.28	10
	$\alpha=0.2$	7657.31	7553.33	10
	$\alpha=0.3$	7668.79	7619.59	10
	$\alpha=0.4$	7702.30	7587.17	10
	$\alpha=0.5$	7767.41	7732.54	10

Παρόμοια αποτελέσματα (αναλογικά) παρατηρούμε και στην περίπτωση πλέον των 150 κόμβων με τους χρόνους εκτέλεσης και τα αντίστοιχα υπολογισθέντα κόστη να φαίνονται με έντονη γραμματοσειρά. Το αξιοσημείωτο σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται στην τελευταία υποκατηγορία (EMDRP_PD4d) στην οποία καμία λύση δεν κατάφερε να πετύχει την εξυπηρέτηση των πελατών με λιγότερα από 10 Drone, ενώ η αντίστοιχη της 1^{ης} περίπτωσης επιτεύχθηκε με μόλις 7 οχήματα. Καταλαβαίνουμε έτσι ότι το κόστος εξυπηρέτησης των πελατών στις τελευταίες δύο υποκατηγορίες είναι πολλαπλάσιο απ' αυτό των πρώτων κατηγοριών καθώς χρειάζονται 30% παραπάνω ενέργεια για να εξυπηρετηθούν και ταυτόχρονα 3 οχήματα περισσότερα. Αξιοσημείωτο είναι ότι παρότι οι λύσεις είναι ελαφρώς χειρότερες, επιτεύχθηκαν σε συντομότερο χρονικό διάστημα.

5.2.4) Παράδειγμα 200 κόμβων

Πίνακας Αποτελεσμάτων 4 : 200 Κόμβοι				
INSTANCES	Average of BEST_SOL COST	Min of BEST_SOL COST2	Average of TIME ELAPSED (sec)	Drones
EMDRP_PD5a	7243.83	7057.99	318.44	9
α=0.2	7124.81	7057.99	434.94	9
α=0.3	7205.62	7123.05	337.13	10
α=0.4	7271.09	7223.39	270.87	10
α=0.5	7373.81	7290.42	230.85	10
EMDRP_PD5b	7481.36	7311.02	320.83	9
α=0.2	7347.40	7311.02	450.14	9
α=0.3	7430.14	7400.41	337.46	10
α=0.4	7509.77	7400.31	270.92	10
α=0.5	7638.15	7612.42	224.80	11
EMDRP_PD5c	9124.26	8890.07	205.78	11
α=0.2	8975.40	8890.07	261.58	11
α=0.3	9076.40	8971.12	215.04	12
α=0.4	9199.08	9142.7	184.90	12
α=0.5	9246.15	9150.48	161.62	13
EMDRP_PD5d	9995.41	9783.22	206.60	12
α=0.2	9857.86	9783.22	261.40	12
α=0.3	9953.66	9900.27	218.02	13
α=0.4	10034.75	9977.79	185.13	13
α=0.5	10135.38	10026.3	161.83	13

Τα αποτελέσματα της τελευταίας περίπτωσης, αυτής των 200 κόμβων, είναι παρόμοια με αυτά της προηγούμενης περίπτωσης. Το αξιοσημείωτο σε αυτήν την περίπτωση είναι το γεγονός πως παρότι αυξάνονται τα κόστη και ο αριθμός των απαιτούμενων οχημάτων παράλληλα με την αύξηση των κόμβων του προβλήματος κατά 50, η διάρκεια εύρεσης μιας βέλτιστης λύσης παραμένει πρακτικά ίδια. Δεν επιβαρυνόμαστε χρονικά δηλαδή παρά την αύξηση των κόμβων.

5.2.5)Συνολικά Αποτελέσματα

Αρχικά, από τα αναλυτικά αποτελέσματα όλων των περιπτώσεων που παρουσιάσαμε προηγουμένως συμπεραίνονται τα εξής:

- Αυξάνοντας των αριθμό των κόμβων, έχουμε ανάλογη αύξηση στον αριθμό των Drone που θα χρησιμοποιηθούν. Ωστόσο, η αύξηση στον αριθμό των οχημάτων γίνεται πιο γρήγορα από αυτή των κόμβων. Στην περίπτωση των 50 κόμβων χρειάστηκαν 3 οχήματα ενώ σε αυτή των 100 (αύξηση κατά 50 κόμβους) 4 έως 6 (αύξηση 1 έως 3). Ωστόσο στους 150 κόμβους (αύξηση κατά 50 κόμβους από τους 100) έχουμε αύξηση των οχημάτων σε 7 έως 10 (αύξηση 1 έως και 4 από τον μέγιστον αριθμό της προηγούμενης περίπτωσης). Έτσι διαπιστώνεται ότι ο αριθμός των οχημάτων μετά από ένα σημείο θα αυξάνεται αρκετά γρηγορότερα από τον αριθμό των πελατών.
- Σε γενικό βαθμό, η λύση μας επηρεάζεται άμεσα από τον αριθμό των κόμβων αλλά κυρίως από τις σχέσεις ανά μεταξύ τους όπως επίσης και οι θέσεις τους στον χώρο. Για τον ίδιο αριθμό κόμβων και διαφορετικές συνδέσεις μπορούμε να βρεθούμε σε αποκλίσεις μεταξύ των λύσεων που να αγγίζουν το 35%.
- Οι χρόνοι των λύσεων δεν μεταβάλλονται με την ανάλογη αύξηση των κόμβων. Στους 50 κόμβους ο μέσος χρόνος εύρεσης ήταν μεγαλύτερος από αυτόν στους 200 κόμβους. Αυτό συμβαίνει καθώς η εύρεση εξαρτάται κυρίως από την τοπική αναζήτηση που γίνεται με το κομμάτι του VNS αλγορίθμου. Όταν ο αριθμός των οχημάτων είναι μεγαλύτερος, η τοπική αναζήτηση εφαρμόζεται πιο γρήγορα καθώς είναι πιο πιθανό να βρεθούμε σε μία καλή κίνηση απ' ότι αν είχαμε λίγα οχήματα.
- Σε σύγκριση των χρόνων ανά υποκατηγορία και όχι ανά κατηγορία παρατηρούμε ότι για μικρές τιμές του α έχουμε μεγαλύτερους χρόνους επίλυσης απ' ότι για μεγάλες τιμές. Αυτό γίνεται καθώς μικρές τιμές του α σημαίνουν αυστηρότητα ως προς την τυχαιοποίηση μιας αρχικής λύσης. Μικρές τιμές του α γεννάνε παρόμοιες αρχικές λύσεις και διαδρομές και οι οποίες μειώνουν την πιθανότητα εύρεσης μιας καλής κίνησης στην μετέπειτα τοπική αναζήτηση.

Στους παρακάτω δύο πίνακες παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για κάθε περίπτωση κόμβων και συγκρίνονται οι καλύτερες λύσεις κάθε περίπτωσης όπως επίσης και οι ελάχιστοι μέση χρόνοι αυτών.

INSTANCES/α	0.2	0.3	0.4	0.5
Instance_50	1742.86	1741.53	1743.04	1741.23
Instance_100	3073.97	3080.99	3108.28	3115.66
Instance_150	4948.93	5024.14	5018.89	5093.91
Instance_200	7057.99	7123.05	7223.39	7290.42

INSTANCES	Average of TIME ELAPSED (ms)
Instance_50	397741.0875
Instance_100	373955.5375
Instance_150	267149.3625
Instance_200	262918.65

Πίνακας 5.2 & 5.3 Συνολικά συγκριτικά αποτελέσματα. Στο πάνω μέρος παρουσιάζονται τα κόστη των καλύτερων λύσεων ανά περίπτωση και ανά τιμή της παραμέτρου α . Στο κάτω μέρος παρουσιάζονται οι μέση χρόνοι εύρεσης των καλύτερων λύσεων.

Αρχικά παρατηρείται ότι για κάθε περίπτωση η καλύτερη λύση βρέθηκε για τιμή της παραμέτρου $\alpha = 0.2$, με εξαίρεση την περίπτωση των 50 κόμβων. Αυτό συσχετίζεται με το άπληστο κριτήριο του αλγορίθμου GRASP, το οποίο αφορά αποκλειστικά την απόσταση. Όταν το α ισούται με 0.2 η σφαίρα πυκνότητας είναι αρκετά μικρή και έτσι για την κατασκευή μίας αρχικής λύσης ουσιαστικά λειτουργούμε με το κριτήριο «ποιος είναι ο αμέσως επόμενος». Αυτό το άπληστο κριτήριο στο συγκεκριμένο παράδειγμα που επηρεαζόμαστε αρκετά από την απόσταση των πελατών γεννά αρκετά καλές λύσεις οι οποίες ναι μεν θέλουν περισσότερο χρόνο για να βελτιωθούν, αλλά γνωρίζουμε ότι ξεκινάμε από σχετικά καλές εφικτές λύσεις.

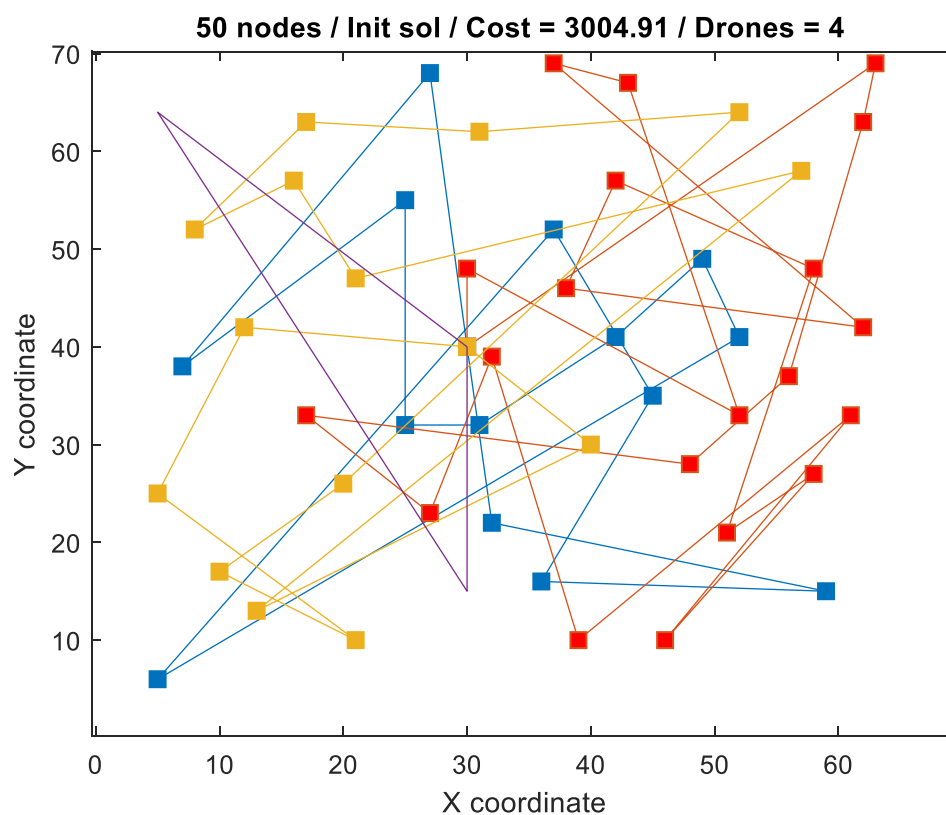
Θα μπορούσε να εξετασθεί περαιτέρω η αύξηση των τιμών του α ώστε ο αλγόριθμος GRASP να εφαρμοστεί με μεγαλύτερη τυχαιότητα και όχι τόσο σκεπτόμενα ώστε να αυξήσουμε τις πιθανότητες να ξεκινήσουμε από μία πολύ καλή λύση είτε από μία πραγματικά κακή αλλά η οποία θα βελτιωθεί πολλές φορές αρκετά πιο γρήγορα, αυξάνοντας ακόμη την πιθανότητα καλής λύσης μέσω τυχαίας αλλαγής.

Όσον αφορά τους χρόνους, παρατηρούμε αυτό που αναφέρθηκε και νωρίτερα, ότι το μέγεθος των κόμβων δεν εξαρτά σε μεγάλο βαθμό τον χρόνο εύρεσης λύσης. Αντιθέτως, ο αριθμός των οχημάτων είναι αυτός που επηρεάζει άμεσα τους

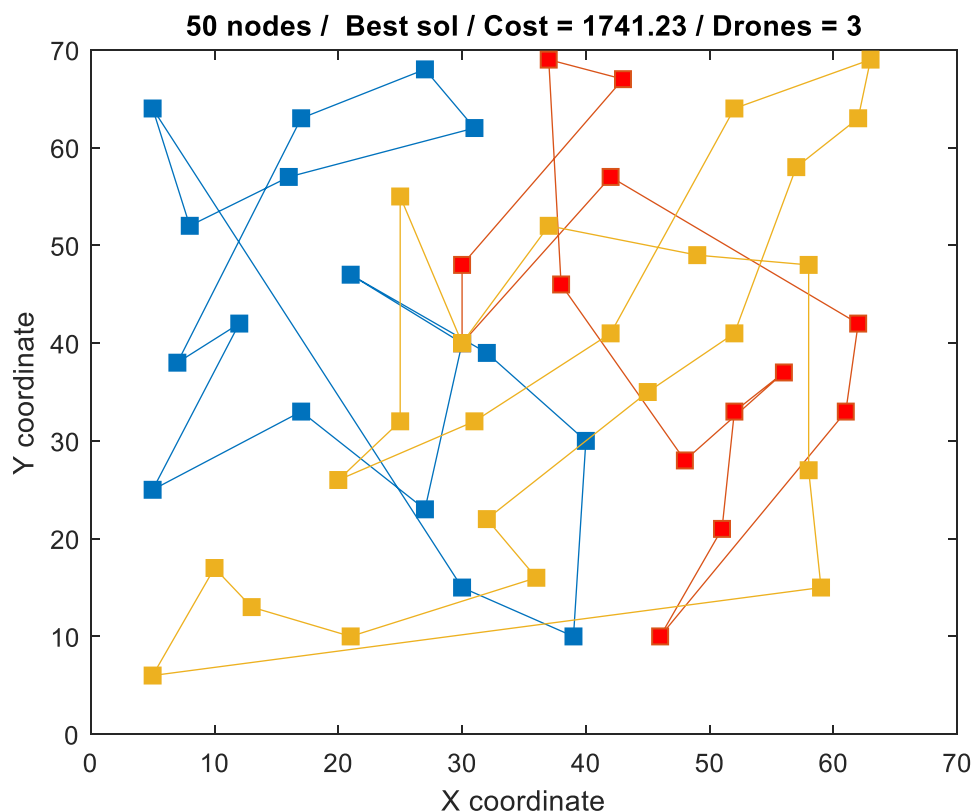
χρόνους. Μπορεί οι περιπτώσεις με υψηλό αριθμό κόμβων να έχουν χειρότερες και περισσότερο κοστοβόρες λύσεις, επιλύονται ωστόσο σε πιο τακτό χρονικό διάστημα.

Σε γενικό πλαίσιο, τόσο οι χρόνοι επίλυσης όσο και οι ίδιες οι λύσεις που προκύπτουν είναι αρκετά ικανοποιητικές και επιβεβαιώνουν τόσο την ορθότητα όσο και την αποτελεσματικότητα του υβριδικού αλγορίθμου. Το σημαντικό μειονέκτημα ωστόσο, έγκειται στο γεγονός ότι η βάση που απογειώνονται τα οχήματα είναι σταθερή. Έτσι εξαρτόμαστε σε μεγάλο βαθμό από τις σχέσεις και τις θέσεις των πελατών. Ωστόσο, μια ενδεχόμενη περίπτωση όπου η βάση μετακινείται από σημείο σε σημείο για να ταιριάζει καλύτερα στους πελάτες θα οδηγούσε σε καλύτερα αποτελέσματα.

Τέλος, παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό παράδειγμα μίας αρχικής λύσης και της τελικής βέλτιστης αυτής που εντοπίστηκε με την εφαρμογή του υβριδικού αλγορίθμου. Η αρχική λύση που είχε «γεννηθεί» από την μέθοδο εξυπηρετούσε όλους τους κόμβους με 4 οχήματα και με συνολικό κόστος περίπου 3,000 J. Αντιθέτως, η τελική λύση το επιτυγχάνει αυτό όχι μόνο με 3 οχήματα, αλλά και με αρκετά μικρότερη ενέργεια, ίση με 1743 J.



Εικόνα 5.1 Αρχική λύση για 50 κόμβους



Εικόνα 5.2 Τελική λύση για 50 κόμβους

Αξίζει να σημειωθεί ότι μπορεί οι διαδρομές να μπλέκονται και να διασταυρώνονται μεταξύ τους, που συνήθως είναι ένδειξη ότι υπάρχουν πολύ καλύτερες διαδρομές που δεν έχουν βρεθεί και που θα αποπλέξουν το γράφημα. Ωστόσο, λόγω τις ιδιαιτερότητας του προβλήματος όπως επίσης και στο γεγονός ότι δεν είναι όλοι οι πελάτες της ίδιας κατηγορίας (Πωλητές και Παραλήπτες), κάποιες διασταυρώσεις είναι αναπόφευκτες και εξαρτώνται αποκλειστικά από τα δεδομένα του προβλήματος. Μπορεί έτσι στο μάτι να φαντάζει ως μία παραμένουσα κακή λύση, στην πραγματικότητα όμως είναι μία βέλτιστη που εξυπηρετεί άριστα τον σκοπό της μελέτης. Περαιτέρω βελτιώσεις θα μπορούσαν ίσως να γίνουν όπως αναφέραμε και πριν, με την είσοδο κινητής βάσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία, παρουσιάστηκε το πρωτότυπο πρόβλημα δρομολόγησης μη στελεχωμένων ιπτάμενων οχημάτων, γνωστά και ως Drones, για ένα δίκτυο πελατών συνδεδεμένων μεταξύ τους. Για την συγκεκριμένη περίπτωση, συνδυάστηκαν δύο αλγόριθμοι με σκοπό την ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας των οχημάτων ώστε να εξυπηρετηθούν βέλτιστα όλες οι παραγγελίες (ζήτηση). Κάθε όχημα, έχει ένα συγκεκριμένο ποσό ενέργειας που μπορεί να χρησιμοποιήσει για την εξυπηρέτηση των παραγγελιών. Το ποσό αυτό καταναλώνεται με ρυθμό που εξαρτάται από δύο παράγοντες, την διανυόμενη απόσταση και το βάρος που μεταφέρεται στην διάρκεια της. Ο τρόπος κατανάλωσης όπως επίσης και οι μεταβλητές του προβλήματος αναλύθηκαν. Εκτενώ σε προηγούμενο παράρτημα

Το συγκεκριμένο πρόβλημα εκτείνει περαιτέρω την κατηγορία των VRP προβλημάτων, συνδέοντας αυτή των VRP με ηλεκτρικά οχήματα με αυτήν των VRPD. Πέρα από τον συνδυασμό αυτών, το πρόβλημα δρομολόγησης ιπτάμενων οχημάτων έρχεται να λύσει και πολλά προβλήματα των προηγούμενων κατηγοριών, όπως την αποσυμφόρηση της κυκλοφορίας στους δρόμους και την ελαχιστοποίηση των χρόνων παράδοσης των τεμαχίων. Ακόμη, βρίσκει εφαρμογή και στην νέα, πιο πράσινη εποχή μετακίνησης των οχημάτων και την ελαχιστοποίηση των ρύπων αυτών. Η εποχή αυτή αποτελεί σταθμό κλειδί για την εφοδιαστική αλυσίδα και την διαχείρισή της, γι' αυτό το λόγο κρίνεται σημαντική η μελέτη για εφαρμογή καινοτόμων μεθόδων που θα την βελτιώσουν και θα την εναρμονίσουν με την βέλτιστη λειτουργία των «logistics» και των ήδη υπάρχουσών μεθοδολογιών.

Για την επίλυση των προβλημάτων εφαρμόστηκε ένας υβριδικός αλγόριθμος Grasp/ VNS, ο οποίος συνδυάζει τα δυνατά σημεία καθ' ενός, εκ των δύο, αλγορίθμων για την επίτευξη γρηγορότερων και κυρίως, πιο αποδοτικών αποτελεσμάτων. Στο 1^ο μέρος του αλγορίθμου κατασκευάστηκαν διάφορες τυχαιοποιημένες λύσεις και, ύστερα τέθηκαν υπό μελέτη με την χρήση του VNS ώστε να βρεθούν καλύτερα τοπικά ή και ακόμη τοπικά ελάχιστα.

Για την εφαρμογή των αλγορίθμων, κατασκευάστηκαν 4 γενικές κατηγορίες προβλημάτων, ανάλογα με τον αριθμό των κόμβων {50, 100, 150, 200} και αναλύθηκαν σε 4 υποκατηγορίες που αντιπροσωπεύουν διαφορετικά σενάρια συνδέσεων μεταξύ των κόμβων.

Από τα αποτελέσματα που εξήχθησαν συμπεραίνεται ότι οι αλγόριθμοι εφαρμόστηκαν με απόλυτη επιτυχία και κατάφεραν να επιτεύξουν σε ικανοποιητικό βαθμό το σκοπό της ελαχιστοποίησης της ενέργειας. Στις περισσότερες λύσεις, οι

βελτιώσεις που υπέστησαν μετά την εφαρμογή των αλγορίθμων ήταν της τάξης του 30%-40% χωρίς να υπολογίζεται σε αυτό η πιθανή μείωση του χρησιμοποιημένου αριθμού οχημάτων. Επιπλέον, οι χρόνοι επίλυσης ήταν αρκετά καλοί και γρήγοροι. Ωστόσο αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι πως η χρονική πολυπλοκότητα εξαρτήθηκε σε σημαντικό βαθμό, από τον αριθμό των χρησιμοποιηθέντων οχημάτων και όχι από τον αριθμό των κόμβων.

Τέλος, σε μελλοντική έρευνα πάνω στα ιπτάμενα οχήματα θα μπορούσαν να εξετασθούν διάφορες οπτικές και μεταβλητές του προβλήματος, όπως η εφαρμογή με αυτοκινούμενη βάση ή η επαναχρησιμοποίηση των οχημάτων του στόλου με χρήση άλλων μπαταριών ή ακόμη και την επαναφόρτιση των ήδη υπαρχουσών. Βέβαια, οι χρόνοι επαναφόρτισης ακόμη παραμένουν αρκετά υψηλοί για να μπορέσουν να εφαρμοστούν ρεαλιστικά σε κάποιο πρόβλημα. Όσο προοδεύσει η τεχνολογία των μπαταριών, τόσο θα «γεννούνται» νέοι κόσμοι στην επιστήμη δρομολόγησης οχημάτων και στην ΔΕΑ.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] Nikolaos A. Kyriakakis, Themistoklis Stamadianos, Magdalene Marinaki, Yannis Marinakis,
The electric vehicle routing problem with drones: An energy minimization
approach for aerial deliveries,
Cleaner Logistics and Supply Chain,
Volume 4, 2022,100041,
ISSN 2772-3909,
<https://doi.org/10.1016/j.clscn.2022.100041>
- [2] Ochelska-Mierzejewska J, Poniszewska-Marańda A, Marańda W. Selected
Genetic Algorithms for Vehicle Routing Problem Solving. *Electronics*. 2021;
10(24):3147.
<https://doi.org/10.3390/electronics10243147>
- [3] Bryant, Kylie, "Genetic Algorithms and the Travelling Salesman Problem"
(2000). HMC Senior Theses. 126.
https://scholarship.claremont.edu/hmc_theses/126
- [4] Florian Arnold, Kenneth Sörensen,
What makes a VRP solution good? The generation of problem-specific
knowledge for heuristics,
Computers & Operations Research,
Volume 106,2019,
ISSN 0305-0548,
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.02.007>
- [5] [Stevens, G.C.](#) (1989), "Integrating the Supply Chain", [International Journal of Physical Distribution & Materials Management](#), Vol. 19 No. 8, pp. 3-8. <https://doi.org/10.1108/EUM000000000000329>
- [6] [Rutner, S.M.](#) and [Langley, C.J.](#) (2000), "Logistics Value: Definition, Process and Measurement", [The International Journal of Logistics Management](#), Vol. 11 No. 2, pp. 73-82. <https://doi.org/10.1108/09574090010806173>
- [7] Matthew Ayamga, Selorm Akaba, Albert Apotele Nyaaba,
Multifaceted applicability of drones: A review,
Technological Forecasting and Social Change,
Volume 167, 2021, 120677,
ISSN 0040-1625,
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120677>

[8] Ruixue Gu, Mark Poon, Zhihao Luo, Yang Liu, Zhong Liu,
A hierarchical solution evaluation method and a hybrid algorithm for the vehicle
routing problem with drones and multiple visits,
Transportation Research Part C: Emerging Technologies,
Volume 141, 2022, 103733,
ISSN 0968-090X,
<https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103733>

[9] Konstantin Kloster, Mahdi Moeini, Daniele Vigo, Oliver Wendt,
The multiple traveling salesman problem in presence of drone- and robot-
supported packet stations,
European Journal of Operational Research, 2022,
ISSN 0377-2217,
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.06.004>

[10] Μαρινάκης Ιωάννης, Μαρινάκη Μαγδαληνή & Μυγδαλάς, Αθανάσιος
(2019). *Προβλήματα Δρομολόγησης Οχημάτων στη Διαχείριση της Εφοδιαστικής*
Αλυσίδας (2^η έκδοση). Χανιά: Εκδόσεις Νέων Τεχνολογιών.