



**ΕΘΝΙΚΟ
ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Α.Π. :
Αθήνα,

ΚΟΣΜΗΤΟΡΑΣ

**Προς τα Μέλη ΔΕΠ της
Σχολής Μηχ/γων
Μηχ/κών**

ΠΡΟΣΚΛΗΣΗ

Σας προσκαλούμε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής του Υ.Δ. κ. *Κωνσταντακόπουλου Γρηγόριου* , Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού, την οποία εκπόνησε στον Τομέα Βιομηχανικής Διοίκησης & Επιχειρησιακής Έρευνας . Η παρουσίαση θα πραγματοποιηθεί τη *Τρίτη 5 Ιουλίου* και ώρα 14:00μ.μ.-17.00μ.μ. διαδικτυακά. Ο ελληνικός τίτλος της Διδακτορικής Διατριβής είναι ο εξής:

«Μέθοδοι Βελτιστοποίησης για Ένα Σύνολο Προβλημάτων Δρομολόγησης
Οχημάτων και Προγραμματισμού Παραδόσεων»

Και ο Αγγλικός ως εξής:

«Optimization Methods Applied in a Class of Vehicle Routing and Scheduling
Problems»

Ο Κοσμήτορας της Σχολής
Nikolaos Marmaras 28.06.2022 18:58

Ν. Μαρμαράς
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Σημείωση: Για οδηγίες για την πρόσβαση σας διαδικτυακά απευθυνθείτε στον επιβλέποντα του Υ.Δ.
Καθ. Κ. Η. Τατσιόπουλου itat@central.ntua.gr

Μέθοδοι Βελτιστοποίησης για Ένα Σύνολο Προβλημάτων Δρομολόγησης Οχημάτων και Προγραμματισμού Παραδόσεων

Γρηγόριος Κωνσταντακόπουλος

Στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής μελετάται και επιλύεται μία σειρά προβλημάτων δρομολόγησης οχημάτων και προγραμματισμού παραδόσεων, ενώ ταυτόχρονα αναπτύσσονται αποδοτικοί εξελικτικοί και τοπικής αναζήτησης μεταερευτικοί αλγόριθμοι οι οποίοι έχουν ως στόχο την βελτιστοποίηση της διανομής, προτείνοντας το βέλτιστο πλάνο δρομολογίων και παραδόσεων. Το γεγονός ότι η δρομολόγηση οχημάτων επηρεάζεται από πολλές μεταβλητές και περιορισμούς, οι οποίες έχουν προέλθει από τη φύση των εταιρειών διανομής, το εξωτερικό περιβάλλον αυτών, και από τις ανάγκες και τις απαιτήσεις των πελατών, έχει οδηγήσει τόσο στο εμπορικό/επιχειρηματικό όσο και ερευνητικό ενδιαφέρον. Προκειμένου να συνδεθούν οι δύο αυτοί τομείς, η παρούσα διατριβή μελετά και προτείνει την ενσωμάτωση των προτεινόμενων αλγόριθμων σε ένα cloud σύστημα δρομολόγησης.

Επιπλέον, οι διάφορες μεταβλητές και περιορισμοί του Προβλήματος της Δρομολόγησης Οχημάτων (ΠΔΟ) αντιστοιχούν σε διαφορετικές παραλλαγές του προβλήματος. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, οι παραλλαγές του προβλήματος που λαμβάνονται υπόψιν έχουν προκύψει μέσα από την αναλυτική ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, καθώς και μέσω της συνεργασίας με εταιρείες διανομής και ανάπτυξης λογισμικού. Πιο συγκεκριμένα, καθορίζονται οι παραλλαγές που απασχολούν πιο συχνά τους ερευνητές και τους επαγγελματίες που δραστηριοποιούνται στο χώρο, όσο και οι παραλλαγές που έχουν τη δυναμική να προσφέρουν στο άμεσο μέλλον. Οι παραλλαγές του προβλήματος της δρομολόγησης που τελικά επιλέχθηκαν προς μελέτη είναι:

1. το ΠΔΟ με Χρονικά Παράθυρα (ΠΔΟΧΠ),
2. το ΠΔΟ με Ταυτόχρονες Περισυλλογές και Παραδόσεις (ΠΔΟΤΠΠ),
3. το ΠΔΟ με Ετερογενή Στόλο Οχημάτων (ΠΔΟΕΣΟ), και
4. το Συνεργατικό ΠΔΟ (ΣΠΔΟ).

Τα εξεταζόμενα προβλήματα δρομολόγησης, τα οποία ανήκουν στην κατηγορία των NP-hard προβλημάτων, παρουσιάζουν εξαιρετική πολυπλοκότητα, ειδικότερα όταν αντιμετωπίζονται ταυτόχρονα. Στην παρούσα διατριβή αντιμετωπίζονται όλες οι παραπάνω παραλλαγές είτε μεμονωμένα είτε συνδυαστικά προκειμένου να καλύπτουν τις ανάγκες και απαιτήσεις των εταιρειών διανομής που δραστηριοποιούνται στις εμπορευματικές μεταφορές. Συγκεκριμένα, το ΠΔΟΧΠΠ λαμβάνει υπόψιν το χρονικό εύρος που έχουν ορίσει οι πελάτες προκειμένου να πραγματοποιηθεί η παράδοση ή παραλαβή των εμπορευμάτων. Στο ΠΔΟΤΠΠ, όπως υποδεικνύει και η ονομασία, επικεντρώνεται σε παραδόσεις και επιστροφές που εκτελούνται ταυτόχρονα προς και από τους πελάτες. Όσον αφορά το ΠΔΟΕΣΟ, ο στόλος οχημάτων που διατηρούν και χρησιμοποιούν οι εταιρείες θεωρείται ετερογενής, που σημαίνει ότι τα οχήματα διαφέρουν όσον αφορά τη χωρητικότητά τους, και τα σταθερά και μεταβλητά κόστη διανομής. Τέλος, το ΣΠΔΟ επικεντρώνεται στις περιπτώσεις όπου εταιρείες διανομής που βρίσκονται και λειτουργούν στις ίδιες περιοχές, συνεργάζονται στο κομμάτι της δρομολόγησης και διανομής.

Το γεγονός ότι με την ταυτόχρονη αντιμετώπιση πολλών παραλλαγών του προβλήματος δυσκολεύει η επίλυση του, καθώς και η ανάγκη των εταιρειών για τη δημιουργία αποδοτικών διαδρομών, έχουν οδηγήσει στην ανάγκη για ανάπτυξη αλγορίθμων βελτιστοποίησης. Αρχικά προτάθηκαν οι ακριβείς αλγόριθμοι από τους ερευνητές. Το πλεονέκτημά τους, το οποίο είναι η βέλτιστη αντιμετώπιση και επίλυση του ΠΔΟ συνοδεύεται από έναν μεγάλο περιορισμό ο οποίος είναι ο περιορισμένος αριθμός πελατών που μπορούν να διαχειριστούν καθώς και ο αυξημένος χρόνος επεξεργασίας που απαιτείται για την επίλυση. Αυτός ο περιορισμός επηρεάζει σημαντικά, οδηγώντας στην μη εφαρμογή αυτών σε συστήματα δρομολόγησης. Επίσης, είχε ως αποτέλεσμα το ερευνητικό ενδιαφέρον να στραφεί στους ευρετικούς αλγορίθμους (heuristic algorithms) οι οποίοι προσφέρουν ποιοτικές λύσεις σε ελάχιστο υπολογιστικό χρόνο. Στη συνέχεια οι ερευνητές προχώρησαν στην ανάπτυξη των μεταευρετικών αλγορίθμων (metaheuristic algorithms) οι οποίοι κατάφεραν να εξισορροπήσουν την ποιότητα της λύσης και τον υπολογιστικό χρόνο που απαιτείται.

Στη συγκεκριμένη έρευνα, μελετώνται και προτείνονται διάφοροι μεταευρετικοί αλγόριθμοι προκειμένου να επιλύσουν τα πολλαπλά προβλήματα δρομολόγησης που αντιμετωπίζουν οι εταιρείες του κλάδου των διανομών. Πιο συγκεκριμένα μελετάται ένας Εξελικτικός Αλγόριθμος (EA), καθώς και δύο αλγόριθμοι Τοπικής Αναζήτησης (TA). Οι αλγόριθμοι αυτοί αντιμετωπίζουν είτε μεμονωμένα, είτε συνδυαστικά ορισμένες παραλλαγές του προβλήματος της δρομολόγησης οχημάτων. Πιο συγκεκριμένα, ο EA αντιμετωπίζει το πρόβλημα της δρομολόγησης οχημάτων με ταυτόχρονες παραδόσεις και επιστροφές και με χρονικά παράθυρα. Επιπλέον, ο αλγόριθμος εφαρμόζεται σε περιπτώσεις διανομής με ηλεκτρικά οχήματα τα οποία έχουν μειωμένη αυτονομία. Η καινοτομία στον συγκεκριμένο αλγόριθμο συνδέεται με τον τελεστή εναλλαγής, καθώς επίσης και με το γεγονός ότι το πρόβλημα αντιμετωπίζεται ως πολύ-αντικειμενικό. Στην πολύ-αντικειμενική βελτιστοποίηση υπάρχουν δύο ή παραπάνω αντικρουόμενοι αντικειμενικοί στόχοι οι οποίοι πρέπει να βελτιστοποιηθούν. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα είναι η ελαχιστοποίηση (i) του αριθμού των οχημάτων που απαιτούνται για την εκτέλεση των παραγγελιών και (ii) της συνολικά διανυόμενης απόστασης.

Όσον αφορά τους αλγόριθμους τοπικής αναζήτησης, ο πρώτος που αναπτύχθηκε και αντιμετωπίζει το πρόβλημα της δρομολόγησης οχημάτων με χρονικά παράθυρα ως πολύ-αντικειμενικό είναι αυτός της Αναζήτησης Ευρείας Γειτονιάς (ΑΕΓ). Ο δεύτερος αλγόριθμος τοπικής αναζήτησης που αναπτύχθηκε είναι αυτός της Προσαρμοστικής Αναζήτησης Ευρείας Γειτονιάς (ΠΡΑΕΓ), ο οποίος αντιμετωπίζει όλες τις προαναφερθείσες παραλλαγές του προβλήματος και πιο συγκεκριμένα το Πρόβλημα της Δρομολόγησης Οχημάτων με Ετερογενή Στόλο Οχημάτων, Ταυτόχρονες Περισυλλογές και Παραδόσεις και Χρονικά Παράθυρα. Ο αλγόριθμος ΠΡΑΕΓ, μετά από προσαρμογές, εφαρμόζεται στο Συνεργατικό ΠΔΟ προκειμένου να εκτιμηθούν τα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη από τη συνεργασία εταιρειών διανομής. Στο πλαίσιο της μελέτης παραλλαγών του ΠΔΟ και της αντιμετώπισής τους μέσω αλγορίθμων βελτιστοποίησης διατυπώθηκε το μαθηματικό τους μοντέλο, καθώς αποτελεί βασικό μέρος για την αποτελεσματική αντιμετώπιση του προβλήματος.

Τέλος, οι προτεινόμενοι αλγόριθμοι έχουν αναπτυχθεί στη γλώσσα προγραμματισμού Python και έχουν δοκιμαστεί σε πολλαπλά δεδομένα της βιβλιογραφίας, προκειμένου να εξασφαλιστεί η αποδοτικότητά τους και η ικανότητάς του να ενσωματωθούν σε ένα cloud σύστημα δρομολόγησης. Από τη στιγμή που και οι τρεις προτεινόμενοι αλγόριθμοι προσφέρουν αποτελέσματα υψηλής ποιότητας αποθηκεύονται σε έναν cloud διακομιστή (server) προκειμένου να είναι προσπελάσιμοι μέσω των κατάλληλων αιτημάτων. Παρ' όλα αυτά, στη συγκεκριμένη μορφή του συστήματος μόνο ο αλγόριθμος ΠΡΑΕΓ είναι προσπελάσιμος καθώς καλύπτει τις περισσότερες περιπτώσεις στη διανομή φορτίων. Το σύστημα το οποίο είναι ικανό να επιλύσει ένα μεγάλο εύρος παραλλαγών του προβλήματος, πρέπει να τροφοδοτηθεί με τα κατάλληλα δεδομένα προκειμένου να προσφέρει αποδοτικά πλάνα εξυπηρέτησης πελατών. Προκειμένου να εξασφαλιστεί αυτό, το σύστημα εκμεταλλεύεται τεχνολογίες που εξασφαλίζουν την ποιότητα και την ακρίβεια των δεδομένων. Όσον αφορά τη γεωκωδικοποίηση και τα δεδομένα χρόνων μετακίνησης και αποστάσεων μεταξύ των σημείων παραγγελίας, χρησιμοποιούνται χάρτες του διαδικτύου. Τα οφέλη από τη χρήση ενός τέτοιου συστήματος το οποίο παρέχεται μέσω διαδικτύου και δεν απαιτεί την εγκατάστασή του στους υπολογιστές της κάθε εταιρείας ξεχωριστά είναι πολλά και δεν περιορίζονται μόνο στο οικονομικό σκέλος. Πέρα από τη εξάλειψη του κόστους για την εγκατάσταση και συντήρηση του συστήματος, οι χρήστες έχουν τη δυνατότητα να εξάγουν αποδοτικά και με μεγάλη ακρίβεια πλάνα δρομολογίων τα οποία οπτικοποιούνται σε χάρτες του διαδικτύου, να κάνουν αλλαγές στα προτεινόμενα δρομολόγια, καθώς επίσης και να εκτελούν διαδικασίες αναδρομολόγησης μετά την έναρξη της διανομής. Επιπλέον, οι τεχνολογίες και τα χαρτογραφικά δεδομένα δίνουν τη δυνατότητα στους χρήστες να αντιμετωπίσουν και τη δυναμική φύση του προβλήματος, καθώς ορισμένα δεδομένα ενδέχεται να αλλάζουν κατά τη διάρκεια του δρομολογίου και να επηρεάσουν την ομαλή εκτέλεσή του. Όλες οι παραπάνω τεχνολογίες και οι λειτουργίες του συστήματος μπορούν να ενισχύσουν σημαντικά τις προσπάθειες των εταιρειών διανομής και των υπευθύνων δρομολόγησης, τόσο πριν όσο και μετά την έναρξη της διανομής.

Συμπερασματικά, η έρευνα επικεντρώνεται σε διάφορους πυλώνες και ξεκινά με τη μελέτη των παραλλαγών του ΠΔΟ οι οποίες λαμβάνονται υπόψιν είτε μεμονωμένα είτε συνδυαστικά, και για τα οποία διαμορφώνεται το μαθηματικό μοντέλο. Επιπρόσθετα, η παρούσα διδακτορική διατριβή προτείνει και αναπτύσσει αλγορίθμους βελτιστοποίησης οι οποίοι αντιμετωπίζουν τις συγκεκριμένες περιπτώσεις διανομής και δοκιμάζονται τόσο σε δεδομένα της βιβλιογραφίας όσο και σε πραγματικά, προκειμένου να διαπιστωθεί η ικανότητά τους να ενσωματωθούν σε πληροφορικά συστήματα δρομολόγησης. Ο τελευταίος πυλώνας έρευνας αφορά τη δυνατότητα των αλγορίθμων να ενσωματωθούν σε πληροφοριακά συστήματα και να συνεργαστούν με τεχνολογίες που είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη πληροφοριακών συστημάτων δρομολόγησης.

Optimization Methods Applied in a Class of Vehicle Routing and Scheduling Problems

Grigorios Konstantakopoulos

The thesis studies and addresses a class of vehicle routing and scheduling problems while also developing powerful evolutionary and local search metaheuristics that aim to optimize the distribution process in urban areas by proposing a plan of routes and deliveries. The fact that route planning is affected by many variables and constraints that have emerged by the nature of logistics companies, their external environment, and their customers' needs and requirements has led to an increased interest both scientifically and commercially. The current thesis, aiming to bring together research and industry, also studies and proposes the integration of the developed algorithms into a cloud routing system, offering highly efficient route plans.

Moreover, the different variables and constraints of the Vehicle Routing Problem (VRP) correspond to different variants of the problem. In the current thesis, the variants considered have arisen through an analytical literature review and the cooperation with industrial and software development companies operating in this field. Specifically, the most commonly addressed, by researchers and practitioners, VRP variants and those with the potential to contribute financially and environmentally to logistics companies in the future are selected. This methodology ensures that both fields (research and industry) will benefit and be interested in, as they are inextricably linked to each other. The variants of the problem that are selected and studied are:

- the Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW),
- the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickups and Deliveries (VRPSPD),
- the Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem (HVRP), and
- the Collaborative VRP.

The VRP variants under study belonging to NP-hard problems are highly complex, primarily when addressed simultaneously. In this thesis, one of the goals is to address all the above-mentioned variants either solely or combined in order to cover most needs and requirements of logistics companies operating on freight distribution field. Each of the above VRP variants corresponds to specific characteristics, variables and restrictions. Specifically, the VRPTW considers the time slots that customers indicate in order to be served by logistics companies. The VRPSPD focuses, as its name indicates, on simultaneous pickups and deliveries, while the HVRP on the heterogeneity of vehicles that logistics companies own, in terms of capacity, fixed and variable costs. Finally, the Collaborative VRP focuses on cases that logistics companies that locate and operate at the same areas collaborate in the distribution process. All these VRP variants form the main requirements and challenges that logistics companies face on freight distribution, and by addressing them great benefits can emerge.

Combining multiple VRP variants is complex, along with the need of companies to acquire efficient and cost-saving solutions have led to the need for optimization algorithms. Initially,

exact algorithms were proposed by researchers. Their advantage, which is optimally solving the VRP, is accompanied by a significant constrain; the limited number of customers that can be handled and the increased computation time needed, especially when customers exceed 100. This limitation is restrictive, and therefore these algorithms are not integrated into software packages. The disadvantages of exact algorithms resulted in researchers proposing heuristics algorithms that offer good quality solutions that are not optimal in most cases in limited computation time. Finally, researchers developed metaheuristic algorithms that, in most cases, offer the best trade-off between efficiency of solutions and computation time.

In the current thesis, multiple metaheuristic algorithms are studied, developed, and proposed to solve the VRP variants that are mentioned above and correspond to those that logistics companies most commonly address on freight distribution. An Evolutionary Algorithm (EA) and two Local Search (LS) metaheuristics are developed. These algorithms address either separately or simultaneously some of the proposed VRP variants. More precisely, the developed EA addresses the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickups and Deliveries and with Time Windows (VRPSPDTW). The algorithm is also applied in cases with electric vehicles with a limited driving range, affecting distribution. The novelty in this solution method is related to the applied crossover operator and the fact that the problem is addressed as multiobjective for the first time. In multiobjective optimization, two or more conflicting objectives exist and need to be optimized, which in the current research are (i) the number of vehicles needed for executing the routes, and (ii) the total traveled distance.

Additionally, the first LS algorithm, a Large Neighborhood Search (LNS) metaheuristic, addresses the VRPTW as a multiobjective. This is the first time a multiobjective LNS algorithm is proposed in the specific problem, offering high-quality results. Finally, the second developed LS metaheuristic is an Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS) metaheuristic that addresses the Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickups and Deliveries and with Time Windows (HVRPSPDTW), which means that the three VRP variants are considered simultaneously. The ALNS algorithm is also applied, after some modifications, in the Collaborative VRP to estimate the economic and environmental benefits from the cooperation of distribution companies. In the context of studying VRP variants and addressing them through optimization algorithms, their mathematical model was formulated, as it is a vital part of efficiently addressing the problem and setting the right variables and constraints.

Finally, the three algorithms have been developed in the Python programming language as libraries containing the necessary functions for solving the VRP. The algorithms are tested in multiple datasets of the literature to ensure their efficiency and ability to be integrated into a cloud routing system. The proposed system is developed in cooperation with a software development company that is responsible for the user interface part, as well as the connection of the cloud system with its individual parts of the system (such as online maps and the database). Additionally, the requirements of the system regarding the master data, as well as its functionalities have been defined jointly.

On the other hand, the core of the system, which is the algorithms that are implemented, have been developed exclusively by me, and configured to serve the need of the software

development company. Since all of the proposed algorithms offer high-quality results, they are all stored in the software development company's server, so that to be accessible by the cloud routing system through the appropriate requests. While the system has the ability to access any of the proposed algorithms, in its current form, the system receives the plan of routes that is extracted by the ALNS algorithm, covering multiple freight distribution cases. The system that handles and addresses multiple variables and constraints needs to be fed with the correct data to offer efficient routes and deliveries. Therefore, it exploits advanced technologies that can ensure the quality and accuracy of data. Online maps are exploited concerning the geocoding procedure and the data related to the distance and the travel time between order points.

The benefits of using such a routing system provided through the cloud, and thus no installation of the system is required on each company's computers, are many and are not limited only to the financial aspect. Besides eliminating installation and maintenance costs, the users can extract efficient and high accuracy plans that are visualized on online maps, modify the proposed routes and schedules, and execute rerouting strategies after the distribution process has started. In addition to these functionalities, when fed with real-time data from online maps, the system can handle the dynamic nature of the problem and address unexpected events that are occurred after the plan of routes have begun. Specifically, data may change during the route execution, affecting the distribution process. All the technologies mentioned above and system functionalities can significantly enhance logistics companies' efforts and decision-makers before and after the distribution process started.

Concluding, the research focuses on multiple aspects, starting with the study of the above-mentioned VRP variants which are considered either solely or combined, along with their mathematical formulation. In addition, the presented thesis proposes and develops optimization algorithms that address these distribution cases and are tested in both datasets of the literature and in real-life cases in order to evaluate the ability of the algorithms to be implemented in a routing system. The last part of the research concerns the ability of algorithms to be suitable for integration into a cloud routing system, as well as their connection with technologies that are necessary for system development.