



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΙΔΗΡΟΔΡΟΜΙΚΗΣ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

**ΕΞΥΠΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΙΚΩΝ
ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΜΕ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΧΩΡΙΑΝΟΠΟΥΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ
cv16502

Επιβλέπων:

Γκιωτσαλίτης Κωνσταντίνος, Επίκουρος καθηγητής

Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, ΕΜΠ

Αθήνα, 21/03/2025



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING
DEPT. OF TRANSPORTATION PLANNING AND ENGINEERING
RAILWAYS AND TRANSPORT LABORATORY

DIPLOMA THESIS

THESIS TITLE

Smart Charging of Electric Vehicles in Freight Transport with Integration of Renewable Energy Sources

Chorianopoulos Ioannis
cv16502

Supervisor:
Gkiotsalitis Konstantinos, Assistant Professor

Dept. of Transportation Planning and Engineering, School of Civil Engineering, NTUA

Athens, 21/03/2025

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Γκιοτσαλίτη Κωνσταντίνο για την πολύτιμη καθοδήγηση, την υποστήριξη και τις εύστοχες συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Η καθοδήγησή του αποτέλεσε θεμέλιο λίθο για την επιτυχή ολοκλήρωση αυτής της μελέτης.

Επίσης οφείλω να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στους συναδέλφους μου, η συμβολή των οποίων υπήρξε απαραίτητη για την επιτυχή διεξαγωγή της έρευνας

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου για τη διαρκή τους στήριξη, την υπομονή και την ενθάρρυνσή τους σε κάθε στάδιο αυτής της διαδρομής.

ABSTRACT

To address the growing environmental concerns, reduce carbon dioxide emissions, and improve energy efficiency, electric freight vehicles (EFVs) offer a sustainable environmental and economic alternative to conventional fossil fuel trucks. However, the challenges associated with the adoption of electric trucks include battery range limitations, operational costs, and potential grid failures under high demand conditions. This study explores the integration of renewable energy sources into the charging process while proposing a linear programming optimization model aimed at minimizing the total cost. Finally, the reliability of the model is evaluated in small-scale networks, and a sensitivity analysis is conducted to examine the influence of key parameters and their variations on the optimal solution.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Για την αντιμετώπιση των αυξανόμενων περιβαλλοντικών ανησυχιών, τη μείωση των εκπομπών αερίων διοξειδίου του άνθρακα και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, τα ηλεκτρικά εμπορευματικά οχήματα (EFV) αποτελούν μια βιώσιμη περιβαλλοντικά και οικονομικά, εναλλακτική λύση στα παραδοσιακά φορτηγά ορυκτών καυσίμων. Ωστόσο, οι προκλήσεις που παρουσιάζονται στη χρήση των ηλεκτρικών φορτηγών, αφορούν την ανεξαρτησία της μπαταρίας του οχήματος, τα λειτουργικά κόστη, καθώς και τυχόν περιστατικά κατάρρευσης του δικτύου σε συνθήκες μεγάλης ζήτησης. Στην παρούσα εργασία, μελετάται η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην διαδικασία φόρτισης, ενώ προτείνεται ένα μοντέλο βελτιστοποίησης γραμμικού προγραμματισμού, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους. Τέλος, εξετάζεται η αξιοπιστία του μοντέλου σε δίκτυα μικρής κλίμακας ενώ πραγματοποιείται και ανάλυση ευαισθησίας για να εξεταστεί η επιρροή κάποιων παραμέτρων και η μεταβολές τους, στη βέλτιστη λύση.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

.....	1
.....	2
1. Εισαγωγή	8
2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	11
2.1.Γενικά	11
2.2.Βιβλιογραφική Αναδρομή	19
2.2.1. Έξυπνη Φόρτιση με Ενσωμάτωση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.	19
2.2.2. Πρόβλημα Δρομολόγησης	24
3. Μεθοδολογία	31
4. Υπολογιστικά Πειράματα	38
4.1.Toy Network	38
4.2. Αριθμητικά Αποτελέσματα	40
4.3. Ανάλυση Ευαισθησίας	45
5. Επίλογος	46
Βιβλιογραφία	48
Appendix	50

Τίτλος Διπλωματικής Εργασίας

Όνομα Επώνυμο : Ιωάννης Χωριανόπουλος

Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τομέας Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής, Εργαστήριο Σιδηροδρομικής και Μεταφορών, Ηρώων Πολυτεχνείου 5, 15773 Αθήνα, Ελλάδα

Σύνοψη

Ο κύριος σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην διαδικασία φόρτισης, ενώ προτείνεται ένα μοντέλο βελτιστοποίησης γραμμικού προγραμματισμού, με σκοπό την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους. Επίσης λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως η ζήτηση, η διαθεσιμότητα ενέργειας προερχόμενη από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, καθώς και η τιμή ηλεκτρικής ενέργειας . Για το λόγο αυτό δημιουργείται ένα μαθηματικό μοντέλο, στο οποίο υπάρχουν προϋποθέσεις που πρέπει να τηρούνται και να εφαρμόζονται για την λειτουργία του σκοπού αυτού.

1. Εισαγωγή

Οι μεταφορές αποτελούν έναν από τους πιο σημαντικούς πυλώνες της κοινωνίας, συμβάλλοντας καθοριστικά σε τομείς όπως αυτός της οικονομίας και του περιβάλλοντος. Καθορίζουν τις τάσεις στις σύγχρονες κοινωνίες συμβάλλοντας στη διαμόρφωση του τρόπου ζωής. Από την εποχή των αμαξών και των ατμομηχανών μέχρι την εξέλιξη των κινητήρων εσωτερικής καύσης στα συμβατικά οχήματα μεταφορές στοχεύουν στην βελτίωση της καθημερινότητας και της ποιότητας ζωής του ανθρώπου. Σημαντικό βήμα στην εξέλιξη των σύγχρονων μεταφορών αποτελεί η ηλεκτροκίνηση. Η ηλεκτροκίνηση θεωρείται ως σημαντική επανάσταση στον τομέα των μετακινήσεων, λαμβάνοντας υπόψη και ζητήματα ενέργειας και περιβάλλοντος. Η μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε κινητική, αποτελεί μια πιο βιώσιμη και ενεργειακά φιλική καινοτομία, ενώ συμβάλλει στην μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Σήμερα, έχει καταγραφεί ότι το μεγαλύτερο ποσοστό ρύπων προέρχεται από τον τομέα των μεταφορών, ενώ ένα αρκετά μεγάλο ποσοστό προέρχεται συγκεκριμένα από τον τομέα των εμπορευματικών μεταφορών. Συνεπώς, η ηλεκτροκίνηση αποτελεί μια από τις πιο δημοφιλής πρακτικές παγκοσμίως, που συμβάλλει στην ενεργειακή μετάβαση, καθιστώντας την ως μια περιβαλλοντικά πιο φιλική εναλλακτική. Δεδομένου ότι στα μεγάλα αστικά κέντρα καταγράφονται σοβαρά προβλήματα στη σύσταση του αέρα κυρίως λόγω των εκπομπών επιβλαβών αερίων και της ύπαρξης μικρό-σωματιδίων στην ατμόσφαιρα, εντείνεται το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής και του φαινομένου του θερμοκηπίου. Ωστόσο, τα ηλεκτρικά οχήματα παρουσιάζουν και κάποιες σημαντικές προκλήσεις, που ενισχύουν την αβεβαιότητα και τον προβληματισμό ως προς την μετατροπή των συμβατικών οχημάτων. Η ενσωμάτωση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας όπως η ηλιακή και η αιολική, στην διαδικασία φόρτισης, συμβάλλουν καθοριστικά στην αποσυμφόρηση του δικτύου, στην υιοθέτηση πιο πράσινων πρακτικών και στην μείωση του κόστους. Σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, η ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση του κόστους φόρτισης δεδομένου ότι το τελευταίο είναι συχνά χαμηλότερο από το κόστος βενζίνης ή πετρελαίου.

Η έξυπνη φόρτιση με χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) αντιπροσωπεύει την εξέλιξη της φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Αποτελεί ένα έξυπνο σύστημα που προσαρμόζει τη φόρτιση βάσει της παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ενώ επιτρέπει στον ιδιοκτήτη του σταθμού φόρτισης να διαχειρίζεται, να παρακολουθεί και να περιορίζει τη χρήση των συσκευών του για βελτιστοποίηση διανομής ενέργειας.

Η πρόοδος που έχει σημειώσει η ηλεκτροκίνηση μέσω των ΑΠΕ τα τελευταία χρόνια είναι αρκετά εντυπωσιακή ωστόσο, υπάρχουν και προκλήσεις που πρέπει να λυθούν. Ένα βασικό ζήτημα είναι η βέλτιστη οργάνωση της υποδομής φόρτισης έτσι ώστε το δίκτυο διαμονής να λειτουργεί με ασφάλεια και σταθερότητα. Σε ορισμένες περιοχές η διασπορά των φορτιστών είναι ανεπαρκής, κάτι που δυσκολεύει την φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων. Επιπλέον, χρειάζεται να βελτιωθούν οι χρόνοι φόρτισης, ειδικότερα όταν αναφερόμαστε σε εμπορευματικά οχήματα, δεδομένου ότι οι μεγάλοι χρόνοι φόρτισης συμβάλλουν στην αύξηση του συνολικού κόστους. Η φόρτιση ενός ηλεκτρικού οχήματος χρειάζεται αρκετό

χρόνο γεγονός που μπορεί να δημιουργήσει αναμονή στους φορτιστές. Ένα άλλο ζήτημα είναι η αύξηση της ενεργειακής κατανάλωσης. Τα ηλεκτρικά οχήματα απαιτούν μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας γεγονός που αυξάνει την ζήτηση ενέργειας ειδικά όταν γίνεται ταυτόχρονη φόρτιση από πολλούς χρήστες. Τέλος το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης των φορτιστών είναι μια ακόμα πρόκληση που απαιτεί τη διάθεση σημαντικών κεφαλαίων .

Η δυνατότητα ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στις υπάρχουσες υποδομές θα ελαττώσει την συμφόρηση στο δίκτυο και θα μειώσει τη συνεχή εξάρτηση από αυτό.

Παγκοσμίως, οι πωλήσεις των ηλεκτρικών οχημάτων έχουν αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια. Το 2021, διπλασιάστηκαν σε σχέση με το προηγούμενο έτος, φτάνοντας ένα σημαντικό ορόσημο τα 6,6 εκατομμύρια αυτοκίνητα που πουλήθηκαν. Αυτή η αγορά κυριαρχείται από την Κίνα, που αντιπροσωπεύει το μεγαλύτερο ποσοστό των παγκόσμιων πωλήσεων ηλεκτρικών οχημάτων, αλλά από το 2020, η αύξηση των πωλήσεων στην Ευρώπη γίνεται επίσης σημαντική. Επιπλέον, 2 εκατομμύρια ηλεκτρικά αυτοκίνητα πουλήθηκαν στην Ευρώπη το πρώτο τρίμηνο του 2022, μια αύξηση περίπου 75% από την ίδια περίοδο του 2021. Οι στατιστικές υποδεικνύουν ότι τα ηλεκτρικά οχήματα που πωλούνται παγκοσμίως θα αυξηθούν σχεδόν δέκα φορές μέχρι το 2030, φτάνοντας περίπου τα 19 εκατομμύρια , μεταφραζόμενα σε παγκόσμιο ποσοστό πάνω από 7% για όλα τα οχήματα. Επομένως, θα υπάρξει αύξηση 4% στη ζήτηση ενέργειας μέχρι το 2030 λόγω της αυξανόμενης παγκόσμιας τάσης των ηλεκτρικών οχημάτων από το 2010 έως το 2021. Καθώς τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα αυξάνονται, η αιολική και η ηλιακή ενέργεια συμμετέχουν ενεργά στις ταχύτερα αναπτυσσόμενες τεχνολογίες, που αναμένεται να καλύψουν περισσότερο από 35% της ζήτησης ηλεκτρισμού έως το 2050. Η πρόβλεψη για μηδενικές εκπομπές έως το 2050 προσφέρει αξιόπιστη και φθηνή ενεργειακή ασφάλεια, υποστηρίζοντας ισχυρή κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη και εξασφαλίζοντας την καθολική πρόσβαση στην ενέργεια. Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα μπορούν να λειτουργήσουν ως ανεξάρτητες καταναεμημένες πηγές ενέργειας για το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Εκτός από την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, μπορούν επίσης να υποστηρίξουν το δίκτυο παρέχοντας υπηρεσίες όπως μείωση της ζήτησης σε ώρες αιχμής, διαχείριση τάσης και συχνότητας. (Pranjal Barman, 2023)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1 Πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων (2020-2030)

(Pranjal Barman, 2023)

Στο συγκεκριμένο εισαγωγικό κεφάλαιο διαπιστώνεται η σημαντικότητα της έξυπνης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με χρήση ΑΠΕ. Σε συνέχεια αυτού, τα κεφάλαια της διπλωματικής εργασίας είναι πέντε και διαμορφώνονται ως εξής:

- Στο δεύτερο κεφάλαιο πραγματοποιείται ανασκόπηση στην ήδη υπάρχουσα βιβλιογραφία για τον εντοπισμό τυχόν κενών στο υπό μελέτη πρόβλημα.
- Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται το ζητούμενο πρόβλημα, ενώ αναλύεται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την δημιουργία του προτεινόμενου μοντέλου βελτιστοποίησης..
- Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα υπολογιστικά πειράματα, ώστε να ελεγχθεί η αξιοπιστία και η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου μοντέλου, ενώ πραγματοποιείται και μια ανάλυση ευαισθησίας με την μεταβολή κάποιων παραμέτρων και καταγράφεται η επίδραση αυτών στη βέλτιστη λύση.
- Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια σύνοψη της παρούσας εργασίας, καθώς και μια παράθεση των βασικών συμπερασμάτων που προκύπτουν.

2. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1.Γενικά

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) αποτελούν μια σημαντική και κρίσιμη κατηγορία ενέργειας που αναμένεται να διαμορφώσει το μέλλον της ενεργειακής αειφορίας και της προστασίας του περιβάλλοντος. Οι ΑΠΕ προσφέρουν μια πολύτιμη λύση στην ανάγκη για ενέργεια, ενώ ταυτόχρονα μειώνουν τον αντίκτυπο της ανθρώπινης δραστηριότητας στον πλανήτη. Οι βασικές μορφές των ΑΠΕ είναι η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια, η υδροηλεκτρική ενέργεια, η βιομάζα και η γεωθερμική ενέργεια. Όλες αυτές οι πηγές ενέργειας έχουν πολλαπλές χρήσεις και εκτείνονται σε όλους τους τομείς της ζωής μας. Η ηλιακή ενέργεια αποτελεί μια από τις πλέον διαδεδομένες ΑΠΕ και έχει εφαρμογές σε πολλούς τομείς. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ αξιοποιούνται για τη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική ενέργεια και εφαρμόζονται σε τομείς όπως η ηλιακή ηλεκτροπαραγωγή, η φόρτιση φορητών ηλεκτρονικών συσκευών καθώς και σε συστήματα θέρμανσης. Η αιολική ενέργεια που προέρχεται από την κίνηση του αέρα μέσω των αιολικών σταθμών παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με τη χρήση ανεμογεννητριών. Αυτή η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται συνήθως για την τροφοδοσία σπιτιών, επιχειρήσεων και οργανισμών. Η υδροηλεκτρική ενέργεια αναφέρεται στη χρήση της ενέργειας που παράγεται από την κίνηση του νερού, όπως ποτάμια, λίμνες ή ωκεανοί. Αντίστοιχα όπως η αιολική ενέργεια έτσι και η υδροηλεκτρική παράγει μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται στην τροφοδοσία σπιτιών και βιομηχανικών μονάδων. Η βιομάζα που αποτελείται από φυτικά -δασικά υπολείμματα (καυσόξυλα, κλαδοδέματα, άχυρα, πριονίδια) και ζωικά απόβλητα (κοπριά, άχρηστα αλιεύματα) χρησιμοποιείται για την παραγωγή βιοενέργειας. Αυτή η ενέργεια χρησιμοποιείται για τη θέρμανση, τον φωτισμό και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και για την παραγωγή βιοαερίου. Τέλος η γεωθερμία είναι η ενέργεια που παράγεται από τη θερμότητα που προέρχεται από το εσωτερικό της Γης και χρησιμοποιείται συνήθως για θέρμανση αλλά και ψύξη κτηρίων. (op.europa.eu, χ.χ.)

Η εξέλιξη της τεχνολογίας φόρτισης είναι ουσιαστική για την ευρύτερη υιοθέτηση των ηλεκτρικών οχημάτων. Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες φόρτισης που εξελίσσονται συνεχώς για να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα και την ταχύτητα της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων.

Η πιο διαδεδομένη και ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (ΗΟ) είναι η **Αγώγιμη Φόρτιση**. Πρόκειται για τη φόρτιση μέσω φυσικής σύνδεσης (καλωδίου) μεταξύ του οχήματος και του σταθμού φόρτισης. Η αγώγιμη φόρτιση προσφέρει

αρκετά πλεονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένης της εύκολης χρήσης, της υψηλής αποδοτικότητας και του χαμηλού κόστους υλοποίησης. Επιπλέον, η αγωγή φόρτιση έχει κατηγοριοποιηθεί περαιτέρω σε 4 κατηγορίες ανάλογα με την ταχύτητα φόρτισης .

- **Αργή Φόρτιση.** Η αργή φόρτιση, γνωστή και ως φόρτιση κανονικής ισχύος, πραγματοποιείται μέσω μονοφασικής παροχής εναλλασσόμενου ρεύματος με ονομαστική ισχύ μικρότερη από 3.7 kW. Ο χρόνος που απαιτείται για την πλήρη φόρτιση ενός ηλεκτρικού οχήματος είναι μεγάλος και μπορεί να ξεπεράσει τις 8 ώρες. Λόγω της μεγάλης διάρκειας φόρτισης, η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως σε ιδιωτικούς χώρους στάθμευσης, όπου υπάρχει μακροχρόνια στάθμευση των οχημάτων και δυνατότητα φόρτισης όλων των τύπων μπαταριών. Η αργή φόρτιση συνήθως χρησιμοποιείται σε ιδιωτικούς χώρους στάθμευσης, όπου η φόρτιση μπορεί να γίνει απευθείας από το οικιακό ηλεκτρικό δίκτυο χωρίς πρόσθετες εγκαταστάσεις, αρκεί να υπάρχει ασφαλής παροχή με γείωση. Επίσης μπορεί αξιοποιηθεί ταυτόχρονα από πολλούς χρήστες, όπου στην περίπτωση αυτή είναι απαραίτητη η εγκατάσταση σταθμού φόρτισης με σύστημα που θα αναγνωρίζει ποιος από τους χρήστες φορτίζει το αυτοκίνητό του.
- **Γρήγορη Φόρτιση.** Η γρήγορη φόρτιση ή φόρτιση Μέσης ισχύος, με μονοφασική παροχή έχει ονομαστική ισχύ από 3.7 kW έως 22 kW και δυνατότητα φόρτισης μπαταριών Νικελίου, Λιθίου. Η περίπτωση αυτή έχει εφαρμογή σε ιδιωτικές περιοχές όπου όμως επιτρέπεται η δημόσια πρόσβαση. Συνήθως χρησιμοποιείται σε μεγάλους χώρους στάθμευσης, όπου τα οχήματα αναμένεται να είναι σταθμευμένα για σχετικά μακρύ χρονικό διάστημα (2-3 ώρες, όπως π.χ. εμπορικά καταστήματα, κινηματογράφοι) ή και για σύντομο σχετικά χρόνο (όπως πχ. εστιατόρια γρήγορου φαγητού ή σουπερμάρκετ).
- **Ταχεία και «Υπερταχεία» φόρτιση.** Η ταχεία φόρτιση ή φόρτιση Υψηλής ισχύος, με τριφασική παροχή έχει ονομαστική ισχύ μεγαλύτερη από 22kW. Ενώ η «Υπερταχεία» φόρτιση με DC διασύνδεση έχει ισχύ μεγαλύτερη των 40kW. Και οι 2 κατηγορίες αφορούν ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρίες Λιθίου και έχουν εφαρμογή σε δημόσιες περιοχές όπου επιτρέπεται η δημόσια πρόσβαση. Χρησιμοποιείται σε τοποθεσίες εταιριών ενοικίασης ηλεκτρικών οχημάτων και σταθμών φόρτισης όπου είναι εγκατεστημένοι σε δημόσιους δρόμους και εξυπηρετούν τους οδηγούς ηλεκτρικών οχημάτων που ζουν σε πυκνό-κατοικημένες περιοχές. Επίσης αναμένεται να εγκατασταθούν σε δρόμους ταχείας κυκλοφορίας ώστε να αυξήσουν την αυτονομία των οχημάτων και να καταστήσουν δυνατή τη μετακίνηση τους για μεγάλες αποστάσεις.

Τρόπος Φόρτισης	Ισχύς(Kw)	Σύνδεση Δικτύου	Τοποθεσία Εφαρμογής
Αργή Φόρτισης	<3,2	AC	Οικία
Γρήγορη Φόρτιση	7.2	AC	Ιδιωτική ή Δημόσια
Ταχεία Φόρτιση	42	AC	Δημόσια
"Υπερ-Ταχεία" Φόρτιση	>40	DC	Δημόσια

*Πίνακας 1 Κατηγορίες αγώγιμης φόρτισης
(Κολιός, 2019)*

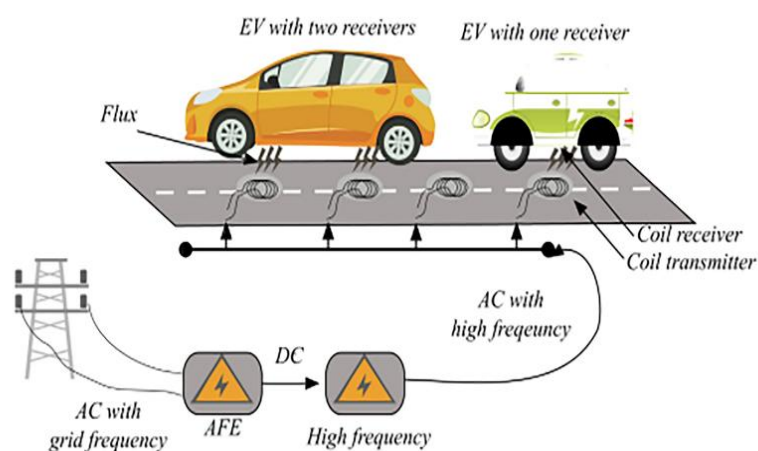
Αργή Φόρτισης	Γρήγορη Φόρτιση	Ταχεία Φόρτιση	"Υπερ-Ταχεία" Φόρτιση
			

Εικόνα 1 Είδη Φορτιστών (Κολιός, 2019)

Μια διαφορετική τεχνολογία που φιλοδοξεί να αλλάξει ριζικά τον τρόπο με τον οποίο φορτίζονται τα ηλεκτρικά οχήματα είναι η **Ασύρματη Φόρτιση**. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι ασύρματης φόρτισης: η στατική και η δυναμική. Η στατική φόρτιση λαμβάνει χώρα όταν το ηλεκτρικό όχημα είναι σταθμευμένο σε ένα δημόσιο ή ιδιωτικό πάρκινγκ. Αντίθετα, η δυναμική φόρτιση συμβαίνει κατά τη διάρκεια της κίνησης του οχήματος, ενώ βρίσκεται πάνω σε τμήματα του δρόμου. Η πολλά υποσχόμενη τεχνολογία ασύρματης φόρτισης βασίζεται στην επαγωγική μεταφορά ισχύος (Inductive Power Transfer - IPT). Τα συστήματα που φορτίζουν με τον τρόπο αυτό μεταφέρουν ισχύ χρησιμοποιώντας την σύμπλεξη ενός πρωτεύοντος πηνίου, το οποίο βρίσκεται στο τμήμα δρόμου φόρτισης και ενός

δευτερεύοντος από την πλευρά του οχήματος χρησιμοποιώντας έναν μετασχηματιστή. Αυτή η τεχνολογία επιτρέπει τη μεταφορά υψηλής ισχύος και παρουσιάζει υψηλή αποδοτικότητα, ενώ είναι αξιόπιστη και εύκολη στη συντήρηση.

Παρόμοια με την στατική τεχνολογία, είναι και η δυναμική φόρτιση αλλά σε αυτήν την περίπτωση επιτρέπει τη φόρτιση των κινούμενων οχημάτων. Αυτή η μέθοδος απαιτεί την εγκατάσταση υποδομής φόρτισης στην οδική επιφάνεια ή πάνω από αυτήν, επιτρέποντας την ασύρματη μεταφορά ενέργειας στο ασύρματο δέκτη ενέργειας του οχήματος καθώς κινείται. Τέλος μπορεί να εφαρμοστεί σε έξυπνους δρόμους, μειώνοντας την ανάγκη για μεγάλης χωρητικότητας μπαταρίες (Latha, 2024)



Εικόνα 2 Λειτουργία ασύρματης φόρτισης (Latha, 2024)

Υπάρχουν και τρεις κατηγορίες ανταλλαγής ενέργειας, οι οποίες περιλαμβάνουν, είτε την ανταλλαγή ενέργειας ανάμεσα σε ένα όχημα και το σύστημα ενέργειας είτε ανταλλαγή ενέργειας ανάμεσα σε δύο οχήματα.

- **Ανταλλαγή μπαταρίας (Battery swapping).** Αυτή είναι μια εναλλακτική τεχνολογία που επιτρέπει στους χρήστες να αντικαταστήσουν την εξαντλημένη μπαταρία του ηλεκτρικού οχήματος τους με μια πλήρως φορτισμένη, είτε είναι καινούργια είτε επαναφορτισμένη. Ωστόσο, αυτή η τεχνολογία μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση του χρόνου αναμονής, καθώς απαιτείται πρόσβαση σε έναν σταθμό ανταλλαγής μπαταρίας και χρόνος για να πραγματοποιηθεί η αντικατάσταση της μπαταρίας. Ένας Σταθμός Ανταλλαγής Μπαταρίας μπορεί να επιβραδύνει τη διαδικασία φόρτισης, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Επιπλέον, μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που παράγονται από το τοπικό

δίκτυο, μπορούν να ενσωματωθούν στο σύστημα αυτό.

- **Vehicle to Grid - V2G.** Η τεχνολογία Vehicle to Grid (V2G) αναφέρεται στη διαδικασία μεταφοράς ενέργειας από ηλεκτρικά οχήματα προς τα ηλεκτρικά δίκτυα. Σε αυτό το σύστημα, τα ηλεκτρικά οχήματα που είναι σταθμευμένα και συνδεδεμένα στο ηλεκτρικό δίκτυο μπορούν να παρέχουν ενέργεια πίσω στο δίκτυο κατά τις περιόδους όπου η ζήτηση ενέργειας είναι υψηλή. Αυτό γίνεται μέσω της εκφόρτισης ενέργειας από τα οχήματα προς τα ηλεκτρικά δίκτυα, συνεισφέροντας έτσι στην κάλυψη της ζήτησης ενέργειας του δικτύου

- **Vehicle to Vehicle.** Η συγκεκριμένη αλληλεπίδραση, βρίσκεται ακόμα σε θεωρητικό στάδιο, αλλά δεν έχει μεγάλες απαιτήσεις για να πραγματοποιηθεί. Ένα ρεαλιστικό σενάριο είναι αυτή η αλληλεπίδραση να πραγματοποιείται εντός των πλαισίων ενός σταθμού φόρτισης, ενδεχομένως χρησιμοποιώντας τις ίδιες υποδομές που απαιτούνται για το V2G. Παρότι η μεταφορά ενέργειας ανάμεσα σε δύο οχήματα δεν ανήκει αυστηρά στο δίκτυο ηλεκτροδότησης, αναμένεται πως θα λειτουργεί σε συνδυασμό με το δίκτυο υπό ένα ενιαίο σύστημα διαχείρισης, οπότε μπορεί να θεωρηθεί ως συστατικό ενός έξυπνου δικτύου. (R. Sasirega, 2025) (Shujuan Wang, 2022)

Σημαντικά άλματα βελτίωσης έχει δείξει και η τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας. Η επιλογή της μπαταρίας στα ηλεκτρικά οχήματα είναι μια πολύπλοκη διαδικασία, καθώς απαιτεί συνεχή ισορροπία ανάμεσα σε πολλά διαφορετικά χαρακτηριστικά. Πρέπει να ληφθεί υπόψη η υψηλή απόδοση της μπαταρίας, η δυνατότητά της να αποθηκεύει αρκετή ενέργεια, το χαμηλό βάρος της, η μικρή διάστασή της, η μεγάλη διάρκεια ζωής της και το χαμηλό κόστος παραγωγής της. Κάθε είδους ηλεκτρικό όχημα απαιτεί ένα συγκεκριμένο τύπο μπαταρίας που να ανταποκρίνεται στις ανάγκες του. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε σύστημα κίνησης υπάρχει μια ιδανική τεχνολογία μπαταρίας. Ωστόσο, πέραν από τις τεχνικές προδιαγραφές, η τιμή της μπαταρίας αποτελεί τον βασικό παράγοντα που επηρεάζει την αποδοχή της τεχνολογίας από την αγορά. Οι μπαταρίες αποτελούν συχνά το πιο δαπανηρό κομμάτι ενός ηλεκτρικού οχήματος. Επομένως, είναι ζωτικής σημασίας να επιλεγούν κατάλληλες τεχνολογίες μπαταριών που να προσφέρουν υψηλή αξιοπιστία, μεγάλη διάρκεια ζωής και ασφάλεια, ενώ παράλληλα να είναι οικονομικά βιώσιμες για τον καταναλωτή.

Τεχνολογίες μπαταριών σε εφαρμογές ηλεκτροκίνητων οχημάτων

1. Μολύβδου οξέως (Lead-acid)

Οι μπαταρίες μολύβδου είναι η πιο οικονομική επιλογή όταν πρόκειται για το κόστος παραγωγής. Ωστόσο, έχουν χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα, οπότε καλύπτουν μικρές αποστάσεις και δεν είναι κατάλληλες για βαριά ή μακροχρόνια χρήση. Είναι κατάλληλες για περιβάλλοντα όπου το βάρος και η απόσταση λειτουργίας δεν είναι προβλήματα, αλλά δεν είναι κατάλληλες για δυναμικές φορτίσεις, όπως κατά την ανάκτηση ενέργειας κατά την πέδηση. Εντούτοις, είναι ασφαλείς και εύκολα ανακυκλώσιμες λόγω του χαμηλού κόστους υλικών τους.

2. Οι Νικελίου καδμίου (NiCd)

Οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου έχουν ελαφρώς υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από τις μπαταρίες μολύβδου οξέος και πιο ανθεκτική πυκνότητα ισχύος. Παρόλα αυτά, η τιμή τους είναι πολύ υψηλότερη. Αυτοί οι τύποι μπαταριών έχουν εξελιχθεί αρκετά και έχουν ωριμάσει, με αποτέλεσμα να είναι εφικτή η χρήση τους σε ηλεκτρικά οχήματα, αν και η τιμή τους εξακολουθεί να είναι αρκετά υψηλή.

3. Οι Νικελίου/υδριδίου μετάλλου (NiMH)

Οι μπαταρίες νικελίου/υδριδίου μετάλλου (NiMH) είναι μια βελτίωση των μπαταριών νικελίου-καδμίου, με παρόμοια τάση και καμπύλες φόρτισης και εκφόρτισης. Σε αντίθεση με τις μπαταρίες νικελίου-καδμίου, μπορούν να παράγουν σχεδόν διπλάσια ενεργειακή πυκνότητα, ενώ ξεχωρίζουν για την υψηλή πυκνότητα ισχύος (πάνω από 1000W/kg) και τον επαρκή χρόνο ζωής. Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν τις μπαταρίες αυτές ιδανικές για υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα.

4. Ιόντων Λιθίου (Li-ION)

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου αναφέρονται σε μια ποικιλία συνδυασμών μετάλλων που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία επαναφορτιζόμενων μπαταριών. Τα χαρακτηριστικά τους, όπως η ισχύς, ο χρόνος ζωής, η απόδοση σε χαμηλές ή υψηλές θερμοκρασίες και η ασφάλεια, εξαρτώνται από τον συνδυασμό των υλικών που χρησιμοποιούνται. Αυτή η τεχνολογία μπαταριών επιτυγχάνει τη υψηλότερη ειδική ενέργεια και πυκνότητα ισχύος σε σύγκριση με όλες τις άλλες διαθέσιμες επαναφορτιζόμενες μπαταρίες στην αγορά. Αυτό οδηγεί σε χαμηλό βάρος και όγκο των μπαταριών. Παρά τις αμφιλεγόμενες συζητήσεις σχετικά με τη διαθεσιμότητα του λιθίου, υπάρχει αρκετή ποσότητα διαθέσιμου λιθίου για να εξοπλίσει όλα τα οχήματα στον κόσμο με μεγάλες μπαταρίες ιόντων λιθίου, σύμφωνα με τις πληροφορίες που διαθέτουμε μέχρι στιγμής.

Τύπος Μπαταρίας	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Εφαρμογές
Μολύβδου-οξέος (Lead-Acid)	Χαμηλό κόστος κατασκευής	Χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα	Χρησιμοποιούνται κυρίως σε συμβατικά οχήματα ως μπαταρίες
	Απλή τεχνολογία με υψηλή αξιοπιστία	Μεγάλο βάρος και περιορισμένη αυτονομία	εκκίνηση, σε μικρά ηλεκτρικά οχήματα, και σε ηλεκτρικά ποδήλατα
	Ευκολία ανακύκλωσης	Μικρή διάρκεια ζωής	
Νικελίου-καδμίου (NiCd)	Ικανοποιητική απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες	Υψηλό κόστος κατασκευής	Παραμένουν σε εφαρμογές
	Υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από τις μπαταρίες μολύβδου	Τοξικά υλικά, περιορισμένη φιλικότητα προς το περιβάλλον	αερόναυπηγικής και βιομηχανικών οχημάτων
Νικελίου-υδριδίου μετάλλου (NiMH)	Υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από τις NiCd	Υψηλότερο κόστος από τις μπαταρίες μολύβδου	Χρησιμοποιούνται κυρίως σε υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (HEVs)
	Αυξημένη αντοχή στον χρόνο	Χαμηλότερη ενεργειακή πυκνότητα συγκριτικά με τις Li-Ion	Εφαρμογές σε βιομηχανικά και εφεδρικά ενεργειακά συστήματα
Ιόντων λιθίου (Li-Ion)	Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, επιτρέποντας μεγαλύτερη αυτονομία	Ακριβή τεχνολογία παραγωγής	Η κυρίαρχη τεχνολογία σε σύγχρονα ηλεκτρικά οχήματα (EVs), όπως Tesla
	Μικρότερο βάρος και όγκος σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες	Απαιτεί προσεκτική διαχείριση θερμοκρασίας για την αποφυγή υπερθέρμανσης	Χρήση σε ηλεκτρικά λεωφορεία, φορτηγά και μοτοποδήλατα
	Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και υψηλή απόδοση σε ακραίες θερμοκρασίες	Περιορισμένοι φυσικοί πόροι για την παραγωγή λιθίου	Εφαρμογές σε αποθήκευση ενέργειας και ανανεώσιμες πηγές

Πίνακας 2 Χαρακτηριστικά μπαταριών

(Jianqiang Kang, 2014) (Ryutaka Yudhistira, 2022) (Κολιός, 2019)

Οι τεχνολογίες φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων και οι τεχνολογίες αποθήκευσης (μπαταρίες) συνδέονται στενά με τον τομέα των εμπορευματικών μεταφορών, επιφέροντας αλλαγές και βελτιώσεις που επηρεάζουν την αποδοτικότητα και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα της βιομηχανίας αυτής. Ένας από τους κύριους τρόπους με τους οποίους οι τεχνολογίες φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων συνδέονται με τις εμπορευματικές μεταφορές είναι μέσω της μετατροπής του στόλου συμβατικών οχημάτων και συγκεκριμένα φορτηγών σε ηλεκτρικά. Η αυξανόμενη χρήση ηλεκτρικών φορτηγών στα μεγάλα αστικά κέντρα έχει ενισχύσει την ανάγκη για εξελίξεις στις υποδομές φόρτισης-σταθμούς φόρτισης. Πόλεις σε όλο τον κόσμο επενδύουν σε φορτιστές που μπορούν να εξυπηρετήσουν την ταυτόχρονη φόρτιση πολλών οχημάτων.

Στον κλάδο των εμπορευματικών μεταφορών, όπου η έννοια των καθυστερήσεων είναι κρίσιμη και η αποδοτικότητα είναι βασική παράμετρος, η έξυπνη φόρτιση αναδεικνύεται καθοριστική για τη μετάβαση των συμβατικών στόλων φορτηγών σε ηλεκτρικά. Η έξυπνη φόρτιση δεν είναι απλώς μια τεχνολογικά εξελιγμένη λύση, αλλά αποτελεί μία ολοκληρωμένη προσέγγιση συσχετισμένη με την εξυπηρέτηση των αναγκών των σύγχρονων επιχειρήσεων. Βασίζεται σε προηγμένες τεχνολογίες φόρτισης και αποθήκευσης ενέργειας, καθώς και σε αναλύσεις δεδομένων που επιτρέπουν τη βέλτιστη χρήση της ενέργειας και τη μείωση του χρόνου φόρτισης.

2.2.Βιβλιογραφική Αναδρομή

2.2.1. Έξυπνη Φόρτιση με Ενσωμάτωση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Στη βιβλιογραφία έχει καταγραφεί από πολλές μελέτες ότι με την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε εγκαταστάσεις φόρτισης, όπως τα ηλιακά πάνελ ή οι μικρές ανεμογεννήτριες αντιμετωπίζουν ένα σύνολο προκλήσεων που σχετίζονται είτε με το κόστος (εγκατάσταση, φόρτιση - προσφορά ενέργειας), είτε με την ικανοποίηση του ισοζυγίου προσφοράς-ζήτησης, δηλαδή η παραγωγή ενέργειας πρέπει να ικανοποιεί τη ζήτηση για φόρτιση, ή την αβεβαιότητα που παρουσιάζουν αυτές οι εναλλακτικές μορφές παραγωγής ενέργειας.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, πολλοί ερευνητές ανέλυσαν και ανέπτυξαν μαθηματικά μοντέλα με στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους (λειτουργικά κόστη, κόστη φόρτισης, κόστη εγκατάστασης κλπ.)

Πιο συγκεκριμένα, ο (Ghazale Haddadian, 2016) αξιολογούν τον συντονισμό μεταξύ των ηλεκτρικών οχημάτων ως κατανεμημένων συσκευών αποθήκευσης ενέργειας και μεταβλητών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Συγκεκριμένα, η έρευνα εξετάζει πώς η ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων ως συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση των ανισορροπιών ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο. Η μελέτη αναγνωρίζει στρατηγικές για την μεγάλη κλίμακα ενσωμάτωσης των μεταβλητών πηγών χωρίς να υπονομεύεται η ασφάλεια της ηλεκτρικής υποδομής. Αβεβαιότητες στο ηλεκτρικό σύστημα σχετικά με το φορτίο, σφάλματα πρόβλεψης της αιολικής ενέργειας, καθώς και τυχαίες διακοπές παραγωγής και μετάδοσης λαμβάνονται υπόψη σε σενάρια τύπου Monte Carlo. Η στοχαστική βελτιστοποίηση του ωριαίου προγραμματισμού ενέργειας διατυπώνεται ως πρόβλημα ανάμεικτου ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού και χρησιμοποιείται ένας γενετικός αλγόριθμος για την επίλυση του προβλήματος, ο οποίος στοχεύει στην ελαχιστοποίηση των λειτουργικών δαπανών του ηλεκτρικού συστήματος. Η μελέτη εξετάζει επίσης τις επιπτώσεις αυτών των ενσωματώσεων στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα, την κοινωνική βιωσιμότητα και την οικονομική λειτουργία των ηλεκτρικών ενεργειακών συστημάτων. Επίσης, ο (Zhixiong Luo, 2020) επικεντρώνονται στην ελαχιστοποίηση των λειτουργικών δαπανών. Αρχικά, εξετάζουν την κοινή ανάπτυξη σταθμών φόρτισης και φωτοβολταϊκών ενεργειακών εγκαταστάσεων για ηλεκτρικά οχήματα (ΗΟ). Ο στόχος τους είναι να βελτιστοποιήσουν τη στρατηγική ανάπτυξης για να βελτιώσουν την ένταξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην υποδομή φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Διατυπώνουν το πρόβλημα ως μοντέλο μικτού-ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (MILP), λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως τη ζήτηση φόρτισης, την παραγωγή ενέργειας από τις εγκαταστάσεις φωτοβολταϊκών και τους περιορισμούς του δικτύου. Για την επίλυση αυτού του πολύπλοκου προβλήματος βελτιστοποίησης, προτείνουν μια προσέγγιση που βασίζεται σε γενετικούς αλγόριθμους. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης, δείχνουν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου στη μείωση τόσο των λειτουργικών δαπανών όσο και της περιβαλλοντικής επίδρασης, παρέχοντας επίσης ενδείξεις για τις βέλτιστες

τοποθεσίες και χωρητικότητες για την ανάπτυξη των σταθμών φόρτισης και των ηλιακών πάνελ για την υποστήριξη βιώσιμης υιοθέτησης ηλεκτρικών οχημάτων και τη σταθερότητα του δικτύου. Ο (C. Battistelli, 2012) επικεντρώνονται στην ελαχιστοποίηση των συνολικών λειτουργικών δαπανών της ζήτησης και προσφοράς, βελτιστοποιώντας τη διαχείριση ενέργειας εντός μικρών ηλεκτρικών ενεργειακών συστημάτων (SEES) με τη χρήση της τεχνολογίας Οχημάτων προς το Δίκτυο (Vehicle2Grid-V2G) και τη χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Η μελέτη τους λειτουργεί σε ρεαλιστικές συνθήκες. Προτείνουν ένα γραμμικό μοντέλο για να αξιολογήσουν τον ρόλο της τεχνολογίας V2G από τα ηλεκτρικά οχήματα (HO) στην υποστήριξη της διαχείρισης ενέργειας. Το συγκεντρωμένο μοντέλο κατασκευάζεται βασισμένο σε αρκετές υποθέσεις, συμπεριλαμβανομένων ομοιόμορφων μπαταριών με σταθερή απόδοση, αμελητέας απώλειας μπαταρίας και σταθερής χωρητικότητας. Επιλέγουν ομοιόμορφες μπαταρίες για να αποτρέψουν τον άμεσο επηρεασμό διαφορετικών τύπων μπαταριών ηλεκτρικού οχήματος στη συγκεντρωμένη χωρητικότητα των Ηλεκτρικών Οχημάτων HO. Το μοντέλο διαχείρισης ενέργειας δομείται ως γραμμικό πρόγραμμα και λύνεται χρησιμοποιώντας το CPLEX. Στη μελέτη τους, οι αριθμητικές προσομοιώσεις δείχνουν την αποτελεσματικότητα της τεχνολογίας V2G στη διαχείριση των ενεργειακών πόρων εντός ενός μικρού ηλεκτρικού ενεργειακού συστήματος SEE. Ωστόσο, αναγνωρίζουν ότι οι διαφορετικοί τύποι μπαταρίες HO.

Οι (Cesar Diaz-Londono, 2020) ασχολούνται με την ελαχιστοποίηση των λειτουργικών κοστών σε πραγματικό χρόνο. Επικεντρώνονται στην αντιμετώπιση της αβεβαιότητας που σχετίζεται με την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, όπως η ηλιακή ενέργεια, και προτείνουν στρατηγικές για τη μείωση αυτής της αβεβαιότητας. Αρχικά, ένας προγραμματιστής λαμβάνει αποφάσεις σχετικά με την ενέργεια που θα αγοράζεται από την αγορά Day-Ahead, λαμβάνοντας υπόψη προβλέψεις από την ανανεώσιμη πηγή και το πρόγραμμα φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Ένα αυτόματο (αναγκαστικό) μοντέλο βασισμένο σε αυτόματες παλινδρομήσεις που βασίζονται σε 5 χρόνια ιστορικών δεδομένων ακτινοβολίας ηλίου εφαρμόζεται για την πρόβλεψη της παραγωγής ενέργειας από την ηλιακή πηγή. Στη συνέχεια, σε πραγματικό χρόνο, υλοποιείται μια προβλεπτική στρατηγική ελέγχου για να ακολουθεί την προγραμματισμένη ισχύ από το δίκτυο, με σκοπό την ελαχιστοποίηση των λειτουργικών εξόδων. Αυτό επιτυγχάνεται με την αντιστάθμιση των διακυμάνσεων στην παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας, εκμεταλλευόμενοι την ευελιξία στη διαδικασία φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Η ανάλυση προσομοίωσης δείχνει την αποτελεσματικότητα αυτής της στρατηγικής στη διαχείριση της μεταβλητότητας των πηγών ανανεώσιμης ενέργειας, στη μείωση των αποκλίσεων μεταξύ του προγραμματισμού της προηγούμενης ημέρας (DA) και στην πραγματική κατανάλωση ενέργειας από το δίκτυο. Επιπλέον, άλλοι ερευνητές ασχολούνται με την βελτιστοποίηση των δαπανών επενδύσεων (κατασκευή και συντήρηση). Αυτός είναι ακριβώς ο στόχος του μοντέλου που δημιουργήθηκε από τον (Reza Sa'adati, 2021). όπου επικεντρώνεται στην κατανομή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Renewable Energy Sources- RESs) και των Σταθμών Γρήγορης Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων (Plug-In Electric Vehicles - PEV) εντός συνδεδεμένων δικτύων μεταφοράς και διανομής. Επικεντρώνονται κυρίως στην βελτιστοποίηση της τοποθέτησης των ΑΠΕ και των

σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων PEV για την ελαχιστοποίηση τόσο των ενεργειακών δαπανών όσο και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, παράλληλα με την εκπλήρωση των περιορισμών μεταφοράς και δικτύου. Διατυπώνουν το πρόβλημα ως ένα μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού ακέραιων (Mixed Integer Linear Programming-MILP), λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η ζήτηση ενέργειας, η χωρητικότητα του σταθμού φόρτισης και η συνδεσιμότητα του δικτύου. Για την επίλυση αυτού του πολύπλοκου προβλήματος βελτιστοποίησης, προτείνουν μια υβριδική μέθοδο λύσης που συνδυάζει γενετικούς αλγόριθμους και έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Μέσω αποτελεσμάτων προσομοίωσης, αποδεικνύεται η αποτελεσματικότητα της προσέγγισής τους στην επίτευξη σημαντικών εξοικονομήσεων κόστους, στη μείωση εκπομπών και στη βελτίωση της διαδικασίας ενσωμάτωσης της ανανεώσιμης ενέργειας στην υποδομή μεταφορών, υποστηρίζοντας έτσι τη βιώσιμη κινητικότητα και την ανθεκτικότητα του δικτύου. Από την άλλη πλευρά, οι (Md Abdul Quddus, 2019) παρουσιάζουν μια καινοτόμο προσέγγιση για το σχεδιασμό και τη διαχείριση των σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, λαμβάνοντας υπόψη αποφάσεις μακροπρόθεσμου σχεδιασμού, λογικής εκτέλεσης και ζήτησης ενέργειας εντός ενός προκαθορισμένου χρονικού πλαισίου. Για να αντιμετωπίσει αυτό την πρόκληση, προτείνει ένα διφασικό στοχαστικό μοντέλο MILP για την ελαχιστοποίηση των ετήσιων δαπανών κατασκευής και συντήρησης ενός σταθμού φόρτισης και άλλων αναμενόμενων δαπανών. Για να επιλυθεί το πρόβλημα, οι συγγραφείς χρησιμοποιούν μια συνδυασμένη μέθοδο της Μέσης Δειγματοληψίας με έναν Αλγόριθμο Προοδευτικής Αντιστάθμισης. Μέσω της εφαρμογής αυτού του μοντέλου, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η ζήτηση ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων ικανοποιείται κυρίως μέσω του δικτύου και της τεχνολογίας Vehicle-to-Grid (V2G) όταν το κόστος ενέργειας είναι χαμηλό και η ηλιακή ενέργεια δεν είναι διαθέσιμη.

Ο (Yujie Liu, 2023), (Kevin Mets, 2012), (Yifan Li, 2012) και (Sebastian Gottwalt, 2013) επικεντρώνονται στην ελαχιστοποίηση της θερμικής ενέργειας, δηλαδή την ελαχιστοποίηση της χρήσης της ενέργειας που προέρχεται από το δίκτυο. Αρχικά, ο (Yujie Liu, 2023) στοχεύει στη βελτιστοποίηση της διαχείρισης ενέργειας για ένα πράσινο σταθμό φόρτισης που ενσωματώνει φωτοβολταϊκά και ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές κατηγορίες ηλεκτρικών οχημάτων. Διατυπώνουν το πρόβλημα ως μαθηματικό μοντέλο χρησιμοποιώντας γραμμικό προγραμματισμό, με στόχο την ελαχιστοποίηση τόσο του λειτουργικού κόστους όσο και του περιβαλλοντικού αντικτύπου. Για να λύσουν αυτό το πολύπλοκο πρόβλημα βελτιστοποίησης, χρησιμοποιούν έναν αλγόριθμο Βελτιστοποίησης με Σμήνη Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization - PSO). Μέσω των αποτελεσμάτων προσομοίωσης, αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα της προσέγγισής τους στην επίτευξη σημαντικών εξοικονομήσεων κόστους και μείωση των εκπομπών άνθρακα σε σύγκριση με τις συμβατικές ρυθμίσεις των σταθμών φόρτισης, υπογραμμίζοντας τη σημασία των ταξινομήσεων των ηλεκτρικών οχημάτων στις στρατηγικές διαχείρισης της ενέργειας για τη βιώσιμη υποδομή φόρτισης. Επίσης, οι (Kevin Mets, 2012) και συνεργάτες επικεντρώνονται στη βελτιστοποίηση της ζήτησης για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων για να βελτιώσουν τη χρήση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Χρησιμοποιούν ένα αποκεντρωμένο αλγόριθμο Διαχείρισης της Ζήτησης (DSM) για να

συγχρονίσουν τη ζήτηση φόρτισης των ΗΟ με την προσφορά ανέμου, προκειμένου να μεγιστοποιήσουν τη χρήση ανανεώσιμης ενέργειας. Η προσέγγισή τους στοχεύει στην αντιστοίχιση της προσφοράς ενέργειας με την κατανάλωση εντός συγκεκριμένων χρονικών πλαισίων. Το σύστημα ενέργειας αποτελείται από κατόχους ηλεκτρικών οχημάτων και ένα συντονιστή, με τους κατόχους ΗΟ να προσαρμόζουν τη ζήτησή τους για να διατηρήσουν την ισορροπία. Η ανεπάρκεια της αντιστοίχισης της προσφοράς με τη ζήτηση έχει ως αποτέλεσμα κόστος ανισορροπίας, μετατρέποντας το αρχικό πρόβλημα της μέγιστης αξιοποίησης των ΑΠΕ σε ελαχιστοποίηση των κοστών ανισορροπίας, ένα πρόβλημα κυρτής βελτιστοποίησης. Εφαρμόζουν τη μέθοδο διπλής αποσύνθεσης για να λύσουν το πρόβλημά τους και για να επικυρώσουν την προσέγγισή τους, διεξάγουν μια περίπτωση μελέτης τεσσάρων εβδομάδων, όπου τα αποτελέσματα προσομοίωσης υποδεικνύουν ότι σε ιδανική περίπτωση θα μπορούσε να ικανοποιηθεί το 73% της ζήτησης ενέργειας. Ωστόσο, σε πρακτικές καταστάσεις χρησιμοποιώντας τον κατανεμημένο τους αλγόριθμο, μπορεί να προσφερθεί το 68% της ζήτησης ενέργειας, ενώ σε τυπικές επιχειρηματικές περιπτώσεις μόνο το 40% της ζήτησης ενέργειας μπορεί να ικανοποιηθεί.

Ο (Yifan Li, 2012) και άλλοι έχουν εξερευνήσει επίσης τον όρο της χρήσης των ηλεκτρικών οχημάτων ως αποθήκευση ενέργειας εντός του πλαισίου του Έξυπνου Δικτύου (ΕΔ) για να αλληλοεπιδράσουν με τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Λαμβάνουν υπόψη τις αβεβαιότητες που σχετίζονται με τις ΑΠΕ, τις τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας και τη ζήτηση των χρηστών στην ανάλυσή τους. Επιπλέον, λαμβάνουν υπόψη τους θερμικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, την αιολική ενέργεια ως τη μοναδική ανανεώσιμη πηγή και τις πετρελαιογεννήτριες. Τα ΗΟ μπορούν να λειτουργούν ως αποθήκευση ενέργειας κατά τη διάρκεια περιόδων υπερπροσφοράς των ΑΠΕ και αντίστροφα, μπορούν να λειτουργούν ως πηγή ενέργειας κατά τη διάρκεια ελλείψεων στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Κατασκεύασαν ένα στοχαστικό μοντέλο προγραμματισμού, λαμβάνοντας υπόψη δύο περιπτώσεις: μία χωρίς ένταξη ΗΟ και μία άλλη με συμμετοχή ΗΟ. Και τα δύο μοντέλα εφαρμόστηκαν χρησιμοποιώντας το GAMS (General Algebraic Modeling System). Μέσω της αποτελεσματικής διαχείρισης των διαδικασιών φόρτισης και εκφόρτισης, προέκυψε σημαντική μείωση των ενεργειακών δαπανών. Με την ίδια οπτική, ο (Sebastian Gottwalt, 2013) κ.ά. θεωρεί τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων ως μια μορφή εύελικτου φορτίου, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί για να μεγιστοποιηθεί η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Χρησιμοποιεί έναν προ-συντονιστή για να διαχειριστεί τη φόρτιση των ΗΟ, ενώ ταυτόχρονα να ικανοποιεί τις ενεργειακές ανάγκες των νοικοκυριών. Η μελέτη επικεντρώνεται στο να μοντελοποιήσει τη συμπεριφορά φόρτισης των ΗΟ που ανήκουν σε πλήρως απασχολούμενους εργαζόμενους χρησιμοποιώντας εμπειρικά προφίλ οδήγησης. Η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από ανανεώσιμες πηγές και συμβατικούς παραγωγούς, με τους τελευταίους να ενεργοποιούνται μόνο όταν η ζήτηση φόρτισης ΗΟ και νοικοκυριών υπερβαίνει τη διαθέσιμη χωρητικότητα από τις ΑΠΕ. Έτσι, ευθυγραμμίζοντας τη ζήτηση φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με τη διαθέσιμη παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, η εξάρτηση από συμβατικές γεννήτριες μειώνεται. Ο (Sebastian Gottwalt, 2013) και συν. διατυπώνουν αυτό το ζήτημα ως πρόβλημα μικτού ακέραιου

προγραμματισμού, υποθέτοντας γνωστή τη μελλοντική διαθεσιμότητα από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τα πρότυπα ταξιδιού των ηλεκτρικών οχημάτων και μια εβδομαδιαία φόρτιση νοικοκυριών, ενώ χρησιμοποίησαν τη μέθοδο CPLEX για την επίλυσή του. Οι (Pantos, 2011) και (Makeen, 2023) προσπαθούν να ελαχιστοποιήσουν το κόστος φόρτισης, ενώ ταυτόχρονα επιδιώκουν τη μεγιστοποίηση των κερδών των σταθμών φόρτισης. Στην πρώτη μελέτη, ο (Pantos, 2011) εισάγει έναν στοχαστικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης που σχεδιάζεται για τη μεγιστοποίηση της χρήσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Για να αντιμετωπίσει την εγγενή αβεβαιότητα στη μεταφορά οχημάτων, χρησιμοποίησε τη μέθοδο προσομοίωσης Monte Carlo για να μοντελοποιήσει διάφορα σενάρια. Χρησιμοποιούνται στατιστικές μέθοδοι για τη διαχείριση των αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με τις ΑΠΕ. Υποθέτει ότι η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να συντονιστεί. Η διαδικασία βελτιστοποίησης ξεκινά με την αξιολόγηση στοχαστικών δεδομένων εισόδου, όπως η αναμενόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, οι τιμές της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και οι ενεργειακές απαιτήσεις των ΗΟ. Οι προβλέψεις για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις ΑΠΕ και τις τιμές της αγοράς προέρχονται από ιστορικά δεδομένα. Τα μοτίβα οδήγησης των υπαρχόντων ΗΟ εξάγονται από σύνολα δεδομένων μεταφορών. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης για την ενέργεια από ΑΠΕ διατυπώνεται ως ένα μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού, και η προτεινόμενη προσέγγιση βελτιστοποίησης αξιολογείται μέσω τριών μελετών περιπτώσεων για να επιβεβαιωθεί η αποτελεσματικότητά της. Ωστόσο, η μελέτη στοχεύει αποκλειστικά στη μέγιστη χρήση των ΑΠΕ, παραβλέποντας τη δυνατότητα πιθανής ανταλλαγής μεταξύ της αύξησης της χρήσης των ΑΠΕ και τη μείωση του κόστους φόρτισης. Από την άλλη πλευρά, οι (Peter Makeen, 2023) προτείνουν ένα καινοτόμο, έξυπνο μοντέλο λειτουργίας για ένα Σταθμό Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων (Electric Vehicle Charging Station - EVCS) που ελέγχεται από έναν σύστημα συγκέντρωσης με βάση ένα ιεραρχικό μοντέλο. Τα συστήματα συγκέντρωσης λειτουργούν ως μορφή σύνδεσης μεταξύ του δικτύου διανομής ενέργειας και του σταθμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, ο οποίος συγκεντρώνει πολλαπλά ηλεκτρικά οχήματα και συντονίζει τη φόρτισή τους. Η πρώτη φάση ενός μοντέλου γραμμικού προγραμματισμού με ακέραιους αριθμούς περιλαμβάνει τον προγραμματισμό της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων για να ισορροπηθεί η παραγωγή και η κατανάλωση ενέργειας του σταθμού, με στόχο τη μείωση της υπερβολικής ενέργειας που παρέχεται στο δίκτυο. Το δεύτερο πρόβλημα περιλαμβάνει τη μεγιστοποίηση του κέρδους του σταθμού φόρτισης ταυτόχρονα με τη μείωση της τιμής φόρτισης για τα ηλεκτρικά οχήματα. Σε αυτό το πρόβλημα, χρησιμοποιούνται η MILP (Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός) και οι μέθοδοι Ενίσχυσης Μάθησης με Προσανατολισμό στην Απόφαση Markov (MDP-RL) για να αυξήσουν τα έσοδα του EVCS. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το μοντέλο προσφέρει μια εφικτή τεχνο-οικονομική λύση που είναι συμβατή με την κανονική λειτουργία. Τέλος, οι (Domínguez-Navarro, 2019) ενσωματώνουν συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και αποθήκευσης ώστε να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα του σχεδιασμού ενός σταθμού γρήγορης φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Ο στόχος τους είναι η ανάπτυξη μιας βιώσιμης υποδομής φόρτισης που ελαχιστοποιεί την εξάρτηση από το δίκτυο ενέργειας ενώ ταυτόχρονα μεγιστοποιεί τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (με την μεγιστοποίηση της καθαρής παρούσας αξίας).

Η Καθαρά Παρούσα Αξία (Net Present Value - NPV) περιλαμβάνει το κόστος εγκατάστασης, την ενέργεια που αγοράζεται από το δίκτυο, τη συντήρηση του σταθμού φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων και την αντικατάσταση μπαταριών. Προτείνουν ένα μαθηματικό μοντέλο βασισμένο στο Γραμμικό Προγραμματισμό για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και της λειτουργίας του σταθμού φόρτισης, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η ζήτηση ενέργειας, η παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας και η χωρητικότητα αποθήκευσης. Η μέθοδος λύσης περιλαμβάνει την εφαρμογή τεχνικών βελτιστοποίησης για τον εντοπισμό της βέλτιστης διαμόρφωσης των συστημάτων ανανεώσιμης ενέργειας και αποθήκευσης για να καλύψουν αποδοτικά τις απαιτήσεις φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Μέσω αποτελεσμάτων προσομοίωσης, αναλύουν το πόσο εφικτό είναι να πραγματοποιηθεί η προσέγγισή τους στη μείωση των λειτουργικών κοστών, την ελαχιστοποίηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και τη βελτίωση της ενεργειακής ανεξαρτησίας, προωθώντας έτσι την υιοθέτηση των ηλεκτρικών οχημάτων και την ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην υποδομή μεταφορών.

2.2.2. Πρόβλημα Δρομολόγησης

Το πρόβλημα δρομολόγησης (routing problem) αναφέρεται σε ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων που αφορούν τον καθορισμό της βέλτιστης διαδρομής ή της βέλτιστης σειράς διαδρομών για την κίνηση ή την παράδοση αντικειμένων από ένα σημείο σε ένα άλλο σε ένα δίκτυο, λαμβάνοντας υπόψη διάφορους περιορισμούς. Το πρόβλημα δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων (Electric Vehicle Routing Problem - EVRP) αποτελεί μια παραλλαγή του κλασικού προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων (Vehicle Routing Problem - VRP), όπου τα συμβατικά οχήματα αντικαθίστανται από ηλεκτρικά. Η μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος περιγράφει τις απαιτήσεις των πελατών, τις χωρητικότητες και τις ενεργειακές ανάγκες των οχημάτων, καθώς και τις αποστάσεις και τους χρόνους μετακίνησης μεταξύ των τοποθεσιών. Το πρόβλημα επιλύεται με μαθηματικά μοντέλα και ευρετικούς αλγορίθμους για την αποδοτική δρομολόγηση των ηλεκτρικών οχημάτων. (Χριστιανίδη, 2020) (Verma, 2018)

Ο (Wang, 2020) αναλύει μια μελέτη υποθέτοντας ότι οι τοποθεσίες των σταθμών φόρτισης είναι γνωστές και σταθερές. Κάθε σταθμός φόρτισης μπορεί να εξυπηρετεί πολλά οχήματα ταυτόχρονα και δεν υπάρχει περιορισμός στον αριθμό των φορών που ένα όχημα μπορεί να επισκεφτεί τον σταθμό φόρτισης. Το προτεινόμενο μοντέλο EVRP έχει ως στόχο να βρει την καλύτερη στρατηγική δρομολόγησης, ώστε να μειωθούν οι συνολικές αποστάσεις εξυπηρέτησης και να μειωθεί η κατανάλωση ενέργειας. Ο (Fan, 2023) εξετάζει ένα πρόβλημα δρομολόγησης Ηλεκτρικών Οχημάτων λαμβάνοντας υπόψη τις ενεργειακές διαφορές των σταθμών φόρτισης και κατασκευάζει ένα μοντέλο μικτού ακέραιου προγραμματισμού βασισμένο στον υπολογιστικό τύπο κατανάλωσης ενέργειας και εκπομπών άνθρακα των ηλεκτρικών οχημάτων. Με στόχο την ελαχιστοποίηση των οικονομικών και

περιβαλλοντικών δαπανών των επιχειρήσεων διανομής, σχεδιάζεται ένας βελτιωμένος αλγόριθμος για τη διεξαγωγή συνολικών αριθμητικών πειραμάτων και τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας του προτεινόμενου μοντέλου. Τα αποτελέσματα των δοκιμών δείχνουν ότι το μοντέλο επιτυγχάνει καλή απόδοση και μπορεί να παρέχει υψηλής ποιότητας λύσεις. Επιπλέον, το πείραμα εξετάζει τη διαφορά εκπομπής άνθρακα των ηλεκτρικών οχημάτων κάτω από ενεργειακές διαφορές των σταθμών φόρτισης, εντοπίζοντας ότι το EVRPEDCS μπορεί να βοηθήσει τις εταιρείες logistics να μειώσουν τις εκπομπές άνθρακα και να μειώσουν το κόστος φόρτισης. Ο (Zhenfeng, 2017) επιδιώκει να βρει τις βέλτιστες διαδρομές παράδοσης για ένα σύνολο ομοιόμορφων ηλεκτρικών οχημάτων με σταθερή χωρητικότητα φόρτωσης. Κάθε πελάτης, ο οποίος έχει γνωστή ζήτηση και ένα παράθυρο παράδοσης, εξυπηρετείται από ακριβώς ένα ηλεκτρικό όχημα. Το κάθε ηλεκτρικό όχημα μπορεί να εξυπηρετήσει πολλούς πελάτες, λαμβάνοντας υπόψη την αυτονομία του. Σε αυτήν την εργασία παρουσιάζεται ένα πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων για ηλεκτρικά οχήματα με περιορισμούς χρονικών παραθύρων. Λαμβάνονται υπόψη το κόστος οδήγησης καθώς και ένα κόστος τιμωρίας αν γίνει παραβίαση των χρονικών παραθύρων. Έχει αναπτυχθεί Γενετικός Αλγόριθμος για την επίτευξη λύσεων. Τα πειράματα δείχνουν ότι το μοντέλο που αναπτύχθηκε αποτυπώνει τα χαρακτηριστικά της παράδοσης ηλεκτρικών οχημάτων. Ο (Teng, 2024) επικεντρώνεται σε μια πιο προκλητική έκδοση του προβλήματος Δρομολόγησης Οχημάτων (VRP), γνωστή ως Δυναμικό Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων με Παράθυρα Χρόνου. Η βασική δυσκολία του δυναμικού προβλήματος δρομολόγησης οφείλεται στην αβεβαιότητα και την απροσδιόριστη ζήτηση που μπορεί να προκύψει. Για παράδειγμα, ορισμένοι πελάτες μπορεί να εμφανιστούν νωρίτερα από ό,τι αναμενόταν με χαλαρούς περιορισμούς παραθύρων χρόνου, αλλά να βρίσκονται μακριά από ένα όχημα. Εάν το όχημα ανταποκριθεί αμέσως στις ανάγκες αυτών των πελατών, μπορεί να υπάρξουν κοντινοί πελάτες με αυστηρούς περιορισμούς παραθύρων χρόνου που δεν μπορούν να ικανοποιηθούν. Σε αυτή την περίπτωση, νέα οχήματα πρέπει να αποσταλούν, με αποτέλεσμα επιπλέον κόστος. Ο (Liu, 2015) αναλύει ένα πρόβλημα τοποθέτησης και δρομολόγησης βασισμένο σε σταθμούς αντικατάστασης μπαταριών, στο οποίο λαμβάνονται υπόψη ταυτόχρονα οι αποφάσεις δρομολόγησης των ηλεκτρικών οχημάτων και η τοποθέτηση των σταθμών αντικατάστασης μπαταριών. Λαμβάνονται υπόψη πέντε διαφορετικές συναρτήσεις στόχου, συμπεριλαμβανομένων της ελαχιστοποίησης της συνολικής διανυθείσας απόστασης, του αριθμού των οχημάτων που χρησιμοποιούνται, του αριθμού των σταθμών αντικατάστασης μπαταριών που χρησιμοποιούνται, του αριθμού των μπαταριών που απαιτούνται και του συνολικού κόστους. Αναφέρονται αποτελέσματα για υπολογιστικά πειράματα σε ποικίλες περιπτώσεις, αξιολογώντας την απόδοση του προτεινόμενου μοντέλου και αναλύοντας τα χαρακτηριστικά του προβλήματος. Ο (Tas, 2013) μελετά ένα πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με ελαστικά παράθυρα χρόνου και στοχαστικούς χρόνους ταξιδιού. Αναπτύσσεται ένα μοντέλο που λαμβάνει υπόψη τόσο το κόστος μεταφοράς (συνολική απόσταση ταξιδιού, αριθμός οχημάτων που χρησιμοποιούνται και υπερωρίες των οδηγών) όσο και το κόστος εξυπηρέτησης. Η στοχαστικότητα στους χρόνους ταξιδιού λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς και των δύο στοιχείων κόστους. Το άρθρο αναλύει τον ρόλο των δύο αυτών στοιχείων και πώς επηρεάζουν την αξιοπιστία της εξυπηρέτησης προς τους πελάτες. Με την

εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου, μπορούν να προκύψουν σημαντικοί συνδυασμοί των δύο στοιχείων κόστους, παρέχοντας διαφορετικές επιλογές λύσεων για τις εταιρείες μεταφορών ώστε να ανταποκριθούν στις προτεραιότητές τους. Τέλος, πραγματοποιείται μια ολοκληρωμένη ανάλυση για να εξεταστούν η συμπεριφορά και τα ειδικά χαρακτηριστικά των εύρεσης των λύσεων. υπολογιστικές πειραματικές μελέτες για γνωστές περιπτώσεις προβλημάτων.

Ο (Guedria, 2016) εξετάζει δύο καλά καθιερωμένες προσεγγίσεις για τον σχεδιασμό των διαδρομών για τις παραδόσεις σε αστικές περιοχές: το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων (VRP) και το πρόβλημα βελτιστοποίησης του σχεδιασμού φόρτωσης οχημάτων. Μέσα από τη μελέτη αυτή προκύπτει ότι οι βέλτιστες λύσεις σπάνια υλοποιούνται λόγω των πολλών διαταραχών που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια μιας αστικής διαδρομής. Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης της δρομολόγησης των οχημάτων στην αστική περιοχή εξαρτάται κυρίως από δύο κριτήρια: την απόσταση που διανύουν τα οχήματα και το φορτίο αυτών των οχημάτων. Στη συνέχεια, επιδεικνύει αυτό το πρόβλημα μέσω ενός σεναρίου που περιλαμβάνει τρεις προσεγγίσεις: Η πρώτη είναι ένα απλό παράδειγμα του προβλήματος δρομολόγησης οχημάτων: (δίνοντας προτεραιότητα στην διαδρομή του οχήματος), στη δεύτερη προσέγγιση δίνει προτεραιότητα στο σχέδιο φόρτωσης (και χαλαρώνει την προτεραιότητα στη διαδρομή του οχήματος.) και το τρίτο μέρος εξηγεί τον συμβιβασμό μεταξύ των δύο πρώτων προσεγγίσεων με μια υβριδική βελτιστοποίηση (διαδρομή, φόρτωση). Οι (Çatay and Sadati, 2023) για να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα της αυτονομίας των αυτοκινήτων καθώς και τους μεγάλους χρόνους επαναφόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων προτείνει στη βιβλιογραφία οχήματα με ανταλλαγή μπαταριών (BSVs) για την παροχή ενέργειας στα σημεία που χρειάζονται. Επιλύουν ένα πρόβλημα δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων με χρονικά παράθυρα και συγχρονισμένη ανταλλαγή κινητών μπαταριών (EVRPTW-SMBS). Σε αυτό το πρόβλημα, τα ηλεκτρικά οχήματα εξυπηρετούν τους πελάτες εντός των χρονικών παραθύρων τους, και τα ηλεκτρικά φορτηγά χρησιμοποιούνται για την επαναφόρτιση ή την αντικατάσταση των μπαταριών τους σε επιλεγμένες τοποθεσίες πελατών κατά τη διάρκεια των επισκέψεών τους. Ο στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος λειτουργίας και το ελάχιστο μέγεθος του στόλου. Προτείνουν μια μαθηματική προσέγγιση που συνδυάζει τη μεταβλητή αναζήτηση περιοχής με ακριβή μέθοδο για την επίλυσή του. Στη συνέχεια, πραγματοποιούν μια εκτενή αριθμητική μελέτη για να επικυρώσουν την απόδοση της προτεινόμενης προσέγγισης και παρουσιάζουν νέες βέλτιστες λύσεις για δύο σχετικά προβλήματα.

Ο (Naroli, 2021) εξετάζει το ζήτημα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για ένα ηλεκτρικό φορτηγό παράδοσης προκειμένου να εκτελέσει την καθημερινή του αποστολή. Διατυπώνεται ένα πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων με παράθυρα χρόνου, με σκοπό την βελτιστοποίηση της διανομής φορτίου σε αστικό επίπεδο, ολοκληρώνοντας την ανάλυση δύο πτυχών, των υποδομών και της διαχείρισης της υπηρεσίας. Πτυχές που θεωρούνται θεμελιώδεις για τη διανομή φορτίου σε ένα σενάριο συστήματος. Το άρθρο περιγράφει μια μελέτη περίπτωσης για την παράδοση φορτίου στο τελευταίο χιλιόμετρο, στην οποία προτείνεται η εγκατάσταση υποδομών παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας στον ίδιο τόπο όπου έχει προγραμματιστεί το αστικό κέντρο διανομής. Η περιοχή

φορτοεκφόρτωσης προτείνεται ως πλατφόρμα ενέργειας και λογιστικής. Επιχειρείται η βελτιστοποίηση της υπηρεσίας παράδοσης για μείωση της ενέργειας που χρησιμοποιείται από το όχημα, συμπεριλαμβάνοντας περιορισμούς όπως παράθυρα χρόνου για τις λειτουργίες παράδοσης/παραλαβής. Οι (Schiffer and Walther, 2017) παρουσιάζουν μια προσέγγιση τοποθέτησης σταθμών φόρτισης όπου λαμβάνει υπόψη τη δρομολόγηση των ηλεκτρικών οχημάτων και τις αποφάσεις τοποθέτησης των σταθμών φόρτισης, με σκοπό την υποστήριξη στρατηγικών αποφάσεων των φορέων λογιστικής. Εξετάζουν διάφορες επιλογές επαναφόρτισης λόγω περιορισμών του πραγματικού κόσμου. Επιπλέον, λαμβάνουν εναλλακτικές συναρτησιακές στοχεύσεις υπόψη, ελαχιστοποιώντας όχι μόνο την απόσταση που έχει διανυθεί, αλλά και τον αριθμό των απαραίτητων οχημάτων, τον αριθμό των τοποθετημένων σταθμών φόρτισης καθώς και το συνολικό κόστος. Παρουσιάζονται αποτελέσματα για τη συνολική απόσταση που έχει διανυθεί από το μοντέλο δρομολόγησης, και εμφανίζονται πιθανές βελτιώσεις σε σύγκριση με ένα μοντέλο δρομολόγησης οχημάτων. Μπορούν να επιτευχθούν μικρότερες συνολικές αποστάσεις εάν επιτραπούν ταυτόχρονα η τοποθέτηση και οι επεκτεινόμενες επιλογές φόρτισης.

ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ	ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ	ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ				ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ				ΧΡΟΝΟΣ				ΚΟΣΤΗ				ΣΥΣΤΗΜΑ	ΖΗΤΗΣΗ
		ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ		ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ		ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ		ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ		ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ		ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ		ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ					
		ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	ΗΛΙΑΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	ΛΕΩΦΟΡΕΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	ΛΕΩΦΟΡΕΙΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ	ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑ					
ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ	ΕΜΠΟΡΕΥΜΑΤΙΚΑ ΦΟΡΤΗΓΑ	Guazale Haddadian et al.	Guazale Haddadian et al.	Guazale Haddadian et al.	Guazale Haddadian et al.	Guazale Haddadian et al.	Guazale Haddadian et al.	Guazale Haddadian et al.	Guazale Haddadian et al.	Guazale Haddadian et al.	Guazale Haddadian et al.	Guazale Haddadian et al.	Guazale Haddadian et al.	Guazale Haddadian et al.	Guazale Haddadian et al.	Guazale Haddadian et al.	Guazale Haddadian et al.	Guazale Haddadian et al.	Guazale Haddadian et al.
	Qing Wang et al.																		
	Lijun Fan et al.																		
	Guo Zhenfeng et al.																		
	Yi Teng et al.																		
	Hao Liu et al.																		
	Duygu Tas- n, Nico Dellaert																		
	Mohamed Guedria et al.																		
	Bulent Çatay et al.																		
	Giuseppe Napoli et al.																		
Πίνακας 4 Παράμετροι Μελετητών (VRP)	Maximilian Schiffer et al.																		

Πίνακας 3 Παράμετροι Μελετητών

ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΗ
Ghazale Haddadian, Nasrin Khallili, Mohammad Khodayar, Mohammad Shahidehpour	Ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας του συστήματος	Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (MILP)	Genetic algorithm (GA)	Αριθμητική προσομοίωση
Zhixiong Luo , Fang He, Xi Lin , Jianjun Wu, Meng Li	Ελαχιστοποίηση του συνδυασμένου κόστους μεταφοράς και του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας	Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (MILP)	Genetic algorithm (GA)	Ρεαλιστική αριθμητική προσομοίωση
C. Battistelli, L. Baringo, A.J. Conejo	Ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας του συστήματος	Γραμμικός Προγραμματισμός(LP)	CPLEX	Αριθμητική προσομοίωση
Cesar Diaz-Londono, Fredy Ruiz, Andrea Mazza, Gianfranco Chicco	Ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας	Γραμμικός Προγραμματισμός(LP)	MPC control strategy	Αριθμητική προσομοίωση (Κολομβία)
Reza Sa'adati, Meysam Jafari-Nokandi , Javad Saebi	Ελαχιστοποίηση του κόστους επένδυσης σε σταθμούς φόρτισης και το κόστος απωλειών ενέργειας.	Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (MILP)	Hybrid algorithm	Αριθμητική προσομοίωση
Md Abdul Quddus, Mohannad Kabli, Mohammad Marufuzzaman	Ελαχιστοποίηση του ετήσιου κόστους κατασκευής και συντήρησης ενός σταθμού φόρτισης.	Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (MILP)	Hybrid algorithm	Αριθμητική προσομοίωση (Ουασιγκτον)
Yujie Liu, Linni Jian, Youwei Jia	Ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους μέσω του συντονισμού των ενεργειακών συναλλαγών μεταξύ των ηλεκτρικών οχημάτων , των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας και του ηλεκτρικού δικτύου.	Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (MILP)	Particle Swarm Optimization algorithm (PSO)	Ρεαλιστική αριθμητική προσομοίωση (Ουασιγκτον)
Kevin Mets, Filip De Turck, Chris Develder	Ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους μέσω βέλτιστων ενεργειακών συναλλαγών και διαχείρισης πόρων	Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (ILP)	Dual Decomposition	Αριθμητική προσομοίωση
Yifan Li, Rakpong Kaewpuang, Ping Wang, Dusit Niyato, Zhu Han	Ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής θερμικής ενέργειας, του κόστους αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και των απωλειών από μη αξιοποιημένη ανανεώσιμη ενέργεια.	Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός (MIP)	GAMS	Αριθμητική προσομοίωση
Sebastian Gottwalt, Alexander Schuller, Christoph Flath, Hartmut Schmeck, Christof Weinhardt	Ελαχιστοποίηση της χρήσης συμβατικής παραγωγής ενέργειας, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα ότι οι απαιτήσεις μετακίνησης των ηλεκτρικών οχημάτων ικανοποιούνται.	Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός (MIP)	IBM CPLEX	Ρεαλιστική αριθμητική προσομοίωση
Milo s Panto s	Ελαχιστοποίηση του κόστους φόρτισης	Γραμμικός Προγραμματισμός(LP)	Genetic algorithm (GA)	Αριθμητική προσομοίωση
Peter Makeen, Hani A. Ghali, Saim Memon, Fang Duan	Μεγιστοποίηση κέρδους των σταθμών φόρτισης, διατηρώντας χαμηλές χρεώσεις για τους χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων	Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (MILP)	Particle Swarm Optimization (PSO)	Αριθμητική προσομοίωση (Αίγυπτο)
J.A. Domínguez-Navarro, R. Dufo-López, J.M. Yusta-Loyo, J.S. Artales-Sevil, J.L. Bernal-Aguistin	Μεγιστοποίηση κέρδους των σταθμών φόρτισης	Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (MILP)	Genetic algorithm (GA)	Αριθμητική προσομοίωση

Πίνακας 5 Σύνοψη μαθηματικών μοντέλων από προηγούμενες μελέτες

ΣΥΓΓΡΑΦΕΑΣ	ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΗ
Qing Wang, Shuai Peng, Shuan Liu	Ελαχιστοποίηση της συνολικής απόστασης εξυπηρέτησης και της κατανάλωσης ενέργειας	Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (MILP)	Tabu algorithm	Αριθμητική προσομοίωση
Lijun Fan , Changshi Liu , Bo Dai , Junyu Li , Zhang Wu , Yuting Guo	Ελαχιστοποίηση του οικονομικού και περιβαλλοντικού κόστους των επιχειρήσεων διανομής logistics	Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός (MIP)	Improved Ant Colony Algorithm (IACA)	Αριθμητική προσομοίωση (ρεαλιστικά δεδομένα)
Guo Zhenfeng, Li Yang, Jiang Xiaodan, Gao Sheng	Ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους μετακίνησης και του κόστους ποινής για την παραβίαση του χρονικού περιθωρίου κάθε πελάτη	Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός (MIP)	Genetic Algorithm	Αριθμητική προσομοίωση
Yi Teng a, Jinbiao Chen b, Shiyuan Zhang b, Jiahai Wang b,c, Zizhen Zhang	Ελαχιστοποίηση του συνολικού χρόνου μετακίνησης.	Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (MILP)	Improved Ant Colony Algorithm (IACA)	Αριθμητική προσομοίωση
Hao Liu , Benhe Gao , Yunhan Liu	Ελαχιστοποίηση του αριθμού των ηλεκτρικών οχημάτων , του συνολικού κόστους μετακίνησης και του αριθμού των πλήρως φορτισμένων εφεδρικών μπαταριών.	Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός (MIP)	Genetic algorithm	Αριθμητική προσομοίωση
Duygu Tas- n, Nico Dellaert, Tom van Woensel, Ton de Kok	Ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους.	Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (MILP)	Tabu algorithm	Αριθμητική προσομοίωση (ρεαλιστικά δεδομένα)
Mohamed Guedria , Nicolas Malhene , Jean-Christophe Deschamps	Ελαχιστοποίηση της συνολικής απόστασης που έχει διανυθεί, του χρόνου εξυπηρέτησης κάθε πελάτη και του χρόνου ακινησίας του οχήματος.	Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (MILP)	Robust hybrid optimization	Αριθμητική προσομοίωση
Bülent Çatay , Ihsan Sadati	Ελαχιστοποίηση του συνολικού λειτουργικού κόστους με τον ελάχιστο απαιτούμενο αριθμό οχημάτων.	Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (MILP)	MathVNS(Mathematical Variable Neighborhood Search)	Αριθμητική προσομοίωση
Giuseppe Napoli , Salvatore Micari , Giorgio Dispenza , Laura Andaloro , Vincenzo Antonucci , Antonio Polimeni	Ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας κατά τη διάρκεια της διαδρομής και της συνολικής απόστασης που διανύθηκε.	Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (MILP)	Tabu algorithm	Αριθμητική προσομοίωση (Capo d'Orlando)
* Maximilian Schiffer , Grit Walther	Ελαχιστοποίηση της συνολικής απόστασης, του αριθμού των οχημάτων και των σταθμών φόρτισης που χρησιμοποιούνται, καθώς και του συνολικού κόστους.	Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (MILP)	Genetic algorithm	Αριθμητική προσομοίωση

Πίνακας 6 Σύνοψη μαθηματικών μοντέλων από προηγούμενες μελέτες (VRP)

3. Μεθοδολογία

Με τον ορό βελτιστοποίηση ορίζεται η επιλογή κατάλληλης λύσης που αξιολογείται ως η ιδανικότερη με βάση ορισμένα κριτήρια. Πιο συγκεκριμένα η βελτιστοποίηση αφορά τη βελτίωση των διαδικασιών και των συστημάτων με στόχο την αύξηση της απόδοσης και τη μείωση του κόστους. Με τον ορό σύστημα χαρακτηρίζεται η χρήση του κατάλληλου μαθηματικού μοντέλου το οποίο αντικαθιστά σχέσεις μεταξύ μαθηματικών στοιχείων με σχέσεις πραγματικών χαρακτηριστικών. Ο σχεδιασμός ενός συστήματος πολλές φορές βασίζεται στην εμπειρία του μηχανικού και σε παραμετρικές διερευνήσεις «δοκιμής και διόρθωσης». Σε αυτό το μαθηματικό πρότυπο δεν επιδιώκεται να υπάρχει ακρίβεια στην λειτουργία του αλλά να υπάρχει ισομορφία σε όλες τις σημαντικές για το σύστημα πτυχές του. Δηλαδή να απεικονίζονται ικανοποιητικά από το πρότυπο εκείνα τα στοιχεία τα οποία είναι σημαντικά για τον προσδιορισμό της απόδοσης του καθώς και οι συνθήκες μέσα από τις οποίες θα βελτιστοποιηθεί. Επιπλέον τα προβλήματα βελτιστοποίησης λαμβάνουν υπόψιν περιορισμούς όπως είναι το εύρος μέσα στο οποίο κινούνται οι παράμετροι σχεδιασμού το οποίο καθορίζει το χώρο αναζήτησης, αλλά και άλλες συναρτήσεις περιορισμού οι οποίες καθορίζουν το χώρο των αποδεκτών λύσεων του προβλήματος. (Ch. Venkateswarlu, 2020)

Η χρήση μεθόδων βελτιστοποίησης εφαρμόζεται σε πολλούς τομείς, με στόχο είτε την αύξηση είτε τη μείωση συγκεκριμένων αντικειμενικών συναρτήσεων που μας ενδιαφέρουν. Αυτοί οι στόχοι μπορεί να περιλαμβάνουν τη μείωση του κόστους παραγωγής, την αύξηση των κερδών, τον περιορισμό της κατανάλωσης πρώτων υλών κατά την ανάπτυξη προϊόντων ή τη βελτίωση της αποδοτικότητας στην παραγωγή. Ορισμένες από τις πιο κοινές μορφές προβλημάτων βελτιστοποίησης που συναντώνται στην πράξη είναι οι εξής:

- **Γραμμικός Προγραμματισμός (LP):** Ο γραμμικός προγραμματισμός χρησιμοποιείται για τη βελτιστοποίηση μιας γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης υπό γραμμικούς περιορισμούς ισότητας και ανισότητας.
- **Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (ILP):** Παρόμοιος με τον γραμμικό προγραμματισμό, αλλά με τον πρόσθετο περιορισμό ότι όλες οι μεταβλητές απόφασης πρέπει να λαμβάνουν ακέραιες τιμές. Ο ILP εφαρμόζεται σε καταστάσεις όπου οι μεταβλητές αντιπροσωπεύουν ακέραιες ποσότητες, όπως στον προγραμματισμό παραγωγής.
- **Μη Γραμμικός Προγραμματισμός (NLP):** Ο NLP ασχολείται με προβλήματα βελτιστοποίησης όπου η αντικειμενική συνάρτηση ή ορισμένοι περιορισμοί είναι μη γραμμικοί. Χρησιμοποιείται σε διάφορους τομείς, συμπεριλαμβανομένου του σχεδιασμού μηχανικών και της χρηματοοικονομικής μοντελοποίησης.
- **Τετραγωνικός Προγραμματισμός (QP):** Ο QP είναι μια ειδική περίπτωση του μη γραμμικού προγραμματισμού όπου η αντικειμενική συνάρτηση είναι τετραγωνική και οι περιορισμοί γραμμικοί. Χρησιμοποιείται στην βελτιστοποίηση χαρτοφυλακίου, τη ρομποτική και τη δομική βελτιστοποίηση.

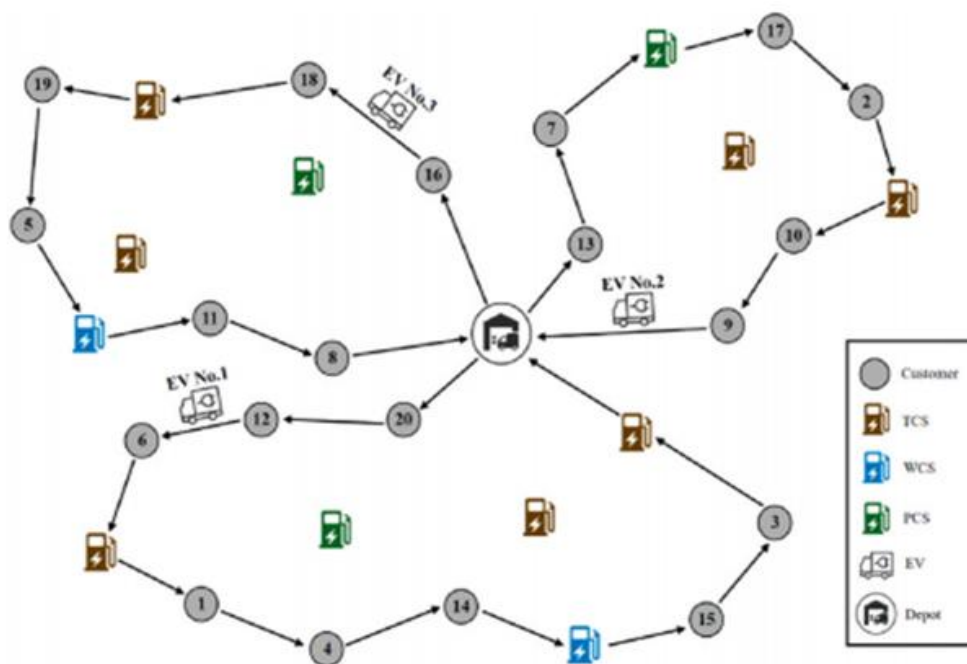
- **Μικτός Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός (MILP):** Ο MILP συνδυάζει στοιχεία γραμμικού και ακέραιου προγραμματισμού για την αντιμετώπιση προβλημάτων με τόσο συνεχείς όσο και διακριτές μεταβλητές απόφασης. Χρησιμοποιείται στο σχεδιασμό δικτύων, τον προγραμματισμό και τα logistics.
- **Δυναμικός Προγραμματισμός:** Αυτή η μέθοδος είναι κατάλληλη για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης με μια διαδικασία λήψης αποφάσεων σε αλληλουχία. Χρησιμοποιείται ευρέως στη θεωρία ελέγχου, τη χρηματοοικονομική και την επιχειρησιακή έρευνα. (Gkiotsalitis, 2023)

Στην παρούσα διπλωματική εργασία επεκτείνεται το μοντέλο των (Fan, 2023) όπου εξετάζει το πρόβλημα δρομολόγησης Ηλεκτρικών Οχημάτων λαμβάνοντας υπόψη τις ενεργειακές διαφορές των σταθμών φόρτισης με στόχο την ελαχιστοποίηση των οικονομικών δαπανών των επιχειρήσεων διανομής. Ουσιαστικά προτείνουν ένα μοντέλο Μικτού Ακέραιου Προγραμματισμού (MIP) ώστε να ελαχιστοποιήσουν τα οικονομικά κόστη. Επίσης προτείνουν έναν αλγόριθμο(IACA) με γρήγορη σύγκλιση και ανθεκτικότητα ώστε να επιβεβαιωθεί η αποτελεσματικότητά του μοντέλου μέσω δοκιμών. Οι πειραματικές δοκιμές επιβεβαιώνουν τα οφέλη της χρήσης ηλεκτρικών οχημάτων ως βιώσιμης λύσης μεταφορών, προσφέροντας σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα.

Η προσέγγιση μας βασίζεται στο πλαίσιο του προβλήματος δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων (EVRP) ωστόσο διαφοροποιείται σημαντικά, εστιάζοντας σε συγκεκριμένες βελτιώσεις και προσαρμογές. Αρχικά διαφοροποιήσαμε την αντικειμενική συνάρτησή όπου αφαιρέσαμε τα περιβαλλοντικά κόστη καθώς δεν σχετίζονταν με τον άμεσο στόχο της ερευνάς μας. Δεν χρησιμοποιήσαμε βάρη στην εξίσωση τις αντικειμενικής μας συνάρτησης. Συμπεριλάβαμε ότι ο κάθε σταθμός φόρτισης θα διαφέρει στην ταχύτητα που θα φορτίζει τα οχήματα.

Η προσέγγιση μας βασίζεται στο πλαίσιο του προβλήματος δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων (EVRP) ωστόσο διαφοροποιείται σημαντικά, εστιάζοντας σε συγκεκριμένες βελτιώσεις και προσαρμογές.

Αρχικά διαφοροποιήσαμε την αντικειμενική συνάρτησή όπου αφαιρέσαμε τα περιβαλλοντικά κόστη καθώς δεν σχετίζονταν με τον άμεσο στόχο της ερευνάς μας. Επιπλέον αφαιρέσαμε τα βάρη στην αντικειμενική μας συνάρτηση καθώς θέλαμε να καθορίσουμε ισορροπία ανάμεσα στα κόστη. Ένα ακόμα στοιχείο που συμπεριλάβαμε είναι ότι ο κάθε σταθμός φόρτισης θα διαφέρει στην ταχύτητα που θα φορτίζει τα οχήματα. Ο χρόνος φόρτισης εξαρτάται από την ποσότητα φόρτισης και την ισχύ του κάθε τύπου σταθμού όπου διαφέρει ανά περίπτωση. Έτσι διαφοροποιήσαμε την αργή με την γρήγορη φόρτιση ανάλογα με τον χρόνο όπου θα φορτίζει το όχημα. Τέλος έχουμε ορίσει μια μέγιστη απόσταση που μπορεί να διανύσει το κάθε φορτηγό.



Εικόνα 4 Πρόβλημα δρομολόγησης με 3 διαφορετικά είδη σταθμών
(Fan, 2023)

Το πρόβλημα που καλούμαστε να επιλύσουμε εμείς , είναι το πρόβλημα δρομολόγησης οχημάτων, με 3 διαφορετικού τύπου σταθμούς ΣΠ (σταθμός παραδοσιακός), ΣΦ (σταθμός με φωτοβολταϊκά), ΣΑ (σταθμός με ανεμογεννήτριες). Στο συγκεκριμένο πρόβλημα διαθέτουμε μία αποθήκη, ένα συγκεκριμένο αριθμό πελατών με συγκεκριμένη ζήτηση, ένα στόλο οχημάτων διαφορετικής και πεπερασμένης χωρητικότητας το καθένα. Στόχος είναι η εξυπηρέτηση όλων των πελατών, ικανοποιώντας τους περιορισμούς και ταυτόχρονα η αναζήτηση της βέλτιστης λύσης, ώστε τα φορτηγά να διανύσουν την όσο το δυνατόν μικρότερη απόσταση. Σε πρώτη φάση, θα βρεθεί μία αρχική υπό βέλτιστη εφικτή λύση που ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς και στη συνέχεια έχοντας ως δεδομένη αυτή την αρχική λύση, καλούμαστε να τη βελτιστοποιήσουμε, με τη χρήση αλγορίθμων. Οι αλγόριθμοι θα επιλυθούν στο προγραμματιστικό περιβάλλον της έχοντας γνωστά δεδομένα εισόδου.

$$P_1 = c_1 \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} T_{ijk} x_{ijk}$$

1

ΣΥΝΟΛΑ	
S	Σύνολο Σταθμών Φόρτισης (F_1, F_2, F_3)
K	Σύνολο Οχημάτων
C	Σύνολο Πελατών
V	Σύνολο Κόμβων
T	Σύνολο Χρονικών Διαστημάτων
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	
Q_k	Η Χωρητικότητα μπαταρίας οχήματος
d_{ij}	Η απόσταση που μπορεί να διανύσει ένα όχημα
T_{ijk}	Ο συνολικός χρόνος διαδρομής από τον κόμβο i σε κόμβο j
q_{ik}	Η ποσότητα φόρτισης οχήματος k στο σταθμό s
W	Το μέγιστο φορτίο του κάθε ηλεκτρικού οχήματος
D_i	Ο όγκος ζήτησης του πελάτη
E_{ijk}	Η κατανάλωση ενέργειας του ηλεκτρικού οχήματος k που διανύει την ακμή (i,j)
ψ	Η μέγιστη απόσταση που μπορεί να διανύσει ένα όχημα
r_i	Ο ρυθμός φόρτισης συνήθως αναπαριστά την ταχύτητα με την οποία ένα όχημα φορτίζει σε ένα σταθμό φόρτισης
a_i	Η ποσότητα ενέργειας (σε kWh) που ένα όχημα μπορεί να απορροφήσει από έναν σταθμό φόρτισης i
SOC _{min}	Η ελάχιστη στάθμη μπαταρίας που είναι επιτρεπτή
c1	Το κόστος ταξιδιού ανά μονάδα χρόνου
c2	Το σταθερό κόστος χρήσης
c3	Το κόστος αργής φόρτισης ανά μονάδα χρόνου σε παραδοσιακό σταθμό
c4	Το κόστος αργής φόρτισης ανά μονάδα χρόνου σε σταθμό με φωτοβολταϊκά
c5	Το κόστος αργής φόρτισης ανά μονάδα χρόνου σε σταθμό με ανεμογεννήτριες
c6	Το κόστος γρήγορης φόρτισης ανά μονάδα χρόνου σε παραδοσιακό σταθμό
c7	Το κόστος γρήγορης φόρτισης ανά μονάδα χρόνου σε σταθμό με φωτοβολταϊκά
c8	Το κόστος γρήγορης φόρτισης ανά μονάδα χρόνου σε σταθμό με ανεμογεννήτριες
m	Ο ρυθμός κατανάλωσης της ενέργειας
ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	
X_{ijk}	Η μεταβλητή αποφάσεων που δηλώνει εάν το όχημα k περνά από το (i,j). Παίρνει τιμή 1 αν το όχημα k περνά από το τοξικό (i,j), και 0 διαφορετικά
w_{ik}	Η μεταβλητή αποφάσεων που δηλώνει εάν το όχημα k επισκέπτεται τον πελάτη i. Παίρνει τιμή 1 αν το όχημα k επισκέπτεται τον πελάτη i, και 0 διαφορετικά
z_{ik}	Οι μεταβλητές z^1_{ik} , z^2_{ik} και z^3_{ik} είναι δυαδικές μεταβλητές (0-1) και ισούνται με 1 όταν το ηλεκτρικό όχημα (EV) k επισκέπτεται αντίστοιχα τον σταθμό φόρτισης TCS, WCS ή PCS i, ενώ ισούνται με 0 σε διαφορετική περίπτωση.
SOC ¹ _{ik}	Η κατάσταση φόρτισης του οχήματος k όταν φτάσει στον κόμβο i
SOC ² _{ik}	Η κατάσταση φόρτισης του οχήματος k όταν αφήσει τον κόμβο i
P1	Το κόστος μετακίνησης ηλεκτρικών οχημάτων
P2	Το σταθερό κόστος αποστολής οχημάτων
P3	Το κόστος φόρτισης
q_{ik}	Η ποσότητα φόρτισης του ηλεκτρικού φορτηγού
t_{ik}	Ο χρόνος φόρτισης που χρειάζεται το ηλεκτρικό φορτηγό

Πίνακας 7 Σύνολα-Παράμετροι-Μεταβλητές προτεινόμενου μοντέλου

$P_2 = c_2 \sum_{j \in C} \sum_{k \in K} x_{ojk}$	2
$P_3 = c_3 \sum_{i \in F1} \sum_{k \in K} q_{ikz1ik} + c_4 \sum_{i \in F2} \sum_{k \in K} q_{ikz2ik} + c_5 \sum_{i \in F3} \sum_{k \in K} q_{ikz3ik}$ $+ c_6 \sum_{i \in F1} \sum_{k \in K} q_{ikz1ik} + c_7 \sum_{i \in F2} \sum_{k \in K} q_{ikz2ik} + c_8 \sum_{i \in F3} \sum_{k \in K} q_{ikz3ik}$	3
$\text{Min}(P_1 + P_2 + P_4)$	4
$\sum_{j \in C} x_{ojk} \leq 1$	5
$\sum_{k \in K} w_{ik} \leq 1$	6
$\sum_{i \in C} \text{DiWik} \leq W$	7
$\text{SOC}_{ik}^2 = Q$	8
$\text{SOC}_{ik}^1 = \text{SOC}_{ik}^2$	9
$x_{i,j,k} * \text{SOC}_{ik}^2 \geq x_{i,j,k} * E_{i,j,k} + E_{j,l,k}$ $x_{i,j,k} * \text{SOC}_{ik}^2 \geq x_{i,j,k} * E_{i,j,k}$	10
$\sum_{j \in V} x_{ijk} - \sum_{j \in V} x_{ijk} = 0$	11
$x_{i,j,k} + x_{j,i,k} \leq 1$	12
$\sum_{k \in K} q_{ikz1ik} \leq a_i$ $\sum_{k \in K} q_{ikz2ik} \leq a_i$ $\sum_{k \in K} q_{ikz3ik} \leq a_i$	13

$\sum_{j \in V - [0]} x_{i0k} - \sum_{j \in V - [0]} x_{0ik} = 0$	14
$SOC_{ik}^2 \geq SOC_{min}$	15
$Z_{i,k}^1 * q_{i,k} = Z_{i,k}^1 * (Q_k - SOC_{i,k}^1)$ $Z_{i,k}^2 * q_{i,k} = Z_{i,k}^2 * (Q_k - SOC_{i,k}^2)$ $Z_{i,k}^3 * q_{i,k} = Z_{i,k}^3 * (Q_k - SOC_{i,k}^3)$	16
$Z_{i,k}^1 * t_{i,k} = Z_{i,k}^1 * (q_{i,k} / r_i)$ $Z_{i,k}^2 * t_{i,k} = Z_{i,k}^2 * (q_{i,k} / r_i)$ $Z_{i,k}^3 * t_{i,k} = Z_{i,k}^3 * (q_{i,k} / r_i)$	17
$x_{i,j,k} * (SOC_{i,k}^1 - SOC_{i,k}^2) = d_{i,j} * m * x_{i,j,k}$	18
$SOC_{i,k}^2 * Z_{i,k}^1 = Q_k * Z_{i,k}^1$ $SOC_{i,k}^2 * Z_{i,k}^2 = Q_k * Z_{i,k}^2$ $SOC_{i,k}^2 * Z_{i,k}^3 = Q_k * Z_{i,k}^3$	19
$\sum_{j \in V} \sum_{i \in V} x_{ijk} d_{ijk} \leq \psi_k$	20

Πίνακας 8 Περιορισμοί Μοντέλου

Οι περιορισμοί 1, 2, 3 υπολογίζουν το κόστος ταξιδιού των ηλεκτρικών οχημάτων ανά μονάδα χρόνου, το σταθερό κόστος χρήσης για αποστολή ενός οχήματος και το συνολικό κόστος φόρτισης αντίστοιχα. Η αντικειμενική συνάρτηση 4 ελαχιστοποιεί το άθροισμα του

κόστους κατά την διανομή των ηλεκτρικών φορτηγών. Ο περιορισμός 5 δηλώνει ότι ένα όχημα k είτε δεν θα ξεκινήσει από την αποθήκη, είτε θα ξεκινήσει κατευθυνόμενο σε έναν πελάτη. Ο περιορισμός 6 ορίζει ότι ο κάθε πελάτης εξυπηρετείται ακριβώς μια φορά από ένα και μόνο ένα όχημα.

Ο περιορισμός 7 διασφαλίζει ότι η μέγιστη χωρητικότητα του οχήματος πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα της ζήτησης των πελατών που πρέπει να εξυπηρετήσει. Ο περιορισμός 8 δηλώνει ότι το κάθε φορτηγό είναι πλήρως φορτισμένο όταν φύγει από την αποθήκη. Ο περιορισμός 9 ορίζει ότι η φόρτιση της μπαταρίας δεν αλλάζει σε έναν κόμβο πελάτη.

Ο περιορισμός 10 δηλώνει ότι η κατάσταση μπαταρίας του οχήματος δεν είναι αρνητική κατά την άφιξή του σε οποιονδήποτε κόμβο. Συγκεκριμένα, εάν ο επόμενος σταθμός είναι κόμβος πελάτη, το όχημα πρέπει να έχει αρκετή ενέργεια για να μεταβεί από τον τρέχοντα κόμβο i στον επόμενο κόμβο j και στη συνέχεια από τον κόμβο j στον πλησιέστερο σταθμό φόρτισης l . Εναλλακτικά, εάν ο επόμενος σταθμός είναι σταθμός φόρτισης ή αποθήκη 0 , το όχημα πρέπει να έχει αρκετή ενέργεια από τον τρέχοντα κόμβο i προς τον πλησιέστερο σταθμό φόρτισης ή την αποθήκη 0 .

Ο περιορισμός 11 διασφαλίζει ότι ο αριθμός των οχημάτων που φτάνουν σε έναν κόμβο είναι ίσος με τον αριθμό των οχημάτων που αναχωρούν από αυτόν. Ο περιορισμός 12 δηλώνει ότι απαγορεύεται ένα όχημα να επιστρέψει από έναν κόμβο j στον κόμβο i όπου τον έχει ξανά επισκεφτεί.

Ο περιορισμός 13 ορίζει ότι η ενέργεια που προέρχεται από όλες τις πηγές τροφοδότησης (δίκτυο, ΑΠΕ και μπαταρία) πρέπει να μπορεί να εξυπηρετήσει την ενέργεια των οχημάτων που θέλουν να φορτίσουν. Ο περιορισμός 14 δηλώνει ότι όποιο ηλεκτρικό όχημα ξεκινήσει από την αποθήκη και θα επιστρέψει πάλι εκεί. Ο περιορισμός 15 ορίζει ότι το $rate$ της μπαταρίας του οχήματος μετά το δρομολόγιο του, και εφόσον αναχωρήσει από έναν σταθμό I δεν μπορεί να είναι μικρότερο από το ελάχιστο όριο μπαταρίας.

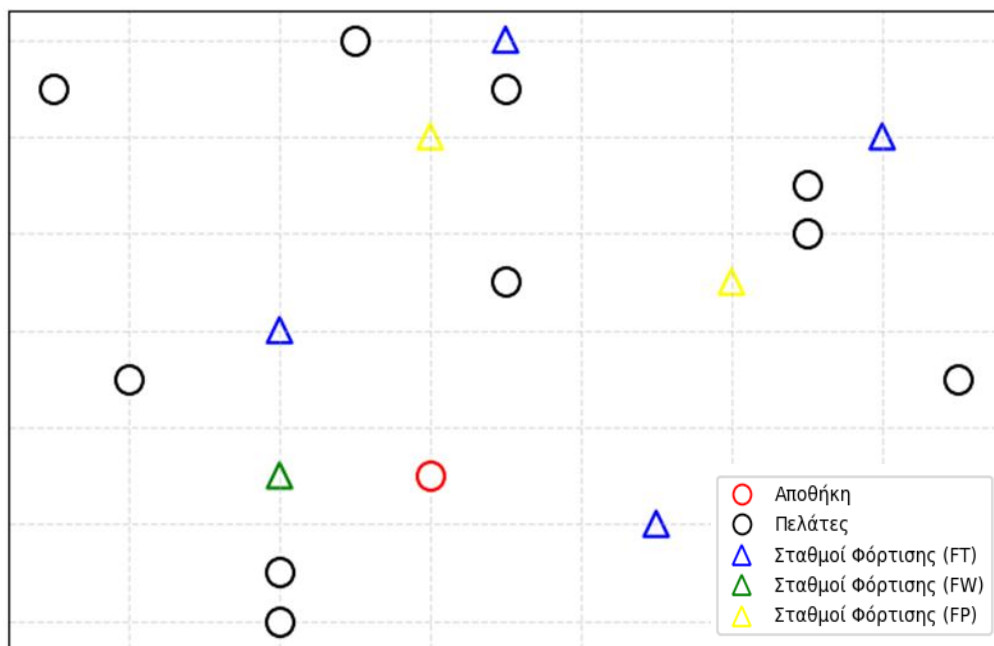
Ο περιορισμός 16 ορίζει ότι όταν το όχημα k επισκέπτεται τον σταθμό φόρτισης (TCS - Traditional Charging Station), η ποσότητα φόρτισης $q_{i,k}$ πρέπει να είναι ίση με τη διαφορά μεταξύ της πλήρους χωρητικότητας της μπαταρίας Q_k και της κατάστασης φόρτισης πριν από τη φόρτιση $SOC^1_{i,k}$.

Ο περιορισμός 17 εξασφαλίζει ότι ο χρόνος φόρτισης είναι ρεαλιστικός και εξαρτάται από την ποσότητα φόρτισης και την ισχύ του σταθμού.

Ο περιορισμός 18 σχετίζεται με την κατανάλωση ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων κατά τη διάρκεια του ταξιδιού τους. Εξασφαλίζει ότι η διαφορά στην κατάσταση φόρτισης SOC πριν και μετά τη μετακίνηση ενός οχήματος ισούται με την ενέργεια που καταναλώθηκε για να διανυθεί η απόσταση μεταξύ δύο κόμβων. Ο περιορισμός 19 αναφέρει ότι όταν ένα όχημα επισκέπτεται συγκεκριμένες κατηγορίες σταθμών (FT, FW, FP), η στάθμη της μπαταρίας του ($SOC^2_{i,k}$) είναι ίση με τη μέγιστη χωρητικότητά του ($Q[k]$), με άλλα λόγια το όχημα φορτίζεται πλήρως. Τέλος ο περιορισμός 20 ορίζει ότι τα ηλεκτρικά φορτηγά μπορούν να διανύσουν μια μέγιστη απόσταση.

4. Υπολογιστικά Πειράματα

Στην ενότητα αυτή, παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τα υπολογιστικά πειράματα που διεξήχθησαν στο πλαίσιο αξιολόγησης της αποτελεσματικότητας του προτεινόμενου μοντέλου. Στη συνέχεια, αναλύονται τα σενάρια που εφαρμόστηκαν για διαφορετικά είδη δικτύων, ενώ πραγματοποιείται και ανάλυση ευαισθησίας για να εντοπιστούν ποιες παράμετροι επηρεάζουν καθοριστικά στην εύρεση βέλτιστης λύσης. Τα υπολογιστικά πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε Python 3.11 (64-bit), χρησιμοποιώντας το Gurobi Optimizer 11.02 ως solver βελτιστοποίησης σε υπολογιστή με επεξεργαστή Intel(R) Core (TM) i7-7700HQ 2.80GHz και 8 GB RAM



4.1. Toy Network

Σχήμα 1 Τοπολογία του Toy Network

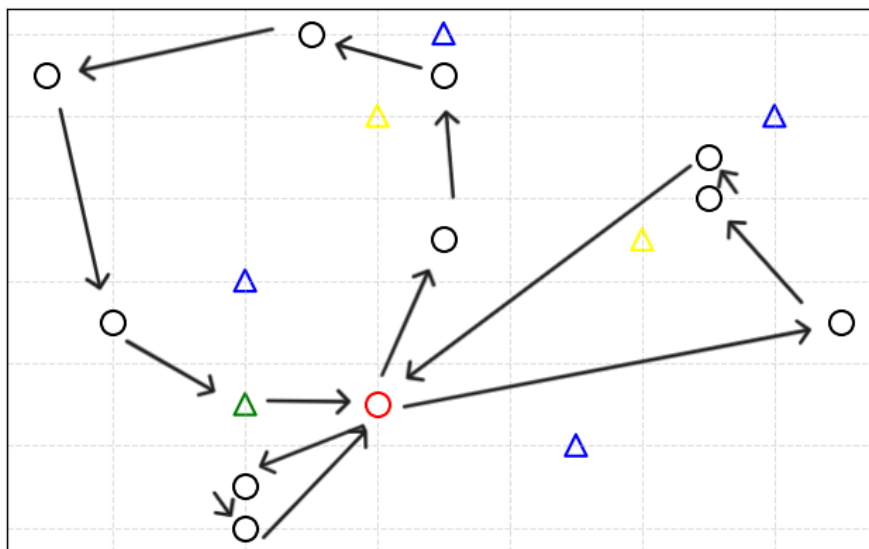
Για να διασφαλιστεί η ορθότητα και η αξιοπιστία του προτεινόμενου μοντέλου γίνεται

εφαρμογή αυτού σε ένα μικρό και πιο απλοποιημένο οδικό δίκτυο. Το απλοποιημένο δίκτυο απεικονίζεται στο Σχ. 1 Περιλαμβάνει 1 τοποθεσία αποθήκης, η οποία απεικονίζεται με κόκκινο κύκλο , 10 τοποθεσίες πελατών, οι οποίες αναπαρίστανται με ένα μαύρο κύκλο, και 7 σταθμούς φόρτισης, που αναπαρίστανται με 3 διαφορετικά χρώματα τριγώνων.(μπλε για τους παραδοσιακούς σταθμούς φόρτισης , κίτρινο για τους σταθμούς με φωτοβολταϊκά και πράσινο για τους σταθμούς που λειτουργούν με ανεμογεννήτριες)

Θεωρούμε ότι υπάρχουν 3 ηλεκτρικά φορτηγά , τα οποία κατευθύνονται σε μία από τις προκαθορισμένες τοποθεσίες. Κάθε ηλεκτρικό φορτηγό είναι μεσαίοι τύπου, με χωρητικότητα μπαταρίας ίση με 100 kWh, έκαστο. Όπως προκύπτει, επιτυγχάνεται η εύρεση βέλτιστης λύσης.

Αριθμός Οχημάτων	Σταθμοί Φόρτισης	Πελάτες	Κόμβοι	Best Objective	Gap	Seconds
3	7	10	17	57.52	0	12

Πίνακας 9 Toy Network



Σχήμα 1 Δρομολόγια Φορτηγών

Όχημα	Διαδρομή
1	$0 \rightarrow 12 \rightarrow 17 \rightarrow 15 \rightarrow 0$
2	$0 \rightarrow 8 \rightarrow 11 \rightarrow 16 \rightarrow 13 \rightarrow 9 \rightarrow 4 \rightarrow 0$
3	$0 \rightarrow 10 \rightarrow 14 \rightarrow 0$

Πίνακας 10 Δρομολόγια φορτηγών με τους κόμβους που επισκέπτονται

4.2. Αριθμητικά Αποτελέσματα

Για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του προτεινόμενου μοντέλου, εξετάστηκαν 4 κατηγορίες δικτύων με 5,10,15 και 20 ηλεκτρικά φορτηγά και δημιουργήθηκαν 5 σενάρια δεδομένων για κάθε κατηγορία, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές αποστάσεις μεταξύ των σταθμών φόρτισης, διαφορετικούς χρόνους διαδρομής και ενεργειακές καταναλώσεις.

Κατηγορία	Αριθμός Οχημάτων (Κ)	Σταθμοί Φόρτισης (S)	Πελάτες (C)	Κόμβοι (V)	Χρονικές Περίοδοι (T)
Κατηγορία 1	5	10	20	30	24
Κατηγορία 2	10	15	30	45	24
Κατηγορία 3	15	20	50	70	24
Κατηγορία 4	20	25	60	85	24

Πίνακας 11 Κατηγορίες πειραμάτων

Στο κάθε σενάριο της αντίστοιχης κατηγορίας ο αριθμός των οχημάτων , οι σταθμοί φόρτισης οι πελάτες, οι κομβοί και οι χρονικές περίοδοι παρέμεναν σταθεροί. Ο τύπος φορτηγών που χρησιμοποιήθηκε είναι ετερογενώς κατανομημένος, δεδομένου ότι έχουν θεωρηθεί δύο είδη ηλεκτρικών οχημάτων (light and medium trucks) βάσει της χωρητικότητας της μπαταρίας τους.

Για την επίλυση των πειραμάτων, θεωρήθηκε ότι ο χρόνος διαδρομής και η ενεργειακή κατανάλωση συνδέονται με την απόσταση ταξιδιού. Επιπλέον, έχει οριστεί μια ελάχιστη αποδεκτή στάθμη μπαταρίας του οχήματος, για όλα τα σενάρια SOC_{min} =25 , ενώ τα κόστη, η μέγιστη αποδεκτή απόσταση που καλούνται να διανύσουν τα οχήματα για να φορτίσουν είναι σταθερά.

1^η κατηγορία

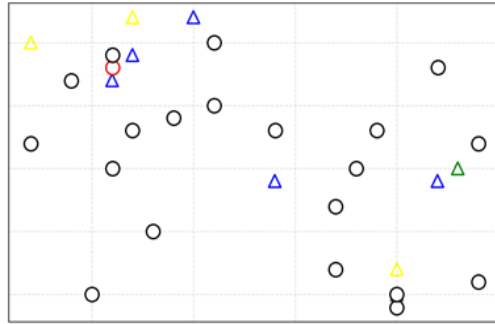
K5_S10_C20_V25_T24	BEST OBJECTIVE	GAP (%)	SECONDS
1ο ΣΕΝΑΡΙΟ	99.80	0.00	16.23
2ο ΣΕΝΑΡΙΟ	105.97	0.00	14.05
3ο ΣΕΝΑΡΙΟ	106.92	0.00	19.36
4ο ΣΕΝΑΡΙΟ	104.64	0.00	12.03
5ο ΣΕΝΑΡΙΟ	106.08	0.00	15.13

Πίνακας 12 Αποτελέσματα 1^{ης} κατηγορίας

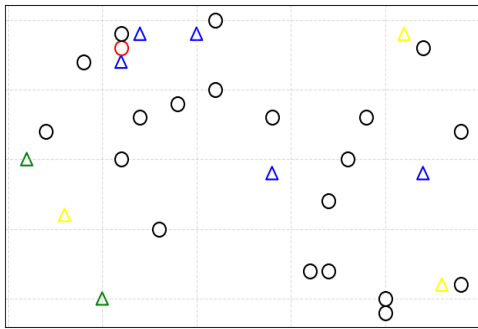
Ενδεικτικά παρουσιάζεται στα σχήματα 7,8,9,10,11 η τοπολογία του εκάστοτε σεναρίου της κατηγορίας 1.



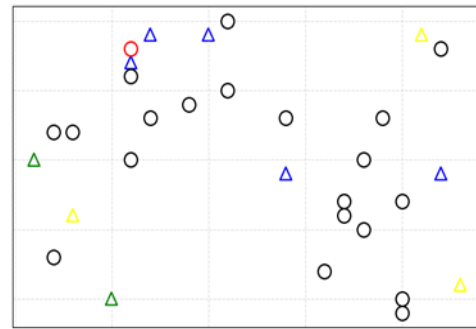
Εικόνα 2 Δίκτυο $I^{ης}$ κατηγορίας $1^{ου}$ σεναρίου



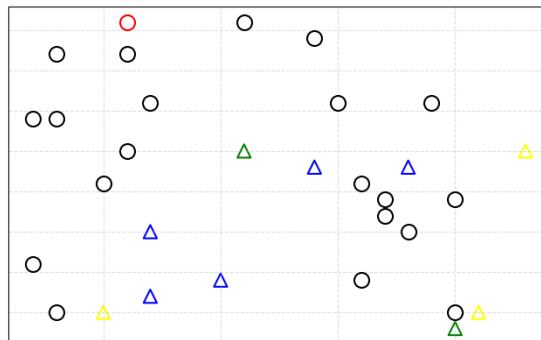
Εικόνα 8 Δίκτυο $I^{ης}$ κατηγορίας $2^{ου}$ σεναρίου



Εικόνα 3 Δίκτυο $I^{ης}$ κατηγορίας $3^{ου}$ σεναρίου



Εικόνα 10 Δίκτυο $I^{ης}$ κατηγορίας $4^{ου}$ σεναρίου



Εικόνα 4 Δίκτυο $I^{ης}$ κατηγορίας $5^{ου}$ σεναρίου

Από την πρώτη κατηγορία το συνολικό κόστος της βελτιστοποίησης που δίνει το μοντέλο (π.χ 99.79898 στο 1ο σενάριο) εκφράζει το συνολικό κόστος λειτουργίας του συστήματος για να επιτευχθεί μια βέλτιστη λύση στο πρόβλημα δρομολόγησης.

Η τιμή που προκύπτει αντιπροσωπεύει το συνολικό κόστος που απαιτείται για:

- Να εξυπηρετηθούν όλοι οι πελάτες (εξασφαλίζοντας ότι τηρούνται όλοι οι περιορισμοί).
- Να διανυθούν όλες οι απαραίτητες διαδρομές.
- Να φορτιστούν τα οχήματα όσο χρειάζεται ώστε να ολοκληρωθούν οι διαδρομές.
- Να επιστρέψουν όλα τα οχήματα στην αποθήκη(depot).

Η διαφοροποίηση στις τιμές οφείλεται κυρίως στις διαφορετικές τιμές που έχει πάρει ο χρόνος διαδρομής από κόμβο σε κόμβο.

Το $GAP = 0$ επιβεβαιώνει ότι το μοντέλο έχει εξαντλήσει όλες τις πιθανές λύσεις και έχει βρει την καλύτερη δυνατή (optimal).

2^η κατηγορία

K10_S15_C30_V45_T24	BEST OBJECTIVE	GAP (%)	SECONDS
1ο ΣΕΝΑΡΙΟ	201.65	0.00	60.54
2ο ΣΕΝΑΡΙΟ	206.49	0.00	76.93
3ο ΣΕΝΑΡΙΟ	210.33	0.00	49.16
4ο ΣΕΝΑΡΙΟ	213.95	0.00	109.80
5ο ΣΕΝΑΡΙΟ	211.49	0.00	63.98

Πίνακας 12 Αποτελέσματα 2^{ης} κατηγορίας

3^η κατηγορία

K15_S20_C50_V70_T24	BEST OBJECTIVE	GAP (%)	SECONDS
1ο ΣΕΝΑΡΙΟ	287.08	0.00	1436.47
2ο ΣΕΝΑΡΙΟ	273.45	0.00	1358.23
3ο ΣΕΝΑΡΙΟ	303.67	0.00	1314.16
4ο ΣΕΝΑΡΙΟ	308.64	0.00	1442.11
5ο ΣΕΝΑΡΙΟ	272.88	0.00	1380.43

Πίνακας 13 Αποτελέσματα 3^{ης} κατηγορίας

4^η κατηγορία

K20_S30_C60_V90_T24	BEST OBJECTIVE	GAP (%)	SECONDS
1ο ΣΕΝΑΡΙΟ	381.87	0.00	2053.46
2ο ΣΕΝΑΡΙΟ	373.14	0.00	1986.33
3ο ΣΕΝΑΡΙΟ	388.37	0.00	1911.78
4ο ΣΕΝΑΡΙΟ	378.46	0.00	2098.11
5ο ΣΕΝΑΡΙΟ	391.09	0.00	1956.76

Πίνακας 14 Αποτελέσματα 4^{ης} κατηγορίας

Παρατηρούμε ότι όσο πιο πολύπλοκο είναι το δίκτυο μας, τόσο αυξάνεται το κόστος (best objective), ενώ καταγράφονται και υψηλοί υπολογιστικοί χρόνοι για την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Η αύξηση του κόστους ανά κατηγορία οφείλεται στο γεγονός ότι όσο περισσότερο στόλο έχουμε διαθέσιμο, τόσο περισσότεροι πελάτες θα εξυπηρετηθούν, επομένως αυξάνονται και οι ανάγκες για φόρτιση, δεδομένου ότι θα πραγματοποιούνται μεγαλύτερες διαδρομές, επομένως θα αυξάνονται τα επιμέρους κόστη της αντικειμενικής συνάρτησης,

4.3. Ανάλυση Ευαισθησίας

Για την αξιολόγηση των κρίσιμων παραμέτρων του μοντέλου, διεξήχθησαν επιπλέον υπολογιστικά πειράματα, δοκιμάζοντας διάφορες τιμές για την μέγιστη απόσταση που μπορούν να διανύσουν τα ηλεκτρικά φορτηγά. Συγκεκριμένα, ένα σενάριο από κάθε κατηγορία εξετάστηκε για τρία διαφορετικά επίπεδα μέγιστης απόστασης: Χαμηλό (min), Μεσαίο (average) και Υψηλό (max).

	$\psi_{\min}(40)$	$\psi_{\text{average}}(60)$	$\psi_{\max}(80)$
1η Κατηγορία	104.33	99.80	95.65
2η Κατηγορία	210.49	201.65	188.84
3η Κατηγορία	286.99	272.89	255.13
4η Κατηγορία	391.22	373.14	354.88

Πίνακας 15 Αποτελέσματα Ανάλυσης Ευαισθησίας

Από τα αποτελέσματά του πίνακα 15 παρατηρούμε ότι όσο αυξάνεται το $y_{\max}$. Τόσο το best objective μειώνεται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το όχημα έχει την δυνατότητα να επισκεφτεί περισσότερους κόμβους και να εξυπηρετήσει περισσότερους πελάτες.. Στην αντίθετη περίπτωση όσο μειώνεται η μέγιστη απόσταση του ψ , το best objective αυξάνεται διότι αν και μειώνονται τα κόστη μετακίνησης, δεδομένου ότι το όχημα εξυπηρετεί πιο κοντινά δρομολόγια, αυξάνονται τα λειτουργικά κόστη, καθώς για να εξυπηρετηθούν όλοι οι πελάτες, απαιτείται περισσότερος στόλος οχημάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι προσεγγίστηκαν τα μέγιστα και τα ελάχιστα όρια του ψ , καθώς παρατηρήθηκε για $\psi < 40\text{km}$ δεν προέκυψε βέλτιστη λύση, ενώ για $\psi > 80\text{km}$ παρατηρήθηκε ότι δεν υπήρχε μεταβολή του best objective.

5. Επίλογος

Η βελτιστοποίηση της δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων (Electric Vehicle Routing Problem - EVRP) αναδεικνύεται ως ένα σημαντικό ζήτημα για τη σύγχρονη βιομηχανία μεταφορών. Η ολοένα αυξανόμενη απαίτηση για βιώσιμες λύσεις και η στροφή προς την ηλεκτροκίνηση καθιστούν αναγκαία τη δημιουργία έξυπνων μοντέλων που ενσωματώνουν παράγοντες όπως η αυτονομία των μπαταριών, η διαθεσιμότητα των σταθμών φόρτισης και οι πράσινες πρακτικές ενσωματωμένες στη διαδικασία φόρτισης.

Πιο συγκεκριμένα, στην παρούσα διπλωματική μελετήθηκε η ένταξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη διαδικασία φόρτισης εμπορευματικών οχημάτων και πώς εν τέλει επηρεάζεται το επίπεδο εξυπηρέτησης των πελατών και το συνολικό κόστος.

Προτείνεται μια εκτεταμένη μορφή του μοντέλου των (Fan, 2023) σχεδιασμένο ως μοντέλο γραμμικού ακέραιου προγραμματισμού. Το μοντέλο επιλύεται με χρήση του Gurobi Optimization solver, δεδομένου ότι στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους, λαμβάνοντας υπόψη κόστη μετακίνησης, κόστη φόρτισης και λειτουργικά κόστη. Στο μοντέλο λαμβάνονται υπόψη τρία είδη σταθμών φόρτισης; Παραδοσιακού σταθμού (άντλησης ενέργειας από το δίκτυο), σταθμό φόρτισης αντλούμενης ενέργειας από φωτοβολταϊκά, καθώς και σταθμό φόρτισης τροφοδοτούμενος με αιολική ενέργεια.

Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας και της αποτελεσματικότητας του προτεινόμενου μοντέλου, διεξήχθησαν υπολογιστικά πειράματα αρχικά σε ένα μικρό δίκτυο (toy network) για να διασφαλιστεί ότι το μοντέλο μπορεί να επιλυθεί βέλτιστα, και εν συνεχεία σε διαφορετικά μεγέθη και είδη δικτύων. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων προκύπτει ότι όσο πιο πολύπλοκο είναι το δίκτυο, το οποίο εξετάζεται τόσο πιο υψηλό είναι το best objective, δηλαδή αυξάνεται το συνολικό κόστος.

Στο πλαίσιο ελέγχου της επιρροής της παραμέτρου της απόστασης στη βέλτιστη λύση, διεξήχθη ανάλυση ευαισθησίας. Χρησιμοποιήθηκαν τρία επίπεδα τιμών (ελάχιστο, μέσο και

μέγιστο) για την μέγιστη απόσταση που μπορεί να καλύψει ένα όχημα για να φτάσει σε έναν κόμβο του δεδομένου δικτύου. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι όσο υψηλότερη ήταν η τιμή της μέγιστης απόστασης για τα διάφορα μεγέθη δικτύων, τόσο μειωνόταν το συνολικό κόστος.

Εν κατακλείδι, η διπλωματική αυτή αποτελεί ένα βήμα τακτικού σχεδιασμού έξυπνων συστημάτων φόρτισης για εμπορευματικά οχήματα. Η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στον τομέα των εμπορευματικών μεταφορών αποτελεί μια τεχνολογική καινοτομία που συμβάλλει στην βελτιστοποίηση των αγορών και του κόστους, αλλά παρουσιάζει και κάποιες προκλήσεις. Στις προκλήσεις συγκαταλέγονται ελλείψεις υποδομών και τεχνογνωσίας, καθώς και η αβεβαιότητα προβλέψεων παραγωγής ενέργειας για μετατροπή σε ηλεκτρική ώστε να μπορεί να καλυφθεί επαρκώς η ζήτηση για φόρτιση. Τέλος, για μελλοντική έρευνα, ενδιαφέρον θα παρουσίαζε να ληφθούν υπόψη οι διακυμάνσεις του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας και η επιρροή τους στη τελική επιλογή φόρτισης, η αβεβαιότητα των ΑΠΕ, λόγω καιρικών συνθηκών στην παραγωγή ενέργειας, καθώς και η εφαρμογή του προτεινόμενου μοντέλου σε ένα πραγματικό δίκτυο.

Βιβλιογραφία

- C. Battistelli, L. B. (2012). Optimal energy management of small electric energy systems including V2G.
- Çatay and Sadati, Ç. (2023). An improved matheuristic for solving the electric vehicle routing problem.
- Cesar Diaz-Londono, F. R. (2020). Optimal Operation Strategy for Electric Vehicles Charging Stations with Renewable Energy Integration.
- Ch. Venkateswarlu, S. E. (2020). Stochastic Global Optimization Methods and Applications to Chemical, Biochemical, Pharmaceutical and Environmental Processes.
- Domínguez-Navarro, J. (2019). Design of an electric vehicle fast-charging station with integration of renewable energy and storage systems.
- Fan, L. (2023). Electric vehicle routing problem considering energy differences of charging stations.
- Ghazale Haddadian, N. K. (2016). Optimal coordination of variable renewable resources and electric vehicles as distributed storage for energy sustainability.
- Gkiotsalitis, K. (2023). Public Transport Optimization.
- Guedria. (2016). Urban Freight Transport: From Optimized Routes to Robust Routes.
- Jianqiang Kang, F. Y. (2014). Comparison of comprehensive properties of Ni-MH (nickel-metal hydride) and Li-ion (lithium-ion) batteries in terms of energy efficiency.
- Kevin Mets, F. D. (2012). Distributed smart charging of electric vehicles for balancing wind energy.
- Latha, B. (2024). Advances in EV wireless charging technology – A systematic review and future trends.
- Liu, H. (2015). Battery Swap Station Location Routing Problem with Capacitated Electric Vehicles.
- Makeen, P. (2023). Smart techno-economic operation of electric vehicle charging station in Egypt.
- Md Abdul Quddus, M. K. (2019). Modeling electric vehicle charging station expansion with an integration of renewable energy and Vehicle-to-Grid sources.
- Napoli, G. (2021). Freight distribution with electric vehicles: A case study in Sicily. RES, infrastructures and vehicle routing.
- Nima Khosravi, M. D. (2024). Enhancing battery management for HEVs and EVs: A hybrid approach for parameter identification and voltage estimation in lithium-ion battery models.
- op.europa.eu. (χ. χ.). Ε ν έ ρ γ ε ι α α π ό α ν α ν ε ώ σ ι μ ε ς π η γ έ ς γ ι α β ι ώ σ ι μ η α γ ρ ο τ ι κ ή α ν ά π τ υ ξ η. Α ν ά κ τ η σ η α π ό <https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/renewable-energy-5-2018/el/>.
- Pantos, M. (2011). Stochastic optimal charging of electric-drive vehicles with renewable energy.
- Peter Makeen, H. A. (2023). Smart techno-economic operation of electric vehicle charging

station in Egypt.

Pranjal Barman, L. D. (2023). Renewable energy integration with electric vehicle technology: A review of the existing smart charging approaches.

R. Sasirega, S. P. (2025). Secure and incentivized V2G Participation with blockchain and game theory.

Reza Sa' adati, M. J.-N. (2021). Allocation of RESs and PEV Fast-Charging Station on Coupled , Transportation and Distribution Networks.

Ryutaka Yudhistira, D. K. (2022). A comparative life cycle assessment of lithium-ion and lead-acid batteries for grid energy storage.

Schiffer and Walther. (2017). The electric location routing problem with time windows and partial.

Sebastian Gottwalt, A. S. (2013). Assessing Load Flexibility in Smart Grids: Electric Vehicles for Renewable Energy Integration.

Shujuan Wang, Q. Z. (2022). V2V-CoVAD: A vehicle-to-vehicle cooperative video alert dissemination mechanism for Internet of Vehicles in a highway environment.

Tas, D. (2013). Vehicle routing problem with stochastic travel times including soft time, windows and service costs.

Teng, Y. (2024). Solving dynamic vehicle routing problem with time windows by ant colony.

Verma, A. (2018). Electric vehicle routing problem with time windows, recharging stations and battery swapping stations.

Wang, Q. (2020). Optimization of Electric Vehicle Routing Problem Using Tabu Search.

Yifan Li, R. K. (2012). An Energy Efficient Solution: Integrating Plug-In Hybrid Electric Vehicle in Smart Grid with Renewable Energy.

Yujie Liu, L. J. (2023). Energy management of green charging station integrated with photovoltaics and energy storage system based on electric vehicles classification.

Zhenfeng, G. (2017). The Electric Vehicle Routing Problem with Time using genetic algorithm.

Zhixiong Luo, F. H. (2020). Joint deployment of charging stations and photovoltaic power plants for electric vehicles.

K o λ ι ός, K. (2019). Σ χ ε δ ι α σ μ ός σ τ α θ μ ο ν τ α χ ε ί ας φ ό ρ τ ι σ ης.

X ρ ι σ τ ι α ν ι δ η, E. (2020). T ο π ρ ό β λ η μ α δ ρ ο μ ο λ ό γ η σ ης τ ω ν ο χ η μ á τ ω ν : M ε λ έ τ η Π ε ρ ί π τ ω σ ης.

.

Appendix

```
import gurobipy as gp
import matplotlib
from gurobipy import GRB
import random
import math
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib import style
import matplotlib
import networkx as nx
from matplotlib.lines import Line2D

matplotlib.use('TkAgg')

#sets6

#σ τ α θ μ ο ι φ ό ρ τ ι σ ης
S = F = {1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10}
FT = {1, 2, 3, 4, 5}
FP = {6, 7, 8}
FW = {9, 10}
#σ ύ ν ο λ ο ο χ η μ á τ ω ν
K = {1, 2, 3, 4, 5}
#Σ ύ ν ο λ ο π ε λ α τ ώ ν
C = {11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30}
#Σ ύ ν ο ο κ ό μ β ω ν
V
=
{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30}
#time slots
T= {1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24}
#PARAMETERS

#χ ω ρ η τ ι κ ό τ η τ α μ π α τ α ρ ί ας ο χ ή μ α τ ος Q[k]
Q = {1: 129, 2: 147, 3: 145, 4: 95, 5: 103}

# Ο ρ ι σ μ ός depot
depot = 0
```

```

# Δ η μ ι ο υ ρ γ ι α γ ρ ά φ ο υ
G = nx.Graph()
G.add_nodes_from(V)

# Δ η μ ι ο υ ρ γ ι α τ υ χ α ί ω ν σ υ ν τ ε τ α γ μ έ ν ω ν γ ι α κ ά θ ε κ ό μ β ο
np.random.seed(42) # Σ τ α θ ε ρ ό seed γ ι α α ν α π α ρ α γ ω γ ή
node_positions = {i: (np.random.randint(5, 29), np.random.randint(9, 29)) for i in V}

# Υ π ο λ ο γ ι σ μ ό ς α π ο σ τ ά σ ε ω ν (Ε υ κ λ ε ί δ ε ι α α π ό σ τ α σ η)
d = {}
for i in V:
    for j in V:
        if i != j:
            d[i, j] = np.linalg.norm(np.array(node_positions[i]) -
np.array(node_positions[j]))
        else:
            d[i, j] = 0 # Α π ό σ τ α σ η κ ό μ β ο υ μ ε τ ο ν ε α υ τ ό τ ο υ = 0

# Ε κ τ ύ π ω σ η α π ο σ τ ά σ ε ω ν
print("Π ί ν α κ α ς α π ο σ τ ά σ ε ω ν:")
print(" || ".join([f"A π ό {i} - {j}: {d[i, j]:.2f}"
for i in V for j in V if i < j]))

# Δ η μ ι ο υ ρ γ ι α γ ρ ά φ ο υ
G = nx.Graph()
G.add_nodes_from(V)

# Σ χ ε δ ί α σ η τ ο υ γ ρ ά φ ο υ
plt.figure(figsize=(8, 5)) # Μ ι κ ρ ό τ ε ρ ο μ έ γ ε θ ο ς ε ι κ ό ν α ς
pos = node_positions # Θ έ σ ε ι ς κ ό μ β ω ν

# Σ χ ε δ ί α σ η depot (α π ο θ ή κ η) ω ς ά δ ε ι ο ς κ ό κ κ ι ν ο ς κ ύ κ λ ο ς
nx.draw_networkx_nodes(
    G,
    pos,
    nodelist=[0], # Depot

```

```

        node_size=150,
        node_color="white",
        edgecolors="red",
        linewidths=1.5,
    )

# Σ χ ε δ ί α σ η   π ε λ α τ ώ ν   ω ς   ά δ ε ι ο ι   π ρ ά σ ι ν ο ι   κ ύ κ λ ο ι
nx.draw_networkx_nodes(
    G,
    pos,
    nodelist=list(C),
    node_size=150,
    node_color="white",
    edgecolors="black",
    linewidths=1.5,
)

# Σ χ ε δ ί α σ η   σ τ α θ μ ώ ν   φ ό ρ τ ι σ η ς   ω ς   ά δ ε ι α   τ ρ ί γ ω ν α   μ ε
# π ε ρ ί γ ρ α μ μ α
for station_set, color in [(FT, "blue"), (FW, "green"), (FP, "yellow")]:
    coords = np.array([pos[i] for i in station_set])
    plt.scatter(
        coords[:, 0], coords[:, 1],
        s=120, facecolors="none", edgecolors=color, marker="^", linewidths=1.5
    )

# Σ χ ε δ ί α σ η   α κ μ ώ ν
nx.draw_networkx_edges(G, pos, edge_color="gray", alpha=0.5)

# Σ χ ε δ ί α σ η   ε τ ι κ ε τ ώ ν
#nx.draw_networkx_labels(G, pos, font_size=6)

# Δ η μ ι ο υ ρ γ ί α   υ π ο μ ν ή μ α τ ο ς
legend_elements = [
    Line2D([0], [0], marker='o', color='w', markerfacecolor='white',
    markeredgecolor='red', markersize=8, label="Α π ο θ ή κ η"),
    Line2D([0], [0], marker='o', color='w', markerfacecolor='white',
    markeredgecolor='black', markersize=8, label="Π ε λ ά τ ε ς"),
    Line2D([0], [0], marker='^', color='w', markerfacecolor='none',
    markeredgecolor='blue', markersize=8, label="Σ τ α θ μ ο ι   Φ ό ρ τ ι σ η ς (FT)"),
    Line2D([0], [0], marker='^', color='w', markerfacecolor='none',
    markeredgecolor='green', markersize=8, label="Σ τ α θ μ ο ι   Φ ό ρ τ ι σ η ς (FW)"),

```

```

Line2D([0], [0], marker='^', color='w', markerfacecolor='none',
markedgecolor='yellow', markersize=8, label="Σ τ α θ μ ο ι Φ ό ρ τ ι σ η ς (FP)",
]

```

```

plt.legend(handles=legend_elements, loc="upper right", fontsize=8, frameon=True)
# Π ρ ο σ θ ή κ η υ π ο μ ν ή μ α τ ο ς ε ξ ω α π ό τ ο δ ι ά γ ρ α μ μ α
plt.legend(handles=legend_elements, loc="upper left", bbox_to_anchor=(1, 1), fontsize=8,
frameon=True)
plt.show()

```

```

# Π ρ ο σ θ ή κ η ά ξ ο ν ω ν κ α ι π λ έ γ μ α τ ο ς
plt.xlabel("", fontsize=10)
plt.ylabel("", fontsize=10)
plt.grid(True, linestyle="--", alpha=0.4)

```

```

plt.title("", fontsize=12)
plt.show()

```

```

# Σ ύ ν ο λ ι κ ό ς χ ρ ό ν ο ς δ ι α δ ρ ο μ ή ς α π ό τ ο ν κ ό μ β ο i σ ε κ ό μ β ο j
μ ε χ ρ ή σ η τ ο υ ο χ ή μ α τ ο ς k T[i, j, k]

```

```

Tsum = {}
for i in V:
    for j in V:
        for k in K:
            if i != j:
                Tsum[(i, j, k)] = d[(i, j)] * 1.2 # Α ν α ς π ο υ μ ε τ ο
η λ ε κ τ ρ ι κ ο ο χ η μ α ε χ ε ι μ ι α μ ε σ η τ α χ υ τ η τ α τ α u = 50
χ ι λ ι ο ε τ ρ α / ω ρ α T = (d/u) * 60 σ ε λ ε π τ α ---> T = d * 1,2
            else:
                Tsum[(i, j, k)] = 0
#print("Random energy Tsum[i, j, k]:")
#print(Tsum)

```

```

print("Time sum Tsum[i, j, 1] for the first vehicle only:")
print("  ||  ".join([f"({i}, {j}, {k}): {Tsum[(i, j, k)]:.2f}"
                    for (i, j, k) in Tsum if k == 1]))

#Το ελάχιστο state of charge που είναι αποδεκτό να έχει ένα
όχημα για να μπορεί να κινήθει και να πάει για
φόρτιση SOCmin
SOCmin = 25
#το κόστος ταξιδιού των ηλ. οχημάτων ανά μονάδα
χρόνου
c1 = 0.2
#σταθερό κόστος ρήσης
c2 = 15
#κόστος φόρτισης ανά μονάδα φόρτισης
c4 = 0.7
c5 = 0.5
c6 = 0.4
c7 = 0.9
c8 = 1.13
c9 = 1.1
#Ο γος ζήτησης του πελάτη D[i]
D
=
{11:14, 12:7, 13:11, 14:9, 15:11, 16:8, 17:11, 18:9, 19:20, 20:11, 21:26, 22:10, 23:17, 24:9, 25:16
, 26:8, 27:10, 28:5, 29:13, 30:18}
#Μέγεθος φορτίο του κάθε ηλεκτρικού οχήματος w[k] σε
kg
w = {1: 93, 2: 115, 3: 150, 4: 94, 5: 121, }
#ενεργειακή κατανάλωση του οχήματος k, κατά τη
διέλευση του τμήματος i, j E[i, j, k]

E = {}
for i in V:
    for j in V:
        for k in K:
            if i != j:
                E[(i, j, k)] = 0.2 * d[(i, j)] # Ενεργειακή
κατανάλωση / χιλι (m) * απόσταση
            else:
                E[(i, j, k)] = 0

print("Energy E[i, j, 1] for the first vehicle only:")

```

```

print(" || ".join([f"({i}, {j}): {E[(i, j, k)]:.2f}"
                    for (i, j, k) in E if k == 1]))

#charging rate r[i]
r = {1: 3, 2: 5, 3: 8, 4: 3, 5: 6, 6: 4, 7: 1, 8: 2, 9: 5, 10: 6 }
#energy consumption rate per driven km m
m = 0.000000001
#max possible travel distance
phi = 60
#energy derived from charging stations (trad,w,p) a[i]
a = { 1: 220, 2: 390, 3: 240, 4: 370, 5: 310, 6: 340, 7: 210, 8: 400, 9: 230, 10: 330 }
model = gp.Model()

#Variables
#1 ότα ν το όχημα περάσει από κόμβο, δ ι α φ ο ρ ε τ ι κ ά 0
X = model.addVars(V, V, K, vtype=GRB. BINARY, name="Xijk")
#1 ε ά ν π ά ε ι σ ε π ε λ ά τ η , δ ι α φ ο ρ ε τ ι κ ά 0
W = model.addVars(C, K, vtype=GRB. BINARY, name="Wik")
#State of charge τ ο υ ο χ ή μ α τ ο ς k, ό τ α ν φ τ ά σ ε ι σ τ ο ν κ ό μ β ο i
SOC1[i, k]
SOC1 = model.addVars(V, K, vtype=GRB. CONTINUOUS, name = "SOC1ik")
#υ π ο λ ε ι π ό μ ε ν η ε ν έ ρ γ ε ι α τ ο υ ο χ ή μ α τ ο ς k ό τ α ν α φ ή ν ε ι
τ ο ν κ ό μ β ο i SOC2[i, k]
SOC2 = model.addVars(V, K, vtype=GRB. CONTINUOUS, name = "SOC2ik")
#1 ότα ν το όχημα επισκεπτεται το σταθμό φόρτισης
traditional, wind and photovoltaic α ν τ ί σ τ ο ι χ α , δ ι α φ ο ρ ε τ ι κ ά 0
Z1 = model.addVars(FT, K, vtype=GRB. BINARY, name="zlik")
Z2 = model.addVars(FW, K, vtype=GRB. BINARY, name="z2ik")
Z3 = model.addVars(FP, K, vtype=GRB. BINARY, name="z3ik")
#Σ υ ν ο λ ι κ ό κ ό σ τ ο ς τ α ξ ι δ ι ο ύ
P1 = model.addVar(vtype=GRB. CONTINUOUS, name="P1")
# Σ τ α θ ε ρ ό κ ό σ τ ο ς χ ρ ή σ η ς ο χ ή μ α τ ο ς
P2 = model.addVar(vtype=GRB. CONTINUOUS, name="P2")
# Κ ό σ τ ο ς φ ό ρ τ ι σ η ς
P4 = model.addVar(vtype=GRB. CONTINUOUS, name="P4")
#η π ο σ ο τ η τ α φ ό ρ τ ι σ η ς τ ο υ η λ . ο χ ή μ α τ ο ς k i n K σ τ ο ν
σ τ α θ μ ό φ ό ρ τ ι σ η ς i i n S q[i, k]
q = model.addVars(S, K, vtype=GRB. CONTINUOUS, name = "qik")
#X ρ ό ν ο ς φ ό ρ τ ι σ η ς κ ά θ ε ο χ ή μ α τ ο ς k t[i, k]

```

```

t = model.addVars(S,K,vtype=GRB.CONTINUOUS,name = "tik")

#constraints
#(1) Κοστος ταξιδίου
model.addConstr(P1 == c1 * (sum(sum(sum (Tsum[i,j,k] * X[i,j,k] for k in K) for j in V)
for i in V)))
#(2) Σταθρο κοστος μεταφορας
model.addConstr(P2 == c2 * (sum(sum(X[0,j,k] for k in K) for j in C)))
#(3) Κοστος φορτισης
model.addConstr(P4 == c4 * (sum(sum(q[i,k] * Z1[i,k] for k in K) for i in FT))+ c5 *
(sum(sum(q[i,k] * Z2[i,k] for k in K) for i in FW))+ c6 * (sum(sum(q[i,k] * Z3[i,k]
for k in K) for i in FP)) + c7 * (sum(sum(t[i,k] * Z1[i,k] for k in K) for i in FT ))
+ c8 * (sum(sum(t[i,k] * Z2[i,k] for k in K) for i in FW ))+ c9 *
(sum(sum(t[i,k] * Z3[i,k] for k in K) for i in FP )))

#(5) Ενα οχημα ειναι θεταξει κενη σε ενα ποτο depot , ακριβως
μια φορα
model.addConstrs(sum(X[0,j,k]for j in C)== 1 for k in K)
#model.addConstrs(sum(X[0,j,k]for j in C)== 1 for k in K)

# Περιορισμοι εξυπηρετησης πελατων: Καθε πελατης
προπειναι να εξυπηρεταται
for j in C:
    model.addConstr(sum(X[i,j,k] for i in V if i != j for k in K) == 1 )

#####
#Αν το οχημα παει απο i σε j, δεν μπορει να επιστρεφει
απο j σε i
model.addConstrs(
    X[i,j,k] + X[j,i,k] <= 1
    for i in V for j in V if i != j for k in K
)
#####3

#(6) Οκαθε πελατης εξυπηρεταται ακριβως μια φορα
model.addConstrs((W[i,k] == sum(X[i,j,k] for j in V if j != i) for k in K for i in C) )
#(7) Η χωρητικοτητα του οχηματος ειναι μεγαλυτερη

```

```

α π ο τ ο α θ ρ ο ι σ μ α τ η ς ζ η τ η σ η ς τ ω ν π ε λ α τ ω ν
model.addConstrs(sum(D[i]*W[i,k] for i in C) <= w[k] for k in K)
#(8) Τ ο κ α θ ε φ ο ρ τ η γ ο ε ι ν α ι π λ η ρ ω ς φ ο ρ τ ι σ μ ε ν ο ο τ α ν
φ υ γ ε ι α π ο τ η ν α π ο θ η κ η
model.addConstrs(SOC2[0,k] == Q[k] for k in K)
#(9) Η κ α τ α σ τ α σ η φ ο ρ τ ι σ η ς τ η ς μ π α τ α ρ ι α ς δ ε ν α λ λ α ζ ε ι
σ τ ο ν κ ο μ β ο τ ο υ π ε λ α τ η
model.addConstrs(SOC1[i,k] == SOC2[i,k] for i in C for k in K)
#(10)
model.addConstrs(X[i, j, k] * SOC2[i, k] >= X[i, j, k] * (E[i, j, k] + E[j, l, k]) for i in C for
j in C for l in S for k in K)
model.addConstrs(X[i, j, k] * SOC2[i, k] >= X[i, j, k] * E[i, j, k] for i in C for j in S for
k in K)

#(11) Π ε ρ ι ο ρ ι σ μ ό ς σ υ ν έ χ ε ι α ς ρ ο ή ς
#model.addConstrs(sum(X[i, j, k] for j in V - {0, i}) - sum(X[j, i, k] for j in V - {0, i}) ==
0 for i in V - {0} for k in K)
for k in K:
    for i in V - {0}: # Γ ι α κ ά θ ε π ε λ ά τ η
        model.addConstr(
            sum(X[j, i, k] for j in V if j != i) == sum(X[i, j, k] for j in V if j != i),
        )

#11.3 Α π ο τ ρ έ π ο υ μ ε τ η ν ε π α ν α λ α μ β α ν ό μ ε ν η ε π ί σ κ ε φ η
σ τ ο ν ί δ ι ο κ ό μ β ο
model.addConstrs(
    sum(X[i, j, k] for j in V if i == j) <= 1 for i in V for k in K
)

model.addConstrs(X[i, i, k] == 0 for i in V for k in K)

#(12) Η ε ν ε ρ γ ε ι α π ο υ π ρ ο ε ρ χ ε τ α ι α π ο ο λ ε ς τ ι ς π η γ ε ς
τ ρ ο φ ο δ ο τ η σ η ς π ρ ε π ε ι ν α ε ξ υ π η ρ ε τ ε ι τ η ν ε ν ε ρ γ ε ι α
τ ω ν ο χ η μ α τ ω ν
model.addConstrs(sum(q[i, k] * Z1[i, k] for k in K) <= a[i] for i in FT)
model.addConstrs(sum(q[i, k] * Z2[i, k] for k in K) <= a[i] for i in FW)
model.addConstrs(sum(q[i, k] * Z3[i, k] for k in K) <= a[i] for i in FP)
#(13) Τ α ο χ η μ α τ α ξ ε κ ι ν ο υ ν κ α ι ξ α ν α ε π ι σ τ ρ ε φ ο υ ν σ τ ο
depot
#3 η Δ ι α φ ο ρ ο π ο ι η σ η

```

```
model.addConstrs(sum(X[i, 0, k] for i in V - {0}) == sum(X[0, i, k] for i in V - {0}) for k
in K)
```

```
# Π ε ρ ι ο ρ ι σ μ ό ς: Κ ά θ ε ό χ η μ α π ρ έ π ε ι ν α ε π ι σ τ ρ έ φ ε ι σ τ η ν
α π ο θ ή κ η α κ ρ ι β ώ ς μ ι α φ ο ρ ά
for k in K:
```

```
    model.addConstr(sum(X[j, 0, k] for j in C) == 1 )
```

```
#(14) Τ ο   r a t e   τ η ς   μ π α τ α ρ ι α ς   τ ο υ   ο χ η μ α τ ο ς   μ ε τ α   τ ο
δ ρ ο μ ο λ ο γ ι ο τ ο υ δ ε ν π ρ ε π ε ι ν α ε ι ν α ι μ ι κ ρ ο τ ε ρ ο α π ο
τ ο ε λ α χ ι σ τ ο r a t e
```

```
model.addConstrs(SOC2[i, k] >= SOCmin for i in C for k in K)
```

```
#(15)
```

```
model.addConstrs( Z1[i, k] * q[i, k] == Z1[i, k]*(Q[k]- SOC1[i, k]) for i in FT for k in K)
```

```
model.addConstrs( Z2[i, k] * q[i, k] == Z2[i, k]*(Q[k]- SOC1[i, k]) for i in FW for k in K)
```

```
model.addConstrs( Z3[i, k] * q[i, k] == Z3[i, k]*(Q[k]- SOC1[i, k]) for i in FP for k in K)
```

```
#(16)
```

```
model.addConstrs( Z1[i, k] * t[i, k] == Z1[i, k] * (q[i, k] / r[i]) for i in FT for k in K)
```

```
model.addConstrs( Z2[i, k] * t[i, k] == Z2[i, k] * (q[i, k] / r[i]) for i in FW for k in K)
```

```
model.addConstrs( Z3[i, k] * t[i, k] == Z3[i, k] * (q[i, k] / r[i]) for i in FP for k in K)
```

```
#(17)
```

```
model.addConstrs(X[i, j, k] * (SOC1[i, k] - SOC2[i, k]) == d[i, j] * m * X[i, j, k] for i in V
- {0} for j in V for k in K)
```

```
#(18)
```

```
model.addConstrs(SOC2[i, k] * Z1[i, k] == Q[k] * Z1[i, k] for i in FT for k in K)
```

```
model.addConstrs(SOC2[i, k] * Z2[i, k] == Q[k] * Z2[i, k] for i in FW for k in K)
```

```
model.addConstrs(SOC2[i, k] * Z3[i, k] == Q[k] * Z3[i, k] for i in FP for k in K)
```

```
#(19)
```

```
model.addConstrs(sum(sum (X[i, j, k] * d[i, j] for j in V)for i in V) <= ϕ for k in K)
```

```
#4      Ο ρ ι σ μ ό ς      α ν τ ι κ ε ι μ ε ν ι κ ή ς      σ υ ν ά ρ τ η σ η ς      γ ι α
ε λ α χ ι σ τ ο π ο ί η σ η κ ό σ τ ο υ ς
```

```
model.setObjective(P1 + P2 + P4, GRB.MINIMIZE)
```

```
# Ε π ι λ υ σ η μ ο ν τ έ λ ο υ
```

```
model.setParam("Threads", 8)
```

```
model.setParam("Method", 2) # Barrier Method
```

```
model.optimize()
```

```
if model.status == GRB.OPTIMAL: # check if the solver is capable of finding an optimal
solution
```

```
    print("optimal")
```

```
else:
```

```
print(model.status, 'not optimal')

print(' FINAL RESULTS')
print( '%.2f' % model.ObjVal , '%.2f' % model.objBound)
style.use("ggplot")
```