

Κραββαρίτης Γεώργιος

ΜΟΝΤΕΛΟ ΧΩΡΟΘΕΤΗΣΗΣ ΣΤΑΘΜΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΥΠΕΡΑΣΤΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ



Επιβλέπων:

Κεπαπτσόγλου Κωνσταντίνος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ - ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ

*Σε όλους όσους με στήριξαν
σε αυτή την πορεία και με
ενέπνευσαν με το δικό τους τρόπο*

Μοντέλο Χωροθέτησης Σταθμών Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων σε Υπεραστικό Δίκτυο

Location Model for the Deployment of Electric Vehicle
Charging Stations on the Western Balkans Highway Network

Συγγραφή

Κραββαρίτης Γεώργιος

Επιβλέπων

Κεπατσόγλου Κωνσταντίνος

Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Σεπτέμβριος 2023

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία με θέμα «Μοντέλο Χωροθέτησης Σταθμών Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων σε Υπεραστικό Δίκτυο» ανατέθηκε από τον κ. Κωνσταντίνο Κεπαπτσόγλου, Αναπληρωτή Καθηγητή του Ε.Μ.Π., τον Οκτώβριο 2022 και εκπονήθηκε στον τομέα Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης της Σχολής Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών – Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν καθοριστικά και επηρέασαν με το δικό τους τρόπο την πορεία ολοκλήρωσης αυτής της εργασίας. Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Υπεύθυνο Επιβλέποντα Καθηγητή, κ. Κωνσταντίνο Κεπαπτσόγλου, για τις συμβουλές, την στήριξη και την επιστημονική καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της Διπλωματικής Εργασίας.

Εν συνεχεία, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής εξέτασης, κ. Ευθύμιο Μπακογιάννη, Επίκουρο Καθηγητή του Ε.Μ.Π., και την κ. Ιωάννα Σπυροπούλου, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του Ε.Μ.Π., για τη συμμετοχή τους στην εξέταση και για το επιστημονικό τους ενδιαφέρον.

Ακόμα, οφείλω ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ στον κ. Χρυσόστομο Μυλωνά, Υποψήφιο Διδάκτορα του Ε.Μ.Π., για την επιστημονική συνεισφορά, τις συμβουλές και την τεχνογνωσία που παρείχε σε κρίσιμα και καινοτόμα σημεία της εργασίας.

Κλείνοντας, επιθυμώ να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς την οικογένειά μου και όλους τους δικούς μου ανθρώπους, για την αμέριστη συμπαράσταση και υποστήριξη που μου παρείχαν ο καθένας με το δικό του τρόπο, τόσο προς την υλοποίηση αυτής της εργασίας όσο και προς τη γενικότερη περάτωση των σπουδών μου.

Κραββαρίτης Γεώργιος
Αθήνα, Οκτώβριος 2023

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στη δημιουργία ενός μοντέλου χωροθέτησης, το οποίο θα υποδεικνύει τον βέλτιστο αριθμό, καθώς και τις θέσεις στις οποίες θα πρέπει να τοποθετηθούν σταθμοί φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο αυτοκινητοδρόμων των Δυτικών Βαλκανίων, ούτως ώστε να υποστηριχθεί λειτουργικά η υιοθέτηση αυτής της νέας τεχνολογίας. Αρχικά, λαμβάνοντας υπόψη ότι η ηλεκτροκίνηση είναι μία σχετικά νεοσύστατη έννοια για τον μέσο μετακινούμενο του 21ου αιώνα, πραγματοποιείται μία αναφορά στην ιστορική εξέλιξη αυτής της τεχνολογίας, θίγεται το καταναλωτικό ζήτημα της επιλογής μέσου το 2023 και παρατίθενται τα ισχύοντα θεσμικά πλαίσια ανά τον κόσμο που αφορούν την ηλεκτροκίνηση. Στη συνέχεια, ακολουθεί η παρουσίαση της μαθηματικής φύσης του προβλήματος και αναγράφεται το θεωρητικό υπόβαθρο που τη συνοδεύει. Κατόπιν, παρουσιάζονται τα αρχικά δεδομένα του προβλήματος και συστήνεται το λογισμικό που θα χρησιμοποιηθεί για τη συγκοινωνιακή μοντελοποίηση του δικτύου, το Aequilibrae. Έπειτα από την περιγραφή των διεργασιών που υλοποιούνται από το λογισμικό, περιγράφεται η δημιουργία του μαθηματικού μοντέλου επίλυσης του προβλήματος, αξιοποιώντας στοιχεία από την Επιχειρησιακή Έρευνα. Οι λύσεις του μοντέλου ενσωματώνονται σε δύο εναλλακτικά σενάρια επίλυσης, τα οποία εν συνεχεία υπόκεινται σε μία οικονομοτεχνική ανάλυση Κόστους – Ωφελειών, προκειμένου να αποφασιστεί ποιο είναι περισσότερο συμφέρον. Καταληκτικά, μετά την επιλογή του καταλληλότερου σεναρίου, ακολουθεί μία συνολική αποτίμηση της μελέτης, παρατίθενται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτή, και υπογραμμίζονται οι μελλοντικές προοπτικές για την εμβάθυνσή της.

Λέξεις Κλειδιά: Ηλεκτρικά Οχήματα, Σταθμοί Φόρτισης, Aequilibrae, Γραμμικός Προγραμματισμός, Συγκοινωνιακή Μοντελοποίηση

ABSTRACT

The main objective of this thesis is the development of a location model that would determine both the optimal number and the locations to which electric vehicles' charging stations should be placed across the Western Balkans Highway Network. The results highlight the necessary capacity of infrastructure, to achieve a full transition towards the adaptation of this new technology. Firstly, considering that electromobility is a relatively new concept for the drivers of the 21st century, an analysis of its historical development is made, which is then followed by an extensive approach of the consumers' dilemma on whether to buy an electric car instead of a gas-powered one and also presenting all the legal action that is now being taken internationally towards the integration of electromobility in transportation. Afterwards, the initial data of the study are presented, as well as the software that will be used for the purpose of transportation modelling, "Aequilibræ". Then, the step-by-step analysis of all the procedures that were implemented with "Aequilibræ" is followed by the description of the linear programming mathematical model that was created through Operational Research. The results that were drawn from the model were later on integrated and divided into two alternate scenarios, which were submitted in a Cost - Benefit Analysis in order to decide the most appropriate one in accordance with the restraints of the study. Finally, after a choice is made, the study is summarized and its conclusions are presented, as well as its prospects for future development.

Key Words: Electric Vehicles (EVs), Charging Infrastructure, Aequilibræ, Linear Programming, Transportation Modelling

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	18
1.1. Ιστορική αναδρομή.....	19
1.2. Επιλογή οχήματος το 2023: ηλεκτρικό ή βενζινοκίνητο;.....	26
1.2.1. Γενικευμένο Κόστος.....	27
1.2.2. Περιβαλλοντικό Αποτύπωμα.....	29
1.2.3. Οδηγική Εμπειρία και Απόδοση.....	31
1.2.4. Θεσμικά Πλαίσια και Υποδομές.....	34
1.2.5. Σύνοψη.....	35
1.3. Ηλεκτροκίνηση: Θεσμικές αλλαγές ανά τον κόσμο και νέες υποδομές.....	36
1.3.1. Θεσμικά πλαίσια για τις αγορές ηλεκτρικών οχημάτων.....	36
1.3.2. Θεσμικά πλαίσια για τις υποδομές των ηλεκτρικών οχημάτων.....	38
1.3.3. Σύνοψη.....	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	41
2.1. Εισαγωγή στη θεωρία των προβλημάτων Χωροθέτησης Εγκαταστάσεων.....	42
2.2. Διατύπωση του προβλήματος.....	46
2.3. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	60
3.1. Στοιχεία από τη θεωρία των δικτύων.....	61
3.2. Παρουσίαση της περιοχής μελέτης και συλλογή αρχικών δεδομένων.....	66
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	71
4.1. Στοιχεία από τη θεωρία του μοντέλου 4 βημάτων.....	72

4.2. Εισαγωγή στη λειτουργία του Aequilibrae	74
4.3. Προετοιμασία του Δικτύου (Network Preparation)	75
4.4. Δημιουργία του Μοντέλου του Δικτύου (Project Creation).....	78
4.5. Ανάθεση Κυκλοφορίας στο Δίκτυο (Traffic Assignment)	82
4.6. Έλεγχος αποτελεσμάτων και αποσφαλμάτωση δικτύου.....	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	89
5.1. Στοιχεία από τη θεωρία του γραμμικού προγραμματισμού	90
5.2. Δημιουργία του μαθηματικού μοντέλου	91
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	94
6.1. Διατύπωση σεναρίων	95
6.1.1. Σενάριο 1 – Κεντρικό δίκτυο φόρτισης	96
6.1.2. Σενάριο 2 – Αποκεντρωμένο δίκτυο φόρτισης	98
6.2. Αξιολόγηση Σεναρίων.....	100
6.2.1. Στοιχεία από την Ανάλυση Κόστους - Ωφελειών.....	100
6.2.2. Ανάλυση Κόστους – Ωφελειών	101
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.....	107
7.1. Ανασκόπηση της Διπλωματικής Εργασίας.....	108
7.2. Αποτίμηση της μελέτης.....	109
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	111

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος των μεταφορών αποτελεί έναν από τους κυριότερους παράγοντες για την επιδείνωση της κλιματικής αλλαγής τις τελευταίες δεκαετίες. Τα περιβαλλοντικά προβλήματα στα οποία επιδρούν άμεσα οι μεταφορές είναι η καύση των ορυκτών καυσίμων και η ατμοσφαιρική ρύπανση. Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και λοιπών αερίων του θερμοκηπίου που πηγάζουν από τις μεταφορές, αγγίζουν περίπου το 37% των συνολικών ρύπων που παράγονται παγκοσμίως. Από αυτές τις εκπομπές, το 74% προέρχεται από χερσαίες μεταφορές (ΙΧ και φορτηγά). Για το λόγο αυτό, σήμερα περισσότερο από ποτέ, η εξυγίανση των μεταφορών συνιστά ζωτική επιταγή για την οικολογική βιωσιμότητα.

Μία κίνηση προς την κατεύθυνση αυτή είναι η μετάβαση στην ηλεκτροκίνηση. Η υιοθέτηση της ηλεκτροκίνησης εκτιμάται πως θα αποφέρει διττά οφέλη για το περιβάλλον. Αφενός επηρεάζοντας άμεσα τις εκπομπές των οχημάτων και αφετέρου οδηγώντας στην ευρεία χρήση ανανεώσιμων πηγών για την παραγωγή ενέργειας. Όμως, για να καταστεί αυτή η μετάβαση επιτεύξιμη μέσα στα επόμενα χρόνια, είναι απαραίτητο να γίνουν κάποια τεχνολογικά και κατασκευαστικά άλματα.

Συγχρόνως όμως, εκτός από τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο, ένα άλλο εξίσου μεγάλο κεφάλαιο της ηλεκτροκίνησης είναι η εμπειρία των μεταφερόμενων. Κύριοι αποδέκτες αυτής της αλλαγής θα είναι οι οδηγοί και κατ' επέκταση οι επιβάτες που τους συνοδεύουν. Έτσι λοιπόν, εκ πρώτης όψεως, είναι εύλογο για τον μέσο οδηγό του 2023 να προκύπτουν διάφοροι

προβληματισμοί. Πόσο κοστίζει ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο; Πού μπορώ να το φορτίσω και με τι συχνότητα; Πόσο διαρκεί η φόρτιση; Σε τι εμβέλεια θα μπορώ να ταξιδέψω; Γιατί να προτιμήσω ένα ηλεκτρικό όχημα έναντι ενός βενζινοκίνητου; Η απάντηση σε όλα αυτά τα ερωτήματα, καθώς και σε άλλα που θα προκύψουν στην πορεία, δίνεται στα πλαίσια της παρούσας μελέτης.

Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η εργασία αυτή επιδιώκει να παρέχει μία ολοκληρωμένη ανασκόπηση της τεχνολογίας της ηλεκτροκίνησης, της επίδρασής στην καθημερινότητα, των βημάτων που απομένουν για την πραγματοποίηση της μετάβασης και, τελικώς να αποδώσει την εικόνα που θα έχουν οι μεταφορές στις επόμενες δεκαετίες.

Αντικείμενο

Η κατασκευή και τοποθέτηση σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, αλλά και άλλων υποδομών σχετικών με τη βέλτιστη λειτουργία τους, συνιστά καταλυτικό παράγοντα για την ανάπτυξη και εδραίωση της ηλεκτροκίνησης στη σύγχρονη κυκλοφορία. Στόχος αυτής της Διπλωματικής Εργασίας είναι ο σχεδιασμός ενός μοντέλου, το οποίο αξιοποιώντας απλά χωρικά δεδομένα, θα καταδεικνύει τον αριθμό και την τοποθεσία εγκατάστασης σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε υπεραστικό δίκτυο. Το υπεραστικό δίκτυο χωρίζεται σε επιμέρους ζώνες μετακινήσεων, οι οποίες μετακινήσεις είναι δεδομένες. Κάθε ζώνη διατρέχεται από ένα σύνολο δρόμων (σύνδεσμοι) και διασταυρώσεων (κόμβοι). Με βάση το μήκος κάθε συνδέσμου και τον αριθμό των μετακινήσεων που διέρχονται από αυτόν, συγκροτείται ένα μοντέλο Γραμμικού Προγραμματισμού, ικανό να μεγιστοποιήσει την εξυπηρετικότητα του δικτύου ως προς την ανάγκη ανεφοδιασμού των οχημάτων που το διασχίζουν. Παράλληλα, λαμβάνονται υπόψη και ορισμένοι οικονομικοί περιορισμοί γύρω από το έργο, επιδιώκοντας να το εντάξουν στα πλαίσια του εφικτού. Έτσι, συντάχθηκαν κάποια εναλλακτικά μεταξύ τους σενάρια, τα οποία αποσκοπούν στην αξιολόγηση του ενδεχόμενου αντικτύπου του έργου.

Δομή

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία αριθμεί συνολικά επτά κεφάλαια, πλην της εισαγωγής. Στα κεφάλαια αυτά γίνεται μία ολοκληρωμένη αναφορά στο ζήτημα της ηλεκτροκίνησης,

αναγράφοντας ιστορικά στοιχεία, τεχνολογικές και θεσμικές εξελίξεις και αποτυπώνοντας τις υφιστάμενες συνθήκες σε επίπεδο υποδομών. Στη συνέχεια παρατίθεται όλο το προαπαιτούμενο θεωρητικό και επιστημονικό υπόβαθρο για την κατανόηση αυτής της συγκοινωνιακής μελέτης, παρουσιάζονται τα δεδομένα που συλλέχθηκαν, καθώς και η επεξεργασία στην οποία υποβλήθηκαν για τη συγκρότηση ενός μαθηματικού μοντέλου που θα επιλύει αποτελεσματικά το πρόβλημα της χωροθέτησης σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε υπεραστικό δίκτυο. Τέλος, σε επίπεδο βιβλιογραφίας, αναφέρεται όλο το επιστημονικό έργο που χρησιμοποιήθηκε για τη σύνταξη αυτής της μελέτης. Αναλυτικότερα, ανά κεφάλαιο:

- *Κεφάλαιο 1:* γνωριμία με την τεχνολογία της ηλεκτροκίνησης. Παρουσιάζεται η ιστορικότητά της, ενώ στη συνέχεια προσεγγίζεται το πρακτικό ζήτημα της σύγχρονης επιλογής οχήματος. Καταληκτικά, αναλύεται όλο το νομικό πλαίσιο ανάπτυξης και προώθησης της ηλεκτροκίνησης για το παρόν και το άμεσο μέλλον.
- *Κεφάλαιο 2:* παρουσίαση του προβλήματος που απασχολεί την παρούσα μελέτη και αναφορά στο απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση της φύσης του. Κλείνοντας, πραγματοποιείται επιγραμματική αναφορά στις επιστημονικές προσεγγίσεις που έχουν καταπιαστεί με την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος.
- *Κεφάλαιο 3:* παράθεση στοιχείων από τη θεωρία των συστημάτων μεταφορών και παρουσίαση των πρωτογενών δεδομένων του προβλήματος και της περιοχής μελέτης.
- *Κεφάλαιο 4:* γνωριμία με το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της λειτουργίας του δικτύου και ανάλυση της επεξεργασίας στην οποία υποβλήθηκαν τα πρωτογενή δεδομένα.
- *Κεφάλαιο 5:* παράθεση στοιχείων από τη θεωρία του γραμμικού προγραμματισμού, συγκρότηση του μαθηματικού μοντέλου και σύνταξη εναλλακτικών σεναρίων αποφάσεων, βάσει των αποτελεσμάτων του.
- *Κεφάλαιο 6:* αξιολόγηση των σεναρίων με τη μέθοδο της ανάλυσης κόστους – ωφέλειας και επιλογή του καταλληλότερου εξ' αυτών.
- *Κεφάλαιο 7:* βιβλιογραφική αναφορά όλων των πηγών που χρησιμοποιήθηκαν για την επιστημονική τεκμηρίωση της εν λόγω εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΗΣ

ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο πραγματοποιείται μία ιστορική αναδρομή στις απαρχές της τεχνολογίας της ηλεκτροκίνησης, στην πρώιμη ανάπτυξή της και τη σταδιακή εγκατάλειψή της, καθώς και στην επάνοδό της κατά τις τελευταίες δεκαετίες. Στη συνέχεια, ακολουθεί μία προσέγγιση του ζητήματος της επιλογής αυτοκινήτου με βάση τα σημερινά δεδομένα, εστιάζοντας σε τέσσερις βασικούς άξονες: το κόστος, τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο, την οδηγική εμπειρία και τους λοιπούς εξωτερικούς παράγοντες (νομικό πλαίσιο και υποδομές). Καταληκτικά, παρουσιάζονται τα μεγαλύτερα κυβερνητικά νομοσχέδια και προγράμματα ανά τον κόσμο, τα οποία αποβλέπουν στην εδραίωση της ηλεκτροκίνησης σε επίπεδο αγοράς και υποδομών.

1.1. Ιστορική αναδρομή

Η ύπαρξη ηλεκτρικών οχημάτων μετράει περισσότερα από 100 χρόνια ιστορίας, με την εφεύρεση του πρώτου ηλεκτροκίνητου ΙΧ να τοποθετείται μεταξύ των ετών 1828 – 1832. Έκτοτε, η δημιουργία οχημάτων τα οποία θα κινούνται με ηλεκτρική ενέργεια δεν έπαψε ποτέ να απασχολεί τους κατασκευαστές και τους πρωτοπόρους της βιομηχανίας. Ωστόσο, είναι γεγονός ότι το έργο τους δεν κατάφερε να γνωρίσει ιδιαίτερη δημοσιότητα εξαιτίας και των υπόλοιπων ραγδαίων τεχνολογικών εξελίξεων που συνέβησαν τις ίδιες χρονικές περιόδους στον κλάδο της αυτοκίνησης. Ιστορικά, η εξέλιξη της ηλεκτροκίνησης μπορεί να χωριστεί σε έξι διακριτές περιόδους (EVBox, *History of the electric car*). Ειδικότερα :

- 1830 – 1880. Οι πρώτοι πρωτοπόροι της ηλεκτροκίνησης.
- 1880 – 1914. Η μετάβαση στις μηχανοκίνητες μεταφορές.
- 1914 – 1970. Η άνοδος του κινητήρα εσωτερικής καύσης (ICE).
- 1970 – 2003. Η επιστροφή των ηλεκτρικών οχημάτων (EVs).
- 2003 – 2020. Η ηλεκτρική επανάσταση.
- 2020 – σήμερα. Η κρίσιμη καμπή και το μέλλον.

Κατά τον 19ο αιώνα, η εφεύρεση του πρώτου ηλεκτρικού οχήματος ήταν απόρροια ενός συνόλου νέων τεχνολογικών ανακαλύψεων, οι οποίες αφορούσαν αφενός τις νέες δυνατότητες των μπαταριών στον τομέα της ενέργειας και αφετέρου την κυκλοφορία νέων κινητήρων στον τομέα της μηχανολογίας. Όλες αυτές οι εξελίξεις διαδραματίζονταν ταυτόχρονα και στις δύο πλευρές του Ατλαντικού. Για το λόγο αυτό, το ηλεκτρικό αυτοκίνητο ως εφεύρεση δεν μπορεί να αποδοθεί μόνο σε ένα άτομο (Rebecca Matulka, *The History of the Electric Car*).

Η πρώτη ιστορική περίοδος της ηλεκτροκίνησης ξεκινάει τη δεκαετία του 1830, όπου γνωστοί εφευρέτες της βιομηχανίας από την Ουγγαρία, την Ολλανδία, τη Μεγάλη Βρετανία και τις ΗΠΑ, καταπιάστηκαν με την ιδέα της δημιουργίας ενός οχήματος που θα κινείται με ηλεκτρική ενέργεια. Η πρώτη επίσημα καταγεγραμμένη επίδειξη ενός ηλεκτρικού οχήματος έγινε από τον Βρετανό εφευρέτη Robert Anderson σε ένα βιομηχανικό συνέδριο το έτος 1835. Ωστόσο, η εφευρέσή του Άντερσον συμπέφτει χρονικά με τις εφευρέσεις του Άνγος Jedlik από την Ουγγαρία, του καθηγητή Sibrandus Stratingh από την Ολλανδία και του Αμερικανού Thomas Davenport, οι οποίοι όλοι



Εικόνα 1.1. Άνγος Jedlik

ανέπτυξαν μοντέλα ηλεκτρικών οχημάτων. Βέβαια, τα οχήματα αυτά δεν ήταν τίποτα άλλο από πρωτότυπα, δηλαδή ηλεκτροδοτούμενες άμαξες, με μέγιστη ταχύτητα τα 12 χλμ/ώρα, μικρή εμβέλεια ταξιδιού και μη επαναφορτιζόμενα.

Το πρώτο ηλεκτρικό όχημα με δυνατότητα επαναφόρτισης κατασκευάστηκε περίπου τριάντα χρόνια αργότερα, τη δεκαετία του 1860 από τον Γάλλο φυσικό Gaston Plante. Το νέο αυτό



Εικόνα 1.2. Gaston Plante

μοντέλο χρησιμοποιούσε την τότε πρωτοποριακή μπαταρία μολύβδου – οξέος, την πρώτη επαναφορτιζόμενη μπαταρία που δημιουργήθηκε ποτέ, την οποία μάλιστα είχε επίσης εφεύρει ο Plante το 1859. Εδώ, αξίζει να σημειωθεί ότι η διαχρονική εξέλιξη που έχει καταγραφεί στην τεχνολογία των ηλεκτρικών οχημάτων είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την τεχνολογική εξέλιξη των μπαταριών, γεγονός που ισχύει μέχρι και σήμερα.

Παρ' όλα αυτά, ως το πρώτο ηλεκτρικό όχημα στην ιστορία με πρακτική σημασία, χαρακτηρίστηκε το μοντέλο του William Morrison, το οποίο κατασκευάστηκε το 1887 (Eric Bryan, *An electrifying Iowan*).

Έτσι, ξεκίνησε ουσιαστικά η δεύτερη περίοδος της ιστορίας της ηλεκτροκίνησης, κατά την οποία οι μεταφερόμενοι ξεκίνησαν να εγκαταλείπουν το έως τότε παραδοσιακό μέσο μεταφοράς, το άλογο, και να στρέφονται προς τα μηχανοκίνητα μέσα. Σε αυτή τη μετάβαση υπήρχαν τρεις ξεκάθαρες επιλογές: ατμός, βενζίνη ή ηλεκτρισμός.

Στην αρχή, τα τρία καύσιμα καταλάμβαναν περίπου ισοδύναμα ποσοστά της αγοράς, με την ατμοκίνηση να υπερισχύει ελαφρώς, καθώς είχε ήδη δοκιμαστεί ως καύσιμο για τις μεταφορές των τρένων και των πλοίων. Εν τέλει όμως, ο ατμός αποδείχθηκε δύσχρηστο καύσιμο για προσωπική χρήση, κυρίως λόγω του χρόνου εκκίνησης του κινητήρα (45 λεπτά), αλλά και της διαρκούς ανάγκης ανεφοδιασμού του με νερό, η οποία περιορίζει σημαντικά την εμβέλεια



Εικόνα 1.3. Το πρώτο ηλεκτρικό όχημα, κατασκευασμένο από τον W. Morrison

κίνησης τέτοιων οχημάτων. Από την άλλη πλευρά, η εναλλακτική της βενζίνης, με τους πρωτοεμφανιζόμενους τότε κινητήρες εσωτερικής καύσης, αποτελούσε μία εξίσου δύσχρηστη επιλογή. Αυτό οφειλόταν στις αυξημένες χειροκίνητες απαιτήσεις οδήγησης των οχημάτων, τους

δυνατούς θορύβους και τις εκπομπές βλαβερών αερίων, με τις τελευταίες να αποτελούν κοινό παρονομαστή μεταξύ της βενζίνης και του ατμού.

Έτσι, μέχρι τις αρχές του 20ου αιώνα, η ηλεκτροκίνηση είχε καταφέρει να επικρατήσει ως η χρυσή τομή στην αυτοκίνηση, καθώς δεν μοιραζόταν κανένα από τα μειονεκτήματα των ανταγωνιστών της (Rebecca Matulka, *The History of the Electric Car*). Μέχρι το 1910, οι περισσότερες μετακινήσεις πραγματοποιούνταν εντός των ηλεκτροδοτούμενων αστικών κέντρων, με αποτέλεσμα οι ανάγκες για ανεφοδιασμό να καλύπτονται με άνεση, ενώ συγχρόνως η ηλεκτροκίνηση είχε καταφέρει να αυξήσει τη δημοτικότητα της τόσο στους επιστημονικούς όσο και στους επιχειρηματικούς κύκλους, καθώς πιστευόταν ότι ήταν το μέλλον των μεταφορών. Ωστόσο, η ανάπτυξη αυτή έμελλε να τελειώσει σύντομα, με την κατασκευή του γνωστού “Model T” από τον Henry Ford.

Η επίδραση του “Model T” στην αμερικανική, και κατ’ επέκταση στην παγκόσμια αγορά άλλαξε την αντίληψη της κοινωνίας για τα αυτοκίνητα. Το όραμα πίσω από την κατασκευή του ήταν η προσιτότητα στην ανερχόμενη μεσαία τάξη, καθώς τα αυτοκίνητα συνήθιζαν να είναι προνόμιο των λίγων. Μέσα στα τέσσερα πρώτα χρόνια κυκλοφορίας του και σε συνδυασμό με την εφαρμογή της μαζικής παραγωγής, το συγκεκριμένο όχημα έφτασε να έχει υποτριπλάσια τιμή από τα αντίστοιχα ηλεκτρικά. Ύστερα από αυτά τα γεγονότα, η ηλεκτροκίνηση παραγκωνίστηκε και πέρασε στην τρίτη ιστορική της περίοδο, την άνοδο του κινητήρα εσωτερικής καύσης.



Εικόνα 1.4. Το Ford "Model T"

Την επικράτηση του κινητήρα εσωτερικής καύσης, και συνεπώς των βενζινοκίνητων οχημάτων, επισφράγισε μία σειρά από γεγονότα. Τη δεκαετία του 1920 κατασκευάστηκαν τα

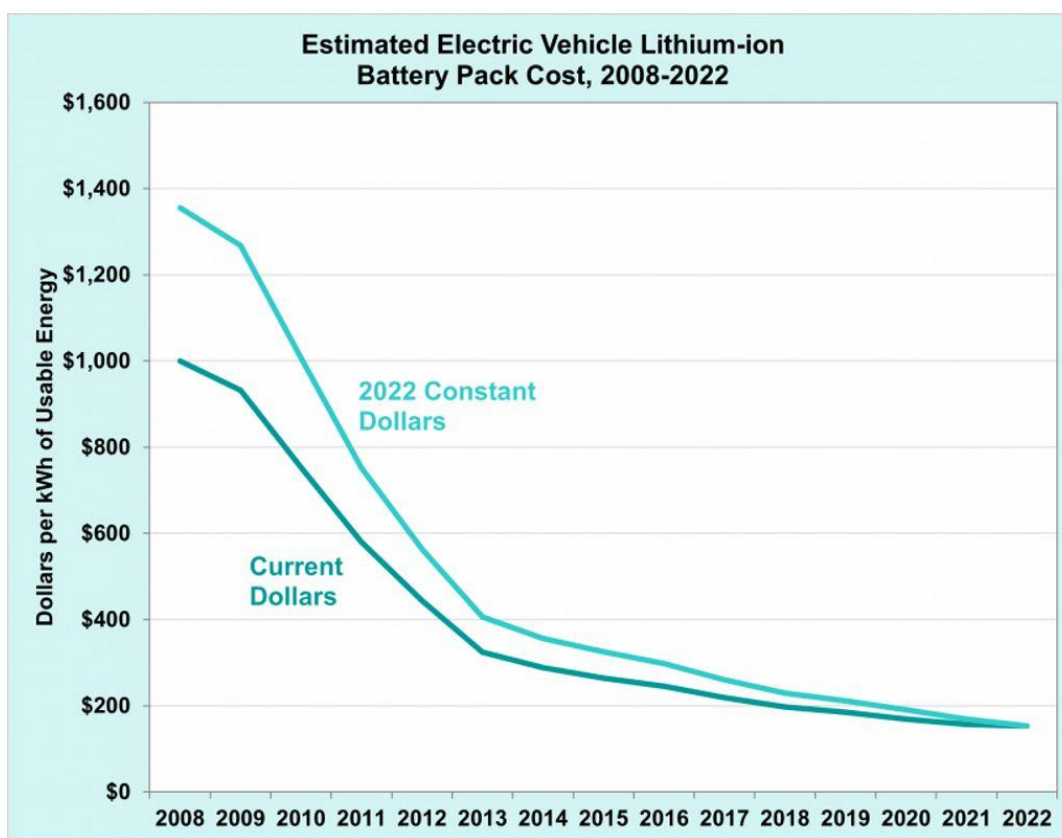
πρώτα οργανωμένα εθνικά οδικά δίκτυα, τόσο στην Ευρώπη όσο και στην Αμερική, τα οποία μπορούσαν να υποστηρίξουν πλήρως τις μετακινήσεις με αυτοκίνητο. Παράλληλα, την ίδια περίοδο, ανακαλύφθηκαν εκτεταμένα κοιτάσματα πετρελαίου σε παγκόσμιο επίπεδο. Η αφθονία και το χαμηλό κόστος των καυσίμων, οδήγησαν στη συγκριτικά γρηγορότερη γεωγραφική εξάπλωση των πρατηρίων καυσίμων σε σχέση με τα δίκτυα ηλεκτροδότησης. Σαν αποτέλεσμα, μέχρι το 1935, η ηλεκτροκίνηση είχε ουσιαστικά εγκαταλειφθεί και η αυτοκινητοβιομηχανία είχε στραφεί εξ' ολοκλήρου (επιστημονικά και επιχειρηματικά) στην ανάπτυξη των βενζινοκίνητων οχημάτων (Rebecca Matulka, *The History of the Electric Car*).

Η κατάσταση αυτή παγιώθηκε για περίπου 40 χρόνια, μέχρι την πετρελαϊκή κρίση του 1973 (EVBox, *History of the electric car*). Η ραγδαία αύξηση στις τιμές των καυσίμων, καθώς και η γενικευμένη ενεργειακή κρίση που αυτή επέφερε, άφησαν τις πρώτες αιχμές για την μείωση της εξάρτησης της κοινωνίας από τα ορυκτά καύσιμα. Αντιλαμβανόμενοι αυτή την ανάγκη, κάποιιοι από τους πρωτοπόρους κατασκευαστές αυτοκινήτων, ξεκίνησαν να αναζητούν εναλλακτικές μορφές καυσίμων. Έτσι, ανανεώθηκε και το ενδιαφέρον προς την ηλεκτροκίνηση. Μέχρι τα τέλη του 20ου αιώνα έγιναν μεγάλες προσπάθειες για την επίλυση των προβλημάτων των ηλεκτρικών οχημάτων (εμβέλεια και ταχύτητα ταξιδιού), χωρίς όμως να προσελκύσουν το κοινωνικό ενδιαφέρον. Όμως, η κατασκευή του πρώτου υβριδικού οχήματος λίγα χρόνια αργότερα, έμελλε να αποτελέσει ένα από τα πιο σημαντικά γεγονότα στην ιστορία των ηλεκτρικών οχημάτων. Το μοντέλο αυτό δεν είναι άλλο από το “Toyota Prius”, το οποίο διατέθηκε στην παγκόσμια αγορά το 2000 (Rebecca Matulka, *The History of the Electric Car*). Μάλιστα, οι από τότε αυξανόμενες τιμές της βενζίνης και η ευαισθητοποίηση για την περιβαλλοντική ρύπανση, συντέλεσαν στην εκτόξευση των πωλήσεων του μοντέλου στην αγορά, εδραιώνοντάς το ως το πρώτο σε πωλήσεις υβριδικό αυτοκίνητο.

Το σημαντικότερο γεγονός στην πρόσφατη ιστορία των ηλεκτρικών οχημάτων συνέβη λίγα χρόνια αργότερα, το 2003, με την ίδρυση της Tesla Motors από τους Martin Eberhard και Marc Tarpenning (EVBox, *History of the electric car*). Κύρια δέσμευση της εταιρείας ήταν η κατασκευή ενός εξ' ολοκλήρου ηλεκτρικού οχήματος, το οποίο θα μπορούσε να διανύσει 320 χιλιόμετρα με μία μόνο φόρτιση. Ο στόχος αυτός λειτούργησε ως έναυσμα για την εντατικοποίηση των εργασιών στον τομέα της ηλεκτροκίνησης και άλλων μεγάλων κατασκευαστών της αυτοκινητοβιομηχανίας. Έτσι, ξεκίνησε η πέμπτη και πιο καινοτόμα περίοδος στην ιστορία των ηλεκτρικών οχημάτων.

Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτής της περιόδου είναι η αλματώδης τεχνολογική ανάπτυξη, η στροφή των αγορών και των καταναλωτών προς τη βιωσιμότητα, η κατασκευή νέων υποδομών και οι κρατικές πρωτοβουλίες που αποβλέπουν σε ένα πιο βιώσιμο μέλλον.

Αρχικά, σε τεχνολογικό επίπεδο, ήδη από τις αρχές του 21ου αιώνα, οι δυνατότητες των νέων ηλεκτρικών οχημάτων έχουν συνδεθεί άμεσα με την ανάπτυξη των μπαταριών ιόντων λιθίου, οι οποίες βελτιώνονται διαρκώς μέχρι και σήμερα. Η χρήση των μπαταριών αυτών έχει επιδράσει σημαντικά στην εμβέλεια ταξιδιού των ηλεκτρικών οχημάτων, αυξάνοντας τη μέση απόσταση που μπορούν να διανύσουν με μία φόρτιση στα 320 με 480 χιλιόμετρα. Ταυτόχρονα, το κόστος για την κατασκευή τους μειώνεται προοδευτικά. Από το 2008 έως το 2022, το κόστος των μπαταριών ιόντων λιθίου έχει ελαττωθεί κατά 89% (εικόνα 1.5), μειώνοντας κατά ένα μεγάλο ποσοστό και το κόστος αγοράς ηλεκτρικών οχημάτων.



Εικόνα 1.5. Διάγραμμα που αναπαριστά την πτώση των τιμών στις μπαταρίες ιόντων λιθίου από το 2008 έως το 2022

Συγχρόνως όμως, η επιδείνωση των φαινομένων που απορρέουν από την κλιματική αλλαγή, έχει προσανατολίσει καταναλωτές και κατασκευαστές προς τη βιωσιμότητα. Η πράσινη

ατζέντα των μεταφορών αποτελεί μέρος και της ενεργειακής πολιτικής πολλών κρατών ανά τον κόσμο, καθώς επίσης και της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Έτσι, οι κυβερνητικοί φορείς σε παγκόσμιο επίπεδο δεν αφήνουν την ηλεκτροκίνηση να αναπτύσσεται ερευνητικά και με βραδείς ρυθμούς, αλλά επιλέγουν να τη συνδράμουν έμπρακτα. Κρατικές χρηματοδοτήσεις, μειώσεις φόρων και επιδοτούμενα ενεργειακά προγράμματα είναι μερικά από τα κίνητρα που παρέχονται από τις κυβερνήσεις σε όσους επιλέγουν να στραφούν προς την ηλεκτροκίνηση, είτε ως καταναλωτές είτε ως κατασκευαστές.

Στο ίδιο μήκος κύματος ενυπάρχει και το ζήτημα των υποδομών. Έκτος από θεσμικές επεμβάσεις, για πρώτη φορά, οι κρατικοί μηχανισμοί επεμβαίνουν έμπρακτα και στα ζητήματα ανεφοδιασμού των ηλεκτρικών οχημάτων, με την προοπτική δημιουργίας κρατικών δικτύων επαναφόρτισης. Αυτό οφείλεται αφενός στις υφιστάμενες ενεργειακές ανάγκες για την εφαρμογή των πολιτικών τους, αλλά και αφετέρου στην επίσπευση της μετάβασης προς τη βιωσιμότητα, όπως υπαγορεύεται από τα φαινόμενα περιβαλλοντικής κρίσης.

Το τέλος της πανδημίας του 2020 και η επανεκκίνηση των παγκόσμιων αγορών το 2021, σηματοδότησαν την αρχή της έκτης ιστορικής περιόδου της ηλεκτροκίνησης, η οποία εκτείνεται ως το σήμερα. Η παρούσα περίοδος συνιστά και το μεγαλύτερο σημείο καμπής στην ιστορία της ηλεκτροκίνησης. Παρατηρώντας τον αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων που κυκλοφορούν, τις πωλήσεις τους είτε καθαυτές είτε ως ποσοστό των γενικών πωλήσεων της αυτοκινητοβιομηχανίας, τα νέα παγκόσμια κυβερνητικά νομοσχέδια, τις κατασκευαστικές δεσμεύσεις των ίδιων των εταιρειών της βιομηχανίας, όλες οι οπτικές καταδεικνύουν τον αδιαμφισβήτητο σημαντικό ρόλο που διαδραματίζει και θα διαδραματίζει η ηλεκτροκίνηση στο μέλλον. Ο αμελητέος αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων που κυκλοφορούσαν το 2010, κατάφερε να ανέβει στο 1 εκατομμύριο μέχρι το 2016, ενώ μέχρι τέλος του 2022, κυκλοφορούσαν παγκοσμίως 26 εκατομμύρια ηλεκτρικά οχήματα. Επίσης, την ίδια χρονιά καταγράφηκε αύξηση της τάξης του 60% στις πωλήσεις των ηλεκτρικών οχημάτων σε σχέση με το 2021, ενώ πλέον καταλαμβάνουν το 14% των παγκόσμιων πωλήσεων σε οχήματα (EVBox, *History of the electric car*).

Η γεωγραφική εξάπλωση της ηλεκτροκίνησης λαμβάνει χώρα σχεδόν ομοιόμορφα σε όλες τις ηπείρους, με την Ευρώπη να πρωτοστατεί ελαφρώς. Σύμφωνα με τους πιο μετριοπαθείς υπολογισμούς του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας, μέχρι το 2030 θα κυκλοφορούν παγκοσμίως 240 εκατομμύρια ηλεκτρικά οχήματα, έναντι των περίπου 30 εκατομμυρίων που κυκλοφορούν σήμερα, εκτιμώντας ότι κάθε χρόνο οι πωλήσεις τους θα αυξάνονται κατά περίπου 30%.

Στο ευρωπαϊκό έδαφος, μέχρι το 2025, εκτιμάται η τοποθέτηση 1 εκατ. φορτιστών στο οδικό δίκτυο (μία αύξηση της τάξης του 124.6%, δεδομένου ότι σήμερα υπάρχουν περίπου 377 χιλιάδες φορτιστές σε όλη την Ευρώπη), ενώ μέχρι το 2026, επιδιώκεται η τοποθέτηση ενός φορτιστή ανά 60 χιλιόμετρα σε κάθε κύριο αυτοκινητόδρομο των ευρωπαϊκών κρατών μελών. Αντίστοιχα, μέχρι το τέλος της δεκαετίας (2030), υπολογίζεται πως θα κυκλοφορούν στους ευρωπαϊκούς δρόμους περίπου 30 εκατ. ηλεκτρικά αυτοκίνητα (σήμερα κυκλοφορούν περίπου 1.5 εκατ. ηλεκτρικά οχήματα), ενώ από το 2035 και μετά, στην ευρωπαϊκή αγορά θα πωλούνται αποκλειστικά ηλεκτροκίνητα οχήματα. Ανάλογες πρωτοβουλίες στους τομείς των πωλήσεων και των υποδομών λαμβάνονται και από την Κίνα, τις ΗΠΑ, το Ηνωμένο Βασίλειο, την Ιαπωνία και τον Καναδά.

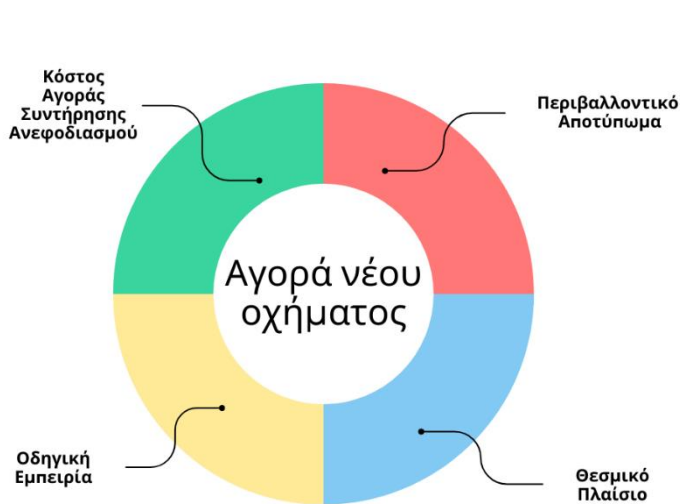
Συνοψίζοντας όλα τα παραπάνω, η ηλεκτροκίνηση μέχρι σήμερα έχει διανύσει μία μακρά εξελικτική πορεία. Η ραγδαία ανάπτυξή της θα συνεχίζεται όσο οι κυβερνήσεις, οι εταιρείες και οι μετακινούμενοι επιζητούν από κοινού τις βιώσιμες μετακινήσεις σε ένα πιο φιλικό για το περιβάλλον μέλλον. Δεδομένων αυτών, η επιτυχής μετάβαση στην ηλεκτροκίνηση και η υλοποίηση των διεθνών μέτρων για την υιοθέτησή της, είναι μόνο θέμα χρόνου να πραγματοποιηθούν.

1.2. Επιλογή οχήματος το 2023: ηλεκτρικό ή βενζινοκίνητο;

Ο καταλυτικότερος παράγοντας για την μετάβαση στην ηλεκτροκίνηση είναι οι επιλογές των μετακινούμενων/καταναλωτών, επειδή ουσιαστικά καθορίζουν τη ζήτηση. Γιατί να προτιμηθεί ένα ηλεκτροκίνητο όχημα έναντι ενός βενζινοκίνητου; Ποια κριτήρια πρέπει να επηρεάσουν μία τέτοια απόφαση; Αυτά είναι τα δύο βασικότερα ερωτήματα που θα απαντηθούν σε αυτή την ενότητα με στόχο να καταδείξουν ότι η εξέλιξη της ηλεκτροκίνησης είναι αλληλένδετη με το μέλλον των μεταφορών.

Η απόφαση για την αγορά ενός ΙΧ είναι ένα περίπλοκο ζήτημα. Συνήθως, τα δύο βασικότερα κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη είναι το κόστος του οχήματος και η ικανότητά του να καλύψει τις ανάγκες του μετακινούμενου. Μέσα στα επόμενα χρόνια, θα προστεθεί και ένα τρίτο κριτήριο, το είδος του κινητήρα (εσωτερικής καύσης ή ηλεκτρικός).

Έως τώρα, στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, οι διαφορετικοί τύποι καυσίμων δεν επηρέαζαν τη συμπεριφορά των οδηγών γύρω από το ζήτημα του ανεφοδιασμού. Ωστόσο, με την σταδιακή αύξηση του ποσοστού των ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά, αυτό αναμένεται να αλλάξει. Συνεπώς, καθίσταται αναγκαία η υπογράμμιση των διαφορών μεταξύ ηλεκτροκίνητων και βενζινοκίνητων οχημάτων, καθώς και η επαρκής ενημέρωση γύρω από τις νέες τεχνολογίες που χρησιμοποιούν τα πρώτα.



Εικόνα 1.6. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή ΙΧ οχήματος

Για το σκοπό αυτό, τα κριτήρια που επιλέχθηκαν για τη σύγκριση μεταξύ ηλεκτρικών και βενζινοκίνητων οχημάτων είναι το γενικευμένο κόστος, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, η οδηγική εμπειρία και το θεσμικό πλαίσιο που περικλείει τη λειτουργία τους (Philana Kwan, *Electric vs. Petrol Cars: Which is*

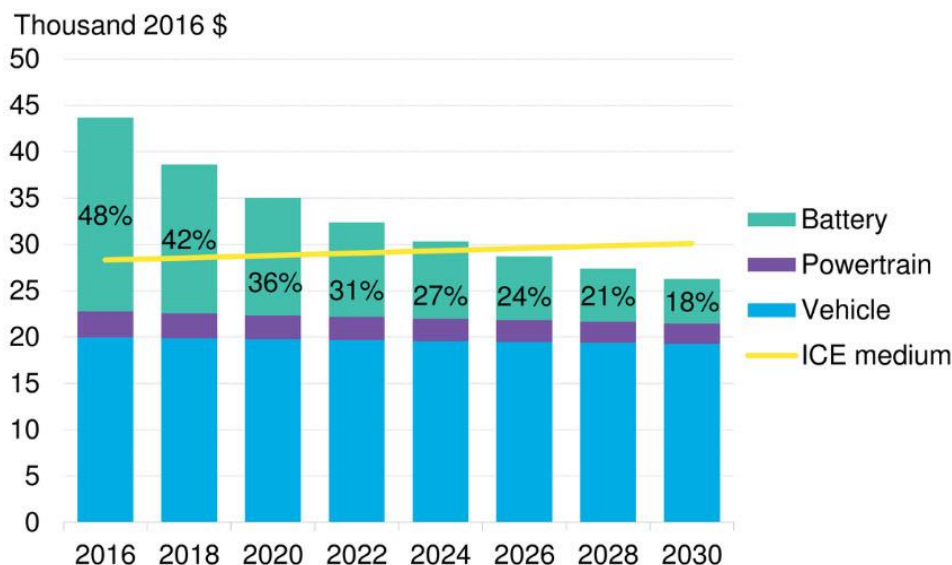
the Better Choice). Αναλυτικότερα, όλα τα κριτήρια παρουσιάζονται στο διάγραμμα της εικόνας 1.6.

1.2.1. Γενικευμένο Κόστος

Στην αγορά ενός οχήματος, ως γενικευμένο κόστος ορίζεται το άθροισμα του κόστους της αγοράς του, της συντήρησής του, αλλά και του ανεφοδιασμού του κατά τη διάρκεια του ενδεδειγμένου χρόνου ζωής του. Για την επιλογή μεταξύ ενός ηλεκτρικού ή ενός βενζινοκίνητου οχήματος, αποτελεί ίσως και τον πιο σημαντικό παράγοντα που θα λάβει υπόψη ο μετακινούμενος.

Το **κόστος αγοράς** αποτελεί την πρώτη κατά σειρά οικονομική επιβάρυνση για τον καταναλωτή, ενώ συγχρόνως είναι και η πιο σταθερή παράμετρος του γενικευμένου κόστους, άρα και η ευκολότερη να εκτιμηθεί.

Κατά κανόνα, τα ηλεκτρικά οχήματα κοστίζουν περισσότερο από τα βενζινοκίνητα. Η διαφορά τους έγγειται κυρίως στο αυξημένο κόστος των μπαταριών ιόντων – λιθίου, οι οποίες χρησιμοποιούνται από τα ηλεκτρικά οχήματα. Παρ' όλα αυτά, οι τιμές των ηλεκτρικών οχημάτων έχουν γνωρίσει μία καθοδική πορεία τα τελευταία χρόνια, η οποία μάλιστα αναμένεται να κλιμακωθεί περαιτέρω με την ολοένα και αυξανόμενη κατασκευή τους. Ειδικότερα, και το κόστος των νέων μπαταριών έχει μειωθεί, οδηγώντας σε μία σταδιακή εξίσωση του κόστους αγοράς των δύο τύπων οχημάτων. Σύμφωνα με το διάγραμμα της εικόνας 1.7, μέχρι το 2025 εκτιμάται πως το μέσο ηλεκτρικό αυτοκίνητο θα κοστίζει το ίδιο με ένα μέσο βενζινοκίνητο (BloombergNEF, *Electri Cars to Reach Price Parity by 2025*).



Εικόνα 1.7. Διάγραμμα που αναπαριστά την πτώση στις τιμές των ηλεκτρικών οχημάτων συναρτήσει της πτώσης των τιμών στις μπαταρίες τους

Στο παραπάνω διάγραμμα, η κίτρινη ευθεία αναπαριστά την τιμή ενός μέσου βενζινοκίνητου οχήματος, τόσο για τα προηγούμενα χρόνια όσο και έως το τέλος της παρούσας δεκαετίας. Αντίστοιχα, στις ράβδους απαντάται διαιρεμένο σε τρία μέρη το κόστος ενός ηλεκτρικού οχήματος. Τα μέρη αυτά είναι ο σκελετός του οχήματος, το σύστημα μετάδοσης κίνησης και η μπαταρία. Η κοστολόγηση των δύο εκ των τριών μερών, προσεγγιστικά, φαίνεται να έχει σταθεροποιηθεί. Σκοπός του διαγράμματος είναι να καταδείξει την κρίσιμη συνεισφορά των μπαταριών στο συνολικό κόστος των ηλεκτρικών οχημάτων. Έτσι, η μείωση που θα πραγματοποιηθεί στις τιμές τους μέσα στα επόμενα χρόνια, θα επιφέρει και την ουσιαστική εξίσωση του κόστους αγοράς των δύο ειδών οχημάτων. Ωστόσο, εδώ αξίζει να σημειωθεί πως το κόστος αγοράς διαφέρει μεταξύ των διαφόρων μοντέλων, είτε πρόκειται για ηλεκτρικά, είτε για βενζινοκίνητα οχήματα. Η ανάλυση που προηγήθηκε αφορά το μέσο όρο του εύρους τιμών που έχει εκτιμηθεί για το κόστος αγοράς των αυτοκινήτων.

Το **κόστος συντήρησης** συνιστά έναν εξίσου σημαντικό παράγοντα οικονομικής επιβάρυνσης, απαραίτητο για την ομαλή λειτουργία ενός οχήματος ανά τα χρόνια. Τα δύο είδη οχημάτων μοιράζονται αρκετές εργασίες συντήρησής του αμαξώματός τους. Η κύρια διαφορά τους έγκειται στη συντήρηση του κινητήρα τους. Τα βενζινοκίνητα οχήματα διαθέτουν αρκετά περισσότερα εξαρτήματα τα οποία συντελούν στην κίνησή τους (δηλαδή στη λειτουργία του κινητήρα τους) απ' όσα διαθέτουν τα αντίστοιχα ηλεκτρικά. Η ανάγκη συντήρησης όλων αυτών των εξαρτημάτων δημιουργεί και τα ανάλογα χρόνια κόστη. Αντίστοιχα, στα ηλεκτρικά οχήματα,

το μεγαλύτερο κόστος συντήρησής τους αφορά μόνο την αντικατάσταση της μπαταρίας τους. Έτσι, συνολικά, έχει εκτιμηθεί ότι τα βενζινοκίνητα οχήματα απαιτούν υψηλότερα κόστη συντήρησης, κατά μερικές χιλιάδες ευρώ, στη διάρκεια της ζωής τους.

Τέλος, το **κόστος των καυσίμων** είναι ίσως το πιο επίκαιρο πεδίο σύγκρισης μεταξύ ηλεκτρικών και βενζινοκίνητων οχημάτων. Είναι γεγονός πως οι τιμές του ρεύματος είναι πολύ χαμηλότερες από αυτές της βενζίνης, πόσο μάλλον έπειτα και από τις αυξήσεις των τελευταίων ετών. Παράλληλα, το πλεονέκτημα των ηλεκτρικών οχημάτων ενισχύεται περαιτέρω από την ενεργειακή τους αποδοτικότητα, δηλαδή τη δυνατότητά τους να μετατρέπουν την ενέργεια των καυσίμων τους σε κινητική. Αντίστοιχα, τα βενζινοκίνητα οχήματα, τα οποία έχουν χαμηλότερη ενεργειακή αποδοτικότητα, απαιτούν μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμων για τις ίδιες αποστάσεις. Φαίνεται λοιπόν, πως τα ηλεκτρικά οχήματα είναι ξεκάθαρα η οικονομικότερη επιλογή.

Συνοψίζοντας, σε ό,τι αφορά την οικονομία, τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν μεγαλύτερο κόστος κατασκευής, ενώ τα βενζινοκίνητα είναι φθηνότερα, απαιτώντας όμως μεγαλύτερες δαπάνες για τη συντήρηση και τον ανεφοδιασμό τους. Για την ορθολογική επιλογή μεταξύ των δύο, πρέπει να ληφθούν υπόψη και ορισμένες τοπικές συνιστώσες, όπως είναι οι τιμές των καυσίμων και των ανταλλακτικών. Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα φαίνονται να αποτελούν μία πιο μακροπρόθεσμη επένδυση με λιγότερα έξοδα σε βάθος χρόνου. Συγχρόνως, οι ραγδαίες εξελίξεις στην τεχνολογία τους, εκτιμάται πως θα ενισχύσουν τα λειτουργικά τους πλεονεκτήματα σε ανεφοδιασμό και συντήρηση, ενώ η μαζική παραγωγή τους θα γεφυρώσει το χάσμα με τα συμβατικά οχήματα στο κόστος αγοράς.

1.2.2. Περιβαλλοντικό Αποτύπωμα

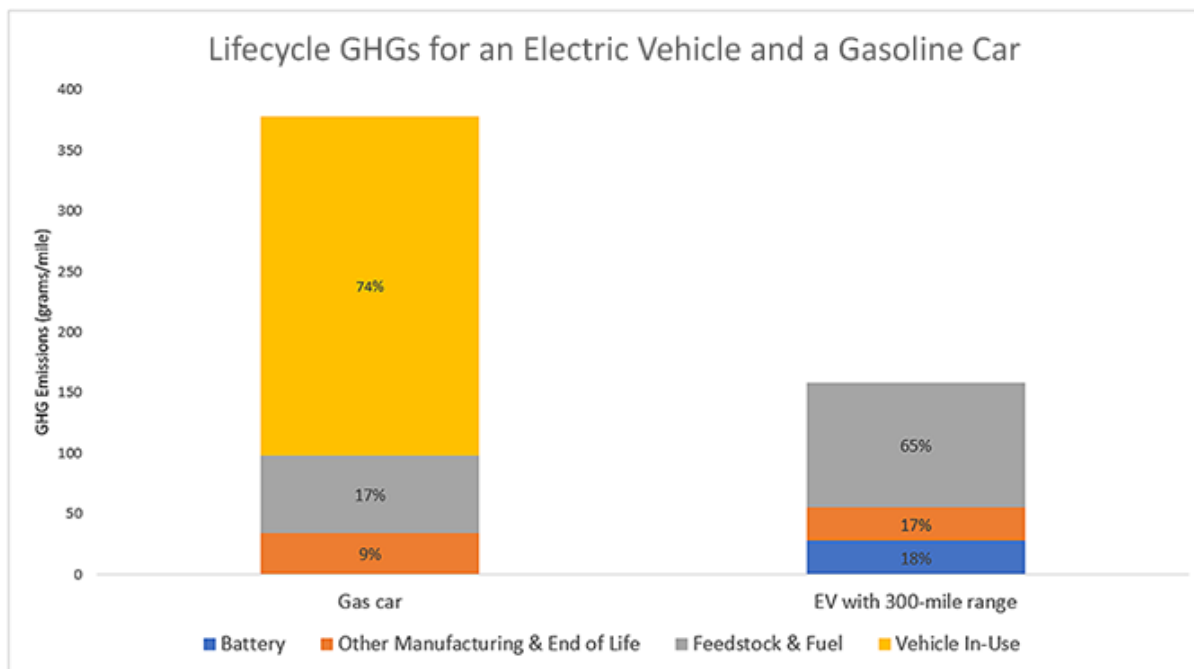
Οι μεταφορές ευθύνονται για το 20% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου παγκοσμίως. Η ανάγκη υιοθέτησης μίας νέας τεχνολογίας η οποία θα μειώσει δραστικά τη ρύπανση, έστρεψε το ενδιαφέρον προς τη βιώσιμη ανάπτυξη και ανέδειξε την ηλεκτροκίνηση ως τη βέλτιστη λύση.

Παρόλο που τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν χαρακτηριστεί με διαφορά ως φιλικότερα για το περιβάλλον, η λειτουργία τους δεν είναι πλήρως απαλλαγμένη από τις εκπομπές ρύπων. Για την κατασκευή ενός ηλεκτρικού οχήματος, και κυρίως της μπαταρίας ιόντων – λιθίου,

χρησιμοποιούνται ορυκτά καύσιμα για την θέρμανση των υλικών. Η διαδικασία αυτή παράγει 80% περισσότερους ρύπους συγκριτικά με την κατασκευή ενός συμβατικού οχήματος με κινητήρα εσωτερικής καύσης.

Ωστόσο, οι περισσότεροι ρύποι για τους οποίους ευθύνεται ένα όχημα, εκπέμπονται αφότου βγει από τη γραμμή παραγωγής. Στα ηλεκτρικά οχήματα, τα οποία δεν έχουν εξατμίσεις, οι ρύποι προέρχονται από τη φόρτισή τους και τον τρόπο παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας που τα τροφοδοτεί. Έτσι, ο περιβαλλοντικός τους αντίκτυπος είναι στην ουσία ένα πρόβλημα εξαρτημένο από την εκάστοτε τοποθεσία φόρτισής τους.

Στο διάγραμμα της εικόνας 1.8 που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι εκπεμπόμενοι ρύποι για κάθε στάδιο της ζωής ενός συμβατικού και ενός ηλεκτρικού οχήματος. Ως κοινή βάση για την καταμέτρηση των ρύπων, ορίστηκε η απόσταση των 300 μιλίων.



Εικόνα 1.8. Διάγραμμα που αναπαριστά τους εκπεμπόμενους ανά 300 μίλια, σε κάθε στάδιο της ζωής ενός ηλεκτρικού και ενός βενζινοκίνητου οχήματος

Σε ένα πείραμα που έγινε στις ΗΠΑ, φάνηκε ότι κατά μέσο όρο τα ηλεκτρικά οχήματα παράγουν 25% λιγότερους ρύπους από τα αντίστοιχα υβριδικά και περίπου 42% από τα συμβατικά οχήματα. Στη συνέχεια, διεξάγοντας το πείραμα στην πολιτεία της Washington, η οποία παράγει ρεύμα σχεδόν εξ' ολοκλήρου από ανανεώσιμες πηγές, φάνηκε πως τα ηλεκτρικά οχήματα εξέπεμψαν 61% λιγότερους ρύπους σε σχέση με τα υβριδικά και το ποσοστό αυξήθηκε ραγδαία σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα. Όμως, η μετακίνηση του πειράματος στην πολιτεία της West

Virginia, η οποία παράγει ηλεκτρική ενέργεια βασιζόμενη κυρίως στην καύση του άνθρακα, κατέδειξε τα ηλεκτρικά οχήματα περισσότερο ρυπογόνα σε σχέση με τα υβριδικά, και πάλι όμως λιγότερο ρυπογόνα σε σχέση με τα βενζινοκίνητα (MIT Climate Portal, *Are electric vehicles definitely better for the climate than gas-powered cars?*).

Συμπερασματικά, φαίνεται πλέον ότι το καύσιμο του μέλλοντος είναι η ηλεκτρική ενέργεια. Τα ηλεκτρικά οχήματα, από κάθε άποψη, συνιστούν συμφέρουσα επιλογή συγκρινόμενα με τα αντίστοιχα συμβατικά οχήματα, χωρίς όμως να στερούνται ρύπων. Τέλος, είναι γεγονός ότι ο σημαντικότερος αρωγός για την μεγιστοποίηση της ωφέλειας που πηγάζει από την ηλεκτροκίνηση, είναι η υιοθέτηση και διάχυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

1.2.3. Οδηγική Εμπειρία και Απόδοση

Δεδομένου ότι τι αυτοκίνητο αποτελεί το πιο σύνηθες μέσο καθημερινής μεταφοράς, η εμπειρία χρήσης του αποτελεί έναν εξίσου σημαντικό παράγοντα για την επιλογή μεταξύ ηλεκτρικού ή βενζινοκίνητου οχήματος. Βέβαια, απ' όλα τα υπόλοιπα πεδία σύγκρισης, αυτό είναι που αφήνει και τα περισσότερα περιθώρια υποκειμενικότητας, καθώς αντικατοπτρίζει εκτός από την ανάγκη, και την επιθυμία για μετακίνηση που έχει ο μέσος μεταφερόμενος. Παρ' όλα αυτά, παρακάτω ακολουθεί μία, κατά το δυνατόν, αντικειμενική προσέγγιση.

Οι επιδόσεις ενός οχήματος είναι το κυριότερο από τα χαρακτηριστικά που περιγράφουν την εμπειρία της οδήγησής του. Αρχικά, τα ηλεκτρικά οχήματα δεν παράγουν δυνατούς θορύβους ούτε κατά την εκκίνηση, ούτε και κατά το υπόλοιπο της κίνησής τους, μειώνοντας έτσι σημαντικά την ηχορύπανση και παρέχοντας μία διαφορετική και ήσυχη εμπειρία. Αντίθετα, οι δυνατοί ήχοι της εκκίνησης και λειτουργίας ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης έχουν το δικό τους κοινό, ενώ ταυτόχρονα είναι και οι πιο συνήθεις ήχοι που απαντώνται στους δρόμους (Carolyn Kossow, *How is driving an EV different from driving a regular car?*). Στη συνέχεια, τίθεται το ζήτημα της επιτάχυνσης, όπου τα ηλεκτρικά οχήματα επιτυγχάνουν μία ομαλή και γρηγορότερη μετάβαση από τη μηδενική στη μέγιστη ταχύτητά τους σε σχέση με τα βενζινοκίνητα. Ωστόσο, τα βενζινοκίνητα οχήματα έχουν τη δυνατότητα να φτάσουν σε μεγαλύτερες ταχύτητες. Τέλος, τα ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα χρησιμοποιούν συστήματα αναγεννητικής πέδησης. Κύριο

χαρακτηριστικό των συστημάτων αυτών είναι η δυνατότητά τους να αποθηκεύουν τη θερμότητα που παράγεται από την επιβράδυνση ή την ακινητοποίηση του οχήματος, πίσω στη μπαταρία του. Έτσι, αυξάνεται περαιτέρω η ενεργειακή αποδοτικότητα, μειώνεται η κατανάλωση σε ενέργεια και επιτυγχάνεται μεγαλύτερη αυτονομία. Από την άλλη πλευρά, τα συστήματα πέδησης των συμβατικών οχημάτων δεν έχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης της παραγόμενης θερμότητας, με αποτέλεσμα αυτή να σπαταλάται.

Οι διαφορές μεταξύ συμβατικών και ηλεκτρικών οχημάτων που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, κυρίως για τις διαδικασίες της επιτάχυνσης και της πέδησης, συνθέτουν έναν νέο τρόπο οδήγησης για τα ηλεκτρικά οχήματα. Αυτή είναι η οδήγηση με ένα πεντάλ. Η βασική αρχή της λειτουργίας της υπαγορεύει ότι αν το πεντάλ πατηθεί, τότε το όχημα επιταχύνει, ενώ όταν το πάτημα σταματήσει, τότε το αυτοκίνητο σταδιακά θα ακινητοποιηθεί. Αυτός ο νέος τρόπος οδήγησης φαίνεται να απλοποιεί αρκετά τα πράγματα, τουλάχιστον σε σύγκριση με τα συμβατικά οχήματα, τα οποία χρησιμοποιούν από 2 έως 3 πεντάλς. Ωστόσο, δεν είναι ακόμα εφαρμόσιμος σε όλα τα μοντέλα ηλεκτρικών αυτοκινήτων, αλλά ούτε και βολικός στο να υιοθετηθεί από όλους τους οδηγούς.

Παράλληλα, η εμπειρία της οδήγησης σχετίζεται άμεσα και από το περιβάλλον στο οποίο πραγματοποιείται. Για το λόγο αυτό γίνεται διαχωρισμός μεταξύ αστικού και υπεραστικού περιβάλλοντος. Στο αστικό περιβάλλον, τα ηλεκτρικά οχήματα φαίνεται να έχουν ξεκάθαρο πλεονέκτημα. Οι κοντινές αποστάσεις και οι υψηλοί κυκλοφοριακοί φόρτοι επιτρέπουν μικρές ταχύτητες, αυξάνουν την ενεργειακή απόδοση και αναδεικνύουν τεχνικά χαρακτηριστικά όπως η αναγεννητική πέδηση και η οδήγηση με ένα πεντάλ. Την ίδια στιγμή όμως, οι πόλεις παρέχουν και ένα πολύ προσιτό περιβάλλον για την μελλοντική ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης. Ο συγκεντρωτικός τρόπος ζωής στα αστικά κέντρα, προμηνύει την επάρκεια εύρεσης των απαραίτητων υποδομών (φόρτιση, συντήρηση κλπ.), ενώ πρόκειται να επωφεληθεί και άμεσα με τη μείωση του θορύβου και των εκπομπών καυσαερίων. Αντίθετα, τα συμβατικά οχήματα υπερτερούν στο υπεραστικό περιβάλλον. Οι μεγάλες αποστάσεις επιτρέπουν μεγάλες ταχύτητες, με τα φαινόμενα συμφόρησης να είναι εξαιρετικά σπάνια. Επιπλέον, πρωταρχικό μέλημα των μετακινούμενων είναι η ελαχιστοποίηση του χρόνου ταξιδιού. Αυτά τα στοιχεία συνοψίζουν και τα μειονεκτήματα των ηλεκτρικών οχημάτων έναντι των συμβατικών. Πιο συγκεκριμένα, τα ηλεκτρικά οχήματα δεν μπορούν να διανύσουν με μία πλήρη φόρτιση την απόσταση που ένα βενζινοκίνητο όχημα διανύει, έχοντας γεμάτο ντεπόζιτο. Επιπρόσθετα, οι μέγιστες ταχύτητες των

ηλεκτρικών οχημάτων είναι γενικά χαμηλότερες από αυτές των συμβατικών, ενώ συγχρόνως αυξάνουν και την κατανάλωση σε ενέργεια, οδηγώντας σε μία χρονοβόρα φόρτιση. Στον αντίποδα, τα συμβατικά οχήματα ανεφοδιάζονται γρήγορα και είναι καταλληλότερα για υψηλές ταχύτητες.

Το ζήτημα του ανεφοδιασμού είναι ίσως και το μεγαλύτερο αρνητικό στοιχείο που απορρέει από την οδήγηση ενός ηλεκτρικού οχήματος. Αν όχι καθαυτό, τότε είναι το άγχος για επαναφόρτιση που δημιουργείται στον οδηγό (range anxiety). Η ανάγκη για τον έγκαιρο εντοπισμό ενός κατάλληλου φορτιστή αποτελεί την κύρια έγνοια των χρηστών ηλεκτρικών οχημάτων. Ειδικότερα σε αντίξοες καιρικές συνθήκες, όταν η ενεργειακή κατανάλωση ενός οχήματος είναι αυξημένη, η εκτίμηση για το πότε θα χρειαστεί φόρτιση δυσχεραίνεται ακόμα περισσότερο. Μάλιστα, στις περιπτώσεις όπου και το δίκτυο των σταθμών φόρτισης είναι αραιό ή ανεπαρκές, το πρόβλημα λαμβάνει μεγαλύτερες διαστάσεις. Κατά τη χρήση όμως των συμβατικών οχημάτων, τίποτα από αυτά δε χρειάζεται να ληφθεί υπόψη (Dave Vanderwerp, *EV Range: Everything You Need to Know*).

Κλείνοντας, μέρος της εμπειρίας χρήσης ενός οχήματος, αποτελούν και οι εργασίες συντήρησής του. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως στη σύγκριση κόστους, τα ηλεκτρικά οχήματα απαιτούν λιγότερη ενασχόληση με τη συντήρησή τους. Έλεγχοι ρουτίνας, όπως τα λάδια του κινητήρα, πλέον δε χρειάζονται. Το ίδιο ισχύει και για τις επισκέψεις στο συνεργείο, οι οποίες είναι πολύ λιγότερες σε σχέση με τα οχήματα που χρησιμοποιούν κινητήρα εσωτερικής καύσης.

Γενικότερα, η εμπειρία από την οδήγηση των οχημάτων είναι το πεδίο στο οποίο υπάρχει και η πιο αμφίροπη σύγκριση μεταξύ τους, ενώ ως παράμετρος μπορεί να υπεισέρθει και η αρέσκεια του κάθε οδηγού. Όμως, η ηλεκτροκίνηση αποτελεί μία διαρκώς αναπτυσσόμενη τεχνολογία. Έτσι, μέσα στα επόμενα χρόνια, αναμένεται να έχει καλύψει τα αρνητικά της στοιχεία και να έχει ενισχύσει τα θετικά. Βέβαια, αυτό δε σημαίνει πως η τεχνολογία των κινητήρων εσωτερικής καύσης θα μείνει στάσιμη στην εξέλιξή της.

1.2.4. Θεσμικά Πλαίσια και Υποδομές

Στην επιλογή οχήματος, έναν εξίσου κρίσιμο ρόλο διαδραματίζουν τα θεσμικά πλαίσια και τα ισχύοντα νομοσχέδια κάθε χώρας. Τα τελευταία χρόνια, έχουν θεσπιστεί διεθνώς πολλοί νόμοι που αφορούν την υιοθέτηση και τη λειτουργία της ηλεκτροκίνησης.

Πιο συγκεκριμένα, πολλές κυβερνήσεις ανά τον κόσμο έχουν προβεί σε φορολογικές ελαφρύνσεις προς τους πολίτες που επιλέγουν να αγοράσουν ηλεκτρικά οχήματα. Τέτοιες ελαφρύνσεις μπορεί να είναι ελάχιστα έως μηδενικά τέλη κυκλοφορίας ή απαλλαγή από περιβαλλοντικά τέλη. Παράλληλα όμως, υπάρχουν και περιπτώσεις κρατικών επιδοτήσεων προς τους καταναλωτές, ώστε να προτιμήσουν την αγορά ενός ηλεκτρικού οχήματος.

Από την άλλη πλευρά, οι περιβαλλοντικές χρεώσεις για τους πολίτες που επιλέγουν την αγορά βενζινοκίνητων οχημάτων, αυξάνονται. Επίσης, την ίδια στιγμή θεσμοθετούνται νέοι κανονισμοί, οι οποίοι οριοθετούν τις ποσότητες των εκπεμπόμενων ρύπων ανά όχημα. Στόχος των κανονισμών αυτών δεν είναι μόνο ο μέσος μετακινούμενος, αλλά και η αυτοκινητοβιομηχανία, προκειμένου να ακολουθήσει μία πιο βιώσιμη κατεύθυνση στα μοντέλα που θα κυκλοφορήσουν τα επόμενα χρόνια.

Ωστόσο, η στήριξη προς την ηλεκτροκίνηση δεν σταματάει εκεί. Σε παγκόσμιο επίπεδο, οι κυβερνήσεις επενδύουν μεγάλα ποσά για την κατασκευή υποδομών απαραίτητων για την ηλεκτροκίνηση, όπως είναι οι σταθμοί φόρτισης. Οι επενδύσεις αυτές έχουν ως απώτερο σκοπό τη δημιουργία κρατικών και διεθνών δικτύων ανεφοδιασμού των ηλεκτρικών οχημάτων, διευκολύνοντας τόσο τους μεταφερόμενους να στραφούν προς τα ηλεκτρικά οχήματα, όσο και τις ίδιες τις μετακινήσεις.

Φαίνεται λοιπόν, πως η νέα τεχνολογία των ηλεκτρικών οχημάτων χαίρει μεγάλης αποδοχής και σε κυβερνητικό επίπεδο. Έτσι, επιδιώκεται μία σταδιακή και ομαλή μετάβαση προς την ηλεκτροκίνηση για όλους τους εμπλεκόμενους (πολίτες, κατασκευαστές, κυβερνήσεις), η οποία αποσκοπεί πρωτίστως στην ελαχιστοποίηση της περιβαλλοντικής ρύπανσης.

1.2.5. Σύνοψη

Ανακεφαλαιώνοντας, σήμερα η επιλογή οχήματος είναι ένα σύνθετο ζήτημα, καθώς τόσο η τεχνολογία όσο και η κοινωνία βρίσκονται σε ένα σταυροδρόμι. Προκειμένου να ληφθεί μία σωστή απόφαση, καθένας πρέπει να αναλογιστεί κάποια βασικά κριτήρια: το κόστος, τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο, την εμπειρία στη χρήση, το ισχύον θεσμικό πλαίσιο και τις υπάρχουσες υποδομές. Όσον αφορά την τελική επιλογή οχήματος, αυτή εν τέλει εξαρτάται από τις ατομικές ανάγκες και προτιμήσεις του καθενός. Γενικά, τα ηλεκτρικά οχήματα προσφέρουν βιώσιμες μεταφορές και χαμηλές εκπομπές ρύπων, ενώ τα βενζινοκίνητα είναι ιδανικά για μεγαλύτερες αποστάσεις και ταχύτερη ανατροφοδότηση.

1.3. Ηλεκτροκίνηση: Θεσμικές αλλαγές ανά τον κόσμο και νέες υποδομές

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ηλεκτροκίνηση είναι η νέα τεχνολογία που θα εντάξει τη βιωσιμότητα στις μεταφορές. Για την υιοθέτηση και εδραίωσή της, έχουν ληφθεί πολλές κυβερνητικές και διακρατικές πρωτοβουλίες ανά τον κόσμο. Οι πρωτοβουλίες αυτές απαρτίζονται από θεσμικά πλαίσια που στοχεύουν αφενός στην αύξηση των αγορών ηλεκτρικών οχημάτων και αφετέρου στη στελέχωση των οδικών δικτύων με επαρκείς υποδομές, ώστε να μπορούν να υποστηρίξουν την εύρυθμη κυκλοφορία και λειτουργία τους.

1.3.1. Θεσμικά πλαίσια για τις αγορές ηλεκτρικών οχημάτων

Τα καταλυτικότερα θεσμικά πλαίσια των τελευταίων ετών για την ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης στις μεγάλες παγκόσμιες αγορές είναι το MIC 2025 στην Κίνα, το ευρωπαϊκό Green Deal Industry Plan και το αμερικανικό Inflation Reduction Act.

Το **MIC 2025** αποτελεί την εθνική στρατηγική που επιδιώκει να καταδείξει την κινεζική βιομηχανία ως την πρωτοπόρο στην παγκόσμια τεχνολογική ανάπτυξη. Στα πλαίσια αυτής της στρατηγικής εντάσσονται η πράσινη ενέργεια και οι βιώσιμες μεταφορές. Κύριος στόχος του σχεδίου είναι, μέχρι το 2025, οι πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων να καταλαμβάνουν το 20% της αγοράς. Τα μέτρα που λήφθηκαν προς αυτή την κατεύθυνση αφορούν την ενίσχυση των κατασκευαστών, ώστε να καταφέρουν να ανταποκριθούν στη ζήτηση, αλλά και την επιδότηση των καταναλωτών ώστε να προτιμήσουν τα ηλεκτρικά οχήματα. Η εφαρμογή του σχεδίου έχει ήδη στεφθεί με περίσσεια επιτυχία, καθώς έως τα μέσα του 2023, οι πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων στην Κίνα καταλαμβάνουν περίπου το 35% της αγοράς.

Το λεγόμενο και **European Green Deal** συνιστά το στρατηγικό σχέδιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη συνολική μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων στη γηραιά ήπειρο. Ως απώτερο στόχο έχει την πραγμάτωση των ευρωπαϊκών δεσμεύσεων για μηδενικούς ρύπους έως το 2050. Το σχέδιο

αυτό κινείται σε τέσσερις βασικούς άξονες. Ο πρώτος είναι η ακώλυτη διάθεση των απαραίτητων πόρων προς τον κατασκευαστικό τομέα, ούτως ώστε να μην επιβραδυνθεί η Πράσινη Μετάβαση εξαιτίας ελλείψεων σε πρώτες ύλες. Ο δεύτερος άξονας αφορά στη διευκόλυνση της απόκτησης επιδοτήσεων σχετικών με ενεργειακά έξοδα και πράσινες τεχνολογίες. Ο επόμενος άξονας περιλαμβάνει την επανεκπαίδευση των εργαζομένων που θα επηρεαστούν από την Πράσινη Μετάβαση. Τέλος, ο τέταρτος άξονας θα ασχοληθεί με την προσέλκυση νέων συνεργατών και επενδύσεων. Το σχέδιο αυτό αφορά άμεσα την ηλεκτροκίνηση, καθώς πρόκειται να επηρεάσει κομβικά τις συνθήκες κατασκευής και παραγωγής μπαταριών για τα ηλεκτρικά οχήματα. Παράλληλα όμως, είναι και εναρμονισμένο με τους νέους ευρωπαϊκούς κανονισμούς “Fit for 55”, οι οποίοι υπαγορεύουν τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και λοιπών αερίων του θερμοκηπίου από τα ΙΧ, κατά τουλάχιστον 55% έως το 2030.

Το τρίτο μεγάλο θεσμικό πλαίσιο είναι το **Inflation Reduction Act** και αφορά τις ΗΠΑ. Το σχέδιο αυτό, στοχεύοντας στην οικοδόμηση μιας οικονομίας που θα βασίζεται στην καθαρή ενέργεια, περιλαμβάνει μία ποικιλία από φορολογικές ελαφρύνσεις και χρηματοδοτήσεις. Κρίσιμο μέρος του σχεδίου αποτελεί και η ηλεκτροκίνηση. Πιο συγκεκριμένα, για τα οχήματα που είναι κατασκευασμένα στις ΗΠΑ, έχουν μπαταρία με ισχύ μεγαλύτερη ή ίση με 7kW (αποκλείοντας έτσι τα υβριδικά) και πληρούν κάποια ακόμα τυπικά κριτήρια, το πρόγραμμα προβλέπει φορολογικές ελαφρύνσεις ύψους 7.5 χιλιάδων δολαρίων. Παράλληλα το πρόγραμμα παρέχει χρηματοδότηση και στους κατασκευαστές, εφόσον η παραγωγή μπαταριών και άλλων εξαρτημάτων πραγματοποιείται εγχώρια. Τέλος, στα πλαίσια του προγράμματος εντάσσεται και το ζήτημα των υποδομών, καθώς προβλέπει έργα για να υποστηρίξουν τη λειτουργία των ηλεκτρικών βαρέων οχημάτων, με χρονικό ορίζοντα το 2031.

Ως απόρροια αυτών των θεσμικών πλαισίων, καθώς και άλλων πιο πρώιμων και περιεκτικών από αυτά, στην Παγκόσμια Αναφορά της ΙΕΑ για την Ηλεκτροκίνηση που γράφτηκε το 2023 (Global EV Outlook 2023), οι χώρες που πρωτοστατούν στη μετάβαση είναι η Κίνα, τα κράτη-μέλη της Ε.Ε., οι ΗΠΑ, η Νορβηγία και η Νότια Κορέα. Μετά την ύφεση της πανδημίας, οι πωλήσεις των ηλεκτρικών οχημάτων ξεκίνησαν να διπλασιάζονται χρόνο με το χρόνο, με αποτέλεσμα σήμερα να κυκλοφορούν στους δρόμους περίπου 26 εκατομμύρια ηλεκτρικά οχήματα. Το 85% των συνολικών πωλήσεων για το 2022 προήλθε από την Κίνα και την Ευρωπαϊκή Ένωση, ένα 10% προήλθε από τις ΗΠΑ, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό καλύφθηκε από τη συνεισφορά άλλων χωρών. Το ίδιο έτος, τα ηλεκτρικά οχήματα κατέλαβαν το 14% της

παγκόσμιας κυκλοφορίας, με την ΙΕΑ να προβλέπει ότι μέχρι το τέλος του 2023 αυτό το ποσοστό θα έχει ανέβει στο 18%.

1.3.2. Θεσμικά πλαίσια για τις υποδομές των ηλεκτρικών οχημάτων

Η παρατηρούμενη αύξηση στον αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων δημιουργεί άμεσα την ανάγκη αναβάθμισης των υποδομών, τόσο με την τοποθέτηση νέων δικτύων φορτιστών, όσο και με την επέκταση των υφιστάμενων, ούτως ώστε να επαρκούν για την κάλυψη της ζήτησης. Σήμερα, η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων πραγματοποιείται κυρίως στις κατοικίες ή στους χώρους εργασίας των ιδιοκτητών τους. Ωστόσο, η ολοένα αυξανόμενη ζήτηση, εκτιμάται πως θα οδηγήσει στη διαδικασία της φόρτισης να υιοθετηθεί η ίδια απλότητα και αυτονομία που εφαρμόζεται για τον ανεφοδιασμό των συμβατικών οχημάτων. Αυτό θα καταστεί επιτεύξιμο με την κατασκευή δημόσιων δικτύων φορτιστών.

Προς αυτή την κατεύθυνση έχουν ξεκινήσει να προσανατολίζονται πολλά κράτη, δίνοντας προτεραιότητα στην ενίσχυση των υποδομών. Στις χώρες όπου υπάρχει σημαντική παρουσία της ηλεκτροκίνησης, όπως η Κίνα, οι ΗΠΑ, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Γερμανία, η Ελβετία και κάποιες ακόμα ευρωπαϊκές χώρες, οι κρατικές επιδοτήσεις για την αγορά ηλεκτρικών οχημάτων σταδιακά αποσύρονται, με το κυβερνητικό ενδιαφέρον να στρέφεται σχεδόν αποκλειστικά στην ανάπτυξη των υποδομών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το Ηνωμένο Βασίλειο, όπου το 2022 ανακοίνωσε τον τερματισμό του προγράμματος επιδοτήσεων για την αγορά ηλεκτρικών οχημάτων, ως μέρος των προσπαθειών της κυβέρνησης να στηρίξει τις νέες υποδομές, διαθέτοντας 1.6 δισεκατομμύρια λίρες (περίπου 1.9 δισ. €) για την κατασκευή 300 χιλιάδων φορτιστών έως το 2030. Ως αντίπαλο δέος σε αυτή την τακτική, χώρες όπως η Αυστραλία, η Βουλγαρία, το Βιετνάμ και η Ινδία, επέλεξαν πρώτα να επενδύσουν μεγάλα ποσά στην ανάπτυξη υποδομών, επιδιώκοντας η μετάβαση στην ηλεκτροκίνηση να ξεκινήσει γι' αυτές βρίσκοντας ήδη πρόσφορο έδαφος. Επιπλέον, κομβικής σημασίας για τις ευρωπαϊκές υποδομές είναι και η εφαρμογή του Alternative Fuel Infrastructure Regulation (AFIR), ενός προγράμματος που αποτελεί μέρος του θεσμικού

πλαisiού “Fit for 55” και παρέχει τις κατευθυντήριες για την κατασκευή κλιματικά ουδέτερων υποδομών στο Διερωπαϊκό Δίκτυο Μεταφορών (TEN-T).

Οι σταθμοί που τοποθετούνται στα δημόσια δίκτυα φόρτισης χωρίζονται σε δύο κατηγορίες με βάση τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά. Πρόκειται για τους σταθμούς «αργής» (κανονικής) και ταχείας φόρτισης. Ως σταθμοί αργής φόρτισης χαρακτηρίζονται όλοι οι φορτιστές με ισχύ από 3.7 έως και 22kW. Συνήθως απαντώνται στον αστικό χώρο, καθώς η λειτουργία τους συμβάλλει στην κάλυψη των αναγκών των ιδιωτών που δεν μπορούν να υποστηρίξουν έναν αποκλειστικά δικό τους φορτιστή ή σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης. Με αυτό τον τρόπο συνεισφέρουν και στην εξάπλωση της ηλεκτροκίνησης στα αστικά κέντρα. Σε παγκόσμιο επίπεδο υπάρχουν εγκατεστημένοι 2.7 εκατομμύρια φορτιστές, από τους οποίους οι «αργοί» φορτιστές καταλαμβάνουν περίπου τα 2/3. Το 2022 τοποθετήθηκαν περίπου 600 χιλιάδες «αργοί» φορτιστές σε όλο τον κόσμο, με τους 360 χιλιάδες από αυτούς να τοποθετούνται στην Κίνα, η οποία πλέον φιλοξενεί το 50% του συνολικού τους αριθμού παγκοσμίως. Στη δεύτερη θέση ακολουθεί η Ευρώπη, η οποία αριθμεί περίπου 460 χιλιάδες σταθμούς αργής φόρτισης.

Στον αντίποδα, οι σταθμοί ταχείας φόρτισης τοποθετούνται κυρίως σε αυτοκινητοδρόμους, επιδιώκοντας την εξομάλυνση των υπεραστικών μετακινήσεων και την αντιμετώπιση του άγχους εμβέλειας (range anxiety) που μαστίζει τους οδηγούς. Από άποψη διάρκειας, η ταχεία φόρτιση ολοκληρώνεται μέσα σε τουλάχιστον υποτριπλάσιο χρόνο σε σύγκριση με μία κανονική φόρτιση. Σε αυτή την κατηγορία φορτιστών ανήκουν όλοι οι φορτιστές με ισχύ μεγαλύτερη από 22kW. Συνολικά υπάρχουν στον κόσμο περίπου 900 χιλιάδες «γρήγοροι» φορτιστές, από τους οποίους περίπου το 84% βρίσκονται στην Κίνα. Στην Ευρώπη, μέχρι το τέλος του 2022, υπήρχαν περίπου 70 χιλιάδες φορτιστές αυτού του τύπου.

Προκειμένου να συνεχιστεί η ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης με τους ίδιους ρυθμούς, πρέπει να αξιολογηθεί η δυνατότητα των δημόσιων υποδομών, και συγκεκριμένα των δημόσιων δικτύων φόρτισης, να ανταποκριθούν στη ζήτηση. Η ζήτηση αυτή πηγάζει κυρίως από το σύνολο των μετακινούμενων που δεν διαθέτουν φορτιστή κατ' οίκον, αλλά χρησιμοποιούν ή σκοπεύουν να αγοράσουν ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Έτσι, προέκυψε η ανάγκη μέτρησης του δείκτη αναλογίας ηλεκτρικού οχήματος ανά φορτιστή, ο οποίος όμως έχει νόημα μόνο για τις χώρες στις οποίες η ηλεκτροκίνηση έχει εδραιωθεί. Κατά μέσο όρο, για κάθε σταθμό φόρτισης στον κόσμο, αντιστοιχούν 10 ηλεκτρικά οχήματα. Οι χώρες που βρίσκονται υπό του μέσου όρου είναι η Κίνα με 9 οχήματα ανά φορτιστή, η Ολλανδία με 5 και η Νότια Κορέα με περίπου 2. Η Ολλανδία

μάλιστα αποτελεί την εξαίρεση και στον ευρωπαϊκό μέσο όρο, ο οποίος κυμαίνεται περί τα 14. Οι χώρες με τις υψηλότερες τιμές είναι οι ΗΠΑ και η Νορβηγία, με 18 και 34 αντίστοιχα. Ωστόσο, οι υψηλές τιμές της αναλογίας αντιπροσωπεύουν μόνο το δημόσιο δίκτυο, ενώ οι χώρες αυτές βασίζονται αποδεδειγμένα στη φόρτιση κατ' οίκον.

Τα κρατικά επιτεύγματα που αναφέρθηκαν για τον τομέα των υποδομών, αποτελούν μέρος μεγαλύτερων διακρατικών προγραμμάτων. Τα γνωστότερα από αυτά τα προγράμματα είναι το “Accelerating to Zero” και το “EV100+”, τα οποία έχουν υπογραφεί τόσο από τις κυβερνήσεις όσο και από τον ιδιωτικό τομέα. Το πρώτο επικυρώθηκε το Νοέμβριο του 2022 στην Παγκόσμια Διάσκεψη του ΟΗΕ για την Κλιματική Αλλαγή (COP27), και αποσκοπεί στην κυκλοφορία οχημάτων με μηδενικούς εκπεμπόμενους ρύπους μέχρι το 2040. Το δεύτερο αποτελεί πρωτοβουλία του οργανισμού Climate Group και εστιάζει στην επιβράδυνση των ολοένα και αυξανόμενων ρύπων που προέρχονται από τη λειτουργία των βαρέων οχημάτων, ενώ παράλληλα δεσμεύει κι αυτό με τη σειρά του τις συμμετέχουσες πλευρές στην κατασκευή βαρέων οχημάτων που θα παράγουν μηδενικούς ρύπους έως το 2040. Αμφότερα τα προγράμματα είναι κομβικής σημασίας για το μέλλον της ηλεκτροκίνησης και συνεπώς των υποδομών που τη διέπουν.

1.3.3. Σύνοψη

Συνοψίζοντας, το σύνολο των θεσμικών εξελίξεων και πρωτοβουλιών, ήδη από τα μέσα της προηγούμενης της δεκαετίας, εστιάζει αφενός στην αύξηση των πωλήσεων ηλεκτρικών οχημάτων και αφετέρου στην κατασκευή επαρκών υποδομών για τη λειτουργία τους. Αυτή η οργανωμένη συλλογική προσπάθεια, τόσο από τις κυβερνήσεις όσο και από τις εταιρείες ανά τον κόσμο, επισφραγίζει και θεσμικά ότι η ηλεκτροκίνηση είναι μονόδρομος για το βιώσιμο μέλλον των μεταφορών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο εισάγεται η έννοια του προβλήματος χωροθέτησης εγκαταστάσεων και διατυπώνεται το αντικείμενο/πρόβλημα που απασχολεί την παρούσα εργασία: η χωροθέτηση σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε υπεραστικό δίκτυο. Τέλος, ένα σύνολο από βιβλιογραφικές αναφορές, των οποίων το επιστημονικό έργο επηρέασε την εκπόνηση της παρούσας μελέτης.

2.1. Εισαγωγή στη θεωρία των προβλημάτων Χωρόθετησης Εγκαταστάσεων

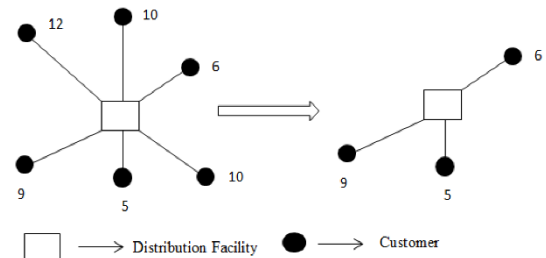
Τα προβλήματα χωροθέτησης εγκαταστάσεων είναι αντικείμενο μελέτης των επιστημονικών κλάδων της επιχειρησιακής έρευνας και της υπολογιστικής γεωμετρίας. Στόχος τους είναι ο προσδιορισμός της βέλτιστης τοποθεσίας μίας ή περισσότερων μονάδων εγκαταστάσεων (π.χ. πυροσβεστικών σταθμών) εντός κάποιου πεπερασμένου χωρικού συστήματος, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα είτε την αποτελεσματικότερη κάλυψη της περιοχής, είτε την ικανοποίηση της ζήτησης, είτε την αλληλεπίδραση με άλλες γειτονικές εγκαταστάσεις, είτε ακόμα και έναν συνδυασμό αυτών των παραγόντων. Τα κριτήρια που χαρακτηρίζουν μία τοποθεσία ως βέλτιστη ποικίλουν ανάλογα με το εκάστοτε πρόβλημα και τις παραμέτρους που λαμβάνονται υπόψη.

Τα ζητήματα αυτής της φύσεως έχουν απασχολήσει την ανθρώπινη δραστηριότητα στο βάθος των αιώνων. Ωστόσο, οι λύσεις που παρέχονταν βασιζόνταν περισσότερο σε ενστικτώδεις ενέργειες και όχι σε κάποιο τεκμηριωμένο επιστημονικό έργο. Η πρώτη επιστημονική προσέγγιση ενός τέτοιου προβλήματος έγινε στις αρχές του 20ου αιώνα και αποδίδεται στον Alfred Weber, ο οποίος έφτιαξε το πρώτο μοντέλο χωροθέτησης (1909). Έκτοτε, ο κλάδος έχει προοδεύσει σημαντικά, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι η μαθηματική έκφραση προβλημάτων του πραγματικού κόσμου αποτελεί σήμερα ένα εύκολο εγχείρημα.

Λαμβάνοντας υπόψη την τρέχουσα επιστημονική πρόοδο, ένα ολοκληρωμένο μοντέλο χωροθέτησης εγκαταστάσεων πρέπει να είναι σε θέση να παρέχει πληροφορίες για :

- τον αριθμό των εγκαταστάσεων που θα τοποθετηθούν
- τη γεωγραφική τους θέση
- το μέγεθος κάθε εγκατάστασης
- την κατανομή της ζήτησης στις επιμέρους εγκαταστάσεις

Οι πληροφορίες που μπορούν να εξαχθούν από τέτοια μοντέλα μαρτυρούν πολλά για την ευελιξία τους σε δεδομένα και ζητούμενα, καθώς και για το γεγονός ότι μπορούν να επιλεγούν για την επίλυση πλήθους εφαρμογών. Έτσι, καταφέρνουν να προσελκύσουν εκτός από το επιστημονικό, και το επιχειρηματικό ενδιαφέρον, ενώ επιστρατεύονται εξίσου από το δημόσιο και τον ιδιωτικό τομέα. Στο δημόσιο τομέα, η χωροθέτηση εγκαταστάσεων συνήθως σχετίζεται με έργα κοινής ωφέλειας (πάρκα, πλατείες κ.α.) ή δημόσιων υπηρεσιών (αστυνομικό τμήμα, στάσεις λεωφορείων κ.α.), αποσκοπώντας στη μεγιστοποίηση του δημόσιου οφέλους, ενώ αρκετές φορές υπόκεινται και σε ευρύτερες κοινωνικοπολιτικές στρατηγικές. Αντίστοιχα, στον ιδιωτικό τομέα, οι νέες εγκαταστάσεις συνήθως προμηνούν κάποια επέκταση (νέα καταστήματα/παραρτήματα) ή έχουν λειτουργικό χαρακτήρα (αποθηκευτικοί χώροι) και στοχεύουν στην πλήρωση των ιδιωτικών συμφερόντων, είτε μεγιστοποιώντας το κέρδος, είτε ελαχιστοποιώντας το κόστος.



Εικόνα 2.1. Σχεδιαγραμματική αναπαράσταση ενός προβλήματος χωροθέτησης εγκαταστάσεων

Τα προβλήματα χωροθέτησης εγκαταστάσεων χωρίζονται επιμέρους σε δύο κύριες κατηγορίες, τα συνεχή (continuous) και τα διακριτά (discrete). Η ειδοποιός διαφορά τους βρίσκεται στη διαχείριση του χωρικού συστήματος για την εύρεση των βέλτιστων τοποθεσιών. Στα συνεχή προβλήματα, ο χώρος ή η περιοχή μελέτης είναι ενιαία και οι εγκαταστάσεις μπορούν να τοποθετηθούν οπουδήποτε εντός του χωρικού συστήματος. Με άλλα λόγια, κάθε ζεύγος συντεταγμένων είναι μία εν δυνάμει θέση για την τοποθέτηση κάποιας εγκατάστασης. Τα μαθηματικά μοντέλα που συγκροτούνται για την επίλυση τέτοιων προβλημάτων χρησιμοποιούν μη γραμμικές σχέσεις. Αντίθετα, στα διακριτά προβλήματα υπάρχει ένα πεπερασμένο σύνολο προεπιλεγμένων θέσεων, στις οποίες δύνανται να τοποθετηθούν οι εγκαταστάσεις. Από αυτές επιλέγεται πάντοτε ένα υποσύνολο, το οποίο είναι σύμφωνο με τα κριτήρια επιλογής του εκάστοτε προβλήματος. Η μαθηματική επίλυση αυτής της κατηγορίας προβλημάτων πραγματοποιείται συνήθως με την μέθοδο του ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού.

Μία άλλη κατηγοριοποίηση αυτών των προβλημάτων γίνεται με βάση τον τύπο των δεδομένων που δέχονται, αλλά και τον τρόπο με τον οποίο τα αξιοποιούν. Έτσι χωρίζονται σε στατικά ή δυναμικά προβλήματα, καθώς και σε ντετερμινιστικά ή στοχαστικά.

- Τα **στατικά** προβλήματα αντλούν δεδομένα για την κατάσταση στην οποία βρίσκεται ένα σύστημα σε μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η μετέπειτα μοντελοποίηση του συστήματος αγνοεί τις μεταβολές που ενδέχεται να επέλθουν με το πέρασμα του χρόνου και παράγει λύσεις ιδανικές για εκείνη τη χρονική στιγμή στην οποία αναφέρονται τα δεδομένα. Η χρήση τους ενδείκνυται για συστήματα που αναμένεται να έχουν διαχρονική λειτουργία.
- Σε αντίθεση με τα στατικά προβλήματα, τα **δυναμικά** περιγράφουν ένα διαρκώς μεταβαλλόμενο σύστημα. Τα προβλήματα αυτά μοντελοποιούνται με τέτοιο τρόπο ώστε οι παράμετροί τους να μπορούν να δέχονται συνεχώς νέα δεδομένα, τα οποία αντλούνται από τις εκάστοτε μεταβολές στο σύστημα. Τέτοιου είδους είναι και τα προβλήματα που συναντώνται στον πραγματικό κόσμο. Ωστόσο είναι δυσκολότερο να επιλυθούν.
- Τα **ντετερμινιστικά** προβλήματα αξιοποιούν ένα πεπερασμένο σύνολο δεδομένων και δέχονται συγκεκριμένες λύσεις. Κατά την μοντελοποίησή τους δέχονται επίσης συγκεκριμένες μεταβλητές και οι λύσεις που αποδίδουν μεταβάλλονται μόνο αν αλλάξουν οι τιμές των μεταβλητών τους. Χρησιμοποιούνται σε διαχρονικές εφαρμογές, αλλά παρέχουν εκτιμήσεις μόνο με βάση ό,τι συμπεριλαμβάνεται στα δεδομένα τους.
- Αντίθετα, τα **στοχαστικά** προβλήματα περιλαμβάνουν και τυχαίες μεταβλητές. Οι τυχαίες μεταβλητές προσομοιάζουν ποσοτικοποιημένα δεδομένα ή διαφορές δεδομένων, οι οποίες είναι αδύνατο να εκτιμηθούν με ακρίβεια. Ωστόσο, στα πλαίσια ενός στοχαστικού μοντέλου, τους δίνεται η δυνατότητα να επηρεάσουν τις παραγόμενες λύσεις.

Η διαδικασία της δημιουργίας μαθηματικών μοντέλων για τις κατηγορίες προβλημάτων χωροθέτησης εγκαταστάσεων που αναφέρθηκαν, ονομάζεται ανάλυση χωροθέτησης (location analysis). Στόχος της είναι η τοποθέτηση εγκαταστάσεων για την κάλυψη της ζήτησης με τον «βέλτιστο» δυνατό τρόπο. Από εκεί πηγάζει και ο χαρακτηρισμός της ως βελτιστοποίηση. Η βελτιστοποίηση επιδρά στη μαθηματική σχέση που περιγράφει τη λύση ενός προβλήματος χωροθέτησης και είναι γνωστή ως αντικειμενική συνάρτηση. Ως διαδικασία, θεωρείται επιτυχής όταν καταφέρει είτε να μεγιστοποιήσει το όφελος, είτε να ελαχιστοποιήσει το κόστος των παρεχόμενων υπηρεσιών που απορρέουν από την τοποθέτηση των εκάστοτε εγκαταστάσεων.

Η πλειοψηφία των προβλημάτων χωροθέτησης διατυπώνεται με τη βοήθεια του ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού. Ενίοτε, όταν αυξάνεται η πολυπλοκότητα κάποιων προβλημάτων

χρησιμοποιούνται και πιο εξειδικευμένες μέθοδοι όπως οι ευρετικοί και οι μεθευρετικοί αλγόριθμοι, οι γενετικοί αλγόριθμοι κ.α. Η πολυπλοκότητα ενός προβλήματος είναι ο ρυθμιστικός παράγοντας που συνήθως μπορεί να αξιολογήσει εκ των προτέρων την αποτελεσματικότητα της βελτιστοποίησης σε ένα πρόβλημα, ενώ ενδέχεται και κάποια προβλήματα να είναι αδύνατο να επιλυθούν με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο. Η πολυπλοκότητα ενός προβλήματος είναι αλληλένδετη με τον αριθμό των μεταβλητών του. Όσο περισσότερες είναι οι μεταβλητές, τόσο πιο δυσεπίλυτο γίνεται ένα πρόβλημα. Για το λόγο αυτό, καθίσταται αναγκαίος ο διαχωρισμός μεταξύ των ζητούμενων μεγεθών και των συλλεγμένων ή παράγωγων δεδομένων, με σκοπό τα πρώτα να είναι όσο το δυνατό λιγότερα και ιδανικά να περιορίζονται σε μόνο μία ποσότητα.

Μέχρι σήμερα, το επιστημονικό έργο γύρω από τα προβλήματα χωροθέτησης εγκαταστάσεων έχει εστιάσει κυρίως στην ανάπτυξη στατικών και ντετερμινιστικών μοντέλων για την επίλυσή τους. Αυτό συνεπάγεται ότι οι πληροφορίες για τη ζήτηση, τις αποστάσεις, το χρόνο διέλευσης και άλλα συναφή μεγέθη είναι ήδη γνωστές και εισάγονται εκ προοιμίου στο μοντέλο. Αντίστοιχα, οι πληροφορίες που εξάγονται από αυτό χρησιμεύουν κυρίως για τη λήψη βραχυπρόθεσμων αποφάσεων. Τέτοιου είδους μοντέλα μπορούν να παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για την κατανόηση των ευρύτερων υφιστάμενων συνθηκών και να παρέχουν γενικευμένες λύσεις. Ωστόσο, αποδεικνύεται πολλές φορές ότι υστερούν στην ενσωμάτωση των αλλαγών και των αβεβαιοτήτων της πραγματικότητας και συνεπώς αδυνατούν να συνεισφέρουν στη λήψη ρεαλιστικών αποφάσεων. Αν και έχουν υπάρξει προσπάθειες για τον εμπλουτισμό των μοντέλων αυτών, είτε με τη δημιουργία εναλλακτικών σεναρίων, είτε με την εισαγωγή μεθόδων στοχαστικού προγραμματισμού, η πιο επιτυχημένη προσομοίωση προβλημάτων του πραγματικού κόσμου έως τώρα πηγάζει από τα δυναμικά μοντέλα.

2.2. Διατύπωση του προβλήματος

Στο φάσμα των κέντρων παροχής υπηρεσιών ανήκουν και οι εγκαταστάσεις φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς είναι υπεύθυνες για την κάλυψη των ανεφοδιαστικών αναγκών που έχουν τα οχήματα αυτά. Το πρόβλημα της χωροθέτησής τους κατά μήκος ενός υπεραστικού δικτύου, αποτελεί και το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Κατά τη διάρκεια μία αστικής ή υπεραστικής μετακίνησης με ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο, είναι λογικό να υπάρξει η ανάγκη ανεφοδιασμού του με ρεύμα. Προκειμένου η μετακίνηση να εξελιχθεί ομαλά, ο οδηγός θα πρέπει να αναζητήσει ένα σημείο φόρτισης για το όχημά του, συνήθως αφότου ειδοποιηθεί και από το σύστημα του οχήματος πως υπάρχει ανάγκη τροφοδότησης με ρεύμα. Η μη έγκαιρη εύρεση ενός τέτοιου σημείου θα έχει σαν αποτέλεσμα το όχημα να ξεμείνει από ενέργεια και να διακοπεί η μετακίνηση, με ό,τι αυτό μπορεί να συνεπάγεται για τους μετακινούμενους. Τι θα συμβεί όμως αν ο πλησιέστερος φορτιστής απέχει απόσταση μεγαλύτερη από αυτή που μπορεί να διανύσει το όχημα; Ή ακόμα κι αν καταφέρει να φτάσει στον φορτιστή, τι χρονική επιβάρυνση θα έχει αν, εκτός από τη διάρκεια φόρτισης του δικού του οχήματος, αντικρίσει και μία ουρά τριών, τεσσάρων ή και περισσότερων οδηγών οι οποίοι περιμένουν να φορτίσουν το δικό τους όχημα; Αυτοί είναι κάποιοι από τους κυριότερους παράγοντες που αφενός πρόκειται να επηρεάσουν καθοριστικά ένα πρόβλημα χωροθέτησης τέτοιων εγκαταστάσεων, αλλά παράλληλα αποτελούν και τα πρώτα πράγματα που θα κληθεί να αναλογιστεί ο χρήστης ενός ηλεκτρικού οχήματος κατά τις μετακινήσεις του.

Το πρώτο και κυριότερο κριτήριο που πρέπει να ληφθεί υπόψη σε ένα πρόβλημα χωροθέτησης υποδομών φόρτισης είναι η απόσταση. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, η απόσταση έχει διττή σημασία. Εκ πρώτης όψεως, εκφράζει την εμβέλεια στην οποία μπορούν να κινηθούν τα ηλεκτρικά οχήματα έως ότου να χρειαστούν φόρτιση. Συγχρόνως όμως εκφράζει και το διάστημα που παρεμβάλλεται μεταξύ των φορτιστών. Παρόλο που και οι δύο εκφάνσεις της απόστασης είναι σημαντικές, στη συγκεκριμένη μελέτη δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στη δεύτερη. Πιο συγκεκριμένα, επιδιώκεται να τοποθετηθούν φορτιστές σε αποστάσεις σίγουρα μικρότερες από αυτές που επιτρέπει η μπαταρία ενός μέσου ηλεκτρικού οχήματος, οι οποίοι όμως θα υφίστανται και κατά τέτοια διαστήματα ώστε να δίνουν αρκετές ευκαιρίες στους οδηγούς να σταματήσουν και να φορτίσουν το όχημά τους. Έτσι, εντάσσοντας την απόσταση μεταξύ των φορτιστών ως παράμετρο στο μοντέλο χωροθέτησης, πρόκειται να υπολογιστεί η χωρική

συχνότητα με την οποία θα τοποθετηθούν οι φορτιστές, ούτως ώστε να καλύψουν επαρκώς τις ανάγκες των μετακινούμενων.

Οι ανάγκες των μετακινούμενων ή, με μία λέξη, η ζήτηση είναι το δεύτερο σημαντικό κριτήριο που λαμβάνεται υπόψη. Στην περίπτωση ενός οδικού δικτύου, η ζήτηση εκφράζεται με τη μορφή των κυκλοφοριακών φόρτων. Οι κυκλοφοριακοί φόρτοι περιγράφουν τον αριθμό των οχημάτων που διέρχονται από το τμήμα μιας οδού κατά τη διάρκεια ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος αναφοράς (π.χ. μία ώρα, μία ημέρα κλπ.). Είναι λογικό ότι στους δρόμους που υπάρχουν μεγαλύτεροι φόρτοι, επιδιώκεται να τοποθετηθεί και μεγαλύτερος αριθμός φορτιστών, προκειμένου να εξυπηρετηθούν και όσο το δυνατόν περισσότεροι μετακινούμενοι. Μάλιστα, αυτό συνάδει και με το γεγονός ότι πρόκειται για ένα δημόσιο δίκτυο φόρτισης, το οποίο, όπως και όλα τα δημόσια έργα, αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση του οφέλους των πολιτών.

Ένα κριτήριο με εξίσου βαρύνουσα σημασία, το οποίο εξαρτάται και από τη ζήτηση, είναι το κόστος. Το κόστος καθαυτό αποτελεί μία ευρεία έννοια. Σε κάθε περίπτωση όμως, η ελαχιστοποίησή του είναι το ζητούμενο. Ως κόστος μπορεί να θεωρηθεί η οικονομική επιβάρυνση των μετακινούμενων για τη φόρτιση ή, ως γενικευμένο κόστος, η χρονική επιβάρυνση που επωμίζονται οι μετακινούμενοι στην περίπτωση της φόρτισης. Ωστόσο, στα πλαίσια του συγκεκριμένου προβλήματος χωροθέτησης, το κόστος σχετίζεται μόνο με την κατασκευή του έργου. Πρόκειται δηλαδή, για το συνολικό κόστος εγκατάστασης ενός δικτύου σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε υπεραστικό δίκτυο. Επαναφέροντας το πρόβλημα, ο ρόλος του κόστους είναι κυρίως περιοριστικός, καθώς αντιπροσωπεύει έναν καθορισμένο προϋπολογισμό, τον οποίο σε καμία περίπτωση δεν θα πρέπει να υπερβούν οι εργασίες. Συγχρόνως όμως, το μέγεθος του έργου θα πρέπει να αντανakλά και τις ανάγκες των μετακινούμενων.

Τέλος, δύο επικουρικά κριτήρια, τα οποία πηγάζουν από το κόστος, είναι ο χώρος και η ενέργεια. Σκοπός του κριτηρίου του χώρου είναι να διασφαλίσει ότι τα σημεία στα οποία θα τοποθετηθούν οι φορτιστές είναι κατάλληλα διαμορφωμένα. Στις περιπτώσεις που αυτό δεν ισχύει, ο χώρος υπεισέρχεται στο κόστος με τη μορφή των απαιτούμενων χωματουργικών εργασιών για την κατάλληλη διαμόρφωση των θέσεων. Αντίστοιχα, η ενέργεια αντιπροσωπεύει το κόστος σύνδεσης των φορτιστών με το δίκτυο ηλεκτροδότησης. Τα δύο αυτά κριτήρια παρόλο που χαρακτηρίστηκαν ως επικουρικά, δεν παύουν να είναι σημαντικά. Εντούτοις, για την επίλυση του παρόντος προβλήματος χωροθέτησης, λαμβάνονται υπόψη και ενσωματώνονται στο κόστος εγκατάστασης.

2.3. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η χωροθέτηση σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, και επομένως επαρκών υποδομών, διαδραματίζει καταλυτικό ρόλο για την περαιτέρω υιοθέτηση της ηλεκτροκίνησης. Επιστημονικοί ερευνητές ανά τον κόσμο έχουν πραγματοποιήσει πολλές και διαφορετικές προσεγγίσεις με στόχο την εύρεση των βέλτιστων τοποθεσιών για την τοποθέτηση των φορτιστών. Ιστορικά, μέχρι τις αρχές της προηγούμενης δεκαετίας, η ηλεκτροκίνηση υπήρχε σαν ιδέα, αλλά υπολειπόταν σε πρακτικές εφαρμογές. Έκτοτε, η εξέλιξη των νέων τεχνολογιών και η επικαιροποίηση του ζητήματος έχουν συμβάλλει ώστε η διαθέσιμη βιβλιογραφία να αυξάνεται και να εμπλουτίζεται διαρκώς.

- ***Η πρόωμη μελέτη των H. Hanabusa και R. Horiguchi (H. Hanabusa et al., 2011)***

Στις αρχές της προηγούμενης δεκαετίας, ξεκίνησε η σύνταξη επιστημονικών μελετών με θέμα την τοποθέτηση υποδομών φόρτισης για τα ηλεκτρικά οχήματα. Μία από τις πρώτες και θεμελιώδεις μελέτες για τον κλάδο, ήταν αυτή των Hanabusa και Horiguchi το 2011. Στα πλαίσια της μελέτης προβλεπόταν η χωροθέτηση σταθμών φόρτισης με στόχο αφενός την ελαχιστοποίηση του κόστους μετακίνησης των οδηγών, αλλά και αφετέρου η εξισορροπημένη κατανομή της ζήτησης μεταξύ των σταθμών. Δηλαδή, οι θέσεις των σταθμών να είναι τέτοιες, ώστε αυτοί να καταστούν προσιτοί και προτιμητέοι από ισόποσα ποσοστά των μετακινούμενων.

Για την επίλυση του προβλήματος, συγκροτήθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης. Η πρώτη αρχή του μοντέλου καταδείκνυε ότι για την εκτίμηση των βέλτιστων θέσεων των σταθμών, θα έπρεπε να υπάρχουν ως δεδομένα ο συνολικός αριθμός τους και η ισχύς της φόρτισης που θα παρείχαν. Εδώ αξίζει να σημειωθεί πως η προσθήκη δεδομένων, ακόμα και σε προσεγγιστικό επίπεδο, τα οποία θα αφορούσαν τις δυνατότητες του ηλεκτρικού δικτύου, ήταν μία σημαντική καινοτομία για τα τότε ερευνητικά δεδομένα. Στη συνέχεια, ο υπολογισμός της ζήτησης θα γινόταν βάσει δεδομένων Προέλευσης – Προορισμού, χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο κατανομής κυκλοφορίας, συγκεκριμένα τον Dial. Τέλος, το κόστος μετακίνησης θα προέκυπτε ως το άθροισμα του χρόνου της μετακίνησης και της αναμονής των οδηγών στον εκάστοτε σταθμό φόρτισης. Οι τελικές θέσεις των σταθμών θα αποδίδονταν από την

ελαχιστοποίηση του κόστους και τον καθορισμό μίας ακτίνας εξυπηρέτησης, η οποία θα οριοθετούσε και την ελάχιστη δυνατή απόσταση μεταξύ τους.

Για την αποτελεσματική αξιολόγηση των δεδομένων των μετακινήσεων, οι συμπεριφορές των μετακινούμενων χωρίστηκαν σε τρεις κατηγορίες. Η πρώτη αφορούσε κανονικά τη διέλευση των μετακινούμενων στον προορισμό τους, η δεύτερη αφορούσε την παράκαμψη της κανονικής τους πορείας προκειμένου να φτάσουν σε κάποιο σταθμό φόρτισης, ενώ η τρίτη συνόψιζε την εμπειρία τους κατά τη φόρτιση (αναμονή για φόρτιση, διάρκεια φόρτισης κλπ.). Το σύνολο όλων των συμπεριφορών συγκροτούσε τη ζήτηση, η οποία εκτιμήθηκε με την τεχνική SUE (Stochastic User Equilibrium), χρησιμοποιώντας, όπως αναφέρθηκε τον αλγόριθμο Dial. Από την ερμηνεία και την ποσοτικοποίηση κάθε συμπεριφοράς θα προέκυπτε και η τελική τιμή του κόστους, το οποίο έπρεπε να ελαχιστοποιηθεί. Αντίστοιχα, η εξισορροπημένη κατανομή της ζήτησης μοντελοποιήθηκε βασισμένη στην Αρχή της Μεγιστοποίησης της Εντροπίας. Η αρχή αυτή συνοψίζεται στην επιλογή της κατανομής με τη μεγαλύτερη δυνατή αβεβαιότητα που είναι δυνατόν να συνάδει με τους εκάστοτε περιορισμούς του προβλήματος.

Η πρακτική εφαρμογή της μελέτης προοριζόταν για μία έκταση 8000 τετραγωνικών χιλιομέτρων γύρω από το Τόκιο. Ωστόσο, η έλλειψη δεδομένων κατά την περίοδο συγγραφής της, συντέλεσε στο να μην υπάρξει κάποια καταγεγραμμένη εφαρμογή της σε πραγματικό δίκτυο.

- ***Η πολυπαραμετρική μελέτη στη Λυών (Baouche et al., 2014)***

Λίγα χρόνια αργότερα, το 2014, υλοποιήθηκε στη Γαλλία μία από τις πιο ολοκληρωμένες προσεγγίσεις της σύγχρονης βιβλιογραφίας, στο πρόβλημα της τοποθέτησης σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Στόχος της μελέτης ήταν η ελαχιστοποίηση του κόστους των τοποθετούμενων υποδομών, αλλά και του κόστους μεταφοράς (travel cost) των ηλεκτρικών οχημάτων. Προκειμένου να επιτευχθεί η κατά το δυνατόν ακριβέστερη προσομοίωση της πραγματικότητας, το μαθηματικό μοντέλο που δημιουργήθηκε έλαβε υπόψη δεδομένα μεταφορών, ενεργειακής κατανάλωσης και τοπογραφίας.

Τα μεταφορικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη είχαν τη μορφή ζευγών Προέλευσης – Προορισμού, με την μελετούμενη γεωγραφική έκταση να χωρίζεται σε 42 επιμέρους ζώνες. Ο καθορισμός των διαδρομών για τα ζεύγη Προέλευσης - Προορισμού έγινε

αξιοποιώντας το περιβάλλον του OSRM(το οποίο βασίζεται στο Open Street Maps) και του Bing Maps, με κριτήριο την επιλογή του συντομότερου χρόνου διαδρομής (shortest path). Στη συνέχεια, τα δεδομένα αυτά εμπλουτίστηκαν και με υψομετρικές πληροφορίες, οι οποίες αντλήθηκαν από την IGN Alti-Maps Database.

Συγχρόνως με τα δεδομένα των μετακινήσεων, το σύστημα ζωνών Προέλευσης – Προορισμού, χρησιμοποιήθηκε και για την γεωγραφική κατανομή της ενεργειακής ζήτησης της περιοχής μελέτης. Η ζήτηση για ενέργεια υπολογίστηκε με χρήση της βιβλιοθήκης VEHLIB, η λειτουργία της οποίας συνοψίζεται στην προσομοίωση των τεχνικών χαρακτηριστικών μοντέλων οχημάτων. Ένα όχημα προσομοιώνεται ως σύστημα που περιλαμβάνει πολλαπλά εξαρτήματα. Εκτιμώντας την μέση ταχύτητα κίνησης αυτού του συστήματος και συνταυτίζοντάς τη με τη μέση ταχύτητα κίνησης που έχει εκτιμηθεί για το δίκτυο, μπορεί να συναχθεί μία ικανοποιητική προσέγγιση των ενεργειακών αναγκών του συστήματος/οχήματος αυτού. Η μελέτη ασχολήθηκε με την προσομοίωση ενός ηλεκτρικού αστικού ΙΧ οχήματος – προτύπου, με μπαταρία χωρητικότητας 20 KWh. Κατόπιν, οι ενεργειακές του ανάγκες υπολογίστηκαν βάσει και της τοπογραφίας (υψομετρικά δεδομένα) της περιοχής, και τελικώς πολλαπλασιάστηκαν ανάλογα με τις μετακινήσεις όλου του δικτύου.

Έπειτα από τη συγκρότηση όλων αυτών των δεδομένων, αυτά εισάχθηκαν σε ένα μαθηματικό μοντέλο ακέραίου γραμμικού προγραμματισμού (βλ. κεφ. 5), το οποίο αριθμούσε συνολικά 1869 περιορισμούς (constraints) και 1796 δυαδικές μεταβλητές (variables). Από το μοντέλο αυτό προέκυψαν εναλλακτικές λύσεις του προβλήματος χωροθέτησης, καθώς παράμετροι όπως το ποσοστό υιοθέτησης ηλεκτρικών οχημάτων, το ποσοστό της εξυπηρετούμενης ζήτησης, η ακτίνα εξυπηρέτησης των σταθμών, αλλά και το είδος τους (αργής, μέσης ή ταχείας φόρτισης) λάμβαναν διαφορετικές τιμές χάριν πειραματισμού.

Τα τελικά συμπεράσματα της μελέτης κατέδειξαν ότι, ποιοτικά, η διαδεδομένη χρήση σταθμών μέσης φόρτισης είναι προτιμότερη, κυρίως σε θέσεις όπως είναι οι δημόσιοι χώροι στάθμευσης, ενώ οι σταθμοί ταχείας φόρτισης εξυπηρετούν βέλτιστα όταν τοποθετούνται σε ήδη υφιστάμενα πρατήρια καυσίμων. Συνολικά, σε επίπεδο χώρου, συμπεραίνεται ότι οι υποδομές φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων είναι συμφέρον να τοποθετούνται σε περιοχές με χρήσεις γης σχετικές με την στάθμευση ή τον ανεφοδιασμό οχημάτων, από το να χωροθετούνται νέες. Τέλος, ποσοτικά, για το μητροπολιτικό κέντρο της Λυών, η μελέτη υπέδειξε την τοποθέτηση τεσσάρων

έως έξι μεγάλων σταθμών φόρτισης, ανάλογα με την ακτίνα εξυπηρέτησής τους (από 1000 έως 3000 μέτρα αντίστοιχα).

- ***Η διττή προσέγγιση του προβλήματος χωροθέτησης σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με χρήση υβριδικού αλγόριθμου (Bai et al., 2019)***

Το 2019 επιχειρήθηκε μία εναλλακτική προσέγγιση του εν λόγω προβλήματος χωροθέτησης, στοχεύοντας στην ταυτόχρονη επίτευξη δύο στόχων. Γι' αυτό και χαρακτηρίστηκε ως «διττή». Οι στόχοι αυτοί ήταν αφενός η ελαχιστοποίηση του κόστους του έργου και αφετέρου η μεγιστοποίηση των παρεχόμενων υπηρεσιών (ωφέλειας) προς τους μετακινούμενους. Ωστόσο, ήδη από τις πρώιμες θεωρήσεις της μελέτης, διαπιστώθηκε ότι οι δύο αυτοί στόχοι είναι αντικρουόμενοι, με την επίτευξη του ενός να συνεπάγεται την παρεμπόδιση του άλλου. Παράλληλα, η μελέτη υιοθέτησε μία εξίσου πρωτοποριακή προσέγγιση και για τη γεωγραφική περιγραφή της περιοχής στην οποία αναφέρεται, εγκαθιδρύοντας ένα δίκτυο από τετραγωνικά κελιά (κάναβος) σε όλο το εύρος της. Επίσης, η ζήτηση για μετακίνηση εκτιμήθηκε με τη βοήθεια δεδομένων GPS, τα οποία φανέρωσαν τη συγκέντρωση οχημάτων σε κάθε κελί της περιοχής.

Ο γεωγραφικός διαχωρισμός με τη χρήση κανάβου, έναντι ζωνών, συνοδεύεται από ορισμένα πλεονεκτήματα, τα οποία είναι σύμφωνα και με τις προτεραιότητες της μελέτης. Έτσι λοιπόν, αιτιολογείται και η επιλογή του. Αρχικά, η μέθοδος αυτή διαθέτει περισσότερα πολεοδομικά ερείσματα (εξαιτίας και της ομοιότητάς της με τα οικοδομικά τετράγωνα), τα οποία την καθιστούν περισσότερη προσιτή για αστικές επεμβάσεις. Πιο συγκεκριμένα, η χωροθέτηση νέων υποδομών εντός του αστικού ιστού δεν μπορεί να γίνει αυθαίρετα, καθώς πρέπει να ληφθούν υπόψη τα ήδη υφιστάμενα κτιριακά συγκροτήματα ή και άλλες χρήσεις γης, οι οποίες δεν δύνανται να μετατοπιστούν αν δεν προηγηθούν επεμβάσεις μεγάλης κλίμακας. Έτσι, σε αντίθεση με άλλα μοντέλα τα οποία υποδεικνύουν μεμονωμένες θέσεις βάσει συντεταγμένων, πλέον δίνεται η δυνατότητα, μετά τον καθορισμό του αριθμού των σταθμών προς τοποθέτηση, εγκατάστασής τους εντός μίας ευρύτερης χωρικής οντότητας που περιλαμβάνεται σε ένα κελί. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η ευελιξία. Δεδομένου ότι πρόκειται για ένα πρόβλημα λήψης αποφάσεων, στο οποίο μάλιστα εμπίπτουν δύο στόχοι (ελαχιστοποίηση κόστους και μεγιστοποίηση ωφέλειας), η προβολή διαφορετικών κελιών, ως εναλλακτικές που ρυθμίζουν

διαφορετικά τις συνιστώσες του προβλήματος, καθίσταται αυτομάτως ως η αποτελεσματικότερη προσέγγιση. Τέλος, η μέθοδος αυτή συνιστά και την βέλτιστη επιλογή για την αξιοποίηση δεδομένων από GPS, λαμβάνοντας υπόψη επίκαιρα δεδομένα για την κίνηση, από τα οποία θα προκύψει και ο μετέπειτα υπολογισμός της ζήτησης για φόρτιση.

Εν συνεχεία, η επίλυση της μελέτης πραγματοποιήθηκε μέσω ενός υβριδικού αλγορίθμου. Ένας αλγόριθμος καλείται υβριδικός όταν συνδυάζει τη λειτουργία διαφορετικών αλγορίθμων ή τεχνικών επίλυσης ενός προβλήματος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο υβριδικός αλγόριθμος προέκυψε από την επιλογή του γενετικού αλγορίθμου NSGA-II και τον περαιτέρω εμπλουτισμό του με στοιχεία γραμμικού προγραμματισμού και τεχνικών γειννίασης. Κατόπιν, το σύνολο των διεργασιών του αλγορίθμου για την επίλυση του προβλήματος χωρίστηκε σε δύο φάσεις. Η πρώτη φάση περιλάμβανε τον καθορισμό των θέσεων όπου θα τοποθετηθούν οι σταθμοί, το είδος του ανεφοδιασμού που θα παρέχουν (π.χ. ταχείας φόρτισης) και τη χωρητικότητα κάθε σταθμού για την κάλυψη της ζήτησης. Έπειτα, κατά τη δεύτερη φάση, η ζήτηση για φόρτιση των κελιών κατανεμήθηκε στους σταθμούς φόρτισης.

Η πρακτική εφαρμογή της μελέτης υλοποιήθηκε στην πόλη της Shenzhen στην Κίνα. Η περιοχή χωρίστηκε σε ένα σύνολο 287 κελιών, από τα οποία επιλέχθηκαν τα 30 για να φιλοξενήσουν σταθμούς φόρτισης. Στη συνέχεια, συγκροτήθηκαν δύο εναλλακτικά σενάρια, καθένα αντίστοιχο με την επίτευξη ενός εκ των δύο αντικρουόμενων στόχων. Το πρώτο σενάριο προέβλεπε στην ελαχιστοποίηση του κόστους των υποδομών, η οποία θα ακολουθούσαν και από την ελάχιστη δυνατή κάλυψη της ζήτησης. Αναλυτικότερα, το σενάριο αυτό υπέδειξε την συνολική τοποθέτηση 46 σταθμών ταχείας φόρτισης σε 12 διαφορετικά κελιά. Αντίθετα, το δεύτερο σενάριο επεδίωξε την βέλτιστη δυνατή εξυπηρέτηση των μετακινούμενων, μεγιστοποιώντας παράλληλα και το κόστος των υποδομών. Ειδικότερα, υπέδειξε και αυτό την τοποθέτηση 46 σταθμών, από τους οποίους όμως μόνο 3 θα παρείχαν τη δυνατότητα ταχείας φόρτισης και οι υπόλοιποι 43 θα λειτουργούσαν ως σταθμοί αλλαγής μπαταριών (battery swapping), παρέχοντας τη δυνατότητα ανεφοδιασμού σε ενέργεια σε ακόμα μικρότερο χρόνο, αλλά όντας συγχρόνως και πιο δαπανηροί. Σε αυτό το σενάριο, η διασπορά των σταθμών θα εκτεινόταν σε 26 διαφορετικά κελιά.

Αμφότερα τα σενάρια που αναφέρθηκαν, αποτελούν τις ακραίες λύσεις του αλγορίθμου για τη μεγιστοποίηση καθενός από τους δύο στόχους. Σε επίπεδο λήψης αποφάσεων, η βέλτιστη λύση είναι πιθανό να προέκυπτε μέσω ενός ενδιάμεσου σεναρίου, το οποίο θα απέβλεπε στα ελάχιστα κόστη, καλύπτοντας όμως ικανοποιητικά τη ζήτηση.

- ***Επίλυση του προβλήματος χωροθέτησης σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με χρήση γραμμικού προγραμματισμού (Bouguerra et al., 2019)***

Το 2019 πραγματοποιήθηκε ακόμα μία σημαντική προσέγγιση του προβλήματος χωροθέτησης σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, επιχειρώντας την επίλυσή του μέσω του γραμμικού προγραμματισμού. Ο γραμμικός προγραμματισμός, ή αλλιώς γραμμική βελτιστοποίηση, αποτελεί μία μέθοδο της επιχειρησιακής έρευνας για την εξαγωγή των καλύτερων δυνατών (βέλτιστων) αποτελεσμάτων από ένα μαθηματικό μοντέλο, το οποίο με τη σειρά του απαρτίζεται μόνο από γραμμικές σχέσεις. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης μελέτης, τα μεγέθη προς βελτιστοποίηση ήταν ο αριθμός και η θέση των σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στο κέντρο της Τύνιδας, πρωτεύουσας της Τυνησίας.

Για την αποτελεσματικότερη προσέγγιση του προβλήματος και προκειμένου να ληφθεί υπόψη ολόκληρο το εύρος των παραμέτρων που επιδρούν σε αυτό, συγκροτήθηκαν συνολικά πέντε μαθηματικά μοντέλα γραμμικού προγραμματισμού. Καθένα από αυτά αποτελεί μετεξέλιξη ή επέκταση του προηγούμενου, με στόχο την σταδιακή ενσωμάτωση περισσότερων παραμέτρων και περιορισμών.

Το πρώτο μοντέλο συνιστά την πιο απλοϊκή προσέγγιση, αποβλέποντας μόνο στον εντοπισμό των θέσεων στις οποίες θα τοποθετηθούν ή όχι σταθμοί φόρτισης. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι ως υποψήφιες θέσεις είχαν ήδη προκαθοριστεί οι τοποθεσίες 31 χώρων στάθμευσης και 8 πρατηρίων καυσίμων. Συνεπώς, η λειτουργία του μοντέλου συνοψίστηκε στην εύρεση του απαραίτητου αριθμού σταθμών φόρτισης με την αξιοποίηση μίας δυαδικής μεταβλητής και συναρτήσεως της απόστασης μεταξύ των σταθμών. Το δεύτερο μοντέλο που ακολούθησε, εισήγαγε τον περιορισμό του κόστους και ενσωμάτωσε στη λειτουργία του την ελαχιστοποίησή του.

Τα δύο πρώτα μοντέλα περιορίστηκαν στην παραγωγή αποτελεσμάτων μόνο για τις θέσεις των σταθμών, ενώ τα επόμενα τρία που ακολουθούν έλαβαν υπόψη και παραμέτρους για τη διαστασιολόγησή τους (π.χ. χωρητικότητα). Έτσι, στο τρίτο μοντέλο εισάχθηκαν τρία νέα μεγέθη: η χωρητικότητα κάθε σταθμού σε φορτιστές, το ατομικό κόστος κάθε φορτιστή και η αναμενόμενη ζήτηση για φόρτιση σε κάθε σταθμό. Τα νέα αυτά μεγέθη επέτρεψαν την ελαχιστοποίηση του κόστους των υποδομών και την ταυτόχρονη κατανομή όλης της ζήτησης στο δίκτυο των σταθμών. Έπειτα, στο τέταρτο μοντέλο, αφορούσε την εκτίμηση της επιβάρυνσης των μετακινούμενων,

υπολογίζοντας την τιμή της συναρτήσεως του εισοδήματός τους και της απόστασης που διανύουν από τον σταθμό φόρτισης μέχρι τον χώρο εργασίας τους. Τέλος, το πέμπτο μοντέλο λειτούργησε αθροιστικά, ενσωματώνοντας όλες τις παραπάνω παραμέτρους.

Το πιο αξιοσημείωτο μέρος της μελέτης αυτής πηγάζει από την πρακτική εφαρμογή της. Για το αστικό κέντρο της Τύνιδας και τα πέντε μοντέλα απέδωσαν παρόμοια αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, όλα τα μοντέλα πλην του τέταρτου υπέδειξαν την τοποθέτηση οκτώ σταθμών φόρτισης, ενώ το τέταρτο υπέδειξε την τοποθέτηση εννέα σταθμών. Οι ομοιότητες των αποτελεσμάτων υποδηλώνουν την υψηλή ακρίβεια του μοντέλου, αλλά και τις υψηλές δυνατότητες του γραμμικού προγραμματισμού για την προσέγγιση τέτοιων προβλημάτων χωροθέτησης.

- ***Χωροταξική προσέγγιση σε πυκνό αστικό δίκτυο (S.Y. He et al., 2022)***

Η μελέτη αυτή αποτελεί μία προσέγγιση με χωροταξικά ερείσματα, η οποία εστιάζει στην ευρύτερη περιοχή του Hong Kong. Σκοπός της είναι η δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου, το οποίο θα καταδειχθεί τόσο τις νέες θέσεις στις οποίες θα πρέπει τοποθετηθούν σταθμοί φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, όσο και τις υφιστάμενες που χρίζουν επέκτασης (με την τοποθέτηση επιπλέον φορτιστών), προκειμένου να καλυφθεί η τωρινή ζήτηση για φόρτιση, αλλά και αυτή που εκτιμάται ότι θα προκύψει στο άμεσο μέλλον. Η καινοτομία της μελέτης εντοπίζεται στην απόπειρα εκτίμησης μελλοντικών δεδομένων, αλλά κυρίως αφορά την ενσωμάτωση κυβερνητικών κανονισμών και χωρικών περιορισμών στο μοντέλο, οι οποίοι σπάνια συμπεριλαμβάνονται σε προβλήματα βελτιστοποίησης.

Τα κριτήρια που επιλέχθηκαν να επιδράσουν ως οι κύριοι ρυθμιστές του μοντέλου είναι δύο. Το πρώτο είναι η ελαχιστοποίηση του ελλείμματος της καλυπτόμενης ζήτησης. Με άλλα λόγια, τα οχήματα των οποίων η ανάγκη για φόρτιση δεν μπορεί να καλυφθεί άμεσα, να είναι τα ελάχιστα δυνατά. Το δεύτερο κριτήριο είναι η ελαχιστοποίηση της απόστασης που θα πρέπει να διανύσει κάθε όχημα για να φτάσει στον πλησιέστερο σταθμό φόρτισης.

Η ακρίβεια της χωρικής ανάλυσης είναι σε επίπεδο γειτονιάς, διαιρώντας επιμέρους την περιοχή μελέτης σε LSBGs (Large Street Block Groups). Η μονάδα αυτή αποτελεί και την θεμελιώδη μονάδα αξιολόγησης του χώρου σύμφωνα με την κυβέρνηση του Hong Kong, ενώ

χρησιμοποιείται και σε πλήθος άλλων εφαρμογών. Έτσι, η περιοχή μελέτης χωρίστηκε σε συνολικά 1622 LSBGs.

Στη συνέχεια, μεταβαίνοντας στην υλοποίηση της μελέτης, αυτή ξεκίνησε με την συλλογή των δεδομένων. Στα προς συλλογή δεδομένα επιβλήθηκε ένας ακόμη διαχωρισμός μεταξύ αυτών που αφορούν την προσφορά και αυτών που αφορούν τη ζήτηση. Αρχικά, για την προσφορά λήφθηκαν υπόψη οι ισχύοντες πολεοδομικοί κανονισμοί, και κατόπιν, σύμφωνα με αυτούς, πραγματοποιήθηκε χωρική ανάλυση των υφιστάμενων χρήσεων γης, προκειμένου να εντοπιστούν οι υποψήφιες θέσεις στις οποίες μπορούν να τοποθετηθούν σταθμοί φόρτισης. Από την ανάλυση αυτή προέκυψε ότι σταθμοί φόρτισης μπορούν να τοποθετηθούν μόνο σε ήδη υφιστάμενους χώρους στάθμευσης, καθώς η πυκνή δόμηση δεν επιτρέπει τον επαναπροσδιορισμό των χρήσεων γης, τουλάχιστον χωρίς να γίνουν επεμβάσεις μεγάλης κλίμακας. Ως απόρροια αυτού, ένα σύνολο 2295 χώρων στάθμευσης χαρακτηρίστηκαν ως υποψήφιες τοποθεσίες, ενώ οι 332 από αυτούς ήδη διέθεταν σταθμούς φόρτισης. Στο κομμάτι της ζήτησης, τα δεδομένα συλλέχθηκαν βάσει ενός ερωτηματολογίου το οποίο αφενός αποσκοπούσε στην εκτίμηση του μέρους του πληθυσμού που έχει ήδη στην κατοχή του κάποιο ηλεκτρικό όχημα, και αφετέρου στην πρόβλεψη της μελλοντικής ζήτησης από τις απαντήσεις όσων δήλωναν ότι σκοπεύουν να αποκτήσουν ηλεκτρικό όχημα μέσα στα επόμενα χρόνια.

Μετά τη συλλογή των δεδομένων, το επόμενο στάδιο της μελέτης ήταν η δημιουργία του μοντέλου. Οι υποψήφιες θέσεις των σταθμών φόρτισης συνδέθηκαν με την εκτιμώμενη μελλοντική ζήτηση χρησιμοποιώντας ζεύγη Προέλευσης – Προορισμού (βλ. κεφ. 3). Η ζήτηση κάθε γειτονιάς συνοψίστηκε σε κεντροειδή (βλ. κεφ. 3), και στη συνέχεια αποφασίστηκε ποιοι χώροι στάθμευσης πρέπει να έχουν σταθμούς φόρτισης και ποιοι όχι, καθώς και πόσοι θα πρέπει να αντιστοιχούν σε κάθε χώρο. Τέλος, πραγματοποιήθηκε η γεωγραφική κατανομή της ζήτησης στους χώρους που κρίθηκαν κατάλληλοι να λάβουν σταθμούς. Επίσης, πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την κατανομή της, η ζήτηση μπορούσε να επιμεριστεί σε παραπάνω από έναν χώρους. Η δυνατότητα αυτή φανερώνει την ευελιξία του μοντέλου, καθώς και την αποτελεσματικότητά του προς τη βέλτιστη δυνατή κάλυψη της ζήτησης.

Από την ολοκλήρωση της μελέτης, προέκυψε ότι στο δίκτυο του Hong Kong πρέπει να τοποθετηθούν 2198 νέοι φορτιστές, από τους οποίους οι 698 θα είναι ταχείας φόρτισης. Η τοποθέτησή τους θα γίνει σε 113 χώρους στάθμευσης που έως τώρα δεν διέθεταν φορτιστές, καθώς και σε 244 χώρους στάθμευσης οι οποίοι θα αυξήσουν τον αριθμό των ήδη υπάρχοντων φορτιστών

τους. Ύστερα από αυτές τις επεμβάσεις, το δίκτυο θα αριθμεί συνολικά 4701 φορτιστές, οι οποίοι θα είναι ικανοί για την κάλυψη περίπου του 80% της εκτιμώμενης μελλοντικής ζήτησης, αφήνοντας ημερησίως τις ανάγκες φόρτισης περίπου 6069 ηλεκτρικών οχημάτων ανικανοποίητες. Ταυτόχρονα, ανά πάσα στιγμή, η μέση απόσταση που θα χρειάζεται να διανύσει ένα ηλεκτρικό όχημα για να φτάσει στον κοντινότερο φορτιστή υπολογίστηκε ίση με 529.82 μέτρα. Τα παραπάνω αποτελέσματα ενισχύουν την εγκυρότητα και τον αντίκτυπο της μελέτης, καθώς την αναδεικνύουν εναρμονισμένη και με τις δεσμεύσεις της κυβέρνησης του Hong Kong, οι οποίες προβλέπουν την ύπαρξη συνολικά 5000 φορτιστών έως το 2025.

Συνοψίζοντας, η ολοκλήρωση της μελέτης ακολουθείται από δύο βασικά συμπεράσματα. Το πρώτο είναι η επιτακτική ανάγκη επέκτασης του δικτύου φόρτισης, ούτως ώστε να καλυφθεί η ολόενα και αυξανόμενη ζήτηση. Το δεύτερο αποκαλύπτει πως η αύξηση του αριθμού των φορτιστών σε ήδη υφιστάμενους σταθμούς φόρτισης είναι μία αποτελεσματικότερη, αλλά και οικονομικότερη πρακτική για την κάλυψη της ζήτησης. Τέλος, είναι βέβαιο πως αμφότερα τα συμπεράσματα σύντομα θα έχουν διεθνή ερείσματα και μπορούν να συνεισφέρουν σημαντικά στην επιτυχή εκπόνηση μελλοντικών μελετών.

- ***Βέλτιστη χωροθέτηση σταθμών φόρτισης σε δίκτυα μεταφορών μεγάλης κλίμακας (H. Fredriksson et al., 2019)***

Σε αυτή τη μελέτη, με τον όρο «βέλτιστη» περιγράφεται η ελάχιστη δυνατή ποσότητα σταθμών φόρτισης, η οποία θα επιτρέπει σε κάθε όχημα να συναντήσει έναν, τουλάχιστον μία φορά κατά τη διάρκεια της πορείας του. Με άλλα λόγια, επιδιώκεται να τοποθετηθεί τέτοιος αριθμός φορτιστών, ώστε κάθε όχημα να έχει μία τουλάχιστον ευκαιρία φόρτισης κατά τη μετακίνησή του. Επισημαίνεται ότι αυτή η προσέγγιση αφορά μόνο υπεραστικά δίκτυα μεγάλων χιλιομετρικών αποστάσεων.

Το δίκτυο χωρίζεται σε τρία βασικά συστατικά στοιχεία, τα οποία είναι οι κόμβοι (nodes), οι σύνδεσμοι (links) και οι διαδρομές (routes). Επεξηγηματικές λεπτομέρειες για καθένα από αυτά δίνονται σε επόμενο κεφάλαιο. Τα αρχικά δεδομένα που αξιοποιούνται από τη μελέτη είναι οι κυκλοφοριακοί φόρτοι των συνδέσμων, δηλαδή το σύνολο των οχημάτων που διέρχονται από κάθε σύνδεσμο σε πεπερασμένο χρόνο (π.χ. στη διάρκεια μίας ημέρας, ενός έτους κλπ.).

Έχοντας αυτά τα δεδομένα, και σε συνδυασμό με τεχνικές ακέραιου προγραμματισμού, η μελέτη αποσκοπεί στην επίλυση ενός προβλήματος κάλυψης κόμβων διαδρομών (Route Node Coverage). Μία διαδρομή ορίζεται από τον κόμβο από τον οποίο ξεκινάει (κόμβος αφετηρίας), τον κόμβο στον οποίο καταλήγει (κόμβος τερματισμού) και από το σύνολο των ενδιάμεσων κόμβων και συνδέσμων που παρεμβάλλονται μεταξύ τους. Κάθε διαδρομή χαρακτηρίζεται από ένα κόστος (c), το οποίο προκύπτει από το συνολικό της μήκος ή τον χρόνο που απαιτείται για να διανυθεί. Όταν το κόστος μίας διαδρομής υπερβαίνει τους περιορισμούς που έχουν τεθεί με βάση την εμβέλεια ενός ηλεκτρικού οχήματος, τότε σε ένα από τους κόμβους αυτής της διαδρομής πρέπει να τοποθετηθεί ένας σταθμός φόρτισης.

Η λειτουργία του μοντέλου συνοψίζεται στην επαναληπτική επίλυση διαφορετικών διαδρομών και στη δυνατότητά του να καταδείξει σε ποιες από αυτές χρειάζεται να τοποθετηθεί ή όχι ένας σταθμός φόρτισης. Όταν μία διαδρομή περιλαμβάνει μέρος κάποιας άλλης διαδρομής στην οποία έχει καταδειχθεί η τοποθέτηση φορτιστή, τότε δεν θα υποδειχθεί η τοποθέτηση επιπλέον σταθμού. Οι διαδρομές που εισάγονται στο μοντέλο είναι εν γένει τυχαίες, αλλά από την αρχή δίνεται προτεραιότητα στη συγκρότηση διαδρομών που περνούν από τους συνδέσμους με τους μεγαλύτερους φόρτους, οι οποίες αποτελούν και τις πιο «συχνές» διαδρομές. Αθροιστικά, όλες αυτές οι διαδρομές συγκροτούν ένα δίκτυο και η επαναληπτικότητα του μοντέλου οδηγεί τελικώς στην επίλυση όλου του δικτύου.

Οι περιοχές στις οποίες εφαρμόστηκε αυτή η προσέγγιση είναι το Sioux Falls στις ΗΠΑ και η νότια Σουηδία. Αν και το Sioux Falls είναι αστική περιοχή, η πολεοδομία του το έχει καταστήσει κατάλληλο για πολλές συγκοινωνιακές μελέτες και σχεδόν ιδανικά πειράματα όταν χρησιμοποιούνται δίκτυα με κόμβους και συνδέσμους. Το δίκτυο του Sioux Falls απαρτίζεται από 24 κόμβους και 38 συνδέσμους (διπλής κατεύθυνσης). Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου διέφεραν συναρτήσει των τιμών που επιλέχθηκαν για το κόστος. Στην περίπτωση που το κόστος ήταν $c=16.1$, το μοντέλο υπέδειξε ότι ο βέλτιστος αριθμός φορτιστών που θα πρέπει να τοποθετηθούν είναι 11. Όταν το κόστος έγινε $c=32.2$, το μοντέλο υπέδειξε 7 φορτιστές, ενώ για κάθε τιμή του κόστους από 62.2 και μετά, το μοντέλο υποδείκνυε την τοποθέτηση μόλις 4 φορτιστών. Δεδομένου ότι το κόστος στη συγκεκριμένη μελέτη αναπαριστά και τις δυνατότητες των ηλεκτρικών οχημάτων, το μεγάλο κόστος συνεπάγεται μεγαλύτερες δυνατότητες (εμβέλεια) και άρα λιγότερους απαραίτητους σταθμούς φόρτισης.

Αντίστοιχα, τα ίδια συμπεράσματα ισχύουν και για τη νότια Σουηδία, με διαφορές βέβαια στην τάξη μεγέθους των αριθμητικών αποτελεσμάτων. Εδώ, το δίκτυο συνίσταται από 14,500 κόμβους και 34,500 συνδέσμους, καλύπτοντας μία συνολική έκταση 80,000 τετραγωνικών χιλιομέτρων. Θεωρώντας ως εμβέλεια κίνησης του μέσου ηλεκτρικού οχήματος τα 150 χιλιόμετρα και ορίζοντας το $c=75$, το μοντέλο υπέδειξε την τοποθέτηση 66 σταθμών φόρτισης κατά μήκος των αυτοκινητοδρόμων, χωρίς να ληφθούν υπόψη τα ενδιάμεσα αστικά κέντρα.

Καταληκτικά, η εύρεση του αριθμού και των τοποθεσιών όπου θα μπου οι σταθμοί φόρτισης είναι μία σημαντική πρόκληση, η οποία αποσκοπεί κυρίως στην ελαχιστοποίηση του κόστους των υποδομών. Τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης, παρόλο που είναι επαρκή ως κατευθυντήριες, χρειάζονται να εμπλουτιστούν με νέα δεδομένα, όπως το τοπογραφικό ανάγλυφο ή τα σημεία στα οποία είναι πιθανότερο να χρειαστεί φόρτιση, ούτως ώστε να αποδώσουν μία πιο ακριβή και αποτελεσματική για τους οδηγούς προσέγγιση.

- ***Βελτιστοποίηση του προβλήματος χωροθέτησης σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με χρήση γενετικών αλγορίθμων (D. Efthymiou et al., 2017)***

Η μελέτη αυτή αποσκοπεί στην επίλυση του προβλήματος χωροθέτησης σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε αστικό δίκτυο, αξιοποιώντας τη μέθοδο των γενετικών αλγορίθμων. Παράλληλα συγκροτείται και ένα ψηφιακό διαδραστικό εργαλείο, το οποίο μπορεί να δεχθεί ως παραμέτρους διαφορετικά δεδομένα εισόδου, καθιστώντας το κατάλληλο για πλήθος εφαρμογών. Επίσης, αυτή η μελέτη αποτελεί και μία από τις ελάχιστες βιβλιογραφικές αναφορές του ζητήματος που αφορούν τον ελλαδικό χώρο, και συγκεκριμένα την πόλη της Θεσσαλονίκης.

Στην Ελλάδα, το ποσοστό των ηλεκτρικών οχημάτων είναι πολύ μικρό (~ 6.2 – 7%), κυρίως ως απόρροια των οικονομικών προβλημάτων της τελευταίας δεκαετίας, η οποία καθυστέρησε τους ρυθμούς ανάπτυξης της νέας αυτής τεχνολογίας. Εκ πρώτης όψεως, οι αυξημένες τιμές των ηλεκτρικών οχημάτων τα καθιστούν δυσπρόσιτα για τους καταναλωτές, ενώ συγχρόνως τα χαμηλά ποσοστά τους στην αγορά δεν έχουν προσελκύσει το κρατικό ενδιαφέρον. Σαν αποτέλεσμα, οι εν δυνάμει καταναλωτές αποφεύγουν την απόκτησή τους και λόγω της έλλειψης υποδομών.

Για τους σκοπούς της μελέτης, η έκταση του δήμου της Θεσσαλονίκης χωρίστηκε σε 124 ζώνες Προέλευσης – Προορισμού. Για το σύνολο των μετακινήσεων που υπερβαίνουν τα 50 χιλιόμετρα, αποφασίστηκε ότι τα οχήματα που εμπλέκονται σε αυτές πρόκειται να χρειαστούν φόρτιση. Για τις μετακινήσεις κάτω των 10 χιλιομέτρων, δεν απαιτείται φόρτιση, ενώ για μετακινήσεις με αποστάσεις μεταξύ 10 και 50 χιλιομέτρων, η ανάγκη για φόρτιση μειώνεται γραμμικά συναρτήσει της απόστασης. Επίσης, ορίστηκε ότι οι υποψήφιες θέσεις για τους σταθμούς φόρτισης θα είναι μόνο τα κεντροειδή των ζωνών.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι αποτελούν μία κατηγορία μεθευρετικών αλγορίθμων, ενώ οφείλουν το όνομά τους στην επιστήμη της Βιολογίας, καθώς επιλύουν προβλήματα βελτιστοποίησης αξιοποιώντας τον μηχανισμό της φυσικής επιλογής. Εκτός από την ονομασία τους, και η υπόλοιπη ορολογία που τους συνοδεύει βρίσκει τις ρίζες της στη βιολογία, με τις λύσεις να χαρακτηρίζονται ως «χρωμοσώματα», τα ζεύγη των λύσεων ως «γονείς» και το αποτέλεσμα της διασταύρωσης ενός ζεύγους λύσεων ως «απόγονος». Η λειτουργία τους συνοψίζεται στην ικανότητά τους να διασταυρώνουν διαδοχικά και παράλληλα πλήθος λύσεων έως ότου να καταλήξουν στη βέλτιστη. Ωστόσο, η πραγματική φύση των αλγορίθμων αυτών είναι πολύ περίπλοκη και η ανάλυσή της ξεφεύγει από τη θεματική αυτής της εργασίας.

Στη συνέχεια, το ψηφιακό εργαλείο που δημιουργήθηκε αξιοποιεί έναν γενετικό αλγόριθμο για να αποδώσει μία βέλτιστη λύση με βάση κάποια δεδομένα εισόδου. Τα δεδομένα αυτά είναι σε πρώτη φάση οι θέσεις των υποψήφιων τοποθεσιών των σταθμών φόρτισης (δηλ. οι X,Y συντεταγμένες τους και η αναμενόμενη ζήτηση που θα εξυπηρετούν) και οι αποστάσεις μεταξύ των υποψήφιων τοποθεσιών. Κατόπιν, καθορίζεται ο αριθμός των σταθμών φόρτισης που επιδιώκεται να τοποθετηθούν, η ακτίνα εξυπηρέτησής τους, καθώς και το γενικευμένο κόστος ανά χιλιόμετρο. Επίσης καθορίζεται και το γεωγραφικό εύρος της εκάστοτε περιοχής μελέτης βάσει συντεταγμένων.

Τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου υπέδειξαν ως βέλτιστη λύση την τοποθέτηση 15 σταθμών φόρτισης, οι οποίοι θα είναι ικανοί για την κάλυψη του 80% της προκύπτουσας ζήτησης έως το 2020. Από τότε, τα δεδομένα και οι απαιτήσεις του δικτύου ενδέχεται να έχουν αλλάξει. Ωστόσο, η λειτουργία του αλγορίθμου παραμένει διαχρονική και με απλές αναπροσαρμογές των δεδομένων δύναται να αποδώσει νέες βέλτιστες λύσεις, τόσο για την παρούσα περιοχή όσο και για άλλες, στις οποίες θα επιλεγεί η χρήση αυτού του εργαλείου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση του συνόλου των αρχικών δεδομένων στα οποία βασίζεται η μελέτη, καθώς και του γεωγραφικού χώρου που αυτά αναφέρονται. Παράλληλα, παρέχεται συνοπτικά το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την κατανόηση όλων των μεγεθών που εμπλέκονται στη συγκρότηση ενός μοντέλου συστήματος μεταφορών.

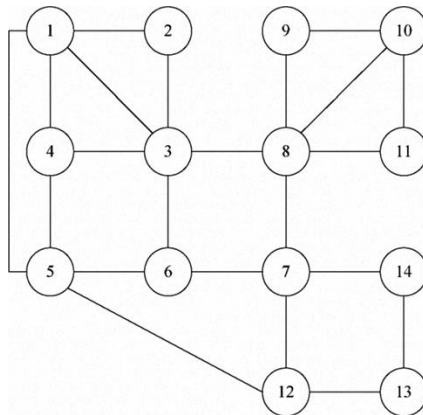
3.1. Στοιχεία από τη θεωρία των δικτύων

Όπως διαπιστώθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η δημιουργία και χρήση μαθηματικών μοντέλων για την ποσοτικοποιημένη ερμηνεία πολύπλοκων και σημαντικών καταστάσεων του πραγματικού κόσμου, αποτελεί κοινή πρακτική για την επιστημονική έρευνα. Στην επιστήμη των μεταφορών, μία συνήθης πρακτική είναι το σύνολο των δρόμων, κόμβων και λοιπών συγκοινωνιακών υποδομών να προσομοιάζεται με τη βοήθεια μοντέλων δικτύων.

Τα δίκτυα αναφέρονται σε συγκοινωνιακές μελέτες μεγάλης κλίμακας, όπως ένα αστικό κέντρο, μία περιφέρεια ή και ένα σύνολο περιφερειών. Έχουν εφαρμογές στην στρατηγική κατασκευή υποδομών, την εύρεση των βέλτιστων διαδρομών κ.α. Γενικότερα, η χρήση των δικτύων είναι προτιμητέα γιατί παρέχει απλότητα και ευελιξία στην προσομοίωση μεγάλων και περίπλοκων συστημάτων.

Ένα δίκτυο αποτελείται από δύο βασικά στοιχεία, τους **συνδέσμους** (links) και **κόμβους** (nodes).

- Οι σύνδεσμοι αναπαριστούν τη μετάβαση από ένα σημείο σε ένα άλλο (π.χ. ένας οδικός άξονας). Έχουν γραμμική γεωμετρία και μπορούν να υιοθετούν διδιάστατη τοπογραφική ακρίβεια. Κάθε σύνδεσμος πρέπει να συνδέεται υποχρεωτικά με δύο κόμβους, έναν στην αρχή και έναν στο πέρας του.
- Οι κόμβοι, με τη σειρά τους, συνιστούν τα άκρα των συνδέσμων (π.χ. οι διασταυρώσεις που συνδέει ένας οδικός άξονας). Έχουν σημειακή γεωμετρία και γι' αυτό δεν περικλείουν τοπογραφική πληροφορία. Κάθε κόμβος μπορεί να συνδέεται με τουλάχιστον έναν ή περισσότερους συνδέσμους.



Εικόνα 3.1. Σχεδιαγραμματική αναπαράσταση των γεωμετρικών στοιχείων ενός δικτύου μεταφορών

Το σύνολο των συνδέσμων και των κόμβων συνιστούν τα γεωμετρικά στοιχεία του δικτύου. Εκτός από τα γεωμετρικά του στοιχεία, ένα δίκτυο μπορεί να περιέχει και πλήθος ποσοτικών στοιχείων, τα οποία χαρακτηρίζουν επιμέρους τα γεωμετρικά (π.χ. το μήκος κάθε συνδέσμου, τις συντεταγμένες κάθε κόμβου κ.α.). Για την αξιοποίηση όλης αυτής της πρόσθετης χωρικής πληροφορίας, το δίκτυο πρέπει να εισαχθεί σε ένα περιβάλλον GIS και να ενταχθεί σε μία βάση γεωχωρικών δεδομένων, όπως εξηγείται παρακάτω.

Έως τώρα, έχοντας διευκρινίσει ποια στοιχεία συνιστούν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ενός δικτύου μεταφορών, μένει να εξεταστούν τα δεδομένα που το συσχετίζουν με τις ίδιες τις μεταφορές. Λαμβάνοντας υπόψη ότι πρόκειται για κατηγορίες πληροφοριών και πρόσθετων δεδομένων, είναι επόμενο πως πολλά από αυτά τα μεγέθη δεν είναι προκαθορισμένα, αλλά ούτε και απαραίτητα για τους σκοπούς του κάθε δικτύου. Παρακάτω, αναφέρονται και επεξηγούνται τα ποσοτικά στοιχεία που χαρακτηρίζουν τους συνδέσμους του δικτύου της παρούσας μελέτης:

- **Μήκος Συνδέσμου (Length).** Πρόκειται για την χιλιομετρική απόσταση στην οποία εκτείνεται κάθε σύνδεσμος του δικτύου.
- **Κατηγορία Συνδέσμου (Type).** Οι οδικοί άξονες, ανάλογα με τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά, χωρίζονται σε επιμέρους κατηγορίες. Τέτοιες κατηγορίες είναι οι αυτοκινητόδρομοι, οι κύριοι οδικοί άξονες, οι δευτερεύοντες οδικοί άξονες, οι συνδετήριοι άξονες, οι συνδέσεις (connectors) κ.α.
- **Κατεύθυνση Συνδέσμου (Direction).** Ένας σύνδεσμος μπορεί να εξυπηρετεί μία ή και δύο κατευθύνσεις (διπλής κατεύθυνσης). Όπως αναφέρθηκε, κάθε σύνδεσμος διαθέτει έναν κόμβο στην αφετηρία και έναν στο πέρας του. Ένας σύνδεσμος έχει κανονική κατεύθυνση όταν η πορεία των οχημάτων κατά μήκος του, ξεκινάει από τον κόμβο της αφετηρίας του και καταλήγει στον κόμβο του πέρατός του. Σε περίπτωση που ισχύει το ανάποδο, τότε ο σύνδεσμος έχει αντίθετη κατεύθυνση. Οι κόμβοι των συνδέσμων διπλής κατεύθυνσης συνδέονται αμφίδρομα.
- **Ταχύτητα Ελεύθερης Ροής (Free Flow Speed).** Η μέση ταχύτητα των οχημάτων που διέρχονται από έναν σύνδεσμο, σε συνθήκες χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου ή έλλειψης λοιπών εμποδίων.
- **Χρόνος Διέλευσης σε συνθήκες Ελεύθερης Ροής (Free Flow Time).** Ο λόγος του Μήκους Συνδέσμου προς την Ταχύτητα Ελεύθερης Ροής του.

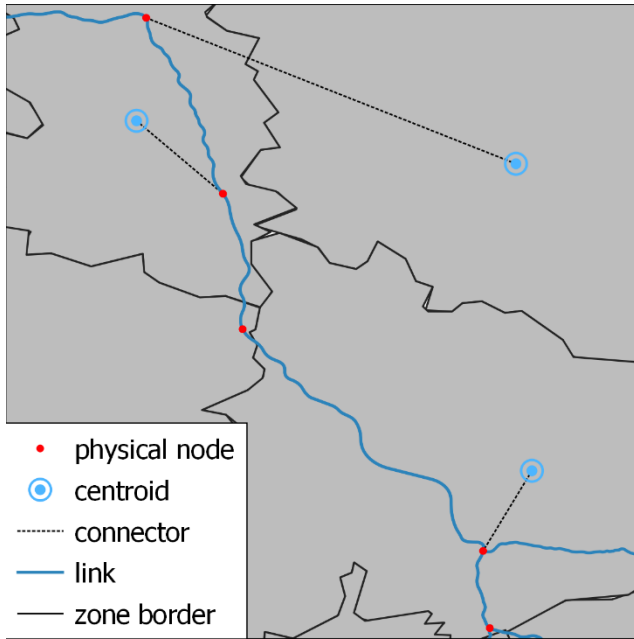
- Χωρητικότητα Συνδέσμου (Capacity). Η μέγιστος αριθμός οχημάτων που μπορούν να διέλθουν ταυτόχρονα από έναν σύνδεσμο.

Όπως και οι σύνδεσμοι, έτσι και οι κόμβοι δύνανται να εμπεριέχουν ποσοτική και ποιοτική πληροφορία. Ωστόσο, είναι λογικό, λόγω της σημειακής τους γεωμετρίας, να περικλείουν λιγότερα μεγέθη για την περιγραφή τους. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, οι πληροφορίες που χαρακτηρίζουν τους κόμβους είναι οι ακόλουθες :

- Οι συντεταγμένες x,y του κάθε κόμβου στο σύστημα αναφοράς WGS 84.
- Η Ζώνη του δικτύου στην οποία ανήκουν. Μία ζώνη μπορεί να περικλείει παραπάνω από έναν κόμβους.
- Η κατηγορία στην οποία εντάσσονται. Οι κόμβοι μπορούν να είναι είτε φυσικοί είτε κεντροειδή. Περισσότερες λεπτομέρειες για τους τύπους των κόμβων παρουσιάζονται παρακάτω.
- Ένα σύστημα αρίθμησης μοναδικό για κάθε κόμβο (ID). Η αρίθμηση των κόμβων εγκαθιδρύεται μετά την ένταξή τους σε μία γεωχωρική βάση δεδομένων.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι κόμβοι χωρίζονται σε δύο επιμέρους κατηγορίες. Αυτές είναι οι **φυσικοί κόμβοι** και τα **κεντροειδή**. Οι φυσικοί κόμβοι αποτελούν υπαρκτά σημεία τομής (διασταυρώσεις) μεταξύ των συνδέσμων και ορίζονται από ακριβείς συντεταγμένες στο σύστημα αναφοράς του δικτύου. Αντίθετα, τα κεντροειδή δεν έχουν φυσική, αλλά πρακτική σημασία. Κάθε ζώνη περιέχει από ένα κεντροειδές. Όπως υποδηλώνει και το όνομά τους, τα κεντροειδή προσομοιάζουν το κέντρο των γεωγραφικών ζωνών του δικτύου. Στο κέντρο αυτό εκκινούν όλες οι μετακινήσεις που έχουν ως προέλευση μία ζώνη, αλλά και καταλήγουν όλες οι μετακινήσεις που έχουν ως προορισμό τη ζώνη αυτή. Προκειμένου να συνδεθεί η έννοια των κεντροειδών με τη λειτουργία του υπόλοιπου δικτύου, πρέπει να γίνει αναφορά για μια κατηγορία συνδέσμων που ονομάζονται συνδέσεις (connectors). Οι σύνδεσμοι αυτοί έχουν πάντοτε στο ένα άκρο τους ένα κεντροειδές και στο άλλο άκρο τους (αυτό που τους συνδέει με το υπόλοιπο δίκτυο) έναν φυσικό κόμβο. Τα κεντροειδή συνδέονται μόνο με συνδέσμους που είναι συνδέσεις.

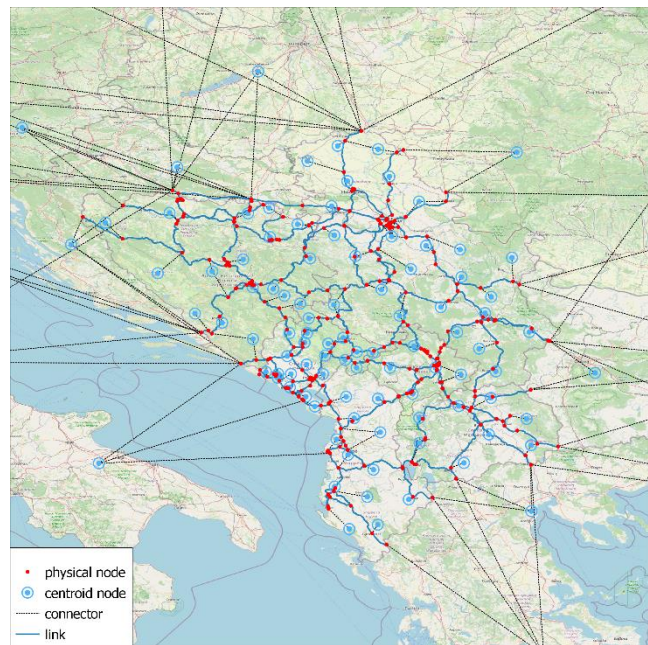
Σε συνέχεια όσων ειπώθηκαν παραπάνω, οι **συνδέσεις** (connectors) έχουν κομβική σημασία στον τρόπο λειτουργίας του δικτύου. Οι συνδέσεις ορίζονται ως οδικοί άξονες με μη πραγματική



Εικόνα 3.2. Απόσπασμα δικτύου ζωνών και των επιμέρους κατηγοριών των γεωμετρικών χαρακτηριστικών του

γεωμετρία και ποσοτικά χαρακτηριστικά. Ο σκοπός τους είναι η διασύνδεση των γεωγραφικών ζωνών ενός δικτύου με τους πραγματικούς οδικούς άξονες του δικτύου. Για το λόγο αυτό, τα ποσοτικά τους χαρακτηριστικά λαμβάνουν υπερβολικά μεγάλες ή μικρές τιμές, ούτως ώστε η επιρροή τους στη λειτουργία του δικτύου να είναι απολύτως αμελητέα. Στην εικόνα 3.2 παρουσιάζεται ένα απόσπασμα δικτύου ζωνών με κεντροειδή και φυσικούς κόμβους, καθώς και οι συνδέσεις και οι υπόλοιποι σύνδεσμοι του δικτύου στη συγκεκριμένη περιοχή.

Ένα δίκτυο μπορεί να διαθέτει εσωτερικές (internal) και εξωτερικές (external) συνδέσεις. Οι εσωτερικές συνδέσεις εξυπηρετούν τη διοχέτευση μετακινήσεων από τα κεντροειδή ζωνών που βρίσκονται εντός του δικτύου. Αντίστοιχα, οι εξωτερικές συνδέσεις χρησιμοποιούνται για την αναπαράσταση μετακινήσεων που ξεκινούν ή καταλήγουν σε κάποια ζώνη εκτός του μελετώμενου δικτύου. Παραδειγματικά, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.3, για τα Δυτικά Βαλκάνια, μία εσωτερική σύνδεση εξυπηρετεί τη συνένωση μίας ζώνης του Μαυροβουνίου απευθείας με το δίκτυο, ενώ μία εξωτερική σύνδεση εξυπηρετεί τη συνένωση των μετακινήσεων που ξεκινούν από την Ιταλία (η οποία δεν ανήκει στα Δυτικά Βαλκάνια) και καταλήγουν στο δίκτυο των Δυτικών Βαλκανίων και αντίστροφα.



Εικόνα 3.3. Εσωτερικές και εξωτερικές συνδέσεις στο δίκτυο των Δυτικών Βαλκανίων

Το σύνολο των μετακινήσεων που πραγματοποιούνται σε ένα δίκτυο αναγράφεται στον **Πίνακα Προέλευσης-Προορισμού** (Origin-Destination Matrix). Ο Πίνακας Προέλευσης-Προορισμού έχει δύο

διαστάσεις και προϋποθέτει τον επιμέρους διαχωρισμό του δικτύου σε ένα σύστημα ζωνών. Συνήθως, οι ζώνες αυτές αποτελούν γεωγραφικές υποδιαιρέσεις της εκάστοτε περιοχής μελέτης. Η πρώτη στήλη του Πίνακα Προέλευσης-Προορισμού (Πίνακας Π-Π) αναγράφει όλες τις ζώνες από τις οποίες ξεκινά κάποια μετακίνηση. Η πρώτη γραμμή του Πίνακα Π-Π αναγράφει όλες τις ζώνες προς τις οποίες γίνεται κάποια μετακίνηση. Τα υπόλοιπα κελιά του πίνακα περιλαμβάνουν τον αριθμό των μετακινήσεων μεταξύ των αντίστοιχων ζωνών. Σύμφωνα με αυτό, είναι επόμενο ότι η κύρια διαγώνιος του Πίνακα Π-Π περιλαμβάνει όλες τις μετακινήσεις που ξεκινούν από μία ζώνη και καταλήγουν εντός της ίδιας ζώνης (ενδοζωνικές μετακινήσεις). Ωστόσο, οι ενδοζωνικές μετακινήσεις συχνά παραλείπονται με τη χρήση κάποιας παραδοχής. Σε αυτή την περίπτωση, οι τιμές της κύριας διαγώνιου του Πίνακα Π-Π είναι μηδενικές. Έτσι, συνοπτικά, ο Πίνακας Π-Π εκφράζει τη ζήτηση για μετακίνηση (traffic demand) στο δίκτυο. Ένα παράδειγμα Πίνακα Π-Π φαίνεται παρακάτω.

Πίνακας 3.1. Πίνακας Προέλευσης-Προορισμού για ένα δίκτυο 7 ζωνών

A/A	1	2	3	4	5	6	7
1	0	96.4944	0.9712	70.1021	78.7102	533.7343	333.4390
2	98.2404	0	0.0948	238.4691	275.9340	136.9737	8.8864
3	0.8675	0.04896	0	0.6206	2.0602	14.1422	5.8068
4	72.0309	405.4927	1.0372	0	174.2939	108.6074	66.3139
5	80.2990	465.8511	5.8291	173.0506	0	211.3458	59.7115
6	158.8875	118.4477	51.4571	98.0121	192.0981	0	29.0335
7	665.3263	14.3308	5.0945	57.7192	67.0166	24.3854	0

Επιπλέον, παρατηρώντας έναν Πίνακα Π-Π, είναι κρίσιμο να είναι γνωστός ο χρονικός ορίζοντας στον οποίο αναφέρονται τα περιεχόμενα των κελιών. Οι μετακινήσεις μπορεί να αναφέρονται σε ωριαία, ημερήσια, ετήσια βάση κλπ. Έτσι, στο παραπάνω παράδειγμα, ο αριθμός των μετακινήσεων αναφέρεται στη χρονική διάρκεια μίας ημέρας.

Η συλλογή όλων των παραπάνω στοιχείων υποδηλώνει την ετοιμότητα ενός δικτύου ενταχθεί σε ένα ευρύτερο μοντέλο. Στη συνέχεια, ύστερα και από ένα σύνολο απαραίτητων διεργασιών, το δίκτυο θα είναι επαρκές για την απόδοση παράγωγων δεδομένων.

3.2. Παρουσίαση της περιοχής μελέτης και συλλογή αρχικών δεδομένων

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, κάθε πρόβλημα χωροθέτησης εγκαταστάσεων επικεντρώνεται σε έναν πεπερασμένο γεωγραφικό χώρο, μία περιοχή μελέτης. Στην παρούσα εργασία, το πρόβλημα χωροθέτησης σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων θα επιλυθεί για την περιοχή των Δυτικών Βαλκανίων. Τα Δυτικά Βαλκάνια είναι ένα σύμπλεγμα έξι χωρών που ανήκουν γεωγραφικά στην ευρωπαϊκή ήπειρο και συγκεκριμένα απαντώνται στη βαλκανική χερσόνησο (χερσόνησος του Αίνου). Οι χώρες αυτές είναι η Σερβία, το Μαυροβούνιο, η Βοσνία – Ερζεγοβίνη, το Κόσοβο, η Αλβανία και τα Σκόπια. Από το εκτεταμένο εύρος των χωρών αυτών, το ενδιαφέρον της εργασίας εστιάζεται αποκλειστικά στο δίκτυο των αυτοκινητοδρόμων που τις διατρέχει. Πιο συγκεκριμένα, το δίκτυο αυτό αποτελεί μέρος του Trans-European Transport Network (TEN-T), ενώ συμπεριλαμβάνει και ένα σύνολο επεκτάσεων των κύριων οδικών αξόνων του, προκειμένου αυτοί να διασυνδέονται επιτυχώς και με τα τοπικά δίκτυα της κάθε χώρας.

Τα Δυτικά Βαλκάνια ως περιοχή, παρόλο που γεωγραφικά ανήκουν στην Ευρώπη, θεσμικά δεν έχουν ενταχθεί στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Για το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως η πολιτική και κοινωνική αστάθεια στην περιοχή, η οποία κορυφώθηκε στα τέλη του 20^{ου} αιώνα και έκτοτε αποκλιμακώνεται σταδιακά. Αντίθετα, ήδη από τις αρχές τους 21^{ου} αιώνα, οι προσπάθειες της Ε.Ε. για την στήριξη και την αναβάθμιση των περιοχών αυτών, με ορίζοντα της ένταξής τους στην Ένωση έχουν εντατικοποιηθεί. Προκειμένου να καταστούν κράτη – μέλη, οι χώρες των Δυτικών Βαλκανίων πρέπει να πληρούν κάποια πολιτικά, οικονομικά και θεσμικά κριτήρια, στα οποία συμπεριλαμβάνεται και η επάρκεια σε ορισμένες υποδομές.

Εστιάζοντας το ενδιαφέρον στο κομμάτι των υποδομών, μέσα στα επόμενα χρόνια αναμένεται να ξεκινήσει η κατασκευή δέκα έργων – σταθμών για τα Δυτικά Βαλκάνια. Από αυτά τα έργα, τα επτά θα αφορούν τις μεταφορές, την ενέργεια και το κλίμα, με το εκτιμώμενο συνολικό τους κόστος να ανέρχεται περίπου στα 3.5 δισ. €. Ο υπεύθυνος φορέας για την εκπόνηση και χρηματοδότησή τους είναι το Western Balkan Investment Framework (WBIF) σε συνεργασία με την Ε.Ε. και λοιπούς ανεξάρτητους χρηματοδότες.

Στα πλαίσια αυτών των νέων υποδομών, και ειδικότερα ως μέρος των επερχόμενων έργων οδοποιίας, εντάσσεται και η εγκατάσταση ενός δικτύου σταθμών για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων. Η τοποθέτηση των εγκαταστάσεων αυτών αναμένεται πως θα εναρμονίσει την ευρωπαϊκή πραγματικότητα με αυτή των Δυτικών Βαλκανίων, καθώς και με την καλπάζουσα τεχνολογία της ηλεκτροκίνησης. Ταυτόχρονα, αναμένεται πως θα εντάξει τις χώρες αυτές και στην τροχιά πλήρωσης των ευρωπαϊκών στόχων για τη βιωσιμότητα των μεταφορών και τον εκμηδενισμό των εκπεμπόμενων ρύπων.



Εικόνα 3.4. Οι χώρες των Δυτικών Βαλκανίων

Μεταβαίνοντας τώρα στα διαθέσιμα δεδομένα, αυτά αποτελούνται από ένα δίκτυο δρόμων, έναν πίνακα Προέλευσης – Προορισμού και ένα χαρτογραφικό υπόβαθρο, το οποίο επιδεικνύει τη γεωγραφική διαίρεση του συστήματος ζωνών.

Ως βάση για το δίκτυο των αυτοκινητοδρόμων αξιοποιήθηκε το μοντέλο REBIS (Regional Balkans Infrastructure Study) του 2012, το οποίο με τη σειρά του αξιοποίησε τα χαρτογραφικά δεδομένα του OpenStreetMaps. Ωστόσο, τα δεδομένα αυτά αφορούν μόνο τη γεωμετρία των

δρόμων, καθώς τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά των οδικών αξόνων, όπως επίσης και τα κυκλοφοριακά δεδομένα, αναφέρονται στο έτος 2019. Το δίκτυο των δρόμων μορφοποιήθηκε ως αρχείο shapefile (.shp) και έπειτα χρησιμοποιήθηκε ως θεματικό επίπεδο στο περιβάλλον του QGIS. Εντός του αρχείου αυτού συμπεριλαμβάνονται και όλα τα ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά δικτύου, όπως αναφέρονται παρακάτω. Έτσι, για κάθε οδικό άξονα που ανήκει στο δίκτυο, εκτός από τη γεωμετρία και τη γεωγραφική του τοποθέτηση, είναι γνωστά τα ακόλουθα :

- η μοναδική τιμή ταυτοποίησης του κάθε συνδέσμου (ID)
- το μήκος του σε χιλιόμετρα (km)
- η κατηγορία βάσει του μεγέθους του (π.χ. αυτοκινητόδρομος, κύριος οδικός άξονας κ.α.)
- η κατεύθυνσή του (Direction).
- η ταχύτητα ελεύθερης ροής κατά μήκος του (Free Flow Speed).
- ο χρόνος διέλευσης από τον άξονα σε συνθήκες ελεύθερης ροής (Free Flow Time)
- η χωρητικότητά του σε οχήματα (Capacity).
- αν είναι ή όχι άξονας σύνδεσης (connector)
- η επιμέρους κατηγοριοποίηση των αξόνων σύνδεσης (internal or external)
- η χώρα στην οποία ανήκει

Στη συνέχεια, το σύνολο των μετακινήσεων που πραγματοποιούνται στο δίκτυο αντλήθηκε από τον Πίνακα Προέλευσης-Προορισμού. Τα δεδομένα του πίνακα αναφέρονται σε μετακινήσεις μεταξύ ζωνών των χωρών των Δυτικών Βαλκανίων, καθώς και σε μετακινήσεις που προέρχονται από ή καταλήγουν σε ευρωπαϊκές χώρες εκτός των Δυτικών Βαλκανίων.

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα, για την αξιοποίηση ενός Πίνακα Π-Π, είναι απαραίτητη η θέσπιση ενός συστήματος ζωνών, το οποίο διαιρεί γεωγραφικά την περιοχή μελέτης. Οι ζώνες του συστήματος αυτού αποτελούνται από γεωγραφικές υποδιαιρέσεις των χωρών των Δυτικών Βαλκανίων (εσωτερικές ζώνες) και από άλλες χώρες εκτός των δυτικών Βαλκανίων (εξωτερικές ζώνες). Εφόσον το οδικό δίκτυο που εξετάζεται στη μελέτη, ανήκει μόνο στην περιοχή των Δυτικών Βαλκανίων, οι εξωτερικές ζώνες διασυνδέονται με αυτό μόνο μέσω εξωτερικών συνδέσεων. Ο συνολικός αριθμός των ζωνών είναι 108. Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται το οδικό δίκτυο και η περιοχή μελέτης διαιρεμένη σε ζώνες.



Εικόνα 3.5. Το δίκτυο αυτοκινητοδρόμων των Δυτικών Βαλκανίων και η ζωνική διαίρεση των χωρών που περικλείει



Εικόνα 3.6. Οι ζώνες του δικτύου και τα κεντροειδή τους

Συνοψίζοντας, το σύνολο των αρχικών δεδομένων (input data) για τη συγκρότηση του δικτύου περιλαμβάνει : το σύνολο των αυτοκινητοδρόμων του δικτύου TEN-T για τα Δυτικά Βαλκάνια και το χάρτη των ζωνών (ως shapfiles), καθώς και τον Πίνακα Π-Π (ως αρχείο excel).

Λαμβάνοντας υπόψη και καταμετρώντας όλα τα παραπάνω, το τελικό μοντέλο του δικτύου αποτελείται από:

- 108 ζώνες (80 εσωτερικές και 28 εξωτερικές)
- 627 οδικούς άξονες
- 171 συνδέσεις (εσωτερικές και εξωτερικές)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ

AEQUILIBRAE

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το κεφάλαιο αυτό αφορά την περιγραφή της διαδικασίας της μοντελοποίησης ενός συστήματος μεταφορών χρησιμοποιώντας το Aequilibrae. Αρχίζει με μία αναφορά στο πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε για τη μοντελοποίηση, το οποίο είναι το «μοντέλο των 4 βημάτων». Κατόπιν, περιγράφονται διαδοχικά όλες οι διεργασίες που υλοποιήθηκαν στο λογισμικό, καθώς και οι έλεγχοι που υπέστησαν τα παράγωγα δεδομένα της μοντελοποίησης για την εξάλειψη τυχόν χονδροειδών σφαλμάτων.

4.1. Στοιχεία από τη θεωρία του μοντέλου 4 βημάτων

Έπειτα από τη συλλογή των δεδομένων, το επόμενο βήμα μίας συγκοινωνιακής μελέτης είναι η μοντελοποίηση του συστήματος μεταφορών της περιοχής με την οποία ασχολείται. Σε ό,τι αφορά τη μοντελοποίηση, υπάρχουν διάφορες εναλλακτικές μέθοδοι, ανάλογες και με την προσέγγιση που επιλέγεται για την εξυπηρέτηση των αναγκών της εκάστοτε μελέτης. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας επιλέχθηκε η υλοποίηση του λεγόμενου «μοντέλου 4 βημάτων».

Το μοντέλο των 4 βημάτων αποτελεί μία μέθοδο προσομοίωσης ενός συγκοινωνιακού συστήματος, αντλώντας τα δεδομένα του από τη ζήτηση για μετακίνηση. Η χρήση του είναι αρκετά διαδεδομένη, ενώ βιβλιογραφικά, απαντάται σε πλήθος εφαρμογών. Όπως προκύπτει και από το όνομά του, η λειτουργία του μοντέλου επιτυγχάνει την προσομοίωση ενός συστήματος μεταφορών μέσα από την υλοποίηση τεσσάρων κύριων βημάτων. Τα βήματα αυτά είναι, κατά σειρά, η γένεση των μετακινήσεων, η κατανομή των μετακινήσεων, η επιλογή μέσου και ο καταμερισμός στο δίκτυο.

Η **γένεση των μετακινήσεων**, ως το πρώτο βήμα, διαδραματίζει θεμελιώδη ρόλο. Ο ρόλος αυτός συνοψίζεται στην εκτίμηση του ημερήσιου όγκου μεταφορών, μετουμεσιώνοντας παράλληλα τις καθημερινές μεταφορές, από απλές δραστηριότητες σε συγκεκριμένες διαδρομές με τοποθεσία προέλευσης και τοποθεσία προορισμού. Ανάλογα με την ακρίβεια κάθε μοντέλου δικτύου, ως προέλευση και προορισμός των μετακινήσεων μπορεί να θεωρηθεί ένα νοικοκυριό, μία ευρύτερη γεωγραφική ζώνη ή και ένα άτομο. Αντίστοιχα, οι μετακινήσεις, με τη σειρά τους χωρίζονται σε αυτές που έχουν προέλευση την κατοικία και προορισμό την εργασία (home-base work trips - HBW), σε αυτές που έχουν προέλευση την κατοικία και ελεύθερο προορισμό (home-based other trips - HBO) και σε αυτές που δεν έχουν προέλευση την κατοικία (non-home-based trips - NHB). Σε αυτή την εργασία, επειδή εξετάζεται ένα ευρύ υπεραστικό δίκτυο, για την προέλευση και τον προορισμό των μετακινήσεων θα χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα ζωνών, οι οποίες συγκροτούνται ως εκτεταμένες γεωγραφικές οντότητες. Αυτή η γεωγραφική διαίρεση μειώνει και την απαιτούμενη λεπτομέρεια γύρω από το ποιόν των μετακινήσεων και έτσι η κατηγοριοποίησή τους καθίσταται άνευ σημασίας για το παρόν μοντέλο.

Στη συνέχεια, το επόμενο και δεύτερο κατά σειρά βήμα της μοντελοποίησης είναι η **κατανομή των μετακινήσεων**. Σε αυτό το βήμα συγκεντρώνονται όλες οι μετακινήσεις που παράγονται από και έλκονται σε κάθε ζώνη. Έπειτα από την ταξινόμησή τους ανά ζώνη

προέλευσης και προορισμού, όλες αυτές οι μετακινήσεις αθροίζονται και συγκροτούν τον πίνακα Προέλευσης – Προορισμού. Μεταξύ άλλων, ένα από τα χαρακτηριστικά του πίνακα αυτού, το οποίο δεν έχει αναφερθεί έως τώρα, είναι ότι το άθροισμα όλων των παραγόμενων μετακινήσεων από όλες τις ζώνες του δικτύου είναι ίσο με το άθροισμα όλων των ελκυόμενων μετακινήσεων προς όλες τις ζώνες του δικτύου. Έτσι λοιπόν, φαίνεται πως ένα δίκτυο αποτελεί ένα ουσιαστικά κλειστό σύστημα, του οποίου όλες οι μετακινήσεις έχουν εξ' ορισμού μία ζώνη προέλευσης και μία ζώνη προορισμού. Στην παρούσα μελέτη, ο πίνακας Προέλευσης – Προορισμού συγκαταλέγεται μαζί με τα συλλεγμένα δεδομένα του προβλήματος. Ωστόσο, όπως αναλύεται και παρακάτω, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσίασε η προσπάθεια της τεχνικής εναρμόνισής του ως ένα ανεξάρτητο αρχείο πίνακα (.omx) με τα γεωχωρικά δεδομένα του δικτύου (κόμβους και συνδέσμους). Άλλωστε, η πλήρωση αυτής της συνθήκης ήταν απαραίτητη προϋπόθεση και για την πραγματοποίηση των υπόλοιπων δύο βημάτων.

Μετά την κατανομή των μετακινήσεων, το βήμα που ακολουθεί είναι η **επιλογή μέσου**. Σε αυτό το στάδιο, οι συνολικές μετακινήσεις του πίνακα Προέλευσης – Προορισμού διαμοιράζονται σε επιμέρους πίνακες, οι οποίοι αναπαριστούν διαφορετικά μέσα μεταφοράς. Έτσι προκύπτουν δεδομένα για τις προτιμήσεις των μετακινούμενων, και συνεπώς για την επιρροή κάθε μέσου στη λειτουργία του δικτύου. Ωστόσο, επειδή αυτή η μελέτη επικεντρώνεται στη λειτουργία ενός δικτύου αυτοκινητοδρόμων, η ποσοστιαία προτίμηση εναλλακτικών μέσων πέραν του αυτοκινήτου θεωρείται αμελητέα. Παράλληλα, η θεώρηση αυτή τεκμηριώνεται και βάσει των υφιστάμενων τεχνολογικών εξελίξεων, σύμφωνα με τις οποίες μόνο τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα είναι κατάλληλα για διαδρομές τέτοιας εμβέλειας. Για τους λόγους αυτούς, κατά την επιλογή μέσου, το μόνο διαθέσιμο μέσο είναι το αυτοκίνητο.

Το τέταρτο και τελευταίο βήμα του μοντέλου είναι ο **καταμερισμός στο δίκτυο**. Μέσα από την υλοποίησή του υπολογίζονται οι διαδρομές που ακολουθούνται από κάθε ζεύγος Προέλευσης – Προορισμού, οι κυκλοφοριακοί φόρτοι σε κάθε οδικό τμήμα του δικτύου, καθώς και οι χρόνοι διαδρομής επί των δρόμων αυτών. Για τον υπολογισμό όλων αυτών των μεγεθών υιοθετείται η μέθοδος καταμερισμού «όλα ή τίποτα» (all-or-nothing). Σύμφωνα με αυτή, για κάθε ζεύγος Προέλευσης – Προορισμού επιδιώκεται η εύρεση εκείνης της διαδρομής που εγγυάται τον ελάχιστο δυνατό χρόνο ταξιδιού (shortest path), χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι εκάστοτε κυκλοφοριακοί φόρτοι των οδικών τμημάτων. Έτσι, ο χρόνος κάθε διαδρομής είναι σταθερός και ανεξάρτητος του φόρτου που συναντάται σε κάθε σύνδεσμο. Η επιλογή αυτής της μεθόδου

καταμερισμού καθίσταται ιδανική για τις περιπτώσεις υπεραστικών δικτύων, όπου τα φαινόμενα κυκλοφοριακής συμφόρησης είναι σπάνια, δεδομένου ότι οι σύνδεσμοι των δικτύων αυτών χαρακτηρίζονται από υψηλές ταχύτητες και μεγάλες χωρητικότητες.

Ανακεφαλαιώνοντας, παρόλο που οι περιπτώσεις δικτύων ποικίλουν, τόσο ως προς τη μορφή τους όσο και ως προς την πολυπλοκότητά τους, η διαδοχική ολοκλήρωση όλων των προηγούμενων βημάτων συνοψίζει τις βασικές αρχές λειτουργίας ενός συστήματος μεταφορών και οδηγεί στην παραγωγή έγκυρων δεδομένων για το μελετώμενο δίκτυο. Στις επόμενες ενότητες θα περιγραφεί η υλοποίηση του μοντέλου των 4 βημάτων στο περιβάλλον QGIS με τη χρήση του εργαλείου Aequilibrae.

4.2. Εισαγωγή στη λειτουργία του Aequilibrae

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, για τη δημιουργία ενός δικτύου μεταφορών, είναι απαραίτητη η ένταξη των στοιχείων του δικτύου σε ένα περιβάλλον GIS. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα της οπτικοποίησης του δικτύου στο χώρο, αλλά και της καταχώρησης των στοιχείων του σε μία βάση γεωχωρικών δεδομένων. Για την παρούσα μελέτη, όλες οι εργασίες επί του δικτύου πραγματοποιούνται στο περιβάλλον του QGIS.

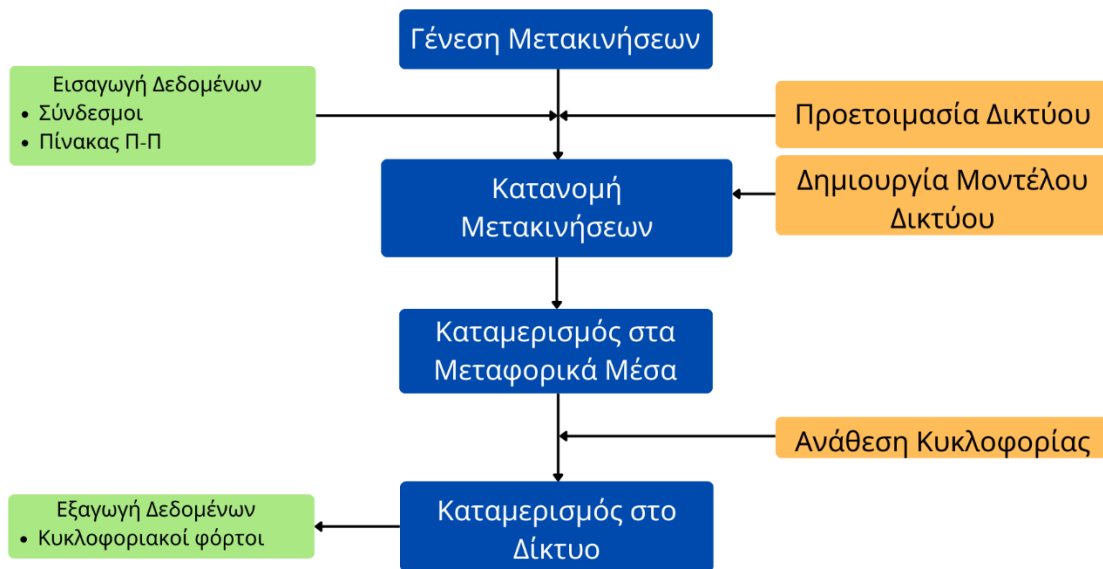
Το εργαλείο (plugin) του QGIS που αφορά τη διαχείριση και επεξεργασία δεδομένων συστημάτων μεταφορών, ονομάζεται Aequilibrae. Το Aequilibrae, όπως και όλα τα άλλα πακέτα του QGIS, είναι ένα πακέτο ανοικτού κώδικα (open source), ενώ συγχρόνως αποτελεί και το πρώτο εργαλείο για τη μοντελοποίηση συστημάτων μεταφορών που έχει γραφτεί σε Python. Οι δυνατότητες και το πλήθος των διεργασιών που μπορεί να εκτελέσει βρίσκονται σε διαρκή ανάπτυξη. Για τους λόγους αυτούς, η χρήση του Aequilibrae στην υλοποίηση αυτής της μελέτης, αποτελεί και το μεγαλύτερο μέρος της καινοτομίας της.

Οι επιμέρους λειτουργίες του Aequilibrae παρέχουν τη δυνατότητα για μία ολοκληρωμένη, βήμα προς βήμα ανάπτυξη ενός τυπικού μοντέλου 4 βημάτων. Η διαδικασία ανάπτυξης του μοντέλου μπορεί να υλοποιηθεί με την ολοκλήρωση τριών διαδοχικών διεργασιών, οι οποίες είναι:

- Η Προετοιμασία του Δικτύου (Network Preparation)
- Η Δημιουργία του Μοντέλου του Δικτύου (Project Creation)

- Η Ανάθεση Κυκλοφορίας (Traffic Assignment)

Παρακάτω, στην εικόνα 4.1, αποδίδονται με μορφή σχεδιαγράμματος τα βήματα του μοντέλου των 4 βημάτων και η συμβολή καθεμίας από τις διεργασίες του *Aequilibræ* προς την πραγματοποίησή τους. Η ολοκλήρωση των διεργασιών οδηγεί στην κατανομή της ζήτησης για μετακίνηση (κυκλοφοριακοί φόρτοι) σε κάθε οδικό άξονα του δικτύου και στην εξαγωγή των δεδομένων αυτών από το μοντέλο.



Εικόνα 4.1. Σχεδιαγραμμική απεικόνιση των σταδίων του μοντέλου των 4 βημάτων και των σημείων που επεμβαίνουν οι διεργασίες του *Aequilibræ* και τα δεδομένα εισόδου και εξόδου για την συγκρότηση του μοντέλου

4.3. Προετοιμασία του Δικτύου (Network Preparation)

Σύμφωνα με το προηγούμενο κεφάλαιο, τα απαραίτητα δεδομένα για τη συγκρότηση ενός δικτύου είναι οι σύνδεσμοι, οι κόμβοι και ο Πίνακας Προέλευσης-Προορισμού. Ωστόσο, τα διαθέσιμα δεδομένα για το δίκτυο αυτό είναι (α) το σύνολο των συνδέσμων, (β) ο Πίνακας

Προέλευσης-Προορισμού και (γ) το χαρτογραφικό υπόβαθρο της περιοχής μελέτης και οι ζώνες στις οποίες αυτή χωρίζεται. Φαίνεται λοιπόν, πως απουσιάζει το σύνολο των κόμβων.

Έτσι, καθίσταται αναγκαίο, ως μέρος της προετοιμασίας του δικτύου, να βρεθεί το σύνολο των κόμβων. Με τη βοήθεια του Aequilibrae, η διαδικασία αυτή μπορεί να εκτελεστεί αυτόματα χρησιμοποιώντας το εργαλείο “network preparation” και εισάγοντας σε αυτό το σύνολο των συνδέσμων. Κατόπιν, εντοπίζονται όλα τα σημεία διασταυρώσεων μεταξύ των διαφορετικών συνδέσμων και δημιουργείται ένα νέο θεματικό επίπεδο (layer), το οποίο περιέχει μόνο τα σημεία αυτά. Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του θεματικού επιπέδου των κόμβων, ενώ στις εικόνες 4.3 και 4.4 γίνεται αντιπαραβολή της εικόνας του δικτύου πριν και μετά την εφαρμογή του.

Links layer

Network Layer

Line layer name

Nodes layer

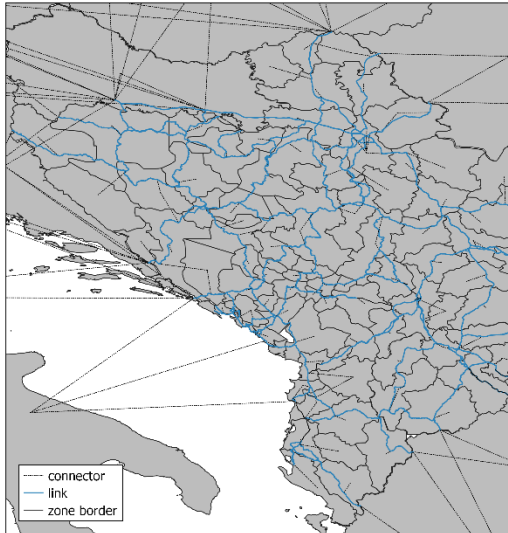
Create node layer Use node layer

Node layer name

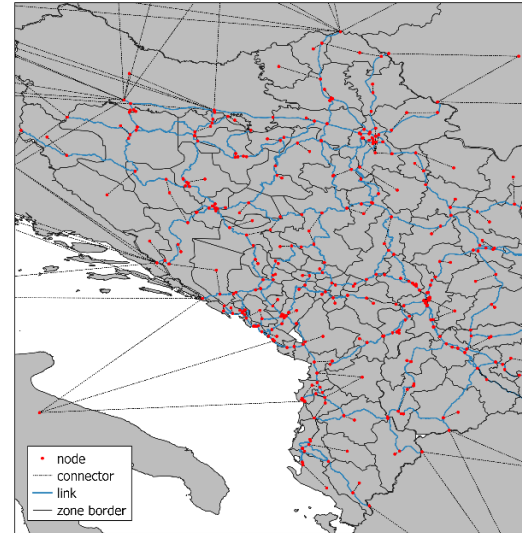
Node numbering start

0%

Εικόνα 4.2. Το εργαλείο της προετοιμασίας του δικτύου (network preparation tool)



Εικόνα 4.3. Το δίκτυο πριν τη διεργασία της προετοιμασίας του (χωρίς κόμβους)



Εικόνα 4.4. Το δίκτυο μετά τη διεργασία της προετοιμασίας του (με κόμβους)

Εκ πρώτης όψεως, φαίνεται πως πλέον είναι διαθέσιμα όλα τα απαραίτητα δεδομένα για τη δημιουργία του δικτύου. Όμως, για να μπορεί το σύνολο των κόμβων να αξιοποιηθεί στη δημιουργία ενός δικτύου είναι απαραίτητος ένας ακόμα διαχωρισμός. Πρόκειται για το διαχωρισμό μεταξύ των φυσικών κόμβων και των κεντροειδών. Αφού οι τύποι των κόμβων διαχωριστούν μέσω των ιδιοτήτων τους (βλ. Δημιουργία Μοντέλου Δικτύου), χρειάζεται να υλοποιηθεί μία χωρική συσχέτιση (spatial join) των συνδέσμων με τους κόμβους, ούτως ώστε να καθοριστεί με ποιους κόμβους συνδέεται ο κάθε σύνδεσμος. Η συσχέτιση αυτή ανήκει στην κατηγορία “one-to-many”, καθώς οι σύνδεσμοι ενώνονται με παραπάνω από έναν κόμβους (ένας στην αφετηρία και ένας στο πέρας τους). Έτσι, το σύνολο των συνδέσμων συνδέεται επιτυχώς με το σύνολο των κόμβων.

Μετά την ολοκλήρωση της συσχέτισης, κάθε σύνδεσμος έχει συσχετιστεί με διαφορετικούς κόμβους και είναι πιθανή η δημιουργία αντιγράφων (duplicates) της κάθε συσχέτισης. Τα αντίγραφα αυτά είναι ανεπιθύμητα, καθώς δυσχεραίνουν τη λειτουργία του μοντέλου. Για την εκκαθάρισή τους χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο “dissolve with stats”, το οποίο τα εξαίρεσε από τη βάση γεωχωρικών δεδομένων με βάση τη σειρά δημιουργίας τους (τα αντίγραφα δημιουργήθηκαν μετά τα πρωτότυπα).

Η ολοκλήρωση αυτών των απαραίτητων διεργασιών, τόσο για τα αρχικά (σύνδεσμοι), όσο και για τα νέα (κόμβοι) δεδομένα, διασφάλισε την πλήρωση όλων των απαραίτητων συνθηκών για τη δημιουργία του μοντέλου του δικτύου. Ωστόσο, όπως αναλύεται και παρακάτω, οι

διεργασίες αυτές αφορούν μόνο την επιτυχή δημιουργία του μοντέλου του δικτύου, ενώ και για την επιτυχή λειτουργία του απαιτείται ένα νέο σύνολο διεργασιών.

4.4. Δημιουργία του Μοντέλου του Δικτύου (Project Creation)

Καθένα από τα θεματικά επίπεδα των κόμβων και των συνδέσμων αποτελεί και μία βάση δεδομένων. Η βάση αυτή περιέχει τοπογραφική πληροφορία, καθώς πρόκειται για σημεία και οδικούς άξονες σε σύστημα αναφοράς, και ποσοτική πληροφορία μέσω του αντίστοιχου πίνακα ιδιοτήτων τους (attribute table). Για να δημιουργηθεί το μοντέλο ενός δικτύου, η πληροφορία των θεματικών επιπέδων πρέπει να συνδυαστεί και να συγκεντρωθεί σε μία κοινή βάση δεδομένων. Το μέρος του συνδυασμού των δεδομένων ολοκληρώθηκε με τη διαδικασία της χωρικής συσχέτισης. Απομένει λοιπόν, η συγκέντρωση όλων των δεδομένων σε μία κοινή βάση.

Το *Aequilibrae* παρέχει τη δυνατότητα δημιουργίας βάσεων δεδομένων για συστήματα μεταφορών μέσω του εργαλείου “create project from layers”. Έτσι, αξιοποιεί τα δύο υφιστάμενα θεματικά επίπεδα (σύνδεσμοι και κόμβοι) και τα συνενώνει σε ένα κοινό μοντέλο. Αυτό είναι και το μοντέλο του δικτύου.

Στην προηγούμενη ενότητα αναφέρθηκε ένα σύνολο διεργασιών που ήταν αναγκαίο να υλοποιηθούν στους κόμβους ούτως ώστε να μπορούν να ταιριάζουν στις προδιαγραφές των δεδομένων ενός δικτύου. Αντίστοιχα, για να μπορεί να δημιουργηθεί σωστά και η βάση δεδομένων του μοντέλου, πρέπει να πληρούνται κάποιες προδιαγραφές. Οι προδιαγραφές αυτές επιβάλλονται από το ίδιο το *Aequilibrae*, καθώς αποτελούν δομικά στοιχεία της λειτουργίας του.

Η μορφή των προδιαγραφών αυτών σχετίζεται τόσο με την κατηγορία των ποσοτικών πληροφοριών που είναι απαραίτητες για το μοντέλο, όσο και με τον τρόπο με τον οποίο οι πληροφορίες αυτές έχουν καταχωρηθεί στον πίνακα ιδιοτήτων των θεματικών επιπέδων. Οι απαιτήσεις σε δεδομένα διαφέρουν μεταξύ συνδέσμων και κόμβων. Αναλυτικότερα, για τους συνδέσμους απαιτείται :

- Η μοναδική αρίθμηση του κάθε συνδέσμου (Link ID). Ουσιαστικά το πρωτεύον κλειδί του πίνακα των συνδέσμων.
- Ο κόμβος της αφετηρίας του συνδέσμου (A Node).
- Ο κόμβος του πέρατος του συνδέσμου (B Node).
- Η κατεύθυνση κάθε συνδέσμου (Direction). Το πεδίο αυτό περιγράφει τη διανυσματική πορεία των μετακινούμενων επί του συνδέσμου και μπορεί να λάβει μόνο τις τιμές 1, 0 και -1. Το 1 υποδηλώνει πως η κατεύθυνση του συνδέσμου ξεκινάει από τον κόμβο της αφετηρίας του και καταλήγει στον κόμβο του πέρατός του (κανονική κατεύθυνση). Το -1 υποδηλώνει πως η κατεύθυνση του συνδέσμου ξεκινάει από τον κόμβο του πέρατός του και καταλήγει στον κόμβο της αφετηρίας του (αντίθετη κατεύθυνση). Τέλος, το 0 υποδηλώνει έναν αμφίδρομο σύνδεσμο (διπλής κατεύθυνσης).
- Το μήκος του συνδέσμου (Distance). Η χιλιομετρική απόσταση στην οποία εκτείνεται ο κάθε σύνδεσμος.
- Το μέσο ή τα μέσα μετακίνησης επί του συνδέσμου (Mode). Το πεδίο αυτό λαμβάνει τιμές γραμμάτων (string). Οι τιμές αυτές είναι c, t, b και w (όπου c=car, t=truck, b=bicycle, w=walking). Στην παρούσα μελέτη, το μέσο λαμβάνει μόνο την τιμή c.
- Η κατηγορία του συνδέσμου (Link Type). Το πεδίο αυτό λαμβάνει ακέραιες τιμές ξεκινώντας από το 1 έως τον αριθμό των διαφορετικών κατηγοριών συνδέσμων που απαντώνται σε ένα δίκτυο. Στην παρούσα μελέτη λαμβάνει τιμές από το 1 έως το 8 (όπου 1=connector, 2=link, 3=motorway, 4=motorway_1, 5=primary, 6=secondary, 7=tertiary, 8=trunk).
- Η χωρητικότητα κάθε συνδέσμου (Capacity). Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η χωρητικότητα ενός συνδέσμου υποδηλώνει το μέγιστο αριθμό οχημάτων που μπορούν να διέρχονται ταυτόχρονα από αυτόν χωρίς να παρατηρούνται φαινόμενα κυκλοφοριακής συμφόρησης. Στους συνδέσμους αυτής της μελέτης, η χωρητικότητα λαμβάνει τιμές από 8500 έως 35000.
- Η ταχύτητα ελεύθερης ροής σε κάθε σύνδεσμο (Free Flow Speed). Γνωρίζοντας τα τεχνικά χαρακτηριστικά των συνδέσμων του δικτύου, καταλαμβάνει τιμές από 50 έως 130 χλμ/ώρα (km/h).
- Ο χρόνος διέλευσης από το σύνδεσμο σε συνθήκες ελεύθερης ροής (Free Flow Time). Μετρείται σε λεπτά. Σε περίπτωση που τα δεδομένα για αυτό το πεδίο δεν είναι εκ των

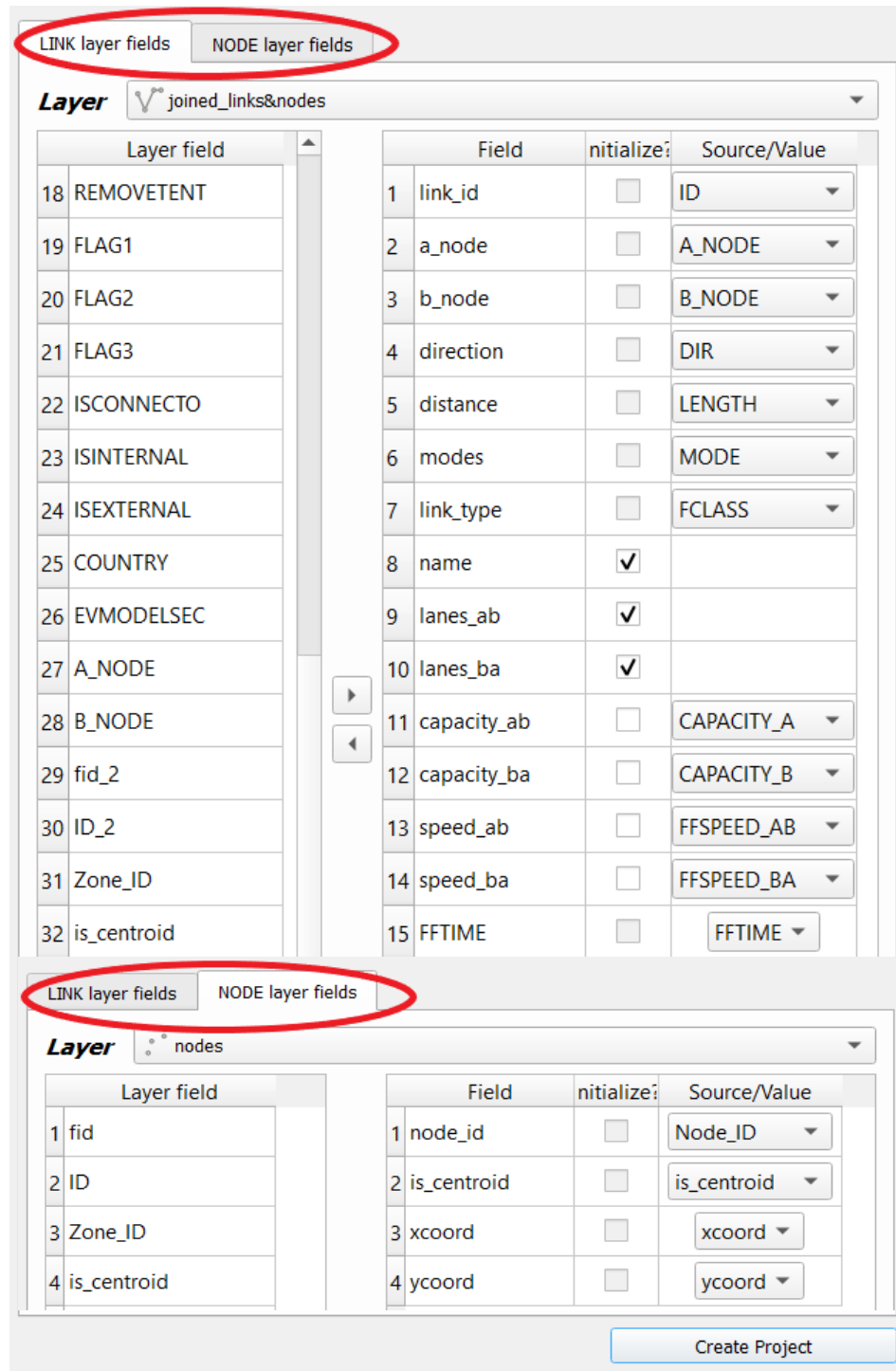
προτέρων διαθέσιμα, μπορεί να υπολογιστεί από το μήκος και την ταχύτητα ελεύθερης ροής, τα οποία είναι γνωστά σε κάθε περίπτωση.

Αντίστοιχα, τα απαιτούμενα δεδομένα για τους κόμβους είναι :

- Η μοναδική αρίθμηση του κάθε κόμβου (Node ID). Πρόκειται για το πρωτεύον κλειδί του πίνακα των κόμβων, η αρίθμηση του οποίου ταυτίζεται με την αρίθμηση που χρησιμοποιείται στα πεδία των κόμβων αφετηρίας και πέρατος για τους συνδέσμους.
- Η κατηγορία του κόμβου (is_centroid). Εξ' ορισμού, το Aequilibræ τοποθετεί ένα πεδίο σε όλους του κόμβους. Το πεδίο ονομάζεται "is_centroid" και αποτελεί μία δυαδική μεταβλητή, η οποία λαμβάνει την τιμή 1 αν ένας κόμβος είναι κεντροειδής και την τιμή 0 αν δεν είναι κεντροειδής.
- Οι συντεταγμένες x, y κάθε κόμβου (στο σύστημα αναφοράς WGS 84).

Τα περισσότερα από τα παραπάνω πεδία είναι προαπαιτούμενα για τη δημιουργία του δικτύου. Ωστόσο, εκτός αυτών, μπορούν να προστεθούν και άλλα πεδία, επικουρικά. Από τα παραπάνω, τα πρόσθετα πεδία ήταν ο χρόνος διέλευσης σε συνθήκες ελεύθερης ροής για τους συνδέσμους και οι συντεταγμένες για τους κόμβους.

Η συμπλήρωση όλων των απαιτούμενων πεδίων και η καταχώρηση των δεδομένων σε αυτά σύμφωνα με τις προδιαγραφές τους, σηματοδοτεί την ολοκλήρωση της δημιουργίας του μοντέλου. Στην εικόνα 4.5 που ακολουθεί παρουσιάζεται το εργαλείο που επιτρέπει την εισαγωγή όλων των δεδομένων που αναφέρθηκαν και οδηγεί στη δημιουργία του μοντέλου του δικτύου.



Εικόνα 4.5. Το εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του μοντέλου του δικτύου(project creation tool) και οι δύο καρτέλες για την παραμετροποίησή του (μία για τους συνδέσμους και μία για τους κόμβους)

4.5. Ανάθεση Κυκλοφορίας στο Δίκτυο (Traffic Assignment)

Ο στόχος κάθε μοντέλου συστήματος μεταφορών είναι η παροχή ποσοτικών δεδομένων για τη λειτουργία του δικτύου στο οποίο αναφέρεται. Το τελικό στάδιο προς την απόκτηση αυτών των δεδομένων είναι ο καταμερισμός στο δίκτυο. Στο *Aequilibrae*, το στάδιο πραγματοποιείται μέσα από η διεργασία της ανάθεσης της κυκλοφορίας (traffic assignment). Για την εκτέλεσή της, πρέπει να είναι γνωστός ο αριθμός των μετακινήσεων που πραγματοποιούνται μεταξύ των ζωνών του δικτύου, καθώς και τα μέσα μεταφοράς που επιλέγονται για αυτές. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας, θα είναι πλέον γνωστές και οι διαδρομές που επιλέγουν οι χρήστες του δικτύου για τις μετακινήσεις τους.

Στην ανάθεση της κυκλοφορίας λαμβάνονται υπόψη τα δεδομένα του Πίνακα Προέλευσης-Προορισμού (μετακινήσεις μεταξύ ζωνών) και τα μέσα μετακίνησης (mode) που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο. Κατόπιν, επιλέγεται η μέθοδος ανάθεσης (algorithm), η οποία προσομοιάζει ακριβέστερα τη λειτουργία του δικτύου και τους στόχους της μελέτης.

Για το παρόν δίκτυο, η μέθοδος που επιλέχθηκε ονομάζεται «όλα ή τίποτα» (all-or-nothing). Η βασική αρχή της μεθόδου υπαγορεύει την εύρεση της συντομότερης διαδρομής μεταξύ των ζευγών Προέλευσης-Προορισμού, ελαχιστοποιώντας τον χρόνο διαδρομής (Free Flow Time). Η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί την πιο απλοποιημένη από τις μεθόδους ανάθεσης, καθώς δε λαμβάνει υπόψη πρόσθετες ανασταλτικές παραμέτρους όπως είναι η κυκλοφοριακή συμφόρηση, οι πιθανές εργασίες επί της οδού κ.α. Σε εναλλακτικές περιπτώσεις δικτύων, τα οποία μπορεί να βρίσκονται εντός αστικών κέντρων ή να υπάρχουν μεγαλύτερες απαιτήσεις ακρίβειας, η μέθοδος «όλα ή τίποτα» ενδέχεται να μην είναι απόλυτα αποτελεσματική. Ωστόσο, συνιστά μία επαρκή επιλογή, επειδή το δίκτυο απαρτίζεται από αυτοκινητοδρόμους, στους οποίους τα φαινόμενα συμφόρησης ή ολοκληρωτικής παρεμπόδισης της κυκλοφορίας τείνουν να σπανίζουν.

Στο περιβάλλον του *Aequilibrae*, η χρήση του εργαλείου “traffic assignment” δίνει τη δυνατότητα εισαγωγής του Πίνακα Π-Π και επιλογής του μέσου μεταφοράς. Σε αυτό το σημείο, είναι εξαιρετικά αναγκαίο, ο Πίνακας Π-Π να έχει λάβει την κατάλληλη μορφοποίηση ώστε να αναγνωριστεί σωστά από το λογισμικό. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη δημιουργία του μοντέλου, το *Aequilibrae* εισήγαγε στη βάση ένα νέο πρωτεύον κλειδί (`ogc_fid`) για την αναγνώριση των

κόμβων και των συνδέσμων αντίστοιχα. Όπως είναι γνωστό από τη θεωρία των βάσεων δεδομένων, το νέο πρωτεύον κλειδί αντικατέστησε το ήδη υπάρχον. Προκειμένου ο Πίνακας Π-Π να εισαχθεί επιτυχώς στο λογισμικό, η αρίθμηση των ζωνών του Πίνακα Π-Π έπρεπε να συμφωνεί με την αρίθμηση του νέου πρωτεύοντος κλειδιού για τους κόμβους (σωστή αναγνώριση των κεντροειδών). Έπειτα, το επόμενο βήμα ήταν η επιλογή και παραμετροποίηση της μεθόδου ανάθεσης και ο καθορισμός των παράγωγων δεδομένων που θα προκύψουν μετά από την εκτέλεσή της.

Όπως αναφέρθηκε, η εκτέλεση της ανάθεσης κυκλοφορίας καταδεικνύει τις διαδρομές που επιλέγουν οι μετακινούμενοι. Επομένως, πλέον γίνονται γνωστοί οι φόρτοι της κυκλοφορίας σε κάθε οδικό άξονα του δικτύου (Link Flows). Οι φόρτοι αυτοί αποτελούν το κυριότερο παράγωγο του μοντέλου, ενώ επικουρικά υπολογίστηκε και το μητρώο γενικευμένου κόστους (Free Flow Time Skim). Όλα τα στάδια υλοποίησης της ανάθεσης κυκλοφορίας παρουσιάζονται διαδοχικά στις εικόνες που ακολουθούν.

Mode	User classes	PCE
1 car (c)	1	1.0

Εικόνα 4.6. Εισαγωγή του πίνακα Προέλευσης - Προορισμού και καθορισμός των χρησιμοποιούμενων μέσων μεταφοράς

Mode	Field	Last iteration	Blended
1 car (c)	fftime	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Εικόνα 4.7. Παραμετροποίηση για τον υπολογισμό του πίνακα των μητρώων γενικευμένου κόστους

Parameter	Value	Field
1 alpha		b
2 beta		power

Εικόνα 4.8. Επιλογή της μεθόδου καταμερισμού και εισαγωγή λοιπών δεδομένων του δικτύου

Το μητρώο γενικευμένου κόστους είναι ένας πίνακας που έχει ίδιες διαστάσεις με τον Πίνακα Π-Π. Η πρώτη γραμμή και η πρώτη στήλη του αντικατοπτρίζουν την αρίθμηση των ζωνών

(όπως συμβαίνει και στον Πίνακα Π-Π). Τα υπόλοιπα κελιά του υποδηλώνουν το κόστος μετακίνησης σε χρόνο (λεπτά) από κάθε ζώνη προέλευσης προς κάθε ζώνη προορισμού. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, το κόστος των μετακινήσεων αφορά μόνο τη χρονική επιβάρυνση των χρηστών του δικτύου και δεν αναφέρεται σε οικονομικές επιβαρύνσεις. Σε άλλες μελέτες, στο μέγεθος αυτό συμπεριλαμβάνονται πρόσθετα κόστη ανεφοδιασμού, στάθμευσης και άλλων παραγόντων, εξού και η ονομασία του ως «γενικευμένο κόστος». Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται ένα απόσπασμα του πίνακα γενικευμένου κόστους που προέκυψε μετά την ανάθεση της κυκλοφορίας.

Πίνακας 4.1. Απόσπασμα του πίνακα γενικευμένου κόστους για 7 ζώνες

A/A	1	2	3	4	5	6	7
1	0.0000	0.0000	0.0000	179,769,313...	0.0000	0.0000	257.8000
2	0.0000	0.0000	0.0000	179,769,313...	140.2000	0.0000	282.5600
3	0.0000	0.0000	0.0000	179,769,313...	140.2000	0.0000	0.0000
4	202.6900	227.3900	227.3900	0.0000	0.0000	227.3900	200.4300
5	0.0000	140.1600	140.1600	0.0000	0.0000	140.1600	200.4300
6	0.0000	0.0000	0.0000	179,769,313...	140.2000	0.0000	282.5600
7	267.4500	281.0200	0.0000	179,769,313...	267.4500	281.0200	0.0000

Η λήψη των δεδομένων των φόρτων και του μητρώου γενικευμένου κόστους ολοκληρώνει την εκτέλεση της ανάθεσης κυκλοφορίας (traffic assignment), αλλά και όλο το σύνολο των διεργασιών μοντελοποίησης του μεταφορικού συστήματος. Διαδικαστικά, το μόνο που απομένει πλέον είναι ο έλεγχος των αποτελεσμάτων της ανάθεσης κυκλοφορίας.

4.6. Έλεγχος αποτελεσμάτων και αποσφαλμάτωση δικτύου

Ο έλεγχος της ορθότητας των δεδομένων αποτελεί κοινή πρακτική έπειτα από όλες τις διεργασίες από τις οποίες εξάγονται μετρήσεις και ποσοτικά δεδομένα. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση της μοντελοποίησης των συστημάτων μεταφορών.

Τόσο οι παραγόμενοι φόρτοι, όσο και τα μητρώα γενικευμένου κόστους πρέπει να βρίσκονται εντός ενός πεδίου τιμών προκειμένου να αντιπροσωπεύουν πιθανές πραγματικές τιμές των μεγεθών στα οποία αναφέρονται. Ειδικότερα, το εύρος τιμών των φόρτων, δεδομένου ότι ο κυκλοφοριακός φόρτος αναπαριστά το σύνολο των οχημάτων που διέρχονται από ένα οδικό τμήμα σε ημερήσια βάση, πρέπει να κυμαίνεται από μερικές εκατοντάδες έως μερικές χιλιάδες μονάδες. Αντίστοιχα, εφόσον το γενικευμένο κόστος στη συγκεκριμένη μελέτη αφορά μόνο τη χρονική επιβάρυνση των μετακινούμενων, θα πρέπει να μετριέται σε λεπτά. Λαμβάνοντας υπόψη ότι πρόκειται για υπεραστικές μετακινήσεις, το σύνολο των λεπτών μπορεί να κυμαίνεται από μερικές δεκάδες έως και μερικές εκατοντάδες, ενώ σε έσχατες περιπτώσεις και μερικές χιλιάδες, καθώς πρόκειται για μετακινήσεις μεταξύ έξι διαφορετικών χωρών. Έτσι, τα δύο αυτά εύρη τιμών μπορούν να λειτουργήσουν αντιπροσωπευτικά για το φιλτράρισμα των παράγωγων δεδομένων.

Η μεθοδική τήρηση των «προδιαγραφών» που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, μπορεί, έπειτα από την παρατήρηση των παράγωγων δεδομένων, να εντοπίσει ενδεχόμενα χονδροειδή σφάλματα. Έτσι, τα κριτήρια αυτά οδήγησαν στην αποκάλυψη ορισμένων σημαντικών αποκλίσεων, τόσο στις τιμές των φόρτων όσο και στις τιμές του μητρώου γενικευμένου κόστους. Μία εικόνα της τάξης μεγέθους των αποκλίσεων στις τιμές του μητρώου γενικευμένου κόστους φαίνεται στην τέταρτη στήλη του Πίνακα 4.1. Εκεί, καθίσταται ξεκάθαρο ότι τουλάχιστον μερικές εκατοντάδες εκατομμύρια λεπτά δεν μπορούν σε καμία περίπτωση να αντικατοπτρίζουν τον χρόνο μετακίνησης μεταξύ δύο ζωνών του δικτύου, ακόμα κι αν πρόκειται για εξωτερικές ζώνες.

Οι αποκλίσεις αυτές, όπως αναφέρθηκε, θεωρούνται χονδροειδή σφάλματα που επηρεάζουν κρίσιμα τη λειτουργία του δικτύου. Εφόσον εντοπίστηκαν στο σύνολό τους, ύστερα χωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες ανάλογα με τα δεδομένα στα οποία ανιχνεύθηκαν. Αναλυτικότερα, πρόκειται για :

- Τους συνδέσμους με μηδενικούς φόρτους. Όταν ένας δρόμος έχει μηδενικό κυκλοφοριακό φόρτο, αυτό σημαίνει πως δεν διέρχονται από αυτόν οχήματα. Είναι επιτρεπτό μετά την ανάθεση κυκλοφορίας κάποιου σύνδεσμου να μην θεωρήθηκαν προτιμητέοι, αλλά όταν πρόκειται για πλήθος δρόμων, από τους οποίους οι περισσότεροι είναι εθνικοί αυτοκινητόδρομοι, τότε είναι πιθανή η ύπαρξη σφαλμάτων.
- Τις ζώνες με πολύ μεγάλες τιμές γενικευμένου κόστους. Όταν ο χρόνος μετακίνησης μεταξύ των ζωνών κυμαίνεται από μερικές δεκάδες έως μερικές εκατοντάδες λεπτά, τότε

καθίσταται βέβαιο πως οι τιμές του κόστους που υπερβαίνουν το εκατομμύριο ενέχουν κάποιο σφάλμα.

Ο έλεγχος των τιμών του δικτύου ολοκληρώθηκε χειροκίνητα χρησιμοποιώντας το εργαλείο “shortest path” του Aequilibræ. Η λειτουργία του συγκεκριμένου εργαλείου συνοψίζεται στον εντοπισμό της συντομότερης διαδρομής μεταξύ δύο κόμβων ελαχιστοποιώντας ένα συγκεκριμένο πεδίο. Το πεδίο που ελαχιστοποιήθηκε σε κάθε περίπτωση ήταν ο χρόνος διέλευσης (Free Flow Time).

Τα σφάλματα που εντοπίστηκαν από τους φόρτους, αλλά και από τα μητρώα γενικευμένου κόστους αφορούσαν τα αρχικά δεδομένα του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, βρήκαν την αιτία τους στο πεδίο της κατεύθυνσης (Direction) των συνδέσμων. Στις περισσότερες περιπτώσεις, σύνδεσμοι μικρού μήκους κοντά σε διασταυρώσεις αυτοκινητοδρόμων είχαν κατεύθυνση αντίθετη από την επιθυμητή, εμποδίζοντας κατά αυτό τον τρόπο την ομαλή λειτουργία του δικτύου. Επιπλέον, στις περιπτώσεις που οι εν λόγω διασταυρώσεις ήταν ισόπεδοι ή ανισόπεδοι κόμβοι, η κυκλοφορία εμποδιζόταν ολοκληρωτικά. Τέλος, υπήρξε και ένα μικρό ποσοστό συνδέσμων οι οποίοι χαρακτηρίστηκαν μη προτιμητέοι κατά την ανάθεση της κυκλοφορίας και συνεπώς έλαβαν μηδενικούς φόρτους. Τα τμήματα αυτά, επιβεβαιωμένα πλέον, δεν συνιστούν σφάλματα, καθώς πρόκειται για συνδέσμους δευτερεύουσας σημασίας (παλαιά τμήματα εθνικών οδών), τα οποία δεν έχουν προτεραιότητα ούτε στη λειτουργία του δικτύου, αλλά ούτε και στην τοποθέτηση σταθμών φόρτισης κατά μήκος τους.

Στον Πίνακα 4.2. που ακολουθεί συγκεντρώθηκε και αποδίδεται αριθμητικά το σύνολο των διορθώσεων που υλοποιήθηκαν, καθώς και η επίδραση που είχε η αποσφαλμάτωση στο δίκτυο, ενώ στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται τα δεδομένα του Πίνακα 4.1 μετά την ολοκλήρωσή της.

Πίνακας 4.2. Ποσοτικοποιημένη επίδραση των ελέγχων αποσφαλμάτωσης στα στοιχεία του δικτύου

	Πριν τον έλεγχο αποσφαλμάτωσης	Μετά τον έλεγχο αποσφαλμάτωσης	Ποσοστιαία μεταβολή
Αριθμός συνδέσμων με μηδενικούς φόρτους	110	63	-43%
Αριθμός ζωνών με μεγάλες αποκλίσεις στο μητρώο γενικευμένου κόστους	8	8	-100%

Πίνακας 4.3. Απόσπασμα του πίνακα γενικευμένου κόστους για 7 ζώνες μετά την αποσφαλμάτωση

A/A	1	2	3	4	5	6	7
1	0.0000	0.0000	0.0000	217.7200	0.0000	0.0000	221.1300
2	0.0000	0.0000	0.0000	242.4800	140.2000	0.0000	245.8900
3	0.0000	0.0000	0.0000	168.7700	140.2000	0.0000	0.0000
4	202.6900	227.3900	163.7600	0.0000	0.0000	227.3900	163.7600
5	0.0000	140.1600	140.1600	0.0000	0.0000	140.1600	163.7600
6	0.0000	0.0000	0.0000	242.4800	140.2000	0.0000	245.8900
7	221.1500	245.8500	0.0000	168.7700	221.1500	245.8500	0.0000

Ο έλεγχος του δικτύου και η απαλοιφή των σφαλμάτων τροποποίησαν τους τελικούς φόρτους και αύξησαν την ακρίβεια του δικτύου. Ο τελικός και περισσότερο ουσιώδης αντίκτυπος της αποσφαλμάτωσης προκύπτει συναρτήσει του μικρότερου αριθμού φορτιστών που χρειάστηκε να τοποθετηθούν καθώς και των χρημάτων που εξοικονομήθηκαν εξαιτίας αυτού. Επιγραμματικά, η αποσφαλμάτωση υπέδειξε την τοποθέτηση περίπου 280 με 366 λιγότερων φορτιστών σε σχέση με τις πρώιμες εκτιμήσεις πριν την υλοποίησή της. Χρηματικά, αυτή η διαφορά μεταφράζεται σε ένα ποσό μεταξύ των 11.2 έως των 14.6 εκατομμυρίων ευρώ. Όλο αυτό το ποσό εξοικονομήθηκε χάρη στην αποσφαλμάτωση, την επιτυχή ολοκλήρωση του ελέγχου και την απαλοιφή των χονδροειδών σφαλμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το κεφάλαιο αυτό αρχίζει με μία θεωρητική αναφορά στην Επιχειρησιακή Έρευνα και στο μαθηματικό πρότυπο του Γραμμικού Προγραμματισμού, το οποίο επιλέχθηκε για τη μαθηματική μοντελοποίηση των παράγωγων δεδομένων που προέκυψαν από το μοντέλο του δικτύου. Στη συνέχεια, περιγράφεται η διαδικασία συγκρότησης του μαθηματικού μοντέλου του προβλήματος και επεξηγείται η σημασία των μαθηματικών μεγεθών που εμπλέκονται στη δημιουργία του.

5.1. Στοιχεία από τη θεωρία του γραμμικού προγραμματισμού

Στα προηγούμενα κεφάλαια έχουν αναφερθεί και επεξηγηθεί έννοιες όπως τα προβλήματα χωροθέτησης εγκαταστάσεων, η βελτιστοποίηση, τα συστήματα μεταφορών και η μοντελοποίησή τους κ.α. Επιπλέον, έχουν παρουσιαστεί εκτεταμένα στοιχεία δεδομένων, ενώ έχουν περιγραφεί λεπτομερώς και όλες οι διεργασίες που πραγματοποιήθηκαν για την εξαγωγή νέων παράγωγων δεδομένων από αυτά, όπως είναι οι κυκλοφοριακοί φόρτοι στους οδικούς άξονες του δικτύου. Ωστόσο, έως τώρα, δεν έχει υπάρξει κάποια αναφορά γύρω από τον τρόπο με τον οποίο όλες αυτές οι πληροφορίες θα αξιοποιηθούν, προκειμένου να αποδώσουν τις θέσεις και τον βέλτιστο αριθμό των σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων που πρόκειται να τοποθετηθούν στο δίκτυο. η απάντηση σε αυτό το ερώτημα δίνεται μέσω της επιχειρησιακής έρευνας.

Η Επιχειρησιακή Έρευνα ή αλλιώς Εφαρμοσμένα Μαθηματικά, συνιστά έναν ευρύ επιστημονικό κλάδο, προσανατολισμένο γύρω από την επίλυση πρακτικών προβλημάτων του πραγματικού κόσμου. Ιστορικά χρονολογείται από τον 17ο αιώνα, έχοντας ως πρωτεργάτες τον Isaac Newton και τον Gottfried Wilhelm Leibniz. Τρεις αιώνες αργότερα, ο κλάδος αυτός γνώρισε ραγδαία ανάπτυξη με αφορμή τον 2ο Παγκόσμιο Πόλεμο, όπου τεχνικές της επιχειρησιακής έρευνας αξιοποιήθηκαν από τις συμμαχικές δυνάμεις για την εύρεση του βέλτιστου τρόπου ανεφοδιασμού με τρόφιμα και πυρομαχικά σε περιοχές που βρίσκονταν μακριά από τις βάσεις τους. Εκεί άλλωστε οφείλει και το όνομά της (από τις στρατιωτικές επιχειρήσεις). Σήμερα, μεθοδολογίες της επιχειρησιακής έρευνας έχουν υιοθετηθεί από φορείς τόσο του ιδιωτικού, όσο και του δημόσιου τομέα, κυρίως για προσομοιώσεις, εφαρμογές γραμμικού προγραμματισμού και στατιστικής.

Ο Γραμμικός Προγραμματισμός (Linear Programming) αποτελεί ένα γεγονός - σταθμό στην ιστορία της επιχειρησιακής έρευνας, καθώς η ανάπτυξή του δεν επηρέασε μόνο την εξέλιξη του κλάδου των εφαρμοσμένων μαθηματικών, αλλά και τον τρόπο με τον οποίο μελετώνται και προσεγγίζονται ποικίλες δραστηριότητες της καθημερινότητας. Για το λόγο αυτό αποτελεί και ένα χρήσιμο εργαλείο της επιστήμης λήψης αποφάσεων. Η λειτουργία του συνοψίζεται στην επίλυση προβλημάτων που στοχεύουν στη βέλτιστη κατανομή πόρων κάτω από περιορισμούς. Σε αυτή την κατηγορία ανήκει και το πρόβλημα που απασχολεί την παρούσα μελέτη, καθώς πρέπει να

αποφασιστεί ο αριθμός και τα βέλτιστα σημεία τοποθέτησης σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε ένα εκτεταμένο δίκτυο αυτοκινητοδρόμων.

Στις περιπτώσεις που επιλέγεται ο Γ.Π., η ποιότητα των αποτελεσμάτων που αποδίδει, συνεπώς και η ποιότητα των αποφάσεων που θα συντελέσει να ληφθούν, είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ακρίβεια της περιγραφής του εκάστοτε προβλήματος. Συνεπώς, η λεπτομερέστερη περιγραφή ενός πραγματικού προβλήματος και η επακριβής μαθηματική έκφραση των μεταβλητών, των περιορισμών και των μεταξύ τους σχέσεων, θα αποφέρει και τα βέλτιστα αποτελέσματα. Ένα σύνηθες πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού απαρτίζεται αρχικά από ένα σύνολο δραστηριοτήτων, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως μεταβλητές και η εύρεση των τιμών που τους αντιστοιχούν αποτελεί τον κύριο στόχο επίλυσης του προβλήματος. Παράλληλα, υπάρχει πάντοτε ένα σύνολο πόρων, οι οποίοι διατίθενται σε περιορισμένες ποσότητες. Η αξιοποίησή τους επιτρέπει την εκτέλεση των δραστηριοτήτων. Στη συνέχεια, τα δύο αυτά μεγέθη υπόκεινται σε ένα σύνολο περιορισμών τεχνολογικού ή θεσμικού χαρακτήρα, οι οποίοι οριοθετούν την κατανομή των πόρων και την εκτέλεση των δραστηριοτήτων. Τέλος, σε κάθε περίπτωση υπάρχει και ένα μέτρο z , υπεύθυνο για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας του συστήματος. Στο γραμμικό προγραμματισμό, όλες οι παράμετροι, οι συναρτήσεις και οι σχέσεις μεταξύ των μεγεθών που αναφέρθηκαν πρέπει να είναι γραμμικοί όροι.

Στην επόμενη ενότητα περιγράφεται η δημιουργία ενός μοντέλου γραμμικού προγραμματισμού, το οποίο θα ενσωματώσει όλα τα μεγέθη και τους περιορισμούς που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την επίλυση του προβλήματος χωροθέτησης σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε υπεραστικό δίκτυο.

5.2. Δημιουργία του μαθηματικού μοντέλου

Στην προηγούμενη ενότητα έγινε μία πρώτη αναφορά στα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού και αναφέρθηκαν τα στοιχεία τα οποία απαρτίζουν τα μοντέλα αυτά. Πρόκειται για τις δραστηριότητες/μεταβλητές, τους διαθέσιμους πόρους, τους εκάστοτε περιορισμούς και το μέτρο αξιολόγησης της αποδοτικότητας του συστήματος. Προκειμένου να επιτευχθεί η κατά το δυνατόν ακριβέστερη περιγραφή ενός προβλήματος, τα στοιχεία αυτά επαναδιατυπώνονται με

μαθηματικούς όρους. Οι δραστηριότητες πλέον καλούνται άγνωστες μεταβλητές και ο προσδιορισμός των τιμών τους συνεπάγεται την επίλυση του προβλήματος. Οι διαθέσιμοι πόροι και οι περιορισμοί εντάσσονται αμφότεροι στο φάσμα των περιορισμών, καθώς οι πρώτοι είναι περιορισμένοι. Άλλωστε, για την ορθότερη επίλυση είναι περισσότερο δόκιμο να δρουν περιοριστικά. Το μέτρο της αποδοτικότητας z συγκροτεί με τη σειρά του την αντικειμενική συνάρτηση, παράγοντας της οποίας είναι πάντοτε οι μεταβλητές.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού αποτελούνται από τις *άγνωστες μεταβλητές* (decision variables), την *αντικειμενική συνάρτηση* και τους *περιορισμούς* (constraints). Στόχος της ανάλυσης του γραμμικού προγραμματισμού είναι ο προσδιορισμός των άγνωστων μεταβλητών που ελαχιστοποιούν ή μεγιστοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση, ικανοποιώντας ταυτόχρονα και τους περιορισμούς. Όλες οι συναρτήσεις του προβλήματος (αντικειμενική συνάρτηση και περιορισμοί) πρέπει να είναι γραμμικές ως προς τις άγνωστες μεταβλητές και όλες οι μεταβλητές πρέπει να είναι μη αρνητικές.

Επαναφέροντας τώρα το ζήτημα της χωροθέτησης των σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, είναι αναγκαίο να ληφθούν αποφάσεις σχετικά με τον αριθμό των σταθμών που θα τοποθετηθούν, καθώς και για τις θέσεις τους. Επομένως, οι άγνωστες μεταβλητές (x_i) είναι οι σταθμοί φόρτισης που θα τοποθετηθούν σε κάθε σύνδεσμο.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στους στόχους της μελέτης, η τοποθέτηση των σταθμών φόρτισης επιδιώκει αφενός τη μεγιστοποίηση του επίπεδου εξυπηρέτησης του δικτύου και αφετέρου την ελαχιστοποίηση του κόστους εγκατάστασης υποδομών. Συνεπώς, ως αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται η μεγιστοποίηση του αριθμού των φορτιστών ανάλογα με τον φόρτο κάθε συνδέσμου ($\max(V_i x_i)$). Παράλληλα, το κόστος θα τεθεί ως περιορισμός, επιβάλλοντας το σύνολο των φορτιστών που θα τοποθετηθούν να μην υπερβαίνει τον προϋπολογισμό του έργου. Τέλος, πρέπει να καθοριστεί και ο χωρικός περιορισμός των θέσεων όπου θα τοποθετηθούν οι σταθμοί. Ο περιορισμός αυτός θα εισαχθεί ως ένα διάστημα (interval) ανά τα οποία θα πρέπει να τοποθετούνται φορτιστές κατά μήκος των συνδέσμων. Όλες οι μαθηματικές σχέσεις και οι περιορισμοί του μοντέλου παρουσιάζονται παρακάτω.

- Άγνωστες μεταβλητές : x_i
- Αντικειμενική συνάρτηση : $\max Z = \sum (V_i * x_i)$ (1)

- Περιορισμοί : $x_i \geq 0$, ακέραιοι

$$\frac{x_i}{L_{min}} \leq \frac{1}{L_i} , \text{ όπου το } L_{min} \text{ είναι το διάστημα τοποθέτησης και } L_i \text{ το μήκος κάθε συνδέσμου}$$

$$\sum(C * x_i) \leq B , \text{ όπου } C \text{ το κόστος κάθε φορτιστή και } B \text{ ο συνολικός Προϋπολογισμός του έργου}$$

Το πρόβλημα επιλύθηκε με τη βοήθεια του εργαλείου OpenSolver στο περιβάλλον του Microsoft Excel. Το συγκεκριμένο εργαλείο ειδικεύεται στην επίλυση περίπλοκων μαθηματικών μοντέλων με πολλές μεταβλητές. Η επίλυση του μοντέλου ολοκληρώθηκε αυτόματα μετά την εισαγωγή των μεταβλητών, της αντικειμενικής συνάρτησης, των περιορισμών και των λοιπών δεδομένων από τα αντίστοιχα κελιά τους.

Για την επίλυση του μοντέλου επιλέχθηκε η συγκρότηση δύο εναλλακτικών προσεγγίσεων (σεναρίων) με στόχο να βρεθεί η βέλτιστη επίλυση του προβλήματος, εξασφαλίζοντας τη μεγιστοποίηση του επιπέδου εξυπηρέτησης του δικτύου και ελαχιστοποιώντας το κόστος του έργου. Τα δύο εναλλακτικά σενάρια παρουσιάζονται και αξιολογούνται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται τα αποτελέσματα που αποδόθηκαν από δύο εναλλακτικές εφαρμογές του μαθηματικού μοντέλου, λαμβάνονται ορισμένες παραδοχές και διατυπώνονται δύο διαφορετικά σενάρια επίλυσης του προβλήματος. Έπειτα, τα σενάρια αυτά αξιολογούνται ποιοτικά, αλλά και ποσοτικά μέσω μίας Ανάλυσης Κόστους – Ωφελειών. Από αυτήν προκύπτει και η υπόδειξη του καταλληλότερου (βέλτιστου), το οποίο αποτελεί και τη λύση του προβλήματος χωροθέτησης σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο αυτοκινητοδρόμων των Δυτικών Βαλκανίων.

6.1. Διατύπωση σεναρίων

Η δημιουργία του μαθηματικού μοντέλου ακολουθήθηκε από τη συγκρότηση δύο εναλλακτικών προσεγγίσεων επίλυσής του. Οι προσεγγίσεις αυτές προέκυψαν ύστερα από την διαφορετική παραμετροποίηση των τιμών των περιορισμών του μοντέλου. Έτσι δημιουργήθηκαν δύο διαφορετικά σενάρια, καθένα από τα οποία αποτελεί μία ενδεχόμενη λύση του προβλήματος χωροθέτησης σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο αυτοκινητοδρόμων των Δυτικών Βαλκανίων. Επίσης, η έκβαση αυτή ενέταξε ουσιαστικά το παρόν πρόβλημα και στην κατηγορία των προβλημάτων λήψης αποφάσεων (decision – making problems), καθώς πλέον διατίθενται δύο ισοδύναμες εναλλακτικές από τις οποίες θα πρέπει να επιλεγεί η μία.

Ωστόσο, πριν διατυπωθούν τα σενάρια, είναι απαραίτητο να γίνουν κάποιες παραδοχές. Οι παραδοχές αυτές στοχεύουν στην απλοποίηση και επεξήγηση κάποιων πρακτικών ζητημάτων που αφορούν παραμέτρους της χρήσης και της λειτουργίας του δικτύου. Αναλυτικότερα :

- Όλοι οι σταθμοί επιτρέπουν την ταχεία φόρτιση των οχημάτων, η οποία διαρκεί κατά μέσο όρο 30 λεπτά.
- Το κόστος αγοράς και τοποθέτησης ενός σταθμού φόρτισης ανέρχεται στα 40,000€ .
- Ο προϋπολογισμός του έργου λαμβάνεται από τα κονδύλια της Ε.Ε. για το πρόγραμμα «Ασφαλείς και Βιώσιμες Μεταφορές στα Δυτικά Βαλκάνια». Το συνολικό ποσό αγγίζει τα 80 εκατομμύρια ευρώ, αλλά εκτιμάται πως για το παρόν εγχείρημα θα διατεθούν περίπου τα 25 από αυτά.
- Για τους δρόμους διπλής κατεύθυνσης, θεωρείται πως και τα δύο ρεύματα της κυκλοφορίας έχουν πρόσβαση σε σημεία φόρτισης.
- Κατά μήκος των συνδέσμων που έχουν χαρακτηριστεί ως συνδέσεις δεν θα τοποθετηθούν σταθμοί φόρτισης.
- Η απόσταση που καλύπτει ένα πλήρως φορτισμένο ηλεκτρικό όχημα είναι κατά μέσο όρο 400 χιλιόμετρα (km).
- Το σύστημα των οχημάτων ειδοποιεί πως υπάρχει ανάγκη για φόρτιση όταν η στάθμη της μπαταρίας πέσει στο 20%.

6.1.1. Σενάριο 1 – Κεντρικό δίκτυο φόρτισης

Το πρώτο σενάριο που προτάθηκε από το μαθηματικό μοντέλο ακολουθεί ένα περισσότερο συγκεντρωτικό πρότυπο. Πιο συγκεκριμένα, προτείνεται η δημιουργία κεντρικών σταθμών φόρτισης που θα εξυπηρετούν πλήθος οχημάτων ταυτόχρονα. Έτσι, προβλέπεται η κατασκευή 30 μεγάλων σταθμών φόρτισης, από τους οποίους, ο καθένας θα περιλαμβάνει 12 φορτιστές. Κάθε σταθμός φόρτισης θα απέχει από τους πλησιέστερους μία μέση απόσταση 50 χιλιομέτρων. Με βάση αυτό το πρότυπο, στο δίκτυο θα τοποθετηθούν συνολικά 360 φορτιστές, με το συνολικό κόστος κατασκευής του έργου να ανέρχεται στα 14,400,000 €.

Το σενάριο αυτό παρέχει τη δυνατότητα ανεφοδιασμού εστιάζοντας σε υπεραστικές μετακινήσεις στις οποίες δεν υπάρχει βιασύνη. Ευκαιρίες ανεφοδιασμού παρέχονται 6-8 φορές προτού εξαντληθεί μία μέση πλήρως φορτισμένη μπαταρία και 1-2 φορές αφότου ληφθεί ειδοποίηση για ανεφοδιασμό από το σύστημα του οχήματος. Ταυτόχρονα, η εμπειρία του ανεφοδιασμού αλλάζει, δημιουργώντας την ανάγκη για μεγαλύτερης διάρκειας στάσεις. Οι στάσεις αυτές θα περιλαμβάνουν τον χρόνο επαναφόρτισης του οχήματος, ο οποίος θα αυξηθεί από μερικά λεπτά σε μερικές δεκάδες λεπτά, καθώς και το χρόνο αναμονής για φόρτιση, στην περίπτωση που όλοι οι φορτιστές είναι κατειλημμένοι. Ωστόσο, υπάρχει η δυνατότητα μείωσης αυτού του συνολικού χρόνου αναμονής, καθώς δεν είναι απαραίτητο (αλλά ούτε και προτείνεται από τους κατασκευαστές μπαταριών) κάθε όχημα να επαναφορτίζεται στο 100%. Η επένδυση αυτή καθίσταται προτιμητέα αν η προτεραιότητα του έργου είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους, αλλά και η ταυτόχρονη ικανοποίηση της ζήτησης για ανεφοδιασμό. Επιγραμματικά, η ποιοτική αξιολόγησή της έχει ως εξής:

Πλεονεκτήματα:

- Δυνατότητα ανεφοδιασμού σε προσιτές αποστάσεις
- Χαμηλό κόστος κατασκευής
- Αναβάθμιση των χρήσεων γης γύρω από τα Κέντρα Φόρτισης

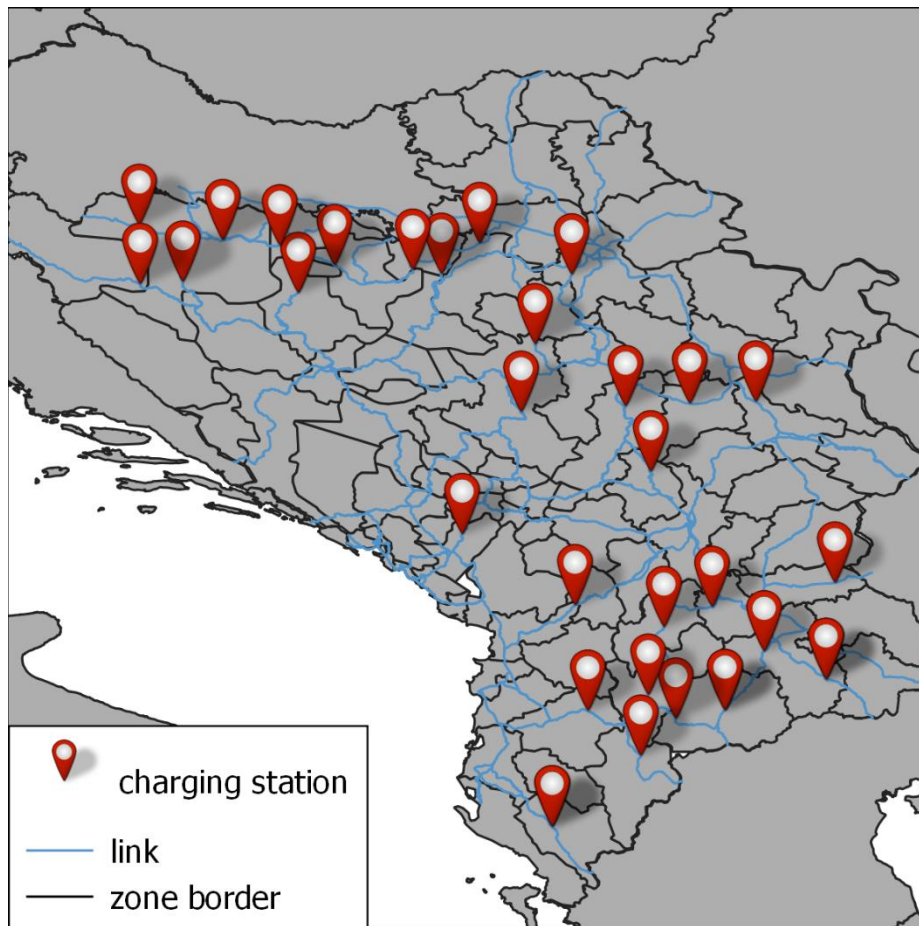
Μειονεκτήματα:

- Εξαιρετικά αυξημένη ζήτηση για ενέργεια σε συγκεκριμένα σημεία
- Η μαζική συγκέντρωση όλων των χρηστών του δικτύου σε περιορισμένες τοποθεσίες ενδέχεται να δημιουργήσει σειρές αναμονής και επιπλέον καθυστερήσεις στις μετακινήσεις

Τα χαρακτηριστικά του πρώτου σεναρίου συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα, ενώ στην εικόνα 6.1 που ακολουθεί, παρουσιάζεται μία ενδεικτική εικόνα της εφαρμογής του στο δίκτυο.

Πίνακας 6.1. Χαρακτηριστικά εφαρμογής σεναρίου 1

Αριθμός Κέντρων Φόρτισης	30
Αριθμός Φορτιστών	360
Απόσταση μεταξύ Κέντρων Φόρτισης	50 km
Κόστος Κατασκευής	14,400,000 €



Εικόνα 6.1. Εφαρμογή των αποτελεσμάτων του σεναρίου 1 στο δίκτυο

6.1.2. Σενάριο 2 – Αποκεντρωμένο δίκτυο φόρτισης

Σε αυτό το σενάριο, το χωρικό πρότυπο του προηγούμενου αντιστρέφεται και ακολουθείται μία αποκεντρωμένη προσέγγιση. Ειδικότερα, προτείνεται η τοποθέτηση μεμονωμένων φορτιστών, όπου κάθε φορτιστής θα συνιστά και έναν σταθμό φόρτισης. Έτσι, θα εξυπηρετείται ένα όχημα τη φορά, ενώ οι φορτιστές θα απέχουν μεταξύ τους μόλις 10 χιλιόμετρα. Σύμφωνα με αυτή την εκδοχή, το σύνολο των φορτιστών που θα τοποθετηθούν στο δίκτυο αγγίζει τους 426 και το συνολικό κόστος κατασκευής του έργου ανέρχεται στα 17,040,000 €.

Σε αυτό το σενάριο επιδιώκεται η δραστική μείωση των καθυστερήσεων για ανεφοδιασμό κατά τη διάρκεια του ταξιδιού ταξιδιού. Ευκαιρίες για φόρτιση δίνονται πλέον 37-40 φορές προτού εξαντληθεί μία μέση πλήρως φορτισμένη μπαταρία και 6-8 φορές μετά την εμφάνιση ειδοποίησης για φόρτιση, καθώς πλέον συναντάται ένας φορτιστής κάθε 10 χιλιόμετρα. Στην περίπτωση ενός κατελημμένου φορτιστή, ο χρήστης του δικτύου έχει την επιλογή να μεταβεί στον επόμενο, έως ότου βρει κάποιον διαθέσιμο. Ο χρήστης θα τεθεί σε αναμονή μόνο στην περίπτωση που η μπαταρία του πρόκειται αδειάσει πριν φτάσει σε επόμενο φορτιστή. Οι πιθανότητες για ένα τέτοιο φαινόμενο είναι εξαιρετικά μειωμένες, γι' αυτό είναι μειωμένο και το ενδεχόμενο αναμονής για φόρτιση. Έτσι, ο συνολικός χρόνος καθυστέρησης σε ένα υπεραστικό ταξίδι, περιορίζεται σχεδόν αποκλειστικά στο χρόνο επαναφόρτισης του οχήματος. Το σενάριο αυτό, αν και πιο δαπανηρό, επιτυγχάνει την αποτελεσματική μεγιστοποίηση του επιπέδου εξυπηρέτησης του δικτύου. Τα ποιοτικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα αυτού του σεναρίου παρουσιάζονται ως εξής:

Πλεονεκτήματα:

- Πολύ συχνή δυνατότητα ανεφοδιασμού
- Μεγαλύτερος αριθμός φορτιστών
- Ομοιόμορφη κατανομή της ζήτησης για ενέργεια
- Μειωμένη εμφάνιση φαινομένων αναμονής και αποφυγή πρόσθετων καθυστερήσεων
- Εγκατάσταση νέων υποδομών χωρίς εκτεταμένες παρεμβάσεις στο υφιστάμενο οδικό δίκτυο

Μειονεκτήματα:

- Υψηλότερο κόστος κατασκευής

Τα χαρακτηριστικά του δεύτερου σεναρίου συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα, ενώ στην εικόνα 6.2 που ακολουθεί, παρουσιάζεται μία ενδεικτική εικόνα της εφαρμογής του στο δίκτυο.

Πίνακας 6.2. Χαρακτηριστικά εφαρμογής σεναρίου 2

Αριθμός Φορτιστών	426
Απόσταση μεταξύ Φορτιστών	10 km
Κόστος Κατασκευής	17,040,000 €



Εικόνα 6.2. Εφαρμογή των αποτελεσμάτων του σεναρίου 2 στο δίκτυο

6.2. Αξιολόγηση Σεναρίων

Τα δύο σενάρια που αναπτύχθηκαν, αποσκοπούν να προσομοιάσουν την πραγματικότητα που θα βιώνει ένας μελλοντικός χρήστης του δικτύου, τις ανάγκες που θα έχει, αλλά και την επάρκεια των υποδομών να τις καλύπτουν. Όπως ισχύει και σήμερα, έτσι και μέσα στα επόμενα χρόνια, οι βασικές ανάγκες κάθε μετακινούμενου θα είναι οι όσο το δυνατόν γρηγορότερες μετακινήσεις με τις χαμηλότερες δυνατές οικονομικές επιβαρύνσεις. Με την ηλεκτροκίνηση, εξ' ορισμού, η πρώτη από αυτές (χρόνος ταξιδιού) πρόκειται να αυξηθεί, καθώς η φόρτιση ενός οχήματος δεν είναι το ίδιο σύντομη υπόθεση όσο είναι ο ανεφοδιασμός του με υγρά καύσιμα. Από την άλλη πλευρά, το υψηλός κόστος των καυσίμων θα πάψει να απασχολεί, διότι η ηλεκτρική ενέργεια είναι συντριπτικά οικονομικότερη. Ωστόσο, στις έγνοιες αυτές πρόκειται να προστεθεί και το ίσως μεγαλύτερο μειονέκτημα της ηλεκτροκίνησης: το άγχος για την εύρεση φορτιστή. Τα σενάρια που προηγήθηκαν αποτελούν απόπειρες εξάλειψης αυτού του άγχους για το παρόν δίκτυο.

Μία πρώτη, ποιοτική αξιολόγηση των δύο σεναρίων και των δυνατοτήτων μπορεί να γίνει μέσα από τη σύγκριση των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων τους, τα οποία παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Ωστόσο, σε αυτή την ενότητα αξιολογούνται και συγκρίνονται οι δυνατότητες κάθε σεναρίου από την επενδυτική σκοπιά, δεδομένου ότι αμφότερα περιγράφουν ένα δημόσιο έργο μεγάλης κλίμακας, το οποίο έχει ως σκοπό τη μεγιστοποίηση του δημόσιου οφέλους. Για το λόγο αυτό, η αξιολόγηση των σεναρίων θα πραγματοποιηθεί με μία Ανάλυση Κόστους – Ωφελειών, η οποία θα αξιολογήσει τα σενάρια ως επενδύσεις και θα υποδείξει το βέλτιστο εκ των δύο. Το σενάριο που θα καταδειχθεί από την Ανάλυση Κόστους – Ωφελειών είναι και αυτό που θα προταθεί ως η οριστική επίλυση της μελέτης.

6.2.1. Στοιχεία από την Ανάλυση Κόστους - Ωφελειών

Η Ανάλυση Κόστους – Ωφελειών αποτελεί μία διαδοσμένη τεχνική οικονομικής εκτίμησης, η οποία συναντάται συχνά σε ζητήματα λήψης αποφάσεων σχετικά με υποδομές. Ειδικότερα, η χρήση της εμπίπτει στη σύγκριση μεταξύ των αναμενόμενων οφελών και των σχετικών μεγεθών κόστους που χαρακτηρίζουν μία επένδυση. Η κύρια αρχή της λειτουργίας της

είναι ο προσδιορισμός της εναλλακτικής λύσης που θα αποφέρει το μέγιστο καθαρό όφελος, όταν από τα συνολικά οφέλη αφαιρεθούν τα συνολικά κόστη. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται εύλογα και το γιατί αποτελεί και ένα από τα πιο χρήσιμα εργαλεία της επιστήμης λήψης αποφάσεων.

Αποσκοπώντας στην υλοποίηση μίας ολοκληρωμένης περιγραφής για την Ανάλυση Κόστους – Ωφελειών που ακολουθεί, καθίσταται αναγκαίο να επεξηγηθεί ένα σύνολο μεγεθών τα οποία χρησιμοποιούνται στην ανάλυση. Τα μεγέθη αυτά είναι:

- Το **έτος – βάση**, το οποίο αποτελεί το κοινό χρονικό σημείο αναφοράς όλων των στοιχείων του προβλήματος.
- Το **επιτόκιο αναγωγής**, το οποίο ισούται με την ποσοστιαία ετήσια αύξηση της αξίας του χρήματος.
- Η **υπολειμματική αξία**, η οποία είναι η αξία του έργου στο τέλος της ζωής του (δηλαδή της περιόδου εκμετάλλευσής του).
- Το **κόστος κατασκευής** του έργου, το οποίο είναι η αξία του έργου στο έτος – βάση.
- Το **κόστος συντήρησης** του έργου, το οποίο περιλαμβάνει το σύνολο όλων των εργασιών συντήρησης που τελούνται στο έργο κατά τη διάρκεια της περιόδου εκμετάλλευσής του.
- Τα **ετήσια έσοδα** του έργου, τα οποία αποτελούν τις ταμειακές εισροές που προκύπτουν για τους επενδυτές από το έργο κατά της διάρκεια της περιόδου εκμετάλλευσής του.
- Η **ετήσια αύξηση κερδών**, η οποία εκφράζει την ποσοστιαία άνοδο που επέρχεται κάθε χρόνο στα έσοδα που αποφέρει το έργο.
- Η **Καθαρή Παρούσα Αξία**, η οποία αποτελεί και το κριτήριο αξιολόγησης των επενδύσεων της παρούσας μελέτης. Πιο συγκεκριμένα, η Κ.Π.Α προσμετρά τα καθαρά οφέλη μίας επένδυσης, λαμβάνοντας υπόψη και τη διαχρονική μεταβολή της αξίας του χρήματος. Μαθηματικά εκφράζεται ως ο λόγος της διαφοράς των συνολικών εξόδων από τα συνολικά έσοδα προς το επιτόκιο αναγωγής για την περίοδο εκμετάλλευσής του έργου.

6.2.2. Ανάλυση Κόστους – Ωφελειών

Η κατασκευή του έργου αναμένεται να ξεκινήσει και να ολοκληρωθεί μέσα στο 2025, ενώ η περίοδος λειτουργίας του έργου έχει δρομολογηθεί να εκκινήσει από 1/1/2026. Ως έτος – βάση

ορίζεται το έτος συγγραφής της παρούσας μελέτης, δηλαδή το 2023. Ο περίοδος εκμετάλλευσης του έργου θα διαρκέσει για 10 χρόνια μετά την εκκίνηση της λειτουργίας του, έως το 2035, ένα έτος - σταθμό για τους ευρωπαϊκούς στόχους. Έργα συντήρησης του δικτύου θα συμβαίνουν κάθε 5 έτη από την έναρξη της λειτουργίας του, ενώ τυχόν εργασίες επέκτασης του δικτύου δεν συμπεριλαμβάνονται σε αυτά τα έξοδα. Σύμφωνα με τις τελευταίες εκτιμήσεις, το επιτόκιο αναγωγής θα είναι ίσο με 2.3% για το 2024, 2.1% για το 2025 και 2% για τα υπόλοιπα έτη που περικλείονται στη μελέτη. Στο πέρας της ζωής του έργου, η υπολειμματική αξία του θα είναι ίση με το 5% της αξίας του στο έτος κατασκευής.

Σε ό,τι αφορά τη λειτουργία του δικτύου, κάθε φορτιστής θα πραγματοποιεί καθημερινά 38 φορτίσεις (2 ανά ώρα από τις 6:00 έως τις 22:00 και άλλες από 6 από τις 22:00 έως τις 6:00). Το κόστος κάθε φόρτισης στο έτος – βάση είναι 28 €. Οι εργασίες συντήρησης για κάθε φορτιστή στο βάθος της πενταετίας είναι 5000 € για το έτος - βάση.

Λύση

Στην Ανάλυση Κόστους – Ωφελειών μεταξύ των σεναρίων, ο κύριος ρυθμιστικός παράγοντας είναι ο αριθμός των φορτιστών που επιλέγεται να εγκατασταθούν. Όλα τα μεγέθη που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση, πλην του κόστους της φόρτισης, εξαρτώνται από τον αριθμό των φορτιστών. Συνεπώς, θα υπολογιστούν ξεχωριστά για το κάθε σενάριο. Ωστόσο, το κόστος της φόρτισης που είναι κοινό υπολογίζεται και ανάγεται στο έτος εκκίνησης της λειτουργίας του έργου σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις. Το επιτόκιο αναγωγής είναι διαφορετικό για το 2024 και το 2025, ενώ από το 2026 και μετά σταθεροποιείται. Για το λόγο αυτό, κάθε μέγεθος θα πρέπει να υποστεί δύο μεμονωμένες αναγωγές, προτού ξεκινήσει η αναγωγή του στα χρόνια της περιόδου εκμετάλλευσης του έργου. Η σχέση σύμφωνα με την οποία πραγματοποιείται η αναγωγή ενός μεγέθους στη μελλοντική του αξία είναι:

$$\text{Αναγόμενο Μέγεθος} = \text{Αρχικό Μέγεθος} * (1 + i)^t \quad (6.1)$$

όπου: i είναι το επιτόκιο αναγωγής

t είναι η χρονική περίοδος ανατοκισμού

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το κόστος της φόρτισης ανάγεται ως εξής:

$$\text{Ανηγμένη Τιμή Φόρτισης (2024)} = 28 * (1 + 0.023)^1 = 28.6 \text{ €}$$

$$\text{Ανηγμένη Τιμή Φόρτισης (2025)} = 28.6 * (1 + 0.021)^1 = 29.2 \text{ €}$$

$$\text{Ανηγμένη Τιμή Φόρτισης (2026)} = 29.2 * (1 + 0.02)^1 = 29.8 \text{ €}$$

Για το Σενάριο 1:

Αντίστοιχα ανάγονται και όλα τα υπόλοιπα μεγέθη:

$$\text{Κόστος Κατασκευής (2023)} = 14,400,000 \text{ €}$$

$$\text{Κόστος Κατασκευής (2024)} = 14,400,000 * (1 + 0.023)^1 = 14,731,200 \text{ €}$$

$$\text{Κόστος Κατασκευής (2025)} = 14,731,200 * (1 + 0.021)^1 = 15,040,555.2 \text{ €}$$

$$\text{Υπολειμματική Αξία} = 0.05 * 15,040,555.2 = 752,027.8 \text{ €}$$

$$\text{Ετήσια Έσοδα (2026)} = 38 * 360 * 365 * 29.8 = 148,949,325.4 \text{ €}$$

$$\text{Κόστος Συντήρησης (2023)} = 360 * 5000 = 1,800,000 \text{ €}$$

$$\text{Κόστος Συντήρησης (2024)} = 1,800,000 * (1 + 0.023)^1 = 1,841,400 \text{ €}$$

$$\text{Κόστος Συντήρησης (2025)} = 1,841,400 * (1 + 0.021)^1 = 1,880,069.4 \text{ €}$$

$$\text{Κόστος Συντήρησης (2030)} = 1,880,069.4 * (1 + 0.02)^5 = 2,075,748.5 \text{ €}$$

$$\text{Κόστος Συντήρησης (2035)} = 1,880,069.4 * (1 + 0.02)^{10} = 2,291,794.1 \text{ €}$$

Στον πίνακα 6.3 που ακολουθεί έχουν συγκεντρωθεί οι τιμές όλων των εσόδων και των εξόδων που πραγματοποιήθηκαν κατά την περίοδο εκμετάλλευσης του έργου, ενώ στα έσοδα έχει συμπεριληφθεί και η ετήσια αύξησή τους κατά 10%. Στις τελευταίες γραμμές του πίνακα υπολογίζονται τα συνολικά έσοδα και έξοδα καθώς και η Καθαρή Παρούσα Αξία του έργου.

Πίνακας 6.3. Υπολογισμός της Κ.Π.Α. του σεναρίου 1 για την περίοδο εκμετάλλευσης του έργου

Έτος	Κόστη	Έξοδα	Έσοδα	Έσοδα - Κόστη
2023	-	-	-	-
2024	-	-	-	-
2025	Κατασκευή	15,040,555.2	-	-15,040,555.2
2026		-	148,949,325.4	133,908,770.2
2027		-	166,823,244.5	300,732,014.7
2028		-	171,649,202.6	472,381,217.4
2029		-	175,231,136	647,612,353.4
2030	Συντήρηση	2,075,748.5	178,750,653.7	824,287,258.6
2031		-	182,327,156.2	1,006,614,415
2032		-	185,973,848.3	1,192,588,263
2033		-	189,693,340.2	1,382,281,603
2034		-	193,487,208.5	1,575,768,812
2035	Συντήρηση	2,291,794.1	197,356,952.8	1,770,833,970
Σύνολο		19,408,097.8	1,790,242,068	1,770,833,970
Υπ. Αξία	752,027.8			
Κ.Π.Α.	1,452,700,637			

Από τον παραπάνω πίνακα προέκυψε ότι η Κ.Π.Α. = 1,452,700,637 €

Για το σενάριο 2:

Ακολουθούν οι απαραίτητες αναγωγές:

Κόστος Κατασκευής (2023) = 17,040,000 €

Κόστος Κατασκευής (2024) = 17,040,000 * (1 + 0.023)¹ = 17,431,920 €

Κόστος Κατασκευής (2025) = 17,431,920 * (1 + 0.021)¹ = 17,797,990.3 €

Υπολειμματική Αξία = 0.05 * 17,797,990.3 = 889,899.5 €

Ετήσια Έσοδα (2026) = 38 * 426 * 365 * 29.8 = 176,256,701.8 €

Κόστος Συντήρησης (2023) = 426 * 5000 = 2,130,000 €

$$\text{Κόστος Συντήρησης (2024)} = 2,130,000 * (1 + 0.023)^1 = 2,178,990 \text{ €}$$

$$\text{Κόστος Συντήρησης (2025)} = 2,178,990 * (1 + 0.021)^1 = 2,224,749 \text{ €}$$

$$\text{Κόστος Συντήρησης (2030)} = 2,224,749 * (1 + 0.02)^5 = 2,456,302.4 \text{ €}$$

$$\text{Κόστος Συντήρησης (2035)} = 2,224,749 * (1 + 0.02)^{10} = 2,711,956.4 \text{ €}$$

Στον πίνακα 6.4 που ακολουθεί έχουν συγκεντρωθεί οι τιμές όλων των εσόδων και των εξόδων που πραγματοποιήθηκαν κατά την περίοδο εκμετάλλευσης του έργου, ενώ στα έσοδα έχει συμπεριληφθεί και η ετήσια αύξησή τους κατά 10%. Στις τελευταίες γραμμές του πίνακα υπολογίζονται τα συνολικά έσοδα και έξοδα καθώς και η Καθαρή Παρούσα Αξία του έργου.

Πίνακας 6.4. Υπολογισμός της Κ.Π.Α. του σεναρίου 2 για την περίοδο εκμετάλλευσης του έργου

Έτος	Κόστη	Έξοδα	Έσοδα	Έσοδα - Κόστη
2023	-	-	-	-
2024	-	-	-	-
2025	Κατασκευή	17,797,990.3	-	-17,797,990.3
2026		-	176,256,701.8	158,458,711.5
2027		-	197,407,506	355866217.4
2028		-	203,118,223.1	558,984,440.6
2029		-	207,356,844.3	766,341,284.9
2030	Συντήρηση	2,456,302.4	211,521,606.8	975,406,589.3
2031		-	215,753,801.6	1,191,160,390.8
2032		-	220,069,053.8	1,411,229,444.7
2033		-	224,470,452.5	1,635,699,897.2
2034		-	228,959,863.4	1,864,659,760.6
2035	Συντήρηση	2,711,956.4	233,539,060.8	2,095,486,865
Σύνολο		22,966,249.1	2,118,453,114.1	2,095,486,865
Υπ. Αξία	889899.5			
Κ.Π.Α.	1,719,029,087			

Από τον παραπάνω πίνακα προέκυψε ότι η Κ.Π.Α. = 1,719,029,087 €

Συμπέρασμα

Στην Ανάλυση Κόστους – Ωφελειών που πραγματοποιήθηκε, ως κριτήριο αξιολόγησης των σεναρίων χρησιμοποιήθηκε η Καθαρή Παρούσα Αξία. Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, πρέπει να επιλεγεί το η επένδυση με τη μεγαλύτερη τιμή Κ.Π.Α. Η επένδυση αυτή είναι το **σενάριο 2**.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΣΥΝΟΨΗ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί την κατακλείδα της Διπλωματικής Εργασίας. Πραγματοποιείται μία συνολική ανασκόπηση του περιεχομένου της μελέτης και διατυπώνονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτήν. Καταληκτικά, παρατίθενται ενδεικτικά και οι προοπτικές μελλοντικής εμβάθυνσής της.

7.1. Ανασκόπηση της Διπλωματικής Εργασίας

Το αντικείμενο που απασχολεί την παρούσα Διπλωματική Εργασία είναι η βέλτιστη χωροθέτηση σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο αυτοκινητοδρόμων των Δυτικών Βαλκανίων ούτως ώστε να καλύπτεται επαρκώς η ζήτηση (κυκλοφοριακοί φόρτοι). Για την επίτευξη του στόχου αυτού προτάθηκε η δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου βελτιστοποίησης, το οποίο θα είναι σε θέση να ενσωματώσει παράγοντες και περιορισμούς του πραγματικού κόσμου, οι οποίοι επηρεάζουν το πρόβλημα, και συνεπώς να αποδώσει ρεαλιστικές λύσεις.

Δεδομένου ότι η ηλεκτροκίνηση αποτελεί μία σχετικά νεοσύστατη έννοια με ολοένα και αυξανόμενη δημοτικότητα, κρίθηκε αναγκαία μία εννοιολογική εισαγωγή στα θέματα που την αφορούν, στην ιστορική πορεία της και στη θεσμική εξέλιξή της. Κατόπιν, έγινε μία αναφορά στη φύση του προβλήματος που αντιμετωπίζεται και του θεωρητικού υποβάθρου που το συνοδεύει. Πιο συγκεκριμένα, το εν λόγω πρόβλημα ανήκει στην κατηγορία των προβλημάτων χωροθέτησης εγκαταστάσεων. Για την επίλυση αυτής της κατηγορίας προβλημάτων, συνήθως επιστρατεύονται μαθηματικά μοντέλα, των οποίων οι προσεγγίσεις ποικίλουν ανάλογα με την ακρίβεια και τις λοιπές προδιαγραφές που θα πρέπει να χαρακτηρίζουν τις λύσεις του.

Προκειμένου να επιλυθεί ένα πρόβλημα, πρέπει να είναι διαθέσιμο ένα σύνολο δεδομένων από τα οποία θα αντληθούν πληροφορίες για την υλοποίηση της μεθοδολογίας επίλυσής του. Η χωροθέτηση σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε υπεραστικό δίκτυο είναι ένα φύσει συγκοινωνιακό πρόβλημα. Για το λόγο αυτό, τα αρχικά του δεδομένα αναφέρονται σε συγκοινωνιακά μεγέθη, τα οποία περιγράφουν το υπό μελέτη δίκτυο μεταφορών. Από αυτά τα δεδομένα θα προκύψουν νέα, παράγωγα, τα οποία έπειτα θα εισαχθούν στο μαθηματικό μοντέλο ώστε και αυτό με τη σειρά του να αποδώσει λύσεις στο πρόβλημα. Το χάσμα μεταξύ των αρχικών και των παράγωγων δεδομένων καλύπτεται από το λογισμικό συγκοινωνιακής μοντελοποίησης, γνωστό ως *Aequilibrae*.

Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα του *Aequilibrae* εισάγονται στο μαθηματικό μοντέλο και μαζί με τους υπόλοιπους περιορισμούς που επιδρούν στο πρόβλημα προκύπτει ένα σύνολο λύσεων. Από τις λύσεις αυτές πρέπει να επιλεγθεί η καταλληλότερη για το σκοπό του έργου. Για το λόγο αυτό, οι λύσεις κατηγοριοποιούνται σε δύο εναλλακτικά σενάρια, από τα οποία επιλέγεται το βέλτιστο σύμφωνα με οικονομοτεχνικά κριτήρια.

Ανατρέχοντας στη δομή των κεφαλαίων, τα πρώτα δύο περιλαμβάνουν κυρίως θεωρητικές και εννοιολογικές αναφορές για το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται και για την ηλεκτροκίνηση γενικότερα. Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα δεδομένα του προβλήματος και το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο που τα συνοδεύει ώστε να είναι απολύτως κατανοητά. Στη συνέχεια, οι διαδικασίες της συγκοινωνιακής και μαθηματικής μοντελοποίησης περιγράφονται στα κεφάλαια 4 και 5 αντίστοιχα, ενώ συγχρόνως παρέχεται και όλο το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο για την επεξήγησή τους. Κλείνοντας, στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα σενάρια των λύσεων, οι παραδοχές που τα συνοδεύουν, καθώς και όλοι οι ποιοτικοί και ποσοτικοί παράγοντες που επηρεάζουν την αιτιολογημένη επιλογή ενός εκ των δύο.

7.2. Αποτίμηση της μελέτης

Η ηλεκτροκίνηση αποτελεί μία διαρκώς αναπτυσσόμενη τεχνολογία με σημαντικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Σε διεθνές επίπεδο χαίρει ολόενα και αυξανόμενης αποδοχής, ενώ συνιστά και ένα από τα κομβικά κεφάλαια στην ατζέντα βιωσιμότητας της Ε.Ε και άλλων αναπτυγμένων χωρών ανά τον κόσμο. Για αυτούς και για άλλους ακόμα λόγους, η τεχνολογία αυτή μπορεί να χαρακτηριστεί ως το μέλλον των μεταφορών.

Στα Δυτικά Βαλκάνια, από την προηγούμενη κιάλας δεκαετία, λαμβάνονται πολλές πρωτοβουλίες που στοχεύουν στην αναβάθμισή τους. Οι πρωτοβουλίες αυτές αφορούν πρωτίστως τον κλάδο των μεταφορών και της ενέργειας, την κλιματική δράση, την ψηφιοποίηση και τον ιδιωτικό τομέα. Στον αγώνα της εκσυγχρόνισης των χωρών αυτών πρωτοστατεί το WBIF και μέσω αυτού η Ε.Ε. Τα κονδύλια που αφορούν μόνο τον τομέα των μεταφορών ξεπερνούν το 1 δισεκατομμύριο ευρώ. Η χρηματοδότηση αυτή, σε συνδυασμό με την ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης, εκτιμάται ότι μπορεί να γεφυρώσει το χάσμα των υποδομών μεταξύ των χώρων των Δυτικών Βαλκανίων και των άλλων Ευρωπαϊκών κρατών - μελών.

Το ζήτημα της στρατηγικής χωροθέτησης σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερη πολυπλοκότητα, αλλά εγκυμονεί και την εξέλιξη του κλάδου. Η παρούσα μελέτη, στηριζόμενη στις βασικές αρχές του «μοντέλου των 4 βημάτων» και της επιχειρησιακής έρευνας, παρείχε μία εμπεριστατωμένη προσέγγιση του προβλήματος.

Αρχικά, συγκεντρώθηκε ένα σύνολο εκτεταμένων πληροφοριών για τη λειτουργία ενός δικτύου αυτοκινητοδρόμων που εκτείνεται σε έξι χώρες και στη συνέχεια το δίκτυο αυτό προσομοιάστηκε μέσω του *Aequilibrae*. Στη συνέχεια, αξιοποιώντας το μαθηματικό πρότυπο του γραμμικού προγραμματισμού, επιτεύχθηκε η επίλυση ενός μοντέλου το οποίο μπορούσε να αποδώσει το βέλτιστο αριθμό φορτιστών που θα τοποθετούνταν στο δίκτυο. Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη χωρικά και οικονομικά κριτήρια, προέκυψαν δύο εναλλακτικά σενάρια, των οποίων η εφαρμογή συνεπάγεται τη λειτουργία του δικτύου μόνο με ηλεκτροκίνητα οχήματα. Από τα σενάρια αυτά επιλέχθηκε αυτό που θεωρήθηκε ως το καταλληλότερο βάσει επενδυτικών κριτηρίων.

Καθένα από τα σενάρια που προτάθηκαν αποτελεί μία πιθανή εικόνα των αυτοκινητοδρόμων του μέλλοντος. Παρόλο που αυτή η μελέτη τα επιβεβαιώνει ως εφικτά, η υλοποίηση του καθενός ενδέχεται να συνοδεύεται κι από άλλες, πρόσθετες εργασίες (π.χ. στο δίκτυο παροχής ενέργειας ή στην οικοδόμηση κεντρικών σταθμών), οι οποίες ξεφεύγουν από το αντικείμενο αυτής της εργασίας. Ωστόσο, φαίνεται ότι συνολικά, η στελέχωση των σύγχρονων αυτοκινητοδρόμων με επαρκή αριθμό φορτιστών αποτελεί ένα έργο χωρίς επεμβάσεις μεγάλης κλίμακας, το οποίο όμως πρόκειται να εκσυγχρονίσει κάθε οδικό δίκτυο στο οποίο θα εφαρμοστεί, ενώ παράλληλα θα το εναρμονίσει με μία καλπάζουσα και περιβαλλοντικά βιώσιμη τεχνολογία.

Οι μελλοντικές μελέτες αναμένεται να αυξήσουν την πολυπλοκότητα και το πλήθος των παραμέτρων που θα λαμβάνουν υπόψη για την επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος. Για παράδειγμα, μέσα στα επόμενα χρόνια θα διατίθενται αναλυτικά δεδομένα για τις οικονομικές επιβαρύνσεις των οδηγών ηλεκτρικών οχημάτων, θα έχουν κατασκευαστεί νέοι οδικοί άξονες, τα βαριά οχήματα θα μπορούν να συμπεριληφθούν σε μοντέλα κ.α. Ωστόσο, σε κάθε περίπτωση, η παρούσα μελέτη θα είναι ικανή να αποτελέσει τη βάση για μελλοντικές λεπτομερέστερες έρευνες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ahn, Y., & Yeo, H. (2015). An Analytical Planning Model to Estimate the Optimal Density of Charging Stations for Electric Vehicles. *PLOS ONE*, 10(11), e0141307. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0141307>
- An electrifying Iowan: William Morrison, pioneer of battery technology and automobiles* -. (n.d.). Retrieved September 10, 2023, from <https://iowahistoryjournal.com/an-electrifying-iowan/>
- Are electric vehicles definitely better for the climate than gas-powered cars?* (n.d.). MIT Climate Portal. Retrieved September 10, 2023, from <https://climate.mit.edu/ask-mit/are-electric-vehicles-definitely-better-climate-gas-powered-cars>
- Bai, X., Chin, K.-S., & Zhou, Z. (2019). A bi-objective model for location planning of electric vehicle charging stations with GPS trajectory data. *Computers & Industrial Engineering*, 128, 591–604. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.01.008>
- Baouche, F., Billot, R., Trigui, R., & El Faouzi, N.-E. (2014). Efficient Allocation of Electric Vehicles Charging Stations: Optimization Model and Application to a Dense Urban Network. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 6(3), 33–43. <https://doi.org/10.1109/MITS.2014.2324023>
- Bartlett, W., Bonomi, M., & Uvalic, M. (n.d.). *The Economic and Investment Plan for the Western Balkans: Assessing the possible economic, social and environmental impact of the proposed Flagship projects*.

- Bouguerra, S., & Bhar Layeb, S. (2019). Determining optimal deployment of electric vehicles charging stations: Case of Tunis City, Tunisia. *Case Studies on Transport Policy*, 7(3), 628–642. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2019.06.003>
- Boyles, S. D., Lownes, N. E., & Unnikrishnan, A. (n.d.). *Transportation Network Analysis*.
- Campbell, J. F. (1993). Continuous and discrete demand hub location problems. *Transportation Research Part B: Methodological*, 27(6), 473–482. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(93\)90018-6](https://doi.org/10.1016/0191-2615(93)90018-6)
- Carrington, D., & editor, D. C. E. (2021, January 19). Electric car batteries with five-minute charging times produced. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/environment/2021/jan/19/electric-car-batteries-race-ahead-with-five-minute-charging-times>
- Efthymiou, D., Chrysostomou, K., Morfoulaki, M., & Aifantopoulou, G. (2017). Electric vehicles charging infrastructure location: A genetic algorithm approach. *European Transport Research Review*, 9(2), 27. <https://doi.org/10.1007/s12544-017-0239-7>
- Electric Cars to Reach Price Parity by 2025. (2017, June 23). *BloombergNEF*. <https://about.bnef.com/blog/electric-cars-reach-price-parity-2025/>
- EV Batteries Almost 90% Cheaper Today Versus 2008, DOE Estimates*. (n.d.). InsideEVs. Retrieved September 10, 2023, from <https://insideevs.com/news/630407/ev-batteries-90-percent-cheaper-2022/>
- EV Range: Everything You Need to Know*. (2022, August 10). Car and Driver. <https://www.caranddriver.com/shopping-advice/a32603216/ev-range-explained/>
- Fredriksson, H., Dahl, M., & Holmgren, J. (2019). Optimal placement of Charging Stations for Electric Vehicles in large-scale Transportation Networks. *Procedia Computer Science*, 160, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.09.446>

Global Electric Vehicle Outlook 2022. (2022).

Hanabusa, H., & Horiguchi, R. (2011). A Study of the Analytical Method for the Location Planning of Charging Stations for Electric Vehicles. In A. König, A. Dengel, K. Hinkelmann, K. Kise, R. J. Howlett, & L. C. Jain (Eds.), *Knowledge-Based and Intelligent Information and Engineering Systems* (Vol. 6883, pp. 596–605). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23854-3_63

Hate traffic? Learn about the hidden benefit. (n.d.). Retrieved September 10, 2023, from <https://www.recurrentauto.com/research/think-you-hate-traffic-learn-about-the-hidden-benefit-of-all-that-stopping>

He, S. Y., Kuo, Y.-H., & Sun, K. K. (2022). The spatial planning of public electric vehicle charging infrastructure in a high-density city using a contextualised location-allocation model. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 160, 21–44. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2022.02.012>

History of the electric car | EVBox. (n.d.). Retrieved September 10, 2023, from <https://blog.evbox.com/electric-cars-history>

How is driving an EV different from driving a regular car? (n.d.). Retrieved September 10, 2023, from <https://www.recurrentauto.com/research/how-is-driving-an-ev-different-from-driving-a-regular-car>

ICE and EVs: Price point perspective. (n.d.). Faistgroup.Com. Retrieved September 10, 2023, from <http://www.faistgroup.com/news/ice-evs-price-point-perspective/>

International Energy Agency. (2023). *Global EV Outlook 2023: Catching up with Climate Ambitions*. OECD. <https://doi.org/10.1787/cbe724e8-en>

- Owen, S. H., & Daskin, M. S. (1998). Strategic facility location: A review. *European Journal of Operational Research*, 111(3), 423–447. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00186-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00186-6)
- Payal. (2023, February 14). Evolution of Electric Vehicles. *YoCharge*. <https://yocharge.com/evolution-of-electric-vehicles/>
- S, R. (n.d.). *Evolution of the Electric Vehicles (EV) Industry | Lab in Motion*. Retrieved September 10, 2023, from <https://labinmotion.com/articles/evolution-of-the-electric-vehicles-ev-industry/>
- Sheffi, Y. (1984). *Urban transportation networks: Equilibrium analysis with mathematical programming methods*. Prentice-Hall.
- The History of the Electric Car*. (n.d.). Energy.Gov. Retrieved September 10, 2023, from <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>
- Tutorials and Sample data—AequilibraE for QGIS 30/07/2018 documentation*. (n.d.). Retrieved September 10, 2023, from https://aequilibrae.com/qgis/V.0.6.1/tutorials_and_sample_data.html
- Ulukan, Z., & Demircioğlu, E. (2015). *A Survey of Discrete Facility Location Problems*. 9(7).
- US EPA, O. (2021, May 14). *Electric Vehicle Myths* [Other Policies and Guidance]. <https://www.epa.gov/greenvehicles/electric-vehicle-myths>
- What's It Like to Own an Electric Car vs. A Gas Car?* (n.d.). J.D. Power. Retrieved September 10, 2023, from <https://www.jdpower.com/cars/shopping-guides/whats-it-like-to-own-an-electric-car-vs-a-gas-car>
- Zamanov, N. (2023, May 14). The Evolution of Electric Car Batteries: Improving Range, Charging Time, and Durability - News. *Cyberswitching*. <https://cyberswitching.com/the-evolution-of-electric-car-batteries-how-advancements-in-battery-technology-are-improving-range-charging-time-and-durability/>

Zhang, M. (2018). Location Planning of Electric Vehicle Charging Station. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 394(4), 042126. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/394/4/042126>

