



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ Μ/Υ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

**Πολυκριτήρια ανάλυση για το σχεδιασμό των δημοσίων υποδομών
φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε επίπεδο πόλης**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχίζας Νικόλαος

Επιβλέπων : Ευάγγελος Σπηλιώτης

Επίκουρος Καθηγητής Τομέας Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων,
Σ.Η.Μ.Μ.Υ. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάιος, 2025



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ Μ/Υ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»

**Πολυκριτήρια ανάλυση για το σχεδιασμό των δημοσίων
υποδομών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε επίπεδο πόλης**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σχίζας Νικόλαος

Επιβλέπων : Ευάγγελος Σπηλιώτης
Επίκουρος Καθηγητής Τομέας Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων
Αποφάσεων, Σ.Η.Μ.Μ.Υ. Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 30 Ιουνίου 2025.

.....
Σπηλιώτης Ευάγγελος
Επίκουρος Καθηγητής, ΕΜΠ

.....
Μαρινάκης Ευάγγελος
Επίκουρος Καθηγητής, ΕΜΠ

.....
Ασκούνης Δημήτριος
Καθηγητής, ΕΜΠ

Αθήνα, Μάιος, 2025

Σχίζας Νικόλαος



Διπλωματούχος Μεταπτυχιακού Προγράμματος (ΔΠΜΣ) "Τεχνο-Οικονομικά Συστήματα", της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Ε.Μ.Π και του Τμήματος Βιομηχανικής Διοίκησης και Τεχνολογίας της Σχολής Ναυτιλίας & Βιομηχανίας του Πανεπιστημίου Πειραιώς."

Copyright © Schizas Nikos, 2025.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη βέλτιστη τοποθέτηση σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (ΣΦΗΟ) με τη χρήση Πολυκριτήριας Ανάλυσης Αποφάσεων (MCDA). Η ανάλυση ανταποκρίνεται στις προκλήσεις που ανακύπτουν από τη ραγδαία εξάπλωση της ηλεκτροκίνησης και την ανάγκη για στρατηγικά κατανομημένες και επαρκείς δημόσιες υποδομές φόρτισης.

Στο πρώτο μέρος εξετάζεται διεξοδικά το διεθνές και εγχώριο πλαίσιο ανάπτυξης της ηλεκτροκίνησης, με έμφαση στις ευρωπαϊκές πολιτικές (Green Deal, Fit for 55, AFIR), την ελληνική πραγματικότητα και τα προβλήματα εφαρμογής σε επίπεδο τοπικής αυτοδιοίκησης.

Το κύριο μέρος της εργασίας εστιάζει στην ανάπτυξη μιας μεθοδολογικής προσέγγισης για την ιεράρχηση των περιοχών με τη μεγαλύτερη ανάγκη και καταλληλότητα για εγκατάσταση ΣΦΗΟ. Η μέθοδος TOPSIS χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των εναλλακτικών, σε συνδυασμό με την εντροπική μέθοδο (Entropy Weight Method) για την αντικειμενική στάθμιση των κριτηρίων. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε δύο στάδια: αρχικά σε επίπεδο ταχυδρομικού κώδικα (Τ.Κ.) και στη συνέχεια σε επίπεδο δημοτικής κοινότητας του Δήμου Αθηναίων. Η επιλογή αυτής της διάρθρωσης επιτρέπει πιο αναλυτική και γεωχωρικά ακριβή αποτύπωση των περιοχών ενδιαφέροντος, ενώ η ομαδοποίηση ανά κοινότητα βασίζεται σε συγκεντρωτικά αποτελέσματα των Τ.Κ. που την απαρτίζουν, διατηρώντας έτσι την ακρίβεια της μικροκλίμακας και την επιχειρησιακή χρησιμότητα της διοικητικής οργάνωσης.

Η βάση δεδομένων περιλαμβάνει δέκα επιλεγμένα κριτήρια: υφιστάμενοι σταθμοί φόρτισης, μηνιαία εκτίμηση φορτίσεων EV, ποσοστό χρήσης υποδομών, αριθμός θέσεων στάθμευσης, πληθυσμός, μέσο εισόδημα, τουριστική δραστηριότητα (ξενοδοχειακές κλίνες), επιχειρηματική δραστηριότητα (πλήθος επιχειρήσεων), σημεία ενδιαφέροντος και υποκάλυψη υποδομών βάσει πληθυσμού. Η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της γλώσσας Python και τεχνολογιών cloud (AWS S3, Athena, Lambdas), επιτρέποντας την αυτοματοποιημένη ανάλυση, τον υπολογισμό δεικτών και τη χαρτογραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων (Folium maps, radar & bar charts). Τα αποτελέσματα ανέδειξαν συγκεκριμένες περιοχές με υψηλή κινητικότητα, τουριστική δραστηριότητα και σημαντικό έλλειμμα υποδομών, κατατάσσοντάς τις με βάση τη σχετική τους προτεραιότητα για νέες επενδύσεις. Η μεθοδολογική προσέγγιση της εργασίας προσφέρει ένα χρήσιμο εργαλείο για τον τεκμηριωμένο σχεδιασμό υποδομών ηλεκτροκίνησης, ενισχύοντας τη λήψη αποφάσεων σε επίπεδο πολιτικής και στρατηγικής. Η συμβολή της στη σχετική βιβλιογραφία έγκειται στη δυνατότητα αποδοτικής χωρικής κατανομής των πόρων και αποφυγής ανισοτήτων κάλυψης. Επιπλέον, η ίδια προσέγγιση μπορεί να προσαρμοστεί και να εφαρμοστεί σε ευρύτερα γεωγραφικά ή θεματικά πεδία (π.χ. πανελλαδική εφαρμογή).

Λέξεις-Κλειδιά: Ηλεκτροκίνηση, Σταθμοί Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων (ΣΦΗΟ), Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων (MCDA), Μέθοδος TOPSIS, AWS, Ηλεκτρικά Οχήματα (EV), Χωροθέτηση Υποδομών, Έξυπνες Πόλεις, Ανάλυση Μεγάλων Δεδομένων

Abstract

This postgraduate thesis focuses on the optimal placement of Electric Vehicle Charging Stations (EVCS) using Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA). The analysis addresses the challenges posed by the rapid expansion of electromobility and the growing need for strategically distributed and adequately scaled public charging infrastructure.

The first part of the study examines the international and national context of electromobility development, with emphasis on European policies (Green Deal, Fit for 55, AFIR), the Greek reality, and the implementation challenges faced by local authorities.

The core of the thesis presents a methodological framework for ranking areas according to their need and suitability for EVCS installation. The TOPSIS method is applied to evaluate alternatives, combined with the Entropy Weight Method to ensure objective weighting of criteria.

The analysis was conducted in two stages: initially at the postal code level and subsequently at the municipal community level of the City of Athens. This structure enables more detailed and spatially accurate identification of priority areas. Grouping by municipal community is based on the aggregated results of the constituent postal codes, preserving the precision of micro-scale analysis while aligning with administrative boundaries for practical planning purposes.

The constructed database incorporates ten selected criteria: existing charging stations, estimated monthly EV charging demand, average utilization rate of infrastructure, number of parking spaces, population, average income, tourism activity (hotel beds), business activity (number of enterprises), points of interest, and infrastructure gap based on population. Data processing was carried out using Python and cloud technologies (AWS S3, Athena, Lambdas), enabling automated analysis, indicator calculation, and visualization of results (Folium maps, radar and bar charts).

The findings highlighted areas with high mobility demand, tourism presence, and significant infrastructure gaps, ranking them according to their relative priority for new investments. The methodology offers a reliable and scalable strategic planning tool, valuable to municipalities, policymakers, and infrastructure providers.

This methodological approach contributes to the academic literature on EV infrastructure siting, by demonstrating the value of multi-criteria tools for efficient spatial resource allocation and the prevention of over- or under-coverage. Moreover, it can be adapted and applied at broader geographical scales or for other applications with similar data structures (e.g., nationwide implementation).

Keywords: E-mobility, Electric Vehicle Charging Stations (EVCS), Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA), TOPSIS Method, Electric Vehicles (EVs), AWS, Python Data Analysis, Smart Cities, Big Data Analytics

Περιεχόμενα

<i>Περίληψη</i>	5
<i>Abstract</i>	6
1. Εισαγωγή στην Ηλεκτροκίνηση	9
1.1 Ιστορική Αναδρομή	9
1.2 Τύποι Ηλεκτρικών Οχημάτων.....	10
1.3 Τύποι Φορτιστών Ηλεκτρικών Οχημάτων.....	14
1.4 Τοποθεσίες Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων	15
2. Ηλεκτροκίνηση στην Ελλάδα	17
2.1 Επίδραση της ηλεκτροκίνησης στο περιβάλλον της Ελλάδας.....	17
2.2 Στόλος ηλεκτρικών οχημάτων στην Ελλάδα	19
2.3 Υφιστάμενη κατάσταση και στόχοι για την ανάπτυξη των δημοσίων σταθμών φόρτισης	21
2.4 Προκλήσεις για το δίκτυο ηλεκτρισμού και την παροχή ενέργειας	23
3. Διεθνές & Εγχώριο Πλαίσιο Ανάπτυξης Υποδομών Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων	26
3.1 Διεθνές Πλαίσιο Μετάβασης στην Ηλεκτροκίνηση και Προκλήσεις Υποδομών	26
3.2 Ρυθμοί Υιοθέτησης Ηλεκτρικών Οχημάτων και Στρατηγικές Ανάπτυξης Υποδομών Φόρτισης	27
3.3 Ευρωπαϊκή Πολιτική για την Ηλεκτροκίνηση και τις Υποδομές Φόρτισης	28
3.4 Ελληνική Πολιτική: Καθυστερήσεις, Ελλείψεις, Προγράμματα και Ρόλος Δήμων	29
3.5 Το Ζήτημα της Βέλτιστης Τοποθέτησης Σταθμών Φόρτισης και η Ανάγκη Πολυκριτήριας Ανάλυσης	31
4. Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων	33
4.1 Εισαγωγή στην Πολυκριτήρια Ανάλυση	33
4.2 Μέθοδοι Πολυκριτήριας Αποφάσεων	34
4.3 Η Μέθοδος TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) 35	
5. Πολυκριτήρια ανάλυση για τοποθέτηση σταθμών φόρτισης στο Δήμο της Αθήνας.	38
5.1 Ανάλυση Κριτηρίων Πολυκριτήριας Αξιολόγησης.....	38
5.2 Κανονικοποίηση και Μετασχηματισμός Τιμών Κριτηρίων.....	52
5.3 Καθορισμός Συντελεστών Βαρύτητας Κριτηρίων	59
5.3.1 Ανάλυση της Μεθόδου Entropy	59
5.3.2 Εφαρμογή της Μεθόδου στα Δεδομένα Χωροθέτησης ΣΦΗΟ.....	61
6. Αποτελέσματα Πολυκριτήριας Ανάλυσης (TOPSIS)	63
6.1 Αποτελέσματα Ανάλυσης TOPSIS και Κατάταξη Ταχυδρομικών Κωδικών	63
6.2 Ανάλυση Ανά Δημοτική Κοινότητα	66

6.3 Ανάλυση Ευαισθησίας.....	71
6.4 Χάραξη πολιτικής και στρατηγικής για τον Δήμο Αθηναίων.....	76
7. Συμπεράσματα και μελλοντικές κατευθύνσεις	78
7.1 Σύνοψη των ευρημάτων και σημασία	78
7.2 Μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις.....	79
Βιβλιογραφία.....	81

1. Εισαγωγή στην Ηλεκτροκίνηση

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Η ηλεκτροκίνηση, παρά την πρόσφατη άνθησή της ως μια βιώσιμη λύση για τις μεταφορές, διαθέτει μια μακρά ιστορική διαδρομή που ανάγεται στις απαρχές της αυτοκίνησης. Η τεχνολογική σύλληψη των ηλεκτρικών οχημάτων (EVs) τοποθετείται χρονικά περίπου στα ίδια χρόνια με την ανάπτυξη των πρώτων συμβατικών οχημάτων με κινητήρες εσωτερικής καύσης, δηλαδή στις αρχές του 19ου αιώνα. Ωστόσο, η εμπορική και κοινωνική αποδοχή των δύο τεχνολογιών ακολούθησε διαφορετικές πορείες, με τα ηλεκτρικά οχήματα να περνούν από περιόδους άνθισης, στασιμότητας και επαναφοράς.

Η πρώτη τεκμηριωμένη απόπειρα κατασκευής ηλεκτρικού οχήματος τοποθετείται χρονικά μεταξύ 1832 και 1839 και αποδίδεται στον Σκωτσέζο εφευρέτη Robert Anderson, ο οποίος ανέπτυξε ένα πρωτόγονο μοντέλο ηλεκτρικής άμαξας, που μπορούσε να επιτύχει μέγιστη ταχύτητα 12 χλμ/ώρα. Παρά το περιορισμένο τεχνολογικό υπόβαθρο της εποχής, η προσπάθεια αυτή αποτέλεσε τη βάση για την περαιτέρω εξέλιξη της ηλεκτροκίνησης [18]. Κατά τη δεκαετία του 1880, η ηλεκτροκίνηση αποκτά πιο οργανωμένη μορφή. Σημαντικά γεγονότα της περιόδου αποτελούν η παρουσίαση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου από τον Thomas Parker στο Λονδίνο το 1884, η κατασκευή ηλεκτρικού τρίκυκλου από τον Gustave Trouné που παρουσιάστηκε στην Διεθνή Έκθεση Ηλεκτρισμού του Παρισιού το 1881, καθώς και η ανάπτυξη του πρώτου υβριδικού αυτοκινήτου “Auto-Mixte” από τον Henri Pieper στο Βέλγιο το 1896.

Το κύριο τεχνολογικό εμπόδιο για την εμπορική διείσδυση των EVs στηρίζεται στους περιορισμούς της αποθηκευτικής τεχνολογίας. Οι πρώιμες μπαταρίες χαρακτηρίζονταν από υψηλό βάρος, μεγάλο όγκο και μικρή ενεργειακή πυκνότητα, ενώ απουσίαζε η δυνατότητα επαναφόρτισης. Σημαντικό ορόσημο αποτέλεσε η ανακάλυψη του στοιχείου μολύβδου-οξέως από τον Gaston Planté το 1859, ενώ κατά την επόμενη εικοσαετία παρατηρείται σημαντική τεχνολογική πρόοδος στους συσσωρευτές, καθιστώντας τους πιο λειτουργικούς και βιώσιμους για χρήση σε οχήματα [18].

Κατά το έτος 1900, τα ηλεκτρικά οχήματα αντιπροσώπευαν περίπου το 38% των οχημάτων στους δρόμους, με σημαντική δημοτικότητα, κυρίως μεταξύ του γυναικείου πληθυσμού, λόγω της απλότητας στη χρήση και του λιτού σχεδιασμού τους. Ωστόσο, η ταχύρρυθμη εξέλιξη των κινητήρων εσωτερικής καύσης, η αυξανόμενη αυτονομία τους, το χαμηλότερο κόστος παραγωγής, καθώς και η κατασκευή δικτύων διανομής καυσίμων, περιόρισαν σημαντικά την ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης από τη δεκαετία του 1920 και εξής. Η αυξανόμενη ανησυχία για τις επιπτώσεις της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και της κλιματικής αλλαγής, ιδίως από τη δεκαετία του 1960, αναβίωσε το ενδιαφέρον της επιστημονικής και τεχνολογικής κοινότητας για την ηλεκτροκίνηση. Έκτοτε, και ιδιαίτερα από τις αρχές του 21ου αιώνα, η τεχνολογία των EVs παρουσιάζει αλματώδη πρόοδο, καθιστώντας την έναν από τους βασικούς άξονες της παγκόσμιας στρατηγικής για την πράσινη μετάβαση στον τομέα των μεταφορών.

1.2 Τύποι Ηλεκτρικών Οχημάτων

Η κατηγοριοποίηση των ηλεκτρικών οχημάτων βασίζεται κυρίως στο είδος και στον τρόπο λειτουργίας του συστήματος πρόωσης. Οι τέσσερις βασικές κατηγορίες είναι οι εξής [18]:

1. Battery Electric Vehicles (BEVs):

Αποτελούν τα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα και είναι πλήρως απαλλαγμένα από κινητήρες εσωτερικής καύσης. Η κίνηση προέρχεται αποκλειστικά από ηλεκτροκινητήρες που τροφοδοτούνται από συσσωρευτές ιόντων λιθίου ή άλλες τεχνολογίες μπαταριών. Η φόρτιση πραγματοποιείται εξωτερικά μέσω σύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο. Τα BEVs αποτελούν τον πιο περιβαλλοντικά φιλικό τύπο EV, καθώς παράγουν μηδενικές εκπομπές ρύπων κατά τη λειτουργία τους.

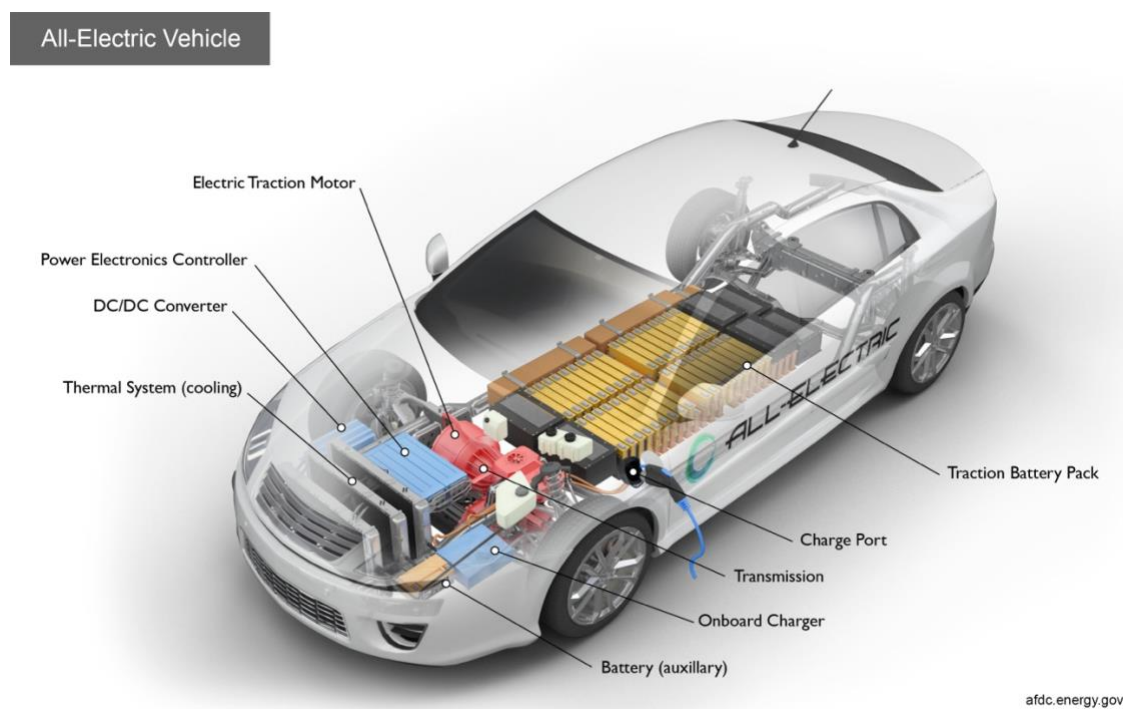


Figure 1 Battery Electric Vehicles (BEVs) [19]

2. Hybrid Electric Vehicles (HEVs):

Τα HEVs συνδυάζουν έναν θερμικό κινητήρα με έναν ηλεκτροκινητήρα. Η ενέργεια για τον ηλεκτροκινητήρα προέρχεται από επαναφορτιζόμενες μπαταρίες που φορτίζονται είτε από τον ίδιο τον κινητήρα εσωτερικής καύσης είτε από την αναγεννητική πέδηση. Δεν έχουν δυνατότητα φόρτισης από εξωτερική πηγή (plug-in). Είναι ευρέως διαδεδομένα λόγω της μεγαλύτερης αυτονομίας και της χαμηλότερης κατανάλωσης σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα.

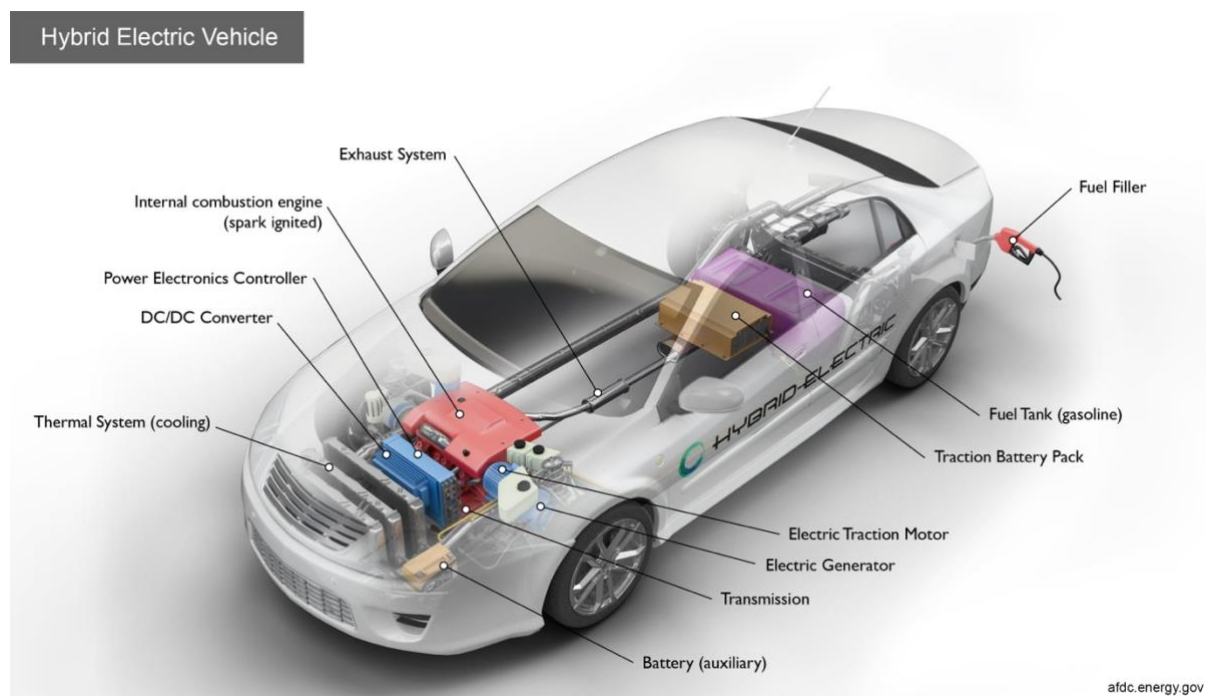


Figure 2 Hybrid Electric Vehicles (HEVs) [19]

3. Plug-In Hybrid Electric Vehicles (PHEVs):

Αποτελούν μια ενδιάμεση λύση μεταξύ HEVs και BEVs. Συνδυάζουν ηλεκτροκινητήρα και κινητήρα εσωτερικής καύσης, ενώ διακρίνονται για τη δυνατότητα φόρτισης της μπαταρίας μέσω εξωτερικής παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο χρήστης μπορεί να επιλέγει μεταξύ πλήρως ηλεκτρικής και υβριδικής λειτουργίας, αυξάνοντας την ευελιξία του οχήματος σε διαφορετικές συνθήκες.

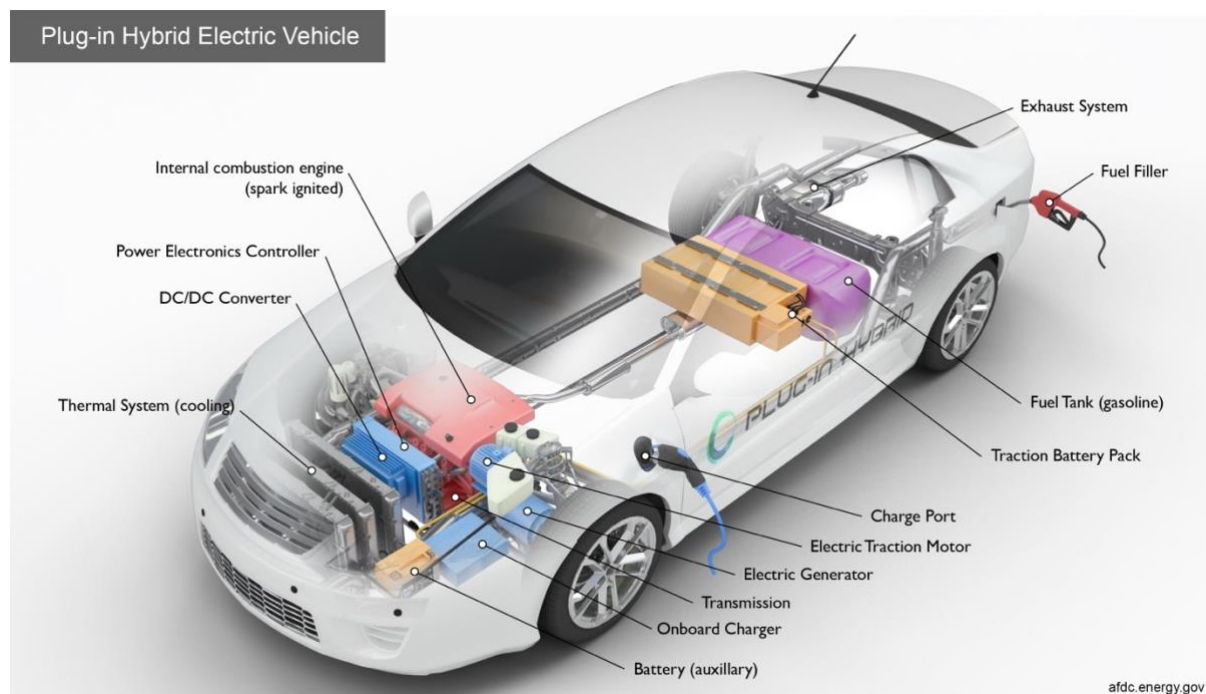


Figure 3 Plug-In Hybrid Electric Vehicles (PHEVs) [19]

4. Fuel Cell Electric Vehicles (FCEVs):

Τα οχήματα κυψελών υδρογόνου χρησιμοποιούν ως ενεργειακή πηγή υδρογόνο, το οποίο αντιδρά με το οξυγόνο σε κυψέλες καυσίμου, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια και νερό ως υποπροϊόν. Προσφέρουν μεγάλες αυτονομίες και σύντομους χρόνους ανεφοδιασμού, ωστόσο η υιοθέτησή τους παραμένει περιορισμένη λόγω των υψηλών τιμών και της ανεπαρκούς υποδομής υδρογόνου.

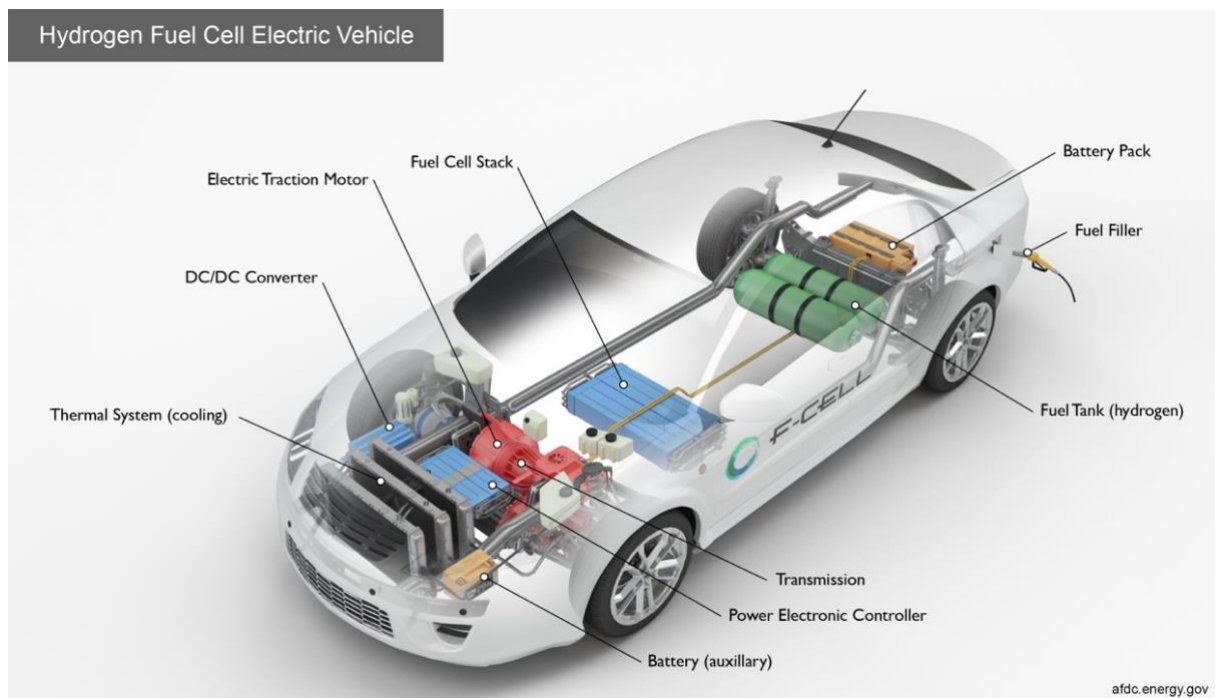


Figure 4 Plug-In Hybrid Electric Vehicles (PHEVs) [19]

1.3 Τύποι Φορτιστών Ηλεκτρικών Οχημάτων

Η κατηγοριοποίηση των φορτιστών ηλεκτρικών οχημάτων βασίζεται κυρίως στον τύπο του ηλεκτρικού ρεύματος που χρησιμοποιείται (εναλλασσόμενο ή συνεχές), την παρεχόμενη ισχύ, καθώς και την ταχύτητα με την οποία πραγματοποιείται η φόρτιση. Οι φορτιστές χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες: τους φορτιστές εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) και τους φορτιστές συνεχούς ρεύματος (DC) [20].

Φορτιστές Εναλλασσόμενου Ρεύματος (AC)

Οι φορτιστές εναλλασσόμενου ρεύματος χρησιμοποιούνται κυρίως για οικιακή ή ιδιωτική φόρτιση και αποτελούν την πιο διαδεδομένη μορφή εγκατάστασης λόγω του χαμηλού κόστους και της ευκολίας σύνδεσης στο υπάρχον οικιακό ηλεκτρικό δίκτυο.

- **Type 1 (SAE J1772):**
Πρόκειται για μονοφασικούς φορτιστές, κυρίως διαδεδομένους στις Ηνωμένες Πολιτείες και την Ιαπωνία. Παρέχουν ισχύ έως 7,4 kW και προσφέρουν περίπου 5–8 χιλιόμετρα αυτονομίας ανά ώρα φόρτισης, γεγονός που καθιστά τους συγκεκριμένους φορτιστές κατάλληλους για καθημερινή χρήση μεσαίας απαίτησης.
- **Type 2 (Mennekes):**
Αποτελεί το πρότυπο φορτιστή στην Ευρώπη και υποστηρίζει τόσο μονοφασική όσο και τριφασική φόρτιση. Η ισχύς που μπορεί να προσφέρει κυμαίνεται από 3 έως 22 kW, προσφέροντας αυτονομία από 20 έως και 120 χιλιόμετρα την ώρα. Ο τύπος αυτός είναι κατάλληλος τόσο για οικιακή όσο και για επαγγελματική χρήση, με ευρεία συμβατότητα στα περισσότερα ευρωπαϊκά ηλεκτρικά οχήματα.

Φορτιστές Συνεχούς Ρεύματος (DC)

Οι φορτιστές συνεχούς ρεύματος αποτελούν την πλέον προηγμένη και ταχεία επιλογή για φόρτιση EVs. Οι φορτιστές αυτοί είναι κατάλληλοι για δημόσιους χώρους, πρατήρια καυσίμων, εμπορικά κέντρα και μεγάλες εγκαταστάσεις, όπου η απαίτηση για γρήγορη επαναφόρτιση είναι ιδιαίτερα αυξημένη.

- **CCS (Combined Charging System):**
Το σύστημα CCS συνδυάζει δυνατότητες AC και DC φόρτισης και έχει καθιερωθεί ως το επικρατέστερο πρότυπο σε παγκόσμιο επίπεδο. Η ευρωπαϊκή εκδοχή CCS2 προσφέρει δυνατότητα ταχυφόρτισης με ισχύ έως και 350 kW, επιτυγχάνοντας φόρτιση έως 80% σε μόλις 20–30 λεπτά. Το CCS είναι σήμερα η πιο διαδεδομένη επιλογή σε δημόσιους ταχυφορτιστές στην Ευρώπη.
- **CHAdemo:**
Αναπτύχθηκε από ιαπωνικές αυτοκινητοβιομηχανίες και παραμένει ευρέως χρησιμοποιούμενος στην Ιαπωνία, αν και η χρήση του έχει περιοριστεί σε ευρωπαϊκά και αμερικανικά δίκτυα. Προσφέρει ισχύ φόρτισης έως 400 kW, ωστόσο δεν υποστηρίζεται από όλους τους σύγχρονους κατασκευαστές EVs, καθώς η τάση συγκλίνει προς το CCS.
- **Tesla Superchargers:**
Οι ταχυφορτιστές Tesla αποτελούν ένα ιδιόκτητο πρότυπο που έχει υλοποιηθεί σε

παγκόσμια δίκτυα ταχυφόρτισης αποκλειστικά για οχήματα Tesla, με ισχύ που φτάνει έως τα 250 kW. Πρόσφατα, ωστόσο, ορισμένοι σταθμοί φόρτισης Tesla έχουν ξεκινήσει να υποστηρίζουν και οχήματα άλλων κατασκευαστών μέσω προσαρμογών ή συμφωνιών (π.χ. NACS).

Πίνακας 1 Συγκριτικός Πίνακας Τεχνικών Χαρακτηριστικών Φορτιστών Ηλεκτρικών οχημάτων

Τύπος Φορτιστή	Ισχύς (kW)	Τύπος Ρεύματος	Πρότυπο Συνδέσμου	Χρήση
AC Type 1	έως 7,4	Εναλλασσόμενο	SAE J1772	Οικιακή/Ιδιωτική
AC Type 2	έως 22	Εναλλασσόμενο	IEC 62196 (Mennekes)	Οικιακή/Δημόσια
DC CCS (CCS2)	έως 350	Συνεχές	CCS (Combined Charging)	Δημόσια, Πανευρωπαϊκή
DC CHAdeMO	έως 400	Συνεχές	CHAdeMO	Ιαπωνία/Παλαιότερα EVs
Tesla Supercharger	έως 250	Συνεχές	Tesla / NACS	Tesla & NACS Vehicles

1.4 Τοποθεσίες Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων

Η διαθεσιμότητα και η κατανομή των σημείων φόρτισης αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τη μαζική υιοθέτηση της ηλεκτροκίνησης. Η ευελιξία των ηλεκτρικών οχημάτων να φορτίζουν σε ποικίλες τοποθεσίες σε αντίθεση με τα συμβατικά οχήματα που εξαρτώνται αποκλειστικά από πρατήρια καυσίμων δημιουργεί νέες δυνατότητες αλλά και προκλήσεις για τον σχεδιασμό βιώσιμων και προσβάσιμων υποδομών.

Σύμφωνα με την τελευταία έκθεση *Global EV Outlook 2024* του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας [21], μέχρι το τέλος του 2023 υπήρχαν σχεδόν 4 εκατομμύρια δημόσια σημεία φόρτισης παγκοσμίως, εκ των οποίων το 36% ήταν ταχυφορτιστές (DC). Η ανάπτυξη των ταχυφορτιστών παρουσίασε ετήσια αύξηση 55%, γεγονός που καταδεικνύει την ανάγκη για ταχύτερες και πιο ευέλικτες λύσεις φόρτισης, ειδικά σε αστικές περιοχές με υψηλή κυκλοφορία.

1. Οικιακή Φόρτιση

Η πιο διαδεδομένη τοποθεσία φόρτισης παραμένει η οικία του χρήστη, καθώς αποτελεί τη βολικότερη και οικονομικότερη επιλογή. Περισσότεροι από το 70% των κατόχων EV στην Ευρώπη φορτίζουν το όχημά τους κατά τη διάρκεια της νύχτας, κάνοντας χρήση φθηνότερων τιμολογίων ηλεκτρικής ενέργειας και εξασφαλίζοντας πλήρη αυτονομία για την επόμενη ημέρα.

2. Φόρτιση στον Χώρο Εργασίας

Η δεύτερη σημαντικότερη κατηγορία είναι η φόρτιση στον χώρο εργασίας. Η πρόσβαση σε φορτιστές κατά τις εργάσιμες ώρες ενισχύει την αποδοτικότητα και μειώνει την ανάγκη για φόρτιση σε ώρες αιχμής. Πολλές επιχειρήσεις εγκαθιστούν πλέον ιδιόκτητους φορτιστές για την εξυπηρέτηση εργαζομένων, πελατών και συνεργατών. Το ποσοστό χρήσης της κατηγορίας αυτής έχει αυξηθεί, κυρίως σε χώρες με ενεργές πολιτικές πράσινης κινητικότητας.

3. Δημόσιοι Σταθμοί Φόρτισης

Η πρόσβαση σε δημόσιους σταθμούς φόρτισης παραμένει κρίσιμη για τη γενίκευση της ηλεκτροκίνησης, ιδιαίτερα για όσους διαμένουν σε πολυκατοικίες χωρίς ιδιωτικό χώρο στάθμευσης. Σύμφωνα με την IEA, η αναλογία των ηλεκτρικών οχημάτων ανά δημόσιο φορτιστή είναι περίπου 9 EVs ανά σταθμό στην Ευρώπη και 7 EVs ανά σταθμό στην Κίνα, με σαφή ένδειξη πίεσης στις υποδομές. Η εν λόγω κατηγορία αποτελεί και τον βασικό αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η οποία επικεντρώνεται στη βελτιστοποίηση της τοποθέτησης δημόσιων σημείων φόρτισης σε αστικά περιβάλλοντα, όπως αυτό της Αθήνας.

4. Πρατήρια Καυσίμων

Πολλά συμβατικά πρατήρια καυσίμων αναβαθμίζονται με την προσθήκη ταχυφορτιστών συνεχούς ρεύματος (DC). Οι σταθμοί αυτοί προσφέρουν ισχύ έως και 350 kW και δυνατότητα φόρτισης έως 80% σε λιγότερο από 30 λεπτά. Η βραχυχρόνια στάθμευση και η εύκολη προσβασιμότητα καθιστούν αυτή την επιλογή ιδανική για αστικά δίκτυα με υψηλό κυκλοφοριακό φόρτο.

5. Εμπορικά Κέντρα και Σούπερ Μάρκετ

Η φόρτιση κατά τη διάρκεια αγορών ή άλλων δραστηριοτήτων σε εμπορικά κέντρα και σούπερ μάρκετ συνιστά στρατηγική λύση που ευνοεί τόσο την εξάπλωση της ηλεκτροκίνησης όσο και τη βιωσιμότητα των επενδύσεων υποδομής. Περισσότερες από τις μισές νέες εγκαταστάσεις σε αστικά κέντρα αφορούν τέτοιου είδους επιχειρήσεις, με στόχο τη σύνδεση της φόρτισης με την καθημερινή ρουτίνα των καταναλωτών.

2. Ηλεκτροκίνηση στην Ελλάδα

2.1 Επίδραση της ηλεκτροκίνησης στο περιβάλλον της Ελλάδας

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η υιοθέτηση της ηλεκτροκίνησης αναδεικνύεται σε ακρογωνιαίο λίθο της στρατηγικής για την επίτευξη των φιλόδοξων κλιματικών και περιβαλλοντικών στόχων που έχει θέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση, όπως αυτοί αποτυπώνονται στην Πράσινη Συμφωνία και τη δέσμη μέτρων "Fit for 55". Η μετάβαση από οχήματα με κινητήρες εσωτερικής καύσης σε αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα (BEVs) και επαναφορτιζόμενα υβριδικά οχήματα (PHEVs) επιφέρει πολυεπίπεδα οφέλη. Πρωτίστως, συμβάλλει δραστικά στον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, με κυριότερο το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), από τον τομέα των οδικών μεταφορών. Δεδομένου ότι οι μεταφορές ευθύνονται για ένα σημαντικό ποσοστό των συνολικών εκπομπών CO₂ στην ΕΕ, η ηλεκτροκίνηση προσφέρει μια άμεση οδό για την απανθρακοποίηση αυτού του κρίσιμου τομέα, βοηθώντας την Ένωση να προσεγγίσει την κλιματική ουδετερότητα έως το 2050.

Πέρα από τον μετριασμό της κλιματικής αλλαγής, η ηλεκτροκίνηση έχει άμεσο και ουσιαστικό θετικό αντίκτυπο στην ποιότητα του ατμοσφαιρικού αέρα, ειδικά στα πυκνοκατοικημένα αστικά κέντρα της Ευρώπης που συχνά αντιμετωπίζουν σοβαρά προβλήματα ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Τα ηλεκτρικά οχήματα, καθώς δεν διαθέτουν σύστημα εξάτμισης, εξαλείφουν τις τοπικές εκπομπές βλαβερών ατμοσφαιρικών ρύπων όπως τα οξείδια του αζώτου (NO_x), τα αιωρούμενα σωματίδια (PM_{2.5} και PM₁₀) και οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs). Αυτοί οι ρύποι συνδέονται άμεσα με αυξημένο κίνδυνο αναπνευστικών παθήσεων (όπως άσθμα και βρογχίτιδα), καρδιαγγειακών νοσημάτων, ακόμα και πρόωρων θανάτων. Επομένως, η ευρύτερη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων μεταφράζεται σε καθαρότερο αέρα για τους πολίτες και μείωση της επιβάρυνσης των συστημάτων δημόσιας υγείας.

Τέλος, η στροφή προς την ηλεκτροκίνηση ενισχύει τη στρατηγική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για μείωση της εξάρτησης από εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα, κυρίως πετρέλαιο, ενισχύοντας την ενεργειακή της ασφάλεια. Παράλληλα, προωθεί την ενσωμάτωση και αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Τα οφέλη της ηλεκτροκίνησης μεγιστοποιούνται όταν η ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται για τη φόρτιση των οχημάτων παράγεται από καθαρές πηγές όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια. Αυτή η συνέργεια μεταξύ καθαρής ενέργειας και καθαρών μεταφορών είναι θεμελιώδης για μια ολοκληρωμένη και βιώσιμη περιβαλλοντική πολιτική σε ευρωπαϊκό επίπεδο, ανοίγοντας τον δρόμο για ένα πιο πράσινο και υγιές μέλλον για όλους τους Ευρωπαίους πολίτες.

Η μετάβαση στην ηλεκτροκίνηση αναμένεται να έχει σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη για την Ελλάδα. Ο τομέας των μεταφορών εξακολουθεί να εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από το πετρέλαιο, το οποίο κάλυπτε το 95,4% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας το 2021, ενώ συνεισφέρει περίπου το ένα τρίτο της συνολικής ενεργειακής ζήτησης της χώρας [22]. Η αντικατάσταση των συμβατικών οχημάτων με ηλεκτρικά μπορεί να μειώσει δραστικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και ρύπων στην ατμόσφαιρα. Συγκεκριμένα, τα ηλεκτρικά οχήματα (EVs) δεν εκπέμπουν ρύπους εξάτμισης (CO₂, NO_x, μικροσωματίδια), συμβάλλοντας στη βελτίωση της ποιότητας του αέρα, ιδιαίτερα στα αστικά κέντρα.

Αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο για πόλεις όπως η Αθήνα, όπου οι συγκεντρώσεις NO₂ και αιωρούμενων σωματιδίων συχνά υπερβαίνουν τα θεσμοθετημένα όρια, επηρεάζοντας αρνητικά τη δημόσια υγεία. Ένα άμεσο όφελος της ηλεκτροκίνησης είναι η μείωση των εκπομπών CO₂. Ακόμη και με το υφιστάμενο μείγμα ηλεκτροπαραγωγής της Ελλάδας – το οποίο βρίσκεται σε φάση ενεργειακής μετάβασης με τη σταδιακή απόσυρση του λιγνίτη και την αυξανόμενη συμμετοχή φυσικού αερίου και ΑΠΕ – η λειτουργία ενός EV εκπέμπει σημαντικά λιγότερο CO₂ ανά χιλιόμετρο σε σύγκριση με ένα αντίστοιχο συμβατικό όχημα.

Καθώς η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται ολοένα και καθαρότερη – με δέσμευση για πλήρη απολιγνιτοποίηση έως το 2028 και στόχο διείσδυσης των ΑΠΕ πάνω από 70% έως το 2030 – το αποτύπωμα άνθρακα της ηλεκτροκίνησης αναμένεται να μειωθεί περαιτέρω [22].

Επιπλέον, τα EVs συμβάλλουν στη μείωση της ηχορύπανσης, καθώς παράγουν ελάχιστο θόρυβο σε χαμηλές ταχύτητες, βελτιώνοντας το ακουστικό περιβάλλον των πόλεων. Η μείωση των επιπέδων θορύβου σε αστικές περιοχές, ιδιαίτερα κατά τις νυχτερινές ώρες, έχει θετικές συνέπειες για τη δημόσια υγεία, συμβάλλοντας σε μειωμένα επίπεδα στρες και βελτιωμένη ποιότητα ύπνου.

Περιβαλλοντικά οφέλη από την ηλεκτροκίνηση στην Ελλάδα:

- **Μείωση εκπομπών CO₂:** Ένα ηλεκτρικό όχημα, υπό ελληνικές συνθήκες, μπορεί να εκπέμπει έως και 30–50% λιγότερο CO₂ ανά χιλιόμετρο σε σχέση με ένα βενζινοκίνητο όχημα, ποσοστό που αναμένεται να αυξηθεί με τη μετάβαση σε καθαρότερη ηλεκτροπαραγωγή [22].
- **Βελτίωση ατμοσφαιρικής ρύπανσης:** Τα EVs εξαλείφουν τους τοπικούς ρύπους εξάτμισης. Η μείωση των NO_x και PM (αιωρούμενων σωματιδίων) βοηθά στη συμμόρφωση με τα πρότυπα ποιότητας του αέρα και στη μείωση φαινομένων όπως το νέφος.
- **Μείωση ηχορύπανσης:** Η απουσία κινητήρα εσωτερικής καύσης καθιστά τα ηλεκτρικά οχήματα σχεδόν αθόρυβα σε χαμηλές ταχύτητες, γεγονός που συμβάλλει στη βελτίωση της ποιότητας ζωής σε πυκνοκατοικημένες περιοχές.
- **Οφέλη για το αστικό περιβάλλον:** Η προώθηση της ηλεκτροκίνησης συνοδεύεται συχνά από παράλληλες παρεμβάσεις στην αστική κινητικότητα, όπως θέσεις στάθμευσης με φορτιστές, υποδομές για ηλεκτρικά λεωφορεία και υποστήριξη της μικροκινητικότητας (e-scooters, e-bikes), συμβάλλοντας σε μια πιο βιώσιμη αστική ανάπτυξη [23].

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα των δυνατοτήτων της ηλεκτροκίνησης είναι το πιλοτικό πρόγραμμα της Αστυπάλαιας. Με την αντικατάσταση των συμβατικών οχημάτων από EVs και την εγκατάσταση υβριδικού σταθμού ΑΠΕ, το έργο στοχεύει στη μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 70% και του κόστους ενέργειας κατά περίπου 25% [24].

Παρά τα οφέλη, η ηλεκτροκίνηση συνοδεύεται και από ορισμένες περιβαλλοντικές προκλήσεις. Η παραγωγή των μπαταριών είναι ενεργοβόρα και απαιτεί την εξόρυξη κρίσιμων μετάλλων όπως λίθιο, κοβάλτιο και νικέλιο, δημιουργώντας περιβαλλοντικό αποτύπωμα στην αλυσίδα εφοδιασμού. Επομένως, είναι κρίσιμη η ανάπτυξη υποδομών ανακύκλωσης και η υιοθέτηση πρακτικών υπεύθυνης προμήθειας πρώτων υλών.

Επιπλέον, το συνολικό κλιματικό όφελος εξαρτάται από το μείγμα ηλεκτροπαραγωγής: όσο υψηλότερη είναι η συμμετοχή ΑΠΕ, τόσο μεγαλύτερο το όφελος από τη χρήση EVs. Στο πλαίσιο αυτό, ο στρατηγικός στόχος για $\geq 70\%$ ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή έως το 2030 θα διασφαλίσει την περαιτέρω μείωση των εκπομπών από τον τομέα των μεταφορών.

Τέλος, απαιτείται ολοκληρωμένος περιβαλλοντικός σχεδιασμός για την απόσυρση των παλαιών οχημάτων και την ανακύκλωση υλικών, ώστε η μετάβαση να είναι κυκλική και βιώσιμη.

Συμπερασματικά, η ηλεκτροκίνηση αποτελεί έναν από τους βασικότερους πυλώνες της περιβαλλοντικά βιώσιμης ανάπτυξης στον τομέα των μεταφορών στην Ελλάδα. Με έναν συνεκτικό σχεδιασμό που να περιλαμβάνει «πράσινη» ηλεκτροπαραγωγή, κυκλική διαχείριση των πρώτων υλών και ενίσχυση των εναλλακτικών μέσων μεταφοράς, μπορεί να μειώσει δραστικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και να συμβάλει ουσιαστικά στην επίτευξη των εθνικών και ευρωπαϊκών κλιματικών στόχων.

2.2 Στόλος ηλεκτρικών οχημάτων στην Ελλάδα

Η ανάπτυξη του στόλου ηλεκτρικών οχημάτων στην Ελλάδα τα τελευταία χρόνια είναι ραγδαία, αν και το συνολικό μερίδιο στην κυκλοφορία παραμένει ακόμη χαμηλό συγκριτικά με την υπόλοιπη Ευρώπη. Έως το 2019, η ηλεκτροκίνηση βρισκόταν σε εμβρυακό στάδιο (ενδεικτικά ταξινομήθηκαν μόλις 190 νέα αμιγώς ηλεκτρικά αυτοκίνητα το 2019). Η κατάσταση άρχισε να μεταβάλλεται μετά το 2020, με την υιοθέτηση κρατικών κινήτρων και επιδοτήσεων (βλ. §4.5) και την αύξηση των διαθέσιμων μοντέλων EV στην αγορά.

Πίνακας 2 Εξέλιξη ταξινομήσεων ηλεκτρικών οχημάτων 2021-2024 στην Ελλάδα [25,26]

Έτος	Νέα BEV (αμιγώς ηλεκτρικά)	Νέα PHEV (επαναφορτιζόμενα υβριδικά)	Μερίδιο BEV στις νέες ταξινομήσεις	Μερίδιο PHEV	Συνολικό μερίδιο EV (BEV+PHEV)
2021	2.176	4.789	2,16%	4,75%	~6,9%
2022	2.827	5.493	2,68%	5,21%	7,9%
2023	6.379	~8.832 (εκτίμηση)	4,74%	~6,6%	~11,3%
2024	8.707	~8.263 (εκτίμηση)	6,35%	~6,05%	12,4%

Τα στοιχεία του 2023–24 για τα PHEV είναι προσεγγιστικά (υπολογισμένα από το μερίδιο και τη συνολική διείσδυση). Παρατηρείται ότι το 2022 τα PHEV υπερτερούσαν αριθμητικά (~66% των νέων ηλεκτροκίνητων), ενώ το 2024 η τάση αντιστράφηκε υπέρ των BEV (51,3% BEV έναντι 48,7% PHEV), αντανakλώντας τη σταδιακή προτίμηση της αγοράς στα πλήρως ηλεκτρικά οχήματα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το συνολικό μερίδιο αγοράς των επαναφορτιζόμενων οχημάτων (EV = BEV+PHEV) αυξήθηκε από 7,9% το 2022 σε 12,4% το 2024. Η αύξηση είναι εντυπωσιακή: οι ταξινομήσεις νέων BEV το 2024 (8.707 οχήματα) ήταν κατά +36,5% υψηλότερες από το 2023, πετυχαίνοντας ρεκόρ όλων των εποχών στην ελληνική αγορά.

Αν και τα νούμερα αυτά υπολείπονται των μεγάλων ευρωπαϊκών αγορών, σηματοδοτούν μια μεταστροφή των εγχώριων αγοραστικών τάσεων: τα υβριδικά και ηλεκτρικά οχήματα κερδίζουν συνεχώς έδαφος έναντι των βενζινοκίνητων/πετρελαιοκίνητων, με τις ταξινομήσεις συμβατικών ICE οχημάτων να μειώνονται (-20,5% το 2024 σε σχέση με 2023).

Παρά τη σημαντική αυτή πρόοδο, η Ελλάδα εξακολουθεί να υπολείπεται του ευρωπαϊκού μέσου όρου σε ό,τι αφορά την ηλεκτροκίνηση. Το συνολικό ποσοστό EV στον στόλο οχημάτων παραμένει χαμηλό: στις αρχές του 2025 εκτιμάται ότι λιγότερο από 1% των επιβατικών οχημάτων που κυκλοφορούν είναι ηλεκτρικά (περίπου 0,4% αμιγώς ηλεκτρικά BEV). Για σύγκριση, στο τέλος του 2022 το αντίστοιχο ποσοστό στην Ευρωπαϊκή Ένωση ήταν ~2,3%.

Ακόμα και ως μερίδιο νέων ταξινομήσεων, όπου η βελτίωση είναι ταχύτερη, η Ελλάδα (12,4% το 2024) υστερεί έναντι του ευρωπαϊκού μέσου όρου (το 2022 ήταν ~21,6% στην ΕΕ). Χαρακτηριστικά, χώρες πρωτοπόρες όπως η Σουηδία, η Ολλανδία ή η Γερμανία καταγράφουν μερίδια νέων EV πάνω από 30%, ενώ σε απόλυτους αριθμούς η ελληνική αγορά EV παραμένει μικρή (π.χ. το 2024 ταξινομήθηκαν ~8,7 χιλ. BEV στην Ελλάδα έναντι ~1,99 εκατομμυρίων στην Ευρώπη).

Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι ο ρυθμός ανάπτυξης στην Ελλάδα είναι από τους υψηλότερους: +125% αύξηση το 2023 και +36% το 2024 στις πωλήσεις EV, ένδειξη ταχείας σύγκλισης με τις ευρωπαϊκές τάσεις.

Από πλευράς τύπων οχημάτων, η ηλεκτροκίνηση στην Ελλάδα αφορά κυρίως επιβατικά αυτοκίνητα ΙΧ. Μέχρι στιγμής, η διείσδυση στα λεωφορεία και φορτηγά είναι περιορισμένη – αν και βρίσκονται σε εξέλιξη διαγωνισμοί για προμήθεια ηλεκτρικών λεωφορείων στις αστικές συγκοινωνίες Αθήνας/Θεσσαλονίκης. Επίσης, μέσω του προγράμματος επιδοτήσεων έχουν κάνει την εμφάνισή τους αρκετά ηλεκτρικά δίκυκλα (σκούτερ, μοτοσικλέτες) και ποδήλατα, διευρύνοντας την ηλεκτροκίνηση και στις μετακινήσεις μικρών αποστάσεων. Στον τομέα των ταξί και ενοικιαζόμενων οχημάτων, υπάρχουν ειδικές ρυθμίσεις για την ενθάρρυνση της μετάβασης: από το 2026 όλα τα νέα ταξί σε Αθήνα/Θεσσαλονίκη θα πρέπει να είναι EV (BEV ή PHEV), γεγονός που θα αυξήσει αισθητά τον αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων σε αστικές εμπορικές χρήσεις.

Συνολικά, ο στόλος των ηλεκτροκίνητων οχημάτων στην Ελλάδα παραμένει μικρός αλλά με εκθετική τάση ανάπτυξης. Από μόλις 62 EV το 2014, έφθασε τα ~18.575 στο τέλος του 2022, ενώ σήμερα 2025 τα κυκλοφορούντα επαναφορτιζόμενα οχήματα ξεπερνούν πιθανότατα τις 40 χιλιάδες.

Η ελληνική πολιτεία έχει θέσει φιλόδοξους στόχους: σύμφωνα με το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ) προβλέπεται τα EV να αποτελούν 30% των νέων ταξινομήσεων ως το 2030 και να αντιπροσωπεύουν περίπου το 10% του συνολικού στόλου οχημάτων έως το 2030. Αυτό μεταφράζεται σε αρκετές εκατοντάδες χιλιάδες ηλεκτρικά οχήματα εντός της δεκαετίας, μια πρόκληση αλλά και ευκαιρία για τον μετασχηματισμό των μεταφορών. Η σύγκλιση με την Ευρώπη είναι εφικτή, εφόσον διατηρηθεί ο τρέχων ρυθμός ανάπτυξης και ληφθούν μέτρα για την περαιτέρω ενίσχυση της ζήτησης και των σχετικών υποδομών (όπως συζητείται στις επόμενες ενότητες).

2.3 Υφιστάμενη κατάσταση και στόχοι για την ανάπτυξη των δημοσίων σταθμών φόρτισης

Η ανάπτυξη ενός εκτεταμένου δικτύου σταθμών φόρτισης είναι καθοριστικός παράγοντας για την επιτυχία της ηλεκτροκίνησης. Στην Ελλάδα, η υποδομή φόρτισης βελτιώνεται με ταχείς ρυθμούς, ξεκινώντας από πολύ χαμηλή βάση. Το 2018 υπήρχαν μόλις 50 δημόσια διαθέσιμα σημεία φόρτισης σε όλη τη χώρα. Έως το 2022, ο αριθμός αυτός είχε αυξηθεί στα 1.020 σημεία.

Η Ελλάδα βρέθηκε με ελάχιστες υποδομές φόρτισης. Είναι ενδεικτικό ότι το 2019 υπήρχαν μόλις 58 δημόσιοι φορτιστές σε όλη τη χώρα αριθμός πρακτικά μηδενικός για τις ανάγκες οποιουδήποτε ουσιαστικού στόλου EV. Έκτοτε σημειώθηκε πρόοδος μέχρι το 2023 οι δημόσια προσβάσιμοι φορτιστές αυξήθηκαν σε περίπου 3.600-4.000. Πιο πρόσφατα δεδομένα δείχνουν περαιτέρω άνοδο: στις αρχές του 2024 λειτουργούσαν περίπου 5.500 σημεία φόρτισης σε όλη την Ελλάδα, εκ των οποίων ~940 σε νησιά [13]. Παρά τη βελτίωση αυτή, οι υποδομές παραμένουν ανεπαρκείς σε σχέση με τις ανάγκες και τους ευρωπαϊκούς μέσους όρους. Για παράδειγμα, στα τέλη του 2023 τα ηλεκτρικά οχήματα (BEV και PHEV) στην Ελλάδα εκτιμάται ότι ξεπερνούσαν τις 15.000, αριθμός που συνεχώς αυξάνεται (το 2023 μόνο πωλήθηκαν περίπου 12.300 νέα ηλεκτρικά αυτοκίνητα). Αυτό σημαίνει ότι ο λόγος οχημάτων ανά φορτιστή στη χώρα μας είναι ακόμα χαμηλός σε απόλυτους αριθμούς, αλλά αν συνυπολογιστεί ότι πολλά σημεία είναι χαμηλής ισχύος (αργοί φορτιστές) και συγκεντρωμένα κυρίως στα μεγάλα αστικά κέντρα, μεγάλα τμήματα της επικράτειας παραμένουν χωρίς επαρκή κάλυψη.

Ιδιαίτερα σε τουριστικές περιοχές και στο εθνικό οδικό δίκτυο, οι ελλείψεις φορτιστών ήταν εμφανείς μέχρι πρόσφατα, δημιουργώντας ανησυχία ότι η Ελλάδα θα υστερήσει στην εξυπηρέτηση ηλεκτρικών οχημάτων. Ωστόσο, έχουν τεθεί φιλόδοξοι στόχοι και σχεδιάζονται παρεμβάσεις. Σύμφωνα με το Ελληνικό Ινστιτούτο Ηλεκτροκίνητων Οχημάτων (ΕΛ.ΙΝ.Η.Ο), στα τέλη του 2023 υπήρχαν περίπου 4.890 δημόσια σημεία φόρτισης σε 2.120 τοποθεσίες, με τον αριθμό αυτό να αναμένεται να αυξηθεί σε 13.000 έως και τα τέλη του 2025 και να ξεπεράσει τις 100.000 έως το 2030. Οι αριθμοί αυτοί καταδεικνύουν τη μεγάλη απόσταση που πρέπει να διανυθεί και τον πολύ γρήγορο ρυθμό ανάπτυξης (~20 φορές αύξηση σε 7 χρόνια) που απαιτείται. Το θετικό είναι ότι η ηλεκτροκίνηση στη χώρα μας παρουσιάζει επιταχυνόμενη άνοδο: το μερίδιο αγοράς των EV διπλασιάζεται σχεδόν κάθε χρόνο, οι αυτονομίες των νέων μοντέλων βελτιώνονται, και όλο και περισσότερες εταιρείες λανσάρουν ηλεκτρικά μοντέλα στην ελληνική αγορά. Αυτό δημιουργεί ένα δυναμικό περιβάλλον όπου τόσο η ζήτηση για φορτιστές όσο και οι επιχειρηματικές ευκαιρίες για επενδύσεις σε σταθμούς φόρτισης αυξάνονται.

Σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα επίσημα στοιχεία (Μητρώο Υποδομών Ηλεκτροκίνησης [27]), λειτουργούν περίπου 3160 τοποθεσίες φόρτισης πανελλαδικά με συνολικά 7.639 σημεία φόρτισης (μετρητές/ρευματοδότες) προσβάσιμα στο κοινό. Αυτή η κάλυψη περιλαμβάνει ποικιλία φορτιστών, από αργούς/μεσαίας ισχύος (π.χ. 7–22 kW AC) που βρίσκονται σε πόλεις και χώρους στάθμευσης, έως ταχυφορτιστές συνεχούς ρεύματος (DC 50 kW και άνω) σε κομβικά σημεία του εθνικού οδικού δικτύου.

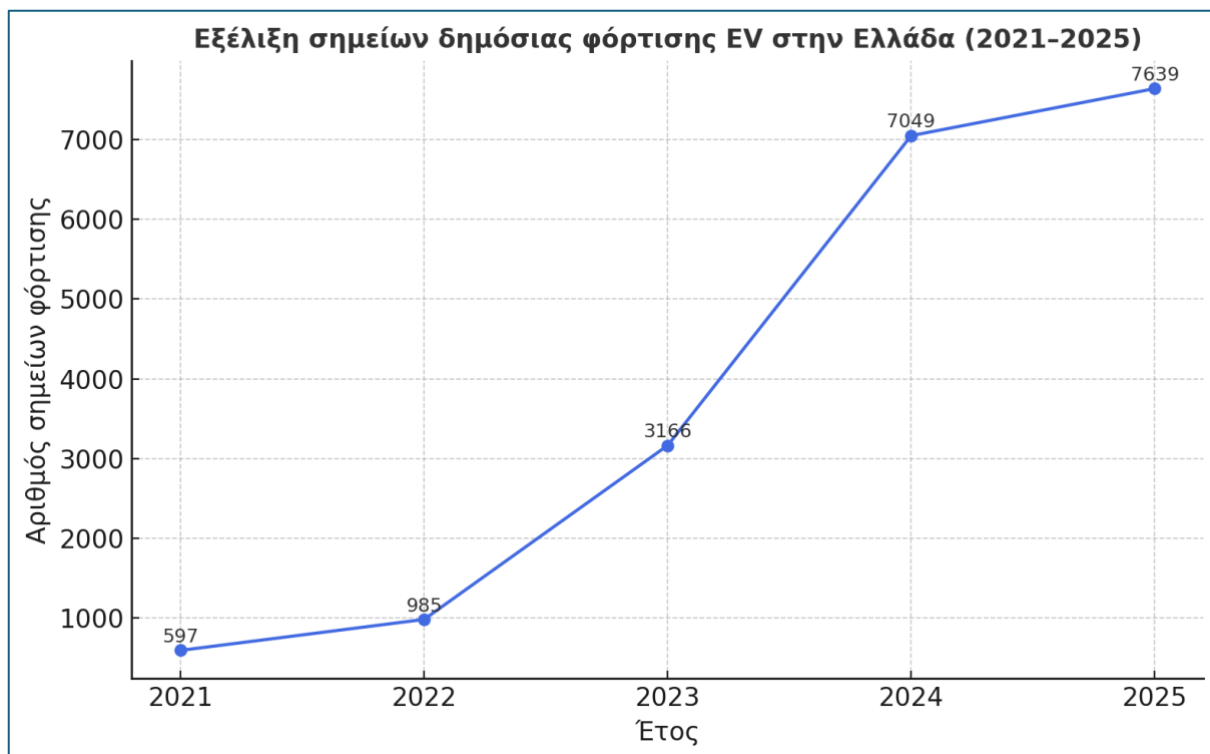


Figure 5 Εξέλιξη Δημοσίων Σταθμών Φόρτισης στην Ελλάδα

Η γεωγραφική κατανομή των φορτιστών μέχρι σήμερα παρουσιάζει συγκέντρωση στα μεγάλα αστικά κέντρα (Αθήνα, Θεσσαλονίκη) και στους κύριους οδικούς άξονες (π.χ. άξονας ΠΑΘΕ, Ιόνια Οδός κ.λπ.). Επίσης, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην εγκατάσταση φορτιστών σε τουριστικούς προορισμούς και νησιά, ώστε να διευκολυνθεί η χρήση ηλεκτρικών οχημάτων από επισκέπτες και κατοίκους (π.χ. έχουν αναπτυχθεί δίκτυα φόρτισης σε δημοφιλή νησιά όπως Κρήτη, Ρόδος, Κέρκυρα, καθώς και σε «πράσινα νησιά» πιλοτικών προγραμμάτων όπως η Χάλκη και η Αстуπάλεια).

Με την πλήρη υλοποίηση του «Φορτίζω Παντού», το διαθέσιμο δημόσιο δίκτυο φόρτισης θα πολλαπλασιαστεί θεαματικά (ουσιαστικά υπερδιπλασιάζεται σε σχέση με σήμερα), καλύπτοντας κρίσιμα κενά και δημιουργώντας μια βασική ραχοκοκαλιά υποδομών.

Οι εθνικοί ποσοτικοί στόχοι για την υποδομή φόρτισης είναι φιλόδοξοι. Σύμφωνα με το Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας, επιδιώκεται η λειτουργία 12.000 σημείων φόρτισης έως το 2025 και 25.000 έως το 2030. Αυτοί οι στόχοι κρίνονται εφικτοί υπό το πρίσμα των τρεχουσών εξελίξεων: το δίκτυο ΔΕΗ blue (του Ομίλου ΔΕΗ) από μόνο του έχει ήδη αναπτύξει >2.700 φορτιστές ως και το 2025 και επεκτείνεται ταχύτατα, ενώ δεκάδες ακόμα δημόσιοι και ιδιωτικοί φορείς (εταιρείες ενέργειας, αλυσίδες καταστημάτων, εταιρείες στάθμευσης, πρατήρια καυσίμων) προσθέτουν σημεία φόρτισης.

Παρά την πρόοδο, προκλήσεις παραμένουν σε ό,τι αφορά την κατανομή και πυκνότητα των φορτιστών. Σε πολλές περιοχές της περιφέρειας και της υπαίθρου, ο αριθμός σταθμών φόρτισης είναι ακόμη περιορισμένος, κάτι που μπορεί να δημιουργεί την αίσθηση «άγχους αυτονομίας» στους δυνητικούς χρήστες EV.

Συνολικά, η υπάρχουσα υποδομή φόρτισης στην Ελλάδα βρίσκεται σε φάση μετάβασης από την πιλοτική κλίμακα σε ευρεία ανάπτυξη. Η μέχρι τώρα αύξηση (από 50 φορτιστές το 2018 σε ~7.000 το 2025) καταδεικνύει τη δυναμική, ενώ τα προσεχή έτη με την υλοποίηση του “Φορτίζω Παντού” και άλλων επενδύσεων, το δίκτυο θα επεκταθεί δραστικά.

Οι εθνικοί στόχοι συνάδουν με την ανάγκη υποστήριξης του στόλου EV που προβλέπεται για το 2030. Η επαρκής, αξιόπιστη και γρήγορη φόρτιση θα άρει ένα από τα σημαντικότερα εμπόδια για τους καταναλωτές, καθιστώντας πρακτικά ρεαλιστική την καθημερινή χρήση ηλεκτρικών οχημάτων παντού στην Ελλάδα (“φόρτιση παντού”). Με παράλληλη μέριμνα για διευκόλυνση της εμπειρίας χρήστη (ενιαίες πλατφόρμες πληρωμών, διαφάνεια στις χρεώσεις, συντήρηση εξοπλισμού) και για ενεργειακά αποδοτική ένταξη των φορτιστών στο δίκτυο, η χώρα βρίσκεται σε τροχιά να υποστηρίξει αποτελεσματικά την αναμενόμενη έκρηξη της ηλεκτροκίνησης.

2.4 Προκλήσεις για το δίκτυο ηλεκτρισμού και την παροχή ενέργειας

Η ευρεία υιοθέτηση της ηλεκτροκίνησης φέρνει στο προσκήνιο ζητήματα επάρκειας και διαχείρισης του ηλεκτρικού συστήματος. Καθώς χιλιάδες οχήματα μεταφέρουν το ενεργειακό τους φορτίο από τα πρατήρια καυσίμων στο ηλεκτρικό δίκτυο, πρέπει να διασφαλιστεί ότι τόσο η παραγωγή όσο και οι υποδομές μεταφοράς/διανομής ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να καλύψουν την πρόσθετη ζήτηση με αξιοπιστία και βιωσιμότητα.

Ενεργειακή επάρκεια και ζήτηση: Η φόρτιση ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου απαιτεί σημαντική ηλεκτρική ενέργεια π.χ. ~15-20 kWh ανά 100 km. Με μερικές εκατοντάδες χιλιάδες EV στους δρόμους (στόχος 2030), το ετήσιο ενεργειακό φορτίο για φόρτιση μπορεί να ανέλθει σε αρκετά TWh, αυξάνοντας την εθνική κατανάλωση ρεύματος. Σύμφωνα με εκτιμήσεις του ΕΣΕΚ, η πρόσθετη ζήτηση από EV μέχρι το 2030 είναι διαχειρίσιμη (περίπου +5-10% της συνολικής ζήτησης), ωστόσο απαιτεί έγκαιρη ανάπτυξη νέας ισχύος ηλεκτροπαραγωγής. Η Ελλάδα στοχεύει σε μεγάλο βαθμό να καλύψει αυτή τη ζήτηση με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), ευθυγραμμίζοντας την ηλεκτροκίνηση με την πράσινη μετάβαση. Η ήδη σημαντική συμμετοχή των ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα (π.χ. ~39% το 2022) αναμένεται να αυξηθεί (Δεσμευτικός στόχος 80% ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή ως το 2030) έτσι ώστε κάθε νέα κιλοβατώρα για EV να προέρχεται κυρίως από καθαρές πηγές [22]. Παρόλα αυτά, βραχυπρόθεσμα, αν η διεύθυνση των EV ξεπεράσει τον ρυθμό αύξησης των ΑΠΕ, υπάρχει κίνδυνος η επιπλέον ζήτηση να καλυφθεί από εργοστάσια φυσικού αερίου, μειώνοντας εν μέρει το περιβαλλοντικό όφελος. Η πρόκληση, συνεπώς, έγκειται στον συγχρονισμό της επέκτασης της ηλεκτροκίνησης με την ανάπτυξη νέων μονάδων πράσινης ενέργειας και αποθήκευσης (π.χ. συσσωρευτές, υδροηλεκτρικά αντλησιοταμίευσης), ώστε το ενεργειακό ισοζύγιο να παραμείνει βιώσιμο.

Ισχύς αιχμής και διαχείριση φορτίου: Ένα κρίσιμο ζήτημα είναι η επίδραση των EV στο φορτίο αιχμής του συστήματος. Εάν μεγάλος αριθμός οχημάτων φορτίζει ταυτόχρονα – π.χ. το βράδυ όταν επιστρέφουν οι οδηγοί στην οικία τους μπορεί να προκληθούν τοπικές ή και συνολικές αιχμές ζήτησης. Το ελληνικό δίκτυο έχει μέγιστη ζήτηση περί τα 9-10 GW, και μια μαζική φόρτιση EV θα μπορούσε να προσθέσει αρκετές εκατοντάδες MW επιπλέον φορτίου τις ώρες αιχμής, πιέζοντας το σύστημα. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, προωθούνται λύσεις έξυπνης φόρτισης (smart charging): δηλαδή φορτιστές και τιμολογιακά κίνητρα που

μετατοπίζουν τη φόρτιση σε ώρες χαμηλής γενικής ζήτησης ή υψηλής παραγωγής ΑΠΕ. Για παράδειγμα, με ειδικά νυχτερινά τιμολόγια ή αυτοματοποιημένα συστήματα, τα περισσότερα EV θα μπορούσαν να φορτίζουν μεταμεσονύκτια (όταν η υπόλοιπη ζήτηση πέφτει) ή κατά τις μεσημεριανές ώρες με υψηλή ηλιοφάνεια (όταν υπάρχει πλεόνασμα ηλιακής παραγωγής). Έτσι, τα EV αντί να επιδεινώσουν τις αιχμές, μπορούν να *εξομαλύνουν* το φορτίο, λειτουργώντας κατά κάποιο τρόπο και ως αποθήκες ενέργειας (π.χ. μέσω μελλοντικών συστημάτων Vehicle-to-Grid, όπου τα συνδεδεμένα οχήματα θα μπορούν δυνητικά να επιστρέφουν ενέργεια στο δίκτυο σε στιγμές ανάγκης). Η Ρυθμιστική Αρχή και ο ΑΔΜΗΕ/ΔΕΔΔΗΕ μελετούν ήδη σενάρια ένταξης των EV, ώστε να διαμορφώσουν κατάλληλα τις καμπύλες φορτίου μέχρι το 2030 και να προλάβουν τυχόν προβλήματα επάρκειας.

Δίκτυο διανομής και υποδομές: Σε τοπικό επίπεδο, η σύνδεση πολλών φορτιστών υψηλής ισχύος μπορεί να απαιτήσει αναβαθμίσεις στους μετασχηματιστές και τα δίκτυα διανομής. Για παράδειγμα, μια γειτονιά όπου δεκάδες σπίτια εγκαθιστούν οικιακούς φορτιστές 7-11 kW ενδέχεται να χρειαστεί ενίσχυση του τοπικού μετασχηματιστή ή των καλωδίων χαμηλής τάσης. Ομοίως, η ανάπτυξη συστοιχιών ταχυφορτιστών 150 kW σε ένα σημείο ανεφοδιασμού στην εθνική οδό απαιτεί ισχυρή παροχή μέσης τάσης. Ο ΔΕΔΔΗΕ λαμβάνει υπόψη του τις προβλέψεις για την ηλεκτροκίνηση στα σχέδια ανάπτυξης του δικτύου, με στοχευμένες παρεμβάσεις όπου αναμένονται υψηλά φορτία φόρτισης (όπως σε μεγάλα αστικά κέντρα ή κομβικά σημεία αυτοκινητοδρόμων). Σημαντικό ρόλο θα παίξει και η χωροθέτηση αποθηκευτικών μονάδων δίπλα σε σταθμούς φόρτισης υψηλής ισχύος – π.χ. μπαταρίες που θα φορτίζονται αργά από το δίκτυο και θα αποδίδουν γρήγορα ενέργεια στα EV όταν συνδέονται πολλά ταυτόχρονα. Τέτοιες λύσεις ήδη δοκιμάζονται πιλοτικά διεθνώς και θα μπορούσαν να εφαρμοστούν και στην Ελλάδα, μειώνοντας την αιχμιακή επιβάρυνση στο δίκτυο διανομής.

Ανανεώσιμες πηγές και ενεργειακό μείγμα: Όπως επισημάνθηκε, η περιβαλλοντική αξία της ηλεκτροκίνησης μεγιστοποιείται μόνο αν η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται καθαρά. Η Ελλάδα έχει δρομολογήσει φιλόδοξα έργα ΑΠΕ (ηλιακά, αιολικά, διασυνδέσεις νησιών κ.ά.) που όχι μόνο θα αντικαταστήσουν τους ρυπογόνους λιγνίτες, αλλά θα καλύψουν και την επιπλέον ζήτηση από τις μεταφορές. Μια πρόκληση εδώ είναι ο συντονισμός προσφοράς-ζήτησης: τα EV μπορούν να λειτουργήσουν υποστηρικτικά, καταναλώνοντας ρεύμα όταν οι ΑΠΕ παράγουν σε αφθονία (π.χ. φόρτιση μεσημέρι με ήλιο ή βράδυ με ισχυρό αέρα), και έτσι να περιορίσουν τις ανάγκες για εφεδρική παραγωγή από φυσικό αέριο. Αντιστρόφως, θα πρέπει να αποφευχθεί η φόρτιση σε χρόνους που θα προκαλούσε ενεργοποίηση παλαιών μονάδων πετρελαίου (στα μη διασυνδεδεμένα νησιά) ή εισαγωγές ρεύματος υψηλού άνθρακα. Η πλήρης διασύνδεση των νησιών (Κυκλάδες, Κρήτη έως 2024, Δωδεκάνησα ως 2027)[22] θα επιτρέψει και στα νησιωτικά EV να φορτίζουν με πράσινη ενέργεια από το ηπειρωτικό σύστημα, εξαλείφοντας τους τοπικούς θερμικούς σταθμούς.

Σημειώνεται ότι η ηλεκτροκίνηση ενέχει και μια θετική πρόκληση για το ενεργειακό σύστημα: τη μείωση της κατανάλωσης πετρελαιοειδών. Κάθε βενζινοκινητήρας που αντικαθίσταται από ηλεκτροκινητήρα μειώνει την ανάγκη για βενζίνη/πετρέλαιο κίνησης και τις σχετικές εισαγωγές καυσίμων. Αυτό ενισχύει την ενεργειακή ασφάλεια και διαφοροποίηση της χώρας. Ωστόσο, μεταφέρει το φορτίο στις ηλεκτρικές ανάγκες – εξ ου και η ανάγκη ολιστικής ενεργειακής στρατηγικής. Στην ουσία, τα EV αποτελούν μέρος του

ευρύτερου ψηφιδωτού της ενεργειακής μετάβασης, το οποίο περιλαμβάνει εξηλεκτρισμό πολλών τομέων (θέρμανση, βιομηχανία, μεταφορές) και παράλληλη απανθρακοποίηση της ηλεκτροπαραγωγής.

Εν κατακλείδι, οι προκλήσεις για το ηλεκτρικό δίκτυο είναι υπαρκτές αλλά αντιμετωπίσιμες με τον σωστό σχεδιασμό. Οι διαχειριστές συστήματος προετοιμάζονται ώστε το ηλεκτρικό δίκτυο της Ελλάδας να αντέξει και να εξυπηρετήσει ένα μελλοντικό στόλο εκατοντάδων χιλιάδων EV, χωρίς διαταραχές. Αυτό περιλαμβάνει επενδύσεις σε δίκτυα, έξυπνες τεχνολογίες διαχείρισης φορτίου, ανάπτυξη ΑΠΕ και αποθήκευσης. Με αυτόν τον τρόπο, η ηλεκτροκίνηση δεν θα θεωρείται βάρος για το σύστημα, αλλά αξιοποιήσιμος πόρος, που θα μπορούσε να βελτιώσει την ευελιξία και αποδοτικότητα του ενεργειακού οικοσυστήματος συνολικά.

3.Διεθνές & Εγχώριο Πλαίσιο Ανάπτυξης Υποδομών Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων

3.1 Διεθνές Πλαίσιο Μετάβασης στην Ηλεκτροκίνηση και Προκλήσεις Υποδομών

Η παγκόσμια μετάβαση στην ηλεκτροκίνηση βρίσκεται σε πλήρη εξέλιξη, με τις πωλήσεις ηλεκτρικών αυτοκινήτων να ξεπερνούν τα 10 εκατομμύρια οχήματα παγκοσμίως το 2022, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 14% των νέων πωλήσεων [1]. Η δυναμική αυτή τάση ενισχύεται από τις δεσμεύσεις 31 κυβερνήσεων στη Διάσκεψη COP26, που υπέγραψαν τη Δήλωση ZEV για μηδενικές εκπομπές σε όλα τα νέα αυτοκίνητα στις κύριες αγορές έως το 2035 [2]. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει ήδη αποφασίσει την απαγόρευση πωλήσεων νέων οχημάτων εσωτερικής καύσης από το 2035, ενώ χώρες όπως η Νορβηγία στοχεύουν σε ακόμη ταχύτερη μετάβαση, έως το 2025.

Παρά την αυξανόμενη διείσδυση των EV, η ανάπτυξη των υποδομών φόρτισης παραμένει μια σημαντική πρόκληση. Στο τέλος του 2022 λειτουργούσαν περίπου 2,7 εκατομμύρια δημόσια προσβάσιμα σημεία φόρτισης παγκοσμίως, με ετήσια αύξηση 55% (900.000 νέοι φορτιστές) [4]. Η γεωγραφική κατανομή τους όμως είναι εξαιρετικά άνιση: πάνω από τους μισούς δημόσιους φορτιστές βρίσκονται στην Κίνα, με την Ευρώπη να ακολουθεί (περίπου 460.000 φορτιστές το 2022) και τις ΗΠΑ να υστερούν σημαντικά [5].

Οι βασικότερες προκλήσεις για την επέκταση της υποδομής φόρτισης διεθνώς συνοψίζονται ως εξής [4,5]:

- **Περιορισμοί Ηλεκτρικών Δικτύων:** Οι σταθμοί φόρτισης απαιτούν σημαντική ισχύ από το δίκτυο ηλεκτροδότησης, καθιστώντας τη διασύνδεσή τους δύσκολη και χρονοβόρα. Πολλές περιοχές αντιμετωπίζουν περιορισμένη χωρητικότητα δικτύου και μεγάλους χρόνους αναμονής για νέες συνδέσεις.
- **Ρυθμιστική Πολυπλοκότητα:** Οι διαδικασίες αδειοδότησης και εγκατάστασης φορτιστών ποικίλλουν σημαντικά μεταξύ χωρών και περιφερειών, δημιουργώντας γραφειοκρατικές καθυστερήσεις και ασυνέχειες στην ανάπτυξη.
- **Ζητήματα Χρηματοδότησης και Βιωσιμότητας:** Η ανάπτυξη δημόσιων σταθμών φόρτισης απαιτεί σημαντικές επενδύσεις, σε έναν κλάδο που βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο χωρίς εγγυημένη βραχυπρόθεσμη κερδοφορία. Πολλοί επενδυτές διστάζουν λόγω αβεβαιότητας, υψηλού κόστους ηλεκτρικής ενέργειας και μακράς περιόδου απόσβεσης.

Επιπρόσθετη πρόκληση αποτελεί η περιορισμένη διαθεσιμότητα δημόσιων φορτιστών σε πυκνοκατοικημένα αστικά κέντρα. Πολλοί πιθανοί αγοραστές EV δεν έχουν ιδιωτικό χώρο στάθμευσης για οικιακό φορτιστή, στις ΗΠΑ μόνο το 48% των κατοίκων διαθέτει off-street parking, με παρόμοια ποσοστά και στην Ευρώπη [6]. Αυτή η πραγματικότητα καθιστά απαραίτητη την ύπαρξη εκτεταμένου δικτύου δημόσιας φόρτισης για την αντιμετώπιση του "άγχους αυτονομίας" (range anxiety) που μπορεί να αποθαρρύνει την υιοθέτηση ηλεκτρικών οχημάτων.

Σύμφωνα με το Παγκόσμιο Οικονομικό Φόρουμ, παρά την αύξηση των σημείων δημόσιας φόρτισης, ο ρυθμός ανάπτυξής τους δεν επαρκεί για να καλύψει τη ραγδαία αυξανόμενη ζήτηση και την επίτευξη των στόχων απανθρακοποίησης. Οι δημοτικές αρχές στις μεγάλες πόλεις αντιμετωπίζουν ιδιαίτερες δυσκολίες λόγω της υψηλής πυκνότητας δόμησης, των περιορισμών του υφιστάμενου δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και της έλλειψης πόρων για ταχεία υλοποίηση και συντήρηση των εγκαταστάσεων.

3.2 Ρυθμοί Υιοθέτησης Ηλεκτρικών Οχημάτων και Στρατηγικές Ανάπτυξης Υποδομών Φόρτισης

Η υιοθέτηση των ηλεκτρικών οχημάτων αυξάνεται εκθετικά τα τελευταία χρόνια, δημιουργώντας αυξανόμενη πίεση για αντίστοιχη ανάπτυξη των υποδομών φόρτισης [7]. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, οι πωλήσεις αμιγώς ηλεκτρικών αυτοκινήτων (BEV) αυξήθηκαν κατά 18 φορές την περίοδο 2017-2023, ενώ το δίκτυο δημόσιων φορτιστών επεκτάθηκε μόλις κατά 6 φορές. Στα τέλη του 2023, κυκλοφορούσαν περίπου 3 εκατομμύρια ηλεκτρικά αυτοκίνητα στην ΕΕ, με τους δημόσιους φορτιστές να ανέρχονται σε ~632.000 – αναλογία περίπου 5 EV ανά σημείο φόρτισης [8].

Για την ομαλή εμπειρία φόρτισης και την αποφυγή ελλείψεων, απαιτείται διατήρηση ευνοϊκής αναλογίας οχημάτων/φορτιστών. Ορισμένες αγορές θεωρούν ότι 10 ηλεκτρικά αυτοκίνητα ανά φορτιστή αποτελούν εύλογη ισορροπία, με την αναλογία να εξαρτάται από την ισχύ των φορτιστών και τη δυνατότητα οικιακής ή εργασιακής φόρτισης.

Με βάση τους φιλόδοξους στόχους για την ηλεκτροκίνηση, οι μελλοντικές ανάγκες σε υποδομές είναι εντυπωσιακές. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εκτιμά ότι περίπου 3,5 εκατομμύρια δημόσια σημεία φόρτισης θα απαιτηθούν στην ΕΕ έως το 2030 για την υποστήριξη του στόχου "Fit for 55" [9]. Ανεξάρτητες αναλύσεις της αυτοκινητοβιομηχανίας ανεβάζουν αυτή την εκτίμηση έως και 8,8 εκατομμύρια φορτιστές πανευρωπαϊκά μέχρι το 2030. Για την κάλυψη αυτών των αναγκών, απαιτείται δεκαπλασιασμός του σημερινού ρυθμού εγκατάστασης (από περίπου 150.000 σε πάνω από 1,2 εκατομμύρια νέους φορτιστές ετησίως). Παρόμοιες προκλήσεις αντιμετωπίζουν και άλλες μεγάλες αγορές, όπως οι ΗΠΑ, η Κίνα και η Ινδία, που χρειάζεται να αναπτύξουν εκατοντάδες χιλιάδες σταθμούς φόρτισης για να στηρίξουν την προβλεπόμενη αύξηση των EV.

Η στρατηγική χωροθέτησης των σταθμών φόρτισης αποτελεί καθοριστικό παράγοντα επιτυχίας. Δεν αρκεί μόνο η ποσοτική επάρκεια – οι φορτιστές πρέπει να τοποθετούνται στα κατάλληλα σημεία για μέγιστη αξιοποίηση και εξυπηρέτηση των χρηστών. Δύο κύριοι άξονες χωροθέτησης είναι:

1. **Αστικοί/τοπικοί φορτιστές:** Απαραίτητοι σε πυκνοκατοικημένες περιοχές και κέντρα πόλεων, όπου πολλοί κάτοικοι δεν έχουν πρόσβαση σε ιδιωτικούς χώρους φόρτισης. Τοποθετούνται σε χώρους στάθμευσης, εμπορικά κέντρα, δημόσια κτίρια και οδούς με υψηλή συγκέντρωση οχημάτων [10].
2. **Υπεραστικοί ταχυφορτιστές:** Αναπτύσσονται κατά μήκος αυτοκινητοδρόμων και βασικών οδικών αξόνων, επιτρέποντας την ανάκτηση μεγάλου μέρους της αυτονομίας σε 20-40 λεπτά. Η παρουσία αξιόπιστων ταχυφορτιστών ανά τακτά

διαστήματα στο εθνικό οδικό δίκτυο (π.χ. κάθε 50-60 χιλιόμετρα) αυξάνει σημαντικά την εμπιστοσύνη στα ηλεκτρικά οχήματα.

Μια ολοκληρωμένη στρατηγική χωροθέτησης συνδυάζει την ευρεία γεωγραφική κάλυψη με τη μεγιστοποίηση της χρήσης των εγκαταστάσεων, λαμβάνοντας υπόψη πολλαπλές παραμέτρους: την πυκνότητα και τα πρότυπα κυκλοφορίας των EV, τις γεωγραφικές αποστάσεις, την προσβασιμότητα και τις διαθέσιμες ηλεκτρικές υποδομές. Για τη βελτιστοποίηση των δικτύων, οι αρχές συχνά εφαρμόζουν πιλοτικές εγκαταστάσεις και συνεργάζονται με παρόχους υπηρεσιών για την ανταλλαγή δεδομένων που βοηθούν στον εντοπισμό σημείων υψηλής ζήτησης.

Συνολικά, οι κυβερνήσεις και ο κλάδος προσπαθούν να εξισορροπήσουν μεταξύ της αποφυγής της υστέρησης υποδομών (infrastructure lag), όπου η έλλειψη φορτιστών επιβραδύνει την αγορά EV και της υπερεπένδυσης (overcapacity) σε αχρησιμοποίητους φορτιστές. Η βέλτιστη ισορροπία απαιτεί συνεχή παρακολούθηση δεικτών όπως: αριθμός EV ανά φορτιστή, μέση χρήση ανά φορτιστή, χρόνοι αναμονής και γεωγραφική κάλυψη.

3.3 Ευρωπαϊκή Πολιτική για την Ηλεκτροκίνηση και τις Υποδομές Φόρτισης

Η Ευρώπη ηγείται παγκοσμίως στην προώθηση της ηλεκτροκίνησης, με ισχυρό θεσμικό πλαίσιο και φιλόδοξους στόχους. Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (Green Deal) του 2019 θέτει ως απώτερο στόχο την κλιματική ουδετερότητα έως το 2050, με ενδιάμεσο στόχο τη μείωση των εκπομπών κατά 55% έως το 2030. Το πακέτο μέτρων "Fit for 55" (2021) περιλαμβάνει την απόφαση για μηδενικές εκπομπές σε όλα τα νέα ΙΧ και ελαφρά επαγγελματικά από το 2035, τερματίζοντας ουσιαστικά τις πωλήσεις συμβατικών οχημάτων εσωτερικής καύσης.

Παράλληλα με τα κίνητρα για την αγορά ηλεκτρικών οχημάτων, η ΕΕ έχει διαμορφώσει συγκεκριμένες πολιτικές για την ανάπτυξη των αναγκαίων υποδομών φόρτισης. Κεντρικό ρόλο έχει ο νέος Κανονισμός για τις Υποδομές Εναλλακτικών Καυσίμων (AFIR - Regulation (EU) 2023/1804), που τέθηκε σε ισχύ τον Απρίλιο του 2024 [5,9]. Ο AFIR αντικαθιστά την προηγούμενη Οδηγία 2014/94/ΕΕ, μετατρέποντας τους στόχους σε δεσμευτικές υποχρεώσεις για τα κράτη-μέλη, με τρεις βασικούς άξονες:

1. Εξασφάλιση ενός ελάχιστου επαρκούς δικτύου φόρτισης σε κάθε κράτος-μέλος
2. Διαλειτουργικότητα και ενιαία τεχνικά πρότυπα σε όλη την Ένωση
3. Φιλική προς τον χρήστη λειτουργία (διαφάνεια τιμών, εύκολες πληρωμές κλπ.)

Ο AFIR καθορίζει συγκεκριμένους ποσοτικούς στόχους για κάθε χώρα με διττή προσέγγιση:

- **Αναλογικοί στόχοι βάσει οχημάτων:** Κάθε κράτος-μέλος πρέπει να διασφαλίζει ελάχιστη διαθέσιμη ισχύ φόρτισης ανά ηλεκτρικό όχημα συγκεκριμένα, τουλάχιστον 1,3 kW δημόσιας ισχύος ανά αμιγώς ηλεκτρικό αυτοκίνητο και 0,8 kW ανά υβριδικό plug-in. Έτσι, όσο αυξάνεται ο στόλος των EV, θα αυξάνεται υποχρεωτικά και η διαθέσιμη υποδομή.

- **Γεωγραφική κάλυψη:** Προβλέπονται σταθμοί φόρτισης κατά μήκος του διευρωπαϊκού δικτύου αυτοκινητοδρόμων (TEN-T) ανά καθορισμένες αποστάσεις (περίπου 60 χλμ για ΙΧ). Για τα βαρέα οχήματα, απαιτούνται ισχυρότεροι σταθμοί (τουλάχιστον 350 kW) ανά περίπου 120 χλμ, καθώς και σε αστικούς κόμβους και ασφαλείς χώρους στάθμευσης για την εξυπηρέτηση των logistics "τελευταίου μιλίου".

Για την υλοποίηση αυτών των φιλόδοξων στόχων, η ΕΕ κινητοποιεί σημαντικούς χρηματοδοτικούς πόρους μέσω του Μηχανισμού Ανάκαμψης και άλλων εργαλείων (CEF, EIB). Η Ευρωπαϊκή Τράπεζα Επενδύσεων, σε συνεργασία με την Επιτροπή, διέθεσε €1,5 δισ. έως το τέλος του 2023 για υποδομές εναλλακτικών καυσίμων, με έμφαση στους ταχυφορτιστές. Παράλληλα, προγράμματα όπως το Connecting Europe Facility συγχρηματοδοτούν διακρατικά δίκτυα φόρτισης, ενώ κάθε κράτος μπορεί να αξιοποιήσει και το Ταμείο Ανάκαμψης για σχετικές επενδύσεις.

Η ευρωπαϊκή προσέγγιση συνθέτει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο που συνδυάζει αυστηρούς στόχους για τις εκπομπές των οχημάτων με δεσμευτικές υποχρεώσεις ανάπτυξης υποδομών φόρτισης. Ήδη σημειώνεται σημαντική πρόοδος, με τον αριθμό των δημόσιων σημείων φόρτισης να τριπλασιάζεται την περίοδο 2019-2022 [11]. Ωστόσο, παραμένουν προκλήσεις όπως η κάλυψη απομακρυσμένων περιοχών και η δημιουργία υποδομών για φορτιστές πολύ υψηλής ισχύος για τα μελλοντικά ηλεκτρικά φορτηγά [11]. Με εργαλεία όπως ο AFIR, η Ευρώπη στοχεύει στη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου πανευρωπαϊκού δικτύου φόρτισης "χωρίς σύνορα", ανταποκρινόμενη στις απαιτήσεις της νέας εποχής μηδενικών ρύπων.

3.4 Ελληνική Πολιτική: Καθυστερήσεις, Ελλείψεις, Προγράμματα και Ρόλος Δήμων

Η μετάβαση στην ηλεκτροκίνηση στην Ελλάδα ξεκίνησε με βραδείς ρυθμούς συγκριτικά με τον ευρωπαϊκό μέσο όρο, λόγω έλλειψης κατάλληλου θεσμικού πλαισίου, ανεπαρκών υποδομών και χαμηλής κοινωνικής αποδοχής. Ωστόσο, από το 2020 και μετά παρατηρείται αισθητή επιτάχυνση, χάρη στην υιοθέτηση ενός ολοκληρωμένου θεσμικού πλαισίου, τη θέσπιση ισχυρών οικονομικών κινήτρων και τη σημαντική ενίσχυση των επενδύσεων σε υποδομές φόρτισης [12]. Το θεσμικό πλαίσιο για την ηλεκτροκίνηση θεμελιώθηκε με τον Νόμο 4710/2020, που περιέλαβε οικονομικά και φορολογικά κίνητρα όπως απαλλαγή από τέλη κυκλοφορίας, εκπτώσεις στα εταιρικά φορολογικά βάρη, και επιδοτήσεις για την αγορά ηλεκτρικών οχημάτων και εγκατάσταση φορτιστών [12]. Παράλληλα, ο Εθνικός Κλιματικός Νόμος (4936/2022) έθεσε σαφείς και δεσμευτικούς στόχους, όπως την πλήρη μετάβαση σε ηλεκτρικά οχήματα από το 2030, με ειδικές ποσοστώσεις για εταιρικά οχήματα, ταξί και άλλα επαγγελματικά οχήματα [12].

Η πολιτεία και ο ιδιωτικός τομέας στην Ελλάδα έχουν δραστηριοποιηθεί έντονα τα τελευταία χρόνια, παρέχοντας κίνητρα και επενδύοντας κεφάλαια για να υπερκεραστεί το αρχικό εμπόδιο του κόστους και της ανωριμότητας αγοράς που συνοδεύει την ηλεκτροκίνηση. Οι παρεμβάσεις αυτές, δηλαδή οι οικονομικές ενισχύσεις, ευρωπαϊκά προγράμματα και συμπράξεις είναι καθοριστικές για την επίτευξη των φιλόδοξων στόχων διείσδυσης EV. Το βασικό εργαλείο ενίσχυσης της ζήτησης ήταν και είναι το πρόγραμμα «Κινούμαι Ηλεκτρικά». Η πρώτη φάση του ξεκίνησε τον Αύγουστο 2020 (Ν.4710/2020), διαθέτοντας ~100 εκατ. €

για την επιδότηση περίπου 14.000 οχημάτων, με ενίσχυση έως 6.000 € ανά νέο ηλεκτρικό όχημα και πρόσθετα μπόνους για απόσυρση παλαιών οχημάτων. Η ανταπόκριση ξεπέρασε κάθε προσδοκία, οδηγώντας στην εξάντληση του προϋπολογισμού και στην αύξηση των ταξινομήσεων EV [29]. Ο Β' κύκλος (2022–2023) συνέχισε με αυξημένο προϋπολογισμό (~50 εκατ. €) και βελτιωμένους όρους, ενώ ο Γ' κύκλος (2024–2025) βρίσκεται ήδη σε εξέλιξη, με στόχο τη συνέχιση της υποστήριξης. Συνολικά, μέχρι τον Μάρτιο 2025 έχουν διατεθεί πάνω από 150 εκατ. €, υποστηρίζοντας δεκάδες χιλιάδες αγορές ή μισθώσεις EV από ιδιώτες και εταιρείες [29]. Επιπλέον, θεσπίστηκαν φορολογικά και λοιπά κίνητρα: απαλλαγή από τα τέλη κυκλοφορίας, ευνοϊκή φορολογική μεταχείριση για εταιρείες και δωρεάν στάθμευση EV σε αρκετούς δήμους [12]. Από το 2024, τουλάχιστον 25% των νέων εταιρικών οχημάτων πρέπει να είναι χαμηλών εκπομπών, ενώ από το 2026 η ίδια απαίτηση ισχύει για τα νέα ταξί σε Αθήνα και Θεσσαλονίκη, δημιουργώντας θεσμικά κατοχυρωμένη ζήτηση [12].

Το πρόγραμμα «Φορτίζω Παντού», χρηματοδοτούμενο από το Ταμείο Ανάκαμψης (Ελλάδα 2.0), με 80 εκατ. € [28], επιδοτεί έως 70% του κόστους εγκατάστασης δημοσίως προσβάσιμων φορτιστών, καλύπτοντας 8.000+ σημεία σε όλη την Ελλάδα. Οι πρώτες αιτήσεις εγκρίθηκαν ήδη από το 2024, με τα έργα να πρέπει να υλοποιηθούν έως τον Οκτώβριο 2025. Η εφαρμογή του νέου ευρωπαϊκού κανονισμού για τις Υποδομές Εναλλακτικών Καυσίμων (AFIR) [28], ο οποίος επιβάλλει την εγκατάσταση ταχυφορτιστών κάθε 60 km στους αυτοκινητοδρόμους έως το 2025, προσδίδει νέα ώθηση στην εθνική στρατηγική. Ήδη, διεθνείς πάροχοι όπως η Tesla και η Ionity έχουν εγκαταστήσει σταθμούς σε στρατηγικές τοποθεσίες, διευκολύνοντας τη διασυνοριακή κυκλοφορία EV. Σε επίπεδο ευρωπαϊκής χρηματοδότησης, η Ελλάδα αξιοποιεί πόρους τόσο από το RRF όσο και από το CEF, Horizon Europe και την ΕΤΕπ, συμμετέχοντας σε έργα για ταχυφορτιστές, καινοτομίες και ευφυή δίκτυα φόρτισης. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η επένδυση της ΔΕΗ blue για 10.000 φορτιστές μέχρι το 2025, με πάνω από 2.000 ήδη ενεργούς το 2024 [30].

Ο ρόλος των Δήμων είναι κρίσιμος: μέσω των Σχεδίων Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων (ΣΦΗΟ) [12], που χρηματοδοτήθηκαν από το Πράσινο Ταμείο, καθορίστηκαν γεωχωρικά οι θέσεις φορτιστών ανά περιοχή. Οι Δήμοι, πέρα από το σχεδιασμό, αναλαμβάνουν οι ίδιοι ή μέσω συνεργασιών με ιδιώτες την υλοποίηση των υποδομών.

Παράλληλα, και οι ιδιώτες επενδυτές κινητοποιούνται: ενεργειακοί όμιλοι (Helleniq Energy, Motor Oil), πάροχοι υποδομών (Blink Charging Hellas, Vox Energy, ElpeFuture), καθώς και αυτοκινητοβιομηχανίες όπως η Tesla, επενδύουν είτε ανεξάρτητα είτε μέσω συνεργασιών. Στρατηγικές συνεργασίες δημόσιου–ιδιωτικού τομέα, όπως στην Αστυπάλαια (με τη Volkswagen) και στη Χάλκη (με Citroën, Vinci, Akuo Energy) [22], προωθούν τη βιώσιμη κινητικότητα μέσω συνδυασμένων λύσεων (EV στόλοι, car-sharing, ΑΠΕ). Τέτοιες δράσεις λειτουργούν ως πιλοτικά παραδείγματα, ενισχύοντας την αποδοχή του κοινού και επιταχύνοντας τη μετάβαση. Αντίστοιχες πρωτοβουλίες υπάρχουν και στον τομέα των logistics και courier, με επενδύσεις σε ηλεκτρικούς στόλους διανομής. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις: η σύνδεση φορτιστών σε υποβαθμισμένα δίκτυα διανομής, η μακροχρόνια συντήρηση και αξιοπιστία των υποδομών, αλλά και η ανάγκη παρακολούθησης δεικτών απόδοσης και διαφάνειας δεδομένων. Η ύπαρξη Μητρώου Υποδομών και η ανάπτυξη ψηφιακών πλατφορμών, όπως το reCharge της ΡΑΑΕΥ, αποτελούν βήματα προς τη σωστή κατεύθυνση.

Συνοψίζοντας, η Ελλάδα έχει αναπτύξει ένα ολοκληρωμένο και δυναμικό πλαίσιο για την ηλεκτροκίνηση, στηριζόμενο σε δημόσιες επιδοτήσεις, ευρωπαϊκές χρηματοδοτήσεις και ιδιωτικές επενδύσεις, διαμορφώνοντας ένα βιώσιμο οικοσύστημα που υποστηρίζει τη σταθερή μετάβαση σε πιο βιώσιμες μορφές μεταφορών. Η συνέχιση των χρηματοδοτήσεων (π.χ. πιθανός Δ' κύκλος «Κινούμαι Ηλεκτρικά», κίνητρα για πολυκατοικίες) και η σταδιακή ενίσχυση της ζήτησης θα διαμορφώσουν το επόμενο στάδιο ωρίμανσης της αγοράς EV στην Ελλάδα.

3.5 Το Ζήτημα της Βέλτιστης Τοποθέτησης Σταθμών Φόρτισης και η Ανάγκη Πολυκριτήριας Ανάλυσης

Καθώς η ηλεκτροκίνηση γνωρίζει ταχεία ανάπτυξη, αναδύεται επιτακτικά ένα κρίσιμο ερευνητικό και πρακτικό πρόβλημα: η επιλογή των βέλτιστων τοποθεσιών για την εγκατάσταση σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (EV). Η αποτελεσματική χωροθέτηση της υποδομής φόρτισης είναι θεμελιώδης για την εξυπηρέτηση των χρηστών, την αποδοτική χρήση των πόρων και τη συνολική βιωσιμότητα του οικοσυστήματος των EV. Ωστόσο, το πρόβλημα αυτό είναι εξαιρετικά σύνθετο και πολυδιάστατο. Η απόφαση για την ιδανική θέση δεν μπορεί να βασίζεται σε έναν μόνο παράγοντα ή σε εμπειρικές εκτιμήσεις, καθώς πρέπει να συνεκτιμηθούν ταυτόχρονα ποικίλα κριτήρια, συχνά με αντικρουόμενες απαιτήσεις. Αυτά περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων:

- **Οικονομικά Κριτήρια:** αντανακλούν την αγοραστική δύναμη, τη χρηματοδοτική ικανότητα και την επενδυτική ελκυστικότητα της περιοχής.
- **Τεχνικά Κριτήρια:** περιλαμβάνουν δείκτες που σχετίζονται με την υφιστάμενη υποδομή, τη ζήτηση και την αξιοποίηση των φορτιστών.
- **Κοινωνικά Κριτήρια:** αποτυπώνουν χαρακτηριστικά του πληθυσμού, της τουριστικής και εμπορικής δραστηριότητας και της χρήσης του δημόσιου χώρου.

Η πληθώρα αυτών των παραγόντων, πολλοί εκ των οποίων μπορούν να αποτρέψουν ένα σταθμό φόρτισης από το να λειτουργεί αποτελεσματικά εάν αγνοηθούν, υπογραμμίζει την ανάγκη για ένα συστηματικό πλαίσιο βελτιστοποίησης των αποφάσεων [14]. Για την αντιμετώπιση αυτής της πολυπλοκότητας, η διεθνής βιβλιογραφία προτείνει και αξιοποιεί εκτενώς μεθόδους Πολυκριτήριας Ανάλυσης Αποφάσεων (Multi-Criteria Decision Analysis - MCDA) [15, 16, 17]. Μέσω της MCDA, καθίσταται δυνατή η ενσωμάτωση και η αξιολόγηση υποψήφιων τοποθεσιών βάσει διαφόρων κατηγοριών κριτηρίων – τεχνικών, οικονομικών, κοινωνικών, περιβαλλοντικών, χωροταξικών/μεταφορικών – ταυτόχρονα. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη στάθμιση των κριτηρίων, δίνοντας διαφορετική βαρύτητα στο καθένα ανάλογα με τις προτεραιότητες του σχεδιασμού (π.χ. εξυπηρέτηση κατοίκων σε αστική περιοχή έναντι υψηλής ισχύος σε αυτοκινητόδρομο), επιτρέποντας μια ευέλικτη και προσαρμοσμένη αξιολόγηση. Μέθοδοι όπως η Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (AHP), η TOPSIS και αλγόριθμοι ασαφούς λογικής (fuzzy logic) χρησιμοποιούνται για την ποσοτική αξιολόγηση και την ιεράρχηση των εναλλακτικών τοποθεσιών.

Μια τέτοια πολυκριτήρια προσέγγιση μπορεί να αποτελέσει τη βάση για την ανάπτυξη ενός Σχεδίου Φόρτισης του Δήμου Αθηναίων [70], όπου οι περιοχές υψηλής προτεραιότητας προσδιορίζονται μέσω αξιολόγησης με βάση πολλαπλά κριτήρια. Οι περιοχές αυτές μπορούν να λειτουργήσουν ως οι πρώτοι πυρήνες ανάπτυξης της υποδομής. Στις επιλεγμένες ζώνες

συνιστάται να διερευνηθούν και να καθοριστούν συγκεκριμένες θέσεις σε δρόμους ή δημοτικούς χώρους στάθμευσης για την εγκατάσταση ενός επαρκούς αριθμού φορτιστών, έτσι ώστε να καλυφθεί το υφιστάμενο έλλειμμα. Η προτεραιοποίηση αυτή διασφαλίζει ότι οι διαθέσιμοι πόροι θα κατευθυνθούν εκεί όπου το κοινωνικό και περιβαλλοντικό όφελος είναι μέγιστο.

Για την αποτελεσματικότερη εφαρμογή, η προσέγγιση αυτή μπορεί να είναι πολυεπίπεδη. Η ανάλυση σε επίπεδο Δημοτικής Κοινότητας επιτρέπει αρχικά τον εντοπισμό ευρύτερων στρατηγικών ζωνών προτεραιότητας. Εν συνεχεία, η εστίαση σε επίπεδο Ταχυδρομικού Κώδικα (TK) εντός αυτών των ζωνών διευκολύνει την ακριβέστερη επιλογή των σημείων εγκατάστασης, συνδυάζοντας έτσι τη στρατηγική στόχευση με την επιχειρησιακή εξειδίκευση.

Σημείο εκκίνησης για την παρούσα διπλωματική εργασία αποτέλεσε, πέρα από τη γενικότερη ανάγκη για τεκμηριωμένο σχεδιασμό υποδομών φόρτισης, και η ύπαρξη σχεδίου φόρτισης σε επίπεδο Δήμου Αθηναίων, το οποίο ανέδειξε την ανάγκη για συστηματική και ποσοτικά τεκμηριωμένη προσέγγιση στον εντοπισμό περιοχών υψηλής προτεραιότητας. Η εργασία φιλοδοξεί να εμπλουτίσει και να υποστηρίξει τον σχεδιασμό αυτό με τη χρήση επιστημονικών μεθόδων πολυκριτήριας ανάλυσης και data-driven εργαλείων υποστήριξης αποφάσεων.

Η ανάγκη για πολυκριτήρια ανάλυση γίνεται πιο έντονη όσο επεκτείνεται η κλίμακα της υποδομής φόρτισης. Ενώ σε αρχικά στάδια μπορεί να γίνονται επιλογές σε "προφανείς" θέσεις, η μαζική ανάπτυξη εκατοντάδων ή χιλιάδων φορτιστών απαιτεί συστηματικοποίηση. Η πολυκριτήρια μεθοδολογία, συμπεριλαμβανομένων εφαρμογών της TOPSIS, προσφέρει αυτή τη συστηματική προσέγγιση, μειώνοντας τον κίνδυνο λανθασμένων επιλογών, όπως η τοποθέτηση φορτιστών σε σημεία που δεν θα χρησιμοποιούνται (σπατάλη πόρων) ή η παράλειψη κρίσιμων περιοχών που θα δημιουργήσει "κενά" στο δίκτυο.

Για να εφαρμοστεί αποτελεσματικά μια τέτοια πολυκριτήρια προσέγγιση απαιτείται συστηματική συλλογή και επεξεργασία δεδομένων για όλα τα κριτήρια που επηρεάζουν την απόφαση. Στη συνέχεια, αυτά τα δεδομένα τροφοδοτούν τα μαθηματικά μοντέλα της Πολυκριτήριας Ανάλυσης. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα διπλωματική εργασία καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική και συμβάλλει ουσιαστικά στην αντιμετώπιση του προβλήματος, καθώς εστιάζει ακριβώς στη συλλογή δεδομένων, την εφαρμογή πολυκριτήριας ανάλυσης (μέσω μεθόδων όπως η TOPSIS) και τον σχεδιασμό για την τοποθέτηση σταθμών φόρτισης. Η εργασία προσφέρει ένα συγκεκριμένο, εφαρμόσιμο πλαίσιο που επιτρέπει την αντικειμενική αξιολόγηση πιθανών τοποθεσιών βάσει πολλαπλών παραμέτρων, οδηγώντας σε τεκμηριωμένες προτάσεις χωροθέτησης. Μέσα από αυτή τη διαδικασία, η εργασία συμβάλλει στον αποτελεσματικότερο σχεδιασμό των υποδομών φόρτισης, διασφαλίζοντας ότι κάθε νέος σταθμός εγκαθίσταται εκεί όπου θα προσφέρει τη μέγιστη ωφέλεια – τόσο για τους χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων όσο και για το σύστημα στο σύνολό του (τεχνικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά, κοινωνικά). Η παροχή ενός τέτοιου συστηματικού, data-driven μοντέλου σχεδιασμού είναι κρίσιμη για την υποστήριξη της ανάπτυξης της ηλεκτροκίνησης και την επίτευξη των σχετικών στόχων.

4. Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων

4.1 Εισαγωγή στην Πολυκριτήρια Ανάλυση

Η Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων (Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA) αποτελεί υπο-πεδίο της επιχειρησιακής έρευνας που επιτρέπει την αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων βάσει πολλαπλών, συχνά συγκρουόμενων, κριτηρίων. Σε αντίθεση με τις μονοκριτήριες προσεγγίσεις, η MCDA εξετάζει ρητά περισσότερα του ενός κριτήρια και διευκολύνει τον λήπτη απόφασης να σταθμίσει τα σχετικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα κάθε εναλλακτικής λύσης. Για παράδειγμα, σε μια επενδυτική απόφαση μπορεί τα κριτήρια του κόστους και της ποιότητας να έρχονται σε σύγκρουση, η MCDA παρέχει μεθόδους για την ταυτόχρονη αξιολόγησή τους, οδηγώντας σε πιο τεκμηριωμένες αποφάσεις.

Πριν από την ανάπτυξη της Πολυκριτήριας ανάλυσης, οι αποφάσεις λαμβάνονταν συχνά βελτιστοποιώντας μια αντικειμενική συνάρτηση ή μια συνάρτηση χρησιμότητας. Αυτή η στρατηγική έχει το πλεονέκτημα ότι παράγει καλά καθορισμένα μαθηματικά προβλήματα, αλλά δεν είναι πάντα ακριβής. Στην πραγματικότητα, είναι ασυνήθιστο να συγκρίνουμε πολλαπλές αποφάσεις σύμφωνα με μία μόνο οπτική γωνία, και οι προτιμήσεις για μια άποψη είναι συχνά δύσκολο να μοντελοποιηθούν από μια συνάρτηση [33]. Η απόδοση περισσότερων του ενός κριτηρίου κάνει το πρόβλημα πιο ρεαλιστικό και παράλληλα προσφέρει μεγαλύτερη ευελιξία, καθώς εξετάζονται περισσότερες διαστάσεις και πτυχές του [32]. Οι Πολυκριτήριες μέθοδοι, σε αντίθεση με τις κλασικές μεθόδους της Επιχειρησιακής Έρευνας όπως είναι ο Γραμμικός Προγραμματισμός ή ο Μεικτός Ακέραιος Προγραμματισμός, δεν παρέχουν λύσεις που να είναι αντικειμενικά οι καλύτερες καθώς δεν υπάρχει άριστη λύση η οποία να εμφανίζει τις καλύτερες αποδόσεις σε όλα τα κριτήρια [32].

Οι πολύπλοκες αποφάσεις, όπως η επιλογή τοποθεσίας εγκατάστασης σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, χαρακτηρίζονται από πληθώρα ετερογενών κριτηρίων (οικονομικά, περιβαλλοντικά, τεχνικά, χωροταξικά, κ.ά.) τα οποία συχνά είναι αντικρουόμενα. Η ταυτόχρονη ανάλυση όλων αυτών των παραμέτρων ξεπερνά τις δυνατότητες μιας μονοκριτήριας προσέγγισης και καθιστά απαραίτητη την εφαρμογή της MCDA [31]. Πράγματι, η βιβλιογραφία αναφέρει ότι τα προβλήματα χωροθέτησης σταθμών φόρτισης μπορούν να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά με μεθόδους πολυκριτήριας ανάλυσης. Η MCDA παρέχει ένα δομημένο πλαίσιο για την αναγνώριση και ιεράρχηση εναλλακτικών λύσεων, ενώ είναι αποτελεσματική στη διαχείριση περίπλοκων και αντικρουόμενων κριτηρίων σε συνθήκες περιορισμένης ή αβέβαιης πληροφόρησης. Συνεπώς, για προβλήματα όπως η βέλτιστη τοποθέτηση σταθμών φόρτισης, η MCDA κρίνεται ιδιαίτερα κατάλληλη καθώς μπορεί να συνθέσει τις προτιμήσεις εμπλεκόμενων φορέων και να ενσωματώσει πολλαπλές οπτικές στον τελικό υπολογισμό της βέλτιστης απόφασης. Στη διεθνή βιβλιογραφία συναντώνται εκτενείς μελέτες και ανασκοπήσεις που επιβεβαιώνουν την αξία της MCDA σε τέτοιου είδους σύνθετα προβλήματα χωροθέτησης και ενεργειακού σχεδιασμού [31].

4.2 Μέθοδοι Πολυκριτηρίας Αποφάσεων

Έχει αναπτυχθεί μια πληθώρα μεθόδων MCDA για την υποστήριξη σύνθετων αποφάσεων. Κάθε μέθοδος διαφέρει ως προς την προσέγγιση με την οποία συνδυάζει τα κριτήρια και διαμορφώνει τις προτιμήσεις. Παρακάτω παρουσιάζονται επιγραμματικά ορισμένες από τις βασικότερες μεθόδους πολυκριτηρίας ανάλυσης αποφάσεων:

- **AHP (Analytic Hierarchy Process – Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία):** Μέθοδος που εισήγαγε ο Saaty (1980) και βασίζεται στη διασπασμένη ιεραρχική διαμόρφωση του προβλήματος. Ο λήπτης απόφασης πραγματοποιεί συγκρίσεις κατά ζεύγη μεταξύ κριτηρίων και μεταξύ εναλλακτικών ως προς κάθε κριτήριο, ώστε να εξαχθούν αριθμητικά βάρη σπουδαιότητας και βαθμολογίες προτίμησης. Η AHP είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη λόγω της απλότητας και της δυνατότητάς της να ενσωματώνει την υποκειμενική κρίση των ειδικών με τρόπο συνεπή. Συχνά χρησιμοποιείται και συνδυαστικά με άλλες μεθόδους (π.χ. για τον υπολογισμό βαρών κριτηρίων που έπειτα τροφοδοτούν μια μέθοδο κατάταξης όπως η TOPSIS)[31].
- **ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la Réalité):** Μια από τις πρώτες μεθόδους υπερκάλυψης (outranking) της “ευρωπαϊκής σχολής” πολυκριτηρίων μεθόδων. Βασίζεται στη σύγκριση όλων των ζευγών εναλλακτικών ως προς κάθε κριτήριο, χρησιμοποιώντας δείκτες συμφωνίας και διαφωνίας (concordance/discordance) για να προσδιορίσει αν μια εναλλακτική υπερισχύει ή «υπερκαλύπτει» μια άλλη. Οι μέθοδοι ELECTRE πραγματοποιούν διαδοχικές εξετάσεις κυριαρχίας και αποκλείουν βαθμιαία τις λιγότερο επιθυμητές επιλογές, αντί να δίνουν ένα μοναδικό αριθμητικό σκορ χρησιμότητας. Τόσο η ELECTRE όσο και η PROMETHEE χαρακτηρίζονται ως μέθοδοι υπερκάλυψης της ευρωπαϊκής σχολής MCDA [34], εστιάζοντας στη σύγκριση εναλλακτικών ανά ζεύγη και όχι στην απόλυτη αξιολόγησή τους.
- **VIKOR (VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje):** Μέθοδος κατάταξης βάσει συμβιβασμού (compromise ranking). Η VIKOR αναπτύχθηκε από τον Opricovic για να προσδιορίζει μια λύση που μεγιστοποιεί τη συνολική ωφέλεια («utility») της “πλειοψηφίας” και ταυτόχρονα ελαχιστοποιεί τη μέγιστη λύπη (“regret”) της “μειοψηφίας”. Υπολογίζει έναν δείκτη κατάταξης για κάθε εναλλακτική λαμβάνοντας υπόψη την απόστασή της από την ιδανική καλύτερη και χειρότερη λύση, παρόμοια με την TOPSIS αλλά με διαφορετικό τρόπο στάθμισης της ομαδικής ωφέλειας έναντι της ατομικής δυσαρέσκειας [35]. Η μέθοδος VIKOR στοχεύει επομένως σε μια συμβιβαστική λύση, βοηθώντας τον αποφασίζοντα να επιλέξει την εναλλακτική που επιτυγχάνει την καλύτερη ισορροπία μεταξύ ανταγωνιστικών κριτηρίων.
- **PROMETHEE (Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations):** Επίσης μέθοδος υπερκάλυψης (όπως η ELECTRE) που αναπτύχθηκε από τους Brans και Vincke τη δεκαετία του 1980. Η PROMETHEE εισάγει συναρτήσεις προτίμησης για κάθε κριτήριο, μέσω των οποίων μετατρέπει τις διαφορές επιδόσεων των εναλλακτικών σε βαθμούς προτίμησης. Στη συνέχεια, υπολογίζει για κάθε εναλλακτική μία εκροή προτίμησης (positive flow) και μία εισροή προτίμησης (negative flow) συγκρίνοντάς την με όλες τις υπόλοιπες εναλλακτικές. Η τελική κατάταξη προκύπτει από την καθαρή ροή προτίμησης (positive minus negative). Όπως και η ELECTRE, έτσι και η PROMETHEE βασίζεται σε επαναληπτικές συγκρίσεις ανά ζεύγη για την εξαγωγή κατάταξης μεταξύ ενός πεπερασμένου συνόλου

εναλλακτικών [36]. Ένα χαρακτηριστικό της PROMETHEE είναι ότι δίνει μια απλή διαδικασία κατάταξης με διαφάνεια ως προς τις προτιμήσεις, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί σε πλήθος εφαρμογών (διαχείριση πόρων, επιλογή προμηθευτών, περιβαλλοντική διαχείριση κ.ά.).

Στις παραπάνω μεθοδολογίες, άλλες ακολουθούν προσέγγιση συγκριτικής αξιολόγησης όλων των εναλλακτικών μέσω ενός ενιαίου συνθετικού δείκτη (όπως η AHP, η TOPSIS, η VIKOR), ενώ άλλες υιοθετούν προσέγγιση υπερκάλυψης μέσω άμεσων συγκρίσεων μεταξύ των εναλλακτικών (όπως η ELECTRE και η PROMETHEE). Κάθε μέθοδος έχει τα πλεονεκτήματά και τους περιορισμούς της, και η επιλογή κατάλληλης μεθόδου εξαρτάται από τη φύση του προβλήματος, τα διαθέσιμα δεδομένα και τις προτιμήσεις των αποφασιζόντων.

4.3 Η Μέθοδος TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)

Η μέθοδος TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) αποτελεί μία από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές Πολυκριτήριας Ανάλυσης Αποφάσεων (MCDA) για την κατάταξη και επιλογή εναλλακτικών λύσεων. Αναπτύχθηκε από τους Hwang και Yoon το 1981 και βασίζεται στην αρχή ότι η καλύτερη επιλογή είναι εκείνη που βρίσκεται όσο το δυνατόν πλησιέστερα στην ιδανική λύση και ταυτόχρονα όσο το δυνατόν πιο μακριά από την αντι-ιδανική λύση [40].

Η ιδανική λύση (A^+) ορίζεται ως μια υποθετική εναλλακτική που εμφανίζει τις βέλτιστες δυνατές επιδόσεις σε όλα τα κριτήρια, ενώ η αντι-ιδανική (A^-) αντιπροσωπεύει την εναλλακτική με τις χειρότερες δυνατές επιδόσεις. Στόχος της μεθόδου είναι η επιλογή εκείνης της πραγματικής εναλλακτικής που έχει τη μικρότερη απόσταση από την A^+ και τη μεγαλύτερη απόσταση από την A^- στον χώρο των κριτηρίων [37].

Ιδιαίτερα η μέθοδος TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στη βιβλιογραφία για προβλήματα που σχετίζονται με την επιλογή τοποθεσίας υποδομών φόρτισης EV [31, 38, 39]. Η TOPSIS προσφέρει ένα ισχυρό εργαλείο για την αξιολόγηση πολλαπλών παραγόντων και τη κατάταξη των εναλλακτικών λύσεων με βάση την εγγύτητά τους στην "ιδανική" λύση και την απόστασή τους από την "αρνητική-ιδανική" λύση. Η αποτελεσματικότητά της ενισχύεται συχνά με τη χρήση υβριδικών μοντέλων που συνδυάζουν την TOPSIS με άλλες τεχνικές (όπως Fuzzy AHP, DEMATEL, VIKOR) και με την ενσωμάτωση γεωχωρικών δεδομένων σε περιβάλλον GIS, όπως στην περίπτωση της μελέτης των Erbaş et al. [39] για την Κωνσταντινούπολη. Η χρήση ασαφούς λογικής μπορεί επιπλέον να βοηθήσει στη διαχείριση της αβεβαιότητας και της υποκειμενικότητας των κρίσεων. Η κυρίαρχη θέση της TOPSIS σε πλήθος εφαρμογών MCDA για προβλήματα χωροθέτησης ΣΦΗΟ, όπως συνοψίζεται από τους Chumbi et al. [31], υπογραμμίζει την καταλληλότητά της για τον πολύπλοκο σχεδιασμό έξυπνων και αποδοτικών δικτύων φόρτισης.

Βήματα της Μεθόδου TOPSIS:

1. Κατασκευή πίνακα απόφασης: Καταγράφονται οι επιδόσεις των εναλλακτικών λύσεων ως προς κάθε κριτήριο.

2. Κανονικοποίηση του πίνακα απόφασης:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}$$

3. Υπολογισμός σταθμισμένου κανονικοποιημένου πίνακα:

$$v_{ij} = w_j \cdot r_{ij}$$

4. Προσδιορισμός της ιδανικής (A^+) και της αντί-ιδανικής (A^-) λύσης:
 $A^+ = \max(v_{ij})$ και $A^- = \min(v_{ij})$ για κριτήρια μεγιστοποίησης
 $A^+ = \min(v_{ij})$, $A^- = \max(v_{ij})$ για κριτήρια ελαχιστοποίησης

5. Υπολογισμός της απόστασης κάθε εναλλακτικής από την ιδανική και την αντί-ιδανική λύση:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}$$

6. Υπολογισμός του συντελεστή εγγύτητας προς την ιδανική λύση:

$$C_i^* = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}$$

7. Κατάταξη των εναλλακτικών: Οι εναλλακτικές λύσεις κατατάσσονται φθίνοντα ως προς τον δείκτη C_i^* .

Η μέθοδος TOPSIS διακρίνεται για την ευκολία κατανόησης, τη λογική προσέγγιση του προβλήματος και την απλότητα υπολογισμού της. Επιπλέον, προσφέρει σαφή ταξινόμηση των εναλλακτικών, ευθυγραμμισμένη με την ανθρώπινη διαίσθηση: η καλύτερη επιλογή είναι εκείνη που μοιάζει περισσότερο με το "ιδανικό". Ωστόσο, έχει επισημανθεί και ένα βασικό της μειονέκτημα, το λεγόμενο φαινόμενο αντιστροφής κατάταξης (rank reversal), δηλαδή η πιθανή αλλαγή της κατάταξης των εναλλακτικών σε περίπτωση προσθήκης ή αφαίρεσης μιας άλλης [42]. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί με τεχνικές ευαισθησίας και τροποποιημένες εκδοχές της μεθόδου.

5. Πολυκριτήρια ανάλυση για τοποθέτηση σταθμών φορτισης στο Δήμο της Αθήνας.

5.1 Ανάλυση Κριτηρίων Πολυκριτήριας Αξιολόγησης

Η στρατηγική ανάπτυξη ΣΦΗΟ αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για την επιτάχυνση της ηλεκτροκίνησης, καθώς επηρεάζει την προσβασιμότητα, την αποδοτικότητα των επενδύσεων και την αποδοχή από τους πολίτες. Η επιλογή κατάλληλων τοποθεσιών συνιστά ένα πολυκριτήριο πρόβλημα, με κοινωνικές, περιβαλλοντικές, τεχνικές και οικονομικές διαστάσεις, που απαιτεί τη χρήση εργαλείων Πολυκριτήριας Ανάλυσης Απόφασης (MCDA). Η παρούσα εργασία εφαρμόζει τη μέθοδο TOPSIS, η οποία, σύμφωνα με τους Behzadian et al. [42] είναι κατάλληλη για προβλήματα ενεργειακού σχεδιασμού λόγω της σαφήνειας και της αριθμητικής ακρίβειας που προσφέρει.

Για την αποτελεσματική εφαρμογή της μεθόδου, απαιτείται η προσεκτική επιλογή και κανονικοποίηση κατάλληλων κριτηρίων, τα οποία να πληρούν τις εξής προϋποθέσεις:

- Να σχετίζονται άμεσα με την αποτελεσματικότητα και βιωσιμότητα της εγκατάστασης ΣΦΗΟ.
- Να διαφοροποιούνται ουσιαστικά ανά περιοχή ή ταχυδρομικό κώδικα.
- Να βασίζονται σε αντικειμενικά και διαθέσιμα δεδομένα.
- Να επιδέχονται ποσοτική αξιολόγηση και μαθηματικό μετασχηματισμό.

Με βάση την επεξεργασία δεδομένων από το σύνολο των ταχυδρομικών κωδικών της περιοχής μελέτης, καθώς και την αξιοποίηση πληθυσμιακών και οικονομικών στατιστικών, μετρήσεων αξιοποίησης και εκτιμήσεων ζήτησης φόρτισης, διαμορφώθηκε ένα συνεκτικό σύνολο δέκα κριτηρίων. Το εν λόγω σύνολο αποτυπώνει την πολυδιάστατη φύση της απόφασης εγκατάστασης ΣΦΗΟ και επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση των περιοχών βάσει τεχνικών, κοινωνικών και οικονομικών παραμέτρων.

Τα κριτήρια αυτά οργανώνονται σε τρεις βασικές θεματικές κατηγορίες:

- **Οικονομικά Κριτήρια:** αντανακλούν την αγοραστική δύναμη, τη χρηματοδοτική ικανότητα και την επενδυτική ελκυστικότητα της περιοχής.
- **Τεχνικά Κριτήρια:** περιλαμβάνουν δείκτες που σχετίζονται με την υφιστάμενη υποδομή, τη ζήτηση και την αξιοποίηση των φορτιστών.
- **Κοινωνικά Κριτήρια:** αποτυπώνουν χαρακτηριστικά του πληθυσμού, της τουριστικής και εμπορικής δραστηριότητας και της χρήσης του δημόσιου χώρου.

Πίνακας 3 Πίνακας Κριτηρίων (C1–C10)

Κωδικός Κριτηρίου	Όνομα Κριτηρίου	Τύπος Κριτηρίου	Επίδραση
C1	Υφιστάμενοι Φορτιστές (ΣΦΗΟ)	Τεχνικό	Αρνητική
C2	Εκτιμώμενες Μηνιαίες Συνεδρίες Φόρτισης	Τεχνικό	Θετική
C3	Μηνιαίο Ποσοστό Χρήσης Υποδομών Φόρτισης	Τεχνικό	Θετική
C4	Αριθμός Θέσεων Στάθμευσης	Τεχνικό	Θετική
C5	Πληθυσμός Περιοχής	Κοινωνικό	Θετική
C6	Μέσο Εισόδημα	Οικονομικό	Θετική
C7	Αριθμός Ξενοδοχειακών Κλινών	Οικονομικό	Θετική
C8	Αριθμός Επιχειρήσεων	Οικονομικό	Θετική
C9	Σημεία Ενδιαφέροντος (POI)	Κοινωνικό	Θετική
C10	Έλλειμμα Υποδομών Φόρτισης	Τεχνικό	Θετική

Κάθε ένα από τα παραπάνω κριτήρια παρουσιάζεται στις επόμενες ενότητες με αναλυτικό και τεκμηριωμένο τρόπο: παρέχεται η θεωρητική του βάση, η σημασία του για την αξιολόγηση των περιοχών, η κατεύθυνση της επίδρασής του (θετική ή αρνητική), καθώς και η προσαρμογή του στη μαθηματική διαδικασία της TOPSIS. Το σύνολο των κριτηρίων διαμορφώνει ένα εργαλείο υποστήριξης λήψης αποφάσεων που αποτυπώνει με αντικειμενικότητα τις ανάγκες και τις δυνατότητες κάθε περιοχής για την προώθηση της ηλεκτροκίνησης.

Μια άλλη βασική πτυχή της μεθοδολογίας είναι η ενσωμάτωση data pipelines που βασίζονται στο cloud και Python scripts για τον χειρισμό των διαφόρων συνόλων δεδομένων που εμπλέκονται. Η διπλωματική αξιοποίησε τα εργαλεία cloud της Amazon Web Services (AWS) για τη συλλογή, αποθήκευση και επεξεργασία δεδομένων της εταιρείας PROTASIS SA [59](για παράδειγμα, άντληση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τις υφιστάμενες θέσεις σταθμών φόρτισης ή πρόσβαση σε ενημερωμένες δημογραφικές βάσεις δεδομένων) και χρησιμοποίησε scriptings Python για τον καθαρισμό των δεδομένων, τον υπολογισμό των κριτηρίων και τους υπολογισμούς TOPSIS. Αυτή η τεχνική προσέγγιση ενισχύει σημαντικά την αναπαραγωγικότητα και την επεκτασιμότητα. Οποιοσδήποτε δήμος ή περιοχή με παρόμοια δεδομένα μπορεί να επαναχρησιμοποιήσει τον κώδικα με ελάχιστες τροποποιήσεις και τα pipelines μπορούν να αυτοματοποιηθούν για την επικαιροποίηση της ανάλυσης καθώς διατίθενται νέα δεδομένα. Η υιοθέτηση μιας τέτοιας ροής εργασίας που τροφοδοτείται από το cloud θεωρείται όλο και περισσότερο ως βέλτιστη πρακτική στον σχεδιασμό έξυπνων πόλεων, όπου τα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων που βασίζονται σε δεδομένα πρέπει να παραμένουν επίκαιρα και εύκολα προσβάσιμα. Για παράδειγμα, εάν η Αθήνα ενημερώσει τα δεδομένα των αισθητήρων κυκλοφορίας της ή εάν κυκλοφορήσουν νέοι αριθμοί εγγραφής ηλεκτρικών οχημάτων το επόμενο έτος, το pipeline που βασίζεται,

μπορεί να ενσωματώσει αυτές τις αλλαγές και να εκτελέσει εκ νέου το MCDA, διατηρώντας τις συστάσεις ενημερωμένες. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με τις εφάπαξ στατικές μελέτες και αποτελεί ένα πρακτικό βήμα προς την ικανότητα συνεχούς σχεδιασμού.

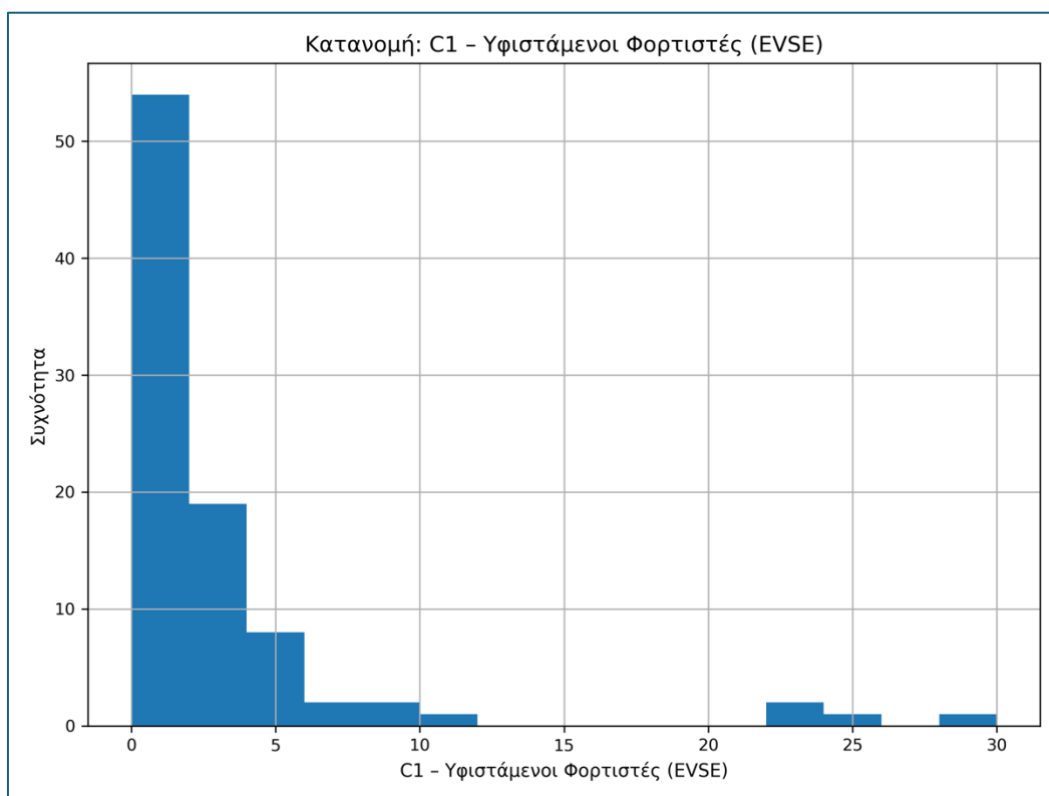
C1 – Υφιστάμενοι Φορτιστές (ΣΦΗΟ)

Ο αριθμός των ήδη εγκατεστημένων σταθμών φόρτισης σε κάθε περιοχή αποτελεί έναν κρίσιμο τεχνικό δείκτη που σχετίζεται με το υφιστάμενο επίπεδο κάλυψης και ωριμότητας της υποδομής ηλεκτροκίνησης. Η παρουσία ή απουσία φορτιστών υποδεικνύει σε μεγάλο βαθμό τον βαθμό προετοιμασίας μιας περιοχής για τη μετάβαση στην ηλεκτροκίνηση, αλλά και τις πιθανές επενδυτικές ευκαιρίες για επέκταση του δικτύου, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6.

Η ενσωμάτωση του κριτηρίου στο μοντέλο MCDA επιτρέπει την αποτύπωση του βαθμού κορεσμού της περιοχής: περιοχές με ήδη ανεπτυγμένο δίκτυο φόρτισης ενδέχεται να παρουσιάζουν μικρότερη ανάγκη για επιπλέον φορτιστές, εκτός αν συνδυάζονται με στοιχεία υψηλής ζήτησης ή έντονης χρήσης. Αντίθετα, περιοχές με μηδενικό ή ελάχιστο αριθμό υφιστάμενων ΣΦΗΟ ενδέχεται να στερούνται βασικής προσβασιμότητας στη φόρτιση, γεγονός που τις καθιστά προτεραιότητα για μελλοντική ανάπτυξη, εφόσον επιβεβαιώνεται η ύπαρξη ζήτησης.

Ωστόσο, στο πλαίσιο της παρούσας ανάλυσης και δεδομένης της συμπερίληψης άλλων μεταβλητών όπως η αξιοποίηση, η ζήτηση και το έλλειμμα υποδομών, το κριτήριο των υφιστάμενων φορτιστών αξιολογείται ως αρνητικό. Αυτό σημαίνει ότι όσο περισσότερες μονάδες ΣΦΗΟ υπάρχουν ήδη σε μια περιοχή, τόσο μικρότερη θεωρείται η σχετική ανάγκη για νέα εγκατάσταση, με στόχο την ενίσχυση περιοχών που σήμερα είναι ενεργειακά υποεξυπηρετούμενες.

Η χρήση του δείκτη αυτού υποστηρίζεται ευρέως στη βιβλιογραφία για τον σχεδιασμό γεωγραφικής κάλυψης ΣΦΗΟ, ιδιαίτερα σε εφαρμογές που στοχεύουν στην κοινωνικά δίκαιη και ισόρροπη κατανομή των υποδομών [43].

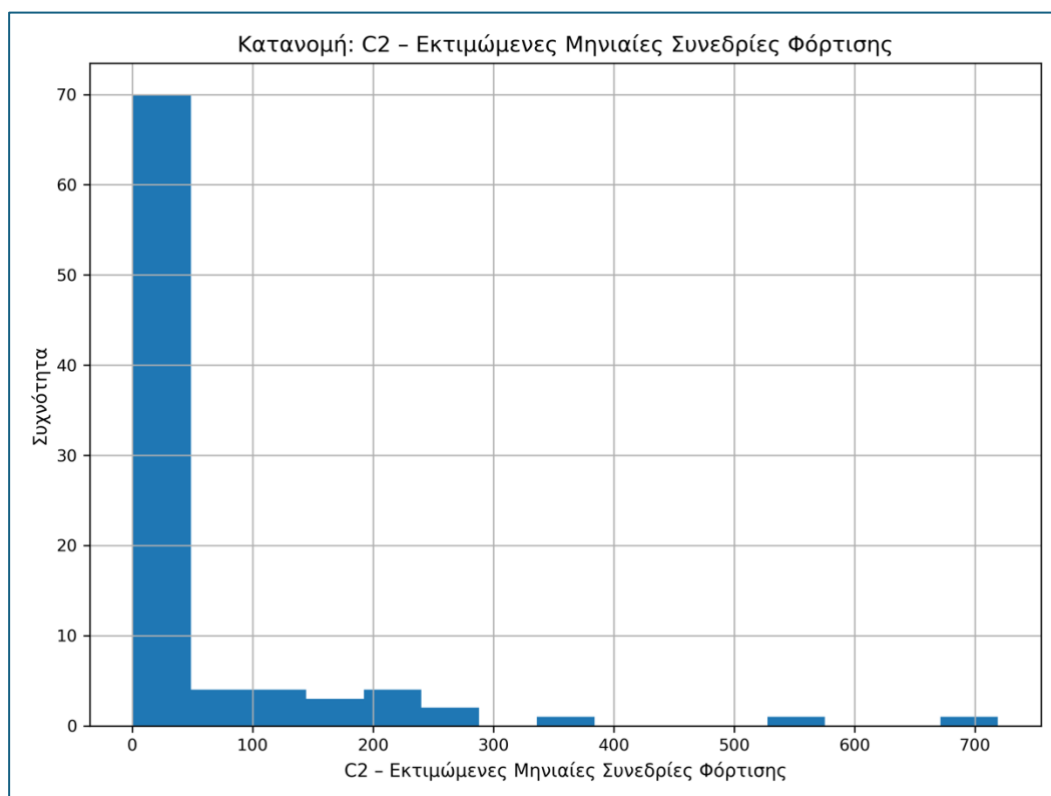


Εικόνα 6 Κατανομή του πλήθους υφιστάμενων υποδομών φόρτισης EVSE ανά ταχυδρομικό κώδικα (Κριτήριο C1 – Υφιστάμενοι Φορτιστές)

C2 – Εκτιμώμενες Μηνιαίες Συνεδρίες Φόρτισης

Η εκτιμώμενη μηνιαία συχνότητα φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε κάθε περιοχή αποτελεί κρίσιμο δείκτη της δυναμικής ζήτησης και της αναμενόμενης χρήσης των σταθμών φόρτισης και στην Εικόνα 7 φαίνεται η κατανομή του κριτηρίου. Το κριτήριο αυτό δεν αποτυπώνει την ενεργειακή κατανάλωση (σε kWh), αλλά τον πλήθος των συνεδριών φόρτισης (charging sessions), δηλαδή το πόσες φορές πραγματοποιείται φόρτιση σε κάθε ταχυδρομικό κώδικα. Η χρήση αυτού του δείκτη επιτρέπει την αποτύπωση της καθημερινής λειτουργικής πίεσης που δέχεται μια περιοχή, ανεξαρτήτως της διάρκειας ή του όγκου κάθε φόρτισης.

Η σημασία του κριτηρίου εντοπίζεται στη δυνατότητα προληπτικού εντοπισμού περιοχών υψηλής μελλοντικής ζήτησης, ακόμα και εάν αυτές δεν έχουν αναπτύξει ακόμα επαρκείς υποδομές. Χρησιμοποιείται συχνά σε συνδυασμό με κυκλοφοριακά δεδομένα, πληθυσμιακές ροές ή πρότυπα χρήσης μετακινήσεων [44]. Η εκτίμηση αυτή προκύπτει είτε από ιστορικά δεδομένα φόρτισης, είτε μέσω πρόβλεψης βάσει συσχετισμών με άλλους τοπικούς δείκτες (π.χ. αριθμός κατοίκων, επιχειρήσεων, σημείων ενδιαφέροντος). Αποτελεί ένα καθαρά θετικό κριτήριο, καθώς η υψηλή εκτιμώμενη συχνότητα φόρτισης συνδέεται με μεγαλύτερη ανάγκη για εγκατάσταση νέων ΣΦΗΟ ή ενίσχυση των υφιστάμενων.



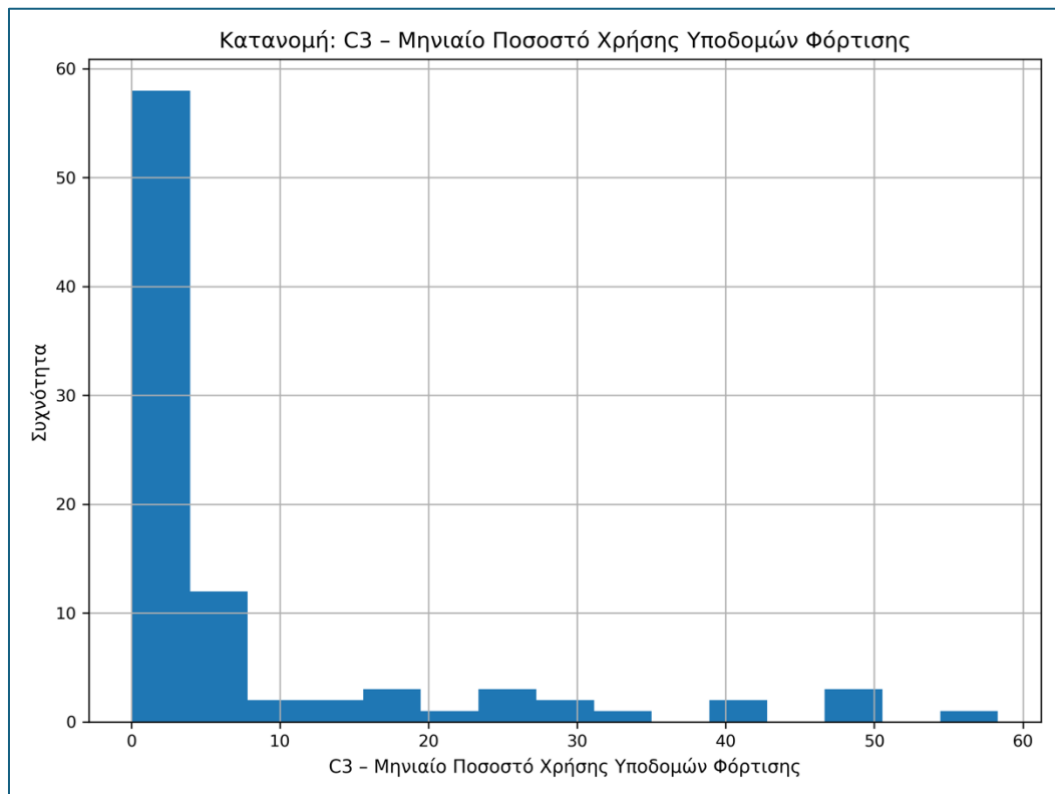
Εικόνα 7 Κατανομή της εκτιμώμενης μηνιαίας ζήτησης φόρτισης ανά ταχυδρομικό κώδικα (Κριτήριο C2 – Εκτιμώμενες Μηνιαίες Συνεδρίες Φόρτισης).

C3 – Μηνιαίο Ποσοστό Χρήσης Υποδομών Φόρτισης

Το μηνιαίο ποσοστό χρήσης των υποδομών φόρτισης αποτελεί έναν ιδιαίτερα σημαντικό τεχνικό δείκτη, καθώς αποτυπώνει τη λειτουργική ένταση του τοπικού δικτύου ΣΦΗΟ (Σταθμοί Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων). Το παρόν κριτήριο εκφράζει το ποσοστό (%) του συνολικού χρόνου λειτουργίας των φορτιστών κατά τον οποίο αυτοί βρίσκονται σε χρήση στη διάρκεια ενός μήνα και η κατανομή του παρουσιάζεται στην Εικόνα 8.

Το ποσοστό αυτό αντανακλά τη ζωντανή και διαχρονική ζήτηση για φόρτιση EV στην εκάστοτε περιοχή. Υψηλά ποσοστά χρήσης καταδεικνύουν κορεσμό του δικτύου και λειτουργική πίεση, ενώ χαμηλά ποσοστά ενδέχεται να υποδηλώνουν πλεονάζουσα υποδομή ή περιορισμένη υιοθέτηση ηλεκτροκίνησης [45]. Η αξιολόγηση της αξιοποίησης των υποδομών αποτελεί θεμέλιο για τον ορθολογικό σχεδιασμό επέκτασης, καθώς επιτρέπει την πρόβλεψη περιοχών με κίνδυνο ανεπαρκούς εξυπηρέτησης στο άμεσο μέλλον.

Στο πλαίσιο του πολυκριτήριου μοντέλου TOPSIS, το κριτήριο εισάγεται ως θετικό (benefit criterion), εφόσον η αυξημένη χρήση αποτελεί ισχυρή ένδειξη λειτουργικής αναγκαιότητας για επέκταση. Η αξιοπιστία του ενισχύεται από την περιοδική καταγραφή με πραγματικά δεδομένα, καθιστώντας το έναν δυναμικό και εμπειρικά τεκμηριωμένο δείκτη ζήτησης.



Εικόνα 8 Κατανομή του ποσοστού χρήσης υφιστάμενων υποδομών φόρτισης (utilization rate) (Κριτήριο C3 – Μηνιαίο Ποσοστό Χρήσης Υποδομών Φόρτισης).

C4 – Αριθμός Θέσεων Στάθμευσης Ταχυδρομικού Κώδικα

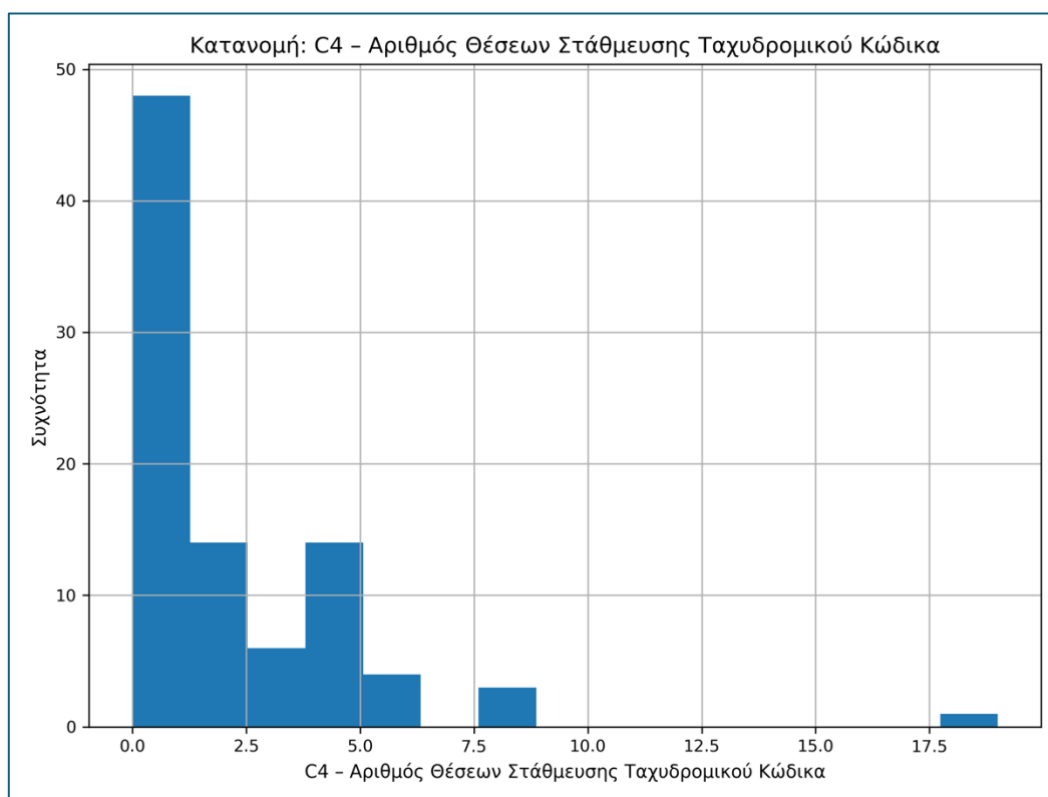
Η διαθεσιμότητα θέσεων στάθμευσης σε κάθε περιοχή αποτελεί βασική προϋπόθεση για την εγκατάσταση Σταθμών Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων (ΣΦΗΟ). Το παρόν κριτήριο αποτυπώνει τον απόλυτο αριθμό διαθέσιμων θέσεων στάθμευσης εντός του εκάστοτε ταχυδρομικού κώδικα και λειτουργεί ως δείκτης του φυσικού και λειτουργικού χώρου που μπορεί να αξιοποιηθεί για την ανάπτυξη σχετικών υποδομών όπως φαίνεται στην Εικόνα 9.

Η σημασία του κριτηρίου έγκειται στο γεγονός ότι, ανεξαρτήτως της ζήτησης για φόρτιση ή του πληθυσμιακού φόρτου, η απουσία κατάλληλων και προσβάσιμων θέσεων στάθμευσης μπορεί να καταστήσει πρακτικά ανεφάρμοστη την εγκατάσταση ΣΦΗΟ. Αντίθετα, περιοχές με επάρκεια τέτοιων χώρων διευκολύνουν την τεχνική και διοικητική υλοποίηση, ενώ παράλληλα μειώνουν το κόστος προσαρμογών.

Τα δεδομένα για το παρόν κριτήριο αντλήθηκαν μέσω web scraping από τον επιχειρηματικό κατάλογο Χρυσός Οδηγός [46], ο οποίος περιλαμβάνει χιλιάδες καταχωρήσεις με διαθέσιμους χώρους στάθμευσης ανά περιοχή. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αποτύπωση της προσφερόμενης χωρητικότητας σε επίπεδο ταχυδρομικού κώδικα, αξιοποιώντας πραγματικά δεδομένα για τη γεωγραφική κάλυψη του ιδιωτικού και ημι-δημόσιου χώρου στάθμευσης.

Η βιβλιογραφία υποστηρίζει ότι η συμβατότητα του αστικού χώρου με τη χρήση ηλεκτροκίνησης είναι θεμελιώδης για τη βιωσιμότητα της εγκατάστασης υποδομών φόρτισης [47]. Στο πλαίσιο της πολυκριτήριας ανάλυσης, το κριτήριο θεωρείται θετικό,

καθώς μεγαλύτερος αριθμός θέσεων συνεπάγεται αυξημένη δυνατότητα εφαρμογής τεχνικών λύσεων χωρίς θεσμικά ή λειτουργικά εμπόδια.



Εικόνα 9 Κατανομή του αριθμού θέσεων στάθμευσης ανά ταχυδρομικό κώδικα (Κριτήριο C4 – Αριθμός Θέσεων Στάθμευσης).

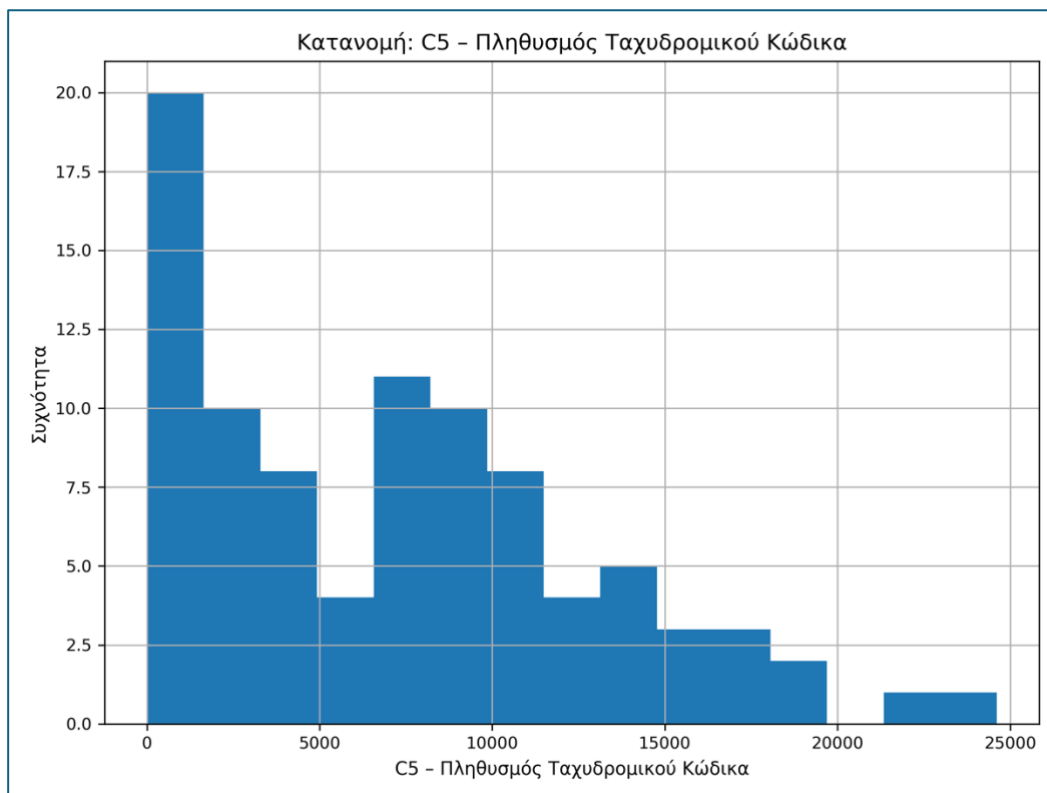
C5 – Πληθυσμός Ταχυδρομικού Κώδικα

Ο πληθυσμός κάθε περιοχής αποτελεί θεμελιώδες κοινωνικό κριτήριο στον σχεδιασμό στρατηγικών υποδομών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (ΣΦΗΟ). Το πλήθος των κατοίκων σε κάθε ταχυδρομικό κώδικα σχετίζεται άμεσα με τη ζήτηση για μεταφορές, τη χρήση ιδιωτικών οχημάτων και την ανάγκη για προσβασιμότητα σε σημεία φόρτισης. Περιοχές με υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα παρουσιάζουν αυξημένη κινητικότητα, μειωμένη δυνατότητα οικιακής φόρτισης και, κατά κανόνα, μεγαλύτερη εξάρτηση από δημόσιες υποδομές.

Η χωρική κατανομή του πληθυσμού επιτρέπει την προτεραιοποίηση περιοχών με κοινωνική ανάγκη για υποστήριξη της ηλεκτροκίνησης. Ιδιαίτερα σε αστικά περιβάλλοντα, οι πολίτες που διαμένουν σε πολυκατοικίες, χωρίς ιδιωτικό χώρο στάθμευσης ή φόρτισης, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από δημόσιες λύσεις. Η ενίσχυση αυτών των περιοχών με ΣΦΗΟ λειτουργεί ως μέσο κοινωνικής δικαιοσύνης και ενεργειακής ισότητας.

Το παρόν κριτήριο ενσωματώνεται στο μοντέλο ως θετικό, δεδομένου ότι υψηλότερος πληθυσμός συνεπάγεται μεγαλύτερη δυνητική χρήση των υποδομών φόρτισης και η κατανομή του παρουσιάζεται στην Εικόνα 10. Επιπλέον, αποτελεί αντικειμενικά καταγεγραμμένο και τακτικά επικαιροποιούμενο μέγεθος, αντλούμενο από εθνικές

στατιστικές πηγές όπως η ΕΛΣΤΑΤ [48], η οποία παρέχει πληθυσμιακά δεδομένα ανά γεωγραφική ενότητα και ταχυδρομικό κώδικα.



Εικόνα 10 Κατανομή πληθυσμού ανά ταχυδρομικό κώδικα (Κριτήριο C5 – Πληθυσμός Ταχυδρομικού Κώδικα).

C6 – Μέσο Εισόδημα Ταχυδρομικού Κώδικα

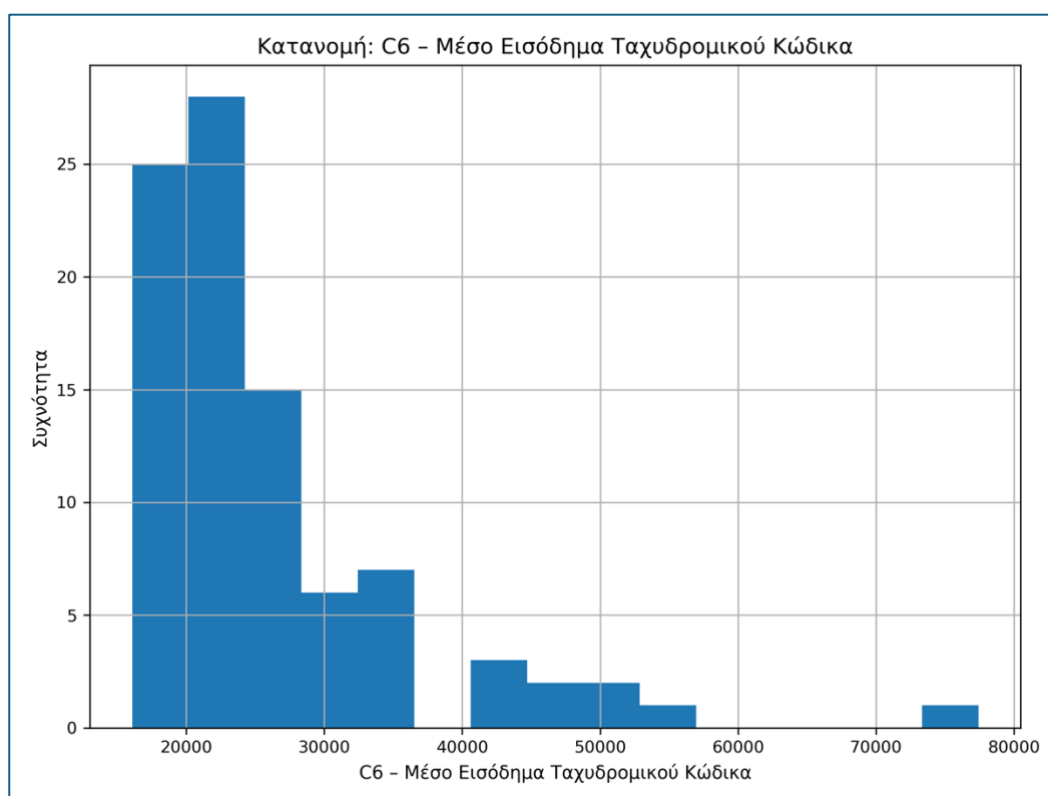
Το μέσο εισόδημα ανά περιοχή αποτελεί έναν κομβικό κοινωνικοοικονομικό δείκτη που αποτυπώνει την αγοραστική δύναμη των κατοίκων, την καταναλωτική τους συμπεριφορά και την ικανότητα υιοθέτησης νέων τεχνολογιών, όπως τα ηλεκτρικά οχήματα (EVs). Η μεταβλητή αυτή σχετίζεται στενά με τη διεξόδυση της ηλεκτροκίνησης, καθώς περιοχές με υψηλότερα εισοδήματα παρουσιάζουν, σύμφωνα με τη διεθνή και ελληνική εμπειρία, αυξημένη πιθανότητα υιοθέτησης EV και συμμετοχής σε βιώσιμα σχήματα κινητικότητας [49].

Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στην παρατήρηση ότι το αρχικό κόστος αγοράς EV, αν και μειούμενο, εξακολουθεί να αποτελεί εμπόδιο για σημαντικό μέρος του πληθυσμού. Ταυτόχρονα, οι περιοχές υψηλού εισοδήματος χαρακτηρίζονται συχνά από αυξημένη περιβαλλοντική συνείδηση και τεχνολογική ετοιμότητα, γεγονός που ενισχύει την αναμενόμενη χρήση των υποδομών φόρτισης.

Το κριτήριο, η κατανομή του οποίου φαίνεται στην Εικόνα 11, ενσωματώνεται στο πολυκριτήριο μοντέλο ως θετικό, εφόσον υψηλότερο διαθέσιμο εισόδημα συνδέεται με μεγαλύτερη ικανότητα και διάθεση χρήσης ΣΦΗΟ, αυξάνοντας τη λειτουργική τους

αποδοτικότητα και τη βιωσιμότητα των επενδύσεων. Επιπλέον, συμβάλλει στον εντοπισμό περιοχών με αναπτυξιακή δυναμική, όπου η ηλεκτροκίνηση μπορεί να ενσωματωθεί ταχύτερα στο υφιστάμενο κοινωνικοοικονομικό περιβάλλον.

Τα εισοδηματικά δεδομένα αντλούνται από την Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛΣΤΑΤ) [50] και αφορούν το κατά κεφαλήν ή/και το διαθέσιμο εισόδημα των νοικοκυριών σε επίπεδο δήμου ή ταχυδρομικού κώδικα. Η χρήση δημόσιας και επίσημης στατιστικής πηγής εξασφαλίζει αντικειμενικότητα, επαναληψιμότητα και γεωγραφική ακρίβεια στην ανάλυση.



Εικόνα 11 Κατανομή μέσου εισοδήματος ανά ταχυδρομικό κώδικα (Κριτήριο C6 – Μέσο Εισόδημα Ταχυδρομικού Κώδικα).

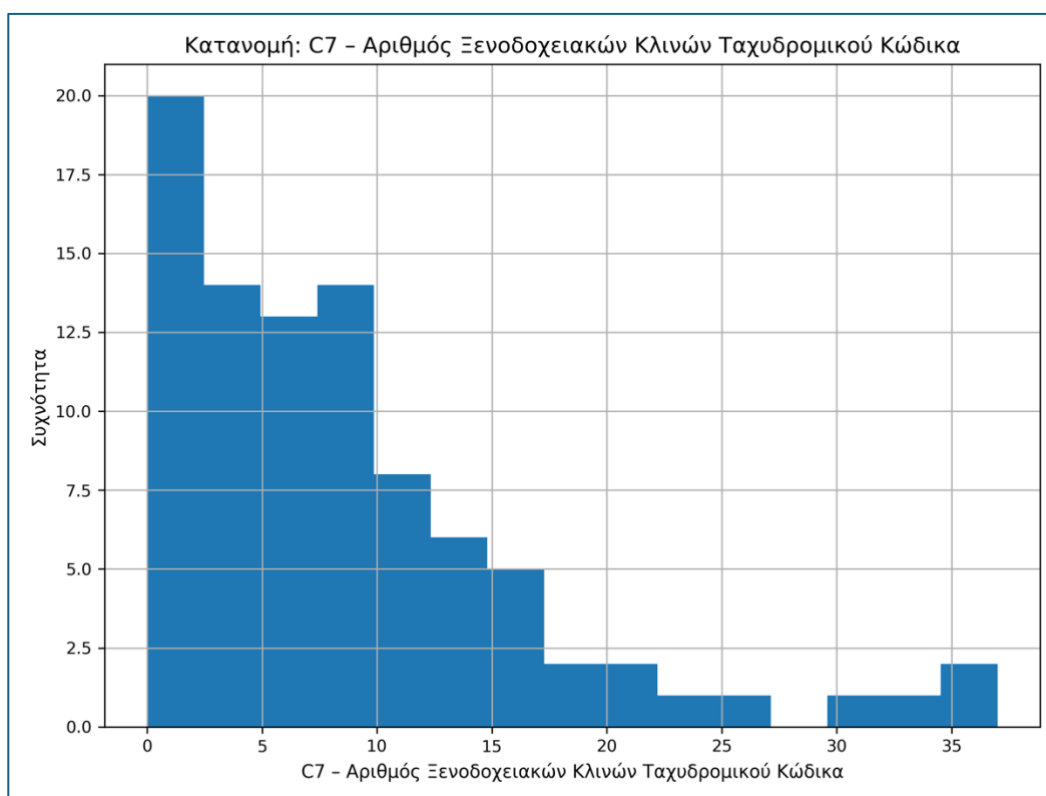
C7 – Αριθμός Ξενοδοχειακών Κλινών Ταχυδρομικού Κώδικα

Ο αριθμός των διαθέσιμων ξενοδοχειακών κλινών σε κάθε περιοχή αποτελεί ισχυρό δείκτη τουριστικής δυναμικής και εν δυνάμει επιβαρυντικού φορτίου στις υποδομές μετακίνησης. Οι περιοχές με αυξημένο αριθμό κλινών συνδέονται άμεσα με υψηλή επισκεψιμότητα, εποχική κυκλοφορία και εντατική χρήση των υποδομών φιλοξενίας και μεταφοράς. Στο πλαίσιο της ηλεκτροκίνησης, αυτό μεταφράζεται σε αυξημένη δυνητική ζήτηση για δημόσιες υποδομές φόρτισης, καθώς οι επισκέπτες που μετακινούνται με EV – είτε μέσω ενοικίασης είτε με ιδιωτικό όχημα – χρειάζονται πρόσβαση σε αξιόπιστα και προσβάσιμα σημεία φόρτισης.

Το παρόν κριτήριο αξιολογείται ως θετικό, καθώς ένας υψηλός αριθμός ξενοδοχειακών κλινών συσχετίζεται με ενισχυμένη τουριστική δραστηριότητα και συνεπώς με μεγαλύτερη ανάγκη για εγκατάσταση ή ενίσχυση ΣΦΗΟ σε περιοχές αυξημένης επισκεψιμότητας και η

κατανομή του φαίνεται στην Εικόνα 12. Η στρατηγική τοποθέτηση ΣΦΗΟ σε τουριστικές περιοχές μπορεί να ενισχύσει την τουριστική εμπειρία, να διαφοροποιήσει τις προσφερόμενες υπηρεσίες και να ευθυγραμμίσει την τοπική τουριστική ταυτότητα με τους στόχους βιώσιμης ανάπτυξης.

Τα δεδομένα για το κριτήριο αντλήθηκαν από την Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛΣΤΑΤ) [51] για το έτος 2019, ώστε να αντικατοπτρίζουν την τουριστική δυναμική πριν από τις στρεβλώσεις που προκάλεσε η πανδημία COVID-19 την περίοδο 2020–2022. Ο υπολογισμός των κριτηριακών τιμών βασίστηκε στον συσχετισμό δύο στατιστικών αρχείων: (α) του αριθμού ξενοδοχειακών κλινών ανά περιφέρεια και (β) των αφίξεων ανά δήμο και περιφερειακή ενότητα, σύμφωνα με την τυπολογία και ταξινόμηση της ΕΛΣΤΑΤ.



Εικόνα 12 Κατανομή αριθμού ξενοδοχειακών κλινών ανά ταχυδρομικό κώδικα (Κριτήριο C7 – Αριθμός Ξενοδοχειακών Κλινών).

C8 – Σημεία Ενδιαφέροντος (POI) Ταχυδρομικού Κώδικα

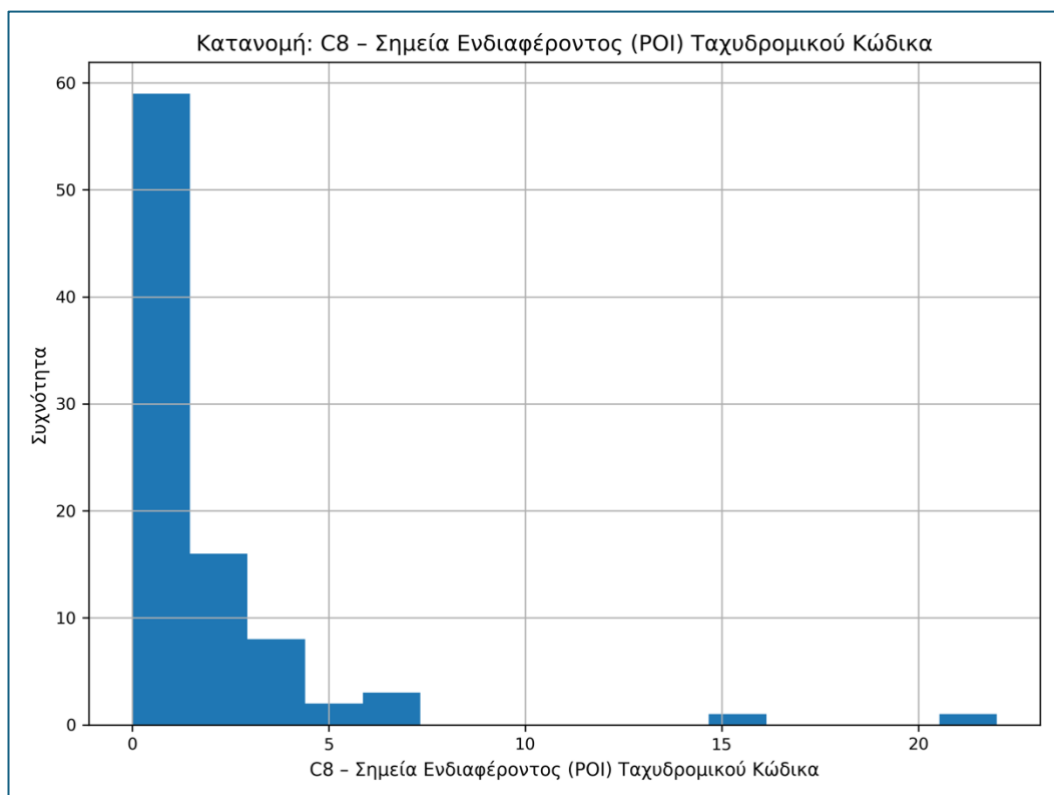
Η χωρική συγκέντρωση σημείων ενδιαφέροντος (Points of Interest – POI) σε μια περιοχή αποτυπώνει τον βαθμό κοινωνικής, διοικητικής, εκπαιδευτικής και εμπορικής δραστηριότητας. Πρόκειται για έναν σύνθετο δείκτη που χρησιμοποιείται για την αποτίμηση της λειτουργικής πυκνότητας μιας περιοχής, καθώς επηρεάζει άμεσα τη ροή ανθρώπων και οχημάτων, και κατ' επέκταση τη ζήτηση για υποδομές φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (ΣΦΗΟ).

Το κριτήριο, η κατανομή του οποίου παρουσιάζεται στην Εικόνα 13, που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία προκύπτει από σύνθεση θεματικών πληροφοριών και καταγραφών που περιλαμβάνουν:

- **Λιμάνια & Αεροδρόμια:** κύριοι κόμβοι εισόδου-εξόδου επιβατικού και τουριστικού κοινού.
- **Υπουργεία & Δημόσιες Υπηρεσίες:** κέντρα διοικητικής δραστηριότητας και καθημερινής εξυπηρέτησης πολιτών.
- **Νοσοκομεία & Πανεπιστήμια:** ζώνες συγκέντρωσης μεγάλων ροών πληθυσμού.
- **Σταθμοί Μετρό και Προαστιακού:** κόμβοι συνδεσιμότητας για διαλειτουργική μετακίνηση.
- **Καταστήματα εστίασης και αλυσίδες (π.χ. Everest):** σημεία εμπορικού ενδιαφέροντος με υψηλή συχνότητα επίσκεψης.

Η παρουσία τέτοιων σημείων σε μια περιοχή ενισχύει τη δυναμική της καθημερινής και εποχικής κινητικότητας, γεγονός που αυξάνει τις ανάγκες για δημόσιες υποδομές φόρτισης. Ειδικά όταν συνδυάζεται με υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα και τουριστική δραστηριότητα, η έντονη συγκέντρωση POI υποδεικνύει περιοχές υψηλής προτεραιότητας για χωροθέτηση ΣΦΗΟ.

Ο σύνθετος δείκτης POI Score υπολογίστηκε με βάση κατηγοριοποιημένα δεδομένα, που καταγράφηκαν και επεξεργάστηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας μέσω εμπλουτισμένων γεωχωρικών και θεματικών πηγών. Το κριτήριο ενσωματώνεται στο μοντέλο ως θετικό, καθώς υποδηλώνει αυξημένη πιθανότητα επανάληψης επισκέψεων και λειτουργική πίεση σε περιοχές με πυκνή καθημερινή χρήση.



Εικόνα 13 Κατανομή αριθμού σημείων ενδιαφέροντος (POI) ανά ταχυδρομικό κώδικα (Κριτήριο C8 – Σημεία Ενδιαφέροντος).

C9 – Αριθμός Επιχειρήσεων Ταχυδρομικού Κώδικα

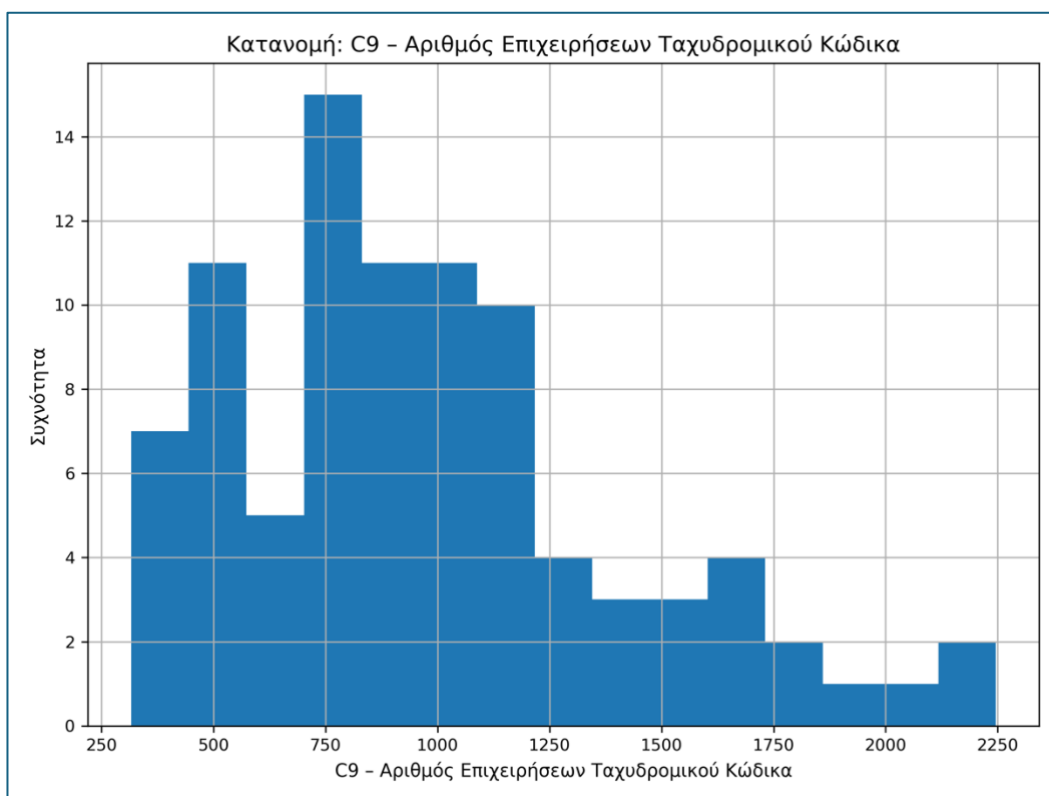
Ο αριθμός των επιχειρήσεων σε κάθε περιοχή αποτελεί βασικό δείκτη τοπικής οικονομικής δραστηριότητας και έντασης της καθημερινής κινητικότητας. Οι δήμοι και ταχυδρομικές ζώνες με αυξημένη συγκέντρωση επιχειρήσεων φιλοξενούν σημαντικό μέρος του εργατικού δυναμικού, γεγονός που συνεπάγεται αυξημένη χρήση μεταφορικών μέσων, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρικών οχημάτων (EV), ιδιαίτερα για επαγγελματικές μετακινήσεις και logistics. Η ενισχυμένη οικονομική δραστηριότητα αυξάνει τη σημασία εγκατάστασης Σταθμών Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων (ΣΦΗΟ), ειδικά σε περιοχές με πυκνή εμπορική και υπηρεσιακή χρήση.

Για τον υπολογισμό του αριθμού των επιχειρήσεων σε επίπεδο δήμου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής (ΕΛΣΤΑΤ) για το έτος 2020 [52], τα οποία παρέχουν τον αριθμό νομικών προσώπων ανά τομέα οικονομικής δραστηριότητας και ανά περιφέρεια. Η αρχική πληροφορία αναφέρεται σε περιφερειακό επίπεδο και η κατανομή σε επίπεδο δήμου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση αναλογικού μοντέλου, βασισμένου στον πληθυσμό του δήμου σε σχέση με τον πληθυσμό της περιφέρειας στην οποία ανήκει:

Αριθμός Επιχειρήσεων ανά TK = Επιχειρήσεις στην Περιφέρεια × (Πληθυσμός TK / Πληθυσμός Περιφέρειας)

Επιπλέον, από την ανάλυση εξαιρέθηκαν δραστηριότητες των πρωτογενών τομέων (γεωργία, δασοκομία, αλιεία, εξόρυξη), καθώς αυτοί χαρακτηρίζονται από ανάγκες βαρέως εξοπλισμού και μετακινήσεων που δεν καλύπτονται ακόμη ευρέως από ηλεκτρικά οχήματα. Η επιλογή αυτή τεκμηριώνεται στη βιβλιογραφία ως κατάλληλη για τη στόχευση αστικών και ημι-αστικών περιοχών με δυναμική μετάβασης σε EV [49].

Το κριτήριο ενσωματώνεται ως θετικό, καθώς η ύπαρξη μεγάλου αριθμού επιχειρήσεων συνεπάγεται περισσότερους εργαζόμενους, αυξημένες μετακινήσεις και συνεπώς μεγαλύτερη ζήτηση για υποδομές φόρτισης και η κατανομή του φαίνεται παρακάτω στην Εικόνα 14.



Εικόνα 14 Κατανομή αριθμού επιχειρήσεων ανά ταχυδρομικό κώδικα (Κριτήριο C9 – Αριθμός Επιχειρήσεων).

C10 – Έλλειμμα Υποδομών Φόρτισης Ταχυδρομικού Κώδικα

Το έλλειμμα υποδομών φόρτισης (ΣΦΗΟ Gap) αποτελεί έναν σύνθετο τεχνικό δείκτη, ο οποίος αποτυπώνει τη διαφορά μεταξύ των απαιτούμενων και των υφιστάμενων σημείων φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (ΣΦΗΟ) σε κάθε περιοχή. Το κριτήριο αυτό προκύπτει από την εφαρμογή θεσμικά καθορισμένου λόγου κάλυψης: σύμφωνα με οδηγία του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (ΥΠΕΝ), προβλέπεται η εγκατάσταση τουλάχιστον ενός σημείου φόρτισης ανά 1.000 κατοίκους σε κάθε δήμο [53].

Η αριθμητική τιμή του δείκτη υπολογίζεται σε δύο στάδια:

1. Διάρθρωση του πληθυσμού κάθε δήμου/περιοχής με το 1.000, ώστε να υπολογιστεί ο αριθμός αναγκαίων φορτιστών σύμφωνα με τη νομοθεσία.
2. Αφαίρεση του αριθμού υφιστάμενων φορτιστών στην ίδια περιοχή, όπως αυτός έχει προκύψει από την καταγραφή (C1).

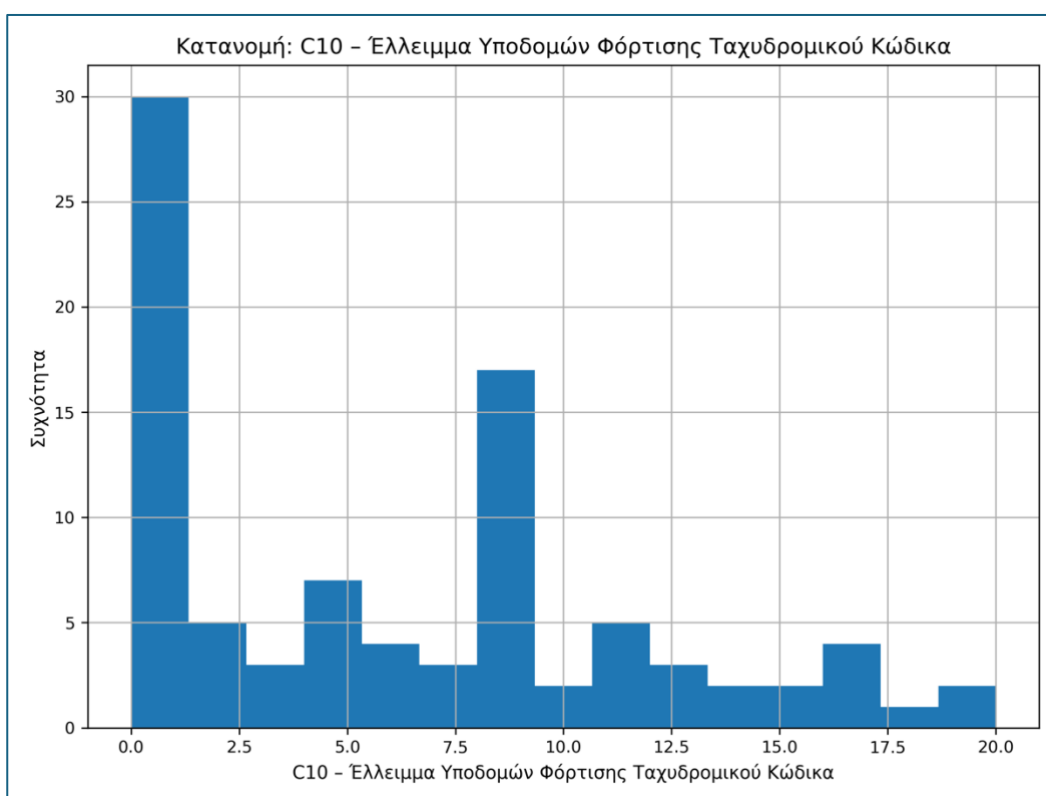
$$\text{Έλλειμμα Φορτιστών} = (\text{Πληθυσμός ΤΚ} / 1000) - \text{Υφιστάμενοι Φορτιστές}$$

Όπου:

- **Πληθυσμός ΤΚ:** Ο συνολικός αριθμός κατοίκων του δήμου.
- **Υφιστάμενοι Φορτιστές:** Ο αριθμός των ήδη εγκατεστημένων ΣΦΗΟ στον δήμο.

Το αποτέλεσμα του υπολογισμού αυτού εκφράζει την ποσοτική υστέρηση κάθε περιοχής ως προς τις ελάχιστες απαιτήσεις υποδομής. Περιοχές με θετική τιμή στο κριτήριο παρουσιάζουν λειτουργικό και ρυθμιστικό κενό που πρέπει να καλυφθεί μελλοντικά. Αντίθετα, αρνητικές ή μηδενικές τιμές υποδεικνύουν επαρκή ή και πλεονάζουσα υποδομή.

Το κριτήριο ενσωματώνεται ως θετικό, καθώς υψηλότερες τιμές του ελλείμματος συνεπάγονται μεγαλύτερη αναγκαιότητα για νέες εγκαταστάσεις. Αποτελεί σημαντικό εργαλείο ευθυγράμμισης των χωροθετήσεων με την ισχύουσα ευρωπαϊκή και εθνική πολιτική για την ηλεκτροκίνηση και παρακάτω παρουσιάζεται η κατανομή του στην Εικόνα 15.



Εικόνα 15 Κατανομή του ελλείμματος υποδομών φόρτισης ανά ταχυδρομικό κώδικα (Κριτήριο C10 – Έλλειμμα Υποδομών Φόρτισης).

5.2 Κανονικοποίηση και Μετασχηματισμός Τιμών Κριτηρίων

Η κανονικοποίηση και ο μετασχηματισμός των τιμών των κριτηρίων αποτελούν κομβικά στάδια στην εφαρμογή της Πολυκριτήριας Ανάλυσης Απόφασης (MCDA), και ιδιαίτερα της μεθόδου TOPSIS, διασφαλίζοντας τη συγκρισιμότητα μεταξύ ετερογενών μεταβλητών. Τα κριτήρια της παρούσας μελέτης αντλούνται από διαφορετικά επιστημονικά πεδία (τεχνικά, κοινωνικά, οικονομικά), χαρακτηρίζονται από ποικίλες μονάδες μέτρησης και παρουσιάζουν σημαντικές αποκλίσεις ως προς την κατανομή και το εύρος τιμών τους. Η εφαρμογή προσεκτικής προεπεξεργασίας διασφαλίζει ότι η αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων είναι δίκαιη και αντικειμενική.

Η κανονικοποίηση αποσκοπεί στη μετατροπή των αρχικών δεδομένων σε μια ενιαία, κοινή αριθμητική κλίμακα $[0,1]$. Αυτή η διαδικασία είναι αναγκαία για την αποτελεσματική αντιμετώπιση της μεροληψίας που μπορεί να προκαλέσουν μεταβλητές με ιδιαίτερα υψηλές απόλυτες τιμές, καθώς επίσης και για την ομαλή ενσωμάτωση των δεδομένων στο πολυκριτήριο μοντέλο. Η σωστή κανονικοποίηση διατηρεί τις σχετικές αναλογίες μεταξύ των τιμών των κριτηρίων, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα ότι όλα τα κριτήρια συμμετέχουν ισότιμα και αμερόληπτα στην τελική αξιολόγηση.

Δεδομένης της αρχικής ανομοιογένειας και ασυμμετρίας των δεδομένων που φαίνεται στις Εικόνες 6-15, εφαρμόστηκε μια σειρά εξειδικευμένων στατιστικών μετασχηματισμών. Αυτοί οι μετασχηματισμοί επιλέχθηκαν ώστε να επιτευχθεί καλύτερη κατανομή των τιμών, μειώνοντας την επίδραση των ακραίων τιμών και εξομαλύνοντας τις ασυμμετρίες των δεδομένων:

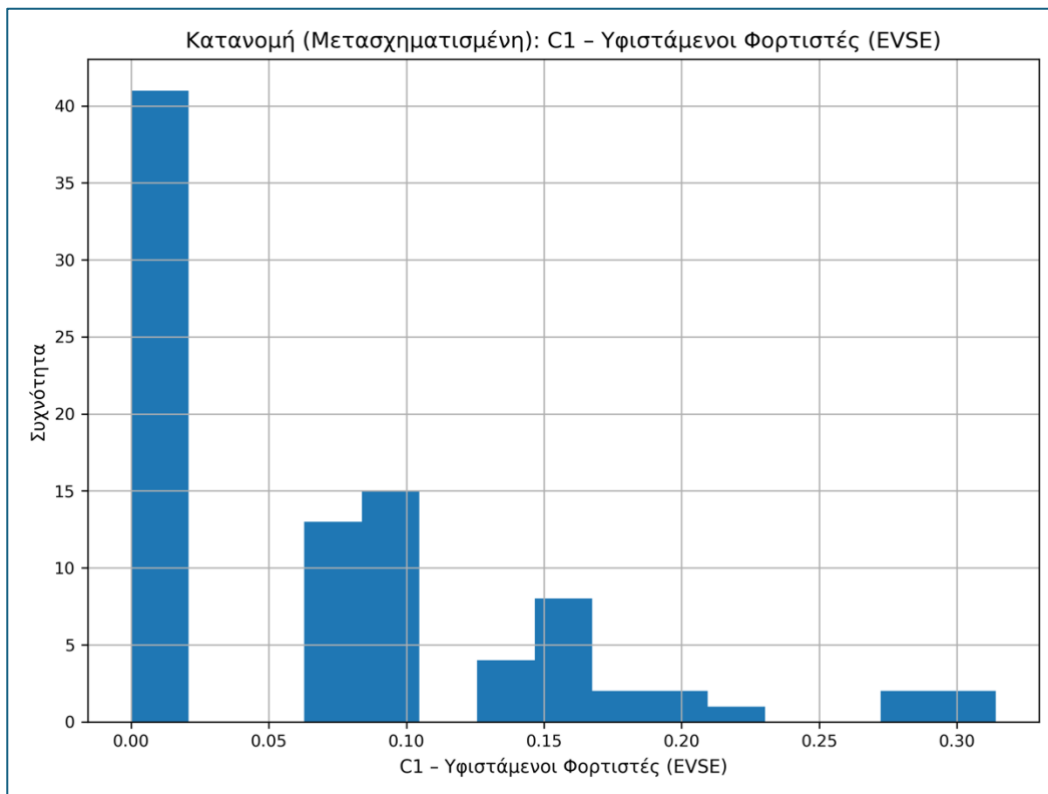
- **Λογαριθμικός μετασχηματισμός $[\log(x)]$:** εφαρμόστηκε στα κριτήρια με έντονη ασυμμετρία και ακραίες τιμές, όπως οι υφιστάμενοι φορτιστές (C1), οι εκτιμώμενες φορτίσεις (C2), ο πληθυσμός περιοχής (C5), το μέσο εισόδημα (C6) και τα σημεία ενδιαφέροντος (C9). Αυτός ο μετασχηματισμός μειώνει τη διασπορά των τιμών και οδηγεί σε μια κατανομή πιο κοντά στην κανονικότητα.
- **Ριζικός μετασχηματισμός $[\sqrt{x}]$:** χρησιμοποιήθηκε για τη βελτίωση της κατανομής δεδομένων με μέτρια ασυμμετρία, όπως το μηνιαίο ποσοστό χρήσης των υποδομών φόρτισης (C3) και το έλλειμμα φορτιστών (C10), μειώνοντας το εύρος των ακραίων τιμών.
- **Εμπειρικός μετασχηματισμός:** εφαρμόστηκε στον αριθμό θέσεων στάθμευσης (C4), μέσω διαίρεσης με τον παράγοντα 3, βασιζόμενος στην εμπειρική παρατήρηση για καλύτερη συγκριτική αξιολόγηση.

Τα κριτήρια σχετικά με τις ξενοδοχειακές κλίνες (C7) και τις επιχειρήσεις (C8) κρίθηκαν επαρκώς ομαλά και δεν απαιτούσαν επιπρόσθετους μετασχηματισμούς.

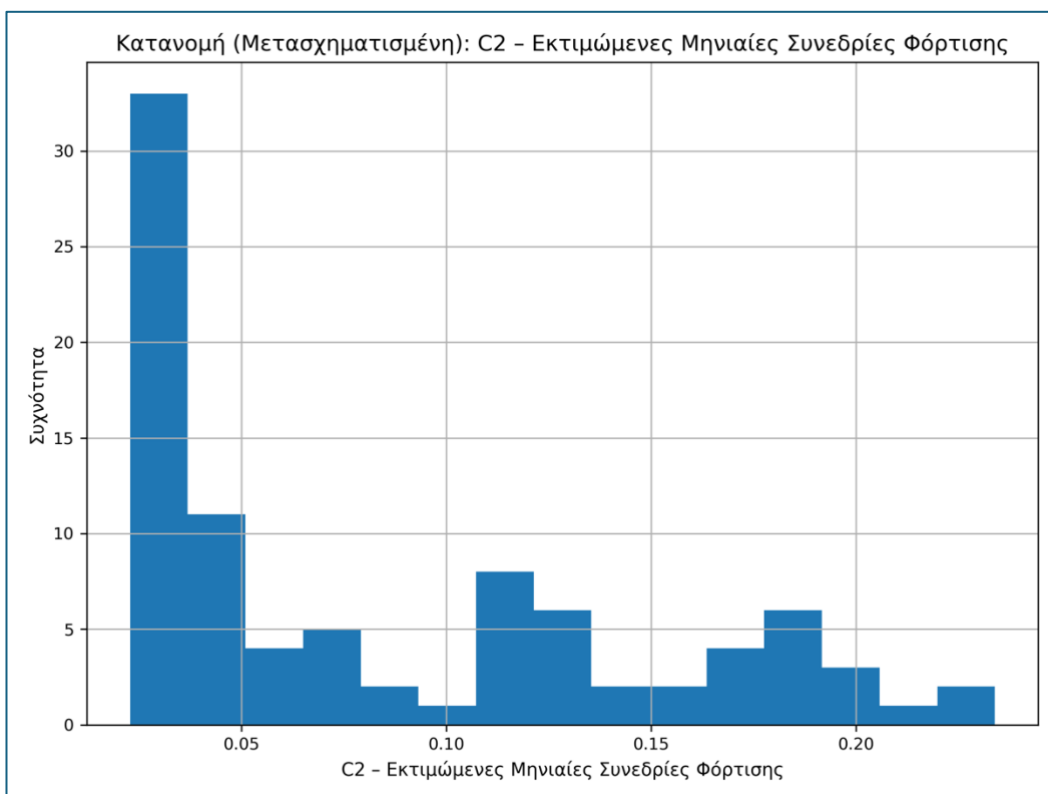
Μετά τους στατιστικούς μετασχηματισμούς, πραγματοποιήθηκε διανυσματική κανονικοποίηση, κατά την οποία κάθε στοιχείο του πίνακα των κριτηρίων κανονικοποιήθηκε μέσω του τύπου:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}}$$

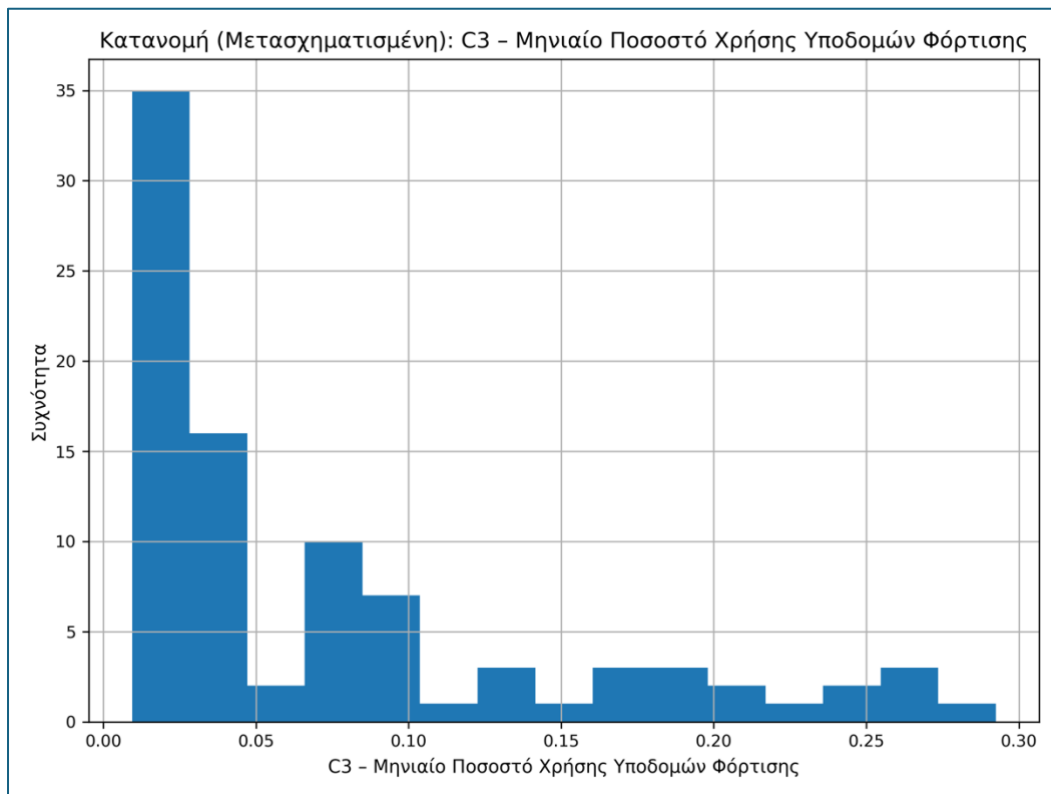
Αυτή η κανονικοποίηση εξασφαλίζει ότι όλα τα κριτήρια έχουν ενιαίο μήκος διανύσματος, παρέχοντας έτσι μια συνεπή και ισορροπημένη αξιολόγηση που ελαχιστοποιεί την επίδραση κριτηρίων με υψηλή απόλυτη διασπορά όπως φαίνεται στις Εικόνες 16-25.



Εικόνα 16 Κατανομή κανονικοποιημένων τιμών του πλήθους υφιστάμενων φορτιστών EVSE ανά ταχυδρομικό κώδικα (Κριτήριο C1 – Υφιστάμενοι Φορτιστές).



Εικόνα 17 Κατανομή κανονικοποιημένων τιμών της εκτιμώμενης μηνιαίας ζήτησης φόρτισης (charging sessions) ανά ταχυδρομικό κώδικα (Κριτήριο C2 – Εκτιμώμενες Μηνιαίες Συνεδρίες Φόρτισης).



Εικόνα 18 Κατανομή κανονικοποιημένων τιμών του ποσοστού χρήσης υποδομών φόρτισης (utilization rate) ανά ταχυδρομικό κώδικα (Κριτήριο C3 – Μηνιαίο Ποσοστό Χρήσης).

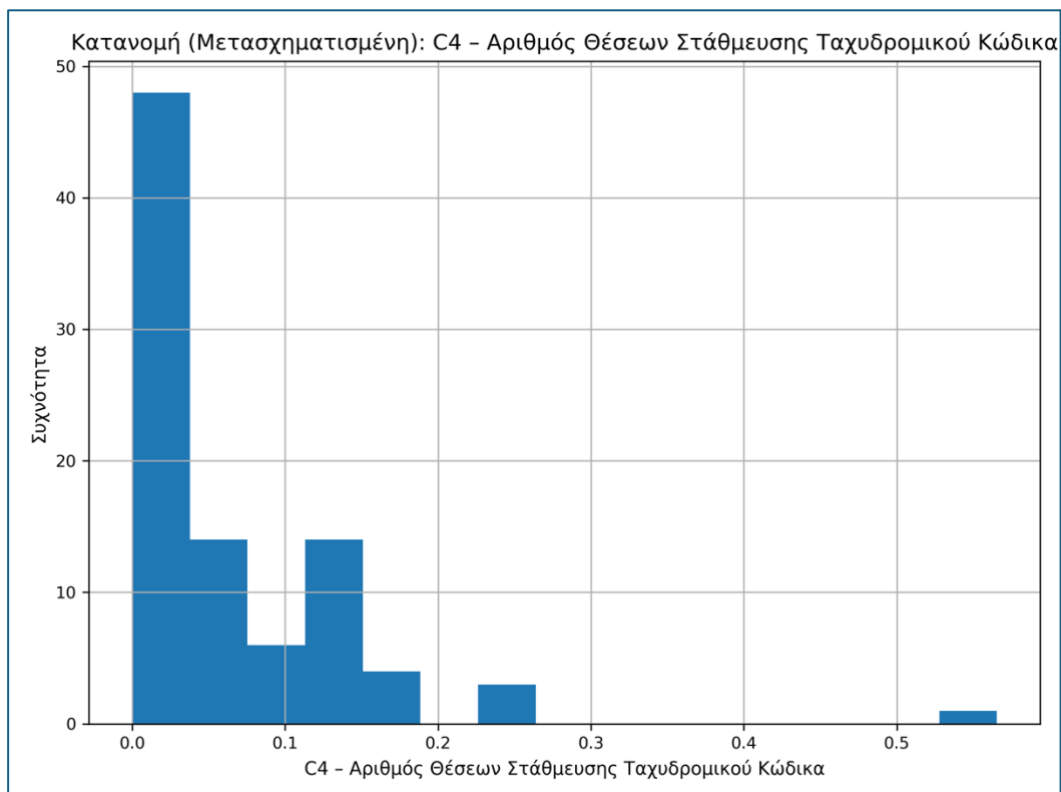
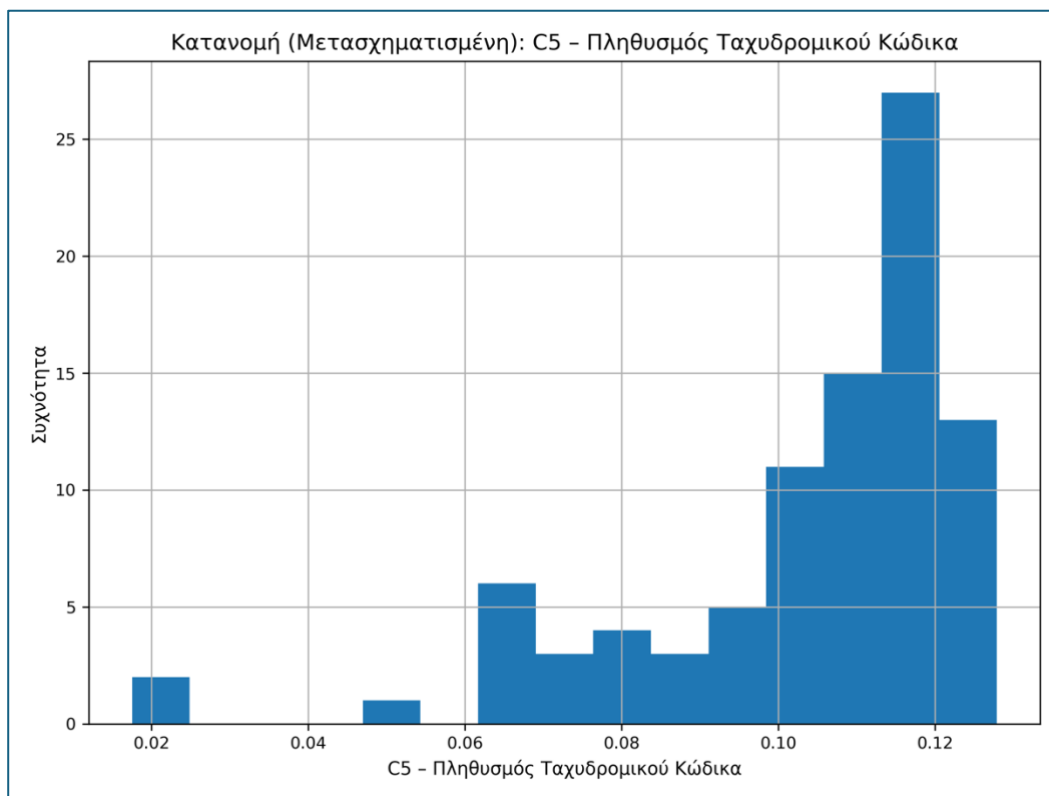
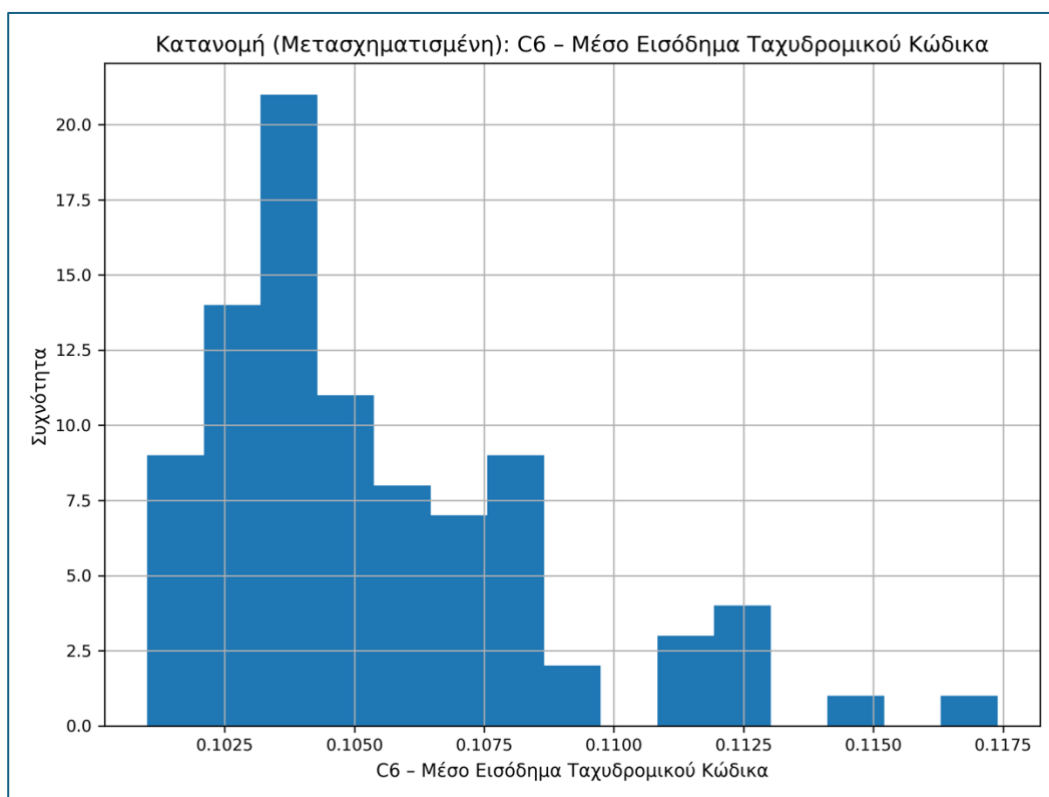


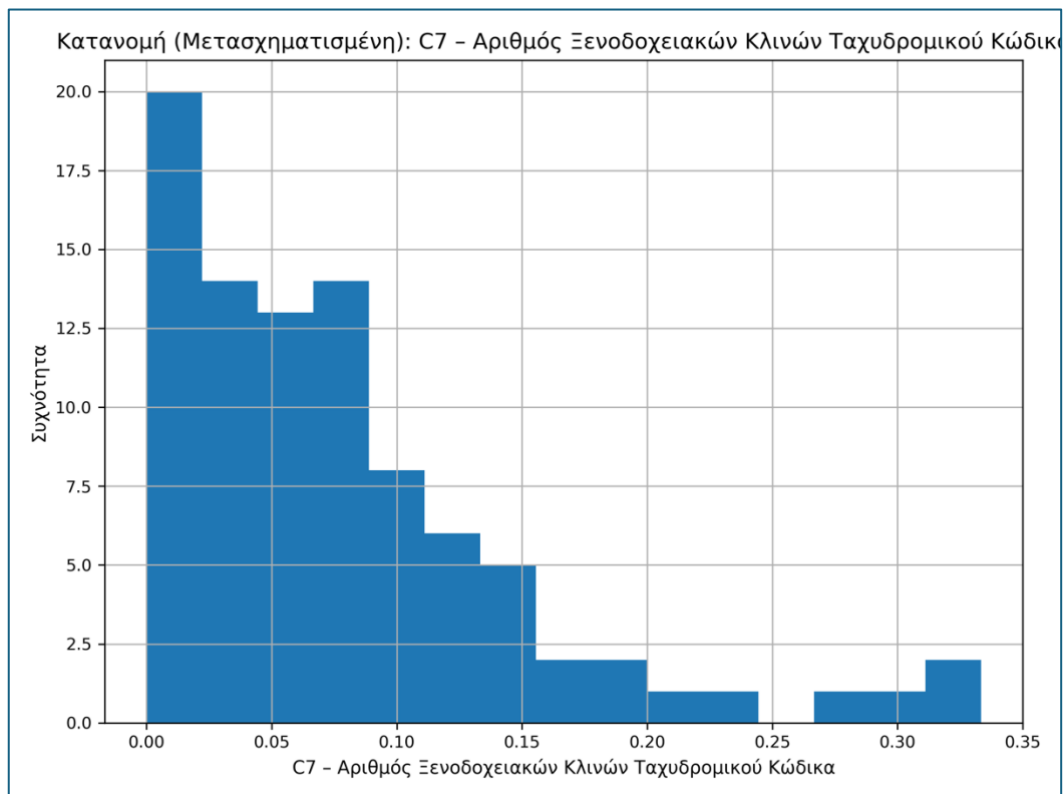
Figure 19 Κατανομή κανονικοποιημένων τιμών του αριθμού θέσεων στάθμευσης ανά ταχυδρομικό κώδικα (Κριτήριο C4 – Αριθμός Θέσεων Στάθμευσης).



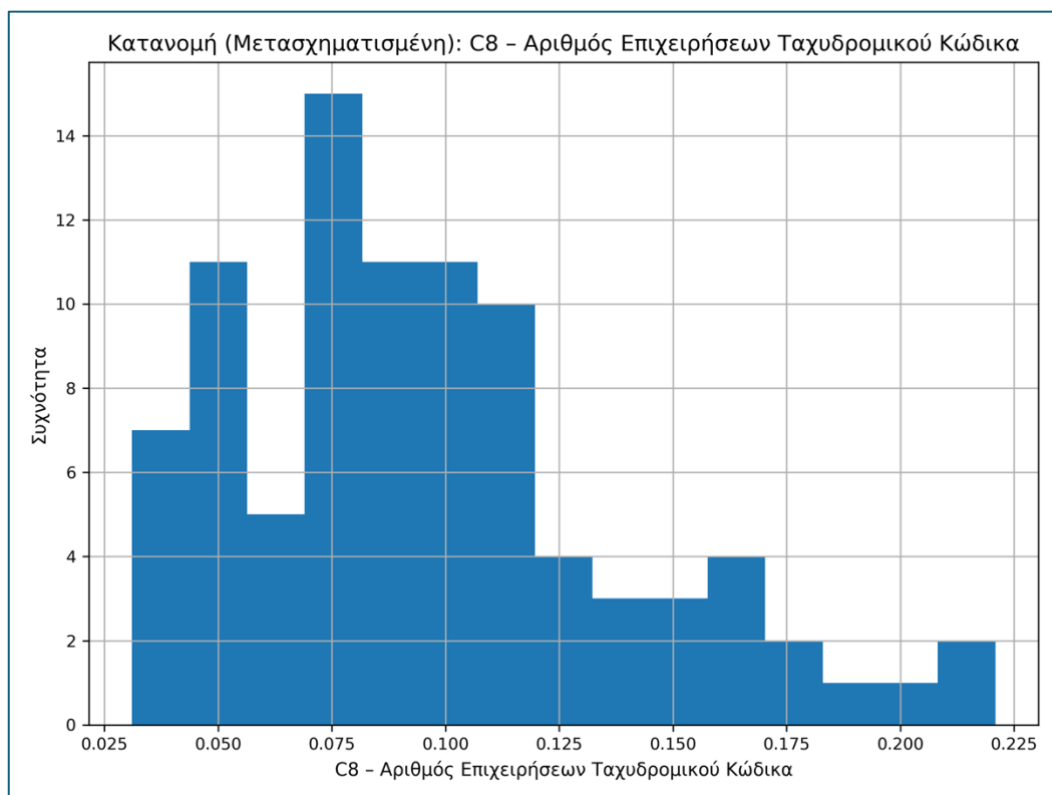
Εικόνα 20 Κατανομή κανονικοποιημένων τιμών πληθυσμού ανά ταχυδρομικό κώδικα (Κριτήριο C5 – Πληθυσμός).



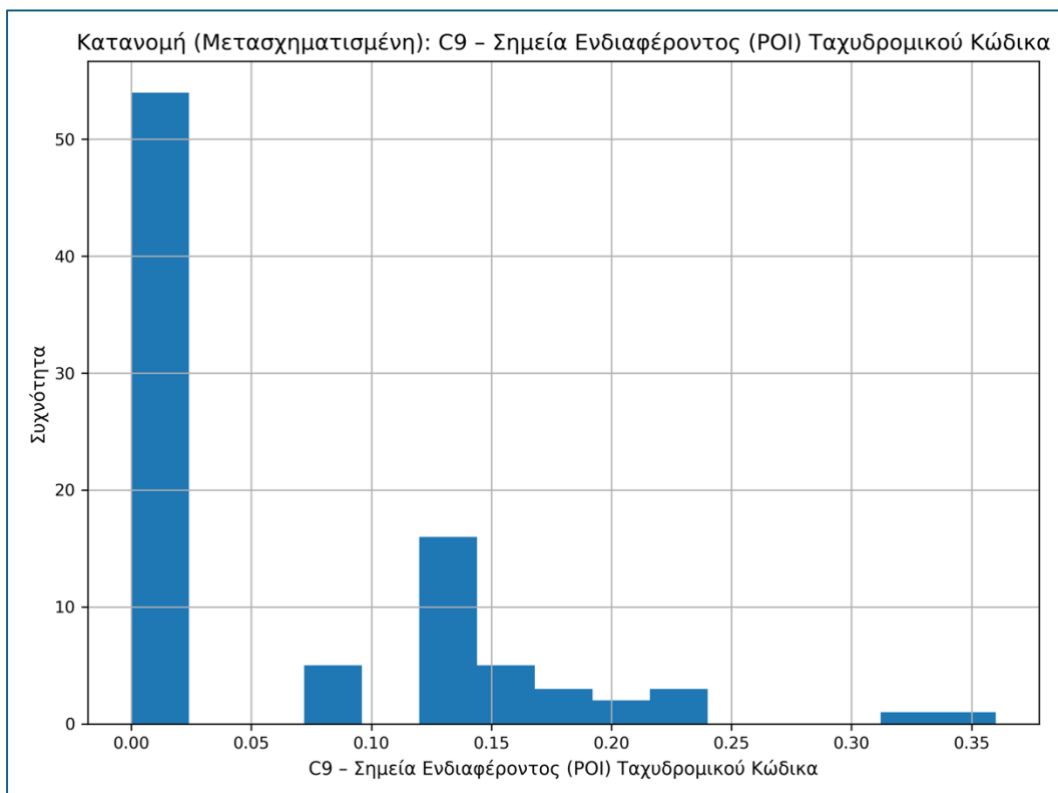
Εικόνα 21 Κατανομή κανονικοποιημένων τιμών του μέσου εισοδήματος ανά ταχυδρομικό κώδικα (Κριτήριο C6 – Μέσο Εισόδημα).



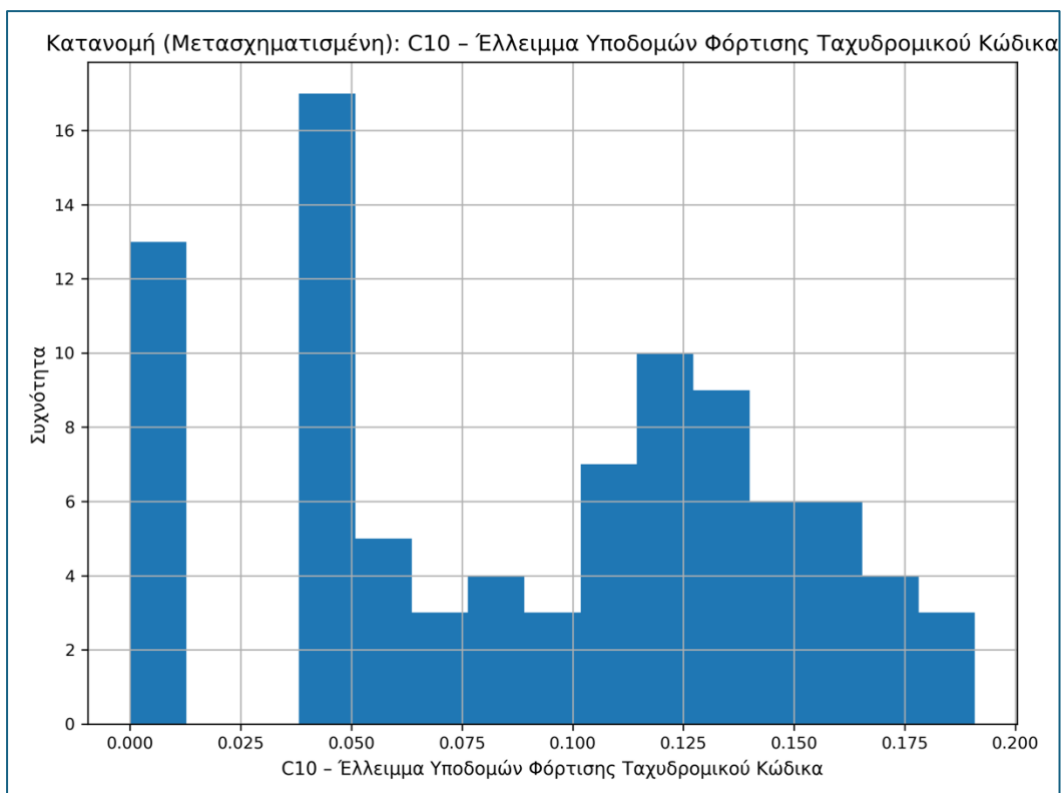
Εικόνα 22 Κατανομή κανονικοποιημένων τιμών του αριθμού ξενοδοχειακών κλινών ανά ταχυδρομικό κώδικα (Κριτήριο C7 – Αριθμός Ξενοδοχειακών Κλινών).



Εικόνα 23 Κατανομή κανονικοποιημένων τιμών του αριθμού σημείων ενδιαφέροντος (POI) ανά ταχυδρομικό κώδικα (Κριτήριο C8 – Σημεία Ενδιαφέροντος).



Εικόνα 24 Κατανομή κανονικοποιημένων τιμών του αριθμού επιχειρήσεων ανά ταχυδρομικό κώδικα (Κριτήριο C9 – Αριθμός Επιχειρήσεων).



Εικόνα 25 Κατανομή κανονικοποιημένων τιμών του ελλείμματος υποδομών φόρτισης ανά ταχυδρομικό κώδικα (Κριτήριο C10 – Έλλειμμα Υποδομών Φόρτισης).

Η πλήρης προεπεξεργασία των δεδομένων τεκμηριώθηκε σε τρεις διακριτούς πίνακες Excel, οι οποίοι αποτελούν και την αρχειακή βάση της ανάλυσης:

- Raw_Numeric: Αρχικά δεδομένα.
- Transformed: Μετασχηματισμένα δεδομένα.
- Normalized: Κανονικοποιημένα δεδομένα για τη μέθοδο TOPSIS.

Η συστηματική αρχειοθέτηση ενισχύει τη διαφάνεια, την επαναληψιμότητα και την επιστημονική εγκυρότητα των αποτελεσμάτων, συμβαδίζοντας με τις βέλτιστες πρακτικές που συνιστά η σχετική διεθνής βιβλιογραφία.

5.3 Καθορισμός Συντελεστών Βαρύτητας Κριτηρίων

Η ανάθεση συντελεστών βαρύτητας στα κριτήρια αποτελεί ένα από τα πλέον κρίσιμα στάδια στην Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων (MCDA), καθώς επηρεάζει άμεσα τη διαμόρφωση της τελικής κατάταξης των εναλλακτικών λύσεων. Τα βάρη αντικατοπτρίζουν τη σχετική σημασία κάθε κριτηρίου στη διαδικασία λήψης αποφάσεων και επομένως απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή και μεθοδολογική συνέπεια [54].

Στη βιβλιογραφία, οι μέθοδοι καθορισμού βαρών διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- **Υποκειμενικές μέθοδοι**, όπου τα βάρη αποδίδονται βάσει γνώμης ειδικών (π.χ. AHP, Simos method),
- **Αντικειμενικές μέθοδοι**, όπου τα βάρη προκύπτουν από τη στατιστική επεξεργασία των δεδομένων χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση.

Για την παρούσα μελέτη, κρίθηκε σκόπιμο να εφαρμοστεί η **αντικειμενική μέθοδος Entropy**, προκειμένου να διασφαλιστεί η αμεροληψία και η βασιμότητα του καθορισμού βαρών με αποκλειστικό κριτήριο τη διαφοροποίηση και την πληροφορία που εμπεριέχουν τα ίδια τα δεδομένα.

5.3.1 Ανάλυση της Μεθόδου Entropy

Η Entropy Method βασίζεται στη θεωρία πληροφορίας του Shannon (1948), η οποία ποσοτικοποιεί την αβεβαιότητα σε ένα σύστημα. Στο πλαίσιο της MCDA, η μέθοδος Entropy υποθέτει ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διασπορά (διαφοροποίηση) των τιμών ενός κριτηρίου μεταξύ των εναλλακτικών, τόσο περισσότερη πληροφορία φέρει και άρα τόσο μεγαλύτερη σημασία έχει για τη διάκριση μεταξύ επιλογών [55].

Η αριθμητική διαδικασία περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

Βήμα 1: Κανονικοποίηση των δεδομένων

Εφόσον οι τιμές των κριτηρίων δεν έχουν κοινή κλίμακα, γίνεται κανονικοποίηση συνήθως με τη μέθοδο Min-Max:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)}$$

- x_{ij} = αρχική τιμή για την εναλλακτική i και το κριτήριο j ,
- x'_{ij} = κανονικοποιημένη τιμή.

Στην παρούσα εργασία, τα δεδομένα είχαν ήδη υποβληθεί σε κανονικοποίηση κατά το στάδιο της προεπεξεργασίας.

Βήμα 2: Υπολογισμός πιθανοτήτων

Για κάθε κριτήριο υπολογίζεται η σχετική συμμετοχή κάθε εναλλακτικής:

$$P_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^n x'_{ij}}$$

όπου n = αριθμός εναλλακτικών.

Βήμα 3: Υπολογισμός εντροπίας

Η εντροπία E_j κάθε κριτηρίου εκφράζεται ως:

$$E_j = -k \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln(P_{ij}), \quad k = \frac{1}{\ln(n)}$$

Η εντροπία λαμβάνει τιμές στο διάστημα $[0,1]$. Χαμηλές τιμές E_j υποδεικνύουν μεγάλη διαφοροποίηση και υψηλή πληροφωρία.

Βήμα 4: Υπολογισμός διαφοροποίησης και τελικών βαρών

Το μέτρο διαφοροποίησης d_j υπολογίζεται ως:

$$d_j = 1 - E_j$$

Τα τελικά βάρη w_j υπολογίζονται μέσω κανονικοποίησης:

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^m d_j}$$

όπου m = αριθμός κριτηρίων.

5.3.2 Εφαρμογή της Μεθόδου στα Δεδομένα Χωροθέτησης ΣΦΗΟ

Η εφαρμογή της μεθόδου Entropy στα κανονικοποιημένα δεδομένα των δέκα επιλεγμένων κριτηρίων επέτρεψε την αντικειμενική αποτύπωση της σχετικής σημασίας κάθε παράγοντα ως προς τη διαφοροποίηση μεταξύ ταχυδρομικών περιοχών. Το βάρος κάθε κριτηρίου προέκυψε με βάση το πόσο ποικίλες είναι οι τιμές του στον χώρο και κατά συνέπεια, πόση πληροφορία μεταφέρει για τη λήψη απόφασης.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα 3 που ακολουθεί, με κάθε κριτήριο να ταξινομείται βάσει της θεματικής κατηγορίας στην οποία ανήκει:

Πίνακας 3 – Βάρη Κριτηρίων Ανά Θεματική Κατηγορία (Entropy Method)

Κωδικός	Κριτήριο	Βάρος Entropy
C1	Πλήθος Υφιστάμενων ΣΦΗΟ	0.1924
C2	Εκτιμώμενες Μηνιαίες Φορτίσεις	0.0708
C3	Μηνιαίο Ποσοστό Χρήσης Υποδομών	0.1227
C4	Θέσεις Στάθμευσης	0.1574
C5	Πληθυσμός	0.0072
C6	Μέσο Εισόδημα	0.0001
C7	Ξενοδοχειακές Κλίνες	0.0955
C8	Πλήθος Επιχειρήσεων	0.0248
C9	Σημεία Ενδιαφέροντος (POIs)	0.2620
C10	Έλλειμμα Υποδομών ΣΦΗΟ	0.0671

Η εφαρμογή της μεθόδου Entropy για τον υπολογισμό των βαρών των κριτηρίων ανέδειξε τις θεματικές που προσφέρουν τη μεγαλύτερη πληροφορία για τη λήψη απόφασης σχετικά με τη βέλτιστη χωροθέτηση σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Τα κριτήρια που σχετίζονται με την υφιστάμενη κατάσταση των υποδομών φόρτισης, όπως ο αριθμός των ήδη εγκατεστημένων σταθμών (C1) και το ποσοστό χρήσης τους (C3), συγκέντρωσαν συνολικά βάρη άνω του 38%, γεγονός που υποδεικνύει έντονες διαφοροποιήσεις μεταξύ περιοχών και υψηλή συμβολή τους στην ανάλυση. Αντίθετα, το κριτήριο του ελλείμματος

υποδομών (C10), αν και βασίζεται σε πληθυσμιακή ανάγκη, εμφάνισε χαμηλότερη βαρύτητα, πιθανόν λόγω της ηπιότερης μεταβολής του μεταξύ των ταχυδρομικών κωδίκων. Η θεματική ομάδα που απορρόφησε το μεγαλύτερο ποσοστό πληροφορίας ήταν εκείνη της χρήσης, συγκεντρώνοντας σχεδόν το 50% της συνολικής πληροφορίας. Ιδιαίτερα, το κριτήριο των σημείων ενδιαφέροντος (POIs – C9) κατέγραψε τη μεγαλύτερη βαρύτητα (0.2620), επιβεβαιώνοντας ότι η παρουσία πολυλειτουργικών περιοχών σχετίζεται άμεσα με αυξημένη ζήτηση για φόρτιση. Οι διαθέσιμες θέσεις στάθμευσης (C4) αποτέλεσαν επίσης σημαντικό παράγοντα, καθώς αποτελούν προϋπόθεση για την υλοποίηση εγκαταστάσεων. Η εκτιμώμενη μηνιαία ζήτηση φόρτισης (C2) κατέχει ενδιαμέση βαρύτητα, κάτι που μπορεί να αποδοθεί στη μικρότερη διακύμανσή της συγκριτικά με άλλα κριτήρια.

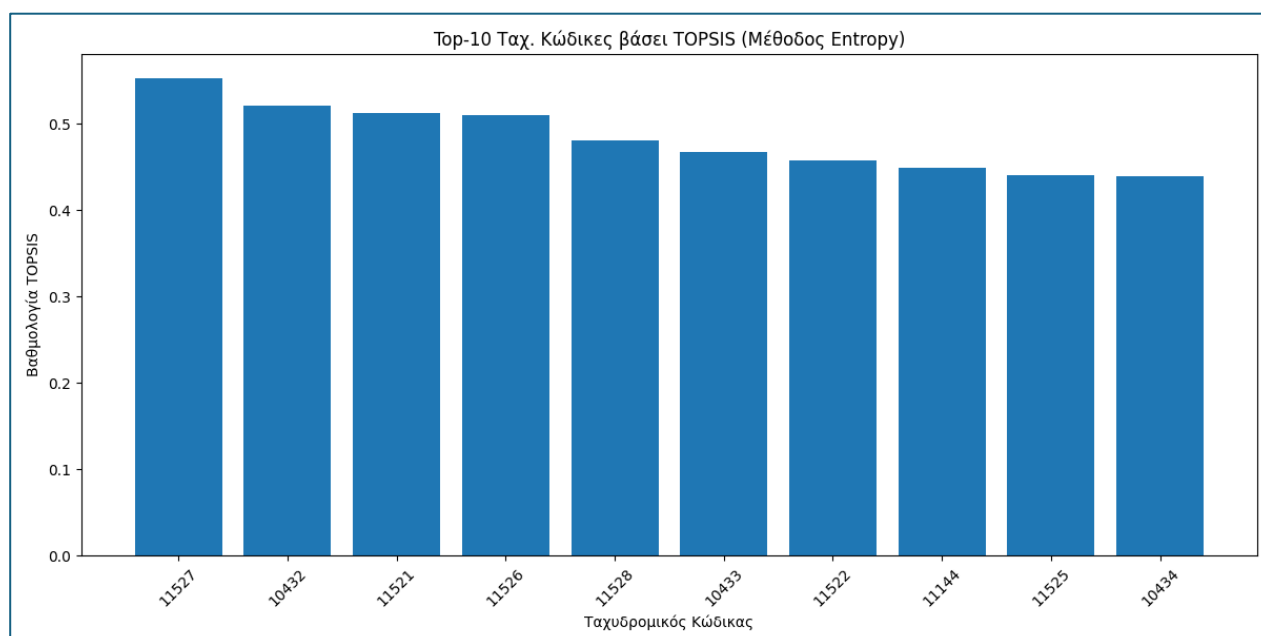
Αντίθετα με τις προσδοκίες, τα κοινωνικοοικονομικά κριτήρια που σχετίζονται με τον πληθυσμό (C5) και το εισόδημα (C6) εμφάνισαν ελάχιστη συμβολή στην ανάλυση, με βάρη 0.0072 και 0.0001 αντίστοιχα. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στη σχετική ομοιογένεια αυτών των μεταβλητών στους ταχυδρομικούς κώδικες της Αθήνας, η οποία δεν παρέχει επαρκή διαφοροποίηση ώστε να θεωρηθούν αποφασιστικής σημασίας. Επιπλέον, τα κριτήρια που σχετίζονται με τον τουρισμό (ξενοδοχειακές κλίνες – C7) και την οικονομική δραστηριότητα (πλήθος επιχειρήσεων – C8) εμφάνισαν μέτρια βάρη, με το πρώτο να διαφοροποιείται περισσότερο και να αποδεικνύεται σημαντικότερο, γεγονός που υποδηλώνει ότι ο τουρισμός επηρεάζει τη χωρική ζήτηση για ΣΦΗΟ. Το C8, παρότι σχετίζεται με την επιχειρηματική κινητικότητα, κατέγραψε χαμηλότερη βαρύτητα (0.0248), πιθανόν λόγω της ομοιογενούς κατανομής των επιχειρήσεων στο αστικό περιβάλλον.

Συνολικά, η μέθοδος Entropy, η οποία βασίζει τον υπολογισμό των βαρών στη διακύμανση των δεδομένων, ανέδειξε κυρίως τα κριτήρια που αντικατοπτρίζουν την υφιστάμενη υποδομή και την ενεργή χρήση του αστικού χώρου, ενώ οι κοινωνικοοικονομικοί δείκτες συνέβαλαν ελάχιστα στην τελική αξιολόγηση, τουλάχιστον στο συγκεκριμένο γεωγραφικό επίπεδο ανάλυσης. Το εύρημα αυτό ευθυγραμμίζεται με τη διεθνή βιβλιογραφία, σύμφωνα με την οποία η μέθοδος Entropy θεωρείται ιδιαίτερα αποτελεσματική σε περιβάλλοντα που απαιτούν αντικειμενικότητα και στηρίζονται στην εσωτερική ποικιλομορφία των δεδομένων [56]. Στη μελέτη των Feng et al. (2021) [57], η ενσωμάτωσή της σε ανάλυση TOPSIS οδήγησε επίσης σε ακριβή προσδιορισμό τοποθεσιών εγκατάστασης σταθμών φόρτισης, λαμβάνοντας υπόψη την περιβαλλοντική και κοινωνική ετερογένεια των περιοχών.

6. Αποτελέσματα Πολυκριτήριας Ανάλυσης (TOPSIS)

6.1 Αποτελέσματα Ανάλυσης TOPSIS και Κατάταξη Ταχυδρομικών Κωδικών

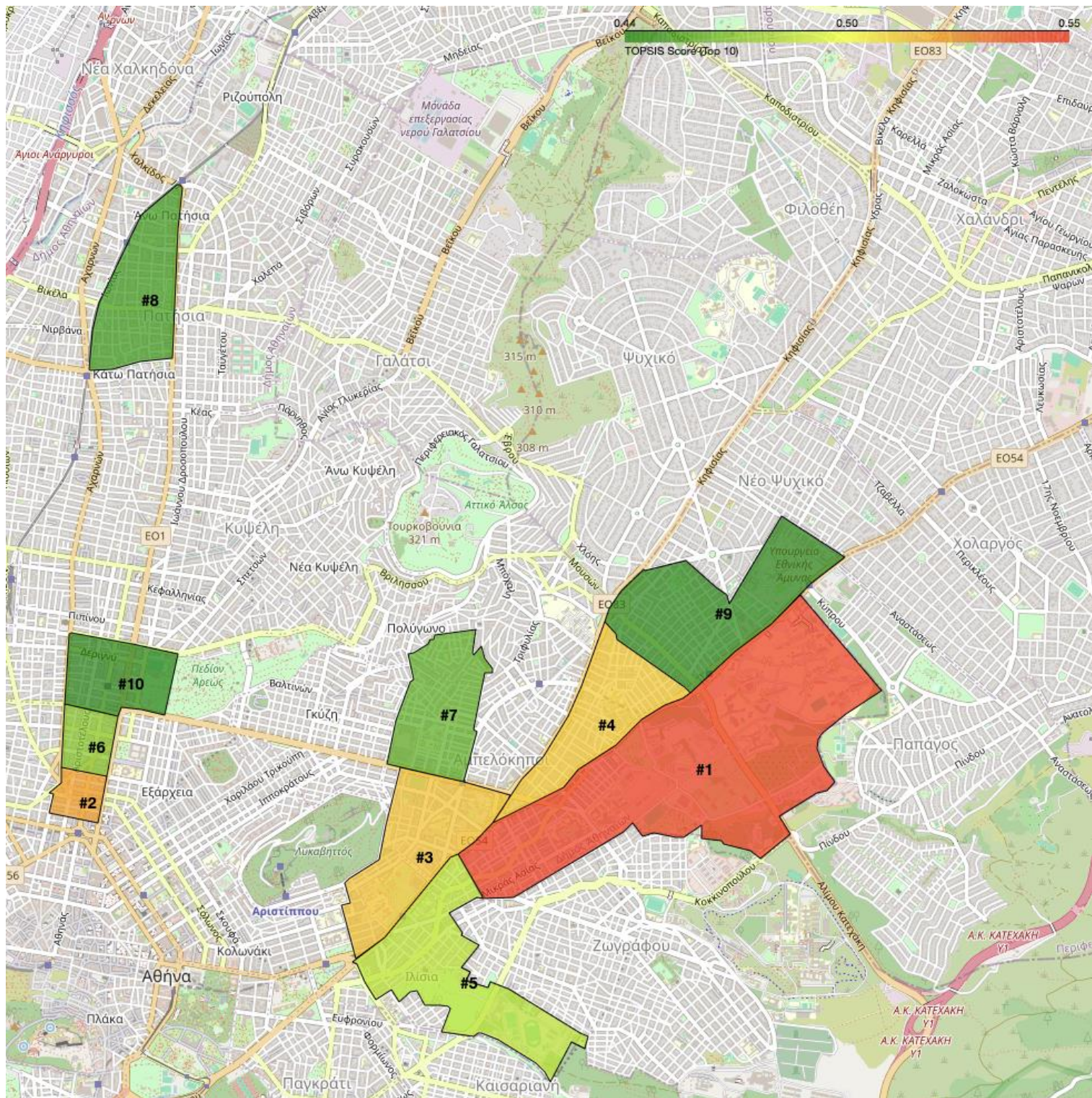
Στο ακόλουθο διάγραμμα της Εικόνας 27 παρουσιάζονται οι 10 κορυφαίοι ταχυδρομικοί κώδικες (Τ.Κ.) της Αθήνας ως προς την καταλληλότητά τους για εγκατάσταση σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (ΣΦΗΟ), βάσει του συνθετικού σκορ TOPSIS με Entropy βάρη. Παρατηρείται ότι ο Τ.Κ. 11527 καταλαμβάνει την 1η θέση με σκορ $\sim 0,554$, ακολουθούμενος από τους 10432, 11521, 11526 και άλλους. Οι τιμές του δείκτη είναι σχετικά χαμηλές (0,33–0,55) λόγω του μεγέθους του προβλήματος και της κανονικοποίησης, ωστόσο η φθίνουσα κατάταξη διακρίνει σαφώς τις περιοχές υψηλότερης προτεραιότητας. Η πολυκριτήρια ανάλυση ανέδειξε κατά κύριο λόγο αστικές ζώνες του κεντρικού τομέα της Αθήνας και όμορων περιοχών ως τις πλέον κατάλληλες για νέους φορτιστές.



Εικόνα 26 Κατάταξη Ταχυδρομικών Κωδικών με βάση το score τους

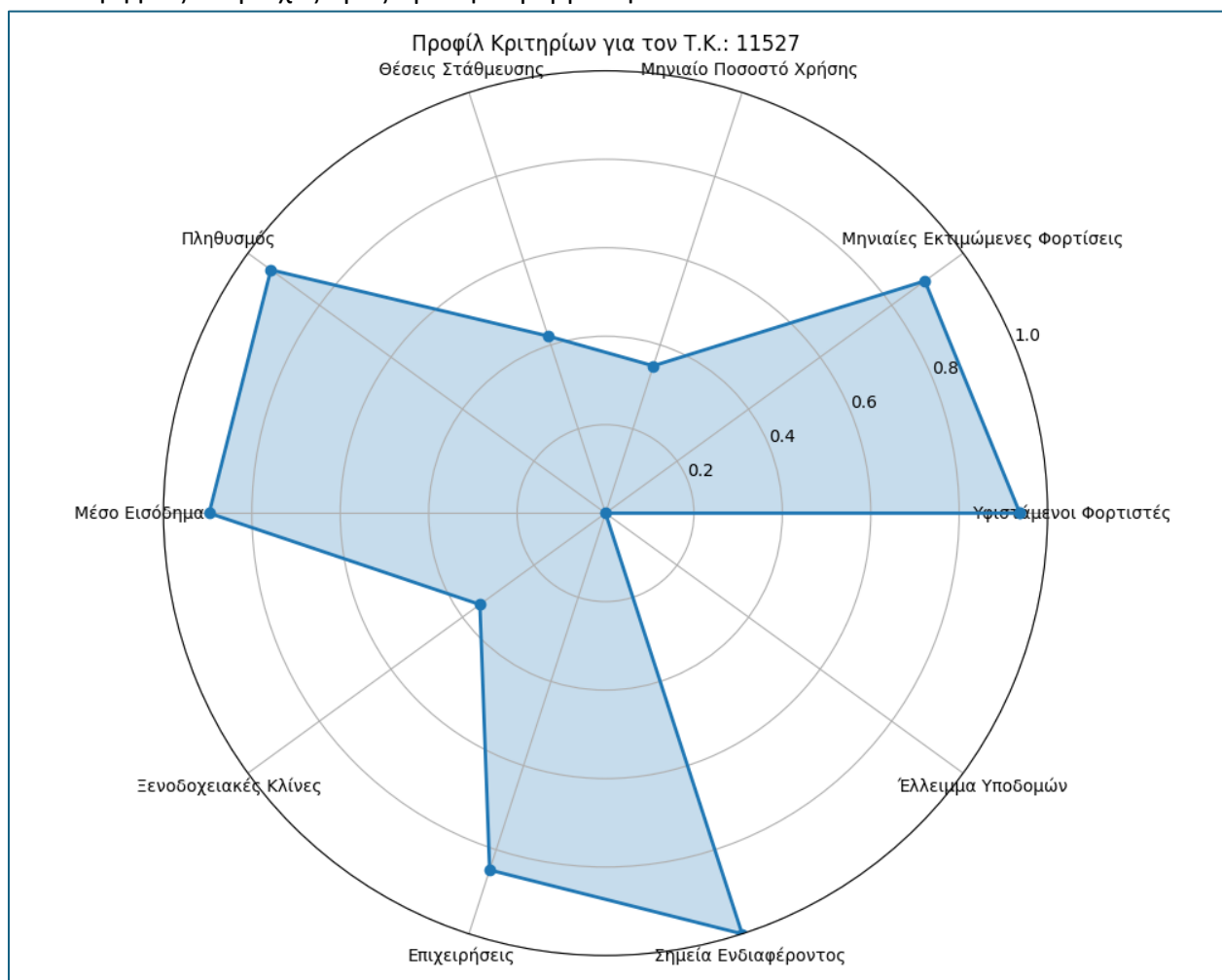
Γεωγραφική κατανομή και τάσεις: Οι Τ.Κ. με την υψηλότερη βαθμολογία εντοπίζονται σε μεγάλο βαθμό κοντά στο κέντρο και τις πυκνοδομημένες περιοχές της πόλης όπως φαίνονται και στον χάρτη της Εικόνας 27. Ενδεικτικά, περιοχές όπως οι Αμπελόκηποι, το ευρύτερο εμπορικό κέντρο της Αθήνας (π.χ. περίξ της Ομόνοιας/Μεταξουργείου, ΤΚ 1043x) και τμήματα των Πατησίων/Κυψέλης (π.χ. 11144) εμφανίζονται στις κορυφαίες θέσεις της κατάταξης. Οι ζώνες αυτές συγκεντρώνουν υψηλή αστική πυκνότητα και έντονη μικτή δραστηριότητα (εμπόριο, υπηρεσίες, αναψυχή), ενώ μέχρι σήμερα υπολείπονται σε υποδομές φόρτισης. Αντιθέτως, περιοχές περιφερειακές ή χαμηλότερης πυκνότητας (ήδη καλύτερα καλυμμένες με ΣΦΗΟ) κατατάσσονται χαμηλότερα, υποδεικνύοντας μικρότερη άμεση ανάγκη επένδυσης εκεί. Το εύρημα αυτό συμφωνεί με τη θεωρητική προσδοκία ότι οι πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές με περιορισμένο ιδιωτικό χώρο στάθμευσης

εξαρτώνται περισσότερο από δημόσιους φορτιστές. Πράγματι, στις εν λόγω περιοχές οι κάτοικοι διαμένουν κυρίως σε πολυκατοικίες χωρίς δυνατότητα οικιακής φόρτισης, γεγονός που αυξάνει τη ζήτηση για δημόσια προσβάσιμα σημεία φόρτισης.



Εικόνα 27 Γεωγραφική κατανομή των Top 10 Ταχυδρομικών Κωδικών

Χαρακτηριστικά περιοχών υψηλού σκορ: Η ανάλυση των κριτηρίων αποκαλύπτει ότι οι περιοχές με υψηλή βαθμολογία TOPSIS τείνουν να συνδυάζουν έντονη δραστηριότητα και πληθυσμιακό φορτίο με συγκριτικά χαμηλή υφιστάμενη κάλυψη υποδομών. Σύμφωνα με τα βάρη Entropy που υπολογίστηκαν, το κριτήριο με τη μεγαλύτερη συμβολή στη διαφοροποίηση των περιοχών ήταν ο αριθμός σημείων ενδιαφέροντος (POIs) πολυλειτουργικών τοποθεσιών όπως καταστήματα, υπηρεσίες, χώροι εργασίας κ.λπ.. Το γεγονός ότι το κριτήριο αυτό έλαβε το υψηλότερο βάρος (26,20%) επιβεβαιώνει πως η έντονη παρουσία δραστηριοτήτων συνδέεται άμεσα με αυξημένη ζήτηση φόρτισης. Πράγματι, οι κορυφαίοι Τ.Κ. (π.χ. 11527, 10432) εμφανίζουν πολύ μεγάλο αριθμό POIs και επιχειρήσεων, γεγονός που συνεπάγεται υψηλή ημερήσια προσέλευση οχημάτων και ανάγκη για δημόσια φόρτιση όπως φαίνεται στην Εικόνα 28 όπου παρουσιάζεται το προφίλ του ταχυδρομικού κώδικα 11527 μέσω πολικού γραφήματος (radar chart). Επιπλέον, οι ίδιες περιοχές διαθέτουν σημαντικό απόλυτο αριθμό θέσεων στάθμευσης (κριτήριο C4) συγκριτικά με άλλες – στοιχείο κρίσιμο για την υλοποίηση νέων ΣΦΗΟ – το οποίο επίσης προσμετρήθηκε με υψηλό βάρος (~15,7%). Αυτό υποδηλώνει ότι όχι μόνο η ζήτηση αλλά και η δυνατότητα χωροθέτησης (διαθεσιμότητα χώρου στάθμευσης) συνέβαλαν στην υψηλή βαθμολογία. Στους υψηλόβαθμους Τ.Κ. καταγράφεται ακόμη αυξημένο ποσοστό χρήσης των υπαρχόντων φορτιστών (κριτήριο C3) και μεγάλο εκτιμώμενο έλλειμμα υποδομών σε σχέση με τον στόλο των οχημάτων (C10), ενισχύοντας τη συνάφεια τους ως “υποψήφιος” περιοχές προς άμεση παρέμβαση.



Εικόνα 28 Προφίλ του πρώτου σε κατάταξη ταχυδρομικού κώδικα 11527.

Αντιθέτως, τα κοινωνικοοικονομικά κριτήρια (πληθυσμός – C5 και μέσο εισόδημα – C6) διαπιστώθηκε ότι είχαν αμελητέα συνεισφορά στη διαφοροποίηση της κατάταξης. Αυτό οφείλεται στη σχετική ομοιογένεια που παρουσιάζουν οι τιμές πληθυσμού και εισοδήματος μεταξύ των ταχυδρομικών περιοχών της Αθήνας – δεν διέφεραν αρκετά ώστε να επηρεάσουν το αποτέλεσμα μέσω της μεθόδου Entropy. Η διαπίστωση αυτή συμφωνεί με τη θεωρητική βάση του μοντέλου, καθώς επιβεβαιώνει ότι σε ένα δεδομένο αστικό περιβάλλον οι διαφορές στην υποδομή και στη χρήση του χώρου υπερισχύουν έναντι δημογραφικών παραγόντων όταν στόχος είναι η ιεράρχηση περιοχών. Με άλλα λόγια, η αντικειμενική στάθμιση Entropy ανέδειξε ως καθοριστικούς τους δείκτες που σχετίζονται με την τρέχουσα προσφορά και ζήτηση φόρτισης – όπως το πλήθος υφιστάμενων ΣΦΗΟ, η χρήση τους και η πυκνότητα δραστηριοτήτων – επιβεβαιώνοντας τη βιβλιογραφία που υποστηρίζει ότι αυτά τα κριτήρια πρέπει να καθοδηγούν τον χωροταξικό σχεδιασμό. Αντίθετα, παράγοντες όπως ο συνολικός πληθυσμός ή το εισόδημα, όσο κι αν θεωρούνται σημαντικοί γενικά για την υιοθέτηση της ηλεκτροκίνησης, δεν αποτέλεσαν διακριτά κριτήρια εντός του Δήμου Αθηναίων. Συνολικά, η προσέγγιση TOPSIS με Entropy βάρη παρήγαγε ένα αξιόπιστο μοντέλο κατάταξης των εναλλακτικών θέσεων εγκατάστασης, το οποίο συμβαδίζει με την εμπειρική παρατήρηση: οι περιοχές με υψηλή κινητικότητα και χαμηλή υπάρχουσα εξυπηρέτηση φορτιστών αναδείχθηκαν ως πρώτες προς προτεραιοποίηση. Αυτό συνάδει και με ευρήματα διεθνών μελετών, όπου συνδυασμός Entropy και TOPSIS κατόρθωσε να προσδιορίσει με ακρίβεια προτεινόμενες τοποθεσίες βάσει διαφορών στην περιβαλλοντική και κοινωνική διάρθρωση περιοχών.

6.2 Ανάλυση Ανά Δημοτική Κοινότητα

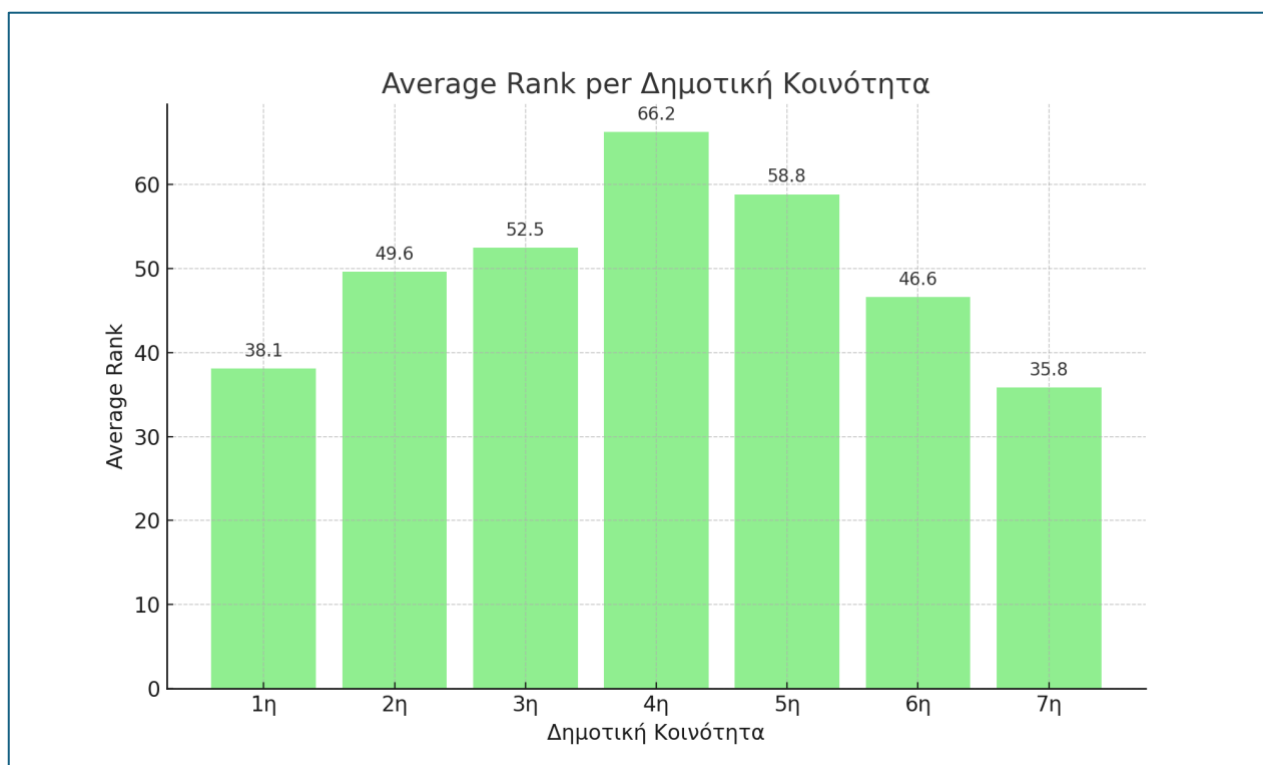
Η ανάλυση των ταχυδρομικών κωδικών του Δήμου Αθηναίων με τη μέθοδο TOPSIS και τη στάθμιση Entropy επέτρεψε την περαιτέρω εμβάθυνση των αποτελεσμάτων σε επίπεδο Δημοτικών Κοινοτήτων. Η γεωγραφική κατανομή των ταχυδρομικών περιοχών, όταν ερμηνεύεται υπό το πρίσμα της διοικητικής διάρθρωσης του Δήμου, αποκαλύπτει κρίσιμες πληροφορίες για τον στρατηγικό σχεδιασμό εγκατάστασης σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (ΣΦΗΟ).

Ο Δήμος Αθηναίων χωρίζεται σε επτά Δημοτικές Κοινότητες όπως φαίνεται στην εικόνα 29, οι οποίες έχουν διαφορετικά κοινωνικο-οικονομικά και χωρικά χαρακτηριστικά. Οι Δημοτικές Κοινότητες αποτελούν το θεμελιώδες διοικητικό και γεωγραφικό επίπεδο για τον τοπικό σχεδιασμό, με βάση το οποίο μπορούν να εφαρμοστούν αποτελεσματικά πολιτικές αστικής ανάπτυξης και βιώσιμης κινητικότητας [65,66].



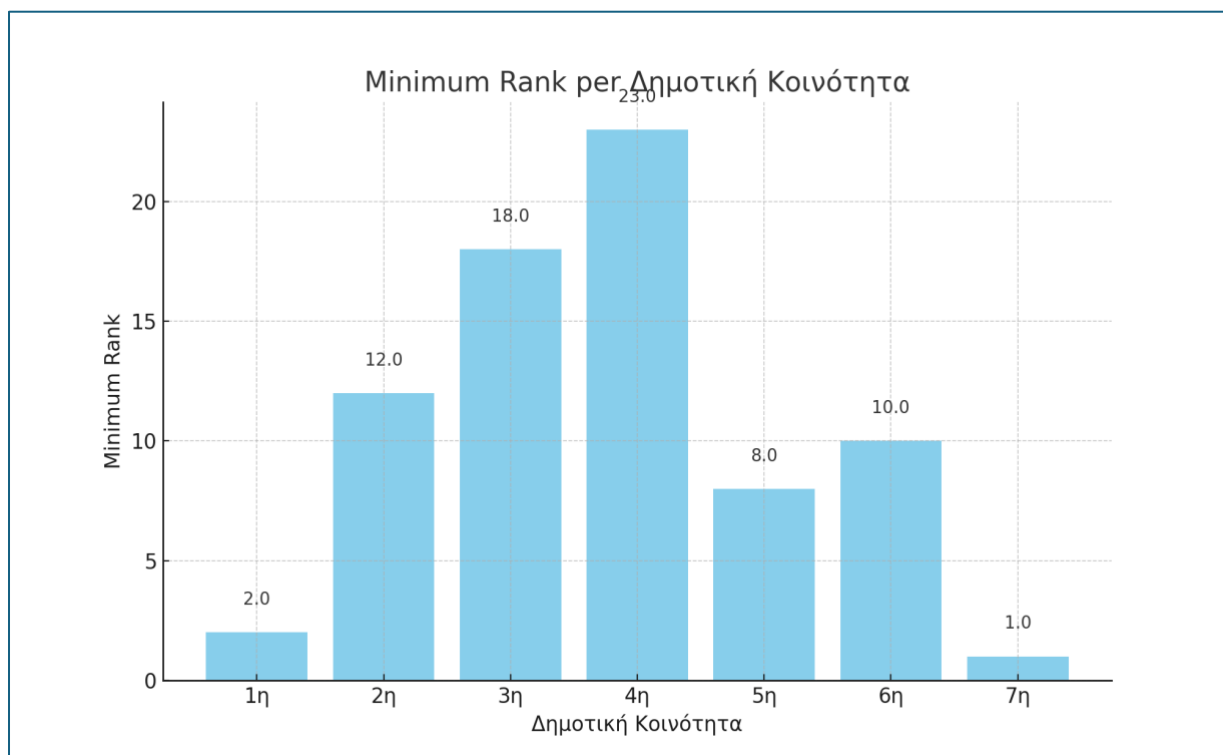
Εικόνα 29 Χάρτης Διαμερισμάτων Δήμου Αθηναίων

Η 7η Δημοτική Κοινότητα, στην οποία περιλαμβάνονται οι Αμπελόκηποι και άλλες περιοχές με έντονη αστική δραστηριότητα, καταγράφει τη χαμηλότερη (δηλαδή καλύτερη) μέση κατάταξη (35,8) μεταξύ όλων των κοινοτήτων, και φιλοξενεί τον ταχυδρομικό κώδικα 11527, ο οποίος κατατάχθηκε πρώτος μεταξύ όλων. Αντίστοιχα, η 1η Δημοτική Κοινότητα, στην οποία υπάγεται το ιστορικό και εμπορικό κέντρο της πόλης, συγκεντρώνει τον μεγαλύτερο αριθμό Τ.Κ. (25 συνολικά), ενώ παρουσιάζει υψηλές επιδόσεις σε κρίσιμα κριτήρια, όπως τα σημεία ενδιαφέροντος (POIs), η επιχειρηματική δραστηριότητα και το έλλειμμα υποδομών, με μέση θέση κατάταξης 38,1. Οι δύο αυτές κοινότητες αποτελούν περιοχές υψηλής προτεραιότητας για την εγκατάσταση ΣΦΗΟ, λόγω της έντονης μικτής χρήσης γης, της αυξημένης κινητικότητας και της ανάγκης για δημόσια προσβάσιμη φόρτιση [67].



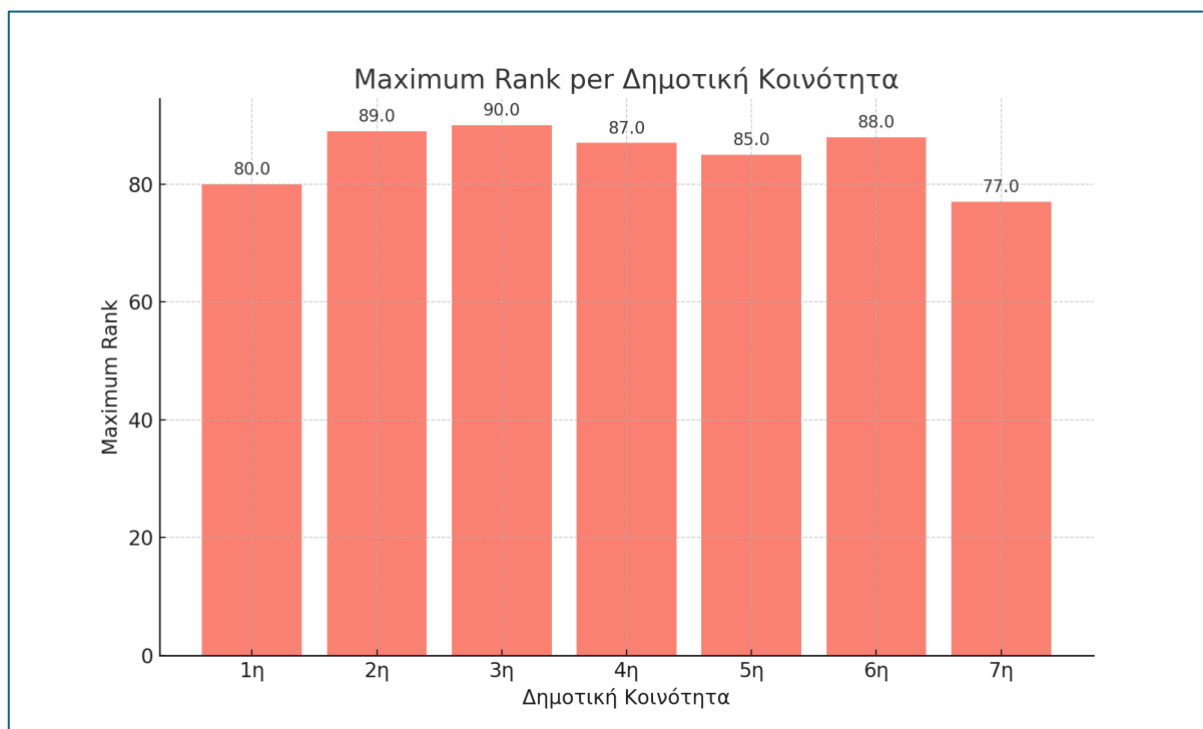
Εικόνα 30 Μέσος Όρος κάθε Δημοτικής Κοινότητας

Η 6η Δημοτική Κοινότητα, με μέση κατάταξη 46,6, ακολουθεί σε δυναμική, ενώ η 2η Κοινότητα εμφανίζει ελαφρώς χαμηλότερη επίδοση (49,6), κυρίως λόγω περιορισμένης διαφοροποίησης σε κριτήρια υποδομών. Η 3η Κοινότητα, με μέση θέση 52,5, χαρακτηρίζεται από ενδιάμεσες επιδόσεις και σχετική εσωτερική ομοιογένεια, χωρίς ακραίες αποκλίσεις.



Εικόνα 31 Ελάχιστη Θέση Κατάταξης Ανά Δημοτική Κοινότητα

Αντιθέτως, οι 5η και 4η Δημοτικές Κοινότητες εμφανίζουν τις χαμηλότερες επιδόσεις, με μέσες κατατάξεις 58,8 και 66,3 αντίστοιχα. Παρότι η 5η περιλαμβάνει τον ταχυδρομικό κώδικα 11524, ο οποίος κατατάσσεται στην 8η θέση πανελλαδικά, η γενική εικόνα παραμένει ασθενής, λόγω της περιορισμένης παρουσίας κατάλληλων υποδομών και χαμηλής διαφοροποίησης σε δείκτες χρήσης. Η 4η, με μόλις τέσσερις Τ.Κ., εμφανίζει συστηματικά χαμηλές βαθμολογίες, γεγονός που αποδίδεται στην έλλειψη ποικιλίας όσον αφορά βασικά χωροταξικά και κοινωνικά χαρακτηριστικά.



Εικόνα 32 Η υψηλότερη (χειρότερη) θέση που καταγράφηκε για Τ.Κ. ανά κοινότητα.

Η διαφοροποίηση των επιδόσεων των Δημοτικών Κοινοτήτων επιβεβαιώνεται από τη διεθνή βιβλιογραφία, που αναγνωρίζει ότι οι τοπικές διοικητικές ενότητες πρέπει να αποτελούν βασικό επίπεδο σχεδιασμού υποδομών λόγω της δυνατότητας τους να ανταποκριθούν σε συγκεκριμένες τοπικές ανάγκες και χαρακτηριστικά [68,69].

Τα στατιστικά στοιχεία των επιδόσεων παρουσιάζονται στην Εικόνα 30, 31 και 32, η οποία ενισχύει την κατανόηση των εσωτερικών ανισοτήτων ανά Δημοτική Κοινότητα. Επιπλέον, η χαρτογραφική αποτύπωση των επτά Δημοτικών Κοινοτήτων στην Εικόνα 11 επιτρέπει τη γεωγραφική ερμηνεία των αποτελεσμάτων και την οπτική κατανόηση των περιοχών προτεραιότητας ενώ ο Πίνακας 4 συνοψίζει τα βασικά στατιστικά στοιχεία της κατάταξης ανά κοινότητα, συμπεριλαμβανομένου του πλήθους Τ.Κ. και των ακραίων τιμών.

Πίνακας 4 Στατιστικά Θέσεων Κατάταξης ανα Δημοτική Κοινότητα

Δημοτική Κοινότητα	Πλήθος Τ.Κ.	Ελάχιστη Θέση	Μέση Θέση	Μέγιστη Θέση
1η	25	2.0	38.1	80.0
2η	12	12.0	49.6	89.0
3η	15	18.0	52.5	90.0
4η	4	23.0	66.2	87.0
5η	6	8.0	58.8	85.0
6η	13	10.0	46.6	88.0
7η	15	1.0	35.8	77.0

Με βάση τη θέση κατάταξης διακρίνουμε γενικά τρεις κατηγορίες κοινοτήτων:

- **Υψηλής προτεραιότητας:** Κοινότητες με έντονη αστική πυκνότητα και υψηλή ζήτηση φόρτισης (μεγάλος πληθυσμός, πολλοί επισκέπτες/τουρίστες, έντονη εμπορική δραστηριότητα) αλλά σχετικά περιορισμένη υπάρχουσα υποδομή φορτιστών. Τέτοιες περιοχές λαμβάνουν κορυφαία βαθμολογία, γιατί οι παράγοντες ζήτησης υπερβαίνουν τις παρούσες δυνατότητες φόρτισης. Σε συμφωνία με τη βιβλιογραφία, περιοχές με έντονη κοινωνικο-οικονομική ανάγκη φαίνονται ως υψηλής προτεραιότητας [69].
- **Μεσαίας προτεραιότητας:** Κοινότητες με ενδιάμεση πυκνότητα και ισορροπημένα χαρακτηριστικά. Παρουσιάζουν μεσαία ζήτηση φόρτισης ή διαθέτουν κατάλληλη υποδομή ώστε να μην είναι άμεσα «κορεσμένες» ούτε «αδιάφορες». Σε αυτές τις περιοχές απαιτείται μεσοπρόθεσμος σχεδιασμός: υπάρχουν δυνατότητες αύξησης φόρτισης, αλλά και μερικές θέσεις φορτιστών ήδη διαθέσιμες.
- **Χαμηλής προτεραιότητας:** Κοινότητες όπου η ζήτηση φόρτισης είναι σχετικά μικρή σε σύγκριση με τη διαθέσιμη υποδομή. Συχνά πρόκειται για περιοχές με χαμηλή πληθυσμιακή πυκνότητα ή υψηλά εισοδήματα (π.χ. προάστια ή κεντρικές όμοιες), όπου πιθανόν ο ιδιωτικός τομέας έχει ήδη προβλέψει επαρκείς σταθμούς φόρτισης. Σύμφωνα με μελέτες, σε τέτοιες ζώνες (υψηλού εισοδήματος ή με υπερεπάρκεια δημόσιων υποδομών) τοποθετήσεις φορτιστών προσφέρουν χαμηλότερη κοινωνικο-οικονομική ωφέλεια [14].

Οπότε με βάση την ανάλυση TOPSIS για τους Ταχυδρομικούς Κώδικες και την επέκταση της στις Δημοτικές Κοινότητες, διαμορφώνονται τρία διακριτά επίπεδα προτεραιότητας για εγκατάσταση οι 1^η και 7^η κοινότητες εντάσσονται στην ανώτερη προτεραιότητα, οι 2^η, 3^η και 6^η στη μεσαία, και οι 4^η και 5^η κοινότητες στη χαμηλή προτεραιότητα. Αυτή η κατηγοριοποίηση μπορεί να ενσωματωθεί σε στρατηγικά σχέδια του Δήμου, όπως προγράμματα επιδοτήσεων και συνεργασίες με ιδιωτικούς φορείς.

Γενικότερα, οι παρατηρούμενες τάσεις ερμηνεύονται από συνδυασμό δημογραφικών, χωρικών και κοινωνικών παραμέτρων. Οι κοινότητες υψηλής προτεραιότητας τείνουν να έχουν υψηλό πληθυσμό, πληθώρα επιχειρήσεων/ξενοδοχείων ή σημεία ενδιαφέροντος

(υποδηλώνοντας συνεχή κίνηση και ανάγκη φόρτισης), σε αντίθεση με τις κοινότητες χαμηλής προτεραιότητας που μπορεί να έχουν ήδη κορεσμένη υποδομή ή λιγότερη κινητικότητα. Η ενσωμάτωση κοινωνικών κριτηρίων (π.χ. εισοδήματος, συλλογικών μετακινήσεων) αντανakλάται στη βαθμολόγηση: μελέτες δείχνουν ότι η τοποθέτηση υποδομών βάσει κοινωνικής ισότητας μπορεί να απαιτήσει επιλογή τοποθεσιών χωρίς άμεσα οικονομικά κέρδη [14]. Στο πλαίσιο αυτό, οι δήμοι ενθαρρύνονται να προσανατολίσουν επενδύσεις σε περιοχές χαμηλού εισοδήματος ή μειωμένων δυνατοτήτων φόρτισης [69], ακριβώς όπως επιβεβαιώνει η ανάλυσή μας (δηλ. οι υψηλής προτεραιότητας κοινότητες αντιστοιχούν σε περιοχές με αυξημένη ανάγκη και κοινωνικό έλλειμμα).

Συμπερασματικά, η συνδυαστική αξιολόγηση δημοτικών κοινοτήτων βάσει ποσοτικών δεικτών υποστηρίζει αντικειμενικά την ιεράρχηση θέσεων φόρτισης, ενσωματώνοντας κρίσιμους παράγοντες (υποδομές, πυκνότητα, κοινωνικά χαρακτηριστικά). Αυτή η ολοκληρωμένη προσέγγιση ενισχύει τον στρατηγικό σχεδιασμό ηλεκτροκίνησης σε τοπικό επίπεδο, όπως προτείνουν οι διεθνείς κατευθύνσεις αστικής πολιτικής. Η πολυκριτήρια αξιολόγηση των Δημοτικών Κοινοτήτων, επομένως, παρέχει ένα ισχυρό εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων στον αστικό σχεδιασμό. Η εφαρμογή της σε πραγματικά δεδομένα του Δήμου Αθηναίων ανέδειξε με σαφήνεια περιοχές που χρήζουν άμεσης επένδυσης σε υποδομές φόρτισης, προσφέροντας έναν οδηγό πολιτικής για βιώσιμη ανάπτυξη και κινητικότητα στην Αθήνα, σύμφωνα με τις διεθνείς πρακτικές και κατευθύνσεις. Τα αποτελέσματά μας συνάδουν με διεθνή ευρήματα: οι πολυκριτήριες τεχνικές (TOPSIS/Entropy) έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία σε μελέτες EV [14, 16, 66], και τονίζουν ότι ο τοπικός σχεδιασμός πρέπει να λαμβάνει υπόψη σύνθετους παράγοντες.

6.3 Ανάλυση Ευαισθησίας

Η ανάλυση ευαισθησίας αποτελεί ουσιώδες εργαλείο στην πολυκριτήρια αξιολόγηση, καθώς επιτρέπει τη διερεύνηση της σταθερότητας των αποτελεσμάτων απέναντι σε μεταβολές των βαρών των επιμέρους κριτηρίων. Σκοπός της παρούσας ανάλυσης είναι η αποτίμηση του βαθμού στον οποίο η τελική κατάταξη των ταχυδρομικών περιοχών μεταβάλλεται όταν αυξάνεται σταδιακά το βάρος ενός μόνο κριτηρίου, ενώ τα υπόλοιπα μειώνονται αναλογικά, ώστε το άθροισμα των βαρών να παραμένει μονάδα (1). Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε βασίζεται στην τεχνική One-at-a-Time (OAT), η οποία περιλαμβάνει την αυτόνομη αύξηση κάθε βάρους κατά 1% έως και 10% (δηλαδή 0.01 έως 0.10), διατηρώντας τη συνολική ισορροπία μέσω αναλογικής μείωσης των υπολοίπων βαρών. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε για όλα τα 10 κριτήρια της ανάλυσης TOPSIS, και σε κάθε βήμα καταγράφηκε η μέση απόλυτη μεταβολή της κατάταξης ($|\Delta Rank|$) των 10 κορυφαίων ταχυδρομικών περιοχών (Top-10).

Η εξίσωση που χρησιμοποιήθηκε για την ανακατανομή των βαρών μετά από αύξηση ενός κριτηρίου έχει ως εξής:

$$w_j' = w_j \cdot \frac{1 - w_k - \delta}{1 - w_k}$$

όπου:

- w_j : κάθε αρχικό βάρος (για $j \neq k$),
- δ : το ποσοστό αύξησης (π.χ. 0.01 για +1%),
- w_k : το βάρος του κριτηρίου που αυξάνεται

Η φόρμουλα εξασφαλίζει ότι **το συνολικό άθροισμα των βαρών παραμένει σταθερό στο 1**, καθώς αυξάνεται ένα βάρος και τα υπόλοιπα προσαρμόζονται αναλογικά.

Αν το w_1 αυξηθεί κατά 1% (δηλαδή $\delta=0.01$), τότε το νέο w_2 υπολογίζεται ως:

$$w_2' = w_2 \cdot \frac{1 - w_1 - 0.01}{1 - w_1}$$

Η ίδια λογική εφαρμόζεται και στα υπόλοιπα βάρη εκτός του w_1 .

Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιείται στο πλαίσιο ανάλυσης ευαισθησίας τύπου OAT (One-At-a-Time), όπου αυξάνεται μεμονωμένα κάθε βάρος από +1% έως +10%, ώστε να εξεταστεί η επίδραση στο τελικό ranking. Η επίδραση αυτή αποτυπώνεται μέσω:

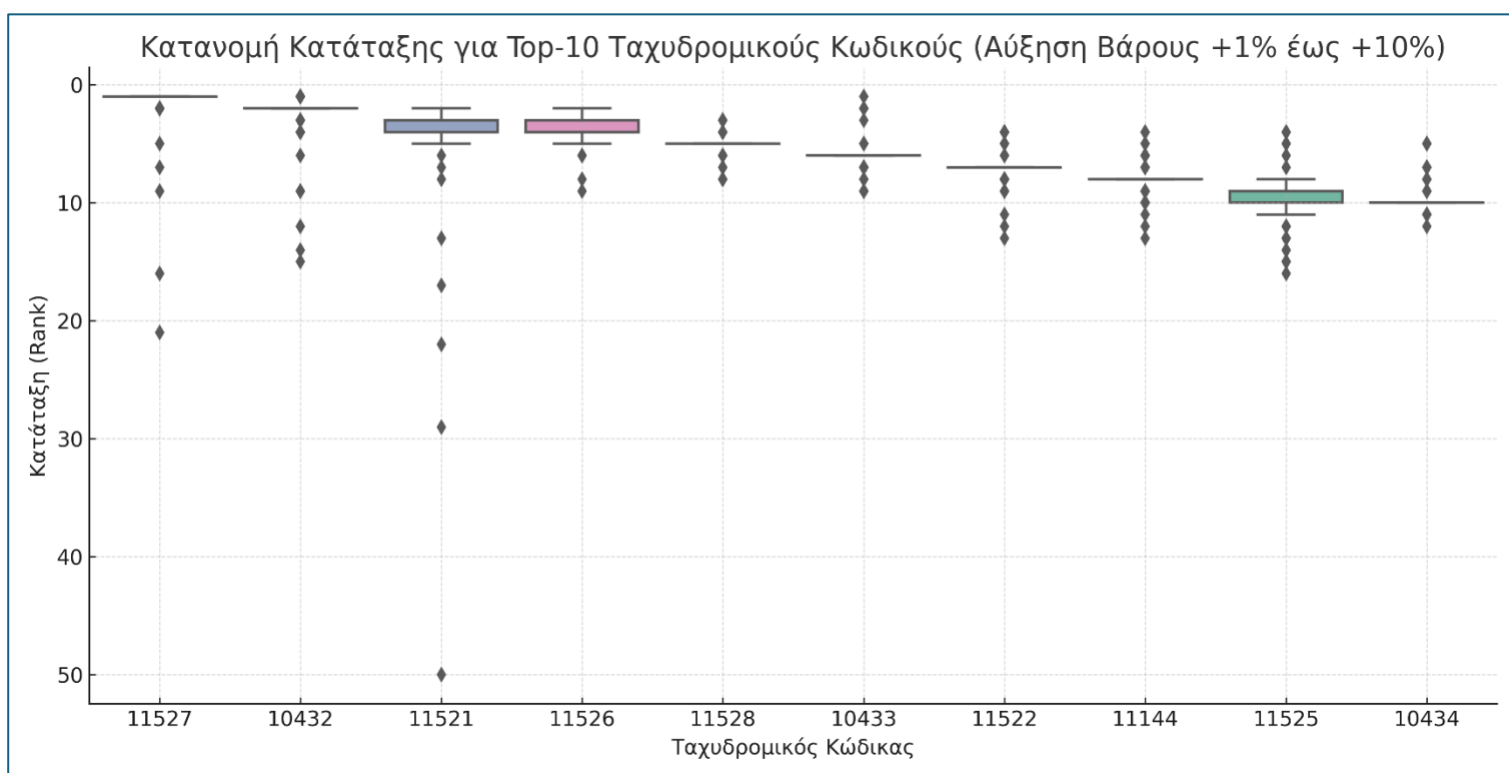
- heatmap, που δείχνει τη συνολική ευαισθησία των 10 κορυφαίων περιοχών ως προς κάθε κριτήριο,
- γραμμικών διαγραμμάτων, που δείχνουν την αλλαγή της μέσης/μέγιστης θέσης κατάταξης αναλογικά με την αύξηση κάθε βάρους.

Η μεθοδολογία αυτή επιτρέπει τον εντοπισμό των πιο κρίσιμων κριτηρίων, τα οποία, ακόμη και με μικρές αλλαγές στα βάρη τους, επηρεάζουν σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα.

Πίνακας 5 Παρατηρήσεις Ευαισθησίας ανά Κριτήριο (αύξηση βάρους +1% έως +10%).

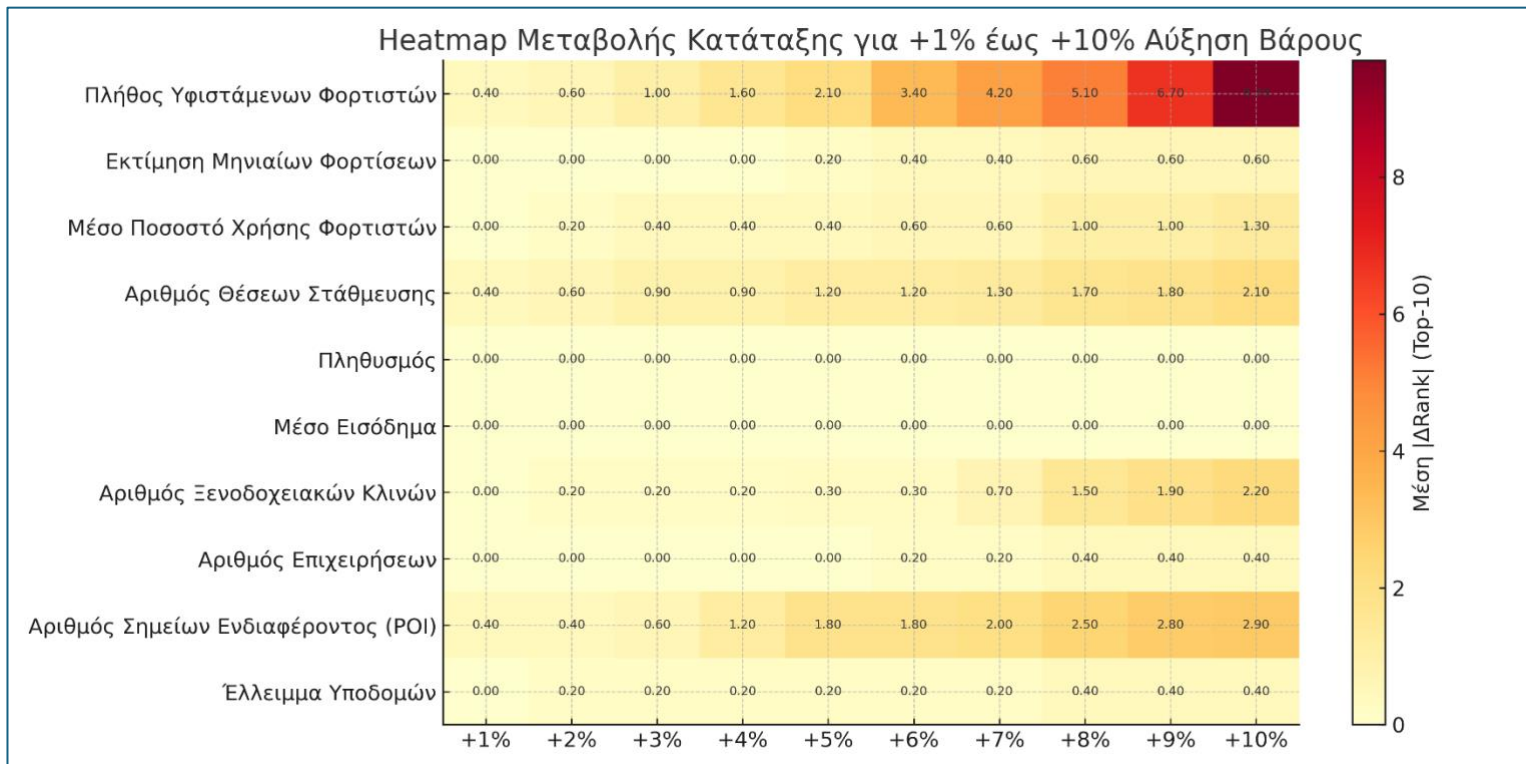
Κριτήριο	Παρατηρήσεις
Πλήθος Υφιστάμενων Φορτιστών (C1)	Σημαντικές αλλαγές ξεκινούν ήδη από +2%. Η μέγιστη $ \Delta Rank $ φτάνει τις 12.6 στο +3%, με διάμεση μεταβολή άνω των 5 θέσεων.
Εκτίμηση Μηνιαίων Φορτίσεων (C2)	Ήπια ευαισθησία. Παρατηρούνται μεταβολές μετά το +6%. Μέγιστη $ \Delta Rank \approx 3.5$ θέσεις.
Μέσο Ποσοστό Χρήσης Φορτιστών (C3)	Ιδιαίτερα ευαίσθητο από το +5% και άνω. Κατάταξη Top-10 περιοχών επηρεάζεται έντονα.
Αριθμός Θέσεων Στάθμευσης (C4)	Μέτρια ευαισθησία. Παρατηρούνται μεταβολές άνω των 3 θέσεων μετά το +6%, με σταδιακή αύξηση.
Πληθυσμός (C5)	Ελάχιστη επίδραση. Η μέση $ \Delta Rank $ παραμένει κάτω από 1 θέση σε όλο το εύρος.
Μέσο Εισόδημα (C6)	Δεν επηρεάζει σημαντικά την κατάταξη. Χαμηλή ευαισθησία σε όλα τα επίπεδα αύξησης.
Αριθμός Ξενοδοχειακών Κλινών (C7)	Ισχυρή ευαισθησία. Μεταβολές ξεκινούν από το +4%. Η μέγιστη $ \Delta Rank $ αγγίζει τις 8.4 θέσεις στο +10%.
Αριθμός Επιχειρήσεων (C8)	Μέτρια επιρροή. Οι Top-10 περιοχές αλλάζουν κατάταξη κατά μέσο όρο 2–4 θέσεις μετά το +7%.
Σημεία Ενδιαφέροντος (POI) (C9)	Υψηλή ευαισθησία. Αλλαγές παρατηρούνται από +5% και άνω, με συνεχόμενη ανοδική μεταβολή.
Έλλειμμα Υποδομών (C10)	Περιορισμένη επιρροή. Καμία τιμή δεν ξεπερνά τις 3 θέσεις μεταβολής στους Top-10.

Συμπληρωματικά προς την ανάλυση ανά κριτήριο, διερευνήθηκε η ευαισθησία της τελικής κατάταξης των δέκα κορυφαίων ταχυδρομικών περιοχών (Top-10) για κάθε πιθανό σενάριο αύξησης βάρους από +1% έως και +10% για κάθε ένα από τα δέκα κριτήρια. Οι μεταβολές καταγράφηκαν συγκεντρωτικά στη παρακάτω εικόνα 33, στην οποία απεικονίζει μέσω διαγραμμάτων τύπου boxplot την κατανομή των κατατάξεων που έλαβε κάθε περιοχή στο σύνολο των σεναρίων ευαισθησίας. Η μορφή του διαγράμματος επιτρέπει την εξαγωγή κρίσιμων συμπερασμάτων: οι ταχυδρομικοί κώδικες που εμφανίζουν χαμηλή ενδοτεταρτημοριακή απόκλιση (interquartile range) και μικρή διακύμανση (δηλαδή στενό εύρος τιμών) διατηρούν σταθερά υψηλή θέση στο σύνολο των σεναρίων, γεγονός που υποδηλώνει δομική ανθεκτικότητα στη μεταβολή των βαρών και συνεπώς υψηλό βαθμό αξιοπιστίας ως υποψήφιοι για εγκατάσταση υποδομών φόρτισης. Αντίθετα, ταχυδρομικοί κώδικες που χαρακτηρίζονται από ευρεία διασπορά κατατάξεων και εμφάνιση ακραίων τιμών (outliers) παρουσιάζουν υψηλή ευαισθησία σε συγκεκριμένα κριτήρια. Η μεταβλητότητα αυτή δύναται να ερμηνευτεί ως ένδειξη εξάρτησης από μεμονωμένους παράγοντες, κάτι που απαιτεί προσεκτικότερη ανάλυση σε ενδεχόμενο εφαρμογής της μεθοδολογίας σε πραγματικό περιβάλλον σχεδιασμού πολιτικής. Το σχήμα αυτό συνιστά ουσιαστικά εργαλείο πολυκριτήριας ευρωστίας, επιτρέποντας τη σύγκριση της «σταθερότητας» κάθε περιοχής υπό εναλλακτικά μοντέλα στάθμισης και διευκολύνοντας τεκμηριωμένες αποφάσεις σε περιβάλλοντα αβεβαιότητας ή πολιτικής διαπραγμάτευσης.



Εικόνα 33 Boxplot για τους Top-10 Ταχυδρομικούς Κώδικες για την κατανομή κατάταξης τους

Τέλος, παρουσιάζεται και η εικόνα 34, ένα heatmap που απεικονίζει τη μέση απόλυτη μεταβολή κατάταξης ($|\Delta Rank|$) για κάθε κριτήριο και για κάθε ποσοστό αύξησης βάρους από +1% έως +10%. Οι γραμμές του heatmap αντιστοιχούν στα 10 κριτήρια και οι στήλες στις ποσοστιαίες αυξήσεις βάρους. Οι υψηλές τιμές αποδίδονται με έντονα θερμά χρώματα (κόκκινο), ενώ οι χαμηλότερες με ψυχρότερα (κίτρινο/πράσινο). Η γραφική απεικόνιση διευκολύνει την αναγνώριση των σημείων με τη μεγαλύτερη ευαισθησία ανά κριτήριο και προσφέρει έναν συγκριτικό άξονα αναφοράς για τους αναλυτές κατά τη διαμόρφωση της τελικής σταθμισμένης απόφασης.



Εικόνα 34 Heatmap που απεικονίζεται η Μεταβολή Κατάταξης για κάθε ποσοστό αύξησης του Βάρους

6.4 Χάραξη πολιτικής και στρατηγικής για τον Δήμο Αθηναίων

Βάσει των παραπάνω, διατυπώνονται οι εξής προτάσεις πολιτικής και στρατηγικής για την Αθήνα, αξιοποιώντας τα ευρήματα της κατάταξης και το υφιστάμενο θεσμικό πλαίσιο:

- **Προτεραιοποίηση κρίσιμων περιοχών:** Ο Δήμος θα ενσωματώσει άμεσα τους κορυφαίους ταχυδρομικούς κώδικες (π.χ. Αμπελόκηποι, Κέντρο, Πατήσια) στο πλάνο χωροθέτησης ΣΦΗΟ, με βάση το υφιστάμενο Σχέδιο Φόρτισης Δήμου. Στο πλαίσιο αυτού του Σχεδίου, οι περιοχές υψηλής προτεραιότητας ορίζονται ως πρώτοι πυρήνες ανάπτυξης, με στόχο την άμεση κάλυψη του εκτιμώμενου ελλείμματος υποδομών. Η προτεραιοποίηση αυτή διασφαλίζει ότι οι διαθέσιμοι πόροι θα κατευθυνθούν εκεί όπου το κοινωνικό και περιβαλλοντικό όφελος είναι μέγιστο.
- **Ενίσχυση δημόσιας στάθμευσης και υποδομών φόρτισης:** Δεδομένου ότι η διαθεσιμότητα χώρου αποτελεί κρίσιμο παράγοντα, η τοπική αυτοδιοίκηση οφείλει να αξιοποιήσει τους δημόσιους χώρους στάθμευσης για ανάπτυξη υποδομών. Αυτό σημαίνει αφενός την τοποθέτηση φορτιστών σε δημοτικά πάρκινγκ, αφετέρου την δέσμευση θέσεων επί οδού αποκλειστικά για φόρτιση EV. Μέτρα όπως η δωρεάν ή προνομιακή στάθμευση ηλεκτρικών οχημάτων σε φορτιστές, η κατάλληλη σήμανση και η ενεργή αστυνόμευση των χώρων φόρτισης θα βελτιώσουν την πρόσβαση και τη χρήση τους. Παράλληλα, η αναβάθμιση του ηλεκτρικού δικτύου σε αυτές τις θέσεις (σε συνεργασία με τον ΔΕΔΔΗΕ) είναι απαραίτητη ώστε να υποστηριχθούν πολλαπλοί ταυτόχρονοι φορτιστές υψηλής ισχύος χωρίς προβλήματα. Έτσι, οι περιοχές υψηλής προτεραιότητας μπορούν να μετατραπούν σε κόμβους φόρτισης με πολλαπλά σημεία, λειτουργώντας ως πρότυπα για την υπόλοιπη πόλη.
- **Συμπράξεις με ιδιωτικό τομέα:** Η συνεργασία δημόσιου και ιδιωτικού τομέα μπορεί να μεγιστοποιήσει τα αποτελέσματα, καθώς το κράτος/δήμος θέτει το πλαίσιο και συνεισφέρει πόρους, ενώ οι επιχειρήσεις υλοποιούν επενδύσεις. Στο πνεύμα αυτό, ο Δήμος Αθηναίων και το ΥΠΕΝ θα πρέπει να ενθαρρύνουν συμπράξεις με ιδιώτες παρόχους φόρτισης (π.χ. μέσω ΣΔΙΤ ή συμβάσεων παραχώρησης). Οι ιδιωτικές εταιρείες μπορούν να εγκαταστήσουν και να λειτουργούν ΣΦΗΟ σε δημοτικούς χώρους ή σε συνεργασία με εμπορικές επιχειρήσεις (εμπορικά κέντρα, σούπερ-μάρκετ, πρατήρια καυσίμων) υπό όρους που θα διασφαλίζουν τη δημόσια πρόσβαση και εύλογη τιμολόγηση. Μέσω του «Φορτίζω Παντού» και άλλων κινήτρων, οι ιδιώτες πάροχοι έχουν ήδη σημαντικό κίνητρο (επιδότηση 70%) να επενδύσουν – η τοπική αρχή μπορεί να λειτουργήσει διευκολυντικά, προσφέροντας ταχύτερες αδειοδοτήσεις, παροχή χώρου ή/και συνδέσεις με το δίκτυο. Τέτοιες συνεργασίες θα επιταχύνουν τον ρυθμό εγκατάστασης φορτιστών στις προτεραιοποιημένες περιοχές, χωρίς ο Δήμος να επωμιστεί εξολοκλήρου το κόστος λειτουργίας.
- **Στοχευμένη χρηματοδότηση και κίνητρα:** Τόσο η κεντρική κυβέρνηση όσο και ο Δήμος πρέπει να διαθέσουν στοχευμένους πόρους για την ανάπτυξη υποδομών στις περιοχές υψηλής ανάγκης. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τη δέσμευση μέρους των κονδυλίων του Ταμείου Ανάκαμψης ή άλλων χρηματοδοτικών εργαλείων (ΕΣΠΑ, Ταμείο Συνοχής) αποκλειστικά για υποδομές φόρτισης εντός πόλης. Επιπλέον, θα ήταν ωφέλιμο να σχεδιαστούν τοπικά κίνητρα: π.χ. μείωση δημοτικών τελών ή φόρων για επιχειρήσεις που εγκαθιστούν φορτιστές ανοικτούς στο κοινό, ή επιβράβευση των ιδιοκτητών EV που χρησιμοποιούν δημόσια φόρτιση (μέσω προγραμμάτων πιστοποίησης πράσινης κινητικότητας). Σημαντικό είναι επίσης

το εργαλείο του προγραμματισμού – η ένταξη συγκεκριμένων στόχων (π.χ. “Χ αριθμός φορτιστών έως το 2025 σε κάθε δημοτική κοινότητα”) στα επιχειρησιακά σχέδια του Δήμου και στα αναθεωρημένα Σχέδια Βιώσιμης Αστικής Κινητικότητας. Με στοχευμένη χρηματοδότηση και παρακολούθηση δεικτών, θα διασφαλιστεί ότι η υλοποίηση συμβαδίζει με τους στρατηγικούς στόχους.

Συμπερασματικά, η πολυκριτήρια αξιολόγηση παρέχει στην τοπική αυτοδιοίκηση ένα εργαλείο τεκμηρίωσης για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τους σταθμούς φόρτισης. Συνδυάζοντας τα ευρήματα της κατάταξης με τις ευρωπαϊκές επιταγές (Fit for 55, AFIR) και τα εθνικά προγράμματα χρηματοδότησης, μπορεί να χαραχθεί μια οδός όπου: (α) οι πλέον κρίσιμες περιοχές της Αθήνας θα αποκτήσουν κατά προτεραιότητα επαρκείς υποδομές φόρτισης, (β) θα δημιουργηθεί ένα πυκνό δίκτυο δημοσίων φορτιστών που να καλύπτει το σύνολο του αστικού ιστού, και (γ) θα επιτευχθούν οι στόχοι ηλεκτροκίνησης με το βέλτιστο κοινωνικό όφελος. Η υλοποίηση των προτάσεων αυτών θα καταστήσει την Αθήνα πιο έτοιμη να αντιμετωπίσει την ραγδαία αύξηση των ηλεκτρικών οχημάτων, προσφέροντας αξιόπιστες επιλογές φόρτισης παντού και συμβάλλοντας στη μετάβαση σε βιώσιμες μεταφορές.

7. Συμπεράσματα και μελλοντικές κατευθύνσεις

7.1 Σύνοψη των ευρημάτων και σημασία

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει ένα πλαίσιο πολυκριτήριας ανάλυσης αποφάσεων (MCDA), με επίκεντρο τη μέθοδο TOPSIS, για την κατάταξη περιοχών ταχυδρομικών κωδικών στο Δήμο Αθηναίων για τη βέλτιστη τοποθέτηση σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (EV). Αξιολογώντας ένα ολοκληρωμένο σύνολο κριτηρίων - συμπεριλαμβανομένων δημογραφικών δεικτών, προτύπων μεταφορών, υφιστάμενων υποδομών και περιβαλλοντικών παραγόντων- η ανάλυση παρήγαγε έναν κατάλογο προτεραιοτήτων περιοχών για επενδύσεις φόρτισης EV. Η κατάταξη με βάση τη TOPSIS είναι σημαντική επειδή παρέχει μια καθοδηγούμενη από δεδομένα και συστηματική ιεράρχηση, διασφαλίζοντας ότι οι επιλεγμένες θέσεις προσεγγίζουν τη βέλτιστη επίδοση σε όλα τα εξεταζόμενα κριτήρια. Από πρακτική άποψη, οι περιοχές με την υψηλότερη κατάταξη που εντοπίστηκαν στην Αθήνα τείνουν να είναι εκείνες με ευνοϊκό συνδυασμό υψηλής αναμενόμενης ζήτησης φόρτισης, κενών υποδομής (που δεν εξυπηρετούνται επαρκώς από τους υφιστάμενους φορτιστές) και κοινωνικοοικονομικής ετοιμότητας για την υιοθέτηση των EV. Το εύρημα αυτό συνάδει με παρόμοιες μελέτες MCDA στον τομέα των EV, οι οποίες αναφέρουν ότι τα καλά επιλεγμένα πολυκριτήρια πλαίσια μπορούν να εντοπίσουν αξιόπιστα ζώνες προτεραιότητας για την ανάπτυξη υποδομών [58]. Η προκύπτουσα σειρά κατάταξης δεν είναι μόνο μια επικύρωση των διαισθητικών προσδοκιών (όπως οι κεντρικές επιχειρηματικές περιοχές που σημειώνουν καλή βαθμολογία λόγω της μεγάλης κυκλοφορίας και της έλλειψης χρέωσης των κατοικιών για τους κατοίκους διαμερισμάτων), αλλά αποκαλύπτει επίσης λιγότερο προφανείς υποψήφιες περιοχές που θα μπορούσαν να παραβλεφθούν εάν οι σχεδιαστές εξέταζαν μόνο έναν παράγοντα όπως ο όγκος κυκλοφορίας ή το κόστος γης. Συνδυάζοντας ποικίλα κριτήρια, η κατάταξη TOPSIS προσθέτει στρατηγική διορατικότητα: αναδεικνύει τα σημεία όπου οι σταθμοί φόρτισης θα αποφέρουν το μεγαλύτερο συνολικό όφελος και την απόδοση της επένδυσης για την κοινότητα.

Η σημασία αυτών των ευρημάτων επεκτείνεται πέρα από τον άμεσο κατάλογο των κορυφαίων περιοχών. Από μεθοδολογική άποψη, καταδεικνύουν την ισχύ των τεχνικών MCDA στον σχεδιασμό αστικών υποδομών. Η προσέγγιση TOPSIS εξασφάλισε ότι κάθε περιοχή ταχυδρομικού κώδικα αξιολογήθηκε ολιστικά σε σχέση με πολλαπλούς στόχους, παράγοντας μια σύνθετη βαθμολογία επιδόσεων για κάθε τοποθεσία. Αυτή η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα πολύτιμη στο πλαίσιο της φόρτισης EV, όπου οι αποφάσεις πρέπει να εξισορροπούν τεχνικές, οικονομικές, κοινωνικές και περιβαλλοντικές εκτιμήσεις. Προηγούμενες έρευνες έχουν τονίσει ότι τέτοιες ολοκληρωμένες αξιολογήσεις βελτιώνουν την ποιότητα των αποφάσεων, αποδίδοντας σταθερές και αποτελεσματικές συστάσεις για τη χωροθέτηση εγκαταστάσεων φόρτισης. Στην παρούσα διατριβή, η κατάταξη με βάση το TOPSIS αποδείχθηκε ότι είναι σταθερή μέσω ανάλυσης ευαισθησίας και εξέτασης σεναρίων (π.χ. δοκιμή διαφορετικών συστημάτων στάθμισης), επιβεβαιώνοντας ότι οι περιοχές με την υψηλότερη κατάταξη που εντοπίστηκαν υπερτερούν σταθερά έναντι άλλων κάτω από λογικές αλλαγές στις παραδοχές. Αυτή η ευρωστία είναι σημαντική για την εμπιστοσύνη των υπευθύνων λήψης αποφάσεων. Επιπλέον, δουλεύοντας σε λεπτομέρεια των περιοχών ταχυδρομικών κωδικών, η ανάλυση προσφέρει αξιοποιήσιμες πληροφορίες για τους δημοτικούς σχεδιαστές - μια κλίμακα στην οποία οι τοπικές κυβερνήσεις μπορούν να προϋπολογίσουν και να σχεδιάσουν συγκεκριμένες εγκαταστάσεις (π.χ. προσδιορίζοντας μια

γειτονιά για 5 νέους ταχυφορτιστές). Συνοψίζοντας, τα ευρήματα παρέχουν μια σαφή απάντηση στο ερευνητικό ερώτημα για το πού πρέπει να δοθεί προτεραιότητα στις υποδομές φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην Αθήνα και υπογραμμίζουν την αξία της MCDA (και ειδικότερα του TOPSIS) ως αυστηρού εργαλείου για την αντιμετώπιση τέτοιων πολύπλευρων χωρικών προβλημάτων λήψης αποφάσεων.

7.2 Μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις

Η παρούσα μελέτη, αν και επικεντρώνεται στην περιοχή της Αθήνας, ανοίγει σημαντικούς δρόμους για μελλοντική έρευνα και εφαρμογές. Η εφαρμογή του πλαισίου MCDA ανέδειξε τη χρησιμότητα της μεθοδολογίας σε ένα σύνθετο αστικό περιβάλλον, όμως απαιτείται δοκιμή και σε άλλες περιοχές της Ελλάδας, όπως μεσαίου μεγέθους πόλεις ή αγροτικές και νησιωτικές κοινότητες. Σε περιοχές με διαφορετικά χαρακτηριστικά – χαμηλότερη πυκνότητα, μεγαλύτερες αποστάσεις, περιορισμένο δίκτυο – ενδέχεται να μεταβάλλεται η σχετική σημασία των κριτηρίων ή να απαιτούνται νέα, όπως η κάλυψη με ΑΠΕ ή η απόσταση από υφιστάμενους ταχυφορτιστές. Παραδείγματα όπως η «Έξυπνη Αστυπάλαια» και η πράσινη μετάβαση της Χάλκης δείχνουν την ανάγκη ενσωμάτωσης τοπικών παραμέτρων, συμπεριλαμβανομένων της ενεργειακής αυτονομίας και της κοινωνικής συμμετοχής. Η αξιοποίηση τέτοιων δεδομένων μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία προφίλ περιοχών με διαφοροποιημένες προτεραιότητες και βάρη, προσφέροντας ένα χρήσιμο εργαλείο για τον εθνικό σχεδιασμό και την ισόρροπη ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης.

Η ανάλυση βασίστηκε κυρίως σε στατικά (μη συχνά επικαιροποιούμενα) δεδομένα, όπως απογραφικά στοιχεία και καταγεγραμμένες υποδομές. Ωστόσο, η αυξανόμενη διαθεσιμότητα δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, όπως κυκλοφοριακές ροές, χρήση φορτιστών και αναζητήσεις σε εφαρμογές EV, δημιουργεί τη δυνατότητα για πιο δυναμικά και ανταποκρινόμενα μοντέλα. Η ενσωμάτωσή τους θα μπορούσε να αναδείξει περιοχές υψηλής ζήτησης που δεν διαφαίνονται από στατικές εκτιμήσεις. Η ανάπτυξη ενός heatmap της ζήτησης, που ανανεώνεται σε συνεχή βάση, θα μπορούσε να μετατρέψει το MCDA σε διαρκές σύστημα υποστήριξης αποφάσεων, κατάλληλο για χρήση σε έξυπνες πόλεις και αναπροσαρμογή των ΣΦΗΟ με βάση τη μεταβολή της ζήτησης.

Παράλληλα, η μελλοντική εξέλιξη της ζήτησης της φόρτισης μπορεί να ενσωματωθεί ως πρόσθετο κριτήριο στην Πολυκριτήρια Ανάλυση Αποφάσεων (MCDA). Η αξιοποίηση προβλεπτικών μοντέλων — όπως τα LSTM, ARIMA ή Random Forests — δίνει τη δυνατότητα εκτίμησης της αναμενόμενης ζήτησης ανά ταχυδρομικό κώδικα. Με αυτόν τον τρόπο, το μοντέλο αποκτά στρατηγική διάσταση, επιτρέποντας την ανάλυση σεναρίων και την προσαρμογή των επενδύσεων ανάλογα με τον ρυθμό υιοθέτησης της ηλεκτροκίνησης σε κάθε περιοχή.

Ένας ακόμη κρίσιμος παράγοντας είναι η δυναμικότητα και η κατάσταση του τοπικού ηλεκτρικού δικτύου, καθώς η ανεξέλεγκτη εγκατάσταση φορτιστών μπορεί να οδηγήσει σε τεχνικά και οικονομικά προβλήματα. Η ενσωμάτωση δεδομένων για υποσταθμούς, γραμμές τάσης και διαθέσιμη ισχύ μπορεί να γίνει είτε ως φίλτρο εφικτότητας είτε ως νέο κριτήριο στο MCDA. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται η τεχνική υλοποιεσιμότητα των προτεινόμενων θέσεων χωρίς υπερβολικές απαιτήσεις σε αναβαθμίσεις. Η αξιοποίηση τέτοιων δεδομένων από τον ΔΕΔΔΗΕ είναι κρίσιμη, ειδικά καθώς η υποδομή είναι άνιση σε

εθνικό επίπεδο. Μια «βαθμολογία ετοιμότητας» μπορεί να προσδώσει επιπλέον ρεαλισμό και να ευθυγραμμιστεί με τις αρχές των έξυπνων δικτύων και της διασύνδεσης ενέργειας-μεταφορών.

Τέλος, τα αποτελέσματα της παρούσας ανάλυσης έχουν άμεσες πολιτικές και επενδυτικές εφαρμογές για την Ελλάδα. Η ανάπτυξη χιλιάδων νέων σημείων φόρτισης, στο πλαίσιο εθνικών προγραμμάτων όπως το «Φορτίζω Παντού», απαιτεί στοχευμένες αποφάσεις με μέγιστη αποδοτικότητα και κοινωνική δικαιοσύνη. Η πολυκριτήρια προσέγγιση, ενσωματώνοντας χωρικά, τεχνικά, κοινωνικά και περιβαλλοντικά δεδομένα, επιτρέπει την ιεράρχηση περιοχών υψηλής προτεραιότητας που δεν αναδεικνύονται με απλές μετρήσεις. Παράλληλα, μπορεί να ενισχύσει την κοινωνική ισότητα, κατευθύνοντας επενδύσεις σε περιοχές με χαμηλό εισόδημα ή περιορισμένη πρόσβαση, υποστηρίζοντας μια δίκαιη μετάβαση προς την καθαρή κινητικότητα. Η ενσωμάτωση της μεθοδολογίας σε θεσμικά εργαλεία των δήμων και των υπουργείων, με δυνατότητα συνεχούς ανανέωσης και παρακολούθησης, θα μπορούσε να συμβάλει στην ευθυγράμμιση των τοπικών δράσεων με τους εθνικούς και ευρωπαϊκούς στόχους.

Βιβλιογραφία

- [1] International Energy Agency. (2023). *Global EV Outlook 2023: Executive summary*. IEA. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023/executive-summary>
- [2] Graham, A. (2024, June 30). Fact check: Several countries have committed to banning new non-electric cars. *PA Media*. <https://pa.media/blogs/fact-check/fact-check-several-countries-have-committed-to-banning-new-non-electric-cars/>
- [3] Mahmud, I., Medha, M. B., & Hasanuzzaman, M. (2023). Global challenges of electric vehicle charging systems and its future prospects: A review. *Research in Transportation Business & Management*, 49, 101011.
- [4] International Energy Agency. (2023). *Global EV Outlook 2023: Trends in charging infrastructure*. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023/trends-in-charging-infrastructure>
- [5] Szumska, E. M. (2023). Electric Vehicle Charging Infrastructure along Highways in the EU. *Energies*, 16(2), 895. <https://doi.org/10.3390/en16020895>
- [6] Elliott, D. (2024, September 30). 'It's just like plugging in your phone' – one founder on the mindset shift needed to scale EVs. *World Economic Forum*. <https://www.weforum.org/stories/2024/09/electric-vehicles-charging-infrastructure/#:~:text=Many%20future%20EV%20drivers%20will,adoption%2C%20the%20paper%E2%80%99s%20authors%20say>
- [7] Powell, S., Cezar, G. V., Min, L., Azevedo, I. M., & Rajagopal, R. (2022). Charging infrastructure access and operation to reduce the grid impacts of deep electric vehicle adoption. *Nature Energy*, 7(10), 932-945.
- [8] Autovista24. (2024, May 20). What is the current state of Europe's EV charging infrastructure? *Autovista24*. <https://autovista24.autovistagroup.com/news/what-is-current-state-europe-ev-charging-infrastructure/>
- [9] Marotta, A., Lodi, C., Julea, A., & Gómez Vilchez, J. J. (2023). European governments' electromobility plans: an assessment with a focus on infrastructure targets and vehicle estimates until 2030. *Energy Efficiency*, 16(8), 92.
- [10] Gulbahar, I. T., Sutcu, M., Almomany, A., & Ibrahim, B. S. K. K. (2023). Optimizing electric vehicle charging station location on highways: A decision model for meeting intercity travel demand. *Sustainability*, 15(24), 16716.
- [11] Ferreira, V. G. (2025, April 2). *Charging ahead: The future of electric vehicle infrastructure in the EU*. European Parliament Think Tank. <https://epthinktank.eu/2025/04/02/charging-ahead-the-future-of-electric-vehicle-infrastructure-in-the-eu/#:~:text=The%20EU%20has%20set%20ambitious,charging%20and%20in%20rural%20areas>
- [12] Watson Farley & Williams. (2024, May 9). *The future of EV charging: Spotlight on Greece*. <https://www.wfw.com/articles/the-future-of-ev-charging-spotlight-on-greece/#:~:text=This%20legislative%20framework%20is%20intended,%E2%81%B5>
- [13] Metaforespress. (2024, April 22). Δημόσιοι σταθμοί φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. <https://www.metaforespress.gr/autokinitodromoi/δημόσιοι-σταθμοί-φόρτισης-ηλεκτρικών/>

- [14] Ademulegun, O. O., MacArtain, P., Oni, B., & Hewitt, N. J. (2022). Multi-Stage Multi-Criteria Decision Analysis for Siting Electric Vehicle Charging Stations within and across Border Regions. *Energies*, 15(24), 9396. <https://doi.org/10.3390/en15249396>
- [15] Guler, D., & Yomralioglu, T. (2020). Suitable location selection for the electric vehicle fast charging station with AHP and fuzzy AHP methods using GIS. *Annals of GIS*, 26(2), 169-189.
- [16] Mahdy, M., Bahaj, A. S., Turner, P., Wise, N., Alghamdi, A. S., & Hamwi, H. (2022). Multi criteria decision analysis to optimise siting of electric vehicle charging points—Case study Winchester District, UK. *Energies*, 15(7), 2497.
- [17] Morocho-Chicaiza, W., Barragán-Escandón, A., Zalamea-León, E., Ochoa-Correa, D., Terrados-Cepeda, J., & Serrano-Guerrero, X. (2024). Identifying locations for electric vehicle charging stations in urban areas through the application of multicriteria techniques. *Energy Reports*, 12, 1794-1809.
- [18] Guarnieri, M. (2012, September). Looking back to electric cars. In *2012 Third IEEE HISTory of ELection-technology CONference (HISTELCON)* (pp. 1-6). IEEE.
- [19] All-electric vehicles. Alternative Fuels Data Center: All-Electric Vehicles. (n.d.). https://afdc.energy.gov/vehicles/electric_basics_ev.html
- [20] Everything you should know about electric vehicle charging [2023]. EVBox. (n.d.). <https://evbox.com/en/ev-charging-guide>
- [21] International Energy Agency. (2024). *Global EV Outlook 2024: Catching up with climate ambitions*. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>
- [22] IEA (International Energy Agency). (2023). *Greece 2023 – Energy Policy Review*. <https://www.iea.org/reports/greece-2023>
- [23] MotorOne.gr. (2024, September 19). Φορτίζω Παντού: Ανακοινώθηκαν οι δικαιούχοι της δράσης 80 εκατ. ευρώ για την εγκατάσταση φορτιστών σε όλη την Ελλάδα. <https://www.motorone.gr/epikairotita/ellada/75112/dikaiouschoi-drasis-80-ekatt-fortizo-pantou/>
- [24] AutoΤρίτη. (2021, June 3). Μοντέλο για όλη την Ευρώπη η Αστυπάλαια (+vids). https://pro.autotriti.gr/data/news/preview_news/Montelo-gia-olh-thn-Eyrowph-h-Astypalaia_217397.asp
- [25] European Alternative Fuels Observatory (EAFO). (2024). *Country Dashboard – Greece*. <https://www.eafo.eu/countries/greece/1740/infrastructure/electricity>
- [26] EVStats. (2025). Στατιστικά Ηλεκτροκίνησης στην Ελλάδα. Retrieved April 19, 2025, from <https://www.evstats.gr/en/>
- [27] Υπουργείο Υποδομών και Μεταφορών. Μητρώο Υποδομών Ηλεκτροκίνησης – Σημεία Φόρτισης. <https://electrokinisi.yme.gov.gr/public/ChargingPoints/>
- [28] Ministry of Digital Governance. (2023). Φορτίζω Παντού – Ελλάδα 2.0 – Ταμείο Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας. <https://greece20.gov.gr/?calls=fortizo-pantoy>
- [29] 4troxoi.gr. (2024, Σεπτέμβριος 19). Εγκρίθηκαν οι πρώτοι σταθμοί του «Φορτίζω Παντού». <https://www.4troxoi.gr/>
- [30] TopGearGreece.gr. (2024). Οι φορτιστές της ΔΕΗ ξεπέρασαν τους 2.000 πανελλαδικά. <https://www.topgeargreece.gr/>
- [31] Chumbi, W. E., Martínez-Minga, R., Zambrano-Asanza, S., Leite, J. B., & Franco, J. F. (2024). Suitable Site Selection of Public Charging Stations: A Fuzzy TOPSIS MCDA Framework on Capacity Substation Assessment. *Energies*, 17(14), 3452. <https://doi.org/10.3390/en17143452>

- [32] Μακρυβελίου Ε.(2021). Αξιολόγηση Και Επιλογή Χαρτοφυλακίου Ερευνητικών Προγραμμάτων Με Χρήση Πολυκριτηριακής Ανάλυσης Και Μαθηματικού Προγραμματισμού. <https://doi.org/10.12681/eadd/50270>
- [33] Roy, B., & Vincke, P. (1981). Multicriteria Analysis: Survey and new directions. *European Journal of Operational Research*, 8(3), 207–218. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(81\)90168-5](https://doi.org/10.1016/0377-2217(81)90168-5)
- [34] Petrillo, A., Salomon, V. A. P., & Tramarico, C. L. (2023). State-of-the-Art Review on the Analytic Hierarchy Process with Benefits, Opportunities, Costs, and Risks. *Journal of Risk and Financial Management*, 16(8), 372. <https://doi.org/10.3390/jrfm16080372>
- [35] Xu X, Zhang Y, Xu Z, Liao H, Tong Z. Multi-attribute decision making based on VIKOR with probabilistic linguistic term sets: An application to the risk evaluation of foreign direct investment. *PLoS One*. 2024 Mar 1;19(3):e0294758. doi: 10.1371/journal.pone.0294758. PMID: 38427701; PMCID: PMC10906857.
- [36] Hamed Taherdoost* and Mitra Madanchian. Using PROMETHEE Method for Multi-Criteria Decision Making: Applications and Procedures. *Iris J of Eco & Buss Manag*. 1(1): 2023. IJEBM.MS.ID.000502.
- [37] Behzadian, M., Otaghsara, S. K., Yazdani, M., & Ignatius, J. (2012). A state-of the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 39(17), 13051–13069. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056>
- [38] Erbaş, M., Yıldız, B., & Ustun, O. (2018). GIS-based multi-criteria decision analysis for EV charging station planning in Istanbul. *Sustainability*, 10(9), 3253. <https://doi.org/10.3390/su10093253>
- [39] Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple attribute decision making: Methods and applications*. Springer-Verlag.
- [40] Shih, H. S., Shyur, H. J., & Lee, E. S. (2007). An extension of TOPSIS for group decision making. *Mathematical and Computer Modelling*, 45(7–8), 801–813. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2006.03.023>
- [41] Triantaphyllou, E. (2000). *Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3157-6>
- [42] Behzadian, M., Otaghsara, S. K., Yazdani, M., & Ignatius, J. (2012). A state-of the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with applications*, 39(17), 13051-13069.
- [43] Zhao, H., & Li, N. (2016). Optimal siting of charging stations for electric vehicles based on fuzzy Delphi and hybrid multi-criteria decision making approaches from an extended sustainability perspective. *Energies*, 9(4), 270.
- [44] He, S. Y., Kuo, Y. H., & Wu, D. (2016). Incorporating institutional and spatial factors in the selection of the optimal locations of public electric vehicle charging facilities: A case study of Beijing, China. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 67, 131-148.
- [45] Sadeghi-Barzani, P., Rajabi-Ghahnavieh, A., & Kazemi-Karegar, H. (2014). Optimal fast charging station placing and sizing. *Applied Energy*, 125, 289-299.
- [46] Χρυσός Οδηγός. (2025). Κατάλογος Επιχειρήσεων – Κατηγορία: Στάθμευση. Ανακτήθηκε από <https://www.xo.gr>
- [47] Sathaye, N., & Kelley, S. (2013). An approach for the optimal planning of electric vehicle infrastructure for highway corridors. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 59, 15-33.
- [48] Ελληνική Στατιστική Αρχή – ΕΛΣΤΑΤ (2023). Μόνιμος Πληθυσμός ανά Περιφερειακή Ενότητα και Δήμο - Απογραφή 2021. Διαθέσιμο από: <https://www.statistics.gr>

- [49] Skaloumpakas, P., Kafouros, A., Spiliotis, E., Sarmas, E., & Marinakis, V. (2025). *Optimizing electric vehicle charging station placement in Greek municipalities through multi-criteria decision analysis*. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 41, 101589. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2024.101589>
- [50] Ελληνική Στατιστική Αρχή – ΕΛΣΤΑΤ (2023). Στατιστικά στοιχεία εισοδημάτων φυσικών προσώπων και νοικοκυριών. Διαθέσιμο από: <https://www.statistics.gr>
- [51] Ελληνική Στατιστική Αρχή – ΕΛΣΤΑΤ (2019). Διαθέσιμες Ξενοδοχειακές Κλίνες και Αφίξεις ανά Δήμο και Περιφέρεια. Διαθέσιμο από: <https://www.statistics.gr/en/mission>
- [52] Ελληνική Στατιστική Αρχή – ΕΛΣΤΑΤ (2020). Μητρώο Επιχειρήσεων ανά Τομέα Οικονομικής Δραστηριότητας. Διαθέσιμο από: <https://www.statistics.gr/en/statistics/-/publication/SBR01>
- [53] Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (2021). Ερμηνευτική Εγκύκλιος για την Ανάπτυξη Δημόσιων Υποδομών Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων στους Δήμους. Διαθέσιμο από: https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/2021/03/%CE%95%CE%A1%CE%9C%CE%97%CE%9D%CE%95%CE%A5%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%97-%CE%95%CE%93%CE%9A%CE%A5%CE%9A%CE%9B%CE%99%CE%9F%CE%A3_%CE%A3%CE%A6%CE%97%CE%9F.pdf
- [54] Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, 1(1), 83-98.
- [55] Liu, P. (2009). Multi-attribute decision-making method research based on interval vague set and TOPSIS method. *Technological and economic development of economy*, 15(3), 453-463.
- [56] Mukhametzhanov, I. (2021). Specific character of objective methods for determining weights of criteria in MCDM problems: Entropy, CRITIC and SD. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 4(2), 76-105.
- [57] Feng, J., Xu, S. X., & Li, M. (2021). A novel multi-criteria decision-making method for selecting the site of an electric-vehicle charging station from a sustainable perspective. *Sustainable Cities and Society*, 65, 102623.
- [58] Rashmitha, Y., Sushma, M. B., & Roy, S. (2024). A novel multi-criteria framework for selecting optimal sites for electric vehicle charging stations from a sustainable perspective: evidence from India. *Environment, Development and Sustainability*, 1-27.
- [59] Protasis Engineering & Consulting S.A. (n.d.). *Protasis Engineering & Consulting S.A.* Retrieved 2025, from <https://protasis.energy/en/>
- [60] Ostermann, A., & Haug, T. (2024). Probabilistic forecast of electric vehicle charging demand: analysis of different aggregation levels and energy procurement. *Energy Informatics*, 7(1), 13.
- [61] Koohfar, S., Woldemariam, W., & Kumar, A. (2023). Prediction of electric vehicles charging demand: A transformer-based deep learning approach. *Sustainability*, 15(3), 2105.
- [62] Roy, A., & Law, M. (2022). Examining spatial disparities in electric vehicle charging station placements using machine learning. *Sustainable cities and society*, 83, 103978.
- [63] Chumbi, W. E., Martínez-Minga, R., Zambrano-Asanza, S., Leite, J. B., & Franco, J. F. (2024). Suitable site selection of public charging stations: a fuzzy topsis mcda framework on capacity substation assessment. *Energies*, 17(14), 3452.

- [64] resources4future (RFF). (2024). *Equity in Electric Vehicle Charging Infrastructure*. (Working Paper 24-14 by J. Min, G. Blossom, & Y. Chen). **Resources for the Future**. (Examines how EV charging investments can reduce or exacerbate inequalities.)
- [65] Guo, S., & Zhao, H. (2015). Optimal site selection of electric vehicle charging station by using fuzzy TOPSIS based on sustainability perspective. *Applied Energy*, 158, 390-402.
- [66] Erbaş, M., Kabak, M., Özceylan, E., & Çetinkaya, C. (2018). Optimal siting of electric vehicle charging stations: A GIS-based fuzzy Multi-Criteria Decision Analysis. *Energy*, 163, 1017-1031.
- [67] Varghese, A. M., Menon, N., & Ermagun, A. (2024). Equitable distribution of electric vehicle charging infrastructure: A systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 206, 114825.
- [68] Yuan, Z., Wen, B., He, C., Zhou, J., Zhou, Z., & Xu, F. (2022). Application of multi-criteria decision-making analysis to rural spatial sustainability evaluation: a systematic review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(11), 6572.
- [69] Bingham, A., & Rider, K. (2024). *Facilitating equity-oriented electric vehicle infrastructure: Guidance for local governments and utilities*. Center for Law, Energy & the Environment (CLEE), University of California, Berkeley. https://www.law.berkeley.edu/wp-content/uploads/2024/10/Facilitating-Equity-Oriented-EV-Infrastructure_CLEE_Oct24.pdf
- [70] Δήμος Αθηναίων. (2022, Σεπτεμβρίου 13). Ολοκλήρωση του Σχεδίου Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων (Σ.Φ.Η.Ο.) Δήμου Αθηναίων. <https://www.cityofathens.gr/oloklirosi-schediyo-fortisis-ilek/>