

EV Charge Station Manager: Σύστημα Διαχείρισης Δικτύου Σταθμών Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων

Σταμάτης Δημήτρης
Μεταπτυχιακός Φοιτητής ΣΘΕΤ ΕΑΠ
dim.stamatis@gmail.com, std1310748@ac.eap.gr

Βασίλειος Καψάλης
Καθηγητής Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών Πανεπιστημίου Πελοποννήσου
και Μέλος ΣΕΠ ΣΘΕΤ ΕΑΠ
kapsalis@go.uop.gr

Περίληψη – Η παρούσα εργασία παρουσιάζει την ανάπτυξη εφαρμογής εύρεσης βέλτιστων διαδρομών και διαχείρισης φορτίσεων σε ένα δίκτυο σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Στο πλαίσιο της εργασίας αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι εύρεσης της χρονικά γρηγορότερης διαδρομής, μέσα σε ένα δίκτυο ετερογενών σταθμών φόρτισης, βάσει παραμέτρων που εισάγονται από τον χρήστη και τον τύπο του οχήματός του. Οι πιθανές διαδρομές μαζί με τον χρόνο άφιξης, τον φορτιστή στο σταθμό φόρτισης και το συνολικό κόστος, παρουσιάζονται στον οδηγό, δίνοντάς του τη δυνατότητα επιλογής μιας διαδρομής και κράτησης των αντίστοιχων φορτιστών. Η κράτηση έχει ως αποτέλεσμα τη δέσμευση των εμπλεκόμενων φορτιστών για το χρόνο που προγραμματίζεται να διαρκέσει η κάθε φόρτιση, αφαιρώντας τη διαθεσιμότητά τους από το δίκτυο για το χρόνο αυτό για χρήση από άλλους οδηγούς. Οι δεσμεύσεις των σταθμών φόρτισης έχουν ως αποτέλεσμα την ακριβή εκτίμηση των ενεργειακών αναγκών ανά σταθμό, έτσι ώστε να γίνει προμήθεια της απαιτούμενης ενέργειας με τον οικονομικότερο τρόπο, για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας στατική μπαταρία που μπορεί να φορτιστεί σε χρονικές στιγμές με χαμηλό κόστος ενέργειας.

Λέξεις-Κλειδιά: Δρομολόγηση Ηλεκτρικών Οχημάτων, Διαχείριση Σταθμών Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων.

I. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία, η ΕΕ έχει θέσει σαν στόχο την μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου που προκαλούνται από τις οδικές μεταφορές κατά 90% έως το 2050. Για τον σκοπό αυτό κρίνεται επιτακτική η ανάγκη για στροφή προς πηγές ενέργειας, που παράγουν χαμηλότερες ως και μηδενικές εκπομπές αερίων ρύπων. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, πολλές χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης, έχουν θεσπίσει την απαγόρευση πώλησης συμβατικών οχημάτων από το 2030, ενώ άλλες ακόμα και από 2025 (Ευρωπαϊκό Ελεγκτικό Συνέδριο, 2021).

Βάσει της Ευρωπαϊκής στρατηγικής, η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων πρέπει να καταστεί εξίσου εύκολη με αυτή των συμβατικών οχημάτων. Αν και το πρόβλημα αυτό δεν είναι τόσο σημαντικό μέσα στις πόλεις, λόγω του μεγάλου αριθμού ιδιωτικών σταθμών φόρτισης, τόσο στα σπίτια όσο και σε άλλους ιδιωτικούς χώρους, το πρόβλημα παίρνει πολύ μεγάλες διαστάσεις μεταξύ πόλεων, όπου η ανάπτυξη υποδομών φόρτισης αποτελούν καταλυτικό παράγοντα για την αντιμετώπιση του προβλήματος.

Είναι γνωστό ότι η αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων είναι πολύ μικρότερη από αυτή των συμβατικών. Αν και τα σύγχρονα ηλεκτρικά οχήματα έχουν αυξήσει σε πολύ μεγάλο βαθμό την αυτονομία τους, αυτή όμως δεν είναι σταθερή και εξαρτάται σε πολύ

μεγάλο βαθμό από τις κλιματολογικές συνθήκες (ξέστη-κρύο), τον τρόπο οδήγησης (γρήγορα-αργά) και το τόπο οδήγησης (οδικό δίκτυο πόλης-αυτοκινητόδρομος). Ο χρόνος φόρτισης εξαρτάται από τις τεχνικές προδιαγραφές του ηλεκτρικού οχήματος και την ισχύ του σημείου φόρτισης. Ένα ηλεκτρικό όχημα θα χρειαστεί από 7 έως 16 ώρες για πλήρη φόρτιση σε φορτιστές αργής φόρτισης, 2 έως 4 ώρες σε φορτιστές συνήθους φόρτισης, ενώ ο χρόνος μειώνεται σημαντικά στα 30 με 40 λεπτά σε φορτιστές ταχείας φόρτισης και σε 20 λεπτά σε υπερταχείας φόρτισης. Το πρόβλημα της περιορισμένης αυτονομίας των ηλεκτρικών οχημάτων, δημιουργεί αβεβαιότητα στον οδηγό για την διαθεσιμότητα ενός σημείου φόρτισης και για τον χρόνο αναμονής στο σταθμό, δημιουργώντας φόβο για το γεγονός ότι το όχημα μπορεί να μην καταφέρει να φτάσει στο σημείο προορισμού ή φόρτισης, ή ότι αναμονή σε περίπτωση που η θέση είναι κατειλημμένη από άλλο ηλεκτρικό όχημα να είναι μεγάλη.

II. ΔΡΟΜΟΛΟΓΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Οι αλγόριθμοι δρομολόγησης που χρησιμοποιούνται για την πλοήγηση οχημάτων σήμερα, βασίζονται κατά κύριο λόγο στον αλγόριθμο του Dijkstra και στις επεκτάσεις του, πάνω σε ένα Γράφο με ακμές τα σημεία σε έναν Χάρτη (Πόλεις – Διασταυρώσεις) και με βάρη τον συνδυασμό χιλιομετρικής απόστασης και χρόνου. Οι σημερινοί αλγόριθμοι δρομολόγησης που αφορούν στα συμβατικά οχήματα αγνοούν τις εκτιμήσεις ανεφοδιασμού και προτείνουν τη μικρότερη χρονικά διαδρομή.

Το πρόβλημα της δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων εξαρτάται από περισσότερους παράγοντες. Πρώτον, ο αλγόριθμος πρέπει να συμπεριλάβει στην απόφασή του την τρέχουσα κατάσταση φόρτισης ενός οχήματος, κάτι που αποκλείει ενδεχομένως κάποιους φορτιστές, που βρίσκονται σε απόσταση μεγαλύτερη από αυτή που μπορεί να διανυθεί με βάση την τρέχουσα κατάσταση φόρτισής του. Δεύτερον, η διαθεσιμότητα καθώς και η ισχύς του κάθε σημείου φόρτισης αποτελεί έναν παράγοντα που επηρεάζει το χρόνο φόρτισης και συνεπώς και το συνολικό χρόνο της διαδρομής. Τέλος, η ισχύς φόρτισης του οχήματος αποτελεί έναν ακόμα παράγοντα που λαμβάνεται υπόψη από τον αλγόριθμο δρομολόγησης.

Όπως αναφέρεται από τους ερευνητές της Google που ασχολούνται με τη δρομολόγηση των ηλεκτρικών οχημάτων στην εφαρμογή Google Maps, ένας θεμελιώδης περιορισμός στην επιλογή διαδρομής για ένα ηλεκτρικό όχημα είναι ότι η απόσταση μεταξύ των στάσεων φόρτισης δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από αυτή που μπορεί να

διανύσει το όχημα με πλήρη φόρτιση (K. Kollias and S. Gollapudi, 2021). Κατά συνέπεια, το μοντέλο επιλογής διαδρομής δίνει έμφαση σε έναν Γράφο σταθμών φόρτισης, σε αντίθεση με τους κλασικούς αλγόριθμους που δίνουν έμφαση σε Γράφους τμημάτων του οδικού δικτύου. Στο μοντέλο δρομολόγησης ηλεκτρικών οχημάτων, κάθε σταθμός φόρτισης είναι ένας κόμβος και κάθε διαδρομή μεταξύ σταθμών φόρτισης είναι μια ακμή. Λαμβάνοντας υπόψη τα διάφορα χαρακτηριστικά κάθε ηλεκτρικού οχήματος όπως τη μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας, τον τύπο του φορτιστή, το ελάχιστο επίπεδο φόρτισης κλπ., ο αλγόριθμος προσδιορίζει ποιες από τις ακμές είναι εφικτές για το υπό εξέταση ηλεκτρικό όχημα και ποιες όχι. Έρευνες που ασχολούνται με την δρομολόγηση ηλεκτρικών οχημάτων αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της δρομολόγησης σε Γράφους με κόμβους τους σταθμούς φόρτισης και ακμές τις αποστάσεις μεταξύ αυτών (S. Pourazarm et al., 2014; M. Dorokhova et al., 2021).

Η δρομολόγηση χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο του Dijkstra στους παραπάνω Γράφους, είναι αρκετή για να δώσει μια εφικτή λύση δρομολόγησης που ολοκληρώνει τη διαδρομή και βελτιστοποιεί τον χρόνο ταξιδιού, αλλά μόνο για οδηγούς που δεν ενδιαφέρονται καθόλου για τον χρόνο φόρτισης και αναμονής στον σταθμό φόρτισης, καθώς φορτίζουν πλήρως τις μπαταρίες τους ανεξάρτητα από τον χρόνο που απαιτείται τόσο για τη φόρτιση, όσο και για την πιθανή αναμονή σε περίπτωση που δεν υπάρχουν διαθέσιμοι φορτιστές. Ωστόσο, τέτοιοι αλγόριθμοι θεωρούν δεδομένη την ύπαρξη διαθέσιμου σημείου φόρτισης στον σταθμό κατά την είσοδο του οχήματος σε αυτόν με μηδενική αναμονή, καθώς επίσης αγνοούν και τον ρυθμό φόρτισης στον σταθμό. Αν ο αλγόριθμος του Dijkstra μπορεί να μας δώσει την ταχύτερη διαδρομή από σταθμό σε σταθμό, το κόστος φόρτισης και το κόστος πιθανής αναμονής στο σταθμό μπορεί να αλλάξει κατά πολύ το συνολικό κόστος της διαδρομής δίνοντας ψευδώς μικρότερο χρονικά αποτέλεσμα.

Τέλος, όπως αναφέρουν και οι ερευνητές στην εργασία (M. Dorokhova et al., 2021), σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή ταχύτερης διαδρομής για ένα ηλεκτρικό όχημα μπορεί να περιλαμβάνουν δεδομένα που έχουν να κάνουν με την αποδεκτή τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος, την αναμενόμενη ισχύ φόρτισης, την απόσταση του οχήματος από τον επόμενο συμβατό σταθμό φόρτισης, την τρέχουσα κατάσταση φόρτισης και την αποδοχή αναμονής σε έναν σταθμό φόρτισης. Συμβατικοί αλγόριθμοι δρομολόγησης, όπως π.χ. ο αλγόριθμος του Dijkstra, επιστρέφουν είτε τον μικρότερο διανυόμενο χρόνο είτε τη μικρότερη απόσταση. Ωστόσο, καμία από αυτές τις επιλογές δεν εγγυάται την ενεργειακή ή οικονομική αποτελεσματικότητα της παραγόμενης διαδρομής. Επομένως, έχει προκύψει ανάγκη για δημιουργία αλγόριθμων δρομολόγησης προσανατολισμένων αποκλειστικά σε ηλεκτρικά οχήματα.

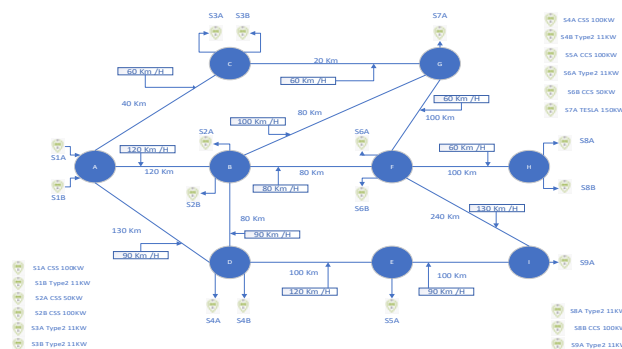
III. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Στην παρούσα εργασία έγινε δημιουργία εφαρμογής σε γλώσσα προγραμματισμού Python, η οποία αρχικά δημιουργεί ένα μη κατευθυντικό Γράφο με κόμβους τους σταθμούς φόρτισης και ακμές τη χιλιομετρική απόσταση μεταξύ αυτών, καθώς και έναν Γράφο με κόμβους τους σταθμούς φόρτισης και με βάρος ακμών την μέση ωριαία ταχύτητα μετάβασης. Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό

όλων των πιθανών ενεργειών φόρτισης που μπορεί να πραγματοποιήσει ένα ηλεκτρικό όχημα για τη μετάβαση του από ένα σημείο σε ένα άλλο, έγινε ανάπτυξη δύο προσεγγιστικών αλγορίθμων, οι οποίοι επιστρέφουν όλα τα πιθανά σενάρια φόρτισης, το συνολικό χρόνο μετάβασης, που συμπεριλαμβάνει τον χρόνο φόρτισης, τα σημεία φόρτισης σε έναν σταθμό καθώς και το συνολικό κόστος φόρτισης. Και οι δύο αλγόριθμοι πραγματοποιούν ελέγχους σε κάθε βήμα για τη διαθεσιμότητα ενός σημείου φόρτισης κατά τον χρόνο ζήτησης. Επίσης, δημιουργήθηκε βάση δεδομένων (MySQL RDBMS), έτσι ώστε όλες οι λειτουργικές μονάδες της εφαρμογής να μπορούν να αντλούν και να εισάγουν δεδομένα. Η βάση δεδομένων χρησιμοποιείται τόσο κατά τη φάση εκτέλεσης των αλγορίθμων και εύρεσης βέλτιστης λύσης φόρτισης, αλλά και κατά τη φάση της διεπαφής με τον χρήστη. Τέλος έγινε δημιουργία διεπαφής Web, ώστε ο χρήστης να αλληλεπιδρά με το κύριο μέρος της εφαρμογής και να μπορεί να διαχειριστεί τις κρατήσεις του.

A. Δημιουργία Γράφου και εύρεση πιθανών διαδρομών

Αρχικά το σύστημα δημιουργεί έναν Γράφο με σημεία και φορτιστές που έχουν εισαχθεί στη βάση δεδομένων. Τα σημεία αυτά μπορεί να είναι σημεία έναρξης και προορισμού αλλά και σημεία φόρτισης. Κάθε σημείο μπορεί να είναι μια πόλη με έναν αριθμό φορτιστών ή ένα σημείο εξυπηρέτησης οχημάτων σε μια εθνική οδό. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται ένα τέτοιο δίκτυο μαζί με τους φορτιστές σε κάθε σημείο.

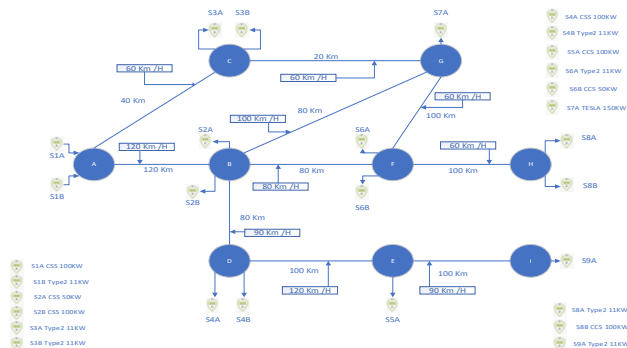


Σχήμα 1. Δίκτυο φορτιστών

Όπως αναφέρθηκε ήδη, ένας θεμελιώδης περιορισμός στην επιλογή διαδρομής για ένα ηλεκτρικό όχημα είναι ότι η απόσταση μεταξύ των σημείων φόρτισης δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από αυτή που μπορεί να διανύσει το όχημα με πλήρη φόρτιση. Στην παρούσα εργασία εισήχθη ακόμη ένας περιορισμός για την αρχικοποίηση του γράφου, που αφορά στη στάθμη φόρτισης της μπαταρίας ενός ηλεκτρικού οχήματος, η οποία δεν μπορεί να πέφτει ποτέ κάτω του 20% της μέγιστης χωρητικότητάς της για λόγους ασφαλείας και διάρκειας ζωής της.

Το σύστημα, όταν δεχθεί ένα αίτημα δρομολόγησης, ανακτά από τη βάση δεδομένων τα μέγιστα χιλιόμετρα που μπορεί να κάνει το ηλεκτρικό όχημα για το οποίο ζητήθηκε δρομολόγηση. Στη συνέχεια ελέγχει αν κάποια ακμή στον Γράφο έχει απόσταση μεγαλύτερη από το 80% των μέγιστων χιλιομέτρων που μπορεί να διανύσει το όχημα με την τρέχουσα φόρτίσή του. Σε περίπτωση που βρεθεί, τότε η ακμή διαγράφεται και ο Γράφος αναπροσαρμόζεται, καθώς το ηλεκτρικό όχημα δεν μπορεί να δρομολογηθεί από το συγκεκριμένο τμήμα.

Έστω ένα όχημα με μέγιστο αριθμό χιλιομέτρων τα 150 Km. Όταν το σύστημα δεχθεί ένα αίτημα δρομολόγησης στον Γράφο του Σχήματος 1, τότε ελέγχει όλες τις ακμές έτσι ώστε να μην υπάρχει καμία με τιμή μεγαλύτερη των 120 Km. Παρατηρούμε ότι υπάρχουν 2 ακμές που η τιμή τους υπερβαίνει τα 120 Km, οι οποίες και διαγράφονται. Ο αναπροσαρμοσμένος Γράφος παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Αναπροσαρμοσμένος Γράφος

Στη συνέχεια το σύστημα επιστρέφει όλες τις πιθανές διαδρομές από το σημείο έναρξης στο σημείο προορισμού, χωρίς να πραγματοποιεί κανένα έλεγχο για το αν η διαδρομή είναι εφικτή σε επίπεδο ύπαρξης συμβατών και διαθέσιμων φορτιστών. Για τη διαδρομή από το Α στο Η το σύστημα επιστρέφει τις παρακάτω διαδρομές:

1. Α – Β – F – H
2. Α – C – G – B – F – H
3. Α – C – G – F – H
4. Α – B – G – F – H

Παρατηρούμε ότι ένας κλασικός αλγόριθμος όπως π.χ. του Dijkstra, θα επέστρεφε σαν καλύτερη διαδρομή την Α – C – G – F – H, με συνολικό μήκος τα 240 Km καθώς είναι και η χιλιομετρικά μικρότερη. Αν και αυτή η λύση μπορεί να είναι σωστή, απαιτεί την ύπαρξη διαθέσιμων και συμβατών φορτιστών, τόσο στο σημείο C ή G ή F. Επίσης δεν είναι βέβαιο ότι η μικρότερη χιλιομετρικά διαδρομή είναι απαραίτητα και η ταχύτερη, καθώς η μέση ωριαία ταχύτητα μεταξύ κόμβων μπορεί να είναι μικρή (όταν τα σημεία αφορούν κόμβους σε επαρχιακό δίκτυο) ή οι σταθμοί φόρτισης να είναι μικρής ισχύος και ο χρόνος φόρτισης που απαιτείται πολύ μεγάλος. Για τους παραπάνω λόγους, όλες οι πιθανές διαδρομές εισάγονται σε 2 αλγόριθμους εύρεσης γρηγορότερης διαδρομής, που ελέγχουν όλες τις παραμέτρους σε πραγματικό χρόνο.

B. Αλγόριθμοι εύρεσης συνδυασμού φόρτισης

Για κάθε μια από τις διαδρομές που επιστρέφονται, πρέπει να εξεταστούν οι πιθανοί συνδυασμοί φόρτισης, έτσι ώστε να ολοκληρωθεί η διαδρομή στο μικρότερο χρονικό διάστημα. Για τον λόγο αυτό αναπτύχθηκαν δύο αλγόριθμοι διαφορετικής επιλογής σημείων φόρτισης, έτσι ώστε να ελεγχθούν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί φόρτισης σε μία διαδρομή. Και οι δύο αλγόριθμοι κατά την εκτέλεσή τους υπολογίζουν τον χρόνο μετάβασης, όχι μόνο βάσει της απόστασης αλλά και της μέσης ωριαίας ταχύτητας μετάβασης. Για τη διαδρομή στο Σχήμα 3, ο χρόνος μετάβασης από το Α στο Β είναι μία ώρα, για τη μετάβαση από το Β στο F, 2 ώρες και για τη μετάβαση από το F στα Η, 1 ώρα, με συνολικό χρόνο μετάβασης τις 3 ώρες, χωρίς την ανάγκη φόρτισης.



Σχήμα 3. Ενδεικτική διαδρομή

Ένας καταλυτικός παράγοντας στην επιλογή σταθμών φόρτισης είναι ο χρόνος φόρτισης και η χρονική διαθεσιμότητα ενός σταθμού φόρτισης, καθώς επηρεάζει κατά πολύ την τελική επιλογή των σημείων φόρτισης. Για τη διαδρομή του Σχήματος 3, αν ένα όχημα αποφασίσει να φορτίσει στο σημείο Α, τότε συνυπολογίζοντας τον χρόνο φόρτισης στο σημείο Α και τον χρόνο μετάβασης στο σημείο Β, δεν είναι βέβαιο ότι θα βρει διαθέσιμο φορτιστή στο σημείο Β, όπως και στην περίπτωση που αποφασίσει να μην φορτίσει στο σημείο Α και απλά να μεταβεί στο σημείο Β. Επίσης, αν σε ένα μικτό σταθμό φόρτισης υπάρχουν ίδιου τύπου φορτιστές με διαφορετική ισχύ φόρτισης, (π.χ. στο σημείο Α ο S1A είναι 100 kW και ο φορτιστής S1B είναι 50 kW), η διαθεσιμότητα του εκάστοτε φορτιστή επηρεάζει την ταχύτητα φόρτισης, άρα και την ώρα μετάβασης στο σημείο Β, καταλήγοντας σε διαφορετική ώρα άφιξης στον προορισμό. Είναι εμφανές ότι υπάρχουν πολλά δυναμικά δεδομένα για τη μετάβαση από ένα σημείο σε ένα άλλο.

Για να μπορέσουμε να εργαστούμε με τη διαθεσιμότητα των φορτιστών στον χρόνο, ο χρόνος χωρίστηκε σε χρονοθυρίδες φόρτισης (charging timeslots). Έτσι μία ημέρα (24 ώρες) χωρίστηκε σε 288 χρονοθυρίδες διάρκειας 5 λεπτών. Για την εύρεση της γρηγορότερης διαδρομής για το χρονικό διάστημα κατά το οποίο ζητήθηκε, ο αλγόριθμος επιστρέφει μια λίστα από πιθανές εφικτές φορτίσεις, τον συνολικό χρόνο που απαιτείται για καθεμία, το κόστος, καθώς και τους φορτιστές στους οποίους πρέπει να γίνει η κάθε πιθανή φόρτιση.

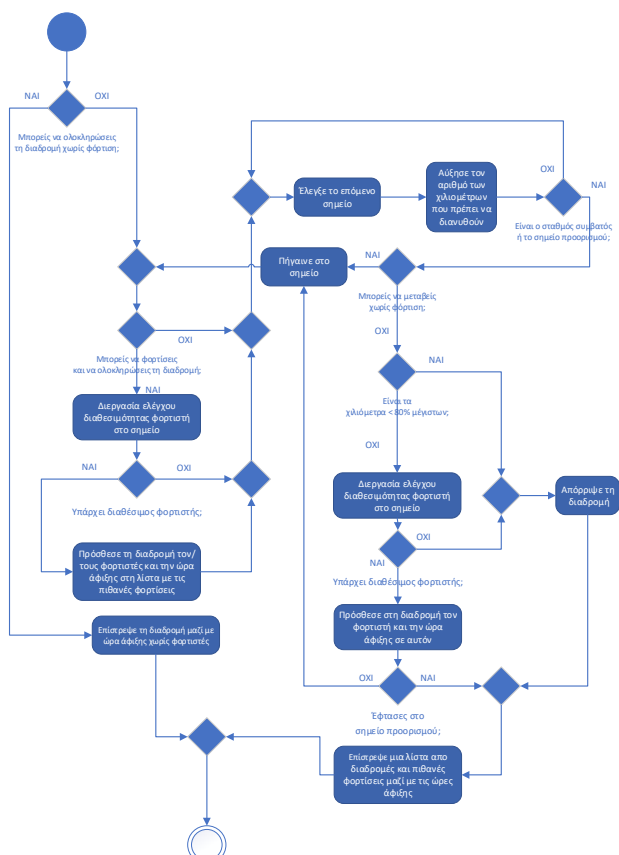
C. Αλγόριθμος σειριακής μετάβασης

Η λειτουργία του αλγόριθμου βασίζεται στη λογική της σειριακής μετάβασης από έναν σταθμό στον επόμενο συμβατό σταθμό. Ως συμβατός νοείται ένας σταθμός όπου το όχημα έχει συμβατό τύπο φορτιστή με αυτόν του σταθμού. Το σημείο έναρξης μπορεί να είναι και μη συμβατό. Ο αλγόριθμος δέχεται σαν εισόδου μια διαδρομή, τον τύπο του οχήματος, την ημερομηνία και ώρα έναρξης καθώς και τα χιλιόμετρα που μπορεί να κάνει το όχημα, σύμφωνα με την κατάσταση φόρτισης στο σημείο έναρξης. Η αναλυτική περιγραφή του αλγόριθμου παρουσιάζεται στο διάγραμμα UML του Σχήματος 4.

D. Αλγόριθμος της πιο απομακρυσμένης σειριακής μετάβασης

Η λειτουργία του αλγόριθμου βασίζεται στη λογική της μετάβασης από έναν σταθμό στον πιο απομακρυσμένο συμβατό σταθμό χρησιμοποιώντας το 80% της μέγιστης χωρητικότητας την μπαταρίας. Αν δηλαδή ένα όχημα μπορεί να διανύσει 200 km με τη μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας, τότε ο αλγόριθμος επιλέγει να μεταβεί στον πιο απομακρυσμένο φορτιστή από το σημείο έναρξης, στο εύρος των 160 km. Ως συμβατός νοείται ένας σταθμός όπου το όχημα που πραγματοποιεί τη διαδρομή έχει συμβατό τύπο φορτιστή με αυτόν του σταθμού. Η βασική προϋπόθεση για τη λειτουργία του αλγόριθμου είναι ότι το

σημείο έναρξης πρέπει να είναι συμβατό και να υπάρχει διαθέσιμος φορτιστής.

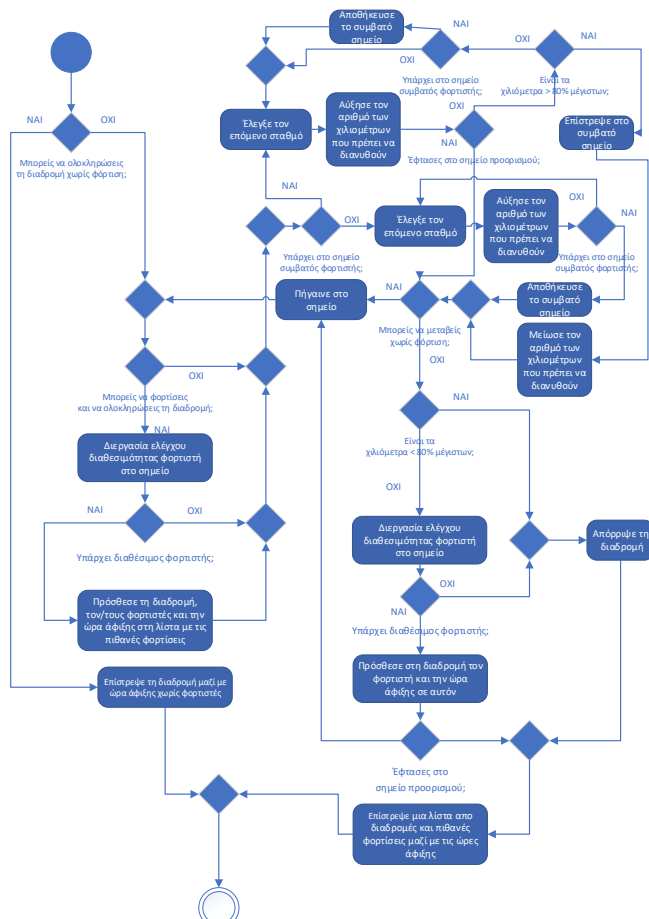


Σχήμα 4. Αλγόριθμος σειριακής μετάβασης

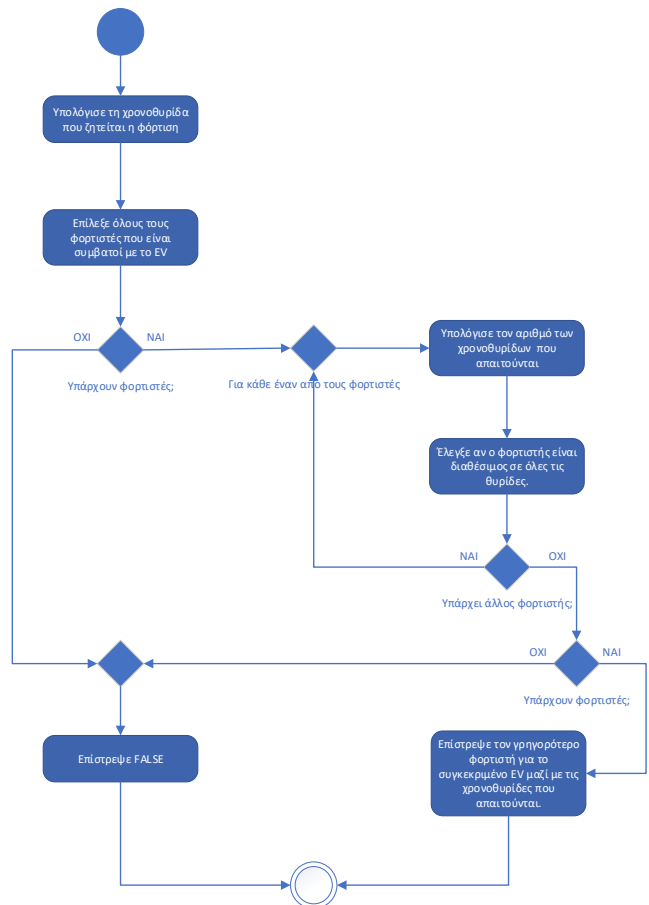
Αν το σημείο έναρξης δεν είναι συμβατό τότε ο αλγόριθμος εξετάζει πάντα τη μετακίνηση του οχήματος στο επόμενο συμβατό σημείο. Ο αλγόριθμος δέχεται σαν εισόδου μια διαδρομή, τον τύπο του οχήματος, την ημερομηνία και ώρα έναρξης, καθώς και τα χιλιόμετρα που μπορεί να κάνει το όχημα σύμφωνα με την κατάσταση φόρτισης στο σημείο έναρξης. Η αναλυτική περιγραφή του αλγόριθμου παρουσιάζεται στο διάγραμμα UML του Σχήματος 5.

Ε. Διεργασία ελέγχου διαθεσιμότητας φορτιστή

Για να ελεγχθεί η χρονική διαθεσιμότητα ενός φορτιστή, έγινε υλοποίηση μίας διεργασίας ελέγχου, η οποία εκτελείται και από τους δύο αλγόριθμους μόνο κατά το στάδιο που απαιτείται μια φόρτιση για τη συνέχεια της διαδρομής, ή για την ολοκλήρωσή της. Τα δεδομένα αντλούνται από μια βάση δεδομένων, όπως θα αναλυθεί αργότερα. Όταν ένα όχημα μπαίνει σε ένα σταθμό, οι παράμετροι που εξετάζονται είναι ο τύπος του οχήματος, η ύπαρξη συμβατών θέσεων φόρτισης στο σημείο, η χρονική στιγμή εισόδου στο σταθμό και οι ενεργειακές ανάγκες του οχήματος. Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται το διάγραμμα UML της διεργασίας ελέγχου διαθεσιμότητας φορτιστή.



Σχήμα 5. Αλγόριθμος της πιο απομακρυσμένης σειριακής μετάβασης



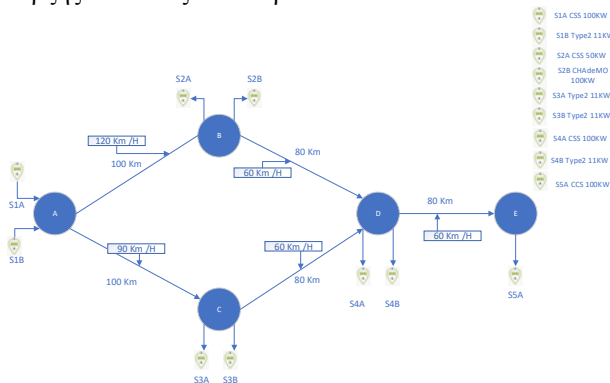
Σχήμα 6. Έλεγχος διαθεσιμότητας φορτιστή

F. Συνολική λειτουργία εφαρμογής και συνδυαστική λειτουργία αλγόριθμων - Αποτελέσματα

Στις προηγούμενες ενότητες παρουσιάστηκε η μεμονωμένη λειτουργία των αλγόριθμων και ο τρόπος παραγωγής μιας πιθανής λύσης φόρτισης. Όταν η εφαρμογή δεχθεί ένα αίτημα δρομολόγησης από κάποιον χρήστη, τότε για την παραγωγή των πιθανών λύσεων φόρτισης ακολουθεί τα παρακάτω βήματα.

1. Από τα στοιχεία εισόδου του χρήστη, διάβασε το σημείο έναρξης, το σημείο προορισμού, τα διαθέσιμα χιλιόμετρα κατά την έναρξη, την ημερομηνία και την ώρα έναρξης.
2. Από τη βάση δεδομένων διάβασε τον τύπο του οχήματος του χρήστη.
3. Αναπροσάρμοσε τον Γράφο βάσει του τύπου του οχήματος του χρήστη.
4. Κάλεσε τον αλγόριθμο της σειριακής αναζήτησης και αποθήκευσε σε ένα λεξικό φορτίσεων, όλες τις πιθανές λύσεις φόρτισης.
5. Κάλεσε τον αλγόριθμο της μακρύτερης σειριακής αναζήτησης και αποθήκευσε στο λεξικό, όλες τις πιθανές λύσεις φόρτισης.
6. Ταξινόμησε το λεξικό φορτίσεων βάσει του χρόνου άφιξης στο προορισμό και επέστρεψε τις λύσεις.
7. Ταξινόμησε το λεξικό φορτίσεων βάσει του συνολικού κόστους φόρτισης και επέστρεψε τις λύσεις.
8. Εφόσον επιλεγεί μια λύση από τον χρήστη, πρόσθεσε τη λύση στη βάση δεδομένων.

Για να διευκρινιστεί ο συνδυαστικός τρόπος επιλογής της γρηγορότερης διαδρομής και της διαχείρισης της φόρτισης εξετάζουμε τον Γράφο του Σχήματος 7. Αν ένα όχημα αιτείται δρομολόγηση από το σημείο Α στο σημείο Η, τότε οι αλγόριθμοί μας εξετάζουν και τις δύο πιθανές διαδρομές μετάβασης, οι οποίες είναι οι Α – Β – Δ – Ε και η Α – C – D – Ε. Η μόνη διαφορά μεταξύ των δύο διαδρομών είναι ότι η διαδρομή Α – C – D – Ε είναι βραδύτερη ως προς τον χρόνο μετάβασης καθώς η μέση ωριαία ταχύτητα στο κομμάτι Α – C είναι 90 χιλιόμετρα. Θεωρούμε ότι το όχημα έχει μέγιστη αυτονομία τα 240 Km, είναι συμβατό με φορτιστές CCS και Type2, ξεκινά την διαδρομή με ποσοστό φόρτισης στο 83% και η ώρα έναρξης είναι στις 10 το πρωί.



Σχήμα 7. Γράφος του παραδείγματος

Οι αλγόριθμοι μετά από την εκτέλεσή τους, επιστρέφουν τις λύσεις του Πίνακα 1.

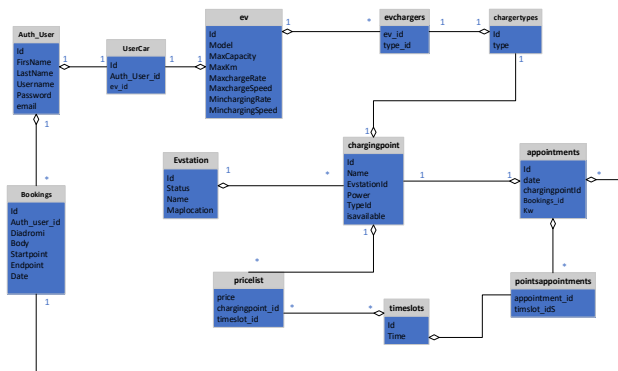
A/A	Διαδρομή	Φορτιστές	Χιλιόμετρα προς φόρτιση	Ώρα άφιξης στον σταθμό	Ώρα άφιξης στον προορισμό	Κόστος
1	[A', B', D', E']	A: S1A 100KW	28 Km	10:00	13:46	12,28 €
		D: S4A 100KW	80 Km	12:14		
2	[A', B', D', E']	B: S2A 50KW	28 Km	10:50	13:50	12,28 €
		D: S4A 100KW	80 Km	12:20		
3	[A', B', D', E']	B: S2A 50KW	108 Km	10:50	14:03	12,28 €
4	[A', C', D', E']	A: S1A 100KW	28 Km	10:00	14:03	12,28 €
		D: S4A 100KW	80 Km	12:30		
5	[A', C', D', E']	C: S3A 11KW	28 Km	11:06	14:32	11,66 €
		D: S4A 100KW	80 Km	13:00		
6	[A', C', D', E']	C: S3A 11KW	108 Km	11:06	15:53	9,90 €

Πίνακας 1. Λύσεις των αλγορίθμων

Με μπλε χρώμα, απεικονίζονται οι λύσεις φόρτισης που έχουν βρεθεί από τον αλγόριθμο σειριακής μετάβασης, ενώ με ροζ χρώμα οι λύσεις του αλγόριθμου της πιο απομακρυσμένης σειριακής μετάβασης. Ο πρώτος αλγόριθμος επιστρέφει συνολικά 2 λύσεις φόρτισης για κάθε πιθανή διαδρομή, ενώ ο δεύτερος μια λύση. Για το συγκεκριμένο όχημα και δίκτυο φορτιστών η ταχύτερη δρομολόγηση είναι η λύση 1 και γίνεται μέσω της διαδρομής Α – Β – Δ – Ε, με φόρτιση στους σταθμούς Α και D και ώρα άφιξης στον προορισμό στη 13:46. Η φθηνότερη αλλά και βραδύτερη διαδρομή είναι η λύση 6 με κόστος στα 9,90 € και ώρα άφιξης στη 15:53. Ένα άλλο στοιχείο που παρατηρούμε είναι ότι οι πρώτες 4 λύσεις έχουν το ίδιο κόστος καθώς οι φορτίσεις γίνονται σε ταχυφορτιστές που έχουν το ίδιο κόστος φόρτισης την συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Η λύση 5 είναι ελαφρώς φθηνότερη γιατί συμπεριλαμβάνει ταχυφορτιστή και κοινό φωτιστή, ενώ η λύση 6 αφορά μόνο κοινό φορτιστή, καθιστώντας την και την φθηνότερη. Τέλος αξίζει να αναφέρουμε την περίπτωση της μη διαθεσιμότητας φορτιστή στο σημείο Α. Σε αυτή την περίπτωση, οι λύσεις φόρτισης 1 και 4, δεν θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν και οι αλγόριθμοι θα επέστρεφαν μόνο τις υπόλοιπες, με καλύτερη την 2, και ώρα άφιξης την 13:50.

G. Βάση δεδομένων συστήματος

Για την εκτέλεση της εφαρμογής, έγινε δημιουργία μίας σχεσιακής βάσης δεδομένων, έτσι ώστε όλες οι λειτουργικές μονάδες της, να μπορούν να αντλούν και να εισάγουν δεδομένα. Η βάση δεδομένων χρησιμοποιείται τόσο κατά τη φάση εκτέλεσης των αλγορίθμων και εύρεσης βέλτιστης λύσης φόρτισης, αλλά και κατά τη φάση της διεπαφής με τον χρήστη. Η υλοποίηση της βάσης δεδομένων έγινε με χρήση λογισμικού ανοικτού κώδικα MySQL Community Edition. Στο Σχήμα 8 παρουσιάζεται το διάγραμμα UML της βάσης δεδομένων.

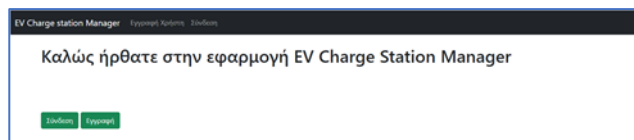


Σχήμα 8. Σχεσιακό μοντέλο βάσης δεδομένων

H. Παρουσίαση εφαρμογής

Για την ανάπτυξη της εφαρμογής παρουσίασης έγινε πρώτα δημιουργία εικονικής μηχανής στην υπηρεσία Vima του GRNET (GRNET Virtual Private Servers). Στη συνέχεια έγινε εγκατάσταση λειτουργικού συστήματος Microsoft Windows 2011 Server Standard edition η οποία παρέχεται δωρεάν για εκπαιδευτικούς σκοπούς από την Microsoft Azure (Microsoft Dev Tools for Teaching). Για την εισαγωγή δεδομένων στην κυρίως εφαρμογή, την προβολή των αποτελεσμάτων δρομολόγησης, των λύσεων φόρτισης, αλλά και της τελικής επιλογής διαδρομής και δημιουργίας κράτησης, έγινε ανάπτυξη εφαρμογής Web, έτσι ώστε ο χρήστης να μπορεί εύκολα να αλληλοεπιδρά με το σύστημα. Για τη δημιουργία της διεπαφής χρήστη έγινε χρήση της πλατφόρμας ανοικτού κώδικα Django (Django Web Framework).

Αρχικά ο χρήστης πλοηγείται στη διεύθυνση <http://62.217.72.118> και εμφανίζεται η σελίδα του Σχήματος 9, δίνοντάς του τη δυνατότητα να συνδεθεί ή να εγγραφεί στο σύστημα.

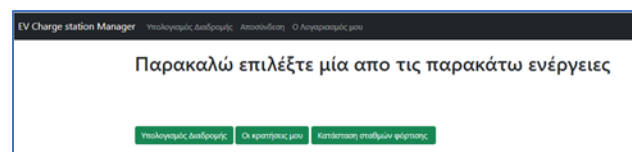


Σχήμα 9. Αρχική σελίδα

Αν ο χρήστης επιθυμεί την εγγραφή του στο σύστημα, επιλέγει τον σύνδεσμο “Εγγραφή” και η εφαρμογή εμφανίζει τη σελίδα του Σχήματος 10. Ο χρήστης εισάγει τα προσωπικά του στοιχεία και επιλέγει το ηλεκτρικό του όχημα από μια λίστα που είναι ήδη περασμένη στη βάση δεδομένων.

Σχήμα 10. Σελίδα εγγραφής νέου χρήστη

Μετά την επιτυχή είσοδο ή την επιτυχή εγγραφή του νέου χρήστη στην εφαρμογή, το σύστημα εμφανίζει τη σελίδα που φαίνεται στο Σχήματος 12.



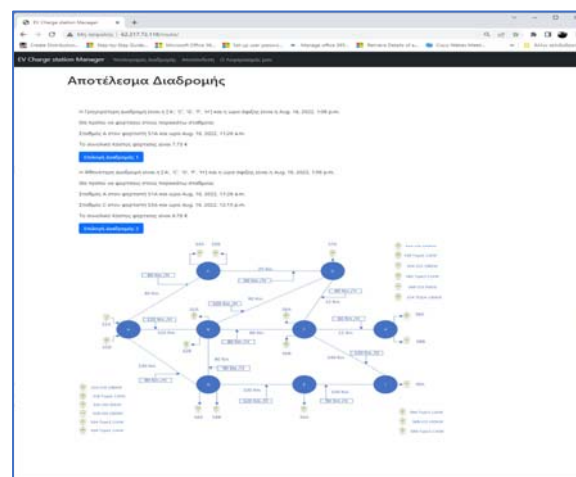
Σχήμα 11. Σελίδα επιλογής ενεργειών

Σε περίπτωση που ο χρήστης δεν είναι διαχειριστής της υπηρεσίας, τότε δεν εμφανίζεται η δυνατότητα προβολής της κατάστασης των σταθμών φόρτισης. Στο στάδιο αυτό ο χρήστης έχει επιλέξει τον “Υπολογισμό διαδρομής” και το σύστημα εμφανίζει τη σελίδα που φαίνεται στο Σχήμα 12.



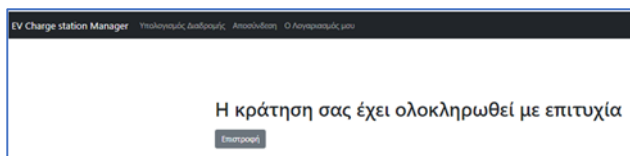
Σχήμα 12. Σελίδα υπολογισμού διαδρομής

Το σύστημα ανακτά από τη βάση δεδομένων, τον τύπο του οχήματος του χρήστη, μαζί με τα μέγιστα χιλιόμετρα που μπορεί να πραγματοποιήσει το όχημα του και εμφανίζει το αποτέλεσμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 13.



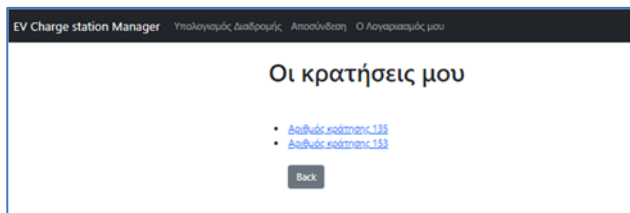
Σχήμα 13. Σελίδα προβολής αποτελεσμάτων

Ο χρήστης επιλέγει μια διαδρομή και το σύστημα δημιουργεί την κράτηση, ενημερώνοντας τα αντίστοιχα πεδία στη βάση δεδομένων. Η εφαρμογή στη συνέχεια εμφανίζει μήνυμα επιτυχούς κράτησης όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 14.



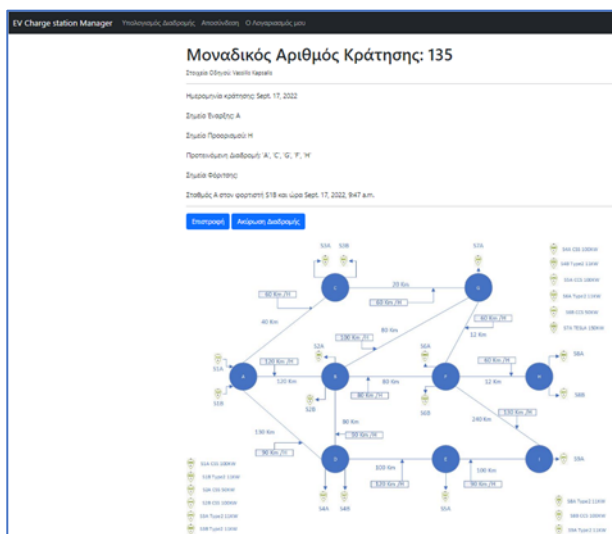
Σχήμα 14. Σελίδα επιβεβαίωσης κράτησης

Ο χρήστης ανά πάσα στιγμή, μπορεί να ελέγχει και να διαχειρίζεται τις κρατήσεις που έχει κάνει για μία συγκεκριμένη διαδρομή. Από την αρχική σελίδα, ο χρήστης επιλέγει τον σύνδεσμο "Οι κρατήσεις μου" και το σύστημα επιστρέφει σελίδα με τις κρατήσεις του εκάστοτε χρήστη, μαζί με τον μοναδικό αριθμό κράτησης, όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 15.



Σχήμα 15. Σελίδα επιλογής κρατήσεων

Στην συνέχεια, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μια κράτηση και να δει τις λεπτομέρειες της προγραμματισμένης διαδρομής και των κρατήσεων φόρτισης, όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 16.

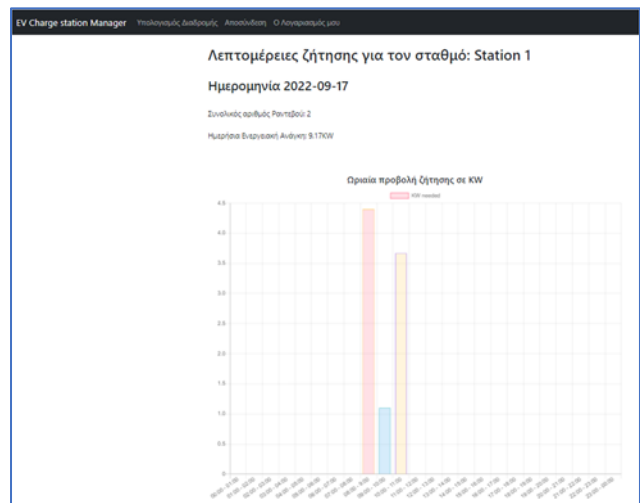


Σχήμα 16. Σελίδα λεπτομερειών κράτησης

Ο χρήστης μπορεί στο σημείο αυτό, να επιστρέψει στις κρατήσεις του επιλέγοντας "Επιστροφή", ή να ακυρώσει τη διαδρομή επιλέγοντας "Ακύρωση Διαδρομής". Σε περίπτωση που η διαδρομή ακυρωθεί, το σύστημα ενημερώνει για τη διαθεσιμότητα των φορτιστών, κάνοντάς τους εκ νέου διαθέσιμους για χρήση.

Οι χρήστες που έχουν οριστεί σαν διαχειριστές της υπηρεσίας, μπορούν ανά πάσα στιγμή να ελέγξουν τις ημερήσιες ενεργειακές ανάγκες ενός σταθμού φόρτισης, έτσι ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί σωστή διαχείριση των απαιτήσεων από το ηλεκτρικό δίκτυο, ή από πιθανές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που είναι εγκαταστημένες στον σταθμό, πριν αυτές ζητηθούν. Όταν ο διαχειριστής επιλέξει τον σύνδεσμο "Κατάσταση σταθμών φόρτισης", το σύστημα εμφανίζει φόρμα επιλογής ενός σταθμού

φόρτισης καθώς και την ημερομηνία που τον αφορά. Αφού ο διαχειριστής επιλέξει έναν σταθμό και την ημερομηνία, τότε το σύστημα βάσει των κρατήσεων που έχουν γίνει και των ενεργειακών αναγκών που έχουν απαιτηθεί, επιστρέφει γραφική ωριαία αναπαράσταση της ζήτησης στον σταθμό, τον συνολικό αριθμό των κρατήσεων και των συνολικών ημερήσιων αναγκών σε kW, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 17.



Σχήμα 17. Γράφημα της ζήτησης και των κρατήσεων του σταθμού

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ θερμά την Τάνια, τη γυναίκα μου, που στέκεται δίπλα μου σε ολόκληρο το ταξίδι, καθώς και όλους τους καθηγητές που είχα στη διάρκεια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος, για την πολύτιμη συμβολή τους.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Ευρωπαϊκό Ελεγκτικό Συνέδριο, Ειδική έκθεση: Υποδομές φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (2021). Retrieved from https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR21_05/SR_Electrical_charging_infrastructure_EL.pdf
- K. Kollias and S. Gollapudi (2021). Addressing Range Anxiety with Smart Electric Vehicle Routing. Retrieved from <https://ai.googleblog.com/2021/01/addressing-range-anxiety-with-smart.html>
- S. Pourazarm, C. Cassandras, A. Malikopoulos (2014). Optimal Routing of Electric Vehicles in Networks with Charging Nodes: A Dynamic Programming Approach. IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC), 2014, pp. 1-7.
- M. Dorokhova, C. Ballif, N. Wyrsh (2021). Routing of Electric Vehicles with Intermediary Charging Stations: A Reinforcement Learning Approach. Front. Big Data, 26 May 2021, Sec. Machine Learning and Artificial Intelligence.
- MySQL RDBMS. <https://dev.mysql.com/>
- GRNET Virtual Private Servers. <https://vima.gnet.gr/>
- Microsoft Dev Tools for Teaching. <https://azureforeducation.microsoft.com/devtools>
- Django Web Framework. <https://www.djangoproject.com/>