



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

**ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

Μεταπτυχιακή Εργασία

**Βέλτιστος Προγραμματισμός Λειτουργίας Μεγάλων
Σταθμών Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων**

Γιώργος Κωνσταντινίδης

Χανιά, Σεπτέμβριος 2021

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Μεταπτυχιακή Εργασία

**Βέλτιστος Προγραμματισμός Λειτουργίας Μεγάλων
Σταθμών Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων**

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Κανέλλος Φώτιος (Επιβλέπων)
Κουτρούλης Ευτύχιος
Σταυρακάκης Γεώργιος

Αναπληρωτής Καθηγητής
Αναπληρωτής Καθηγητής
Καθηγητής

Γιώργος Κωνσταντινίδης

Χανιά, Σεπτέμβριος 2021

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνησή της.

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέπων καθηγητή μου, κύριο Κανέλλο Φώτιο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε εξ' αρχής, αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα, την επιστημονική του καθοδήγηση, τις υποδείξεις του, το αμείωτο ενδιαφέρον του, τη συμπαράστασή του, τη συνεχή του υποστήριξη και το αμείωτο ενδιαφέρον που έδειξε μέχρι την ολοκλήρωση της εργασίας μου.

Ευχαριστώ τους καθηγητές κύριο Κουτρούλη Ευτύχιο και Σταυρακάκη Γεώργιο ως μέλη της τριμελούς επιτροπής.

Επίσης, ευχαριστώ τον καθηγητή, κύριο Καλαιτζάκη Κωνσταντίνο, για την σημαντική συμβολή του στην έναρξη της μεταπτυχιακής μου εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένειά μου για όλη τη στήριξη, τη συμπαράσταση και την κατανόησή τους, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η αύξηση του αριθμού των ηλεκτρικών οχημάτων (ΗΟ) θα επιφέρει μεγάλη αύξηση στη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας. Η έξυπνη φόρτιση των ΗΟ έχει πολλά οφέλη όπως την μείωση του κόστους φόρτισης, την αποφυγή μεγάλων επενδύσεων στο δίκτυο διανομής κ.ά. Ο συνδυασμός της έξυπνης φόρτισης των ΗΟ με υπηρεσίες όπως Vehicle-to-Grid (V2G) (μεταφορά ενέργειας από τα ΗΟ στο δίκτυο διανομής) μπορεί να αποδώσει παραπάνω οφέλη στον δίκτυο της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και στον ιδιοκτήτη του ΗΟ. Στην παρούσα εργασία, προτείνεται μια αποτελεσματική μέθοδος φόρτισης των ΗΟ σε ένα πάρκινγκ χρησιμοποιώντας V2G λειτουργία και λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς σε επίπεδο ΗΟ, του τοπικού μετασχηματιστή του πάρκινγκ και του δικτύου διανομής. Ο κύριος στόχος της προτεινόμενης μεθόδου φόρτισης είναι η μείωση του κόστους φόρτισης σε επίπεδο πάρκινγκ και ΗΟ. Χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization, PSO) για τον προγραμματισμό της φόρτισης των ΗΟ. Δύο συμβατικοί μέθοδοι φόρτισης των ΗΟ χρησιμοποιήθηκαν για την σύγκριση των αποτελεσμάτων: 1) τα ΗΟ φορτίζουν με την μέγιστη ισχύ που τους επιτρέπει ο σταθμός φόρτισης και ο on-board μετατροπέας ισχύος του κάθε ΗΟ και 2) τα ΗΟ φορτίζουν με την απαιτούμενη σταθερή ισχύ που χρειάζεται για να επιτύχουν το επιθυμητό επίπεδο φόρτισης. Επιπλέον, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου με ισοδύναμο σωρευτικό μοντέλο του πάρκινγκ όπου το σύνολο των ΗΟ ισοδυναμούσε με μια μπαταρία. Χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά δεδομένα για τη τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, του φορτίου του δικτύου διανομής και της δραστηριότητας του πάρκινγκ (αφίξεις/αναχωρήσεις). Η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου αποδεικνύεται από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα ενδεικτικά σενάρια λειτουργίας. Τέλος, αναφέρεται ότι για την εφαρμογή της μεθόδου φόρτισης δεν απαιτούνται εξελιγμένα συστήματα υπολογισμού, μέτρησης και επικοινωνίας.

Abstract

The increase of the number of electric vehicles will lead to a large increase in electricity demand. Smart charging of electric vehicles (EVs) has many benefits such as reduction of charging costs, limitation of large investments in the distribution network, etc. The combination of smart charging of EVs with ancillary services such as Vehicle-to-Grid (V2G) (energy transfer from EVs to the distribution network) can provide more benefits to the electricity network as well as to the owner of the EV. In this work, a method for the efficient charging of electric vehicles (EVs) at the parking lot (PL) level, including V2G operation and taking into account lifetime of EV batteries, distribution network and local transformer loading, is proposed. The main goal of the proposed charging method is to reduce the cost of charging at the levels of PL and EV. The Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm was used to derive the charging schedule of the EVs. The proposed method is compared with two conventional charging strategies: 1) the EVs charge with the maximum power allowed by the charging station and the on-board power converter of each EV and 2) the EVs charge with the constant power required to achieve the desired level of charge at the end of the charging period. In addition, the results of the proposed method were compared with an equivalent aggregation model of the EVs parking lot where all EVs' batteries were aggregated to one battery. Real-world data were used for the price of electricity, the load of the distribution network and the activity of the PL (arrivals / departures of the hosted EVs). The effectiveness of the proposed method is demonstrated by the results obtained by the indicative operation scenarios. Finally, it is noted that the application of the proposed charging method does not require advanced calculation, measurement and communication systems.

Δημοσιεύσεις

Αποτέλεσμα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας ήταν η δημοσίευση του άρθρου:

Konstantinidis, G.; Kanellos, F.D.; Kalaitzakis, K. A Simple Multi-Parameter Method for Efficient Charging Scheduling of Electric Vehicles. Appl. Syst. Innov. 2021, 4, 58.
<https://doi.org/10.3390/asi4030058>

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1	14
Εισαγωγή	14
1.1 Θεωρητικό υπόβαθρο	15
1.1.1 Κύριοι τύποι ηλεκτρικών οχημάτων	15
1.1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ηλεκτρικών οχημάτων	16
1.1.3 Επίπεδα φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων	18
1.1.4 Τύποι σύνδεσης για την φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων	19
1.1.5 Άγχος αυτονομίας.....	20
1.1.6 Vehicle to Grid	20
1.1.7 Μικροδίκτυα.....	22
1.1.8 Υποβάθμιση της μπαταρίας.....	22
1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	23
1.3 Στόχος και σχεδιασμός της μεταπτυχιακής εργασίας	27
1.4 Δομή μεταπτυχιακής εργασίας	28
Κεφάλαιο 2.....	29
Μεθοδολογία	29
2.1 Επιλογή φορτιστή.....	29
2.2 Αντικειμενική συνάρτηση και Περιορισμοί.....	31
2.3 Επιλογή αλγορίθμου βελτιστοποίησης.....	35
2.4 Αρχικοποίηση τιμών του PSO	36
2.5 Λαμβάνοντας υπόψη το όριο ισχύος του μετασχηματιστή του πάρκινγκ.....	38
2.6 Λαμβάνοντας υπόψη το φορτίο του ηλεκτρικού δικτύου	38
Κεφάλαιο 3.....	40
Αποτελέσματα Προσομοίωσης	40
3.1 Δεδομένα εισόδου της εξεταζόμενης μεθοδολογίας φόρτισης	40
3.1.1 Εκτίμηση του επιθυμητού επιπέδου φόρτισης	40
3.1.2 Εκτίμηση του επιθυμητού επιπέδου φόρτισης	42
3.1.3 Επιλογή μοντέλου ηλεκτρικού οχήματος.....	42
3.2 Σενάρια φόρτισης.....	43
3.3 Σενάρια με τις βασικές μεθόδους φόρτισης	44
3.3.1 Φόρτιση στο σενάριο 1.....	44
3.3.2 Φόρτιση στο σενάριο 2.....	45

3.4 Σενάρια με την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου φόρτισης	46
3.4.1 Φόρτιση στο σενάριο 3.....	46
3.4.2 Φόρτιση στο σενάριο 4.....	46
3.4.3 Φόρτιση στο σενάριο 5.....	47
3.4.4 Φόρτιση στο σενάριο 6.....	48
3.5 Σύγκριση των εξεταζόμενων σεναρίων.....	48
3.6 Ισοδύναμο μοντέλο του πάρκινγκ.....	52
Κεφάλαιο 4.....	55
Συμπεράσματα - Προτάσεις	55
Βιβλιογραφία.....	56

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Παγκόσμιο απόθεμα ηλεκτρικών οχημάτων ανά περιοχή .	14
Εικόνα 2. Κύριοι τύποι ηλεκτρικών οχημάτων.	15
Εικόνα 3. Βασικά επίπεδα φόρτισης.	19
Εικόνα 4. Βύσματα φορτιστών ΗΟ.	19
Εικόνα 5. Προσδιοριζόμενα οφέλη V2G από συνεντεύξεις.	21
Εικόνα 6. Η διαμόρφωση του εξεταζόμενου ηλεκτρικού συστήματος με το πάρκινγκ.	32
Εικόνα 7. Ψευδοκώδικας της συνάρτησης change_sign.	34
Εικόνα 8. Δομή σωματιδίου.	36

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1. Διάγραμμα ροής για την επιλογή τύπου φορτιστή.....	31
Διάγραμμα 2. Προσαρμογή αρχικών τιμών των σωματιδίων.....	37
Διάγραμμα 3. Αφίξεις, αναχωρήσεις και αριθμός ΗΟ που συμμετέχουν στην μέθοδο φόρτισης. ..	40
Διάγραμμα 4. Πιθανότητα του κάθε επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας του ΗΟ κατά την άφιξη του στο πάρκινγκ.	41
Διάγραμμα 5. Φορτίο του ηλεκτρικού δικτύου και τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας με και χωρίς την εφαρμογή της ταρίφας.....	43
Διάγραμμα 6. Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και ενεργού ισχύος του πάρκινγκ στο σενάριο 1.....	45
Διάγραμμα 7. Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και ενεργού ισχύος του πάρκινγκ στο σενάριο 2.....	45
Διάγραμμα 8. Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και ενεργού ισχύος του πάρκινγκ στο σενάριο 3.....	46
Διάγραμμα 9. Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και ενεργού ισχύος του πάρκινγκ στο σενάριο 4.....	47
Διάγραμμα 10. Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και ενεργού ισχύος του πάρκινγκ στο σενάριο 5.....	47
Διάγραμμα 11. Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και ενεργού ισχύος του πάρκινγκ στο σενάριο 6.....	48
Διάγραμμα 12. Ισχύς φόρτισης και επίπεδο φόρτισης μπαταρίας του 231ου ΗΟ ($EV_{CS} = 102$), συνδεδεμένο σε DC φορτιστή.	50
Διάγραμμα 13. Ισχύς φόρτισης και επίπεδο φόρτισης μπαταρίας του 432ου ΗΟ ($EV_{CS} = 205$), συνδεδεμένο σε AC (1-phase 32 A) φορτιστή.	50
Διάγραμμα 14. Ισχύς φόρτισης και επίπεδο φόρτισης μπαταρίας του 265ου ΗΟ ($EV_{CS} = 117$), συνδεδεμένο σε AC (3-phase 16 A) φορτιστή.	51
Διάγραμμα 15. Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και ενεργός ισχύς του πάρκινγκ από το ισοδύναμο μοντέλο και το σενάριο 5.....	53
Διάγραμμα 16. Συνολική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στις μπαταρίες των ΗΟ και τα αντίστοιχα πάνω και κάτω όρια.	54

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Τύπος φορτιστή, πλήθος του κάθε τύπου φορτιστή και όρια ισχύος τους.	29
Πίνακας 2. Ποσοστά μοντέλων ΗΟ, χωρητικότητα μπαταρίας και περιορισμός ισχύος του on-board μετατροπέα ισχύος.	43
Πίνακας 3. Εξεταζόμενα σενάρια.	44
Πίνακας 4. Ενέργεια που αγοράστηκε και πουλήθηκε στο δίκτυο, καθαρή ανταλλασσόμενη ενέργεια και κόστη φόρτισης.	48
Πίνακας 5. Μείωση κόστους φόρτισης (%).	49
Πίνακας 6. Μείωση κόστους φόρτισης για το 231ο ΗΟ (%).	50
Πίνακας 7. Μείωση κόστους φόρτισης για το 432ο ΗΟ (%).	51
Πίνακας 8. Μείωση κόστους φόρτισης για το 265ο ΗΟ (%).	51

ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

c	Δυναδική μεταβλητή που δηλώνει τη φόρτιση του HO
C_{EV}	Κόστος φόρτισης του HO
d	Δυναδική μεταβλητή που δηλώνει τη εκφόρτιση του HO
d_{power}	Αθροιστικό πλεόνασμα του ορίου ισχύος του φορτιστή για ολόκληρη την περίοδο φόρτισης
E_{Arr}	Η ενέργεια της μπαταρίας του HO όταν αυτό συνδέεται στον σταθμό φόρτισης
$E_{max}^{charger}$	Η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να παρέχει ο φορτιστής
$E_{max(min)}$	Το μέγιστο (ελάχιστο) όριο της ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί στην μπαταρία του HO
E_{req}	Η ενέργεια που χρειάζεται το HO για να φορτίσει μέχρι το επιθυμητό επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας του
EP	Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας
\overline{EP}	Μέση τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας
EP_t	Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας μετά την εφαρμογή της ταρίφας
EV_{CS}	Το σύνολο των HO που συμμετέχουν στη μέθοδο φόρτισης
i	Ο δείκτης αρίθμησης των HO
k	Συντελεστής που χρησιμοποιείται στη διαδικασία αρχικοποίησης της PSO
L	Φορτίου του ηλεκτρικού δικτύου
L_{max}^{grid}	Η μέγιστη τιμή του φορτίου που μπορεί να αντέξει ο μετασχηματιστής του κύριου τροφοδότη του δικτύου διανομής
P	Ανταλλαγή ισχύος μεταξύ HO και ηλεκτρικού δικτύου
\bar{P}	Η σταθερή ισχύς που απαιτείται από το HO, κατά τη διάρκεια της περιόδου φόρτισης, για την επίτευξη του επιθυμητού επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας του
$P_{limit}^{Charger}$	Το όριο ισχύος που εφαρμόζεται στο φορτιστή λαμβάνοντας υπόψη την ονομαστική ισχύ του μετασχηματιστή του πάρκινγκ και του on-board μετατροπέας ισχύος του HO
$P_{Max}^{Charger}$	Μέγιστη (ονομαστική ισχύς) ισχύ του φορτιστή
P_{Max}^{EV}	Μέγιστο όριο ισχύος του on-board μετατροπέας ισχύος του HO
$P_{initial}$	Διάνυσμα που περιλαμβάνει τις αρχικές τιμές της ισχύος φόρτισης του HO
P_{Max}	Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να ανταλλάξει το πάρκινγκ με το ηλεκτρικό δίκτυο
P_{TF}	Το όριο ισχύος (ονομαστική ισχύς) του μετασχηματιστή του πάρκινγκ
pf	Ο συντελεστής απόδοσης ισχύος του συνδυαστικού συστήματος της μπαταρίας του HO, του μετατροπέα ισχύος φόρτισης και της καλωδίωσης
SoC_{Arr}	Το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας του HO όταν αυτό συνδέεται στον σταθμό φόρτισης

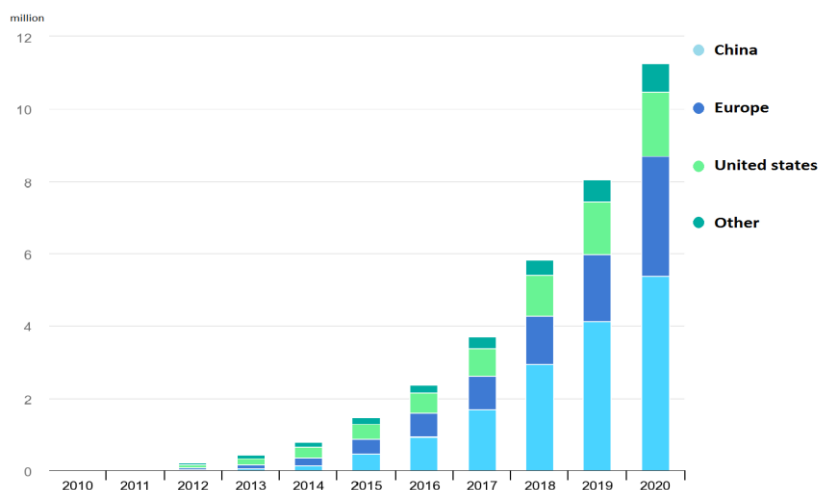
SoC _{Dep}	Το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας του ΗΟ όταν αυτό αποσυνδέεται από τον σταθμό φόρτισης
SoC _{NCP}	Το χαμηλότερο επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας του ΗΟ που απαιτείται για να φτάσει στο επόμενο σημείο φόρτισης
SoC _{RA}	Το επιπρόσθετο επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας του ΗΟ εξαιτίας του ‘άγχους αυτονομίας’ του οδηγού
SoC _t	Το επιθυμητό επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας του ΗΟ κατά την αναχώρηση του από το πάρκινγκ
t	Ο δείκτης για το χρονικό διάστημα
t _{Arr}	Ο δείκτης για τη χρονική στιγμή που το ΗΟ συνδέεται στο φορτιστή
t _{Dep}	Ο δείκτης για τη χρονική στιγμή που το ΗΟ αποσυνδέεται από τον φορτιστή
tariff	Η ταρίφα που εφαρμόζεται στην τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας
Δt	Διάρκεια του κάθε χρονικού διαστήματος

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Πολλές χώρες παγκοσμίως προσπαθούν να μειώσουν το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα στον πλανήτη. Στην συμφωνία του Παρισιού [1] 196 χώρες συμφώνησαν στη μείωση της θερμοκρασίας κατά 1,5 °C σε σύγκριση με τα προβιομηχανικά επίπεδα. Για την επίτευξη του συγκεκριμένου στόχου, είναι απαραίτητη η μείωση των αερίων του θερμοκηπίου. Όσον αφορά την Ευρώπη, οι στόχοι της για το ενεργειακό της πλαίσιο και το κλίμα έως το 2030 είναι η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου τουλάχιστον κατά 40% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990, αύξηση τουλάχιστον 32% του μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και βελτίωση τουλάχιστον κατά 32,5% της ενεργειακής απόδοσης [2].

Τα συμβατικά οχήματα ευθύνονται για το υψηλότερο ποσοστό των συνολικών εκπομπών, αερίων του θερμοκηπίου και επικίνδυνων για την υγεία του ανθρώπου, του τομέα των μεταφορών [3]. Η αντικατάστασή τους με ηλεκτρικά οχήματα (ΗΟ) μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο στην προσπάθεια της Ευρώπης αλλά και ολόκληρου του κόσμου στην επίτευξη των στόχων τους για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου καθώς παράγουν μειωμένες (υβριδικά ΗΟ) ή και μηδενικές (αμιγώς ΗΟ) εκπομπές. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των μπαταριών, ένα από τα πιο ακριβά μέρη ενός ΗΟ, βοήθησε ώστε τα ΗΟ να γίνουν πιο προσιτά στο ευρύ κοινό, καθώς οι μπαταρίες έγιναν πιο αποδοτικές και μειώθηκε η τιμή τους [4]. Η διείσδυση των ΗΟ έχει ανοδική πορεία την τελευταία δεκαετία, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1 [5].



Εικόνα 1. Παγκόσμιο απόθεμα ηλεκτρικών οχημάτων ανά περιοχή [5].

Η εμφάνιση των ΗΟ προσφέρει αρκετά οφέλη αλλά ταυτόχρονα δημιουργεί και προκλήσεις [6-8]. Για την μεγιστοποίηση των πλεονεκτημάτων των ΗΟ και την αντιμετώπιση των περισσότερων προκλήσεων που επιφέρουν, πρέπει να χρησιμοποιηθούν έξυπνοι τρόποι φόρτισής τους καθώς και υπηρεσίες Vehicle to Grid (V2G) [9]. V2G είναι η τροφοδότηση του ηλεκτρικού δικτύου (Grid) με ηλεκτρική ενέργεια από το ηλεκτρικό όχημα (Vehicle).

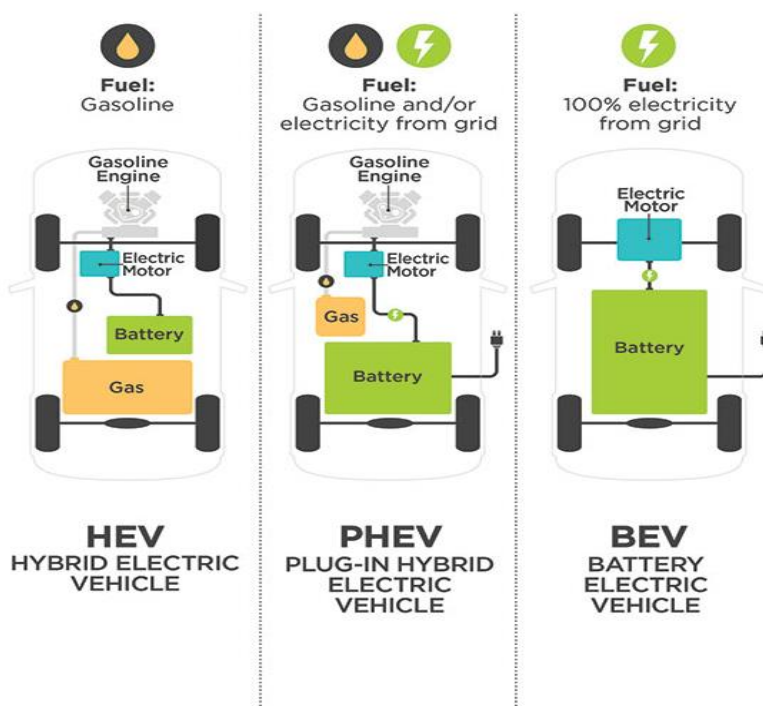
Πιθανοί λόγοι για τους οποίους θα προτιμηθεί ένα πάρκινγκ με σταθμούς φόρτισης για την φόρτιση και στάθμευση ενός ΗΟ:

- Η προστασία από τις ακραίες καιρικές συνθήκες. Οι μπαταρίες των ΗΟ καταπονούνται όταν επικρατούν ακραίες καιρικές συνθήκες ακόμα και αν είναι σταθμευμένα.
- Οι οδηγοί των ΗΟ δεν έχουν δικό τους σταθμό φόρτισης στο σπίτι τους ή δεν έχουν χώρο για την εγκατάστασή του.
- Ένα πάρκινγκ είναι πιθανόν να είναι εξοπλισμένο με σταθμό ταχείας φόρτισης (DC φορτιστές).

1.1 Θεωρητικό υπόβαθρο

1.1.1 Κύριοι τύποι ηλεκτρικών οχημάτων

Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι ηλεκτρικών οχημάτων, τα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα (ΑΗΟ), τα plug-in υβριδικά οχήματα (plug-in ΥΟ) και τα υβριδικά οχήματα (ΥΟ), όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2. Κύριοι τύποι ηλεκτρικών οχημάτων (Πηγή: Electric Power Research Institute).

1) Υβριδικά οχήματα

Τα υβριδικά οχήματα (ΥΟ) συνδυάζουν έναν συμβατικό κινητήρα εσωτερικής καύσης με έναν ηλεκτρικό κινητήρα και μπαταρία για την μείωση της κατανάλωσης καυσίμων. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από το σύστημα φρένων του οχήματος. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται «regenerative braking». Η κύρια διαφορά μεταξύ ΥΟ σε σχέση με τα plug-in ΥΟ και τα ΑΗΟ είναι ότι δεν υπάρχει θύρα φόρτισης και οι μπαταρίες των ΥΟ φορτίζουν από τον κινητήρα εσωτερικής καύσης και την κίνηση των τροχών του οχήματος.

2) Plug-in υβριδικά οχήματα

Τα plug-in ΥΟ συνδυάζουν έναν συμβατικό κινητήρα εσωτερικής καύσης με έναν ηλεκτρικό κινητήρα όμοια με ένα υβρίδιο. Όμως τα plug-in ΥΟ έχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα συσσωρευτή και πιο ισχυρό ηλεκτροκινητήρα. Τα plug-in ΥΟ μπορούν να κινηθούν μόνο με τον ηλεκτροκινητήρα. Μερικά από αυτά μπορούν να καλύψουν πάνω από 70 μίλια χωρίς τη βοήθεια του κινητήρα εσωτερικής καύσης. Το πλεονέκτημα των plug-in ΥΟ έναντι των ΑΗΟ είναι ότι μπορούν να κινηθούν ακόμα και αν οι μπαταρίες του οχήματος είναι άδειες, χρησιμοποιώντας καύσιμα. Ένα μειονέκτημά τους μπορεί να θεωρηθεί ότι χρησιμοποιούν δύο συστήματα για την λειτουργία τους, ηλεκτροκινητήρα και κινητήρα εσωτερικής καύσης, κάτι που μπορεί να κάνει τα κόστη συντήρησης τους πιο ακριβά από ένα ΑΗΟ.

3) Αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα

Τα ΑΗΟ αναφέρονται συχνά ως ηλεκτρικά οχήματα (ΗΟ). Λειτουργούν αποκλειστικά από την ηλεκτρική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες τους. Τα ΗΟ είναι πιο αποδοτικά και φιλικά στο περιβάλλον σε σχέση με τους προηγούμενους δυο τύπους ΗΟ. Παρόλο που έχουν μεγαλύτερη χωρητικότητα συσσωρευτών από ότι τα plug-in ΥΟ η αυτονομία τους περιορίζεται κατά μέσο όρο στα 316 χιλιόμετρα [10].

1.1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα ηλεκτρικών οχημάτων

Όταν εξετάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των ΗΟ (των ΑΗΟ) σε σύγκριση με τα συμβατικά οχήματα, είναι σημαντικό να αναγνωριστεί ότι τα ΗΟ αλλάζουν συνεχώς και η τεχνολογία τους εξακολουθεί να αναπτύσσεται με ραγδαίους ρυθμούς. Αν και τα ΗΟ υπερτερούν σε πολλούς τομείς σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα, υπάρχουν ορισμένες κατηγορίες που βρίσκονται στη δεύτερη θέση. Παρακάτω παρουσιάζονται ορισμένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ΗΟ έναντι των συμβατικών οχημάτων [11],[12]:

Πλεονεκτήματα

- **Περιβαλλοντική επίπτωση:** Τα ΗΟ παράγουν μηδαμινούς (ΑΗΟ) ρύπους. Επιπλέον, η ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται για τη φόρτιση των μπαταριών τους μπορεί να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Επιπλέον, πραγματοποιείται μείωση των ρύπων μεταφοράς των καυσίμων στα βενζινάδικα, τα οποία χρησιμοποιούν τα συμβατικά οχήματα.
- **Συντήρηση:** Τα ΗΟ έχουν λιγότερα κινούμενα μέρη σε σύγκριση με τα συμβατικά οχήματα κάτι που μειώνει τα κόστη συντήρησης.
- **Ενεργειακή απόδοση:** Η ποσότητα ενέργειας από την πηγή (καυσίμου ή μπαταρίας) που μετατρέπεται σε πραγματική ενέργεια για την τροφοδότηση των τροχών ενός οχήματος είναι πολύ καλύτερη στα ΗΟ.
- **Οικονομία:** Ένα ΗΟ μπορεί να καλύψει παραπάνω χιλιόμετρα από ότι ένα συμβατικό όχημα αν ξοδευτούν τα ίδια χρήματα για την τροφοδότηση τους (ηλεκτρική ενέργεια ή καύσιμα αντίστοιχα).

Μειονεκτήματα

- **Κόστος αγοράς:** Το αρχικό κόστος για την αγορά ενός ΗΟ είναι μεγαλύτερο από ότι στα συμβατικά οχήματα.
- **Μικρή Αυτονομία:** Ο μέσος όρος χιλιομέτρων που μπορούν να καλύψουν τα ΗΟ είναι 316 χιλιόμετρα [10].
- **Διαθεσιμότητα σταθμών φόρτισης:** Μερικές φορές είναι δύσκολο να βρεθούν σταθμοί φόρτισης. Σε ορισμένες χώρες δεν υπάρχει αρκετά αναπτυγμένο σύστημα σταθμών φόρτισης.
- **Χρόνος φόρτισης:** Ο χρόνος φόρτισης ενός ΗΟ κυμαίνεται από 30 λεπτά έως πάνω από 20 ώρες.

Επιπλέον, το κόστος αντικατάστασης της μπαταρίας, ένα από τα πιο ακριβά μέρη του ΗΟ, ενός ΗΟ μπορεί να θεωρηθεί σαν μειονέκτημα, καθώς είναι υπό μελέτη αν και πόσες φορές θα χρειαστεί η αντικατάσταση της κατά την διάρκεια ζωής του ΗΟ. Τα τρία τελευταία μειονεκτήματα μπορούν να αντιμετωπιστούν με την σωστή διαχείριση και προγραμματισμό φόρτισης. Όσο αναφορά το πρώτο μειονέκτημα, σε ορισμένες χώρες οι κυβερνήσεις επιδοτούν την αγορά ΗΟ, ενώ σε κάποιες άλλες όχι. Τέλος, κάτι που μπορεί να θεωρηθεί σαν πλεονέκτημα αλλά και μειονέκτημα είναι η αθόρυβη λειτουργία τους. Δεν προκαλούν ηχορύπανση αλλά ταυτόχρονα τα κάνει επικίνδυνα, καθώς οι άνθρωποι έχουν πιο καλή επίγνωση για το που βρίσκεται το όχημα από τον ήχο που παράγει.

1.1.3 Επίπεδα φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

Βάσει της μέγιστης ισχύος που παρέχει ο φορτιστής στη μπαταρία, υπάρχουν τρία κυρίως επίπεδα φόρτισης:

- **Level 1:** Οι level 1 φορτιστές HO μπορούν να συνδεθούν σε μια τυπική πρίζα μονοφασικής παροχής εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) με τάση 120 V και παρέχουν ισχύ εξόδου έως 2,4 kW. Είναι οι πιο αργοί και οι πιο φθηνοί φορτιστές. Μπορούν να προσφέρουν αυτονομία από 4 έως 8 χιλιόμετρα ανά ώρα φόρτισης. Πιο συχνά χρησιμοποιούνται για φόρτιση του HO στο σπίτι, αλλά μπορούν να βρεθούν μερικές φορές σε χώρους εργασίας. Τα πλεονεκτήματα αυτών των φορτιστών είναι ότι δεν απαιτείται κόστος εγκατάστασης, είναι φορητοί και έχουν μικρό αντίκτυπο στην επιβάρυνση του ηλεκτρικού δικτύου. Ωστόσο, η διαδικασία φόρτισης διαρκεί περισσότερο από τα άλλα επίπεδα.
- **Level 2:** Παρέχουν φόρτιση μέσω πρίζας AC με τάση 208-240 V, παρέχοντας έτσι ισχύ έως 19.2 kW. Επιπλέον, απαιτείται εγκατάσταση πρόσθετου εξοπλισμού φόρτισης. Μπορεί να αποδώσει περίπου 19 έως 96 χιλιόμετρα αυτονομία ανά ώρα φόρτισης. Μπορούν να βρεθούν εξίσου σε σπίτια, χώρους εργασίας και σε δημόσιους χώρους. Παρόλο που είναι ταχύτεροι από τους φορτιστές level 1, είναι ακριβότεροι και έχουν μεγαλύτερο αντίκτυπο στην επιβάρυνση του ηλεκτρικού δικτύου.
- **Level 3/DC Fast Charge:** Οι φορτιστές level 3 χρησιμοποιούν συνεχές ρεύμα (DC) σε αντίθεση με τα level 1 και 2 που χρησιμοποιούν εναλλασσόμενο ρεύμα. Είναι ο ταχύτερος διαθέσιμος φορτιστής και το HO μπορεί να φορτιστεί έως και 80% της μπαταρίας του σε 20-40 λεπτά. Επιπλέον, η τάση που χρησιμοποιούν είναι έως 950 V και μπορεί να προσφέρει ισχύ εξόδου έως 350 kW [13]. Χρησιμοποιούνται γενικά σε δημόσιους σταθμούς φόρτισης λόγω του υψηλού κόστους και της κατανάλωσης ισχύος. Δεν είναι κάθε μοντέλο HO ικανό για DC Fast Charge. Επίσης, δεν συνιστάται να χρησιμοποιούνται συχνά σταθμοί ταχείας φόρτισης, επειδή ο υψηλός ρυθμός φόρτισης μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας ενός HO.


Οι χρόνοι φόρτισης κυμαίνονται λιγότερο από 30 λεπτά έως 20 ώρες ή και περισσότερο. Οι χρόνοι αυτοί εξαρτώνται από τον τύπο των HO, τον τύπο της μπαταρίας τους, το πόσο αποφορτισμένη είναι, τη χωρητικότητά της, τις καιρικές συνθήκες κ.λπ. Στην Εικόνα 3 απεικονίζονται τα τρία βασικά επίπεδα φόρτισης.

Level 1	Level 2	DC Fast Charge
		
VOLTAGE: 120V 1-Phase AC AMPS: 12-16 Amps CHARGING LOAD: 1.4-1.9 kW CHARGING TIME: 3-5 Miles per Hour	VOLTAGE: 208V or 240 V 1-Phase AC AMPS: 12-80 Amps (Typ. 32 Amps) CHARGING LOAD: 2.5-19.2 kW (Typ. 6.6 kW) CHARGING TIME: 12-60 Miles per Hour	VOLTAGE: 208V or 480V 3-Phase AC AMPS: >100 Amps CHARGING LOAD: 50-350 kW CHARGING TIME: 60-80 Miles in 20 Minutes

Εικόνα 3. Βασικά επίπεδα φόρτισης.

1.1.4 Τύποι σύνδεσης για την φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων

Τα πρότυπα σύνδεσης και τα βύσματα για την φόρτισης ΗΟ διαφέρουν ανάλογα με τις γεωγραφικές περιοχές και τα μοντέλα. Στη Βόρεια Αμερική και την Ευρώπη συναντάται το σύστημα συνδυασμένης φόρτισης (Charging Compine System, CCS), ενώ η Ιαπωνία και οι αυτοκινητοβιομηχανίες της χρησιμοποιούν το CHAdeMO. Η Κίνα, η οποία διαθέτει το μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς ηλεκτρικών οχημάτων στον κόσμο, χρησιμοποιεί το GB /T. Ο τύπος σύνδεσης που χρειάζεται κάθε ΗΟ για την φόρτιση του ποικίλλει ανάλογα με το όχημα και επίσης ανάλογα με την ονομαστική ισχύ του σημείου φόρτισης. Στην Εικόνα 4 απεικονίζονται τα βύσματα των φορτιστών που συναντιούνται στις διάφορες γεωγραφικές περιοχές καθώς και τη διαφορά τους αναλόγως το ρεύμα φόρτισης.

Current type	Region			
	Japan	America	Europe, rest of world	China
AC				
Plug name:	J1772 (or Type 1)	J1772 (or Type 1)	Mennekes (or Type 2)	GB/T
DC				
Plug name:	CHAdeMO	CCS1	CCS2	GB/T

Εικόνα 4. Βύσματα φορτιστών ΗΟ ^[14].

Στην Ευρώπη, οι τύποι σύνδεσης για την φόρτισης των ΗΟ είναι παρόμοιοι με τη Βόρεια Αμερική, αλλά υπάρχουν μερικές διαφορές. Πρώτον, στην Ευρώπη η τυπική οικιακή τάση είναι 230 V, που είναι σχεδόν διπλάσια από αυτή που χρησιμοποιείται στη Βόρεια Αμερική. Για αυτόν τον λόγο, δεν υπάρχει "level 1" επίπεδο φόρτισης στην Ευρώπη. Δεύτερον, στην Ευρώπη χρησιμοποιείται ο σύνδεσμος IEC 62196 Type 2, που συνήθως αναφέρεται ως Mennekes, αντί για το βύσμα J1772 (το πρότυπο που χρησιμοποιείται από όλους τους κατασκευαστές εκτός από την Tesla) που χρησιμοποιείται σε Βόρεια Αμερική και Ιαπωνία.

Η DC φόρτιση στην Ευρώπη είναι παρόμοια με τη Βόρεια Αμερική, όπου το CCS είναι το πρότυπο που χρησιμοποιείται σχεδόν από όλους τους κατασκευαστές. Το σύστημα CCS στην Ευρώπη συνδυάζει την υποδοχή Type 2 με δυο παραπάνω ακροδέκτες. Ο ίδιος τρόπος χρησιμοποιείται και στη Βόρεια Αμερική με την υποδοχή J1772, οπότε ενώ ονομάζεται επίσης CCS, είναι μια ελαφρώς διαφορετική υποδοχή. Το Tesla Model 3 χρησιμοποιεί πρόσφατα το ευρωπαϊκό σύστημα φόρτισης CCS στην Ευρώπη και η Tesla έχει εξοπλίσει τους σταθμούς Supercharger να διαθέτουν υποδοχή CCS.

1.1.5 Άγχος αυτονομίας

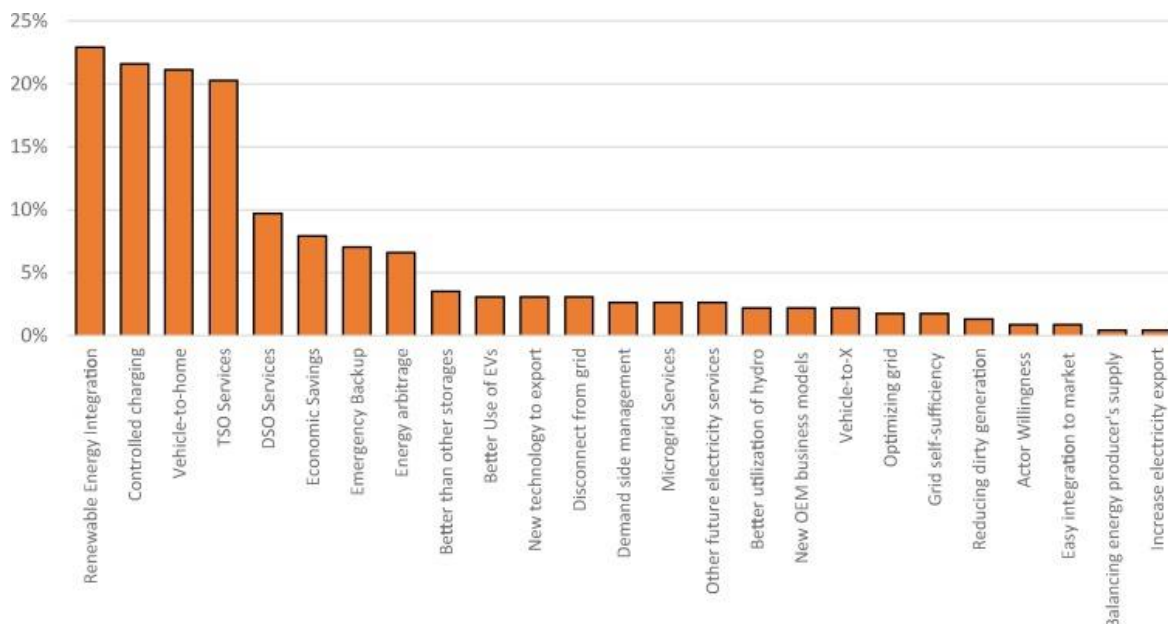
Το "άγχος αυτονομίας" (range anxiety) είναι το άγχος των οδηγών ΗΟ σχετικά με τον αν έχουν αρκετή ενέργεια οι μπαταρίες των ΗΟ τους για να φτάσουν στον επόμενο σταθμό φόρτισης. Ειδικά στην Ελλάδα, η έλλειψη σταθμών φόρτισης επιβαρύνει αυτό το πρόβλημα.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας των μπαταριών οδηγεί χρόνο με τον χρόνο στην παραγωγή ΗΟ με όλο και μεγαλύτερη αυτονομία. Σύμφωνα με τον καθηγητή Maximilian Fichtner τα νέα ΗΟ θα μπορούν να ξεπεράσουν τα 500 χιλιόμετρα με μια πλήρη φόρτιση [15]. Επιπλέον, η εμφάνιση όλο και περισσότερων σταθμών φόρτισης καθώς και ταχυφορτιστών σε κομβικά σημεία θα διευκολύνουν τους οδηγούς ΗΟ να μειώσουν ή και να εξαφανίσουν το άγχος της αυτονομίας των ΗΟ στα επόμενα χρόνια.

1.1.6 Vehicle to Grid

Ο όρος Vehicle to grid (V2G) περιγράφει ένα σύστημα στο οποίο τα ηλεκτρικά οχήματα που συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο επικοινωνούν με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας για να αποδώσουν ενέργεια σε αυτό μέσω της αποφόρτισης των μπαταριών τους. Το V2G, είναι ένα αναδυόμενο ενεργειακό σύστημα, με τη δυνατότητα να μειώσει τα φορτία αιχμής και να υποστηρίξει την ισορροπία του ηλεκτρικού δικτύου.

Αυτό απαιτεί εξειδικευμένη υποδομή από την πλευρά του δικτύου, ώστε να μπορεί να λαμβάνει ενέργεια από τα ΗΟ, καθώς και ειδικές τεχνολογίες από την πλευρά των ΗΟ και των φορτιστών τους που να επιτρέπουν τη μεταφορά ενέργειας στο δίκτυο. Στην Εικόνα 5 απεικονίζονται τα οφέλη του V2G που προσδιορίστηκαν από συνεντεύξεις στην έρευνα των Noel et al. [6].



Εικόνα 5. Προσδιοριζόμενα οφέλη V2G από συνεντεύξεις στην έρευνα των Noel et al. [6].

Δεδομένου ότι ανά πάσα στιγμή περίπου το 95% των αυτοκινήτων είναι σταθμευμένα, οι μπαταρίες των ΗΟ θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να επιτρέψουν τη ροή ηλεκτρικής ενέργειας από το αυτοκίνητο στο ηλεκτρικό δίκτυο διανομής. Επιπλέον στην μελέτη [16], υπολόγισαν ότι ο χρόνος που ένα ΗΟ παραμένει συνδεδεμένο στον φορτιστή ενώ έχει φορτίσει είναι περίπου το 60.32% του συνολικού χρόνου στάθμευσης. Σε άλλη έρευνα, μελετήθηκε η προθυμία των οδηγών των ΗΟ να συμμετέχουν στις V2G υπηρεσίες [17]. Το άγχος αυτονομίας θεωρήθηκε ένας σημαντικός παράγοντας για το αν θα συμμετάσχει κάποιος οδηγός ΗΟ σε V2G υπηρεσίες. Στην [18], μελετήθηκαν διαφορετικά επιχειρηματικά μοντέλα V2G και κατέληξαν σε πέντε παράγοντες που πρέπει να δοθεί προσοχή για να είναι επικερδείς αυτές οι υπηρεσίες. Οι παράγοντες αυτοί είναι: η υποβάθμιση της μπαταρίας εξαιτίας των V2G υπηρεσιών, η διανομή των κερδών από τις V2G υπηρεσίες μεταξύ των εμπλεκόμενων στις υπηρεσίες αυτές, το είδος των V2G υπηρεσιών όπως η ρύθμιση της συχνότητας, η ποσότητα ενέργειας που χρησιμοποιείται σε αυτές τις υπηρεσίες και οι παράμετροι που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη όταν χρησιμοποιούνται V2G υπηρεσίες για τη δημιουργία προσφορών στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Μια έκθεση του 2015 σχετικά με τα πιθανά κέρδη που σχετίζονται με το V2G διαπίστωσε ότι με την κατάλληλη ρυθμιστική υποστήριξη, οι ιδιοκτήτες οχημάτων θα μπορούσαν να κερδίζουν 454\$, 394\$ και 318\$ ετησίως, ανάλογα με το αν η μέση ημερήσια διαδρομή τους ήταν 32, 64 ή 97 χιλιόμετρα, αντίστοιχα [19].

Τέλος, η προσφορά υπηρεσιών V2G αναμένεται ιδιαίτερα ευνοϊκή για τον διαχειριστή του δικτύου/συστήματος. Οι ηλεκτρονικές διατάξεις που ρυθμίζουν τη λειτουργία της μπαταρίας μπορούν εύκολα να ελέγξουν την έγχυση/απορρόφηση ενεργού και άεργου ισχύος. Επιπρόσθετα, η V2G λειτουργία μπορεί να αξιοποιηθεί για την υποστήριξη της συχνότητας του δικτύου, ειδικότερα σε συστήματα με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ.

Ως μειονέκτημα των υπηρεσιών V2G μπορεί να θεωρηθεί η συμβολή τους στην μείωση της ζωής των μπαταριών των ΗΟ, καθώς οι μπαταρίες είναι ένα από τα πιο ακριβά μέρη ενός ΗΟ.

1.1.7 Μικροδίκτυα

Μικροδίκτυα (microgrids) είναι ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας που αποτελείται από δίκτυα χαμηλής τάσης με διασπαρμένες πηγές ενέργειας (μικρογεννήτριες, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κ.ά.), συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και ελεγχόμενα φορτία. Μπορούν να είναι είτε συνδεδεμένα με ένα κεντρικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είτε να είναι απομονωμένα. Τα μικροδίκτυα έχουν οφέλη ως προς τη λειτουργία και απόδοση του συστήματος μέσω του σωστού συντονισμού και διαχείρισης.

1.1.8 Υποβάθμιση της μπαταρίας

Η διαδικασία που μειώνει μη αναστρέψιμα την αρχική χωρητικότητα των μπαταριών ονομάζεται υποβάθμιση της μπαταρίας (battery degradation) και μπορεί να προκληθεί από πολλούς παράγοντες. Οι πιο κοινοί παράγοντες που επηρεάζουν την υγεία των μπαταριών ιόντων λιθίου (lithium-ion) είναι οι εξής:

- Ο χρόνος
- Ακραίες θερμοκρασίες
- Χρήση της μπαταρίας όταν είναι σε πολύ χαμηλό ή υψηλό επίπεδο φόρτισης
- Διέλευση ή απορρόφηση υψηλού ηλεκτρικού ρεύματος από την μπαταρία
- Η χρήση τους (κύκλοι φόρτισης)

Η υποβάθμιση της μπαταρίας είναι ένα σοβαρό οικονομικό πρόβλημα καθώς η μπαταρία είναι ένα από τα πιο ακριβά εξαρτήματα των ΗΟ. Διαφορετικοί τύποι μπαταριών λιθίου έχουν διαφορετικούς κύκλους ζωής ανάλογα με τη χημεία τους και τους προαναφερθέντες λόγους. Οι κύκλοι φόρτισης κυμαίνονται κάπου μεταξύ μερικών εκατοντάδων έως μερικών χιλιάδων [20].

Ορισμένοι μέθοδοι για την επιμήκυνσή της διάρκειας ζωής του ΗΟ είναι [21]:

➤ **Ελαχιστοποίηση της έκθεσης του ΗΟ σε εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες όταν είναι σταθμευμένο**

Η έκθεση του ΗΟ σε υψηλές θερμοκρασίες όταν είναι παρκαρισμένο και δεν είναι συνδεδεμένο σε φορτιστή, ενεργοποιεί το σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας για να διατηρήσει την θερμοκρασία σε χαμηλά επίπεδα για βέλτιστη απόδοση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την κατανάλωση της ενέργειας των μπαταριών.

➤ **Φόρτιση της μπαταρίας μέχρι το 100%**

Τα ΗΟ έχουν εγκατεστημένο ένα σύστημα διαχείρισης των μπαταριών με το οποίο αποφεύγεται η φόρτιση και η εκφόρτιση σε υψηλά και χαμηλά επίπεδα φόρτισης, αντίστοιχα. Γίνεται να παρακαμφθούν τα όρια φόρτισης ώστε να εκμεταλλευτεί ο χρήστης την μέγιστη λειτουργία των μπαταριών αλλά αυτό έχει αρνητικό αντίκτυπο στην διάρκεια ζωής των μπαταριών.

➤ **Αποφυγή συχνής χρήσης της ταχείας φόρτισης**

Η μεγάλη ένταση του ρεύματος που χρησιμοποιείται από τους φορτιστές ταχείας φόρτισης οδηγούν στην μεγαλύτερη καταπόνηση των μπαταριών από ότι οι φορτίσεις με τους άλλους φορτιστές μικρότερης έντασης ρεύματος. Η χρήση των τυπικών φορτιστών μπορούν να δώσουν 10% περισσότερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας σε σχέση με την ταχεία φόρτιση σε βάθος 8 χρόνων.

➤ **Έλεγχος της βέλτιστης κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας κατά την διάρκεια μεγάλης περιόδου στάθμευσης.**

Το ΗΟ θα δυσκολευτεί να διατηρήσει την κατάσταση φόρτισης στο 100% όταν η διάρκεια στάθμευσης τους είναι πολύ μεγάλη. Η αγορά ενός φορτιστή με χρονοδιακόπτη και η ρύθμιση του να διατηρεί το επίπεδο φόρτισης μεταξύ 25% και 75% είναι μια στρατηγική για την αποφυγή αυτού του προβλήματος.

1.2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Έξυπνοι τρόποι φόρτισης συνδυάζοντας ή μη V2G υπηρεσίες, έχουν μελετηθεί στο παρελθόν και θα συνεχίζουν να ελκύουν το ενδιαφέρον των μελετητών καθώς νέα στοιχεία εμφανίζονται με την αύξηση και χρήση των ΗΟ. Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές μελέτες σχετικά με την έξυπνη φόρτιση των ΗΟ λαμβάνοντας υπόψη κάθε φορά διαφορετικές παραμέτρους και σκοπίες.

Στην [22] μελετάται η κατανομή φορτιστών σε μια περιοχή για την επίτευξη μέγιστου κέρδους. Το κέρδος περιλαμβάνει τον αριθμό των φορτιστών, το είδος τους και τα κέρδη από την χρησιμοποίησή τους. Στις [23],[24] μελετήθηκαν ποιες θέσεις του ηλεκτρικού δικτύου θα ήταν πιο κατάλληλες για την δημιουργία ενός πάρκινγκ με φορτιστές για ΗΟ. Τα πάρκινγκ με φορτιστές ΗΟ

θα χαρακτηρίζονται ως μεγάλοι καταναλωτές καθώς ένα πάρκινγκ με 100 φορτιστές ισχύος 11 kW έκαστος θα μπορεί να ανεβάσει τη ζήτηση του για ενεργό ισχύ έως και 1100 kW. Ταυτόχρονα αν είναι δυνατή η λειτουργία V2G, θα μπορεί να παρέχει στο δίκτυο μεγάλα ποσά ενέργειας.

Στις [25-31] εξετάζεται η έξυπνη φόρτιση των ΗΟ, συνδεδεμένων στο δίκτυο της ηλεκτρικής ενέργειας ή σε μικροδίκτυα (microgrids). Στην [25], αναπτύχθηκε μια μέθοδος φόρτισης που επιλύει το πρόβλημα φόρτισης των ΗΟ με τον αλγόριθμο Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων. Ο βασικός στόχος είναι η γρήγορη και με μειωμένο κόστος φόρτιση, αλλά η υπερφόρτωση του δικτύου δεν θεωρήθηκε ως συντελεστής στην αντικειμενική συνάρτηση. Στην [26], δημιουργήθηκε μια βελτιωμένη εκδοχή του αλγορίθμου Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων για την φόρτιση/εκφόρτιση των ΗΟ ώστε να μειωθούν οι απώλειες ισχύος του ηλεκτρικού δικτύου, η συχνότητα λειτουργίας τους και για να εξομαλυνθεί η καμπύλη ισχύος του φορτίου. Ταυτόχρονα, επιχειρήθηκε να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις φόρτισης των ιδιοκτητών των ΗΟ. Σε αυτή την εργασία θεωρήθηκε ένας τύπος ΗΟ με αργό ρυθμό φόρτισης. Στην [27], παρουσιάζεται μια καινοτόμος μέθοδος για την φόρτιση ΗΟ. Το επιθυμητό επίπεδο φόρτισης, ικανοποιώντας τους περιορισμούς του ηλεκτρικού δικτύου και των ΗΟ, επιτεύχθηκε μέσω ενός ιεραρχικού πολυπρακτορικού συστήματος (hierarchical multi-agent system) με μικρούς χρόνους υπολογισμού και επικοινωνίας. Στην [28], δημιουργήθηκε μια στρατηγική φόρτισης για την ικανοποίηση των απαιτήσεων φόρτισης των ΗΟ και ταυτόχρονα την μείωση των επιπλέον επενδύσεων του δικτύου διανομής λόγω των φορτίσεων των ΗΟ. Η επικοινωνία μεταξύ των ΗΟ και των σταθμών φόρτισης είναι απαραίτητη για να αποφασιστεί αν το ΗΟ θα φορτίσει, εκφορτίσει ή θα παραμείνει αδρανές στο σταθμό φόρτισης. Τρεις είναι οι βασικοί παράγοντες για την φόρτιση/εκφόρτιση των ΗΟ στους σταθμούς φόρτισης σε αυτή την μελέτη: η αποθηκευμένη ενέργεια της μπαταρίας την συγκεκριμένη στιγμή, η αποδοτικότητα της φόρτισης του σταθμού φόρτισης και οι συνθήκες φόρτισης του οδηγού. Θεωρήθηκε ότι κάθε ΗΟ μπορεί να αποθηκεύσει αλλά και να αποστείλει στους σταθμούς φόρτισης την αποθηκευμένη ενέργεια της μπαταρίας κάθε χρονική στιγμή. Επιπλέον, η ικανότητα φόρτισης και η απόσταση κάθε σταθμού φόρτισης μεταδίδεται από τους ίδιους τους σταθμούς φόρτισης. Στην [29], εξετάστηκαν οι επείγουσες απαιτήσεις φόρτισης. Τα ΗΟ μπορούσαν να φορτίσουν σε αργό ή γρήγορο ρυθμό φόρτισης ανάλογα με το πόσο επείγουσα είναι η φόρτιση. Η προτεινόμενη μέθοδος ικανοποιεί τις απαιτήσεις φόρτισης των ΗΟ και εξομαλύνει την ανταλλαγή ενέργειας των ΗΟ με το μικροδίκτυο. Στην [30], προτάθηκε μια μέθοδος φόρτισης των ΗΟ στο δίκτυο διανομής σε πραγματικό χρόνο. Η προτεινόμενη μέθοδος βοήθησε στην καλύτερη διαμονή ισχύος στο δίκτυο (εξομάλυνσης αιχμών και γέμισμα των κοιλάδων (valley filling)). Η V2G λειτουργία δεν χρησιμοποιείται στις μελέτες [29],[30]. Στην [31] μελετήθηκε η φόρτιση των ΗΟ στο δίκτυο διανομής και το πρόβλημα επιλύθηκε με μεικτό ακέραιο γραμμικό προγραμματισμό (Mixed Integer Linear Programming). Εννιά σενάρια εξετάστηκαν για τον έλεγχο της προτεινόμενης μεθόδου, όπου

το κάθε σενάριο συνδύαζε διαφορετικό αριθμό ΗΟ, ΗΟ που συμμετείχαν ή όχι στην λειτουργία V2G, ποσοστό λάθους πρόβλεψης, ύπαρξη γεννητριών στο δίκτυο και διαφορετικό επίπεδο φόρτισης.

Στις [32-45] μελετάται η έξυπνη φόρτιση πολλών ΗΟ σε χώρους στάθμευσης, είτε πάρκινγκ ΗΟ είτε πάρκινγκ ενός χώρου εργασίας.

Στις [32-34], εξετάζεται η φόρτιση ΗΟ σε πάρκινγκ ενός χώρου εργασίας. Στην [32], αναπτύχθηκε ένας ελεγκτής διαχείρισης ενέργειας των ΗΟ σε ένα μικροδίκτυο σε έναν χώρο εργασίας σε πραγματικό χρόνο με μεταβλητή κοστολόγηση. Ο ελεγκτής διαχείρισης ενέργειας και τα ΗΟ πρέπει να ανταλλάσσουν πληροφορίες για να μειώσουν την κατανάλωση ισχύος στον χώρο εργασίας και να μειώσουν ταυτόχρονα το κόστος φόρτισης. Η μεθοδολογία "random forest" χρησιμοποιήθηκε για την πρόβλεψη των μοτίβων ταξιδιού των ΗΟ για να διασφαλιστεί όσο το δυνατόν καλύτερος προγραμματισμός φόρτισης. Η υπερφόρτωση του τοπικού μετασχηματιστή δεν περιλήφθηκε στην συνάρτηση βελτιστοποίησης. Τα αποτελέσματα από την συνεργασία του προγραμματισμού φόρτισης των ΗΟ μεταξύ εργαζόμενου και εργοδότη χρησιμοποιώντας συνεργατική θεωρία παιγνίων, μελετώνται στην [33]. Θεωρήθηκε ότι η φόρτιση θα γίνεται στο σπίτι του εργαζόμενου και η εκφόρτιση στον χώρο εργασίας. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης μπορούν να επωφεληθούν και οι δύο πλευρές της συμφωνίας, εργαζόμενος-εργοδότης. Στην [34], μελετήθηκε ένα σύστημα εξομάλυνσης αιχμών και γεμίσματος κοιλάδων της κατανάλωσης ισχύος σε ένα μη-οικιακό σύστημα, πιο συγκεκριμένα σε ένα εκπαιδευτικό ίδρυμα, με τον κατάλληλο προγραμματισμό της φόρτισης και εκφόρτισης των ΗΟ. Το κόστος φόρτισης δεν θεωρήθηκε σαν στόχος της βελτιστοποίησης. Επίσης χρησιμοποιήθηκε ένας τύπος ΗΟ και επιλέχτηκε ο αργός ρυθμός φόρτισης/εκφόρτισης.

Στην [35], δημιουργήθηκε ένα κεντρικό σύστημα προγραμματισμού φόρτισης για να αυξήσει τα κέρδη του πάρκινγκ και να μεγιστοποιήσει τον αριθμό των ΗΟ τα οποία πετυχαίνουν το επιθυμητό επίπεδο φόρτισης. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν ρεαλιστικά μοτίβα κίνησης οχημάτων. Η λύση του προβλήματος έγινε με το λογισμικό Advanced Interactive Multidimensional Modeling System. Μόνο ο αργός ρυθμός φόρτισης λήφθηκε υπόψη σε αυτή τη μελέτη. Στην [36], σχεδιάστηκε ένα σύστημα για τον προγραμματισμό φόρτισης των ΗΟ με στόχο να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις φόρτισης των ΗΟ που εισέρχονται στο πάρκινγκ, λαμβάνοντας υπόψη την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας. Χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων για την επίλυση του προβλήματος. Στην [37], δημιουργήθηκε μια βελτιστοποιημένη έκδοση του αλγορίθμου Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων για το προγραμματισμό της φόρτισης 30 ΗΟ σε ένα πάρκινγκ. Στην [38], η βελτιστοποίηση του προγραμματισμού φόρτισης των ΗΟ έγινε με μια μη-συνεργατική θεωρία παιγνίων. Το επίπεδο φόρτισης, η χωρητικότητα του μετασχηματιστή και η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας επηρέασαν την συνάρτηση βελτιστοποίησης. Το φορτίο του ηλεκτρικού δικτύου δεν λήφθηκε υπόψη στις [35-38]. Στην [39], ο αλγόριθμος Βελτιστοποίησης

Σμήνους Σωματιδίων χρησιμοποιήθηκε για το προγραμματισμό της φόρτισης και εκφόρτισης των ΗΟ σε ένα πάρκινγκ λαμβάνοντας υπόψη την αβεβαιότητα της συμπεριφοράς των οδηγών σχετικά με τα επίπεδα φόρτισης των ΗΟ και το χρόνο παραμονής στο πάρκινγκ. Πρωταρχικός στόχος τους ήταν η αύξηση των κερδών του πάρκινγκ και δευτερευόν η αύξηση των κερδών των ιδιοκτητών των ΗΟ. Οικονομική επιβάρυνση επιβαλλόταν στον οδηγό του ΗΟ ή στο πάρκινγκ εάν δεν τηρούσε την αρχική συμφωνία τους σχετικά με την φόρτιση του ΗΟ. Στην [40], η μέθοδος που δημιουργήθηκε για την μείωση του κόστους φόρτισης και την ικανοποίηση των απαιτήσεων φόρτισης των ΗΟ, χρησιμοποιεί γραμμικό προγραμματισμό για την εύρεση την λύσης. Ένα σύστημα ασαφούς λογικής υλοποιήθηκε για να υπολογίσει την προτεραιότητα φόρτισης/εκφόρτισης των ΗΟ ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης, την υπολειπόμενη ώρα φόρτισης και την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας. Στην [41], οι συγγραφείς πρότειναν μια μέθοδο φόρτισης των ΗΟ σε ένα πάρκινγκ που διαθέτει ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Τα ΗΟ οχήματα χωρίστηκαν σε αυτά που μπορούν να φορτίσουν με γρήγορο και αργό ρυθμό φόρτισης. Τα αποτελέσματα της μελέτης τους έδειξαν ότι με την προτεινόμενη μέθοδο φόρτισης, η γρήγορη φόρτιση των ΗΟ δεν επιβάρυνε τις αιχμές του φορτίου του δικτύου διανομής.

Στις [42-45], μελετάται η φόρτιση των ΗΟ σε πάρκινγκ όταν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εγκαθίστανται σε αυτό ή στο ηλεκτρικό δίκτυο. Στην [42], προτάθηκε μια στρατηγική για την βέλτιστη φόρτιση των ΗΟ, ανάλογα με την εποχή, σε ένα πάρκινγκ με εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά (Φ/Β). Χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο βελτιστοποίησης CPLEX για την επίλυση του προβλήματος, και σύμφωνα με τους συγγραφείς η προτεινόμενη μέθοδος είχε μειωμένο κόστος από ότι τη μη συντονισμένη φόρτιση. Στην [43], μελετήθηκε η φόρτιση των ΗΟ σε ένα πάρκινγκ με Φ/Β και με σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Μεικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση του βέλτιστου προγραμματισμού φόρτισης, συντονίζοντας κατάλληλα την φόρτιση των ΗΟ, την παραγωγή ενέργειας από τα Φ/Β και το σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Η προτεινόμενη μέθοδος μεγιστοποιεί την ικανοποίηση των οδηγών των ΗΟ, φορτίζοντας τα στο επιθυμητό επίπεδο φόρτισης, καθώς επίσης μειώνει και το συνολικό κόστος λειτουργίας του πάρκινγκ. Μια παρόμοια μελέτη διεξήχθη στην [44], όπου δημιουργήθηκε μια μέθοδος για την εύρεση βέλτιστων συμβολαίων για την φόρτιση των ΗΟ σε πάρκινγκ με Φ/Β και σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Όσον αφορά την πώληση ενέργειας στο δίκτυο διανομής, η V2G λειτουργία θεωρήθηκε ότι θα χρησιμοποιηθεί σαν τελευταία επιλογή, μετά τα Φ/Β και σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Τροποποιημένα μοτίβα ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας εφαρμόστηκαν για την αποφυγή της υπερφόρτωσης του μετασχηματιστή του πάρκινγκ. Στις [42-44] δεν θεωρήθηκε η υπερφόρτιση του δικτύου σαν μεταβλητή στο πρόβλημα της βελτιστοποίησης. Στην [45], αναπτύχθηκε ένα δυο-επιπέδων μοντέλο για τη διαχείριση της λειτουργίας ενός πάρκινγκ με ΗΟ με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες της συμπεριφοράς των οδηγών των ΗΟ. Σε

αυτή την μελέτη, εξετάστηκε η επίδραση που έχει η τοποθεσία και το μέγεθος των ΑΠΕ στο δίκτυο διανομής, στα κέρδη του πάρκινγκ.

Συνολικά, μόνο στις μελέτες [34],[35] χρησιμοποιήθηκαν ρεαλιστικά δεδομένα αφίξεων και αναχωρήσεων οχημάτων σε χώρους στάθμευσης. Επιπλέον, σε καμία μελέτη στην βιβλιογραφία δεν λήφθηκε υπόψη ο περιορισμός των εναλλαγών φόρτισης και εκφόρτισης σε μια περίοδο φόρτισης για την μείωση της καταπόνησης την μπαταρίας του ΗΟ.

1.3 Στόχος και σχεδιασμός της μεταπτυχιακής εργασίας

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας ήταν η δημιουργία μιας μεθοδολογίας φόρτισης και εκφόρτισης των ΗΟ σε ένα πάρκινγκ με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί σε επίπεδο ΗΟ, πάρκινγκ και ηλεκτρικού δικτύου και ταυτόχρονα η φόρτιση να γίνει με το ελάχιστο κόστος. Η προτεινόμενη μέθοδος φόρτισης συνδυάζει τα εξής:

- Ο προγραμματισμός φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων πραγματοποιείται σε επίπεδο ΗΟ. Ωστόσο, λαμβάνονται υπόψη οι κύριοι περιορισμοί στο επίπεδο του ΗΟ, του πάρκινγκ και του ηλεκτρικού δικτύου διανομής, επιτρέποντας έτσι την ευρύτερη εφαρμογή της μεθόδου στο μέλλον.
- Η προτεινόμενη μέθοδος φόρτισης μπορεί να εφαρμοστεί εύκολα χωρίς να χρειάζεται να αποκαλύψει προσωπικά δεδομένα σε άλλους και απαιτεί λίγες προβλέψεις. Οι μόνες προβλέψεις που χρειάζονται είναι αυτές της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας, της φόρτισης του δικτύου διανομής και της μέγιστης/ελάχιστης συνολικής ισχύος φόρτισης των ΗΟ. Πρέπει να σημειωθεί ότι μόνο η τελευταία πρόβλεψη πρέπει να πραγματοποιηθεί από τον χειριστή του πάρκινγκ.
- Η προτεινόμενη μέθοδος φόρτισης έχει μικρή επίδραση στην καταπόνηση την μπαταρίας του ΗΟ, ενώ ταυτόχρονα επιτρέπει την λειτουργία V2G. Αυτό επιτυγχάνεται διατηρώντας τους κύκλους φόρτισης των μπαταριών των ΗΟ κάτω από ένα καθορισμένο όριο, το οποίο ορίζεται από τον οδηγό.
- Υλοποιήθηκε μια απλή αλλά και αποτελεσματική τεχνική αρχικοποίησης του αλγορίθμου Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του εξεταζόμενου προβλήματος. Η προτεινόμενη μέθοδος αρχικοποίησης βοήθησε τον αλγόριθμο να συγκλίνει γρήγορα σε μια πολύ καλή λύση και με μεγάλο βαθμό βεβαιότητας.
- Εφαρμόστηκε ένας απλός και εύκολος τρόπος για να ληφθεί υπόψη η υπερφόρτιση του μετασχηματιστή του πάρκινγκ καθώς και του δικτύου διανομής.
- Στην παρούσα εργασία δεν απαιτείται η χρήση μεθόδων βέλτιστης κατανομής της ισχύος φόρτισης στα ΗΟ σε πραγματικό χρόνο. Αυτό απλοποιεί σημαντικά την υλοποίηση της μεθόδου φόρτισης και μειώνει την πολυπλοκότητα και την απαιτούμενη υπολογιστική απαίτηση.

Επιπλέον, η ευαισθησία της μεθόδου στην πρόβλεψη της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας είναι περιορισμένη.

1.4 Δομή μεταπτυχιακής εργασίας

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η μεθοδολογία για την υλοποίηση της μεθόδου φόρτισης. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα δεδομένα εισόδου για το κάθε εξεταζόμενο σενάριο και αναλύονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των εξεταζόμενων σεναρίων. Τέλος, στο Κεφάλαιο 4 ακολουθούν τα συμπεράσματα και οι πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις της εργασίας.

Κεφάλαιο 2

Μεθοδολογία

2.1 Επιλογή φορτιστή

Στο υπό μελέτη πάρκινγκ θεωρήθηκαν ότι υπάρχουν τρεις τύποι φορτιστών: α) μονοφασικός 32A, β) τριφασικός 16A και γ) φορτιστής συνεχούς ρεύματος (ταχείας φόρτισης) ισχύος 50 kW. Το πλήθος από τους δυο πρώτους τύπους φορτιστών είναι αρκετό ώστε να φορτιστούν όλα τα ΗΟ που εισέρχονται στο πάρκινγκ σε αντίθεση με τους φορτιστές συνεχούς ρεύματος που επιλέχθηκαν μόνο δυο. Οι λόγοι που επιλέχθηκαν μόνο δυο είναι η τιμή τους, διότι είναι πολύ πιο ακριβοί σε αντίθεση με τους άλλους τύπους φορτιστών και ότι ένας μικρός αριθμός από τους οδηγούς θα τους χρησιμοποιήσει. Η πλειοψηφία των οδηγών από όσους θα χρησιμοποιήσουν φορτιστές ταχείας φόρτισης είναι αυτοί που έχουν ένα έκτακτο ταξίδι, χαμηλό επίπεδο φόρτισης των μπαταριών και περιορισμένο χρόνο για φόρτιση, καθώς και οι οδηγοί που διανύουν μεγάλες αποστάσεις και χρειάζονται να φορτίσουν το ΗΟ τους παραπάνω από μία φορά για να φτάσουν στον τελικό τους προορισμό. Έγινε η υπόθεση ότι οι φορτιστές και τα ΗΟ μπορούν να υποστηρίξουν αμφίδρομη ροή ενέργειας. Οι τύποι των φορτιστών, η ποσότητα του κάθε τύπου φορτιστή καθώς και τα όρια ισχύος τους απεικονίζονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Τύπος φορτιστή, πλήθος του κάθε τύπου φορτιστή και όρια ισχύος τους.

Τύπος φορτιστή	Πλήθος φορτιστών	Όρια ισχύος
1-phase 32A Type 2	150	$-7.4 \text{ kW} \leq \text{ισχύς} \leq 7.4 \text{ kW}$
3-phase 16A Type 2	100	$-11 \text{ kW} \leq \text{ισχύς} \leq 11 \text{ kW}$
Combined Charging System	2	$0 \text{ kW} \leq \text{ισχύς} \leq 50 \text{ kW}$

Ο σταθμός φόρτισης ενεργοποιείται όταν το ΗΟ συνδεθεί σε αυτόν. Τότε γίνεται η αναγνώριση και αποστολή των δεδομένων της ώρας άφιξης του ΗΟ, των χαρακτηριστικών της μπαταρίας του και του επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας του, στον κεντρικό συλλέκτη και επεξεργαστή δεδομένων του πάρκινγκ. Δίνονται επίσης από τον οδηγό η ώρα αναχώρησής του και το επιθυμητό επίπεδο φόρτισης του ΗΟ του. Για τη φόρτιση και εκφόρτιση των ΗΟ σύμφωνα με την μέθοδο φόρτισης καθώς και για

τους τεχνικούς και λειτουργικούς περιορισμούς των ΗΟ, του πάρκινγκ και του ηλεκτρικού δικτύου είναι υπεύθυνος ο χειριστής του πάρκινγκ.

Αρχικά, ελέγχεται αν το ΗΟ θα συμμετάσχει στη μέθοδο φόρτισης όπως υπολογίστηκε στην εξίσωση (1). Εάν το επίπεδο φόρτισης του ΗΟ κατά την άφιξη του (SoC_{Arr}) στο πάρκινγκ είναι μεγαλύτερο από το επιθυμητό επίπεδο φόρτισης κατά την αναχώρηση (SoC_t) τότε το ΗΟ δεν συμμετέχει στην μέθοδο φόρτισης, όπως φαίνεται στην εξίσωση (1). Τα ΗΟ που συμμετείχαν στην μέθοδο φόρτισης ανήκουν στο σύνολο EV_{CS} .

$$EV_{CS}(i) = \begin{cases} 1, & SoC_{Arr}(i) < SoC_t(i) \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad \forall i \in EV \quad (1)$$

Σύμφωνα με το εξεταζόμενο σετ δεδομένων σε αυτή την εργασία, 365 από τα 793 ΗΟ που εισήλθαν στο πάρκινγκ στο υπό μελέτη 24ωρο, συμμετείχαν στη μέθοδο φόρτισης.

Στη συνέχεια γίνεται έλεγχος για το αν υπάρχει αρκετός χρόνος για να φορτίσει το ΗΟ σε έναν AC φορτιστή ή θα πρέπει να συνδεθεί σε έναν φορτιστή ταχείας φόρτισης, όπως φαίνεται στην εξίσωση (2).

$$AC_{Charger} = \begin{cases} 1, & E_{max}^{charger}(i) - E_{req}(i) \geq 0 \\ 0, & otherwise \end{cases}, \quad \forall i \in EV_{CS} \quad (2)$$

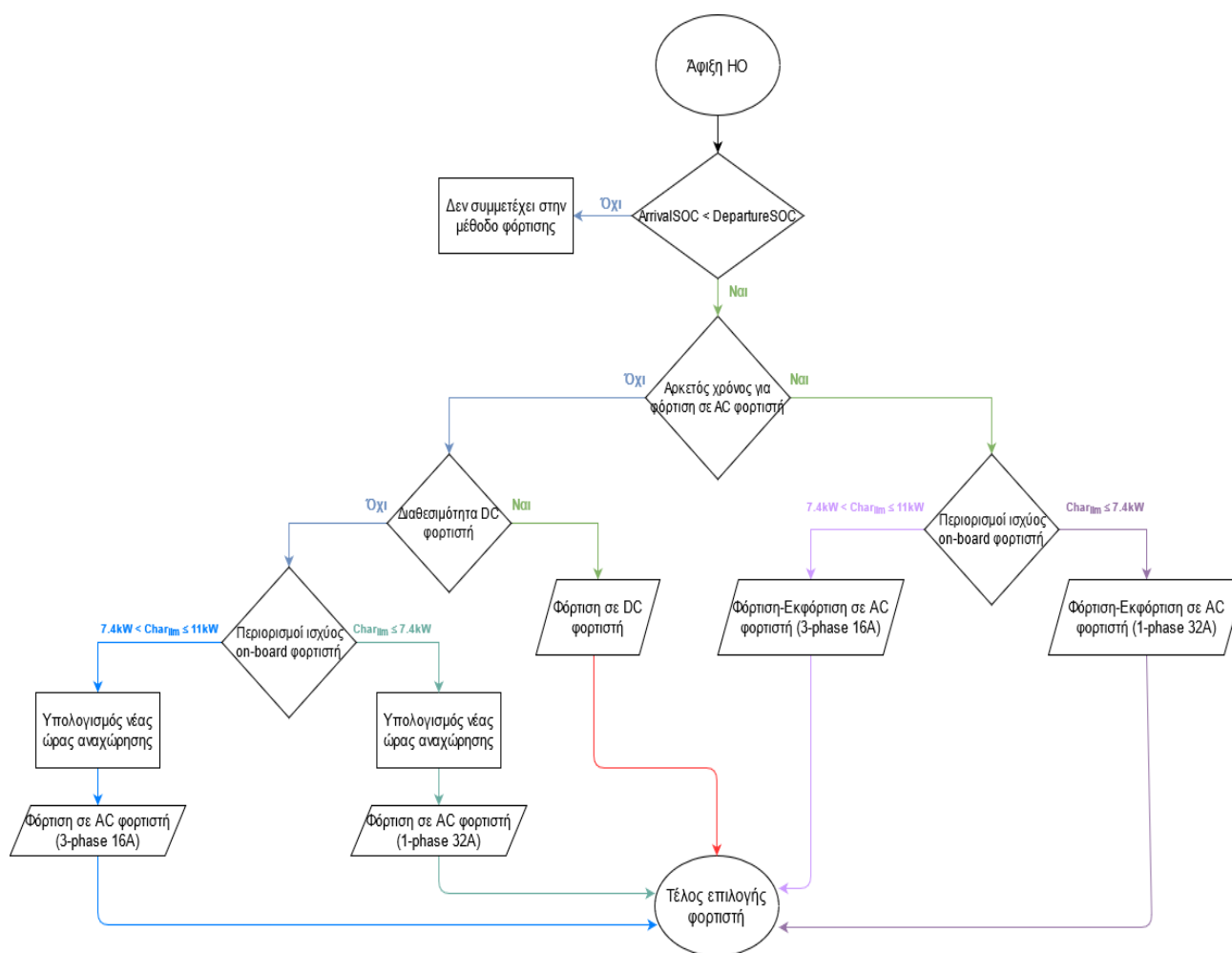
Όπου, $E_{max}^{charger}(i)$ είναι η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να παρέχει ο φορτιστής του i -οστού ΗΟ αν ο φορτιστής λειτουργεί στην μέγιστη ονομαστική του ισχύ κατά την διάρκεια στάθμευσης του ΗΟ στο πάρκινγκ. Η ενέργεια αυτή εξαρτάται και από τους περιορισμούς ισχύος φόρτισης του κάθε ΗΟ. $E_{req}(i)$ είναι η ενέργεια που χρειάζεται το i -οστό ΗΟ για να φορτίσει μέχρι το επιθυμητό επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας του. Η επιλογή του AC φορτιστή εξαρτάται από τους περιορισμούς ισχύος φόρτισης του κάθε ΗΟ. Η επιλογή τους γίνεται σύμφωνα με τις εξισώσεις (3) και (4).

$$Charger(1-phase 32A) = \begin{cases} 1, & P_{Max}^{Charger}(i) \leq 7.4 \text{ kW} \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad \forall i \in EV_{CS} \quad (3)$$

$$Charger(3-phase 16A) = \begin{cases} 1, & 7.4 < P_{Max}^{Charger}(i) \leq 11 \text{ kW} \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad \forall i \in EV_{CS} \quad (4)$$

Όπου, $P_{Max}^{Charger}(i)$ είναι η μέγιστη ονομαστική ισχύς φόρτισης του i -οστού ΗΟ. Η διαθεσιμότητα των DC φορτιστών ελέγχεται στην περίπτωση που ο χρόνος στάθμευσης του ΗΟ δεν είναι αρκετός για να φορτιστεί σε AC φορτιστή. Η εκφόρτιση δεν αποτελεί επιλογή όταν το ΗΟ φορτίζει σε DC φορτιστή. Εάν όλοι οι φορτιστές ταχείας φόρτισης είναι κατειλημμένοι τότε το ΗΟ θα φορτίσει σε έναν AC φορτιστή, αλλά για να επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο φόρτισης θα υπολογιστεί νέα ώρα

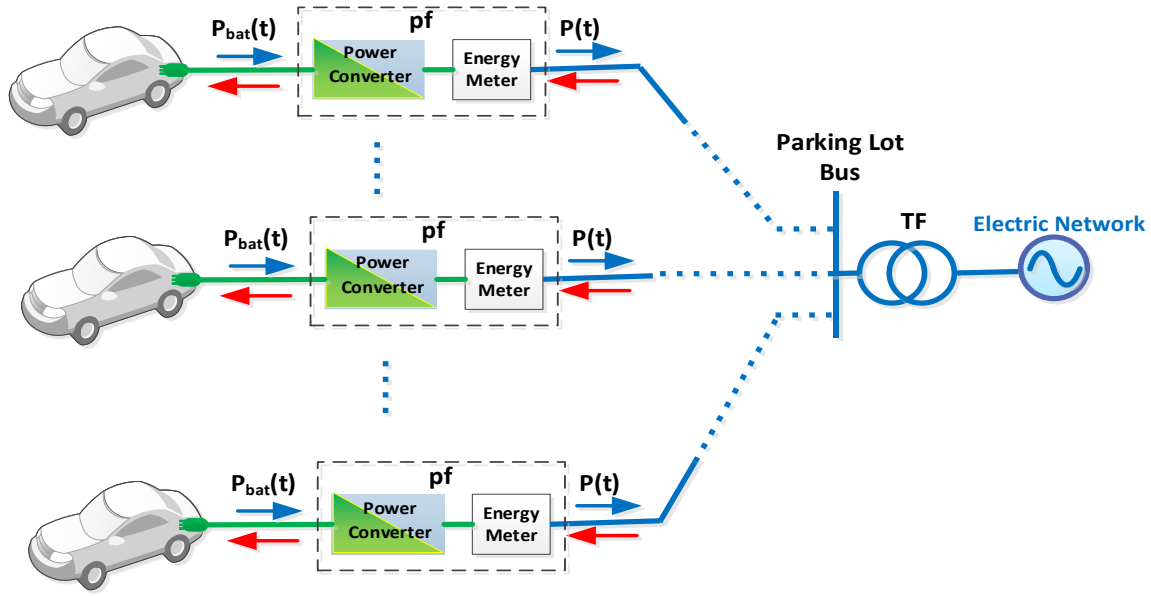
αναχώρησης, καθώς η φόρτιση θα διαρκέσει παραπάνω από την αρχική εκτίμηση αναχώρησης του οδηγού. Με την προϋπόθεση η νέα ώρα αναχώρησης του ΗΟ να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην παλιά, ο προγραμματισμός φόρτισης του συγκεκριμένου ΗΟ θα είναι τέτοιος, ώστε ο φορτιστής που είναι συνδεδεμένο να λειτουργεί στο μέγιστο της ονομαστικής του ισχύος (συνυπολογίζοντας του περιορισμούς ισχύος φόρτισης του κάθε ΗΟ) χωρίς να συμπεριληφθεί η εκφόρτιση στο χρονοδιάγραμμα φόρτισης. Η επιλογή φορτιστή περιγράφεται μέσω του Διάγραμμα 1.



Διάγραμμα 1. Διάγραμμα ροής για την επιλογή τύπου φορτιστή.

2.2 Αντικειμενική συνάρτηση και Περιορισμοί

Στην Εικόνα 6 απεικονίζεται η διαμόρφωση του ηλεκτρικού συστήματος του πάρκινγκ με ΗΟ. Ο μετρητής ρεύματος του κάθε φορτιστή θεωρήθηκε ως σημείο αναφοράς για την καταμέτρηση της κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 6. Η διαμόρφωση του εξεταζόμενου ηλεκτρικού συστήματος με το πάρκινγκ ^[47].

Δύο δυαδικές μεταβλητές, c και d , δημιουργήθηκαν για τον έλεγχο φόρτισης και εκφόρτισης των ΗΟ.

$$c(i,t) = \begin{cases} 1, & P(i,t) \geq 0 \\ 0, & 0 > P(i,t) \end{cases}, \quad t_{Arr}(i) \leq t < t_{Dep}(i), \quad \forall i \in EV_{CS} \quad (5)$$

$$d(i,t) = \begin{cases} 0, & P(i,t) \geq 0 \\ 1, & 0 > P(i,t) \end{cases}, \quad t_{Arr}(i) \leq t < t_{Dep}(i), \quad \forall i \in EV_{CS} \quad (6)$$

Όπου, $P(i,t)$ είναι η προγραμματισμένη ισχύς του φορτιστή, που καταγράφεται στον μετρητή, για το i -οστό ΗΟ την χρονική στιγμή t .

Ο συντελεστής απόδοσης ισχύος (pf) του συνδυασμένου συστήματος της καλωδίωσης, του μετατροπέα ισχύος φόρτισης και της μπαταρίας του ΗΟ θεωρήθηκε ίσος με 0,93 [34],[43],[45]. Στην εξίσωση (7) καθορίζεται ο συντελεστής απόδοσης ισχύος (pf).

$$pf(i,t) = \begin{cases} \frac{P_{bat}(i,t)}{P(i,t)}, & c(i,t) = 1 \\ \frac{P(i,t)}{P_{bat}(i,t)}, & d(i,t) = 1 \end{cases} \quad t_{Arr}(i) \leq t < t_{Dep}(i), \quad \forall i \in EV_{CS} \quad (7)$$

Τέσσερις τύποι περιορισμών πρέπει να ικανοποιούνται από τα ΗΟ που συμμετέχουν στην προτεινόμενη μέθοδο φόρτισης:

- [1] Μπορούν να εκφορτίσουν μέχρι δυο φορές για να αποφευχθεί η πρόωρη μείωση ζωής της μπαταρίας του ΗΟ.
- [2] Το μέγιστο και ελάχιστο όριο της αποθηκευμένης ενέργειας της μπαταρίας δεν πρέπει να παραβιαστεί.
- [3] Το μέγιστο και ελάχιστο όριο ισχύος του φορτιστή δεν πρέπει να παραβιαστεί.
- [4] Το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας πρέπει να είναι ίσο με το επιθυμητό επίπεδο φόρτισης μπαταρίας που όρισε ο οδηγός κατά την ώρα αναχώρησης του ΗΟ από το πάρκινγκ.

Οι παραπάνω περιορισμοί εκφράζονται από τις παρακάτω εξισώσεις :

- Περιορισμός για την μείωση της καταπόνησης της μπαταρίας

$$\text{change_sign}(P(i,t)) \leq 3, \quad t_{\text{Arr}}(i) \leq t < t_{\text{Dep}}(i), \quad \forall i \in \text{EV}_{\text{CS}} \quad (8)$$

- Περιορισμοί για την αποθηκευμένη ενέργεια της μπαταρίας

$$\sum_{t=t_{\text{Arr}}}^t \left(\text{pf} \cdot c(t) - \frac{d(t)}{\text{pf}} \right) \cdot P(i,t) \cdot \Delta t + E_{\text{Arr}}(i) \geq E_{\text{min}}(i), \quad t_{\text{Arr}}(i) \leq t < t_{\text{Dep}}(i), \quad \forall i \in \text{EV}_{\text{CS}} \quad (9)$$

$$\sum_{t=t_{\text{Arr}}}^t \left(\text{pf} \cdot c(t) - \frac{d(t)}{\text{pf}} \right) \cdot P(i,t) \cdot \Delta t + E_{\text{Arr}}(i) \leq E_{\text{max}}(i), \quad t_{\text{Arr}}(i) \leq t < t_{\text{Dep}}(i), \quad \forall i \in \text{EV}_{\text{CS}} \quad (10)$$

- Περιορισμοί ισχύος των φορτιστών

$$-P_{\text{limit}}^{\text{Charger}}(i,t) \leq P(i,t) \leq P_{\text{limit}}^{\text{Charger}}(i,t), \quad t_{\text{Arr}}(i) \leq t < t_{\text{Dep}}(i), \quad \forall i \in \text{EV}_{\text{CS}} \quad (11)$$

- Επιθυμητό επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας

$$\sum_{t=t_{\text{Arr}}}^{t_{\text{Dep}}-1} \left(\text{pf} \cdot c(t) - \frac{d(t)}{\text{pf}} \right) \cdot P(i,t) \cdot \Delta t + E_{\text{Arr}}(i) = \text{SoC}_t(i) \cdot \frac{E_{\text{max}}(i)}{100}, \quad \forall i \in \text{EV}_{\text{CS}} \quad (12)$$

Όπου, $E_{\text{Arr}}(i)$ είναι η αποθηκευμένη ενέργεια στη μπαταρία του i -οστού ΗΟ όταν αυτό συνδέεται στον σταθμό φόρτισης, $E_{\text{max(min)}}(i)$ είναι το μέγιστο (ελάχιστο) όριο της ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί στη μπαταρία του i -οστού ΗΟ, $t_{\text{Arr}}(i)$ είναι η χρονική στιγμή που το i -οστό ΗΟ συνδέεται στο σταθμό φόρτισης, $t_{\text{Dep}}(i)$ είναι η χρονική στιγμή που το i -οστό ΗΟ αποσυνδέεται από το σταθμό φόρτισης, $P_{\text{limit}}^{\text{Charger}}(i,t)$ είναι το όριο ισχύος του φορτιστή του i -οστού ΗΟ την χρονική στιγμή t και $\text{SoC}_{\text{Dep}}(i)$ είναι το επίπεδο φόρτισης του i -οστού ΗΟ την στιγμή αναχώρησης του από το πάρκινγκ.

Η συνάρτηση `change_sign` στην εξίσωση (8) ορίζει το πόσες φορές αλλάζει πρόσημο η ισχύς φόρτισης του HO, P , κατά τη διάρκεια της φόρτισης του. Όσες περισσότερες φορές αλλάζει το πρόσημο (μεταβολές μεταξύ φόρτισης και εκφόρτισης), τόσο πιο ευέλικτος μπορεί να είναι ο προγραμματισμός φόρτισης του HO και τόσο πιο μειωμένο το κόστος φόρτισης. Όμως, οι πολλές μεταβολές μεταξύ φόρτισης και εκφόρτισης καταπονούν περισσότερο την μπαταρία των HO, που είναι το πιο ακριβό μέρος ενός HO. Η μέγιστη τιμή της `change_sign` θεωρήθηκε σε αυτή την εργασία τρία, δηλαδή το HO μπορεί να εκφορτίσει έως 2 φορές. Στην Εικόνα 7 απεικονίζεται ο ψευδοκώδικας της συνάρτησης `change_sign`.

```
pos=1;
neg=1;
ch_sig=0;
if P(i,t)>0 && pos==1
    pos = 1;
    neg = -1;
elseif P(i,t)<0 && neg==1
    pos = -1;
    neg = 1;
elseif P(i,t)==0
    # Do nothing
else
    pos = -pos;
    neg = -neg;
    ch_sig = ch_sig + 1;
end
```

Εικόνα 7. Ψευδοκώδικας της συνάρτησης `change_sign`.

Η αντικειμενική συνάρτηση για το εξεταζόμενο πρόβλημα αντιπροσωπεύει το κόστος φόρτισης του HO και παρουσιάζεται στην εξίσωση (13).

$$C_{EV}(i) = \min \left(\sum_{t=t_{Arr}}^{t_{Dep}-1} P(i,t) \cdot \Delta t \cdot EP(t) \right), \quad \forall i \in EV_{CS} \quad (13)$$

Όπου, $EP(t)$ είναι η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας την χρονική στιγμή t .

2.3 Επιλογή αλγορίθμου βελτιστοποίησης

Ο αλγόριθμος που επιλέχθηκε για την επίλυση του εξεταζόμενου προβλήματος, με τους προαναφερθέντες περιορισμούς, ήταν ο αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization - PSO). Ο PSO χαρακτηρίζεται ως εξελικτικός μεθευρετικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης. Η αποτελεσματικότητα του σε προβλήματα βελτιστοποίησης με μεγάλο εύρος εφαρμογών και με χαμηλές υπολογιστικές απαιτήσεις, η απλότητα του, η ικανότητα να λύσει μη-γραμμικά πολλαπλής βελτιστοποίησης προβλήματα τον έκαναν ευρέως γνωστό [48].

Προτάθηκε από τους James Kennedy και Russell Eberhart το 1995, με στόχο την προσομοίωση της κοινωνικής συμπεριφοράς των πουλιών μέσα σε ένα σμήνος που αναζητούν τροφή σε έναν καθορισμένο χώρο [49].

Αρχικά δημιουργείται ένα σύνολο από σωματίδια (πουλιά) που έχουν συγκεκριμένη θέση (Δx) και ταχύτητα (v) σε έναν ορισμένο χώρο αναζήτησης. Το κάθε σωματίδιο αποτελεί μια πιθανή λύση του προβλήματος και αναπαρίσταται από ένα διάνυσμα n -διαστάσεων στο χώρο των λύσεων (μέσα στον χώρο αναζήτησης). Τα πουλιά αλλάζουν θέσεις βάσει κοινωνικό-ψυχολογικών τάσεων για να μιμηθούν τα άλλα πουλιά που έβρισκαν την τροφή (λύσεις του προβλήματος). Έτσι και η κίνηση των σωματιδίων βασίζεται στην ικανότητα να συγκρατεί ο αλγόριθμος τις λύσεις και την εμπειρία των γειτονικών σωματιδίων για να τις αξιοποιήσει και να κινηθούν προς μια πιθανή καλύτερη θέση στον χώρο αναζήτησης. Μια συνάρτηση κόστους αξιολογεί το κάθε σωματίδιο. Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου αποθηκεύεται το ατομικό βέλτιστο και το καθολικό βέλτιστο. Ατομικό βέλτιστο είναι η βέλτιστη θέση του κάθε σωματιδίου (η καλύτερη λύση του συγκεκριμένου σωματιδίου), ενώ καθολικό βέλτιστο είναι η βέλτιστη θέση του σωματιδίου με την καλύτερη θέση σε ολόκληρο το σμήνος (η καθολική καλύτερη λύση). Το διάνυσμα της ταχύτητας που οδηγεί την διαδικασία της βελτιστοποίησης αντιπροσωπεύει την εμπειρική γνώση του σωματιδίου καθώς και την ανταλλασσόμενη πληροφορία από τα γειτονικά του σωματίδια. Η ταχύτητα του εκάστοτε σωματιδίου σε κάθε επανάληψη είναι το άθροισμα τριών παραγόντων: της προηγούμενης ταχύτητας του, της κίνησης προς το ατομικό του βέλτιστο και της κίνησης προς το καθολικό βέλτιστο. Η ταχύτητα και η θέση του κάθε σωματιδίου περιγράφονται από τις εξισώσεις (14) και (15), αντίστοιχα.

$$v_l^{(k+1)} = w \cdot v_l^{(k)} + a_1 \cdot r_1 (\Delta x_l^{Pbest} - \Delta x_l^{(k)}) + a_2 \cdot r_2 (\Delta x^{Gbest} - \Delta x_l^{(k)}) \quad (14)$$

$$\Delta x_l^{(k+1)} = \Delta x_l^{(k)} + v_l^{(k+1)} \quad (15)$$

Όπου $v_l^{(k)}$ είναι η ταχύτητα του l -οστού σωματιδίου την k -οστή επανάληψη, w είναι το βάρος αδράνειας, a_1 και a_2 είναι μεταβλητές επιτάχυνσης, r_1 και r_2 είναι τυχαίες μεταβλητές στο διάστημα $[0,1]$, Δx_l^{Pbest} είναι η καλύτερη προηγούμενη λύση που αντιστοιχεί στο l -οστό σωματίδιο και Δx^{Gbest} είναι η καλύτερη καθολική λύση. Η δομή του κάθε σωματιδίου που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή τη μελέτη παρουσιάζεται στην Εικόνα 8.



Εικόνα 8. Δομή σωματιδίου.

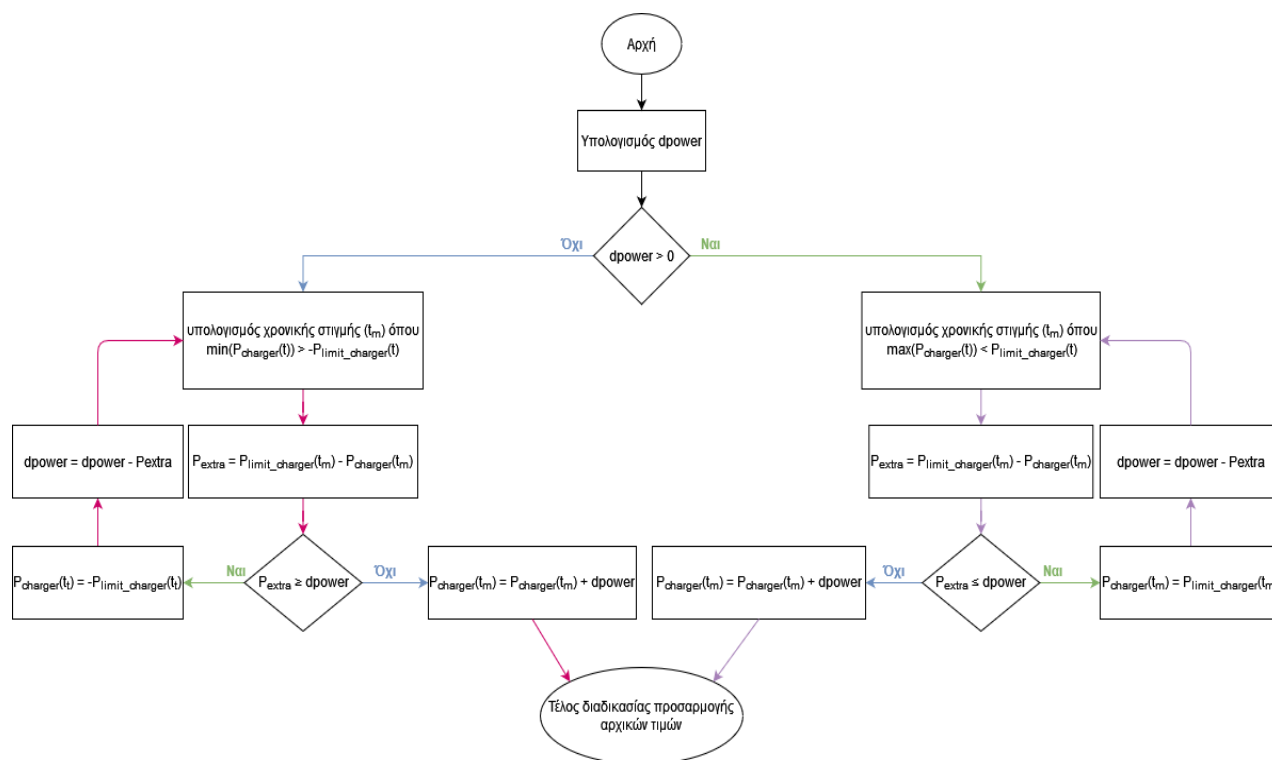
2.4 Αρχικοποίηση τιμών του PSO

Πραγματοποιήθηκε κατάλληλη αρχικοποίηση των σωματιδίων του PSO, ώστε να μπορεί η μέθοδος συγκλίνει πιο γρήγορα στην λύση και με μεγαλύτερη αποδοτικότητα. Η αρχικοποίηση των τιμών ισχύος του φορτιστή του i -οστού HO δίνονται από την εξίσωση (16).

$$P_{initial}(i, t) = \bar{P}(i) + k \cdot \frac{\bar{EP} - EP(t)}{\max(|\bar{EP} - EP|)}, \quad t_{Arr}(i) \leq t < t_{Dep}(i), \quad \forall i \in EV_{CS} \quad (16)$$

Όπου, $\bar{P}(i)$ είναι η μέση τιμή ισχύος, την οποία χρειάζεται το i -οστό HO για να φορτίσει στο επιθυμητό επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας κατά την παραμονή του στο πάρκινγκ, $EP(t)$ είναι η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας την χρονική στιγμή t , \bar{EP} είναι η μέση τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας κατά την παραμονή του i -οστού HO στο πάρκινγκ και k είναι ένας συντελεστής που ορίζεται από τον χειριστή του συστήματος.

Στις περιπτώσεις που ορισμένες τιμές της ισχύος ξεπερνούν τα όρια ισχύος του φορτιστή τότε η λύση δεν γίνεται δεκτή και το σωματίδιο δεν βοηθά στη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Για να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, υλοποιούνται η παρακάτω διαδικασία (Διάγραμμα 2).



Διάγραμμα 2. Προσαρμογή αρχικών τιμών των σωματιδίων.

Η μεταβλητή $dpower$ που χρησιμοποιείται στο Διάγραμμα 2 είναι το αθροιστικό πλεόνασμα του ορίου ισχύος του φορτιστή για ολόκληρη την περίοδο φόρτισης του. Αν η μεταβλητή $dpower$ είναι θετική τότε η αναζήτηση για την αναδιανομή ισχύος ίσης με τη $dpower$ γίνεται τις χρονικές στιγμές όπου η ισχύς φόρτισης είναι θετική (λειτουργία φόρτισης). Αρχικά αναζητούνται οι χρονικές στιγμές, t_m , όπου η ισχύς φόρτισης είναι μέγιστη αλλά μικρότερη από το ανώτερο όριο ισχύος του φορτιστή. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η διαφορά (P_{extra}) από το ανώτερο όριο ισχύος του φορτιστή, τη χρονική στιγμή t_m , από τη μέγιστη ισχύ φόρτισης που βρέθηκε, τη χρονική στιγμή t_m . Ο λόγος που αναζητούνται αυτές οι χρονικές περιόδους για να προστεθεί παραπάνω ισχύς φόρτισης βασίζεται στο γεγονός ότι η αρχικοποίηση των τιμών έγινε σε συνδυασμό με τη συνολική ισχύ και την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας. Ως εκ τούτου, τις χρονικές στιγμές που τους έχει ανατεθεί μεγάλη ισχύς φόρτισης, είναι και οι χρονικές στιγμές που η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας έχει την μικρότερη τιμή. Αν η τιμή της διαφοράς είναι μεγαλύτερη από την τιμή της $dpower$, τότε στην ισχύ φόρτισης την χρονική στιγμή t_m προστίθεται η τιμή της $dpower$ και η διαδικασία τερματίζει. Ειδικά, ανατίθεται στην ισχύ φόρτισης τη χρονική στιγμή t_m το μέγιστο όριο ισχύος στον φορτιστή τη χρονική στιγμή t_m , αφαιρείται η τιμή της P_{extra} από την τιμή της $dpower$ και ξεκινάει η αναζήτηση για νέες χρονικές στιγμές t_m . Αντίστοιχη διαδικασία πραγματοποιείται στην περίπτωση που η τιμή της $dpower$ είναι αρνητική.

2.5 Λαμβάνοντας υπόψη το όριο ισχύος του μετασχηματιστή του πάρκινγκ

Όταν το όριο ισχύος (ονομαστική ισχύς) του μετασχηματιστή του πάρκινγκ δεν λαμβανόταν υπόψη στην μέθοδο φόρτισης τότε το όριο ισχύος του φορτιστή, $P_{\text{limit}}^{\text{Charger}}$, ήταν ίσο με το μέγιστο όριο ισχύος του φορτιστή, αν ο περιορισμός ισχύος του on-board μετατροπέα ισχύος του ΗΟ ήταν ίσος ή και μεγαλύτερος από το μέγιστο όριο ισχύος του φορτιστή. Ειδικά, το όριο ισχύος του φορτιστή ήταν ίσο με το μέγιστο όριο του on-board μετατροπέα ισχύος ($P_{\text{Max}}^{\text{EV}}$) του ΗΟ όταν οι περιορισμοί ισχύος φόρτισης του ΗΟ δεν επέτρεπαν να φορτίσει με μεγαλύτερο ρυθμό. Ο υπολογισμός του ορίου ισχύος του φορτιστή του i -οστού ΗΟ παρουσιάζεται στην εξίσωση (17).

$$P_{\text{limit}}^{\text{Charger}}(i,t) = \begin{cases} P_{\text{Max}}^{\text{Charger}}, & P_{\text{Max}}^{\text{Charger}} \leq P_{\text{Max}}^{\text{EV}} \\ P_{\text{Max}}^{\text{EV}}, & P_{\text{Max}}^{\text{Charger}} > P_{\text{Max}}^{\text{EV}} \end{cases}, \quad t_{\text{Arr}}(i) \leq t < t_{\text{Dep}}(i), \quad \forall i \in \text{EV}_{\text{CS}} \quad (17)$$

Για να αποφευχθεί η παραβίαση του ορίου ισχύος του μετασχηματιστή του πάρκινγκ, P_{TF} , τα όρια ισχύος των φορτιστών υπολογίστηκαν εκ νέου. Κάθε χρονική στιγμή υπολογιζόταν το συνολικό άθροισμα ισχύος φόρτισης, όπως φαίνεται στην εξίσωση (18) και στην συνέχεια έγινε ο νέος καθορισμός ορίων ισχύος του κάθε φορτιστή όπως δίνεται στην εξίσωση (19).

$$P_{\text{Max}}(t) = \sum_i P_{\text{Max}}^{\text{Charger}}(i,t) \quad (18)$$

$$P_{\text{limit}}^{\text{Charger}}(i,t) = \min\left(\frac{P_{\text{Max}}^{\text{Charger}}(i,t)}{P_{\text{Max}}(t)} \cdot P_{\text{TF}}, P_{\text{Max}}^{\text{Charger}}(i,t)\right), \quad t_{\text{Arr}}(i) \leq t < t_{\text{Dep}}(i), \quad \forall i \in \text{EV}_{\text{CS}} \quad (19)$$

2.6 Λαμβάνοντας υπόψη το φορτίο του ηλεκτρικού δικτύου

Για να μειωθεί η συνεισφορά του πάρκινγκ στην υπερφόρτιση του δικτύου, εφαρμόστηκε μια ταρίφα στην τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, όταν το φορτίο του ηλεκτρικού δικτύου υπερέβαινε το 80% της μέγιστης τιμής του φορτίου που μπορεί να αντέξει ο μετασχηματιστής του κύριου τροφοδότη του δικτύου διανομής. Η ταρίφα που εφαρμόστηκε υπολογίστηκε σύμφωνα με την εξίσωση (20). Η νέα τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας μετά την εφαρμογή της ταρίφας δίνεται στην εξίσωση (21). Η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας θεωρήθηκε ίδια για την φόρτιση και εκφόρτιση των ΗΟ.

$$\text{tariff}(t) = \begin{cases} 1 + (L(t) - 0.8 \cdot L_{\text{max}}^{\text{grid}}) / L_{\text{max}}^{\text{grid}}, & L(t) > 0.8 \cdot L_{\text{max}}^{\text{grid}} \\ 1, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (20)$$

$$EP_t(t) = EP(t) \cdot \text{tariff}(t) \quad (21)$$

Όπου, $L(t)$ είναι το φορτίο του ηλεκτρικού δικτύου την χρονική στιγμή t και L_{\max}^{grid} είναι το μέγιστο φορτίο που μπορεί να αντέξει ο μετασχηματιστής του κύριου τροφοδότη του δικτύου διανομής.

Οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και το ημερήσιο φορτίο του ηλεκτρικού δικτύου εξήχθησαν με κατάλληλες προσαρμογές από δεδομένα του Ανεξάρτητου Διαχειριστή Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ) [50].

Κεφάλαιο 3

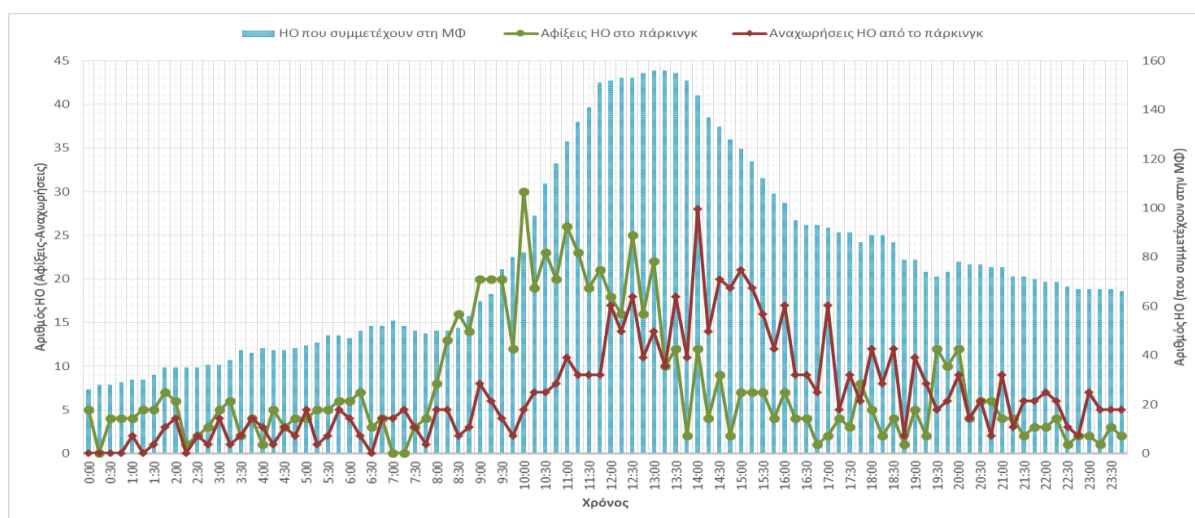
Αποτελέσματα Προσομοίωσης

3.1 Δεδομένα εισόδου της εξεταζόμενης μεθοδολογίας φόρτισης

Το αντικείμενο μελέτης αυτής της εργασίας είναι ένα πάρκινγκ στα Χανιά. Το συγκεκριμένο πάρκινγκ δεν διαθέτει προς το παρόν σταθμούς φόρτισης, αλλά θεωρείται ότι θα μπορούσαν να είναι μια μελλοντική επένδυση. Οι αφίξεις-αναχωρήσεις των οχημάτων καθώς και οι χρόνοι παραμονής τους στο πάρκινγκ έχουν εξαχθεί από πραγματικά δεδομένα που δόθηκαν από το συγκεκριμένο πάρκινγκ. Τα υπόλοιπα δεδομένα που ήταν απαραίτητα για την προσομοίωση, δημιουργήθηκαν έτσι ώστε να ακολουθούν όσο γίνεται πιο ρεαλιστικά τις καταστάσεις φόρτισης των ΗΟ. Ο χρονικός ορίζοντας της προσομοίωσης λειτουργίας του πάρκινγκ χωρίστηκε σε χρονικά διαστήματα των $\Delta t=15$ λεπτών. Δημιουργήθηκαν και μελετήθηκαν έξι σενάρια για να αξιολογήσουν την αποδοτικότητα της προτεινόμενης μεθόδου φόρτισης.

3.1.1 Εκτίμηση του επιθυμητού επιπέδου φόρτισης

Οι αφίξεις και αναχωρήσεις των ΗΟ καθώς και ο αριθμός των ΗΟ που συμμετείχαν στην προτεινόμενη μέθοδο φόρτισης απεικονίζονται στο Διάγραμμα 3.



Διάγραμμα 3. Αφίξεις, αναχωρήσεις και αριθμός ΗΟ που συμμετέχουν στην μέθοδο φόρτισης.

Το πάρκινγκ είναι ανοιχτό για το κοινό από τις 8:00 έως τις 00:00 εκτός για τους τακτικούς πελάτες που έχουν πρόσβαση όλο το 24ωρο. Κάποιος/α που είχε παρκάρει πριν τις 00:00 μπορεί να αποχωρήσει από το πάρκινγκ ακόμα και εάν το πάρκινγκ έχει κλείσει. Θεωρήθηκε ότι υπήρχαν ήδη 40 ΗΟ στο πάρκινγκ κατά την έναρξη της χρονικής περιόδου της προσομοίωσης.

Οι περισσότεροι οδηγοί ΗΟ είναι πιο πιθανό να φορτίζουν τα οχήματά τους σπίτι τους. Επομένως, πολλοί οδηγοί θα ξεκινούν από το σπίτι τους με πλήρως φορτισμένη ή με μεγάλο επίπεδο φόρτισης των μπαταριών των ΗΟ τους. Στην [35] οι συγγραφείς εξήγαγαν από ρεαλιστικά μοτίβα κίνησης και παρκαρίσματος οχημάτων ότι το 95% των οχημάτων (συμβατικών) που μελέτησαν είχαν ταξιδεύσει λιγότερο από 100 χιλιόμετρα πριν την άφιξή τους στα πάρκινγκ. Επιπλέον, σύμφωνα με την έρευνα που πραγματοποιήθηκε [46], το 85.2% των οχημάτων (συμβατικών) που μελετήθηκαν έκαναν λιγότερο από 24 χιλιόμετρα την ημέρα. Το Nissan Leaf με απόδοση 161 Wh/km [51] μπορεί να καλύψει, θεωρητικά, την απόσταση των 24 χιλιομέτρων με το 10% της μπαταρίας του. Στην πραγματικότητα η απόδοση ενός ΗΟ εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η οδηγική συμπεριφορά, οι καιρικές συνθήκες κ.ά. Κατά συνέπεια, ένα πλήρως φορτισμένο αμάξι έχει αρκετή ενέργεια για να καλύψει τα καθημερινά δρομολόγια των περισσότερων οδηγών. Η κατανομή του επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας που έχει κάθε ΗΟ όταν εισέρχεται στο εξεταζόμενο πάρκινγκ απεικονίζεται στο Διάγραμμα 4 και έχει προκύψει λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω δεδομένα.



Διάγραμμα 4. Πιθανότητα του κάθε επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας του ΗΟ κατά την άφιξη του στο πάρκινγκ.

3.1.2 Εκτίμηση του επιθυμητού επιπέδου φόρτισης

Εξετάστηκαν δύο παράγοντες για τον υπολογισμό του επιθυμητού επιπέδου φόρτισης κατά την αναχώρηση των ΗΟ από το πάρκινγκ. Αυτοί είναι, η απόσταση από το επόμενο σημείο φόρτισης (Next Charging Point) και το άγχος αυτονομίας (Range Anxiety). Η απόσταση από το επόμενο σημείο φόρτισης χωρίστηκε σε τρεις κατηγορίες: 1)"μικρής απόστασης", όπου το επιθυμητό επίπεδο φόρτισης πρέπει να είναι ίσο ή μεγαλύτερο από το 40% του μέγιστου επιπέδου φόρτισης, 2)"μεσαίας απόστασης", όπου το επιθυμητό επίπεδο φόρτισης πρέπει να είναι ίσο ή μεγαλύτερο από το 60% του μέγιστου επιπέδου φόρτισης και 3)"μεγάλης απόστασης", όπου το επιθυμητό επίπεδο φόρτισης πρέπει να είναι ίσο ή μεγαλύτερο από το 80% του μέγιστου επιπέδου φόρτισης. Σύμφωνα με την έρευνα που πραγματοποιήθηκε [46], η πλειοψηφία των οδηγών έκαναν μικρές αποστάσεις στην διάρκεια μιας μέρας. Έχοντας αυτό ως δεδομένο, οι πιθανότητες για να είναι η απόσταση από το επόμενο σημείο φόρτισης "μικρή", "μεσαία" ή "μεγάλη" θεωρήθηκαν ίσες με 60%, 30% και 10%, αντίστοιχα. Επιπλέον λόγω του ότι ένα πλήρως ΗΟ μπορεί να ικανοποιήσει τα καθημερινά δρομολόγια της πλειοψηφίας των οδηγών, μπορεί να θεωρηθεί ότι θα υπάρχει ένα μικρό ποσοστό των οδηγών που θα έχει πολύ άγχος αυτονομίας. Επίσης, είναι δύσκολο να υπολογιστεί με ακρίβεια πόσα χιλιόμετρα αντιστοιχούν στην ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στις μπαταρίες του ΗΟ καθώς πολλοί παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν την απόδοση της μπαταρίας όπως η οδικική συμπεριφορά, καιρικές συνθήκες, η διαδρομή κ.ά. Οπότε θα προκύψουν πολλοί οδηγοί που παρόλο που θα ξέρουν ότι το επίπεδο φόρτισης των ΗΟ τους είναι αρκετό, θα επιθυμούν να φορτίσουν το ΗΟ τους λίγο παραπάνω για ασφάλεια. Έτσι προέκυψε ότι οι πιθανότητες για τους οδηγούς που θα έχουν λίγο, μέτριο και πολύ άγχος αυτονομίας είναι ίσες με 25%, 60% και 15%, αντίστοιχα. Όσο πιο μακριά είναι το επόμενο σημείο φόρτισης και πιο μεγάλο το άγχος αυτονομίας, τόσο μεγαλύτερο θα είναι και το επιθυμητό επίπεδο φόρτισης του ΗΟ. Το επιθυμητό επίπεδο φόρτισης υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση (22).

$$SoC_t(i) = SoC_{NCP}(i) + SoC_{RA}(i) \quad \forall i \in EV$$

with

$$SoC_{NCP}(i) = \begin{cases} 40 (\%), & \text{μικρή απόσταση για το NCP} \\ 60 (\%), & \text{μεσαία απόσταση για το NCP} \\ 80 (\%), & \text{μεγάλη απόσταση για το NCP} \end{cases} \quad SoC_{RA}(i) = \begin{cases} 7 \cdot \text{rand}(i) (\%), & \text{χαμηλό RA} \\ 14 \cdot \text{rand}(i) (\%), & \text{μέτριο RA} \\ 20 \cdot \text{rand}(i) (\%), & \text{υψηλό RA} \end{cases} \quad (22)$$

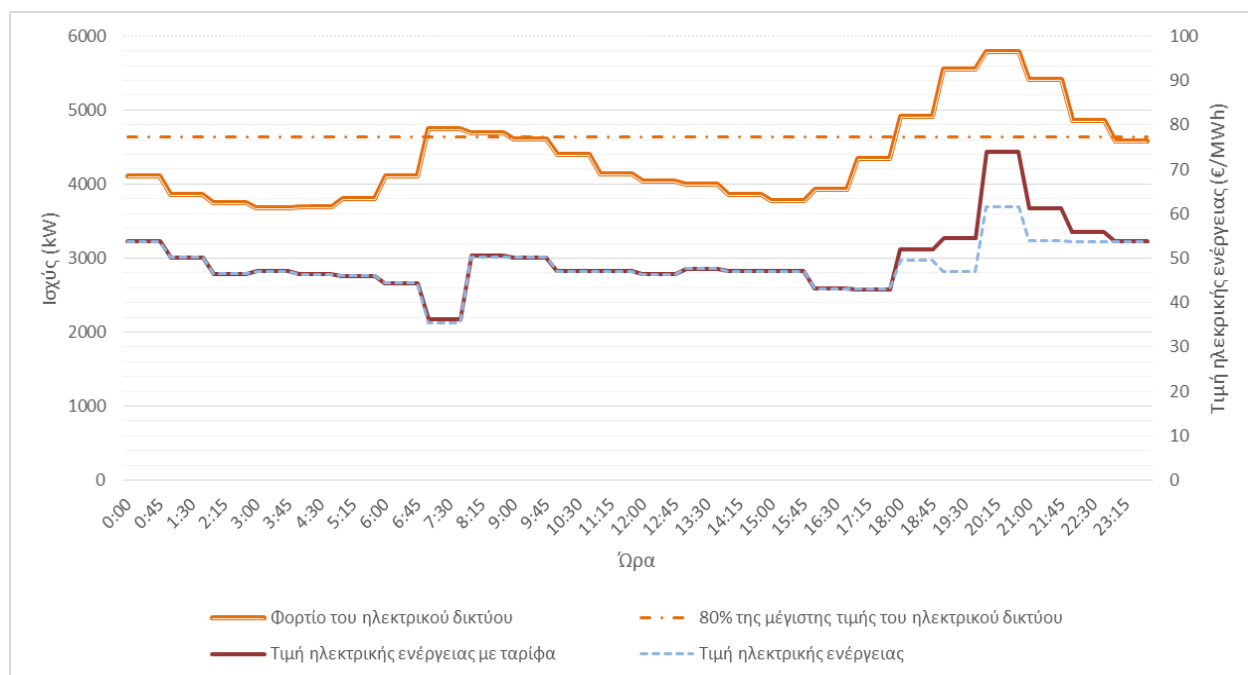
3.1.3 Επιλογή μοντέλου ηλεκτρικού οχήματος

Τρία αντιπροσωπευτικά μοντέλα ΗΟ επιλέχθηκαν για την προσομοίωση και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους απεικονίζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Ποσοστά μοντέλων ΗΟ, χωρητικότητα μπαταρίας και περιορισμός ισχύος του on-board μετατροπέα ισχύος.

Μοντέλο ΗΟ	Ποσοστό τύπου ΗΟ	Χωρητικότητα μπαταρίας (kWh)	Μέγιστη ισχύς on-board μετατροπέα ισχύος (kW)
Nissan Leaf [51]	0.45	40	3.6
Tesla Model 3 Standard Range Plus [52]	0.35	50	11
BMW i3 120 Ah [53]	0.2	42.2	11

Το φορτίο του ηλεκτρικού δικτύου και η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας πριν και μετά την εφαρμογή της προτεινόμενης ταρίφας απεικονίζονται στο Διάγραμμα 5. Η νέα τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας με την ενσωματωμένη ταρίφα χρησιμοποιήθηκε στη μέθοδο βελτιστοποίησης για την «ανακούφιση» του δικτύου. Η τελική κοστολόγηση της φόρτισης των ΗΟ έγινε με την πραγματική τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς την ταρίφα.



Διάγραμμα 5. Φορτίο του ηλεκτρικού δικτύου και τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας με και χωρίς την εφαρμογή της ταρίφας.

3.2 Σενάρια φόρτισης

Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζεται η εφαρμογή και τα αποτελέσματα της προτεινόμενης μεθόδου φόρτισης σύμφωνα με την μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2. Υλοποιήθηκαν συνολικά έξι σενάρια για να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου φόρτισης. Στον Πίνακα 3 απεικονίζονται τα βασικά χαρακτηριστικά του κάθε σεναρίου. Τα

αποτελέσματα της μεθόδου φόρτισης συγκρίθηκαν με δυο βασικές συμβατικές μεθόδους φόρτισης όπου τα ΗΟ φόρτιζαν με την μέγιστη ισχύ που επιτρέπει ο περιορισμός ισχύος του on-board μετατροπέα ισχύος τους (Σ1) ή φορτίζουν με την απαιτούμενη σταθερή ισχύ που χρειάζεται για να επιτύχουν το επιθυμητό επίπεδο φόρτισης κατά την αναχώρησή τους (Σ2). Στα σενάρια Σ1 και Σ2, η προτεινόμενη μέθοδος φόρτισης, η προτεινόμενη ταρίφα και ο περιορισμός ισχύος στο πάρκινγκ δεν εφαρμόστηκαν. Επίσης, δεν αποτελούσε επιλογή η εκφόρτιση των ΗΟ στα Σ1 και Σ2. Στα σενάρια 3 (Σ3), 4 (Σ4), 5 (Σ5) και 6 (Σ6) εφαρμόστηκε η προτεινόμενη μέθοδος φόρτισης. Στα Σ4 και Σ6, εφαρμόστηκε η προτεινόμενη ταρίφα στην τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας όπως υπολογίστηκε στη εξίσωση (20) και (21). Επιπροσθέτως στα Σ5 και Σ6, θεωρήθηκε όριο ισχύος η ονομαστική τιμή ισχύος του μετασχηματιστή του πάρκινγκ, η οποία θεωρήθηκε ίση με 400 kVA.

Πίνακας 3. Εξεταζόμενα σενάρια.

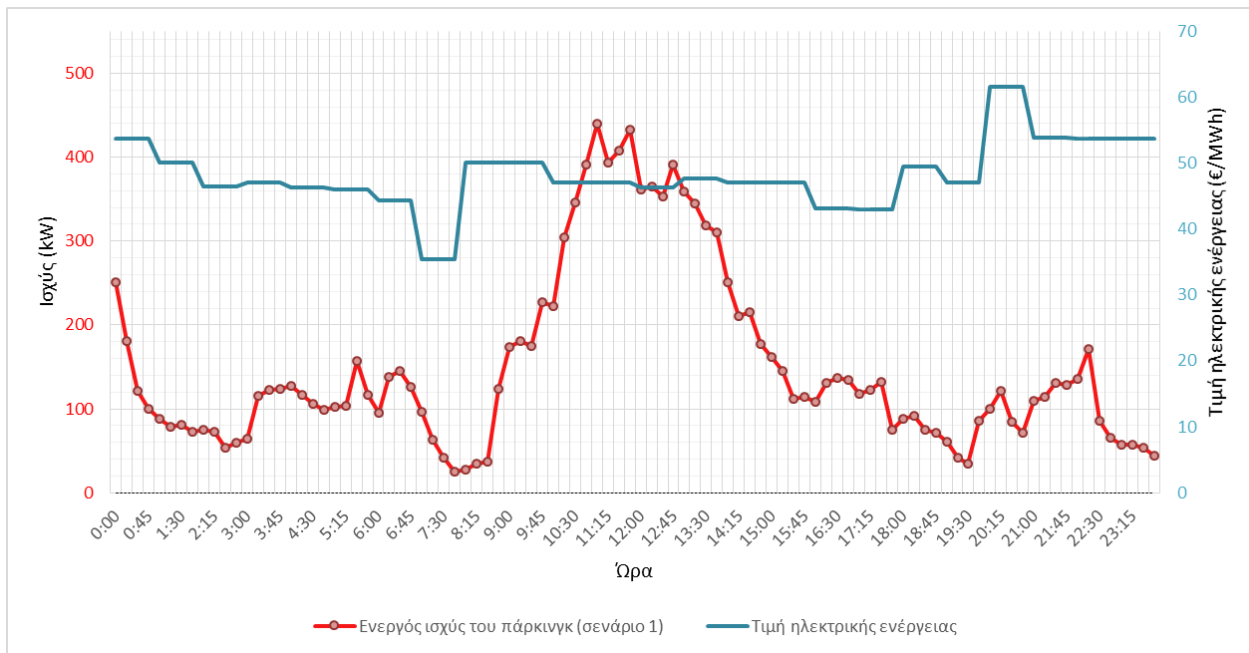
Σενάριο	Ταρίφα	Όριο ισχύος του μετασχηματιστή του πάρκινγκ	Προτεινόμενη μέθοδος φόρτισης
Σ1	Όχι	Όχι	Όχι
Σ2	Όχι	Όχι	Όχι
Σ3	Όχι	Όχι	Ναι
Σ4	Ναι	Όχι	Ναι
Σ5	Όχι	Ναι	Ναι
Σ6	Ναι	Ναι	Ναι

Συνολικά, 365 ΗΟ συμμετείχαν στη μέθοδο φόρτισης κατά την διάρκεια του υπό μελέτη 24ώρου. Η συνολική απαιτούμενη ενέργεια για να φτάσουν το επιθυμητό επίπεδο φόρτισης ήταν 3663 kWh (σε όλα τα σενάρια). Ο χρόνος χωρίστηκε σε διαστήματα των 15 λεπτών.

3.3 Σενάρια με τις βασικές μεθόδους φόρτισης

3.3.1 Φόρτιση στο σενάριο 1

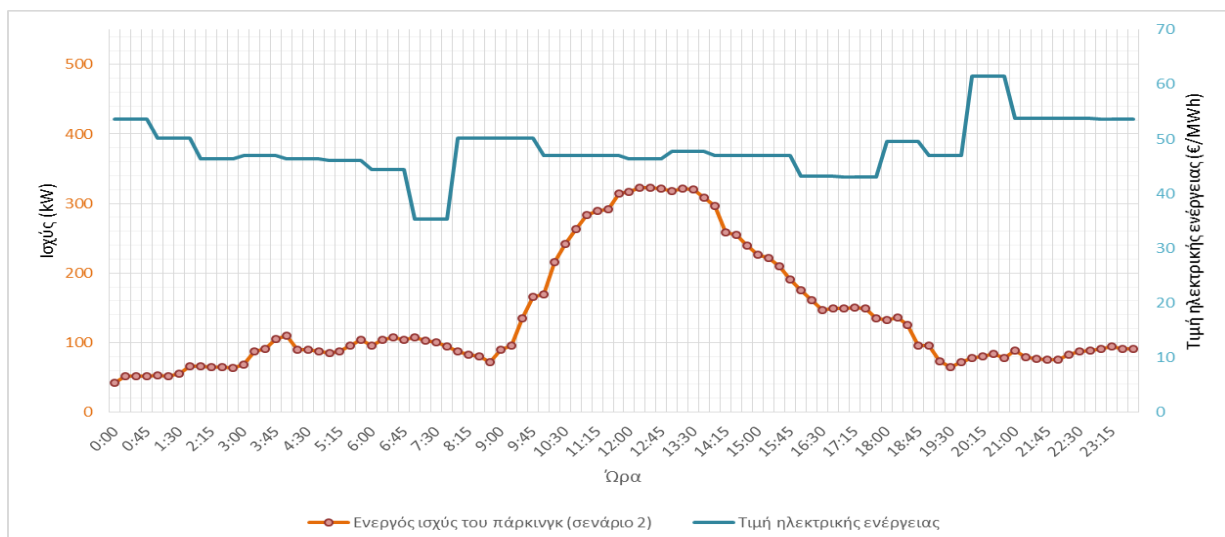
Στο σενάριο 1, το κόστος φόρτισης ήταν 176,85 €. Η μέγιστη και ελάχιστη τιμή της ενεργού ισχύος του πάρκινγκ ήταν 440 kW στις 11:00 και 25 kW στις 7:45, αντίστοιχα. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από το Διάγραμμα 6, η ενεργός ισχύς του πάρκινγκ δεν επηρεάζεται από την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας όπως ήταν αναμενόμενο.



Διάγραμμα 6. Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και ενεργού ισχύος του πάρκινγκ στο σενάριο 1.

3.3.2 Φόρτιση στο σενάριο 2

Στο σενάριο 2, το κόστος φόρτισης ήταν 175,24 €. Η μέγιστη και ελάχιστη τιμή της ενεργού ισχύος του πάρκινγκ ήταν 323 kW στις 12:15 και 45 kW στις 00:00, αντίστοιχα. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο Διάγραμμα 7, η ενεργός ισχύς του πάρκινγκ δεν επηρεάζεται από την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας ούτε σε αυτό το σενάριο. Επίσης, παρατηρείται ότι η κυματομορφή της ενεργού ισχύος σε σχέση με αυτήν από το Σ1 είναι η πιο ομαλή. Αυτό συμβαίνει καθώς φορτίζοντας τα ΗΟ με το μέσο όρο της ισχύος για να επιτύχουν το επιθυμητό επίπεδο φόρτισης, η συνολική ισχύ φόρτισης είναι πιο ομοιόμορφα κατανομημένη στο χρόνο σε σχέση με το Σ1.

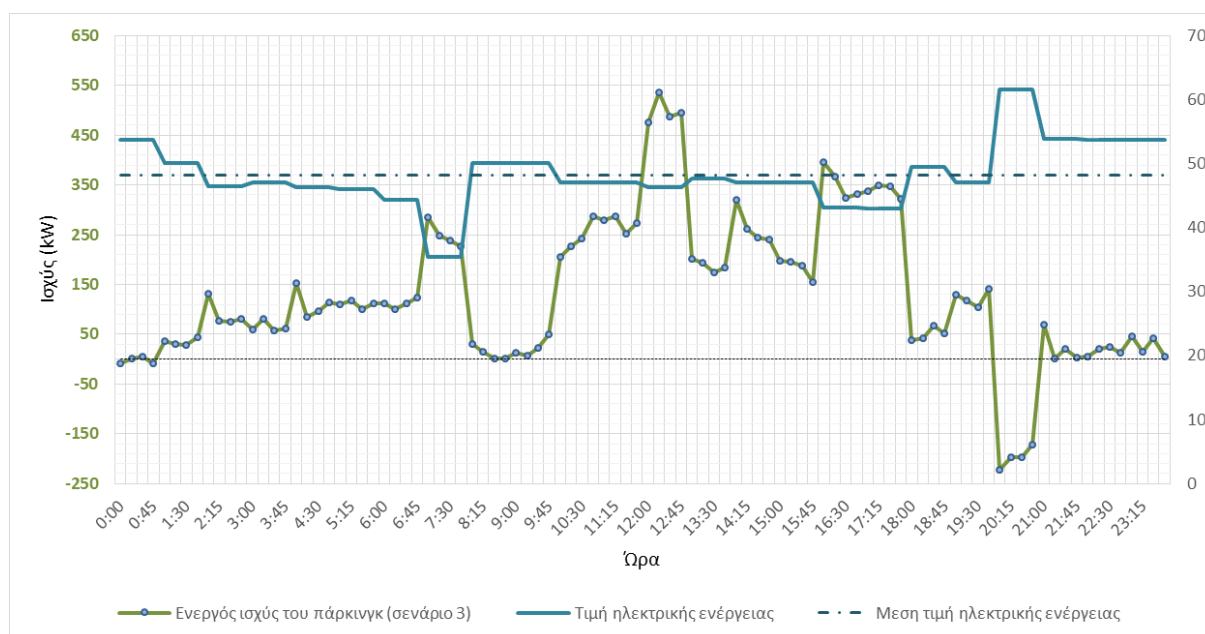


Διάγραμμα 7. Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και ενεργού ισχύος του πάρκινγκ στο σενάριο 2.

3.4 Σενάρια με την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου φόρτισης

3.4.1 Φόρτιση στο σενάριο 3

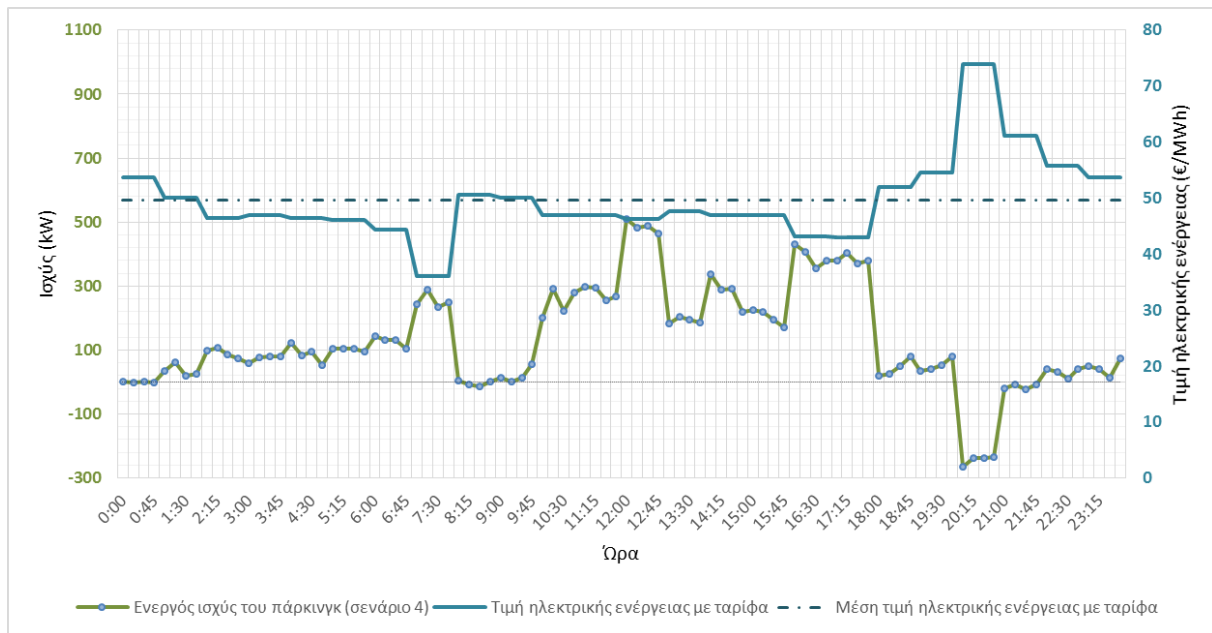
Στο σενάριο 3, το κόστος φόρτισης ήταν 161,36 €. Η ενέργεια που αγοράστηκε από το δίκτυο ήταν ίση με 3864 kWh, ενώ η ενέργεια που πουλήθηκε στο δίκτυο ήταν ίση με 201 kWh. Η μέγιστη τιμή της ενεργού ισχύος ήταν ίση με 536 kW και πραγματοποιήθηκε στις 12:15. Αν και η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας την συγκεκριμένη χρονική περίοδο δεν ήταν η πιο χαμηλή ημερησίως, ήταν η ώρα που φορτίζουν τα περισσότερα ΗΟ (Διάγραμμα 3). Η ελάχιστη τιμή της κατανάλωσης ισχύος πραγματοποιείται στις 20:00 όπου η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είχε την υψηλότερη τιμή της ημέρας και ήταν ίση με -222 kW (η αρνητική τιμή ισχύος εκφράζει την απόδοση ενέργειας στο δίκτυο). Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η ισχύς φόρτισης του πάρκινγκ συσχετίζεται με τις αυξομειώσεις της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας σε αυτό το σενάριο.



Διάγραμμα 8. Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και ενεργού ισχύος του πάρκινγκ στο σενάριο 3.

3.4.2 Φόρτιση στο σενάριο 4

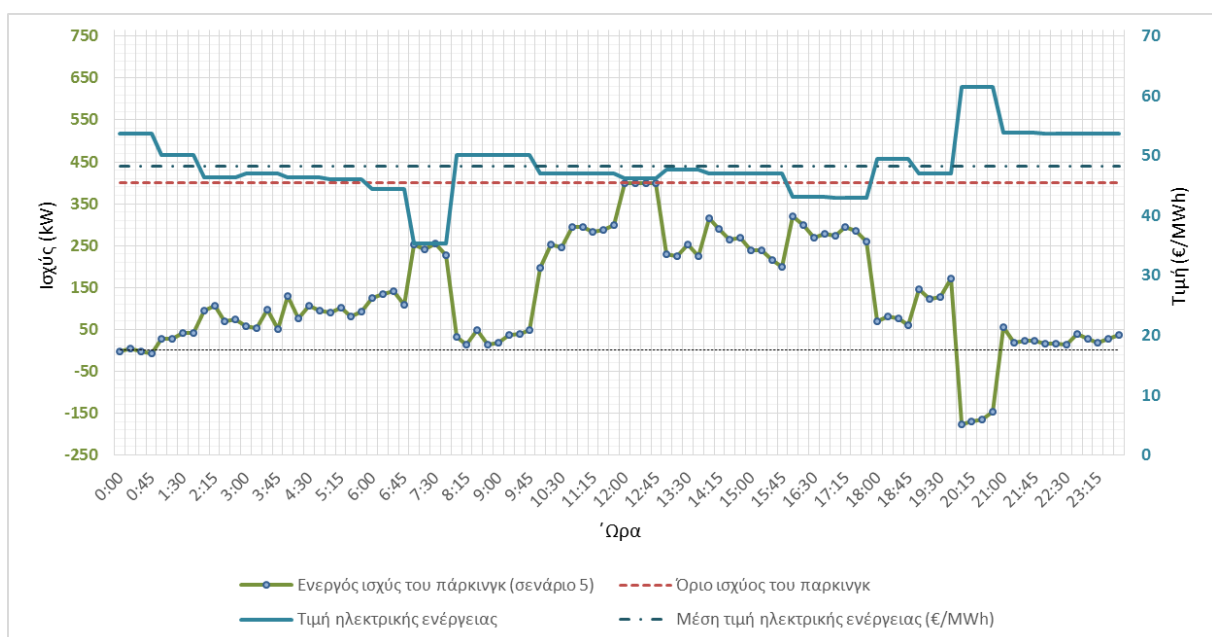
Στο σενάριο 4, το κόστος φόρτισης ήταν 160,3 €. Η ενέργεια που αγοράστηκε από το δίκτυο ήταν ίση με 3926 kWh, ενώ η ενέργεια που πουλήθηκε στο δίκτυο ήταν ίση με 263 kWh. Η μέγιστη τιμή της κατανάλωσης ισχύος ήταν ίση με 510 kW και πραγματοποιήθηκε στις 12:00 ενώ η ελάχιστη τιμή της ήταν ίση με -264 kW και πραγματοποιήθηκε στις 20:00. Η ισχύς φόρτισης του πάρκινγκ συσχετίζεται και σε αυτό το σενάριο με τις αυξομειώσεις της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας.



Διάγραμμα 9. Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και ενεργού ισχύος του πάρκινγκ στο σενάριο 4.

3.4.3 Φόρτιση στο σενάριο 5

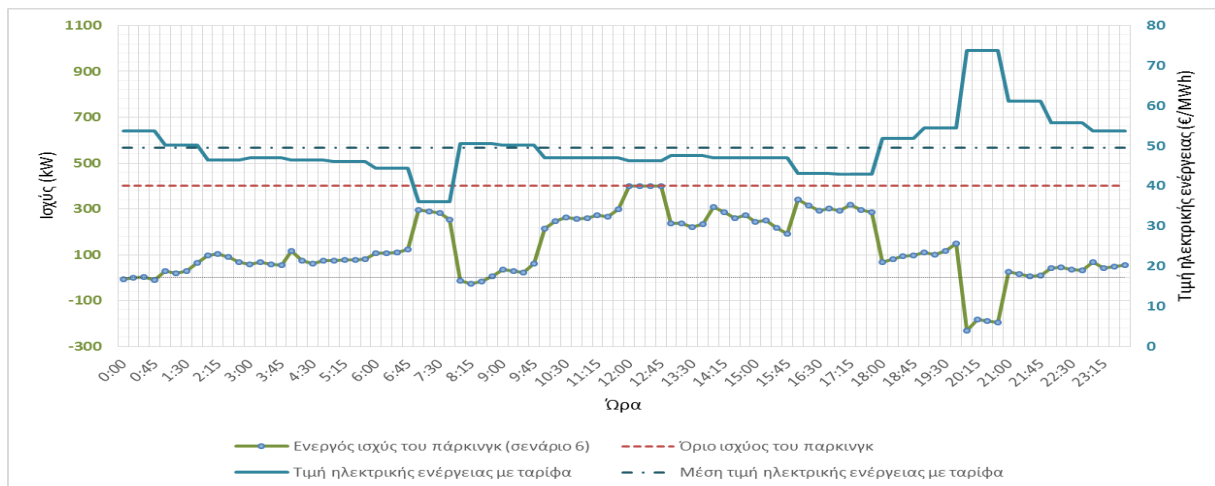
Στο σενάριο 5, το κόστος φόρτισης ήταν 162,65 €. Η ενέργεια που αγοράστηκε από το δίκτυο ήταν ίση με 3831 kWh, ενώ η ενέργεια που πουλήθηκε στο δίκτυο ήταν ίση με 168 kWh. Η μέγιστη τιμή της κατανάλωσης ισχύος είναι ίση με 400 kW (ονομαστική τιμή του μετασχηματιστή του πάρκινγκ) και πραγματοποιήθηκε την περίοδο 12:00-12:45 ενώ η ελάχιστη ήταν ίση με -176 kW και πραγματοποιήθηκε στις 20:00. Η ισχύς του πάρκινγκ συσχετίζεται και σε αυτό το σενάριο με τις αυξομειώσεις της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας.



Διάγραμμα 10. Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και ενεργού ισχύος του πάρκινγκ στο σενάριο 5.

3.4.4 Φόρτιση στο σενάριο 6

Στο σενάριο 6, το κόστος φόρτισης ήταν 161,87 €. Η ενέργεια που αγοράστηκε από το δίκτυο ήταν ίση με 3880 kWh, ενώ η ενέργεια που πουλήθηκε στο δίκτυο ήταν ίση με 217 kWh. Η μέγιστη τιμή της κατανάλωσης ισχύος είναι ίση με 400 kW (ονομαστική τιμή του μετασχηματιστή του πάρκινγκ) και πραγματοποιήθηκε την περίοδο 12:00-12:45, ενώ η ελάχιστη ήταν ίση με -230 kW και πραγματοποιήθηκε στις 20:00. Η ισχύς φόρτισης του πάρκινγκ συσχετίζεται και σε αυτό το σενάριο με τις αυξομειώσεις της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας.



Διάγραμμα 11. Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και ενεργού ισχύος του πάρκινγκ στο σενάριο 6.

3.5 Σύγκριση των εξεταζόμενων σεναρίων

Το κόστος φόρτισης μειώθηκε σημαντικά όταν εφαρμόστηκε η προτεινόμενη μέθοδος φόρτισης σε σύγκριση με αυτό των βασικών (κλασικών) μεθόδων φόρτισης. Η ενέργεια που αγοράστηκε και πουλήθηκε αντίστοιχα στο ηλεκτρικό δίκτυο καθώς και το κόστος φόρτισης του κάθε σεναρίου παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Ενέργεια που αγοράστηκε και πουλήθηκε στο δίκτυο, καθαρή ανταλλασσόμενη ενέργεια και κόστη φόρτισης.

Σενάρια	Ενέργεια που καταναλώθηκε από το δίκτυο (kWh)	Ενέργεια που πουλήθηκε από το δίκτυο (kWh)	Καθαρή ανταλλασσόμενη ενέργεια (kWh)	Κόστη φόρτισης (€)
Σ1	3663	-	3663	176.85
Σ2	3663	-	3663	175.24
Σ3	3864	201	3663	161.36
Σ4	3926	263	3663	160.3
Σ5	3831	168	3663	162.65
Σ6	3880	217	3663	161.87

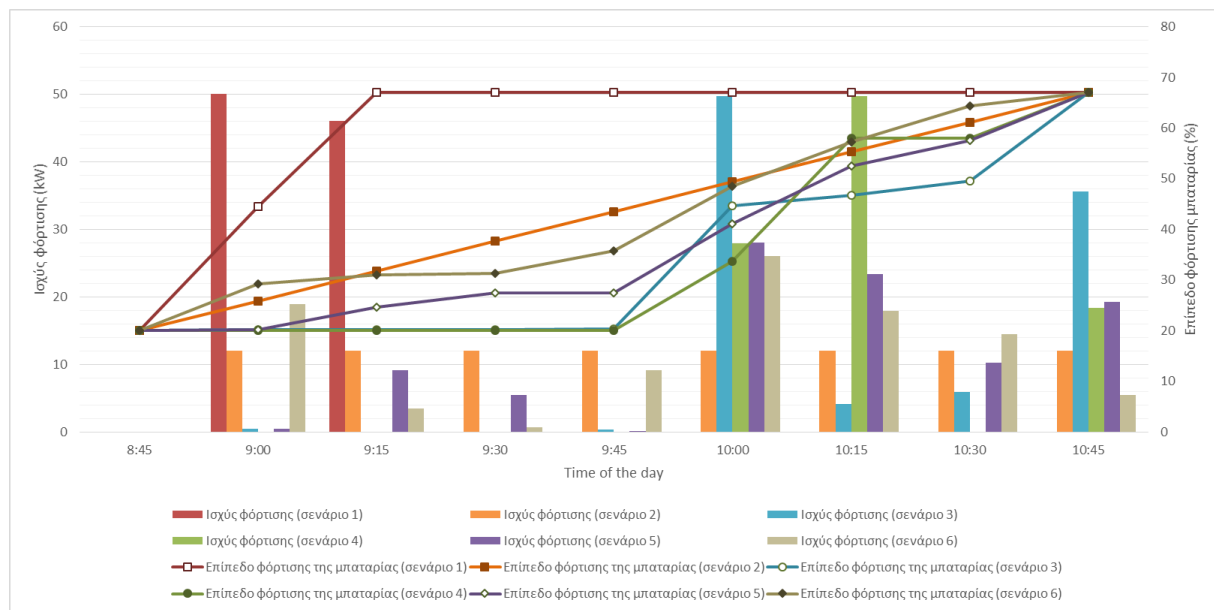
Η σύγκριση των κοστών φόρτισης των σεναρίων όπου εφαρμόστηκε η προτεινόμενη μέθοδος φόρτισης απεικονίζονται στον Πίνακα 5. Το κόστος του σεναρίου 4 θεωρήθηκε ως σημείο αναφοράς για τον υπολογισμό των συγκρίσεων. Οι θετικές τιμές αντιπροσωπεύουν την μείωση του κόστους φόρτισης.

Πίνακας 5. Μείωση κόστους φόρτισης (%).

Σενάρια	Σ1	Σ2	Σ3	Σ4	Σ5	Σ6
Σ3	9.67	8.66	0	-0.66	0.8	0.32
Σ4	10.32	9.32	0.66	0	1.47	0.98
Σ5	8.86	7.85	-0.8	-1.47	0	-0.49
Σ6	9.34	8.34	-0.32	-0.98	0.49	0

Στα σενάρια 4 και 6, όπου εφαρμόστηκε η προτεινόμενη ταρίφα, η ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ πάρκινγκ και δικτύου αυξήθηκε ενώ το κόστος μειώθηκε σε σχέση με τα αντίστοιχα σενάρια 3 και 5. Τη μείωση του κόστους στα σενάρια 4 και 6 ενίσχυσε η πώληση παραπάνω ενέργειας, λόγω της εφαρμογής της ταρίφας, τις χρονικές στιγμές, όπου η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας ήταν υψηλή. Οι χρονικές περίοδοι υψηλού φορτίου στο δίκτυο συνέπεσαν με την υψηλή τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, κάτι που συνήθως ισχύει στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, ο περιορισμός ισχύος που εφαρμόστηκε δεν επηρέασε αισθητά το κόστος φόρτισης αν και τα κόστη στα σενάρια 5 και 6 ήταν λίγο χειρότερα από αυτά των σεναρίων 3 και 4. Τέλος, η προτεινόμενη μέθοδος φόρτισης, διασφαλίζοντας τους τεχνικούς και λειτουργικούς περιορισμούς σε επίπεδο ΗΟ, πάρκινγκ και ηλεκτρικού δικτύου, παρουσίασε καλύτερη απόδοση έως και 10,32% σε σχέση με τις βασικές μεθόδους φόρτισης.

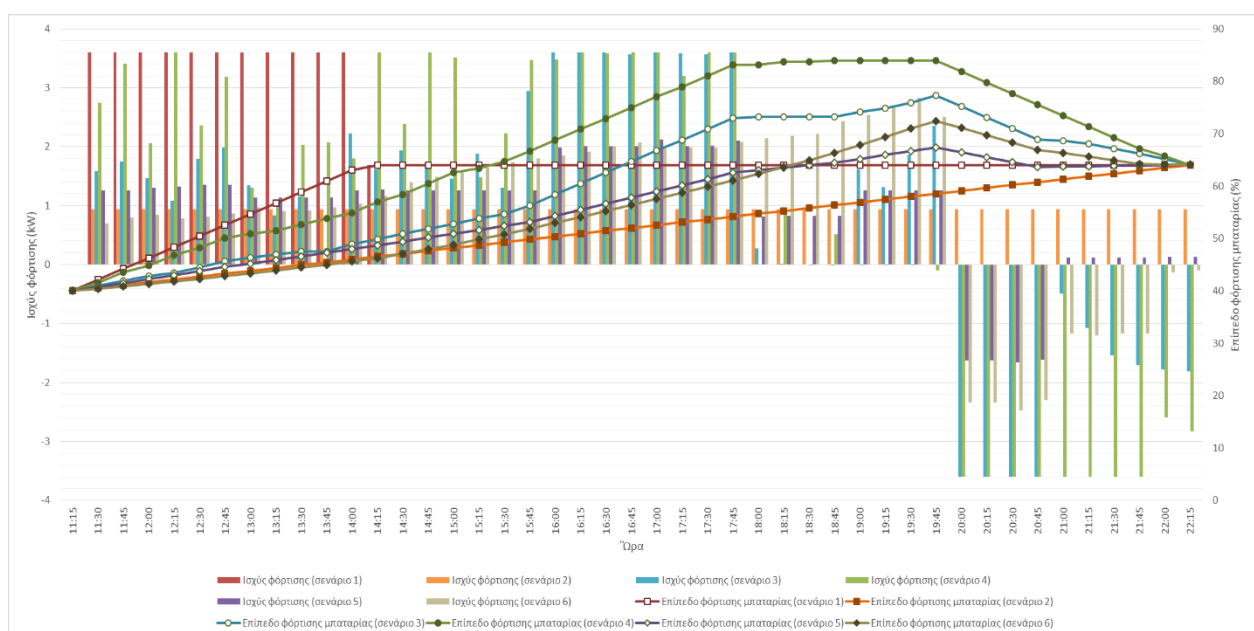
Στα Διαγράμματα 12-14 απεικονίζονται ενδεικτικά η ισχύς φόρτισης και το επίπεδο φόρτισης ορισμένων ΗΟ, ένα σε κάθε τύπο φορτιστή. Στους Πίνακες 6-8 παρουσιάζεται η μείωση κόστους φόρτισης για τα σενάρια 3 έως 6. Ως σημείο αναφοράς στον Πίνακα 6 θεωρήθηκε το κόστος φόρτισης στο σενάριο 3 ενώ στον Πίνακα 7 και Πίνακα 8 το κόστος φόρτισης στο σενάριο 4.



Διάγραμμα 12. Ισχύς φόρτισης και επίπεδο φόρτισης μπαταρίας του 231ου HO ($EV_{CS} = 102$), συνδεδεμένο σε DC φορτιστή.

Πίνακας 6. Μείωση κόστους φόρτισης για το 231ο HO (%).

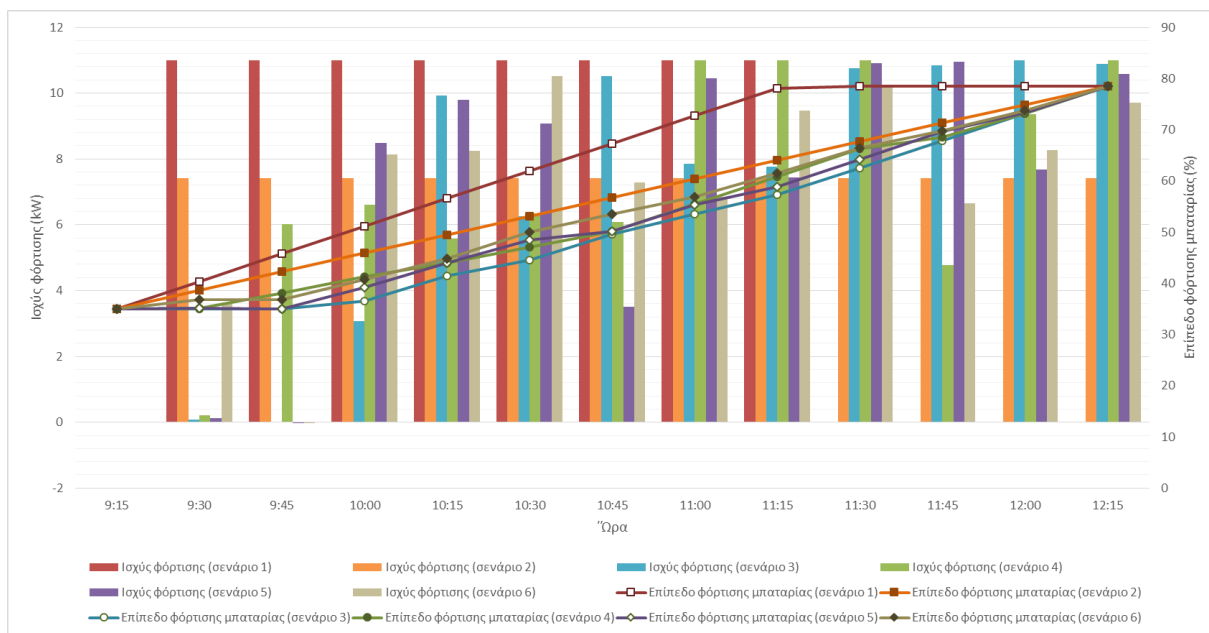
Σενάρια	Σ1	Σ2	Σ3	Σ4	Σ5	Σ6
Σ3	6,52	3,24	0	-0,05	0,98	2,15
Σ4	6,57	3,3	0,05	0	1,04	2,21
Σ5	5,54	2,26	-0,98	-1,04	0	1,17
Σ6	4,37	1,09	-2,15	-2,21	-1,17	0



Διάγραμμα 13. Ισχύς φόρτισης και επίπεδο φόρτισης μπαταρίας του 432ου HO ($EV_{CS} = 205$), συνδεδεμένο σε AC (1-phase 32 A) φορτιστή.

Πίνακας 7. Μείωση κόστους φόρτισης για το 432ο HO (%).

Σενάρια	Σ1	Σ2	Σ3	Σ4	Σ5	Σ6
Σ3	12,53	16,71	0	0,46	6,73	10,21
Σ4	12,07	16,24	-0,46	0	6,26	9,74
Σ5	5,8	9,98	-6,73	-6,26	0	3,48
Σ6	2,32	6,5	-10,21	-9,74	-3,48	0

**Διάγραμμα 14.** Ισχύς φόρτισης και επίπεδο φόρτισης μπαταρίας του 265ου HO ($EV_{CS} = 117$), συνδεδεμένο σε AC (3-phase 16 A) φορτιστή.**Πίνακας 8.** Μείωση κόστους φόρτισης για το 265ο HO (%).

Σενάρια	Σ1	Σ2	Σ3	Σ4	Σ5	Σ6
Σ3	2	1,21	0	0,48	0,07	0,34
Σ4	1,52	0,73	-0,48	0	-0,41	-0,14
Σ5	1,92	1,14	-0,07	0,41	0	0,27
Σ6	1,66	0,87	-0,34	0,14	-0,27	0

Σε επίπεδο HO τα κόστη φόρτισης με την προτεινόμενη μέθοδο φόρτισης ήταν μειωμένα ή ίσα με τα κόστη φόρτισης με τις βασικές μεθόδους φόρτισης. Τα κόστη φόρτισης ήταν ίσα στην περίπτωση όπου δεν ήταν αρκετός χρόνος φόρτισης μέχρι την ώρα αναχώρησης των HO. Τότε οι φορτιστές (σε όλα τα σενάρια) λειτουργούσαν στο μέγιστο της ισχύος τους ή της ισχύος που επέτρεπε ο on-board μετατροπέας ισχύος των HO με αποτέλεσμα η ισχύς φόρτισης να ήταν ίδια σε όλα τα

σενάρια φόρτισης. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι στα σενάρια που εφαρμόστηκε η προτεινόμενη μέθοδος φόρτισης τα ΗΟ, τα οποία έμειναν αρκετή ώρα στο πάρκινγκ έτσι ώστε να προλάβουν να φορτίσουν και να εκφορτίσουν είχαν μεγαλύτερο ποσοστό κέρδους από τα ΗΟ που είχαν χρόνο μόνο για να φορτίσουν.

3.6 Ισοδύναμο μοντέλο του πάρκινγκ

Ένα ισοδύναμο μοντέλο του πάρκινγκ ΗΟ αναπτύχθηκε σε αυτήν την ενότητα ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματα του με αυτά της μεθόδου φόρτισης. Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιείται από το ισοδύναμο μοντέλο του πάρκινγκ είναι το συνολικό κόστος φόρτισης του πάρκινγκ, C_{PL} , κατά το εξεταζόμενο 24ωρο (96 τέταρτα). Η συνολική ενεργός ισχύς, $P_{PL}(t)$, που ανταλλάσσεται από το πάρκινγκ και το ηλεκτρικό δίκτυο είναι η μεταβλητή απόφασης κατά την διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου. Για να διασφαλιστεί μια δίκαιη σύγκριση μεταξύ των μεθόδων εφαρμόστηκαν οι ίδιες συνθήκες που επικρατούσαν και στην προτεινόμενη μέθοδο φόρτισης. Η αρχική και η τελική ενέργεια που αποθηκεύεται είναι η ίδια και στις δύο περιπτώσεις, ενώ εφαρμόζεται και η ίδια απαίτηση για την μείωση της καταπόνησης της μπαταρίας (δυο κύκλους εκφόρτισης κατά μέγιστο). Το πρόβλημα βελτιστοποίησης για το ισοδύναμο μοντέλο ορίζεται στις εξισώσεις (23) - (30):

$$C_{PL} = \min \left(\sum_{t=1}^{96} P_{PL}(t) \cdot EP(t) \cdot \Delta t \right) \quad (23)$$

- Περιορισμός για την μείωση της καταπόνησης της μπαταρίας

$$change_sign(P_{PL}(t)) \leq 3, \quad \forall t \quad (24)$$

- Περιορισμοί συνολικής αποθήκευσης ενέργειας

$$\sum_{t=1}^t \left(pf \cdot c(t) - \frac{d(t)}{pf} \right) \cdot P_{PL}(t) \cdot \Delta t + E_{PL}(t)|_{t=0} \geq \sum_i E_{min}(i,t), \quad \forall t, \forall i \in EV_{CS} \quad (25)$$

$$\sum_{t=1}^t \left(pf \cdot c(t) - \frac{d(t)}{pf} \right) \cdot P_{PL}(t) \cdot \Delta t + E_{PL}(t)|_{t=0} \leq \sum_i E_{max}(i,t), \quad \forall t, \forall i \in EV_{CS} \quad (26)$$

- Περιορισμοί συνολικής ισχύος φόρτισης

$$-\sum_i P_{limit}^{Charger}(i,t) \leq P_{PL}(t) \leq \sum_i P_{limit}^{Charger}(i,t), \quad \forall t, \forall i \in EV_{CS} \quad (27)$$

$$\sum_i P_{\text{limit}}^{\text{Charger}}(i,t) \leq P_{\text{TF}}, \quad \forall t, \quad \forall i \in \text{EV}_{\text{CS}} \quad (28)$$

➤ Περιορισμός συνολικής αποθήκευσης ενέργειας στο τέλος του εικοσιτετραώρου

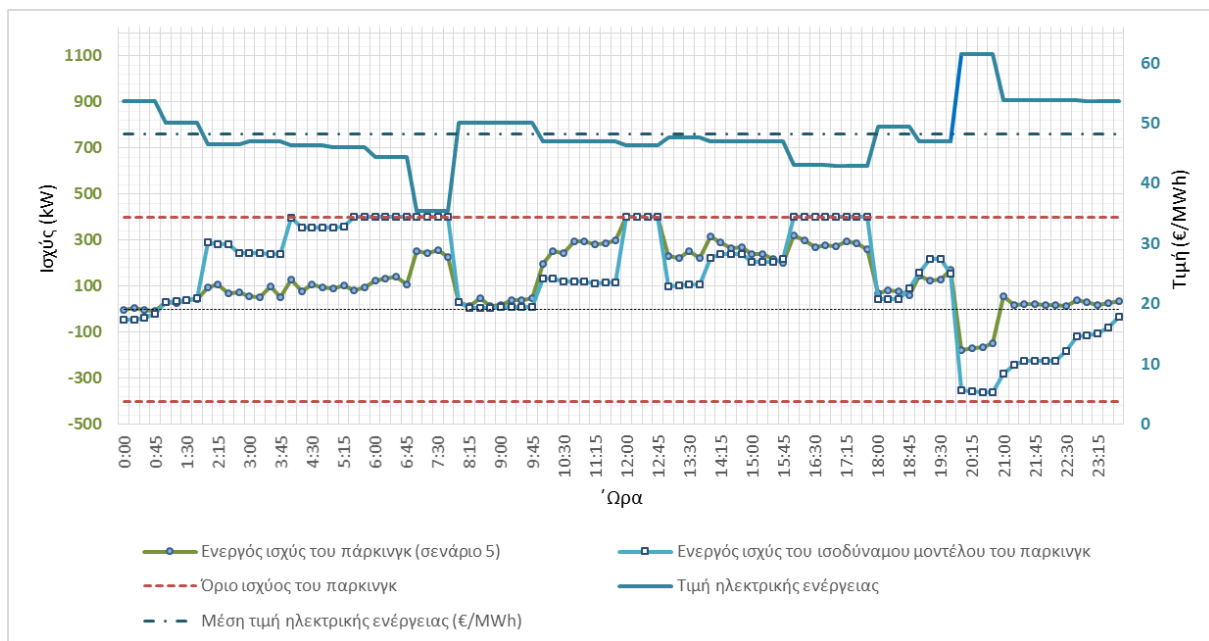
$$\sum_{t=1}^{96} \left(\text{pf} \cdot c(t) - \frac{d(t)}{\text{pf}} \right) \cdot P_{\text{PL}}(t) \cdot \Delta t + E_{\text{PL}}(t)|_{t=0} = \sum_i E(i, 96), \quad \forall i \in \text{EV}_{\text{CS}} \quad (29)$$

➤ Αρχική αποθηκευμένη ενέργεια

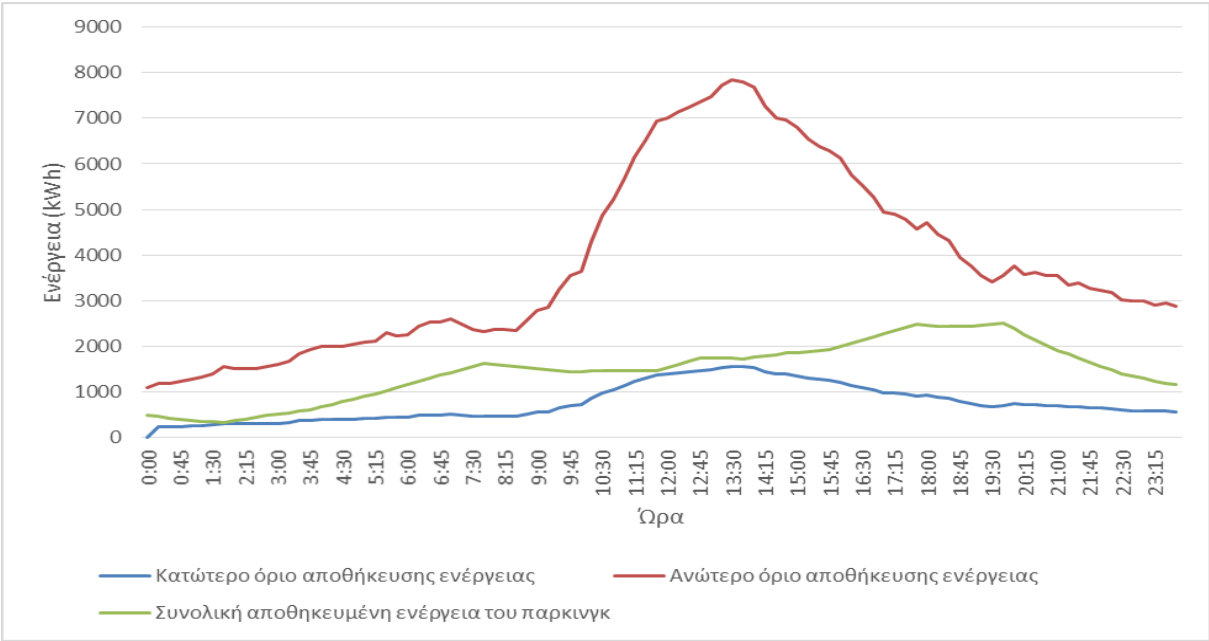
$$E_{\text{PL}}(t)|_{t=0} = \sum_i E(i, 0), \quad \forall i \in \text{EV}_{\text{CS}} \quad (30)$$

Όπου, P_{PL} είναι η συνολική ενεργός ισχύς που ανταλλάσσεται από το πάρκινγκ και το ηλεκτρικό δίκτυο, E_{PL} είναι η συνολική ενέργεια που αποθηκεύεται στα ΗΟ, E είναι η ενέργεια που αποθηκεύεται σε ένα ΗΟ και $E_{\text{min(max)}}$ είναι η ελάχιστη (μέγιστη) ενέργεια που μπορεί να αποθηκεύεται σε ένα ΗΟ.

Όταν το ισοδύναμο μοντέλο εφαρμόστηκε, η ενέργεια που αγοράστηκε και πουλήθηκε στο ηλεκτρικό δίκτυο ήταν 4591 kWh και 928 kWh, αντίστοιχα. Το κόστος φόρτισης σε αυτό το σενάριο ήταν 158,09 € και ήταν 2,8% μικρότερο από το αντίστοιχο σενάριο με την προτεινόμενη μέθοδο φόρτισης. Πρέπει να σημειωθεί ότι το ισοδύναμο μοντέλο δεν είναι εύκολα υλοποιήσιμο σε πραγματικές εφαρμογές, καθώς είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο σε σφάλματα πρόβλεψης της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, οι χαμηλές απαιτήσεις υλοποίησης της προτεινόμενης μεθόδου φόρτισης την καθιστούν πιο κατάλληλη σε σχέση με παρόμοιες τεχνικές ισοδύναμων μοντέλων.



Διάγραμμα 15. Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και ενεργός ισχύς του πάρκινγκ από το ισοδύναμο μοντέλο και το σενάριο 5.



Διάγραμμα 16. Συνολική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στις μπαταρίες των ΗΟ και τα αντίστοιχα πάνω και κάτω όρια.

Κεφάλαιο 4

Συμπεράσματα – Προτάσεις

Η μεγάλη αύξηση των ΗΟ οδηγεί σε πολλά πιθανά προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν από τους διαχειριστές των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ). Για τον σκοπό αυτό, στην παρούσα εργασία προτάθηκε ένας αλγόριθμος για την αποτελεσματική φόρτιση των ΗΟ σε ένα πάρκινγκ με μικρές απαιτήσεις υλοποίησης. Η εφαρμογή του προτεινόμενου αλγορίθμου αποδείχτηκε ότι είναι επωφελής για τους ιδιοκτήτες των ΗΟ, το πάρκινγκ και για το ηλεκτρικό δίκτυο.

Πιο συγκεκριμένα, η προτεινόμενη μέθοδος φόρτισης μείωσε το κόστος φόρτισης ικανοποιώντας τους περιορισμούς που υπήρχαν σε επίπεδο ΗΟ, πάρκινγκ και ηλεκτρικού δικτύου, ενώ ταυτόχρονα επέτρεπε την V2G λειτουργία με μικρή καταπόνηση της μπαταρίας των ΗΟ. Επιπλέον, το φορτίο του ηλεκτρικού δικτύου στο οποίο βρίσκεται το πάρκινγκ λήφθηκε υπόψη, καθώς ενσωματώθηκε μια κατάλληλα διαμορφωμένη ταρίφα, η οποία εφαρμόστηκε στην τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, για τη μείωση της υπερφόρτισης του δικτύου.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα διαφορετικά σενάρια φόρτισης, που δημιουργήθηκαν για το υπό μελέτη πάρκινγκ, αποδεικνύουν τη δυνατότητα υλοποίησης της προτεινόμενης μεθόδου φόρτισης, καθώς εμφάνισε καλύτερη απόδοση σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους φόρτισης σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια. Με την προτεινόμενη μέθοδο φόρτισης επιτεύχθηκε μείωση του συνολικού κόστους έως και 10,32% σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους φόρτισης. Τέλος, μια κλασική μέθοδος βελτιστοποίησης της φόρτισης ΗΟ βάσει ενός ισοδύναμου μοντέλου του πάρκινγκ παρουσίασε σχεδόν ίδια (ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα) από την μέθοδο φόρτισης. Ωστόσο, η προτεινόμενη μέθοδος φόρτισης έχει χαμηλές απαιτήσεις εφαρμογής και σε συνδυασμό με την υψηλή ευαισθησία των ισοδύναμων μοντέλων σε σφάλματα πρόβλεψης της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας, καθιστούν την προτεινόμενη μέθοδο πιο κατάλληλη για τέτοιες εφαρμογές.

Μελλοντικές επεκτάσεις του παρόντος σχεδίου εφαρμογής μπορούν περιλαμβάνουν την εγκατάσταση Φ/Β ή άλλων ΑΠΕ στο πάρκινγκ και αντίστοιχη ανάπτυξη αλγορίθμων φόρτισης, η ένταξη αλγορίθμων πρόβλεψης της δραστηριότητας των ΗΟ, αλγορίθμων μάθησης και αποδοτικών αλγορίθμων λειτουργίας πραγματικού χρόνου που να αντισταθμίζουν βέλτιστα τα όποια σφάλματα πρόβλεψης.

Βιβλιογραφία

- [1] The Paris Agreement. Available online: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement> (accessed on 30 August 2021).
- [2] 2030 climate & energy framework. Available online: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_en (accessed on 30 August 2021).
- [3] Greenhouse gas emissions from transport in Europe. Available online: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-greenhouse-gases-7/assessment> (accessed on 30 August 2021).
- [4] Electric vehicles: driving the transition. Available online: <https://publications.parliament.uk/pa/cm201719/cmselect/cmbeis/383/383.pdf> (accessed on 30 August 2021).
- [5] Global EV Outlook 2021. Available online: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021> (accessed on 30 August 2021).
- [6] Noel, L.; de Rubens, G.Z.; Kester, J.; Sovacool, B.K. Beyond emissions and economics: Rethinking the co-benefits of electric vehicles (EVs) and vehicle-to-grid (V2G). *Transp. Policy* 2018, 71, 130–137.
- [7] Fauzal, M.; Feng, S.Y.; Zureel, M.F.; Sinidol, B.E.; Wong, D.; Jian, G.K. A review on challenges and opportunities of electric vehicles (EVs). *J. Mech. Eng. Res. Dev.* 2019, 42, 130–137.
- [8] Capuder, T.; Sprčić, D.M.; Zoričić, D.; Pandžić, H. Review of challenges and assessment of electric vehicles integration policy goals: Integrated risk analysis approach. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2020, 119, 105894.
- [9] Guille, C.; Gross, G. Design of a Conceptual Framework for the V2G Implementation. In *Proceedings of the 2008 IEEE Energy 2030 Conference*, Atlanta, GA, USA, 17–18 November 2008; pp. 1–3.
- [10] Range of full electric vehicles. Available online: <https://ev-database.org/cheatsheet/range-electric-car> (accessed on 30 August 2021).
- [11] The pros and cons of electric cars. Available online: <https://www.carsguide.com.au/ev/advice/the-pros-and-cons-of-electric-cars-83745> (accessed on 30 August 2021).
- [12] Pros and cons of electric cars. Available online: <https://www.energysage.com/electric-vehicles/101/pros-and-cons-electric-cars/> (accessed on 30 August 2021).
- [13] Bahrami, Ali. (2020). EV Charging Definitions, Modes, Levels, Communication Protocols and Applied Standards.
- [14] What is CCS charging? Available online: <https://thedriven.io/2018/12/10/what-is-ccs-charging/> (accessed on 30 August 2021).
- [15] “Ranges of over 500 kilometers will soon be a matter of course”. Available online: <https://www.volkswagenag.com/en/news/stories/2021/04/ranges-of-over-500-kilometres-will-soon-be-a-matter-of-course.html> (accessed on 30 August 2021).
- [16] Lucas, A.; Barranco, R.; Refa, N. EV Idle Time Estimation on Charging Infrastructure, Comparing Supervised Machine Learning Regressions. *Energies* 2019, 12, 269.
- [17] Geske, J.; Schumann, D. Willing to participate in vehicle-to-grid (V2G)? Why not! *Energy Policy* 2018, 120, 392–401.

- [18] Høj, J.C.M.L.; Juhl, L.T.; Lindegaard, S.B. V2G—An economic gamechanger in E-mobility? *World Electr. Veh. J.* 2018, 9, 35.
- [19] Li, Z.; Chowdhury, M.; Bhavsar, P.; He, Y. Optimizing the performance of vehicle-to-grid (V2G) enabled battery electric vehicles through a smart charge scheduling model. *Int.J Automot. Technol.* 2015, 16, 827–837.
- [20] What can 6,000 electric vehicles tell us about EV battery health? Available online: <https://www.geotab.com/blog/ev-battery-health/> (accessed on 30 August 2021).
- [21] How to extend EV battery life? Available online: <https://www.kia.com/dm/discover-kia/ask/how-to-extend-ev-battery-life.html> (accessed on 30 August 2021).
- [22] Shabbar, R.; Kasasbeh, A.; Ahmed, M.M. Charging Station Allocation for Electric Vehicle Network Using Stochastic Modeling and Grey Wolf Optimization. *Sustainability* 2021, 13, 3314.
- [23] Optimal Allocation of Electric Vehicle Charging Infrastructure in Cities and Regions. Available online: <https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/optimal-allocation-electric-vehicle-charging-infrastructure-cities-and-regions> (accessed on 27 February 2021).
- [24] Xavier, E.B.; Dias, B.H.; Borba, B.S.M.C.; Quirós-Tortós, J. Sizing and Placing EV Parking Lots: Challenges Ahead in Real Applications. In *Proceedings of the 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference—Latin America (ISGT Latin America)*, Gramado, Brazil, 15–18 September 2019; pp. 1–6.
- [25] Savari, G.F.; Krishnasamy, V.; Sugavanam, V.; Vakesan, K. Optimal charging scheduling of electric vehicles in micro grids using priority algorithms and particle swarm optimization. *Mob. Netw. Appl.* 2019, 24, 1835–1847.
- [26] Yang, J.; He, L.; Fu, S. An improved PSO-based charging strategy of electric vehicles in electrical distribution grid. *Appl. Energy* 2014, 128, 82–92.
- [27] Kanellos, F.D. Optimal scheduling and real-time operation of distribution networks with high penetration of plug-in electric vehicles. *IEEE Syst. J.* 2020, 1–10.
- [28] Tang, Q.; Xie, M.; Yang, K.; Luo, Y.; Zhou, D.; Song, Y. A decision function based smart charging and discharging strategy for electric vehicle in smart grid. *Mob. Netw. Appl.* 2019, 24, 1722–1731.
- [29] Zhou, K.; Cheng, L.; Wen, L.; Lu, X.; Ding, T. A coordinated charging scheduling method for electric vehicles considering different charging demands. *Energy* 2020, 213, 118882.
- [30] Zheng, Y.; Shang, Y.; Shao, Z.; Jian, L. A novel real-time scheduling strategy with near-linear complexity for integrating large-scale electric vehicles into smart grid. *Applied Energy* 2018, 217, 1–13.
- [31] Antúnez, C. S.; Franco, J. F.; Rider, M. J.; Romero, R. A new methodology for the optimal charging coordination of electric vehicles considering vehicle-to-grid technology. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 2016, 7(2), 596–607.
- [32] Lakshminarayanan, V.; Chemudupati, V.G.S.; Pramanick, S.K.; Rajashekara, K. Real-time optimal energy management controller for electric vehicle integration in workplace microgrid. *IEEE Trans. Transp. Electrification* 2018, 5, 174–185.
- [33] Zima-Bockarjova, M.; Sauhats, A.; Petrichenko, L.; Petrichenko, R. Charging and discharging scheduling for electrical vehicles using a shapley-value approach. *Energies* 2020, 13, 1160.

- [34] Ioakimidis, C.S.; Thomas, D.; Rycerski, P.; Genikomsakis, K.N. Peak shaving and valley filling of power consumption profile in non-residential buildings using an electric vehicle parking lot. *Energy* 2018, 148, 148–158.
- [35] Kuran, M.Ş.; Viana, A.C.; Iannone, L.; Kofman, D.; Mermoud, G.; Vasseur, J.P. A smart parking lot management system for scheduling the recharging of electric vehicles. *IEEE Trans. Smart Grid* 2015, 6, 2942–2953.
- [36] Wu, H.; Pang, G.K.H.; Choy, K.L.; Lam, H.Y. A scheduling and control system for electric vehicle charging at parking lot. In *Proceedings of the 2017 11th Asian Control Conference (ASCC)*, Gold Coast, Australia, 17–20 December 2017; pp. 13–18.
- [37] Zhang, P.; Shao, W.; Qu, H.; Xu, W.; Xu, Z. Study on charging strategy of electric vehicle parking lot based on improved PSO. In *Proceedings of the 2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, Yinchuan, China, 28–30 May 2016; pp. 4456–4460.
- [38] Zhang, L.; Li, Y. A game-theoretic approach to optimal scheduling of parking-lot electric vehicle charging. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 2015, 65(6), 4068–4078.
- [39] Alinejad, M.; Rezaei, O.; Kazemi, A.; Bagheri, S. An optimal management for charging and discharging of electric vehicles in an intelligent parking lot considering vehicle owner's random behaviors. *J. Energy Storage* 2021, 35, 102245.
- [40] Yao, L.; Damiran, Z.; Lim, W.H. A fuzzy logic-based charging scheme for electric vehicle parking station. In *Proceedings of the 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, Florence, Italy, 7–10 June 2016; pp. 1–6.
- [41] Khalkhali, H.; Hosseini, S. H. Multi-stage stochastic framework for simultaneous energy management of slow and fast charge electric vehicles in a restructured smart parking lot. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 2020, 116, 105540.
- [42] Ivanova, A.; Fernandez, J. A.; Crawford, C.; Djilali, N. Coordinated charging of electric vehicles connected to a net-metered PV parking lot. In *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe) 2017*, (pp. 1-6). IEEE.
- [43] Yao, L.; Damiran, Z.; Lim, W.H. Optimal charging and discharging scheduling for electric vehicles in a parking station with photovoltaic system and energy storage system. *Energies* 2017, 10, 550.
- [44] Li, D.; Zouma, A.; Liao, J.T.; Yang, H.T. An energy management strategy with renewable energy and energy storage system for a large electric vehicle charging station. *eTransportation* 2020, 6, 100076.
- [45] Shafie-Khah, M.; Siano, P.; Fitiwi, D.Z.; Mahmoudi, N.; Catalao, J.P. An innovative two-level model for electric vehicle parking lots in distribution systems with renewable energy. *IEEE Trans. Smart Grid* 2017, 9, 1506–1520.
- [46] Popular Vehicle Trips Statistics. Available online: <https://nhts.ornl.gov/vehicle-trips> (accessed on 27 February 2021).
- [47] Konstantinidis, G.; Kanellos, F.D.; Kalaitzakis, K. A Simple Multi-Parameter Method for Efficient Charging Scheduling of Electric Vehicles. *Appl. Syst. Innov.* 2021, 4, 58.
- [48] Del Valle, Y.; Venayagamoorthy, G. K.; Mohagheghi, S.; Hernandez, J. C.; Harley, R. G. Particle swarm optimization: basic concepts, variants and applications in power systems. *IEEE Transactions on evolutionary computation* 2008, 12(2), 171–195.
- [49] Kennedy, J.; Eberhart, R. Particle swarm optimization. In *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks 1995* (Vol. 4, pp. 1942–1948).

-
- [50] Independent Power Transmission Operator, Data. Available online: <https://www.admie.gr/en/market/market-statistics/detaildata> (accessed on 10 November 2020).
 - [51] Nissan Leaf. Available online: <https://ev-database.org/car/1106/Nissan-Leaf> (accessed on 27 February 2021).
 - [52] Tesla Model 3 Standard Range Plus. Available online: <https://ev-database.org/car/1177/Tesla-Model-3-Standard-Range-Plus> (accessed on 27 February 2021).
 - [53] BMW i3 120 Ah. Available online: <https://ev-database.org/car/1145/BMW-i3-120-Ah> (accessed on 27 February 2021).