



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΕΧΟΜΕΝΩΝ
ΒΟΗΘΗΤΙΚΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΑΠΟ ΟΜΑΔΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ
ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΩΝ ΜΕ ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ

ΚΑΡΑΝΔΙΝΟΥ ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ ΑΓΑΠΗ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΚΑΝΕΛΛΟΣ ΦΩΤΙΟΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΚΟΥΤΡΟΥΛΗΣ ΕΥΤΥΧΙΟΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΣΤΑΥΡΑΚΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΧΑΝΙΑ, ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ 2024

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τη μεταπτυχιακή διπλωματική μου εργασία, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνηση της.

Αρχικά ευχαριστώ θερμά τον επιβλέπων καθηγητή μου, κύριο Κανέλλο Φώτιο, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, την όλη επιστημονική καθοδήγηση καθώς και για τη συμπαράσταση και την υποστήριξη του μέχρι την ολοκλήρωση της εργασίας μου. Η συμβολή του ήταν παραπάνω από σημαντική.

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

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

Περίληψη

Αυξάνοντας τον αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων, αναμένεται αντίστοιχα μεγάλη αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Λύσεις όπως η έξυπνη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων (ΗΟ) έχουν πολλά πλεονεκτήματα για το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, περιορίζοντας τις μεγάλες επενδύσεις στο δίκτυο διανομής, καθώς και πολλά οφέλη για τον ιδιοκτήτη ενός ΗΟ, μειώνοντας το κόστος φόρτισης. Σε αυτή την εργασία, προτείνεται μια μέθοδος για την αξιολόγηση των επιπτώσεων της πολυκριτηριακής βέλτιστης φόρτισης των ΗΟ σε επίπεδο συστήματος ισχύος. Η προτεινόμενη μέθοδος βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων λαμβάνει υπόψη την πρόβλεψη φορτίου του συστήματος ισχύος, την παραγωγή από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) και την τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας ανά ώρα της ημέρας. Τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν προσφέρουν βοηθητική υπηρεσία στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μετατοπίζοντάς τη ζήτησή τους σε περιόδους μειωμένου φορτίου καθώς αυτό λαμβάνεται υπόψη στη μέθοδο βελτιστοποίησης. Επιπλέον, η μέθοδος ενισχύεται χρησιμοποιώντας λεπτομερή μοντελοποίηση της καθημερινής δραστηριότητας κάθε ΗΟ λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά της περιοχής στην οποία δραστηριοποιείται, το είδος του ταξιδιού, τις προτιμήσεις φόρτισης οχήματος του οδηγού καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ΗΟ. Σχετικά με τη μέθοδο υλοποίησης, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν βασίστηκαν στην πραγματικότητα, έγινε εφαρμογή της λειτουργίας Vehicle to Grid (V2G) και η βελτιστοποίηση εφαρμόστηκε στο ηλεκτρικό σύστημα της Κρήτης. Η αποδοτικότητα της προτεινόμενης μεθόδου αποδεικνύεται από τα αποτελέσματα που προέκυψαν σύμφωνα με ενδεικτικά σενάρια λειτουργίας. Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι για την εφαρμογή της μεθόδου φόρτισης δεν απαιτούνται εξελιγμένα συστήματα υπολογισμού, μέτρησης και επικοινωνίας γεγονός που καθιστά σχετικά εύκολη την εφαρμογή και υλοποίηση της.

Abstract

Increasing the number of electric vehicles, a large increase in electricity demand is expected. Solutions like smart charging of electric vehicles (EVs) has many advantages to the electricity network, limiting the large investments in the distribution network, as well as many benefits to the owner of the EV, reducing the charging cost. In this work, a method for the assessment of the effects of multi-objective optimal charging of PEVs at power system level is proposed. The proposed multi-objective optimization method takes into consideration the forecasts of power system load, Renewable Energy Sources (RES) and electricity price. Moreover, it is enhanced by the detailed modeling of the daily EV activity taking into consideration the characteristics of the area they are having activity, the type of the activity, the charging preferences of the driver as well as the technical characteristics of the EV. Moreover, Vehicle to Grid (V2G) operation can be modeled by the proposed method. Real-world data were used and the method was applied to the power system of Crete. 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.

Δημοσίευση

Αποτέλεσμα της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας ήταν η δημοσίευση του άρθρου:
Aikaterini Agapi Karandinou, Fotios D. Kanellos «A method for the Assessment of Multi-Objective Optimal Charging of Plug-in Electric Vehicles at Power System Level». WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS and CONTROL DOI: 10.37394/23203.2022.17.36

Ελληνικές και Αγγλικές Συντομογραφίες και Ακρωνύμια

ΑΔΜΗΕ	Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΑΕΠ	Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
Γ.Μ.	Γραμμή Μεταφοράς
ΕΣΜΗΕ	Εθνικός Στρατηγικός Μεταφορέας Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΗΟ	Ηλεκτρικό Όχημα
ΚΕΕ	Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας
ΚΥΤ	Κέντρο Υπερυψηλής Τάσης
ΜΜ	Μονάδα Μέτρησης
ΜΕΚ	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης
Σ.Η.Ε.	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΣΜ ΕΡ/ΣΡ	Σταθμό Μετατροπής Εναλλασσόμενου Ρεύματος σε Συνεχές Ρεύμα
ΣΜ ΣΡ/ΕΡ	Σταθμό Μετατροπής Συνεχούς Ρεύματος σε Εναλλασσόμενο Ρεύμα
ΥΚΩ	Υποχρεωτικές Κοινωνικές Οικονομικές Υποχρεώσεις
ΥΟ	Υβριδικό Όχημα
Υ/Σ	Υποσταθμός
ΥΤ	Υψηλή Τάση
AC	Εναλλασσόμενο Ρεύμα
Aggregator	Φορέας Συγκέντρωσης- Συνάθροισης
Backbone	Τηλεπικοινωνιακό δίκτυο κορμού
BEV	Battery Electric Vehicle
CA	Central Aggregator- Κεντρικός Φορέας Συγκέντρωσης
DC	Συνεχές Ρεύμα
DWCS	Dynamic Wireless Charging Station
EV	Electric Vehicle

EVSE	Electric Vehicle Service Equipment
HEV	Hybrid Electric Vehicle
IEA	International Energy Agency
Interpolation	Γραμμική Παρεμβολή (Διαδικασία εκτίμησης άγνωστων τιμών που πέφτουν μεταξύ γνωστών)
GIS	Gas Insulated Substation
LA	Τοπικός Φορέας Συγκέντρωσης
PHEV/PEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
Peak Shaving	Reducing energy consumption during peak periods to avoid exceeding supply limits.
SCADA	Σύστημα συλλογής μετρήσεων
SoC	State of Charge
SoC target	Επιθυμητό επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας του ΗΟ
SWCS	Static Wireless Charging Station
TSO	Transmission System Operator
Valley Filling	Building up energy consumption during off-peak periods to take advantage of lower energy costs.
V2G	Vehicle to Grid
VEP	Virtual Electricity Price
VSC	Voltage Source Converter
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle

Πίνακας Περιεχομένων

Κεφάλαιο 1	8
Εισαγωγή	8
1.1 Υπόβαθρο	8
1.1.1 Κλιματική Αλλαγή και Ηλεκτρικά Οχήματα	8
1.1.2 Κατηγορίες Ηλεκτρικών Οχημάτων	9
1.1.3 Πλεονεκτήματα Ηλεκτρικών Οχημάτων	13
1.1.4 Επίπεδα φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων	14
1.1.5 Τύποι Συσσωρευτών Ηλεκτρικών Οχημάτων	16
1.1.6 V2G Λειτουργία	18
1.1.7 Διαχείριση Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων	20
1.1.8 Δίκτυο Κρήτης	20
1.1.9 Χαρακτηριστικά στοιχεία και κόστος συμβατικών μονάδων του ΣΗΕ Κρήτης	24
1.1.10 10ετές Πρόγραμμα Ανάπτυξης ΑΔΜΗΕ	25
1.1.11 Έργα Ανάπτυξης ΑΔΜΗΕ	26
1.1.12 Έργα Ανάπτυξης Κρήτης ΑΔΜΗΕ	27
1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	30
1.3 Στόχος και Σχεδιασμός της Προτεινόμενης Μεθόδου	31
1.4 Δομή Μεταπτυχιακής Εργασίας	32
Κεφάλαιο 2	33
Περιγραφή Μεθοδολογίας Αλγορίθμου	33
2.1 Σκοπός και Παρουσίαση Αλγορίθμου	33
2.2 Δεδομένα Εισόδου Αλγορίθμου	35
2.3 Στρατηγικές Φόρτισης	44
2.4 Μοντέλο Μπαταρίας	44
2.5 Μοντέλο Έξυπνης Φόρτισης Ηλεκτρικού Οχήματος	46
2.6 Μοντέλο Φόρτισης Συναθροιστή (Aggregator)	49
Κεφάλαιο 3	51
Αποτελέσματα Προσομοίωσης	51
3.1 Αποτελέσματα Σεναρίων	51
3.2 Αποτελέσματα Συναθροιστή	62
3.3 Συνολικά Κόστη Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων	65
Κεφάλαιο 4	67

Συμπεράσματα και Επεκτάσεις	67
Βιβλιογραφία	69

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Στη σύγχρονη εποχή, η αυτοκινητοβιομηχανία και οι ερευνητές έχουν επικεντρωθεί στην εξέλιξη και αξιοποίηση τόσο των Plug-in ηλεκτρικών οχημάτων (PEV) όσο και στα ηλεκτρικά οχήματα (EV) λόγω της έλλειψης των ορυκτών καυσίμων και ταυτόχρονα της αύξησης της τιμής τους, καθώς και λόγω περιβαλλοντικών ανησυχιών. Επίσης, ορισμένα από τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν τα EV αφορούν τις χαμηλές εκπομπές αερίων, το χαμηλό κόστος λειτουργίας, τη βελτίωση της αξιοπιστίας του δικτύου, την ασφάλεια λειτουργίας και την αύξηση της διείσδυσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ).

1.1 Υπόβαθρο

1.1.1 Κλιματική Αλλαγή και Ηλεκτρικά Οχήματα

Σύμφωνα με την επιστημονική τεκμηρίωση του Νίκολα Στερν (Οκτώβριος 2006) εκτιμάται ότι η κλιματική αλλαγή θα μειώσει το παγκόσμιο ΑΕΠ (Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν) από 5% έως 20%, εάν δεν ληφθούν μέτρα περιορισμού των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα [1].

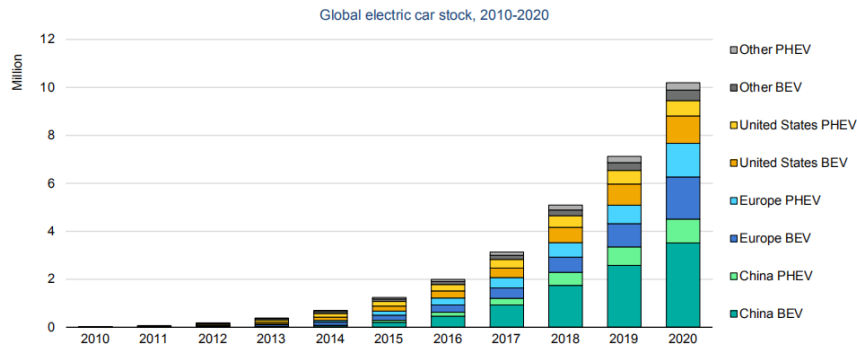
Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, εν έτη 2017, οι συνολικές εκπομπές του διοξειδίου του άνθρακα προήλθαν κατά 22 % από τον τομέα των οδικών μεταφορών [2].

Συνεπώς, οι μεταφορές έχουν καθοριστικό ρόλο τόσο για τη βελτίωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και της κλιματικής αλλαγής όσο και για την βελτίωση της ποιότητας του αέρα. Η αντικατάσταση των συμβατικών οχημάτων με

τα ηλεκτρικά οχήματα παίζει σημαντικό ρόλο στην επίτευξη στόχων για τη μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου παράγοντας μειωμένες (υβριδικά ΗΟ) έως και μηδενικές (αμιγώς ΗΟ) εκπομπές.

Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί άνοδος της διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων σε παγκόσμιο επίπεδο Εικόνα 1 [3].

More than 10 million electric cars were on the world's roads in 2020 with battery electric models driving the expansion

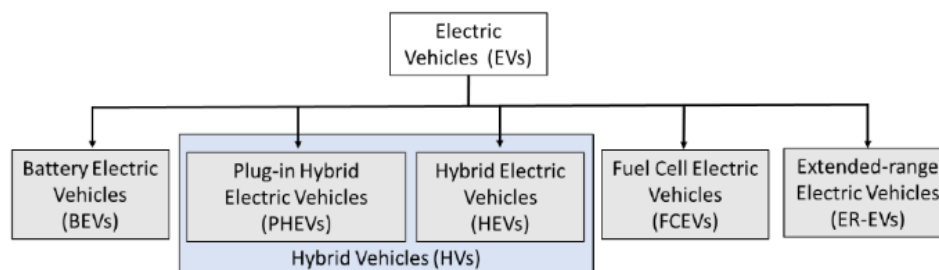


Εικόνα 1 Παγκόσμιο απόθεμα ηλεκτρικών αυτοκινήτων, 2010-2020 [3]

1.1.2 Κατηγορίες Ηλεκτρικών Οχημάτων

Ανάλογα με τον τύπο, τα Η/Ο διακρίνονται στις εξής κατηγορίες [4]:

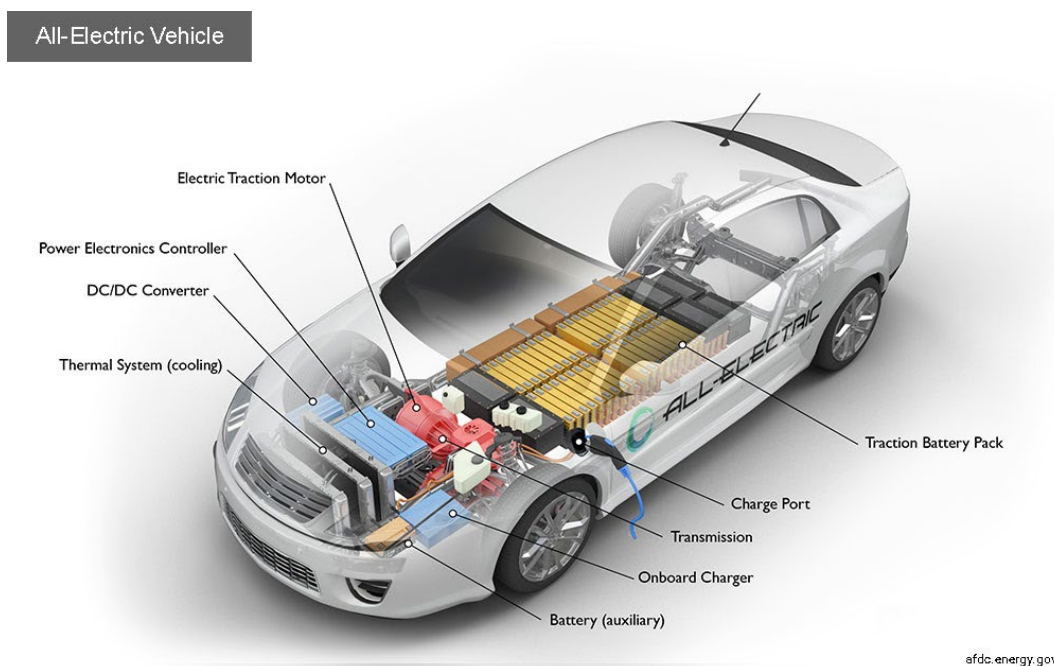
1. Ηλεκτρικά οχήματα με συσσωρευτές (BEVs)
2. Υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (HEVs)
3. Επαναφορτιζόμενα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (PHEVs)
4. Extended Range Ηλεκτρικά Οχήματα (EREV)
5. Ηλεκτρικά οχήματα με κυψέλη καυσίμου (FCEVs)



Εικόνα 2 Διαφορετικές Κατηγορίες ΗΟ σύμφωνα με τη ρύθμιση κινητήρα τους.[5]

BEV

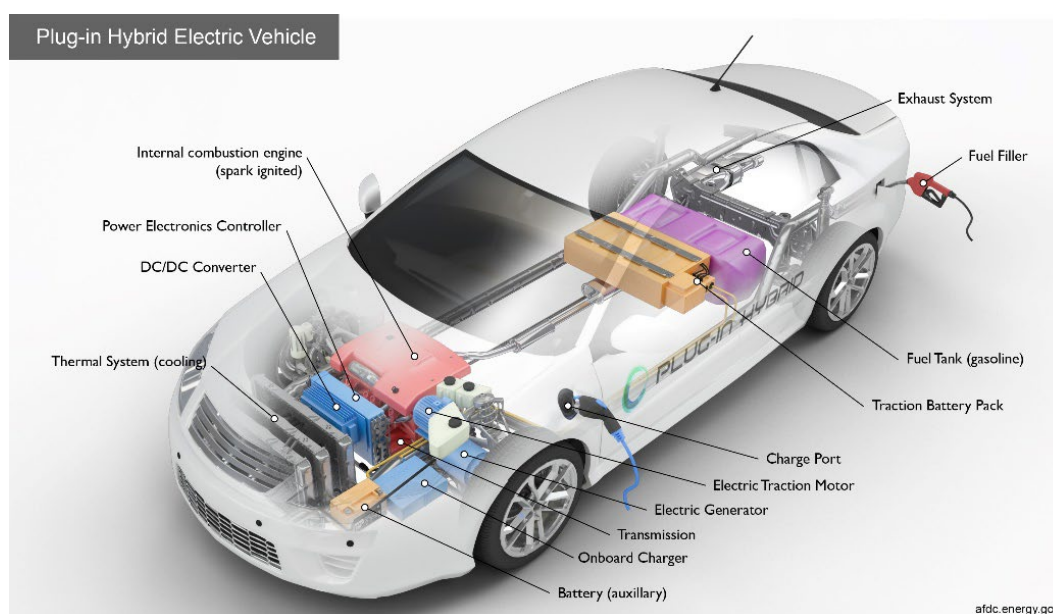
Η κατηγορία των αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων γνωστά ως ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία ιόντων λιθίου (BEV), διαθέτουν ηλεκτροκινητήρα αντί για κινητήρα εσωτερικής καύσης. Τα BEV υποστηρίζονται από ηλεκτρική ενέργεια που βρίσκεται αποθηκευμένη στις μπαταρίες τους. Η επαναφόρτιση των μπαταριών πραγματοποιείται είτε χρησιμοποιώντας εξωτερικές πηγές όπως η φόρτιση από το ηλεκτρικό δίκτυο ή από τις ΑΠΕ, είτε χρησιμοποιώντας εσωτερικές πηγές όπως η εξαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μια διαδικασία που λέγεται πέδηση με ανάκτηση ενέργειας. Η μείωση εξάρτησης από τα καύσιμα, η μηδενική εκπομπή ρύπων στο περιβάλλον και η μείωση θορύβου καθιστούν τα BEV ιδανικά οχήματα.



Εικόνα 3 BEV [36]

PHEV

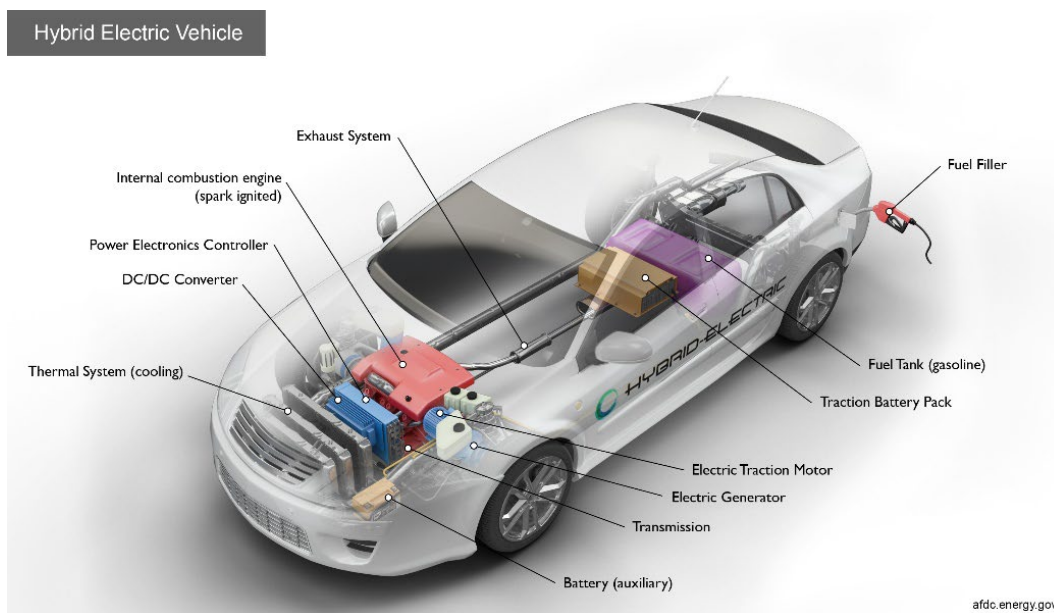
Τα plug-in υβριδικά έχουν εισαχθεί στην αγορά ως τελευταία έκδοση ηλεκτρικών οχημάτων. Τα PHEV μπορούν να θεωρηθούν μείγμα τεχνολογίας απλού οχήματος με BEV, που σημαίνει ότι ένα PHEV αποτελείται από έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης (κατανάλωση καυσίμου), από ένα αμιγώς ηλεκτρικό κινητήρα (κατανάλωση αποθηκευμένης ηλεκτρικής ενέργειας) και μια μπαταρία ιόντων λιθίου η οποία επαναφορτίζεται με σύνδεση στο ηλεκτρικό δίκτυο. Ανάλογα την κατάσταση του δρόμου το PHEV μπορεί να αλλάξει τον κινητήρα από ηλεκτρικό σε καύσιμο ή αντίθετα.



Εικόνα 4 PHEV [36]

HEV

Τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα HEV συγκριτικά με τα PHEV που αναφέρθηκαν προηγουμένως έχουν βασική διαφορά στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Βασίζονται στο συνδυασμό κινητήρα εσωτερικής καύσης με έναν ηλεκτροκινητήρα και μια μπαταρία όπως τα PHEV μόνο που, η μπαταρία φορτίζει από τον ίδιο τον κινητήρα βενζίνης ή κατά το φρενάρισμα, διαδικασία που ονομάζεται «regenerative braking». Στην συγκεκριμένη κατηγορία δεν υπάρχει θύρα φόρτισης των μπαταριών από εξωτερικές πηγές, και οι μπαταρίες φορτίζουν μόνο από τον κινητήρα εσωτερικής καύσης και την κίνηση των τροχών του οχήματος.



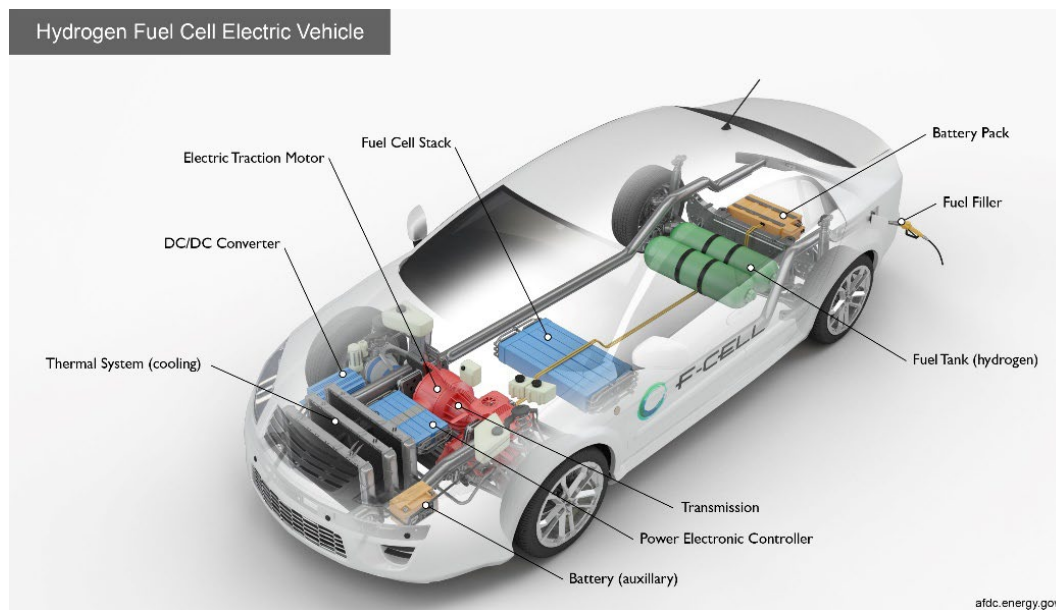
Εικόνα 5 HEV [36]

EREV

Τα Extended Range ηλεκτρικά οχήματα (EREV) αφορούν νέα τεχνολογία μπαταρίας εκτεταμένης εμβέλειας και συγκεκριμένα υβριδικά οχήματα με μεγαλύτερη μπαταρία χωρητικότητας 10 έως 20 kWh. Αποτελούνται από μπαταρία, ηλεκτρικό κινητήρα και κινητήρα εσωτερικής καύσης όμως οι τροχοί κινούνται μόνο από τον ηλεκτροκινητήρα, ενώ ο κινητήρας εσωτερικής καύσης φορτίζει τις μπαταρίες όταν εξαντληθούν. Παρά την παρουσία MEK, είναι σχεδόν εξίσου φιλικά προς το περιβάλλον και ενεργειακά αποδοτικά αφού η MEK χρησιμοποιείται μόνο για τη διατήρηση της φόρτισης της μπαταρίας και όχι για την άμεση κίνηση του οχήματος.

FCEV

Τα Fuel Cell Electric Vehicles είναι επίσης αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα τα οποία χρησιμοποιούν κυψέλες υδρογόνου για την μετατροπή υδρογόνου σε ηλεκτρική ενέργεια η οποία τροφοδοτεί έναν ηλεκτροκινητήρα για να κινήσει το όχημα. Επιπλέον σημαντικό χαρακτηριστικό τους είναι ο άμεσος χρόνος ανεφοδιασμού των δεξαμενών υδρογόνου με διάρκεια περίπου 3 λεπτά.



Εικόνα 6 FCEV [36]

1.1.3 Πλεονεκτήματα Ηλεκτρικών Οχημάτων

Με βάση τη μελέτη της IEA [3] τα ηλεκτρικά οχήματα ωφελούν τον τομέα του περιβάλλοντος, της υγείας και της κοινωνίας. Ορισμένα πλεονεκτήματα είναι:

- **Ενεργειακή απόδοση.** Τα ηλεκτρικά οχήματα είναι τρεις με πέντε φορές πιο αποτελεσματικά από τα οχήματα που χρησιμοποιούν κινητήρες εσωτερικής καύσης καθώς η ποσότητα ενέργειας από την πηγή (καυσίμου ή μπαταρίας) που μετατρέπεται σε πραγματική ενέργεια για την τροφοδοσία των τροχών ενός οχήματος είναι πολύ καλύτερη στα ΗΟ.
- **Περιβαλλοντική επίπτωση.** Τα ΗΟ συνεισφέρουν στη μείωση μόλυνσης του αέρα καθώς παράγουν μηδαμινούς ρύπους όπως και λιγότερα αέρια του θερμοκηπίου. Επίσης, εφόσον η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται από ΑΠΕ γίνεται λόγος για χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.
- **Συντήρηση.** Τα ΗΟ σε σύγκριση με τα συμβατικά αποτελούνται από λιγότερα εξαρτήματα οπότε η συντήρηση που απαιτείται είναι πιο εύκολη και χαμηλότερη σε κόστος, γεγονός που καθιστά τα ΗΟ πιο αξιόπιστα.
- **Μείωση ηχητικής όχλησης.** Τα ΗΟ δημιουργούν λιγότερο θόρυβο από τα συμβατικά οχήματα που χρησιμοποιούν κινητήρες εσωτερικής καύσης. Θα μπορούσε να θεωρηθεί και αρνητικό αυτό λόγω επικινδυνότητας, καθώς ο ήχος βοηθάει τον πεζό να αντιληφθεί την παρουσία του οχήματος.

Παρά τα θετικά των ΗΟ, επικρατεί αρκετός ενδιασμός ως προς την αγορά τους. Αυτό συμβαίνει αφού το αρχικό κόστος αγοράς ενός ΗΟ είναι αρκετά υψηλό σε σχέση με ένα συμβατικό, όπως επίσης και η μπαταρία έχει υψηλό κόστος αντικατάστασης. Επιπλέον, η διαθεσιμότητα σταθμών φόρτισης είναι ακόμη περιορισμένη και η αυτονομία των ΗΟ για μεγάλες αποστάσεις είναι μικρή.

1.1.4 Επίπεδα φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61851-1 ορίζονται τέσσερις τρόποι φόρτισης (modes) ηλεκτροκίνητων οχημάτων που περιγράφονται παρακάτω [6],[34]:

Φόρτιση Επιπέδου 1 (Οικιακή)



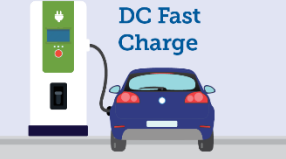
Η πλέον αργή μορφή φόρτισης, εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Σχεδόν όλα τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα παραδίδονται με ένα καλώδιο κατάλληλο για αυτή την μορφή φόρτισης προκειμένου να συνδεθεί ο ρευματολήπτης του αυτοκινήτου με οποιονδήποτε οικιακό ρευματοδότη 120 V (ή 240 V αναλόγως της χώρας) με ασφάλεια 16 A. Μπορεί να γίνει φόρτιση κατά τη διάρκεια της νύκτας και εντός 6 έως 8 ωρών να πραγματοποιηθεί πρόσληψη ενέργειας για διαδρομές από 90 έως 120 χιλιομέτρων.

Φόρτιση Επιπέδου 2 (Ημιταχεία)

Παρέχουν φόρτιση μέσω πρίζας AC με τάση μονοφασική 240 V ή τριφασική 240 V/400 V, παρέχοντας έτσι ισχύ από 3 kW έως 22 kW. Επιπλέον, απαιτείται εγκατάσταση πρόσθετου εξοπλισμού φόρτισης EVSE που διαθέτει εξαρτημένο καλώδιο σύνδεσης με τον ρευματολήπτη του αυτοκινήτου ή που διαθέτει ειδικό ρευματοδότη φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Μπορεί να αποδώσει περίπου 20 έως 120 χιλιόμετρα αυτονομία ανά ώρα φόρτισης. Μπορούν να βρεθούν εξίσου σε σπίτια, χώρους εργασίας και σε δημόσιους χώρους. Παρόλο που είναι ταχύτεροι από τους φορτιστές επιπέδου 1, είναι ακριβότεροι και έχουν μεγαλύτερο αντίκτυπο στην επιβάρυνση του ηλεκτρικού δικτύου.

Ταχεία φόρτιση με συνεχές ρεύμα (DC)

Αυτή η κατηγορία φορτιστών χρησιμοποιεί συνεχές ρεύμα (DC) σε αντίθεση με τις προηγούμενες που χρησιμοποιούν εναλλασσόμενο. Είναι ο ταχύτερος διαθέσιμος φορτιστής καθώς επιτυγχάνονται πολύ γρήγορες φορτίσεις ανάλογα με την ισχύ του εξωτερικού φορτιστή (από 40kW έως και 350 kW) και το ΗΟ μπορεί να φορτιστεί έως και 80% της μπαταρίας του σε 30-60 λεπτά. Χρησιμοποιούνται γενικά σε δημόσιους σταθμούς φόρτισης λόγω του υψηλού κόστους και της κατανάλωσης ισχύος. Δεν είναι κάθε μοντέλο ΗΟ 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 ΗΟ.

KNOW YOUR EV CHARGING STATIONS		
 <p>AC Level One</p> <p>VOLTAGE 120V 1-Phase AC</p> <p>AMPS 12–16 Amps</p> <p>CHARGING LOAD 1.4–1.9 kW</p> <p>CHARGING TIME 3–5 Miles per Hour</p>	 <p>AC Level Two</p> <p>VOLTAGE 208V or 240V 1-Phase AC</p> <p>AMPS 12–80 Amps (Typ. 32 Amps)</p> <p>CHARGING LOAD 2.5–19.2 kW (Typ. 6.6 kW)</p> <p>CHARGING TIME 12–60 Miles per Hour</p>	 <p>DC Fast Charge</p> <p>VOLTAGE 208V or 480V 3-Phase AC</p> <p>AMPS >100 Amps</p> <p>CHARGING LOAD 50–350 kW</p> <p>CHARGING TIME 60–80 Miles in 20 Minutes</p>

Εικόνα 7 Βασικά Επίπεδα Φόρτισης [4].

Στατική και Δυναμική Ασύρματη Φόρτιση

Η ασύρματη φόρτιση [7] των ηλεκτρικών οχημάτων ανάλογα την εφαρμογή διακρίνεται σε δύο κατηγορίες, τη στατική ασύρματη φόρτιση και τη δυναμική ασύρματη φόρτιση.

Στην στατική ασύρματη φόρτιση ή αλλιώς SWCS, όπως δηλώνει και το όνομα, η μπαταρία του ΗΟ φορτίζει όταν είναι ακίνητη (σταματημένο όχημα). Παρκάροντας το όχημα σε πάρκινγκ ή γκαράζ όπου υποστηρίζεται η ασύρματη φόρτιση, πραγματοποιείται φόρτιση του οχήματος με την ευθυγράμμιση του πομπού που βρίσκεται εγκατεστημένος υπόγεια στο έδαφος με τον δέκτη ο οποίος είναι τοποθετημένος κάτω από το όχημα. Η διάρκεια της φόρτισης αυτής εξαρτάται από το μέγεθος του τροφοδοτικού AC του οχήματος καθώς και από την απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη. Ο πιο αποδοτικός τρόπος φόρτισης πραγματοποιείται αξιοποιώντας περιοχές όπου το αυτοκίνητο μένει σταθμευμένο για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

Στη δυναμική ασύρματη φόρτιση ή αλλιώς DWCS, όπως φαίνεται και από το όνομα της, η ασύρματη φόρτιση μπορεί να γίνει όσο το όχημα βρίσκεται σε λειτουργία. Η ισχύς μεταφέρεται μέσω του αέρα από τον ακίνητο πομπό στην περιέλιξη του δέκτη του κινούμενου οχήματος. Λόγω του ότι η μπαταρία φορτίζεται συνεχώς κατά τη διάρκεια ενός ταξιδιού, ο συγκεκριμένος τρόπος φόρτισης υποστηρίζει την απόσταση αρκετών χιλιομέτρων του οχήματος. Αυτό ελαχιστοποιεί την ανάγκη μεγάλης χωρητικότητας μπαταρίας του οχήματος γεγονός που μειώνει το βάρος του ΗΟ.

1.1.5 Τύποι Συσσωρευτών Ηλεκτρικών Οχημάτων

Συσσωρευτής ή με άλλα λόγια μπαταρία, είναι ηλεκτροχημικές διατάξεις που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική κατά την εκφόρτισή τους και αντίστροφα κατά τη φόρτιση τους. Οι συσσωρευτές χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας και η φόρτιση τους γίνεται με ηλεκτρονικούς μετατροπείς εναλλασσόμενης ή συνεχής τάσης. Από τη στιγμή που δημιουργήθηκαν οι πρώτες μπαταρίες (τέλη 19ου αιώνα) έγιναν προσπάθειες δημιουργίας οχημάτων που θα κινούνταν με αυτές. Πλέον οι συσσωρευτές αποτελούν το πιο σημαντικό μέρος ενός ηλεκτρικού οχήματος. Ωστόσο, το κόστος των μπαταριών είναι υψηλό, ανεβάζοντας σημαντικά το κόστος αγοράς ενός ηλεκτρικού οχήματος συγκριτικά με το κόστος ενός συμβατικού. Βέβαια, έχει πραγματοποιηθεί σημαντική βελτίωση και ο στόχος είναι η ευρεία παραγωγή συσσωρευτών με όσο γίνεται μικρότερο κόστος, μεγαλύτερη χωρητικότητα και ισχύ καθώς και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

Οι βασικές κατηγορίες [8] , [34] συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται σε ΗΟ είναι οι παρακάτω:

- **Ιόντων Λιθίου (Li-On)**

Αφορά τον πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο τύπο μπαταρίας σε ηλεκτρικά οχήματα κυρίως σε BEV και PHEV, καθώς και είναι γενικά γνωστός αφού χρησιμοποιείται και σε πολλούς φορητούς ηλεκτρονικούς εξοπλισμούς όπως κινητά τηλέφωνα και φορητούς υπολογιστές. Αυτός ο συσσωρευτής έχει υψηλή αναλογία ισχύος προς βάρος, υψηλή ενεργειακή απόδοση και αρκετά καλή απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες. Η μπαταρία έχει μεγαλύτερη αναλογία ενέργειας ανά βάρος, παράμετρος σημαντική για τα ΗΟ. Ακόμη, αυτή η μπαταρία έχει χαμηλό επίπεδο «αυτοεκφόρτισης» συνεπώς είναι ικανή να διατηρεί την πλήρη φόρτιση της και να είναι προτιμότερη από άλλες. Σημαντικό είναι επίσης το γεγονός του ότι τα περισσότερα μέρη της μπαταρίας μπορούν να ανακυκλωθούν, προωθώντας την περιβαλλοντική συνείδηση.

- **Υβριδίου Νικελίου-Μετάλλου (NiMH)**

Ο συγκεκριμένος τύπος χρησιμοποιείται κυρίως στα υβριδικά-ηλεκτρικά οχήματα HEV αλλά και σε ορισμένα BEV οχήματα. Έχουν μεγαλύτερο κύκλο ζωής από τις μπαταρίες ιόντων λιθίου ή τις μπαταρίες μολύβδου. Επίσης είναι ασφαλείς και αντέχουν σε εσφαλμένη χρήση. Στα μειονεκτήματα τους περιλαμβάνεται το ακριβό κόστος, το υψηλό ποσοστό αυτοεκφόρτισης, η αύξηση θερμότητας σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτές οι ελλείψεις κάνουν τις μπαταρίες αυτές πιο χρήσιμες για τα HEV τα οποία δε χρειάζεται να επαναφορτίσουν τις μπαταρίες του εκτός του συστήματος.

- **Μολύβδου (SLA)**

Αφορούν τις πιο παλαιές επαναφορτιζόμενες μπαταρίες. Συγκριτικά με τις μπαταρίες Li-On και NiMH, αυτές οι μπαταρίες χάνουν χωρητικότητα και είναι πιο βαριές αλλά η τιμή είναι σχετικά φθηνή και ασφαλής. Οι SLA χρησιμοποιούνται κυρίως για

επαγγελματικά οχήματα ως δευτερεύον σύστημα αποθήκευσης ενώ υπάρχουν έρευνες που επενδύουν σε SLA μπαταρίες μεγάλης χωρητικότητας.

- **Υπερπυκνωτές**

Οι μπαταρίες αυτές όπως και οι SLA μπαταρίες χρησιμοποιούνται κυρίως ως δευτερεύουσες συσκευές αποθήκευσης σε ηλεκτρικά οχήματα. Ουσιαστικά, σε αντίθεση με άλλες ηλεκτροχημικές μπαταρίες, αυτός ο τύπος μπαταρίας αποθηκεύει πολωμένο υγρό ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και τον ηλεκτρολύτη. Αυξάνοντας την επιφάνεια του υγρού, αυξάνεται και η ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας.

- **ZEBRA**

Οι ZEBRA αφορούν Ερευνητική Δραστηριότητα Μπαταριών Μηδενικών Εκπομπών. Οι μπαταρίες αυτές βρίσκουν εφαρμογή σε ηλεκτρικά οχήματα και είναι φθηνές και αρκετά ασφαλείς. Επίσης έχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, περισσότερους από 1000 κύκλους ζωής και ανοχή βραχυκυκλώματος. Το κύριο πρόβλημα με τις μπαταρίες αυτές είναι η λειτουργία τους σε θερμοκρασία 270-350° C και η χαμηλή πυκνότητα ισχύος που τις καθιστά ακατάλληλες για εφαρμογές σε BEV.

Characteristics	Lead Acid	NiMH	ZEBRA	Li-ion
Nominal cell voltage (V)	2	1.2	2.58	2.5/ 3.3/ 3.6–3.7
Specific energy (Wh/kg)	30–45	30–80	90–100	90–220
Energy density (Wh/L)	60–75	140–300	160	280–400
Specific power (Wh/kg)	180	250–1000	150	600–3400
Cycle life	500–800	500–1000	1000	1000–8000
Self-discharge (%/month)	2–4	20–30	0	2–5
Temperature range (°C)	–20–60	–20–60	270–350	–20–60
Relative costs (\$/kWh)	150	500	270	700
Efficiency (%)	85	80	75–85	93

Εικόνα 8 Σύγκριση διάφορων τύπων συσσωρευτών [8]

1.1.6 V2G Λειτουργία

Η λειτουργία Vehicle to Grid (V2G) επιτρέπει στα ηλεκτρικά οχήματα (EV) να παρέχουν ενέργεια από τις μπαταρίες τους πίσω στο ηλεκτρικό δίκτυο όταν είναι σταθμευμένα, προσφέροντας σημαντικές υπηρεσίες στο δίκτυο και δημιουργώντας έσοδα για τους ιδιοκτήτες τους. Ο όρος V2G προέρχεται από την αγγλική φράση "Vehicle to Grid", δηλαδή "Όχημα προς Δίκτυο", υποδηλώνοντας αυτήν την διπλή κατεύθυνση ροής ενέργειας. Ενώ πολλά οχήματα χρησιμοποιούνται μόνο ένα μικρό μέρος της ημέρας, ένα μεγάλο ποσοστό τους είναι διαθέσιμο για V2G, παρέχοντας έτσι ένα σημαντικό απόθεμα ενέργειας για το δίκτυο.

Στη λειτουργία Vehicle to Grid (V2G), η ενέργεια μπορεί να επιστραφεί στο ηλεκτρικό δίκτυο με δύο βασικούς τρόπους:

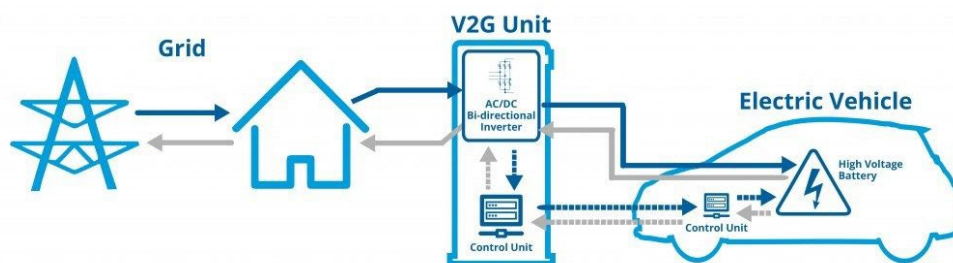
- **Αμφίδρομη V2G Λειτουργία (Bidirectional V2G)**

Περιλαμβάνει τη δυνατότητα αποφόρτισης του συσσωρευτή του οχήματος, επιτρέποντας την παροχή ενέργειας από το όχημα προς το δίκτυο. Παράλληλα, περιλαμβάνει την παραδοσιακή φόρτιση του οχήματος από το δίκτυο. Το πλεονέκτημα είναι ότι δίνει τη δυνατότητα στο όχημα να επιστρέψει την αποθηκευμένη ενέργεια στο δίκτυο, παρέχοντας ευελιξία και υποστήριξη σε περιόδους αυξημένης ζήτησης.

- **Μονής Κατεύθυνσης V2G Λειτουργία (Unidirectional V2G)**

Περιλαμβάνει την αποφυγή υπερφόρτισης του δικτύου ρυθμίζοντας τον ρυθμό φόρτισης του συσσωρευτή του οχήματος, ώστε να φορτίζει όταν υπάρχει περίσσεια ενέργειας στο δίκτυο. Δεν επιτρέπει την επιστροφή ενέργειας από το όχημα στο δίκτυο. Το θετικό είναι ότι μπορεί να βοηθήσει στη διαχείριση της ζήτησης αποφεύγοντας την φόρτιση σε ώρες αιχμής, αλλά χωρίς να προσφέρει ενέργεια πίσω στο δίκτυο. Η μονής κατεύθυνσης V2G λειτουργία έχει πιο περιορισμένες δυνατότητες αλλά θεωρείται πιο εύκολα προσβάσιμη από την αμφίδρομη καθώς για την έγχυση ενέργειας στο δίκτυο απαιτείται ειδικός εξοπλισμός ηλεκτρονικών ισχύος ο οποίος δεν προσφέρεται στα ήδη υπάρχοντα μοντέλα EV της αγοράς. Επίσης είναι λογικό ο οδηγός να μην είναι διατεθειμένος να δώσει την έγκριση του για αποφόρτιση της μπαταρίας του για διαφορετικό σκοπό από την μετακίνηση του οχήματος του ή να φοβάται για σχετική φθορά του συσσωρευτή μέσω συχνής φόρτισης και εκφόρτισης κατά τη V2G λειτουργία. Στην παρούσα εργασία βέβαια, θα εστιάσουμε στο bidirectional V2G, οπότε όταν γίνεται αναφορά στη V2G λειτουργία θα σημαίνει αποκλειστικά και μόνο αμφίδρομη λειτουργία. Αξίζει να σημειωθεί επίσης ότι πρακτικά η λειτουργία V2G δεν έχει εφαρμοστεί πρακτικά παρά μόνο σε θεωρητικό και ερευνητικό επίπεδο. Προσθέτοντας λοιπόν, μεγάλο όγκο ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, σημειώνεται αντίστοιχη αύξηση της ζήτησης φορτίου σε αυτό. Συνεπώς προκύπτει η ανάγκη βέλτιστης διαχείρισης ενέργειας. Η V2G τεχνολογία εξυπηρετεί στην καλύτερη διαχείριση και αξιοποίηση

των σταθμευμένων οχημάτων καθώς και έχει ως στόχο την αμφίδρομη ροή ηλεκτρικής ενέργειας τόσο από το HO προς το δίκτυο, αξιοποιώντας μέρος της ενέργειας από τις μπαταρίες των οχημάτων, όσο και από το δίκτυο προς το HO. Επίσης χρησιμοποιώντας τεχνολογίες ΑΠΕ (Φωτοβολταϊκά, Ανεμογεννήτριες, κυψέλες υδρογόνου) σε ένα όχημα κάθε καταναλωτής μπορεί να γίνει και παραγωγός και να προσφέρει ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο ή απλά να καλύπτει μέρος της ζήτησης του. Αξίζει να αναφερθεί ότι έρευνες [6] έχουν δείξει ότι το 95% των οχημάτων είναι σταθμευμένο κατά τη διάρκεια της ημέρας, οπότε το ποσοστό αυτό είναι διαθέσιμο ώστε να εφαρμοστεί τεχνολογία V2G. Η αρχιτεκτονική V2G αποτελείται από HO και συστήματα που συλλέγουν δεδομένα από ορισμένο αριθμό οχημάτων και τα μεταφέρουν στο διαχειριστή του δικτύου ώστε να ολοκληρώνονται οι διεργασίες του δικτύου πιο αποδοτικά. Αντίστοιχα, οι aggregators μεταφέρουν απαραίτητες πληροφορίες και από την πλευρά του δικτύου προς τα HO. Οι aggregators παρακολουθούν το SOC ή αλλιώς την κατάσταση φόρτισης των μπαταριών των HO και τα ομαδοποιούν. Για την κάλυψη των αναγκών του δικτύου είναι απαραίτητη η έγχυση και απορρόφηση ενέργειας επιπέδου MWh. Ο CA έχει ευθύνη για την παρακολούθηση των οχημάτων και αναλαμβάνει τη συναλλαγή ηλεκτρικής ισχύος από τη μεριά των HO με βάση τη μεταβαλλόμενη τιμή αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας. Έπειτα, LAs έχουν οργανωθεί σε ιεραρχική δομή και κατανέμονται σε διάφορες περιοχές. Κάθε LA είναι υπεύθυνο να παρακολουθεί τα οχήματα που βρίσκονται στην περιοχή δικαιοδοσίας του και μεταφέρει τα δεδομένα στον CA αυτόματα, ώστε να γίνεται η επιτήρηση μεγάλου όγκου οχημάτων πιο αποδοτικά. Στο δίκτυο υφίσταται ροή ενέργειας και πληροφορίας μέσω ανταλλαγής πληροφοριών διαφορετικού τύπου όπως το SOC κάθε HO και η τιμή ενέργειας και η διαθεσιμότητα ισχύος των HO. Στη συνέχεια ο χειριστής του δικτύου έχει τη δυνατότητα να στείλει σήμα στον CA ώστε να ζητήσει ηλεκτρική ισχύ ο οποίος τελικά ειδοποιεί το στόλο των οχημάτων για παροχή της απαιτούμενης ισχύος.



Εικόνα 9 Σχηματική Αναπαράσταση του V2G [10]

1.1.7 Διαχείριση Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων

Αν και τα ηλεκτρικά οχήματα διαθέτουν αρκετά πλεονεκτήματα σε διάφορες πτυχές λειτουργίας του συστήματος ισχύος, μπορούν να αποτελέσουν πηγή προβλημάτων στη λειτουργία του συστήματος εφόσον κατά την αυξανόμενη διείσδυση τους στο σύστημα δεν υφίσταται κατάλληλος έλεγχος. Το δίκτυο διανομής είναι το κομμάτι του συστήματος ισχύος το οποίο θα παρέχει ισχύ φόρτισης στα PEV ή θα απορροφά την ισχύ που εγχέεται από αυτά (V2G λειτουργία), συνεπώς είναι το πρώτο σημείο που θα αντιμετωπίσει προβλήματα υπερφόρτωσης, αστάθεια τάσης, συντονισμό προστασίας κτλ. Ως εκ τούτου, κρίνεται αναγκαίο να υιοθετηθούν τεχνικές έξυπνης φόρτισης και διαχείρισης ισχύος όπως επίσης και ενέργειες για τον περιορισμό αυτών των προβλημάτων ή ακόμη και την αλλαγή των προβλημάτων αυτών σε ευκαιρία βελτίωσης της λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να επιτραπεί η περαιτέρω ενσωμάτωση τους στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Για παράδειγμα, η χρήση τους ως μεγάλες συσκευές κατανεμημένης αποθήκευσης ενέργειας θα βοηθήσει στην ενσωμάτωση περισσότερων ΑΠΕ στο δίκτυο. [2] [3]. Αναφορικά με την συνεργασία μεταξύ PEV και δικτύου διανομής, έχει πραγματοποιηθεί αρκετή έρευνα με σκοπό το βέλτιστο έλεγχο φόρτισης PEV, ο οποίος θα μειώσει τις αιχμές ζήτησης φορτίου διανομής, την αστάθεια της τάσης, τις απώλειες ενεργού και άεργου ισχύος του δικτύου διανομής και τέλος θα μειώσει τη συμφόρηση του δικτύου. Επιπλέον, τα PEV έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν βοηθητικές υπηρεσίες στο δίκτυο καθώς ανάλογα με τις συνθήκες φόρτισης και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, είναι σε θέση να διοχετεύουν ισχύ στο δίκτυο (V2G), να παρέχουν υποστήριξη συχνότητας και ρύθμιση άεργου ισχύος με την προϋπόθεση ότι χρησιμοποιούν κατάλληλους μετατροπείς .

1.1.8 Δίκτυο Κρήτης

Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης, προς το παρόν, είναι αυτόνομο και μη διασυνδεδεμένο με το ηπειρωτικό δίκτυο [11]. Είναι υψίστης σημασίας η διασύνδεση με τον υπόλοιπο κορμό της Ελλάδας τόσο για λόγους οικονομικούς όσο και περιβαλλοντικούς. Συνεπώς, έγιναν τεράστια βήματα για την διασύνδεση της Κρήτης και αναμένεται η πλήρης ένταξη της στο διασυνδεδεμένο σύστημα της Ελλάδας έως το 2024. Στα θετικά περιλαμβάνεται η αύξηση του ηλεκτρικού χώρου ώστε να διεισδύσουν περαιτέρω ΑΠΕ στην Κρήτη καθώς και η παύση λειτουργίας των συμβατικών σταθμών παραγωγής οδηγώντας στο μηδενισμό των σχετικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Το πιο σημαντικό πλεονέκτημα της διασύνδεσης, αφορά την ποιότητα και αξιοπιστία τροφοδότησης των φορτίων της Κρήτης.

Στο Σ.Η.Ε της Κρήτης λειτουργούν 3 θερμικοί συμβατικοί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίοι αποτελούνται συνολικά από 27 συμβατικές μονάδες με συνολική εγκατεστημένη ισχύς 820,02 MW και μέγιστη αποδιδόμενη καθαρή ισχύ θέρους 695,86 MW, *Εικόνα 13*. Οι μονάδες diesel και οι ατμοστρόβιλοι χρησιμοποιούν ως καύσιμο μαζούτ, ενώ οι αεριοστρόβιλοι και οι μονάδες συνδιασμένου κύκλου χρησιμοποιούν πετρέλαιο ντίζελ.

Συγκεκριμένα έχουμε τους παρακάτω.

- **ΑΗΣ Λινοπεραμάτων:**

Αποτελείται από 15 μονάδες με καύσιμο μαζουτ και diesel, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος **272,59 MW** (μέγιστη απόδοση καθαρής ισχύς θέρους 232,75 MW) και συγκεκριμένα από έξι μονάδες ατμοστροβίλων, τέσσερις μονάδες Diesel και πέντε μονάδες αεριοστροβίλων.

Η τοποθεσία του βρίσκεται στο Γάζι, νομό Ηρακλείου και αφορά τον πρώτο σταθμό ηλεκτρικής ενέργειας που εγκαταστάθηκε στο νησί.



Εικόνα 10 ΑΗΣ Λινοπεραμάτων

- **ΑΗΣ Χανίων :**

Η τοποθεσία του βρίσκεται στην Ξυλοκαμάρα, νομό Χανίων και αποτελείται από 9 μονάδες με καύσιμο diesel, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος **345,19 MW** (μέγιστη απόδοση καθαρής ισχύς θέρους 272,11 MW) και συγκεκριμένα από μια μονάδα ατμοστροβίλου και οκτώ μονάδες αεριοστροβίλων.



Εικόνα 11 ΑΗΣ Χανίων

- **ΑΗΣ Αθρινολάκκου :**

Η τοποθεσία του βρίσκεται στο νομό Λασιθίου και αποτελείται από 4 μονάδες με καύσιμο μαζουτ, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος **202,24 MW** (μέγιστη απόδοση καθαρής ισχύς θέρους 191 MW) και συγκεκριμένα από δύο ατμοστρόβιλους και δύο μονάδες Diesel.



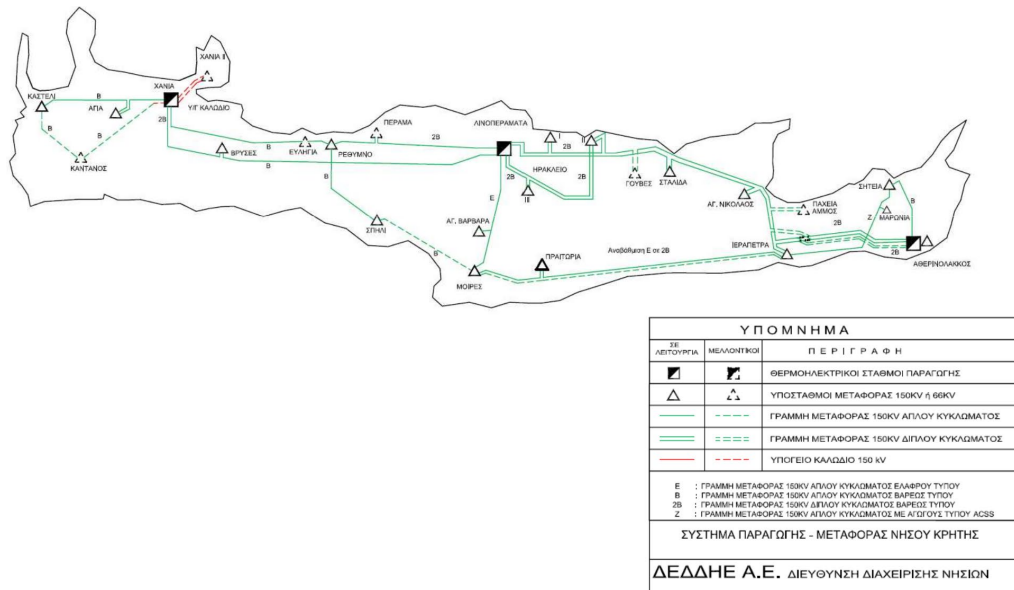
Εικόνα 12 ΑΗΣ Αθρινολάκκου

Τέλος στην Κρήτη βρίσκονται σε λειτουργία 35 Αιολικά Πάρκα, 1047 Φωτοβολταικοί Σταθμοί και 1 Μικρός Υδροηλεκτρικός Σταθμός συνολικής ισχύς εγκατάστασης στα 278,65 MW.

ΟΝΟΜΑΣΙΑ ΣΤΑΘΜΟΥ	ΜΟΝΑΔΑ	ΚΑΥΣΙΜΟ	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ GROSS [MW]	ΜΕΠΙΣΤΗ ΑΠΟΔΙΔΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΘΕΡΟΥΣ [MW]	ΕΤΟΣ ΛΗΞΗΣ ΑΔΕΙΑΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	ΣΧΟΛΙΟ
ΑΗΣ ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΩΝ	ATM2	ΜΑΖΟΥΤ	15	13	2020	
	ATM3	ΜΑΖΟΥΤ	15	13	2020	
	ATM4	ΜΑΖΟΥΤ	25	22,35	2020	
	ATM5	ΜΑΖΟΥΤ	25	22	2021	
	ATM6	ΜΑΖΟΥΤ	25	22	2021	
	A/Σ 1	DIESEL	16,25	12,5	2020	σε ψυχρή εφεδρεία
	A/Σ 2	DIESEL	16,25	12,5	2020	
	A/Σ 3	DIESEL	43,3	36,3	2027	
	A/Σ 4	DIESEL	14,72	12,8	2026	
	A/Σ 5	DIESEL	27,95	24,3	δεν έχει άδεια παραγωγής	
	D1	ΜΑΖΟΥΤ	12,28	10,5	2020	
	D2	ΜΑΖΟΥΤ	12,28	10,5	2020	
	D3	ΜΑΖΟΥΤ	12,28	10,5	2020	
	D4	ΜΑΖΟΥΤ	12,28	10,5	2020	
Σύνολο - ΑΗΣ ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΩΝ			272,59	232,75		
ΑΗΣ ΧΑΝΙΩΝ	A/Σ 1	DIESEL	16,2		2020	δεν λειτουργεί λόγω βλάβης
	A/Σ 4	DIESEL	20	17,25	2020	σε ψυχρή εφεδρεία
	A/Σ 5	DIESEL	30	26,2	2020	
	A/Σ 11	DIESEL	59,37	49,63	2023	
	A/Σ 12	DIESEL	59,37	49,63	2023	
	A/Σ 2-13	DIESEL	27,95	24,4	δεν έχει άδεια παραγωγής	
	A/Σ 6	DIESEL	44,9	105	2030	ΣΚ Χανίων
	A/Σ 7		44,9			
	ATM 8		42,5			
Σύνολο - ΑΗΣ ΧΑΝΙΩΝ			345,19	272,11		
ΑΗΣ ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΥ	D1	ΜΑΖΟΥΤ	51,12	49	2034	
	D2	ΜΑΖΟΥΤ	51,12	49	2034	
	ATM1	ΜΑΖΟΥΤ	50	46,5	2047	
	ATM2	ΜΑΖΟΥΤ	50	46,5	2048	
Σύνολο - ΑΗΣ ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΥ			202,24	191		
Σύνολο ΚΡΗΤΗΣ			820,02	695,86		

Εικόνα 13 Το Σύστημα Παραγωγής της Κρήτης [11]

Όσον αφορά το Σύστημα Μεταφοράς της Κρήτης *Εικόνα 14*, απαρτίζεται από ένα δίκτυο γραμμών υψηλής και υπερυψηλής τάσης το οποίο μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους σταθμούς παραγωγής προς τα κέντρα κατανάλωσης του νησιού. Στο πλαίσιο ενίσχυσης της ενεργειακής ασφάλειας και μείωσης κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας προγραμματίζεται η διασύνδεση της Κρήτης με το ηπειρωτικό δίκτυο Ελλάδας.



Εικόνα 14 Το Σύστημα Μεταφοράς της Κρήτης [11]

1.1.9 Χαρακτηριστικά στοιχεία και κόστος συμβατικών μονάδων του ΣΗΕ Κρήτης

Η γενική μορφή της συνάρτησης κόστους δίνεται από την τριτοβάθμια εξίσωση [34]:

$$F(P)=[A \cdot P^3+B \cdot P^2+C \cdot P+D] \cdot \text{κόστος καυσίμου (€/MWh)} \quad (1.1)$$

,όπου P η αποδιδόμενη ισχύς την εκάστοτε στιγμή σε MW και τα A, B, C, D οι παράμετροι κόστους των θερμικών μονάδων. Παρακάτω παρουσιάζονται οι παράμετροι κόστους των μονάδων καθώς και το κόστος του καυσίμου που χρησιμοποιούν:

Περιοχή	Μονάδα	A (Kg/MWh3)	B (Kg/MWh2)	C (Kg/MWh)	D (Kg)	Κόστος Καυσίμου (€/Kg)	Κόστος εκκίνησης (€)
Λινοπεράματα	ATM 1	17.377	-167.2	727.6	0.001	0.4149	2.500
	ATM 2	0.476	-11.824	378.937	0.001	0.4149	2.500
	ATM 3	0.476	-11.824	378.937	0.001	0.4149	2.500
	ATM 4	0.18	-8.053	355.088	0	0.4149	4.000
	ATM 5	0.092	-4.166	300.58	0	0.4149	4.000
	ATM 6	0.092	-4.166	300.58	0	0.4149	4.000
	Diesel 1	0.421	-8.378	230.368	0	0.4149	220
	Diesel 2	0.421	-8.378	230.369	0	0.4148	220
	Diesel 3	0.421	-8.378	230.368	0	0.4149	219
	Diesel 4	0.421	-8.378	230.369	0.01	0.4148	220
	AEP 1	2.48	-5.87	881.5	1.2	0.6982	179.1
	AEP 2	0.3195	-6.777	280.49	1622.8	0.6982	500
	AEP 3	0.0001	0.2533	197.65	2418	0.6982	1413
	AEP 4	0.0001	0.7913	234.95	1093.8	0.6982	858
Χανιά	AEP 5	0.001	0.3605	196.29	1675.8	0.6982	350
	AEP 1	0	0.01	267	2170	0.6962	99
	AEP 4	0	0.01	219	2865	0.6962	1300
	AEP 5	0	0.01	275	3757	0.6962	400
	AEP 6 ΣΚ	0.001	0.01	145.54	5120	0.6962	440.01
	AEP 7 ΣΚ	0.001	0.01	145.64	5120	0.6962	440.41
	AEP 11	0.001	0.01	227	5000	0.6962	0.1
	AEP 12	0.001	0.01	227	5000	0.6962	0.1
	AEP 13	0.001	0.3605	196.29	1675.8	0.6962	858
	Diesel 1	0.017	-1.3	222.6	0.27	0.3919	270
Αθρινόλακκος	Diesel 2	0.017	-1.3	222.6	0.27	0.3919	270
	ATM 1	-0.003	-0.958	282.91	0.8	0.3919	350
	ATM 2	-0.003	-0.958	282.91	0.8	0.3919	350

Εικόνα 15 Παράμετροι κόστους των θερμικών μονάδων του συστήματος Κρήτης [34].

1.1.10 10ετές Πρόγραμμα Ανάπτυξης ΑΔΜΗΕ

Ο ΑΔΜΗΕ, [12] ως κύριος διαχειριστής του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα, διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη διασφάλιση της σταθερότητας και της αποδοτικότητας του ενεργειακού δικτύου. Το 10ετές Πρόγραμμα Ανάπτυξης (2024-2033) αποσκοπεί στην αναβάθμιση και επέκταση του δικτύου για να ανταποκριθεί στις μελλοντικές ενεργειακές ανάγκες και προκλήσεις. Ο ΕΣΜΗΕ και το πρόγραμμα Ανάπτυξης ΑΔΜΗΕ είναι στενά συνδεδεμένα μεταξύ τους καθώς διαμορφώνουν και καθοδηγούν την ανάπτυξη του ελληνικού συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ΕΣΜΗΕ παρέχει την κατάλληλη στρατηγική για την ανάπτυξη του δικτύου λαμβάνοντας υπόψιν τις ανάγκες της αγοράς και διεθνείς υποχρεώσεις, ενώ ο ΑΔΜΗΕ στοχεύει στη υλοποίηση της μέσω συγκεκριμένων έργων.

Ένας από τους κύριους στόχους του προγράμματος είναι η ενίσχυση της αξιοπιστίας του δικτύου, μέσω της αναβάθμισης των υφιστάμενων υποδομών και της κατασκευής νέων γραμμών μεταφοράς. Παράλληλα, το πρόγραμμα προωθεί την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο, με στόχο την αύξηση του ποσοστού της καθαρής ενέργειας στο ενεργειακό μίγμα.

Ένα από τα σημαντικότερα έργα του προγράμματος είναι η ηλεκτρική διασύνδεση Κρήτης-Αττικής, η οποία θα βελτιώσει σημαντικά την ενεργειακή ασφάλεια και τη σταθερότητα της Κρήτης. Επιπλέον, η αναβάθμιση των υποσταθμών στην ηπειρωτική Ελλάδα θα αυξήσει την αποδοτικότητα του δικτύου και θα μειώσει τις απώλειες ενέργειας.

Το πρόγραμμα αναμένεται να ολοκληρωθεί σε τρεις φάσεις, με την πρώτη φάση να περιλαμβάνει την κατασκευή των πιο κρίσιμων υποδομών μέχρι το 2027. Η χρηματοδότηση θα προέλθει από ευρωπαϊκά κονδύλια, κρατικούς πόρους και ιδιωτικές επενδύσεις.

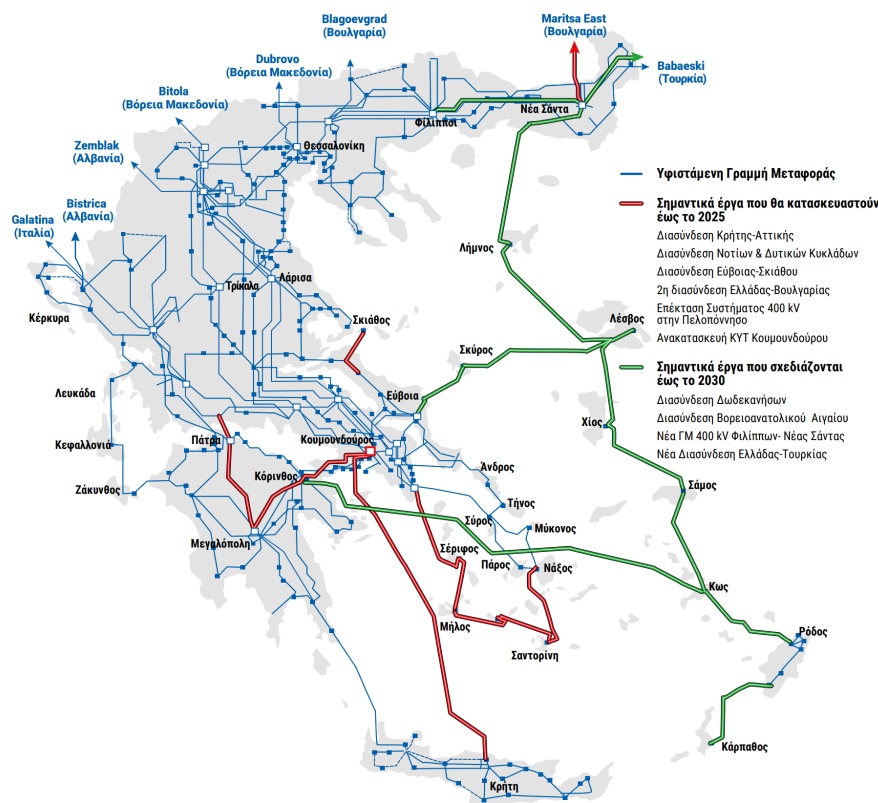
Η υλοποίηση του 10ετούς προγράμματος θα οδηγήσει στη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας και στην αύξηση των επενδύσεων στην ενεργειακή υποδομή. Παράλληλα, η ενίσχυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα συμβάλει στη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, προωθώντας τη βιώσιμη ανάπτυξη.

Το 10ετές Πρόγραμμα Ανάπτυξης του ΑΔΜΗΕ αποτελεί μια στρατηγική επένδυση στην ενεργειακή υποδομή της Ελλάδας, με στόχο την ενίσχυση της αξιοπιστίας, την προώθηση της καθαρής ενέργειας και τη βελτίωση της ενεργειακής ασφάλειας. Η επιτυχής υλοποίηση του προγράμματος θα έχει σημαντικά θετικά αποτελέσματα για την ελληνική οικονομία και κοινωνία.

1.1.11 Έργα Ανάπτυξης ΑΔΜΗΕ

Τα έργα ανάπτυξης [12] του Συστήματος για την περίοδο 2024-2033 που αφορούν το Δεκαετές Πρόγραμμα Ανάπτυξης αποτελούν μια στρατηγική επένδυση στην ενεργειακή υποδομή της Ελλάδας και αφορούν:

- Ενίσχυση του Συστήματος με νέα ΚΥΤ και Υ/Σ, νέες Γ.Μ., αναβαθμίσεις Γ.Μ., επεκτάσεις υφιστάμενων ΚΥΤ ή Υ/Σ, έργα τα οποία απαιτούνται για την κάλυψη των αναγκών που έχουν προβλεφθεί για αυτή τη χρονική περίοδο.
- Εκσυγχρονισμός υφιστάμενων υποδομών Υ/Σ και ΚΥΤ καθώς και των σχετικών υποδομών ελέγχου που τα συνοδεύουν.
- Έργα βελτιστοποίησης λειτουργίας και οικονομίας του Συστήματος, όπως ενίσχυση υφιστάμενων Υ/Σ και ανέγερση νέων Γ.Μ. για την καλύτερη κάλυψη αναγκών των χρηστών του Συστήματος.
- Προσθήκη νέων ή και αναβάθμιση ήδη υφιστάμενων διασυνδετικών Γ.Μ. με γειτονικές χώρες.
- Ανάπτυξη εκσυγχρονισμένων υποδομών SCADA, backbone και τηλεπικοινωνιακών ζεύξεων μεταξύ των ΥΣ και ΚΥΤ των ΚΕΕ



Εικόνα 16 Χάρτης Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας [12]

1.1.12 Έργα Ανάπτυξης Κρήτης ΑΔΜΗΕ

Διασύνδεση της Κρήτης με την Πελοπόννησο

Το συγκεκριμένο Έργο Διασύνδεσης αποτελεί διασύνδεση 150 kV Εναλλασσόμενου Ρεύματος 2x200 MVA και θεωρείται η πρώτη φάση διασύνδεσης της Κρήτης με το ΕΣΜΗΕ [12].

Το έργο απαρτίζεται από:

- Εγκατάσταση δύο υποβρύχιων καλωδίων μήκους 135 km έκαστο
- Αναβάθμιση υφιστάμενων εναέριων Γραμμών Μεταφοράς
- Κατασκευή νέων εναέριων Γραμμών Μεταφοράς
- Εγκατάσταση υπόγειων καλωδίων
- Υ/Σ στην Πελοπόννησο
- Υ/Σ στην Κρήτη
- Σύστημα ελεγχόμενης σύγχρονης αντιστάθμισης αέργου ισχύος (STATCOM) στο Ηράκλειο

Η ολοκλήρωση του Έργου σηματοδοτεί σημαντικό ορόσημο καθώς αφορά :

- Τη μεγαλύτερη σε μήκος (174 km) καλωδιακή διασύνδεση AC στον κόσμο.

- Τη μεγαλύτερη σε μήκος υποβρύχια καλωδιακή διασύνδεση ΥΤ, με τριπολικό καλώδιο τεχνολογίας μόνωσης XLPE στον κόσμο (132 km).
- Τη βαθύτερη υποβρύχια καλωδιακή διασύνδεση ΥΤ, με τριπολικό καλώδιο τεχνολογίας μόνωσης XLPE στον κόσμο (1.000 m).



Εικόνα 17 Ηλεκτρική Διασύνδεση Κρήτης-Πελοποννήσου [12]

Διασύνδεση της Κρήτης με την Αττική

Το συγκεκριμένο Έργο Διασύνδεσης περιλαμβάνεται στο «top 5» των πιο καινοτόμων έργων διασύνδεσης συνεχούς ρεύματος πανευρωπαϊκά [12].

Διαδρομή του Έργου:

- Έναρξη από τον ΣΜ ΕΡ/ΣΡ Αττικής κοντά στο ΚΥΤ Κουμουνδούρου.
- Υπόγεια όδευση δύο καλωδίων HVDC από ΣΜ έως σημείο προσαιγιάλωσης στην Πάχη Μεγάρων.
- Στην Παχη Μεγάρων, τα δύο καλώδια ποντίζονται στη θάλασσα και συνεχίζουν υποθαλάσσια διαδρομή έως την τοποθεσία προσαιγιάλωσης της Κορακιάς στην Κρήτη.
- Από την Κορακιά, τα δύο καλώδια οδεύουν προς τον τερματικό ΣΜ ΣΡ/ΕΠ Δαμάστας και τελικά η διασύνδεση με το δίκτυο της Κρήτης ολοκληρώνεται μέσω του νέου υποσταθμού GIS Δαμάστας.
- Η λειτουργία του Συστήματος θα ολοκληρωθεί με την τοποθέτηση δύο σταθμών ηλεκτροδίων, ένας στην Αττική και ένας στο Ηράκλειο.

Η ολοκλήρωση του Έργου σηματοδοτεί σημαντικό ορόσημο καθώς αφορά :

- Αποτελεί τη νησιωτική διασύνδεση με τη μεγαλύτερη ισχύ (1.000 MW) παγκοσμίως, μαζί με τη Σαρδηνία.

- Βρίσκεται στην πρώτη 3άδα υποβρύχιων διασυνδέσεων με το μεγαλύτερο βάθος παγκοσμίως.
- Χρησιμοποιείται τάση 500 kV DC και η πλέον σύγχρονη τεχνολογία VSC
- Αποτελεί την πρώτη διασύνδεση συνεχούς ρεύματος στη Μεσόγειο που αξιοποιεί την υπερσύγχρονη τεχνολογία μετατροπών VSC.



Εικόνα 18 Ηλεκτρική Διασύνδεση Κρήτης-Αττικής [12]

Συνοψίζοντας, τα κύρια οφέλη της Διασύνδεσης του Αυτόνομου έως τώρα Ηλεκτρικού Συστήματος της Κρήτης με την υπόλοιπη Ελλάδα ως προς το Σύστημα, το Περιβάλλον και τους Καταναλωτές φαίνονται παρακάτω:

- Μείωση της πετρελαϊκής εξάρτησης της χώρας.
- Μείωση αερίων του Θερμοκηπίου.
- Αξιοποίηση των ΑΠΕ (Αιολικού και Ηλιακού δυναμικού) της Κρήτης.
- Μείωση των χρεώσεων ΥΚΩ για όλους τους καταναλωτές.
- Μείωση του κόστους παραγωγής ενέργειας.
- Μείωση περιβαλλοντικής επιβάρυνσης στην Κρήτη λόγω της σταδιακής μείωσης παραγωγής ενέργειας από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς.
- Αξιόπιστη και σταθερή λειτουργία του ενεργειακού δικτύου της Κρήτης με σημαντικά οφέλη στον τουρισμό και γενικά στην οικονομική δραστηριότητα.

1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Στις μέρες μας, η αυτοκινητοβιομηχανία και οι ερευνητές έχουν εστιάσει την προσοχή τους στα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα καθώς και στα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα, λόγω της έλλειψης ορυκτών καυσίμων, της αύξησης των τιμών του πετρελαίου και των περιβαλλοντικών ανησυχιών. Επιπλέον, τα ηλεκτρικά οχήματα προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως χαμηλές εκπομπές αερίων και χαμηλό λειτουργικό κόστος. Τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν επίσης να συμβάλουν στη βελτίωση της αξιοπιστίας του δικτύου, της ασφάλειας λειτουργίας και της αύξησης της διείσδυσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να βοηθήσουν τις ΑΠΕ καθώς υπό κατάλληλο έλεγχο η συνολική ισχύς των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την άμβλυνση μεγάλων αποκλίσεων παραγωγής ενέργειας από τις ΑΠΕ και την πλήρωση των «κοιλιάδων» του φορτίου του συστήματος ενώ «ξυρίζει» τα φορτία αιχμής. Παρά το γεγονός ότι τα ηλεκτρικά οχήματα διαθέτουν πολλά πλεονεκτήματα σε διάφορες πτυχές της λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, μπορούν επίσης να αποτελέσουν πηγή προβλημάτων λειτουργίας στο σύστημα ισχύος. Τα προβλήματα αυτά γίνονται πιο εμφανή εάν δεν ελέγχονται κατάλληλα και η διείσδυσή τους στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται σημαντικά. Το δίκτυο διανομής είναι το τμήμα του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που θα παρέχει ισχύ φόρτισης στα ηλεκτρικά οχήματα ή θα απορροφά την ισχύ που εγχέεται από αυτά (λειτουργία V2G) και επομένως το πρώτο που θα αντιμετωπίσει προβλήματα υπερφόρτισης, αστάθειας τάσης κλπ [13]. Ως εκ τούτου, κρίνεται σημαντική η ενσωμάτωση έξυπνων τεχνικών φόρτισης και διαχείρισης ισχύος και ενέργειας για τη μείωση αυτών των προβλημάτων. Για παράδειγμα, η χρήση τους ως μεγάλες έξυπνες καταναεμημένες συσκευές αποθήκευσης ενέργειας θα βοηθήσει στην ενσωμάτωση περισσότερων ΑΠΕ [14], [15]. Όσον αφορά τη συνεργασία μεταξύ ηλεκτρικών οχημάτων και δικτύου διανομής, έχουν γίνει πολλές έρευνες για τον βέλτιστο έλεγχο φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με σκοπό τη μείωση αιχμών ζήτησης φορτίου διανομής, τη μείωση αστάθειας τάσης καθώς και τη μείωση των απωλειών ενεργού και αέργου ισχύος του δικτύου διανομής [16], [17]. Επιπλέον, τα ηλεκτρικά οχήματα θα είναι σε θέση να προσφέρουν βοηθητικές υπηρεσίες στο δίκτυο. Ανάλογα με τις συνθήκες φόρτισης και τον εξοπλισμό, τα ηλεκτρικά οχήματα ενδέχεται να είναι σε θέση να εγχέουν ισχύ στο δίκτυο (V2G), να παρέχουν υποστήριξη συχνότητας και ρύθμιση αέργου ισχύος, υπό την προϋπόθεση ότι χρησιμοποιούν κατάλληλους μετατροπείς φόρτισης [18], [19]. Τεχνικές διαχείρισης ισχύος και ενέργειας, όπως το ξύρισμα φορτίου αιχμής και η πλήρωση κοιλάδας, εφαρμόζονται σε ηλεκτρικά οχήματα μέσω κατάλληλης έξυπνης φόρτισης [20]. Ο οικονομικός αντίκτυπος της φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων αξιολογείται σε επίπεδο δικτύου διανομής. Μια στρατηγική ελαχιστοποίησης του κόστους φόρτισης συγκρίνεται με εκείνη που στοχεύει στο μέγιστο ξύρισμα φορτίου σε

επίπεδο δικτύου διανομής [21]. Στο [22], φαίνεται ότι το σύστημα φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων που χρησιμοποιεί ηλιακά φωτοβολταϊκά μπορεί να μειώσει το κόστος φόρτισης κατά 50-100%. Στο [23], προτείνεται μια μέθοδος που ελαχιστοποιεί το κόστος χρέωσης των ηλεκτρικών οχημάτων και ταυτόχρονα διασφαλίζει την κανονική λειτουργία του δικτύου διανομής. Στο [24], προτείνεται μια μέθοδος που διατηρεί βέλτιστα τις διακυμάνσεις συχνότητας μεταξύ των αποδεκτών ορίων υπό μεγάλη διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων. Σε αυτή την εργασία, η υποστήριξη συχνότητας παρέχεται βέλτιστα λαμβάνοντας υπόψη την ευελιξία του PEV. Στο [25], προτείνεται μια άλλη μέθοδος χρέωσης που ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος φόρτισης των PEV σε επίπεδο χώρου στάθμευσης. Στο [26], ο στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί το κόστος φόρτισης σε πραγματικό χρόνο, λαμβάνοντας υπόψη όλους τους περιορισμούς σε επίπεδο ηλεκτρικού οχήματος και δικτύου διανομής και με την ελάχιστη εξάρτηση από την πρόβλεψη ορισμένων κρίσιμων εισόδων του αλγορίθμου βελτιστοποίησης φόρτισης. Στο [27], χρησιμοποιείται μια μέθοδος βελτιστοποίησης βασισμένη σε σμήνη σωματιδίων για τη βέλτιστη φόρτιση ή εκφόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων. Ελήφθησαν υπόψη παράμετροι όπως οι απώλειες ισχύος ηλεκτρικού δικτύου, η καθημερινή ομαλότητα φορτίου και οι προτιμήσεις φόρτισης των ιδιοκτητών ηλεκτρικών οχημάτων. Στο [28] έχει γίνει έρευνα για την εκτίμηση της τιμής χρέωσης κατά την πλήρωση της κοιλάδας λαμβάνοντας υπόψη την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ. Στο [29], ένας αλγόριθμος διαχείρισης ισχύος εφαρμόζεται σε ένα σύστημα που περιλαμβάνει ΑΠΕ, Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας και ηλεκτρικά οχήματα. Στοχεύει στην παροχή εικονικής αδράνειας υποστηρίζοντας τη συχνότητα του συστήματος. Στο [30], προτείνεται ένα στοχαστικό γραμμικό μοντέλο προγραμματισμού για τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων για διάφορα σενάρια λειτουργίας. Στο [31], προτείνεται μια μέθοδος που επιλύει ένα πρόβλημα δρομολόγησης πολλαπλών οχημάτων με χρονικούς περιορισμούς και συγκρίνεται με διάφορους αλγορίθμους. Στο [32] προτείνεται μια μέθοδος προσομοίωσης μιας αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας που εξαρτάται από παραγωγούς-καταναλωτές και ηλεκτρικά οχήματα και μειώνει το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας.

1.3 Στόχος και Σχεδιασμός της Προτεινόμενης Μεθόδου

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας ήταν η δημιουργία μιας μεθοδολογίας για την αποτελεσματική, πολυκριτηριακή, βέλτιστη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων. Οι κύριοι στόχοι της μεθόδου είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους φόρτισης του ηλεκτρικού οχήματος και ταυτόχρονα η μείωση των διακυμάνσεων του καθαρού φορτίου (το φορτίο που απομένει μετά την αφαίρεση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ) του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η προτεινόμενη μέθοδος εφαρμόστηκε στο ηλεκτρικό σύστημα της Κρήτης και αξιολογήθηκε για διαφορετικά σενάρια λειτουργίας. Η αποτελεσματικότητα της

μεθόδου αποδεικνύεται από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και τη στατιστική τους ανάλυση.

Η μέθοδος που προτείνεται σε αυτή την εργασία περιλαμβάνει μια σειρά από χαρακτηριστικά που αναφέρονται παρακάτω.

1. Ένα ρεαλιστικό μοντέλο δραστηριότητας ηλεκτρικού οχήματος, βασισμένο σε δεδομένα πραγματικού κόσμου, αναπτύσσεται για την προσομοίωση του ημερήσιου προγράμματος του ηλεκτρικού οχήματος. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε λαμβάνει υπόψη διάφορες παραμέτρους που σχετίζονται με τον τύπο ηλεκτρικού οχήματος, τη συμπεριφορά του οδηγού και τα χαρακτηριστικά της περιοχής που ταξιδεύει το ηλεκτρικό όχημα. Με αυτόν τον τρόπο, οι χρονικές περίοδοι φόρτισης και οι ενεργειακές ανάγκες του ηλεκτρικού οχήματος υπολογίζονται ανά περίπτωση.
2. Προτείνονται δύο απλές και εύκολες στην εφαρμογή μέθοδοι βελτιστοποίησης φόρτισης σε επίπεδο ηλεκτρικό όχημα. Βασίζονται στην εκτίμηση μιας εικονικής τιμής ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία ορίζεται με τρόπο που ενσωματώνει την πραγματική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και το καθαρό φορτίο του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η πρώτη βελτιστοποίηση εφαρμόζεται σε ένα προς ένα τα οχήματα λαμβάνοντας υπόψιν όλους τους σχετικούς τεχνικούς και λειτουργικούς περιορισμούς του συστήματος φόρτισης ηλεκτρικού οχήματος και της μπαταρίας, ενώ στη δεύτερη βελτιστοποίηση αντιμετωπίζει το σύνολο των οχημάτων ως μια μπαταρία λαμβάνοντας υπόψιν τη συνολική συμπεριφορά των οχημάτων ανά χρονική στιγμή.
3. Οι προτεινόμενες μέθοδοι μπορούν να εφαρμοστούν εύκολα καθώς δεν χρησιμοποιούν χρονοβόρους υπολογισμούς και δεν απαιτούν εξελιγμένο εξοπλισμό. Οι είσοδοι που απαιτούνται αφορούν μόνο τις προβλέψεις της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας, της παραγωγής ΑΠΕ και του φορτίου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Οι παραπάνω είσοδοι είναι διαθέσιμες από τον διαχειριστή του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.
4. Οι προτεινόμενη μέθοδος βέλτιστης φόρτισης πληθυσμού ΗΟ πολλαπλών στόχων ενσωματώνεται με τη λεπτομερή μοντελοποίηση της δραστηριότητας των ηλεκτρικών οχημάτων για την παροχή ακριβούς εκτίμησης των επιπτώσεων της φόρτισής τους στο φορτίο του συστήματος ισχύος.

1.4 Δομή Μεταπτυχιακής Εργασίας

Στο Κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η μεθοδολογία για την υλοποίηση της μεθόδου φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, τα δεδομένα εισόδου του μοντέλου καθώς και τα εξεταζόμενα σενάρια ενώ στο Κεφάλαιο 3 αναλύονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των εξεταζόμενων σεναρίων. Τέλος, στο Κεφάλαιο 4 ακολουθούν τα συμπεράσματα και οι πιθανές μελλοντικές επεκτάσεις της εργασίας.

Κεφάλαιο 2

Περιγραφή Μεθοδολογίας Αλγορίθμου

2.1 Σκοπός και Παρουσίαση Αλγορίθμου

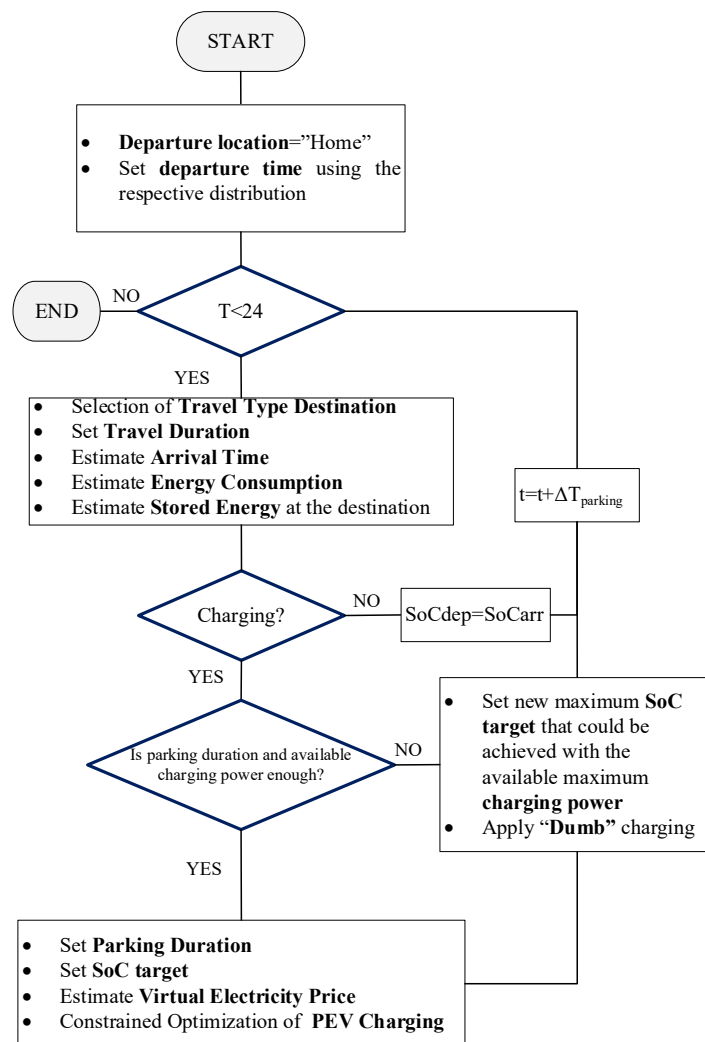
Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο και ταυτόχρονα η εξισορρόπηση της διακύμανσης του καθαρού φορτίου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας για τη ρύθμιση κάθε πιθανής επίπτωσης από την ενσωμάτωση των ΑΠΕ στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, τα δεδομένα εισόδου και η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου βασίστηκαν στην αξιοποίηση πραγματικών δεδομένων και ρεαλιστικών συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας τα οποία προσομοιώνουν τη στοχαστική συμπεριφορά του συστήματος. Αξίζει να σημειωθεί η σημασία της δημιουργίας ρεαλιστικών ημερήσιων προγραμμάτων οδήγησης ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς επηρεάζουν το φορτίο φόρτισης κατά τη διάρκεια της ημέρας και κατά συνέπεια το συνολικό φορτίο του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Η μοντελοποίηση του ημερήσιου προγράμματος για κάθε ηλεκτρικό όχημα και για κάθε νομό της Κρήτης διαμόρφωσε μια τελική ρουτίνα ηλεκτρικού οχήματος με τελικό σκοπό την εξαγωγή του συνολικού προφίλ φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων.

Παρακάτω φαίνεται η λογική που ακολουθείται για το ημερήσιο πρόγραμμα κάθε ΗΟ.

- Αρχικά η αναχώρηση ενός ηλεκτρικού οχήματος ξεκινάει από το «Home» τη χρονική στιγμή που προκύπτει χρησιμοποιώντας αντίστοιχη κατανομή πυκνότητας πιθανότητας. Αντίστοιχα το επίπεδο φόρτισης μπαταρίας (SoC) αρχικοποιείται κατά την εκκίνηση του οχήματος με τιμή από 80%-100% η οποία επιλέγεται από αντίστοιχη κατανομή πυκνότητας πιθανότητας.
- Ο επόμενος προορισμός του οχήματος καθώς και η διάρκεια του ταξιδιού που βασίζεται στην πόλη την οποία βρίσκεται το ηλεκτρικό όχημα, πραγματοποιείται με τυχαία επιλογή από αντίστοιχες κατανομές πυκνότητας πιθανότητας τόσο για την τοποθεσία προορισμού του οχήματος όσο και για τη διάρκεια του ταξιδιού.

- Η χρονική στιγμή άφιξης στο χώρο στάθμευσης προκύπτει από τη διάρκεια του ταξιδιού. Η απόφαση φόρτισης της μπαταρίας του οχήματος εξαρτάται από το επίπεδο φόρτισης μπαταρίας (SoC) κατά την άφιξη του ηλεκτρικού οχήματος και επιλέγεται από αντίστοιχη κατανομή. Προφανώς η μη φόρτιση της μπαταρίας έχει ως αποτέλεσμα η στάθμη της να είναι ίδια κατά την επόμενη εκκίνηση του οχήματος.
- Η χρονική διάρκεια φόρτισης λαμβάνεται χρησιμοποιώντας κατάλληλες κατανομές πυκνότητας πιθανότητας σύμφωνα με τον τύπο δραστηριότητας που έχει ο οδηγός του ηλεκτρικού οχήματος κατά την περίοδο φόρτισης.
- Η προτεινόμενη βέλτιστη μέθοδος φόρτισης για το ηλεκτρικό όχημα ή η «dumb» φόρτιση εφαρμόζονται εφόσον το επιλέξει ο οδηγός ή η διάρκεια στάθμευσης και η διαθέσιμη μέγιστη ισχύς φόρτισης δεν είναι αρκετή για να επιτευχθεί ο επιθυμητός στόχος επίπεδο φόρτισης μπαταρίας (SoC). Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για ένα 24ωρο και για κάθε όχημα.



Εικόνα 19 Αλγόριθμος εκτίμησης ημερήσιου προγράμματος ΗΟ και φόρτιση ΗΟ.

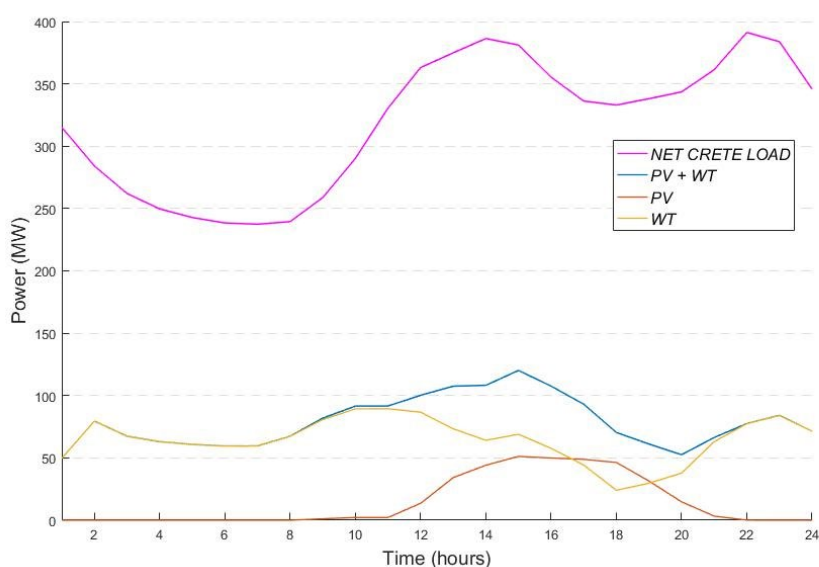
2.2 Δεδομένα Εισόδου Αλγορίθμου

1. Γενικά Δεδομένα Εισόδου του Μοντέλου

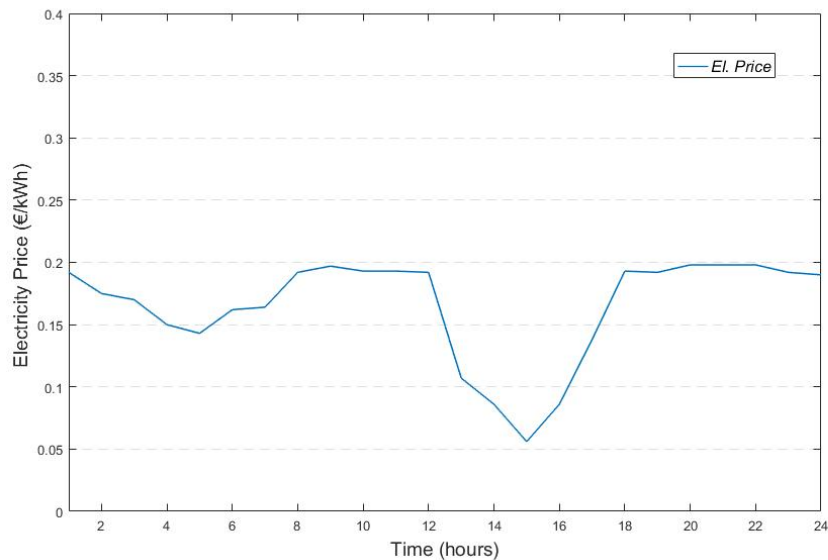
Όλα τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην εφαρμογή αντικατοπτρίζουν μεγέθη του Σ.Η.Ε. Κρήτης. Χρησιμοποιήθηκαν τόσο ρεαλιστικά δεδομένα όπως πραγματικοί τύποι οχημάτων και χρονοσειρές, όσο και στοχαστικά δεδομένων όπως κατανομές πυκνότητας πιθανότητας τα οποία περιγράφουν τα μεγέθη που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση.

- **Ημερήσιες Χρονοσειρές**

Για την συγκεκριμένη εφαρμογή, χρησιμοποιήθηκαν σειρές πραγματικού χρόνου ποσοτήτων που καταγράφηκαν στο ηλεκτροπαραγωγικό Σύστημα της Κρήτης. Αφορούν ημερήσιες προβλέψεις παραγωγής φωτοβολταϊκής και αιολικής ενέργειας, τιμής ηλεκτρικής ενέργειας και καθαρού φορτίου Συστήματος Κρήτης όπως φαίνεται στα Σχήματα 1 και 2.



Σχήμα 1 Ενδεικτικό Συνολικό Φορτίο Κρήτης & Ενδεικτική Παραγωγή ΑΠΕ (Φ/Β και Αιολικά)



Σχήμα 2 Ενδεικτική Τιμή Ηλεκτρικής Ενέργειας εντός Ημέρας

- **Τύποι Οχημάτων**

Η επιλογή κατηγοριών των ηλεκτρικών οχημάτων έγινε με βάση το κόστος αγοράς τους. Επιλέχθηκαν τέσσερα διαφορετικά μοντέλα με γενικά προσιτό κόστος καθώς τα ηλεκτρικά οχήματα χαμηλού και μεσαίου κόστους αναμένεται να κυριαρχήσουν στην αγορά. Τα χαρακτηριστικά τους π.χ. χωρητικότητα μπαταρίας, μέγιστος/ελάχιστος ρυθμός φόρτισης φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 1.

Parameters				
EV Model	1	2	3	4
P_{max} (kW)	4.6	3.7	11	7.2
SoC_{max} (kWh)	17.6	16	35	36.8
<i>Specific Cons.</i> (kWh/100km)	25.5	25.8	25	26

Πίνακας 1 Παράμετροι ΗΟ

2. Μοντέλο δραστηριότητας Ηλεκτρικού Οχήματος

Τα σημαντικά δεδομένα που είναι απαραίτητα για την παραγωγή του ημερήσιου προγράμματος ενός ηλεκτρικού οχήματος αποθηκεύονται στη δομή δεδομένων EV.field, στα πεδία της οποίας καταχωρούνται διανύσματα και μεταβλητές που φαίνονται συνοπτικά στην παρακάτω λίστα και αναλύονται στη συνέχεια:

ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΑ	Μ.Μ. ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΟΣ	ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ	Μ.Μ. ΜΕΤΑΒΛΗΤΗΣ
<i>EV.Tr_Destination</i>	<i>hours</i>	<i>EV.SoC0</i>	<i>%</i>
<i>EV.TDep</i>	<i>hours</i>	<i>EV.SoCmax</i>	<i>kWh</i>
<i>EV.ΔTtr</i>	<i>min</i>	<i>EV.SoCmin</i>	<i>kWh</i>
<i>EV.ΤArr</i>	<i>hours</i>	<i>EV.Pmax</i>	<i>kW</i>
<i>EV.ΔTch</i>	<i>hours</i>	<i>EV.Pmin</i>	<i>kW</i>
<i>EV.Vel</i>	<i>km/hour</i>	EV.Spec_Cons	<i>kWh/100 km</i>
<i>EV.ΔStr</i>	<i>km</i>		
<i>EV.Cons</i>	<i>kWh</i>		
<i>EV.Edep</i>	<i>kWh</i>		
<i>EV.Earr</i>	<i>kWh</i>		

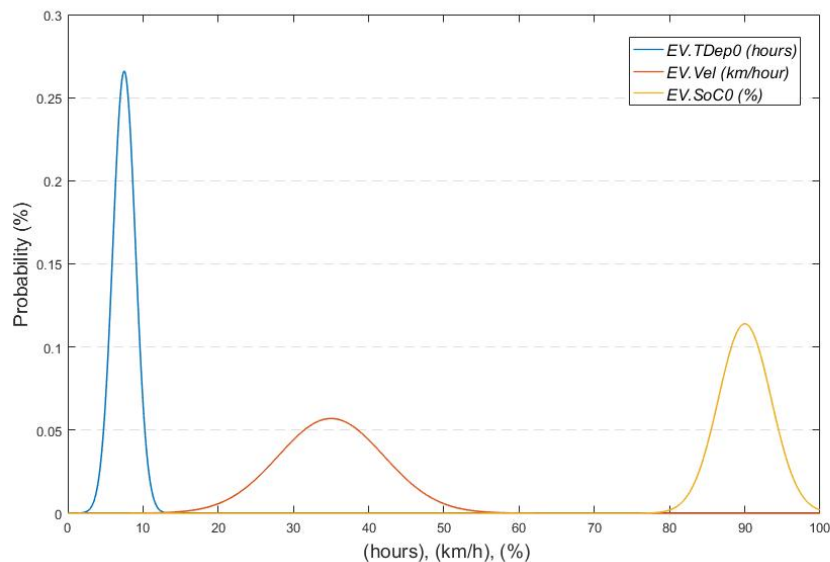
Πίνακας 2 Μεταβλητές και Διανύσματα

- **Μεταβλητές**

Στην προσομοίωση του συστήματος αξιοποιήθηκαν μεταβλητές, δηλαδή μεμονωμένες τιμές που αποθηκεύονται στα αντίστοιχα πεδία της δομής. Παρακάτω οι πιο σημαντικές μεταβλητές:

EV.SoC0

Δηλώνει το ποσοστό της αρχικής κατάστασης φόρτισης (SoC) του οχήματος κατά την έναρξη του ημερήσιου δρομολογίου του. Λαμβάνει τιμές από μια κανονική κατανομή, με μέση τιμή $\mu=90$ και τυπική απόκλιση $\sigma=3,5$ όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3 Χρονική Στιγμή Αναχώρησης ΗΟ, Ταχύτητα ταξιδιού ΗΟ &, Αρχικό SoC του ΗΟ.

EV.SoCmax & EV.SoCmin

Αναφέρονται στη μέγιστη και ελάχιστη χωρητικότητα φόρτισης ή αλλιώς την Ενέργεια (SoC) της μπαταρίας του οχήματος που έχει οριστεί από τον κατασκευαστή και εξαρτώνται από τον τύπο της μπαταρίας στον *Πίνακα 1*.

EV.Pmax & EV.Pmin

Αφορούν τη μέγιστη και την ελάχιστη Ισχύ Φόρτισης της μπαταρίας του οχήματος όπως φαίνεται και στον *Πίνακα 1*.

EV.Spec_Cons

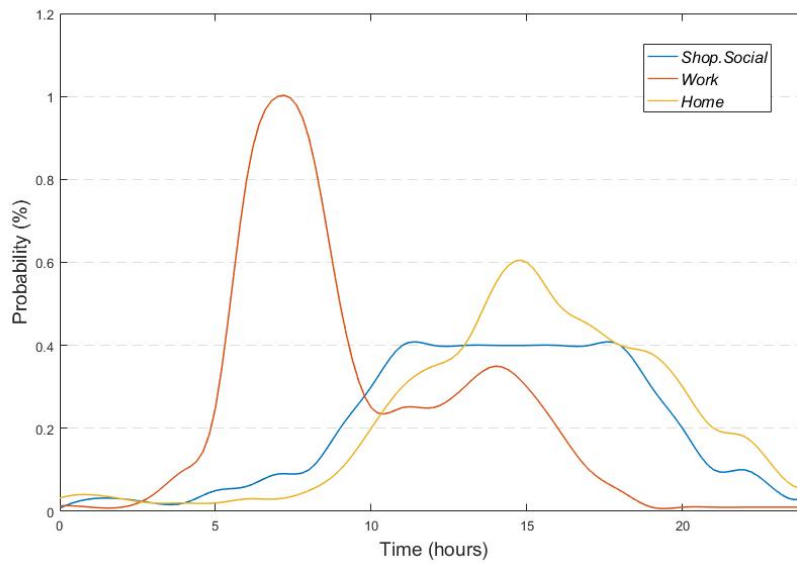
Είναι η μεταβλητή ειδικής κατανάλωσης ενέργειας που αντιπροσωπεύει την τυπική κατανάλωση ενέργειας ανά 100 km διαδρομής ενός οχήματος όπως φαίνεται και στον *Πίνακα 1*.

- **Διανύσματα**

Στην προσομοίωση του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν διανύσματα πολλαπλών τιμών που αποθηκεύονται στα αντίστοιχα πεδία της δομής. Παρακάτω η ανάλυση τους:

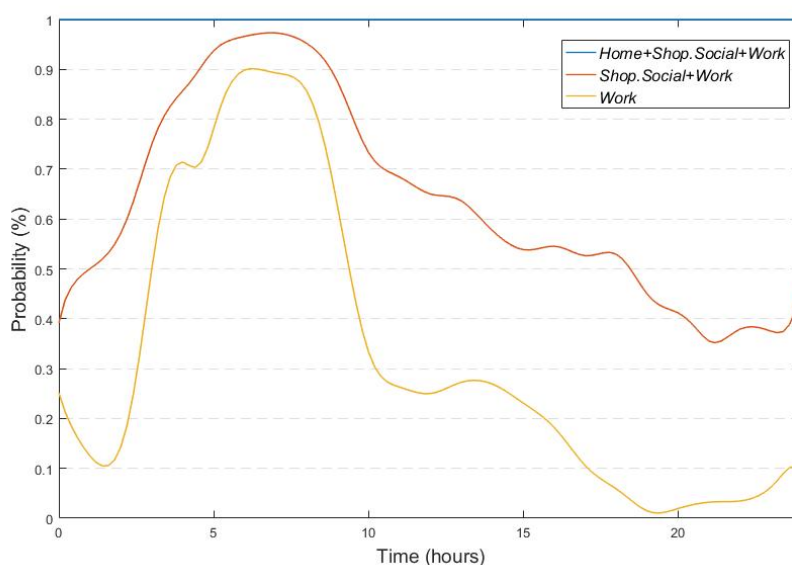
EV.Tr_Destination

Αλφαριθμητικό που ορίζει το είδος του ταξιδιού σύμφωνα με τον ταξιδιωτικό προορισμό του κάθε οχήματος. Θεωρούνται τρεις τύποι προορισμών: «σπίτι», «καταστήματα & κοινωνικές δραστηριότητες» και «εργασία». Το όχημα ξεκινά το καθημερινό του πρόγραμμα από το σπίτι και ο αλγόριθμος επιλέγει τυχαία τον επόμενο προορισμό σύμφωνα με μια προκαθορισμένη κατανομή πιθανοτήτων κατά την ημέρα. Ο κάθε προορισμός του ταξιδιού εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ώρα έναρξης του ταξιδιού και οι κατανομές φαίνονται στο *Σχήμα 4*.



Σχήμα 4 Κατανομές Ρυθμών Αναχώρησης Οχήματος

Για την επιλογή τοποθεσίας προορισμού αθροίστηκαν οι τρεις κατανομές ρυθμών αναχώρησης κάθε είδους ταξιδιού, έπειτα έγινε κανονικοποίηση σε κάθε μια κατανομή ξεχωριστά σύμφωνα με το ωριαίο άθροισμά τους ώστε να διαμορφωθούν τα όρια επιλογής προορισμού Σχήμα 5. Με την τυχαία επιλογή αριθμού από 0-1 και με βάση τη ώρα εκκίνησης του οχήματος γίνεται επιλογή τοποθεσίας προορισμού. Για παράδειγμα, έστω ο τυχαίος αριθμός ισούται με 0.5 και η χρονική στιγμή αναχώρησης είναι στις 14:00, τα όρια επιλογής είναι μεταξύ πράσινης και μπλε γραμμής άρα η ο προορισμός είναι ο *Shop or Social*.



Σχήμα 5 Όρια επιλογής προορισμού ενός ηλεκτρικού οχήματος

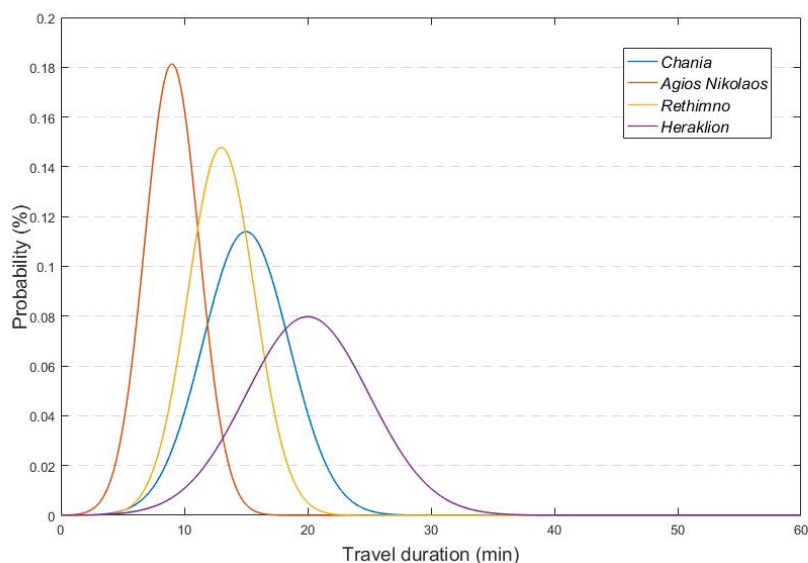
EV.TDep

Δηλώνει τη χρονική στιγμή έναρξης του επόμενου ταξιδιού του οχήματος. Το πρώτο στοιχείο του διανύσματος ορίζεται τυχαία χρησιμοποιώντας την κανονική κατανομή του Σχήμα 4, με μέση τιμή $\mu=7,5$ και τυπική απόκλιση $\sigma=1,5$. Σύμφωνα με την κατανομή αυτή οι περισσότεροι άνθρωποι ξεκινούν το καθημερινό τους πρόγραμμα από το σπίτι γύρω στις 7:30 π.μ. Νέα τιμή αναχώρησης προκύπτει εφόσον ένα ηλεκτρικό όχημα ταξιδεύσει και σταθμεύσει.

Ας υποθέσουμε ότι το j υποδηλώνει τον αριθμό της j -οστης αναχώρησης του οχήματος, τότε το j στοιχείο του διανύσματος *EV.TDep* υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$EV.TDep(j) = EV.TArr(j) + EV.\Delta Ttr(j) + EV.\Delta Tch(j) \quad (2.1)$$

Το διάνυσμα ***EV.ΔTtr*** αποτελείται από τις διάρκειες των ταξιδιών που εκτελέσθηκαν από ένα όχημα (σε min) κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η επιλογή της χρονικής διάρκειας ενός ταξιδιού πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας μια κανονική κατανομή με χαρακτηριστικά που βασίζονται στο μέγεθος της πόλης και συγκεκριμένα στις εκτιμώμενες αποστάσεις που εκτελούν τα οχήματα εντός πόλης. Οι κατανομές για τις τέσσερις πόλεις της Κρήτης που έχουν θεωρηθεί (Χανιά, Ηράκλειο, Ρέθυμνο και Άγιος Νικόλαος) έχουν αντίστοιχα μέση τιμή $\mu=15, 20, 13, 9$ και τυπική απόκλιση $\sigma= 3.5, 5, 2.7, 2.2$, όπως φαίνονται παρακάτω στο Σχήμα 6.

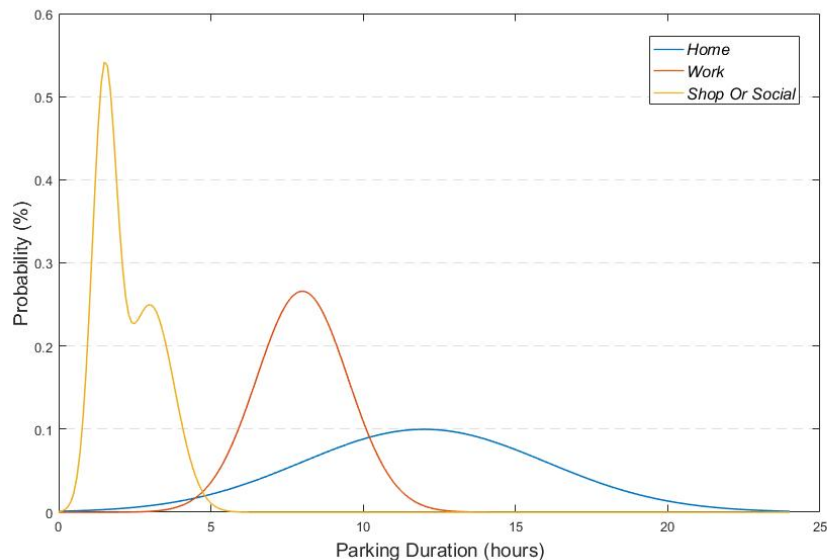


Σχήμα 6 Κατανομή Χρονικής Διάρκειας ενός οχήματος

Το διάνυσμα **EV.TArr** περιλαμβάνει τους χρόνους άφιξης του οχήματος εντός της ημέρας. Σύμφωνα με τον υπολογισμό του $EV.TDep(j)$ το j στοιχείο του $EV.TArr$ υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη εξίσωση.

$$EV.TArr(j) = EV.TDep(j) + EV.\Delta Ttr(j) \quad (2.2)$$

Το διάνυσμα **EV.ΔTch** αφορά το διάνυσμα χρόνου (σε hours) που περιλαμβάνει τις διάρκειες των περιόδων φόρτισης ή στάθμευσης του οχήματος. Οι τιμές του διανύσματος επιλέγονται τυχαία από κατάλληλες κατανομές πυκνότητας πιθανότητας ανάλογα με τη δραστηριότητα του οδηγού ενώ το ηλεκτρικό όχημα είναι σταθμευμένο π.χ. “home”, “shop - social” ή “work”, όπως φαίνονται παρακάτω στο **Σχήμα 7**.



Σχήμα 7 Κατανομές Πιθανότητας Χρονικής Διάρκειας Στάθμευσης για διαφορετικές δραστηριότητες των οδηγών

Το διάνυσμα **EV.Vel** περιλαμβάνει τις ταχύτητες κίνησης του οχήματος κατά τη διάρκεια των ταξιδιών του. Λαμβάνεται τυχαία χρησιμοποιώντας την κανονική κατανομή, με μέση τιμή $\mu=35$ και τυπική απόκλιση $\sigma=7$ όπως φαίνεται στο **Σχήμα 3**. Η επιλογή της κατανομής βασίστηκε στην υπόθεση ότι η ταχύτητα ταξιδιού μέσα σε μια πόλη κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 15 και 55 km/h με μέση τιμή 35 km/h.

Το διάνυσμα **EV.ΔStr** αποθηκεύει τις αποστάσεις που διένυσε το όχημα κατά τη διάρκεια της ημέρας και υπολογίζεται, γνωρίζοντας την ταχύτητα του οχήματος και τη διάρκεια της j διαδρομής του οχήματος, ως εξής:

$$EV.\Delta Str(j) = EV.Vel(j) + EV.\Delta Ttr(j) \quad (2.3)$$

Το διάνυσμα **EV.Cons** αποθηκεύει τις τιμές κατανάλωσης ενέργειας (σε kWh) των ταξιδιών που εκτελεί το όχημα κατά τη διάρκεια της ημέρας, χρησιμοποιώντας τις τιμές *EV.ΔStr* και *EV.Spec_Cons*:

$$EV.Cons(j) = EV.\Delta Str(j) \times EV.Spec_{Cons} \quad (2.4)$$

Το διάνυσμα **EV.Edep** δηλώνει την τιμή ενέργειας που αφορά τη φόρτιση της μπαταρίας σε εκατοστιαίο ποσοστό κατά την αναχώρηση του οχήματος προς κάποιο προορισμό. Αρχικοποιείται με βάση τον παρακάτω τύπο.

$$EV.Edep(j) = EV.SoC0/100 \cdot EV.SoCmax \quad (2.5)$$

Έπειτα η τιμή *EV.Edep* ανάλογα με το αν χρειάζεται φόρτιση ένα όχημα ή όχι λαμβάνει μέγιστη τιμή φόρτισης *EV.SoCmax* που ορίζεται από τον κατασκευαστή του οχήματος ή την τελευταία τιμή *EV.Earr* άφιξης αντίστοιχα.

Το διάνυσμα **EV.Earr** αντιπροσωπεύει την ενέργεια (σε kWh) που είναι αποθηκευμένη στην μπαταρία του οχήματος όταν φτάνει στον προορισμό του, γνωρίζοντας την αποθηκευμένη ενέργεια στην αρχή του *j* ταξιδιού *EV.Edep* και την ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια αυτού *EV.Cons*:

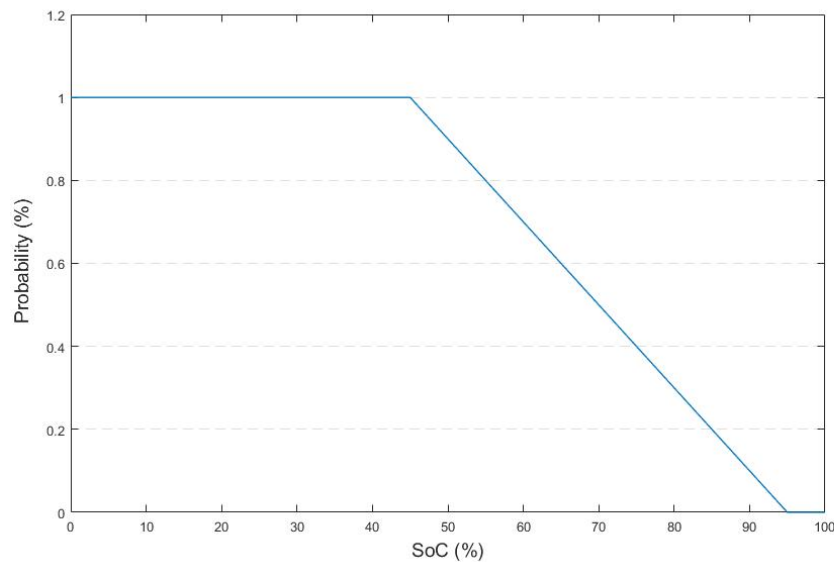
$$EV.Earr(j) = EV.Edep(j) - EV.Cons(j) \quad (2.6)$$

Επιπλέον το *EV.Earr* χρησιμοποιείται ώστε να αποφανθεί το *EV.Earr_per* (σε %), δηλαδή εάν οι μπαταρίες του οχήματος θα 1φορτίσουν ή όχι. Η δυνατότητα φόρτισης αυξάνεται γραμμικά, ενώ μειώνεται το state of charge της μπαταρίας *Σχήμα 8*.

$$EV.Earr_per(j) = \frac{EV.Earr(j)}{EV.SoCmax} \cdot 100 \quad (2.7)$$

Αρχικά εφαρμόζεται γραμμική παρεμβολή (interpolation) του *EV.Earr_per* για να βρεθεί η πιθανότητα φόρτισης πάνω *Σχήμα 8*. Με έναν τυχαίο αριθμό από 0-1

συγκρίνουμε τις δύο τιμές και εάν το ποσοστό της μπαταρίας είναι μικρότερο του 45% η μπαταρία φορτίζει στη μέγιστη τιμή $EV.SoC_{max}$ που έχει δοθεί από τον κατασκευαστή, εφόσον το ποσοστό βρίσκεται ανάμεσα στο 45%-95% υπάρχει πιθανότητα φόρτισης και εάν το ποσοστό είναι μεγαλύτερο του 95 % το όχημα δε φορτίζει, σύμφωνα με το Σχήμα 8.



Σχήμα 8 Κατανομή για επιλογή επιπέδου φόρτισης μπαταρίας

Ένα ακόμη διάνυσμα είναι η **$EV.P_{dumb}$** αφορά την ισχύ που η μπαταρία του οχήματος ζητάει από το δίκτυο. Όταν το όχημα βρίσκεται στο σταθμό και φορτίζει έχουμε P θετικό ενώ όταν βρίσκεται στο σταθμό και δε φορτίζει το P είναι μηδέν. Η συγκεκριμένη φόρτιση είναι μη ελεγχόμενη φόρτιση καθώς τραβάει σταθερή ισχύ που ισούται με:

$$EV.P_{dumb}(t_0: t_f) = \frac{EV.SoC_{max} - EV.Earr(t_0)}{EV.\Delta T_{ch}} \quad (2.8)$$

Όπου, t_0 ο χρόνος σύνδεσης ενός οχήματος στο δίκτυο φόρτισης και t_f ο χρόνος αποσύνδεσης ενός οχήματος από το δίκτυο φόρτισης.

2.3 Στρατηγικές Φόρτισης

- **Μη ελεγχόμενη φόρτιση (Dumb Charging)**

Είναι η πιο απλή μορφή φόρτισης μόλις το όχημα σταθμεύσει. Εφόσον κριθεί απαραίτητο, το όχημα απορροφά σταθερή ισχύ λαμβάνοντας υπόψιν μόνο την ανάγκη της μπαταρίας. Σε μεγάλο ποσοστό διείσδυσης οχημάτων, ο μη συντονισμός φόρτισης τους με το δίκτυο μπορεί να προκαλέσει αιχμές ζήτησης και αστάθεια στο σύστημα.

- **Ελεγχόμενη Φόρτιση για ένα προς ένα όχημα**

Η ελεγχόμενη Φόρτιση ανά όχημα επιδιώκει την απορρόφηση ισχύος σε χρονικές στιγμές όπου τα ΑΠΕ έχουν υψηλή παραγωγή και χαμηλό κόστος κατανάλωσης ενέργειας. Σκοπός είναι να ελαχιστοποιεί το κόστος φόρτισης των οχημάτων και κατά συνέπεια το κόστος παραγωγής ενέργειας.

- **Ελεγχόμενη Φόρτιση στο σύνολο των οχημάτων**

Η ελεγχόμενη Φόρτιση στη συγκεκριμένη περίπτωση εφαρμόστηκε στο σύνολο των οχημάτων, αντιμετωπίζοντας τα ως μια ενιαία μπαταρία. Η απορρόφηση ισχύος εφαρμόζεται λαμβάνοντας υπόψιν την παραγωγή ΑΠΕ και σκοπός είναι να ελαχιστοποιεί το κόστος φόρτισης των οχημάτων και κατά συνέπεια το κόστος παραγωγής ενέργειας.

2.4 Μοντέλο Μπαταρίας

Το μοντέλο μπαταρίας κάθε οχήματος, προκύπτει υπολογίζοντας τα άνω και κάτω δυναμικά όρια ενέργειας του. Τα δυναμικά όρια ενέργειας αφορούν εκτίμηση της ελάχιστης και μέγιστης ενέργειας που μπορεί να υποστηρίξει η μπαταρία του οχήματος κάθε χρονική στιγμή φόρτισης. Αυτά τα όρια προστατεύουν την μπαταρία και εξυπηρετούν τη βέλτιστη και αποδοτική λειτουργία της. Αρχικά υπολογίζονται οι χρόνοι t_{l1} , t_{l2} , t_{h1} , t_{h2} και στη συνέχεια τα δυναμικά όρια E_{low} και E_{high} .

$$E_{low}(i, t) = \begin{cases} E_{min}(i) + P_{min}(i) (t - t_{l1}(i)) & , if t < t_{l1}(i) \quad (2.9) \\ E_{min}(i) & , if t_{l1}(i) \leq t \leq t_{l2}(i) \quad (2.10) \\ E_{min}(i) + P_{max}(i) (t - t_{l2}(i)) & , if t > t_{l2}(i) \quad (2.11) \end{cases}$$

$$E_{high}(i, t) = \begin{cases} E_{max}(i) + P_{max}(i) (t - t_{h1}(i)) & , if t < t_{h1}(i) \quad (2.12) \\ E_{max}(i) & , if t_{h1}(i) \leq t \leq t_{h2}(i) \quad (2.13) \\ E_{min}(i) + P_{min}(i) (t - t_{h2}(i)) & , if t > t_{h2}(i) \quad (2.14) \end{cases}$$

$$t_{l1}(i) = t_0(i) - \frac{E_0(i) - E_{min}(i)}{P_{min}(i)} \quad (2.15)$$

$$t_{h1}(i) = t_0(i) - \frac{E_0(i) - E_{max}(i)}{P_{max}(i)} \quad (2.16)$$

$$t_{l2}(i) = t_f(i) - \frac{E_{trgt}(i) - DE_{trgt}(i) - E_{min}(i)}{P_{max}(i)} \quad (2.17)$$

$$t_{h2}(i) = t_f(i) - \frac{E_{trgt}(i) + DE_{trgt}(i) - E_{max}(i)}{P_{min}(i)} \quad (2.18)$$

$$DE_{trgt}(i) = \frac{2.5 \times E_{max}(i)}{100} \quad (2.19)$$

Όπου:

E_{low} , το ελάχιστο αποδεκτό δυναμικό όριο ενέργειας της μπαταρίας ανά χρονική στιγμή

E_{high} , το μέγιστο αποδεκτό δυναμικό όριο ενέργειας της μπαταρίας ανά χρονική στιγμή

t_{l1} , η χρονική στιγμή πριν το σύστημα αρχίσει να πλησιάζει τα ελάχιστα όρια ενέργειας με βάση την ελάχιστη ισχύ (ροή ενέργειας)

t_{h1} , η χρονική στιγμή πριν το σύστημα αρχίσει να πλησιάζει τα μέγιστα όρια ενέργειας με βάση την μέγιστη ισχύ (ροή ενέργειας)

t_{l2} , χρονική στιγμή μετά την οποία το σύστημα προσαρμόζεται για να φτάσει στο στοχευμένο επίπεδο ενέργειας

t_{h2} , χρονική στιγμή μετά την οποία το σύστημα προσαρμόζεται για να φτάσει στο στοχευμένο επίπεδο ενέργειας.

DE_{trgt} , η ενεργειακή απόκλιση ή περιθώριο γύρω από τον ενεργειακό στόχο E_{trgt}

2.5 Μοντέλο Έξυπνης Φόρτισης Ηλεκτρικού Οχήματος

Η στρατηγική φόρτισης εφαρμόζεται χρησιμοποιώντας γραμμικό προγραμματισμό και συγκεκριμένα τη συνάρτηση `fmincon`. Για τη χρήση της `fmincon` το πρόβλημα πρέπει να διατυπωθεί σε κατάλληλους πίνακες που δέχεται η συνάρτηση ως είσοδο. Επίσης πρέπει να καθοριστούν οι περιορισμοί του προβλήματος. Αρχικά έγινε υπολογισμός μιας εικονικής τιμής ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να χρησιμοποιηθεί για τον βέλτιστο προγραμματισμό φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Η ιδέα της διαμόρφωσης της εικονικής τιμής ηλεκτρικής ενέργειας είναι να συνδυάσει τις πληροφορίες από την πρόβλεψη της πραγματικής τιμής ηλεκτρικής ενέργειας και την πρόβλεψη του καθαρού φορτίου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας σε μία μόνο μεταβλητή. Τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν με αυτό τον τρόπο να προσφέρουν βοηθητική υπηρεσία στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μετατοπίζοντάς τη ζήτησή τους σε περιόδους μειωμένου φορτίου καθώς αυτό λαμβάνεται υπόψη στη δημιουργία της εικονικής τιμής ηλεκτρικής ενέργειας.

Ας υποθέσουμε ότι ο ορίζοντας βελτιστοποίησης ορίζεται από την άφιξη και την αναχώρηση του ηλεκτρικού οχήματος από το χώρο στάθμευσης $[T_{0,i} \ T_{f,i}]$ και η πρόβλεψη της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας στην i th ηλεκτρικών οχημάτων κανονικοποιείται όπως παρακάτω:

$$\underline{\widehat{EP}}(t) = \frac{\widehat{EP}(t) - \widehat{EP}_{min}}{\widehat{EP}_{max} - \widehat{EP}_{min}} \quad (2.20)$$

όπου,

$$\widehat{EP}_{max} = \max(\widehat{EP}(t)), \quad \forall t \in [T_{0,i} \ T_{f,i}] \quad (2.21)$$

$$\widehat{EP}_{min} = \min(\widehat{EP}(t)), \quad \forall t \in [T_{0,i} \ T_{f,i}] \quad (2.22)$$

Όπου, $\underline{\widehat{EP}}(t)$ (σε p.u.) είναι η κανονικοποιημένη προβλεπόμενη τιμή ηλεκτρικής ενέργειας, $\widehat{EP}(t)$ (σε €/MWh) είναι η προβλεπόμενη τιμή ηλεκτρικής ενέργειας, \widehat{EP}_{min} (σε €/MWh) είναι η ελάχιστη τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και \widehat{EP}_{max} (σε €/MWh) είναι η μέγιστη τιμή ηλεκτρικής ενέργειας στην περίοδο βελτιστοποίησης $[T_{0,i} \ T_{f,i}]$.

Ας υποθέσουμε ότι η πρόβλεψη παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ στον ορίζοντα βελτιστοποίησης $[T_{0,i} \ T_{f,i}]$ του i th ΗΟ είναι $\widehat{P}_{RES}(t)$ και η αντίστοιχη πρόβλεψη του φορτίου του συστήματος ισχύος είναι \widehat{P} . Τότε η πρόβλεψη του καθαρού φορτίου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι,

$$\hat{P}_{net} = \hat{P} - \hat{P}_{RES}(t) \quad (2.23)$$

Στη συνέχεια το προβλεπόμενο καθαρό φορτίο του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας κανονικοποιείται όπως παρακάτω:

$$\underline{\hat{P}}_{net}(t) = \frac{\hat{P}_{net}(t) - \hat{P}_{net,min}}{\hat{P}_{net,max} - \hat{P}_{net,min}} \quad (2.24)$$

όπου,

$$\hat{P}_{net,max} = \max(\hat{P}_{net}(t)) \quad \forall t \in [T_{0,i} \ T_{f,i}] \quad (2.25)$$

$$\hat{P}_{net,min} = \min(\hat{P}_{net}(t)) \quad \forall t \in [T_{0,i} \ T_{f,i}] \quad (2.26)$$

Όπου, $\hat{P}_{RES}(t)$ είναι η προβλεπόμενη παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ, $\underline{\hat{P}}_{net}(t)$ (σε p.u.) είναι το κανονικοποιημένο προβλεπόμενο καθαρό φορτίο του συστήματος ισχύος, $\hat{P}_{net,min} (max)$ είναι η ελάχιστη(μέγιστη) τιμή του προβλεπόμενου καθαρού φορτίου του συστήματος ισχύος στην περίοδο βελτιστοποίησης.

Η προβλεπόμενη τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ κανονικοποιήθηκαν όπως περιγράφεται παραπάνω προκειμένου να ενσωματωθούν σε μια ενιαία μεταβλητή που ονομάζεται εικονική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στη συνέχεια, η εικονική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας (σε p.u.) μπορεί να οριστεί ως:

$$EP'(t) = a \cdot \underline{\hat{EP}}(t) + (1 - a) \cdot \underline{\hat{P}}_{net}(t) \quad (2.27)$$

Όπου, a είναι μια παράμετρος η οποία κυμαίνεται μεταξύ [0-1] και ορίζει το βάρος της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας στον υπολογισμό της εικονικής τιμής ηλεκτρικής ενέργειας. Το υπόλοιπο μέρος της εικονικής τιμής ηλεκτρικής ενέργειας αντιστοιχεί στο καθαρό φορτίο του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Το a μπορεί να οριστεί από τον χειριστή του συστήματος.

Το βέλτιστο πρόβλημα φόρτισης ΗΟ που επιλύθηκε σε αυτήν την εργασία ορίζεται στα (2.28)-(2.33) όπου ελαχιστοποιείται το «εικονικό κόστος φόρτισης» των ηλεκτρικών οχημάτων. Με αυτόν τον τρόπο, η ισχύς φόρτισης εκτιμάται κατάλληλα για να ελαχιστοποιήσει από κοινού το πραγματικό κόστος φόρτισης και τις διακυμάνσεις του καθαρού φορτίου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

λαμβάνοντας υπόψη τους τεχνικούς περιορισμούς της μπαταρίας ηλεκτρικού οχήματος και του συστήματος φόρτισής της.

$$\min_{P_i^*} \sum_{t=T_{0,i}:\Delta t:T_{f,i}} P_i^*(t) \cdot EP'(t) \cdot \Delta t \quad (2.28)$$

όπου,

$$P_i^*(t) \leq P_{i,max}(t) \quad \forall t \in [T_{0,i}, T_{f,i}] \quad (2.29)$$

$$P_i^*(t) \geq P_{i,min}(t) \quad \forall t \in [T_{0,i}, T_{f,i}] \quad (2.30)$$

$$E_i(T_{0,i}) + \sum_{T_{0,i}:\Delta t:t} P_i^*(t) \cdot \Delta t \geq E_{i,min} \quad \forall t \in [T_{0,i}, T_{f,i}] \quad (2.31)$$

$$E_i(T_{0,i}) + \sum_{T_{0,i}:\Delta t:t} P_i^*(t) \cdot \Delta t \leq E_{i,max} \quad \forall t \in [T_{0,i}, T_{f,i}] \quad (2.32)$$

$$E_i(T_{0,i}) + \sum_{T_{0,i}:\Delta t:T_{f,i}} P_i^*(t) \cdot \Delta t = E_i(T_{f,i}) \quad (2.33)$$

Όπου, i δηλώνει το i -οστό όχημα, $P_i^*(t)$ είναι η βέλτιστη ενεργή ισχύς που ανταλλάσσει το ηλεκτρικό όχημα με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας (σύμβαση φορτίου), Δt είναι το χρησιμοποιούμενο χρονικό διάστημα (12 λεπτά σε αυτή τη μελέτη) και E_i είναι η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στην μπαταρία του i th οχήματος. $T_{0,i}$ είναι η χρονική στιγμή κατά την οποία το όχημα φτάνει στον προορισμό του και συνδέεται στο δίκτυο και $T_{f,i}$ είναι η χρονική στιγμή κατά την οποία αποσυνδέεται από το δίκτυο και εκκινεί από το σταθμό φόρτισης. Καθώς το όχημα ίσως σταματάει σε σταθμούς φόρτισης αρκετές φορές κατά τη διάρκεια της ημέρας είναι λογικό η αντικειμενική συνάρτηση να εφαρμόζεται σε κάθε σταμάτημα κάθε οχήματος.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι δεν υπάρχουν ιδιαίτερα προβλήματα αριθμητικής σταθερότητας που πρέπει να αντιμετωπιστούν σε αυτή τη μέθοδο. Θα μπορούσε να προκύψει αστάθεια εάν η προτεινόμενη βέλτιστη μέθοδος φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων δεν μπορέσει να βρει λύση. Ωστόσο, αυτό δεν θα συμβεί λόγω της μικρής κλίμακας του προβλήματος, παρά μόνο όταν η απαιτούμενη ενέργεια φόρτισης δεν μπορεί να καλυφθεί από τη διαθέσιμη ισχύ φόρτισης και τη διάρκεια φόρτισης. Αυτό επιλύεται με έναν έλεγχο των παραπάνω και εάν οι στόχοι φόρτισης δεν μπορούν να επιτευχθούν, τότε υπολογίζονται εκ νέου κατάλληλα και εφαρμόζεται απλή φόρτιση όπως φαίνεται στο *Εικόνα 19*.

2.6 Μοντέλο Φόρτισης Συναθροιστή (Aggregator)

Σκοπός του Συναθροιστή

Η V2G λειτουργία χρησιμοποιεί την δυνατότητα αποθήκευσης των συσσωρευτών από τα ΗΟ. Ο Συναθροιστής θεωρείται νέος παίχτης στην αγορά ηλεκτρικής Ενέργειας και διαχειρίζεται τις φορτίσεις και εκφορτίσεις των μπαταριών. Ο μεγάλος όγκος διαχείρισης των ΗΟ οδήγησε στη δημιουργία μιας δυναμικής μπαταρίας που αντιπροσωπεύει τη συναθροιστική ενέργεια (Aggregated Energy) που είναι αποθηκευμένη σε όλα τα σταθμευμένα οχήματα κάθε στιγμή. Η μέγιστη και ελάχιστη Ενέργεια της μπαταρίας ισούται με το άθροισμα μέγιστης και ελάχιστης Ενέργειας των σταθμευμένων οχημάτων για κάθε χρονική στιγμή. Αντίστοιχα η μέγιστη και ελάχιστη Ισχύς της μπαταρίας ισούται με το άθροισμα μέγιστης και ελάχιστης Ισχύος των σταθμευμένων οχημάτων για κάθε χρονική στιγμή.

Το βέλτιστο πρόβλημα φόρτισης της μπαταρίας σε αυτήν την περίπτωση ορίζεται στα (2.34)-(2.43) όπου ελαχιστοποιείται το «εικονικό κόστος φόρτισης» των ηλεκτρικών οχημάτων. Με αυτόν τον τρόπο, η ισχύς φόρτισης της μπαταρίας εκτιμάται κατάλληλα για να ελαχιστοποιήσει από κοινού το πραγματικό κόστος φόρτισης και τις διακυμάνσεις του καθαρού φορτίου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνοντας υπόψη τους τεχνικούς περιορισμούς του Aggregator.

$$\min_{P_{Agg}^*} \sum_{t=T_0:\Delta t:T_f} P_{Agg}^*(t) \cdot EP'(t) \cdot \Delta t \quad (2.34)$$

όπου,

$$P_{Agg}^*(t) \leq P_{Agg,max}(t) \quad \forall t \in [T_0, T_f] \quad (2.35)$$

$$P_{Agg}^*(t) \geq P_{Agg,min}(t) \quad \forall t \in [T_0, T_f] \quad (2.36)$$

$$E_{Agg}(T_0) + \sum_{T_0:\Delta t:t} P_{Agg}^*(t) \cdot \Delta t \geq E_{Agg,min}(t) \quad \forall t \in [T_0, T_f] \quad (2.37)$$

$$E_{Agg}(T_0) + \sum_{T_0:\Delta t:t} P_{Agg}^*(t) \cdot \Delta t \leq E_{Agg,max}(t) \quad \forall t \in [T_0, T_f] \quad (2.38)$$

$$E_{Agg}(T_0) + \sum_{T_0,i:\Delta t:T_{f,i}} P_{Agg}^*(t) \cdot \Delta t = E_{Agg}(T_{f,i}) \quad (2.39)$$

Όπου, Agg δηλώνει τη συνάθροιση των οχημάτων ή αλλιώς μια δυναμική μπαταρία, $P_{Agg}^*(t)$ είναι η βέλτιστη ενεργή ισχύς που ανταλλάσσει η μπαταρία με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας (σύμβαση φορτίου), Δt είναι το χρησιμοποιούμενο χρονικό διάστημα (12 λεπτά σε αυτή τη μελέτη) και E_{Agg} είναι η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στην μπαταρία .

Η μέγιστη και ελάχιστη τιμή ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στην μπαταρία φαίνεται παρακάτω:

$$E_{Agg,max}(t) = \sum_i E_{i,max}(t) \quad (2.40)$$

$$E_{Agg,min}(t) = \sum_i E_{i,min}(t) \quad (2.41)$$

Η μέγιστη και ελάχιστη τιμή της ενεργού ισχύος είναι :

$$P_{Agg,max}(t) = \sum_i P_{i,max}(t) \quad (2.42)$$

$$P_{Agg,min}(t) = \sum_i P_{i,min}(t) \quad (2.43)$$

Κεφάλαιο 3

Αποτελέσματα Προσομοίωσης

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αντίστοιχα αποτελέσματα μοντελοποίησης του ΣΗΕ Κρήτης για κάθε σενάριο διείσδυσης και ποσοστό V2G λειτουργίας των ΗΟ. Τα αποτελέσματα αφορούν:

- Συνολική Ισχύ Φόρτισης Οχημάτων
- Συνολικό Φορτίο Συστήματος
- Συνολικό Κόστος Φόρτισης Οχημάτων
- Κόστος Κατανάλωσης Ενέργειας Συστήματος

Στόχος είναι να βελτιστοποιήσουμε τα φορτία των ηλεκτρικών οχημάτων και συνεπώς του συστήματος μεταφοράς και ταυτόχρονα να ελαχιστοποιηθεί και το συνολικό κόστος καυσίμου.

3.1 Αποτελέσματα Σεναρίων

Επιγραμματικά τα σενάρια (SC1 , SC2, SC3) αφορούν:

- Το SC1 εφαρμόζει βελτιστοποίηση με βάση το καθαρό φορτίο της Κρήτης.
- Το SC2 εφαρμόζει βελτιστοποίηση με βάση την τιμή ηλεκτρικής Ενέργειας.
- Το SC3 εφαρμόζει βελτιστοποίηση με βάση το καθαρό φορτίο της Κρήτης κατά 50% και με βάση την τιμή ηλεκτρικής Ενέργειας κατά 50%.

Να σημειωθεί ότι σε όλα τα σενάρια στο σύνολο των οχημάτων εφαρμόζεται απλή φόρτιση κατά 25%, V2G φόρτιση κατά 45% και V1G φόρτιση κατά 30%. Θεωρείται πιο κοντά στην πραγματικότητα σενάριο καθώς ανάλογα την οικονομική δυνατότητα και τις ανάγκες του κάθε οδηγού γίνεται η επιλογή δυνατοτήτων της μπαταρίας του οχήματος.

Η προτεινόμενη μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της επίδρασης της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων στο φορτίο του Σ.Η.Ε. της Κρήτης.

Σύμφωνα με τον στόχο του Εθνικού Σχεδίου Ενέργειας και Κλίματος, το ποσοστό διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων θα πρέπει να φτάσει το 30% του αριθμού των οχημάτων το 2030. Εξαιτίας αυτού, έγινε η επιλογή εφαρμογής ενός επιθετικού σεναρίου όπου ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων θεωρείται ότι αντιστοιχεί στο 40% του αριθμού του συνόλου των οχημάτων στην Κρήτη έως το 2030. Επιπλέον, ο συνολικός στόλος οχημάτων στην Κρήτη εκτιμάται ότι θα ανέλθει περίπου σε 500.000 το 2030 [30]. Τα παραπάνω οδηγούν στην υπόθεση ότι ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων στην Κρήτη το 2030 θα είναι περίπου 200.000. Έπειτα, πραγματοποιήθηκε διανομή αυτού του συνολικού αριθμού ηλεκτρικών οχημάτων στις τέσσερις μεγαλύτερες πόλεις της Κρήτης, συγκεκριμένα, Ηράκλειο, Χανιά, Ρέθυμνο και Άγιο Νικόλαο. Ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων τοποθετήθηκε σε κάθε πόλη με γνώμονα τον πληθυσμό κάθε πόλης. Ως εκ τούτου, η δραστηριότητα ηλεκτρικών οχημάτων και η φόρτιση υπολογίστηκαν για κάθε πόλη ξεχωριστά σύμφωνα με τα τοπικά χαρακτηριστικά και μεγέθη (αποστάσεις, δραστηριότητες κ.τ.λ.).

Υλοποιήθηκαν τρία σενάρια εφαρμογής της προτεινόμενης μεθόδου βελτιστοποίησης. Η αναλυτική περιγραφή τους δίνεται στη συνέχεια.

- **Στο Σενάριο 1 (SC1)**, η βέλτιστη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων γίνεται χρησιμοποιώντας μια εικονική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας (VEP) που διαμορφώνεται μόνο από το κανονικοποιημένο καθαρό ηλεκτρικό φορτίο της Κρήτης ($\alpha=0$).
- **Στο σενάριο 2 (SC2)**, η βέλτιστη χρέωση των ηλεκτρικών οχημάτων γίνεται χρησιμοποιώντας μια εικονική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας που διαμορφώνεται μόνο από την κανονικοποιημένη τιμή ηλεκτρικής ενέργειας ($\alpha=1$).
- **Στο σενάριο 3 (SC3)**, η βέλτιστη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων γίνεται χρησιμοποιώντας μια εικονική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας που σχηματίζεται από το κανονικοποιημένο καθαρό ηλεκτρικό φορτίο της Κρήτης και την κανονικοποιημένη τιμή ηλεκτρικής ενέργειας με στάθμιση 50 % ($\alpha=0.5$).

Έγινε η υπόθεση επίσης ότι το 75% των ηλεκτρικών οχημάτων θα εφαρμόσει την προτεινόμενη μέθοδο έξυπνης φόρτισης. Το υπόλοιπο 25% θα εφαρμόσει απλή φόρτιση, απορροφώντας μια σταθερή ποσότητα ισχύος κατά τη διάρκεια της περιόδου φόρτισης. Επίσης στην έξυπνη φόρτιση θα εφαρμοστεί 60% V2G λειτουργίας και 40% V1G λειτουργίας.

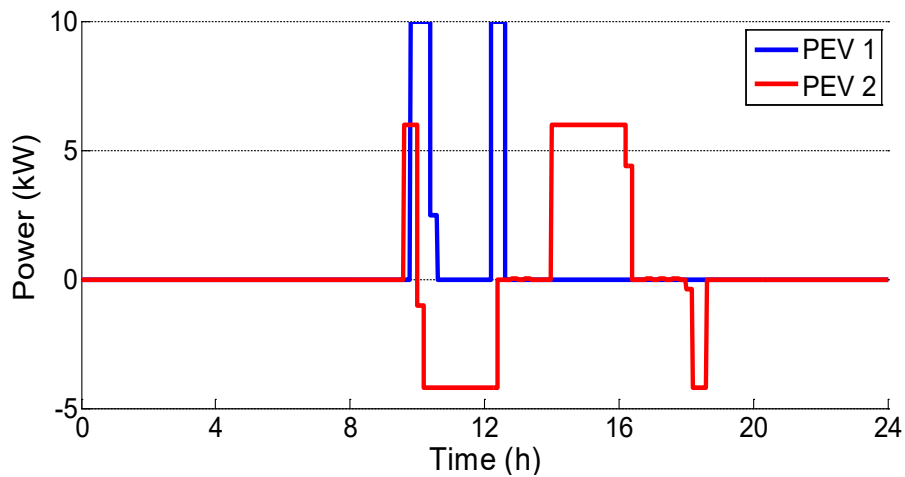
Επιπλέον, το σενάριο SC3 χωρίστηκε σε τρία υποσενάρια για να εξεταστούν τα διαφορετικά ποσοστά αποδοχής των V2G και V1G (βέλτιστη φόρτιση χωρίς έγχυση ισχύος στο δίκτυο). Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκε στα υποσενάρια SC3.a, SC3.b και SC3.c ότι το 100%, 60% και 40% των ηλεκτρικών οχημάτων που εφαρμόζουν έξυπνη

φόρτιση θα χρησιμοποιούν V2G, αντίστοιχα. Τα υπόλοιπα θα χρησιμοποιούν V1G. Όλα τα εξεταζόμενα σενάρια παρατίθενται στον Πίνακα 3.

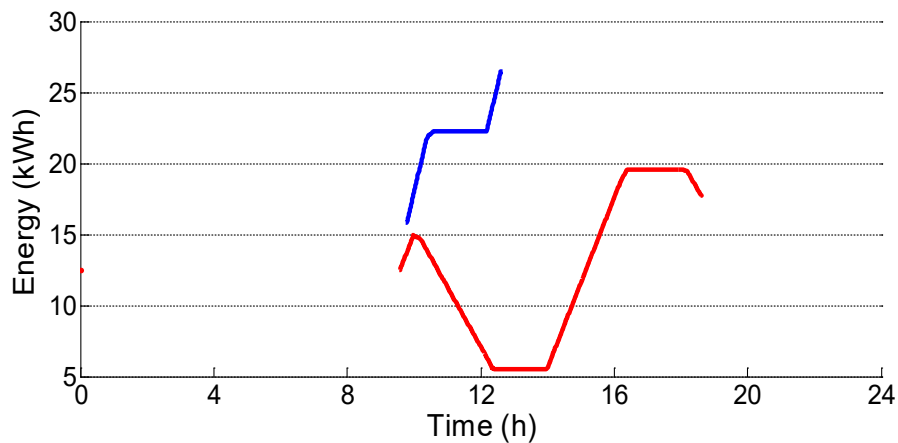
Εφαρμογή Σεναρίων					
	SC1	SC2	SC3		
			SC3.a (Low V2G)	SC3.b (Med. V2G)	SC3.c (High V2G)
<i>a</i>	0	1	0.5	0.5	0.5
<i>VEP</i>	Καθαρό Ηλεκτρικό Φορτίο (Κ.Η.Φ)	Τιμή Ηλεκτρικής Ενέργειας (Τ.Η.Ε)	Κ.Η.Φ. & Τ.Η.Ε.	Κ.Η.Φ. & Τ.Η.Ε.	Κ.Η.Φ. & Τ.Η.Ε.
<i>Έξυπνη Φόρτιση</i>	75%	75%	75%	75%	75%
<i>Απλή Φόρτιση</i>	25%	25%	25%	25%	25%
<i>V2G (% πληθυσμ ού ΗΟ)</i>	45%	45%	30%	45%	75%
<i>V1G (% πληθυσμ ού ΗΟ)</i>	30%	30%	45%	30%	0%

Πίνακας 3 Σεναρία Φόρτισης

Δίνονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα της λογικής του ημερήσιου προγράμματος κίνησης δύο οχημάτων για χρονικό διάστημα ενός 24ώρου στα οποία φαίνονται οι αλλαγές καταστάσεων. Το προφίλ φόρτισης όλων των οχημάτων στην Κρήτη, προκύπτει αθροίζοντας όλα τα ημερήσια προγράμματα κίνησης που εκτελεί κάθε όχημα.

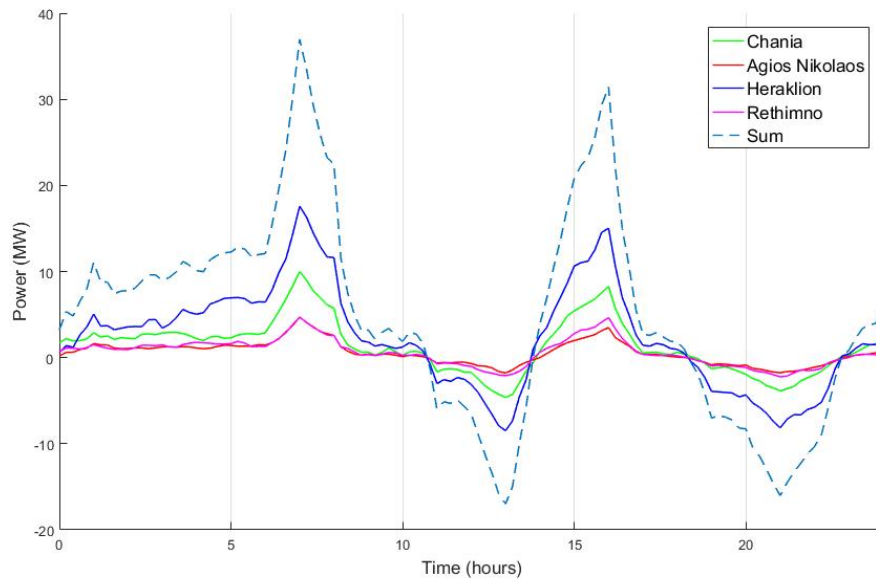


Σχήμα 9 Ισχύς Φόρτισης δύο ανεξάρτητων οχημάτων.

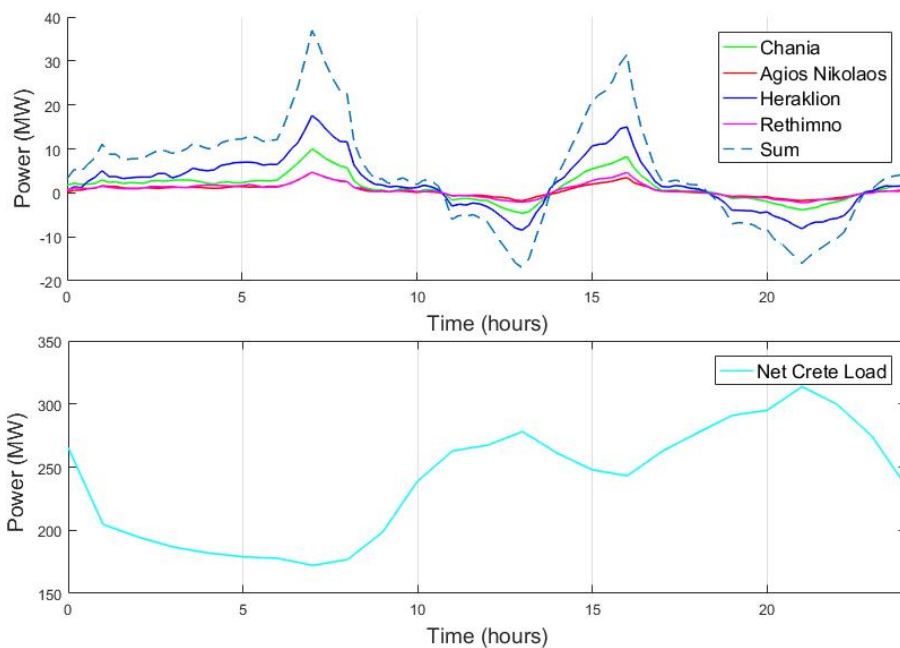


Σχήμα 10 Αποθηκευμένη Ενέργεια δύο ανεξάρτητων οχημάτων

Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 9 φαίνονται οι τροχιές βέλτιστης ισχύος φόρτισης για ενδεικτικά ΗΟ. Το ΗΟ1 χρησιμοποιεί V1G φόρτιση, ενώ το ΗΟ2 χρησιμοποιεί V2G φόρτιση. Προφανώς τα δύο ηλεκτρικά οχήματα προσαρμόζουν βέλτιστα την ισχύ φόρτισής τους σύμφωνα με τη διαμορφωμένη εικονική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι τροχιές ακολουθούν το SC3 σενάριο. Οι αντίστοιχες τροχιές της αποθηκευμένης ηλεκτρικής ενέργειας των δύο ηλεκτρικών οχημάτων φαίνεται στο Σχήμα 10.

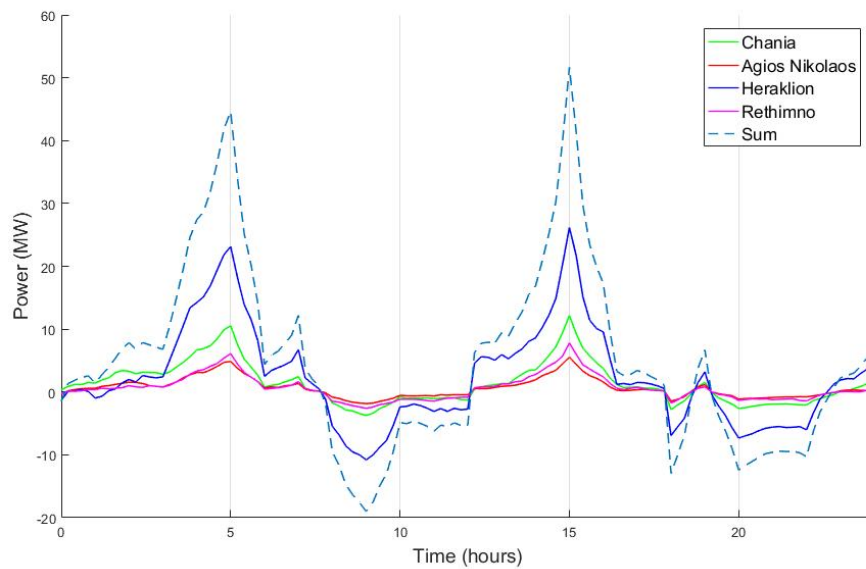


Σχήμα 11 Ισχύς που ανταλλάσσουν τα οχήματα με το δίκτυο για το Σενάριο 1

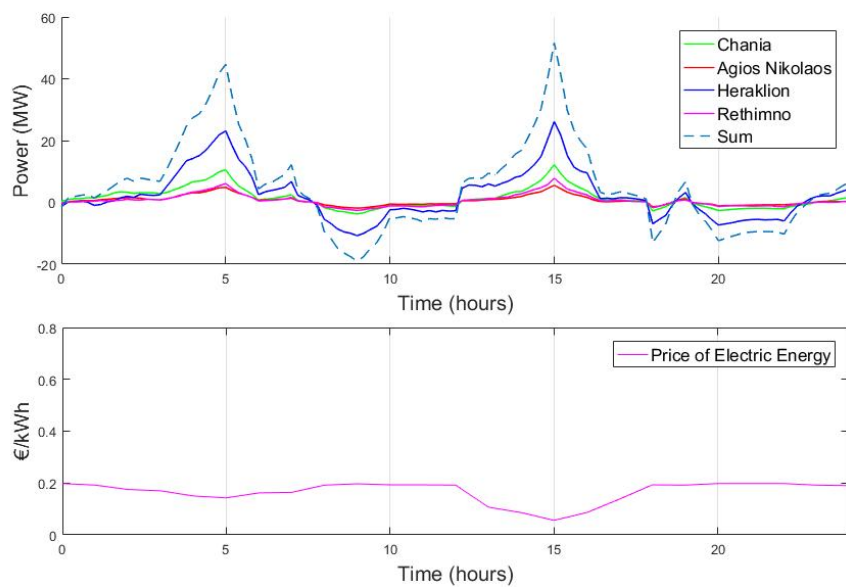


Σχήμα 12 Σύγκριση της Ισχύος που ανταλλάσσουν τα οχήματα με το δίκτυο για το Σενάριο 1 με το καθαρό Φορτίο

Όσον αφορά το Σενάριο 1 (SC1) εφαρμόζεται βελτιστοποίηση με βάση το καθαρό φορτίο της Κρήτης. Στα Σχήματα 11 και 12 φαίνεται ότι τα ηλεκτρικά οχήματα παρέχουν ισχύ στο δίκτυο όταν το καθαρό φορτίο του συστήματος διαθέτει κορυφές (peaks) συγκεκριμένα στις 14:30 μ.μ. και στις 22:00 μ.μ., ενώ απορροφούν ισχύ όταν το καθαρό φορτίο του συστήματος έχει χαμηλές τιμές δηλαδή μεταξύ 05:00 π.μ. - 07:00 π.μ όπως και στις 15:00 μ.μ. - 16:00 μ.μ.

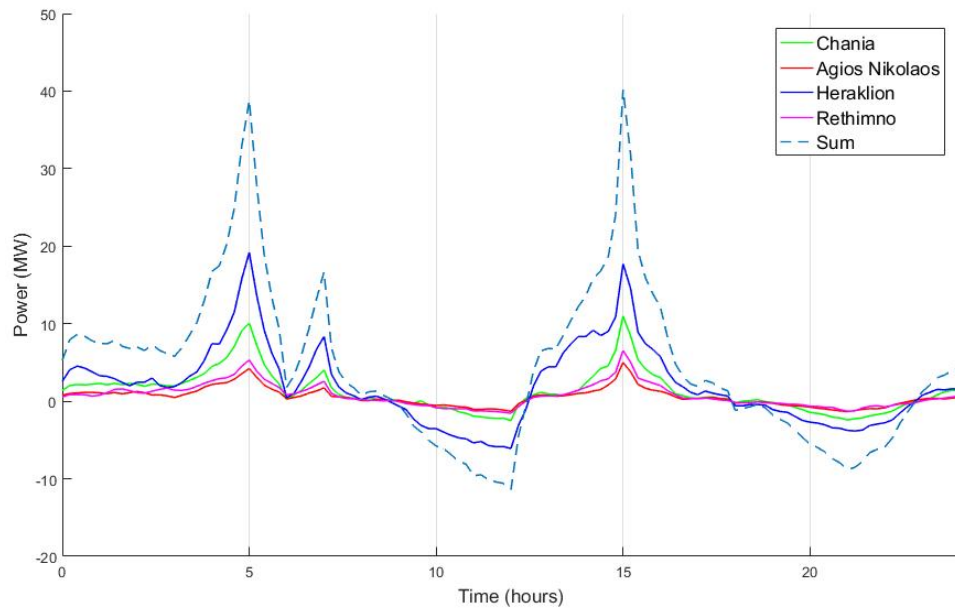


Σχήμα 13 Ισχύς που ανταλλάσσουν τα οχήματα με το δίκτυο για το Σενάριο 2

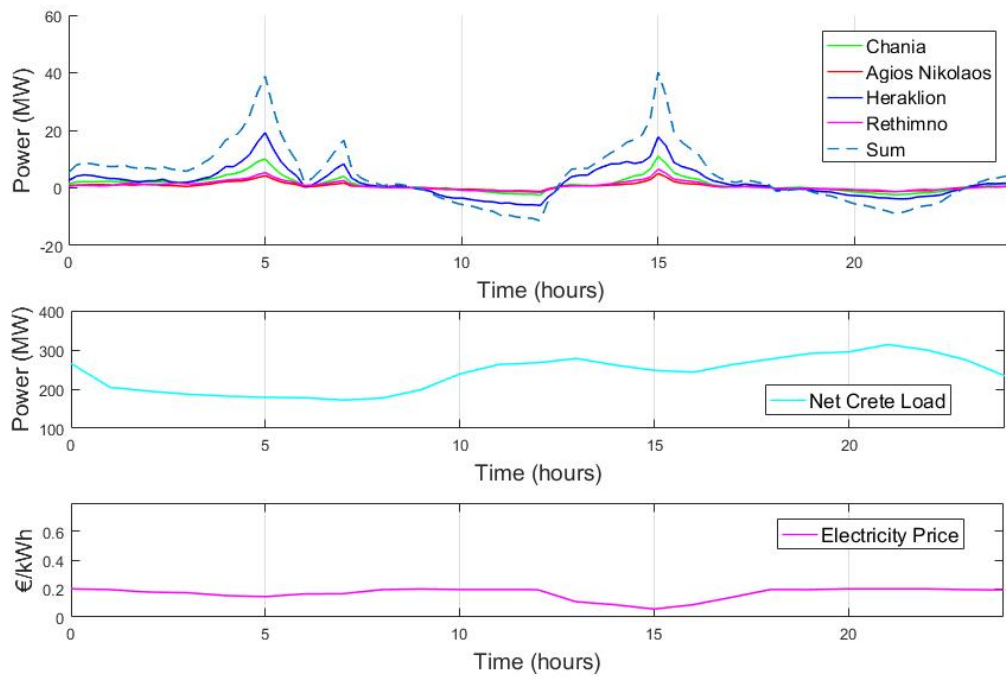


Σχήμα 14 Σύγκριση της Ισχύος που ανταλλάσσουν τα οχήματα με το δίκτυο για το Σενάριο 2 με τη Τιμή της Ηλεκτρικής Ενέργειας

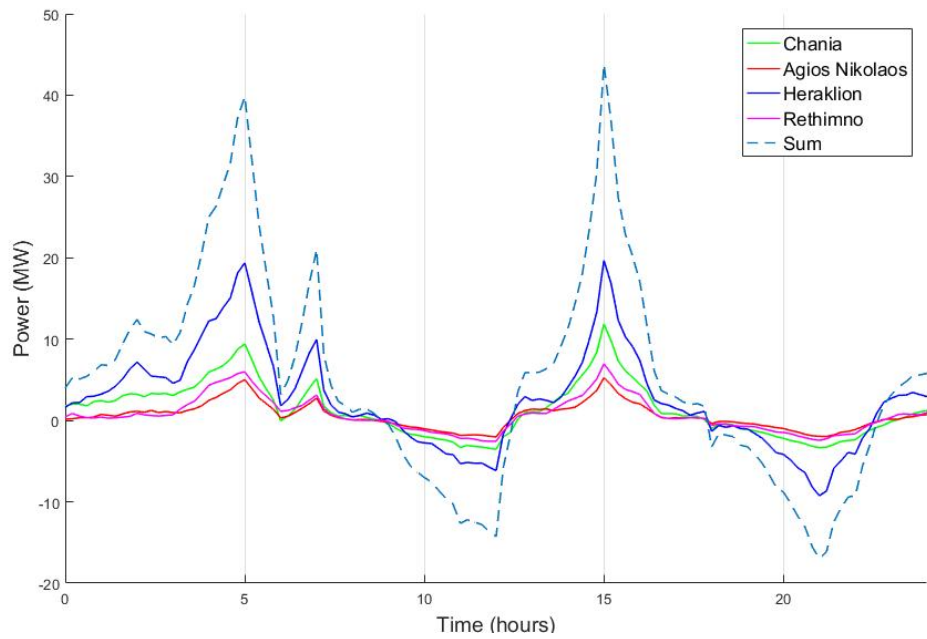
Σχετικά με το Σενάριο 2 (SC2) όπως φαίνεται και στα Σχήματα 13 και 14, γίνεται εφαρμογή βελτιστοποίησης με βάση την τιμή ηλεκτρικής Ενέργειας. Φαίνεται ότι τα ηλεκτρικά οχήματα απορροφούν περισσότερη ενέργεια, όταν η τιμή ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλή συγκεκριμένα στις 05:00 π.μ. και στις 15:00 μ.μ., ενώ προσφέρουν ενέργεια στο δίκτυο όταν η τιμή ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλή.



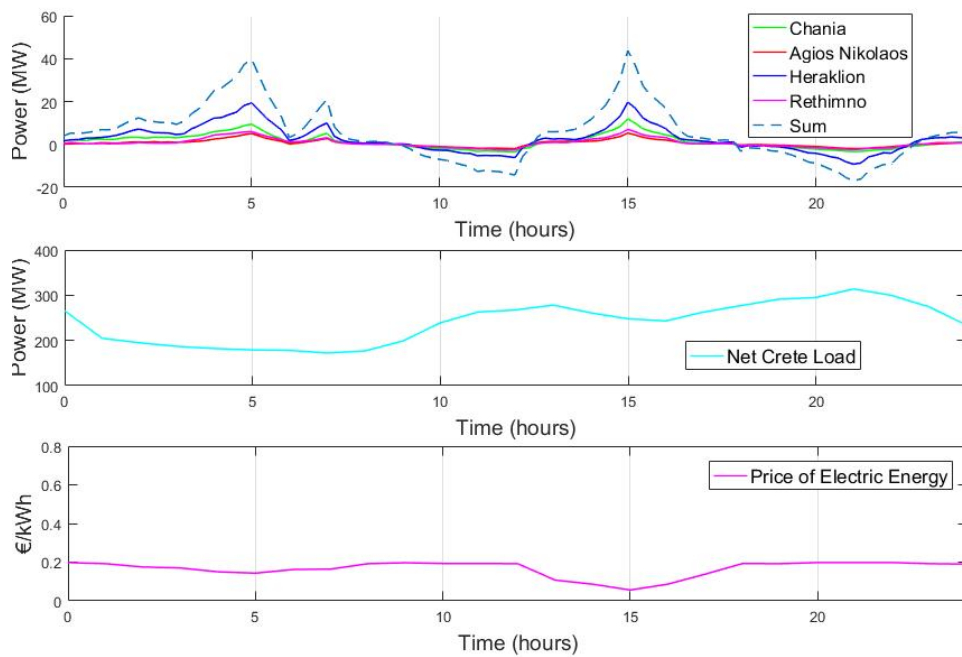
Σχήμα 15 Ισχύς που ανταλλάσσουν τα οχήματα με το δίκτυο για το Σενάριο 3, V2G=40%



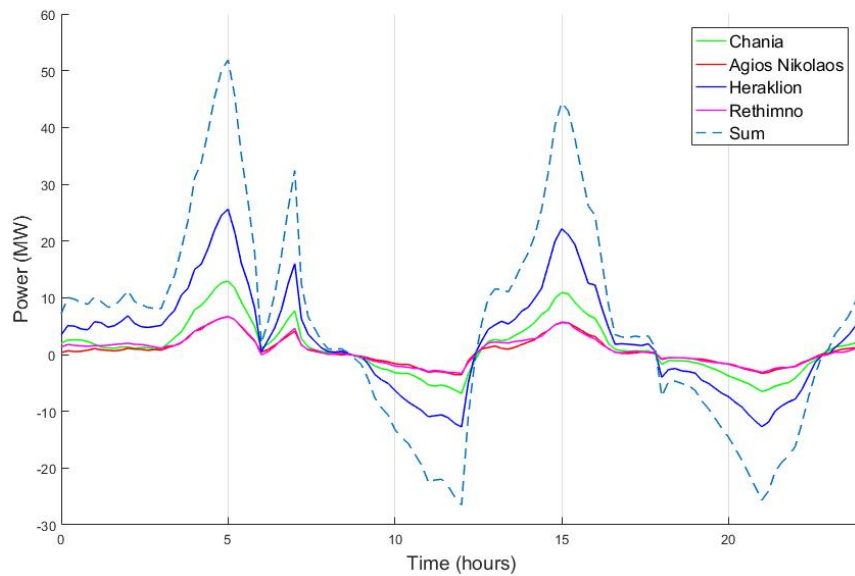
Σχήμα 16 Σύγκριση της ισχύος που ανταλλάσσουν τα οχήματα με το δίκτυο για το Σενάριο 3, V2G=40% με το καθαρό Φορτίο και τη Τιμή της Ηλεκτρικής Ενέργειας



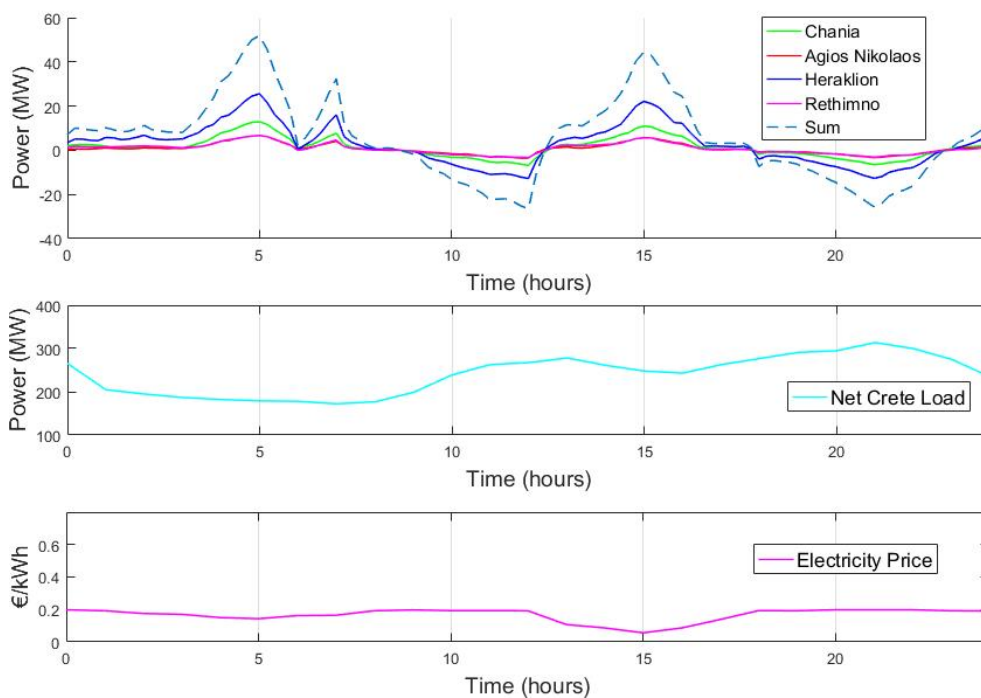
Σχήμα 17 Ισχύς που ανταλλάσσουν τα οχήματα με το δίκτυο για το Σενάριο 3, V2G=60%



Σχήμα 18 Σύγκριση της Ισχύος που ανταλλάσσουν τα οχήματα με το δίκτυο για το Σενάριο 3, V2G=60% με το καθαρό Φορτίο και τη Τιμή της Ηλεκτρικής Ενέργειας



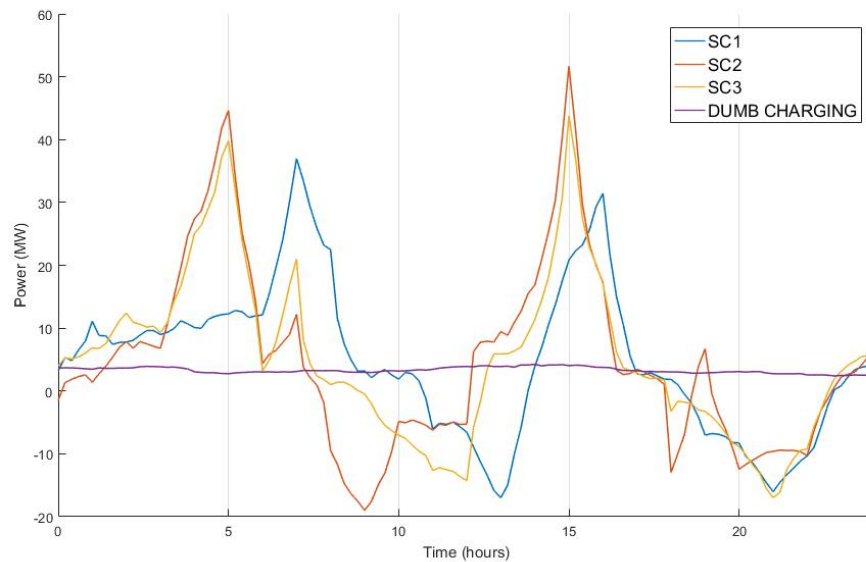
Σχήμα 19 Ισχύς που ανταλλάσσουν τα οχήματα με το δίκτυο για το Σενάριο 3, V2G=100%



Σχήμα 20 Σύγκριση της Ισχύος που ανταλλάσσουν τα οχήματα με το δίκτυο για το Σενάριο 3, V2G=100% με το καθαρό Φορτίο και την Τιμή Ηλεκτρικής Ενέργειας

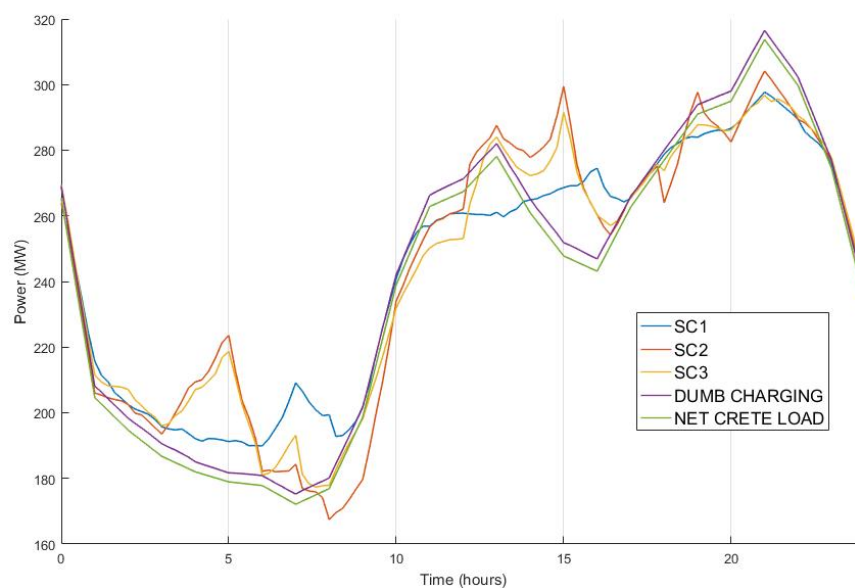
Στο Σενάριο 3 (SC3) εφαρμόζεται βελτιστοποίηση με βάση το καθαρό φορτίο της Κρήτης κατά 50% και με βάση την τιμή ηλεκτρικής Ενέργειας κατά 50%. Στο SC3, Σχήματα 15, 16, 17, 18, 19 και 20 τα ηλεκτρικά οχήματα απορροφούν περισσότερη ισχύ όταν η τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και ταυτόχρονα η ζήτηση καθαρού φορτίου είναι χαμηλή, δηλαδή στις 05:00 π.μ. και στις 15:00 μ.μ., ενώ η έγχυση ηλεκτρικής

ενέργειας στο δίκτυο πραγματοποιείται όταν η τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και η ζήτηση καθαρού φορτίου είναι υψηλή δηλαδή στο διάστημα 10:00 π.μ. - 13:00 μ.μ. και στο διάστημα 18:00 μ.μ. – 21:00 μ.μ.. Επίσης παρατηρούμε πως όσο αυξάνουμε το ποσοστό V2G τόσο περισσότερο αυξάνεται ή μειώνεται η προσφορά ή απορρόφηση προς και από το δίκτυο.



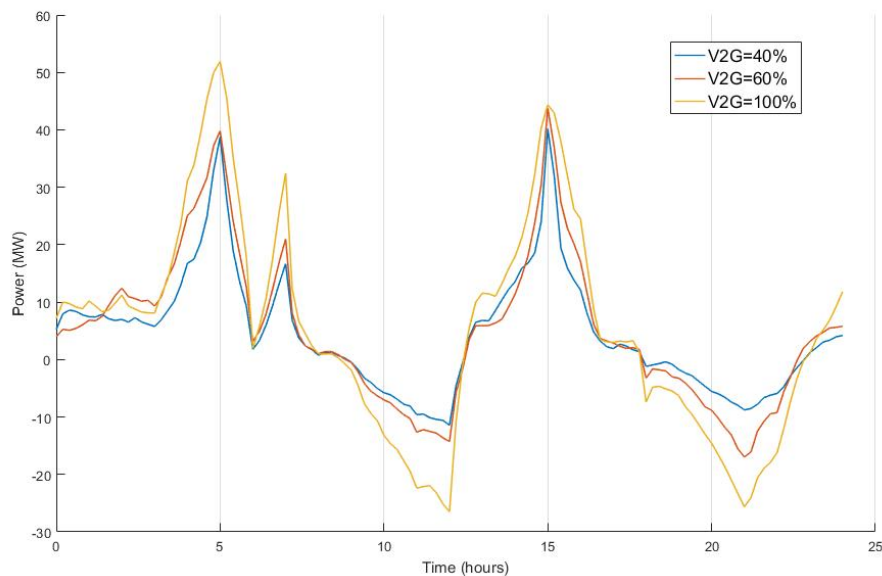
Σχήμα 21 Ισχύς που ανταλλάσσουν τα οχήματα με το δίκτυο για κάθε σενάριο

Στο Σχήμα 21, απεικονίζεται η συνολική ισχύς των ηλεκτρικών οχημάτων που ανταλλάσσουν με το δίκτυο, για τα σενάρια SC1-SC3 καθώς και η σύγκριση με την απλή φόρτιση (Dumb) η οποία αντιστοιχεί σε θετική ισχύ με μικρές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας.

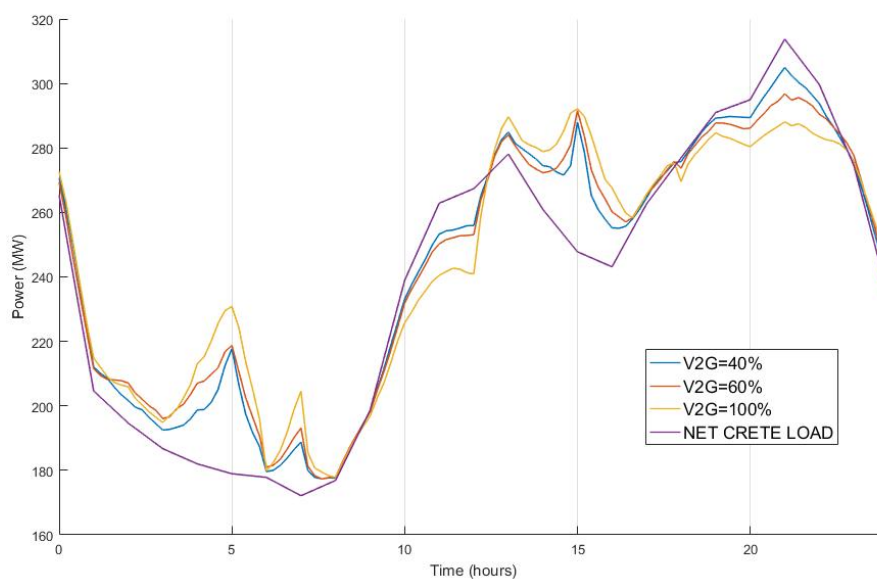


Σχήμα 22 Καθαρό φορτίο με προσθήκη συνολική ισχύος ΗΟ για όλα τα Σενάρια

Στο Σχήμα 22, απεικονίζεται το καθαρό φορτίο της Κρήτης με την προσθήκη του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων για κάθε σενάριο SC1-SC3. Συγκεκριμένα, το SC1 βοηθά το δίκτυο να διαθέτει μικρότερες διακυμάνσεις φορτίου μέσω στρατηγικής Peak Shaving και Valley filling που εφαρμόζεται στις κατάλληλες χρονικές περιόδους. Ως εκ τούτου, ο κύριος στόχος της εξισορρόπησης της καμπύλης φορτίου επιτυγχάνεται. Στο SC2, μόνο η τιμή ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνεται υπόψη και όχι το καθαρό φορτίο του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ στο SC3 και οι δύο παράγοντες λαμβάνονται από κοινού υπόψιν.



Σχήμα 23 Ισχύς που ανταλλάσσουν τα οχήματα με το δίκτυο για κάθε V2G ποσοστό

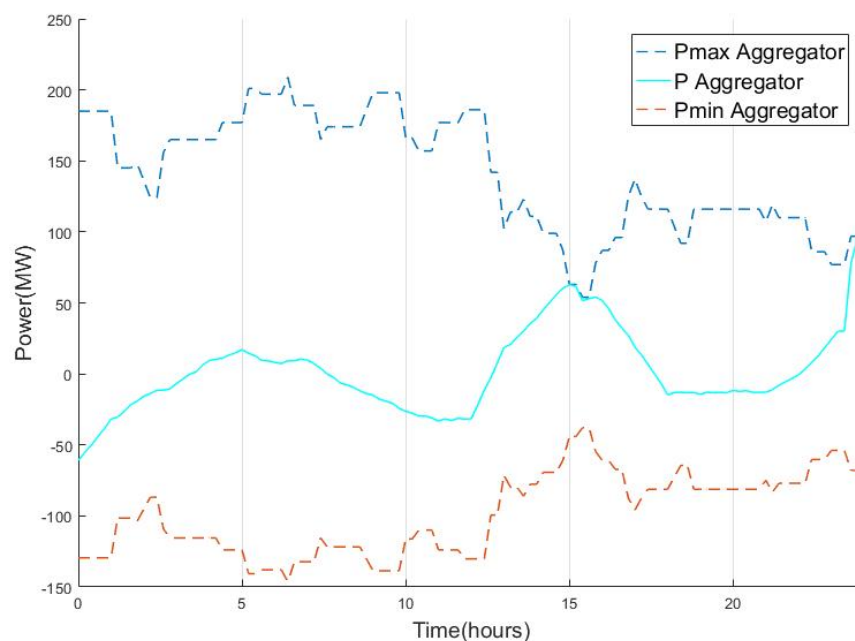


Σχήμα 24 Καθαρό Φορτίο Κρήτης με διείσδυση οχημάτων για κάθε V2G ποσοστό

Στα Σχήματα 23 και 24 απεικονίζεται η συνολική ηλεκτρική ισχύς των ηλεκτρικών οχημάτων για διαφορετικό ποσοστό V2G συμμετοχής στη βελτιστοποίηση (SC3.a-SC3.c) Πίνακας 3. Παρατηρείται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η διεύθυνση V2G, τόσο καλύτερη είναι η ισορροπία φορτίου.

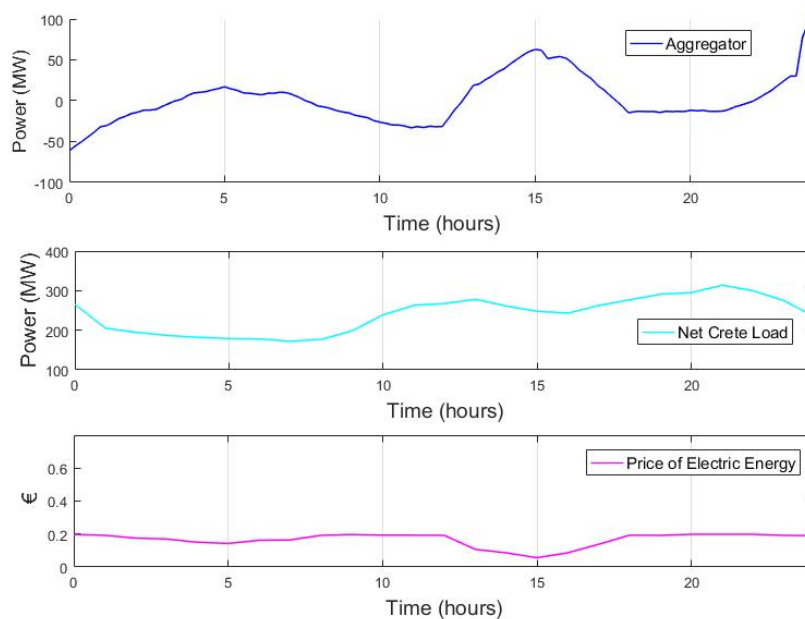
3.2 Αποτελέσματα Συναθροιστή

Η βελτιστοποίηση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων με χρήση του συναθροιστή εφαρμόζει V2G λειτουργία 60% και αντιστοιχεί στο σενάριο SC3. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν.



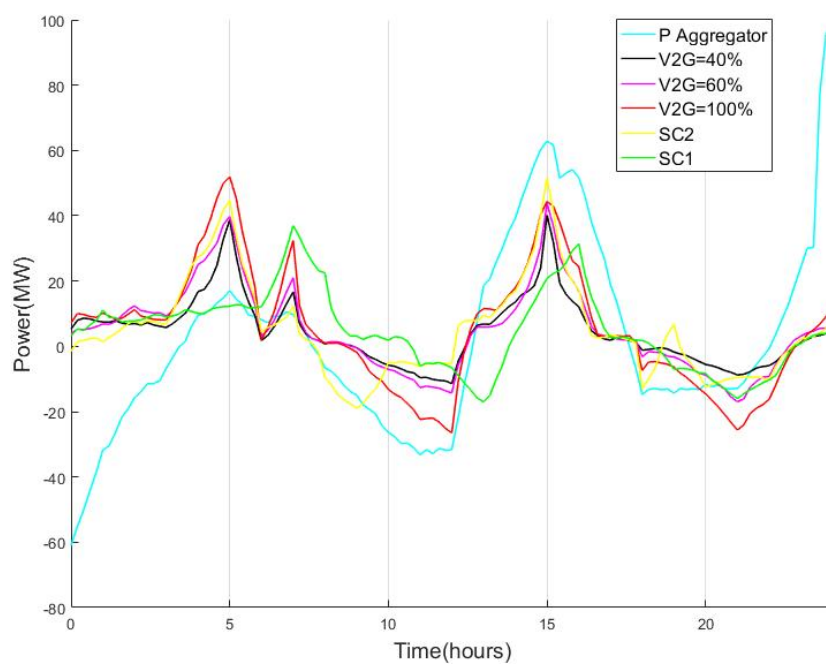
Σχήμα 25 Όρια Συναθροιστή και Ισχύς που ανταλλάσσει με το δίκτυο

Στο Σχήμα 25 βλέπουμε τα όρια εντός των οποίων λειτουργεί ο συναθροιστής τα οποία προκύπτουν αθροίζοντας όλα τα Pmin και Pmax των οχημάτων ανά χρονική στιγμή όπως αναλύεται σε το προηγούμενο Κεφάλαιο. Αυτό που γίνεται αντιληπτό είναι ότι τις χρονικές στιγμές που το συνολικό Pmax των οχημάτων είναι χαμηλότερο κατά της διάρκεια του 24ώρου, ο συναθροιστής τυγχάνει να αξιοποιεί περισσότερη ισχύ.

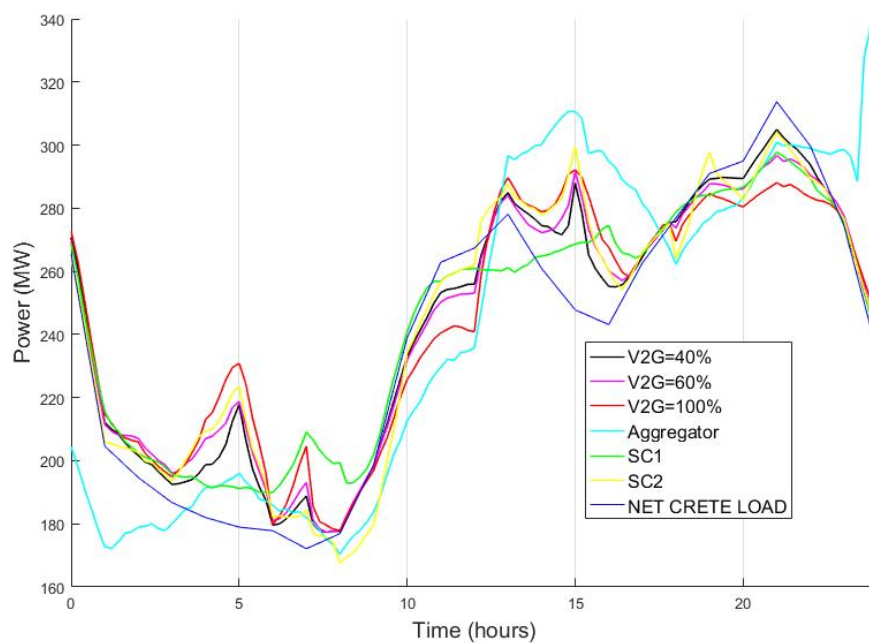


Σχήμα 26 Σύγκριση της Ισχύος που ανταλλάσσουν τα οχήματα με το δίκτυο για τον Συναθροιστή με το καθαρό Φορτίο και την Τιμή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Στον συναθροιστή γίνεται εφαρμογή του Σεναρίου 3 (SC3) με βελτιστοποίηση σύμφωνα με το καθαρό φορτίο της Κρήτης κατά 50% και σύμφωνα με την τιμή ηλεκτρικής Ενέργειας κατά 50%. Στο Σχήμα 26 ο συναθροιστής απορροφάει περισσότερη ισχύ όταν η τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και ταυτόχρονα η ζήτηση καθαρού φορτίου είναι χαμηλή, δηλαδή κοντά στις 15:00 μ.μ., ενώ η έγχυση ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο πραγματοποιείται όταν η τιμή ηλεκτρικής ενέργειας και η ζήτηση καθαρού φορτίου είναι υψηλή δηλαδή στο διάστημα 10:00 π.μ. - 12:00 μ.μ. και 19:00 μ.μ. – 21:00 μ.μ.



Σχήμα 27 Συγκριτικό ισχύος που ανταλλάσσουν τα οχήματα με το δίκτυο



Σχήμα 28 Συγκριτικό Καθαρού Φορτίου Κρήτης με διείσδυση οχημάτων για κάθε περίπτωση

Στα Σχήματα 27 και 28 φαίνεται η σύγκριση όλων των βελτιστοποιήσεων που χρησιμοποιήθηκαν. Είναι φανερό ότι ο συναθροιστής έχει πιο ομαλές διακυμάνσεις γεγονός ευνοϊκό για το συνολικό φορτίο του Συστήματος. Αυτό βοηθάει στην εξισορρόπηση του συνολικού φορτίου της Κρήτης.

3.3 Συνολικά Κόστη Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων

Στο σημείο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν το κόστος φόρτισης των οχημάτων για τα διάφορα σενάρια και τον Συναθροιστή Φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων.

Σύμφωνα με τη σχετική έρευνα [34], που απορρέει από την εξίσωση υπολογισμού κόστους λειτουργίας (1.1), το Κόστος Παραγωγής του ΣΗΕ Κρήτης συνυπολογίζοντας τις αντίστοιχες ΑΠΕ φτάνει στα 851,910 (€/ημέρα).

Για τον υπολογισμό του τελικού Συνολικού Κόστους Φόρτισης των οχημάτων για όλα τα σενάρια χρησιμοποιήθηκε ο τύπος :

$$Cost_{Sci} = \sum_{t=0:24} \widehat{EP}(t) * P_i(t) \quad (3.1)$$

Όπου,

$Cost_{Sci}$ (σε €/ημέρα) το τελικό κόστος για κάθε σενάριο i από 1 έως 3,

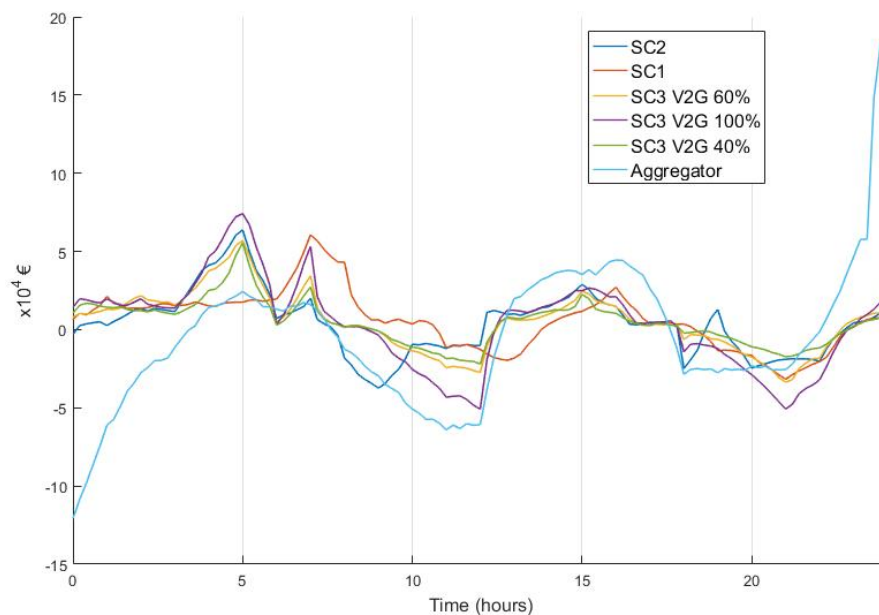
$\widehat{EP}(t)$ (σε €/MWh) είναι η προβλεπόμενη τιμή ηλεκτρικής ενέργειας, $P_i(t)$ (σε MW) είναι η βέλτιστη ισχύς που ανταλλάσσει το ηλεκτρικό όχημα με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Έπειτα εκτελώντας τα σενάρια για τα κόστη φόρτισης των οχημάτων προκύπτει ο παρακάτω Πίνακας 4.

Κόστη Συστήματος σύμφωνα με τα Σενάρια Φόρτισης						
Συνολικά Κόστη	SC1	SC2	SC3 (V2G 40%)	SC3 (V2G 60%)	SC3 (V2G 100%)	Συναθροιστής
Συνολικό Κόστος Φόρτισης ΗΟ (€/Ημέρα)	72,753	45,941	56,074	57,965	44,698	40,700
Συνολικό Κόστος Λειτουργίας Συστήματος (€/Ημέρα)	924,663	897,851	907,984	909,875	896,608	892,610

Πίνακας 4 Κόστη Σ.Η.Ε. Κρήτης και Σεναρίων Φόρτισης

Παρατηρούμε, ότι το κόστος στο Σενάριο 1 είναι πιο υψηλό και αυτό καθώς ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης δε λαμβάνει υπόψιν την παράμετρο του κόστους. Αντίθετα στο Σενάριο 2 όπου η βελτιστοποίηση βασίζεται στον παράγοντα κόστος, φαίνεται ότι έχουμε πιο οικονομικά αποτελέσματα. Έπειτα στο Σενάριο 3, όπου ο αλγόριθμος βασίζεται κατά 50% στην τιμή κόστους της ενέργειας, φαίνεται ότι τα αποτελέσματα βρίσκονται μεταξύ SC1 και SC2. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό V2G λειτουργίας τόσο πιο οικονομικά είναι τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε. Ο συναθροιστής ο οποίος βλέπει τα οχήματα σαν μια ενιαία μπαταρία προκύπτει πιο οικονομικός από όλες τις περιπτώσεις καθώς εφαρμόζει το SC3.



Σχήμα 29 Συνολικό Ωριαίο Κόστος Φόρτισης Οχημάτων

Στο Σχήμα 28, παρουσιάζεται το συνολικό ωριαίο κόστος φόρτισης οχημάτων για όλα τα σενάρια διεύθυνσης και τρόπους φόρτισης.

Κεφάλαιο 4

Συμπεράσματα και Επεκτάσεις

Η μεγάλη αύξηση των ΗΟ οδηγεί σε πολλές προκλήσεις που χρήζουν αντιμετώπισης από τους διαχειριστές των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτή την εργασία, προτείνεται μια μέθοδος για την αξιολόγηση των επιπτώσεων της βέλτιστης φόρτισης των ΗΟ σε επίπεδο συστήματος ισχύος. Αρχικός στόχος η ελαχιστοποίηση του συνολικού ημερήσιου κόστους φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων καθώς και η εξομάλυνση της καμπύλης του ημερήσιου φορτίου του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, ως μια βοηθητική υπηρεσία που μπορούν να προσφέρουν τα διασυνδεδεμένα ηλεκτρικά οχήματα κατά τη φόρτισή τους. Τα σενάρια της προτεινόμενης μεθόδου βελτιστοποίησης πολλαπλών κριτηρίων λαμβάνουν υπόψη την πρόβλεψη φορτίου του συστήματος ισχύος, την παραγωγή από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) και την τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας ανά ώρα της ημέρας. Επίσης, υλοποιήθηκε το μοντέλο του συναθροιστή φόρτισης διασυνδεδεμένων ηλεκτρικών οχημάτων, το οποίο αντιμετωπίζει το στόλο ηλεκτρικών οχημάτων ως ισοδύναμη μπαταρία. Η μέθοδος ενισχύεται χρησιμοποιώντας λεπτομερή μοντελοποίηση της καθημερινής δραστηριότητας κάθε ηλεκτρικού οχήματος λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά της περιοχής στην οποία δραστηριοποιείται, το είδος του ταξιδιού, τις προτιμήσεις φόρτισης οχήματος του οδηγού καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού οχήματος. Σχετικά με τη μέθοδο υλοποίησης, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν βασίστηκαν στην πραγματικότητα, έγινε εφαρμογή της λειτουργίας Vehicle to Grid (V2G) και η βελτιστοποίηση προσαρμόστηκε στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης.

Όπως είναι φανερό από τα αποτελέσματα, το σενάριο βελτιστοποίησης του συναθροιστή είναι πιο οικονομικό σε σχέση με τα σενάρια που βελτιστοποιούν ένα προς ένα τα οχήματα. Όσον αφορά τη V2G λειτουργία που εφαρμόζεται, όσο μεγαλύτερο το ποσοστό διείσδυσης V2G λειτουργίας τόσο πιο οικονομικά αποτελέσματα φόρτισης προκύπτουν. Παρατηρείται εξομάλυνση του αρχικού

προφίλ του Συστήματος της Κρήτης με αύξηση της ζήτησης φορτίου στα σημεία χαμηλής ενεργειακής ζήτησης (valley filling) και μείωση της ζήτησης σε περιόδους αιχμής. Σχετικά με την ισχύ φόρτισης που αξιοποιούν τα ηλεκτρικά οχήματα φαίνεται ότι ο συναθροιστής κατανέμει βέλτιστα την ισχύ σε σχέση με το φορτίο του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις και εναλλαγές σε σχέση με την ένα προς ένα όχημα βέλτιστη φόρτιση.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι για την εφαρμογή της μεθόδου φόρτισης δεν απαιτούνται εξελιγμένα συστήματα υπολογισμού, μέτρησης και επικοινωνίας γεγονός που καθιστά σχετικά εύκολη την εφαρμογή και υλοποίηση της.

Ενδεικτικές μελλοντικές επεκτάσεις αφορούν:

- Μοντελοποίηση διασυνδέσεων του ηλεκτρικού δικτύου (της Κρήτης με την Πελοπόννησο και Αττική στην περίπτωση που μελετήθηκε).
- Μοντελοποίηση υπεραστικών διαδρομών των ηλεκτρικών οχημάτων (μεταξύ Νομών της Κρήτης στην περίπτωση που μελετήθηκε) .
- Αυξημένη λεπτομέρεια σχεδίασης ελέγχου φόρτισης και εκφόρτισης κάθε οχήματος π.χ. γήρανση μπαταριών.
- Υπολογισμοί Ενεργών και Άεργων Απωλειών δικτύου.
- Αξιοποίηση ορισμένων εφαρμογών τεχνητής νοημοσύνης και συγκεκριμένα, αξιοποίηση πρόβλεψης επιπέδου δραστηριότητας PEV της επόμενης ημέρας, τιμής ηλεκτρικής ενέργειας και απόφαση φόρτισης με βάση την κατάσταση φόρτισης μπαταρίας του ηλεκτρικού οχήματος.

Βιβλιογραφία

- [1] Nikolas Stern, “Stern Review: The Economics of Climate Change”, Centro de Ciencia do Sistema Terrestre (CCST), Jan. 2009, pp. 160-163
- [2] “Greenhouse gas emissions from transport in Europe.”, European Environment Agency (EEA), Jul. 2023
- [3] "Global EV Outlook 2021", International Energy Agency (IEA), Apr. 2021, pp. 17
- [4] Bijan Bibak, Hatice Tekiner-Moğulkoş, “A comprehensive analysis of Vehicle to Grid (V2G) systems and scholarly literature on the application of such systems” , ScienceDirect/ Renewable Energy Focus, Mar 2021, pp. 5-15
- [5] Julio A Sanguesa, Vicente Torres-Sanz, Piedad Garrido, FranciscoJ. Martinez, “A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges”, Smart Cities, Mar 2021, pp. 376- 378
- [6] Nicki Schill, “Μερικές πληροφορίες για τη φόρτιση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου”, Ελληνικό Ινστιτούτο Ηλεκτροκίνητων Οχημάτων (ΕΛ.ΙΝ.Η.Ο.), Jan.2020
- [7] Chirag Panchal, Sascha Stegen, Junwei Lu, “Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system”, ScienceDirect, Jun.2018, pp. 922-937
- [8] Zhipeng Liu, Fushuan Wen, Gerard Ledwich, “Optimal planning of electric-vehicle charging stations in distribution systems”, IEEE, Nov. 2012, pp. 102-110
- [9] J. J. E. Garzás, A. G. Armada, G. Seco-Granados, “Fair Design of Plug-in Electric Vehicles Aggregator for V2G Regulation”, IEEE, Aug. 2012
- [10] Cassidy Shell, “EV Charging: Software and Grid Services”, Cleantech Group, Jul.2019
- [11] Γιάννης Καμπούρης, “Διασύνδεση Κρήτης- Σχεδιασμός και Οδικός Χάρτης Υλοποίησης”, ΑΔΜΗΕ, pp. 1-39
- [12] “Δεκαετές Πρόγραμμα Ανάπτυξης ΑΔΜΗΕ”, ΑΔΜΗΕ
- [13] Zhipeng, L., Fushuan, W., Ledwich, G ., “Optimal planning of electric-vehicle charging stations in distribution systems”, IEEE Trans.Power Deliv., Jan. 2013, pp. 102–110
- [14] Galus, M.D., Vaya, M.G., Krause, T., Andersson, G. , “The role of electric vehicles in smart grids”, Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ., Feb. 2013, pp.384-400
- [15] Y. Xiang, J. Liu, and Y. Liu, “Optimal active distribution system management considering aggregated plug-in electric vehicles,” Elect. Power Syst. Res., Oct. 2015, pp. 105–115.

- [16] J. E. Cardona et al., "Decentralized electric vehicles charging coordination using only local voltage magnitude measurements," *Elect. Power Syst. Res.*, Apr. 2018, pp. 139–151.
- [17] S. Pirouzi et al., "Power conditioning of distribution networks via single-phase electric vehicles equipped," *IEEE Syst. J.*, Sep. 2019, pp. 3433–3442.
- [18] V. Monteiro, J. G. Pinto, and J. L. Afonso, "Operation modes for the electric vehicle in smart grids and smart homes: Present and proposed modes," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Mar. 2016, pp. 1007–1020
- [19] A. Dutta and S. Debbarma, "Frequency regulation in deregulated market using vehicle-to-grid services in residential distribution network," *IEEE Syst. J.*, Sep. 2018, pp. 2812–2820
- [20] K. Qian, C. Zhou, M. Allan, and Y. Yuan, "Modeling of load demand due to EV battery charging in distribution systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, May 2011, pp. 802–810
- [21] E. Veldman and R. A. Verzijlbergh, "Distribution grid impacts of smart electric vehicle charging from different perspectives," *IEEE Trans. Smart Grid*, , Jan. 2015, pp. 333–342
- [22] Sheik Mohammed S., Femin Titus, Sudhakar Babu Thanikanti , Sulaiman S. M., Sanchari Deb and Nallapaneni Manoj Kumar, "Charge Scheduling Optimization of Plug-In Electric Vehicle in a PV Powered Grid-Connected Charging Station Based on Day-Ahead Solar Energy Forecasting in Australia", *Sustainability (Switzerland) MDPI*, Mar. 2022, pp. 14-15
- [23] Fotios D. Kanellos, "Optimal Scheduling and Real-Time Operation of Distribution Networks With High Penetration of Plug-In Electric Vehicles", *IEEE Systems Journal*, Sep. 2021, pp. 3-8
- [24] Michail Dakanalis and Fotios D. Kanellos, "Efficient Model for Accurate Assessment of Frequency Support by Large Populations of Plug-in Electric Vehicles", *MDPI Inventions*, Nov. 2021, pp. 8-16
- [25] George Konstantinidis, Fotios D. Kanellos and Kostas Kalaitzakis, "A Simple Multi-Parameter Method for Efficient Charging Scheduling of Electric Vehicles" *MDPI Applied System Innovation*, Aug. 2021, pp. 4-21
- [26] Fotios D. Kanellos, Kostas Kalaitzakis, Ioannis Psarras, Yannis Katsigiannis, "Efficient and robust power and energy management for large clusters of plug-in electric vehicles and distribution networks", *IET Energy Systems Integration*, Apr. 2022, pp. 5-8
- [27] Yang, J., He, L., Fu, S., "An improved PSO-based charging strategy of electric vehicles in electrical distribution grid." *Appl. Energy*, May 2014, pp. 82–92.

- [28] Shao-Chao Ma, Bo-Wen Yi, Ying Fan, "Research on the valley-filling pricing for EV charging considering renewable power generation", Energy Economics, Dec. 2021, pp. 7-12.
- [29] Umer Akram, Mithulananthan Nadarajah, Rakibuzzaman Shah, Saifullah Shafiq, "Frequency Security Constrained Energy Management in an Isolated Power System," WSEAS Trans on Power Systems, Oct.2020, pp. 222-229
- [30] Zongfei Wang, Patrick Jochem, Wolf Fichtner, "A scenario-based stochastic optimization model for charging scheduling of electric vehicles under uncertainties of vehicle availability and charging demand," Journal of Cleaner Production, Dec. 2019, pp. 1-15
- [31] Supaporn, Suwannarongsri, "Solving Multiple Vehicle Routing Problems with Time Constraints by Flower Pollination Algorithm Optimization," WSEAS Trans on Systems, Aug.2020, pp. 178- 187
- [32] Ricardo Faia , João Soares, Zita Vale, Juan Manuel Corchado, "An Optimization Model for Energy Community Costs Minimization Considering a Local Electricity Market between Prosumers and Electric Vehicles," Electronics 2021 MDPI, Jan. 2021, pp. 1-17
- [33] Hellenic Statistical Authority: 2011 Population Census.
Available on: <https://www.statistics.gr/en/home>
- [34] Καρανδινού Αικατερίνη Αγάπη, "Μοντελοποίηση του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας της Κρήτης με μεγάλη διείσδυση ΑΠΕ και ηλεκτρικών οχημάτων", Ιδρυματικό Αποθετήριο Πολυτεχνείο Κρήτης, Jun. 2020
- [35] AIKATERINI AGAPI KARANDINOY, FOTIOS D. KANELLOS, "A method for the Assessment of Multi-Objective Optimal Charging of Plug-in Electric Vehicles at Power System Level" , WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS and CONTROL, Jul. 2022
- [36] "How do All -Electric Cars Work", U.S. DEPARTMENT OF ENERGY