

# Μοντελοποίηση Λειτουργίας Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας σε Συνθήκες Μεγάλης Διείσδυσης Ηλεκτρικών Οχημάτων

Συγγραφέας: Γεωργία Δρετάκη

Επιβλέπων: Φώτιος Κανέλλος



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών

Πολυτεχνείο Κρήτης

Ιούνιος, 2025



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να αποδώσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Καθοριστικής σημασίας ήταν η συμβολή του καθηγητή κ. Κανέλλου Φώτιου, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την καθοδήγηση και τη στήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνας. Παράλληλα, δε θα μπορούσα να μην αναφέρω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για τη συνεχή ενθάρρυνση και την απεριόριστη υποστήριξή τους. Η συμβολή όλων σας ήταν κρίσιμη για την ολοκλήρωση αυτού του ερευνητικού εγχειρήματος.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη μοντελοποίηση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Κρήτη, ιδιαίτερα στο πλαίσιο της υψηλής διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων. Συγκεκριμένα, η μελέτη αυτή επιχειρεί να καθορίσει εκ νέου τα όρια της ηλεκτροκίνησης στο νησί, κάνοντας χρήση πραγματικών δεδομένων για τη συμπεριφορά των οδηγών, όπως οι χρόνοι στάθμευσης και φόρτισης, καθώς και η ικανότητα των ηλεκτρικών οχημάτων να επιστρέφουν ενέργεια στο δίκτυο μέσω της τεχνολογίας V2G. Επιπλέον, ενσωματώνονται δεδομένα σχετικά με τις παραγωγικές μονάδες της Κρήτης και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας του νησιού για την εξισορρόπηση του φορτίου και τη μείωση του κόστους ενέργειας. Για την ανάπτυξη του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό MATLAB το οποίο λαμβάνει υπόψη τον αντίκτυπο των ηλεκτρικών οχημάτων στην προσφορά ενέργειας, σε συνδυασμό με τις συμβατικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

## **ABSTRACT**

This thesis examines the modeling of the electricity market in Crete, particularly in the context of high penetration of electric vehicles. Specifically, this study attempts to redefine the limits of electrification on the island by making use of real data on driver behaviour such as parking and charging times, as well as the ability of electric vehicles to return energy to the grid via V2G technology. In addition, data on Crete's generation plants and the island's renewable energy sources are incorporated to balance load and reduce energy costs. The model was developed using MATLAB software that takes into account the impact of electric vehicles on energy supply in combination with conventional power plants and renewable energy sources.

## **ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ**

**ΑΠΕ** : Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

**ΗΟ** : Ηλεκτρικό Όχημα

**ΜΕΚ** : Μηχανή Εσωτερικής Καύσης

**ΣΗΕ** : Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

**AC**: Alternating Current

**BEV** : Battery Electric Vehicle

**DC** : Direct Current

**EV** : Electric Vehicle

**FCEV** : Fuel Cell Electric Vehicle

**HEV** : Hybrid Electric Vehicle

**PHEV** : Plug in Hybrid Electric Vehicle

**V2G** : Vehicle-to-Grid

# Περιεχόμενα

## Κατάλογος Σχημάτων

## Κατάλογος Πινάκων

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1	Κίνητρο και Σημασία της Εργασίας . . . . .	1
1.2	Αντικείμενο και Μεθοδολογία . . . . .	2
1.3	Διάρθρωση Εργασίας . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Θεωρητικό Υπόβαθρο</b>	<b>4</b>
2.1	Ηλεκτρικά Οχήματα . . . . .	4
2.1.1	Battery Electric Vehicle (BEV) . . . . .	4
2.1.2	Plug in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) . . . . .	5
2.1.3	Hybrid Electric Vehicle (HEV) . . . . .	5
2.1.4	Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV) . . . . .	5
2.2	Πλεονεκτήματα και προκλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων . . . . .	6
2.3	Μέθοδοι Φόρτισης . . . . .	8
2.3.1	Μη Ελεγχόμενη Φόρτιση . . . . .	8
2.3.2	Ελεγχόμενη Φόρτιση . . . . .	8
2.4	Επίπεδα Φόρτισης . . . . .	9
2.4.1	Επίπεδο 1 : Τυπικός ρευματοδότης - αργή AC φόρτιση. . . . .	9
2.4.2	Επίπεδο 2 : Τυπικός ρευματοδότης - αργή AC φόρτιση με διατάξεις προστασίας. . . . .	9
2.4.3	Επίπεδο 3 : Εξοπλισμός μόνιμα συνδεδεμένος σε δίκτυο τροφοδοσίας - γρήγορη AC φόρτιση. . . . .	10
2.4.4	Επίπεδο 4 : Ταχεία DC φόρτιση. . . . .	10
2.4.5	Ασύρματη φόρτιση . . . . .	11
2.5	Τεχνολογία V2G . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Ηλεκτρικό Σύστημα Κρήτης</b>	<b>14</b>
3.1	Θερμικές Μονάδες . . . . .	14
3.2	ΑΠΕ στην Κρήτη . . . . .	16

<b>4</b>	<b>Μοντελοποίηση Ηλεκτρικών Οχημάτων και Ενεργειακού Συστήματος</b>	<b>18</b>
4.1	Αρχιτεκτονική Αλγορίθμου Ηλεκτρικών Οχημάτων . . . . .	18
4.2	Μοντελοποίηση Ηλεκτρικών Οχημάτων . . . . .	18
4.2.1	Δομή Δεδομένων Οχήματος . . . . .	19
4.2.2	Στοχαστική Περιγραφή Συμπεριφοράς . . . . .	24
4.3	Ρουτίνα Οχήματος . . . . .	34
4.4	Μοντέλο Συνανθροιστή . . . . .	39
4.5	Μοντελοποίηση Ισοδύναμων Γεννητριών . . . . .	41
4.6	Κόστος Μονάδων Συστήματος . . . . .	45
4.7	Μοντέλο Δικτύου Κρήτης . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Αποτελέσματα Μοντελοποίησης</b>	<b>47</b>
5.1	Σενάρια Διείσδυσης Ηλεκτρικών Οχημάτων . . . . .	47
5.2	Αποτελέσματα Αλγορίθμου Οχημάτων . . . . .	48
5.2.1	Συνολική Ισχύς Φόρτισης Οχημάτων ανά Νομό (Dumb Charging) . .	49
5.2.2	Αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων που φορτίζουν υπό σενάριο Dumb Charging στην Κρήτη . . . . .	51
5.2.3	Άφιξη και Αναχώρηση Ηλεκτρικών Οχημάτων στους Σταθμούς Φόρτισης . . . . .	52
5.2.4	Κατανομή Ενέργειας Άφιξης και Αναχώρησης Οχημάτων ανά Νομό .	54
5.2.5	Εξέλιξη Ισχύος Φόρτισης και Ενέργειας Οχήματος σε Χρονική Βάση	56
5.2.6	Όρια Ενέργειας Ισοδύναμων Μπαταριών ανά Νομό . . . . .	58
5.2.7	Επίδραση στο Φορτίο (dumb charging) . . . . .	60
5.3	Αποτελέσματα Συνάρτησης Fmincon. . . . .	63
5.3.1	Επίδραση στο φορτίο (V2G) . . . . .	63
5.3.2	Ενέργεια Αποθηκευμένη στους Aggregator . . . . .	66
5.3.3	Άνω και Κάτω Όρια Ισχύος των Aggregator . . . . .	68
5.3.4	Τιμή Ενέργειας Ανά Σενάριο Διείσδυσης . . . . .	70
5.3.5	Σύγκριση Σεναρίων . . . . .	73
<b>6</b>	<b>Συμπεράσματα και Επεκτάσεις</b>	<b>76</b>
6.1	Συμπεράσματα και Ανατροφοδότηση Στοχοθεσίας . . . . .	76
6.2	Επεκτάσεις . . . . .	76



## Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου ανά χώρα και τομέα [2] . . . . .	1
2.1	Τύποι Ηλεκτρικών Οχημάτων: (a) Hybrid Electric Vehicle (HEV), (b) Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV), (c) Battery Electric Vehicle (BEV), (d) Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV). [6] . . . . .	6
2.2	Μέθοδοι Φόρτισης [7]. . . . .	10
2.3	Ασύρματη Φόρτιση. [8] . . . . .	11
2.4	Σχηματική αναπαράσταση V2G λειτουργίας. [10] . . . . .	12
3.1	Αιολικά και ΜΥΗΣ Κρήτης. [16] . . . . .	17
4.1	Διάγραμμα ροής καταστάσεων ΗΟ. . . . .	22
4.2	Αριθμός οχημάτων που πραγματοποιούν υπεραστικές διαδρομές ανά ώρα. . . . .	25
4.3	Πιθανότητα εκτέλεσης υπεραστικής διαδρομής: Χανιά–Ηράκλειο. . . . .	25
4.4	Πιθανότητα εκτέλεσης υπεραστικής διαδρομής: Χανιά–Ρέθυμνο. . . . .	26
4.5	Πιθανότητα εκτέλεσης υπεραστικής διαδρομής: Ρέθυμνο–Ηράκλειο. . . . .	26
4.6	Κατανομή για το ρυθμό αναχώρησης οχήματος προς συγκεκριμένο προορισμό. . . . .	27
4.7	Κατανομή για επιλογή του επόμενου προορισμού. . . . .	27
4.8	Χρόνος αναχώρησης οχήματος. . . . .	28
4.9	Κατανομή για το ποσοστό μπαταρίας κατά την αναχώρηση του οδηγού από το σπίτι. . . . .	29
4.10	Κατανομή για το ποσοστό μπαταρίας κατά την αναχώρηση του οδηγού από το σπίτι στην τοποθεσία Χανιά με προορισμό το Ηράκλειο. . . . .	29
4.11	Κατανομή για το ποσοστό μπαταρίας κατά την αναχώρηση του οδηγού από το σπίτι στην τοποθεσία Χανιά με προορισμό το Ρέθυμνο. . . . .	30
4.12	Κατανομή για το ποσοστό μπαταρίας κατά την αναχώρηση του οδηγού από το σπίτι στην τοποθεσία Ρέθυμνο με προορισμό το Ηράκλειο. . . . .	30
4.13	Αστική Διαδρομή. . . . .	31
4.14	Υπεραστική Διαδρομή. . . . .	31
4.15	Χρόνος ταξιδιού ανάλογα με τον προορισμό. . . . .	32
4.16	Χρόνος παραμονής οχήματος. . . . .	33
4.17	Επιλογή φόρτισης κατά τη στάθμευση. . . . .	37

4.18	Διάγραμμα ροής αλγορίθμου οχημάτων. . . . .	38
4.19	Ισοδύναμες καμπύλες κόστους ανά ομάδα γεννητριών. . . . .	43
5.1	Πληθυσμός ΗΟ ανά σενάριο διείσδυσης. . . . .	48
5.2	Κατανομή ΗΟ σε πόλεις. . . . .	48
5.3	Κατανομή θέσης ΗΟ κατά τη διάρκεια της ημέρας. . . . .	49
5.4	Συνολική ισχύς φόρτισης των ΗΟ ανά ώρα, με χρήση της μεθόδου "dumb charging", ανά νομό. . . . .	50
5.5	Συνολική ισχύς φόρτισης όλων των ΗΟ στην Κρήτη, βάσει "dumb charging".	51
5.6	Αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων σε κατάσταση φόρτισης ανά ώρα, για κάθε νομό. . . . .	51
5.7	Συνολικός αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων σε κατάσταση φόρτισης ανά ώρα στην Κρήτη. . . . .	52
5.8	Αριθμός ΗΟ που φτάνουν και αναχωρούν από σταθμούς φόρτισης, ανά ώρα και νομό. . . . .	53
5.9	Συνολικός αριθμός ΗΟ που φτάνουν και αναχωρούν από σταθμούς φόρτισης της Κρήτης, ανά ώρα. . . . .	53
5.10	Συνολική ενέργεια των ΗΟ κατά την άφιξη και αναχώρηση από τους σταθμούς φόρτισης ανά ώρα, ανά νομό. . . . .	55
5.11	Συνολική ενέργεια κατά την άφιξη και την αναχώρηση όλων των ΗΟ στους σταθμούς φόρτισης της Κρήτης. . . . .	55
5.12	Προφίλ φόρτισης δύο τυχαίων ΗΟ για αστικά/υπεραστικά δρομολόγια. . . . .	56
5.13	Ενέργεια δύο τυχαίων ΗΟ για αστικά/υπεραστικά δρομολόγια. . . . .	57
5.14	Όρια ενέργειας aggregator για την πόλη Ηράκλειο ανά σενάριο. . . . .	58
5.15	Όρια ενέργειας aggregator για την πόλη Χανιά ανά σενάριο. . . . .	58
5.16	Όρια ενέργειας aggregator για την πόλη Ρέθυμνο ανά σενάριο. . . . .	59
5.17	Όρια ενέργειας aggregator για την πόλη Λασιθί ανά σενάριο. . . . .	59
5.18	Συνολικό φορτίο χωρίς ΗΟ . . . . .	60
5.19	Συνολικό φορτίο με χαμηλή διείσδυση ΗΟ (dumb charging). . . . .	61
5.20	Συνολικό φορτίο με μέση διείσδυση ΗΟ (dumb charging). . . . .	61
5.21	Συνολικό φορτίο με υψηλή διείσδυση ΗΟ (dumb charging). . . . .	62
5.22	Συνολικό φορτίο με πολύ υψηλή διείσδυση ΗΟ (dumb charging). . . . .	62
5.23	Φορτίο συστήματος για το σενάριο Low-V2G. . . . .	63
5.24	Φορτίο συστήματος για το σενάριο Medium-V2G. . . . .	64

5.25 Φορτίο συστήματος για το σενάριο High-V2G. . . . .	65
5.26 Φορτίο συστήματος για το σενάριο Ultra High-V2G. . . . .	65
5.27 Ενέργεια aggregator για το σενάριο Low. . . . .	66
5.28 Ενέργεια aggregator για το σενάριο Medium. . . . .	66
5.29 Ενέργεια aggregator για το σενάριο High. . . . .	67
5.30 Ενέργεια aggregator για το σενάριο Ultra High. . . . .	68
5.31 Ισχύς aggregator για το σενάριο Low. . . . .	68
5.32 Ισχύς aggregator για το σενάριο Medium. . . . .	69
5.33 Ισχύς aggregator για το σενάριο High. . . . .	69
5.34 Ισχύς aggregator για το σενάριο Ultra High. . . . .	70
5.35 Τιμή MWh με ΑΠΕ. . . . .	71
5.36 Τιμή MWh ανά σενάριο. . . . .	72
5.37 Ισχύς συστήματος ανά σενάριο. . . . .	74

## Κατάλογος Πινάκων

3.1	Θερμικές Μονάδες Κρήτης . . . . .	14
3.2	Χαρακτηριστικά Θερμικών Μονάδων Λινοπεραμάτων . . . . .	15
3.3	Χαρακτηριστικά Θερμικών Μονάδων Αθρινόλακου . . . . .	15
3.4	Χαρακτηριστικά Θερμικών Μονάδων Χανίων . . . . .	16
4.1	Τύποι και χαρακτηριστικά ΗΟ . . . . .	20
4.2	Κατανάλωση Τύπων Μπαταριών . . . . .	20
4.3	Μέγιστη Ισχύς Φόρτισης Τύπων Μπαταριών . . . . .	20
4.4	Ελάχιστη Ισχύς Φόρτισης Τύπων Μπαταριών . . . . .	21
4.5	Μέγιστη Χωρητικότητα Τύπων Μπαταριών . . . . .	21
4.6	Ελάχιστη Χωρητικότητα Τύπων Μπαταριών . . . . .	21
4.7	Χρόνος αστικού ταξιδιού ανά νομό . . . . .	32
4.8	Αποστάσεις μεταξύ νομών. . . . .	32
4.9	Χρόνος παραμονής οχήματος σε προορισμό. . . . .	33
4.10	Χαρακτηριστικά κατανομών του στόλου ΗΟ. [19] [18] . . . . .	34
4.11	Ισοδύναμοι συντελεστές κόστους ανά ομάδα γεννητριών. . . . .	42
4.12	Άνω και κάτω όρια ομάδων γεννητριών. . . . .	42
5.1	Μέση τιμή MWh ανά σενάριο. . . . .	73
5.2	Ποσοστιαία μείωση μέσης τιμής MWh ανά σενάριο μετάβασης. . . . .	74

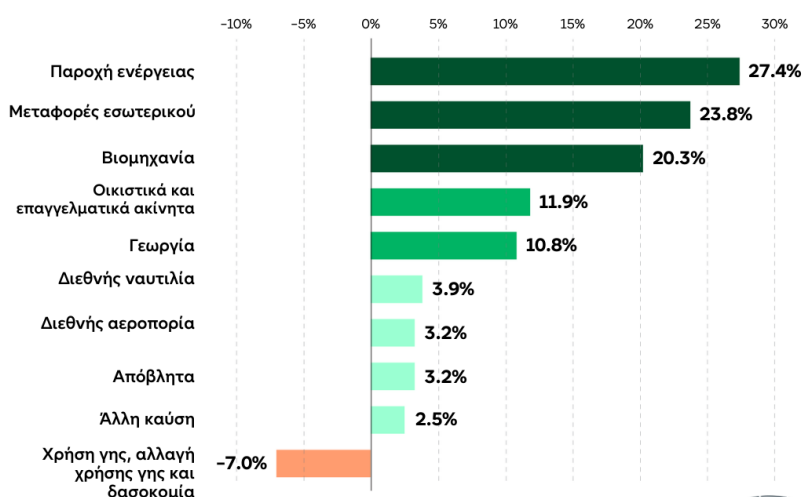
## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Κίνητρο και Σημασία της Εργασίας

Η αλματώδης εξάπλωση των οχημάτων με Μηχανή Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ) έχει δραματίσει καθοριστικό ρόλο στη σύγχρονη κοινωνία, προσφέροντας άνεση, ταχύτητα και ευκολία στις μετακινήσεις. Εντούτοις, η άμετρη χρήση και εν τέλει η εξάρτηση από αυτά τα μέσα μεταφοράς αποτελούν τις βασικές αιτίες υποβάθμισης του ατμοσφαιρικού αέρα, ιδιαίτερα σε περιοχές πυκνού αστικού ιστού. Σύμφωνα με δεδομένα του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, κατά το έτος 2022 ο τομέας των εσωτερικών μεταφορών ευθύνεται για το 23,8% των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην ΕΕ [1]. Παράλληλα, προβάλλονται και σημαντικά ζητήματα στον τομέα της δημόσιας υγείας, καθώς τα ρυπογόνα αέρια προκαλούν αναπνευστικά προβλήματα στον γενικό πληθυσμό. Οι επιπτώσεις αυτές μεταφράζονται και σε οικονομικούς όρους, καθώς το κόστος για τα συστήματα υγειονομικής περίθαλψης αυξάνεται σημαντικά λόγω των ασθενειών που σχετίζονται με την ατμοσφαιρική ρύπανση.

### Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου στην ΕΕ ανά τομέα

μερίδιο των συνολικών εκπομπών  
που εκτιμάται σε ισοδύναμο CO<sub>2</sub> (2022)



πηγή: Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος



Σχήμα 1.1: Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου ανά χώρα και τομέα [2]

Αξίζει να επισημανθεί και η γενικότερη επίδραση που έχουν στο περιβάλλον, με τη μόλυνση

του ατμοσφαιρικού αέρα και τη συμβολή στην κλιματική αλλαγή. Ένα ακόμη φλέγον ζήτημα λόγω της ευρείας χρήσης οχημάτων με κινητήρα εσωτερικής καύσης είναι η εξάρτηση από τους ορυκτούς πόρους, όπως η βενζίνη και το ντίζελ. Η διαδικασία εξόρυξης και μεταφοράς πετρελαίου είναι στον πυρήνα της προβληματική, καθώς ενέχει περιβαλλοντικούς κινδύνους, όπως διαρροές πετρελαίου, μόλυνση οικοσυστημάτων και ρύπανση υδάτων.

Συγχρόνως, οι περιορισμένοι φυσικοί πόροι αυξάνουν την ενεργειακή εξάρτηση από συγκεκριμένες περιοχές του κόσμου. Οι τιμές του πετρελαίου είναι ευμετάβλητες, εξαρτώμενες από γεωπολιτικές συγκρούσεις και οικονομικές κρίσεις. Αυτό οδηγεί σε ενεργειακή αστάθεια και οικονομική ανασφάλεια για πολλές χώρες, ιδιαίτερα για εκείνες που δεν έχουν μεριμνήσει για ενεργειακή αυτονομία. Τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα των επιδείνωση της ποιότητας ζωής στην ολότητά της.

Παράλληλα, η διεθνής και ευρωπαϊκή πολιτική προωθεί την απολιγνιτοποίηση και τη μετάβαση σε «πράσινες» τεχνολογίες, επιταχύνοντας την ανάγκη για αναδιάρθρωση και εκσυγχρονισμό. Σε αυτό το πλαίσιο, τα Ηλεκτρικά Οχήματα (ΗΟ) αποτελούν μια πιο βιώσιμη λύση, καθώς λειτουργούν όχι μόνο ως μέσα μετακίνησης αλλά και ως φορητές αποθήκες ενέργειας, με δυνατότητα να συνεισφέρουν στην εξισορρόπηση του συστήματος, ειδικά μέσω τεχνολογιών όπως το Vehicle-to-Grid (V2G)).

## 1.2 Αντικείμενο και Μεθοδολογία

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη μοντελοποίηση του ηλεκτρικού συστήματος της Κρήτης, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τις υφιστάμενες μονάδες παραγωγής και τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), όσο και τον ρόλο των ΗΟ σε διάφορα σενάρια διεξόδου.

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο σε περιβάλλον MATLAB, το οποίο αποσκοπεί στην προσομοίωση του ηλεκτρικού συστήματος της Κρήτης, λαμβάνοντας υπόψη την συμβολή των ΑΠΕ, τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο και εξετάζοντας διαφορετικά σενάρια διεξόδου ΗΟ. Πιο συγκεκριμένα, η μεθοδολογία περιλαμβάνει την ανάπτυξη ενός αλγορίθμου που προσομοιάζει τη συμπεριφορά διαφορετικών τύπων ΗΟ σε βάση εικοσιτετράωρου, λαμβάνοντας υπόψη χρονικά προφίλ άφιξης/αναχώρησης σε σταθμούς φόρτισης και απαιτούμενη ενέργεια φόρτισης. Το φορτίο των ΗΟ έχει τη δυνατότητα να εφαρμόζει διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης (απλή φόρτιση - dumb charging

και V2G.

Ο αλγόριθμος ενσωματώνει τις ενεργειακές απαιτήσεις των ΗΟ στο συνολικό φορτίο του συστήματος και προσδιορίζει την κατανομή της παραγωγής στις θερμικές μονάδες και τις ΑΠΕ, με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους και τη διατήρηση της ισορροπίας ισχύος σε κάθε χρονική περίοδο. Ακόμη, αποσκοπεί στην αξιολόγηση, μέσω προσομοιώσεων, της δυνατότητας των ΗΟ να συμβάλλουν στη μείωση της χρήσης συμβατικών μονάδων και την εκτίμηση των επιπτώσεών τους στην ευελιξία και την αξιοπιστία του συστήματος.

### 1.3 Διάρθρωση Εργασίας

Το περιεχόμενο της εργασίας διαρθρώνεται ως εξής: Στο Κεφάλαιο 2 αναλύεται το θεωρητικό υπόβαθρο, παρέχοντας τις απαραίτητες βάσεις για την κατανόηση των τεχνολογιών και των αρχών που σχετίζονται με το θέμα της μελέτης. Στη συνέχεια, το Κεφάλαιο 3 περιγράφεται το ηλεκτρικό σύστημα της Κρήτης, οι μονάδες παραγωγής ενέργειας και οι ΑΠΕ, καθώς και η τεχνολογία των ΗΟ και η ενσωμάτωσή τους στο ενεργειακό σύστημα. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η μεθοδολογία και το μοντέλο που αναπτύχθηκε σε περιβάλλον MATLAB, περιγράφοντας τις διαδικασίες και τους αλγορίθμους που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση των διαφορετικών σεναρίων. Έπειτα, στο Κεφάλαιο 5 παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα διάφορα σενάρια διείσδυσης ΗΟ και αναλύονται οι επιπτώσεις τους στο σύστημα. Καταληκτικά, στο Κεφάλαιο 6 παρατίθενται τα συμπεράσματα της εργασίας, καθώς και προτάσεις για μελλοντική έρευνα και εφαρμογές.

## 2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

### 2.1 Ηλεκτρικά Οχήματα

Ηλεκτρικό αυτοκίνητο ονομάζεται κάθε τύπος οχήματος, ο οποίος αντί για Μηχανή Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ) διαθέτει ηλεκτρικό κινητήρα και για την κίνησή του δεν καταναλώνει υγρά καύσιμα, αντιθέτως αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια σε επαναφορτιζόμενους συσσωρευτές. Τα οχήματα τα οποία χρησιμοποιούν τόσο ΜΕΚ, όσο και ηλεκτροκινητήρα ονομάζονται υβριδικά.

Τα ΗΟ αποτελούνται από τρία κυρίως μέρη: τον ηλεκτρικό κινητήρα, τον ελεγκτή και τους συσσωρευτές. Ο ηλεκτρικός κινητήρας είναι υπεύθυνος για την κίνηση του οχήματος καθώς μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική η οποία μεταφέρεται σε εκείνον από την μπαταρία. Το εκάστοτε μοντέλο ηλεκτρικού οχήματος δύναται να έχει ένα ή παραπάνω ηλεκτροκινητήρες.

Ο ελεγκτής των ηλεκτρονικών ισχύος καθορίζει τη λειτουργία του ΗΟ και επιτυγχάνει την κίνηση του οχήματος μέσω της κυκλοφορίας του ηλεκτρικού ρεύματος από την μπαταρία στον ηλεκτροκινητήρα. Ταυτόχρονα, ελέγχει και ρυθμίζει λειτουργίες, λαμβάνοντας πληροφορίες από τα διάφορα συστήματα, όπως την παραγόμενη ροπή και ταχύτητα.

Οι συσσωρευτές είναι το σημείο στο οποίο αποθηκεύεται η ηλεκτρική ενέργεια, σε μορφή DC ρεύματος, η οποία έπειτα προωθείται στον ηλεκτροκινητήρα. Μέσω του συστήματος αναγεννητικής πέδησης, όταν το όχημα επιβραδύνει, παράλληλα γίνεται μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε ηλεκτρική και αποθηκεύεται για μελλοντική χρήση.

Παρακάτω αναλύονται οι κυριότεροι τύποι ΗΟ και παρουσιάζεται η βασική αρχή λειτουργίας τους.

#### 2.1.1 Battery Electric Vehicle (BEV)

Τα BEV, τα οποία είναι γνωστά και ως All-Electric Vehicles (AEV), κινούνται εξ ολοκλήρου με ηλεκτρική ενέργεια και δεν διαθέτουν ΜΕΚ [3]. Η ηλεκτρική ενέργεια που χρησιμοποιείται για την κίνηση του οχήματος, αποθηκεύεται σε συστοιχία συσσωρευτών, οι οποίοι φορτίζουν με απευθείας σύνδεση στο δίκτυο. Ο αντιστροφέας αναλαμβάνει τη μετατροπή του DC ρεύματος από την μπαταρία σε AC και ρυθμίζοντας τη συχνότητα



του εναλλασσόμενου ρεύματος έχει τη δυνατότητα να αλλάζει την ταχύτητα με την οποία περιστρέφεται ο κινητήρας. Μπορεί επίσης να αυξήσει ή να μειώσει την ισχύ ή τη ροπή του κινητήρα παραλλάσσοντας το πλάτος του σήματος. Όταν το αυτοκίνητο επιβραδύνει ή ο οδηγός πατήσει φρένο, ο κινητήρας μετατρέπεται σε γεννήτρια και παράγει ενέργεια, η οποία αποστέλλεται πίσω στην μπαταρία.

### **2.1.2 Plug in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)**

Αυτός ο τύπος ηλεκτρικού οχήματος, χρησιμοποιεί τόσο ηλεκτρική ενέργεια, όσο και συμβατικά καύσιμα (βενζίνη ή ντίζελ). Αρχικά η λειτουργία τους είναι ηλεκτρική έως ότου εξαντληθεί η μπαταρία τους και έπειτα λειτουργούν όπως ένα συμβατικό όχημα. Μπορούν να φορτίσουν με απευθείας σύνδεση στο δίκτυο μέσω θύρας φόρτισης και μέσω αναγεννητικής πέδησης [4]. Επιπρόσθετα, τα PHEV παράγουν χαμηλότερα επίπεδα εκπομπών ρύπων και έχουν χαμηλή κατανάλωση, ανάλογα με την πηγή ηλεκτρικής ενέργειας και το πόσο συχνά το όχημα λειτουργεί σε αμιγώς ηλεκτρική λειτουργία.

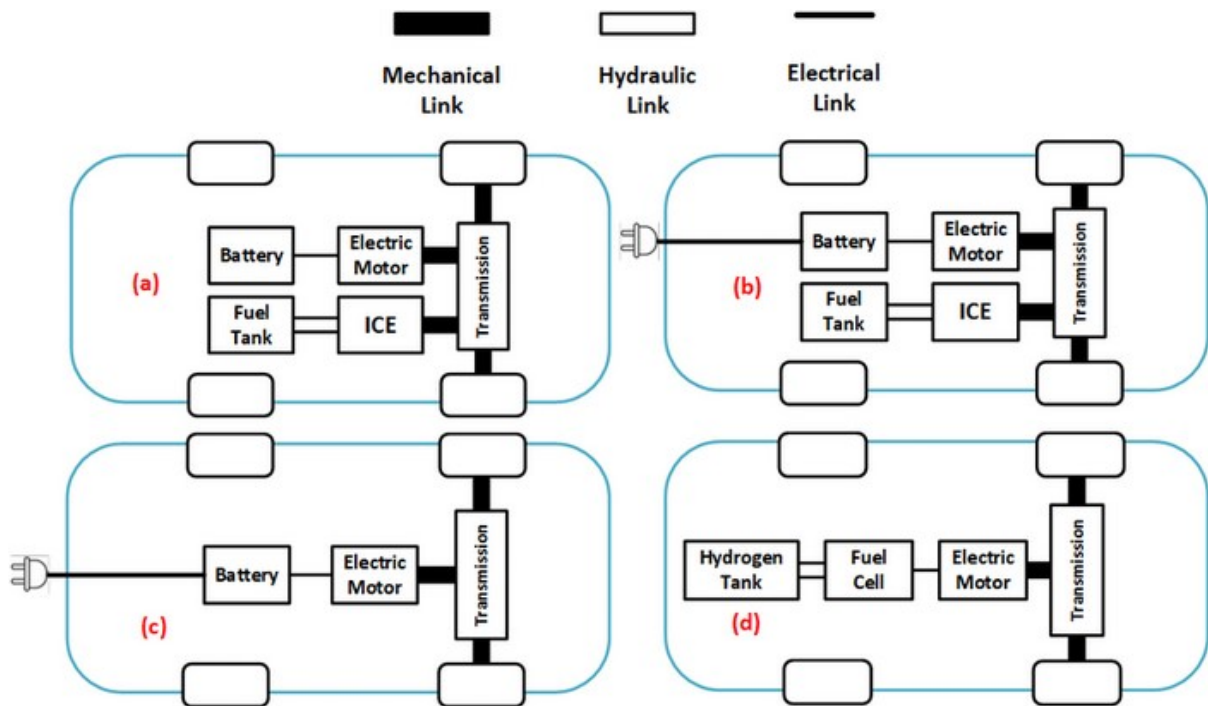
### **2.1.3 Hybrid Electric Vehicle (HEV)**

Τα υβριδικά οχήματα (HEV) διαθέτουν ΚΕΚ και ηλεκτροκινητήρα [5]. Ο ΚΕΚ παίρνει ενέργεια από συμβατικά καύσιμα, ενώ ο ηλεκτροκινητήρας από ηλεκτρική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στις μπαταρίες. Ωστόσο, η ηλεκτρική μπαταρία μπορεί να φορτίσει μόνο από τον ΚΕΚ, την κίνηση των τροχών ή από συνδυασμό και των δύο. Δεν υπάρχει η δυνατότητα δηλαδή, να φορτίσει απευθείας από το δίκτυο με χρήση συνδέσμου φόρτισης. Τα HEV συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα της οικονομίας καυσίμων και χαμηλών εκπομπών ρύπων, διαθέτοντας την ισχύ και την αυτονομία ενός συμβατικού οχήματος.

### **2.1.4 Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV)**

Τα FCEV είναι γνωστά ως οχήματα με μηδενικές εκπομπές ρύπων. Η σημαντικότερη διαφορά που παρουσιάζουν σε σχέση με τα υπόλοιπα ηλεκτρικά οχήματα είναι ότι παράγουν μόνα τους την ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζονται για την κίνησή τους. Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα ηλεκτρικά οχήματα, που αντλούν ηλεκτρική ενέργεια από μια μόνο μπαταρία, τα FCEV παράγουν ηλεκτρική ενέργεια σε μία συστοιχία κυψελών καυσίμου μέσω χημικής αντίδρασης μεταξύ υδρογόνου και οξυγόνου. Ανεφοδιάζονται όπως τα συμβατικά, βενζινοκίνητα ή πετρελαιοκίνητα οχήματα, απλά με αέριο υδρογόνο. Κατά την ενεργοποίηση, το

υδρογόνο που είναι αποθηκευμένο στην δεξαμενή, συναντά οξυγόνο το οποίο εισέρχεται από μία γρύλια εισαγωγής. Αυτή η χημική αντίδραση παράγει ενέργεια για τη φόρτιση της μπαταρίας. Μειονέκτημα του συγκεκριμένου τύπου οχήματος αποτελεί η αναγκαιότητα για εκσυγχρονισμό των υποδομών ανεφοδιασμού με υδρογόνο [3].



Σχήμα 2.1: Τύποι Ηλεκτρικών Οχημάτων: (a) Hybrid Electric Vehicle (HEV), (b) Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV), (c) Battery Electric Vehicle (BEV), (d) Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV). [6]

## 2.2 Πλεονεκτήματα και προκλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων

Η ηλεκτροκίνηση στην ολότητά της παρουσιάζει τόσο πλεονεκτήματα όσο και προκλήσεις.

- **Χαμηλές εκπομπές ρύπων.** Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των ΗΟ είναι το χαμηλό αποτύπωμα άνθρακα που αφήνουν, καθώς τα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα παράγουν μηδενικές εκπομπές καυσαερίων και τα PHEV δεν παράγουν καυσαέρια όταν λειτουργούν σε αμιγώς ηλεκτρική λειτουργία. Ως αποτέλεσμα, είναι φιλικά προς το περιβάλλον και συμβάλλουν στην εξομάλυνση του φαινομένου του θερμοκηπίου και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης.
- **Συμβολή στην ενεργειακή ασφάλεια.** Τα αμιγώς ΗΟ δεν χρησιμοποιούν καθόλου υγρά καύσιμα, όπως τη βενζίνη και το ντίζελ. Αντιθέτως, κινούνται με ηλεκτρι-

κή ενέργεια ή υδρογόνο και τα υβριδικά οχήματα κάνουν χρήση συνήθως λιγότερων καυσίμων από ό,τι παρόμοια συμβατικά οχήματα, επειδή χρησιμοποιούν τεχνολογίες ηλεκτροκίνησης για την αύξηση της απόδοσης του οχήματος μέσω της αναγεννητικής πέδησης - ανάκτηση ενέργειας που διαφορετικά χάνεται κατά την πέδηση. Όλα τα παραπάνω συμβάλλουν στην απεξαρτητοποίηση από τα περιορισμένα αποθέματα πετρελαίου, ενισχύοντας την ενεργειακή ασφάλεια.

- **Χαμηλό κόστος λειτουργίας.** Το ενεργειακό κόστος των ΗΟ είναι σχετικά χαμηλότερο από ότι ενός οχήματος με ΜΕΚ, καθώς η ηλεκτρική ενέργεια είναι φθηνότερη από το κόστος της βενζίνης ή του ντίζελ. Επίσης, η συντήρηση ενός ΗΟ είναι τόσο λιγότερο τακτική όσο και οικονομικότερη, καθώς οι ηλεκτροκινητήρες έχουν πολλαπλάσια διάρκεια ζωής από ότι ένα ΜΕΚ.

Κάποια από τα μειονεκτήματα των ΗΟ συνοψίζονται παρακάτω:

- **Κόστος αγοράς και συντήρησης.** Ενώ το κόστος συντήρησης ενός ΗΟ είναι σχετικά χαμηλό, το κόστος παραγωγής και κατά συνέπεια αγοράς είναι αρκετά μεγάλο. Αυτό είναι ένα πρόβλημα που αναμένεται να αμβλυνθεί με την πρόοδο της τεχνολογίας μπαταριών και την αύξηση του όγκου παραγωγής. Επίσης, το αρχικό κόστος μπορεί να αντισταθμιστεί από την εξοικονόμηση κόστους καυσίμου, τις ελαφρύνσεις στα περιβαλλοντικά τέλη και τα κίνητρα των κρατών.
- **Ανάγκη εξέλιξης των υποδομών φόρτισης.** Νευραλγικό σημείο για την εγκαθίδρυση των ΗΟ στην καθημερινότητα των πολιτών είναι η ανάγκη δημιουργίας των κατάλληλων υποδομών φόρτισης. Για να μπορέσει να υπάρξει μεγάλη διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων, θα πρέπει να υπάρχουν και οι αντίστοιχοι σταθμοί φόρτισης για να μπορέσουν να καλύψουν τον όγκο ζήτησης.
- **Αυτονομία και μπαταρίες.** Τα αμιγώς ΗΟ έχουν μικρότερη αυτονομία σε σχέση με τα οχήματα με ΜΕΚ και χρειάζονται μεγαλύτερο χρόνο για να ανεφοδιαστούν πλήρως. Η πλήρης επαναφόρτιση της μπαταρίας με φορτιστή επιπέδου 1 ή 2 μπορεί να διαρκέσει αρκετές ώρες, ενώ ακόμη και οι σταθμοί ταχείας φόρτισης χρειάζονται 30 λεπτά για να φορτίσουν στο 80% της χωρητικότητας, οπότε είναι σημαντικός ο προγραμματισμός του ανεφοδιασμού από τον οδηγό, ειδικά όταν πρόκειται να κάνει ένα μεγάλο ταξίδι.

## 2.3 Μέθοδοι Φόρτισης

Η φόρτιση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για την ευρεία υιοθέτησή τους, διότι επηρεάζει τόσο τη βιωσιμότητα του ηλεκτρικού δικτύου, όσο και την εμπειρία του χρήστη. Υπάρχουν δύο βασικές προσεγγίσεις στη φόρτιση: η μη ελεγχόμενη και η ελεγχόμενη φόρτιση. Κάθε μία από αυτές τις μεθόδους παρουσιάζει διαφορετικά πλεονεκτήματα, προκλήσεις και επιπτώσεις στο ενεργειακό σύστημα.

### 2.3.1 Μη Ελεγχόμενη Φόρτιση

Η μη ελεγχόμενη φόρτιση είναι η πιο απλή και άμεση μορφή φόρτισης, όπου τα ηλεκτρικά οχήματα φορτίζουν με σταθερή ισχύ μόλις συνδεθούν στο δίκτυο. Στα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η ευκολία χρήσης, καθώς οι οδηγοί απλώς συνδέουν το όχημά τους, χωρίς να χρειάζεται να ακολουθήσουν κάποιον πολύπλοκο προγραμματισμό. Ακόμη, χαρακτηρίζεται από χαμηλό κόστος υλοποίησης και δεν απαιτείται ειδικός εξοπλισμός ή λογισμικό για την προγραμματισμένη φόρτιση.

Η μέθοδος παρουσιάζει και μειονεκτήματα, καθώς η μη ελεγχόμενη φόρτιση μπορεί να δημιουργήσει αιχμές στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, ειδικά κατά τις ώρες υψηλών ενεργειακών απαιτήσεων, αυξάνοντας τον κίνδυνο υπερφόρτωσης του δικτύου. Ακόμη, χαρακτηρίζεται από υψηλό κόστος ενέργειας, καθώς οι χρήστες συχνά μπορούν να φορτίσουν τα οχήματά τους κατά τις ώρες με τα υψηλότερα τιμολόγια ηλεκτρικής ενέργειας.

### 2.3.2 Ελεγχόμενη Φόρτιση

Η ελεγχόμενη φόρτιση, γνωστή και ως "έξυπνη φόρτιση", αξιοποιεί τεχνολογίες και αλγόριθμους για τη διαχείριση της διαδικασίας φόρτισης. Λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως το φορτίο του δικτύου, τις τιμές ενέργειας και τη διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών, στόχος της εν λόγω μεθόδου είναι η βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου με τη διαδικασία πλήρωσης κοιλάδας (valley filling) στις ώρες ελάχιστης ζήτησης φορτίου και περικοπής αιχμής (peak shaving) στις ώρες μέγιστης ζήτησης φορτίου. Η φόρτιση κατανέμεται σε ώρες χαμηλής ζήτησης, εξισορροπώντας και μειώνοντας τον κίνδυνο υπερφόρτωσης του δικτύου. Ακόμη, η ρύθμιση της ισχύος φόρτισης μπορεί να παρατείνει τη διάρκεια ζωής των μπαταριών.

Από την άλλη πλευρά παρατηρούνται ορισμένες προκλήσεις όπως το υψηλό κόστος υποδο-

μής, καθώς απαιτείται εξειδικευμένος εξοπλισμός, όπως έξυπνοι φορτιστές, και υποστήριξη λογισμικού. Παράλληλα, η ελεγχόμενη φόρτιση απαιτεί επικοινωνία μεταξύ του οχήματος, του φορτιστή και του ηλεκτρικού δικτύου, καθώς και ρύθμιση των επιθυμιών του χρήστη.

Η επιλογή μεταξύ μη ελεγχόμενης και ελεγχόμενης φόρτισης εξαρτάται από τις ανάγκες του χρήστη και τις δυνατότητες του δικτύου. Η μη ελεγχόμενη φόρτιση προσφέρει πρακτικότητα και άμεση χρήση, αλλά συνοδεύεται από σημαντικά μειονεκτήματα όσον αφορά την απόδοση του δικτύου και το κόστος ενέργειας. Αντίθετα, η ελεγχόμενη φόρτιση, αν και πιο πολύπλοκη, παρέχει ουσιαστικά οφέλη για το περιβάλλον, το κόστος και τη σταθερότητα του συστήματος. Με την πρόοδο της τεχνολογίας και τη διάδοση των έξυπνων δικτύων, η ελεγχόμενη φόρτιση αναμένεται να αποτελέσει το πρότυπο για τη βιώσιμη ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων.

## 2.4 Επίπεδα Φόρτισης

### 2.4.1 Επίπεδο 1 : Τυπικός ρευματοδότης - αργή AC φόρτιση.

Σε αυτόν τον τύπο φόρτισης, το ηλεκτρικό όχημα συνδέεται σε ένα τυπικό οικιακό ρευματοδότη μέσω ενός απλού καλωδίου προέκτασης, χωρίς κανένα μέτρο ασφαλείας που να διασφαλίζει τον έλεγχο και την επικοινωνία με το ΗΟ. Αποτελεί τον πιο αργό τρόπο φόρτισης και χρησιμοποιεί AC ρεύμα με τυπική μέγιστη ισχύ τα 2 kW. Αυτή η λειτουργία φόρτισης έχει απαγορευθεί σε αρκετές χώρες, καθώς δεν υπόκειται σε μέτρα προστασίας και σε περίπτωση αλλοίωσης του καλωδίου φόρτισης μπορεί να προκληθεί βλάβη στο όχημα καθώς και υπέρταση με σοβαρό κίνδυνο πυρκαγιάς.

### 2.4.2 Επίπεδο 2 : Τυπικός ρευματοδότης - αργή AC φόρτιση με διατάξεις προστασίας.

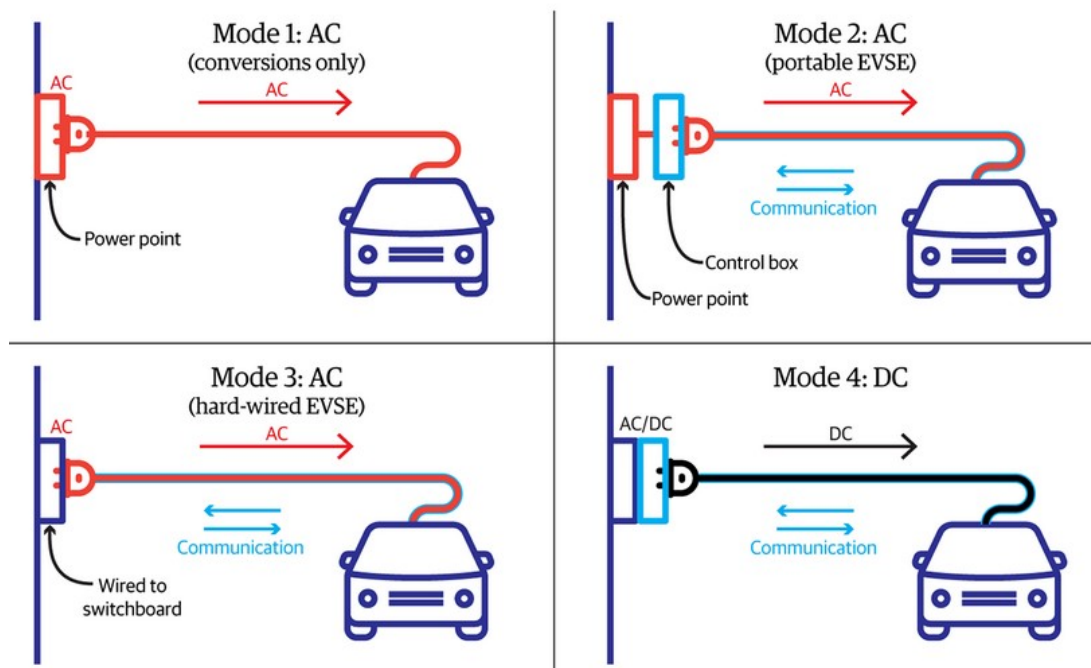
Αυτός ο τύπος φόρτισης παρουσιάζει αρκετές ομοιότητες με τον προηγούμενο, με τη διαφορά ότι διαθέτει μέσα επικοινωνίας με το όχημα και παρέχει προστασία από ηλεκτροπληξία. Αυτό εξασφαλίζει μεγαλύτερη ασφάλεια τόσο για τον υλικό εξοπλισμό, δηλαδή το όχημα και την ηλεκτρική εγκατάσταση, όσο και για το άτομο που φορτίζει. Ο εν λόγω τύπος φόρτισης, αποτελεί επίσης αργή μέθοδο φόρτισης με AC ρεύμα. Το κιβώτιο ελέγχου επιτρέπει την απομακρυσμένη εκκίνηση και διακοπή της φόρτισης καθώς και λειτουργίες όπως ανίχνευση θερμοκρασίας όπου σε περίπτωση απρόβλεπτης διαταραχής του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας,

ο φορτιστής διακόπτει τη φόρτιση και προστατεύει το ΗΟ από πιθανές υπερτάσεις ρεύματος. Ακόμη, σε σχέση με την προηγούμενη μέθοδο, επιτρέπει γρηγορότερη φόρτιση [6].

### 2.4.3 Επίπεδο 3 : Εξοπλισμός μόνιμα συνδεδεμένος σε δίκτυο τροφοδοσίας - γρήγορη AC φόρτιση.

Αποτελεί τον πιο διαδεδομένο AC τύπο φόρτισης, ο οποίος παρουσιάζει περισσότερα οφέλη σε σχέση με τους προηγούμενους τύπους φόρτισης. Η βελτίωση οφείλεται στην ύπαρξη ακόμη περισσότερων προληπτικών συστημάτων και στην επίτευξη μεγαλύτερης ενδοεπικοινωνίας μεταξύ δικτύου, φορτιστή και οχήματος. Επιτρέπει γρήγορη φόρτιση μέσω οικιακού επίτοιχου κουτιού, το οποίο είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση των λειτουργιών της προστασίας και της επικοινωνίας. Έχει τη δυνατότητα να φορτίσει σε μονοφασική ή τριφασική λειτουργία παρέχοντας πολύ μεγαλύτερη ισχύ φόρτισης σε σχέση με τους προηγούμενους τύπους φόρτισης (από 3.7kW έως 22kW).

### 2.4.4 Επίπεδο 4 : Ταχεία DC φόρτιση.



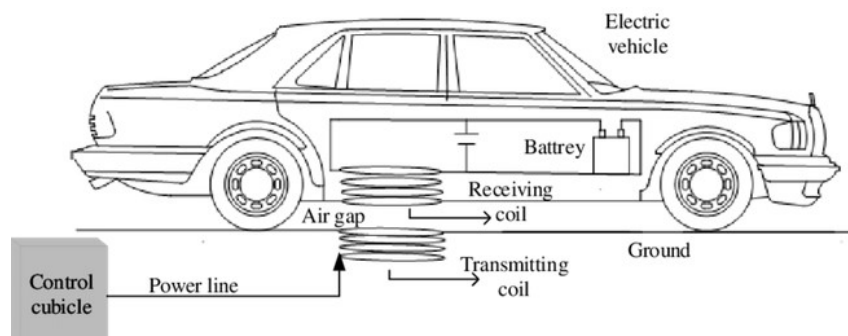
Σχήμα 2.2: Μέθοδοι Φόρτισης [7].

Στην παρούσα μέθοδο φόρτισης, η φόρτιση γίνεται μέσω εξοπλισμού τροφοδοσίας DC πολύ ταχύτερα από ότι στους προηγούμενους τρόπους λειτουργίας, καθώς το εύρος φόρτισης ηλεκτρικής ισχύος είναι υψηλότερο από 24kW. Οι ταχυφορτιστές πρέπει να είναι συνδεδεμένοι σε

μια καμπίνα υψηλής τάσης. Η υψηλή ένταση ρεύματος που παρέχουν τους επιτρέπει συνήθως να φορτίζουν έως και το 80% της ηλεκτρικής αυτονομίας του αυτοκινήτου σε λιγότερο από 30 λεπτά. Δεδομένης της υψηλής ισχύος που παρέχουν, οι σταθμοί ταχείας φόρτισης χρησιμοποιούν ειδικά καλώδια και συνδέσμους και συναντώνται κυρίως σε δημόσιους, κοινόχρηστους χώρους.

#### 2.4.5 Ασύρματη φόρτιση

Η ασύρματη φόρτιση χρησιμοποιεί την γνωστή ως επαγωγική φόρτιση για τη μετάδοση ηλεκτρικού ρεύματος από τον φορτιστή σε ένα μαγνητικό πηνίο στο κάτω μέρος του αυτοκινήτου. Η ασύρματη φόρτιση για ΗΟ μπορεί να παρέχει έως και 20kW ισχύος φόρτισης. Η ασύρματη φόρτιση των ΗΟ διατίθεται σε δύο τύπους: στατική φόρτιση ΗΟ, κατά την οποία το ΗΟ δεν κινείται και σταθμεύει σε καθορισμένο χώρο πάνω από το εγκατεστημένο πηνίο φόρτισης και δυναμική φόρτιση, η οποία λαμβάνει χώρα στον ανοιχτό δρόμο, και δίνει τη δυνατότητα στους οδηγούς να μπορούν να φορτίζουν συνεχώς όσο κινούνται.



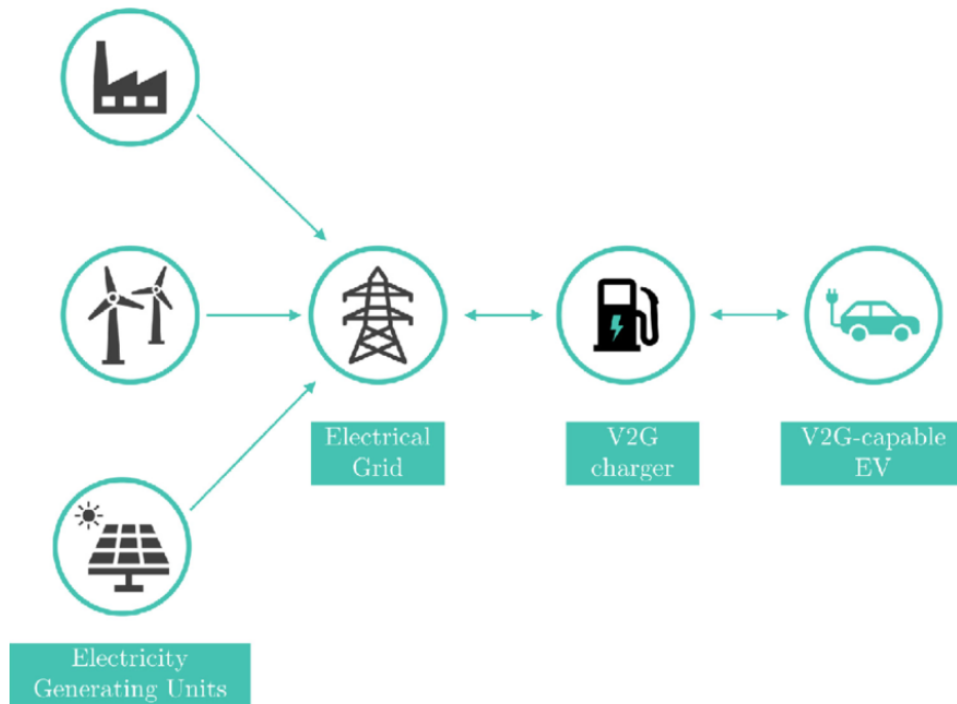
Σχήμα 2.3: Ασύρματη Φόρτιση. [8]

### 2.5 Τεχνολογία V2G

Η τεχνολογία V2G αποτελεί μια από τις πιο καινοτόμες λύσεις στον τομέα της ενέργειας, προσφέροντας τη δυνατότητα στα ηλεκτρικά οχήματα να λειτουργούν όχι μόνο ως καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και ως πηγές ενέργειας για το ηλεκτρικό δίκτυο. Η λειτουργία αυτή αναμένεται να αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο γίνεται διαχείριση ενέργειας, βελτιώνοντας τη σταθερότητα των δικτύων, μειώνοντας το κόστος της ενέργειας και υποστηρίζοντας τη μετάβαση προς ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον.

Σε πρακτικό επίπεδο, η λειτουργία της εδράζεται στη χρήση των μπαταριών των οχημάτων ως προσωρινές αποθήκες ενέργειας [9] που μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες του δικτύου

σε ώρες αιχμής ή σε περιόδους υψηλής ζήτησης. Η τεχνολογία αυτή αναπτύχθηκε για να αντιμετωπίσει τις προκλήσεις της αυξημένης ζήτησης για ηλεκτρική ενέργεια, καθώς και την ανάγκη για ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, οι οποίες χαρακτηρίζονται από διακυμάνσεις στη διαθεσιμότητά τους.



Σχήμα 2.4: Σχηματική αναπαράσταση V2G λειτουργίας. [10]

Η λειτουργία βασίζεται σε ένα διπλής κατεύθυνσης σύστημα φόρτισης που επιτρέπει την ανταλλαγή ενέργειας ανάμεσα στις μπαταρίες του ηλεκτρικού οχήματος και το δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, οι σταθμοί φόρτισης είναι ειδικά σχεδιασμένοι για να επιτρέπουν την αμφίδρομη μεταφορά ενέργειας. Το όχημα μπορεί να φορτίζει κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης και να επιστρέφει ενέργεια στο δίκτυο όταν οι ανάγκες είναι αυξημένες [11]. Παράλληλα, ένα σύστημα επικοινωνίας μεταξύ του δικτύου, του σταθμού φόρτισης, και του οχήματος διαχειρίζεται πότε και πόση ενέργεια θα αποθηκευτεί ή θα επιστραφεί.

Η λειτουργία αυτή πραγματοποιείται μέσω πρωτοκόλλων επικοινωνίας, όπως το Open Charge Point Protocol (OCPP). Συγχρόνως, οι διαχειριστές δικτύου χρησιμοποιούν αλγόριθμους για να αποφασίζουν πότε είναι κατάλληλο να αντληθεί ενέργεια από τα ΗΟ, διασφαλίζοντας ότι οι μπαταρίες παραμένουν επαρκώς φορτισμένες για τις ανάγκες των οδηγών. Κατά τις ώρες αιχμής, η ενέργεια που έχει αποθηκευτεί στις μπαταρίες των EVs επιστρέφεται στο δίκτυο για να καλυφθούν οι αυξημένες ανάγκες, μειώνοντας την πίεση στους σταθμούς



παραγωγής ενέργειας.

Η τεχνολογία V2G παρέχει πολλαπλά οφέλη τόσο για τους ιδιοκτήτες EVs, όσο και για το ηλεκτρικό δίκτυο.

- **Βελτίωση Σταθερότητας Δικτύου**

Η V2G λειτουργεί ως μηχανισμός εξισορρόπησης για το ηλεκτρικό δίκτυο. Οι μπαταρίες των EVs μπορούν να παρέχουν ενέργεια κατά τις ώρες αιχμής, μειώνοντας τον κίνδυνο διακοπών ρεύματος ή υπερφόρτωσης του δικτύου.

- **Υποστήριξη Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας**

Οι ΑΠΕ, όπως ο άνεμος και ο ήλιος, έχουν στοχαστική παραγωγή λόγω καιρικών συνθηκών. Η V2G επιτρέπει την αποθήκευση της πλεονάζουσας ενέργειας από τις ΑΠΕ στις μπαταρίες των EVs, ώστε να χρησιμοποιηθεί αργότερα όταν χρειαστεί.

- **Μείωση Κόστους Ενέργειας**

Οι ιδιοκτήτες EVs μπορούν να επωφεληθούν οικονομικά, καθώς η V2G τους επιτρέπει να πωλούν την ενέργεια που δεν χρειάζονται πίσω στο δίκτυο. Αυτό μπορεί να μειώσει σημαντικά το κόστος φόρτισης ή ακόμα και να δημιουργήσει εισόδημα.

- **Ενίσχυση Ενεργειακής Αποδοτικότητας**

Η V2G επιτρέπει την καλύτερη διαχείριση της διαθέσιμης ενέργειας, μειώνοντας τις απώλειες που προκύπτουν από υπερπαραγωγή ή υποχρησιμοποίηση.

### 3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΚΡΗΤΗΣ

#### 3.1 Θερμικές Μονάδες

Οι θερμικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας διακρίνονται σε μονάδες βάσης και μονάδες αιχμής, ανάλογα με τον ρόλο τους στην κάλυψη της ζήτησης. Οι μονάδες βάσης παρέχουν σταθερή και συνεχόμενη ισχύ για την κάλυψη του βασικού φορτίου του δικτύου, το οποίο είναι σχετικά σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας και οι μονάδες αιχμής λειτουργούν κυρίως σε περιόδους υψηλής ζήτησης (ώρες αιχμής) για να καλύψουν προσωρινά αυξημένες ανάγκες. Οι μονάδες βάσης χαρακτηρίζονται από υψηλό κόστος εκκίνησης εν αντιθέσει με τις μονάδες αιχμής.

Το ηλεκτρικό σύστημα της Κρήτης αποτελείται από τρεις σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με συνολικά 27 μονάδες. Οι σταθμοί εμφανίζονται στο Ηράκλειο, τα Χανιά και τον Αθρινόλααχο. Συνολικά, η εγκατεστημένη ισχύς των συμβατικών μονάδων στην Κρήτη ανέρχεται σε περίπου 800 MW [12] .

Οι μονάδες της Κρήτης παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα:

Μονάδα Παραγωγής	Αεριοστρόβιλος	Ατμοστρόβιλος	Μονάδα Εσωτερικής Καύσης	Μονάδα Συνδυασμένου Κύκλου	Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)
Σταθμός Λινοπεραμάτων	5	6	4	-	265
Σταθμός Χανίων	6	-	-	2	348
Σταθμός Αθρινόλααχου	-	2	2	-	190
Συνολικά	11	8	6	2	803

Πίνακας 3.1: Θερμικές Μονάδες Κρήτης

Παρακάτω παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των θερμικών μονάδων ανά νομό [13].

Μονάδα	Ονομαστική	Μέγιστη Ενεργός	Ελάχιστη Ενεργός	A	B	C	D	Κόστος Καυσίμου	Κόστος Εκκίνησης
	Ισχύς (MW)	Ισχύς (MW)	Ισχύς (MW)	(kg/MWh <sup>3</sup> )	(kg/MWh <sup>2</sup> )	(kg/MWh)	(kg)	Μονάδας (€/kg)	Μονάδας (€)
ATM1	6	6	4	17.377	-167.2	727.6	0.001	0.4149	2500
ATM2	14	13	7	0.476	-11.824	378.937	0.001	0.4149	2500
ATM3	14	13	7	0.476	-11.824	378.937	0.001	0.4149	2500
ATM4	24	22.35	16	0.18	-8.053	355.088	0	0.4149	4000
ATM5	24	22	10	0.092	-4.166	300.58	0	0.4149	4000
ATM6	24	22	10	0.092	-4.166	300.58	0	0.4149	400
DIESEL1	11	10.5	4.8	0.421	-8.378	230.368	0	0.4149	220
DIESEL2	11	10.5	4.8	0.421	-8.378	230.369	0	0.4149	220
DIESEL3	11	10.5	4.8	0.421	-8.378	230.368	0	0.4149	219
DIESEL4	11	10.5	4.8	0.421	-8.378	230.369	0.01	0.4148	220
AEP1	15	13	3	2.48	-5.87	881.5	1.2	0.6982	179.1
AEP2	15	12.5	2	0.3195	-6.777	280.49	1622.8	0.6982	500
AEP3	43	36.3	5	0.0001	0.2533	197.65	2418	0.6982	1413
AEP4	14	12.8	2	0.0001	0.7913	234.95	1093.8	0.6982	858
AEP5	28	24.3	5	0.001	0.3605	169.29	1675.29	0.6982	350

Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικά Θερμικών Μονάδων Λινοπεραμάτων

Μονάδα	Ονομαστική	Μέγιστη Ενεργός	Ελάχιστη Ενεργός	A	B	C	D	Κόστος Καυσίμου	Κόστος Εκκίνησης
	Ισχύς (MW)	Ισχύς (MW)	Ισχύς (MW)	(kg/MWh <sup>3</sup> )	(kg/MWh <sup>2</sup> )	(kg/MWh)	(kg)	Μονάδας (€/kg)	Μονάδας (€)
DIESEL1	51	49	30	0.017	-1.3	222.6	0.27	0.3919	270
DIESEL2	51	49	30	0.017	-1.3	222.6	0.27	0.3919	270
ATM1	44	46.5	27	-0.003	-0.958	282.91	0.8	0.3919	350
ATM2	44	46.5	27	-0.003	-0.958	282.91	0.8	0.3919	350

Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά Θερμικών Μονάδων Αθρινόλαχου

Μονάδα	Ονομαστική	Μέγιστη Ενεργός	Ελάχιστη Ενεργός	A	B	C	D	Κόστος Καυσίμου	Κόστος Εκκίνησης
	Ισχύς (MW)	Ισχύς (MW)	Ισχύς (MW)	(kg/MWh <sup>3</sup> )	(kg/MWh <sup>2</sup> )	(kg/MWh)	(kg)	Μονάδας (€/kg)	Μονάδας (€)
AEP1	16	11	3	0	0.01	267	2170	0.6962	99
AEP4	24	17.25	1	0	0.01	219	2865	0.6962	1300
AEP5	30	26.2	2	0	0.01	275	3757	0.6962	400
AEP6 ΣΚ	66	49.63	5	0.001	0.01	145.54	5120	0.6962	440.41
AEP7 ΣΚ	66	49.36	5	0.001	0.01	145.64	5120	0.6962	440.41
AEP11	59	34	1.5	0.001	0.01	227	5000	0.6962	0.1
AEP12	59	34	1.5	0.001	0.01	227	5000	0.6962	0.1
AEP13	28	26.4	2	0.001	0.3605	196.29	1675.8	0.6962	858

Πίνακας 3.4: Χαρακτηριστικά Θερμικών Μονάδων Χανίων

Όσον αφορά την ενεργειακή πρακτική, τα τελευταία χρόνια η Κρήτη βρίσκεται σε διαδικασία διασύνδεσης με το ηπειρωτικό ηλεκτρικό σύστημα της Ελλάδας, με στόχο την ενίσχυση της ενεργειακής ασφάλειας και την αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ. Η ολοκλήρωση της ηλεκτρικής διασύνδεσης της Κρήτης με το ηπειρωτικό σύστημα, προβλέπεται να απελευθερώσει σταδιακά το νησί από την υποχρέωση παραγωγής ενέργειας μέσω θερμοηλεκτρικών σταθμών που χρησιμοποιούν υγρά καύσιμα, γεγονός που θα μειώσει τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και θα επιτρέψει την περαιτέρω ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο νησί. Η διασύνδεση αποτελείται από δύο υποβρύχια καλώδια μεταξύ Κρήτης και Πελοποννήσου 150 kV AC 2x200 MVA μήκους 135 χιλιομέτρων [14].

Παράλληλα, ελλατώνεται η εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα και μεγιστοποιείται η εκμετάλλευση του δυναμικού ΑΠΕ του νησιού. Επίσης, μειώνεται η υποχρέωση για ύπαρξη εφεδρικών σταθμών με ορισμένες συμβατικές μονάδες να παραμένουν σε καθεστώς εφεδρείας και μετά τη διασύνδεση για την αντιμετώπιση εκτάκτων αναγκών. Από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της διασύνδεσης με το ηπειρωτικό σύστημα είναι η μείωση του κόστους του ρεύματος.

### 3.2 ΑΠΕ στην Κρήτη

Η Κρήτη διαθέτει σημαντικό αριθμό σταθμών ΑΠΕ, ενώ αξιοποιεί το αιολικό της δυναμικό με την εγκατάσταση αιολικών πάρκων σε διάφορες περιοχές αλλά και την ηλιακή ενέργεια μέσω φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, συμβάλλοντας σημαντικά στην παραγωγή καθαρής

ενέργειας.

Σύμφωνα με την Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) στην Κρήτη βρίσκονται σε λειτουργία αιολικά ισχύος 210 MW, φωτοβολταϊκά ισχύος 102,3 MW και ΜΥΗΣ 0,3 MW. Επίσης, έχουν λάβει οριστική προσφορά ζήτησης αιολικά ισχύος 3,6 MW, φωτοβολταϊκά ισχύος 2,2 MW, βιομάζα/βιοαέριο ισχύος 3 MW και ηλιοθερμικός σταθμός ισχύος 70 MW [15]. Το εφικτό περιθώριο υποδοχής συνολικής (υφιστάμενης και νέας) εγκατεστημένης ισχύος Σταθμών ΑΠΕ στην Κρήτη μετά την ολοκλήρωση της Φάσης II Διασύνδεσής υπολογίζεται σε 2.150 MW.



Σχήμα 3.1: Αιολικά και ΜΥΗΣ Κρήτης. [16]

Ένα από τα πιο καινοτόμα έργα είναι ο υβριδικός σταθμός στο Αμάρι, ο οποίος συνδυάζει αιολική ενέργεια με τεχνολογία αντλησιοταμίευσης. Το έργο αυτό βασίζεται στην ενεργειακή αξιοποίηση του υφιστάμενου ταμιευτήρα του φράγματος των Ποταμών και συνδυάζει ενέργεια από δύο αιολικά πάρκα 27 ανεμογεννητριών στον Δήμο Σητείας ισχύος 89,1 MW και ένα σύστημα αντλησιοταμίευσης συνολικής ισχύος 72 MW[17].

Συνολικά, η Κρήτη επενδύει σημαντικά στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, με στόχο την αύξηση της ενεργειακής της αυτονομίας και τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

#### 4 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για τη δυναμική μοντελοποίηση των ΗΟ σε συνδυασμό με το ενεργειακό σύστημα της Κρήτης. Ο βασικός σκοπός είναι η ταυτόχρονη προσομοίωση της κυκλοφορίας και της φόρτισης των ΗΟ και η ενσωμάτωση των φορτίων τους στον ενεργειακό σχεδιασμό του νησιού. Η μελέτη αποσκοπεί στην κατανόηση των επιπτώσεων της διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο με στόχο την ομαλή και αποδοτική λειτουργία του συστήματος.

##### 4.1 Αρχιτεκτονική Αλγορίθμου Ηλεκτρικών Οχημάτων

Η μοντελοποίηση των ΗΟ προσομοιώνει την κίνηση και τη φόρτιση των οχημάτων σε αστικές και υπεραστικές διαδρομές με σκοπό την εξαγωγή του ημερήσιου προγράμματος των οχημάτων στους νομούς της Κρήτης. Για την επίτευξή του, έχει γίνει υλοποίηση της ρουτίνας των οχημάτων στο Matlab σε βάση εικοσιτετράωρου.

Πιο συγκεκριμένα, επιλέγεται τυχαία ο τύπος ΗΟ και αναθέτονται οι αντίστοιχες τιμές για την κατανάλωση του οχήματος, τη χωρητικότητα της μπαταρίας και τα άνω και κάτω όρια ισχύος και φόρτισης. Έπειτα κάθε όχημα του στόλου αντιστοιχείται τυχαία σε ένα νομό και ξεκινά την ρουτίνα του από την τοποθεσία 'home'. Ανάλογα με τον νομό που βρίσκεται το όχημα καθορίζεται ο χρόνος διαδρομής και αποφασίζεται η μέση ταχύτητα και η απόσταση που διανύθηκε κατά τον χρόνο αυτό. Με βάση την απόσταση που έχει διανύσει το ΗΟ και την κατανάλωση του, υπολογίζεται η στάθμη της μπαταρίας κατά την άφιξη στον σταθμό φόρτισης, αν θα φορτίσει κατά τον χρόνο στάθμευσης, και αν ναι με πόση ισχύ. Η διάρκεια στάθμευσης καθορίζεται από την αντίστοιχη κατανομή και εξαρτάται από τον προορισμό του οχήματος. Σύμφωνα με τον χρόνο άφιξης στον σταθμό φόρτισης και τη διάρκεια στάθμευσης γίνεται ο υπολογισμός της ώρας αναχώρησης για τον επόμενο προορισμό. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για ένα εικοσιτετράωρο.

##### 4.2 Μοντελοποίηση Ηλεκτρικών Οχημάτων

Η παρούσα ενότητα περιγράφει τη μεθοδολογία μοντελοποίησης των ΗΟ εντός του συνολικού πλαισίου προσομοίωσης του ενεργειακού συστήματος. Η προσέγγιση βασίζεται σε

προσομοίωση σε διακριτά χρονικά βήματα (time-step simulation), η οποία επιτρέπει την παρακολούθηση της κατάστασης κάθε οχήματος σε όλη τη διάρκεια του ημερήσιου κύκλου. Η μοντελοποίηση διαχωρίζεται σε τρία διακριτά επίπεδα: τη δομή των δεδομένων που περιγράφουν κάθε όχημα, τη στοχαστική περιγραφή της συμπεριφοράς τους και, τέλος, τον αλγόριθμο της καθημερινής λειτουργίας τους.

#### 4.2.1 Δομή Δεδομένων Οχήματος

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων του προφίλ φόρτισης των ΗΟ, δημιουργήθηκε μια δομή για την αποθήκευση των μεταβλητών του αλγορίθμου και τη διαμόρφωση του προγράμματος κάθε οχήματος.

Κάθε όχημα στη βάση δεδομένων του αλγορίθμου χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο μεταβλητών, οι οποίες χωρίζονται σε σταθερά και δυναμικά χαρακτηριστικά. Ορισμένες από τις μεταβλητές που αποθηκεύονται στη συγκεκριμένη δομή δεδομένων σχετίζονται με τα τεχνικά χαρακτηριστικά των οχημάτων, όπως η χωρητικότητα της μπαταρίας και τα άνω και κάτω όρια φόρτισης. Άλλες μεταβλητές είναι δυναμικές και περιγράφουν τη συμπεριφορά των οχημάτων κατά την κυκλοφορία, όπως ο προορισμός του ταξιδιού, η ενεργειακή κατανάλωση κατά τη διάρκειά του, καθώς και οι παράμετροι φόρτισης — αν το όχημα θα φορτίσει, με ποια ισχύ και για πόσο χρονικό διάστημα.

Οι μεταβλητές που αφορούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των οχημάτων είναι οι εξής:

#### **EV.BatteryType**

Στην παρούσα υλοποίηση έχουν επιλεχθεί τέσσερις τύποι ΗΟ, με διαφορετικά χαρακτηριστικά, ως προς την κατανάλωση, τη χωρητικότητα της μπαταρίας, την ισχύ και τον χρόνο φόρτισης. Ο τύπος του οχήματος επιλέγεται με βάση ένα τυχαίο ακέραιο από το ένα έως το τέσσερα. Όσον αφορά την κατανάλωση του ΗΟ έχει προσαυξηθεί κατά 30%, ώστε να προσομοιώνει όσο καλύτερα γίνεται την πραγματική κατανάλωση. Τα χαρακτηριστικά των διαφορετικών τύπων ΗΟ παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1 [13].

Τύπος	Κατανάλωση (Wh/km)	Χωρητικότητα Μπαταρίας (kWh)	Ισχύς Φόρτισης (kW)
Τύπος 1	156	57.5	11
Τύπος 2	162	45	7.4
Τύπος 3	169	52	22
Τύπος 4	201.5	68	11

Πίνακας 4.1: Τύποι και χαρακτηριστικά ΗΟ

## EV.Consumption

Αφορά την εργοστασιακή κατανάλωση του ΗΟ και διαφέρει ανάλογα τον τύπο του οχήματος.

Τύπος	Τύπος 1	Τύπος 2	Τύπος 3	Τύπος 4
Κατανάλωση (Wh/km)	156	162	169	201.5

Πίνακας 4.2: Κατανάλωση Τύπων Μπαταριών

## EV.Pmax

Αφορά τη μέγιστη ισχύ φόρτισης του ΗΟ (kW) και διαφέρει ανάλογα τον τύπο του οχήματος.

Τύπος	Τύπος 1	Τύπος 2	Τύπος 3	Τύπος 4
Μέγιστη Ισχύς Φόρτισης AC (kW)	11	7.4	22	11

Πίνακας 4.3: Μέγιστη Ισχύς Φόρτισης Τύπων Μπαταριών

## EV.Pmin

Αφορά την ελάχιστη ισχύ φόρτισης του ΗΟ (kW) και διαφέρει ανάλογα τον τύπο του οχήματος.



Τύπος	Τύπος 1	Τύπος 2	Τύπος 3	Τύπος 4
Ελάχιστη Ισχύς Φόρτισης AC (kW)	-11	-7.4	-22	-11

Πίνακας 4.4: Ελάχιστη Ισχύς Φόρτισης Τύπων Μπαταριών

**EV.Emax**

Αφορά τη μέγιστη χωρητικότητα της μπαταρίας του ΗΟ (kWh) και διαφέρει ανάλογα τον τύπο του οχήματος.

Τύπος	Τύπος 1	Τύπος 2	Τύπος 3	Τύπος 4
Μέγιστη Χωρητικότητα (kWh)	57.5	45	52	68

Πίνακας 4.5: Μέγιστη Χωρητικότητα Τύπων Μπαταριών

**EV.Emin**

Αφορά τη ελάχιστη χωρητικότητα της μπαταρίας του ΗΟ (kWh) και διαφέρει ανάλογα τον τύπο του οχήματος. Η ελάχιστη χωρητικότητα της μπαταρίας εκφράζεται ως:

$$EV.Emin = 0.2 \times EV.Emax \quad (kWh). \quad (4.1)$$

Τύπος	Τύπος 1	Τύπος 2	Τύπος 3	Τύπος 4
Ελάχιστη Χωρητικότητα (kWh)	11.5	9	10.4	13.6

Πίνακας 4.6: Ελάχιστη Χωρητικότητα Τύπων Μπαταριών

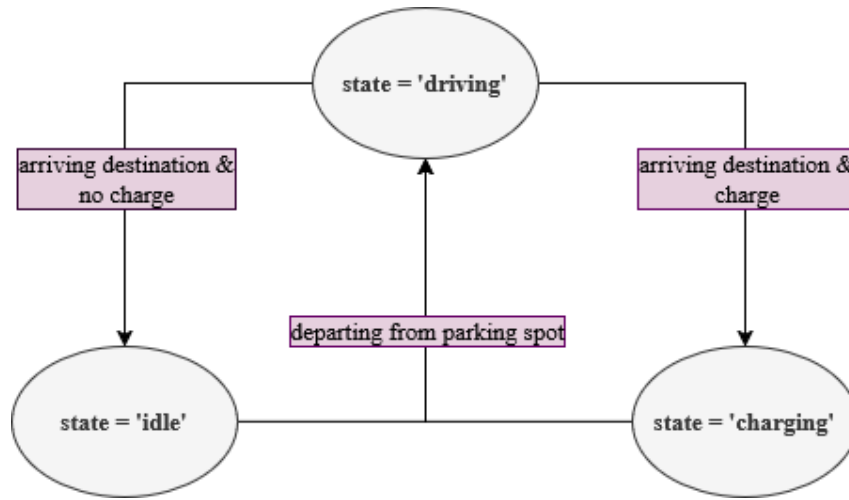
Οι μεταβλητές οι οποίες είναι δυναμικές και περιγράφουν την κατάσταση κάθε μεμονωμένου οχήματος σε κάθε χρονική στιγμή της προσομοίωσης είναι οι παρακάτω:

## EV.Destination

Η μεταβλητή Destination αφορά την τοποθεσία στην οποία το όχημα βρίσκεται ή οδεύει προς αυτήν. Οι πιθανές τιμές για την παρούσα μεταβλητή είναι 'home', 'work', 'shop/social'.

## EV.State

Η μεταβλητή EV.State αφορά την κατάσταση στη οποία βρίσκεται το ΗΟ. Μια επισκόπηση των μεταβάσεων παρουσιάζεται παρακάτω.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ροής καταστάσεων ΗΟ.

## EV.Etrgt

Η μεταβλητή Etrgt (kWh) αφορά την επιθυμητή στάθμη της μπαταρίας του ΗΟ, όταν εκείνο αναχωρήσει για νέο προορισμό μετά από στάθμευση. Εξαρτάται από την τιμή  $EV.Emax$ . Η τιμή της μεταβλητής επιλέγεται τυχαία από  $0.75 \times EV.Emax$  έως  $0.98 \times EV.Emax$ .

## EV.Earr

Η μεταβλητή EV.Earr (KWh) αφορά την ενέργεια της μπαταρίας του οχήματος, όταν αυτό φτάνει στον προορισμό του. Εξαρτάται από την κατανάλωση του οχήματος κατά το ταξίδι και την ενέργεια την οποία έχει το όχημα κατά την αναχώρησή του από τον προηγούμενο σταθμό. Δίνεται από τη σχέση:

$$EV.Earr = EV.Edep - EV.TravelConsumption \quad (KWh) \quad (4.2)$$

## EV.Edep

Η μεταβλητή  $E_{dep}$  (kWh) αφορά την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στην μπαταρία του ΗΟ όταν εκείνο αναχωρεί για το επόμενο του ταξίδι. Εξαρτάται από το αν το όχημα έχει φορτίσει στην προηγούμενη στάθμευσή του ή όχι. Έτσι, αν το όχημα έχει προηγουμένως φορτίσει, η τιμή του θα είναι  $EV.E_{dep} = EV.E_{trgt}$  αλλιώς θα πάρει την τιμή  $EV.E_{dep} = EV.E_{arr}$ , δηλαδή το όχημα θα αναχωρήσει με την ίδια ενέργεια με την οποία έφτασε. Όσον αφορά το πρώτο ταξίδι, με αφετηρία την τοποθεσία 'home' ισχύει ότι

$$EV.E_{dep} = \frac{EV.SoC0(\%)}{100} \times EV.E_{max} \quad (kWh). \quad (4.3)$$

### EV.ArrivalTime

Η μεταβλητή  $ArrivalTime$  αφορά τον χρόνο άφιξης του οχήματος στον προορισμό του για κάθε ταξίδι που πραγματοποιεί. Εξαρτάται από τον χρόνο έναρξης του ταξιδιού και το χρόνο που διήρκεσε η διαδρομή του. Υπολογίζεται από τη σχέση:

$$EV.ArrivalTime = \frac{EV.TravelTime(min)}{60} + EV.DepartureTime \quad (h) \quad (4.4)$$

### EV.TravelConsumption

Η μεταβλητή  $TravelConsumption$  (KWh) αφορά την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια του ταξιδιού από ένα προορισμό σε έναν άλλο. Δίνεται από τη σχέση:

$$EV.TravelConsumption = EV.Consumption \times EV.TravelDistance \quad (KWh). \quad (4.5)$$

### EV.P

Η μεταβλητή  $P$  (kW) αφορά την ισχύ με την οποία ένα όχημα φορτίζει κατά τη στάθμευσή του. Η ισχύ αυτή σχετίζεται με τη μέθοδο φόρτισης 'dumb charging'. Δίνεται από την σχέση:

$$EV.P = \frac{EV.E_{trgt} - EV.E_{arr}}{EV.ChargingTime} \quad (kW) \quad (4.6)$$

Εάν ο χρόνος στάθμευσης δεν επαρκεί για την επιθυμητή φόρτιση της μπαταρίας του ΗΟ, η μεταβλητή  $EV.P > EV.P_{max}$ , το οποίο δεν είναι εφικτό. Σε αυτήν την περίπτωση τίθεται

$EV.P = EV.P_{max}$  με επαναπροσδιορισμό του  $EV.Etrgt$ .

## EV.E

Η μεταβλητή  $E$  (kWh) αφορά την ενέργεια που έλαβε το ΗΟ κατά τη φόρτισή του. Εξαρτάται από το χρόνο και την ισχύ φόρτισης. Δίνεται από τον τύπο:

$$EV.E = EV.P \times EV.ChargingTime \quad (kWh) \quad (4.7)$$

### 4.2.2 Στοχαστική Περιγραφή Συμπεριφοράς

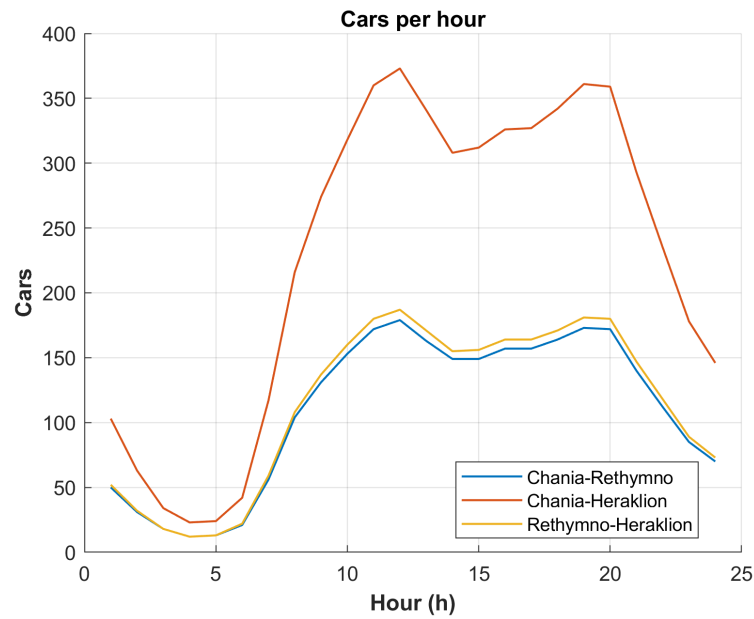
Αναφέρεται στις κατανομές πιθανοτήτων που χρησιμοποιούνται για να δημιουργηθούν οι δυναμικές τιμές των χαρακτηριστικών. Περιέχει τους κανόνες που καθορίζουν πώς θα κινηθεί το όχημα, όχι τα ίδια τα αποτελέσματα της κίνησης.

#### Επιλογή τύπου διαδρομής: Αστική ή Υπεραστική

Για τη μοντελοποίηση της στοχαστικής επιλογής μεταξύ αστικής και υπεραστικής μετακίνησης, αξιοποιούνται δεδομένα που προέρχονται από πραγματικές μετρήσεις του αριθμού οχημάτων που μετακινούνται καθημερινά μεταξύ των βασικών πόλεων της Κρήτης (Χανιά – Ρέθυμνο, Χανιά – Ηράκλειο, Ρέθυμνο – Ηράκλειο)[18]. Τα δεδομένα αυτά περιλαμβάνουν τόσο ηλεκτρικά, όσο και συμβατικά οχήματα και διατίθενται σε ανάλυση ανά ώρα της ημέρας.

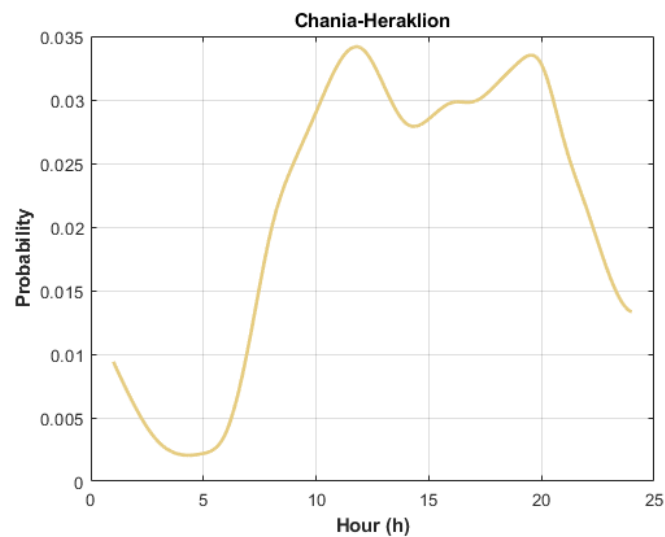
- Οι διαδρομές Χανιά – Ηράκλειο, Χανιά – Ρέθυμνο και Ρέθυμνο – Ηράκλειο θεωρούνται υπεραστικές.
- Για τις υπόλοιπες περιοχές, όπως το Λασιθί, λόγω έλλειψης στοιχείων, όλες οι διαδρομές θεωρούνται αστικές.

Αρχικά, υπολογίζεται ο συνολικός αριθμός οχημάτων που εκτελούν αστικές και υπεραστικές διαδρομές, λαμβάνοντας υπόψη την κατανομή του πληθυσμού των οχημάτων στο νησί, καθώς και το ποσοστό διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων.

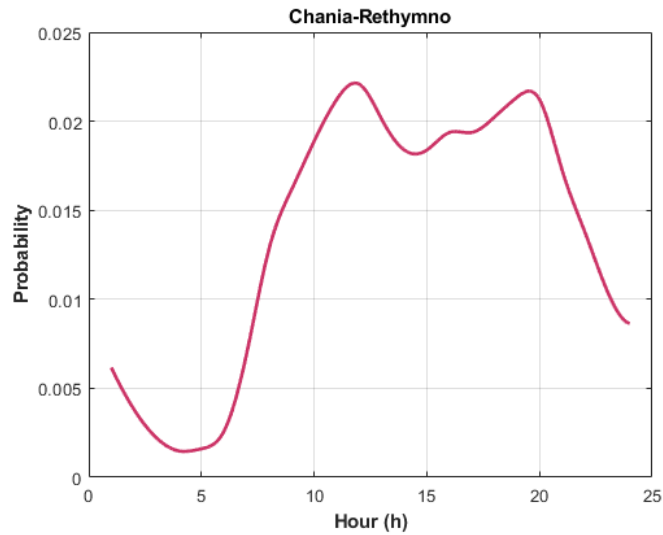


Σχήμα 4.2: Αριθμός οχημάτων που πραγματοποιούν υπεραστικές διαδρομές ανά ώρα.

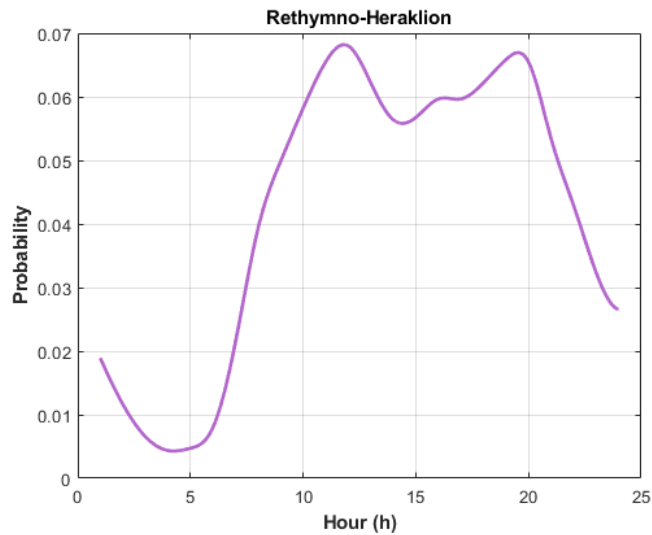
Από τον αριθμό των οχημάτων που εκτελούν υπεραστικές διαδρομές, παράγονται πιθανοτικά προφίλ ανά ώρα, κανονικοποιώντας ως προς το άθροισμα των υπεραστικών μετακινήσεων. Οι πιθανοκρατικές κατανομές αυτές εκφράζουν την πιθανότητα ένα όχημα να εκτελέσει υπεραστική διαδρομή σε δεδομένη χρονική στιγμή.



Σχήμα 4.3: Πιθανότητα εκτέλεσης υπεραστικής διαδρομής: Χανιά-Ηράκλειο.



Σχήμα 4.4: Πιθανότητα εκτέλεσης υπεραστικής διαδρομής: Χανιά–Ρέθυμνο.



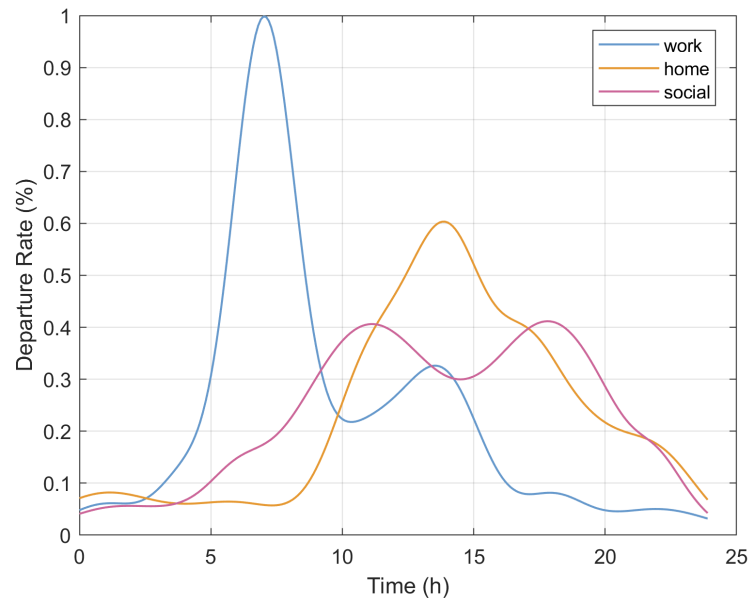
Σχήμα 4.5: Πιθανότητα εκτέλεσης υπεραστικής διαδρομής: Ρέθυμνο–Ηράκλειο.

Κατά τη διαδικασία αρχικοποίησης κάθε οχήματος, πραγματοποιείται μια στοχαστική δειγματοληψία για την απόφαση: αστική ή υπεραστική μετακίνηση. Ειδικά για την περίπτωση των υπεραστικών μετακινήσεων από τα Χανιά, εφαρμόζεται και μια επιπλέον στοχαστική επιλογή για τον προορισμό, μεταξύ Ρεθύμνου και Ηρακλείου, με βάση τις σχετικές πιθανότητες ανά ώρα.

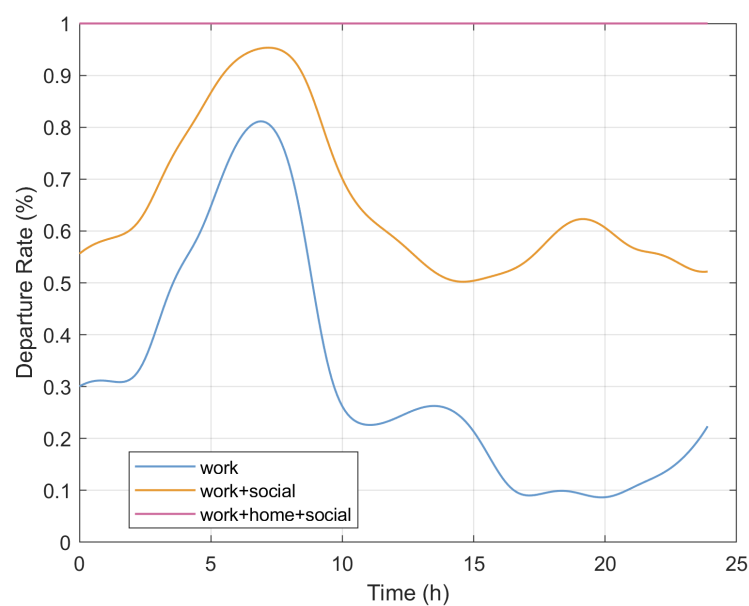
## EV.TypeOfTravel

Οι διαθέσιμοι προορισμοί για την μοντελοποίηση είναι 'home', 'work' και 'social/shop'. Παρακάτω εμφανίζονται οι κατανομές για το ρυθμό αναχώρησης για τους προορισμούς. Έπειτα, έχει γίνει κανονικοποίηση και πρόσθεση των κατανομών, οπότε προκύπτει το διάγραμμα από

το οποίο αποφασίζεται ο επόμενος προορισμός του οχήματος. Πιο συγκεκριμένα, παράγεται ένας τυχαίος αριθμός από 0 έως 1 και ανάλογα την ώρα αναχώρησης του οχήματος γίνεται αντιστοίχιση με ένα σημείο στο διάγραμμα. Για παράδειγμα, αν η ώρα αναχώρησης είναι 12:00 και ο τυχαίος αριθμός 0.4, τότε το όχημα θα αναχωρήσει για τον προορισμό 'social'. Στην περίπτωση της υπεραστικής μετακίνησης, επιλέγεται επίσης ένας δευτερεύων, αστικός προορισμός στον οποίο το όχημα θα κατευθυνθεί κατά την άφιξή του στην πόλη.



Σχήμα 4.6: Κατανομή για το ρυθμό αναχώρησης οχήματος προς συγκεκριμένο προορισμό.

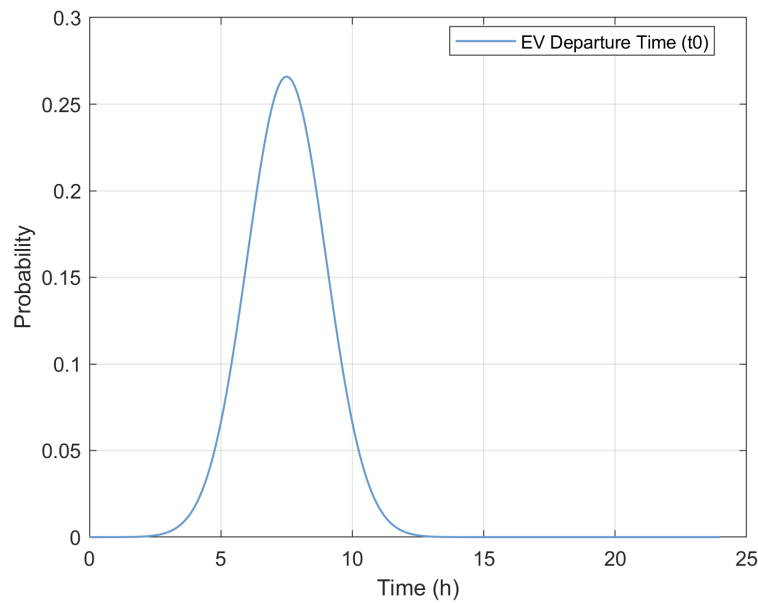


Σχήμα 4.7: Κατανομή για επιλογή του επόμενου προορισμού.

## EV.DepartureTime

Η μεταβλητή DepartureTime αφορά την ώρα κατά την οποία το ΗΟ εκκινεί για το ταξίδι από την τοποθεσία 'home'. Η ώρα εκκίνησης επιλέγεται τυχαία από την κατανομή. Παρατηρείται ότι η ώρα κατά την οποία εκκινούν τα περισσότερα οχήματα είναι στις 8:00π.μ. Για κάθε επόμενο προορισμό, ο χρόνος αναχώρησης υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$EV.DepartureTime = EV.ArrivalTime + EV.ChargingTime \quad (h) \quad (4.8)$$



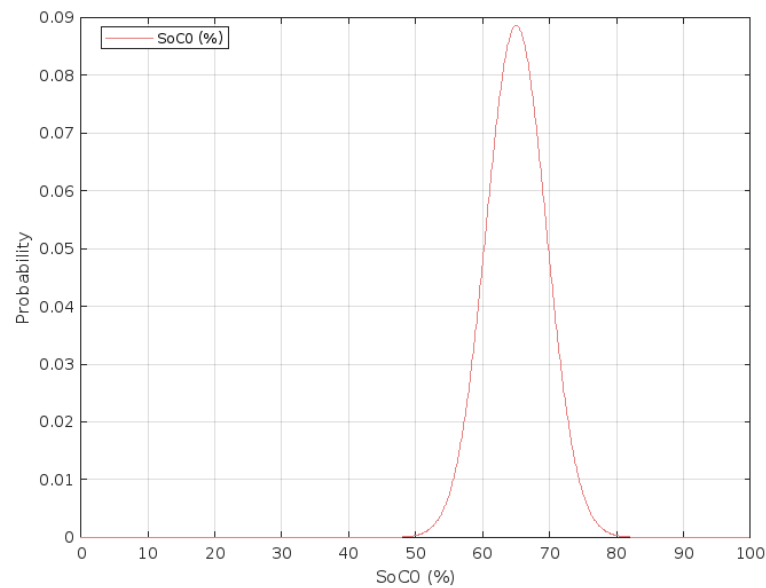
Σχήμα 4.8: Χρόνος αναχώρησης οχήματος.

## EV.SoC0

Η μεταβλητή SoC0 (%) αφορά το ποσοστό της μπαταρίας του ΗΟ κατά την αναχώρησή του από το σπίτι του οδηγού για το πρώτο του ταξίδι. Μπορεί να λάβει διάφορες τιμές ανάλογα αν το ταξίδι που πραγματοποιεί είναι σε αστικό ή σε υπεραστικό προορισμό.

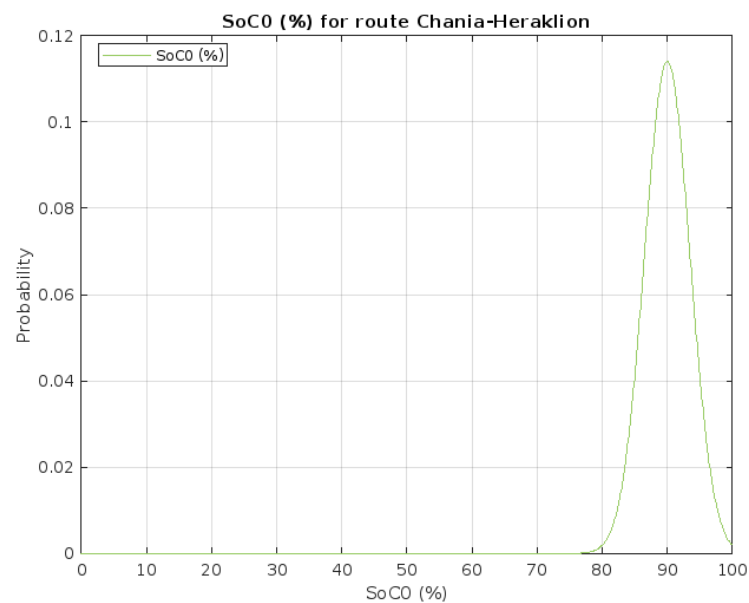
Αν το όχημα ταξιδεύει εντός πόλεως, τότε η μεταβλητή αποφασίζεται τυχαία με βάση την παρακάτω κατανομή.





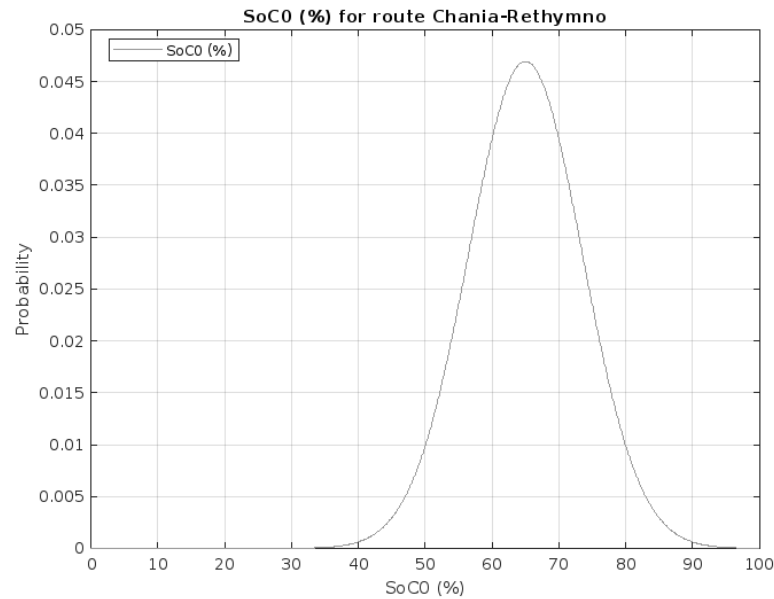
Σχήμα 4.9: Κατανομή για το ποσοστό μπαταρίας κατά την αναχώρηση του οδηγού από το σπίτι.

Αν το όχημα ταξιδεύει από την πόλη Χανιά στην πόλη Ηράκλειο, τότε η μεταβλητή αποφασίζεται τυχαία με βάση την παρακάτω κατανομή.



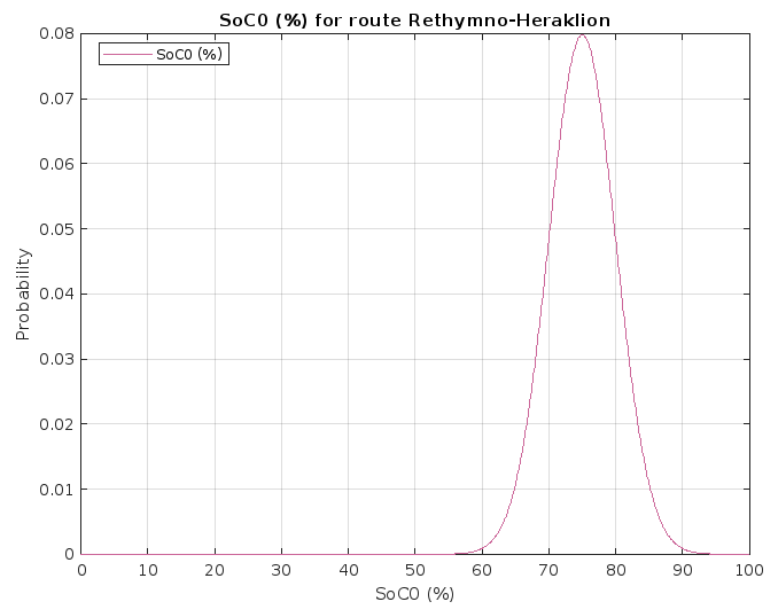
Σχήμα 4.10: Κατανομή για το ποσοστό μπαταρίας κατά την αναχώρηση του οδηγού από το σπίτι στην τοποθεσία Χανιά με προορισμό το Ηράκλειο.

Αν το όχημα ταξιδεύει από την πόλη Χανιά στην πόλη Ρέθυμνο, τότε η μεταβλητή αποφασίζεται τυχαία με βάση την παρακάτω κατανομή.



Σχήμα 4.11: Κατανομή για το ποσοστό μπαταρίας κατά την αναχώρηση του οδηγού από το σπίτι στην τοποθεσία Χανιά με προορισμό το Ρέθυμνο.

Αν το όχημα ταξιδεύει από την πόλη Ρέθυμνο στην πόλη Ηράκλειο, τότε η μεταβλητή αποφασίζεται τυχαία με βάση την παρακάτω κατανομή.

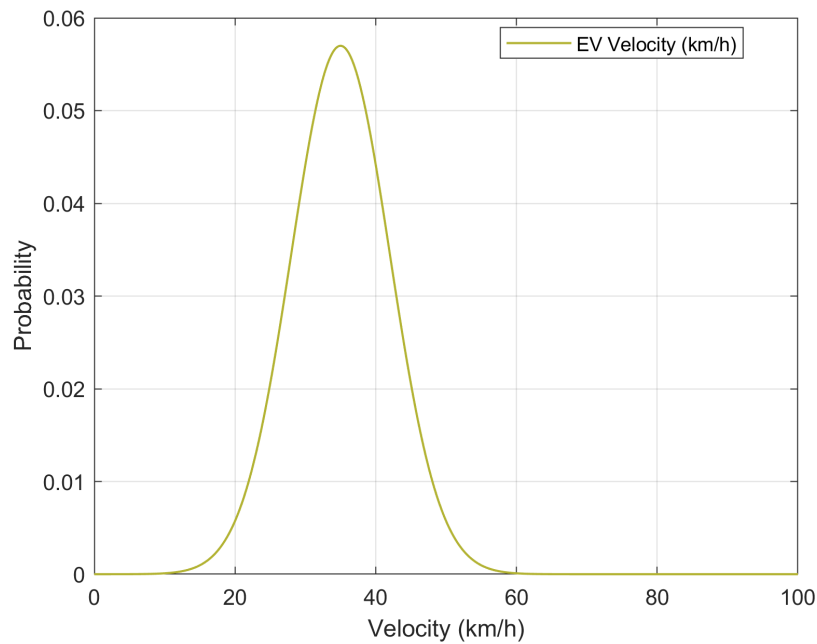


Σχήμα 4.12: Κατανομή για το ποσοστό μπαταρίας κατά την αναχώρηση του οδηγού από το σπίτι στην τοποθεσία Ρέθυμνο με προορισμό το Ηράκλειο.

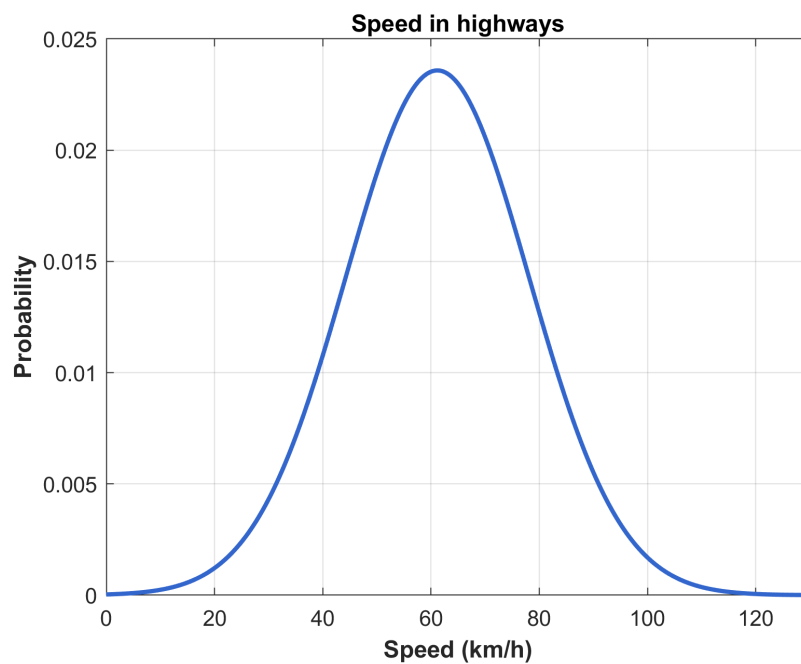
Παρατηρείται ότι, όσο μεγαλώνει η χιλιομετρική απόσταση, τόσο αυξάνεται και η αρχική στάθμη της μπαταρίας.

## EV.Speed

Η μεταβλητή Speed (km/h) αφορά την ταχύτητα του ΗΟ και βασίζεται σε πραγματικά δεδομένα. Η ταχύτητα που θα λάβει ένα όχημα εξαρτάται από τον τύπο του ταξιδιού, δηλαδή εάν αυτό θα είναι εντός ή εκτός πόλεως και καθορίζεται από τις παρακάτω κατανομές.



Σχήμα 4.13: Αστική Διαδρομή.



Σχήμα 4.14: Υπεραστική Διαδρομή.

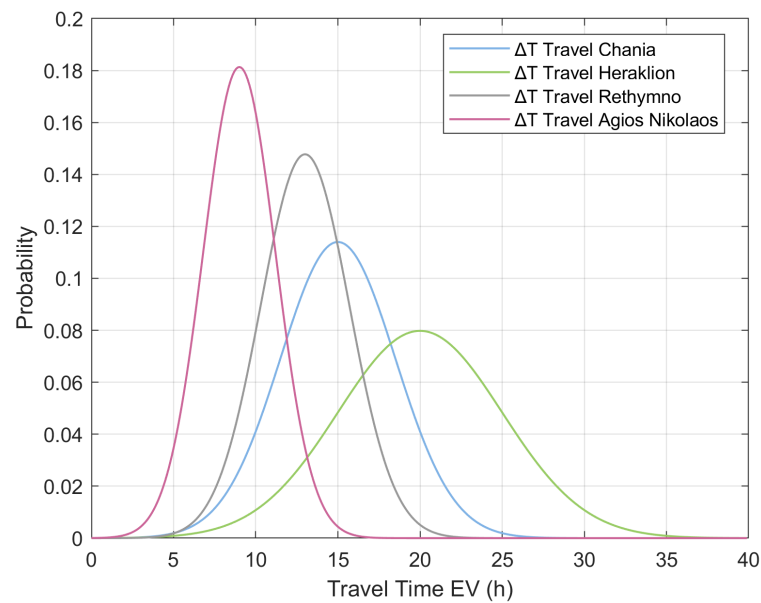
**EV.TravelTime**

Η μεταβλητή TravelTime αφορά τον χρόνο κάθε ταξιδιού. Η κανονική κατανομή που έχει δημιουργηθεί, βασίζεται στις μέσες αποστάσεις του κάθε νομού.

Νομός	Ηράκλειο	Χανιά	Ρέθυμνο	Λασιθί
-------	----------	-------	---------	--------

Χρόνος(λ.)      5-38      4-28      5-25      2-18

Πίνακας 4.7: Χρόνος αστικού ταξιδιού ανά νομό



Σχήμα 4.15: Χρόνος ταξιδιού ανάλογα με τον προορισμό.

Ο χρόνος ταξιδιού για διαδρομές εκτός πόλης καθορίζεται από την ταχύτητα του οχήματος και την απόσταση των δύο πόλεων. Παρακάτω παραθέτονται οι αποστάσεις μεταξύ των νομών που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή.

Νομός	Χανιά-Ηράκλειο	Χανιά-Ρέθυμνο	Ρέθυμνο-Ηράκλειο
-------	----------------	---------------	------------------

Απόσταση (km)      140      60      80

Πίνακας 4.8: Αποστάσεις μεταξύ νομών.

## EV.TravelDistance

Η μεταβλητή TravelDistance αφορά την απόσταση που διανύει το ΗΟ σε κάθε του ταξίδι. Εξαρτάται από την ταχύτητα του ΗΟ και τον χρόνο ταξιδιού. Υπολογίζεται από τη σχέση:

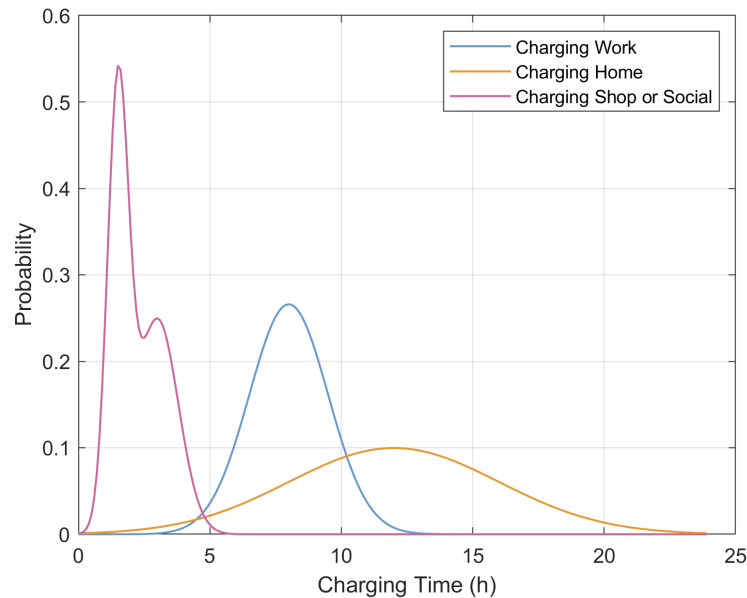
$$EV.TravelDistance = EV.Speed \times \frac{EV.TravelTime(min)}{60} \quad (km) \quad (4.9)$$

## EV.ChargingTime

Η μεταβλητή ChargingTime αφορά τον χρόνο στάθμευσης του ΗΟ ανάμεσα σε δύο ταξίδια. Δεν είναι απαραίτητο ότι σε κάθε στάθμευση θα υπάρξει και φόρτιση. Αυτό αποφασίζεται με βάση τη στάθμη της μπαταρίας του οχήματος τη στιγμή που φτάνει στον προορισμό του και σταθμεύει. Ο χρόνος παραμονής του οχήματος στον προορισμό συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα:

Προορισμός	'home'	'work'	'social'
Χρόνος(ω.)	2-22	2-13	0-9

Πίνακας 4.9: Χρόνος παραμονής οχήματος σε προορισμό.



Σχήμα 4.16: Χρόνος παραμονής οχήματος.

Στον παρακάτω πίνακα περιγράφονται οι παράμετροι των κανονικών κατανομών που έχουν χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή των δεδομένων.

	Τύπος Κατανομής	Μέση Τιμή ( $\mu$ )	Τυπική Απόκλιση ( $\sigma$ )
EV.DepartureTime	Κανονική	7.5	1.5
EV.TravelTime (Chania)	Κανονική	15	3.5
EV.TravelTime (Heraklion)	Κανονική	20	5
EV.TravelTime (Rethymno)	Κανονική	13	2.7
EV.TravelTime (Lasithi)	Κανονική	9	2.2
EV.Speed (αστικές διαδρομές)	Κανονική	35	7
EV.Speed (υπεραστικές διαδρομές)	Κανονική	61	17
EV.ChargingTime (home)	Κανονική	12	4
EV.ChargingTime	Κανονικοποιημένο άθροισμα	1.5	0.4
(shop/social)	δύο κανονικών κατανομών	3	0.8
EV.ChargingTime (work)	Κανονική	8	1.5
EV.SoC0 (αστικές διαδρομές)	Κανονική	65	4.5
EV.SoC0 (Chania-Heraklion)	Κανονική	90	3.5
EV.SoC0 (Chania-Rethymno)	Κανονική	65	8.5
EV.SoC0 (Rethymno-Heraklion)	Κανονική	75	5

Πίνακας 4.10: Χαρακτηριστικά κατανομών του στόλου HO. [19] [18]

### 4.3 Ρουτίνα Οχήματος

#### Αρχικοποίηση Ταξιδιού.

Αρχικά επιλέγεται ο νομός στον οποίο βρίσκεται το όχημα, το οποίο καθορίζει τις κατανομές για τον χρόνο ταξιδιού. Έπειτα, γίνεται τυχαία επιλογή του τύπου οχήματος με βάση ένα ακέραιο από το 1 έως το 4. Με αυτόν τον τρόπο προσδιορίζονται τα χαρακτηριστικά του HO, όπως η κατανάλωση *EV.Consuption* και η ισχύς φόρτισης *EV.P*. Η ρουτίνα ξεκινάει πάντα από την τοποθεσία 'home' και εξελίσσεται βήμα προς βήμα μέχρι τη συμπλήρωση ενός πλήρους ημερήσιου κύκλου.

Για κάθε HO αποφασίζεται εάν η πρώτη διαδρομή της ημέρας θα είναι εντός ή εκτός πόλης. Η απόφαση βασίζεται σε στοχαστικές πιθανότητες που υπολογίζονται από πραγματικά δε-

δομένα κυκλοφορίας μεταξύ των βασικών υπεραστικών διαδρομών της Κρήτης (π.χ. Χανιά–Ηράκλειο, Χανιά–Ρέθυμνο, Ρέθυμνο–Ηράκλειο). Οι πιθανότητες αυτές εξαρτώνται από τη γεωγραφική θέση του οχήματος (νομός), την ώρα της ημέρας, και τον συνολικό αριθμό ηλεκτρικών οχημάτων στο νησί. Αν δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για κάποιον νομό (π.χ. Λασιθί), τότε θεωρείται ότι όλες οι διαδρομές είναι αστικές. Ανάλογα με την επιλογή (αστική ή υπεραστική), καθορίζεται και το αρχικό επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας.

Το ταξίδι ξεκινάει την χρονική στιγμή που αποφασίζεται από την κατανομή *EV.DepartureTime* και εν συνεχεία επιλέγεται ο προορισμός του ΗΟ. Πιο συγκεκριμένα, παράγεται ένας τυχαίος αριθμός από 0 έως 1 και ανάλογα με το χρόνο αναχώρησης, αντιστοιχίζεται σε μία πιθανότητα στο διάγραμμα των κανονικοποιημένων κατανομών. Υπάρχουν τρεις πιθανοί προορισμοί 'home', 'work', 'shop/social'. Διευκρινίζεται ότι, ο προορισμός του ΗΟ δεν μπορεί να είναι ο ίδιος με τον τόπο αναχώρησης του οχήματος.

### Υπεραστικές Διαδρομές.

Για υπεραστικές διαδρομές, επιλέγεται πρώτα ο νομός στον οποίο θα ταξιδέψει (π.χ. από Χανιά προς Ηράκλειο ή Ρέθυμνο), με βάση ωριαίες πιθανότητες από κυκλοφοριακά δεδομένα. Στη συνέχεια, επιλέγεται η ταχύτητα από την κατανομή υπεραστικής ταχύτητας και υπολογίζεται η κατανάλωση και η απόσταση για το υπεραστικό σκέλος. Μετά την άφιξη στον νέο νομό, ορίζεται ένας δευτερεύων προορισμός (π.χ. *work*) εντός της νέας πόλης και επιλέγεται νέα ταχύτητα από αστική κατανομή, ώστε να προσομοιωθεί η τελευταία φάση της μετακίνησης. Και για τα δύο σκέλη του ταξιδιού (υπεραστικό + αστικό), υπολογίζονται ξεχωριστά η κατανάλωση ενέργειας και η απόσταση.

Αφού ολοκληρωθεί ένα υπεραστικό ταξίδι και το όχημα φτάσει στον νέο νομό, πραγματοποιούνται μία ή περισσότερες αστικές μετακινήσεις στην πόλη υποδοχής. Τουλάχιστον μία διαδρομή θεωρείται βέβαιη, ενώ ενδεχομένως να ακολουθήσουν και επιπλέον, ανάλογα με τον εναπομείναντα χρόνο της ημέρας. Η διαδικασία επιλογής προορισμών, διάρκειας στάθμευσης και απόφασης φόρτισης ακολουθεί την ίδια λογική όπως και για τις αρχικές αστικές διαδρομές, με χρήση στοχαστικών κατανομών.

Πριν το τέλος της ημέρας, πραγματοποιείται έλεγχος επάρκειας ενέργειας για να διαπιστωθεί αν το όχημα μπορεί να επιστρέψει στην αρχική του πόλη. Επομένως, υπολογίζεται η απαιτούμενη ενέργεια για το υπεραστικό σκέλος της επιστροφής, καθώς και για την πιθανή ενδοαστική κίνηση εντός της πόλης-βάσης. Η απαιτούμενη ενέργεια βασίζεται στην αντίστοι-

χη απόσταση, στην επιλεγμένη ταχύτητα επιστροφής και στα τεχνικά χαρακτηριστικά του οχήματος.

Αν το διαθέσιμο επίπεδο ενέργειας επαρκεί για το σύνολο της επιστροφής, το όχημα ξεκινά τη διαδρομή. Σε αντίθετη περίπτωση, η επιστροφή μετατίθεται σε μεταγενέστερη ώρα και η προσομοίωση συνεχίζει με ενδιάμεσες στάσεις και νέες αποφάσεις φόρτισης μέχρι να εξασφαλιστεί η επιστροφή του ΗΟ στην πόλη-βάση.

### **Αστικές Διαδρομές.**

Για αστικές διαδρομές, επιλέγεται απευθείας ταχύτητα από αστική κατανομή, ο χρόνος ταξιδιού από την αντίστοιχη κατανομή του νομού, και ακολούθως υπολογίζεται η κατανάλωση και η απόσταση.

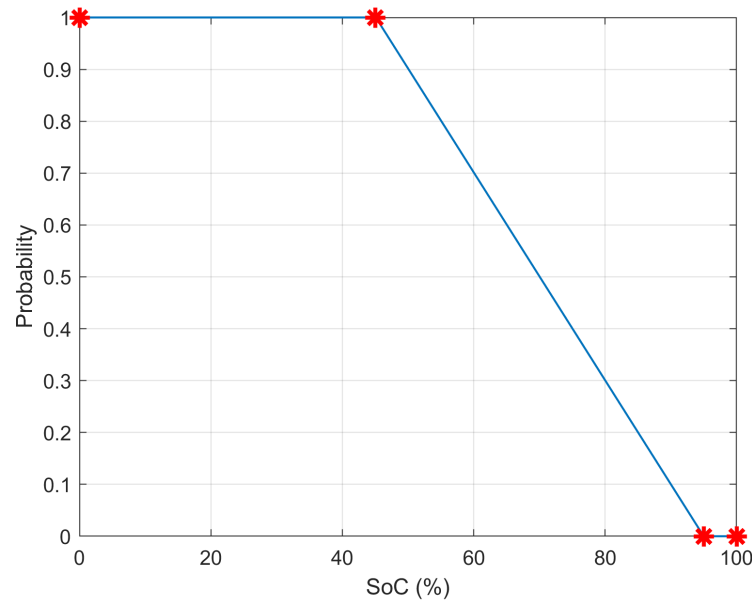
### **Στάθμευση-Φόρτιση Οχήματος.**

Μόλις το όχημα φτάσει στον προορισμό του, επιλέγεται η διάρκεια στάθμευσης με βάση τις κατανομές ανά τύπο προορισμού. Στη συνέχεια αποφασίζεται αν το όχημα θα φορτίσει ή όχι. Η στάθμη της μπαταρίας κατά την άφιξη θα είναι ίση με την στάθμη της μπαταρίας όταν το όχημα εκκίνησε από την προηγούμενη θέση του μείον την κατανάλωση κατά τη διάρκεια του ταξιδιού.

Η απόφαση για φόρτιση βασίζεται σε κανόνες:

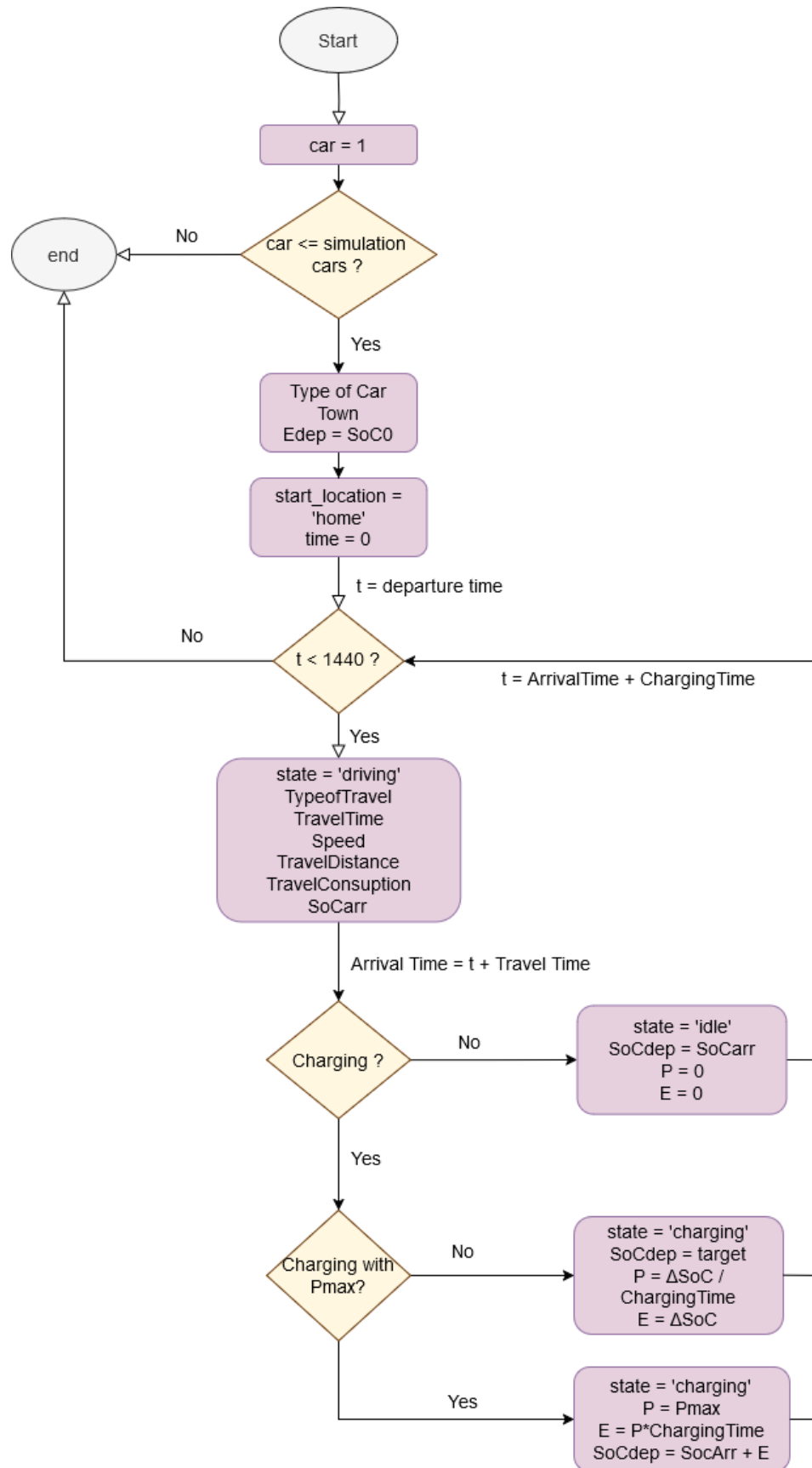
- Αν το SoC είναι  $> 95\%$ , δε γίνεται φόρτιση.
- Αν το SoC είναι  $< 45\%$ , η φόρτιση θεωρείται βέβαιη.
- Αν το SoC είναι μεταξύ  $45\%$  και  $95\%$ , εκτιμάται με βάση την παρακάτω κατανομή.





Σχήμα 4.17: Επιλογή φόρτισης κατά τη στάθμευση.

Πιο συγκεκριμένα, επιλέγεται τυχαία ένας αριθμός από 0 έως 1, ο οποίος αντιστοιχίζεται με μια πιθανότητα στην κατανομή. Αν η τιμή βρεθεί κάτω από την καμπύλη, τότε το όχημα θα φορτίσει, αλλιώς θεωρείται ότι δε γίνεται φόρτιση και τα επίπεδα της μπαταρίας μένουν τα ίδια. Αν πραγματοποιηθεί φόρτιση, η ενέργεια αυξάνεται σταδιακά σύμφωνα με την ισχύ φόρτισης του οχήματος και τον χρόνο στάθμευσης. Διαφορετικά, το επίπεδο ενέργειας παραμένει σταθερό. Έπειτα εκτελείται νέο ταξίδι με διαφορετικό προορισμό. Η συγκεκριμένη ρουτίνα συνεχίζεται μέχρι να συμπληρωθεί το εικοσιτετράωρο.



Σχήμα 4.18: Διάγραμμα ροής αλγορίθμου οχημάτων.

#### 4.4 Μοντέλο Συναθροιστή

Στη διενεργούμενη μοντελοποίηση, όλες οι μπαταρίες των ΗΟ ανά νομό συνυπολογίζονται και εκτιμούνται ως τέσσερις μπαταρίες που φορτίζουν και εκφορτίζουν. Η λειτουργία αυτή απλουστεύει τη μελέτη των ΗΟ, λόγω του μεγάλου όγκου οχημάτων που μελετούνται. Αυτές οι δυναμικές μπαταρίες, αντιπροσωπεύουν τη συναθροιστική (Aggregated) ενέργεια που είναι αποθηκευμένη σε όλα τα σταθμευμένα οχήματα μια δεδομένη στιγμή σε ένα δεδομένο νομό.

Αρχικά υπολογίζονται οι χρόνοι  $t_{l_1}$ ,  $t_{l_2}$ ,  $t_{h_1}$ ,  $t_{h_2}$  για κάθε φόρτιση, τα οποία βοηθούν στον υπολογισμό των άνω και κάτω δυναμικών ορίων ενέργειας για κάθε όχημα. Τα  $t_0$ ,  $t_f$  αντιστοιχούν στους χρόνους που το όχημα ξεκινά και σταματά να φορτίζει αντίστοιχα. Τα  $E_{min}$ ,  $E_{max}$  αποτελούν στην ελάχιστη και μέγιστη τιμή της αποθηκευμένης στο ΗΟ ενέργειας, το  $E_0$  εκφράζει το αρχικό ποσό ενέργειας που έχει το ΗΟ όταν ξεκινά να φορτίζει και το  $E_{target}$  το απαιτούμενο ποσό ενέργειας τη στιγμή που το όχημα θα αποσυνδεθεί από το δίκτυο. Το  $\Delta SoC$  αφορά τη μέγιστη επιτρεπτή απόκλιση από το  $SoC_{target}$  για την παρούσα διατριβή. Οι μεταβλητές  $t_{L_1}$ ,  $t_{H_1}$ ,  $t_{L_2}$  και  $t_{H_2}$  εκτιμώνται ως εξής [20]:

$$t_{l_1}(i) = t_0(i) - \frac{E_0(i) - E_{min}(i)}{P_{min}(i)} \quad (4.10)$$

$$t_{h_1}(i) = t_0(i) - \frac{E_0(i) - E_{max}(i)}{P_{max}(i)} \quad (4.11)$$

$$\Delta SoC(i) = \frac{2.5 \times E_{max}(i)}{100} \quad (4.12)$$

$$t_{l_2}(i) = t_f(i) - \frac{E_{target}(i) - \Delta SoC(i) - E_{min}(i)}{P_{max}(i)} \quad (4.13)$$

$$t_{h_2}(i) = t_f(i) - \frac{E_{target}(i) + \Delta SoC(i) - E_{max}(i)}{P_{min}(i)} \quad (4.14)$$

Τα δυναμικά άνω και κάτω όρια ενέργειας των Η.Ο.,  $E_{low}$  και  $E_{high}$ , ορίζονται γενικά από

τέσσερα σημεία στα οποία αρχίζουν να μειώνονται ή να αυξάνονται με σταθερό ρυθμό μεταβολής  $P_{min}$  ή  $P_{max}$ . Τα σημεία αυτά είναι  $(t_0, E_0)$ ,  $(t_{l_1}, E_{min})$ ,  $(t_{l_2}, E_{min})$  και  $(t_f, E_{target})$  για το  $E_{low}$  και  $(t_0, E_0)$ ,  $(t_{h_1}, E_{max})$ ,  $(t_{h_2}, E_{max})$  και  $(t_f, E_{target})$  για το  $E_{high}$ . Τα όρια  $E_{high}$ ,  $E_{low}$  του i-οστού ΗΟ για τη χρονική στιγμή  $t$  υπολογίζονται ως εξής [20]:

$$E_{high}(i, t) = \begin{cases} E_{max}(i), & t_{h_1}(i) \leq t \leq t_{h_2}(i) \\ E_{max}(i) + P_{min}(t - t_{h_2}(i)), & t_{h_2}(i) < t < t_f(i) \\ E_{max}(i) + P_{max}(t - t_{h_1}(i)), & t_0(i) < t < t_{h_1}(i) \end{cases} \quad (4.15)$$

$$E_{low}(i, t) = \begin{cases} E_{min}(i), & t_{l_1}(i) \leq t \leq t_{l_2}(i) \\ E_{min}(i) + P_{max}(t - t_{l_2}(i)), & t_{l_2}(i) < t < t_f(i) \\ E_{min}(i) + P_{min}(t - t_{l_1}(i)), & t_0(i) < t < t_{l_1}(i) \end{cases} \quad (4.16)$$

Ο κύριος στόχος του συναθροιστή είναι να ληφθούν τα δυναμικά άνω και κάτω όρια της συνολικής αποθηκευμένης ενέργειας στις μπαταρίες των ΗΟ και της συνολικής ενεργού ισχύος που μπορούν να ανταλλάξουν με το ηλεκτρικό δίκτυο. Τα χρονικά μεταβαλλόμενα όρια κάθε ισοδύναμης μπαταρίας υπολογίζονται με την εφαρμογή των ακόλουθων εξισώσεων [21]:

$$P_{max}^{aggr}(t) = \sum_i P_{max}(i, t), \forall t \quad (4.17)$$

$$P_{min}^{aggr}(t) = \sum_i P_{min}(i, t), \forall t \quad (4.18)$$

Αξιοσημείωτο είναι ότι, ο αριθμός των συνδεδεμένων οχημάτων διαφέρει κάθε χρονική στιγ-

μή, καθώς συνεχώς συνδέονται και αποσυνδέονται οχήματα από το δίκτυο. Η ενέργεια των ΗΟ που είναι διαθέσιμη κάθε στιγμή είναι δυναμική και ισούται με τη διαφορά της ενέργειας των οχημάτων που αποσυνδέονται με την ενέργεια των οχημάτων που συνδέονται στο δίκτυο, τη δεδομένη χρονική στιγμή  $t$ . Η ενέργεια αυτή υπολογίζεται με την εφαρμογή των ακόλουθων εξισώσεων [22]:

$$E_{max}^{aggr}(t) = \sum_i E_{high}(i, t) + DE_{dyn}(t), \forall t \quad (4.19)$$

$$E_{min}^{aggr}(t) = \sum_i E_{low}(i, t) + DE_{dyn}(t), \forall t \quad (4.20)$$

$$DE_{dyn}(t) = \sum_{T_0:\Delta t:t} (E_{dep,total}(t) - E_{arr,total}(t)) \quad (4.21)$$

$$E_{arr,total}(t) = \sum_{\forall i \text{ with EV plugged at } t} E_0(i) \quad (4.22)$$

$$E_{dep,total}(t) = \sum_{\forall i \text{ with EV unplugged at } t} E_{target}(i) \quad (4.23)$$

Με αυτόν τον τρόπο εκτιμούνται τα άνω και κάτω όρια της ενέργειας για τις τέσσερις μπαταρίες. Οι μπαταρίες κατανέμονται σε κάθε πόλη (Ηράκλειο, Χανιά, Ρέθυμνο και Λασιθί).

#### 4.5 Μοντελοποίηση Ισοδύναμων Γεννητριών

Για την απλούστευση του μοντέλου και την απεικόνιση των θερμικών γεννητριών ως ενιαίες ισοδύναμες μονάδες, εφαρμόστηκε η μαθηματική μέθοδος polynomial regression. Η μέθοδος αυτή επιτρέπει την προσέγγιση της συνολικής καμπύλης κόστους μιας ομάδας γεννητριών βρίσκοντας ισοδύναμους συντελεστές A,B,C,D. Στη συνέχεια, οι συντελεστές αυτοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο επερχόμενο πρόβλημα βελτιστοποίησης με μειωμένο υπολογιστικό κόστος.

Ομάδα	A (Kg/MWh <sup>3</sup> )	B (Kg/MWh <sup>2</sup> )	C (Kg/MWh)	D (Kg)	Fuel Cost ( €/Kg)
Χανιά	0.000015	0.0048	137.7972	24096.3433	0.69
Λινοπεράματα	0.000731	0.0335	154.9229	16338.1592	0.51
Αθερινόλακκος	0.000162	-0.0625	84.4507	7833.4290	0.39

Πίνακας 4.11: Ισοδύναμοι συντελεστές κόστους ανά ομάδα γεννητριών.

Αρχικά, για κάθε ομάδα γεννητριών προσδιορίζεται το συνολικό ελάχιστο και μέγιστο φορτίο που δύναται να καλυφθεί, το μεν ελάχιστο ως την ελάχιστη τιμή των αντίστοιχων γεννητριών που βρίσκονται στο γκρουπ ομαδοποίησης, το δε μέγιστο ως το άθροισμα των άνω ορίων ισχύος των επιμέρους μονάδων.

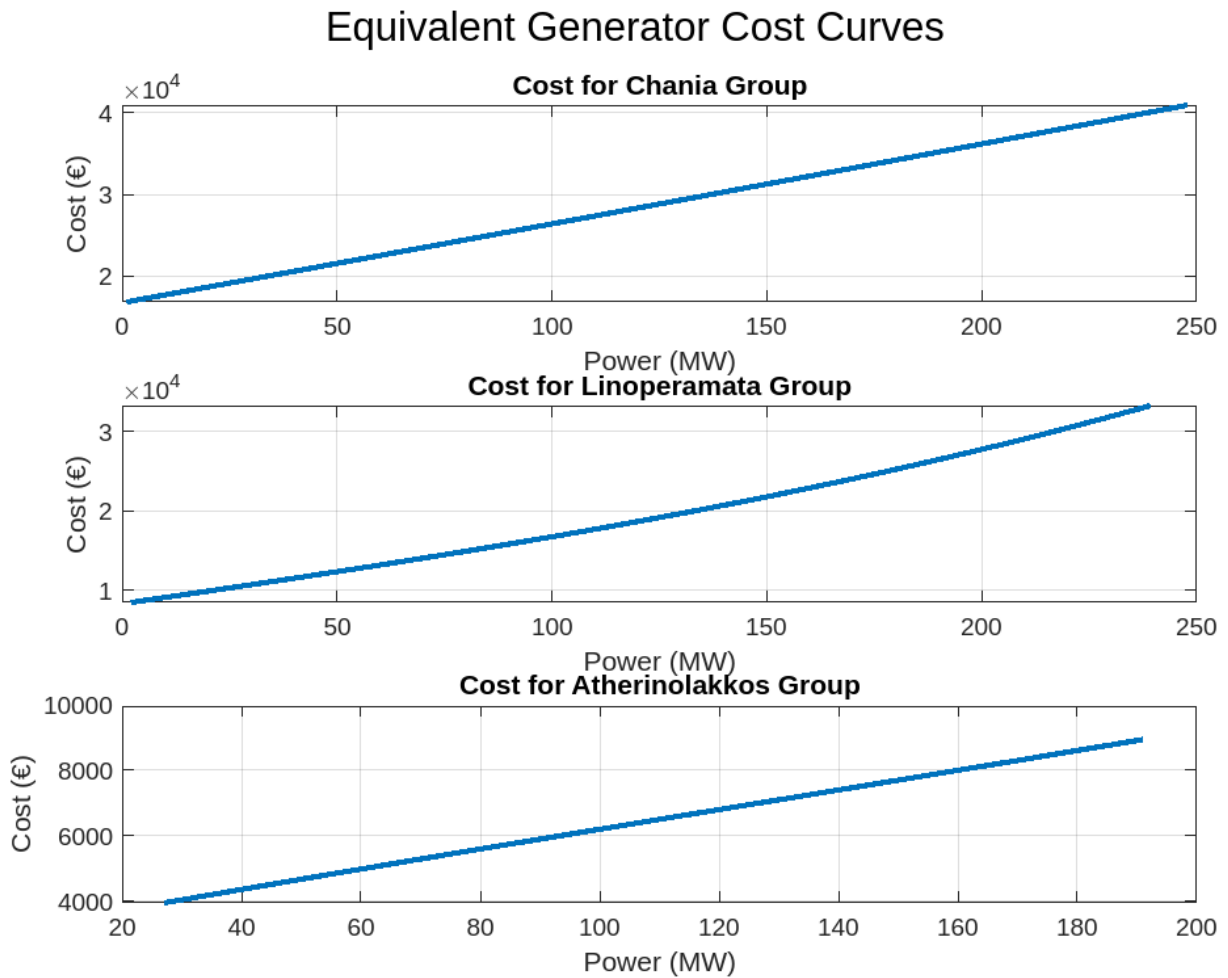
Ομάδα	Pmin (MW)	Pmax (MW)
Χανιά	1	247.84
Λινοπεράματα	2	239.25
Αθερινόλακκος	27	191

Πίνακας 4.12: Άνω και κάτω όρια ομάδων γεννητριών.

Στη συνέχεια, για διακριτές τιμές της συνολικής ισχύος, ανά 10 MW, η ισχύς κατανέμεται στις μονάδες της ομάδας με βάση το σχετικό εύρος λειτουργίας της κάθε μονάδας, δηλαδή το ποσοστό της διαφοράς πάνω-κάτω ορίου ως προς το συνολικό εύρος της ομάδας.

Για κάθε τέτοια κατανομή ισχύος, υπολογίζεται το κόστος λειτουργίας κάθε μονάδας ως πολυωνυμική συνάρτηση τρίτου βαθμού της ισχύος της, πολλαπλασιασμένη με το αντίστοιχο μοναδιαίο κόστος καυσίμου. Το συνολικό κόστος της ομάδας προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους. Έπειτα, τα σημεία ισχύος-κόστους που προκύπτουν χρησιμοποιούνται για να εφαρμοστεί πολυωνυμική παλινδρόμηση τρίτου βαθμού. Το αποτέλεσμα είναι μία ενιαία καμπύλη κόστους που απεικονίζει τη συμπεριφορά της ομάδας ως μία ισοδύναμη γεννήτρια.

Οι συντελεστές του πολυωνύμου που προκύπτει αντιστοιχούν στους ισοδύναμους συντελεστές κόστους της ομάδας. Επιπλέον, ο μέσος όρος του μοναδιαίου κόστους καυσίμου των μονάδων της ομάδας χρησιμοποιείται ως το ισοδύναμο κόστος καυσίμου.



Σχήμα 4.19: Ισοδύναμες καμπύλες κόστους ανά ομάδα γεννητριών.

### Ανάλυση Συντελεστών Κόστους Παραγωγής ανά Ομάδα Μονάδων

Οι ισοδύναμοι συντελεστές κόστους για κάθε ομάδα μονάδων προέκυψαν μέσω πολυωνυμικής παλινδρόμησης τρίτου βαθμού, ώστε να αποδοθεί συνολικά η σχέση μεταξύ παραγόμενης ισχύος και κατανάλωσης καυσίμου για την ομάδα. Η μέθοδος αυτή δεν βασίζεται στη στάθμιση επιμέρους συντελεστών, αλλά στην προσέγγιση του πραγματικού κόστους των μονάδων με κοινή πολυωνυμική μορφή, βελτιστοποιώντας το σφάλμα παλινδρόμησης.

Η κατανομή των πολυωνυμικών συντελεστών κόστους παραγωγής  $A, B, C, D$  για τις ομάδες μονάδων Λινοπεράματα, Χανιά και Αθρινόλακκος αντικατοπτρίζει τη δυναμικότητα και το λειτουργικό καθεστώς κάθε μονάδας. Οι συντελεστές αυτοί εκφράζουν τη σχέση μεταξύ της παραγόμενης ισχύος και της απαιτούμενης ποσότητας καυσίμου, η οποία μεταφράζεται σε οικονομικό κόστος μέσω του εκάστοτε κόστους καυσίμου (€/kg).

### Αθερινόλακκος

Η ομάδα του Αθερινόλακκου χαρακτηρίζεται από σαφώς χαμηλότερους συντελεστές κόστους. Ο συντελεστής  $C$ , που αποτελεί τον κύριο όρο της γραμμικής σχέσης μεταξύ ισχύος και κατανάλωσης καυσίμου, έχει τιμή  $84.45 \text{ kg/MWh}$  – σημαντικά χαμηλότερη από τις υπόλοιπες ομάδες. Το χαμηλό σταθερό κόστος  $D$  και η χρήση καυσίμου χαμηλότερου κόστους ( $0.39 \text{ €/kg}$ ) καθιστούν τις μονάδες αυτές κατάλληλες για λειτουργία βάσης. Πράγματι, πρόκειται για τις νεότερες και αποδοτικότερες θερμικές μονάδες της Κρήτης, με μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση και μικρότερες απώλειες.

### Χανιά

Οι μονάδες της ομάδας Χανίων παρουσιάζουν υψηλότερο σταθερό κόστος λειτουργίας  $D = 24,096 \text{ kg}$  και μέτριο συντελεστή  $C = 137.8 \text{ kg/MWh}$ , γεγονός που τις καθιστά ενδιάμεσης απόδοσης. Η χρήση καυσίμου υψηλού κόστους ( $0.70 \text{ €/kg}$ ) επιβαρύνει περαιτέρω το συνολικό κόστος παραγωγής. Οι τιμές των  $A$  και  $B$  είναι μικρές, γεγονός που υποδεικνύει σχετικά ομαλή αύξηση κόστους με την αύξηση της ισχύος. Οι μονάδες αυτές είναι παλαιότερης τεχνολογίας, με μέτρια απόδοση, και τυπικά χρησιμοποιούνται για την κάλυψη μέσης ή μεταβαλλόμενης ζήτησης, ιδίως όταν οι μονάδες βάσης δεν επαρκούν.

### Λινοπεράματα

Η ομάδα των Λινοπεραμάτων εμφανίζει τους υψηλότερους συντελεστές  $A, B, C$ , ιδιαίτερα έντονους ως προς την εξάρτηση από την ισχύ. Οι μονάδες αυτές διαθέτουν υψηλό  $C = 154.9 \text{ kg/MWh}$  και σημαντικούς μη γραμμικούς όρους ( $A = 0.000731 \text{ kg/MWh}^3$ ,  $B = 0.0335 \text{ kg/MWh}^2$ ), γεγονός που οδηγεί σε ταχεία αύξηση του κόστους παραγωγής με την ισχύ. Παρά το μέτριο κόστος καυσίμου ( $0.51 \text{ €/kg}$ ), η ολική τους καμπύλη κόστους τις καθιστά οικονομικά ασύμφορες για συνεχή λειτουργία. Ως εκ τούτου, χρησιμοποιούνται κυρίως ως μονάδες αιχμής – ενεργοποιούνται περιοδικά για την κάλυψη βραχυπρόθεσμων αναγκών σε υψηλό φορτίο ή όταν εξαντλούνται οι φθηνότερες επιλογές.

Συμπερασματικά, η διαμόρφωση των συντελεστών κόστους ανά ομάδα μονάδων αντανακλά με ακρίβεια τον ρόλο που αυτές διαδραματίζουν στο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής της Κρήτης. Η κατηγοριοποίηση σε μονάδες βάσης και αιχμής προκύπτει από τα ίδια τα τεχνικοοικονομικά χαρακτηριστικά των ομάδων, τα οποία αναδεικνύονται μέσα από τη μορφή και τη συμπεριφορά των καμπυλών κόστους και οριακού κόστους.



#### 4.6 Κόστος Μονάδων Συστήματος

Η παρακάτω τριτοβάθμια εξίσωση δίνει τη γενική μορφή της συνάρτησης κόστους κάθε μονάδας παραγωγής:

$$F(P) = (A \times P^3 + B \times P^2 + C \times P + D) \times FuelCost \text{ ( €/MWh)} \quad (4.24)$$

όπου  $P$  η αποδιδόμενη ισχύς την εκάστοτε στιγμή σε MW και τα  $A, B, C, D$  οι παράμετροι κόστους των θερμικών μονάδων. Οι παράμετροι κόστους των μονάδων καθώς και το ενδεικτικό κόστος του καυσίμου που χρησιμοποιούν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.12.

#### 4.7 Μοντέλο Δικτύου Κρήτης

Για την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους παραγωγής έγινε χρήση της συνάρτησης της MATLAB, `fmincon`, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση [23]:

$$TC(t) = \min(\sum_{i=1}^3 F_i(P_i(t))), \forall t \quad (4.25)$$

Η `fmincon` λαμβάνει κάποιες γραμμικές παραμέτρους, ώστε να μπορέσουν να περιγραφούν οι περιορισμοί τόσο για τη διαδικασία φόρτισης, όσο και για τις ανάγκες του οδηγού. Για τις εξισώσεις ισότητας ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$TotalLoad(t) = \sum_{i=1}^3 P_i(t) - \sum_{j=1}^4 P_{bj}(t), \forall t \quad (4.26)$$

όπου  $P_i(t), i = 1...3$  είναι η παραγωγή των μονάδων τη χρονική στιγμή  $t$  και  $P_{bj}(t)$  η συνολική ισχύς των ΗΟ του Ηρακλείου, Χανίων, Ρεθύμνου και Λασιθίου αντίστοιχα για την δεδομένη χρονική στιγμή. Τα ΗΟ θεωρούνται ως μια ισοδύναμη μπαταρία ανά νομό η οποία φορτίζει ή εκφορτίζει.

$$TotalLoad(t) = CreteLoad(t) + EVsLoad(t) - RES(t), \forall t \quad (4.27)$$

$$E_f - E_0 = \sum_{i=1}^t P_b(t) \quad (4.28)$$

όπου  $E_f$ ,  $E_0$  το επιθυμητό και το αρχικό επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας αντίστοιχα και  $P_b(t)$  η ισχύς της αντίστοιχης μπαταρίας. Η παραπάνω εξίσωση εφαρμόζεται και για τις τέσσερις μπαταρίες.

Όσον αφορά τα άνω και κάτω όρια των μονάδων παραγωγής, ισχύει για κάθε χρονικό βήμα  $t$  ότι:

$$1 \leq P_1(t) \leq 247.84, \quad 2 \leq P_2(t) \leq 239.25, \quad 27 \leq P_3(t) \leq 191,$$

Για τους συναθροιστές των ΗΟ ικανοποιούνται οι παρακάτω ανισότητες:

$$\sum_{k=1}^t P_{bi}(k) * dt \leq E_{max}^{aggr}(t) - E_0, \forall t, i \quad (4.29)$$

$$\sum_{k=1}^t P_{bi}(k) * dt \geq E_{min}^{aggr}(t) - E_0, \forall t, i \quad (4.30)$$

Ακόμη επιβάλλονται οι παρακάτω περιορισμοί για τη λειτουργία της κάθε ισοδύναμης μπαταρίας.:

$$P_{min}^{aggr}(t) \leq P_{bi}(t) \leq P_{max}^{aggr}(t), \forall t, i \quad (4.31)$$

$$SoC_{min} \leq SoC \leq SoC_{max} \quad (4.32)$$

Για την υλοποίηση του αλγορίθμου, χρησιμοποιήθηκε ένα απλοποιημένο σύστημα αγοράς ενέργειας. Μέρη του συστήματος αυτού αποτελούν οι θερμικές μονάδες παραγωγής ενέργειας των Χανίων, του Ηρακλείου και του Αθηνολάκκου, οι ΑΠΕ του νησιού και οι Aggregator, οι οποίοι συμπεριφέρονται είτε ως μονάδα παραγωγής, είτε ως φορτίο.

## 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

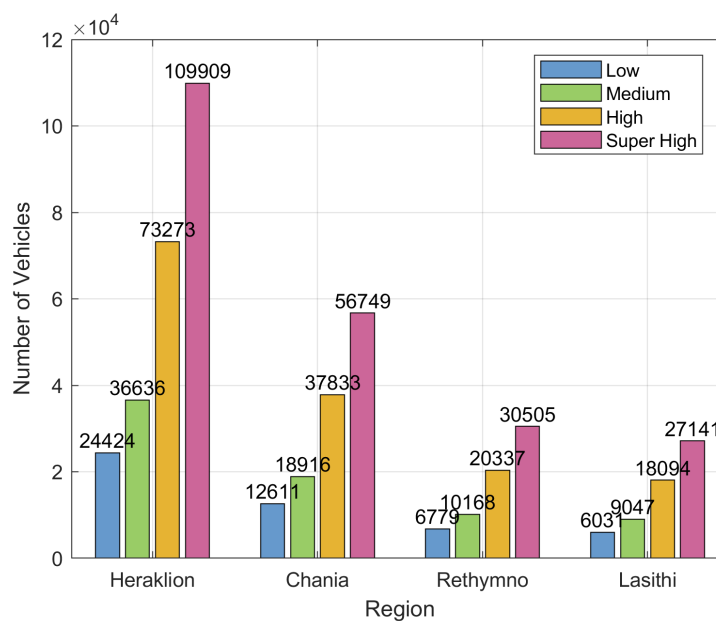
Η μελέτη και η υλοποίηση του αλγορίθμου βασίζεται σε διερεύνηση της λειτουργίας του συστήματος της Κρήτης με τη συνεισφορά των ΑΠΕ και τη μοντελοποίηση διαφόρων σεναρίων διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων. Τα παραγόμενα αποτελέσματα, εξετάζονται συγκριτικά με σκοπό την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

### 5.1 Σενάρια Διείσδυσης Ηλεκτρικών Οχημάτων

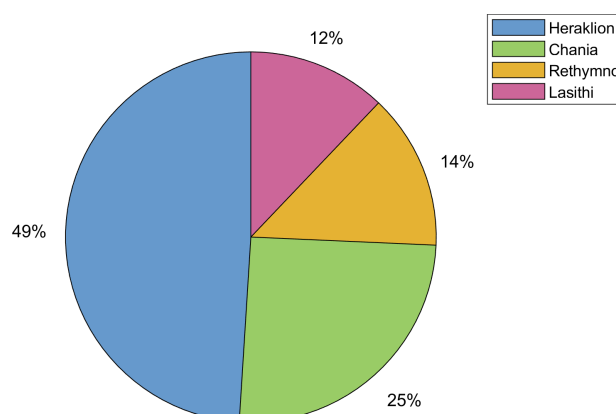
Στην παρούσα διατριβή πραγματοποιήθηκαν δοκιμές του αλγορίθμου για τέσσερα διαφορετικά σενάρια διείσδυσης ΗΟ. Λαμβάνοντας υπόψη τον εκτιμώμενο πληθυσμό για τα οχήματα της Κρήτης έως το 2030, υπολογίζεται ξεχωριστά για κάθε νομό ο προσδοκώμενος αριθμός ΗΟ με βάση τα παρακάτω σενάρια:

- **Σενάριο Χαμηλής (Low) Διείσδυσης:** Είναι το σενάριο, σύμφωνα με το οποίο τα ηλεκτρικά οχήματα θα φτάσουν το 10% του συνολικού στόλου οχημάτων έως το 2030.
- **Σενάριο Μέσης (Medium) Διείσδυσης:** Είναι το σενάριο, σύμφωνα με το οποίο τα ηλεκτρικά οχήματα θα φτάσουν το 15% του συνολικού στόλου οχημάτων έως το 2030.
- **Σενάριο Υψηλής (High) Διείσδυσης:** Είναι το σενάριο, σύμφωνα με το οποίο τα ηλεκτρικά οχήματα θα φτάσουν το 30% του συνολικού στόλου οχημάτων έως το 2030.
- **Σενάριο Πολύ Υψηλής (Ultra High) Διείσδυσης:** Είναι το σενάριο, σύμφωνα με το οποίο τα ηλεκτρικά οχήματα θα φτάσουν το 45% του συνολικού στόλου οχημάτων έως το 2030.

Παρακάτω παρατίθενται σχηματικά τόσο τα σενάρια διείσδυσης, όσο και ο πληθυσμός ΗΟ ανά νομό με βάση τον προσδοκώμενο αριθμό οχημάτων στην Κρήτη (συμβατικών και ΗΟ) για το 2030, ο οποίος φτάνει τα 498.454 οχήματα.



Σχήμα 5.1: Πληθυσμός ΗΟ ανά σενάριο διείσδυσης.

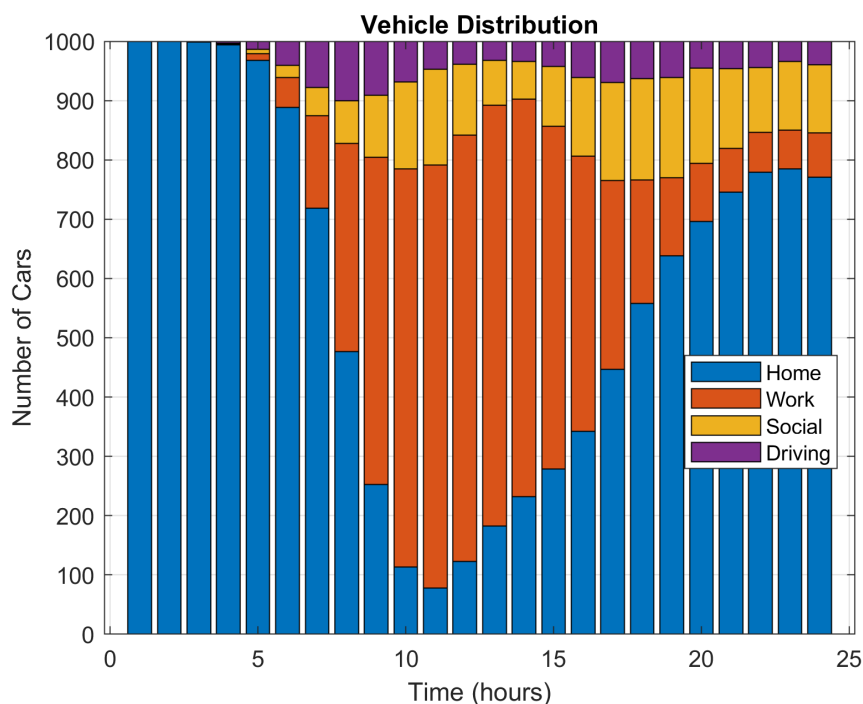


Σχήμα 5.2: Κατανομή ΗΟ σε πόλεις.

## 5.2 Αποτελέσματα Αλγορίθμου Οχημάτων

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η κατανομή των ΗΟ στους διάφορους προορισμούς κατά τη διάρκεια της ημέρας. Παρατηρείται ότι, τις πρώτες πρωινές ώρες η πλειονότητα των οχημάτων βρίσκεται σταθμευμένη στην τοποθεσία 'home'. Από τις 5:00 με 6:00 το πρωί που ξεκινάει η ανθρώπινη δραστηριότητα, φαίνεται πως αρκετά οχήματα οδεύουν προς τους προορισμούς 'work' και 'social'. Το μεσημέρι παρατηρείται επιστροφή των οχημάτων στην τοποθεσία 'home'. Καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας και ειδικά τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες πολλά ΗΟ βρίσκονται σε κίνηση, οδηγώντας από τον ένα προορισμό στον άλλο. Η αιχμή της

κινητικότητας παρατηρείται τις ώρες 8:00 με 17:00 ενώ από τις 24:00 μέχρι τις 5:00 ελάχιστα οχήματα βρίσκονται σε κινητικότητα.

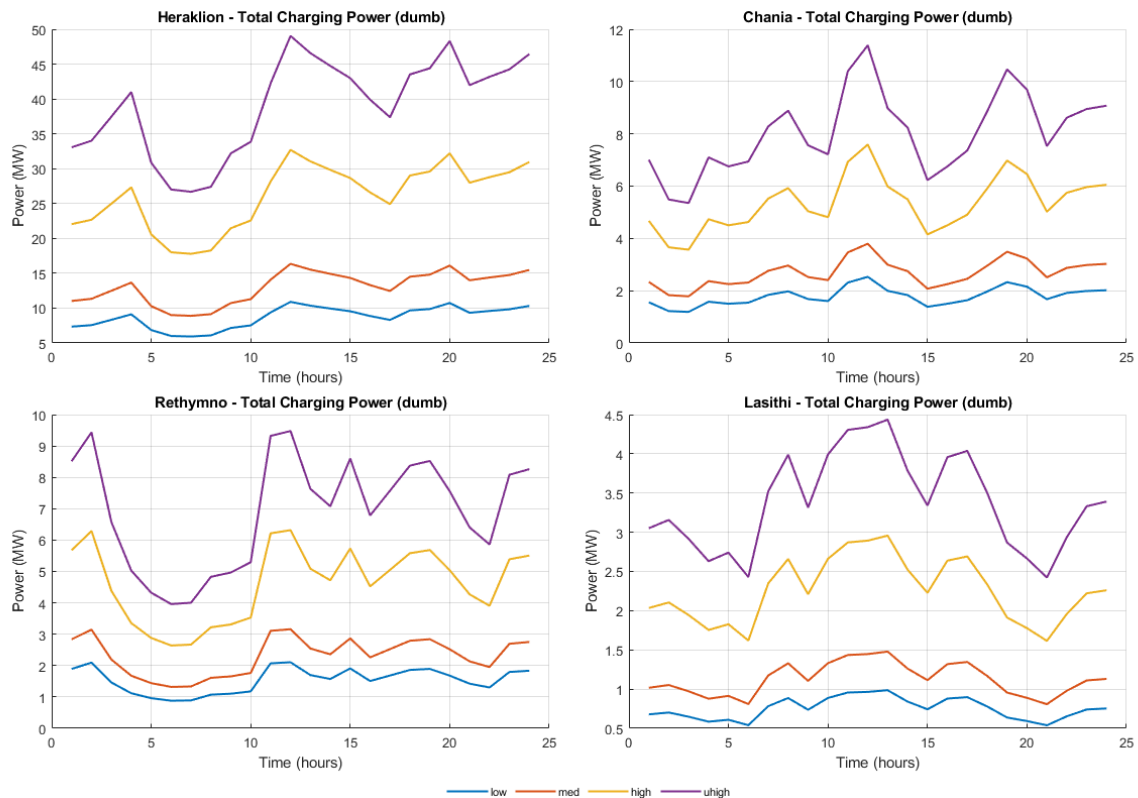


Σχήμα 5.3: Κατανομή θέσης ΗΟ κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζεται ο συνολικός αριθμός οχημάτων που φορτίζουν κατά τη διάρκεια της ημέρας και η ισχύς των οχημάτων που φορτίζουν με τη μέθοδο dumb charging ανά τα σενάρια διείσδυσης.

### 5.2.1 Συνολική Ισχύς Φόρτισης Οχημάτων ανά Νομό (Dumb Charging)

Η συνολική ισχύς φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων παρουσιάζει αξιοσημείωτες διαφοροποιήσεις μεταξύ των νομών της Κρήτης και μεταβάλλεται σημαντικά ανάλογα με το σενάριο διείσδυσης. Το Ηράκλειο συγκεντρώνει το μεγαλύτερο φορτίο φόρτισης καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, γεγονός που αποδίδεται στην υψηλή πληθυσμιακή συγκέντρωση και στην αυξημένη κυκλοφορία. Στο σενάριο υπερυψηλής διείσδυσης (uhigh), η ισχύς φόρτισης ξεπερνά τα 48 MW κατά τις μεσημβρινές και απογευματινές ώρες, με τη συνολική ζήτηση να παραμένει άνω των 30 MW στο μεγαλύτερο μέρος της ημέρας. Οι τιμές αυτές επιβεβαιώνουν την ύπαρξη έντονων αιχμών, οι οποίες ενδέχεται να οδηγήσουν σε συμφόρηση των τοπικών δικτύων διανομής.

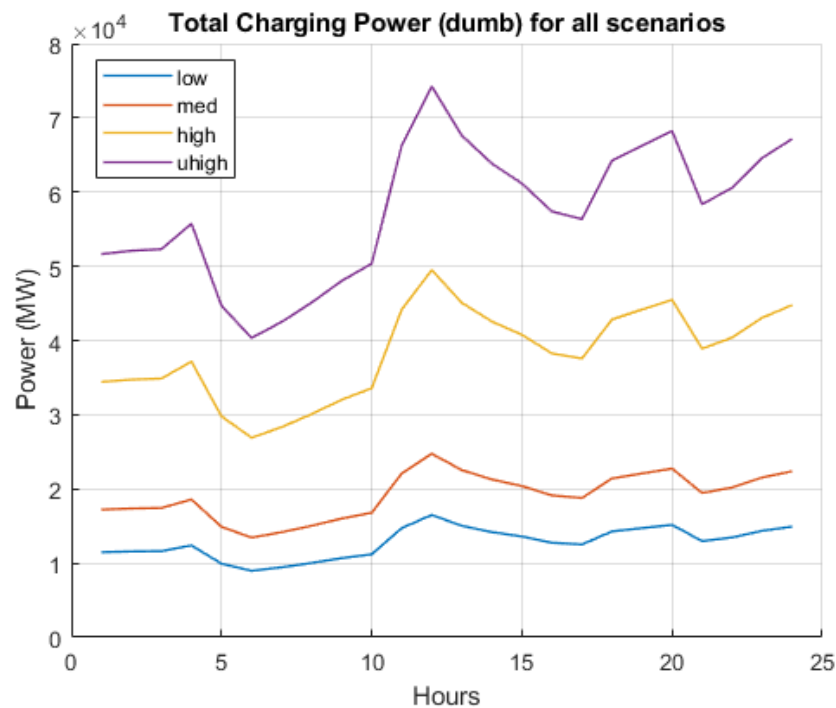


Σχήμα 5.4: Συνολική ισχύς φόρτισης των ΗΟ ανά ώρα, με χρήση της μεθόδου "dumb charging", ανά νομό.

Στον αντίποδα, το Λασιθί εμφανίζει τις χαμηλότερες απαιτήσεις φόρτισης, με μέγιστες τιμές που δεν ξεπερνούν τα 4.5 MW ακόμη και στο πιο επιβαρυνμένο σενάριο. Η ήπια ημερήσια διακύμανση της ισχύος, σε συνδυασμό με τον γενικά περιορισμένο αριθμό οχημάτων, καθιστά την περιοχή αυτή λιγότερο ευάλωτη σε ζητήματα αιχμών.

Τα Χανιά και το Ρέθυμνο καταλαμβάνουν ενδιάμεσες θέσεις, παρουσιάζοντας ήπιες διαφοροποιήσεις μεταξύ τους. Στο Ρέθυμνο καταγράφεται μια χαρακτηριστική διπλή αιχμή — πρωινή και απογευματινή — η οποία υποδηλώνει επαναλαμβανόμενο μοτίβο μετακινήσεων και φόρτισης. Αντίστοιχα, στα Χανιά η ισχύς ακολουθεί πιο ομαλή χρονική κατανομή, με μέγιστες τιμές της τάξης των 11 MW, χωρίς ιδιαίτερα έντονες διακυμάνσεις.

Γενικά, η μετάβαση από χαμηλά σε υψηλά σενάρια διείσδυσης οδηγεί σε επιβάρυνση, ιδίως στις μεγαλύτερες πόλεις. Η ανεξέλεγκτη φόρτιση που χαρακτηρίζει το σενάριο dumb charging προκαλεί χρονική συσσώρευση της ζήτησης σε συγκεκριμένα διαστήματα της ημέρας, καθιστώντας αναγκαία την υιοθέτηση στρατηγικών διαχείρισης φορτίου. Η ανάγκη για εξομάλυνση αιχμών καθιστά επιτακτική την αξιοποίηση τεχνολογιών όπως η αμφίδρομη φόρτιση V2G.



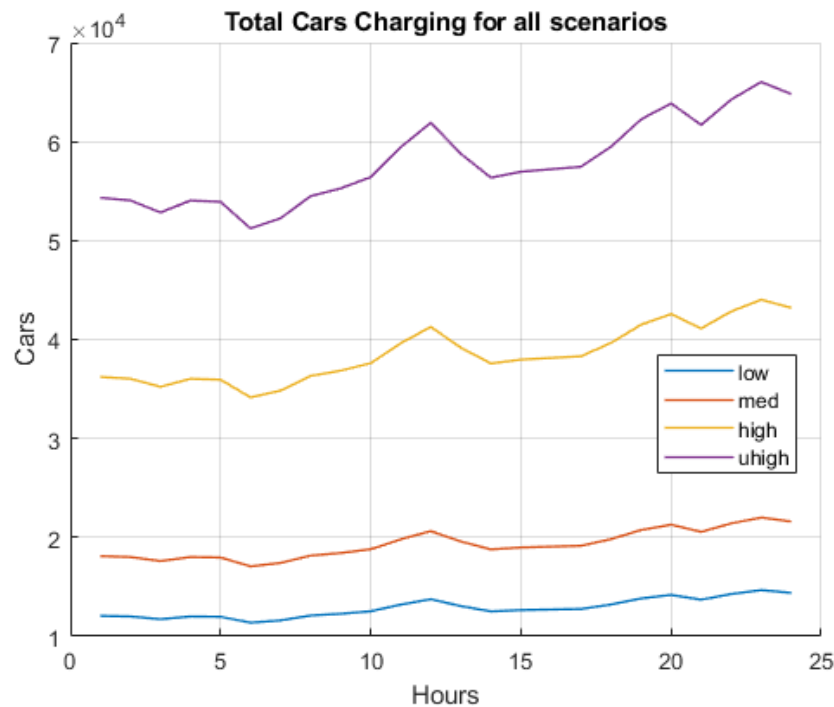
Σχήμα 5.5: Συνολική ισχύς φόρτισης όλων των ΗΟ στην Κρήτη, βάσει "dumb charging".

### 5.2.2 Αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων που φορτίζουν υπό σενάριο Dumb Charging στην Κρήτη



Σχήμα 5.6: Αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων σε κατάσταση φόρτισης ανά ώρα, για κάθε νομό.

Ο αριθμός των οχημάτων που βρίσκονται σε διαδικασία φόρτισης κατά τη διάρκεια του 24ώρου παρουσιάζει διακριτές διακυμάνσεις ανά νομό και ανά επίπεδο διείσδυσης. Όπως αναμενόταν, το Ηράκλειο καταγράφει το μεγαλύτερο αριθμό οχημάτων που φορτίζουν, ακολουθούμενο από τα Χανιά, το Ρέθυμνο και τέλος το Λασίθι. Η κατανομή παρουσιάζει σαφείς αιχμές στις πρωινές και απογευματινές ώρες, γεγονός που αντικατοπτρίζει τα μοτίβα μετακίνησης και στάθμευσης των χρηστών.



Σχήμα 5.7: Συνολικός αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων σε κατάσταση φόρτισης ανά ώρα στην Κρήτη.

Η αύξηση του επιπέδου διείσδυσης συνοδεύεται από αντίστοιχη αύξηση του αριθμού των οχημάτων που φορτίζουν ταυτόχρονα, διατηρώντας ωστόσο την ίδια γενική χρονική μορφή. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι η ζήτηση για ισχύ φόρτισης αναμένεται να επιτείνεται ποσοτικά, αλλά όχι απαραίτητα να μεταβληθεί ως προς το χρονικό της προφίλ.

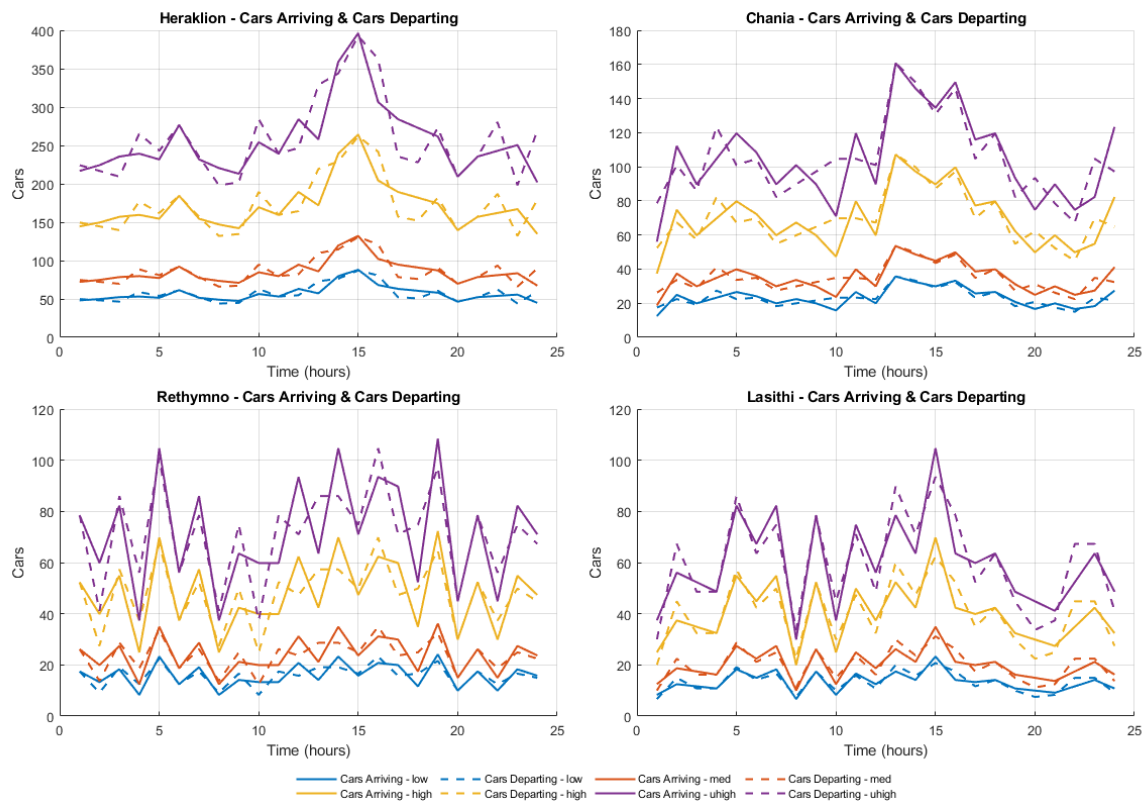
### 5.2.3 Άφιξη και Αναχώρηση Ηλεκτρικών Οχημάτων στους Σταθμούς Φόρτισης

Ακόμη, απεικονίζεται ο αριθμός οχημάτων που έρχεται και φεύγει από τους σταθμούς φόρτισης καθώς και η ενέργεια με την οποία έρχονται και φεύγουν από αυτούς.

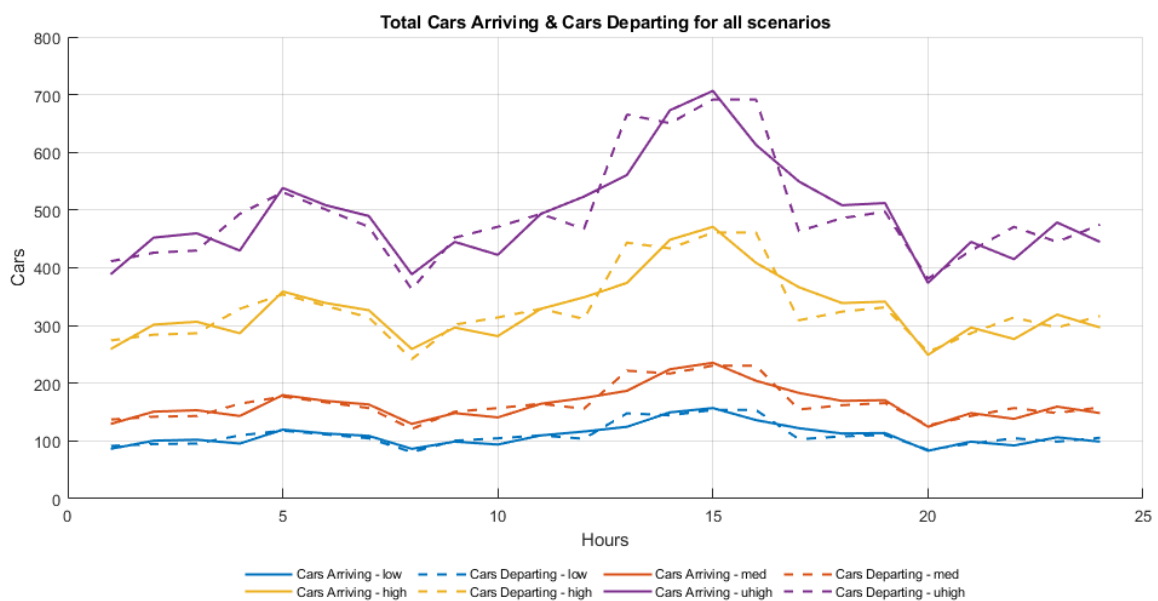
Η ημερήσια εξέλιξη του αριθμού των ηλεκτρικών οχημάτων που εισέρχονται ή αποχωρούν



από τους σταθμούς φόρτισης καταδεικνύει τα βασικά πρότυπα κινητικότητας των χρηστών σε κάθε νομό.



Σχήμα 5.8: Αριθμός ΗΟ που φτάνουν και αναχωρούν από σταθμούς φόρτισης, ανά ώρα και νομό.



Σχήμα 5.9: Συνολικός αριθμός ΗΟ που φτάνουν και αναχωρούν από σταθμούς φόρτισης της Κρήτης, ανά ώρα.

Οι αφίξεις εμφανίζουν κορυφώσεις κατά τις πρωινές ώρες και, σε μικρότερο βαθμό, αργά το απόγευμα, αντανακλώντας τις ώρες που τα οχήματα φτάνουν στους σταθμούς για επαναφόρτιση μετά από διαδρομές. Αντίστοιχα, οι αναχωρήσεις επικεντρώνονται κυρίως στη μεσημβρινή και απογευματινή ζώνη, υποδηλώνοντας την ολοκλήρωση της διαδικασίας φόρτισης ή την ανάγκη μετακίνησης σε άλλο προορισμό.

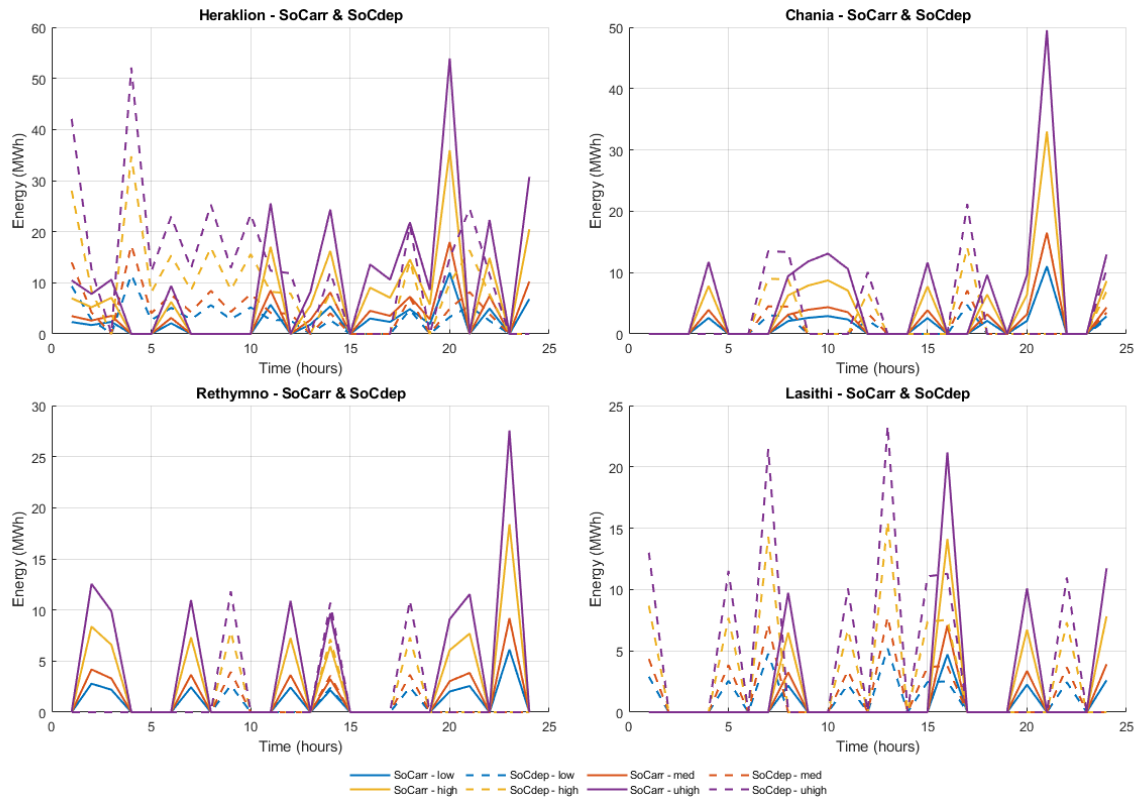
Η σύγκριση μεταξύ των νομών επιβεβαιώνει την υπεροχή του Ηρακλείου ως προς τον όγκο μετακίνησης, ενώ τα υπόλοιπα γεωγραφικά διαμερίσματα παρουσιάζουν αναλογικά μικρότερα, αλλά παρόμοιας μορφής, πρότυπα.

#### 5.2.4 Κατανομή Ενέργειας Άφιξης και Αναχώρησης Οχημάτων ανά Νομό

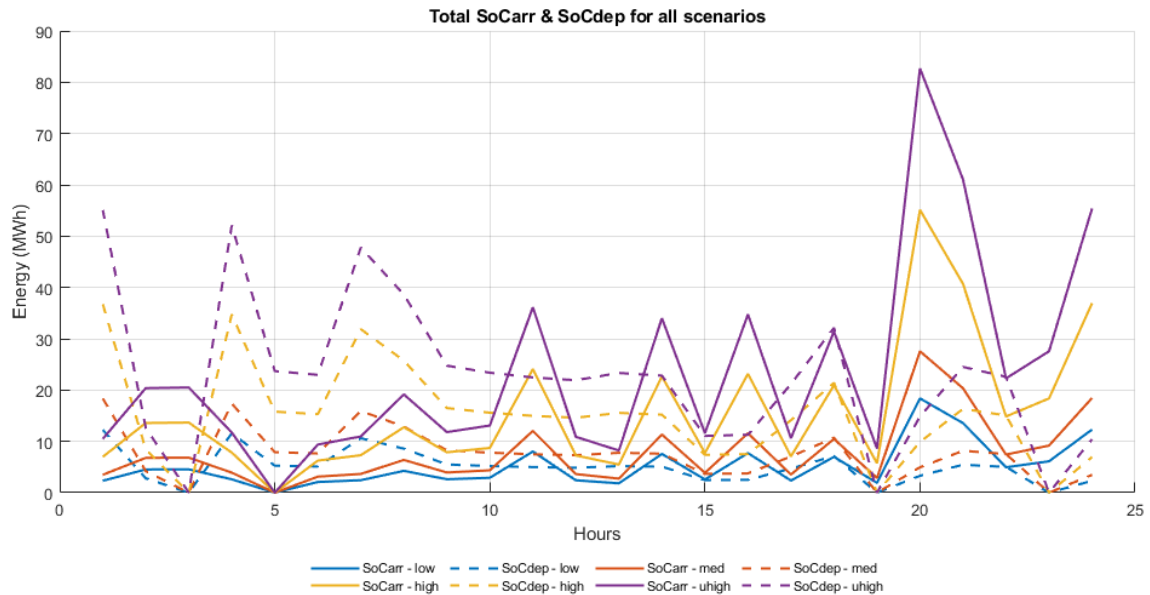
Η ενεργειακή συμπεριφορά των οχημάτων κατά την άφιξη και την αναχώρηση από τους σταθμούς φόρτισης διαφέρει σημαντικά μεταξύ των νομών της Κρήτης, αντανακλώντας τόσο τις τοπικές συνθήκες μετακίνησης, όσο και τη σύνθεση του στόλου. Στο γράφημα απεικονίζεται η χρονική κατανομή της ενέργειας που διαθέτουν τα οχήματα κατά την άφιξη (SoCarr) και της ενέργειας κατά την αναχώρηση (SoCdep), υπό διάφορα σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων.

Στο Ηράκλειο, καταγράφονται οι μεγαλύτερες τιμές τόσο στην ενέργεια άφιξης, όσο και στην ενέργεια αναχώρησης. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στον αυξημένο αριθμό μετακινήσεων, καθώς και στον μεγαλύτερο μέσο όρο χιλιομετρικής απόστασης. Οι διαφορές μεταξύ SoCarr και SoCdep, με το τελευταίο να εμφανίζεται συστηματικά υψηλότερο, υποδηλώνουν αυξημένες απαιτήσεις φόρτισης, ιδίως τις μεσημβρινές και βραδινές ώρες. Η συμπεριφορά αυτή ενισχύεται στα σενάρια υψηλής και υπερυψηλής διείσδυσης, όπου εμφανίζονται και οι ισχυρότερες αιχμές.

Στα Χανιά και στο Ρέθυμνο, οι τιμές είναι συγκριτικά χαμηλότερες, με καθαρές αιχμές σε συγκεκριμένες χρονικές ζώνες της ημέρας. Παρατηρείται μια ομοιομορφία στην απόσταση μεταξύ των καμπυλών SoCarr και SoCdep, γεγονός που υποδηλώνει σταθερό προφίλ ενεργειακών απαιτήσεων κατά τη διάρκεια της ημέρας. Στο Ρέθυμνο ιδιαίτερα, η συστηματική υπεροχή του SoCdep σε σχέση με το SoCarr καθιστά εμφανή την ανάγκη για επαναλαμβανόμενη φόρτιση εντός της ημέρας, στοιχείο που ενδέχεται να υποδεικνύει τη χρήση του οχήματος για επαγγελματικές ή διανομαρχιακές δραστηριότητες.



Σχήμα 5.10: Συνολική ενέργεια των ΗΟ κατά την άφιξη και αναχώρηση από τους σταθμούς φόρτισης ανά ώρα, ανά νομό.



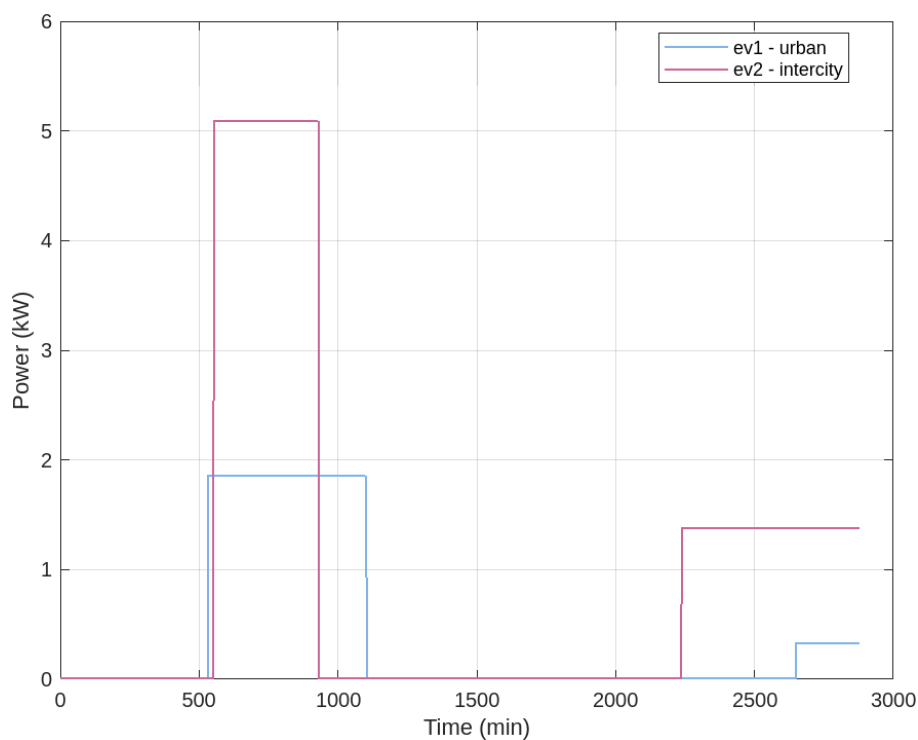
Σχήμα 5.11: Συνολική ενέργεια κατά την άφιξη και την αναχώρηση όλων των ΗΟ στους σταθμούς φόρτισης της Κρήτης.

Η Περιφερειακή Ενότητα Λασιθίου παρουσιάζει την πιο αραιή χρονική κατανομή ενέργειας, κυρίως λόγω της μικρότερης πληθυσμιακής πυκνότητας και του χαμηλότερου αριθμού ηλεκτρικών οχημάτων. Οι αιχμές είναι αποσπασματικές, ενώ η ενέργεια άφιξης εμφανίζεται

σε πολλές περιπτώσεις υψηλότερη από την απαιτούμενη ενέργεια αναχώρησης, γεγονός που μπορεί να συνδέεται με μικρές τοπικές διαδρομές και με επαρκή κατάσταση φόρτισης των οχημάτων πριν την είσοδό τους στους σταθμούς.

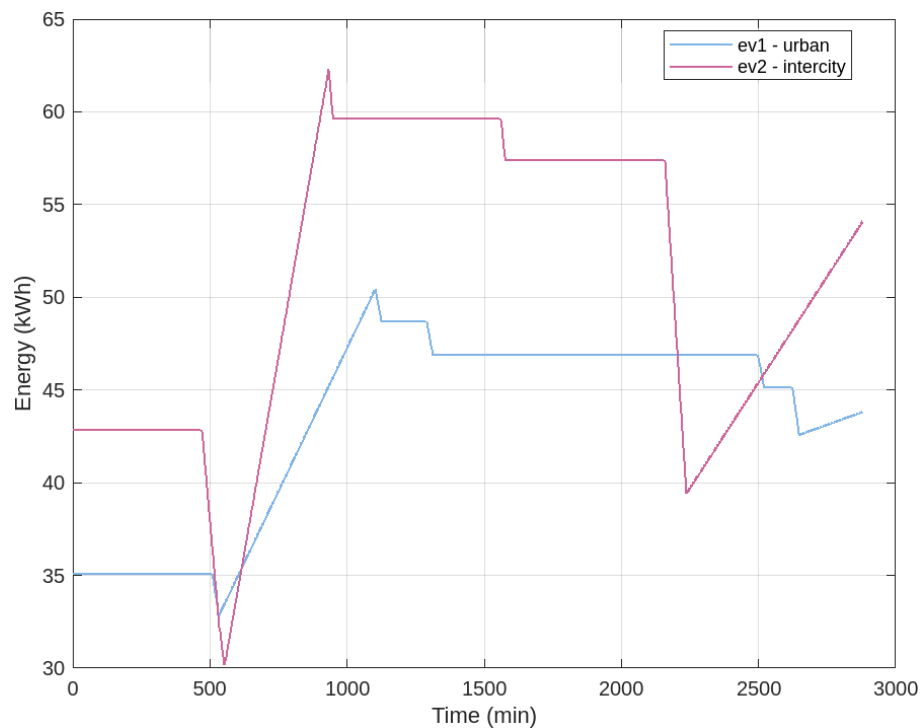
### 5.2.5 Εξέλιξη Ισχύος Φόρτισης και Ενέργειας Οχήματος σε Χρονική Βάση

Η ανάλυση της ισχύος φόρτισης ενός μεμονωμένου ηλεκτρικού οχήματος επιτρέπει την παρακολούθηση της χρονικής στιγμής και της διάρκειας των περιόδων επαναφόρτισης. Η ισχύς εμφανίζεται μηδενική κατά τις φάσεις ακινησίας ή μετακίνησης, ενώ παρουσιάζει απότομη άνοδο και σταθερή παραμονή σε συγκεκριμένα επίπεδα κατά τη διάρκεια σύνδεσης με τον σταθμό φόρτισης.



Σχήμα 5.12: Προφίλ φόρτισης δύο τυχαίων ΗΟ για αστικά/υπεραστικά δρομολόγια.

Παράλληλα, η ενέργεια του οχήματος (σε kWh) ακολουθεί την παρακάτω συμπεριφορά: αυξάνεται γραμμικά όταν το όχημα φορτίζεται και μειώνεται κατά την πραγματοποίηση διαδρομών, αποτυπώνοντας την κατανάλωση ενέργειας.



Σχήμα 5.13: Ενέργεια δύο τυχαίων ΗΟ για αστικά/υπεραστικά δρομολόγια.

Η συγκεκριμένη αναπαράσταση παρέχει σημαντική πληροφόρηση για τη διαχείριση του ενεργειακού προφίλ κάθε οχήματος και για τον προσδιορισμό της καταλληλότητας του χρονοπρογραμματισμού φόρτισης σε σχέση με τις ανάγκες μετακίνησης.

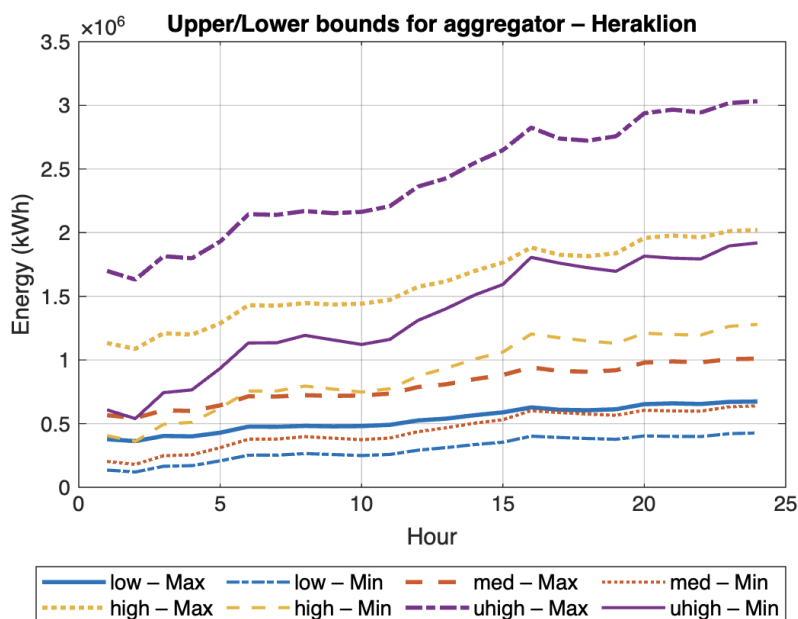
Η σύγκριση μεταξύ αστικών και υπεραστικών διαδρομών αναδεικνύει διακριτές διαφοροποιήσεις στην κατανάλωση ενέργειας και στον τρόπο με τον οποίο εξελίσσεται η κατάσταση φόρτισης του οχήματος.

Στις αστικές μετακινήσεις, τα οχήματα διανύουν μικρότερες αποστάσεις με συχνές στάσεις, γεγονός που συνεπάγεται πιο ήπια κατανάλωση ενέργειας. Η μείωση της ενέργειας εμφανίζεται με μικρότερα βήματα και συνοδεύεται συχνά από επαναλαμβανόμενες περιόδους φόρτισης εντός της ίδιας ημέρας.

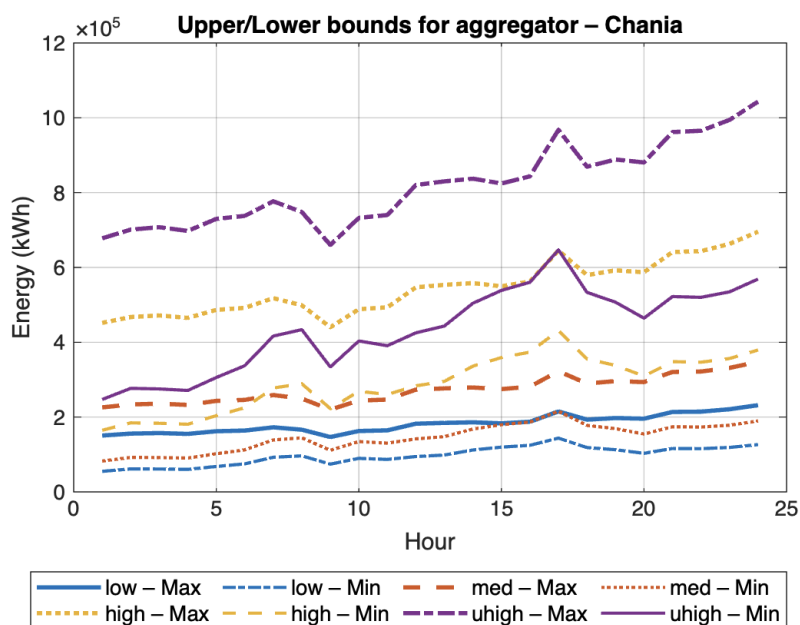
Αντιθέτως, στις υπεραστικές διαδρομές, τα οχήματα πραγματοποιούν μεγαλύτερες μετακινήσεις, γεγονός που οδηγεί σε σημαντικότερες πτώσεις της ενεργειακής στάθμης σε συντομότερο χρονικό διάστημα. Η φόρτιση, στην περίπτωση αυτή, είναι εντονότερη αντανακλώντας την ανάγκη πλήρους αναπλήρωσης ενέργειας για την επόμενη μεγάλη διαδρομή.

### 5.2.6 Όρια Ενέργειας Ισοδύναμων Μπαταριών ανά Νομό

Στα γραφήματα παρουσιάζονται τα χρονικά εξελισσόμενα άνω και κάτω όρια της αποθηκευμένης ενέργειας για κάθε ισοδύναμη μπαταρία, ανά νομό. Οι καμπύλες αυτές προκύπτουν από τη συναθροιστική συνεισφορά όλων των συνδεδεμένων οχημάτων σε έναν σταθμό φόρτισης, υπολογιζόμενες δυναμικά σε κάθε χρονική στιγμή.

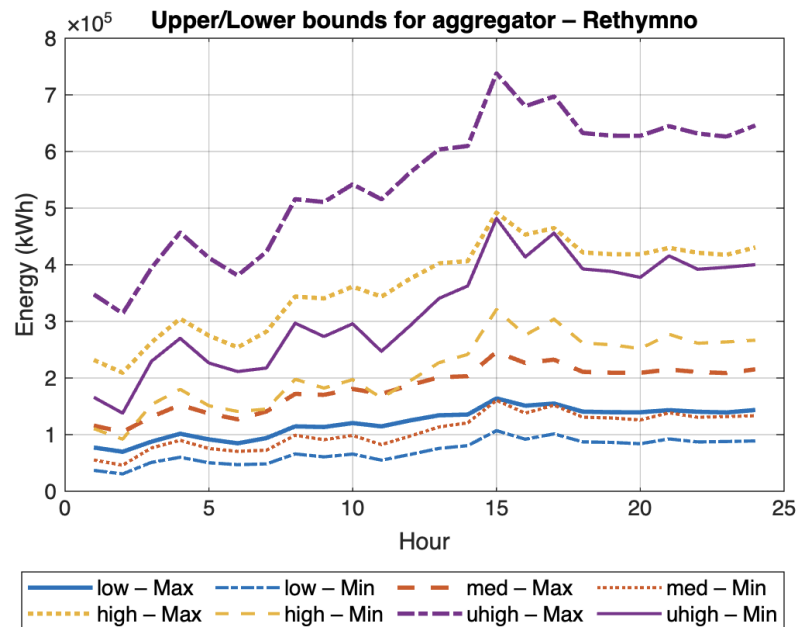


Σχήμα 5.14: Όρια ενέργειας aggregator για την πόλη Ηράκλειο ανά σενάριο.

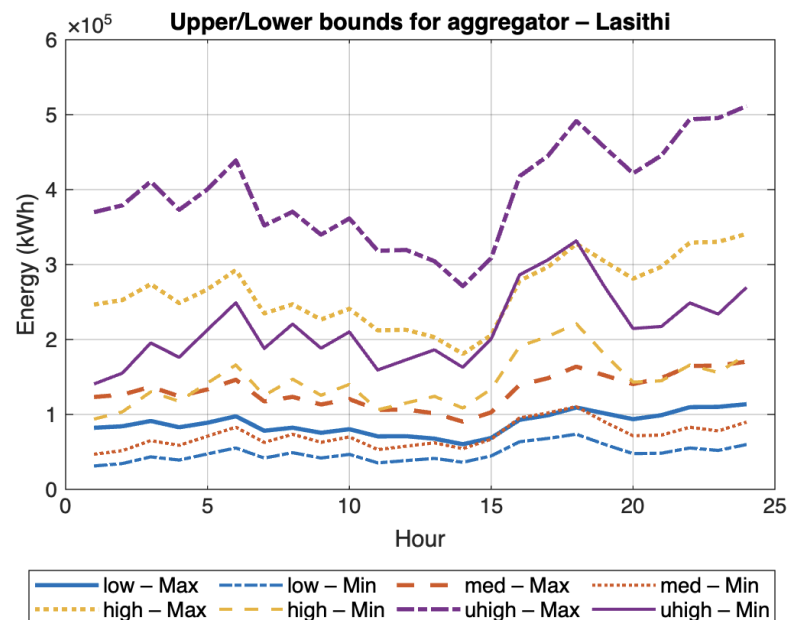


Σχήμα 5.15: Όρια ενέργειας aggregator για την πόλη Χανιά ανά σενάριο.

Τα άνω όρια εκφράζουν τη μέγιστη δυνατή ενέργεια που μπορεί να διατηρηθεί στον σταθμό από τα συνδεδεμένα ΗΟ. Αντιστοίχως, τα κάτω όρια προσδιορίζουν την ελάχιστη δυνατή ενέργεια που πρέπει να είναι διαθέσιμη, ώστε να διασφαλίζεται η ενεργειακή κάλυψη των επερχόμενων δρομολογίων.



Σχήμα 5.16: Όρια ενέργειας aggregator για την πόλη Ρέθυμνο ανά σενάριο.



Σχήμα 5.17: Όρια ενέργειας aggregator για την πόλη Λασιθί ανά σενάριο.

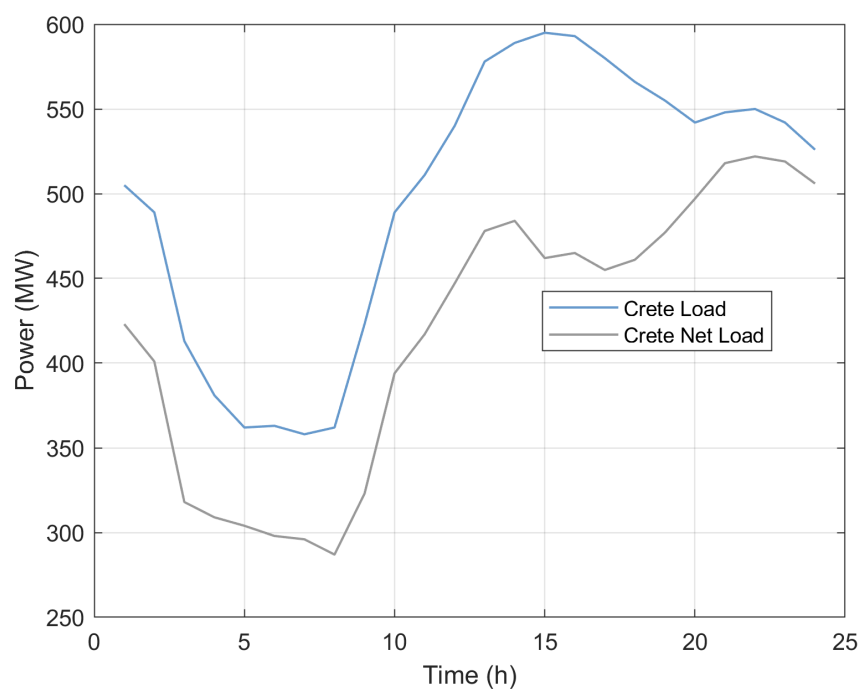
Όπως προκύπτει από τις καμπύλες, παρατηρούνται διακριτές διακυμάνσεις μεταξύ των νομών,

οι οποίες οφείλονται τόσο στη διαφορετική πυκνότητα στόλου ΗΟ, όσο και στην ιδιαίτερη κατανομή των χρόνων άφιξης και αναχώρησης. Η ημερήσια διακύμανση της ενέργειας είναι εμφανής, με τα όρια να μεταβάλλονται δυναμικά ανάλογα με τον αριθμό και την κατάσταση των οχημάτων που συνδέονται και αποσυνδέονται. Ενδεικτικά, παρατηρείται διεύρυνση της ενεργειακής ζώνης τις ώρες αιχμής, όταν δηλαδή η διαθεσιμότητα στόλου είναι αυξημένη, προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία στη διαχείριση της ενέργειας.

Η χρήση ισοδύναμων μπαταριών απλοποιεί τη μελέτη της συμπεριφοράς του στόλου και επιτρέπει τον άμεσο προσδιορισμό της δυνητικής ικανότητας αποθήκευσης ή απορρόφησης ενέργειας από το δίκτυο. Η παρουσία μεταβλητής δυναμικής ενέργειας ενισχύει τη ρεαλιστικότητα του μοντέλου, καθώς ενσωματώνει την επίδραση των αφίξεων και αναχωρήσεων οχημάτων στην εξελισσόμενη κατάσταση ενέργειας.

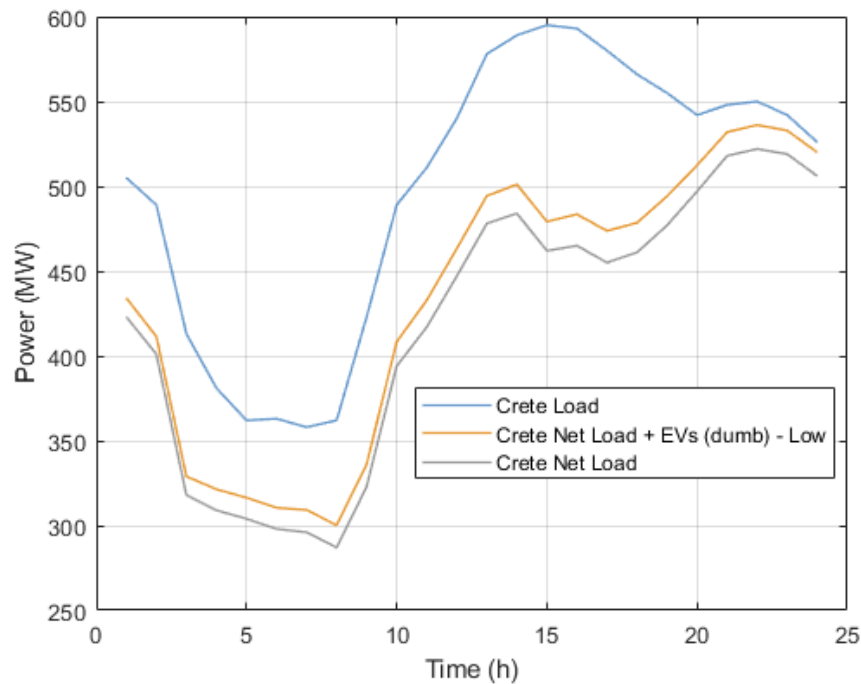
### 5.2.7 Επίδραση στο Φορτίο (dumb charging)

Στα γραφήματα παρουσιάζεται η εξέλιξη του φορτίου ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας ανά σενάριο, καθώς και η μορφή του καθαρού φορτίου (net load), με και χωρίς την επίδραση των ΗΟ. Η σύγκριση αυτών των μεγεθών επιτρέπει την αποτίμηση της επίδρασης της ηλεκτροκίνησης στην καμπύλη ζήτησης και κατά συνέπεια στις απαιτήσεις εξισορρόπησης του ηλεκτρικού δικτύου.



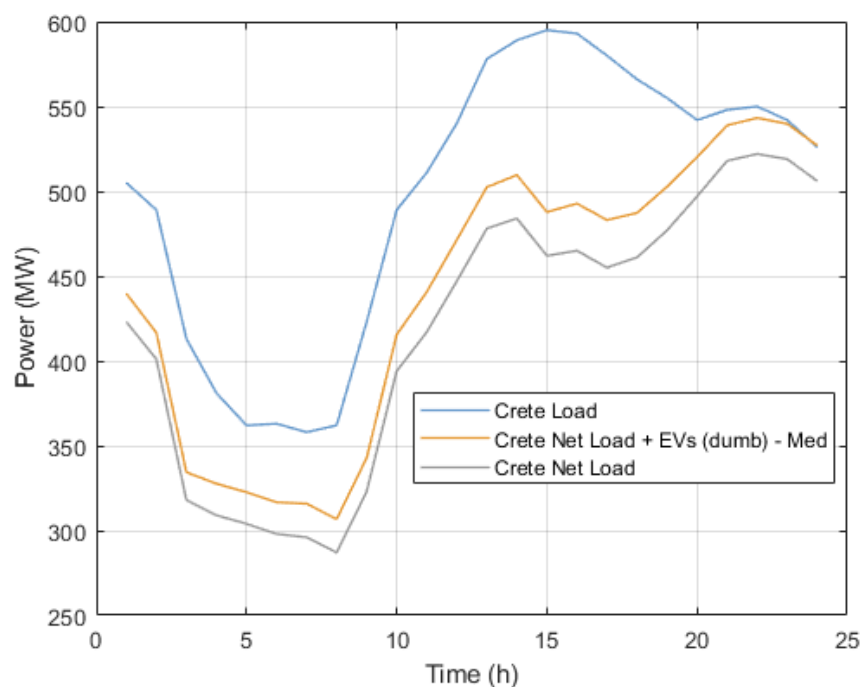
Σχήμα 5.18: Συνολικό φορτίο χωρίς ΗΟ



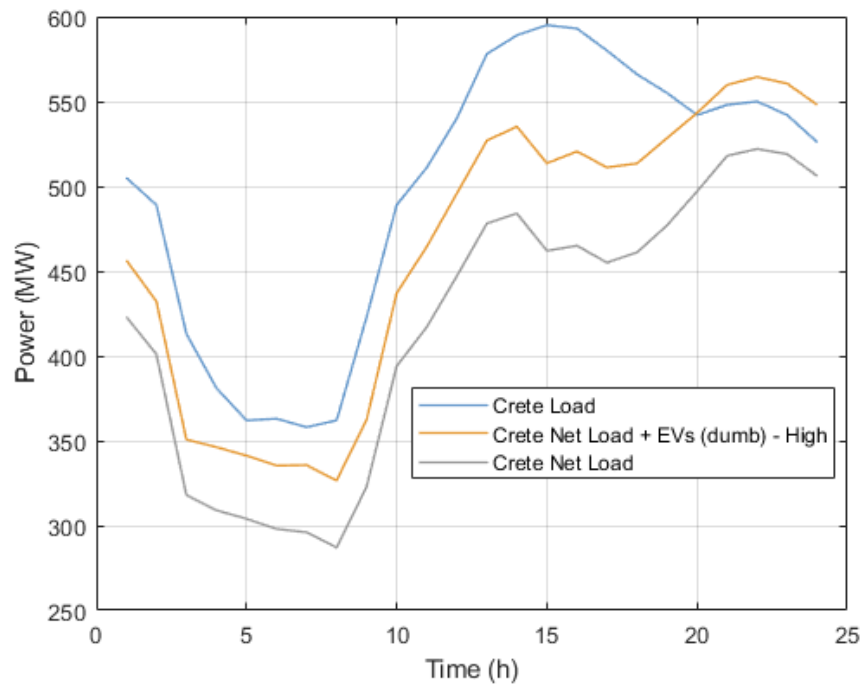


Σχήμα 5.19: Συνολικό φορτίο με χαμηλή διείσδυση ΗΟ (dumb charging).

Το καθαρό φορτίο, προκύπτει ως η διαφορά του βασικού φορτίου με την παραγόμενη ισχύ από ΑΠΕ. Η ενσωμάτωση των ΑΠΕ οδηγεί σε αισθητή μείωση του φορτίου τις μεσημβρινές ώρες, κατά τις οποίες η φωτοβολταϊκή παραγωγή είναι υψηλή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση μίας βαθιάς κοιλάδας τις ώρες υψηλής παραγωγής και απότομη άνοδο το απόγευμα.

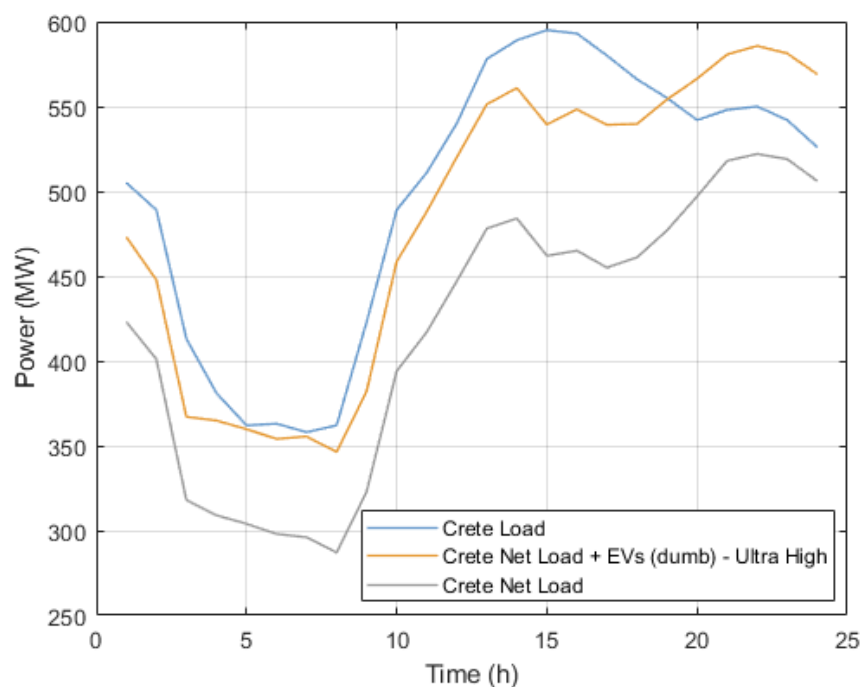


Σχήμα 5.20: Συνολικό φορτίο με μέση διείσδυση ΗΟ (dumb charging).



Σχήμα 5.21: Συνολικό φορτίο με υψηλή διείσδυση ΗΟ (dumb charging).

Η ενσωμάτωση των ΗΟ μεταβάλλει περαιτέρω το καθαρό φορτίο, με την επίδραση να εξαρτάται από τη στρατηγική φόρτισης. Στα σενάρια που εφαρμόζεται "dumb charging", παρατηρείται επιπλέον αύξηση του φορτίου ιδίως τις βραδινές ώρες, δηλαδή ακριβώς κατά την περίοδο που το καθαρό φορτίο ανεβαίνει απότομα, επιτείνοντας τις ανάγκες για ενέργεια.



Σχήμα 5.22: Συνολικό φορτίο με πολύ υψηλή διείσδυση ΗΟ (dumb charging).

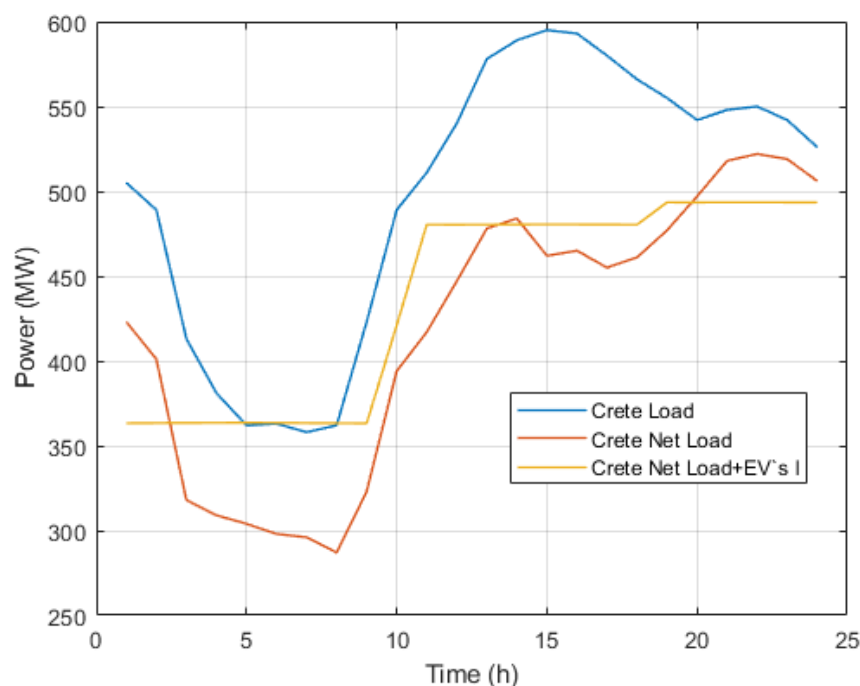
Δεδομένου ότι, η μη ελεγχόμενη φόρτιση συνεπάγεται απορρόφηση σταθερής ισχύος από το δίκτυο καθ'όλη τη διάρκεια της φόρτισης συνάγεται το συμπέρασμα ότι η αιχμή ζήτησης του συστήματος της Κρήτης συμπίπτει με την αιχμή της ζήτησης των ΗΟ. Το παραπάνω έχει ως αποτέλεσμα να αυξάνεται η ζήτηση ισχύος τη δεδομένη χρονική στιγμή.

### 5.3 Αποτελέσματα Συνάρτησης Fmincon.

#### 5.3.1 Επίδραση στο φορτίο (V2G)

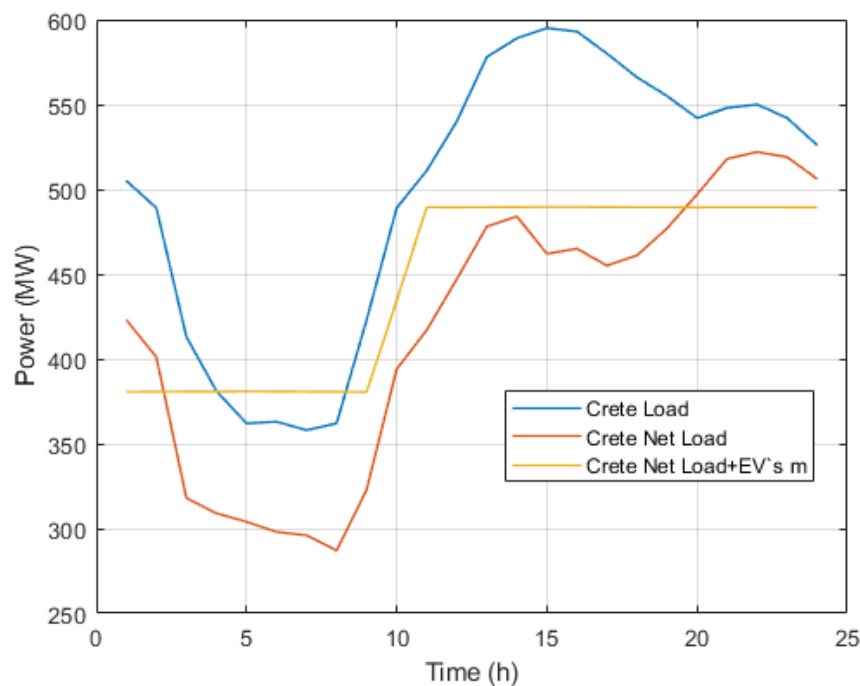
Η εικόνα αποτυπώνει την επίδραση της (V2G) λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων στο ενεργειακό προφίλ της Κρήτης υπό τέσσερα σενάρια διείσδυσης: Low, Med, High και Ultra High. Η μπλε γραμμή δείχνει το αρχικό φορτίο του νησιού (χωρίς ΑΠΕ ή ΗΟ), η κόκκινη γραμμή το καθαρό φορτίο μετά την αφαίρεση της παραγωγής ΑΠΕ, και η κίτρινη καμπύλη το νέο καθαρό φορτίο με την επίδραση των ηλεκτρικών οχημάτων μέσω V2G.

Στο σενάριο Low, η επίδραση των ηλεκτρικών οχημάτων είναι περιορισμένη λόγω περιορισμένου αριθμού οχημάτων στο στόλο. Η καμπύλη Net Load + EVs ακολουθεί την κόκκινη, με ανύψωση μετά τις 10:00, ένδειξη πως τα οχήματα κυρίως φορτίζουν όταν υπάρχει περίσσεια παραγωγής από ΑΠΕ. Το σχήμα παραμένει ωστόσο δυναμικά αντίστοιχο με το Net Load.



Σχήμα 5.23: Φορτίο συστήματος για το σενάριο Low-V2G.

Στο σενάριο Medium, η συμβολή των ηλεκτρικών οχημάτων γίνεται περισσότερο ουσιαστική. Η κίτρινη καμπύλη δείχνει ξεκάθαρη παρέμβαση στις ώρες μεταξύ 10:00 και 23:00, όπου το φορτίο σταθεροποιείται σε ανώτερα επίπεδα σε σχέση με το Net Load, αλλά με εμφανή εξομάλυνση σε σχέση με το αρχικό προφίλ του συνολικού φορτίου. Η διαφορά μεταξύ του καθαρού φορτίου και της νέας κατάστασης φανερώνει πως τα ΗΟ λειτουργούν υποστηρικτικά προς το δίκτυο, ενισχύοντας τη διαθεσιμότητα ενέργειας κατά τις μεσημεριανές ώρες, όταν η παραγωγή ΑΠΕ είναι υψηλή.

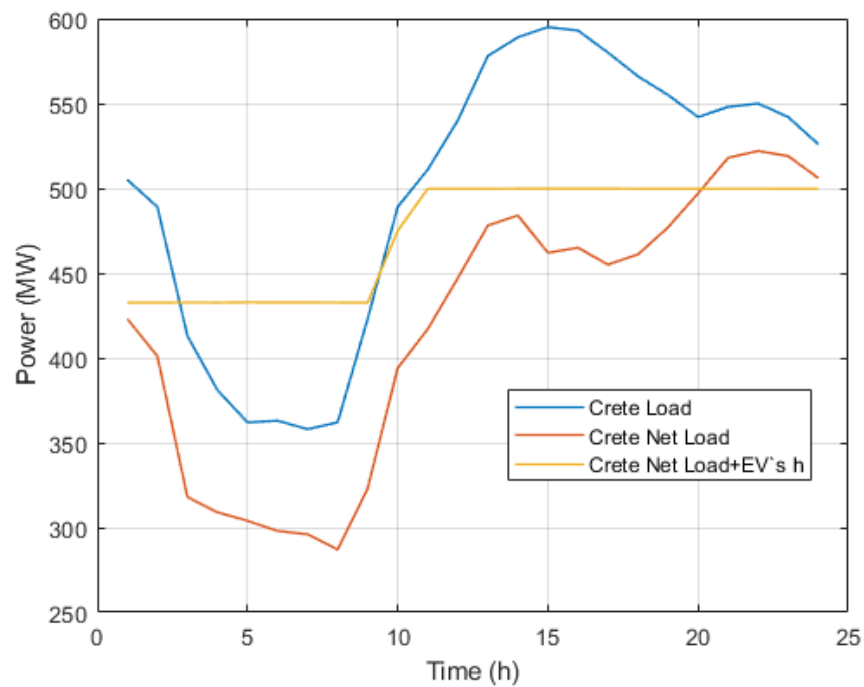


Σχήμα 5.24: Φορτίο συστήματος για το σενάριο Medium-V2G.

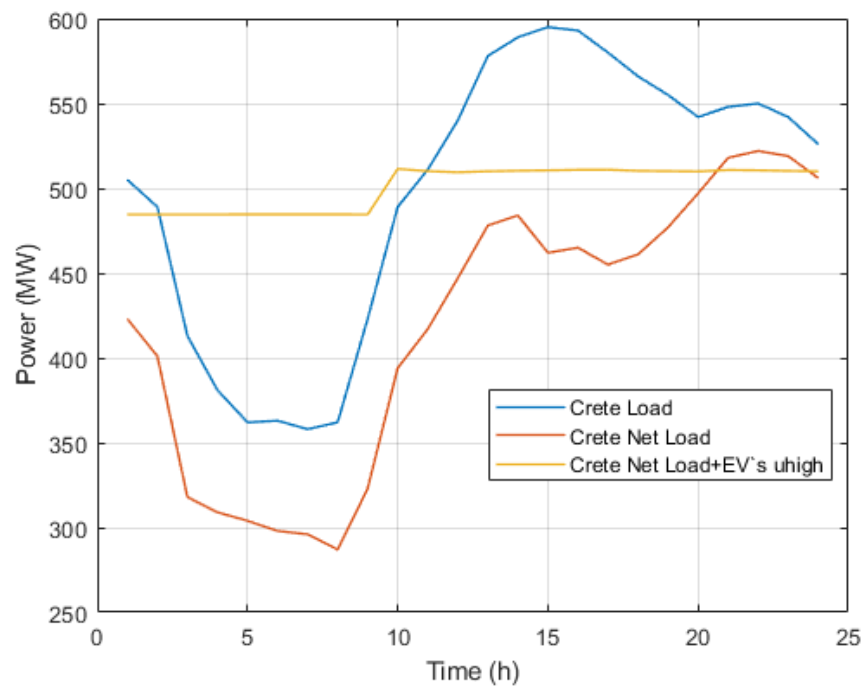
Στο σενάριο High, η ενεργειακή επίδραση των ηλεκτρικών οχημάτων αποκτά κρίσιμη σημασία. Η κίτρινη καμπύλη σταθεροποιείται σε ακόμα υψηλότερα επίπεδα, και ουσιαστικά δημιουργεί ένα νέο προφίλ ζήτησης, πιο ομαλό, με μειωμένες διακυμάνσεις μεταξύ νυχτερινών και απογευματινών ωρών. Παρότι η συνολική απαίτηση αυξάνεται, η λειτουργία V2G επιτρέπει στα οχήματα να επιστρέφουν ενέργεια στο δίκτυο κατά τις ώρες αιχμής, περιορίζοντας τη συχνότητα και το ύψος των αιχμών. Αυτή η σταθεροποίηση συμβάλλει στην καλύτερη αξιοποίηση των θερμικών μονάδων και στην ευκολότερη ενσωμάτωση των ΑΠΕ.

Στο σενάριο Ultra High, η συμβολή των ηλεκτρικών οχημάτων είναι πλέον καταλυτική. Η καμπύλη Net Load + EVs ακολουθεί μια σχεδόν επίπεδη γραμμή μεταξύ 10:00 και 23:00, αποκαλύπτοντας τη δυνατότητα των οχημάτων να εξομαλύνουν σχεδόν πλήρως τις διακυμάν-

σεις του συστήματος. Η επίδραση των οχημάτων υπερβαίνει την απλή μετατόπιση φορτίου και λειτουργεί ουσιαστικά ως ενεργός αποθηκευτικός μηχανισμός.



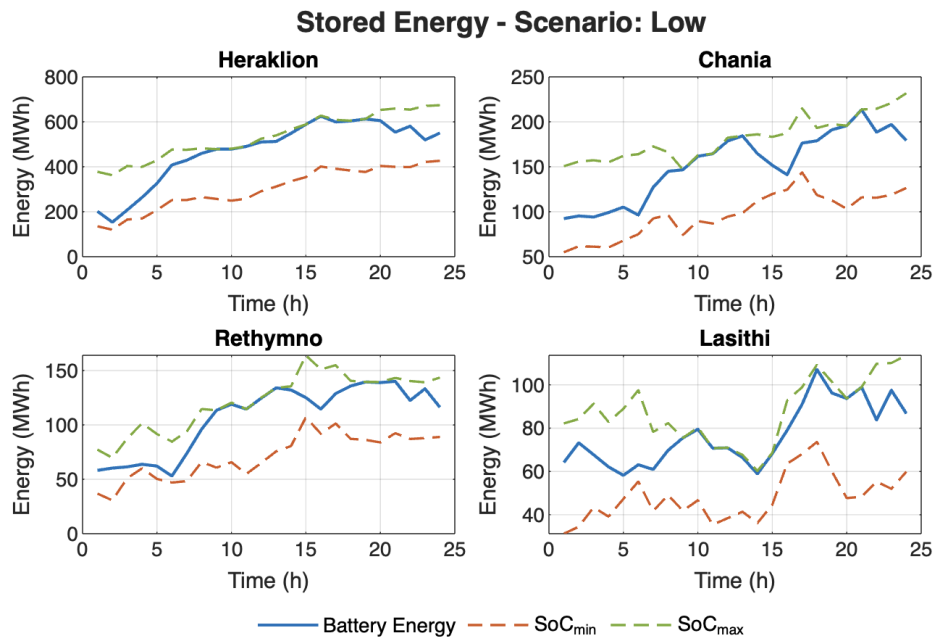
Σχήμα 5.25: Φορτίο συστήματος για το σενάριο High-V2G.



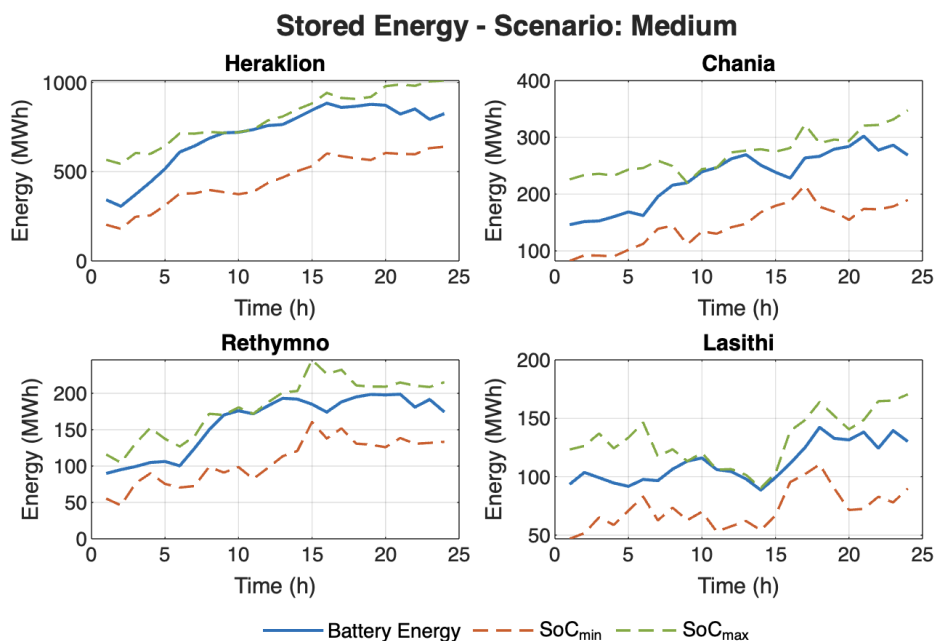
Σχήμα 5.26: Φορτίο συστήματος για το σενάριο Ultra High-V2G.

### 5.3.2 Ενέργεια Αποθηκευμένη στους Aggregator

Η εικόνα απεικονίζει την αποθηκευμένη ενέργεια στις μπαταρίες των aggregator για το σενάριο χαμηλής διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων, λαμβάνοντας υπόψη τα όρια του State of Charge (SoC) ανά ώρα και ανά περιφερειακή ενότητα.



Σχήμα 5.27: Ενέργεια aggregator για το σενάριο Low.



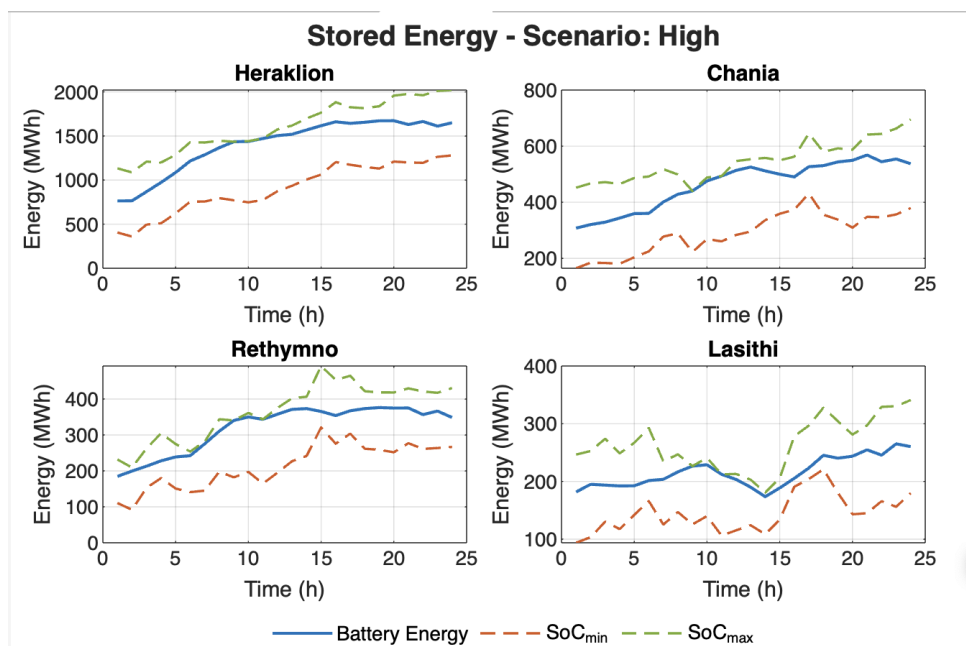
Σχήμα 5.28: Ενέργεια aggregator για το σενάριο Medium.

Στο Ηράκλειο, όπου καταγράφεται η μεγαλύτερη συγκέντρωση ηλεκτρικών οχημάτων, η

καμπύλη ενέργειας πλησιάζει σταθερά το ανώτατο όριο ( $SoC_{max}$ ), με κορύφωση νωρίς το απόγευμα. Αυτό φανερώνει έντονη διαδικασία φόρτισης κατά τις πρωινές ώρες, πιθανότατα λόγω της ταυτόχρονης παρουσίας οχημάτων σε χώρους στάθμευσης και της διαθεσιμότητας φθηνής ενέργειας ή παραγωγής από ΑΠΕ. Η αποφόρτιση προς το τέλος της ημέρας είναι ήπια, αφήνοντας επαρκές απόθεμα ενέργειας.

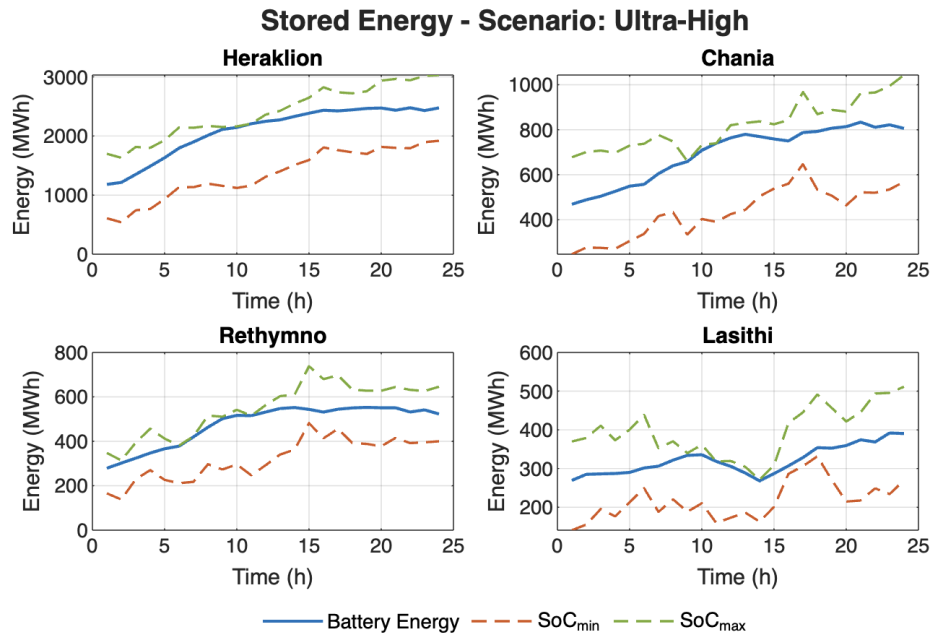
Στα Χανιά και το Ρέθυμνο παρατηρείται επίσης σταδιακή αύξηση της αποθηκευμένης ενέργειας με περιοδικές διακυμάνσεις, που όμως παραμένουν εντός των επιτρεπτών ορίων. Η καμπύλη του  $SoC$  πλησιάζει αρκετά το μέγιστο σε μεσημεριανές ώρες, υποδεικνύοντας ικανοποιητική αξιοποίηση της δυναμικότητας του στόλου για αποθήκευση.

Στο Λασίθι, η εικόνα είναι πιο ασταθής, με την αποθηκευμένη ενέργεια να μειώνεται αισθητά μεταξύ 14:00 και 17:00, γεγονός που μπορεί να οφείλεται είτε σε αυξημένες ανάγκες εκφόρτισης (π.χ. για υποστήριξη του συστήματος), είτε σε περιορισμένη διαθεσιμότητα οχημάτων λόγω μετακινήσεων. Παρ' όλα αυτά, το απόθεμα επανακάμπτει σταδιακά έως το τέλος της ημέρας, παραμένοντας εντός ασφαλών επιπέδων.



Σχήμα 5.29: Ενέργεια aggregator για το σενάριο High.

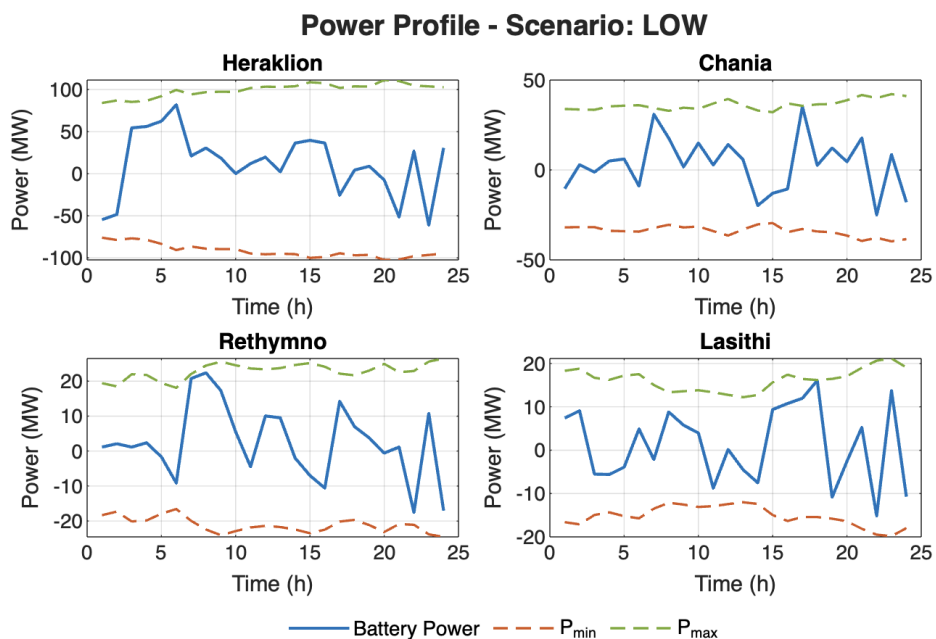
Συνολικά, οι aggregators επιτυγχάνουν μια ισορροπημένη διαχείριση της αποθηκευμένης ενέργειας, αξιοποιώντας τις περιόδους υψηλής παραγωγής ενέργειας για φόρτιση. Η λειτουργία παραμένει εντός των τεχνικών ορίων, αναδεικνύοντας τη δυνατότητα των ΗΟ να συμβάλλουν στη σταθερότητα και την αποδοτικότητα του ηλεκτρικού συστήματος.



Σχήμα 5.30: Ενέργεια aggregator για το σενάριο Ultra High.

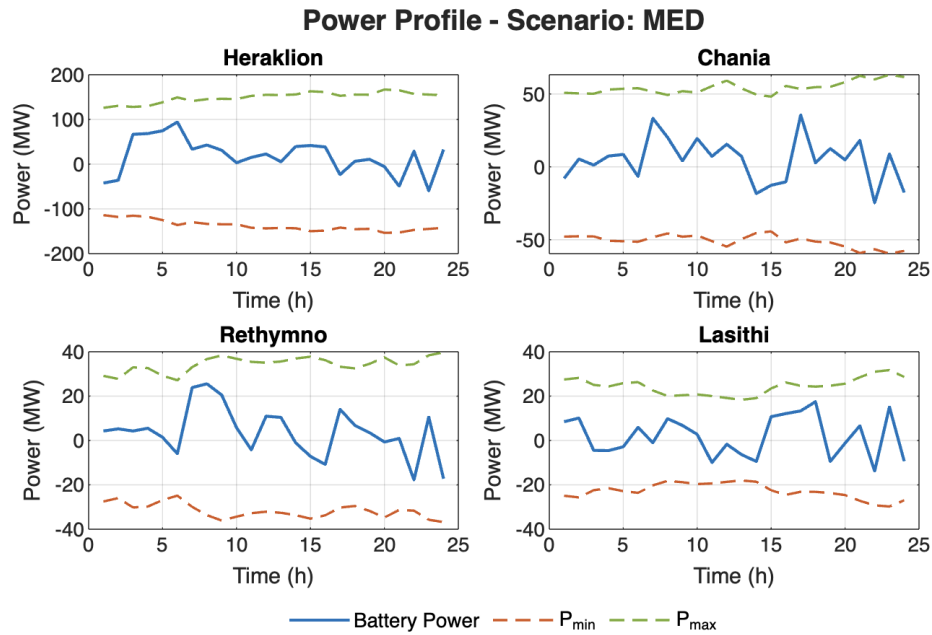
### 5.3.3 Άνω και Κάτω Όρια Ισχύος των Aggregator

Η εικόνα παρουσιάζει το προφίλ ισχύος των aggregator ανά γεωγραφική περιοχή (Ηράκλειο, Χανιά, Ρέθυμνο, Λασιθί) και ανά σενάριο διείσδυσης ΗΟ. Η μπλε συνεχής γραμμή απεικονίζει την καθαρή ισχύ της μπαταρίας (θετική: φόρτιση, αρνητική: εκφόρτιση), ενώ οι διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν στα επιτρεπτά όρια λειτουργίας κάθε aggregator ( $P_{max}$  και  $P_{min}$ ).



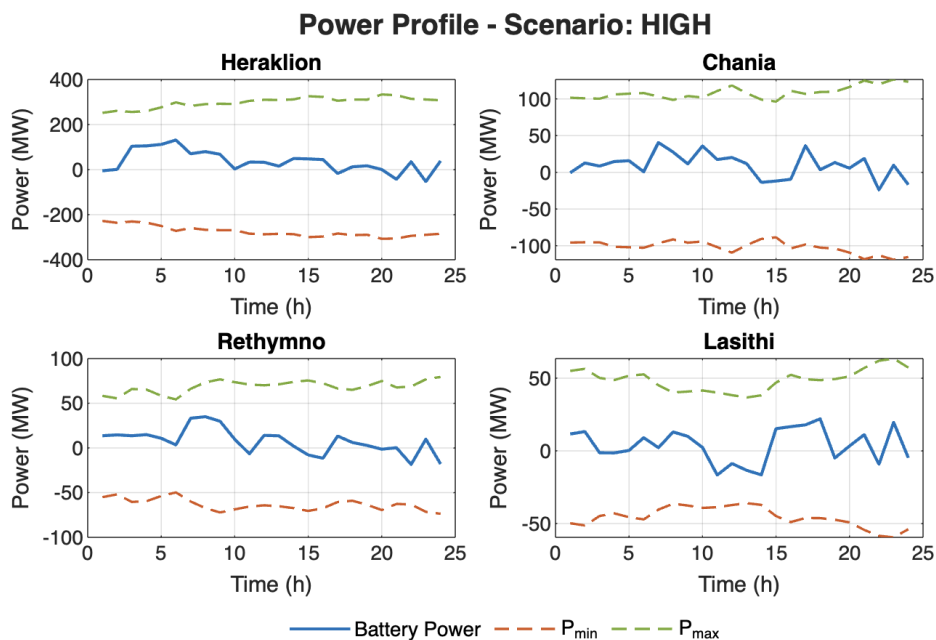
Σχήμα 5.31: Ισχύς aggregator για το σενάριο Low.



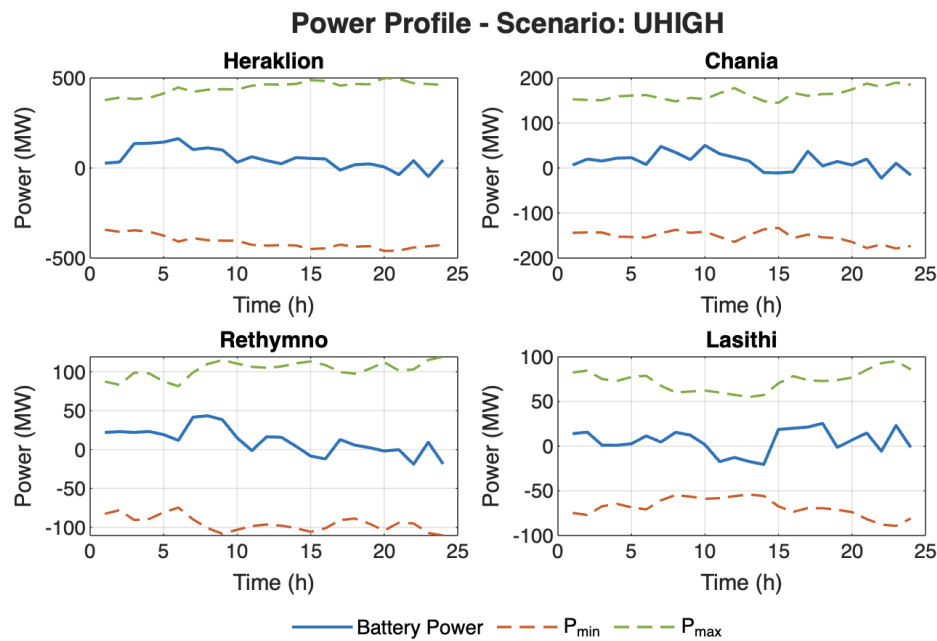


Σχήμα 5.32: Ισχύς aggregator για το σενάριο Medium.

Στο Ηράκλειο, η ισχύς μεταβάλλεται σημαντικά κατά τη διάρκεια της ημέρας, με σαφείς περιόδους εκφόρτισης (αρνητικές τιμές) που πιθανώς συνδέονται με τις ώρες αιχμής του φορτίου, και ενδιάμεσες φάσεις φόρτισης.



Σχήμα 5.33: Ισχύς aggregator για το σενάριο High.



Σχήμα 5.34: Ισχύς aggregator για το σενάριο Ultra High.

Στα Χανιά, η ισχύς της μπαταρίας κυμαίνεται κυρίως εντός μικρότερου εύρους, χωρίς ακραίες τιμές, γεγονός που μπορεί να οφείλεται σε περιορισμένο αριθμό οχημάτων ή μικρότερες ενεργειακές απαιτήσεις. Το ίδιο συμβαίνει και στο Ρέθυμνο, όπου η ισχύς εμφανίζει ήπιες διακυμάνσεις με περιορισμένα σημεία εκφόρτισης.

Στο Λασιθί, το προφίλ παρουσιάζει μεγαλύτερες μεταβολές, με εναλλαγές φόρτισης και εκφόρτισης καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας.

Η τήρηση των ορίων υποδεικνύει ότι το σύστημα λειτουργεί με ασφάλεια, ενώ η κατανομή της ισχύος ενισχύει την εικασία ότι η διαχείριση της ενέργειας των ΗΟ συντονίζεται κατάλληλα, με στόχο την εξομάλυνση των διακυμάνσεων ζήτησης και την υποστήριξη του τοπικού συστήματος.

#### 5.3.4 Τιμή Ενέργειας Ανά Σενάριο Διείσδυσης

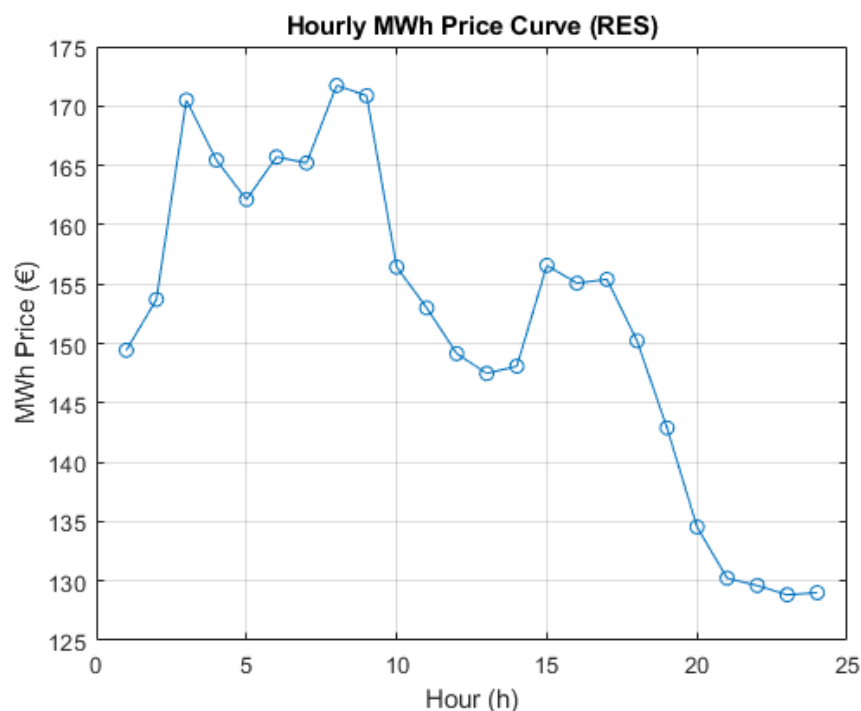
Η καμπύλη τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας, όπως προκύπτει από την παρουσία αποκλειστικά ΑΠΕ, παρουσιάζει διακυμάνσεις της ζήτησης σε συνδυασμό με προσφορά από ΑΠΕ. Κατά τις πρώτες νυχτερινές ώρες (01:00–02:00), η τιμή ενέργειας διαμορφώνεται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, γεγονός που ερμηνεύεται από τη δραστικά μειωμένη ζήτηση και την ταυτόχρονη παρουσία επαρκούς παραγωγής από αιολικά πάρκα, τα οποία μπορούν να λειτουργούν αδιάλειπτα ανεξαρτήτως ηλιακής ακτινοβολίας. Αντιθέτως, κατά τις ώρες 03:00–09:00 παρατηρείται

αύξηση της τιμής, η οποία συσχετίζεται με τη σταδιακή άνοδο της ζήτησης, λόγω της επανεκκίνησης της οικονομικής δραστηριότητας (βιομηχανίες, φωτισμός, πρωινή κατανάλωση νοικοκυριών), χωρίς όμως ακόμη επαρκή συμμετοχή των φωτοβολταϊκών σταθμών.

Επιπλέον, η μεσημβρινή σταθεροποίηση της τιμής σχετίζεται με την αυξημένη συμμετοχή των φωτοβολταϊκών στο ενεργειακό ισοζύγιο, ενώ η σταδιακή αποκλιμάκωση των τιμών μετά τις 20:00 αντανακλά τη μείωση της ζήτησης και την πιθανή διαθεσιμότητα αιολικής ισχύος.

Η ενσωμάτωση τεχνολογιών V2G στο ηλεκτρικό σύστημα αναμένεται να επιφέρει σημαντική εξομάλυνση της καμπύλης τιμών, κυρίως κατά τις ώρες αιχμής. Τα ηλεκτρικά οχήματα, λειτουργώντας ως κινητές μονάδες αποθήκευσης ενέργειας, δύνανται να διοχετεύσουν ενέργεια στο δίκτυο κατά τις πρωινές και βραδινές ώρες υψηλής ζήτησης (π.χ. 07:00–09:00 και 18:00–21:00), συμβάλλοντας στην αποτροπή έντονων αυξήσεων τιμών. Αντίστροφα, κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης και τιμών (01:00–05:00), τα οχήματα δύνανται να φορτίζονται, αξιοποιώντας τη φθηνή ενέργεια.

Η εφαρμογή V2G, υπό κατάλληλο σχεδιασμό και ρυθμιστικό πλαίσιο, μπορεί να συνεισφέρει ουσιαστικά στην οικονομική αποδοτικότητα του συστήματος, στη βελτιστοποίηση της χρήσης των ΑΠΕ και στη μείωση της μεταβλητότητας των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας.

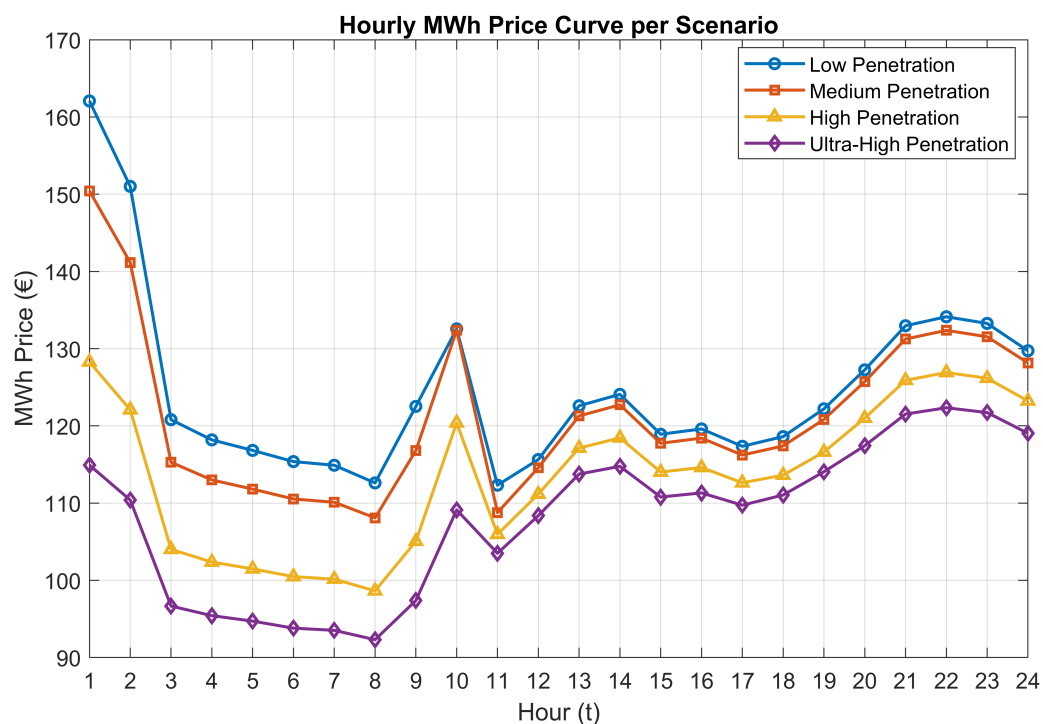


Σχήμα 5.35: Τιμή MWh με ΑΠΕ.

Το γράφημα απεικονίζει την ωριαία διακύμανση της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας (€/MWh) για τέσσερα σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων με δυνατότητα V2G: Low, Medium, High και Ultra-High Penetration. Η συμπεριφορά των καμπυλών φανερώνει τη στενή αλληλεξάρτηση μεταξύ του βαθμού διείσδυσης ΗΟ και της διαμόρφωσης των τιμών στην αγορά ενέργειας.

Στο σενάριο Low Penetration, η τιμή της MWh παρουσιάζει υψηλή τιμή κατά τις πρώτες πρωινές ώρες, με κορυφή άνω των 160€/MWh. Το γεγονός αυτό υποδηλώνει περιορισμένες δυνατότητες απόκρισης στη ζήτηση και αυξημένη εξάρτηση από ακριβές μονάδες παραγωγής ή υψηλό φορτίο βάσης, χωρίς ουσιαστική υποστήριξη από τα ΗΟ. Καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, οι τιμές παραμένουν γενικά αυξημένες, με δευτερεύουσες αιχμές μεταξύ 12:00 και 21:00.

Καθώς η διείσδυση αυξάνεται στο Medium και High, παρατηρείται σταδιακή αποκλιμάκωση των τιμών, ειδικά στις πρωινές ώρες. Η λειτουργία των ΗΟ με V2G προσφέρει επιπλέον διαθέσιμη ισχύ στο δίκτυο μέσω ελεγχόμενης εκφόρτισης, μειώνοντας την ανάγκη για ενεργοβόρες και ακριβές συμβατικές μονάδες. Επίσης, οι καμπύλες αποκτούν πιο ομαλή μορφή, ένδειξη ότι το σύστημα αποκτά αυξημένη ευελιξία και σταθερότητα στην κάλυψη των μεταβολών της ζήτησης.



Σχήμα 5.36: Τιμή MWh ανά σενάριο.

Το σενάριο Ultra-High Penetration παρουσιάζει σαφώς τις χαμηλότερες τιμές σε όλες τις ώρες της ημέρας, με τη MWh να διατηρείται κοντά ή και κάτω από τα 100€/MWh στις πρώτες 10 ώρες, και με σημαντικά χαμηλότερες τιμές ακόμα και κατά τις ώρες αιχμής (17:00–22:00). Η εξαιρετικά διευρυμένη χρήση V2G σε αυτό το σενάριο υποδεικνύει ότι τα ηλεκτρικά οχήματα λειτουργούν όχι απλώς ως φορτίο αλλά ως καθαρός ενεργειακός πόρος, συμβάλλοντας αποφασιστικά στη μείωση του κόστους ηλεκτροπαραγωγής.

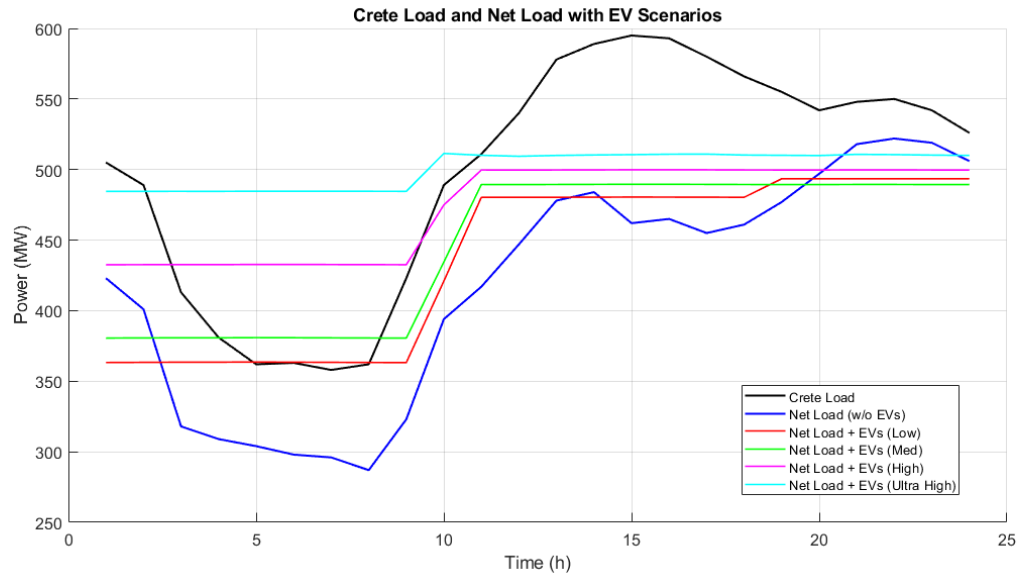
Σενάριο	ΑΠΕ	Low	Medium	High	Ultra High
Τιμή	151.72	124.02	120.51	112.70	107.22

Πίνακας 5.1: Μέση τιμή MWh ανά σενάριο.

Συνολικά, η ανάλυση των καμπυλών καταδεικνύει ότι η ενσωμάτωση ηλεκτρικών οχημάτων με δυνατότητα V2G αποτελεί κρίσιμο εργαλείο για εξισσορόπηση της τιμής της ενέργειας. Η προοδευτική μείωση των ωριαίων τιμών ενέργειας σε συνάρτηση με τη διείσδυση των ΗΟ επιβεβαιώνει ότι η τεχνολογία αυτή έχει τη δυναμική να μετασχηματίσει τις τοπικές αγορές ενέργειας, καθιστώντας τις πιο ευέλικτες, αποδοτικές και οικονομικά βιώσιμες.

### 5.3.5 Σύγκριση Σεναρίων

Συνολικά, παρατηρείται πως καθώς αυξάνεται η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων, και εφόσον αυτά υποστηρίζουν V2G δυνατότητες, η συνολική καμπύλη ζήτησης μετασχηματίζεται σταδιακά σε μια περισσότερο επίπεδη μορφή. Η ύπαρξη της αμφίδρομης ροής ενέργειας προσδίδει στο σύστημα ευελιξία και σταθερότητα. Με αύξηση της διείσδυσης, όχι μόνο δεν επιδεινώνεται το προφίλ ζήτησης, αλλά αντίθετα εξομαλύνεται σημαντικά, διευκολύνοντας την περαιτέρω ενσωμάτωση ΑΠΕ, την αποδοτικότερη χρήση συμβατικών μονάδων και τη συνολική αποκατάσταση της ισορροπίας στο δίκτυο.



Σχήμα 5.37: Ισχύς συστήματος ανά σενάριο.

Σενάριο Μετάβασης	Ποσοστιαία Μείωση Τιμής
Μόνο ΑΠΕ → Low	18.25%
Low → Medium	2.83%
Medium → High	6.47%
High → Ultra High	4.86%

Πίνακας 5.2: Ποσοστιαία μείωση μέσης τιμής MWh ανά σενάριο μετάβασης.

Ο παραπάνω πίνακας παρουσιάζει την ποσοστιαία μείωση της μέσης τιμής της μεγαβατώρας (MWh) κατά τη μετάβαση από ένα σενάριο διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων σε ένα επόμενο με υψηλότερη συμμετοχή. Η μετάβαση από το σενάριο Low στο Medium οδηγεί σε μείωση της τιμής κατά 2.83%, γεγονός που υποδηλώνει ότι ακόμη και μια μέτρια αύξηση των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να προσφέρει αξιοσημείωτη ευελιξία στο σύστημα και να περιορίσει την ανάγκη για πιο δαπανηρές μορφές παραγωγής.

Η επόμενη μετάβαση, από Medium σε High, επιφέρει μείωση 6.47%, σχεδόν υπερδιπλάσια της προηγούμενης, κάτι που δείχνει πως στο σενάριο υψηλής διείσδυσης τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν φτάσει σε κρίσιμο μέγεθος ώστε να προσφέρουν ουσιαστική συμβολή στην εξισορρόπηση της προσφοράς και ζήτησης ενέργειας.

Στη συνέχεια, η μετάβαση από High σε Ultra High συνεχίζει τη φθίνουσα πορεία της τιμής

κατά 4.86%, αλλά με ελαφρώς μικρότερο ρυθμό, κάτι που ενδέχεται να οφείλεται στην προσέγγιση ενός σημείου κορεσμού, όπου η περαιτέρω αύξηση των οχημάτων αποφέρει μειωμένα περιθώρια κέρδους ως προς τη μείωση του κόστους.

Η συνολική διαφορά από το σενάριο Low στο Ultra High ανέρχεται σε 13.56%, επιβεβαιώνοντας την ισχυρή επίδραση που έχει η μαζική ενσωμάτωση ηλεκτρικών οχημάτων στη μείωση του κόστους ενέργειας. Συνολικά, ο πίνακας αναδεικνύει ότι η αύξηση της συμμετοχής των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να λειτουργήσει ως εργαλείο μείωσης των τιμών και βελτίωσης της αποδοτικότητας της αγοράς, αν και με φθίνουσα απόδοση σε πολύ υψηλά επίπεδα διείσδυσης.

## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

### 6.1 Συμπεράσματα και Ανατροφοδότηση Στοχοθεσίας

Τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας φανερώνουν ότι η μεγάλη διείσδυση ΗΟ, σε συνδυασμό με την ενσωμάτωση ΑΠΕ και την εφαρμογή της τεχνολογίας V2G, συμβάλλει σημαντικά στη μείωση του συνολικού κόστους ηλεκτρικής ενέργειας. Η δυνατότητα αμφίδρομης ροής ενέργειας μέσω της λειτουργίας V2G εξομαλύνει τις αιχμές ζήτησης, οδηγώντας σε πιο αποδοτική αξιοποίηση των ΑΠΕ και μείωση της ανάγκης για ακριβές μονάδες αιχμής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους λειτουργίας των γεννητριών, καθώς μειώνονται τόσο οι ώρες λειτουργίας, όσο και οι απαιτήσεις για γρήγορες εκκινήσεις και αποκρίσεις.

Παράλληλα, η αυξημένη συμμετοχή των ΑΠΕ συμβάλλει στη μείωση του κόστους καυσίμου, δεδομένου ότι περιορίζεται η εξάρτηση από συμβατικές θερμικές μονάδες υψηλού κόστους. Το συνολικό φορτίο παρουσιάζει διαφοροποιήσεις σε σχέση με το παραδοσιακό προφίλ ζήτησης, καθώς τα ηλεκτρικά οχήματα λειτουργούν όχι μόνο ως καταναλωτές, αλλά και ως μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Αυτή η δυναμική διαχείριση του φορτίου ενισχύει την αξιοπιστία του συστήματος και οδηγεί σε ένα πιο ευέλικτο και οικονομικά αποδοτικό ενεργειακό δίκτυο. Συμπερασματικά, μια μεγάλη διείσδυση ΗΟ μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ισορροπία προσφοράς και ζήτησης ενέργειας, δημιουργώντας την αναγκαιότητα για αναπροσαρμογή των υφιστάμενων υποδομών, αυξάνοντας παράλληλα την ανάγκη για έξυπνη διαχείριση φορτίου και προηγμένα συστήματα ελέγχου.

### 6.2 Επεκτάσεις

Στο πλαίσιο μελλοντικών επεκτάσεων, η παρούσα εργασία θα μπορούσε να εμπλουτιστεί με την ενσωμάτωση μη αστικών δρομολογίων, λαμβάνοντας υπόψη τις διαφοροποιημένες ανάγκες φόρτισης σε ημιαστικές και αγροτικές περιοχές, καθώς και την τουριστική δραστηριότητα που επηρεάζει σημαντικά τη ζήτηση στην Κρήτη. Επιπλέον, η ανάλυση θα μπορούσε να επεκταθεί με τη μελέτη της διασύνδεσης της Κρήτης με το ηπειρωτικό σύστημα, αξιολογώντας τον αντίκτυπο στην ευελιξία και την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού. Παράλληλα, η διερεύνηση προηγμένων στρατηγικών ευφυούς διαχείρισης φόρτισης και αλληλεπίδρασης με το δίκτυο, σε συνδυασμό με σενάρια υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ και σταθερών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, θα μπορούσε να προσφέρει περαιτέρω κατανόηση της



δυναμικής του συστήματος. Τέλος, η εκπόνηση ανάλυσης κόστους-οφέλους για διαφορετικούς ενδιαφερόμενους φορείς (καταναλωτές, παρόχους ενέργειας, διαχειριστές δικτύου) θα συμβάλλει στην αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας και της αποδοτικότητας των προτεινόμενων λύσεων.

## REFERENCES

- [1] Ευρωπαϊκό Ελεγκτικό Συνέδριο. *Προς έναν επιτυχημένο τομέα μεταφορών στην E-E*. [https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/LR\\_TRANSPORT/LR\\_TRANSPORT\\_EL.pdf](https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/LR_TRANSPORT/LR_TRANSPORT_EL.pdf). 2018.
- [2] Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. *Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου ανά χώρα και τομέα (γράφημα)*. <https://www.europarl.europa.eu/topics/el/article/20180301ST098928/ekpompes-aerion-thermokipiou-ana-chora-kai-tomea-grafima>. 2024.
- [3] Fayed Alanazi. «Electric Vehicles: Benefits, Challenges, and Potential Solutions for Widespread Adaptation». In: *Applied Sciences* 13 (May 2023), p. 6016. DOI: 10.3390/app13106016.
- [4] Ahmed A. El Baset A. El Halim et al. «Electric vehicles: a review of their components and technologies». In: *International Journal of Power Electronics and Drive Systems* 13 (Dec. 2022), pp. 2041–2061. DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i4.pp2041-2061.
- [5] Nimantha Samarakoon et al. «A Comprehensive Review of Electric Vehicles». In: 05 (July 2024), pp. 111–142.
- [6] Morsy Nour et al. «Review of Positive and Negative Impacts of Electric Vehicles Charging on Electric Power Systems». In: *Energies* (Sept. 2020), p. 4675. DOI: 10.3390/en13184675.
- [7] RENEW Magazine. *Charging forward: an EVSE buyers guide*. <https://renew.org.au/renew-magazine/buyers-guides/charging-forward-an-evse-buyers-guide/>. 2021.
- [8] Huayu Zeng et al. «Optimization of unipolar magnetic couplers for EV wireless power chargers». In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 40 (Aug. 2016), p. 012010. DOI: 10.1088/1755-1315/40/1/012010.
- [9] Necmi Altin and Melih SARP. «Review on Vehicle-to-Grid Systems: The Most Recent Trends and Smart Grid Interaction Technologies». In: *GAZI UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE* 33 (June 2020), pp. 394–411. DOI: 10.35378/guj.554206.

- [10] Andrei Goncearuc et al. «The barriers to widespread adoption of vehicle-to-grid: A comprehensive review». In: *Energy Reports* 12 (June 2024), pp. 27–41. DOI: 10.1016/j.egy.2024.05.075.
- [11] Emmanuel Kinoti and J Michael. «Review of Electric Vehicle-To-Grid (V2g)». In: *Engineering Open Access* 2 (Jan. 2024), pp. 1–11.
- [12] ΑΔΜΗΕ. *Πρόγραμμα Κατανομής ΜΣΣ Κρήτης*. <https://www.admie.gr/sites/default/files/diaboyleyseis/attached-files2021/10/.pdf>. 2021.
- [13] Παναγιουλάκης Στέφανος. «Αξιολόγηση V2G λειτουργίας μεγάλων στόλων ηλεκτρικών οχημάτων.» Chania: Technical University of Crete, 2022.
- [14] ΑΔΜΗΕ. *Διασύνδεση της Κρήτης με την Πελοπόννησο*. <https://www.admie.gr/erga/erga-diasyndeseis/diasyndesi-tis-kritis-me-tin-peloponniso>. 2021.
- [15] Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας. *Καθορισμός περιθωρίου ισχύος έργων ΑΠΕ στην Κρήτη μετά την ολοκλήρωση της Φάσης II Διασύνδεσής της με το Ελληνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΣΜΗΕ) σύμφωνα με την παράγραφο 4 του άρθρου 100 του ν.4821/2021 (ΦΕΚ Α'134)*. <https://www.raaey.gr/energeia/wp-content/uploads/2023/03/67>. 2018.
- [16] Αποκεντρωμένη Διοίκηση Κρήτης. *Σταθμοί Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας από ΑΠΕ*. <https://data.apdkritis.gov.gr/el/dataset/>. 2024.
- [17] Γενική Γραμματεία Ιδιωτικών Επενδύσεων. *Υβριδικό Έργο Φράγματος Ποταμών (Αμαρίου)*. <https://ependyseis.mindev.gov.gr/el/stratigikes/erga/ivridiko-ergo-fragmatos-potamon-amariou>. 2024.
- [18] Κωνσταντίνος Λεοντσίνης. «Εκτίμηση κατανάλωσης ενέργειας ηλεκτροκίνητων οχημάτων μέσω εναέριας παρατήρησης της κυκλοφορίας.» Chania: Technical University of Crete, 2022.
- [19] Καρανδινού Αικατερίνη Αγάπη. «Μοντελοποίηση του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας της Κρήτης με μεγάλη διείσδυση ΑΠΕ και ηλεκτρικών οχημάτων.» Chania: Technical University of Crete, 2020.
- [20] Michail Dakanalis and Fotios D. Kanellos. «Efficient Model for Accurate Assessment of Frequency Support by Large Populations of Plug-in Electric Vehicles». In: *Inventions* 6.89 (2021), pp. 232–233.

- 
- [21] Fotios D. Kanellos. «Optimal Scheduling and Real-Time Operation of Distribution Networks With High Penetration of Plug-In Electric Vehicles». In: *IEEE SYSTEMS JOURNAL* 15.3 (2021), pp. 232–233.
  - [22] Dimitra G. Kyriakou and Fotios D. Kanellos. «Energy and power management system for microgrids of large scale building prosumers». In: *IET Energy Systems Integration* 5:228–244 (2023), pp. 232–233.
  - [23] Dimitra G. Kyriakou and Fotios D. Kanellos. «Optimal Operation of Microgrids Comprising Large Building Prosumers and Plug-in Electric Vehicles Integrated into Active Distribution Networks». In: *Energies* 15.6182 (2022), pp. 6–7.