



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**Συμβολή στη διαχείριση των ηλεκτρικών οχημάτων για την  
αποδοτικότερη ενσωμάτωσή τους στα δίκτυα ηλεκτρικής  
ενέργειας**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Ευάγγελος Λ. Καρφόπουλος

Αθήνα, ΜΑΡΤΙΟΣ 2017





## ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**Ευάγγελου Καρφόπουλου**

Διπλωματούχου Ηλεκτρολόγου Μηχανικού & Μηχανικού Υπολογιστών του Ε.Μ.Π.

**«Συμβολή στη διαχείριση των ηλεκτρικών οχημάτων για την  
αποδοτικότερη ενσωμάτωσή τους στα δίκτυα ηλεκτρικής  
ενέργειας»**

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή: Νικόλαος Χατζηαργυρίου, Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Ευάγγελος Διαλυνάς, Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Σταύρος Παπαθανασίου, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**Εγκρίθηκε από την Επταμελή Εξεταστική Επιτροπή στις 15 Μαρτίου 2017**

### Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή



Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.



Ευάγγελος Διαλυνάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.



Σταύρος Παπαθανασίου  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.



Αναστάσιος Μπακιρτζής  
Καθηγητής Α.Π.Θ.



Πάυλος Γεωργιλάκης  
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

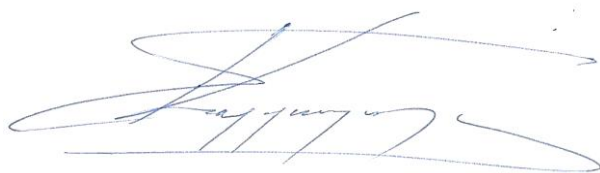


Νικόλαος Μαράτος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.



Σπύρος Χατζηβασιλειάδης  
Επίκ. Καθηγητής D.T.U.

Αθήνα, Μάρτιος 2017



.....

Ευάγγελος Α. Καρφόπουλος

Διδάκτωρ Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Ευάγγελος Α. Καρφόπουλος, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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



*Στους γονείς μου και στη σύζυγο μου  
με αγάπη και ευγνωμοσύνη*



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο εξηλεκτρισμός του τομέα των μεταφορών απαιτεί τη διασύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μέσω κατάλληλων υποδομών φόρτισης. Οι ενεργειακές ανάγκες των ηλεκτρικών οχημάτων θα πρέπει να εξυπηρετούνται όπως και η οικιακή κατανάλωση, χωρίς καμία διάκριση. Η διαφορετικότητα του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων συγκριτικά με το οικιακό φορτίο έγκειται στο γεγονός ότι το φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων δεν είναι στατικό και μπορεί να μετατοπιστεί τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Από την πλευρά των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, η ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων για τη φόρτιση τους αποτελεί ένα επιπρόσθετο φορτίο που αναμένεται να μεταβάλλει την καμπύλη φορτίου του συστήματος και να επηρεάσει τη λειτουργία και διαχείριση των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, ανάλογα με το επίπεδο ενσωμάτωσης των ηλεκτρικών οχημάτων και τον τρόπο φόρτισης τους.

Σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η μελέτη της επίδρασης της ενσωμάτωσης των ηλεκτρικών οχημάτων στη λειτουργία των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και η ανάπτυξη αλγορίθμων διαχείρισης τους για την αποδοτικότερη ένταξη τους σε αυτά. Ο καθορισμός του αντικειμενικού στόχου διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι άμεσα συνδεδεμένος με τα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε δικτύου που μελετάται. Ως εκ τούτου, είναι αναγκαία η μελέτη της επίδρασης των ηλεκτρικών οχημάτων σε όλα τα επίπεδα ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας (δηλαδή σύστημα παραγωγής, δίκτυο μεταφοράς, δίκτυο διανομής, διασυνδεδεμένα και μη δίκτυα) με σκοπό να προσδιοριστούν τα πιθανά προβλήματα που θα επιφέρει η ενσωμάτωση τους σε αυτά τα δίκτυα λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικά σενάρια διείσδυσης και πολιτικές ενσωμάτωσης. Δύο είναι οι βασικοί άξονες των προτεινόμενων αλγορίθμων διαχείρισης: η μεγιστοποίηση του αριθμού διασυνδεδεμένων ηλεκτρικών οχημάτων στις υφιστάμενες δικτυακές υποδομές χωρίς να παραβιάζονται οι λειτουργικοί περιορισμοί των δικτύων και η πλήρης ενσωμάτωση τους στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, θεωρώντας αμφίδρομη ροή ισχύος μεταξύ ηλεκτρικών οχημάτων και δικτύου.

Η δυναμική συμπεριφορά των ηλεκτρικών οχημάτων λόγω της κινητικότητας τους επιτάσσει την υιοθέτηση ευέλικτων μεθόδων διαχείρισης τους με σκοπό την εξυπηρέτηση των ενεργειακών αναγκών τους λαμβάνοντας υπόψη τις επιθυμίες των χρηστών των ηλεκτρικών οχημάτων, τους περιορισμούς των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας και τις παραμέτρους των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας. Η εφαρμογή αποκεντρωμένων αλγορίθμων διαχείρισης φορτίου σε έντονα μεταβαλλόμενα και σύνθετα περιβάλλοντα μπορεί να αποδειχθεί αποδοτικότερη συγκριτικά με την αντίστοιχη των κεντρικών αλγορίθμων. Για τον σκοπό αυτό, η παρούσα διδακτορική διατριβή επικεντρώνεται στον σχεδιασμό και στην ανάπτυξη αποκεντρωμένων αλγορίθμων διαχείρισης της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων. Η απόδοση των προτεινόμενων αποκεντρωμένων αλγορίθμων συγκρίνεται με την αντίστοιχη των κεντρικών αλγορίθμων αποδεικνύοντας την ικανότητα τους να συγκλίνουν στην ίδια βέλτιστη λύση με τους κεντρικούς αλγορίθμους, για υψηλά ποσοστά διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων, σε μικρότερο υπολογιστικό χρόνο.

Τέλος, στην παρούσα διατριβή αναπτύχθηκαν μια πρότυπη υποδομή φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων και μια διαλειτουργική πλατφόρμα διαχείρισης σταθμών φόρτισης, που επιτρέπουν τις δοκιμές συμβατότητας των εμπορικών τεχνολογιών με τα διεθνή πρότυπα ηλεκτροκίνησης και την εφαρμογή καινοτόμων αλγορίθμων διαχείρισης σε ελεγχόμενο περιβάλλον.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ηλεκτρικά οχήματα, αποκεντρωμένος έλεγχος, θεωρία παιγνίων, παίγνια αποφάσεων, πολύ-πρακτορικά συστήματα, απόκριση συχνότητας, έλεγχος στατισμού, διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

## **ABSTRACT**

The electrification of the transport sector requires the interconnection of the Electric Vehicles (EV) with the electricity grids utilizing appropriate charging infrastructures. The EV energy needs should be served as domestic consumption in a non-discriminatory way. The difference between EV and domestic demands lies in the fact that the charging demand is not static due to EV mobility and it presents intense spatial and temporal volatility. From the grid perspective, the EV charging demand is an additional load which can significantly modify the system load curve and affect the way electricity networks are operated and managed, in respect to the EV deployment level and the charging policy.

The present PhD thesis aims to analyse the impact of EV deployment on the operation of electricity grids and to propose EV management algorithms that enables their efficient integration in the electricity grids in respect to the outcome of the grid impact analysis. The objective of an EV management is network dependent and it is directly linked to the technical and operational characteristics of the respective network under study. Thus, a holistic grid impact analysis (generation system, transmission/distribution networks, non-interconnected systems) is necessary in order to identify the potential operational market/network issues that EV share will provoke examining different EV penetration scenarios and EV deployment strategies. The two main goals of the proposed EV management algorithms in the present PhD thesis are: the maximization of the EV hosting capacity of distribution networks considering the current grid infrastructure as well as distributed renewable energy and the integrated market participation of the aggregated EV batteries' capacity, taking into consideration the bidirectional power flow between the electric vehicles and the electricity grid.

The dynamic EV behavior due to their mobility requires the development of advanced smart charging solutions aiming to serve EV charging needs balancing EV users' preferences, network operational constraints and electricity market parameters. The implementation of decentralized management algorithms in highly volatile environments can be more efficient compared to centralized ones. Thus, the present PhD thesis focuses on the design and development of decentralized EV control algorithms. The performance of the proposed decentralized EV control algorithms is compared to the one of the respective centralized methods concluding that distributed algorithms provide results of similar quality requiring shorter computation time under high EV share.

Last but not least, a standard custom-made charging station and an interoperable back-office system for charging stations network has been developed enabling the performance of compatibility tests to e-mobility standards of different commercial e-mobility technologies and the implementation of innovative EV management algorithms in laboratory or real environment.

## **KEYWORDS**

Electric vehicles, decentralized algorithms, game theory, decision games, multi-agent systems, frequency response, droop-control, RES hosting capacity

## Πρόλογος

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο εργαστήριο Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Νικόλαου Χατζηαργυρίου. Σκοπός της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η μελέτη της επίδρασης της ενσωμάτωσης των ηλεκτρικών οχημάτων στη λειτουργία των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και η ανάπτυξη αλγορίθμων διαχείρισης τους για την αποδοτικότερη ένταξη τους σε αυτά. Κύριος άξονας των προτεινόμενων αλγορίθμων διαχείρισης είναι η ελαχιστοποίηση της επιβάρυνσής των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας λόγω της επιπρόσθετης ζήτησης για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων και η μεγιστοποίηση του αριθμού διασυνδεδεμένων ηλεκτρικών οχημάτων στις υφιστάμενες δικτυακές υποδομές χωρίς να παραβιάζονται οι λειτουργικοί περιορισμοί των δικτύων.

Στο πρώτο μέρος του πρώτου κεφαλαίου αναλύονται οι τεχνολογίες ηλεκτροκίνησης (τεχνολογίες ηλεκτρικών οχημάτων, υποδομές φόρτισης, τεχνολογίες μπαταριών κτλ) καθώς και ρυθμιστικά θέματα ηλεκτροκίνησης (νέοι φορείς ηλεκτροκίνησης, επαυξημένες αρμοδιότητες υφιστάμενων φορέων στον τομέα της ενέργειας, φάσεις ανάπτυξης της ηλεκτροκίνησης, μοντέλα ανάπτυξης υποδομών φόρτισης κτλ) η γνώση των οποίων είναι απαραίτητη για την βαθύτερη κατανόηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Το δεύτερο μέρος του πρώτου κεφαλαίου, περιλαμβάνει τη βιβλιογραφική ανασκόπηση με την ερευνητική δραστηριότητα για την ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Η βιβλιογραφική ανασκόπηση δομείται σε τρία επίπεδα ανάλογα με το πεδίο έρευνας:

- Μοντελοποίηση της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων και ανάλυση της επίδρασης του επιπρόσθετου φορτίου στη λειτουργία των ηλεκτρικών δικτύων
- Ανάπτυξη αλγορίθμων διαχείρισης της διασυνδεδεμένης λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων βάσει του οριζόμενου αντικειμενικού στόχου (δικτυακοί, οικονομικοί και μεικτοί)
- Ανάπτυξη αλγορίθμων διαχείρισης της διασυνδεδεμένης λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων βάσει του επιπέδου λήψεως των αποφάσεων (κεντρικοί/αποκεντρωμένοι αλγόριθμοι)

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση στο πρώτο κεφάλαιο είναι οριζόντια και περιληπτική παραθέτοντας τις γενικές κατευθύνσεις και τα συμπεράσματα από τα παραπάνω πεδία έρευνας. Στα επιμέρους κεφάλαια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, γίνεται μια πιο ενδελεχής βιβλιογραφική ανάλυση του εκάστοτε εξεταζόμενου πεδίου έρευνας με σκοπό να αναδειχθεί η συνεισφορά της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η μοντελοποίηση της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων καθώς και οι επιπτώσεις του επιπρόσθετου φορτίου τους στη λειτουργία των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Ο καθορισμός του αντικειμενικού στόχου διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι άμεσα συνδεδεμένος με τα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά του εκάστοτε δικτύου που μελετάται. Ως εκ τούτου είναι αναγκαία η μελέτη της επίδρασης των ηλεκτρικών οχημάτων σε όλα τα επίπεδα ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή σύστημα παραγωγής, δίκτυο μεταφοράς, δίκτυο διανομής, διασυνδεδεμένα και μη δίκτυα κ.α. με σκοπό να προσδιοριστούν τα πιθανά προβλήματα που θα επιφέρει η ενσωμάτωση τους σε αυτά τα δίκτυα λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικά σενάρια διεύθυνσης και πολιτικές ενσωμάτωσης (μη ελεγχόμενη φόρτιση, φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο, έξυπνη φόρτιση με ελαχιστοποίηση κόστους, έξυπνη φόρτιση “valley-filling” κτλ). Στα πλαίσια εκπόνησης της παρούσας διδακτορικής διατριβής αναπτύχθηκε ένα στοχαστικό εργαλείο προσομοίωσης για την εκτίμηση του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων λαμβάνοντας υπόψη το προφίλ μετακίνησης των αυτοκινήτων, σενάρια διεύθυνσης τους καθώς και πολιτικές φόρτισής τους. Η καμπύλη φορτίου που εξάγεται από το εργαλείο αυτό, μπορεί να προστεθεί στην

καμπύλη φορτίου του συστήματος και εν συνεχεία να μελετηθεί η επίδραση του επιπρόσθετου φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων χρησιμοποιώντας εμπορικά ή μη προγράμματα προσομοίωσης της λειτουργίας των δικτύων. Πιο συγκεκριμένα, έχει μελετηθεί η επίδραση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων

- Στην καμπύλη φορτίου διάφορων Ευρωπαϊκών χωρών (Ελλάδα, Γερμανία, Ισπανία, Πορτογαλία, Ηνωμένο Βασίλειο)
- Στο Ελληνικό σύστημα παραγωγής του ηπειρωτικού συστήματος και του μη διασυνδεδεμένου συστήματος της Κρήτης
- Στο Ελληνικό σύστημα μεταφοράς του ηπειρωτικού συστήματος
- Σε δύο ενδεικτικά δίκτυα διανομής: γραμμή MT του αστικού δικτύου της Κατερίνης, γραμμή MT του επαρχιακού δικτύου της Ικαρίας.

Στο τρίτο και τέταρτο κεφάλαιο της διατριβής, αναπτύχθηκαν δύο αποκεντρωμένοι αλγόριθμοι για τη διαχείριση των ηλεκτρικών οχημάτων οι οποίοι βασίζονται στη θεωρία παιγνίων για διαχείριση μεγάλου πληθυσμού (Nash certainty equivalence principles). Ο πρώτος αλγόριθμος (Κεφάλαιο 3) έχει στόχο τη μετακίνηση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων από ώρες αιχμής σε ώρες χαμηλού φορτίου με σκοπό να ελαχιστοποιηθεί η διακύμανση του φορτίου του συστήματος και να μην δημιουργούνται απότομες αιχμές από τη φόρτιση των οχημάτων («valley-filling»). Αυτή η πολιτική διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι από τις πιο πολυ-εφαρμοζόμενες μεθόδους διαχείρισης της φόρτισης τους και έχουν προταθεί διαφορετικές μέθοδοι για την επίτευξη της. Η εφαρμογή ενός κεντρικού αλγορίθμου για την επίτευξη του «valley-filling» έχει ένα σημαντικό μειονέκτημα, ο χρόνος επίλυσης του αυξάνει εκθετικά με την αύξηση του πλήθους των ηλεκτρικών οχημάτων. Ως εκ τούτου, η εφαρμογή κεντρικών αλγορίθμων είναι αποδοτική για πολύ μικρά ποσοστά διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων. Ο αποκεντρωμένος αλγόριθμος που αναπτύχθηκε στα πλαίσια εκπόνησης της παρούσας διδακτορικής διατριβής σε συνδυασμό με την υιοθέτηση ιεραρχικού τρόπου μετάδοσης των δεδομένων επιτρέπει τη σύγκλιση του αλγορίθμου σε μικρό χρονικό διάστημα ανεξαρτήτως σχεδόν του μεγέθους του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων υπό εξέταση. Η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου εξετάστηκε μέσω προσομοιώσεων σε δίκτυα διανομής μέσης τάσης. Ο δεύτερος αλγόριθμος (Κεφάλαιο 4) αποτελεί επέκταση του πρώτου αλγορίθμου εξετάζοντας την αμφίδρομη ροή ισχύος για τη λειτουργία των ηλεκτρικών οχημάτων. Αυτό σημαίνει ότι τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα αντιμετωπίζονται ως μη στατικά αποθηκευτικά μέσα, λόγω της κινητικότητας τους, που μπορούν να παρέχουν ενέργεια στο δίκτυο αλλά και να απορροφούν ενέργεια από αυτό («Vehicle-to-Grid», V2G). Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε έχει σκοπό τη συνέργεια μεταξύ των ηλεκτρικών οχημάτων και της διεσπαρμένης παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με απώτερο στόχο τη μεγιστοποίηση της διείσδυσης των ΑΠΕ και των ηλεκτρικών οχημάτων σε ένα δίκτυο διανομής χωρίς να απαιτείται αναβάθμιση του δικτύου για την ομαλή λειτουργία του. Η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου εξετάστηκε με την προσομοίωση της εφαρμογής του σε ένα επαρχιακό δίκτυο μέσης τάσης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο της διατριβής, αναλύθηκε η δυνατότητα παροχής επικουρικών υπηρεσιών από τα ηλεκτρικά οχήματα προς τον διαχειριστή του δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, εξετάστηκε η δυνατότητα παροχής πρωτεύουσας ρύθμισης της συχνότητας σε απομονωμένα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας με μεγάλη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Για τον σκοπό αυτό αναπτύχθηκε ένα δυναμικό μοντέλο για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα το οποίο έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζει δυναμικά το σημείο λειτουργίας φόρτισης ή εκφόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων όταν η συχνότητα του δικτύου είναι εκτός ορίων. Ο έλεγχος που υιοθετήθηκε βασίζεται στις καμπύλες στατισμού (συχνότητας – ενεργού ισχύος) η κλίση των οποίων προσαρμόζεται δυναμικά ώστε στην περίπτωση που η συχνότητα είναι χαμηλή τα πλήρως φορτισμένα οχήματα να παρέχουν ισχύ στο δίκτυο και τα οχήματα με χαμηλή φόρτιση μπαταρίας να μειώνουν αναλογικά το ρυθμό φόρτισης

τους, ενώ αντίθετα όταν η συχνότητα είναι υψηλή τα πλήρως φορτισμένα οχήματα σταματούν να παρέχουν ενέργεια στο δίκτυο και τα οχήματα με χαμηλή φόρτιση μπαταρίας αυξάνουν το ρυθμό φόρτισής τους. Η αποδοτικότητα του ελέγχου αυτού εξετάστηκε προσομοιώνοντας διαφορετικές καταστάσεις μεταβολής της συχνότητας (απώλεια παραγωγής ΑΠΕ λόγω βραχυκυκλώματος, απώλεια συμβατικών μονάδων παραγωγής λόγω βραχυκυκλώματος) στο απομονωμένο δίκτυο της Κρήτης.

Έπειτα, αναπτύχθηκε αλγόριθμος για τη βέλτιστη διαχείριση των ηλεκτρικών οχημάτων από ένα διαχειριστή στόλου οχημάτων ( aggregator) με σκοπό να μεγιστοποιήσει το κέρδος του μέσω της συμμετοχής του στη χονδρεμπορική αγορά ενέργειας αλλά και στις αγορές εφεδρειών (γρήγορη δευτερεύουσα ρύθμιση). Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος αποτελείται από τρία επίπεδα:

- Τον βέλτιστο ημερήσιο προγραμματισμό της λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων για τη μεγιστοποίηση του κέρδους ενός διαχειριστή στόλου οχημάτων (day-ahead scheduling)
- Τη βέλτιστη κατανομή σε ωριαία βάση του προφίλ από τον προγραμματισμό της προηγούμενης μέρας στα ηλεκτρικά οχήματα (intra-day scheduling)
- Τη βέλτιστη κατανομή στα ηλεκτρικά οχήματα ενός σήματος ισχύος προερχόμενο από τον διαχειριστή του δικτύου για δευτερεύουσα ρύθμιση (σε επίπεδο 5-λεπτου).

Στο έκτο κεφάλαιο της διατριβής αναπτύχθηκαν μια πρότυπη υποδομή φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων και μια διαλειτουργική πλατφόρμα διαχείρισης σταθμών φόρτισης, που επιτρέπουν τις δοκιμές συμβατότητας των εμπορικών τεχνολογιών με τα διεθνή πρότυπα ηλεκτροκίνησης και την εφαρμογή καινοτόμων αλγορίθμων διαχείρισης σε ελεγχόμενο περιβάλλον.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη και τις ευχαριστίες μου στον κ. Νικόλαο Χατζηαργυρίου, Καθηγητή του Τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, τόσο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την αποδοχή μου στη θέση του υποψήφιου διδάκτορα όσο και για την άριστη καθοδήγηση, την συνεχή ενθάρρυνση, την αμέριστη συμπαράσταση και το άριστο κλίμα συνεργασίας για την εκπόνηση της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στους κ. Ευάγγελο Διαλυνά, Καθηγητής ΕΜΠ, κ. Σταύρο Παπαθανασίου, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ, κ. Παύλο Γεωργιάκη, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ, για τις πολύτιμες συμβουλές οι οποίες συνεισέφεραν σημαντικά στην ορθή και ολοκληρωμένη ερευνητική πορεία της παρούσας διατριβής.

Εξίσου θερμές ευχαριστίες οφείλονται στον κ. Αναστάσιο Μπακιρτζή, Καθηγητής ΑΠΘ, για την αποδοχή συμμετοχής του στην πενταμελή εξεταστική επιτροπή της ενδιάμεσης κρίσης και στην επταμελή εξεταστική επιτροπή

Ευχαριστώ θερμότατα τον Καθηγητή ΕΜΠ κ. Νικόλαο Μαράτο για την αποδοχή συμμετοχής του στην επταμελή εξεταστική επιτροπή.

Ιδιαίτερος ευχαριστώ τον Επίκουρο Καθηγητή του Τεχνολογικού Ιδρύματος του Πανεπιστημίου της Δανίας (DTU) κ. Σπύρο Χατζηβασιλειάδη για την αποδοχή συμμετοχής του στην επταμελή εξεταστική επιτροπή.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά την κα. Ειρήνη Γασπαράκη και την κα. Ελένη Αυλωνίτου για την πολύτιμη γραμματειακή υποστήριξη σε πλείστα όσα θέματά μου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλα τα μέλη του εργαστηρίου των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας για την εξαιρετική και φιλική συνεργασία. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον Νίκο Κορρέ και τη Φιλία Δόβα για την πολύτιμη βοήθεια τους σε θέματα πληροφορικής.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στους γονείς μου, Λουκά και Δέσποινα, και στον αδερφό μου Κωνσταντίνο για την ηθική υποστήριξη, συναισθηματική συμπαράσταση και υλική υποστήριξη που μου προσέφεραν σε όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου. Τέλος, ιδιαίτερα θερμές ευχαριστίες οφείλω στη σύζυγο μου, Ελεάνα, για την ηθική συμπαράσταση της και για την πολύτιμη βοήθεια της σε θέματα πληροφορικής.

Ευάγγελος Λ. Καρφόπουλος  
Αθήνα, Μάρτιος 2017





## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ .....	1
1.1.1 Τεχνολογίες Ηλεκτροκίνησης .....	1
1.1.2 Κλάσεις Ηλεκτρικών Οχημάτων .....	2
1.1.3 Τεχνολογίες Αποθήκευσης.....	2
1.1.4 Σταθμοί Φόρτισης .....	5
1.2 ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ.....	11
1.2.1 Ισχύουσα Νομοθεσία για Ηλεκτρικά Οχήματα .....	11
1.2.2 Νέοι ενεργειακοί παράγοντες ηλεκτροκίνησης.....	12
1.2.3 Φάσεις Διείσδυσης των Ηλεκτρικών Οχημάτων στο Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας .....	13
1.2.4 Μοντέλα φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων .....	18
1.2.5 Μοντέλα ανάπτυξης υποδομών δημόσιας φόρτισης .....	26
1.3 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....	29
1.3.1 Μελέτες διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.....	29
1.3.2 Αντικειμενικοί στόχοι της διαχείρισης ηλεκτρικών οχημάτων .....	32
1.3.3 Επίπεδο ελέγχου για τη διαχείριση ηλεκτρικών οχημάτων .....	33

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

#### ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ

<b>ΔΙΚΤΥΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ</b> .....	<b>37</b>
2.1 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ .....	37
2.1.1 Μέθοδος προσδιορισμού ενεργειακών αναγκών.....	37
2.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΚΑΜΠΥΛΗ ΖΗΤΗΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ 43	
2.2.1 Μη ελεγχόμενη φόρτιση.....	44
2.2.2 Ελεγχόμενη Φόρτιση μέσω διζωνικού τιμολογίου.....	48
2.2.3 Ελεγχόμενη Φόρτιση – “valley-filling”.....	50
2.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ .....	51
2.3.1 Ανάλυση συστήματος παραγωγής για το Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα .....	51
2.3.2 Ανάλυση συστήματος παραγωγής για το αυτόνομο ηλεκτρικό σύστημα της Κρήτης.....	54
2.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ .....	60
2.4.1 Μη Ελεγχόμενη Φόρτιση .....	60
2.4.2 Ελεγχόμενη Φόρτιση – “valley-filling”.....	62
2.5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ .....	65
2.5.1 Αστικό δίκτυο διανομής μέσης τάσης της Κατερίνης (20kV).....	65
2.5.2 Επαρχιακό δίκτυο διανομής μέσης τάσης της Ικαρίας (15kV).....	69
2.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	75

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

#### ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΩΡΕΣ ΜΕ ΧΑΜΗΛΗ

<b>ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ</b> .....	<b>79</b>
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	79
3.2 ΗΜΕΡΗΣΙΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ – ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΟΣΤΟΥΣ .....	79
3.2.1 Πρόβλεψη Ενεργειακών Αναγκών .....	82
3.2.2 Διαχείριση του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων σε πραγματικό χρόνο .....	88
3.2.3 Πρόβλεψη ενεργειακών αναγκών με περιορισμό της αιχμής ζήτησης της φόρτισης.....	90
3.3 ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ (“VALLEY-FILLING”).....	93

3.3.1	Κεντρικός αλγόριθμος.....	94
3.3.2	Αποκεντρωμένος αλγόριθμος “Valley-Filling”.....	96
3.3.3	Σύγκριση κεντρικού και αποκεντρωμένου αλγορίθμου .....	109
3.4	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΣΤΟΛΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ.....	111
3.5	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	118

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4**

### **ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ**

	<b>ΔΙΑΝΟΜΗΣΜΕ ΥΨΗΛΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΑΠΕ .....</b>	<b>121</b>
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	121
4.2	ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΑΠΕ ΣΕ ΑΝΑΧΩΡΗΣΕΙΣ ΔΙΚΤΥΩΝ ΔΙΑΝΟΜΗΣ Μ.Τ. (“RES HOSTING CAPACITY”) .....	122
4.2.1	Κριτήρια και πρακτικές υπολογισμού μέγιστου ορίου διείσδυσης ΑΠΕ .....	123
4.2.2	Μη ελεγχόμενη και Ελεγχόμενη διείσδυση ΑΠΕ .....	125
4.3	ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ (ΣΥΝΕΡΓΕΙΑ ΗΟ/ΑΠΕ).....	129
4.3.1	Προτεινόμενο αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης της φόρτισης.....	131
4.3.2	Εφαρμογή αποκεντρωμένου αλγορίθμου σε δίκτυα διανομής Μ.Τ. ....	142
4.4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	151

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5**

### **ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΟΧΗ**

	<b>ΕΠΙΚΟΥΡΙΚΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ.....</b>	<b>153</b>
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	153
5.2	ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	154
5.2.1	Ρυθμιστής τάσης μονάδων παραγωγής .....	154
5.2.2	Ρύθμιση συχνότητας φορτίου στα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.....	155
5.2.3	Μοντελοποίηση ΑΠΕ.....	158
5.3	ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟΝ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ .....	158
5.3.1	Συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας .....	160
5.3.2	Συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στη δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας .....	176
5.4	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	207

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6**

### **ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΕΝΣΥΡΜΑΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ**

	<b>ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥΣ .....</b>	<b>209</b>
6.1	ΠΡΟΤΥΠΑ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗΣ .....	209
6.1.1	Πρότυπα διεπαφής Ηλεκτρικού Οχήματος- υποδομών φόρτισης .....	210
6.1.2	Πρότυπα διεπαφής Διαχειριστή υποδομών φόρτισης - σταθμών φόρτισης (OCPP).....	215
6.1.3	Πρότυπα διεπαφής Διαχειριστή Δικτύου Διανομής και Διαχειριστή υποδομών φόρτισης ..	218
6.2	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΒΑΣΕΙ IEC61851 .....	220
6.2.1	Προσομοιωτής ηλεκτρικού οχήματος .....	220
6.2.2	Πρότυπος σταθμός φόρτισης.....	222
6.2.3	Πιλοτικές Εφαρμογές εξοπλισμού ηλεκτροκίνησης.....	224
6.3	ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ.....	226
6.3.1	Εμπλεκόμενοι φορείς ηλεκτροκίνησης .....	226
6.3.2	Εννοιολογική αρχιτεκτονική συστήματος διαχείρισης υποδομών φόρτισης.....	227
6.3.3	Απαιτήσεις χρηστών και συστήματος .....	229
6.3.4	Ανάπτυξη πλατφόρμας διαχείρισης.....	234
6.3.5	Εφαρμογή Χρήστη .....	243
6.3.6	Πιλοτικές εφαρμογές της πλατφόρμας διαχείρισης υποδομών φόρτισης.....	245

6.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	246
-----------------------	-----

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7**

<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΒΟΛΗ – ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ.....</b>	<b>249</b>
---	------------

7.1 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	249
---	-----

7.2 ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ .....	253
------------------------------------	-----

7.3 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....	255
---	-----

<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Δίκτυα Διανομής Μ.Τ. ....</b>	<b>Π-1</b>
---	------------

<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: Πιστοποιητικά συμβατότητας σταθμού φόρτισης IEC 61851 .....</b>	<b>Π-5</b>
---	------------

<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: Αποτελέσματα δοκιμών στο ερευνητικό κέντρο JRC (Ispra, Ιταλία) .....</b>	<b>Π-9</b>
--	------------

<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: Αποτελέσματα δοκιμών πλατφόρμας διεχείρισης υποδομών φόρτισης – ερευνητικό κέντρο JRC .....</b>	<b>Π-15</b>
---	-------------

<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε: Αποτελέσματα δοκιμών πλατφόρμας διεχείρισης υποδομών φόρτισης –ERTEL και RSE .....</b>	<b>Π-18</b>
--	-------------



## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ

$\Delta I_{bat}$	συνεισφορά των ηλεκτρικών οχημάτων στο σήμα ρύθμισης
$\Delta RS$	απόκλιση μεταξύ του ζητούμενου σήματος ρύθμισης και της πραγματικής συνεισφοράς των ηλεκτρικών οχημάτων
$\Delta t$	χρονικά υπο-διαστήματα στα οποία χωρίζεται η περίοδος μελέτης
$\Delta V$	διακύμανση της τάσης
$AverCon$	μέση κατανάλωση μπαταρίας ( $kWh/km$ )
$C$	ονομαστική ισχύς μετασχηματιστή
$C_{bat}$	η ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας
$C_{eff}$	συντελεστής απόδοση της φόρτισης
$C_{G,m}^t$	κόστος παραγωγής της ενεργού ισχύος από τη μονάδα $m$ τη χρονική στιγμή $t$
$Comp$	Συντελεστής αντιστάθμισης για μη προγραμματισμένες αναχωρήσεις ηλεκτρικών οχημάτων
$CPA$	Αριθμός διαθέσιμων χρονικών διαστημάτων για φόρτιση πριν το επόμενο ταξίδι
$CP$	χρονική διάρκεια στάθμευσης
$d$	διάρκεια υπο-διαστήματος ελέγχου
$D_{net}$	καθαρή ζήτηση του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνοντας υπόψη την συνεισφορά των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής
$D_t$	ζήτηση του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας
$Dci$	κόστος φθοράς της μπαταρίας
$Deg$	φθορά της μπαταρίας
$Efi$	απόδοση υποδομών φόρτισης
$E_l$	ελαστικότητα ζήτησης που προσφέρει ένα όχημα
$ExU, ExD$	αναμενόμενα ποσοστά άνω και κάτω ρύθμισης
$ExR$	αναμενόμενα ποσοστά στρεφόμενη εφεδρείας
$f$	Συχνότητα δικτύου
$FPI$	Σημείο λειτουργίας $i$ -οστού οχήματος
$I_i$	τιμή ρεύματος στο ζυγό $i$
$I_{bat}$	ρεύμα μπαταρίας
$K^c, K^d$	σταθερές προσαρμοστικού ελέγχου στατισμού
$K_{droop}, T_{droop}$	σταθερές συνάρτησης μεταφοράς ελέγχου μέσω χαρακτηριστικών στατισμού
$Mci$	χωρητικότητα μπαταρίας
$MaxAP_{i,t}, MnAP_{i,t}$	μέγιστη διαθέσιμη ποσότητα ισχύος για άνω/κάτω ρύθμιση του $i^{ου}$ -οχήματος

$MaxAP'_i, MnAP'_i$	πραγματική μέγιστη διαθέσιμη ποσότητα ισχύος για άνω/κάτω ρύθμιση του $i^{ov}$ -οχήματος
$MnL, MxL$	εκτιμώμενη ελάχιστη και μέγιστη του φορτίου του δικτύου
$p^v$	εικονικά σήματα ελέγχου
$p_t$	τιμή αγοράς ενέργειας τη χρονική στιγμή $t$
$P_{j,t}^{DG}$	Παραγωγή ισχύος από τη μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής $j$ τη στιγμή $t$
$P_{ch}^{EV}, P_{dch}^{EV}$	το προφίλ φόρτισης και εκφόρτισης του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων
$P_{nomCS}$	η ονομαστική ισχύς της υποδομής φόρτισης
$P_{G,m}^t$	η παραγωγή ενεργού ισχύος της μονάδας $m$ τη χρονική στιγμή $t$
$P_{G,m}^{min}, P_{G,m}^{max}$	ελάχιστη και μέγιστη ισχύς παραγωγής της μονάδας $m$
$P_L$	το φορτίο του συστήματος
$P_{PV}$	ηλιακή ενέργεια που εγχέεται στο σύστημα
$P_{SR}$	η στρεφόμενη εφεδρεία
$P_{SR,m}$	η στρεφόμενη εφεδρεία της μονάδας $m$
$P_{trip,i,t}^{EV}$	κατανάλωση μπαταρίας ηλεκτρικού οχήματος $i$ λόγω ταξιδιού τη στιγμή $t$
$P_w$	αιολική ενέργεια που εισάγεται στο σύστημα
$P_{w,av}$	η διαθέσιμη αιολική ενέργεια
$P_{w,max}$	μέγιστη αιολική ενέργεια που μπορεί να απορροφήσει το σύστημα
$PD_i(k)$	απόκριση ηλεκτρικού οχήματος $i$ τη στιγμή $t$ σε ένα σήμα ρύθμισης
$Perc_i$	συμμετοχή του $i$ -οστού ηλεκτρικού οχήματος στην λειτουργία V2G (εκφόρτιση) ως ποσοστό της χωρητικότητας της μπαταρίας του
$Plug_{i,t}$	είναι μια δυαδική μεταβλητή $\{0,1\}$ που καθορίζει αν το $i$ -οστό όχημα είναι συνδεδεμένο ή όχι στο ηλεκτρικό δίκτυο τη στιγμή $t$
$POP_{aggr}^{for}$	προφίλ λειτουργίας ηλεκτρικών οχημάτων μετά την εφαρμογή του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού
$POP_i$	προφίλ λειτουργίας του $i$ -οστού ηλεκτρικού οχήματος
$POP_i^{real}$	πραγματικό προφίλ λειτουργίας του $i$ -οστού ηλεκτρικού οχήματος
$PRr$	εκτιμώμενη τιμές για παροχή στρεφόμενη εφεδρείας
$PRu, PRd$	εκτιμώμενη τιμές για παροχή άνω και κάτω εφεδρείας
$R$	στατισμός
$R_{series}$	εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας στην οποία οφείλεται η εσωτερική πτώση τάσης
$R_{Self\_Discharge}$	φθορά της μπαταρίας όταν αυτή μένει ανενεργή για μεγάλο χρονικό διάστημα
$Rt, Ct$	σταθερές της μπαταρίας που εκφράζουν την αντίδραση της μπαταρίας σε δυναμικές μεταβολές του φορτίου
$Ru, Rd(t)$	χωρητικότητα του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων για άνω και κάτω ρύθμιση

$Rr$	χωρητικότητα του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων για στρεφόμενη εφεδρεία
$Rs$	επιθυμητό σήμα ρύθμισης (%)
$Rs_{MW}$	επιθυμητό σήμα ρύθμισης (MW)
$RsRP_i$	η μέγιστη διαθέσιμη ποσότητα ισχύος για στρεφόμενη εφεδρεία του $i^{ου}$ οχήματος για τη χρονική στιγμή $t$
$SOC_{in,i}$	το αρχικό επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας του $i$ -οστού οχήματος την στιγμή που συνδέεται στο δίκτυο για να φορτίσει
$SOC_{i,t}$	το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας του $i$ -οστού οχήματος τη χρονική στιγμή $t$
$TSN_i$	απαιτούμενος αριθμός υπο-διαστημάτων για την πλήρη φόρτιση της μπαταρίας του $i$ -οστού οχήματος
$u_{c,t}, u_{d,t}$	Βοηθητικές δυαδικές μεταβλητές που επιτρέπουν (ένα-1) ή όχι (μηδέν-0) την λειτουργία της φόρτισης ή της εκφόρτισης
$V_{feed}$	τάση ζυγού αναφοράς σε δίκτυο διανομής
$V_m$	μέση τιμή της τάσης
$V_n$	ονομαστική τιμή τάσης
$Voc(SOC)$	μια πηγή τάσης εξαρτημένη από το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας
$x_i$	δυαδικό διάνυσμα που περιγράφει τα διαστήματα στα οποία το $i$ -οστό όχημα φορτίζει.





## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΕΙΚΟΝΑ 1-1 ΚΟΣΤΟΣ ΚΑΙ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ [3] .....	3
ΕΙΚΟΝΑ 1-2 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΥΣ ΤΥΠΟΥΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ [10].....	5
ΕΙΚΟΝΑ 1-3 ΙΕC ΠΡΟΤΥΠΑ ΓΙΑ ΑΓΩΓΙΜΗ ΦΟΡΤΙΣΗ (REECK,2014) .....	6
ΕΙΚΟΝΑ 1-4 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΛΥΣΗ ΕΠΑΓΩΓΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΑΠΟ ΤΟ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ FASTINCHARGE.....	7
ΕΙΚΟΝΑ 1-5 ΠΡΩΤΗ ΦΑΣΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ: ΚΑΤΑΛΥΤΙΚΗ ΦΑΣΗ.....	14
ΕΙΚΟΝΑ 1-6 ΔΕΥΤΕΡΗ ΦΑΣΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ: ΦΑΣΗ ΕΔΡΑΙΩΣΗΣ.....	16
ΕΙΚΟΝΑ 1-7 ΤΡΙΤΗ ΦΑΣΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ: ΠΡΟΧΩΡΗΜΕΝΗ ΦΑΣΗ.....	18
ΕΙΚΟΝΑ 1-8 ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΕΞΑΡΤΗΤΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗΣ (ΥΠΟΔΟΜΕΣ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΧΡΗΣΗΣ).....	27
ΕΙΚΟΝΑ 1-9 ΜΟΝΤΕΛΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ – “DSO MODEL” (ΥΠΟΔΟΜΕΣ ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΧΡΗΣΗΣ) .....	28
ΕΙΚΟΝΑ 1-10 ΡΟΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ.....	33
ΕΙΚΟΝΑ 1-11 ΡΟΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ.....	35
ΕΙΚΟΝΑ 2-1 ΠΟΣΟΣΤΑ ΚΑΙ ΣΕΝΑΡΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ (ΠΗΓΗ: ΙΕΑ, “GLOBAL EV OUTLOOK 2016”) .....	39
ΕΙΚΟΝΑ 2-2 ΣΕΝΑΡΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ: (Α) ΡΕΑΛΙΣΤΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ, (Β) ΑΙΣΙΟΔΟΞΟ ΣΕΝΑΡΙΟ, (Γ) ΥΠΕΡΑΙΣΙΟΔΟΞΟ ΣΕΝΑΡΙΟ (ΠΗΓΗ: MERGE [2]).....	41
ΕΙΚΟΝΑ 2-3 ΠΡΟΦΙΛ ΧΡΟΝΙΚΗΣ ΣΤΙΓΜΗΣ ΕΠΙΣΤΡΟΦΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ (ΠΗΓΗ: MERGE [15]).....	45
ΕΙΚΟΝΑ 2-4 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΗΣ ΩΡΑΣ ΕΠΙΣΤΡΟΦΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΤΕΛΕΥΤΑΙΑ ΔΙΑΔΡΟΜΗ ΤΗΣ ΗΜΕΡΑΣ .....	45
ΕΙΚΟΝΑ 2-5 ΜΕΣΟ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΠΡΟΦΙΛ ΔΙΑΝΥΟΜΕΝΩΝ ΑΠΟΣΤΑΣΕΩΝ ΑΝΑ ΗΜΕΡΑ (ΠΗΓΗ: MERGE [15]) .....	46
ΕΙΚΟΝΑ 2-6 ΑΠΟΣΤΑΣΕΙΣ ΠΟΥ ΔΙΑΝΥΟΝΤΑΙ ΚΑΘΕ ΜΕΡΑ – ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΕΣ ΗΜΕΡΕΣ ΚΑΙ ΣΑΒΒΑΤΟΚΥΡΙΑΚΑ .....	46
ΕΙΚΟΝΑ 2-7 ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΠΡΟΦΙΛ ΖΗΤΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ - ΜΗ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ (ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΗ) .....	47
ΕΙΚΟΝΑ 2-8 ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΠΡΟΦΙΛ ΖΗΤΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ - ΜΗ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ (ΣΑΒ/ΡΙΑΚΟ).....	47
ΕΙΚΟΝΑ 2-9 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ – ΜΗ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ: (Α) ΧΕΙΜΩΝΑΣ ΚΑΙ (Β) ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ.....	48
ΕΙΚΟΝΑ 2-10 ΕΤΗΣΙΑ ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ - ΜΗ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ.....	48
ΕΙΚΟΝΑ 2-11 ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΠΡΟΦΙΛ ΖΗΤΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ - ΜΗ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ .....	49
ΕΙΚΟΝΑ 2-12 ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΠΡΟΦΙΛ ΖΗΤΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ - ΜΗ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ, ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΤΟ ΣΠΙΤΙ/ΕΡΓΑΣΙΑ (70.000 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ) .....	50
ΕΙΚΟΝΑ 2-13 ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΠΡΟΦΙΛ ΖΗΤΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ - ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΜΕ ΔΙΩΩΝΙΚΟ ΤΙΜΟΛΟΓΙΟ .....	51
ΕΙΚΟΝΑ 2-14 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ – ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΜΕ ΔΙΩΩΝΙΚΟ ΤΙΜΟΛΟΓΙΟ: (Α) ΧΕΙΜΩΝΑΣ ΚΑΙ (Β) ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ .....	51
ΕΙΚΟΝΑ 2-15 ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΠΡΟΦΙΛ ΖΗΤΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ – ΜΗ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΜΕΣΩ ΔΙΩΩΝΙΚΟΥ ΤΙΜΟΛΟΓΙΟΥ.....	52
ΕΙΚΟΝΑ 2-16 ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΠΡΟΦΙΛ ΖΗΤΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ – ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ “VALLEY-FILLING” .....	53
ΕΙΚΟΝΑ 2-17 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ – ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ “VALLEY-FILLING” (ΧΕΙΜΩΝΑΣ) .....	53
ΕΙΚΟΝΑ 2-18 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΕΤΗΣΙΑ ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ – .....	53
ΕΙΚΟΝΑ 2-19 ΜΕΙΓΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ - 2020 .....	54
ΕΙΚΟΝΑ 2-20 ΕΤΗΣΙΟ ΕΙΔΙΚΟ ΚΟΣΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟ ΣΥΣΤΗΜΑ .....	55

ΕΙΚΟΝΑ 2-21 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΕΤΗΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΛΙΓΝΙΤΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ .....	55
ΕΙΚΟΝΑ 2-22 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΕΤΗΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΥ ΚΥΚΛΟΥ ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΜΕ ΤΗΝ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ .....	56
ΕΙΚΟΝΑ 2-23 ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΡΥΠΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ .....	56
ΕΙΚΟΝΑ 2-24 ΕΚΤΙΜΩΜΕΝΟ ΠΡΟΦΙΛ ΖΗΤΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΑΥΤΟΝΟΜΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ (2030) .....	57
ΕΙΚΟΝΑ 2-25 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΝΤΑΞΗ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΣΕ ΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ .....	58
ΕΙΚΟΝΑ 2-26 ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΕΤΗΣΙΟΥ ΠΡΟΦΙΛ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ ΛΟΓΩ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ – 30000 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ (ΣΕΝΑΡΙΟ ΑΝΑΦΟΡΑΣ Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ).....	61
ΕΙΚΟΝΑ 2-27 ΕΤΗΣΙΑ ΑΠΟΚΟΠΗ ΔΙΟΛΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ .....	62
ΕΙΚΟΝΑ 2-28 ΕΤΗΣΙΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO <sub>2</sub> ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ .....	62
ΕΙΚΟΝΑ 2-29 ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ CO <sub>2</sub> ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ .....	62
ΕΙΚΟΝΑ 2-30 ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ .....	63
ΕΙΚΟΝΑ 2-31 ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΕΙΔΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ .....	63
ΕΙΚΟΝΑ 2-32 ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ – ΜΗ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ.....	64
ΕΙΚΟΝΑ 2-33 ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΗΣ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΤΟΥ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ – ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ “VALLEY-FILLING” .....	66
ΕΙΚΟΝΑ 2-34 ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ ΣΤΟΥΣ ΖΥΓΟΥΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ.....	67
ΕΙΚΟΝΑ 2-35 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ....	67
ΕΙΚΟΝΑ 2-36 ΓΡΑΜΜΗ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ .....	68
ΕΙΚΟΝΑ 2-37 ΤΥΠΙΚΕΣ ΗΜΕΡΗΣΙΕΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ .....	68
ΕΙΚΟΝΑ 2-38 ΜΕΓΙΣΤΗ ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ ΚΑΙ ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΟΥ Μ/Σ ΜΕ ΤΗΝ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΕΠΙΒΑΡΥΝΣΗ (ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΠΙ ΤΗΣ ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ) .....	69
ΕΙΚΟΝΑ 2-39 ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ (Α.Μ.) ΚΑΙ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ (%) ΤΩΝ ΖΥΓΩΝ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ.....	69
ΕΙΚΟΝΑ 2-40 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ ΓΙΑ ΜΙΑ (Α) ΤΥΠΙΚΗ ΧΕΙΜΩΡΙΝΗ ΚΑΙ (Β) ΚΑΛΟΚΑΙΡΙΝΗ (ΔΕΞΙΑ) ΗΜΕΡΑ .....	70
ΕΙΚΟΝΑ 2-41 ΠΡΟΦΙΛ ΤΑΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΚΑΙ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ:.....	71
ΕΙΚΟΝΑ 2-42 ΜΕΓΙΣΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΓΡΑΜΜΩΝ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΚΑΙ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ: Α)ΜΕΓΙΣΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΓΡΑΜΜΩΝ ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ, Β) ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ, Γ)ΜΕΓΙΣΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΓΡΑΜΜΩΝ ΧΕΙΜΩΝΑ, Δ) ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΧΕΙΜΩΝΑ (ΠΟΣΟΣΤΑ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ) .....	72
ΕΙΚΟΝΑ 2-43 ΓΡΑΜΜΗ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕΣΗΣ ΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΤΗΣ ΙΚΑΡΙΑΣ.....	73
ΕΙΚΟΝΑ 2-44 ΤΥΠΙΚΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΤΗΣ ΙΚΑΡΙΑΣ.....	73
ΕΙΚΟΝΑ 2-45 ΜΕΓΙΣΤΗ ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗ ΤΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΤΗΣ ΙΚΑΡΙΑΣ.....	74
ΕΙΚΟΝΑ 2-46 ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΤΙΜΗ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ (Α.Μ.) ΤΩΝ ΖΥΓΩΝ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΤΗΣ ΙΚΑΡΙΑΣ.....	74
ΕΙΚΟΝΑ 2-47 ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ (%) ΤΩΝ ΖΥΓΩΝ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΤΗΣ ΙΚΑΡΙΑΣ.....	74
ΕΙΚΟΝΑ 2-48 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΤΗΣ ΙΚΑΡΙΑΣ (Α) ΓΙΑ ΤΟ ΕΛΑΧΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ (ΧΕΙΜΩΡΙΝΗ ΜΕΡΑ) ΚΑΙ (Β) ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ (ΚΑΛΟΚΑΙΡΙΝΗ ΜΕΡΑ) .....	75

ΕΙΚΟΝΑ 2-49 ΠΡΟΦΙΛ ΤΑΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΙΚΑΡΙΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΕΡΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ (0-450), ΑΠΕ (0-2MW) ΚΑΙ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ: Α)ΕΛΛΑΧΙΣΤΗ ΤΑΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ, Β) ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΑΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ, Γ)ΕΛΛΑΧΙΣΤΗ ΤΑΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ ΧΕΙΜΩΝΑ, Δ) ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΑΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΧΕΙΜΩΝΑ .....	77
ΕΙΚΟΝΑ 2-50 ΜΕΓΙΣΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΓΡΑΜΜΩΝ ΚΑΙ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΙΚΑΡΙΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΕΡΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ (0-450), ΑΠΕ (0-2MW) ΚΑΙ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ: Α)ΜΕΓΙΣΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΓΡΑΜΜΩΝ ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ, Β) ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ, Γ)ΜΕΓΙΣΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΓΡΑΜΜΩΝ ΧΕΙΜΩΝΑ, Δ) ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΧΕΙΜΩΝΑ (ΠΟΣΟΣΤΑ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ ΧΩΡΙΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ).....	78
ΕΙΚΟΝΑ 2-51 ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΑΥΞΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΧΜΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΤΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΕΣ ΧΩΡΕΣ. ....	79
ΕΙΚΟΝΑ 2-52 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΕΩΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΕΥΡΩΠΑΪΚΕΣ ΧΩΡΕΣ .....	80
ΕΙΚΟΝΑ 3-1 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΖΗΤΗΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΚΑΙ «ΡΑΥΒΑΚ ΕΦΦΕΚΤ».....	81
ΕΙΚΟΝΑ 3-2: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΕΛΑΧΙΣΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ .....	82
ΕΙΚΟΝΑ 3-3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ DAY-AHEAD ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ .....	84
ΕΙΚΟΝΑ 3-4 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΑΦΙΞΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΣΠΙΤΙ ΜΕΤΑ ΤΟ ΤΕΛΕΥΤΑΙΟ ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΤΑΞΙΔΙ.....	87
ΕΙΚΟΝΑ 3-5: ΠΟΣΟΣΤΟ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΕΙΝΑΙ ΠΑΡΚΑΡΙΣΜΕΝΑ ΣΤΟ ΣΠΙΤΙ.....	87
ΕΙΚΟΝΑ 3-6: 24ΩΡΗ ΧΡΟΝΟΣΕΙΡΑ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΑ ΩΡΑ .....	88
ΕΙΚΟΝΑ 3-7: ΖΗΤΗΣΗ ΟΧΗΜΑΤΩΝ, ΤΑΞΙΝΟΜΗΜΕΝΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΕΛΑΧΙΣΤΟ ΚΟΣΤΟΣ .....	88
ΕΙΚΟΝΑ 3-8: ΛΕΠΤΟΜΕΡΗΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΒΑΣΕΙ ΙΣΧΥΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ.....	89
ΕΙΚΟΝΑ 3-9 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ .....	90
ΕΙΚΟΝΑ 3-10 ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΙΣΧΥΟΣ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ( $P_{K\_REAL}$ ) ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΟΥ ΠΡΟΦΙΛ ΖΗΤΗΣΗΣ ( $P_K$ ).....	90
ΕΙΚΟΝΑ 3-11 ΠΕΡΙΣΣΕΙΑ ΙΣΧΥΟΣ ΒΑΣΕΙ ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΟΥ ΠΡΟΦΙΛ ΖΗΤΗΣΗΣ .....	91
ΕΙΚΟΝΑ 3-12 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΜΕ ΥΙΟΘΕΤΗΣΗ ΟΡΙΟΥ ΔΙΧΜΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ .....	93
ΕΙΚΟΝΑ 3-13 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΟΦΙΛ ΖΗΤΗΣΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΤΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΟΡΙΟΥ ΔΙΧΜΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ.....	93
ΕΙΚΟΝΑ 3-14 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΟΦΙΛ ΖΗΤΗΣΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΤΗ ΘΕΩΡΗΣΗ ΟΡΙΟΥ ΔΙΧΜΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ.....	95
ΕΙΚΟΝΑ 3-15 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ (“VALLEY-FILLING”).....	95
ΕΙΚΟΝΑ 3-16 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ “VALLEY-FILLING” .....	97
ΕΙΚΟΝΑ 3-17 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ ΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΑΡΙΘΜΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ .....	97
ΕΙΚΟΝΑ 3-18 ΜΙΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΗΣ .....	98
ΕΙΚΟΝΑ 3-19 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ (“VALLEY-FILLING”) 103	
ΕΙΚΟΝΑ 3-20 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΠΑΙΓΝΙΟ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ (“VALLEY-FILLING”).....	105
ΕΙΚΟΝΑ 3-21 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΠΑΙΓΝΙΟ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ (“VALLEY-FILLING”)- ΣΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ RAU (ΜΗ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ).....	106
ΕΙΚΟΝΑ 3-22 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΠΑΙΓΝΙΟ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ (“VALLEY-FILLING”)- ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΖΗΤΗΣΗ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΟΥ Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ (ΜΗ ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ) .....	106
ΕΙΚΟΝΑ 3-23 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΠΑΙΓΝΙΟ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ (“VALLEY-FILLING”)- ΣΗΜΑΤΑ *ΕΛΕΓΧΟΥ RAU (ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ – WEAKLY COUPLED AGENTS) .....	108
ΕΙΚΟΝΑ 3-24 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΠΑΙΓΝΙΟ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ (“VALLEY-FILLING”)- ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΖΗΤΗΣΗ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΟΥ Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ (ΣΥΖΕΥΓΜΕΝΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ – WEAKLY COUPLED AGENTS) .....	108

ΕΙΚΟΝΑ 3-25 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟΥ ΚΑΙ ΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ “VALLEY-FILLING” ΘΕΩΡΩΝΤΑΣ ΜΗ ΟΜΟΙΟΓΕΝΗ ΣΤΟΛΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ .....	109
ΕΙΚΟΝΑ 3-26 ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΕΤΕΡΟΓΕΝΗ ΣΤΟΛΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ .....	110
ΕΙΚΟΝΑ 3-27 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ ΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ .....	111
ΕΙΚΟΝΑ 3-28 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΧΡΟΝΟΥ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ ΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΚΑΙ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ .....	112
ΕΙΚΟΝΑ 3-29 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΣΤΟΛΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΧΡΟΝΟ ..	115
ΕΙΚΟΝΑ 3-30 ΘΕΩΡΟΥΜΕΝΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΖΗΤΗΣΗΣ Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ .....	116
ΕΙΚΟΝΑ 3-31 ΠΙΘΑΝΟΤΗΤΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΑΝΑ ΩΡΑ.....	116
ΕΙΚΟΝΑ 3-32 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ Α .....	117
ΕΙΚΟΝΑ 3-33 ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ - ΣΕΝΑΡΙΟ Α .....	118
ΕΙΚΟΝΑ 3-34 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΣΕΝΑΡΙΟ Β.....	118
ΕΙΚΟΝΑ 3-35 ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ - ΣΕΝΑΡΙΟ Β .....	118
ΕΙΚΟΝΑ 3-36 ΕΠΙΠΕΔΟ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΑΝΑΧΩΡΗΣΗ ΤΩΝ ΑΦΟΡΤΙΣΤΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ - ΣΕΝΑΡΙΟ Β.....	119
ΕΙΚΟΝΑ 3-37 ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΦΟΡΤΙΣΤΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ ΣΤΗΝ ΕΥΕΛΙΚΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ - .....	119
ΕΙΚΟΝΑ 4-1 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΑΓΚΟΣΜΙΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΡΥΠΩΝ CO <sub>2</sub> ΑΝΑ ΤΟΜΕΑ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ (ΙΕΑ- 2015).....	122
ΕΙΚΟΝΑ 4-2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΤΟΥ ΟΡΙΟΥ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΑΠΕ ΣΕ ΕΝΑ ΔΙΚΤΥΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ ΚΡΙΤΗΡΙΟ ΤΗΝ ΤΑΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ.....	126
ΕΙΚΟΝΑ 4-3 ΚΑΜΠΥΛΗ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ $Q(V)$ .....	128
ΕΙΚΟΝΑ 4-4 ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΑΣΗ ΖΥΓΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΗΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΑΠΕ ΚΑΙ ΤΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΤΗΣ.....	129
ΕΙΚΟΝΑ 4-5 ΟΡΙΟ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΑΠΕ ΒΑΣΕΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΑΠΟΣΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΖΥΓΩΝ.....	130
ΕΙΚΟΝΑ 4-6 ΟΡΙΟ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΑΠΕ ΑΝΑ ΖΥΓΟ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΕΛΕΓΧΟ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ .....	130
ΕΙΚΟΝΑ 4-7 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΑΠΕ.....	132
ΕΙΚΟΝΑ 4-8 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΙΚΤΟΥ ΑΚΕΡΑΙΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ GBD.....	139
ΕΙΚΟΝΑ 4-9 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΚΤΥΟΥ: ΠΡΟΦΙΛ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΔΙΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ.....	140
ΕΙΚΟΝΑ 4-10 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΚΕΝΤΡΙΚΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΣΥΝΕΡΓΕΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ/ΑΠΕ .....	141
ΕΙΚΟΝΑ 4-11 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΔΙΚΤΥΟΥ: ΠΡΟΦΙΛ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΚΑΙ ΔΙΑΘΕΣΙΜΗ ΔΙΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ.....	141
ΕΙΚΟΝΑ 4-12 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΣΥΝΕΡΓΕΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ/ΑΠΕ .....	142
ΕΙΚΟΝΑ 4-13 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΕΤΕΡΟΓΕΝΗ ΣΤΟΛΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ .....	142
ΕΙΚΟΝΑ 4-14 ΖΗΤΗΣΗ 300 ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ .....	145
ΕΙΚΟΝΑ 4-15 ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΑΣΗΣ ΑΝΑ ΖΥΓΟ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ.....	145
ΕΙΚΟΝΑ 4-16 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ .....	146
ΕΙΚΟΝΑ 4-17 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥ ΑΠΕ .....	146
ΕΙΚΟΝΑ 4-18 ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΑΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΗΟ ΚΑΙ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ.....	147
ΕΙΚΟΝΑ 4-19 ΣΥΝΕΡΓΕΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΑΠΕ (ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ Γ ΚΑΙ Δ).....	148
ΕΙΚΟΝΑ 4-20 ΩΡΙΑΙΟ ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΠΡΟΦΙΛ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΩΣ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΗΣ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΟΥΣ.....	148
ΕΙΚΟΝΑ 4-21 ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΤΩΝ ΖΥΓΩΝ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΦΒ.....	149
ΕΙΚΟΝΑ 4-22 ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΠΡΟΦΙΛ ΤΑΣΗΣ ΑΝΑ ΖΥΓΟ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΦΒ: (Α) 5MW ΚΑΙ (Β) 11.1MW .....	150
ΕΙΚΟΝΑ 4-23 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΑΠΕ .....	150

ΕΙΚΟΝΑ 4-24 ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗ ΤΗΣ ΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ Μ.Τ. ΤΗΣ ΣΠΕΡΧΕΙΑΔΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΦΒ/ΗΟ ΚΑΙ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ .....	151
ΕΙΚΟΝΑ 4-25 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ Μ.Τ. ΤΗΣ ΣΠΕΡΧΕΙΑΔΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΦΒ/ΗΟ ΚΑΙ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ .....	152
ΕΙΚΟΝΑ 4-26 ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΤΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ Μ.Τ. ΤΗΣ ΣΠΕΡΧΕΙΑΔΑΣ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΑ ΣΕΝΑΡΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΦΒ ΚΑΙ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΕΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (800 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ).....	152
ΕΙΚΟΝΑ 5-1 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΥΤΟΜΑΤΟΥ ΡΥΘΜΙΣΤΗ ΤΑΣΗΣ .....	155
ΕΙΚΟΝΑ 5-2 ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ (LOAD-FREQUENCY CONTROL - LFC) [183] .....	157
ΕΙΚΟΝΑ 5-3 ΡΥΘΜΙΣΤΗΣ ΣΤΡΟΦΩΝ ΑΤΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ [184].....	157
ΕΙΚΟΝΑ 5-4 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ .....	158
ΕΙΚΟΝΑ 5-5 ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΣΤΡΟΒΙΛΟΥ ΧΩΡΙΣ ΑΝΑΘΕΡΜΑΝΣΗ ΚΑΙ ΤΟΥ ΡΥΘΜΙΣΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΤΟΥ.....	158
ΕΙΚΟΝΑ 5-6 ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑ ΡΥΘΜΙΣΗ....	159
ΕΙΚΟΝΑ 5-7 ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΤΑΘΕΡΗΣ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ.....	159
ΕΙΚΟΝΑ 5-8 ΤΡΟΠΟΠΟΙΗΜΕΝΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ (LOAD-FREQUENCY CONTROL - LFC) ΜΕ ΤΗ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ.....	160
ΕΙΚΟΝΑ 5-9 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗΣ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ .	162
ΕΙΚΟΝΑ 5-10 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΑΣΗΣ –ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ.....	162
ΕΙΚΟΝΑ 5-11 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ.....	163
ΕΙΚΟΝΑ 5-12 ΣΤΑΘΕΡΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΕΥΜΑΤΟΣ: ΔΙΑΚΕΚΟΜΜΕΝΗ ΚΑΜΠΥΛΗ $SOC_{MAX}=0.9$ , $SOC_{MIN}=0.1$ , $SOC_{HIGH}=0.8$ , $SOC_{LOW}=0.2$ . ΚΑΙ ΣΥΝΕΧΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗ $SOC_{MAX}=0.9$ , $SOC_{MIN}=0.5$ , $SOC_{HIGH}=0.9$ , $SOC_{LOW}=0.5$ . .....	164
ΕΙΚΟΝΑ 5-13 ΣΤΑΤΙΚΟΣ ΚΑΙ ΔΥΝΑΜΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΜΕΣΩ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΣΤΑΤΙΣΜΟΥ .....	164
ΕΙΚΟΝΑ 5-14 ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΜΕΣΩ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΣΤΑΤΙΣΜΟΥ .....	165
ΕΙΚΟΝΑ 5-15 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΣΕ MATLAB/SIMULINK	166
ΕΙΚΟΝΑ 5-16 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΣΕ EUROSTAG .....	167
ΕΙΚΟΝΑ 5-17 ΥΠΟΘΕΤΙΚΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ .....	168
ΕΙΚΟΝΑ 5-18 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΗ ΠΡΩΤΕΥΟΥΣΑ ΡΥΘΜΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕΣΩ ΑΠΛΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ .....	169
ΕΙΚΟΝΑ 5-19 ΜΟΝΟΦΑΣΙΚΟ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ.....	171
ΕΙΚΟΝΑ 5-20 ΠΡΟΦΙΛ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ ΧΑΜΗΛΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ..	173
ΕΙΚΟΝΑ 5-21 ΠΡΟΦΙΛ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ ΥΨΗΛΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ....	174
ΕΙΚΟΝΑ 5-22 ΠΡΟΦΙΛ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ ΧΑΜΗΛΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ, ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΑ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΦΒ (ΣΕΝΑΡΙΟ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗΣ Δ1).....	174
ΕΙΚΟΝΑ 5-23 ΠΡΟΦΙΛ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ ΧΑΜΗΛΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ, ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΑ ΚΑΙ ΜΕ ΦΒ (ΣΕΝΑΡΙΟ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗΣ Δ1) .....	175
ΕΙΚΟΝΑ 5-24 ΠΡΟΦΙΛ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ ΥΨΗΛΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ, ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΑ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΦΒ (ΣΕΝΑΡΙΟ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗΣ Δ1).....	175
ΕΙΚΟΝΑ 5-25 ΠΡΟΦΙΛ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ ΥΨΗΛΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ, ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΑ ΚΑΙ ΜΕ ΦΒ (ΣΕΝΑΡΙΟ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗΣ Δ1) .....	175
ΕΙΚΟΝΑ 5-26 ΙΣΧΥΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΠΡΙΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΤΗ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ Δ1 ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ .....	176
ΕΙΚΟΝΑ 5-27 ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΡΙΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΤΗ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ Δ1 ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ .....	177
ΕΙΚΟΝΑ 5-28 ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΔΙΚΤΥΟΥ ΠΡΙΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΤΗ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗ Δ1 ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ .....	177
ΕΙΚΟΝΑ 5-29 ΠΛΗΡΗΣ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΑΓΟΡΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΧΟΝΔΡΕΜΠΟΡΙΚΗ ΚΑΙ ΕΦΕΔΡΕΙΩΝ).....	178
ΕΙΚΟΝΑ 5-30 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΩΡΙΑΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥ ΣΤΟΛΟΥ .....	189
ΕΙΚΟΝΑ 5-31 ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΣΤΗ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑ ΡΥΘΜΙΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕΣΩ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗΣ ΣΤΑΤΙΣΜΟΥ .....	191

ΕΙΚΟΝΑ 5-32 ΑΡΙΘΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΕΙΝΑΙ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΑ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	195
ΕΙΚΟΝΑ 5-33 ΤΙΜΕΣ ΑΓΟΡΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ .....	195
ΕΙΚΟΝΑ 5-34 ΠΡΟΒΛΕΠΟΜΕΝΟ ΦΟΡΤΙΟ ΔΙΚΤΥΟΥ .....	196
ΕΙΚΟΝΑ 5-35 ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΣΗΜΑ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ V2G ΑΠΟ ΤΟΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΚΑΛΙΦΟΡΝΙΑΣ (CAISO) .....	196
ΕΙΚΟΝΑ 5-36 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ ΘΕΩΡΩΝΤΑΣ ΜΟΝΟ ΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ .....	197
ΕΙΚΟΝΑ 5-37 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΤΟΝ ΗΜΕΡΗΣΙΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ ΘΕΩΡΩΝΤΑΣ ΑΜΦΙΔΡΟΜΗ ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ ΑΠΟ ΚΑΙ ΠΡΟΣ ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ .....	197
ΕΙΚΟΝΑ 5-38 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΩΡΙΑΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΗΜΕΡΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ .....	198
ΕΙΚΟΝΑ 5-39 ΕΙΚΟΝΙΚΑ ΣΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΩΡΙΑΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΗΜΕΡΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ .....	198
ΕΙΚΟΝΑ 5-40 ΕΙΚΟΝΙΚΑ ΣΗΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΩΡΙΑΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΗΜΕΡΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ .....	199
ΕΙΚΟΝΑ 5-41 ΠΡΟΦΙΛ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΕΝΟΣ ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΕΞΕΤΑΖΟΜΕΝΗ ΟΜΑΔΑ .....	199
ΕΙΚΟΝΑ 5-42 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΣΤΟΛΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ .....	200
ΕΙΚΟΝΑ 5-43 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΤΟΥ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕΣΩ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΣΤΑΤΙΣΜΟΥ .....	201
ΕΙΚΟΝΑ 5-44 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕΣΩ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΣΤΑΤΙΣΜΟΥ .....	202
ΕΙΚΟΝΑ 5-45 ΧΡΟΝΟΣ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕΣΩ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΣΤΑΤΙΣΜΟΥ ...	202
ΕΙΚΟΝΑ 5-46 ΠΡΟΦΙΛ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕΣΩ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΣΤΑΤΙΣΜΟΥ .....	203
ΕΙΚΟΝΑ 5-47 ΠΡΟΦΙΛ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΙΚΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕΣΩ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΣΤΑΤΙΣΜΟΥ .....	203
ΕΙΚΟΝΑ 5-48 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑΣ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΕΝΑ ΕΝΔΕΙΚΤΙΚΟ ΟΧΗΜΑ	204
ΕΙΚΟΝΑ 5-49 ΑΠΟΚΡΙΣΗ ΣΤΟΛΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΣΗΜΑ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ( $RS_{Mw}$ ) ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑΣ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ .....	204
ΕΙΚΟΝΑ 5-50 ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΟΥ ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΣΗΜΑΤΟΣ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑΣ ΡΥΘΜΙΣΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ .....	204
ΕΙΚΟΝΑ 5-51 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΙΚΤΟΥ ΑΚΕΡΑΙΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΟΑ .....	206
ΕΙΚΟΝΑ 5-52 RMSE ΣΦΑΛΜΑ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΟΑ .....	207
ΕΙΚΟΝΑ 5-53 ΣΦΑΛΜΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ ΚΑΘΕ ΩΡΑ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΟΑ .....	207
ΕΙΚΟΝΑ 5-54 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ $\gamma$ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΟΑ .....	207
ΕΙΚΟΝΑ 5-55 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΗ ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΚΑΙ ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ .....	208
ΕΙΚΟΝΑ 5-56 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΣΥΓΚΛΙΣΗΣ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ GBD ΚΑΙ ΟΑ .....	208
ΕΙΚΟΝΑ 6-1 ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ .....	209
ΕΙΚΟΝΑ 6-2 ΑΚΡΟΔΕΚΤΕΣ ΚΑΛΩΔΙΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΥΠΟΥ 2 (IEC 62196) .....	210
ΕΙΚΟΝΑ 6-3 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΜΕΤΑΞΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (IEC 61851) .....	211
ΕΙΚΟΝΑ 6-4 ΕΠΙΤΡΕΠΤΕΣ ΜΕΤΑΒΑΣΕΙΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (IEC 61851) .....	212
ΕΙΚΟΝΑ 6-5 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΓΙΑ ΜΙΑ ΠΛΗΡΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (IEC 61851) .....	213
ΕΙΚΟΝΑ 6-6 ΠΡΩΤΕΥΟΝΤΕΣ ΚΑΙ ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΝΤΕΣ ΠΑΙΚΤΕΣ ΟΠΩΣ ΟΡΙΖΟΝΤΑΙ ΣΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ IEC15118215	

ΕΙΚΟΝΑ 6-7 ΟΜΑΔΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΩΝ ΟΠΩΣ ΟΡΙΖΟΝΤΑΙ ΣΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ IEC15118 .....	215
ΕΙΚΟΝΑ 6-8 ΠΡΟΤΥΠΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ IEC61851 .....	219
ΕΙΚΟΝΑ 6-9 ΠΡΟΤΥΠΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ IEC61851 .....	221
ΕΙΚΟΝΑ 6-10 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΚΑΤΑ IEC61581 .....	221
ΕΙΚΟΝΑ 6-11 ΓΡΑΦΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ .....	221
ΕΙΚΟΝΑ 6-12 ΕΜΠΟΡΙΚΟΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΤΗΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ .....	222
ΕΙΚΟΝΑ 6-13 ΣΧΗΜΑΤΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΣΤΑΘΜΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ IEC61851 ...	222
ΕΙΚΟΝΑ 6-14 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ IEC61851 .....	223
ΕΙΚΟΝΑ 6-15 ΓΡΑΦΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗΣ .....	223
ΕΙΚΟΝΑ 6-16 ΠΡΟΤΥΠΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ IEC61851 .....	223
ΕΙΚΟΝΑ 6-17 ΠΡΟΤΥΠΟΣ ΣΤΑΘΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟ ΠΡΟΤΥΠΟ IEC61851 .....	224
ΕΙΚΟΝΑ 6-18 ΕΝΝΟΙΟΛΟΓΙΚΗ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ .....	228
ΕΙΚΟΝΑ 6-19 ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ΠΛΑΤΦΟΡΜΑΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ .....	235
ΕΙΚΟΝΑ 6-20 ΣΧΕΣΙΑΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΗΣ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .....	235
ΕΙΚΟΝΑ 6-21 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ JAVA ΚΛΑΣΕΩΝ ΤΩΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΠΟΥ ΑΠΕΙΚΟΝΙΖΟΥΝ ΤΗ ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ .....	237
ΕΙΚΟΝΑ 6-22 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΧΡΟΝΟΥ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΗΝΥΜΑΤΩΝ ΕΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙ ΤΟΥ ΟΓΚΟΥ ΤΟΥΣ (ΑΡΙΣΤΕΡΑ SOAP WEB SERVICES, ΔΕΞΙΑ REST WEB SERVICES) [199] .....	239
ΕΙΚΟΝΑ 6-23 ΑΡΧΙΚΗ (ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΧΡΗΣΤΗ) ΚΑΙ ΒΑΣΙΚΗ ΟΘΟΝΗ (ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ) ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΧΡΗΣΤΗ .....	244
ΕΙΚΟΝΑ 6-24 ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑ ΟΘΟΝΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΧΡΗΣΤΗ – ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΑΝΑ ΣΤΑΘΜΟ.....	245
ΕΙΚΟΝΑ 6-25 ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΑ ΟΘΟΝΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΧΡΗΣΤΗ – ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΑΝΑ ΣΤΑΘΜΟ.....	246





## ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ 1-1 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΝΤΑΙ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ [9] ...	4
ΠΙΝΑΚΑΣ 1-2 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΝΕΥΡΜΑΤΗΣ ΚΑΙ ΑΣΥΡΜΑΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ .....	7
ΠΙΝΑΚΑΣ 1-3 ΆΞΟΝΕΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ ΤΗΣ ΚΑΤΑΛΥΤΙΚΗΣ ΦΑΣΗΣ .....	14
ΠΙΝΑΚΑΣ 1-4 ΆΞΟΝΕΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ ΤΗΣ ΦΑΣΗΣ ΕΔΡΑΙΩΣΗΣ .....	16
ΠΙΝΑΚΑΣ 1-5 ΆΞΟΝΕΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ ΤΗΣ ΠΡΟΧΩΡΗΜΕΝΗΣ ΦΑΣΗΣ .....	18
ΠΙΝΑΚΑΣ 1-6 ΚΑΤΑΛΥΤΙΚΗ ΦΑΣΗ - ΕΥΚΑΙΡΙΕΣ ΚΑΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΕΜΠΛΕΚΟΜΕΝΟΥΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ (ΜΗ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ) .....	20
ΠΙΝΑΚΑΣ 1-7 ΕΥΚΑΙΡΙΕΣ ΚΑΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΕΜΠΛΕΚΟΜΕΝΟΥΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ (ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ) .....	23
ΠΙΝΑΚΑΣ 2-1 ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΑΝΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ .....	40
ΠΙΝΑΚΑΣ 2-2 ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗ ΣΤΟ ΣΠΙΤΙ Η ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΣΗΜΕΙΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ .....	41
ΠΙΝΑΚΑΣ 2-3 ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΙΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΤΑΘΜΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ..	41
ΠΙΝΑΚΑΣ 2-4 ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΟΥ ΣΤΟΛΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΠΡΕΠΕΙ ΝΑ ΦΟΡΤΙΣΟΥΝ ΜΕΣΑ ΣΤΗΝ ΗΜΕΡΑ .....	47
ΠΙΝΑΚΑΣ 2-5 ΣΕΝΑΡΙΑ ΣΥΜΜΕΤΟΧΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΜΕΣΩ ΔΙΖΩΝΙΚΟΥ ΤΙΜΟΛΟΓΙΟΥ ....	50
ΠΙΝΑΚΑΣ 2-6 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΓΙΑ ΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΟΥ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ .....	52
ΠΙΝΑΚΑΣ 2-7 ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΡΗΤΗΣ – 2030 .....	55
ΠΙΝΑΚΑΣ 2-8 ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΑΥΞΗΣΗ ΣΤΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΤΟΥΣ – ΜΗ ΕΛΕΓΧΟΜΕΝΗ ΦΟΡΤΙΣΗ .....	63
ΠΙΝΑΚΑΣ 2-9 ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΗ ΑΥΞΗΣΗ ΣΤΗ ΜΕΓΙΣΤΗ ΦΟΡΤΙΣΗ ΤΟΥΣ – “VALLEY-FILLING” .....	64
ΠΙΝΑΚΑΣ 2-10 ΠΟΙΟΤΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΤΗΣ ΚΑΤΕΡΙΝΗΣ ΜΕ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ .....	68
ΠΙΝΑΚΑΣ 2-11 ΠΟΙΟΤΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΚΑΜΠΥΛΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΗΣ ΙΚΑΡΙΑΣ ΜΕ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ .....	74
ΠΙΝΑΚΑΣ 2-12 ΠΟΙΟΤΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΤΗΣ ΙΚΑΡΙΑΣ ΜΕ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ .....	74
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-1: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ (1Α) .....	83
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-2: ΠΟΣΟΣΤΙΑΙΑ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΚΑΙ ΙΣΧΥ ΦΟΡΤΙΣΗΣ .....	84
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-3 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑ ΤΥΠΟ ΚΑΙ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΩΝ ΔΙΑΣΤΗΜΑΤΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ .....	86
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-4 ΛΙΣΤΑ ΑΦΟΡΤΙΣΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ .....	90
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-5: ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΟΙΝΩΝ ΠΑΙΓΝΙΟΥ (PRISONER DILEMMA) .....	98
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-6: ΕΤΕΡΟΓΕΝΗΣ ΣΤΟΛΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ .....	107
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-7: ΒΑΘΜΟΣ ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΖΗΤΗΣΗΣ .....	112
ΠΙΝΑΚΑΣ 3-8: ΒΑΘΜΟΣ ΠΡΟΤΕΡΑΙΟΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑ ΖΗΤΗΣΗΣ .....	116
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-1: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΓΙΑ ΤΟ ΟΡΙΟ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΑΠΕ .....	129
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-2: ΜΕΓΙΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ .....	143
ΠΙΝΑΚΑΣ 4-3: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΛΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ $N_{EV}$ .....	149
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-1: ΣΕΝΑΡΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΠΡΟΦΙΛ ΖΗΤΗΣΗΣ/ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΕ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ .....	169
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-2: ΤΟ ΠΡΟΦΙΛ ΕΝΤΑΞΗΣ ΤΩΝ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ ΑΝΑ ΣΕΝΑΡΙΟ .....	171
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-3: ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΚΔΗΛΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΑΡΑΧΗΣ Δ1 .....	171
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-4: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΛΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ .....	193
ΠΙΝΑΚΑΣ 5-5: ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΑ ΠΟΣΟΣΤΑ ΕΠΙΚΟΥΡΙΚΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ .....	194
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-1 ΚΥΚΛΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (DUTY CYCLE) ΤΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΟΥ ΟΡΙΖΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟΝ ΣΤΑΘΜΟ ΦΟΡΤΙΣΗΣ .....	211
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-2 ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ (STATE MACHINE) .....	212
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-3 ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ .....	214
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-4 ΒΑΣΙΚΑ ΜΗΝΥΜΑΤΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΕΝΟΣ ΠΛΗΡΟΥΣ ΚΥΚΛΟΥ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (OCPP) .....	216

ΠΙΝΑΚΑΣ 6-5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΔΙΑΘΕΣΙΜΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΣΤΟ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ JRC (ISPRA, ΙΤΑΛΙΑ) – COTEVOS PROJECT.....	225
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-6 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΧΡΗΣΤΩΝ AX-1.....	229
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-7 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΧΡΗΣΤΩΝ AX-2.....	230
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-8 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΧΡΗΣΤΩΝ AX-3.....	230
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-9 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΧΡΗΣΤΩΝ AX-4.....	230
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-10 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΧΡΗΣΤΩΝ AX-5.....	230
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-11 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΧΡΗΣΤΩΝ AX-6.....	230
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-12 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΧΡΗΣΤΩΝ AX-7.....	231
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-13 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΧΡΗΣΤΩΝ AX-8.....	231
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-14 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΧΡΗΣΤΩΝ AX-9.....	231
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-15 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΧΡΗΣΤΩΝ AX-10.....	231
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-16 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΧΡΗΣΤΩΝ AX-11.....	231
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-17 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΧΡΗΣΤΩΝ AX-12.....	231
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-18 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΣ-1.....	232
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-19 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΣ-2.....	232
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-20 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΣ-3.....	232
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-21 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΣ-4.....	232
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-22 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΣ-5.....	232
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-23 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΣ-6.....	232
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-24 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΣ-7.....	233
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-25 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΣ-8.....	233
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-26 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΣ-9.....	233
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-27 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΣ-10.....	233
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-28 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΣ-11.....	233
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-29 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΣ-12.....	233
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-30 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΣ-13.....	234
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-31 ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΣ-14.....	234
ΠΙΝΑΚΑΣ 6-32 ΣΥΓΚΡΙΣΗ SOAP –RESTFUL WEB SERVICES [199] .....	238

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗ

### 1.1 Τεχνολογίες Ηλεκτρικών Οχημάτων

#### 1.1.1 Τεχνολογίες Ηλεκτροκίνησης

Τα ηλεκτρικά οχήματα διαχωρίζονται, ανάλογα με την τεχνολογία τους, στις εξής κατηγορίες:

✓ **Ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας (Battery Electric Vehicles - BEV)**

Η χημική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στη μπαταρία που είναι εγκατεστημένη στο όχημα χρησιμοποιείται για την κίνηση ενός ή περισσότερων ηλεκτρικών κινητήρων. Η αυτονομία οδήγησης, χωρίς ενδιάμεση φόρτιση, είναι περιορισμένη (περίπου 150km κατά μέσο όρο). Το κόστος για τη φόρτιση της μπαταρίας τους και, συνεπώς, το λειτουργικό κόστος τους, είναι ιδιαίτερα χαμηλό συγκριτικά με το αντίστοιχο των συμβατικών οχημάτων. Οι άμεσες εκπομπές ρύπων από τα ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας είναι μηδενικές. Ενδεικτικά παραδείγματα οχημάτων αυτής της κατηγορίας είναι τα: Smart-for-Two, Tesla Roadster, Nissan Leaf, i-MiEV, BMW i3, Renault Zoe, κτλ.

✓ **Ηλεκτρικά οχήματα αυξημένης αυτονομίας (Extended Range Electric Vehicles - EREV)**

Τα οχήματα της κατηγορίας αυτής διαθέτουν μηχανή εσωτερικής καύσης και ηλεκτρικό κινητήρα. Ωστόσο, η κίνηση του οχήματος στηρίζεται αποκλειστικά στον ηλεκτρικό κινητήρα. Η μηχανή εσωτερικής καύσης χρησιμοποιείται μόνο για την κίνηση μιας γεννήτριας που σκοπό έχει την φόρτιση της κύριας μπαταρίας του ηλεκτρικού οχήματος. Η βασική και πλήρης φόρτιση της μπαταρίας πραγματοποιείται με την διασύνδεση του οχήματος στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Η τεχνολογία αυτή δίνει τη δυνατότητα αύξησης της αυτονομίας οδήγησης (>300km) εν συγκρίσει με τα καθαρά ηλεκτρικά οχήματα BEV. Ενδεικτικά παραδείγματα οχημάτων αυτής της κατηγορίας είναι: Opel Ampera, Chevrolet Volt, Fisker Karma, Renault Kangoo, κτλ.

✓ **Plug-in Υβριδικά Οχήματα (PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicles)**

Τα οχήματα της κατηγορίας αυτής, όπως και τα EREV, διαθέτουν δύο τύπους κινητήρων: ένα ηλεκτροκινητήρα, ο οποίος τροφοδοτείται από μια μπαταρία παρέχοντας αυτονομία οδήγησης μερικών δεκάδων χιλιομέτρων, και έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων: *παράλληλης σύνδεσης* όπου η μηχανή εσωτερικής καύσης και ο ηλεκτρικός κινητήρας είναι συνδεδεμένα στο μηχανικό σύστημα μετάδοσης της κίνησης, *εν σειράς σύνδεσης* όπου μόνο ο ηλεκτρικό κινητήρας δίνει την κίνηση στους τροχούς, ενώ η μηχανή εσωτερικής καύσης χρησιμοποιείται για να φορτίζει τη μπαταρία ή να παρέχει ισχύ στο ηλεκτρικό κινητήρα και *μεικτού τύπου* όπου συνδυάζονται η παράλληλη και η εν σειρά σύνδεση<sup>1</sup>. Ενδεικτικά παραδείγματα οχημάτων αυτής της κατηγορίας είναι : Chevrolet Volt PHEV, Saturn VUE PHEV, Kia LPGand electric Hybrid, κτλ.

---

<sup>1</sup>University of Missouri-Columbia, Plug-in Hybrid Electric Vehicles:  
<http://web.missouri.edu/~suppesg/PHEV.htm>

### 1.1.2 Κλάσεις Ηλεκτρικών Οχημάτων

Όλα τα οχήματα, ανάλογα με τον αριθμό των τροχών που διαθέτουν και τη χρήση τους, κατατάσσονται (σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή νομοθεσία) σε διάφορες κατηγορίες [1]. Αντίστοιχη κατηγοριοποίηση υιοθετείται και για τα ηλεκτρικά οχήματα [2]:

- ✓ **L2e:** Δίκυκλα οχήματα με μία μέγιστη ταχύτητα που δεν ξεπερνά τα 45 km/h και κινητήρα με ισχύ μικρότερη από 4KW.
- ✓ **L3e:** Δίκυκλα οχήματα με ταχύτητα μεγαλύτερη των 45 km/h.
- ✓ **L6e:** Οχήματα τεσσάρων τροχών με βάρος χωρίς φορτίο όχι μεγαλύτερο από 350kg (το βάρος της μπαταρίας δε συμπεριλαμβάνεται). Η μέγιστη ταχύτητα των οχημάτων αυτών είναι 45 km/h, ενώ η ισχύς του κινητήρα δεν ξεπερνά τα 4KW.
- ✓ **L7e:** Οχήματα τεσσάρων τροχών με μέγιστο βάρος χωρίς φορτίο, το οποίο δεν περιλαμβάνει και το βάρος της μπαταρίας, 400kg (550kg για οχήματα που προορίζονται να μεταφέρουν εμπορεύματα). Η μέγιστη ισχύς του κινητήρα είναι 15KW.
- ✓ **M1:** Επιβατικά οχήματα τεσσάρων τροχών με το πολύ 8 θέσεις συν τη θέση του οδηγού. Τα οχήματα της κλάσης αυτής αναμένεται να είναι τα κυρίαρχα στην αγορά ηλεκτρικών οχημάτων.
- ✓ **M2,M3:** Μεγαλύτερα επιβατικά οχήματα με βάρος ίσο ή μεγαλύτερο από 5 τόνους (M2 και M3 αντίστοιχα) τεσσάρων τροχών, με το πολύ 8 θέσεις συν τη θέση του οδηγού.
- ✓ **N1:** Οχήματα για τη μεταφορά αγαθών με βάρος χωρίς φορτίο που δεν ξεπερνά τους 3,5 τόνους.
- ✓ **N2:** Οχήματα για τη μεταφορά αγαθών με βάρος χωρίς φορτίο που κυμαίνεται μεταξύ 3,5 και 12 τόνων.

Οι διαθέσιμες τεχνολογίες ηλεκτρικών οχημάτων και συστοιχιών καθιστούν αποτρεπτική τη χρήση τους για εμπορικά οχήματα με βάρος μεγαλύτερο των 12 τόνων.

### 1.1.3 Τεχνολογίες Αποθήκευσης

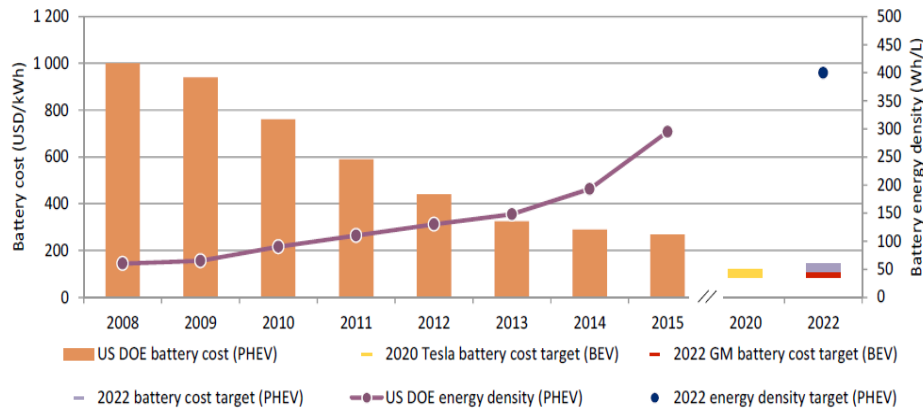
Ένα από τα βασικότερα μέρη του Ηλεκτρικού Οχήματος, αν όχι το βασικότερο, είναι η συστοιχία συσσωρευτών. Τα τελευταία χρόνια επενδύονται σημαντικά κεφάλαια και παρουσιάζεται, παγκοσμίως, έντονη επιστημονική δραστηριότητα για τη βελτίωση των χαρακτηριστικών υφιστάμενων τύπων συσσωρευτών ή/και την επινοήση νέων τύπων συσσωρευτών. Στόχος είναι η ευρεία παραγωγή συσσωρευτών με μικρότερο κόστος, μεγαλύτερη χωρητικότητα και ισχύ, καθώς και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

Η σημαντικές εξελίξεις στον τομέα των συσσωρευτών τις τελευταίες δεκαετίες επέτρεψαν την εμπορική τους χρήση στον χώρο της αυτοκινητοβιομηχανίας. Ωστόσο, το κόστος των μπαταριών είναι υψηλό, ακόμα και σήμερα, ανεβάζοντας σημαντικά το κόστος αγοράς ενός ηλεκτρικού οχήματος συγκριτικά με το κόστος του αντίστοιχου συμβατικού. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια σημαντική μείωση στο κόστος της μπαταρίας με παράλληλη αύξηση της πυκνότητας ενέργειας, όπως περιγράφεται στην αναφορά της IEA “Global EV outlook 2016” [3] (Εικόνα 1-1).

Υπάρχουν διαφορετικές τεχνολογίες μπαταριών που είναι εμπορικά διαθέσιμες. Κάθε τεχνολογία έχει τα δικά της χαρακτηριστικά και, επομένως, τα δικά της πλεονεκτήματα/μειονεκτήματα συγκριτικά με τις ανταγωνιστικές τεχνολογίες. Στη συνέχεια, αναλύονται οι κύριες τεχνολογίες συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται σήμερα για την αποθήκευση ενέργειας στα ηλεκτρικά οχήματα [4]-[9] :

#### ✓ *Μολύβδου οξέος (Lead-Acid)*

Είναι μία αρκετά διαδεδομένη τεχνολογία, κυρίως λόγω του χαμηλού κόστους της, που κυμαίνεται μεταξύ 70-110€/KWh. Το χαμηλό κόστος μετέτρεψε αυτό τον τύπο μπαταριών στην κύρια επιλογή για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα μέχρι και τα μέσα της δεκαετίας του '90. Οι ιδιαίτερα μεγάλες απαιτήσεις των συσσωρευτών αυτών σε μάζα και σε όγκο (30-40Wh/kg) περιορίζουν την εφαρμογή του στα ηλεκτρικά οχήματα, όπου ο παράγοντας χαμηλού κόστους υπερτερεί.



Εικόνα 1-1 Κόστος και πυκνότητα ενέργειας μπαταρίας [3]

Η απόδοση και η ικανότητα αποθήκευσης αυτής της τεχνολογίας μπαταριών μειώνεται όταν οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος είναι χαμηλές. Σε ακραίες καιρικές συνθήκες, είναι απαραίτητη η εκτροπή ενέργειας από τις μπαταρίες για τη λειτουργία του συστήματος θέρμανσης τους, με αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά η απόδοσή τους. Επιπρόσθετα, έχει παρατηρηθεί πως η διάρκεια ζωής των μπαταριών αυτών μειώνεται από τις συνεχόμενες εκφορτίσεις για επίπεδα εκφόρτισης άνω του 20% της ονομαστικής χωρητικότητας. Μεγάλες εκφορτίσεις καταπονούν τις μπαταρίες και περιορίζουν τη διάρκεια ζωής τους στα τέσσερα χρόνια, καθώς οι κύκλοι φόρτισης δεν μπορούν να ξεπεράσουν τους 400. Η χωρητικότητά τους μάλιστα μειώνεται σημαντικά καθώς αυξάνεται η ταχύτητα εκφόρτισης. Αυτό συμβαίνει σε όλες τις μπαταρίες, λόγω μη επιθυμητών πλευρικών αντιδράσεων μέσα στον συσσωρευτή, είναι ωστόσο ιδιαίτερα έντονο στις μπαταρίες μολύβδου οξέος.

Ένα επιπλέον μειονέκτημα των συσσωρευτών μολύβδου οξέος είναι ότι έχουν περιορισμένη χωρητικότητα, η οποία προσφέρει αυτονομία περίπου 80 χιλιομέτρων. Το γεγονός αυτό περιορίζει την εφαρμογή τους σε ηλεκτρικά αυτοκίνητα που πραγματοποιούν μικρές διαδρομές.

Παρά τα μειονεκτήματα που έχουν οι μπαταρίες μολύβδου οξέος, το ιδιαίτερα χαμηλό κόστος τους, η φιλικότητά τους προς το περιβάλλον (αφού η διαδικασία ανακύκλωσης τους είναι απλή) και η υψηλή ενεργειακή ισχύ τους, η συγκεκριμένη τεχνολογία παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στον χώρο της ηλεκτροκίνησης. Η πλήρης φόρτιση της μπαταρίας ανά τακτά χρονικά διαστήματα συνεισφέρει στην επιβράδυνση της φθοράς της μπαταρίας.

### ✓ *Ιόντων Λιθίου (Lithium-Ion)*

Οι συσσωρευτές αυτής της τεχνολογίας εφαρμόζονται σήμερα ευρέως σε πολλές ηλεκτρονικές συσκευές με άριστη αποδοτικότητα. Η εφαρμογή σε ηλεκτρικά οχήματα είναι ιδιαίτερα ελκυστική, αφού διαθέτουν υψηλή πυκνότητα ενέργειας ανά μονάδα μάζας και όγκου, προσφέροντας έτσι ιδιαίτερα αυξημένη αυτονομία. Πιο συγκεκριμένα, οι συγκεκριμένες μπαταρίες παρουσιάζουν περίπου 2-3 φορές μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα από άλλες τεχνολογίες μπαταριών (300Wh/kg ή 100Wh/kg). Η διάρκεια ζωής των μπαταριών αυτών ανέρχεται στους 1000 πλήρους κύκλους λειτουργίας.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά καθιστούν την τεχνολογία αυτή ιδανική για εφαρμογές όπως τα ηλεκτρικά οχήματα, επιτρέποντας μεγαλύτερη αυτονομία οδήγησης συγκριτικά με τη τεχνολογία μολύβδου-οξέος. Παραδείγματα χρήσης αυτής της τεχνολογίας: BMW i3, Nissan Leaf, Mitsubishi i-MiEV, κτλ. Ωστόσο, το υψηλό κόστος των μπαταριών αυτού του τύπου είναι ένα σημαντικό αρνητικό στοιχείο μιας και το αρχικό κεφάλαιο επένδυσης σε ηλεκτρικό όχημα αυξάνεται σημαντικά συγκριτικά με το κόστος του αντίστοιχου συμβατικού οχήματος. Το 2007, το κόστος των συγκεκριμένων συσσωρευτών ήταν περίπου 1500 \$/kWh, ενώ το 2020 αναμένεται να μειωθεί σημαντικά (250\$/kWh).

✓ *Νικελίου υδριδίου μετάλλου (NiMH)*

Τα κυριότερα πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας μπαταριών είναι η αποδεδειγμένη διάρκεια ζωής τους και η ογκομετρική χωρητικότητα τους (storing volumetric energy and power) και η δυνατότητα αποδοτικής λειτουργίας τους σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Ωστόσο έχουν σημαντικούς περιορισμούς όσον αφορά στην πυκνότητα ενέργειας (μεταξύ 50-60% της ενεργειακής πυκνότητας των μπαταριών Ιόντων-Λιθίου) και ισχύος. Το κυριότερο μειονέκτημα τους είναι ότι η συνεχής εκφόρτιση των μπαταριών αυτού του τύπου σε υψηλή ισχύ μειώνει αισθητά τη διάρκεια ζωής τους σε 200-300 πλήρους κύκλους λειτουργίας. Η αποδοτικότερη χρήση των μπαταριών επιτυγχάνεται όταν η εκφόρτιση κυμαίνεται μεταξύ 20-50% της ονομαστικής χωρητικότητας.

Η κατασκευή των μπαταριών αυτών από συγκεκριμένα στοιχεία και χημικές αντιδράσεις περιορίζει σημαντικά τις προοπτικές βελτίωσης τους. Ένα ακόμα μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας είναι το υψηλό τους κόστος το οποίο και δεν αναμένεται να μειωθεί σημαντικά στα επόμενα έτη. Η συγκεκριμένη τεχνολογία χρησιμοποιείται κυρίως σε υβριδικά-ηλεκτρικά οχήματα.

✓ *Νικελίου Καδμίου (Ni-Cd)*

Οι μπαταρίες Νικελίου-Καδμίου έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και επιτρέπουν την πλήρη εκφόρτιση τους χωρίς να επηρεάζεται η απόδοσή τους. Η ενεργειακή πυκνότητα των μπαταριών αυτών είναι μικρή (περίπου 55Wh/kg) συγκριτικά με την αντίστοιχη των μπαταριών Ιόντων-Λιθίου. Το κυριότερο μειονέκτημα τους είναι το κόστος εγκατάστασής τους.

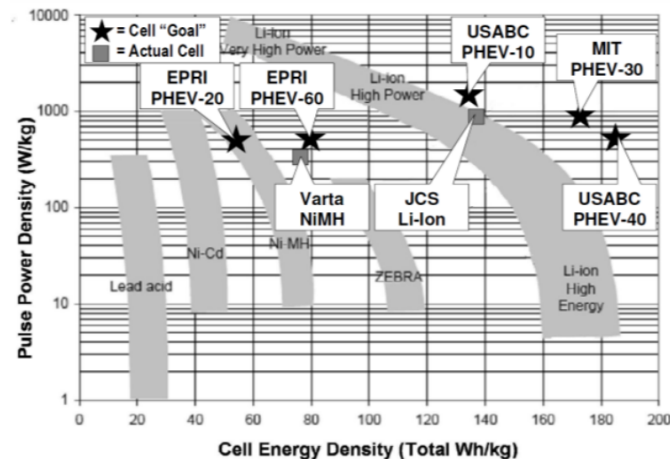
Επιπρόσθετες τεχνολογίες, (Ψευδαργύρου, Νατρίου ή Zebra) καθώς και διαφορετικές τεχνολογίες Ιόντων-Λιθίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων. Ωστόσο αυτές που αναφέρθηκαν αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μέρος της συγκεκριμένης αγοράς. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των υπερ-πυκνωτών (σημαντικά μεγάλη πυκνότητα ισχύος και πολύ γρήγορος ρυθμός φόρτισης/εκφόρτισης) αξιοποιούνται στα βοηθητικά συστήματα ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων, για παράδειγμα αποθήκευση και ανάκτηση της ενέργειας της πέδησης βελτιώνοντας έτσι την απόδοσή τους [11]. Η κύρια τεχνολογία που αναμένεται να αξιοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό είναι αυτή που αφορά τις μπαταρίες Ιόντων-Λιθίου, καθώς το ερευνητικό ενδιαφέρον είναι έντονο ώστε να μειωθεί το κόστος τους. Οι μπαταρίες μολύβδου οξέος, που χρησιμοποιούνταν σε πολλά ηλεκτρικά οχήματα παλιότερα λόγω του χαμηλού τους κόστους, θα μπορούσαν να επιστρέψουν σε εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων αν με κάποιο τρόπο αυξανόταν η διάρκεια ζωής τους, προσφέροντας παράλληλα αυξημένη αυτονομία.

Στον Πίνακα 1-1 συνοψίζονται τα συγκριτικά χαρακτηριστικά διαφορετικών τεχνολογιών μπαταρίας [9], ενώ στην Εικόνα 1-2 απεικονίζεται σχηματικά το εύρος της πυκνότητας ενέργειας ανά τεχνολογία μπαταρίας [10].

Πίνακας 1-1 Χαρακτηριστικά μπαταριών που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά οχήματα [9]

	Ενέργεια (kW/kg)	Αιχμή Ισχύος (W/Kg)	Ενεργειακή Απόδοση (%)	Διάρκεια Ζωής (κύκλοι)	Κόστος (\$/kWh)
<b>Acidic</b>					
Lead-Acid	35-50	150-400	>80	500-1000	120-150
<b>Alkaline</b>					
Nickel/cadmium	40-60	80-150	75	800	250-350
Nickel/iron	50-60	80-150	65	1500-2000	200-400
Nickel/zinc	55-75	170-260	70	300	100-300
Ni-metal-Hydride	70-90	200-300	70	750-1200	200-350
Aluminum/air	200-300	90	<50	-	-
Iron/air	80-120	90	60	500	50
Zinc/air	100-200	30-80	60	600	90-120
<b>Flow</b>					
Zinc/bromine	70-85	90-110	65-75	500-2000	200-250
Vanadium redox	20-30	110	75-85	-	400-450

<u>Molten salt</u>					
Sodium/Sulfur	150-240	230	85	800	250-450
Sodium/Ni/Cl	90-120	130-160	80	1200	230-345
Li-ion-sulfur(FeS)	100-130	150-250	80	1000	110
<u>Organic/lithium</u>					
Lithium-ion	80-130	200-300	>95	1000	200
Li-ion high power	85-95	~400	-	-	-
Li-ion low power	130-150	~600	-	-	-



Εικόνα 1-2 Συγκριτικά αποτελέσματα ενεργειακής πυκνότητας για διαφορετικούς τύπους μπαταριών [10]

## 1.1.4 Σταθμοί Φόρτισης

### 1.1.4.1 Τεχνολογίες Σταθμών Φόρτισης

#### ✓ Φόρτιση με αγώγιμη σύνδεση

Η φόρτιση αυτού του τύπου απαιτεί τη σύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων σε κατάλληλο ηλεκτρικό εξοπλισμό, με επαφές που πρέπει να συνδεθούν άμεσα μεταξύ τους. Ανάλογα με το επίπεδο ισχύος φόρτισης, οι υποδομές φόρτισης διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες σύμφωνα με το πρότυπο IEC 62196 [12]-[13]:

- **Επίπεδο 1 (Mode 1):** Αυτός είναι ο πιο συνηθισμένος τρόπος φόρτισης που απαιτεί τη σύνδεση του αυτοκινήτου σε μονοφασική παροχή εναλλασσόμενου ρεύματος, η οποία μπορεί να είναι και ένας συμβατικός οικιακός ρευματοδότης. Στην Αμερική, όπως ορίζεται και από το πρότυπο SAE J1772, η μέγιστη ισχύς φόρτισης είναι 1,92kW (καθώς η ονομαστική τιμή της τάσης είναι 110-120V και το ονομαστικό ρεύμα είναι 16A). Στην Ευρώπη, όπου οι ρευματοδότες έχουν τάση 220-230V, η αντίστοιχη μέγιστη ισχύς είναι 3,2kW. Τα περισσότερα ηλεκτρικά οχήματα διαθέτουν ένα κατάλληλο καλώδιο φόρτισης που παρέχεται με την αγορά τους με αποτέλεσμα να μην απαιτείται επιπλέον εξοπλισμός για τη φόρτισή τους. Ο χρόνος φόρτισης σε τέτοιες υποδομές φόρτισης είναι μεγάλος (μπορεί να ξεπεράσει και τις 8ώρες για πλήρη φόρτιση) και χρησιμοποιούνται μόνο για οικιακή φόρτιση.
- **Επίπεδο 2 (Mode 2):** Μονοφασική φόρτιση με ονομαστικό ρεύμα φόρτισης 32A και μέγιστη ισχύς 7.2kW. Για τη φόρτιση αυτή, ο οικιακός ρευματοδότης δεν επαρκεί και απαιτείται συγκεκριμένη υποδομή φόρτισης. Η μέγιστη ισχύς των υποδομών αυτών μπορεί φτάσει την τιμή των 19,2kW με μέγιστο ρεύμα 80A, σύμφωνα με το πρότυπο SAE J1772. Ο απαιτούμενος χρόνος φόρτισης στο επίπεδο 2 είναι μειωμένος κατά 50% συγκριτικά με τον

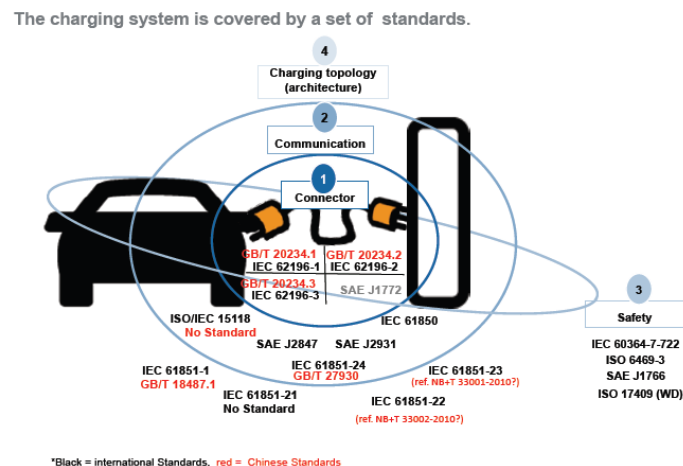
αντίστοιχο του επιπέδου 1. Το κόστος ωστόσο για αυτή την κατηγορία φόρτισης κυμαίνεται μεταξύ 500\$-6000\$ ανάλογα με το επίπεδο των προσφερόμενων υπηρεσιών<sup>2</sup>.

- **Επίπεδο 3 (Mode 3):** Το επίπεδο αυτό αφορά στην ταχεία φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων (< 1ώρα) με τριφασική παροχή ηλεκτρικού ρεύματος ή με χρήση DC ρεύματος. Σε αυτό το επίπεδο φόρτισης, το ονομαστικό εναλλασσόμενο ρεύμα φόρτισης είναι 63A επιτρέποντας μεταφερόμενη ισχύ ίση με 42kW. Στη περίπτωση συνεχούς ρεύματος, η ισχύς φόρτισης μπορεί να φτάσει τα 100kW. Οι φορτιστές συνεχούς ρεύματος είναι αρκετά σύνθετοι μιας και απαιτούν την ενσωμάτωση του μετατροπέα εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές στις υποδομές φόρτισης. Το κόστος αυτών των υποδομών φόρτισης είναι πολύ υψηλό και μπορεί να φτάσει τις μερικές δεκάδες χιλιάδες ευρώ.

Στην Εικόνα 1-3 παρουσιάζονται τα πρότυπα που υιοθετούνται σε κάθε επίπεδο (ηλεκτρικό και επικοινωνιακό) αλληλεπίδρασης μεταξύ σταθμού φόρτισης και ηλεκτρικού οχήματος.

- Καλώδια και Υποδοχείς Φόρτισης - IEC 62196
- Τοπολογίες φόρτισης ενσύρματης/ασύρματης- IEC 61851
- Επικοινωνίες ISO/IEC 15118 και IEC 61850
- Ασφάλεια IEC 62351 και ISO/IEC 15118

### Overview Standardization IEC, SAE and GB Relevant IEC/SAE and GB Standards for charging systems



Εικόνα 1-3 IEC πρότυπα για αγωγή φόρτιση (Reeck,2014)

### ✓ *Ασύρματη (Επαγωγική) φόρτιση*

Τα συστήματα που φορτίζουν με τον τρόπο αυτό μεταφέρουν εναλλασσόμενη ισχύ με μαγνητική σύμπλεξη ενός πρωτεύοντος πηνίου στην πλευρά της παροχής και ενός δευτερεύοντος από την πλευρά του οχήματος χρησιμοποιώντας έναν μετασχηματιστή. Επειδή η μπαταρία του οχήματος μπορεί να φορτιστεί μόνο με DC ρεύμα, το εναλλασσόμενο ρεύμα στην έξοδο του δευτερεύοντος πηνίου ανορθώνεται πριν εισέλθει στη μπαταρία. Οι φορτιστές αυτού του τύπου διατηρούν το μεγαλύτερο μέρος του κυκλώματος φόρτισης εκτός του οχήματος και επικοινωνούν με τη μπαταρία μέσω υπέρυθρων ή ραδιοσυχνοτήτων [15].

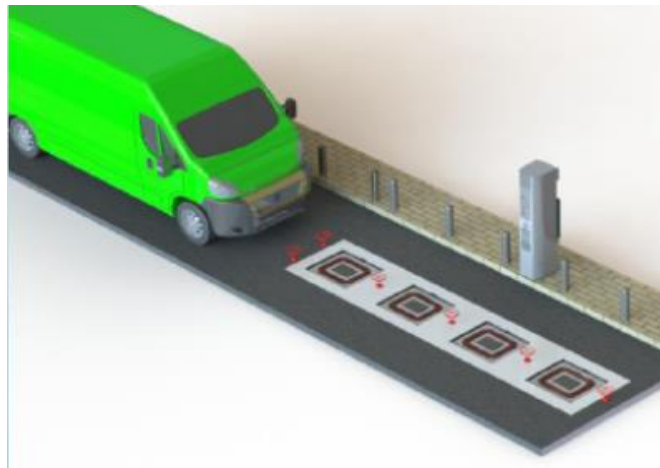
Εταιρίες αυτοκινήτων όπως οι Audi, BMW, Daimler, Opel και Volkswagen έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους σε μία ερευνητική εργασία που στηρίζεται από τη γερμανική κυβέρνηση με την

<sup>2</sup> Costs Associated With Non-Residential Electric Vehicle Supply Equipment, US department of Energy, 2015



ονομασία “Effizienzhaus-Plusmit Elektromobilität”, η οποία αφορά στην επαγωγική φόρτιση. Το 2012 η Daimler προχώρησε σε τέτοιες δοκιμές, παρέχοντας ένα μοντέλο Mercedes-Benz A-Class E-CELL τροποποιημένο ώστε να διαθέτει επιλογή επαγωγικής φόρτισης [16]. Αν και η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι ιδιαίτερα βολική για τον χρήστη, αφού δεν απαιτεί κάποιο καλώδιο σύνδεσης, η απόδοσή της είναι ιδιαίτερα χαμηλή συγκριτικά με την αντίστοιχη της ενσύρματης φόρτισης. Η NISSAN παρέχει ένα εμπορικά διαθέσιμο προϊόν για την ασύρματη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων.

Πέραν της στατικής επαγωγικής (ασύρματης) φόρτισης, υπάρχει και η δυναμική φόρτιση όπου η ενέργεια φόρτισης μεταφέρεται στο όχημα καθώς αυτό κινείται. Στη δυναμική φόρτιση δεν απαιτείται η επαφή του οχήματος με τις λωρίδες, αφού επιτρέπεται η ύπαρξη ενός διακένου αέρος. Ένα ενδεικτικό παράδειγμα δυναμικής φόρτισης, όπως αυτό προτάθηκε στο Ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα FastInCharge<sup>3</sup>, παρουσιάζεται στην Εικόνα 1-4.



Εικόνα 1-4 Προτεινόμενη λύση επαγωγικής φόρτισης από το Ευρωπαϊκό πρόγραμμα FastInCharge

Τα συγκριτικά χαρακτηριστικά των δύο μεθόδων φόρτισης (ενσύρματης και ασύρματης/επαγωγικής) αναφέρονται στον Πίνακα 1-2. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει συνοπτικά τα κύρια χαρακτηριστικά των 2 μεθόδων φόρτισης.

<u>Πίνακας 1-2 Συγκριτικά χαρακτηριστικά ενσύρματης και ασύρματης φόρτισης</u>		
	<u>Ασύρματη φόρτιση</u>	<u>Ενσύρματη φόρτιση</u>
<b>Κόστος</b>	Πιο ακριβή	Πιο οικονομική
<b>Πολυπλοκότητα</b>	Αρκετά σύνθετη	Απλούστερη
<b>Ασφάλεια</b>	Καλύτερη από τη φόρτιση με Επαφή, λόγω της ηλεκτρικής απομόνωσης του οχήματος με την τροφοδοσία	Αρκετά καλή λόγω των αποδοτικών τεχνικών ανίχνευσης σφάλματος που εφαρμόζονται
<b>Ενεργειακή Απόδοση</b>	Όχι τόσο αποδοτική (απώλειες μαγνητικού κυκλώματος κ.λ.π.)	Πιο αποδοτική

#### 1.1.4.2 Θέσεις των Σταθμών Φόρτισης

Τα συμβατικά οχήματα με μηχανές εσωτερικής καύσης ανεφοδιάζονται με υγρά καύσιμα σε ειδικούς σταθμούς ανεφοδιασμού. Κατ’ αντιστοιχία, για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων απαιτείται η διασύνδεση τους στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μέσω υποδομών φόρτισης. Η

<sup>3</sup> <http://fastincharge.eu/>

μεγάλη έκταση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας προσφέρει πολλές επιλογές δυνητικών θέσεων εγκατάστασης υποδομών φόρτισης. Οι τοποθεσίες στις οποίες αναμένεται να εγκατασταθούν οι σταθμοί φόρτισης κατηγοριοποιούνται ως εξής [15], [17]:

- ✓ **Ιδιωτική περιοχή – επιτρέπεται η πρόσβαση μόνο σε ιδιώτες:**
  - Ιδιωτικοί χώροι στάθμευσης στην οικία: Δεν απαιτείται κάποιο επιπλέον κόστος ή εγκατάσταση για απλή φόρτιση, από τη στιγμή που υπάρχει παροχή ρεύματος με προστασία γείωσης.
  - Ιδιωτικοί χώροι στάθμευσης που μοιράζονται από περισσότερους του ενός κατοίκους: Στην περίπτωση αυτή είναι δυνατή η εγκατάσταση σταθμού φόρτισης που θα αναγνωρίζει ποιος από τους χρήστες φορτίζει το αυτοκίνητό του, ώστε το κόστος φόρτισης να επιβαρύνει μόνο αυτόν.
  - Εταιρίες με ηλεκτρικά οχήματα προς ενοικίαση: Οι εταιρίες αυτές πιθανώς να χρειαστούν φορτιστές επιπέδου 2 ή ακόμα και γρήγορους φορτιστές επιπέδου 3, ενώ το κόστος για τη φόρτιση θα επιβαρύνει την ίδια την εταιρία.
  
- ✓ **Ιδιωτική περιοχή – επιτρέπεται η δημόσια πρόσβαση:**
  - Μεγάλοι χώροι στάθμευσης, όπου τα οχήματα αναμένεται να είναι σταθμευμένα για σχετικά μακρύ χρονικό διάστημα (2-3ώρες, π.χ. εμπορικά καταστήματα, κινηματογράφοι) ή σύντομο χρόνο (πχ. εστιατόρια γρήγορου φαγητού ή σουπερμάρκετ.
  - Χώροι εργασίας (π.χ. ο χώρος στάθμευσης για τους υπαλλήλους σε μία εταιρία): Πολλές εταιρίες εξετάζουν τον αντίκτυπο που θα είχε η εγκατάσταση σταθμών φόρτισης για τους εργαζόμενους σε αυτές, αφού η φόρτιση κατά τη διάρκεια της εργασίας σχεδόν αυξάνει την ημερήσια απόσταση που είναι δυνατό να διανύσει ένα ηλεκτρικό όχημα.
  - Κατάλληλα διαμορφωμένοι χώροι ειδικά για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων: Οι οδηγοί πιθανότητα να επιθυμούν χρόνους φόρτισης αντίστοιχους με αυτούς των συμβατικών πρατηρίων υγρών καυσίμων. Ωστόσο, επειδή η γρήγορη φόρτιση έχει κάποιους περιορισμούς λόγω υπερθέρμανσης της μπαταρίας, αναπτύχθηκε ένας πρότυπος σταθμός φόρτισης για αντικατάσταση της αφόρτιστης μπαταρίας με φορτισμένη σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα (BetterPlace). Το κόστος επένδυσης ενός τέτοιου σταθμού φόρτισης καθώς και τα προβλήματα διαλειτουργικότητας που υπήρχαν καθιστά τη λύση αυτή μη βιώσιμη.
  
- ✓ **Δημόσια περιοχή - επιτρέπεται η δημόσια πρόσβαση:**
  - Σταθμοί φόρτισης (κυρίως Επιπέδου 2) που είναι εγκατεστημένοι σε δημόσιους δρόμους και εξυπηρετούν οδηγούς ηλεκτρικών οχημάτων που ζουν σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, όπου δεν υπάρχουν οικιακά γκαράζ.
  - Υποδομές ταχείας φόρτισης αναμένεται να εγκατασταθούν σε δρόμους ταχείας κυκλοφορίας ώστε να αυξήσουν την αυτονομία των οχημάτων και να καταστήσουν δυνατή τη μετακίνησή τους για μεγάλες αποστάσεις. Οι σταθμοί προβλέπεται να εγκατασταθούν ανά 80 περίπου χιλιόμετρα σε δρόμους ταχείας κυκλοφορίας και πρέπει να απέχουν λιγότερο από 1,5 χιλιόμετρο από τις αντίστοιχες εξόδους.

### 1.1.4.3 Καλώδια Φόρτισης

#### ✓ Καλώδια σύνδεσης στις Η.Π.Α

Το πρότυπο που έχει υιοθετηθεί από τους περισσότερους κατασκευαστές ηλεκτρικών οχημάτων στη Βόρεια Αμερική είναι το SAE J1772, το οποίο καλύπτει τις φυσικές, ηλεκτρικές και λειτουργικές απαιτήσεις του ρευματολήπτη του οχήματος, καθώς και του καλωδίου που θα συνδέσει το όχημα με την παροχή ρεύματος. Βασίζεται στο σχεδιασμό που εφάρμοσε η Ιαπωνική εταιρία Yazaki, ενώ το καλώδιο διαμέτρου 43 χιλιοστών που υποστηρίζεται έχει 5 ακροδέκτες [18]:

- **Επαφή 1:** Η μία γραμμή τροφοδοσίας
- **Επαφή 2:** Η άλλη γραμμή τροφοδοσίας ή ο ουδέτερος. Οι 2 πρώτες επαφές έχουν το ίδιο ακριβώς μέγεθος.
- **Επαφή 3:** Γείωση. Ο ακροδέκτης αυτός συνδέει τον αγωγό γείωσης του σταθμού φόρτισης με το σασί του αυτοκινήτου, ώστε να αποφευχθούν σφάλματα ως προς γη.
- **Επαφή 4:** Οδηγός Ελέγχου. Ο συγκεκριμένος ακροδέκτης, μέσω ενός τετραγωνικού παλμού 12V/1kHz, που παράγεται από τον εξοπλισμό φόρτισης, επιβεβαιώνει την παρουσία και τη σύνδεση του οχήματος, επιτρέπει τη διακοπή και την έναρξη της παροχής ενέργειας, παρέχει το απαιτούμενο ρεύμα στο όχημα, ελέγχει την παρουσία της γείωσης και τη διαδικασία της φόρτισης και καθορίζει τις απαιτήσεις εξαέρωσης.
- **Επαφή 5:** Ελεγκτής διασύνδεσης. Έχει ίδιο μέγεθος με την επαφή 4 και προορίζεται να αποτρέψει την κίνηση του οχήματος όσο αυτό είναι συνδεδεμένο στον φορτιστή.

Το συγκεκριμένο πρότυπο επιτρέπει τη φόρτιση στο επίπεδο 1 με εναλλασσόμενη ισχύ μέχρι και 1,9KW (120V 15/20A), καθώς και στο επίπεδο 2 με ισχύ έως 19KW (208 – 240 AC και ρεύμα μέχρι 80A). Το καλώδιο είναι σχεδιασμένο να αντέχει σε 10.000 κύκλους φόρτισης, φτάνοντας έτσι μία διάρκεια ζωής που ξεπερνάει τα 27 χρόνια. Το πρότυπο SAE J1772 δεν υποστηρίζει DC φόρτιση, ωστόσο έχει ήδη αρχίσει η σχεδίαση του προτύπου ώστε να καλύπτει και αυτή τη λειτουργία. Ο φορτιστής, που θα βρίσκεται εκτός του οχήματος, θα συνδέεται απ' ευθείας με τη μπαταρία, παρέχοντας υψηλή τάση και μεταφέροντας ισχύ που θα ξεπερνάει τα 100KW. Αναμένεται να έχει τους ίδιους ακροδέκτες με το υπάρχον πρότυπο, με την προσθήκη δύο επιπλέον DCεπαφών και σύνδεσμο για σειριακή μεταφορά δεδομένων μεταξύ του οχήματος και του φορτιστή. Ο ρευματολήπτης του οχήματος θα υποστηρίζει είτε AC είτε DC φόρτιση, ενώ το νέο πρότυπο θα είναι συμβατό και με το προηγούμενο.

#### ✓ Καλώδια σύνδεσης στην Ευρώπη

Στην Ευρώπη, ο τύπος καλωδίου που έχει επικρατήσει για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων καθορίζεται από το πρότυπο IEC 62196-2. Το καλώδιο διαθέτει 7 ακροδέκτες:

- **Επαφή 1:** 1<sup>η</sup> γραμμή τροφοδοσίας (για τη μεταφορά τριφασικής ισχύος)
- **Επαφή 2:** 2η γραμμή τροφοδοσίας (για τη μεταφορά τριφασικής ισχύος)
- **Επαφή 3:** 3η γραμμή τροφοδοσίας (για τη μεταφορά τριφασικής ισχύος)
- **Επαφή 4:** Ουδέτερος
- **Επαφή 5:** Γείωση
- **Επαφή 6:** Οδηγός Ελέγχου – Πιλοτικό σήμα
- **Επαφή 7:** Ελεγκτής διασύνδεσης με σταθμό

#### ✓ DC φόρτιση

Η εταιρία ηλεκτρικής ισχύος TEPCO στο Τόκιο σε συνεργασία με το ινστιτούτο έρευνας αυτοκινήτων JARI της Ιαπωνίας έχουν αναπτύξει ένα πρότυπο, με την ονομασία **TEPCO/JARI**, που επιτρέπει DC φόρτιση με μεταφερόμενη ισχύ μέχρι και 50KW. Το καλώδιο που έχουν διαμορφώσει έχει 9 ακροδέκτες [19]:

- Δύο ακροδέκτες για τη μετάδοση ισχύος
- Δύο ακροδέκτες επικοινωνίας

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗ

- Δύο για έλεγχο των ηλεκτρονόμων του οχήματος
- Έναν ακροδέκτη γείωσης για να παρακολουθεί την απομόνωση του οχήματος
- Έναν ακροδέκτη που ελέγχει αν έχει γίνει η σύνδεση
- Ένα ακροδέκτη που υποδεικνύει την έναρξη της φόρτισης

Η εταιρία ηλεκτρικής ισχύος TEPCO στο Τόκιο, μαζί με τις εταιρίες Toyota, Nissan, Mitsubishi Motors και Fuji Heavy Industries ίδρυσαν τη συνεργασία CHAdeMO. Υιοθετώντας το πρότυπο TEPCO/JARI, η συνεργασία αυτή προσπαθεί να αυξήσει τον αριθμό των σταθμών που προσφέρουν γρήγορη φόρτιση και να καθιερώσει συγκεκριμένα πρότυπα για τη φόρτιση των οχημάτων.

### 1.1.4.4 Πρόταση Eurelectric για τις υποδομές φόρτισης

Σύμφωνα με την έκθεση της Eurelectric για την προτυποποίηση των σταθμών φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων διακρίνονται τα παρακάτω δυο στάδια εξέλιξης με χρονικό ορίζοντα πριν και μετά το 2017 [14].

#### ✓ Σημερινή κατάσταση

	Ιδιωτική Οικιακή σύνδεση	Ιδιωτική αποκλειστική υποδοχή για HO	Ημι-δημόσιας σύνδεσης AC	Δημόσιας σύνδεσης AC	Δημόσιας σύνδεσης DC
<b>Ισχύς Σύνδεσης</b>	≤3.7kW 1Φ AC	έως 22kW	έως 22kW	έως 22kW	50kW (ChadeMo)
<b>Καλώδιο σύνδεσης</b>	Οικιακό	IEC 60309-2 Type2/ Type 3	Type2 / Type 3	Type2 / Type 3	Yazaki (ChadeMo)
<b>Επίπεδο φόρτισης</b>	Mode 2	Mode 2 ή 3	Mode 3	Mode 3	Mode 4
<b>Πρωτόκολλο επικοινωνίας</b>	IEC61851-1	IEC61851-1 ISO/IEC15118	IEC61851-1 ISO/IEC15118	IEC61851-1 ISO/IEC15118	-
<b>Εξωτερική Επικοινωνία</b>	-	-	-	Τιμολόγηση	IEC 61850-420

#### ✓ Ευρεία διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων

	Ιδιωτική Οικιακή σύνδεση	Ιδιωτική αποκλειστική υποδοχή για HO	Ημι-δημόσιας σύνδεσης AC	Δημόσιας σύνδεσης AC	Δημόσιας σύνδεσης DC
<b>Ισχύς Σύνδεσης</b>	≤3.7kW 1Φ AC	έως 22kW	έως 22(43)kW	έως 43kW	100kW
<b>Καλώδιο σύνδεσης</b>	Οικιακό	Type 2/3	Type 2/3	Type 2/3	IEC 62196-3
<b>Επίπεδο φόρτισης</b>	Mode 2	Mode 3	Mode 3	Mode 3	Mode 4
<b>Πρωτόκολλο επικοινωνίας</b>	IEC61851-1	ISO/IEC15118	ISO/IEC15118	ISO/IEC 15118	IEC 61851-24 ISO/IEC15118
<b>Εξωτερική Επικοινωνία</b>	-	IEC61850-7-420	IEC6185-7-420	IEC6185-7-420	IEC 61850-420

## 1.2 Ρυθμιστικά Θέματα

### 1.2.1 Ισχύουσα Νομοθεσία για Ηλεκτρικά Οχήματα

Στην Ελλάδα, η ηλεκτροκίνηση είναι σε αρκετά πρώιμο στάδιο όσον αφορά τόσο στην ανάπτυξη των υποδομών φόρτισης σε δημόσιους χώρους όσο και στην ύπαρξη ενός ολοκληρωμένου ρυθμιστικού πλαισίου, αν και έχει δημοσιευτεί ΦΕΚ β50/2015 - Κ.Υ.Α. αριθμ. 71287/6443/31.12.2014 “Καθορισμός των όρων, προϋποθέσεων και τεχνικών προδιαγραφών συσκευών φόρτισης συσσωρευτών ηλεκτροκίνητων οχημάτων και τροπολογία-προσθήκη υπ. Αρ 1629/217,25/7/2014 σχετικά με τον νόμο ν.4001/2011 περί αδειών προμήθειας ενέργειας για την παροχή υπηρεσιών φόρτισης ηλεκτροκίνητων οχημάτων.

Η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στην Ελλάδα είναι αρκετά περιορισμένη, εν τούτοις το ενδιαφέρον για την ηλεκτροκίνηση εντείνεται. Για παράδειγμα, η ΔΕΗ (ΚΔΕΠ) συμμετείχε στο φιλόδοξο Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα *GreeneMotion*<sup>4</sup>, στο οποίο ένας περιορισμένος αριθμός ηλεκτρικών αυτοκινήτων εισήχθη σε Αθήνα και Κοζάνη και αναπτύχθηκαν οι αντίστοιχες υποδομές φόρτισης. Επιπρόσθετα, με πρωτοβουλία των ΕΚΟ και ΕΛ.ΙΝ.Η.Ο<sup>5</sup> και της εταιρίας Fortisis έχει αναπτυχθεί ένας περιορισμένος αριθμός σταθμών φόρτισης οχημάτων κυρίως σε ιδιωτικούς χώρους στάθμευσης και πρατήρια υγρών καυσίμων.

Η προώθηση της διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων στην ελληνική αγορά θα μπορούσε να ενισχυθεί, σε αρχικό τουλάχιστον στάδιο, από τη χρησιμοποίηση σημαντικού αριθμού ηλεκτρικών οχημάτων σε δημόσιες ή ιδιωτικές εταιρίες. Ειδικότερα, για την είσοδο ηλεκτρικών οχημάτων σε δημόσιες υπηρεσίες, δημοτικούς οργανισμούς, επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας και γενικότερα στον στενό και ευρύτερο δημόσιο τομέα, ιδιαίτερα ευνοϊκή είναι η νομοθετική ρύθμιση (Νόμος 3855/2010, άρθρο 8, παρ. 3) η οποία προβλέπει την έκδοση ΚΥΑ για τον Κανονισμό Προμήθειας Οχημάτων και την ποσόστωση καθαρών οχημάτων όπως είναι τα Η/Ο.

Όσον αφορά κίνητρα για την απόκτηση ηλεκτρικών οχημάτων από μεμονωμένους ιδιώτες χρήστες, ένας αριθμός νομοθεσιών για ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα βρίσκεται ήδη σε εφαρμογή:

- Όλα τα Ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας (BEV), ως οχήματα με μηδενικές εκπομπές ρύπων, απαλλάσσονται από τα τέλη κυκλοφορίας, ενώ τα ηλεκτρικά οχήματα αυξημένης αυτονομίας (EREV) και τα Plug-in Υβριδικά Οχήματα (PHEV) δεν καταβάλλουν τέλη κυκλοφορίας εφόσον πληρούν τα εκάστοτε κριτήρια που ορίζονται από τις ισχύουσες διατάξεις για τα οχήματα αντιρρυπαντικής τεχνολογίας.
- Τα ηλεκτρικά και υβριδικά οχήματα απαλλάσσονται από το ειδικό τέλος ταξινόμησης για όλη τη διάρκεια ζωής τους [Νόμος 2960/2001 ΦΕΚ Α! 265/22 Νοεμβρίου 2001]
- Τέλος επιτρέπεται καθημερινά η είσοδος των ηλεκτρικών οχημάτων στον δακτύλιο Αθηνών [Υπουργική Απόφαση 1889/Φ.911 ΦΕΚ Β! 1140/ 11 Αυγούστου 2003] και κάθε παρόμοια ρύθμιση για είσοδο σε συγκεκριμένες οδικές αρτηρίες δεν ισχύει για τα οχήματα αυτά.

<sup>4</sup><http://www.dei.gr/Default.aspx?id=31384&nt=18&lang=1>

<sup>5</sup>[http://www.heliev.gr/filesd/refuel\\_ev.pdf](http://www.heliev.gr/filesd/refuel_ev.pdf)

### 1.2.2 Νέοι ενεργειακοί παράγοντες ηλεκτροκίνησης

Η ομαλή ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί την ανάπτυξη νέων ενεργειακών παραγόντων, οι οποίοι περιγράφονται στη συνέχεια (σύμφωνα με τον οδικό χάρτη ηλεκτροκίνησης που αναπτύχθηκε στο ερευνητικό πρόγραμμα MERGE [22]).

✓ **Ιδιοκτήτης Ηλεκτρικού Οχήματος:**

Ο νέος αυτός παράγοντας θα έχει στην κατοχή του ένα ηλεκτρικό όχημα, με την απαίτηση το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας του σε καθημερινή βάση να επαρκεί για την κάλυψη των μετακινήσεων του.

✓ **Ιδιοκτήτες Συσσωρευτών:** Ο συσσωρευτής ευθύνεται για το υψηλό κόστος των ηλεκτρικών οχημάτων, κόστος το οποίο αποτελεί τροχοπέδη για την ευρεία διάδοση των οχημάτων αυτών, ιδιαίτερα μάλιστα αν ληφθεί υπόψη και η μικρή διάρκεια ζωής τους. Στην προσπάθεια να παρακαμφθεί το συγκεκριμένο εμπόδιο, είναι πιθανό να αναπτυχθούν νέα επιχειρηματικά μοντέλα με διάφορες δομές ιδιοκτησίας και παράγοντες οι οποίοι θα αναλάβουν το ρίσκο της κατοχής, εγγύησης και ελέγχου της λειτουργίας των μπαταριών, ώστε να διαχωριστεί το κόστος της μπαταρίας από το κόστος του οχήματος. Έτσι ο μελλοντικός ιδιοκτήτης ηλεκτρικού οχήματος θα μπορεί να αγοράζει το ηλεκτρικό όχημα άνευ μπαταρίας, την οποία στη συνέχεια θα μπορεί να προμηθεύεται υπό τη μορφή ενοικίασης (battery leasing). Κάτι αντίστοιχο έχει εφαρμοστεί στη Γαλλία από την αυτοκινητοβιομηχανία Renault για το μοντέλο Zoe. Σε ένα μελλοντικό και πιο φιλόδοξο πλάνο, οι μπαταρίες των οχημάτων θα μπορούν να αξιοποιηθούν για να υποστηρίξουν το ηλεκτρικό δίκτυο προσφέροντας επικουρικές υπηρεσίες σε αυτό.

✓ **Διαχειριστής του Σημείου Φόρτισης:** Ο ρόλος του συγκεκριμένου παράγοντα θα είναι διπλός: α) ως τελικός πελάτης μπορεί να αγοράζει την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για να φορτίσει το ηλεκτρικό όχημα που έχει στη κατοχή του ή β) ως ένα νέο επιχειρηματικό μοντέλο μπορεί να προμηθεύεται από την αγορά ένα ποσό ενέργειας, το οποίο μπορεί να μεταπουλά, μέσω διμερών συμβολαίων, σε άλλους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων που συνδέονται σε έναν σταθμό φόρτισης.

✓ **Ιδιοκτήτης των Υποδομών Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων:** Ο παράγοντας αυτός είναι παρόμοιος με τον διαχειριστή σημείου φόρτισης, με τη διαφορά ότι δεν παρέχει υπηρεσίες φόρτισης και διαχείρισης των ενεργειακών αναγκών. Στην περίπτωση ιδιωτικής περιουσίας, η εγκατάσταση της υποδομής φόρτισης θεωρείται ότι πραγματοποιείται από τον ιδιοκτήτη της συγκεκριμένης περιουσίας, ο οποίος μπορεί να αναθέσει σε έναν διαχειριστή σημείου φόρτισης, με σύμβαση υπεργολαβίας, τη διαχείριση και παροχή υπηρεσιών φόρτισης. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι ο υπεύθυνος μίας εγκατάστασης εμπορικών κτιρίων, όπου η στάθμευση δεν είναι η κύρια λειτουργία της κατασκευής.

✓ **Προμηθευτής-Συναθροιστής Ηλεκτρικής Ενέργειας Ηλεκτρικών Οχημάτων:** Είναι υπεύθυνος για την προμήθεια της ενέργειας από την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και τη μεταπώληση της στους ιδιοκτήτες των ηλεκτρικών οχημάτων, με διμερή σύμβαση που παρέχει πρόσβαση σε συγκεκριμένα σημεία φόρτισης. Η καινοτομία του συγκεκριμένου παράγοντα είναι ότι παρέχει στους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων τη δυνατότητα φόρτισης των οχημάτων τους σε διαφορετικά σημεία σύνδεσης, γεωγραφικά ανεξάρτητα μεταξύ τους. Οι προμηθευτές ηλεκτρικών οχημάτων λειτουργούν ως λιανοπωλητές. Επομένως, η επιχείρησή τους πρέπει να ορίζεται ως ανταγωνιστική δραστηριότητα, αποδεσμευμένη από άλλες λειτουργίες του συστήματος ηλεκτρικής ισχύος. Οι προμηθευτές επιδιώκουν τη σύναψη όσο το δυνατόν μεγαλύτερου αριθμού συμβάσεων με ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων, γεγονός που θα τους δώσει μελλοντικά τη δυνατότητα για παροχή επικουρικών υπηρεσιών (V2G λειτουργία) στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

- ✓ **Πάροχος Τεχνολογίας Μετάδοσης Πληροφοριών για Ηλεκτρικά Οχήματα:** Η ελεγχόμενη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων απαιτεί την ανταλλαγή σημαντικής ποσότητας πληροφοριών, ενισχύοντας την αλληλεπίδραση μεταξύ των εμπλεκόμενων παικτών. Το γεγονός αυτό δίνει την ευκαιρία σε εταιρείες που είναι εξειδικευμένες σε τεχνολογίες μεταβίβασης πληροφοριών να εμπορευτούν την τεχνογνωσία τους. Ως εκ τούτου, τέτοιου είδους εταιρείες αποτελούν τον σύνδεσμο μεταξύ ενεργειακών παραγόντων, παρέχοντας αξιόπιστη και ασφαλή μεταφορά πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο. Ενδεικτικό παράδειγμα αποτελούν οι εταιρείες τηλεπικοινωνιών, οι οποίες μάλιστα μπορούν να αξιοποιήσουν και τις ήδη υπάρχουσες τηλεπικοινωνιακές υποδομές τους. Η κατοχή και η διαχείριση μια τέτοιας πληροφορίας υπόκεινται στα νομικά πλαίσια των ευαίσθητων προσωπικών δεδομένων και ως εκ τούτου απαιτείται αυστηρό ρυθμιστικό πλαίσιο για την παροχή τέτοιων υπηρεσιών.

### 1.2.3 Φάσεις Διεξόδου των Ηλεκτρικών Οχημάτων στο Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας αναμένεται να πραγματοποιηθεί σε τρεις φάσεις, κάθε μια από τις οποίες καθορίζει τις επιπρόσθετες λειτουργικές δυνατότητες της διασύνδεσης αυτής. Οι φάσεις αυτές καθώς και οι επιτρεπόμενες λειτουργίες/υπηρεσίες, όπως αυτές αναπτύχθηκαν στα πλαίσια του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος MERGE, περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.

#### ✓ **Καταλυτική Φάση**

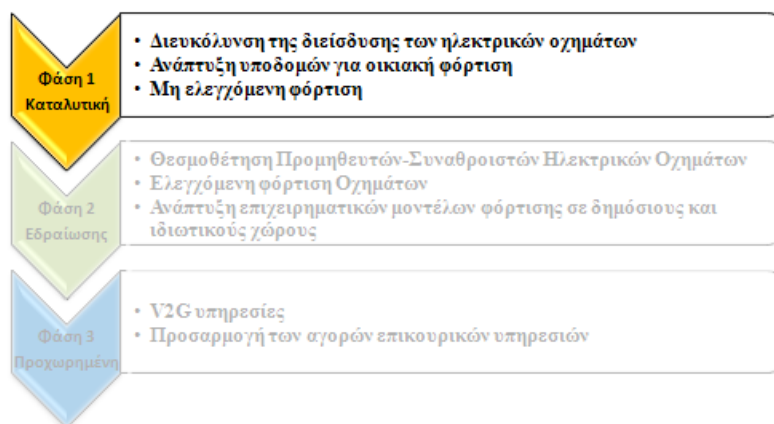
Στο βραχυπρόθεσμο μέλλον, η οικιακή φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων κατά τη διάρκεια της νύχτας αναμένεται ότι θα είναι ο πιο πρακτικός και, συνεπώς, ο πιο συνηθισμένος τρόπος φόρτισης. Στη καταλυτική φάση, τα ηλεκτρικά οχήματα θεωρούνται ως ένα επιπρόσθετο συμβατικό φορτίο, το οποίο αντιμετωπίζεται από τον διαχειριστή του συστήματος ως επιπρόσθετη οικιακή κατανάλωση. Κύριος στόχος της φάσης αυτής είναι η εξυπηρέτηση των ενεργειακών αναγκών των ηλεκτρικών οχημάτων και η άμβλυνση της ανασφάλειας των χρηστών για την αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων (Εικόνα 1-5). Ο ιδιοκτήτης του σπιτιού μπορεί να χρησιμοποιήσει μια κοινή υποδοχή ρεύματος για τη φόρτιση του οχήματος με αργό ρυθμό (Mode 1) είτε να εγκαταστήσει τον απαραίτητο εξοπλισμό για την ταχύτερη φόρτιση του ηλεκτρικού οχήματος, ενημερώνοντας παράλληλα τον προμηθευτή για την μέγιστη απαιτούμενη ισχύ φόρτισης. Σκοπός του ιδιοκτήτη είναι η φόρτιση του ηλεκτρικού οχήματος, ώστε να καλύπτονται οι ενεργειακές ανάγκες των καθημερινών μετακινήσεων του. Εμπόδια ενδέχεται να παρουσιασθούν σχετικά με την κατανομή του κόστους εγκατάστασης του εξοπλισμού ανάμεσα στα μέλη της συνοικίας σε κοινούς χώρους στάθμευσης πολυκατοικιών ή άλλων οικιακών συγκροτημάτων.

Καθώς δεν υπάρχει η δυνατότητα άμεσου ελέγχου της διαδικασίας της φόρτισης, ο Προμηθευτής-Συναθροιστής μπορεί έμμεσα να επηρεάσει τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων προσφέροντας οικονομικά κίνητρα (ειδικά διαμορφωμένα τιμολόγια) στους χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων. Τα τιμολόγια αυτά θα δώσουν τα κατάλληλα κίνητρα στους χρήστες των ηλεκτρικών οχημάτων, ώστε να πραγματοποιούν τη φόρτιση σε συγκεκριμένες ώρες με χαμηλή κατανάλωση. Για την εφαρμογή τέτοιων τιμολογίων, είναι απαραίτητος ένας ηλεκτρονικός μετρητής για την εγκατάσταση του οποίου συστήνεται να είναι υπεύθυνος ο διαχειριστής του συστήματος διανομής.

Ωστόσο, τιμολόγια με διαφοροποιήσεις ως προς τη χρονική περίοδο κατανάλωσης μπορεί να προκαλέσουν απότομες αιχμές φορτίου στο σύστημα αν όλοι οι χρήστες των οχημάτων ταυτόχρονα πραγματοποιούν τη φόρτιση σε ώρες που είναι ωφέλιμες για αυτούς. Για μικρά επίπεδα διεξόδου ηλεκτρικών οχημάτων, η αιχμή από την φόρτιση τους δεν επηρεάζει αισθητά τη λειτουργία του δικτύου, ωστόσο μια σημαντική αύξηση της διεξόδου τους μπορεί να προκαλέσει πρόωρες αναβαθμίσεις του δικτύου. Στη φάση αυτή, οι ρυθμιστικές διατάξεις πρέπει να εστιάζουν στην αποζημίωση του διαχειριστή του συστήματος διανομής για το επιπλέον κόστος (ενίσχυση δικτύου,

ενεργειακές απώλειες, λειτουργικό κόστος, κόστος διαχείρισης δικτύου) που θα επιφέρουν τα ηλεκτρικά οχήματα.

Σημαντικός είναι και ο ρόλος των αυτοκινητοβιομηχανιών στη φάση αυτή, μιας και θα πρέπει να προετοιμάσουν και να εμπορευματοποιήσουν τις τεχνολογίες εκείνες που θα επιτρέψουν τη διαχείριση του φορτίου σε επόμενες φάσεις.



Εικόνα 1-5 Πρώτη Φάση διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων: Καταλυτική Φάση

Ο Πίνακας 1-3 παρουσιάζει τους κύριους άξονες στρατηγικής της καταλυτικής φάσης.

Πίνακας 1-3 Άξονες στρατηγικής της καταλυτικής φάσης

<b>Άξονες Στρατηγικής της Καταλυτικής Φάσης</b>	
<b>1<sup>ος</sup> Άξονας Στρατηγικής</b>	<p style="text-align: center;"><b>Ελαχιστοποίηση του κόστους απόκτησης και λειτουργίας του ηλεκτρικού οχήματος και προώθηση της ηλεκτροκίνησης στον τομέα μεταφορών</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Ανάδειξη οικονομικών κινήτρων για την αγορά ηλεκτρικού οχήματος</li> <li>❖ Αποφυγή επιβολής φόρων σχετικά με τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων</li> <li>❖ Αποφυγή υποχρεωτικής εγκατάστασης ειδικής μετρητικής διάταξης αποκλειστικά για τα ηλεκτρικά οχήματα</li> <li>❖ Ορισμός τιμολογίων ανάλογα με το χρόνο χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας</li> </ul>
<b>2<sup>ος</sup> Άξονας Στρατηγικής</b>	<p style="text-align: center;"><b>Αντιμετώπιση των πιθανών δυσκολιών από την πλευρά των ιδιοκτητών ηλεκτρικού οχήματος για τη διευκόλυνση τους:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Θεώρηση του ηλεκτρικού οχήματος ως ένα απλό ηλεκτρικό φορτίο χωρίς να διακρίνεται από τα οικιακά συμβατικά φορτία</li> <li>❖ Έμφαση στην εξυπηρέτηση των αναγκών του ιδιοκτήτη</li> <li>❖ Έμφαση σε απλές και οικονομικές λύσεις σχετικά με τον έλεγχο, τις μετρητικές διατάξεις και τις χρεώσεις</li> <li>❖ Διευκόλυνση της εγκατάστασης του απαραίτητου εξοπλισμού φόρτισης, καταργώντας νομικούς περιορισμούς σε κτίρια πολυκατοικιών</li> </ul>
<b>3<sup>ος</sup> Άξονας Στρατηγικής</b>	<p style="text-align: center;"><b>Λειτουργία του τομέα ηλεκτρικής ενέργειας ως σύμμαχος και όχι ως εμπόδιο:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Οι εταιρίες διανομής των ηλεκτρικών δικτύων θα πρέπει να προσαρμοστούν στο νέο φορτίο και όχι αντιστρόφως</li> <li>❖ Αποφυγή θέσπισης κανόνων που προωθούν διακρίσεις σχετικά με την εξυπηρέτηση του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων έναντι των συμβατικών φορτίων, με στόχο την προστασία των δικτύων τους.</li> <li>❖ Υλοποίηση απαραίτητων επενδύσεων για την εξυπηρέτηση του επιπρόσθετου φορτίου</li> </ul>



- ❖ Ελαχιστοποίηση της αρνητικής επίδρασης των ηλεκτρικών οχημάτων στον τομέα ηλεκτρικής ενέργειας.
- ❖ Αποφυγή της πλήρως μη ελεγχόμενης φόρτισης θεσπίζοντας πολυζωνικά τιμολόγια (Time-of-Use).
- ❖ Εξασφάλιση απόσβεσης του κόστους των απαιτούμενων επενδύσεων στο δίκτυο για την εξυπηρέτηση του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων, μέσω ρυθμιστικών μηχανισμών που αφορούν το κέρδος των εταιρειών διανομής

---

#### Διευκόλυνση της λειτουργίας του αναμενόμενου επιχειρηματικού μοντέλου:

---

#### 4<sup>ος</sup> Άξονας Στρατηγικής

- ❖ Ανάπτυξη μοντέλου του Διαχειριστή Σημείου Φόρτισης
- ❖ Εγκατάσταση πιλοτικών σταθμών φόρτισης σε δημόσιους χώρους

---

#### Προετοιμασία για τη Φάση Εδραίωσης

---

#### 5<sup>ος</sup> Άξονας Στρατηγικής

- ❖ Ανάπτυξη πιλοτικών προγραμμάτων
  - ❖ Ορισμός προδιαγραφών του εξοπλισμού φόρτισης για τη μέτρηση συχνότητας
  - ❖ Έμφαση στη προτυποποίηση των διαδικασιών
  - ❖ Οριστική αποδέσμευση της λιανικής αγοράς
- 

#### ✓ Φάση Εδραίωσης

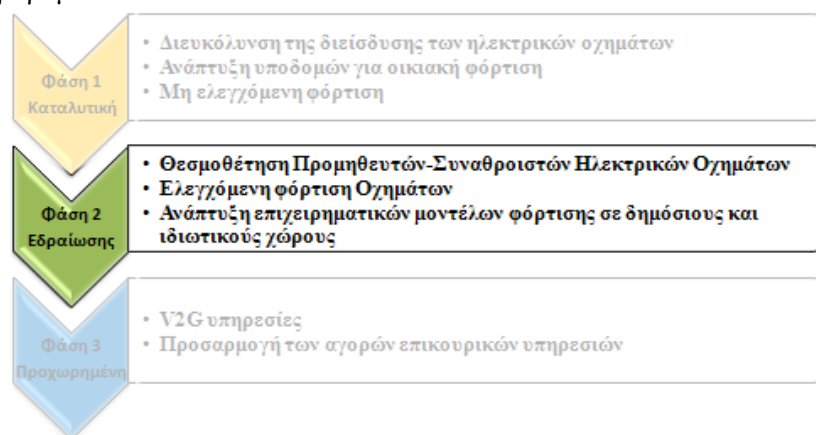
Η έναρξη της φάσης εδραίωσης αναμένεται όταν η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων γίνει σημαντικά αισθητή, γεγονός που εκτιμάται ότι θα ξεκινήσει στο μεσοπρόθεσμο διάστημα και, επομένως, δεν απαιτεί άμεση μέριμνα. Για την κάλυψη των αυξημένων ενεργειακών αναγκών των ηλεκτρικών οχημάτων απαιτείται η φόρτιση σε δημόσιους χώρους ή σε κατάλληλα διαμορφωμένους σταθμούς φόρτισης. Στη παρούσα φάση, η διαχείριση της ζήτησης του στόλου των οχημάτων είναι απαραίτητη για την ομαλή λειτουργία του δικτύου. Ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο αναμένεται να διαδραματίσουν οι *Προμηθευτές-Συναθροιστές*, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την εξυπηρέτηση και τον έλεγχο της ζήτησης των οχημάτων, μέσω διμερών συμβάσεων με τους ιδιοκτήτες τους. Στη φάση αυτή, οι ρυθμιστικές διατάξεις πρέπει να επιτρέπουν την ομαλή είσοδο στην αγορά ενέργειας των *Προμηθευτών-Συναθροιστών* ηλεκτρικών οχημάτων, οι οποίοι θα είναι ικανοί να διαχειρίζονται συμβάσεις με χιλιάδες ηλεκτρικά οχήματα που είναι ταυτόχρονα συνδεδεμένα σε διάφορες περιοχές του δικτύου.

Η διαχείριση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, παρέχει στον *Προμηθευτή-Συναθροιστή* τη δυνατότητα παροχής επικουρικών υπηρεσιών, μέσω της μεταβολής του ρυθμού φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Η ικανότητα μείωσης/αύξησης του φορτίου του συστήματος, με μείωση/αύξηση του ρυθμού φόρτισης, εξαρτώνται από τις ενεργειακές ανάγκες των ιδιοκτητών. Ο διαχωρισμός των εφεδρειών αύξησης ή μείωσης του φορτίου καθώς και οι διαφορετικές προσφορές τιμών για τα δύο αυτά είδη εφεδρείας παρέχουν στους *Προμηθευτές-Συναθροιστές* επαρκή ευελιξία, ώστε να προσφέρουν τιμές σύμφωνα με τους περιορισμούς που τίθενται από τους τρόπους και την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας.

Στη φάση αυτή, σημαντικό ρόλο έχουν οι διαχειριστές του σημείου φόρτισης, οι οποίοι θα μπορούν να αγοράζουν ενέργεια, είτε από τη χονδρική αγορά είτε από έναν προμηθευτή, και στη συνέχεια να τη μεταπωλούν στους ιδιοκτήτες οχημάτων. Στην περίπτωση αγοράς ενέργειας από τη χονδρική αγορά, οι χρηματοοικονομικές υποχρεώσεις τους θα πρέπει να προσδιορίζονται με τον ίδιο βαθμό αυστηρότητας που χαρακτηρίζει τις αντίστοιχες των προμηθευτών. Σε κάθε περίπτωση, οι αρμοδιότητες των διαχειριστών του σημείου φόρτισης θα πρέπει να καθορίζονται από αυστηρές νομοθετικές ρυθμίσεις.

Η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων δεν αναμένεται να πραγματοποιηθεί ομοιόμορφα σε κάθε περιοχή και αυτό επηρεάζει την απόφαση του διαχειριστή του δικτύου για τον σχεδιασμό του δικτύου. Σε περιοχές με μεγάλη διείσδυση, ίσως απαιτούνται επενδύσεις σχετικές με επέκταση και

ενίσχυση του δικτύου με επιπρόσθετες λειτουργικές δαπάνες. Οι ομοιόμορφες χρεώσεις για πελάτες του ίδιου επιπέδου τάσης, που εφαρμόζονται σήμερα, υποδεικνύουν ότι το επιπρόσθετο αυτό κόστος που θα επιφέρουν τα ηλεκτρικά οχήματα σε μία συγκεκριμένη τοποθεσία θα κατανομηθεί ομοιόμορφα σε όλους τους καταναλωτές. Για να αποφευχθεί αυτό, μια λύση θα ήταν η υιοθέτηση διαφορετικών χρεώσεων για χρήση του συστήματος, ανάλογα με την τοποθεσία. Τέτοιες χρεώσεις θα μπορούσαν να λειτουργήσουν ως αντικίνητρο στους χρήστες των ηλεκτρικών οχημάτων για τη φόρτιση των μπαταριών σε περιοχές και χρονικές στιγμές που το δίκτυο είναι ήδη σημαντικά επιβαρυνόμενο.



Εικόνα 1-6 Δεύτερη Φάση διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων: Φάση Εδραίωσης

Ο Πίνακας 1-4 παρουσιάζει τους κύριους άξονες στρατηγικής της φάσης εδραίωσης.

Πίνακας 1-4 Άξονες στρατηγικής της φάσης εδραίωσης

<b>Άξονες Στρατηγικής της Φάσης Εδραίωσης</b>	
<b>1<sup>ος</sup> Άξονας Στρατηγικής</b>	<p><b>Ενσωμάτωση Προμηθευτών-Συναθροιστών Ηλεκτρικών Οχημάτων στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Προσαρμογή της σχεδίασης των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας και των αγορών επικουρικών υπηρεσιών στα χαρακτηριστικά του νέου αυτού παράγοντα</li> <li>❖ Προσδιορισμός ελάχιστης ποσότητας ενέργειας που απαιτείται για τη συμμετοχή στις αγορές.</li> <li>❖ Εξασφάλιση της εφεδρείας, όχι νωρίτερα από 24 ώρες</li> <li>❖ Μη συμμετρικές προσφορές (άνω και κάτω ρύθμιση) στις αγορές εφεδρείας</li> <li>❖ Ορισμός των ευθυνών και των υποχρεώσεων</li> <li>❖ Εφαρμογή μηχανισμών, ειδικά προσαρμοσμένων για τους Προμηθευτές-Συναθροιστές, που θα περιορίζουν τους κινδύνους που παρουσιάζονται</li> <li>❖ Έμφαση στην εγκατάσταση έξυπνων μετρητών</li> <li>❖ Σταδιακή εφαρμογή δυνατότητας περιαγωγής (roaming) για την πρόσβαση στα σημεία φόρτισης.</li> </ul>
<b>2<sup>ος</sup> Άξονας Στρατηγικής</b>	<p><b>Δυνατότητα ελέγχου της φόρτισης</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Προώθηση των εφαρμογών έξυπνου δικτύου (Smart-Grid) και εικονικών πάρκων παραγωγής (Virtual PowerPlant)</li> <li>❖ Οι υποδομές που αναπτύσσονται για την υλοποίηση των έξυπνων δικτύων θα αξιοποιηθούν για τον έλεγχο των φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Η ανάπτυξη υποδομών έξυπνων δικτύων αποκλειστικά και μόνο για τις ανάγκες ελέγχου φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων δεν είναι βιώσιμη λύση.</li> <li>❖ Προτυποποίηση των πρωτόκολλων επικοινωνίας</li> </ul>

---

**Προσαρμογή των Διαχειριστών Συστήματος στην ελεγχόμενη φόρτιση των οχημάτων**

---

**3<sup>ος</sup> Άξονας  
Στρατηγικής**

- ❖ Θέσπιση ρυθμιστικών πλαισίων που θα καθορίζουν την αλληλεπίδραση μεταξύ των Προμηθευτών-Συναθροιστών και των διαχειριστών του συστήματος
  - ❖ Οι διαχειριστές του δικτύου θα πρέπει να επικυρώνουν τα προγράμματα φόρτισης των Προμηθευτών-Συναθροιστών, ώστε να μην παραβιάζονται οι τεχνικοί περιορισμοί του δικτύου.
  - ❖ Μελέτη του σχεδιασμού τιμολογίων πρόσβασης, ανάλογα με τον χρόνο χρήσης (ToU: TimeofUse)
  - ❖ Μελέτη του σχεδιασμού τιμολογίων πρόσβασης ανάλογα με την τοποθεσία
  - ❖ Ο τρόπος διαχείρισης της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη σχεδίαση του δικτύου.
- 

✓ **Προχωρημένη Φάση**

Η προχωρημένη φάση περιγράφει ένα μακροπρόθεσμο και ιδιαίτερα αισιόδοξο σενάριο. Στη φάση αυτή, εκτιμάται πως τα ηλεκτρικά οχήματα θα λειτουργούν ως διεσπαρμένες αποθηκευτικές μονάδες, που θα επιτρέπουν την αμφίδρομη ροή ισχύος από (φόρτιση) και προς (εκφόρτιση – V2G λειτουργία) το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Η αποθηκευτική ικανότητα ενός στόλου οχημάτων μπορεί να αξιοποιηθεί από τους Προμηθευτές-Συναθροιστές για την παροχή επικουρικών υπηρεσιών, συμβάλλοντας έτσι στην αποδοτικότερη λειτουργία του δικτύου. Ωστόσο, μία τέτοια χρήση επιβαρύνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας, το κόστος της οποίας είναι σημαντικό. Η συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά επικουρικών υπηρεσιών μπορεί να αποφέρει κέρδη τόσο στους Προμηθευτές-Συναθροιστές όσο και στους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων [32].

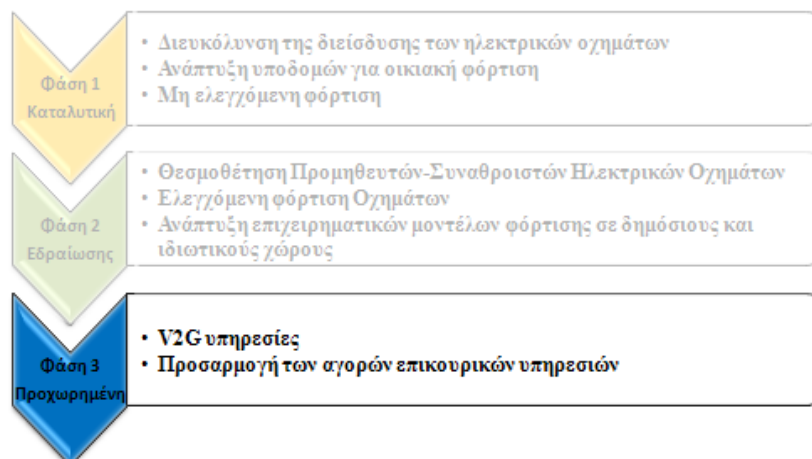
Ο Προμηθευτής-Συναθροιστής θα διαδραματίζει πρωτεύοντα ρόλο στην παροχή υπηρεσιών V2G, διευκολύνοντας τη μαζική συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων σε αγορές επικουρικών υπηρεσιών. Βέβαια η υλοποίηση αυτής της υπηρεσίας απαιτεί την ανάπτυξη σύνθετων μεθόδων ελέγχου και περίπλοκες υποδομές επικοινωνίας. Ο Προμηθευτής-Συναθροιστής είναι σε θέση να παρέχει στον διαχειριστή του συστήματος συγκεκριμένες υπηρεσίες σύμφωνα με όρους που θεσπίζονται μέσω του κώδικα δικτύου και ενός ρυθμιστικού πλαισίου. Στον κώδικα αυτό πρέπει να καθορίζονται οι προϋποθέσεις για τη παροχή τέτοιων υπηρεσιών από τα ηλεκτρικά οχήματα, για παράδειγμα ελάχιστες απαιτήσεις εφεδρείας, τοπικές αγορές για παροχή επικουρικών υπηρεσιών, διακανονισμοί τιμολόγησης κ.τ.λ. Πολλές από αυτές τις υπηρεσίες ενδέχεται να περιλαμβάνουν και τοπικά εξαρτώμενες συνιστώσες, όπως διαχείριση συμφορήσεων ή έλεγχος τάσης, και οι οποίες θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τον σχεδιασμό του συγκεκριμένου κώδικα.

Ένα ιδιαίτερα σημαντικό ζήτημα στη φάση αυτή είναι η καταπόνηση των συσσωρευτών, λόγω της εξειδικευμένης χρήσης τους για προσφορά ενέργειας στο δίκτυο. Επομένως, θέματα σχετικά με την απόδοση της μπαταρίας, όπως π.χ. κάποιο είδος εγγύησης που θα μπορούσαν να δίνουν οι κατασκευαστές αυτοκινήτων, πρέπει να διευθετηθούν στη φάση αυτή.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι και η ενσωμάτωση ‘έξυπνων’ μετρητών στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς θα ωφελήσει σημαντικά και τους διαχειριστές του δικτύου, οι οποίοι, μέσω καινοτόμων μελετών, θα πρέπει να αναζητήσουν νέους τρόπους για βελτίωση της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών τους.

Τέλος, η δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας από τα ηλεκτρικά οχήματα και η εναπόθεση της στο δίκτυο σε μεταγενέστερες ώρες είναι ιδιαίτερα σημαντική στην περίπτωση νησιδοποιημένων συστημάτων, καθώς θα μπορούσε να εξασφαλίσει την αδιάλειπτη παροχή ενέργειας.

Ο Πίνακας 1-5 παρουσιάζει τους κύριους άξονες στρατηγικής της προχωρημένης φάσης.



Εικόνα 1-7 Τρίτη Φάση διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων: Προχωρημένη Φάση

Πίνακας 1-5 Αξονες στρατηγικής της προχωρημένης φάσης

Αξονες Στρατηγικής της Προχωρημένης Φάσης	
	<b>Πλήρης ενσωμάτωση της αποθηκευτικής ικανότητας που προσφέρουν τα ηλεκτρικά οχήματα</b>
<b>1<sup>ος</sup> Αξονας Στρατηγικής</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Προσαρμογή των αγορών επικουρικών υπηρεσιών σε Ευρωπαϊκό επίπεδο για τη συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων σε αυτές.</li> <li>❖ Προσαρμογή του κώδικα του δικτύου διανομής ώστε να επιτρέπει συμφωνίες μεταξύ Διαχειριστή Συστήματος και Προμηθευτή-Συναθροιστή για αποφυγή επενδύσεων δικτύου και διαχείριση συμφορήσεων.</li> <li>❖ Εκτίμηση της επίδρασης των ηλεκτρικών οχημάτων στην ποιότητα των παρεχόμενων υπηρεσιών</li> </ul>
	<b>Προτυποποίηση τηλεπικοινωνιακών και ηλεκτρικών υποδομών για την ελεγχόμενη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων σε Ευρωπαϊκό επίπεδο</b>
<b>2<sup>ος</sup> Αξονας Στρατηγικής</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Θέσπιση προδιαγραφών μετάδοσης πληροφοριών, που θα επιτρέπουν την ασφαλή επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο μεταξύ Ηλεκτρικού Οχήματος, Διαχειριστών Δικτύου και Προμηθευτών-Συναθροιστών</li> <li>❖ Προτυποποίηση του εξοπλισμού φόρτισης (με δυνατότητες αμφίδρομης ροής ισχύος) σε Ευρωπαϊκό επίπεδο</li> </ul>

## 1.2.4 Μοντέλα φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

### 1.2.4.1 Καταλυτική Φάση

#### ✓ Οικιακή φόρτιση

Το πιο απλό μοντέλο φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων είναι η οικιακή. Στην περίπτωση αυτή, η ενέργεια που απαιτείται για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των καθημερινών μετακινήσεων εξυπηρετείται τις βραδινές ώρες και τιμολογείται ως επιπρόσθετο οικιακό φορτίο. Η σύμβαση παροχής μεταξύ προμηθευτή και τελικού πελάτη μπορεί να είναι απλή ή σύνθετη. Στην απλή περίπτωση, η τιμολόγηση της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι διαφορετική τις ώρες υψηλής ή χαμηλής ζήτησης, ώστε η φόρτιση να γίνεται κατά προτίμηση τις ώρες χαμηλής ζήτησης. Στη σύνθετη περίπτωση, η τιμολόγηση μεταβάλλεται σε ωριαία βάση προωθώντας μία ενιαία διαχείριση της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων σε συνδυασμό με τα υπόλοιπα φορτία. Αν ο

διαχωρισμός των χρεώσεων της κατανάλωσης των ηλεκτρικών οχημάτων και των οικιακών συσκευών είναι απαραίτητος, όπως για παράδειγμα η υιοθέτηση διαφορετικών τιμολογίων ή οικονομικών κινήτρων για τη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων, είναι αναγκαία η χρήση ξεχωριστού μετρητή στο σημείο φόρτισης. Στην περίπτωση αυτή, ο ιδιοκτήτης του σπιτιού θα έχει δύο τιμολόγια ή συμβάσεις παροχής, την ήδη υπάρχουσα για τη μέτρηση της οικιακής ηλεκτρικής κατανάλωσης και μία καινούρια για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων.

Ο προμηθευτής ηλεκτρικής ενέργειας είναι υπεύθυνος για τις διαπραγματεύσεις στη χονδρική και λιανική αγορά ενέργειας. Τα κέρδη του προέρχονται από τη διαφορά των τιμών μεταξύ της χονδρικής αγοράς και του τελικού πελάτη. Η μεγιστοποίηση του κέρδους του εξαρτάται από την ακρίβεια της πρόβλεψης της αθροιστικής ζήτησης των πελατών του, η οποία μάλιστα καθορίζει και την απαραίτητη προμήθεια ηλεκτρικής ενέργειας από τη χονδρική αγορά. Στον συγκεκριμένο τρόπο φόρτισης, οι περισσότερες λειτουργίες του *Προμηθευτή-Συναθροιστή* δεν μεταβάλλονται καθώς τα ηλεκτρικά οχήματα αντιμετωπίζονται ως ένα επιπρόσθετο φορτίο από την πλευρά των τελικών πελατών. Καθώς δεν υπάρχει η δυνατότητα άμεσου ελέγχου της διαδικασίας της φόρτισης, ο *Προμηθευτής-Συναθροιστής* μπορεί έμμεσα να επηρεάσει τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων προσφέροντας οικονομικά κίνητρα (ειδικά διαμορφωμένα τιμολόγια) στους χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων. Αν η ανταπόκριση των χρηστών στα ειδικά διαμορφωμένα τιμολόγια είναι θετική, τότε η αβεβαιότητα του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων, ως εκ τούτου και το ρίσκο του *Προμηθευτή-Συναθροιστή*, μειώνονται.

Ο Διαχειριστής του συστήματος διανομής στη φάση αυτή έχει κυρίως συμβουλευτικό χαρακτήρα, ενώ θα πρέπει παράλληλα να εποπτεύει τις διασυνδέσεις φόρτισης. Η μη ελεγχόμενη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων, πιθανώς, να προκαλέσει σημαντική αύξηση του φορτίου τις ώρες που η κατανάλωση του συστήματος είναι υψηλή. Αν η αύξηση φορτίου σε ένα συγκεκριμένο τμήμα του ηλεκτρικού δικτύου είναι έντονη, λόγω του ευνοϊκού περιβάλλοντος για την αποδοχή των ηλεκτρικών οχημάτων, τότε δικτυακά προβλήματα (υπερφορτίσεις στις γραμμές και στους μετασχηματιστές του δικτύου, πτώση τάσεων ζυγών κτλ. ) μπορούν να προκύψουν. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η ενίσχυση του δικτύου διανομής είναι απαραίτητη. Το κόστος ενίσχυσης του δικτύου αφορά στον Διαχειριστή του συστήματος διανομής. Η απόσβεση της επένδυσης αυτής επιτυγχάνεται μέσω του κόστους χρήσης του δικτύου, το οποίο καθορίζεται από ρυθμιστικές διατάξεις.

Το επιπρόσθετο φορτίο της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων θα πρέπει να ληφθεί υπόψη από τον Διαχειριστή του δικτύου κατά τον σχεδιασμό ανάπτυξης του δικτύου. Η ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων εισάγει στο σχεδιασμό ένα βαθμό αβεβαιότητας και απαιτεί την εφαρμογή στοχαστικών μεθοδολογιών. Ο βαθμός διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων (και επομένως και η επίδρασή τους στη καμπύλη φορτίου) δεν μπορεί να προσδιοριστεί επακριβώς, αφού εξαρτάται από τις τεχνολογικές εξελίξεις, τη γενικότερη κοινωνική αποδοχή και την ανάπτυξη των υποδομών φόρτισης, ενώ τα σενάρια ζήτησης θα είναι διαφορετικά ανά γεωγραφική περιοχή, λόγω της κινητικότητας των οχημάτων.

Ο Πίνακας 1-6 συνοψίζει επιγραμματικά τις υποχρεώσεις, τις ευκαιρίες και τους κινδύνους για κάθε εμπλεκόμενο φορέα στην καταλυτική φάση.

#### 1.2.4.2 Φάση Εδραίωσης

##### ✓ *Ελεγχόμενη Φόρτιση σε δημόσιο χώρο*

Η ανάπτυξη των υποδομών σε δημόσιους χώρους έχει ως στόχο την εξυπηρέτηση των ενεργειακών αναγκών των ηλεκτρικών οχημάτων κατά τη διάρκεια της ημέρας και πριν τη βραδινή φόρτιση στο σπίτι, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα για μεγαλύτερες ημερήσιες διανυόμενες αποστάσεις. Με τον τρόπο αυτό ενισχύεται η εμπιστοσύνη των καταναλωτών για τη δυνατότητα των ηλεκτρικών οχημάτων να καλύπτουν πλήρως τις ημερήσιες ανάγκες τους για μετακίνηση. Οι υποδομές φόρτισης σε δημόσιους χώρους με δημόσια πρόσβαση επιτάσσουν τη συνεργασία μεταξύ των εμπλεκόμενων ενεργειακών παραγόντων. Η πρόσβαση στους δημόσιους σταθμούς φόρτισης

θα πρέπει να είναι ελεύθερη σε όλους τους *Προμηθευτές-Συναθροιστές* χωρίς διακρίσεις ή μονοπωλιακές πρακτικές.

Σε αυτό το μοντέλο φόρτισης, ο ιδιοκτήτης του ηλεκτρικού οχήματος δεν αναλαμβάνει κάποια ιδιαίτερα καθήκοντα ή υποχρεώσεις. Η χρέωση της χρήσης των σταθμών αυτών φόρτισης καθορίζεται βάσει διμερών συμφωνιών με κάποιον *Προμηθευτή-Συναθροιστή* και μπορεί να αφορά είτε το κόστος ενέργειας είτε το χρόνο στάθμευσης. Επιπρόσθετα, η χρέωση του χρήστη επηρεάζεται και από το επίπεδο ισχύος φόρτισης.

Όταν ένα ηλεκτρικό όχημα συνδέεται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, ο διαθέσιμος χρόνος στάθμευσης και οι ενεργειακές ανάγκες του αποστέλλονται στον *Προμηθευτή-Συναθροιστή*. Στη συνέχεια, ο *Προμηθευτής-Συναθροιστής* προγραμματίζει τη φόρτιση του οχήματος με τρόπο ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις του χρήστη και να μεγιστοποιεί το δικό του κέρδος. Η μεγιστοποίηση του κέρδους του *Προμηθευτή-Συναθροιστή* εξαρτάται από τον μέγεθος του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων που διαχειρίζεται. Τα ηλεκτρικά οχήματα είναι πλέον ελεγχόμενα φορτία και ο τρόπος διαχείρισής τους από τον *Προμηθευτή-Συναθροιστή*, κατά τη διάρκεια που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο, διαμορφώνει το περιθώριο κέρδους του. Σε ένα ανταγωνιστικό περιβάλλον, ο *Προμηθευτής-Συναθροιστής* θα πρέπει να διαμορφώνει τιμολόγια σύμφωνα με τις συνθήκες που επικρατούν στην αγορά, μεταφέροντας κάποιες από τις χρεώσεις που του αναλογούν στο χρήστη του ηλεκτρικού οχήματος. Η αστάθεια των τιμών της αγοράς ενέργειας επηρεάζει άμεσα το κέρδος του *Προμηθευτή-Συναθροιστή*.

**Πίνακας 1-6 Καταλυτική φάση - Ευκαιρίες και Κίνδυνοι για τους εμπλεκόμενους παράγοντες (μη ελεγχόμενη φόρτιση)**

<b>Μη Ελεγχόμενη Φόρτιση</b>			
<b>Φορείς</b>	<b>Αρμοδιότητες Υποχρεώσεις</b>	<b>Ευκαιρίες</b>	<b>Κίνδυνοι</b>
<b>Ιδιοκτήτης του Σπιτιού</b>	-Εγκατάσταση οικιακών υποδομών φόρτισης. -Ενημέρωση του προμηθευτή για τη μέγιστη απαιτούμενη ισχύ φόρτισης.	*Μείωση του κόστους μετακινήσεων λόγω της αποδέσμευσης από συμβατικά καύσιμα	*Υψηλό κόστος ηλεκτρικών οχημάτων λόγω κόστους μπαταρίας *Φθορά μπαταρίας
<b>Προμηθευτής Ηλεκτρικής Ενέργειας</b>	*Εξυπηρέτηση του φορτίου των οχημάτων χωρίς διακρίσεις σε σχέση με τα υπόλοιπα συμβατικά φορτία	*Αύξηση του τζίρου λόγω επιπρόσθετης κατανάλωσης *Ελαστικότητα ζήτησης μέσω ειδικών τιμολογίων	*Αδυναμία άμεσου ελέγχου της ζήτησης. *Μεταβλητή ζήτηση λόγω κινητικότητας οχημάτων. *Αύξηση της αβεβαιότητας της πρόβλεψης φορτίου
<b>Διαχειριστής Δικτύου Διανομής</b>	*Συμβουλευτικός ρόλος. *Εποπτεία των εγκαταστάσεων φόρτισης και της διασύνδεσής τους με το δίκτυο		*Η πρόβλεψη του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων είναι πιο σύνθετη *Αύξηση των απωλειών του δικτύου *Παραβιάσεις ορίων λειτουργίας του δικτύου *Ανάγκη συμβατότητας των σημερινών έξυπνων μετρητών με τις μελλοντικές λειτουργίες των ηλεκτρικών οχημάτων. *Ο διαχωρισμός τιμολόγησης οικιακού φορτίου και ηλεκτρικών οχημάτων, προϋποθέτει την εγκατάσταση ξεχωριστών μετρητών

Οι διαχειριστές του συστήματος σχεδιάζουν και προγραμματίζουν τη λειτουργία του δικτύου στηριζόμενοι σε προβλέψεις για την αύξηση του φορτίου. Στην πρόβλεψη της ζήτησης θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων η οποία εξαρτάται από το επίπεδο διείσδυσης και την κινητικότητα τους. Σε δίκτυα που παρατηρείται απότομη αύξηση της διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων, η πρόβλεψη της ζήτησης τους πιθανόν να παρουσιάζει μεγαλύτερα σφάλματα. Επομένως, απαιτείται μια περίοδος εκμάθησης της κινητικότητας και της φόρτισης τους, η οποία μάλιστα θα στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στα ιστορικά δεδομένα της καταλυτικής φάσης.

Στη περίπτωση που οι υποδομές φόρτισης σε δημόσιο χώρο ανήκουν στην ιδιοκτησία του διαχειριστή του δικτύου, το κόστος απόσβεσης των υποδομών θα πρέπει να καθορίζεται από ρυθμιστικές διατάξεις. Η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των ενεργειακών απωλειών στα δίκτυα διανομής, ανεξαρτήτως από τον τρόπο φόρτισης (ελεγχόμενο ή μη). Στις ρυθμιστικές διατάξεις προβλέπονται οικονομικά κίνητρα για τη μείωση των ενεργειακών απωλειών του δικτύου από τους διαχειριστές του δικτύου, ενώ σε αντίθετη περίπτωση, υπόκεινται σε κυρώσεις αν οι απώλειες του δικτύου ξεπερνούν μία τιμή αναφοράς. Η διαχείριση του φορτίου τους και η μετατόπιση της εξυπηρέτησης των ενεργειακών αναγκών τους σε ώρες μη αιχμής του συστήματος, συμβάλλει στη μείωση των ενεργειακών απωλειών και στην αποδοτικότερη λειτουργία του δικτύου.

Η διαχείριση του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων θα συμβάλει και στην ομαλή διείσδυση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής. Η προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των μονάδων συνδυασμένης παραγωγής ισχύος και θερμότητας συνεπάγεται υψηλότερο ποσοστό συμμετοχής της διεσπαρμένης παραγωγής στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αν η εξυπηρέτηση της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων μετατοπιστεί σε ώρες με περίσσεια ισχύος διεσπαρμένης παραγωγής, τότε πρόωρες επενδύσεις δικτύου, που απαιτούνται λόγω της διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων, πιθανόν να αναβληθούν ή να αποφευχθούν.

✓ *Σταθμοί φόρτισης σε ιδιωτικό χώρο με δημόσια πρόσβαση*

Τα νομοθετικό πλαίσιο πρέπει να διαμορφωθεί καταλλήλως για τη λειτουργία σταθμών φόρτισης σε ιδιωτικούς χώρους όπου η στάθμευση οχημάτων επιτρέπεται σε ευρύτερο κοινό (εμπορικά πολύ-καταστήματα, γραφεία κτλ.). Όλες οι νομοθετικές προϋποθέσεις για τους διαχειριστές των σημείων φόρτισης (διατάξεις μέτρησης, χρηματοοικονομικές υποχρεώσεις και τεχνικές δυνατότητες) πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο απλές και ξεκάθαρες για να μειώσουν όλα τα εμπόδια πρόσβασης για τους διάφορους παράγοντες, ενώ πρέπει να τεθούν εκτεταμένοι και δεσμευτικοί κανονισμοί μόνο εκεί που θεωρούνται απολύτως απαραίτητοι. Το ρυθμιστικό πλαίσιο θα μπορούσε, ανάλογα με την πολυπλοκότητά του, να αποτελεί μία ευκαιρία για τους διαχειριστές του σημείου φόρτισης διευκολύνοντας και προωθώντας επιχειρηματικούς διακανονισμούς ή έναν κίνδυνο ορίζοντας μία ιδιαίτερα σύνθετη επιχειρηματική δραστηριότητα που μπορεί να αναπτυχθεί μόνο από παράγοντες με υψηλά μερίδια αγορών.

Αν η ανάπτυξη του σταθμού φόρτισης πραγματοποιηθεί από ιδιωτικούς φορείς, οι ίδιοι είναι υπεύθυνοι για την ανάπτυξη των απαραίτητων υποδομών, την προμήθεια της ενέργειας από τη λιανική αγορά και τη μεταπώληση της στους καταναλωτές, ακολουθώντας τις αντίστοιχες ρυθμιστικές διατάξεις.

Οι διαχειριστές των σημείων φόρτισης ενεργούν ως τελικοί πελάτες. Την ενέργεια που προμηθεύονται τη μεταπουλούν στους χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων βάσει μίας εμπορικής σύμβασης που θέτει συγκεκριμένους όρους και προϋποθέσεις. Το περιθώριο κέρδους του διαχειριστή του σημείου φόρτισης καθορίζεται από τη διαφορά μεταξύ της τιμής της ενέργειας που προμηθεύονται και της τιμολόγησης των προσφερόμενων υπηρεσιών στους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων.

✓ *Σταθμοί ενοικίασης και αλλαγής μπαταριών*

Στους σταθμούς αυτούς προσφέρεται η δυνατότητα στους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων να αντικαταστήσουν τον αφόρτιστο συσσωρευτή του οχήματος με έναν πλήρως φορτισμένο σε

διάστημα λίγων μόνο λεπτών. Το αρχικό κόστος επένδυσης ενός τέτοιου σταθμού είναι ιδιαίτερα υψηλό καθώς δεν απαιτείται μόνο η ανάπτυξη των κατάλληλων υποδομών αλλά και η απόκτηση κατάλληλου αριθμού συσσωρευτών που θα ικανοποιεί τις ανάγκες των τελικών πελατών. Η απόσβεση του επενδυτικού κεφαλαίου πραγματοποιείται μέσω της τιμολόγησης της παρεχόμενης υπηρεσίας προς τους τελικούς πελάτες, στην οποία θα πρέπει να συμπεριλαμβάνεται και το κόστος φθοράς της μπαταρίας. Αυτό απαιτεί βέβαια άριστη γνώση της τεχνολογίας των συσσωρευτών, ώστε να γίνει σωστή εκτίμηση του κόστους φθοράς της μπαταρίας. Η ομαλή και αποτελεσματική λειτουργία ενός τέτοιου σταθμού φόρτισης προϋποθέτει την προτυποποίηση των διασυνδέσεων με το όχημα.

Επιπρόσθετα, οι σταθμοί αυτοί μπορούν να λειτουργήσουν και ως μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, ο σταθμός θα μπορούσε να αποθηκεύει ενέργεια με χαμηλό κόστος κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης και να προσφέρει ανταγωνιστικές τιμές κατά τις ώρες αιχμής φορτίου. Η αποθηκευτική ικανότητα ενός τέτοιου σταθμού θα μπορούσε να συνδυαστεί με διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής.

Η λειτουργία ενός τέτοιου σταθμού φόρτισης εξυπηρετεί τους προμηθευτές καθώς η ζήτηση για τη φόρτιση των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων εμφανίζει μεγαλύτερη ευελιξία. Οι προμηθευτές μπορούν να προσφέρουν στους διαχειριστές των σταθμών αυτών κατάλληλα διαμορφωμένα τιμολόγια που να ευνοούν την κατανάλωση σε ώρες χαμηλής ζήτησης. Οι σταθμοί παρέχουν στους προμηθευτές τη δυνατότητα ενός έμμεσου ελέγχου της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων.

Ο διαχειριστής του σταθμού φόρτισης μπορεί να προμηθεύεται την ενέργεια απευθείας από την αγορά ενέργειας, είτε πιο απλά από έναν προμηθευτή μέσω διμερών συμβάσεων. Η τιμολόγηση της προμηθευόμενης ενέργειας θα διευθετείται σύμφωνα με τη ζήτηση ενέργειας και την αιχμή ισχύος, όπως αυτές καταγράφονται από τον κεντρικό μετρητή του σταθμού.

- ✓ *Φόρτιση στο σπίτι υπό τη διαχείριση του Προμηθευτή-Συναθροιστή ηλεκτρικών οχημάτων*

Στο μοντέλο αυτό ο Προμηθευτής-Συναθροιστής είναι ο ενδιάμεσος παράγοντας μεταξύ χονδρικής αγοράς ενέργειας και τελικών καταναλωτών. Ο Προμηθευτής-Συναθροιστής προμηθεύεται ενέργεια από τη χονδρική αγορά και τη μεταπωλεί στους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων. Στο συγκεκριμένο μοντέλο, προσφέρεται η δυνατότητα ξεχωριστής τιμολόγησης της ενέργειας που απαιτείται για τη φόρτιση του οχήματος, δίνοντας τη δυνατότητα εφαρμογής οικονομικής πολιτικής, για παράδειγμα εισαγωγή ειδικής φορολογίας ή οικονομικών κινήτρων για την αύξηση της διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων.

Ο ιδιοκτήτης του ηλεκτρικού οχήματος θα πρέπει να υπογράψει ένα συμβόλαιο για παροχή ενέργειας αποκλειστικά για τη φόρτιση του ηλεκτρικού του οχήματος με κάποιον Προμηθευτή-Συναθροιστή. Ο ιδιοκτήτης του οχήματος αναλαμβάνει το κόστος των εγκαταστάσεων φόρτισης, ενημερώνοντας παράλληλα τον Προμηθευτή-Συναθροιστή για το μέγιστο επίπεδο ισχύος φόρτισης.

Ο Προμηθευτής-Συναθροιστής λαμβάνει τις μετρήσεις ενέργειας από τον μετρητή, τις οποίες χρησιμοποιεί για την τιμολόγηση και την πρόβλεψη της ζήτησης. Βάσει των αναγκών φόρτισης και μετακίνησης των ηλεκτρικών οχημάτων ο Προμηθευτής-Συναθροιστής προγραμματίζει βέλτιστα τη φόρτιση τους με τρόπο που να ικανοποιεί πλήρως τις απαιτήσεις του καταναλωτή και παράλληλα να μεγιστοποιεί το κέρδος του.

Ο ρόλος του διαχειριστή του συστήματος είναι η επίβλεψη της ομαλής λειτουργίας του δικτύου, επιβάλλοντας στον Προμηθευτή-Συναθροιστή τη μεταβολή του προγραμματισμού φόρτισης σε περιπτώσεις που παραβιάζονται οι τεχνικοί περιορισμοί του δικτύου.

- ✓ *Εμπορικό κτίριο ή κτίριο γραφείων με χώρο στάθμευσης για ηλεκτρικά οχήματα και ενιαία διαχείριση ενέργειας*

Στο μοντέλο αυτό, ο διαχειριστής του σημείου φόρτισης είναι ουσιαστικά ο διαχειριστή του δικτύου, που αγοράζει ενέργεια για να τη μεταπουλήσει σε ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων, οι οποίοι μπορεί να είναι εργαζόμενοι σε ένα γραφείο ή πελάτες ενός εμπορικού καταστήματος. Είναι



ουσιαστικά μία ειδική περίπτωση του μοντέλου «Σταθμοί Φόρτισης σε ιδιωτικό χώρο με δημόσια πρόσβαση». Ο ιδιοκτήτης του κτιρίου είναι υπεύθυνος για την εγκατάσταση των απαραίτητων υποδομών φόρτισης. Η χρέωση της ενέργειας στους ιδιοκτήτες των ηλεκτρικών οχημάτων βασίζεται στις ενεργειακές ανάγκες του εκάστοτε οχήματος και στη χρονική περίοδο που πραγματοποιήθηκε η φόρτιση. Η μεμονωμένη μέτρηση της κατανάλωσης κάθε οχήματος είναι εφικτή, ωστόσο αυξάνει σημαντικά το κόστος επένδυσης.

Ο ιδιοκτήτης του ηλεκτρικού οχήματος δεν έχει στο μοντέλο αυτό κάποια συγκεκριμένα καθήκοντα. Απολαμβάνει τις υπηρεσίες που του προσφέρει ο διαχειριστής του σημείου φόρτισης με το αντίστοιχο χρηματικό αντίτιμο.

Ο ρόλος των προμηθευτών ενέργειας δεν τροποποιείται μιας και η φόρτιση αυτή αντιμετωπίζεται ως μια αύξηση της κατανάλωσης του συγκεκριμένου κτηρίου.

Ο Πίνακας 1-7 συνοψίζει τις υποχρεώσεις, τις ευκαιρίες και τους κινδύνους για κάθε εμπλεκόμενο φορέα στη φάση εδραίωσης.

**Πίνακας 1-7 Ευκαιρίες και Κίνδυνοι για τους εμπλεκόμενους παράγοντες (ελεγχόμενη φόρτιση)**

Φορείς	Ελεγχόμενη Φόρτιση		
	Καθήκοντα-Υποχρεώσεις	Ευκαιρίες	Κίνδυνοι
<b>Ιδιοκτήτης ηλεκτρικού οχήματος</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Αποζημίωση του Προμηθευτή-Συναθροιστή/ Διαχειριστή σημείου φόρτισης για τις παρεχόμενες υπηρεσίες</li> <li>*Εγκατάσταση υποδομών για οικιακή φόρτιση</li> <li>*Ενημέρωση του Προμηθευτή-Συναθροιστή για την απαιτούμενη ισχύ.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Νέες υπηρεσίες που διευκολύνουν τη μετακίνηση με ηλεκτρικά οχήματα</li> </ul>	
<b>Προμηθευτής-Συναθροιστής Ηλεκτρικών Οχημάτων</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Προμήθεια ηλεκτρικής ενέργειας από την αγορά ενέργειας</li> <li>*Συβάσεις με ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων.</li> <li>*Βέλτιστος προγραμματισμός φόρτισης</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Διαχείριση μίας ιδιαίτερα μεγάλης ενεργειακής ζήτησης που αυξάνει σημαντικά τα περιθώρια κέρδους του</li> <li>*Ευελξία ζήτησης (αύξηση κέρδους, ανταγωνιστικότερα συμβόλαια, διόρθωση των σφαλμάτων πρόβλεψης</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Μεγάλη αβεβαιότητα ιδιαίτερα στο αρχικό στάδιο της ελεγχόμενης φόρτισης</li> <li>*Σφάλμα προβλέψεων</li> <li>*Εκθεση στην αστάθεια των τιμών αγοράς</li> </ul>
<b>Ιδιοκτήτης του σταθμού φόρτισης</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Ως τελικός πελάτης θα αγοράζει την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια και θα τη μεταπουλούν σε χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων.</li> <li>*Εγκατάσταση υποδομών φόρτισης</li> <li>*Βελτιστοποίηση του προγράμματος φόρτισης</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Η προσφορά υπηρεσιών φόρτισης προσελκύει πελάτες που ενδιαφέρονται για συγκεκριμένες λειτουργίες (π.χ. χώρο στάθμευσης)</li> <li>*Αύξηση του περιθωρίου κέρδους λόγω της μεταπώλησης ενέργειας</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Αυστηρές χρηματοοικονομικές υποχρεώσεις.</li> <li>*Λανθασμένες μακροπρόθεσμες προβλέψεις φορτίου με αποτυχία ανάκτησης του κόστους εξοπλισμού.</li> <li>*Ιδιαίτερα πολύπλοκες ρυθμίσεις για τους φορείς που μεταπουλούν ενέργεια</li> </ul>
<b>Σταθμός Ενοικίασης και Αλλαγής Μπαταριών</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Θα προσφέρουν τη δυνατότητα στα ηλεκτρικά οχήματα να αλλάξουν το συσσωρευτή που διαθέτουν με έναν πλήρως φορτισμένο σε διάστημα λίγων μόνο λεπτών.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Αύξηση του περιθωρίου κέρδους λόγω της μεταπώλησης ενέργειας</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Υπερβολικά αυξημένο το αρχικό κόστος επένδυσης</li> <li>*Ελλιπής προτυποποίησης των</li> </ul>

		*Δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας	διασυνδέσεων με τα οχήματα *Φθορά μπαταριών
<b>Προμηθευτής Ηλεκτρικής Ενέργειας</b>	*Λειτουργούν ως μεσάζοντες μεταξύ αγοράς ενέργειας και τελικού πελάτη	*Αύξηση της ζήτησης ενέργειας *Ελαστικότητα ζήτησης ανταποκρινόμενη σε ειδικά διαμορφωμένα τιμολόγια. * Αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ	*Αβεβαιότητα πρόβλεψης ζήτησης *Μη ανταπόκριση των χρηστών στα οικονομικά κίνητρα
<b>Διαχειριστής Συστήματος Διανομής</b>	*Υπεύθυνοι για τους μετρητές (όπου αυτό επιβάλλεται) *Ανάπτυξη υποδομών για φόρτιση σε δημόσιους χώρους *Έλεγχος του προγραμματισμού φόρτισης που επιλέγει ο Προμηθευτής-Συναθροιστής ώστε να μην παραβιάζονται οι τεχνικοί περιορισμοί του δικτύου	*Αποτροπή υπερφορτίσεων του δικτύου που θα επέφεραν πρόωρες επενδύσεις στο δίκτυο. *Αξιοποίηση της αποθηκευτικής ικανότητας των οχημάτων για μεγιστοποίηση της διείσδυσης των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.	*Πιο σύνθετη η πρόβλεψη αύξησης φορτίου (ανάγκη προσαρμογής). *Πιο σύνθετος ο προγραμματισμός και η λειτουργία των δικτύων *Κόστος επένδυσης για την ανάπτυξη υποδομών δημόσιας φόρτισης *Σημαντικός αριθμός νέων μετρητών για πιθανή διαχώριση κτηριακής κατανάλωσης από την κατανάλωση της φόρτισης των οχημάτων.
<b>Πάροχοι Υπηρεσιών Μετάδοσης Πληροφοριών</b>	*Παρέχουν εξειδικευμένες υπηρεσίες επικοινωνίας	*Δυνατότητα εισόδου σε νέα επιχειρηματικά μοντέλα.	Προστασία απορρήτου και ασφάλεια μετάδοσης της πληροφορίας

#### 1.2.4.3 Προχωρημένη Φάση

Στις προηγούμενες φάσεις διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων, κύριος στόχος ήταν η προμήθεια ηλεκτρικής ενέργειας από τη χονδρεμπορική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας για τη φόρτιση των οχημάτων σύμφωνα με τις απαιτήσεις των χρηστών. Στη καταλυτική φάση, τα ηλεκτρικά οχήματα μπορεί να αποδειχθούν ιδιαίτερα σημαντικά για τη λειτουργία του δικτύου, προσαρμόζοντας τον ρυθμό φόρτισής τους ή εγχέοντας ισχύ στο δίκτυο.

Για την προσφορά υπηρεσιών V2G απαιτούνται πιο σύνθετοι τρόποι διαχείρισης των μπαταριών των οχημάτων, ανάπτυξη αμφίδρομων υποδομών φόρτισης για τα οχήματα και τους σταθμούς φόρτισης καθώς και σύγχρονων επικοινωνιακών υποδομών. Οι δαπάνες αυτές θα μπορούν να αντισταθμιστούν από τα οφέλη που θα προκύψουν, ωστόσο υπάρχει ένα ρίσκο λόγω της αβεβαιότητας του ποσοστού συμμετοχής των καταναλωτών. Οι υπηρεσίες υποστήριξης του δικτύου από τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να επιφέρουν ένα επιπρόσθετο κέρδος στους ιδιοκτήτες των οχημάτων, το μέγεθος του οποίου μπορεί να επηρεάσει τη συμμετοχή τους στην παροχή V2G υπηρεσιών.

Η προσφορά υπηρεσιών V2G αναμένεται ιδιαίτερα ευνοϊκή για τον διαχειριστή του δικτύου/συστήματος. Οι ηλεκτρονικές διατάξεις που ρυθμίζουν τη λειτουργία της μπαταρίας μπορούν εύκολα να ελέγξουν την έγχυση/απορρόφηση ενεργού και άεργου ισχύος. Ο έλεγχος της άεργου ισχύος μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους διαχειριστές του συστήματος στη Μέση Τάση, όπου η αναλογία R/X των γραμμών μεταφοράς είναι χαμηλή και όχι τόσο στη Χαμηλή Τάση, όπου η αναλογία R/X είναι υψηλή και η πτώση τάσης οφείλεται κυρίως στη ροή ενεργού ισχύος.

Επιπρόσθετα, η V2G λειτουργία μπορεί να αξιοποιηθεί για την υποστήριξη της συχνότητας του δικτύου, ειδικότερα σε συστήματα με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ.

Τα επιχειρηματικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν στη προηγούμενη φάση μπορούν να υιοθετηθούν και στη φάση αυτή, θεωρώντας ότι τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν επιπρόσθετα τη δυνατότητα παροχής ισχύος προς το δίκτυο. Ο Πίνακας 1-7 συνοψίζει τις υποχρεώσεις, τις ευκαιρίες και τους κινδύνους για κάθε εμπλεκόμενο φορέα στην προχωρημένη φάση.

**Πίνακας 1 7 Ευκαιρίες και Κίνδυνοι για τους εμπλεκόμενους παράγοντες (προσφορά υπηρεσιών V2G)**

<b>Προσφορά Υπηρεσιών V2G</b>			
<b>Φορείς</b>	<b>Καθήκοντα-Υποχρεώσεις</b>	<b>Ευκαιρίες</b>	<b>Κίνδυνοι</b>
<b>Ιδιοκτήτης του ηλεκτρικού οχήματος</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Αγορά εξοπλισμού για την αμφίδρομη ροή ισχύος</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Διεσπαρμένη πηγή αποθήκευσης ενέργειας</li> <li>*Μείωση του κόστους κατανάλωσης του σπιτιού</li> <li>* Αύξηση κέρδους από τη προσφορά υπηρεσιών V2G</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Ταχύτερη φθορά της μπαταρίας</li> <li>* Επιπρόσθετος εξοπλισμός για το σύστημα διαχείρισης οικιακής ενέργειας</li> </ul>
<b>Προμηθευτής-Συναθροιστής Ηλεκτρικών Οχημάτων</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Προμήθεια ηλεκτρικής ενέργειας από την αγορά</li> <li>*Διαχείριση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων ικανοποιώντας πλήρως τις ανάγκες των καταναλωτών</li> <li>* Επικοινωνία με τους διαχειριστές του συστήματος για παροχή επικουρικών υπηρεσιών</li> <li>*Ανάπτυξη συστήματος επικοινωνίας με το όχημα για τον έλεγχο του βάσει των απαιτήσεων των ιδιοκτητών</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Συμμετοχή στις αγορές επικουρικών υπηρεσιών με σκοπό την αύξηση του κέρδους τους</li> <li>*Αύξηση της ανταγωνιστικότητας προσφέροντας ευνοϊκότερες συμβάσεις (λόγω V2Gλειτουργίας)για την προσέλκυση περισσότερων καταναλωτών</li> <li>*Αύξηση της ελαστικότητας της ζήτησης</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Υποτίμηση ή υπερεκτίμηση του κόστους φθοράς των μπαταριών</li> <li>*Μη ακριβείς προβλέψεις αθροιστικής διαθέσιμης χωρητικότητας μπαταριών.</li> </ul>
<b>Προμηθευτής Ηλεκτρικής Ενέργειας</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Παροχή ενέργειας.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Επέκταση των υπηρεσιών διαχείρισης που μπορεί ήδη να προσφέρει</li> <li>*Αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ αξιοποιώντας την αποθηκευτική ικανότητα των ηλεκτρικών οχημάτων</li> <li>*Ελαστικότητα ζήτησης</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Μη επαρκής ανταπόκριση των ιδιοκτητών στα οικονομικά κίνητρα που θέτει</li> </ul>
<b>Σταθμοί Αλλαγής Μπαταριών (στην προσφορά υπηρεσιών V2G)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Αντικατάσταση αφόρτιστης μπαταρίας με φορτισμένη σε διάστημα λίγων μόνο λεπτών.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Συμμετοχή στις αγορές επικουρικών υπηρεσιών.</li> <li>*Δεν απαιτούνται σύνθετες τηλεπικοινωνιακές υποδομές καθώς όλες οι μπαταρίες είναι συγκεντρωμένες στην ίδια τοποθεσία.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Υψηλό αρχικό κεφαλαίου επένδυσης για την απόκτηση μπαταριών</li> </ul>
<b>Διαχειριστής συστήματος διανομής</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Παρακολούθηση και διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του δικτύου</li> <li>*Εγκατάσταση ηλεκτρονικών μετρητών</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Δυνατότητα τοπικού ελέγχου της τάσης και της άεργου ισχύος (κυρίως για ειδικά διαμορφωμένους σταθμούς φόρτισης συνδεδεμένους στο δίκτυο Μέσης Τάσης).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Προβλήματα ποιότητας ισχύος, π.χ. αρμονικές, λόγω της αυξημένης χρήσης ηλεκτρονικών ισχύος</li> </ul>

	(αμφίδρομη ροή ισχύος και πολλαπλά τιμολόγια) * Επικύρωση του προγραμματισμού φόρτισης των <i>Προμηθευτών-Συναθροιστών</i>	* Αποδοτικότερη λειτουργία του συστήματος διανομής (μείωση απωλειών, αποτροπή υπερφόρτισης του δικτύου, βελτίωση του προφίλ τάσεων κτλ) * Αποτροπή πρόωρων επενδύσεων στο δίκτυο	* Τοπικά ζητήματα στη λειτουργία του δικτύου
<b>Διαχειριστής του συστήματος μεταφοράς</b>	* Παρακολούθηση και διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του δικτύου μεταφοράς * Εκκαθάριση Αγοράς ενέργειας	* Αποδοτικότερη λειτουργία του συστήματος μεταφοράς και ενίσχυση της επάρκειας του συστήματος παραγωγής * Μείωση της αβεβαιότητας πρόβλεψης φορτίου. * Αποτροπή πρόωρων επενδύσεων στο δίκτυο * Μείωση της αστάθειας των τιμών και ενίσχυση της ασφάλειας του συστήματος (χάρη στην προσφορά επικουρικών υπηρεσιών και διαχείρισης από την πλευρά της ζήτησης)	* Μη ακριβής πρόβλεψη της στοχαστικής ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων * Ανάγκη για εγγύηση δεσμεύσεων για τη V2G λειτουργία των ηλεκτρικών οχημάτων
<b>Πάροχοι Υπηρεσιών Μετάδοσης Πληροφοριών</b>	* Παρέχουν εξειδικευμένες υπηρεσίες επικοινωνίας	* Δυνατότητα εισόδου σε νέα επιχειρηματικά μοντέλα.	* Προστασία απορρήτου και ασφάλεια μετάδοσης της πληροφορίας  * Ταχύτητα και συνέπεια μετάδοσης δεδομένων

### 1.2.5 Μοντέλα ανάπτυξης υποδομών δημόσιας φόρτισης

Η ανάπτυξη υποδομών φόρτισης δημόσιας χρήσης είναι καθοριστικής σημασίας για την ευρεία διάδοση των ηλεκτρικών οχημάτων καθώς αυξάνει την μέγιστη ημερήσια διανυόμενη απόσταση που μπορεί να κάνει ένας χρήστης και επίσης περιορίζει την ανησυχία των χρηστών ηλεκτρικών οχημάτων για το αν θα έχουν τη δυνατότητα να φορτίσουν το όχημα τους εκτάκτως εκτός οικίας. Η σημασία των υποδομών δημόσιας φόρτισης για την προώθηση της ηλεκτροκίνησης αποτυπώνεται και στην Κοινοτική Οδηγία 2014/94/ΕΕ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, σύμφωνα με την οποία κάθε κράτος-μέλος πρέπει να εξασφαλίσει ένα επαρκές δίκτυο υποδομών δημόσιας φόρτισης, ορίζοντας ενδεικτικά 1 σταθμό ανά 10 ηλεκτρικά οχήματα. Σε απόλυτα νούμερα, για την Ελλάδα, ο ενδεικτικός αριθμός σημείων επαναφόρτισης, με ορίζοντα το 2020, ανέρχεται σε 13000.

Το ρυθμιστικό πλαίσιο στην Ελλάδα για την ηλεκτροκίνηση περιορίζεται στο ΦΕΚ Β50/2015 (Κ.Υ.Α. αριθμ. 71287/6443/31.12.2014) σύμφωνα με το οποίο καθορίζονται οι τεχνικές προδιαγραφές των σταθμών φόρτισης (IEC 61851-1, Mode 3&4) και των ακροδεκτών (IEC 62196, Type 2&3, CHAdeMO) καθώς και η χωροταξική θέση εγκατάστασης των σημείων φόρτισης. Ωστόσο, η είσοδος των ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά, αναμένεται να εισάγει την ανάπτυξη νέων παικτών στην ηλεκτροκίνηση, οι αρμοδιότητες και οι ευθύνες των οποίων θα πρέπει να καθοριστούν μέσω ενός ολοκληρωμένου ρυθμιστικού πλαισίου.

Στον τομέα ανάπτυξης υποδομών δημόσιας φόρτισης καθοριστική είναι η τοποθέτηση/πρόταση της Eurelectric για τα μοντέλα ανάπτυξης τέτοιων υποδομών [21]. Σύμφωνα με την πρόταση της Eurelectric υπάρχουν δύο μοντέλα ανάπτυξης υποδομών φόρτισης δημόσιας χρήσης: το μοντέλο ανεξάρτητης αγοράς ηλεκτροκίνησης και το μοντέλο ολοκληρωμένων υποδομών φόρτισης (“DSO

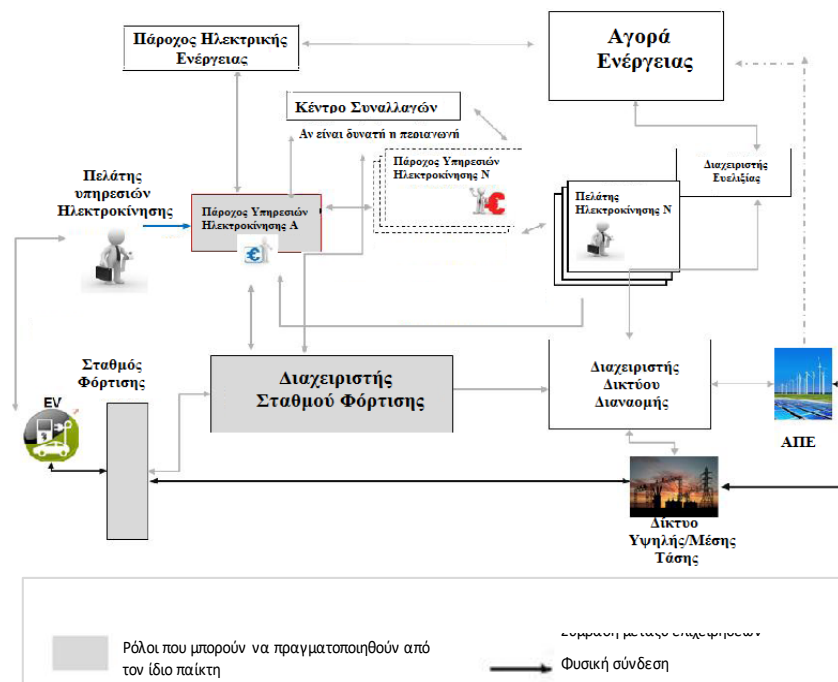
model”). Οι κομβικές διαφορές μεταξύ αυτών των δύο μοντέλων εντοπίζονται στο ιδιοκτησιακό και λειτουργικό καθεστώς των υποδομών.

Και στα δύο μοντέλα ανάπτυξης δημόσιων υποδομών φόρτισης, πέραν τον συμβατικών εμπλεκόμενων φορέων (διαχειριστής δικτύου, πάροχος ηλεκτρικής ενέργειας κτλ) καθοριστικό ρόλο έχουν και οι νέοι εμπλεκόμενοι φορείς ηλεκτροκίνησης. Επιπρόσθετα, ο ρόλος κάποιων εμπλεκόμενων φορέων είναι αναβαθμισμένος. Περισσότερες λεπτομέρειες αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

### ✓ Μοντέλο ανεξάρτητης αγοράς ηλεκτροκίνησης

Στο συγκεκριμένο μοντέλο, η ιδιοκτησία και η διαχείριση των υποδομών δημόσιας φόρτισης θεωρούνται ανταγωνιστικές δραστηριότητες που μπορούν να εκτελεστούν από έναν ή περισσότερους τρίτους φορείς της αγοράς στην ίδια πόλη/δρόμο (Εικόνα 1-8). Οι συγκεκριμένες δραστηριότητες δεν εντάσσονται στις ρυθμιστικές αρμοδιότητες του Διαχειριστή του Δικτύου Διανομής. Ωστόσο, ο ρόλος του παραμένει σημαντικός καθώς τα νέα σημεία σύνδεσης των υποδομών αντιμετωπίζονται σαν οποιοδήποτε άλλο σημείο σύνδεσης στο δίκτυο. Στο μοντέλο ανεξάρτητης διαχείρισης αγοράς ηλεκτροκίνησης ο Διαχειριστής του Δικτύου Διανομής (ΔΕΔΔΗΕ) παρέχει τον μετρητή για το σταθμό (εκτός και αν το ρυθμιστικό πλαίσιο αναφέρει ότι η εγκατάσταση των μετρητών γίνεται από τρίτο φορέα – Διαχειριστής μετρητών) και είναι υπεύθυνος για τη διασφάλιση της επάρκειας των υποδομών του δικτύου για την εξυπηρέτηση του φορτίου των υποδομών δημόσιας φόρτισης. Η ενσωμάτωση των υποδομών φόρτισης δημόσιας χρήσης στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, όσον αφορά στο σημείο σύνδεσης και την ονομαστική ισχύ τους, θα πρέπει να πραγματοποιείται με τη σύμφωνη γνώμη του Διαχειριστή του Δικτύου Διανομής.

Σε μία πλήρως ανεξάρτητη αγορά ηλεκτροκίνησης, ο ιδιοκτήτης των υποδομών φόρτισης μπορεί να είναι παράλληλα και ο διαχειριστής και ο πάροχος υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης που εξυπηρετεί τον χρήστη. Στη περίπτωση αυτή, οι τρεις σκιασμένοι φορείς ηλεκτροκίνησης στην Εικόνα 1-8 εκφυλίζονται σε μια κοινή οντότητα ηλεκτροκίνησης. Ωστόσο, σε κάθε περίπτωση, ο διαχειριστής του σταθμού φόρτισης πρέπει να είναι ουδέτερος, δηλαδή να επιτρέπει τη πρόσβαση σε οποιονδήποτε πάροχο υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης.



Εικόνα 1-8 Μοντέλο ανεξάρτητης αγοράς ηλεκτροκίνησης (υποδομές δημόσιας χρήσης)

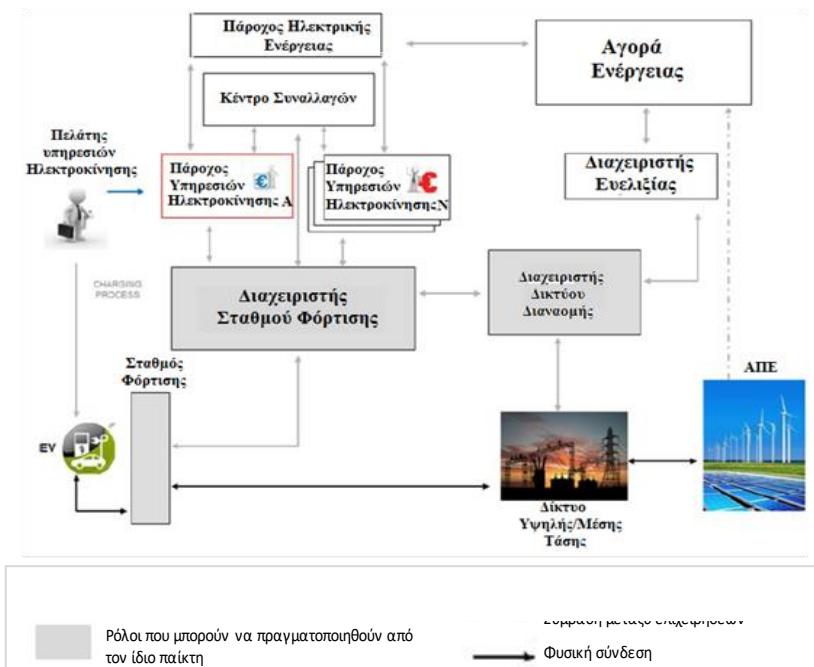
Η χρήση των υποδομών δημόσιας φόρτισης από ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων και πελάτες υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης προϋποθέτει τη σύναψη διμερών συμβολαίων με κάποιο πάροχο υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης ή χρήση συστημάτων άμεσης πληρωμής (πιστωτική χάρτα, κάρτες χρονοχρέωσης κτλ). Η χρήση υποδομών δημόσιας φόρτισης, που ανήκει σε κάποιον πάροχο υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης, από ένα χρήστη που δεν έχει διμερές συμβόλαιο με τον συγκεκριμένο πάροχο απαιτεί την ανάπτυξη υπηρεσιών περιαγωγής.

Το μοντέλο ανεξάρτητης αγοράς ηλεκτροκίνησης προβλέπει και τη δυνατότητα ανάπτυξης ευέλικτων μορφών φόρτισης για την παροχή επικουρικών υπηρεσιών υποστήριξης του δικτύου. Ο Διαχειριστής του Δικτύου Διανομής μπορεί να αξιοποιήσει τις υπηρεσίες ευελιξίας με σκοπό την αποδοτικότερη λειτουργία του δικτύου.

Το μοντέλο ανεξάρτητης αγοράς ηλεκτροκίνησης εφαρμόζεται στη Γερμανία, την Ισπανία, τη Γαλλία και τη Δανία.

✓ **Μοντέλο ολοκληρωμένων υποδομών φόρτισης – “DSO model”**

Στο δεύτερο μοντέλο υποδομών δημόσιας φόρτισης, η ιδιοκτησία και η διαχείριση των υποδομών δημόσιας φόρτισης θεωρούνται δραστηριότητες του Διαχειριστή του δικτύου και θα πρέπει να ενταχθούν στο ρυθμιστικό πλαίσιο λειτουργίας και διαχείρισης των δικτύων διανομής μέσης και χαμηλής τάσης (Εικόνα 1-9). Η ανάπτυξη των δημόσιων υποδομών φόρτισης στο μοντέλο αυτό εκτελείται από τον Διαχειριστή του Δικτύου Διανομής ανεξάρτητα από την είσοδο ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά. Αρμόδιος για τη διαχείριση των υποδομών φόρτισης είναι ο Διαχειριστής του Δικτύου, ο οποίος θα πρέπει να επιτρέπει, χωρίς διάκριση, την πρόσβαση στις υποδομές φόρτισης οποιουδήποτε παρόχου υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης, επιτρέποντας την ανάπτυξη ενός ανταγωνιστικού περιβάλλοντος για την παροχή υπηρεσιών στους χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων (Business-to-Customers – B2C). Αυτό το μοντέλο είναι ιδανικό για την προώθηση της ηλεκτροκίνησης σε χώρες που τα επίπεδα διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά είναι χαμηλά και οι αυτοκινητοβιομηχανίες/προμηθευτές σταθμών φόρτισης δεν είναι διατεθειμένοι να αναλάβουν επιχειρηματικά ρίσκα (“chicken-egg” πρόβλημα).



**Εικόνα 1-9 Μοντέλο ολοκληρωμένων υποδομών φόρτισης – “DSO model” (υποδομές δημόσιας χρήσης)**

Το μοντέλο αυτό έχει ήδη υιοθετηθεί από την Ιταλία, την Ιρλανδία, το Λουξεμβούργο, τη Σλοβενία (μόνο σε εθνικές οδούς) και την Αυστρία. Ο Διαχειριστής του Δικτύου Διανομής έχει την ευθύνη ανάπτυξης των υποδομών φόρτισης και των υπηρεσιών μέτρησης, ενώ διακρίνονται δύο εναλλακτικές σχετικά με την τεχνική και εμπορική διαχείρισή τους:

- Η εμπορική και τεχνική διαχείριση των σταθμών ανατίθεται σε έναν ανεξάρτητο φορέα της αγοράς (Λουξεμβούργο, Σλοβενία, Αυστρία). Ο Διαχειριστής του Δικτύου Διανομής είναι υπεύθυνος για την ανάπτυξη των υποδομών φόρτισης και της τηλεμέτρησης.
- Ο Διαχειριστής του Δικτύου Διανομής είναι υπεύθυνος για την ανάπτυξη των υποδομών και την τεχνική διαχείριση των σταθμών, ωστόσο η εμπορική διαχείριση των σταθμών (σε συνδυασμό με τις υπηρεσίες τιμολόγησης) εμπίπτει σε κάποιον άλλο φορέα της αγοράς. Αυτή η εναλλακτική παρατηρείται στην Ιρλανδία.

Η συμμετοχή του Διαχειριστή του Δικτύου Διανομής στην ηλεκτροκίνηση θα πρέπει να καθορίζεται από συγκεκριμένο ρυθμιστικό πλαίσιο, το οποίο θα καθορίζει και τον τρόπο απόσβεσης του κόστους ανάπτυξης των υποδομών. Το κόστος για την ανάπτυξη των υποδομών φόρτισης μπορεί είτε να συμπεριληφθεί στη ρυθμιστικά οριζόμενη βάση των περιουσιακών στοιχείων του Διαχειριστή του Δικτύου Διανομής και να κατανεμηθεί στους χρήστες των υποδομών φόρτισης (ως μέρος της χρέωσης χρήσης του δικτύου), είτε να χρηματοδοτηθεί από δημόσιους πόρους, με την κοινωνία να αναλαμβάνει το βάρος για έναν πιο καθαρό τομέα μεταφορών.

Στο μοντέλο αυτό οι πελάτες ηλεκτροκίνησης δύνανται να συνάψουν σύμβαση με έναν ή και περισσότερους παρόχους υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης, ενώ παράλληλα θα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να φορτίσουν το όχημά τους σε όλο το δίκτυο υποδομών δημόσιας φόρτισης που έχει αναπτυχθεί από τον Διαχειριστή του Δικτύου Διανομής. Όσον αφορά στην κοστολόγηση της διαδικασίας της φόρτισης, ο Διαχειριστής του Σημείου Φόρτισης (Διαχειριστής του Δικτύου Διανομής) αποστέλλει τα δεδομένα συναλλαγής για κάθε κύκλο φόρτισης στον αντίστοιχο πάροχο υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης, ο οποίος καθορίζει το αντίτιμο της διαδικασίας της φόρτισης βάσει του διμερούς συμβολαίου με τον εκάστοτε χρήστη. Το κόστος για την πρόσβαση και χρήση των υποδομών μπορεί να καθορίζεται βάσει ποικίλων κριτηρίων, π.χ χρόνος χρήσης, επίπεδο φόρτισης, κατανάλωση ενέργειας κτλ.

Επιπρόσθετα, με την ιδιότητα του Διαχειριστή του Σημείου Φόρτισης, ο Διαχειριστής του Δικτύου Διανομής θα έχει τη δυνατότητα αξιοποίησης της ευέλικτης φόρτισης με σκοπό την αποφυγή τοπικής συμφόρησης του δικτύου σε περιόδους αυξημένης κατανάλωσης και πρόωρων επενδύσεων για την ενίσχυση του δικτύου. Οι υποδομές πληροφοριών και επικοινωνίας (ICT) που επιτρέπουν την παρακολούθηση και διαχείριση των σταθμών φόρτισης θα πρέπει να αναπτυχθούν από τον Διαχειριστή του Δικτύου. Η εμπειρία και οι υποδομές του Διαχειριστή του Δικτύου σε συστήματα απομακρυσμένης μέτρησης της κατανάλωσης είναι σημαντικές.

## 1.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

### 1.3.1 Μελέτες διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

Η μοντελοποίηση των ηλεκτρικών οχημάτων είναι είτε απλή, θεωρώντας τα οχήματα ως ένα απλό επιπρόσθετο φορτίο χωρίς διάκριση από το οικιακό [25], είτε πιο σύνθετη, θεωρώντας τα οχήματα ως ένα ευέλικτο φορτίο (flexible load) το φορτίο του οποίου μπορεί να μετατοπιστεί χρονικά μέσα στην ημέρα. Στη περίπτωση αυτή, τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν τη δυνατότητα (θετική/αρνητικής) μεταβολής του επιπέδου φόρτισης με αποτέλεσμα να αυξάνεται ή να μειώνεται η συνολική ζήτηση του στόλου των οχημάτων [37]. Η υπηρεσία δυναμικής μεταβολής του επιπέδου φόρτισης για την υποστήριξη της λειτουργίας του δικτύου ονομάζεται Vehicle-to-Grid (V2G) υπηρεσία [37]. Στη συνέχεια όμως, ο όρος V2G επεκτάθηκε με σκοπό να περιγράψει τη δυνατότητα παροχής ενέργειας από το ηλεκτρικό όχημα προς το δίκτυο. Η αμφίδρομη ροή ισχύος για την υποστήριξη της λειτουργίας του δικτύου προσδιορίστηκε ως V2G [58], [88]. Ο σημαντικότερος προβληματισμός για την υιοθέτηση της αμφίδρομης ροής ισχύος είναι η φθορά

της μπαταρίας. Σύμφωνα με τη μελέτη [60], η φθορά της μπαταρίας για την παροχή ενέργειας στο δίκτυο είναι ίσο με το 50% της φθοράς της μπαταρίας που προκαλείται από τη γρήγορη οδήγηση.

Η πρωταρχική προσέγγιση της ηλεκτροκίνησης στη βιβλιογραφία αφορά στη μελέτη της επίδρασης του επιπρόσθετου φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων στη καμπύλη φορτίου και στη λειτουργία των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας [22]-[97]. Πρόκειται για τεχνοοικονομικές μελέτες που έχουν σκοπό να διερευνήσουν τις επιπτώσεις (οικονομικές, δικτυακές και περιβαλλοντικές) της ενσωμάτωσης των ηλεκτρικών οχημάτων στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Τέτοιου είδους μελέτες είναι σημαντικές δεδομένου ότι τα συμπεράσματα που προκύπτουν από αυτές αφορούν στις πιθανές προκλήσεις που μπορούν να προκύψουν σε όλα τα επίπεδα του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας από τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων. Ο προσδιορισμός των τεχνο-οικονομικών προκλήσεων που εγείρονται από την ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο συνεισφέρει στον προσδιορισμό των στόχων για την ανάπτυξη στρατηγικών διαχείρισής τους.

Επιπρόσθετα, ορισμένες μελέτες επεκτείνουν την έρευνα τους στην οικονομική αποτίμηση της συμμετοχής των ηλεκτρικών οχημάτων στη παροχή επικουρικών υπηρεσιών για την υποστήριξη του δικτύου. Η οικονομική αποτίμηση των επικουρικών υπηρεσιών προς τους διαχειριστές δικτύου προσφέρει χρήσιμα συμπεράσματα για την ανάπτυξη επιχειρηματικών μοντέλων καθώς και των αντίστοιχων τεχνολογιών που θα τις υποστηρίζουν.

#### ✓ *Συνεισφορά στον περιορισμό αιχμής δικτύου*

Στη μελέτη [26], πραγματοποιήθηκε συγκριτική ανάλυση της υποστήριξης του δικτύου την ώρα αιχμής με παροχή ισχύος από ηλεκτρικά οχήματα και με υιοθέτηση προγραμμάτων άμεσης διαχείρισης φορτίου (Direct Load Control – DLC). Το συμπέρασμα που προέκυψε αναφέρει ότι το επενδυτικό κόστος των δύο αυτών λύσεων είναι παρόμοιο, ωστόσο, η διαθέσιμη χωρητικότητα υποστήριξης του δικτύου είναι σχεδόν πενταπλάσια στη περίπτωση των ηλεκτρικών οχημάτων. Αντίστοιχη μελέτη για την οικονομική αποτίμηση της συνεισφοράς των ηλεκτρικών οχημάτων στη παροχή επικουρικών υπηρεσιών για την περίπτωση της Ιαπωνίας παρουσιάζεται στην [27]. Η παροχή επικουρικών υπηρεσιών για το φορτίο βάσης δεν είναι σε καμία περίπτωση βιώσιμη στρατηγική μιας και το κόστος της ενέργειας από ηλεκτρικά οχήματα εκτιμάται \$0.446/kWh (Honda EV plus) που είναι πολύ υψηλότερο από το αντίστοιχο κόστος από μονάδες βάσης (~\$0.1/kWh), βάσει των μελετών [26]-[27]. Τέλος, η μελέτη στην [43] αναλύει την επίδραση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων στη τοπική οριακή τιμή (Locational Marginal Price – LMP), καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι η αύξηση του φορτίου του δικτύου κατά 10% σε τοπικό επίπεδο μπορεί να αυξήσει την LMP κατά 26%. Δηλαδή η εξυπηρέτηση της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων θα είναι πιο ακριβή συγκριτικά με το κόστος εξυπηρέτησης της συμβατικής ζήτησης πριν την ενσωμάτωση τους στο δίκτυο, περιορίζοντας το περιθώριο κέρδους από την αγορά ενέργειας σε χαμηλή τιμή και πώληση της σε υψηλή (arbitrage).

Όλες οι παραπάνω μελέτες αφορούν στην επίπτωση της ενσωμάτωσης των ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Η μελέτη [57] αναλύει το οικονομικά οφέλη του ιδιοκτήτη ενός ηλεκτρικού οχήματος από την έγχυση ενέργειας από τη μπαταρία του οχήματος στο δίκτυο κατά την ώρα αιχμής. Η ανάλυση έγινε για ένα ηλεκτρικό όχημα με μικρή μπαταρία (16kWh). Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αναφέρουν ένα ετήσιο κέρδος \$142-\$249, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το κόστος φθοράς της μπαταρίας. Αν συνυπολογιστεί η φθορά της μπαταρίας, τότε το κόστος αυτό περιορίζεται σημαντικά (< \$118).

#### ✓ *Συνεισφορά στις επικουρικές υπηρεσίες*

Η πρώτη ολοκληρωμένη μελέτη για τα οικονομικά οφέλη της συμμετοχής ενός στόλου ηλεκτρικών οχημάτων στις αγορές επικουρικών υπηρεσιών πραγματοποιήθηκε από τον Kempton [29] αναλύοντας την αγορά ενέργειας της Καλιφόρνιας. Δύο επικουρικές υπηρεσίες μελετήθηκαν: γρήγορη δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας (regulation response) και στρεφόμενη εφεδρεία (spinning reserve). Για την περίπτωση της συμμετοχής στη δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας, το ετήσιο κέρδος υπολογίζεται μεταξύ \$3162-\$8442. Το αντίστοιχο κέρδος από τη συμμετοχή στη στρεφόμενη εφεδρεία είναι μειωμένο σημαντικά (< \$700). Επιπρόσθετα, ένα σημαντικό



συμπέρασμα της ανάλυσης αυτής είναι ότι η τεχνολογία του αυτοκινήτου επηρεάζει το κέρδος της παροχής επικουρικών υπηρεσιών. Για παράδειγμα το κέρδος της συμμετοχής των υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων στη στρεφόμενη εφεδρεία είναι μεγαλύτερο συγκριτικά αυτό των ηλεκτρικών οχημάτων μόνο με μπαταρία.

Αργότερα, η ανάλυση της συμμετοχής των ηλεκτρικών οχημάτων (500 οχήματα) στην αγορά εφεδρειών της Γερμανίας και της Σουηδίας [61] απέδειξε ότι το κέρδος παροχής επικουρικών υπηρεσιών εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του συστήματος παραγωγής. Όσον αφορά στη Σουηδία, η συμμετοχή στις αγορές εφεδρειών δεν είναι κερδοφόρα επιλογή, ενώ αντίθετα στη Γερμανία το μηνιαίο κέρδος ανά όχημα μπορεί να φτάσει το 80€. Η αντίθεση αυτή αιτιολογείται από το γεγονός ότι η εφεδρεία στη Σουηδία παρέχεται κυρίως από υδροηλεκτρικά ενώ αντίθετα στη Γερμανία κυρίως από λιγνιτικές μονάδες.

Το συγκριτικό πλεονέκτημα των ηλεκτρικών οχημάτων έναντι των συμβατικών μονάδων παραγωγής είναι η γρήγορη και διεσπαρμένη απόκριση τους [29], [22], [84]. Η χωρητικότητα της μπαταρίας των ηλεκτρικών οχημάτων με την αξιοποίηση της αμφίδρομης ροής ισχύος μπορεί να συνεισφέρει σημαντικά στην υποστήριξη της συχνότητας του δικτύου [84], [89]. Ένα από τα σημαντικότερα θέματα της συμμετοχής των οχημάτων στις αγορές επικουρικών υπηρεσιών είναι το γεγονός ότι η μπαταρία του ηλεκτρικού οχήματος μπορεί να καταλήξει εν τέλει να είναι είτε πλήρως φορτισμένη είτε πλήρως αποφορτισμένη. Για να αποφευχθεί αυτό, κάθε διασυνδεδεμένο ηλεκτρικό όχημα λειτουργεί σε ένα επιθυμητό σημείο λειτουργίας (Preferred Operational Point - POP) λαμβάνοντας υπόψη πιθανή συμμετοχή σε άνω ή κάτω εφεδρεία [37].

#### ✓ *Συνεισφορά στην ενσωμάτωση ΑΠΕ*

Τέλος, η συνεισφορά των ηλεκτρικών οχημάτων στη διαλείπουσα παραγωγή των ΑΠΕ, ως μονάδες αποθήκευσης, μπορεί να είναι σημαντική είτε με άμεσο τρόπο, με χρήση της μπαταρίας των ηλεκτρικών οχημάτων [33], [41], [46], [48], [48], [72] και [81] είτε με έμμεσο τρόπο, μέσω της δευτερεύουσας χρήσης των φθαρμένων μπαταριών των οχημάτων (επίπεδο φόρτισης < 80%) [97]. Σε όλες τις μελέτες, τα οφέλη από τη συσχέτιση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ηλεκτρικών οχημάτων είναι πολύ σημαντικά τόσο για τη διόρθωση των σφαλμάτων πρόβλεψης όσος και για την καλύτερη συσχέτιση παραγωγής ΑΠΕ – κατανάλωσης.

#### ✓ *Συνεισφορά στη μείωση των εκπομπών ρύπων CO<sub>2</sub>*

Οι περισσότερες περιβαλλοντικές μελέτες [22], [23], [24], [28], [37], [47] και [81], καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι υπάρχουν προοπτικές μείωσης των ρύπων CO<sub>2</sub> και βελτίωσης της ποιότητας του αέρα στα αστικά κέντρα. Ωστόσο, σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και οι ρύποι CO<sub>2</sub> από το σύστημα παραγωγής για την εξυπηρέτηση. Οι επιπρόσθετες εκπομπές ρύπων από το σύστημα παραγωγής για την εξυπηρέτηση του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων είναι ένα ζήτημα που θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την εκτίμηση της μείωσης των συνολικών ρύπων CO<sub>2</sub> από τον εξηλεκτρισμό του τομέα μεταφορών. Σε κάθε περίπτωση, η «από-ανθρακοποίηση» των οδικών μεταφορών μεταφέρει τις εκπομπές ρύπων από τα αστικά κέντρα προς τα κέντρα παραγωγής.

#### ✓ *Επίπτωση στη λειτουργία του δικτύου*

Η ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας εισάγει ένα επιπρόσθετο φορτίο σε αυτά το οποίο τροποποιεί την καμπύλη φορτίου των δικτύων. Η βαθμός επίδρασης στη καμπύλη φορτίου εξαρτάται από τα εκάστοτε σενάρια διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων. Η μεταβολή της καμπύλης του φορτίου του δικτύου επηρεάζει τον τρόπο λειτουργίας και διαχείρισης του δικτύου [2], [36], [40], [45], [50], [51], [58], [62], [63], [64], [64], [65], [74], [76], [77], [84]. Η μελέτη της επίδρασης των ηλεκτρικών οχημάτων αφορά κυρίως στα δίκτυα διανομής Μ.Τ. και πιο συγκεκριμένα στη μεταβολή των απωλειών του δικτύου, του προφίλ της τάσης (πτώση και διακύμανση τάσεως), στη φόρτιση των γραμμών/μετασχηματιστών κτλ. Η αποτύπωση των επιπτώσεων στη λειτουργία των δικτύων διανομής προσφέρει χρήσιμα

συμπεράσματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη τόσο κατά τον σχεδιασμό στρατηγικών διαχείρισης τους όσο και κατά τον παραγραμματισμό λειτουργίας και επέκτασης των δικτύων.

### 1.3.2 Αντικειμενικοί στόχοι της διαχείρισης ηλεκτρικών οχημάτων

Για την ανάπτυξη ενός συστήματος διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων και του αντίστοιχου προβλήματος βελτιστοποίησης θα πρέπει εκ των προτέρων να προσδιοριστεί ένας αντικειμενικός σκοπός. Στη βιβλιογραφία έχουν αναγνωρισθεί ποικίλοι αντικειμενικοί σκοποί, που μπορούν να καταταχθούν σε τρεις κατηγορίες.

#### ✓ *Τεχνικοί σκοποί*

Οι τεχνικοί σκοποί αφορούν στη διαχείριση και τους λειτουργικούς/ρυθμιστικούς περιορισμούς των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανάπτυξη αλγορίθμων διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων αυτής της κατηγορίας επικεντρώνεται στην ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων σε δίκτυα διανομής με όσο το δυνατόν αποδοτικότερο τρόπο, δηλαδή για την ελαχιστοποίηση των απωλειών του δικτύου ή τη διακύμανση της τάσης ή τη μείωση της αιχμής ζήτησης του δικτύου ή την εξισορρόπηση τοπικής παραγωγής με κατανάλωση κτλ ([35], [52], [53], [64], [74], [76], [78], [79]). Απώτερος σκοπός της διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι η μεγιστοποίηση της διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων σε ένα δίκτυο διανομής χωρίς να παραβιάζονται οι λειτουργικοί περιορισμοί του. Σε ορισμένες μελέτες, γίνεται και αναφορά στη δυνατότητα αποδοτικότερης λειτουργίας του δικτύου με την αξιοποίηση της V2G λειτουργίας των οχημάτων (αμφίδρομη ροή ισχύος).

#### ✓ *Οικονομικοί σκοποί*

Οι οικονομικοί σκοποί συνδέονται με τους συμμετέχοντες στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας όπως είναι οι καταναλωτές, οι παραγωγοί και οι έμποροι λιανικής πώλησης. Το κόστος της ενέργειας μεταβάλλεται χρονικά είτε δυναμικά (δυναμική τιμολόγηση) είτε στατικά (προκαθορισμένα πολυζωνικά τιμολόγια). Θεωρώντας τα ηλεκτρικά οχήματα ως ευέλικτα φορτία, η μετατόπιση της εξυπηρέτησης των ενεργειακών τους αναγκών από ώρες αιχμής (υψηλής τιμολόγησης) σε ώρες με χαμηλή ζήτηση (χαμηλή τιμολόγηση) ελαχιστοποιεί το κόστος της φόρτισης της μπαταρίας τους και, συνεπώς, το κόστος λειτουργίας του ίδιου του οχήματος. Οι αλγόριθμοι για τη διαχείριση των ηλεκτρικών οχημάτων αυτής της κατηγορίας λαμβάνουν υπόψη, κατά τη βελτιστοποίηση, τις τιμές αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και τους λειτουργικούς περιορισμούς του στόλου των οχημάτων όχι όμως τους λειτουργικούς περιορισμούς των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας [54], [55], [56], [68], [74], [80], [82].

Η ελαχιστοποίηση του κόστους φόρτισης μπορεί να πραγματοποιηθεί στο επίπεδο του ηλεκτρικού οχήματος και όχι στο επίπεδο του διαχειριστή ενός στόλου ηλεκτρικών οχημάτων ([66], [91]). Το πρόβλημα βελτιστοποίησης στη περίπτωση αυτή είναι η απλούστερη μορφή του προβλήματος βελτιστοποίησης του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων.

#### ✓ *Μεικτοί σκοποί*

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, οι αλγόριθμοι διαχείρισης καθορίζουν τη βέλτιστη λειτουργία των ηλεκτρικών οχημάτων λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και τους λειτουργικούς περιορισμούς των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Στόχος των αλγορίθμων αυτών είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους ενέργειας ή η μεγιστοποίηση του κέρδους από την επιπρόσθετη παροχή επικουρικών υπηρεσιών στο δίκτυο ([38], [76], [90]).

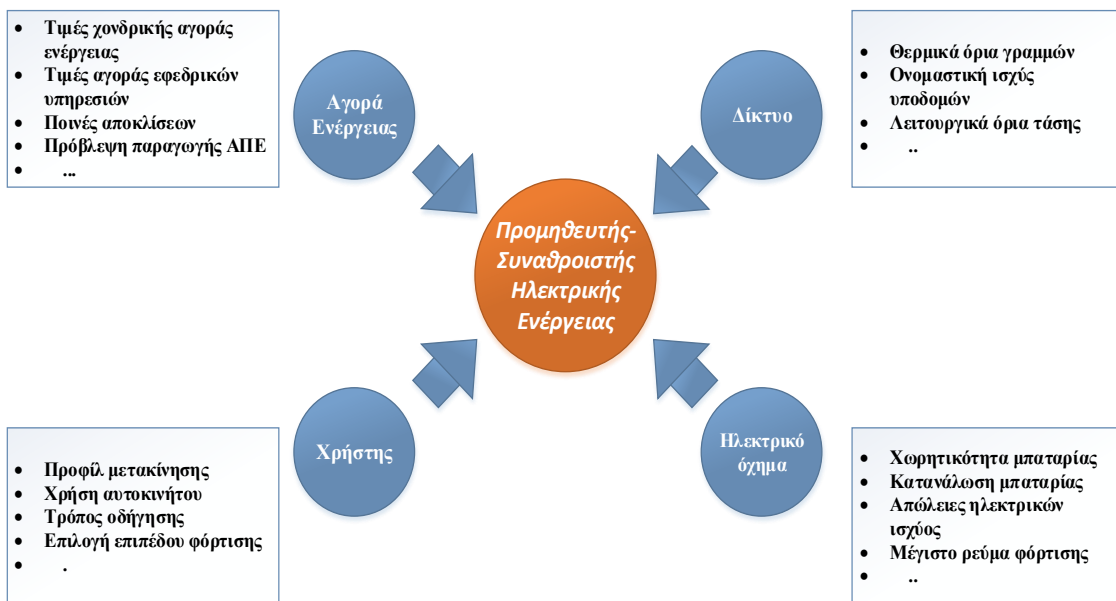
### 1.3.3 Επίπεδο ελέγχου για τη διαχείριση ηλεκτρικών οχημάτων

Το επίπεδο ελέγχου για τη διαχείριση των ηλεκτρικών οχημάτων καθορίζεται από το επίπεδο στο οποίο υπάρχει η ευφυΐα ώστε να είναι δυνατή η χάραξη στρατηγικών και η λήψη αποφάσεων. Με βάση το επίπεδο ελέγχου, οι αλγόριθμοι διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: τους κεντρικούς αλγορίθμους και τους αποκεντρωμένους.

✓ **Κεντρικοί αλγόριθμοι**

Στους κεντρικούς αλγορίθμους, υπάρχει ένας κεντρικός συντονιστής ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη διαμόρφωση της στρατηγικής του για τη διαχείριση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Ο κεντρικός αυτός συντονιστής (*Προμηθευτής-Συναθροιστής Ηλεκτρικής Ενέργειας Ηλεκτρικών Οχημάτων*) είναι γνώστης όλων των απαραίτητων πληροφοριών που απαιτούνται για τον υπολογισμό της βέλτιστης λειτουργίας ενός στόλου οχημάτων, δεδομένης της εκάστοτε στρατηγικής, π.χ. τιμές αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, προφίλ μετακίνησης ηλεκτρικών οχημάτων, τεχνικά χαρακτηριστικά μπαταριών οχημάτων, περιορισμοί δικτύου κτλ (Εικόνα 1-10). Βάσει όλων των παραπάνω πληροφοριών, ο κεντρικός συντονιστής καθορίζει το επίπεδο φόρτισης για κάθε ηλεκτρικό όχημα ξεχωριστά.

Διαφορετικές μέθοδοι υιοθετούνται για την επίλυση του προβλήματος κεντρικής βελτιστοποίησης. Η επιλογή της εκάστοτε μεθόδου εξαρτάται από τον τύπο του προβλήματος βελτιστοποίησης και ως εκ τούτου από τη στρατηγική φόρτισης.



Εικόνα 1-10 Ροή πληροφορίας κεντρικής διαχείρισης ηλεκτρικών οχημάτων

i. *Γραμμικός προγραμματισμός*

Η πιο απλή μορφή ενός κεντρικού αλγορίθμου είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων ([68], [93]). Ένα τέτοιο πρόβλημα είναι γραμμικό και η επίλυση του δεν είναι χρονοβόρα ακόμα και για την περίπτωση μεγάλου στόλου ηλεκτρικών οχημάτων. Το γραμμικό πρόβλημα ελαχιστοποίησης του κόστους φόρτισης έχει την εξής μορφή:

$$\text{Min } \sum_{i=1}^N \sum_{t_{0,i}}^{t_{0,i}+T_i} p(t) \cdot P_i(t) \cdot \Delta t \quad \text{E 1-1}$$

μ.π.

$$h(P_i) = 0 \quad \text{E 1-2}$$

$$g(P_i) \leq 0 \quad \text{E 1-3}$$

όπου  $\mathbf{p}(t)$  οι τιμές αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας,  $\mathbf{P}_i$  είναι βέλτιστο σημείο λειτουργίας του  $i$ -οστού οχήματος τη χρονική στιγμή  $t$ ,  $h$  και  $g$  είναι οι ισοτικοί και ανισοτικοί περιορισμοί που αφορούν στη λειτουργία της μπαταρίας και στη πλήρη φόρτιση της εντός χρονικού διαστήματος  $T$ .

ii. *Τετραγωνικός προγραμματισμός*

Ο τετραγωνικός προγραμματισμός συναντάται κυρίως στις στρατηγικές φόρτισης που έχουν τεχνικούς αντικειμενικούς στόχους, π.χ. η ελαχιστοποίηση των απωλειών του δικτύου [75] ή η ελαχιστοποίηση της διακύμανσης του φορτίου (“valley-filling”) [94]. Στα προβλήματα αυτά, η αντικειμενική συνάρτηση έχει τετραγωνική μορφή ενώ οι περιορισμοί είναι συνήθως γραμμικοί:

$$\text{Min } \sum_{i=1}^N \sum_{t_0,i}^{t_0,i+T_i} \mathbf{R}_i \mathbf{I}_{i,t} \quad \text{ή} \quad \text{Min } \sum_{i=1}^N \sum_{t_0,i}^{t_0,i+T_i} (\mathbf{P}_{i,t} + \mathbf{D}_t - \mathbf{D}_{avg}) \quad \text{E 1-3}$$

μ.π.

$$\mathbf{h}(\mathbf{P}_i) = \mathbf{0} \quad \text{E 1-4}$$

$$g(\mathbf{P}_i) \leq 0 \quad \text{E 1-5}$$

όπου  $\mathbf{P}_{i,t}$  είναι βέλτιστο σημείο λειτουργίας του  $i$ -οστού οχήματος τη χρονική στιγμή  $t$ ,  $\mathbf{D}_t$  είναι η συμβατική κατανάλωση δικτύου (χωρίς ηλεκτρικά οχήματα),  $\mathbf{D}_{avg}$  είναι η μέση τιμή της συμβατικής κατανάλωσης δικτύου,  $h$  και  $g$  είναι οι ισοτικοί και ανισοτικοί περιορισμοί που αφορούν στη λειτουργία των μπαταριών των οχημάτων και πιθανόν του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.

iii. *Δυναμικός προγραμματισμός*

Ο δυναμικός προγραμματισμός χρησιμοποιήθηκε [63] ως εναλλακτική λύση για το πρόβλημα βελτιστοποίησης των απωλειών σε ένα δίκτυο διανομής. Η μορφή του τετραγωνικού προβλήματος βελτιστοποίησης του δυναμικού προγραμματισμού είναι η εξής:

$$\mathbf{f}_t = \text{min } L_t(\mathbf{S}_t, \mathbf{P}_t) + \mathbf{f}_{t+1}(\mathbf{S}_{t+1}) \quad \text{E 1-6}$$

μ.π.

$$\mathbf{S}_{t,i} = \mathbf{S}_{t+1,i} - \mathbf{P}_{t,i} \Delta t \quad \text{E 1-7}$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{P}_i) = \mathbf{0} \quad \text{E 1-8}$$

$$g(\mathbf{P}_i) \leq 0 \quad \text{E 1-9}$$

όπου  $f_t$  οι απώλειες του δικτύου από τη περίοδο  $t$  ως το τέλος της περιόδου  $T$ ,  $\mathbf{S}_t$  είναι το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας του  $i$ -οστού οχήματος τη χρονική στιγμή  $t$ ,  $\mathbf{P}_t$  είναι η ονομαστική ισχύς των υποδομών φόρτισης, Από τα συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ δυναμικού προγραμματισμού και τετραγωνικού προγραμματισμού [63] αποδεικνύεται ότι οι δύο μέθοδοι δίνουν παρόμοια αποτελέσματα.

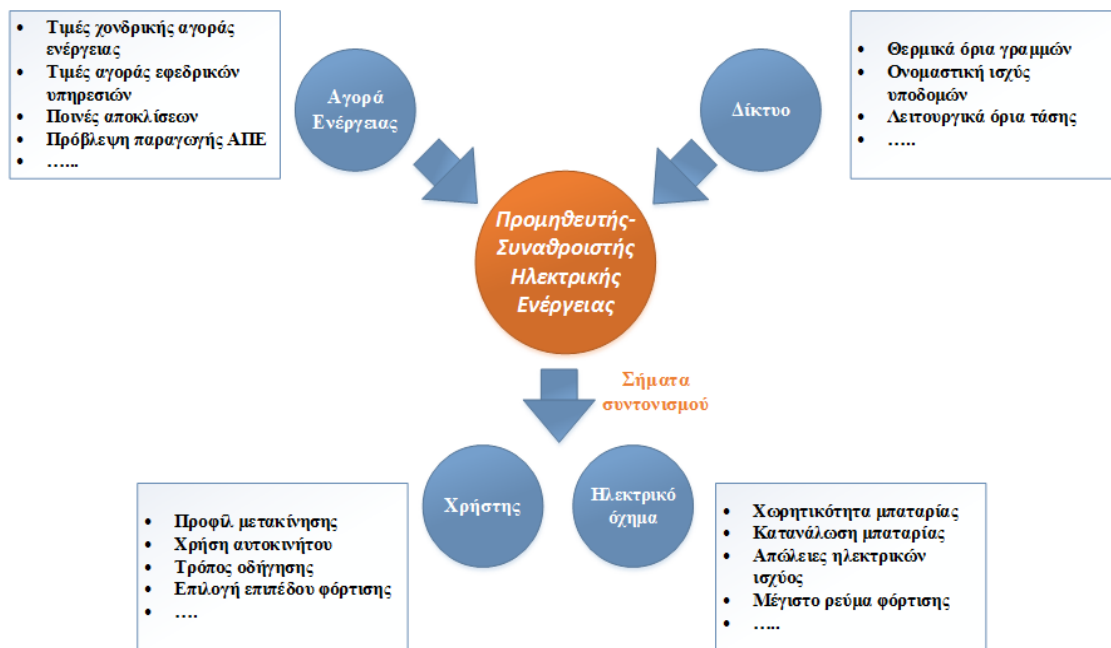
iv. *Στοχαστική βελτιστοποίηση*

Η επίλυση οποιουδήποτε προβλήματος για τη βέλτιστη διαχείριση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων προϋποθέτει τη γνώση του προφίλ μετακίνησης τους. Ωστόσο, η κινητικότητα των ηλεκτρικών οχημάτων δεν είναι μια ντετερμινιστική παράμετρος. Η στοχαστική συμπεριφορά μετακίνησης των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να προσεγγιστεί μόνο μέσω πιθανοτικών κατανομών [2]. Ως εκ τούτου, η διαχείριση του στόλου των οχημάτων σε μια τέτοια περίπτωση δεν είναι εφικτή με χρήση ντετερμινιστικών μεθόδων βελτιστοποίησης ([69], [71]). Η πιο βασική πιθανοτική μέθοδος βελτιστοποίησης είναι η αριθμητική μέθοδος Monte Carlo. Στη συγκεκριμένη μέθοδο, όλες οι στοχαστικές παράμετροι αντικαθίστανται από μια τυχαία τιμή της αντίστοιχης κατανομής τους και το πρόβλημα επιλύεται εν συνεχεία με ντετερμινιστική μέθοδο. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για ένα μεγάλο αριθμό επαναλήψεων έως ότου η μέση τιμή της βέλτιστης λύσης να μην μεταβάλλεται πλέον καθώς αυξάνονται οι επαναλήψεις.

✓ *Αποκεντρωμένοι αλγόριθμοι*

Στους αποκεντρωμένους αλγορίθμους, υπάρχει ένας κεντρικός συντονιστής ο οποίος είναι υπεύθυνος για τη διαμόρφωση της στρατηγικής του και τον συντονισμό της λειτουργίας των

ηλεκτρικών οχημάτων. Ο κεντρικός συντονιστής δεν έχει τη δυνατότητα άμεσου ελέγχου του επιπέδου της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα διαθέτουν αυξημένο επίπεδο «νοημοσύνης» και «αυτονομίας» ώστε να καθορίζουν ατομικά το βέλτιστο επίπεδο φόρτισης τους βάσει των ενεργειακών αναγκών τους και των περιορισμών μετακίνησής τους. Ο συντονισμός τους για την επίτευξη της γενικής στρατηγικής διαχείρισης του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων γίνεται έμμεσα μέσω σημάτων ελέγχου, που σκοπό έχουν να καθοδηγήσουν τη μαζική συμπεριφορά των ηλεκτρικών οχημάτων προς ένα γενικό στόχο ( Εικόνα 1-11). Τα σήματα αυτά ελέγχου καθορίζονται βάσει της στρατηγικής φόρτισης που έχει υιοθετηθεί καθώς και εξωτερικών παραγόντων (αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, δίκτυο). Σε αντίθεση με την περίπτωση των κεντρικών αλγορίθμων, εδώ ο μεγάλος όγκος πληροφοριών, που αφορά στα τεχνικά χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών οχημάτων και στις ανάγκες μετακίνησής τους, δεν γνωστοποιείται στον κεντρικό συντονιστή. Όλη η πληροφορία αξιοποιείται τοπικά για τον προσδιορισμό της βέλτιστης λειτουργίας του οχήματος βάσει των σημάτων ελέγχου.



Εικόνα 1-11 Ροή πληροφορίας κεντρικής διαχείρισης ηλεκτρικών οχημάτων

Η πλειονότητα των εφαρμογών αποκεντρωμένων αλγορίθμων αφορά στην ελαχιστοποίηση της διακύμανσης της τάσης, δηλαδή τη στρατηγική “valley-filling” ([70], [83], [92], [98]). Η επίλυση αυτών των προβλημάτων βελτιστοποίησης πραγματοποιείται είτε με χρήση της θεωρίας παιγνίων ([70], [92], [98], [100]) είτε της μεθόδου “max-weight” [83]. Η θεωρία παιγνίων και πιο συγκεκριμένα το παίγνιο Stackelberg έχει επίσης εφαρμοστεί στην αποκεντρωμένη διαχείριση του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων [95], [96].

Επιπρόσθετα, μια άλλη μέθοδος για την επίλυση αποκεντρωμένων αλγορίθμων διαχείρισης του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων είναι η dual-decomposition [99], [101]. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε προβλήματα βελτιστοποίησης των οποίων οι περιορισμοί είναι συζευγμένοι (coupled constraints) με αποτέλεσμα το αρχικό πρόβλημα να μην μπορεί να χωριστεί σε επιμέρους ανεξάρτητα ισοδύναμα προβλήματα. Με τη μέθοδο dual decomposition, οι συζευγμένοι περιορισμοί αποσυνδέονται (decoupled constraints) με τη χρήση των συντελεστών Lagrange. Ως εκ τούτου, το αρχικό πρόβλημα μπορεί να χωριστεί σε επιμέρους ανεξάρτητα υπο-προβλήματα τα οποία μπορούν να επιλυθούν τοπικά από κάθε ηλεκτρικό όχημα. Η απόφαση για τη βέλτιστη λειτουργία του κάθε οχήματος εξαρτάται από τις τιμές των πολλαπλασιαστών Lagrange, που καθορίζονται από τον κεντρικό συντονιστή.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

### 2.1 Προσδιορισμός των ενεργειακών αναγκών φόρτισης

Στην παρούσα ενότητα προσδιορίζονται οι ημερήσιες ενεργειακές ανάγκες των ηλεκτρικών οχημάτων για τη φόρτιση τους και αποτιμάται η επίδραση του επιπρόσθετου φορτίου τους στην ημερήσια και ετήσια καμπύλη φορτίου του ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι ενεργειακές ανάγκες των ηλεκτρικών οχημάτων καθορίζονται από την ημερήσια μετακίνηση τους, δηλαδή τις ημερήσιες αποστάσεις που διανύονται, και την κυκλοφοριακή συμπεριφορά του χρήστη. Η ημερήσια μετακίνηση και η κυκλοφοριακή συμπεριφορά τους δεν μπορούν να προσδιοριστούν με ντετερμινιστικό τρόπο και ως εκ τούτου ο προσδιορισμός του φορτίου φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων δεν μπορεί να γίνει με ντετερμινιστικές μεθόδους. Επιπρόσθετα, οι τεχνικές προδιαγραφές του στόλου ηλεκτρικών οχημάτων (η τεχνολογία των οχημάτων, η κατανάλωση του ανά χιλιόμετρο κτλ.), και των υποδομών φόρτισης (επίπεδο φόρτισης, απώλειες μεταφοράς ισχύος κτλ) καθορίζουν επίσης την καμπύλη της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Ως εκ τούτου, στην ενότητα αυτή θα αναπτυχθεί και αναλυθεί μια στοχαστική μέθοδος προσδιορισμού της ζήτησης φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων.

Η κατανομή της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων κατά τη διάρκεια της ημέρας βασίζεται στη χρονική στιγμή που το όχημα συνδέεται σε ένα σημείο φόρτισης, το χρονικό διάστημα που παραμένει διασυνδεδεμένο και τη διαθεσιμότητα των υποδομών φόρτισης (φόρτιση στο σπίτι, στο χώρο εργασίας ή σε δημόσιο χώρο). Οι παράγοντες αυτοί καθορίζουν τις μεταβολές στο ημερήσιο προφίλ ζήτησης ενός δικτύου.

#### 2.1.1 Μέθοδος προσδιορισμού ενεργειακών αναγκών

Το σύνολο των παραμέτρων που καθορίζουν την καμπύλη ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να χωριστεί σε δύο υποσύνολα, σύμφωνα με τη φύση της εκάστοτε παραμέτρου, όπως παρουσιάζεται παρακάτω:

✓ **Σταθερές παράμετροι:**

- Επίπεδο διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων
- Κατηγοριοποίηση των ηλεκτρικών οχημάτων (PHEV, BEV, L7e, M1, N1, N2)
- Χωρητικότητα μπαταρίας
- Τεχνολογίες σταθμών φόρτισης (επίπεδο 1, 2 και 3)
- Διαθεσιμότητα φόρτισης (σπίτι, σπίτι/χώρος εργασίας)
- Απώλειες φόρτισης
- Στρατηγική φόρτισης (Μη ελεγχόμενη, Ελεγχόμενη με διζωνικό τιμολόγιο, Ελεγχόμενη φόρτιση, V2G)

✓ **Πιθανοτικές παράμετροι:**

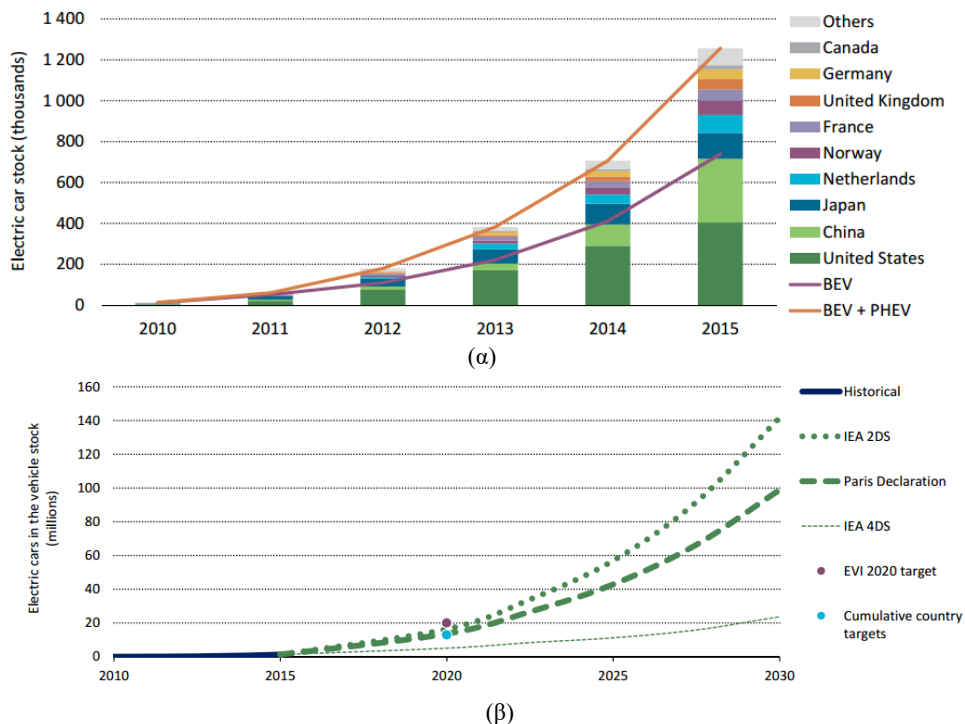
- Ημερήσια απόσταση που διανύεται
- Συνδεσιμότητα των οχημάτων (ώρα άφιξης/αναχώρησης)

Στη συνέχεια επεξηγούνται λεπτομερώς οι παραπάνω παράμετροι.

I. Επίπεδο διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων

Ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων βασίζεται στις προβλεπόμενες πωλήσεων των ηλεκτρικών οχημάτων. Υποθέτοντας ότι οι πωλήσεις οχημάτων είναι ανάλογες με τις πληθυσμιακές αλλαγές, οι μελλοντικές πωλήσεις παρουσιάζουν μία ανοδική τάση. Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που καθορίζουν τα σενάρια διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων, όπως η τεχνολογική ανάπτυξη και το κόστος των συσσωρευτών, η τιμή των συμβατικών υγρών καυσίμων, οι επενδύσεις σε υποδομές φόρτισης, οι στόχοι για μείωση της ρύπανσης κ.τ.λ..

Μέχρι σήμερα έχουν έρθει στη δημοσιότητα ποικίλες έρευνες σχετικά με τις προβλέψεις για τη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων. Παρά τις όποιες διαφοροποιήσεις στα εκτιμώμενα ποσοστά διείσδυσης, το κοινό στοιχείο όλων των ερευνών είναι τα βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα σενάρια διείσδυσης που είναι αρκετά αισιόδοξα. Η πιο πρόσφατη έρευνα σχετικά με τα σενάρια πωλήσεων ηλεκτρικών οχημάτων δημοσιεύτηκε το 2016 από την IEA στην αναφορά της με τίτλο “Global EV outlook 2016”<sup>1</sup>. Στην Εικόνα 2-1 παρουσιάζονται δύο διαγράμματα που απεικονίζουν τη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων μέχρι σήμερα (2015) καθώς και τα εκτιμώμενα ποσοστά διείσδυσης μέχρι το 2030.



Εικόνα 2-1 Ποσοστά και σενάρια διείσδυσης Ηλεκτρικών Οχημάτων (πηγή: IEA, “Global EV Outlook 2016”)

Το πάνω διάγραμμα στην Εικόνα 2-1 απεικονίζει την εκθετική αύξηση των ηλεκτρικών οχημάτων την τελευταία πενταετία από τη σχεδόν μηδενική βάση του 2010. Οι δύο καμπύλες αντικατοπτρίζουν την αύξηση των δύο τεχνολογιών ηλεκτρικών οχημάτων (ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας και υβριδικά) αποδεικνύοντας το ελαφρύ προβάδισμα της διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων μπαταρίας. Το κάτω διάγραμμα στην Εικόνα 2-1, απεικονίζει τα μελλοντικά σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων μέχρι το 2030 βάσει διαφορετικών περιβαλλοντικών στόχων. Τα σενάρια IEA 2DS και 4DS δημοσιεύονται από την IEA και αφορούν σε σενάρια μείωσης των εκπομπών ρύπων σε όλους του τομείς (ενέργεια, βιομηχανία, μεταφορές, αγροτικές δραστηριότητες κ.τ.λ.) έτσι ώστε η μέση αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη να μην υπερβεί τους 2 ή 4°C, αντίστοιχα. Ενδεικτικά, για το σενάριο IEA-2DC προβλέπεται μείωση των ρύπων στον τομέα μεταφορών κατά 18%, το οποίο μεταφράζεται σε 140.000.000 ηλεκτρικά οχήματα

<sup>1</sup> [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Global\\_EV\\_Outlook\\_2016.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Global_EV_Outlook_2016.pdf)



(2030). Αντίστοιχα, οι στόχοι για τη μείωση των περιβαλλοντικών ρύπων που συμφωνήθηκαν στο Παρίσι (Δεκέμβριος 2015) μεταφράζονται σε 100.000.000 ηλεκτρικά οχήματα (2030). Σε κάθε περίπτωση, τα σενάρια διείσδυσης είναι πολύ αισιόδοξα λαμβάνοντας υπόψη τη σημερινή εικόνα (2015).

Στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος MERGE [2] πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις σχετικά με τα προβλεπόμενα ποσοστά διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων για διαφορετικές χώρες της ΕΕ, μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα. Σύμφωνα με την έρευνα αυτή, τρία σενάρια διείσδυσης αποτυπώθηκαν (Εικόνα 2-2):

- *Σενάριο 1 - Ρεαλιστικό*: Το σενάριο που είναι πιο πιθανό να πραγματοποιηθεί
- *Σενάριο 2 - Αισιόδοξο*: Πιο αισιόδοξο από αυτό που αναμένεται πραγματικά να συμβεί
- *Σενάριο 3 – Υπεραισιόδοξο*: Χαρακτηρίζεται από μία πάρα πολύ μεγάλη διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων.

Σύμφωνα με τα παραπάνω σενάρια και για λόγους προσομοίωσης, τρία σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων εξετάζονται στο κεφάλαιο αυτό (Εικόνα 2-2):

- *Σενάριο 1*: 34.000 ηλεκτρικά οχήματα
- *Σενάριο 2*: 70.000 ηλεκτρικά οχήματα
- *Σενάριο 3*: 142.000 ηλεκτρικά οχήματα

## II. Κατηγοριοποίηση των ηλεκτρικών οχημάτων.

Τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να διαχωριστούν σε κατηγορίες ανάλογα με την τεχνολογία, τον αριθμό των τροχών που διαθέτουν και τη χρήση για την οποία προορίζονται.

Όσον αφορά στην τεχνολογία των οχημάτων, διακρίνονται σε (σύμφωνα με την ανάλυση της ενότητας 1.1.1 της παρούσας διατριβής):

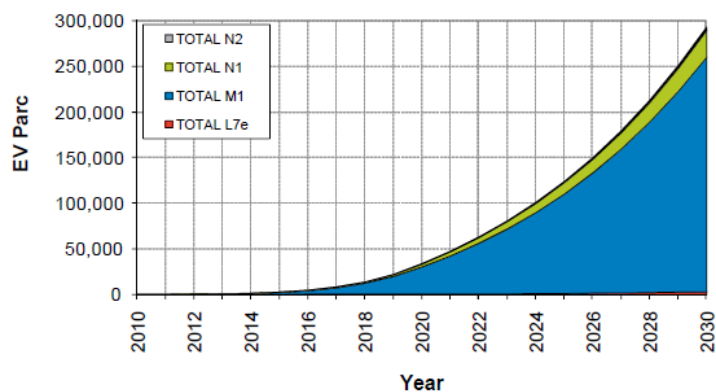
- Ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας (Battery Electric Vehicles - BEV)
- Ηλεκτρικά οχήματα αυξημένης αυτονομίας (Extended Range Electric Vehicles - EREV)
- Plug-in Υβριδικά Οχήματα (PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicles)

Όσον αφορά στην κλάση τους, διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες, που αναμένεται να είναι κυρίαρχες στις πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων,:

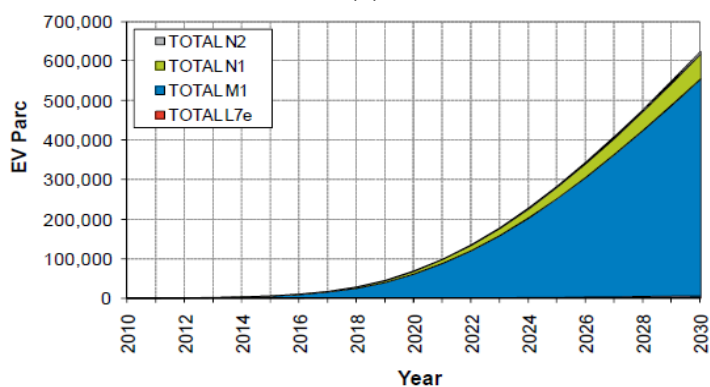
- L7e: μικρά οχήματα πόλης
- M1: Επιβατικά οχήματα 4 θέσεων
- N1: Οχήματα για τη μεταφορά αγαθών με βάρος χωρίς φορτίο που δεν ξεπερνά τους 3,5 τόνους
- N2: Οχήματα με βάρος χωρίς φορτίο που κυμαίνεται μεταξύ 3,5 και 12 τόνων που χρησιμοποιούνται για εξυπηρέτηση εμπορικών αναγκών.

## III. Ημερήσια διανύσιμη απόσταση

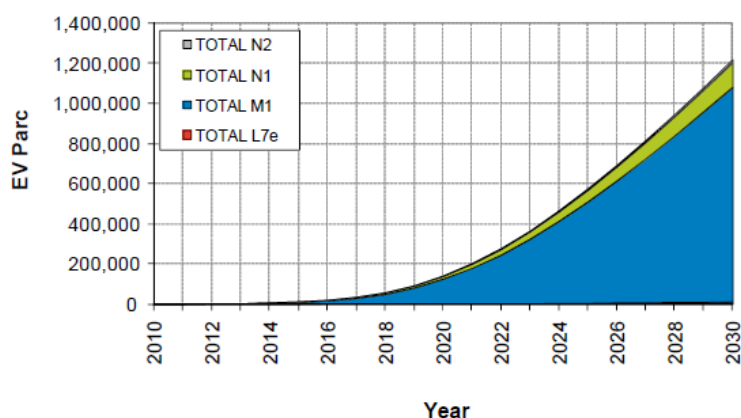
Η παράμετρος αυτή περιγράφει το μήκος της διαδρομής που καλύπτεται από ένα ηλεκτρικό όχημα μεταξύ δύο οικιακών κύκλων φόρτισης. Οι ημερήσιες διανύσιμες αποστάσεις εξαρτώνται κυρίως από τον σκοπό χρήσης των ηλεκτρικών οχημάτων. Για παράδειγμα, τις καθημερινές, τα οχήματα χρησιμοποιούνται κυρίως για εξυπηρέτηση εργασιακών αναγκών, επομένως, το προφίλ των αποστάσεων παρουσιάζει σχεδόν το ίδιο μοτίβο. Αντίθετα, τα σαββατοκύριακα/αργίες, η κινητικότητα των οχημάτων περιορίζεται κατά 25-30%, ενώ παράλληλα αυξάνονται οι διανύσιμες αποστάσεις.



(α)



(β)



(γ)

Εικόνα 2-2 Σενάρια διεξόδου Ηλεκτρικών Οχημάτων για την Ελλάδα: (α) Ρεαλιστικό σενάριο, (β) Αισιόδοξο σενάριο, (γ) Υπεραισιόδοξο σενάριο (πηγή: MERGE [2])

#### IV. Κατανάλωση συσσωρευτή

Ορίζοντας τη συνολική διανυόμενη απόσταση, το ποσό ενέργειας που απαιτείται για τη φόρτιση εξαρτάται από την ταχύτητα οδήγησης, τις καιρικές συνθήκες, τις κυκλοφοριακές συνθήκες κ.τ.λ. Επειδή οι παραπάνω παράμετροι μεταβάλλονται κατά περίπτωση, μία μέση κατανάλωση (kWh/km) υιοθετείται για τον προσδιορισμό της κατανάλωσης της μπαταρίας.

#### V. Χωρητικότητα Μπαταρίας

Η χωρητικότητα της μπαταρίας ποικίλει ανάλογα με την κατηγορία των οχημάτων. Ο Πίνακας 2-1 αναφέρει ενδεικτικές τιμές (μέση, ελάχιστη και μέγιστη) της χωρητικότητας των μπαταριών ανά κατηγορία ηλεκτρικών οχημάτων, βάσει των μοντέλων που είναι διαθέσιμα στην αγορά.

**Πίνακας 2-1 Χωρητικότητα μπαταρίας ανά κατηγορία ηλεκτρικών οχημάτων**

Τύπος οχήματος		Χωρητικότητα Μπαταρίας (kWh)		
		Μέση	Ελάχιστη	Μέγιστη
L7e	BEV	8.7	3	15
M1	BEV	28.5	10	72
	PHEV/EREV	12.9	4	22.6
N1	BEV	23	9.6	40
	PHEV/EREV	12.9	4	22.6
N2	BEV	51.2	51.2	120

#### VI. Απαιτούμενη περίοδος φόρτισης

Η παράμετρος αυτή καθορίζει την ελάχιστη χρονική περίοδο κατά την οποία το ηλεκτρικό όχημα πρέπει να παραμείνει συνδεδεμένο στο δίκτυο για την πλήρη φόρτιση της μπαταρίας του. Η περίοδος φόρτισης εξαρτάται από την κατανάλωση της μπαταρίας του οχήματος και τη μέγιστη ισχύ φόρτισης των αντίστοιχων υποδομών σύνδεσης.

#### VII. Διαθεσιμότητα φόρτισης

Διαφορετικά σενάρια φόρτισης προσομοιώνονται ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των υποδομών για φόρτιση:

- *Φόρτιση μετά την τελευταία διαδρομή (φόρτιση στο σπίτι):* Καθώς η υιοθέτηση της ηλεκτροκίνησης στον τομέα μεταφορών παραμένει ακόμη σε αρχικό στάδιο, ο αριθμός σημείων φόρτισης αρχικά θα είναι περιορισμένος. Επομένως, οι περισσότεροι από τους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων θα έχουν τη δυνατότητα να φορτίζουν το όχημά τους αποκλειστικά και μόνο σε οικιακό σταθμό φόρτισης
- *Φόρτιση όταν ένα (ιδιωτικό ή δημόσιο) σημείο φόρτισης είναι διαθέσιμο:* Στο σενάριο αυτό, ο ιδιοκτήτης ηλεκτρικού οχήματος δύναται να φορτίσει το όχημά του όχι μόνο στο σπίτι του αλλά και σε διαφορετικά σημεία, όπως για παράδειγμα στον χώρο εργασίας του. Το συγκεκριμένο σενάριο απαιτεί την εγκατάσταση ενός σημαντικού αριθμού σημείων φόρτισης σε διάφορες δημόσιες και ιδιωτικές περιοχές. Καθώς δεν είναι δυνατό να προσδιοριστεί ο ακριβής αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων που θα φορτίζουν στο σπίτι ή στον χώρο εργασίας, υιοθετούνται διαφορετικά μοντέλα φόρτισης όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 2-2.
- *Φόρτιση όταν η κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή είναι μικρότερη από ένα επιθυμητό επίπεδο:* Η μέση απόσταση που μπορεί να διανύσει ένα ηλεκτρικό όχημα είναι μεγαλύτερη από 100km, σύμφωνα με τις υπάρχουσες τεχνολογίες. Όταν η ημερήσια διανυόμενη απόσταση είναι περιορισμένη, για παράδειγμα μικρότερη από 30km κυρίως σε αστικές περιοχές, ο ιδιοκτήτης του ηλεκτρικού οχήματος πιθανώς να μη φορτίζει τη μπαταρία του οχήματος καθημερινά, παρά μόνο όταν αυτός κρίνει ότι είναι αναγκαίο. Στο σενάριο αυτό, υποθέτουμε ότι ο ιδιοκτήτης του ηλεκτρικού οχήματος θα φορτίσει το όχημά του όταν η κατάσταση φόρτισής της μπαταρίας είναι μικρότερη από ένα κατώτατο όριο(40%).

**Πίνακας 2-2 Μοντέλα για φόρτιση στο σπίτι ή πολλαπλά σημεία φόρτισης**

	Μέθοδος Φόρτισης
1 <sup>ο</sup> Μοντέλο	75% στο Σπίτι – 25% στο Σπίτι/Δουλειά
2 <sup>ο</sup> Μοντέλο	50% στο Σπίτι – 50% στο Σπίτι/Δουλειά
3 <sup>ο</sup> Μοντέλο	25% στο Σπίτι – 75% στο Σπίτι/Δουλειά

### VIII. Τεχνολογίες σταθμών φόρτισης

Η παράμετρος αυτή καθορίζει τη μέγιστη επιτρεπόμενη ανταλλαγή ισχύος μεταξύ των ηλεκτρικών οχημάτων και του ηλεκτρικού δικτύου, η οποία εξαρτάται από την ονομαστική ισχύ των υποδομών φόρτισης. Το επίπεδο φόρτισης επηρεάζει, επίσης, τη διάρκεια ενός κύκλου για την πλήρη φόρτιση της μπαταρίας.

Στην παρούσα μελέτη, εξετάζονται τρεις διαφορετικοί τρόποι φόρτισης: απλή (επίπεδο 1), γρήγορη (επίπεδο 2) και ταχεία φόρτιση (επίπεδο 3) σύμφωνα με τα πρότυπα IEC 62196-1 και IEC 61851-1. Η επιλογή συγκεκριμένου τρόπου φόρτισης για κάθε ηλεκτρικό όχημα είναι πιθανολογική και βασίζεται στην κλάση στην οποία ανήκει. Για παράδειγμα, η σύνδεση ενός οχήματος N2, με συσσωρευτή χωρητικότητας 51,2-120 kWh, σε ένα σημείο κανονικής φόρτισης είναι μη ρεαλιστική, επομένως, η πιθανότητα της συγκεκριμένης επιλογής είναι μηδενική. Ο Πίνακας 2-3 παρουσιάζει μια προσεγγιστική αντιστοιχία τύπων ηλεκτρικών οχημάτων και επιπέδου φόρτισης, όπως αυτή αποτυπώθηκε από το ευρωπαϊκό ερευνητικό πρόγραμμα MERGE [2].

**Πίνακας 2-3 Αντιστοίχιση τεχνολογίας σταθμών φόρτισης ανά τύπο ηλεκτρικού οχήματος**

Τύπος οχήματος		Υποδομή φόρτισης		
		Επίπεδο 1	Επίπεδο 2	Επίπεδο 3
L7e	BEV	90%	10%	0%
M1	BEV	85%	10%	5%
	PHEV	85%	10%	5%
N1	BEV	85%	10%	5%
	PHEV	85%	10%	5%
N2	BEV	0%	80%	20%

### IX. Απώλειες Φόρτισης

Η παράμετρος αυτή προσομοιώνει τις απώλειες ισχύος για τη μετατροπή της εναλλασσόμενης ισχύος του δικτύου σε συνεχή για τη φόρτιση των συσσωρευτών των ηλεκτρικών οχημάτων, λόγω της λειτουργίας των ηλεκτρονικών ισχύος. Για τις ανάγκες της παρούσας μελέτης, οι απώλειες αυτές θεωρούνται ίσες με 10-15% της συνολικής ενεργειακής ζήτησης.

### X. Στρατηγική Φόρτισης

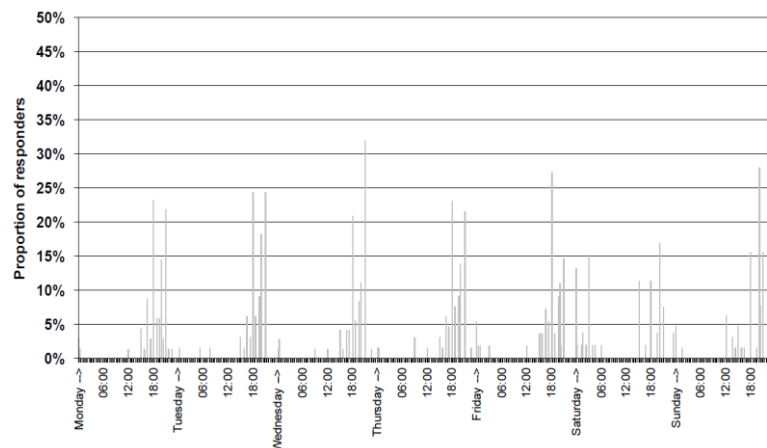
Διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης εξετάζονται ώστε να εξαχθούν ολοκληρωμένα συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

- *Μη ελεγχόμενη φόρτιση:* Η διαδικασία της φόρτισης ξεκινά αμέσως μετά τη σύνδεση του ηλεκτρικού οχήματος στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Η στρατηγική αυτή αναφέρεται κυρίως στην οικιακή φόρτιση, όπου το επίπεδο φόρτισης είναι χαμηλό (επίπεδο 1) και απαιτείται μεγάλο χρονικό διάστημα για την πλήρη φόρτιση της μπαταρίας.
- *Χρήση πολύ-ζωνικών τιμολογίων:* Η μέθοδος αυτή είναι ένας απλοποιημένος μηχανισμός της αγοράς για την έμμεση (μέσω κινήτρων) διαχείριση της κατανάλωσης. Σκοπός της στρατηγικής αυτής είναι η μετατόπιση της κατανάλωσης από τις ώρες αιχμής σε ώρες χαμηλής κατανάλωσης. Αυτό επιτυγχάνεται με την υιοθέτηση διαφορετικών λιανικών τιμών αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε μια χρονική ζώνη εντός μιας ημέρας. Η πιο απλός και πολύ-εφαρμοζόμενος μηχανισμός είναι το διζωνικό τιμολόγιο, σύμφωνα με το οποίο υπάρχουν δύο ζώνες (υψηλής και χαμηλής) χρέωσης της ενέργειας.

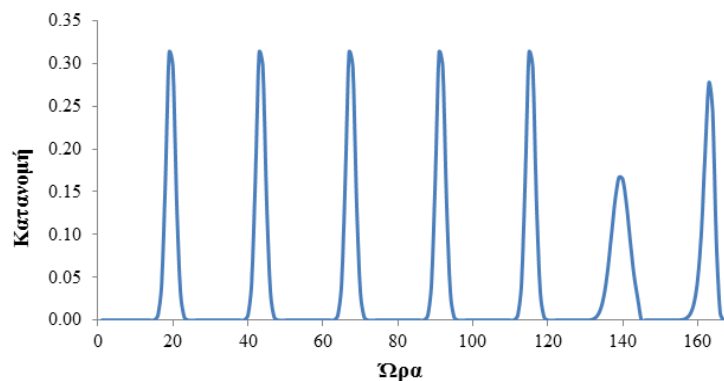
- *Ελεγχόμενη Φόρτιση:* Στο σενάριο ελεγχόμενης φόρτισης υιοθετείται η ιδέα της πλήρωσης των κοιλάδων που παρατηρούνται στην καμπύλη φορτίου (φόρτιση με ομοιόμορφη κατανομή). Αυτό επιτυγχάνεται με τη μετάθεση της φόρτισης των οχημάτων από τις ώρες αιχμής σε ώρες όπου η ζήτηση δεν είναι τόσο αυξημένη, έτσι ώστε να καλυφθεί ομοιόμορφα η κοιλότητα που δημιουργεί η καμπύλη φορτίου τις βραδινές ώρες. Η εφαρμογή της φόρτισης αυτής εξυπηρετείται από το γεγονός ότι η κινητικότητα των ηλεκτρικών οχημάτων τις ώρες αυτές είναι περιορισμένη.

## 2.2 Επίδραση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων στην καμπύλη ζήτησης του συστήματος

Η ώρα επιστροφής των οδηγών μετά την τελευταία διαδρομή της ημέρας, παρέχει ιδιαίτερα χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τη διαθεσιμότητα φόρτισης, ειδικά στην περίπτωση της μη ελεγχόμενης οικιακής φόρτισης. Αναμένεται ότι οι περισσότεροι οδηγοί θα φορτίζουν το ηλεκτρικό όχημά τους αμέσως μόλις επιστρέψουν στο σπίτι, μετά την τελευταία ημερήσια διαδρομή τους, χωρίς να αξιοποιούν τη δυνατότητα χαμηλότερων χρεώσεων ενέργειας μέσω διζωνικού τιμολογίου. Η ώρα επιστροφής από την τελευταία διαδρομή της ημέρας ακολουθεί το προφίλ που παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-3 και βασίζεται στην έρευνα που έγινε (μέσω ερωτηματολογίου) στην Ελλάδα στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού προγράμματος MERGE [15] Για λόγους προσομοίωσης, το στατιστικό προφίλ στην Εικόνα 2-3 προσεγγίζεται από τις κανονικές κατανομές που απεικονίζονται στην Εικόνα 2-4. Για παράδειγμα η κατανομή της ώρας άφιξης για τις καθημερινές είναι μια κανονική κατανομή με μέση τιμή 20:00 και με τυπική απόκλιση μια ώρα.

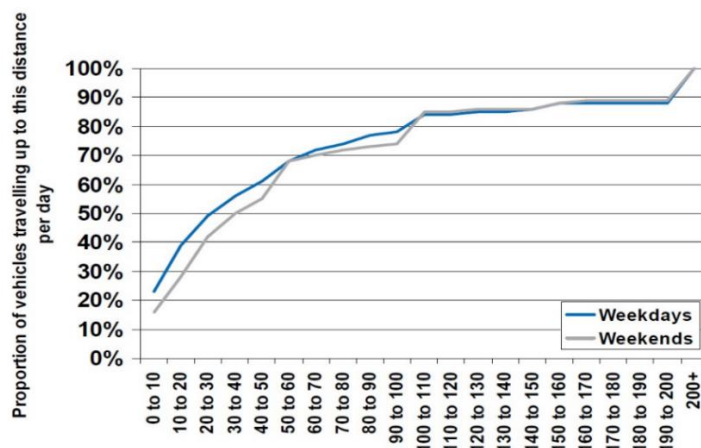


Εικόνα 2-3 Προφίλ χρονικής στιγμής επιστροφής για την Ελλάδα (πηγή: MERGE [15])

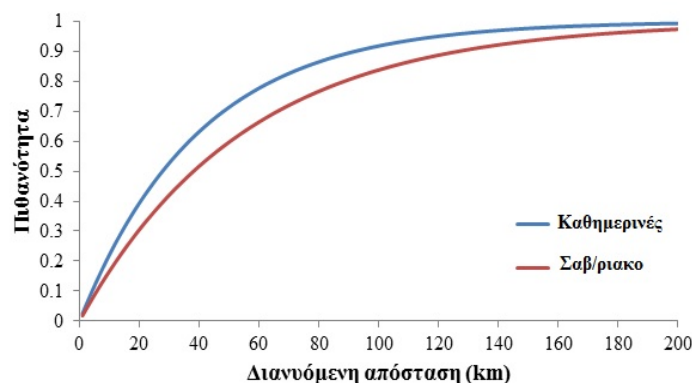


Εικόνα 2-4 Κατανομή της ώρας επιστροφής από την τελευταία διαδρομή της ημέρας

Όσον αφορά στην ημερήσια διανυόμενη απόσταση των ηλεκτρικών οχημάτων, το μέσο Ευρωπαϊκό προφίλ διανυόμενης απόστασης υιοθετήθηκε, όπως αυτό προέκυψε από την ανάλυση του Ευρωπαϊκού προγράμματος MERGE [15]. Η Εικόνα 2-6 απεικονίζει την αντίστοιχη αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας για το μήκος της ημερήσιας διανυόμενης απόστασης που υιοθετήθηκε για λόγου προσομοίωσης. Το υψηλότερο ποσοστό οδηγών (95%) διανύει λιγότερο από 100km ημερησίως. Η μέση τιμή της εκθετικής συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας για το 95% του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων θεωρείται 35km τις καθημερινές και 46km τα Σαββατοκύριακα. Το υπολειπόμενο 5% του στόλου των οχημάτων χαρακτηρίζεται από μεγάλες διανυόμενες αποστάσεις, ωστόσο η επίδραση τους στο συνολικό προφίλ ζήτησης της φόρτισης δεν είναι σημαντική.



Εικόνα 2-5 Μέσο Ευρωπαϊκό προφίλ διανυόμενων αποστάσεων ανά ημέρα (πηγή: MERGE [15])



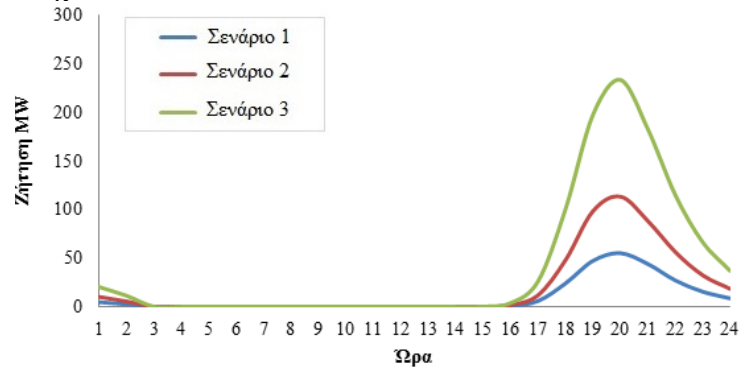
Εικόνα 2-6 Αποστάσεις που διανύονται κάθε μέρα – Καθημερινές ημέρες και Σαββατοκύριακα

### 2.2.1 Μη ελεγχόμενη φόρτιση

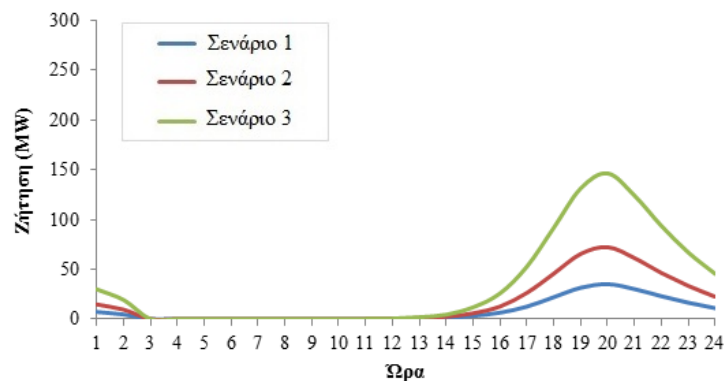
Η μη ελεγχόμενη φόρτιση αναφέρεται στη σύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων σε οικιακό ρευματοδότη, μετά τη τελευταία διαδρομή που πραγματοποιεί ο ιδιοκτήτης του οχήματος κατά τη διάρκεια της ημέρας, και την ταυτόχρονη έναρξη της φόρτισης στη μέγιστη δυνατή ισχύ. Το ημερήσιο προφίλ των ενεργειακών αναγκών των ηλεκτρικών οχημάτων στην περίπτωση της μη ελεγχόμενης φόρτισης απεικονίζεται στην Εικόνα 2-7, για διαφορετικά σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων. Όπως είναι αναμενόμενο, η αιχμή του προφίλ ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων αυξάνει καθώς αυξάνεται ο αριθμός τους. Στο 1<sup>ο</sup> σενάριο (34.000 οχήματα), οι συνολικές ενεργειακές ανάγκες φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι ίσες με 236MWh και η αιχμή ζήτηση τους είναι ίση περίπου με 55MW. Στο 2<sup>ο</sup> σενάριο (70.000 οχήματα), ο στόλος των ηλεκτρικών οχημάτων σχεδόν διπλασιάζεται, συγκριτικά με το 1<sup>ο</sup> σενάριο, με αποτέλεσμα να διπλασιάζεται η αιχμή ζήτησης τους (113MW) καθώς και οι ενεργειακές τους ανάγκες (485MWh).

Αντίστοιχα, στο 3<sup>ο</sup> σενάριο (142.000 οχήματα), η αύξηση της διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων αυξάνει την αιχμή ζήτησης (233MW) και τις ενεργειακές ανάγκες φόρτισης (995MWh).

Παρόμοια είναι τα συμπεράσματα για το προφίλ ζήτησης των οχημάτων τα Σαββατοκύριακα (αργίες). Ενδεικτικά αποτελέσματα από το ημερήσιο προφίλ ζήτησης απεικονίζονται στην Εικόνα 2-8. Οι ενεργειακές ανάγκες των ηλεκτρικών οχημάτων για κάθε σενάριο είναι 204MWh, 419MWh και 846MWh, αντίστοιχα.



Εικόνα 2-7 Ημερήσιο προφίλ ζήτησης ηλεκτρικών οχημάτων - μη ελεγχόμενη φόρτιση (καθημερινή)



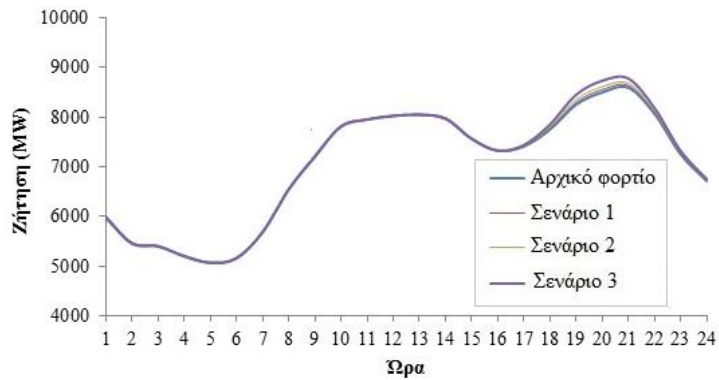
Εικόνα 2-8 Ημερήσιο προφίλ ζήτησης ηλεκτρικών οχημάτων - μη ελεγχόμενη φόρτιση (Σαβ/ριακο)

Στην Εικόνα 2-9 παρουσιάζεται η τροποποιημένη ημερήσια καμπύλη φορτίου του Ελληνικού συστήματος (χειμώνας και καλοκαίρι) για διαφορετικά σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων, για την περίπτωση της μη ελεγχόμενης φόρτισης. Είναι προφανές ότι, για μεγαλύτερα ποσοστά διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων, η επίδραση του επιπρόσθετου φορτίου φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων στην καμπύλη φορτίου του συστήματος είναι εντονότερη. Είναι αξιοσημείωτο ότι η ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων στη μη ελεγχόμενη φόρτιση συμπίπτει με την περίοδο υψηλής κατανάλωσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αιχμής ζήτησης του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη χειμερινή περίοδο. Πιο συγκριμένα, η ποσοστιαία αύξηση της αιχμής του δικτύου για κάθε σενάριο είναι 0,51%, 1,02% και 2,13%, αντίστοιχα. Το επιπρόσθετο φορτίο εξ αιτίας της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, συγκριτικά με το φορτίο του δικτύου, δεν είναι μεγάλο, ωστόσο συμπίπτει με την περίοδο υψηλής κατανάλωσης του δικτύου επιδεινώνοντας την επιβάρυνση των δικτύων τις ώρες αιχμής.

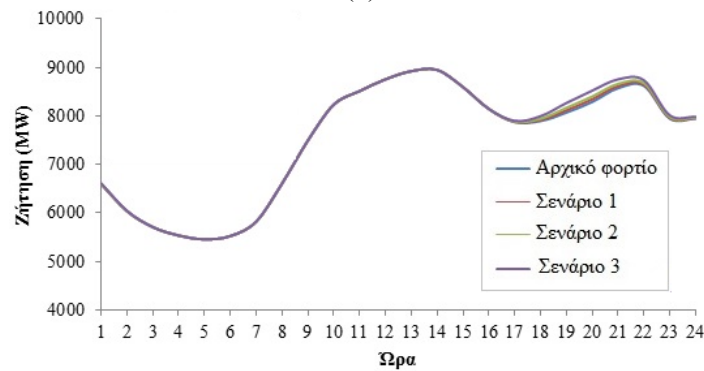
Η Εικόνα 2-9(β) απεικονίζει την τροποποιημένη καμπύλη ζήτησης για μια θερινή ημέρα εξετάζοντας διαφορετικά σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων. Το καλοκαίρι, η αιχμή του φορτίου παρουσιάζεται το μεσημέρι, την ώρα που τα ηλεκτρικά οχήματα είναι σταθμευμένα στους χώρους εργασίας και επομένως δεν φορτίζονται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην αυξάνεται η αιχμή του φορτίου του συστήματος λόγω φόρτισης των οχημάτων, ωστόσο, τις βραδινές ώρες παρατηρείται μία αύξηση της ζήτησης.

Τα παραπάνω συμπεράσματα είναι εμφανή και από τη μελέτη της επίδρασης της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων στην ετήσια καμπύλη του Ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η Εικόνα 2-10 απεικονίζει την τροποποιημένη ετήσια καμπύλη φορτίου του συστήματος ενέργειας λαμβάνοντας υπόψη το επιπρόσθετο φορτίο φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων (καθημερινές και

Σαββατοκύριακα/αργίες) για διαφορετικά σενάρια διείσδυσης. Η επίδραση της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων στην καμπύλη φορτίου του συστήματος είναι περιορισμένη καθώς μικρός σχετικά αριθμός οχημάτων θεωρείται σε κάθε σενάριο διείσδυσης. Ωστόσο, η επίδραση γίνεται αισθητή κατά τις ώρες αιχμής της χειμερινής περιόδου.

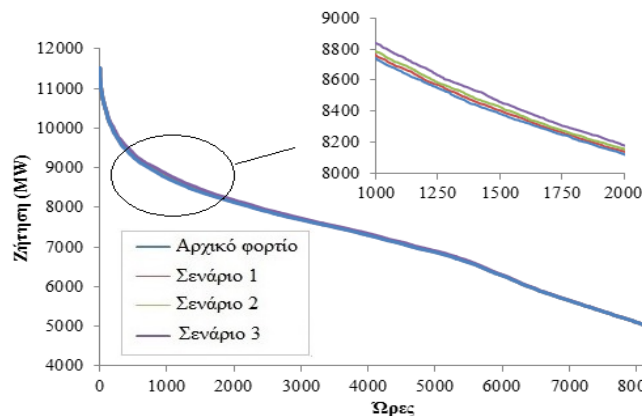


(α)



(β)

Εικόνα 2-9 Τροποποιημένη ημερήσια καμπύλη φορτίου του Ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας – μη ελεγχόμενη φόρτιση: (α) χειμώνας και (β) καλοκαίρι



Εικόνα 2-10 Ετήσια καμπύλη φορτίου του Ελληνικού συστήματος - μη ελεγχόμενη φόρτιση

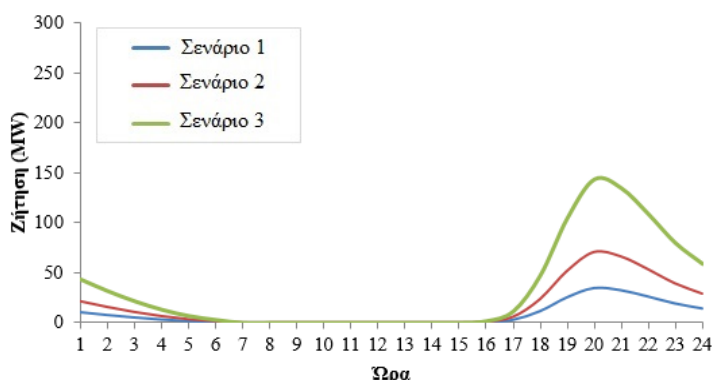
#### ✓ Μη ελεγχόμενη φόρτιση με κριτήριο το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας

Ένα μεγάλο ποσοστό του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων αξιοποιεί ένα μικρό μέρος της χωρητικότητας της μπαταρίας του για να εξυπηρετήσει τις ενεργειακές ανάγκες των καθημερινών μετακινήσεων του. Επομένως, είναι σκόπιμο να εξετασθεί το σενάριο όπου οι ιδιοκτήτες



ηλεκτρικών οχημάτων φορτίζουν το όχημά τους μόνο όταν η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας είναι μικρότερη από ένα κατώτατο όριο. Στη συγκεκριμένη μελέτη, το όριο αυτό ισούται με 40%. Η Εικόνα 2-11 παρουσιάζει το ημερήσιο προφίλ ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων για τα τρία σενάρια διείσδυσης τους. Στην περίπτωση αυτή, η αιχμή ζήτησης της φόρτισης είναι μειωμένη κατά περίπου 40%, συγκριτικά με την αντίστοιχη της απλής μη ελεγχόμενης φόρτισης, και αντίστοιχα η απαιτούμενη ενέργεια φόρτισης είναι μειωμένη κατά περίπου 18%.

Ο Πίνακας 2-4 παρουσιάζει τον αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων που συνδέονται στο δίκτυο για μια περίοδο μελέτης δεκαπέντε ημερών. Από τα αποτελέσματα του πίνακα προκύπτει ότι περίπου το ένα τρίτο του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων χρειάζεται να φορτίσει μέσα σε μια ημέρα.



Εικόνα 2-11 Ημερήσιο προφίλ ζήτησης ηλεκτρικών οχημάτων - μη ελεγχόμενη φόρτιση με κριτήριο το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών

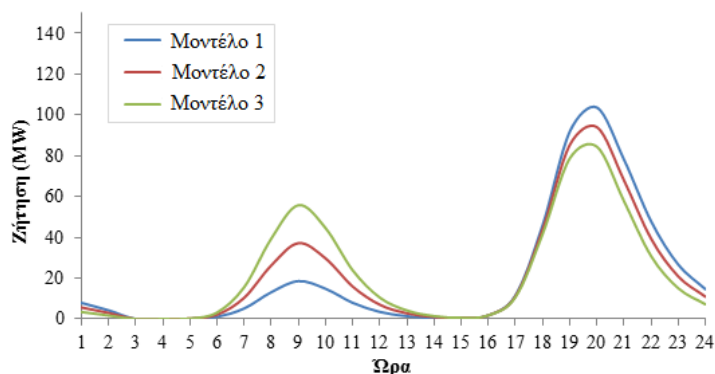
Πίνακας 2-4 Ποσοστό του στόλου ηλεκτρικών οχημάτων που πρέπει να φορτίσουν μέσα στην ημέρα

#### Διάστημα μελέτης δεκαπέντε ημερών

Εξεταζόμενη μέρα	Ποσοστό (%) στόλου που φορτίζει	Εξεταζόμενη μέρα	Ποσοστό (%) στόλου που φορτίζει
1	18,17	9	34,89
2	30,57	10	35,79
3	35,46	11	35,12
4	36,00	12	35,07
5	35,44	13	30,93
6	30,48	14	34,16
7	33,38	15	32,55
8	34,24		

#### ✓ Μη ελεγχόμενη φόρτιση – Δυνατότητα φόρτισης στο χώρο εργασίας

Στις προηγούμενες προσεγγίσεις της μη ελεγχόμενης φόρτισης, είχε γίνει η υπόθεση της δυνατότητας μόνο για οικιακή φόρτιση, δηλαδή ο ιδιοκτήτης του ηλεκτρικού οχήματος έχει τη δυνατότητα να φορτίζει το όχημά του μόνο όταν επιστρέφει στο σπίτι του. Στο νέο σενάριο μη ελεγχόμενης φόρτισης που θα εξεταστεί στην ενότητα αυτή, ο ιδιοκτήτης μπορεί να φορτίσει το όχημά του και σε χώρους εκτός σπιτιού, για παράδειγμα στον χώρο εργασίας. Η Εικόνα 2-12 απεικονίζει το ημερήσιο προφίλ ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων θεωρώντας το 2<sup>ο</sup> σενάριο διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων (70.000 οχήματα) και εξετάζοντας τα τρία μοντέλα που περιγράφουν τα διαφορετικά ποσοστά φόρτισης στο σπίτι και στον χώρο εργασίας όπως αναφέρει ο Πίνακας 2-4. Η δυνατότητα φόρτισης στην εργασία έχει ως αποτέλεσμα ένα μέρος των ενεργειακών αναγκών των οχημάτων να εξυπηρετείται τις πρωινές ώρες που η κατανάλωση του δικτύου είναι σχετικά χαμηλή. Ως εκ τούτου, η ζήτηση που πρέπει να εξυπηρετηθεί από την οικιακή φόρτιση είναι μικρότερη συμβάλλοντας στη μείωση της αιχμής ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων τις βράδυνες ώρες.



Εικόνα 2-12 Ημερήσιο προφίλ ζήτησης ηλεκτρικών οχημάτων - μη ελεγχόμενη φόρτιση, δυνατότητα φόρτισης στο σπίτι/εργασία (70.000 ηλεκτρικά οχήματα)

Οι συνολικές ενεργειακές ανάγκες φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων για τα τρία μοντέλα φόρτισης είναι 501MWh, 517MWh και 533MWh, αντίστοιχα. Αυτές οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι ελαφρώς αυξημένες συγκριτικά με τις αντίστοιχες στην περίπτωση της μη ελεγχόμενης, οικιακής φόρτισης. Αυτό οφείλεται στη φόρτιση των Plug-in Υβριδικών Οχημάτων (PHEV), τα οποία τώρα έχουν τη δυνατότητα περαιτέρω χρήσης της μπαταρίας τους κατά τη διάρκεια της ημέρας μιας και αυτή φορτίζεται πλήρως τις πρωινές ώρες στον χώρο εργασίας.

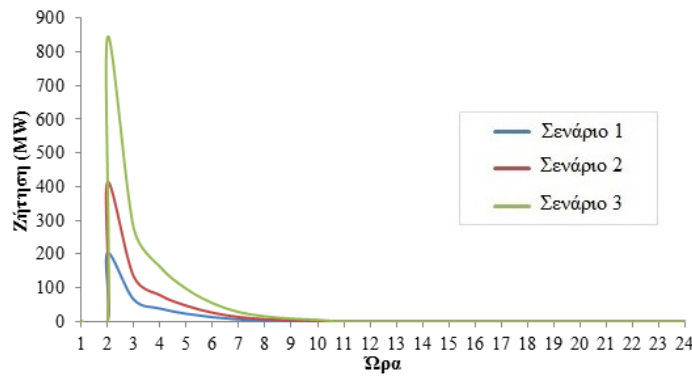
## 2.2.2 Ελεγχόμενη Φόρτιση μέσω διζωνικού τιμολογίου

Ο σκοπός της χρήσης διζωνικού τιμολογίου είναι η μεταφορά ενός μέρους της ζήτησης από τις ώρες αιχμής σε ώρες όπου η κατανάλωση είναι σχετικά χαμηλή. Στην παρούσα μελέτη υιοθετείται η εξής προσέγγιση τιμολόγησης:

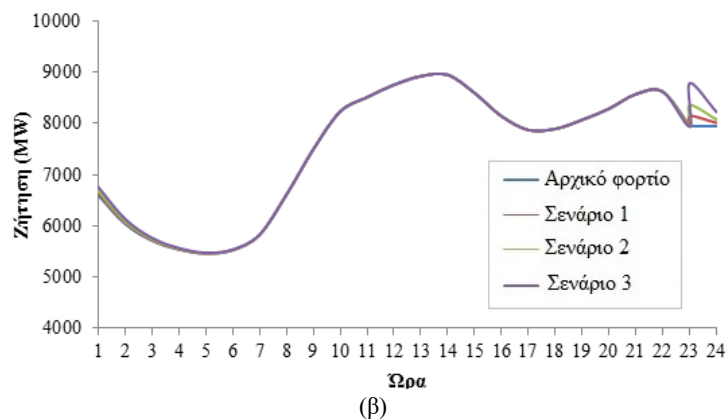
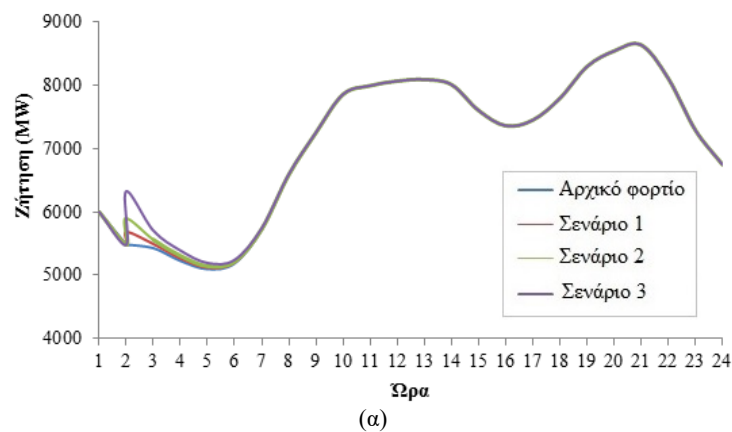
- ✓ *Χειμερινή περίοδος (1/11 – 30/4)*: οι ώρες χαμηλής χρέωσης είναι μεταξύ 02:00 και 08:00 για το βράδυ και μεταξύ 15:30 και 17:30 για το μεσημέρι.
- ✓ *Καλοκαιρινή περίοδο (1/5 – 30/10)*: οι ώρες χαμηλής χρέωσης είναι μεταξύ 23:00 και 07:00.

Η Εικόνα 2-13 απεικονίζει το ημερήσιο προφίλ ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων, μετά την εφαρμογή της ελεγχόμενης φόρτισης με διζωνικό τιμολόγιο, για διαφορετικά σενάρια διείσδυσης τους. Η αιχμή της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων για τα τρία σενάρια είναι 204MW, 413MW και 844MW αντίστοιχα, ενώ οι ενεργειακές ανάγκες τους είναι 236MWh, 485MWh και 995MWh. Από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για όλα τα σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων, παρατηρείται μία απότομη αύξηση του φορτίου τη χρονική στιγμή έναρξης της περιόδου χαμηλής χρέωσης κατανάλωσης. Οι συνολικές ενεργειακές ανάγκες των οχημάτων είναι ίσες με τις αντίστοιχες της μη ελεγχόμενης, οικιακής φόρτισης, με τη διαφορά ότι εδώ η φόρτιση όλων των οχημάτων ταυτοχρονίζεται.

Η Εικόνα 2-14 απεικονίζει την τροποποιημένη ημερήσια καμπύλη φορτίου του Ελληνικού συστήματος (χειμώνας και καλοκαίρι) για διαφορετικά σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων, για την περίπτωση της ελεγχόμενης φόρτισης με διζωνικό τιμολόγιο. Η τακτική του διζωνικού τιμολογίου επιφέρει μετατόπιση της επιπλέον ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων σε ώρες εκτός αιχμής, ωστόσο, η φόρτιση όλων των οχημάτων είναι απόλυτα συγχρονισμένη, γεγονός που κάνει αισθητή την επίδραση των οχημάτων στη συνολική ζήτηση, ιδιαίτερα μάλιστα όταν το επίπεδο διείσδυσης αυξάνεται σημαντικά. Επιπρόσθετα, οι απότομες αιχμές ζήτησης που προκαλεί η ταυτόχρονη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να επηρεάσει και το σύστημα παραγωγής, δηλαδή τον προγραμματισμό ένταξης των μονάδων.



Εικόνα 2-13 Ημερήσιο προφίλ ζήτησης ηλεκτρικών οχημάτων - ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο



Εικόνα 2-14 Τροποποιημένη ημερήσια καμπύλη φορτίου του Ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας – ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο: (α) χειμώνας και (β) καλοκαίρι

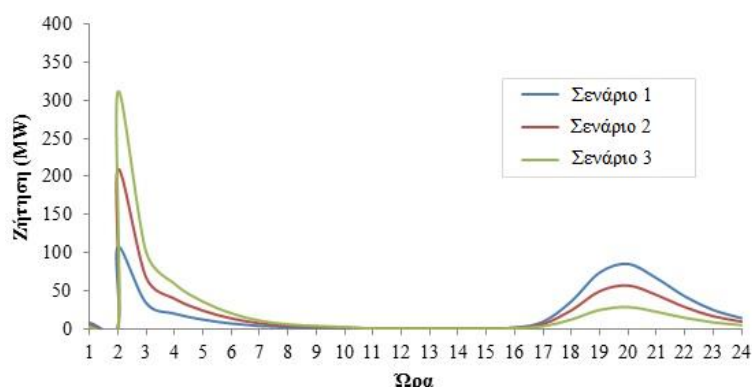
Στις προηγούμενες παραγράφους εξετάστηκε ξεχωριστά η ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων είτε με τη στρατηγική της μη ελεγχόμενης φόρτισης είτε με τη στρατηγική της ελεγχόμενης φόρτισης μέσω διζωνικού τιμολογίου. Το ποσοστό εθελούσιας συμμετοχής των χρηστών ηλεκτρικών οχημάτων στην ελεγχόμενη φόρτιση μέσω διζωνικού τιμολογίου επηρεάζει την καμπύλη ζήτησης της φόρτισης τους. Για τον λόγο αυτό, εξετάζονται τρία διαφορετικά σενάρια συμμετοχής ηλεκτρικών οχημάτων στην ελεγχόμενη φόρτιση μέσω διζωνικού τιμολογίου (Πίνακας 2-5), ενώ τα υπόλοιπα ηλεκτρικά οχήματα φορτίζουν με τη στρατηγική της μη ελεγχόμενης φόρτισης.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα τρία αυτά σενάρια απεικονίζονται στην Εικόνα 2-15. Ο συνδυασμός των δύο αυτών στρατηγικών έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των αιχμών ζήτησης της φόρτισης κάθε στρατηγικής συγκριτικά με τα αποτελέσματα της μεμονωμένης εφαρμογής τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το φορτίο κατανέμεται ποσοστιαία, ανάλογα με το σενάριο συμμετοχής, σε δύο χρονικές περιόδους. Παρά το γεγονός ότι η αιχμή ζήτησης της

φόρτισης λόγω εφαρμογής της ελεγχόμενης φόρτισης μέσω διζωνικού τιμολογίου είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με την αντίστοιχη της μη ελεγχόμενης φόρτισης, η δεύτερη περίπτωση μπορεί να είναι πιο επιζήμια για τη λειτουργία του δικτύου αφού ταυτοχρονίζεται με την αιχμή ζήτησης του δικτύου.

**Πίνακας 2-5 Σενάρια συμμετοχής στην ελεγχόμενη φόρτιση μέσω διζωνικού τιμολογίου**

	Στρατηγικές Φόρτισης	
	Μη Ελεγχόμενη	Ελεγχόμενη- Διζωνικό τιμολόγιο
<b>Σενάριο 1</b>	25%	75%
<b>Σενάριο 2</b>	50%	50%
<b>Σενάριο 3</b>	75%	25%



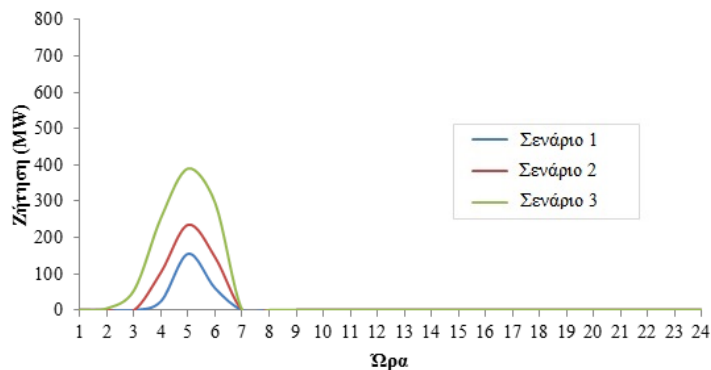
**Εικόνα 2-15 Ημερήσιο προφίλ ζήτησης ηλεκτρικών οχημάτων – μη ελεγχόμενη φόρτιση και ελεγχόμενη φόρτιση μέσω διζωνικού τιμολογίου**

### 2.2.3 Ελεγχόμενη Φόρτιση – “valley-filling”

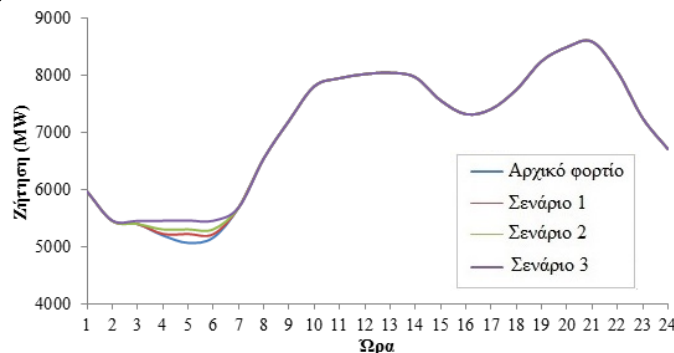
Στην παρούσα ανάλυση υιοθετείται μια πιο σύνθετη διαδικασία ελέγχου των ηλεκτρικών οχημάτων που σκοπό έχει τη μετατόπιση του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων σε ώρες με χαμηλή κατανάλωση κατά τρόπο ώστε οι κοιλότητες της καμπύλης φορτίου να πληρούνται ομοιόμορφα. Η στρατηγική αυτή ελεγχόμενης φόρτισης είναι ευρέως διαδεδομένη στη βιβλιογραφία με το όνομα “valley-filling”. Η πλήρωση των κοιλοτήτων της καμπύλης φορτίου με την εφαρμογή της στρατηγικής “valley-filling” έχει συνεπακόλουθο πλεονέκτημα την ελαχιστοποίηση της διακύμανσης του φορτίου.

Στην Εικόνα 2-16 παρουσιάζεται η επιπρόσθετη ημερήσια ζήτηση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων για τα τρία σενάρια διεύθυνσης. Η αιχμή ζήτησης από την εφαρμογή της στρατηγικής “valley-filling” είναι σχεδόν η μισή της αντίστοιχης στην ελεγχόμενη φόρτιση μέσω διζωνικού τιμολογίου και περίπου διπλάσια της αντίστοιχης της μη ελεγχόμενης φόρτισης. Βέβαια, στη στρατηγική ελεγχόμενης φόρτισης “valley-filling” η ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων κατανέμεται ομοιόμορφα στις ώρες που η κατανάλωση του συστήματος είναι ελάχιστη. Το γεγονός αυτό συμβάλει στη μείωση της διαφοράς μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης ημερήσιας ζήτησης βελτιώνοντας με αυτό τον τρόπο τον συντελεστή φορτίου του συστήματος.

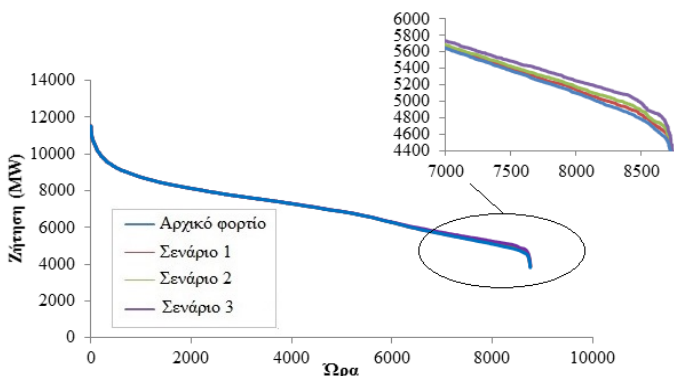
Στην Εικόνα 2-17 απεικονίζεται η επίδραση του επιπρόσθετου φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων στην ημερήσια καμπύλη φορτίου του Ελληνικού συστήματος ενέργειας εφαρμόζοντας τη στρατηγική φόρτισης “valley-filling”. Το συμπέρασμα αυτό αποδεικνύεται και από την τροποποιημένη ετήσια καμπύλη φορτίου του Ελληνικού συστήματος ενέργειας. Στη συγκεκριμένη στρατηγική αυξάνεται το φορτίο βάσης του συστήματος. Ως εκ τούτου, το επιπρόσθετο φορτίο ζήτησης εξυπηρετείται από τις πιο οικονομικές μονάδες παραγωγής.



Εικόνα 2-16 Ημερήσιο προφίλ ζήτησης ηλεκτρικών οχημάτων – ελεγχόμενη φόρτιση “valley-filling”



Εικόνα 2-17 Τροποποιημένη ημερήσια καμπύλη φορτίου του Ελληνικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας – ελεγχόμενη φόρτιση “valley-filling” (χειμώνας)



Εικόνα 2-18 Τροποποιημένη ετήσια καμπύλη φορτίου του Ελληνικού συστήματος – ελεγχόμενη φόρτιση “valley-filling”

## 2.3 Επίδραση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων στο σύστημα παραγωγής

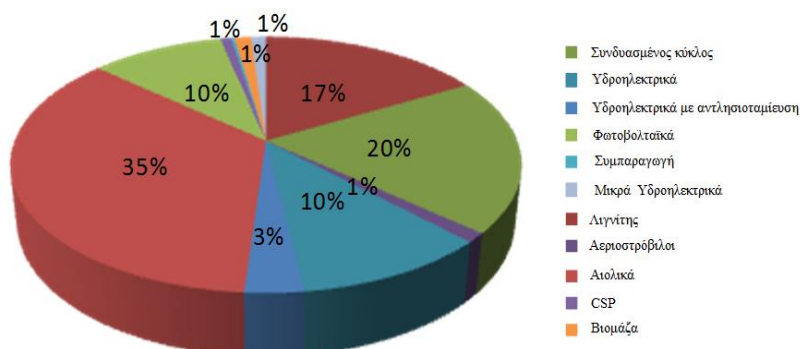
### 2.3.1 Ανάλυση συστήματος παραγωγής για το Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα

Για την ανάλυση του συστήματος παραγωγής για το διασυνδεδεμένο σύστημα παραγωγής, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα ROM Model, το οποίο έχει αναπτυχθεί από το Πανεπιστήμιο Comillas και επιτρέπει την οικονομικό-περιβαλλοντική ανάλυση ενός συστήματος παραγωγής. Αναλυτικότερα, τα τεχνικά χαρακτηριστικά και η λειτουργία του προγράμματος ROM Model περιγράφονται στο πρόγραμμα MERGE [102].

Η μελέτη για το Ελληνικό σύστημα παραγωγής αφορά στο έτος 2020. Τα δεδομένα εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν για την παρούσα ανάλυση παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-6. Όσον αφορά στο μείγμα παραγωγής για το διασυνδεδεμένο σύστημα, η Εικόνα 2-19 απεικονίζει το ποσοστό συμμετοχής για κάθε τύπο μονάδων στη συνολική εγκαταστημένη ισχύ παραγωγής.

Πίνακας 2-6 Δεδομένα για το σύστημα παραγωγής του διασυνδεδεμένου συστήματος

2020		
Ενέργεια	[TWh]	61
Αιχμή ζήτησης	[MW]	11449
Ελάχιστο Φορτίο	[MW]	3762
Λόγος αιχμή/ελάχιστο φορτίο	[p.u.]	3.0
Μέγιστη άνω εφεδρεία	[MW]	1359
Μέγιστη κάτω εφεδρεία	[MW]	229
Λιγνιτικές μονάδες	[MW]	3764
Συνδυασμένου κύκλου	[MW]	4374
Ντίζελ/Αερίου	[MW]	264
Μέγιστη παραγωγή Υδροηλεκτρικών	[MW]	2327
Υδροηλεκτρικά με αντλιοσταμείωση	[MW]	699
Αιολική ισχύς	[MW]	7900
Φωτοβολταϊκή ισχύς	[MW]	2250
CSP	[MW]	185
Συμπαγωγή	[MW]	56
Βιομάζα	[MW]	282
Μικρά υδροηλεκτρικά	[MW]	253



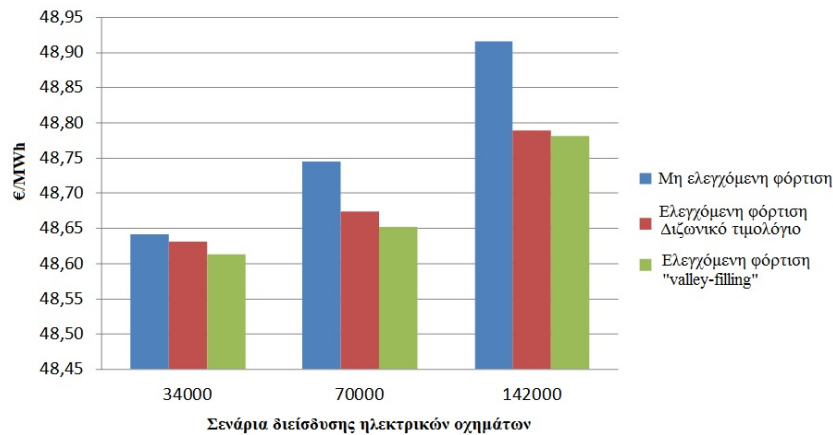
Εικόνα 2-19 Μείγμα παραγωγής για το διασυνδεδεμένο σύστημα - 2020

Όσον αφορά στα ηλεκτρικά οχήματα, διαφορετικά σενάρια διεύθυνσης (ρεαλιστικό, αισιόδοξο, υπεραισιόδοξο) και στρατηγικές φόρτισης (μη ελεγχόμενη, ελεγχόμενη με διζωνικό τιμολόγιο, ελεγχόμενη “valley-filling”) υιοθετήθηκαν σύμφωνα με την ανάλυση της ενότητας 2.2 της παρούσας διατριβής.

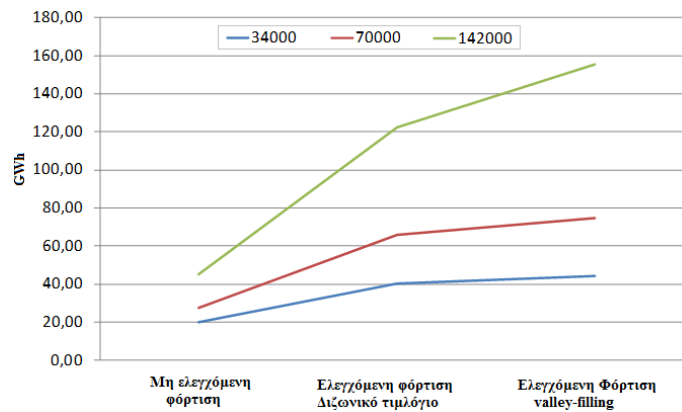
Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του ελληνικού συστήματος παραγωγής, με τη χρήση του λογισμικού ROM Model παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους. Η Εικόνα 2-20 απεικονίζει τη μεταβολή του ετήσιου ειδικού κόστους παραγωγής (€/MWh) για διαφορετικά σενάρια διεύθυνσης και διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης. Όπως είναι αναμενόμενο, η αύξηση της ζήτησης λόγω της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του ειδικού κόστους. Ωστόσο, το ποσοστό αύξησης του ειδικού κόστους εξαρτάται από τον τύπο των μονάδων που τελικά θα εξυπηρετήσουν το επιπρόσθετο φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων. Σύμφωνα με την ανάλυση της ενότητας 2.2 του παρόντος κεφαλαίου, το φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων στη μη ελεγχόμενη φόρτιση συμπίπτει με την περίοδο αυξημένης ζήτησης του δικτύου. Ως εκ τούτου το φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων θα εξυπηρετηθεί από μονάδες αιχμής που παρουσιάζουν υψηλό κόστος παραγωγής. Αντίθετα, στην ελεγχόμενη φόρτιση (διζωνικό τιμολόγιο και “valley-filling”), η ζήτηση των οχημάτων μετατοπίζεται σε ώρες με χαμηλή κατανάλωση, οπότε εξυπηρετείται κυρίως από βασικές μονάδες οι οποίες είναι φθηνότερες. Η παραπάνω παρατήρηση εξηγεί το γεγονός ότι η αύξηση του ετήσιου ειδικού κόστους είναι μικρότερη στην ελεγχόμενη φόρτιση συγκριτικά με την αντίστοιχη της μη ελεγχόμενης φόρτισης. Αναλυτικότερα, η μεταβολή της ετήσιας παραγωγής δύο ενδεικτικών τύπων μονάδων, λιγνιτικές μονάδες (βάσης)



και συνδυασμένου κύκλου (αιχμής), για διαφορετικά σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων και για διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης παρουσιάζονται στην Εικόνα 2-21 και στην Εικόνα 2-22.

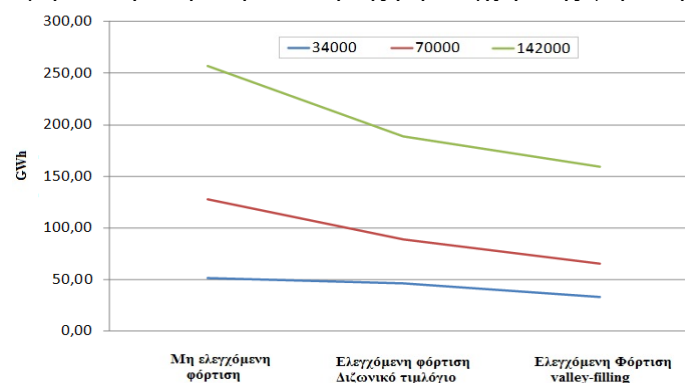


Εικόνα 2-20 Ετήσιο ειδικό κόστος παραγωγής για το διασυνδεδεμένο σύστημα

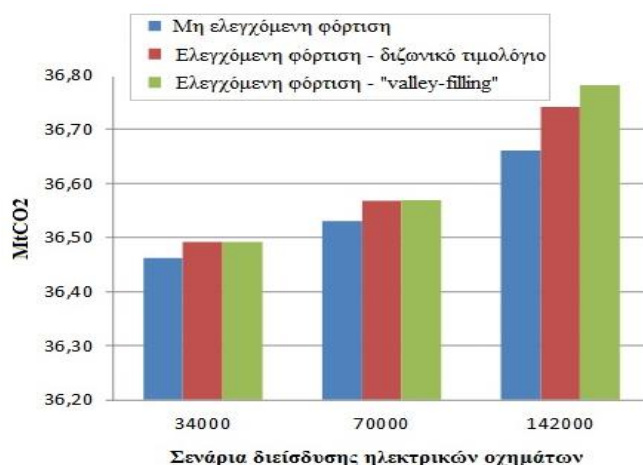


Εικόνα 2-21 Μεταβολή της ετήσια παραγωγής λιγνιτικών μονάδων συγκριτικά με την περίπτωση χωρίς ηλεκτρικά οχήματα

Όσον αφορά στην περιβαλλοντική επίπτωση των ηλεκτρικών οχημάτων, δηλαδή στους επιπρόσθετους ρύπους CO<sub>2</sub> που εκπέμπονται από το σύστημα παραγωγής για να εξυπηρετήσουν το επιπρόσθετο φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων, τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Εικόνα 2-23. Η αύξηση της ζήτησης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, έχει ως αποτέλεσμα, όπως ήταν αναμενόμενο, την αύξηση των εκπεμπόμενων ρύπων. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η εξυπηρέτηση της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων στην περίπτωση της ελεγχόμενης φόρτισης από τις μονάδες βάσεις, που είναι οι περισσότερο ρυπογόνες, έχει ως συνέπεια την μεγαλύτερη αύξηση των ρύπων συγκριτικά με την περίπτωση της μη ελεγχόμενης φόρτισης.



Εικόνα 2-22 Μεταβολή της ετήσια παραγωγής μονάδων συνδυασμένου κύκλου συγκριτικά με την περίπτωση χωρίς ηλεκτρικά οχήματα

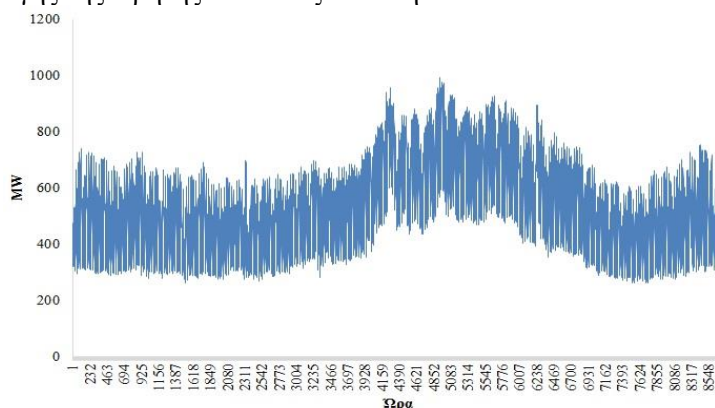


Εικόνα 2-23 Εκπομπές ρύπων για το Ελληνικό σύστημα παραγωγής

### 2.3.2 Ανάλυση συστήματος παραγωγής για το αυτόνομο ηλεκτρικό σύστημα της Κρήτης

Το ηλεκτρικό σύστημα της Κρήτης είναι ένα μεγάλο αυτόνομο σύστημα με κύριο χαρακτηριστικό την υψηλή διείσδυση αιολικής ενέργειας. Η συμβατική παραγωγή αποτελείται από τρεις βασικούς σταθμούς στις τοποθεσίες Λινοπεράματα, Χανιά και Αθρινόλακκος. Το βασικό φορτίο εξυπηρετείται κυρίως από ατμοστρόβιλους και μονάδες ντίζελ, ενώ οι αεριοστρόβιλοι εξυπηρετούν την ημερήσια αιχμή ζήτησης.

Όσον αφορά το φορτίο, το ετήσιο προφίλ ζήτησης που υιοθετήθηκε για τη μελέτη του συστήματος παραγωγής της Κρήτης απεικονίζεται στην Εικόνα 2-24.



Εικόνα 2-24 Εκτιμώμενο προφίλ ζήτησης για το αυτόνομο σύστημα της Κρήτης (2030)

Ο Πίνακας 2-7 απεικονίζει το προφίλ των μονάδων παραγωγής που υιοθετήθηκε για τη μελέτη της επίδρασης της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων στο σύστημα παραγωγής της Κρήτης (2030).

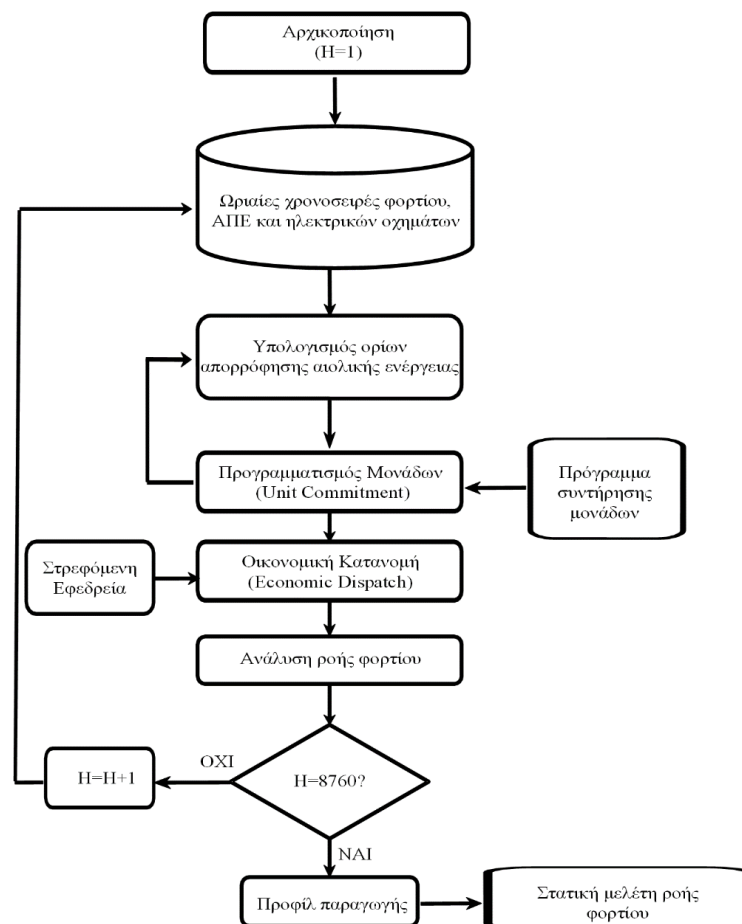
Πίνακας 2-7 Σύστημα παραγωγής Κρήτης – 2030

Όνομα Μονάδας	Περιοχή	Τύπος καυσίμου	Ονομαστική ισχύς (MW)
Ντίζελ 1	Αθρινόλακκος	Ντίζελ	51.2
Ντίζελ 2	Αθρινόλακκος	Ντίζελ	51.2
Ντίζελ 3	Αθρινόλακκος	Ντίζελ	51.2
Ντίζελ 4	Αθρινόλακκος	Ντίζελ	51.2
Ντίζελ 5	Αθρινόλακκος	Ντίζελ	51.0
Ντίζελ 6	Αθρινόλακκος	Ντίζελ	51.0
Ατμό/βίλοι 1	Αθρινόλακκος	Φυσικό αέριο	46.5
Ατμό/βίλοι 2	Αθρινόλακκος	Φυσικό αέριο	46.5
Αερ/βίλοι 1	Λινοπεράματα	Φυσικό αέριο	28.0



Αερ/βίλοι 2	Λινοπεράματα	Φυσικό αέριο	59.4
Αερ/βίλοι 3	Λινοπεράματα	Φυσικό αέριο	59.4
Αερ/βίλοι 4	Χανιά	Φυσικό αέριο	14.7
Αερ/βίλοι 5	Χανιά	Φυσικό αέριο	28.0
Αερ/βίλοι 6	Χανιά	Φυσικό αέριο	43.3
Συνδ. Κύκλος 1	Χανιά	Φυσικό αέριο	45.0
Συνδ. Κύκλος 2	Χανιά	Φυσικό αέριο	45.0
Συνδ. Κύκλος 3	Χανιά	Φυσικό αέριο	45.0
Συνδ. Κύκλος 4	Κορακιά	Φυσικό αέριο	260.0
Συνδ. Κύκλος 5	Κορακιά	Φυσικό αέριο	260.0
WIND	—		340
PV	—		100

Για τη μελέτη του συστήματος παραγωγής της Κρήτης αναπτύχθηκε ένα εργαλείο ένταξης και κατανομής των μονάδων βάσει του λειτουργικού τους κόστους. Το διάγραμμα ροής στην Εικόνα 2-25 περιγράφει την ωριαία προσομοίωση για τον προγραμματισμό και την ένταξη των μονάδων. Για κάθε ώρα ενός έτους, εισάγονται τα δεδομένα εισόδου, δηλαδή η χρονοσειρά του φορτίου, η παραγωγή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η επιπρόσθετη ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων ανάλογα με τη στρατηγική φόρτισης που έχει υιοθετηθεί. Στη συνέχεια, με επαναληπτικό τρόπο, καθορίζεται η ένταξη των μονάδων παραγωγής λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς διεύθυνσης ΑΠΕ, το τεχνικό ελάχιστο των μονάδων, τις απαιτήσεις εφεδρείας και τον προγραμματισμό συντήρησης των μονάδων. Το αποτέλεσμα αυτής της επαναληπτικής διαδικασίας είναι το προφίλ παραγωγής των μονάδων, το οποίο είναι απαραίτητο για την εκτέλεση των ροών φορτίου για την ανάλυση της λειτουργίας του συστήματος μεταφοράς.



Εικόνα 2-25 Διάγραμμα ροής για τον προγραμματισμό και την ένταξη των μονάδων σε ένα σύστημα μεταφοράς

✓ Καθορισμός ορίων απορρόφησης αιολικής ενέργειας

Στην περίπτωση ενός μη διασυνδεδεμένου ηλεκτρικού συστήματος, υιοθετείται ένας συντελεστής μέγιστης απορρόφησης αιολικής ενέργειας, που συνήθως λαμβάνει τιμές από 25% έως 40% του φορτίου, για λόγους ευστάθειας του συστήματος. Επιπρόσθετα, η δυνατότητα απορρόφησης της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας περιορίζεται από το τεχνικό ελάχιστο των μονάδων που είναι ενταγμένες. Το συνολικό τεχνικό ελάχιστο των δεσμευμένων μονάδων καθορίζεται ως εξής:

- i. Αρχικά, γίνεται η παραδοχή ότι όλη η διαθέσιμη αιολική ενέργεια μπορεί να εισαχθεί στο σύστημα:

$$P_w = P_{w_{av}} \quad \text{E 2-1}$$

όπου  $P_w$  είναι η αιολική ενέργεια που εισάγεται στο σύστημα και  $P_{w_{av}}$  η διαθέσιμη αιολική ενέργεια.

- ii. Οι συμβατές μονάδες δεσμεύονται ανάλογα με τη σειρά προτεραιότητας, έτσι ώστε η συνολική τους μέγιστη ισχύς να είναι επαρκής για να εξυπηρετηθεί πλήρως το φορτίο.

$$\sum_{i \in A} P_{max}^i \geq P_L + P_{SR} + P_{ch}^{EV} - P_{dch}^{EV} - P_w - P_{PV} \quad \text{E 2-2}$$

όπου  $P_{max}^i$  είναι η μέγιστη ισχύς που εγγέεται στο σύστημα από τη μονάδα  $i$ ,  $P_L$  είναι το φορτίο του συστήματος,  $P_{SR}$  είναι η στρεφόμενη εφεδρεία,  $P_w$  και  $P_{PV}$  είναι η αιολική και ηλιακή ενέργεια που εγγέεται στο σύστημα αντίστοιχα και  $P_{ch}^{EV}$ ,  $P_{dch}^{EV}$  είναι το συνολικό προφίλ φόρτισης και εκφόρτισης του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων. Η μέγιστη αιολική ενέργεια που μπορεί να απορροφήσει το σύστημα είναι:

$$P_{w_{max}} = P_L + P_{ch}^{EV} - P_{PV} - \sum_{i \in A} P_{min}^i \quad \text{E 2-3}$$

όπου  $\sum_{i \in A} P_{min}^i$  αναφέρεται στο τεχνικό ελάχιστο της μονάδας  $i$ .

- iii. Στην περίπτωση που το  $P_{w_{max}}$  είναι μικρότερο της διαθέσιμης αιολικής ενέργειας  $P_{w_{av}}$ , τότε θεωρείται ότι  $P_w = P_{w_{max}}$  και η διαδικασία επαναλαμβάνεται από το βήμα ii). Διαφορετικά, θεωρείται ότι  $P_w = P_{w_{av}}$  και η διαδικασία τερματίζεται.

✓ Ένταξη μονάδων παραγωγής

Γενικά, τα κριτήρια φόρτισης μιας μονάδας σχετίζονται με την ειδική κατανάλωση καυσίμου, την προηγούμενη κατάσταση της μονάδας και την εκτίμηση φορτίου. Πιο συγκεκριμένα, η λειτουργία των συμβατικών μονάδων του αυτόνομου νησιωτικού συστήματος βασίζεται στους ακόλουθους κανόνες:

- Η παραγωγή ΑΠΕ εντάσσεται κατά προτεραιότητα, ωστόσο η συνεισφορά τους στο συνολικό μείγμα παραγωγής δεν πρέπει να ξεπερνά το 40%.
- Οι συμβατικές μονάδες παραγωγής εντάσσονται κατά σειρά προτεραιότητας βάσει του κόστους λειτουργίας τους (merit order). Η σειρά ένταξης μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των μονάδων λόγω βλάβης ή συντήρησης.
- Οι μονάδες βάσης Ατμοστρόβιλοι 1 και 2 δε σβήνουν παρά μόνο όταν αυτό επιβάλλεται από το μακροπρόθεσμο προγραμματισμό (εβδομαδιαίο ή μηνιαίο)
- Οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου είναι δυνατό να σβήνουν μία φορά την εβδομάδα και συγκεκριμένα εντός του Σαββατοκύριακου όπου η κατανάλωση είναι χαμηλή. Στην περίπτωση αυτή, οι μονάδες αυτές δεν επιτρέπεται να ενταχθούν σε λειτουργία πριν από το πρωί της Δευτέρας.
- Οι μονάδες ντίζελ μπορούν να διακοπούν έως 3 φορές την εβδομάδα. Οι μονάδες ντίζελ πρέπει να λειτουργούν κατ' ελάχιστο έξι ώρες για να ενταχθούν. Εναλλακτικά, όταν οι ανάγκες περιορίζονται σε λιγότερες ώρες προτιμάται η ένταξη αεριοστρόβιλων.
- Για τους αεριοστρόβιλους δεν τίθεται κανένας περιορισμός έναυσης και σβέσης και ως εκ τούτου αξιοποιούνται κατά τη διάρκεια αιχμών ζήτησης.
- Για τη συντήρηση των μονάδων, υιοθετείται προκαθορισμένο πρόγραμμα συντήρησής ανά έτος

✓ Στρεφόμενη εφεδρεία συστήματος

Ο καθορισμός της απαιτούμενης ποσότητας για στρεφόμενη εφεδρεία εξαρτάται από το συνολικό φορτίο καθώς και από την παραγωγή των αιολικών πάρκων. Αναλυτικότερα, θα πρέπει να πληρούνται τα ακόλουθα κριτήρια:

1. Όταν η παραγωγή των αιολικών πάρκων είναι μηδενική ή είναι εκτός λειτουργίας, η στρεφόμενη εφεδρεία για λόγους ευστάθειας του συστήματος ορίζεται τουλάχιστον ίση με το 15% του εκάστοτε φορτίου του συστήματος.
2. Όταν τα αιολικά πάρκα παράγουν ενέργεια, η στρεφόμενη εφεδρεία είναι τουλάχιστον ίση με την εκάστοτε αιολική παραγωγή.
3. Η στρεφόμενη εφεδρεία θα πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με τη μέγιστη παραγωγή των συμβατικών μονάδων.

✓ Οικονομική Κατανομή

Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής περιγράφεται παρακάτω:

$$\min C_{TC}^t = \sum_{m=1}^M C_{G,m}^t(P_{G,m}^t) \quad \text{E 2-4}$$

όπου  $t$  είναι το εξεταζόμενο χρονικό διάστημα,  $M$  είναι ο αριθμός των διαθέσιμων μονάδων παραγωγής,  $C_{G,m}^t$  είναι το κόστος παραγωγής της ενεργού ισχύος από τη μονάδα  $m$ , και  $P_{G,m}^t$  είναι η παραγωγή ενεργού ισχύος της μονάδας. Οι αντίστοιχοι περιορισμοί για το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής είναι οι εξής:

- Περιορισμός της ισορροπίας της πραγματικής ισχύος:

$$\sum_{m=1}^M P_{G,m} - P_D + P_{ch}^{EV} - P_{losses} = 0 \quad \text{E 2-5}$$

όπου  $P_{G,m}$  είναι η παραγωγή ενεργού ισχύος της μονάδας,  $M$  είναι ο συνολικός αριθμός των μονάδων,  $P_D$  η συμβατική ζήτηση του δικτύου,  $P_{ch}^{EV}$  το προφίλ φόρτισης του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων, και  $P_{losses}$  είναι οι απώλειες του συστήματος μεταφοράς.

- Όρια λειτουργίας των μονάδων:

$$P_{G,m}^{min} \leq P_{G,m} \leq P_{G,m}^{max}$$

όπου  $P_{G,m}$  είναι η παραγωγή ενεργού ισχύος της μονάδας  $m$  και  $P_{G,m}^{min}$ ,  $P_{G,m}^{max}$  αποτελούν την ελάχιστη και τη μέγιστη ισχύ που η μονάδα  $m$  μπορεί να παράγει.

- Περιορισμοί της στρεφόμενης εφεδρείας:

$$P_{G,m}^{min} \leq P_{G,m} + P_{SR,m} \leq P_{G,m}^{max} \\ P_{SR,m} \geq P_{SR,m}^{min}$$

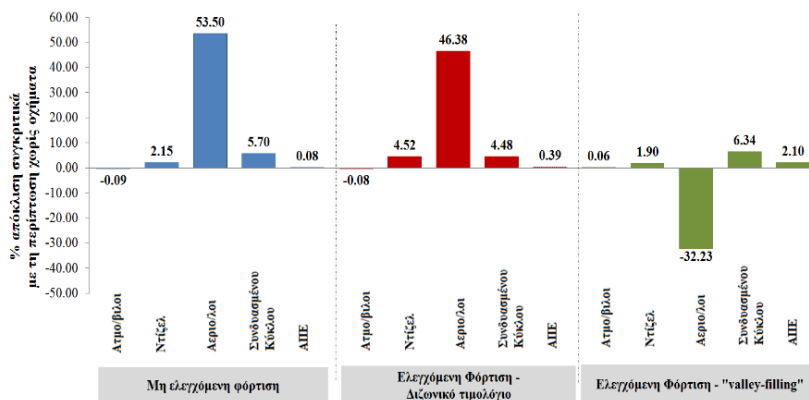
όπου  $P_{SR,m}$  η στρεφόμενη εφεδρεία που δίνει η μονάδα  $m$ , και  $P_{SR,m}^{min}$  η ελάχιστη στρεφόμενη εφεδρεία της μονάδας  $m$ .

Η μέθοδος για τον προγραμματισμό και την κατανομή των μονάδων παραγωγής εφαρμόστηκε στο αυτόνομο σύστημα της Κρήτης για ένα έτος με σκοπό τη μελέτη της επίδρασης της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων στο μείγμα του συστήματος παραγωγής, εξετάζοντας διαφορετικά σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων και στρατηγικών φόρτισης. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων παρουσιάζονται και αναλύονται στις επόμενες παραγράφους.

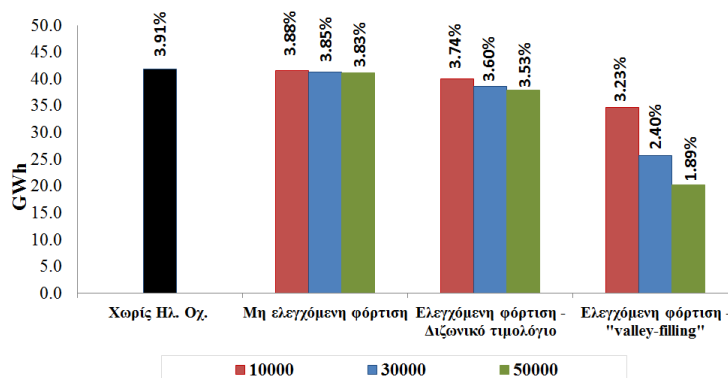
Η Εικόνα 2-26 απεικονίζει την ποσοστιαία μεταβολή της ετήσιας παραγωγής για κάθε τύπο μονάδας λόγω της διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων (αισιόδοξο σενάριο - 30000 οχήματα), εξετάζοντας διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης. Τα εξαγόμενα ποσοστά αφορούν στην μεταβολή της παραγωγής συγκριτικά με την αντίστοιχη ετήσια παραγωγή για το σενάριο χωρίς ηλεκτρικά οχήματα. Η πιο σημαντική μεταβολή παρατηρείται στην παραγωγή των αεριοστρόβιλων, που είναι από τις πιο ακριβές μονάδες παραγωγής. Στη περίπτωση της μη ελεγχόμενης φόρτισης, το φορτίο από τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων προστίθεται στην αιχμή του δικτύου με αποτέλεσμα να απαιτείται μεγαλύτερη παραγωγή από τις μονάδες αιχμής (αεριοστρόβιλοι). Παρόμοια είναι η περίπτωση της ελεγχόμενης φόρτισης μέσω διζωνικού τιμολογίου, καθώς ο ταυτοχρονισμός της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων στην έναρξη της περιόδου χαμηλής τιμολόγησης δημιουργεί απότομη αιχμή ζήτησης. Αντίθετα, στην περίπτωση της ελεγχόμενης φόρτισης “valley-filling” η

ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων μετατοπίζεται προς τις ώρες με χαμηλή κατανάλωση και εξυπηρετείται από αιολική παραγωγή και συμβατικές μονάδες (ντίζελ και συνδυασμένου κύκλου). Η συνεισφορά των ηλεκτρικών οχημάτων στην απορρόφηση μεγαλύτερης αιολικής παραγωγής επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα στην Εικόνα 2-27, που απεικονίζει την ετήσια αποκοπή αιολικής ενέργειας. Τα ποσοστά στο διάγραμμα αφορούν στην αποκοπή ως προς τη διαθέσιμη ετήσια αιολική παραγωγή. Σε όλα τα σενάρια φόρτισης, το επιπρόσθετο φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων συνεισφέρει στη μείωση της αποκοπής αιολικής ενέργειας, η οποία ελαχιστοποιείται με την υιοθέτηση της ελεγχόμενης φόρτισης “valley-filling”.

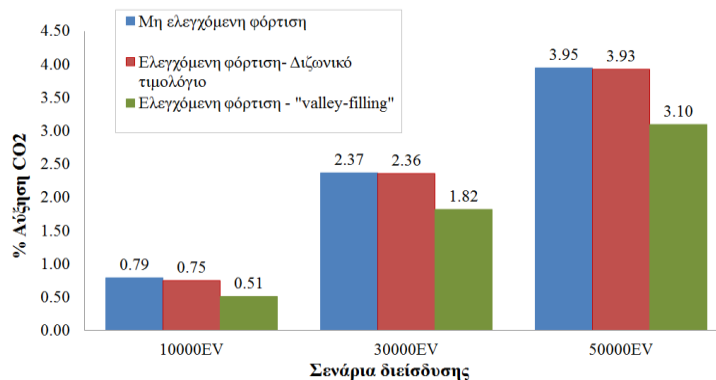
Ένα από τα σημαντικότερα ερωτήματα που αφορούν στην ηλεκτροκίνηση είναι το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των ηλεκτρικών οχημάτων. Τα ηλεκτρικά οχήματα που χρησιμοποιούν μόνο μπαταρία για τη μετακίνησή τους (BEV) θεωρούνται οχήματα με μηδενικές εκπομπές ρύπων. Αυτό είναι αληθές, ωστόσο, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των μονάδων παραγωγής που εξυπηρετούν τις ενεργειακές ανάγκες μετακίνησης των ηλεκτρικών οχημάτων. Η Εικόνα 2-28 απεικονίζει τις ετήσιες εκπομπές ρύπων του συστήματος παραγωγής της Κρήτης για διαφορετικά σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων και διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης. Όπως ήταν αναμενόμενο, η αύξηση της ετήσιας παραγωγής λόγω της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των εκπομπών CO<sub>2</sub>. Η αύξηση των εκπεμπόμενων ρύπων αποδεικνύεται ότι επηρεάζεται τόσο έντονα από τη στρατηγική φόρτισης όσο από το ποσοστό διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων. Η μετατόπιση της ζήτησης των οχημάτων, στην περίπτωση της ελεγχόμενης φόρτισης “valley-filling”, συνεισφέρει στην απορρόφηση μεγαλύτερων ποσοστών ΑΠΕ, ωστόσο, αυτό αντισταθμίζεται από το γεγονός ότι η ζήτησή τους εξυπηρετείται από ρυπογόνες μονάδες.



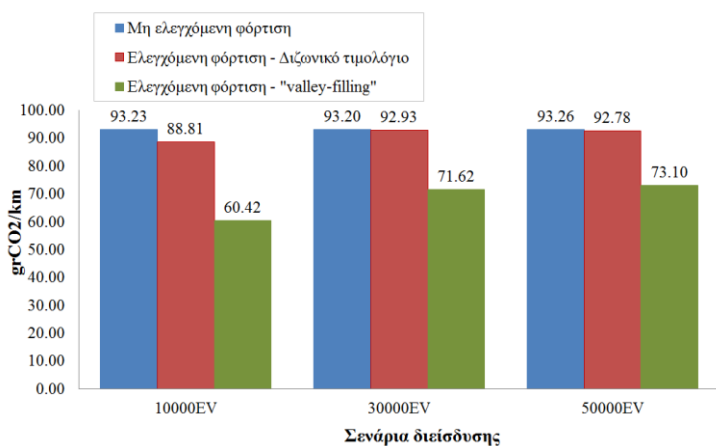
Εικόνα 2-26 Μεταβολή του ετήσιου προφίλ παραγωγής της Κρήτης λόγω διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων – 30000 ηλεκτρικά οχήματα (σενάριο αναφοράς η περίπτωση χωρίς ηλεκτρικά οχήματα)



Εικόνα 2-27 Ετήσια αποκοπή αιολικής ενέργειας της Κρήτης για διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης και διαφορετικά σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων



**Εικόνα 2-28** Ετήσιες εκπομπές CO<sub>2</sub> του συστήματος παραγωγής της Κρήτης για διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης και διαφορετικά σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων



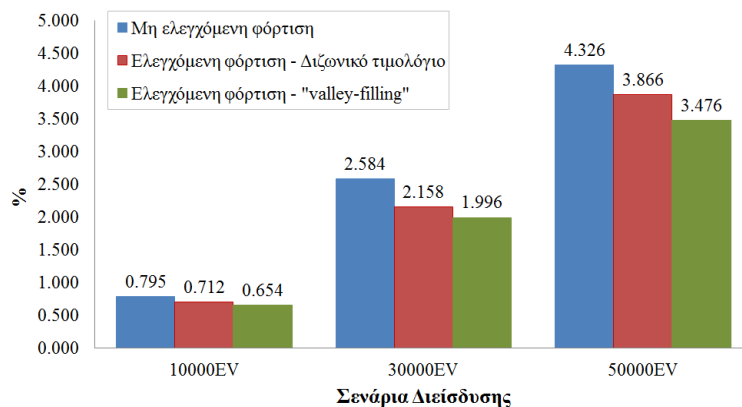
**Εικόνα 2-29** Αποτύπωμα CO<sub>2</sub> των ηλεκτρικών οχημάτων για διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης και διαφορετικά σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων

Από τα αποτελέσματα στην Εικόνα 2-28 αποδεικνύεται ότι μπορεί τα ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρίας να έχουν μηδενικές εκπομπές ρύπων, ωστόσο, οι έμμεσες εκπομπές για την εξυπηρέτηση των ενεργειακών τους αναγκών θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στις περιβαλλοντικές μελέτες. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της μελέτης για τον υπολογισμό των ισοδύναμων εκπομπών CO<sub>2</sub> (grCO<sub>2</sub>/km) των ηλεκτρικών οχημάτων ( Εικόνα 2-29). Σύμφωνα με την κοινοτική οδηγία *EU Regulation No 443/2009*, οι επιτρεπόμενες εκπομπές ρύπων των συμβατικών οχημάτων για το 2015 είναι 130grCO<sub>2</sub>/km και 95grCO<sub>2</sub>/km για το 2021. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στην Εικόνα 2-29, οι αντίστοιχες ισοδύναμες εκπομπές ρύπων CO<sub>2</sub> για τα ηλεκτρικά οχήματα είναι χαμηλότερες του στόχου για το 2021. Η υιοθέτηση πιο ευέλικτων στρατηγικών φόρτισης (“valley-filling”) συνεισφέρει στην περαιτέρω μείωση των ισοδύναμων εκπομπών CO<sub>2</sub> των ηλεκτρικών οχημάτων. Η συσχέτιση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων με την παραγωγή ΑΠΕ, ειδικότερα αν συνδυαστεί και με αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ, συνεισφέρει στην ελαχιστοποίηση των έμμεσων εκπεμπόμενων ρύπων CO<sub>2</sub> των ηλεκτρικών οχημάτων.

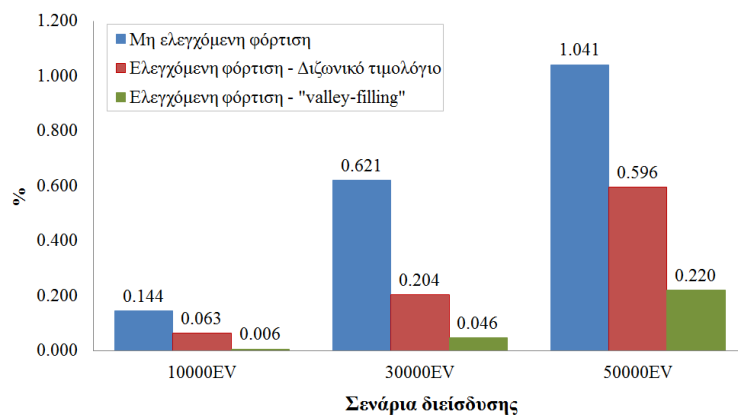
Στη συνέχεια, αναλύεται η επίδραση των ηλεκτρικών οχημάτων στο κόστος λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης. Με σενάριο αναφοράς το κόστος λειτουργίας και συντήρησης του συστήματος για την περίπτωση όπου η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων είναι μηδενική, η Εικόνα 2-30 απεικονίζει την ποσοστιαία μεταβολή του κόστους παραγωγής για διαφορετικά σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων και στρατηγικές φόρτισης. Η ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο συντελεί στην αύξηση του συνολικού κόστους λειτουργίας του συστήματος, όπως ήταν αναμενόμενο. Η υιοθέτηση πιο σύνθετων στρατηγικών φόρτισης (“valley-filling”) δεν επηρεάζει το κόστος λειτουργίας του συστήματος όσο τα ποσοστά διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι μικρά. Καθώς ο αριθμός των διασυνδεδεμένων

ηλεκτρικών οχημάτων αυξάνεται, η εφαρμογή πιο ευφυών αλγορίθμων διαχείρισης τους έχει μεγαλύτερη συνεισφορά στον περιορισμό της αύξησης του κόστους λειτουργίας του συστήματος παραγωγής.

Για τη βαθύτερη κατανόηση των οικονομικών οφελών της υιοθέτησης εξελιγμένων αλγορίθμων διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων, η Εικόνα 2-31 παρουσιάζει την ποσοστιαία μεταβολή του ειδικού κόστους λειτουργίας του συστήματος για διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης και διαφορετικά σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων. Το ειδικό κόστος λειτουργίας και συντήρησης (€/MWh) ορίζεται ως το πηλίκο της διαίρεσης του συνολικού ετήσιου κόστους λειτουργίας του συστήματος δια τη συνολική ετήσια κατανάλωση του δικτύου. Η “plug-n-play” ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο της Κρήτης, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους ενέργειας. Η υιοθέτηση διζωνικής τιμολόγησης για τη μετατόπιση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων σε ώρες με χαμηλή κατανάλωση συντελεί στον περιορισμό της αύξησης του κόστους ενέργειας. Η εφαρμογή εξελιγμένων αλγορίθμων διαχείρισης της φόρτισης μεγιστοποιεί τα οικονομικά οφέλη συντελώντας σε πολύ μικρές ή μηδενικές μεταβολές του ειδικού κόστους.



Εικόνα 2-30 Ποσοστιαία μεταβολή κόστους λειτουργίας και συντήρησης του συστήματος της Κρήτης για διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης και διαφορετικά σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων



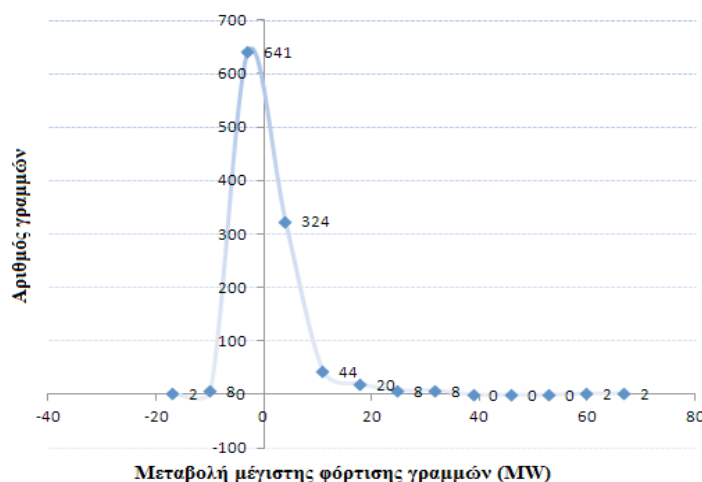
Εικόνα 2-31 Ποσοστιαία μεταβολή ειδικού κόστους λειτουργίας και συντήρησης του συστήματος της Κρήτης για διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης και διαφορετικά σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων

## 2.4 Επίδραση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων στο σύστημα μεταφοράς

### 2.4.1 Μη Ελεγχόμενη Φόρτιση

Η επιπρόσθετη ζήτηση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων επηρεάζει το βέλτιστο σημείο του ενεργειακού προγραμματισμού των μονάδων παραγωγής του συστήματος με αποτέλεσμα να μεταβάλλονται και οι ροές ισχύος στις γραμμές του δικτύου μεταφοράς. Η Εικόνα 2-32

παρουσιάζει το ιστόγραμμα της μεταβολής της μέγιστης φόρτισης των γραμμών μεταφοράς για την περίπτωση της μη ελεγχόμενης φόρτισης με μεγάλη διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων, εν συγκρίσει με τα επίπεδα φόρτισης των γραμμών πριν την ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων. Στο μεγαλύτερο ποσοστό των γραμμών που αυξάνεται η μέγιστη φόρτιση τους, η αύξηση αυτή δεν ξεπερνάει τα 10MW.



Εικόνα 2-32 Ιστόγραμμα μεταβολής της μέγιστης φόρτισης των γραμμών μεταφοράς του Ελληνικού συστήματος – μη ελεγχόμενη φόρτιση

Ο Πίνακας 2-8 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της μη ελεγχόμενης φόρτισης για το Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς, όσον αφορά στη μεταβολή των ροών ισχύος στις γραμμές μεταφοράς. Σε ορισμένες γραμμές (με κόκκινο χρώμα) παρατηρείται αύξηση της ροής ισχύος, ενώ σε άλλες γραμμές παρατηρείται μείωση της ροής ισχύος (με πράσινο χρώμα). Η γραμμή με τη μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση στην τιμή της μέγιστης φόρτισης της (192%) είναι η γραμμή διασύνδεσης 19811-15011-1 (ΠΓΔΜ - KYT Θεσσαλονίκης). Η αύξηση του φορτίου του συστήματος τις ώρες υψηλής κατανάλωσης λόγω της μη ελεγχόμενης φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των εισερχόμενων ροών ισχύος από τις διασυνδέσεις, που καλύπτουν πλέον ένα μεγάλο ποσοστό των ενεργειακών αναγκών την ηλεκτρικών οχημάτων. Η μείωση των ροών ισχύος εμφανίζεται σε περιοχές όπου υπήρχε αυξημένη παραγωγή για την εξυπηρέτηση απομακρυσμένων φορτίων, πριν τη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων, και μέρος της αξιοποιείται στη συνέχεια για την εξυπηρέτηση των ενεργειακών αναγκών φόρτισης τους.

Παρά την αύξηση των ροών ισχύος πάνω σε συγκεκριμένες γραμμές, σε καμία περίπτωση δεν παρατηρείται παραβίαση των θερμικών ορίων τους.

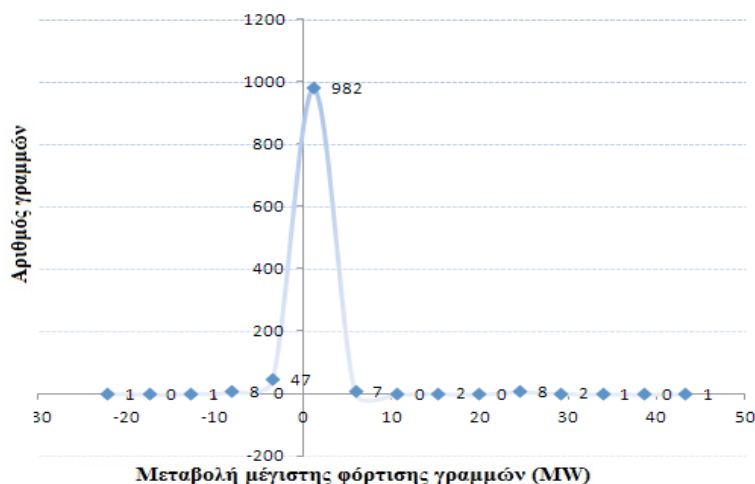
Πίνακας 2-8 Γραμμές μεταφοράς με τη μεγαλύτερη αύξηση στη μέγιστη φόρτισή τους – μη ελεγχόμενη φόρτιση

Κωδικός Γραμμής	Θερμικό Όριο (MW)	Μέγιστη Φόρτιση γραμμών μεταφοράς		
		Μηδενική Διείσδυση Οχημάτων (MW)	Υψηλή Διείσδυση Οχημάτων (MW)	Μεταβολή Μέγιστης Φόρτισης (%)
19811-15011-1	1400	389.8	1137.8	191.87
30011-22011-1	1400	501.5	568.9	13.44
30011-22011-2	1400	501.5	568.9	13.44
30011-23011-1	1400	472.0	533.8	13.09
30011-23011-2	1400	472.0	533.8	13.09
43113-43016-1	1400	232.6	266.8	14.66
43016-43013-1	1400	232.0	266.0	14.61
43111-43012-1	1400	231.4	265.1	14.56
16011-15011-1	1400	213.1	245.7	15.30
16011-15011-2	1400	213.1	245.7	15.30
34011-23011-1	1400	632.7	664.3	5.01
26636-26632-1	202	131.3	161.8	23.23
26835-26636-1	202	129.4	159.0	22.87
40011-30011-1	1400	386.3	412.6	6.83

40011-30011-2	1400	386.3	412.6	6.83
40011-30011-3	1400	382.1	408.2	6.83
40011-30011-4	1400	382.1	408.2	6.83
70011-34011-1	1400	342.1	367.5	7.42
70011-34011-2	1400	342.1	367.5	7.42
40436-40231-1	202	82.6	106.2	28.57
40536-40436-1	202	82.4	105.8	28.40
88011-71011-1	1400	214.1	235.0	9.76
27031-26435-1	202	87.0	107.5	23.56
27134-26836-1	202	105.5	125.8	19.24
26536-26435-1	202	85.9	105.9	23.28
71011-70011-1	1400	275.2	254.6	-7.49
23011-21011-1	1400	225.2	209.3	-7.06
71036-71011-1	1400	243.6	233.2	-4.27
64331-64131-1	202	64.7	54.9	-15.15
21011-16011-1	1400	281.0	272.3	-3.13
21011-16011-2	1400	281.0	272.3	-3.13
22011-15011-1	1400	331.6	323.5	-2.44
22011-15011-2	1400	331.6	323.5	-2.44
88011-34011-1	1400	372.4	365.0	-1.99
62031-61031-1	202	156.1	149.0	-4.55
83634-83331-1	202	62.0	55.8	-9.84
83734-83634-1	175	62.0	55.8	-9.84
64536-63335-1	202	61.9	55.8	-9.85
63335-63331-1	202	61.9	55.7	-9.85

#### 2.4.2 Ελεγχόμενη Φόρτιση – “valley-filling”

Η Εικόνα 2-33 παρουσιάζει το ιστόγραμμα της μεταβολής της μέγιστης φόρτισης των γραμμών μεταφοράς για την περίπτωση της ελεγχόμενης φόρτισης (“valley-filling”) με μεγάλη διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων, εν συγκρίσει με τα επίπεδα φόρτισης των γραμμών πριν την ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων. Στο μεγαλύτερο ποσοστό των γραμμών που αυξάνεται η μέγιστη φόρτιση τους, η αύξηση αυτή δεν ξεπερνάει τα 2MW. Συγκριτικά με τα αποτελέσματα της μη ελεγχόμενης φόρτισης, η μετατόπιση της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων σε ώρες χαμηλής κατανάλωσης μειώνει σημαντικά την επιβάρυνση των γραμμών μεταφοράς.



Εικόνα 2-33 Ιστόγραμμα μεταβολής της μέγιστης φόρτισης των γραμμών μεταφοράς του Ελληνικού συστήματος – ελεγχόμενη φόρτιση “valley-filling”

Ο Πίνακας 2-9 παρουσιάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της ελεγχόμενης φόρτισης (“valley-filling”) για το Ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς, όσον αφορά στη μεταβολή των ροών ισχύος στις γραμμές μεταφοράς. Σε ορισμένες γραμμές (με κόκκινο χρώμα) παρατηρείται



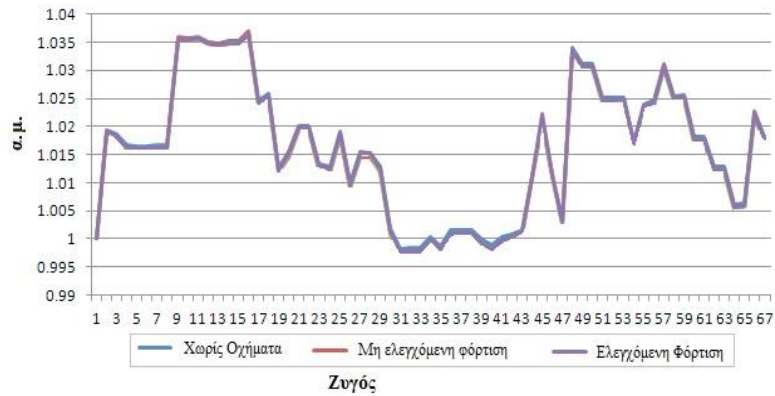
αύξηση της ροής ισχύος, ενώ σε άλλες γραμμές παρατηρείται μείωση της ροής ισχύος (με πράσινο χρώμα). Η μεγαλύτερη αύξηση της μέγιστης φόρτισης των γραμμών είναι 45.5MW, που είναι σαφώς μικρότερη από την αντίστοιχη μέγιστη αύξηση της μη ελεγχόμενης φόρτισης (748MW). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ελεγχόμενη φόρτιση δεν απαιτεί την εισαγωγή επιπρόσθετης ενέργειας από τις διασυνδέσεις, καθώς πραγματοποιείται τις ώρες του βασικού φορτίου.

Η γραμμή με την μεγαλύτερη επιβάρυνση στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η γραμμή που συνδέει το βόρειο τμήμα του ηλεκτρικού δικτύου με το νότιο. Η μεταβολή αυτή παρατηρείται τη χρονική στιγμή με την ελάχιστη κατανάλωση του συστήματος καθώς το φορτίο εξυπηρετείται από τις μονάδες που βρίσκονται στο βόρειο τμήμα του δικτύου. Η αύξηση του φορτίου στο νότιο τμήμα του δικτύου, λόγω της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, έχει ως συνέπεια την αύξηση της ροής ισχύος στη συγκεκριμένη γραμμή.

Όσον αφορά στο προφίλ της τάσης του Ελληνικού διασυνδεδεμένου συστήματος μεταφοράς, δεν παρατηρούνται σημαντικές διαφοροποιήσεις μετά τη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων, ανεξαρτήτως της στρατηγικής φόρτισης που υιοθετείται. Ενδεικτικά, η Εικόνα 2-34 απεικονίζει τη μέση τιμή της τάσης για διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης αποδεικνύοντας ότι το προφίλ της τάσης δεν επηρεάζεται αισθητά από το επιπρόσθετο φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων.

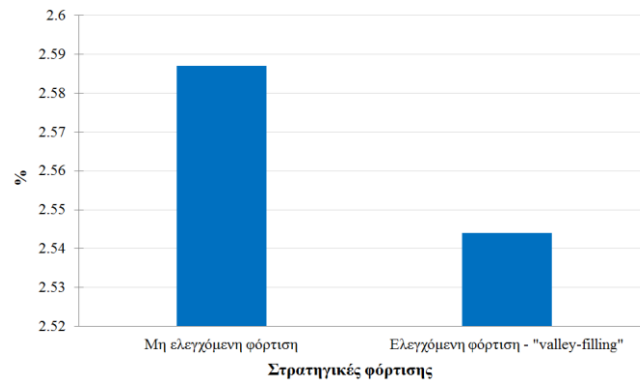
**Πίνακας 2-9 Γραμμές μεταφοράς με τη μεγαλύτερη αύξηση στη μέγιστη φόρτισή τους –“valley-filling”**

Κωδικός Γραμμής	Μέγιστη Φόρτιση γραμμών μεταφοράς			
	Θερμικό Όριο (MW)	Μηδενική Διείσδυση Οχημάτων (MW)	Υψηλή Διείσδυση Οχημάτων (MW)	Ποσοστιαία Μεταβολή Μέγιστης Φόρτισης (%)
88011-71011-1	1400	214.1	259.6	21.25
34011-23011-1	1400	632.7	667.8	5.55
30011-22011-1	1400	501.5	529.1	5.50
30011-22011-2	1400	501.5	529.1	5.50
40011-30011-1	1400	386.3	413.0	6.91
40011-30011-2	1400	386.3	413.0	6.91
40011-30011-3	1400	382.1	408.6	6.94
40011-30011-4	1400	382.1	408.6	6.94
30011-23011-1	1400	472.0	498.3	5.57
30011-23011-2	1400	472.0	498.3	5.57
23013-21011-1	1400	490.6	516.8	5.34
34011-23014-1	1400	485.4	510.9	5.25
70011-34011-1	1400	342.1	357.7	4.56
70011-34011-2	1400	342.1	357.7	4.56
19331-19131-1	202	83.4	58.9	-29.38
27041-24033-1	202	85.1	73.1	-14.10
23011-22011-1	1400	270.3	260.3	-3.70
23011-22011-2	1400	270.3	260.3	-3.70
35531-35031-1	202	56.0	46.4	-17.14
27436-24033-1	202	60.0	51.1	-14.83
27531-27435-1	202	60.0	51.1	-14.83
27531-27436-1	202	60.0	51.1	-14.83
27435-27031-1	202	60.0	51.1	-14.83
35531-34131-1	202	59.3	52.8	-10.96
16031-12135-1	202	35.1	29.5	-15.95
14532-12135-1	202	35.0	29.4	-16.00
61033-61011-1	1400	100.5	95.3	-5.17



Εικόνα 2-34 Μέση τάση στους ζυγούς του συστήματος μεταφοράς για διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης

Η Εικόνα 2-35 απεικονίζει τις απώλειες του διασυνδεδεμένου συστήματος μεταφοράς ως ποσοστό του φορτίου του συστήματος. Η υιοθέτηση ευέλικτων στρατηγικών φόρτισης και η μετατόπιση του φορτίου σε ώρες μη αιχμής μειώνει ελαφρώς τις συνολικές απώλειες του δικτύου μεταφοράς.



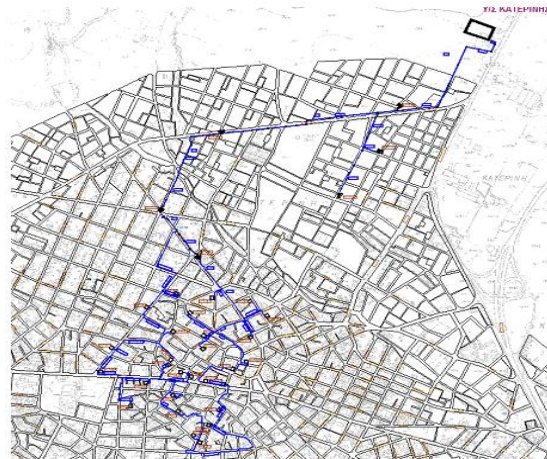
Εικόνα 2-35 Απώλειες του συστήματος μεταφοράς για διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης

## 2.5 Επίδραση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο διανομής

Η επίδραση των ηλεκτρικών οχημάτων σε επιλεγμένα δίκτυα διανομής πραγματοποιείται αναλύοντας τη μόνιμη κατάσταση λειτουργίας των δικτύων και λαμβάνοντας ως δεδομένα τις ωριαίες χρονικές σειρές φορτίου και παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Δύο ενδεικτικά δίκτυα διανομής μέσης τάσης, ένα επαρχιακό και ένα αστικό, θα εξεταστούν με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση του επιπρόσθετου φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων σε δίκτυα με διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά. Τα εξεταζόμενα δίκτυα είναι μια αστική γραμμή διανομής του δικτύου της Κατερίνης και μια γραμμή διανομής μέσης τάσης του δικτύου της Κατερίνης.

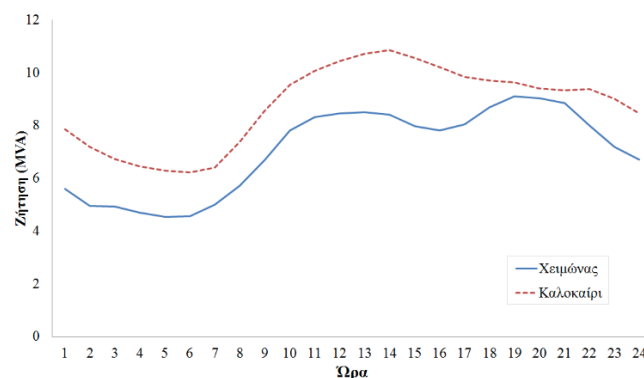
### 2.5.1 Αστικό δίκτυο διανομής μέσης τάσης της Κατερίνης (20kV)

Η γραμμή διανομής που θα εξεταστεί αποτελεί τμήμα του αστικού δικτύου διανομής Μ.Τ. της Κατερίνης και παρουσιάζεται με μπλε χρώμα στην Εικόνα 2-36. Η εξεταζόμενη γραμμή διανομής περιλαμβάνει 35 υποσταθμούς φορτίου ΜΤ/ΧΤ με ονομαστική ισχύ: 3 των 160KVA, 1 των 250KVA, 3 των 400KVA, 1 των 500KVA, 22 των 630KVA, 1 των 100kVA και 4 των 1260KVA. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του κεντρικού μετασχηματιστή (ΥΤ/ΜΤ) της γραμμής είναι 25ΜVA. Το μονογραμμικό διάγραμμα του δικτύου της Κατερίνης απεικονίζεται στο Παράρτημα Α.



Εικόνα 2-36 Γραμμή διανομής μέσης τάσης του δικτύου της Κατερίνης

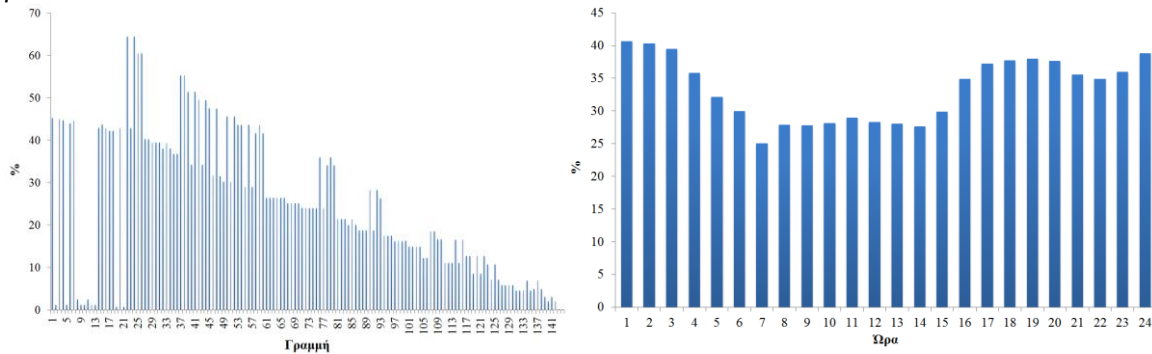
Η Εικόνα 2-37 απεικονίζει δύο τυπικές ημερήσιες καμπύλες φορτίου του δικτύου για την καλοκαιρινή και χειμερινή περίοδο. Η αιχμή ζήτησης της γραμμής είναι 11MW και παρατηρείται την καλοκαιρινή περίοδο, ενώ το ελάχιστο φορτίο είναι 4.5MW και παρατηρείται τη χειμερινή περίοδο.



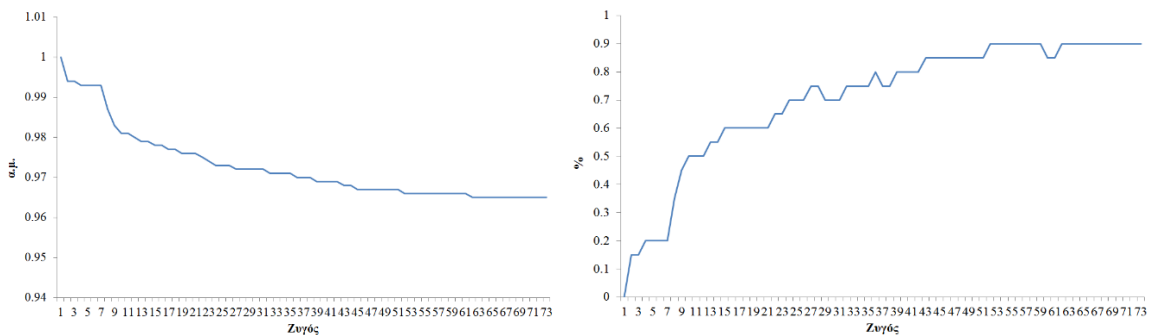
Εικόνα 2-37 Τυπικές ημερήσιες καμπύλες του δικτύου της Κατερίνης

Η Εικόνα 2-38 απεικονίζει τη μέγιστη επιβάρυνση των στοιχείων της γραμμής διανομής, δηλαδή τη μέγιστη ποσοστιαία φόρτιση των γραμμών και τη φόρτιση του μετασχηματιστή με τη

μεγαλύτερη επιβάρυνση ως ποσοστό της ονομαστικής ισχύος του, αντίστοιχα. Όσον αφορά στο προφίλ της τάσης, η ελάχιστη τιμή και η διακύμανση της τάσης ανά ζυγό απεικονίζονται στην Εικόνα 2-39. Και οι δύο παραπάνω δείκτες ποιότητας της τάσης παραμένουν εντός ρυθμιστικών ορίων.



**Εικόνα 2-38 Μέγιστη ποσοστιαία φόρτιση των γραμμών της Κατερίνης και καμπύλη φόρτιση του Μ/Σ με τη μεγαλύτερη επιβάρυνση (ποσοστό επί της ονομαστικής ισχύος)**



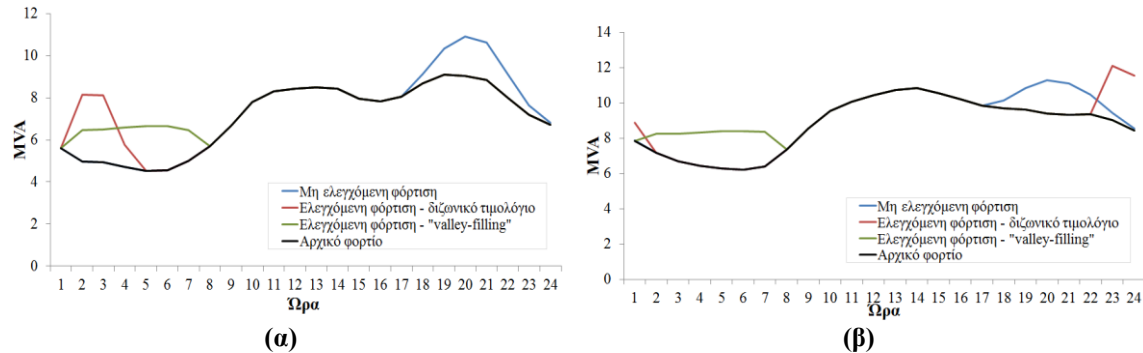
**Εικόνα 2-39 Ελάχιστη τιμή (α.μ.) και διακύμανση της τάσης (%) των ζυγών του δικτύου της Κατερίνης**

Στη συνέχεια θα αναλυθεί η επίδραση του επιπρόσθετου φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο της Κατερίνης εξετάζοντας διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης. Βάσει των σεναρίων διείσδυσης για την ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων όπως παρουσιάστηκαν στην Εικόνα 2-2, για τις ανάγκες της προσομοίωσης, το μέγεθος του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων είναι 1200 οχήματα (αισιόδοξο σενάριο). Ο στόλος των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελείται μόνο από οχήματα κατηγορίας M1 με μέση κατανάλωση 0.15kWh/km, ενώ η χωρητικότητα της μπαταρίας τους είναι 24kWh. Όσον αφορά στο προφίλ μετακίνησης των ηλεκτρικών οχημάτων (ώρες άφιξης/αναχώρησης και διανυόμενη απόσταση) υιοθετήθηκαν τα προφίλ της Εικόνα 2-4 και Εικόνα 2-6.

Η Εικόνα 2-40 απεικονίζει τη μεταβολή της ημερήσια καμπύλης του δικτύου της Κατερίνης για μια τυπική χειμερινή και καλοκαιρινή ημέρα λαμβάνοντας υπόψη την ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων, για διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης. Η μη ελεγχόμενη φόρτιση, όπως είναι αναμενόμενο, δημιουργεί μια νέα αιχμή ζήτησης, η οποία είτε προστίθεται στην αρχική αιχμή ζήτηση του δικτύου (χειμερινή μέρα), είτε είναι χρονικά μετατοπισμένη βάσει της ώρας άφιξης των ηλεκτρικών οχημάτων στο σπίτι (καλοκαιρινή μέρα). Η ταύτιση της αιχμής ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων με την υψηλή κατανάλωση του δικτύου συντελεί σε μεγαλύτερη αύξηση (19.74%) της αιχμής της τροποποιημένης καμπύλης του δικτύου, συγκριτικά με την αύξηση αιχμής την καλοκαιρινή μέρα (3.94%). Η υιοθέτηση απλών στρατηγικών φόρτισης, όπως το διζωνικό τιμολόγιο, δεν είναι επαρκής λύση μιας και η αιχμή ζήτησης της φόρτισης που δημιουργείται λόγω του ταυτοχρονισμού της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων την ώρα έναρξης του χαμηλού τιμολογίου επιβαρύνει σημαντικά το δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, στην καλοκαιρινή μέρα, η αιχμή ζήτησης της τροποποιημένης καμπύλης του δικτύου στην περίπτωση της ελεγχόμενης φόρτισης μέσω διζωνικού τιμολογίου είναι αυξημένη κατά 7.2% συγκριτικά με την αντίστοιχη αιχμή της μη ελεγχόμενης φόρτισης. Αντίθετα, στην περίπτωση της ελεγχόμενης φόρτισης “valley-filling”, η

ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων κατανέμεται σε όλο το διαθέσιμο χρονικό διάστημα για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων, χωρίς να μεταβάλλεται η αιχμή ζήτησης του δικτύου.

Ο Πίνακας 2-10 παρουσιάζει κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη καμπυλών φορτίου για το δίκτυο της Κατερίνης, όπως ο συντελεστής φορτίσεως (μέσο φορτίο/μέγιστο φορτίο), ο συντελεστής ομοιομορφίας (ελάχιστο φορτίο/μέγιστο φορτίο) και η ποσοστιαία αύξηση αιχμής φορτίου.



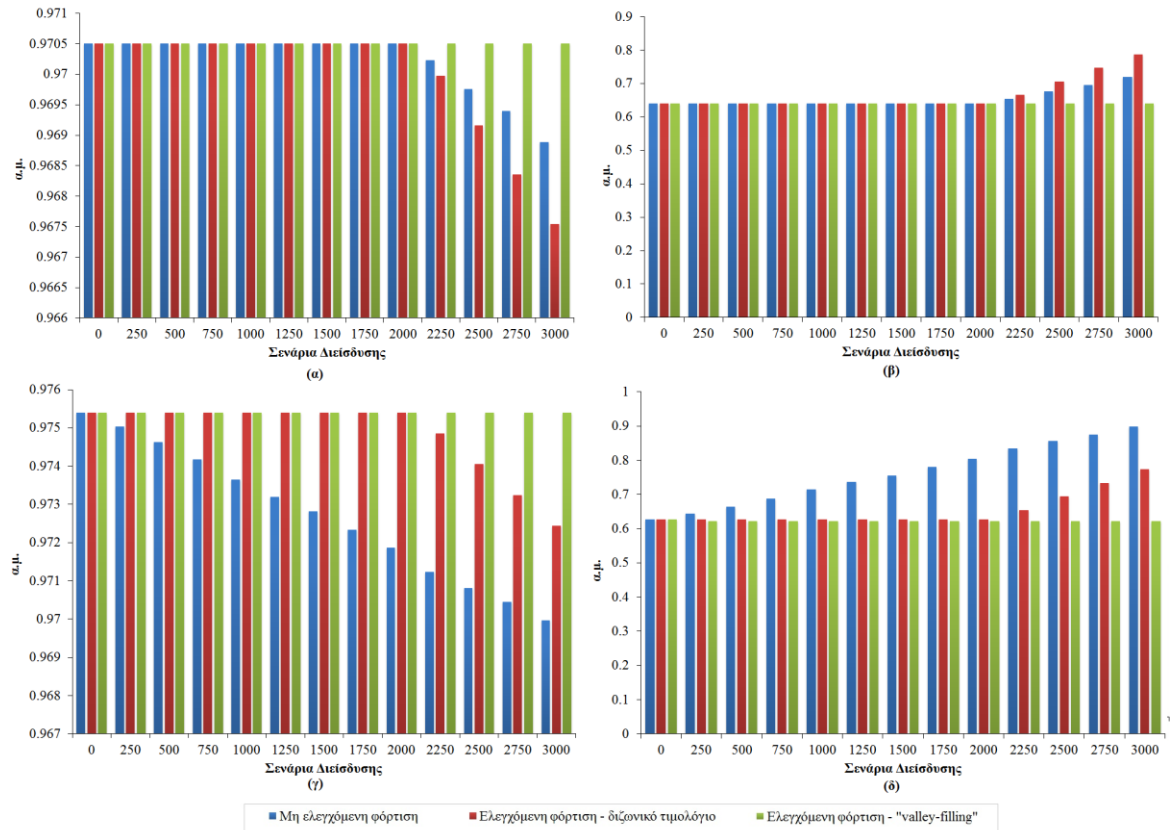
Εικόνα 2-40 Τροποποιημένη καμπύλη φορτίου του δικτύου της Κατερίνης για μια (α) τυπική χειμωνιά και (β) καλοκαιρινή (δεξιά) ημέρα

Πίνακας 2-10 Ποιοτικοί δείκτες λειτουργίας του δικτύου της Κατερίνης με ενσωμάτωση ηλεκτρικών οχημάτων

		Χαρακτηριστικά μεγέθη καμπυλών φορτίου		
		Συντελεστής Φορτίσεως (Load Factor)	Συντελεστής ομοιομορφίας (Uniformity factor)	Αύξηση αιχμής (%)
ΧΕΙΜΩΝΑΣ	Αρχικό Σενάριο	0.7764	0.4973	-
	Μη ελεγχόμενη φόρτιση	0.6753	0.4153	19.4%
	Ελεγχόμενη φόρτιση - διζωνικό τιμολόγιο	0.8103	0.4973	-
	Ελεγχόμενη φόρτιση – “valley-filling”	0.8252	0.6149	-
ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ	Αρχικό Σενάριο	0.8071	0.5741	-
	Μη ελεγχόμενη φόρτιση	0.8024	0.5523	3.94%
	Ελεγχόμενη φόρτιση - διζωνικό τιμολόγιο	0.7492	0.5152	11.43%
	Ελεγχόμενη φόρτιση – “valley-filling”	0.8484	0.6803	-

Στη συνέχεια, εξετάζεται το προφίλ της τάσης (ελάχιστη τιμή και διακύμανση της τάσης) για διαφορετικά σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων και για διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης (Εικόνα 2-41). Στην περίπτωση της μη ελεγχόμενης φόρτισης, όσο αυξάνεται ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων τόσο μειώνεται η ελάχιστη τιμή της τάσης, καθώς αυξάνεται το μέγιστο φορτίο του δικτύου. Μείωση της ελάχιστης τάσης δικτύου παρατηρείται σε υψηλότερα ποσοστά διείσδυσης (>2000 ηλεκτρικά οχήματα) και στην περίπτωση της ελεγχόμενης φόρτισης με διζωνικό τιμολόγιο. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η αιχμή ζήτησης της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων σε υψηλά ποσοστά διείσδυσης υπερβαίνει την αρχική αιχμή ζήτησης του δικτύου. Για το λόγο αυτό, στην περίπτωση της καλοκαιρινής ημέρας, για μικρά ποσοστά διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων, η αρχική αιχμή του δικτύου δεν επηρεάζεται για καμία στρατηγική φόρτισης, ενώ για μεγάλα ποσοστά διείσδυσης η αιχμή ζήτησης λόγω ελεγχόμενης φόρτισης με διζωνικό τιμολόγιο είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη για μη ελεγχόμενη φόρτιση, που συνεπάγεται εντονότερη πτώση τάσεως. Αντίθετα, στην περίπτωση της ελεγχόμενης φόρτισης – “valley-filling”, η ομοιογενή κατανομή του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων την περίοδο

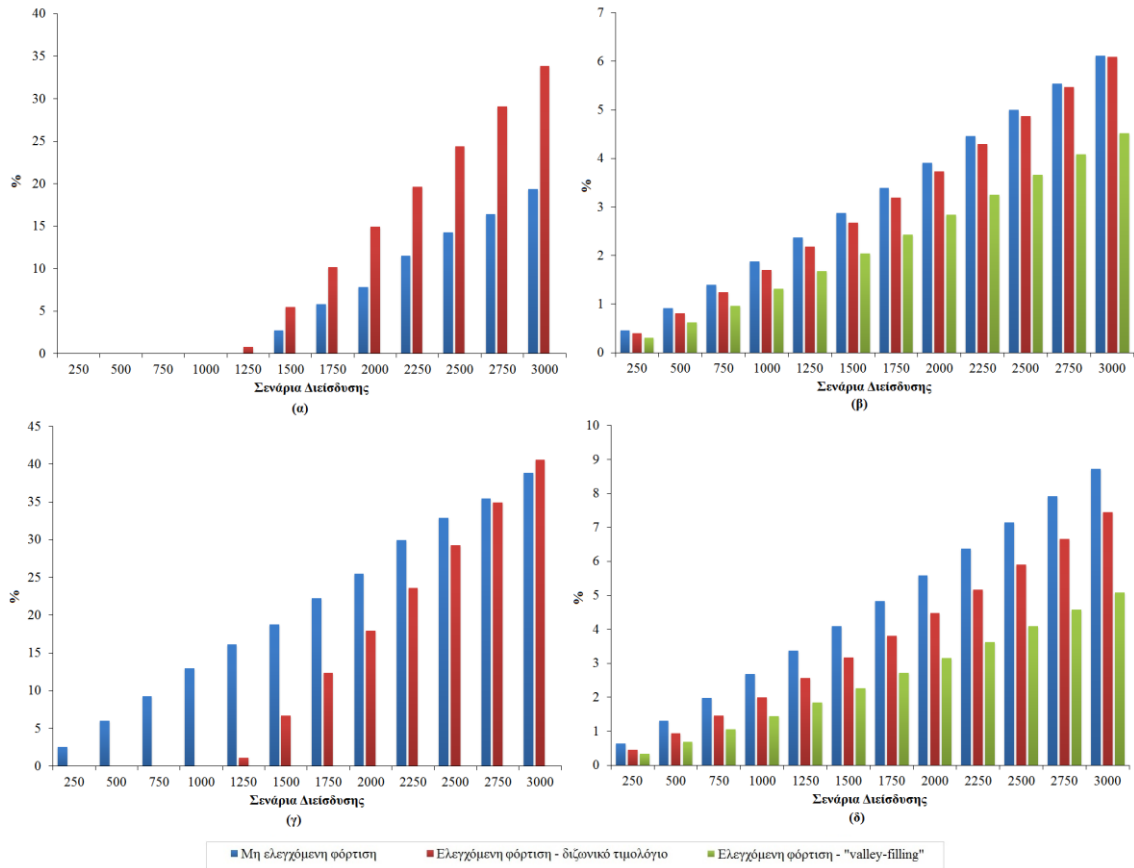
χαμηλής φόρτισης δεν επηρεάζει την αρχική αιχμή του δικτύου και, επομένως, ούτε και την ελάχιστη τιμή της τάσης. Όσον αφορά στη μέγιστη διακύμανση τάσης του δικτύου, που επίσης επηρεάζεται από τη μεταβολή της αιχμής του δικτύου, η υιοθέτηση ευέλικτων στρατηγικών φόρτισης βελτιώνει τον συγκεκριμένο δείκτη ποιότητας τάσης. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι τόσο η ελάχιστη τιμή όσο και η μέγιστη διακύμανση της τάσης δικτύου παραμένουν εντός ρυθμιστικών ορίων, υπό οποιοδήποτε σενάριο διείσδυσης ή στρατηγικής φόρτισης.



**Εικόνα 2-41 Προφίλ τάσης δικτύου Κατερίνης για διαφορετικά σενάρια διείσδυσης και στρατηγικές φόρτισης: α)Ελάχιστη τάση δικτύου καλοκαίρι, β) Μέγιστη διακύμανση τάσης δικτύου καλοκαίρι, γ)Ελάχιστη τάση δικτύου χειμώνα, δ) Μέγιστη διακύμανση τάσης δικτύου χειμώνα**

Η Εικόνα 2-42 απεικονίζει την επιβάρυνση του δικτύου, όσον αφορά στη μέγιστη φόρτιση των γραμμών του δικτύου και τις απώλειες του δικτύου, για διαφορετικά σενάρια διείσδυσης και διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης. Τα ποσοστά της αύξησης των απωλειών στην Εικόνα 2-42 έχουν υπολογιστεί βάσει των απωλειών δικτύου χωρίς ηλεκτρικά οχήματα. Από τα αποτελέσματα είναι εμφανές ότι στην περίπτωση της μη ελεγχόμενης φόρτισης και στην περίπτωση της ελεγχόμενης φόρτισης με διζωνικό τιμολόγιο η φόρτιση των γραμμών αυξάνεται σημαντικά καθώς αυξάνεται στο ποσοστό διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων. Μάλιστα, στην καλοκαιρινή ημέρα, για μέση και υψηλή διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων, η ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο προκαλεί μεγαλύτερη φόρτιση των γραμμών, λόγω του ταυτοχρονισμού της φόρτισης των οχημάτων, συγκριτικά με τη μη ελεγχόμενη φόρτιση. Κάτι αντίστοιχο δεν συμβαίνει στην περίπτωση της χειμερινής μέρας γιατί η καμπύλη φορτίου εμφανίζει εντονότερη κοιλάδα κατά την περίοδο χαμηλής κατανάλωσης. Σε αντίθεση με τις άλλες δύο στρατηγικές φόρτισης, στην περίπτωση της ελεγχόμενης φόρτισης “valley-filling”, η μέγιστη φόρτιση του δικτύου δεν επηρεάζεται επιτρέποντας την ενσωμάτωση μεγαλύτερων ποσοστών διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο θεωρώντας τις υφιστάμενες υποδομές δικτύου. Όσον αφορά στις απώλειες του δικτύου, η αύξηση της ζήτησης του δικτύου λόγω φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων έχει ως συνέπεια την αύξηση των απωλειών του δικτύου. Ωστόσο, η υιοθέτηση ευέλικτων στρατηγικών φόρτισης μπορεί να περιορίσει την αντίστοιχη αύξηση των απωλειών του δικτύου διανομής έως και 3.7%, συγκριτικά με τη μη ελεγχόμενη φόρτιση.

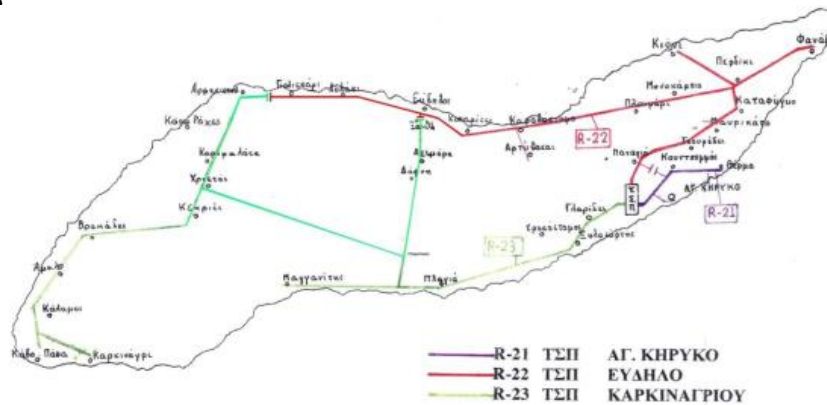




Εικόνα 2-42 Μέγιστη φόρτιση γραμμών και απώλειες δικτύου Κατερίνης για διαφορετικά σενάρια διείσδυσης και στρατηγικές φόρτισης: α)μέγιστη φόρτιση γραμμών καλοκαίρι, β) απώλειες δικτύου καλοκαίρι, γ)μέγιστη φόρτιση γραμμών χειμώνα, δ) απώλειες δικτύου χειμώνα (ποσοστά ως προς το σενάριο χωρίς ηλεκτρικά οχήματα)

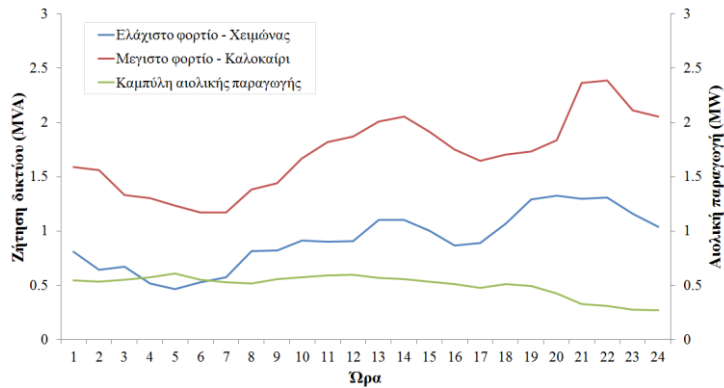
### 2.5.2 Επαρχιακό δίκτυο διανομής μέσης τάσης της Ικαρίας (15kV)

Η γραμμή διανομής που θα εξεταστεί αποτελεί τμήμα του επαρχιακού δικτύου διανομής Μ.Τ. της Ικαρίας και παρουσιάζεται με κόκκινο χρώμα στην Εικόνα 2-43. Η εξεταζόμενη γραμμή διανομής (50 χιλιομέτρων) περιλαμβάνει 57 υποσταθμούς φορτίου ΜΤ/ΧΤ με ονομαστική ισχύ: 1 των 250KVA, 5 των 160KVA, 1 των 150KVA, 8 των 100KVA, 3 των 75KVA, 29 των 50KVA, 7 των 25KVA και 1 των 15kVA. Το μονογραμμικό διάγραμμα του δικτύου της Ικαρίας απεικονίζεται στο Παράρτημα Α.



Εικόνα 2-43 Γραμμή διανομής μέσης τάσης του δικτύου της Ικαρίας

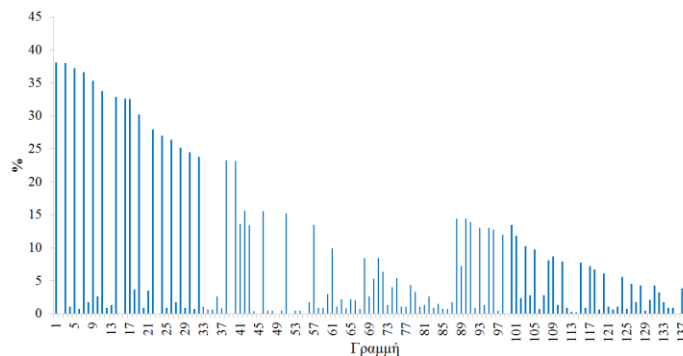
Η Εικόνα 2-44 απεικονίζει τις ημερήσιες καμπύλες ζήτησης του δικτύου για τις περιπτώσεις μεγίστου και ελαχίστου φορτίου. Λόγω της έντονης τουριστικής ζήτησης του νησιού, παρατηρείται έντονη εποχικότητα στην καμπύλη του φορτίου. Η αιχμή της καμπύλης ζήτησης της γραμμής είναι 2.8MW και παρατηρείται το καλοκαίρι (Αύγουστος), ενώ το ελάχιστο φορτίο είναι 0.46MW και παρατηρείται το χειμώνα (Φεβρουάριο). Η Ικαρία χαρακτηρίζεται από ένα σημαντικό αιολικό δυναμικό και η αιολική παραγωγή είναι σημαντική για την εξυπηρέτηση της ζήτησης του νησιού. Για την παρούσα μελέτη, η εγκατεστημένη ισχύς των αιολικών είναι ίση με 1MW με το ημερήσιο προφίλ παραγωγής να απεικονίζεται στην Εικόνα 2-44.



Εικόνα 2-44 Τυπική ημερήσια καμπύλη φορτίου του δικτύου της Ικαρίας

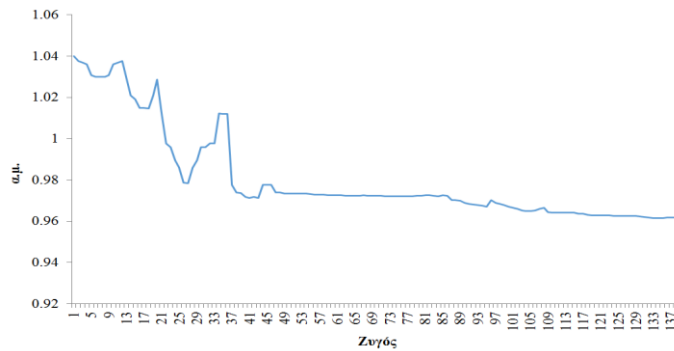
Η Εικόνα 2-45 απεικονίζει τη μέγιστη επιβάρυνση των στοιχείων της γραμμής διανομής, δηλαδή τη μέγιστη ποσοστιαία φόρτιση των γραμμών. Παρατηρούμε ότι η μέγιστη φόρτιση των γραμμών (<40%) είναι χαμηλή ακόμα και στην περίπτωση της μέγιστης φόρτισης δικτύου. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των γραμμών ενός επαρχιακού δικτύου διανομής είναι ότι η φόρτιση τους δεν είναι μεγάλη δεδομένου του χαμηλού φορτίου που εξυπηρετεί το δίκτυο συνολικά, ωστόσο είναι μεγάλες σε μήκος. Ως εκ τούτου, η μεταβολή του φορτίου δεν επηρεάζει τόσο τη φόρτιση των γραμμών, όσο την πτώση τάσης πάνω σε αυτές. Τα προφίλ της τάσης του δικτύου για την ελάχιστη τιμή της καθώς και για τη μέγιστη διακύμανση της, για τη περίπτωση του μεγίστου φορτίου, απεικονίζονται στην Εικόνα 2-46 και Εικόνα 2-47.

Στη συνέχεια θα αναλυθεί η επίδραση του επιπρόσθετου φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο της Ικαρίας εξετάζοντας διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης. Για τις ανάγκες της προσομοίωσης, το μέγεθος του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων είναι 300 οχήματα. Ο στόλος των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελείται μόνο από οχήματα κατηγορίας M1 με μέση κατανάλωση 0.15kWh/km, ενώ η χωρητικότητα της μπαταρίας τους είναι 24kWh. Όσον αφορά στο προφίλ μετακίνησης των ηλεκτρικών οχημάτων (ώρες άφιξης/αναχώρησης και διανυόμενη απόσταση) υιοθετήθηκαν τα προφίλ της Εικόνα 2-4 και Εικόνα 2-6.

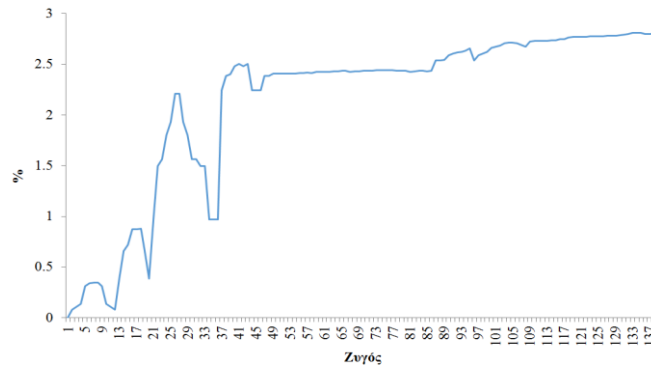


Εικόνα 2-45 Μέγιστη ποσοστιαία φόρτιση των γραμμών της Ικαρίας



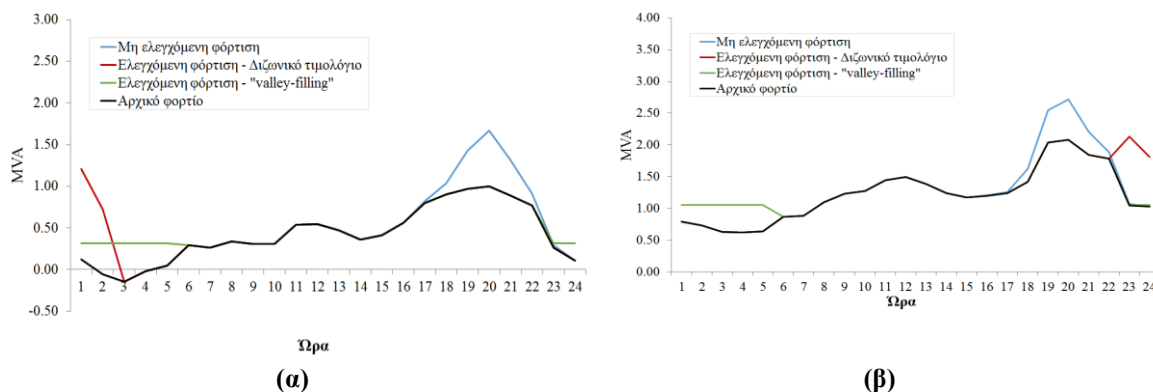


Εικόνα 2-46 Ελάχιστη τιμή της τάσης (α.μ.) των ζυγών του δικτύου της Ικαρίας



Εικόνα 2-47 Διακύμανση της τάσης (%) των ζυγών του δικτύου της Ικαρίας (ποσοστό επί της ονομαστικής ισχύος)

Η Εικόνα 2-48 απεικονίζει τη μεταβολή της ημερήσια καμπύλης του δικτύου της Κατερίνης για τη χειμωνιάτικη ημέρα με το ελάχιστο φορτίο λαμβάνοντας υπόψη την ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων, για διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης. Αντίστοιχα, η μεταβολή της ημερήσια καμπύλης δικτύου για το μέγιστο φορτίο (καλοκαιρινή μέρα) απεικονίζεται στην Εικόνα 2-48. Όπως διαπιστώθηκε και στη περίπτωση της Κατερίνης, η μη ελεγχόμενη φόρτιση δημιουργεί μια νέα αιχμή ζήτησης λόγω της ταύτισης της αιχμής ζήτησης της φόρτισης με την υψηλή κατανάλωση του δικτύου. Η ποσοστιαία αύξηση της αιχμής των τροποποιημένων καμπυλών φορτίου συγκριτικά με την καμπύλη αρχικού φορτίου είναι 30.5% για το καλοκαίρι και 66.34% για το χειμώνα. Παρά το γεγονός ότι η καμπύλη ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων για τη μη ελεγχόμενη φόρτιση είναι ίδια για χειμώνα και καλοκαίρι (συνολική ζήτηση 1.86MW), η επίπτωση στην καμπύλη φορτίου του δικτύου είναι εντονότερη το χειμώνα λόγω χαμηλότερης κατανάλωσης τους χειμερινούς μήνες (η ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων είναι το 4.53% του ημερήσιου φορτίου για το καλοκαίρι και 8,46% για το χειμώνα). Η υιοθέτηση απλών στρατηγικών φόρτισης, όπως το διζωνικό τιμολόγιο, δεν είναι επαρκής λύση για την εποχική περίοδο χαμηλής κατανάλωσης μιας και η αιχμή ζήτησης της φόρτισης που δημιουργείται λόγω του ταυτοχρονισμού της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων την ώρα έναρξης του χαμηλού τιμολογίου επιβαρύνει σημαντικά το δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, στη χειμερινή μέρα, η αιχμή ζήτησης της τροποποιημένης καμπύλης του δικτύου στην περίπτωση της ελεγχόμενης φόρτισης μέσω διζωνικού τιμολογίου είναι αυξημένη κατά 20.04% συγκριτικά με την αντίστοιχη αιχμή της μη ελεγχόμενης φόρτισης. Ωστόσο, η επίπτωση της ελεγχόμενης φόρτισης με διζωνικό τιμολόγιο είναι μικρότερη συγκριτικά με την αντίστοιχη της μη ελεγχόμενης φόρτισης. Αντίθετα, στην περίπτωση της ελεγχόμενης φόρτισης “valley-filling”, η ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων κατανέμεται σε όλο το διαθέσιμο χρονικό διάστημα για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων, χωρίς να μεταβάλλεται η αιχμή ζήτησης του δικτύου.



**Εικόνα 2-48 Τροποποιημένη καμπύλη φορτίου του δικτύου της Ικαρίας (α) για το ελάχιστο φορτίο (χειμωρινή μέρα) και (β) για το μέγιστο φορτίο (καλοκαιρινή μέρα)**

Ο Πίνακας 2-11 παρουσιάζει κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη καμπυλών φορτίου για το δίκτυο της Ικαρίας, όπως ο συντελεστής φορτίσεως (μέσο φορτίο/μέγιστο φορτίο), ο συντελεστής ομοιομορφίας (ελάχιστο φορτίο/μέγιστο φορτίο) και η ποσοστιαία αύξηση αιχμής φορτίου. Επειδή το φορτίο του δικτύου της Ικαρίας δεν είναι ιδιαίτερα υψηλό και η φόρτιση των γραμμών είναι σχετικά χαμηλή, όπως αποδεικνύεται από την Εικόνα 2-45, είναι σημαντικό να εξεταστούν και ορισμένα περαιτέρω λειτουργικά χαρακτηριστικά του δικτύου που αφορούν στο προφίλ τάσης.

Ο Πίνακας 2-12 παρουσιάζει την επίπτωση της φόρτισης του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων στην ελάχιστη τιμή και στην μέγιστη διακύμανση της τάσης καθώς και τη μέγιστη φόρτιση των γραμμών του δικτύου της Ικαρίας. Από τα αποτελέσματα του πίνακα συνεπάγεται ότι η επιβάρυνση των γραμμών λόγω της απότομης αιχμής του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων στις περιπτώσεις της μη ελεγχόμενης φόρτισης και ελεγχόμενη φόρτισης με διζωνικό τιμολόγιο αυξάνεται σημαντικά, ωστόσο, δεν ξεπερνά τα θερμικά όρια των γραμμών λόγω του χαμηλού αρχικού φορτίου του δικτύου της Ικαρίας. Το πρόβλημα στη λειτουργία του δικτύου εντοπίζεται στη μέγιστη διακύμανση της τάσης, η οποία στη μη ελεγχόμενη φόρτιση ξεπερνά το ρυθμιστικό όριο του 3% και στην περίπτωση της ελεγχόμενης φόρτισης με διζωνικό τιμολόγιο είναι κοντά στο άνω όριο. Ως εκ τούτου, η μέγιστη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων καθορίζεται από τη μέγιστη διακύμανση της τάσης.

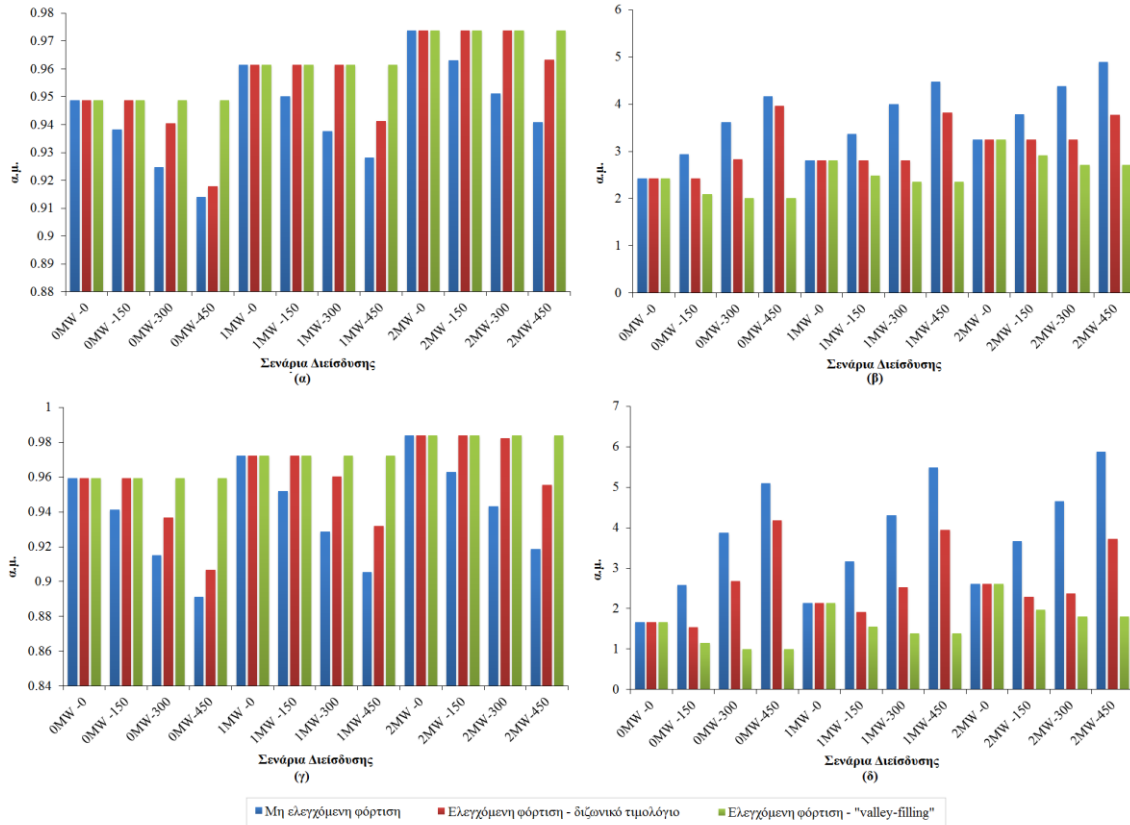
**Πίνακας 2-11 Ποιοτικοί δείκτες καμπυλών για το δίκτυο της Ικαρίας με ενσωμάτωση ηλεκτρικών οχημάτων**  
**Χαρακτηριστικά μεγέθη καμπυλών φορτίου**

		Συντελεστής Φορτίσεως (Load Factor)	Συντελεστής ομοιομορφίας (Uniformity factor)	Αύξηση αιχμής (%)
<b>ΧΕΙΜΩΝΑΣ</b>	Αρχικό Σενάριο	0.6914	0.3487	-
	Μη ελεγχόμενη φόρτιση	0.5000	0.2323	66,34%
	Ελεγχόμενη φόρτιση - διζωνικό τιμολόγιο	0.5266	0.2448	20.04%
	Ελεγχόμενη φόρτιση – “valley-filling”	0.7500	0.3987	-
<b>ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ</b>	Αρχικό Σενάριο	0.5845	0.2981	-
	Μη ελεγχόμενη φόρτιση	0.4764	0.2283	30.53%
	Ελεγχόμενη φόρτιση - διζωνικό τιμολόγιο	0.6076	0.2915	2.34%
	Ελεγχόμενη φόρτιση – “valley-filling”	0.6562	0.4172	-

**Πίνακας 2-12 Ποιοτικοί δείκτες λειτουργίας του δικτύου της Ικαρίας με ενσωμάτωση ηλεκτρικών οχημάτων**  
**Χαρακτηριστικά μεγέθη καμπυλών φορτίου**

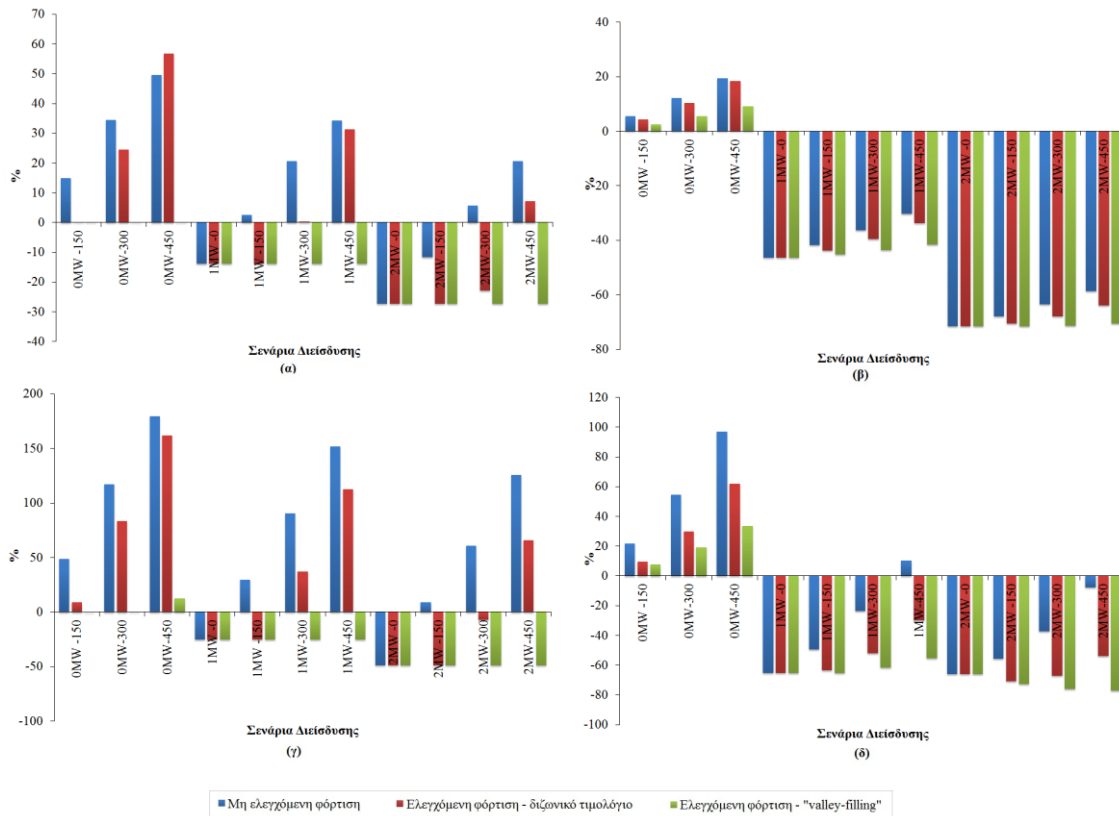
	Μέγιστη Φόρτιση Γραμμών	Ελάχιστη Τάση	Μέγιστη Διακύμανση τάσης	
<b>ΧΕΙΜΩΝΑΣ</b>	Αρχικό Σενάριο	17.8	0.9723	2.14
	Μη ελεγχόμενη φόρτιση	45.5 (+155.6%)	0.93 (-4.35%)	4.35 (+103.3%)
	Ελεγχόμενη φόρτιση - διζωνικό τιμολόγιο	32.67 (83.6%)	0.96 (-1.3%)	2.52 (+17.8%)
	Ελεγχόμενη φόρτιση – “valley-filling”	17.8	0.9723	1.39 (-35.1%)
<b>ΚΑΛΟΚΑΙΡΙ</b>	Αρχικό Σενάριο	38.09	0.9614	2.81
	Μη ελεγχόμενη φόρτιση	52.41 (+37.6%)	0.939 (-2.3%)	3.95 (+40.5%)
	Ελεγχόμενη φόρτιση - διζωνικό τιμολόγιο	44.28 (+16.251)	0.9612 (-0.02%)	2.82 (+0.4%)
	Ελεγχόμενη φόρτιση – “valley-filling”	38.09	0.9614	2.35 (-16.4%)

Στη συνέχεια, εξετάζεται το προφίλ της τάσης (ελάχιστη τιμή και διακύμανση της τάσης) για διαφορετικά σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και για διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης (Εικόνα 2-49). Η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο επαρχιακό δίκτυο της Ικαρίας έχει θετική επίπτωση όσον αφορά στην ελάχιστη τιμή της τάσης μιας και μειώνει την αιχμή του φορτίου, ενώ αρνητική επίπτωση στη διακύμανση της τάσης μιας και η έντονη αιολική παραγωγή την περίοδο χαμηλής κατανάλωσης διευρύνει την απόκλιση μεγίστου και ελαχίστου φορτίου του δικτύου. Μάλιστα, για μεγάλη διείσδυση αιολικών (2MW), η διακύμανση της τάσης είναι εκτός ρυθμιστικών ορίων (>3%). Η υιοθέτηση της μη ελεγχόμενη φόρτισης κατά την ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο της Ικαρίας έχει έντονη αρνητική επίπτωση τόσο στην ελάχιστη τιμή της τάσης όσο και στη διακύμανση της, λόγω της αύξησης της αιχμής φορτίου. Η ενσωμάτωση υψηλών ποσοστών διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων με τη στρατηγική της μη ελεγχόμενης φόρτισης, εμποδίζει την ενσωμάτωση μεγαλύτερων ποσοστών διείσδυσης αιολικής παραγωγής δημιουργώντας την ανάγκη για λήψη επιπρόσθετων μέτρων από το διαχειριστή του δικτύου για την απορρόφηση της. Όσον αφορά στη στρατηγική της ελεγχόμενης φόρτισης με διζωνικό τιμολόγιο, η στρατηγική αυτή μπορεί να θεωρηθεί αποδοτική για χαμηλά ποσοστά διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων και δεδομένου ότι το φορτίο του δικτύου δεν είναι υψηλό. Σε αντίθετη περίπτωση και ειδικότερα όταν τα ποσοστά διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι υψηλά, η ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο έχει ως αποτέλεσμα την παραβίαση των ρυθμιστικών περιορισμών της τάσης. Αντίθετα, η υιοθέτηση πιο ευέλικτης στρατηγικής φόρτισης (“valley-filling”) συνεισφέρει σημαντικά στην αποδοτικότερη λειτουργία του δικτύου. Μάλιστα είναι ιδιαίτερα σημαντικό ότι η μετατόπιση και κατανομή της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων της ώρες χαμηλής κατανάλωσης και υψηλής αιολικής παραγωγής επιτρέπει την ενσωμάτωση υψηλότερων ποσοστών αιολικής παραγωγής καθώς αυξάνεται το μέγεθος του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων. Η στρατηγική “valley-filling” είναι η πιο αποτελεσματική μέθοδος συγκριτικά με τις άλλες δύο στρατηγικές.



**Εικόνα 2-49** Προφίλ τάσης δικτύου Ικαρίας για διαφορετικά σενάρια διεיסδυσης ηλεκτρικών οχημάτων (0-450), ΑΠΕ (0-2MW) και στρατηγικές φόρτισης: α)Ελάχιστη τάση δικτύου καλοκαίρι, β) Μέγιστη διακύμανση τάσης δικτύου καλοκαίρι, γ)Ελάχιστη τάση δικτύου χειμώνα, δ) Μέγιστη διακύμανση τάσης δικτύου χειμώνα

Η Εικόνα 2-50 απεικονίζει την επιβάρυνση του δικτύου, όσον αφορά στη μέγιστη φόρτιση των γραμμών και τις απώλειες του δικτύου, για διαφορετικά σενάρια διεיסδυσης ηλεκτρικών οχημάτων, αιολικής παραγωγής και διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης. Τα ποσοστά της αύξησης των απωλειών έχουν υπολογιστεί βάσει των απωλειών δικτύου χωρίς ηλεκτρικά οχήματα και χωρίς ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Από τα αποτελέσματα στην Εικόνα 2-50 είναι προφανές ότι η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μειώνει την επιβάρυνση των γραμμών. Ωστόσο, η ενσωμάτωση υψηλότερων ποσοστών διεיסδυσης ηλεκτρικών οχημάτων αυξάνει την επιφόρτιση των γραμμών, ειδικότερα στην περίπτωση της μη ελεγχόμενης φόρτισης, περιορίζοντας αισθητά τη θετική επίδραση της αιολικής παραγωγής. Η ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο είναι αποδοτική όσο η διεיסδυση των ηλεκτρικών οχημάτων παραμένει σε χαμηλά επίπεδα. Η ελεγχόμενη φόρτιση “valley-filling” δεν επηρεάζει σε κανένα σενάριο προσομοίωσης τη μέγιστη φόρτιση των γραμμών και αυτό γιατί το φορτίο της φόρτισης κατανέμεται κατά τη διάρκεια της περιόδου χαμηλής κατανάλωσης. Όσον αφορά στις απώλειες του δικτύου, η εξυπηρέτηση του επιπρόσθετου φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων από το ανάντυ δίκτυο (0MW αιολική παραγωγή) έχει ως συνέπεια την αύξηση των απωλειών του δικτύου. Η υιοθέτηση ευέλικτων στρατηγικών φόρτισης είναι ικανή να περιορίσει το ποσοστό αύξησης των απωλειών αυτών. Η αξιοποίηση της διαθέσιμης αιολικής παραγωγής από την τοπική κατανάλωση είναι πολύ σημαντική ακόμα και για υψηλά ποσοστά διεיסδυσης ηλεκτρικών οχημάτων. Η πιο αξιοσημείωτη περίπτωση είναι αυτή για μεγάλη διεיסδυση αιολικής παραγωγής και χαμηλό φορτίο δικτύου (χειμερινή ημέρα). Η υιοθέτηση της ελεγχόμενης φόρτισης “valley-filling” συντελεί στην περαιτέρω μείωση των απωλειών δικτύου καθώς η διεισδυση των ηλεκτρικών οχημάτων αυξάνει. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, το πλεόνασμα αιολικής παραγωγής τις ώρες χαμηλού φορτίου, που έχει ως αποτέλεσμα την αναστροφή ροή ισχύος, αξιοποιείται για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων σε τοπικό επίπεδο.

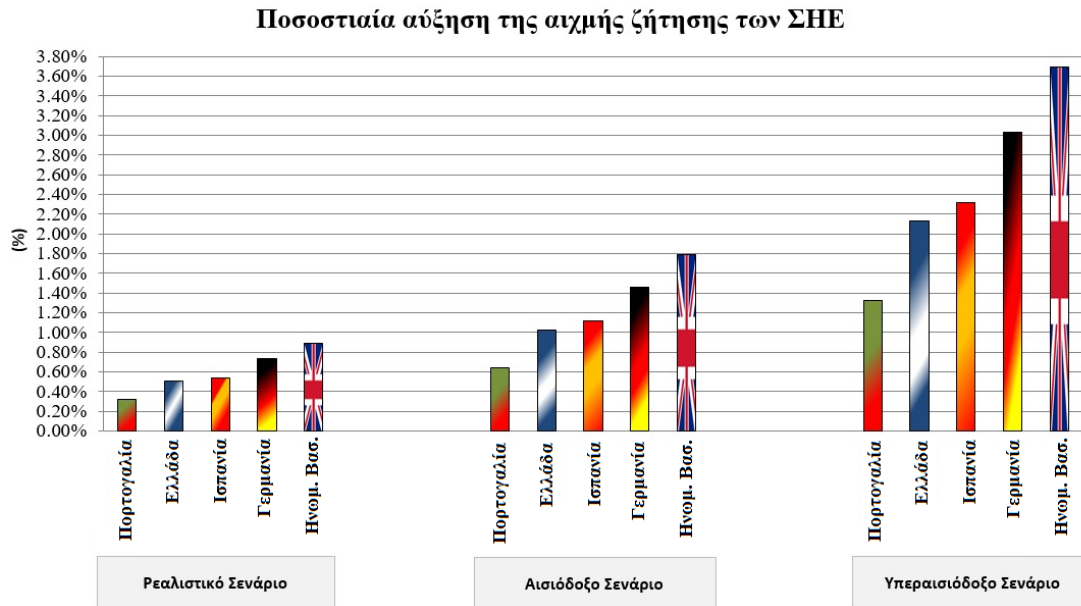


**Εικόνα 2-50 Μέγιστη φόρτιση γραμμών και απώλειες δικτύου Ικαρίας για διαφορετικά σενάρια ηλεκτρικών οχημάτων (0-450), ΑΠΕ (0-2MW) και στρατηγικές φόρτισης: α)μέγιστη φόρτιση γραμμών καλοκαίρι, β) απώλειες δικτύου καλοκαίρι, γ)μέγιστη φόρτιση γραμμών χειμώνα, δ) απώλειες δικτύου χειμώνα (ποσοστά ως προς το σενάριο χωρίς ηλεκτρικά οχήματα)**

## 2.6 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό, αρχικά, εκτιμήθηκαν οι επιπρόσθετες, ημερήσιες ενεργειακές ανάγκες φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, που εξυπηρετούν τις ημερήσιες ενεργειακές ανάγκες μετακίνησης τους, και αναλύθηκε η επίδρασή της επιπρόσθετης ζήτησης της φόρτισης στην ημερήσια και ετήσια καμπύλη φορτίου του Ελληνικού συστήματος. Για το σκοπό αυτό, αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία που εξετάζει διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης (ελεγχόμενη ή μη) λαμβάνοντας υπόψη ποικίλες κυκλοφοριακές συνήθειες των οδηγών (π.χ. την ημερήσια διανυόμενη απόσταση, τη χρονική στιγμή που το όχημα συνδέεται για φόρτιση, το ρυθμό φόρτισης, την κατανάλωση της μπαταρίας, κ.τ.λ.).

Η μη ελεγχόμενη φόρτιση μπορεί να χαρακτηριστεί ως η χειρότερη στρατηγική φόρτισης. Στο περίπτωση αυτή, η ενεργειακή ζήτηση των οχημάτων εξαρτάται άμεσα από την ώρα επιστροφής στο σπίτι, μετά την τελευταία διαδρομή της ημέρας. Καθώς η επιστροφή στο σπίτι συνοδεύεται με αύξηση της οικιακής κατανάλωσης, η ζήτηση των οχημάτων συγχρονίζεται με την αιχμή φορτίου του συστήματος. Επομένως, η μη ελεγχόμενη φόρτιση έχει ως αποτέλεσμα την περαιτέρω επιβάρυνση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας τις ώρες αιχμής, η ένταση της οποίας εξαρτάται από το επίπεδο διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων. Η παρούσα ανάλυση για την επίδραση της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων στην καμπύλη φορτίου του Ελληνικού συστήματος πραγματοποιήθηκε για άλλες τέσσερις Ευρωπαϊκές χώρες (Γερμανία, Ισπανία, Ηνωμένο Βασίλειο και Πορτογαλία). Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής, για διαφορετικά σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων, συνοψίζονται στην Εικόνα 2-51.



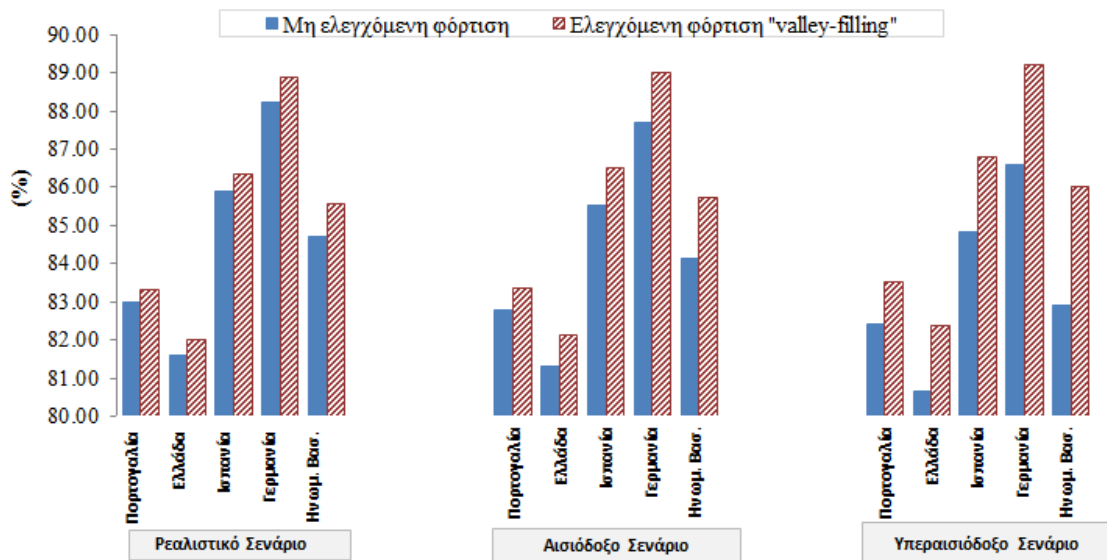
Εικόνα 2-51 Ποσοστιαία αύξηση της αιχμής ζήτησης των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας για διαφορετικές Ευρωπαϊκές χώρες.

Ωστόσο, η ανάπτυξη υποδομών φόρτισης στους χώρους εργασίας μπορεί να περιορίσει την επιβάρυνση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας τις ώρες αιχμής. Ένα μέρος των καθημερινών αναγκών φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, δηλαδή η κατανάλωση της μπαταρίας για την οδήγηση από το σπίτι στη δουλειά, μπορεί να ανακτηθεί κατά τις πρωινές ώρες στον χώρο εργασίας, όταν η ζήτηση του συστήματος είναι ακόμη σχετικά χαμηλή.

Η ελεγχόμενη φόρτιση μέσω διζωνικού τιμολογίου εξυπηρετεί τη μετατόπιση της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων από ώρες υψηλού φορτίου σε ώρες με χαμηλή κατανάλωση. Ωστόσο, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η συγκεκριμένη στρατηγική φόρτισης έχει ως αποτέλεσμα την απότομη αύξηση της ζήτησης των οχημάτων τη χρονική στιγμή έναρξης της περιόδου χαμηλής τιμολόγησης, γεγονός που ενδέχεται να επηρεάσει σημαντικά την προγραμματισμένη λειτουργία του συστήματος παραγωγής.

Η ελεγχόμενη φόρτιση “valley-filling” μετατοπίζει τη ζήτηση των οχημάτων σε ώρες που η ζήτηση φορτίου είναι χαμηλή, αποτρέποντας την εμφάνιση αιχμών στην καμπύλη φορτίου του συστήματος και μειώνοντας ταυτόχρονα την ημερήσια διακύμανση του φορτίου. Στην Εικόνα 2-52 απεικονίζεται ο συντελεστής φορτίσεως (μέσο φορτίο συστήματος/μέγιστο φορτίο συστήματος) σε διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες, λαμβάνοντας υπόψη τα σενάρια διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων. Τα συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ μη ελεγχόμενης φόρτισης και ελεγχόμενης φόρτισης “valley-filling”, αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα της στρατηγικής “valley-filling”. Αν και η στρατηγική αυτή είναι η πιο αποδοτική συγκριτικά με τις υπόλοιπες, η εφαρμογή της είναι ιδιαίτερα σύνθετη και απαιτούνται προχωρημένα μοντέλα διαχείρισης.





Εικόνα 2-52 Συντελεστής φορτίσεως για διαφορετικές Ευρωπαϊκές χώρες

Στη συνέχεια, βάσει των αποτελεσμάτων της παραπάνω ανάλυσης για την καμπύλη φορτίου, αναλύθηκε η επίδραση των ηλεκτρικών οχημάτων στο σύστημα παραγωγής. Η εξυπηρέτηση του επιπρόσθετου φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της συνολικής ετήσιας παραγωγής και συνεπώς την αύξηση του κόστους λειτουργίας του. Η υιοθέτηση διαφορετικών στρατηγικών φόρτισης επηρεάζει σημαντικά το μείγμα παραγωγής και συνεπώς το κόστος εξυπηρέτησης του φορτίου τους. Στην περίπτωση της Ελλάδος, η υιοθέτηση μη ευέλικτων στρατηγικών φόρτισης έχει ως συνέπεια την εξυπηρέτηση της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων από μονάδες αιχμής. Αντίθετα, η υιοθέτηση ευέλικτων στρατηγικών φόρτισης μετατοπίζει το φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων σε ώρες με χαμηλή κατανάλωση όπου εξυπηρετείται από μονάδες βάσης. Το κόστος παραγωγής των μονάδων αιχμής είναι υψηλότερο συγκριτικά με τις μονάδες βάσης, με αποτέλεσμα η εξυπηρέτηση της ζήτησης για φόρτιση να είναι ακριβότερη στην περίπτωση απουσίας ελεγχόμενης φόρτισης. Το μείγμα παραγωγής καθορίζει και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του συστήματος παραγωγής. Οι μονάδες βάσης είναι πιο ρυπογόνες συγκριτικά με τις μονάδες αιχμής. Ως εκ τούτου, η υιοθέτηση ευέλικτων στρατηγικών φόρτισης από τη μια συνεισφέρει στην οικονομικότερη εξυπηρέτηση του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων αλλά από την άλλη έχει αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την εξυπηρέτηση του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να περιορίσει σημαντικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της ελεγχόμενης φόρτισης. Σε κάθε περίπτωση, τα ηλεκτρικά οχήματα δεν είναι πραγματικά μηδενικών εκπομπών ρύπων δεδομένου του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της παραγωγής που εξυπηρετεί το φορτίο τους. Η υιοθέτηση ευέλικτων στρατηγικών φόρτισης με υψηλά ποσοστά διείσδυσης ΑΠΕ μπορεί να μειώσει σημαντικά το ισοδύναμο προφίλ εκπομπών ρύπων σε επίπεδα πολύ χαμηλότερα (~60grCO<sub>2</sub>/χιλ) των αντίστοιχων για τα συμβατικά οχήματα.

Όσον αφορά την ανάλυση του συστήματος μεταφοράς αποδεικνύεται ότι είναι αρκετά στιβαρό ώστε να μην δημιουργούνται λειτουργικά προβλήματα από την εξυπηρέτηση του επιπρόσθετου φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων, ανεξαρτήτως της στρατηγικής φόρτισης και του επιπέδου διείσδυσης τους. Η υιοθέτηση διαφορετικών στρατηγικών φόρτισης επηρεάζει τις ροές ισχύος πάνω στις γραμμές του συστήματος μεταφοράς, επιβαρύνοντας είτε τις διασυνδέσεις είτε τις γραμμές που ενώνουν τα κέντρα παραγωγής με τα κέντρα φορτίου, χωρίς ωστόσο να παραβιάζονται τα θερμικά όρια τους.

Όσον αφορά στην ανάλυση των δικτύων διανομής Μ.Τ. είναι εμφανές ότι κάθε δίκτυο διανομής έχει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης ενός μέγιστου αριθμού ηλεκτρικών οχημάτων, πέραν του οποίου παραβιάζεται ένας ή περισσότεροι λειτουργικοί περιορισμοί του δικτύου (θερμικά όρια γραμμών,

φόρτιση μετασχηματιστών, μέγιστη διακύμανση τάσης κτλ). Το κριτήριο για να τον προσδιορισμό της μέγιστης επιτρεπόμενης διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, τα αστικά δίκτυα διανομής είναι συνήθως πυκνά και το επίπεδο φόρτισης τους είναι υψηλό λόγω του αυξημένου πληθυσμού που εξυπηρετεί. Ως εκ τούτου, η ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων αναμένεται να επιβαρύνει περαιτέρω τη φόρτιση των υποδομών του δικτύου. Αντίθετα, τα επαρχιακά δίκτυα διανομής χαρακτηρίζονται από το μεγάλο μήκος των γραμμών τους, το οποίο συνεπάγεται μεγάλες πτώσεις τάσεις, ενώ το φορτίο που εξυπηρετούν είναι σχετικά χαμηλό. Συνεπώς, για τον προσδιορισμό του μέγιστου επιτρεπτού αριθμού ηλεκτρικών οχημάτων που μπορούν να συνδεθούν σε ένα δίκτυο χωρίς να παραβιάζονται οι λειτουργικοί περιορισμοί των δεικτών διανομής, λαμβάνεται υπόψη η χωρητικότητα του εξοπλισμού του δικτύου στην περίπτωση αστικών δικτύων και το προφίλ της τάσης στην περίπτωση επαρχιακών δικτύων. Όσον αφορά στις στρατηγικές φόρτισης, η υιοθέτηση ευέλικτων στρατηγικών επιτρέπει την καλύτερη αξιοποίηση της χωρητικότητας ενός δικτύου και την ενσωμάτωση μεγαλύτερων ποσοστών διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων. Επιπρόσθετα, η αύξηση του φορτίου του δικτύου λόγω της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των απωλειών του δικτύου ανεξαρτήτου υιοθετούμενης στρατηγικής.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΩΡΕΣ ΜΕ ΧΑΜΗΛΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ

### 3.1 Εισαγωγή

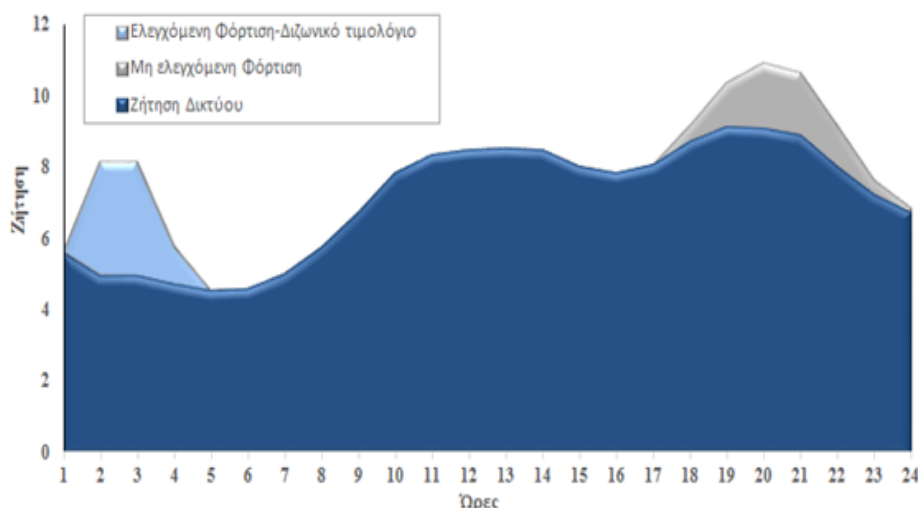
Το επιπρόσθετο φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να επηρεάσει σημαντικά τόσο τη λειτουργία όσο και τον σχεδιασμό των υφιστάμενων δικτύων διανομής, ειδικότερα, στην περίπτωση υψηλών επιπέδων διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων. Οι εκτιμώμενες επιπτώσεις στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας όπως αυτές προσδιορίστηκαν στο Κεφάλαιο 2 απασχολούν τους διαχειριστές δικτύου. Η μη ελεγχόμενη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων για μικρά ποσοστά διείσδυσης δεν αναμένεται να προκαλέσει αισθητές επιπτώσεις στη λειτουργία των δικτύων διανομής. Ωστόσο, η συνεχής αύξηση του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων και η μη υιοθέτηση μηχανισμών διαχείρισης της φόρτισης τους επιδρά σημαντικά στην αύξηση της αιχμής του φορτίου του συστήματος όπως αποδεικνύεται από την ανάλυση του κεφαλαίου 2 για τα ελληνικά δίκτυα διανομής. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν παρόμοιες μελέτες [53], [62], [65], [87], [103] για διαφορετικά δίκτυα διανομής, οι οποίες καταλήγουν σε παρεμφερή συμπεράσματα: το επιπρόσθετο φορτίο από τη μη ελεγχόμενη οικιακή φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων ταυτοχρονίζεται με την αυξημένη οικιακή κατανάλωση με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι πιθανότητες παραβίασης των λειτουργικών ορίων της τάσης του δικτύου ή υπερφόρτισης του εξοπλισμού του.

Για να αποφευχθεί αυτός ο ταυτοχρονισμός απαιτείται η υιοθέτηση ενός συστήματος διαχείρισης της φόρτισης των οχημάτων, το οποίο θα σέβεται τις ενεργειακές ανάγκες μετακίνησης και τις απαιτήσεις του χρήστη και ταυτόχρονα θα αποτρέπει την παραβίαση των λειτουργικών περιορισμών του δικτύου. Η μετατόπιση του φορτίου από τις ώρες αιχμής στις ώρες μη αιχμής μπορεί να επιτευχθεί με ποικίλους τρόπους. Ο πιο συνηθισμένο και απλός τρόπος μετατόπισης φορτίου που υιοθετείται ευρέως είναι η δημιουργία χρονικών ζωνών όπου η ενέργεια τιμολογείται διαφορετικά, ώστε να αντικατοπτρίζεται το επίπεδο ζήτησης: υψηλό φορτίο συνεπάγεται ζώνη υψηλής τιμολόγησης της ενέργειας. Ωστόσο υιοθέτηση διζωνικού τιμολογίου δεν είναι πάντοτε επαρκής λύση, ιδιαίτερα στην περίπτωση όπου το δίκτυο είναι ήδη αρκετά επιβαρυνμένο. Η απλή υιοθέτηση του διζωνικού τιμολογίου έχει ως αποτέλεσμα το ονομαζόμενο «payback effect», δηλαδή τη μετατόπιση του φορτίου σε μεταγενέστερες ώρες (Εικόνα 3-1). Το «payback effect» στη περίπτωση διζωνικού τιμολογίου έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας απότομης αιχμής φορτίου κατά την έναρξη του χαμηλού τιμολογίου, η οποία μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στη λειτουργία του δικτύου όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2.

Στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου προτείνονται μέθοδοι διαχείρισης φορτίου με σκοπό την αποφυγή εμφάνισης νέων αιχμών φορτίου στο δίκτυο λόγω της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων.

### 3.2 Ημερήσιος Ενεργειακός Προγραμματισμός – Ελαχιστοποίηση κόστους

Η ελαχιστοποίηση του κόστους ενέργειας για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων είναι η πιο απλή στρατηγική διαχείρισης τους μετά από αυτή της εφαρμογής διζωνικού τιμολογίου, η οποία δεν είναι πάντα αποδοτική λύση όπως αποδείχθηκε στο Κεφάλαιο 2. Η μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος ελαχιστοποίησης του κόστους φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι ένα απλό γραμμικό πρόβλημα με περιορισμούς την πλήρη φόρτιση των μπαταριών τους και την ονομαστική ισχύ των υποδομών φόρτισης:



Εικόνα 3-1 Διαχείριση ζήτησης φορτίου και «Payback Effect»

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N \sum_{t_0,i}^{t_0,i+T_i} p_t \cdot P_{ch,i,t}^{EV} \cdot \Delta t \quad \text{E 3-1}$$

μ.π.

$$\sum_{t_0,i}^{t_0,i+T_i} P_{ch,i,t}^{EV} \cdot \Delta t - (1 - SOC_{in,i}) \cdot C_{bat}/C_{eff} \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \text{E 3-2}$$

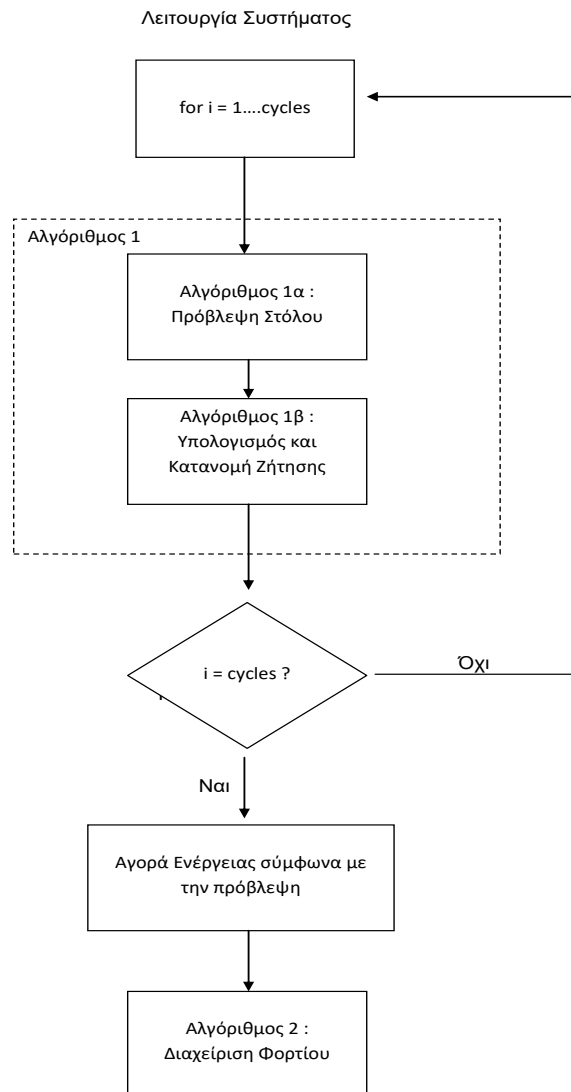
$$P_{ch,i,t}^{EV} \leq P_{nomCS} \quad \forall i = 1, \dots, N, \forall t = 1, \dots, T \quad \text{E 3-3}$$

όπου  $N$  είναι ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων που εξετάζονται,  $p^t$  είναι η (προβλεπόμενη) τιμή αγοράς ενέργειας,  $t_{0,i}$  είναι το διάστημα άφιξης του  $i$ -οστού ηλεκτρικού οχήματος,  $P_{ch,i,t}^{EV} \in \mathbb{R}^+$  είναι η ισχύς φόρτισης του  $i$ -οστού όχημα τη χρονική στιγμή  $t$ ,  $0 \leq SOC_{in,i} \leq 1$  είναι το αρχικό επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας του  $i$ -οστού οχήματος τη στιγμή που συνδέεται στο δίκτυο για να φορτίσει,  $C_{bat}$  είναι η ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας (kWh),  $C_{eff}$  προσδιορίζει την απόδοση της φόρτισης λόγω απωλειών και  $P_{nomCS}$  είναι η ονομαστική ισχύς του σταθμού φόρτισης.

Το παραπάνω γραμμικό μοντέλο ελαχιστοποίησης της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων συναντάται αρκετά συχνά στη βιβλιογραφία [82], [104], [105]) και εφαρμόζεται σε περιπτώσεις με χαμηλή διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο, όπου η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας δεν επηρεάζεται από την επιπρόσθετη ζήτηση της φόρτισης. Ωστόσο, υπάρχουν και πιο σύνθετες στρατηγικές ελαχιστοποίησης του κόστους φόρτισης που λαμβάνουν υπόψη τους τη μεταβολή του κόστους ενέργειας και τα χαρακτηριστικά των γραμμών του δικτύου ([90], [105], [106]). Μια τέτοια υιοθέτηση αυξάνει την πολυπλοκότητα του αλγορίθμου και απαιτεί την εφαρμογή πιο σύνθετων μεθόδων επίλυσης.

Στόχος της ενότητας αυτής είναι η ανάπτυξη ενός απλοποιημένου αλγορίθμου για τη διαχείριση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους ενέργειας. Βασική ιδέα για την ανάπτυξη του αλγορίθμου είναι η εφαρμογή του στο αρχικό στάδιο διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων όπου οι επικοινωνιακές υποδομές για τη διαχείριση των σταθμών φόρτισης είναι σε αρκετά πρώιμο στάδιο και ως εκ τούτου περιορισμένες. Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζεται μια μεθοδολογία για την πλήρη εξυπηρέτηση των ενεργειακών αναγκών μετακίνησης των ηλεκτρικών οχημάτων με το ελάχιστο κόστος που βασίζεται στη χρήση απλών ηλεκτρονικών μετρητών με δυνατότητα απομακρυσμένο ελέγχου.

Στην Εικόνα 3-2 παρουσιάζεται το διάγραμμα λειτουργίας της προτεινόμενης μεθοδολογίας που αποτελείται από δύο μέρη: α) την πρόβλεψη των ενεργειακών αναγκών των ηλεκτρικών οχημάτων και β) την κατανομή του εκτιμώμενου προφίλ ζήτησης στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα σε πραγματικό χρόνο.



**Εικόνα 3-2: Διάγραμμα λειτουργίας της μεθοδολογίας ελαχίστου κόστους για τη διαχείριση των ηλεκτρικών οχημάτων**

Αναλυτικότερα, ο αλγόριθμος 1 χρησιμοποιεί στοχαστικές και ντετερμινιστικές μεταβλητές που αφορούν στα ηλεκτρικά οχήματα, τους σταθμούς φόρτισης και τα μοτίβα οδήγησης με σκοπό την πρόβλεψη των ενεργειακών αναγκών του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων για την επόμενη ημέρα (day-ahead). Για την πρόβλεψη αυτή απαιτείται η επιλογή τυχαίων τιμών από την κατανομή κάθε στοχαστικής μεταβλητής.

Ντετερμινιστικές μεταβλητές:

1. Στόλος ηλεκτρικών οχημάτων
2. Επίπεδα φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (Modes 1,2&3)
3. Απώλειες φόρτισης
4. Είδος φόρτισης (ελεγχόμενη ή μη)
5. Τύποι ηλεκτρικών οχημάτων (PHEV, BEV, L7e,M1,N1,N2)
6. Επιλογή τεχνολογιών σταθμών φόρτισης ανά τύπο οχήματος

Στοχαστικές μεταβλητές:

1. Απόσταση που διανύθηκε μεταξύ δύο διαδοχικών φορτίσεων
2. Συνδεσιμότητα ηλεκτρικών οχημάτων (ώρα και διάρκεια σύνδεσης των ηλεκτρικών οχημάτων με το δίκτυο)

Στόχος του αλγορίθμου είναι η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών τους με το μικρότερο κόστος. Η ελαχιστοποίηση του κόστους απαιτεί τη γνώση ή την πρόβλεψη των τιμών αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για την επόμενη ημέρα. Βάσει της χρονοσειράς των τιμών αγοράς ενέργειας αποφασίζεται η κατανομή της ζητούμενης ισχύος στις ώρες με το χαμηλότερο ενεργειακό κόστος. Η εξαγόμενη κατανομή της ζήτησης στηρίζεται σε ένα σύνολο τυχαίων επιλογών για τις στοχαστικές μεταβλητές. Η «απόζευξη» της κατανομής αυτής από την τυχειότητα των στοχαστικών μεταβλητών μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση της μεθόδου Monte Carlo. Με τη μέθοδο Monte Carlo προσομοιώνονται διαφορετικά σενάρια δεδομένων αναθέτοντας τυχαίες τιμές κάθε φορά στις στοχαστικές μεταβλητές. Η τελική κατανομή προκύπτει από τον μέσο όρο των επιμέρους κατανομών κάθε σεναρίου. Το αποτέλεσμα του αλγορίθμου 1 σε συνδυασμό με τη μέθοδο Monte Carlo είναι ένας πίνακας ο οποίος δείχνει την ισχύ που πρέπει να αγορασθεί από τη day-ahead αγορά ενέργειας για να καλυφθεί η προβλεπόμενη ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων με το ελάχιστο δυνατό (προβλεπόμενο ή μη) κόστος.

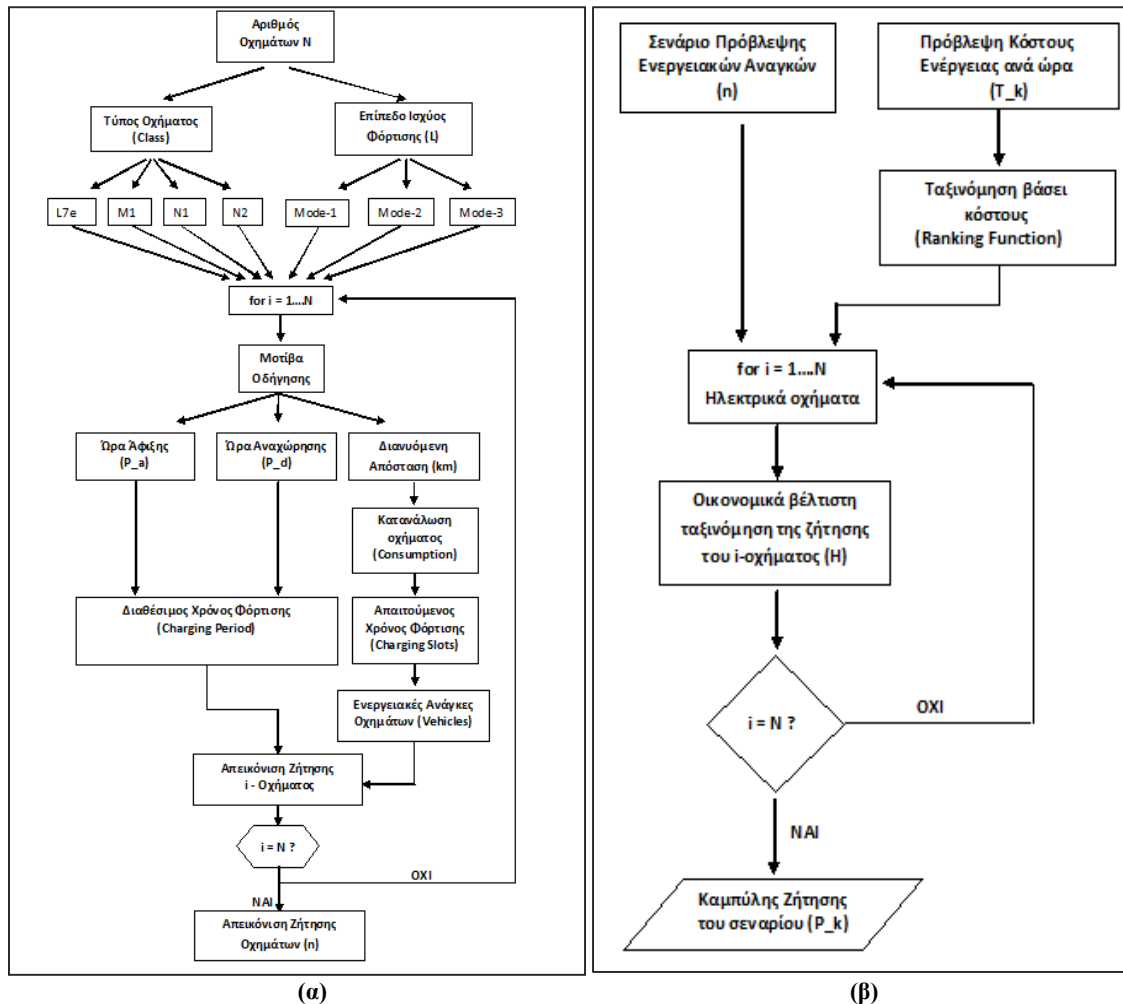
Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος 2 εφαρμόζεται σε πραγματικό χρόνο. Κάθε φορά που ένα ηλεκτρικό όχημα συνδέεται στο ηλεκτρικό δίκτυο για να φορτίσει, η φόρτιση του αποφασίζεται από τον κεντρικό ελεγκτή βάσει των προτιμήσεων του οδηγού (διάρκεια φόρτισης, επίπεδο φόρτισης, τύπος φόρτισης) και της διαθέσιμης αγορασθείσας ισχύος (αλγόριθμος 1). Στόχος του αλγορίθμου 2 είναι η ενεργειακή ισορροπία μεταξύ προβλεπόμενης και πραγματικής ζήτησης.

### 3.2.1 Πρόβλεψη Ενεργειακών Αναγκών

Ο αλγόριθμος πρόβλεψης ενεργειακών αναγκών αποτελείται από δύο μέρη: α) την πρόβλεψη των ενεργειακών αναγκών του στόλου (το εργαλείο αυτό έχει επεξηγηθεί αναλυτικά στο κεφάλαιο) και 2) υπολογισμός και κατανομή ζήτησης.

Ο αλγόριθμος εκτίμησης των ενεργειακών αναγκών των ηλεκτρικών οχημάτων (Εικόνα 3-3(α)) έχει περιγραφεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 2. Το αποτέλεσμα του αλγορίθμου είναι ένας πίνακας που απεικονίζει τον αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων που απαιτούν συγκεκριμένο αριθμό χρονικών περιόδων για πλήρη φόρτιση και για δεδομένο επίπεδο ισχύος φόρτισης (Mode 1-3). Για παράδειγμα, η θέση που εμφανίζεται ο αριθμός 5 υποδηλώνει ότι 5 οχήματα θα ζητήσουν να φορτίσουν σε Mode-2 για 10 χρονικές περιόδους, όχι απαραίτητα διαδοχικές αλλά σίγουρα εντός του εξεταζόμενου διαστήματος φόρτισης που ορίζεται από την ώρα άφιξης και αναχώρησης του εκάστοτε οχήματος.

Τα δεδομένα που προκύπτουν από τον αλγόριθμο (α) αποτελούν δεδομένα εισόδου για τον αλγόριθμο (β) όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3-3(β). Με βάση το σενάριο πρόβλεψης ενεργειακών αναγκών και την πρόβλεψη των ωριαίων τιμών ενέργειας ( $T_k$ ) καθορίζεται η κατανομή της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων κατά τη διάρκεια ενός 24-ώρου. Η συνάρτηση Ranking Function παράγει μια λίστα με τα χρονικά διαστήματα (timeslots) της εξεταζόμενης περιόδου ταξινομημένα κατά αύξουσα σειρά κόστους ηλεκτρικής ενέργειας. Με τον τρόπο αυτό, τα διαστήματα με το μικρότερο κόστος αποκτούν ιεραρχική προτεραιότητα στη διαδικασία φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων σε σχέση με τα ακριβότερα. Στην περίπτωση που δύο ή περισσότερα διαστήματα παρουσιάζουν ίδιο κόστος ενέργειας, τότε προτεραιότητα δίνεται στο διάστημα που έχει τη μικρότερη χρονική απόσταση από το αμέσως προηγούμενο φθηνότερο-διάστημα. Στην περίπτωση όπου και πάλι δύο διαστήματα είναι ισοδύναμα, τότε προτεραιότητα δίνεται στο διάστημα που προηγείται έναντι του άλλου. Στην οικονομικά βέλτιστη κατανομή της ζήτησης του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων, λαμβάνονται υπόψη το προβλεπόμενο προφίλ μετακίνησης του, δηλαδή οι ώρες άφιξης/αναχώρησης, του κάθε ηλεκτρικού οχήματος και οι ενεργειακές ανάγκες του όπως αποτυπώνει ο Πίνακας 3-1



Εικόνα 3-3 Αλγόριθμοι day-ahead προγραμματισμού (α) πρόβλεψη ενεργειακών αναγκών (β) Day-Ahead προγραμματισμός ελαχίστου κόστους

**Πίνακας 3-1: Αποτέλεσμα Αλγορίθμου (1α)**

**Ηλεκτρικά Οχήματα**

Χρονικό διάστημα	Mode-1	Mode-2	Mode-3
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
9	.	.	.
10	.	5	.
11	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

Βάσει του αριθμού των απαιτούμενων διαστημάτων για την πλήρη φόρτιση της μπαταρίας κάθε οχήματος, το προβλεπόμενο προφίλ ζήτησης του  $(H(i))$  προκύπτει με την επιλογή των ισάριθμων διαστημάτων με το χαμηλότερο ενεργειακό. Το πρόβλημα ελαχιστοποίησης του κόστους φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων αναπαρίσταται μαθηματικά ως ακολούθως:

$$Min \sum_{i=1}^N \sum_{t_0,i}^{t_{0,i}+T_i} p_t \cdot x_{i,t} \cdot P_{nomCS} \cdot \Delta t \quad E\ 3-3$$

$$\sum_{t_0,i}^{t_0,i+T_i} \mu.π. x_{i,t} \cdot P_{nomCS} \cdot \Delta t - (1 - SOC_{in,i}) \cdot C_{bat} / C_{eff} \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, N \quad E 3-4$$

όπου  $N$  είναι ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων που εξετάζονται,  $p(t)$  είναι η (προβλεπόμενη) τιμή αγοράς ενέργειας,  $t_{o,i}$  είναι το διάστημα άφιξης του  $i$ -οστού ηλεκτρικού οχήματος,  $P_{nomCS}$  είναι η ονομαστική ισχύς φόρτισης του σταθμού στον οποίο έχει συνδεθεί το  $i$ -οστό όχημα,  $0 \leq SOC_{in,i} \leq 1$  είναι το αρχικό επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας του  $i$ -οστού οχήματος τη στιγμή που συνδέεται στο δίκτυο για να φορτίσει,  $C_{bat}$  είναι η ονομαστική χωρητικότητα της μπαταρίας (kWh) και  $C_{eff}$  προσδιορίζει την απόδοση της φόρτισης λόγω απωλειών. Το δυαδικό διάνυσμα  $x_i$  περιγράφει τα διαστήματα στα οποία το  $i$ -οστό όχημα φορτίζει. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια του διαστήματος  $t$ , το όχημα παραμένει αδρανές αν το  $x_{i,t}=0$ , ενώ φορτίζει αν το  $x_{i,t}=1$ .

Η εκτίμηση του ενεργειακού προφίλ του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων επηρεάζεται άμεσα από την επιλογή των τιμών για τις στοχαστικές παραμέτρους. Ως εκ τούτου, διαφορετικά προφίλ ζήτησης για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων εξάγονται για κάθε σύνολο τιμών των στοχαστικών μεταβλητών που επιλέγεται. Για τον λόγο αυτό, για την εξαγωγή του προφίλ ζήτησης (P-k) του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων υιοθετείται η μέθοδος Monte Carlo, η οποία είναι μια αριθμητική μέθοδος για την επίλυση μαθηματικών προβλημάτων μέσω προσομοίωσης τυχαίων αριθμών.

### Αριθμητικό Παράδειγμα

Υποθέτουμε έναν στόλο 1.000 ηλεκτρικών οχημάτων, τα οποία κατανέμονται στις επιμέρους κατηγορίες οχημάτων ως εξής:

- L7e: 1%
- M1: 88%
- N1: 10%
- N2: 1%

Τα επίπεδα ισχύος φόρτισης είναι τρία:

$$L(j) = \begin{bmatrix} 3,6kW \\ 11kW \\ 45kW \end{bmatrix}$$

Η συσχέτιση μεταξύ των διαφορετικών τύπων οχημάτων και τα διαφορετικά επίπεδα φόρτισης προσδιορίζεται στον παρακάτω πίνακα.

**Πίνακας 3-2: Ποσοστιαία κατανομή οχημάτων ανά τύπο και ισχύ φόρτισης**

	L7e %	M1 %	N1 %	N2 %
<i>Mode-1 (3,6kW)</i>	90	85	85	0
<i>Mode-2 (11kW)</i>	10	10	10	80
<i>Mode-3 (45kW)</i>	0	5	5	20

Οι καταναλώσεις ανά τάξη επιλέγονται να είναι οι μέσες τιμές των καταναλώσεων των οχημάτων όπως παρουσιάζονται παρακάτω:

$$AverCon = \begin{bmatrix} 0,13 \\ 0,16 \\ 0,24 \\ 0,80 \end{bmatrix} kWh/km$$

Οι ημερήσιες διανυόμενες αποστάσεις είναι διαφορετικές για κάθε όχημα και προσδιορίζονται μέσω κανονικών κατανομών. Πιο συγκεκριμένα, οι εξής θεωρήσεις έχουν υιοθετηθεί:

- Για οχήματα τύπου L7e και M1 θεωρούμε ότι οι διανυόμενες αποστάσεις τις καθημερινές ακολουθούν κανονική κατανομή με μέση τιμή 40 km,

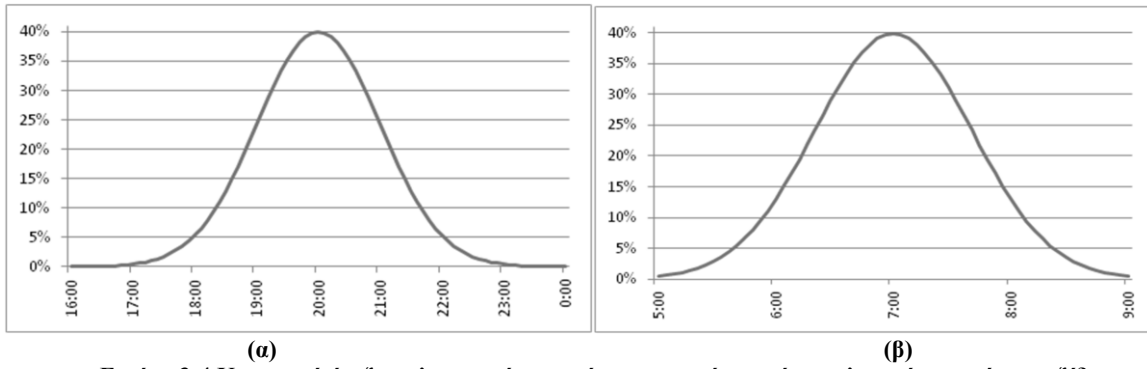
- Για τα οχήματα τύπου N1 θεωρούμε ότι οι διανυόμενες αποστάσεις τις καθημερινές ακολουθούν κανονική κατανομή με μέση τιμή 70 km και
- Για τα οχήματα τύπου N2 θεωρούμε ότι οι διανυόμενες αποστάσεις τις καθημερινές ακολουθούν κανονική κατανομή με μέση τιμή 100.
- Οι μετακινήσεις το Σαββατοκύριακο θεωρούνται μεγαλύτερες με τη μέση τιμή να αυξάνει κατά περίπου 10-25%.

Με βάση τα παραπάνω, η τελική ημερήσια κατανάλωση ενός ηλεκτρικού οχήματος λόγω μετακινήσεων υπολογίζεται από το γινόμενο της μέσης κατανάλωσης του επί τη διανυόμενη απόσταση. Για παράδειγμα, ένα ηλεκτρικό όχημα τύπου L7e που διανύει 40km ημερησίως, με μέση κατανάλωση 0,13kWh/km, έχει καταναλώσει  $40 \times 0,13 = 5,2\text{kWh}$  για τις ανάγκες μετακίνησης του. Διαιρώντας την καταναλισκόμενη ενέργεια με το επίπεδο της ισχύος φόρτισης προκύπτει ο απαιτούμενος χρόνος για πλήρη φόρτιση της μπαταρίας του οχήματος (π.χ.  $5,2\text{kWh}/3,6\text{kW} = 1,44\text{ώρες}$ ). Επειδή η διαίρεση είναι ατελής, η ακρίβεια του εξαγόμενου προφίλ ζήτησης εξαρτάται από τη χρονική διάρκεια των διαστημάτων προσομοίωσης. Όσο πιο μικρή είναι αυτή (πχ. 5 λεπτά, 10 λεπτά, 30 λεπτά, 1 ώρα κτλ) με τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια αποτυπώνονται οι ενεργειακές ανάγκες των ηλεκτρικών οχημάτων. Ωστόσο, όσο μεγαλύτερη ακρίβεια επιζητείται (άρα μικρότερης διάρκειας διαστήματα προσομοίωσης), τόσο μεγαλώνει και ο αριθμός των μεταβλητών βελτιστοποίησης του προβλήματος (E3-3 – E3-4), με αποτέλεσμα να αυξάνει σημαντικά ο χρόνος υπολογισμού της βέλτιστης λύσης. Ανάλογα με τις απαιτήσεις και τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής, η χρονική διάρκεια του διαστήματος επιλέγεται κατάλληλα ώστε να υπάρχει ισορροπία μεταξύ ακρίβειας στην αποτύπωση των ενεργειακών αναγκών των οχημάτων και ταχύτητα επίλυσης. Στην παρούσα διπλωματική το εύρος του διαστήματος προσομοίωσης επιλέχθηκε 15 λεπτά.

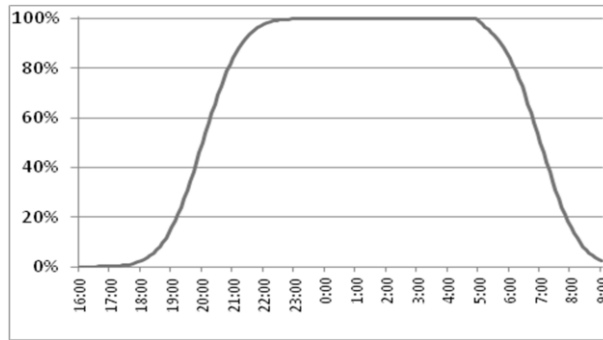
Όσον αφορά στη χρονική στιγμή άφιξης των ηλεκτρικών οχημάτων στην κατοικία του χρήστη μετά το τελευταίο ημερήσιο ταξίδι του, θεωρήθηκε μια κανονική κατανομή με μέση τιμή την ώρα 20:00 και τυπική απόκλιση 1 ώρας (Εικόνα 3-4α). Ως εκ τούτου το αναμενόμενο διάστημα άφιξης των οχημάτων (Arrival Period) είναι μεταξύ των ωρών 17:00 - 23:00. Αντίστοιχη θεώρηση υιοθετήθηκε και για την πρωινή χρονική στιγμή αναχώρησης: κανονική κατανομή με μέση τιμή την ώρα 7:00 και τυπική απόκλιση 1 ώρας (Εικόνα 3-4β). Λαμβάνοντας υπόψη τις δύο παραπάνω κανονικές κατανομές για τις χρονικές στιγμές άφιξης και αναχώρησης των ηλεκτρικών οχημάτων προκύπτουν οι μεταβλητές  $P_a$  και  $P_b$  καθώς επίσης και το εκτιμώμενο ποσοστό συνδεδεμένων οχημάτων ανά ώρα για το χρονικό διάστημα μελέτης (17:00-9:00), όπως παρουσιάζεται στην εικόνα Εικόνα 3-5.

Λαμβάνοντας υπόψη την εκτιμώμενη κατανάλωση ενέργειας των ηλεκτρικών αυτοκινήτων λόγω μετακινήσεων για καθημερινές και Σαβ/κα καθώς και των διαστημάτων προσομοίωσης (15λεπτών), ο Πίνακας 3-3 κατηγοριοποιεί τον στόλο των ηλεκτρικών οχημάτων βάσει του επιπέδου φόρτισης (Mode 1-3) και του αριθμού των χρονικών διαστημάτων (timeslots) που απαιτούνται για την πλήρη φόρτιση της μπαταρίας των οχημάτων. Για παράδειγμα, 360 ηλεκτρικά αυτοκίνητα που φορτίζουν σε επίπεδο ισχύος 3,6kW (Mode-1) χρειάζονται 7x15-λεπτα για να καλύψουν πλήρως τις καθημερινές ενεργειακές ανάγκες τους. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα, μπορεί κάποιος να παρατηρήσει ότι για τα επίπεδα φόρτισης Mode-1 και Mode-2 ο χρόνος φόρτισης έχει αυξηθεί κατά περίπου 1x15-λεπτο στην περίπτωση του Σαβ/κου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην αύξηση της ζήτησης της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων λόγω της αύξησης των διανυόμενων ημερήσιων αποστάσεων τα Σαβ/κα.

Ο Πίνακας 3-3 συνοψίζει τα αποτελέσματα της μεταβλητής *Vehicles* του Αλγορίθμου που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-3(α) που μαζί με τις μεταβλητές  $P_a$  και  $P_b$  αποτελούν τα δεδομένα εισόδου για τον αλγόριθμο της ελαχιστοποίησης του κόστους (Εικόνα 3-3(β)). Λόγω της στοχαστικότητας των παραμέτρων φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων που αφορούν στη χρονική διάρκεια, στη διανυόμενη απόσταση και στην ώρα (time slot) άφιξης και αναχώρησης, τα δεδομένα εισόδου του αλγορίθμου της ελαχιστοποίησης του κόστους φόρτισης είναι διαφορετικά σε κάθε προσομοίωση.



Εικόνα 3-4 Κατανομή άφιξης ηλεκτρικών οχημάτων στο σπίτι μετά το τελευταίο ημερήσιο ταξίδι



Εικόνα 3-5: Ποσοστό οχημάτων που είναι παρκαρισμένα στο σπίτι

Πίνακας 3-3 Κατανομή οχημάτων ανά τύπο και απαιτούμενων διαστημάτων φόρτισης

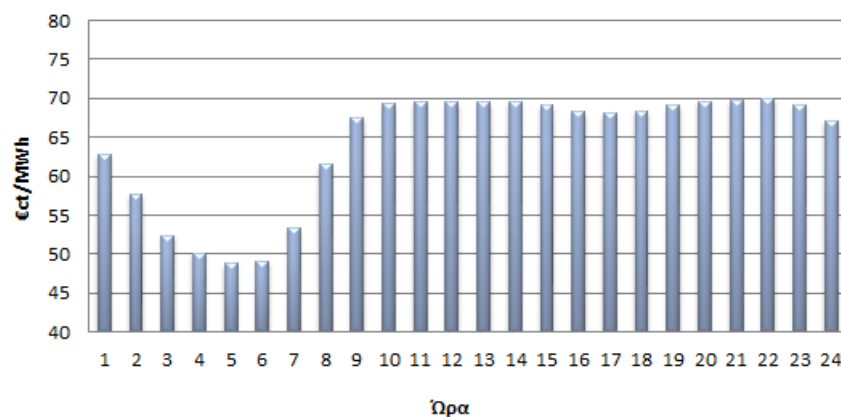
No 15-λεπτο	ΑΡΙΘΜΟΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ					
	Καθημερινές			Σαββατοκύριακα		
	Mode-1	Mode-2	Mode-3	Mode-1	Mode-2	Mode-3
1	0	0	44	0	0	43
2	0	22	5	0	0	6
3	0	67	2	0	53	2
4	0	1	0	0	36	0
5	22	9	0	0	4	0
6	238	2	0	3	5	0
7	360	6	0	51	5	0
8	132	0	0	333	4	0
9	5	0	0	324	0	0
10	5	0	0	44	0	0
11	31	0	0	2	0	0
12	33	0	0	3	0	0
13	12	0	0	38	0	0
14	4	0	0	31	0	0
15	0	0	0	12	0	0
16	0	0	0	1	0	0
17	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0



Πέραν των παραμέτρων που αφορούν στα χαρακτηριστικά της φόρτισης του στόλου των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, (η πρόβλεψη για) το κόστος της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητη. Για τις ανάγκες του παραδείγματος, υιοθετήθηκε η 24-ωρη χρονοσειρά των τιμών αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας της Εικόνα 3-6. Αυτή η χρονοσειρά είχε υιοθετηθεί από το EUDEEP project και αφορά στις τιμές ηλεκτρικής ενέργειας της αγοράς APX<sup>1</sup> για ένα 24-ωρο του έτους 2003. Επειδή το χρονικό βήμα των προσομοιώσεων είναι ίσο με 15-λεπτα, η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας θεωρείται σταθερή για όλα τα 15-λεπτα της ίδιας ώρας.

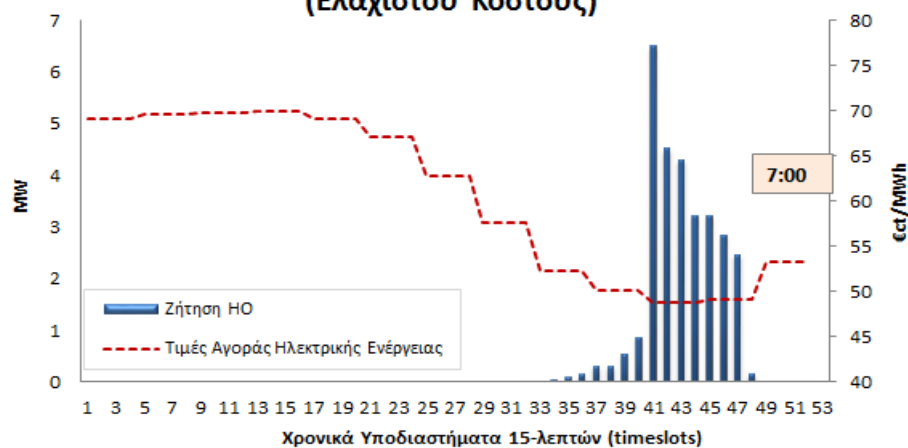
Η εξερχόμενη καμπύλη φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων από τον αλγόριθμο ελαχιστοποίησης του κόστους φόρτισης απεικονίζεται στην Εικόνα 3-7 και αφορά σε μια τυχαία προσομοίωση των στοχαστικών μεταβλητών εισόδου για καθημερινή. Δεδομένου ότι όλα τα ηλεκτρικά οχήματα θα φορτίζουν κατά τη διάρκεια του φθηνότερου χρονικού διαστήματος, παρατηρείται μια έντονη αιχμή ζήτησης κατά τη διάρκεια του. Όσο αυξάνεται το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας αναμένεται μείωση της συνολικής ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων. Η επιλογή των χρονικών διαστημάτων φόρτισης εξαρτάται αφενός μεν από το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας αφετέρου δε από το προφίλ μετακίνησης των ηλεκτρικών οχημάτων (διαθέσιμα χρονικά διαστήματα για φόρτιση).

**Τιμές αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας - APX Market  
(EUDeep project)**



Εικόνα 3-6: 24ωρη χρονοσειρά του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας ανά ώρα

**Προφίλ ζήτησης Ηλεκτρικών Οχημάτων  
(Ελαχίστου Κόστους)**

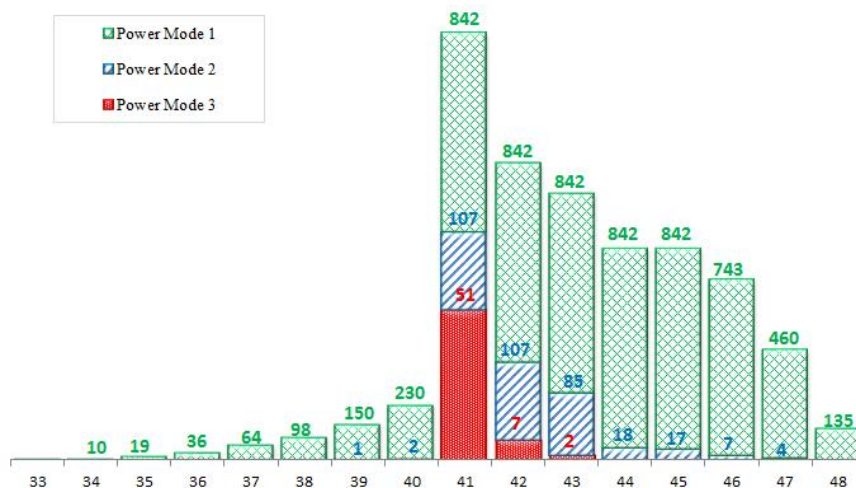


Εικόνα 3-7: Ζήτηση οχημάτων, ταξινομημένων με βάση το ελάχιστο κόστος

Το διάγραμμα στην Εικόνα 3-7 απεικονίζει το αθροιστικό προφίλ του στόλου των οχημάτων. Η κατανομή της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων ανά επίπεδο φόρτισης απεικονίζεται στην

<sup>1</sup> Amsterdam power eXchange (ApX), Historical prices of 2003 [Online]. Available: [www.apx.nl](http://www.apx.nl)

Εικόνα 3-9. Σημειώνεται πως στο παρακάτω διάγραμμα, με κόκκινο απεικονίζεται ο αριθμός των οχημάτων που φορτίζουν σε επίπεδο ισχύος Mode-3, με μπλε σε επίπεδο φόρτισης Mode-2, και με πράσινο σε επίπεδο φόρτισης Mode-1. Το ύψος της κάθε μπάρας είναι ανάλογο με την ισχύ που απαιτείται για να φορτίσει η εκάστοτε κατηγορία οχημάτων ενώ οι αριθμοί στον οριζόντιο άξονα αντιστοιχούν στον αύξοντα αριθμό των υπό εξέταση διαστημάτων προσομοίωσης.



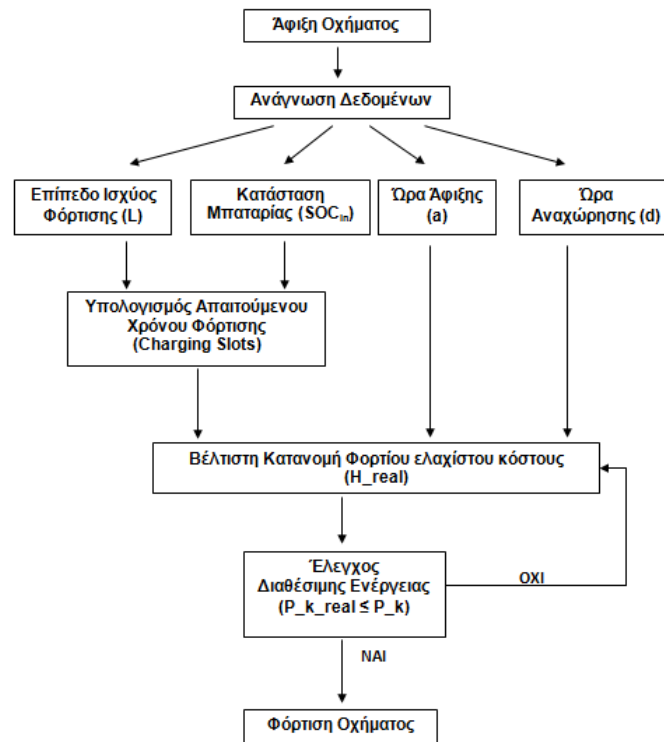
Εικόνα 3-8: Λεπτομερής κατανομή φόρτισης οχημάτων βάσει ισχύος φόρτισης (αλγόριθμος ελαχιστοποίησης κόστους)

Το προφίλ ενέργειας που απεικονίζεται στην Εικόνα 3-7 αφορά σε μια τυχαία προσομοίωση των στοχαστικών παραμέτρων εισόδου. Διαφορετική επιλογή τιμών για τις στοχαστικές παραμέτρους εισόδου θα δημιουργήσει νέο προφίλ ζήτησης για την φόρτιση των αυτοκινήτων. Η μέθοδος Monte Carlo υιοθετήθηκε για την εξαγωγή του προφίλ ζήτησης του στόλου των ηλεκτρικών αυτοκινήτων με την επανάληψη ενός μεγάλου αριθμού προσομοιώσεων του αλγορίθμου ελαχιστοποίησης του κόστους για διαφορετικές τιμές των στοχαστικών παραμέτρων εισόδου. Μετά την εκτέλεση 5000 επαναλήψεων διαπιστώθηκε ότι η μέση τιμή του προφίλ ζήτησης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων παραμένει σχεδόν σταθερή.

### 3.2.2 Διαχείριση του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων σε πραγματικό χρόνο

Με βάση τον προγραμματισμό της προηγούμενης ημέρας όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, η κατανομή της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων σε πραγματικό χρόνο πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τις (ενεργειακές) ανάγκες μετακίνησης των ηλεκτρικών οχημάτων. Η μέθοδος της διαχείρισης του φορτίου σε πραγματικό χρόνο απεικονίζεται στην Εικόνα 3-9. Εν συγκρίσει με το πρόβλημα βελτιστοποίησης (E3-3 – E3-4), ο αλγόριθμος στην Εικόνα 3-9 υιοθετεί έναν επιπρόσθετο περιορισμό ο οποίος επιτάσσει το συνολικό προφίλ φόρτισης σε πραγματικό χρόνο ( $P_{k\_real}$ ) να μην ξεπερνά την προβλεπόμενη ζήτηση ( $P_k$ ).

Λόγω της στοχαστικότητας της μετακίνησης των ηλεκτρικών οχημάτων, οι πραγματικές ενεργειακές ανάγκες των οχημάτων ( $P_{k\_real}$ ) αναμένεται να παρουσιάζουν αποκλίσεις συγκριτικά με την πρόβλεψη της ζήτησης της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων ( $P_k$ ) όπως προκύπτει μετά και την εφαρμογή της Monte Carlo. Το οικονομικά βέλτιστο προφίλ φόρτισης βασισμένο σε πραγματικά δεδομένα μετακίνησης των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να παρουσιάζει είτε θετικές είτε αρνητικές αποκλίσεις εν συγκρίσει με το προβλεπόμενο προφίλ. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό αριθμητικό παράδειγμα τέτοιων αποκλίσεων.



Εικόνα 3-9 Αλγόριθμος κατανομής φορτίου σε πραγματικό χρόνο

**Αριθμητικό Παράδειγμα**

Ας θεωρήσουμε την κατανομή των οχημάτων όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 3-3. Το βέλτιστα οικονομικά προφίλ φόρτισης βάσει της κατανομής του πίνακα αυτού, συγκριτικά με το μέσο προφίλ φόρτισης που προκύπτει από την εφαρμογή της Monte-Carlo, παρουσιάζει ορισμένες αποκλίσεις όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 3-10. Οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται στις διαφορές μεταξύ του προβλεπόμενου προφίλ μετακίνησης και του πραγματικού. Εξ αιτίας των διαφορών αυτών, μετά την εφαρμογή του αλγορίθμου κατανομής φορτίου (Εικόνα 3-9), ορισμένα οχήματα δεν είναι πλήρως φορτισμένα ( Πίνακας 3-4), παρά το γεγονός ότι σε ορισμένα χρονικά διαστήματα υπάρχει περίσσεια ισχύος βάσει πρόβλεψης Εικόνα 3-11.



Εικόνα 3-10 Απόκλιση Ισχύος πραγματικού ( $P_{k\_real}$ ) και προβλεπόμενου προφίλ ζήτησης ( $P_k$ )



Εικόνα 3-11 Περίσσεια ισχύος βάσει προβλεπόμενου προφίλ ζήτησης

Πίνακας 3-4 Λίστα αφόρτιστων ηλεκτρικών οχημάτων

a/a Οχήματος	Επίπεδο Ισχύος Φόρτισης	Απαιτούμενα time slot φόρτισης	Time slot τελικής φόρτισης	Ποσοστό φόρτισης
171	Mode-1	13	12	92,3%
203	Mode-1	12	11	91,6%
976	Mode-1	6	5	83,3%
977	Mode-1	6	5	83,3%
978	Mode-1	6	5	83,3%
999	Mode-1	5	4	80%
1000	Mode-1	5	4	80%

Θα πρέπει να σημειωθεί στο σημείο αυτό, ότι οι αποκλίσεις μπορεί να διαφοροποιούνται (μικρότερες ή μεγαλύτερες) ανάλογα με το εκάστοτε θεωρούμενο προφίλ μετακίνησης. Για να περιοριστεί το σφάλμα πρόβλεψης και να μειωθούν οι αποκλίσεις προτείνεται είτε η χρήση πιο αναβαθμισμένων και ευέλικτων αλγορίθμων φόρτισης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων είτε η χρήση αποθηκευτικού μέσου. Στη συνέχεια της διατριβής θα παρουσιαστούν διαφορετικές μέθοδοι (κυρίως αποκεντρωμένοι) που επιτρέπουν τη βέλτιστη διαχείριση ενός στόλου ηλεκτρικών αυτοκινήτων με σκοπό να επιτευχθούν ποικίλοι τεχνικοί και/ή οικονομικοί στόχοι.

### 3.2.3 Πρόβλεψη ενεργειακών αναγκών με περιορισμό της αιχμής ζήτησης της φόρτισης

Στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκε ένας αλγόριθμος ενεργειακού προγραμματισμού για την ελαχιστοποίηση του κόστους ενέργειας. Από τα αποτελέσματα που εμφανίζονται στην Εικόνα 3-7 είναι εμφανές ότι στα χρονικά διαστήματα με το μικρότερο κόστος ενέργειας παρατηρείται έντονη αύξηση της ζήτησης για φόρτιση. Πιο συγκεκριμένα, για έναν στόλο 1000 ηλεκτρικών οχημάτων, η αιχμή ζήτησης για τη φόρτιση τους ξεπερνά τα 6MW. Μια τέτοια αιχμή ζήτησης προστιθέμενη στην καμπύλη φορτίου ενός δικτύου διανομής δύναται να προκαλέσει υπερφόρτιση των γραμμών ή των Μ/Σ του.

Για τον περιορισμό της αιχμής ζήτησης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, στον αλγόριθμο του ενεργειακού προγραμματισμού μπορεί να υιοθετηθεί ένας περιορισμός για τη μέγιστη επιτρεπτή αιχμή ζήτησης ( $P_k_{lim}$ ). Η υιοθέτηση του επιπρόσθετου περιορισμού αφορά σε περιπτώσεις όπου τα ποσοστά διείσδυσης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι υψηλά. Το όριο αυτό στην αιχμή ζήτησης μπορεί να προσδιοριστεί από το διαχειριστή του συστήματος διανομής.

Το όριο στην αιχμή ζήτησης μπορεί να εκφραστεί σαν ποσοστό της αρχικής αιχμής ζήτησης όπως αυτή εκτιμάται από τον αλγόριθμο που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Η μείωση της ζήτησης αυτής επιτυγχάνεται με τη μετατόπιση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων στα χρονικά διαστήματα με το αμέσως πιο φθινό κόστος ενέργειας. Η μετατόπιση της ζήτησης πραγματοποιείται με τρόπο ώστε να ικανοποιούνται πλήρως οι ενεργειακές ανάγκες των ηλεκτρικών οχημάτων, δηλαδή πλήρη φόρτιση της μπαταρίας πριν το πρώτο πρωινό δρομολόγιο, καθώς και να μην παραβιάζεται το όριο αιχμής ζήτησης που έχει θεωρηθεί.

Με βάσει τα παραπάνω, ο αλγόριθμος κατανομής φορτίου σε πραγματικό χρόνο όπως περιγράφηκε προηγουμένως και απεικονίζεται στην Εικόνα 3-9 τροποποιείται με την υιοθέτηση ενός επιπρόσθετου περιορισμού για το μέγιστο όριο αιχμής ζήτησης στο πρόβλημα βελτιστοποίησης (E 3-3) – (E 3-4):

$$\text{Min } \sum_{i=1}^N \sum_{t_0,i}^{t_0,i+T_i} p_t \cdot x_i(t) \cdot P_{nomCS} \cdot \Delta t \quad \text{E 3-5}$$

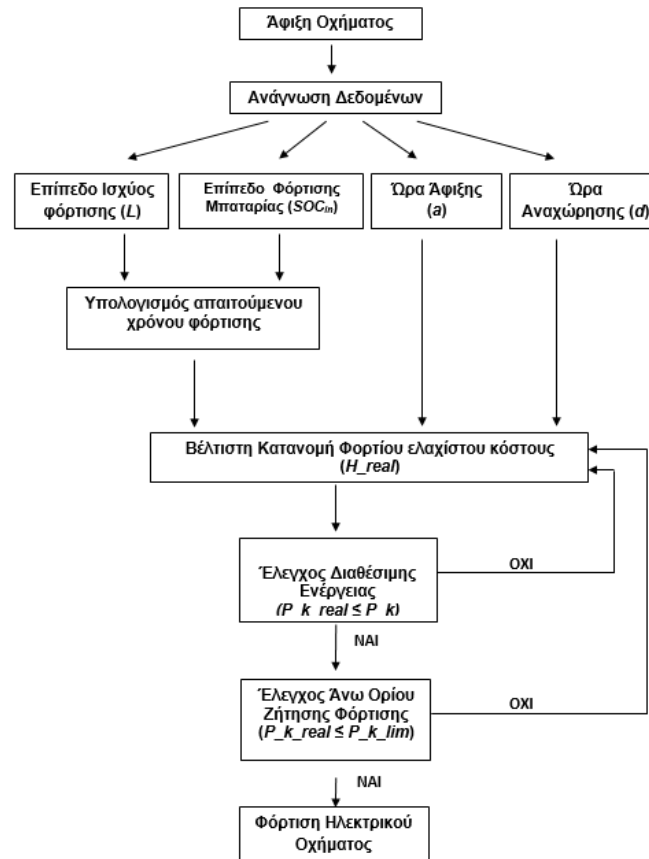
$$\begin{aligned} \mu.π. \\ \sum_{t_0,i}^{t_0,i+T_i} x_i(t) \cdot P_{nomCS} \cdot \Delta t - (1 - SOC_{in,i}) \cdot C_{bat}/C_{eff} \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, N \quad \text{E 3-6} \\ \sum_{i=1}^N x_i(t) \cdot P_{nomCS} \leq P_{k\_lim}(t) \quad \forall t = 1, \dots, T \quad \text{E 3-7} \end{aligned}$$

Ο τροποποιημένος αλγόριθμος κατανομής φορτίου σε πραγματικό χρόνο με υιοθέτηση άνω ορίου αιχμής ζήτησης (3MW) για τη φόρτιση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-12.

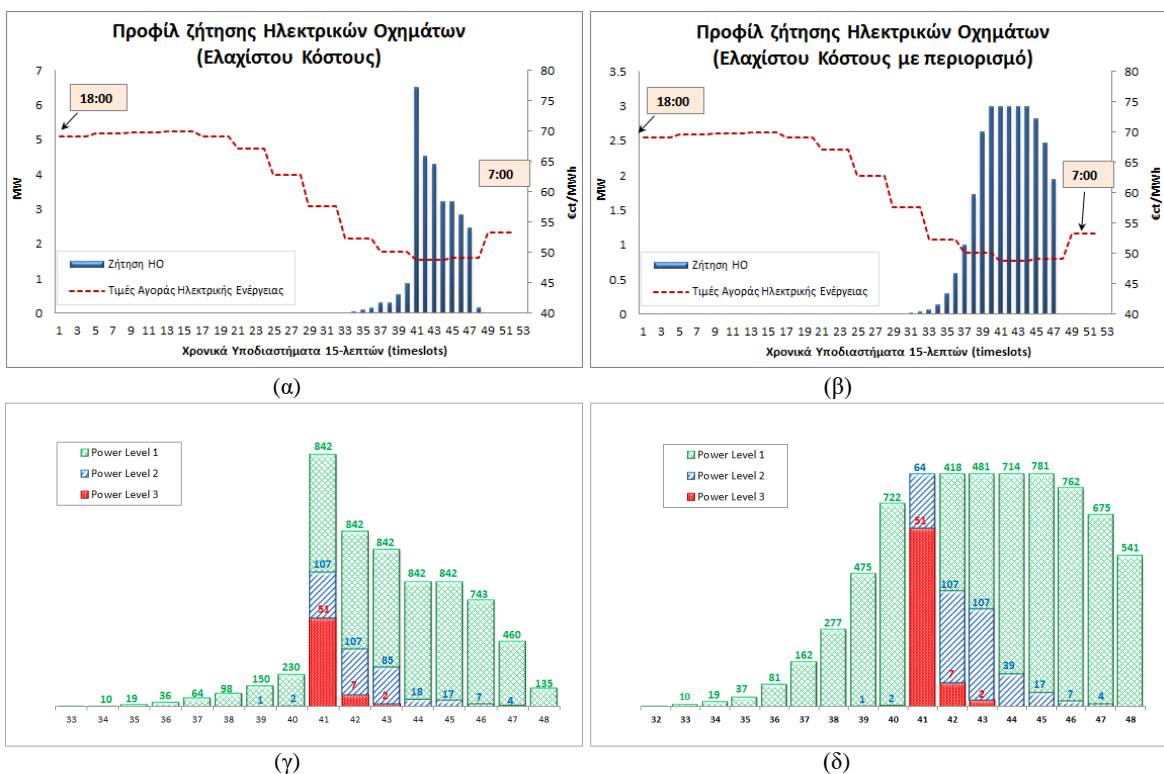
Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του τροποποιημένου αλγορίθμου παρουσιάζονται στην Εικόνα 3-13. Τα διαγράμματα (α) και (γ) αφορούν στη βέλτιστη οικονομική κατανομή χωρίς περιορισμό αιχμής ζήτησης ενώ στα διαγράμματα (β) και (δ) έχει θεωρεί ο περιορισμός. Τα διαγράμματα (γ) και (δ) είναι ενδεικτικά της μετατόπισης φορτίου από τις ώρες με την φθηνότερη ηλεκτρική ενέργεια στις αμέσως επόμενες ώρες με την φθηνότερη ενέργεια έτσι ώστε η αιχμή ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων να μην ξεπερνά ένα ανώτερο όριο.

Το όριο στην αιχμή ζήτησης θεωρήθηκε σταθερό για την παραπάνω ανάλυση για όλο το εξεταζόμενο χρονικό διάστημα. Το όριο αυτό θα μπορούσε να είναι μεταβλητό ως προς το χρόνο όπως για παράδειγμα αν θεωρεί ότι το τροποποιημένο φορτίο του δικτύου (καμπύλη ζήτησης δικτύου και φορτίο ηλεκτρικών οχημάτων) δεν πρέπει να ξεπερνά ένα άνω όριο κατά τη διάρκεια της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Σε αυτή την περίπτωση, δεδομένης της καμπύλης ζήτησης του δικτύου, το όριο αιχμής φόρτισης προσδιορίζεται αν αφαιρεθεί η ωριαία ζήτηση του δικτύου από το άνω όριο που έχει θεωρηθεί. Όσο πιο χαμηλό είναι το όριο αυτό, τόσο μικρότερη είναι η αιχμή ζήτησης του δικτύου που οφείλεται στη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων. Η μείωση της αιχμής ζήτησης από τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων συνεισφέρει στην μείωση των αιχμών του φορτίου ενός δικτύου διανομής, στη μείωση των απωλειών των γραμμών και αυξάνει τον μέγιστο αριθμό οχημάτων που μπορούν να συνδεθούν στο δίκτυο χωρίς να απαιτούνται επενδύσεις αναβάθμισης του δικτύου. Επιπρόσθετα, για μεγάλα ποσοστά διείσδυσης η μείωση της αιχμής ζήτησης των οχημάτων σε μακροσκοπικό επίπεδο (σύστημα παραγωγής) συνεισφέρει στην οικονομικότερη λειτουργία του δικτύου ενέργειας (δεδομένου ότι απότομη αύξηση του φορτίου συνεπάγεται απότομη αύξηση των τιμών αγοράς ενέργειας).

Ωστόσο υπάρχει μια ελάχιστη τιμή για το όριο αιχμής ζήτησης χαμηλότερα της οποίας κάποια οχήματα δεν θα φορτιστούν πλήρως. Όταν το όριο αιχμής ζήτησης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων γίνει ελάχιστο, τότε έχουμε την περίπτωση ελαχιστοποίησης της αιχμής του φορτίου ζήτησης. Η επιλογή του ελάχιστου ορίου αιχμής ζήτησης βάσει του φορτίου ενός δικτύου διανομής έχει ως αποτέλεσμα την ελαχιστοποίησης της διακύμανσης του φορτίου (“valley-filling”), όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας διατριβής.



Εικόνα 3-12 Τροποποιημένος αλγόριθμος κατανομής φορτίου με υιοθέτηση ορίου αιχμής ζήτησης φόρτισης



Εικόνα 3-13 Συγκριτικά αποτελέσματα για το προφίλ ζήτησης φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων με και χωρίς τη θεώρηση ορίου αιχμής ζήτησης

### 3.3 Ελαχιστοποίηση διακύμανσης ζήτησης του δικτύου (“Valley-Filling”)

Στην προηγούμενη ενότητα εξετάστηκε ένας αλγόριθμος για την ελαχιστοποίηση του κόστους φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Ο αλγόριθμός αυτός βασίζεται στην παραδοχή ότι το φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων είναι πολύ μικρό εν συγκρίσει με το φορτίο του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και ως εκ τούτου η τιμή της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας δεν επηρεάζεται από την επιπρόσθετη ζήτηση για τη φόρτιση των μπαταριών τους (αυτό ισχύει για μικρά ποσοστά διείσδυσης ηλεκτρικών αυτοκινήτων). Ωστόσο, όταν το ποσοστό διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι ιδιαίτερα υψηλό, η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να μεταβληθεί αναλόγως με το προφίλ της ζήτησης για την πλήρη φόρτιση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων.

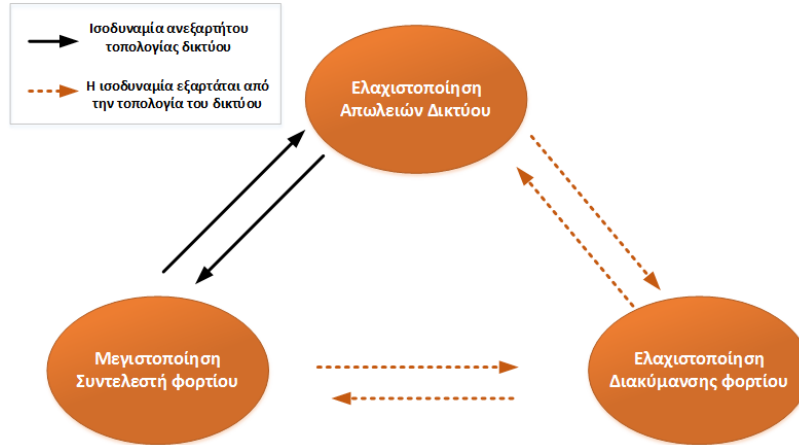
Η αύξηση της ζήτησης σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας συνεπάγεται και την αύξηση των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας. Η συσχέτιση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας με το κόστος παραγωγής μπορεί να αναπαρασταθεί με ποικίλους τρόπους, θεωρώντας για παράδειγμα μια βηματική συνάρτηση ή μια τμηματικώς γραμμική συνάρτηση που προσεγγίζει μια αντίστοιχη βηματική αναπαράσταση ενέργειας-κόστους ή μια απλοποιημένη τετραγωνική κυματομορφή ([107], [108], [109]). Παρόλο που οι τιμές αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας δεν αντανακλούν επακριβώς τη ζήτηση, οι απότομες αυξήσεις του φορτίου αναμένεται να προκαλέσουν αύξηση του κόστους παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχουν πρακτικές μελέτες ([110]-[111]) που αποδεικνύουν ότι η ελαχιστοποίηση της διακύμανσης της ζήτησης (“valley-filling”) ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας συνεπάγεται την ελαχιστοποίηση (“near optimal”) του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας.

Η ελαχιστοποίηση της διακύμανσης του προφίλ ζήτησης σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας πέραν του οικονομικού οφέλους συνεισφέρει και στην αποδοτικότερη λειτουργία των δικτύων διανομής όπως αποδείχθηκε στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας διατριβής. Σύμφωνα με την ανάλυση του Sortomme [75], υπάρχει ένα τρίγωνο ισοδυναμίας μεταξύ 3 προβλημάτων: ελαχιστοποίησης της διακύμανσης φορτίου – μεγιστοποίησης του συντελεστή φορτίου – ελαχιστοποίηση απωλειών ([112]-[113]). Το τρίγωνο ισοδυναμίας απεικονίζεται στην Εικόνα 3-14 με μαύρα, συνεχή βέλη αναπαρίστανται οι ισοδυναμίες που έχουν ισχύ ανεξαρτήτου τοπολογίας του δικτύου που μελετάται, ενώ με κόκκινα, διακεκομμένα βέλη αναπαρίστανται οι ισοδυναμίες που ισχύουν απόλυτα υπό προϋποθέσεις. Πιο συγκεκριμένα, η απόλυτη ισοδυναμία μεταξύ απωλειών-διακύμανσης και απωλειών-συντελεστή φορτίου ισχύει για δίκτυα διανομής με ένα ζυγό τροφοδοσίας (feeder) από τον υποσταθμό και το φορτίο συγκεντρωμένο στο τέλος της γραμμής. Οι παραπάνω παραδοχές δεν είναι ρεαλιστικές για πραγματικά δίκτυα διανομής. Ωστόσο αποδεικνύεται [75] ότι η ελαχιστοποίηση των απωλειών σε ένα δίκτυο διανομής μπορεί να προσεγγίσει με ικανοποιητική ακρίβεια το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης της διακύμανσης του φορτίου. Αυτή η παρατήρηση είναι ιδιαίτερα σημαντική γιατί η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενός δικτύου είναι ένα πιο σύνθετο πρόβλημα που απαιτεί την γνώση των τεχνικών χαρακτηριστικών του δικτύου καθώς και το φορτίο κάθε ζυγού του δικτύου. Αντίθετα, η ελαχιστοποίηση της διακύμανσης του φορτίου απαιτεί τη γνώση μόνο του αθροιστικού προφίλ ζήτησης στο επίπεδο του υποσταθμού ενός δικτύου διανομής.

Το επιπρόσθετο κόστος εξυπηρέτησης της ζήτησης λόγω των απωλειών δικτύου επιβαρύνει αρχικά τους παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας και κατ’ επέκταση τον τελικό καταναλωτή ηλεκτρικής ενέργειας. Ως εκ τούτου, η μείωση των απωλειών λειτουργίας σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του λειτουργικού κόστους του δικτύου. Επιπρόσθετα, η μείωση των απωλειών του δικτύου ωφελεί και τους λειτουργούς των δικτύων καθώς συνεισφέρει στην αποδοτικότερη λειτουργία τους, όπως αποδείχθηκε από την ανάλυση του Κεφαλαίου 2 της παρούσας διατριβής.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, η ελαχιστοποίηση της διακύμανσης της ζήτησης σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη το επιπρόσθετο φορτίο λόγω της φόρτισης των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων, προσφέρει τόσο οικονομικά όσο και τεχνικά οφέλη. Στις επόμενες παραγράφους θα αναλυθούν δύο αλγόριθμοι, ένας κεντρικός και ένας αποκεντρωμένος, που επιτρέπουν την ελαχιστοποίηση της διακύμανσης της ζήτησης σε ένα δίκτυο διανομής. Η απόδοση των δύο αυτών μεθόδων θα αναλυθεί και συγκριθεί στη συνέχεια μέσω προσομοιώσεων από την εφαρμογή τους σε ένα ρεαλιστικό μοντέλο προσομοίωσης μια γραμμής του αστικού δικτύου διανομής της Κατερίνης.

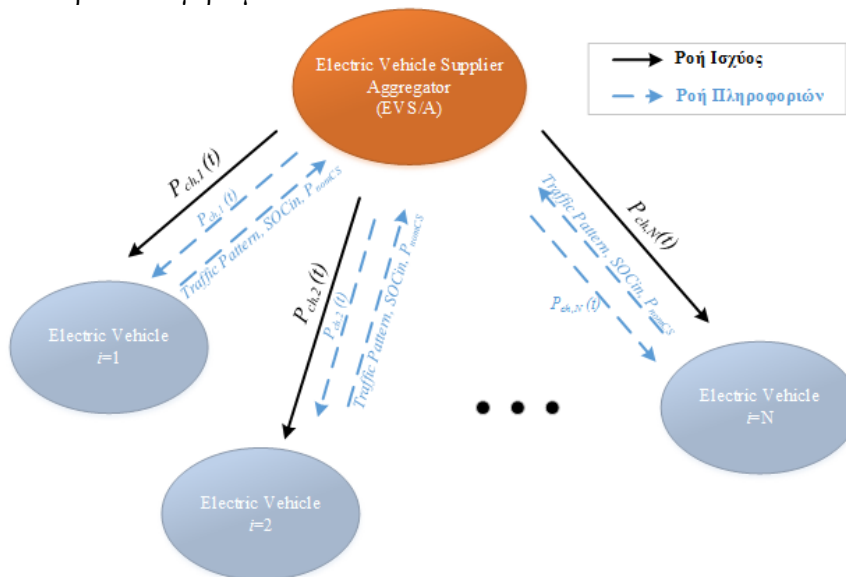




Εικόνα 3-14 Συγκριτικά αποτελέσματα για το προφίλ ζήτησης φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων με και χωρίς τη θεώρηση ορίου αιχμής ζήτησης

### 3.3.1 Κεντρικός αλγόριθμος

Η στρατηγική της ελαχιστοποίησης της διακύμανσης του φορτίου (“valley-filling”) για τη διαχείριση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι η πιο εφαρμοσμένη πρακτική στη βιβλιογραφία. Στον κεντρικό έλεγχο, όλα τα δεδομένα φόρτισης συμπεριλαμβανομένων όλων των δευτερευόντων πληροφοριών διαβιβάζονται σε έναν ενιαίο κεντρικό σημείο. Η συλλογή και η επεξεργασία τους γίνεται από έναν κεντρικό συντονιστή (*Electric Vehicle Supplier Aggregator - EVSA*), ο οποίος καθορίζει το επίπεδο φόρτισης των διασυνδεδεμένων ηλεκτρικών οχημάτων κάθε χρονική στιγμή  $t$  με σκοπό την επίτευξη της ελαχιστοποίησης της διακύμανσης του φορτίου (“valley-filling”). Στην Εικόνα 3-15 απεικονίζεται η αρχιτεκτονική του συστήματος για την υλοποίηση του κεντρικού αλγορίθμου.



Εικόνα 3-15 Αρχιτεκτονική Συστήματος Κεντρικού Αλγορίθμου (“valley-filling”)

Η μαθηματική αναπαράσταση του προβλήματος για την ελαχιστοποίηση της διακύμανσης του φορτίου σε ένα δίκτυο παρουσιάζεται παρακάτω:

$$\min_{P_{ch,i}} J_{cent} = \sum_{t=1}^T (\sum_{i=1}^N P_{ch,i,t}^{EV} + D^t - \mu)^2 \quad \text{E 3-8}$$

μ.π.

$$h_{1,i}(P_{ch}): \sum_{t=1}^T P_{ch,i,t}^{EV} \Delta t - (1 - SOC_{in,i}) \frac{C_{bat}}{C_{eff}} = 0 \quad \text{E 3-9}$$



$$\text{ή ισοδύναμα } SOC_i(T) - 1 = 0 \quad \text{E 3-10}$$

$$g_{1,i,t}(P_{ch}): P_{ch,i,t}^{EV} - P_{nomCS} \leq 0 \quad \text{E 3-11}$$

$$\text{για } P_{ch,i,t}^{EV} \in \mathfrak{R}^+, i = 1, 2, \dots, N \text{ EVs}, t = 1, 2, \dots, T \quad \text{E 3-12}$$

$$\mu = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (D^t + \sum_{i=1}^N P_{ch,i,t}^{EV}) \quad \text{E 3-13}$$

$$SOC_i(t+1) - SOC_i(t) = \frac{1}{C_{bat}} P_{ch,i,t}^{EV} \cdot C_{eff} \Delta t \quad \text{E 3-14}$$

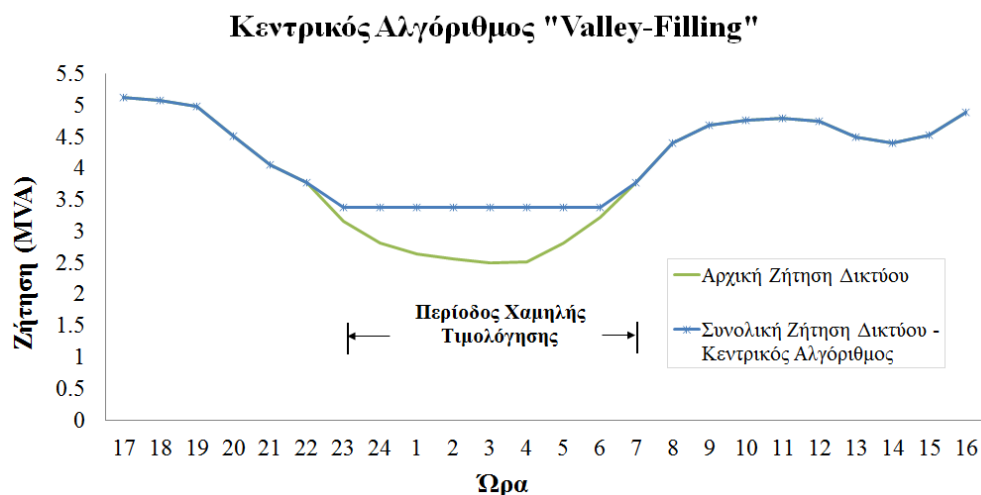
όπου  $P_{ch,i,t}^{EV}$  είναι το επίπεδο φόρτισης του εκάστοτε  $i$ -οστού ηλεκτρικού οχήματος τη χρονική στιγμή  $t$ ,  $D^t$  είναι η ζήτηση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας (χωρίς το φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων),  $\mu$  είναι μέση τιμή του επαυξημένου φορτίου του δικτύου για τη χρονική περίοδο που μελετάται,  $SOC_{in,i}$  είναι το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας τη χρονική στιγμή σύνδεσης του  $i$ -οστού οχήματος στο δίκτυο για φόρτιση,  $SOC_i(t)$  είναι το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας τη χρονική στιγμή  $t$  του  $i$ -οστού οχήματος,  $C_{bat}$  (kWh) είναι η ονομαστική ισχύς της μπαταρίας,  $C_{eff}$  είναι η απόδοση της φόρτισης λόγω των απωλειών των ηλεκτρονικών ισχύος και  $P_{nomCS}$  είναι η ονομαστική ισχύς των υποδομών φόρτισης.

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης της διακύμανσης του φορτίου για τη διαχείριση της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων όπως διατυπώθηκε παραπάνω είναι ένα πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού με γραμμικούς περιορισμούς. Όσο αυξάνεται ο αριθμός των οχημάτων αυξάνεται ο αριθμός των μεταβλητών και των περιορισμών με αποτέλεσμα να αυξάνεται και ο υπολογιστικός χρόνος. Εξ αιτίας της τετραγωνικής μορφής της αντικειμενικής συνάρτησης, ο υπολογιστικός χρόνος για την επίλυση του κεντρικού προβλήματος αναμένεται να έχει εκθετική αύξηση εν συγκρίσει με την αύξηση του μεγέθους του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων. Η επίλυση του μπορεί να γίνει με τη χρήση των βιβλιοθηκών `fmincon` της Matlab ή `CPLEX` του GAMS.

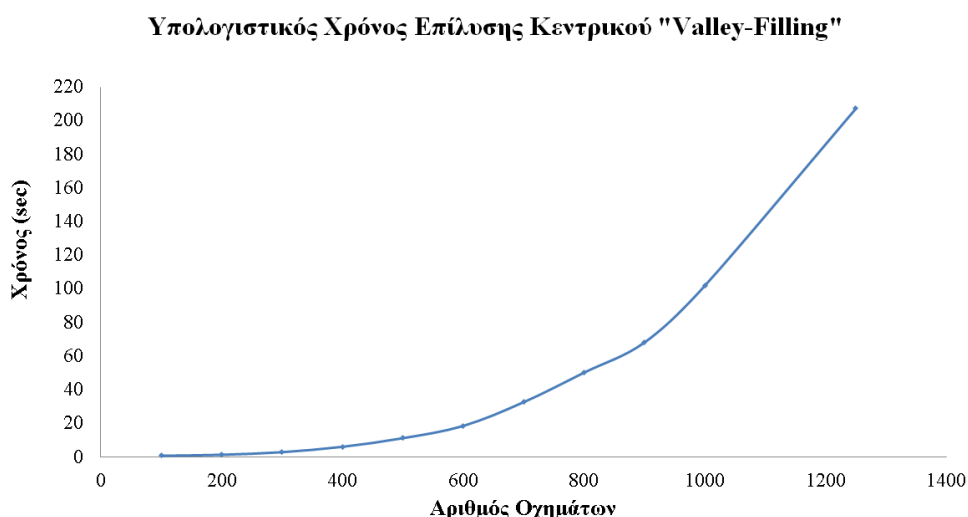
### Αριθμητικό Παράδειγμα

Ας θεωρήσουμε ένα στόλο 460 οχημάτων τύπου M1 με μπαταρία χωρητικότητας 16kWh. Οι υποδομές φόρτισης θεωρούμε ότι είναι οικιακής χρήσης χαμηλής ισχύος,  $P_{nomCS}=3\text{kWh}$ . Οι συνολικές απώλειες του σταθμού φόρτισης προσεγγίζονται ως ποσοστό του επιπέδου φόρτισης,  $C_{eff}=80\%$ . Το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας λόγω την ημερήσιων μετακινήσεων θεωρείται κατά μέσο όρο ίσο με  $SOC_{in}=45\%$ . Επίσης, θεωρούμε ότι η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων πρέπει να πραγματοποιηθεί εντός της περιόδου χαμηλής τιμολόγησης, δηλαδή 23:00-7:00 (για καλοκαιρινούς μήνες). Ως εκ τούτου, όλα τα ηλεκτρικά οχήματα θα πρέπει να είναι πλήρως φορτισμένα μέχρι τις 7:00 ακόμα και αν κάποια αναχωρούν αργότερα ( $t_{depart} \geq 7:00$ ).

Βάσει των παραπάνω θεωρήσεων για τις παραμέτρους εισόδου, το αποτέλεσμα από την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης (E-8 – E-14) απεικονίζεται στην Εικόνα 3-16. Όπως προαναφέρθηκε, ο υπολογιστικός χρόνος για την επίλυση του κεντρικού αλγορίθμου “valley-filling” αναμένεται να έχει εκθετική αύξηση συγκριτικά με την αύξηση του μεγέθους του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων λόγω της τετραγωνικής μορφής της αντικειμενικής συνάρτησης στην εξίσωση E-8. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται και από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στη Matlab σε υπολογιστή (Intel i5 2400K, 3.1GHz, 4cores, 8GB DDR3, PCE-10700 1333MHz). Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τον χρόνο σύγκλισης του αλγορίθμου θεωρώντας διαφορετικά μεγέθη στόλου ηλεκτρικών οχημάτων απεικονίζονται στην Εικόνα 3-17. Η επίλυση του κεντρικού προβλήματος έγινε σε περιβάλλον Matlab χρησιμοποιώντας την βιβλιοθήκη `quadprog`.



Εικόνα 3-16 Αποτέλεσμα κεντρικού αλγορίθμου για "valley-filling"



Εικόνα 3-17 Αποτελέσματα σύγκλισης κεντρικού αλγορίθμου συναρτήσει του αριθμού ηλεκτρικών οχημάτων

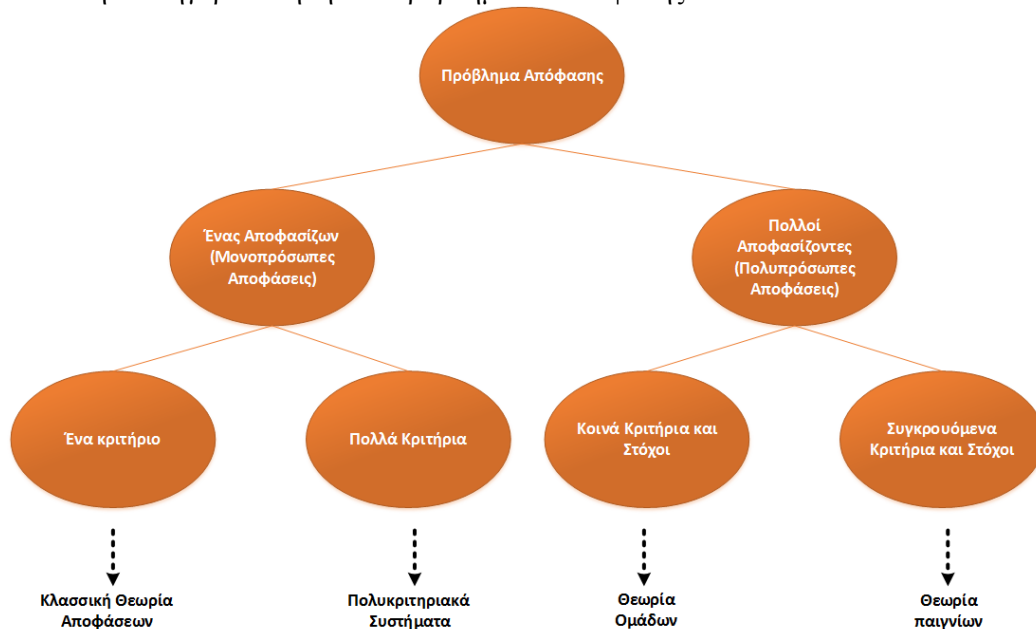
### 3.3.2 Αποκεντρωμένος αλγόριθμος "Valley-Filling"

Κατά τον σχεδιασμό ενός συστήματος διαχείρισης της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων θα πρέπει να ληφθούν υπόψη οι εξής προκλήσεις: ο αριθμός των μεταβλητών, η υπολογιστική πολυπλοκότητα του προβλήματος καθώς και η αβεβαιότητα που εισάγεται λόγω της δυναμικής συμπεριφοράς των ηλεκτρικών οχημάτων που οφείλεται στην κινητικότητα τους. Στην προηγούμενη ενότητα αποδείχθηκε ότι ο κεντρικός αλγόριθμος που επιτυγχάνει "valley-filling" παρουσιάζει εκθετική σύγκλιση συγκριτικά με τον αριθμό ηλεκτρικών οχημάτων που εξετάζεται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η επεξεργασία των δεδομένων και η επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης γίνεται από ένα κεντρικό σημείο. Η αποσύνθεση του κεντρικού προβλήματος σε επιμέρους υπο-προβλήματα και η επίλυση τους από διαφορετικά σημεία ελέγχου μπορεί να επιταχύνει την επίλυση τέτοιων προβλημάτων.

Στην ενότητα αυτή θα αναπτυχθεί και αναλυθεί ένας αποκεντρωμένος αλγόριθμος διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων με στόχο την ελαχιστοποίηση της διακύμανσης του φορτίου του δικτύου ηλεκτρική ενέργειας. Προτού παρουσιαστεί ο αλγόριθμος είναι απαραίτητο να αναλυθεί η αρχιτεκτονική του αποκεντρωμένου αλγορίθμου καθώς και ο ρόλος των ενεργειακών παικτών που συμμετέχουν σε αυτόν για την κατανόηση του.

### 3.3.2.1 Προβλήματα αποφάσεων - Θεωρία Παιγνίων

Τα προβλήματα απόφασης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο μεγάλες υποκατηγορίες ανάλογα με τον αριθμό των παικτών που συμμετέχουν στη λήψη της απόφασης. Πιο συγκεκριμένα, υπάρχουν προβλήματα με έναν αποφασίζοντα (μονοπρόσωπες αποφάσεις) και με πολλούς (πολυπρόσωπες αποφάσεις). Τα προβλήματα μονοπρόσωπων αποφάσεων κατηγοριοποιούνται περαιτέρω σε προβλήματα απόφασης με ένα κριτήριο (κλασική θεωρία αποφάσεων) και με πολλά κριτήρια (πολυκριτηριακά συστήματα). Αντίστοιχα, τα προβλήματα πολυπρόσωπων αποφάσεων κατηγοριοποιούνται περαιτέρω σε προβλήματα με κοινά κριτήρια/στόχους (θεωρία ομάδων) και συγκρουόμενα κριτήρια και στόχοι (θεωρία παιγνίων). Το διάγραμμα στην Εικόνα 3-18 απεικονίζει συνοπτικά την κατηγοριοποίηση των προβλημάτων απόφασης.



Εικόνα 3-18 Μια κατηγοριοποίηση των προβλημάτων απόφασης<sup>2</sup>

Στην ενότητα αυτή θα επικεντρωθούμε στα προβλήματα πολυπρόσωπων αποφάσεων με συγκρουόμενα κριτήρια (non-cooperative games) τα οποία επιλύονται με τη χρήση μεθόδων της θεωρίας παιγνίων [115]. Οι θεμελιώδεις αρχές ενός μη-συνεργατικού παιγνίου συνοψίζονται παρακάτω:

- Κάθε παίκτης που συμμετέχει στο παίγνιο έχει τη δυνατότητα επιλογής 2 ή περισσότερων στρατηγικών.
- Τα οφέλη από την επιλογή κάθε στρατηγικής του συναρτήσε των επιλογών των άλλων παικτών είναι γνωστά εξ αρχής σε όλους (πίνακας ανταμοιβών του παιγνίου).
- Οι παίκτες που συμμετέχουν στο παίγνιο αυτό είναι ορθολογιστές και δεν αντιδρούν συναισθηματικά. Αυτό σημαίνει ότι κάθε παίκτης επιλέγει τη στρατηγική εκείνη που βελτιστοποιεί την δική του ευημερία βάσει του πίνακα ανταμοιβών.
- Οι παίκτες επιλέγουν ταυτόχρονα την στρατηγική που θα ακολουθήσουν χωρίς να επικοινωνούν μεταξύ τους. Με τον τρόπο αυτό αποκλείεται η δυνατότητα συνεργασιών καθώς κάθε παίκτης δεν γνωρίζει την επιλογή των άλλων παικτών εκ των προτέρων.

Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα ενός μη-συνεργατικού τέτοιου παιγνίου είναι το δίλλημα του φυλακισμένου (prisoner dilemma). Ας υποθέσουμε ότι η αστυνομία έχει συλλάβει δύο υπόπτους για συμμετοχή σε ληστεία (Υπόπτος Α και Υπόπτος Β) και υπάρχουν αρκετά στοιχεία για να καταδικαστούν σε 2 χρόνια φυλάκισης. Ωστόσο, η αστυνομία έχει πληροφορίες/ενδείξεις για τη συμμετοχή τους σε μια συμμορία, χωρίς όμως να υπάρχουν οι απαιτούμενες αποδείξεις για την ενοχοποίησή τους. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητη η ομολογία τους για την καταδίκη. Οι δύο

<sup>2</sup> <https://ocw.aoc.ntua.gr/modules/units/?course=MECH121&id=612>

ύποπτοι συλλαμβάνονται και οδηγούνται σε δύο διαφορετικά ανακριτικά δωμάτια χωρίς να υπάρχει η δυνατότητα οπτικής ή ακουστικής επαφής μεταξύ τους. Στον καθένα εκ των δύο η αστυνομία διατυπώνει την ακόλουθη πρόταση: «Αν ομολογήσεις και προδώσεις τον φίλο σου ότι συμμετείχε στη ληστεία θα αφεθείς ελεύθερος υπό την προϋπόθεση άρνησης ομολογίας από τον φίλο σου. Στην περίπτωση αυτή, ο φίλο σου θα καταδικαστεί σε 20 χρόνια φυλάκισης. Στην περίπτωση που ομολογήσετε και οι δύο, η ποινή φυλάκισης θα μειωθεί στα 5 χρόνια. Στην αντίθετη περίπτωση (μη ομολογίας και των δύο), τότε η ποινή φυλάκισης ανέρχεται σε ένα έτος».

Βάσει των παραπάνω στοιχείων, ο

Πίνακας 3-5 συνοψίζει τις ποινές που προβλέπονται σε κάθε ύποπτο από την επιλογή μιας στρατηγικής συγκριτικά με τις πιθανές στρατηγικές του άλλου υπόπτου. Αν οι δύο παίκτες είχαν τη δυνατότητα συνεργασίας, τότε και οι δύο θα επέλεγαν τη στρατηγική που επιφέρει τη μικρότερη ποινή, δηλαδή και οι δύο δε θα ομολογούσαν. Ωστόσο, όπως προαναφέραμε οι δύο ύποπτοι δεν έχουν καμία οπτική ή ακουστική επαφή κατά τη διάρκεια της ανάκρισης. Το σημείο ισορροπίας σε μια τέτοια περίπτωση είναι εκείνο στο οποίο κανένας από τους δύο υπόπτους δεν μπορεί να επωφεληθεί από μονομερή αλλαγή στρατηγικής. Το σημείο ισορροπίας προσδιορίζεται με τη μέθοδο “minmax”. Για κάθε ύποπτο προσδιορίζεται η στρατηγική που επιφέρει την μικρότερη ποινή δεδομένης της στρατηγικής του άλλου. Για παράδειγμα, αν θεωρήσουμε ότι ο ύποπτος Β επιλέγει να ομολογήσει τότε η μικρότερη δυνατή ποινή είναι 5 έτη φυλάκισης αν και ο ύποπτος Α ομολογήσει, ενώ αν ο ύποπτος Β επιλέξει να μην ομολογήσει τότε ο ύποπτος Α μπορεί να αφεθεί ελεύθερος αν δεν ομολογήσει. Αντίστοιχη λογική εφαρμόζεται και για τον ύποπτο Β. Από τις στρατηγικές που συνεπάγονται τις μικρότερες ποινές που έχει προσδιορίσει κάθε ύποπτος συγκριτικά με τη στρατηγική του άλλου, επιλέγει εκείνη με τη μεγαλύτερη ποινή. Βάσει αυτού του κριτηρίου, το σημείο ισορροπίας και για τους δύο κρατούμενος είναι η κοινή ομολογία και των δύο.

Πίνακας 3-5: Πίνακας ποινών παιγνίου (prisoner dilemma)

		ΥΠΟΠΤΟΣ Β		Ελάχιστη Ποινή του Β βάσει στρατηγικής του Α
		ΟΜΟΛΟΓΕΙ	ΔΕΝ ΟΜΟΛΟΓΕΙ	
ΥΠΟΠΤΟΣ Α	ΟΜΟΛΟΓΕΙ	A = - 5, B = - 5	A = 0, B = - 20	-5
	ΔΕΝ ΟΜΟΛΟΓΕΙ	A = -20, B = 0	A = - 2, B = - 2	0
Ελάχιστη Ποινή του Α βάσει στρατηγικής του Β		-5	0	

### 3.3.2.2 Εφαρμογή θεωρίας παιγνίων στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα- Mean field Games

Η θεωρία παιγνίων παρέχει μια σειρά μεθόδων για την επίλυση προβλημάτων απόφασης στα οποία οι συμμετέχοντες αποφασίζουν ατομικά τη στρατηγική τους χωρίς να γνωρίζουν τις επιλογές των υπολοίπων. Η θεωρία παιγνίων έχει εφαρμοστεί βιβλιογραφικά για την ελαχιστοποίηση του κόστους φόρτισης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Πιο συγκεκριμένα, τα παίγνια μέσου πεδίου (mean field games) αξιοποιήθηκαν με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους φόρτισης ενός μεγάλου αριθμού ηλεκτρικών οχημάτων [95], [116], [117], [118], [119].

Στο παίγνια αυτά υπάρχει ένα κεντρικός συντονιστής ο οποίος επικοινωνεί στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο καθορίζεται βάσει συγκεκριμένης συνάρτησης  $p_t$ . Η συνάρτηση αυτή είναι αύξουσα και αντικατοπτρίζει τη ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων, δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η ζήτηση των οχημάτων σε μια ώρα τόσο μεγαλύτερη είναι και η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας. Ως εκ τούτου, η ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων επηρεάζει άμεσα την τιμή παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας, σε αντίθεση με αυτό που ίσχυε στην ενότητα 3.2.

Ας υποθέσουμε ένα πεπερασμένο σύνολο  $\mathcal{N}=\{1, \dots, N\}$  ηλεκτρικών οχημάτων που συμμετέχουν στο παίγνιο για την ελαχιστοποίηση του κόστους ενέργειας. Το επίπεδο κατανάλωσης του εκάστοτε ηλεκτρικού οχήματος  $n \in \mathcal{N}$  κάθε χρονική στιγμή  $t \in [0, T]$  προσδιορίζεται ως μεταβλητή  $g(t)$  και μετρείται σε kWh. Αντίστοιχα, η επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας ενός ηλεκτρικού οχήματος  $n$  κάθε χρονική στιγμή  $t$  συμβολίζεται ως  $x_t^{(n)} \in [0, 1]$ . Η μπαταρία είναι εντελώς αφόρτιστη όταν  $x_t^{(n)} = 0$  και πλήρως φορτισμένη όταν  $x_t^{(n)} = 1$ . Αν υποθέσουμε ότι το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας ενός ηλεκτρικού οχήματος  $n$  τη χρονική στιγμή  $t$  συμβολίζεται ως  $a_t^{(n)}$ , τότε η δυναμική λειτουργία της μπαταρίας αναπαρίσταται από την παρακάτω διαφορική εξίσωση:

$$\frac{d}{dt} x = a_t^{(n)} \cdot C_{eff} - g_t^{(n)} \quad \text{E 3-15}$$

όπου τα  $a_t^{(n)}, g_t^{(n)}$  είναι κατάλληλα επιλεγμένα ώστε για μια ορισμένη αρχική τιμή  $x_0^{(n)}$  να ισχύει ο περιορισμός  $0 \leq x_t^{(n)} \leq 1, \forall t$ . Βάσει του προφίλ φόρτισης τους κάθε χρονική στιγμή  $t$ ,  $a_t = \{a_t^1, \dots, a_t^N\}$ , η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας προσδιορίζεται ως  $a_t \leftrightarrow p_t(a_t)$ . Μια τέτοια στρατηγική δυναμικής τιμολόγησης παρέχει κίνητρα στα ηλεκτρικά οχήματα για τη φόρτιση τους σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους. Επιπρόσθετα, το κόστος φόρτισης ενός ηλεκτρικού οχήματος  $n$  δεν εξαρτάται μόνο από την ατομική λειτουργία του αλλά και τον τρόπο λειτουργίας και των υπολοίπων οχημάτων  $-n$ . Στόχος κάθε ηλεκτρικού οχήματος είναι η επιλογή κατάλληλου προφίλ φόρτισης  $a^{(n)} = \{a_1^{(n)}, \dots, a_T^{(n)}\}$  που θα ελαχιστοποιεί το κόστος φόρτισης του  $J_k$ :

$$J_k(a^{(n)}, a^{(-n)}) = \int_0^T (a_t^{(n)} \cdot p(a_t) + h_t^n(a_t^n) + f_t^n(x_t^n)) dt + k^{(n)}(x_T^n) \quad \text{E 3-16}$$

όπου  $h_t^n(a_t^n)$  μοντελοποιεί το ψυχολογικό κόστος του χρήστη ηλεκτρικού οχήματος να φορτίσει με ποσότητα ενέργεια  $a_t^n$  τη χρονική στιγμή  $t$  (πράγματι οι χρήστες προτιμούν να φορτίζουν βραδινές ώρες με την επιστροφή τους στην οικία τους),  $f_t^n(x_t^n)$  μοντελοποιεί το κόστος για ένα όχημα  $n$  να διατηρεί ένα κλάσμα διαθέσιμης ενέργειας κάθε χρονική στιγμή  $t$  (για παράδειγμα, τις ώρες αιχμής οι χρήστες προτιμούν να έχουν τις μπαταρίες όσο το δυνατόν περισσότερο φορτισμένες ώστε να μην απαιτηθεί φόρτιση για την εξυπηρέτηση των ενεργειακών αναγκών μετακίνησης τους) και  $k^{(n)}(x_T^n)$  το κόστος της μη πλήρους φόρτισης της μπαταρίας στο τέλος της εξεταζόμενης περιόδου  $T$ .

Η βέλτιστη λύση  $a^{*(n)}$  που ελαχιστοποιεί το κόστος φόρτισης ενός ηλεκτρικού οχήματος  $n$  βάσει της παραπάνω εξίσωσης είναι το σημείο ισορροπίας Nash για το οποίο ισχύει η παρακάτω συνθήκη:

$$J_k(a^{*(n)}, a^{*(-n)}) \leq J_k(a^{(n)}, a^{*(-n)}) \quad \text{E 3-17}$$

Βάσει της παραπάνω συνθήκης, όταν επέλθει η ισορροπία Nash, η μονομερής απόκλιση ( $a^{(n)}$ ) από τη βέλτιστη λύση ( $a^{*(n)}$ ) θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους φόρτισης ( $J_k(a^{(n)}, a^{(-n)}) \geq J_k(a^{*(n)}, a^{*(-n)})$ ).

Για την εφαρμογή του παίγνιου mean-field είναι απαραίτητη η ισχύς δύο παραδοχών: i) ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων είναι επαρκώς μεγάλος που μπορεί να θεωρηθεί άπειρος, ii) τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν όμοια τεχνικά χαρακτηριστικά (μπαταρία, απόδοση φόρτισης κτλ) όχι όμως απαραίτητα όμοια λειτουργικά χαρακτηριστικά (διαφορετικό επίπεδο φόρτισης μπαταριών). Βάσει των δύο παραπάνω παραδοχών, αντί για το διάνυσμα κατάστασης των μπαταριών  $(x_t^{(1)}, \dots, x_t^{(N)})$  τη χρονική στιγμή  $t$  μπορούμε να θεωρήσουμε μια τυχαία μεταβλητή  $x_t$  με κατανομή  $m(t, x)$  τέτοια ώστε

$$m(t, x) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \delta_{\{x_t^{(n)} \leq x\}}(X) \quad \text{E 3-18}$$

Στη συνέχεια, μια παραδοχή ότι η μεταβλητή ελέγχου  $g_t^{(n)}$  έχει ίδια τιμή για όλα τα ηλεκτρικά οχήματα, δηλαδή όλα τα οχήματα έχουν ακριβώς την ίδια ημερήσια κατανάλωση στην μπαταρία τους, θα ήταν η ρεαλιστική. Για το λόγο αυτό, η κατανάλωση της μπαταρίας θεωρείται ως μια στοχαστική παράμετρος με μέση τιμή  $g_t dt$  και τυπική απόκλιση  $\sigma_t^2$  τη χρονική στιγμή  $t$ . Επομένως, η κατανάλωση των ηλεκτρικών οχημάτων μοντελοποιείται ως  $g_t [dt + \sigma_t dW_t]$ , όπου  $W_t$  είναι η Brownian κίνηση και  $dW_t$  διαφορική αναπαράσταση της σύμφωνα με τον Ito [120].

Επομένως, η εξίσωση κατάστασης για το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας των οχημάτων περιγράφεται πλέον από την ακόλουθη στοχαστική αναπαράσταση:

$$dx_t = a_t dt - g_t(dt + \sigma_t dW_t) + dK_t \quad \text{E 3-19}$$

όπου  $x_0 \in [0,1]$  τυχαία μεταβλητή με κατανομή  $m_0 = m(0, \cdot)$  και  $dK_t$  είναι μια μεταβλητή που εξασφαλίζει ότι τη λειτουργία της μπαταρίας εντός ορίων ( $x_t \in [0,1]$ ).

Σύμφωνα με τις παραπάνω παραδοχές, πλέον, το πρόβλημα των  $N$ -παικτών (ηλεκτρικών οχημάτων) μετατρέπεται σε στοχαστικό παίγνιο ενός παίκτη με μια εξίσωση κατάστασης E-3-19 και μια μεταβλητή ελέγχου. Η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι μια συνάρτηση εξαρτημένη από την ολική στιγμιαία ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων  $\int_0^1 a_t m_t(x)$ . Ισοδύναμα, η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να θεωρηθεί ως μια συνάρτηση της εκτιμώμενης ζήτησης για τη φόρτιση των μπαταριών  $g_t + \frac{d}{dt}(\int_0^1 x m_t(dx))$ . Δηλαδή πλέον η τιμή της ενέργειας δεν καθορίζεται βάσει της στιγμιαίας κατανάλωσης αλλά από την κατανομή  $m_t$  τη χρονική στιγμή  $t$ . Επομένως, η τιμή της ενέργειας καθορίζεται ως ακολούθως:

$$p_t(m_t) = D(t, \cdot) \left( g_t + \frac{d}{dt} \int_0^1 x m_t(dx) \right) \quad \text{E 3-20}$$

όπου  $D(t,p)$  είναι η συνολική συνάρτηση ζήτησης συμπεριλαμβανομένων της συμβατικής ζήτησης και αυτής των ηλεκτρικών οχημάτων τη χρονική στιγμή  $t$  για τιμή ενέργειας  $p$ . Η συνάρτηση αυτή είναι κεντρική και καθοδηγεί έμμεσα τη συμπεριφορά των ηλεκτρικών οχημάτων. Για παράδειγμα, τις περιόδους που η συμβατική κατανάλωση είναι υψηλή, η τιμή μπορεί να αυξηθεί περαιτέρω με την φόρτιση των οχημάτων αποτρέποντας τη φόρτιση τους σε περιόδους αιχμής.

Επομένως, για τη βέλτιστη στρατηγική φόρτισης  $\alpha^*$  που συνεπάγεται την ισορροπία στο παίγνιο αυτό (mean field equilibrium) ισχύει ότι  $J_k(\alpha^*, m^*) \leq J_k(\alpha, m^*)$ . Ας υποθέσουμε ότι η συνάρτηση κόστους του συστήματος περιγράφεται ως εξής:

$$v(t, x) = \inf_{a \in A} E \left[ \int_t^T (a_t p_t(m_t) + h_t(a_t) + f_t(x_t)) dt + k(x_T) \right] \quad \text{E 3-21}$$

Το σημείο ισορροπίας του παιγνίου  $\alpha^*$  πρέπει να είναι λύση της παρακάτω εξίσωσης Hamilton-Jacobi-Bellman [121]:

$$\begin{aligned} \partial_t v(t, x) = & -\inf_{a \in A} \{ a \partial_x v(t, x) + a p_t(m_t^*) + h_t(a_t) + f_t(x_t) \} \\ & + g_t \partial_x v(t, x) - \frac{1}{2} g_t^2 \sigma_t^2 \partial_{xx}^2 v(t, x) \end{aligned} \quad \text{E 3-22}$$

όπου  $m_t^*$  είναι η λύση της εξίσωσης Fokker-Planck-Kolmogorov:

$$\partial_t m(t, x) = -\partial_x [(a_t^* - g_t) m(t, x)] + \frac{1}{2} g_t^2 \sigma_t^2 \partial_{xx}^2 m(t, x) \quad \text{E 3-23}$$

Αν υποθέσουμε ότι το ψυχολογικό κόστος  $h_t(a_t)$  εκφράζεται από μια τετραγωνική παράσταση της μορφής  $h_t(a_t) = (1/2) H_t a_t^2$ , όπου  $H_t > 0$  εκφράζει την απροθυμία ενός χρήστη ηλεκτρικού οχήματος να αγοράσει ενέργεια τη χρονική στιγμή  $t$ . Μια τέτοια επιλογή κόστους είναι φαινομενικά μη ρεαλιστική μιας και οι χρήστες δείχνουν μεγαλύτερη προτίμηση στο να αγοράζουν μικρά ποσά ενέργειας. Ωστόσο, στα πλαίσια του παιγνίου αυτό μεταφράζεται στο γεγονός ότι, κατά μέσο όρο, μόνο ένας περιορισμένος αριθμός χρηστών ηλεκτρικών οχημάτων θέλει (ή μπορεί) να φορτίσει. Για παράδειγμα, τις βραδινές ώρες η πλειονότητα των ηλεκτρικών οχημάτων είναι διασυνδεδεμένα στο δίκτυο, έτσι το ψυχολογικό κόστος  $h_t$  είναι μικρό (περισσότεροι χρήστες επιθυμούν να φορτίσουν). Αυξάνοντας το ψυχολογικό κόστος για μεγαλύτερα ποσά ενέργειας φόρτισης λειτουργεί ως αποτρεπτικός παράγοντας φόρτισης για ένα μέρος του πλήθους των χρηστών. Συνεπώς, σύμφωνα με τη συνθήκη ελαχιστοποίησης Pontryagin's [122], η βέλτιστη λύση  $\alpha_t^*$  που ελαχιστοποιεί την παράσταση  $\inf_{a \in A} \{ a \partial_x v(t, x) + a p_t(m_t^*) + h_t(a_t) + f_t(x_t) \}$  δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\alpha_t^* = -\frac{1}{H_t} [\partial_x v(t, x) + p_t(m_t^*)] \quad \text{E 3-24}$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση E 3-24 στην εξίσωση E 3-22 και E 3-23, τελικά προκύπτει ότι:

#### Mean Field Game Differential Equations

$$\partial_t v(t, x) = \frac{1}{2H_t} (\partial_x v(t, x) + p_t(m_t^*))^2 + g_t \partial_x v(t, x) - f_t(x_t) - \frac{1}{2} g_t^2 \sigma_t^2 \partial_{xx}^2 v(t, x) \quad \text{E 3-25}$$

$$\begin{aligned} \partial_t m(t, x) = & \left( \frac{1}{H_t} [\partial_x v^*(t, x) + p_t(m(t, x))] + g_t \right) \partial_x m(t, x) \\ & + \frac{1}{H_t} \partial_{xx}^2 v^*(t, x) m(t, x) + \frac{1}{2} g_t^2 \sigma_t^2 \partial_{xx}^2 m(t, x) \end{aligned} \quad \text{E 3-26}$$

### 3.3.2.3 Προτεινόμενο αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης της φόρτισης

#### Αρχιτεκτονική Συστήματος

Η αρχιτεκτονική του αποκεντρωμένου συστήματος διαχείρισης βασίζεται στις αρχές των πολύ-πρακτορικών συστημάτων (Multi-Agent Systems - MAS), [123], [124], [125], [197]. Πράκτορας (agent) είναι μια οντότητα λογισμικού που χαρακτηρίζεται από δύο θεμελιώδεις ιδιότητες: αυτήν της ευφυΐας που του δίνει την ικανότητα να μπορεί να λαμβάνει αποφάσεις και της επικοινωνίας με άλλους πράκτορες που του δίνει τη δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας και ανταλλαγής πληροφοριών που επηρεάζουν τον τρόπο λήψης των αποφάσεων σε ατομικό επίπεδο.

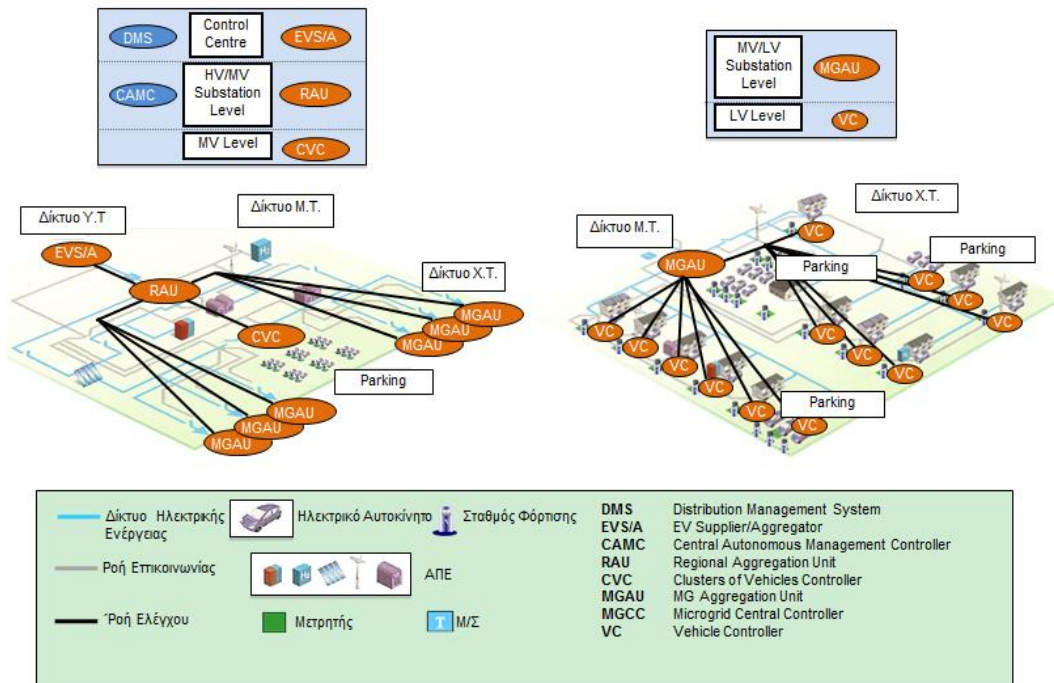
Στα πολύ-πρακτορικά συστήματα, κάθε πράκτορας (agent) αντιπροσωπεύει και μια οντότητα φυσική ή εικονική που δύναται να επηρεάσει τον τρόπο με τον οποίο συμπεριφέρεται το υπό εξέταση σύστημα. Ένα βασικό χαρακτηριστικό της λειτουργίας των πρακτόρων είναι βαθμός αυτονομίας που διαθέτουν, δηλαδή τη δυνατότητα να καθορίζουν τον τρόπο λειτουργίας τους χωρίς την ύπαρξη κάποιου κεντρικού ελεγκτή. Ο τρόπος λειτουργίας των πρακτόρων καθορίζονται από διάφορες τάσεις (tendencies). Για παράδειγμα, αν θεωρήσουμε μια μπαταρία που λειτουργεί ως αποθηκευτικό μέσο, η τάση αυτή θα μπορούσε να είναι η φόρτιση της μπαταρίας όταν το επίπεδο φόρτισης της είναι χαμηλό και μέχρι την πλήρη φόρτιση της. Σε μια τέτοια περίπτωση, ο ευφυής πράκτορας λειτουργεί βάσει των τοπικών αναγκών της μπαταρίας καθώς και των τεχνικών περιορισμών που ορίζει η ασφαλής λειτουργία της. Η επικοινωνία του ευφυή πράκτορα της μπαταρίας με άλλους πράκτορες επιτρέπει την ανταλλαγή πληροφοριών για την επίτευξη πιο σύνθετων στόχων. Για παράδειγμα η επικοινωνία του πράκτορα που ελέγχει τη λειτουργία της μπαταρίας με τον λειτουργό της αγοράς για το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας επιτρέπει την επίτευξη πιο σύνθετων στόχων: φόρτιση της μπαταρίας όταν το επίπεδο φόρτισης της είναι χαμηλό (τοπική πληροφορία) και η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλή (εξωτερική πληροφορία). Επιπρόσθετα, η επικοινωνία αυτή θα μπορούσε να περιλαμβάνει περισσότερους των δύο πρακτόρων όπως για παράδειγμα τον διαχειριστή του δικτύου, ο οποίος μπορεί να θέσει ένα άνω όριο στην ωριαία ζήτηση. Ας υποθέσουμε ότι υπάρχει  $N$  πλήθος μπαταριών που ελέγχονται από  $N$  πράκτορες. Η ταυτόχρονη φόρτιση  $N$  μπαταριών μπορεί να προκαλέσει μια αιχμή ζήτησης η οποία δύναται να επηρεάσει την ομαλή λειτουργία του δικτύου. Λαμβάνοντας υπόψη τον διαχειριστή του δικτύου, στόχος των πρακτόρων των μπαταριών είναι η φόρτιση των μπαταριών όταν το επίπεδο φόρτισης είναι χαμηλό, η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι φθηνή και η ωριαία ζήτηση της φόρτισης δεν υπερβαίνει ένα συγκεκριμένο άνω όριο. Όσο πιο πολύπλοκες γίνονται οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των διαφόρων πρακτόρων, τόσο πιο σύνθετη και πολύπλοκη γίνεται η λειτουργία του συστήματος.

Βάσει των αρχών λειτουργίας των πολύ-πρακτορικών συστημάτων, ο προτεινόμενος αποκεντρωμένος αλγόριθμος για τη διαχείριση των ηλεκτρικών οχημάτων απαιτεί τη θεώρηση των παρακάτω πρακτόρων όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 3-19:

- i. **Κεντρικός συντονιστής (Electric Vehicle Supply Equipment Aggregator - EVSEA):** Είναι υπεύθυνος για τον συντονισμό της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων που είναι διασκορπισμένα σε μεγάλη γεωγραφική έκταση, με σκοπό να επιτευχθεί ένας κοινός στόχος (στη συγκεκριμένη περίπτωση ο κοινός στόχος είναι η στρατηγική φόρτισης “valley-filling”). Ο EVSE/A δεν έχει τη δυνατότητα να καθορίσει το επίπεδο φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, όπως συμβαίνει στον κεντρικό έλεγχο. Ωστόσο, δύναται να επηρεάσει έμμεσα το προφίλ φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων μέσω κάποιων σημάτων ελέγχου που παράγει. Τα σήματα αυτά ελέγχου έχουν σκοπό τον συντονισμό της μαζικής συμπεριφοράς των ηλεκτρικών οχημάτων κατά τη φόρτιση με σκοπό να επιτευχθεί ο κοινός στόχος. Ο κεντρικός συντονιστής δεν έχει τοπική γνώση για τη λειτουργική κατάσταση των ηλεκτρικών οχημάτων, όπως το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών, το μέγεθος της μπαταρίας και το προφίλ μετακίνησης τους, παρά μόνο για το επίπεδο φόρτισης κάθε χρονική στιγμή  $t$ .
- ii. **Περιφερειακός Συναθροιστής (Regional Aggregation Unit – RAU):** Πρόκειται για μια εικονική οντότητα χωρίς φυσική ύπαρξη που βρίσκεται στο επίπεδο του υποσταθμού ΥΤ/ΜΤ και διαχειρίζεται έναν αριθμό τοπικών συναθροιστών (Microgrid Aggregation



- Unit – MGAU) ή ομάδες από ελεγκτές ηλεκτρικών οχημάτων (Cluster of Vehicles Controller – CVC). Μπορεί να υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός τοπικών συναθροιστών ανάλογα με το πλήθος των υποσταθμών ΥΤ/ΜΤ που υφίστανται στο εξεταζόμενο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Ο RAU είναι υπεύθυνος για την εφαρμογή της στρατηγικής του EVS/A σε τοπικό επίπεδο. Επιπρόσθετα, κάθε RAU είναι υπεύθυνος για τον προσδιορισμό των κατάλληλων σημάτων ελέγχου που επιτρέπουν τον συντονισμό της λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων για την επίτευξη της στρατηγικής του κεντρικού συντονιστή.
- iii. **Τοπικός Συναθροιστής (Microgrid Aggregation Unit – MGAU) ή ομάδα από ελεγκτές ηλεκτρικών οχημάτων (Cluster of Vehicles Controller – CVC):** Πρόκειται για εικονικές οντότητες που βρίσκονται στο επίπεδο των υποσταθμών ΜΤ/ΧΤ παρέχοντας κυρίως επικουρικές υπηρεσίες επικοινωνίας. Ο MGAU είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση ενός στόλου αυτοκινήτων που συνδέονται στο δίκτυο Χ.Τ. ενός υποσταθμού, ενώ ο CVC είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση των ηλεκτρικών οχημάτων που είναι σταθμευμένα σε μεγάλους δημόσιους ή ιδιωτικούς χώρους στάθμευσης. Ο ρόλος του MGAU και του CVC είναι η συνάθροιση του προφίλ ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων που βρίσκονται υπό την εποπτεία τους και η επικοινωνία ενός αθροιστικού προφίλ ζήτησης προς τον RAU.
  - iv. **Ελεγκτής Ηλεκτρικού Οχήματος (Vehicle Controller - VC):** Πρόκειται για τον πράκτορα (agent) που αντιπροσωπεύει τον χρήστη του ηλεκτρικού οχήματος όσον αφορά στις ενεργειακές ανάγκες για τη φόρτιση της μπαταρίας καθώς και τις ανάγκες μετακίνησης του. Ο VC έχει τη δυνατότητα να καθορίζει το επίπεδο φόρτισης κάθε χρονική στιγμή  $t$  βάσει των προτιμήσεων και ενεργειακών αναγκών του χρήστη καθώς και των σημάτων ελέγχου που καθορίζονται από τον εκάστοτε RAU.



Εικόνα 3-19 Αρχιτεκτονική συστήματος αποκεντρωμένου αλγορίθμου (“valley-filling”)

Η επικοινωνία μεταξύ των πρακτόρων όπως περιγράφηκε παραπάνω προϋποθέτει την ύπαρξη κοινή γλώσσα, κοινής αναπαράστασης της γνώσης και των εννοιών καθώς και να υπάρχει ο τρόπος να ανταλλαχθούν οι πληροφορίες [126]. Η κοινή γλώσσα αναφέρεται στο τρόπο σύνταξης των μηνυμάτων ώστε να είναι εφικτή η αναγνώριση του περιεχομένου της επικοινωνίας. Επιπρόσθετα θα πρέπει να υπάρχει ένα κοινό λεξιλόγιο που αφορά σε έννοιες που είναι κοινές σε όλους (ίδιο όνομα, ίδιες μονάδες μέτρησης κτλ.). Ο τρόπος που θα ανταλλαχθεί η πληροφορία είναι μια σύνθετη διαδικασία και αναφέρεται στη δομή που πρέπει να έχει η γλώσσα ώστε να περιγράφει πολύπλοκες και σύνθετες έννοιες. Το θέμα της επικοινωνίας των πρακτόρων είναι ένα σύνθετο



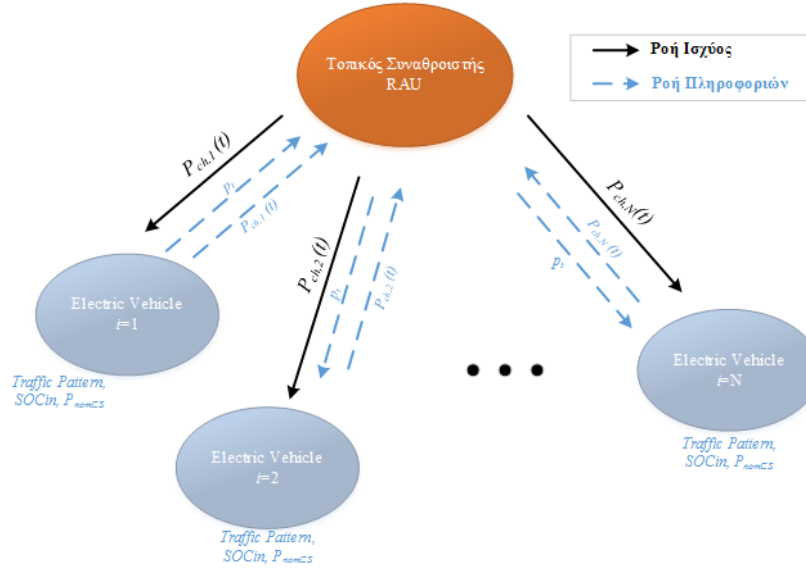
θέμα για το οποίο υπάρχουν πλατφόρμες επικοινωνίας ελεύθερης πρόσβασης (π.χ. JADE<sup>3</sup>) και οι οποίες παρέχουν τον μηχανισμό αλλά και τον τρόπο επικοινωνίας των πρακτόρων.

Όσον αφορά στις υποδομές επικοινωνιών που επιτρέπουν την υλοποίηση ενός αποκεντρωμένου αλγορίθμου, απαιτείται η υιοθέτηση αμφίδρομων καναλιών επικοινωνίας για την ανταλλαγή πληροφοριών. Οι τεχνολογίες επικοινωνιών πρέπει να είναι κατάλληλα επιλεγμένες ώστε να εξασφαλίζεται η απρόσκοπτη και ασφαλής μετάδοση των δεδομένων με μικρές καθυστερήσεις. Σε αντίθετη περίπτωση, οι πιθανότητες μη σύγκλισης ενός αποκεντρωμένου αλγορίθμου είναι πολύ μεγάλες. Η ιδέα των έξυπνων δικτύων έχει δώσει μεγάλη ώθηση στην ανάπτυξη νέων ή βελτίωση υπάρχουσών τεχνολογιών επικοινωνίας που εξασφαλίζουν την ασφαλή και αξιόπιστη μετάδοση δεδομένων [15], [127]. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τεχνολογιών επικοινωνίας για τα έξυπνα δίκτυα είναι: PowerLine communication (PLC), Digital Subscriber Line (DSL), General Packet Radio Service (GPRS), Wi-Fi etc. Κάθε τεχνολογία επικοινωνίας χαρακτηρίζεται από πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα, ως εκ τούτου η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας εξαρτάται από τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής. Τα βασικά κριτήρια επιλογής της κατάλληλης τεχνολογίας επικοινωνίας είναι η ευκολία εφαρμογής, το κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας καθώς και η καταλληλότητα της (ακτίνα διάδοσης πληροφορίας, διαθεσιμότητα δικτύου επικοινωνιών, ασφάλεια μετάδοσης και επεκτασιμότητα). Για παράδειγμα, η χρήση σύνδεσης DSL είναι μια οικονομική λύση, με επαρκή διαθεσιμότητα και με υψηλή ταχύτητα μετάδοσης δεδομένων. Ωστόσο, υπάρχουν σημαντικά ζητήματα ασφάλειας της μετάδοσης των δεδομένων. Αυτό απαιτεί την ανάπτυξη εικονικών ιδιωτικών δικτύων (Virtual Power Networks – VPN) που συνεπάγεται αυξημένα έξοδα λειτουργίας. Η χρήση των υφιστάμενων δικτύων τηλεπικοινωνίας (GSM) είναι μια πρακτική και οικονομική λύση. Ωστόσο το κόστος μετάδοσης της πληροφορίας είναι υψηλό (το κόστος μετάδοσης 1Mb μέσω GPRS είναι συγκρίσιμο με το κόστος φόρτισης ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου [15]). Το υψηλό λειτουργικό κόστος της GPRS τεχνολογίας μπορεί να μειωθεί εν μέρει χρησιμοποιώντας την σε συνδυασμό με άλλες τεχνολογίες όπως, για παράδειγμα, με την τεχνολογία PLC που είναι ευρέως διαδεδομένη στις εφαρμογές τηλεμέτρησης. Ωστόσο, η τεχνολογία PLC χαρακτηρίζεται από δύο σημαντικά μειονεκτήματα: το χαμηλό εύρος του διαύλου επικοινωνίας (20kb/sec) και η περιορισμένη ακτίνα μετάδοσης (συνήθως στις εφαρμογές τηλεμέτρησης ο κάθε μετρητής λειτουργεί ως αναμεταδότης της πληροφορίας του προηγούμενου). Η επιλογή ενός αποκεντρωμένου αλγορίθμου επιτρέπει την εφαρμογή της τεχνολογίας PLC αφού οι απαιτήσεις σε όγκο μετάδοσης δεδομένων είναι αρκετά περιορισμένες λόγω της τοπικής διαχείρισης και επεξεργασίας τους. Επιπρόσθετα, η υιοθέτηση ενδιάμεσων επιπέδων άθροισης (aggregation layers) περιορίζει τις απαιτήσεις όσον αφορά στην ακτίνα διάδοσης της πληροφορίας. Συμπερασματικά, η προτεινόμενη αρχιτεκτονική αποκεντρωμένου ελέγχου δεν επιβάλλει περιορισμούς στην υιοθέτηση οποιασδήποτε τεχνολογίας επικοινωνίας.

#### 3.3.2.4 Μαθηματική μοντελοποίηση αποκεντρωμένου αλγορίθμου (παίγνιο N-παικτών)

Ο αποκεντρωμένος αλγόριθμος που αναπτύχθηκε ανήκει στα παίγνια με ένα κριτήριο βελτιστοποίησης (single objective), μη συνεργατικά (non-cooperative) και είναι δυναμικό (dynamic game). Είναι παίγνιο ενός κριτηρίου απόφασης μιας και κάθε παίκτης (χρήστης ηλεκτρικού οχήματος) έχει ένα μόνο στόχο να εξυπηρετήσει. Είναι μη-συνεργατικό παίγνιο, γιατί κάθε παίκτης επιλέγει τη στρατηγική του χωρίς να γνωρίζει την επιλογή στρατηγικής των υπολοίπων. Τέλος, πρόκειται για ένα δυναμικό παίγνιο μιας και κάποιοι παίκτες (VC) καθορίζουν τη στρατηγική τους βασισμένοι στα σήματα ελέγχου που άλλοι παίκτες παράγουν (RAU), Εικόνα 3-20.

<sup>3</sup> Jade programmer guide Available On line <http://jade.tilab.com/>



Εικόνα 3-20 Δυναμικό Παίγνιο αποκεντρωμένης διαχείρισης ηλεκτρικών οχημάτων (“valley-filling”)

Τα σήματα ελέγχου ( $p_t$ ) που παράγονται από τον περιφερειακό συναθροιστή (RAU) προκύπτουν από την παρακάτω εξίσωση:

$$p_t = U(D^t + \sum_{i=1}^N P_{ch,i,t}^{EV}) = \frac{1}{C} (D_t + \sum_{i=1}^N P_{ch,i,t}^{EV}) = \frac{N}{C} \left( \frac{D_t}{N} + \frac{\sum_{i=1}^N P_{ch,i,t}^{EV}}{N} \right) = c^N (d_t^N + P_{ch,t}^{EV}) \quad \text{E 3-27}$$

όπου  $D^t$  το συμβατικό φορτίου του δικτύου διανομής,  $C$  η ονομαστική ισχύς του μετασχηματιστή ΥΤ/ΜΤ. Από την παραπάνω εξίσωση διαπιστώνουμε ότι τα σήματα ελέγχου τελικά καθορίζονται από τη μέση τιμή της ισχύος φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων για κάθε χρονική στιγμή  $t$ . Τα σήματα αυτά ελέγχου προσομοιώνουν εν μέρει τη συμπεριφορά της αγοράς ενέργειας. Αύξηση της ζήτησης συνεπάγεται αύξηση των τιμών αγοράς ενέργειας (αυξάνεται και η τιμή των σημάτων ελέγχου της εξίσωσης E3-27).

Κάθε ηλεκτρικό όχημα που συνδέεται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας για να φορτίσει χαρακτηρίζεται από ένα συγκεκριμένο επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας του ( $SOC_i(t=0)$ ,  $C_{bat}$  ονομαστική χωρητικότητα μπαταρίας) καθώς και συγκεκριμένο χρονικό διάστημα στάθμευσης  $T_i$  (χρόνος άφιξης και χρόνος αναχώρησης  $\rightarrow$  διαθέσιμη χρονική διάρκεια φόρτισης). Οι ενεργειακές ανάγκες φόρτισης ενός ηλεκτρικού οχήματος  $i$  καθορίζονται από την παρακάτω εξίσωση:

$$\sum_{t=0}^{T_i} P_{ch,i,t}^{EV} \Delta t = (1 - SOC_{i,t=0}) \cdot C_{bat} / C_{eff} \quad \text{E 3-28}$$

Η δυναμική συμπεριφορά της μπαταρίας κάθε ηλεκτρικού οχήματος περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$SOC_{i,t+1} - SOC_{i,t} = \frac{1}{C_{bat}} P_{ch,i,t}^{EV} \Delta t \cdot C_{eff} \quad (\rightarrow SOC_{i,T} = 1, \text{πλήρη φόρτιση}) \quad \text{E 3-29}$$

Το πεδίο ορισμού της μεταβλητής  $P_{ch,i,t}^{EV}$  για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων καθορίζεται από την ονομαστική ισχύ των υποδομών φόρτισης ( $P_{nomCS}$ ):

$$0 \leq P_{ch,i,t}^{EV} \leq P_{nomCS,i} \quad \text{E 3-30}$$

### A. Μη συζευγμένες αντικειμενικές συναρτήσεις ηλεκτρικών οχημάτων (Uncoupled agents)

Βάσει των σημάτων ελέγχου, η αντικειμενική συνάρτηση για τη βέλτιστη διαχείριση των ηλεκτρικών οχημάτων δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$J_n(\mathbf{P}_{ch}) = \sum_{t \in T} p_t(r_t) \cdot P_{ch,i,t}^{EV} = \sum_{t \in T} U(D_t + \sum_{i=1}^N P_{ch,i,t,k-1}^{EV}) \cdot P_{ch,i,t,k}^{EV} \quad \text{E 3-31}$$

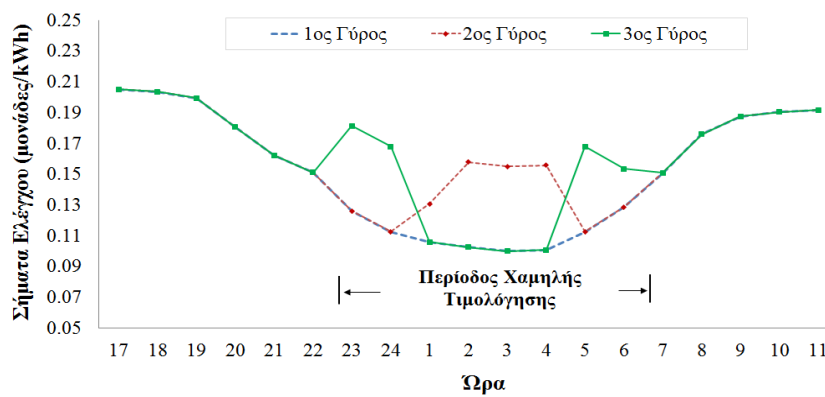
Συνεπώς, το πρόβλημα βελτιστοποίησης για κάθε ηλεκτρικό όχημα είναι ένα γραμμικό πρόβλημα (E3-31) με γραμμικούς περιορισμούς (E 3-28 – E 3-30) για κάθε επανάληψη  $k$ . Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα παράδειγμα με τη λειτουργία του παίγνιου όταν οι αντικειμενικές συναρτήσεις των ηλεκτρικών οχημάτων δεν είναι συζευγμένες.

### Αριθμητικό Παράδειγμα

Επανερχόμαστε στο παράδειγμα της ενότητας 3.1.1 που αφορά στον κεντρικό τρόπο διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Υπενθυμίζουμε ότι είχε θεωρηθεί ένας στόλος 460 οχημάτων τύπου M1 με μπαταρία χωρητικότητας 16kWh. Οι υποδομές φόρτισης θεωρούμε ότι είναι οικιακής χρήσης χαμηλής ισχύος,  $P_{nomCS}=3\text{kWh}$ . Οι συνολικές απώλειες του σταθμού φόρτισης προσεγγίζονται ως ποσοστό του επιπέδου φόρτισης,  $C_{eff}=80\%$ . Το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας λόγω των ημερήσιων μετακινήσεων θεωρείται κατά μέσο όρο ίσο με  $SOC_{in}=45\%$ . Επίσης, θεωρούμε ότι η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων πρέπει να πραγματοποιηθεί εντός της περιόδου χαμηλής τιμολόγησης, δηλαδή 23:00-7:00 (για καλοκαιρινούς μήνες). Ως εκ τούτου, όλα τα ηλεκτρικά οχήματα θα πρέπει να είναι πλήρως φορτισμένα μέχρι τις 7:00 ακόμα και αν κάποια αναχωρούν αργότερα ( $t_{depart} \geq 7:00$ ).

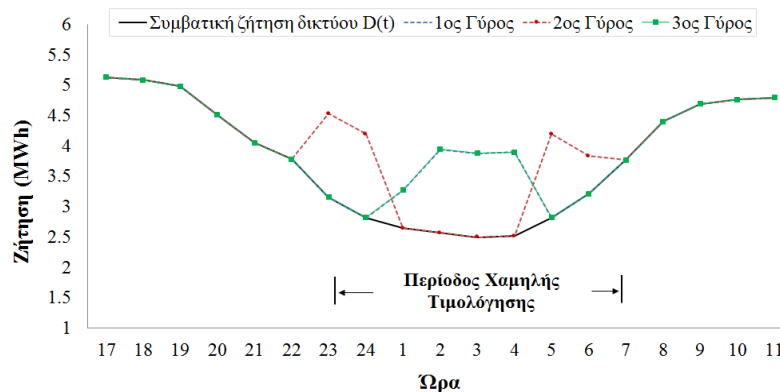
Τα αποτελέσματα του δυναμικού παίγνιου N παικτών παρουσιάζονται στα δύο επόμενα διαγράμματα (Εικόνα 3-21 και Εικόνα 3-22).

Σήματα Ελέγχου Δυναμικού Παίγνιου (RAU)



Εικόνα 3-21 Δυναμικό Παίγνιο αποκεντρωμένης διαχείρισης ηλεκτρικών οχημάτων (“valley-filling”)- Σήματα Ελέγχου RAU (μη συζευγμένες συναρτήσεις)

Φορτίο Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ



Εικόνα 3-22 Δυναμικό Παίγνιο αποκεντρωμένης διαχείρισης ηλεκτρικών οχημάτων (“valley-filling”)- Συνολική ζήτηση στο επίπεδο του Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ (μη συζευγμένες συναρτήσεις)

Στο πρώτο διάγραμμα απεικονίζονται τα σήματα ελέγχου που παράγονται από τον τοπικό αθροιστή (RAU) λαμβάνοντας υπόψη το συμβατικό φορτίο του Μ/Σ καθώς και τη ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων όπως αυτή διαμορφώνεται στο τέλος κάθε γύρου του παίγνιου επιλύοντας το πρόβλημα βελτιστοποίησης E 3-31 με περιορισμούς E 3-28 – E 3-30. Στον πρώτο γύρο, η ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων αρχικοποιείται στο μηδέν ( $P_{ch,i,t \rightarrow 0}^{EV} = 0$ ), επομένως τα σήματα ελέγχου καθορίζονται αποκλειστικά και μόνο από τη συμβατική ζήτηση του δικτύου ( $D_i$ ). Ως εκ τούτου, οι τιμές των σημάτων ελέγχου είναι υψηλές όταν το φορτίο του δικτύου είναι υψηλό ενώ αντίθετα οι τιμές είναι χαμηλές τις ώρες με χαμηλή κατανάλωση. Η λογική παραγωγής των σημάτων αυτών αποτρέπει τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων τις ώρες αιχμής και μετατοπίζει τη φόρτιση τους

τις ώρες με χαμηλή κατανάλωση, όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα του πρώτου γύρου στην Εικόνα 3-22. Όπως αναμενόταν, όλα τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα δείχνουν μεγαλύτερη προτίμηση στις ώρες με τις χαμηλότερες τιμές των σημάτων ελέγχου. Βάσει του βέλτιστου προφίλ των ηλεκτρικών οχημάτων, ο περιφερειακός αθροιστής (RAU) παράγει μια νέα χρονοσειρά σημάτων ελέγχου. Λόγω της αύξησης της ζήτησης του δικτύου τις βραδινές ώρες, οι τιμές των σημάτων ελέγχου αυξάνονται εκείνες τις ώρες με σκοπό να αποτρέψουν τον ταυτοχρονισμό της φόρτισης όλων των οχημάτων, με μέγιστο ρυθμό φόρτισης, την ίδια στιγμή. Βάσει των νέων σημάτων ελέγχου, τα ηλεκτρικά οχήματα αντιδρούν αναλόγως μετατοπίζοντας της φόρτιση τους στην αρχή και στο τέλος της εξεταζόμενης περιόδου φόρτισης δημιουργώντας έτσι δύο νέες αιχμές ζήτησης. Στον τρίτο γύρο οι τιμές των σημάτων ελέγχου αυξάνονται στα άκρα της κοιλάδας του αρχικού φορτίου ενώ αντίθετα μειώνονται στο κέντρο της. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, το φορτίο της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων να συγκεντρωθεί ξανά στο κέντρο της κοιλάδας της αρχικής ζήτησης. Στους επόμενους γύρους του παιγνίου, το σύστημα ταλαντώνεται μεταξύ των δύο αυτών καταστάσεων (αιχμή ζήτησης στο κέντρο της κοιλάδας της συμβατικής ζήτησης- δυο αιχμές ζήτησης στα άκρα της κοιλάδας) χωρίς να επιτυγχάνεται η στρατηγική της ελαχιστοποίησης της διακύμανσης του φορτίου (valley-filling) που επιζητείται.

### B. Συζευγμένες αντικειμενικές συναρτήσεις ηλεκτρικών οχημάτων (weakly-coupled agents)

Στην προηγούμενη ενότητα αποδείχθηκε ότι όταν οι αντικειμενικές συναρτήσεις την ηλεκτρικών οχημάτων είναι τελείως ανεξάρτητες, το παίγνιο ταλαντώνεται μεταξύ δύο καταστάσεων. Για να αποφευχθεί αυτό, η αντικειμενική συνάρτηση κάθε οχήματος τροποποιείται με την υιοθέτηση ενός δευτεροβάθμιου όρου που λειτουργεί ως ποινή για την απόκλιση της ατομική συμπεριφοράς κάθε παίκτη από την μέση συμπεριφορά του συνόλου των παικτών. Πιο συγκεκριμένα, η αντικειμενική συνάρτηση κάθε ηλεκτρικού οχήματος E 3-31 τροποποιείται ως εξής:

$$J_n(\mathbf{P}_{ch}) = \sum_{t \in T} \left\{ p_t \cdot P_{ch,i,t}^{EV} + \delta \cdot (P_{ch,i,t}^{EV} - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{ch,i,t}^{EV})^2 \right\} \quad \text{E 3-32}$$

μ.π.

$$\sum_{t=0}^{T_i} P_{ch,i,t}^{EV} \Delta t = (1 - SOC_i(t=0)) \cdot C_{bat} / C_{eff} \quad \text{E 3-33}$$

$$SOC_{i,t+1} - SOC_{i,t} = \frac{1}{C_{bat}} P_{ch,i,t}^{EV} \Delta t \cdot C_{eff} \quad (\rightarrow SOC_{i,T} = 1, \text{πλήρη φόρτιση}) \quad \text{E 3-34}$$

$$0 \leq P_{ch,i,t}^{EV} \leq P_{nomCS,i} \quad \text{E 3-35}$$

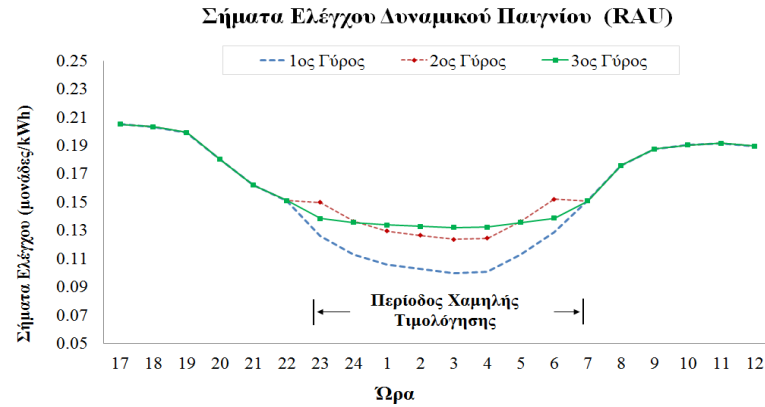
όπου  $\delta \geq 0$  είναι μια παράμετρος σύγκλισης για την οποία πρέπει να ισχύει η παρακάτω συνθήκη [118]:

$$\frac{1}{2c^N} \sup_{p \in [pmin,1]} \frac{dp}{dr} \leq \delta \leq \frac{C_{eff}}{c^N} \inf_{p \in [pmin,1]} \frac{dp}{dr} \quad \text{E 3-36}$$

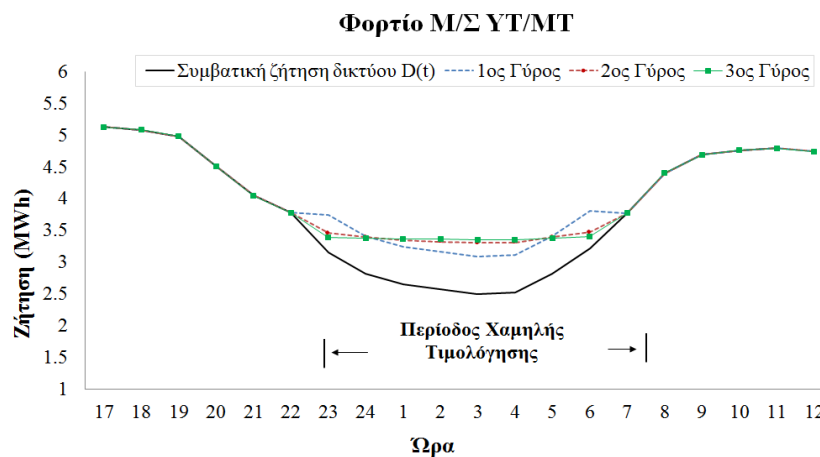
Το πρόβλημα βελτιστοποίησης E 3-32 – E 3-35 είναι ένα πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού με γραμμικούς περιορισμούς. Το συγκεκριμένο πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί με εμπορικά διαθέσιμες βιβλιοθήκες όπως η “Quadprog” της Matlab ή “CPLEX” του GAMS.

### Αριθμητικό Παράδειγμα

Ας υποθέσουμε το παραπάνω παράδειγμα της ενότητας αυτής. Τα σήματα ελέγχου καθώς και η συνολική ζήτηση του Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα (Εικόνα 3-23 - Εικόνα 3-24). Σε κάθε γύρο του παιγνίου, στα χρονικά διαστήματα με την χαμηλότερη συμβατική κατανάλωση το φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων καθώς και η μέση τιμή τους αυξάνει σταδιακά έως ότου ισορροπήσουν σε εκείνες τις τιμές που ελαχιστοποιούν την διακύμανση του φορτίου (“valley-filling”).



Εικόνα 3-23 Δυναμικό Παίγνιο αποκεντρωμένης διαχείρισης ηλεκτρικών οχημάτων (“valley-filling”)- Σήματα \*Ελέγχου RAU ( συζευγμένες συναρτήσεις – weakly coupled agents)



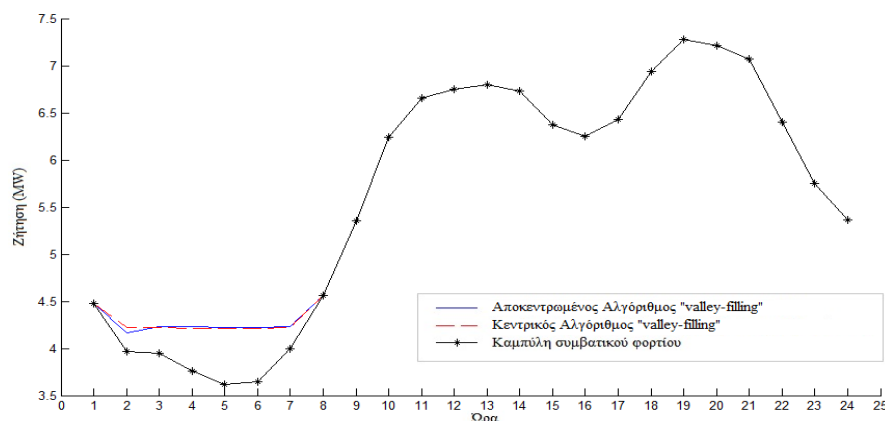
Εικόνα 3-24 Δυναμικό Παίγνιο αποκεντρωμένης διαχείρισης ηλεκτρικών οχημάτων (“valley-filling”)- Συνολική ζήτηση στο επίπεδο του Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ ( συζευγμένες συναρτήσεις – weakly coupled agents)

### 3.3.2.5 Ανάλυση σύγκλισης αλγορίθμου ως προς την ομοιογένεια του στόλου

Στις παραπάνω παραγράφους αναλύθηκε και παρουσιάστηκε ο αποκεντρωμένος αλγόριθμος για την επίτευξη της στρατηγικής φόρτισης “valley-filling”. Η σύγκλιση του αλγορίθμου στη βέλτιστη λύση “valley-filling” προϋποθέτει την ομοιογένεια του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων, δηλαδή ίδια χωρητικότητα μπαταρίας σε όλα τα ηλεκτρικά οχήματα, κοινό διάστημα φόρτισης, ίδιο επίπεδο ισχύος φόρτισης κτλ. Στην ενότητα αυτή θα μελετήσουμε τη σύγκλιση του αλγορίθμου για την περίπτωση ετερογενούς στόλου ηλεκτρικών οχημάτων. Για τον σκοπό αυτό, εξετάζουμε έναν μικρό αριθμό ηλεκτρικών οχημάτων με διαφορετικά χαρακτηριστικά όπως παρουσιάζει ο Πίνακας 3-6 τη στρατηγική “valley-filling” και του αντίστοιχου αποκεντρωμένου. Στη περίπτωση που ο στόλος δεν είναι ομοιογενής, ο αποκεντρωμένος αλγόριθμος δεν συγκλίνει στη βέλτιστη λύση αλλά πολύ κοντά σε αυτή όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 3-25.

Πίνακας 3-6: Ετερογενής στόλος ηλεκτρικών οχημάτων

	Αριθμός Αυτοκινήτων	Χωρητικότητα Μπαταρίας $C_{bat}$ (kWh)	Κατανάλωση Μπαταρίας (% $C_{bat}$ )
<b>Ομάδα Α</b>	50	24	40
<b>Ομάδα Β</b>	100	24	20
<b>Ομάδα Γ</b>	150	14	50



Εικόνα 3-25 Σύγκριση αποκεντρωμένου και κεντρικού αλγορίθμου “valley-filling” θεωρώντας μη ομοιογενή στόλο ηλεκτρικών οχημάτων

Το ζήτημα της σύγκλισης του αποκεντρωμένου αλγορίθμου για μη ομοιογενή στόλο έχει επιλυθεί βιβλιογραφικά με δύο τρόπους: *i*) διαχωρισμός των ηλεκτρικών οχημάτων ανά ομάδα με όμοια χαρακτηριστικά, ώστε να διατηρείται η ομοιομορφία του στόλου, και προσδιορισμός του συντελεστή ποινής για κάθε κατηγορία ξεχωριστά ([128]) και *ii*) υιοθέτηση διαφορετικού συντελεστή ποινής ([98]). Στην πρώτη περίπτωση, το βέλτιστο προφίλ φόρτισης κάθε αυτοκινήτου καθορίζεται από την αντικειμενική συνάρτηση (E 3-32) και τους αντίστοιχους περιορισμούς (E 3-33) – (E3-35), με τη διαφοροποίηση ότι ο όρος  $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{ch,i,t}$  αφορά στο άθροισμα των προφίλ των ηλεκτρικών οχημάτων που ανήκουν στην ίδια ομάδα και όχι όλου του στόλου. Τα σήματα ελέγχου  $p_t$  που παράγει ο RAU για τον συντονισμό των ηλεκτρικών οχημάτων καθορίζονται από την εξίσωση (E 3-27) βάσει του αθροιστικού προφίλ φόρτισης του συνόλου των ηλεκτρικών οχημάτων. Στη δεύτερη περίπτωση, ο συντελεστής ποινής τροποποιείται και δεν εξαρτάται πλέον από τη μέση τιμή του προφίλ φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων αλλά από την απόκλιση του ατομικού προφίλ φόρτισης κάθε οχήματος κατά την επανάληψη  $k$  από το αντίστοιχο ατομικό προφίλ φόρτισης της προηγούμενης επανάληψης  $k-1$ . Επομένως, η αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης E 3-32 τροποποιείται ως ακολούθως:

$$J_n^k(\mathbf{P}_{ch}) = \sum_{t \in T} \left\{ p_t^k \cdot P_{ch,i,t}^{EV} + \frac{1}{2} \cdot (P_{ch,i,t}^{EV} - P_{ch,i,t}^{EV,k-1})^2 \right\} \quad \text{E 3-37}$$

μ.π. (E 3-33) – (E 3-35)

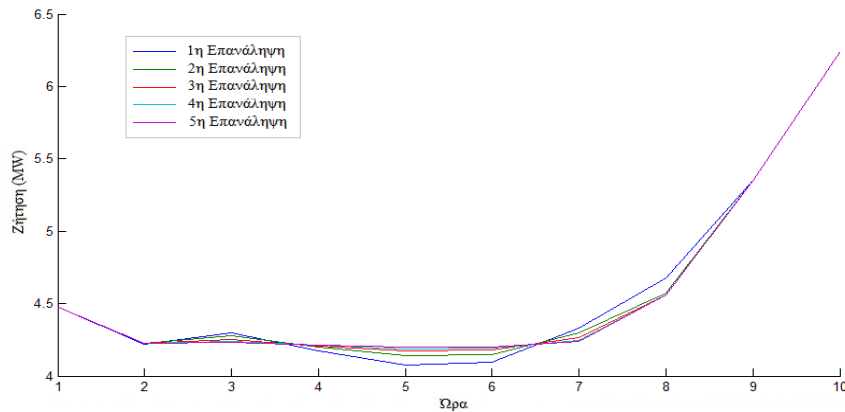
όπου τα σήματα ελέγχου  $p_t$  που παράγει ο RAU σε κάθε επανάληψη  $k$  δίνονται από την παρακάτω εξίσωση:

$$p_t^k = \gamma \cdot \nabla U(D_t + \sum_{i=1}^N P_{ch,i,t}^{EV,k-1}) \quad \text{E 3-38}$$

όπου  $\gamma$  μια θετικά ορισμένη σταθερά που καθορίζει τη σύγκλιση του αποκεντρωμένου αλγορίθμου,  $U(D_t + \sum_{i=1}^N P_{ch,i,t})$  είναι μια κυρτή συνάρτηση της οποίας η πρώτη παράγωγος  $\nabla U$  είναι μια Lipschitz συνάρτηση και ως εκ τούτου υπάρχει μια Lipschitz σταθερά  $\beta$  για την οποία ισχύει ότι  $|\nabla U(x) - \nabla U(y)| \leq \beta |x - y|$ . Όσο μικραίνει η τιμή της σταθεράς  $\gamma$ , μικραίνουν και τα σήματα ελέγχου που παράγονται από τον RAU (E 3-37) με αποτέλεσμα να αυξάνεται η βαρύτητα του συντελεστή ποινής στην αντικειμενική συνάρτηση (E 3-36). Στο σημείο σύγκλισης, ο συντελεστής ποινής μηδενίζεται. Όπως αποδεικνύεται στην ανάλυση του Gan ([98]) για τη σύγκλιση του αλγορίθμου, η σταθερά  $\gamma$  πρέπει να ικανοποιεί την παρακάτω συνθήκη:

$$\gamma \leq \frac{1}{N \cdot \beta} \quad \text{E 3-39}$$

Ο τροποποιημένος αποκεντρωμένος αλγόριθμος εφαρμόστηκε για τον ετερογενή στόλο που παρουσιάζει ο Πίνακας 3-6 και τα αποτελέσματα του απεικονίζονται στην Εικόνα 3-26. Σε αντίθεση με τον προτεινόμενο αποκεντρωμένο αλγόριθμο που ο συντελεστής ποινής καθορίζεται από το μέσο προφίλ φόρτισης, ο τροποποιημένος αποκεντρωμένος αλγόριθμος εξασφαλίζει τη σύγκλιση στη βέλτιστη λύση μετά από λίγες επαναλήψεις.



Εικόνα 3-26 Σύγκλιση τροποποιημένου αποκεντρωμένου αλγορίθμου για ετερογενή στόλο ηλεκτρικών οχημάτων

Ένα επιπρόσθετο πλεονέκτημα του τροποποιημένου αλγορίθμου σύγκλισης είναι ότι το βέλτιστο προφίλ φόρτισης κάθε οχήματος καθορίζεται από τα τοπικά χαρακτηριστικά και ανάγκες του οχήματος καθώς και τα σήματα ελέγχου του RAU. Δηλαδή δεν είναι απαραίτητη η γνώση του μέσου προφίλ φόρτισης συνεισφέροντας στη μείωση των δεδομένων επικοινωνίας.

### 3.3.3 Σύγκριση κεντρικού και αποκεντρωμένου αλγορίθμου

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστεί μια συγκριτική ανάλυση των αποτελεσμάτων μεταξύ του κεντρικού αλγορίθμου για την ελαχιστοποίηση της διακύμανσης του φορτίου όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.3.1 και του αντίστοιχου αποκεντρωμένου αλγορίθμου της ενότητας 3.3.2.4. Η αντικειμενική συνάρτηση του κεντρικού προβλήματος μπορεί να εκφραστεί ισοδύναμα (δεδομένου ότι η μέση τιμή του φορτίου του δικτύου  $\mu$  είναι ανάλογη του συμβατικού φορτίου και της συνολικής ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων) ως εξής:

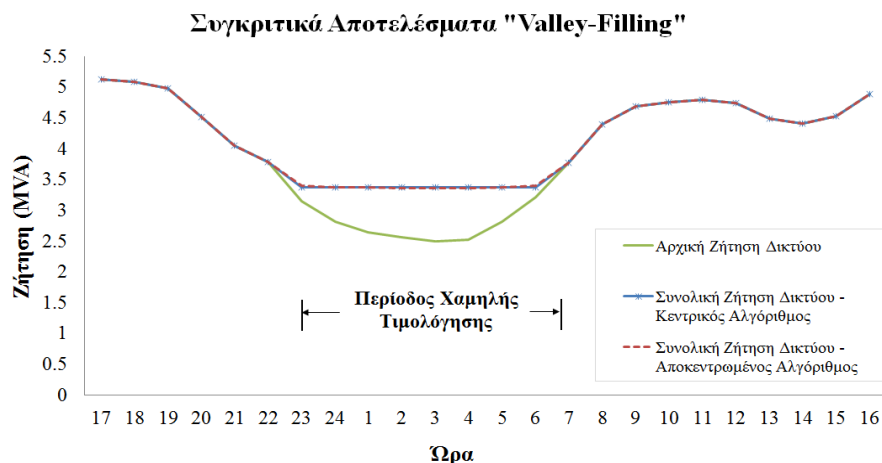
$$\min_{P_{ch,i}} J_{cent} = \sum_{t=1}^T (\sum_{i=1}^N P_{ch,i,t}^{EV} + D^t)^2 \quad \text{E 3-40}$$

Η αντικειμενική συνάρτηση E3-40 είναι τετραγωνικής μορφής και επομένως το κεντρικό πρόβλημα είναι τετραγωνικού προγραμματισμού με γραμμικούς περιορισμούς (E3-9)–(E3-14) και μπορεί να εκφραστεί στην εξής μορφή:

$$\min_{P_{ch,i}} J_{cent} = \frac{1}{2} x^T H x + f^T x \quad \text{E 3-41}$$

όπου  $H=2*I_{N*T}$  με  $I_{N*T}$  να είναι ταυτοτικός πίνακας διαστάσεων  $N*T$  και  $f$  μηδενικός πίνακας. Η επίλυση του κεντρικού προβλήματος έγινε σε περιβάλλον Matlab χρησιμοποιώντας την βιβλιοθήκη *quadprog*. Το τελικό αποτελέσματα της σύγκλισης των δύο αλγορίθμων παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-27, αποδεικνύοντας την ισοδυναμία των δύο αλγορίθμων. Στη συνέχεια θα αναλυθούν η ροή πληροφορίας που μεταδίδεται κατά την υλοποίηση τους καθώς και ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος.





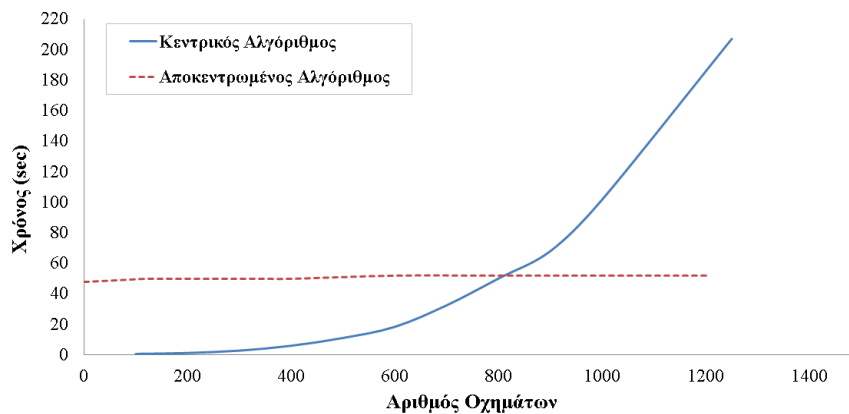
Εικόνα 3-27 Συγκριτικά αποτελέσματα σύγκλισης κεντρικού και αποκεντρωμένου αλγορίθμου

Ο κεντρικός αλγόριθμος απαιτεί την επεξεργασία όλων των πληροφοριών κάθε ηλεκτρικού οχήματος σε ένα κεντρικό σημείο. Καθώς ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων αυξάνει, το κεντρικό πρόβλημα ελαχιστοποίησης της διακύμανσης του φορτίου γίνεται πιο σύνθετο και απαιτείται μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύ λόγω του ότι αυξάνονται ο αριθμός των μεταβλητών καθώς και ο αριθμός των περιορισμών του προβλήματος. Ως εκ τούτου, ο υπολογιστικός χρόνος στο κεντρικό πρόβλημα επηρεάζεται σημαντικά από το πλήθος των εξεταζόμενων ηλεκτρικών οχημάτων. Πιο συγκεκριμένα, όπως παρουσιάστηκε στην Εικόνα 3-17, η εξάρτηση του χρόνου υπολογισμού σε σχέση με το μέγεθος του στόλου των οχημάτων έχει πολυωνυμική μορφή λόγω της τετραγωνικής μορφής της αντικειμενικής συνάρτησης του κεντρικού προβλήματος. Για λόγους σύγκρισης, ο αποκεντρωμένος αλγόριθμος με συζευγμένες συναρτήσεις εφαρμόστηκε σε μια υπολογιστική μονάδα με περιορισμένες υπολογιστικές δυνατότητες (Intel Xscale™ PXA255 processor at 400 MHz with 64 MB RAM and 32MB flash memory) που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο για την εφαρμογή και εξέταση πολύ-πρακτορικών συστημάτων στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος Microgrids<sup>4</sup>. Το πολύ-πρακτορικό σύστημα όπως παρουσιάστηκε στην Εικόνα 3-19, εφαρμόστηκε στη πλατφόρμα ανάπτυξης και επικοινωνίας πολυ-πρακτορικών συστημάτων Java Agent Development Framework (JADE) [130]. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής αυτής παρουσιάζονται στην Εικόνα 3-28. Ο χρόνος σύγκλισης παραμένει αμετάβλητος ανεξάρτητα από το πλήθος των ηλεκτρικών οχημάτων στον αποκεντρωμένο αλγόριθμο. Η υιοθέτηση και μόνο ενός αποκεντρωμένου αλγορίθμου χωρίς ενδιάμεσα επίπεδα άθροισης μπορεί να βελτιώσει το χρόνο σύγκλισης του κεντρικού προβλήματος και αντί πολυωνυμικής μορφής να αποκτήσει γραμμική μορφή σύγκλισης συγκριτικά με το πλήθος των οχημάτων όπως αποδεικνύεται στην ανάλυση του Vandael [131]. Η εκθετική μορφή σύγκλισης του απλού αποκεντρωμένου αλγορίθμου οφείλεται στο γεγονός ότι ο κεντρικός συντονιστής πρέπει να διαχειριστεί μόνος του όλη την πληροφορία που έρχεται σχεδόν συγχρονισμένα από όλα τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα δημιουργώντας υπερφόρτιση του διαύλου επικοινωνίας. Η προτεινόμενη υιοθέτηση ενδιάμεσων επιπέδων άθροισης των προφίλ ζήτησης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων συνεισφέρει στην ελαχιστοποίηση των δεδομένων επικοινωνίας προς τον κεντρικό συντονιστή. Με τον τρόπο αυτό, ο χρόνος σύγκλισης του προτεινόμενου αποκεντρωμένου αλγορίθμου παραμένει σταθερός ανεξάρτητα από το μέγεθος του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων.

<sup>4</sup> <http://www.microgrids.eu/default.php>



Υπολογιστικός Χρόνος Επίλυσης Κεντρικού και Αποκεντρωμένου Αλγορίθμου "Valley-Filling"



Εικόνα 3-28 Συγκριτικά αποτελέσματα χρόνου σύγκλισης κεντρικού και αποκεντρωμένου αλγορίθμου

Ο χρόνος υπολογισμού του βέλτιστου προφίλ φόρτισης ενός ηλεκτρικού οχήματος στη περίπτωση του αποκεντρωμένου αλγορίθμου είναι λιγότερο από 13sec σε κάθε γύρο του παιγνίου. Η μέση καθυστέρηση μετάδοσης της πληροφορίας στο κατώτερο επίπεδο επικοινωνίας (VC-MGAU) υπολογίστηκε μικρότερη από 60msec. Η αντίστοιχη καθυστέρηση μετάδοσης στο ανώτερο επίπεδο επικοινωνίας (MGAU-RAU) είναι μεγαλύτερη και ίση περίπου με 500msec λόγω του ότι οι πράκτορες ανήκουν σε διαφορετικές πλατφόρμες της JADE. Αναλυτικότερες πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο επικοινωνίας και τις καθυστερήσεις μετάδοσης στην πλατφόρμα JADE υπάρχουν στις μελέτες [132]-[133]. Συνοψίζοντας τα παραπάνω, ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης κάθε γύρου, συμπεριλαμβανομένων του χρόνου υπολογισμού του βέλτιστου προφίλ φόρτισης και των καθυστερήσεων μετάδοσης της πληροφορίας, δεν ξεπερνά τα 600msec. Για τη σύγκλιση του αποκεντρωμένου αλγορίθμου, απαιτείται ένας αριθμός επαναλήψεων του παιγνίου. Συνολικά, ο χρόνος σύγκλισης για την επίτευξη της ισορροπίας δε ξεπερνά τα 55sec ανεξαρτήτως του αριθμού των ηλεκτρικών οχημάτων.

### 3.4 Αλγόριθμος διαχείρισης στόλου ηλεκτρικών οχημάτων σε πραγματικό χρόνο

Σκοπός της ενότητας αυτής είναι η ανάλυση ενός κεντρικού αλγορίθμου διαχείρισης ενός περιορισμένου αριθμού ηλεκτρικών οχημάτων σε περιόδους υψηλής κατανάλωσης. Σε περιόδους όπου το (τοπικό) δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι σημαντικά φορτισμένο, δύναται να μην είναι εφικτή η ταυτόχρονη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων καθώς η αθροιστική ζήτηση τους μπορεί να προκαλέσει υπερφόρτιση του δικτυακού εξοπλισμού (πχ.χ τον Μ/Σ σε έναν κεντρικό σταθμό στάθμευσης ηλεκτρικών οχημάτων ή τον Μ/Σ σε ένα τοπικό δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας κτλ). Ο αλγόριθμος που θα παρουσιαστεί στην ενότητα αυτή αξιοποιεί την ελαστικότητα της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων με σκοπό την χρονική μετατόπιση της έτσι ώστε να εξυπηρετηθεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος της και παράλληλα να μην υφίστανται τεχνικά προβλήματα στον ηλεκτρολογικό/ δικτυακό εξοπλισμό.

Στην Εικόνα 3-29 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής του προτεινόμενου αλγορίθμου. Αρχικά, η παρακολούθηση και ανάλυση της λειτουργίας του δικτύου είναι απαραίτητη λαμβάνοντας υπόψη τη συμβατική ζήτηση του. Βάσει αυτής της ανάλυσης καθορίζεται η μέγιστη, επιπρόσθετη ζήτηση που μπορεί να εξυπηρετηθεί τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή χωρίς να παραβιάζεται κανένας τεχνικός περιορισμός λειτουργίας του δικτύου. Αν δεν παραβιάζεται κάποιος δικτυακός περιορισμός, τότε κάθε ηλεκτρικό όχημα, που συνδέεται στο ηλεκτρικό δίκτυο, μπορεί να φορτίσει στο μέγιστο επιτρεπτό επίπεδο φόρτισης, όπως αυτό ορίζεται από την ονομαστική ισχύ φόρτισης των υποδομών φόρτισης. Αντιθέτως, αν η αθροιστική ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων τη δεδομένη χρονική στιγμή δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί πλήρως, μέρος αυτής πρέπει να μετατοπιστεί και να εξυπηρετηθεί σε μεταγενέστερο χρόνο. Ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων που η φόρτιση

τους αποκόπτεται (παραμένουν αδρανή για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα) καθορίζεται από τον προτεινόμενο αλγόριθμο βάσει των παρακάτω κριτηρίων:

1. Μέγιστη ζήτηση φόρτισης που μπορεί να εξυπηρετηθεί από τις υφιστάμενες δικτυακές υποδομές
2. Περίοδος στάθμευσης κάθε ηλεκτρικού οχήματος
3. Συνολική κατανάλωση ενέργειας κάθε ηλεκτρικού οχήματος πριν τη σύνδεση του στο δίκτυο
4. Αριθμός περιόδων αποκοπής της φόρτισης ενός ηλεκτρικού οχήματος

Πιο συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος απόφασης, τα διασυνδεδεμένα ηλεκτρικά οχήματα κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες: η πρώτη κατηγορία (A1) αποτελείται από ηλεκτρικά οχήματα τα οποία είναι ήδη διασυνδεδεμένα από προηγούμενο χρονικό διάστημα απόφασης, ενώ η δεύτερη κατηγορία αφορά σε ηλεκτρικά οχήματα που μόλις συνδέθηκαν σε σταθμό φόρτισης. Ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων που μπορούν να φορτίσουν κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος εξαρτάται από το περιθώριο φόρτισης του δικτύου ( $P_{av}$ ) και την ονομαστική ισχύ των υποδομών φόρτισης. Αν η συνολική ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα είναι μικρότερη ή ίση από  $P_{av}$ , τότε όλα τα οχήματα φορτίζουν στο μέγιστο δυνατό επίπεδο. Σε αντίθετη περίπτωση, τα ηλεκτρικά οχήματα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: οχήματα που προσφέρουν ελαστικότητα για τη φόρτιση τους και αυτά που δεν προσφέρουν.

Η ελαστικότητα φόρτισης ( $E_i$ ) που προσφέρεται από ένα όχημα προσδιορίζεται ως εξής:

$$E_i = (T - T_{arrival}) - T_{full} \quad E\ 3-42$$

όπου  $T$  είναι το συνολικό διάστημα φόρτισης που εξετάζεται,  $T_{arrival}$  είναι το χρονικό διάστημα που το ηλεκτρικό όχημα συνδέεται στο δίκτυο και  $T_{full}$  είναι ο αριθμός των χρονικών διαστημάτων που απαιτείται για την πλήρη φόρτιση της μπαταρίας ενός ηλεκτρικού οχήματος. Η παράμετρος  $T_{full}$  προσδιορίζεται ως εξής:

$$T_{full} = (1 - SOC)C_{bat}/P_{nomCS} \quad E\ 3-43$$

όπου  $C_{bat}$  η χωρητικότητα της μπαταρίας του ηλεκτρικού οχήματος,  $SOC$  το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας,  $P_{nomCS}$  η ονομαστική ισχύς των υποδομών φόρτισης.

Τα ηλεκτρικά οχήματα που δεν έχουν τη δυνατότητα παροχής ελαστικότητας ζήτησης, έχουν προτεραιότητα στη διαδικασία φόρτισης έναντι αυτών που προσφέρουν ελαστικότητα. Τα ηλεκτρικά οχήματα με μη ελαστική ζήτηση ( $N$ ) ταξινομούνται σε μια λίστα προτεραιότητας βάσει των παρακάτω κριτηρίων: τον αριθμό των χρονικών διαστημάτων που ένα όχημα έχει παραμείνει αδρανές (δεν φορτίζει), ενώ είναι διασυνδεδεμένο στο δίκτυο, και το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας τους. Προτεραιότητα φόρτισης παρέχεται στο όχημα με το μεγαλύτερο αριθμό αδρανών διαστημάτων και το χαμηλότερο επίπεδο φόρτισης. Το νέο περιθώριο φόρτισης του δικτύου για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων που προσφέρουν ελαστικότητα ζήτησης, λαμβάνοντας υπόψη τη ζήτηση των οχημάτων χωρίς ελαστικότητα ζήτησης, είναι :

$$P'_{av} = P_{av} - \sum_{i=1}^N P_{ch,i}^{EV} \quad E\ 3-44$$

όπου  $P_{ch,i}^{EV}$  είναι η ισχύς φόρτισης του  $i$ -ου ηλεκτρικού οχήματος που δεν προσφέρει ελαστικότητα ζήτησης.

Τα ηλεκτρικά οχήματα που προσφέρουν ελαστικότητα ζήτησης κατηγοριοποιούνται σε  $k$  κατηγορίες ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας τους. Στην παρούσα μελέτη, θεωρούνται τέσσερεις κατηγορίες όπως αυτές περιγράφονται στον Πίνακα 3-7.

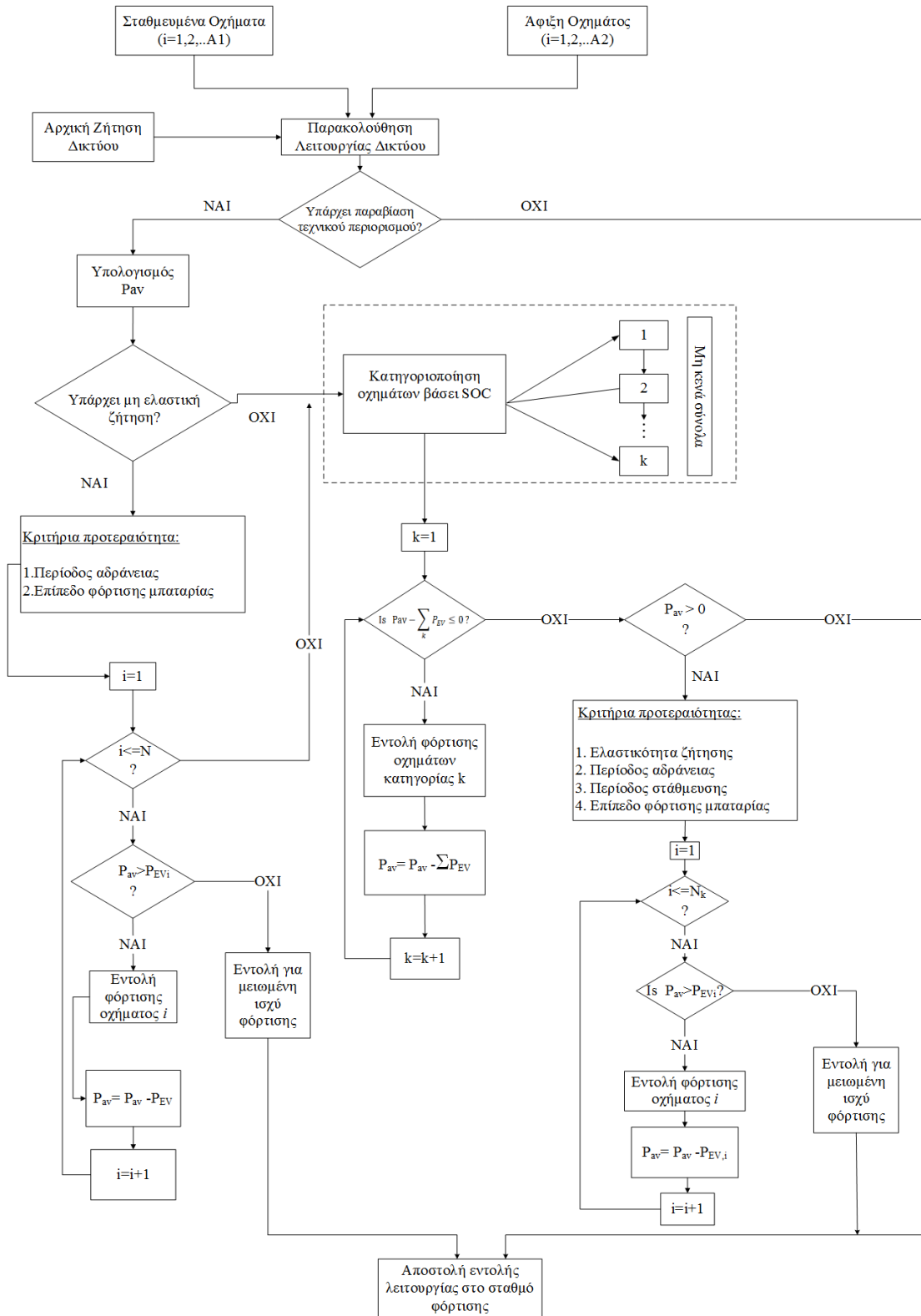
<b>Πίνακας 3-7: Βαθμός προτεραιότητας οχημάτων με ελαστικότητα ζήτησης</b>	
<b>Επίπεδο Φόρτισης Μπαταρίας</b>	<b>Βαθμός Προτεραιότητας</b>
0% - 30%	High Priority (H)
30% - 70%	High-Average Priority (HA)
70% - 90%	Low-Average Priority (LA)
90% - 100%	Low Priority (L)

Στη συνέχεια, η συνολική ζήτηση κάθε μιας από τις παραπάνω κατηγορίες συγκρίνεται με το περιθώριο φόρτισης του δικτύου ( $P'_{av}$ ). Αν η αθροιστική ζήτηση της εκάστοτε εξεταζόμενης

κατηγορίας υπερβαίνει το περιθώριο φόρτισης του δικτύου, ένα ποσοστό της ζήτησης των οχημάτων που ανήκουν στην κατηγορία αυτή δεν θα εξυπηρετηθεί. Ο προσδιορισμός των οχημάτων που δεν θα φορτίσουν την συγκεκριμένη χρονική στιγμή γίνεται βάσει των παρακάτω κριτηρίων:

- *Ελαστικότητα ζήτησης:* Τα συνδεδεμένα οχήματα που προσφέρουν ελαστικότητα ζήτησης ταξινομούνται σε μια λίστα με φθίνουσα σειρά ελαστικότητας. Η αποκοπή της ζήτησης ξεκινάει από την κορυφή της λίστας.
- *Χρονικά διαστήματα αδράνειας:* ο αριθμός των χρονικών διαστημάτων κατά τα οποία αποκόπηκε η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων
- *Χρόνος στάθμευσης:* Ο συνολικός διαθέσιμος χρόνος που το όχημα παραμένει διασυνδεδεμένο και μπορεί να πραγματοποιηθεί φόρτιση
- *Φόρτιση μπαταρίας:* Το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας του ηλεκτρικού οχήματος

Στο τέλος της διαδικασίας, ο αλγόριθμος εξάγει το σημείο λειτουργίας για κάθε ηλεκτρικό όχημα.

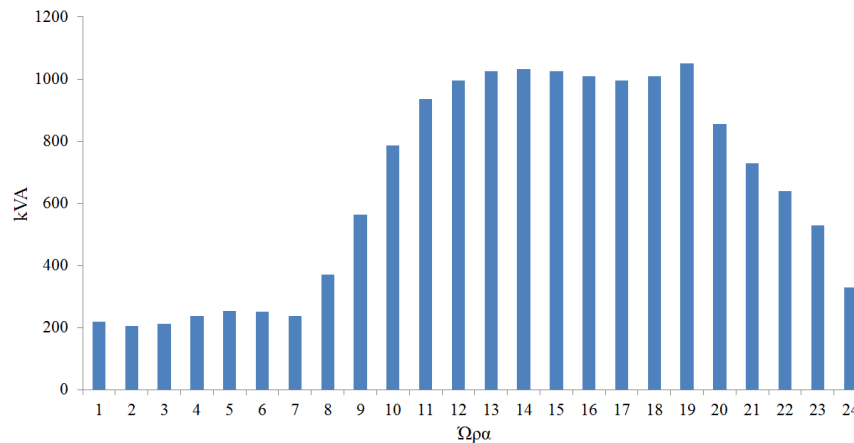


**Αριθμητικό παράδειγμα**

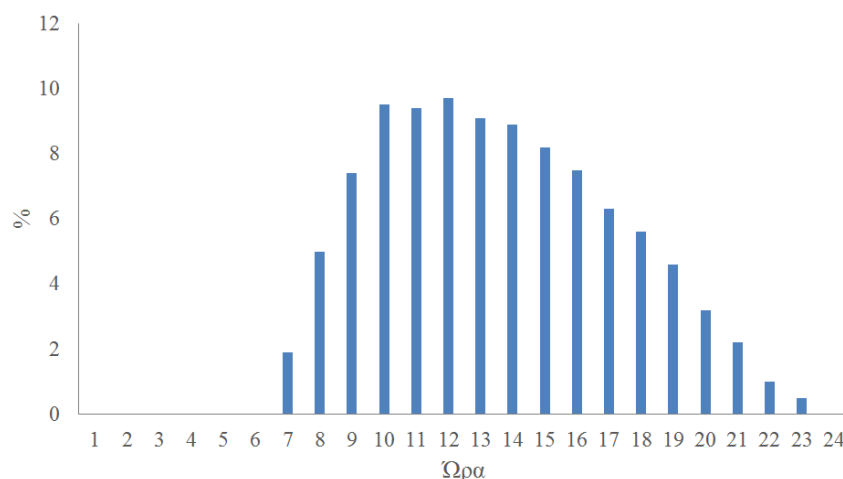
Για τις ανάγκες της προσομοίωσης, θεωρούμε ένα μετασχηματιστή MT/XT με ονομαστική ισχύ 1250kVA Που τροφοδοτεί εμπορικό φορτίο. Η θεωρούμενη καμπύλη ζήτησης του μετασχηματιστή

παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-30. Επιπρόσθετα, οι διαθέσιμες υποδομές φόρτισης θεωρούνται τύπου Mode 2 (7.2kW) ενώ οι συνολικές απώλειες λειτουργίας είναι ίσες με 10%. Το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας κάθε ηλεκτρικού οχήματος τη στιγμή που συνδέεται στο δίκτυο προσδιορίζεται τυχαία βάσει μιας ομοιόμορφης κατανομής μεταξύ των τιμών 20%-40%. Όσον αφορά στην χωρητικότητα των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων, θεωρείται ίδια για όλα τα οχήματα και ίση με 24kWh.

Σχετικά με το στόλο των ηλεκτρικών οχημάτων, εξετάζεται η λειτουργία 180 οχημάτων ή ισοδύναμα 180 συνεδρίες φόρτισης. Η ώρα έναρξης αυτών των φορτίσεων απεικονίζεται στην Εικόνα 3-31. Η πιθανότητα έναρξης της φόρτισης ενός ηλεκτρικού οχήματος είναι μεγαλύτερη μεταξύ των ωρών 9:00-16:00.



Εικόνα 3-30 Θεωρούμενη καμπύλη ζήτησης Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ



Εικόνα 3-31 Πιθανότητα έναρξης της διαδικασίας φόρτισης ανά ώρα

Για την αξιολόγηση της απόδοσης του προτεινόμενου αλγορίθμου εξετάζονται τρία σενάρια:

- *Σενάριο Α:* Όλα τα ηλεκτρικά οχήματα προσφέρουν ελαστικότητα ζήτησης. Σε αυτό το σενάριο, η διάρκεια της περιόδου στάθμευσης είναι μεγαλύτερη από το απαιτούμενο χρονικό διάστημα για την πλήρη φόρτιση της μπαταρίας των οχημάτων.
- *Σενάριο Β:* Κανένα όχημα δεν προσφέρει ελαστικότητα ζήτησης. Στο ακραίο αυτό σενάριο, η απαιτούμενη διάρκεια για την πλήρη φόρτιση της μπαταρίας ενός οχήματος είναι ίση με τη χρονική διάρκεια στάθμευσης του οχήματος.
- *Σενάριο Γ:* Ανάλυση ευαισθησίας ως προς το ποσοστό των οχημάτων που προσφέρουν ελαστικότητα ζήτησης. Στο σενάριο αυτό, εξετάζονται διαφορετικά ποσοστά συμμετοχής στην ευέλικτη φόρτιση (10%-90%), με σκοπό να αποτυπωθεί η επίδραση

της ελαστικότητας ζήτησης στο επίπεδο φόρτισης των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων κατά την αναχώρησή τους.

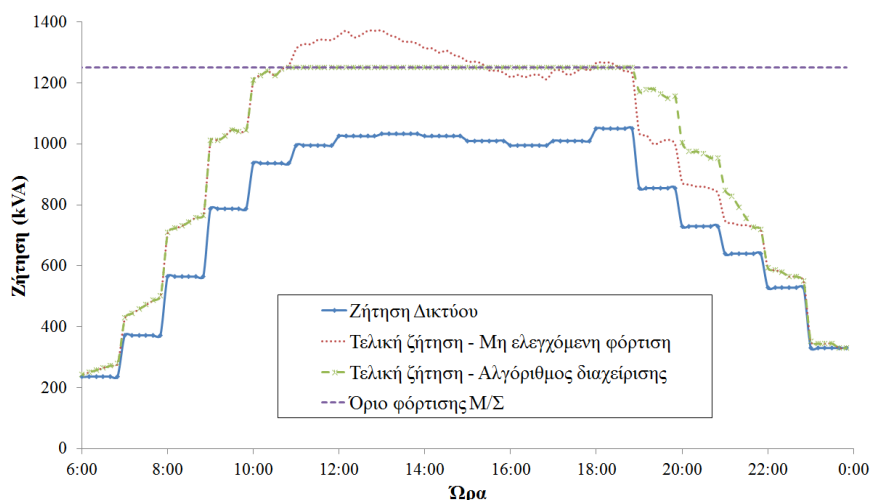
Η ώρα αναχώρησης των ηλεκτρικών οχημάτων προσδιορίζεται από μια κανονική κατανομή όπως περιγράφει ο Πίνακας 3-8. Κάθε ένα από τα παραπάνω σενάρια συγκρίνεται με την περίπτωση της μη ελεγχόμενης φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων.

Πίνακας 3-8: Βαθμός προτεραιότητας οχημάτων με ελαστικότητα ζήτησης

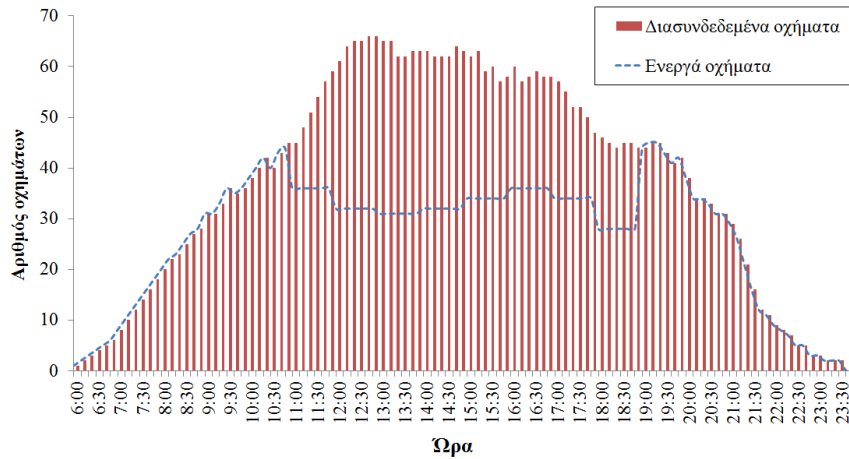
Scenarios	Charging Sessions	Departure Time		% EV Users offering demand elasticity	Initial SOC
		Mean Value (hour)	Standard Deviation (hour)		
Scenario A	180	4	1.5	0%	20% - 40%
Scenario B	180	Equal to a full charging period		100%	20% - 40%
Scenario C	180	4	1.5	10% - 90%	20% - 40%

Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του Σεναρίου Α εμφανίζονται στην Εικόνα 3-32. Η διακεκομμένη οριζόντια γραμμή υποδηλώνει το άνω όριο φόρτισης του εξεταζόμενου μετασχηματιστή. Τις πρωινές ώρες, η ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων καθώς και η φόρτιση του μετασχηματιστή είναι χαμηλές. Ως εκ τούτου, οι ενεργειακές ανάγκες φόρτισης το χρονικό αυτό διάστημα εξυπηρετούνται πλήρως. Ωστόσο, μετά τη χρονική στιγμή 10:40, η φόρτιση του μετασχηματιστή είναι αρκετά υψηλή. Συνεπώς, ένα μέρος της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων αποκόπτεται και εξυπηρετείται σε μεταγενέστερα χρονικά διαστήματα. Ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων που φορτίζουν συγκριτικά με τον αριθμό των διασυνδεδεμένων οχημάτων παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-33.

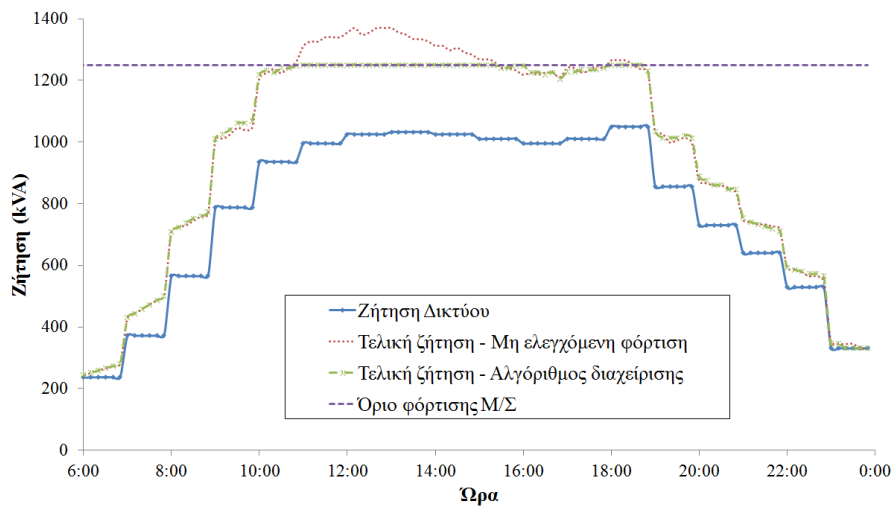
Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του Σεναρίου Β, όπου δεν υπάρχει δυνατότητα μετατόπισης της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-34. Στο σενάριο αυτό, όταν η ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων ξεπερνά το όριο φόρτισης του μετασχηματιστή, η πλεονάζουσα ζήτηση των οχημάτων αποκόπτεται. Ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων που φορτίζουν συγκριτικά με τον αριθμό των διασυνδεδεμένων οχημάτων παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-35.



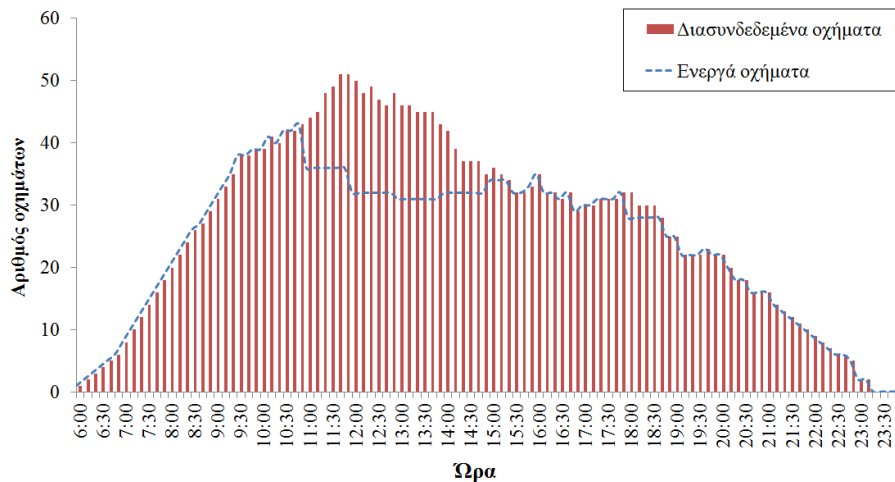
Εικόνα 3-32 Αποτελέσματα προσομοίωσης για το Σενάριο Α



Εικόνα 3-33 Αριθμός διασυνδεδεμένων και ενεργών ηλεκτρικών οχημάτων - Σενάριο Α



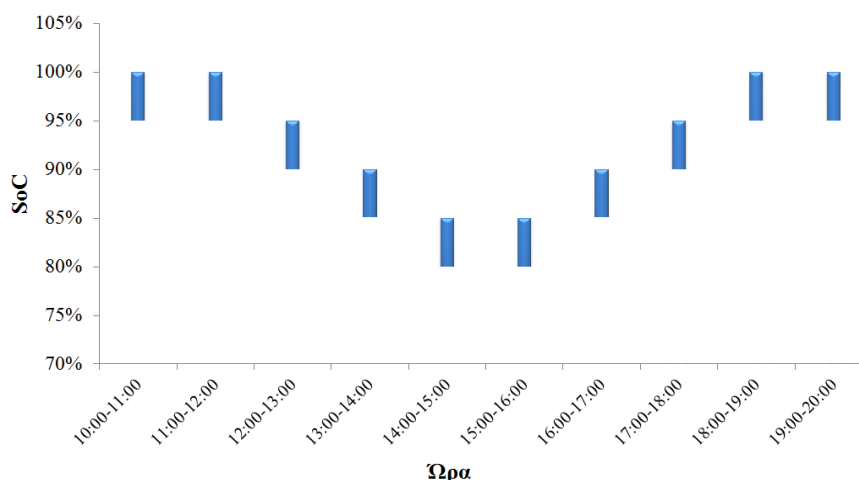
Εικόνα 3-34 Αποτελέσματα προσομοίωσης για το Σενάριο Β



Εικόνα 3-35 Αριθμός διασυνδεδεμένων και ενεργών ηλεκτρικών οχημάτων - Σενάριο Β

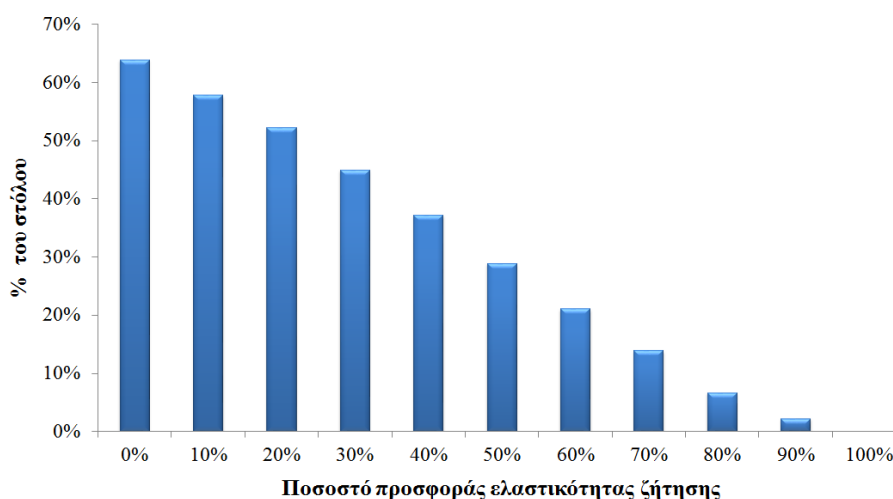
Η απουσία ελαστικότητας ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων στο σενάριο Β έχει ως αποτέλεσμα την ελλιπή φόρτιση των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων. Το 64% των συνολικών φορτίσεων δε ολοκληρώνεται λόγω της απόρριψης φορτίου. Λόγω της στοχαστικής συμπεριφοράς των ηλεκτρικών οχημάτων, η μέθοδος Monte Carlo υιοθετείται για το Σενάριο Β, με σκοπό να μελετηθεί το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων κατά τη

αναχώρησή τους. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής απεικονίζονται στην Εικόνα 3-36. Όσο αυξάνει ο αριθμός των διασυνδεδεμένων οχημάτων κατά την περίοδο υψηλής κατανάλωσης, η απουσία ευέλικτης φόρτισης συνεπάγεται χαμηλότερα επίπεδα φόρτισης μπαταριών κατά την αναχώρηση των οχημάτων. Τις ώρες αιχμής ζήτησης του δικτύου (14:00-16:00), το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών των αφόρτιστων ηλεκτρικών οχημάτων που αναχωρούν αγγίζει το επίπεδο 80-85%.



Εικόνα 3-36 Επίπεδο φόρτισης των μπαταριών κατά την αναχώρηση των αφόρτιστων οχημάτων - Σενάριο Β

Στο Σενάριο Γ, εξετάζονται διαφορετικά ποσοστά ηλεκτρικών οχημάτων που προσφέρουν ευέλικτη φόρτιση. Ο αριθμός των αφόρτιστων ηλεκτρικών οχημάτων ως ποσοστό του στόλου για διαφορετικά ποσοστά ευέλικτης φόρτισης απεικονίζονται στην Εικόνα 3-37. Από τα αποτελέσματα είναι εμφανές και αναμενόμενο το συμπέρασμα ότι όσο μεγαλύτερη είναι η προσφορά ελαστικότητας ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων τόσο μικρότερο είναι το ποσοστό των αφόρτιστων ηλεκτρικών οχημάτων.



Εικόνα 3-37 Ποσοστό αφόρτιστων οχημάτων για διαφορετικά σενάρια συμμετοχής στην ευέλικτη φόρτιση - Σενάριο Γ

### 3.5 Συμπεράσματα

Το επιπρόσθετο φορτίο από τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων όταν δεν υιοθετείται κάποια στρατηγική φόρτισης ταυτοχρονίζεται με την περίοδο αυξημένης κατανάλωσης του δικτύου. Οι αρνητικές επιπτώσεις της μη ελεγχόμενης φόρτισης στη λειτουργία των δικτύων διανομής αναλύθηκαν εκτενώς στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας διατριβής. Σε συνέχεια αυτής της ανάλυσης, στο παρόν κεφάλαιο προτάθηκαν δύο μέθοδοι για τη διαχείριση της φόρτισης των ηλεκτρικών



οχημάτων με σκοπό την εξυπηρέτηση των ενεργειακών αναγκών μετακίνησης των ηλεκτρικών οχημάτων σε ώρες με χαμηλή κατανάλωση στο δίκτυο λαμβάνοντας υπόψη τις προτιμήσεις και τις ανάγκες μετακίνησης των χρηστών των ηλεκτρικών οχημάτων.

Η πρώτη μέθοδος αφορά στον προ-ημερησίας προγραμματισμό της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων από ένα κεντρικό συντονιστή (*Electric Vehicle Supplier Aggregator - EVSA*) με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων βάσει των (προβλεπόμενων) τιμών αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Το αποτέλεσμα της υιοθέτησης της προτεινόμενης στοχαστικής μεθόδου είναι η μετατόπιση του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων στις χρονικές περιόδους με το χαμηλότερο κόστος ενέργειας. Ωστόσο, λόγω του ταυτοχρονισμού της φόρτισης του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων τη χρονική στιγμή με το χαμηλότερο κόστος ενέργειας, δημιουργείται μια αιχμή ζήτησης εκείνη τη χρονική στιγμή. Ως εκ τούτου, η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται στα πρώτα στάδια της ανάπτυξης της ηλεκτροκίνησης που τα ποσοστά διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι σχετικά χαμηλά και επομένως η μετατόπιση του επιπρόσθετου φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων δεν επηρεάζει σημαντικά τη λειτουργία των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια, η προτεινόμενη στοχαστική μέθοδος αναβαθμίστηκε με σκοπό την αποφυγή δημιουργίας υψηλής αιχμής ζήτησης εισάγοντας έναν επιπρόσθετο περιορισμό στον προγραμματισμό της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων για το άνω όριο αιχμής ζήτησης. Όσο μικρότερο είναι το όριο αυτό, τόσο μικρότερη είναι η αιχμή ζήτησης της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Το όριο αιχμής ζήτησης έχει ένα ελάχιστο όριο κάτω από το οποίο ορισμένα οχήματα παραμένουν αφόρτιστα. Η υιοθέτηση του ελάχιστου ορίου αιχμής ζήτησης έχει ως αποτέλεσμα τη στρατηγική φόρτισης “*valley-filling*”. Ωστόσο, το συνολικό κόστος της φόρτισης αυξάνεται αντίστοιχα λόγω της μετατόπισης της ζήτησης σε ακριβότερες χρονικές στιγμές. Η πρώτη μέθοδος διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων ολοκληρώνεται με την ανάπτυξη ενός αλγορίθμου για την διαχείριση της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων σε πραγματικό χρόνο, λαμβάνοντας υπόψη τις πραγματικές (ενεργειακές) ανάγκες μετακίνησης τους καθώς και την εκτιμώμενη καμπύλη ζήτησης του προ-ημερησίας προγραμματισμού. Οι αποκλίσεις μεταξύ εκτιμώμενου και πραγματικού προφίλ μετακίνησης των ηλεκτρικών οχημάτων έχει ως αποτέλεσμα την απόκλιση μεταξύ πραγματικού και εκτιμώμενου βέλτιστου προφίλ φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Η εξομάλυνση των αποκλίσεων επιτυγχάνεται είτε με την ακριβέστερη πρόβλεψη της μετακίνησης των οχημάτων είτε με τη χρήση αποθηκευτικού μέσου.

Η δεύτερη μέθοδος αφορά στην αποκεντρωμένη διαχείριση των ηλεκτρικών οχημάτων με σκοπό την αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων της στρατηγικής φόρτισης “*valley-filling*”. Η προτεινόμενη μέθοδος υιοθετεί τις αρχές των πολύ-πρακτορικών συστημάτων (*Multi-Agent Systems - MAS*) για τον καθορισμό της λειτουργικής συμπεριφοράς και επικοινωνίας των εμπλεκόμενων ενεργειακών παικτών. Ο αποκεντρωμένος αλγόριθμος στηρίζεται στις θεμελιώδεις αρχές των μη-συνεργατικών παιγνίων όπου οι πράκτορες που ελέγχουν τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα αποφασίζουν το βέλτιστο προφίλ φόρτισης τους βάσει των ενεργειακών τους αναγκών και περιορισμών μετακίνησης τους. Η διαχείριση ενός πλήθους «έξυπνων» ηλεκτρικών οχημάτων για την επίτευξη της στρατηγικής “*valley-filling*” απαιτεί τον συντονισμό τους από έναν κεντρικό διαχειριστή (*Electric Vehicle Supplier Aggregator - EVSA*). Ο συντονισμός τους επιτυγχάνεται μέσω σημάτων ελέγχου που δεν προσδιορίζουν το βέλτιστο προφίλ φόρτισης τους αλλά μπορούν να επηρεάσουν τη βέλτιστη απόφασή τους. Ένα τέτοιο παίγνιο είναι δυναμικό και η σύγκλιση του απαιτεί την εκτέλεση μερικών επαναλήψεων του ιδίου αλγορίθμου. Για τη σύγκλιση του προτεινόμενου αλγορίθμου είναι απαραίτητη η μερική σύζευξη των αντικειμενικών συναρτήσεων βελτιστοποίησης των ηλεκτρικών οχημάτων μέσω ενός συντελεστή ποιότητος. Η βέλτιστη λύση από την υιοθέτηση του συντελεστή ποιότητος που καθορίζεται από το μέσο προφίλ φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων αποδεικνύεται ισοδύναμη με την αντίστοιχη του κεντρικού αλγορίθμου για την περίπτωση όπου ο στόλος των ηλεκτρικών οχημάτων είναι ομοιογενής. Στην αντίθετη περίπτωση, ο προτεινόμενος αλγόριθμος παρουσιάζει μικρή απόκλιση από τη βέλτιστη λύση. Δύο είναι οι προτεινόμενες λύσεις στη βιβλιογραφία για τη σύγκλιση του αποκεντρωμένου αλγορίθμου στην περίπτωση ετερογενούς στόλου ηλεκτρικών οχημάτων: *i*) η ομαδοποίηση των ηλεκτρικών οχημάτων με κοινά χαρακτηριστικά και ο προσδιορισμός του μέσου προφίλ φόρτισης ανά ομάδα και *ii*) η χρήση τροποποιημένου συντελεστή ποιότητος που καθορίζεται από το βέλτιστο προφίλ της προηγούμενης επανάληψης του παιγνίου.

Τα αποτελέσματα της συγκριτικής ανάλυσης μεταξύ κεντρικού και αποκεντρωμένου αλγορίθμου αποδεικνύουν ότι ο αποκεντρωμένος αλγόριθμος μπορεί να συγκλίνει στη βέλτιστη λύση και ο υπολογιστικός χρόνος είναι αρκετά μικρότερος από τον αντίστοιχο του κεντρικού αλγορίθμου. Πιο συγκεκριμένα, ο χρόνος σύγκλισης στη βέλτιστη λύση συναρτίζεται του αριθμού των ηλεκτρικών οχημάτων έχει πολυωνυμική μορφή στον κεντρικό αλγόριθμο και γραμμική στην περίπτωση του αποκεντρωμένου. Στην περίπτωση που υιοθετηθεί ιεραρχική δομή επικοινωνίας, ο χρόνος σύγκλισης του αποκεντρωμένου αλγορίθμου γίνεται σχεδόν ανεξάρτητος του αριθμού των ηλεκτρικών οχημάτων.

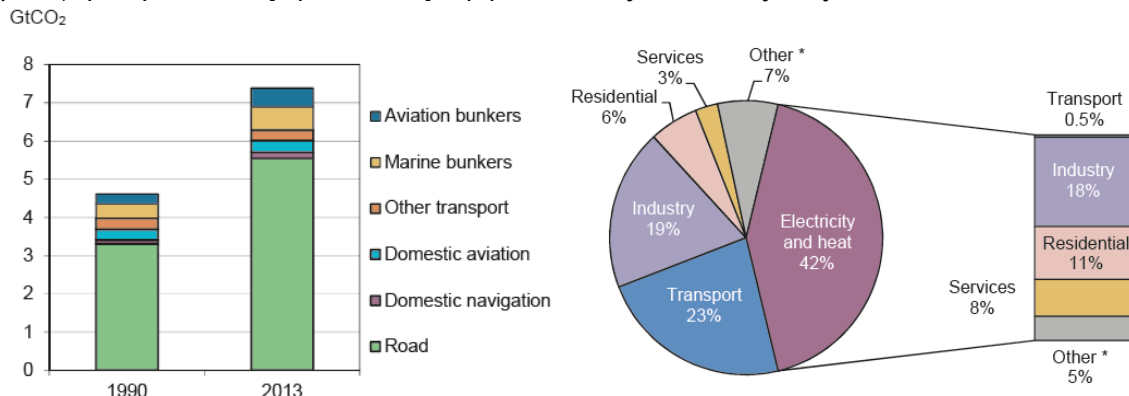
Κλείνοντας το κεφάλαιο αυτό της διατριβής θα πρέπει να σημειωθεί ότι μόνο η ροή ισχύος από το δίκτυο προς την μπαταρία των ηλεκτρικών οχημάτων (λειτουργία φόρτισης) μελετήθηκε. Η αμφίδρομη ροή ισχύος (φόρτιση/εκφόρτιση) που επιτρέπει επιπρόσθετα τη ροή ισχύος από την μπαταρία του ηλεκτρικού οχήματος προς το δίκτυο θα μελετηθεί στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας διατριβής.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΜΕ ΥΨΗΛΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΑΠΕ

### 4.1 Εισαγωγή

Σύμφωνα με την έκθεση της IEA (International Energy Agency) αναφορικά με τις εκπομπές ρύπων CO<sub>2</sub><sup>1</sup>, ο τομέας των μεταφορών είναι ο δεύτερος σημαντικότερος παράγοντας παγκόσμιος ρύπανσης της ατμόσφαιρας (23%) σε συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα ακολουθώντας τον τομέα του ηλεκτρισμού/θέρμανσης (42%). Τα αποτελέσματα της έκθεσης για τις εκπομπές ρύπων συνοψίζονται στην Εικόνα 4-1. Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στον τομέα των μεταφορών το 2013 ήταν αυξημένες κατά 68% συγκριτικά με τις αντίστοιχες εκπομπές του 1990. Είναι αξιοσημείωτο το γεγονός ότι το μεγαλύτερο ποσοστό εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (περίπου 75%) στο τομέα μεταφορών οφείλεται στην οδική μετακίνηση. Η χρήση εναλλακτικών, φιλικών προς το περιβάλλον, μορφών ενέργειας μπορεί να περιορίσει σημαντικά την επιβάρυνση του περιβάλλοντος. Συνεπώς, ο εξηλεκτρισμός του τομέα των μεταφορών καθώς και η αύξηση της διείσδυσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στο σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνεισφέρει σημαντικά στην πράσινη ανάπτυξη του τομέα της ενέργειας και των μεταφορών μειώνοντας δραστικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους.



Εικόνα 4-1 Ανάλυση παγκόσμιων εκπομπών ρύπων CO<sub>2</sub> ανά τομέα δραστηριότητας (IEA-2015)

Η μαζική ενσωμάτωση ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας [134] καθώς και η αυξημένη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [135] αναμένονται να μεταβάλλουν σημαντικά το προφίλ ζήτησης των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας [136] και να επηρεάσουν τον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν και σχεδιάζονται τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας [87], [65], [137], [138]. Πιο συγκεκριμένα, η μεγάλη διείσδυση ΑΠΕ μπορεί να διαταράξει την ομαλή και ασφαλή λειτουργία των δικτύων παραβιάζοντας διάφορους τεχνικούς περιορισμούς της λειτουργίας τους, όπως για παράδειγμα αύξηση της τάσης στον ζυγό που συνδέονται, διακύμανση της συχνότητας εξ αιτίας του στοχαστικού προφίλ παραγωγής, εσφαλμένη ενεργοποίηση των συστημάτων προστασίας λόγω αναστροφής ροής ισχύος κτλ. [137]. Παρομοίως, η μαζική ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο χωρίς την εφαρμογή κάποιου συστήματος διαχείρισης τους (“plug-n-play” – “dumb charging”), όπως εκτενώς αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας διατριβής, μπορεί να προκαλέσει προβλήματα πτώσης τάσεως (κυρίως σε επαρχιακά

<sup>1</sup> IEA-2015 Edition, [goo.gl/y8L3wB](http://goo.gl/y8L3wB)

δίκτυα διανομής) και υπερφόρτισης του εξοπλισμού του δικτύου (κυρίως σε αστικά δίκτυα διανομής).

Σύμφωνα με την έκθεση της ΕΕ “*EU Smart Grid Technology Platform 2007 Strategic Agenda Report*”<sup>2</sup>, τα δίκτυα διανομής χαρακτηρίζονται από μια έντονη «δομική αδράνεια» (“structural inertia”) εξ αιτίας του γεγονότος ότι αποτελούνται κατά κύριο λόγο από παθητικά, μη ελεγχόμενα φορτία. Ως εκ τούτου, υπό το σενάριο αυξημένης διείσδυσης ΑΠΕ και ηλεκτρικών οχημάτων (Η/Ο), η αναβάθμιση των υποδομών του δικτύου βάσει των σεναρίων ενσωμάτωσης ΑΠΕ/ΗΟ είναι απαραίτητη για την διατήρηση της ασφαλούς και αξιόπιστης λειτουργίας τους. Η ελαστικότητα της ζήτησης της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων που μπορεί να προσφέρει ένα εξελιγμένο σύστημα διαχείρισης φορτίου, όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας διατριβής, μπορεί να καθυστερήσει ή ακόμα και να ακυρώσει πρόωρες επενδύσεις στο δίκτυο προάγοντας την κατανάλωση της τοπικά παραγόμενης πράσινης ενέργειας από τοπικά φορτία. Τέτοιες προκλήσεις απαιτούν την ανάπτυξη νέων εξελιγμένων συστημάτων διαχείρισης που επιτρέπουν τη συνέργεια μεταξύ ΑΠΕ και ηλεκτρικών οχημάτων με σκοπό την αύξηση της μέγιστης ικανότητας διείσδυσης ΑΠΕ (“*RES hosting capacity*”) και ηλεκτρικών αυτοκινήτων (“*EV hosting capacity*”) σε ένα δίκτυο διανομής ΜΤ χωρίς να παραβιάζονται οι τεχνικοί περιορισμοί λειτουργίας των υφιστάμενων υποδομών δικτύου.

Σε αυτό το κεφάλαιο της παρούσας διατριβής, θα αναπτυχθεί ένα αποκεντρωμένος αλγόριθμος διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων που λαμβάνει υπόψη του την αμφίδρομη ροή ισχύος, δηλαδή φόρτιση (Grid-to-Vehicle, G2V) και εκφόρτιση (Vehicle-to-Grid, V2G) της μπαταρίας των ηλεκτρικών οχημάτων καθώς και την παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας με σκοπό την:

- μεγιστοποίηση του ποσοστού διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων σε ένα δίκτυο διανομής θεωρώντας τις υφιστάμενες υποδομές δικτύου
- μεγιστοποίηση του ποσοστού διείσδυσης ΑΠΕ σε ένα δίκτυο διανομής θεωρώντας τις υφιστάμενες υποδομές δικτύου
- αποδοτικότερη λειτουργία του δικτύου διανομής όσον αφορά στο προφίλ τάσης και τις απώλειες δικτύου.

## 4.2 Μέγιστη διείσδυση ΑΠΕ σε αναχωρήσεις δικτύων διανομής Μ.Τ. (“*RES Hosting Capacity*”)

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες παρατηρείται μια έντονη διείσδυση διασυνδεδεμένων τοπικών μονάδων παραγωγής σε παγκόσμιο επίπεδο το οποίο οφείλεται στους φιλόδοξους στόχους που έχουν τεθεί σε εθνικό και διεθνές επίπεδο. Η υιοθέτηση ειδικών οικονομικών κινήτρων (σταθερή ταρίφα παραγωγής από ΑΠΕ, φοροαπαλλαγές κτλ) για την ανάπτυξη διεσπαρμένων σταθμών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έδωσαν απότομη ώθηση στην ενσωμάτωση ανανεώσιμων τεχνολογιών ενέργειας στα ηλεκτρικά δίκτυα. Ωστόσο, σε επίπεδο δικτύων διανομής, η αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ έχει εγείρει μια σειρά προκλήσεων που επηρεάζουν την ομαλή λειτουργία των δικτύων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων λειτουργικών ζητημάτων είναι τα ακόλουθα [139][140]:

- **Παραβίαση των θερμικών ορίων:** Η ενσωμάτωση των ΑΠΕ μεταβάλλει τις ροές ρεύματος και μπορεί να οδηγήσει στην παραβίαση των θερμικών ορίων των στοιχείων του δικτύου.
- **Ρύθμιση Τάσης:** Η υψηλή παραγωγή από ΑΠΕ σε συνδυασμό με τη χαμηλή κατανάλωση μπορεί να προκαλέσει προβλήματα υπέρτασης στους απομακρυσμένους κόμβους των γραμμών διανομής. Ακόμα και αν επιτυγχάνεται ρύθμιση της τάσης μέσω Μ/Σ με Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) ή ρυθμιστών τάσης βηματικού τύπου (*step voltage regulator*), ο έλεγχος της τάσης περιπλέκεται όταν οι γραμμές με διαφορετικά χαρακτηριστικά τροφοδοτούνται από τον ίδιο μετασχηματιστή.
- **Επίπεδο σφάλματος:** Η συμβολή των ΑΠΕ στο ρεύμα σφάλματος μπορεί να οδηγήσει σε υπέρβαση των ορίων του δικτύου.
- **Ποιότητα Ισχύος:** Τα ηλεκτρονικά ισχύος που απαιτούνται για τη διασύνδεση των ΑΠΕ στο δίκτυο εγγέουν σημαντικές αρμονικές στο δίκτυο.

<sup>2</sup> [ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp7/energy/docs/smartgrids\\_agenda\\_en.pdf](ftp://ftp.cordis.europa.eu/pub/fp7/energy/docs/smartgrids_agenda_en.pdf)

- **Ανάστροφη ροή ισχύς:** Τα σημερινά δίκτυα διανομής έχουν σχεδιαστεί υιοθετώντας τη λογική της μονής κατεύθυνσης ροής ισχύος από τους κεντρικούς σταθμούς παραγωγής στο ανώτερο επίπεδο προς τα κέντρα κατανάλωσης στο κατώτερο επίπεδο του δικτύου. Στις περιπτώσεις όπου η κατανάλωση είναι πολύ χαμηλή και η παραγωγή από ΑΠΕ είναι υψηλή, η ισχύς έχει ανάστροφη ροή προς το ανάντη δίκτυο επηρεάζοντας τη λειτουργία των ρυθμιστών τάσης και των συστημάτων προστασίας.

Λόγω των παραπάνω λειτουργικών προβλημάτων που επιφέρει η αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ στα δίκτυα διανομής, οι διαχειριστές των δικτύων υιοθετούν συντηρητικά ποσοστά όσον αφορά στην επιτρεπόμενη εγκατεστημένη ισχύ παραγωγής ΑΠΕ. Από την άλλη πλευρά, οι επενδυτές ΑΠΕ πιέζουν για την αδειοδότηση όλο και μεγαλύτερης εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ με σκοπό την εκμετάλλευση των υψηλών οικονομικών κινήτρων που προσφέρονται. Η εξυπηρέτηση όλων των αδειοδοτήσεων ΑΠΕ πιθανόν να απαιτεί την υλοποίηση έργων αναβάθμισης του δικτύου. Είναι λοιπόν απαραίτητος ο προσδιορισμός ενός άνω ορίου διείσδυσης ΑΠΕ σε ένα δίκτυο διανομής, πέραν του οποίου η πιθανότητα εμφάνισης λειτουργικών προβλημάτων είναι υψηλή ή δεδομένη. Το μέγιστο όριο αυτό διείσδυσης ΑΠΕ έχει θεσπιστεί διεθνώς ως “*Hosting Capacity*” από την Ευρωπαϊκή Ένωση Ρυθμιστών Ενέργειας [141] και Διαχειριστών Δικτύου [142]. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή υιοθετείται ο παρακάτω ορισμός:

**Ορισμός: Μέγιστο Όριο διείσδυσης ΑΠΕ (*RES hosting capacity*):** Είναι ένας δείκτης λειτουργίας του δικτύου που προσδιορίζει την μέγιστη δυνατή εγκατεστημένη ισχύ ΑΠΕ που μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα δίκτυο διανομής πέραν της οποίας ένας ή περισσότεροι τεχνικοί περιορισμοί του δικτύου (πχ. όρια τάσης, όρια φόρτισης γραμμών και Μ/Σ, μέγιστο ρεύμα σφάλματος κ.α.) υπερβαίνουν ένα προκαθορισμένο όριο.

Δεν υπάρχει μια κοινή μεθοδολογία προσδιορισμού του ορίου διείσδυσης ΑΠΕ. Διαφορετικά πρακτικά κριτήρια αξιολόγησης υιοθετούνται διεθνώς από τους διαχειριστές του δικτύου με σκοπό να προσδιορίσουν το μέγιστο όριο διείσδυσης ΑΠΕ [143]. Κοινή βάση όλων των πρακτικών είναι η υιοθέτηση κριτηρίων ποιότητας ισχύος για τον προσδιορισμό του ορίου [144]-[153].

#### 4.2.1 Κριτήρια και πρακτικές υπολογισμού μέγιστου ορίου διείσδυσης ΑΠΕ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται μια συνοπτική επισκόπηση των πρακτικών που υιοθετούνται από τους διαχειριστές του δικτύου σε διεθνές επίπεδο για τον προσδιορισμό του ορίου διείσδυσης ΑΠΕ. Η ανάλυση αυτή στηρίζεται στην αναφορά “*Capacity distribution feeders for hosting DER*” της ομάδας εργασίας C6-24 της CIGRE [139]. Παρά το γεγονός ότι δεν υπάρχει μια ενιαία μέθοδος προσδιορισμού του μέγιστου ορίου διείσδυσης ΑΠΕ, τα πρακτικά κριτήρια που υιοθετούνται διεθνώς για το σκοπό αυτό μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τέσσερις βασικές κατηγορίες που αναλύονται στη συνέχεια.

- ✓ *Κατηγορία Α: Κριτήρια βασισμένα στην ικανότητα των υφιστάμενων υποδομών δικτύου*

Το μέγιστο όριο διείσδυσης ορίζεται ως ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος του μετασχηματιστή των υποσταθμών ΥΤ / ΜΤ ή ΜΤ/ΧΤ και τα θερμικά όρια των γραμμών αναχώρησης ΜΤ και ΧΤ. Όσον αφορά στα όρια των υποσταθμών ΥΤ / ΜΤ και ΜΤ / ΧΤ, το ποσοστό αυτό συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 50% και 75%, όπως για παράδειγμα στην Ισπανία, τον Καναδά, την Ιταλία, τη Νότια Αφρική, κλπ Αντίθετα, σε μερικές χώρες, το ποσοστό αυτό του ορίου μπορεί να είναι ακόμα πιο χαλαρό φθάνοντας έως και το 90% (δηλαδή Τσεχίας) ή ακόμα και 100% (δηλαδή το Βέλγιο και τη Νότια Κορέα). Τα προαναφερθέντα κριτήρια μπορούν να γίνουν ακόμα πιο αυστηρά στην περίπτωση που επιβάλλονται πρόσθετοι περιορισμοί, όπως είναι η αντίστροφη ροή ισχύος και ο κανόνας N-1. Ενδεικτικά παραδείγματα χωρών όπου εφαρμόζονται τέτοιοι περιορισμοί, είναι ο Καναδάς, το Βέλγιο, η Κίνα και η Τσεχία.

- ✓ *Κατηγορία Β: Κριτήρια που σχετίζονται με τα όρια λειτουργίας της τάση όπως αυτά καθορίζονται από τις ρυθμιστικές αρχές/πρότυπα*

Η ανώτερη μέση τάση και τα όρια διακύμανσης της τάσης περιορίζουν το επίπεδο διείσδυσης των ΑΠΕ σε ένα δίκτυο διανομής. Στις περισσότερες χώρες, τα ρυθμιστικά όρια λειτουργίας της τάσης βασίζονται στο πρότυπο EN 50160 για τα δίκτυα μέσης τάσης και EN 50549 για τα δίκτυα ΧΤ. Ωστόσο, ακόμη και αν η τυπική επιτρεπόμενη μεταβολή της τάσης είναι 10% από την ονομαστική τιμή, στην πράξη πολλοί διαχειριστές δικτύων διανομής υιοθετούν πιο αυστηρά κριτήρια μεταξύ 5 ÷ 8%. Η διακύμανση της τάσης γύρω από τη μέση τιμή δεν πρέπει να υπερβαίνει το 3 ÷ 4% εξασφαλίζοντας ότι η τάση στους καταναλωτές ΧΤ έχει την προβλεπόμενη ποιότητα.

Για την αξιολόγηση των κριτηρίων της τάσης, είναι απαραίτητη η ανάλυση ροής φορτίου λαμβάνοντας υπόψη δύο ακραίες λειτουργικές συνθήκες του δικτύου. Για παράδειγμα, για ένα δεδομένο κόμβο  $i$ , προσδιορίζονται οι τάσεις στο μέγιστο φορτίο / ελάχιστη παραγωγή για τον υπολογισμό της ελάχιστης τάσης  $V_{min,i}$  και στο ελάχιστο φορτίο / μέγιστη παραγωγή ενέργειας για τη μέγιστη τάση  $V_{max,i}$ . Οι δείκτες αξιολόγησης της ποιότητας της μέσης τάσης και της απόκλισης της ( $V_{m,i}$  και  $\Delta V_i$  αντίστοιχα) ορίζονται ως εξής:

$$V_{m,i} (\%) = \frac{\frac{V_{max,i} + V_{min,i}}{2} - V_n}{V_n} \cdot 100\% \quad \text{E 4-1}$$

$$\Delta V_i (\%) = \frac{V_{max,i} - V_{min,i}}{2 \cdot V_n} \cdot 100\% \quad \text{E 4-2}$$

όπου  $V_n$  αντιστοιχεί στην ονομαστική τάση του δικτύου ( $V_n = 1$ ).

Ένα επιπρόσθετο κριτήριο για τον μελέτη του ορίου διείσδυσης ΑΠΕ ενός δικτύου διανομής είναι η τάση λειτουργίας (τα ρυθμιστικά όρια είναι  $0.95\text{αμ} \leq V_i \leq 1.05\text{αμ}$ , για κάθε  $i=1,2,\dots,N_{bus}$ ). Σε αυτό το σενάριο μελέτης, υποθέτουμε ότι η τοποθέτηση των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής στους ζυγούς του δικτύου είναι ίδια με αυτή στο πραγματικό δίκτυο. Στη συνέχεια, η συνολική εγκατεστημένη ισχύ των μονάδων ΑΠΕ στον δίκτυο αυξάνεται, βηματικά, ξεκινώντας από μηδενική ισχύ και φτάνοντας μέχρι ένα άνω όριο ισχύος. Η κατανομή της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ ανά ζυγό διασύνδεσης ΑΠΕ γίνεται με τυχαίο τρόπο. Για κάθε συνολική εγκατεστημένη ισχύ ΑΠΕ και για κάθε τυχαίο σενάριο κατανομής της, υπολογίζονται τα μέτρα των τάσεων των ζυγών και καταγράφεται η τιμή με τη μεγαλύτερη τιμή (μέγιστη τάση δικτύου). Η σύνδεση μιας μονάδας παραγωγής ΑΠΕ σε ένα ζυγό έχει ως αποτέλεσμα την ανύψωση της τάσης του ζυγού σύνδεσης. Ως εκ τούτου, η παραβίαση του άνω ορίου της τάσης ( $V_i \leq 1.05\text{αμ}$ , για κάθε  $i=1,2,\dots,N_{bus}$ ) του ζυγού σύνδεσης καθορίζει το όριο διασύνδεσης ΑΠΕ. Αυτός είναι ο λόγος που τελικά καταγράφεται μόνο η μέγιστη τάση της γραμμής για κάθε σενάριο κατανομής των ΑΠΕ. Στην Εικόνα 4-2 απεικονίζεται το διάγραμμα ροής της μελέτης του ορίου διείσδυσης ΑΠΕ σε ένα δίκτυο διανομής με κριτήριο την τάση λειτουργίας.

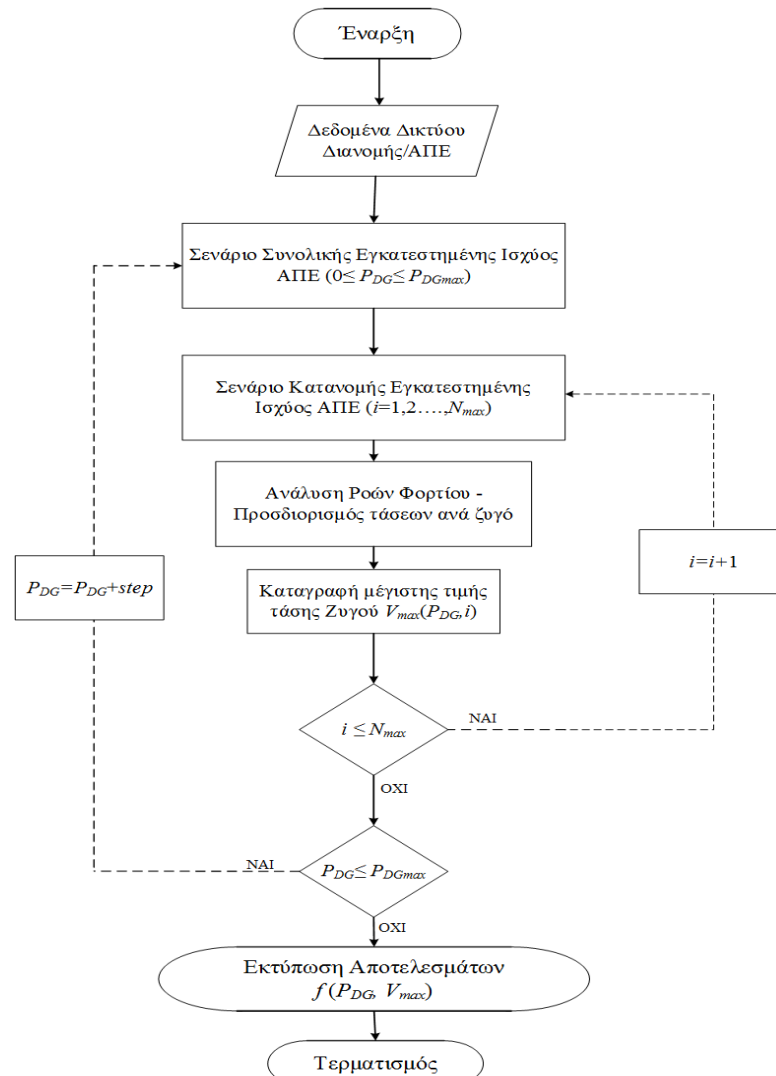
✓ *Κατηγορία Γ: Κριτήρια με βάση την αναλογία φορτίου-παραγωγής*

Σε ορισμένες χώρες, τα κριτήρια με βάση την αναλογία φορτίου-παραγωγής εφαρμόζονται είτε για την πρόληψη νησιδοποιημένης λειτουργίας του δικτύου είτε για την αποφυγή υπέρβασης των ρυθμιστικών ορίων τάσης. Για παράδειγμα, στον Καναδά, η μέγιστη επιτρεπόμενη παραγωγή ΑΠΕ που μπορεί να συνδεθεί σε ένα δίκτυο διανομής δεν πρέπει να υπερβαίνει το 7 ÷ 10% της αιχμής του ετήσιου φορτίου της γραμμής αναχώρησης. Στη Νότια Αφρική, το ποσοστό αυτό είναι σχεδόν διπλάσιο. Στις ΗΠΑ, η αθροιστική ονομαστική ισχύς των ΑΠΕ σε μια γραμμή διανομής πρέπει να είναι μικρότερη από το 100% του ελάχιστου φορτίου της γραμμής και μέχρι το 5% της αιχμής του συνολικού ετήσιου φορτίου. Εάν τα κριτήρια αυτά δεν πληρούνται, τότε απαιτείται μια λεπτομερής διαδικασία αξιολόγησης.

✓ *Κατηγορία Δ: Κριτήρια που σχετίζονται με την ικανότητα του δικτύου σε περίπτωση βραχυκυκλώματος*

Τα κριτήρια βραχυκυκλώματος εξασφαλίζουν ότι το επίπεδο σφάλματος του δικτύου, λαμβάνοντας υπόψη τη διείσδυση ΑΠΕ, δεν υπερβαίνει τα τεχνικά όρια του εξοπλισμού του δικτύου στην περίπτωση βραχυκυκλώματος (short-circuit capacity, SCC), το οποίο προσδιορίζεται από την παρακάτω φόρμουλα:

$$SCC \cong \frac{S_{base}}{Z + S_{base}/MV A_{trans}} \quad \text{E 4-3}$$



Εικόνα 4-2 Διάγραμμα ροής μελέτης του ορίου διείσδυσης ΑΠΕ σε ένα δίκτυο διανομής με κριτήριο την τάση λειτουργίας

όπου  $Z$  είναι η σύνθετη αντίδραση (α.μ) του πιο ηλεκτρικά απομακρυσμένου ζυγού από τον υποσταθμό,  $MVA_{trans}$  είναι η ονομαστική ισχύς του Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ και  $S_{base}$  είναι η βασική ισχύς του δικτύου. Για λόγους ασφαλείας, οι διαχειριστές των δικτύων διανομής εφαρμόζουν αυστηρότερα κριτήρια, για παράδειγμα η συνολική ονομαστική ισχύς των διασυνδεδεμένων ΑΠΕ δεν πρέπει να ξεπερνά ένα μικρό ποσοστό (συνήθως 15 ÷ 25%) του SCC στο σημείο κοινής σύνδεσης. Το πιο συντηρητικό ποσοστό (δηλαδή 10%) εφαρμόζεται στην Κίνα και την Ισπανία, ενώ το υψηλότερο ποσοστό εφαρμόζεται στις ΗΠΑ.

#### 4.2.2 Μη ελεγχόμενη και Ελεγχόμενη διείσδυση ΑΠΕ

Ας υποθέσουμε μια ακτινική αναχώρηση ενός δικτύου διανομής με  $k=1, \dots, N_{bus}$  ζυγούς και μάλιστα έστω ότι ο  $N_{bus}$  είναι ο πιο ηλεκτρικά απομακρυσμένος ζυγός από τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ της γραμμής. Η τάση σε κάθε ζυγό  $k$  δίνεται από την παρακάτω εξίσωση [154] - [155]:

$$V_k = V_0 + \sum_{i=1}^{N_{bus}} z_{ki} I_i \quad \text{E 4-4}$$

όπου  $V_0=1\alpha\mu$  είναι η ονομαστική τάση του ζυγού αναχώρησης,  $I_i$  είναι το συνολικό ρεύμα που εγχέεται στο ζυγό  $i$  (το ρεύμα λόγω παραγωγής ΑΠΕ μείον το ρεύμα της ζήτησης) και  $z_{ki}$  προσδιορίζεται ως εξής:

$$z_{ki} = \begin{cases} \sum_{l \in \text{path}(k)} z_b(l) & \text{for } k = i \\ \sum_{l \in \text{path}(k) \cap \text{path}(i)} z_b(l) & \text{for } k \neq i \end{cases} \quad \text{E 4-5}$$

όπου  $path(k)$  είναι η σειρά των ζυγών που αποτελούν το μονοπάτι ανάμεσα στον ζυγό αναχώρησης και στον ζυγό  $k$ . Θεωρώντας φορτία σταθερής ισχύος  $S_i$ , μοναδιαίο συντελεστή ισχύος και τάση περίπου ίση με 1αμ, το ρεύμα κάθε ζυγού του δικτύου δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$I_i = \frac{S_i^*}{V_i^*} \cong P_i \quad \text{E 4-6}$$

όπου  $V_i^*$  είναι η συζυγής τάση και  $P_i$  είναι η εγγεόμενη ισχύς στο ζυγό  $i$ . Αν υποθέσουμε ότι όλο το φορτίο και όλες οι ΑΠΕ συνδέονται σε ένα ζυγό  $i$ , τότε η εξίσωση E 4-4 μετατρέπεται ως ακολούθως:

$$V_k = V_0 + z_{kk} \sum_{i=1}^{N_{bus}} P_i \quad \text{E 4-7}$$

Σύμφωνα με τον ορισμό E 4-5,  $z_{kk}$  είναι η συνολική αντίσταση του μονοπατιού που συνδέει τον ζυγό αναχώρησης με τον ζυγό  $k$  και, επομένως, ισχύει η παρακάτω συνθήκη:

$$z_{kk} \sum_{i=1}^{N_{bus}} P_i \geq z_{ki} \sum_{i=1}^{N_{bus}} P_i \quad \leftrightarrow \quad k = N_{bus} \quad \text{E 4-8}$$

Αφού  $N_{bus}$  είναι ο πιο ηλεκτρικά απομακρυσμένος ζυγός από τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ της γραμμής και άρα  $z_{kk} \leq z_{N_{bus}N_{bus}}$ , από την εξίσωση E 4-7 προκύπτει ότι:

$$V_{N_{bus}} \geq V_k \quad \forall k = 1, 2, \dots, N_{bus} \quad \text{E 4-9}$$

Η συνθήκη E 4-9 αποδεικνύει ότι το πρόβλημα ανύψωσης της τάσης στην περίπτωση της σύνδεσης των ΑΠΕ σε ένα μόνο ζυγό είναι εντονότερο όσο το σημείο σύνδεσης των ΑΠΕ απομακρύνεται ηλεκτρικά από τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ της γραμμής. Το χειρότερο σενάριο ανύψωσης της τάσης συναντάται στο πιο απομακρυσμένο ζυγό  $N_{bus}$ . Επομένως, το αυστηρότερο όριο διασύνδεσης ΑΠΕ σε ένα ακτινικό δίκτυο διανομής καθορίζεται από τα όρια διασύνδεσης ΑΠΕ στον πιο ηλεκτρικά απομακρυσμένο ζυγό από τον υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ της γραμμής.

Το μέγιστο όριο διείσδυσης των ΑΠΕ σε ένα δίκτυο διανομής μπορεί να αυξηθεί εφαρμόζοντας διάφορες τεχνικές ελέγχου της τάσης. Δύο είναι οι πιο συνηθισμένες πρακτικές ελέγχου της τάσης: α) η ρύθμιση της τάσης μέσω Μ/Σ με Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ) και β) η ρύθμιση αέργου ισχύος από τις τοπικές μονάδες παραγωγής.

✓ *Ρύθμιση της τάσης μέσω Μ/Σ με Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο (ΣΑΤΥΦ)*

Στην περίπτωση αυτή η τάση του ζυγού αναχώρησης στον υποσταθμό ρυθμίζεται έτσι ώστε η τάση σε όλους τους ζυγούς της γραμμής να είναι εντός επιτρεπόμενων ορίων. Η λειτουργία του ρυθμιστή τάσης γίνεται βάσει των παρακάτω εξισώσεων:

$$\Delta V_e = \frac{\sum_{k=1}^{N_{bus}} \Delta V_k \cdot S_k}{\sum_{k=1}^{N_{bus}} S_k} \quad \text{E 4-10}$$

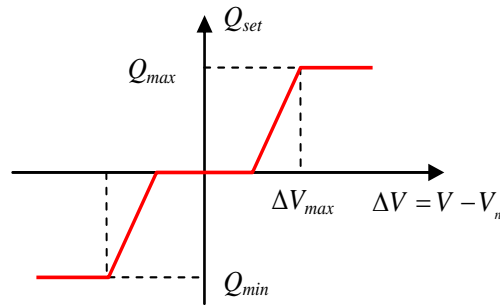
$$V_{feed} = \begin{cases} 0.95 & \text{if } \Delta V_e > 0.05 \\ 1.0 & \text{if } |\Delta V_e| < 0.05 \\ 1.05 & \text{if } \Delta V_e < -0.05 \end{cases} [pu] \quad \text{E 4-11}$$

όπου  $\Delta V_k$  είναι η πτώση τάσης στον ζυγό  $k$  από την τάση του ζυγού αναχώρησης,  $S_k$  είναι το φορτίο στον ζυγό  $k$ .

✓ *Ρύθμιση της τάσης μέσω ελέγχου της αέργου ισχύος*

Τα ηλεκτρονικά ισχύος που επιτρέπουν τη διασύνδεση των διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας επιτρέπουν τη λειτουργία τους και σε επαγωγικό συντελεστή ισχύος με σκοπό την απορρόφηση αέργου ισχύος από το δίκτυο. Με τον τρόπο αυτό αντισταθμίζεται εν μέρει η τάση στον ζυγό σύνδεσης των ΑΠΕ. Στην περίπτωση που η τάση του ζυγού σύνδεσης των ΑΠΕ είναι εντός επιτρεπτών ορίων, τότε η ανταλλαγή αέργου ισχύος είναι μηδενική ή παραμένει αμετάβλητη από προηγούμενη κατάσταση αντιστάθμισης. Στην αντίθετη περίπτωση, η ανταλλαγή ισχύος μεταξύ δικτύου και ΑΠΕ καθορίζεται από μια γραμμική καμπύλη  $Q(V)$  όπως φαίνεται στην Εικόνα 4-3.



Εικόνα 4-3 Καμπύλη ελέγχου αέργου ισχύος  $Q(V)$ 

### Αριθμητικό παράδειγμα

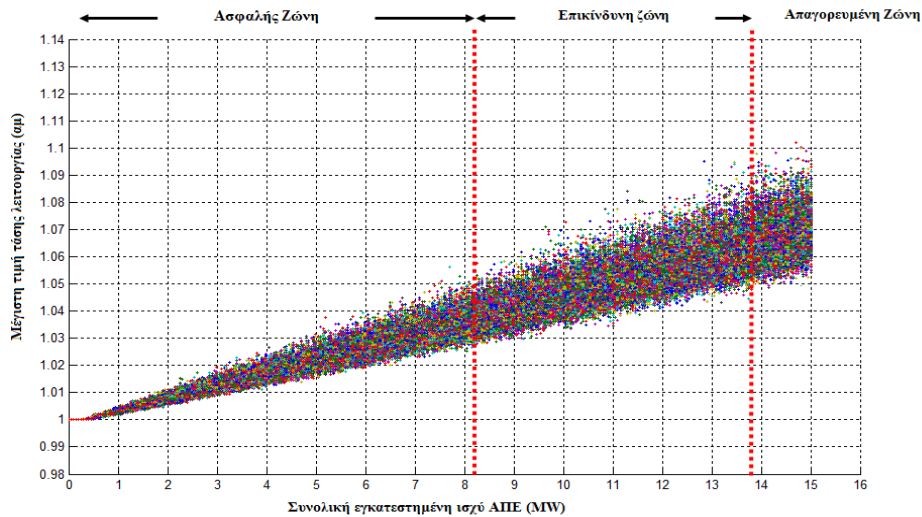
Για τον προσδιορισμό του μέγιστου ορίου διείσδυσης ΑΠΕ σε ένα δίκτυο διανομής εξετάστηκε το πραγματικό μοντέλο μιας γραμμής αναχώρησης του επαρχιακού δικτύου διανομής ΜΤ της Σπερχειάδας (Κεντρική Ελλάδα). Τα χαρακτηριστικά του δικτύου περιγράφονται στο Παράρτημα Α. Στη συνέχεια, αναλύονται και ποσοτικοποιούνται οι διαφορετικές πρακτικές/κριτήρια προσδιορισμού του μέγιστου ορίου διείσδυσης ΑΠΕ.

#### Κατηγορίες Υπολογισμού:

- **Κατηγορία Α:** Το μέγιστο όριο διασύνδεσης ΑΠΕ σε μια αναχώρηση ενός δικτύου διανομής καθορίζεται ως ποσοστό (50%-100%) της ονομαστικής ισχύος του Μ/Σ ΥΤ/ΜΤ ή Μ/Σ ΜΤ/ΧΤ και τα θερμικά όρια των γραμμών του δικτύου. Σύμφωνα με την παραπάνω θεώρηση, το μέγιστο όριο διασύνδεσης για τη γραμμή διανομής της Σπερχειάδας κυμαίνεται μεταξύ 2.36MW - 4.71MW και φράσσεται λόγω των λειτουργικών περιορισμών της γραμμής με το μικρότερο θερμικό όριο. Σε μια πιο αναλυτική προσέγγιση, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των ΑΠΕ συγκεντρώνεται σε έναν μόνο ζυγό κάθε φορά και αυξάνεται βηματικά έως ότου παραβιαστεί ένας ή περισσότεροι τεχνικοί περιορισμοί του δικτύου. Θεωρώντας τη λειτουργία του δικτύου τη χρονική στιγμή με το ελάχιστο φορτίο, το όριο μέγιστης διείσδυσης ΑΠΕ κυμαίνεται μεταξύ 2.4 MW-4.8MW.

- **Κατηγορία Β:** Για τον υπολογισμό της διακύμανσης της τάσης ( $\Delta V_i$  (%)) όπως ορίστηκε στην εξίσωση Ε 4-2, η ελάχιστη τάση προσδιορίζεται στο μέγιστο φορτίο δικτύου θεωρώντας την ελάχιστη παραγωγή ΑΠΕ, ενώ η μέγιστη τιμή της τάσης προσδιορίζεται στο ελάχιστο φορτίο θεωρώντας μέγιστη παραγωγή ΑΠΕ. Η θέση και η εγκατεστημένη ισχύ των ΑΠΕ είναι κρίσιμες παράμετροι που επηρεάζουν τα συμπεράσματα για το όριο διείσδυσης των ΑΠΕ σε ένα δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή, οι ζυγοί που συνδέονται οι ΑΠΕ είναι οι ίδιοι με αυτούς που συνδέονται οι ανανεώσιμες μονάδες παραγωγής ενέργειας στο πραγματικό δίκτυο. Για τον προσδιορισμό του ορίου διείσδυσης ΑΠΕ, η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ αυξάνεται βηματικά και κατανέμεται αναλογικά και σύμφωνα με την πραγματική κατανομή ΑΠΕ έως ότου παραβιαστεί το όριο λειτουργίας της τάσης. Βάσει των παραπάνω προδιαγραφών, το όριο διείσδυσης των ΑΠΕ είναι 5.4MW.

Στην περίπτωση που το κριτήριο για το όριο διείσδυσης των ΑΠΕ είναι η τάση λειτουργίας, όπως περιγράφεται στην Εικόνα 4-2, για δεδομένη εγκατεστημένη ισχύ ΑΠΕ, ένα πλήθος μέγιστων τάσεων παράγεται ανάλογα με το σενάριο κατανομής των ΑΠΕ. Τα αποτελέσματα όλων των σεναρίων απεικονίζονται στην Εικόνα 4-4. Βάσει αυτών η εγκατεστημένη ισχύς των ΑΠΕ μπορεί να χωριστεί σε τρεις ζώνες: α) Ασφαλής ζώνη (0-8MW) όπου οποιοδήποτε σενάριο κατανομής της ισχύος ΑΠΕ δεν αναμένεται να παραβιάσει το άνω όριο λειτουργίας της τάσης β) Επικίνδυνη ζώνη (8MW-14MW) όπου η παραβίαση των ορίων της τάσης εξαρτάται από την κατανομή των ΑΠΕ και γ) Απαγορευμένη ζώνη (>14MW) όπου η εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ είναι αρκετά μεγάλη ώστε να παραβιάζονται τα όρια της τάσης για κάθε σενάριο κατανομής. Το διάγραμμα στην Εικόνα 4-4 είναι ενδεικτικό της ικανότητας ενός δικτύου διανομής να δεχθεί μεγαλύτερα ποσοστά διείσδυσης ΑΠΕ.



Εικόνα 4-4 Μέγιστη τάση ζυγών συναρτήσει της εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ και των σεναρίων κατανομής της

- Κατηγορία Γ:** Σύμφωνα με το κριτήριο αυτό, το όριο διείσδυσης ΑΠΕ καθορίζεται από το λόγο φορτίου-παραγωγής. Συνεπώς, το όριο διείσδυσης ΑΠΕ κυμαίνεται μεταξύ 0.53MW-0.75MW (7÷10%) αν θεωρήσουμε το μέγιστο φορτίο του δικτύου και 3MW αντίστοιχα αν θεωρήσουμε το ελάχιστο φορτίο.
- Κατηγορία Δ:** Στο κριτήριο αυτό, το όριο διείσδυσης καθορίζεται ως ποσοστό (10÷25%) της ισχύος βραχυκύκλωσης του δικτύου (SCC). Στην περίπτωση αυτή, το όριο διείσδυσης κυμαίνεται μεταξύ 1.42MW – 3.54MW.

Η επιλογή ενός κριτηρίου για τον προσδιορισμό του ορίου διείσδυσης ΑΠΕ σχετίζεται άμεσα με τα χαρακτηριστικά του υπό εξέταση δικτύου διανομής. Πιο συγκεκριμένα, τα κριτήρια Γ και Δ εφαρμόζονται κυρίως σε αστικές γραμμές δικτύων διανομής που εξυπηρετούν, συνήθως, υψηλότερη συγκέντρωση φορτίων. Αντίθετα, στην περίπτωση των γραμμών επαρχιακών δικτύων διανομής, όπου το μήκος των γραμμών είναι αρκετά μεγαλύτερο και οι μεταβολές του φορτίου επηρεάζουν εντονότερα το προφίλ της τάσης, εφαρμόζεται κυρίως το κριτήριο Β.

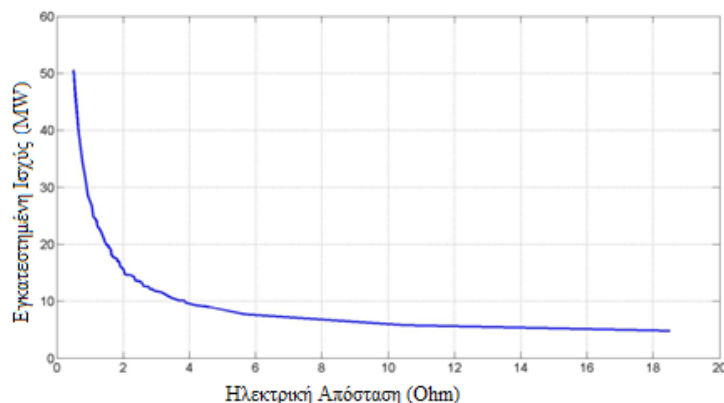
**Πρακτικές Υπολογισμού:**

✓ *Μη ελεγχόμενη διασύνδεση ΑΠΕ:*

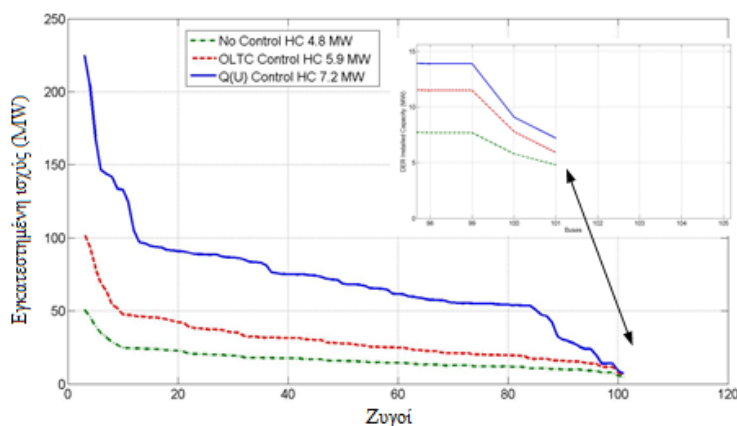
Η Εικόνα 4-5 παρουσιάζει το μέγιστο όριο σύνδεσης ΑΠΕ για κάθε ζυγό ώστε να μην παραβιάζεται κανένας τεχνικός περιορισμός του δικτύου, θεωρώντας ότι η εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ συγκεντρώνεται σε έναν ζυγό κάθε φορά. Το όριο διείσδυσης ΑΠΕ μειώνεται εκθετικά εν συναρτήσει της ηλεκτρικής απόστασης του κάθε ζυγού από τον κεντρικό υποσταθμό. Το χειρότερο σενάριο διείσδυσης ΑΠΕ, όπως αποδείχθηκε και μαθηματικά στην ενότητα 4.2.2, προκύπτει για την περίπτωση διασύνδεσης τους στον πιο ηλεκτρικά απομακρυσμένο ζυγό (4.8MW).

✓ *Ελεγχόμενη διασύνδεση ΑΠΕ:*

Στην περίπτωση αυτή, το όριο διείσδυσης ΑΠΕ προσδιορίζεται εξετάζοντας δύο σενάρια ρύθμισης της τάσης: μέσω Μ/Σ με Σύστημα Αλλαγής Τάσης Υπό Φορτίο και μέσω ελέγχου της αέργου ισχύος. Στην περίπτωση εφαρμογής Μ/Σ με σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίου, η τάση αναφορά είναι 1αμ, και τα περιθώρια ελέγχου των ενδιάμεσων λήψεων είναι +7.5%-12.5% με βήμα 1.25%. Και στη περίπτωση της ελεγχόμενης φόρτισης, η εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ συγκεντρώνεται σε ένα ζυγό κάθε φορά. Τα αποτελέσματα για το όριο διείσδυσης ΑΠΕ σε κάθε ζυγό παρουσιάζονται στην Εικόνα 4-6. Η εφαρμογή της ρύθμισης της τάσης με ΣΑΤΥΦ αύξησε το όριο διείσδυσης ΑΠΕ κατά 23% (5.9MW) συγκριτικά με τη μη ελεγχόμενη φόρτιση (4.8MW). Πιο αποτελεσματική αποδεικνύεται η ρύθμιση της τάσης μέσω αέργου ισχύος καθώς το όριο διείσδυσης ΑΠΕ αυξάνεται κατά 22% (7.2MW) συγκριτικά με την περίπτωση της ρύθμισης τάσης με ΣΑΤΥΦ.



Εικόνα 4-5 Όριο διείσδυσης ΑΠΕ βάσει ηλεκτρικής απόστασης των ζυγών



Εικόνα 4-6 Όριο διείσδυσης ΑΠΕ ανά ζυγό με και χωρίς έλεγχο της τάσης

Τα παραπάνω αριθμητικά αποτελέσματα για το όριο διείσδυσης ΑΠΕ για κάθε σενάριο συνοψίζει ο Πίνακας 4-1.

Πίνακας 4-1: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για το όριο διείσδυσης ΑΠΕ

Κριτήρια Διείσδυσης ΑΠΕ	Όριο Διείσδυσης ΑΠΕ (MW)
Κατηγορία Α – Φόρτιση Γραμμών	2.4 - 4.8
Κατηγορία Β – Διακύμανση τάσης	5.4
Κατηγορία Γ – Λόγος Φορτίο/Παραγωγή	3.0
Κατηγορία Δ – Ισχύς Βραχυκύκλωσης	1.4 - 3.5
Μη ελεγχόμενη φόρτιση	4.8
Ελεγχόμενη Φόρτιση - ΣΑΤΥΦ	5.9
Ελεγχόμενη Φόρτιση – Άεργος ισχύς Q(V)	7.2

### 4.3 Αποκεντρωμένος αλγόριθμος διαχείρισης ηλεκτρικών οχημάτων (Συνέργεια ΗΟ/ΑΠΕ)

Στη βιβλιογραφία [66], [70], [75], [79], [83], [92], [98], [131], [156], [157] - [169], έχουν αναπτυχθεί πληθώρα αλγορίθμων διαχείρισης της φόρτισης που εξυπηρετούν διαφορετικές στρατηγικές όπως για παράδειγμα ελαχιστοποίηση του κόστους φόρτισης, αποκοπή αιχμών/ελαχιστοποίηση της διακύμανσης του φορτίου του δικτύου, ρύθμιση συχνότητας, αντιστάθμιση αέργου ισχύος, στήριξη τάσης κτλ. Η μέθοδος υλοποίησης της διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων ποικίλει ανάλογα με την εκάστοτε εφαρμογή, όπως για παράδειγμα αλγόριθμοι δημοπράτησης, μέθοδοι γραμμικού προγραμματισμού (Lagrangian Relaxation), “max-

weight”, θεωρία παιγνίων (Nash certainty equivalence and mean-field games), γενετικοί αλγόριθμοι, δυναμικές μέθοδοι με καμπύλες στατισμού (droop-based), resistance emulation methods, etc. Η επίτευξη του αντικειμενικού σκοπού της διαχείρισης ενός στόλου ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να γίνει με την εφαρμογή είτε αποκεντρωμένου αλγορίθμου [70], [83], [92], [98], [131], [157]-[162] είτε κεντρικού [66], [75], [79], [163]-[169]. Η εφαρμογή ενός αποκεντρωμένου αλγορίθμου παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι της εφαρμογής του αντίστοιχου κεντρικού αλγορίθμου για εφαρμογές πραγματικού-χρόνου όπως αναλύθηκε εκτενώς στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας διατριβής.

Η ελαχιστοποίηση της διακύμανσης του φορτίου (“valley-filling”) είναι μια από τις πιο διαδεδομένες στρατηγικές διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Στις μελέτες [70], [92] και [98], διαφορετικοί αποκεντρωμένοι αλγόριθμοι με στόχο την επίτευξη “valley-filling” προτείνονται. Βασική αρχή λειτουργίας αυτών των αποκεντρωμένων συστημάτων διαχείρισης είναι η παραγωγή δυναμικών τιμών ενέργειας/σημάτων ελέγχου, που αντικατοπτρίζουν τη λειτουργική κατάσταση του συστήματος, και η ελαχιστοποίηση του κόστους φόρτισης κάθε ηλεκτρικού οχήματος βάσει των σημάτων ελέγχου και των περιορισμών του εκάστοτε οχήματος που εκφράζουν τις ενεργειακές ανάγκες μετακίνησης και προτιμήσεις του εκάστοτε χρήστη. Ο αποκεντρωμένος αλγόριθμος που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας διατριβής βασίζεται στη θεωρία παιγνίων  $N$ -παικτών (Nash Certainty Equivalence (NCE) equivalence και mean-field game models) και τα δυναμικά σήματα ελέγχου παράγονται σε ωριαία βάση σύμφωνα με τον ποσοστό φόρτισης του  $M/\Sigma$   $YT/MT$ , δηλαδή (συμβατικό φορτίο + φορτίο ηλεκτρικών οχημάτων)/(ονομαστική ισχύ  $M/\Sigma$ ) [92]. Παρόμοιο σκεπτικό ακολουθείται και στη μελέτη [70] με τη διαφορά ότι τα σήματα ελέγχου παράγονται βάσει της εγκατεστημένης ισχύος του συστήματος παραγωγής. Και στις δύο περιπτώσεις η αντικειμενική συνάρτηση των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελείται από δύο όρους: το κόστος φόρτισης των μπαταριών βάσει των σημάτων ελέγχου και το κόστος απόκλισης από τη μέση συμπεριφορά λειτουργίας (μέση ισχύς φόρτισης) του συνόλου των ηλεκτρικών οχημάτων. Στις μελέτες [83] και [98], οι συγγραφείς τροποποιούν την αντικειμενική συνάρτηση των ηλεκτρικών οχημάτων των αλγορίθμων [70] και [92] αντικαθιστώντας τον επιπρόσθετο όρο του κόστους απόκλισης από τη μέση ισχύ φόρτισης του στόλου με έναν νέο που αφορά στη χρονική διακύμανση του φορτίου των οχημάτων. Με τον τρόπο αυτό, δεν απαιτείται η γνώση της μέσης συμπεριφοράς των οχημάτων σε τοπικό επίπεδο για τη σύγκλιση του αλγορίθμου επιτρέποντας την εφαρμογή μυωπικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης (“myopic algorithms”, πχ. “max-weight” [131]). Η τροποποίηση αυτή, όπως θα αποδειχθεί και στη συνέχεια, εξασφαλίζει τη σύγκλιση στη βέλτιστη λύση ακόμα και αν ο στόλος των ηλεκτρικών οχημάτων παρουσιάσει σημαντική ετερογένεια ή/και υπάρχουν σημαντικές καθυστερήσεις στην επικοινωνία (“asynchronous communication”).

Οι παραπάνω αλγόριθμοι διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων λαμβάνουν υπόψη τους μόνο μια κατεύθυνση ροής ισχύος, από το δίκτυο προς τις μπαταρίες (λειτουργία φόρτισης της μπαταρίας). Η εφαρμογή της αμφίδρομης ροής ισχύος από και προς το δίκτυο (λειτουργίες φόρτισης/εκφόρτισης) προσφέρουν σημαντικά οικονομικά και τεχνικά οφέλη όπως αποδεικνύεται στις μελέτες [158], [168]-[169]. Από οικονομικής απόψεως, ένας κεντρικός διαχειριστής των ηλεκτρικών οχημάτων (EVSE/A) έχει τη δυνατότητα αξιοποίησης της πλήρους χωρητικότητας της μπαταρίας προσφέροντας του περισσότερες επιχειρηματικές ευκαιρίες. Από τεχνικής απόψεως, δίνεται η δυνατότητα αποκοπής των αιχμών ζήτησης και αποφόρτισης του δικτύου στους διαχειριστές του δικτύου αποτρέποντας πρόωρες επενδύσεις επέκτασης του δικτύου.

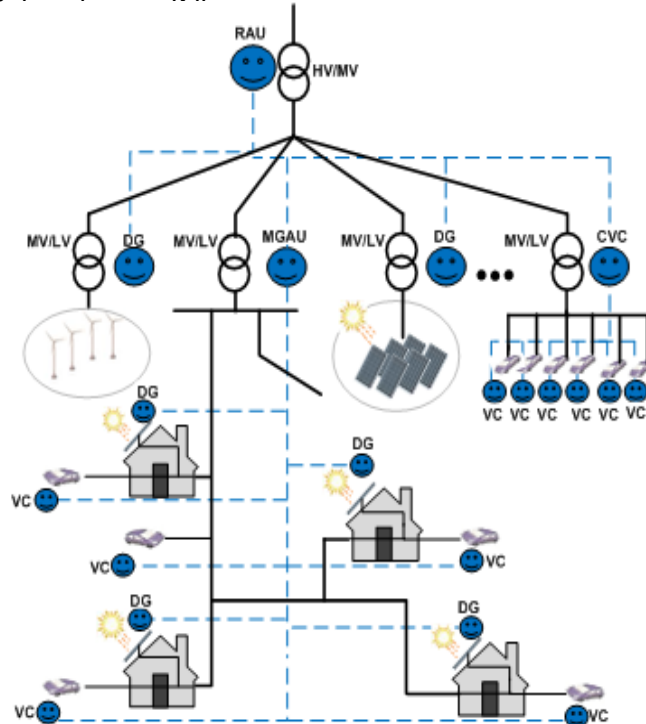
Σκοπός του προτεινόμενου συστήματος διαχείρισης ηλεκτρικών οχημάτων είναι:

- Η διαχείριση τους με αποκεντρωμένο τρόπο αξιοποιώντας τα πλεονέκτημα που προσφέρουν αυτές οι μέθοδοι συγκριτικά με τις κεντρικές μεθόδους διαχείρισης.
- Η αξιοποίηση της ευελιξίας της φόρτισης τους με σκοπό το επιπρόσθετο φορτίο για τη φόρτιση τους να μην δημιουργεί νέες αιχμές φορτίου στο δίκτυο.
- Η αξιοποίηση της τοπικής παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ με σκοπό τη μείωση της εισροής ενέργειας από το ανάντη δίκτυο. Αυτό θα συντελέσει και στην αποδοτικότερη λειτουργία του δικτύου διανομής, δηλαδή μείωση απωλειών δικτύου, βελτίωση του προφίλ της τάσης κτλ.
- Αύξηση του μέγιστου ορίου διείσδυσης ΑΠΕ και ηλεκτρικών οχημάτων σε ένα δίκτυο διανομής εξετάζοντας αποκλειστικά τις υφιστάμενες υποδομές φόρτισης.

### 4.3.1 Προτεινόμενο αποκεντρωμένο σύστημα διαχείρισης της φόρτισης

#### 4.3.1.1 Αρχιτεκτονική Συστήματος

Η αρχιτεκτονική του προτεινόμενου αποκεντρωμένου συστήματος που έχει σκοπό την συνέργεια μεταξύ των ηλεκτρικών οχημάτων και τη διεσπαρμένη παραγωγή ΑΠΕ παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-7. Οι μαύρες ενιαίες γραμμές προσδιορίζουν τα μονοπάτια ισχύος ενώ οι μπλε, διακεκομμένες γραμμές προσδιορίζουν τα μονοπάτια επικοινωνίας. Η ιεραρχική δομή επικοινωνίας που υιοθετείται είναι όμοια με αυτήν που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας διατριβής και βασίζεται στις αρχές των πολύ-πρακτορικών συστημάτων (Multi-agent systems). Το πολύ-πρακτορικό σύστημα που αναπτύχθηκε (Εικόνα 4-7) αποτελείται από έναν αριθμό πρακτόρων που είναι υπεύθυνοι για την αποδοτική αξιοποίηση των διαθέσιμων ενεργειακών πόρων (πχ. DG, VC, RAU) ή για την ενδιάμεση συλλογή των προφίλ φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων (πχ. CVC, MGAU) και την επικοινωνία ενός αθροιστικού προφίλ ζήτησης προς τα ανώτερα επίπεδα επικοινωνίας (RAU). Στη συνέχεια, θα παρουσιαστούν συνοπτικά οι υφιστάμενες ή/και οι νέες (συγκριτικά με το Κεφάλαιο 3) αρμοδιότητες των πρακτόρων που αποτελούν το προτεινόμενο σύστημα διαχείρισης ηλεκτρικών οχημάτων.



Εικόνα 4-7 Αρχιτεκτονική συστήματος αποκεντρωμένης διαχείρισης ηλεκτρικών οχημάτων σε δίκτυα διανομής με υψηλή διείσδυση ΑΠΕ

Ο **Περιφερειακός αθροιστής (Regional Aggregation Unit - RAU)** είναι ο πράκτορας που βρίσκεται στο υψηλότερο επίπεδο της ιεραρχικής επικοινωνίας, δηλαδή στον υποσταθμό Υ.Τ./Μ.Τ. που διαχειρίζεται μια σειρά από τοπικούς συναθροιστές (MGAU) ή/και ομάδες από ελεγκτές ηλεκτρικών οχημάτων (CVC). Ο αριθμός των πρακτόρων RAU που μπορεί να υπάρχει σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο εξαρτάται από τον αριθμό των υφιστάμενων υποσταθμών Υ.Τ./Μ.Τ. Ο πράκτορας RAU μπορεί να προσφέρει υπηρεσίες διαχείρισης φορτίου σε διαφορετικούς ενεργειακούς φορείς εξυπηρετώντας διαφορετικούς στόχους κατά περίπτωση. Στο προτεινόμενο σύστημα διαχείρισης, θεωρούμε ότι ο παράγοντας RAU λαμβάνει οικονομικά κίνητρα από τον Διαχειριστή Δικτύου Διανομής (ΔΕΔΔΗΕ) για να προσφέρει υπηρεσίες διαχείρισης φορτίου σε συγκεκριμένη περιοχή δικτύου αρμοδιότητάς του. Τέτοιου είδους υπηρεσίες διαχείρισης φορτίου προς τον διαχειριστή δικτύου μπορούν να προκύψουν από προγράμματα παροχής κινήτρων μείωσης των απωλειών ισχύος του δικτύου, όπως το πρόγραμμα OFGEM στο Ηνωμένο Βασίλειο,

Ισπανία, κλπ [170] ή ως αντίμετρο για την αναβολή/μετάθεση των επενδύσεων στο δίκτυο λόγω υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ ή/και ηλεκτρικών οχημάτων. Ο πράκτορας RAU είναι υπεύθυνος για την παρακολούθηση και την πρόβλεψη του προφίλ παραγωγής των ΑΠΕ, που συνδέονται απευθείας σε ζυγούς Μ.Τ., που απαιτείται για τον καθορισμό των σημάτων ελέγχου που μεταδίδονται στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Επιπλέον, ο πράκτορας RAU είναι υπεύθυνος για τον προσδιορισμό των απαιτούμενων τεχνολογιών επικοινωνίας και πληροφορικής (ICT) που επιτρέπουν την εφαρμογή του προτεινόμενου συστήματος διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Μέρος από τα οικονομικά οφέλη του πράκτορα RAU από την παροχή υπηρεσιών διαχείρισης φορτίου μπορεί να μοιραστεί στους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων που συμμετέχουν σε αυτές είτε απευθείας βάσει της προσφερόμενης ευελιξίας φόρτισης είτε έμμεσα απολαμβάνοντας φθηνότερα τιμολόγια λιανικής πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας.

Ο **Τοπικός Αθροιστής (MicroGrid Aggregation Unit - MGAU)** και ο **ελεγκτής ομάδας οχημάτων (Cluster of Vehicle Controllers - CVC)** είναι παράγοντες που βρίσκονται στο επίπεδο των υποσταθμών Μ.Τ./ Χ.Τ. και παρέχουν βοηθητικές υπηρεσίες επικοινωνίας. Ο πράκτορας MGAU είναι υπεύθυνος για έναν αριθμό ηλεκτρικών αυτοκινήτων που είναι διασκορπισμένα στο δίκτυο Χ.Τ. και ανήκουν στον ίδιο υποσταθμό Μ.Τ./ Χ.Τ. Παρόμοια, ο πράκτορας CVC είναι υπεύθυνος για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα που είναι συγκεντρωμένα σε μεγάλες περιοχές στάθμευσης δημόσιας ή ιδιωτικής πρόσβασης. Επιπρόσθετα, ο παράγοντας MGAU είναι υπεύθυνος για τη συνάθροιση των τοπικών προφίλ κατανάλωσης και παραγωγής των καταναμημένων ενεργειακών πόρων. Το ενιαίο καθαρό προφίλ φορτίου που προέρχονται από κάθε MGAU μεταδίδονται στον αντίστοιχο πράκτορα RAU.

Ο **ελεγκτής οχημάτων (Vehicle Controller - VC)** αντιπροσωπεύει το EV στο ανάντη δίκτυο και εκφράζει τις προτιμήσεις του ιδιοκτήτη τους στον MGAU ή CVC. Οι ελεγκτές αυτοί είναι ιδιοτελείς οντότητες που έχουν σκοπό να εξυπηρετήσουν τις ενεργειακές ανάγκες μετακίνησης του ηλεκτρικού οχήματος βάσει των προτιμήσεων και των περιορισμών που θέτουν οι χρήστες.

Ο πράκτορας για τον έλεγχο της **Διεσπαρμένης Παραγωγής (Distributed Generation - DG)** είναι υπεύθυνος για τη διαχείριση των μονάδων καταναμημένης παραγωγής ΑΠΕ που συνδέονται είτε απευθείας στο δίκτυο μέσης τάσης είτε στο δίκτυο ΧΤ, όπως οι μικρές ανεμογεννήτριες (WT), φωτοβολταϊκά στέγης (PV), οικιακές μονάδες συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και θερμότητας, κλπ. Για τους σκοπούς του κεφαλαίου της παρούσας διδακτορικής διατριβής θα εξεταστούν μόνο τα φωτοβολταϊκά και οι ανεμογεννήτριες των οποίων η παραγωγή καθορίζεται από τις καιρικές συνθήκες, εκτός αν περιορίζεται/αποκόπτεται για να διατηρηθεί η ασφαλής λειτουργία του δικτύου.

Όσον αφορά στις τεχνολογίες επικοινωνιών και πληροφορικής που επιτρέπουν την εφαρμογή της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής, υπάρχουν ποικίλες εναλλακτικές που μπορούν να υιοθετηθούν αποδοτικότερα κατά περίπτωση όπως αναλύθηκε διεξοδικά στο κεφάλαιο 3 (Ενότητα 3.3.2.3) της παρούσας διατριβής.

#### 4.3.1.2 Μαθηματική μοντελοποίηση κεντρικού αλγορίθμου

Ο κεντρικός αλγόριθμος που θα αναπτυχθεί στη συνέχεια έχει σκοπό την ελαχιστοποίηση της διακύμανσης του συνολικού φορτίου του δικτύου (“valley-filling”) λαμβάνοντας υπόψη το συμβατικό μη ελεγχόμενο φορτίο του, τη ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων καθώς και την παραγόμενη ισχύ από ΑΠΕ. Τα θετικά πλεονεκτήματα αυτής της στρατηγικής φόρτισης αναλύθηκαν διεξοδικά στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας διατριβής. Στόχος του προτεινόμενου κεντρικού αλγορίθμου είναι η συνέργεια μεταξύ ηλεκτρικών οχημάτων και ΑΠΕ για την αποδοτικότερη αξιοποίηση της διεσπαρμένης παραγωγής από την τοπική κατανάλωση και συνεπώς την αποδοτικότερη λειτουργία των δικτύων διανομής.

Συνεπώς, το κεντρικό πρόβλημα διαχείρισης της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων εκφράζεται από το παρακάτω πρόβλημα βελτιστοποίησης:

$$\begin{aligned} \text{Min}_{P_{ch,i}^{EV}, P_{dch,i}^{EV}} f_{cent} &= \sum_{t=1}^T U \left( \sum_{i=1}^N (P_{ch,i,t}^{EV} - P_{dch,i,t}^{EV}) - \sum_{j=1}^M P_{j,t}^{DG} + D_t \right) \\ &= \sum_{t=1}^T \left( \frac{1}{2} \left( \sum_{i=1}^N (P_{ch,i,t}^{EV} - P_{dch,i,t}^{EV}) - \sum_{j=1}^M P_{j,t}^{DG} + D_t \right)^2 \right) \end{aligned} \quad \text{E 4-12}$$

μ.π.

$$\sum_{t=1}^T \left\{ (P_{ch,i,t}^{EV} \cdot C_{eff} - \frac{P_{dch,i,t}^{EV}}{C_{eff}}) \cdot \Delta t - P_{trip,i,t}^{EV} \right\} = 0 \quad \text{E 4-13}$$

$$u_{c,t} + u_{d,t} - 1 \leq 0 \quad \text{E 4-14}$$

$$P_{ch,i,t} - u_{c,t} \cdot Plug_{i,t} \cdot P_{nomCS} \leq 0 \quad \text{E 4-15}$$

$$P_{dch,i,t} - u_{d,t} \cdot Plug_{i,t} \cdot P_{nomCS} \leq 0 \quad \text{E 4-16}$$

$$\sum_{\tau=1}^t (P_{ch,i,\tau} \cdot C_{eff} - P_{dch,i,\tau}/C_{eff}) \cdot \Delta t - \sum_{\tau=1}^t P_{trip,i,\tau}^{EV} \leq 0 \quad \text{E 4-17}$$

$$- \sum_{\tau=1}^t (P_{ch,i,\tau} \cdot C_{eff} - P_{dch,i,\tau}/C_{eff}) \cdot \Delta t - C_{bat,i} + \sum_{\tau=1}^t P_{trip,i,\tau}^{EV} \leq 0 \quad \text{E 4-18}$$

$$\sum_{\tau=1}^t P_{dch,i,\tau} \Delta t / C_{eff} - Perc_i \cdot C_{bat,i} \leq 0 \quad \text{E 4-19}$$

όπου  $P_{ch,i,t}^{EV}, P_{dch,i,t}^{EV} \in \mathbb{R}_+$  (kW) είναι οι μεταβλητές απόφασης για το επίπεδο φόρτισης και εκφόρτισης, αντίστοιχα, του  $i$ -οστού οχήματος τη χρονική στιγμή  $t$ ,  $P_{j,t}^{DG}$  (kW) εκφράζει την παραγωγή της μονάδας διεσπαρμένης παραγωγής  $j$  τη χρονική στιγμή  $t$ ,  $D_t$  (kW) είναι η μη ελαστική (συμβατική) ζήτηση του εξεταζόμενου δικτύου (εδώ μπορούν να συμπεριληφθούν και τα ηλεκτρικά οχήματα που επιλέγουν την επείγουσα, μη-ελεγχόμενη φόρτιση),  $C_{eff} \in \mathcal{R}_+$  εκφράζει τις απώλειες των ηλεκτρονικών ισχύος για ροές ισχύος από και προς το δίκτυο,  $P_{trip,i,t}^{EV}$  (kWh) εκφράζει την κατανάλωση ενέργειας του  $i$ -οστού οχήματος για να εξυπηρετήσει τις ενεργειακές ανάγκες μετακίνησης του τη χρονική στιγμή  $t$ ,  $u_{c,t}, u_{d,t} \in \mathbb{N} = \{0,1\}$  είναι δυαδικές μεταβλητές που επιτρέπουν (ένα-1) ή όχι (μηδέν-0) την λειτουργία της φόρτισης ή της εκφόρτισης, αντίστοιχα, τη χρονική στιγμή  $t$ , για το στόλο των ηλεκτρικών οχημάτων,  $Plug_{i,t} \in \mathbb{N} = \{0,1\}$  είναι μια δυαδική μεταβλητή που καθορίζει αν το  $i$ -οστό όχημα είναι συνδεδεμένο (ένα-1) ή όχι (μηδέν-0) στο ηλεκτρικό δίκτυο τη χρονική στιγμή  $t$ ,  $Perc_i$  την μέγιστη επιτρεπτή εκφόρτιση της μπαταρίας του  $i$ -οστού οχήματος για αποκοπή φορτίου αιχμής ως ποσοστό της χωρητικότητας της μπαταρίας,  $P_{nomCS}$  εκφράζει την ονομαστική ισχύ φόρτισης του σταθμού και  $C_{bat,i}$  (kWh) είναι η ονομαστική ισχύς της μπαταρίας του  $i$ -οστού οχήματος.

Ο μοναδικός εξισωτικός περιορισμός (E 4-13) εξασφαλίζει την πλήρη φόρτιση του ηλεκτρικού οχήματος μέχρι την αναχώρηση του λαμβάνοντας υπόψη τις ημερήσιες ενεργειακές ανάγκες μετακίνησης καθώς και την έγχυση ισχύος στο δίκτυο για την παροχή επικουρικών υπηρεσιών (θεωρούμε ότι η μπαταρία όλων των οχημάτων, αρχικά, είναι πλήρως φορτισμένη). Επειδή δεν έχει πραγματικό νόημα η ταυτόχρονη φόρτιση και εκφόρτιση της μπαταρίας ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου τη χρονική στιγμή  $t$ , ο ανισωτικός περιορισμός E 4-14 εξασφαλίζει τον συγκεκριμένο περιορισμό λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων. Οι ανισωτικοί περιορισμοί E 4-15 και E 4-16 εκφράζουν το άνω όριο φόρτισης/εκφόρτισης ενός ηλεκτρικού οχήματος τη χρονική στιγμή  $t$  λαμβάνοντας υπόψη την ονομαστική ισχύ φόρτισης του σταθμού και αν το όχημα είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο. Τέλος, οι ανισωτικοί περιορισμοί E 4-17 και E 4-18 εξασφαλίζουν ότι η μπαταρία λειτουργεί εντός των αποδεκτών ορίων λειτουργίας καθόλη τη διάρκεια του εξεταζόμενου διαστήματος.

Η αντικειμενική συνάρτηση του κεντρικού προβλήματος ελαχιστοποίησης της διακύμανσης του φορτίου του δικτύου έχει τετραγωνική μορφή και περιλαμβάνει δύο θετικά-ορισμένες μεταβλητές απόφασης  $P_{ch,i,t}^{EV}, P_{dch,i,t}^{EV}$ . Όσον αφορά στους περιορισμούς, παρατηρούμε ότι δεν είναι όλοι γραμμικοί λόγω της ύπαρξης των ακέραιων μεταβλητών ( $u_{c,t}, u_{d,t}$ ). Επομένως, το κεντρικό πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι ένα πρόβλημα μεικτού ακέραιου τετραγωνικού προγραμματισμού (Mixed-Integer Quadratic Problem - MIQP). Τέτοιου είδους προβλήματα δεν αντιμετωπίζονται με συμβατικές τεχνικές βελτιστοποίησης αλλά απαιτούνται πιο σύνθετες μέθοδοι, όπως για παράδειγμα η Benders Decomposition ([171]-[172]), η Outer Approximation ([172]-[173]), η Branch and Bound ([174]-[175]), Feasibility approach ([176]) κτλ. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή θα αναλυθούν και θα εξεταστούν οι μέθοδοι Benders Decomposition και Outer Approximation που είναι από τις πιο ευρέως διαδεδομένες μεθόδους. Η εφαρμογή των μεθόδων αυτών θα εξεταστεί στη συνέχεια του παρόντος κεφαλαίου.



#### 4.3.1.3 Μαθηματική μοντελοποίηση αποκεντρωμένου αλγορίθμου (παίγνιο $N$ -παικτών)

Βάσει της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών του κεντρικού προβλήματος βελτιστοποίησης όπως αποτυπώθηκε παραπάνω (E4-12 – E4-18), στη παρούσα ενότητα θα αναπτυχθεί και θα παρουσιαστεί ο αντίστοιχος αποκεντρωμένος αλγόριθμος για τη διαχείριση της λειτουργίας των οχημάτων με σκοπό την ελαχιστοποίηση της διακύμανσης του συνολικού φορτίου του δικτύου. Ο προτεινόμενος έλεγχος είναι ένα πρόβλημα απόφασης με πολλούς αποφασίζοντες στο οποίο οι συμμετέχοντες δεν συνεργάζονται μεταξύ τους (Κεφάλαιο 3 – Ενότητα 3.3.2.1). Πρόκειται για ένα παίγνιο στο οποίο ένας κεντρικός συντονιστής (leader) που καθορίζει τη στρατηγική της διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων παράγει κάποια σήματα ελέγχου, βάσει των οποίων οι υπόλοιποι παίκτες του παιγνίου (responders) καθορίζουν τη στρατηγική τους βάσει των προτιμήσεων και των περιορισμών τους. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, ο κεντρικός συντονιστής είναι ο εκάστοτε RAU ο οποίος επιδιώκει την βελτίωση του μέγιστου ορίου διείσδυσης ΑΠΕ/ηλεκτρικών οχημάτων σε ένα δίκτυο διανομής θεωρώντας τις υφιστάμενες υποδομές και την αποδοτικότερη λειτουργία του δικτύου βάσει των απωλειών του δικτύου και του προφίλ της τάσης. Ως εκ τούτου, ο RAU επιδιώκει να:

- μετατοπίσει τη ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων σε ώρες με χαμηλή κατανάλωση δικτύου και κατά προτίμηση σε ώρες με περίσσεια παραγωγής από ΑΠΕ.
- αποκόψει την αιχμή της συμβατικής ζήτησης του δικτύου μέσω της V2G λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων

Η στρατηγική του RAU μετατρέπεται σε μια επαναληπτική μέθοδο συντονισμού των ηλεκτρικών οχημάτων μέσω σημάτων ελέγχου. Σε κάθε επανάληψη  $k$ , ο RAU παράγει ένα σετ από σήματα ελέγχου που επηρεάζονται από τη λειτουργία φόρτισης/εκφόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Η σημασία αυτών των σημάτων ελέγχου συναρτίζεται της ζήτησης είναι αντίστοιχη αυτής των τιμών αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας: όσο πιο υψηλή είναι η ζήτηση τόσο πιο υψηλές είναι και οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας. Κατ' αντιστοιχία, όσο υψηλότερη είναι η ζήτηση στο επίπεδο του  $Υ/Σ$   $Υ.Τ./Μ.Τ$  που εξυπηρετείται από το ανάντη δίκτυο τόσο υψηλότερες είναι και οι τιμές των σημάτων ελέγχου. Να διευκρινιστεί ότι τα σήματα ελέγχου μπορεί να προσομοιάζουν με τις τιμές αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας ωστόσο είναι δύο τελείως διαφορετικά μεγέθη. Οι πραγματικές τιμές χρέωσης των ηλεκτρικών οχημάτων καθορίζονται μέσω διμερών συμφωνιών μεταξύ των χρηστών τους και των αντίστοιχων παρόχων ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη τη φθορά της μπαταρίας για τις υπηρεσίες V2G. Ωστόσο, περαιτέρω ανάλυση για τέτοια εμπορικά συμβόλαια δεν εξετάζονται στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

Τα σήματα ελέγχου που παράγει ο RAU διαμορφώνονται βάσει της παρακάτω μαθηματικής φόρμουλας:

$$p(t, D_{net}, \sum_N P_{ch,i,t}^{EV}, \sum_N P_{dch,i,t}^{EV}) = \gamma \cdot \nabla U(D_{net}, \sum_N P_{ch,i,t}^{EV}, \sum_N P_{dch,i,t}^{EV}) \quad \text{E 4-20}$$

$$\text{όπου } D_{net} = D_t - \sum_M P_{j,t}^{DG} \quad \text{E 4-21}$$

Η παράμετρος  $\gamma$  είναι μια θετικά ορισμένη σταθερά η τιμή της οποίας εξασφαλίζει τη σύγκλιση του αλγορίθμου, όπως θα αποδειχθεί στη συνέχεια. Τα σήματα αυτά ελέγχου επηρεάζουν το βέλτιστο προφίλ λειτουργίας της μπαταρίας (φόρτιση/εκφόρτιση) που καθορίζεται από τους ίδιους τους χρήστες βάσει των προτιμήσεων και των ενεργειακών αναγκών τους. Επομένως, το πρόβλημα βελτιστοποίησης που πρέπει να λυθεί από κάθε VC για τον προσδιορισμό του βέλτιστου προφίλ ζήτησης περιγράφεται παρακάτω:

$$\min_{P_{ch,i,t}^{EV}, P_{dch,i,t}^{EV}} J_i^{k+1}(P_{ch,i,t}^{EV}, P_{dch,i,t}^{EV}, P_{ch,-i,t}^{EV}, P_{dch,-i,t}^{EV}) = \sum_{t=1}^T \left\{ p_t^{k+1} \cdot (P_{k+1,i,t}^{EV}) + \frac{1}{2} (P_{k+1,i,t}^{EV} - P_{k,i,t}^{EV})^2 \right\} \quad \text{E 4-22}$$

$$\text{όπου } P_{k,i,t}^{EV} = P_{ch,k,i,t}^{EV} - P_{dch,k,i,t}^{EV} \quad \text{για } P_{ch,k,i,t}^{EV}, P_{dch,k,i,t}^{EV} \in \mathbb{R}_+ \quad \text{E 4-23}$$

$$\mu.π. \quad (\text{E 4 - 13}) - (\text{E 4 - 19})$$

Η αντικειμενική συνάρτηση E 4-22 αποτελείται από δύο μέρη: το πρώτο μέρος αφορά στο εικονικό κόστος/κέρδος λόγω φόρτισης/ εκφόρτισης της μπαταρίας του ηλεκτρικού οχήματος



βάσει των σημάτων ελέγχου όπως διαμορφώνονται από τον RAU, ενώ το δεύτερο μέρος είναι ο συντελεστής ποινής που αποτρέπει τις απότομες μεταβολές στο προφίλ φόρτισης μεταξύ δύο επαναλήψεων. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονίσουμε ότι υιοθετήθηκε ο συντελεστής ποινής του τροποποιημένου αλγορίθμου που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, λόγω των πλεονεκτημάτων που απορρέουν από την εφαρμογή του: σύγκλιση στη βέλτιστη λύση ακόμα και στην περίπτωση ετερογενή στόλου ηλεκτρικών οχημάτων και μείωση των δεδομένων μετάδοσης. Ο προτεινόμενο αποκεντρωμένος αλγόριθμος που επιτρέπει τη συνέργεια μεταξύ ηλεκτρικών οχημάτων και ΑΠΕ αποτελεί αναβάθμιση του τροποποιημένου αλγορίθμου του Κεφαλαίου 3 με σκοπό την ενσωμάτωση της παραγωγής ΑΠΕ καθώς και την αμφίδρομη ροή ισχύος από και προς την μπαταρία του ηλεκτρικού οχήματος.

**Απόδειξη σύγκλισης του αποκεντρωμένου αλγορίθμου**

**Λήμμα 1: Η ανισότητα**

$$\langle p^k, \sum_{i \in N} P_{k+1,i}^{EV} - \sum_{i \in N} P_{k,i}^{EV} \rangle \leq - \left\| \sum_{i \in N} P_{k+1,i}^{EV} - \sum_{i \in N} P_{k,i}^{EV} \right\| \quad \text{E 4-24}$$

ισχύει  $\forall i \in N$  και  $k \geq 1$

**Απόδειξη:**

Η αντικειμενική συνάρτηση των ηλεκτρικών οχημάτων  $J$  είναι κυρτή (convex) μιας και ο πίνακας Hessian είναι θετικά ημι-ορισμένος (positive semi-definite)  $\forall P^{EV} \in S = \{0 \leq P_{ch}^{EV} - P_{dch}^{EV} \leq P_{max}\}$ :

$$\frac{\partial J}{\partial P_{ch}^2} \cdot \frac{\partial J}{\partial P_{dch}^2} - \left( \frac{\partial J}{\partial P_{dch} \partial P_{dch}} \right)^2 > 0 \quad \text{και} \quad \frac{\partial J}{\partial P_{ch}^2}, \frac{\partial J}{\partial P_{dch}^2} \geq 0 \quad \text{E 4-25}$$

Δεδομένου ότι η συνάρτηση  $J$  είναι κυρτή και διαφορίσιμη κατά Gateaux (*Gateaux differentiable*), τότε από την πρώτου βαθμού συνθήκη βελτιστοποίησης (*first order necessary optimality condition*) για την (E4-22) ισχύει η παρακάτω ανισότητα (*Euler's inequality*):

$$\langle \nabla J(P_{k+1}^{EV}), \sum_{i \in N} P_i^{EV} - \sum_{i \in N} P_{k+1,i}^{EV} \rangle \geq 0 \quad \text{E 4-26}$$

Αντικαθιστώντας την πρώτη παράγωγο της συνάρτησης  $J$ , προκύπτει ότι:

$$\langle (p^k + \sum_{i \in N} P_{k+1,i}^{EV} - \sum_{i \in N} P_{k,i}^{EV}), (\sum_{i \in N} P_i^{EV} - \sum_{i \in N} P_{k+1,i}^{EV}) \rangle \geq 0 \quad \text{E 4-27}$$

που ισχύει  $\forall P_i^{EV} \in S$ . Επειδή  $P_{k,i}^{EV} \in S$  τότε η παραπάνω ανίσωση τροποποιείται ως εξής:

$$\langle (p^k + \sum_{i \in N} P_{k+1,i}^{EV} - \sum_{i \in N} P_{k,i}^{EV}), (\sum_{i \in N} P_i^{EV} - \sum_{i \in N} P_{k+1,i}^{EV}) \rangle \geq 0 \quad \text{E 4-28}$$

Επομένως αποδεικνύεται ότι η ανίσωση (E 4-24) ισχύει  $\forall i \in N$  και  $k \geq 1$

**Λήμμα 2: Τα προφίλ λειτουργίας (φόρτιση/εκφόρτιση) της μπαταρίας των ηλεκτρικών οχημάτων ( $P_{k,i}^{EV}$ ) συγκλίνει στη βέλτιστη λύση του κεντρικού αλγορίθμου (E 4-12) – (E 4-19) καθώς  $k \rightarrow \infty$**

**Απόδειξη:**

Η αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης του κεντρικού προβλήματος έχει την εξής μορφή:

$$f_{cent}^{k+1} = \sum_{t=1}^T U(\sum_{i=1}^N P_{k+1,i,t}^{EV} + D_{net,t}^{k+1}) \quad \text{E 4-29}$$

Επειδή η συνάρτηση  $U$  είναι κυρτή ισχύει ότι:

$$f_{cent}^{k+1} = \sum_{t=1}^T U\left(D_{net,t}^k + \sum_{i \in N} P_{k,i,t}^{EV}\right) - \nabla U(D_{net,t}^{k+1} + \sum_{i \in N} P_{k+1,i,t}^{EV}) \cdot \left(\sum_{i \in N} P_{k,i,t}^{EV} - \sum_{i \in N} P_{k+1,i,t}^{EV}\right) \quad \text{E 4-30}$$

Επειδή η συμβατική ζήτηση του δικτύου (χωρίς το φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων) παραμένει αμετάβλητη κατά την εκτέλεση των επαναλήψεων σύγκλισης του αλγορίθμου, ισχύει ότι:

$$D_{net,t}^k = D_{net,t}^{k+1} \quad \text{E 4-31}$$

Η πρώτη παράγωγος  $\nabla U$  είναι μια συνάρτηση Lipschitz για την οποία υπάρχει μια θετικά ορισμένη σταθερά  $\beta$  τέτοια ώστε:

$$|\nabla U(x) - \nabla U(y)| \leq \beta |x - y|, \quad \forall x, y \quad \text{E 4-32}$$

Συνεπώς,

$$f_{cent}^{k+1} \leq f_{cent}^k - \langle \nabla U^k + \beta \cdot (\sum_{i \in N} P_{k+1,i,t}^{EV} - \sum_{i \in N} P_{k,i,t}^{EV}), (\sum_{i \in N} P_{k,i,t}^{EV} - \sum_{i \in N} P_{k+1,i,t}^{EV}) \rangle \quad \text{E 4-33}$$

Σύμφωνα με τον ορισμό των σημάτων ελέγχου  $p^k$  (E 4-20) και αντικαθιστώντας την ισοδύναμη αναπαράσταση της  $\nabla U^k$ , η παραπάνω ανισότητα ισοδυναμεί με:

$$f_{cent}^{k+1} \leq f_{cent}^k + \frac{1}{\gamma} \sum_{i \in N} \langle p^k, P_{k+1}^{EV} - P_k^{EV} \rangle + \beta \left\| \sum_{i \in N} P_{k+1,i,t}^{EV} - \sum_{i \in N} P_{k,i,t}^{EV} \right\|^2 \quad \text{E 4-34}$$

Σύμφωνα με την ανισότητα του Λήμματος 1, η παραπάνω ανίσωση τροποποιείται ως ακολούθως:

$$f_{cent}^{k+1} \leq f_{cent}^k - \frac{1}{\gamma} \sum_{i \in N} \left\| P_{k+1,i,t}^{EV} - P_{k,i,t}^{EV} \right\|^2 + \beta \left\| \sum_{i \in N} P_{k+1,i,t}^{EV} - \sum_{i \in N} P_{k,i,t}^{EV} \right\|^2 \quad \text{E 4-35}$$

Επιπρόσθετα, σύμφωνα με την ανίσωση Cauchy-Schwarz, ισχύει ότι:

$$f_{cent}^{k+1} \leq f_{cent}^k - \frac{1}{\gamma} \left\| \sum_{i \in N} P_{k+1,i,t}^{EV} - \sum_{i \in N} P_{k,i,t}^{EV} \right\|^2 + \beta \cdot N \sum_{i \in N} \left\| P_{k+1,i,t}^{EV} - P_{k,i,t}^{EV} \right\|^2 \quad \text{E 4-36}$$

Αν για τη θετικά ορισμένη σταθερά  $\gamma$ , επιλεγεί τιμή που ικανοποιεί τη συνθήκη  $\gamma \leq 1/(N\beta)$  τότε ο δεύτερος όρος του δεξιού μέρους της παραπάνω ανισότητας έχει θετική τιμή και επομένως ισχύει ότι:

$$-\frac{1}{\gamma} \left\| \sum_{i \in N} P_{k+1,i,t}^{EV} - \sum_{i \in N} P_{k,i,t}^{EV} \right\|^2 + \beta \cdot N \sum_{i \in N} \left\| P_{k+1,i,t}^{EV} - P_{k,i,t}^{EV} \right\|^2 \leq 0 \quad \text{E 4-37}$$

Συνεπώς, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης φθίνει μετά από κάθε επανάληψη μέχρι τη σύγκλιση της στη βέλτιστη τιμή:

$$f_{cent}^{k+1} \leq f_{cent}^k \quad \text{E 4-38}$$

#### 4.3.1.4 Επίλυση προβλήματος βελτιστοποίησης μεικτού ακέραιου προγραμματισμού

Στην ενότητα αυτή αναλύεται και εφαρμόζεται η Generalized Benders Decomposition (GBD) που είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης μεικτού ακέραιου προγραμματισμού. Η μέθοδος της GBD επιλύει προβλήματα μαθηματικού προγραμματισμού και βελτιστοποίησης της παρακάτω μορφής:

$$\begin{aligned} \text{(Primal Problem - P)} \quad & \min_{x,y} f(x,y) & \text{E 4-39} \\ \text{s.t. } & h(x,y) = 0 \\ & g(x,y) \leq 0 \\ & x \in X \subseteq \mathbb{R} \text{ και } y \in Y = \{0,1\} \end{aligned}$$

υπό τους παρακάτω περιορισμούς:

- I. Το  $X$  είναι ένα μη κενό κυρτό σύνολο και οι συναρτήσεις  $f$  και  $g$  είναι κυρτές για κάθε σταθερή τιμή του  $y \in Y = \{0,1\}$ , ενώ οι συναρτήσεις  $h$  είναι γραμμικές για κάθε σταθερή τιμή του  $y \in Y = \{0,1\}$ .
- II. Το σύνολο  $Z_y = \{z \in \mathbb{R} : h(x,y) = 0, g(x,y) \leq 0\}$  για κάποιο  $x \in X$  είναι κλειστό σύνολο για κάθε σταθερή τιμή του  $y \in Y$ .
- III. Για κάθε σταθερή τιμή του  $y \in Y \cap V$ , όπου  $V = \{y \in Y : h(x,y) = 0, g(x,y) \leq 0\}$  για κάποιο  $x \in X$  ισχύει μια από τις παρακάτω συνθήκες:
  - Το παραπάνω πρόβλημα έχει πεπερασμένη λύση και έχει και ένα διάνυσμα πολλαπλασιαστών Lagrange για τους ισοτικούς και ανισοτικούς περιορισμούς αντίστοιχα.
  - Το παραπάνω πρόβλημα είναι μη φραγμένο και δεδομένου αυτού, η τιμή της αντικειμενικής του συνάρτησης τείνει στο  $-\infty$ .

Η βασική ιδέα της μεθόδου GBD είναι η αποσύνθεση του αρχικού προβλήματος (P) σε δύο ξεχωριστά προβλήματα: το κύριο πρόβλημα (master problem – MP) και πολλαπλά υπο-προβλήματα (sub-problems - SP). Η GBD είναι μια επαναληπτική μέθοδος επίλυσης, από τη μια μεριά, των υπο-προβλημάτων που προκύπτουν από το αρχικό πρόβλημα (P) με την ανάθεση συγκεκριμένων τιμών στις ακέραιες μεταβλητές και από την άλλη του κύριου προβλήματος (MP).

Σε κάθε επανάληψη της μεθόδου παράγεται ένα άνω και ένα κάτω φράγμα που προσδιορίζουν το εύρος των τιμών εντός των οποίων κινείται η βέλτιστη λύση του αρχικού προβλήματος. Το άνω φράγμα προκύπτει από την επίλυση των υπο-προβλημάτων (SP) ενώ το κάτω φράγμα από την επίλυση του προβλήματος (MP). Καθώς ο αριθμός των επαναλήψεων αυξάνεται, η ακολουθία του άνω φράγματος είναι συνεχώς φθίνουσα ενώ η αντίστοιχη του κάτω ορίου είναι συνεχώς αύξουσα. Ως εκ τούτου μετά το πέρας ενός αριθμού επαναλήψεων οι ακολουθίες του άνω και κάτω φράγματος συγκλίνουν σε μια τιμή, η οποία μάλιστα είναι και η βέλτιστη λύση του αρχικού προβλήματος (P).

Το υπο-πρόβλημα (Sub-problem- SP) που καθορίζει το άνω φράγμα της βέλτιστης λύσης στη GBD προκύπτει από το αρχικό πρόβλημα επίλυσης θεωρώντας συγκεκριμένες τιμές για τις ακέραιες μεταβλητές ( $y^k$ ), όπου  $k$  ο αριθμός της εκάστοτε τρέχουσας επανάληψης. Η μαθηματική περιγραφή του υπο-προβλήματος για την επανάληψη  $k$  είναι η ακόλουθη:

$$\begin{aligned} \text{(Sub-problem – SP)} \quad & \min_x f(x, y^k) && \text{E 4-40} \\ \text{μ.π.} \quad & h(x, y^k) = 0 : \lambda^k \\ & g(x, y^k) \leq 0 : \mu^k \\ & x \in X \subseteq \mathbb{R} \end{aligned}$$

Αν το παραπάνω υπο-πρόβλημα SP είναι επιλύσιμο κατά την επανάληψη  $k$ , τότε από την επίλυση του προκύπτουν οι τιμές για τις συνεχείς μεταβλητές  $x^k$ . Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης  $f(x^k, y^k)$  αποτελεί το άνω φράγμα της βέλτιστης λύσης. Η συνάρτηση Lagrange, με πολλαπλασιαστές  $\lambda^k$  και  $\mu^k$  για τους ισοτικούς και ανισοτικούς περιορισμούς αντίστοιχα, είναι η κάτωθι:

$$L(x, y, \lambda^k, \mu^k) = f(x, y) + \lambda^k h(x, y) + \mu^k g(x, y) \quad \text{E 4-41}$$

Αν το υπο-πρόβλημα SP δεν είναι επιλύσιμο, τότε το πρόβλημα τροποποιείται χαλαρώνοντας του ανισοτικούς περιορισμούς ως εξής:

$$\begin{aligned} \text{(Feasibility Sub-problem – FSP)} \quad & \min_x \sum_{j=1}^p a_j && \text{E 4-42} \\ \text{μ.π.} \quad & h(x, y^k) = 0 : \bar{\lambda}^k \\ & g(x, y^k) \leq a_j, j = 1, 2, \dots, p : \bar{\mu}^k \\ & a_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, p \end{aligned}$$

όπου  $p$  συμβολίζει τον αριθμό των ανισοτικών περιορισμών. Στην περίπτωση αυτή, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του υπο-προβλήματος FSP δεν επηρεάζει το άνω όριο. Αντίθετα η νέα συνάρτηση Lagrange, με πολλαπλασιαστές  $\bar{\lambda}^k$  και  $\bar{\mu}^k$  για τους ισοτικούς και ανισοτικούς περιορισμούς αντίστοιχα, έχει την εξής μορφή:

$$\bar{L}(x, y, \bar{\lambda}^k, \bar{\mu}^k) = \bar{\lambda}^k h(x, y) + \bar{\mu}^k g(x, y) \quad \text{E 4-43}$$

Από το υπο-πρόβλημα SP προκύπτουν οι τιμές για τις συνεχείς μεταβλητές  $x^k$  οι οποίες χρησιμοποιούνται στο κύριο πρόβλημα (Master Problem- MP) για τον προσδιορισμό του κάτω φράγματος της βέλτιστης λύσης καθώς και των νέων τιμών για τις ακέραιες μεταβλητές  $y$ . Οι περιορισμοί του προβλήματος MP καθορίζονται από τη δυνατότητα επίλυσης ή μη του υπο-προβλήματος SP. Το πρόβλημα MP έχει την εξής μορφή:

$$\begin{aligned} \text{(Master Problem – MP)} \quad & \min_{y, \mu} \mu_\beta && \text{E 4-44} \\ \text{μ.π.} \quad & \mu_\beta \geq \inf_{x \in R_{\geq 0}} L(x, y, \lambda^k, \mu^k), \text{ αν το (SP) είναι επιλύσιμο} \\ & 0 \geq \inf_{x \in R_{\geq 0}} \bar{L}(x, y, \bar{\lambda}^k, \bar{\mu}^k), \text{ αν το (SP) δεν είναι επιλύσιμο} \end{aligned}$$

Τα βήματα του αλγορίθμου της GBD συνοψίζονται στο διάγραμμα ροής στην Εικόνα 4-8. Η εφαρμογή της GBD για την επίλυση του προτεινόμενου αποκεντρωμένου αλγόριθμου διαχείρισης ηλεκτρικών οχημάτων περιγράφεται στη συνέχεια. Αντίστοιχη είναι και η εφαρμογή της GBD για τον κεντρικό αλγόριθμο.

### Primal Problem

$$\min_{P_{ch,k,i,t}^{EV}, P_{dch,k,i,t}^{EV}, u_c^k, u_d^k} \{f_i^k(t, P_{k,i,t}^{EV}, P_{k-1,i,t}^{EV}, u_{c,t}^k, u_{d,t}^k)\} =$$

$$= c^T P_{ch,k,i,t}^{EV} + d^T P_{dch,k,i,t}^{EV} + \frac{1}{2}(P_{ch,k,i,t}^{EV})^T Q P_{ch,k,i,t}^{EV} + \frac{1}{2}(P_{ch,k,i,t}^{EV})^T R P_{dch,k,i,t}^{EV} + \frac{1}{2}(P_{dch,k,i,t}^{EV})^T S P_{dch,k,i,t}^{EV} + ct \quad E\ 4-45$$

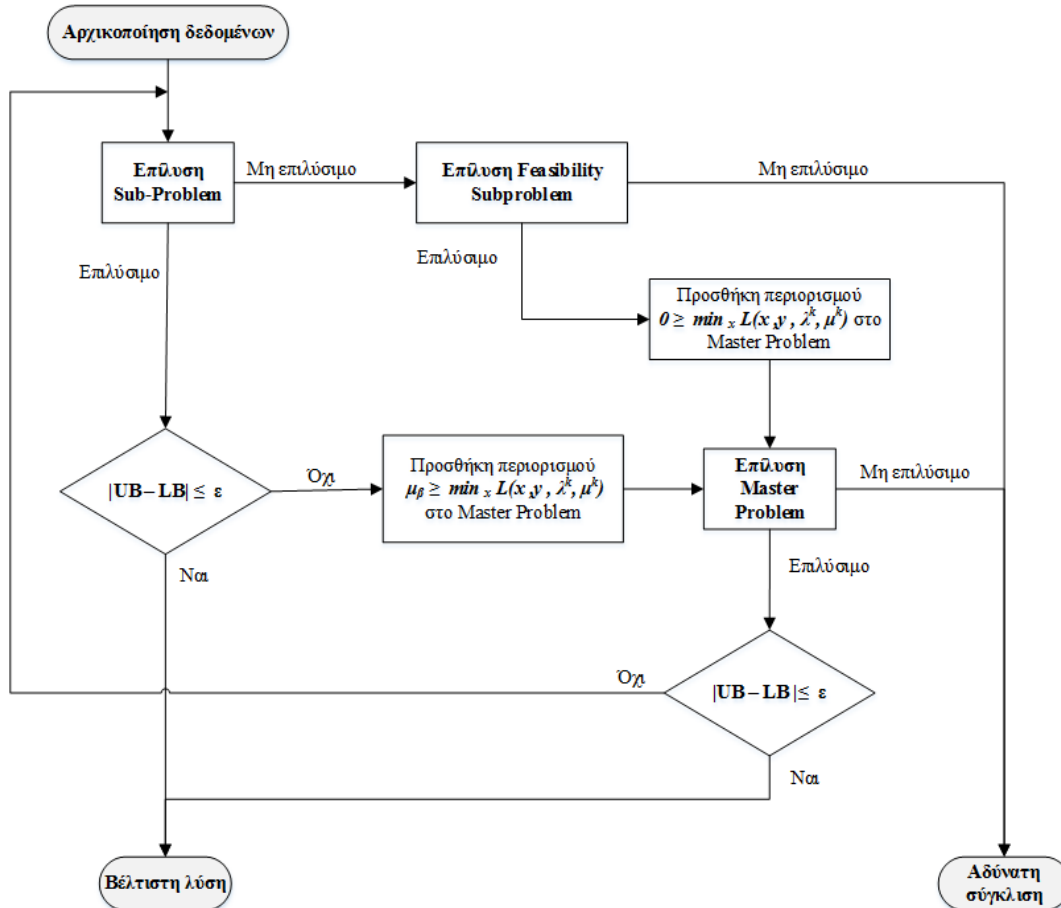
Όπου  $ct = \frac{1}{2}(P_{ch,k-1,i,t}^{EV} - P_{dch,k-1,i,t}^{EV})^2$ ,  $c = p^v - P_{ch,k-1,i,t}^{EV} + P_{dch,k-1,i,t}^{EV}$ ,  $d = -c$ ,  $Q_{TxT} = \begin{cases} 1 & \text{for } i = j \\ 0 & \text{for } i \neq j \end{cases}$ ,  $R = -Q_{TxT}$ ,  $S = Q$

μ.π.

(E 4-14) → περιορισμός με ακέραιες μεταβλητές

(E 4-13), (E 4-17), (E 4-18), (E 4-19) → περιορισμοί με συνεχείς μεταβλητές

(E 4-15), (E 4-16) → περιορισμοί με συνεχείς και ακέραιες μεταβλητέ



Εικόνα 4-8 Διάγραμμα ροής για την επίλυση μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού με τη μέθοδο GBD

**Sub-problem (SP) της GBD**

$$\min_{P_{ch,k,i,t}^{EV}, P_{dch,k,i,t}^{EV}, u_c^v, u_d^v} \{f_i^k(t, P_{k,i,t}^{EV}, P_{k-1,i,t}^{EV})\} = c^T P_{ch,k,i,t}^{EV} + d^T P_{dch,k,i,t}^{EV} + \frac{1}{2}(P_{ch,k,i,t}^{EV})^T Q P_{ch,k,i,t}^{EV} + \frac{1}{2}(P_{ch,k,i,t}^{EV})^T R P_{dch,k,i,t}^{EV} + \frac{1}{2}(P_{dch,k,i,t}^{EV})^T S P_{dch,k,i,t}^{EV} + ct \quad E\ 4-46$$

μ.π.

(E 4-13), (E 4-17), (E 4-18), (E 4-19) → περιορισμοί με συνεχείς μεταβλητές

(E 4-15), (E 4-16) → περιορισμοί με συνεχείς και προκαθορισμένες ακέραιες μεταβλητές

**Relaxed Master Problem (MP) της GBD**

$$\min_{u_c, t, u_d, \mu_\beta} \mu_\beta \quad E\ 4-47$$

μ.π.

$$(E\ 4-14) \rightarrow \text{περιορισμός με ακέραιες μεταβλητές}$$

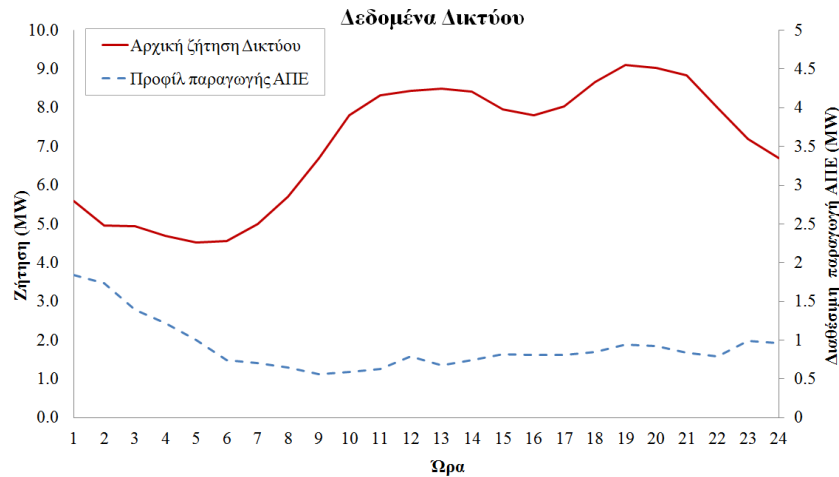
$$\mu_{\beta} \geq \inf_{P^{EV} \in R_{\geq 0}} L(P_{k,i,t}^{EV}, u_{c,t}, u_{d,t}, \lambda, \mu), \quad \text{αν το (SP) είναι επιλύσιμο}$$

$$0 \geq \inf_{P^{EV} \in R_{\geq 0}} \bar{L}(P_{k,i,t}^{EV}, u_{c,t}, u_{d,t}, \bar{\lambda}, \bar{\mu}), \text{αν το (SP) δεν είναι επιλύσιμο}$$

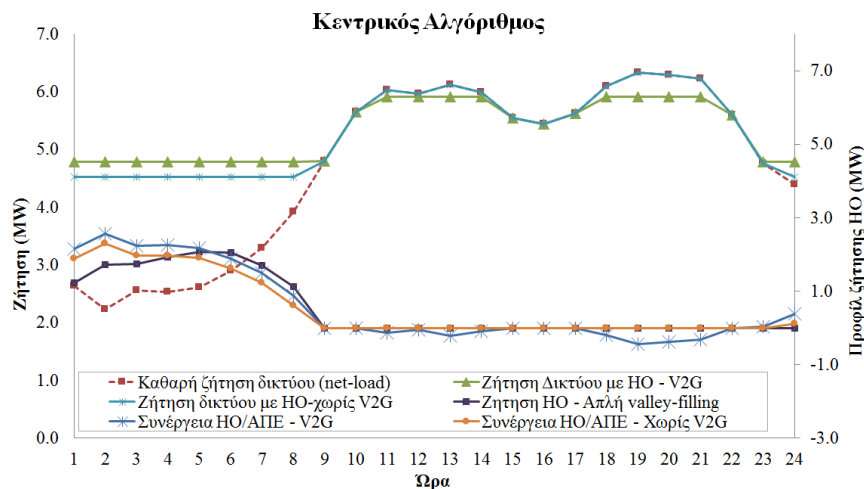
**Αριθμητικά Παραδείγματα**

**Α. Κεντρικός Αλγόριθμος**

Ας υποθέσουμε ένα στόλο 1000 ηλεκτρικών οχημάτων με τα εξής χαρακτηριστικά: χωρητικότητα μπαταρίας  $C_{bat,i}=21\text{kWh}$ , απώλειες φόρτισης λόγω ηλεκτρονικών ισχύος  $C_{eff}=0.85$ , ονομαστική ισχύς φόρτισης σταθμού  $P_{nomCS}=3\text{kW}$ , κατανάλωση μπαταρίας λόγω μετακίνησης των οχημάτων  $P_{trip,i,t}^{EV}=55\% C_{bat,i}$ . Για τις ανάγκες του αλγορίθμου θεωρούμε μια υποθετική καμπύλη φορτίου καθώς και μια καμπύλη αιολικής παραγωγής (Εικόνα 4-9). Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του κεντρικού αλγορίθμου (E 4-12) – (E 4-19) απεικονίζονται στην Εικόνα 4-10 για διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης, πχ. αμφίδρομη ή μη ροή ισχύος, “valley-filling” (μέθοδος Κεφαλαίου 3 της παρούσας διατριβής χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η παραγωγή από ΑΠΕ), συνέργεια ηλεκτρικών αυτοκινήτων και ΑΠΕ κτλ. Η επιπρόσθετη ημερήσια αύξηση της ζήτησης φόρτισης λόγω της V2G λειτουργίας είναι περίπου 18.2% (2.47MW). Συγκριτικά με την απλή στρατηγική φόρτισης “valley-filling”, η προτεινόμενη μεθοδολογία μετατοπίζει μέρος της ζήτησης φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων σε χρονικές στιγμές με υψηλή παραγωγή ΑΠΕ.



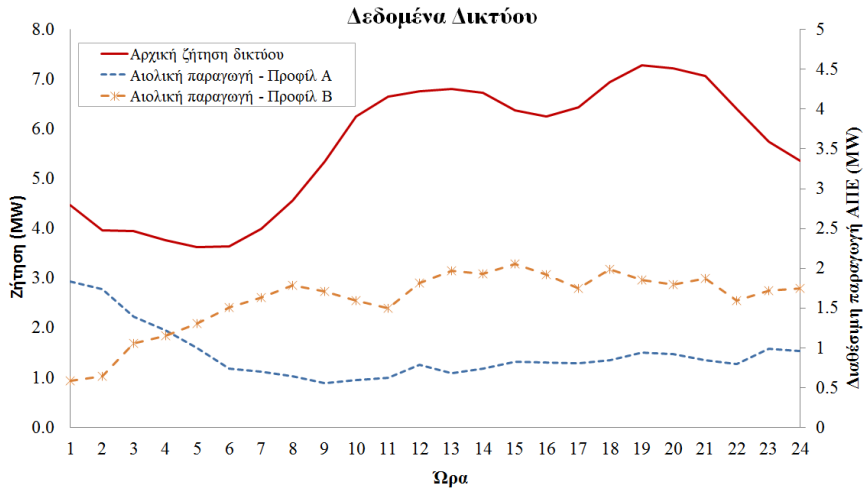
Εικόνα 4-9 Δεδομένα δικτύου: προφίλ συμβατικής κατανάλωσης δικτύου και διαθέσιμη αιολική παραγωγή



Εικόνα 4-10 Αποτελέσματα εφαρμογής κεντρικού αλγορίθμου συνέργειας ηλεκτρικών οχημάτων/ΑΠΕ

## Β. Προτεινόμενος αποκεντρωμένος αλγόριθμος

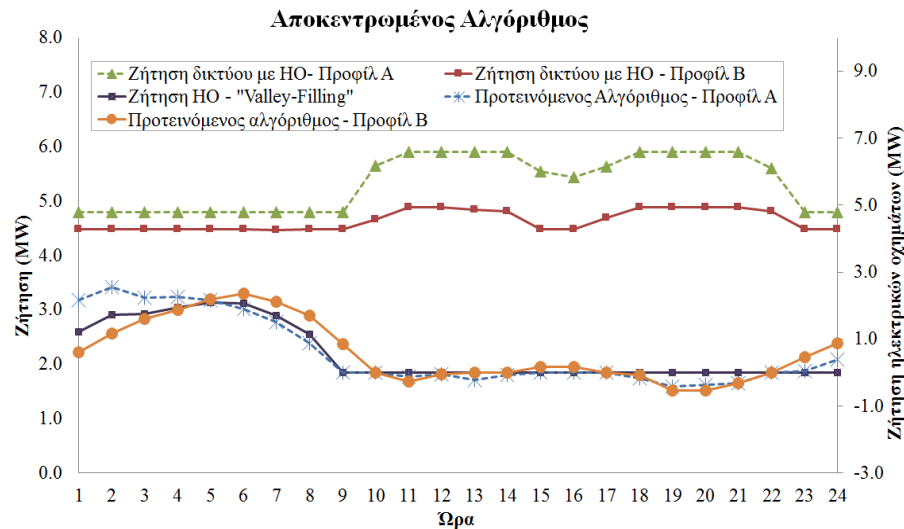
Ας θεωρήσουμε τον ίδιο στόλο ηλεκτρικών οχημάτων με την περίπτωση του κεντρικού αλγορίθμου (1000 ηλεκτρικά οχήματα με χωρητικότητα μπαταρίας  $C_{bat,i} = 21\text{kWh}$ , απώλειες φόρτισης λόγω ηλεκτρονικών ισχύος  $C_{eff} = 0.85$ , ονομαστική ισχύς φόρτιση σταθμού  $P_{nomCS} = 3\text{kW}$ , κατανάλωση μπαταρίας λόγω μετακίνησης των οχημάτων  $P_{trip,i,t}^{EV} = 55\% C_{bat,i}$ ). Θεωρούμε δύο διαφορετικά προφίλ αιολικής παραγωγής (Εικόνα 4-11) με σκοπό την αξιολόγηση της αποδοτικότητας του προτεινόμενου αποκεντρωμένου αλγορίθμου όσον αφορά στη συσχέτιση της ζήτησης φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων και της παραγωγής ΑΠΕ.



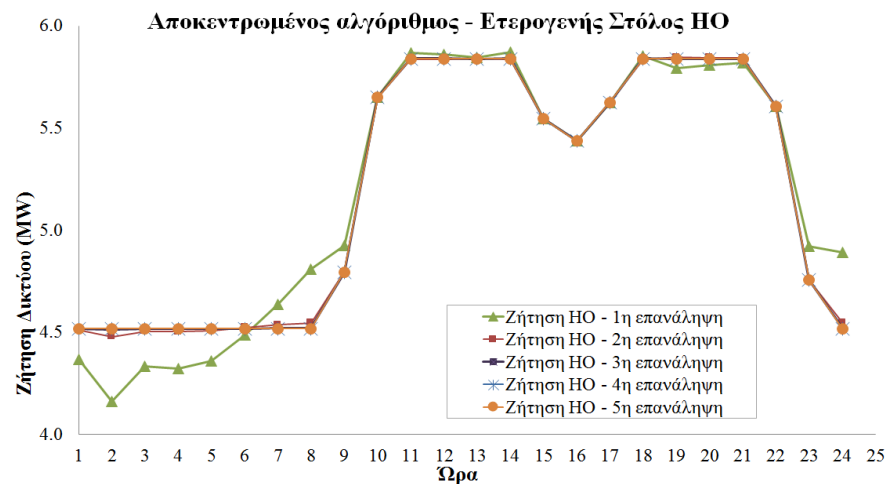
Εικόνα 4-11 Δεδομένα δικτύου: προφίλ συμβατικής κατανάλωσης δικτύου και διαθέσιμη αιολική παραγωγή

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του προτεινόμενου αποκεντρωμένου αλγορίθμου απεικονίζονται στην Εικόνα 4-12 για διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης. Από τα συγκριτικά προφίλ της ζήτησης των οχημάτων στην Εικόνα 4-12 αποδεικνύεται ότι η ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων μετατοπίζεται, κατά προτεραιότητα, σε ώρες με υψηλή παραγωγή ΑΠΕ. Εν συνεχεία, η εναπομείνουσα ζήτηση φόρτισης κατανέμεται σε ώρες με χαμηλή ζήτηση φορτίου με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση της διακύμανσης της ζήτησης του δικτύου. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του κεντρικού αλγορίθμου (Εικόνα 4-10) με τα αντίστοιχα του προτεινόμενου αποκεντρωμένου αλγορίθμου (Εικόνα 4-12) αποδεικνύεται η ισοδυναμία των δύο αυτών μεθόδων διαχείρισης της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων.

Στη συνέχεια, η σύγκλιση του προτεινόμενου αποκεντρωμένου αλγορίθμου εξετάζεται για την περίπτωση ετερογενούς στόλου οχημάτων. Για τον σκοπό αυτό, εξετάζεται ένα στόλος 1000 ηλεκτρικών οχημάτων με διαφορετικές καταναλώσεις μετακίνησης, ώρες σύνδεσης/αποσύνδεσης από το δίκτυο, διαφορετικά ποσοστά συμμετοχής στις υπηρεσίες V2G ( $Perc_i$ ). Πιο συγκεκριμένα, ο στόλος ηλεκτρικών οχημάτων αποτελείται από 150 οχήματα με  $C_{bat,i} = 24\text{kWh}$ ,  $P_{trip,i,t}^{EV} = 55\%$  and  $Perc_i = 15\%$ , 350 οχήματα με  $C_{bat,i} = 24\text{kWh}$ ,  $P_{trip,i,t}^{EV} = 65\%$  and  $Perc_i = 20\%$ , 500 οχήματα με  $C_{bat,i} = 16\text{kWh}$ ,  $P_{trip,i,t}^{EV} = 40\%$  and  $Perc_i = 10\%$ . Τα αποτελέσματα της σύγκλισης του αποκεντρωμένου αλγορίθμου για ετερογενή στόλο ηλεκτρικών οχημάτων παρουσιάζονται στην Εικόνα 4-13 όπου αποδεικνύεται ότι ο αποκεντρωμένος αλγόριθμος συγκλίνει στη βέλτιστη λύση μετά από ελάχιστες επαναλήψεις.



Εικόνα 4-12 Αποτελέσματα εφαρμογής αποκεντρωμένου αλγορίθμου συνέργειας ηλεκτρικών οχημάτων/ΑΠΕ



Εικόνα 4-13 Αποτελέσματα σύγκλισης αποκεντρωμένου αλγορίθμου για ετερογενή στόλο ηλεκτρικών οχημάτων

#### 4.3.1.5 Διαχείριση σφαλμάτων πρόβλεψης παραγωγής ΑΠΕ/ φορτίου ζήτησης

Για την επίτευξη της συνέργειας ηλεκτρικών οχημάτων και ΑΠΕ είναι απαραίτητη η πρόβλεψη τόσο του συμβατικού (μη ελεγχόμενου) φορτίου του δικτύου όσο και της παραγωγής από ΑΠΕ. Το σφάλμα πρόβλεψης εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως για παράδειγμα το επίπεδο του δικτύου για οποίο ζητείται η πρόβλεψη, το μέγεθος ενός πάρκου ΑΠΕ, τον χρονικό ορίζοντα της πρόβλεψης, η χωρική ανάλυση του πάρκου κτλ ([171]-[178]). Συνήθως το σφάλμα πρόβλεψης είναι μεγαλύτερο στα χαμηλότερα επίπεδα του δικτύου (χαμηλά τάση) λόγω εντονότερης στοχαστικότητας του φορτίου καθώς και για μεγάλο χρονικό ορίζοντα. Επιπρόσθετα, το σφάλμα πρόβλεψης για το φορτίο του δικτύου (<5% [171]) είναι συνήθως αρκετά μικρότερο από το αντίστοιχο σφάλμα πρόβλεψης των ΑΠΕ (>10% [178]).

Η ακρίβεια της πρόβλεψης μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την απόδοση οποιοδήποτε αλγορίθμου διαχείρισης ηλεκτρικών οχημάτων (κεντρικού και αποκεντρωμένου). Στον προτεινόμενο αποκεντρωμένο αλγόριθμο, τα σήματα ελέγχου που παράγονται από τον περιφερειακό αθροιστή (RAU) στηρίζονται στην πρόβλεψη της παραγωγής ΑΠΕ και του συμβατικού (μη ελεγχόμενου) φορτίου του δικτύου. Ο αλγόριθμος αυτός είναι περισσότερο αποδοτικός όταν εφαρμόζεται σε δίκτυα διανομής Μ.Τ. μιας και στα δίκτυα διανομής Χ.Τ. η

πρόβλεψη παραγωγής από ΑΠΕ είναι δυσκολότερη λόγω της υψηλής μεταβλητότητας της παραγωγής τους.

Η διαχείριση των σφαλμάτων πρόβλεψης του φορτίου/ΑΠΕ ώστε να μην επηρεάζεται η σύγκλιση των αλγορίθμων διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων αντιμετωπίζεται μέσω δύο ισοδύναμων μεθόδων: τη μέθοδο βελτιστοποίησης κυλιόμενων πολλαπλών περιόδων (“rolling multi-period optimization method”, [179]-[180]) και τη μέθοδο προβλεπτικών μοντέλων ελέγχου (“model predictive control”, [181]). Σύμφωνα με τις παραπάνω μεθόδους, κάθε χρονικό διάστημα  $t$ , ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης λαμβάνει υπόψη του την τρέχουσα κατάσταση του δικτύου (π.χ. συμβατικό φορτίο δικτύου μέσω πραγματικών μετρήσεων, πραγματική παραγωγή ΑΠΕ, συνδεδεμένα ηλεκτρικά οχήματα, κτλ.) καθώς και τη μελλοντική κατάσταση του δικτύου για έναν χρονικό ορίζοντα  $T$ , βάσει των βραχυχρόνιων προβλέψεων για την παραγωγή των ΑΠΕ και για τη ζήτηση του δικτύου. Βάσει των τωρινών μετρήσεων φορτίου/παραγωγής καθώς και των προβλεπόμενων τιμών τους, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης παράγει μια χρονοσειρά με σημεία λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων (επίπεδο φόρτισης/εκφόρτισης) για κάθε ηλεκτρικό όχημα για όλο το εξεταζόμενο χρονικό διάστημα  $T$ . Από την παραπάνω χρονοσειρά, μόνο το βέλτιστο σημείο που αφορά στο τρέχων χρονικό διάστημα  $t$  εφαρμόζεται τελικά. Για το επόμενο χρονικό διάστημα  $t+1$ , ο χρονικός ορίζοντας βελτιστοποίησης μετατοπίζεται κατά ένα χρονικό διάστημα μπροστά και το πρόβλημα βελτιστοποίησης επιλύεται ξανά λαμβάνοντας υπόψη τις μετρούμενες τιμές για τη ζήτηση δικτύου και την παραγωγή ΑΠΕ καθώς και των αντίστοιχων προβλεπόμενων τιμών τους. Ως εκ τούτου, τα σφάλματα πρόβλεψης εξαλείφονται (τελείως ή εν μέρει) με την εκτέλεση πολλαπλών επαναλήψεων του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, λαμβάνοντας υπόψη τις μετρούμενες και προβλεπόμενες τιμές ζήτησης δικτύου και παραγωγής ΑΠΕ, και ρυθμίζοντας αντίστοιχα τον χρονικό ορίζοντα βελτιστοποίησης.

Δεδομένου ότι η απόφαση βελτιστοποίησης βασίζεται στην τρέχουσα μετρούμενη κατάσταση του δικτύου (της ζήτησης σε πραγματικό χρόνο και μετρήσεις παραγωγής ΑΠΕ), θεωρείται ότι η κατάσταση του δικτύου παραμένει ίδια ή σχεδόν ίδια κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος  $t$ . Αυτό ισχύει εάν επιλεγεί σχετικά μικρό χρονικό βήμα προσομοίωσης για τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Ωστόσο, η μείωση του χρονικού βήματος βελτιστοποίησης αυξάνει τον αριθμό των μεταβλητών/περιορισμών και συνεπώς τον υπολογιστικό χρόνο του προβλήματος βελτιστοποίησης. Ως εκ τούτου, θα πρέπει να υπάρχει ένας συμβιβασμός ανάμεσα στην ακρίβεια επίλυσης και στο χρόνο σύγκλισης του προβλήματος βελτιστοποίησης. Στα αριθμητικά παραδείγματα στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού, το χρονικό βήμα βελτιστοποίησης είναι ίσο με μια ώρα για χρονικό ορίζοντα 24 ωρών.

#### 4.3.2 Εφαρμογή αποκεντρωμένου αλγορίθμου σε δίκτυα διανομής Μ.Τ.

Στην ενότητα αυτή ο προτεινόμενος αποκεντρωμένος αλγόριθμος εφαρμόζεται σε πραγματικά μοντέλα προσομοίωσης δικτύων διανομής με σκοπό την αξιολόγηση του όσον αφορά στη λειτουργία του δικτύου (προφίλ τάσης, απώλειες δικτύου, μέγιστο όριο διείσδυσης ΑΠΕ, μέγιστος αριθμός διασύνδεσης ηλεκτρικών οχημάτων). Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται δύο γραμμές αναχώρησης επαρχιακών δικτύων διανομής Μ.Τ (Ικαρίας και Σπερχειάδας) με διαφορετικά λειτουργικά χαρακτηριστικά και ΑΠΕ (αιολικά και φωτοβολταϊκά, αντίστοιχα). Τα χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων δικτύων παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

Όσον αφορά στον στόλο ηλεκτρικών οχημάτων, τέσσερις κατηγορίες ηλεκτρικών οχημάτων αναλόγως με το μέγεθος τους και τη χρήση τους εξετάζονται, L7e, M1, N1 και N2 (Κεφάλαιο 1 της παρούσας διατριβής). Ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων σε κάθε κατηγορία καθορίζεται ως ποσοστό επί του συνολικού αριθμού ηλεκτρικών οχημάτων, π.χ. 1% L7e, 88% M1, 10% N1 and 1% N2. Το μέγιστο επίπεδο φόρτισης για κάθε μια από τις παραπάνω κατηγορίες εμφανίζεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4-2).

Το προφίλ μετακίνησης τους καθορίζεται από τον χρόνο άφιξης/αναχώρησης, την ημερήσια διανυόμενη απόσταση και τη μέση κατανάλωση της μπαταρίας (kWh/km). Ο χρόνος άφιξης και αναχώρησης είναι μια στοχαστική παράμετρος εισόδου που προσδιορίζεται από μια κανονική κατανομή με μέση τιμή 6:00πμ/8:00μμ και τυπική απόκλιση μια/δύο ώρες. Για την ημερήσια διανυόμενη απόσταση υιοθετήθηκε μια εκθετική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας με μέση τιμή



35χιλ./45χιλ για Καθημερινές/Σαββατοκύριακα. Η κατανάλωση της μπαταρίας εξαρτάται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού οχήματος. Πιο συγκεκριμένα, η μέση κατανάλωση για κάθε κατηγορία ηλεκτρικών οχημάτων είναι (0.13 kWh/χιλ για L7e, 0.16 kWh/χιλ. για M1, 0.24 kWh/χιλ για N1 and 0.8 kWh/χιλ για N2).

Διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης θα εξεταστούν στη συνέχεια και θα συγκριθούν με σκοπό την αξιολόγηση της προτεινόμενης αποκεντρωμένης μεθόδου για τη συνέργεια ηλεκτρικών οχημάτων και ΑΠΕ. Πιο αναλυτικά, οι στρατηγικές που θα προσομοιωθούν είναι οι εξής:

- ✓ **Στρατηγική Α –“Μη ελεγχόμενη Φόρτιση”**: Οικιακή σύνδεση στο δίκτυο και μη-ελεγχόμενη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων αμέσως μετά το τελευταίο ημερήσιο ταξίδι τους (λειτουργία “plug-and-play”).
- ✓ **Στρατηγική Β –“Διζωνικό τιμολόγιο”**: Το διζωνικό τιμολόγιο είναι ένας απλός μηχανισμός για την μετατόπιση φορτίου σε ώρες με χαμηλή κατανάλωση.
- ✓ **Στρατηγική Γ–“Εξυπνη φόρτιση-“Valley-Filling”**: Εφαρμογή της στρατηγικής “valley-filling” που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας διατριβής λαμβάνοντας υπόψη την παραγωγή από ΑΠΕ.
- ✓ **Στρατηγική Δ–“Εξυπνη φόρτιση –Συνέργεια ΗΟ/ΑΠΕ με V2G”**: Εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου για τη συνέργεια ηλεκτρικών οχημάτων και ΑΠΕ θεωρώντας αμφίδρομη ροή ισχύος.

**Πίνακας 4-2: Μέγιστο επίπεδο φόρτισης για κάθε κατηγορία ηλεκτρικών οχημάτων**

	EV Fleet classification			
	% L7e	% M1	% N1	% N2
<b>Mode 1 (3.6kW)</b>	90	85	85	0
<b>Mode 2 (11kW)</b>	10	10	10	80
<b>Mode 3 (45kW)</b>	0	5	5	20

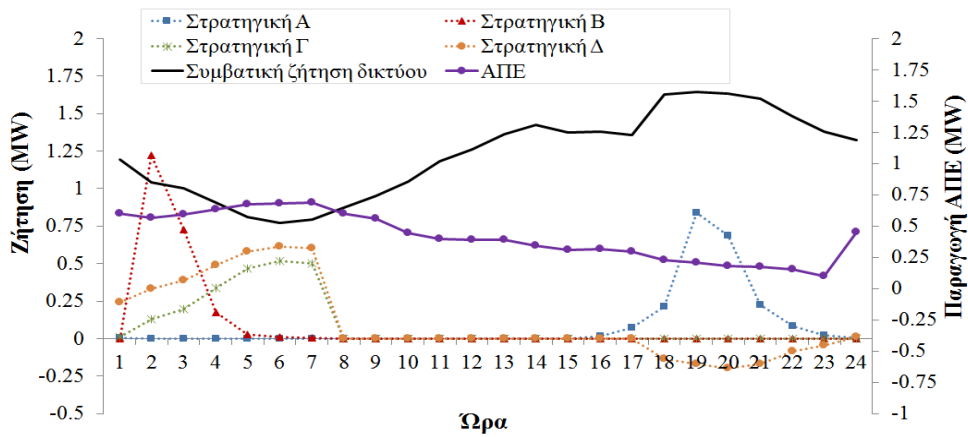
#### 4.3.2.1 Γραμμή αναχώρησης επαρχιακού δικτύου διανομής στην Ικαρία

Η γραμμή αναχώρησης που θα εξεταστεί ανήκει στο βόρειο-δυτικό τμήμα του αυτόνομου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας της Ικαρίας. Η γραμμή (15kV, μήκους 50 χιλιομέτρων) περιλαμβάνει 57 υποσταθμούς και 2 αιολικά πάρκα. Όσον αφορά στην εγκατεστημένη ισχύ των αιολικών πάρκων, διαφορετικά σενάρια διείσδυσης θα εξεταστούν θεωρώντας σταθερό συντελεστή ισχύος 0,95 (επαγωγικός). Η αιχμή της ζήτησης της γραμμής είναι περίπου 2MVA.

Αρχικά, θεωρείται ένας στόλος 300 ηλεκτρικών οχημάτων με τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Η εγκατεστημένη ισχύς των αιολικών πάρκων είναι ίση με 1MW. Βάσει αυτών, τα αποτελέσματα από την εφαρμογή των διαφορετικών στρατηγικών φόρτισης παρουσιάζονται στην Εικόνα 4-14. Στη στρατηγική Α, η ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων συγχρονίζεται με την περίοδο υψηλής οικιακής κατανάλωσης. Αυτό έχει ως συνέπεια την απότομη αύξηση της αιχμής ζήτησης του δικτύου επηρεάζοντας αρνητικά την ποιότητα της τάσης καθώς και τις συνολικές απώλειες της γραμμής (Εικόνα 4-15 - Εικόνα 4-16). Οι συνολικές ημερήσιες ενεργειακές ανάγκες τους ανέρχονται σε 2.17MWh. Η εφαρμογή ενός διζωνικού τιμολογίου (Στρατηγική Β) μετατοπίζει την αιχμή ζήτησης των οχημάτων σε ώρες με χαμηλή κατανάλωση. Ωστόσο, δημιουργείται μια απότομη αιχμή φόρτισης κατά την έναρξη του χαμηλού τιμολογίου ενέργειας. Επομένως, η απλή εφαρμογή διζωνικού τιμολογίου δεν είναι αρκετά αποδοτική λαμβάνοντας ως κριτήρια αποδοτικότητας την τάση (Εικόνα 4-15) και τις απώλειες (Εικόνα 4-16). Οι στρατηγικές φόρτισης Γ και Δ μετατοπίζουν τη ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων σε ώρες χαμηλής κατανάλωσης δίνοντας προτεραιότητα στα χρονικά διαστήματα με υψηλή παραγωγή ΑΠΕ. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται αποδοτικότερη αξιοποίηση των τοπικών διαθέσιμων ενεργειακών πόρων η οποία αντικατοπτρίζεται στο προφίλ της τάσης καθώς και στις απώλειες του δικτύου. Τα οφέλη μεγιστοποιούνται στην περίπτωση που υιοθετείται η αμφίδρομη λειτουργία των ηλεκτρικών οχημάτων (V2G). Η ενέργεια που αποδίδεται στο δίκτυο λόγω της V2G λειτουργίας είναι ίση με 0.8MWh. Η ανάκτηση της από το δίκτυο για την πλήρη φόρτιση των

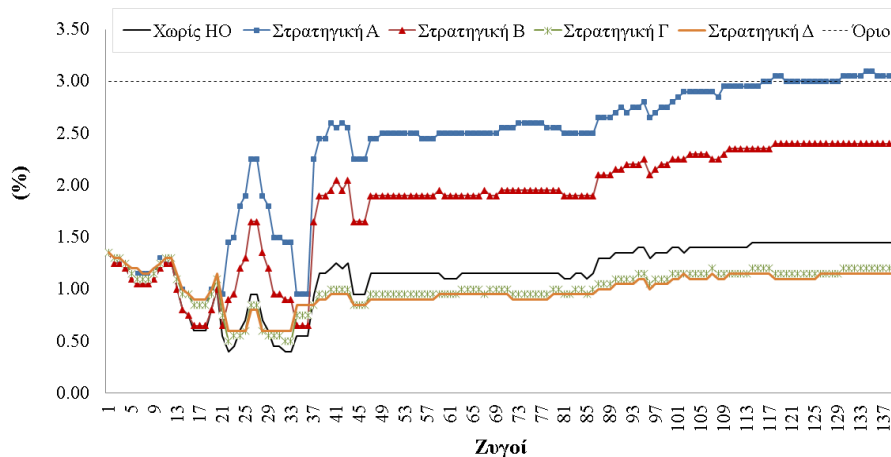
μπαταριών του στόλου των οχημάτων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των ημερήσιων ενεργειακών τους αναγκών κατά 50%. Στην Εικόνα 4-15 απεικονίζεται η διακύμανση τάσης για τις διάφορες στρατηγικές φόρτισης. Το όριο διακύμανσης της τάσης καθορίζεται από το πρότυπο EN50160 και είναι ίσο με 10%. Στην πραγματικότητα, πολλοί διαχειριστές δικτύων διανομής λαμβάνουν αυστηρότερα λειτουργικά όρια για την τάση των δικτύων διανομής Μ.Τ, όπως για παράδειγμα η Αυστρία (2-3%), το Βέλγιο (3%), η Τσεχία (2-3%) Γερμανία (2%) κτλ. Ως εκ τούτου, στην παρούσα μελέτη το όριο για τη διακύμανση της τάσης θεωρείται ίσο 3%.

**Ζήτηση Ηλεκτρικών Οχημάτων**

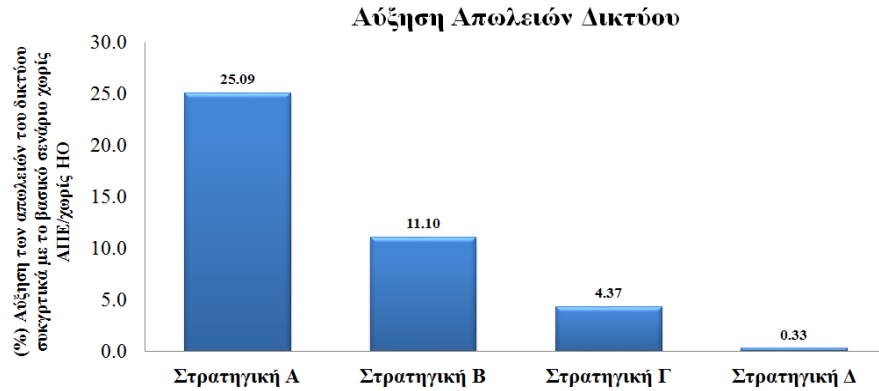


**Εικόνα 4-14 Ζήτηση 300 ηλεκτρικών οχημάτων για διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης (300 HO, 1MW ΑΠΕ, V2G - 10% Cbat)**

**Διακύμανση Τάσης**



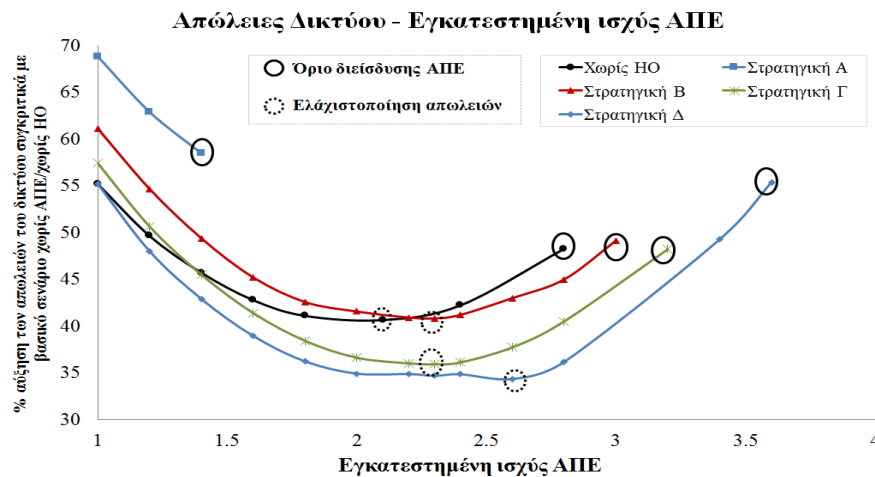
**Εικόνα 4-15 Διακύμανση τάσης ανά ζυγό του δικτύου διανομής για διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης (300 HO, 1MW ΑΠΕ, V2G - 10% Cbat)**



**Εικόνα 4-16 Απώλειες δικτύου διανομής για διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης (300 ΗΟ, 1ΜW ΑΠΕ, V2G - 10%Cbat)**

Στη συνέχεια, για την αναλυτικότερη αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του προτεινόμενου αλγορίθμου συνέργειας ηλεκτρικών οχημάτων/ΑΠΕ όσον αφορά στη βελτίωση του μέγιστου ορίου διείσδυσης ΑΠΕ στο δίκτυο διανομής, εξετάζονται διαφορετικά σενάρια διείσδυσης ΑΠΕ. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής για τις διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης παρουσιάζονται στην Εικόνα 4-17 στην οποία απεικονίζονται οι απώλειες του δικτύου (ως ποσοστό των απωλειών του βασικού σεναρίου χωρίς ΑΠΕ/χωρίς ΗΟ) εν συναρτήσεως της εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ. Τα κυκλωμένα σημεία των καμπυλών υποδηλώνουν το μέγιστο όριο διείσδυσης ΑΠΕ του δικτύου για το εκάστοτε σενάριο, λαμβάνοντας ως κριτήριο τους περιορισμούς λειτουργίας της τάσης. Η ενσωμάτωση μεγαλύτερων ποσοστών διείσδυσης ΑΠΕ και η απορρόφηση της παραγωγής τους σε τοπικό επίπεδο έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών του δικτύου. Ωστόσο, σε κάθε σενάριο υπάρχει ένα άνω όριο διείσδυσης ΑΠΕ (κυκλικά σημεία με διακεκομμένη γραμμή) πέραν του οποίου οι απώλειες δικτύου αρχίζουν να αυξάνονται λόγω της ανάστροφης ροής ισχύος.

Όπως είναι εμφανές από τα αποτελέσματα στην Εικόνα 4-17, η προτεινόμενη μεθοδολογία της συνέργειας μεταξύ ηλεκτρικών οχημάτων και ΑΠΕ (Στρατηγική Δ) πλεονεκτεί έναντι όλων των άλλων στρατηγικών φόρτισης μιας και συντελεί αποδοτικότερα στη μείωση των απωλειών καθώς και στην αύξηση του μέγιστου ορίου διασύνδεσης ΑΠΕ.



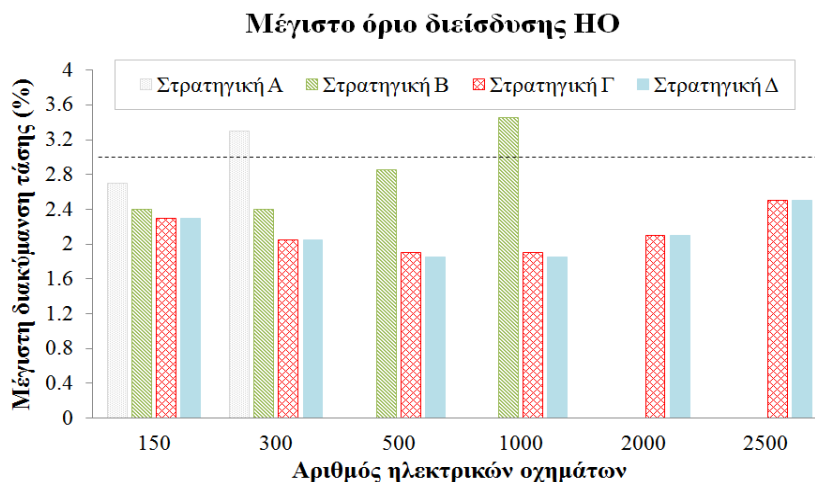
**Εικόνα 4-17 Ανάλυση ευαισθησίας ως προς την εγκατεστημένη ισχύ ΑΠΕ (300 ΗΟ, V2G - 10%Cbat)**

Η γραμμή του δικτύου διανομής της Ικαρίας που εξετάζεται, είναι μια επαρχιακή γραμμή. Σύμφωνα με την ανάλυση του Κεφαλαίου 2 της παρούσας διατριβής, η ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων σε επαρχιακά δίκτυα αναμένεται να επηρεάσει του προφίλ της τάσης (κυρίως τη διακύμανση της) λόγω των έντονων πτώσεων τάσης που παρατηρούνται εξ αιτίας του μεγάλου μήκους των γραμμών τους. Οι περιορισμοί λειτουργίας της τάσης είναι, επομένως, εκείνοι που καθορίζουν τελικά το μέγιστο όριο διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων σε μια γραμμή ενός επαρχιακού δικτύου διανομής. Για το λόγο αυτό, στη συνέχεια προσδιορίζεται η μέγιστη

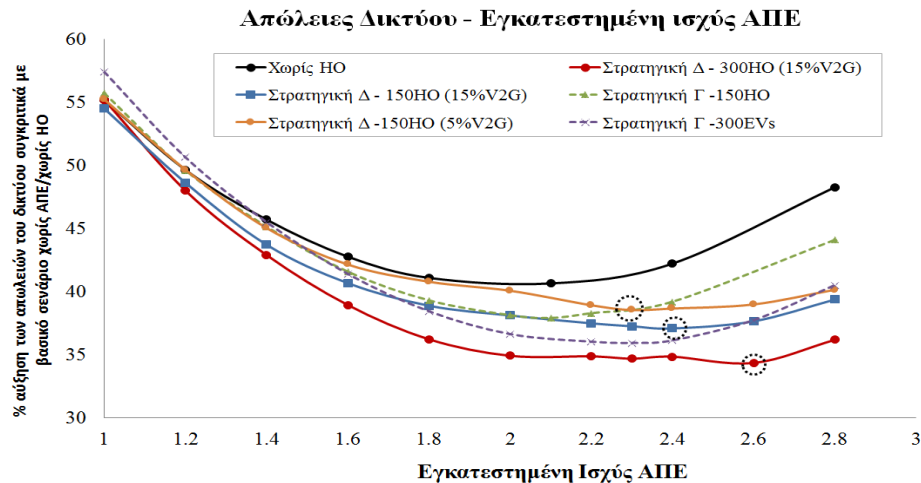
διακύμανση της τάσης της γραμμής εξετάζοντας διαφορετικά σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων και διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης (Εικόνα 4-18). Η εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ, στη συγκεκριμένη περίπτωση, θεωρείται ίση με 2.1MW που είναι το βέλτιστο όριο διείσδυσης ΑΠΕ (λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες δικτύου) όταν η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων είναι μηδενική. Η διακεκομμένη γραμμή απεικονίζει το θεωρούμε μέγιστο όριο διακύμανσης για την παρούσα ανάλυση πέραν του οποίου δεν επιτρέπεται περαιτέρω αύξηση του αριθμού ηλεκτρικών οχημάτων (να σημειωθεί ότι στην παρούσα μελέτη δε λαμβάνονται υπόψη οι διάφορες πρακτικές διόρθωσης της τάσης σε ένα δίκτυο διανομής).

Η προτεινόμενη μεθοδολογία της συνέργειας ΗΟ/ΑΠΕ μπορεί εν μέρει να περιορίσει την αύξηση της διακύμανσης της τάσης επιτρέποντας την ενσωμάτωση μεγαλύτερου αριθμού ηλεκτρικών οχημάτων χωρίς την απαίτηση για αναβάθμιση των υποδομών του δικτύου ή την εφαρμογή τεχνικών διόρθωσης της τάσης. Η μη ελεγχόμενη φόρτιση (Στρατηγική Α) περιορίζει αισθητά τον μέγιστο όριο διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων. Η εφαρμογή απλών στρατηγικών ελέγχου όπως το διζωνικό τιμολόγιο (Στρατηγική Β) αυξάνει το μέγιστο όριο διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων συγκριτικά με τη μη ελεγχόμενη φόρτιση, ωστόσο υστερεί κατά πολύ των δύο άλλων προχωρημένων έξυπνων στρατηγικών φόρτισης, δηλαδή την απλή “valley-filling” και τον προτεινόμενο αλγόριθμο συνέργειας ΑΠΕ/ΗΟ. Σε αντίθεση λοιπόν με τις άλλες στρατηγικές, η μέγιστη διακύμανση της τάσης στις στρατηγικές φόρτισης Γ και Δ μειώνεται καθώς αυξάνει ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων, για μικρά και μεσαία ποσοστά διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων (<1000 οχήματα). Για μεγαλύτερα ποσοστά διείσδυσης, η διαθέσιμη χωρητικότητα μπαταρίας για V2G λειτουργίες δεν μπορεί να αξιοποιηθεί λόγω των υψηλών ενεργειακών αναγκών των ηλεκτρικών οχημάτων.

Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, είναι προφανές πλέον ότι υπάρχει μια πολύ έντονη συσχέτιση μεταξύ του μέγιστου ορίου διείσδυσης ΑΠΕ και ηλεκτρικών οχημάτων σε μια γραμμή ενός επαρχιακού δικτύου διανομής. Το βέλτιστο όριο διείσδυσης ΑΠΕ, συγκριτικά με τις απώλειες του δικτύου, αυξάνει καθώς αυξάνει ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων που συμμετέχουν στην V2G λειτουργία υπό την προτεινόμενη στρατηγική φόρτισης (Στρατηγική Δ) και αντίστροφα. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει και από τα αποτελέσματα στην Εικόνα 4-19, όπου εξετάζονται οι απώλειες του δικτύου συγκριτικά με την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ και της διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων. Επιπρόσθετα, η εντονότερη συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στη λειτουργία V2G, εκφρασμένο ως ποσοστό (%) της χωρητικότητας της μπαταρίας τους, μπορεί να μειώσει περαιτέρω τις απώλειες του δικτύου επιτρέποντας μεγαλύτερα ποσοστά διείσδυσης ΑΠΕ στη γραμμή διανομής.



Εικόνα 4-18 Μέγιστη διακύμανση τάσης για διαφορετικά σενάρια διείσδυσης ΗΟ και στρατηγικές φόρτισης (2.1MW ΑΠΕ)

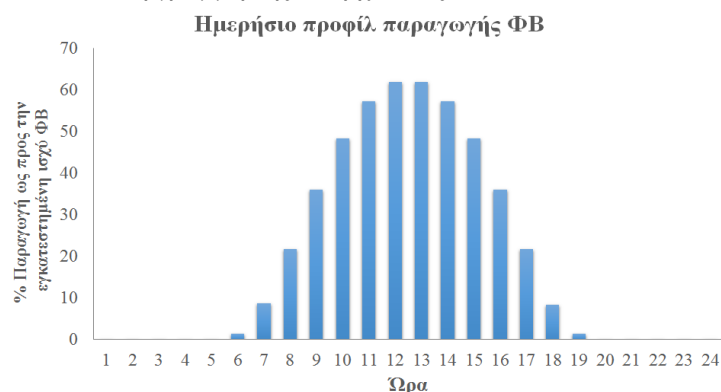


Εικόνα 4-19 Συνέργεια ηλεκτρικών οχημάτων και ΑΠΕ (Στρατηγική Γ και Δ)

#### 4.3.2.2 Γραμμή αναχώρησης επαρχιακού δικτύου διανομής στη Σπερχειάδα

Στην προηγούμενη ενότητα αναλύθηκε και σχολιάστηκε η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας για την συνέργεια ηλεκτρικών οχημάτων και ΑΠΕ σε μια γραμμή ενός επαρχιακού δικτύου διανομής Μ.Τ. που διαθέτει αιολική παραγωγή για την εξυπηρέτηση μέρους της ζήτησης του δικτύου. Στην ενότητα αυτή θα αναλυθεί η μελέτη μιας γραμμής του επαρχιακού δικτύου διανομής της Σπερχειάδας που διαθέτει φωτοβολταϊκή παραγωγή για την εξυπηρέτηση της ζήτησης. Ο λόγος που εξετάζεται το δίκτυο της Σπερχειάδας είναι το γεγονός ότι το προφίλ της φωτοβολταϊκής παραγωγής είναι διαφορετικό από το αντίστοιχο της αιολικής παραγωγής, οπότε κρίνεται σημαντική η μελέτη της επίδρασης των διαφορετικών προφίλ ΑΠΕ στην απόδοση του προτεινόμενου αλγορίθμου συνέργειας ΑΠΕ/ΗΟ.

Για τη φωτοβολταϊκή παραγωγή, θεωρήθηκε το παρακάτω ωριαίο, ημερήσιο φωτοβολταϊκό προφίλ παραγωγής ως ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών κατανέμεται χωρικά και ποσοτικά με αναλογικό τρόπο βάσει της πραγματικής κατανομής φωτοβολταϊκών στη γραμμή της Σπερχειάδας.

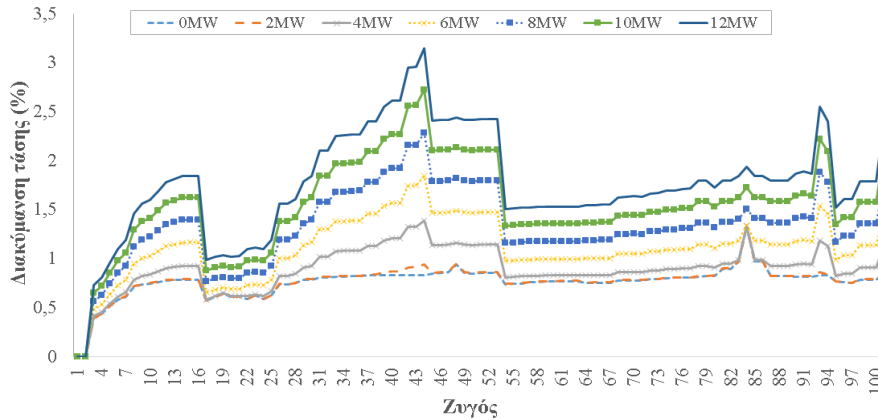


Εικόνα 4-20 Ωριαίο ημερήσιο προφίλ παραγωγής φωτοβολταϊκών ως ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος τους

Αρχικά εξετάζουμε τη λειτουργία της γραμμής (διακύμανση τάσης και απώλειες γραμμής) χωρίς την ενσωμάτωση ηλεκτρικών οχημάτων. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζουμε το μέγιστο όριο διείσδυσης ΦΒ μέχρι το οποίο δεν παραβιάζονται τα όρια της τάσης ( $0.95 \leq V_{\zeta\omega\gamma\acute{o}\upsilon} \text{ (pu)} \leq 1.05$ ,  $\Delta V \leq 3\%$ ). Στην Εικόνα 4-21 απεικονίζεται το προφίλ της διακύμανσης της τάσης ανά ζυγό για διαφορετικά σενάρια εγκατεστημένης ισχύος ΦΒ. Η διακύμανση της τάσης παραβιάζει το όριο του 3% για εγκατεστημένη ισχύ ΦΒ 12MW. Μειώνοντας το βήμα προσομοίωσης για την

εγκατεστημένη ισχύ ΦΒ, προκύπτει ότι η διακύμανση της τάσης αγγίζει το άνω όριο στην περίπτωση που η εγκατεστημένη ισχύς γίνει ίση με 11.1MW.

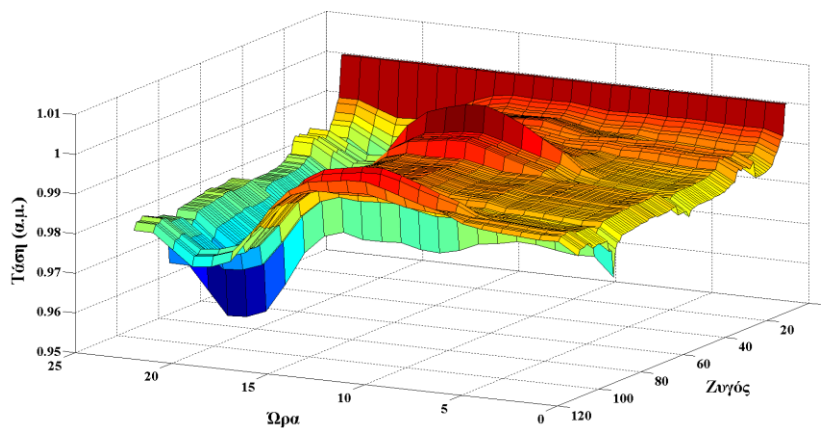
Διακύμανση τάσης ανά ζυγό



Εικόνα 4-21 Διακύμανση της τάσης των ζυγών του δικτύου για διαφορετικά σενάρια διείσδυσης ΦΒ

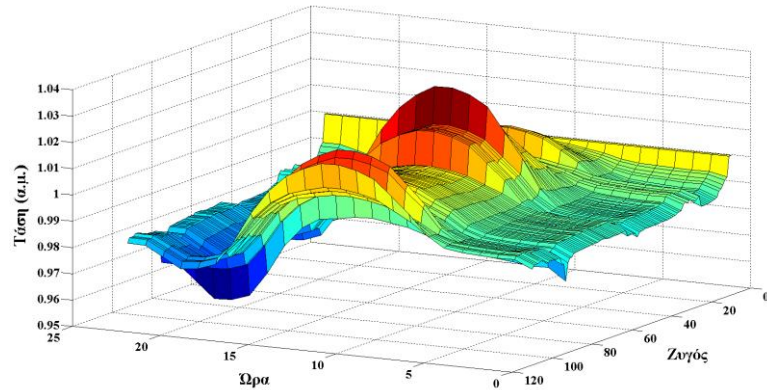
Όσον αφορά στο ημερήσιο προφίλ της τάσης, όπως αποδεικνύεται στην Εικόνα 4-22 η ελάχιστη τιμή της τάσης παραμένει σταθερή ( $V_{min,11.1MW} = 0.953$ ) και εντός ρυθμιστικών ορίων σε κάθε περίπτωση. Αυτό συμβαίνει γιατί η αιχμή του φορτίου δεν επηρεάζεται από τη φωτοβολταϊκή παραγωγή και συνεπώς η ελάχιστη τιμή της τάσης παραμένει σταθερή. Αντιθέτως, η ενσωμάτωση της τοπικής παραγωγής στο δίκτυο έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της τάσης στους ζυγούς σύνδεσης που γίνεται ακόμα πιο έντονη όσο αυξάνεται η εγκατεστημένη ισχύς των ΦΒ. Ωστόσο, ακόμα και σε αυτή την περίπτωση, η μέγιστη τάση των ζυγών δεν ξεπερνά το ρυθμιστικό άνω όριο ( $V_{ζυγού} (pu) \leq 1.05$ ). Συνοψίζοντας, το όριο της διακύμανσης της τάσης είναι ο παράγοντας που περιορίζει το ποσοστό διείσδυσης των ΦΒ στη γραμμή αναχώρησης του δικτύου διανομής Μ.Τ. της Σπερχειάδας.

Ημερήσιο προφίλ τάσης

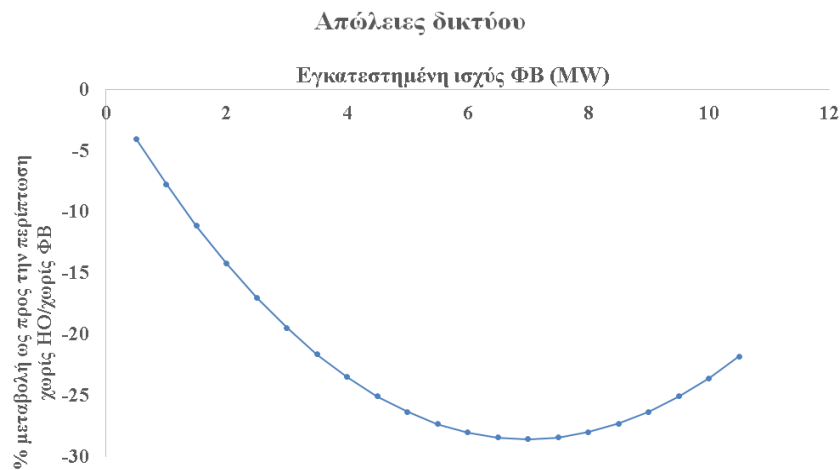


(α)





(β)  
Εικόνα 4-22 Ημερήσιο προφίλ τάσης ανά ζυγό για διαφορετικά σενάρια διείσδυσης ΦΒ: (α) 5MW και (β) 11.1MW



Εικόνα 4-23 Απώλειες δικτύου για διαφορετικά σενάρια διείσδυσης ΑΠΕ

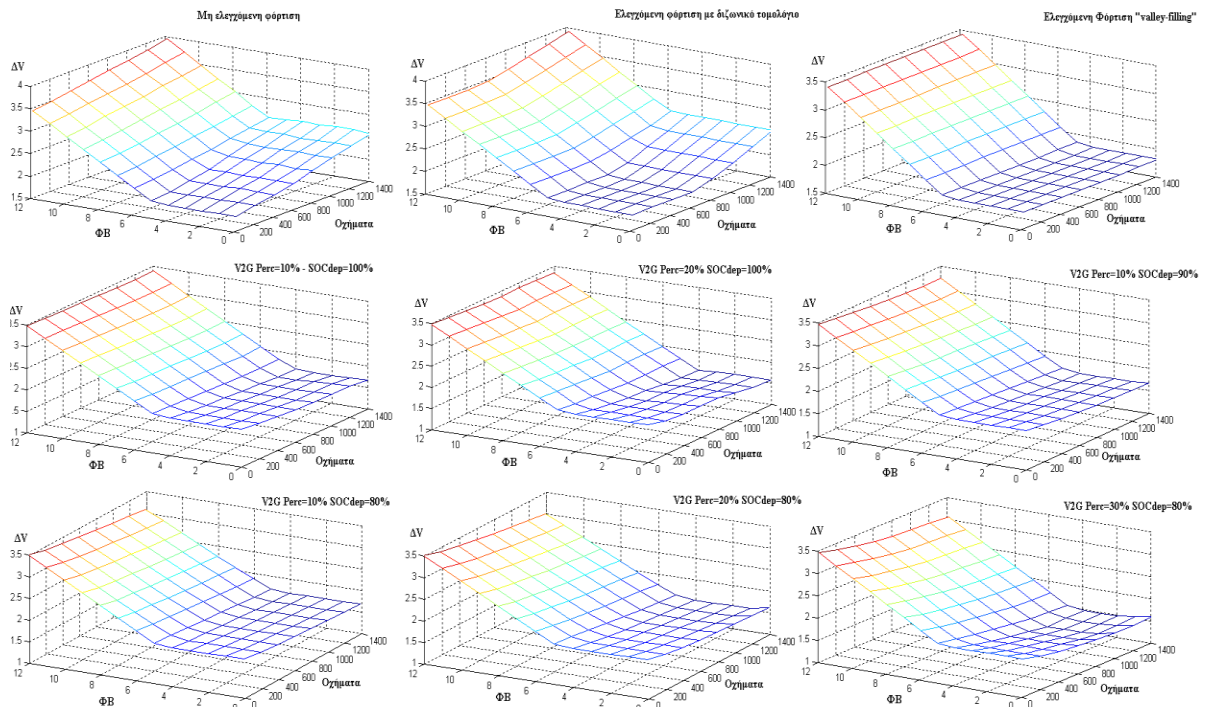
Εν συνεχεία, εξετάζεται η επίδραση της ενσωμάτωσης των ηλεκτρικών οχημάτων στη γραμμή αναχώρησης της Σπερχειάδας εξετάζοντας την εφαρμογή διαφορετικών στρατηγικών φόρτισης τους. Για τις ανάγκες των προσομοιώσεων θεωρήθηκε ένας στόλος ηλεκτρικών οχημάτων με τα εξής χαρακτηριστικά:

Πίνακας 4-3: Χαρακτηριστικά στόλου ηλεκτρικών οχημάτων  $N_{ev}$

	Αριθμός Αυτοκινήτων	Χωρητικότητα Μπαταρίας $C_{bat}$ (kWh)	Κατανάλωση Μπαταρίας (% $C_{bat}$ )	Επίπεδο Φόρτισης (kW)
<b>Ομάδα Α</b>	$1/3N_{ev}$	21	20	3,6 (Mode 1)
<b>Ομάδα Β</b>	$1/3N_{ev}$	21	29	3.6 (Mode 1)
<b>Ομάδα Γ</b>	$1/3N_{ev}$	21	35	3.6 (Mode 1)

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, δηλαδή η μέγιστη διακύμανση της τάσης και η μεταβολή των απωλειών συγκριτικά με τις απώλειες του σεναρίου χωρίς ΦΒ/χωρίς ΗΟ, για διαφορετικά σενάρια διείσδυσης ΦΒ/ηλεκτρικών οχημάτων καθώς και για διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης απεικονίζονται στις Εικόνα 4-24 και Εικόνα 4-25. Σε κάθε σενάριο διείσδυσης ΑΠΕ, η διακύμανση της τάσης αυξάνεται ή παραμένει σταθερή καθώς αυξάνεται ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων που συνδέονται στο δίκτυο για τις περιπτώσεις της μη ελεγχόμενης φόρτισης, ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο και “valley-filling”, ενώ στην

περίπτωση του προτεινόμενου αλγορίθμου συνέργειας ΦΒ/ΗΟ η διακύμανση της τάσης μειώνεται αυξάνοντας τη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων. Η έντονη διείσδυση ΦΒ στη γραμμή διανομής έχει ως αποτέλεσμα την έντονη αύξηση της διακύμανσης της τάσης η οποία εν συνεχεία περιορίζει το μέγιστο όριο διείσδυσης ΦΒ στο δίκτυο. Η προτεινόμενη στρατηγική συνέργειας ΦΒ/ΗΟ συνεισφέρει στην αύξηση του μέγιστου ορίου διείσδυσης ΦΒ (περίπου 11MW) λόγω της αμφίδρομης ροής ισχύος. Μάλιστα, θα περίμενε κανείς όσο μεγαλύτερη είναι η συμμετοχή των οχημάτων στην V2G λειτουργία (μεγαλύτερο ποσοστό *Perc*) το προφίλ της τάσης να βελτιώνεται επιτρέποντας μεγαλύτερα ποσοστά διείσδυσης ΦΒ και ηλεκτρικών οχημάτων. Ωστόσο, από τα διαγράμματα για *Perc=10%-SOC=100%* και *Perc=20%-SOC=100%* στην Εικόνα 4-24 δεν παρατηρούνται αισθητές διαφορές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων δε ταυτίζεται απόλυτα με τη φωτοβολταϊκή παραγωγή. Πιο συγκεκριμένα, η παραγωγή από ΦΒ παρατηρείται κυρίως τις μεσημεριανές ώρες (Εικόνα 4-20) όπου η κατανάλωση της μπαταρίας των οχημάτων είναι σχετικά μικρή μιας και το πρωί τα αυτοκίνητα ξεκινούν πλήρως φορτισμένα λόγω της οικιακής φόρτισης το βράδυ. Σε αντίθεση με την αιολική παραγωγή η οποία συσχετίζεται πλήρως με τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων (η περίπτωση της Ικαρίας που μελετήθηκε παραπάνω), το ήμισυ περίπου της ημερήσιας κατανάλωσης των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να συσχετιστεί και να εξυπηρετηθεί από ΦΒ, ενώ το υπόλοιπο εξυπηρετείται τις ώρες με χαμηλή κατανάλωση στο δίκτυο. Αυτό οφείλεται στον περιορισμό που απαιτεί την πλήρη φόρτιση των οχημάτων (*SOC=100%*) πριν το πρώτο ημερήσιο ταξίδι. Αν ο περιορισμός αυτός γίνει πιο χαλαρός (*SOC=90%* ή *SOC=80%*) τότε μεγαλύτερο ποσοστό των ενεργειακών αναγκών μετακίνησης των ηλεκτρικών οχημάτων δύναται να συσχετιστεί με τη φωτοβολταϊκή παραγωγή. Αυτό αποδεικνύεται από τα διαγράμματα στην Εικόνα 4-24, όπου η χαλάρωση του περιορισμού κατά 20% επιτρέπει την ενσωμάτωση υψηλότερων ποσοστών διείσδυσης ΦΒ (ακόμα και 12MW) για υψηλά ποσοστά διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων χωρίς να παραβιάζονται οι περιορισμοί λειτουργίας της τάσης..

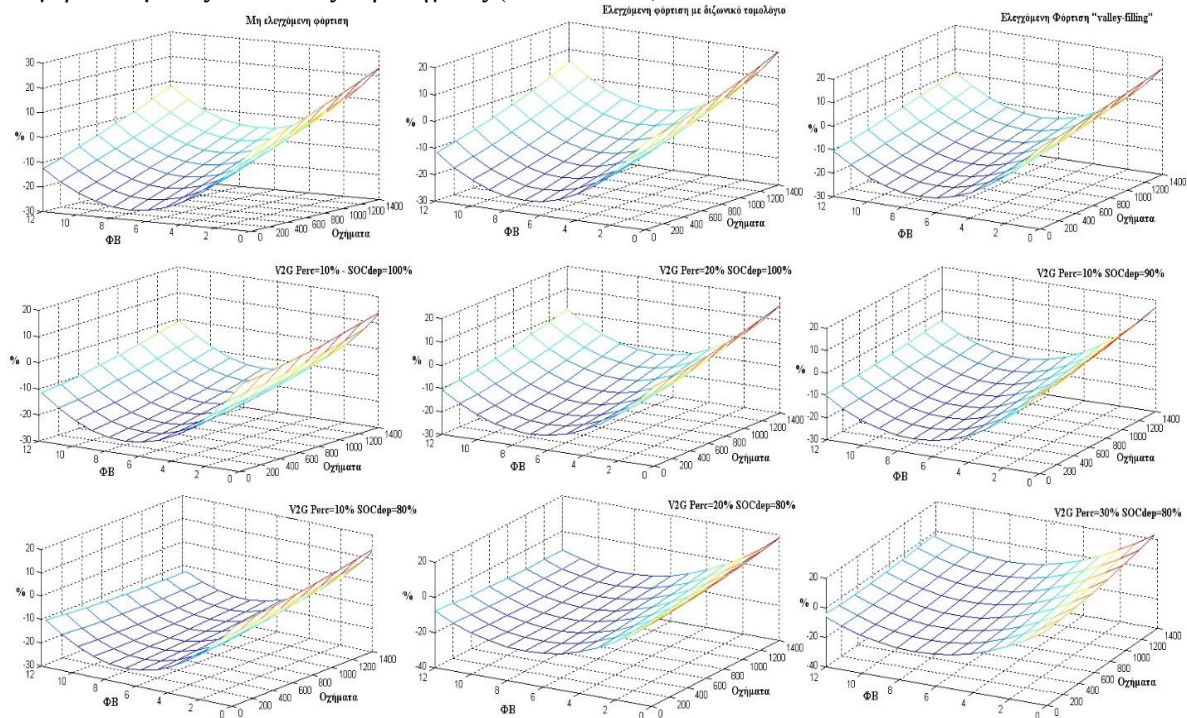


Εικόνα 4-24 Μέγιστη διακύμανση της τάσης της γραμμής Μ.Τ. της Σπερχειάδας για διαφορετικά σενάρια διείσδυσης ΦΒ/ΗΟ και στρατηγικές φόρτισης

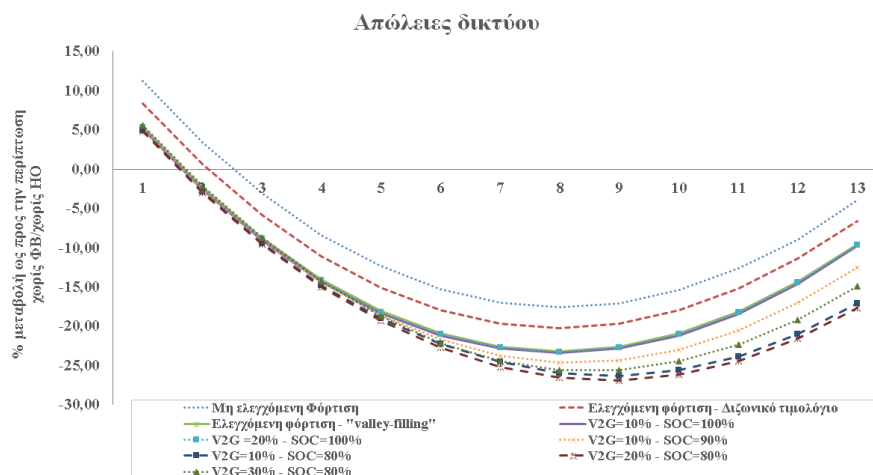
Όσον αφορά στις απώλειες του δικτύου, η εξυπηρέτηση της τοπικής κατανάλωσης από τοπική παραγωγή συνεισφέρει στη μείωση των απωλειών λειτουργίας. Ωστόσο, πέραν ενός ορίου διείσδυσης ΦΒ οι απώλειες του δικτύου αυξάνουν σταδιακά λόγω της αναστροφής ροής ισχύος. Αντίστοιχα αποτελέσματα για τις απώλειες του δικτύου παρατηρήθηκαν και στην προηγούμενη ανάλυση για το δίκτυο διανομής της Ικαρίας. Η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας για τη



συνέργεια ΦΒ/ΗΟ καθώς και η χαλάρωση του περιορισμού για πλήρη φόρτιση πριν την έναρξη του πρώτου ταξιδιού μεγιστοποιεί τα οφέλη λειτουργίας του δικτύου ελαχιστοποιώντας τις απώλειες της γραμμής όταν η εγκατεστημένη ισχύς των ΦΒ είναι 9MW, δηλαδή περίπου 1MW συγκριτικά με τις υπόλοιπες στρατηγικές (Εικόνα 4-26).



Εικόνα 4-25 Απώλειες δικτύου της γραμμής Μ.Τ. της Σπερχειάδας για διαφορετικά σενάρια διείσδυσης ΦΒ/ΗΟ και στρατηγικές φόρτισης



Εικόνα 4-26 Απώλειες δικτύου της γραμμής Μ.Τ. της Σπερχειάδας για διαφορετικά σενάρια διείσδυσης ΦΒ και στρατηγικές φόρτισης (800 ηλεκτρικά οχήματα)

#### 4.4 Συμπεράσματα

Το κεφάλαιο αυτό της παρούσας διδακτορικής διατριβής επεκτείνει τη μεθοδολογία διαχείρισης που προτάθηκε στο κεφάλαιο 3 που βασίζεται στα δυναμικά, μη συνεργατικά παίγνια με σκοπό την υποστήριξη της αμφίδρομης ροής ισχύος μεταξύ ηλεκτρικών οχημάτων και ηλεκτρικού δικτύου καθώς και τη συσχέτιση της ζήτησης της φόρτισης των οχημάτων με την τοπική παραγωγή από διεσπαρμένη παραγωγή (ΑΠΕ). Ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι αποκεντρωμένος και η σύγκλιση του εξασφαλίζεται εντός ολίγων επαναλήψεων όπως αποδείχθηκε και μαθηματικά παραπάνω. Η αποκέντρωση της επίλυσης του προβλήματος και η υιοθέτηση ενδιάμεσων επιπέδων

επικοινωνίας επιτρέπει την ταχύτερη σύγκλιση του, συγκριτικά με τον χρόνο σύγκλισης του αντίστοιχου κεντρικού αλγορίθμου.

Η υιοθέτηση της V2G λειτουργίας επιτρέπει τη λειτουργία των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων ως αποθηκευτικό μέσο που μπορεί σαν αθροιστική χωρητικότητα να συνεισφέρει στην εξυπηρέτηση μέρους της αιχμής ζήτησης του δικτύου σε τοπικό επίπεδο μειώνοντας τις ροές από το ανάντη δίκτυο και συνεπώς μειώνοντας τις απώλειες των γραμμών του δικτύου. Η ενέργεια των μπαταριών που χρησιμοποιείται για την εξυπηρέτηση των αιχμών ζήτησης του δικτύου ανακτάται κατά τις ώρες χαμηλής κατανάλωσης δίνοντας προτεραιότητα στις ώρες όπου υπάρχει πλεόνασμα παραγωγής ΑΠΕ. Ανάλογα με τον τύπο των εγκατεστημένων ΑΠΕ στο δίκτυο η φόρτιση μετατοπίζεται εξολοκλήρου τις βραδινές ώρες (στην περίπτωση αιολικής παραγωγής) ή μέρος της μπορεί να εξυπηρετείται την ημέρα κατά τη διάρκεια υψηλής φωτοβολταϊκής παραγωγής.

Η συνέργεια ΗΟ/ΑΠΕ που επιτυγχάνει ο προτεινόμενος αλγόριθμος συνεισφέρει στην αποδοτικότερη λειτουργία των δικτύων διανομής (περιορισμός της αύξησης των απωλειών δικτύου και βελτίωση του προφίλ της τάσης) και επιτρέπει τη διασύνδεση υψηλότερων επιπέδων διείσδυσης ΑΠΕ και ηλεκτρικών οχημάτων χωρίς να απαιτούνται επενδύσεις για την αναβάθμιση του δικτύου. Η αύξηση του μέγιστου ορίου διασύνδεσης ΑΠΕ σε μια γραμμή διανομής λόγω της εφαρμογής του προτεινόμενου αλγορίθμου για τη συνέργεια ΑΠΕ/ΗΟ εκτιμάται περίπου 12% συγκριτικά με την εφαρμογή της έξυπνης φόρτισης “valley-filling” ενώ είναι πολύ μεγαλύτερη (>20%) συγκριτικά με απλές μεθόδους διαχείρισης. Αντίστοιχα, το μέγιστο ποσοστό διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων στην περίπτωση της συνέργειας ΑΠΕ/ΗΟ είναι πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο στην περίπτωση εφαρμογής λιγότερο σύνθετων μεθόδων διαχείρισης ηλεκτρικών οχημάτων.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## ΑΠΟΚΕΝΤΡΩΜΕΝΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΟΧΗ ΕΠΙΚΟΥΡΙΚΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ

### 5.1 Εισαγωγή

Στον Κώδικα Διαχείρισης του Συστήματος, ως επικουρικές υπηρεσίες ορίζονται οι υπηρεσίες που απαιτούνται για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του Συστήματος από τα σημεία έγχυσης στα σημεία κατανάλωσης και για τη διασφάλιση της ποιότητας παροχής της ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του Συστήματος. Υπάρχουν διαφορετικές επικουρικές υπηρεσίες για την υποστήριξη της λειτουργίας του δικτύου:

- **Πρωτεύουσα Ρύθμιση Συστήματος** ορίζεται η συλλογική αυτόματη διορθωτική αντίδραση των μονάδων παραγωγής και των φορτίων στις αποκλίσεις της πραγματικής συχνότητας του Συστήματος από τη συχνότητα αναφοράς ( $\Delta f \geq 200mHz$ ). Η σταθεροποίηση της συχνότητας γίνεται σε διάστημα τριάντα (30) δευτερολέπτων από την εκδήλωση της διαταραχής. Η αυτόματη διορθωτική αντίδραση είναι το αποτέλεσμα της αυτόματης ρύθμισης της ενεργού ισχύος εξόδου των Μονάδων ανάλογα με το στατισμό του ρυθμιστή φορτίου. Η ρύθμιση αυτή μπορεί να μην επαναφέρει τη συχνότητα στο επίπεδο της συχνότητας αναφοράς. Οι λειτουργικές καταστάσεις των συμμετεχόντων στην πρωτεύουσα ρύθμιση πρέπει να διατηρούνται σταθερές για τουλάχιστον δεκαπέντε (15) λεπτά.
- **Δευτερεύουσα Ρύθμιση Συστήματος** ορίζεται η κεντρική ρύθμιση των μονάδων παραγωγής με τηλεχειρισμό από τον Διαχειριστή του Συστήματος (Automatic Generation Control – AGC) με σκοπό την ελαχιστοποίηση της απόκλισης της συχνότητας του δικτύου μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση από τη συχνότητα αναφοράς (λαμβάνοντας υπόψη και τα όρια ανοχής αποκλίσεων). Η ρύθμιση μπορεί να λαμβάνει χώρα σε χρονικό διάστημα από δέκα (10) δευτερόλεπτα έως δεκαπέντε (15) λεπτά από την ενεργοποίησή της ενώ ο κύκλος λειτουργίας του AGC είναι 4sec και μπορεί να ανανεώνει τα σημεία λειτουργίας που στέλνονται στις μονάδες κάθε 8sec.
- **Τριτεύουσα Ρύθμιση και Στρεφόμενη Εφεδρεία** ορίζονται η περιοδική ρύθμιση από τον Διαχειριστή του Συστήματος για την ελαχιστοποίηση του κόστους της εγχεόμενης ενέργειας για τη ρύθμιση της συχνότητας. Ο χρόνος ανταπόκρισης στην τριτεύουσα ρύθμιση φτάνει τα δεκαπέντε (15) λεπτά.
- **Τριτεύουσα Μη Στρεφόμενη Εφεδρεία Μονάδας**, η Εφεδρεία Τριτεύουσας Ρύθμισης Μονάδας η οποία δεν είναι συγχρονισμένη στο Σύστημα.
- **Στατή Εφεδρεία Συστήματος**, ορίζεται ως το σύνολο της μέγιστης ποσότητας ενεργού ισχύος που μπορεί να διατεθεί στο Σύστημα από μη συγχρονισμένες μονάδες εντός διαστήματος από είκοσι (20) λεπτά έως τέσσερις (4) ώρες για κάθε Περίοδο Κατανομής.
- **Ρύθμιση Τάσης** αποσκοπεί στη διατήρηση της τάσης εντός του εύρους κανονικής λειτουργίας. Για τον σκοπό αυτό απαιτείται να υπάρχει επαρκής στατική και δυναμική εφεδρεία αέργου ισχύος.
- **Επανεκκίνηση Συστήματος** μετά από γενική ή μερική διακοπή λειτουργίας του ορίζεται η υπηρεσία η οποία παρέχεται από μονάδες και συνίσταται στη δυνατότητα επανεκκίνησης των Μονάδων χωρίς τροφοδότηση από εξωτερική πηγή ισχύος, και στην έγχυση ενέργειας στο Σύστημα, εντός μίας (1) ώρας, ή εντός δεκαπέντε (15) λεπτών.

Το κεφάλαιο αυτό της παρούσας διδακτορικής διατριβής επικεντρώνεται σε δύο από τις προαναφερθείσες επικουρικές υπηρεσίες: την πρωτεύουσα και τη δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Η αναγκαιότητα των επικουρικών υπηρεσιών για τη ρύθμιση της συχνότητας σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας έγκειται στην απόκλιση των καμπυλών παραγωγής ενέργειας και

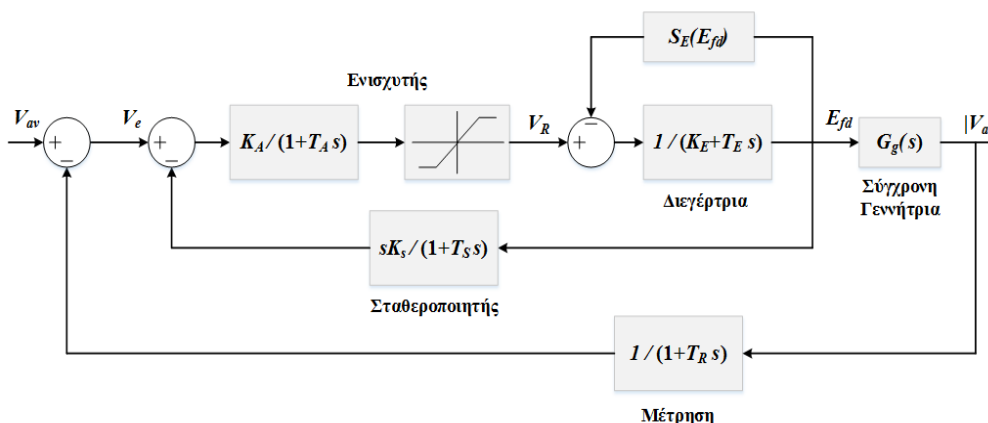
ζήτησης φορτίου. Οι αιτίες ύπαρξης τέτοιων αποκλίσεων είναι τα σφάλματα πρόβλεψης του συνολικού φορτίου καθώς και τα σφάλματα πρόβλεψης της συνολικής παραγωγής ενέργειας λόγω απρόβλεπτων βλαβών/αστοχιών του εξοπλισμού και της άμεσης εξάρτησης της παραγωγής των ΑΠΕ από τις καιρικές συνθήκες. Σε επίπεδο λειτουργίας του δικτύου, τέτοιες αποκλίσεις μεταφράζονται σε διακύμανση της συχνότητας του δικτύου από τη βασική τιμή (50Hz). Πλεόνασμα παραγωγής συνεπάγεται αύξηση της συχνότητας ενώ έλλειμα παραγωγής συνεπάγεται μείωση της συχνότητας. Βάσει Κώδικα Διαχείρισης Δικτύου, η αποδεκτή διακύμανση της συχνότητας Δικτύου, υπό συνθήκες κανονικής λειτουργίας, είναι μεταξύ 49.85 και 50.15Hz<sup>1</sup>. Επιπρόσθετα, η αποδεκτή διακύμανση κατά τη διάρκεια διαταραχών στο Σύστημα είναι μεταξύ 49,75 και 50,2Hz, ενώ για σοβαρές διαταραχές τα όρια ανοχής διευρύνονται μεταξύ 49.5 και 50.5Hz.

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η ανάλυση της συμμετοχής των ηλεκτρικών οχημάτων στη πρωτεύουσα και δευτερεύουσα ρύθμιση της συχνότητας. Το πλεονέκτημα των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων είναι η δυνατότητα άμεσης ρύθμισης της εγχεόμενης/ απορροφημένης ενεργού ισχύος προς/από το δίκτυο λόγω της ταχύτατης απόκρισης των ηλεκτρικών ισχύος. Εξαιτίας των διαφορετικών χρονικών περιορισμών απόκρισης για κάθε τύπο εφεδρείας, απαιτείται διαφορετική μοντελοποίηση της λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων. Η πρωτεύουσα ρύθμιση απαιτεί τη δυναμική προσομοίωση των ηλεκτρικών οχημάτων και την απόκριση τους, σε πραγματικό χρόνο, στις αποκλίσεις της συχνότητας του δικτύου μέσω καμπυλών στατισμού ενεργού ισχύος-συχνότητας (P-f droop curves). Για τη δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας, υιοθετείται μια στατική μοντελοποίηση της λειτουργίας της μπαταρίας των ηλεκτρικών οχημάτων.

Είναι σημαντικό να τονιστεί στο σημείο αυτό, ότι η συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας (χονδρεμπορική και επικουρικές υπηρεσίες) αφορά στην Προχωρημένη Φάση διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων (σύμφωνα με τον ορισμό στο Κεφάλαιο 1), όπου οι τεχνολογίες των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, οι υποδομές φόρτισης και τηλεπικοινωνιών είναι ώριμες και τα ρυθμιστικά πλαίσια ηλεκτροκίνησης είναι πλήρως ορισμένα. Υπό αυτές τις προϋποθέσεις ακολουθεί η ανάλυση και η ανάπτυξη των μηχανισμών που επιτρέπουν τη συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά ενέργειας και στη ρύθμιση της συχνότητας του δικτύου.

## 5.2 Μοντελοποίηση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας

### 5.2.1 Ρυθμιστής τάσης μονάδων παραγωγής



Εικόνα 5-1 Μαθηματικό μοντέλο αυτόματου ρυθμιστή τάσης

Οι σύγχρονες μηχανές περιγράφονται από τις κλασσικές εξισώσεις PARK. Σε κάθε γεννήτρια ενσωματώνεται ένας ρυθμιστής στροφών και ένας ρυθμιστής τάσης. Όσον αφορά στον ρυθμιστή στροφών, η λειτουργία και μοντελοποίηση του περιγράφεται στην ενότητα 5.2.2. Όσον αφορά

<sup>1</sup> Για το Δίκτυο των μη διασυνδεδεμένων νησιών τα αποδεκτά όρια διακύμανσης της συχνότητας δικτύου καθορίζονται βάσει του προτύπου EN50160 και πρέπει να είναι μεταξύ 49 και 51Hz για το 95% του χρόνου μιας εβδομάδος και μεταξύ 42.5 και 57.5Hz για το 100% του χρόνου

στον ρυθμιστή τάσης, το μαθηματικό μοντέλο απεικονίζεται στην Εικόνα 5-1. Το μπλόκ «μέτρηση» αναπαριστά τον ανορθωτή και το φίλτρο της τάσης εισόδου και έχει κέρδος μονάδα και χρονική σταθερά  $T_R$  πολύ μικρή. Ο ενισχυτής ενισχύει με κέρδος  $K_A$  (χρονική σταθερά  $T_A$ ) τη διαφορά μεταξύ σφάλματος εισόδου και σήματος βρόχου σταθεροποίησης της διέγερσης, ενώ η έξοδος του περιορίζεται ώστε να μην ξεπερνά τα πρακτικά όρια. Η συνάρτηση μεταφοράς της διεγέρτριας καθορίζεται από τις τιμές των παραμέτρων  $K_E$  και  $T_E$ . Η παράμετρος  $S_E$  συμβολίζει τη συνάρτηση κόρου της διεγέρτριας. Ο βρόχος στην Εικόνα 5-1 κλείνει με τη συνάρτηση μεταφοράς της γεννήτριας που συνδέει την τάση  $E_{fd}$  με την τερματική τάση  $|V_a|$ .

### 5.2.2 Ρύθμιση συχνότητας φορτίου στα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

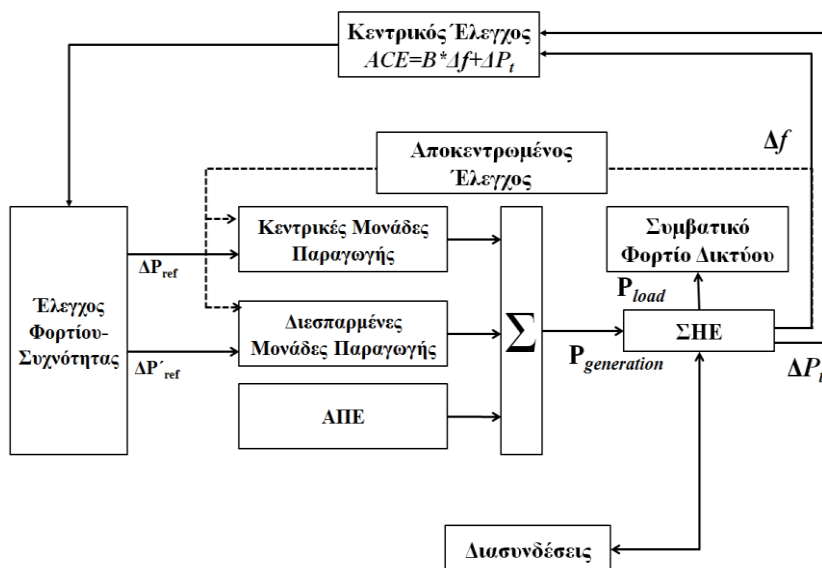
Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας έχουμε συνεχείς μεταβολές του φορτίου, οπότε η παραγωγή ισχύος θα πρέπει να ρυθμίζεται αντιστοίχως ώστε να ανταποκρίνεται στη ζήτηση. Κατά την λειτουργία μιας γεννήτριας, η ηλεκτρομαγνητική ροπή που ασκείται στον δρομέα της γεννήτριας οφείλεται στο ηλεκτρικό φορτίο το οποίο τροφοδοτεί η γεννήτρια. Αύξηση της ζήτησης ισχύος συνεπάγεται και αύξηση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής με συνέπεια ο δρομέας να επιβραδύνεται και συνεπώς η συχνότητα να μειώνεται. Αντίστροφα, στην περίπτωση πλεονάζουσας παραγόμενης ισχύος ο δρομέας επιταχύνεται και η συχνότητα αυξάνεται. Χαρακτηριστικό παράδειγμα μιας τέτοιας μεταβολής είναι όταν για κάποιο λόγο μια γεννήτρια τίθεται εκτός λειτουργίας, οπότε όλες οι υπόλοιπες καλούνται να αυξήσουν την παραγωγή τους, προκειμένου να καλύψουν το έλλειμμα ηλεκτρικής ισχύος που προκάλεσε η βλάβη.

Η διατήρηση της συχνότητας εντός ρυθμιστικών ορίων είναι πολύ σημαντική για την ομαλή λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Συχνότητες δικτύου εκτός αποδεκτών ορίων μπορούν να προκαλέσουν από δυσλειτουργίες στις διασυνδεδεμένες συσκευές μέχρι και την μη λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας λόγω αποσυγχρονισμού των μονάδων. Για την αποφυγή τέτοιων φαινομένων, κάθε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας διαθέτει στρεφόμενη εφεδρεία, δηλαδή γεννήτριες που λειτουργούν αλλά δεν παράγουν τη μέγιστη δυνατή ισχύ τους. Με το τρόπο αυτό συμβάντα όπως αύξηση του φορτίου ή απώλεια κάποιας μονάδας μπορούν να καλυφθούν από αυτή τη στρεφόμενη εφεδρεία. Στην ακραία περίπτωση μη επάρκειας της στρεφόμενης εφεδρείας, η διατήρηση της συχνότητας του δικτύου στα επιθυμητά επίπεδα πραγματοποιείται με αποκοπές φορτίου.

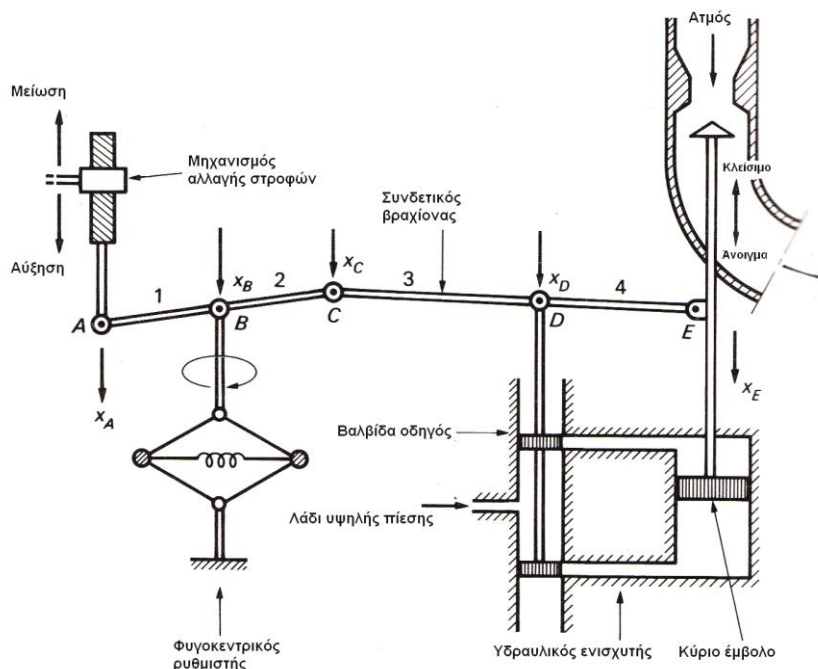
Ο βαθμός απόκρισης κάθε μονάδας παραγωγής στη μεταβολή της συχνότητας εξαρτάται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε μονάδας. Μια μονάδα που μπορεί να μεταβάλλει σημαντικά το φορτίο της για σχετικά μικρές μεταβολές της συχνότητας ονομάζεται **ρυθμίζουσα**. Τέτοιες μονάδες εξυπηρετούν κυρίως τις αιχμές του φορτίου. Αντίθετα, οι μονάδες που εξυπηρετούν το μεγαλύτερο ποσοστό της ζήτησης του συστήματος και ονομάζονται **μονάδες βάσης** μεταβάλλουν ελάχιστα το φορτίο τους. Γενικότερα, για μικρές μεταβολές του φορτίου αξιοποιούνται τα ρυθμιστικά εργοστάσια, όπως τα υδροηλεκτρικά και οι αεριοστρόβιλοι, που παρουσιάζουν μικρούς χρόνους ανάληψης ισχύος, ενώ για μεγαλύτερες μεταβολές φορτίου αξιοποιούνται οι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί. Η χρήση των σταθμών αυτών γίνεται προγραμματισμένα καθώς η εκκίνηση τους απαιτεί αρκετές ώρες [182].

Για τη ρύθμιση της συχνότητας σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας υιοθετείται το μοντέλο ρύθμισης φορτίου-συχνότητας που παρουσιάζεται στην Εικόνα 5-2. Δύο τρόποι ελέγχου της συχνότητας εφαρμόζονται: η πρωτεύουσα ρύθμιση που αφορά στη βραχυχρόνια ρύθμιση του επιπέδου της παραγόμενης ισχύος από τις μονάδες παραγωγής μέσω τοπικών ελεγκτών και η δευτερεύουσα ρύθμιση που αφορά στην αντιστάθμιση του μόνιμου σφάλματος της συχνότητα δικτύου συγκριτικά με τη συχνότητα αναφοράς, όπως αυτό προκύπτει από την πρωτεύουσα ρύθμιση.

Στην πρωτεύουσα ρύθμιση πρωταρχικό ρόλο έχει ο ρυθμιστής στροφών. Ενδεικτικά παρατίθεται στην Εικόνα 5-3 ο ελεγκτής στροφών ατμοηλεκτρικού σταθμού. Βασική ιδέα του πρωτογενή ελέγχου της συχνότητας είναι η ρύθμιση της θέσης του σημείου E. Μια μεταβολή του σημείου E ( $\Delta x_E$ ) προκαλεί μεταβολή στην ισχύ του στροβίλου ( $\Delta P_T$ ). Μέσω της ηλεκτρομηχανικής αλληλεπίδρασης στη γεννήτρια, η μεταβολή  $\Delta P_T$  προκαλεί μια μεταβολή στην παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ  $\Delta P_G$ . Αν αμελήσουμε τις απώλειες της γεννήτριας μπορούμε να υποθέσουμε ότι οι μεταβολές  $\Delta P_T$  και  $\Delta P_G$  είναι ίσες.



Εικόνα 5-2 Μοντέλο ελέγχου ρύθμισης φορτίου-συχνότητας (Load-Frequency Control - LFC) [183]

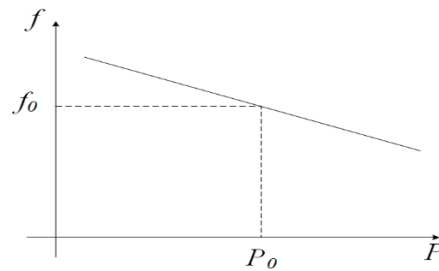


Εικόνα 5-3 Ρυθμιστής στροφών ατμοηλεκτρικού σταθμού [184]

Για μια δεδομένη ταχύτητα αναφοράς, κάθε τιμή παραγόμενης ισχύος αντιστοιχεί και σε μια τιμή συχνότητας, στη μόνιμη κατάσταση μετά την επίδραση του ρυθμιστή στροφών. Η καμπύλη που προσδιορίζει τη συσχέτιση φορτίου-συχνότητας προσδιορίζεται ως χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας (Εικόνα 5-4) και αναφέρεται στη μόνιμη κατάσταση μετά την πρωτεύουσα ρύθμιση και πριν τη δευτερεύουσα. Η κλίση της καμπύλης αυτής είναι αρνητική και ονομάζεται στατισμός. Ο στατισμός συμβολίζεται με R και προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$R = -\frac{\Delta\omega}{\Delta P} \tag{E 5-1}$$





Εικόνα 5-4 Χαρακτηριστική καμπύλη φορτίου-συχνότητας

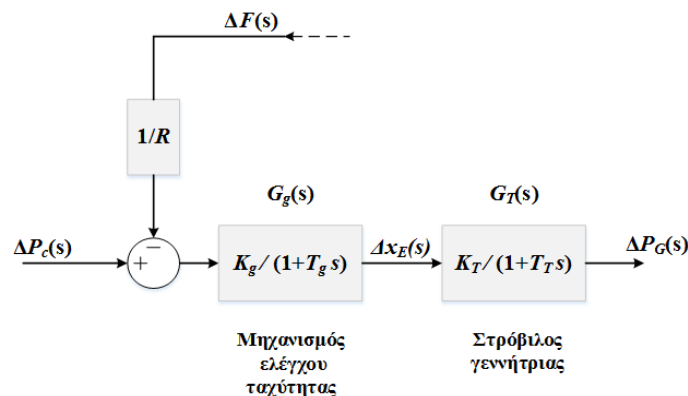
Ο στατισμός μετριέται σε ποσοστό επί τοις εκατό και εκφράζει την ποσοστιαία μόνιμη μεταβολή της συχνότητας λειτουργίας για μεταβολή φορτίου ίση με την ονομαστική ισχύ της γεννήτριας. Στην οριακή περίπτωση που ο στατισμός είναι μηδέν, η συχνότητα παρουσιάζει μηδενική ευαισθησία στις αλλαγές του φορτίου. Βάσει της τιμής του στατισμού, διαφοροποιούνται οι διάφορες μονάδες μέσα στο σύστημα. Για παράδειγμα, μια μονάδα με μικρό στατισμό μεταβάλλει σημαντικά το φορτίο της σε μια μικρή μεταβολή της συχνότητας (ρυθμίζουσες μονάδες). Αντίθετα, μια μονάδα με μεγάλο στατισμό στην αντίστοιχη μεταβολή της συχνότητας θα μεταβάλλει πολύ λιγότερο την παραγωγή της (μονάδες βάσης).

Η συνάρτηση μεταφοράς του στρόβιλου που περιγράφει τη συνολική διαδικασία της ρύθμισης συχνότητας απεικονίζεται στην Εικόνα 5-5:

$$\Delta x_E(s) = \frac{K_g}{1+T_g s} \left( \Delta P_C(s) - \frac{1}{R} \Delta F(s) \right) \quad \text{E 5-2}$$

$$\Delta P_G(s) = \frac{K_T}{1+T_T s} \Delta x_E(s) \quad \text{χωρίς αναθέρμανση} \quad \text{E 5-3}$$

$$\Delta P_G(s) = \frac{K_T(1+K_T T_T s)}{(1+T_T s)(1+T_r s)} \Delta x_E(s) \quad \text{με αναθέρμανση} \quad \text{E 5-4}$$

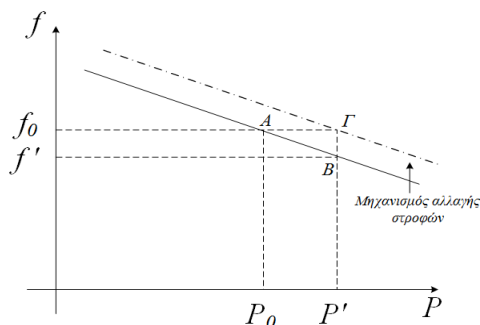


Εικόνα 5-5 Συνάρτηση μεταφοράς στρόβιλου χωρίς αναθέρμανση και του ρυθμιστή ταχύτητας του

Όπως αναλύθηκε παραπάνω, η πρωτεύουσα ρύθμιση σταθεροποιεί τη συχνότητα του συστήματος σε μια τιμή, στη μόνιμη κατάσταση, κοντά στην ονομαστική τιμή. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητο να εισαχθεί και μια επιπλέον ρύθμιση που θα εξαλείψει το μόνιμο αυτό σφάλμα. Η δευτερεύουσα αυτή ρύθμιση γίνεται μέσω ενός μηχανισμού αλλαγής στροφών. Οι ρυθμιστές στροφών είναι εφοδιασμένοι με έναν τέτοιο μηχανισμό που μεταθέτει τη χαρακτηριστική φορτίου-συχνότητας της μονάδας προκειμένου να μεταβληθεί το σημείο λειτουργίας της μονάδας. Για παράδειγμα έστω ότι το σύστημα ισορροπεί στο σημείο A ( $P_0, f_0$ ) όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-6. Η αύξηση του φορτίου από το σημείο  $P_0$  στο σημείο  $P'$ , μετατοπίζει το σημείο ισορροπίας από το σημείο A στο σημείο B ( $P', f'$ ). Η δευτερεύουσα ρύθμιση μεταβάλλει τη θέση της χαρακτηριστικής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-6, έτσι ώστε η συχνότητα να επανέλθει στην ονομαστική τιμή της και η παραγόμενη ισχύς από τη γεννήτρια να εξυπηρετεί το επιπρόσθετο φορτίο (σημείο ισορροπίας Γ).

Η δευτερεύουσα ρύθμιση υλοποιείται αυτόματα από το Σύστημα Αυτόματης Ρύθμισης Παραγωγής (ΑΡΠ-AGC) το οποίο λαμβάνει ως είσοδο τις μετρήσεις συχνότητας, ροών ισχύος στις διασυνδέσεις, τα λειτουργικά επίπεδα και όρια παραγωγής των μονάδων και αποφασίζει το σήμα

ρύθμισης (set-point) στις υπό αυτόματη ρύθμιση μονάδες. Οι τιμές αυτές κυμαίνονται περίξ του σημείου βάσης (base-point), που προκύπτει από την επίλυση του προβλήματος Οικονομικής Κατανομής Πραγματικού Χρόνου σε χρονικά διαστήματα πεντάλεπτων. Με τη συνολική ρύθμιση της παραγωγής των μονάδων γίνεται η διόρθωση του Σφάλματος Ρύθμισης Περιοχής (Area Control Error – ACE).

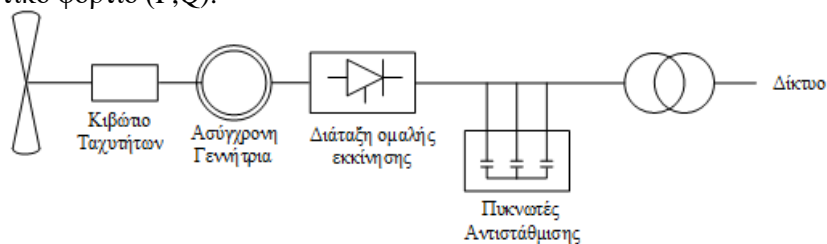


Εικόνα 5-6 Μετατόπιση χαρακτηριστικής φορτίου συχνότητας με δευτερεύουσα ρύθμιση

### 5.2.3 Μοντελοποίηση ΑΠΕ

Όσον αφορά στη μοντελοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, το μοντέλο των ανεμογεννητριών που υιοθετήθηκε είναι το αντίστοιχο των ανεμογεννητριών σταθερής ταχύτητας με γεννήτρια επαγωγής τύπου βραχυκυκλωμένου κλωβού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-7. Στις ανεμογεννήτριες σταθερής ταχύτητας, ο δρομέας στρέφεται με σταθερό αριθμό στροφών ανεξάρτητα της ταχύτητας του ανέμου. Η σύνδεση τους με το δίκτυο γίνεται απευθείας χρησιμοποιώντας ένα μετασχηματιστή για την προσαρμογή του επιπέδου τάσης γεννήτριας σε αυτό του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Κύριο πλεονέκτημα τους είναι η απλότητα και αξιοπιστία του συστήματος σταθερών στροφών. Ταυτόχρονα, εμφανίζουν και μειονεκτήματα που σχετίζονται με τη σταθερότητα των στροφών και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της μηχανής επαγωγής<sup>2</sup>. Παρά το γεγονός ότι αυτή η τεχνολογία ανεμογεννητριών είναι παρωχημένη, η πλειονότητα των ανεμογεννητριών στην Κρήτη είναι τέτοιου τύπου λόγω παλαιότητας.

Όσον αφορά στη μοντελοποίηση των φωτοβολταϊκών, η ηλιακή παραγωγή προσομοιώνεται ως σταθερό, αρνητικό φορτίο (P,Q).



Εικόνα 5-7 Μοντέλο ανεμογεννήτριας σταθερής ταχύτητας

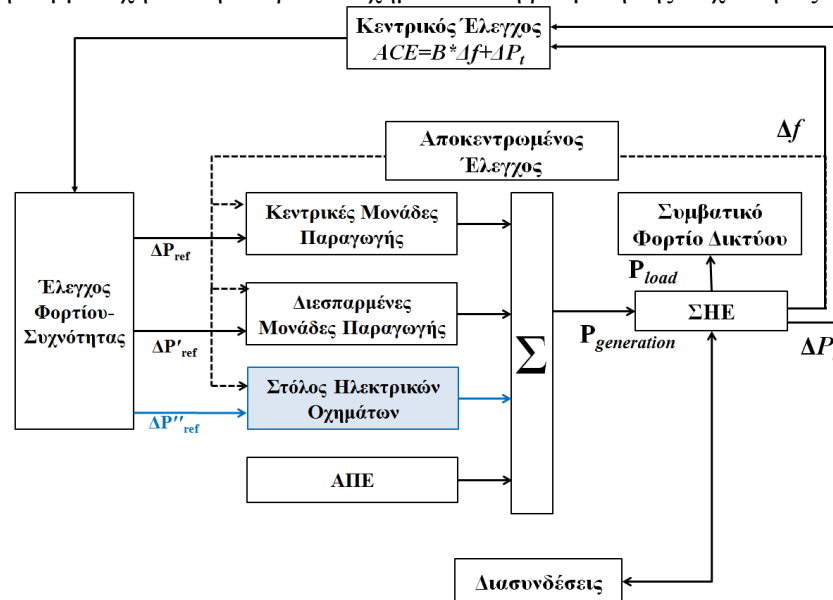
### 5.3 Ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στον μηχανισμό ρύθμισης φορτίου-συχνότητας

Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα λόγω των ηλεκτρονικών ισχύος που διαθέτουν για τη διασύνδεση της μπαταρίας τους με το δίκτυο έχουν τη δυνατότητα να ανταποκρίνονται ταχύτατα στις μεταβολές της συχνότητας. Επομένως, η αξιοποίηση της χωρητικότητας της μπαταρίας τους μπορεί να υποστηρίξει μέρος του μηχανισμού ρύθμισης της συχνότητας. Ωστόσο, η περιορισμένη χωρητικότητα της μπαταρίας ενός μεμονωμένου ηλεκτρικού οχήματος δεν είναι ικανή να προσφέρει στήριξη της συχνότητας του δικτύου. Η υποστήριξη της συχνότητας του δικτύου απαιτεί τη συμμετοχή ενός αρκετά μεγάλου στόλου ηλεκτρικών οχημάτων.

<sup>2</sup> [http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/1105/3/Nimertis\\_Maroudas.pdf](http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/1105/3/Nimertis_Maroudas.pdf)



Ένας στόλος ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να συμμετέχει τόσο στην πρωτεύουσα όσο και στη δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας, χωρίς ωστόσο να επηρεάζονται οι ανάγκες μετακίνησης των χρηστών τους. Το τροποποιημένο μοντέλο ελέγχου ρύθμισης φορτίου-συχνότητας απεικονίζεται στην Εικόνα 5-8. Η συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στη ρύθμιση πρωτεύουσας συχνότητας γίνεται μέσω των καμπυλών στατισμού οι οποίες είναι κατάλληλα τροποποιημένες ώστε να λαμβάνουν υπόψη τις ενεργειακές ανάγκες μετακίνησης των χρηστών τους. Στην περίπτωση, αυτή κάθε όχημα αντιδρά αυτόνομα και ανεξάρτητα στις μετρούμενες μεταβολές της συχνότητας. Αντίθετα, η συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στη δευτερεύουσα ρύθμιση της συχνότητας απαιτεί την απόκριση τους σε συγκεκριμένο σήμα ελέγχου ( $\Delta P''_{ref}$ ) από τον έλεγχο φορτίου συχνότητας. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητος ο συντονισμός της λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων έτσι ώστε η αθροιστική τους λειτουργία να εξυπηρετεί τις ανάγκες του δικτύου για ρύθμιση συχνότητας. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να τονίσουμε ότι η Διόρθωση Σφάλματος Ρύθμισης Περιοχής (ACE) καθορίζεται από το σημείο ρύθμισης (set-point) στην υπό αυτόματη ρύθμιση μονάδες και το σημείο βάσης που προκύπτει από το την επίλυση του προβλήματος Οικονομικής Κατανομής Πραγματικού Χρόνου. Το σημείο ρύθμισης (set-point) επανακαθορίζεται κάθε 8 δευτερόλεπτα, ώστε να εξασφαλίζεται η ταχεία απόκριση των μονάδων στις μεταβολές του Συστήματος, ενώ το σημείο βάσης καθορίζεται σε πεντάλεπτη βάση. Όσον αφορά στα ηλεκτρικά οχήματα θεωρούμε ότι η περιοδικότητα της κατανομής σημάτων ελέγχου τους είναι πεντάλεπτη, ακολουθώντας την αναπροσαρμογή του σημείου βάσης. Στις επόμενες ενότητες θα αναλυθεί εκτενέστερα η συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στη ρύθμιση της συχνότητας του δικτύου.



Εικόνα 5-8 Τροποποιημένο μοντέλο ελέγχου ρύθμισης φορτίου-συχνότητας (Load-Frequency Control - LFC) με τη συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων

Στη βιβλιογραφία, για την συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στις επικουρικές υπηρεσίες για τη ρύθμιση της συχνότητας του δικτύου υιοθετούνται δύο προσεγγίσεις: α) για τη βραχυπρόθεσμη ρύθμιση της συχνότητας, ο έλεγχος της λειτουργίας τους (φόρτιση/εκφόρτιση) καθορίζεται από μια χαρακτηριστική στατισμού (droop-based control) [158], [185] - [187] και β) για τη μακροπρόθεσμη ρύθμιση της συχνότητας, ο συντονισμός της λειτουργίας τους γίνεται μέσω οικονομικών κινήτρων (incentive-based control) [188]-[192].

Οι μέθοδοι που βασίζονται σε χαρακτηριστικές στατισμού εφαρμόζονται στην περίπτωση πρωτεύουσας ρύθμισης συχνότητας δικτύου. Στην πλειονότητα τους, το βέλτιστο σημείο λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων (φόρτιση, εκφόρτιση, αδρανής) καθορίζεται αποκλειστικά και μόνο από τη μεταβολή της συχνότητας χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι ενεργειακές ανάγκες μετακίνησης των ηλεκτρικών οχημάτων καθώς και ο χρόνος αναχώρησης τους. Ακόμα και πιο εξελιγμένες μέθοδοι [187] όπου οι ενεργειακές ανάγκες μετακίνησης των ηλεκτρικών οχημάτων λαμβάνονται υπόψη, σκοπός είναι η πλήρης φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων δίχως να

λαμβάνονται υπόψη οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας ή ο βέλτιστος προγραμματισμός τους από έναν κεντρικό διαχειριστή (EVSEA) που εκπροσωπεί τα ηλεκτρικά οχήματα στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας.

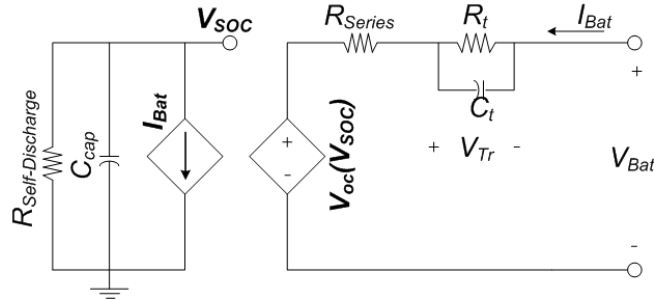
Στις μεθόδους που υιοθετούν οικονομικά κίνητρα, οι χρήστες και οι διαχειριστές στόλου ηλεκτρικών οχημάτων συμμετέχουν στην αγορά επικουρικών υπηρεσιών με κίνητρο τα οικονομικά οφέλη και με σκοπό να μεγιστοποιήσουν το κέρδος τους. Η βέλτιστη λειτουργία των ηλεκτρικών οχημάτων για τη συμμετοχή τους στις αγορές επικουρικών υπηρεσιών μπορεί να καθοριστεί είτε με κριτήριο το κέρδος του διαχειριστή των οχημάτων ([188],[189] και [192]) είτε το μεμονωμένο κέρδος για κάθε χρήστη ([190] και [191]). Στην περίπτωση του διαχειριστή του στόλου των οχημάτων, η σχετικά μικρή χωρητικότητα των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων αθροίζεται σχηματίζοντας μια εικονική ενιαία αποθηκευτική μονάδα. Στη συνέχεια, ο EVSEA βελτιστοποιεί τη λειτουργία της εικονικής αποθηκευτικής μονάδας είτε για να μεγιστοποιήσει το δικό του κέρδος ([188] και [189]) είτε για να ελαχιστοποιήσει το κόστος φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων ([192]). Αναλυτικότερα, στις προσεγγίσεις των μελετών [190] και [191], η μεγιστοποίηση του κέρδους επιτυγχάνεται μέσω της βελτιστοποίησης της ατομικής λειτουργίας κάθε οχήματος (single vehicle optimality). Στις περιπτώσεις αυτές, κάθε ηλεκτρικό όχημα καθορίζει τη βέλτιστη στρατηγική του βάσει των ενεργειακών αναγκών του και των περιορισμών λόγω μετακίνησης χωρίς να γνωρίζει τη συμπεριφορά και τη λειτουργία των υπόλοιπων ηλεκτρικών οχημάτων. Οι προσεγγίσεις των μελετών [188], [190] και [192] εγγυώνται την εξυπηρέτηση των ενεργειακών αναγκών κάθε ηλεκτρικού οχήματος, ωστόσο θεωρούν ανεξάρτητες και αποσυνδεδεμένες τις περιόδους φόρτισης από τις περιόδους ρύθμισης συχνότητας: κατά τη διάρκεια της λειτουργίας φόρτισης / εκφόρτισης, η μπαταρία φορτίζεται EV / αποφορτίζεται, χωρίς να είναι σε θέση να παρέχει επικουρικές υπηρεσίες, ενώ κατά τη διάρκεια συμμετοχής της στη ρύθμιση συχνότητας η μπαταρία παραμένει αδρανής.

Στις επόμενες ενότητες, θα αναλυθεί εκτενέστερα η συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στην πρωτεύουσα ρύθμιση, λαμβάνοντας υπόψη και τις ενεργειακές ανάγκες μετακίνησης των ηλεκτρικών οχημάτων επιπρόσθετα της υποστήριξης της συχνότητας, καθώς και η συμμετοχή τους στη δευτερεύουσα ρύθμιση, λαμβάνοντας υπόψη την πλήρη συμμετοχή τους στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας (χονδρεμπορική και εφεδρειών).

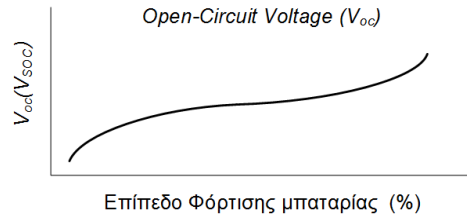
### 5.3.1 Συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας

#### 5.3.1.1 Δυναμική προσομοίωση της μπαταρίας των ηλεκτρικών οχημάτων

Για την ανάλυση της συμμετοχής των ηλεκτρικών οχημάτων στην πρωτεύουσα ρύθμιση της συχνότητας είναι απαραίτητη η δυναμική μοντελοποίηση της λειτουργίας της μπαταρίας τους. Το ισοδύναμο μοντέλο για την μπαταρία των ηλεκτρικών οχημάτων που υιοθετείται στην παρούσα διδακτορική διατριβή είναι το μοντέλο Thevenin το οποίο είναι ευρέως χρησιμοποιημένο και βασίζεται σε στοιχεία ηλεκτρικών κυκλωμάτων για την αναπαράσταση της τάσης και του ρεύματος της μπαταρίας [193]-[194]. Στην Εικόνα 5-9 απεικονίζεται το μοντέλο αυτό:  $R_{Series}$  είναι η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας στην οποία οφείλεται η εσωτερική πτώση τάσης,  $R_t$  και  $C_t$  είναι οι σταθερές της μπαταρίας που εκφράζουν την αντίδραση της μπαταρίας σε δυναμικές μεταβολές του φορτίου,  $V_{oc}(SOC)$  είναι μια πηγή τάσης εξαρτημένη από το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας (State-Of-Charge, SOC) μέσω μιας μη-γραμμικής σχέσης (Εικόνα 5-10). Το αριστερό μέρος του μοντέλου της μπαταρίας παρέχει με ακρίβεια το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας:  $C_{cap}$  είναι η χωρητικότητα της μπαταρίας (Ah),  $R_{Self\_Discharge}$  εκφράζει τη φθορά της μπαταρίας όταν αυτή μένει ανενεργή για μεγάλο χρονικό διάστημα.



Εικόνα 5-9 Δυναμικό μοντέλο αναπαράστασης της μπαταρίας των ηλεκτρικών οχημάτων



Εικόνα 5-10 Χαρακτηριστική καμπύλη τάσης –επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας

Οι δυναμικές εξισώσεις που περιγράφουν το μοντέλο της μπαταρίας παρουσιάζονται παρακάτω:

$$\frac{V_{oc} - V_{Tr} - V_{Bat}}{R_{series}} = I_{Bat} \quad \text{E 5-5}$$

$$C_{cap} \frac{dV_{soc}}{dt} + \frac{V_{soc}}{R_{self-Discharge}} = I_{Bat} \quad \text{E 5-6}$$

$$C_t \frac{dV_{Tr}}{dt} + \frac{V_{Tr}}{R_t} = I_{Bat} \quad \text{E 5-7}$$

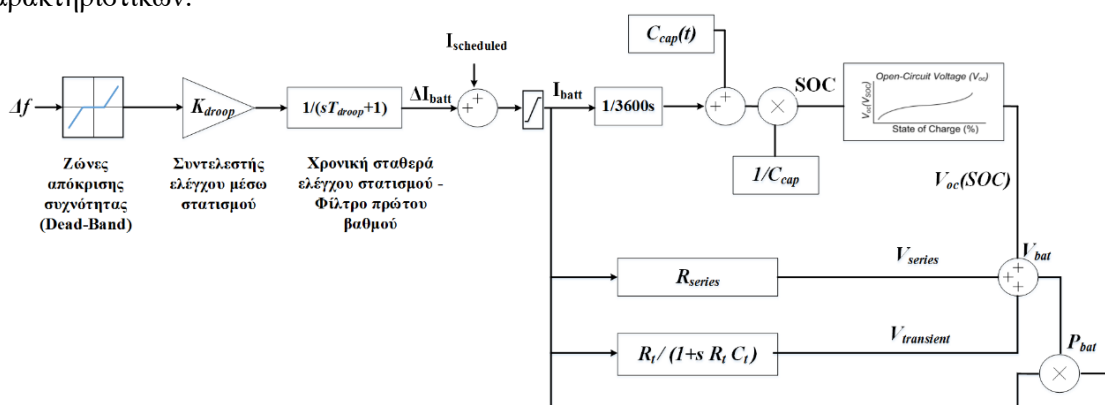
$$V_{Bat} * I_{Bat} = P_{Bat} \quad \text{E 5-8}$$

### 5.3.1.2 Ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας

Γενικά σε εφαρμογές αποθήκευσης, η απόκριση μια στατικής μπαταρίας στη μεταβολή της συχνότητας καθορίζεται μέσω των χαρακτηριστικών στατισμού του αντιστροφέα της μπαταρίας (droop-based control). Η μεταβολή της συχνότητας «μεταφράζεται» σε μεταβολή της ισχύος/ρεύματος μέσω της χαρακτηριστικής στατισμού και του συντελεστή  $K_{droop}$ . Στη συνέχεια η μεταβολή της ισχύος/ρεύματος εισέρχεται σε ένα φίλτρο πρώτης βαθμίδας με συνάρτηση μεταφοράς  $1/(sT_{droop}+1)$  που αντικατοπτρίζει τη χρονική καθυστέρηση απόκρισης του ελέγχου. Έπειτα, η μεταβολή του ρεύματος που επιφέρει η συμμετοχή της ρύθμισης συχνότητας προστίθεται στον ενεργειακό προγραμματισμό φόρτισης/εκφόρτισης ( $I_{scheduled}$ ) που καθορίζει το ενεργειακό προφίλ φόρτισης για την εξυπηρέτηση των ενεργειακών αναγκών μετακίνησης των οχημάτων καθώς και την V2G λειτουργία. Το συνολικό ρεύμα θα πρέπει να μην ξεπερνά το ονομαστικό ρεύμα του σταθμού φόρτισης, το οποίο διασφαλίζεται μέσω της χαρακτηριστικής κορεσμού. Το μοντέλο απόκρισης μιας μπαταρίας αποθήκευσης στη μεταβολή της συχνότητας παρουσιάζεται ολοκληρωμένο στην Εικόνα 5-11, λαμβάνοντας υπόψη και το ισοδύναμο μοντέλο Thevenin. Όταν η μεταβολή της συχνότητας ξεπεράσει τα ρυθμιστικά όρια ανοχής τότε τα οχήματα συνεισφέρουν στην υποστήριξη της συχνότητας είτε απορροφώντας είτε δίνοντας ενέργεια από και προς το δίκτυο.

Η αντίδραση κάθε οχήματος στη μεταβολή της συχνότητας εξαρτάται από την επιλογή των παραμέτρων ελέγχου του στατισμού ( $K_{droop}$ ,  $T_{droop}$ ). Η μεταβολή στην ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ μπαταρίας και δικτύου καθορίζεται από την τιμή του συντελεστή  $K_{droop}$ . Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι όλα τα αυτοκίνητα, ανεξάρτητα από τα τεχνικά (χωρητικότητα μπαταρίας, εγκατεστημένη ισχύς σταθμού φόρτισης κτλ) και λειτουργικά χαρακτηριστικά τους (επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας, ενεργειακές ανάγκες μετακίνησης, ώρα αναχώρησης κτλ), αντιδρούν ομοιογενώς στην μεταβολή της συχνότητας. Για παράδειγμα, ένα όχημα που το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας είναι 30% θα αποκριθεί σε μια αρνητική μεταβολή της συχνότητας ( $\Delta f < 0$ ) προσφέροντας ισχύ ή αποκόπτοντας ισχύ από τη φόρτιση του ίση με την αντίστοιχη ισχύ ενός οχήματος με επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας 80%. Με άλλα λόγια, δεν υπάρχει κάποιο κριτήριο σύμφωνα με το οποίο να καθορίζεται

η συμμετοχή του κάθε οχήματος στη ρύθμιση της συχνότητας βάσει των λειτουργικών του χαρακτηριστικών.



Εικόνα 5-11 Δυναμικό μοντέλο απόκρισης μπαταρίας αποθήκευσης

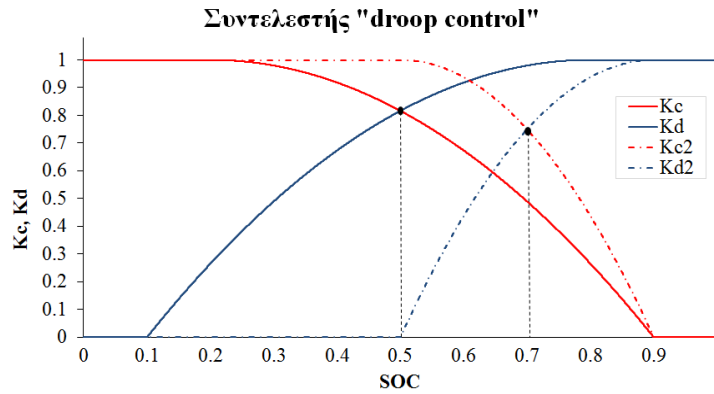
Σύμφωνα με τα παραπάνω, είναι απαραίτητη η σύνδεση του συντελεστή κέρδους του ελέγχου  $K_{droop}$  με το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας έτσι ώστε να είναι αναλογικότερη η συμμετοχή των οχημάτων στη ρύθμιση της συχνότητας. Η σύνδεση του συντελεστή κέρδους με το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας καθορίζεται από τις παρακάτω σχέσεις [158]:

$$\Delta I_{batt} = \begin{cases} K^c \Delta f & (\Delta f_k \geq 0) \\ K^d \Delta f & (\Delta f_k < 0) \\ I_{max} & (K^c \Delta f_k \geq I_{max}) \\ -I_{max} & (K^d \Delta f_k \leq -I_{max}) \end{cases} \quad E\ 5-9$$

$$\begin{cases} K^c = K_{droop} \left( 1 - \left( \frac{SOC_t - SOC^{low}}{SOC^{max} - SOC^{low}} \right)^2 \right) \\ K^d = K_{droop} \left( 1 - \left( \frac{SOC_t - SOC^{high}}{SOC^{min} - SOC^{high}} \right)^2 \right) \end{cases} \quad E\ 5-10$$

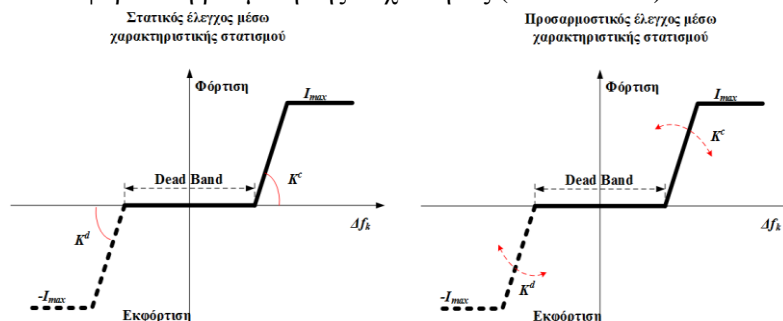
όπου  $K_{droop}$  είναι ο σταθερός συντελεστής κέρδους του ελεγκτή ρεύματος,  $SOC^{max}$  και  $SOC^{min}$  είναι η μέγιστη και ελάχιστη επιτρεπτή τιμή λειτουργίας της μπαταρίας,  $SOC^{high}$  και  $SOC^{low}$  είναι η κατάσταση υψηλής και χαμηλής φόρτισης της μπαταρίας,  $SOC$  είναι το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας του οχήματος μια δεδομένη χρονική στιγμή  $t$ .

Στην Εικόνα 5-12 παρουσιάζονται δύο ενδεικτικά παραδείγματα για την τιμή του συντελεστή φόρτισης  $K^c$  (κόκκινες γραμμές) και εκφόρτισης  $K^d$  (μπλε γραμμές). Όταν στο σύστημα υπάρχει έλλειμα παραγωγής και η συχνότητα είναι μικρότερη των επιτρεπτών ορίων, όσο υψηλότερο είναι το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας ενός οχήματος τόσο εντονότερη είναι η συμμετοχή του στην ρύθμιση συχνότητας μέσω της V2G λειτουργίας. Αντίθετα όταν υπάρχει πλεόνασμα παραγωγής, τα οχήματα που είναι αφόρτιστα συμμετέχουν εντονότερα στη διαδικασία ρύθμισης της συχνότητας. Το ποσοστό συμμετοχής των ηλεκτρικών οχημάτων στη ρύθμιση συχνότητας γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας σε βάθος χρόνου αν τείνει προς το σημείο διασταύρωσης των δύο καμπυλών φόρτισης και εκφόρτισης (σημεία Α και Β). Ως εκ τούτου, όταν αξιοποιείται όλο το εύρος της χωρητικότητας της μπαταρίας για τη στήριξη της συχνότητας, η λειτουργία των ηλεκτρικών οχημάτων είναι τέτοια ώστε το επίπεδο της μπαταρίας να διατηρείται περίπου στο 50%. Για να αλλάξει το «σημείο ροπής» (π.χ. σημείο Β) είναι απαραίτητη η αναθεώρηση των ορίων λειτουργίας της μπαταρίας περιορίζοντας αισθητά το εύρος της χωρητικότητας που συμμετέχει στη ρύθμιση της συχνότητας. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, υιοθετείται ένας δυναμικός ελεγκτής ρεύματος ο οποίος υιοθετεί τον προσαρμοστικό έλεγχο στατισμού (adaptive droop control).



Εικόνα 5-12 Σταθερός έλεγχος ρεύματος: Διακεκομμένη καμπύλη  $SOC_{max}=0.9, SOC_{min}=0.1, SOC_{high}=0.8, SOC_{low}=0.2$ . και συνεχής καμπύλη  $SOC_{max}=0.9, SOC_{min}=0.5, SOC_{high}=0.9, SOC_{low}=0.5$ .

Η ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ μπαταρίας ηλεκτρικού οχήματος και δικτύου είναι μια επικουρική υπηρεσία, επιπρόσθετη της ροής ισχύος από το δίκτυο προς το ηλεκτρικό όχημα για την εξυπηρέτηση των ενεργειακών αναγκών μετακίνησης των ηλεκτρικών οχημάτων. Στον προσαρμοστικό έλεγχο σημαντικό ρόλο έχει το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας όταν το όχημα συνδέεται στο δίκτυο. Η αντίδραση των οχημάτων στη μεταβολή της συχνότητας του ελέγχου μέσω χαρακτηριστικής στατισμού ρυθμίζεται κατάλληλα ώστε το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας να διατηρείται κοντά στο αρχικό επίπεδο τη στιγμή της διασύνδεσης. Παράλληλα δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να ορίσει εκείνος το επιθυμητό επίπεδο συμμετοχής των ηλεκτρικών οχημάτων στη ρύθμιση συχνότητας αντικαθιστώντας το αρχικό επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας με ένα νέο προς το οποίο επιθυμεί ο χρήστης να συγκλίνει η μπαταρία μέσω της συμμετοχής στη πρωτεύουσα ρύθμιση εντός της εξεταζόμενη χρονικής περιόδου. Με τον τρόπο αυτό, ο χρήστης μπορεί να μεταβάλλει τον ρυθμό φόρτισης/εκφόρτισης του και επομένως να επηρεάζει και τη συμμετοχή του όσον αφορά στη ρύθμιση της συχνότητας (Εικόνα 5-13).



Εικόνα 5-13 Στατικός και δυναμικός έλεγχος μέσω χαρακτηριστικής στατισμού

Οι αντίστοιχοι συντελεστές  $K_c$  και  $K_d$  για κάθε χρονική στιγμή  $t$  στον προσαρμοστικό έλεγχο στατισμού δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις [187]:

Όταν  $SOC_t \leq SOC_i^{min}$

$$\begin{cases} K_t^c = K_{droop} \\ K_t^d = 0 \end{cases} \quad \text{E 5-11}$$

Όταν  $SOC_t \geq SOC_i^{max}$

$$\begin{cases} K_t^c = 0 \\ K_t^d = K_{droop} \end{cases} \quad \text{E 5-12}$$

Όταν  $SOC_i^{min} < SOC_t < SOC_i^{in}$

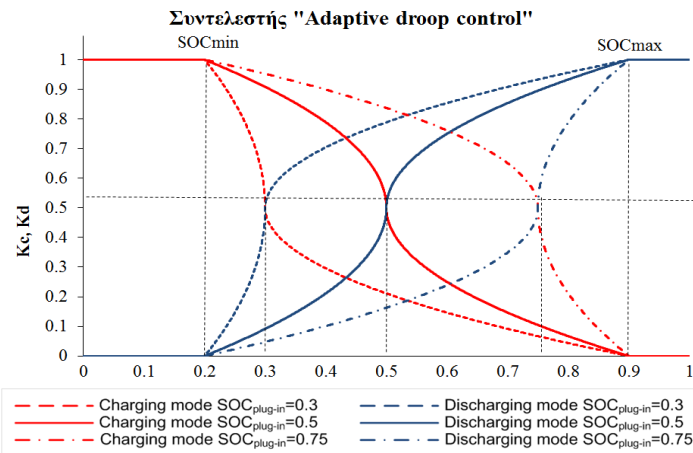
$$\begin{cases} K_t^c = \frac{1}{2}K_{droop} \left( 1 + \sqrt{\frac{SOC_{i,k} - SOC_i^{in}}{SOC_i^{min} - SOC_i^{in}}} \right) \\ K_t^d = \frac{1}{2}K_{droop} \left( 1 - \sqrt{\frac{SOC_{i,k} - SOC_i^{in}}{SOC_i^{min} - SOC_i^{in}}} \right) \end{cases} \quad \text{E 5-13}$$

Όταν  $SOC_i^{in} < SOC_t < SOC_i^{max}$

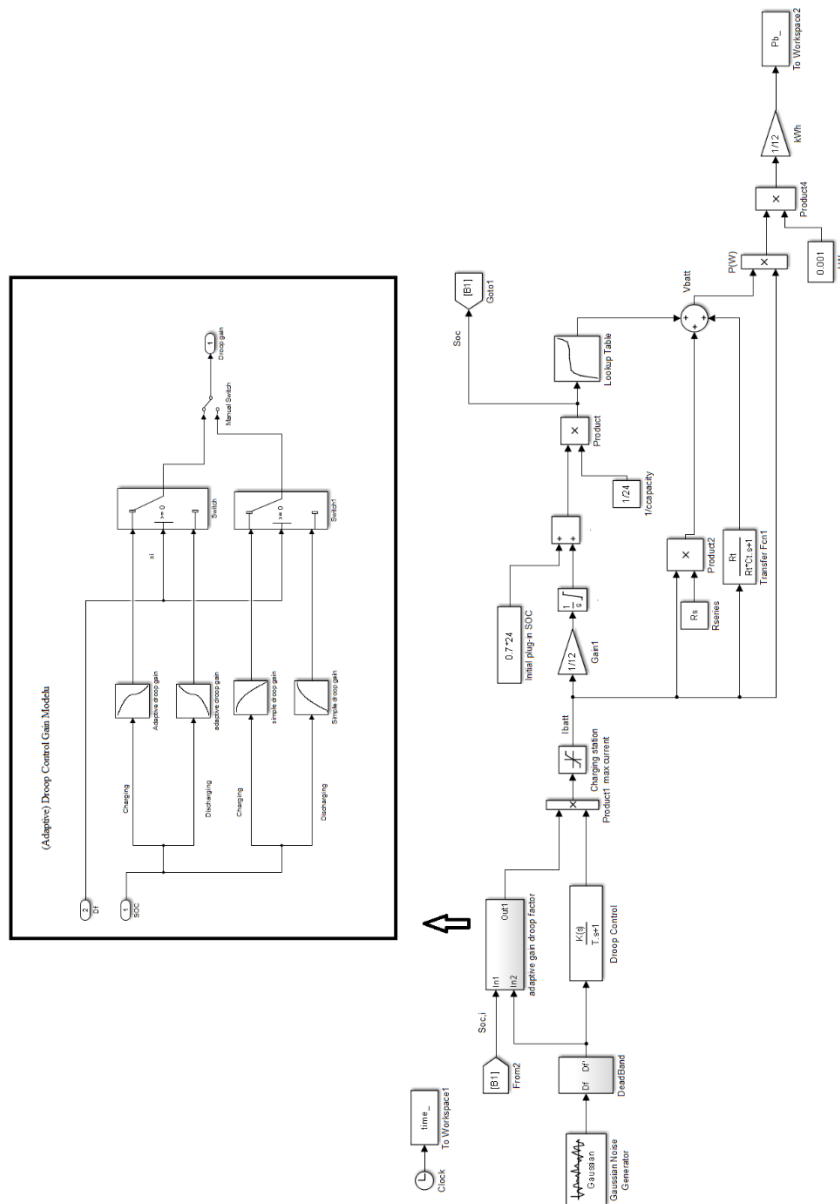
$$\begin{cases} K_t^c = \frac{1}{2}K_{droop} \left( 1 - \sqrt{\frac{SOC_{i,k} - SOC_i^{in}}{SOC_i^{max} - SOC_i^{in}}} \right) \\ K_t^d = \frac{1}{2}K_{droop} \left( 1 + \sqrt{\frac{SOC_{i,k} - SOC_i^{in}}{SOC_i^{max} - SOC_i^{in}}} \right) \end{cases} \quad \text{E 5-14}$$

όπου  $K_t^c + K_t^d = K_{droop}$ . Σύμφωνα με τις παραπάνω σχέσεις για τους συντελεστές κέρδους του προσαρμοστικού ελέγχου στατισμού, οι γραφικές παραστάσεις που απεικονίζουν τους συντελεστές φόρτισης και εκφόρτισης για διαφορετικά επίπεδα φόρτισης της μπαταρίας κατά τη σύνδεση ενός ηλεκτρικού οχήματος στο δίκτυο παρουσιάζονται στην Εικόνα 5-14.

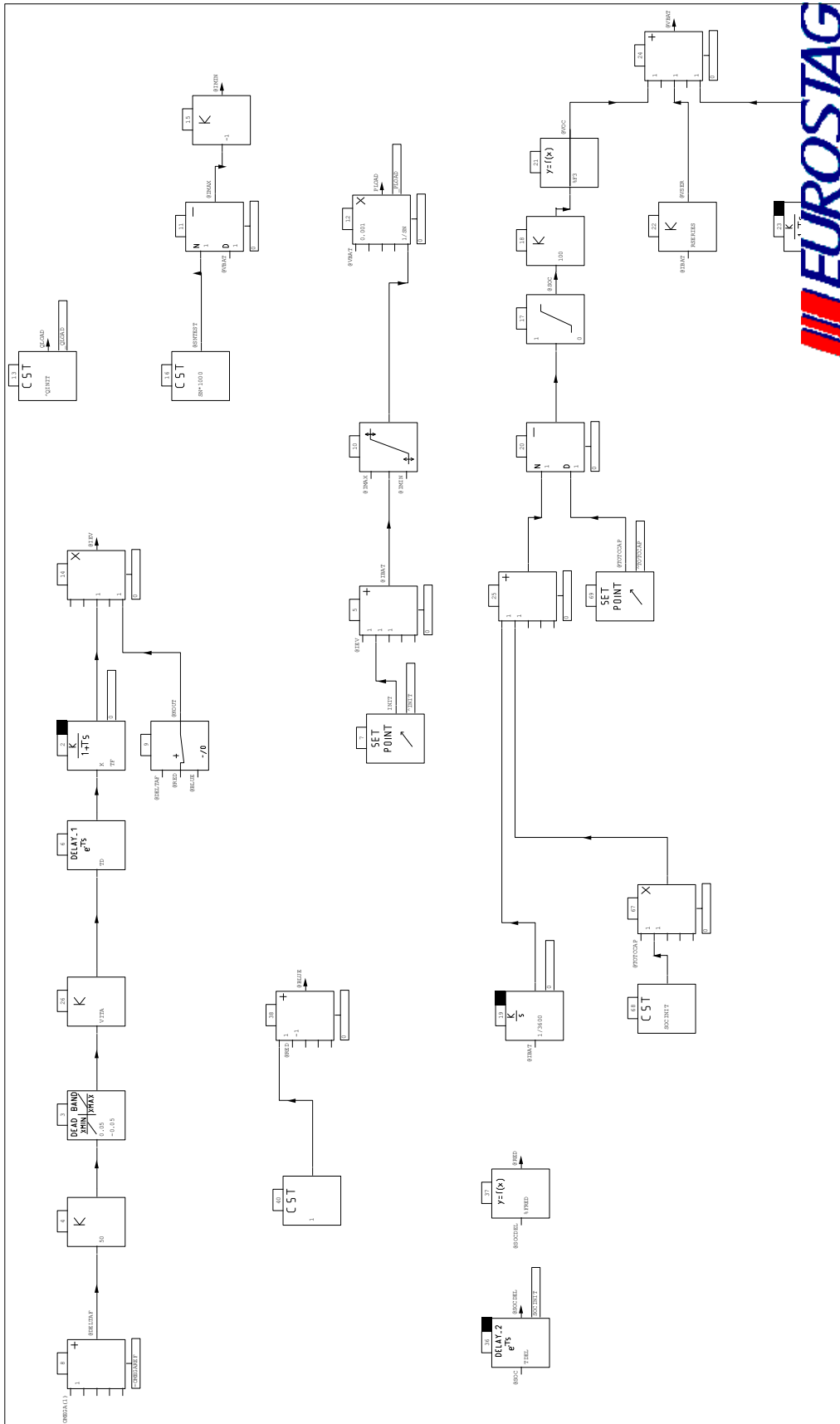
Συνοψίζοντας τα παραπάνω, το δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης ενός ηλεκτρικού οχήματος για τη συμμετοχή τους στη ρύθμιση της συχνότητας του δικτύου παρουσιάζονται στις Εικόνα 5-15 και Εικόνα 5-16.



Εικόνα 5-14 Προσαρμοστικός έλεγχος συχνότητας μέσω χαρακτηριστικής στατισμού



Εικόνα 5-15 Δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης ηλεκτρικού οχήματος σε Matlab/Simulink



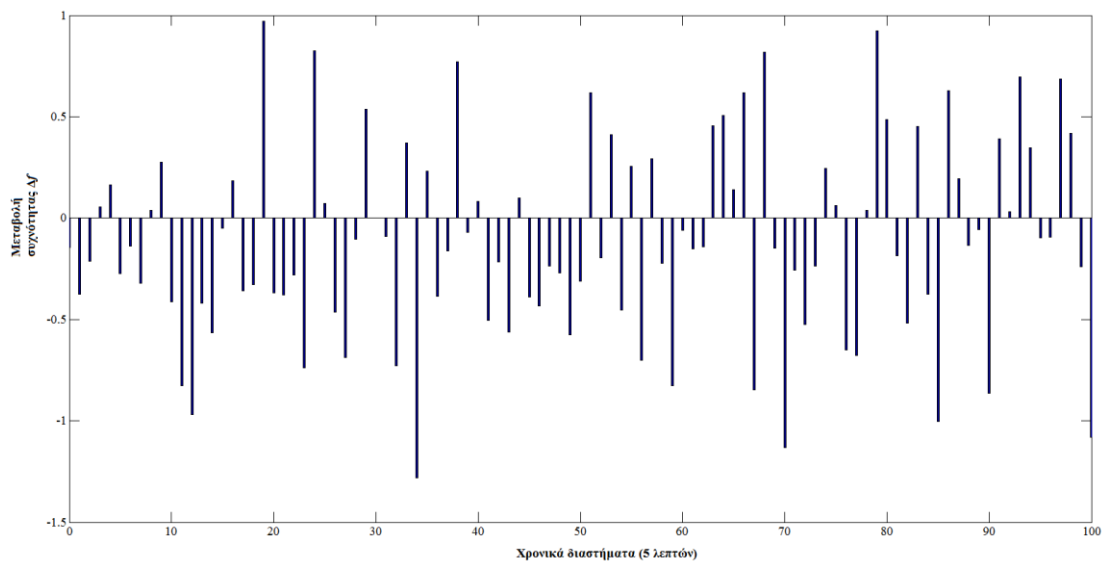
Εικόνα 5-16 Δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης ηλεκτρικού οχήματος σε Eurostag

**Αριθμητικό παράδειγμα**



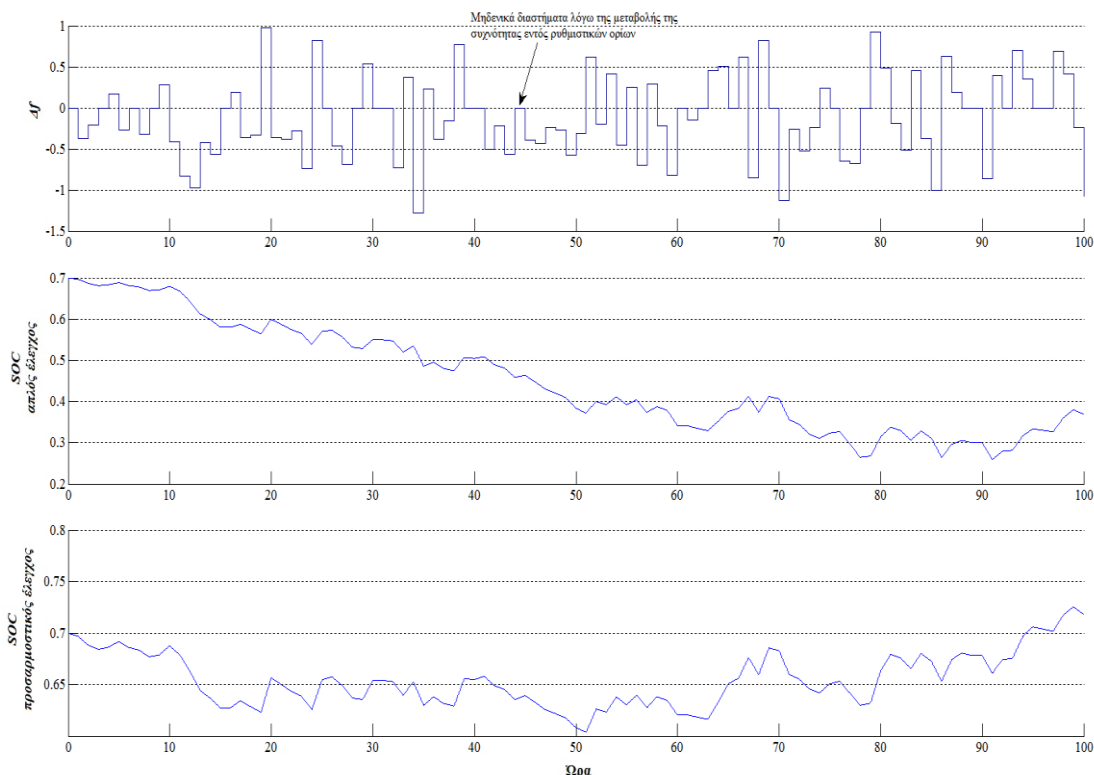
Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ένα απλό αριθμητικό παράδειγμα με σκοπό να γίνει πιο κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας του προσαρμοστικού ελέγχου συχνότητας μέσω χαρακτηριστικής στατισμού. Για τον σκοπό αυτό, θα εξεταστεί η συμμετοχή στη πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας ενός ηλεκτρικού οχήματος που διαθέτει μπαταρία χωρητικότητας 24Ah και είναι συνδεδεμένο σε σταθμό φόρτισης Mode 2 (ονομαστικό ρεύμα σταθμού 32A). Για την προσομοίωση της απόκρισης της συχνότητας μέσω χαρακτηριστικής στατισμού, θεωρήθηκε ότι το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας όταν το όχημα συνδέεται στο δίκτυο είναι 70% και για την απόκριση της μπαταρίας στις μεταβολές της συχνότητας θεωρήθηκε  $K_{droop}=15$  και  $T_{droop}=0.005$  (η επιλογή των παραμέτρων είναι ενδεικτική ωστόσο είναι κοινή και για τις δύο μεθόδους ελέγχου της συχνότητας).

Για το σήμα εισόδου μεταβολής της συχνότητας, μια γεννήτρια θορύβου Gaussian από τη βιβλιοθήκη στο Simulink της Matlab υιοθετήθηκε με τις εξής παραμέτρους: μέση τιμή -0,12, διακύμανση 0,2, αρχικό πλήθος 100. Συνεπώς, η μεταβολή της συχνότητας παρουσιάζεται στην Εικόνα 5-17.



**Εικόνα 5-17 Υποθετική μεταβολή συχνότητας  
(Matlab/Simulink, Gaussian θόρυβος, μέση τιμή=-0.12 και διακύμανση=0.2)**

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή των δύο μεθόδων ελέγχου για τη συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας απεικονίζονται στην Εικόνα 5-18. Το πρώτο διάγραμμα απεικονίζει τη μεταβολή της συχνότητας που είναι εκτός ρυθμιστικών ορίων ( $\pm 15\%$ ) και για την οποία απαιτείται η συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων για τη ρύθμιση της. Τα δύο τελευταία διαγράμματα στην Εικόνα 5-18 παρουσιάζουν την μεταβολή του επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας λόγω της συμμετοχής των ηλεκτρικών οχημάτων στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας υιοθετώντας τον απλό έλεγχο και β) τον προσαρμοστικό. Από τη σύγκριση των δύο διαγραμμάτων προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο απλός έλεγχος έχει ως αποτέλεσμα το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας στο τέλος της εξεταζόμενης περιόδου να είναι αρκετά χαμηλό ( $\sim 40\%$ ), ενώ στη περίπτωση του προσαρμοστικού ελέγχου το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας διατηρείται πολύ κοντά ( $\sim 70\%$ ) στο αντίστοιχο αρχικό επίπεδο κατά τη σύνδεση του ηλεκτρικού οχήματος με το δίκτυο. Επομένως, με τον προσαρμοστικό έλεγχο της συχνότητας εξασφαλίζεται η διατήρηση του επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας του ηλεκτρικού οχήματος σε βάθος χρόνου έτσι ώστε η αυτονομία μετακίνησης του να μην επηρεάζεται.



Εικόνα 5-18 Συγκριτικά αποτελέσματα συμμετοχής ηλεκτρικών οχημάτων στη πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας μέσω απλού και προσαρμοστικού ελέγχου ρεύματος

### 5.3.1.3 Εφαρμογή του προσαρμοστικού μοντέλου συμμετοχής στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας στο αυτόνομο ηλεκτρικό σύστημα της Κρήτης

Το κύριο χαρακτηριστικό των αυτόνομων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας έναντι των διασυνδεδεμένων συστημάτων είναι το γεγονός ότι είναι πιο ευάλωτα σε διαταραχές που τυχόν μπορούν να συμβούν στο δίκτυο. Στην περίπτωση του ηπειρωτικού συστήματος, σημαντική είναι και η συνεισφορά των διασυνδέσεων σε περιπτώσεις διαταραχών. Επομένως, η μελέτη της συμμετοχής των ηλεκτρικών οχημάτων στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας αποκτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε απομονωμένα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Στην ενότητα αυτή μελετάται η εφαρμογή του προσαρμοστικού ελέγχου συμμετοχής στη πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας στο αυτόνομο σύστημα της Κρήτης. Σκοπός της μελέτης αυτής είναι να διερευνηθεί η επίδραση της συμμετοχής των ηλεκτρικών οχημάτων στη σταθεροποίηση της συχνότητας του συστήματος της Κρήτης εξετάζοντας διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης/εκφόρτισης.

Όσον αφορά στη μοντελοποίηση του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων, αυτά προσομοιώνονται σαν μια αθροιστική χωρητικότητα μπαταρίας που συνδέεται στους ζυγούς Υ.Τ/Μ.Τ. Η λειτουργία των ηλεκτρικών οχημάτων (φόρτιση/ εκφόρτιση) καθορίζεται με τυχαίο τρόπο για να διασφαλιστεί η ετερογένεια του στόλου και για να παρατηρήσουμε την ποικιλομορφία στη συνεισφορά των ηλεκτρικών οχημάτων στην υποστήριξη της συχνότητας. Η τυχαία επιλογή της λειτουργίας τους καθορίζει την τιμή του  $I_{scheduled}$  που απεικονίζεται στην Εικόνα 5-11. Το μέγιστο ρεύμα φόρτισης/εκφόρτισης είναι 32Α και αφορά σε σταθμούς φόρτισης με ονομαστική ισχύ 7.2kW (Mode 2 ). Οι τιμές των παραμέτρων για την προσομοίωση της μπαταρίας των ηλεκτρικών οχημάτων είναι:  $K_{droop}=1\text{kA/Hz}$ ,  $T_{droop}=1\text{sec}$ ,  $R_{series}=0.013\Omega$ ,  $R_i=0.001\Omega$ ,  $C_i=1\text{F}$ . Διαφορετικές πολιτικές υιοθετούνται όσον αφορά στη στρατηγική φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων:

- **Σενάριο Α - Μη ευέλικτη φόρτιση:** Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα προσομοιώνονται σαν ένα συμβατικό φορτίο το οποίο προστίθεται στην κατανάλωση του δικτύου.

- **Σενάριο Β: Ευέλικτη φόρτιση με δυνατότητα αποκοπής φορτίου:** Τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να μεταβάλλουν το επίπεδο φόρτισης τους ανάλογα με το επίπεδο της συχνότητας δικτύου.
- **Σενάριο Γ: Ευέλικτη φόρτιση με δυνατότητα έκχυσης ενέργειας στο δίκτυο (V2G):** Τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να μεταβάλλουν το επίπεδο φόρτισης τους ή ακόμα και να εγχέουν ενέργεια στο δίκτυο ανάλογα με το επίπεδο της συχνότητας του δικτύου. Λόγω φθοράς της μπαταρίας των ηλεκτρικών αυτοκινήτων από την V2G λειτουργία, θεωρούμε ότι ένα ποσοστό (40%) του συνολικού στόλου ηλεκτρικών οχημάτων συμμετέχει στη ρύθμιση συχνότητας εγχέοντας ενέργεια στο δίκτυο.

Όσον αφορά στη λειτουργική κατάσταση του δικτύου πριν την εκδήλωση της διαταραχής, διαφορετικά επίπεδα φόρτισης ζυγών και παραγωγής ΑΠΕ εξετάζονται όπως παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5-1).

**Πίνακας 5-1: Σενάρια για το προφίλ ζήτησης/παραγωγής ΑΠΕ του δικτύου**

Σενάρια	Φορτίο Δικτύου (MW)	Αιολική Παραγωγή (MW)	Φ/Β Παραγωγή (MW)	Ηλεκτρικά Οχήματα (MW)	Αποκοπή Φορτίου	V2G
A1	250	120	0	0	✗	✗
A2	250	143	0	100	✗	✗
A3	300	90	50	0	✗	✗
A4	300	143	50	100	✗	✗
A5	600	143	0	0	✗	✗
A6	600	143	0	100	✗	✗
A7	600	143	50	0	✗	✗
A8	600	143	50	100	✗	✗
B2	250	143	0	100	✓	✗
B4	300	143	50	100	✓	✗
B6	600	143	0	100	✓	✗
B8	600	143	50	100	✓	✗
C2	250	143	0	100	✓	✓
C4	300	143	50	100	✓	✓
C6	600	143	0	100	✓	✓
C8	600	143	50	100	✓	✓

Η παρούσα ανάλυση επικεντρώνεται στη δυναμική συμπεριφορά του αυτόνομου ηλεκτρικού δικτύου της Κρήτης, όσον αφορά στη συχνότητα δικτύου, στη συμπεριφορά των ηλεκτρικών οχημάτων και στην παραγωγή των μονάδων (συμβατικών και μη) μετά την εκδήλωση μια διαταραχής στο δίκτυο. Για τον σκοπό αυτό, δύο διαφορετικές διαταραχές δικτύου εξετάζονται:

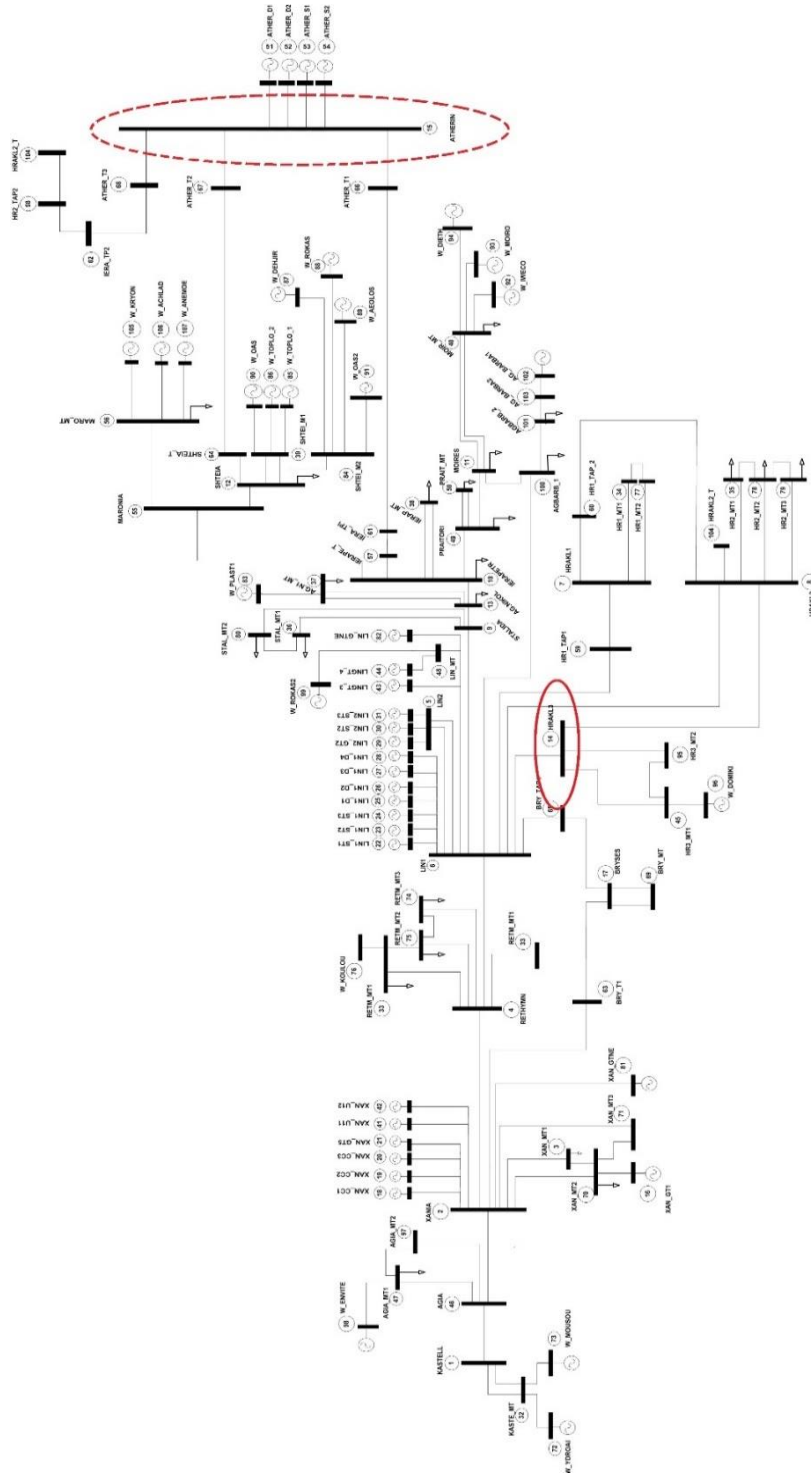
**Σενάριο Δ1:** Τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό υψηλής στη περιοχή του Ηρακλείου που υποδεικνύεται με κόκκινο συνεχή κύκλο στην Εικόνα 5-19.

**Σενάριο Δ2:** Τριφασικό βραχυκύκλωμα στον ζυγό υψηλής τάσης στον Αθερινόλακκο (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή στην Εικόνα 5-19) με ταυτόχρονη απώλεια των γεννητριών ντίτζελ (ATHER\_D1 και ATHER\_D2).

#### Αποτελέσματα σεναρίου διαταραχής Δ1

Η ζήτηση που πρέπει να εξυπηρετηθεί από τις συμβατικές μονάδες εξαρτάται από το προφίλ παραγωγής των ΑΠΕ καθώς και το προφίλ ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων. Επομένως, το προφίλ παραγωγής του συστήματος της Κρήτης είναι διαφορετικό ανάλογα με το εξεταζόμενο σενάριο. Ο Πίνακας 5-2 παρουσιάζει το προφίλ ένταξης των συμβατικών μονάδων καθώς και τη συνολική διαθέσιμη εφεδρεία ανά σενάριο. Για χαμηλά επίπεδα φόρτισης του δικτύου (A1-A4), η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων αυξάνει τη διαθέσιμη εφεδρεία του συστήματος αφού περισσότερες μονάδες εντάσσονται στο σύστημα για να εξυπηρετήσουν το επιπρόσθετο φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων. Αντίθετα, για υψηλά επίπεδα φόρτισης του δικτύου, η διείσδυση των

ηλεκτρικών οχημάτων μειώνει τη διαθέσιμη εφεδρεία του συστήματος, αφού όλες οι μονάδες παραγωγής είναι ήδη ενταγμένες στο σύστημα και παράγουν μεγαλύτερα ποσά ενέργειας ώστε να εξυπηρετήσουν τις επιπρόσθετες ανάγκες φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων.



Εικόνα 5-19 Μονοφασικό ισοδύναμο διάγραμμα για το σύστημα μεταφοράς της Κρήτης

Πίνακας 5-2: Το προφίλ ένταξης των συμβατικών μονάδων της Κρήτης ανά σενάριο

Συμβατικές Μονάδες	Σενάρια Μελέτης											
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	B2 & C2	B4 & C4	B6 & C6	B8 & C8
16XAN_GT1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
18XAN_CC1	✓	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
19XAN_CC2	✓	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
20XAN_CC3	✓	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
21XAN_GT5	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	x	x	✓	✓
22LIN1_ST1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
23LIN1_ST2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
24LIN1_ST3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
25LIN1_D1	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓
26LIN1_D2	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓
27LIN1_D3	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓
28LIN1_D4	x	x	x	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓
29LIN2_GT2	x	x	x	x	x	✓	x	x	x	x	✓	x
30LIN2_ST2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
31LIN2_ST3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
41XAN_U11	✓	x	x	x	✓	✓	✓	✓	x	x	✓	✓
42XAN_U12	x	x	x	x	✓	✓	x	✓	x	x	✓	✓
43LINGT3	x	x	x	x	✓	✓	✓	✓	x	x	✓	✓
44LINGT4	x	x	x	x	x	✓	x	x	x	x	✓	x
51ATHERD1	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
52ATHERD2	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
53ATHERS1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
54ATHERS2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
81XANGTNE	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
82LIN_GTNE	x	x	x	x	x	✓	x	x	x	x	✓	x
Εφεδρεία (MW)	203	226	141	275	246	216	215	196	226	275	216	196

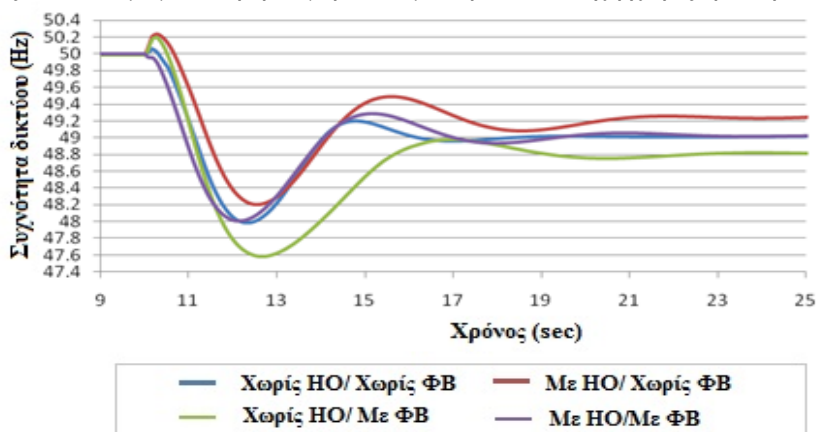
Η εκδήλωση της διαταραχής Δ1 (στον ζυγό Υ.Τ/Μ.Τ στην περιοχή του Ηρακλείου) προκαλεί πτώση της τάσης στους ζυγούς του δικτύου με αποτέλεσμα να ενεργοποιούνται οι προστασίες υπότασης των αιολικών πάρκων. Ως εκ τούτου, ένα σημαντικό μέρος της αιολικής παραγωγής που συνεισέφερε στην εξυπηρέτηση του φορτίου της Κρήτης δεν είναι πλέον διαθέσιμο. Τα αιολικά πάρκα που δεν είναι πλέον διαθέσιμα μετά την εκδήλωση της διαταραχής παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5-3).

Πίνακας 5-3: Διαθεσιμότητα αιολικών πάρκων μετά την εκδήλωση της διαταραχής Δ1

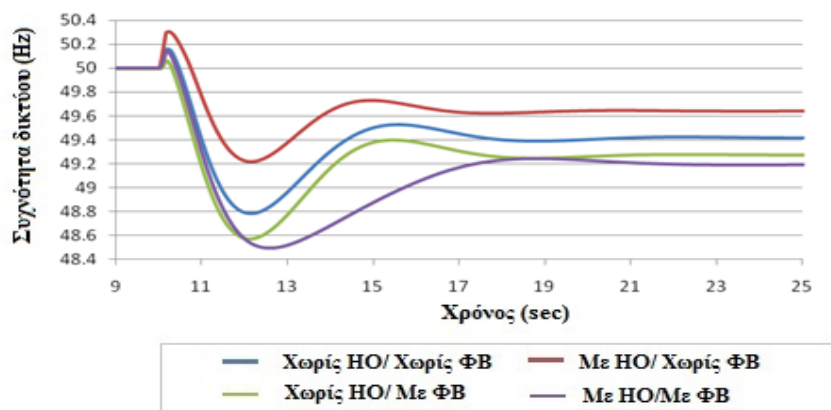
Αιολικά Πάρκα	Σενάρια Μελέτης											
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	B2 & C2	B4 & C4	B6 & C6	B8 & C8
90371 CLR	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
90373 CLR	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
90372 CLR	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
90393 CLR	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
90445 CLR	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
90461 CLR	x	x	x	x	✓	✓	x	x	x	x	x	x
90462 CLR	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
90463 CLR	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
90467 CLR	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
90464 CLR	x	x	x	x	x	✓	x	x	x	x	x	x
90465 CLR	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
90469 CLR	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
90466 CLR	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

90468 CLR	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
90471 CLR	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
90472 CLR	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
90473 CLR	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
90551 CLR	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
90651 CLR	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
90661 CLR	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	x	✓	✓	✓
90703 CLR	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
90951 CLR	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
90952 CLR	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
90953 CLR	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
90954 CLR	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<b>Εγκατεστημένη ισχύς ΑΠΕ (MW)</b>	120	143	90	143	143	143	143	143	143	143	143	143
<b>Απώλεια ισχύος ΑΠΕ (MW)</b>	104	102	56	102	102	102	102	102	102	102	102	102
<b>Απώλεια ισχύος ΑΠΕ (%)</b>	86	71	62	71	71	71	71	71	71	71	71	71

Η απώλεια ενός σημαντικού μέρους της παραγωγής (λόγω απώλειας αιολικών πάρκων) έχει ως συνέπεια τη βύθιση της συχνότητας όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-20 και στην Εικόνα 5-21. Τα δύο αυτά διαγράμματα απεικονίζουν το προφίλ της συχνότητας σε περίοδο χαμηλής και υψηλής κατανάλωσης, αντίστοιχα. Παρατηρούμε ότι όταν το σφάλμα συμβεί σε περιόδους χαμηλής κατανάλωσης, η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων ως συμβατικά φορτία συντελεί στη μείωση της βύθισης της συχνότητας του δικτύου κατά το μεταβατικό στάδιο και στη σταθεροποίηση της πιο κοντά στην ονομαστική της τιμή στη μόνιμη κατάσταση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μεγαλύτερη ισχύς εφεδρείας είναι διαθέσιμη για να υποστηρίξει τη συχνότητα δικτύου καθώς εντάσσονται περισσότερες μονάδες παραγωγής λόγω της επιπρόσθετης ζήτησης φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Αντίθετα, η ενσωμάτωση της ΦΒ παραγωγής στο σύστημα μειώνει τον αριθμό των ενταγμένων μονάδων στο σύστημα, που απαιτούνται για να εξυπηρετήσουν το φορτίο του συστήματος, και, συνεπώς, μειώνεται η διαθέσιμη εφεδρεία με αποτέλεσμα η συχνότητα δικτύου να παρουσιάζει μεγαλύτερη βύθιση κατά το μεταβατικό στάδιο και να σταθεροποιείται σε χαμηλότερα επίπεδα στη μόνιμη κατάσταση. Η συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας συνεισφέρει στην αποκατάσταση της συχνότητας του δικτύου εξισορροπώντας τις αρνητικές επιπτώσεις της ΦΒ παραγωγής κατά την εκδήλωση της διαταραχής. Σε περιόδους υψηλής κατανάλωσης και διείσδυσης ΑΠΕ (Εικόνα 5-21), η ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο μειώνει τη διαθέσιμη ισχύ εφεδρείας με αποτέλεσμα η βύθιση της συχνότητας να είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με την αντίστοιχη χωρίς ηλεκτρικά οχήματα.

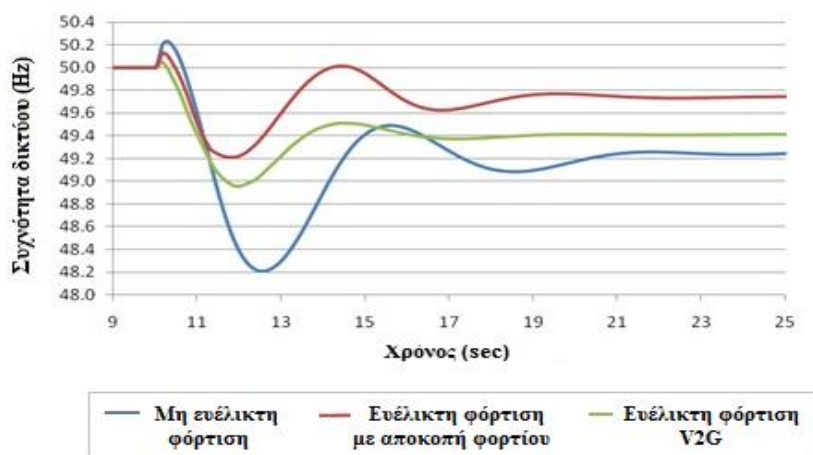


Εικόνα 5-20 Προφίλ συχνότητας δικτύου για την περίοδο χαμηλής κατανάλωσης δικτύου (Σενάριο διαταραχής Δ1)



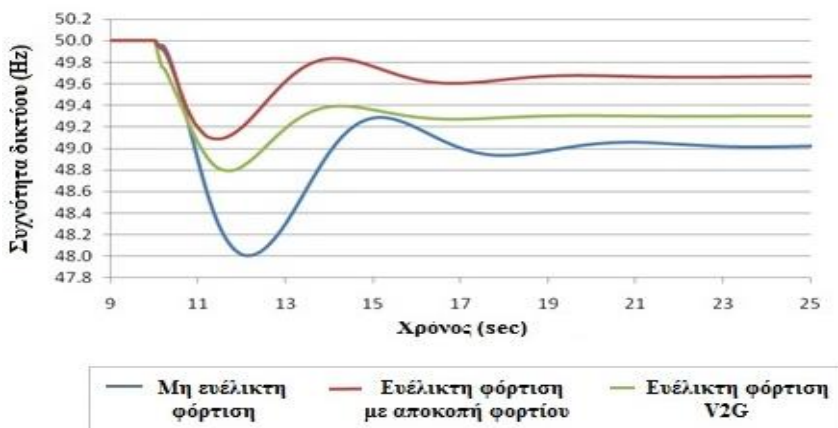
Εικόνα 5-21 Προφίλ συχνότητας δικτύου για την περίοδο υψηλής κατανάλωσης δικτύου (Σενάριο διαταραχής Δ1)

Στα παραπάνω διαγράμματα, τα ηλεκτρικά οχήματα συμπεριφέρονται ως απλά φορτία βάσει της «plug-n-play» θεώρησης, δηλαδή με τη σύνδεση τους στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας η διαδικασία της φόρτισης ξεκινά αυτόματα στο μέγιστο επιτρεπτό επίπεδο φόρτισης χωρίς δυνατότητα αλλαγής ρυθμού φόρτισης. Στα επόμενα διαγράμματα (Εικόνα 5-22-Εικόνα 5-25), παρουσιάζεται το προφίλ της συχνότητας για διαφορετικά στιγμιότυπα φόρτισης του δικτύου της Κρήτης και παραγωγής ΦΒ θεωρώντας διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Από τα αποτελέσματα είναι φανερό ότι η συνεισφορά των ηλεκτρικών οχημάτων στη ρύθμιση συχνότητας μέσω της ευέλικτης φόρτισης (αποκοπή φορτίου ή V2G) είναι σημαντική ενισχύοντας τη δυναμική ασφάλεια του δικτύου. Μάλιστα, η περιορισμένη συμμετοχή των οχημάτων στην V2G λειτουργία (μόνο το 40% του στόλου) περιορίζει τη διαθέσιμη χωρητικότητα των μπαταριών που μπορεί δυνητικά να υποστηρίξει επικουρικά τη συχνότητα δικτύου. Η ευέλικτη φόρτιση με αποκοπή φορτίου φαίνεται να είναι αποδοτικότερη συγκριτικά με την V2G λειτουργία δεδομένου ότι όλα τα ηλεκτρικά οχήματα συμμετέχουν σε αυτή. Ωστόσο, η ευέλικτη φόρτιση με αποκοπή φορτίου προϋποθέτει τη φόρτιση όλων των ηλεκτρικών οχημάτων στο μέγιστο επιτρεπτό επίπεδο κάτι το οποίο δεν είναι δεδομένο. Η συμμετοχή ενός ποσοστού του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων στη V2G λειτουργία είναι μια πιο ρεαλιστική προσέγγιση η οποία προσφέρει επίσης ανταγωνιστικά αποτελέσματα.

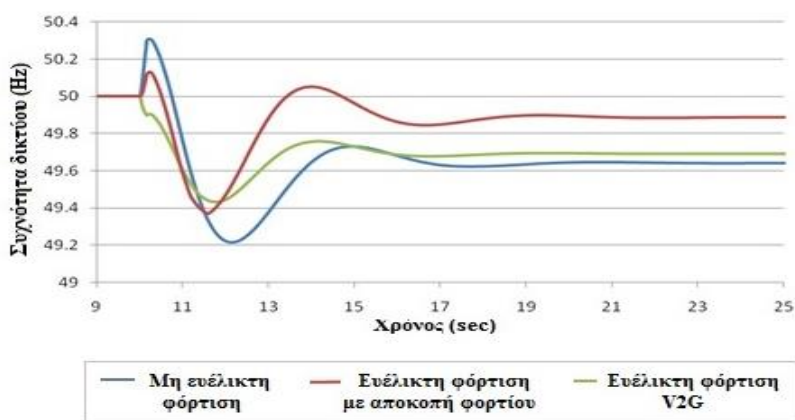


Εικόνα 5-22 Προφίλ συχνότητας δικτύου για την περίοδο χαμηλής κατανάλωσης δικτύου, με ηλεκτρικά αυτοκίνητα και χωρίς ΦΒ (Σενάριο διαταραχής Δ1)

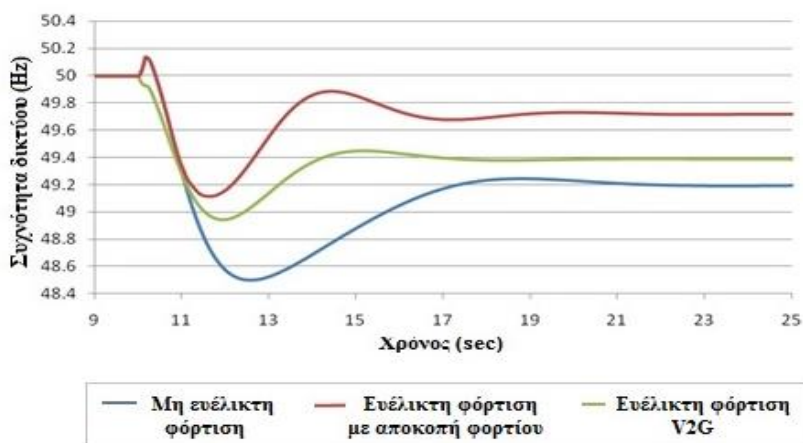




Εικόνα 5-23 Προφίλ συχνότητας δικτύου για την περίοδο χαμηλής κατανάλωσης δικτύου, με ηλεκτρικά αυτοκίνητα και με ΦΒ (Σενάριο διαταραχής Δ1)



Εικόνα 5-24 Προφίλ συχνότητας δικτύου για την περίοδο υψηλής κατανάλωσης δικτύου, με ηλεκτρικά αυτοκίνητα και χωρίς ΦΒ (Σενάριο διαταραχής Δ1)



Εικόνα 5-25 Προφίλ συχνότητας δικτύου για την περίοδο υψηλής κατανάλωσης δικτύου, με ηλεκτρικά αυτοκίνητα και με ΦΒ (Σενάριο διαταραχής Δ1)

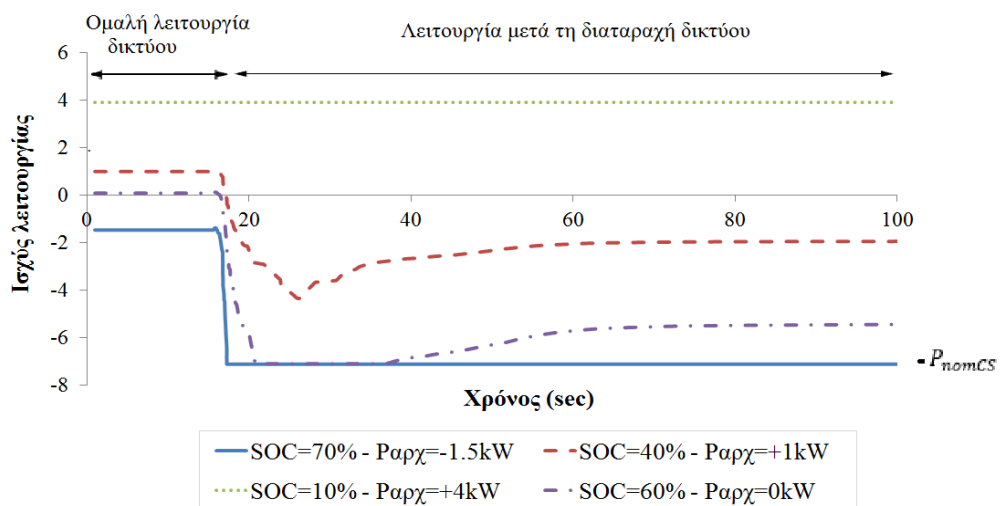
Στη συνέχεια, η επίδραση του προσαρμοστικού ελέγχου συχνότητας μέσω χαρακτηριστικής στατισμού στον τρόπο λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων για την επικουρική υποστήριξη της συχνότητας δικτύου απεικονίζεται στις Εικόνα 5-26 και Εικόνα 5-27. Η παρούσα προσομοίωση αφορά στην περίοδο χαμηλής κατανάλωσης δικτύου με υψηλή διείδυση ΑΠΕ.



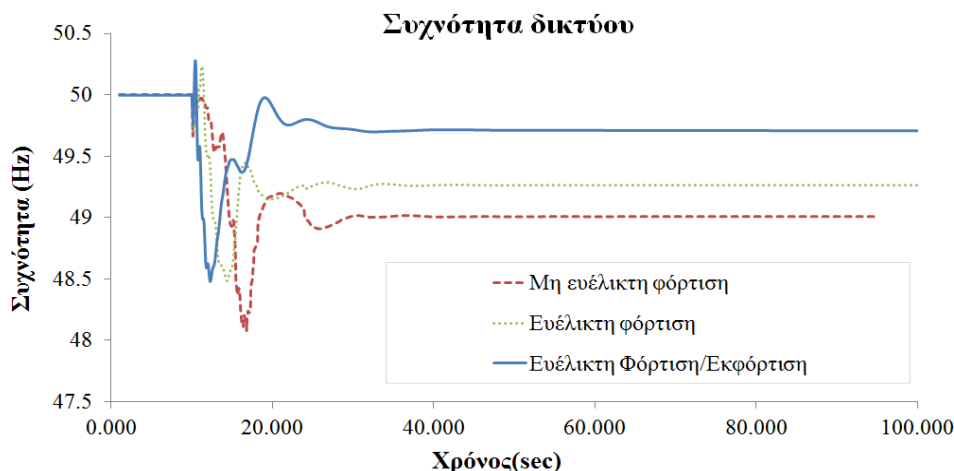
Πιο συγκριμένα, η Εικόνα 5-26 απεικονίζει ενδεικτικά τη συμμετοχή στη πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας, μέσω του προσαρμοστικού ελέγχου, τεσσάρων ηλεκτρικών οχημάτων με διαφορετικό προφίλ λειτουργίας. Στην ομαλή κατάσταση λειτουργίας του δικτύου πριν την εκδήλωση του βραχυκυκλώματος, κάθε ηλεκτρικό όχημα έχει το δικό του προφίλ λειτουργίας ανάλογα με τις ενεργειακές ανάγκες (το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας κατά τη διασύνδεση τους είναι διαφορετικό) και τους περιορισμούς μετακίνησης του. Μετά την εκδήλωση της διαταραχής Δ1, η συνεισφορά κάθε οχήματος στην πρωτεύουσα ρύθμιση καθορίζεται, τοπικά, από τον προσαρμοστικό έλεγχο που περιγράφεται από τις σχέσεις E5-11 – E5-14. Συνεπώς, το όχημα με το μικρότερο επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας (10%) δεν συμμετέχει στην υποστήριξη της συχνότητας δικτύου λόγω των περιορισμένων διαθέσιμων πόρων της μπαταρίας του. Λόγω των αυξημένων ενεργειακών αναγκών μετακίνησης του, το όχημα συνεχίζει τη διαδικασία της φόρτισης του ανεπηρέαστα ακόμα και μετά την εκδήλωση της διαταραχής. Αντίθετα, στη περίπτωση όπου η φόρτιση της μπαταρίας είναι υψηλή (70%), το όχημα προσφέρει τη μέγιστη δυνατή υποστήριξη της συχνότητας παρέχοντας στο δίκτυο ισχύ ίση με την ονομαστική ισχύ των υποδομών φόρτισης (7.2kW). Στην περίπτωση του οχήματος που το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας είναι 40%, η λειτουργική του κατάσταση μετά τη διαταραχή (εκφόρτιση) μεταβάλλεται συγκριτικά με την αντίστοιχη κατά την ομαλή λειτουργία του δικτύου (φόρτιση).

Παρά την ετερογένεια της συνεισφοράς των ηλεκτρικών οχημάτων, που οφείλεται στον προσαρμοστικό έλεγχο που λαμβάνει υπόψη τις ενεργειακές ανάγκες και περιορισμούς μετακίνησης των ηλεκτρικών οχημάτων, η αθροιστική συνεισφορά του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων είναι ωφέλιμη για την υποστήριξη της συχνότητας σε πρωτογενές επίπεδο όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5-27. Τρία σενάρια ρύθμισης της συχνότητας εξετάζονται: στο βασικό σενάριο δεν υπάρχουν ηλεκτρικά οχήματα, στο απλό σενάριο διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων επιτρέπεται μόνο η ρύθμιση του επιπέδου φόρτισης, ενώ στο προχωρημένο σενάριο τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν την δυνατότητα έγχυσης ισχύος προς το δίκτυο. Στο βασικό σενάριο, παρατηρούμε ότι η συχνότητα στη μόνιμη κατάσταση μετά τη διαταραχή και την ενεργοποίηση της πρωτεύουσας ρύθμισης σταθεροποιείται στη χαμηλότερη (συγκριτικά με τα άλλα δύο σενάρια) τιμή των 49Hz. Η βέλτιστη ρύθμιση συχνότητας επιτυγχάνεται με την υιοθέτηση της αμφίδρομης ροής ισχύος καθώς δίνεται η δυνατότητα αξιοποίησης της μέγιστης χωρητικότητας ρύθμισης της μπαταρίας των ηλεκτρικών οχημάτων.

### Προφίλ λειτουργίας ηλεκτρικών οχημάτων

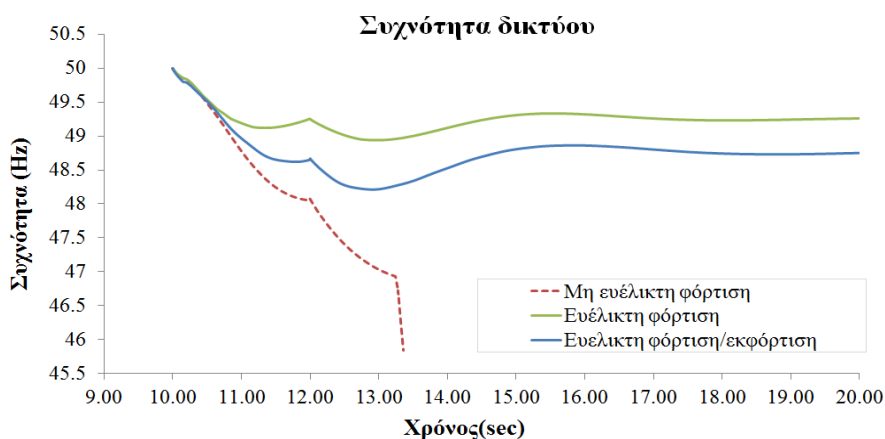


Εικόνα 5-26 Ισχύς λειτουργίας ηλεκτρικών οχημάτων πριν και μετά τη διαταραχή Δ1 στο δίκτυο



Εικόνα 5-27 Συχνότητα δικτύου πριν και μετά τη διαταραχή Δ1 στο δίκτυο

Τα αποτελέσματα από το σενάριο διαταραχής Δ2 παρουσιάζονται στην Εικόνα 5-28. Πιο συγκεκριμένα, για το σενάριο όπου επιτρέπεται μόνο η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων, υποθέτουμε ότι τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα φορτίζουν στη μέγιστη ισχύ πριν την εκδήλωση της διαταραχής. Επιπρόσθετα, θεωρούμε ότι τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα είναι πλήρως φορτισμένα και ένα ποσοστό 40% επιθυμεί να συμμετάσχει στην παροχή επικουρικών υπηρεσιών για την στήριξη της συχνότητας. Από τα αποτελέσματα στην Εικόνα 5-28, προκύπτει ότι στη περίπτωση που τα ηλεκτρικά οχήματα δεν προσφέρουν ευελιξία ζήτησης η συχνότητα καταρρέει και επομένως οι προστασίες των συμβατικών μονάδων ενεργοποιούνται και το σύστημα οδηγείται σε blackout. Αυτό το blackout μπορεί να αποφευχθεί με τη συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας είτε αποκόπτοντας μέρος της ζήτησης φόρτισης είτε εγχέοντας ενέργεια στο δίκτυο. Το επίπεδο σταθεροποίησης της συχνότητας μετά τη διαταραχή στη μόνιμη κατάσταση εξαρτάται από την αρχική κατάσταση λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων καθώς και από το ποσοστό συμμετοχής τους.



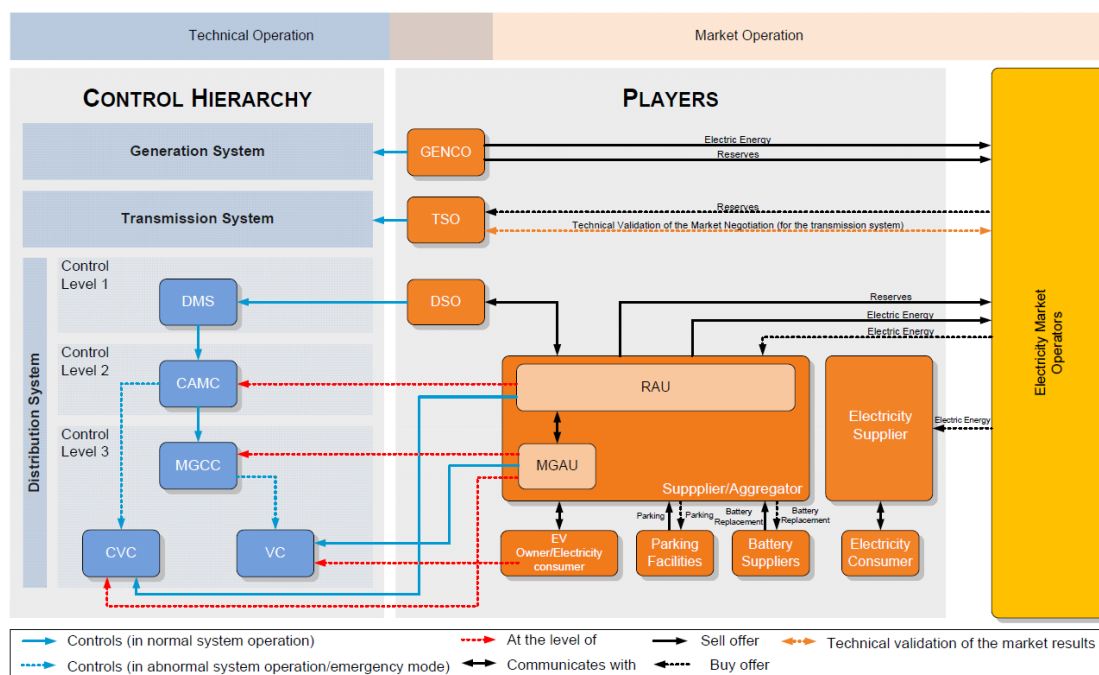
Εικόνα 5-28 Συχνότητα δικτύου πριν και μετά τη διαταραχή Δ1 στο δίκτυο

### 5.3.2 Συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στη δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας

Η συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στη δευτερεύουσα ρύθμιση αποτελεί ουσιαστικά τη συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά εφεδρειών. Υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί για τη συμμετοχή τους στην αγορά εφεδρειών αλλά και γενικότερα στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Καταρχάς, λόγω της περιορισμένη χωρητικότητας της μπαταρίας τους, τα ηλεκτρικά οχήματα δεν μπορούν να συμμετάσχουν ως μεμονωμένες οντότητες. Η ελάχιστη δήλωση ονομαστικής παραγωγής για μια μονάδα παραγωγής, βάσει των δηλώσεων συμμετοχής στο ΛΑΓΗΕ, είναι 1MW. Ομοίως, για τη συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητη η συνάθροιση των μπαταριών πολλών οχημάτων με στόχο

την επίτευξη μιας κρίσιμης αθροιστικής χωρητικότητας ικανής να επιτρέψει τη συμμετοχή τους. Επιπρόσθετα, η συμμετοχή τους στις αγορές ενέργειας απαιτεί την σύναψη συμφωνιών με τον λειτουργό της αγοράς σχετικά με τη διαθέσιμη χωρητικότητα για δευτερεύουσα εφεδρεία αλλά και το χρονικό διάστημα που θα είναι διαθέσιμη. Επομένως, απαιτείται ο προγραμματισμός της λειτουργίας τους από έναν κεντρικό διαχειριστή (Electric Vehicle Supply Equipment Aggregator-*EVSEA*) ο οποίος θα είναι υπεύθυνος για τη συνάθροιση και διαχείριση της λειτουργίας του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων καθώς και για τις συμφωνίες με τον διαχειριστή της αγοράς. Είναι σημαντικό να τονιστεί στο σημείο αυτό, ότι η διαθέσιμη χωρητικότητα των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων για την υποστήριξη της συχνότητας σε δευτερογενές επίπεδο εξαρτάται άμεσα από το προφίλ μετακίνησης τους (ώρα αναχώρησης/ άφιξης, κατανάλωση μπαταρίας, διανύομενη απόσταση κτλ.) καθώς και το προφίλ φόρτισης τους. Ως εκ τούτου, η συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά εφεδρειών είναι άμεσα εξαρτώμενη από τη συμμετοχή τους στη χονδρεμπορική αγορά ενέργειας για την εξυπηρέτηση των ενεργειακών τους αναγκών.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, είναι απαραίτητη η μελέτη της πλήρους συμμετοχής των ηλεκτρικών οχημάτων τόσο στη χονδρεμπορική αγορά ενέργειας όσο στην αγορά εφεδρειών. Υιοθετώντας τα επίπεδα συνάθροισης (aggregation layers) όπως παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3 της παρούσας διδακτορικής διατριβής, η πλήρης ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στις αγορές ενέργειας απεικονίζεται στην Εικόνα 5-29. Στην ενότητα αυτή θα επικεντρωθούμε στον προγραμματισμό της λειτουργίας φόρτισης και εκφόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων για τη συμμετοχή τους στη χονδρεμπορική αγορά ενέργειας καθώς και στον καθορισμό των βέλτιστων προσφορών χωρητικότητας των μπαταριών τους για τη συμμετοχή τους στις αγορές εφεδρειών (δευτερεύουσα και τριτεύουσα στρεφόμενη εφεδρεία).



Εικόνα 5-29 Πλήρης ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο και στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας (χονδρεμπορική και εφεδρειών)<sup>3</sup>

Στις επόμενες παραγράφους, θα αναλυθεί η πλήρης συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας η οποία αποτελείται από τρία επίπεδα ελέγχου:

- Ημερήσιος ενεργειακός προγραμματισμός των ηλεκτρικών οχημάτων (day-ahead EV optimal scheduling): καθορίζει το βέλτιστο προφίλ φόρτισης/εκφόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, βάσει των προβλεπόμενων προφίλ μετακίνησης των ελεγχόμενων ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς και τη βέλτιστη διαθέσιμη αποθηκευτική χωρητικότητα για την παροχή επικουρικών υπηρεσιών. Ο ημερήσιος προγραμματισμός πραγματοποιείται από τον

<sup>3</sup> [https://ec.europa.eu/jrc/sites/default/files/LOPES\\_JPL\\_JRC\\_ISPRA\\_FinalF2.pdf](https://ec.europa.eu/jrc/sites/default/files/LOPES_JPL_JRC_ISPRA_FinalF2.pdf)

κεντρικό διαχειριστή των ηλεκτρικών οχημάτων (*EVSEA*) με απώτερο σκοπό τη μεγιστοποίηση των κερδών του από τη διαχείριση των μπαταριών ενός στόλου ηλεκτρικών οχημάτων και την παροχή ενέργειας (*V2G* λειτουργία) και επικουρικών υπηρεσιών στο δίκτυο. Σε αντάλλαγμα προς τους χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων και για λόγους ανταγωνισμού, ο *EVSEA* προσφέρει πολύ χαμηλές τιμές για την ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για τη φόρτισης τους.

- Ωριαία διαχείριση των ηλεκτρικών οχημάτων κατά την ημέρα εφαρμογής (operational day) του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού. καθορίζει τα σημεία λειτουργίας κάθε ηλεκτρικού οχήματος για κάθε ώρα της ημέρας λαμβάνοντας υπόψη το αθροιστικό προφίλ λειτουργίας του ημερήσιου προγραμματισμού καθώς και τις ενεργειακές ανάγκες/περιορισμούς λόγω της μετακίνησης τους κατά τη διάρκεια του εξεταζόμενου διαστήματος.
- Βραχυπρόθεσμη βέλτιστη κατανομή ενός σήματος ισχύος στα ηλεκτρικά οχήματα για την παροχή επικουρικών υπηρεσιών: καθορίζει τη βέλτιστη απόκριση κάθε ελεγχόμενου ηλεκτρικού οχήματος σε ένα σήμα ισχύος για επικουρικές υπηρεσίες βάσει του σημείου λειτουργίας τους όπως προκύπτει από τον αλγόριθμο ωριαίας διαχείρισης τους κατά την ημέρα εφαρμογής, το επίπεδο φόρτισης (SOC) της μπαταρίας τους καθώς και το διαθέσιμο χρονικό διάστημα στάθμευσης πριν την αναχώρηση τους.

### 5.3.2.1 Ημερήσιος ενεργειακός προγραμματισμός των ηλεκτρικών οχημάτων (*day-ahead EV optimal scheduling*)

Πριν του μαθηματικού μοντέλου για τον ημερήσιο προγραμματισμό των ηλεκτρικών οχημάτων, είναι αναγκαία η διευκρίνιση ορισμένων παραδοχών απαραίτητων για τη λειτουργία και την εφαρμογή του. Πιο συγκεκριμένα:

- Οι αγορές επικουρικών υπηρεσιών για άνω και κάτω ρύθμιση θεωρούνται ξεχωριστές με σκοπό τη συμμετοχή του *EVSEA* σε αυτές με ασύμμετρες προσφορές.
- Οι περίοδοι φόρτισης/εκφόρτισης και παροχής επικουρικών υπηρεσιών δεν απαιτείται να είναι αποσυνδεδεμένες καθώς ξεχωριστές προσφορές για τη φόρτιση/εκφόρτιση τους και την παροχή επικουρικών υπηρεσιών κατατίθενται για κάθε χρονικό υπο-διάστημα μελέτης (time interval).
- Για την ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ ηλεκτρικών οχημάτων και δικτύου, η ροή από το δίκτυο προς το ηλεκτρικό όχημα (λειτουργία φόρτισης) έχει θετικό πρόσημο, ενώ αρνητικό για ροή ισχύος από το όχημα προς το δίκτυο (λειτουργία εκφόρτισης).

Δύο μαθηματικά μοντέλα του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού θα αναπτυχθούν: το πρώτο μοντέλο εξετάζει μόνο τη λειτουργία φόρτισης (unidirectional day-ahead optimal scheduling, [168]), ενώ το δεύτερο εξετάζει την αμφίδρομη ροή ισχύος μεταξύ ηλεκτρικών οχημάτων και δικτύου (bidirectional day-ahead optimal scheduling, [195]).

#### ✓ Μοντελοποίηση του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού μόνο για φόρτιση

Στην περίπτωση που εξετάζουμε τον έλεγχο μόνο της λειτουργίας φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων [168], η ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ δικτύου και ηλεκτρικών οχημάτων μοντελοποιείται ως μια μη αρνητικά ορισμένη μεταβλητή απόφασης στο πρόβλημα βελτιστοποίησης του ενεργειακού προγραμματισμού ( $FP_{i,t} \geq 0$ , *Final Power Draw* για κάθε ηλεκτρικό όχημα  $i$  τη χρονική στιγμή  $t$ ). Η τιμή της μεταβλητής  $FP_{i,t}$  εξαρτάται από τις ενεργειακές ανάγκες φόρτισης του κάθε οχήματος, το προφίλ μετακίνησης τους καθώς και τη συμμετοχή τους στις επικουρικές υπηρεσίες του δικτύου. Η αναμενόμενη ροή ισχύος προς το ηλεκτρικό όχημα  $E\{FP_{i,t}\}$  είναι συνάρτηση των:

- $POP_{i,t}$ , είναι το σημείο βέλτιστης λειτουργίας του  $i^{ov}$  οχήματος για τη χρονική στιγμή  $t$ .
- $E\{RU_{i,t}\}$ , είναι η αναμενόμενη διακινούμενη ποσότητα ισχύος για άνω ρύθμιση του  $i^{ov}$  οχήματος για τη χρονική στιγμή  $t$ .

- $E\{RD_{i,t}\}$ , είναι η αναμενόμενη διακινούμενη ποσότητα ισχύος για κάτω ρύθμιση του  $i^{ov}$  οχήματος για τη χρονική στιγμή  $t$ .

Οι αναμενόμενες ποσότητες ρύθμισης  $E\{RU_{i,t}\}$ ,  $E\{RD_{i,t}\}$  εκτιμώνται βάσει ιστορικών δεδομένων. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή λόγω έλλειψης ιστορικών δεδομένων, οι αναμενόμενες ποσότητες ρύθμισης θα προσδιοριστούν ως ένα ποσοστό της συνολικής μέγιστης διαθέσιμης ισχύος για λόγους προσομοίωσης.

$$E\{RU_{i,t}\} = MnAP_{i,t} \cdot ExU_t \quad E\ 5-15$$

$$E\{RD_{i,t}\} = MxAP_{i,t} \cdot ExD_{i,t} \quad E\ 5-16$$

όπου  $MxAP_{i,t}$ , είναι η μέγιστη διαθέσιμη ποσότητα ισχύος για κάτω ρύθμιση του  $i^{ov}$ -οχήματος για τη χρονική στιγμή  $t$ ,  $MnAP_{i,t}$ , είναι η μέγιστη διαθέσιμη ποσότητα ισχύος για άνω ρύθμιση του  $i^{ov}$  οχήματος για τη χρονική στιγμή  $t$ ,  $ExU_t$  είναι το αναμενόμενο ποσοστό άνω ρύθμισης που θα ζητήσει ο διαχειριστής συστήματος τη χρονική στιγμή  $t$ ,  $ExD_t$ , είναι το αναμενόμενο ποσοστό κάτω ρύθμισης που θα ζητήσει ο διαχειριστής συστήματος τη χρονική στιγμή  $t$ . Επομένως, η εκτιμώμενη τιμή της ροής ενέργειας από το δίκτυο προς τα ηλεκτρικά οχήματα θα ισούται με:

$$E\{FP_{i,t}\} = E\{RD_{i,t}\} + POP_{i,t} - E\{RU_{i,t}\} \xrightarrow[(E5-16)]{(E5-15)}$$

$$E\{FP_{i,t}\} = MxAP_{i,t} \cdot ExD_t + POP_{i,t} - MnAP_{i,t} \cdot ExU_t \quad E\ 5-17$$

Το απαιτούμενο σήμα ρύθμισης από τον διαχειριστή του δικτύου ( $RS$ , *regulation signal*) δεν είναι γνωστό κατά τον ενεργειακό προγραμματισμό. Ως εκ τούτου, μόνο εκτίμηση του σήματος ελέγχου ρύθμισης μπορεί να γίνει με σκοπό την εκτίμηση της ανταλλαγής ενέργειας μεταξύ ηλεκτρικών οχημάτων και δικτύου  $E\{FP_{i,t}\}$ . Το σήμα ρύθμισης  $RS$  που στέλνει ο διαχειριστής δικτύου στον EVSEA είναι μια διακριτή συνάρτηση για την οποία ισχύει ότι:

$$RS_k: k \rightarrow \begin{cases} [RS_{min}, 0], & \text{πεδίο τιμών σήματος άνω ρύθμισης} \\ [0, RS_{max}], & \text{πεδίο τιμών σήματος κάτω ρύθμισης} \end{cases} \quad E\ 5-18$$

οπού ο  $k$  είναι ο χρόνος μεταξύ 2 διαδοχικών σημάτων ρύθμισης.

Η αναμενόμενη τιμή μιας τυχαίας διακριτής μεταβλητής  $Z$  είναι ίση με το άθροισμα των πιθανών τιμών ( $z$ ) που μπορεί να πάρει επί την πιθανότητα εμφάνισης της κάθε τιμής  $Pr[z]$  ( $Z = \sum_{-\infty}^{+\infty} z \cdot Pr[z]$ ). Ως εκ τούτου, οι αναμενόμενες τιμές για άνω και κάτω ρύθμιση προσδιορίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$\overline{E\{RU\}} = \sum_0^{RS_{min}} RS \cdot Pr[RS] \quad E\ 5-19$$

$$\overline{E\{RD\}} = \sum_0^{RS_{max}} RS \cdot Pr[RS] \quad E\ 5-20$$

Συνεπώς, τα αναμενόμενα ποσοστά άνω και κάτω ρύθμισης προσδιορίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$ExU = \frac{\sum_{RS_{min}}^0 RS \cdot Pr[RS]}{\sum_{RS_{min}}^0 RS} \quad E\ 5-21$$

$$ExD = \frac{\sum_0^{RS_{max}} RS \cdot Pr[RS]}{\sum_0^{RS_{max}} RS} \quad E\ 5-22$$

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, σκοπός του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού ενός στόλου ηλεκτρικών οχημάτων είναι η μεγιστοποίηση του κέρδους του διαχειριστή του στόλου (EVSEA). Ο διαχειριστής των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να είναι μια δημόσια ή ιδιωτική επιχείρηση η οποία έχει συνάψει συμβόλαια με ένα αυξημένο αριθμό ηλεκτρικών οχημάτων ( $N$ ). Το κέρδος των ηλεκτρικών οχημάτων από τη συμμετοχή τους σε ένα τέτοιο επιχειρηματικό μοντέλο είναι η φόρτιση της μπαταρίας τους σε πολύ χαμηλές και σταθερές τιμές ( $Mk$ ), χαμηλότερες και από την ελάχιστη τιμή της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Όσο χαμηλότερη είναι η τιμή χρέωσης της ενέργειας φόρτισης που προσφέρει ο EVSEA στους χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων τόσο αυξάνει η ανταγωνιστικότητα του έναντι άλλων EVSEAs. Το γεγονός ότι ο EVSEA αγοράζει την ενέργεια για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων από την αγορά ενέργειας σε τιμή υψηλότερη από την αντίστοιχη που προσφέρει στα ηλεκτρικά οχήματα προκαλεί μια ζημία στο οικονομικό ισοζύγιο του EVSEA. Η ζημία αυτή εξισορροπείται από την παροχή επικουρικών υπηρεσιών στον διαχειριστή του δικτύου.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, το ημερήσιο εισόδημα ενός *EVSEA* προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\begin{aligned} In &= \text{κέρδος από τη συμμετοχή στις αγορές επικουρικών υπηρεσιών} \\ &+ \text{έσοδα από την πώληση ενέργειας στους χρήστες ΗΟ} \\ &= \sum_{t=1}^{24} (PRu_t \cdot Ru_t + PRd_t \cdot Rd_t) + Mk \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (E\{FP_{i,t}\}) \end{aligned} \quad E 5-23$$

όπου

- $Ru_t$  είναι η συνολική διαθέσιμη ισχύ του στόλου για άνω ρύθμιση την ώρα  $t$ :
 
$$Ru_t = \sum_{i=1}^N MnAP_{i,t} \quad E 5-24$$

- $Rd_t$ , είναι η συνολική διαθέσιμη ισχύ του στόλου για κάτω ρύθμιση την ώρα  $t$ :
 
$$Rd_t = \sum_{i=1}^N MxAP_{i,t} \quad E 5-25$$

- $PRu_t$ , είναι η προβλεπόμενη τιμή της αγοράς επικουρικών υπηρεσιών για άνω ρύθμιση την ώρα  $t$

- $PRd_t$ , είναι η προβλεπόμενη τιμή της αγοράς επικουρικών υπηρεσιών για κάτω ρύθμιση την ώρα  $t$

Αντίστοιχα, το κόστος της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από τη χονδρεμπορική αγορά για την εξυπηρέτηση των ενεργειακών αναγκών φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, βάσει των προβλεπόμενων τιμών αγοράς ενέργειας ( $P_t$ ), προσδιορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$C = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (E\{FP_{i,t}\} \cdot P_t) \quad E 5-26$$

Επομένως, η αντικειμενική συνάρτηση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού για τη φόρτιση ενός στόλου ηλεκτρικών οχημάτων είναι η εξής:

$$\begin{aligned} Prof = In - C &= \sum_{t=1}^{24} (PRu_t \cdot Ru_t + PRd_t \cdot Rd_t) + Mk \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (E\{FP_{i,t}\}) \\ &- \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (E\{FP_{i,t}\} \cdot P_t) \end{aligned} \quad E 5-27$$

Η βελτιστοποίηση της παραπάνω αντικειμενικής συνάρτησης συνεπάγεται τη μεγιστοποίηση του κέρδους του *EVSEA*. Οι μεταβλητές απόφασης της αντικειμενικής συνάρτησης είναι οι  $POP_{i,t}$ ,  $MxAP_{i,t}$  και  $MnAP_{i,t}$ . Οι περιορισμοί του προβλήματος βελτιστοποίησης για τον ημερήσιο ενεργειακό προγραμματισμό των ηλεκτρικών οχημάτων επιβάλλονται από τη λειτουργία και τους περιορισμούς των ηλεκτρικών οχημάτων λόγω της κινητικότητας τους και λόγω των περιορισμών λειτουργίας της μπαταρίας τους:

#### Περιορισμοί λειτουργίας μπαταρίας

$$\sum_{t=1}^{time} (E\{FP_{i,t}\}) \cdot Ef_i + SOC_{i,t=1} - \sum_{t=1}^{time} P_{trip,i,t}^{EV} \leq C_{bat,i}, \quad \forall i, time \quad E 5-28$$

$$\sum_{t=1}^{time} (E\{FP_{i,t}\}) \cdot Ef_i + SOC_{i,t=1} - \sum_{t=1}^{time} P_{trip,i,t}^{EV} \geq 0, \quad \forall i, time \quad E 5-29$$

$$SOC_{i,t=1} - \sum_{t=1}^T P_{trip,i,t}^{EV} + Ef_i \cdot \sum_{t=1}^T (POP_{i,t}) = C_{bat,i} \quad E 5-30$$

$$SOC_{i,t=1}(1) = SOC_{i,t=T+1} = C_{bat,i} \quad E 5-31$$

όπου  $Ef_i$  είναι η απόδοση (efficiency) των ηλεκτρονικών ισχύος του  $i^{ov}$  οχήματος,  $C_{bat,i}$  είναι η χωρητικότητα της μπαταρίας του  $i^{ov}$  οχήματος (kWh),  $SOC_{i,t}$  εκφράζει το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας του  $i^{ov}$  οχήματος τη χρονική στιγμή  $t$ ,  $P_{trip,i,t}^{EV}$  εκφράζει την κατανάλωση ενέργειας του  $i^{ov}$  ηλεκτρικού οχήματος για την πραγματοποίηση δρομολογίου τη χρονική στιγμή  $t$  ( $P_{trip,i,t}^{EV}=0$  όταν το όχημα είναι σταθμευμένο).

#### Περιορισμοί υποδομών φόρτισης

$$MxAP_{i,t} + POP_{i,t} \leq P_{nomCS_{i,t}}, \quad \forall i \quad E 5-32$$

$$POP_{i,t} - MnAP_{i,t} \geq 0, \quad \forall i \quad E 5-33$$

όπου  $P_{nomCS_{i,t}}$  είναι η εγκαταστημένη ισχύς του σταθμού φόρτισης στον οποίο συνδέεται το όχημα  $i$  τη χρονική στιγμή  $t$ .

#### Περιορισμοί λόγω κινητικότητας ηλεκτρικών οχημάτων

$$POP_{i,t} \cdot (1 - Plug_{i,t}) = 0 \quad E 5-34$$

$$MxAP_{i,t} \cdot (1 - Plug_{i,t}) = 0 \quad E 5-35$$

$$MnAP_{i,t} \cdot (1 - Plug_{i,t}) = 0 \quad E 5-36$$

όπου  $Plug_{i,t}$ , είναι μια παράμετρος που εκφράζει αν το όχημα  $i$  είναι σε ταξίδι και άρα μη διασυνδεδεμένο. Το  $Plug_{i,t}$  δίνεται από τη σχέση:

$$Plug_{i,t} = \begin{cases} 0, & \text{αν } P_{trip,i,t}^{EV} \neq 0 \\ 1, & \text{αν } P_{trip,i,t}^{EV} = 0 \end{cases} \quad \text{E 5-37}$$

Περιορισμοί βάσει του πεδίου ορισμού των μεταβλητών

$$POP_{i,t} \geq 0, \forall i \quad \text{E 5-38}$$

$$MxAP_{i,t} \geq 0, \forall i \quad \text{E 5-39}$$

$$MnAP_{i,t} \geq 0, \forall i \quad \text{E 5-40}$$

Περιορισμοί δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας

$$\sum_{i=1}^N POP_{i,t} \leq \frac{MxL-L_t}{MxL-MnL} \cdot \sum_{i=1}^N (C_{bat,i} \cdot Plug_{i,t}), \forall i, t \quad \text{E 5-41}$$

όπου  $L_t$  είναι η προβλεπόμενη συμβατική ζήτηση του δικτύου την χρονική στιγμή  $t$  και  $MxL, MnL$  είναι η μέγιστη και ελάχιστη, αντίστοιχα, τιμή της προβλεπόμενης ζήτησης κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Οι περιορισμοί E5-28 και E5-29 εξασφαλίζουν ότι τα λειτουργικά άνω και κάτω όρια της μπαταρίας των ηλεκτρικών οχημάτων δεν παραβιάζονται σε καμία χρονική στιγμή. Οι περιορισμοί E5-30 και E5-31 εξασφαλίζουν την πλήρη φόρτιση της μπαταρίας στο τέλος της εξεταζόμενης περιόδου. Οι περιορισμοί E5-33 και E5-34 εξασφαλίζουν ότι η ανταλλαγή ισχύος μεταξύ δικτύου και ηλεκτρικών οχημάτων δεν παραβιάζει την εγκατεστημένη ισχύ των υποδομών φόρτισης. Οι περιορισμοί E5-35 – E5-37 αφορούν στην κινητικότητα των ηλεκτρικών οχημάτων μιας και τα οχήματα αλληλεπιδρούν με το δίκτυο μόνο όταν είναι σταθμευμένα. Τέλος, οι περιορισμοί E5-39 – E5-41 καθορίζουν το πεδίο ορισμού των μεταβλητών απόφασης (μη αρνητικά ορισμένες μεταβλητές). Τέλος, ο περιορισμός E 5-42 αποτρέπει την φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων την περίοδο υψηλής ζήτησης και τη δημιουργία νέας αιχμής ζήτησης στο δίκτυο.

#### ✓ *Μοντελοποίηση του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού με αμφίδρομη ροή ισχύος*

Στην περίπτωση αυτή εξετάζεται η αμφίδρομη ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ ηλεκτρικών οχημάτων και δικτύου (λειτουργία φόρτισης και εκφόρτισης). Ως εκ τούτου, το πρόβλημα βελτιστοποίησης του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα τροποποιείται καταλλήλως έτσι ώστε να ενσωματωθεί η δυνατότητα παροχής ενέργειας από τα μπαταρία προς το δίκτυο. Στη συνέχεια, αναλύεται το τροποποιημένο πρόβλημα βελτιστοποίησης του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού θεωρώντας αμφίδρομη ροή ισχύος.

Η ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ δικτύου και ηλεκτρικών οχημάτων εξαρτάται από την ενέργεια φόρτισης/εκφόρτισης (το πεδίο ορισμού της μεταβλητής απόφασης  $POP_{i,t}$  επεκτείνεται και στους αρνητικούς αριθμούς), την εκτιμώμενη ενέργεια για άνω και κάτω ρύθμιση και επιπρόσθετα την αναμενόμενη ποσότητα ενέργειας για στρεφόμενη εφεδρεία. Επομένως, η ισότητα E 5-17 τροποποιείται ως εξής:

$$\begin{aligned} E\{FP_{i,t}\} &= E\{RD_{i,t}\} + POP_{i,t} - E\{RU_{i,t}\} - E\{RR_{i,t}\} \Rightarrow \\ EFP_{i,t} &= MxAP_{i,t} \cdot ExD_t + POP_{i,t} - MnAP_{i,t} \cdot ExU_t - RsRP_{i,t} \cdot ExR_t \quad \text{E 5-42} \end{aligned}$$

όπου  $E\{RR_{i,t}\}$ , είναι η αναμενόμενη ποσότητα ισχύος για στρεφόμενη εφεδρεία του  $i^{ov}$  οχήματος για τη χρονική στιγμή  $t$ ,  $RsRP_{i,t}$  είναι η μέγιστη διαθέσιμη ποσότητα ισχύος για στρεφόμενη εφεδρεία του  $i^{ov}$  οχήματος για τη χρονική στιγμή  $t$  και  $ExR_t$  είναι το αναμενόμενο ποσοστό στρεφόμενης εφεδρείας που θα ζητήσει ο διαχειριστής συστήματος τη χρονική στιγμή  $t$ . Αντίστοιχα με την περίπτωση της αναμενόμενης τιμής για άνω και κάτω ρύθμιση, η αναμενόμενη τιμή της στρεφόμενης εφεδρείας προκύπτει ως εξής:

$$ExR = \frac{\overline{E\{RR\}}}{\sum_{RRS_{min}}^0 RRS} \frac{\overline{E\{RR\}} = \sum_{RRS_{min}}^0 RRS \cdot Pr[RRS]}{\sum_{RRS_{min}}^0 RRS} \rightarrow ExR = \frac{\sum_{RRS_{min}}^0 RRS \cdot Pr[RRS]}{\sum_{RRS_{min}}^0 RRS} \quad E 5-43$$

Το κέρδος του *EVSEA* πλέον καθορίζεται από 3 παράγοντες: την πώληση ενέργειας στο δίκτυο (*V2G* λειτουργία), την προμήθεια ενέργειας στους χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων για τη φόρτιση της μπαταρίας τους και την παροχή επικουρικών υπηρεσιών (άνω/κάτω ρύθμιση, στρεφόμενη εφεδρεία). Επομένως, το κέρδος του *EVSEA* (E5-23) τροποποιείται ως εξής:

$$In = \sum_{t=1}^{24} (PRu_t \cdot Ru_t + PRd_t \cdot Rd_t + PRr_t \cdot Rr_t) + Mk \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (E\{FP_{i,t}\}) + \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} \left( \frac{sgn(E\{FP_i(t)\})-1}{2} E\{FP_{i,t}\} \cdot P_t \right) \quad E 5-44$$

όπου  $sgn(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$  είναι η συνάρτηση που διαχωρίζει τις δύο κατευθύνσεις της ροής

ισχύος μεταξύ δικτύου και ηλεκτρικών οχημάτων (το θετικό πρόσημο για τον όρο  $sgn(E\{FP_{i,t}\})$  αναφέρεται στη λειτουργία φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων ενώ το αρνητικό πρόσημο αναφέρεται στη λειτουργία εκφόρτισης),  $P_t$  είναι η προβλεπόμενη τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας την ώρα  $t$ ,  $PRr_{i,t}$  είναι η προβλεπόμενη τιμή της στρεφόμενη εφεδρεία την ώρα  $t$  και  $Rr_t$  είναι η συνολική διαθέσιμη ισχύ του στόλου του aggregator για στρεφόμενη εφεδρεία την ώρα  $t$ :

$$Rr_t = \sum_{i=1}^N RSRP_{i,t} \quad E 5-45$$

Στα έξοδα του *EVSEA*  $C$  εκτός από το κόστος αγοράς της ενέργειας για την εξυπηρέτηση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων προστίθεται και το κόστος φθοράς των συσσωρευτών για τη λειτουργία της εκφόρτισης. Επομένως, τα έξοδα του *EVSEA* (E5-26) τροποποιούνται ως εξής:

$$C = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (E\{FP_{i,t}\} \cdot P_t) + \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} \left( \frac{sgn(E\{FP_i(t)\})-1}{2} E\{FP_{i,t}\} \cdot DC_i / Ef_i \right) \quad E 5-46$$

όπου  $DC_i$  είναι το κόστος φθοράς του  $i^{ou}$  συσσωρευτή για εκφόρτιση ενέργειας ίση με 1kWh και καθορίζεται από τον τύπο:

$$DC_i = \left( 0,042 \times \frac{BatC_i}{5000} \right) + \left( \frac{1-Ef_i^2}{Ef_i} \times Mk \right) \quad E 5-47$$

Ο πρώτος όρος του αθροίσματος E5-47 αναφέρεται στο κόστος φθοράς ανά kWh όπως προκύπτει από τις μελέτες [57] και [60]. Ο όρος  $BatC_i$  (τιμή/kWh) αναφέρεται στο κόστος αντικατάστασης του  $i^{ou}$  συσσωρευτή. Ο δεύτερος όρος αποτρέπει την επιπρόσθετη χρέωση των χρηστών των ηλεκτρικών οχημάτων από τον *EVSEA* λόγω των απωλειών των ηλεκτρονικών ισχύος. Πιο συγκεκριμένα, αν η μπαταρία ενός ηλεκτρικού οχήματος απορροφήσει 10kWh για φόρτιση, ο χρήστης του οχήματος θα χρεωθεί από τον *EVSEA* για ποσό ενέργειας  $10kWh/0.9=11.11kWh$ , λόγω των απωλειών των ηλεκτρονικών ισχύος. Αντίστοιχα, αν η ενέργεια εκφόρτισης της μπαταρίας είναι 10kWh, τότε ο χρήστης του οχήματος θα αποζημιωθεί για ενέργεια  $10kWh*0.9=9kWh$ . Ως εκ τούτου, ο *EVSEA* μπορεί να αυξήσει το κέρδος του απλά φορτίζοντας και εκφορτίζοντας τις μπαταρίες. Ο δεύτερος όρος, λοιπόν, της εξίσωσης E5-47 έχει σκοπό να εξισορροπήσει τις απώλειες ενέργειας λόγω των ηλεκτρονικών ισχύος και να μην χρεώνεται επιπρόσθετα ο χρήστης των ηλεκτρικών οχημάτων.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω, η αντικειμενική συνάρτηση για τον ημερήσιο ενεργειακό προγραμματισμό ενός στόλου ηλεκτρικών οχημάτων θεωρώντας αμφίδρομη ροή ισχύος μεταξύ ηλεκτρικών οχημάτων και δικτύου δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$Prof = \sum_{t=1}^{24} (PRu_t \cdot Ru_t + PRd_t \cdot Rd_t + PRr_t \cdot Rr_t) + Mk \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (E\{FP_{i,t}\}) - \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (E\{FP_{i,t}\} \cdot P_t) - \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} \left( \frac{sgn(E\{FP_i(t)\})-1}{2} \cdot E\{FP_{i,t}\} \cdot DC_i / Ef_i \right) \quad E 5-48$$

Η βελτιστοποίηση της παραπάνω αντικειμενικής συνάρτησης συνεπάγεται τη μεγιστοποίηση του κέρδους του *EVSEA*. Οι μεταβλητές απόφασης της αντικειμενικής συνάρτησης είναι οι  $POP_{i,t}$ ,  $MxAP_{i,t}$ ,  $MnAP_{i,t}$  και  $RSRP_{i,t}$ . Ο τελευταίος όρος της αντικειμενικής συνάρτησης είναι μη γραμμικό όρος και επομένως το πρόβλημα του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού γίνεται μη γραμμικό. Για να μετατραπεί το πρόβλημα σε γραμμικό εισάγεται μια βοηθητική μεταβλητή  $Deg_{i,t}$  για την οποία ισχύουν οι εξής περιορισμοί:

$$Deg_{i,t} \geq 0 \quad E 5-49$$



$$Deg_{i,t} \geq \frac{sgn(E\{FP_{i,t}\})-1}{2} \cdot E\{FP_{i,t}\} \cdot \frac{DC_i}{Ef_i} \rightarrow$$

$$Deg_{i,t} \geq (POP_{i,t} - MnAP_{i,t} \cdot ExU_t - RsRP_{i,t} \cdot ExR_t) \cdot DC_i/Ef_i \quad E 5-50$$

Επομένως, η αντικειμενική συνάρτηση θα έχει την εξής τελική μορφή:

$$Prof = \sum_{t=1}^{24} (PRu_t \cdot Ru_t + PRd_t \cdot Rd_t + PRr_t \cdot Rr_t) + Mk \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (E\{FP_{i,t}\}) - \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (E\{FP_{i,t}\} \cdot P_t) - \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} Deg_{i,t} \quad E 5-51$$

Οι περιορισμοί που ολοκληρώνουν τη μαθηματική μοντελοποίηση του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού των ηλεκτρικών οχημάτων για αμφίδρομη ροή ισχύος παρουσιάζονται στη συνέχεια:

#### Περιορισμοί λειτουργίας μπαταρίας

$$\sum_{t=1}^{time} (E\{FP_{i,t}\} - \rho_{i,t}) \cdot Ef_i + SOC_{i,t=1} - \sum_{t=1}^{time} P_{trip,i,t}^{EV} \leq C_{bat,i}, \forall i, time \quad E 5-52$$

$$\sum_{t=1}^{time} (E\{FP_{i,t}\} - \rho_{i,t}) \cdot Ef_i + SOC_{i,t=1} - \sum_{t=1}^{time} P_{trip,i,t}^{EV} \geq 0, \forall i, time \quad E 5-53$$

$$SOC_{i,t=1} - \sum_{t=1}^T P_{trip,i,t}^{EV} + Ef_i \cdot \sum_{t=1}^T (POP_{i,t} + \rho_{i,t}) = C_{bat,i} \quad E 5-54$$

$$SOC_{i,t=1} = SOC_{i,t=T+1} = C_{bat,i} \quad E 5-55$$

όπου  $Ef_i$ , είναι η απόδοση (efficiency) των ηλεκτρονικών ισχύος του  $i^{ov}$  οχήματος,  $C_{bat,i}$  είναι η χωρητικότητα της μπαταρίας του  $i^{ov}$  οχήματος (kWh),  $SOC_{i,t}$  εκφράζει το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας του  $i^{ov}$  οχήματος τη χρονική στιγμή  $t$ ,  $P_{trip,i,t}^{EV}$  εκφράζει την κατανάλωση ενέργειας του  $i^{ov}$  ηλεκτρικού οχήματος για την πραγματοποίηση δρομολογίου τη χρονική στιγμή  $t$  ( $P_{trip,i,t}^{EV}=0$  όταν το όχημα είναι σταθμευμένο) και  $\rho_{i,t}$  είναι η απώλεια ενέργειας της μπαταρίας, επειδή θεωρούμε ότι είναι μη ιδανική, και δίνεται από τη σχέση:

$$\rho_{i,t} = \frac{Deg(i,t) 1 - Ef_i^2}{DC_i Ef_i} \quad E 5-56$$

#### Περιορισμοί υποδομών φόρτισης

$$MxAP_{i,t} + POP_{i,t} \leq P_{nomCS_{i,t}}, \quad \forall i \quad E 5-57$$

$$POP_{i,t} - MnAP_{i,t} \geq 0, \quad \forall i \quad E 5-58$$

όπου  $P_{nomCS_{i,t}}$ , είναι η εγκαταστημένη ισχύς του σταθμού φόρτισης στον οποίο συνδέεται το όχημα  $i$  τη χρονική στιγμή  $t$ .

#### Περιορισμοί λόγω κινητικότητας ηλεκτρικών οχημάτων

$$POP_{i,t} \cdot (1 - Plug_{i,t}) = 0 \quad E 5-59$$

$$MxAP_{i,t} \cdot (1 - Plug_{i,t}) = 0 \quad E 5-60$$

$$MnAP_{i,t} \cdot (1 - Plug_{i,t}) = 0 \quad E 5-61$$

όπου  $Plug_{i,t}$ , είναι μια παράμετρος που εκφράζει αν το όχημα  $i$  είναι σε ταξίδι και άρα μη διασυνδεδεμένο. Το  $Plug_{i,t}$  δίνεται από τη σχέση:

$$Plug_{i,t} = \begin{cases} 0, & \text{αν } P_{trip,i,t}^{EV} \neq 0 \\ 1, & \text{αν } P_{trip,i,t}^{EV} = 0 \end{cases} \quad E 5-62$$

#### Περιορισμοί βάσει του πεδίου ορισμού των μεταβλητών

$$POP_{i,t} \geq 0, \forall i \quad E 5-63$$

$$MxAP_{i,t} \geq 0, \forall i \quad E 5-64$$

$$MnAP_{i,t} \geq 0, \forall i \quad E 5-65$$

#### Περιορισμοί δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας

$$\sum_{i=1}^N POP_{i,t} \leq \frac{MxL - L_t}{MxL - MnL} \cdot \sum_{i=1}^N (MP_i(t) \cdot Plug_i(t)), \quad \forall i, t \quad E 5-66$$

όπου  $L_t$  είναι η προβλεπόμενη συμβατική ζήτηση του δικτύου τη χρονική στιγμή  $t$  και  $MxL$ ,  $MnL$  είναι η μέγιστη και ελάχιστη, αντίστοιχα, τιμή της προβλεπόμενης ζήτησης κατά τη διάρκεια της ημέρας.

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης για τον ημερήσιο ενεργειακό προγραμματισμό των ηλεκτρικών οχημάτων, είτε θεωρώντας μόνο τη λειτουργία φόρτισης είτε για αμφίδρομη ροή ισχύος, είναι γραμμικό με γραμμικούς περιορισμούς.

### 5.3.2.2 Ωριαία διαχείριση των ηλεκτρικών οχημάτων κατά την ημέρα εφαρμογής

Το προφίλ βέλτιστης λειτουργίας όπως προέκυψε από τον ημερήσιο ενεργειακό προγραμματισμό θα πρέπει να ακολουθηθεί σε ωριαία βάση κατά την ημέρα εφαρμογής του. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητη η κατανομή του βέλτιστου αυτού προφίλ στα ηλεκτρικά οχήματα με τρόπο ώστε η απόκλιση του πραγματικού αθροιστικού προφίλ ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων από το βέλτιστο να είναι ελάχιστη (ιδανικά μηδενική) και οι λειτουργικοί περιορισμοί των ηλεκτρικών αυτοκινήτων να μην παραβιάζονται.

Η μαθηματική μοντελοποίηση της βέλτιστης λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων κατά την ημέρα εφαρμογής έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η απόκλιση του πραγματικού προφίλ λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων από αυτό του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού είναι η εξής:

$$\min_{P_{ch,i}^{EV}, P_{dch,i}^{EV}, u_c, u_d} f_{cent} = \sum_{t=1}^T U (\sum_{i=1}^N P_{i,t}^{EV} - POP_t^{for}) = \sum_{t=1}^T \left( \frac{1}{2} (\sum_{i=1}^N P_{i,t}^{EV} - POP_t^{for}) \right)^2 \quad \text{E 5-67}$$

$$\text{όπου } P_{i,t}^{EV} = P_{ch,i,t}^{EV} - P_{dch,i,t}^{EV} \text{ και } POP_t^{for} = \sum_{i=1}^N POP_{i,t} \quad \text{E 5-68}$$

$$\mu.\pi. \sum_{t=1}^T (P_{ch,i,t}^{EV} \cdot Efi - P_{dch,i,t}^{EV}/Efi) \Delta t - \sum_{t=1}^T P_{trip,i,t}^{EV} = 0 \quad \forall i \in N \quad \text{E 5-69}$$

$$u_{c,t} + u_{d,t} - 1 \leq 0 \quad \text{E 5-70}$$

$$P_{ch,i,t}^{EV} - u_{c,t} \cdot Plug_{i,t} \cdot P_{nomCS_{i,t}} \leq 0 \quad \text{E 5-71}$$

$$P_{dch,i,t}^{EV} - u_{d,t} \cdot Plug_{i,t} \cdot P_{nomCS_{i,t}} \leq 0 \quad \text{E 5-72}$$

$$\sum_{\tau=1}^t (P_{ch,i,\tau}^{EV} Efi - P_{dch,i,\tau}^{EV}/Efi) - \sum_{\tau=1}^t P_{trip,i,\tau}^{EV} \leq 0 \quad \text{E 5-73}$$

$$- \sum_{\tau=1}^t (P_{ch,i,\tau}^{EV} Efi - P_{dch,i,\tau}^{EV}/Efi) - C_{bat,i} + \sum_{\tau=1}^t P_{trip,i,\tau}^{EV} \leq 0 \quad \text{E 5-74}$$

$$P_{ch,i,t}^{EV}, P_{dch,i,t}^{EV} \in R_{\geq 0} \text{ και } u_{c,t}, u_{d,t} \in U_{EV} = \{0,1\}$$

Η αντικειμενική συνάρτηση E5-67 ελαχιστοποιεί την απόκλιση μεταξύ του πραγματικού προφίλ λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων και του αντίστοιχου που προκύπτει από τον ημερήσιο ενεργειακό προγραμματισμό. Η συνάρτηση  $U$  της αντικειμενικής συνάρτησης είναι δευτέρου βαθμού με σκοπό την ελαχιστοποίηση και των αρνητικών ( $\sum_{i=1}^N P_{i,t}^{EV} \leq POP_t^{for}$ ) και θετικών αποκλίσεων ( $\sum_{i=1}^N P_{i,t}^{EV} \geq POP_t^{for}$ ). Ο ισοτικός περιορισμός E5-69 εξασφαλίζει ότι η μπαταρία κάθε ηλεκτρικού οχήματος θα είναι πλήρως φορτισμένη στο τέλος της εξεταζόμενης περιόδου. Επειδή η ταυτόχρονη φόρτιση και εκφόρτιση την ίδια χρονική στιγμή  $t$  είναι μη ρεαλιστική λειτουργική κατάσταση, η ανίσωση E5-70 εξασφαλίζει αυτόν τον λειτουργικό περιορισμό, σε συνδυασμό με τις ανισότητες E5-71 και E5-72, με την υιοθέτηση των δύο ακέραιων μεταβλητών ( $u_{c,t}, u_{d,t}$ ). Οι δύο αυτές ανισότητες E5-71 και E5-72 καθορίζουν το άνω όριο του πεδίου ορισμού των μεταβλητών απόφασης  $P_{ch,i,t}^{EV}, P_{dch,i,t}^{EV}$  για κάθε χρονική στιγμή  $t$  βάσει της εγκατεστημένης ισχύος των υποδομών φόρτισης ( $P_{nomCS_{i,t}}$ ) καθώς και της κινητικότητας των ηλεκτρικών οχημάτων ( $Plug_{i,t}$ ). Οι περιορισμοί E5-73 και E5-74 εξασφαλίζουν ότι το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας κάθε χρονική στιγμή  $t$  κινείται εντός αποδεκτών ορίων.

Το παραπάνω πρόβλημα βελτιστοποίησης ανήκει στην κατηγορία των μικτών ακέραιων μη γραμμικών προβλημάτων, λόγω της τετραγωνικής μορφής της αντικειμενικής συνάρτησης και των ακέραιων μεταβλητών απόφασης ( $u_{c,t}, u_{d,t}$ ). Λόγω της μη γραμμικότητας του προβλήματος, ο χρόνος επίλυσης του αυξάνει πολυωνυμικά καθώς αυξάνεται ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων. Σε μη γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης όπου ο αριθμός των μεταβλητών/περιορισμών είναι μεγάλος, η αποσύνθεση του σε μικρότερα προβλήματα και η αποκεντρωμένη επίλυση του μπορεί να μειώσει αισθητά τον υπολογιστικό χρόνο επίλυσης.

Στη συνέχεια της ενότητας αυτή θα αναλυθεί ένας αποκεντρωμένος τρόπος διαχείρισης για την κατανομή του βέλτιστου ενεργειακού προφίλ του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Πρόκειται για ένα πρόβλημα πολυπρόσωπων αποφάσεων με συγκρουόμενα κριτήρια (non-cooperative games) τα οποία επιλύονται με τη χρήση μεθόδων της θεωρίας παιγνίων, όπως αναλύθηκε εκτενώς στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας διατριβής. Σε τέτοιου είδους προβλήματα υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες συμμετεχόντων: ο **ηγέτης (leader)**, που είναι μοναδικός σε κάθε

πρόβλημα και καθορίζει την πολιτική διαχείρισης και οι *ακόλουθοι (followers)* που ακολουθούν την πολιτική του ηγέτη εξυπηρετώντας ωστόσο τις δικές τους επιθυμίες/ανάγκες. Στην περίπτωση των ηλεκτρικών οχημάτων, το ρόλο του ηγέτη αναλαμβάνει ο EVSEA του οποίου η πολιτική διαχείρισης εξυπηρετεί την εφαρμογή του βέλτιστου ενεργειακού προφίλ όπως αυτό προκύπτει από τον ημερήσιο ενεργειακό προγραμματισμό ( $POP^{for}$ ). Οι θετικές/αρνητικές τιμές του προφίλ αναφέρονται στην απορρόφηση/έγχυση ενέργειας από/προς το δίκτυο (λειτουργία φόρτισης/εκφόρτισης). Δεδομένης της πολιτικής φόρτισης του EVSEA, κάθε ηλεκτρικό όχημα (λειτουργώντας ως ακόλουθος) αποφασίζει ατομικά το βέλτιστο προφίλ λειτουργίας του βάσει των ενεργειακών του αναγκών και των περιορισμών λόγω της κινητικότητας του.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, το κεντρικό πρόβλημα της ωριαίας διαχείρισης του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων (E5-67 – E5-74) μετατρέπεται σε έναν επαναληπτικό, αποκεντρωμένο αλγόριθμο στον οποίο ο EVSEA δεν έχει την δυνατότητα να καθορίσει τον τρόπο λειτουργίας του κάθε οχήματος αλλά επηρεάζει το συνολικό προφίλ φόρτισης/εκφόρτισης του στόλου των οχημάτων. Πιο συγκεκριμένα, σε κάθε επανάληψη  $k$ , ο EVSEA καθορίζει ένα σύνολο εικονικών τιμών ελέγχου που αντικατοπτρίζει την απόκλιση μεταξύ του πραγματικού προφίλ λειτουργίας του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων και του επιθυμητού ( $POP^{for}$ ). Σκοπός της πολιτικής διαχείρισης του EVSEA είναι η παραγωγή κατάλληλων εικονικών τιμών ελέγχου που θα ελαχιστοποιήσουν την παραπάνω απόκλιση. Αυτές οι εικονικές τιμές ελέγχου  $p_t^v$  καθορίζονται από την παρακάτω φόρμουλα:

$$p_t^v = \gamma * \left( \sum_{i=1}^N \{P_{ch,i,t}^{EV \ v-1} - P_{dch,i,t}^{EV \ v-1}\} - POP_t^{for} \right), \gamma \in (0,1) \subset \mathbb{R} \quad E\ 5-75$$

Για την πρώτη επανάληψη ( $v=1$ ), ισχύει ότι  $P_{ch,i,t}^{EV \ 0} = 0$  και  $P_{dch,i,t}^{EV \ 0} = 0$ . Η παράμετρος  $\gamma$  είναι μια θετικά ορισμένη παράμετρος η τιμή της οποίας εξασφαλίζει τη σύγκλιση του αποκεντρωμένου αλγορίθμου, όπως αποδεικνύεται στη συνέχεια αυτής της ενότητας. Οι εικονικές τιμές ελέγχου δεν αντικατοπτρίζουν το πραγματικό κόστος ενέργειας φόρτισης ή το πραγματικό κέρδος από την έγχυση ισχύος στο δίκτυο. Πρόκειται για εικονικές τιμές ελέγχου που εξυπηρετούν μόνο τις ανάγκες υλοποίησης του αποκεντρωμένου αλγορίθμου και είναι τελείως διαφορετικές από τις τιμές αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Βάσει των εικονικών τιμών ελέγχου του EVSEA (ηγέτης), κάθε ηλεκτρικό όχημα (ακόλουθος) καθορίζει τη δική του στρατηγική λειτουργίας (φόρτιση/εκφόρτιση). Το πρόβλημα βελτιστοποίησης κάθε ηλεκτρικού οχήματος έγκειται στην ελαχιστοποίηση του εικονικού κόστους φόρτισης του καθορίζοντας τα βέλιστα επίπεδα φόρτισης/εκφόρτισης κάθε ώρα  $t$  και μοντελοποιείται ως ακολούθως:

$$\min_{P_{ch,i,t}^{EV \ v}, P_{dch,i,t}^{EV \ v}} \left\{ J_i^v \left( t, P_{ch,i,t}^{EV \ v}, P_{dch,i,t}^{EV \ v}, P_{ch,i,t}^{EV \ v-1}, P_{dch,i,t}^{EV \ v-1} \right) \right\}$$

$$J_i^v \left( t, P_{ch,i,t}^{EV \ v}, P_{dch,i,t}^{EV \ v}, P_{ch,i,t}^{EV \ v-1}, P_{dch,i,t}^{EV \ v-1} \right) = \sum_{t=1}^{24} \left\{ p_t^v \cdot P_{i,t}^{EV \ v} + \frac{1}{2} \left( P_{i,t}^{EV \ v} - P_{i,t}^{EV \ v-1} \right)^2 \right\} \quad E\ 5-76$$

μ.π.

$$\sum_{t=1}^{24} \left( P_{ch,i,t}^{EV \ v} \cdot E f_i - \frac{P_{dch,i,t}^{EV \ v}}{E f_i} \right) \Delta t - \sum_{t=1}^{24} P_{trip,i,t}^{EV \ v} = 0 \quad E\ 5-77$$

$$u_{c,i,t} + u_{d,i,t} - 1 \leq 0 \quad E\ 5-78$$

$$\left( P_{ch,i,t}^{EV \ v} - u_{c,i,t} \cdot Plug_{i,t} \cdot P_{nomCS_{i,t}} \right) \leq 0 \quad E\ 5-79$$

$$\left( P_{dch,i,t}^{EV \ v} - u_{d,i,t} \cdot Plug_{i,t} \cdot P_{nomCS_{i,t}} \right) \leq 0 \quad E\ 5-80$$

$$\left( SOC_i^{in} - 1 \right) C_{bat,i} + \sum_{\tau=1}^t \left( P_{ch,i,\tau}^{EV \ v} \cdot E f_i - \frac{P_{dch,i,\tau}^{EV \ v}}{E f_i} \right) \Delta t - \sum_{\tau=1}^t P_{trip,i,\tau}^{EV \ v} \leq 0 \quad E\ 5-81$$

$$-SOC_i^{in} C_{bat,i} - \sum_{\tau=1}^t \left( P_{ch,i,\tau}^{EV \ v} \cdot E f_i - \frac{P_{dch,i,\tau}^{EV \ v}}{E f_i} \right) \Delta t + \sum_{\tau=1}^t P_{trip,i,\tau}^{EV \ v} \leq 0 \quad E\ 5-82$$

$$P_{ch,i,t}^{EV}, P_{dch,i,t}^{EV} \in R_{\geq 0} \text{ και } u_{c,t}, u_{d,t} \in U_{EV} = \{0,1\}$$

Η αντικειμενική συνάρτηση E5-76 αποτελείται από τρεις παράγοντες: το εικονικό κόστος φόρτισης ( $p_t^v \cdot P_{ch,i,t}^{EV}$ ), το εικονικό κέρδος από την έγχυση ισχύος στο δίκτυο ( $p_t^v \cdot P_{dch,i,t}^{EV}$ ) και έναν όρο ποινής ( $\frac{1}{2}(P_{i,t}^{EV^v} - P_{i,t}^{EV^{v-1}})^2$ ) που μηδενίζει όταν επιτυγχάνεται η σύγκλιση του αλγορίθμου ( $P_{i,t}^{EV^v} = P_{i,t}^{EV^{v-1}}$ ). Το αρνητικό πρόσημο στο εικονικό κέρδος υιοθετήθηκε για λόγους ελαχιστοποίησης της συνάρτησης. Η υιοθέτηση του όρου ποινής είναι απαραίτητη για τη σύγκλιση του αλγορίθμου, διαφορετικά το όλο σύστημα διαχείρισης θα ταλαντευόταν μεταξύ δύο καταστάσεων όπως αναλύθηκε εκτενώς στο Κεφάλαιο 3 της παρούσας διατριβής. Επιπρόσθετα, όσο πιο μικρή είναι η τιμή της παραμέτρου  $\gamma$  τόσο πιο μικρές είναι οι εικονικές τιμές ελέγχου του EVSEA βάσει της εξίσωσης E5-75. Επομένως, η βαρύτητα του όρου ποινής στην αντικειμενική συνάρτηση E5-76 γίνεται μεγαλύτερη με αποτέλεσμα οι μεταβολές του προφίλ λειτουργίας των οχημάτων μετά από κάθε επανάληψη ( $\|P_{i,t}^{EV^v} - P_{i,t}^{EV^{v-1}}\|^2$ ) να είναι μικρές. Αυτό μπορεί να επηρεάσει αισθητά το χρόνο σύγκλισης του αλγορίθμου. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητη η ορθή επιλογή της τιμής για την παράμετρο  $\gamma$ .

Δεδομένου ότι  $P_{i,t}^{EV} = P_{ch,i,t}^{EV} - P_{dch,i,t}^{EV}$  και  $P_{ch,i,t}^{EV} \cdot P_{dch,i,t}^{EV} = 0$  (μιας και δεν είναι ρεαλιστική η ταυτόχρονη λειτουργία φόρτισης και εκφόρτισης τη χρονική στιγμή  $t$ ), η αντικειμενική συνάρτηση E5-76 αποκτά την παρακάτω μορφή:

$$J_i^v(t, P_{ch,i,t}^{EV^v}, P_{dch,i,t}^{EV^v}, P_{ch,i,t}^{EV^{v-1}}, P_{dch,i,t}^{EV^{v-1}}) = \sum_{t=1}^{24} \left\{ \begin{array}{l} p_t^v \cdot (P_{ch,i,t}^{EV^v} - P_{dch,i,t}^{EV^v}) \\ + \frac{1}{2} (P_{ch,i,t}^{EV^v} - P_{ch,i,t}^{EV^{v-1}})^2 \\ + \frac{1}{2} (P_{ch,i,t}^{EV^v} - P_{dch,i,t}^{EV^{v-1}})^2 \end{array} \right\} \quad \text{E 5-83}$$

Στη συνέχεια, τα βέλτιστα προφίλ κάθε οχήματος  $P_{ch,i,t}^{EV^v}, P_{dch,i,t}^{EV^v}$  αθροίζονται σε ένα ενιαίο προφίλ ( $POP_t$ ):

$$POP_t = \sum_{i=1}^N \{P_{ch,i,t}^{EV^{v-1}} - P_{dch,i,t}^{EV^{v-1}}\} \quad \text{E 5-84}$$

Βάσει αυτού του πραγματικού βέλτιστου προφίλ ( $POP_t$ ), ο EVSEA ανανεώνει τις εικονικές τιμές ελέγχου σύμφωνα με την εξίσωση E5-75. Σύμφωνα με τις νέες εικονικές τιμές ελέγχου του EVSEA, κάθε ηλεκτρικό όχημα υπολογίζει εκ νέου το βέλτιστο προφίλ λειτουργίας του (E5-83, μ.π. E5-77 - E5-82). Η διαδικασία αυτή εκτελείται επαναληπτικά έως ότου:

$$|POP_t - POP_t^{for}| \leq \varepsilon \quad \text{E 5-85}$$

Το διάγραμμα ροής στην Εικόνα 5-30 συνοψίζει την επαναληπτική διαδικασία σύγκλισης του αποκεντρωμένου αλγορίθμου για την ωριαία κατανομή του βέλτιστου προφίλ του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού στα ηλεκτρικά οχήματα. Το πρόβλημα ελαχιστοποίησης του εικονικού κόστους φόρτισης ανήκει στην κατηγορία των μεικτών ακεραίων μη-γραμμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Οι μέθοδοι επίλυσης αυτής της κατηγορίας προβλημάτων αναλύθηκαν και συγκρίθηκαν στο Κεφάλαιο 4 της παρούσας διδακτορικής διατριβής.

### Απόδειξη σύγκλισης του αποκεντρωμένου αλγορίθμου

Η αντικειμενική συνάρτηση του κεντρικού προβλήματος για την ωριαία διαχείριση του στόλου ηλεκτρικών οχημάτων δίνεται από τη σχέση E5-76:

$$f_{cent}^{v+1} = \sum_{t \in T} U \left( \sum_{i \in N} P_{i,t}^{EV^{v+1}} - POP_t^{for} \right) = \sum_{t \in T} \frac{1}{2} \left( \sum_{i \in N} P_{i,t}^{EV^{v+1}} - POP_t^{for} \right)^2 \quad \text{E 5-86}$$

Η συνάρτηση  $U$  είναι κυρτή, επομένως, ισχύει ότι:

$$f_{cent}^{v+1} \leq \sum_{t \in T} U \left( \sum_{i \in N} P_{i,t}^{EV^v} - POP_t^{for} \right) - \nabla U \left( \sum_{i \in N} P_{i,t}^{EV^{v+1}} - POP_t^{for} \right) \cdot \left( \sum_{i \in N} P_{i,t}^{EV^v} - \sum_{i \in N} P_{i,t}^{EV^{v+1}} \right) \quad \text{E 5-87}$$

Θεωρώντας ότι η συνάρτηση  $\nabla U$  είναι Lipschitz, υπάρχει μια θετικά ορισμένη σταθερά  $K > 0$  τέτοια

ώστε:

$$|\nabla U(x) - \nabla U(y)| \leq K|x - y| \quad \text{E 5-88}$$

Επομένως,

$$f_{cent}^{v+1} \leq f_{cent}^v - \langle \nabla U(\sum_{i \in N} P_i^{EV^v} - POP^{for}) + K \left( \sum_{i \in N} P_i^{EV^{v+1}} - \sum_{i \in N} P_i^{EV^v} \right), \sum_{i \in N} P_i^{EV^v} - \sum_{i \in N} P_i^{EV^{v+1}} \rangle \quad \text{E 5-89}$$

Σύμφωνα με τον καθορισμό των εικονικών τιμών ελέγχου (E5-75), η παραπάνω ανισότητα τροποποιείται ως εξής:

$$f_{cent}^{v+1} \leq f_{cent}^v + \frac{1}{\gamma} \sum_{i \in N} \left( p^v \cdot (P_i^{EV^{v+1}} - P_i^{EV^v}) \right) + K \left\| \sum_{i \in N} P_i^{EV^{v+1}} - \sum_{i \in N} P_i^{EV^v} \right\|^2 \quad \text{E 5-90}$$

Η αντικειμενική συνάρτηση κάθε οχήματος  $J$  είναι κυρτή (convex) καθώς ο πίνακας Hessian είναι θετικά ημ-ορισμένος (positive semi-definite)  $\forall P_i^{EV} \in S = \{P_i^{EV} \in \mathbb{R}^+ : P_i^{EV} \leq P_{nomCS_i}\}$ :

$$\frac{\partial f}{\partial P_{ch}^{EV^2}} \cdot \frac{\partial f}{\partial P_{dch}^{EV^2}} - \left( \frac{\partial f}{\partial P_{ch}^{EV}} \frac{\partial f}{\partial P_{dch}^{EV}} \right)^2 > 0 \quad \text{και} \quad \frac{\partial f}{\partial P_{ch}^{EV^2}}, \frac{\partial f}{\partial P_{dch}^{EV^2}} \geq 0 \quad \text{E 5-91}$$

Δεδομένου ότι η συνάρτηση  $J$  είναι κυρτή και διαφορίσιμη κατά Gateaux (*Gateaux differentiable*), τότε από την πρώτου βαθμού συνθήκη βελτιστοποίησης (*first order necessary optimality condition*) για την E5-86 ισχύει η ανισότητα του *Euler*:

$$\langle \nabla f(P_i^{EV^{v+1}}), \sum_{i \in N} P_i^{EV} - \sum_{i \in N} P_i^{EV^v} \rangle \geq 0 \quad \text{E 5-92}$$

$$\langle p^v + \sum_{i \in N} P_i^{EV^{v+1}} - \sum_{i \in N} P_i^{EV}, \sum_{i \in N} P_i^{EV} - \sum_{i \in N} P_i^{EV^{v+1}} \rangle \geq 0 \quad \text{E 5-93}$$

$\forall P_i^{EV} \in S$ . Αφού  $P_i^{EV^v} \in S$  τότε ισχύει ότι:

$$\langle p^v + \sum_{i \in N} P_i^{EV^{v+1}} - \sum_{i \in N} P_i^{EV^v}, \sum_{i \in N} P_i^{EV^v} - \sum_{i \in N} P_i^{EV^{v+1}} \rangle \geq 0 \quad \text{E 5-94}$$

Άρα,

$$\langle p^v, \sum_{i \in N} P_i^{EV^{v+1}} - \sum_{i \in N} P_i^{EV^v} \rangle \leq - \left\| \sum_{i \in N} P_i^{EV^{v+1}} - \sum_{i \in N} P_i^{EV^v} \right\|^2 \quad \text{E 5-95}$$

Συνεπώς, η ανίσωση E5-90 τροποποιείται ως ακολούθως:

$$f_{cent}^{v+1} \leq f_{cent}^v - \frac{1}{\gamma} \sum_{i \in N} \left\| P_i^{EV^{v+1}} - P_i^{EV^v} \right\|^2 + K \left\| \sum_{i \in N} P_i^{EV^{v+1}} - \sum_{i \in N} P_i^{EV^v} \right\|^2 \quad \text{E 5-96}$$

Τέλος, σύμφωνα με την ανισότητα Cauchy-Schwarz, ισχύει ότι:

$$f_{cent}^{v+1} \leq f_{cent}^v - \frac{1}{\gamma} \sum_{i \in N} \left\| P_i^{EV^{v+1}} - P_i^{EV^v} \right\|^2 + K \cdot N \sum_{i \in N} \left\| P_i^{EV^{v+1}} - P_i^{EV^v} \right\|^2 \quad \text{E 5-97}$$

Επιλέγοντας κατάλληλη τιμή για τη σταθερά  $\gamma$ , τέτοια ώστε  $\gamma < 1/(NK)$  εξασφαλίζεται η σύγκλιση του αποκεντρωμένου αλγορίθμου:

$$\frac{-1}{\gamma} \sum_{i \in N} \left\| P_i^{EV^{v+1}} - P_i^{EV^v} \right\|^2 + K \cdot N \sum_{i \in N} \left\| P_i^{EV^{v+1}} - P_i^{EV^v} \right\|^2 \leq 0 \quad \text{E 5-98}$$

$$\rightarrow f_{cent}^{v+1} \leq f_{cent}^v$$

Αν  $f_{cent}^{v+1} = f_{cent}^v$ , τότε  $P_i^{EV^{v+1}} = P_i^{EV^v}$  και λόγω της σχέσης E5-93 θα ισχύει ότι:

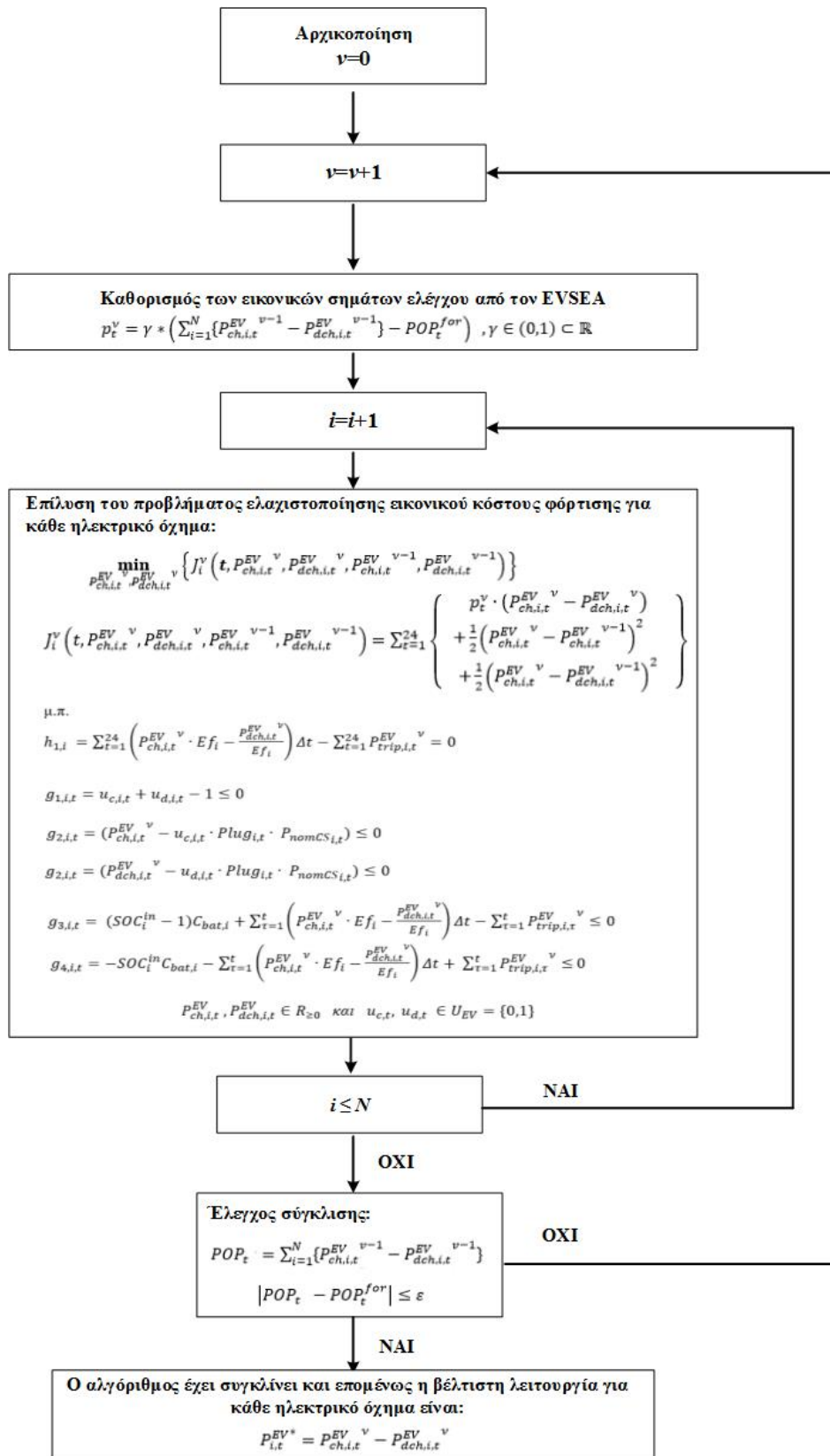
$$\langle p^v, \sum_{i \in N} P_i^{EV} - \sum_{i \in N} P_i^{EV^v} \rangle \geq 0 \quad \text{E 5-99}$$

Συνεπώς,

$$\langle p^v, \sum_{i \in N} P_i^{EV} - \sum_{i \in N} P_i^{EV^v} \rangle = \sum_{i \in N} \langle p^v, \sum_{i \in N} P_i^{EV} - \sum_{i \in N} P_i^{EV^v} \rangle \geq 0 \quad \text{E 5-100}$$

Αυτή είναι η πρώτου βαθμού συνθήκη βελτιστοποίησης για την αντικειμενική συνάρτηση E5-86.

Επομένως,  $f_{cent}^{v+1} = f_{cent}^v \rightarrow P_i^{EV^{v+1}} = P_i^{EV^v} \rightarrow$  άρα  $P_i^{EV^v}$  είναι και η βέλτιστη λύση.



Εικόνα 5-30 Διάγραμμα ροής αποκεντρωμένου αλγορίθμου για την ωριαία διαχείριση του στόλου

### 5.3.2.3 Βραχυπρόθεσμη βέλτιστη κατανομή ενός σήματος ισχύος στα ηλεκτρικά οχήματα για την παροχή επικουρικών υπηρεσιών

Στην ενότητα αυτή θα αναλυθεί η βέλτιστη απόκριση των ηλεκτρικών οχημάτων (ισχύς φόρτισης/ εκφόρτισης) σε ένα σήμα ρύθμισης ( $RS_k$ , όπου  $k$  είναι μια παράμετρος χρόνου διαφορετική από την  $t=1,2,\dots,24$  που καθορίζει τα χρονικά διαστήματα αναθεώρησης του σήματος ρύθμισης) που στέλνει ο διαχειριστής του δικτύου προς τον *EVSEA*. Το σήμα ρύθμισης αφορά στη γρήγορη δευτερεύουσα ρύθμιση και αποστέλλεται κάθε 5λεπτά στον *EVSEA*. Για το σήμα ρύθμισης, ισχύει η παρακάτω σύμβαση:

$$RS_k = \begin{cases} < 0, & \text{ζητείται άνω ρύθμιση (εκφόρτιση ή μείωση φόρτισης)} \\ & = 0, & \text{δεν ζητείται ρύθμιση} \\ > 0, & \text{ζητείται κάτω ρύθμιση (φόρτιση ή μείωση εκφόρτισης)} \end{cases} \quad \text{E 5-101}$$

Επιπρόσθετα, το σήμα ρύθμισης εκφράζεται ως ποσοστό των διαθέσιμων χωρητικοτήτων για ρύθμιση όπως αυτές προσδιορίστηκαν από τον ημερήσιο ενεργειακό προγραμματισμό. Ως εκ τούτου, η ισχύς που ζητείται από τα ηλεκτρικά οχήματα για την υποστήριξη της συχνότητας σε δευτερογενές επίπεδο ( $RS_{MW}$ ) είναι:

$$RS_{MW} = \begin{cases} RS_k * \sum_{i,t} MnAP_{i,k}, & RS_k < 0 \\ 0, & RS_k = 0 \\ RS_k * \sum_{i,t} MxAP_{i,k}, & RS_k > 0 \end{cases} \quad \text{E 5-102}$$

Στη συνέχεια θα αναλυθούν δύο αποκεντρωμένοι αλγόριθμοι σκοπός των οποίων είναι η κατανομή του σήματος ρύθμισης του διαχειριστή δικτύου στα ηλεκτρικά οχήματα βάσει των ενεργειακών αναγκών και περιορισμών μετακίνησης των ηλεκτρικών οχημάτων. Ο πρώτος αλγόριθμος στηρίζεται στον προσαρμοστικό έλεγχο μέσω χαρακτηριστικής στατισμού που παρουσιάστηκε στην ενότητα 5.3.1.2 της παρούσας διατριβής. Ο δεύτερος αλγόριθμος επιτρέπει τη συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων με αποκεντρωμένο τρόπο στη δευτερεύουσα ρύθμιση λαμβάνοντας υπόψη τις ενεργειακές ανάγκες φόρτισης του κάθε οχήματος, το χρονικό διάστημα που το όχημα παραμένει διασυνδεδεμένο μέχρι το επόμενο ταξίδι του καθώς και την αθροιστική χωρητικότητα του στόλου για παροχή επικουρικών υπηρεσιών.

#### Αλγόριθμος Α: Προσαρμοστικός έλεγχος μέσω καμπυλών στατισμού

Η Εικόνα 5-31 απεικονίζει το δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης ενός ηλεκτρικού οχήματος που συμμετέχει στη δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας με εφαρμογή προσαρμοστικού ελέγχου μέσω χαρακτηριστικής στατισμού. Το τελικό σημείο λειτουργίας του ηλεκτρικού οχήματος καθορίζεται από τη συνεισφορά του κάθε οχήματος ( $P_i$ ) στο σήμα ρύθμισης ( $RS_{MW}$ ) που ζητείται από το διαχειριστή του δικτύου και από το βέλτιστο σημείο λειτουργίας που καθορίζεται από την ωριαία διαχείριση του στόλου ηλεκτρικών οχημάτων. Η συνεισφορά των ηλεκτρικών οχημάτων στο σήμα ρύθμισης  $RS_{MW}$  καθορίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

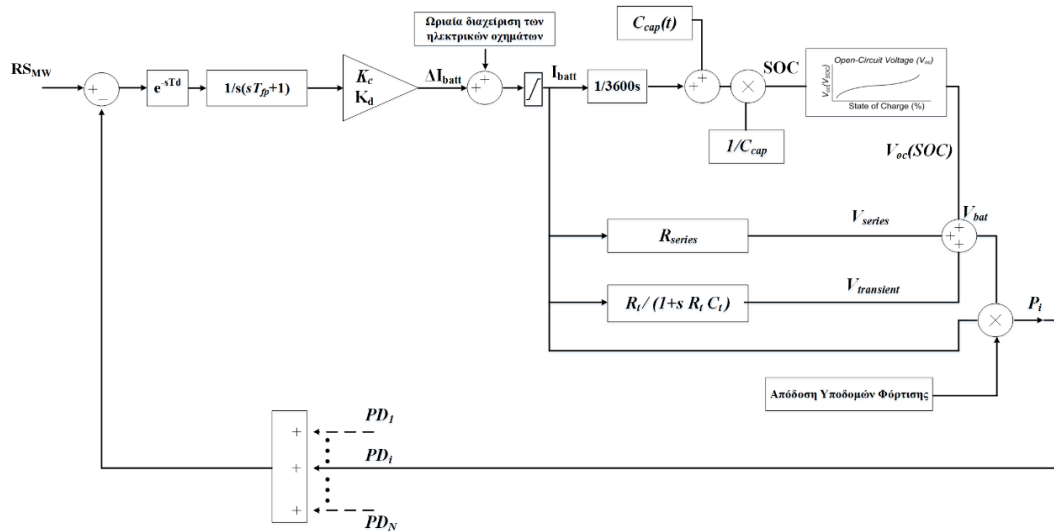
$$\Delta I_{bat} = \frac{K_c}{(1+sT_p)s} \Delta RS_{MW}, \quad \text{if } RS_{MW} > 0 \quad \text{E 5-103}$$

$$\Delta I_{bat} = \frac{K_d}{(1+sT_p)s} \Delta RS_{MW}, \quad \text{if } RS_{MW} < 0 \quad \text{E 5-104}$$

όπου  $K_c$  και  $K_d$  ( $K_c+K_d = 1$ ) προσδιορίζονται από τις σχέσεις E5-11 – E5-14. Οι μεταβολές του ρεύματος θα πρέπει σε κάθε περίπτωση να μην παραβιάζουν τους τεχνικούς περιορισμούς των υποδομών φόρτισης, δηλαδή το ονομαστικό ρεύμα του σταθμού. Αυτό εξασφαλίζεται μέσω του μπλοκ κορεσμού που περιορίζει τη μέγιστη (λειτουργία φόρτισης) και ελάχιστη (λειτουργία εκφόρτισης) τιμή του ρεύματος. Η επίδραση της μεταβολής του ρεύματος στην μπαταρία του ηλεκτρικού οχήματος μοντελοποιείται μέσω του ισοδύναμου μοντέλου Thevenin, όπως αυτό παρουσιάστηκε στην Εικόνα 5-9.

Ο προσαρμοστικός έλεγχος βασίζεται σε επαναληπτική και αμφίδρομη ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των ηλεκτρικών οχημάτων και του *EVSEA*, που είναι και ο αρμόδιος για την επικοινωνία με τον διαχειριστή του συστήματος. Σε κάθε επανάληψη, ο *EVSEA* επικοινωνεί στα ηλεκτρικά οχήματα την απόκλιση του επιθυμητού σήματος ρύθμισης ( $RS_{MW}$ ) και της πραγματικής

συνεισφοράς των ηλεκτρικών οχημάτων ( $\sum_{i \in N} PD_{i,k}$ ). Ο προσαρμοστικός έλεγχος συγκλίνει όταν  $\Delta RS_{MW} = |\sum_{i=1}^N PD_{i,k} - RS_{MW,k}| \leq \varepsilon$ .



Εικόνα 5-31 Σχηματικό διάγραμμα μοντελοποίησης συμμετοχής ηλεκτρικού οχήματος στη δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας με εφαρμογή προσαρμοστικού ελέγχου μέσω χαρακτηριστικής στατισμού

Ποικίλες τεχνολογίες μπορούν να εφαρμοστούν για την υλοποίηση της αμφίδρομης επικοινωνίας κατά περίπτωση [127]. Τυχόν καθυστερήσεις στη μετάδοση της επικοινωνίας μπορούν να επηρεάσουν τη σύγκλιση του μοντέλου. Συνεπώς, για λόγους προσομοίωσης υιοθετήθηκε η παράμετρος  $e^{-T_d t}$ .

**Αλγόριθμος Β: Αποκεντρωμένη κατανομή σήματος δευτερεύουσας ρύθμισης συχνότητας**

Στον αλγόριθμο αυτό, η συνεισφορά των ηλεκτρικών οχημάτων στη δευτερεύουσα ρύθμιση καθορίζεται βάσει των ενεργειακών αναγκών κάθε ηλεκτρικού οχήματος και το διαθέσιμο χρονικό διάστημα που το όχημα παραμένει σταθευμένο. Στο πλαίσιο αυτό, η συμμετοχή ενός ηλεκτρικού οχήματος στην περίπτωση κάτω ρύθμισης ( $RS_k > 0$ ) γίνεται εντονότερη όταν οι ενεργειακές ανάγκες φόρτισης είναι υψηλές ή/και το διαθέσιμο χρονικό διάστημα φόρτισης είναι μικρό. Αντίθετα στην περίπτωση άνω ρύθμισης ( $RS_k < 0$ ), η συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων γίνεται εντονότερη όταν οι ενεργειακές ανάγκες φόρτισης είναι μικρές ή/και η περίοδος φόρτισης μακρά.

Πρόκειται για μια επαναληπτική διαδικασία η οποία απαιτεί την αμφίδρομη ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ του EVSEA και των ηλεκτρικών οχημάτων. Από την πλευρά του EVSEA, οι πληροφορίες που κοινοποιούνται στα ηλεκτρικά οχήματα είναι η ζητούμενη ισχύς ρύθμισης ( $RS_{MW}$  ή  $\Delta RS_{MW}$ ), η εκτιμώμενη μέγιστη/ελάχιστη αθροιστική χωρητικότητα ρύθμισης ( $MxAP_{agg} = \sum_{i \in N} MxAP_i$ ,  $MnAP_{agg} = \sum_{i \in N} MnAP_i$ ) και η πραγματική αθροιστική συνεισφορά των οχημάτων στις επικουρικές υπηρεσίες ( $\sum_{i=1}^N PD_i$ ). Από την πλευρά των ηλεκτρικών οχημάτων, μόνο η συνεισφορά του κάθε οχήματος ( $PD_i$ ), που αποφασίζεται τοπικά από τον προτεινόμενο αλγόριθμο, κοινοποιείται προς τον EVSEA. Η ανταλλαγή πληροφοριών και η επεξεργασία των αντίστοιχων δεδομένων στον προτεινόμενο αλγόριθμο, για κάθε επανάληψη  $k$ , περιγράφεται από τα ακόλουθα βήματα:

1) Αρχικά υπολογίζονται σε τοπικό επίπεδο από τα ηλεκτρικά οχήματα οι πραγματικές μέγιστες διαθέσιμες ποσότητες για κάτω ( $MxAP_{i,k}^r$ ) και άνω ρύθμιση ( $MnAP_{i,k}^r$ ) τη χρονική στιγμή  $k$  θεωρώντας ότι  $RS_k = 0$ ,

$$MnAP_{i,k}^r = \min \left( \left| C_{bat,i} \cdot \frac{60}{d} - \alpha \right|, \beta_1 \right) \cdot Plug_{i,k} \tag{E 5-105}$$

$$MxAP_{i,k}^r = \min(|\alpha|, \beta_2) \cdot Plug_{i,k} \tag{E 5-106}$$

$$\alpha = (1 - SOC_{i,k}) \cdot C_{bat,i} \cdot \frac{60}{k} - E f_i \cdot P_{i,t}^{EV} \tag{E 5-107}$$



$$\beta_1 = P_{nomCS_{i,t}} + P_{i,t}^{EV} \quad \text{και} \quad \beta_2 = P_{nomCS_{i,t}} - P_{i,t}^{EV} \quad \text{E 5-108}$$

όπου  $Plug_{i,k}$ , είναι 0 αν το όχημα  $i$  τη χρονική στιγμή  $k$  δεν είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο διαφορετικά είναι 1,  $\alpha$  είναι η παράμετρος που εξασφαλίζει τη λειτουργία της μπαταρίας εντός λειτουργικών ορίων σε κάθε επανάληψη  $k$  και οι παράμετροι  $\beta_1/\beta_2$  εξασφαλίζουν ότι η ροή ισχύος από και προς το δίκτυο δεν ξεπερνά την ονομαστική ισχύ των υποδομών φόρτισης. Για τον καθορισμό των τιμών των παραμέτρων  $\alpha$ ,  $\beta_1$  και  $\beta_2$  λαμβάνονται υπόψη και οι βέλτιστες τιμές λειτουργίας του ωριαίου αλγορίθμου διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων ( $P_{i,t}^{EV}$ ).

2) Η συνεισφορά του εκάστοτε ηλεκτρικού οχήματος στο σήμα ρύθμισης ( $RS_{MW}$ ) που καθορίζεται από τον  $EVSEA$  προσδιορίζεται ως εξής:

$$PD_{i,k} = \begin{cases} K_{i,k} \cdot RS_{MW,k}, & RS(k) \neq 0 \\ 0, & RS(k) = 0 \end{cases} \quad \text{E 5-109}$$

όπου

$$K_i(k) = \begin{cases} \frac{TSN_{i,k}}{CPA_{i,k}} \cdot \frac{MnAP_{i,k}^r}{MnAP_{aggr,k}}, & RS_k < 0 \\ 0, & RS_k = 0 \\ \left(1 - \frac{TSN_{i,k}}{CPA_{i,k}}\right) \cdot \frac{MxAP_{i,k}^r}{MxAP_{aggr,k}}, & RS_k > 0 \end{cases} \quad \text{E 5-110}$$

$$TSN_{i,k} = \min(CPA_{i,k}, (1 - SOC_{i,k}) \cdot C_{bat,i} \cdot \frac{60}{d} / P_{nomCS_{i,t}}) \in \mathbb{N} \quad \text{E 5-111}$$

$$CPA_{i,k} = \sum_{\delta=k}^{\frac{60}{d}} \{Plug_i(\delta)\} \in \mathbb{N} \quad \text{E 5-112}$$

3) Στο τέλος κάθε επανάληψης  $\nu$  του αλγορίθμου, ο  $EVSEA$  υπολογίζει την απόκλιση μεταξύ του ζητούμενου σήματος ρύθμισης ( $RS_{MW,k}$ ) και της πραγματικής συνεισφοράς των ηλεκτρικών οχημάτων ( $\sum_{i \in N} PD_{i,k}$ ):

$$\Delta RS_k^\nu = RS_{MW,k} - \sum_{i=1}^N PD_{i,k}^\nu \quad \text{E 5-113}$$

Αν  $\Delta RS_k^\nu \leq \varepsilon$  τότε ο αλγόριθμος συνεχίζει με το βήμα 6, διαφορετικά συνεχίζει στο βήμα 4.

4) Η συνεισφορά κάθε ηλεκτρικού οχήματος στο σήμα ελέγχου  $\Delta RS_k^\nu$  καθορίζεται από την εξής σχέση:

$$PD_{i,k}^\nu = \begin{cases} PD_{i,k}^{\nu-1} + \Delta PD_{i,k}^\nu, & \Delta RS_k^{\nu-1} \neq 0 \\ 0, & \Delta RS_k^{\nu-1} = 0 \end{cases} \quad \text{E 5-114}$$

όπου

$$\Delta PD_{i,k}^\nu = \frac{\Delta PD_{i,k}^{\nu-1}}{\sum_{i \in N_A} \Delta PD_{i,k}^{\nu-1}} \Delta RS_k^{\nu-1} \quad \text{E 5-115}$$

Η απόκλιση  $\Delta PD_{i,k}^\nu$  είναι φραγμένη μεταβλητή λόγω των λειτουργικών περιορισμών της μπαταρίας  $[-MnAP_{i,k}^r, MxAP_{i,k}^r]$ . Στην περίπτωση που η συνεισφορά ενός ηλεκτρικού οχήματος  $i$  περιορίζεται από τους λειτουργικούς περιορισμούς της μπαταρίας του κατά την επανάληψη  $\nu$ , τότε το συγκεκριμένο ηλεκτρικό όχημα δεν θα συμμετάσχει στη διαδικασία ρύθμισης για τις επόμενες επαναλήψεις ( $> \nu$ ) του αλγορίθμου για το χρονικό διάστημα  $k$ . Το συγκεκριμένο ηλεκτρικό όχημα  $i$  κατατάσσεται στην κατηγορία των ανενεργών οχημάτων  $N_I$  για τις επόμενες επαναλήψεις. Μόνο τα ηλεκτρικά οχήματα που έχουν δυνατότητα περαιτέρω συνεισφοράς στο σήμα ρύθμισης  $\Delta PD_{i,k}^\nu$  παραμένουν ενεργά για τις επόμενες επαναλήψεις. Τα οχήματα κατατάσσονται στο υποσύνολο των ενεργών οχημάτων  $N_A$  που είναι συμπληρωματικό του υποσυνόλου  $N_I$  αφού  $N = \{N_A \cup N_I\}$ . Για τον υπολογισμό του σήματος ρύθμισης  $\Delta RS_k^\nu$  και τα δύο υποσύνολα ( $N_A, N_I$ ) λαμβάνονται υπόψη. Ο διαχωρισμός των ηλεκτρικών οχημάτων σε ενεργά και μη-ενεργά οχήματα για τον προσδιορισμό του  $PD_{i,k}^\nu$  ελαχιστοποιεί τον αριθμό των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται μεταξύ του  $EVSEA$  και των ηλεκτρικών οχημάτων. Επίσης, ο διαχωρισμός αυτός εξασφαλίζει τη σύγκλιση του αλγορίθμου εντός ενός περιορισμένου αριθμού επαναλήψεων, όπως αποδεικνύεται στη συνέχεια.

5)  $\nu = \nu + 1$ , επιστροφή στο βήμα 3.

6) Όταν επιτευχθεί η σύγκλιση του αλγορίθμου:

$$|\Delta RS_k^v - \Delta RS_k^{v-1}| \leq \varepsilon \quad E 5-116$$

η λειτουργική κατάσταση κάθε ηλεκτρικού οχήματος περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$POP_{i,k}^r = X_{i,k} + PD_{i,k}^v \quad E 5-117$$

$$SOC_{i,k+1} = SOC_{i,k} + \frac{POP_{i,k}^r \cdot \frac{d}{60}}{C_{bat,i}} \quad E 5-118$$

### Απόδειξη σύγκλισης του αποκεντρωμένου αλγορίθμου

Η απόκλιση μεταξύ του ζητούμενου σήματος ρύθμισης ( $RS_{MW}$ ) και της πραγματικής συνεισφοράς των ηλεκτρικών οχημάτων ( $\sum_{i \in N} PD_{i,k}$ ) προσδιορίζεται από τη σχέση E5-119. Για την πρώτη επανάληψη του αλγορίθμου και για  $RS_{MW,k} \neq 0$  ισχύει ότι:

$$\Delta RS_k^{v=1} = RS_{MW,k} - \sum_{i=1}^N PD_{i,k}^{v=1} \xrightarrow{E 5-109} \quad E 5-119$$

$$\Delta RS_k^{v=1} = RS_{MW,k} - \sum_{i=1}^N K_{i,k} \cdot RS_{MW,k} \Rightarrow \quad E 5-120$$

$$\Delta RS_k^{v=1} = (1 - \sum_{i=1}^N K_{i,k}) \cdot RS_{MW,k} \xrightarrow{E 5-110} \quad E 5-121$$

Αν  $RS_k > 0$ , τότε

$$\Delta RS_k^{v=1} = \left( 1 - \sum_{i=1}^N \frac{TSN_{i,k}}{CPA_{i,k}} \cdot \frac{MnAP_{i,k}^r}{MnAP_{aggr,k}^r} \right) \cdot RS_{MW,k} \quad E 5-122$$

Δεδομένου ότι  $\sum_{i=1}^N \frac{TSN_{i,k}}{CPA_{i,k}} \cdot MnAP_{i,k}^r \leq \sum_{i=1}^N MnAP_{i,k}^r = MxAP_{aggr,k}^r$ , η απόκλιση  $\Delta RS_k^{v=1}$  είναι μικρότερη από ζητούμενο σήμα ρύθμισης  $RS_{MW,k}$  και εξαρτάται από τον όρο  $\frac{TSN_{i,k}}{CPA_{i,k}}$ . Για κάθε επιπρόσθετη επανάληψη ( $v > 1$ )

$$\Delta RS_k^{v+1} = RS_{MW,k} - \sum_{i=1}^N PD_{i,k}^{v+1} \xrightarrow{E 5-114} \quad E 5-123$$

$$\Delta RS_k^{v+1} = RS_{MW,k} - \sum_{i=1}^N (PD_{i,k}^v + \Delta PD_{i,k}^{v+1}) \quad E 5-124$$

$$\Delta RS_k^{v+1} = RS_{MW,k} - \sum_{i=1}^N (PD_{i,k}^v + W_{PD,i}^v \cdot \Delta RS_k^v) \quad E 5-125$$

όπου  $W_{PD,i}^v = \frac{\Delta PD_{i,k}^v}{\sum_{i \in N_A} \Delta PD_{i,k}^v}$

$$\begin{aligned} \Delta RS_k^{v+1} &= RS_{MW,k} - \sum_{i \in N} PD_i^v(k) - \sum_{i \in N} W_{PD,i}^v \cdot \Delta RS_k^v \\ &= \Delta RS_k^v - \sum_{i \in N} W_{PD,i}^v \cdot \Delta RS_k^v \\ &= (1 - \sum_{i \in N} W_{PD,i}^v) \cdot \Delta RS_k^v \end{aligned} \quad E 5-126$$

Στην περίπτωση που η ποσότητα ισχύος  $\Delta PD_{i,k}^v = W_{PD,i}^v \cdot \Delta RS_k^v$  δεν παραβιάζει τους λειτουργικούς περιορισμούς της μπαταρίας, τότε ο όρος  $W_{PD,i}^v$  καθορίζεται ως εξής:

$$\sum_{i \in N} \left( \frac{PD_{i,k}^v}{\sum_{i \in N} PD_{i,k}^v} \right) = \frac{\sum_{i \in N} PD_{i,k}^v}{\sum_{i \in N} PD_{i,k}^v} = 1 \quad E 5-127$$

και άρα  $\Delta RS_k^{v+1} = 0$

Στην αντίθετη περίπτωση όπου  $MxAP_{i,k}^r < \left( \frac{PD_{i,k}^v}{\sum_{i=1}^N PD_{i,k}^v} \right)$ , προκύπτει ότι:

$$\Delta PD_{i,k}^v < W_{PD,i}^v \cdot \Delta RS_k^v \Rightarrow \Delta RS_k^{v+1} < \Delta RS_k^v \quad E 5-128$$

Ως εκ τούτου, όσο αυξάνεται ο αριθμός των επαναλήψεων η απόκλιση μεταξύ του ζητούμενου σήματος ρύθμισης ( $RS_{MW,k}$ ) και της πραγματικής συνεισφοράς των ηλεκτρικών οχημάτων

$(\sum_{i \in N} PD_{i,k})$  μειώνεται, ακόμα και στην περίπτωση όπου η συνεισφορά τους στη δευτερεύουσα ρύθμιση περιορίζεται λόγω των λειτουργικών περιορισμών της μπαταρίας τους.

Όμοια ανάλυση σύγκλισης ισχύει και για την περίπτωση που  $RS_k < 0$ .

#### 5.3.2.4 Αριθμητικό παράδειγμα

##### I. Στόλος ηλεκτρικών οχημάτων

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, εξετάζεται ένας στόλος 10000 οχημάτων τύπου L7e και M1. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του στόλου αυτού περιγράφονται στον Πίνακα 5-4. Όσον αφορά στο προφίλ μετακίνησης, ισχύουν οι κάτωθι παραδοχές:

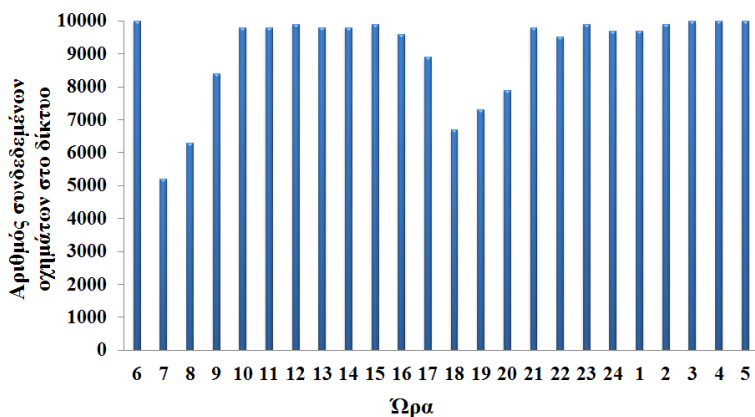
- 06:00-09:00: Σε όλα τα ηλεκτρικά οχήματα, η μπαταρία τους είναι πλήρως φορτισμένη μέχρι 6:00. Κατά το χρονικό αυτό διάστημα, κάθε ηλεκτρικό όχημα πραγματοποιεί ένα δρομολόγιο.
- 10:00-15:00: Στο διάστημα αυτό, τα ηλεκτρικά οχήματα είναι σταθμευμένα και συνδεδεμένα στο δίκτυο. Ωστόσο, ένας τυχαίος αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να πραγματοποιήσει ένα επιπρόσθετο δρομολόγιο.
- 16:00-19:00: Οι χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων επιστρέφουν στην οικία τους και συνδέουν το όχημα του στο ηλεκτρικό δίκτυο.
- 20:00-03:00: Στο διάστημα αυτό, ένας τυχαίος, μικρός αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να πραγματοποιήσει απρόσμενα ένα επιπρόσθετο δρομολόγιο. Ωστόσο, μέχρι της 3:00, όλα τα οχήματα έχουν επιστρέψει και συνδεθεί ξανά στο δίκτυο.
- 03:00-05:00: Όλα τα οχήματα είναι συνδεδεμένα. Καμία απρόσμενη αναχώρηση δεν υφίσταται στο διάστημα αυτό.

**Πίνακας 5-4: Χαρακτηριστικά στόλου ηλεκτρικών οχημάτων**

	Αριθμός Οχημάτων	Χωρητικότητα Μπαταρίας (kWh)	Κατανάλωση (kWh/km)
<b>Ομάδα Α</b>	500	53	0,127
<b>Ομάδα Β</b>	2000	26	0,157
<b>Ομάδα C</b>	2000	30	0,14
<b>Ομάδα D</b>	2500	16	0,125
<b>Ομάδα E</b>	3000	24	0,21

Βάσει των παραπάνω παραδοχών, παράγεται ένα τυχαίο προφίλ λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων που αποτελεί τη βάση των προσομοιώσεων στη συνέχεια. Ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο κάθε ώρα παρουσιάζεται στην Εικόνα 5-32. Όσον αφορά στην ημερήσια διανυόμενη απόσταση, προκύπτει από μια κανονική κατανομή με μέση τιμή 40km και τυπική απόκλιση 5km. Για την ώρα άφιξης και αναχώρησης κάθε ηλεκτρικού οχήματος, θεωρήθηκαν κανονικές κατανομές με μέσες τιμές 07:30 και 17:30, αντίστοιχα, με τυπική απόκλιση μισής ώρας. Το προφίλ λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων είναι τυχαίο για τον σκοπό της προσομοίωσης. Ωστόσο, η αποδοτικότητα των προτεινόμενων αλγορίθμων δεν επηρεάζεται αν υιοθετηθούν διαφορετικά προφίλ μετακίνησης, τύπων ηλεκτρικών οχημάτων κτλ.

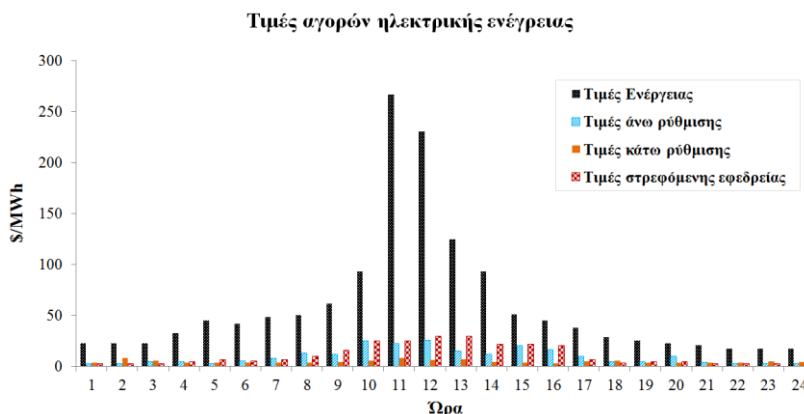
Για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων, θεωρούνται μονοφασικές υποδομές φόρτισης τύπου Mode 2 (30A, 7.2kW) σύμφωνα με το πρότυπο 62196-1.



Εικόνα 5-32 Αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

II. Δεδομένα ηλεκτρικών αγορών

Τα απαιτούμενα δεδομένα για την προσομοίωση των αγορών ενέργειας (χονδρεμπορικής και εφεδρειών) προέρχονται από ιστορικά δεδομένα της αγοράς ενέργειας ERCOT. Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται στην Εικόνα 5-33 καθώς και στον Πίνακα 5-5.



Εικόνα 5-33 Τιμές αγορών ηλεκτρικής ενέργειας

Πίνακας 5-5: Αναμενόμενα ποσοστά επικουρικών υπηρεσιών

Ωρα	Ωρα της επόμενης μέρας	Αναμενόμενο Ποσοστό Άνω Ρύθμισης ( ExU)	Αναμενόμενο Ποσοστό Κάτω Ρύθμισης ( ExD)	Αναμενόμενο Ποσοστό Στρεφόμενης Εφεδρείας (ExR)
1	06.00	0,44	1	0,08
2	07.00	0,23	0,99	0,08
3	08.00	0,13	0,97	0,08
4	09.00	0,34	0,82	0,001
5	10.00	0,71	0,98	0,1
6	11.00	0,56	0,85	0,001
7	12.00	0,61	0,53	0,001
8	13.00	0,57	0,61	0,001
9	14.00	0,32	0,54	0,001
10	15.00	0,12	0,78	0,001
11	16.00	0,99	0,32	0,001
12	17.00	0,96	0,46	0,001
13	18.00	0,89	0,84	0,001
14	19.00	0,92	0,96	0,001
15	20.00	0,01	0,6	0,001
16	21.00	0,45	0,62	0,001
17	22.00	0,67	0,64	0,001

18	23.00	0,87	0,59	0,001
19	24.00	0,79	0,85	0,001
20	01.00	0,96	0,45	0,001
21	02.00	0,98	0,32	0,001
22	03.00	0,95	0,34	0
23	04.00	0,93	0,24	0
24	05.00	0,23	0,81	0

### III. Προβλέψεις καθαρού φορτίου

Η πρόβλεψη για το αναμενόμενο καθαρό φορτίο της ημέρας προγραμματισμού παρουσιάζεται στην Εικόνα 5-34.

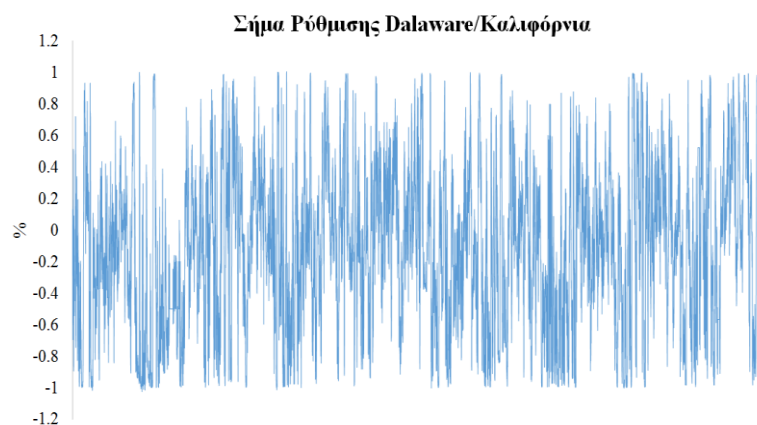


Εικόνα 5-34 Προβλεπόμενο φορτίο δικτύου

### IV. Σήμα ρύθμισης RS

Για τη συμμετοχή του στόλου των οχημάτων στη δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας, χρησιμοποιήθηκε ένα πραγματικό σήμα ρύθμισης που επικοινωνήσε ο διαχειριστής του δικτύου στην Καλιφόρνια (CaISO) κατά το πρώτο πείραμα της V2G λειτουργίας σε πραγματικό περιβάλλον από το πανεπιστήμιο του Dalaware<sup>4</sup> (Εικόνα 5-35). Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του σήματος αυτού αναφέρονται στη συνέχεια:

- **Διάρκεια Σήματος:** 12 μέρες ή  $12 \cdot 24 = 288$  ώρες ή  $12 \cdot 24 \cdot 3600 = 1036800$  sec
- **Χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών τιμών:** 30 sec
- **Μέσος Όρος Σήματος:**  $0,1247 > 0 \rightarrow$  ζητείται περισσότερο κάτω ρύθμιση

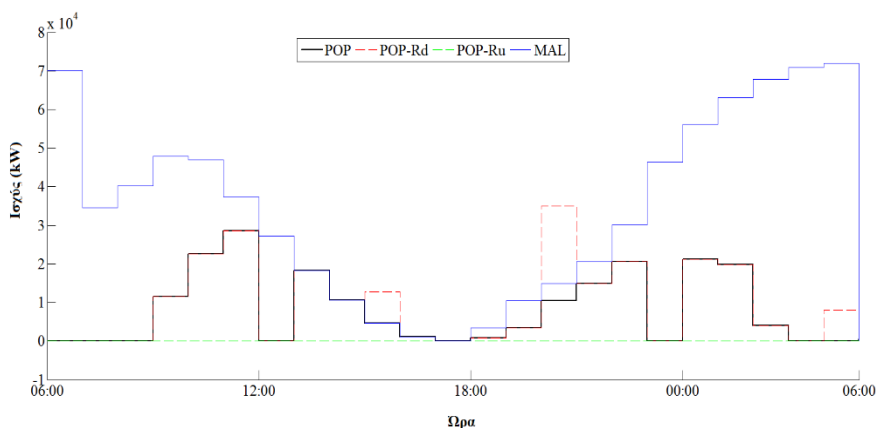


Εικόνα 5-35 Πραγματικό σήμα ρύθμισης συχνότητας για λειτουργία V2G από τον διαχειριστή συστήματος της Καλιφόρνιας (CaISO)

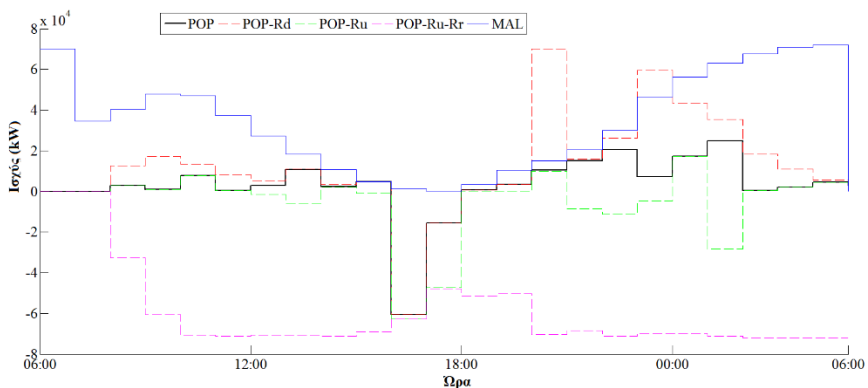
<sup>4</sup> <http://www.udel.edu/V2G/Tools.html>, 9/1/2013

### V. Αποτελέσματα Ημερήσιου Ενεργειακού προγραμματισμού

Θεωρώντας τα παραπάνω δεδομένα εισόδου, τα αποτελέσματα των αλγορίθμων του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού για την περίπτωση μόνο της φόρτισης καθώς και για την αμφίδρομη ροή ισχύος μεταξύ ηλεκτρικών οχημάτων και δικτύου απεικονίζονται στην Εικόνα 5-36 και Εικόνα 5-37, αντίστοιχα. Τα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζουν το αθροιστικό βέλτιστο σημείο λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων (POP) καθώς και τη βέλτιστη προσφορά επικουρικών υπηρεσιών. Η μαύρη γραμμή απεικονίζει τη βέλτιστη λειτουργία του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των αγορών ενέργειας καθώς και το φορτίο του δικτύου για την αποφυγή δημιουργίας νέων αιχμών ζήτησης. Οι διακεκομμένες γραμμές απεικονίζουν το προφίλ της χωρητικότητας μπαταρίας για την παροχή επικουρικών υπηρεσιών. Η διαφορά μεταξύ του βέλτιστου προφίλ λειτουργίας και του εκάστοτε προφίλ επικουρικών υπηρεσιών καθορίζει την προσφορά της εκάστοτε επικουρικής υπηρεσίας.



Εικόνα 5-36 Αποτελέσματα αλγορίθμου για τον ημερήσιο ενεργειακό προγραμματισμό θεωρώντας μόνο τη λειτουργία της φόρτισης



Εικόνα 5-37 Αποτελέσματα αλγορίθμου για τον ημερήσιο ενεργειακό προγραμματισμό θεωρώντας αμφίδρομη ροή ισχύος από και προς το ηλεκτρικό δίκτυο

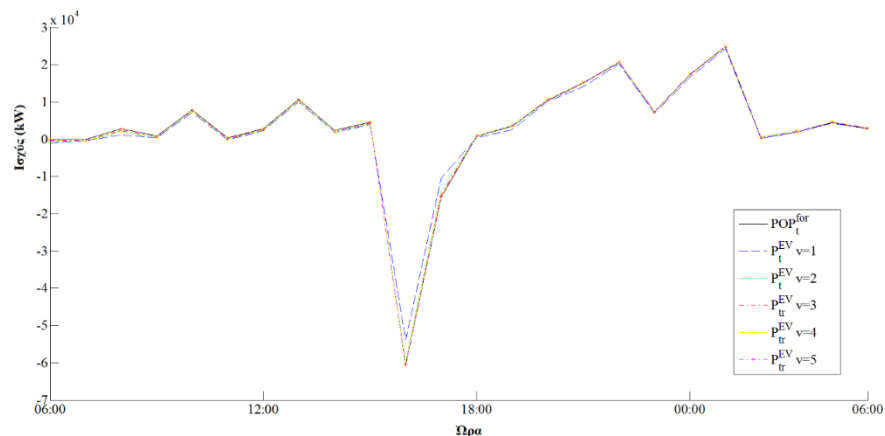
Η λειτουργία των ηλεκτρικών οχημάτων και οι προσφορές για τις επικουρικές υπηρεσίες είναι πιο σύνθετες στην περίπτωση της αμφίδρομης ροής ισχύος. Οι εξαγόμενες βέλτιστες καμπύλες από τον ημερήσιο ενεργειακό προγραμματισμό αποτελούν τα δεδομένα εισόδου για τους επόμενους αλγορίθμους (ωριαία διαχείριση του στόλου κατά την ημέρα εφαρμογής και βραχυπρόθεσμη βέλτιστη κατανομή για τη δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Το αντίστοιχο κέρδος του EVSEA, που διαχειρίζεται τον στόλο των ηλεκτρικών οχημάτων, είναι 520\$ για την περίπτωση που εξετάζεται μόνο η λειτουργία της φόρτισης και 39469\$ για την περίπτωση της αμφίδρομης ροής ισχύος. Είναι εμφανές ότι τα κέρδη από την πλήρη αξιοποίηση της χωρητικότητας της μπαταρίας των ηλεκτρικών οχημάτων για παροχή επικουρικών υπηρεσιών στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολλαπλάσια συγκριτικά με την περίπτωση που εξετάζεται μόνο η λειτουργία φόρτισης.

## VI. Ωριαία διαχείριση των ηλεκτρικών οχημάτων κατά την ημέρα εφαρμογής

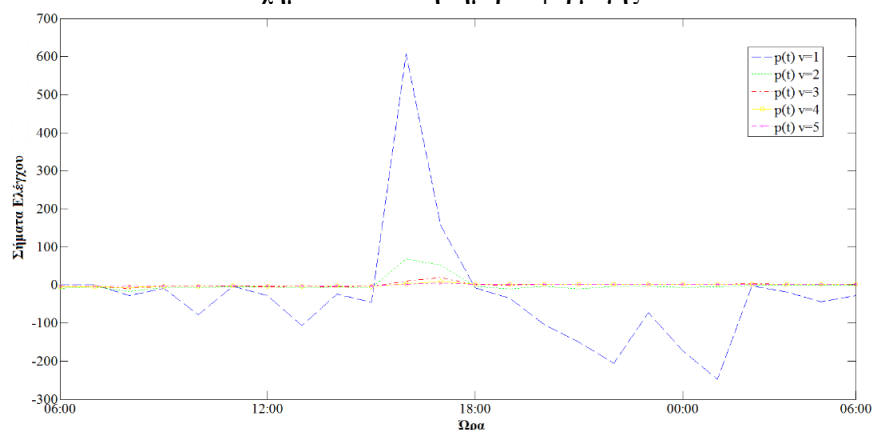
Σκοπός του αλγορίθμου αυτού είναι η κατανομή του βέλτιστου προφίλ λειτουργίας του στόλου όπως προκύπτει από τον ενεργειακό προγραμματισμό στα ηλεκτρικά οχήματα με αποκεντρωμένο τρόπο βάσει των ενεργειακών αναγκών φόρτισης τους καθώς και το προφίλ μετακίνησης τους. Επειδή η λειτουργία του αλγορίθμου αυτού είναι ίδια ανεξάρτητα από τη θεώρηση αμφίδρομης ροής ισχύος ή μη, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια αφορούν την αμφίδρομη ροή ισχύος μόνο καθώς το βέλτιστο προφίλ λειτουργίας είναι πιο σύνθετο συγκριτικά με το αντίστοιχο της περίπτωσης της φόρτισης.

Η Εικόνα 5-38 απεικονίζει τα πραγματικά αθροιστικά προφίλ λειτουργίας του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων βάσει των εικονικών τιμών ελέγχου (Εικόνα 5-39) που ανακοινώνονται από τον EVSEA σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου. Τα σήματα ελέγχου μεταβάλλονται σε κάθε επανάληψη σύμφωνα με την απόκλιση μεταξύ του εκάστοτε πραγματικού προφίλ λειτουργίας και του επιθυμητού. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν την αποδοτικότητα του αποκεντρωμένου αλγορίθμου που αναπτύχθηκε να προσεγγίσει ένα επιθυμητό προφίλ λειτουργίας εντός ολίγων επαναλήψεων.

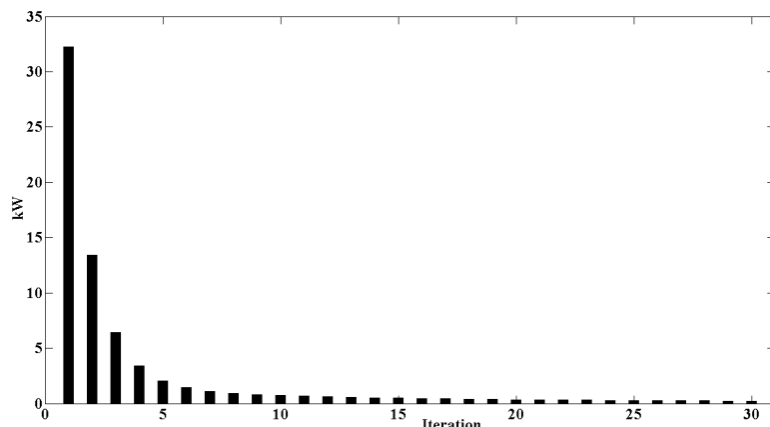
Η Εικόνα 5-40 παρουσιάζει το σφάλμα σύγκλισης του αλγορίθμου (root mean-square error, RMSE) μετά από κάθε επανάληψη του αποκεντρωμένου αλγορίθμου. Παρά το γεγονός ότι το σφάλμα είναι υψηλό στις αρχικές επαναλήψεις, στη συνέχεια μειώνεται ραγδαία (σχεδόν εκθετικά) μετά από λίγες επαναλήψεις. Καθώς ο αριθμός των επαναλήψεων αυξάνεται, ο ρυθμός μείωσης του σφάλματος σύγκλισης μειώνεται σημαντικά. Ο αριθμός των απαιτούμενων επαναλήψεων εξαρτάται από την απαιτούμενη ακρίβεια όπως καθορίζεται στο κριτήριο σύγκλισης. Ο καθορισμός του κριτηρίου σύγκλισης θα πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται ισορροπία μεταξύ χρόνου σύγκλισης και ακρίβειας της λύσης.



Εικόνα 5-38 Αποτελέσματα αποκεντρωμένου αλγορίθμου για την ωριαία διαχείριση των ηλεκτρικών οχημάτων κατά την ημέρα εφαρμογής

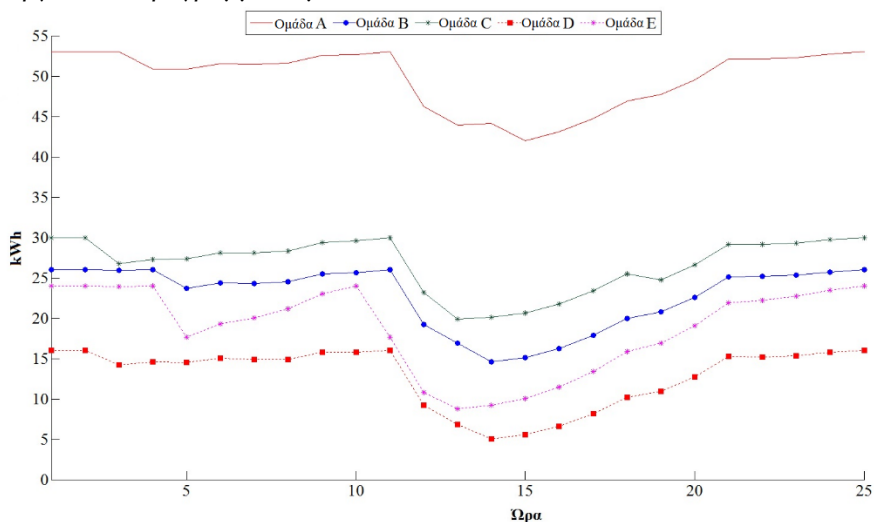


Εικόνα 5-39 Εικονικά σήματα ελέγχου του αποκεντρωμένου αλγορίθμου για την ωριαία διαχείριση των ηλεκτρικών οχημάτων κατά την ημέρα εφαρμογής



Εικόνα 5-40 Σφάλμα σύγκλισης μετά από κάθε επανάληψη του προτεινόμενου αποκεντρωμένου αλγορίθμου

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα προφίλ λειτουργίας ενός ενδεικτικού ηλεκτρικού οχήματος από κάθε ομάδα με διαφορετικά λειτουργικά και τεχνικά χαρακτηριστικά. Στην Εικόνα 5-41 απεικονίζεται η μεταβολή στο επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας του εκάστοτε ηλεκτρικού οχήματος λαμβάνοντας υπόψη το προφίλ μετακίνησης τους καθώς και το βέλτιστο προφίλ φόρτισης/εκφόρτισης, όπως προκύπτει από τον αλγόριθμο της ωριαίας διαχείρισης του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων. Αρχικά, παρατηρούμε ότι όλα τα οχήματα είναι πλήρως φορτισμένα στην αρχή και στο τέλος της εξεταζόμενης περιόδου. Στα υπόλοιπα χρονικά διαστήματα, η λειτουργία της μπαταρίας των ηλεκτρικών οχημάτων παραμένει εντός λειτουργικών ορίων. Αύξηση του επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας υποδηλώνει την πραγματοποίηση φόρτισης. Αντίθετα, μείωση του επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας υποδηλώνει είτε λειτουργία εκφόρτισης είτε κατανάλωση ενέργειας λόγω μετακίνησης του οχήματος. Παρά το γεγονός ότι διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης/εκφόρτισης μπορούν να υιοθετηθούν από κάθε όχημα μεμονωμένα, το αθροιστικό ενεργειακό προφίλ του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων ακολουθεί το βέλτιστο προφίλ του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού.



Εικόνα 5-41 Προφίλ λειτουργίας της μπαταρίας ενός ενδεικτικού οχήματος για κάθε εξεταζόμενη ομάδα

## VII. Κατανομή σήματος επικουρικών υπηρεσιών στα ηλεκτρικά οχήματα

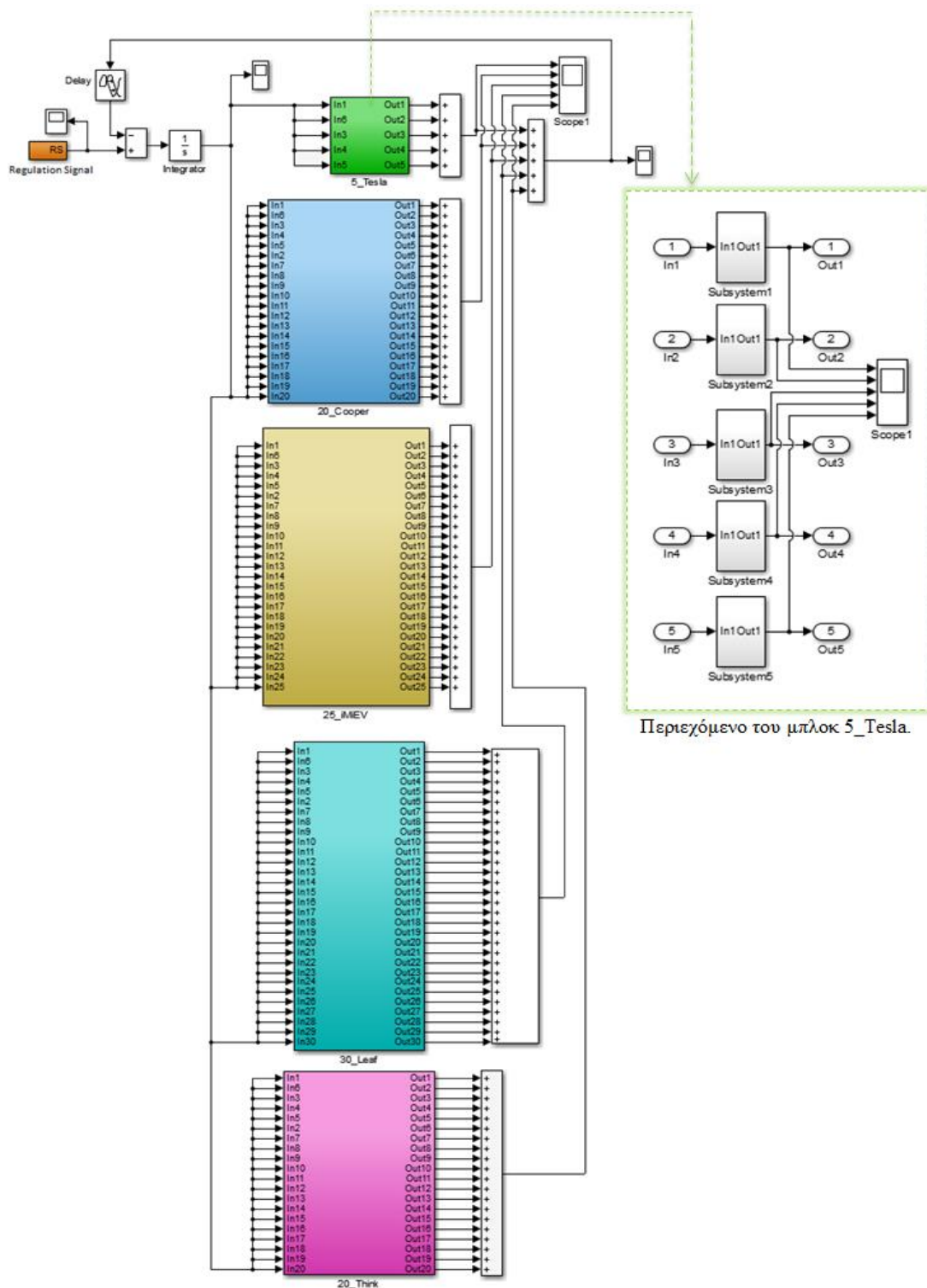
### Αλγόριθμος A: Προσαρμοστικός έλεγχος μέσω καμπυλών στατισμού

Ο προσαρμοστικός έλεγχος μέσω καμπυλών στατισμού πραγματοποιήθηκε σε περιβάλλον Simulink/ Matlab όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 5-42 και στην Εικόνα 5-43.

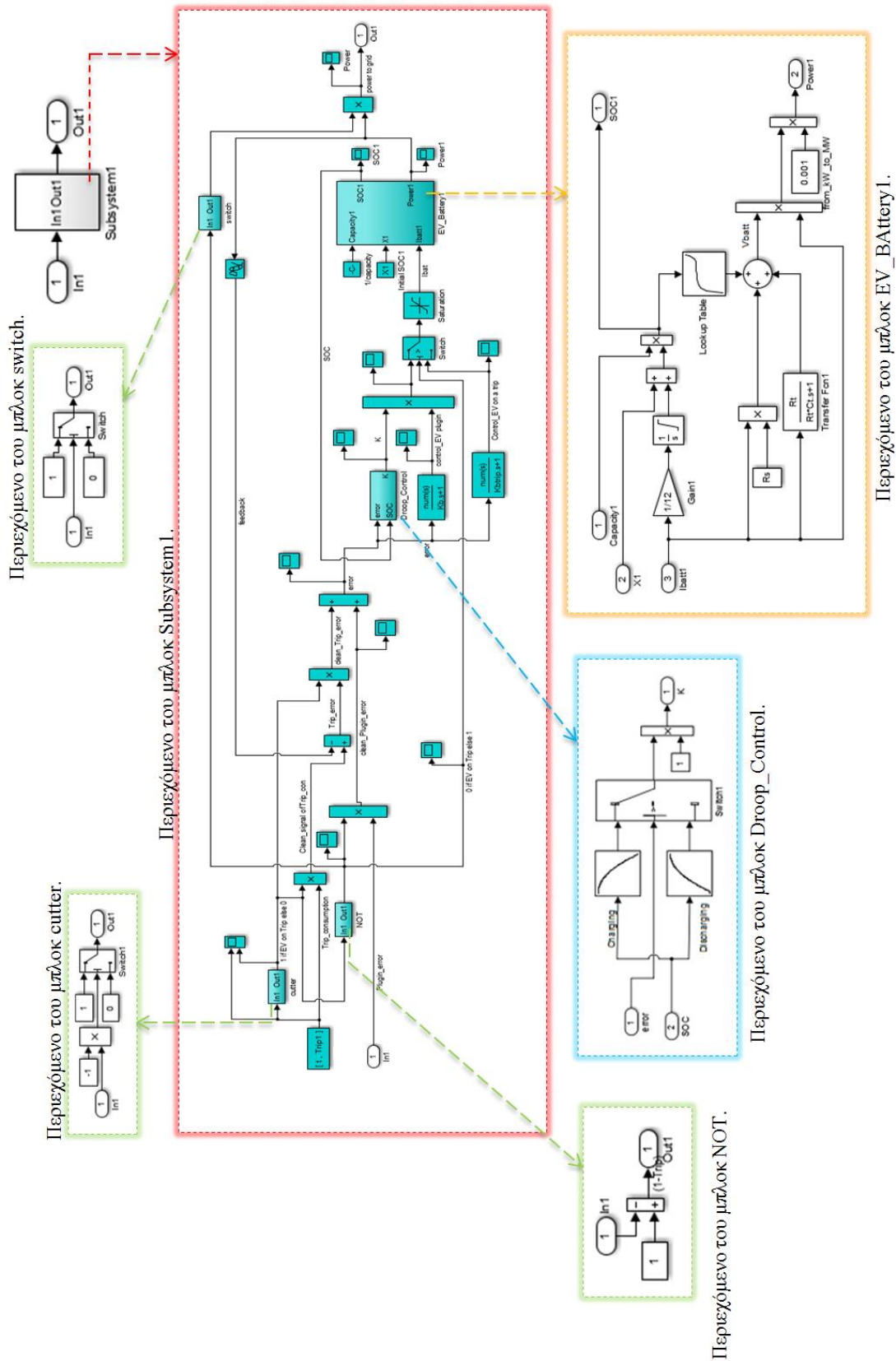
Το πορτοκαλί μπλόκ στην Εικόνα 5-42 προσομοιώνει μια γεννήτρια για την παραγωγή του σήματος ρύθμισης της συχνότητας όπως αυτό που επικοινωνεί ο διαχειριστής του συστήματος ενέργειας στον EVSEA. Κάθε ένα από τα υπόλοιπα έγχρωμα μπλόκ προσομοιώνει τη λειτουργία



των οχημάτων που ανήκουν στην ίδια ομάδα. Το διάγραμμα στην Εικόνα 5-43 προσομοιώνει τον προσαρμοστικό έλεγχο καθώς και τη λειτουργία της μπαταρίας των ηλεκτρικών οχημάτων όπως αυτό παρουσιάστηκε στην ενότητα 5.3.2.3 της παρούσας διατριβής.



Εικόνα 5-42 Μοντελοποίηση του στόλου ηλεκτρικών οχημάτων και των σημάτων ρύθμισης της συχνότητας

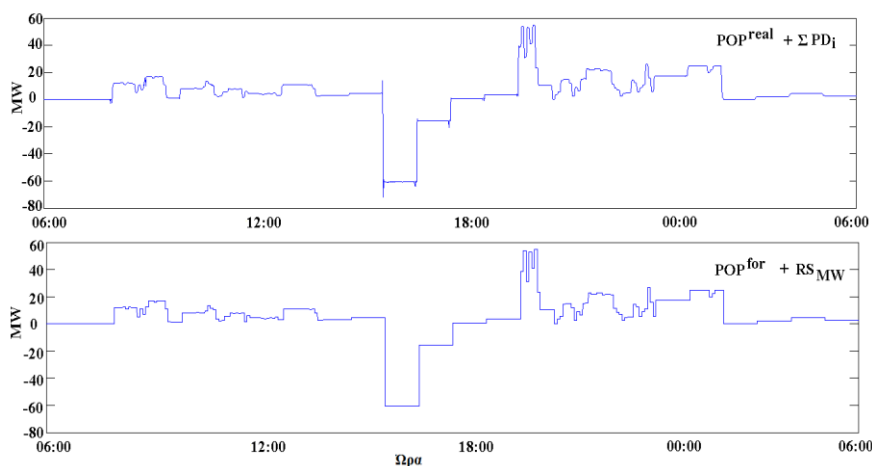


Εικόνα 5-43 Μοντελοποίηση της μπαταρίας των ηλεκτρικών οχημάτων και του προσαρμοστικού ελέγχου μέσω καμπυλών στατισμού

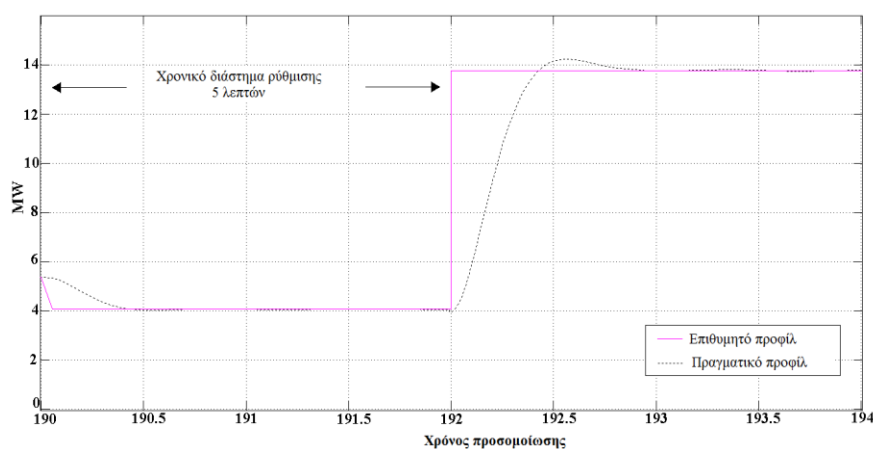
Τα αποτελέσματα από την προσομοίωση του προσαρμοστικού ελέγχου μέσω καμπυλών στατισμού απεικονίζονται στην Εικόνα 5-44. Το κάτω διάγραμμα της εικόνας απεικονίζει το

βέλτιστο προφίλ λειτουργίας του στόλου λαμβάνοντας υπόψη τον ημερήσιο ενεργειακό προγραμματισμό καθώς και το σήμα ρύθμισης συχνότητας. Αντίστοιχα, το άνω διάγραμμα απεικονίζει το πραγματικό προφίλ λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων όπως αυτό προκύπτει από την εφαρμογή του προτεινόμενου ωριαίου αλγορίθμου διαχείρισης και του προσαρμοστικού ελέγχου μέσω καμπυλών στατισμού. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα των εφαρμοζόμενων αλγορίθμων καθώς το σφάλμα απόκλισης είναι μικρό (ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος – RMSE είναι ίση με 0.307kW). Για λόγους προσομοίωσης, το πραγματικό χρονικό διάστημα των 5 λεπτών για την ανανέωση του σήματος ρύθμισης της συχνότητας ισοδυναμεί με 2 δευτερόλεπτα της προσομοίωσης, όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 5-45. Θεωρώντας ότι η καθυστέρηση στη μετάδοση της επικοινωνίας είναι 100msec, ο χρόνος σύγκλισης του προσαρμοστικού ελέγχου μέσω καμπυλών στατισμού εξαρτάται από το επίπεδο αλλαγών του σήματος ρύθμισης συχνότητας και κυμαίνεται μεταξύ 0.4-0.8 δευτερολέπτων σε κλίμακα χρόνου προσομοίωσης ή αντίστοιχα 1-2 λεπτών σε πραγματικό χρόνο.

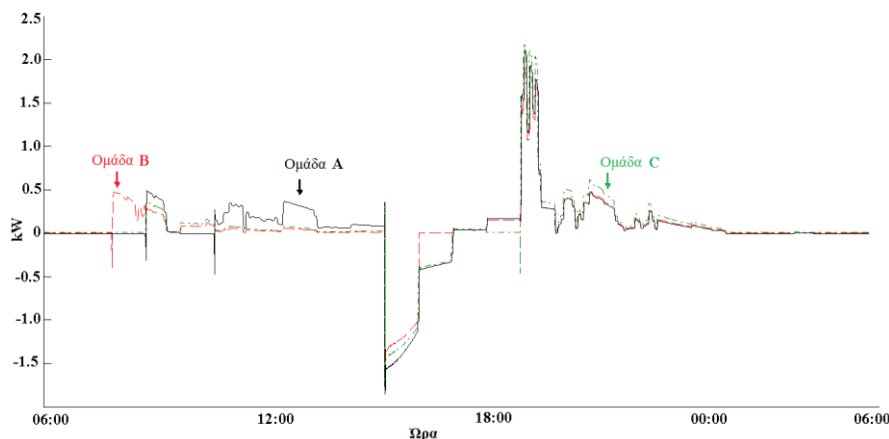
Χαρακτηριστικά παραδείγματα της ανταλλαγής ισχύος μεταξύ ηλεκτρικών οχημάτων από διαφορετικές ομάδες και του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και το προφίλ λειτουργίας των μπαταριών τους απεικονίζονται στην Εικόνα 5-46 και στην Εικόνα 5-47, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αποδεικνύουν ότι ο προσαρμοστικός έλεγχος μέσω καμπυλών στατισμού μπορεί να εφαρμοστεί αποτελεσματικά για την επικουρική δευτερογενή ρύθμιση της συχνότητας δικτύου εξυπηρετώντας παράλληλα τις τοπικές (δηλαδή μετακίνηση οχημάτων, ενεργειακές ανάγκες, βέλτιστο σημείο λειτουργίας κτλ) και κεντρικές απαιτήσεις (δηλαδή το σήμα ρύθμισης της συχνότητας – RS).



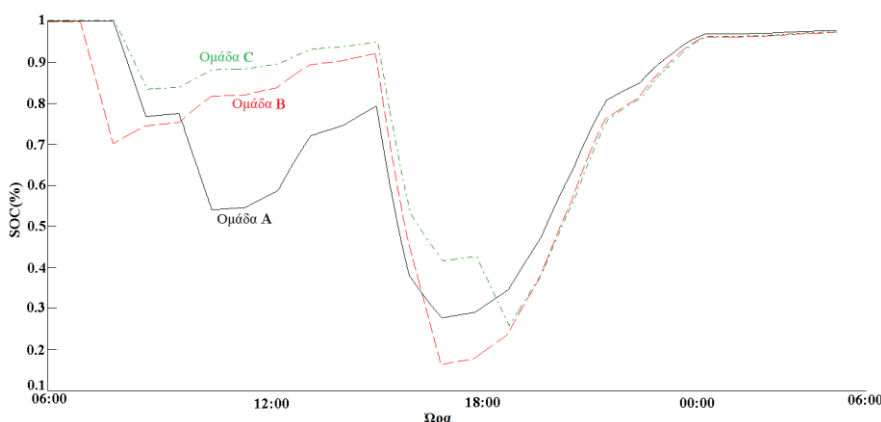
Εικόνα 5-44 Αποτελέσματα προσομοίωσης του προσαρμοστικού ελέγχου μέσω καμπυλών στατισμού



Εικόνα 5-45 Χρόνος σύγκλισης του προσαρμοστικού ελέγχου μέσω καμπυλών στατισμού



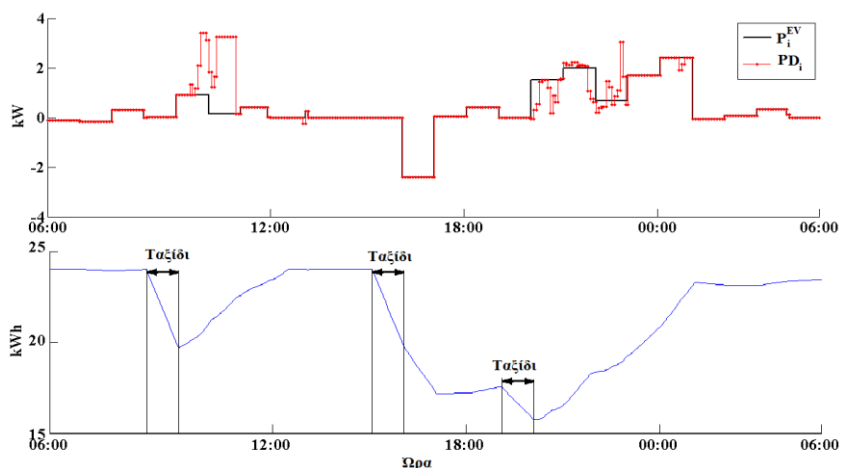
Εικόνα 5-46 Προφίλ λειτουργίας ενδεικτικών ηλεκτρικών οχημάτων με εφαρμογή του προσαρμοστικού ελέγχου μέσω καμπυλών στατισμού



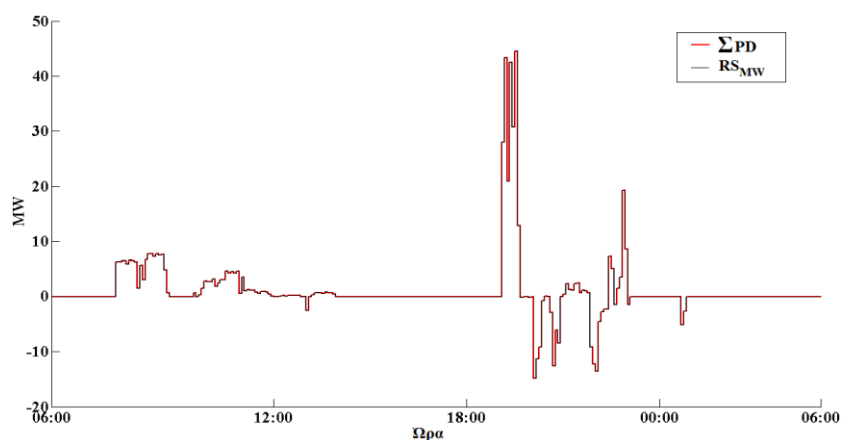
Εικόνα 5-47 Προφίλ λειτουργίας ενδεικτικών ηλεκτρικών οχημάτων με εφαρμογή του προσαρμοστικού ελέγχου μέσω καμπυλών στατισμού

Αλγόριθμος Β: Αποκεντρωμένη κατανομή σήματος δευτερεύουσας ρύθμισης συχνότητας

Τα αποτελέσματα από τον προτεινόμενο αποκεντρωμένο αλγόριθμο κατανομής σήματος δευτερεύουσας ρύθμισης συχνότητας παρουσιάζονται στην Εικόνα 5-48 και Εικόνα 5-49. Πιο συγκεκριμένα, στο πρώτο διάγραμμα στην Εικόνα 5-48 απεικονίζεται το προφίλ λειτουργίας ενός ενδεικτικού ηλεκτρικού οχήματος μετά την εφαρμογή του προτεινόμενου αλγορίθμου για τη ρύθμιση συχνότητας ( $PD_i$ ), συγκριτικά με το αντίστοιχο του ωριαίου αλγορίθμου διαχείρισης ( $P_i^{EV}$ ). Οι συγκριτικές διαφορές μεταξύ των δύο αυτών καμπυλών υποδηλώνουν την συμμετοχή του συγκεκριμένου ηλεκτρικού οχήματος στη δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Το δεύτερο διάγραμμα στην Εικόνα 5-48 απεικονίζει τη λειτουργία της μπαταρίας του συγκεκριμένου οχήματος. Τα λειτουργικά όρια της μπαταρίας δεν παραβιάζονται σε όλη την εξεταζόμενη περίοδο παρά την κατανάλωση λόγω μετακινήσεων, V2G λειτουργίας και την παροχή επικουρικών υπηρεσιών για τη ρύθμιση συχνότητας στο δίκτυο. Η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη τόσο στην αρχή όσο και στο τέλος της εξεταζόμενης περιόδου. Εν συνεχεία, η Εικόνα 5-49 απεικονίζει την αθροιστική βέλτιστη απόκριση των ηλεκτρικών οχημάτων ( $\sum PD$ ) μετά την εφαρμογή του προτεινόμενου αποκεντρωμένου αλγορίθμου κατανομής σήματος δευτερεύουσας ρύθμισης συχνότητας. Η απόκλιση του προφίλ αυτού από το επιθυμητό για τη ρύθμιση της συχνότητας ( $RS_{MW}$ ) είναι πολύ μικρή (ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος – RMSE είναι ίση με 0.342kW).

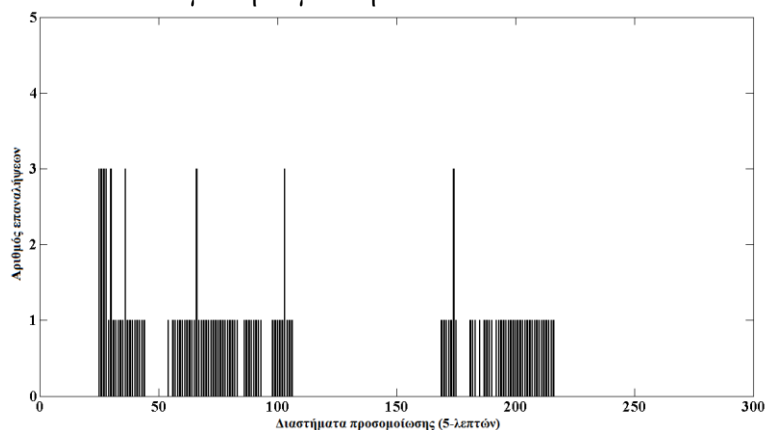


Εικόνα 5-48 Αποτελέσματα προσομοίωσης του προτεινόμενου αποκεντρωμένου αλγορίθμου κατανομής σήματος δευτερεύουσας ρύθμισης συχνότητας για ένα ενδεικτικό όχημα



Εικόνα 5-49 Απόκριση στόλου ηλεκτρικών οχημάτων στο σήμα ρύθμισης ( $RS_{MW}$ ) μετά την εφαρμογή προτεινόμενου αποκεντρωμένου αλγορίθμου κατανομής σήματος δευτερεύουσας ρύθμισης συχνότητας

Στην Εικόνα 5-50 απεικονίζεται ο αριθμός των επαναλήψεων που απαιτούνται για τη σύγκλιση του προτεινόμενου αποκεντρωμένου αλγορίθμου κατανομής σήματος δευτερεύουσας ρύθμισης συχνότητας. Αποδεικνύεται ότι ο αλγόριθμος συγκλίνει πολύ γρήγορα, όταν το προβλεπόμενο προφίλ μετακίνησης των ηλεκτρικών οχημάτων του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού είναι κοντά στο πραγματικό, ενώ ο αριθμός των επαναλήψεων μεγαλώνει ελαφρώς καθώς το σφάλμα εκτίμησης αυξάνεται. Επιπρόσθετα, η ταχύτητα σύγκλισης εξαρτάται από την τεχνολογία επικοινωνίας που υιοθετείται (καθυστερήσεις στη μετάδοση των δεδομένων) και τον αριθμό των επαναλήψεων που απαιτούνται για τη σύγκλιση.



Εικόνα 5-50 Σύγκλιση του προτεινόμενου αποκεντρωμένου αλγορίθμου κατανομής σήματος δευτερεύουσας ρύθμισης συχνότητας

**5.3.2.5 Επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης μεικτού ακέραιου προγραμματισμού για την ωριαία διαχείριση των ηλεκτρικών οχημάτων**

Στο Κεφάλαιο 4 της παρούσας διατριβής, παρουσιάστηκε και αναλύθηκε η μέθοδος της Generalized Bender Decomposition (GBD) για την επίλυση του μεικτού ακέραιου προβλήματος για την συνέργεια της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων με την παραγωγή ΑΠΕ. Η ίδια μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την επίλυση του προβλήματος της ωριαίας διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων που ανήκει στην κατηγορία των μεικτών ακέραιων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Στην ενότητα αυτή, θα αναλυθεί η εφαρμογή της μεθόδου Outer Approximation για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος. Η αποτελεσματικότητα της θα αξιολογηθεί συγκριτικά με τα αντίστοιχα αποτελέσματα από την εφαρμογή της GBD.

Η μέθοδος της Outer Approximation (OA) επιλύει προβλήματα βελτιστοποίησης της μορφής:

$$\begin{aligned} \text{(Primal Problem – P)} \quad & \min_{x,y} f(x, y) = c^T y + f(x) && \text{E 5-129} \\ & \text{s. t} \quad g(x) + By \leq 0 \\ & x \in X \subseteq \mathbb{R} \text{ και } y \in Y = \{0,1\} \end{aligned}$$

υπό τους παρακάτω περιορισμούς:

- I. Το  $X$  είναι ένα μη κενό κυρτό σύνολο και οι συναρτήσεις  $f$  και  $g$  είναι κυρτές για κάθε σταθερή τιμή του  $y \in Y = \{0,1\}$ , ενώ οι συναρτήσεις  $h$  είναι γραμμικές για κάθε σταθερή τιμή του  $y \in Y = \{0,1\}$ .
- II. Οι συναρτήσεις  $f$  και  $g$  είναι συνεχώς παραγωγίσιμες.
- III. Οι μεταβλητές  $x$  και  $y$  είναι διαχωρίσιμες

Η βασική ιδέα της μεθόδου αυτής είναι παρόμοια με αυτή που υιοθετείται στην GBD. Δηλαδή, από το αρχικό πρόβλημα (Primal Problem) προκύπτουν δύο νέα, ξεχωριστά προβλήματα: το κύριο πρόβλημα (master problem – MP) και πολλαπλά υπο-προβλήματα (sub-problems - SP). Η σημαντικότερη διαφοροποίηση των δύο μεθόδων έγκειται στη δημιουργία του κύριου προβλήματος (Master Problem).

Η OA είναι μια επαναληπτική μέθοδος επίλυσης, από τη μια μεριά, των υπο-προβλημάτων που προκύπτουν από το αρχικό πρόβλημα (P) με την ανάθεση συγκεκριμένων τιμών στις ακέραιες μεταβλητές και από την άλλη του κύριου προβλήματος (MP). Σε κάθε επανάληψη της μεθόδου παράγεται ένα άνω και ένα κάτω φράγμα που προσδιορίζουν το εύρος των τιμών εντός των οποίων κινείται η βέλτιστη λύση του αρχικού προβλήματος. Το άνω φράγμα προκύπτει από την επίλυση των υπο-προβλημάτων (SP) ενώ το κάτω φράγμα από την επίλυση του προβλήματος (MP). Καθώς ο αριθμός των επαναλήψεων αυξάνει, η ακολουθία του άνω φράγματος είναι συνεχώς φθίνουσα ενώ η αντίστοιχη του κάτω ορίου είναι συνεχώς αύξουσα. Ως εκ τούτου μετά το πέρας ενός αριθμού επαναλήψεων οι ακολουθίες του άνω και κάτω φράγματος συγκλίνουν σε μια τιμή, η οποία μάλιστα είναι και η βέλτιστη λύση του αρχικού προβλήματος (P).

Το υπο-πρόβλημα (Sub-problem- SP) που καθορίζει το άνω φράγμα της βέλτιστης λύσης στη OA προκύπτει από το αρχικό πρόβλημα επίλυσης θεωρώντας συγκεκριμένες τιμές για τις ακέραιες μεταβλητές ( $y^k$ ), όπου  $k$  ο αριθμός της εκάστοτε τρέχουσας επανάληψης. Η μαθηματική περιγραφή του υπο-προβλήματος για την επανάληψη  $k$  είναι η ακόλουθη:

$$\begin{aligned} \text{(Sub-problem – SP)} \quad & \min_x f(x, y^k) = c^T y^k + f(x) && \text{E 5-130} \\ & \mu. \text{ π.} \quad g(x) + By^k \leq 0 : \mu^k \\ & x \in X \subseteq \mathbb{R} \end{aligned}$$

Αν το παραπάνω υπο-πρόβλημα SP είναι επιλύσιμο κατά την επανάληψη  $k$ , τότε από την επίλυση του προκύπτουν οι τιμές για τις συνεχείς μεταβλητές  $x^k$ . Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης  $f(x^k, y^k)$  αποτελεί το άνω φράγμα της βέλτιστης λύσης. Γνωρίζοντας την τιμή του  $x^k$ , είναι εφικτή η γραμμικοποίηση των κυρτών συναρτήσεων  $f(x)$  και  $g(x)$ , όπως περιγράφεται στη συνέχεια:

$$f(x) \geq f(x^k) + \nabla f(x^k)(x - x^k), \quad \forall x^k \in X \quad \text{E 5-131}$$

$$g(x) \geq g(x^k) + \nabla g(x^k)(x - x^k), \quad \forall x^k \in X \quad \text{E 5-132}$$

Αν το υπο-πρόβλημα SP δεν είναι επιλύσιμο, τότε το πρόβλημα τροποποιείται χαλαρώνοντας

του ανισοτικού περιορισμού ως εξής:

$$\begin{aligned}
 & \text{(Feasibility Sub-problem – FSP)} && \min_x \sum_{j=1}^p a_j && \text{E 5-133} \\
 & \mu. \pi. \quad h(x, y^k) = 0 && : \bar{\lambda}^k \\
 & g(x, y^k) \leq a_j, j = 1, 2, \dots, p && : \bar{\mu}^k \\
 & a_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, p
 \end{aligned}$$

όπου  $p$  συμβολίζει τον αριθμό των ανισοτικών περιορισμών. Στην περίπτωση αυτή, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης του υπο-προβλήματος FSP δεν επηρεάζει το άνω όριο. Γνωρίζοντας τη βέλτιστη τιμή  $\bar{x}^k$  που προκύπτει από την επίλυση του παραπάνω προβλήματος, είναι εφικτή η γραμμικοποίηση της κυρτής συνάρτησης  $g(x)$ , όπως περιγράφεται στη συνέχεια:

$$g(x) \geq g(\bar{x}^k) + \nabla g(\bar{x}^k)(x - \bar{x}^k), \forall \bar{x}^k \in X \quad \text{E 5-134}$$

Από το υπο-πρόβλημα SP προκύπτουν οι τιμές για τις συνεχείς μεταβλητές  $x^k$  οι οποίες χρησιμοποιούνται στο κύριο πρόβλημα (Master Problem- MP) για τον προσδιορισμό του κάτω φράγματος της βέλτιστης λύσης καθώς και των νέων τιμών για τις ακέραιες μεταβλητές  $y$ . Οι περιορισμοί του προβλήματος MP καθορίζονται από τη δυνατότητα επίλυσης ή μη του υπο-προβλήματος SP. Το πρόβλημα MP έχει την εξής μορφή:

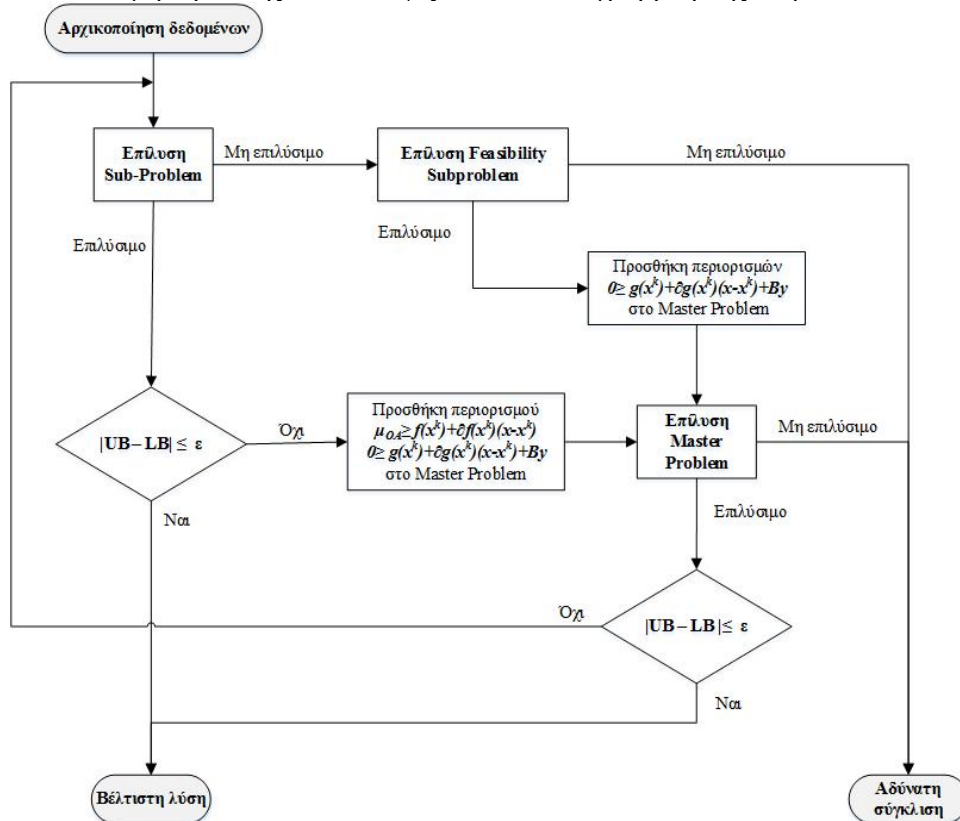
$$\text{(Master Problem – MP)} \quad \min_{x,y,\mu} f(x, y) = c^T y + \mu_{OA} \quad \text{E 5-135}$$

μ.π.

$$\left. \begin{aligned}
 & \mu_{OA} \geq f(x^k) + \nabla f(x^k)(x - x^k), \quad \forall x^k \in X \\
 & 0 \geq g(x^k) + \nabla g(x^k)(x - x^k) + By, \quad \forall x^k \in X
 \end{aligned} \right\} \text{αν το (SP) είναι επιλύσιμο} \quad \text{E 5-136}$$

$$0 \geq g(\bar{x}^k) + \nabla g(\bar{x}^k)(x - \bar{x}^k) + By, \quad \forall \bar{x}^k \in X \text{ αν το (SP) δεν είναι επιλύσιμο} \quad \text{E 5-137}$$

Τα βήματα του αλγορίθμου της OA συνοψίζονται στο διάγραμμα ροής στην:

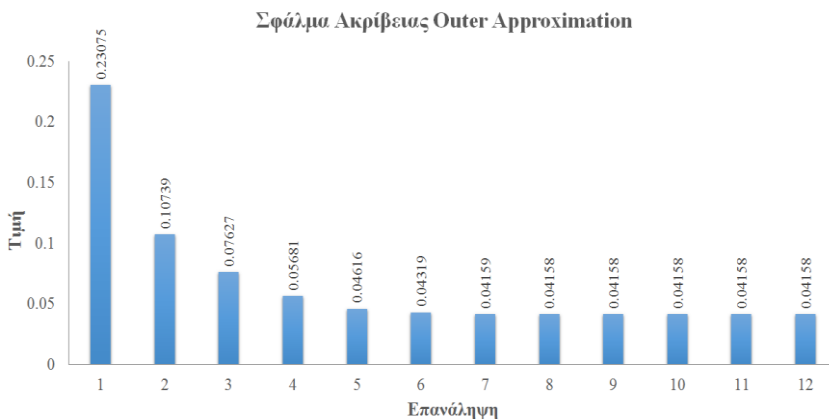


Εικόνα 5-51 Διάγραμμα ροής για την επίλυση μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού με τη μέθοδο OA

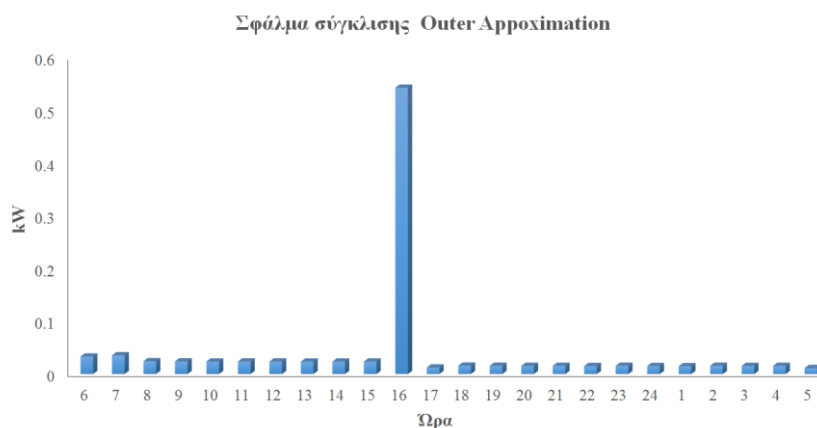
Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή της μεθόδου GBD για το αριθμητικό παράδειγμα που παρουσιάστηκε παραπάνω απεικονίζονται στην Εικόνα 5-52.Καθώς αυξάνεται ο αριθμός των



επαναλήψεων της προτεινόμενης αποκεντρωμένης μεθόδου για την ωριαία διαχείριση του στόλου ηλεκτρικών οχημάτων το σφάλμα ακρίβειας μειώνεται εκθετικά. Στις πρώτες επαναλήψεις, η μείωση του σφάλματος είναι σημαντική, ωστόσο, καθώς ο αριθμός των επαναλήψεων αυξάνεται ο ρυθμός μείωσης του σφάλματος περιορίζεται σημαντικά. Όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 5-52, το σφάλμα σύγκλισης στη βέλτιστη λύση είναι μεγαλύτερο τις ώρες που παρατηρείται απότομη διακύμανση της καμπύλης ισχύος.

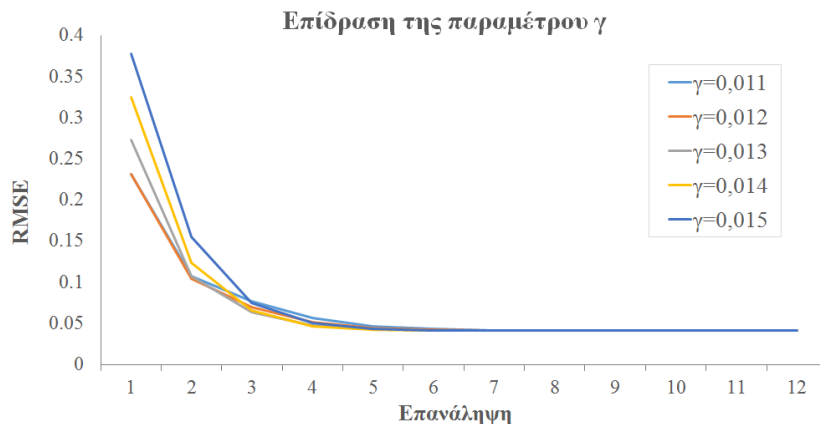


Εικόνα 5-52 RMSE σφάλμα για κάθε επανάληψη μετά την εφαρμογή της OA



Εικόνα 5-53 Σφάλμα σύγκλισης κάθε ώρα μετά την εφαρμογή της OA

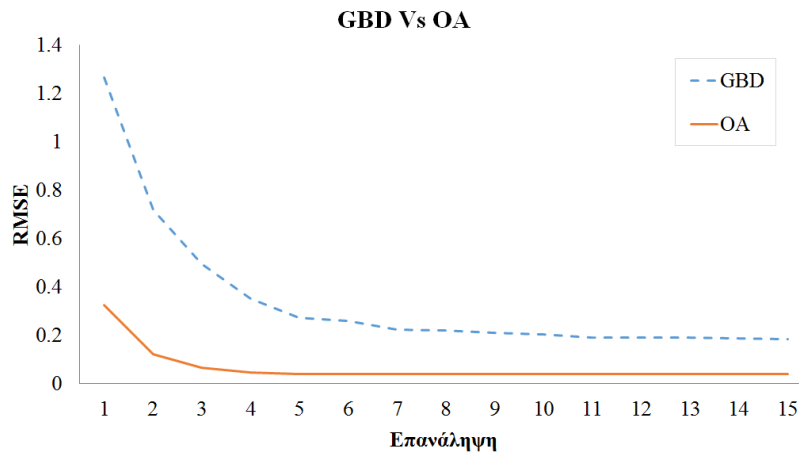
Στον αποκεντρωμένο αλγόριθμο της ωριαίας διαχείρισης η επιλογή της τιμής για την παράμετρο  $\gamma$  είναι πολύ σημαντική όσον αφορά στη σύγκλιση του αλγορίθμου. Η επιλογή της παραμέτρου  $\gamma$  επηρεάζει και τη ταχύτητα σύγκλισης της μεθόδου OA, όπως αποδεικνύεται και στην Εικόνα 5-54. Η ταχύτερη σύγκλιση επιτυγχάνεται για τιμή της παραμέτρου  $\gamma$  ίση με 0.014.



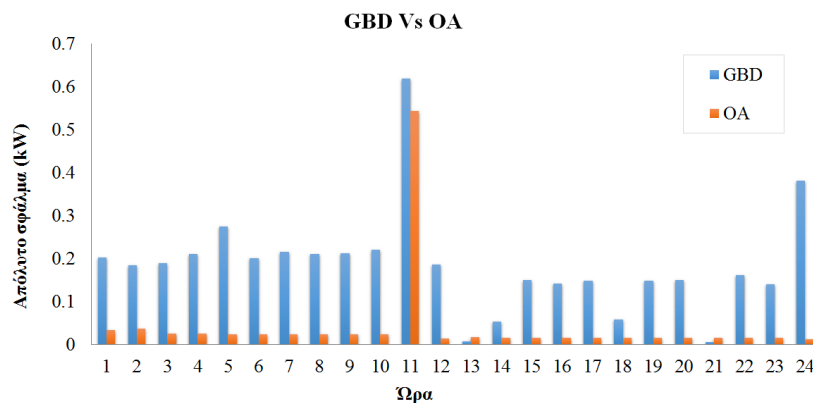
Εικόνα 5-54 Επίδραση της τιμής της παραμέτρου  $\gamma$  στην απόδοση της μεθόδου OA



Στη συνέχεια, η απόδοση της μεθόδου OA συγκρίνεται με την αντίστοιχη της GBD όσον αφορά στη ταχύτητα σύγκλισης και στην ακρίβεια της λύσης. Τα συγκριτικά αποτελέσματα των δύο μεθόδων, όπως αυτά απεικονίζονται στην Εικόνα 5-55 και στην Εικόνα 5-56, αποδεικνύουν ότι η μέθοδος OA υπερτερεί έναντι της μεθόδου GBD.



Εικόνα 5-55 Συγκριτικά αποτελέσματα για τη ταχύτητα και ακρίβεια σύγκλισης των μεθόδων GBD και OA



Εικόνα 5-56 Συγκριτικά αποτελέσματα ακρίβειας σύγκλισης των μεθόδων GBD και OA

## 5.4 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν αλγόριθμοι και μοντέλα για τη συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στις επικουρικές αγορές ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνοντας υπόψη τις ενεργειακές ανάγκες και περιορισμούς των μετακινήσεων των ηλεκτρικών οχημάτων, τις τιμές των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και τις ανάγκες του δικτύου για την υποστήριξη της συχνότητας.

Για τη συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας αναπτύχθηκε ένα προσαρμοστικό μοντέλο ελέγχου για τη ρύθμιση της απόκρισης της μπαταρίας του εκάστοτε ηλεκτρικού οχήματος στις μεταβολές της συχνότητας. Η υιοθέτηση του δυναμικού ελέγχου μέσω χαρακτηριστικών στατισμού πλεονεκτεί έναντι του συμβατικού ελέγχου (“droop-control”) καθώς λαμβάνει υπόψη τις μεμονωμένες ανάγκες των ηλεκτρικών οχημάτων. Στον συμβατικό έλεγχο μέσω χαρακτηριστικών στατισμού, η απόκριση των ηλεκτρικών οχημάτων είναι ομοιόμορφη ανεξάρτητα από το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας τους, τις μελλοντικές ενεργειακές ανάγκες μετακίνησης, τις ανάγκες του δικτύου για φόρτιση/εκφόρτιση κτλ. Αντίθετα, ο δυναμικός έλεγχος διαφοροποιεί την απόκριση των ηλεκτρικών οχημάτων για τη ρύθμιση της συχνότητας σε πρωτογενές επίπεδο βάσει των παραπάνω παραμέτρων. Με τον τρόπο αυτό, αν για παράδειγμα υπάρχει έλλειμα παραγωγής στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, τα αυτοκίνητα που έχουν άμεση ανάγκη φόρτισης θα συνεχίζουν να φορτίζουν, ενώ τα πιο φορτισμένα οχήματα θα μειώσουν τον ρυθμό φόρτισης τους ή ακόμα μπορεί να συνεισφέρουν με την έγχυση ενέργειας στο δίκτυο.

Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τη συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στην πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας αποδεικνύουν ότι η συνεισφορά τους είναι σημαντική. Τα οφέλη αυτά μεγιστοποιούνται όταν λαμβάνεται υπόψη η αμφίδρομη ροή ισχύος, καθώς ολόκληρη η χωρητικότητα της μπαταρίας αξιοποιείται για την υποστήριξη της συχνότητας του δικτύου. Μάλιστα, στο δυσμενές σενάριο με απώλεια μονάδων παραγωγής που εξετάστηκε για το σύστημα της Κρήτης (Διαταραχή 2), η επικουρική υποστήριξη της συχνότητας του δικτύου από τα ηλεκτρικά οχήματα (είτε θεωρώντας μόνο φόρτιση είτε αμφίδρομη ροής ισχύος) συμβάλλει στην αποφυγή της κατάρρευσης της συχνότητας.

Η συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στη δευτερεύουσα ρύθμιση της συχνότητας του δικτύου είναι πιο σύνθετη διαδικασία, καθώς απαιτεί τον συντονισμό της λειτουργίας του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων για την απόκριση του σε ένα σήμα ρύθμισης συχνότητας. Η χρήση αποκεντρωμένων αλγορίθμων για τον συντονισμό της λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων δίνει τη δυνατότητα άμεσης απόκρισης τους στο εκάστοτε σήμα ρύθμισης. Τα συγκριτικά πλεονεκτήματα του αποκεντρωμένου αλγορίθμου κατανομής του σήματος ρύθμισης έναντι της μεθόδου του προσαρμοστικού ελέγχου μέσω καμπυλών στατισμού αποτυπώνονται στη συνέχεια:

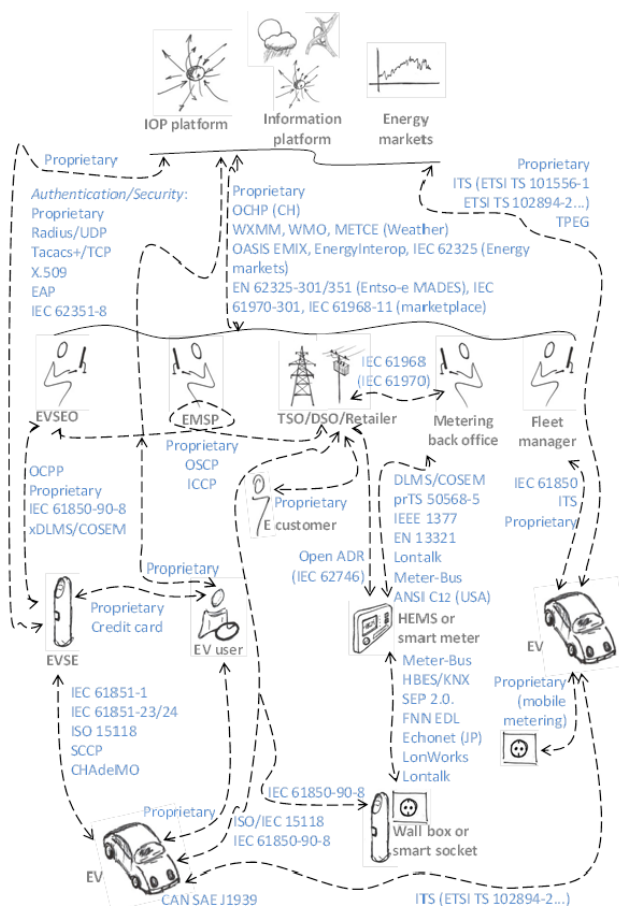
- *Ευκολία εφαρμογής:* Η σύγκλιση της μεθόδου μέσω καμπυλών στατισμού εξαρτάται από τις παραμέτρους ελέγχου ( $K_e$ ,  $K_d$  και  $T_P$ ). Ο προσδιορισμός των παραμέτρων αυτών γίνεται κατά περίπτωση και, ως εκ τούτου, απαιτεί μια εκ-των-προτέρων ανάλυση (a-priori analysis) της συμπεριφοράς του συστήματος. Αντίθετα, στον αποκεντρωμένο αλγόριθμο κατανομής δεν απαιτείται κάποια αντίστοιχη παραμετροποίηση, ακολουθώντας την "plug-n-play" πρακτική.
- *Χρόνος Σύγκλιση:* Από τις υπολογισμένες RMSE τιμές των δύο αλγορίθμων, οι δύο μέθοδοι παρουσιάζουν παρόμοια και αποδεκτή ακρίβεια. Ωστόσο, ο αποκεντρωμένος αλγόριθμος κατανομής εξασφαλίζει πολύ γρήγορη σύγκλιση μέσα σε λίγες επαναλήψεις, ειδικά στην περίπτωση που το υποσύνολο των μη ενεργών ηλεκτρικών οχημάτων είναι άδειο. Η γρήγορη σύγκλιση οφείλεται στον ορισμό της  $DPD_i^y$  από την εξίσωση E 5-115.
- *Χρονικός ορίζοντας λειτουργίας:* Στη μέθοδο απόκρισης στη συχνότητα μέσω καμπυλών στατισμού, τα ηλεκτρικά οχήματα ανταποκρίνονται στο σήμα ρύθμισης  $RS_{MW}$  κατά τη χρονική στιγμή  $k$  βάσει μόνο της τρέχουσας κατάστασης της μπαταρίας τους χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η ώρα αναχώρησής τους. Αυτό σημαίνει ότι δύο οχήματα με το ίδιο επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας τους, αλλά με διαφορετικούς χρόνους αναχώρησής (δηλαδή διαφορετική διάρκεια της περιόδου φόρτισης για κάθε όχημα) θα έχουν την ίδια ακριβώς απόκριση στο σήμα ρύθμισης. Αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της οδηγικής αυτονομίας του οχήματος με το μικρότερο διαθέσιμο διάστημα φόρτισης. Αντίθετα, στον αποκεντρωμένο αλγόριθμο κατανομής, λαμβάνονται υπόψη τόσο οι ενεργειακές ανάγκες των οχημάτων ( $TSN$ ) όσο και το διαθέσιμο χρονικό διάστημα φόρτισης ( $CPA$ ), με αποτέλεσμα το σήμα ρύθμισης  $RS_{MW}$  να κατανέμεται, δικαιότερα, στα ηλεκτρικά οχήματα.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

## ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΟΤΥΠΩΝ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΕΝΣΥΡΜΑΤΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΟΥΣ

### 6.1 Πρότυπα ηλεκτροκίνησης

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες προώθησης της ηλεκτροκίνησης, αν όχι ο σημαντικότερος, είναι η προτυποποίηση των υποδομών ηλεκτροκίνησης και των επικοινωνιών μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων. Στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος COTEVOS<sup>1</sup>, πραγματοποιήθηκε μια ενδελεχής έρευνα σχετικά με τα πρότυπα για την επικοινωνία και την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων στην ηλεκτροκίνηση. Η Εικόνα 6-1 Εικόνα 6-1 Υφιστάμενα πρότυπα ηλεκτροκίνησης για την επικοινωνία και την ανταλλαγή πληροφοριών συνοψίζει τα αποτελέσματα των προτύπων ηλεκτροκίνησης. Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η ανάπτυξη υποδομών φόρτισης και του συστήματος διαχείρισής τους βάσει των διεθνών προτύπων για την ηλεκτροκίνηση.



Εικόνα 6-1 Υφιστάμενα πρότυπα ηλεκτροκίνησης για την επικοινωνία και την ανταλλαγή πληροφοριών

<sup>1</sup> <http://cotevos.eu/>

### 6.1.1 Πρότυπα διεπαφής Ηλεκτρικού Οχήματος- υποδομών φόρτισης

Τα υφιστάμενα πρότυπα ηλεκτροκίνησης που αφορούν στην επικοινωνία και στη μεταφορά πληροφοριών μεταξύ ηλεκτρικών οχημάτων (Electric Vehicles - EV) και υποδομών φόρτισης (Electric Vehicle Supply Equipment - EVSE) είναι :

- IEC 62196: Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles που αφορά στην προτυποποίηση των καλωδίων και των υποδοχών σύνδεσης
- IEC 61851: Electric vehicle conductive charging system που αφορά στην επικοινωνία χαμηλού επιπέδου για την ενσύρματη φόρτιση
- IEC 15118: Road vehicles - Vehicle to grid communication interface που αφορά στην επικοινωνία υψηλού επιπέδου για την ενσύρματη φόρτιση

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται εν συντομία τα κύρια σημεία των παραπάνω προτύπων που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των πρότυπων υποδομών φόρτισης.

- IEC 62196

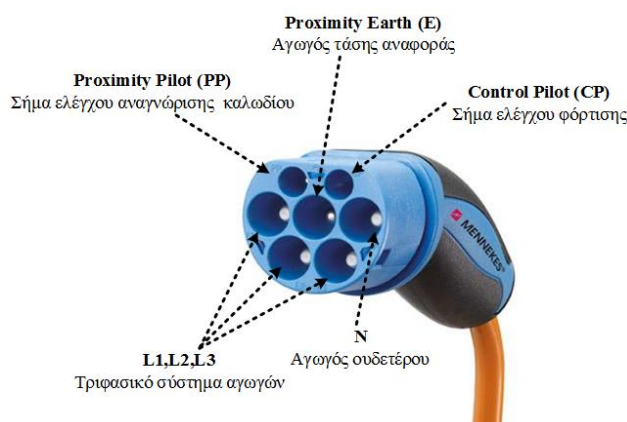
Το πρότυπο αυτό αναφέρεται στα τεχνικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά που πρέπει να πληρούνται για τις υποδοχές και τα καλώδια διασύνδεσης μεταξύ ηλεκτρικών οχημάτων και υποδομών φόρτισης για την περίπτωση της ενσύρματης φόρτισης, είτε με συνεχές είτε με εναλλασσόμενο ρεύμα.

Όσον αφορά στην τάση και στο ρεύμα λειτουργίας, το πρότυπο καθορίζει τα εξής χαρακτηριστικά:

- 690V AC 50Hz – 60Hz, το ονομαστικό ρεύμα δεν πρέπει να ξεπερνά τα 250A,
- 1500V DC το ονομαστικό ρεύμα δεν πρέπει να ξεπερνά τα 400A.

Όσον αφορά στον τύπο των καλωδίων σύνδεσης, η χρήση των καλωδίων τύπου 2 (type 2) χρησιμοποιούνται είναι υποχρεωτική για δημοσίως προσβάσιμες υποδομές φόρτισης. Η Εικόνα 6-2 απεικονίζει τους ακροδέκτες ενός καλωδίου φόρτισης (αντίστοιχοι είναι και οι ακροδέκτες των υποδοχών των σταθμού φόρτισης και του αυτοκινήτου).

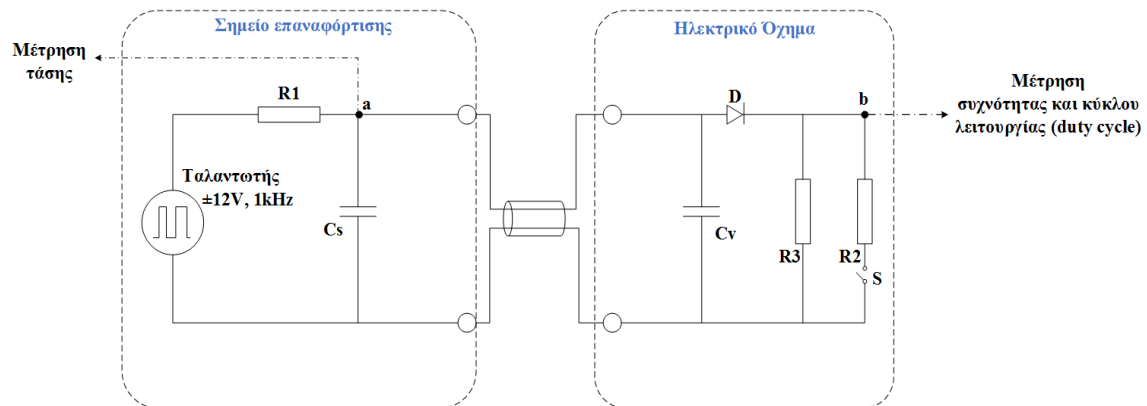
- L1, L2 και L3 είναι το τριφασικό σύστημα αγωγών του δικτύου για τη μεταφορά της ενέργειας από το σταθμό φόρτισης προς το ηλεκτρικό όχημα.
- N είναι ο αγωγός ουδετέρου του δικτύου
- Proximity Earth (PE) είναι ο αγωγός που καθορίζει το επίπεδο της τάσης αναφοράς (αγωγός γείωσης).
- Control Pilot (CP) είναι ο αγωγός που μεταφέρει το σήμα ελέγχου για τη διαχείριση του κύκλου φόρτισης ενός ηλεκτρικού οχήματος σύμφωνα με το πρότυπο IEC61851.
- Proximity Pilot (PP) είναι ο αγωγός που ελέγχει την παρουσία ή μη ενός καλωδίου καθώς και το μέγιστο ονομαστικό ρεύμα του καλωδίου.



Εικόνα 6-2 Ακροδέκτες καλωδίου φόρτισης τύπου 2 (IEC 62196)

- IEC 61851

Το πρότυπο αυτό ηλεκτροκίνησης αναφέρεται στη χαμηλού επιπέδου επικοινωνία (μέσω παλμικών σημάτων) μεταξύ ηλεκτρικού οχήματος και υποδομής φόρτισης. Στην επικοινωνία αυτή οι αγωγοί για το σήματα ελέγχου και αναγνώρισης καλωδίου. Το ισοδύναμο κύκλωμα που αναπαριστά την επικοινωνία για το σήμα ελέγχου απεικονίζεται στην Εικόνα 6-3 και αποτελείται από δύο μέρη: το κύκλωμα του σημείου επαναφόρτισης και το κύκλωμα του ηλεκτρικού οχήματος.



Εικόνα 6-3 Ισοδύναμο κύκλωμα για την αναπαράσταση του σήματος ελέγχου μεταξύ ηλεκτρικού οχήματος και υποδομής φόρτισης (IEC 61851)

Στην πλευρά του σταθμού φόρτισης, ο ταλαντωτής παράγει ένα παλμικό σήμα πλάτους  $\pm 12V$  και συχνότητας  $1kHz$ . Τα όρια επιτρεπόμενων αποκλίσεις για τις παραπάνω τιμές είναι  $\pm 0,6\%$  για την τάση και  $\pm 0,5\%$  για τη συχνότητα. Ο διαχειριστής του σημείου φόρτισης έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλει την κύκλο λειτουργίας (duty cycle) του παλμικού σήματος με συγκεκριμένο τρόπο. Ο κύκλος λειτουργίας του παλμικού σήματος καθορίζει το ονομαστικό ρεύμα λειτουργίας του σταθμού φόρτισης (Πίνακας 6-1) και μπορεί να αξιοποιηθεί στην εφαρμογή ευέλικτων στρατηγικών φόρτισης για τη μεταβολή του επιπέδου φόρτισης.

**Πίνακας 6-1 Κύκλος λειτουργίας (duty cycle) του σήματος ελέγχου που ορίζεται από τον σταθμό φόρτισης**

Κύκλος λειτουργίας	Μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα
0%	Ο σταθμός φόρτισης δεν είναι διαθέσιμος
5%	Απαιτείται ψηφιακή επικοινωνία (IEC 15118)
$10\% \leq \text{κύκλος λειτουργίας} \leq 85\%$ (%κύκλος λειτουργίας)=ρεύμα[A]/0.6	Το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα κυμαίνεται μεταξύ 6A-51A
$85\% < \text{κύκλος λειτουργίας} \leq 96\%$ (%κύκλος λειτουργίας)=ρεύμα[A]/2.5+64	Το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα κυμαίνεται μεταξύ 51A-80A
100%	Μηδενικό ρεύμα

Από την άλλη πλευρά, το ηλεκτρικό όχημα διαχειρίζεται μόνο τους θετικούς παλμούς του σήματος ελέγχου, οι αρνητικοί παλμοί ανακόπτονται από τη δίοδο  $D$ . Οι πυκνωτές  $C_v$  και  $C_s$  είναι πυκνωτές διασύνδεσης (coupling capacitors) και η τιμή της χωρητικότητας τους καθορίζεται στο πρότυπο ( $C_v \leq 2400pF$  και  $300pF \leq C_s \leq 1600pF$ ). Οι αντιστάσεις του κυκλώματος του ηλεκτρικού οχήματος ( $R_2$  και  $R_3$ ) καθορίζουν το ρεύμα που διαρέει το συνολικό κύκλωμα στην Εικόνα 6-3, επομένως, και την πτώση τάσης που παρατηρείται στο σημείο  $a$ . Η σύνδεση ενός ηλεκτρικού οχήματος σε μια υποδομή φόρτισης συνεπάγεται κλείσιμο του κυκλώματος του σημείου επαναφόρτισης μέσω της αντίστασης  $R_3$ . Η πτώση τάσης που προκαλείται στο σημείο  $a$  λόγω σύνδεσης του ηλεκτρικού οχήματος είναι  $3V$  ( $V_a = 9V$ ). Ο διακόπτης  $S$  εισάγει στο ισοδύναμο κύκλωμα μια νέα αντίσταση  $R_2$  παράλληλα στην αντίσταση  $R_3$ , με αποτέλεσμα να μειώνεται η συνολική αντίσταση ( $R_2 // R_3 < \min(R_2, R_3)$ ) του κυκλώματος του ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Η μείωση της συνολικής αντίστασης του ισοδύναμου κυκλώματος συνεπάγεται την αύξηση του

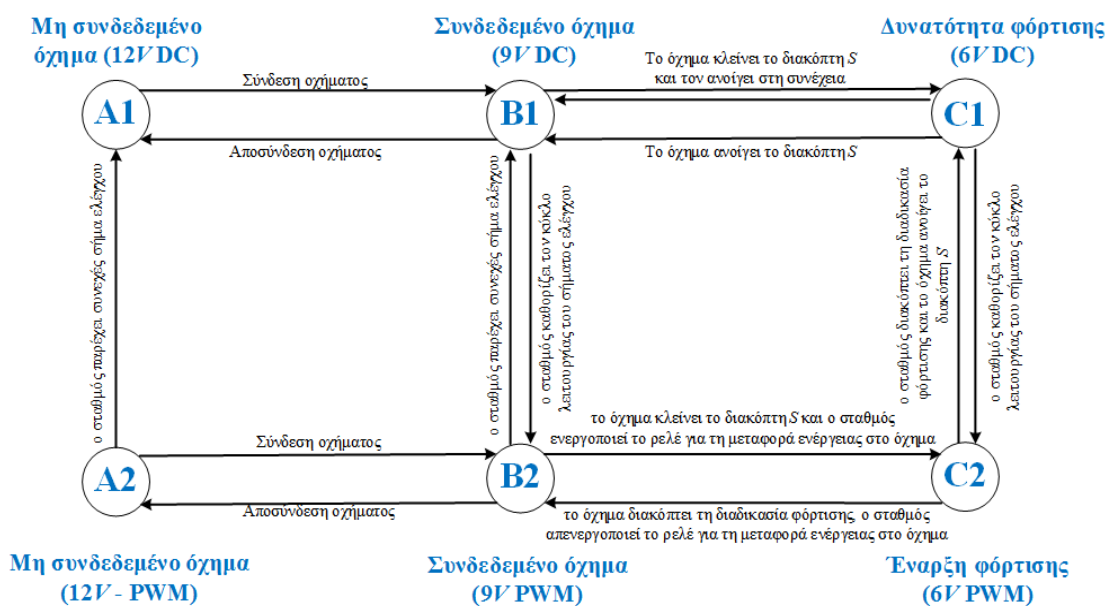
ρεύματος του κυκλώματος, συνεπώς, και αύξηση της πρώτης τάσης στο σημείο a κατά 3V ( $V_a = 6V$ ). Σε περιπτώσεις όπου η υποδομή φόρτισης είναι εγκατεστημένη σε κλειστό χώρο, η τιμή της  $R_3$  γίνεται ακόμα μικρότερη και η πτώση τάσης στο σημείο a είναι μεγαλύτερη (6V,  $V_a = 3V$ ), με σκοπό την ενεργοποίηση του συστήματος εξαιρισμού του χώρου στάθμευσης. Η λειτουργία αυτή δεν υποστηρίζεται από την πλειονότητα των εμπορικά διαθέσιμων φορτιστών επιπέδου 2 (Mode 2).

Σύμφωνα με τα παραπάνω, διακρίνονται τέσσερις βασικές καταστάσεις λειτουργίας ανάλογα με τη σύνδεση ή μη ηλεκτρικού οχήματος, την κατάσταση του διακόπτη S, οι οποίες αντιστοιχούν σε συγκεκριμένα επίπεδα τάσης όσον αφορά στο πλάτος του σήματος ελέγχου ( $V_a$ ). Οι καταστάσεις αυτές περιγράφονται στον Πίνακα 6-2. Επιπρόσθετα, διακρίνονται και δύο έκτακτες καταστάσεις για την περίπτωση όπου υπάρχει βλάβη στο σταθμό ή βραχυκύκλωμα μεταξύ αγωγού ελέγχου και αγωγού τάσης αναφοράς (γείωση), η τάση στο σημείο a είναι μηδενική ( $V_a=0$ ), και για την περίπτωση όπου ο σταθμός φόρτισης δεν είναι διαθέσιμος, η τάση στο σημείο a είναι συνεχής με αρνητικό πλάτος 12V ( $V_a = -12V$ ).

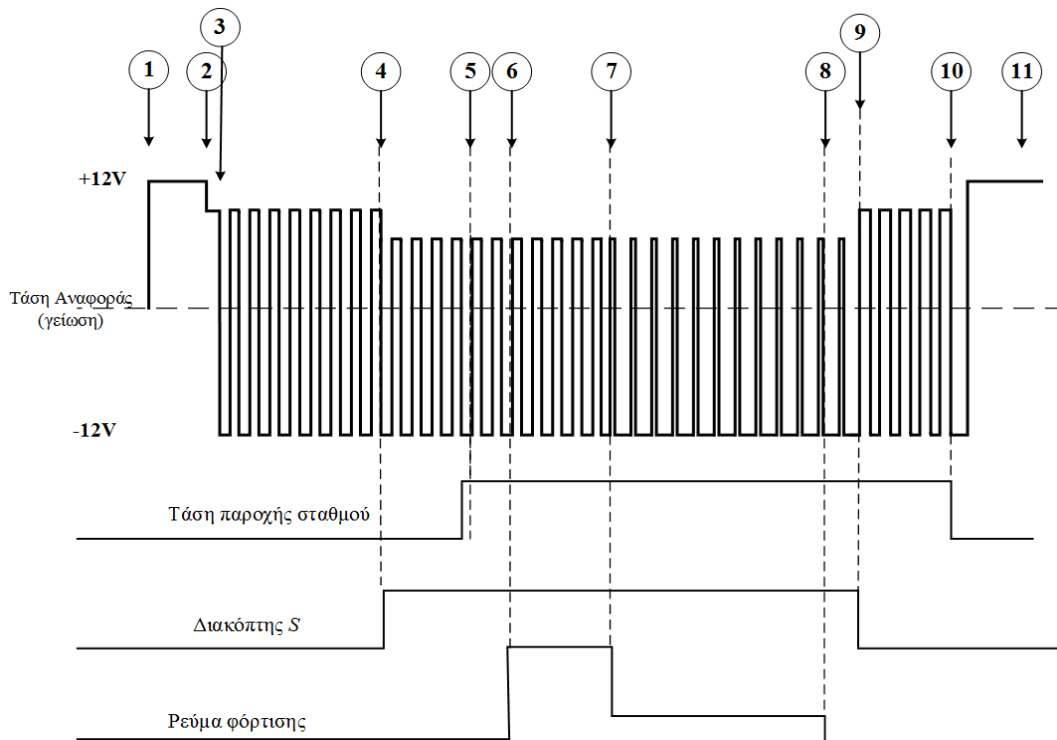
Οι επιτρεπές μεταβάσεις μεταξύ των καταστάσεων λειτουργίας απεικονίζονται στην Εικόνα 6-4. Οι καταστάσεις X1 (όπου  $X=\{A,B,C\}$ ) υποδηλώνουν ότι ο σταθμός δεν είναι έτοιμος για να ξεκινήσει η διαδικασία της φόρτισης ή ότι επιθυμεί να διακοπεί η τρέχουσα διαδικασία της φόρτισης. Στις καταστάσεις X1 το σήμα ελέγχου είναι συνεχές, ενώ το πλάτος του εξαρτάται από την κατάσταση του ηλεκτρικού οχήματος. Αντίθετα, στις καταστάσεις X2, ο σταθμός είναι έτοιμος για τη φόρτιση του οχήματος δεδομένης φυσικά και της δικής του ετοιμότητας.

Πίνακας 6-2 Καταστάσεις λειτουργίας του ισοδύναμου κυκλώματος (state machine)

Κατάσταση λειτουργίας	Συνδεδεμένο όχημα	Κατάσταση Διακόπτη S	Λειτουργία Φόρτισης	Τάση $V_a$ (V)	Παρατηρήσεις
A	X	ανοιχτός	X	12	δεν υπάρχει συνδεδεμένο όχημα
B	✓	ανοιχτός	X	9	σύνδεση οχήματος
C	✓	κλειστός	✓	6	λειτουργία φόρτισης χωρίς σύστημα εξαιρισμού
D	✓	κλειστός	✓	3	λειτουργία φόρτισης με σύστημα εξαιρισμού
E	✓	ανοιχτός	X	0	πρόβλημα δικτύου, βραχυκυκλωμένο σήμα ελέγχου, ...
F	✓	ανοιχτός	X	-12	μη διαθέσιμος σταθμός



Εικόνα 6-4 Επιτρεπές μεταβάσεις μεταξύ των καταστάσεων λειτουργίας (IEC 61851)



**Εικόνα 6-5 Παράδειγμα μετάβασης καταστάσεων και σήματος ελέγχου για μια πλήρη διαδικασία φόρτισης (IEC 61851)**

Στην Εικόνα 6-5 απεικονίζεται το διάγραμμα λειτουργίας για ένα τυχαίο παράδειγμα ενός πλήρους κύκλου φόρτισης. Κάθε μεταβολή της κατάστασης λειτουργίας προσδιορίζεται από έναν αύξοντα αριθμό ο οποίος επεξηγείται στη συνέχεια:

1. *Κατάσταση λειτουργίας A:* Ο σταθμός φόρτισης είναι ελεύθερος καθώς δεν υπάρχει συνδεδεμένο όχημα. Το σήμα ελέγχου που παράγεται από τον σταθμό φόρτισης είναι μια συνεχή τάση πλάτους 12V.
2. *Κατάσταση λειτουργίας B:* Τη χρονική στιγμή που ένα ηλεκτρικό όχημα συνδέεται στον σταθμό φόρτισης μέσω ενός καλωδίου το πλάτος του σήματος ελέγχου μειώνεται στην τιμή των 9V.
3. *Κατάσταση λειτουργίας B:* Ο σταθμός φόρτισης που παρακολουθεί την τάση του σήματος ελέγχου ( $V_a$ ), παράγει πλέον ένα παλμικό σήμα. Ο κύκλος λειτουργίας του παλμικού σήματος καθορίζεται από το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα φόρτισης του σταθμού. Το σύστημα διαχείρισης της μπαταρίας του ηλεκτρικού οχήματος παρακολουθεί το κύκλο λειτουργίας του σήματος ελέγχου και προσαρμόζει κατάλληλα το μέγιστο ρεύμα φόρτισης της μπαταρίας του.
4. *Κατάσταση λειτουργίας B→C:* Στη συνέχεια, το ηλεκτρικό όχημα κλείνει τον διακόπτη  $S$  ειδοποιώντας τον σταθμό φόρτισης ότι είναι έτοιμο για την έναρξη της φόρτισης του.
5. *Κατάσταση λειτουργίας C:* Μετά από χρονικό διάστημα  $t$ , ο σταθμός φόρτισης ενεργοποιεί το ρελέ για την παροχή ενέργειας από το ηλεκτρικό δίκτυο προς το ηλεκτρικό όχημα.
6. *Κατάσταση λειτουργίας C:* Η διαδικασία της φόρτισης έχει ξεκινήσει.
7. *Κατάσταση λειτουργίας C:* Ο σταθμός φόρτισης μειώνει τον κύκλο λειτουργίας (duty cycle) του σήματος ελέγχου έτσι ώστε να μειωθεί και το ρεύμα φόρτισης.
8. *Κατάσταση λειτουργίας C:* Η φόρτιση της μπαταρίας έχει ολοκληρωθεί και το ηλεκτρικό όχημα δεν απορροφά πλέον ενέργεια από το δίκτυο (μηδενικό ρεύμα).
9. *Κατάσταση λειτουργίας C → B:* Το ηλεκτρικό όχημα ανοίγει τον διακόπτη  $S$  ζητώντας από τον σταθμό φόρτισης τη δυνατότητα αποσύνδεσης του.



10. *Κατάσταση λειτουργίας Β:* Ο σταθμός φόρτισης καταγράφει την αλλαγή στο πλάτος του σήματος ελέγχου ( $V_a=9V$ ), επομένως την επιθυμία του ηλεκτρικού οχήματος να αποσυνδεθεί, απενεργοποιεί το ρελέ και εν συνεχεία αποδεσμεύει το καλώδιο σύνδεσης.

11. *Κατάσταση λειτουργίας Α:* Το ηλεκτρικό όχημα έχει αποσυνδεθεί και ο σταθμός φόρτισης παραμένει διαθέσιμος για τη φόρτιση του επόμενου ηλεκτρικού οχήματος.

Το πρότυπο IEC61851 καθορίζει και τις προδιαγραφές για την αναγνώριση του καλωδίου. Σε κάθε καλώδιο φόρτισης υπάρχει μια αντίσταση μεταξύ του αγωγού αναγνώρισης καλωδίων και του αγωγού τάσης αναφοράς. Η τιμή της αντίστασης αυτής καθορίζει το ονομαστικό ρεύμα του καλωδίου φόρτισης όπως περιγράφει αναλυτικά ο Πίνακας 6-3. Σε ορισμένες περιπτώσεις, υπάρχουν εμπορικά διαθέσιμα καλώδια φόρτισης που αναγράφουν ονομαστικό ρεύμα 16Α. Στην πραγματικότητα πρόκειται για καλώδια φόρτισης με ονομαστικό ρεύμα 20Α και ισοδύναμη αντίσταση μεταξύ του αγωγού αναγνώρισης καλωδίων και του αγωγού τάσης αναφοράς ίση με 680Ω.

Πίνακας 6-3 Προτυποποίηση αναγνώρισης καλωδίων φόρτισης	
Ονομαστικό ρεύμα καλωδίου φόρτισης (A)	Ισοδύναμη αντίσταση ±3% ανοχή (kΩ)
13	1.5
20	0.68
32	0.22
63(3Φ) / 70(1Φ)	0.1

• *IEC 15118*

Το πρότυπο αυτό καθορίζει την επικοινωνία υψηλού επιπέδου μεταξύ ηλεκτρικού οχήματος και σταθμού φόρτισης. Η ενεργοποίηση της επικοινωνίας αυτής προϋποθέτει την παραγωγή ενός παλμικού σήματος από το σταθμό φόρτισης με κύκλο λειτουργίας 5%. Το συγκεκριμένο πρότυπο συμπληρώνει τα πρότυπα IEC 61851 και IEC62196 όσον αφορά στη μεταφορά πληροφοριών από το ηλεκτρικό όχημα προς τον σταθμό φόρτισης, για παράδειγμα ενεργειακές ανάγκες φόρτισης, επιθυμητό επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας κατά την αναχώρηση, επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας κατά τη διασύνδεση με το δίκτυο, χωρητικότητα μπαταρίας κτλ.

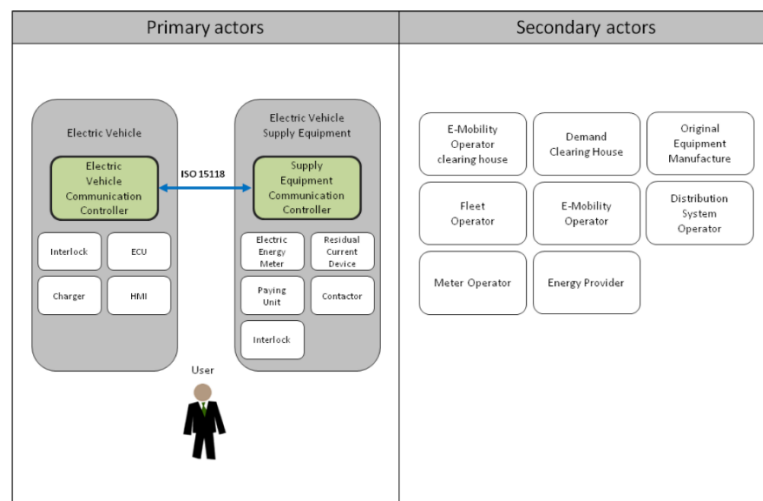
Στο πρώτο μέρος του IEC15118 ορίζονται οι πρωτεύοντες και δευτερεύοντες παίκτες ηλεκτροκίνησης καθώς και οι αρμοδιότητές τους (Εικόνα 6-6). Ως πρωτεύοντες παίκτες ορίζονται τα στοιχεία εκείνα που συμμετέχουν άμεσα στη διαδικασία της φόρτισης, δηλαδή ηλεκτρικό όχημα, σταθμός φόρτισης, ρελέ διασύνδεσης, μηχανισμός κλειδώματος καλωδίου, φορτιστής μπαταρίας οχήματος, ηλεκτρονικός μετρητής, μηχανισμός πληρωμών, σύστημα διεπαφής (human machine interface). Ως δευτερεύοντες παίκτες ορίζονται οι φορείς ηλεκτροκίνησης που σχετίζονται με τη διαχείριση των ηλεκτρικών οχημάτων σε υψηλό επίπεδο, δηλαδή πάροχος υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης, υπεύθυνος εκκαθάρισης συναλλαγών, κατασκευαστής σταθμών φόρτισης, διαχειριστής στόλου ηλεκτρικών οχημάτων, διαχειριστής δικτύου διανομής και προμηθευτής ηλεκτρικής ενέργειας.

Επιπρόσθετα, στο πρώτο μέρος του προτύπου καθορίζονται και οι λειτουργίες ενός πλήρους κύκλου φόρτισης, οι οποίες κατηγοριοποιούνται σε οκτώ γενικές κατηγορίες όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 6-7:

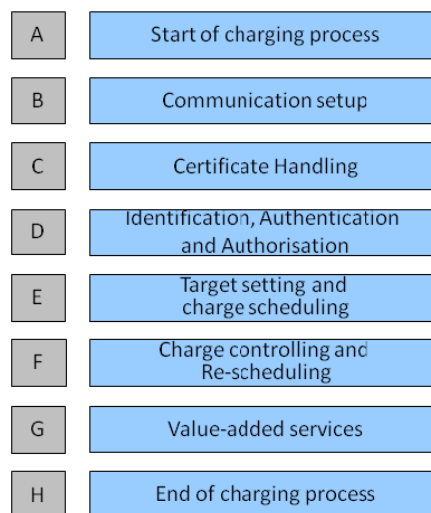
- Κατηγορία Α: Έναρξη φόρτισης με επιβαλλόμενη επικοινωνία υψηλού επιπέδου ή με παράλληλη επικοινωνία χαμηλού (IEC61851) και υψηλού (IEC15118) επιπέδου
- Κατηγορία Β: Εγκατάσταση επικοινωνίας
- Κατηγορία Γ: Διαχείριση πιστοποιητικών ασφαλείας
- Κατηγορία Δ: Διαδικασία αναγνώρισης και πιστοποίησης
- Κατηγορία Ε: Προσδιορισμός στόχων φόρτισης και προγραμματισμός του προφίλ φόρτισης, αντιστάθμιση αέργου ισχύος
- Κατηγορία ΣΤ: Διαδικασία φόρτισης (μετρήσεις, επαναπροσδιορισμός του προφίλ φόρτισης, διακοπή φόρτισης)



- Κατηγορία Z: Μετάδοση πληροφοριών για την εκκαθάριση της φόρτισης ή των επικουρικών υπηρεσιών που προσφέρονται από ένα όχημα.
- Κατηγορία H: Τερματισμός φόρτισης



Εικόνα 6-6 Πρωτεύοντες και δευτερεύοντες παίκτες όπως ορίζονται στο πρότυπο IEC15118



Εικόνα 6-7 Ομάδες λειτουργιών όπως ορίζονται στο πρότυπο IEC15118

Το δεύτερο μέρος του προτύπου περιέχει την τεχνική περιγραφή του και τις απαιτήσεις για τη διασφάλιση της διαλειτουργικότητας του συστήματος (Open System Interconnections – OSI). Το τρίτο μέρος του προτύπου αναφέρεται στις απαιτήσεις για τη μετάδοση των πληροφοριών σε φυσικό επίπεδο και σε επίπεδο μετάδοσης δεδομένων (2ο επίπεδο). Στην παρούσα διδακτορική διατριβή δεν θα εξεταστεί το συγκεκριμένο πρότυπο, επομένως δεν κρίνεται σκόπιμη η περαιτέρω ανάλυση του.

### 6.1.2 Πρότυπα διεπαφής Διαχειριστή υποδομών φόρτισης - σταθμών φόρτισης (OCPP)

Το πρωτόκολλο επικοινωνίας μεταξύ Διαχειριστή σταθμών φόρτισης και υποδομών φόρτισης είναι το Open Charge Point Protocol (OCPP)<sup>2</sup>, το οποίο ανήκει στο Επίπεδο Εφαρμογής (Layer 7)

<sup>2</sup> <http://www.openchargealliance.org/>

του μοντέλου OSI και έχει υιοθετηθεί ευρέως στην Ευρώπη. Σκοπός του πρωτοκόλλου αυτού είναι η επικοινωνία του διαχειριστή των υποδομών φόρτισης με οποιοδήποτε σταθμό φόρτισης ανεξαρτήτως κατασκευαστή. Με τον τρόπο αυτό, η ενσωμάτωση ενός νέου σταθμού φόρτισης στο σύστημα διαχείρισης τους ή η μεταφορά υφιστάμενων σταθμών φόρτισης σε άλλο σύστημα διαχείρισης γίνεται με απλές διαδικασίες.


Η επικοινωνία μεταξύ Διαχειριστή σταθμών φόρτισης και υποδομών φόρτισης περιλαμβάνει την επικοινωνία δεδομένων και πληροφοριών που αφορούν στη λειτουργία του σταθμού φόρτισης (αν ο σταθμός είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο, αν υπάρχει κάποιο σφάλμα λειτουργίας κτλ) και στη διαδικασία της φόρτισης (έναρξη/λήξη φόρτισης, μετρήσεις ρεύματος/τάσης κτλ). Η επικοινωνία αυτή είναι αμφίδρομη και πραγματοποιείται μέσω web services<sup>3</sup> που είναι υπηρεσίες που είναι συνεχώς προσβάσιμες σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση δικτύου. Ο κώδικας του πρωτοκόλλου OCPP είναι ελεύθερης πρόσβασης και περιλαμβάνει τις υπηρεσίες διαδικτύου τόσο του σταθμού φόρτισης όσο και του διαχειριστή τους.

Ο Πίνακας 6-4 περιγράφει τα βασικά μηνύματα επικοινωνίας του πρωτοκόλλου OCPP που είναι απαραίτητα για την εκτέλεση ενός πλήρους κύκλου φόρτισης. Τα μηνύματα που περιγράφονται στο πρωτόκολλο OCPP διακρίνονται σε 2 κατηγορίες: τα μηνύματα που αποστέλλονται από τον σταθμό φόρτισης προς τον διαχειριστή του δικτύου υποδομών φόρτισης και εκείνα που ακολουθούν την αντίθετη ροή επικοινωνίας.

**Πίνακας 6-4 Βασικά μηνύματα επικοινωνίας για την εκτέλεση ενός πλήρους κύκλου φόρτισης (OCPP)**

<b>Σταθμός Φόρτισης</b>		<b>Διαχειριστής σημείων φόρτισης</b>
<b>Εκκίνηση/Επανεκκίνηση</b>		
Send BootNotification req	→	Receive BootNotification req
Receive BootNotification conf	←	Send BootNotification conf
<b>Χωρίς παρουσία ηλεκτρικού οχήματος</b>		
Send StatusNotification req	→	Receive StatusNotification req
• Status: Available		
Receive StatusNotification conf	←	Send StatusNotification conf
Send Heartbeat req	→	Receive Heartbeat req
Receive Heartbeat conf	←	Send Heartbeat conf
<b>Παρουσία ηλεκτρικού οχήματος</b>		
Send StatusNotification req	→	Receive StatusNotification req
• Status: Unavailable		
Receive StatusNotification conf	←	Send StatusNotification conf
Send StartTransaction req	→	Receive StartTransaction req
Receive StartTransaction conf	←	Send StartTransaction conf
Send DataTransfer req		
• MessageID:	→	Receive DataTransfer req
GetChargeInstruction		
Receive DataTransfer conf	←	Send DataTransfer conf
		Send DataTransfer req
Receive DataTransfer req	←	• MessageID : ChangeChargeInstruction
		• Pmax=0
Send DataTransfer conf	→	Receive DataTransfer conf
<b>Πιστοποίηση χρήστη για τη χρήση του σταθμού</b>		
		Send DataTransfer req
Receive DataTransfer req	←	• MessageID : ChangeChargeInstruction
		• Pmax>0

<sup>3</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Web\\_service](https://en.wikipedia.org/wiki/Web_service)

	Send DataTransfer conf	→	Receive DataTransfer conf
<b>Φόρτιση</b> 	Send DataTransfer req		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MessageID: kvcbx</li> <li>• MeterValues</li> </ul>	→	Receive DataTransfer req
	Receive DataTransfer conf	←	Send DataTransfer conf
<b>Λήξη φόρτισης</b>	Send StopTransaction req	→	Receive StopTransaction req
	Receive StopTransaction conf	←	Send StopTransaction conf
	Send StatusNotification req	→	Receive StatusNotification req
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Status: Available</li> </ul>		
	Receive StatusNotification conf	←	Send StatusNotification conf
	Receive DataTransfer req	←	Send DataTransfer req
			<ul style="list-style-type: none"> <li>• MessageID :</li> <li>• Pmax=0</li> </ul>
	Send DataTransfer conf	→	Receive DataTransfer conf

- **Boot Notification**

Όταν ένας σταθμός φόρτισης εκκινεί/επανεκκινεί πρέπει να συνδεθεί στο κεντρικό σύστημα διαχείρισης έτσι ώστε να είναι δυνατή η αμφίδρομη ανταλλαγή πληροφοριών και δεδομένων. Τα μηνύματα που είναι απαραίτητα για την έναρξη της επικοινωνίας τους είναι τα: `BootNotification.req`, που αποστέλλεται από τον σταθμό φόρτισης για να ενημερώσει το κέντρο διαχείρισης σχετικά με την ταυτότητα του, τον σειριακό αριθμό, τον κατασκευαστή, το μοντέλο, το firmware κτλ, και `BootNotification.conf..` που είναι το μήνυμα-απάντηση του κέντρου διαχείρισης στο `BootNotification.req` μήνυμα του σταθμού φόρτισης για την αποδοχή ή μη του σταθμού. Στην περίπτωση αποδοχής της σύνδεσης του σταθμού φόρτισης, το κεντρικό σύστημα διαχείρισης ενημερώνει το σταθμό για την τοπική ώρα (για λόγους συγχρονισμού) καθώς και το χρόνο επανάληψης του μηνύματος `Hearbeat`.

- **Status Notification**

Ο σταθμός φόρτισης στέλνει ένα ενημερωτικό μήνυμα στο κέντρο διαχείρισης κάθε φορά που μεταβάλλεται η κατάσταση του ή εμφανίζεται κάποιο σφάλμα λειτουργίας. Για παράδειγμα, ο σταθμός ενημερώνει τον διαχειριστή ότι είναι διαθέσιμος (`available`) όταν δεν υπάρχει συνδεδεμένο όχημα ή `apασχολημένος` (`occupied`) όταν συνδεθεί κάποιο όχημα. Σε περίπτωση σφάλματος ή συντήρησης ο σταθμός φόρτισης δηλώνεται ως `εσφαλαμένος` (`faulted`) ή `μη διαθέσιμος` (`unavailable`).

- **HeartBeat**

Το κεντρικό σύστημα διαχείρισης πρέπει ανά τακτά χρονικά διαστήματα να ενημερώνεται για την κατάσταση λειτουργίας κάθε σταθμού φόρτισης. Κατά τη διάρκεια που ο σταθμός φόρτισης παραμένει αδρανής, δηλαδή δεν υπάρχει συνδεδεμένο όχημα, στέλνει ένα μήνυμα `HeartBeat` στο κέντρο διαχείρισης για να δηλώσει ότι είναι σε λειτουργία και το κανάλι επικοινωνίας είναι ενεργό. Το κέντρο διαχείρισης απαντά στο μήνυμα `HeartBeat` του σταθμού στέλνοντας την τοπική ώρα για λόγους συγχρονισμού. Η συχνότητα ανταλλαγής των μηνυμάτων αυτών καθορίζεται από το κέντρο διαχείρισης στο μήνυμα `BootNotification.conf`.

- **Start transaction**

Με το μήνυμα αυτό (`StartTransaction.req`) ο σταθμός φόρτισης ενημερώνει το κέντρο διαχείρισης ότι ένα ηλεκτρικό όχημα έχει συνδεθεί και είναι έτοιμο να φορτίσει. Το κέντρο διαχείρισης έχει τη δυνατότητα αποδοχής ή απόρριψης του αιτήματος έναρξης της διαδικασίας

φόρτισης ανάλογα με το αν ο χρήστης είναι πιστοποιημένος ή όχι (StartTransaction.conf). Στην περίπτωση αποδοχής, το κέντρο διαχείρισης ορίζει ένα κωδικό για τη διαδικασία της φόρτισης. Ο κωδικός αυτός είναι μοναδικός και αναφέρεται σε κάθε μήνυμα που αφορά στην ανταλλαγή δεδομένων και πληροφοριών κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης φόρτισης.

- **Stop transaction**

Με το μήνυμα αυτό (StopTransaction.req) ο σταθμός φόρτισης ενημερώνει το κέντρο διαχείρισης ότι η διαδικασία της με συγκεκριμένο Transaction ID έχει τελειώσει. Ο διαχειριστής του δικτύου απαντά στο μήνυμα του σταθμού με το μήνυμα (StopTransaction.conf) το περιεχόμενο του οποίου αποτελείται από προαιρετικά πεδία συμπλήρωσης.

- **Change Availability**

Ο διαχειριστής του δικτύου υποδομών φόρτισης έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλει τη λειτουργική κατάσταση ενός σταθμού είτε για λόγους συντήρησης είτε για λόγους αναβάθμισης λογισμικού, είτε για λόγους υπερφόρτισης του δικτύου κτλ Έτσι ένας σταθμός που είναι αρχικά διαθέσιμος (Available – OCPP) μπορεί να αλλάξει κατάσταση σε μη-διαθέσιμος (Unavailable – OCPP) και αντιστρόφως.

- **ChangeConfiguration**

Ο διαχειριστής των υποδομών φόρτισης έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλει κάποιες παραμέτρους της λειτουργίας του σταθμού. Η λειτουργία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική και μπορεί να αξιοποιηθεί στην υιοθέτηση ευέλικτων στρατηγικών φόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, ο διαχειριστής των υποδομών φόρτισης έχει τη δυνατότητα να ορίζει το μέγιστο ρεύμα που επιτρέπεται να φορτίσει ένα όχημα, το οποίο μπορεί να είναι μικρότερο από ή ίσο με το ονομαστικό ρεύμα του σταθμού. Με αυτό τον τρόπο ελέγχεται το επίπεδο φόρτισης σε ένα σταθμό προσφέροντας υπηρεσίες διαχείρισης της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων στους εμπλεκόμενους φορείς της ηλεκτροκίνησης (χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων, προμηθευτές ενέργειας, διαχειριστές δικτύου κτλ).

- **GetConfiguration**

Ο διαχειριστής των υποδομών φόρτισης έχει τη δυνατότητα να ζητήσει από ένα σταθμό φόρτισης την τιμή μιας συγκεκριμένης παραμέτρου λειτουργίας.

- **RemoteStartTransaction / RemoteStopTransaction**

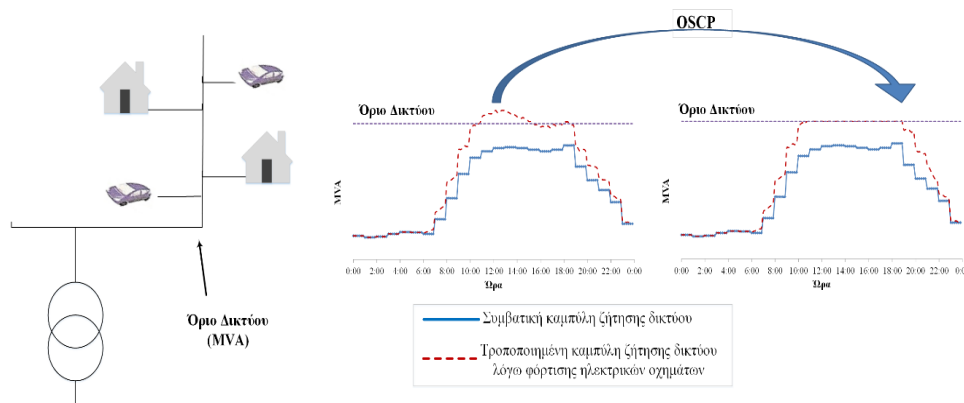
Ο διαχειριστής των υποδομών φόρτισης έχει τη δυνατότητα να ζητήσει από ένα σταθμό φόρτισης την έναρξη ή τον τερματισμό μιας συναλλαγής (Transaction). Ο σταθμός φόρτισης πρέπει να απαντήσει στο μήνυμα αυτό προσδιορίζοντας την επιτυχή ή μη έναρξη/λήξη της συναλλαγής.

### 6.1.3 Πρότυπα διεπαφής Διαχειριστή Δικτύου Διανομής και Διαχειριστή υποδομών φόρτισης

Η υψηλή διεύθυνση των ηλεκτρικών οχημάτων στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς την εφαρμογή κάποιας ευέλικτης στρατηγικής φόρτισης αναμένεται να προκαλέσει σημαντικές διαταραχές στη λειτουργία των δικτύων διανομής, όπως αναλύθηκε εκτενώς στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Ως εκ τούτου, ο Διαχειριστής του Δικτύου θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη του το επιπρόσθετο φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων, βάσει των προβλεπόμενων σεναρίων διεύθυνσης τους, τόσο κατά τον προγραμματισμό της λειτουργίας του δικτύου όσο και κατά τον σχεδιασμό επέκτασης του. Για την αποφυγή πρόωρων επενδύσεων από τον Διαχειριστή του δικτύου διανομής για την εξυπηρέτηση του επιπρόσθετου φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων,

είναι δυνατή η αξιοποίηση της ευελιξίας της φόρτισης τους με σκοπό την αποφυγή παραβιάσεων των λειτουργικών περιορισμών του δικτύου.

Για τον σκοπό αυτό, έχει αναπτυχθεί ένα ανοιχτό πρότυπο ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ Διαχειριστών δικτύων διανομής και Διαχειριστών υποδομών φόρτισης που επιτρέπει την ευέλικτη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων λαμβάνοντας υπόψη τη χωρητικότητα των υφιστάμενων υποδομών των δικτύων διανομής και τις ενεργειακές ανάγκες/περιορισμούς μετακίνησης των ηλεκτρικών οχημάτων. Το πρότυπο αυτό είναι το Open Smart Charging Protocol (OSCP)<sup>4</sup> το οποίο έχει αναπτυχθεί από την ίδια κοινοπραξία που ανέπτυξε το πρωτόκολλο επικοινωνίας OCPP. Η βασική αρχή του προτύπου αυτού απεικονίζεται στην Εικόνα 6-8. Ο Διαχειριστής του δικτύου διανομής επικοινωνεί στον Διαχειριστή των υποδομών φόρτισης την ημερήσια καμπύλη με το ωραία επιπρόσθετο φορτίο που μπορεί να εξυπηρετηθεί από τις υφιστάμενες υποδομές δικτύου, χωρίς να παραβιάζονται οι λειτουργικοί περιορισμοί του, δεδομένης της πρόβλεψης του για το φορτίο του δικτύου. Βάσει αυτής της ημερήσιας καμπύλης φορτίου, ο Διαχειριστής των υποδομών φόρτισης δημιουργεί το αντίστοιχο προφίλ φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων που εξυπηρετεί κατά τον βέλτιστο δυνατό τρόπο τις ενεργειακές ανάγκες τους. Η συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στην ευέλικτη φόρτιση είναι πολύ σημαντική για την αποδοτικότητα (ποσοστό οχημάτων που δεν εξυπηρετήθηκε πλήρως ή η ζήτηση φόρτισης τους) κάθε στρατηγική ευέλικτης φόρτισης, όπως αποδείχθηκε μέσα από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων της Εικόνας 3-37 του κεφαλαίου 3 της παρούσας διατριβής.



Εικόνα 6-8 Πρότυπος προσομοιωτής ηλεκτρικού οχήματος σύμφωνα με το πρότυπο IEC61851

Τα κύρια μηνύματα ανταλλαγής πληροφοριών του προτύπου OSCP είναι δύο:

- *Ικανότητα επιπρόσθετης φόρτισης της γραμμής ενός δικτύου (UpdateCableCapacityForecast):* Με το μήνυμα αυτό ο Διαχειριστής του δικτύου διανομής ενημερώνει τους Διαχειριστές των υποδομών φόρτισης σχετικά με τη δυνατότητα επιπρόσθετης επιβάρυνσης των γραμμών του δικτύου διανομής για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων. Στην περίπτωση ύπαρξης διαφορετικών Διαχειριστών υποδομών φόρτισης, ο Διαχειριστής του δικτύου θα πρέπει να καταναίμει το προβλεπόμενο περιθώριο φόρτισης του δικτύου με τρόπο δίκαιο, αιτιολογημένο και χωρίς διακρίσεις. Η συχνότητα αποστολής του μηνύματος (15 λεπτά, 30 λεπτά, 1 ώρα,... κτλ) αυτού δεν προσδιορίζεται από το πρότυπο OSCP, επομένως ο ορισμός της καθορίζεται κατά περίπτωση.
- *Αναπροσαρμογή της διαθέσιμης χωρητικότητας δικτύου για τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων:* Με το μήνυμα αυτό ο Διαχειριστής των σταθμών φόρτισης μπορεί να ζητήσει επιπρόσθετη διαθέσιμη χωρητικότητα από τον Διαχειριστή του δικτύου ή να προσφέρει το ποσοστό της διαθέσιμης χωρητικότητας που δεν θα αξιοποιηθεί.

<sup>4</sup> <http://www.openchargealliance.org/protocols/oscp/oscp-10/>

## 6.2 Ανάπτυξη πρότυπων υποδομών φόρτισης βάσει IEC61851

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής αναπτύχθηκαν πρότυπες υποδομές φόρτισης σύμφωνα με τις αρχές λειτουργίας και επικοινωνίας όπως αυτές ορίζονται στο IEC61851 που αφορά στην επικοινωνία χαμηλού επιπέδου μεταξύ ηλεκτρικών οχημάτων και σταθμών φόρτισης. Για την εφαρμογή του προτύπου IEC61851 υλοποιήθηκε το ισοδύναμο κύκλωμα, όπως ορίζεται στο IEC61851 και παρουσιάστηκε στην Εικόνα 6-3, που αφορά στη λειτουργία τόσο του ηλεκτρικού οχήματος όσο και στη λειτουργία του σταθμού φόρτισης. Η υλοποίηση και των δύο μερών του IEC61851 εξυπηρετεί τους εξής σκοπούς:

- Ο προσομοιωτής ηλεκτρικού οχήματος κατά IEC61851 παρέχει τη δυνατότητα ελέγχου της συμβατότητας ενός σταθμού φόρτισης με το πρότυπο αυτό καθώς και την επιβεβαίωση της ορθής λειτουργίας του μετά την εγκατάσταση του.
- Ο πρότυπος σταθμός φόρτισης κατά IEC61851 επιτρέπει τη φόρτιση οποιοδήποτε ηλεκτρικού οχήματος.

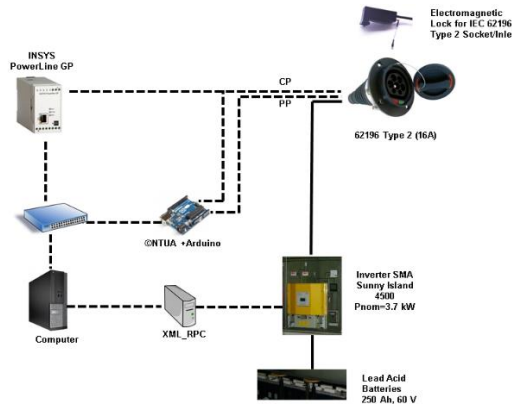
### 6.2.1 Προσομοιωτής ηλεκτρικού οχήματος

Η Εικόνα 6-9 απεικονίζει το σχηματικό διάγραμμα του προσομοιωτή ενός ηλεκτρικού οχήματος που αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία:

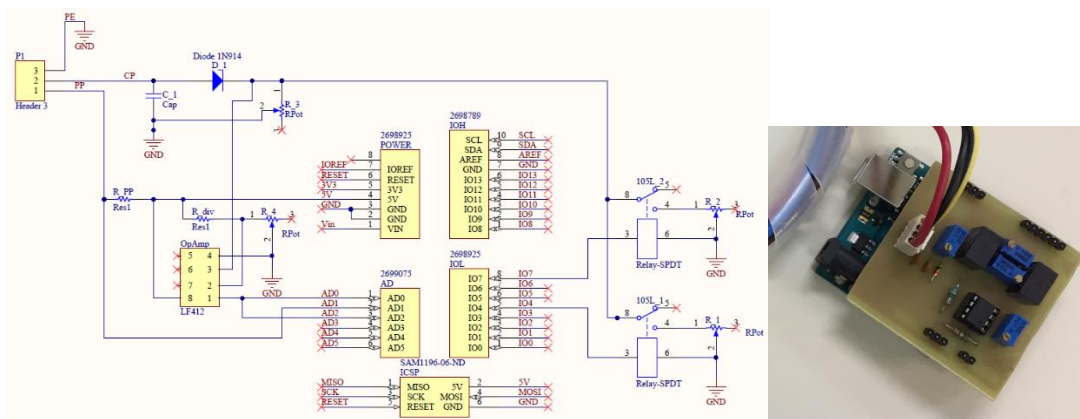
- Ακροδέκτης Τύπου 2 κατά IEC62196 (16A)
- Ηλεκτρομηχανική κλειδαριά για ακροδέκτη Τύπου 2
- Arduino Uno Rev3 για τον έλεγχο των αντιστάσεων R3 και R2, που προσδιορίζουν την κατάσταση λειτουργίας του ηλεκτρικού οχήματος, και για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών του σήματος ελέγχου (συχνότητα και κύκλο λειτουργίας του παλμού)
- Ηλεκτρονικό κύκλωμα ηλεκτρικού οχήματος κατά IEC61851 (Εικόνα 6-10)
- Ηλεκτρονικός Υπολογιστής (H/Y) για την ανάπτυξη ενός γραφικού περιβάλλοντος για την αλλαγή των καταστάσεων λειτουργίας του οχήματος καθώς και για την καταγραφή των μετρήσεων της φόρτισης. Επιπρόσθετα, ο H/Y είναι απαραίτητος και για την υιοθέτηση της επικοινωνίας υψηλού επιπέδου βάσει IEC15118.
- Η μπαταρία του ηλεκτρικού οχήματος προσομοιώθηκε με τον διαθέσιμο εργαστηριακό εξοπλισμό: συστοιχία μπαταριών μολύβδου οξέος 60V, 250Ah και αντιστροφέας SMA Sunny Island 4500 ονομαστικής ισχύος 3.7kW.
- Η επικοινωνία με τον αντιστροφέα για την ανταλλαγή δεδομένων και εντολών πραγματοποιήθηκε μέσω XML\_RPC<sup>5</sup>.
- Η υψηλού επιπέδου επικοινωνία προϋποθέτει την επικοινωνία μέσω του καλωδίου ισχύος (Power Line Communication -PLC). Το INSYS Powerline GP είναι ένα εμπορικό προϊόν της INSYS που επιτρέπει τη μετάδοση πληροφοριών με χρήση δύο τεχνολογιών επικοινωνίας Ethernet και PLC.
- Router: Για τη διασύνδεση και μεταφορά δεδομένων μέσω ethernet μεταξύ των στοιχείων του προσομοιωτή ηλεκτρικού οχήματος.

Για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της λειτουργίας του προσομοιωτή ηλεκτρικών οχημάτων αναπτύχθηκε ένα γραφικό περιβάλλον σε Java (Εικόνα 6-11), το οποίο επιτρέπει την παρακολούθηση των βασικών χαρακτηριστικών του σήματος ελέγχου (συχνότητα, κύκλος λειτουργίας), χωρίς την ανάγκη χρήσης παλμογράφου, την αναγνώριση του ονομαστικού ρεύματος του καλωδίου σύνδεσης. Τέλος, μέσω του γραφικού περιβάλλοντος είναι δυνατή η σύνδεση/αποσύνδεση αντιστάσεων που καθορίζουν την αλλαγή κατάστασης ενός ηλεκτρικού οχήματος.

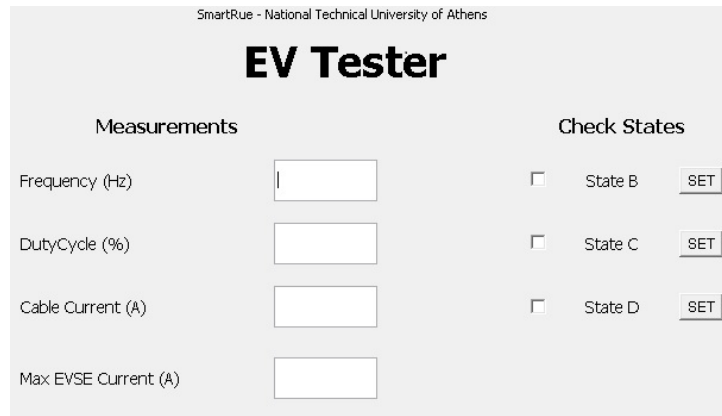
<sup>5</sup> <http://xmlrpc.scripting.com/>



Εικόνα 6-9 Πρότυπος προσομοιωτής ηλεκτρικού οχήματος σύμφωνα με το πρότυπο IEC61851



Εικόνα 6-10 Κατασκευή κυκλώματος ηλεκτρικού οχήματος κατά IEC61581



Εικόνα 6-11 Γραφικό περιβάλλον ελέγχου λειτουργίας του προσομοιωτή ηλεκτρικού οχήματος

Υπάρχουν διαφορετικά εμπορικά διαθέσιμα προϊόντα που προσομοιώνουν τη λειτουργία των ηλεκτρικών οχημάτων (EV tester) με σκοπό τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας ενός σταθμού φόρτισης κατά την εγκατάσταση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου εξοπλισμού είναι ο προσομοιωτής ηλεκτρικού οχήματος της Walther που απεικονίζεται στην Εικόνα 6-12. Τα πλεονεκτήματα της προτεινόμενης κατασκευής συγκριτικά με το εμπορικό προϊόν της Walther είναι το χαμηλό κόστος κατασκευής (κόστος προτεινόμενης κατασκευής με καλώδιο φόρτισης μικρότερο από 150€, κόστος προϊόντος Walther 480€, 4/2015) και η δυνατότητα καταγραφής μετρήσεων στον Η/Υ για τη δημιουργία μιας αναφοράς για τη συμβατότητα ενός σταθμού φόρτισης με το πρότυπο IEC61851.



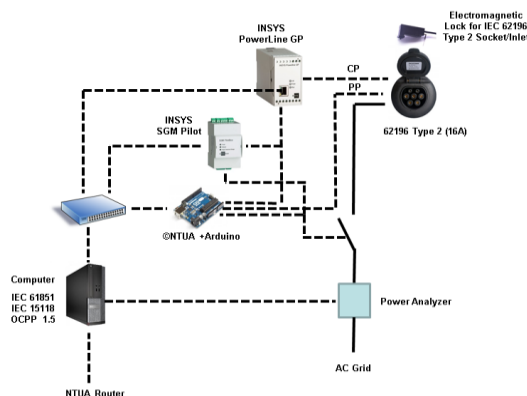
Εικόνα 6-12 Εμπορικός προσομοιωτής οχήματος

## 6.2.2 Πρότυπος σταθμός φόρτισης

Η Εικόνα 6-13 απεικονίζει το σχηματικό διάγραμμα του πρότυπου σταθμού φόρτισης που αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία:

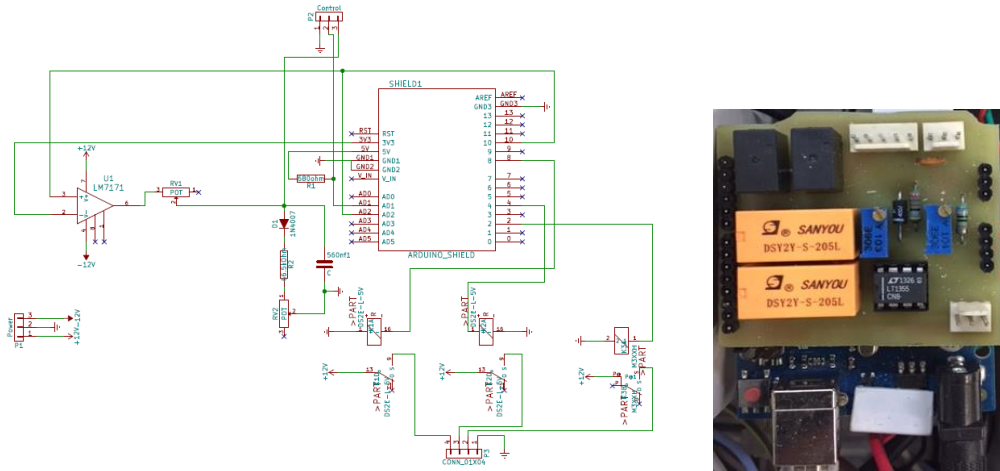
- Ακροδέκτης Τύπου 2 κατά IEC62196 (16A)
- Ηλεκτρομηχανική κλειδαριά για ακροδέκτη Τύπου 2
- Arduino Uno Rev3 για την παραγωγή και τη διαμόρφωση του παλμικού σήματος ελέγχου, τη μέτρηση της τάσης στο σημείο  $V_a$  (Εικόνα 6-3) και την αναγνώριση του καλωδίου φόρτισης.
- Ηλεκτρονικό κύκλωμα σταθμού φόρτισης κατά IEC61851 (Εικόνα 6-14)
- Ηλεκτρονικός Υπολογιστής (H/Y) για την ανάπτυξη ενός γραφικού περιβάλλοντος (Εικόνα 6-15) στο οποίο αναγράφονται τα χαρακτηριστικά του σήματος ελέγχου, το ονομαστικό ρεύμα του καλωδίου φόρτισης και η κατάσταση λειτουργίας του σταθμού βάσει του προτύπου IEC61851 (state machine). Επιπρόσθετα, ο H/Y είναι απαραίτητος και για την υιοθέτηση του πρωτοκόλλου επικοινωνίας OCPP που θα αναλυθεί εκτενέστερα στην επόμενη παράγραφο.
- INSYS SGM Pilot: είναι ένα εμπορικό προϊόν της INSYS για την παραγωγή του σήματος ελέγχου από έναν σταθμό φόρτισης
- Η υψηλού επιπέδου επικοινωνία προϋποθέτει την επικοινωνία μέσω του καλωδίου ισχύος (Power Line Communication -PLC). Το INSYS Powerline GP είναι ένα εμπορικό προϊόν της INSYS που επιτρέπει την μετάδοση πληροφοριών με χρήση δύο τεχνολογιών επικοινωνίας Ethernet και PLC.
- Router: Για τη διασύνδεση και μεταφορά δεδομένων μέσω ethernet μεταξύ των στοιχείων του προσομοιωτή ηλεκτρικού οχήματος.
- Διακόπτης που επιτρέπει τη ροή ενέργειας από το δίκτυο προς το ηλεκτρικό όχημα.
- Ηλεκτρονικός μετρητής για την παρακολούθηση της τάσης και του ρεύματος της φόρτισης

Η Εικόνα 6-16 απεικονίζει την τελική κατασκευή του σταθμού φόρτισης.

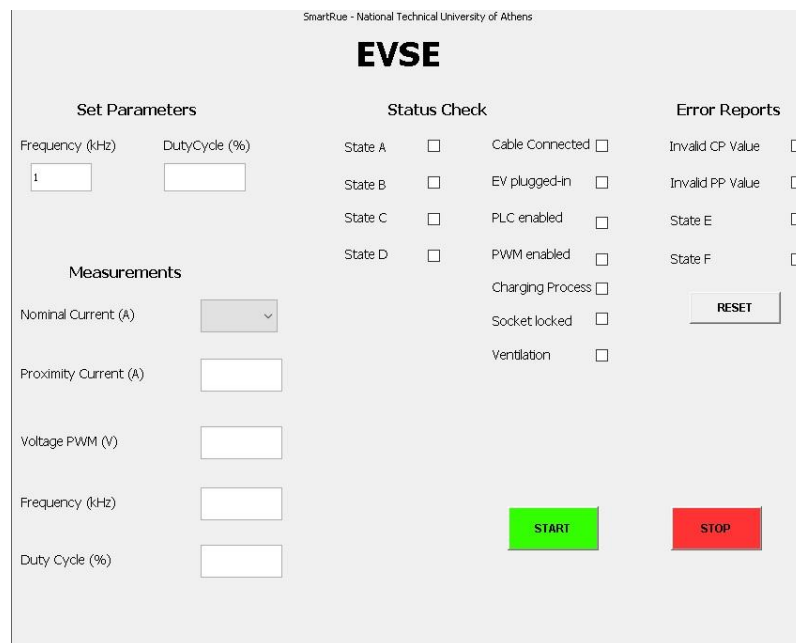


Εικόνα 6-13 Σχηματικό διάγραμμα σταθμού φόρτισης σύμφωνα με το πρότυπο IEC61851





Εικόνα 6-14 Κατασκευή κυκλώματος ηλεκτρικού οχήματος σύμφωνα με το πρότυπο IEC61851



Εικόνα 6-15 Γραφικό περιβάλλον παρακολούθησης και ελέγχου της λειτουργίας του σταθμού φόρτισης



Εικόνα 6-16 Πρότυπος σταθμός φόρτισης σύμφωνα με το πρότυπο IEC61851

Ο σταθμός φόρτισης που κατασκευάστηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής εξετάστηκε στο ερευνητικό κέντρο JRC της ΕΕ στην Ispra, Ιταλία. Στο ερευνητικό αυτό κέντρο έχει αναπτυχθεί ένας πιστοποιημένος εξοπλισμός για τον έλεγχο της συμβατότητας των σταθμών

φόρτιση με το πρότυπο IEC61851. Ο σταθμός φόρτισης πέρασε επιτυχώς όλα τις δοκιμές συμβατότητας που έγιναν από τον πιστοποιημένο εξοπλισμό του ερευνητικού κέντρου. Στην παρουσιάζεται το «πιστοποιητικό» επιτυχούς διεκπεραίωσης των δοκιμών συμβατότητας (με πράσινο χρώμα επισημαίνονται οι επιτυχημένες δοκιμές συμβατότητας), ενώ στο Παράρτημα Β απεικονίζονται με λεπτομέρεια τα αποτελέσματα των δοκιμών.



Εικόνα 6-17 Πρότυπος σταθμός φόρτισης σύμφωνα με το πρότυπο IEC61851

## 6.2.3 Πιλοτικές Εφαρμογές εξοπλισμού ηλεκτροκίνησης

### 6.2.3.1 Προσομοιωτής ηλεκτρικού οχήματος

Με τον προσομοιωτή ηλεκτρικού οχήματος εξετάστηκαν συνολικά 26 διαφορετικοί φορτιστές που ήταν διαθέσιμοι στις εγκαταστάσεις της JRC στην Ispra της Ιταλίας. Συνολικά 16 διαφορετικές διαδικασίες που εκτελέστηκαν σχεδόν σε κάθε σταθμό φόρτισης και οι οποίες περιγράφονται στη συνέχεια:

- C. 01: Φόρτιση σύμφωνα με IEC61851
- C. 02: Φόρτιση σύμφωνα με IEC61851 και απαίτηση λειτουργίας εξαερισμού
- C. 03: Φόρτιση σύμφωνα με IEC61851 και διακοπή της από τον χρήστη μέσω του σταθμού φόρτισης
- C. 04: Φόρτιση σύμφωνα με IEC61851 και διακοπή της αποσυνδέοντας το καλώδιο
- C. 05: Φόρτιση σύμφωνα με IEC61851 και έναρξη της φόρτισης με συνδεδεμένο καλώδιο
- C. 06: Φόρτιση σύμφωνα με IEC61851 ανοίγοντας και κλείνοντας το διακόπτη S2
- C. 101: Αναγνώριση καλωδίου 13A
- C. 102: Αναγνώριση καλωδίου 20A
- C. 103: Αναγνώριση καλωδίου 32A
- C. 104: Αναγνώριση καλωδίου 63A
- C. 105: Σφάλμα «E» διακοπής παροχής από το δίκτυο, η φόρτιση σταματά
- C. 106: Σφάλμα «E» βραχυκύκλωμα μεταξύ αγωγού σήματος ελέγχου και αγωγού γείωσης, η φόρτιση σταματά
- C. 107: Σφάλμα «F», αρνητικό τιμή στο σήμα ελέγχου, η φόρτιση σταματά
- C. 108: Αποσύνδεση αγωγού σήματος ελέγχου, η φόρτιση σταματά

- C. 109: Αποσύνδεση αγωγού αναγνώρισης καλωδίου φόρτισης, δεν επηρεάζει τη φόρτιση  
 C. 110: Αποσύνδεση αγωγού τάσης αναφοράς (γείωσης), η φόρτιση σταματά.

Ο Πίνακας 6-5 συνοψίζει τα αποτελέσματα των δοκιμών με χρήση του προτεινόμενου προσομοιωτή ηλεκτρικού οχήματος. Στις δοκιμές αυτές συμμετείχαν παράλληλα και ερευνητικά εργαστήρια άλλων Ευρωπαϊκών χωρών με εμπορικούς ή μη προσομοιωτές ηλεκτρικών οχημάτων, οπότε τα αποτελέσματα των επιμέρους δοκιμών κάθε ερευνητικής ομάδας συγκρίθηκαν με το σύνολο των δοκιμών για την εγκυρότητα τους. Για λόγους εμπιστευτικότητας, δεν εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα οι κατασκευάστριες εταιρείες. Με πράσινο χρώμα υποδεικνύονται οι δοκιμές τις οποίες πέρασε επιτυχώς κάθε σταθμός, ενώ αντίθετα με κόκκινο χρώμα υποδεικνύονται οι ανεπιτυχείς δοκιμές. Με γκρι χρώμα αναφέρονται οι δοκιμές που δεν πραγματοποιήθηκαν είτε λόγω ύπαρξης διαφορετικών ακροδεκτών στον σταθμό (κατά το πρότυπο SAE) είτε για άλλους λόγους. Η ύπαρξη ενός σημαντικού αριθμού κόκκινων κελιών αποδεικνύει ότι υπάρχουν ζητήματα διαλειτουργικότητας σε ορισμένες περιπτώσεις.

**Πίνακας 6-5 Αποτελέσματα δοκιμών διαθέσιμων σταθμών φόρτισης στο ερευνητικό κέντρο JRC (Ispra, Ιταλία) – Cotevos project<sup>6</sup>**

Δοκιμή Σταθμοί φόρτισης	C.01	C.02	C.03	C.04	C.05	C.06	C.101	C.102	C.103	C.104	C.105	C.106	C.107	C.108	C.109	C.110
EVSE.1	OK	Failed	Failed	Failed	Failed	OK	Not performed	Not performed	Not performed	Not performed	Failed	Not performed	Failed	Not performed	Not performed	Not performed
EVSE.2	OK	Failed	Failed	Failed	Failed	OK	Not performed	Not performed	Not performed	Not performed	Failed	Not performed	Failed	Not performed	Not performed	Not performed
EVSE.3	OK	Failed	Failed	Failed	Failed	OK	Not performed	Not performed	Not performed	Not performed	Failed	Not performed	Failed	Not performed	Not performed	Not performed
EVSE.4	OK	OK	Failed	Failed	Failed	OK	Not performed	Not performed	Not performed	Not performed	Failed	OK	Failed	OK	Failed	OK
EVSE.5	OK	OK	Failed	Failed	Failed	OK	Not performed	Not performed	Not performed	Not performed	Failed	Not performed	Failed	Not performed	Not performed	Not performed
EVSE.6	OK	Failed	Failed	Failed	Failed	OK	Not performed	Not performed	Not performed	Not performed	Failed	OK	Failed	OK	Failed	OK
EVSE.7	OK	Failed	Failed	Failed	Failed	OK	Not performed	Not performed	Not performed	Not performed	Failed	OK	Failed	OK	Failed	OK
EVSE.8	OK	Failed	Failed	Failed	Failed	OK	Not performed	Not performed	Not performed	Not performed	Failed	Not performed	Failed	Not performed	Not performed	Not performed
EVSE.9	OK	Failed	Failed	Failed	Failed	OK	Not performed	Not performed	Not performed	Not performed	Failed	Not performed	Failed	Not performed	Not performed	Not performed
EVSE.10	OK	OK	Failed	Failed	Failed	OK	Not performed	Not performed	Not performed	Not performed	Failed	Not performed	Failed	Not performed	Not performed	Not performed
EVSE.11	OK	Not performed	Not performed	Not performed	Not performed	OK	Not performed	Not performed	Not performed	Not performed	Failed	OK	Failed	OK	Failed	OK
EVSE.12	OK	Not performed	Not performed	Not performed	Not performed	OK	Not performed	Not performed	Not performed	Not performed	Failed	OK	Failed	OK	Failed	OK
EVSE.13	OK	Failed	Failed	Failed	Failed	OK	Not performed	Not performed	Not performed	Not performed	Failed	Not performed	Failed	Not performed	Not performed	Not performed
EVSE.14	OK	Failed	Failed	Failed	Failed	OK	Failed	Not performed	Not performed	Not performed	Failed	OK	Failed	OK	Failed	OK
EVSE.15	OK	Failed	Failed	Failed	Failed	OK	Failed	Not performed	Not performed	Not performed	Failed	Not performed	Failed	Not performed	Not performed	Not performed
EVSE.16	OK	Failed	Failed	Failed	Failed	OK	Not performed	Not performed	Not performed	Not performed	Failed	Not performed	Failed	Not performed	Not performed	Not performed
EVSE.17	OK	OK	Failed	Failed	Failed	OK	Not performed	Not performed	Not performed	Not performed	Failed	Not performed	Failed	Not performed	Not performed	Not performed
EVSE.18	OK	OK	Failed	Failed	Failed	OK	Not performed	Not performed	Not performed	Not performed	Failed	Not performed	Failed	Not performed	Not performed	Not performed
EVSE.19	OK	OK	Failed	Failed	Failed	OK	Not performed	Not performed	Not performed	Not performed	Failed	Not performed	Failed	Not performed	Not performed	Not performed
EVSE.20	OK	Not performed	Not performed	Not performed	Not performed	OK	Not performed	Not performed	Not performed	Not performed	Failed	Not performed	Failed	Not performed	Not performed	Not performed
EVSE.21	OK	Not performed	Not performed	Not performed	Not performed	OK	Failed	Not performed	Not performed	Not performed	Failed	Not performed	Failed	Not performed	Not performed	Not performed
EVSE.22	OK	Not performed	Not performed	Not performed	Not performed	OK	Failed	Not performed	Not performed	Not performed	Failed	Not performed	Failed	Not performed	Not performed	Not performed
EVSE.23	OK	Not performed	Not performed	Not performed	Not performed	OK	Failed	Not performed	Not performed	Not performed	Failed	Not performed	Failed	Not performed	Not performed	Not performed
EVSE.24	OK	Not performed	Not performed	Not performed	Not performed	OK	Failed	Not performed	Not performed	Not performed	Failed	Not performed	Failed	Not performed	Not performed	Not performed
EVSE.25	OK	Not performed	Not performed	Not performed	Not performed	OK	Not performed	Not performed	Not performed	Not performed	Failed	OK	Failed	OK	Failed	OK
EVSE.26	OK	Not performed	Not performed	Not performed	Not performed	OK	Not performed	Not performed	Not performed	Not performed	Failed	Not performed	Failed	Not performed	Not performed	Not performed

Not performed due to mismatching plugs or other issues  
 OK  
 Failed

<sup>6</sup> <http://cotevos.eu/>

### 6.2.3.2 Πρότυπος σταθμός φόρτισης

Με τον πρότυπο σταθμό φόρτισης που αναπτύχθηκε στην παρούσα διδακτορική διατριβή εξετάστηκαν διαφορετικοί τύποι ηλεκτρικών οχημάτων (N1, M1 και ηλεκτρική μηχανή) που ήταν διαθέσιμοι στις εγκαταστάσεις της JRC στην Ispra της Ιταλίας. Ενδεικτικά αποτελέσματα των δοκιμών συμβατότητας εμπορικών ηλεκτρικών οχημάτων στο πρότυπο IEC61851 παρουσιάζονται στο Παράρτημα Γ. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών αποδείχθηκε, όπως ήταν αναμενόμενο, ότι τα εξεταζόμενα ηλεκτρικά οχήματα είναι πλήρως συμβατά με το πρότυπο IEC61851, όσον αφορά στον κύκλο φόρτισης τους υπό ομαλές συνθήκες, δηλαδή τιμές συχνότητας σήματος ελέγχου εντός προβλεπόμενων ορίων και αδιάλειπτης λειτουργίας του σταθμού. Αντίθετα, στην περίπτωση όπου η συχνότητα του πιλοτικού σήματος δεν είναι εντός προβλεπόμενων ορίων, η συμπεριφορά τους διαφοροποιείται ανά όχημα: στη μια περίπτωση, η φόρτιση διακόπτεται και η λειτουργική κατάσταση του σταθμού φόρτισης μεταβάλλεται από C2 σε B2 μέχρι την επαναφορά της συχνότητας εντός επιτρεπτών ορίων, ενώ στην άλλη περίπτωση, η φόρτιση δεν διακόπτεται. Στη δοκιμή με τη διακοπή της παροχής ισχύος από τον σταθμό φόρτισης με το άνοιγμα του AC ρελέ του σταθμού φόρτισης, όλα τα ηλεκτρικά οχήματα διέκοψαν τη φόρτιση τους, ενώ η επανεκκίνηση της φόρτισης απαιτούσε την αποσύνδεση και επανασύνδεση του καλωδίου φόρτισης.

## 6.3 Πλατφόρμα διαχείρισης υποδομών φόρτισης

Η ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς την υιοθέτηση κάποιας στρατηγικής φόρτισης μπορεί να προκαλέσει σημαντικά προβλήματα στη λειτουργία των δικτύων διανομής. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή προτάθηκαν διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης που επιτρέπουν την ομαλή και αποδοτικότερη ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων. Ωστόσο, η υιοθέτηση οποιασδήποτε στρατηγικής φόρτισης προϋποθέτει την ανάπτυξη ενός συστήματος διαχείρισης των σταθμών φόρτισης που επιτρέπει την επικοινωνία και την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ ενός κεντρικού διαχειριστή και των ηλεκτρικών οχημάτων/ χρηστών.

Στην παρούσα διδακτορική διατριβή αναπτύχθηκε ένα πρότυπο σύστημα διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων που επιτρέπει την παρακολούθηση της λειτουργίας των σταθμών φόρτισης, την επικοινωνία με το χρήστη καθώς και τη διαχείριση των σταθμών φόρτισης για την παροχή υπηρεσιών διαχείρισης φορτίου. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται η ανάπτυξη και η λειτουργία του συστήματος διαχείρισης.

### 6.3.1 Εμπλεκόμενοι φορείς ηλεκτροκίνησης

Στην ενότητα αυτή προσδιορίζονται οι φορείς ηλεκτροκίνησης που έχουν ενεργό ρόλο στο προτεινόμενο σύστημα διαχείρισης και στη συνέχεια επεξηγούνται οι αρμοδιότητες τους.

- *Πάροχος Υπηρεσιών Ηλεκτροκίνησης*

Είναι το νομικό πρόσωπο που είναι αρμόδιο για την εμπορική διαχείριση του σταθμού φόρτισης. Ο πάροχος υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης είναι υπεύθυνος για την προμήθεια της ενέργειας είτε από την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας είτε από κάποιον προμηθευτή, ανάλογα με το εκάστοτε ρυθμιστικό πλαίσιο. Ο πάροχος υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης είναι ο ενδιάμεσος φορέας ηλεκτροκίνησης μεταξύ χρηστών ηλεκτρικών οχημάτων και αγοράς ενέργειας. Είναι υπεύθυνος για τον καθορισμό της τιμολογιακής πολιτικής της ενέργειας φόρτισης καθώς και για την παροχή υπηρεσιών προς τον χρήστη (πλοήγηση, πιστοποίηση, ενημέρωση τιμολογιακής πολιτικής, προσβασιμότητα σε τρίτα δίκτυα υποδομών φόρτισης κτλ).

- *Διαχειριστής Υποδομών Φόρτισης*

Είναι το νομικό πρόσωπο που είναι αρμόδιο για την τεχνική διαχείριση του σταθμού φόρτισης. Ο διαχειριστής του δικτύου έχει τη δυνατότητα άμεσης επικοινωνίας και ανταλλαγής πληροφοριών

με τον σταθμό. Επιπρόσθετα, έχει τη δυνατότητα μεταβολής του επιπέδου φόρτισης ενός ηλεκτρικού οχήματος, καθορίζοντας το μέγιστο ρεύμα φόρτισης του σταθμού, για την παροχή επικουρικών υπηρεσιών σε τρίτους (π.χ. διαχειριστή δικτύου, προμηθευτές ενέργειας κτλ). Με τον τρόπο αυτό ο διαχειριστής των σταθμών φόρτισης μπορεί να παρέχει υπηρεσίες διαχείρισης φορτίου για την υιοθέτηση ευέλικτων στρατηγικών φόρτισης.

- *Χρήστης ηλεκτρικού οχήματος*

Ο χρήστης ηλεκτρικού οχήματος μπορεί να είναι ο ιδιοκτήτης του οχήματος ή ο ενοικιαστής του. Κύρια ανησυχία των (νέων) χρηστών ηλεκτρικών οχημάτων είναι η επάρκεια του δικτύου υποδομών φόρτισης μιας και τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν περιορισμένη αυτονομία συγκριτικά με τα συμβατικά οχήματα. Συνήθως, η καταναλωθείσα ενέργεια της μπαταρίας κατά τη διάρκεια της ημέρας ανακτάται με την οικιακή φόρτιση τις βραδινές ώρες. Ωστόσο, σε ορισμένες περιπτώσεις (π.χ. ταξί, διανομείς κτλ) η οικιακή φόρτιση δεν επαρκεί για να καλύψει τις αυξημένες ημερήσιες ενεργειακές ανάγκες μετακίνησης. Ως εκ τούτου είναι απαραίτητη η ανάπτυξη ενός επαρκούς δικτύου ηλεκτροκίνησης για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων κατά τη διάρκεια της ημέρας. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό για έναν χρήστη να είναι ενήμερος για την θέση των υποδομών φόρτισης αλλά και τη διαθεσιμότητα τους έτσι ώστε να μπορεί να προγραμματίζει τη βέλτιστη κατά προτίμηση διαδρομή με στάση για φόρτιση προς τον προορισμό του. Επιπρόσθετα, η γνώση των τιμολογιακών πολιτικών (ορισμός τιμολογιακών ζωνών είτε χρήση δυναμικής τιμολόγησης) δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη για τον προγραμματισμό της φόρτισης του τις ώρες με χαμηλή χρέωση.

- *Διαχειριστής δικτύου διανομής*

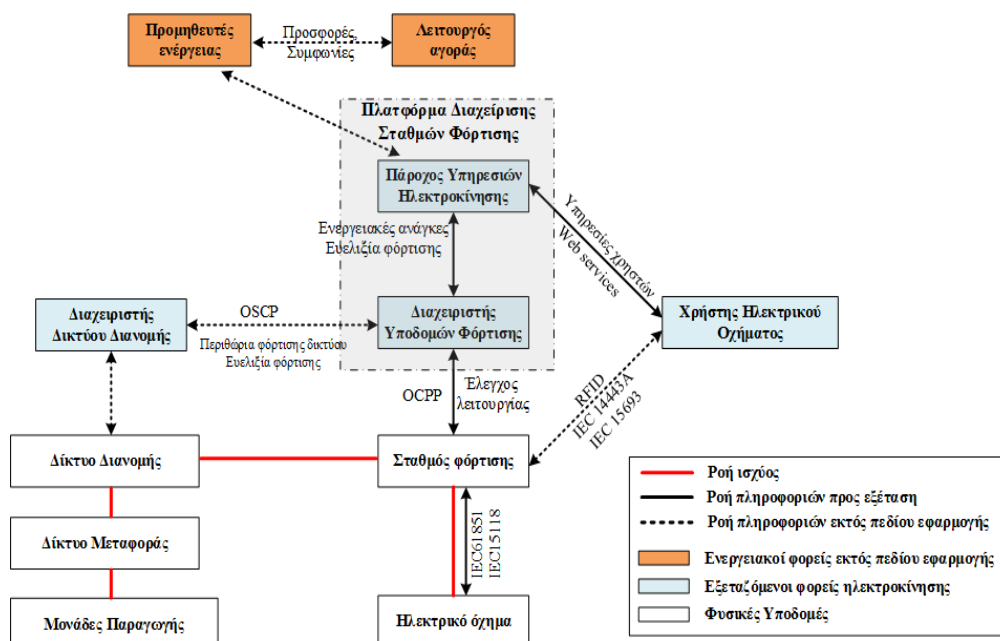
Ο Διαχειριστής του Δικτύου Διανομής είναι υπεύθυνος για τον προγραμματισμό και τη λειτουργία του δικτύου διανομής. Ο Διαχειριστής θα πρέπει να διασφαλίζει αμερόληπτα τη διασύνδεση των υποδομών φόρτισης στο δίκτυο και να προβαίνει στις απαραίτητες αναβαθμίσεις δικτύου, όποτε αυτό απαιτείται, για τη διασφάλιση της ασφαλούς και αξιόπιστης λειτουργίας του. Επιπρόσθετα, ο διαχειριστής του δικτύου είναι υπεύθυνος και για τη μέτρηση της ενέργειας φόρτισης στα σημεία διασύνδεσης του σταθμού με το δίκτυο.

Στο σενάριο μαζικής διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων, το επιπρόσθετο φορτίο τους μπορεί να διαταράξει την ομαλή λειτουργία του δικτύου, όπως αποδείχθηκε στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας διδακτορικής διατριβής. Στην περίπτωση αυτή, ο διαχειριστής του δικτύου δύναται να ζητήσει τη συνδρομή του Διαχειριστή των υποδομών φόρτισης για τον περιορισμό της ζήτησης φόρτισης σε μια περιοχή του δικτύου διανομής. Για την προσφορά επικουρικών υπηρεσιών από τον Διαχειριστή των σταθμών φόρτισης προς τον Διαχειριστή του δικτύου υπάρχει το πρωτόκολλο επικοινωνίας Open Smart Charging Protocol (OSCP)<sup>7</sup>, σύμφωνα με το οποίο ο Διαχειριστής του δικτύου παρέχει στον διαχειριστή των υποδομών φόρτισης δεδομένα για τα περιθώρια επιπρόσθετης φόρτισης του δικτύου. Βάσει των περιθωρίων αυτών καθώς και των ενεργειακών αναγκών των χρηστών ηλεκτρικών οχημάτων ο διαχειριστής μπορεί να μεταβάλλει το επίπεδο φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων.

### 6.3.2 Εννοιολογική αρχιτεκτονική συστήματος διαχείρισης υποδομών φόρτισης

Στην προηγούμενη ενότητα προσδιορίστηκαν οι άμεσα εμπλεκόμενοι φορείς της ηλεκτροκίνησης και αναλύθηκαν οι αρμοδιότητες τους. Στην ενότητα αυτή περιγράφονται η εννοιολογική αρχιτεκτονική του συστήματος διαχείρισης και προσδιορίζονται τα μονοπάτια ανταλλαγής πληροφοριών και τα αντίστοιχα πρότυπα/πρωτόκολλα επικοινωνίας μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων (Εικόνα 6-18).

<sup>7</sup> <http://www.openchargealliance.org/protocols/oscp/oscp-10/>



Εικόνα 6-18 Εννοιολογική αρχιτεκτονική συστήματος διαχείρισης υποδομών φόρτισης

- Πάροχος Υπηρεσιών Ηλεκτροκίνησης – Χρήστη ηλεκτρικού οχήματος: Αμφίδρομη επικοινωνία μέσω web services
- Διαχειριστή υποδομών φόρτισης – Σταθμός φόρτισης: Αμφίδρομη επικοινωνία με εφαρμογή του OCPP.
- Πάροχος υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης – Διαχειριστή υποδομών φόρτισης: Η πλατφόρμα διαχείρισης αναπτύχθηκε υιοθετώντας τις αρχές του μοντέλου της «Ανεξάρτητης αγοράς» όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 1, της παρούσας διατριβής. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, ο πάροχος υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης και ο διαχειριστής των υποδομών φόρτισης εκφυλίζονται σε μια οντότητα. Επομένως, η πλατφόρμα διαχείρισης που αναπτύχθηκε στην παρούσα διδακτορική διατριβή παρέχει τις υπηρεσίες και λειτουργίες που αφορούν και στους δύο παραπάνω φορείς ηλεκτροκίνησης. Στην αντίθετη περίπτωση, που οι δύο αυτοί φορείς ηλεκτροκίνησης είναι ανεξάρτητες οντότητες (μοντέλο «ολοκληρωμένων υποδομών φόρτισης»), η προτεινόμενη αρχιτεκτονική υιοθετείται με το διαχωρισμό των αντίστοιχων υπηρεσιών και λειτουργιών τους.

Στη συνέχεια περιγράφονται οι υπηρεσίες που προσφέρονται μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων ηλεκτροκίνησης οι οποίες κατατάσσονται σε τρεις γενικές κατηγορίες:

- *Υπηρεσίες ενημέρωσης χρηστών* που αφορά στις υπηρεσίες που προσφέρονται στους χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων, δηλαδή τοπολογία δικτύου υποδομών φόρτισης, διαθεσιμότητα σταθμών, κόστος ενέργειας κτλ. Οι πληροφορίες αυτές είναι σημαντικές καθώς ο χρήστης βάσει των ενεργειακών αναγκών μετακίνησης του μπορεί να επιλέξει τη διαδρομή προς τον προορισμό του συμπεριλαμβανομένης μιας ενδιάμεσης φόρτισης. Οι παραπάνω υπηρεσίες προσφέρονται στους χρήστες υπό τη μορφή web services.
- *Υπηρεσίες διαχείρισης* που αφορά στην παρακολούθηση της λειτουργίας όταν ο σταθμός είναι αδρανής για τον συγχρονισμό του καθώς και κατά τη διάρκεια της φόρτισης για την καταγραφή της κατανάλωσης. Επίσης, ο διαχειριστής των υποδομών φόρτισης δύναται να μεταβάλλει το μέγιστο ρεύμα του σταθμού, δηλαδή να μεταβάλλει το

επίπεδο ισχύος της φόρτισης βάσει των απαιτήσεων της ευέλικτης φόρτισης. Για τις υπηρεσίες διαχείρισης υιοθετείται το πρωτόκολλο OCPP.

- *Υπηρεσίες απόφασης* που αφορά στη λήψη αποφάσεων σχετικά με την τιμολογιακή πολιτική που θα υιοθετηθεί (πχ. τιμολόγιο πολλαπλών ζωνών, δυναμική τιμολόγηση κτλ), τη διαχείριση των αιτημάτων κράτησης των σταθμών φόρτισης καθώς και την παροχή επικουρικών υπηρεσιών προς τρίτους φορείς (π.χ. προμηθευτές ενέργειας, Διαχειριστές Δικτύων κτλ). Η επιλογή ης ευέλικτης στρατηγικής φόρτισης καθορίζεται βάσει των αναγκών/περιορισμών των χρηστών και της λειτουργίας των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας/αγοράς ενέργειας.

### 6.3.3 Απαιτήσεις χρηστών και συστήματος

Στην ενότητα αυτή προσδιορίζονται οι απαιτήσεις των χρηστών (user requirements) και του συστήματος (system requirements) που αποτελούν τη βάση για τον σχεδιασμό της πλατφόρμας διαχείρισης.

- ✓ *Απαιτήσεις Χρηστών:* Αντικατοπτρίζουν τις ανάγκες των χρηστών και καθορίζουν τις λειτουργίες που πρέπει να εκτελεί κάθε συμμετέχοντας. Οι ανάγκες των συμμετεχόντων στην πλατφόρμα μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να είναι αντικρουόμενες. Για παράδειγμα, η ταυτόχρονη φόρτιση ενός μεγάλου αριθμού ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να διαταράξει την ομαλή λειτουργία του δικτύου διανομής. Σε αυτή την περίπτωση, ο διαχειριστής δικτύου θα ζητήσει/απαιτήσει την μείωση της κατανάλωσης ώστε να διατηρηθεί η ασφαλής και ομαλή λειτουργία του δικτύου. Στην περίπτωση αυτή, η πλατφόρμα διαχείρισης των σταθμών φόρτισης πρέπει να καθορίσει το προφίλ φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων εξισορροπώντας τις ανάγκες μετακίνησης των χρηστών ηλεκτρικών οχημάτων και τους περιορισμούς του δικτύου διανομής.
- ✓ *Απαιτήσεις συστήματος:* Αντικατοπτρίζουν τις λειτουργικές και μη λειτουργικές απαιτήσεις της πλατφόρμας διαχείρισης. Οι λειτουργικές απαιτήσεις καθορίζουν τις τεχνικές ανάγκες για την εκτέλεση της εκάστοτε λειτουργίας ή για την επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών συμμετεχόντων. Οι μη λειτουργικές απαιτήσεις αναφέρονται σε ζητήματα διαλειτουργικότητας, επεκτασιμότητας κτλ. Επιπρόσθετα, οι απαιτήσεις του συστήματος κατατάσσονται σε *απαραίτητες* για την αρχική υλοποίηση και *προαιρετικές* που μπορούν να υιοθετηθούν σε μελλοντικές επεκτάσεις της πλατφόρμας.

#### 6.3.3.1 Απαιτήσεις Χρηστών

Πίνακας 6-6 Απαιτήσεις Χρηστών AX-1

<i>Αίτημα μεταβολής ζήτησης από τρίτους ενεργειακούς φορείς</i>	
<i>Απαίτηση#</i>	AX-1
<i>Περιγραφή</i>	Θα πρέπει να δίνεται η δυνατότητα αιτήματος σε διαφορετικούς ενεργειακούς φορείς (προμηθευτές, διαχειριστές συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας κτλ) για μεταβολή της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων για την εξυπηρέτηση των εκάστοτε αναγκών τους

**Πίνακας 6-7 Απαιτήσεις Χρηστών AX-2**

<i>Απομακρυσμένη παρακολούθηση υποδομών φόρτισης</i>	
<b>Απαίτηση#</b>	<b>AX-2</b>
<b>Περιγραφή</b>	Ο διαχειριστής των σταθμών φόρτισης θα πρέπει να μπορεί να παρακολουθεί τη λειτουργία των υποδομών φόρτισης και να συλλέγει απομακρυσμένα τα λειτουργικά δεδομένα του σταθμού (στοιχεία συγχρονισμού, σφάλματα λειτουργίας κτλ) και της φόρτισης (τάση, ρεύμα, κατανάλωση, επίπεδο φόρτισης, χρονική διάρκεια κτλ).

**Πίνακας 6-8 Απαιτήσεις Χρηστών AX-3**

<i>Ο διαχειριστής του σταθμού φόρτισης θα πρέπει να αποθηκεύει τα δεδομένα κατανάλωσης σε μια βάση δεδομένων</i>	
<b>Απαίτηση#</b>	<b>AX-3</b>
<b>Περιγραφή</b>	Τα δεδομένα από την παρακολούθηση της λειτουργίας των υποδομών φόρτισης αποθηκεύονται σε μια κεντρική βάση δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά είναι απαραίτητα για την τιμολόγηση της φόρτισης καθώς και για την απεικόνιση της διαθεσιμότητας του δικτύου υποδομών φόρτισης.

**Πίνακας 6-9 Απαιτήσεις Χρηστών AX-4**

<i>Απομακρυσμένος έλεγχος των υποδομών φόρτισης από τον διαχειριστή των σταθμών φόρτισης</i>	
<b>Απαίτηση#</b>	<b>AX-4</b>
<b>Περιγραφή</b>	Ο διαχειριστής του δικτύου θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα απομακρυσμένου ελέγχου του σταθμού για τον συγχρονισμό του, την αναβάθμιση του λογισμικού του και τη μεταβολή του μέγιστου ρεύματος φόρτισης για την παροχή υπηρεσιών διαχείρισης της ζήτησης.

**Πίνακας 6-10 Απαιτήσεις Χρηστών AX-5**

<i>Δυνατότητα εφαρμογής διαφορετικής τιμολογιακής πολιτικής για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων</i>	
<b>Απαίτηση#</b>	<b>AX-5</b>
<b>Περιγραφή</b>	Ο πάροχος υπηρεσιών ευέλικτης φόρτισης έχει τη δυνατότητα να καθορίσει την τιμολογιακή πολιτική του (δυναμική τιμολόγηση, χρήση πολύ-ζωνικών τιμολογίων κτλ) ανάλογα με τις συνθήκες της αγοράς ενέργειας.

**Πίνακας 6-11 Απαιτήσεις Χρηστών AX-6**

<i>Αναγνώριση και ταυτοποίηση χρήστη</i>	
<b>Απαίτηση#</b>	<b>AX-6</b>
<b>Περιγραφή</b>	Ο πάροχος υπηρεσιών ευέλικτης φόρτισης συνάπτει συμβόλαια με τους χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων με σκοπό τη δυνατότητα χρήσης των υποδομών φόρτισης του δικτύου του



Πίνακας 6-12 Απαιτήσεις Χρηστών AX-7

<i>Ενημέρωση χρηστών για την τοπολογία του δικτύου υποδομών φόρτισης και τη λειτουργική τους κατάσταση</i>	
<i>Απαίτηση#</i>	<i>AX-7</i>
<i>Περιγραφή</i>	Οι χρήστες των ηλεκτρικών οχημάτων μπορούν να ενημερώνονται για την τοποθεσία των σταθμών φόρτισης και τη διαθεσιμότητα τους έτσι ώστε να προγραμματίσουν αποδοτικότερα το δρομολόγιο τους σε περίπτωση που απαιτείται ενδιάμεση φόρτιση για την ολοκλήρωση της διαδρομής.

Πίνακας 6-13 Απαιτήσεις Χρηστών AX-8

<i>Αποδοχή/Άρνηση αιτήματος φόρτισης σε ένα σταθμό φόρτισης</i>	
<i>Απαίτηση#</i>	<i>AX-8</i>
<i>Περιγραφή</i>	Ο πάροχος υπηρεσιών ευέλικτης φόρτισης μπορεί να αποδεχτεί ή να αρνηθεί ένα αίτημα φόρτισης σε μια υποδομή φόρτισης για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα λαμβάνοντας υπόψη τα αιτήματα κράτησης σταθμών φόρτισης και μεταβολής της ζήτησης από τρίτους φορείς

Πίνακας 6-14 Απαιτήσεις Χρηστών AX-9

<i>Διατήρηση της μεταβολής ζήτησης για τη συμφωνηθείσα χρονική περίοδο</i>	
<i>Απαίτηση#</i>	<i>AX-9</i>
<i>Περιγραφή</i>	Σε περίπτωση αποδοχής αιτήματος μεταβολής της ζήτησης, ο πάροχος υπηρεσιών ευέλικτης φόρτισης θα πρέπει να διατηρεί το επίπεδο μεταβολής ζήτησης για ολόκληρη τη συμφωνηθείσα χρονική περίοδο χωρίς αποκλίσεις.

Πίνακας 6-15 Απαιτήσεις Χρηστών AX-10

<i>Οι χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων επικοινωνούν με τον πάροχο υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης μέσω εφαρμογής (user interface)</i>	
<i>Απαίτηση#</i>	<i>AX-10</i>
<i>Περιγραφή</i>	Οι χρήστες μέσω της εφαρμογής αυτής μπορούν να ανταλλάσσουν πληροφορίες με τον πάροχο υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης και να απολαμβάνουν τις προσφερόμενες υπηρεσίες.

Πίνακας 6-16 Απαιτήσεις Χρηστών AX-11

<i>Εγγραφή χρήστη ηλεκτρικού οχήματος στο πελατολόγιο του παρόχου υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης</i>	
<i>Απαίτηση#</i>	<i>AX-11</i>
<i>Περιγραφή</i>	Οι χρήστες θα πρέπει να μπορούν εγγραφούν στο πελατολόγιο ενός ή περισσότερων παρόχων υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης και να απολαμβάνουν τις εκάστοτε υπηρεσίες που τους παρέχουν.

Πίνακας 6-17 Απαιτήσεις Χρηστών AX-12

<i>Αίτημα επί τούτω φόρτισης ή μέσω κράτησης</i>	
<i>Απαίτηση#</i>	<i>AX-12</i>

<b>Περιγραφή</b>	Οι χρήστες θα πρέπει να μπορούν να φορτίζουν σε οποιοδήποτε σταθμό φόρτισης είναι κοντά τους και είναι διαθέσιμος ή να τον δεσμεύουν για μελλοντική χρήση.
------------------	--

### 6.3.3.2 Απαιτήσεις Συστήματος

Πίνακας 6-18 Απαιτήσεις Συστήματος ΑΣ-1

<b>Φιλική προς το χρήστη εφαρμογή για την επικοινωνία με τον πάροχο υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης</b>	
<b>Απαίτηση#</b>	<b>ΑΣ-1</b>
<b>Περιγραφή</b>	Η εφαρμογή πρέπει να είναι εύχρηστη προς τον χρήστη
<b>Προτεραιότητα</b>	Απαραίτητη

Πίνακας 6-19 Απαιτήσεις Συστήματος ΑΣ-2

<b>Διαλειτουργικότητα πλατφόρμας</b>	
<b>Απαίτηση#</b>	<b>ΑΣ-2</b>
<b>Περιγραφή</b>	Η πλατφόρμα θα πρέπει να είναι συμβατή με τα διεθνή πρότυπα
<b>Προτεραιότητα</b>	Απαραίτητη

Πίνακας 6-20 Απαιτήσεις Συστήματος ΑΣ-3

<b>Αναβάθμιση της πλατφόρμας</b>	
<b>Απαίτηση#</b>	<b>ΑΣ-3</b>
<b>Περιγραφή</b>	Η πλατφόρμα θα πρέπει να επιτρέπει την ενσωμάτωση νέων ή αναβάθμιση υπάρχοντων υπηρεσιών
<b>Προτεραιότητα</b>	Απαραίτητη

Πίνακας 6-21 Απαιτήσεις Συστήματος ΑΣ-4

<b>Επεκτασιμότητα</b>	
<b>Απαίτηση#</b>	<b>ΑΣ-4</b>
<b>Περιγραφή</b>	Η πλατφόρμα θα πρέπει να επιτρέπει την ενσωμάτωση μεγάλου αριθμού σταθμών φόρτισης και χρηστών χωρίς διάκριση.
<b>Προτεραιότητα</b>	Απαραίτητη

Πίνακας 6-22 Απαιτήσεις Συστήματος ΑΣ-5

<b>Συλλογή δεδομένων</b>	
<b>Απαίτηση#</b>	<b>ΑΣ-5</b>
<b>Περιγραφή</b>	Συλλογή δεδομένων από τον σταθμό φόρτισης (τάσης, ρεύματος, ενεργού/αέργου ισχύος κτλ)
<b>Προτεραιότητα</b>	Απαραίτητη

Πίνακας 6-23 Απαιτήσεις Συστήματος ΑΣ-6

<b>Αποθήκευση δεδομένων</b>	
<b>Απαίτηση#</b>	<b>ΑΣ-6</b>

<b>Περιγραφή</b>	Αποθήκευση των δεδομένων σε μια βάση δεδομένων ακολουθώντας ένα μοντέλο δεδομένων.
<b>Προτεραιότητα</b>	Απαραίτητη

Πίνακας 6-24 Απαιτήσεις Συστήματος ΑΣ-7

<i>Απομακρυσμένος ορισμός μέγιστου ρεύματος σταθμού</i>	
<b>Απαίτηση#</b>	<b>ΑΣ-7</b>
<b>Περιγραφή</b>	Ο ορισμός του μέγιστου ρεύματος σταθμού επηρεάζει άμεσα και το επίπεδο φόρτισης
<b>Προτεραιότητα</b>	Απαραίτητη

Πίνακας 6-25 Απαιτήσεις Συστήματος ΑΣ-8

<i>Αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ σταθμού φόρτισης και διαχειριστή υποδομών φόρτισης</i>	
<b>Απαίτηση#</b>	<b>ΑΣ-8</b>
<b>Περιγραφή</b>	Η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ πλατφόρμας και σταθμού φόρτισης είναι αμφίδρομη.
<b>Προτεραιότητα</b>	Απαραίτητη

Πίνακας 6-26 Απαιτήσεις Συστήματος ΑΣ-9

<i>Αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ χρηστών ηλεκτρικών οχημάτων και διαχειριστή υποδομών φόρτισης</i>	
<b>Απαίτηση#</b>	<b>ΑΣ-9</b>
<b>Περιγραφή</b>	Η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ πλατφόρμας και χρηστών ηλεκτρικών οχημάτων είναι αμφίδρομη.
<b>Προτεραιότητα</b>	Απαραίτητη

Πίνακας 6-27 Απαιτήσεις Συστήματος ΑΣ-10

<i>Αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ ενεργειακών παικτών και διαχειριστή υποδομών φόρτισης</i>	
<b>Απαίτηση#</b>	<b>ΑΣ-10</b>
<b>Περιγραφή</b>	Η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ ενεργειακών παικτών (αγοράς, διαχειριστές δικτύου κτλ) και χρηστών ηλεκτρικών οχημάτων είναι αμφίδρομη.
<b>Προτεραιότητα</b>	Απαραίτητη

Πίνακας 6-28 Απαιτήσεις Συστήματος ΑΣ-11

<i>3G σύνδεση στην συσκευή όπου είναι εγκατεστημένη η εφαρμογή για τον χρήστη</i>	
<b>Απαίτηση#</b>	<b>ΑΣ-11</b>
<b>Περιγραφή</b>	Η υιοθέτηση 3G σύνδεσης είναι απαραίτητη για την ανταλλαγή πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο όπου και αν βρίσκεται ο χρήστης
<b>Προτεραιότητα</b>	Απαραίτητη

Πίνακας 6-29 Απαιτήσεις Συστήματος ΑΣ-12

<i>Συγχρονισμός συστήματος</i>	
<b>Απαίτηση#</b>	<b>ΑΣ-12</b>

<b>Περιγραφή</b>	Όλοι οι σταθμοί φόρτισης και οι χρήστες θα πρέπει να είναι συγχρονισμένοι βάσει μιας κοινής αναφοράς χρόνου για την ανταλλαγή πληροφοριών
<b>Προτεραιότητα</b>	Απαραίτητη

Πίνακας 6-30 Απαιτήσεις Συστήματος ΑΣ-13

<i>Ασφαλής και αξιόπιστη επικοινωνία</i>	
<b>Απαίτηση#</b>	<b>ΑΣ-13</b>
<b>Περιγραφή</b>	Πρέπει να διασφαλίζεται η συνεχής και σταθερή επικοινωνία μεταξύ όλων των εμπλεκόμενων φορέων.
<b>Προτεραιότητα</b>	Απαραίτητη

Πίνακας 6-31 Απαιτήσεις Συστήματος ΑΣ-14

<i>Εμπιστευτικότητα δεδομένων</i>	
<b>Απαίτηση#</b>	<b>ΑΣ-14</b>
<b>Περιγραφή</b>	Τα προσωπικά δεδομένα των χρηστών δεν πρέπει να δημοσιεύονται προς μη εξουσιοδοτημένους φορείς.
<b>Προτεραιότητα</b>	Απαραίτητη

### 6.3.4 Ανάπτυξη πλατφόρμας διαχείρισης

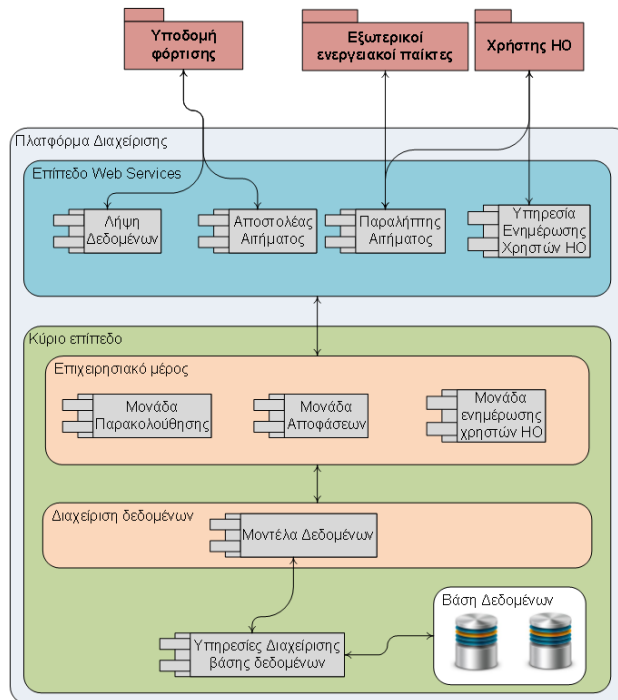
Η πλατφόρμα διαχείρισης αναπτύχθηκε στη γλώσσα προγραμματισμού Java 7 στο προγραμματιστικό περιβάλλον Netbeans IDE (Integrated Development Environment). Το αρχιτεκτονικό διάγραμμα της πλατφόρμας διαχείρισης παρουσιάζεται στην Εικόνα 6-19.

Δύο είναι τα επίπεδα που συνθέτουν την πλατφόρμα διαχείρισης: το κύριο επίπεδο και των web services. Η ευφυία της πλατφόρμας διαχείρισης συγκεντρώνεται στο κύριο επίπεδο που επεξεργάζεται όλα τα αιτήματα εκτέλεσης ή τροποποίησης της διαδικασίας της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων (π.χ. αιτήματα άμεσης φόρτισης, κράτησης σταθμών κτλ). Επιπρόσθετα, το κύριο μέρος είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση των δεδομένων από τις υποδομές φόρτισης. Το επίπεδο των web services επιτρέπει την επικοινωνία και την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ της πλατφόρμας διαχείρισης και των εξωτερικών παικτών (διαχειριστή δικτύου, αγορά ενέργειας κτλ)/χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων/υποδομή φόρτιση.

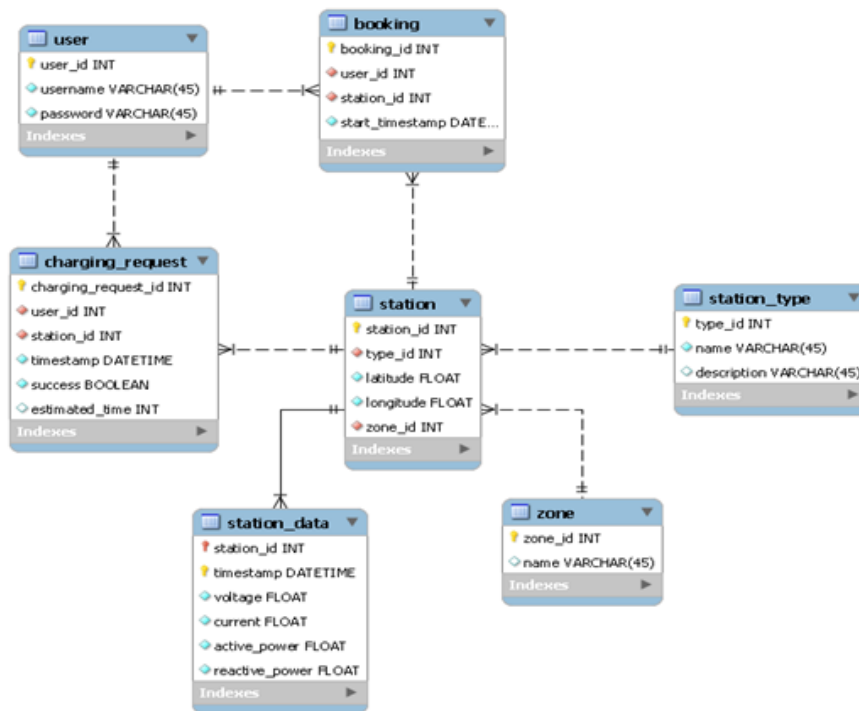
#### ✓ **Κύριο επίπεδο**

Το κύριο επίπεδο αποτελείται από δύο μέρη: το επιχειρησιακό μέρος, στο οποίο εκτελούνται όλες οι υπηρεσίες που αναλύθηκαν στην παράγραφο 6.3.2 του παρόντος κεφαλαίου, και το μοντέλο δεδομένων.

Το μοντέλο δεδομένων αναπτύχθηκε με τη χρήση της Hibernate framework, μιας βιβλιοθήκης της Java για τη σχεσιακή απεικόνιση των αντικειμένων. Για την αποθήκευση και διαχείριση των δεδομένων, αναπτύχθηκε μια βάση δεδομένων με τη χρήση της MySQL RDBMS (relational database management system). Το σχεσιακό διάγραμμα της βάσης δεδομένων που αναπτύχθηκε απεικονίζεται στην Εικόνα 6-20.



Εικόνα 6-19 Αρχιτεκτονική πλατφόρμας διαχείρισης ηλεκτρικών οχημάτων



Εικόνα 6-20 Σχεσιακό διάγραμμα της βάσης δεδομένων

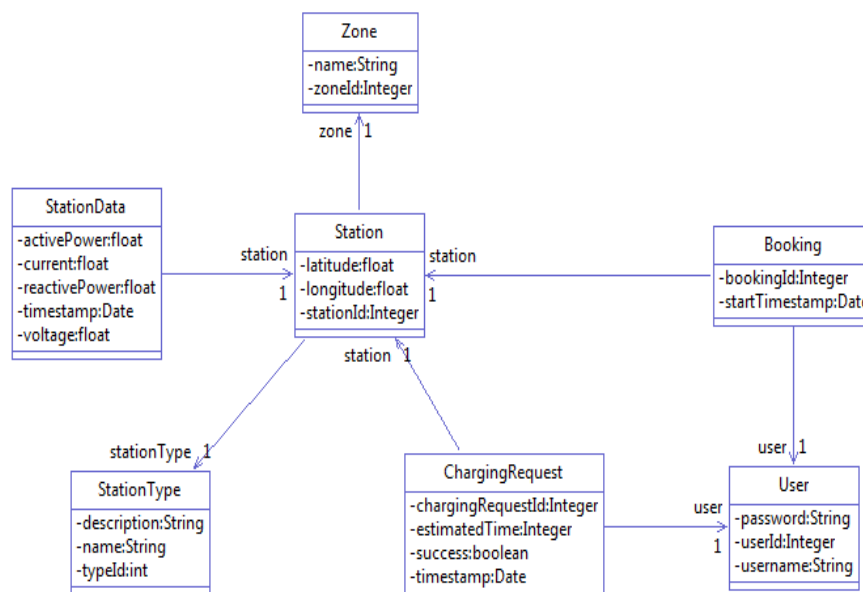
Πιο συγκεκριμένα, δημιουργήθηκαν οι παρακάτω πίνακες:

- **user:** περιέχει τα ιδιωτικά στοιχεία αναγνώρισης για κάθε χρήστη
  - *username:* το όνομα χρήστη το οποίο είναι μοναδικό για κάθε χρήστη και αποτελεί το πρωτεύον κλειδί (primary key) για τον πίνακα.
  - *password:* ο κωδικός πρόσβασης είναι συγκεκριμένος για κάθε χρήστη.

- **station\_type**: παρέχει πληροφορίες για τον τύπο κάθε σταθμού που είναι συνδεδεμένος στο δίκτυο (ενσύρματη φόρτιση, στατικός επαγωγικός φορτιστής, δυναμικός επαγωγικός φορτιστής, επίπεδο φόρτισης κτλ)
  - *type\_id*: ο αριθμός που χαρακτηρίζει το τύπο κάθε σταθμού. Είναι μοναδικός και αποτελεί το πρωτεύον κλειδί (primary key) για τον πίνακα.
  - *name*: καθορίζει το όνομα κάθε τύπου σταθμού φόρτισης.
  - *description*: περιέχει γενικές παρατηρήσεις σχετικά με το τύπο κάθε σταθμού
  
- **station**: περιγράφει τα χαρακτηριστικά κάθε σταθμού.
  - *station\_id*: είναι ο αριθμός που μοναδικά χαρακτηρίζει κάθε σταθμό κατά την εγγραφή του στη βάση δεδομένων. Αποτελεί το πρωτεύον κλειδί (primary key) για τον πίνακα.
  - *type\_id*: είναι ο ακέραιος αριθμός που χαρακτηρίζει τον τύπο κάθε σταθμού σύμφωνα με τον ορισμό του πίνακα station\_type (foreign key).
  - *latitude/longitude*: γεωγραφικές συντεταγμένες που καθορίζουν τη γεωγραφική θέση κάθε σταθμού
  - *zone\_id*: είναι ένας ακέραιος αριθμός που καθορίζει τη ζώνη εγκατάστασης του βάσει της τοπολογίας του δικτύου διανομής (foreign key).
  
- **station data**: στον πίνακα αυτόν αποθηκεύονται τα μετρητικά δεδομένα των υποδομών φόρτισης.
  - *station\_id*: προσδιορίζει τον μοναδικό αριθμό του σταθμού φόρτισης, σύμφωνα με τον πίνακα station (foreign key), για τον οποίο γίνεται η εκάστοτε εγγραφή μετρητικών δεδομένων. Αποτελεί το πρωτεύον κλειδί (primary key) για τον πίνακα.
  - *timestamp*: προσδιορίζει την ακριβή χρονική στιγμή καταγραφής των μετρητικών δεδομένων από τον μετρητή του σταθμού φόρτισης. Αποτελεί το πρωτεύον κλειδί (primary key) για τον πίνακα.
  - *voltage*: η τάση του δικτύου στο σημείο σύνδεσης του σταθμού φόρτισης.
  - *current*: το ρεύμα της φόρτισης
  - *active/reactive power*: η ενεργός και η άεργος ροή ισχύος από το δίκτυο προς το σταθμό φόρτισης.
  
- **zone**: καθορίζει τη ζώνη/περιοχή στην οποία είναι συνδεδεμένος κάθε σταθμός φόρτισης βάσει της τοπολογίας του δικτύου. Για παράδειγμα μια ζώνη μπορεί να ορίζεται από τα σημεία σύνδεσης σταθμών φόρτισης που ανήκουν στον ίδιο υποσταθμό.
  - *zone\_id*: κάθε ζώνη χαρακτηρίζεται από έναν μοναδικό αριθμό που αποτελεί και το πρωτεύον κλειδί (primary key) για τον πίνακα.
  - *name*: προσδιορίζει το όνομα κάθε ζώνης
  
- **booking**: περιέχει τα αποδεκτά αιτήματα κράτησης σταθμών φόρτισης.
  - *booking\_id*: κάθε αποδεκτό αίτημα κράτησης σταθμού φόρτισης εγγράφεται στη βάση δεδομένων με έναν αύξοντα αριθμό που είναι και μοναδικός για κάθε εγγραφή. Αποτελεί το πρωτεύον κλειδί (primary key) για τον πίνακα.

- *user\_id*: προσδιορίζει τον μοναδικό αριθμό ταυτοποίησης του χρήστη ηλεκτρικού οχήματος, όπως αναφέρεται στον πίνακα user (foreign key), για τον οποίο έχει γίνει η κράτηση ενός σταθμού φόρτισης
  - *station\_id*: προσδιορίζει τον μοναδικό αριθμό καθορισμού του εκάστοτε σταθμού για τον οποίον έχει γίνει αποδεκτό το αίτημα κράτησης
  - *start\_timestamp*: προσδιορίζει τη χρονική διάρκεια της κράτησης
- **charging request**: αποθηκεύει όλα τα αιτήματα φόρτισης από τους χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων
    - *charging\_request\_id*: κάθε αίτημα έναρξης της διαδικασίας της φόρτισης εγγράφεται στη βάση δεδομένων με έναν αύξοντα αριθμό που είναι και μοναδικός για κάθε εγγραφή. Αποτελεί το πρωτεύον κλειδί (primary key) για τον πίνακα.
    - *user\_id*: προσδιορίζει τον μοναδικό αριθμό ταυτοποίησης του χρήστη ηλεκτρικού οχήματος, όπως αναφέρεται στον πίνακα user (foreign key), ο οποίος στέλνει αίτημα για τη φόρτιση του ηλεκτρικού οχήματος του.
    - *station\_id*: προσδιορίζει τον μοναδικό αριθμό καθορισμού του εκάστοτε σταθμού για τον οποίον έχει σταλεί αίτημα έναρξης της φόρτισης
    - *start\_timestamp*: προσδιορίζει τη χρονική στιγμή του αιτήματος
    - *success*: «1» καθορίζει τα αποδεκτά αιτήματα και «0» καθορίζει τα μη αποδεκτά αιτήματα
    - *estimated\_time*: είναι ο εκτιμώμενος χρόνος για την πλήρη φόρτιση του ηλεκτρικού οχήματος

Η μονάδα υπηρεσιών διαχείρισης της βάσης δεδομένων είναι υπεύθυνη για την αποθήκευση/ανάκληση δεδομένων προς/από τη βάση και για τη μετάφραση του σχεσιακού μοντέλου της βάσης (entity relationship data model) στο αντίστοιχο αντικειμενοστραφές (object oriented). Οι αντίστοιχες Java κλάσεις για τα αντικείμενα που αποτελούν τη βάση δεδομένων απεικονίζονται στην Εικόνα 6-21



Εικόνα 6-21 Διάγραμμα Java κλάσεων των αντικειμένων που απεικονίζουν τη βάση δεδομένων

✓ **Επίπεδο διαδικτυακών υπηρεσιών (web services)**

Στο επίπεδο αυτό πραγματοποιούνται οι επικοινωνίες μεταξύ του κυρίου επιπέδου της πλατφόρμας διαχείρισης και των εξωτερικών φορέων/υποδομών. Ένα web service είναι ένα σύστημα λογισμικού σχεδιασμένο να υποστηρίζει τη διαλειτουργική, επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών εφαρμογών λογισμικού που εκτελούνται σε διαφορετικές μηχανές/περιβάλλοντα. Τα web services διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, βάσει την αρχιτεκτονικής δομής που υιοθετείται κατά την ανάπτυξη τους:

- **Simple Object Access Protocol (SOAP):** Πρόκειται για ένα πρωτόκολλο που καθορίζει τη βασική δομή των μηνυμάτων ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ υπηρεσιών διαδικτύου ανεξάρτητα από το λειτουργικό σύστημα, τη γλώσσα προγραμματισμού κτλ. Για την ανταλλαγή μηνυμάτων χρησιμοποιείται το πρωτόκολλο XML ενώ για την επικοινωνία χρησιμοποιούνται κοινά πρωτόκολλα HTTP, SMTP.
- **Restful (Representative State Transfer):** Πρόκειται για μια αρχιτεκτονική που εστιάζει στους πόρους του συστήματος. Πόρος νοείται οποιαδήποτε πληροφοριακό αντικείμενο που μπορεί να αποθηκευτεί σε ένα υπολογιστή (ηλεκτρονικό αρχείο, αποτέλεσμα ενός αλγορίθμου, μια εγγραφή σε βάση δεδομένων κτλ) σε που αναπαριστά ένα στιγμιότυπο μιας δεδομένης χρονικής στιγμής. Το βασικό χαρακτηριστικό που διακρίνει την αρχιτεκτονική REST από τις άλλες είναι η ενιαία διεπαφή (uniform interface) για τη μεταφορά των πληροφοριών σε τυποποιημένη μορφή και όχι σε κάποια μορφή υλοποιημένη για τις εκάστοτε ανάγκες μιας εφαρμογής.

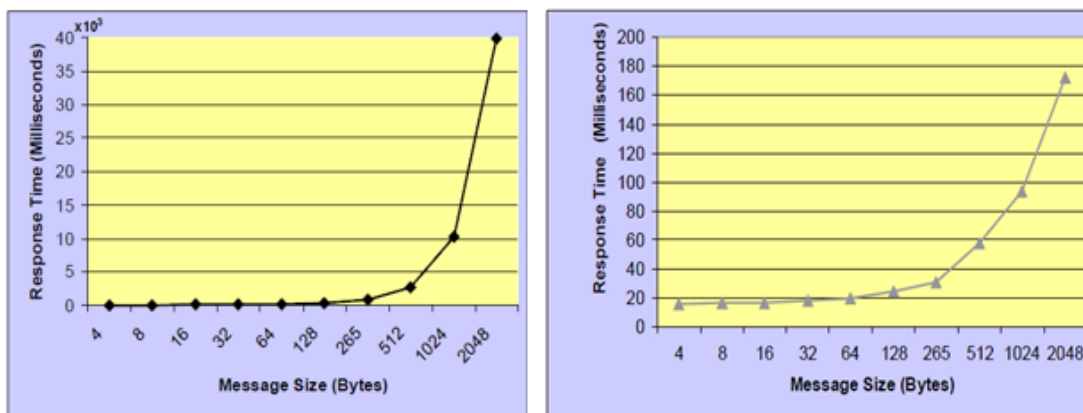
Και οι δύο παραπάνω αρχιτεκτονικές σχεδίασης διαδικτυακών υπηρεσιών αξιοποιούνται σε διαφορετικές εφαρμογές. Ωστόσο, κάθε μια αρχιτεκτονική εμφανίζει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τα οποία την καθιστούν αποδοτικότερη σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Ο Πίνακας 6-32 παρουσιάζει τα συγκριτικά στοιχεία των δύο αρχιτεκτονικών σχεδιασμού για διαφορετικά κριτήρια όπως αναλύονται στην [198]. Το πιο σημαντικό πλεονέκτημα των REST web services έναντι των SOAP είναι η μέση ταχύτητα επεξεργασίας των μηνυμάτων εν συναρτήσει του όγκου (bytes) των μηνυμάτων. Σύμφωνα με τη μελέτη στην [199], ο χρόνος επεξεργασίας αυξάνει εκθετικά καθώς αυξάνεται ο όγκος των μηνυμάτων. Ωστόσο, ο χρόνο επεξεργασίας των μηνυμάτων στην περίπτωση των REST web services είναι σημαντικά μικρότερος από τον αντίστοιχο των SOAP web services.

Πίνακας 6-32 Σύγκριση SOAP –Restful web services [199]

Κριτήρια	SOAP	RESTful
<b>Χαρακτηριστικό</b>	Βασισμένο σε XML	Βασισμένο σε HTTP και XML
<b>Απόδοση</b>	Υψηλότεροι χρόνοι απόκρισης, Μικρότερο throughput Περιορισμοί στο Bandwidth λόγω του overhead ανά αίτηση	Μικρότεροι χρόνοι απόκρισης Μεγαλύτερο throughput Καλύτερη αξιοποίηση bandwidth
<b>Υπηρεσίες/Πόροι</b>	Σχετίζεται με υπηρεσίες	Σχετίζεται με πόρους
<b>Atomic transaction</b>	Υποστηρίζεται	Δεν υποστηρίζεται
<b>Ασφάλεια</b>	Χρήση του SSL του HTTP. Έχει ένα σύνολο από πρότυπα web services για την υποστήριξη της ασφάλειας (ws-trust, ws-security, wc-policy κτλ)	Χρήση του SSL του HTTP
<b>Προσωρινή αποθήκευση δεδομένων</b>	Απαιτείται ειδικός προγραμματισμός	Εύκολη υλοποίηση
<b>Επιμερισμός φορτίου</b>	Δύσκολη υλοποίηση	Εύκολη υλοποίηση



<b>Αξιοπιστία</b>	Με τη βοήθεια του ws-ReliableMessaging έχει υψηλή αξιοπιστία	Μικρότερη αξιοπιστία
<b>Διείσδυση στην αγορά</b>	18%	71%



Εικόνα 6-22 Συγκριτικά συμπεράσματα χρόνου επεξεργασίας μηνυμάτων εν συναρτήσει του όγκου τους (αριστερά SOAP web services, δεξιά REST web services) [199]

Η ευελιξία και ευκολία εφαρμογής των REST web services, καθιστά τη συγκεκριμένη αρχιτεκτονική σχεδίασης διαδικτυακών εφαρμογών κατάλληλη για ανάπτυξη εφαρμογών σε κινητά και tablets. Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα διδακτορική διατριβή επιλέχθηκε η συγκεκριμένη αρχιτεκτονική σχεδίασης για την υλοποίηση των απαιτούμενων web services. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται και επεξηγούνται οι συναρτήσεις (functions) του REST web service που αναπτύχθηκαν.

#### Παραλήπτης Δεδομένων

- *sendMonitoringData*: παραλαμβάνει τα στοιχεία λειτουργίας (τάση, ρεύμα, ισχύς κτλ) από τον σταθμό φόρτισης. Η είσοδος της συνάρτησης αυτής αποτελείται από τέσσερα ορίσματα τύπου χαρακτήρων. Το πρώτο στοιχείο περιγράφει τον αριθμό ταυτοποίησης του σταθμού με τον οποίο είναι εγγεγραμμένος στη βάση. Τα υπόλοιπα στοιχεία αναφέρονται στη λειτουργία του σταθμού περιγράφοντας την τάση, το ρεύμα και την ισχύ. Τα τέσσερα αυτά στοιχεία χωρίζονται μεταξύ τους με τον χαρακτήρα “@”. Δεν αναμένεται κάποια πληροφορία εξόδου μετά την εκτέλεση του web service.

Input: String stationIds, String voltages, String currents, String powers

Output: -

#### Παραλήπτης αιτημάτων

- *sendBookingRequest*: γίνεται αποδεκτό ή όχι ένα αίτημα για κράτηση ενός σταθμού φόρτισης σε συγκεκριμένη ώρα και για δεδομένη χρονική διάρκεια. Η είσοδος της συνάρτησης αποτελείται από τρία ορίσματα τύπου χαρακτήρων: το όνομα χρήστη (“username”) που στέλνει το αίτημα κράτησης για ένα σταθμό φόρτισης, τον σταθμό (“station\_id”), και τη χρονική διάρκεια δέσμευσης (“timeslots”) του σταθμού φόρτισης αποτελούμενο από ένα ή περισσότερα χρονικά διαστήματα (15-λεπτών). Η

έξοδος της συνάρτησης αυτής είναι μια λογική μεταβλητή που παίρνει τιμή “true” όταν το αίτημα γίνεται αποδεκτό ή “false” στην αντίθετη περίπτωση.

Input: String username, String stationId, String timeslotIds

Output: boolean successfullBooking

- *sendChargingRequest*: γίνεται αποδεκτό ή όχι ένα αίτημα για φόρτιση ενός ηλεκτρικού οχήματος την τρέχουσα χρονική στιγμή δεδομένης της διαθεσιμότητας του σταθμού φόρτισης. Η είσοδος της συνάρτησης αποτελείται από τρία ορίσματα τύπου χαρακτήρων: το όνομα χρήστη (“username”) που στέλνει το αίτημα κράτησης για ένα σταθμό φόρτισης, τον σταθμό (“station\_id”), και την εκτιμώμενη χρονική διάρκεια δέσμευσης (“chargingSeconds”) του σταθμού φόρτισης. Η έξοδος της συνάρτησης αυτής είναι μια λογική μεταβλητή που παίρνει τιμή “true” όταν το αίτημα γίνεται αποδεκτό ή “false” στην αντίθετη περίπτωση.

Input: String username, String stationId, String chargingSeconds

Output: boolean successfullCharging

#### Αποστολέας αιτημάτων

- *sendDemandResponseRequest*: με τον τρόπο αυτό αποστέλλεται από τον πάροχο υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης ή τον διαχειριστή του δικτύου αίτημα διαχείρισης της ζήτησης της φόρτισης (demand response) είτε για λόγους αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας είτε για τεχνικούς λόγους λειτουργίας του δικτύου. Η είσοδος της συνάρτησης αποτελείται από δύο ορίσματα τύπου χαρακτήρων: το ποσοστό μεταβολής της ζήτησης (“percentageOfLoadShedding”) και την περιοχή στην οποία παραβιάζονται οι τεχνικοί περιορισμοί του δικτύου.

Input: String percentageOfLoadShedding, String zoneIds

Output:

#### Υπηρεσίες ενημέρωσης χρηστών ηλεκτρικών οχημάτων

- *userAuthenticate*: για τη χρήση των προσφερόμενων υπηρεσιών χρήστη της πλατφόρμας διαχείρισης απαιτείται η ταυτοποίηση του χρήστη με το όνομα χρήστη (username) και τον κωδικό πρόσβασης (password). Με τον τρόπο αυτό αποτρέπεται η χρήση της πλατφόρμας σε μη εξουσιοδοτημένους χρήστες και επιτρέπει την παροχή προσωποποιημένων πληροφοριών και υπηρεσιών στον χρήστη. Η έξοδος της συνάρτησης αυτής είναι μια λογική μεταβλητή που παίρνει τιμή “true” όταν ο χρήστης είναι εξουσιοδοτημένος ή “false” στην αντίθετη περίπτωση.

Input:: String username, String password

Output: boolean successfullLogin

- *getStationData*: παρέχει πληροφορίες σχετικά με τη γεωγραφική θέση των σταθμών φόρτισης αλλά και τον τύπο τους. Η συγκριμένη συνάρτηση δεν απαιτεί κάποιο όρισμα εισόδου. Η έξοδος της συνάρτησης είναι ένα αντικείμενο (“StationData”) με όρισμα μια λίστα με τα χαρακτηριστικά των σταθμών (station\_id, longitude/latitude, stationType).

Input:

Output: StationData stationData  
 Object StationData: List<Station> stations  
 Object Station : int stationId, float longitude, float latitude, String stationType (ON\_ROUTE, STATIC)

Παράδειγμα της εξόδου της συνάρτησης αυτής σε XML μορφή παρουσιάζεται στη συνέχεια:

```
<Stations>
  <stations>
    <stationId>1</stationId>
    <stationType>STATIC</stationType>
    <latitude>38.0074</latitude>
    <longitude>23.7013</longitude>
  </stations>
  <stations>
    <stationId>2</stationId>
    <stationType>STATIC</stationType>
    <latitude>38.0121</latitude>
    <longitude>23.7287</longitude>
  </stations>
  <stations>
    <stationId>3</stationId>
    <stationType>ON_ROUTE</stationType>
    <latitude>38.015</latitude>
    <longitude>23.7227</longitude>
  </stations>
  <stations>
    <stationId>4</stationId>
    <stationType>STATIC</stationType>
    <latitude>38.006</latitude>
    <longitude>23.729</longitude>
  </stations>
</Stations>
```

- *getCurrentStationsState*: παρέχει πληροφορίες σχετικά με την τρέχουσα διαθεσιμότητα των σταθμών φόρτισης, δηλαδή αν ο εκάστοτε σταθμός φόρτισης είναι διαθέσιμος/απασχολημένος/εκτός λειτουργίας και για πόσο χρονικό διάστημα θα παραμείνει μη διαθέσιμος. Η συγκριμένη συνάρτηση δεν απαιτεί κάποιο όρισμα εισόδου. Η έξοδος της συνάρτησης είναι ένα αντικείμενο (“CurrentStationsState”) με όρισμα μια λίστα με τη λειτουργική κατάσταση των σταθμών (station\_id, state, estimatedChargingTime).

Input:

Output: CurrentStationsState currentStationsState

```
Object CurrentStationsState: List<StationState>
stationStates
Object StationState: int stationId, String state (FREE,
BUSY, GRID_CLOSED), int estimatedChargingSeconds
```

Παράδειγμα της εξόδου της συνάρτησης αυτής σε XML μορφή παρουσιάζεται στη συνέχεια:

```
<StationStates>
  <stationStates>
    <stationId>1</stationId>
    <state>BUSY</state>
    <estimatedChargingSeconds>1185</estimatedChargingSec
onds>
  </stationStates>
  <stationStates>
    <stationId>2</stationId>
    <state>FREE</state>
    <estimatedChargingSeconds>0</estimatedChargingSecond
s>
  </stationStates>
  <stationStates>
    <stationId>3</stationId>
    <state>FREE</state>
    <estimatedChargingSeconds>0</estimatedChargingSecond
s>
  </stationStates>
  <stationStates>
    <stationId>4</stationId>
    <state>FREE</state>
    <estimatedChargingSeconds>0</estimatedChargingSecond
s>
  </stationStates>
</StationStates>
```

- *getDailyStationStates*: παρέχει ημερήσιες πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση ενός σταθμού φόρτισης καθώς και τις τιμές αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Το μοναδικό όρισμα εισόδου είναι ο αριθμός του σταθμού φόρτισης για τον οποίο ο εκάστοτε χρήστης ζητάει πληροφορίες. Η έξοδος της συνάρτησης είναι ένα αντικείμενο (“DailyStationStates”) με όρισμα μια λίστα με τη λειτουργική κατάσταση του (timeslotId,state,price).

Input: String stationId

```
Output: DailyStationStates dailyStationStates
Object DailyStationStates: List<TimeslotState>
timeslotStates
Object TimeslotState: int timeslotId, String state
FREE, BUSY, GRID_CLOSED), Float price
```

Παράδειγμα της εξόδου της συνάρτησης αυτής σε XML μορφή παρουσιάζεται στη συνέχεια:

```
<DailyStationStates>
  <dailyStationStates>
    <startTimeslotId>12</startTimeslotId>
    <state>BUSY</state>
    <price>0.2</price>
```

```

</dailyStationStates>
<dailyStationStates>
  <startTimeslotId>13</startTimeslotId>
  <state>BUSY</state>
  <price>0.2</price>
</dailyStationStates>
<dailyStationStates>
  <startTimeslotId>14</startTimeslotId>
  <state>BUSY</state>
  <price>0.2</price>
</dailyStationStates>
<dailyStationStates>
  <startTimeslotId>15</startTimeslotId>
  <state>FREE</state>
  <price>0.2</price>
</dailyStationStates>
<dailyStationStates>
  <startTimeslotId>16</startTimeslotId>
  <state>FREE</state>
  <price>0.2</price>
</dailyStationStates>
<dailyStationStates>
  <startTimeslotId>17</startTimeslotId>
  <state>FREE</state>
  <price>0.2</price>
</dailyStationStates>
...

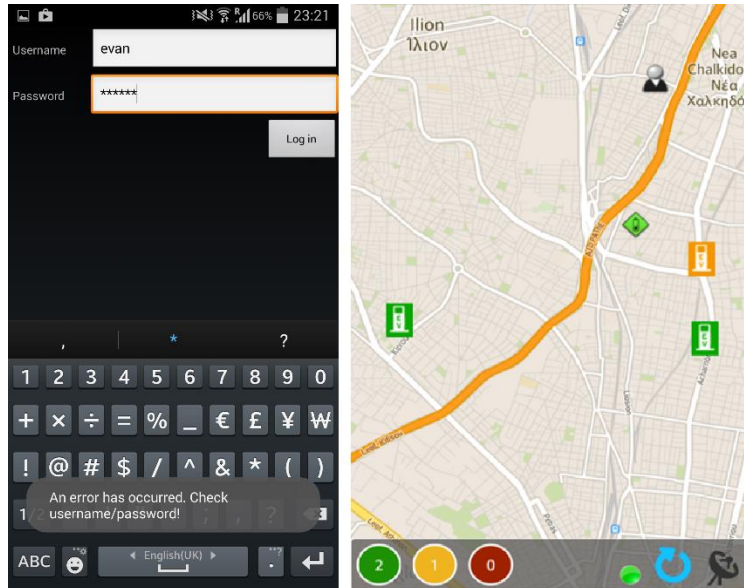
```

### 6.3.5 Εφαρμογή Χρήστη

Για να μπορεί ο χρήστης να επικοινωνεί με την πλατφόρμα διαχείρισης και να απολαμβάνει τις παρεχόμενες υπηρεσίες ηλεκτροκίνησης αναπτύχθηκε μια εφαρμογή που λειτουργεί σε περιβάλλον Android. Η εφαρμογή αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας Eclipse IDE με Android ADT v. 23.0.2.1259578 και η ελάχιστη απαίτηση για Android σύστημα είναι η έκδοση 4.0 (API 14-Ice cream Sandwich). Για τη γεωγραφική απεικόνιση των σταθμών φόρτισης χρησιμοποιήθηκαν οι χάρτες της Google (Google maps). Η επικοινωνία της εφαρμογής χρηστών με την πλατφόρμα διαχείρισης πραγματοποιείται με το κάλεσμα των αναπτυγμένων διαδικτυακών υπηρεσιών (web services) της ενότητας 6.3.5 της παρούσας διατριβής. Η κλήση των web services γίνεται με ασύγχρονο τρόπο έτσι ώστε κάθε υπηρεσία να μην επηρεάζει την εκτέλεση κάποιας άλλης δραστηριότητας της εφαρμογής χρήστη.

Στην αρχική οθόνη της εφαρμογής, ο χρήστης πρέπει να εισάγει το όνομα και τον κωδικό χρήστη για την πιστοποίηση του και τη χρήση των υπηρεσιών της πλατφόρμας διαχείρισης, όπως φαίνεται στην αριστερή φωτογραφία στην Εικόνα 6-23. Η πλατφόρμα διαχείρισης δεν επιτρέπει τη χρήση των υπηρεσιών ηλεκτροκίνησης σε μη πιστοποιημένους χρήστες προβάλλοντας μήνυμα σφάλματος σύνδεσης. Σε περίπτωση επιτυχημένης σύνδεσης στην εφαρμογή, εμφανίζεται η βασική οθόνη της εφαρμογής στην οποία απεικονίζονται οι πλησιέστερες υποδομές φόρτισης ανάλογα με τη γεωγραφική θέση του χρήστη (δεξιά φωτογραφία στην Εικόνα 6-23). Επιπρόσθετα της γεωγραφικής θέσης, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ενημερωθεί για τον τύπο και την τρέχουσα διαθεσιμότητα των υποδομών φόρτισης. Η σχηματική ποικιλομορφία στην απεικόνιση των σταθμών φόρτισης (ορθογώνιο, ρόμβος κτλ) κωδικοποιεί τον τύπο των υποδομών φόρτισης. Για παράδειγμα, τα ορθογώνια σχήματα θα μπορούσαν να απεικονίζουν σταθμούς ενσύρματης φόρτισης ενώ οι ρόμβοι σταθμούς επαγωγικής φόρτισης. Εναλλακτικά, η σχηματική διαφοροποίηση θα μπορούσε να κωδικοποιεί το επίπεδο φόρτισης (Mode 1, Mode 2 και Mode 3).

Επίσης, η χρωματική κωδικοποίηση υποδηλώνει τη διαθεσιμότητα του σταθμού. Ο διαθέσιμος σταθμός απεικονίζεται με πράσινο χρώμα, ο δεσμευμένος σταθμός λόγω φόρτισης απεικονίζεται με πορτοκαλί χρώμα ενώ με κόκκινο χρώμα ο σταθμός δεν είναι διαθέσιμος λόγω βλάβης/συντήρησης.



Εικόνα 6-23 Αρχική (πιστοποίηση χρήστη) και βασική οθόνη (γεωγραφικά δεδομένα) της εφαρμογής χρήστη

Τέλος, τα εικονίδια στο κάτω μέρος της βασικής οθόνης παρέχουν επιπρόσθετες πληροφορίες ή υπηρεσίες σχετικά με:



Κάθε κύκλος ενημερώνει τον χρήστη για τον αριθμό των σταθμών φόρτισης που είναι (μη) διαθέσιμοι/δεσμευμένοι βάσει της χρωματική κωδικοποίησης που υιοθετείται



Το εικονίδιο αυτό αφορά στη διαθεσιμότητα σύνδεσης 3G/4G. Το πράσινο χρώμα υποδηλώνει την ύπαρξη σύνδεση στο διαδίκτυο. Σε αντίθετη περίπτωση εμφανίζεται κόκκινο χρώμα



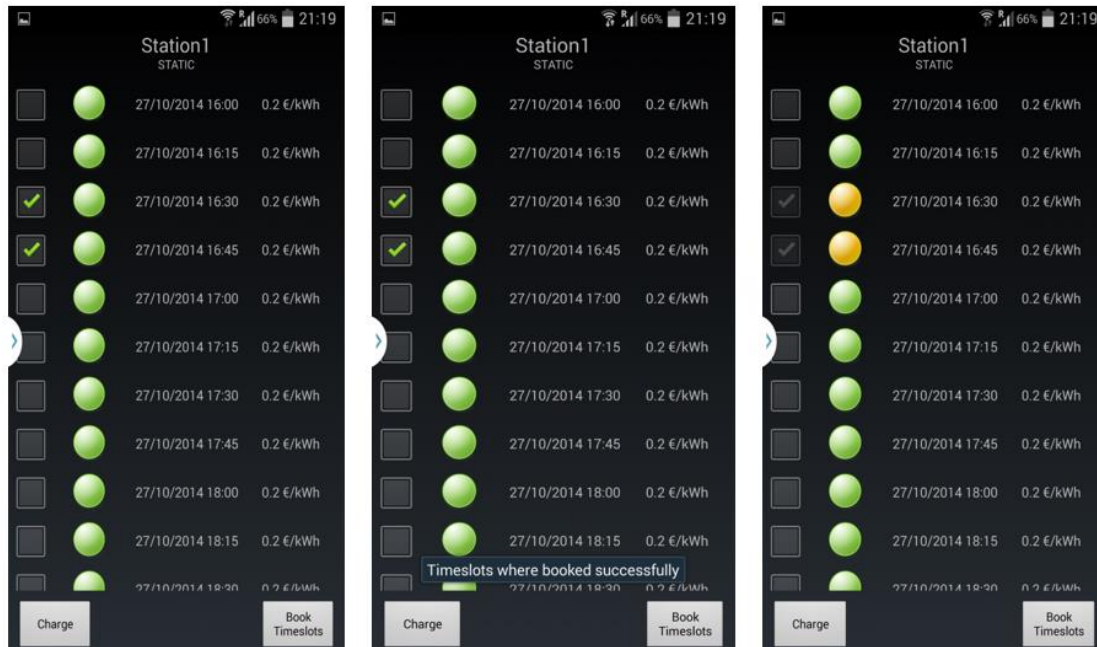
Η εφαρμογή ανανεώνει την κατάσταση των υποδομών φόρτισης ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Μετά από κάθε ανανέωση, το επίπεδο μεγέθυνσης του χάρτη είτε παραμένει στο επίπεδο επιθυμίας του χρήστη είτε επανέρχεται σε ένα προεπιλεγμένο επίπεδο.



Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζει την προβολή του χάρτη βάσει της γεωγραφικής του θέσης. Η προσαρμογή της προβολής γίνεται αυτόματα και προϋποθέτει την ενεργοποίηση της υπηρεσίας GPS.

Στη συνέχεια, η εφαρμογή δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει ένα σταθμό φόρτισης από τον χάρτη και να λάβει περισσότερες πληροφορίες για αυτόν. Με το άγγιγμα του εικονιδίου κάθε σταθμού φόρτισης εμφανίζεται μια δευτερεύουσα οθόνη της εφαρμογής όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 6-24. Στην οθόνη αυτή, ο χρήστης μπορεί να δει πληροφορίες αποκλειστικά για τον συγκεκριμένο σταθμό, π.χ. διαθεσιμότητα του σταθμού για τις επόμενες 24 ώρες, το κόστος της ενέργειας φόρτισης ανάλογα με τη συμφωνηθείσα τιμολογιακή πολιτική. Στην οθόνη αυτή ο

χρήστης έχει τη δυνατότητα να ζητήσει άδεια φόρτισης για τον συγκεκριμένο σταθμό πιέζοντας την επιλογή “Charge”. Στην περίπτωση που ο σταθμός φόρτισης είναι διαθέσιμος, η πλατφόρμα διαχείρισης επιτρέπει την έναρξη της διαδικασίας φόρτισης. Επιπρόσθετα, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δεσμεύσει τον σταθμό φόρτισης για μελλοντική χρήση επιλέγοντας τα αντίστοιχα χρονικά διαστήματα και πατώντας την επιλογή “Book timeslots”. Σε περίπτωση επιτυχημένης κράτησης, η χρωματική ένδειξη των αντίστοιχων χρονικών διαστημάτων μεταβάλλεται από πράσινη σε πορτοκαλί.



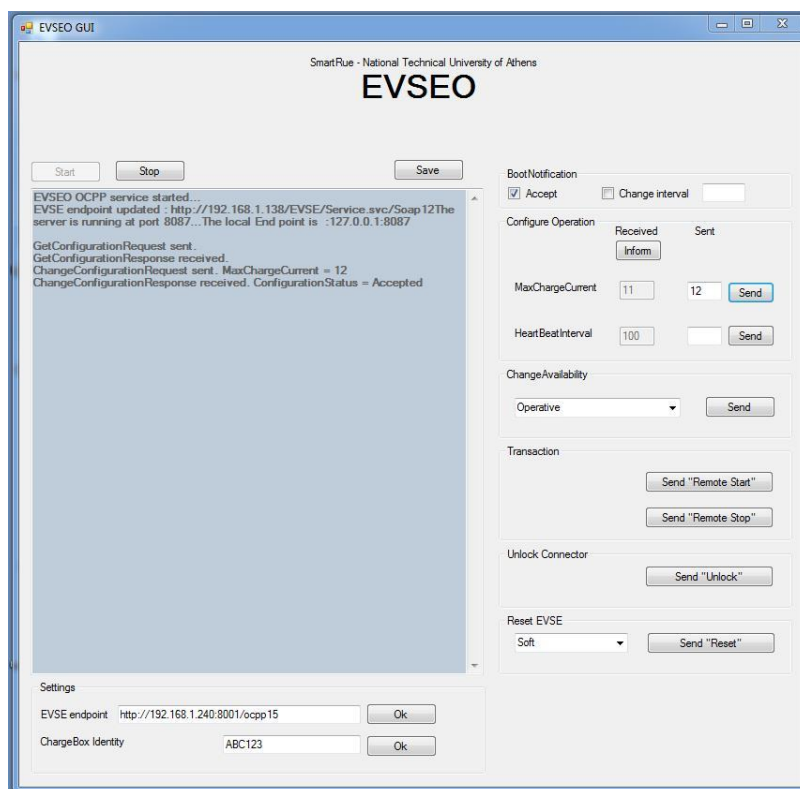
Εικόνα 6-24 Δευτερεύουσα οθόνη εφαρμογής χρήστη – πληροφορίες ανά σταθμό

### 6.3.6 Πιλοτικές εφαρμογές της πλατφόρμας διαχείρισης υποδομών φόρτισης

Η πλατφόρμα διαχείρισης υποδομών φόρτισης εφαρμόστηκε σε πραγματικό περιβάλλον στην πόλη Douai, Γαλλία, στα πλαίσια του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος FastInCharge. Η εφαρμογή της αφορούσε στη διαχείριση υποδομών επαγωγικής (ασύρματης) φόρτισης. Οι υποδομές φόρτισης αναπτύχθηκαν από το Πολυτεχνείο του Gabrono στην Βουλγαρία σε συνεργασία με την Γαλλική εταιρεία κατασκευής σταθμών φόρτισης DBT. Ενδεικτικές καταγραφές της επικοινωνίας ενός σταθμού φόρτισης της Γαλλικής εταιρείας DBT με την πλατφόρμα διαχείρισης όπως καταγράφηκαν στον server της DBT παρουσιάζονται στο Παράρτημα Δ.

Για τον έλεγχο της λειτουργίας των υποδομών φόρτισης μέσω της πλατφόρμας διαχείρισης αναπτύχθηκε μια διεπαφή χρήστη μέσω της οποίας πραγματοποιείται η παρακολούθηση και η διαχείριση των σταθμών φόρτισης. Η εφαρμογή αυτή χρησιμοποιήθηκε για τον έλεγχο δύο εμπορικών σταθμών φόρτισης: έναν οικιακό σταθμό φόρτισης της ETREL (Etrell charging wallbox 16A) και έναν σταθμό φόρτισης της εταιρείας RSE. Οι δοκιμές της πλατφόρμας διαχείρισης πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος COTEVOS<sup>8</sup>. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών παρουσιάζονται στο Παράρτημα Ε.

<sup>8</sup> <http://www.gridinnovation-on-line.eu/Articles/Library/COTEVOS---Ensuring-Electric-Vehicle-EV-Interoperability-Within-Smart-Grids.kl>



Εικόνα 6-25 Δευτερεύουσα οθόνη εφαρμογής χρήστη – πληροφορίες ανά σταθμό

## 6.4 Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό της διδακτορικής διατριβής αναλύθηκαν τα πρότυπα ηλεκτροκίνησης με σκοπό την ανάπτυξη πρότυπων υποδομών φόρτισης και μιας διαλειτουργικής πλατφόρμας διαχείρισης για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της λειτουργίας τους. Οι πρότυπες τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διδακτορική διατριβή (προσομοιωτής ηλεκτρικού οχήματος, σταθμός φόρτισης, πλατφόρμα διαχείρισης, εφαρμογή χρήστη) εφαρμόστηκαν πιλοτικά σε πραγματικά, ελεγχόμενα περιβάλλοντα λειτουργώντας συνδυαστικά με εμπορικά διαθέσιμες τεχνολογίες.

Όσον αφορά στην ανάπτυξη των υποδομών φόρτισης, τα βασικά πρότυπα ηλεκτροκίνησης είναι δύο: IEC 61851 Electric vehicle conductive charging system που αφορά στην επικοινωνία χαμηλού επιπέδου για την ενσύρματη φόρτιση και IEC 15118 Road vehicles - Vehicle to grid communication interface που αφορά στην επικοινωνία υψηλού επιπέδου για την ενσύρματη φόρτιση. Η υιοθέτηση του προτύπου IEC15118 είναι περιορισμένη σε μικρής κλίμακας εφαρμογές. Αντιθέτως, το πρότυπο IEC61851 υιοθετείται από όλες τις υποδομές φόρτισης και τα ηλεκτρικά οχήματα. Το συγκεκριμένο πρότυπο περιγράφει την επικοινωνία του σταθμού φόρτισης με το ηλεκτρικό όχημα μέσω ενός πιλοτικού σήματος (Control Pilot). Για την υλοποίηση του προτύπου IEC61851, αναπτύχθηκαν και οι δύο πλευρές επικοινωνίας, δηλαδή ένας προσομοιωτής ηλεκτρικού οχήματος και ένας σταθμός φόρτισης. Μάλιστα, ο σταθμός φόρτισης που αναπτύχθηκε πέρασε επιτυχώς τις δοκιμές συμβατότητας με το πρότυπο IEC61851 που πραγματοποιήθηκαν στο ερευνητικό κέντρο JRC της ΕΕ στην Ispra, Ιταλία. Επιπρόσθετα, οι δύο αυτές τεχνολογίες εξετάστηκαν ξεχωριστά με άλλες εμπορικά διαθέσιμες επιλογές (είτε ηλεκτρικά οχήματα είτε σταθμούς φόρτισης). Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών αποδεικνύουν ότι υπάρχουν ορισμένα θέματα συμβατότητας με



το πρότυπο IEC61851 που εντοπίζονται στην διαφορετική συμπεριφορά των τεχνολογιών αυτών υπό συνθήκες μη ομαλής εκτέλεσης της διαδικασίας φόρτισης.

Όσον αφορά στην πλατφόρμα διαχείρισης υποδομών φόρτισης, κάθε εταιρία προμήθειας υποδομών φόρτισης υιοθετεί το δικό της σύστημα παρακολούθησης και διαχείρισης τους. Ως εκ τούτου, η προμήθεια διαφορετικών τύπων υποδομών φόρτισης από διαφορετικούς προμηθευτές θα υποχρέωνε τον εκάστοτε διαχειριστή υποδομών φόρτισης να επιβλέπει πολλαπλές εφαρμογές για την παρακολούθηση και διαχείριση τους. Σκοπός της πλατφόρμας διαχείρισης που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής είναι η δυνατότητα επικοινωνίας του κεντρικού διαχειριστή με κάθε τύπο υποδομών φόρτισης ανεξαρτήτως κατασκευαστή. Για τον σκοπό αυτό, η επικοινωνία της πλατφόρμας διαχείρισης με τους σταθμούς φόρτισης υιοθετεί τις αρχές επικοινωνίας του πρωτοκόλλου OCPP. Ένα σημαντικό ποσοστό των κατασκευαστών υποδομών φόρτισης υιοθετούν το πρότυπο OCPP ως εναλλακτικό τρόπο παρακολούθησης και διαχείρισης τους. Επιπρόσθετα, η πλατφόρμα διαχείρισης παρέχει υπηρεσίες ηλεκτροκίνησης στους χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων, όπως χαρτογράφηση του δικτύου των υποδομών φόρτισης, ενημέρωση διαθεσιμότητας τους, κράτηση σταθμών φόρτισης για μελλοντική χρήση κτλ, καθώς και υπηρεσίες διαχείρισης φορτίου (demand response services) με τον απομακρυσμένο έλεγχο του επιπέδου φόρτισης. Η πλατφόρμα διαχείρισης που αναπτύχθηκε δοκιμάστηκε επιτυχώς με εμπορικούς σταθμούς ενσύρματης φόρτισης (ETREL, RSE) στο ερευνητικό κέντρο JRC της ΕΕ στην Ispra, Ιταλία καθώς και με σταθμούς επαγωγικής (ασύρματης) φόρτισης που κατασκευάστηκαν από τη Γαλλική εταιρία DBT σε συνεργασία με το Πολυτεχνείο του Gabrovo, Βουλγαρία.

Τέλος, η πλατφόρμα διαχείρισης και ο σταθμός φόρτισης που αναπτύχθηκε στην παρούσα διδακτορική διατριβή επιτρέπουν την ανάπτυξη μικρών πιλοτικών εφαρμογών σε εργαστηριακό ή σε ελεγχόμενο πραγματικό περιβάλλον με σκοπό την υλοποίηση και δοκιμή καινοτόμων αλγορίθμων διαχείρισης ηλεκτρικών οχημάτων για ερευνητικούς σκοπούς.



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΣΥΜΒΟΛΗ - ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

### 7.1 Ανακεφαλαίωση και συμπεράσματα

Ο σύγχρονος τρόπος ζωής με τις αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις για την εξυπηρέτηση των ανθρώπινων δραστηριοτήτων έχει προκαλέσει σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, οι οποίες είναι εμφανείς στην καθημερινή μας ζωή (π.χ. αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του περιβάλλοντος, έντονα και καταστροφικά καιρικά φαινόμενα, νέφος, κ.τ.λ.). Οι κύριες ανθρώπινες δραστηριότητες επιβάρυνσης του περιβάλλοντος είναι η παραγωγή ενέργειας και ακολουθούν οι μεταφορές. Οι δύο αυτοί τομείς των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, ενέργειας και μεταφορών, είναι υπεύθυνοι για τα 2/3 των παγκόσμιων εκπεμπόμενων ρύπων CO<sub>2</sub>. Μάλιστα, στον τομέα των μεταφορών, οι οδικές μεταφορές είναι ο κύριος ρυπαντής με σοβαρές επιπτώσεις κυρίως στη ποιότητα ζωής των αστικών κέντρων. Η «από-ανθρακοποίηση» του τομέα της ενέργειας και των μεταφορών αποτελεί μονόδρομο για τη διασφάλιση της ποιότητας ζωής των επόμενων γενεών. Στον τομέα της ενέργειας, εδώ και δύο δεκαετίες, έχουν γίνει σημαντικές προσπάθειες για την παραγωγή «πράσινης» ενέργειας μέσω της εκμετάλλευσης των φυσικών ενεργειακών πόρων (αέρας, ήλιος, θαλάσσια κύματα κ.τ.λ.). Στον τομέα των μεταφορών, τα πρώτα βήματα εξηλεκτισμού των οδικών μεταφορών παρατηρούνται στις αρχές της δεκαετίας μας. Τα σημαντικά οφέλη που απορρέουν από την αντικατάσταση των συμβατικών οχημάτων με ηλεκτρικά καθώς και οι προοπτικές ανάπτυξης μιας νέας αγοράς με ποικίλες επιχειρηματικές δραστηριότητες αποτέλεσαν το εφαλτήριο για το έντονο ενδιαφέρον πολλών εμπλεκόμενων φορέων (αυτοκινητοβιομηχανιών, εταιριών κατασκευής/προμήθειας σταθμών φόρτισης, λογισμικού, τηλεπικοινωνιών κ.τ.λ.).

Οι μηδενικές εκπομπών αέριων ρύπων από τα ηλεκτρικά οχήματα καθώς και η σημαντικά μειωμένη ηχορύπανση τους τα καθιστούν ιδανική λύση για την βελτίωση των οδικών μεταφορών και της ποιότητας ζωής της κοινωνίας, ιδιαίτερα στα αστικά κέντρα. Ωστόσο, για τον πληρέστερο προσδιορισμό του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των ηλεκτρικών οχημάτων, θα πρέπει να συνυπολογιστεί όλος ο κύκλος λειτουργίας ενός ηλεκτρικού οχήματος. Η ενέργεια που απαιτείται για τις μετακινήσεις των ηλεκτρικών οχημάτων και αποθηκεύεται προσωρινά στις μπαταρίες τους παράγεται από κάποια(ες) μονάδα(ες) παραγωγής. Στην περίπτωση που η πηγή ενέργειας προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, τότε τα ηλεκτρικά οχήματα αποτελούν ένα «πράσινο» μέσω μεταφοράς. Αντίθετα, στην περίπτωση που η πηγή ενέργειας είναι μια συμβατική μονάδα παραγωγής (π.χ. λιγνιτική μονάδα) θα πρέπει να συνυπολογιστεί και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της παραγόμενης ενέργειας για την εξυπηρέτηση των ενεργειακών αναγκών μετακίνησης των οχημάτων. Από τις ενεργειακές μελέτες της παρούσας διατριβής (μελέτη ενεργειακού συστήματος Κρήτης) αποδεικνύεται ότι το ενεργειακό αποτύπωμα των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ 60-93grCO<sub>2</sub>/χιλ, ανάλογα με τον τρόπο φόρτισης τους και την αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για τη φόρτιση τους.

Ο εξηλεκτισμός του τομέα των μεταφορών απαιτεί τη διασύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μέσω κατάλληλων υποδομών φόρτισης. Οι ενεργειακές ανάγκες των ηλεκτρικών οχημάτων θα πρέπει να εξυπηρετούνται όπως και η οικιακή κατανάλωση, χωρίς καμία διάκριση. Η διαφορετικότητα του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων συγκριτικά με το οικιακό φορτίο έγκειται στο γεγονός ότι το φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων δεν είναι στατικό και μπορεί να μετατοπιστεί τόσο χωρικά όσο και χρονικά. Από την πλευρά των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας, η ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων για τη φόρτιση τους αποτελεί ένα επιπρόσθετο φορτίο που αναμένεται να μεταβάλλει την καμπύλη φορτίου του συστήματος, ανάλογα με το επίπεδο ενσωμάτωσης των ηλεκτρικών οχημάτων και τον τρόπο φόρτισης τους. Για μικρά ποσοστά διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας δεν αναμένεται να υπάρξουν αξιοσημείωτες επιπτώσεις στον τρόπο λειτουργίας και διαχείρισης των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, όσο το επίπεδο διείσδυσης αυξάνεται, είναι απαραίτητη η

ανάπτυξη και εφαρμογή κατάλληλων στρατηγικών ευέλικτης φόρτισης με σκοπό την ευσταθή και ασφαλή λειτουργία των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας.

Πιο συγκεκριμένα, η «plug-n-play» ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας αποδεικνύεται η λιγότερο αποδοτική στρατηγική φόρτισης. Στην περίπτωση αυτή, το προφίλ ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων εξαρτάται άμεσα από την επιστροφή των χρηστών στην οικία τους, με αποτέλεσμα το φορτίο τους να συμπίπτει με την υψηλή οικιακή κατανάλωση, επιβαρύνοντας επιπρόσθετα τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Η μη ελεγχόμενη φόρτιση έχει αρνητικές επιπτώσεις στην οικονομική και τεχνική απόδοση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η εξυπηρέτηση των ενεργειακών αναγκών τους τις ώρες αιχμής πραγματοποιείται από τις μονάδες αιχμής, που έχουν και το υψηλότερο κόστος παραγωγής. Ως εκ τούτου, το μοναδιαίο κόστος (€/kWh) της επιπρόσθετης ενέργειας φόρτισης είναι το υψηλότερο δυνατό. Όσον αφορά στην αποδοτικότητα της λειτουργίας των δικτύων, αύξηση της αιχμής ζήτησης συνεπάγεται μεγιστοποίηση της επιβάρυνσης του εξοπλισμού του δικτύου και των απωλειών του.

Όσον αφορά στην επάρκεια του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, ακόμα και στο χειρότερο σενάριο, υψηλή διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων (υπεραισιόδοξο σενάριο) με μη ελεγχόμενη φόρτιση, το επιπρόσθετο φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων δεν αναμένεται να εγείρει ζητήματα επάρκειας της παραγωγής ή του συστήματος μεταφοράς. Λειτουργικά προβλήματα αναμένονται σε τοπικά δίκτυα. Κάθε δίκτυο διανομής έχει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης ενός μέγιστου αριθμού ηλεκτρικών οχημάτων, πέραν του οποίου παραβιάζεται ένας ή περισσότεροι λειτουργικοί περιορισμοί του δικτύου (θερμικά όρια γραμμών, φόρτιση μετασχηματιστών, μέγιστη διακύμανση τάσης κτλ). Το κριτήριο για τον προσδιορισμό της μέγιστης επιτρεπόμενης διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων καθορίζεται από τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε δικτύου. Πιο συγκεκριμένα, τα αστικά δίκτυα διανομής είναι συνήθως πυκνά και το επίπεδο φόρτισης τους είναι υψηλό λόγω του αυξημένου πληθυσμού που εξυπηρετεί. Ως εκ τούτου, η ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων αναμένεται να επιβαρύνει περαιτέρω τη φόρτιση των υποδομών του δικτύου. Αντίθετα, τα επαρχιακά δίκτυα διανομής χαρακτηρίζονται από το μεγάλο μήκος των γραμμών τους, το οποίο συνεπάγεται μεγάλες πτώσεις τάσεις, ενώ το φορτίο που εξυπηρετούν είναι σχετικά χαμηλό. Συνεπώς, για τον προσδιορισμό του μέγιστου επιτρεπτού αριθμού ηλεκτρικών οχημάτων που μπορούν να συνδεθούν σε ένα δίκτυο χωρίς να παραβιάζονται οι λειτουργικοί περιορισμοί των δεικτών διανομής, λαμβάνεται υπόψη η χωρητικότητα του εξοπλισμού του δικτύου στην περίπτωση αστικών δικτύων και το προφίλ της τάσης στη περίπτωση επαρχιακών δικτύων.

Η υιοθέτηση απλών μηχανισμών αγοράς για τη μετατόπιση της ζήτησης από ώρες αιχμής σε περιόδους χαμηλής κατανάλωσης, όπως το διζωνικό τιμολόγιο, μπορεί να είναι αποδοτική κατά περίπτωση. Το σημαντικότερο μειονέκτημα της εφαρμογής της ελεγχόμενης φόρτισης με διζωνικό τιμολόγιο είναι ο ταυτοχρονισμός του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων τη χρονική στιγμή έναρξης της περιόδου χαμηλής τιμολόγησης. Η απότομη αιχμή ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων τη χρονική αυτή στιγμή δεν επηρεάζει σημαντικά τη λειτουργία των δικτύων όσο η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων δεν είναι υψηλή και η κατανάλωση δικτύου είναι χαμηλή συγκριτικά με το φορτίο αιχμής δικτύου. Σε αντίθετη περίπτωση, η ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο μπορεί να επιφέρει χειρότερη επιβάρυνση στο δίκτυο, συγκριτικά με τη μη ελεγχόμενη φόρτιση. Για τον λόγο αυτό, η εφαρμογή της ελεγχόμενης φόρτισης με διζωνικό τιμολόγιο συνίσταται μόνο κατά τα πρώτα στάδια ενσωμάτωσης των ηλεκτρικών οχημάτων στα δίκτυα.

Η εφαρμογή πιο σύνθετων στρατηγικών φόρτισης προσαρμοσμένων στις ανάγκες και αδυναμίες του εκάστοτε δικτύου αποτελεί την ιδανικότερη εναλλακτική για την αποδοτικότερη ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή εξετάστηκαν δύο σύνθετες στρατηγικές φόρτισης: “valley-filling” και συνέργεια ΑΠΕ/ηλεκτρικών οχημάτων. Κύριο χαρακτηριστικό και των δύο αυτών στρατηγικών φόρτισης, είναι η αποδοτικότερη αξιοποίηση της χωρητικότητας του δικτύου και των τοπικών ενεργειακών πόρων με σκοπό τη μεγιστοποίηση του ποσοστού ενσωμάτωσης των ηλεκτρικών οχημάτων χωρίς να παραβιάζονται οι λειτουργικοί περιορισμοί των δικτύων. Οι δύο αυτές στρατηγικές αποδείχθηκαν, οικονομικά και τεχνικά, αποδοτικότερες συγκριτικά με τη μη ελεγχόμενη φόρτιση και την ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο. Μάλιστα, η ελεγχόμενη φόρτιση με συνέργεια

ΑΠΕ/ηλεκτρικών οχημάτων μεγιστοποιεί και τα περιβαλλοντικά οφέλη τόσο στον τομέα των οδικών μεταφορών όσο και στο τομέα της ενέργειας. Παρά το γεγονός ότι οι στρατηγικές “valley-filling” και συνέργεια ΑΠΕ/ηλεκτρικών οχημάτων είναι αποδοτικότερες, η εφαρμογή τους είναι ιδιαίτερα σύνθετη διαδικασία και απαιτείται η ανάπτυξη/εφαρμογή προχωρημένων μοντέλων και υποδομών διαχείρισης.

Όσον αφορά στις υποδομές διαχείρισης, η αξιοποίηση των υφιστάμενων τηλεπικοινωνιακών υποδομών μπορεί να μειώσει σημαντικά το χρόνο και το κόστος εφαρμογής σύνθετων στρατηγικών φόρτισης.

Όσον αφορά στην ανάπτυξη προχωρημένων μοντέλων διαχείρισης, η υιοθέτηση αποκεντρωμένων αλγορίθμων διαχείρισης αποδείχθηκε αποδοτικότερη, συγκριτικά με τους αντίστοιχους κεντρικούς αλγορίθμους, καθώς παρέχουν την ίδια βέλτιστη λύση με αισθητά μικρότερο χρόνο σύγκλισης. Μάλιστα, στην περίπτωση των σύνθετων στρατηγικών φόρτισης “valley-filling” και συνέργεια ΑΠΕ/ηλεκτρικών οχημάτων ο χρόνος σύγκλισης συναρτήσει του μεγέθους του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων είναι εκθετικός στην περίπτωση υιοθέτησης κεντρικών αλγορίθμων, λόγω της τετραγωνικής πολυπλοκότητας του προβλήματος βελτιστοποίησης. Η υιοθέτηση αποκεντρωμένων αλγορίθμων μετατρέπει τη σύγκλιση από εκθετική σε γραμμική. Περαιτέρω μείωση του χρόνου σύγκλισης μπορεί να επιτευχθεί με την υιοθέτηση ιεραρχικής δομής επικοινωνίας με σκοπό τον περιορισμό του όγκου μετάδοσης των δεδομένων.

Η ανάπτυξη αποκεντρωμένων αλγορίθμων στηρίζεται στην κατανομημένη ευφυΐα, δηλαδή στην ικανότητα των ίδιων των ηλεκτρικών οχημάτων να λαμβάνουν αποφάσεις σχετικά με το βέλτιστο προφίλ φόρτισης τους λαμβάνοντας υπόψη τους τοπικούς περιορισμούς λειτουργίας (λειτουργία όρια μπαταρίας, κινητικότητα οχημάτων, κατανάλωση μπαταρίας κτλ) καθώς και παραμέτρους του περιβάλλοντος τους (τιμές αγοράς ενέργειας, περιορισμοί δικτύου, ανάγκες χρήστη κ.τ.λ.). Όμως πέραν της τοπικής ευφυΐας, ο συντονισμός της συμπεριφοράς των ηλεκτρικών οχημάτων είναι απαραίτητος για την επίτευξη ολιστικών στόχων, όπως “valley-filling” και συνέργεια ΑΠΕ/ηλεκτρικών οχημάτων. Ο συντονισμός τους επιτυγχάνεται μέσω σημάτων ελέγχου που δεν προσδιορίζουν το βέλτιστο προφίλ φόρτισης τους αλλά μπορούν να επηρεάσουν τη βέλτιστη απόφασή τους. Ωστόσο, αποδείχθηκε ότι η υιοθέτηση μόνο σημάτων ελέγχου για τον συντονισμό της λειτουργίας τους δεν είναι αρκετή καθώς η συντονισμένη συμπεριφορά των ηλεκτρικών οχημάτων ταλαντώνεται μεταξύ δύο καταστάσεων χωρίς να επιτυγχάνεται η σύγκλιση στον ολιστικό στόχο. Στις περιπτώσεις αυτές είναι απαραίτητη η μερική σύζευξη των αντικειμενικών συναρτήσεων των ηλεκτρικών οχημάτων. Η επιλογή του όρου σύζευξης στην αντικειμενική συνάρτηση των ηλεκτρικών οχημάτων είναι σημαντική καθώς επηρεάζει την ακρίβεια της σύγκλισης. Η εφαρμογή τέτοιων πολύπλοκων στρατηγικών φόρτισης απαιτεί την υιοθέτηση σύνθετων μαθηματικών μοντέλων, όπως η θεωρία παιγνίων. Οι αποκεντρωμένοι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν στην παρούσα διατριβή για τις στρατηγικές φόρτισης “valley-filling” και συνέργεια ΑΠΕ/ηλεκτρικών οχημάτων ανήκουν στα παίγνια με ένα κριτήριο βελτιστοποίησης (single objective), μη συνεργατικά (non-cooperative) και είναι δυναμικό (dynamic game). Είναι παίγνιο ενός κριτηρίου απόφασης μιας και κάθε παίκτης (χρήστης ηλεκτρικού οχήματος) έχει ένα μόνο στόχο να εξυπηρετήσει. Είναι μη-συνεργατικό παίγνιο, γιατί κάθε παίκτης επιλέγει τη στρατηγική του χωρίς να γνωρίζει την επιλογή στρατηγικής των υπολοίπων. Τέλος, πρόκειται για ένα δυναμικό παίγνιο μιας και κάποιοι παίκτες (ηλεκτρικά οχήματα) καθορίζουν τη στρατηγική τους βασιζόμενοι στα σήματα ελέγχου που άλλοι παίκτες παράγουν (κεντρικός συντονιστής)

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης στην περίπτωση “valley-filling” είναι τετραγωνικού προγραμματισμού με γραμμικούς περιορισμούς το οποίο μπορεί να επιλυθεί με τη μέθοδο των ενεργών συνόλων. Ωστόσο, η υιοθέτηση της αμφίδρομης ροής ισχύος μεταξύ μπαταρίας ηλεκτρικών οχημάτων και δικτύου μετατρέπει το πρόβλημα βελτιστοποίησης σε πιο σύνθετο πρόβλημα μικτού ακέραιου μη τετραγωνικού προγραμματισμού. Η επίλυση τέτοιων προβλημάτων απαιτεί την εφαρμογή πιο σύνθετων εργαλείων βελτιστοποίησης. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή, εξετάστηκαν δύο μέθοδοι επίλυσης μικτού ακέραιου μη τετραγωνικού προγραμματισμού: Bender Decomposition και Outer Approximation. Τα αποτελέσματα της

εφαρμογής των δύο μεθόδων αποδεικνύουν ότι η Outer Approximation παρουσιάζει ταχύτερη σύγκλιση και μεγαλύτερη ακρίβεια συγκριτικά με τη Bender Decomposition, λόγω των αυστηρότερων περιορισμών που εισάγονται στο κεντρικό πρόβλημα (Master problem).

Το τελικό στάδιο ενσωμάτωσης των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει τη συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, χονδρεμπορική και επικουρικών υπηρεσιών. Για την αποδοτικότερη ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στις αγορές ενέργειας απαιτείται ο προγραμματισμός της λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων και η υποβολή προσφορών στον λειτουργό της αγοράς. Η μεγιστοποίηση των κερδών από τη συμμετοχή στις αγορές ενέργειας προϋποθέτει την αμφίδρομη ροή ισχύος και την αποδέσμευση των αγορών επικουρικών υπηρεσιών για την υποβολή ασύμμετρων προσφορών. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού των ηλεκτρικών οχημάτων για τη συμμετοχή τους στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού. Η ωραία διαχείριση των ηλεκτρικών οχημάτων για την κατανομή του βέλτιστου προφίλ από τον ημερήσιο προγραμματισμό προσεγγίστηκε ως ένα πρόβλημα πολυπρόσωπων αποφάσεων με συγκρουόμενα κριτήρια και είναι μικτού αθέτου μη γραμμικού προγραμματισμού. Για την επίλυση του προτάθηκε ένα δυναμικό παίγνιο ηγέτη-ακολουθών ("leader-followers" – Stackelberg game).

Η συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στις αγορές επικουρικών υπηρεσιών για την υποστήριξη της συχνότητας διακρίνεται στην πρωτεύουσα και στη δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας. Η συνεισφορά των ηλεκτρικών οχημάτων στην υποστήριξη της συχνότητας θα πρέπει να γίνεται με γνώμονα το επίπεδο φόρτισης των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων και τις μελλοντικές ενεργειακές ανάγκες μετακίνησής τους. Στη βάση αυτή, για την απόκριση των ηλεκτρικών οχημάτων στον πρωτογενή έλεγχο της συχνότητας αναπτύχθηκε ένας προσαρμοστικός έλεγχος μέσω χαρακτηριστικής στατισμού (adaptive droop control). Ο συνήθης στατικός έλεγχος μέσω καμπυλών στατισμού (static droop-control), που υιοθετείται και σε περιπτώσεις στήριξης της συχνότητας δικτύου από αποθηκευτικά μέσα μέσω μετατροπών ισχύος, επιβάλλει την ομοιογενή αντίδραση των ηλεκτρικών οχημάτων στις μεταβολές της συχνότητας. Για παράδειγμα, ένα όχημα που το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας είναι 30% θα αποκριθεί σε μια αρνητική μεταβολή της συχνότητας ( $\Delta f < 0$ ) προσφέροντας ισχύ ή αποκόπτοντας ισχύ από τη φόρτιση του ίση με την αντίστοιχη ισχύ ενός οχήματος με επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας 80%. Αντίθετα, ο προσαρμοστικός έλεγχος μέσω χαρακτηριστικής στατισμού επιτρέπει την ετερογένεια της απόκρισης των ηλεκτρικών οχημάτων βάσει του επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας τους. Επιπρόσθετα, στον προσαρμοστικό έλεγχο, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ορίσει την ροπή της συνεισφοράς της μπαταρίας στη ρύθμιση συχνότητας, ανάλογα με τις ανάγκες του, δίνοντας περισσότερη βαρύτητα στη φόρτιση ή την εκφόρτιση της.

Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του προσαρμοστικού ελέγχου μέσω χαρακτηριστικής στατισμού στο αυτόνομο σύστημα της Κρήτης αποδεικνύουν τη δυνατότητα αξιοποίησης της αδρανούς χωρητικότητας της μπαταρίας των ηλεκτρικών οχημάτων για την υποστήριξη της λειτουργίας του δικτύου. Παρά την ετερογένεια στην απόκριση των ηλεκτρικών οχημάτων στις μεταβολές της συχνότητας, λόγω της υιοθέτησης του προσαρμοστικού ελέγχου, η συνολική συνεισφορά του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων επαρκεί για την υποστήριξη της συχνότητας του δικτύου. Η χρήση της αμφίδρομης ροής ισχύος μεταξύ δικτύου και ηλεκτρικών οχημάτων είναι πιο αποτελεσματική από την αποκοπή της φόρτισης για τη ρύθμιση της συχνότητας δικτύου. Ωστόσο, το μεγαλύτερο μειονέκτημα της V2G λειτουργίας είναι η φθορά της μπαταρίας, που μπορεί να αποτρέψει κάποιους χρήστες από την εφαρμογή της. Ωστόσο, από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αποδείχθηκε ότι ακόμα και η μειωμένη συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στη V2G λειτουργία μπορεί να υποστηρίξει τη συχνότητα (και μάλιστα να αποτρέψει μια ενδεχόμενη κατάρρευση της συχνότητας).

Αντίστοιχα, για τη συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στη δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας, αναπτύχθηκε ένας αποκεντρωμένος αλγόριθμος ο οποίος καθορίζει την απόκριση των ηλεκτρικών οχημάτων σε ένα σήμα ρύθμισης συχνότητας βάσει των ενεργειακών αναγκών κάθε ηλεκτρικού οχήματος και το διαθέσιμο χρονικό διάστημα που το όχημα παραμένει σταθμευμένο. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος είναι απλός στην εφαρμογή του, εξασφαλίζει πολύ γρήγορη

σύγκλιση μέσα σε λίγες επαναλήψεις και λαμβάνει υπόψη του τις μελλοντικές ενεργειακές ανάγκες μετακίνησης των οχημάτων.

Η προτυποποίηση των τεχνολογιών/επικοινωνιών ηλεκτροκίνησης καθώς και η θεσμοθέτηση ενός ολοκληρωμένου πλαισίου ηλεκτροκίνησης είναι απαραίτητες την ανάπτυξη και προώθηση του εξηλεκτρισμού του τομέα των μεταφορών. Στην παρούσα διδακτορική διατριβή έγινε μια εκτενής ανάλυση σε ρυθμιστικά θέματα, βάσει των πρακτικών που υιοθετούνται σε διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες και των οδικών χαρτών ηλεκτροκίνησης που εξήχθησαν από σχετικά Ευρωπαϊκά προγράμματα, καθώς και στα πρότυπα ηλεκτροκίνησης, βάσει των οποίων αναπτύχθηκε ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης και λειτουργίας υποδομών φόρτισης. Η πρότυπη υποδομή φόρτισης (πιστοποιήθηκε η συμβατότητα της με το πρότυπο IEC61851 από το ερευνητικό κέντρο JRC της ΕΕ στην Ispra, Ιταλία) και η πλατφόρμα διαχείρισης σταθμών φόρτισης (back-office σύστημα) εξυπηρετούν δύο σκοπούς: τον έλεγχο συμβατότητας με τα διεθνή πρότυπα εμπορικά διαθέσιμων τεχνολογιών ηλεκτροκίνησης και την εφαρμογή και αξιολόγηση καινοτόμων αλγορίθμων διαχείρισης της λειτουργίας ενός στόλου ηλεκτρικών οχημάτων. Οι δοκιμές συμβατότητας με εμπορικά διαθέσιμες τεχνολογίες ηλεκτροκίνησης, που πραγματοποιήθηκαν στο ερευνητικό κέντρο JRC, αποδεικνύουν ότι παρά την ωριμότητα των τεχνολογιών ηλεκτροκίνησης παρατηρούνται ορισμένες αποκλίσεις συμβατότητας με τα πρότυπα υπό συνθήκες μη ομαλής εκτέλεσης της διαδικασίας φόρτισης. Η πλατφόρμα διαχείρισης των υποδομών φόρτισης που αναπτύχθηκε επιτρέπει την εφαρμογή και δοκιμή καινοτόμων αλγορίθμων διαχείρισης φορτίου (demand response services) στο πλαίσιο των έξυπνων δικτύων σε πραγματικό ή εργαστηριακό περιβάλλον.

## 7.2 Συνεισφορά της διατριβής

Η συμβολή της διατριβής συνοψίζεται στα εξής:

### ❖ Κεφάλαιο 2:

- Αναπτύχθηκε ένα στοχαστικό εργαλείο προσομοίωσης για την εκτίμηση του επιπρόσθετου φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων. Το εργαλείο αυτό αναπτύχθηκε στο περιβάλλον Matlab και μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί σε εργαλεία μελετών ροών φορτίου όπως το Matpower κτλ. Επιπρόσθετα, το συγκριμένο εργαλείο προσομοίωσης δίνει τη δυνατότητα μελέτης του προφίλ ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων για διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης.
- Αναλύθηκε εκτενώς η επίδραση της ενσωμάτωσης των ηλεκτρικών οχημάτων στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. Εξήχθησαν τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά συμπεράσματα αναφορικά με την επίδραση των ηλεκτρικών οχημάτων στην καμπύλη φορτίου του συστήματος (Ελλάδα, Ισπανία, Γερμανία, Ηνωμένο Βασίλειο, Πορτογαλία), στο σύστημα παραγωγής και στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής.

### ❖ Κεφάλαιο 3:

- Αναπτύχθηκε ένας κεντρικός αλγόριθμος προγραμματισμού της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων για την ελαχιστοποίηση του κόστους των ηλεκτρικών οχημάτων λαμβάνοντας υπόψη και πιθανούς περιορισμούς του δικτύου (αποκοπή αιχμής ζήτησης ηλεκτρικών οχημάτων). Η εφαρμογή του αλγορίθμου αυτού είναι απλή μιας και δεν απαιτείται η ανάπτυξη σύνθετων υποδομών διαχείρισης της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων.
- Αναπτύχθηκε ένας κεντρικός αλγόριθμος διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων που επιτρέπει τη διαχείριση ενός στόλου ηλεκτρικών οχημάτων σε πραγματικό χρόνο. Η εφαρμογή του ενδείκνυται για τη διαχείριση υποδομών δημόσιας χρήσης σε δίκτυα διανομής Μ.Τ., για την αποφυγή υπερφόρτισης των υποδομών του δικτύου διανομής.
- Αναπτύχθηκε ένας αποκεντρωμένος αλγόριθμος διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων βασισμένος στη θεωρία παιγνίων και πιο συγκεκριμένα στα παίγνια μέσου πεδίου (mean-field games). Η αποτελεσματικότητά του προτεινόμενου αποκεντρωμένου

αλγόριθμου επιβεβαιώνεται από τα συγκριτικά αποτελέσματα ακρίβειας και χρόνου σύγκλισης στη βέλτιστη λύση εν συγκρίσει με τον αντίστοιχο κεντρικό αλγόριθμο. Επιπρόσθετα, προτάθηκε και μια ιεραρχική δομή επικοινωνίας που βασίζεται στις αρχές των πολύ-πρακτορικών συστημάτων (Multi-agent Systems) με σκοπό τη μείωση των καθυστερήσεων επικοινωνίας και την ταχύτερη σύγκλιση του αλγορίθμου.

❖ Κεφάλαιο 4:

- Αφού αναλύθηκαν εκτενώς τα όρια διείσδυσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ηλεκτρικών οχημάτων σε δίκτυα διανομής, στη συνέχεια αναπτύχθηκαν δύο ισοδύναμοι (κεντρικός και αποκεντρωμένος) αλγόριθμος με σκοπό την συνέργεια μεταξύ ηλεκτρικών οχημάτων και ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για τη μεγιστοποίηση της ικανότητας ενσωμάτωσης ΑΠΕ και ηλεκτρικών οχημάτων στις υφιστάμενες υποδομές δικτύου. Ο κεντρικός αλγόριθμος είναι ένα πρόβλημα μικτού αέριου μη γραμμικού προγραμματισμού και επιλύθηκε με εφαρμογή της μεθόδου Bender Decomposition. Ο προτεινόμενος αποκεντρωμένος αλγόριθμος είναι ένα πρόβλημα απόφασης με πολλούς αποφασίζοντες στον οποίο οι συμμετέχοντες δεν συνεργάζονται μεταξύ τους (παίγνιο Stackelberg). Η σύγκλιση του αποκεντρωμένου αλγορίθμου αποδεικνύεται στο Κεφάλαιο 4 της παρούσας διατριβής. Ο προτεινόμενος αποκεντρωμένος αλγόριθμος εφαρμόστηκε σε δύο Ελληνικά δίκτυα διανομής Μ.Τ. με σκοπό να ποσοτικοποιηθούν τα οφέλη της συνέργειας ΑΠΕ/ηλεκτρικών οχημάτων.

❖ Κεφάλαιο 5:

- Υιοθετήθηκε ο προσαρμοστικός έλεγχος μέσω χαρακτηριστικής στατισμού για τη μελέτη της πρωτεύουσας ρύθμισης συχνότητας των ηλεκτρικών οχημάτων και συγκρίθηκε με τον αντίστοιχο στατικό έλεγχο (περιβάλλον Matlab/Simulink). Ο προσαρμοστικός έλεγχος αναπτύχθηκε και σε περιβάλλον Eurostag με σκοπό τη μελέτη της συνεισφοράς των ηλεκτρικών οχημάτων στην πρωτογενή ρύθμιση συχνότητας σε μη διασυνδεδεμένα ηλεκτρικά συστήματα (Κρήτη).
- Αναπτύχθηκε ένας αποκεντρωμένος αλγόριθμος για την ωριαία κατανομή του βέλτιστου προφίλ λειτουργίας βάσει του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού για την συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας. Ο αποκεντρωμένος αλγόριθμος ανήκει στην κατηγορία προβλημάτων πολυπρόσωπων αποφάσεων με συγκρουόμενα κριτήρια (non-cooperative games) και είναι πρόβλημα μικτού αέριου γραμμικού προγραμματισμού. Λόγω της πολυπλοκότητας της καμπύλης λειτουργίας του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού υιοθετήθηκαν και συγκρίθηκαν δύο μέθοδοι επίλυσης μικτών αέριων μη γραμμικών προβλημάτων: Bender Decomposition και Outer Approximation.
- Αναπτύχθηκαν και συγκρίθηκαν δύο αλγόριθμοι για τη βραχυπρόθεσμη βέλτιστη κατανομή ενός σήματος ισχύος στα ηλεκτρικά οχήματα για τη δευτερεύουσα ρύθμιση συχνότητας: προσαρμοστικός έλεγχος μέσω καμπυλών στατισμού και αποκεντρωμένη κατανομή σήματος δευτερεύουσας ρύθμισης συχνότητας.

❖ Κεφάλαιο 6:

- Αναπτύχθηκαν πρότυπη υποδομή ενσύρματης φόρτισης βάσει του προτύπου IEC61851 και διαλειτουργική πλατφόρμα παρακολούθησης και διαχείρισης υποδομών φόρτισης βάσει του προτύπου επικοινωνίας OCPP. Οι πρότυπες αυτές υποδομές επιτρέπουν την εξέταση συμβατότητας εμπορικών προϊόντων ηλεκτροκίνησης με τα αντίστοιχα πρότυπα ηλεκτροκίνησης και την εφαρμογή/δοκιμή αλγορίθμων διαχείρισης της φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε πραγματικό ή εργαστηριακό περιβάλλον.



### 7.3 Μελλοντικές επεκτάσεις της διατριβής

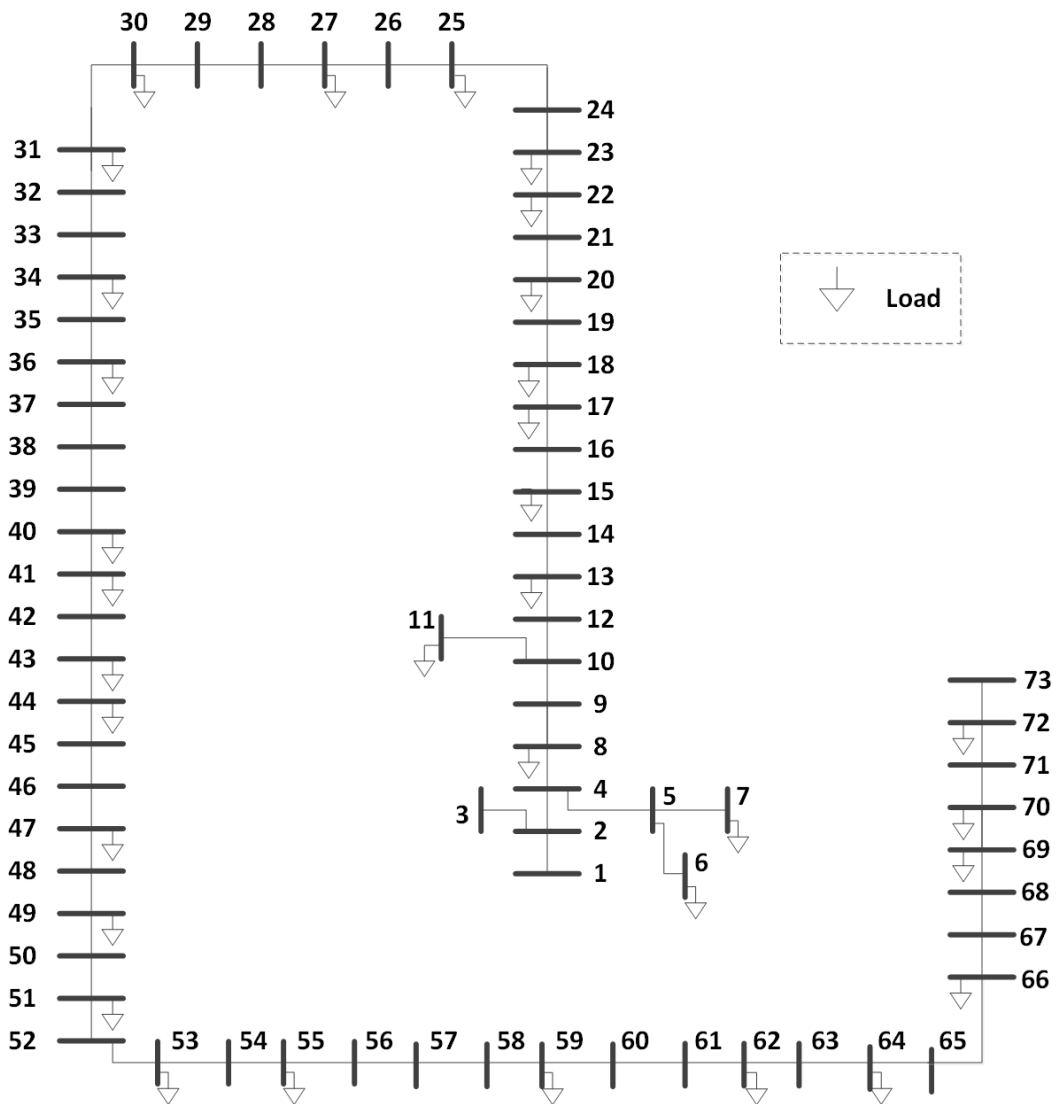
Από τη διατριβή αυτή διαφαίνονται κάποιες κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα:

- Μελέτη, ανάπτυξη και εφαρμογή κατανεμημένων αλγορίθμων διαχείρισης της φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, πχ. κοινής συναίνεσης (consensus algorithms), για την παροχή υπηρεσιών διαχείρισης φορτίου στους εμπλεκόμενους φορείς ηλεκτροκίνησης..
- Ανάπτυξη αλγορίθμων διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων για την υποστήριξη της τάσης σε ένα δίκτυο διανομής, είτε με ρύθμιση ενεργού ισχύος είτε με ρύθμιση άεργου.
- Ανάπτυξη μοντέλου διαχείρισης ηλεκτρικών οχημάτων σε συνδυασμό με άλλους ενεργειακού πόρους, πχ. ευέλικτα φορτία, ελεγχόμενα φορτία προσφορών, τοπικές παραγωγές κτλ. Το μοντέλο αυτό θα μπορούσε να αναπτυχθεί στα πλαίσια των εικονικών σταθμών παραγωγής (Virtual Power Plants – VPP).
- Ενσωμάτωση μοντέλων μπαταρίας ηλεκτρικών οχημάτων και διαχείρισης τους στο RTDS (Real-Time Digital Power System Simulator) για την εκτέλεση hardware-in-the loop προσομοιώσεων. Οι προσομοιώσεις αυτές μπορούν να συνδυαστούν με πλατφόρμες προσομοίωσης για τηλεπικοινωνιακά δίκτυα με σκοπό να αξιολογηθεί η πραγματική επίπτωση των επικοινωνιακών καθυστερήσεων στη σύγκλιση των αποκεντρωμένων αλγορίθμων (co-simulations).

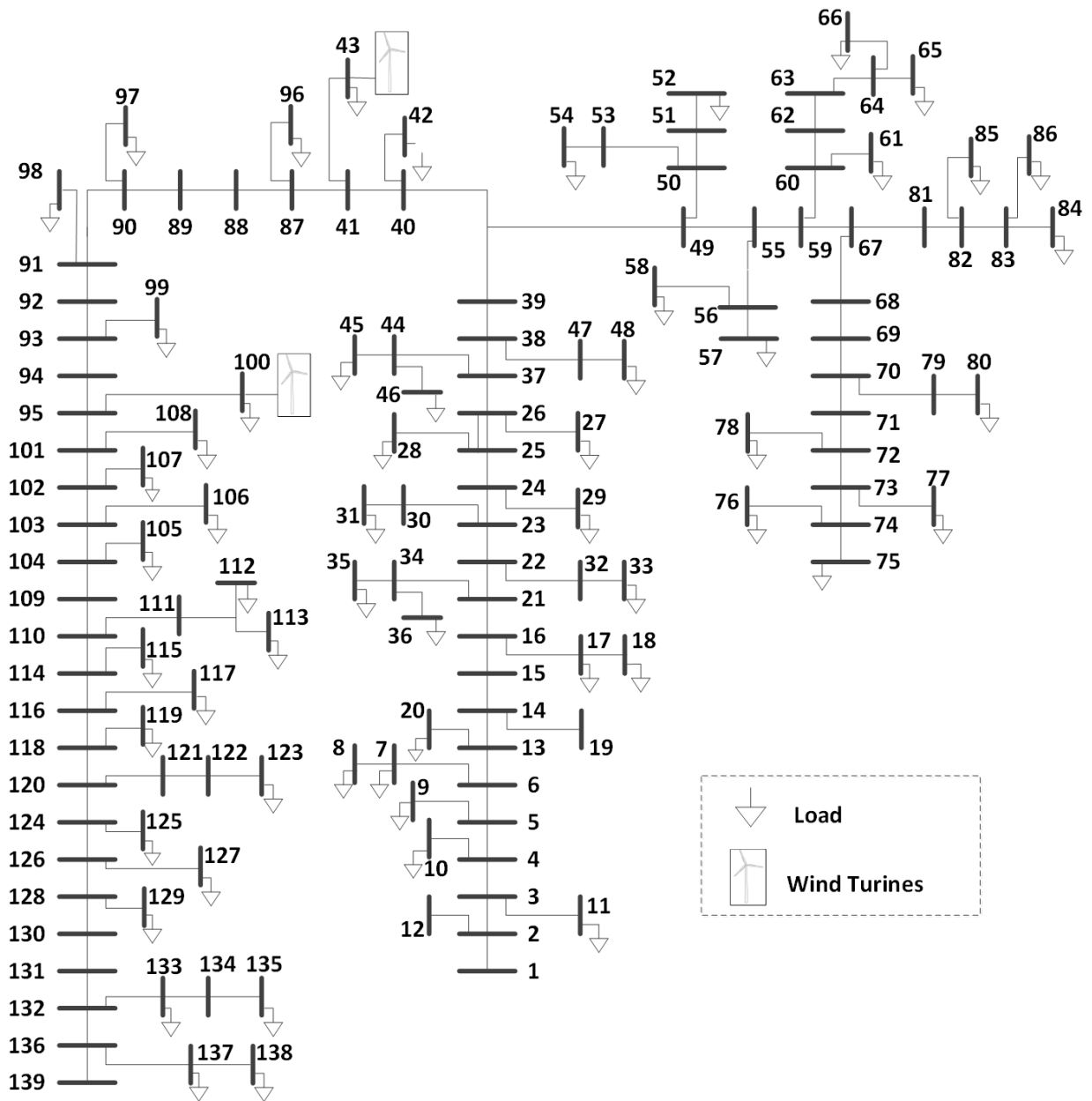
# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

## Δίκτυα Διανομής Μ.Τ.

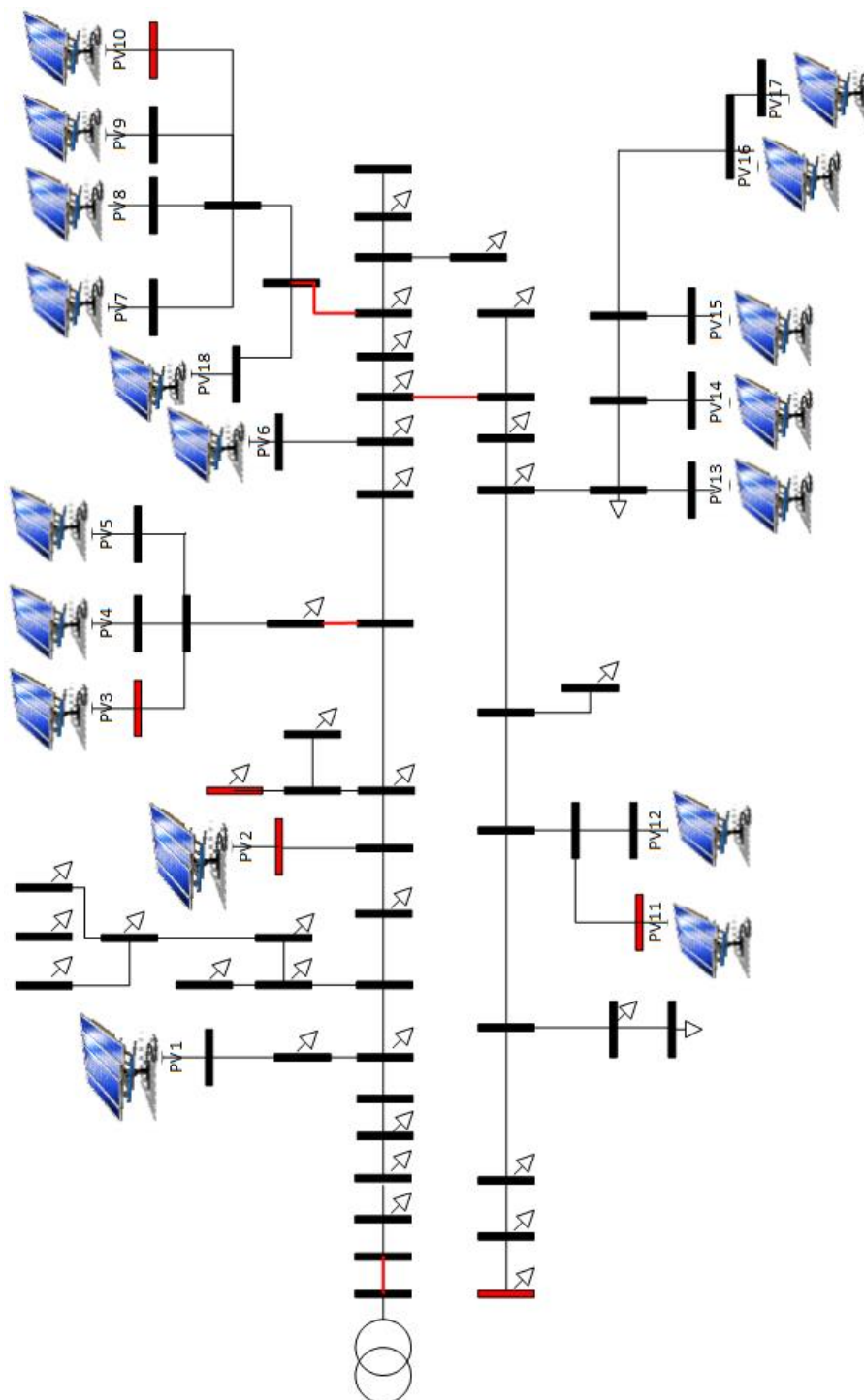
### Γραμμή Διανομής Μ.Τ. Κατερίνης



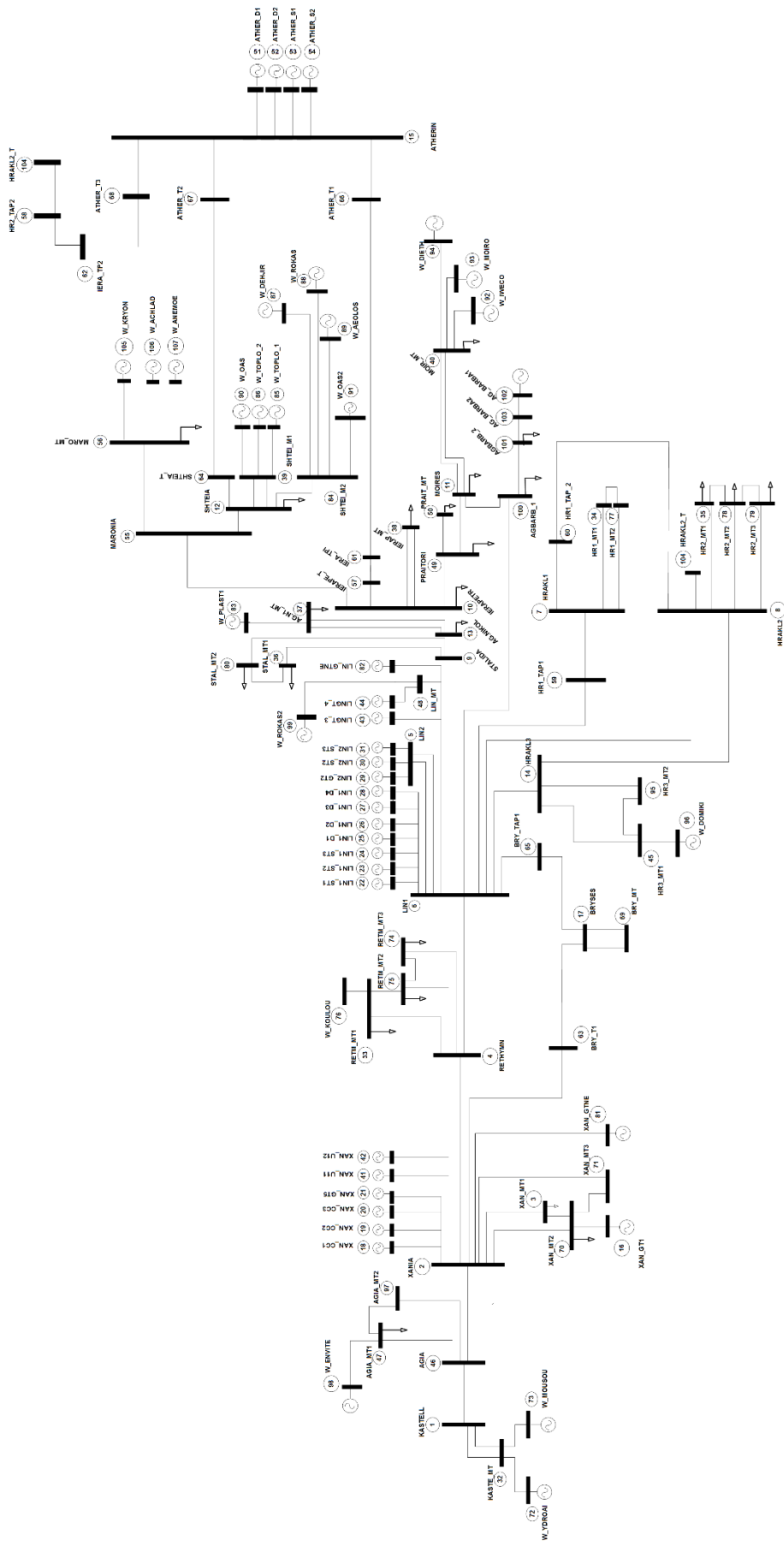
**Γραμμή Διανομής Μ.Τ. Ικαρίας**



Γραμμή Διανομής Μ.Τ. Σπερχειάδας



# Δίκτυο Μεταφοράς Κρήτης



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

### Αποτελέσματα πιστοποίησης συμβατότητας σταθμού φόρτισης με το πρότυπο IEC61851 (JRC)

AC-Test



Location: SmartRue of NTUA

Charging Station: again at RT (2 Dec)

Date: 02.12.2015

SLAC Status: False (--> See SLAClog.txt)

PP: 673 Ohm => 20 A (2 mm<sup>2</sup>)

SECC Status: False

Frequency: 50 Hz

V2G (Exi) Status: False

Phase direction: Right

R-Variable ISO15118

State	Umin [V]	Umax [V]
A	11	13
B	8,47	9,49
C	5,66	6,35
D	2,85	3,02

U-Variable ISO15118

State	Umin [V]	Umax [V]
A	11	13
B	8	10
C	5	7
D	2	4

R-Variable, Nominal values

State	Rcp [Ohm]	Ucp [V]	Fcp [Hz]	Ti:Tp [%]	UL1 [V]	UL2 [V]	UL3 [V]
A	open	11.5	0	100	0	0	0
B	2700	8.5	999	26.3	0	0	0
C	877	5.6	999	26.1	223	223	222
B	2700	8.5	999	26.3	0	0	0

R-Variable, Max values

State	Rcp [Ohm]	Ucp [V]	Fcp [Hz]	Ti:Tp [%]	UL1 [V]	UL2 [V]	UL3 [V]
A	open	11.5	0	100	0	0	0
B	3300	8.9	999	26.3	0	0	0
C	1150	6.3	999	26.2	223	225	224
B	3300	8.9	999	26.3	0	0	0

R-Variable, Min values

State	Rcp [Ohm]	Ucp [V]	Fcp [Hz]	Ti:Tp [%]	UL1 [V]	UL2 [V]	UL3 [V]
A	open	11.5	0	100	0	0	0
B	2428	8.2	999	26.3	0	0	0
C	812	5.4	999	26.1	219	224	224
B	2429	8.3	999	26.3	0	0	0

## U-Variable, Nominal values

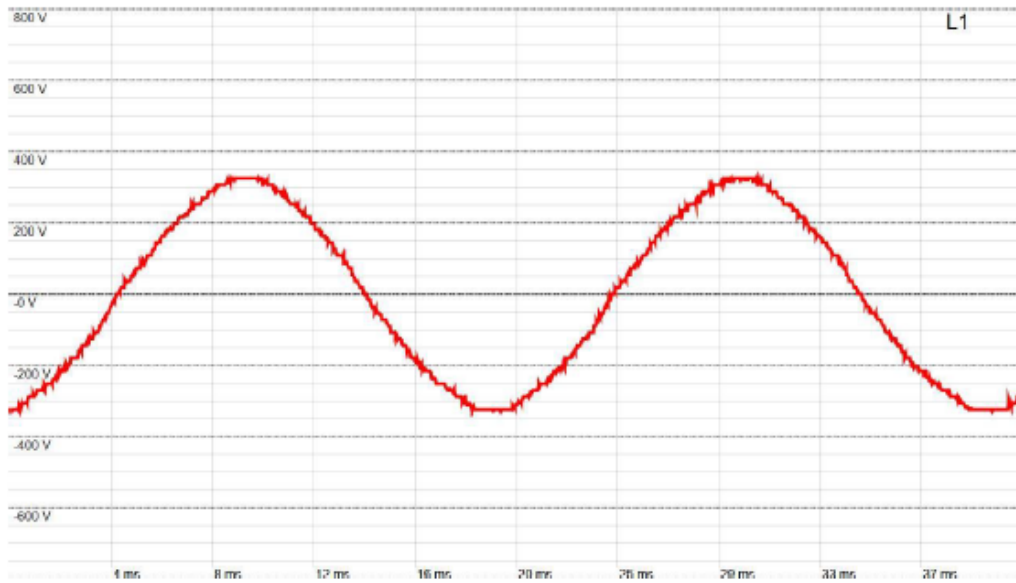
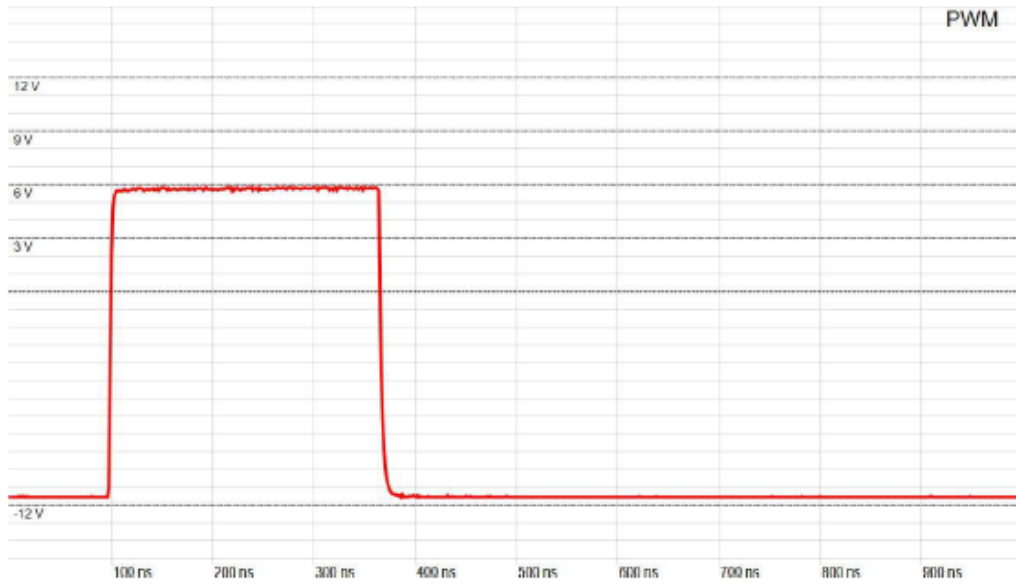
State	Rcp [Ohm]	Ucp [V]	Fcp [Hz]	Ti:Tp [%]	UL1 [V]	UL2 [V]	UL3 [V]
A	open	11.5	0	100	0	0	0
B	3010	8.7	999	26.3	0	0	0
C	961	5.9	999	26.1	225	225	221
B	3010	8.7	999	26.3	0	0	0

## U-Variable, Max values

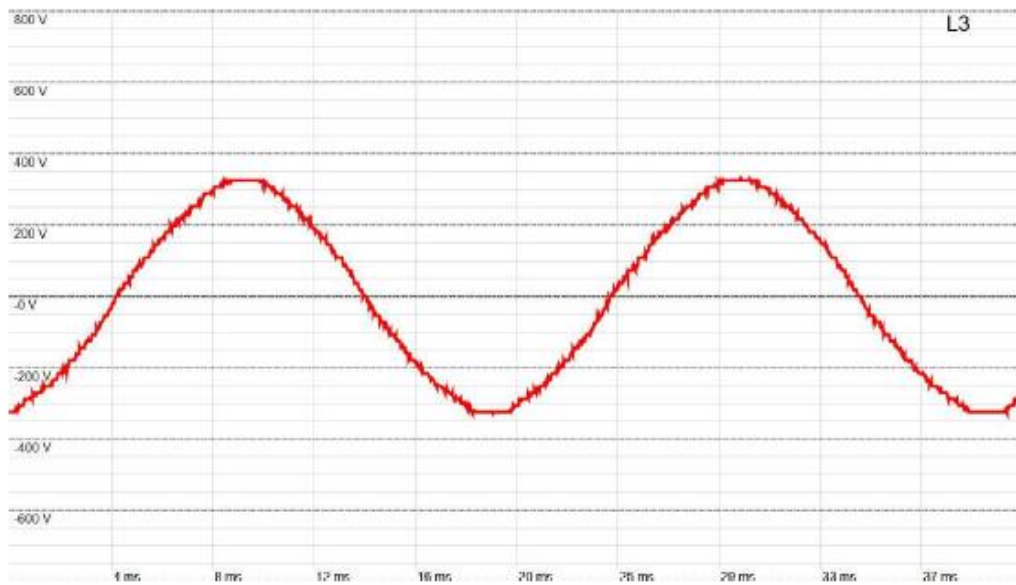
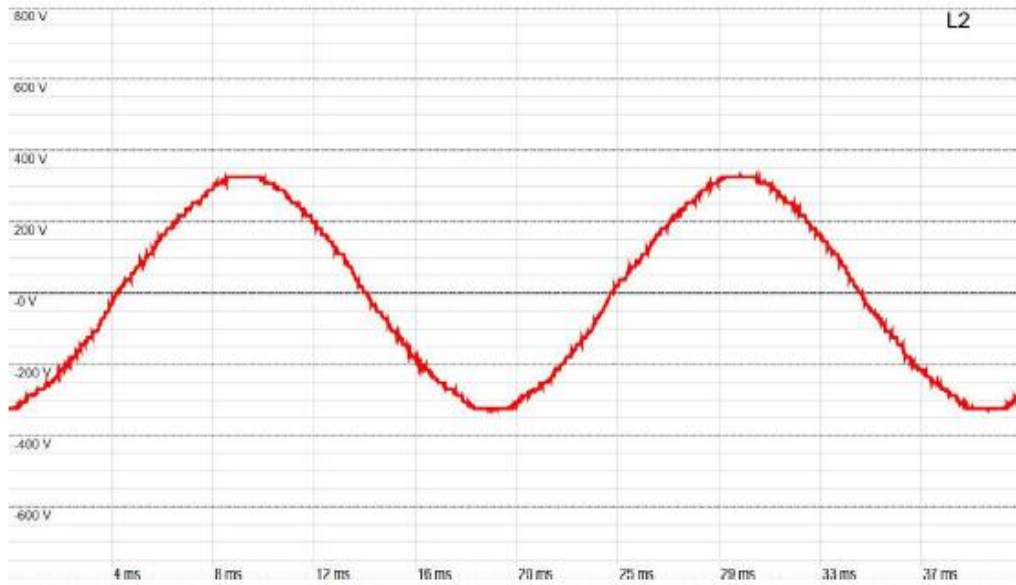
State	Rcp [Ohm]	Ucp [V]	Fcp [Hz]	Ti:Tp [%]	UL1 [V]	UL2 [V]	UL3 [V]
A	open	11.5	0	100	0	0	0
B	3531	9.1	999	26.3	0	0	0
C	1111	6.3	999	26.2	223	224	224
B	3531	9	999	26.3	0	0	0

## U-Variable, Min values

State	Rcp [Ohm]	Ucp [V]	Fcp [Hz]	Ti:Tp [%]	UL1 [V]	UL2 [V]	UL3 [V]
A	open	11.5	0	100	0	0	0
B	2354	8.2	999	26.3	0	0	0
C	820	5.4	999	26.1	222	225	225
B	2354	8.2	999	26.3	0	0	0







## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

<b>***SmartRue Research Team - National Technical University of Athens ***</b>								
<b>Δοκιμή 1: Έλεγχος μέγιστου ρεύματος φόρτισης ηλεκτρικού οχήματος μέσω του Duty Cycle του σήματος ελέγχου (CP) που παράγει ο σταθμός</b>								
TimeStamp	Icable (A)	State	Freq (kHz)	Duty Cycle	Irms (A)	CP-Volt (V)	Παρατηρήσεις	
12/1/2015 12:10:55	20.0	C2	1.01	0.27	15.88	6.18	Φόρτιση ηλεκτρικού οχήματος στο μέγιστο ρεύμα σταθμού 16A (Duty Cycle 16A/0.6=26.67%)	
12/1/2015 12:10:56	20.0	C2	1.01	0.26	15.92	6.18		
12/1/2015 12:10:57	20.0	C2	1.01	0.27	16.0	6.18		
12/1/2015 12:10:58	20.0	C2	1.01	0.26	15.91	6.18		
12/1/2015 12:10:59	20.0	C2	1.01	0.27	15.79	6.18		
12/1/2015 12:11:00	20.0	C2	1.01	0.27	15.8	6.15		
12/1/2015 12:11:01	20.0	C2	1.01	0.2	15.37	6.18	Μείωση του μέγιστου ρεύματος φόρτισης από τον σταθμό φόρτισης, 16A->12A (Duty Cycle 12A/0.6=0.2%)	
12/1/2015 12:11:02	20.0	C2	1.01	0.2	12.4	6.18		
12/1/2015 12:11:03	20.0	C2	1.01	0.2	11.91	6.18		
12/1/2015 12:11:04	20.0	C2	1.01	0.2	11.86	6.18		
12/1/2015 12:11:05	20.0	C2	1.01	0.2	11.94	6.18		
12/1/2015 12:11:06	20.0	C2	1.01	0.2	11.93	6.18		
12/1/2015 12:11:07	20.0	C2	1.01	0.2	11.79	6.18		
12/1/2015 12:11:08	20.0	C2	1.01	0.2	11.88	6.15		
12/1/2015 12:11:09	20.0	C2	1.01	0.2	11.96	6.15		
12/1/2015 12:11:10	20.0	C2	1.01	0.2	11.88	6.18		
12/1/2015 12:11:11	20.0	C2	1.01	0.2	11.83	6.18		
12/1/2015 12:11:12	20.0	C2	1.01	0.19	11.9	6.2		
12/1/2015 12:11:13	20.0	C2	1.01	0.2	11.97	6.2		
12/1/2015 12:11:14	20.0	C2	1.01	0.13	11.25	6.18	Περαιτέρω μείωση του μέγιστου ρεύματος φόρτισης από τον σταθμό φόρτισης (12A->8A) (Duty Cycle 8A/0.6=0.13A)	
12/1/2015 12:11:15	20.0	C2	1.01	0.13	8.34	6.15		
12/1/2015 12:11:16	20.0	C2	1.01	0.13	7.85	6.18		
12/1/2015 12:11:17	20.0	C2	1.01	0.13	7.83	6.18		
12/1/2015 12:11:18	20.0	C2	1.01	0.13	7.94	6.18		
12/1/2015 12:11:19	20.0	C2	1.01	0.13	7.91	6.18		
12/1/2015 12:11:20	20.0	C2	1.01	0.13	7.81	6.15		
12/1/2015 12:11:21	20.0	C2	1.01	0.13	7.92	6.18		
12/1/2015 12:11:22	20.0	C2	1.01	0.13	7.83	6.18		
12/1/2015 12:11:23	20.0	C2	1.01	0.13	7.68	6.18		
12/1/2015 12:11:24	20.0	C2	1.01	0.13	7.74	6.18		
12/1/2015 12:11:25	20.0	C2	1.01	0.13	7.64	6.15		
12/1/2015 12:11:26	20.0	C2	1.01	0.13	7.74	6.15		
12/1/2015 12:11:27	20.0	C2	1.01	0.13	7.69	6.18		
12/1/2015 12:11:28	20.0	C2	1.01	0.13	7.65	6.18		

12/1/2015	12:11:29	20.0	C2	1.01	0.13	7.74	6.15
12/1/2015	12:11:30	20.0	C2	1.01	0.13	7.67	6.15

<b>***SmartRue Research Team - National Technical University of Athens ***</b>							
<b>Δοκιμή 2: Έλεγχος συμπεριφοράς ηλεκτρικού οχήματος για συχνότητα εκτός ορίων προδιαγραφών IEC61851</b>							
TimeStamp	Icable (A)	State	Freq (kHz)	Duty Cycle	Irms (A)	CP-Volt (V)	Παρατηρήσεις
12/1/2015	12:12:50	20	C2	1.01	0.26	15.82	6.18
12/1/2015	12:12:51	20	C2	1.01	0.27	15.77	6.18
12/1/2015	12:12:52	20	C2	1.01	0.27	15.99	6.15
12/1/2015	12:12:53	20	C2	1.01	0.27	15.87	6.18
12/1/2015	12:12:54	20	C2	0.99	0.26	15.86	6.15
12/1/2015	12:12:55	20	C2	0.99	0.27	16.05	6.18
12/1/2015	12:12:56	20	C2	0.99	0.27	15.91	6.18
12/1/2015	12:12:57	20	C2	0.99	0.27	15.84	6.2
12/1/2015	12:12:58	20	C2	0.99	0.27	15.92	6.18
12/1/2015	12:12:59	20	C2	0.99	0.27	15.99	6.18
12/1/2015	12:13:00	20	C2	0.99	0.26	15.98	6.18
12/1/2015	12:13:01	20	C2	0.99	0.27	15.83	6.18
12/1/2015	12:13:02	20	C2	0.99	0.26	16.01	6.18
12/1/2015	12:13:03	20	C2	0.99	0.27	15.99	6.18
12/1/2015	12:13:04	20	C2	0.99	0.27	15.88	6.2
12/1/2015	12:13:05	20	C2	0.99	0.26	15.95	6.18
12/1/2015	12:13:06	20	C2	0.99	0.27	15.95	6.18
12/1/2015	12:13:07	20	C2	0.99	0.27	15.99	6.18
12/1/2015	12:13:08	20	C2	0.99	0.27	15.86	6.18
12/1/2015	12:13:09	20	C2	0.99	0.27	15.77	6.15
12/1/2015	12:13:10	20	C2	0.99	0.27	15.77	6.15
12/1/2015	12:13:11	20	B2	0.9	0.27	0.49	9.2
12/1/2015	12:13:12	20	B2	0.9	0.27	0	9.07
12/1/2015	12:13:13	20	B2	0.9	0.27	0	9.1
12/1/2015	12:13:14	20	B2	0.9	0.27	0	9.1
12/1/2015	12:13:15	20	B2	0.9	0.26	0	9.07
12/1/2015	12:13:16	20	B2	0.9	0.27	0	9.07
12/1/2015	12:13:17	20	B2	0.9	0.27	0	9.1
12/1/2015	12:13:18	20	B2	0.9	0.26	0	9.1
12/1/2015	12:13:19	20	B2	0.9	0.27	0	9.1
12/1/2015	12:13:20	20	B2	0.9	0.27	0	9.07
12/1/2015	12:13:21	20	B2	0.9	0.27	0	9.07
12/1/2015	12:13:22	20	B2	0.89	0.26	0	9.1
12/1/2015	12:13:23	20	B2	0.9	0.27	0	9.07

Συνδεδεμένο ηλεκτρικό όχημα στο σταθμό φόρτισης μέσω καλωδίου μέγιστου ρεύματος 20A. Ρεύμα φόρτισης ίσο με το ονομαστικό ρεύμα του σταθμού φόρτισης (16A)

Μεταβολή της συχνότητας που παράγει ο σταθμός φόρτισης εκτός ορίων προδιαγραφών IEC 61851 (1kHz->0.9kHz)

Το ηλεκτρικό όχημα αναγνωρίζει την παραβίαση της συχνότητας φόρτισης και σταματάει τη διαδικασία της φόρτισης άμεσα

12/1/2015	12:13:24	20	B2	0.9	0.27	0	9.1	
12/1/2015	12:13:25	20	B2	0.9	0.26	0	9.1	
12/1/2015	12:13:26	20	B2	0.9	0.26	0	9.1	
12/1/2015	12:13:27	20	C2	1.01	0.27	0.87	6.1	
12/1/2015	12:13:28	20	C2	1.01	0.27	0.86	6.18	
12/1/2015	12:13:29	20	C2	1.01	0.27	0.87	6.18	
12/1/2015	12:13:30	20	C2	1.01	0.27	0.86	6.18	
12/1/2015	12:13:31	20	C2	1.01	0.27	0.88	6.15	
12/1/2015	12:13:32	20	C2	1.01	0.27	0.88	6.15	
12/1/2015	12:13:33	20	C2	1.01	0.26	1.13	6.18	
12/1/2015	12:13:34	20	C2	1.01	0.27	0.84	6.18	
12/1/2015	12:13:35	20	C2	1.01	0.26	1.56	6.18	
12/1/2015	12:13:36	20	C2	1	0.27	16.07	6.18	Επαναφορά της συχνότητας στο προβλεπόμενο επίπεδο βάσει προτύπου IEC61851
12/1/2015	12:13:37	20	C2	1.01	0.27	15.99	6.18	
12/1/2015	12:13:38	20	C2	1.01	0.27	16.18	6.18	
12/1/2015	12:13:39	20	C2	1.01	0.27	16.11	6.18	
12/1/2015	12:13:40	20	C2	1.01	0.27	16.04	6.18	Το ηλεκτρικό όχημα επανεκκινεί την διαδικασία της φόρτισης της μπαταρίας του στο μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα (16A)
12/1/2015	12:13:41	20	C2	1.01	0.27	16.09	6.18	
12/1/2015	12:13:42	20	C2	1.01	0.27	16.23	6.18	
12/1/2015	12:13:43	20	C2	1.01	0.27	16.16	6.18	
12/1/2015	12:13:44	20	C2	1.01	0.27	16.03	6.18	
12/1/2015	12:13:45	20	C2	1.01	0.27	16.07	6.18	
12/1/2015	12:13:46	20	C2	1.01	0.27	16.14	6.18	
12/1/2015	12:13:47	20	C2	1.01	0.26	16.06	6.18	
12/1/2015	12:13:48	20	C2	1.01	0.26	16	6.15	
12/1/2015	12:13:49	20	C2	1.01	0.26	16.08	6.18	
12/1/2015	12:13:50	20	C2	1.01	0.26	16.22	6.18	
12/1/2015	12:13:51	20	C2	1.01	0.27	16.03	6.18	
12/1/2015	12:13:52	20	C2	1.01	0.27	16.05	6.18	
12/1/2015	12:13:53	20	C2	1.01	0.27	16.05	6.18	
12/1/2015	12:13:54	20	B2	1.1	0.27	0.46	9.18	Μεταβολή της συχνότητας που παράγει ο σταθμός φόρτισης εκτός ορίων προδιαγραφών IEC 61851 (1kHz->1.1kHz)
12/1/2015	12:13:55	20	B2	1.1	0.27	0	9.1	
12/1/2015	12:13:56	20	B2	1.1	0.27	0	9.1	
12/1/2015	12:13:57	20	B2	1.09	0.27	0	9.07	
12/1/2015	12:13:58	20	B2	1.11	0.26	0	9.07	
12/1/2015	12:13:59	20	B2	1.1	0.27	0	9.1	
12/1/2015	12:14:00	20	B2	1.09	0.27	0	9.07	Το ηλεκτρικό όχημα αναγνωρίζει την παραβίαση της συχνότητας φόρτισης και σταματάει τη διαδικασία της φόρτισης άμεσα
12/1/2015	12:14:01	20	B2	1.1	0.26	0	9.1	
12/1/2015	12:14:02	20	B2	1.1	0.27	0	9.1	
12/1/2015	12:14:03	20	B2	1.1	0.27	0	9.07	
12/1/2015	12:14:04	20	B2	1.1	0.27	0	9.07	
12/1/2015	12:14:05	20	C2	1.01	0.27	0.88	6.1	Επαναφορά της συχνότητας στο προβλεπόμενο επίπεδο βάσει προτύπου IEC61851
12/1/2015	12:14:06	20	C2	1.01	0.27	0.84	6.15	
12/1/2015	12:14:07	20	C2	1.01	0.26	0.86	6.18	
12/1/2015	12:14:08	20	C2	1.01	0.27	0.85	6.18	
12/1/2015	12:14:09	20	C2	1.01	0.26	0.88	6.15	

12/1/2015	12:14:10	20	C2	1.01	0.26	1.31	6.18	Το ηλεκτρικό όχημα επανεκκινεί την διαδικασία της φόρτισης της μπαταρίας του στο μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα (16A)
12/1/2015	12:14:11	20	C2	1.01	0.27	1.13	6.18	
12/1/2015	12:14:12	20	C2	1.01	0.26	0.84	6.18	
12/1/2015	12:14:13	20	C2	1.01	0.27	0.87	6.18	
12/1/2015	12:14:14	20	C2	1.01	0.27	16.26	6.18	
12/1/2015	12:14:15	20	C2	1.01	0.27	16.12	6.18	
12/1/2015	12:14:16	20	C2	1.01	0.27	16.05	6.18	
12/1/2015	12:14:17	20	C2	1.01	0.27	16.16	6.18	
12/1/2015	12:14:18	20	C2	1.01	0.27	16.11	6.18	
12/1/2015	12:14:19	20	C2	1.01	0.26	16.2	6.18	
12/1/2015	12:14:20	20	C2	1.01	0.27	16.11	6.18	

**\*\*\*SmartRue Research Team - National Technical University of Athens**

\*\*\*

**Δοκιμή 3: Συμπεριφορά ηλεκτρικού οχήματος μετά την αποκοπή και επαναφορά του ρεύματος φόρτισης από τον σταθμό φόρτισης (άνοιγμα/κλείσιμο AC ρελέ)**

TimeStamp	Icable (A)	State	Freq (kHz)	Duty Cycle	Irms (A)	CP-Volt (V)	Παρατηρήσεις
12/1/2015	12:19:08	20	B2	1.01	0.27	0	9.07
12/1/2015	12:19:09	20	B2	1.01	0.27	0	9.07
12/1/2015	12:19:10	20	B2	1.01	0.27	0	9.07
12/1/2015	12:19:11	20	B2	1.01	0.27	0	9.07
12/1/2015	12:19:12	20	B2	1.01	0.26	0	9.07
12/1/2015	12:19:13	20	B2	1.01	0.27	0	9.07
12/1/2015	12:19:14	20	B2	1.01	0.27	0	9.07
12/1/2015	12:19:15	20	B2	1.01	0.27	0	9.07
12/1/2015	12:19:16	20	B2	1.01	0.27	0	9.07
12/1/2015	12:19:17	20	B2	1.01	0.26	0	9.07
12/1/2015	12:19:18	20	B2	1.01	0.27	0	9.07
12/1/2015	12:19:19	20	B2	1.01	0.27	0	9.07
12/1/2015	12:19:20	20	B2	1.01	0.27	0	9.07
12/1/2015	12:19:21	20	B2	1.01	0.27	0	9.07
12/1/2015	12:19:22	20	B2	1.01	0.26	0	9.07
12/1/2015	12:19:23	20	B2	1.01	0.27	0	9.07
12/1/2015	12:19:24	20	B2	1.01	0.27	0	9.07
12/1/2015	12:19:25	20	B2	1.01	0.27	0	9.07
12/1/2015	12:19:26	20	B2	1.01	0.26	0	9.07
12/1/2015	12:19:27	20	B2	1.01	0.27	0	9.07
12/1/2015	12:19:28	20	B2	1.01	0.27	0	9.07
12/1/2015	12:19:29	20	B2	1.01	0.27	0	9.07
12/1/2015	12:19:30	20	B2	1.01	0.27	0	9.07
12/1/2015	12:19:31	20	B2	1.01	0.26	0	9.07

12/1/2015	12:19:32	20	B2	1.01	0.27	0	9.07	
12/1/2015	12:19:33	20	B2	1.01	0.27	0	9.07	
12/1/2015	12:19:34	20	B2	1.01	0.27	0	9.07	
12/1/2015	12:19:35	20	B2	1.01	0.26	0.8	9.18	
12/1/2015	12:19:36	20	B2	1.01	0.27	0.79	9.18	
12/1/2015	12:19:37	20	B2	1.01	0.27	0.8	9.18	
12/1/2015	12:19:38	20	B2	1.01	0.27	0.79	9.18	
12/1/2015	12:19:39	20	B2	1.01	0.27	0.81	9.18	
12/1/2015	12:19:40	20	B2	1.01	0.26	0.78	9.18	
12/1/2015	12:19:41	20	B2	1.01	0.27	0.79	9.18	
12/1/2015	12:19:42	20	B2	1.01	0.27	0.79	9.15	
12/1/2015	12:19:43	20	B2	1.01	0.27	0.82	9.18	
12/1/2015	12:19:44	20	B2	1.01	0.27	0.81	9.15	
12/1/2015	12:19:45	20	B2	1.01	0.26	0.78	9.18	
12/1/2015	12:19:46	20	B2	1.01	0.26	0.81	9.18	
12/1/2015	12:19:47	20	B2	1.01	0.27	0.79	9.18	
12/1/2015	12:19:48	20	B2	1.01	0.27	0.8	9.18	
12/1/2015	12:19:49	20	B2	1.01	0.27	0.78	9.18	
12/1/2015	12:19:50	20	B2	1.01	0.26	0.79	9.18	
12/1/2015	12:19:51	20	A2	1.01	0.26	0	12.33	Αποσύνδεση ηλεκτρικού οχήματος από τον σταθμό φόρτισης Ο σταθμός φόρτισης δεν παράγει πλέον PWM πιλοτικό σήμα
12/1/2015	12:19:52	20	A1	0	1	0	12.33	
12/1/2015	12:19:53	20	A1	0	1	0	12.33	
12/1/2015	12:19:54	20	A1	0	1	0	12.33	
12/1/2015	12:19:55	20	A1	0	1	0	12.35	
12/1/2015	12:19:56	20	A1	0	1	0.79	12.32	
12/1/2015	12:19:57	20	B1	0	1	0.8	9.23	Σύνδεση ηλεκτρικού οχήματος. Ο σταθμός φόρτισης αναγνωρίζει το όχημα και προετοιμάζει το PWM σήμα ελέγχου
12/1/2015	12:19:58	20	B2	1.01	0.27	0.78	9.18	
12/1/2015	12:19:59	20	C2	1.01	0.26	1.2	6.18	Το ηλεκτρικό όχημα είναι έτοιμο για φόρτιση. Το ρεύμα της φόρτισης αυξάνεται σταδιακά μέχρι τη μέγιστη τιμή που επιτρέπει ο σταθμός φόρτισης μέσω του πιλοτικού σήματος ελέγχου
12/1/2015	12:20:00	20	C2	1.01	0.26	0.8	6.15	
12/1/2015	12:20:01	20	C2	1.01	0.27	3.18	6.15	
12/1/2015	12:20:02	20	C2	1.01	0.26	16.62	6.18	
12/1/2015	12:20:03	20	C2	1.01	0.27	16.26	6.18	
12/1/2015	12:20:04	20	C2	1.01	0.26	16.25	6.18	
12/1/2015	12:20:05	20	C2	1.01	0.27	16.15	6.18	
12/1/2015	12:20:06	20	C2	1.01	0.27	16.09	6.15	
12/1/2015	12:20:07	20	C2	1.01	0.27	16.3	6.18	
12/1/2015	12:20:08	20	C2	1.01	0.27	0	6.1	Απότομη αποκοπή ρεύματος φόρτισης μέσω του AC ρελέ του σταθμού φόρτισης Το ηλεκτρικό όχημα παραμένει διαθέσιμο για φόρτιση για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα
12/1/2015	12:20:09	20	C2	1.01	0.27	0	6.08	
12/1/2015	12:20:10	20	C2	1	0.27	0	6.08	
12/1/2015	12:20:11	20	C2	1	0.27	0	6.08	
12/1/2015	12:20:12	20	C2	1.01	0.27	0	6.08	
12/1/2015	12:20:13	20	C2	1.01	0.26	0	6.08	
12/1/2015	12:20:14	20	C2	1.01	0.26	0	6.08	
12/1/2015	12:20:15	20	C2	1.01	0.26	0	6.08	

12/1/2015	12:20:16	20	B2	1.01	0.27	0	9.07	Από τη στιγμή που το ρεύμα δεν επανέρχεται στο σταθμό φόρτισης το ηλεκτρικό όχημα αλλάζει τη λειτουργική του κατάσταση σε μη διαθέσιμο για φόρτιση
12/1/2015	12:20:17	20	B2	1.01	0.26	0	9.07	
12/1/2015	12:20:18	20	B2	1.01	0.26	0	9.07	
12/1/2015	12:20:19	20	B2	1.01	0.27	0	9.07	
12/1/2015	12:20:20	20	B2	1.01	0.27	0	9.07	
12/1/2015	12:20:21	20	B2	1.01	0.27	0	9.07	
12/1/2015	12:20:22	20	A2	1.01	0.26	0	12.21	Αποσύνδεση του ηλεκτρικού οχήματος από τον σταθμό φόρτισης
12/1/2015	12:20:23	20	A1	0	1	0	12.21	
12/1/2015	12:20:24	20	A1	0	1	0	12.21	
12/1/2015	12:20:25	20	A1	0	1	0	12.21	Λειτουργία του σταθμού φόρτισης σε κατάσταση αδράνειας
12/1/2015	12:20:26	20	A1	0	1	0	12.21	
12/1/2015	12:20:27	20	A1	0	1	0	12.21	
12/1/2015	12:20:28	20	A1	0	1	0	12.21	
12/1/2015	12:20:29	20	B1	0	1	0	9.1	Επανασύνδεση του ηλεκτρικού οχήματος με τον σταθμό φόρτισης Παραγωγή PWM σήματος ελέγχου
12/1/2015	12:20:30	20	B2	1.01	0.26	0	9.07	
12/1/2015	12:20:31	20	B2	1.01	0.26	0	9.07	
12/1/2015	12:20:32	20	C2	1.01	0.27	0.85	6.08	Το ηλεκτρικό όχημα είναι έτοιμο για φόρτιση. Το ρεύμα της φόρτισης αυξάνεται σταδιακά μέχρι τη μέγιστη τιμή που επιτρέπει ο σταθμός φόρτισης μέσω του πιλοτικού σήματος ελέγχου
12/1/2015	12:20:33	20	C2	1.01	0.27	2.41	6.15	
12/1/2015	12:20:34	20	C2	1.01	0.27	0.81	6.15	
12/1/2015	12:20:35	20	C2	1.01	0.27	0.86	6.18	
12/1/2015	12:20:36	20	C2	1.01	0.27	13.29	6.18	
12/1/2015	12:20:37	20	C2	1.01	0.26	18.07	6.18	
12/1/2015	12:20:38	20	C2	1.01	0.27	16.28	6.18	
12/1/2015	12:20:39	20	C2	1	0.27	16.23	6.18	
12/1/2015	12:20:40	20	C2	1.01	0.27	16.12	6.18	
12/1/2015	12:20:41	20	C2	1.01	0.27	16.17	6.15	
12/1/2015	12:20:42	20	C2	1.01	0.27	16.28	6.15	
12/1/2015	12:20:43	20	C2	1.01	0.27	16.25	6.15	
12/1/2015	12:20:44	20	C2	1.01	0.27	16.25	6.18	
12/1/2015	12:20:45	20	C2	1.01	0.27	16.2	6.15	
12/1/2015	12:20:46	20	C2	1.01	0.27	16.19	6.18	
12/1/2015	12:20:47	20	C2	1.01	0.26	16.26	6.18	
12/1/2015	12:20:48	20	C2	1.01	0.27	16.3	6.18	
12/1/2015	12:20:49	20	C2	1.01	0.26	16.17	6.18	
12/1/2015	12:20:50	20	C2	1.01	0.27	16.14	6.15	
12/1/2015	12:20:51	20	C2	1.01	0.27	16.3	6.15	
12/1/2015	12:20:52	20	C2	1.01	0.27	16.2	6.18	
12/1/2015	12:20:53	20	C2	1.01	0.27	16.15	6.18	

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ

Ενδεικτικές καταγραφές της επικοινωνίας ενός σταθμού φόρτισης της Γαλλικής εταιρίας DBT με την πλατφόρμα διαχείρισης όπως καταγράφηκαν στον server της DBT παρουσιάζονται στη συνέχεια:

```
[2015-07-29 16:40:32] static/gir.vat.mx.02126d -----  
[2015-07-29 16:40:32] static/gir.vat.mx.02126d connecting to  
http://147.102.30.48/EVSEO/Service.svc/soap12
```

```
[2015-07-29 16:41:32] static/gir.vat.mx.02126d -----  
[2015-07-29 16:41:32] static/gir.vat.mx.02126d connecting to  
http://147.102.30.48/EVSEO/Service.svc/soap12
```

```
[2015-07-29 16:42:33] static/gir.vat.mx.02126d -----  
[2015-07-29 16:42:33] static/gir.vat.mx.02126d connecting to  
http://147.102.30.48/EVSEO/Service.svc/soap12
```

```
[2015-07-29 16:43:34] static/gir.vat.mx.02126d -----  
[2015-07-29 16:43:34] static/gir.vat.mx.02126d connecting to  
http://147.102.30.48/EVSEO/Service.svc/soap12
```

```
[2015-07-29 16:43:34] static/gir.vat.mx.02126d sending:  
POST /EVSEO/Service.svc/soap12 HTTP/1.1  
Host: 147.102.30.48  
User-Agent: gSOAP/2.8  
Content-Type: application/soap+xml; charset=utf-8; action="/BootNotification"  
Content-Length: 1560  
Connection: close  
Accept-Encoding: gzip, deflate
```

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>  
<SOAP-ENV:Envelope xmlns:SOAP-ENV="http://www.w3.org/2003/05/soap-envelope"  
xmlns:SOAP-ENC="http://www.w3.org/2003/05/soap-encoding"  
xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"  
xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"  
xmlns:ocppCp15="urn://Ocpp/Cp/2012/06/" xmlns:ocppCs15="urn://Ocpp/Cs/2012/06/"  
xmlns:wsa5="http://www.w3.org/2005/08/addressing"><SOAP-  
ENV:Header><ocppCs15:chargeBoxIdentity SOAP-  
ENV:mustUnderstand="true">static</ocppCs15:chargeBoxIdentity><wsa5:MessageID>02126d-  
20150729164334030-  
745530</wsa5:MessageID><wsa5:From><wsa5:Address>http://10.83.107.179/ocpp</wsa5:Ad-  
dress></wsa5:From><wsa5:To SOAP-  
ENV:mustUnderstand="true">http://147.102.30.48/EVSEO/Service.svc/soap12</wsa5:To><wsa-  
5:Action SOAP-ENV:mustUnderstand="true"/>BootNotification</wsa5:Action></SOAP-  
ENV:Header><SOAP-  
ENV:Body><ocppCs15:bootNotificationRequest><ocppCs15:chargePointVendor>DBT</ocppCs15  
:chargePointVendor><ocppCs15:chargePointModel>NQC-ACDC-  
COMBO</ocppCs15:chargePointModel><ocppCs15:chargePointSerialNumber>gir.vat.mx.02126d
```



```
</ocppCs15:chargePointSerialNumber><ocppCs15:chargeBoxSerialNumber>gir.vat.mx.02126d</ocppCs15:chargeBoxSerialNumber><ocppCs15:firmwareVersion>1.2.17-rc0</ocppCs15:firmwareVersion><ocppCs15:iccid>8933209512008132240</ocppCs15:iccid><ocppCs15:imsi>208209500813224</ocppCs15:imsi><ocppCs15:meterType>DBT NQC-ACDC-COMBO-AO-UR</ocppCs15:meterType><ocppCs15:meterSerialNumber>gir.vat.mx.02126d</ocppCs15:meterSerialNumber></ocppCs15:bootNotificationRequest></SOAP-ENV:Body></SOAP-ENV:Envelope>
[2015-07-29 16:43:39] static/gir.vat.mx.02126d received:
HTTP/1.1 200 OK
Cache-Control: private
Content-Length: 636
Content-Type: application/soap+xml; charset=utf-8
Server: Microsoft-IIS/7.5
X-AspNet-Version: 4.0.30319
X-Powered-By: ASP.NET
Date: Wed, 29 Jul 2015 14:43:30 GMT
Connection: close
```

```
<s:Envelope xmlns:s="http://www.w3.org/2003/05/soap-envelope" xmlns:a="http://www.w3.org/2005/08/addressing"><s:Header><a:Action s:mustUnderstand="1">urn://Ocpp/Cs/2012/06/ICentralSystemService/BootNotificationResponse</a:Action><a:RelatesTo>02126d-20150729164334030-745530</a:RelatesTo></s:Header><s:Body xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance" xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"><bootNotificationResponse xmlns="urn://Ocpp/Cs/2012/06/"><status>Accepted</status><currentTime>2015-07-29T17:43:30.5791651+03:00</currentTime><heartbeatInterval>5</heartbeatInterval></bootNotificationResponse></s:Body></s:Envelope>
[2015-07-29 14:43:30] static/gir.vat.mx.02126d -----
[2015-07-29 14:43:30] static/gir.vat.mx.02126d connecting to
http://147.102.30.48/EVSEO/Service.svc/soap12
[2015-07-29 14:43:30] static/gir.vat.mx.02126d sending:
POST /EVSEO/Service.svc/soap12 HTTP/1.1
Host: 147.102.30.48
User-Agent: gSOAP/2.8
Content-Type: application/soap+xml; charset=utf-8; action="/StatusNotification"
Content-Length: 1168
Connection: close
Accept-Encoding: gzip, deflate
```

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<SOAP-ENV:Envelope xmlns:SOAP-ENV="http://www.w3.org/2003/05/soap-envelope" xmlns:SOAP-ENC="http://www.w3.org/2003/05/soap-encoding" xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance" xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema" xmlns:ocppCp15="urn://Ocpp/Cp/2012/06/" xmlns:ocppCs15="urn://Ocpp/Cs/2012/06/" xmlns:wsa5="http://www.w3.org/2005/08/addressing"><SOAP-ENV:Header><ocppCs15:chargeBoxIdentity SOAP-
```

ENV:mustUnderstand="true">static</ocppCs15:chargeBoxIdentity><wsa5:MessageID>02126d-20150729144330317-723368</wsa5:MessageID><wsa5:From><wsa5:Address>http://10.83.107.179/ocpp</wsa5:Address></wsa5:From><wsa5:To SOAP-ENV:mustUnderstand="true">http://147.102.30.48/EVSEO/Service.svc/soap12</wsa5:To><wsa5:Action SOAP-ENV:mustUnderstand="true"/>/StatusNotification</wsa5:Action></SOAP-ENV:Header><SOAP-ENV:Body><ocppCs15:statusNotificationRequest><ocppCs15:connectorId>2</ocppCs15:connectorId><ocppCs15:status>Available</ocppCs15:status><ocppCs15:errorCode>NoError</ocppCs15:errorCode><ocppCs15:timestamp>2015-07-29T16:40:52Z</ocppCs15:timestamp></ocppCs15:statusNotificationRequest></SOAP-ENV:Body></SOAP-ENV:Envelope>

[2015-07-29 14:43:33] static/gir.vat.mx.02126d received:  
HTTP/1.1 200 OK  
Cache-Control: private  
Content-Length: 489  
Content-Type: application/soap+xml; charset=utf-8  
Server: Microsoft-IIS/7.5  
X-AspNet-Version: 4.0.30319  
X-Powered-By: ASP.NET  
Date: Wed, 29 Jul 2015 14:43:34 GMT  
Connection: close

```
<s:Envelope xmlns:s="http://www.w3.org/2003/05/soap-envelope"
xmlns:a="http://www.w3.org/2005/08/addressing"><s:Header><a:Action
s:mustUnderstand="1">urn://Ocpp/Cs/2012/06/ICentralSystemService/StatusNotificationResponse</a:Action><a:RelatesTo>02126d-20150729144330317-723368</a:RelatesTo></s:Header><s:Body xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance" xmlns:xsd="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"><statusNotificationResponse xmlns="urn://Ocpp/Cs/2012/06/" /></s:Body></s:Envelope>
```

[2015-07-29 14:43:33] static/gir.vat.mx.02126d -----  
[2015-07-29 14:43:33] static/gir.vat.mx.02126d connecting to  
http://147.102.30.48/EVSEO/Service.svc/soap12  
[2015-07-29 14:43:38] static/gir.vat.mx.02126d sending:  
POST /EVSEO/Service.svc/soap12 HTTP/1.1  
Host: 147.102.30.48  
User-Agent: gSOAP/2.8  
Content-Type: application/soap+xml; charset=utf-8; action="/StatusNotification"  
Content-Length: 1168  
Connection: close  
Accept-Encoding: gzip, deflate

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε

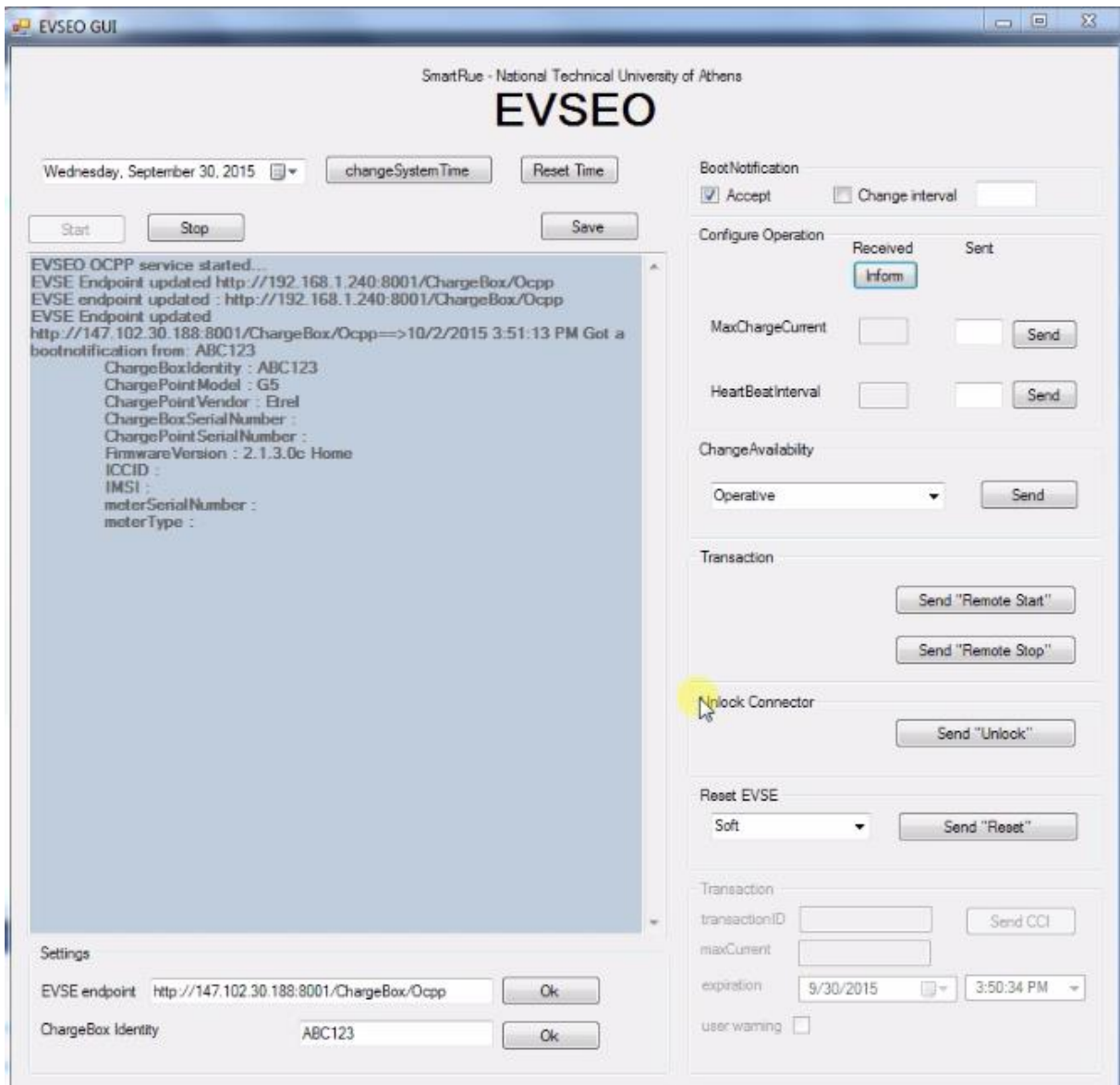
Δοκιμές της πλατφόρμας διαχείρισης υποδομών φόρτισης με έναν οικιακό σταθμό φόρτισης της ETREL και έναν σταθμό φόρτισης της RSE. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε πλαίσια στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Ερευνητικού προγράμματος COTEVOS.

### Σταθμός φόρτισης ETREL

#### **TC-2.1-EVSE-1.5-101 Boot notification: Normal procedure**

Author	Version	Date
ETREL	1.0	2015-08-04
<b>Test Group</b>	2. EVSE Operation	
<b>Test Case</b>	2.1 Monitoring (OCPP 1.5)	
<b>Test ID</b>	TC-2.1-EVSE-1.5-101 Boot notification: Normal procedure	
<b>Description</b>	After Charge Point starting-up the Charge Box sends a notification to Central System with information about its configuration. Central System accepts the Charge Box and requires from Charge Box to change the current date/time and heartbeat interval.	
<b>Test Objective</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>verify if Charge Point correctly sends to Central System the notification after its re-boot and receives and implements the requirement from central System to change current date/time and heartbeat interval</li> </ul>	
<b>Information objects</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Charge Box: <i>chargePointModel</i>, <i>chargePointVendor</i> (mandatory), other Charge Point data (optional)</li> <li>Central System: <i>heartbeatInterval</i>, <i>currentTime</i>, <i>status</i> (mandatory)</li> <li>Central System: <i>key</i>, <i>value</i> (mandatory) - in ChangeConfiguration.req PDU (TC-2.3-EVSE-1.5-101 Charge Box configuration: Heartbeat interval)</li> <li>Charge Box: <i>status</i> (mandatory) - in ChangeConfiguration.conf PDU (TC-2.3-EVSE-1.5-101 Charge Box configuration: Heartbeat interval)</li> <li>Central System: <i>type</i> (mandatory) - in Reset.req PDU (TC-2.3-EVSE-1.5-206 Hard Charge Box reset)</li> </ul>	
<b>Equipment Specifications:</b>		
<b>DUT:</b> <b>EVSE (Charge Box = CB)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Manufacturer: EVSE</li> <li>Model: Etrell wallbox</li> </ul>	
<b>Emulator:</b> <b>EVSE Back-end (Central System = CS)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Manufacturer: NTUA</li> <li>Model:</li> </ul>	
<b>Preconditions</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>TC-2.3-EVSE-1.5-101 Charge Box configuration: Heartbeat interval tested</li> <li>TC-2.3-EVSE-1.5-206 Hard Charge Box reset tested</li> </ul>	
<b>Test Procedure:</b>		

Step	Action	Expected Result	Actual Result
1	Execute TC-2.3-EVSE-1.5-101 Charge Box configuration: Heartbeat interval, Step 1 (in CS launch ChangeConfiguration.req PDU with field values <i>key</i> = "HeartBeatInterval", <i>value</i> = "x")	CB sends ChangeConfiguration.conf PDU with field value <i>status</i> = Accepted to CS	✓
2	Via CS GUI insert (vendor specific): Current CS time = "new_CS_Time" (dateTime) Heartbeat interval = y (integer - in seconds)		✓
3	Execute TC-2.3-EVSE-1.5-206 Hard Charge Box reset, Step 1 (in CS launch Reset.req PDU with field value: <i>type</i> = Hard)	CB re-boots and sends BootNotification.req PDU to CS	✓ [Manual reboot]
4	In CB logs check information sent in BootNotification.req PDU	field value <i>chargePointModel</i> ≠ "" field value <i>chargePointVendor</i> ≠ ""	✓
5	CS replies with BootNotification.conf PDU to CB (field values <i>status</i> = Accepted, <i>currentTime</i> = "new_CS_Time", <i>heartbeatInterval</i> = y)		✓
6	Check CB current time	CB current time must be synchronized with CS date/time	✓
7	Wait for next Heartbeat.req PDU sent by CB	CB sends Heartbeat.req PDU to CS	✓
8	CS replies with Heartbeat.conf PDU to CB	CB receives Heartbeat.conf PDU - no CB action	✓
9	Wait y seconds (equal to new heartbeat interval) from Step 5	CB sends Heartbeat.req PDU to CS	✓
10	CS replies with Heartbeat.conf PDU to CB	CB receives Heartbeat.conf PDU - no CB action	✓
<b>Postconditions</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Charge Point in normal operation (Available state)</li> <li>• each y seconds the Charge Box sends Heartbeat.req PDU to CS</li> </ul>		
<b>Comments</b>	/		

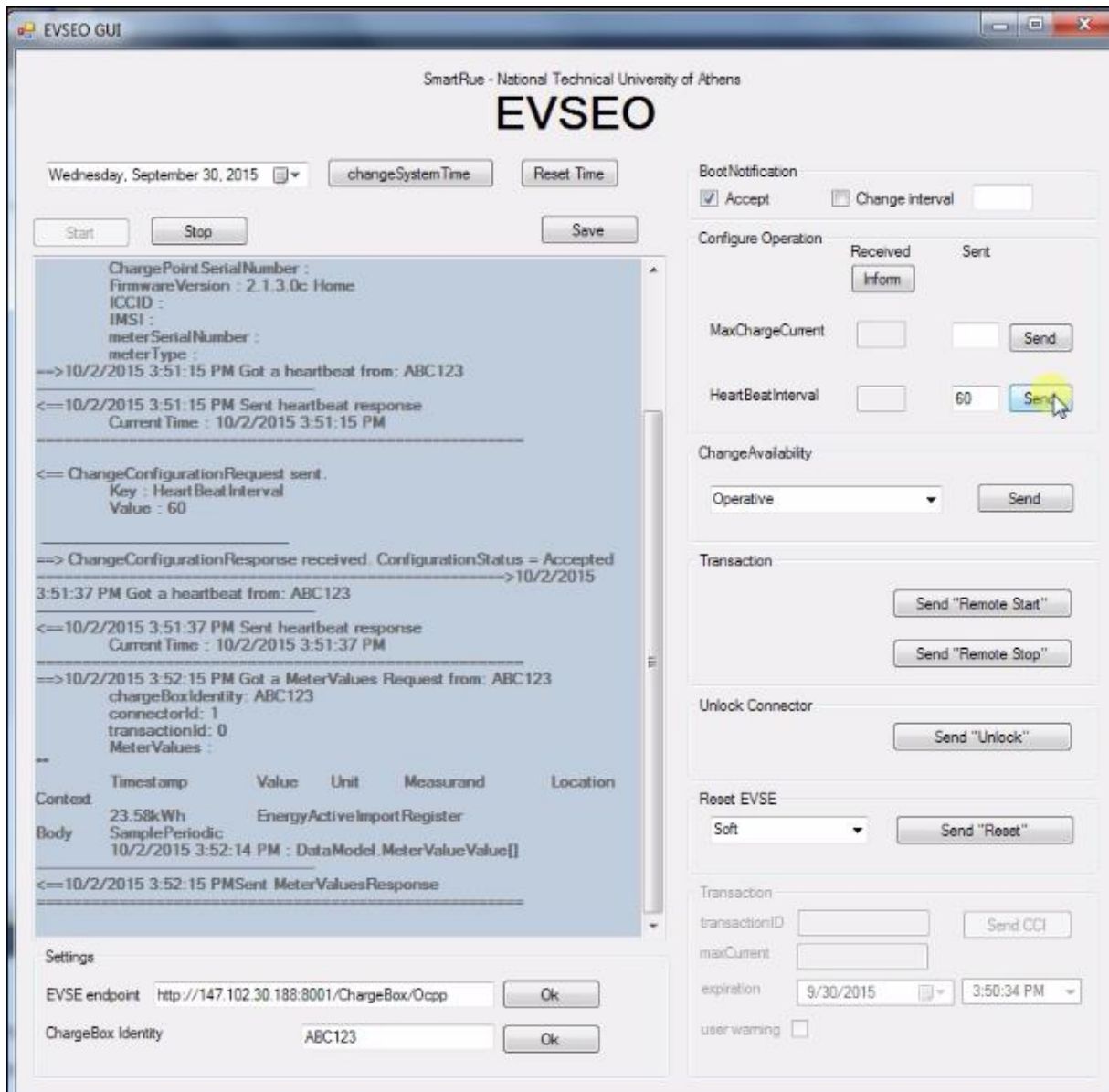


**TC-2.1-EVSE-1.5-103 Heartbeat: Normal procedure**

Author	Version	Date
ETREL	1.0	2015-08-04
<b>Test Group</b>	2. EVSE Operation	
<b>Test Case</b>	2.1 Monitoring (OCPP 1.5)	
<b>Test ID</b>	TC-2.1-EVSE-1.5-103 Heartbeat: Normal procedure	
<b>Description</b>	Charge Box receives from Central System the requirement to change current date/time and heartbeat interval	
<b>Test Objective</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>verify if Charge Box correctly receives the requirement received from Central System to change current time and heartbeat interval and correctly interprets and executes the requirement</li> </ul>	

<b>Information objects</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Central System: <i>currentTime</i> (mandatory)</li> <li>Central System: <i>key, value</i> (mandatory) - in ChangeConfiguration.req PDU (TC-2.3-EVSE-1.5-101 Charge Box configuration: Heartbeat interval)</li> <li>Charge Box: <i>status</i> (mandatory) - in ChangeConfiguration.conf PDU (TC-2.3-EVSE-1.5-101 Charge Box configuration: Heartbeat interval)</li> </ul>		
<b>Equipment Specifications:</b>			
<b>DUT:</b> EVSE (Charge Box = CB)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Manufacturer: EVSE</li> <li>Model: ETREL</li> </ul>		
<b>Emulator:</b> EVSEO Back-end (Central System = CS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Manufacturer: NTUA</li> <li>Model:</li> </ul>		
<b>Preconditions</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>TC-2.3-EVSE-1.5-101 Charge Box configuration: Heartbeat interval tested</li> </ul>		
<b>Test Procedure:</b>			
<b>Step</b>	<b>Action</b>	<b>Expected Result</b>	<b>Actual Result</b>
1	Execute TC-2.3-EVSE-1.5-101 Charge Box configuration: Heartbeat interval, Step 1 (in CS launch ChangeConfiguration.req PDU with field values <i>key</i> = "HeartBeatInterval", <i>value</i> = "x")	CB sends ChangeConfiguration.conf PDU with field value <i>status</i> = Accepted to CS	✓
2		Every x seconds CB sends Heartbeat.req PDU to CS	✓
3	Execute TC-2.3-EVSE-1.5-101 Charge Box configuration: Heartbeat interval, Step 1 (in CS launch ChangeConfiguration.req PDU with field values <i>key</i> = "HeartBeatInterval", <i>value</i> = "y")	CB sends ChangeConfiguration.conf PDU to CS (field value <i>status</i> = Accepted)	✓
4	Via CS GUI insert (vendor specific): Current CS time = "new_CS_Time" (dateTime)		✓
5	Wait for next Heartbeat.req PDU sent by CB	CB sends Heartbeat.req PDU to CS	✓
6	CS replies with Heartbeat.conf PDU to CB (with field value <i>currentTime</i> = "new_CS_Time")	CB receives Heartbeat.conf PDU - no CB action	✓
7	Check CB current time	must be synchronized with new CS date/time	✓
8	Wait y seconds (equal to new heartbeat interval) from Step 3	CB sends Heartbeat.req PDU to CS	✓

9	CS replies with Heartbeat.conf PDU to CB	CB receives Heartbeat.conf PDU - no CB action	✓
<b>Postconditions</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>each y seconds Charge Box sends Heartbeat.req PDU to Central System</li> </ul>		
<b>Comments</b>	/		

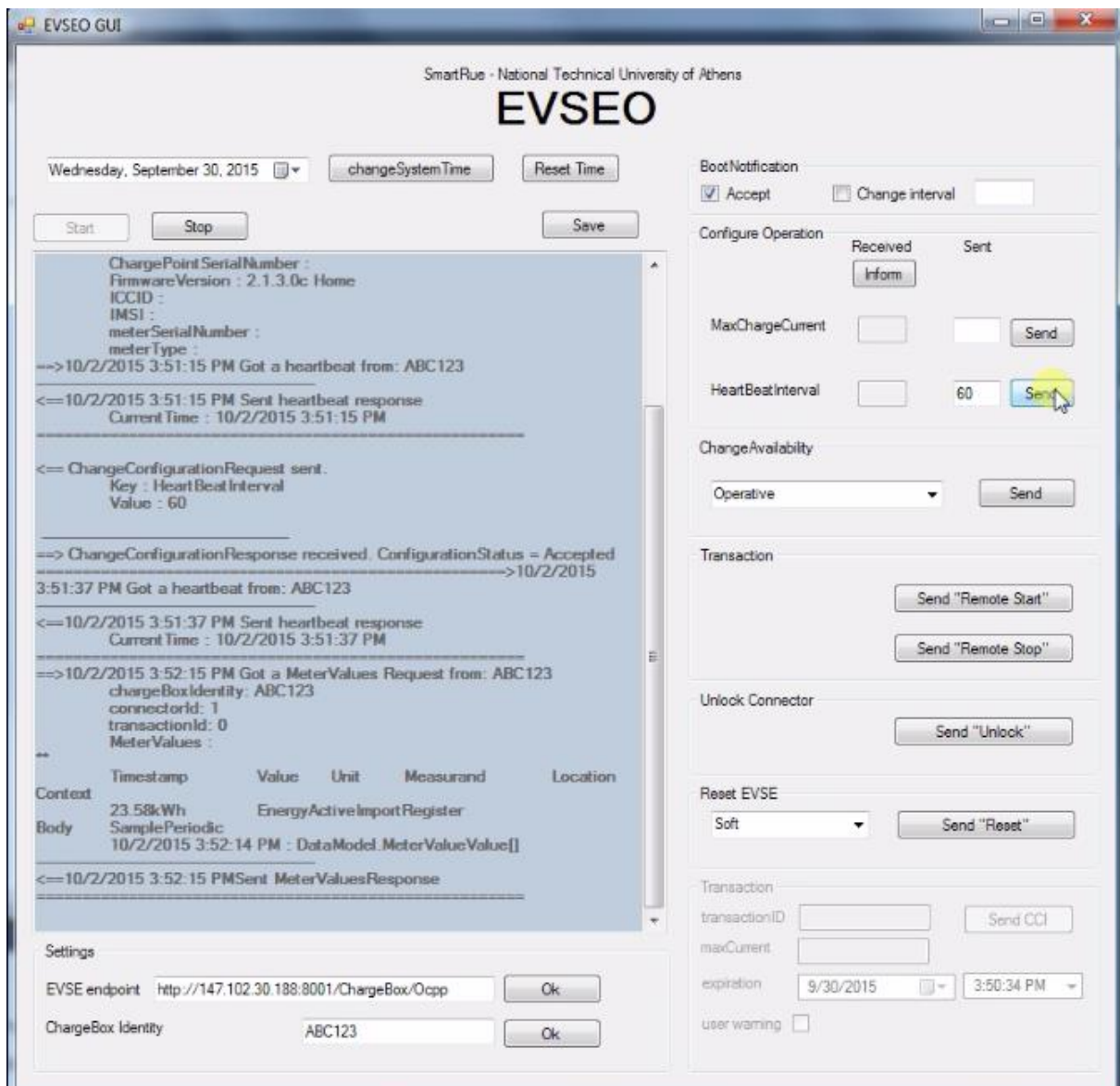


### TC-2.3-EVSE-1.5-101 Charge Box configuration: Heartbeat interval

Author	Version	Date
ETREL	1.0	2015-08-14
<b>Test Group</b>	2. EVSE Operation	
<b>Test Case</b>	2.3 EVSE Control (OCPP 1.5)	
<b>Test ID</b>	TC-2.3-EVSE-1.5-101 Charge Box configuration: Heartbeat interval	

<b>Description</b>	Charge Box receives from Central System the requirement to change heartbeat interval. Charge Box replies to requirement received from Central System and applies the change of parameter.		
<b>Test Objective</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>verify if Charge Box correctly replies to and interprets and implements the requirement of Central System to change heartbeat interval</li> </ul>		
<b>Information objects</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Central System: <i>key, value</i> (mandatory)</li> <li>Charge Box: <i>status</i> (mandatory)</li> </ul>		
<b>Equipment Specifications:</b>			
<b>DUT: EVSE (Charge Box = CB)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Manufacturer: EVSE</li> <li>Model: ETREL</li> </ul>		
<b>Emulator: EVSEO Back-end (Central System = CS)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Manufacturer: NTUA</li> <li>Model:</li> </ul>		
<b>Preconditions</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Charge Box registered with Central System</li> </ul>		
<b>Test Procedure:</b>			
<b>Step</b>	<b>Action</b>	<b>Expected Result</b>	<b>Actual Result</b>
1	In CS launch ChangeConfiguration.req PDU with field values: <i>key</i> = "HeartBeatInterval" <i>value</i> = "x" (x is integer value >0)	CB sends ChangeConfiguration.conf PDU to CS	✓
2	In CB logs check information sent in ChangeConfiguration.conf PDU	field value <i>status</i> = Accepted	✓
3	Wait x seconds	CB sends Heartbeat.req PDU to CS	✓
4	In CS launch ChangeConfiguration.req PDU with field values: <i>key</i> = "HeartBeatInterval" <i>value</i> = "y" (y is any non-integer value or integer value ≤0)	CB sends ChangeConfiguration.conf PDU	✓
5	In CB logs check information sent in ChangeConfiguration.conf PDU	field value <i>status</i> = Rejected	✓
<b>Postconditions</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>each x seconds the Charge Box sends Heartbeat.req PDU to Central System</li> </ul>		
<b>Comments</b>	/		





**TC-2.3-EVSE-1.5-106 Charge Box configuration: Periodic data sampling interval**

Author	Version	Date
ETREL	1.0	2015-08-14
<b>Test Group</b>	2. EVSE Operation	
<b>Test Case</b>	2.3 EVSE Control (OCPP 1.5)	
<b>Test ID</b>	TC-2.3-EVSE-1.5-106 Charge Box configuration: Periodic data sampling interval	

<b>Description</b>	Charge Box receives from Central System the requirement to change the data sampling interval of sampled measurands (see TC-2.3-EVSE-1.5-108 Charge Box configuration: Sampled measurands), i.e. the data sampling interval of measurements that are acquired in regular intervals, but irrespective of the actual time. The time of data sampling of sampled measurands is not conditioned by clock (such as in the case of clock-aligned data - see TC-2.3-EVSE-1.5-107 Charge Box configuration: Clock-aligned data sampling interval) but for example by start of charging transaction. Charge Box replies to requirement received from Central System.		
<b>Test Objective</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>verify if Charge Box correctly replies to requirement of Central System to change the data sampling interval for sampled measurands</li> </ul>		
<b>Information objects</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Central System: <i>key, value</i> (mandatory)</li> <li>Charge Box: <i>status</i> (mandatory)</li> </ul>		
<b>Equipment Specifications:</b>			
<b>DUT:</b> EVSE (Charge Box = CB)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Manufacturer:EVSE</li> <li>Model: ETREL</li> </ul>		
<b>Emulator:</b> EVSEO Back-end (Central System = CS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Manufacturer: NTUA</li> <li>Model:</li> </ul>		
<b>Preconditions</b>			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Charge Box registered with Central System</li> </ul>		
<b>Test Procedure:</b>			
<b>Step</b>	<b>Action</b>	<b>Expected Result</b>	<b>Actual Result</b>
1	In CS launch ChangeConfiguration.req PDU with field values: <i>key</i> = "MeterValueSampleInterval" <i>value</i> = "x" (x is any non-integer value or integer value <0 or integer value lower than a value preset in CB for minimum data sampling interval for sampled measurands)	CB sends ChangeConfiguration.conf PDU	✓
2	In CB logs check information sent in ChangeConfiguration.conf PDU	field value <i>status</i> = Rejected	✓
3	In CS launch ChangeConfiguration.req PDU with field values: <i>key</i> = "MeterValueSampleInterval" <i>value</i> = "y" (y is any integer value ≥ value preset in CB for minimum data sampling interval for sampled measurands)	CB sends ChangeConfiguration.conf PDU	✓

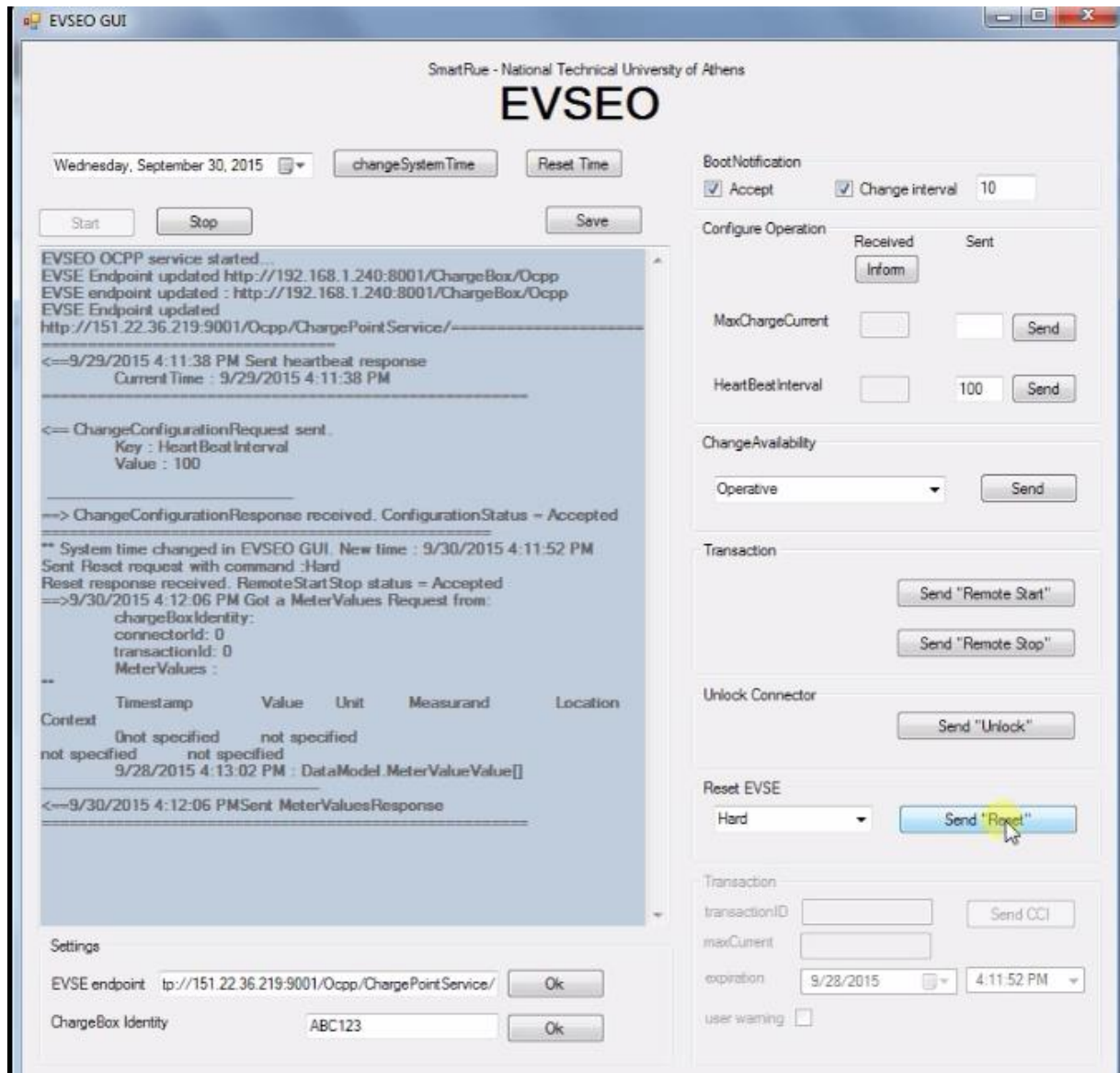
4	In CB logs check information sent in ChangeConfiguration.conf PDU	field value <i>status</i> = Accepted	✓
5	In CS launch ChangeConfiguration.req PDU with field values: <i>key</i> = "MeterValueSampleInterval" <i>value</i> = "0"	CB sends ChangeConfiguration.conf PDU	✓
6	In CB logs check information sent in ChangeConfiguration.conf PDU	field value <i>status</i> = Accepted	✓
<b>Postconditions</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CB is continuously sending MeterValues.req PDU to CS</li> </ul>		
<b>Comments</b>	/		

## Σταθμός φόρτισης RSE

### TC-2.1-EVSE-1.5-101 Boot notification: Normal procedure

Author	Version	Date	
ETREL	1.0	2015-08-04	
<b>Test Group</b>	2. EVSE Operation		
<b>Test Case</b>	2.1 Monitoring (OCPP 1.5)		
<b>Test ID</b>	TC-2.1-EVSE-1.5-101 Boot notification: Normal procedure		
<b>Description</b>	After Charge Point starting-up the Charge Box sends a notification to Central System with information about its configuration. Central System accepts the Charge Box and requires from Charge Box to change the current date/time and heartbeat interval.		
<b>Test Objective</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>verify if Charge Point correctly sends to Central System the notification after its re-boot and receives and implements the requirement from central System to change current date/time and heartbeat interval</li> </ul>		
<b>Information objects</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Charge Box: <i>chargePointModel</i>, <i>chargePointVendor</i> (mandatory), other Charge Point data (optional)</li> <li>Central System: <i>heartbeatInterval</i>, <i>currentTime</i>, <i>status</i> (mandatory)</li> <li>Central System: <i>key</i>, <i>value</i> (mandatory) - in ChangeConfiguration.req PDU (TC-2.3-EVSE-1.5-101 Charge Box configuration: Heartbeat interval)</li> <li>Charge Box: <i>status</i> (mandatory) - in ChangeConfiguration.conf PDU (TC-2.3-EVSE-1.5-101 Charge Box configuration: Heartbeat interval)</li> <li>Central System: <i>type</i> (mandatory) - in Reset.req PDU (TC-2.3-EVSE-1.5-206 Hard Charge Box reset)</li> </ul>		
<b>Equipment Specifications:</b>			
<b>DUT:</b> <b>EVSE (Charge Box = CB)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Manufacturer: SCAME</li> <li>Model: SCAME LIBERA 63A</li> </ul>		
<b>Emulator:</b> <b>EVSEO Back-end (Central System = CS)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Manufacturer: NTUA custom</li> <li>Model: custom</li> </ul>		
<b>Preconditions</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>TC-2.3-EVSE-1.5-101 Charge Box configuration: Heartbeat interval tested</li> <li>TC-2.3-EVSE-1.5-206 Hard Charge Box reset tested</li> </ul>		
<b>Test Procedure:</b>			
Step	Action	Expected Result	Actual Result

1	Execute TC-2.3-EVSE-1.5-101 Charge Box configuration: Heartbeat interval, Step 1 (in CS launch ChangeConfiguration.req PDU with field values <i>key</i> = "HeartBeatInterval", <i>value</i> = "x")	CB sends ChangeConfiguration.conf PDU with field value <i>status</i> = Accepted to CS	✓
2	Via CS GUI insert (vendor specific): Current CS time = "new_CS_Time" (dateTime) Heartbeat interval = y (integer - in seconds)		✓
3	Execute TC-2.3-EVSE-1.5-206 Hard Charge Box reset, Step 1 (in CS launch Reset.req PDU with field value: <i>type</i> = Hard)	CB re-boots and sends BootNotification.req PDU to CS	✓
4	In CB logs check information sent in BootNotification.req PDU	field value <i>chargePointModel</i> ≠ "" field value <i>chargePointVendor</i> ≠ ""	✓
5	CS replies with BootNotification.conf PDU to CB (field values <i>status</i> = Accepted, <i>currentTime</i> = "new_CS_Time", <i>heartbeatInterval</i> = y)		✓
6	Check CB current time	CB current time must be synchronized with CS date/time	✓
7	Wait for next Heartbeat.req PDU sent by CB	CB sends Heartbeat.req PDU to CS	✓
8	CS replies with Heartbeat.conf PDU to CB	CB receives Heartbeat.conf PDU - no CB action	✓
9	Wait y seconds (equal to new heartbeat interval) from Step 5	CB sends Heartbeat.req PDU to CS	✓
10	CS replies with Heartbeat.conf PDU to CB	CB receives Heartbeat.conf PDU - no CB action	✓
<b>Postconditions</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Charge Point in normal operation (Available state)</li> <li>• each y seconds the Charge Box sends Heartbeat.req PDU to CS</li> </ul>	
<b>Comments</b>		Initially, there were some WS-addressing problems that were overcome	



### TC-2.1-EVSE-1.5-103 Heartbeat: Normal procedure

Author	Version	Date
ETREL	1.0	2015-08-04
<b>Test Group</b>	2. EVSE Operation	
<b>Test Case</b>	2.1 Monitoring (OCPP 1.5)	
<b>Test ID</b>	TC-2.1-EVSE-1.5-103 Heartbeat: Normal procedure	
<b>Description</b>	Charge Box receives from Central System the requirement to change current date/time and heartbeat interval	
<b>Test Objective</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>verify if Charge Box correctly receives the requirement received from Central System to change current time and heartbeat interval and correctly interprets and executes the requirement</li> </ul>	

<b>Information objects</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Central System: <i>currentTime</i> (mandatory)</li> <li>Central System: <i>key, value</i> (mandatory) - in ChangeConfiguration.req PDU (TC-2.3-EVSE-1.5-101 Charge Box configuration: Heartbeat interval)</li> <li>Charge Box: <i>status</i> (mandatory) - in ChangeConfiguration.conf PDU (TC-2.3-EVSE-1.5-101 Charge Box configuration: Heartbeat interval)</li> </ul>		
<b>Equipment Specifications:</b>			
<b>DUT:</b> <b>EVSE (Charge Box = CB)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Manufacturer: SCAME</li> <li>Model: SCAME LIBERA – 63 A</li> </ul>		
<b>Emulator:</b> <b>EVSEO Back-end (Central System = CS)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Manufacturer: RSE (custom)</li> <li>Model: custom</li> </ul>		
<b>Preconditions</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>TC-2.3-EVSE-1.5-101 Charge Box configuration: Heartbeat interval tested</li> </ul>		
<b>Test Procedure:</b>			
<b>Step</b>	<b>Action</b>	<b>Expected Result</b>	<b>Actual Result</b>
1	Execute TC-2.3-EVSE-1.5-101 Charge Box configuration: Heartbeat interval, Step 1 (in CS launch ChangeConfiguration.req PDU with field values <i>key</i> = "HeartBeatInterval", <i>value</i> = "x")	CB sends ChangeConfiguration.conf PDU with field value <i>status</i> = Accepted to CS	✓
2		Every x seconds CB sends Heartbeat.req PDU to CS	✓
3	Execute TC-2.3-EVSE-1.5-101 Charge Box configuration: Heartbeat interval, Step 1 (in CS launch ChangeConfiguration.req PDU with field values <i>key</i> = "HeartBeatInterval", <i>value</i> = "y")	CB sends ChangeConfiguration.conf PDU to CS (field value <i>status</i> = Accepted)	✓
4	Via CS GUI insert (vendor specific): Current CS time = "new_CS_Time" (dateTime)		✓
5	Wait for next Heartbeat.req PDU sent by CB	CB sends Heartbeat.req PDU to CS	✓
6	CS replies with Heartbeat.conf PDU to CB (with field value <i>currentTime</i> = "new_CS_Time")	CB receives Heartbeat.conf PDU - no CB action	✓
7	Check CB current time	must be synchronized with new CS date/time	✓
8	Wait y seconds (equal to new heartbeat interval) from Step 3	CB sends Heartbeat.req PDU to CS	✓



9	CS replies with Heartbeat.conf PDU to CB	CB receives Heartbeat.conf PDU - no CB action	✓
<b>Postconditions</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>each y seconds Charge Box sends Heartbeat.req PDU to Central System</li> </ul>		
<b>Comments</b>	Initially, there were some WS-addressing problems that were overcome		

The screenshot displays the EVSEO GUI interface. At the top, it shows the date as Friday, October 02, 2015, and a 'change System Time' button. The main area contains a log window with the following entries:

```

=>> ChangeConfigurationResponse received. ConfigurationStatus = Accepted
4:19:37 PM Got a heartbeat from:
<--9/28/2015 4:19:37 PM Sent heartbeat response
Current Time : 9/28/2015 4:19:37 PM

=>>9/28/2015 4:19:48 PM Got a heartbeat from:
<--9/28/2015 4:19:48 PM Sent heartbeat response
Current Time : 9/28/2015 4:19:48 PM

=>>9/28/2015 4:19:53 PM Got a MeterValues Request from:
chargeBoxIdentity:
connectorId: 0
transactionId: 0
MeterValues :
**
Context      Timestamp      Value      Unit      Measurand      Location
not specified  not specified  not specified
9/28/2015 4:19:56 PM : DataModel.MeterValueValue[]
<--9/28/2015 4:19:53 PM Sent MeterValuesResponse

** System time changed in EVSEO GUI. New time : 10/2/2015 4:18:22
PM=>>10/2/2015 4:18:23 PM Got a heartbeat from:
<--10/2/2015 4:18:23 PM Sent heartbeat response
Current Time : 10/2/2015 4:18:23 PM

=>>10/2/2015 4:18:34 PM Got a heartbeat from:
<--10/2/2015 4:18:34 PM Sent heartbeat response
Current Time : 10/2/2015 4:18:34 PM

```

Below the log is a 'Settings' section with fields for 'EVSE endpoint' (tp://151.22.36.219:9001/Ocpp/ChargePointService/) and 'ChargeBox Identity' (ABC123). On the right side, there are several control panels: 'BootNotification' (Accept checked), 'Configure Operation' (Received/Sent buttons), 'MaxChargeCurrent' and 'HeartBeatInterval' (input fields and Send buttons), 'ChangeAvailability' (Operative dropdown and Send button), 'Transaction' (Send Remote Start/Stop buttons), 'Unlock Connector' (Send Unlock button), 'Reset EVSE' (Soft dropdown and Send Reset button), and another 'Transaction' section (transactionID, maxCurrent, expiration, user warning fields and buttons).



## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] European Commission (2009), “Mobility and Transport”, Road Safety: Vehicle Categories [online]: [http://ec.europa.eu/transport/road\\_safety/vehicles/categories\\_en.htm](http://ec.europa.eu/transport/road_safety/vehicles/categories_en.htm)
- [2] EU MERGE project, Task 3.2, Part 1 of Deliverable D3.2, “Evaluation of the Impact that a Progressive Deployment of EV will Provoke on Electricity Demand, Steady State Operation, Market Issues, Generation Schedules and on the Volume of Carbon Emissions-Electric Vehicle Penetration Scenarios in Germany, UK, Spain, Portugal and Greece”.
- [3] IEA report: “Global EV outlook 2016”. Online: [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Global\\_EV\\_Outlook\\_2016.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Global_EV_Outlook_2016.pdf)
- [4] James Larminie, John Lowry , “Electric vehicle technology explained ”, John Wiley & Sons, Ltd.
- [5] Center for Entrepreneurship & Technology, University of California, Berkeley, “The Electric Vehicle Battery Landscape: Opportunities and Challenges”, Dec. 2009 [http://large.stanford.edu/courses/2011/ph240/zhong1/docs/BatteryBrief\\_final.pdf](http://large.stanford.edu/courses/2011/ph240/zhong1/docs/BatteryBrief_final.pdf)
- [6] The Boston Consulting Group (BCG), “Batteries for Electric cars-Challenges, Opportunities and the Outlook to 2020”, 2009: <http://www.bcg.com/documents/file36615.pdf>
- [7] Institute of Transportation Studies University of California Davis, “Batteries for Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs): Goals and the State of Technology circa 2008”, JonnAxsen, Andrew Burke, Ken Kurani, May 2008.
- [8] J. C. Viera, M. Gonzalez, J. C. Anton, J. C. Campo, F. J. Ferrero, and M. Valledor, “NiMH vsNiCd batteries under high charging rates,” in Proc. 28th Annu. Telecommun. EnergyConf. , Sep. 2006, pp. 1–6.
- [9] Y. Gao, M. Ehsani, “Investigation of battery technologies for the army’s hybrid vehicle application,” in Proc. 56th IEEE Veh. Technol. Conf., Sep. 2002, pp. 1505–1509
- [10] Wencong Su; Habiballah Eichi; Wentze Zeng; Mo-Yuen Chow: “A Survey on the Electrification of Transportation in a Smart Grid Environment”, IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 8, is. 1, pp. 1-10, 2012
- [11] Alireza Khaligh, Zhihao Li, “Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 59, no. 6, July 2010
- [12] A. M. Foley, I. J. Winning, B.P. O Gallachoir, “State of the art in EV charging infrastructure”, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2010
- [13] Idaho National Laboratory, Clean Cities December 2010 Webinar, “Electric Vehicle Charging Levels and Requirements Overview”, Jim Francfort, December 15, 2010: [http://www1.eere.energy.gov/cleancities/toolbox/pdfs/ev\\_charging\\_requirements.pdf](http://www1.eere.energy.gov/cleancities/toolbox/pdfs/ev_charging_requirements.pdf)
- [14] Eurelectric Report: “Facilitating e-mobility: Eurelectric views on charging infrastructure”. Online [http://www.eurelectric.org/media/27060/0322\\_facilitating\\_emobility\\_eurelectric\\_views\\_-\\_final-2012-030-0291-01-e.pdf](http://www.eurelectric.org/media/27060/0322_facilitating_emobility_eurelectric_views_-_final-2012-030-0291-01-e.pdf)
- [15] MERGE: Mobile Energy Resources in Greeds of Electricity, Task 1.1, Deliverable 1.1, Specification for an enabling smart technology, 3 August 2011.
- [16] Mobile Magazine [online]: <http://www.mobilemag.com/2011/12/21/inductive-charging-for-electric-vehicles-will-be-tested-in-berlin/> [accessed 10 January 2012]
- [17] U.S. Department of Energy, Charging Plug-In Electric Vehicles at Home [online]: [http://www.afdc.energy.gov/afdc/vehicles/electric\\_charging\\_home.html](http://www.afdc.energy.gov/afdc/vehicles/electric_charging_home.html)
- [18] SAE J1772™ Update For IEEE Standard 1809 Guide for Electric-Sourced Transportation Infrastructure, Meeting February 18, 2010, Gery Kissel, SAE J1772™ Task Force Lead:
- [19] TEPCO, Press Release (Mar 15, 2010) Establishment of CHAdeMO Association [online]: <http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/10031501-e.html> [accessed 11 January 2012]
- [20] MERGE Deliverable WP5\_Task5.3: “Scenarios and roadmap for deployment of EV in three European regions: recommendations for policy makers and regulators”, December 2011.
- [21] Eurelectric Position paper, “ Charging infrastructures for electric vehicles”, 2016

- [22] J. Salihi, "Energy Requirements for Electric Cars and their Impact on Electric Power Generation and Distribution Systems", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 9, no. 5, 1973
- [23] G. T. Heydt, "The Impact of Electric Vehicle Deployment on Load Management Strategies", *IEEE Power Engineering Review*, vol. 3, no. 5, May 1983
- [24] S. Rahman, G.B. Shrestha, "An investigation into the impact of electric vehicle load on the electric utility distribution system", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 2, April 1993
- [25] Ford A. Electric vehicles and the electric utility company. *Energy Policy* 1994; 22:555–570. DOI: 10.1016/0301-4215(94)90075-2.
- [26] Kempton W, Letendre SE. Electric vehicles as a new power source for electric utilities. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 1997; 2:157–175. DOI: 10.1016/S1361-9209(97)00001-1.
- [27] Kempton W, Kubo T. Electric-drive vehicles for peak power in Japan. *Energy Policy* 2000; 28:9–18. DOI: 10.1016/S0301-4215(99)00078-6.
- [28] A. Brooks, T. Gage, "Integration of Electric Drive Vehicles with the Electric Power Grid: a New Value Stream", Presented at the 18th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium (EVS-18), Berlin, Germany, 2001
- [29] Kempton W, Tomic J, Letendre SE, Brooks A, Lipman T. Vehicle to grid power: battery, hybrid, and fuel cell vehicles as resources for distributed electric power in California. Working Paper Series ECD-ITS-RR-01-03, UC Davis Institute for Transportation Studies, June, 2001. Available at: <http://escholarship.org/uc/item/5cc9g0jp>.
- [30] Hawkins D. Vehicle to grid—a control area operators perspective. EVAA Electric Transportation Industry Conference, December, 2001.
- [31] M. Duvall, "Comparing the benefits and Impacts of Hybrid Electric Vehicle Options for Compact Sedan and Sport Utility Vehicles", Tech. Rep., Electric Power research Institute, 2002.
- [32] W. Kempton, J. Tomic, "Vehicle to grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue", *Journal of Power Sources*, Elsevier, 2005.
- [33] Kempton W, Tomic J. Vehicle-to-grid power implementation: from stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy. *Journal of Power Sources*, 144:268–279, 2005.
- [34] A. Simpson, "Cost-Benefit Analysis of Plug-in Hybrid Electric Vehicle Technology", 22nd International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium (EVS-22), Yokohama, Japan, 2006
- [35] J.A. Peças Lopes, C.L. Moreira, A.G. Madureira, "Defining Control Strategies for MicroGrids Islanded Operation", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21 no. 2, May 2006
- [36] K. Clement, K. Van Reusel, J. Driesen: "The consumption of electrical energy of plug-in hybrid electric vehicles in Belgium", EETF- European Ele-Drive Transportation Conference, Brussels, Belgium, June 2007
- [37] M Duvall, E. Knipping, M. Alexander, L. Tonachel, C. Clark, "Environmental Assessment of Plug-In Hybrid Electric Vehicles, Tech. Rep., Electric Power Research Institute, California (USA), July 2007
- [38] E. Haesen, J. Driesen, R. Belmans, "Multi-objective valuation of electricity storage services", *Proceedings of EESAT Conference*, Sept. 2007
- [39] Brooks A, Thesen SH. PG&E and Tesla Motors: vehicle to grid demonstration and evaluation program. 23th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition (EVS23), December, 2007
- [40] E. Haesen, J. Driesen, R. Belmans, "Robust planning methodology for integration of stochastic generators in distribution grids", *IET Renewable Power Generation*, vol. 1, no. 1, 2007
- [41] V. Marano, G. Rizzoni, Energy and economic evaluation of PHEVs and their interaction with renewable energy sources and the power grid, in: *Proc. IEEE Veh. Electronics and Safety Conf.*, pp. 84-89, 2008.
- [42] B. Sovacool, R. Hirsh, "Beyond batteries: An examination of the benefits and barriers to plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) and a vehicle-to-grid (V2G) transition", *Elsevier Energy Policy*, vol. 37, Dec. 2008

- [43] Wang L. Potential impacts of plug-in hybrid electric vehicles on locational marginal prices. IEEE Energy2030 Conference, November, 2008.
- [44] S.G. Wirasingha, N. Schofield, A. Emadi, "Plug-in hybrid electric vehicle developments in the US: trends, barriers, and economic feasibility", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008
- [45] S. Blumsack, C. Samaras, P. Hines, "Long-Term Electric System Investments to support Plug-in Hybrid Electric Vehicles", Tech. Rep., 2008
- [46] Bludszweit H. Reduction of the uncertainty of wind power predictions using energy storage. PhD Thesis, Departamento de Ingenieria Electrica, Universidad de Zaragoza, June, 2009.
- [47] J. Van Mierlo, Y. Marenne, "Energy consumption, CO2 emissions and other considerations related to Battery Electric Vehicles", draft version, Association for Electric Vehicles in Europe, April 2009
- [48] Birnie D. Solar-to-vehicle (S2V) systems for powering commuters of the future. Journal of Power Sources, 186:539–542, 2009.
- [49] Markel T, Kuss M, Denholm P. Communication and control of electric vehicles supporting renewables. IEEE Vehicle Power and Propulsion Systems Conference, September 7–10, 2009.
- [50] G.A. Putrus, P. Suwanapingkarl, D. Johnston, E.C. Bentley, M. Narayana "Impact of electric vehicles on power distribution networks", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, pp. 827-831, Vancouver, Canada, Sept. 2009
- [51] K. Clement-Nyns, E. Haesen, J. Driesen, "Stochastic analysis of the impact of plug-in hybrid electric vehicles on the distribution grid", 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2009
- [52] J. A. Peças Lopes, P. M. Rocha Almeida, F. J. Soares, "Using Vehicle-to-Grid to Maximize the Integration of Intermittent Renewable Energy Resources in Islanded Electric Grids", International Conference on Clean Electrical Power, 2009
- [53] K. Clement-Nyns, E. Haesen, J. Driesen, "Coordinated charging of multiple plug-in hybrid electric vehicles in residential distribution grids", IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, 2009
- [54] Lombardi, P. Vasquez, Z. A. Styczynski, "Plug-in electric vehicles as storage devices within an Autonomous power system: Optimization issue", IEEE PowerTech, Oct. 2009
- [55] Shin-ichi Inage, "Modelling Load Shifting Using Electric Vehicles in a Smart Grid Environment", Working Paper, International Energy Agency, 2010
- [56] I. Momber, T. Gómez; G. Venkataramanan, M. Stadler, S. Beer, J. Lai, C. Marnay, V. Battaglia, "Plug-in Electric Vehicle Interactions with a Small Office Building: An economic Analysis using DER-CAM", 2010
- [57] S. B. Peterson, J. F. Whitacre, and J. Apt, "The economics of using plug-in hybrid electric vehicle battery packs for grid storage," J. Power Sources, vol. 195, no. 8, pp. 2377–2384, 2010.
- [58] P. Papadopoulos, S. Skarvelis-Kazakos, I. Grau, L. M. Cipcigan, N. Jenkins, "Predicting Electric Vehicle Impacts on Residential Distribution Networks with Distributed Generation", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010
- [59] Quinn C, Zimmerle D, Bradley TH. The effect of communication architecture on the availability, reliability, and economics of plug-in hybrid electric vehicle-to-grid ancillary services. Journal of Power Sources, 195:1500– 1509, 2010.
- [60] Peterson SB, Whitacre J, Apt J. Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and vehicle-to-grid utilization. Journal of Power Sources, 195:2385–2392,2010.
- [61] Andersson SL, Elofsson AK, Galus MD, Goransson L, Karlsson S, Johnsson F, Andersson G. Plug-in hybrid electric vehicles as regulating power providers: case studies of Sweden and Germany. Energy Policy, 38:2751–2762,2010.
- [62] A.S. Masoum, S. Dei, P. S. Moses, A.A. Siada, "Voltage Profile and THD Distortion of Residential Network with High Penetration of Plug-in Electrical Vehicles", IEEE/PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010
- [63] K. Clement-Nyns, E. Haesen, J. Driesen, "The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid", IEEE Transactions on Power Systems, pp. 371-380, Feb. 2010

- [64] S. Acha, T.C. Green, N. Shah, "Effects of optimized plug-in hybrid vehicle charging strategies on electric distribution network losses", IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition, pp. 1-6, Apr. 2010
- [65] L. Pieltain Fernandez, T. Gomez San Roman, R. Cossent, C. Mateo Domingo, P. Frias, "Assessment of the Impact of Plug-in Electric Vehicles on Distribution Networks", IEEE Transactions on Power Systems, May 2010
- [66] N. Rotering, M. Ilic, "Optimal Charge Control of Plug-In Hybrid Electric Vehicles in Deregulated Electricity Markets", IEEE Transactions on Power Systems, Nov. 2010
- [67] K. Qian, C. Zhou, M. Allan, Y. Yuan, "Modeling of Load Demand Due to EV Battery Charging in Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, issue 2, Aug. 2010
- [68] O. Sundström, C. Binding: "Optimization Methods to Plan the Charging of Electric Vehicle Fleets." In Proceedings of the International Conference on Control, Communication and Power Engineering, pp. 28 - 29, 2010.
- [69] J. Fluhr, K. H. Ahlert, C. Weinhardt: "A Stochastic Model for Simulating the Availability of Electric Vehicles for Services to the Power Grid." In 43th International Conference on Systems Sciences, Hawaii, pp. 1 - 10, 2010.
- [70] Zhongjing Ma, Callaway, D., Hiskens, I., "Decentralised charging control for large population of plug-in electric vehicles: Application of the Nash certainty equivalence principle", in IEEE International Control applications (CCA) Conference, Yokohama, Sept. 2010.
- [71] W. Su, M.Y. Chow: "Evaluation on Intelligent Energy Management System for PHEVs/PEVs Using Monte Carlo Method." In 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), pp. 1675 - 1680, 2011.
- [72] Ekman CK. "On the synergy between large electric vehicle fleet and high wind penetration—an analysis of the Danish case. Renewable Energy", 36:546–553, 2011.
- [73] D. Dallinger, D. Krampe, M. Wietschel, Vehicle-to-grid regulation reserves based on a dynamic simulation of mobility behavior, IEEE Trans. Smart Grid, 302-313, 2011.
- [74] S. Acha, T.C. Green, N. Shah, "Optimal Charging Strategies of Electric Vehicles in the UK Power Market", IEEE/PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2011
- [75] E. Sortomme, M.M. Hindi, S.D.J. MacPherson, S.S. Venkata, "Coordinated Charging of Plug-In Hybrid Electric Vehicles to Minimize Distribution System Losses", IEEE Transactions on Smart Grid, March 2011
- [76] M. Aliakbar Golki, H. Valizadeh Haghi, "Using a Multivariate DOE Method for Congestion Study in Distribution Systems under Impacts of Plug-in Electric Vehicles", 21st International Conference on Electricity Distribution, Frankfurt, Germany, June 2011
- [77] A. G. Anastasiadis, E. Voreadi, and N. D. Hatziargyriou, "Probabilistic Load Flow Methods with High Integration of Renewable Energy Sources and Electric Vehicles – Case Study of Greece", IEEE PowerTech Conference, Trondheim, June 2011.
- [78] A.S. Masoum, S. Deilami, P.S. Moses, M.A.S. Masoum, A. Abu-Siada "Smart load management of plug-in electric vehicles in distribution and residential networks with charging stations for peak shaving and loss minimisation considering voltage regulation", Generation, Transmission & Distribution, IET, vol. 5, issue 8, pp. 877-888, August 2011.
- [79] S. Deilami, A.S. Masoum, P.S. Moses, M.A.S. Masoum, "Real-Time Coordination of Plug-In Electric Vehicle Charging in Smart Grids to Minimize Power Losses and Improve Voltage Profile", in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 2, Issue 3, pp 456-467, Sept. 2011.
- [80] M. Doostizadeh, M. Khanabadi, A. Esmailian, M. Mohseninezhad, "Optimal Energy Management of a Retailer with Smart Metering and Plug-in Hybrid Electric Vehicle", 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2011
- [81] A.Y. Saber, G.K. Venayagamoorthy, Plug-in vehicles and renewable energy sources for cost and emission reductions, IEEE Trans. Ind. Elect., 1229-1238, 2011.
- [82] J. Hu, S. You, J. Østergaard, M. Lind, Q.W. Wu: "Optimal Charging Schedule of an Electric Vehicle Fleet." In 46th International Universities' Power Engineering Conference (UPEC), Germany, 2011.
- [83] Q. Li, T. Cui, R. Negi, F. Franchetti, M. Ilic, "Online Decentralised Charging of Plug-In Electric Vehicles in Power Systems", eprint arXiv:1106.5063, Nov. 2011.

- [84] C. Wu, H.M. Rad, J. Huang, J. Jatskevich, PEV-based combined frequency and voltage regulation for smart grid, in: Rec. IEEE PES Innovative Smart Grid Tech. Conf. (ISGT), January 2012.
- [85] A. De Los Rios, J. Goentzel, K.E. Nordstrom, C.W. Siegert, Economic analysis of vehicle-to-grid (V2G)-enabled fleets participating in the regulation service market, in: Rec. IEEE PES Innovative Smart Grid Tech. Conf. (ISGT), January 2012.
- [86] E. Keane, D. Flynn, Potential for electric vehicles to provide power system reserve, in: Rec. IEEE Power and Energy Syst. Innovative Smart Grid Tech. Conf., January 2012.
- [87] Q. Gong, S. Midlam-Mohler, V. Marano, G. Rizzoni, "Study of PEV Charging on Residential Distribution Transformer Life", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3, Issue 1, pp. 404-412, March 2012
- [88] M. Yilmaz, P.T. Krein, Review of benefits and challenges of vehicle-to-grid technology, in: Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), IEEE, pp. 3082-3089, 2012.
- [89] D. Wu, K.T. Chau, C. Liu, S. Gao, F. Li, Transient stability analysis of SMES for smart grid with vehicle-to-grid operation, IEEE Trans. Smart Grid, 1-4, 2012
- [90] O. Sundstrom, C. Binding: "Flexible Charging Optimization for Electric Vehicles Considering Distribution Grid Constraints." IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 3, No. 1, pp. 26 - 37, 2012.
- [91] T. Lan, J. Hu, Q. Kang, C. Si, L. Wang, Q. Wu: "Optimal Control of an Electric Vehicle's Charging Schedule under Electricity Markets." Neural Computing and Application, 2012.
- [92] E. Karfopoulos, N. Hatziargyriou, "A multi-agent System for Controlled Charging of a large Population of Electric Vehicles", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, issue 2, pp. 1196-1204, Sept 2012.
- [93] E. Karfopoulos, C. Marmaras, N. Hatziargyriou: "Charging Control Model for Electric Vehicle Supplier Aggregator", 3rd ISGT Conference, IEEE, Berlin, Germany, Oct. 2012
- [94] E. Karfopoulos, N. Hatziargyriou, "A Multi-Agent System For Controlled Charging of a Large Population of Electric Vehicles", IEEE Trans. on Power Systems, 2012
- [95] R. Couillet, S. M. Perlaza, H. Tembine, and M. Debbah, "Electrical vehicles in the smart grid: A mean field game analysis," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 30, no. 6, pp. 1086-1096, 2012.
- [96] W. Tushar, W. Saad, H. V. Poor, and D. B. Smith, "Economics of electric vehicle charging: A game theoretic approach," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 3, no. 4, pp. 1767-1778, 2012.
- [97] Varvara Alimisis and Nikos D. Hatziargyriou, "Evaluation of a Hybrid Power Plant Comprising Used EV-Batteries to Complement Wind Power", IEEE Trans. On Sustainable energy, vol. 4, no. 2, April 2013.
- [98] L. Gan, U. Topcu, S. Low, "Optimal decentralized protocol for electric vehicle charging", IEEE Trans. On Power Systems, vol. 28, No.2, pp.940-951, May 2013.
- [99] Jinfeng Yang; Zaiyue Yang, "Optimal scheduling of electric vehicle using dual decomposition", 26th Chinese Control and Decision Conference, 2014
- [100] Ziming Zhu, S. Lambotharan, Woon Hau Chin, Zhong Fan, "A Mean Field Game Theoretic Approach to Electric Vehicles Charging", IEEE Access, vol. 4, pp. 3501-3510, 2016
- [101] Mohammad Shahidepour; Chengcheng Shao; Xifan Wang; Xiuli Wang; Biyang Wang, "Partial Decomposition for Distributed Electric Vehicle Charging Control Considering Electric Power Grid Congestion", IEEE Trans. On Smart Grids, 2016
- [102] MERGE deliverable, WP2\_Task 2.2-2.5, Deliverable 2.2: "Functional specification for tools to assess steady state and dynamic behaviour impacts, impact on electricity markets and impact of high penetration of EV on the reserve levels", 2011
- [103] J.A. Pecas Lopes, F.J. Soares, P.M. Rocha Almeida, "Identifying Management Procedures to Deal with Connection of Electric Vehicles in the Grid", IEEE PowerTech, Bucharest, 2009
- [104] O. Sundstrom, C. Binding, "Optimization Methods to Plan the Charging of Electric Vehicles Fleets", International Conference on Control, Communication and Power Engineering, pp. 28-29, 2010.
- [105] Peng Minghong, Liu Lian, Jiang Chuanwen, "A review on the economic dispatch and risk management of the large-scale plug-in electric vehicles (PHEVs)-penetrated power systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp.1508-1515, 2012.

- [106] Ahmed Yousuf Saber, Ganesh Kumar Venayagamoorthy, “Unit Commitment with Vehicle-to-Grid using Particle Swarm Optimization”, IEEE PowerTech conf., pp. 1-8, Bucharest, 2009
- [107] C. Li, S. Tang, Y. Cao, Y. Xu, Y. Li, J. Li, R. Zhang, “A new stepwise power tariff model and its application for residential consumers in regulated electricity markets”, IEEE PES Trans., vol.28, issue 1, pp. 300-308, 2012.
- [108] M. Greer, “Electricity Cost Modeling Calculation”, Elsevier Science, 2010.
- [109] Mary B. Cain and Fernando L. Alvarado, “Implications of Cost and Bid Format on Electricity Market Studies: Linear Versus Quadratic Costs”, Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, Halifax Canada, Large Engineering Systems Conference on Power Engineering, July 2004, Halifax Canada.
- [110] MERGE Deliverable D4.2: Generation System Adequacy for 2020 and 2030. A Study for the Hellenic and Iberian System, pp. 53–63, Feb. 2012, [Online]. Available: <http://goo.gl/rofOy>.
- [111] I. Momber, T. Gomez, M. Rivier, and C. Mateo, “Benefits of EV-supplier-aggregators and distribution system operators from applying smart charging of plug-in electric vehicles,” in Proc. Cigrè Int. Symp. the Electric Power System of the Future: Integrating Supergrids and Microgrids, Bologna, Italy, Sep. 2011.
- [112] M. W. Gustafson and J. S. Baylor, “The equivalent hours loss factor revisited,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 3, no. 4, pp. 1502–1508, 1988.
- [113] O. M. Mikić, “Variance-based loss computation in low voltage distribution networks,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 22, no. 1, pp. 179–187, 2007.
- [114] N. Downing, M. Ferdowsi, Ed Bower, C. Joyce, K. Strunz, E. Abbasi, MERGE Deliverable D1.1, Task 1.5, “ Identification of traffic patterns and human behaviours”, May 2010.
- [115] Tamer Basar & Geert Jan Olsder, “Dynamic non-cooperative Game Theory”, Society for Industrial and Applied Mathematics (Philadelphia)-1998.
- [116] Zhongjing Ma, Duncan S. Callaway, Ian. A. Hakens, “Decentralised charging control of large populations of plug in electric vehicles”, IEEE Trans. On Control Systems Technology, vol. 21, no. 1, Jan. 2013
- [117] Francesca Parise, Marcello Colombino, Sergio Grammatico, John Lygeros, “Mean field constrained charging policy for large populations of plug-in electric vehicles”, IEEE 53rd Conf. on Decision and Control, LA, California, USA, Dec. 2014.
- [118] Zhongjing Ma, Suli Zou, Long Ran. Xingyu Shi, Ian. A. Hakens, “Decentralised coordination for large-scale plug-in electric vehicles in smart grid: an efficient real-time price approach”, IEEE 45th Annual conference on decision and control, Osaka, Japan, Dec. 2015
- [119] Francesca Parise, Sergio Grammatico, Marcello Colombino, John Lygeros, “On constrained mean field control for large populations of heterogeneous agents: Decentralized convergence to Nash equilibria”, European Control Conference, Linz, July 2015.
- [120] K. Itô, “Multiple Wiener integral,” J. Math. Soc. Japan, vol. 3, no. 1, pp. 157–169, 1951.
- [121] Olivier Guéant, Jean-Michel Lasry, Pierre-Louis Lions, “Mean Field Games and Applications”, Paris-Princeton Lectures on Mathematical Finance 2010, pp. 205–266, 2011
- [122] B. K. Øksendal, “Stochastic differential equations: an introduction with applications”. Springer Verlag, 2003.
- [123] M. Wooldridge, “Agent-based software engineering,” Proc. Inst. Elec. Eng., vol. 144, pp. 26-37, 1997.
- [124] N. Jennings, S. Bussman, “Agent Based Control Systems” IEEE Control Systems Magazine June 2003
- [125] Άρης Δημέας, “Συμβολή στον καταναεμημένο έλεγχο συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής στην χαμηλής τάσης”, Διδακτορική Διατριβή, 2006
- [126] Jacques Ferber. Multi-Agent Systems. An introduction to Distributed Intelligence. Addison-Wesley.
- [127] V. C. Gungor, D. Sahin, T. Kocak, S. Ergut, C. Buccella, C. Cecati, G. P. Hancke, “Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards”, IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol 7, Issue 4, pp. 529-539, November 2011.
- [128] Zhongjing Ma, “Decentralised valley fill charging control of large population plug-in electric vehicles”, Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Taiyuan, pp. 821 – 826, May 2012.

- [129] M. Shahraeini, M. H. Javidi and M. S. Ghazizadeh, "Comparison between communication infrastructures of centralized and decentralized wide area measurement systems
- [130] JADE PROGRAMMER'S GUIDE [Online]. Available at: <http://jade.tilab.com/doc/index.html>.
- [131] S. Vandael, N. Boucké, T. Holvoet, G. Deconinck, "Decentralized demand side management of plug-in hybrid vehicles in a Smart Grid", Proc. Of 10th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems – Innovative Applications track, Taiwan, May 2011.
- [132] O. J. L. Orozco, J. L. M. Lastra, J. A. P. Garcia and M.A. C. Soto, "Messaging performance of FIPA interaction protocols in networked embedded controllers", EURASIP journal on Embedded Systems-Embedded System Design in Intelligent Industrial Automation, article ID 470856, vol. 2008, pp.206-211, April 2008.
- [133] D. Mengistu, P. Troger, L. -Lundberg, P. Davidsson, "Scalability in distributed Multi-Agent based simulations: The JADE case", Second International conference on Future Generation Communication and Networking Symposia, vol. 5, pp. 93-99, Sanya, Dec. 2008.
- [134] B. Hassett, Ed Bower, M. Alexander, "Electric Vehicle penetration scenarios in Germany, UK, Spain, Portugal and Greece", Part I of Del. D3.2, MERGE, February, 2011. [Online]. Available: [goo.gl/Z6HRJ](http://goo.gl/Z6HRJ)
- [135] M. Ragwitz, W. Schade, B. Breitschopf, R. Walz, N. Helfrich, M. Rathmann, G. Resch, C. Panzer, T. Faber, R. Haas, C. Nathani, M. Holzhey, I. Kanstantinaviciute, P. Zagamé, A. Fougeyrollas, Boris Le Hir, "The impact of renewable energy policy on economic growth and employment in the EU", Final report, EmployRES, p. 89, April 2009. [Online]. Available: [goo.gl/13fNs](http://goo.gl/13fNs)
- [136] N. Hatziargyriou, E. L. Karfopoulos, K. Tsatsakis, Garcia-Valle, Rodrigo; Peças Lopes, João A. "The impact of EV charging on the System Demand", Chapter 3 of "Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks", Springer,2012, p. 57.
- [137] J.C. Hernandez, A. Medina, F. Jurado, "Impact comparison of PV system integration into rural and urban feeders", ELSEVIER Energy Conversion and Management, vol. 49, no. 6, pp. 1747-1765, 2008.
- [138] N. Hatziargyriou, J. A. Pecos Lopes, E. T. Bower, K. Strunz, M. Rivier, V. Lioliou, J. Wu, S. Papathanasiou, E. Karfopoulos, A. G. Bordagaray, P. Cabral, C. L Lecum, A. Walsh, K. Kanellopoulos, C. Joyce, N. Hartmann, J. O. Willums, "Impact Of Electric and Plug-In Hybrid Vehicles on Grid Infrastructure – Results from the Merge Project", CIGRE Conference, Paris, France, 2012
- [139] CIGRE Technical Brochure 586, WG C6-24,conv. S. Papathanasiou, "Capacity of Distribution Feeders for Hosting Distributed Energy Resources," 2014.
- [140] J. Deuse, S. Grenard, K. Karoui, O. Samuelsson, L. Gertmar, P. Karlsson, V. Chuvychin, A. Sauhats, L. Ribickis, M. H. J. Bollen, M. Häger, F. Söllenkvist and M. Speychal, "Interactions of Dispersed Energy Resources with Power Systems in Normal and Emergency Conditions," in Proceedings of the CIGRE session, Paris, 2006
- [141] European Regulators Group for Electricity and Gas, "Position paper on smart grids," European Regulators Group for Electricity and Gas, Brussels, 2010.
- [142] The European Network of Transmission System Operators, "European Electricity Grid Initiative Roadmap and Implementation plan," ENTSO-E, Brussels, 2010.
- [143] P. Georgilakis, N. Htaziargyriou, "Optimal Distributed Generation Placement in Power Distribution Networks: Models, Methods, and Future Research", IEEE Trnas. On Power Systems, vol. 28, issue 3, pp. 3420-3428, Aug. 2013
- [144] Working Group CIGRE C4-07/CIRED, "Power-quality indices and objectives," CIGRE report 261, Paris, 2004.
- [145] M. H. J. Bollen, Y. Yang and F. Hassan, "Integration of distributed generation in the power system - a power quality approach," in 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), Wollongong, 2008.
- [146] L. Gertmar, P. Karlsson and O. Samuelsson, "On DC injection to AC grids from distributed generation," in European Conference on Power Electronics and Applications, Dresden, 2005.

- [147] J. Deuse, S. Grenard, M. H. J. Bollen and M. Häger, "Effective impact of DER on distribution system protection," in 19th International conference on Electricity Distribution (CIRED), Vienna, 2007.
- [148] M. H. J. Bollen and M. Häger, "Power quality: interactions between distributed energy resources, the grid, and other customers," *Electrical Power Quality and Utilisation Magazine*, vol. 1, no. 1, pp. 51-61, 2005.
- [149] F. Demailly, A. Even, O. Ninet and J. Bouckaert, "Optimal design of the distribution infrastructure and the impact of distributed generation," in 18th International Conference on Electricity Distribution(CIRED), Turin, 2005.
- [150] C. Schwaegerl, M. H. J. Bollen, K. Karoui and A. Yagmur, "Voltage control in distribution systems as a limitation of the hosting capacity for distributed energy resources," in 18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (CIRED), Turin, 2005.
- [151] M. H. J. Bollen, "Overvoltages due to Wind Power - Hosting Capacity, Deterministic and Statistical Approaches," *Electrical Power Quality & Utilization Magazine*, vol. 3, no. 2, 2008.
- [152] N. Hatziaargyriou, T. Karakatsanis, G. Strbac, "Connection Criteria for Renewable Generation Based on Probabilistic Analysis", 6th Intern. Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, PMAPS'2000, Funchal, Madeira, Sept. 25-28 2000
- [153] V. Chuvychin, A. Sauhats and V. Strelkovs, "Problems of frequency control in the power system with massive penetration of distributed generation," *Power System Operation and Control*, vol. 8, pp. 19-23, 2008.
- [154] M.Papadopoulos, N.D.Hatziaargyriou, M.Papadakis, "Graphics Aided Interactive Analysis of Radial Distribution Networks", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. PWRD-2, Nr.4, October 1987
- [155] N. Hatziaargyriou, E. Karfopoulos, A. Tsitsimelis, D. Koukoula, M. Rossi, V. Giacomo, "On the DER hosting capacity of distribution feeders", 23rd international conference on Electricity Distribution, Lyon, Paris, June 2015
- [156] N. Leemput, J. Van Roy, F. Geth, P. Tant, B. Claessens, J. Driesen, "Comparative Analysis of Coordination Strategies for Electric Vehicles" ,2nd IEEE PES-ISGT Conference, Manchester, UK, December, 2011.
- [157] A. Mohsenian-Rad, V.W.S. Wong, J. Jatskev, R. Schrober, A. Leon-Garcia, "Autonomous Demand Side Management Bases on Game-Theoretic Energy Consumption Scheduling for the Future Smart Grid", *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 1, Issue 3, pp. 320-331, Dec. 2010.
- [158] Ota, Y.; Taniguchi, H.; Nakajima, T.; Liyanage, K.M.; Baba, J.; Yokoyama, A, "Autonomous Distributed V2G (Vehicle-to-Grid) Satisfying Scheduled Charging," *Smart Grid, IEEE Transactions on* , vol.3, no.1, pp.559,564, March 2012
- [159] B. Roossien, P.C. van der Laag, "Universal Power Manager: Integrating ECN's PowerMatcher with Nedap's Atrium", Tech. Rep., Energy research Center of the Netherlands, Jan. 2010
- [160] S. De Breucker, P. Jacqmaer, K. De Brabandere, J. Driesen, R. Belmans, "Grid Power Quality Improvements Using Grid-Coupled Hybrid Electric Vehicles", 3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 2006
- [161] M. Prodanovic , K. De Brabandere, J. Van den Keybus, T. Green and J. Driesen, "Harmonic and reactive power compensation as ancillary services in inverter-based distributed generation", *The Institution of Engineering and Technology*, Dec. 2006
- [162] S. Bashash, S.J. Moura, H.K. Fathy , "Charge Trajectory Optimization of Plug-in Hybrid Electric Vehicles for Energy Cost Reduction and Battery Health Enhancemen", *American Control Conference*, Baltimore, USA, June 2010
- [163] Y. Cao, S. Tang, C. Li, P. Zhang,, Y. Tan, Z. Zhang, J. Li, "An Optimized EV Charging Model Considering TOU Price and SOC Curve", to be published in *IEEE Trans. on Smart Grids*, 2011.
- [164] A. Bandyopadhyay, L. Wang, V. K. Devabhaktuni, R. C. Green II, "Aggregator Analysis for efficient Day-Time Charging of Plug-in Hybrid Electric Vehicles", *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Detroit Michigan, USA, July 2011.
- [165] P. Zhang, K. Qian, C. Zhou, B. Stewart,D. Hepburn, "A Methodology for optimization of Power Systems Demand Due to Electric Vehicle Charging Load ", *IEEE Trans. On PWRs*, vol. 27, no. 3, pp.1628-1636, Aug. 2012.



- [166] F. O. Resende, J. A. Peças Lopes, “Optimal Management of Battery Charging of Electric Vehicles: A new Microgrid Feature”, IEEE PowerTech Conference, Trondheim, Norway, June 2011.
- [167] K. Mets, T. Verschueren, W. Haerick, C. Develder, “Optimizing smart energy control strategies for plug-in hybrid electric vehicle charging”, IEEE Network Operations and Management Symposium Workshops, Osaka, Japan, April 2010.
- [168] Eric Sortomme, Mohamed A. El-Sharkawi “Optimal Charging Strategies for Unidirectional Vehicle-to-Grid”, IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 2, No. 1, March 2011
- [169] S.W. Hadley, A. Tsvetkova, “Potential Impacts of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Regional Power Generation”, The Electricity Journal, vol. 22, no. 10, pp. 56-68, 2009
- [170] ECOFYS report, “Incentives to improve energy efficiency in EU grids”, April 2013, [Online]. Available: [goo.gl/SjELZT](http://goo.gl/SjELZT)
- [171] A. M. Goeffrion, “Generalized Benders Decomposition”, Journal of optimization theory and applications, vol. 10, no. 4, pp. 237-260, 1972
- [172] C. A. Floudas, “Nonlinear and Mixed Integer Optimization: Fundamentals and Applications”, Oxford University Press, 1995
- [173] M. A. Duran, I. E. Grossman, “An outer-approximation algorithm for a class of mixed-integer nonlinear programs”, Mathematical programming 36, North Holland, pp. 307-339, 1986.
- [174] E. M. L. Beale, “Branch and Bound Methods for Mathematical Programming Systems”, Annals of Discrete Mathematics, vol. 5, pp. 201-219, 1979
- [175] O. K. Gupta, “Branch and bound experiments in nonlinear integer programming”, Dissertation, 1980
- [176] H. Mawengkang, B.A. Murtagh, “Solving nonlinear integer programs with large scale optimization software”, Annals of Operations Research 5, pp. 425-437, 1985.
- [177] G. Sideratos, A. Ikonopoulou, N. Hatziargyriou, “A Committee of Machine Learning Techniques for Load Forecasting in a Smart Grid Environment”, International Journal of Energy and Power (IJEP), vol.4, 2015
- [178] G. Kariniotakis, I. Martí, D. Casas, P. Pinson, T. S. Nielsen, H. Madsen, G. Giebel, J. Usaola, I. Sanchez, A.M. Palomares, R. Brownsword, J. Tambke, U. Focken, M. Lange, P. Louka, G. Kallos, C. Lac, G. Sideratos, G. Descombes., “What performance can be expected by short-term wind power prediction models depending on site characteristics?”, Proceedings of the European Wind Energy Conference EWEC, London, UK, 2004.
- [179] A. O’Connell, A. Keane, D. Flynn: “Rolling multi-period optimization to control electric vehicle charging in distribution networks”, IEEE Trans. On PWRs, vol. 29, Iss. 1, pp. 340-348, 2014.
- [180] Caramanis, M. ; Foster, J.M., “Management of electric vehicle charging to mitigate renewable generation intermittency and distribution network congestion,” Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control, 2009 jointly with 28th Chinese Control Conference. CDC/CCC 2009. Digital Object Identifier: 10.1109/CDC.2009.5399955 Publication Year: 2009 , Page(s): 4717 – 4722.
- [181] M. Galus, R. La Fauci, G. Andersson, “Investigating PHEV wind balancing capabilities using heuristics and model predictive control”, IEEE PES GM , Minneapolis, USA, July 2010
- [182] Π.Ντοκόπουλος, “Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας”, Παρατηρητής, 1986
- [183] Jayakrishnan Radhakrishna Pillai and Birgitte Bak-Jensen, “Integration of vehicle-to-grid in the western Danish power system”, IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 2, issue 1, Jan. 2011
- [184] Olle I. Elgerd, “Electrical and Electronic Engineering series- Electric Energy System Theory: An Introduction”, Mc Graw-Hill
- [185] Y. Ota, H. Taniguchi, T. Nakajima, K. M. Liyanage, and A. Yokoyama, “An autonomous distributed vehicle-to-grid control of grid-connected electric vehicle”, in Proceedings of ICIS 2009, Dec. 2009, pp. 414–418.
- [186] H. Yang, C. Y. Chung, and J. Zhao, “Application of plug-in electric vehicles to frequency regulation based on distributed signal acquisition via limited communication,” IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 2, pp. 1017–1026, May 2013.

- [187] H. Liu, Z. Hu, Y. Song, J. Lin, “Decentralized Vehicle-to-grid control for primary frequency regulation considering charging demands”, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 28, no. 3, pp. 3480-3489 August 2013.
- [188] S. Han, S. Han, and K. Sezaki, “Development of an optimal vehicle-to-grid aggregator for frequency regulation,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 1, no. 1, pp. 65–72, Jun. 2010.
- [189] S. Han, S. Han, and K. Sezaki, “Optimal control of the plug-in electric vehicles for V2G frequency regulation using quadratic programming,” in Proceedings of IEEE PES ISGT 2011, Jan. 2011.
- [190] W. Shi and V. W. S. Wong, “Real-time vehicle-to-grid control algorithm under price uncertainty,” in Proceedings of IEEE Smart Grid Comm 2011, Oct. 2011, pp. 261–266.
- [191] J. Donadee and M. Ilic, “Stochastic optimization of grid to vehicle frequency regulation capacity bids,” IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 2, pp. 1061–1069, March 2014.
- [192] R. Wang, Y. Li, P. Wang, and D. Niyato, “Design of a V2G aggregator to optimize PHEV charging and frequency regulation control,” in Proceedings of IEEE Smart Grid Comm 2013, Oct 2013, pp. 127–132.
- [193] M. Chen, G. A. Rincon-More, “Accurate Electrical Battery Model Capable Predicting Runtime and I-V Performance”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.21, no. 2, pp. 504-511, 2006.
- [194] F. Marra, G. Ya Yang, C. Traeholt, E. Larsen, C. N. Rasmussen, Shi, You, “Demand Profile Study of Battery Electric Vehicle under Different Charging Options”, IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, USA, Jul. 2012.
- [195] E. Sortomme, M.A. El-Sharkawi, "Optimal Scheduling of Vehicle-to-Grid Energy and Ancillary Services," Smart Grid, IEEE Transactions, vol.3, no.1, Μάρτιος 2012
- [196] D. Dallinger, D. Krampe, and M. Wietschel, “Vehicle-to-grid regulation reserves based on a dynamic simulation of mobility behavior,” IEEE Trans. Smart Grid, vol. 2, no. 2, pp. 302–313, 2011.
- [197] Karfopoulos, E., Tena, L., Torres, A., Salas, P., Jorda, J.G., Dimeas, A., Hatziargyriou, N., “A multi-agent system providing demand response services from residential consumers”, Electric Power Systems Research, vol. 120, pp. 163-176,2015
- [198] Ιωάννης Βορδος, “Συγκριτική ανάλυση αρχιτεκτονικών σχεδίασης διαδικτυακών υπηρεσιών (web services)”, Διπλωματική Εργασία ΕΜΠ, 2014,
- [199] G. Mulligan, D. Gracanin, “A comparison of soap and rest implementations of a service based interaction independence middleware framework”, Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference, 2009

## ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

### Σε επιστημονικά περιοδικά

- A1. **E. Karfopoulos**, N.Hatziargyriou, “A Multi-Agent System For Controlled Charging of a Large Population of Electric Vehicles”, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 28, issue 2, pp.1196-1204, 2013 - DOI: 10.1109/TPWRS.2012.2211624
- A2. **E. Karfopoulos**, N. Hatziargyriou, “Distributed Coordination of Electric Vehicles Providing V2G Services”, IEEE Trans. on Power Systems, vol 31, issue 1, pp. 329-338, Jan 2016 - DOI: 10.1109/TPWRS.2015.2395723
- A3. **E. Karfopoulos**, K. Panourgias, N. Hatziargyriou, “Distributed Coordination of Electric Vehicles Providing V2G Regulation Services”, IEEE Trans. on Power Systems, vol. 31, issue 4, pp. 2834-2846, 2016 - DOI: 10.1109/TPWRS.2015.2472957
- A4. **E. Karfopoulos**, Tena, L., Torres, A., Salas, P., Jorda, J.G., Dimeas, A., Hatziargyriou, N., “A multi-agent system providing demand response services from residential consumers”, Electric Power Systems Research, vol. 120, pp. 163-176, 2015 - DOI: 10.1016/j.epsr.2014.06.001
- A5. Ioannis Karakitsios, **E. Karfopoulos**, Nikos Hatziargyriou, “Impact of dynamic and static fast inductive charging of electric vehicles on the distribution network”, Electric Power Systems Research, vol 140, pp. 107-115, 2016
- A6. I. Karakitsios, **E. Karfopoulos**, N. Madjarov, A. Bustillo, M. Ponsar, Dionisio Del Pozo, L. Marengo “An integrated approach for Dynamic Charging of Electric Vehicles by Wireless Power Transfer – Lessons learned from real-life implementation”, SAE International Journal of Alternative Powertrains - V126-8EJ, 2017-01-9076, 2017
- A7. Ioannis Karakitsios, **E. Karfopoulos**, Nikos Hatziargyriou, “An EV management system exploiting the charging elasticity of EV users”, Special Issue of DER Journal on Grid Integration of EVs, 2015.
- A8. M. N. Moschakis, **E. L. Karfopoulos**, E. I. Zountouridou, S. A. Papathanassiou, “On Adaptation of Electric Vehicle and Microgrid Issues to EMC-Power Quality Standards”, Electrical and Electronic Engineering Journal, doi: 10.5923/j.eee.20120205.02, 2012

### Βιβλία:

- B1. N. Hatziargyriou, **E. Karfopoulos**, K. Tsatsakis, “The impact of EV charging on the System Demand”, Chapter 3 of book entitled “Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks”, Springer, ISBN 978-1-4614-0134-6, 2012

## Δημοσιεύσεις σε επιστημονικά συνέδρια με κριτές

- Γ1. **E. Karfopoulos**, C. Marmaras, N. Hatziargyriou: “Charging Control Model for Electric Vehicle Supplier Aggregator”, 3rd ISGT Conference, IEEE, Berlin, Germany, Oct. 2012.
- Γ2. N. Hatziargyriou, J. A. Pecas Lopes, E. T. Bower, K. Strunz, M. Rivier, V. Lioliou, J. Wu, S. Papathanasiou, **E. Karfopoulos**, A. G. Bordagaray, P. Cabral, C. L Lecum, A. Walsh, K. Kanellopoulos, C. Joyce, N. Hartmann, J. O. Willums, “Impact Of Electric and Plug-In Hybrid Vehicles on Grid Infrastructure – Results from the Merge Project”, CIGRE Conference, Paris, France, Aug. 2012
- Γ3. **Karfopoulos, E.L.**; Voumvoulakis, E.M.; Hatziargyriou, N.,” Steady-state and dynamic impact analysis of the large scale integration of plug-in EV to the operation of the autonomous power system of Crete Island”, Medpower, 2014
- Γ4. **Karfopoulos, E.L.**; Voumvoulakis, E.M.; Hatziargyriou, N.,” Energy Management System for fast inductive charging network: The FastInCharge project”, Medpower, , 2014
- Γ5. Karakitsios, I.; **Karfopoulos, E.L.**; Hatziargyriou, N., “Static and dynamic fast inductive charging: The FastInCharge project concept”, Medpower 2014
- Γ6. N. Hatziargyriou, A. Tsikalakis, **E. Karfopoulos**, T. Tomtsi, G. Karagiorgis, C. Christodoulou, A. Poullikkas: “Evaluation of Virtual Power Plant (VPP) operation based on actual measurements”, 7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower), Agia Napa, Cyprus, Nov. 2010
- Γ7. Ferdowski, M. ; **Karfopoulos, E.** ; Unda, I.G. ; Skarvelis-Kazakos, S. ; Papadopoulos, P. ; Abbasi, E. ; Cipcigan, L.M. ; Jenkins, N. ; Hatziargyriou, N. ; Strunz, K.: “Virtual Power Plant Control concepts with Electric Vehicles”, 16th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems, Hersonisos, Grete Island, Greece, Sept. 2011.
- Γ8. **E. Karfopoulos**, P. Papadopoulos, S. Skarvelis-Kazakos, I. Grau, L. M. Cipcigan, N. Hatziargyriou, N. Jenkins, “Introducing electric vehicles in the Microgrids concept”, 16thInternational Conference on Intelligent System Application to Power Systems, Hersonisos, Grete Island, Greece, Sept. 2011.
- Γ9. M. N. Moschakis, **E. Karfopoulos**, E. Zountouridou, S. Papathanasiou: “Adapting EV-microgrid concepts to European grid standards related to power quality”, 16th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems, Hersonisos, Grete Island, Greece, Sept. 2011.
- Γ10. **E. Karfopoulos**, D. Koukoula, N. Hatziargyriou, “Dual Tariff Charging Control for Large EV Fleets”, 1st International Conference on Smart Grids and Green IT Systems, Porto, Portugal, April 2012
- Γ11. **E. Karfopoulos**, E. Zountouridou, S. Papathanasiou, N. Hatziargyriou: “High Level Requirements for Smart Meters that will enable the efficient deployment of electric vehicles”, E-Energy Conference, Athens, Greece, Oct. 2010
- Γ12. E. Zountouridou, **E. Karfopoulos**, S. Papathanasiou and N. Hatziargyriou, “Review of IEC/EN Standards for Data Exchange between Smart Meters and Devices”, E-Energy Conference, Athens, Greece, Oct. 2010.
- Γ13. G. Peppink, R. Kamphuis, K. Kok, A. Dimeas, **E. Karfopoulos**, N. Hatziargyriou, N.

Hadjsaid, Raphael Caire, R. Gustavsson, J. M. Salas, H. Niesing, J. van der Velde, L. Tena, F. Bliet, M. Eijgelaar, L. Hamilton, H. Akkermans, "INTEGRAL: ICT-Platform Based Distributed Control in Electricity Grids with a Large Share of Distributed Energy Resources and Renewable Energy Sources", E-Energy Conference, Athens, Greece, Oct. 2010

