



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## Μελέτη Αλγορίθμων Έξυπνης Δυναμικής Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σταύρος Ι. Πουρνιάς

**Επιβλέπων :** Νικόλαος Κ. Ουζούνογλου  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2017





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ  
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

## Μελέτη Αλγορίθμων Έξυπνης Δυναμικής Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σταύρος Ι. Πουρνιάς

**Επιβλέπων :** Νικόλαος Κ. Ουζούνογλου  
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 27<sup>η</sup> Ιουλίου 2017.

.....  
Ουζούνογλου Νικόλαος  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Ματσόπουλος Γεώργιος  
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Αμδίτης Άγγελος  
Ερευνητής Α' ΕΠΙΣΕΥ

Αθήνα, Ιούλιος 2017

.....  
Σταύρος Ι. Πουρνιάς

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

Copyright © Σταύρος Πουρνιάς, 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.

# Περίληψη

Η ατμοσφαιρική ρύπανση και ιδιαίτερα το φαινόμενο του θερμοκηπίου έχουν επιστήσει την προσοχή της παγκόσμιας επιστημονικής κοινότητας και των κυβερνήσεων, οι οποίες λαμβάνουν μέτρα καταπολέμησης του. Ειδικά στον τομέα των μεταφορών παρουσιάζεται μια στροφή στα ηλεκτρικά οχήματα λόγω των ποικίλων πλεονεκτημάτων τους αλλά κυρίως λόγω των χαμηλότερων ρύπων τους. Ωστόσο, η μεγάλη διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να επιφέρει επιπλοκές στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την έξυπνη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων, η οποία μπορεί να αντισταθμίσει το παραπάνω πρόβλημα και να ομαλοποιήσει την ένταξή τους στο ηλεκτρικό δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, η διπλωματική εργασία εστιάζει στη δυναμική φόρτιση, δηλαδή τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων όσο αυτά κινούνται. Αναλύονται δύο αλγόριθμοι (AIMD και Rate Control), οι οποίοι εφαρμόζονται στο πλαίσιο της δυναμικής φόρτισης, γίνονται ανάλογες προσομοιώσεις με τη βοήθεια του προγράμματος Veins, το οποίο προσφέρει ρεαλιστικές προσομοιώσεις σεναρίων κίνησης και δικτύων, και αξιολογούνται τα αποτελέσματα.

## Λέξεις Κλειδιά

ηλεκτρικά οχήματα, ατμοσφαιρική ρύπανση, έξυπνη φόρτιση, δυναμική φόρτιση, καταναεμημένοι αλγόριθμοι

# Abstract

Air pollution, and in particular the greenhouse effect, has drawn the attention of the world scientific community and governments, which take action to combat it. Especially in the transport sector there is a shift in electric vehicles due to their various advantages but mainly due to their lower pollutants. However, the large penetration of electric vehicles can cause complications in the electrical system. This diploma thesis deals with the smart charging of electric vehicles, which can compensate for the above problem and normalize their integration into the grid. More specifically, the diploma thesis focuses on dynamic charging, i.e. the charging of electric vehicles as they move. Two algorithms (AIMD and Rate Control) are analyzed, which are applied in the context of dynamic charging, simulations are made with the help of the Veins program, which offers realistic scenario and network simulations, and the results are evaluated.

## **Key words**

Electric vehicles, air pollution, smart charging, dynamic charging, distributed algorithms

# Ευχαριστίες

Η εργασία πραγματοποιήθηκε στο *Εργαστήριο Μικροκυμάτων και Οπτικών Ινών* υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Ν. Ουζούνογλου και του Ερευνητή Α' ΕΠΙΣΕΥ Δρ. Α. Αμδίτη. Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Ουζούνογλου, καθώς και τον Δρ. Αμδίτη, για την άριστη συνεργασία μας καθόλη τη διάρκεια της προετοιμασίας της εργασίας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω και τον Δρ. Ι. Καρασεϊτανίδη, τεχνικό διευθυντή της ομάδας I-SENSE του ΕΠΙΣΕΥ, για την ευκαιρία εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ θερμά τον κ. Θ. Θεοδωρόπουλο, υποψήφιο διδάκτορα στο ΕΜΠ, ο οποίος με βοήθησε σε όλα τα στάδια της διπλωματικής εργασίας, όντας πάντα διαθέσιμος και πρόθυμος να επιλύσει οποιαδήποτε απορία μου.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συμφοιτητές μου για τη στήριξή τους καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην οικογένειά μου, στους γονείς και την αδερφή μου, για την αμέριστη ηθική συμπαράσταση και υλική υποστήριξη σε όλα τα χρόνια της ζωής μου, ώστε να φτάσω στο σημείο που βρίσκομαι σήμερα.





# Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την έξυπνη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων. Συγκεκριμένα, επικεντρώνεται στη δυναμική φόρτιση, δηλαδή στη φόρτιση των οχημάτων όσο αυτά κινούνται, στα πλαίσια της οποίας εφαρμόζονται δύο αλγόριθμοι. Η δομή της διπλωματικής εργασίας έχει ως εξής:

Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στην αναγκαιότητα της χρήσης των ηλεκτρικών οχημάτων λόγω της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, και των λοιπών πλεονεκτημάτων τους. Παρέχονται επίσης πληροφορίες σχετικά με την σημερινή αγορά των ηλεκτρικών οχημάτων.

Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναφέρονται διάφορα τεχνικά χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών οχημάτων: οι κατηγορίες τους, οι τεχνολογίες ηλεκτροκίνησης και συσσωρευτών, και διάφορα θέματα σχετικά με τους σταθμούς φόρτισης (οι τεχνολογίες τους, οι θέσεις τους και τα καλώδια που χρησιμοποιούνται).

Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρέχονται πληροφορίες σχετικά με την ένταξη των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο: ποια είναι η νομοθεσία στην Ελλάδα, ποιοι είναι οι νέοι ενεργειακοί φορείς που εμφανίζονται και ποιες οι φάσεις διεξόδου των οχημάτων στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στην έξυπνη φόρτιση. Αναλύεται η αναγκαιότητά της, τι ακριβώς είναι, και ποια είναι τα οφέλη που μπορεί να προσφέρει στους εμπλεκόμενους φορείς.

Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται μια κατηγοριοποίηση των αλγορίθμων που υπάρχουν στη βιβλιογραφία για την έξυπνη φόρτιση ανάλογα με το στόχο τους, το επίπεδο ελέγχου, και τη μέθοδο επίλυσης που χρησιμοποιούν.

Στο 6<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται μια θεωρητική ανάλυση των αλγορίθμων δυναμικής φόρτισης που επιλέχθηκαν, καθώς και του πλαισίου εφαρμογής τους.

Στο 7<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων των δύο αλγορίθμων, καθώς και παρατηρήσεις επί τούτων.

Στο 8<sup>ο</sup> κεφάλαιο εξάγονται τελικά συμπεράσματα και συζητούνται οι προοπτικές επέκτασης των αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκαν.

# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή</b>	
1.1	Αναγκαιότητα χρήσης ηλεκτρικών οχημάτων	17
1.2	Πλεονεκτήματα ηλεκτρικών οχημάτων	20
1.3	Αγορά ηλεκτρικών οχημάτων	21
<b>2</b>	<b>Τεχνολογίες ηλεκτρικών οχημάτων</b>	
2.1	Τεχνολογίες ηλεκτροκίνησης	26
2.2	Κατηγορίες ηλεκτρικών οχημάτων	32
2.3	Τεχνολογίες συσσωρευτών	33
2.4	Σταθμοί φόρτισης	
	2.4.1 Τεχνολογίες σταθμών φόρτισης	36
	2.4.2 Θέσεις σταθμών φόρτισης	38
	2.4.3 Καλώδια φόρτισης	40
<b>3</b>	<b>Ένταξη ηλεκτρικών οχημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο</b>	
3.1	Ισχύουσα νομοθεσία	44
3.2	Νέοι ενεργειακοί φορείς	45
3.3	Φάσεις διείσδυσης	47
<b>4</b>	<b>Έξυπνη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων</b>	
4.1	Αναγκαιότητα	51
4.2	Ορισμός	52
4.3	Οφέλη	54
<b>5</b>	<b>Αλγόριθμοι έξυπνης φόρτισης</b>	
5.1	Κατηγοριοποίηση προβλημάτων μεγιστοποίησης	60
5.2	Κατηγοριοποίηση αλγορίθμων	63
5.3	Μέθοδοι επίλυσης	65

<b>6</b>	<b>Επιλογή αλγορίθμων δυναμικής φόρτισης</b>	
6.1	Θεωρητικό πλαίσιο εφαρμογής	69
6.2	Αλγόριθμος AIMD	74
6.3	Αλγόριθμος Rate Control	76
<b>7</b>	<b>Αποτελέσματα προσομοιώσεων</b>	
7.1	Περιβάλλον προσομοίωσης	83
7.2	Αλγόριθμος AIMD	85
7.2	Αλγόριθμος Rate Control	88
<b>8</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	101
	<b>Βιβλιογραφία</b>	103

# Ευρετήριο Εικόνων

<b>Εικόνα 0-1</b> Τομείς εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, EU-28, 1990 και 2015 [1]	1
<b>Εικόνα 1-2</b> Τομείς κατανάλωσης ενέργειας (% της συνολικής), EU-28, 2015 [2]	2
<b>Εικόνα 1-3</b> Χρονοδιάγραμμα συνολικών πωλήσεων ηλεκτρικών οχημάτων, 2010-2015, EU-28 [5]	3
<b>Εικόνα 1-4</b> Κίνητρα για την αγορά-χρήση ηλεκτρικών αυτοκινήτων σε κράτη της Ευρώπης [5]	4
<b>Εικόνα 2-1</b> Ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας (Battery Electric Vehicles – BEV) [5]	5
<b>Εικόνα 2-2</b> Ηλεκτρικά οχήματα αυξημένης αυτονομίας (Range Extended Electric Vehicles – REEV) [5]	6
<b>Εικόνα 2-3</b> Plug-in Υβριδικά Ηλεκτρικά Οχήματα (Plug-in Hybrid Electric Vehicles – PHEV) [5]	7
<b>Εικόνα 2-4</b> Υβριδικά Ηλεκτρικά Οχήματα (Hybrid Electric Vehicles – HEV) [5]	8
<b>Εικόνα 2-5</b> Ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου (Fuel Cell Electric Vehicles – FCEV) [5]	9
<b>Εικόνα 2-6</b> Κόστος και πυκνότητα ενέργειας μπαταρίας [7]	10
<b>Εικόνα 2-7</b> Διάγραμμα θέσεων σταθμών φόρτισης [9]	11
<b>Εικόνα 2-8</b> Καλώδιο σύνδεσης SAE J1772	12
<b>Εικόνα 2-9</b> Καλώδιο σύνδεσης IEC 62196-2	13
<b>Εικόνα 2-10</b> Καλώδιο σύνδεσης TEPCO/JARI	14
<b>Εικόνα 3-1</b> Πρώτη φάση διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων - Καταλυτική Φάση [11]	15
<b>Εικόνα 3-2</b> Δεύτερη φάση διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων - Φάση Εδραίωσης [11]	16
<b>Εικόνα 3-3</b> Τρίτη φάση διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων - Προχωρημένη Φάση [11]	17
<b>Εικόνα 4-1</b> % Εξοικονόμηση κόστους βάσει των τιμών αιχμής και χαμηλής ζήτησης (€/MWh) σε έξι κράτη της ΕΕ [16]	18
<b>Εικόνα 4-2</b> Εκτιμώμενο συνολικό κόστος ιδιοκτησίας ηλεκτρικών οχημάτων και οχημάτων με μηχανή εσωτερικής καύσης σε βάθος δεκαετίας(€) [16]	19
<b>Εικόνα 5-1</b> Ροή πληροφορίας στους κεντρικούς αλγορίθμους έξυπνης φόρτισης [19]	20
<b>Εικόνα 5-2</b> Αμφίδρομη ροή πληροφορίας στους καταναμημένους αλγορίθμους έξυπνης φόρτισης [19]	21
<b>Εικόνα 5-3</b> Μονόδρομη ροή πληροφορίας στους καταναμημένους αλγορίθμους έξυπνης φόρτισης [19]	22
<b>Εικόνα 6-1</b> Λογικό διάγραμμα αλγορίθμου [32]	23
<b>Εικόνα 6-2</b> Λογικό διάγραμμα αλγορίθμου AIMD	24

<b>Εικόνα 7-1</b> Περιβάλλον OMNET++	25
<b>Εικόνα 7-2</b> Γραφικό περιβάλλον προσομοίωσης OMNET++	26
<b>Εικόνα 7-3</b> Γραφικό περιβάλλον προσομοίωσης SUMO	27
<b>Εικόνα 7-4</b> Διάγραμμα συνολικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για $\beta=0.87$	28
<b>Εικόνα 7-5</b> Μεγέθυνση διαγράμματος συνολικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για $\beta=0.87$	29
<b>Εικόνα 7-6</b> Μεγέθυνση διαγράμματος συνολικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για $\beta=0.88$	30
<b>Εικόνα 7-7</b> Μεγέθυνση διαγράμματος συνολικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για $\beta=0.89$	31
<b>Εικόνα 7-8</b> Μεγέθυνση διαγράμματος συνολικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για $\Delta t_{CSP}/\Delta t_{veh} = 6.5$	32
<b>Εικόνα 7-9</b> Μεγέθυνση διαγράμματος συνολικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για $\alpha=0.0015$	33
<b>Εικόνα 7-10</b> Διάγραμμα συνολικής και ατομικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για $w_i=5, N=30$	34
<b>Εικόνα 7-11</b> Διάγραμμα τιμής ηλεκτρικής ενέργειας (σε cents/ kWh) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για $w_i=5, N=30$	35
<b>Εικόνα 7-12</b> Διάγραμμα ρυθμού σύγκλισης $\gamma$ συναρτήσει του χρόνου (σε s) για $w_i=5, N=30$	36
<b>Εικόνα 7-13</b> Διάγραμμα κατάστασης φόρτισης SoC συναρτήσει του χρόνου (σε s) για $w_i=5, N=30$	37
<b>Εικόνα 7-14</b> Διάγραμμα συνολικής και ατομικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για $w_i=5, N=30$ με διεσπαρμένη εμφάνιση οχημάτων στο χρόνο	38
<b>Εικόνα 7-15</b> Διάγραμμα τιμής ηλεκτρικής ενέργειας (σε cents/ kWh) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για $w_i = 5, N = 30$ με διεσπαρμένη εμφάνιση οχημάτων στο χρόνο	39
<b>Εικόνα 7-16</b> Διάγραμμα συνολικής και ατομικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για $w_i=5, N=60$	40
<b>Εικόνα 7-17</b> Διάγραμμα τιμής ηλεκτρικής ενέργειας (σε cents/ kWh) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για $w_i=5, N=60$	41
<b>Εικόνα 7-18</b> Διάγραμμα συνολικής και ατομικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για $w_i=2.5, N=60$	42
<b>Εικόνα 7-19</b> Διάγραμμα τιμής ηλεκτρικής ενέργειας (σε cents/ kWh) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για $w_i=2.5, N=60$	43
<b>Εικόνα 7-20</b> Διάγραμμα συνολικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για $w_i=3.6..6.4, N=30$	44
<b>Εικόνα 7-21</b> Μεγέθυνση διαγράμματος ατομικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για $w_i=3.6..6.4, N=30$	45
<b>Εικόνα 7-22</b> Διάγραμμα τιμής ηλεκτρικής ενέργειας (σε cents/ kWh) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για $w_i=3.6..6.4, N=30$	46
<b>Εικόνα 7-23</b> Διάγραμμα κόστους φόρτισης κάθε ηλεκτρικού οχήματος (σε cents) για $w_i=3.6..6.4, N=30$	47

<b>Εικόνα 7-24</b> Διάγραμμα συνολικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για $w_i=5$ σε $w_i=10, N=30$	48
<b>Εικόνα 7-25</b> Μεγέθυνση διαγράμματος ατομικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για $w_i=5$ σε $w_i=10, N=30$	49
<b>Εικόνα 7-26</b> Διάγραμμα τιμής ηλεκτρικής ενέργειας (σε cents/kWh) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για $w_i=5$ σε $w_i=10, N=30$	50
<b>Εικόνα 7-27</b> Διάγραμμα παραμέτρου $\alpha$ συναρτήσει του χρόνου (σε s) για $w_i=5, N=30, P_{max}=500kW$	51
<b>Εικόνα 7-28</b> Διάγραμμα συνολικής και ατομικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για $w_i=5, N=30, P_{max}=500kW, \mu\epsilon\tau\alpha\beta\omicron\lambda\eta \alpha$	52
<b>Εικόνα 7-29</b> Διάγραμμα τιμής ηλεκτρικής ενέργειας (σε cents/kWh) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για $w_i=5, N=30, P_{max}=500kW, \mu\epsilon\tau\alpha\beta\omicron\lambda\eta \alpha$	53
<b>Εικόνα 7-30</b> Διάγραμμα πολλαπλασιαστικού παράγοντα $wFactor$ συναρτήσει του χρόνου (σε s) για $w_i=5, N=30, P_{max}=500kW, \epsilon\pi\alpha\nu\alpha\pi\rho\sigma\delta\iota\omicron\rho\iota\sigma\mu\acute{o}\varsigma w_i$	54
<b>Εικόνα 7-31</b> Διάγραμμα συνολικής και ατομικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για $w_i=5, N=30, P_{max}=500kW, \epsilon\pi\alpha\nu\alpha\pi\rho\sigma\delta\iota\omicron\rho\iota\sigma\mu\acute{o}\varsigma w_i$	55
<b>Εικόνα 7-32</b> Διάγραμμα τιμής ηλεκτρικής ενέργειας (σε cents/kWh) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για $w_i=5, N=30, P_{max}=500kW, \epsilon\pi\alpha\nu\alpha\pi\rho\sigma\delta\iota\omicron\rho\iota\sigma\mu\acute{o}\varsigma w_i$	56

# Ευρετήριο Πινάκων

<b>Πίνακας 2-1</b> Πλεονεκτήματα τεχνολογιών ηλεκτροκίνησης	31
<b>Πίνακας 2-2</b> Συγκριτικά χαρακτηριστικά ενσύρματης και ασύρματης φόρτισης [9]	38
<b>Πίνακας 4-1</b> Κόστος ενίσχυσης δικτύων χαμηλής τάσης και μείωση κόστους με έξυπνη φόρτιση (εκατομμύρια €) [ERDF]	58



# 1. Εισαγωγή

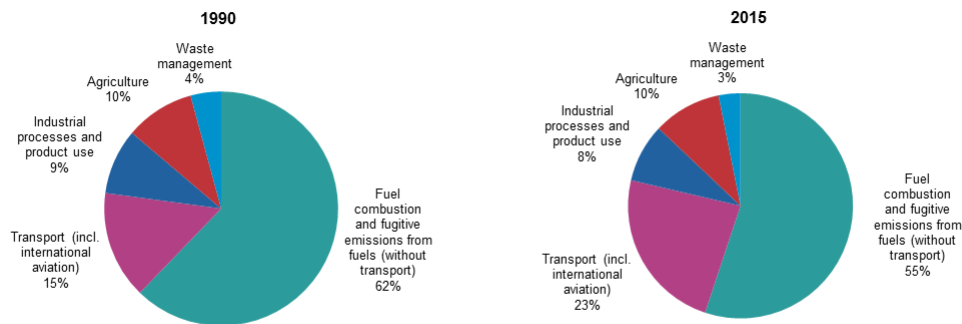
## 1.1 Αναγκαιότητα χρήσης ηλεκτρικών οχημάτων

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας κυρίως μέσω της καύσης ορυκτών καυσίμων, σε συνδυασμό με τις αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες του ανθρώπου, έχουν καταστήσει την ατμοσφαιρική ρύπανση σημαντική απειλή για τον πλανήτη και την ανθρώπινη υγεία. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει στην υπογραφή συνθηκών τόσο σε ευρωπαϊκό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο, με σκοπό τη μείωση των εκπομπών επιβλαβών ουσιών που προκύπτουν από ανθρώπινους παράγοντες.

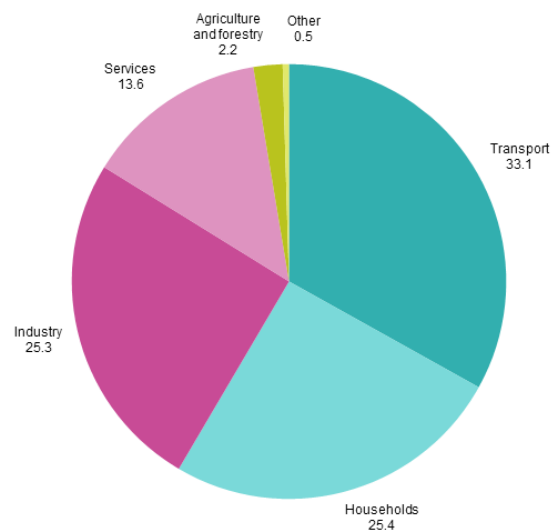
Ήδη από το 1979 έχει υπογραφεί συνθήκη για τη διασυνοριακή ατμοσφαιρική ρύπανση σε μεγάλη απόσταση (CLRTAP) από την Οικονομική Επιτροπή για την Ευρώπη του ΟΗΕ (UNECE). Έκτοτε έχουν ληφθεί περαιτέρω μέτρα και έχουν τεθεί στόχοι για την καταστολή του προβλήματος. Από το 2008 γίνεται ουσιαστική εφαρμογή της Εμπορίας Εκπομπών του Πρωτοκόλλου του Κιότο, βάσει της οδηγίας 2003/78/ΕΚ, και τον Ιανουάριο του ίδιου έτους αναλήφθηκε νέα ευρωπαϊκή πολιτική για το κλίμα, το ενεργειακό πακέτο «20-20-20 για το 2020», το οποίο στοχεύει στη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κατά 20% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990, στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της Ευρώπης κατά 20% αποκλειστικά από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, και στην βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης κατά 20%. Επίσης, τον Ιούλιο του 2009 τέθηκε ο στόχος των 2°C από τους ηγέτες της ομάδας των G8 στην 35<sup>η</sup> Σύνοδο στην Ιταλία, που αφορά στη συγκράτηση της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη κάτω από το όριο των 2°C σε σχέση με την προβιομηχανική περίοδο.

Η ατμοσφαιρική ρύπανση στην Ευρώπη οφείλεται κυρίως στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, στις μεταφορές, στη βιομηχανία, στη γεωργία και στην αποθήκευση και διανομή των ορυκτών καυσίμων. Όσον αφορά στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, οι περισσότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) προέρχονται από την καύση ορυκτών καυσίμων. Ο τομέας της ενέργειας αποτελεί τον κύριο συντελεστή – 55% των

εκπομπών CO<sub>2</sub> στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) το 2015 - , ενώ ο τομέας των μεταφορών έρχεται δεύτερος με ποσοστό 23% (Εικόνα 1-1).



**Εικόνα 1-1 Τομείς εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, EU-28, 1990 και 2015 [1]**



Note: figures do not sum to 100.0 % due to rounding.  
Source: Eurostat (online data code: nrg\_100a)

**Εικόνα 1-2 Τομείς κατανάλωσης ενέργειας (% της συνολικής), EU-28, 2015 [2]**

Παράλληλα, ο τομέας των μεταφορών έχει το μεγαλύτερο μερίδιο στη ζήτηση ενέργειας (Εικόνα 1-2). Επιπλέον έχει τη μικρότερη διαφοροποίηση, με το 90% της καταναλισκόμενης ενέργειας να προέρχεται από ορυκτά καύσιμα [3]. Για να

περιορισθούν λοιπόν οι εκπομπές ρύπων και αερίων του θερμοκηπίου, οφείλουν να ληφθούν κατάλληλα μέτρα και πολιτικές.

Τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να συνεισφέρουν σημαντικά στην επίτευξη αυτού του στόχου, καθώς έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν σημαντική βελτίωση στην ενεργειακή απόδοση όλων των επίγειων μέσων μεταφοράς. Μπορούν τόσο να αυξήσουν την ποικιλία των πηγών ενέργειας στον τομέα των μεταφορών (διότι δεν απαιτούνται ορυκτά καύσιμα για την κίνησή τους), όσο και να μειώσουν την ατμοσφαιρική ρύπανση, αφού - εν αντιθέσει με τα οχήματα με μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) – δεν εκπέμπουν μικροσωματίδια αιθάλης και μετάλλων, οξειδία του αζώτου, υδρογονάνθρακες, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του θείου και αέρια του θερμοκηπίου, τα οποία αποτελούν συστατικά του νέφους και προκαλούν προβλήματα στο αναπνευστικό σύστημα.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά στα αέρια του θερμοκηπίου, αν και υπάρχει η άποψη ότι στον πλήρη κύκλο ζωής των αυτοκινήτων, οι εκπομπές των ηλεκτρικών οχημάτων είναι μεγαλύτερες από αυτές των οχημάτων με ΜΕΚ, πρόσφατη έρευνα κατέληξε στο αντίθετο συμπέρασμα [4]. Η πρώτη φάση της ζωής του οχήματος περιλαμβάνει την εξαγωγή και παραγωγή των πρώτων υλών, τη μεταφορά τους στο εργοστάσιο και την κατασκευή του οχήματος. Η μεγαλύτερη διαφορά σε αυτή τη φάση έγκειται στην μπαταρία των ηλεκτρικών οχημάτων, η οποία είναι υπεύθυνη για την περίσσεια ρύπανση συγκριτικά με τα οχήματα με ΜΕΚ. Η δεύτερη φάση περιλαμβάνει τη χρήση του οχήματος, και εδώ είναι που το ηλεκτρικό όχημα επικρατεί, διότι με κατάλληλη διεύθυνση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τα ηλεκτρικά οχήματα παράγουν πολύ λιγότερους ρύπους μέσα στα εκτιμώμενα 260.000 χιλιόμετρα χρήσης τους. Επιπροσθέτως, οι εκπομπές ρύπων που σχετίζονται με την συντήρηση των ηλεκτρικών οχημάτων αναμένονται να περιορισθούν στο ελάχιστο ή να είναι ίδιες με αυτές των οχημάτων με ΜΕΚ. Τέλος, στην τρίτη φάση, οι περισσότερες έρευνες δείχνουν ότι η εκπομπή αερίων από την ανακύκλωση και την καταστροφή των αχρείαστων μερών του ηλεκτρικού οχήματος είναι αμελητέες. Οπότε, αν και κατά την κατασκευή τους, τα ηλεκτρικά οχήματα παράγουν περισσότερα αέρια του θερμοκηπίου, καταφέρνουν μέχρι το τέλος της ζωής τους να συνεισφέρουν λιγότερο στην υπερθέρμανση του πλανήτη σε σχέση με τα οχήματα με ΜΕΚ.

## 1.2 Πλεονεκτήματα ηλεκτρικών οχημάτων

Εκτός του βασικού και προαναλυθέντος πλεονεκτήματος των ηλεκτρικών οχημάτων αναφορικά με την ατμοσφαιρική ρύπανση, υπάρχουν και άλλα οφέλη που προάγουν τη χρήση τους, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω:

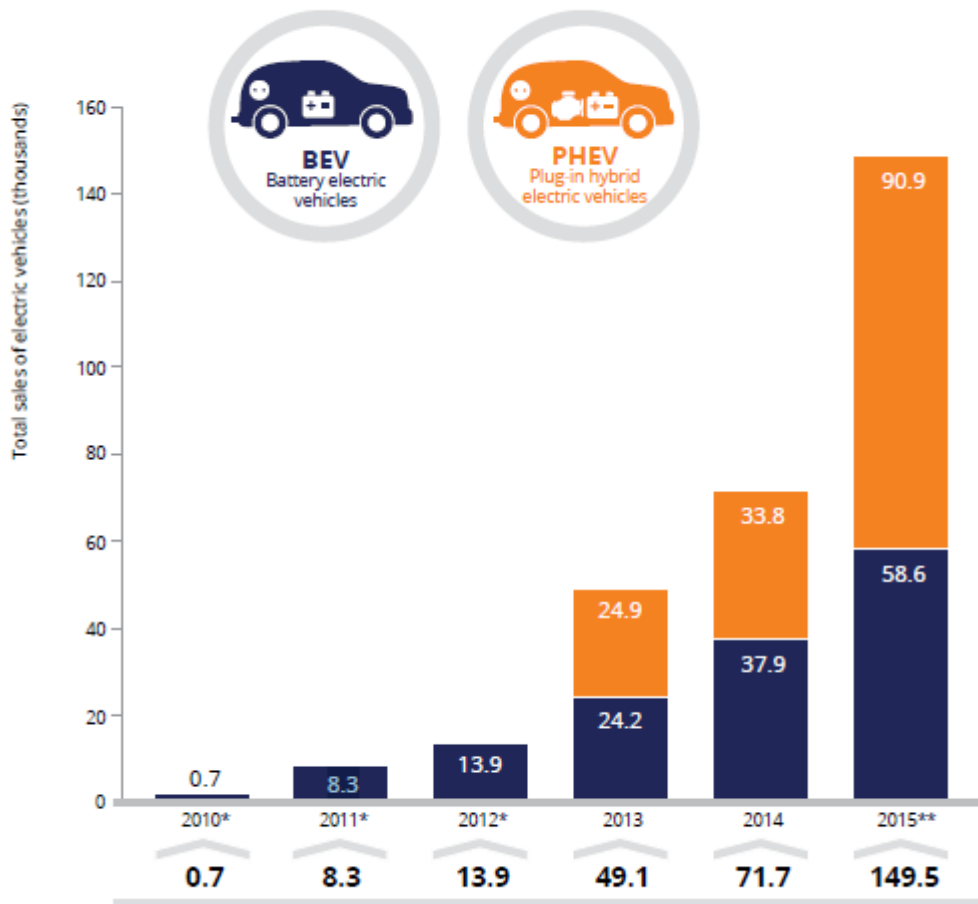
- Μειωμένο κόστος λειτουργίας, σύμφωνα με υπολογισμούς των General Motors και Chrysler.
- Μείωση της ηχορύπανσης, αφού το ηλεκτρικό όχημα είναι ουσιαστικά αθόρυβο σε σχέση με οχήματα με ΜΕΚ. Για το λόγο αυτό και λόγω των μειωμένων ρύπων, επιτρέπει την ενσωμάτωση της κίνησης σε περιοχές «ιστορικά ευαίσθητες», όπως τα ιστορικά κέντρα πόλεων.
- Φόρτιση με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), κάτι το οποίο συνεισφέρει στην «πράσινη πολιτική».
- Φόρτιση και κατ' οίκον μέσω του οικιακού ηλεκτρικού δικτύου, χωρίς να είναι απαραίτητη η μετάβαση σε πρατήριο καυσίμων.
- Αποδοτική διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας, μέσω της ελεγχόμενης φόρτισης και της Vehicle-2-Grid (V2G) τεχνολογίας, όπως θα αναλυθεί εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο.
- Αξιοπιστία. Είναι πιο εύκολη η κατασκευή τους, διότι ο ηλεκτροκινητήρας είναι πιο απλός στη δομή του. Εφόσον τροφοδοτείται μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος, οι οποίοι ελέγχονται εύκολα ηλεκτρονικά, δεν απαιτείται συνήθως νερό για την ψύξη τους και δεν χρησιμοποιεί φίλτρα και λάδι, με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζει προβλήματα που δημιουργούνται από χαμηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος.
- Κατανάλωση μόνο όταν κινείται, οπότε είναι πολύ καλή επιλογή για χρήση σε αστικά κέντρα.

- Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, καθώς η ηλεκτρική μηχανή μπορεί να αντέξει 1.000.000 μίλια εν αντιθέσει με τα 100.000 μίλια του συμβατικού.
- Οικονομικές διευκολύνσεις από τις κυβερνήσεις αρκετών αναπτυγμένων χωρών (μεταξύ των οποίων και η ελληνική), οι οποίες προσφέρουν φορολογικές διευκολύνσεις στους κατόχους ηλεκτρικών οχημάτων. Στην Ελλάδα συγκεκριμένα οι κάτοχοι υβριδικών οχημάτων δεν πληρώνουν τέλη κυκλοφορίας και ταξινόμησης και επιτρέπεται να κινούνται συνεχώς στον δακτύλιο.

Τα ηλεκτρικά οχήματα λοιπόν προσφέρουν πολυάριθμα πλεονεκτήματα, με τα ελάχιστα μειονεκτήματά τους να περιορίζονται στους συσσωρευτές – στην πυκνότητα ενέργειάς τους, στην αυτονομία, στο κόστος, στη διάρκεια φόρτισης και διάρκεια ζωής τους - , για την αντιμετώπιση των οποίων η επιστημονική κοινότητα συνεχίζει με εντατικούς ρυθμούς την έρευνα.

### **1.3 Αγορά ηλεκτρικών οχημάτων**

Υβριδικά οχήματα είναι διαθέσιμα στην Ευρώπη σχεδόν δυο δεκαετίες. Ωστόσο, ο αριθμός των πωλήσεών τους δεν είναι εύκολα διαθέσιμος από τα επίσημα στατιστικά στοιχεία της ΕΕ, καθώς κατηγοριοποιούνταν απλά σαν βενζινοκίνητα ή πετρελαιοκίνητα. Το 2010 λιγότερα από 700 ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας είχαν πωληθεί στην ΕΕ, ενώ τα επαναφορτιζόμενα υβριδικά οχήματα είναι εμπορικά διαθέσιμα από το 2011. Από το 2013, τα τελευταία έγιναν πιο δημοφιλή λόγω της αύξησης του εύρους οδήγησής τους και των κρατικών επιδοτήσεων που ενθάρρυναν την κατοχή ηλεκτρικών οχημάτων. Εκείνη τη χρονιά, πωλήθηκαν περίπου 49.000 ηλεκτρικά οχήματα στην ΕΕ. Έκτοτε, ο αριθμός των πωλήσεων ηλεκτρικών οχημάτων αυξάνεται ραγδαία κάθε χρόνο. Το 2015, σχεδόν 150.000 ηλεκτρικά οχήματα πωλήθηκαν εντός της ΕΕ (Εικόνα 1-3). Συγκεντρωτικά, μόλις έξι κράτη-μέλη ευθύνονται για το 90% σχεδόν των συνολικών πωλήσεων ηλεκτρικών οχημάτων: η Ολλανδία, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Γερμανία, η Γαλλία, η Σουηδία και η Δανία.



Εικόνα 1-3 Χρονοδιάγραμμα συνολικών πωλήσεων ηλεκτρικών οχημάτων, 2010-2015, EU-28 [5]

Σημείωση: \* Διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία μόνο για BEVs, \*\*Μη τελικά στοιχεία

Σε παγκόσμιο επίπεδο, ο αριθμός των επιβατικών ηλεκτρικών αυτοκινήτων ξεπέρασε το 1.000.000 το Σεπτέμβριο του 2015, από 30.000 το 2010, και ο αριθμός των ηλεκτρικών δίκυκλων ξεπέρασε τα 200.000.000 το 2015, χάρη στις κινεζικές πόλεις.

Παρ' όλη την αύξηση των πωλήσεων όμως, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα αποτελούν ένα μικρό ποσοστό των συνολικών πωλημένων οχημάτων στην ΕΕ, μόλις το 1.2% για το 2015. Σε ορισμένα κράτη βέβαια, το ποσοστό αυτό διαφοροποιείται, όπως στην Ολλανδία για παράδειγμα, όπου ανέρχεται στο 10%. Συνολικά, περίπου το 0.15% όλων των επιβατικών οχημάτων στους ευρωπαϊκούς δρόμους είναι ηλεκτρικά.

Υπάρχουν διάφοροι λόγοι που οι καταναλωτές είναι διστακτικοί στο να αγοράσουν ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο, οι οποίοι περιλαμβάνουν τα εξής:

- Υψηλότερα κόστη. Στη σημερινή αγορά, ένα επιβατικό ηλεκτρικό όχημα μπορεί να κοστίζει και 10.000 ευρώ παραπάνω συγκριτικά με ένα αντίστοιχο συμβατικό, διαφορά η οποία αποδίδεται κυρίως στην μπαταρία του οχήματος. Πολλές έρευνες συμφωνούν στο ότι αυτός είναι και ο κύριος λόγος που οι καταναλωτές δεν αγοράζουν ηλεκτρικά οχήματα, αγνοώντας ή υποτιμώντας το μετέπειτα χαμηλότερο κόστος λειτουργίας. Αναμένουν επίσης ότι τα σημερινά κίνητρα αγοράς, όπως η δωρεάν στάθμευση και φόρτιση, θα αναιρεθούν στο άμεσο μέλλον, κάτι το οποίο αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα στην επιλογή ηλεκτρικού οχήματος.
- Διαθεσιμότητα μοντέλων. Όλοι οι βασικοί κατασκευαστές αυτοκινήτων παράγουν πλέον ηλεκτρικά οχήματα, με περισσότερα από 30 μοντέλα να κυκλοφορούν στην αγορά. Το νούμερο αυτό όμως είναι μικρό σε σχέση με αυτό των συμβατικών αυτοκινήτων, οπότε οι καταναλωτές έχουν μικρότερο εύρος επιλογών. Ακόμη, λόγω της μικρής αγοράς, δεν προσφέρεται ιδιαίτερα ρύθμιση παραμέτρων, όπως επιπλέον εξοπλισμός, επιλογές εμφάνισης ή επιλογές μπαταρίας/κινητήρα. Συχνά δε, τα ηλεκτρικά μοντέλα διατίθενται προς πώληση μόνο με τις τελευταίες τεχνολογίες, χωρίς να παρέχεται η δυνατότητα να αφαιρεθούν και να μειωθεί έτσι το κόστος.
- Μη ανταπόκριση στις ανάγκες του οδηγού. Έχοντας συνηθίσει οι οδηγοί στα συμβατικά οχήματα, η μετάβαση στα ηλεκτρικά είναι δύσκολη, κυρίως λόγω των περιορισμών του εύρους οδήγησης και της φόρτισης. Αν και η αυτονομία των μπαταριών των περισσότερων ηλεκτρικών οχημάτων που κυκλοφορούν αυτή τη στιγμή στην αγορά επαρκεί για την πλειονότητα των καθημερινών δρομολογίων των καταναλωτών, οι απαιτήσεις τους είναι μεγαλύτερες. Επιπλέον, αν και η νυχτερινή φόρτιση μπορεί να καλύψει τις ανάγκες τους, τα σημεία φόρτισης κρίνονται ανεπαρκή και οι οδηγοί υποστηρίζουν ότι ο χρόνος φόρτισης ξεπερνά τα αποδεκτά για αυτούς όρια.
- Περιορισμένη πληροφόρηση, κυρίως όσον αφορά τις υποδομές φόρτισης – τα σημεία φόρτισης, την πρόσβαση σε αυτά και τις μεθόδους πληρωμών – και την αυτονομία οδήγησης.

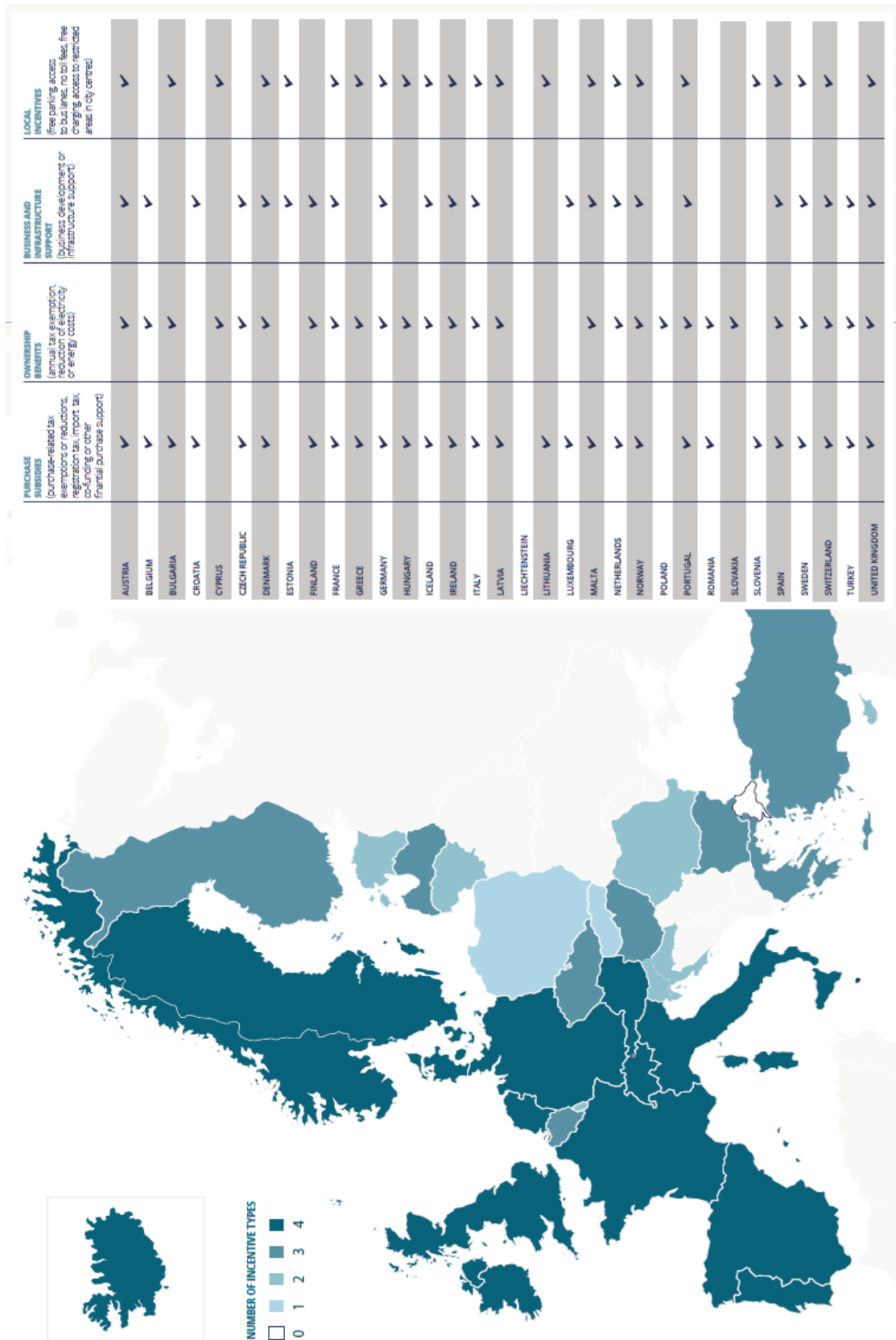
- Τεχνολογική αβεβαιότητα. Αν και η τεχνολογία των ηλεκτρικών οχημάτων είναι πάνω από 150 χρόνων, οι καταναλωτές την θεωρούν πρόσφατη ανακάλυψη, με αποτέλεσμα να αντιμετωπίζουν ορισμένες πλευρές της με αβεβαιότητα, όπως την αυτονομία οδήγησης, την διαθεσιμότητα φόρτισης και κυρίως το προσδόκιμο ζωής της μπαταρίας.

Απαιτείται λοιπόν η παροχή μέτρων που θα ενθαρρύνουν την αγορά και χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων. Τέτοια κίνητρα έχουν εφαρμοστεί στην ΕΕ και περιλαμβάνουν:

- Επιδότησεις στην αγορά των οχημάτων, υπό τη μορφή μείωσης φόρων ή κρατικών επιχορηγήσεων κατά την αγορά του οχήματος
- Μείωση κόστους ιδιοκτησίας, υπό τη μορφή μείωσης φόρων.
- Οικονομική υποστήριξη στην βιομηχανία των ηλεκτρικών οχημάτων, είτε στον τομέα της έρευνας, είτε των υποδομών.
- Τοπικές κυβερνητικές ενέργειες, όπως χρήση ηλεκτρικών οχημάτων για δημόσιες υπηρεσίες, παροχή δωρεάν στάθμευσης και φόρτισης, χρήση λωριδών λεωφορείων, ελεύθερη πρόσβαση στο δακτύλιο, έκπτωση σε διόδια και άλλα υποστηρικτικά μέτρα ενημέρωσης και προώθησης.

Όλα τα παραπάνω μέτρα παρουσιάζονται συνοπτικά στην παρακάτω εικόνα για πολλά κράτη της Ευρώπης (Εικόνα 1-4):





Εικόνα 1-4 Κίνητρα για την αγορά-χρήση ηλεκτρικών αυτοκινήτων σε κράτη της Ευρώπης [5]

## 2. Τεχνολογίες ηλεκτρικών οχημάτων

### 2.1 Τεχνολογίες ηλεκτροκίνησης

Τα ηλεκτρικά οχήματα, ανάλογα με την τεχνολογία τους, διαχωρίζονται στις εξής κατηγορίες [5]:

- ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας (Battery Electric Vehicles – BEV),
- ηλεκτρικά οχήματα αυξημένης αυτονομίας (Range Extended Electric Vehicles – REEV),
- plug-in υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (Plug-in Hybrid Electric Vehicles – PHEV),
- υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (Hybrid Electric Vehicles – HEV), και
- ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου (Fuel Cell Electric Vehicles – FCEV)

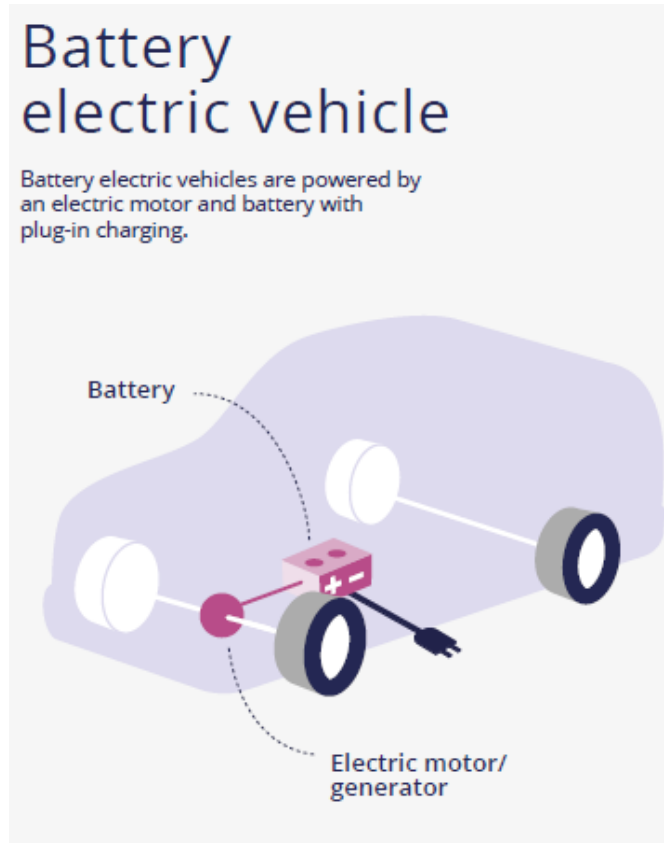
οι οποίες αναλύονται παρακάτω:

- Ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας (Battery Electric Vehicles – BEV)

Είναι τα ηλεκτρικά οχήματα που κινούνται αποκλειστικά με την ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται σε μπαταρία εγκατεστημένη εντός του οχήματος. Όταν αυτή αποφορτιστεί, μπορεί να επαναφορτιστεί με τη διασύνδεση του οχήματος στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ενός κοινού οικιακού ρευματοδότη ή μέσω ειδικής μονάδας φόρτισης. Τα BEV έχουν τη μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση από όλα τα συστήματα πρόωσης των οχημάτων έχοντας τη δυνατότητα να μετατρέψουν πάνω από το 80% της αποθηκευμένης στην μπαταρία ενέργειας σε κινητική. Ελαχιστοποιούν επίσης τις απώλειες ενέργειας απενεργοποιώντας τη μηχανή όταν το όχημα δεν κινείται και φορτίζοντας την μπαταρία με το λεγόμενο «αναπαραγωγικό φρενάρισμα», το οποίο αξιοποιεί τη θερμότητα που παράγεται κατά το φρενάρισμα του οχήματος. Η αυτονομία οδήγησης είναι πιο περιορισμένη σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα και απαιτούν μεγάλους χρόνους φόρτισης. Η μη χρήση καυσίμων συνεπάγεται σαφώς μικρότερο λειτουργικό κόστος σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα και,

καθώς βασίζονται αποκλειστικά στην ηλεκτρική ενέργεια, οι άμεσες εκπομπές ρύπων είναι μηδενικές.

*Ενδεικτική ηλεκτρική αυτονομία: 80-400 χιλιόμετρα.*

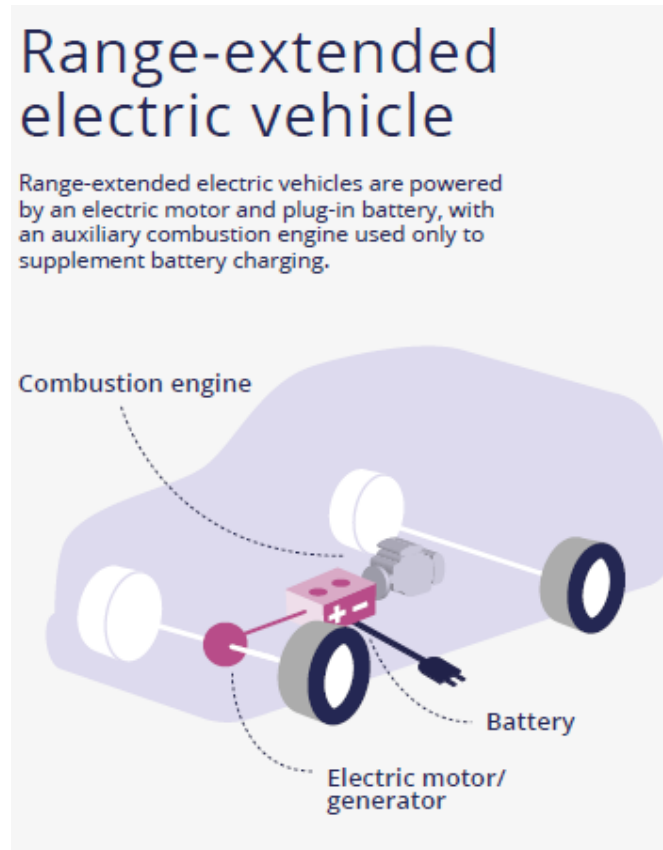


Εικόνα 2-1 Ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας (Battery Electric Vehicles – BEV) [5]

- Ηλεκτρικά οχήματα αυξημένης αυτονομίας (Range Extended Electric Vehicles – REEV)

Είναι τα ηλεκτρικά οχήματα, τα οποία διαθέτουν μηχανή εσωτερικής καύσης και ηλεκτρικό κινητήρα. Ωστόσο, η κίνηση του οχήματος στηρίζεται αποκλειστικά στον ηλεκτρικό κινητήρα. Η μηχανή εσωτερικής καύσης χρησιμοποιείται μόνο για τη φόρτιση της μπαταρίας ή την παροχή ισχύος στον ηλεκτροκινητήρα, για αυτό μπορεί να είναι και μικρή μειώνοντας έτσι το βάρος του οχήματος. Η φόρτιση της μπαταρίας μπορεί επίσης να πραγματοποιηθεί με τη διασύνδεση του οχήματος στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Εν αντιθέσει με τα BEV, τα REEV ανεφοδιάζονται και με το είδος καυσίμου με το οποίο λειτουργεί η μονάδα επέκτασης της αυτονομίας τους, ξεπερνώντας έτσι το πρόβλημα της περιορισμένης αυτονομίας των BEV.

*Ενδεικτική ηλεκτρική αυτονομία: 70-145 χιλιόμετρα.*



Εικόνα 2-2 Ηλεκτρικά οχήματα αυξημένης αυτονομίας (Range Extended Electric Vehicles – REEV) [5]

- Plug-in Υβριδικά Ηλεκτρικά Οχήματα (Plug-in Hybrid Electric Vehicles – PHEV)

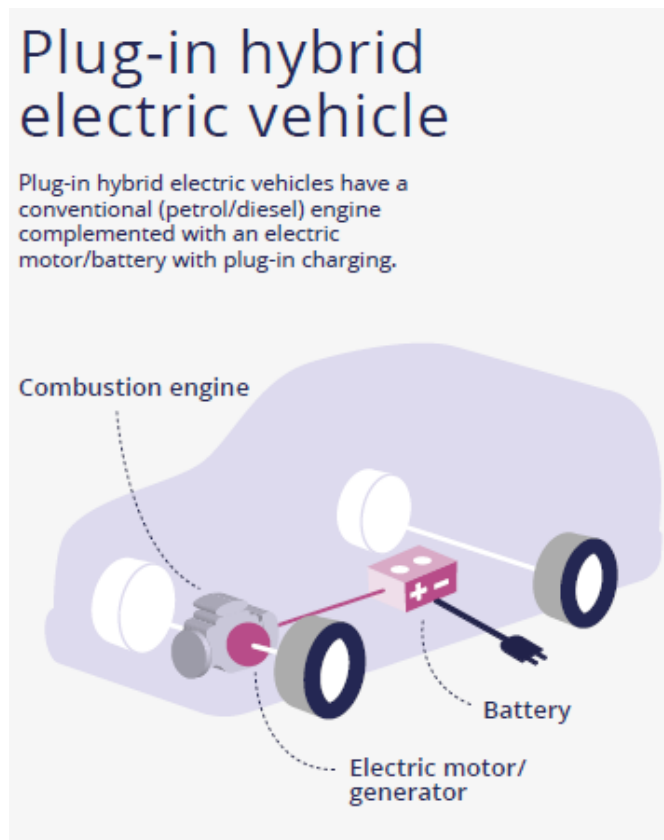
Είναι τα ηλεκτρικά οχήματα που κινούνται χρησιμοποιώντας συνδυασμό ηλεκτροκινητήρα και μηχανή εσωτερικής καύσης, και τα οποία, εκτός από τον εφοδιασμό τους με το κατάλληλο καύσιμο για τη μηχανή εσωτερικής καύσης, έχουν τη δυνατότητα να φορτίζουν τη μπαταρία τους με διασύνδεση στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Υπάρχουν οι εξής τύποι υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων:

- *παράλληλης σύνδεσης*, όπου τόσο ο ηλεκτροκινητήρας, όσο και ο κινητήρας εσωτερικής καύσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μετάδοση της κίνησης στο όχημα,
- *εν σειρά σύνδεσης*, όπου μόνο ο ηλεκτροκινητήρας δίνει την κίνηση στους τροχούς, ενώ η μηχανή εσωτερικής καύσης χρησιμοποιείται για τη φόρτιση της μπαταρίας ή την παροχή ισχύος στον ηλεκτροκινητήρα,

- *μικτού τύπου*, όπου συνδυάζονται οι παράλληλη και η εν σειρά σύνδεση με στόχο τη μέγιστη ευελιξία.

Η ηλεκτρική αυτονομία είναι μικρότερη από αυτή των BEV, αφού οι μπαταρίες τείνουν να έχουν μικρότερη χωρητικότητα, το οποίο συμβαίνει διότι το όχημα δεν βασίζεται αποκλειστικά στην ηλεκτρική ενέργεια. Οι μπαταρίες είναι σχεδιασμένες κυρίως για μικρές διαδρομές εντός πόλης και όχι για ταξίδια. Ωστόσο, χάρη στη μηχανή εσωτερικής καύσης, η συνολική αυτονομία οδήγησης αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις εξαρτώνται από το εάν το όχημα κινείται με τη βοήθεια της μηχανής εσωτερικής καύσης ή μόνο με τον ηλεκτροκινητήρα.

*Ενδεικτική ηλεκτρική αυτονομία: 20-85 χιλιόμετρα.*



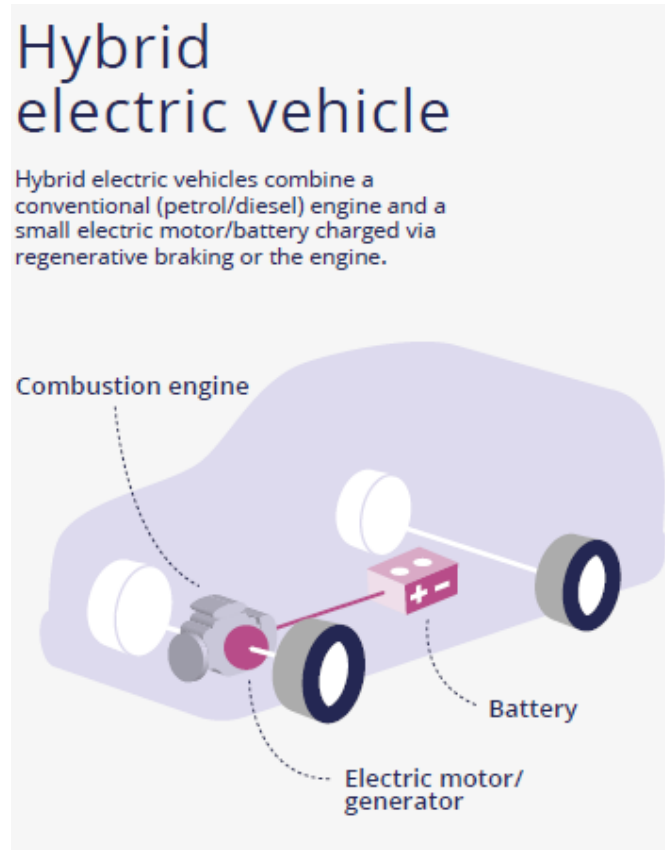
**Εικόνα 2-3 Plug-in Υβριδικά Ηλεκτρικά Οχήματα (Plug-in Hybrid Electric Vehicles – PHEV) [5]**

- Υβριδικά Ηλεκτρικά Οχήματα (Hybrid Electric Vehicles – HEV)

Είναι τα ηλεκτρικά οχήματα που είναι εμπορικά διαθέσιμα πάνω από 15 χρόνια και η μόνη διαφορά τους με τα PHEV έγκειται στο γεγονός ότι η μπαταρία δεν μπορεί να φορτιστεί με διασύνδεση στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Η

υβριδικότητά τους απαντάται στην αύξηση της απόδοσης καυσίμου, μειώνοντας τις εκπομπές ρύπων.

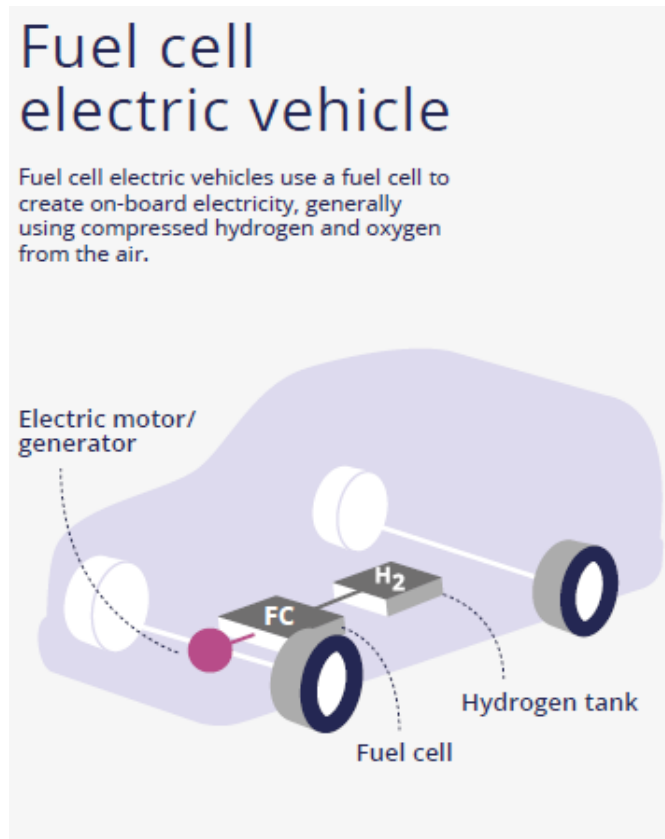
*Ενδεικτική ηλεκτρική αυτονομία: 0-10 χιλιόμετρα.*



Εικόνα 2-4 Υβριδικά Ηλεκτρικά Οχήματα (Hybrid Electric Vehicles – HEV) [5]

- Ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου (Fuel Cell Electric Vehicles – FCEV)  
Είναι τα ηλεκτρικά οχήματα που βασίζονται εξ' ολοκλήρου στην ηλεκτρική ενέργεια, η οποία όμως δεν είναι αποθηκευμένη σε μπαταρία αλλά σε κυψέλες καυσίμου που συνδυάζουν το υδρογόνο (που είναι αποθηκευμένο σε δεξαμενή εντός του οχήματος) με το οξυγόνο του αέρα. Το κύριο πλεονέκτημά τους έναντι των BEV είναι η μεγαλύτερη αυτονομία και η γρηγορότερη φόρτιση. Ωστόσο, η τεχνολογία τους είναι ακόμα σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης και λίγα μοντέλα είναι εμπορικά διαθέσιμα.

*Ενδεικτική ηλεκτρική αυτονομία: 160-500 χιλιόμετρα.*



Εικόνα 2-5 Ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου (Fuel Cell Electric Vehicles – FCEV) [5]

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα της κάθε τεχνολογίας ηλεκτροκίνησης (Πίνακας 2-1):

	Απόδοση	Χαμηλός Θόρυβος	Χαμηλές Εκπομπές καυσαερίων	Σταθμοί ανεφοδιασμού	Τεχνολογική απλότητα	Κατ'οίκον φόρτιση	Αυτονομία οδήγησης
BEV	++	++	++	-	+	+	-
REEV	+	+	+	+	-	+	++
PHEV	+	+	+	+	-	+	++
HEV	+	-	-	+	-	-	++
FCEV	+	+	++	-	-	-	+

Πίνακας 2-1 Πλεονεκτήματα τεχνολογιών ηλεκτροκίνησης

## 2.2 Κατηγορίες 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 [6].

Αντίστοιχη κατηγοριοποίηση υπάρχει και για τα ηλεκτρικά οχήματα:

- L2e: Δίκυκλα οχήματα με μέγιστη ταχύτητα όχι μεγαλύτερη από 45 km/h και κινητήρα με ισχύ μικρότερη των 4kW.
- L3e: Δίκυκλα οχήματα με μέγιστη ταχύτητα μεγαλύτερη των 45 km/h.
- L6e: Οχήματα τεσσάρων τροχών με μέγιστο βάρος χωρίς φορτίο όχι μεγαλύτερο από 350kg (χωρίς να υπολογίζεται το βάρος της μπαταρίας), μέγιστη ταχύτητα όχι μεγαλύτερη από 45 km/h και κινητήρα με ισχύ μικρότερη των 4kW.
- L7e: Οχήματα τεσσάρων τροχών με μέγιστο βάρος χωρίς φορτίο, και χωρίς να υπολογίζεται το βάρος της μπαταρίας, όχι μεγαλύτερο από 350kg (550kg για οχήματα που προορίζονται να μεταφέρουν εμπορεύματα) και κινητήρα με ισχύ μικρότερη των 15kW.
- M1: Επιβατικά οχήματα τεσσάρων τροχών με το πολύ 8 θέσεις συν τη θέση του οδηγού, τα οποία αναμένεται να είναι τα κυρίαρχα στην αγορά ηλεκτρικών οχημάτων, όπως επιβεβαιώνεται από τις συνεχείς ανακοινώσεις των διαφόρων κατασκευαστών αυτοκινήτων περί κυκλοφορίας νέων μοντέλων ηλεκτρικών οχημάτων τύπου M1.
- M2: Μεγαλύτερα επιβατικά οχήματα τεσσάρων τροχών με βάρος όχι μεγαλύτερο από 5 τόνους, με το πολύ 8 θέσεις συν τη θέση του οδηγού.
- M3: Μεγαλύτερα επιβατικά οχήματα τεσσάρων τροχών με βάρος μεγαλύτερο από 5 τόνους, με το πολύ 8 θέσεις συν τη θέση του οδηγού.



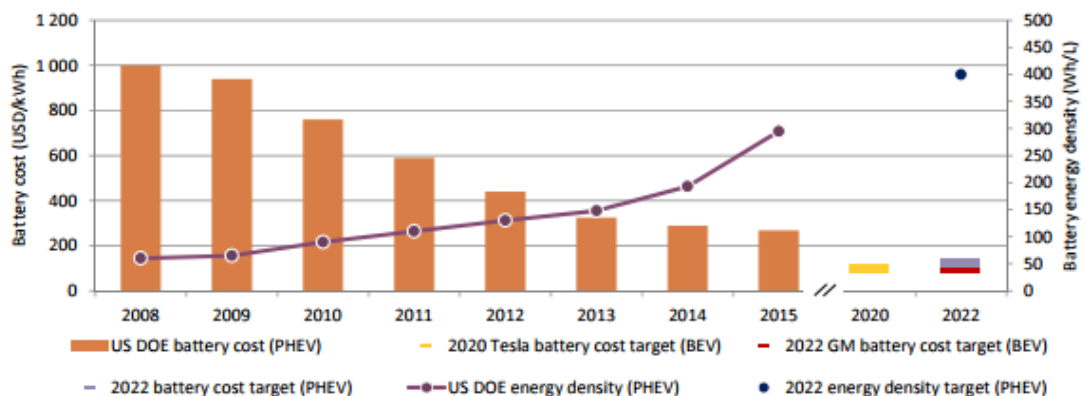
- N1: Οχήματα για τη μεταφορά αγαθών με βάρος χωρίς φορτίο όχι μεγαλύτερο από 3.5 τόνους.
- N2: Οχήματα για τη μεταφορά αγαθών με βάρος χωρίς φορτίο που κυμαίνεται μεταξύ 3.5 και 12 τόνων.

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

### 2.3 Τεχνολογίες συσσωρευτών

Ένα από τα βασικότερα μέρη του ηλεκτρικού οχήματος, αν όχι το βασικότερο, είναι η συστοιχία συσσωρευτών. Τα τελευταία χρόνια παρουσιάζονται μεγάλες επενδύσεις και επιστημονική δραστηριότητα για τη βελτίωση των ήδη υπαρχόντων τύπων συσσωρευτών, αλλά και την επινοήση νέων τύπων. Στόχος είναι η ευρεία παραγωγή συσσωρευτών με μικρότερο κόστος, μεγαλύτερη χωρητικότητα και ισχύ, και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.

Αν και χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία, το κόστος είναι ακόμα υψηλό, ανεβάζοντας σημαντικά το κόστος αγοράς ενός ηλεκτρικού οχήματος συγκριτικά με ένα συμβατικό. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σημαντική μείωση στο κόστος της μπαταρίας, με παράλληλη αύξηση της πυκνότητας ενέργειας (Εικόνα 2-6).



Εικόνα 2-6 Κόστος και πυκνότητα ενέργειας μπαταρίας [7]

Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες συσσωρευτών που είναι εμπορικά διαθέσιμες. Μια σύντομη περιγραφή των κύριων τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται σήμερα στην αποθήκευση ενέργειας στα ηλεκτρικά οχήματα παρουσιάζεται παρακάτω [8]:

- Μολύβδου-Οξέος (Lead-Acid)

Είναι μια αρκετά διαδεδομένη τεχνολογία κυρίως του χαμηλού κόστους της, αλλά έχουν μεγάλες απαιτήσεις σε όγκο και μάζα, με αποτέλεσμα να καταλήγουν να αποτελούν μεγάλο ποσοστό της τελικής μάζας του οχήματος.

Η απόδοση και η ικανότητα αποθήκευσης αυτής της τεχνολογίας μπαταριών μειώνεται όταν οι θερμοκρασίες περιβάλλοντος είναι χαμηλές. Έχει επίσης παρατηρηθεί ότι οι μεγάλες εκφορτίσεις περιορίζουν τη διάρκεια ζωής τους στα τέσσερα χρόνια, καθώς οι κύκλοι φόρτισης δεν μπορούν να ξεπεράσουν τους 400. Με την αύξηση της ταχύτητας εκφόρτισης, μειώνεται σημαντικά η χωρητικότητά τους, στοιχείο που απαντάται σε όλες τις μπαταρίες, αλλά είναι ιδιαίτερα έντονο στις μολύβδου-οξέος. Έχουν ακόμα περιορισμένη χωρητικότητα, και κατά συνέπεια μικρή αυτονομία – περίπου 80 χιλιόμετρα –, γεγονός το οποίο περιορίζει την εφαρμογή τους σε ηλεκτρικά αυτοκίνητα που χρησιμοποιούνται για μικρές διαδρομές.

Παρά τα μειονεκτήματά τους ωστόσο, το ιδιαίτερα χαμηλό κόστος τους, η φιλικότητα στο περιβάλλον λόγω της απλής διαδικασίας ανακύκλωσής τους, και η υψηλή ενεργειακή τους ισχύς καθιστούν τη συγκεκριμένη τεχνολογία ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα στο χώρο της ηλεκτροκίνησης.

- Ιόντων-Λιθίου (Lithium-Ion)

Η τεχνολογία αυτή εφαρμόζεται σήμερα σε πολλές ηλεκτρονικές εφαρμογές με άριστη αποδοτικότητα. Η εφαρμογή σε ηλεκτρικά οχήματα είναι ιδιαίτερα ελκυστική, καθώς οι μπαταρίες αυτής της τεχνολογίας διαθέτουν υψηλή πυκνότητα ενέργειας ανά μονάδα μάζας και όγκου, προσφέροντας έτσι αυξημένη αυτονομία, και μεγάλη διάρκεια ζωής, η οποία ανέρχεται στους 1000 κύκλους ζωής. Βασικό μειονέκτημα είναι το υψηλό κόστος τους, το οποίο βέβαια αναμένεται να μειωθεί σημαντικά.

- Νικελίου-Υβριδίου Μετάλλου (NiMH)

Βασικά πλεονεκτήματα των μπαταριών της τεχνολογίας αυτής είναι η αποδεδειγμένη διάρκεια ζωής τους, η ογκομετρική χωρητικότητά τους και η δυνατότητα αποδοτικής λειτουργίας τους σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών. Η πυκνότητα ενέργειας τους είναι μεταξύ των αντίστοιχων των μπαταριών μολύβδου-οξέος και ιόντων-λιθίου. Βασικά μειονεκτήματα αποτελούν το υψηλό κόστος τους – το οποίο δεν αναμένεται να μειωθεί σημαντικά στο προσεχές μέλλον – και το ότι η συνεχής εκφόρτισή τους σε υψηλή ισχύ μειώνει αισθητά τη διάρκεια ζωής τους. Επιπλέον, η κατασκευή τους από συγκεκριμένα χημικά στοιχεία και χημικές αντιδράσεις περιορίζει σημαντικά τις προοπτικές βελτίωσής τους. Η συγκεκριμένη τεχνολογία απαντάται κυρίως σε υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα.

- Νικελίου-Καδμίου (Ni-Cd)

Οι μπαταρίες αυτής της τεχνολογίας έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και επιτρέπουν την πλήρη εκφόρτισή τους χωρίς να επηρεάζεται η απόδοσή τους. Η πυκνότητα ενέργειάς τους είναι μεταξύ των αντίστοιχων των μπαταριών μολύβδου-οξέος και ιόντων-λιθίου. Το κυριότερο μειονέκτημά τους είναι το υψηλό κόστος εγκατάστασής τους.

- Κυψέλες καυσίμου (Fuel Cells)

Η τεχνολογία αυτή γνωρίζει μεγάλη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια και δημιουργούνται έτσι οι προϋποθέσεις για την υιοθέτησή τους στα συστήματα ηλεκτροκίνησης. Βασικά πλεονεκτήματα αποτελούν η υψηλή απόδοση μετατροπής καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια, η ανάκτηση θερμικών απωλειών, η ευελιξία καυσίμου, η αντοχή και η αξιοπιστία. Το υδρογόνο είναι το ιδανικό μη ρυπογόνο καύσιμο για τις κυψέλες, καθώς έχει την υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα και το προϊόν αντίδρασης είναι νερό. Ωστόσο, λόγω της μικρής πυκνότητας του υδρογόνου, απαιτείται μεγάλος χώρος αποθήκευσης στο όχημα για ικανοποιητική αυτονομία.

Επιπρόσθετες τεχνολογίες (Ψευδαργύρου, Νατρίου ή Zebra), καθώς και διαφορετικές τεχνολογίες ιόντων-λιθίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων, με τις προαναφερθείσες – πλην των ανερχομένων κυψελών καυσίμου – να

αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο μέρος της συγκεκριμένης αγοράς. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των υπερπυκνωτών (σημαντικά μεγάλη πυκνότητα ισχύος και πολύ γρήγορος ρυθμός φόρτισης/εκφόρτισης) αξιοποιούνται στα βοηθητικά συστήματα ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων - όπως για παράδειγμα στην αποθήκευση και ανάκτηση της ενέργειας της πέδησης - βελτιώνοντας έτσι την απόδοσή τους.

## 2.4 Σταθμοί φόρτισης

### 2.4.1 Τεχνολογίες σταθμών φόρτισης

Η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να γίνει με δύο μεθόδους:

- Φόρτιση με αγώγιμη σύνδεση,
- Ασύρματη (Επαγωγική) φόρτιση,

οι οποίες αναλύονται παρακάτω:

- 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 βάσει του προτύπου IEC 62196:

- *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 ο συμβατικός οικιακός ρευματοδότης. Στην Αμερική, σύμφωνα με το πρότυπο SAE J1772, η μέγιστη ισχύς φόρτισης είναι 1.92kW, ενώ στην Ευρώπη η αντίστοιχη ισχύς είναι 3.2kW. Στα περισσότερα ηλεκτρικά οχήματα παρέχεται κατά την αγορά τους κατάλληλο καλώδιο φόρτισης, χωρίς να απαιτείται έτσι επιπλέον εξοπλισμός. Ο χρόνος φόρτισης σε τέτοιες υποδομές φόρτισης είναι μεγάλος (ίσως και άνω των οκτώ ωρών) και χρησιμοποιούνται μόνο για οικιακή φόρτιση.

- *Επίπεδο 2 (Mode 2):* Μονοφασική φόρτιση με ονομαστικό ρεύμα φόρτισης 32A και μέγιστη ισχύ 7.2kW. Για αυτή τη φόρτιση απαιτείται συγκεκριμένη υποδομή φόρτισης, η μέγιστη ισχύς της οποίας μπορεί να φτάσει τα 19.2kW με μέγιστο ρεύμα 80A, σύμφωνα με το πρότυπο SAE J1772. Ο απαιτούμενος χρόνος φόρτισης είναι μειωμένος κατά 50% σε σχέση με το επίπεδο 1. Το κόστος αυτών των υποδομών μπορεί να φτάσει τις μερικές χιλιάδες ευρώ.
- *Επίπεδο 3 (Mode 3):* Ταχεία φόρτιση (< 1ώρα) με τριφασική παροχή ηλεκτρικού ρεύματος – επιτρέποντας μεταφερόμενη ισχύ ίση με 42kW με ονομαστικό ρεύμα φόρτισης 63A – ή με χρήση DC ρεύματος – επιτρέποντας μεταφερόμενη ισχύ μέχρι και 100kW –. Οι φορτιστές συνεχούς ρεύματος είναι αρκετά σύνθετοι, καθώς απαιτούν την ενσωμάτωση του μετατροπέα εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές στις υποδομές φόρτισης, το κόστος των οποίων μπορεί να φτάσει τις μερικές δεκάδες χιλιάδες ευρώ.

- Ασύρματη (Επαγωγική) φόρτιση

Η φόρτιση αυτού του τύπου πραγματοποιείται με μεταφορά εναλλασσόμενης ισχύος με μαγνητική σύμπλεξη ενός πρωτεύοντος τυλίγματος στην πλευρά της παροχής και ενός δευτερεύοντος στην πλευρά του οχήματος χρησιμοποιώντας έναν μετασχηματιστή. Επειδή ο συσσωρευτής του οχήματος μπορεί να φορτιστεί μόνο με DC ρεύμα, το AC ρεύμα εξόδου του δευτερεύοντος τυλίγματος ανορθώνεται με την κατάλληλη διάταξη πριν εισέλθει σε αυτόν. Οι επαγωγικοί φορτιστές διατηρούν το μεγαλύτερο μέρος του κυκλώματος φόρτισης εκτός του οχήματος και επικοινωνούν με αυτό μέσω υπερύθρων ή ραδιοσυχνοτήτων.

Πέραν της στατικής επαγωγικής φόρτισης, υπάρχει και η δυναμική φόρτιση όπου η ενέργεια φόρτισης μεταφέρεται στο όχημα καθώς αυτό κινείται. Σε αυτή την περίπτωση, το πρωτεύον τύλιγμα βρίσκεται εντός του δρόμου και καθώς το όχημα διέρχεται από πάνω, το μαγνητικό κύκλωμα κλείνει και υπάρχει ροή ισχύος.

Τα συγκριτικά χαρακτηριστικά των δύο μεθόδων φόρτισης (ενσύρματης και ασύρματης) αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2-2).

	Ενσύρματη φόρτιση	Ασύρματη φόρτιση
<b>Κόστος</b>	Πιο οικονομική	Πιο ακριβή
<b>Πολυπλοκότητα</b>	Απλούστερη	Πιο σύνθετη
<b>Ασφάλεια</b>	Αρκετά καλή λόγω των αποδοτικών τεχνικών ανίχνευσης σφάλματος	Καλύτερη από την ενσύρματη φόρτιση λόγω της ηλεκτρικής απομόνωσης του οχήματος με την τροφοδοσία
<b>Ενεργειακή Απόδοση</b>	Πιο αποδοτική	Όχι τόσο αποδοτική

Πίνακας 2-2 Συγκριτικά χαρακτηριστικά ενσύρματης και ασύρματης φόρτισης [9]

#### 2.4.2 Θέσεις σταθμών φόρτισης

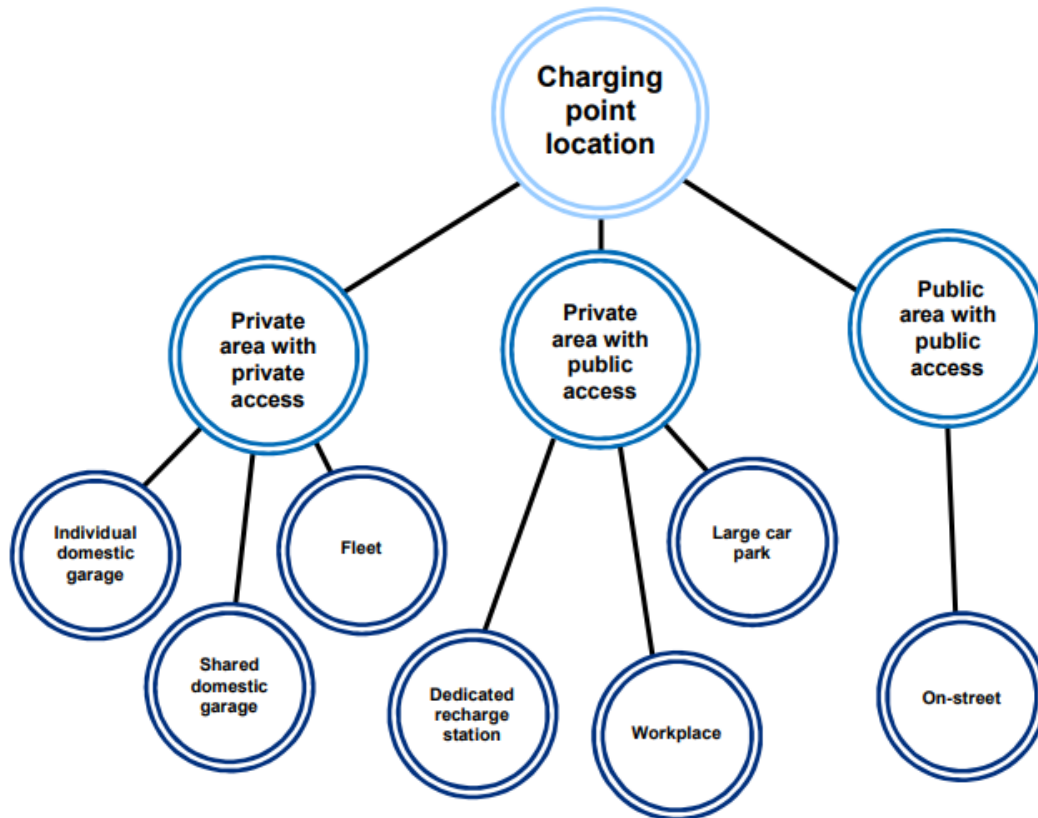
Οι τοποθεσίες των σταθμών φόρτισης κατηγοριοποιούνται ως εξής [9]:

- Ιδιωτική περιοχή με ιδιωτική πρόσβαση
  - *Ιδιωτικοί οικιακοί χώροι στάθμευσης:* Δεν απαιτείται κάποια επιπλέον εγκατάσταση για απλή φόρτιση επιπέδου 1, από τη στιγμή που υπάρχει παροχή ρεύματος με προστασία γείωσης, και οι καταναλωτές μπορούν να εκμεταλλευτούν το νυχτερινό τιμολόγιο κατανάλωσης.
  - *Ιδιωτικοί κοινόχρηστοι οικιακοί χώροι στάθμευσης:* Είναι δυνατή η εγκατάσταση εξοπλισμού που να αναγνωρίζει το χρήστη που φορτίζει το όχημά του, ώστε το κόστος φόρτισης να επιβαρύνει μόνο αυτόν.
  - *Εταιρίες με ηλεκτρικά οχήματα προς ενοικίαση:* Πιθανόν να χρειαστούν φορτιστές επιπέδου 2 και 3, ενώ δεν θα χρειαστεί ατομικός εξοπλισμός για τη μέτρηση της κατανάλωσης, καθώς το κόστος για τη φόρτιση θα επιβαρύνει την εταιρία.

- Ιδιωτική περιοχή με δημόσια πρόσβαση
  - *Μεγάλοι χώροι στάθμευσης (π.χ. εμπορικά καταστήματα):* Τα οχήματα αναμένεται να είναι σταθμευμένα για ένα χρονικό διάστημα λίγων ωρών και ανάλογα με τη χρησιμοποίηση, πιθανόν να χρειαστεί ένας συνδυασμός φορτιστών επιπέδου 1, 2 και 3.
  - *Χώροι εργασίας (π.χ. χώρος στάθμευσης υπαλλήλων μιας εταιρίας):* Μπορεί να αξιοποιηθεί ο μεγάλος χρόνος παραμονής των οχημάτων στο χώρο εργασίας με τη φόρτισή τους, αν και οι τιμές του ηλεκτρικού ρεύματος θα είναι υψηλές εκείνες τις ώρες, οπότε πιθανόν να χρειαστούν μόνο φορτιστές επιπέδου 1.
  - *Κατάλληλα διαμορφωμένοι χώροι ειδικά για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων:* Αντίστοιχα με τα πρατήρια καυσίμων, οι οδηγοί μπορούν να φορτίζουν το όχημά τους σε ιδιωτικούς σταθμούς φόρτισης με φορτιστές επιπέδου 3. Επειδή ο χρόνος φόρτισης περιορίζεται λόγω της υπερθέρμανσης της μπαταρίας, σταθμοί φόρτισης που να αντικαθιστούν τις αφόρτιστες μπαταρίες με φορτισμένες μπορούν να πετύχουν χαμηλούς χρόνους ανεφοδιασμού. Αυτό, ωστόσο, προϋποθέτει από τους κατασκευαστές συγκεκριμένα πρότυπα μπαταρίας και το κόστος επένδυσης ενός τέτοιου σταθμού φόρτισης, λόγω της αγοράς και αποθήκευσης πολλών μπαταριών, είναι μεγάλο.
- Δημόσια περιοχή με δημόσια πρόσβαση

Είναι σταθμοί που στοχεύουν στην εξυπηρέτηση οδηγών ηλεκτρικών οχημάτων, οι οποίοι ζουν σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, όπου δεν υπάρχουν ιδιωτικοί χώροι στάθμευσης.

Παρακάτω παρατίθεται ένα διάγραμμα, όπου παρουσιάζονται συνοπτικά οι προαναφερθείσες θέσεις των σταθμών φόρτισης (Εικόνα 2-7):



Εικόνα 2-7 Διάγραμμα θέσεων σταθμών φόρτισης [9]

### 2.4.3 Καλώδια φόρτισης

Παρακάτω θα αναλυθούν τρία βασικά καλώδια σύνδεσης [9]:

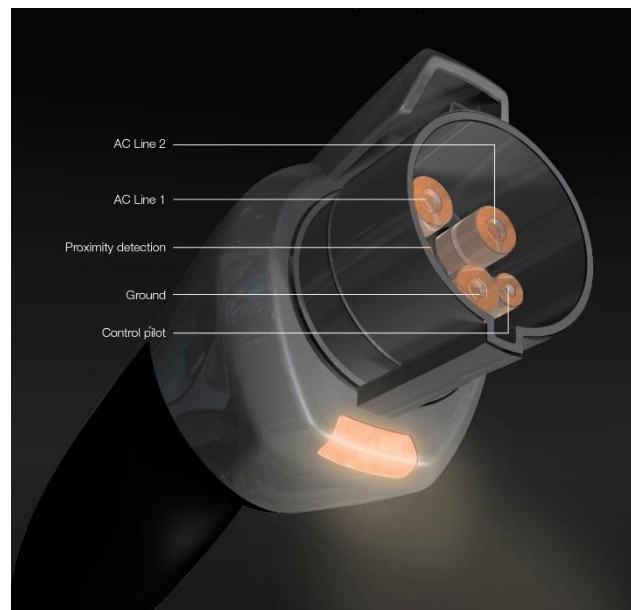
- Καλώδια σύνδεσης στις Η.Π.Α.

Το πρότυπο που χρησιμοποιούν οι περισσότεροι κατασκευαστές στις ΗΠΑ είναι το SAE J1772, το οποίο καλύπτει τις φυσικές, ηλεκτρικές και λειτουργικές απαιτήσεις του ρευματολήπτη του οχήματος, καθώς και του καλωδίου σύνδεσης του οχήματος με την παροχή ρεύματος. Βασίζεται στο σχεδιασμό της ιαπωνικής εταιρίας Yazaki, και το καλώδιο έχει πέντε ακροδέκτες, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2-8:

- *Επαφή 1:* 1<sup>η</sup> γραμμή τροφοδοσίας
- *Επαφή 2:* 2<sup>η</sup> γραμμή τροφοδοσίας ή ουδέτερος
- *Επαφή 3:* Γείωση. Συνδέει τον αγωγό γείωσης του σταθμού φόρτισης με το σασί του αυτοκινήτου.



- *Επαφή 4:* Οδηγός ελέγχου. Επιβεβαιώνει την παρουσία και τη σύνδεση του οχήματος, επιτρέπει την έναρξη και την διακοπή της παροχής ενέργειας, παρέχει το απαιτούμενο ρεύμα στο όχημα και καθορίζει τις απαιτήσεις εξαέρωσης.
- *Επαφή 5:* Ελεγκτής διασύνδεσης. Ανιχνεύει την παρουσία του καλωδίου σύνδεσης, αποτρέποντας την κίνηση του οχήματος όσο αυτό είναι συνδεδεμένο στο φορτιστή.



**Εικόνα 2-8 Καλώδιο σύνδεσης SAE J1772**

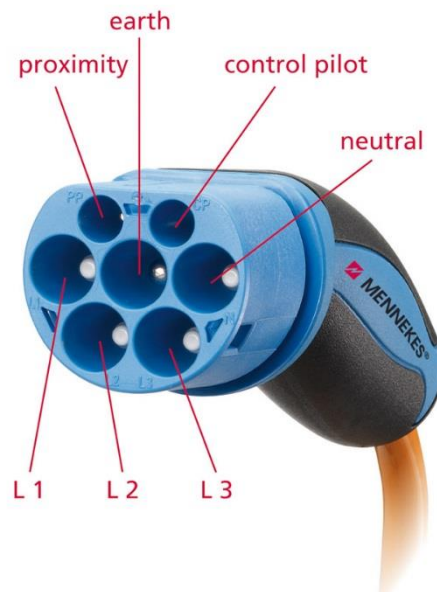
Το συγκεκριμένο πρότυπο επιτρέπει φόρτιση επιπέδου 1 με ισχύ μέχρι και 1.9kW (120V, 12-16A, 1 φάση) ή επιπέδου 2 με ισχύ μέχρι και 19kW (208-240V, 80A, 1 φάση), ενώ δεν υποστηρίζει DC φόρτιση, αν και έχει αρχίσει η σχεδίαση προτύπου που να καλύπτει και αυτή τη λειτουργία με μεταφερόμενη ισχύ άνω των 100kW. Το καλώδιο είναι σχεδιασμένο να αντέχει 100.000 κύκλους φόρτισης, με τη διάρκεια ζωής του να ξεπερνά τα 27 έτη.

- Καλώδια σύνδεσης στην Ευρώπη

Το καλώδιο που έχει επικρατήσει στην Ευρώπη βασίζεται στο πρότυπο IEC 62196-2 και διαθέτει 7 ακροδέκτες (με όμοιες λειτουργίες με το πρότυπο SAE J1772), όπως φαίνεται και στην εικόνα 2-9:

- *Επαφή 1:* 1<sup>η</sup> γραμμή τροφοδοσίας (για τη μεταφορά τριφασικής ισχύος)

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



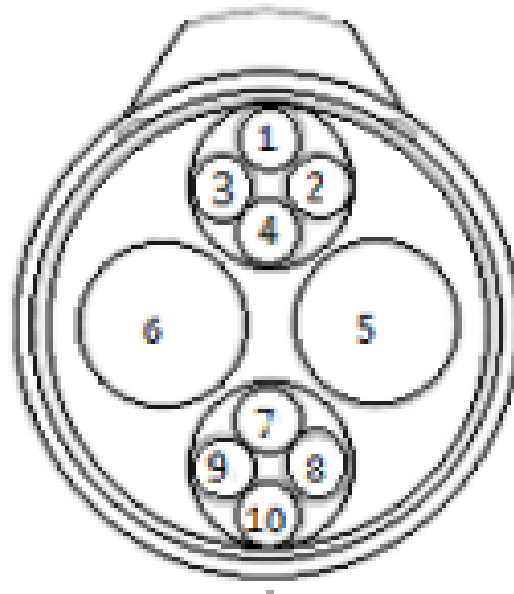
Εικόνα 2-9 Καλώδιο σύνδεσης IEC 62196-2

- DC φόρτιση

Η Εταιρία Ηλεκτρικής Ισχύος του Τόκιο (TEPCO) σε συνεργασία με το Ινστιτούτο Έρευνας Αυτοκινήτων της Ιαπωνίας (JARI) έχουν αναπτύξει ένα πρότυπο, με την ονομασία TEPCO/JARI που επιτρέπει DC φόρτιση με τριφασική είσοδο 200V και DC έξοδο 50kW/500V/125A. Το καλώδιο έχει 10 ακροδέκτες, όπως φαίνεται στην εικόνα 2-10:

- *Επαφή 1*: Γείωση
- *Επαφή 2*: Ελεγκτής ηλεκτρονόμου 1
- *Επαφή 3*: -
- *Επαφή 4*: Υποδεικνύει την έναρξη της φόρτισης
- *Επαφή 5*: Αρνητική γραμμή τροφοδοσίας
- *Επαφή 6*: Θετική γραμμή τροφοδοσίας

- *Επαφή 7*: Ελεγκτής διασύνδεσης
- *Επαφή 8*: Θετικός ακροδέκτης επικοινωνίας
- *Επαφή 9*: Αρνητικός ακροδέκτης επικοινωνίας
- *Επαφή 10*: Ελεγκτής ηλεκτρονόμου 2



Εικόνα 2-10 Καλώδιο σύνδεσης TEPCO/JARI

Αξίζει να σημειωθεί ότι έχει ιδρυθεί η ιαπωνική συνεργασία CHAdeMO, η οποία στοχεύει στην υιοθέτηση του προτύπου TEPCO/JARI σε παγκόσμιο επίπεδο.

## 3. Ένταξη ηλεκτρικών οχημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο

### 3.1 Ισχύουσα νομοθεσία

Στην Ελλάδα η ηλεκτροκίνηση βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο όσον αφορά τόσο στην ανάπτυξη των υποδομών φόρτισης σε δημόσιους χώρους όσο και στην ύπαρξη ενός ολοκληρωμένου ρυθμιστικού πλαισίου, αν και έχει δημοσιευθεί 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 το νόμο ν.4001/2011 περί αδειών προμήθειας ενέργειας για την παροχή υπηρεσιών φόρτισης ηλεκτροκίνητων οχημάτων.

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

Η προώθηση της διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων στην ελληνική αγορά θα μπορούσε να ενισχυθεί, σε αρχικό τουλάχιστον επίπεδο, από τη χρησιμοποίηση σημαντικού αριθμού ηλεκτρικών οχημάτων σε δημόσιες ή ιδιωτικές εταιρίες. Ειδικότερα, για την είσοδο ηλεκτρικών οχημάτων στο δημόσιο τομέα, είναι ιδιαίτερα ευνοϊκή 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 ηλεκτρικά.

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

- Όλα τα BEV, ως οχήματα με μηδενικές εκπομπές ρύπων, απαλλάσσονται από τα τέλη κυκλοφορίας, ενώ τα REEV και 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]
- 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 αυτά.

### 3.2 Νέοι ενεργειακοί φορείς

Η ομαλή ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας απαιτεί την ανάπτυξη νέων ενεργειακών φορέων, οι οποίοι περιγράφονται παρακάτω (όπως καθορίστηκαν στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος MERGE [10]):

- Ιδιοκτήτης Ηλεκτρικού Οχήματος: Θα έχει στην κατοχή του ένα ηλεκτρικό όχημα, με την απαίτηση το επίπεδο φόρτισής του να επαρκεί για την κάλυψη των καθημερινών αναγκών του.
- Ιδιοκτήτες Συσσωρευτών: Για να παρακαμφθεί το εμπόδιο του υψηλού κόστους των μπαταριών, που λειτουργεί ανασταλτικά στη διάδοση των ηλεκτρικών οχημάτων, είναι δυνατό να αναπτυχθούν νέοι φορείς, οι οποίοι θα αναλάβουν το ρίσκο της κατοχής, εγγύησης και ελέγχου των μπαταριών, ώστε να

διαχωριστεί το κόστος της μπαταρίας από αυτό του οχήματος. Έτσι, θα μπορεί ο μελλοντικός ιδιοκτήτης να αγοράζει το ηλεκτρικό όχημα χωρίς μπαταρία, την οποία στη συνέχεια θα ενοικιάζει από αυτόν το νέο φορέα.

- Διαχειριστής Σημείου Φόρτισης (ΔΣΦ): Ο ρόλος του συγκεκριμένου φορέα δύναται να είναι διπλός: ως τελικός πελάτης ο ΔΣΦ μπορεί να αγοράζει την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για να φορτίσει το ηλεκτρικό όχημα που έχει στη κατοχή του ή 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: Είναι παρόμοιος με το διαχειριστή σημείου φόρτισης, χωρίς όμως να παρέχει υπηρεσίες φόρτισης και διαχείρισης των ενεργειακών αναγκών, τις οποίες βέβαια μπορεί να αναθέσει σε ένα διαχειριστή σημείου φόρτισης με σύμβαση υπεργολαβίας. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι ο ιδιοκτήτης ενός εμπορικού κέντρου, όπου η στάθμευση δεν είναι η κύρια λειτουργία του.
- Προμηθευτής-Συναθροιστής Ηλεκτρικής Ενέργειας (Π-ΣΗΟ ή διεθνώς EVS-Α): Είναι υπεύθυνος για την προμήθεια ενέργειας από την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και τη μεταπώλησή της στους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων, με διμερή σύμβαση που παρέχει πρόσβαση σε συγκεκριμένα σημεία φόρτισης. Η καινοτομία αυτού του φορέα έγκειται στο γεγονός ότι οι συμβάσεις δεν περιορίζονται σε μια συγκεκριμένη τοποθεσία αλλά προσφέρεται η ελευθερία επιλογής μεταξύ διαφόρων σημείων φόρτισης. Ο φορέας αυτός λειτουργεί ως λιανοπωλητής και η επιχείρησή του πρέπει να ορίζεται ως ανταγωνιστική δραστηριότητα, αποδεδειγμένη από άλλες λειτουργίες του συστήματος ηλεκτρικής ισχύος. Οι προμηθευτές επιδιώκουν τη σύναψη πολλών συμβάσεων με ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων, γεγονός που θα τους προσφέρει μελλοντικά τη δυνατότητα να παρέχουν επικουρικές υπηρεσίες στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της Vehicle-to-Grid (V2G) λειτουργίας.

- Πάροχος Τεχνολογίας Μετάδοσης Πληροφοριών για Ηλεκτρικά Οχήματα: Η ελεγχόμενη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων απαιτεί την ανταλλαγή σημαντικής ποσότητας πληροφοριών, γεγονός το οποίο δίνει την ευκαιρία σε εταιρίες εξειδικευμένες σε τεχνολογίες μεταβίβασης πληροφοριών να εμπορευτούν την τεχνογνωσία τους. Ρόλος του νέου αυτού φορέα είναι η αξιόπιστη και ασφαλής μεταφορά πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο.

### 3.3 Φάσεις διείσδυσης

Η ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να γίνει σταδιακά, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η εξυπηρέτηση αυτού του επιπρόσθετου φορτίου χωρίς να διαταράσσεται η ομαλή λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου. Οι τρεις φάσεις ενσωμάτωσης των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι εξής (όπως καθορίστηκαν στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος MERGE) :

- Καταλυτική φάση,
- Φάση εδραίωσης,
- Προχωρημένη φάση,

οι οποίες αναλύονται παρακάτω:

- Καταλυτική φάση

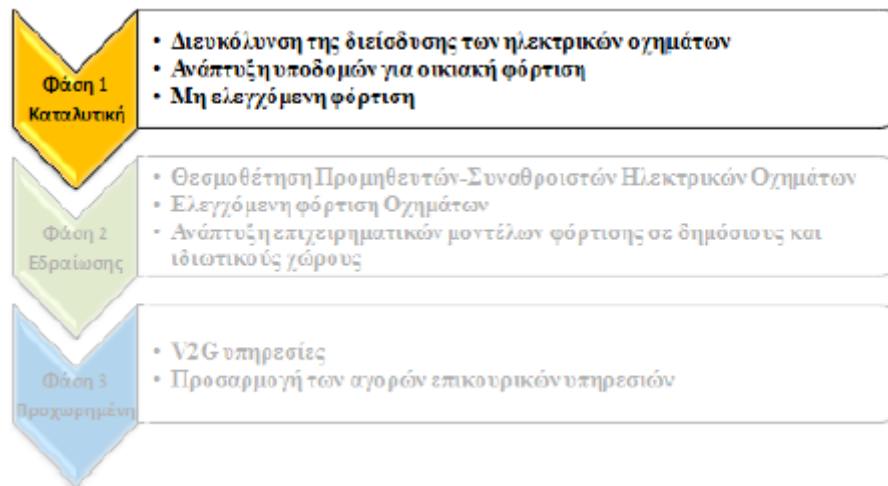
Βασικός ανασταλτικός παράγοντας στην ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ανασφάλεια των χρηστών για την αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων και την επάρκεια σταθμών φόρτισης. Αναμένεται λοιπόν, στο βραχυπρόθεσμο μέλλον, η οικιακή φόρτιση κατά τη διάρκεια της νύχτας να είναι ο πιο συνηθισμένος τρόπος φόρτισης. Στόχος αυτής της φάσης είναι η άμβλυνση αυτού του ανασταλτικού παράγοντα και η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των ηλεκτρικών οχημάτων, τα οποία αντιμετωπίζονται ως επιπρόσθετο συμβατικό φορτίο (Εικόνα 3-1).

Καθώς δεν υπάρχει η δυνατότητα άμεσου ελέγχου της διαδικασίας της φόρτισης, ο EVS-A μπορεί έμμεσα να επηρεάσει τη φόρτιση προσφέροντας οικονομικά κίνητρα στους χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων, ώστε να πραγματοποιούν τη φόρτιση σε συγκεκριμένες ώρες με χαμηλή κατανάλωση. Για αυτό το σκοπό είναι απαραίτητος ηλεκτρονικός μετρητής για την

εγκατάσταση του οποίου προτείνεται να είναι υπεύθυνος ο διαχειριστής του συστήματος διανομής.

Ωστόσο, αυτή η τακτική μπορεί να προκαλέσει αιχμές φορτίου στο σύστημα, οι οποίες μπορεί να είναι ανεπαίσθητες για μικρά επίπεδα διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων, αλλά για μεγαλύτερα να προκαλέσουν πρόωρες αναβαθμίσεις του δικτύου, για τις οποίες ο διαχειριστής του συστήματος διανομής θα πρέπει να αποζημιωθεί.

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



Εικόνα 3-1 Πρώτη φάση διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων - Καταλυτική Φάση [11]

- Φάση εδραίωσης

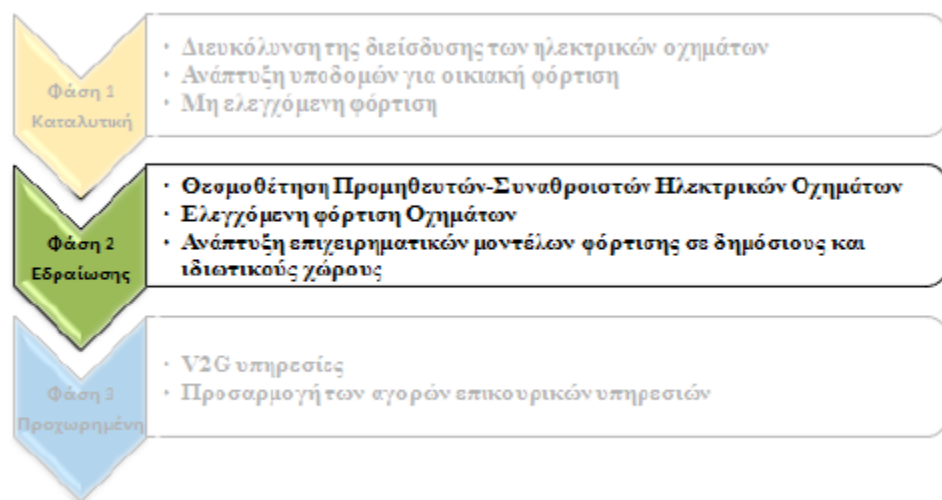
Η φάση αυτή θα ξεκινήσει όταν η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων γίνει σημαντικά αισθητή, γεγονός που εκτιμάται ότι θα συμβεί στο μεσοπρόθεσμο διάστημα. Για την κάλυψη των αυξημένων ενεργειακών αναγκών των ηλεκτρικών οχημάτων απαιτείται η φόρτιση σε δημόσιους χώρους ή σε κατάλληλα διαμορφωμένους σταθμούς φόρτισης. Στη φάση αυτή η διαχείριση της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι απαραίτητη για την ομαλή λειτουργία του δικτύου (για λόγους που θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο). Οι EVS-A θα είναι υπεύθυνοι για την εξυπηρέτηση και τον έλεγχο της ζήτησης των οχημάτων, και οι ρυθμιστικές διατάξεις θα πρέπει να τους επιτρέπουν την ομαλή είσοδο στην αγορά ενέργειας, ώστε να είναι ικανοί να διαχειρίζονται συμβάσεις με ένα μεγάλο αριθμό οχημάτων που θα είναι ταυτόχρονα



συνδεδεμένα σε διάφορες περιοχές του δικτύου. Επιπλέον, μέσω της διαχείρισης της φόρτισης θα έχουν τη δυνατότητα να παρέχουν επικουρικές υπηρεσίες στο δίκτυο μεταβάλλοντας το ρυθμό φόρτισης των οχημάτων.

Σημαντικό ρόλο στη φάση αυτή διαδραματίζουν και οι διαχειριστές του σημείου φόρτισης, οι οποίοι θα μπορούν να αγοράζουν ενέργεια και στη συνέχεια να τη μεταπωλούν στους ιδιοκτήτες οχημάτων. Οι αρμοδιότητές τους θα πρέπει σαφώς να καθορίζονται από αυστηρές νομοθετικές ρυθμίσεις.

Δεν αναμένεται, επίσης, ομοιόμορφη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων σε κάθε περιοχή, και αυτό ίσως έχει ως συνέπεια την αναγκαιότητα επενδύσεων για την επέκταση και την ενίσχυση του δικτύου. Βάσει των σημερινών συνθηκών, το επιπλέον αυτό κόστος αναμένεται να κατανεμηθεί ομοιόμορφα σε όλους τους καταναλωτές. Για να αποφευχθεί αυτό, μια λύση θα ήταν η επιβολή διαφορετικών χρεώσεων για χρήση του συστήματος, ανάλογα με την τοποθεσία, γεγονός το οποίο θα μπορούσε να λειτουργήσει ανασταλτικά στην επιλογή φόρτισης των μπαταριών σε μέρη και ώρες που το δίκτυο είναι ήδη επιβαρυνόμενο.



Εικόνα 3-2 Δεύτερη φάση διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων - Φάση Εδραίωσης [11]

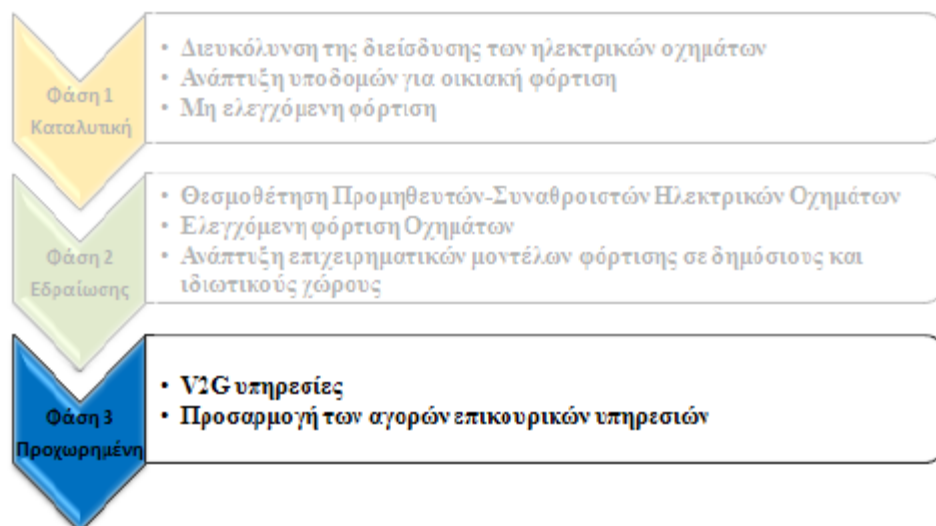
- Προχωρημένη Φάση

Η φάση αυτή ανταποκρίνεται σε μακροπρόθεσμα και ιδιαίτερα αισιόδοξα σενάρια. Στην προχωρημένη φάση εκτιμάται πως τα ηλεκτρικά οχήματα θα λειτουργούν ως διασπαρμένες αποθηκευτικές μονάδες, και ομοίως με τη φάση εδραίωσης, υπό την καθοδήγηση του EVS-A θα παρέχουν επικουρικές υπηρεσίες - οι οποίες θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο -, συμβάλλοντας

στην αποδοτικότερη λειτουργία του δικτύου και στην αύξηση της διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Η υλοποίηση της υπηρεσίας αυτής απαιτεί την ανάπτυξη σύνθετων μεθόδων ελέγχου και περίπλοκες υποδομές επικοινωνίας. Ο EVS-A θα είναι σε θέση να παρέχει στο διαχειριστή του συστήματος συγκεκριμένες υπηρεσίες σύμφωνα με όρους που θα θεσπίζονται μέσω του κώδικα δικτύου και ενός ρυθμιστικού πλαισίου.

Ιδιαίτερα σημαντικά ζητήματα είναι η καταπόνηση των μπαταριών λόγω της μη εξειδικευμένης χρήσης τους για προσφορά ενέργειας στο δίκτυο, που συνεπάγεται την ανάγκη διευθέτησης θεμάτων σχετικά με την απόδοσή τους, και η ενσωμάτωση έξυπνων μετρητών στο δίκτυο, οι οποίοι θα βοηθήσουν τους διαχειριστές του δικτύου σε μελέτες σχετικές με τη βελτίωση της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών τους.



Εικόνα 3-3 Τρίτη φάση διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων - Προχωρημένη Φάση

[11]

## 4. Έξυπνη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων

### 4.1 Αναγκαιότητα

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η φάση εδραίωσης σηματοδοτεί ένα σημείο στην ένταξη των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας όπου θα είναι απαραίτητος ο έλεγχος της φόρτισής τους. Βάσει έρευνας της Eurelectric[16], το 90% της φόρτισης αναμένεται να λαμβάνει χώρα στην οικία των καταναλωτών, σε χώρους στάθμευσης κοντά στην οικία ή στους εργασιακούς χώρους. Συνεπώς, τα δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης σε αστικές ή εμπορικές περιοχές θα είναι πιθανώς τα πρώτα που θα επηρεαστούν από την αύξηση του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων.

Για τον έλεγχο της ικανότητας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας να υποστηρίξει το επιπλέον φορτίο που θα εισάγουν τα ηλεκτρικά οχήματα, απαιτείται να εξετασθεί η επίδραση του φορτίου αυτού σε δύο στοιχεία του συστήματος: στη ζήτηση ενέργειας (kWh) και στη ζήτηση ισχύος (kW). Η ανάλυση της Eurelectric καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η επιπλέον ενεργειακή ζήτηση λόγω του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων είναι διαχειρίσιμη από το δίκτυο. Ακόμα και η περίπτωση της πλήρους μετάβασης σε ηλεκτρικά οχήματα θα προσθέσει 802 TWh ή αλλιώς θα προκαλέσει 24.3% αύξηση στη συνολική ζήτηση ενέργειας. Ωστόσο, ανάλογα με την ώρα και την ισχύ της φόρτισης, τα ηλεκτρικά οχήματα μπορεί να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στην αιχμή φορτίου (GW) σε συγκεκριμένες ώρες και τοποθεσίες.

Η τυπική χρήση ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου θα περιλαμβάνει την κίνηση του κατά τη διάρκεια της μέρας και τη φόρτισή του το βράδυ, όταν οι εργαζόμενοι θα επιστρέφουν στην οικία τους (εκτός και αν φόρτισαν το αυτοκίνητο τους στο χώρο εργασίας). Οπότε, το αυξημένο φορτίο λόγω των ηλεκτρικών οχημάτων θα συμπίπτει με τη βραδινή αιχμή φορτίου στις κατοικημένες περιοχές και θα δημιουργεί και μια

πρωινή αιχμή όταν οι οδηγοί σταθμεύουν στην εργασία τους, κυρίως στις εμπορικές και βιομηχανικές περιοχές.

Υπό αυτές τις συνθήκες λοιπόν, η μη ελεγχόμενη φόρτιση θα είχε ως αποτέλεσμα ιδιαίτερα μεγάλες αιχμές για λίγες ώρες μες στην ημέρα, με το δίκτυο να μένει ανεπηρέαστο τις υπόλοιπες ώρες. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να έχει έντονες επιπτώσεις που αφορούν σε όλους τους φορείς: συμφόρηση του δικτύου διανομής λόγω των αιχμών φορτίου, αυξημένο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας, ακριβές ενισχύσεις του δικτύου, καθώς και ευρύτερες κοινωνικές και περιβαλλοντικές συνέπειες. Τέτοιου είδους προβλήματα θα μπορούσαν να ξεπεραστούν εάν υπήρχε ενεργός έλεγχος της φόρτισης, συμβάλλοντας στην αποτελεσματικότερη χρήση των υφιστάμενων δυνατοτήτων του δικτύου.

Η έξυπνη φόρτιση θα μπορούσε να καταστήσει δυνατή την αποφυγή των περισσότερων ενισχύσεων του δικτύου και του σχετιζόμενου κόστους, και την εκμετάλλευση της ισχύος και της δυναμικής αποθηκευτικής ικανότητας των ηλεκτρικών οχημάτων. Θα μπορούσε, επίσης, να προγραμματιστεί η φόρτιση των οχημάτων όταν τα κτίρια παράγουν περισσότερη ενέργεια από ότι καταναλώνουν, όπως για παράδειγμα το μεσημέρι που υπάρχει αρκετή ηλιακή ενέργεια διαθέσιμη.

## 4.2 Ορισμός

Βάσει του Κοινού Ευρωπαϊκού Οργανισμού Τυποποίησης CEN-CENELEC, «Η έξυπνη φόρτιση ενός ηλεκτρικού οχήματος είναι όταν ο κύκλος φόρτισης μπορεί να μεταβληθεί από εξωτερικά συμβάντα, επιτρέποντας προσαρμοστικές συνήθειες φόρτισης, παρέχοντας στο ηλεκτρικό όχημα την ικανότητα να ενσωματώνεται σε όλο το σύστημα τροφοδοσίας με τρόπο φιλικό προς το δίκτυο και το χρήστη. Η έξυπνη φόρτιση πρέπει να διευκολύνει την ασφάλεια (αξιοπιστία) της προσφοράς και ταυτόχρονα να ικανοποιεί τους περιορισμούς και τις απαιτήσεις κινητικότητας του χρήστη. Για την επίτευξη των στόχων αυτών με ασφαλή, αξιόπιστο, βιώσιμο και αποτελεσματικό τρόπο, πρέπει να ανταλλάσσονται πληροφορίες μεταξύ των διαφόρων φορέων.» [17]

Επιπλέον, η έξυπνη φόρτιση περιλαμβάνει «τη φόρτιση ενός ηλεκτρικού οχήματος ελεγχόμενης από αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ δύο ή περισσότερων φορέων για τη βελτιστοποίηση όλων των απαιτήσεων των πελατών, καθώς και της διαχείρισης του δικτύου και της παραγωγής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όσον αφορά στο κόστος, τους περιορισμούς, την αξιοπιστία και την ασφάλεια». [17]

Σε κάθε περίπτωση, η έξυπνη φόρτιση καθοδηγείται από:

- Σήματα τιμής, όπου τα ευέλικτα φορτία των ηλεκτρικών οχημάτων ανταποκρίνονται στη δυναμική ωριαία τιμή της ενέργειας, στην τιμή της μέγιστης στιγμιαίας ζήτησης ισχύος, κ.ά.
- Σήματα ελέγχου, σύμφωνα με την εκάστοτε κατάσταση του δικτύου και της αγοράς (αίτημα για προσωρινή μείωση στη ζήτηση ισχύος, ανοχή σε αύξηση της ζητούμενης ισχύος, κ.ά.)

Ο μηχανισμός ελέγχου μπορεί να ενεργοποιηθεί από το δίκτυο, από το σημείο φόρτισης ή από το ίδιο το όχημα, ενώ ένα σύστημα επικοινωνίας με το δίκτυο επιτρέπει στη διαδικασία φόρτισης να λαμβάνει υπόψη τις πραγματικές δυνατότητες του δικτύου (οι έξυπνοι αλγόριθμοι μπορούν να διανεμηθούν και στα τρία επίπεδα), καθώς και τις προτιμήσεις των πελατών. Τα σήματα τιμών ή ελέγχου μπορούν να μεταδίδονται μέσω υποδομής ICT (Information Communication Technology – Τεχνολογία Επικοινωνιών Πληροφοριών) (π.χ. ευφύες σύστημα μέτρησης, επικοινωνία μεταξύ σταθμών φόρτισης και συστημάτων back-end) προκειμένου να επιτραπεί στους αλγορίθμους να λάβουν υπόψη τους περιορισμούς στην παραγωγή και στο δίκτυο, καθώς και να δοθεί η δυνατότητα στους πελάτες να επωφεληθούν από τις ευκαιρίες τιμών. Η έξυπνη χρέωση θα πρέπει να σέβεται τις ανάγκες του πελάτη και τις απαιτήσεις φόρτισης σχετικά με τη διαθεσιμότητα οχημάτων, εφόσον δεν υπάρχουν κρίσιμοι περιορισμοί από το δίκτυο ή την προσφορά ενέργειας.

### 4.3 Οφέλη

Η έξυπνη χρέωση μπορεί να αποτελέσει ευκαιρία για όλους τους εμπλεκόμενους φορείς:

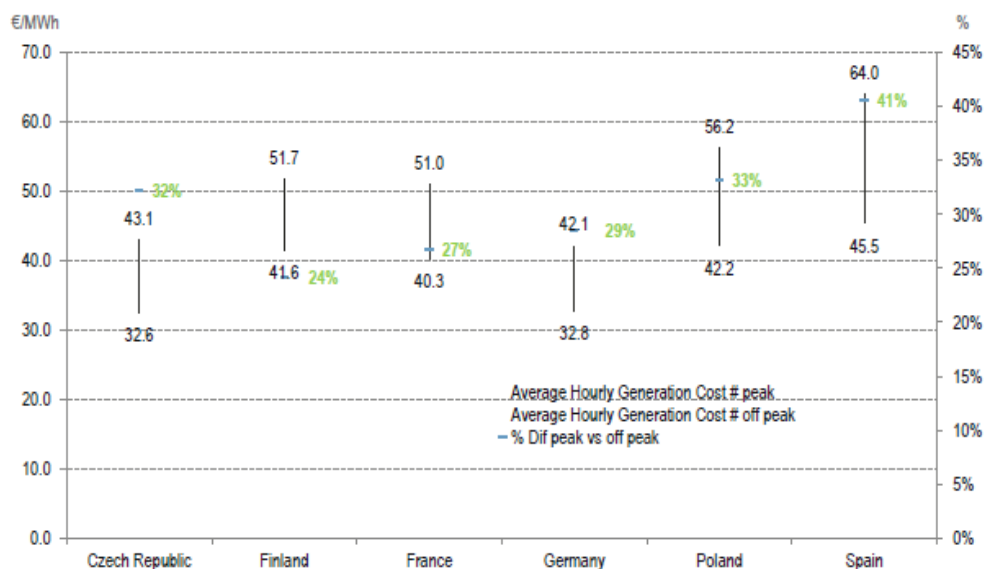
- Πελάτες: ικανοποίηση, μειωμένο κόστος ενέργειας, οικολογική αξία,
  - Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας: βελτιστοποίηση της παραγωγικής ικανότητας και της χωρητικότητας του δικτύου, απόδοση κόστους με την ελαχιστοποίηση του κόστους ενίσχυσης του δικτύου, διευκόλυνση της ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας,
  - Κοινωνία: μείωση των τοπικών και παγκόσμιων εκπομπών CO<sub>2</sub> και των συναφών δαπανών, αύξηση της ενεργειακής απόδοσης και της κοινωνικής ευημερίας.
- Μεγιστοποίηση της διευκόλυνσης των πελατών με παράλληλη μείωση του κόστους

Προκειμένου να εφαρμοστεί η έξυπνη φόρτιση, είναι σημαντική η ενημέρωση των πελατών για τον ενεργό ρόλο που μπορούν να διαδραματίσουν στην αποφυγή της αύξησης του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι πελάτες πρέπει να γνωρίζουν ότι τα αυτοκίνητά τους ενδέχεται να φορτίζονται με καθυστέρηση ή ότι η μπαταρία ενδέχεται να μην είναι πλήρως φορτισμένη στην αρχή ενός ταξιδιού αλλά ότι δεν έχει κατ' ανάγκην αντίκτυπο στις ανάγκες κινητικότητας τους ενώ μπορεί να βελτιώσει την οικονομική και περιβαλλοντική επίδοση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η αποδοχή από τον πελάτη θα εξαρτηθεί από τους φορείς που θα σέβονται ένα σύνολο απαιτήσεων που ορίζονται από τον πελάτη. Οι πελάτες μπορούν για παράδειγμα να ρυθμίσουν το χρόνο αναχώρησης του αυτοκινήτου ή το απαιτούμενο απόθεμα χωρητικότητας μπαταρίας. Στη συνέχεια, ο σταθμός φόρτισης καθορίζει την τρέχουσα κατάσταση της μπαταρίας και υπολογίζει την ενέργεια που απαιτείται για την επίτευξη της επιθυμητής κατάστασης.

Επιπλέον, οι πελάτες θα μπορούσαν να αποδεχθούν ευκολότερα μια υπηρεσία έξυπνης φόρτισης εάν είναι οικονομικά συμφέρουσα. Πράγματι, η έξυπνη χρέωση θα μπορούσε να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση κόστους εάν οι πελάτες χρησιμοποιούν φθηνότερο ηλεκτρικό ρεύμα σε ώρες «εκτός αιχμής».

Αυτό είναι εφικτό όταν εφαρμόζονται χρονικά μεταβαλλόμενες τιμές που μπορούν να παροτρύνουν τους οδηγούς να φορτίζουν σε ευνοϊκότερους για τη λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας χρόνους, όπως για παράδειγμα κατά τη διάρκεια της νύκτας. Οι πελάτες μπορούν να λάβουν υπόψη το σήμα της τιμής ή διαφορετικά να αποφασίσουν να καταβάλουν υψηλότερη τιμή ως αποτέλεσμα.

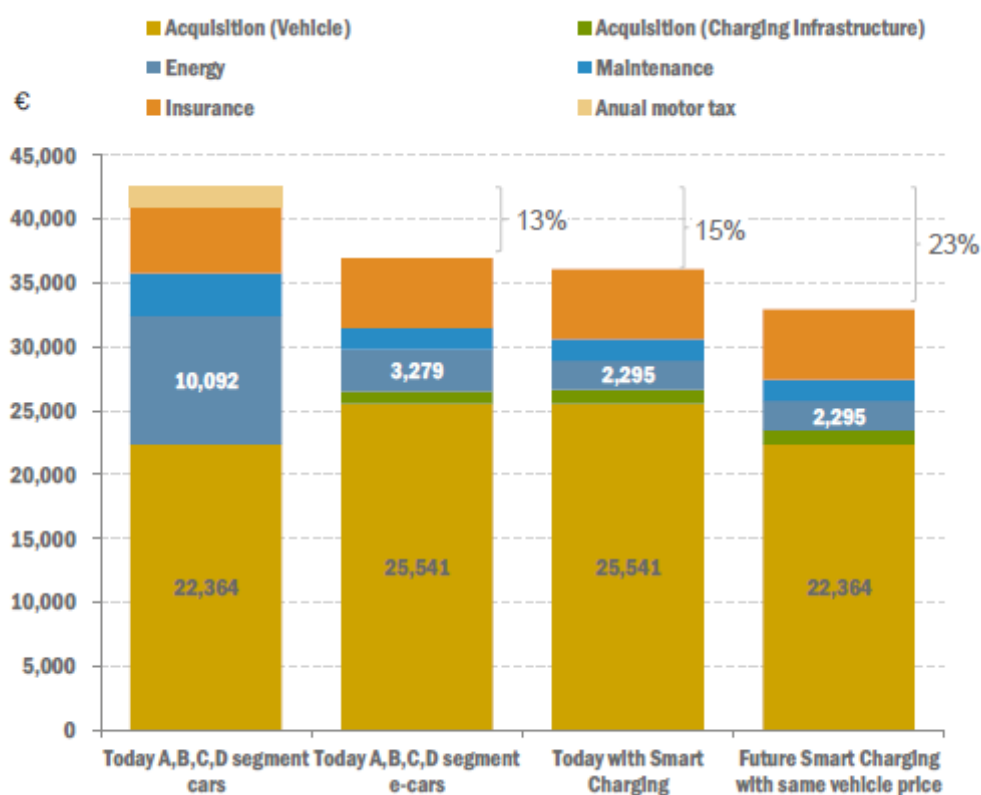
Στην εικόνα 4-1 παρουσιάζονται οι εξοικονομήσεις κόστους σε έξι κράτη της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Τσεχία, Φινλανδία, Γαλλία, Γερμανία, Πολωνία, Ισπανία) όταν η φόρτιση μετατοπίζεται σε περιόδους εκτός αιχμής. Παρατηρείται εξοικονόμηση μεταξύ 24% και 41%, η οποία οφείλεται στη μεγάλη διαφορά τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας ανάμεσα στις ώρες αιχμής και χαμηλής ζήτησης.



Εικόνα 4-1 % Εξοικονόμηση κόστους βάσει των τιμών αιχμής και χαμηλής ζήτησης (€/MWh) σε έξι κράτη της ΕΕ [16]

Σε οποιαδήποτε στρατηγική έξυπνης φόρτισης βέβαια, ο πελάτης έχει τον έλεγχο, είτε άμεσα είτε έμμεσα μέσω αυτοματοποιημένων συστημάτων. Οι πελάτες θα πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να παρακάμψουν οποιοδήποτε αυτόματο σήμα ελέγχου φορτίου εάν χρειάζονται άμεση φόρτιση της μπαταρίας του οχήματός τους.

Πέραν της άμεσης εξοικονόμησης κόστους λόγω χαμηλότερων τιμών ενέργειας, οι κάτοχοι ηλεκτρικών οχημάτων μπορούν να επωφεληθούν και από χαμηλότερο συνολικό κόστος ιδιοκτησίας. Σύμφωνα με την εικόνα 4-2, εκτός από τη μείωση του λογαριασμού ηλεκτρικής ενέργειας στο 1/3 λόγω της μετάβασης από συμβατικό αυτοκίνητο σε ηλεκτρικό, η έξυπνη φόρτιση επιφέρει περαιτέρω μείωση κατά 30%. Κατά αυτόν τον τρόπο, αν και η τιμή αγοράς ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου το 2014 ήταν 14% υψηλότερη σε σχέση με την αντίστοιχη ενός συμβατικού, σε βάθος δεκαετίας καταλήγει να είναι πιο συμφέρουσα επιλογή.



Εικόνα 4-2 Εκτιμώμενο συνολικό κόστος ιδιοκτησίας ηλεκτρικών οχημάτων και οχημάτων με μηχανή εσωτερικής καύσης σε βάθος δεκαετίας(€) [16]

Αν και η έξυπνη φόρτιση απαιτεί την εγκατάσταση νέων υποδομών, το κόστος τους υπερκαλύπτεται από την εξοικονόμηση κόστους που περιγράφηκε προηγουμένως.



- Οφέλη συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας για την παραγωγή και τα δίκτυα:

Τα ηλεκτρικά οχήματα είναι ένας νέος τύπος κινητού και μεταβλητού φορτίου που θα είναι κατά κανόνα συνδεδεμένο στα δίκτυα διανομής σε χαμηλές τάσεις. Καθώς τα ηλεκτρικά οχήματα δεν είχαν ληφθεί υπόψη στον αρχικό σχεδιασμό των δικτύων, θα μπορούσαν να προκαλέσουν σοβαρούς περιορισμούς και υπερφορτώσεις. Η έξυπνη φόρτιση θα χρειαστεί επομένως να λάβει υπόψη τους περιορισμούς του δικτύου, ώστε να αποφευχθεί η υπερφόρτωσή του.

Όπως προαναφέρθηκε, ελλοχεύει σοβαρός κίνδυνος όταν η αιχμή λόγω της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων συμπίπτει με την ήδη υπάρχουσα αιχμή του δικτύου. Η κατάσταση αυτή μπορεί να προκαλέσει πτώσεις τάσης ή θερμική καταπόνηση, τα οποία μπορεί να οδηγήσουν σε γενικότερη καταπόνηση του δικτύου ή τελικά στη διακοπή της λειτουργίας του.

Καθώς το δίκτυο διανομής σχεδιάστηκε με την ικανότητα να μεταφέρει τη μέγιστη δυνατή ισχύ οποιαδήποτε χρονική στιγμή, οι περίοδοι που αυτό δεν συμβαίνει συνεπάγονται υπολειτουργία του δικτύου. Στο υποθετικό σενάριο της πλήρους μετάβασης σε ηλεκτρικά οχήματα μέχρι το 2035, η μη ελεγχόμενη φόρτιση θα μπορούσε να επιφέρει αύξηση μέχρι και 30% στο φορτίο αιχμής ανάλογα με την τιμή του συντελεστή φορτίου αιχμής (  $\text{coefficient peak load - CPL} = \text{φορτίο αιχμής (GW)}/\text{μέσο φορτίο (GW)}$  ). Ωστόσο με την εφαρμογή έξυπνης φόρτισης, η αύξηση αυτή μπορεί είναι μηδενική, με παράλληλη μείωση του συντελεστή φορτίου αιχμής κατά 17.4% που συνεπάγεται αποδοτικότερη χρήση του δικτύου.

Βελτιστοποιώντας, λοιπόν, τη χρησιμοποίηση του δικτύου, μπορούν να αποφευχθούν και τα επιπλέον κόστη για την ενίσχυση του δικτύου. Σε κτιριακό επίπεδο η προσθήκη του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων ίσως να απαιτούσε την ενίσχυση της γραμμής σύνδεσης με το δίκτυο διανομής και τη συνδρομή για υψηλότερη μέγιστη ονομαστική ισχύ. Σε επίπεδο δικτύου διανομής, τα επενδυτικά κόστη για τον διαχειριστή του θα προέρχονταν από την ενίσχυση των γραμμών και των μεταφορών, συν το μερίδιο που του αναλογεί βάσει κανονισμών από το κόστος σύνδεσης των κτιρίων στο δίκτυο.

Μια μελέτη που έγινε στη Γαλλία από το ΕΤΠΑ (Ευρωπαϊκό Ταμείο Περιφερειακής Ανάπτυξης) κατέληξε στα εξής κόστη χωρίς έξυπνη φόρτιση και την εξοικονόμηση λόγω της έξυπνης φόρτισης (Πίνακας 4-1):

<b>Συνολικό κόστος ενίσχυσης του δικτύου χαμηλής τάσης για κάθε εκατομμύριο ηλεκτρικών οχημάτων, όσον αφορά σε:</b>	<b>Κόστος χωρίς έξυπνη φόρτιση</b>	<b>Μείωση κόστους λόγω της έξυπνης φόρτισης</b>
Φόρτιση σε μεμονωμένες οικίες	200 Μ€	200 Μ€
Φόρτιση σε πολυκατοικίες ή σε επιχειρηματικά κτίρια	650 Μ€	450 Μ€
Δημόσιοι σταθμοί φόρτισης στους δρόμους και σε χώρους στάθμευσης	240 Μ€	120 Μ€

**Πίνακας 4-1 Κόστος ενίσχυσης δικτύων χαμηλής τάσης και μείωση κόστους με έξυπνη φόρτιση (εκατομμύρια €) [ERDF]**

Λαμβάνοντας υπόψη του κύριους υποσταθμούς και τις γραμμές μέσης τάσης, η ενίσχυσή τους χωρίς έξυπνη φόρτιση θα απαιτούσε 80 Μ€ για κάθε εκατομμύριο ηλεκτρικών οχημάτων να προστεθούν στο κόστος του δικτύου χαμηλής τάσης. Η έξυπνη φόρτιση θα μπορούσε να μειώσει το μεγαλύτερο μέρος αυτού του κόστους, και συνεπώς τα κόστη που αντιστοιχούν στο διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς.

Επιπροσθέτως, με την έξυπνη φόρτιση, οι σχετιζόμενες ενεργειακές απαιτήσεις είναι πιο ομοιόμορφα κατανεμημένες σε όλο το σύστημα επιτρέποντας την καλύτερη δυνατή χρήση της διαθέσιμης παραγωγικής ικανότητας. Επομένως, μειώνει την ανάγκη για δαπανηρές μονάδες παραγωγής που χρησιμοποιούνται σε ώρες αιχμής φορτίου.

Η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, λόγω της μεταβλητότητας τους, μπορούν να δημιουργήσουν πλεονάζουσα ενεργειακή απόδοση, προκαλώντας σημαντικές αιχμές στο σύστημα ισχύος. Τα ηλεκτρικά οχήματα με επαναφορτιζόμενες μπαταρίες και συνεπώς με εγγενή χωρητικότητα αποθήκευσης αντιπροσωπεύουν μια μορφή ζήτησης που θα μπορούσε να συμβάλει στην ευελιξία του συστήματος. Με την έξυπνη φόρτιση, τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν τη δυνατότητα να μεταφέρουν τα φορτία τους σε περιόδους χαμηλής ζήτησης ή να αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια για μεταγενέστερη χρήση. Αυτός ο ελεγχόμενος τρόπος φόρτισης θα μπορούσε συνεπώς να επιτρέψει την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με οικονομικά αποδοτικό τρόπο, προς όφελος τόσο των πελατών όσο και των παραγωγών. Οι πελάτες θα μπορούν να επωφεληθούν από τις πιο ελκυστικές τιμές λόγω της αφθονίας των

ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως είναι η αιολική ενέργεια τη νύχτα ή η ηλιακή ενέργεια κατά τη διάρκεια της ημέρας. Οι παραγωγοί θα ωφεληθούν επίσης καθώς θα έχουν την ευκαιρία να πουλήσουν την παραγωγή τους ανά πάσα στιγμή.

- Αύξηση της βιωσιμότητας για την κοινωνία γενικότερα:

Η έξυπνη φόρτιση θα μπορούσε να συμβάλει στην ταχύτερη ανάληψη της ηλεκτρικής κινητικότητας, οδηγώντας σε σημαντικά κοινωνικά οφέλη, όπως έχει αναλυθεί στο πρώτο κεφάλαιο. Συγκεκριμένα, η έξυπνη φόρτιση θα προσφέρει ένα πρόσθετο όφελος, επιτυγχάνοντας εκπομπές κοντά στο μηδέν λόγω της βελτιστοποιημένης φόρτισης. Εάν τα οχήματα συντονιστούν να φορτίζουν σε περιόδους χαμηλότερης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, μπορούν να βελτιστοποιήσουν τη χρήση της υφιστάμενης χωρητικότητας και να χρησιμοποιούν λιγότερους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής εκτός ωρών αιχμής. Επιπλέον, με την έξυπνη φόρτιση, ο χρόνος φόρτισης μπορεί να συντονιστεί για να συμπέσει με την διαθέσιμη ανανεώσιμη ενέργεια, όπως ο άνεμος τη νύχτα, ή η ηλιακή ενέργεια το μεσημέρι, προσφέροντας περαιτέρω οφέλη όσον αφορά στις μειώσεις εκπομπών.

## 5. Αλγόριθμοι έξυπνης φόρτισης

### 5.1 Κατηγοριοποίηση προβλημάτων βελτιστοποίησης

Για την αξιοποίηση των υποδομών έξυπνης φόρτισης απαιτείται η ανάπτυξη αλγορίθμων, πάνω στους οποίους θα βασίζεται η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων. Με τους αλγορίθμους αυτούς επιτυγχάνεται η επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης, τα οποία - βάσει του στόχου τους - μπορεί να σχετίζονται με τα εξής [18]:

- Το δίκτυο
- Τον EVS-A
- Τον πελάτη

- Δίκτυο

Με τον έλεγχο και το συντονισμό της φόρτισης, μια «valley-filling» στρατηγική μπορεί να μετριάσει την έλλειψη ισορροπίας με τη μετατόπιση μεγάλων απαιτήσεων ισχύος σε ώρες χαμηλής ζήτησης. Με αυτόν τον τρόπο, η ισορροπία προσφοράς-ζήτησης της ενεργού ισχύος συμβάλλει στη διατήρηση μια σταθερής συχνότητας δικτύου. Επιπλέον, αν η παραγωγή και η κατανάλωση αέργου ισχύος είναι εξισορροπημένες, μπορούν να αποτραπούν μεγάλες διακυμάνσεις της τάσης. Τέλος, η μείωση του προσδόκιμου ζωής των μετασχηματιστών (λόγω των υψηλών θερμοκρασιών) μπορεί να αντισταθμιστεί με την καλύτερη συντήρηση των μονωτήρων διέλευσης (λόγω της μικρότερης διακύμανσης φορτίου).

Τα προβλήματα βελτιστοποίησης λοιπόν, μπορούν να στοχεύουν στη:

- *μείωση της διακύμανσης φορτίου (Load Flattening)*: Μπορεί να επιτευχθεί είτε άμεσα με την ελαχιστοποίηση του συνολικού φορτίου ή την ελαχιστοποίηση της διακύμανσης της τάσης, είτε έμμεσα με την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους (κόστους παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας). Έχει επίσης αποδειχθεί ότι, δεδομένου ότι όλα τα

φορτία είναι συνδεδεμένα σε ένα μόνο ζυγό, τα προβλήματα ελαχιστοποίησης διακύμανσης φορτίου, ελαχιστοποίησης απωλειών ισχύος και μεγιστοποίησης του συντελεστή φορτίου είναι ισοδύναμα. Επίσης, η ισοδυναμία της ελαχιστοποίησης της διακύμανσης της τάσης και της μεγιστοποίησης του συντελεστή φορτίου είναι ανεξάρτητα της τοπολογίας.

- *ρύθμιση της συχνότητας*: Τα ηλεκτρικά οχήματα είναι σε θέση να παρουσιάσουν ταχεία απόκριση σε αλλαγές της συχνότητας, και θεωρούνται συνεπώς κατάλληλα για την παροχή υπηρεσιών ρύθμισης συχνότητας. Το πρόβλημα ρύθμισης συχνότητας μπορεί να αντιμετωπιστεί και ως πρόβλημα εξισορρόπησης ενεργού ισχύος και μπορεί να επιλυθεί είτε άμεσα με την ελαχιστοποίηση της απόκλισης της πραγματικής ενεργού ισχύος από την επιθυμητή, είτε έμμεσα με την ελαχιστοποίηση του κόστους κατανάλωσης ενεργού ισχύος.
  - *ρύθμισης της τάσης*: Το πρόβλημα ρύθμισης τάσης μπορεί να αντιμετωπιστεί και ως πρόβλημα εξισορρόπησης αέργου ισχύος. Παραδοσιακά, το δίκτυο κάνει χρήση πυκνωτών για αντιστάθμιση αέργου ισχύος. Πρόσφατα, τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν αναδειχθεί ικανά στην αντιστάθμιση αέργου ισχύος κάνοντας χρήση των AC/DC αναστροφέων που φέρουν, και μάλιστα χωρίς να προκαλείται σοβαρή καταπόνηση στις μπαταρίες τους. Η ρύθμιση της τάσης, λοιπόν, μπορεί να επιτευχθεί με έλεγχο PQ (μείωση της ενεργού ισχύος που χρησιμοποιείται στη φόρτιση, προς παραγωγή αέργου) είτε άμεσα με ρύθμιση της αέργου ισχύος σε κόμβους κοντά σε αυτόν που μας ενδιαφέρει, είτε έμμεσα με ελαχιστοποίηση της διακύμανσης της τάσης ή του κόστους κατανάλωσης αέργου ισχύος ή συνδυασμό τους.
- EVS-A

Ο EVS-A γεφυρώνει τη ροή ισχύος μεταξύ του δικτύου και των καταναλωτών. Πιο συγκεκριμένα, είναι υπεύθυνος για τη διατήρηση ενός σταθερού και αξιόπιστου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και για την ικανοποίηση των ενεργειακών απαιτήσεων των κατόχων ηλεκτρικών οχημάτων. Ωστόσο, έχει ως κίνητρο τον περιορισμό του κόστους λειτουργίας ή την αύξηση των

κερδών του, το οποίο δεν μπορεί να χαρακτηριστεί αλτρουιστικό. Επομένως, οι στόχοι του περιλαμβάνουν την:

- *παροχή υπηρεσιών στο δίκτυο και τους κατόχους ηλεκτρικών οχημάτων:*  
Ο EVS-A επιθυμεί να μεγιστοποιήσει την συνολική ευημερία των κατόχων ηλεκτρικών οχημάτων, δηλαδή τη συνολική ικανοποίηση από τις υπηρεσίες που τους παρέχονται. Μπορεί δηλαδή να μεγιστοποιήσει το άθροισμα των αποδιδόμενων ισχύων άμεσης φόρτισης των οχημάτων ή την διαφορά των παρεχόμενων υπηρεσιών μείον το κόστος φόρτισης.
- *αύξηση των κερδών του:* Ο EVS-A ορίζει κάποια τιμή για τις υπηρεσίες του, ώστε να προσελκύσει περισσότερους πελάτες. Εντωμεταξύ, μπορεί να κερδίσει έσοδα από το δίκτυο για την ολοκλήρωση των υπηρεσιών που έχει δεσμευθεί ή να καταβάλει πρόστιμο σε αντίθετη περίπτωση. Για παράδειγμα, μπορεί να κινητοποιήσει τους πελάτες του να πουλάνε την περίσσεια ενέργεια κατά τις ώρες αιχμής. Επιθυμεί λοιπόν να μεγιστοποιήσει τα κέρδη του ρυθμίζοντας κατάλληλα την ισορροπία μεταξύ των τιμών του και των πιθανών εσόδων του από το δίκτυο.

- Πελάτης

Το κορυφαίο ενδιαφέρον ενός πελάτη μπορεί να μην είναι να ακολουθήσει τον έλεγχο από το δίκτυο και να ικανοποιήσει τις ανάγκες του δικτύου ή του EVS-A. Πράγματι, η τυφλή παρακολούθηση των απαιτήσεων του EVS-A μπορεί να μην οδηγήσει στο πιο ευεργετικό αποτέλεσμα για έναν ιδιοκτήτη ηλεκτρικού οχήματος. Στόχος, λοιπόν, του πελάτη είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους φόρτισης, το οποίο οφείλει να σέβεται ο διαχειριστής της έξυπνης φόρτισης. Γενικά δεν υπάρχει μεγάλη έρευνα σχετικά με τη μείωση του κόστους φόρτισης για κάθε πελάτη ξεχωριστά, αν και το πρόβλημα αυτό θα επικρατήσει περισσότερο όταν αυξηθεί η διείσδυση των οχημάτων στο δίκτυο.

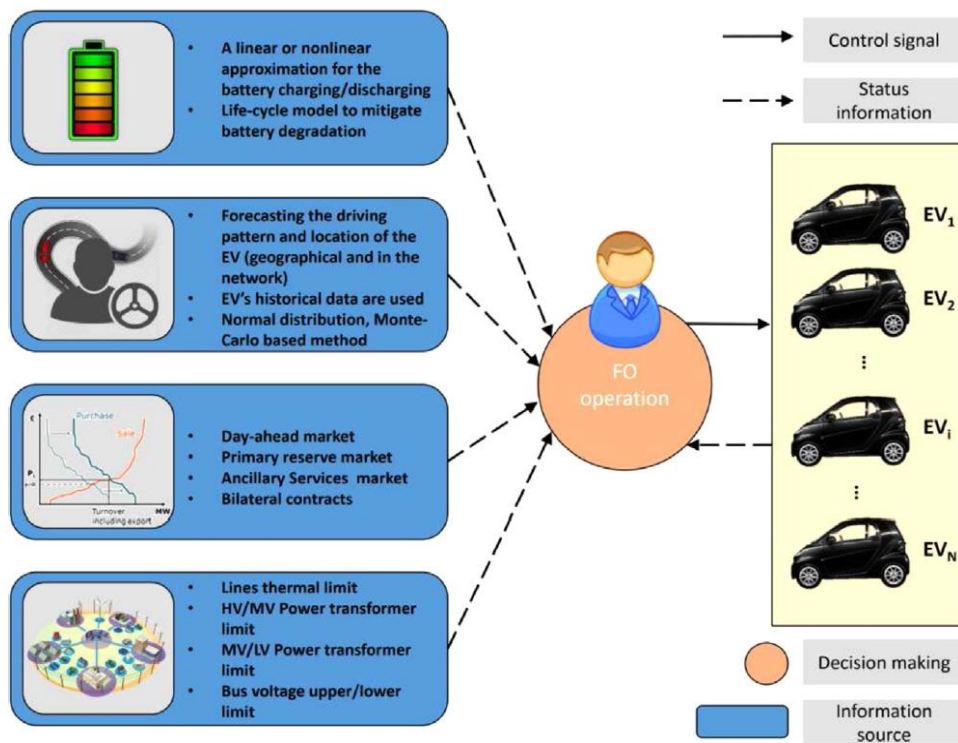
## 5.2 Κατηγοριοποίηση αλγορίθμων

Το επίπεδο ελέγχου για τη διαχείριση της φόρτισης 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 έξυπνης φόρτισης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε κεντρικούς και κατακεντρωμένους.

- Κεντρικοί Αλγόριθμοι

Στους κεντρικούς αλγορίθμους υπάρχει ένας κεντρικός συντονιστής (EVS-A), ο οποίος με τη βοήθεια αμφίδρομης επικοινωνίας με τα ηλεκτρικά οχήματα διαχειρίζεται το χρόνο και την ισχύ φόρτισής τους, με σκοπό την επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Οι κεντρικοί αλγόριθμοι απαιτούν εκτεταμένη αμφίδρομη επικοινωνία πραγματικού χρόνου, γεγονός το οποίο αυξάνει το κόστος του επικοινωνιακού εξοπλισμού, καθιστώντας τους μη επιθυμητούς από τους EVS-A.

Η ροή πληροφορίας στους κεντρικούς αλγορίθμους παρουσιάζεται στην εικόνα 5-1.

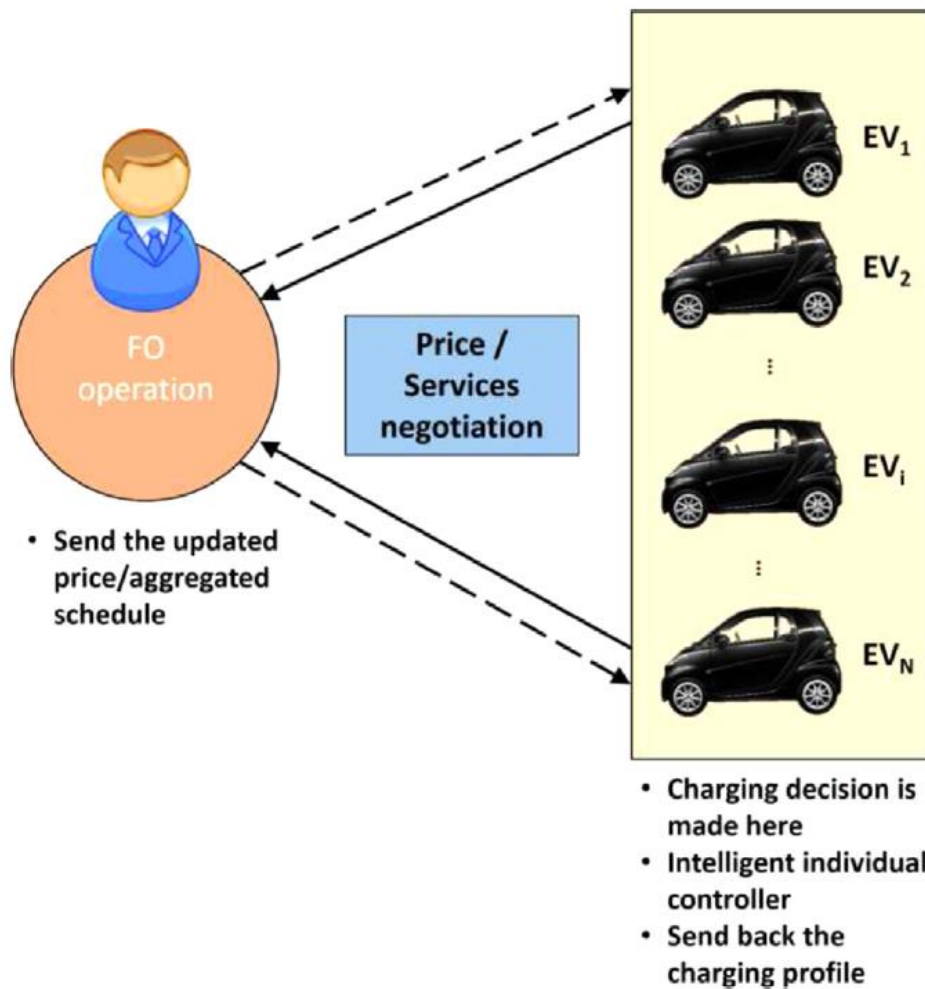


Εικόνα 5-1 Ροή πληροφορίας στους κεντρικούς αλγορίθμους έξυπνης φόρτισης [19]

- Καταναμημένοι αλγόριθμοι

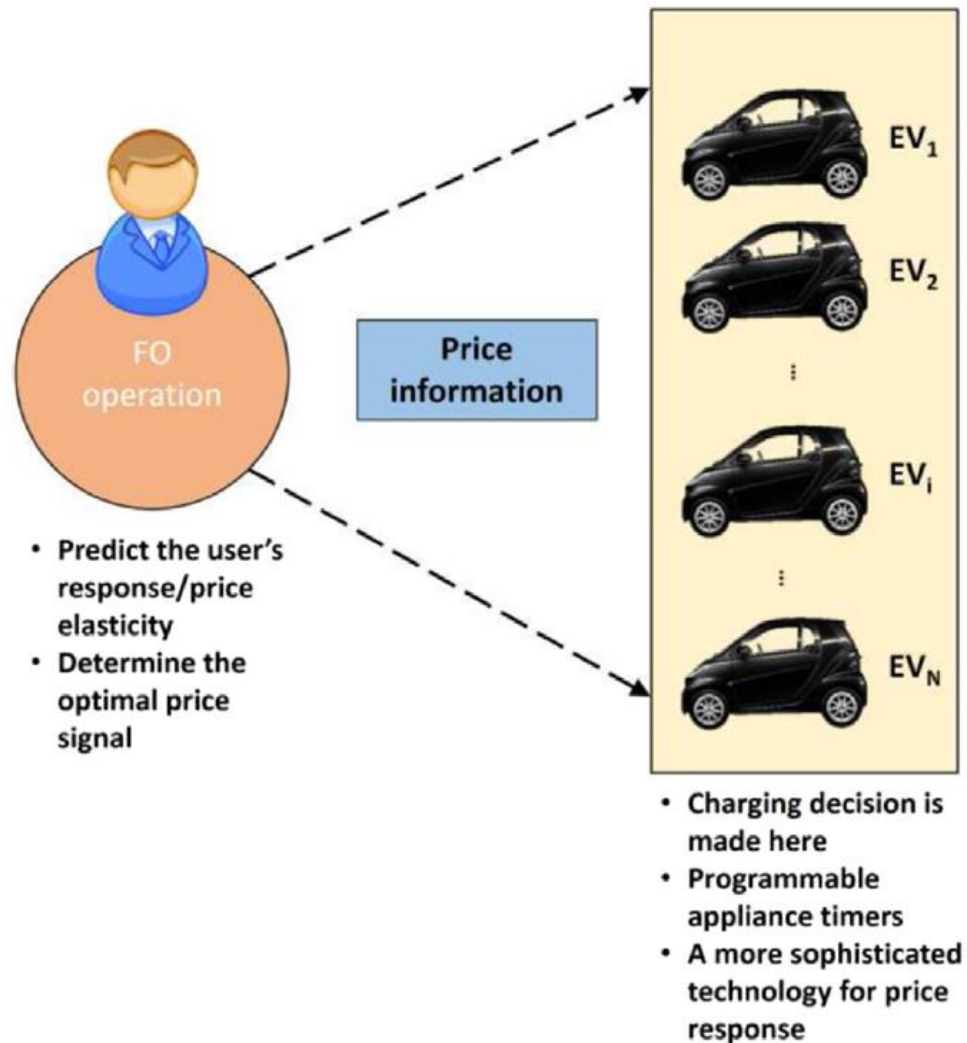
Στους καταναμημένους αλγορίθμους υπάρχει ένας κεντρικός συντονιστής (EVS-A), ο οποίος εκπέμπει μία κοινή τιμή ηλεκτρικού ρεύματος ή ένα σήμα ισχύος αναφοράς σε όλα τα ηλεκτρικά οχήματα. Έπειτα κάθε όχημα ξεχωριστά αποφασίζει την ισχύ και το χρόνο φόρτισής του, βάσει δικών του παραμέτρων και κριτηρίων βελτιστοποίησης. Σε κάποιο βαθμό, οι στρατηγικές αυτές συγκλίνουν ασυμπτωτικά στους στόχους βελτιστοποίησης με λιγότερους υπολογισμούς. Ο EVS-A μπορεί να επικοινωνεί είτε μονόδρομα είτε αμφίδρομα με τα οχήματα, χωρίς να απαιτείται γνωστοποίηση μεγάλου όγκου πληροφοριών, εν αντιθέσει με τους κεντρικούς αλγορίθμους.

Η ροή πληροφορίας στους καταναμημένους αλγορίθμους παρουσιάζεται στις εικόνες 5-2 και 5-3.



Εικόνα 5-2 Αμφίδρομη ροή πληροφορίας στους καταναμημένους αλγορίθμους έξυπνης φόρτισης [19]





Εικόνα 5-3 Μονόδρομη ροή πληροφορίας στους καταναμημένους αλγορίθμους έξυπνης φόρτισης [19]

### 5.3 Μέθοδοι επίλυσης

Διαφορετικές μέθοδοι επίλυσης χρησιμοποιούνται για την επίλυση των προβλημάτων μεγιστοποίησης και την υλοποίηση των αλγορίθμων. Η επιλογή της εκάστοτε μεθόδου εξαρτάται από τον τύπο του προβλήματος βελτιστοποίησης και ως εκ τούτου από τη στρατηγική φόρτισης. Συχνά χρησιμοποιούμενες μέθοδοι είναι οι εξής:

- Γραμμικός προγραμματισμός:

Το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης του κόστους φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι γραμμικό ([20],[21]). Είναι η πιο απλή μορφή ενός κεντρικού αλγορίθμου και η επίλυση του δεν είναι χρονοβόρα ακόμα και για την περίπτωση μεγάλου στόλου ηλεκτρικών οχημάτων. Έχει την εξής μορφή:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N \sum_{t_0,i}^{t_{0,i}+T_i} p(t) \cdot P_i(t) \cdot \Delta t$$

με περιορισμούς:

$$h(P_i) = 0$$

$$g(P_i) \leq 0$$

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

- Τετραγωνικός προγραμματισμός:

Συναντάται κυρίως σε προβλήματα βελτιστοποίησης που έχουν στόχους που σχετίζονται με το δίκτυο ([22],[23]). Η αντικειμενική συνάρτηση σε αυτά τα προβλήματα έχει τετραγωνική μορφή, ενώ οι περιορισμοί είναι συνήθως γραμμικοί:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N \sum_{t_0,i}^{t_{0,i}+T_i} R_i \cdot I_{i,t} \quad \text{ή} \quad \text{Min} \sum_{i=1}^N \sum_{t_0,i}^{t_{0,i}+T_i} (P_{i,t} + D_t - D_{avg})$$

με περιορισμούς:

$$h(P_i) = 0$$

$$g(P_i) \leq 0$$

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

- Δυναμικός προγραμματισμός:

Παράδειγμα χρήσης του είναι στο πρόβλημα βελτιστοποίησης των απωλειών σε ένα δίκτυο διανομής [24] και η μορφή του είναι η εξής:

$$f_t = \min L_t(S_t, P_t) + f_{t+1}(S_{t+1})$$

με περιορισμούς:

$$S_{t,i} = S_{t+1,i} - P_{t,i} \cdot \Delta t$$

$$h(P_i) = 0$$

$$g(P_i) \leq 0$$

όπου  $f_t$  οι απώλειες του δικτύου από την περίοδο  $t$  ως το τέλος της περιόδου  $T$ ,  $S_t$  το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας του  $i$ -οστού οχήματος τη χρονική στιγμή  $t$ ,  $P_t$  η ονομαστική ισχύς των υποδομών φόρτισης.

- Στοχαστικός προγραμματισμός:

Χρησιμοποιείται όταν η διαχείριση του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων δεν είναι εφικτή με χρήση ντετερμινιστικών μεθόδων βελτιστοποίησης λόγω της στοχαστικής συμπεριφοράς κάποιου παραμέτρου, όπως για παράδειγμα της μετακίνησης των οχημάτων ([25],[26]). Παράδειγμα αποτελεί η μέθοδος Monte-Carlo, στην οποία όλες οι στοχαστικές παράμετροι αντικαθίστανται από μία τυχαία τιμή της αντίστοιχης κατανομής τους και το πρόβλημα επιλύεται στη συνέχεια με ντετερμινιστική μέθοδο. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρις ότου υπάρχει σύγκλιση σε κάποια τιμή.

- Θεωρία παιγνίων

Η θεωρία των παιγνίων και πιο συγκεκριμένα το παίγνιο Stackelberg έχει εφαρμοστεί στην κατανομημένη διαχείριση του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους της φόρτισής τους ([27],[28]).

- Dual decomposition

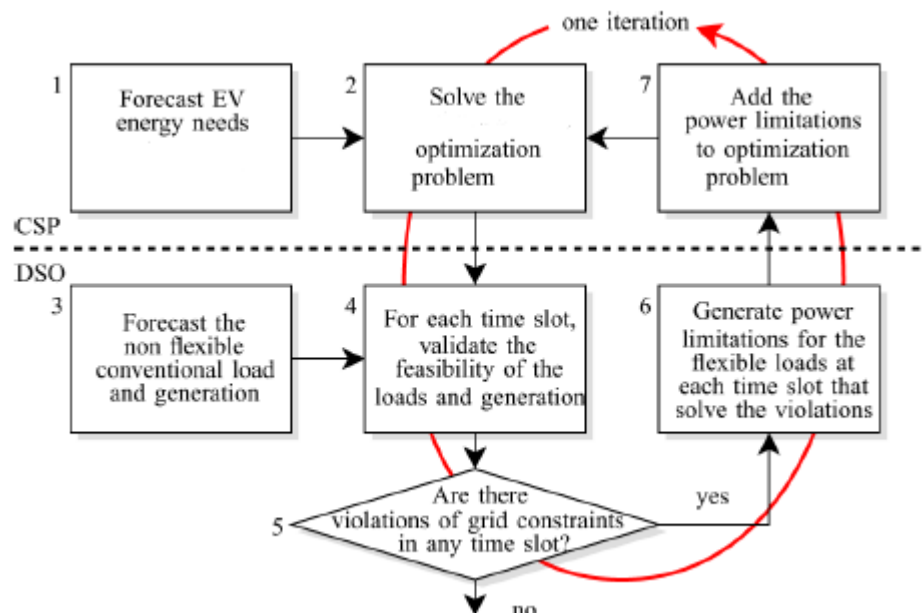
Αποτελεί μια κατανομημένη μέθοδο επίλυσης σε προβλήματα κυρτής βελτιστοποίησης (με την οποία πραγματεύεται και μετέπειτα η παρούσα διπλωματική εργασία), όπου δηλαδή η αντικειμενική συνάρτηση είναι κυρτή και οι περιορισμοί είναι συζευγμένοι με αποτέλεσμα το αρχικό πρόβλημα να μην μπορεί να διαχωριστεί σε επιμέρους ανεξάρτητα προβλήματα ([29],[30]).

Με τη μέθοδο αυτή οι συζευγμένοι περιορισμοί αποσυνδέονται με τη χρήση των συντελεστών Lagrange. Έτσι, το αρχικό πρόβλημα μπορεί να χωριστεί σε επιμέρους ανεξάρτητα υπο-προβλήματα τα οποία μπορούν να επιλυθούν τοπικά από κάθε ηλεκτρικό όχημα.

## 6. Επιλογή αλγορίθμων δυναμικής φόρτισης

### 6.1 Θεωρητικό πλαίσιο εφαρμογής

Με γνώμονα την ικανοποίηση των κατόχων ηλεκτρικών οχημάτων και παράλληλα την αποφυγή της υπερφόρτωσης του δικτύου διανομής, απαιτείται αρχιτεκτονική που βασίζεται στην επικοινωνία μεταξύ του παρόχου υπηρεσιών φόρτισης (Charging Service Provider-CSP ή EVS-A), ο οποίος χειρίζεται τη φόρτιση των οχημάτων και του διαχειριστή του δικτύου διανομής (DSO-Distribution System Operator), ο οποίος χειρίζεται το δίκτυο διανομής. Όπως παρουσιάζεται και στο λογικό διάγραμμα στην εικόνα 6-1, αν δεν υπάρχουν περιορισμοί, τότε το πρόβλημα βελτιστοποίησης χρειάζεται να επιλυθεί μία μόνο φορά. Διαφορετικά, απαιτούνται επαναλήψεις, μέχρις ότου ικανοποιηθούν οι περιορισμοί του δικτύου.



Εικόνα 6-1 Λογικό διάγραμμα αλγορίθμου [32]

Συνοπτικά, τα βήματα του αλγορίθμου είναι τα εξής:

1. Πρόβλεψη των ενεργειακών αναγκών των ηλεκτρικών οχημάτων (CSP),
2. Επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης (CSP),
3. Πρόβλεψη φορτίου βάσης και παραγόμενου φορτίου (DSO),
4. Επικύρωση της εφαρμοσιμότητας των καταναλισκόμενων και παραγόμενων φορτίων κάθε χρονική στιγμή (DSO),
5. Έλεγχος ύπαρξης παραβιάσεων των περιορισμών του δικτύου κάθε χρονική στιγμή (DSO),
6. Δημιουργία περιορισμών για τα ευέλικτα φορτία κάθε χρονική στιγμή, οι οποίοι αντισταθμίζουν τις παραβιάσεις (DSO),
7. Προσθήκη των περιορισμών ισχύος στο πρόβλημα βελτιστοποίησης (CSP).

Πιο συγκεκριμένα, ο καθορισμός των περιορισμών ισχύος στο δίκτυο εξαρτάται από το στόχο του DSO. Δύο μέθοδοι που μπορεί να ακολουθήσει ο DSO είναι:

- Μέθοδος δικτύου ροής,
- Μέθοδος ροής φορτίου,

για τις οποίες ακολουθεί ανάλυση [32]:

- Μέθοδος δικτύου ροής

Χρησιμοποιείται εάν η μήτρα αγωγιμοτήτων του δικτύου δεν είναι διαθέσιμη στον DSO ή αν μόνο το ποσοστό φόρτωσης των γραμμών παρουσιάζει ενδιαφέρον. Σε αυτήν την περίπτωση, το δίκτυο αναπαρίσταται ως ένα δίκτυο ροής, το οποίο κατασκευάζεται για κάθε χρονική στιγμή βάσει των περιορισμών σύνδεσης και φόρτωσης του δικτύου και ορίζεται ως εξής:

$$F = \{(V, E), s, t \in V, c: V \times V \rightarrow R^+\},$$

Όπου  $(V, E)$  κατευθυνόμενος γράφος με ακμές  $E$  και κόμβους  $V$ , που περιέχουν μία πηγή  $s \in V$ , ένα προορισμό  $t \in V$ , και μια χωρητικότητα  $c(u, v) \in R^+ \forall (u, v) \in E$  και  $c(u, v) = 0 \forall (u, v) \notin E$ . Η ροή στο δίκτυο είναι μία συνάρτηση  $f: V \times V \rightarrow R$ , όπου

$$f(u, v) \leq c(u, v) \forall (u, v) \in V \times V \quad (1a)$$

$$f(u, v) = -f(v, u) \forall (u, v) \in V \times V \quad (1b)$$

$$\sum_{u \in V} f(u, v) = 0 \forall u \in V \setminus \{s, t\}. \quad (1c)$$

Οι χωρητικότητες των εσωτερικών ακμών,

$$\{c(u, v) \mid u, v \in V \setminus \{s, t\}\},$$

είναι τα μέγιστα ποσοστά φόρτωσης των στοιχείων του δικτύου. Το δίκτυο ροής περιλαμβάνει επιπλέον ακμές από έναν εικονικό κόμβο-πηγή σε όλους τους κόμβους που αντιπροσωπεύουν μονάδες παραγωγής. Οι χωρητικότητες αυτών των ακμών είναι η παραγόμενη ισχύς  $P_{g,j}(u_g)$  για κάθε μονάδα παραγωγής  $u_g$ . Ομοίως, το δίκτυο ροής περιλαμβάνει επίσης πρόσθετες ακμές από όλους τους κόμβους που αντιπροσωπεύουν ρευματοδότες σε έναν εικονικό κόμβο-προορισμό. Οι χωρητικότητες αυτών των ακμών είναι η συνολική ζητούμενη ισχύς κάθε ρευματοδότη  $u_c$

$$c(u_c, t) = P_{base,j}(u_c) + \sum_{i \in \Omega(u_c)} P_{b,i,j},$$

όπου  $P_{base,j}(u_c)$  το συμβατικό φορτίο στο ρευματοδότη  $u_c$  τη χρονική στιγμή  $j$  και  $\Omega(u_c)$  είναι το σύνολο των οχημάτων που είναι συνδεδεμένα στο ρευματοδότη  $u_c$  τη χρονική στιγμή  $j$ .

Η μέγιστη ροή στο δίκτυο από την πηγή στον προορισμό μπορεί να διατυπωθεί ως ένα γραμμικό πρόγραμμα

$$\max \sum_{u \in V} f(s, u)$$

με περιορισμούς (1a), (1b), (1c),

το οποίο μπορεί να επιλυθεί με μια τυπική μέθοδο γραμμικού προγραμματισμού. Μετά την επίλυση της βελτιστοποίησης της μέγιστης ροής είναι γνωστή η ροή σε κάθε ακμή. Εάν οι ροές από τις ακμές προς τον προορισμό είναι ίσες με τις χωρητικότητες αυτών των ακμών, τα επίπεδα ισχύος που ζητούνται στους ρευματοδότες είναι εφικτά και μπορούν να παραδοθούν μέσω του δικτύου. Το κριτήριο αυτό μπορεί να ελεγχθεί ως εξής:

$$f(u, v) = c(u, v) \forall u \in V.$$

Εάν το κριτήριο δεν ισχύει, τότε υπάρχει συμφόρηση και η ζητούμενη ισχύς δεν μπορεί να παραδοθεί στους ρευματοδότες. Σε αυτή την περίπτωση, υπάρχει μια ελάχιστη περικοπή στο δίκτυο, όπου όλες οι ακμές που περνούν από την περικοπή είναι κορεσμένες. Αυτή η περικοπή διαχωρίζει το σύνολο των κόμβων στο δίκτυο ροής σε  $(S, T)$ , όπου  $s \in S$  και  $t \in T^s$ .

Για να προσδιοριστούν οι περιορισμοί ισχύος για τα ηλεκτρικά οχήματα, πρέπει να βρεθούν όλα τα ασύνδετα υποδίκτυα του δικτύου κάτω από την ελάχιστη

περικοπή, δηλαδή το τμήμα του αρχικού δικτύου ροής που σχετίζεται με το  $T$ . Για κάθε ένα από τα διαφορετικά ασύνδετα υποδίκτυα δημιουργείται ο ακόλουθος περιορισμός ισχύος:

$$\sum_{(u,t) \in E'} \sum_{i \in \Omega(u)} P_{b,i,j}(u) \leq \sum_{\substack{(u,v) \in C \\ v \in V'}} f(u,v) - \sum_{(u,t) \in E'} P_{base,j}(u),$$

όπου  $P_{base,j}(u)$  είναι το φορτίο βάσης από το βήμα 3 του αλγορίθμου. Ο παραπάνω περιορισμός περιορίζει τη συνολική φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων σε όλους τους κόμβους στο ασύνδετο υποδίκτυο στη διαφορά μεταξύ της συμφορημένης εισροής στο υποδίκτυο και του συνολικού φορτίου βάσης των ρευματοδοτών στο υποδίκτυο.

- Μέθοδος ροής φορτίου

Εάν η μήτρα αγωγιμοτήτων του δικτύου είναι γνωστοποιημένη στον DSO, μια παραδοσιακή ανάλυση ροής φορτίου μπορεί να παρέχει περισσότερη πληροφορία από την προηγούμενη μέθοδο. Οι περιορισμοί ισχύος μπορούν να καθοριστούν με διάφορους τρόπους, όπως για παράδειγμα μέσω του μέγιστου ποσοστού φόρτωσης – όπως στην προηγούμενη μέθοδο – ή μέσω της μέγιστης επιτρεπόμενης πτώσης τάσης.

Στην περίπτωση που τα δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης είναι ακτινικά δέντρα που ξεκινούν από τους υποσταθμούς, ο περιορισμός ισχύος μπορεί να δημιουργηθεί βρίσκοντας την κριτική γραμμή και τα φορτία κάτω από αυτήν. Για παράδειγμα, έστω ότι έχει καθοριστεί η ροή φορτίου για τη χρονική στιγμή  $j$ . Έστω  $P_{line,j}$  η ροή ενεργού ισχύος στην κριτική γραμμή τη χρονική στιγμή  $j$  και  $Q_{line,j}$  η ροή αέργου ισχύος. Το μέγιστο φορτίο της γραμμής είναι  $P_{line}^{max}$  και το σύνολο των ρευματοδοτών κάτω από την κριτική γραμμή είναι  $U_c$ . Το σύνολο των ηλεκτρικών οχημάτων σε αυτούς τους ρευματοδότες είναι  $\Omega(U_c)$ . Το συνολικό ενεργό φορτίο που καθορίζεται κατά το υπολογισμό ροής φορτίου είναι

$$P_{load,j} = \sum_{i \in \Omega(u)} P_{b,i,j} + \sum_{u_c \in U_c} P_{base,j}(u_c),$$

και το συνολικό άεργο

$$Q_{load,j} = \sum_{u_c \in U_c} Q_{base,j}(u_c).$$



Ο νέος περιορισμός ισχύος είναι

$$\sum_{i \in \Omega(u)} P_{b,i,j} \leq P_{line}^{max} - \sum_{u_c \in U_c} P_{base,j}(u_c) - P_{line,j} - P_{load,j}$$

όπου η συνολική επιτρεπόμενη ισχύς φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων στο  $\Omega(U_c)$  περιορίζεται στο δεξί σκέλος της παραπάνω ανισότητας.

Εάν παραβιαστεί η μέγιστη επιτρεπόμενη πτώση τάσης, τότε η ρυθμός φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων πρέπει να μειωθεί στο δίκτυο κάτω από την κριτική γραμμή. Η μέγιστη ενεργός ισχύς που μπορεί να καταναλώσουν τα φορτία εξαρτάται από την επιτρεπόμενη πτώση τάσης, το άεργο φορτίο στο δίκτυο κάτω από την κριτική γραμμή, και στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της ίδιας της γραμμής. Ο νέος περιορισμός ισχύος που σχετίζεται με τον περιορισμό της πτώσης τάσης είναι

$$\sum_{i \in \Omega(u)} P_{b,i,j} \leq P_{line}^{max}(Q_{load,j}, \Delta U_{max}, R, X) - \sum_{u_c \in U_c} P_{base,j}(u_c) - P_{line,j} - P_{load,j}$$

όπου  $\Delta U_{max}$  η μέγιστη πτώση τάσης και  $Z = R = jX$  η αντίσταση του ισοδύναμου Thevenin της γραμμής. Ο περιορισμός περιορίζει τη συνολική φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων στο  $\Omega(U_c)$  στο δεξί σκέλος της παραπάνω ανισότητας.

Η παρούσα διπλωματική θεωρεί δεδομένους τους περιορισμούς ισχύος και τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων, η οποία μπορεί να βρεθεί με διαδικασία ανάλογη με αυτές που παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Εστιάζει, ωστόσο, στην επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης και στην ανάθεση της ισχύος φόρτισης κάθε οχήματος κάθε χρονική στιγμή, για την περίπτωση της δυναμικής φόρτισης, όπου τα οχήματα δηλαδή φορτίζουν εν κινήσει.

Με τη δυναμική φόρτιση επιτυγχάνεται μεγαλύτερο εύρος οδήγησης και μπορεί να εγκατασταθεί μικρότερη μπαταρία στο όχημα, μειώνοντας έτσι το βάρος και το κόστος του οχήματος. Τέτοιου είδους συστήματα φόρτισης, λοιπόν, που βρίσκονται εντός του δρόμου, μπορούν να συνεισφέρουν στην υπέρβαση των βασικών ανασταλτικών παραγόντων της ηλεκτροκίνησης, δηλαδή του περιορισμένου εύρους οδήγησης και του υψηλού κόστους, τα οποία σχετίζονται και τα δύο με την τεχνολογία και τις

προδιαγραφές των σημερινών μπαταριών. Συμβάλλουν επιπλέον στην καλαισθησία, καθώς δεν είναι φανερά, και είναι πιο άνετα και ασφαλή, καθώς δεν απαιτείται η επαφή και η χρήση καλωδίων, ούτε η στάθμευση προς ανεφοδιασμό.

Από την πλευρά του δικτύου, οι προβλέψεις για τους περιορισμούς μπορούν να έχουν σχετικά μεγάλο χρονικό ορίζοντα αλλά από την πλευρά των οχημάτων ο χρονικός ορίζοντας είναι μικρός, καθώς η κατάσταση του προβλήματος βελτιστοποίησης συνεχώς αλλάζει λόγω του έντονα μεταβαλλόμενου αριθμού αυτοκινήτων. Ο αριθμός των οχημάτων δύναται να είναι σταθερός για το ελάχιστο χρονικό διάστημα που απαιτείται για να διασχίσει το όχημα ένα «μπλοκ» φόρτισης ή το κενό μεταξύ δύο, το οποίο ανέρχεται σε 7.2ms (με ταχύτητα οχήματος ίση με 100km/h, μήκος «μπλοκ» φόρτισης 1.5m, και κενό 0.2m). Οπότε μέσα σε 7.2ms πρέπει να επιλυθεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Από την άλλη πλευρά, η καθυστέρηση του OCPP (Open Charge Point Protocol) ανέρχεται σε

$$T_{ocpp} = 2 \times T_{dsrc} + T_{http} + T_{processing},$$

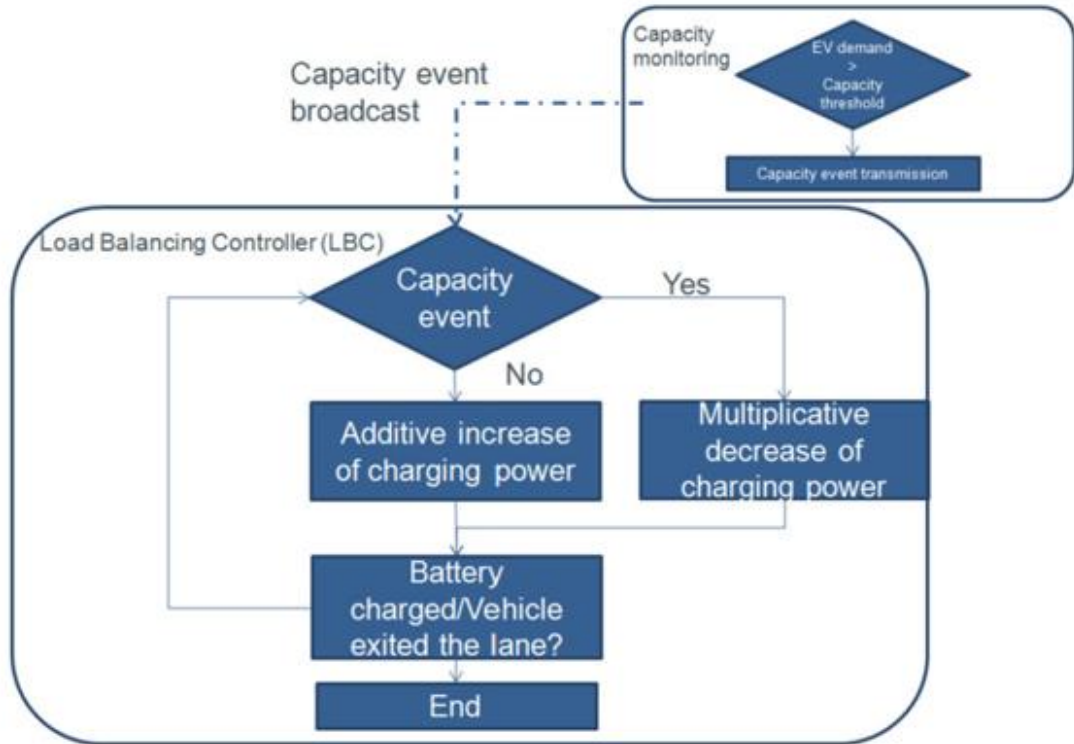
όπου  $T_{dsrc} = 3.5ms$  και  $T_{http} = 1ms$ , οπότε  $T_{ocpp} > 8ms > 7.2ms$ , που σημαίνει ότι η επίλυση του προβλήματος είναι ήδη απαρχαιωμένη όταν γίνεται διαθέσιμη. Απαιτούνται λοιπόν κατανεμημένοι αλγόριθμοι που θα τρέχουν εντός του οχήματος. Στην υλοποίηση των αλγορίθμων, οι οποίοι αναλύονται στη συνέχεια, μπορεί να συμβάλει και η τεχνολογία DSRC, η οποία θα αξιοποιηθεί στις προσομοιώσεις, καθώς έχει τη δυνατότητα εκπομπής σημάτων με μικρή καθυστέρηση.

## 6.2 Αλγόριθμος AIMD

Ο αλγόριθμος AIMD (Additive Increase-Multiplicative Decrease) όντας επιτυχής στη ρύθμιση της συμφόρησης στο διαδίκτυο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στον έλεγχο της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς ο διαμοιρασμός του εύρους ζώνης στο διαδίκτυο φέρει ομοιότητες με το διαμοιρασμό ισχύος στα ηλεκτρικά δίκτυα.

Ο αλγόριθμος AIMD χαρακτηρίζεται από μια φάση προσθετικής αύξησης και μια φάση πολλαπλασιαστικής μείωσης. Κατά την προσθετική φάση, τα οχήματα αυξάνουν το ρυθμό φόρτισής τους κατά έναν αθροιστικό παράγοντα  $\alpha > 0$ . Όταν η καταναλώμενη ισχύς φτάσει ή ξεπεράσει τη διαθέσιμη, τότε υπάρχει «γεγονός χωρητικότητας»

(capacity event), το οποία συνεπάγεται την εκπομπή σήματος ελέγχου (congestion signal). Όταν κάποιο όχημα λαμβάνει ένα τέτοιο σήμα, μειώνει το ρυθμό φόρτισής του κατά έναν πολλαπλασιαστικό παράγοντα  $\beta \in (0,1)$ . Στην εικόνα 6-2 παρουσιάζεται το λογικό διάγραμμα του αλγορίθμου:



Εικόνα 6-2 Λογικό διάγραμμα αλγορίθμου AIMD

Για την αποτελεσματική λειτουργία του αλγορίθμου, απαιτείται η αύξηση της συνολικής ζήτησης ισχύος των ηλεκτρικών οχημάτων μεταξύ δύο πολλαπλασιαστικών μειώσεων να είναι μικρότερη από τη μείωση. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, πρέπει να τεθούν ορισμένοι περιορισμοί. Έστω λοιπόν  $\Delta t_{veh}$  το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών φάσεων αθροιστικής αύξησης,  $\Delta t_{CSP}$  το χρονικό διάστημα μεταξύ δύο διαδοχικών ελέγχων για capacity event,  $N$  ο συνολικός αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων,  $x(t) \leq P_{max}$  η συνολική ισχύς φόρτισης όλων των οχημάτων κατόπιν μιας πολλαπλασιαστικής μείωσης και  $x(t + \Delta t_{CSP}) > P_{max}$ , όπου  $P_{max}$  η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς για τη φόρτιση των οχημάτων. Η αύξηση της συνολικής ζήτησης λόγω των φάσεων αθροιστικής αύξησης της ισχύος φόρτισης των οχημάτων είναι ίση με  $aN \frac{\Delta t_{CSP}}{\Delta t_{veh}}$  και μετά τη μείωση ισχύει:

$$x(t + \Delta t_{CSP}) = \beta(1 + aN \frac{\Delta t_{CSP}}{\Delta t_{veh}})$$

και ο περιορισμός που πρέπει να ισχύει είναι:

$$x(t + \Delta t_{CSP}) < x(t) \rightarrow \beta < \frac{x(t) - aN \frac{\Delta t_{CSP}}{\Delta t_{veh}}}{x(t)}$$

Στην οριακή κατάσταση όπου  $x(t) = P_{max}$ , ο περιορισμός είναι:

$$\beta < \frac{P_{max} - aN \frac{\Delta t_{CSP}}{\Delta t_{veh}}}{P_{max}}$$

Πλεονεκτήματα του αλγορίθμου είναι η κατανομημένη επίλυση, που είναι βασική προϋπόθεση της δυναμικής φόρτισης, και η ελάχιστη επικοινωνία, καθώς τα αυτοκίνητα δεν επικοινωνούν καθόλου μεταξύ τους, και ούτε συμβουλευονται κάποιον φορέα για την αύξηση του ρυθμού φόρτισής τους. Η επικοινωνία βασίζεται στην εικόνα 5-3 και περιορίζεται μόνο στην αποστολή του σήματος ελέγχου από τον CSP σε κάθε όχημα όποτε είναι αναγκαίο. Επίσης, δεν χρειάζεται κάποια γνώση του δικτύου, παρά μόνο το αν η ζητούμενη ισχύς ξεπερνά τη διαθέσιμη. Τέλος, κάτω από πολύ ήπιες υποθέσεις, η διαθέσιμη ισχύς κατανέμεται δίκαια ανάμεσα στο στόλο των ηλεκτρικών οχημάτων.

### 6.3 Αλγόριθμος Rate Control

Ο αλγόριθμος έχει ως στόχο τη μεγιστοποίηση των λαμβανομένων υπηρεσιών από τα ηλεκτρικά οχήματα, διατηρώντας όμως ένα δίκαιο διαμοιρασμό της ισχύος. Το βασικό μοντέλο του αλγορίθμου περιγράφεται παρακάτω [33].

Έστω ένα δίκτυο με ένα σύνολο  $J$  από πηγές, με  $C_j$  να είναι η πεπερασμένη ικανότητα της πηγής  $j$ , όπου  $j \in J$ , η διαδρομή  $r$  ένα μη κενό υποσύνολο του  $J$ ,  $R$  το σύνολο των

δυνατών διαδρομών,  $A_{jr} = 1$  αν  $j \in r$ , ώστε η πηγή  $j$  να βρίσκεται πάνω στην διαδρομή  $r$ , και διαφορετικά  $A_{jr} = 0$ . Ορίζεται έτσι μια μήτρα  $A = (A_{jr}, j \in J, r \in R)$ .

Γίνεται συσχέτιση μίας διαδρομής  $r$  με ένα χρήστη, και υποτίθεται ότι αν ένας ρυθμός  $x_r$  διατεθεί στο χρήστη  $r$ , τότε αυτό έχει ωφελιμότητα  $U_r(x_r)$  στο χρήστη. Έστω ότι η  $U_r(x_r)$  είναι μια αυξανόμενη, αυστηρά κοίλη και συνεχώς διαφοροποιήσιμη συνάρτηση, στο  $x_r \geq 0$ . Έστω επίσης ότι οι ωφελιμότητες είναι αθροιστικές, ώστε η συνολική ωφελιμότητα των ρυθμών  $x = (x_r, r \in R)$  να είναι  $\sum_{r \in R} U_r(x_r)$ . Έστω  $U = (U_r(\cdot), r \in R)$  και  $C = (C_j, j \in J)$ . Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, οι βέλτιστοι ρυθμοί προκύπτουν από την επίλυση του ακόλουθου προβλήματος:

*SYSTEM*( $U, A, C$ ):

$$\max \sum_{r \in R} U_r(x_r)$$

με περιορισμό

$$Ax \leq C$$

όπου

$$x \geq 0.$$

Αν και αυτό το πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι μαθηματικά επιλύσιμο με μεθόδους κυρτού προγραμματισμού, περιλαμβάνει ωφελιμότητες  $U$  που είναι απίθανο να είναι γνωστές στο δίκτυο. Οδηγούμαστε, έτσι, στη θεώρηση δύο απλούστερων προβλημάτων.

Έστω ότι ο χρήστης  $r$  επιλέγει να πληρώσει μια ποσότητα ανά μονάδα χρόνου,  $w_r$ , και λαμβάνει ως αντάλλαγμα μία ροή  $x_r$ , ανάλογη του  $w_r$ , δηλαδή  $x_r = w_r/\lambda_r$ , όπου  $\lambda_r$  η χρέωση ανά μονάδα ροής για το χρήστη  $r$ . Τότε το πρόβλημα μεγιστοποίησης της ωφελιμότητας για το χρήστη  $r$  έχει ως εξής:

*USER* <sub>$r$</sub> ( $U_r; \lambda_r$ ):

$$\max U_r\left(\frac{w_r}{\lambda_r}\right) - w_r$$

όπου

$$w_r \geq 0.$$

Έστω έπειτα, ότι το δίκτυο γνωρίζει το διάνυσμα  $w = (w_r, r \in R)$ , και επιχειρεί να μεγιστοποιήσει τη συνάρτηση  $\sum_r w_r \log x_r$ . Τότε το πρόβλημα βελτιστοποίησης του δικτύου έχει ως εξής:

$NETWORK(A, C; w)$ :

$$\max \sum_{r \in R} w_r \log x_r$$

με περιορισμό

$$Ax \leq C$$

όπου

$$x \geq 0.$$

Έχει αποδειχθεί ότι πάντα υπάρχουν διανύσματα  $\lambda = (\lambda_r, r \in R)$ ,  $w = (w_r, r \in R)$  και  $x = (x_r, r \in R)$ , που ικανοποιούν τη σχέση  $w_r = \lambda_r x_r, r \in R$ , τέτοια ώστε το  $w_r$  επιλύει το  $USER_r(U_r; \lambda_r)$ ,  $r \in R$  και το  $x$  επιλύει το  $NETWORK(A, C; w)$ . Επιπλέον, το διάνυσμα  $x$  είναι η μοναδική λύση στο  $SYSTEM(U, A, C)$ . [34]

Το διάνυσμα ρυθμών  $x = (x_r, r \in R)$  είναι αναλογικά δίκαιο εάν είναι εφικτό, δηλαδή εάν  $x \geq 0$  και  $Ax \leq C$ , και εάν για ένα οποιοδήποτε άλλο εφικτό διάνυσμα  $x^*$ , το άθροισμα το αναλογικών μεταβολών είναι μη θετικό:

$$\sum_{r \in R} \frac{x_r^* - x_r}{x_r} \leq 0. \quad (1)$$

Αν  $w_r = 1, r \in R$ , τότε ένα διάνυσμα ροών  $x$  επιλύει το  $NETWORK(A, C; w)$  αν και μόνο αν είναι αναλογικά δίκαιο.

Ένα διάνυσμα  $x$  είναι τέτοιο ώστε οι ρυθμοί ανά μονάδα χρέωσης είναι αναλογικά δίκαιοι, εάν το  $x$  είναι εφικτό και αν για οποιοδήποτε άλλο εφικτό διάνυσμα  $x^*$

$$\sum_{r \in R} w_r \frac{x_r^* - x_r}{x_r} \leq 0. \quad (2)$$

Η σχέση μεταξύ των συνθηκών (1) και (2) περιγράφεται καλύτερα αν τα  $w_r, r \in R$  είναι όλα ακέραια. Για κάθε  $r \in R$ , αντικαθίσταται ο χρήστης  $r$  από  $w_r$  ολόιδιους

υποχρήστες, γίνεται η αναλογικά δίκαιη κατανομή ανάμεσα στους  $\sum_r w_r$  χρήστες και ανατίθεται στο χρήστη  $r$  ο συνολικός ρυθμός που έχει διανεμηθεί στους  $w_r$  υποχρήστες. Τότε οι προκύπτοντες ρυθμοί ανα μονάδα χρέωσης είναι αναλογικά δίκαιοι. Αποδεικνύεται τελικά ότι το διάνυσμα ρυθμών  $x$  επιλύει το  $NETWORK(A, C; w)$  αν και μόνο αν οι ρυθμοί ανά μονάδα χρέωσης είναι αναλογικά δίκαιοι. [34]

Με τη χρήση συνάρτησης Lagrange προκύπτει η βέλτιστη λύση στο πρόβλημα  $NETWORK(A, C; w)$ , που αποτελεί και λύση στο  $SYSTEM(U, A, C)$ :

$$x_r = \frac{w_r}{\sum_{j \in r} p_j}$$

όπου  $p = (p_j, j \in J)$  το διάνυσμα τιμών σκιάς (shadow prices) και  $(x_r, r \in R), (p_j, j \in J)$  επιλύουν τις σχέσεις:

$$p \geq 0, \quad Ax \leq C, \quad p^T(C - Ax) = 0$$

Χρησιμοποιείται μετέπειτα κατανεμημένος αλγόριθμος για την εφαρμογή λύσης σε μία χαλάρωση του προβλήματος  $NETWORK(A, C; w)$ , όπου:

$$\frac{d}{dt} x_r(t) = \gamma(w_r - x_r(t) \sum_{j \in r} p_j(t)) \quad (3)$$

όπου

$$p(t) = f_j\left(\sum_{s: j \in S} x_s(t)\right)$$

Με τη χρήση κατάλληλης συνάρτησης Lyapunov, αποδεικνύεται ότι το διάνυσμα  $x$  που τη μεγιστοποιεί είναι σταθερό σημείο του συστήματος, το οποίο μάλιστα συγκλίνει στη λύση του αρχικού κεντρικού προβλήματος  $NETWORK(A, C; w)$ .

Κάνοντας τώρα μετάβαση σε ένα πιο πρακτικό και εστιασμένο στη παρούσα διπλωματική εργασία πρόβλημα [35], χρησιμοποιείται το διακριτό ανάλογο της (3):

$$x_i(n+1) = x_i(n) + \gamma(w_i - x_i(n)p(n)),$$

όπου  $x_i(n)$  η ζήτηση ισχύος του χρήστη  $i$  τη χρονική στιγμή  $n$ ,  $w_i$  η διάθεση του χρήστη  $i$  να πληρώσει (willingness to pay parameter – WTP),  $\gamma$  παράμετρος που ελέγχει το ρυθμό σύγκλισης του αλγορίθμου και  $p(n)$  η τιμή της ενέργειας τη χρονική στιγμή  $n$ :

$$p(n) = f\left(\sum_{i=1}^N x_i(n)\right)$$

όπου  $N$  ο συνολικός αριθμός των χρηστών.

Αν η συνάρτηση  $f$  έχει τη μορφή  $f(x) = ax^k$ , με  $a$  και  $k$  σταθερές, προκύπτει ότι η τιμή στην ισορροπία του συστήματος ισούται με:

$$p^* = a^{\frac{1}{k+1}} \left(\sum_{i=1}^N w_i\right)^{\frac{k}{k+1}} \quad (4)$$

και οι ζητήσεις των οχημάτων  $x_i$  προσεγγίζουν τη βέλτιστη τιμή:

$$x_i^* = \frac{w_i}{p^*} \quad (5)$$

Έχουμε καταλήξει λοιπόν σε μια κατανεμημένη λύση του προβλήματος βελτιστοποίησης που στοχεύει στον αναλογικά δίκαιο διαμοιρασμό βάσει του WTP των καταναλωτών και επιλύεται τοπικά από κάθε όχημα ξεχωριστά, με μοναδική επικοινωνία να αποτελεί το σήμα τιμής που στέλνει ο CSP στα οχήματα.

Ενισχύεται ο αλγόριθμος επιπλέον με την προσθήκη δύο παραμέτρων:

- της κατάστασης φόρτισης του οχήματος (State Of Charge – SoC), που υπολογίζεται ως εξής:

$$y_i(n+1) = y_i(n) + \frac{a_i}{B_i} x_i(n)$$

όπου  $y_i(n) \in [0,1]$  το SoC του οχήματος  $i$  τη χρονική στιγμή  $n$ , με αρχική τιμή  $y_i(0)$ ,  $a_i$  η απόδοση της φόρτισης, και  $B_i$  το μέγεθος της μπαταρίας του οχήματος  $i$ , και

- του κόστους φόρτισης  $C_i$ , που υπολογίζεται ως εξής:

$$C_i = \sum_{n=1}^T x_i(n) p(n)$$

όπου  $T$  ο συνολικός αριθμός των χρονικών περιόδων φόρτισης.

Ωστόσο, στο [35] δεν λαμβάνονται υπόψη δύο βασικά στοιχεία:

- ο υπολογισμός του ρυθμού σύγκλισης  $\gamma$ , ο οποίος είναι απαραίτητος για τη σύγκλιση του συστήματος και ιδιαίτερα στην περίπτωση της δυναμικής φόρτισης, όπου υπάρχει έντονη μεταβολή του αριθμού των οχημάτων.



- οι περιορισμοί του δικτύου. Αν και η συνάρτηση της τιμής της ενέργειας αποτελεί ένα αποτρεπτικό στοιχείο στη ζήτηση μεγάλης ισχύος, δεν υπάρχει εγγύηση ότι δεν θα παραβιαστούν οι περιορισμοί που θέτει το σύστημα.

Τα δύο αυτά στοιχεία εντάχθηκαν στον αλγόριθμό μας όπως περιγράφεται στη συνέχεια.

- Υπολογισμός του ρυθμού σύγκλισης  $\gamma$

Όπως παρουσιάζεται στο [33] η σύγκλιση του συστήματος πραγματοποιείται όταν η φασματική ακτίνα (spectral radius) του πίνακα  $-\gamma \Gamma^T \Phi \Gamma$  είναι μικρότερη της μονάδας, όπου

$$\Gamma^T \Phi \Gamma = WX^{-1} + X^{\frac{1}{2}} A^T F' A X^{\frac{1}{2}}$$

$$X = \text{diag}(x_r, r \in R), W = \text{diag}(w_r, r \in R) \text{ και } F' = \text{diag}(f'_j, j \in J)$$

Στην περίπτωση μας έχουμε μόνο μία πηγή  $j$ , οπότε η παραπάνω εξίσωση εξαλείφεται στην:

$$\Gamma^T \Phi \Gamma = WX^{-1} + \frac{df}{dx} X^{\frac{1}{2}} I X^{\frac{1}{2}}$$

Απαιτείται λοιπόν πλέον και η εκπομπή του  $\gamma$ , εκτός από την τιμή της ενέργειας κάθε χρονική στιγμή, καθώς και η συλλογή των  $w$  από τα οχήματα, η οποία βέβαια μπορεί να περιοριστεί μόνο στις στιγμές που μεταβάλλεται η τιμή τους.

- Περιορισμοί του δικτύου

Από (4) και (5), προκύπτει για τη βέλτιστη τιμή της συνολικής κατανάλωσης όλων των οχημάτων  $x^*$  ότι:

$$x^* = \frac{(\sum_{i=1}^N w_i)^{\frac{1}{k+1}}}{a^{\frac{1}{k+1}}}$$

Λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό στο συνολικό φορτίο  $x^* \leq P_{max}$ , όπου  $P_{max}$  η μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύς, καταλήγουμε σε δύο περιπτώσεις:

$$\alpha \geq \frac{\sum_{i=1}^N w_i}{P_{max}^{k+1}} \quad \text{ή} \quad \sum_{i=1}^N w_i \leq \alpha P_{max}^{k+1}$$

Μπορούμε επομένως είτε να μεταβάλουμε την συνάρτηση της τιμής θέτοντας

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^N w_i}{P_{max}^{k+1}}, \quad \text{όταν } x^* > P_{max}$$

είτε να θέσουμε

$$\sum_{i=1}^N w_i = \alpha P_{max}^{k+1}, \quad \text{όταν } x^* > P_{max}$$

και να εκπέμψουμε ένα σήμα ελέγχου, με το οποίο θα επαναπροσδιοριστούν τα  $w$  σε μία νέα κλίμακα διατηρώντας όμως τις μεταξύ τους αναλογίες.

Εν τέλει η επικοινωνία βασίζεται στην εικόνα 5-2 και απαιτείται η αποστολή των WTP από τα οχήματα στον CSP και η αποστολή του  $\gamma$ , της τιμής της ενέργειας και του πολλαπλασιαστικού παράγοντα (σε περίπτωση επαναπροσδιορισμού των  $w_i$ ) από τον CSP στα οχήματα. Η λειτουργία του αλγορίθμου θα εξεταστεί μέσω προσομοιώσεων στο επόμενο κεφάλαιο.

# 7. Αποτελέσματα προσομοιώσεων

## 7.1 Περιβάλλον προσομοίωσης

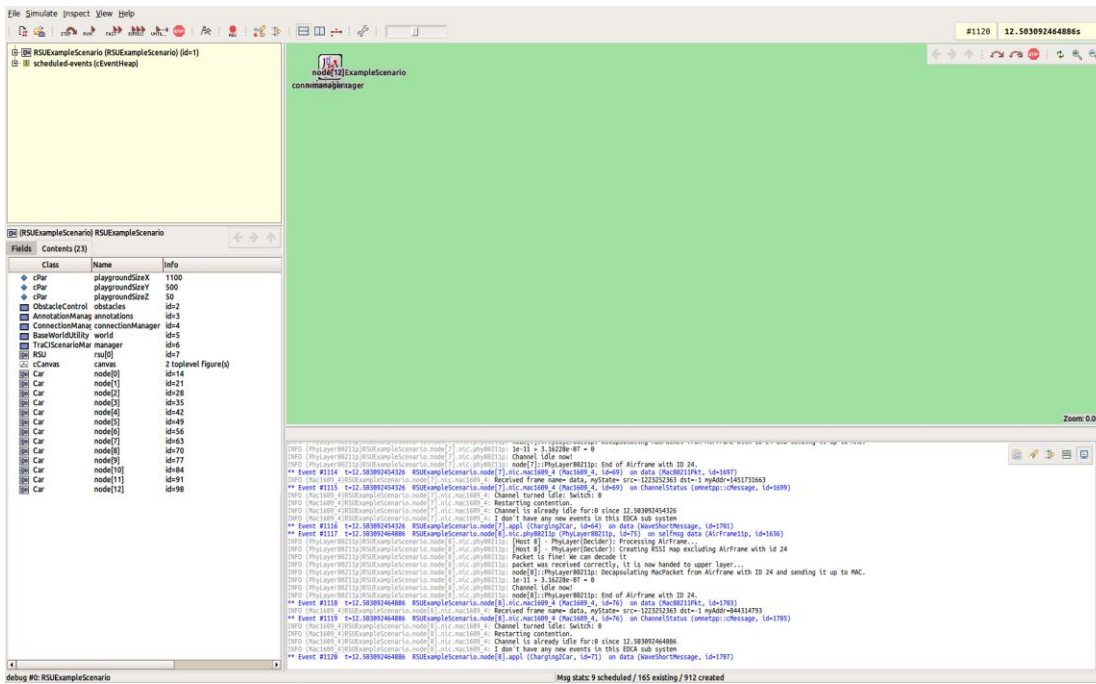
Για τις προσομοιώσεις των αλγορίθμων χρησιμοποιήθηκε το Veins, το οποίο είναι ένα πλαίσιο (framework) που συνδυάζει το περιβάλλον του Omnet++, που είναι μια πλατφόρμα για την ανάπτυξη προσομοιώσεων δικτύων, και το SUMO που είναι ένας προσομοιωτής σεναρίων κίνησης. Οπότε αποτελεί μια πολύ καλή επιλογή για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς είναι δυνατόν να ελεγχθούν οι αλγόριθμοι σε πραγματικά σενάρια κίνησης, ενώ υπάρχουν και οι υποδομές επικοινωνίας που απαιτούνται. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται το σύστημα DSRC (Dedicated Short Range Communication), το οποίο συνάδει με τις απαιτήσεις των αλγορίθμων για εκπομπή σημάτων, συμπεριλαμβάνοντας έτσι τις όποιες καθυστερήσεις προκύπτουν.

Παρουσιάζονται επίσης ενδεικτικές εικόνες του περιβάλλοντος:

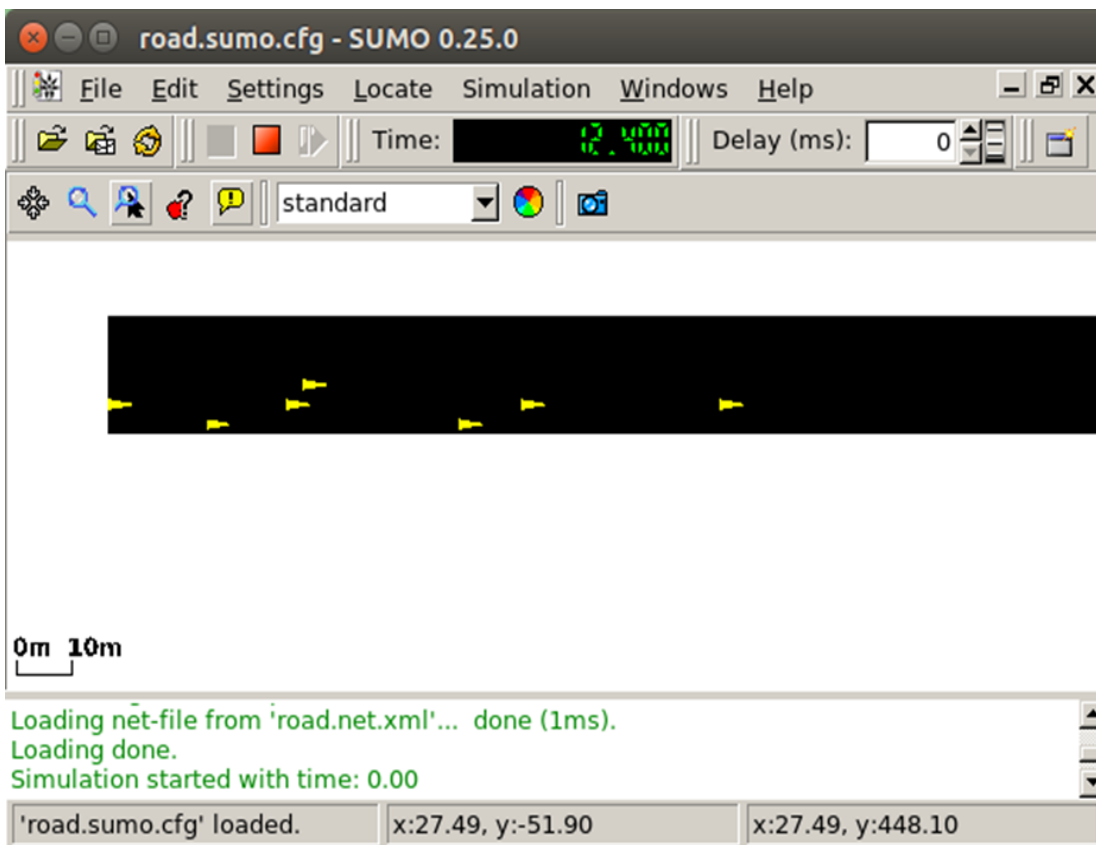
```

16 ##### Charging 1 #####
17 ** node[1].CarTimer = 0.001s
18 ** chargingStation = 0.01
19 ** jacFactor = 0.61
20 ** defFactor = 0.5
21
22 ##### Charging 2 #####
23 ** rsu[1].RSUTimer = 0.5s
24
25 ##### Car #####
26 ** BatterySize = 25 kWh
27 ** initialSec = 0.5 #h
28 ** maxChargingRate = 100 #100kW
29 ** minChargingRate = 0 #100kW
30 ** a = 0.85 #charging efficiency
31 ** node[0].w = 0
32 ** w = 5 #w (euro$/hour) willing to pay
33 ** q = 0.005 #initial convergence rate
34
35 ##### RSU #####
36 ** changeW = false
37 ** changeQTime = 50
38 ** wMax = 10
39
40 ##### RSU #####
41 ## Is there a restriction on supply? ##
42 ** restrictedSupply = false #take supply into account or not?
43 ** supply = 5 #available supply from network (supply*100 kWh)
44 ## method to follow during max load ##
45 ** wChange = false # change a or w if demand hits supply?
46
47 ## Is there a change on the available supply? ##
48 ** changeSupply = false #change available supply during simulation
49 ** newSupply = 7 #new available supply
50 ** changeSupplyTime = 50 #when does the supply change?
51
52 ##### price parameters #####
53 ** alphaInit = 0.0012
54 ** kApp = 5
55 ** minPrice = 0
56
57 ##### Simulation parameters #####
58 #
59 #####
60 debug-on-errors = false
61 print-stdout-speed = false
62
63 sim-time-limit = 120s
64
65 ** rsu[0].appl.*.scalar-recording = true
66 ** node[1].appl.*.scalar-recording = true
67
68 ** rsu[0].appl.*.vector-recording = true
69 ** node[1].appl.*.vector-recording = true
70
71 ** scalar-recording = false
72 ** vector-recording = false
73
74 ** debug = false
  
```

Εικόνα 8-1 Περιβάλλον OMNET++



Εικόνα 7-2 Γραφικό περιβάλλον προσομοίωσης OMNET++



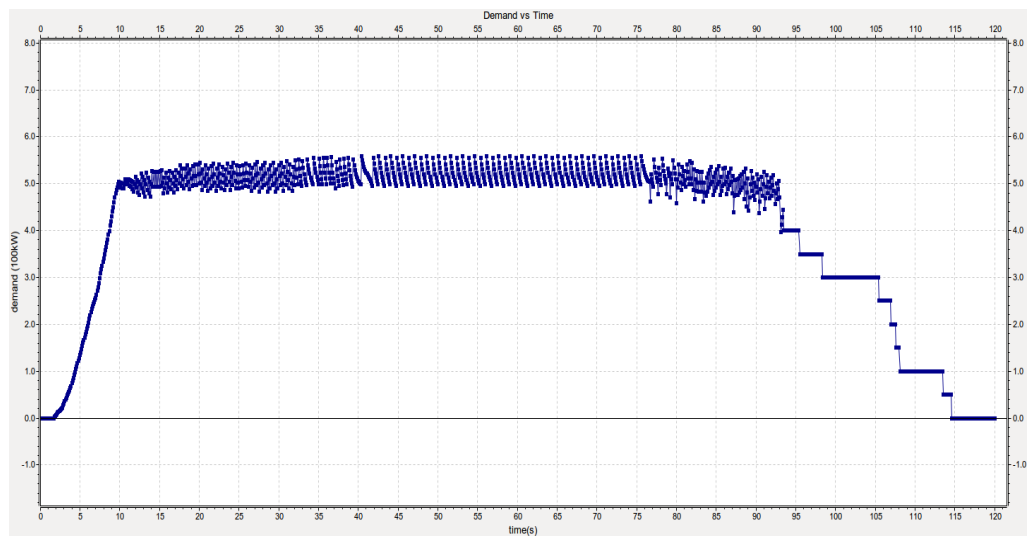
Εικόνα 7-3 Γραφικό περιβάλλον προσομοίωσης SUMO

Για τις προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκε δρόμος ενός χιλιομέτρου, όπου στη μέση υπάρχει εκπομπός σημάτων, ενώ τροποποιούνται στοιχεία που αφορούν στην κίνηση των οχημάτων (η διάρκεια και η πιθανότητα εμφάνισής τους, και ο αριθμός τους).

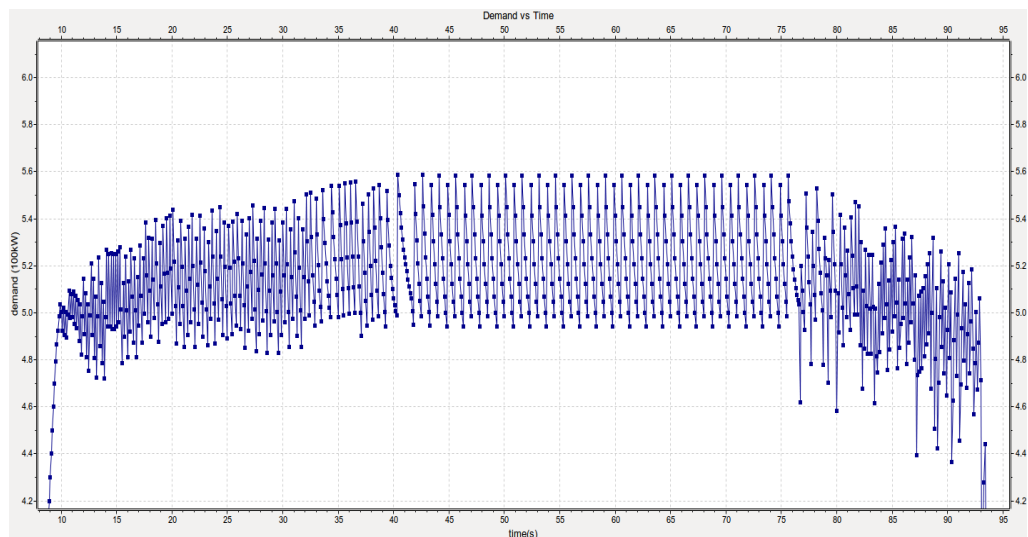
## 7.2 Αλγόριθμος AIMD

Για τις προσομοιώσεις έχουμε επιλέξει, χωρίς βλάβη της γενικότητας,  $P_{max} = 500kW$ ,  $\Delta t_{CSP} = 0.01$ ,  $\Delta t_{veh} = 0.001$ ,  $N=30$  ο μέγιστος αριθμός οχημάτων και  $\alpha=0.002$ . Βάσει περιορισμού προκύπτει ότι  $\beta < 0.88$ , το οποίο μπορεί να επιβεβαιωθεί και από τις προσομοιώσεις:

- $\beta=0.87$



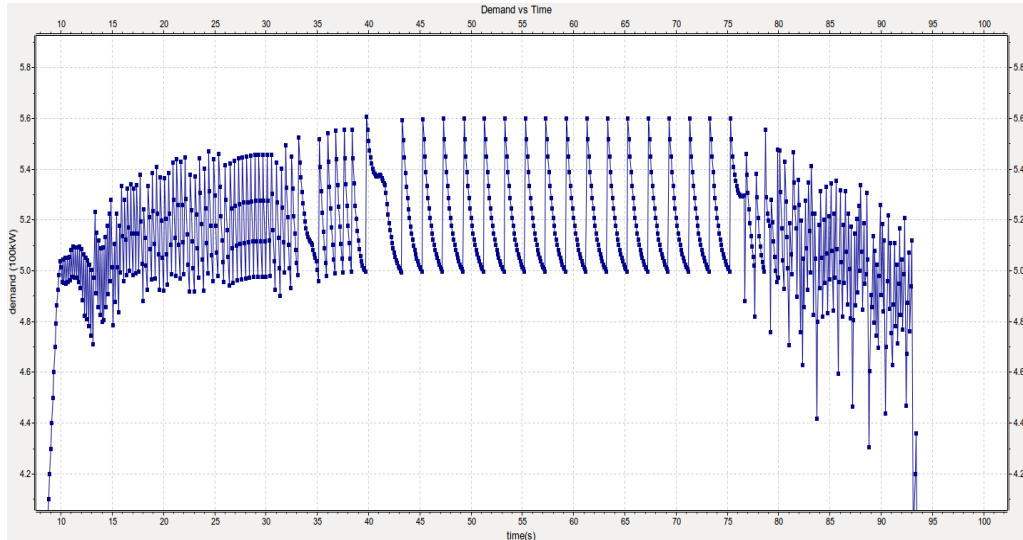
Εικόνα 7-4 Διάγραμμα συνολικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για  $\beta=0.87$



Εικόνα 7-5 Μεγέθυνση διαγράμματος συνολικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για  $\beta=0.87$

Παρατηρείται αποτελεσματική λειτουργία του αλγορίθμου, καθώς το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία στην κρίσιμη περίοδο που εστιάζεται στην εικόνα 7-5, όπου όλα τα οχήματα βρίσκονται στο δρόμο.

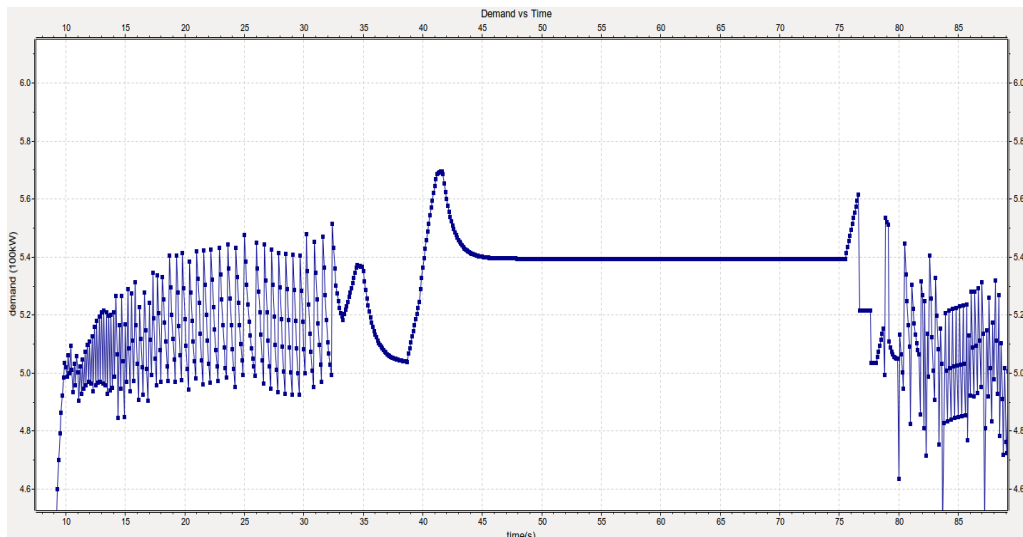
- $\beta=0.88$



**Εικόνα 7-6** Μεγέθυνση διαγράμματος συνολικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για  $\beta=0.88$

Παρατηρείται μια οριακή κατάσταση, όπου η αύξηση και η μείωση εξουδετερώνονται.

- $\beta=0.89$



**Εικόνα 7-7** Μεγέθυνση διαγράμματος συνολικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για  $\beta=0.89$

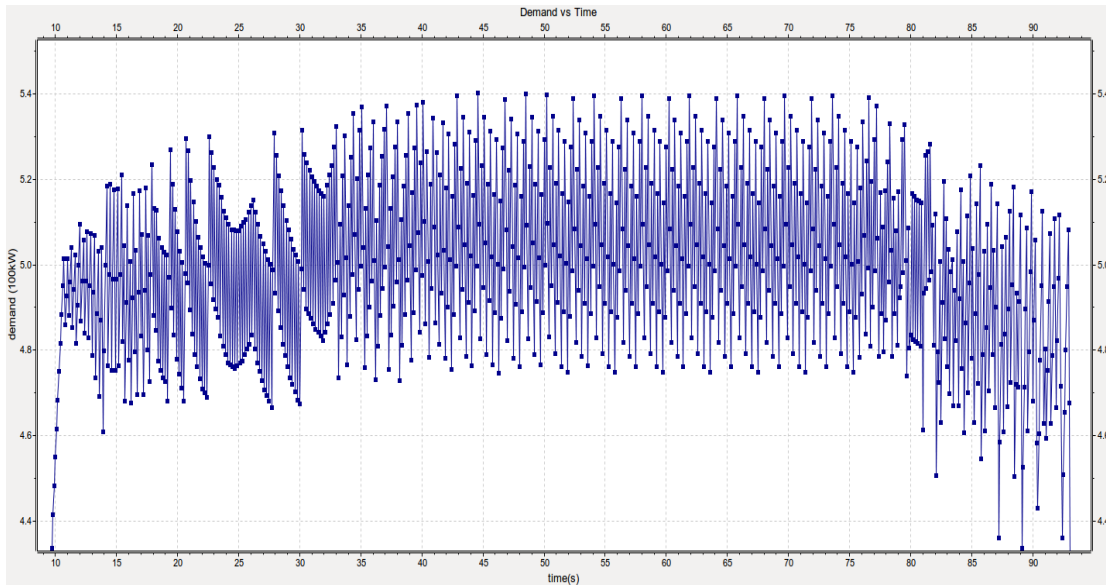
Παρατηρείται μη αποτελεσματική λειτουργία του αλγορίθμου, καθώς η ισχύς παραμένει σταθερά άνω του επιτρεπόμενου ορίου στο διάστημα  $\Delta t \approx 35 - 75s$ .

Αν θέλουμε να περιορίσουμε και τη διακύμανση της ισχύος, τότε πρέπει να εισάγουμε άλλον έναν περιορισμό:

$$\alpha N \frac{\Delta t_{CSP}}{\Delta t_{veh}} < P_{max} \cdot f_{increase}, \quad f_{increase} \in [0,1],$$

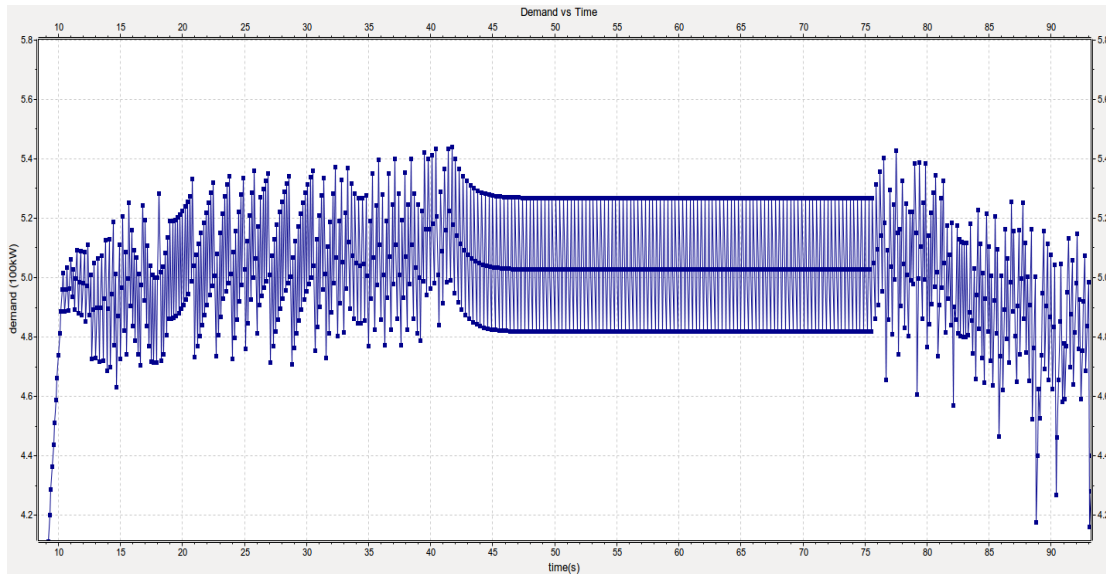
δηλαδή η αύξηση της συνολικής ζήτησης λόγω των αθροιστικών αυξήσεων να είναι μικρότερη από το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο ποσοστιαίας αύξησης της  $P_{max}$ . Οπότε, αν επιθυμούμε απόκλιση μικρότερη του 10% ( $f_{increase} < 0.1$ ), μπορούμε να θέσουμε είτε  $\frac{\Delta t_{CSP}}{\Delta t_{veh}} < 8.33$  είτε  $\alpha < 0,00166$ , ανάλογα με τη δυνατότητα των υποδομών.

Για παράδειγμα, για  $\frac{\Delta t_{CSP}}{\Delta t_{veh}} = 6.5$ , προκύπτει:



**Εικόνα 7-8** Μεγέθυνση διαγράμματος συνολικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για  $\frac{\Delta t_{CSP}}{\Delta t_{veh}} = 6.5$

και για  $\alpha=0.0015$ :



Εικόνα 7-9 Μεγέθυνση διαγράμματος συνολικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για  $\alpha=0.0015$

Παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις, η απόκλιση είναι όντως μικρότερη του 10%.

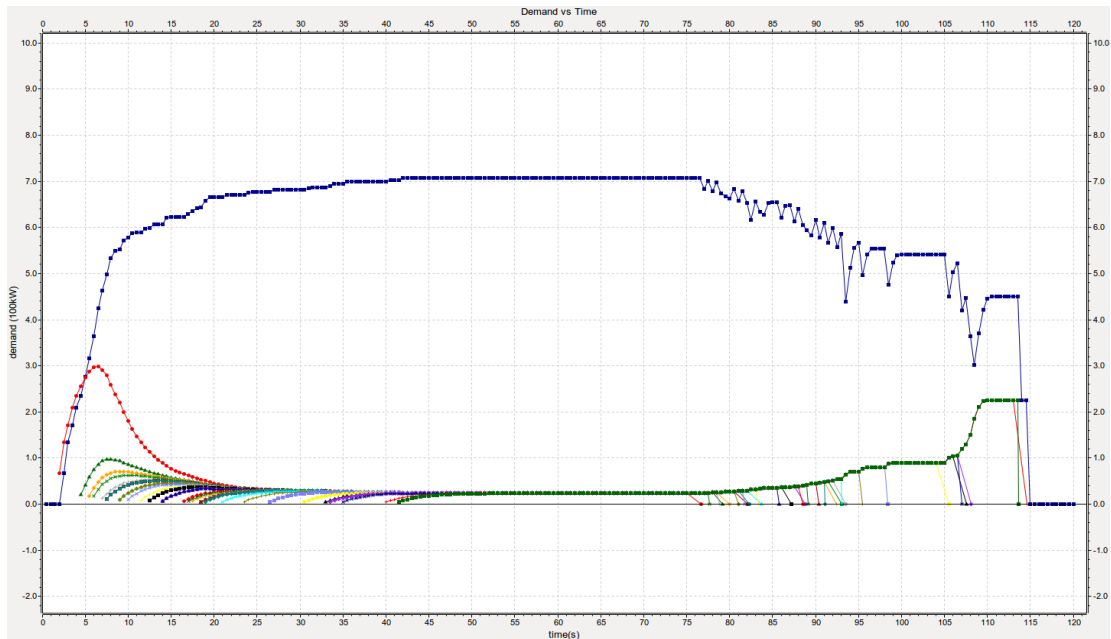
### 7.3 Αλγόριθμος Rate Control

Για την προσομοιώσεις μας έχουμε επιλέξει, χωρίς βλάβη της γενικότητας, τις παρακάτω τιμές:

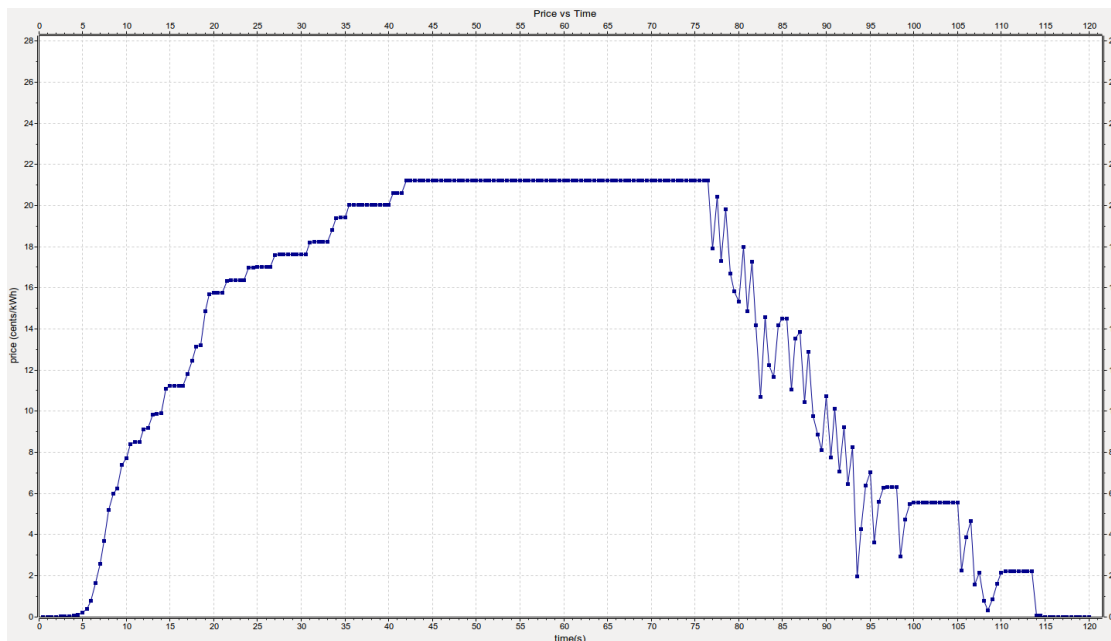
- $\alpha = 0.0012$ , και  $k=5$ , για την  $f(x)$
- $B_i = 25\text{kWh}$ ,  $\alpha_i = 0.85$  για τη συνάρτηση του SoC κάθε οχήματος.

Έπειτα, για  $w_i=5$  για κάθε όχημα και μέγιστο αριθμό οχημάτων  $N = 30$ , προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα:





Εικόνα 7-10 Διάγραμμα συνολικής και ατομικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για  $w_i = 5, N = 30$

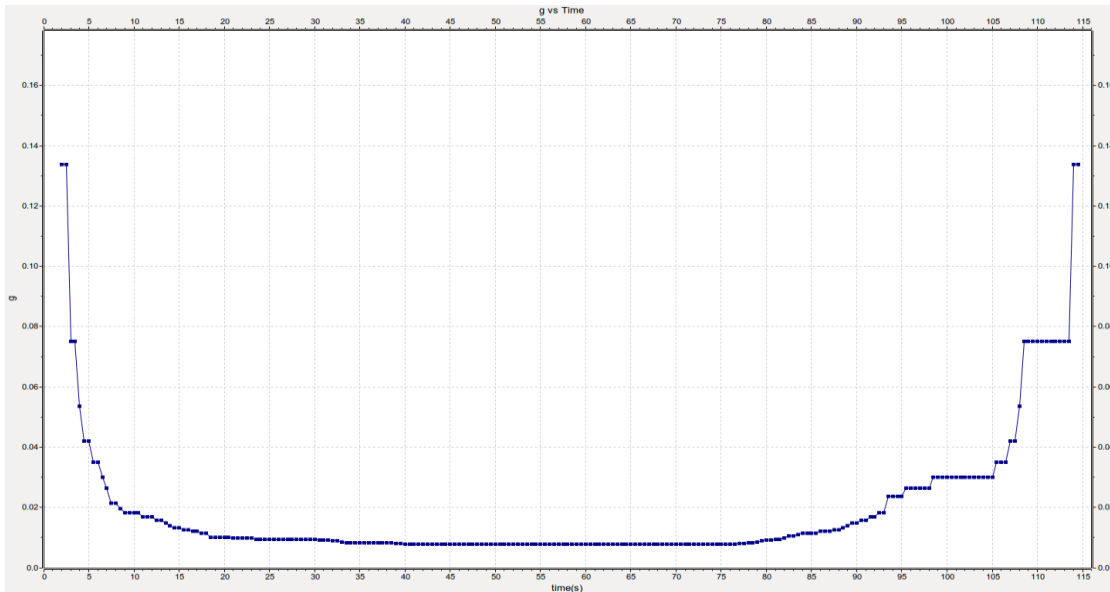


Εικόνα 7-11 Διάγραμμα τιμής ηλεκτρικής ενέργειας (σε cents/kWh) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για  $w_i = 5, N = 30$

Στο πρώτο γράφημα φαίνεται η ζήτηση του κάθε οχήματος (οι καμπύλες με τις χαμηλές τιμές) και η συνολική ζήτηση του στόλου. Παρατηρούμε ότι υπάρχει σύγκλιση στις θεωρητικές τιμές στην κατάσταση ισορροπίας που έχουν εμφανιστεί όλα τα οχήματα, περίπου δηλαδή την χρονική περίοδο 45-75s:

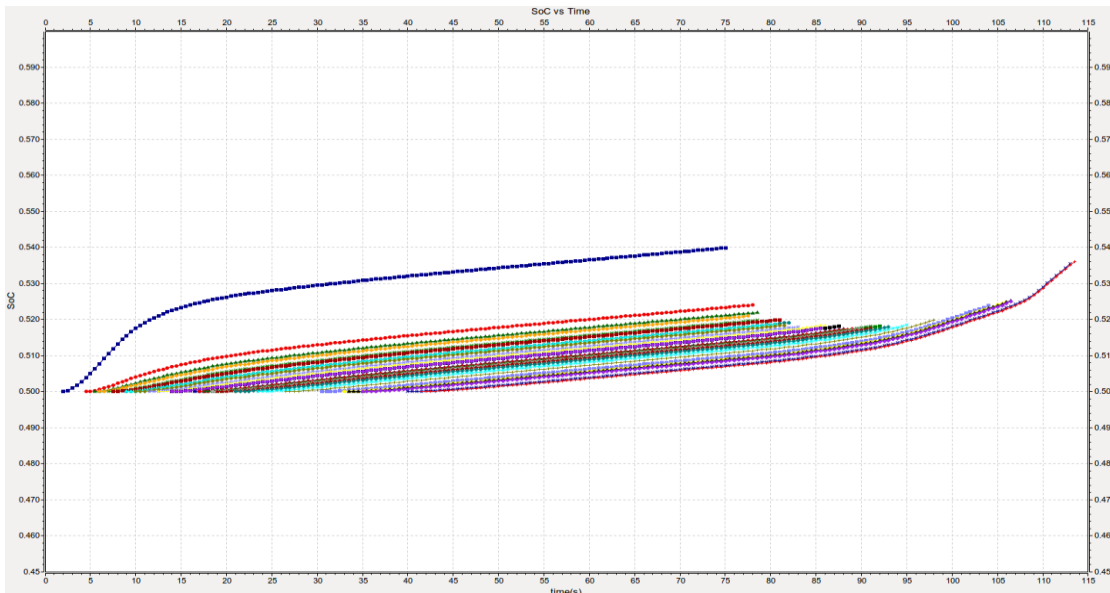
$$x^* = 707kW, x_i^* = 23.5kW, p^* \approx 21cents/kWh$$

Μπορούμε επιπλέον να δούμε την κυματομορφή του  $\gamma$ , που υπολογίζεται αυτόματα:



Εικόνα 7-12 Διάγραμμα ρυθμού σύγκλισης  $\gamma$  συναρτήσει του χρόνου (σε s) για  $w_i = 5, N = 30$

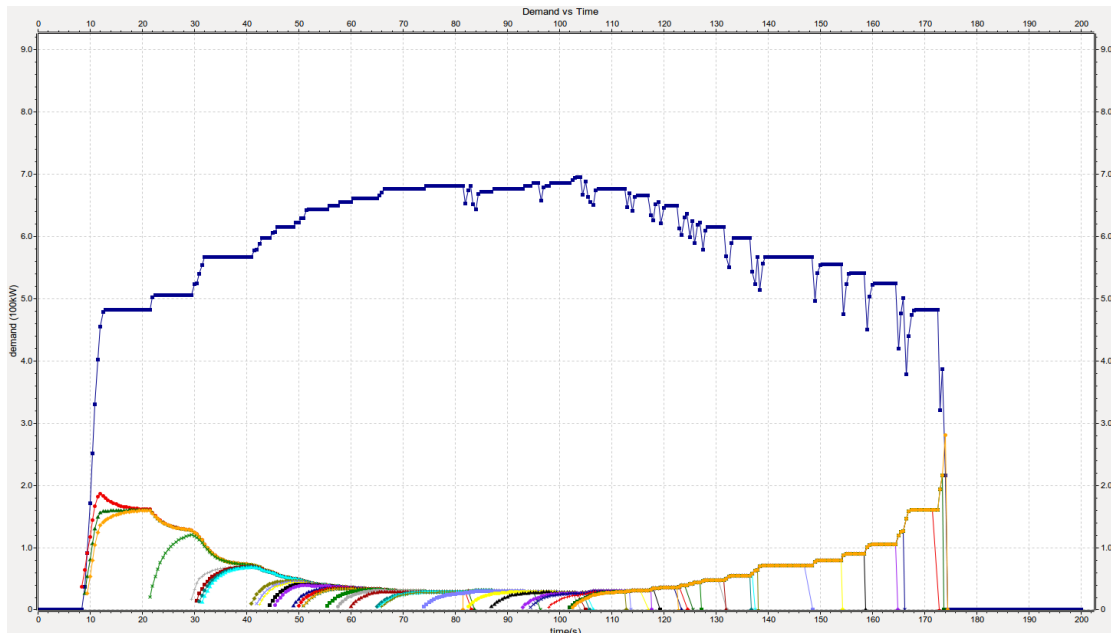
καθώς και του SOC:



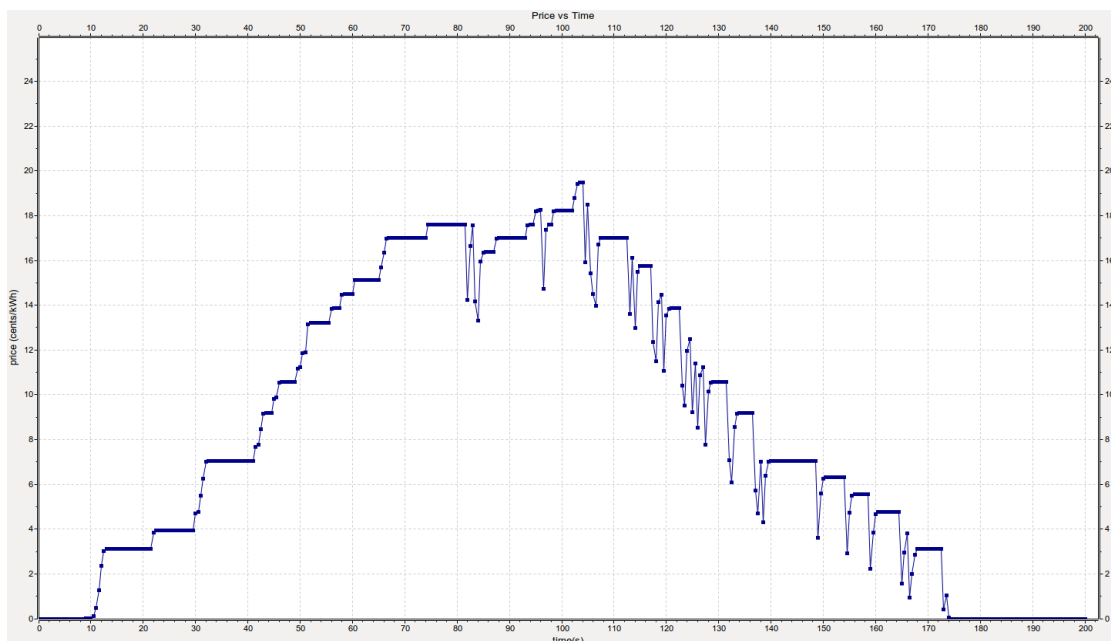
Εικόνα 7-13 Διάγραμμα κατάστασης φόρτισης SoC συναρτήσει του χρόνου (σε s) για  $w_i = 5, N = 30$

Όσον αφορά στο SoC, λόγω του μικρού μήκους του δρόμου, η μεταβολή είναι πολύ μικρή. Για λόγους πληρότητας ενσωματώθηκε στον αλγόριθμο αλλά στο εξής θα παραλείπεται η αναφορά σε αυτό.

Μπορούμε επίσης να επηρεάσουμε τους χρόνους εμφάνισης των οχημάτων, ώστε όταν εμφανιστεί το τελευταίο, να έχει ήδη ολοκληρώσει τη διαδρομή του ένας αριθμός οχημάτων. Χωρίς να μεταβάλουμε άλλη παράμετρο λοιπόν, προκύπτουν τα εξής:



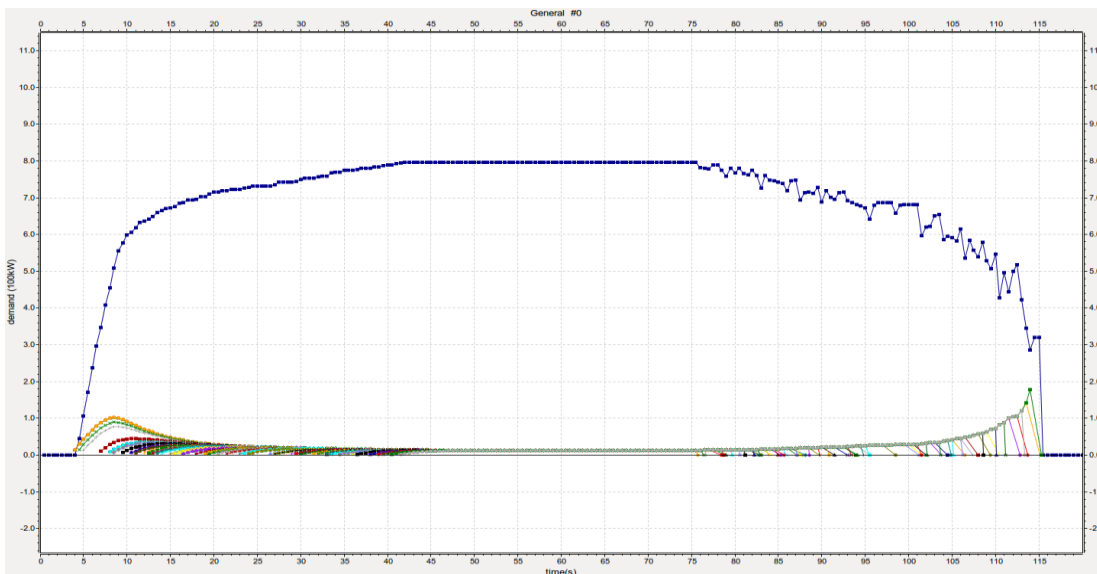
Εικόνα 7-14 Διάγραμμα συνολικής και ατομικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για  $w_i = 5$ ,  $N = 30$  με διεσπαρμένη εμφάνιση οχημάτων στο χρόνο



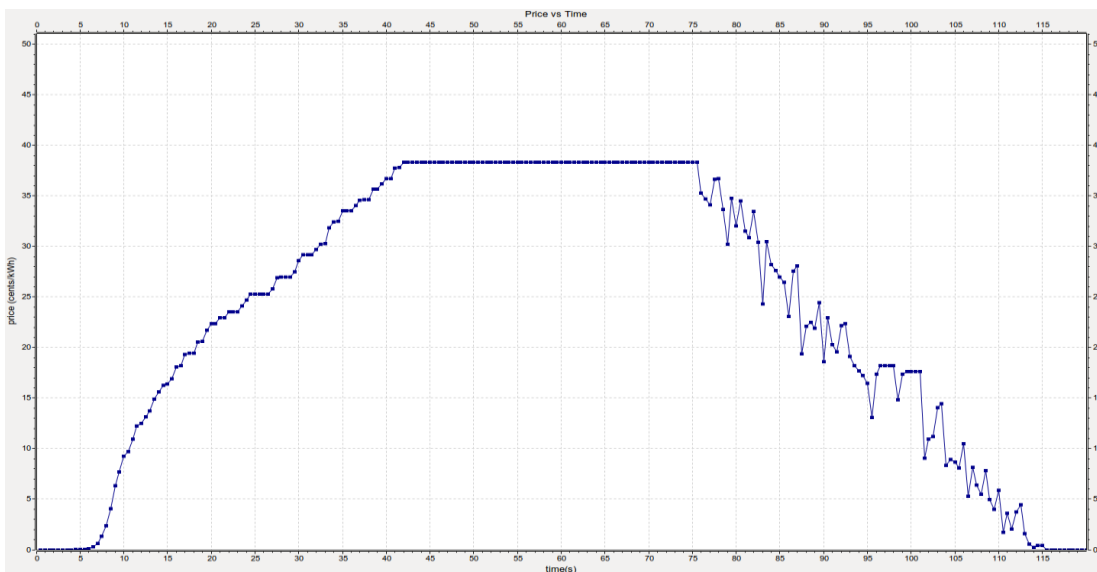
Εικόνα 7-15 Διάγραμμα τιμής ηλεκτρικής ενέργειας (σε cents/kWh) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για  $w_i = 5$ ,  $N = 30$  με διεσπαρμένη εμφάνιση οχημάτων στο χρόνο

Μπορούμε να παρατηρήσουμε κάποια τάση στις θεωρητικές τιμές αλλά λόγω του μεταβαλλόμενου αριθμού οχημάτων, τα γραφήματα αυτά δεν προσφέρουν οπτική άνεση, ώστε να είναι ξεκάθαρο το αποτέλεσμα. Εξάλλου ο αριθμός των οχημάτων δεν φτάνει ποτέ τα 30 με αυτόν τον τρόπο, με αποτέλεσμα να μην ισχύουν οι θεωρητικές τιμές που υπολογίστηκαν. Οποιαδήποτε άλλη κατάσταση επίσης, δεν έχει κάποια αξιόλογη διάρκεια, για να τη χαρακτηρίσουμε μόνιμη, με αποτέλεσμα να απορριφθεί αυτός ο τρόπος εμφάνισης οχημάτων στις προσομοιώσεις.

Εάν τώρα μεταβληθεί ο μέγιστος αριθμός οχημάτων σε  $N=60$  προκύπτουν τα εξής:



Εικόνα 7-16 Διάγραμμα συνολικής και ατομικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για  $w_i = 5$ ,  $N = 60$



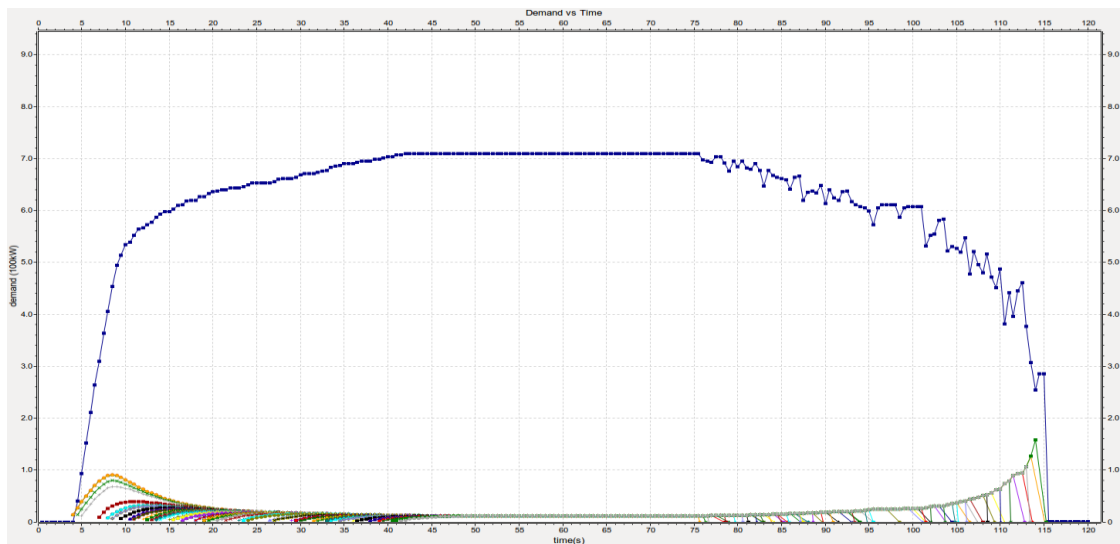
Εικόνα 7-17 Διάγραμμα τιμής ηλεκτρικής ενέργειας (σε cents/kWh) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για  $w_i = 5$ ,  $N = 60$

Παρατηρούμε ότι υπάρχει σύγκλιση στις τιμές:

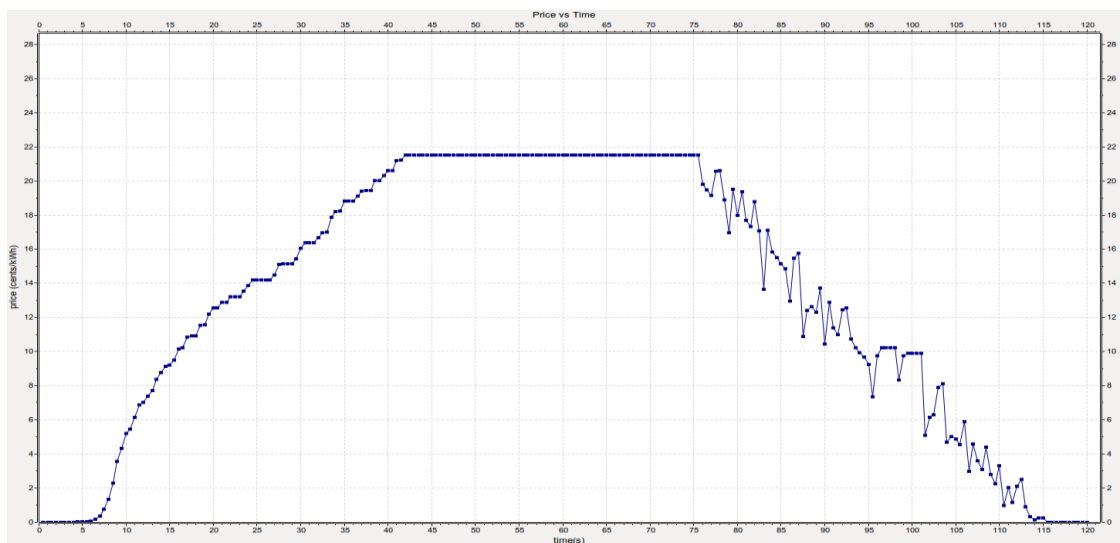
$$x^* = 794kW, x_i^* = 13kW, p^* \approx 38cents/kWh$$

Επίσης παρατηρείται αύξηση στα  $x^*$  και  $p^*$ , διότι εξαρτώνται από το  $\sum w_i$ , και μείωση στα  $x_i$  λόγω της αύξησης της τιμής ενώ μένει σταθερό το WTP.

Λόγω της εξάρτησης βέβαια από το  $\sum w_i$  μόνο, θα μπορούσαμε να πετύχουμε ίδιες τιμές στα  $x^*$  και  $p^*$  με τις αρχικές αν επιπλέον μεταβάλουμε τα  $w_i$  και τα θέσουμε ίσα με 2.5, οπότε και τα  $x_i^*$  θα μειώνονταν στο μισό. Οπότε και στις δύο περιπτώσεις προκύπτει  $\sum w_i=150$ . Μπορούμε επίσης να το επιβεβαιώσουμε και με τις προσομοιώσεις.



Εικόνα 7-18 Διάγραμμα συνολικής και ατομικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για  $w_i = 2.5, N = 60$

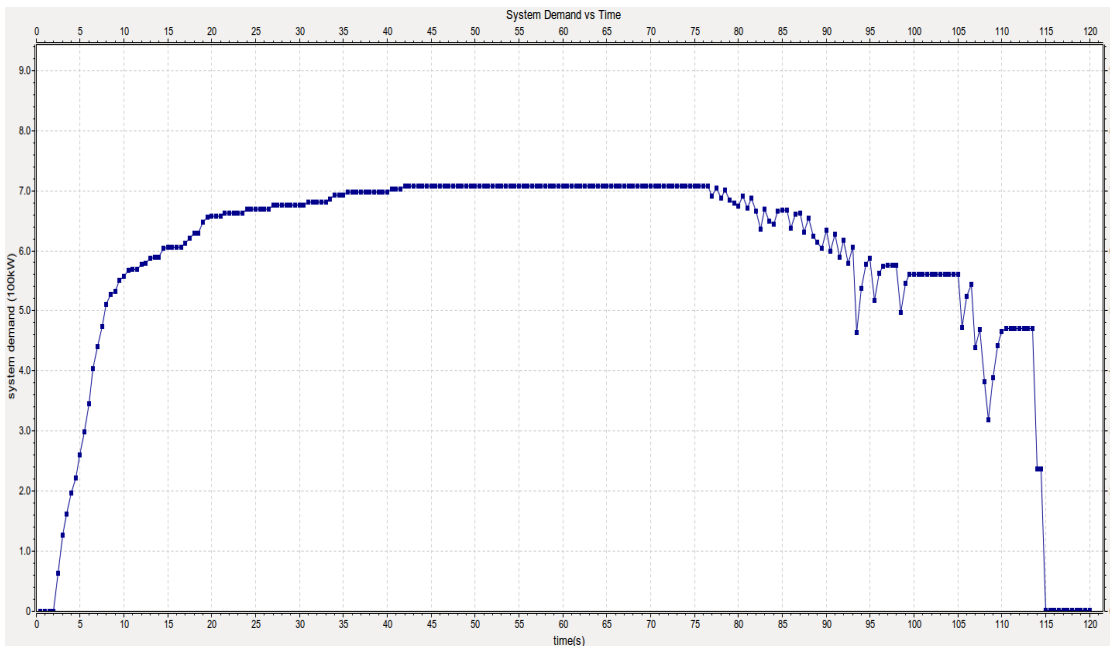


Εικόνα 7-19 Διάγραμμα τιμής ηλεκτρικής ενέργειας (σε cents/kWh) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για  $w_i = 2.5, N = 60$

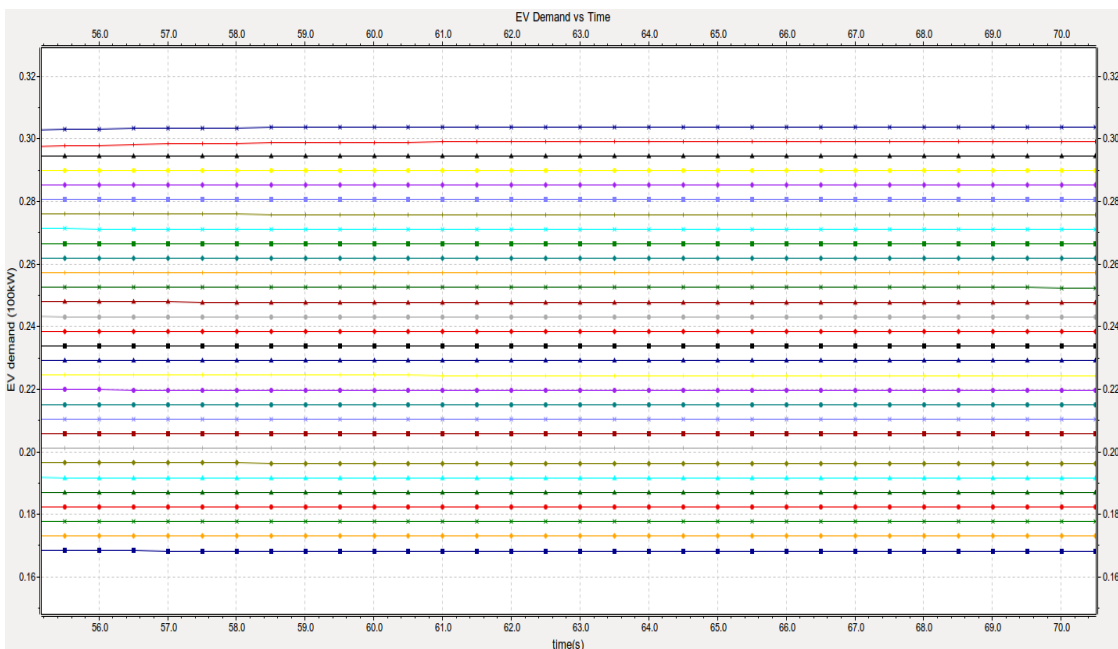
Όπως παρατηρούμε, υπάρχει σύγκλιση στις τιμές:

$$x^* = 707kW, x_i^* = 11.8kW, p^* \approx 21cents/kWh$$

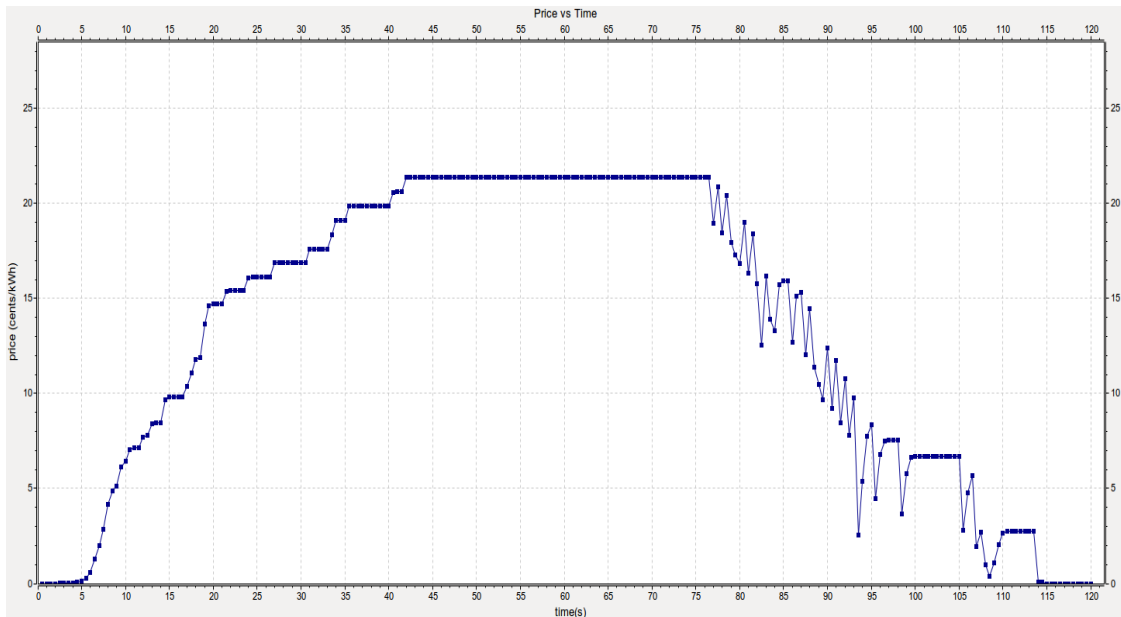
Για να ελέγξουμε και περαιτέρω την αναλογική δικαιοσύνη του αλγορίθμου, θέτουμε διαφορετικό  $w_i$  για κάθε χρήστη. Έτσι, για  $N=30$ , τα  $w_i$  ξεκινούν από 3.6 και αυξάνονται κατά 0.1, με το  $\sum w_i$  λοιπόν να παραμένει ίδιο με την αρχική προσομοίωση:



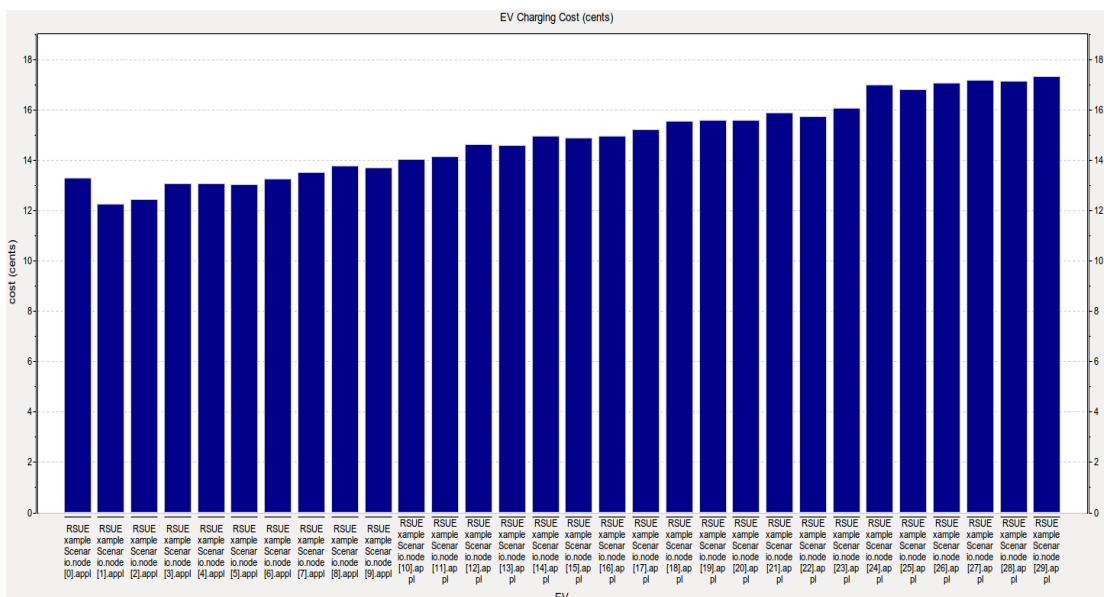
Εικόνα 7-20 Διάγραμμα συνολικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για  $w_i = 3.6..6.4, N = 30$



Εικόνα 7-21 Μεγέθυνση διαγράμματος ατομικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για  $w_i = 3.6..6.4, N = 30$



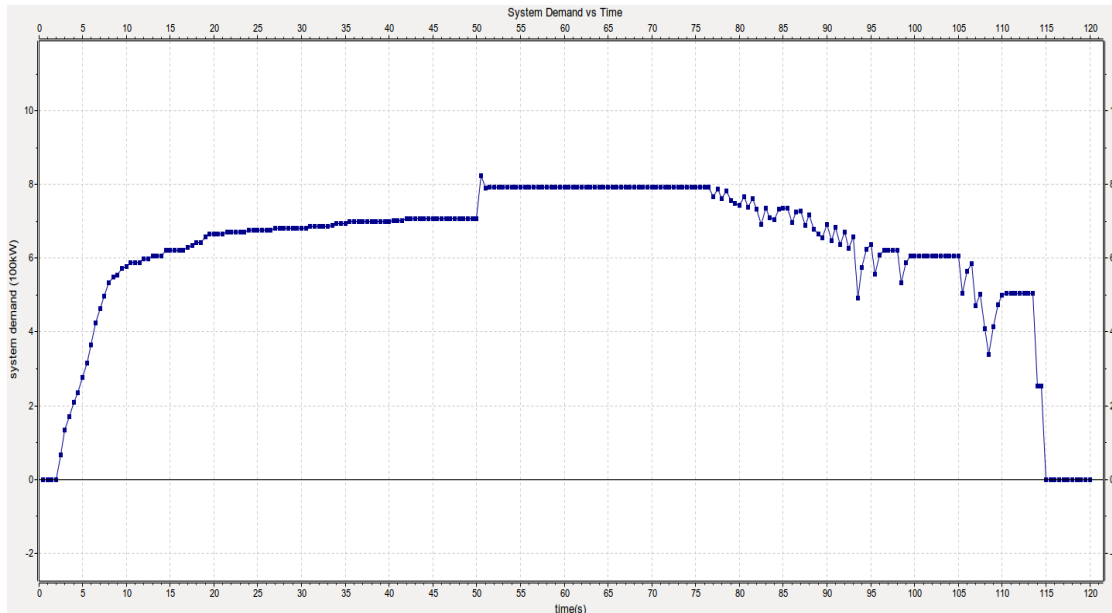
Εικόνα 7-22 Διάγραμμα τιμής ηλεκτρικής ενέργειας (σε cents/kWh) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για  $w_i = 3.6.6.4, N = 30$



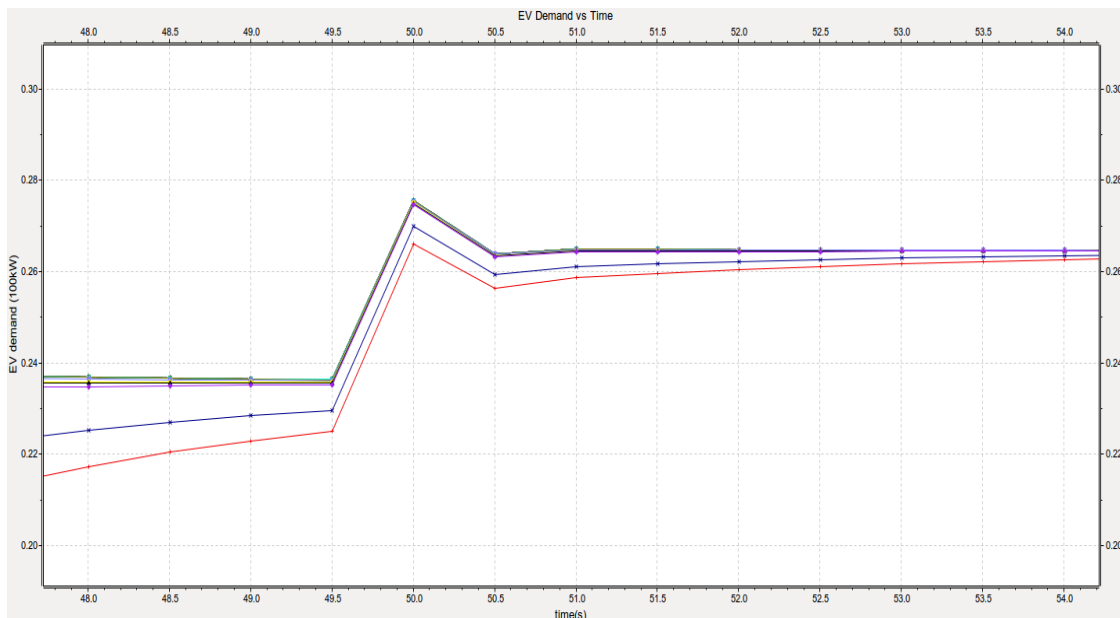
Εικόνα 7-23 Διάγραμμα κόστους φόρτισης κάθε ηλεκτρικού οχήματος (σε cents) για  $w_i = 3.6.6.4, N = 30$

Επιβεβαιώνεται λοιπόν η αναλογική δικαιοσύνη του αλγορίθμου, όπως φαίνεται από το διάγραμμα ισχύος των οχημάτων αλλά και του κόστους. Στο κόστος βέβαια δεν υπάρχει αυστηρή αναλογία λόγω του μεταβαλλόμενου αριθμού οχημάτων, και αφού το κόστος προκύπτει από το σύνολο της προσομοίωσης, δεν λαμβάνεται μόνο η κατάσταση ισορροπίας υπόψη, με αποτελέσματα να παρουσιάζονται αυτές οι «αντιφάσεις» (για παράδειγμα  $Cost_0 > Cost_1$ ). Παρατηρούνται επίσης, ως ήταν αναμενόμενο, ίδιες τιμές συνολικής ζήτησης και τιμής ηλεκτρικής ενέργειας με την αρχική προσομοίωση.

Θα μπορούσαμε επίσης να ελέγξουμε την απόκριση του αλγόριθμου σε απότομες μεταβολές του  $w_i$ . Ερχόμενοι πάλι στην περίπτωση των ίδιων  $w_i$  για όλα τα οχήματα, τα αυξάνουμε τη χρονική στιγμή  $t = 50s$  από την τιμή 5 στην τιμή 10 και προκύπτουν τα εξής:

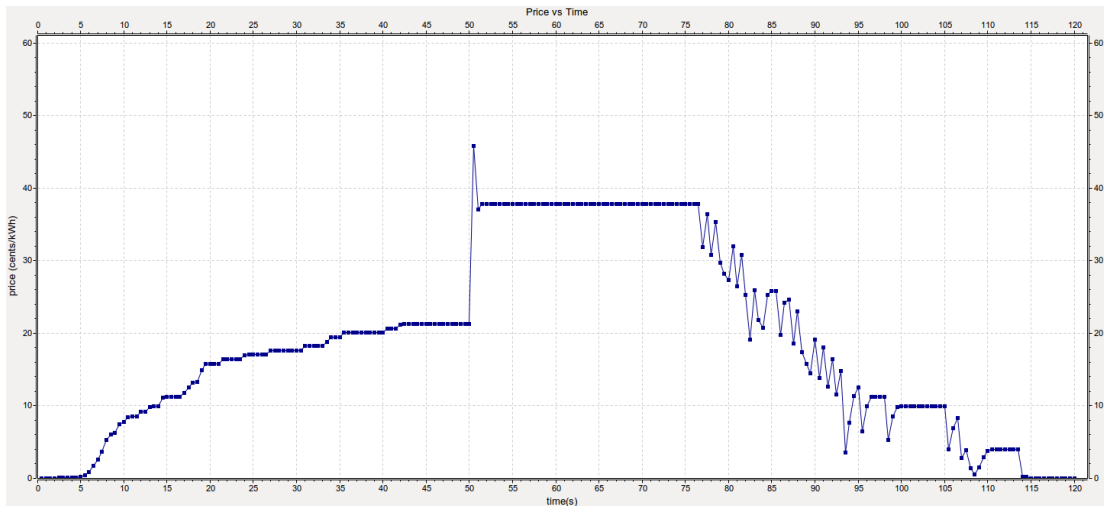


Εικόνα 7-24 Διάγραμμα συνολικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για  $w_i = 5$  σε  $w_i = 10$ ,  $N = 30$



Εικόνα 7-25 Μεγέθυνση διαγράμματος ατομικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για  $w_i = 5$  σε  $w_i = 10$ ,  $N = 30$





Εικόνα 7-26 Διάγραμμα τιμής ηλεκτρικής ενέργειας (σε cents/kWh) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για  $w_i = 5$  σε  $w_i = 10$ ,  $N = 30$

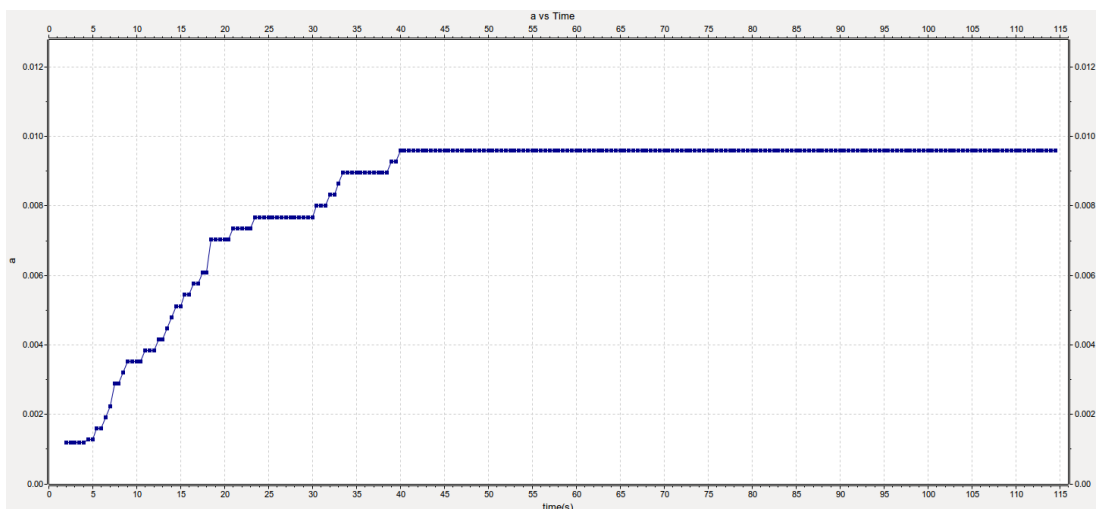
Παρατηρείται και πάλι σύγκλιση στις νέες αυξημένες τιμές κατόπιν μια μικρής αιχμής:

$$x^* = 793kW, x_i^* = 0,265kW, p^* \approx 38cents/kWh$$

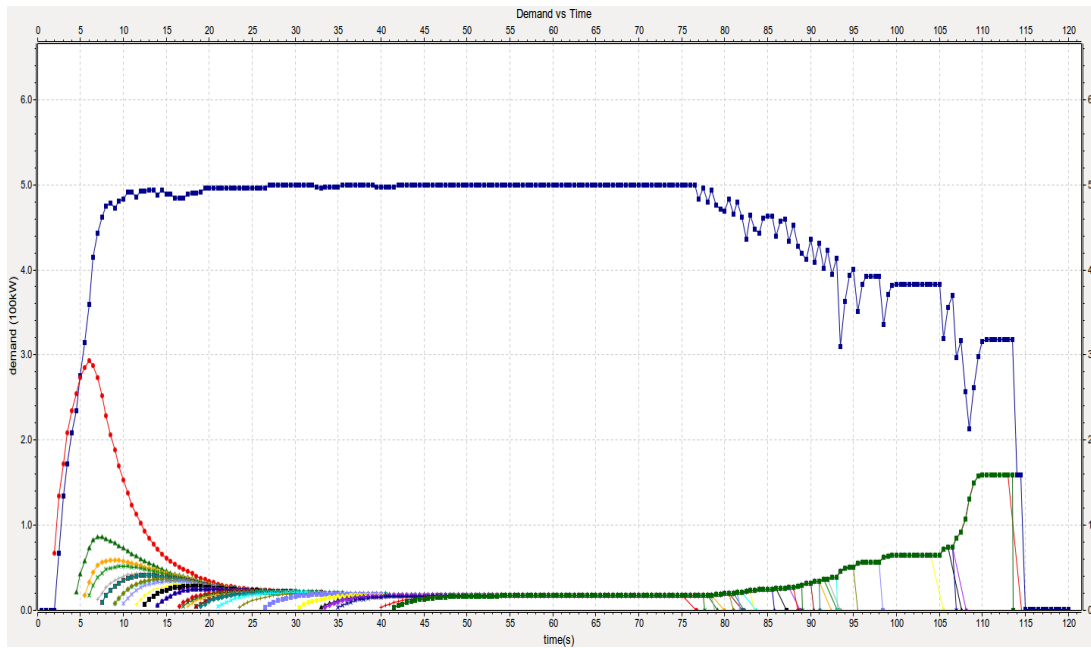
όπου τα  $x^*$  και  $p^*$  είναι ίδια με προηγούμενη προσομοίωση ( $w_i = 5$ ,  $N = 60$ ) λόγω του ίδιου  $\sum w_i = 300$ .

Φτάνουμε λοιπόν στην περίπτωση περιορισμού από το δίκτυο. Έστω ότι ο περιορισμός δίνεται μέσω της εξίσωσης  $P_{max} = 500kW$ . Με τις παραμέτρους της αρχικής προσομοίωσης λοιπόν ( $w_i = 5$ ,  $N = 30$ ) μπορούμε να εφαρμόσουμε τις δύο διαφορετικές τακτικές που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

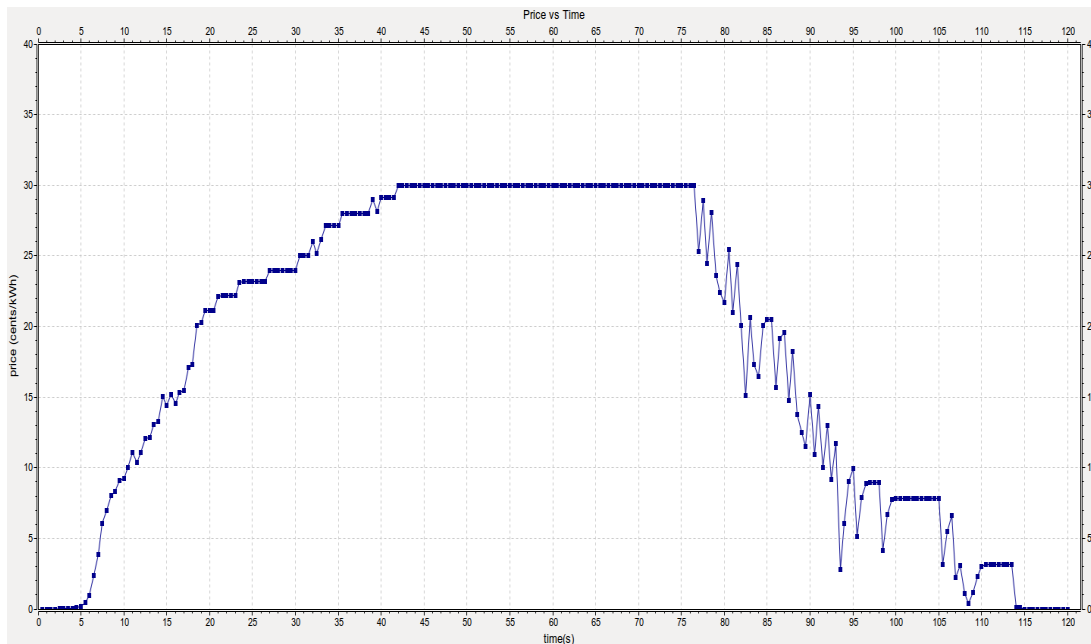
Με μεταβολή της μεταβλητής  $\alpha$  κάθε χρονική στιγμή προκύπτουν τα εξής:



Εικόνα 7-27 Διάγραμμα παραμέτρου  $\alpha$  συναρτήσει του χρόνου (σε s) για  $w_i = 5$ ,  $N = 30$ ,  $P_{max} = 500kW$



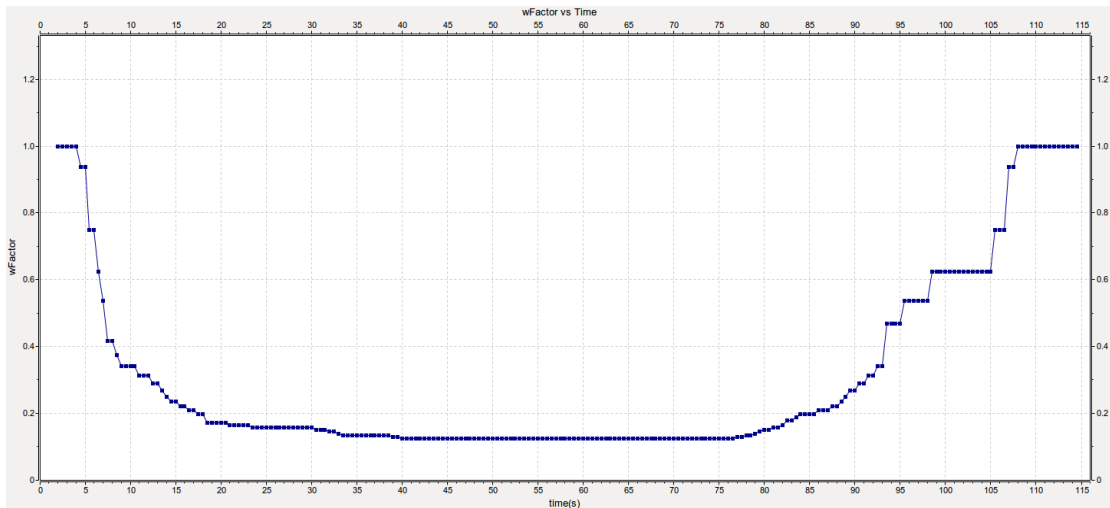
Εικόνα 7-28 Διάγραμμα συνολικής και ατομικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για  $w_i = 5$ ,  $N = 30$ ,  $P_{max} = 500kW$ , μεταβολή  $\alpha$



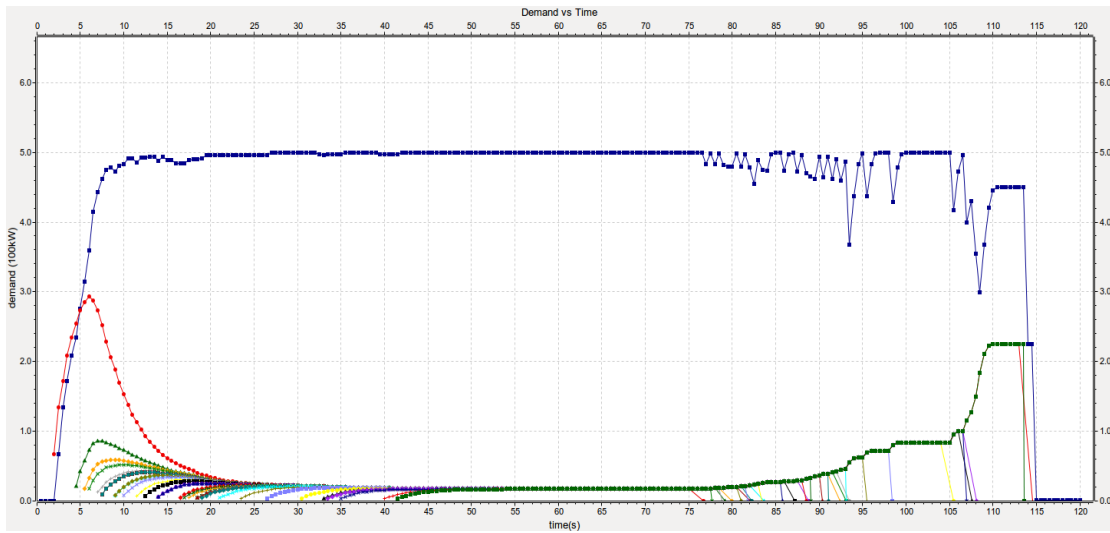
Εικόνα 7-29 Διάγραμμα τιμής ηλεκτρικής ενέργειας (σε cents/kWh) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για  $w_i = 5$ ,  $N = 30$ ,  $P_{max} = 500kW$ , μεταβολή  $\alpha$

Με επαναπροσδιορισμό των  $w_i$  κάθε χρονική στιγμή, η οποία προκύπτει με

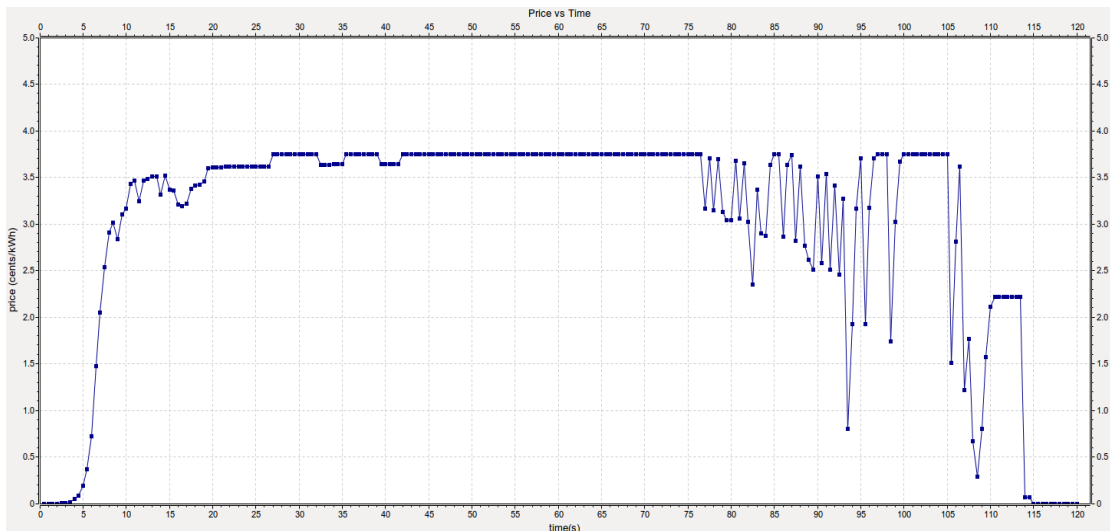
πολλαπλασιασμό των  $w_i$  με ένα παράγοντα  $wFactor = \frac{\alpha P_{max}^{k+1}}{\sum w_i}$ , προκύπτουν τα εξής:



Εικόνα 7-30 Διάγραμμα πολλαπλασιαστικού παράγοντα  $wFactor$  συναρτήσει του χρόνου (σε s) για  $w_i = 5$ ,  $N = 30$ ,  $P_{max} = 500kW$ , επαναπροσδιορισμός  $w_i$



Εικόνα 7-31 Διάγραμμα συνολικής και ατομικής ισχύος φόρτισης (σε 100kW) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για  $w_i = 5$ ,  $N = 30$ ,  $P_{max} = 500kW$ , επαναπροσδιορισμός  $w_i$



Εικόνα 7-32 Διάγραμμα τιμής ηλεκτρικής ενέργειας (σε cents/kWh) συναρτήσει του χρόνου (σε s) για  $w_i = 5$ ,  $N = 30$ ,  $P_{max} = 500kW$ , επαναπροσδιορισμός  $w_i$

Παρατηρούμε ότι και στις δύο περιπτώσεις ο περιορισμός τηρείται. Επιπλέον, τα  $x_i^*$  είναι ίδια και στις δύο περιπτώσεις, τηρώντας τις απαιτούμενες αναλογίες. Ωστόσο, στην πρώτη περίπτωση, η τιμή είναι τάξεις μεγέθους ψηλότερη από τη δεύτερη (30 και 3.75cents/kWh αντίστοιχα), καθώς μεταβάλαμε τη συνάρτηση της τιμής  $f(x)$ , με αποτέλεσμα να αυξάνεται δραματικά και το συνολικό κόστος του συστήματος από 49cents σε 294cents. Επίσης, στη δεύτερη περίπτωση γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση της διαθέσιμης ισχύος μετά τα 80s. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, η δεύτερη μέθοδος απαιτεί την εκπομπή μιας παραπάνω παραμέτρου προς όλα τα οχήματα (του wFactor).

Έχοντας ολοκληρώσει τις προσομοιώσεις, αξίζει να παρατηρηθεί το ότι στην αρχή και στο τέλος όλων των προσομοιώσεων, όπου ο αριθμός των οχημάτων είναι πολύ μικρός, τηρείται μεν η συνάρτηση τιμής, αλλά αυτό οδηγεί σε εξευτελιστικά ποσά τιμών. Θα έπρεπε λοιπόν να υπάρχει μέριμνα διαφορετικής προσέγγισης από το δίκτυο σε αυτές τις περιπτώσεις, είτε να μην γίνεται αξιοποίηση του αλγορίθμου σε πολύ χαμηλό αριθμό οχημάτων, είτε να υπάρχουν διαφορετικές συναρτήσεις τιμής ανάλογα με το μέγεθος του στόλου ηλεκτρικών οχημάτων.

## 8. Συμπεράσματα

Αναλύθηκαν και προσομοιώθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια δύο αλγόριθμοι δυναμικής φόρτισης που προέκυψαν έπειτα από κατάλληλη προσαρμογή αλγορίθμων στατικής φόρτισης.

Ο αλγόριθμος AIMD με κατάλληλη επιλογή παραμέτρων επιτελεί το σκοπό του, που είναι η τήρηση των περιορισμών ισχύος. Συνάδει απόλυτα με το πνεύμα της δυναμικής φόρτισης που απαιτεί κατανεμημένο τρόπο ελέγχου, λόγω της έντονης μεταβλητότητας, καθώς δεν χρειάζεται οποιαδήποτε μορφή επικοινωνίας εκτός από ένα σήμα ελέγχου όταν χρειαστεί. Με κατάλληλο ίσως εμπλουτισμό, θα μπορούσε να επιτελέσει και πιο σύνθετες λειτουργίες.

Ο αλγόριθμος Rate Control ομοίως καταφέρνει να ολοκληρώνει το στόχο του και να διατηρεί την ισορροπία του σε οποιαδήποτε μεταβολή. Έντονες μεταβολές του αριθμού των οχημάτων, της ισχύος και της παραμέτρου WTP δεν φάνηκε να αποτελούν πρόβλημα στην επίτευξη της σύγκλισης στις θεωρητικές βέλτιστες τιμές. Θα μπορούσε να έχει προοπτικές εξέλιξης όσον αφορά στα κριτήρια επιλογής του WTP, καθώς στην παρούσα διπλωματική εργασία ορίζεται αυθαίρετα. Οι κάτοχοι των οχημάτων θα μπορούσαν να θέτουν τους ενεργειακούς τους στόχους άμεσα ή έμμεσα και κατόπιν να ορίζεται από το σύστημα μια κατάλληλη παράμετρος WTP.

Από ενεργειακή σκοπιά, θα μπορούσε να ενταχθεί η εύρεση των περιορισμών του δικτύου με τη χρήση ίσως πιο εξειδικευμένων ενεργειακά εργαλείων, ώστε να γίνει καλύτερη προσέγγιση στις πραγματικές συνθήκες, εντάσσοντας περισσότερους ενεργειακούς φορείς στο πλαίσιο εφαρμογής.

Όσον αφορά στις παραμέτρους των οχημάτων, θα μπορούσε να υπάρξει κατηγοριοποίησή τους ανάλογα με το ποσοστό φόρτισής τους για παράδειγμα – δηλαδή οχήματα με χαμηλό ποσοστό να έχουν μεγαλύτερη προτεραιότητα στη φόρτιση – ή και ανάλογα με την χρήση του οχήματος – δηλαδή οχήματα επειγόντων καταστάσεων, όπως ασθενοφόρα και πυροσβεστικά, να λαμβάνουν προτεραιότητα, και μέσα μαζικής

μεταφοράς να φορτίζουν τη νύχτα ώστε να μην επιβαρύνουν το φορτίο και παρεμποδίζουν τη φόρτιση των οχημάτων τις ώρες αιχμής -. Η κατηγοριοποίηση αυτή θα μπορούσε να αποτυπωθεί στις αυξητικές και μειωτικές παραμέτρους του αλγορίθμου AIMD και στην παράμετρο WTP του αλγορίθμου Rate Control.

Όσον αφορά στη μπαταρία, θα μπορούσε να ενισχυθεί το σύστημα με την εισαγωγή περιορισμών στο ρυθμό φόρτισης των οχημάτων (ελάχιστος και μέγιστος ρυθμός), ώστε να τοποθετηθεί το σύστημα εγγύτερα στις πραγματικές συνθήκες, λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά της μπαταρίας και τη βελτιστοποίηση της χρήσης της, παρουσιάζοντας την ελάχιστη δυνατή καταπόνηση.

Εν τέλει, ο αλγόριθμος AIMD θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις όπου η συμφόρηση του δικτύου επικοινωνίας αποτελεί προτεραιότητα στους περιορισμούς, καθώς περιλαμβάνει την εκπομπή μόλις ενός σήματος. Λόγω της μη ένταξης της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας στη δομή του, εφαρμόζει καλύτερα και σε περιπτώσεις χαμηλού αριθμού οχημάτων και κατά συνέπεια χαμηλής ζήτησης, και θα μπορούσε να προηγηθεί του αλγορίθμου Rate Control, καθώς σε τέτοιες καταστάσεις ο αλγόριθμος Rate Control οδηγεί σε εξευτελιστικά ποσά τιμών. Η χρήση του αλγορίθμου Rate Control από την άλλη πλευρά, είναι αποτελεσματικότερη σε περιπτώσεις μεγάλης ενεργειακής ζήτησης από τα ηλεκτρικά οχήματα, καθώς παρέχει αποτελεσματικότερη διαχείριση της διαθέσιμης ισχύος λόγω του δίκαιου καταμερισμού της μέσω της παραμέτρου WTP .

# Βιβλιογραφία

- [1] Eurostat, European Environment Agency (2017). *Greenhouse gas emission statistics*. Retrieved from [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Greenhouse\\_gas\\_emission\\_statistics](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Greenhouse_gas_emission_statistics)
- [2] Eurostat (2017). *Consumption of energy*. Retrieved from [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Consumption\\_of\\_energy](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Consumption_of_energy)
- [3] Eurostat, *Energy, Transport and Environment Indicators*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016. Eurostat. Web. 19 Jul. 2017. <http://ec.europa.eu/eurostat/web/products-statistical-books/-/KS-DK-16-001>
- [4] Union of Concerned Scientists, *State of Charge, Electric Vehicles' Global Warming Emissions and Fuel-Cost Savings across the United States*. Cambridge: UCS Publications, 2012. Union of Concerned Scientists. Web. 19 Jul. 2017. <http://www.ucsusa.org/clean-vehicles/electric-vehicles/emissions-and-charging-costs-electric-cars#.WW6sAoSGOUk>
- [5] European Environment Agency, *Electric vehicles in Europe*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016. European Environment Agency. Web. 19 Jul. 2017. <https://www.eea.europa.eu/publications/electric-vehicles-in-europe/#parent-fieldname-title>
- [6] European Commission (2017). *Vehicle categories*. Retrieved from [https://ec.europa.eu/transport/road\\_safety/topics/vehicles/vehicle\\_categories\\_en](https://ec.europa.eu/transport/road_safety/topics/vehicles/vehicle_categories_en)
- [7] International Energy Agency, *Global EV Outlook 2016*. Paris: IEA Publications, 2016. International Energy Agency. Web. 19 Jul. 2017. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/global-ev-outlook-2016.html>
- [8] A. Khaligh and 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, pp. 2806-2814, 2010.
- [9] MERGE, WP 1, Task 1.1, Deliverable D1.1, *Specification For an Enabling Smart Technology*. 3 Aug. 2010.

- [10]MERGE, WP 5, Task 5.1, Deliverable D5.1, *New Actors and Business Models for the Integration of Electric Vehicles in Power Systems*, 4 Feb. 2011
- [11]Ευάγγελος Λ. Καρφόπουλος, *Συμβολή στη διαχείριση των ηλεκτρικών οχημάτων για την αποδοτικότερη ενσωμάτωσή τους στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας*, ΕΜΠ, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Μάρτιος 2017
- [12]Θανόπουλος Αντώνης, *Ηλεκτρικά Αυτοκίνητα και Συστήματα Τροφοδοσίας τους*, ΕΜΠ, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Ιούνιος 2015
- [13]Χαράλαμπος Μαρμαράς, *Προγραμματισμός, Κατανομή και Διαχείριση Φορτίου Ηλεκτρικών Οχημάτων βάσει Οικονομικών και Δικτυακών Κριτηρίων*, ΕΜΠ, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Μάρτιος 2012
- [14]Χάρης Δούκας, Καρακώστα, Ιωάννης Ψαρράς, *Σύγχρονες Τάσεις στο Σχεδιασμό και τη Χάραξη Βιώσιμης Ενεργειακής Πολιτικής για την Προώθηση Καθαρών Τεχνολογιών*, ΕΜΠ, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Εργαστήριο Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης, Μάρτιος 2010
- [15]A. Foley, I. Winning and B. O Gallachoir, "*State-of-the-art in electric vehicle charging infrastructure*", 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2010.
- [16]Eurelectric, *Smart Charging: steering the charge, driving the change*, March 2015
- [17]CEN-CENELEC eMobility Coordination Group, CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group, *WG Smart Charging Report – Smart Charging of electric vehicles in relation to smart grid*, 8 May 2015. CEN-CENELEC. Web. 19 Jul. 2017. <https://www.cencenelec.eu/standards/Sectors/Transport/ElectricVehicles/Pages/default.aspx>
- [18]Q. Wang, X. Liu, J. Du and F. Kong, "*Smart Charging for Electric Vehicles: A Survey From the Algorithmic Perspective*", IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, no. 2, pp. 1500-1517, 2016.
- [19]Hu, H. Morais, T. Sousa and M. Lind, "*Electric vehicle fleet management in smart grids: A review of services, optimization and control aspects*", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 56, pp. 1207-1226, 2016.
- [20]O. Sundstrom and 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.



- [21]E. Karfopoulos, C. Marmaras, N. Hatziargyriou: “*Charging Control Model for Electric Vehicle Supplier Aggregator*”, 3<sup>rd</sup> ISGT Conference, IEEE, Berlin, Germany, Oct. 2012.
- [22]Sortomme, E., Hindi, M., MacPherson, S. and Venkata, S. *Coordinated Charging of Plug-In Hybrid Electric Vehicles to Minimize Distribution System Losses*. IEEE Transactions on Smart Grid, 2(1), pp.198-205, 2011.
- [23]Karfopoulos, E. and Hatziargyriou, N. *A Multi-Agent System for Controlled Charging of a Large Population of Electric Vehicles*. IEEE Transactions on Power Systems, 28(2), pp.1196-1204, 2013.
- [24]Clement-Nyns, K., Haesen, E. and Driesen, J. *The Impact of Charging Plug-In Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid*. *IEEE Transactions on Power Systems*, 25(1), pp.371-380, 2010
- [25]Fluhr, J., Ahlert, K. and Weinhardt, C. *A Stochastic Model for Simulating the Availability of Electric Vehicles for Services to the Power Grid*. 2010 43rd Hawaii International Conference on System Sciences, 2010.
- [26]Su, W. and Chow, M. *Evaluation on intelligent energy management system for PHEVs/PEVs using Monte Carlo method*. 2011 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011.
- [27]Couillet, R., Perlaza, S., Tembine, H. and Debbah, M. *Electrical Vehicles in the Smart Grid: A Mean Field Game Analysis*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 30(6), pp.1086-1096, 2012
- [28]Tushar, W., Saad, W., Poor, H. and Smith, D. *Economics of Electric Vehicle Charging: A Game Theoretic Approach*. IEEE Transactions on Smart Grid, 3(4), pp.1767-1778, 2012
- [29]Yang, J. and Yang, Z. *Optimal scheduling of electric vehicle using dual decomposition*. The 26th Chinese Control and Decision Conference (2014 CCDC), 2014
- [30]Shao, C., Wang, X., Shahidehpour, M., Wang, X. and Wang, B. *Partial Decomposition for Distributed Electric Vehicle Charging Control Considering Electric Power Grid Congestion*. IEEE Transactions on Smart Grid, 8(1), pp.75-83, 2017
- [31]W. Zhang, D. Zhang, B. Mu, L. Wang, Y. Bao, J. Jiang and H. Morais, “*Decentralized Electric Vehicle Charging Strategies for Reduced Load Variation*

- and Guaranteed Charge Completion in Regional Distribution Grids*", *Energies*, vol. 10, no. 2, p. 147, 2017.
- [32]O. Sundstrom and 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.
- [33]F. Kelly, A. Maulloo and D. Tan, "*Rate control for communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability*", *Journal of the Operational Research Society*, vol. 49, no. 3, pp. 237-252, 1998.
- [34]F. Kelly, "*Charging and rate control for elastic traffic*", *European Transactions on Telecommunications*, vol. 8, no. 1, pp. 33-37, 1997.
- [35]Fan, "*A Distributed Demand Response Algorithm and Its Application to PHEV Charging in Smart Grids*", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 3, pp. 1280-1290, 2012.
- [36]S. Stüdli, E. Crisostomi, R. Middleton and R. Shorten, "*A flexible distributed framework for realising electric and plug-in hybrid vehicle charging policies*", *International Journal of Control*, vol. 85, no. 8, pp. 1130-1145, 2012.
- [37]C. Wang and M. de Groot, "*Managing end-user preferences in the smart grid*", *Proceedings of the 1st International Conference on Energy-Efficient Computing and Networking - e-Energy '10*, 2010.
- [38]A. Ganesh, K. Laevens and R. Steinberg, "*Congestion pricing and user adaptation*", *Proceedings IEEE INFOCOM 2001. Conference on Computer Communications. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Society (Cat. No.01CH37213)*.
- [39]H. Bessembinder and M. Lemmon, "*Equilibrium Pricing and Optimal Hedging in Electricity Forward Markets*", *The Journal of Finance*, vol. 57, no. 3, pp. 1347-1382, 2002.
- [40]T. Stamati and P. Bauer, "*On-road charging of electric vehicles*", *2013 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2013.
- [41]Theodoros Theodoropoulos, *ICT systems for intelligent wireless dynamic EV charging*, March 2017
- [42]B. Yang and M. Johansson, "*Distributed Optimization and Games: A Tutorial Overview*", *Networked Control Systems*, pp. 109-148, 2010.