



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

**Βέλτιστος προγραμματισμός της V2G λειτουργίας των
ηλεκτρικών οχημάτων για την παροχή ενέργειας και
επικουρικών υπηρεσιών στο δίκτυο**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ευάγγελος Ε. Τσιγγούνης

Επιβλέπων : Χατζηαργυρίου Νικόλαος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2013



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

**Βέλτιστος προγραμματισμός της V2G λειτουργίας των
ηλεκτρικών οχημάτων για την παροχή ενέργειας και
επικουρικών υπηρεσιών στο δίκτυο**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ευάγγελος Ε. Τσιγγούνης

Επιβλέπων : Χατζηαργυρίου Νικόλαος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....

Χατζηαργυρίου Νικόλαος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Παπαθανασίου Σταύρος
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Γεωργιάκης Παύλος
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2013

.....
Ευάγγελος Ε. Τσιγγούνης

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

Copyright © Ευάγγελος Ε. Τσιγγούνης, 2013

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 το συγγραφέα.

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια, σε παγκόσμιο επίπεδο παρατηρείται μια συστηματική προσπάθεια για τον εξηλεκτισμό του τομέα των μεταφορών, καθώς οι τιμές των καυσίμων παραμένουν υψηλές, ενώ οι ανησυχίες για τις επιπτώσεις των εκπεμπόμενων ρύπων στο περιβάλλον γίνονται εντονότερες. Ωστόσο, η επερχόμενη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελεί και μία πρόκληση για τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Η λειτουργία και ο προγραμματισμός τους θα πρέπει να αναπροσαρμοστούν για να διαχειριστούν το επιπρόσθετο φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων έτσι ώστε να αποφευχθούν πιθανές πρόωρες επενδύσεις. Η εξυπηρέτηση των ενεργειακών αναγκών των οχημάτων θα πρέπει να γίνεται με το βέλτιστο οικονομικό τρόπο, διασφαλίζοντας παράλληλα την ομαλή λειτουργία του δικτύου.

Η αποθηκευτική χωρητικότητα των συσσωρευτών ενός στόλου ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να αξιοποιηθεί επιχειρηματικά από τους παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας (με την υποστήριξη των εταιρειών τηλεπικοινωνιακών και πληροφοριακών συστημάτων). Η δυνατότητα αμφίδρομης ροής ισχύος από το δίκτυο προς το ηλεκτρικό όχημα (Grid-to-Vehicle - G2V) και ανάστροφα (Vehicle-to-Grid – V2G), επιτρέπει την ανάπτυξη νέων επιχειρηματικών μοντέλων για την παροχή ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών στους διαχειριστές του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Η διαχείριση της ενεργειακής λειτουργίας (φόρτιση/εκφόρτιση) των συσσωρευτών των ηλεκτρικών οχημάτων στη διασυνδεδεμένη λειτουργία τους απαιτεί τη θεσμοθέτηση ενός νέου ενεργειακού παίχτη, ονόματι “*Aggregator*”.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου, ο οποίος θα αξιοποιηθεί από έναν κεντρικό διαχειριστή ενός στόλου ηλεκτρικών οχημάτων (Aggregator) με σκοπό να προγραμματίσει βέλτιστα την παροχή ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών (ρύθμιση συχνότητας και στρεφόμενη εφεδρεία) στο δίκτυο, κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστο οικονομικό κέρδος για το διαχειριστή αυτόν. Επιπρόσθετα, αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος για τον καθορισμό της λειτουργίας (operational set-points) κάθε οχήματος, σε πραγματικό χρόνο, βάσει του αρχικού ενεργειακού προγραμματισμού.

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια ιστορική αναδρομή στις τεχνολογίες ηλεκτρικών οχημάτων και περιγράφεται η λειτουργία των αγορών ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών. Στο κεφάλαιο 2, αναλύεται και στοιχειοθετείται η δυνατότητα συμμετοχής των ηλεκτρικών οχημάτων στις αγορές αυτές μέσω της V2G λειτουργίας. Στο κεφάλαιο 3, περιγράφεται η μοντελοποίηση του προβλήματος αφενός μέσω ενός συστήματος μεταβλητών και εξισώσεων, που απαρτίζουν τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης και αφετέρου μέσω διαγραμμάτων ροής, που απαρτίζουν τον αλγόριθμο της φάσης κατανομής. Στο κεφάλαιο 4, το παραπάνω πρόβλημα «μεταφράζεται» σε μορφή κατανοητή από το προγραμματιστικό περιβάλλον GAMS. Στο κεφάλαιο 5, αξιολογείται η αποδοτικότητα των αλγορίθμων αυτών μέσω προσομοιώσεων με πραγματικά δεδομένα αγορών ηλεκτρικής ενέργειας (ERCOT), ενώ στο κεφάλαιο 6 συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα της ανάλυσης αυτής.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ηλεκτρικά οχήματα, aggregator, vehicle-to-grid (V2G), επικουρικές υπηρεσίες, ρύθμιση συχνότητας, στρεφόμενη εφεδρεία, προγραμματισμός, μεγιστοποίηση κέρδους

ABSTRACT

In the last few years, there has been a worldwide, systematic effort to electrify the sector of transportation as fuel prices remain high, and concerns about the impact of pollutants emitted into the environment become more pronounced. However, the upcoming penetration of electric vehicles is also a challenge for the electrical grids. Their operation and planning should be adjusted to handle the additional load of electric vehicles so as to avoid possible early investments. The satisfaction of the vehicles' energy needs should be done with a cost effective way while ensuring the smooth operation of the electrical grid.

The storage capacity of the batteries in a fleet of electric vehicles can be economically utilized by electricity providers (with the support of telecommunications and information technology companies). The bidirectional power flow from the grid to the electric vehicle (Grid-to-Vehicle, G2V) and reverse (Vehicle-to-Grid, V2G), allows the development of new business models for the provision of ancillary services to the system operators. The energy management (charging / discharging) of the batteries of the grid-connected electric vehicles requires the establishment of a new energy player named "Aggregator".

The purpose of this thesis is to develop an algorithm, which will be used by a central administrator of a fleet of electric vehicles (Aggregator), in order to schedule optimally the provision of energy and ancillary services (frequency regulation and spinning reserve) in the electrical grid, in such a way as to achieve the maximization of the economic profit of the Aggregator. Additionally, an algorithm for determining the operational set-points of each vehicle in real time, based on the energy scheduling, was developed.

Chapter 1 gives a historical overview of the electric vehicles' technologies and describes the function of energy and ancillary services markets. In Chapter 2, the potential benefits of the participation of the electric vehicles in these markets are analysed. Chapter 3 describes the mathematical modeling of the problem through a system of equations and variables that make up the optimization algorithm and through flowcharts that make up the dispatch algorithm. In chapter 4, the above mathematical problem is being "translated" into GAMS language. Chapter 5 evaluates the efficacy of the developed algorithms through a simulation with real market data (ERCOT). Finally, Chapter 6 summarizes the main conclusions of this thesis.

KEY WORDS

Electric vehicles, aggregator, vehicle-to-grid (V2G), ancillary services, frequency regulation, spinning reserves, scheduling, profit maximization

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2012-2013 στον τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. Υπεύθυνος κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας ήταν ο Καθηγητής κ. Ν. Χατζηαργυρίου, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της, καθώς κατά αυτόν τον τρόπο μου επιτράπη να ασχοληθώ με ένα θέμα, μεγάλου προσωπικού ενδιαφέροντος.

Με την ευκαιρία αυτή, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Ευάγγελο Καρφόπουλο για τη συνεχή βοήθεια, τις πολύτιμες συμβουλές και την αμέριστη καθοδήγηση, που μου παρείχε σε όλα τα στάδια ανάπτυξης και συγγραφής της παρούσας εργασίας.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, που με στήριξε με κάθε δυνατό τρόπο, υλικό και ψυχολογικό, καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου σταδιοδρομίας.

Ευάγγελος Ε. Τσιγγούνης
Μάρτιος 2013

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1	ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ.....	15
1.1	Ηλεκτρικά Οχήματα.....	15
1.2	Ιστορική Αναδρομή.....	16
1.3	Τύποι Ηλεκτρικών Οχημάτων.....	19
1.3.1	<i>Ηλεκτρικά οχήματα με συσσωρευτές (Battery Electric Vehicles/BEVs).</i>	<i>19</i>
1.3.2	<i>Υβριδικά Ηλεκτρικά Οχήματα (Hybrid Electric Vehicles/HEVs).....</i>	<i>20</i>
1.3.3	<i>Επαναφορτιζόμενα Υβριδικά Οχήματα με Ηλεκτρική Ενέργεια από Εξωτερική Πηγή (Plug-in Hybrid Electric Vehicles /PHEVs).....</i>	<i>21</i>
1.3.4	<i>Ηλεκτρικά Οχήματα με Ενεργειακά Στοιχεία (Fuel Cell Electric Vehicles/FCEVs).....</i>	<i>22</i>
1.4	Γνωρίσματα και τεχνολογίες συσσωρευτών.....	23
1.5	Κατηγορίες φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.....	24
1.6	Αγορές ηλεκτρικής ενέργειας.....	26
1.7	Αγορές επικουρικών υπηρεσιών.....	29
1.7.1	<i>Στρεφόμενη εφεδρεία.....</i>	<i>29</i>
1.7.2	<i>Ρύθμιση συχνότητας.....</i>	<i>30</i>
2	V2G ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ.....	31
2.1	Η ιδέα της V2G λειτουργίας.....	31
2.2	Η εγκατάσταση της V2G λειτουργίας.....	34
2.3	Συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στις αγορές ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών.....	38
2.4	Πιθανά επιχειρηματικά μοντέλα.....	39
2.4.1	<i>V2G λειτουργία χωρίς την ύπαρξη aggregator.....</i>	<i>42</i>
2.4.2	<i>V2G λειτουργία με την ύπαρξη aggregator.....</i>	<i>43</i>
2.5	Πλεονεκτήματα της V2G λειτουργίας.....	46
2.5.1	<i>Μεγαλύτερη διείσδυση των ΑΠΕ.....</i>	<i>46</i>
2.5.2	<i>Αξιοπιστία ηλεκτρικού δικτύου.....</i>	<i>48</i>
2.5.3	<i>Οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.....</i>	<i>50</i>
2.6	Περιορισμοί της V2G λειτουργίας.....	51
3	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ.....	55
3.1	Σκοπός κεφαλαίου.....	55

3.2	V2G προγραμματισμός (scheduling)	55
3.3	Ημερήσια έσοδα και έξοδα του aggregator	58
3.4	Περιορισμοί της βελτιστοποίησης	66
3.4.1	Περιορισμοί συσσωρευτή	66
3.4.2	Περιορισμοί ηλεκτρικής σύνδεσης	68
3.4.3	Περιορισμοί οδήγησης	69
3.4.4	Περιορισμοί δικτύου διανομής	70
3.4.5	Περιορισμοί γραμμικότητας	71
3.5	Αλγόριθμος για τη φάση της κατανομής (dispatch)	72
4	ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ	
	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΗ ΓΛΩΣΣΑ GAMS	77
4.1	Λόγοι επιλογής της γλώσσας GAMS	77
4.2	Δομή ενός μοντέλου σε GAMS	78
4.2.1	Σύνολα	80
4.2.2	Εισαγωγή Δεδομένων	81
4.2.3	Μεταβλητές	83
4.2.4	Εξισώσεις	84
4.2.5	Μοντέλα	86
4.2.6	Δήλωση επίλυσης	88
4.2.7	Επικοινωνία με το Excel	88
4.2.8	Βρόχοι	89
4.2.9	Σχόλια	90
4.2.10	Έξοδος στο GAMS	91
4.2.11	Περίληψη επίλυσης	93
4.3	Διατύπωση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σε GAMS	94
4.3.1	Σύνολα	94
4.3.2	Σταθερές	94
4.3.3	Παράμετροι	95
4.3.4	Μεταβλητές	97
4.3.5	Εξισώσεις μοντέλου	98
5	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ	
	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ	101
5.1	Σκοπός κεφαλαίου	101

5.2	Το σύστημα ERCOT	101
5.3	Παραδοχές και δεδομένα εισόδου.....	103
5.4	Αποτελέσματα.....	113
5.5	Ανάλυση ευαισθησίας για την παράμετρο $BatC(i)$	119
5.6	Ανάλυση ευαισθησίας για την παράμετρο $Trips(i,t)$	123
6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		
ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ		129
6.1	Σύνοψη και συμπεράσματα.....	129
6.2	Μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας.....	131
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ.....		133
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ		139

1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

1.1 Ηλεκτρικά Οχήματα

Ως ηλεκτρικό όχημα (Electric Vehicle/EV) ορίζουμε κάθε όχημα, το οποίο για την προώθηση του χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια μέσω ενός ή περισσότερων ηλεκτρικών κινητήρων, αντί της συνήθους πρακτικής, που επιβάλλει μία μηχανή εσωτερικής καύσης. Παρόλη την ύπαρξη διαφορετικών κατηγοριών ηλεκτρικών οχημάτων, πχ τραίνων, μοτοσυκλετών, πλοίων, αεροπλάνων κτλ, στην παρούσα εργασία θα περιορίσουμε τον όρο «ηλεκτρικά οχήματα» αποκλειστικά και μόνο στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Αν και υπάρχουν διαφορετικά είδη EVs με διαφορετικές αρχές λειτουργίας, κοινό χαρακτηριστικό όλων είναι η ύπαρξη συσσωρευτών, οι οποίοι αποθηκεύουν ενέργεια, την οποία και αποδίδουν μετά στον ηλεκτροκινητήρα, που θα καλύψει τουλάχιστον ένα μέρος της απαιτούμενης ροπής για την κίνηση των τροχών. Υπάρχουν και άλλες μορφές αποθήκευσης της απαραίτητης αυτής ενέργειας, όπως πχ τα συστήματα σφονδύλων (flywheels), τα οποία όμως δεν είναι πολύ συνηθισμένα και δεν θα μας απασχολήσουν εδώ. Όταν η αποθηκευμένη ενέργεια τελειώσει λόγω της κατανάλωσης της για την κίνηση του οχήματος ή/και άλλων λειτουργιών, που θα εξετάσουμε αργότερα, υπάρχει είτε η δυνατότητα ανανέωσης της μέσω της κατάλληλης σύνδεσης του ηλεκτρικού οχήματος σε κάποια πηγή ενέργειας, πχ το ηλεκτρικό δίκτυο, είτε η παραγωγή της πάνω στο ίδιο το όχημα. Ο έλεγχος του ηλεκτροκινητήρα γίνεται πλέον σε όλα τα EVs με ηλεκτρονικά ισχύος.

Το βασικό πλεονέκτημα των σύγχρονων ηλεκτρικών αυτοκινήτων συγκρινόμενα με τα συμβατικά βενζινοκίνητα και πετρελαιοκίνητα είναι το γεγονός ότι είναι πιο «καθαρά», υπό την έννοια ότι επιβαρύνουν πολύ λιγότερο το περιβάλλον. Οι εκπομπές καυσαερίων και ιδιαιτέρως CO₂ όταν αυτά κινούνται είναι μηδενικές και εν δυνάμει μπορεί να είναι μηδενικές και κατά την παραγωγή της απαιτούμενης για την κίνηση τους ηλεκτρικής ενέργειας, εάν αυτή προέρχεται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Μηδενικός είναι επίσης και ο θόρυβος τους αλλά και οι ανάγκες τους σε λάδια, φίλτρα και νερό. Ο ηλεκτροκινητήρας και τα ηλεκτρονικά ισχύος, που χρησιμοποιούνται είναι αρκετά αξιόπιστα, ενώ μειώνουν την ενεργειακή εξάρτηση από άλλες χώρες, καθώς η ηλεκτρική ενέργεια είναι εγχώρια παραγόμενη. Επιπλέον, όπως θα δούμε παρακάτω με λεπτομέρεια, μπορούν υπό προϋποθέσεις να προσφέρουν σημαντικά οφέλη στα ηλεκτρικά συστήματα και στη διεύθυνση των ΑΠΕ σε αυτά [1].

Βασικά μειονεκτήματά τους εν συγκρίσει με τα συμβατικά αυτοκίνητα είναι προς το παρόν τα εξής: το υψηλό κόστος τους, η μικρότερη αυτονομία τους λόγω ανεπάρκειας των συσσωρευτών, το μεγάλο βάρος και ο μεγάλος όγκος των συσσωρευτών, οι μικρότερες αποδόσεις τους, η μεγάλη διάρκεια φόρτισης τους και η δυσκολία πρόσβασης σε φορτιστές.

1.2 Ιστορική Αναδρομή

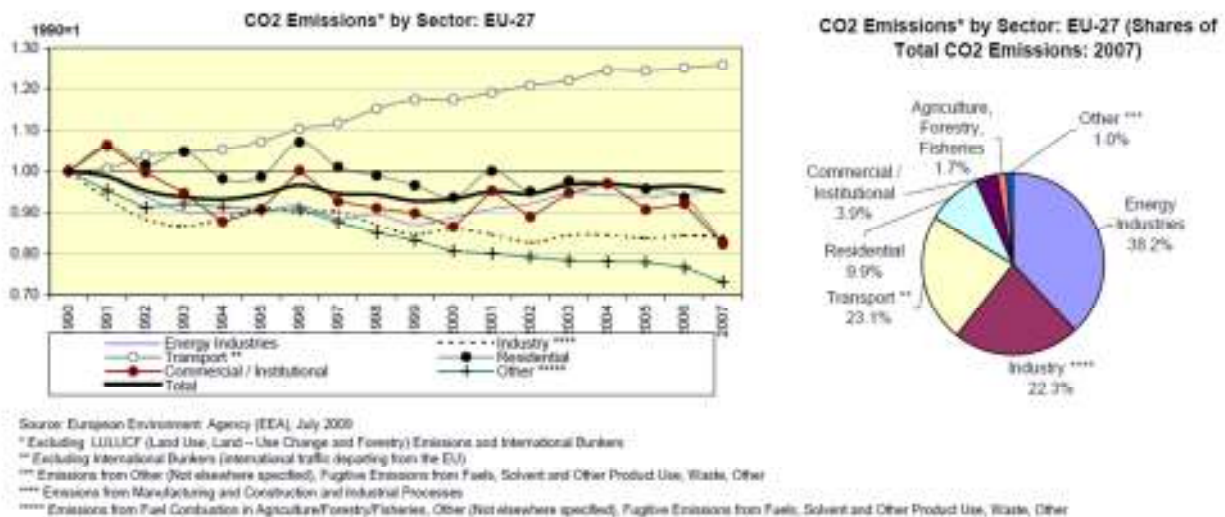
Η ιδέα των ηλεκτρικών αυτοκινήτων δεν είναι σημερινή. Αντιθέτως, πρωτοεμφανίστηκε στα μέσα του 19^{ου} αιώνα και η εφεύρεση τους αποδίδεται σε διάφορους ανθρώπους. Τα πρώτα πειραματικά μοντέλα αναπτύχθηκαν τις δεκαετίες 1830-50 κυρίως στην Ευρώπη, ανέπτυσαν ταχύτητες κάτω των 10 km/ώρα και χρησιμοποιούσαν συσσωρευτές μίας χρήσεως [2]. Σημαντική ώθηση στην περαιτέρω έρευνα δόθηκε στις δεκαετίες 1860-70, όταν και υπήρξε μεγάλη βελτίωση της τεχνολογίας των συσσωρευτών, όπως π.χ. η εφεύρεση των επαναφορτιζόμενων συσσωρευτών οξέως-μολύβδου. Όταν λίγα χρόνια μετά, άρχισε η εμπορική διάθεση τους, έλαβαν μεγάλης αποδοχής από τους καταναλωτές και στις δύο πλευρές του Ατλαντικού. Μέχρι τότε, οι υπάρχοντες τρόποι αυτοκίνησης ήταν τα ατμοκίνητα και τα βενζινοκίνητα αμάξια. Τα ηλεκτροκίνητα, παρά την περιορισμένη ταχύτητα και αυτονομία τους, πρώτον δεν προκαλούσαν το θόρυβο, τη μυρωδιά και τις δονήσεις που σχετίζονταν με τα βενζινοκίνητα, δεύτερον ο ηλεκτροκινητήρας εκκινούσε πολύ ευκολότερα από το βενζινοκινητήρα, που τότε εκκινούσε χειρωνακτικά μέσω μανιβέλας και τρίτον δεν απαιτούσαν αλλαγές στις ταχύτητες, γεγονός που διευκόλυνε σημαντικά την οδήγηση. Ούτε βέβαια τα ατμοκίνητα αμάξια απαιτούσαν αλλαγή ταχυτήτων, αλλά έπασχαν αφενός από μεγάλο χρόνο εκκίνησης, έως και μισής ώρας τα κρύα πρωινά και αφετέρου από περιορισμένη αυτονομία μέχρι να ξαναχρειαστούν νερό. Έτσι λοιπόν, η δημοτικότητα των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, που χρησιμοποιούνταν κυρίως ως αυτοκίνητα πόλης καλύπτοντας μικρές σχετικά αποστάσεις, αυξανόταν συνεχώς, καταφέροντας στις αρχές του 20^{ου} αιώνα να κατέχουν έως και το 38% του συνολικού στόλου των αυτοκινήτων στις ΗΠΑ. Επιπλέον, αρκετές ήταν οι διακρίσεις των ηλεκτρικών αυτοκινήτων σε επίπεδο διαγωνισμών και ρεκόρ, με αξιοσημείωτο το όχημα του Camille Jenatzy με το όνομα “Jamais Contente” (ποτέ ικανοποιημένη στα γαλλικά), το οποίο εν έτει 1899 ήταν το πρώτο όχημα, που ξεπερνούσε την ταχύτητα των 100 km/ώρα [2].



Εικόνα 1.2.1: Μοντέλα των πρώτων ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Παρόλη την αρχική επιτυχία των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, μία σειρά από ιστορικά γεγονότα κατά τον 20^ο αιώνα άρχισαν να ανακόπτουν την ανοδική τους πορεία προς όφελος των αυτοκινήτων με μηχανή εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ). Η έντονη αστικοποίηση, η ανάλογη αύξηση του μεγέθους των πόλεων και η διάνοιξη

δρόμων απαιτούσε από τα μεταφορικά μέσα ολοένα και μεγαλύτερη αυτονομία, κάτι στο οποίο τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα εξ' αρχής υστερούσαν. Η ανακάλυψη μεγάλων κοιτασμάτων πετρελαίου κυρίως στη Β. Αμερική και η σχετικά χαμηλή τιμή του σε συνδυασμό με την εφεύρεση της εξάτμισης και της μίζας κατέστησαν τα οχήματα με μηχανή εσωτερικής καύσης αφενός πιο οικονομικά και αποδοτικά και αφετέρου πιο φιλικά στο χρήστη. Το τελειωτικό χτύπημα ήρθε από την έναρξη της μαζικής παραγωγής από τον Henry Ford του βενζινοκίνητου T-Model κατά τη δεκαετία του 1910 στις ΗΠΑ, γεγονός που σιγά σιγά κατέστησε την παραγωγή ηλεκτροκίνητων οχημάτων μη οικονομικά βιώσιμη. Για όλους τους παραπάνω λόγους σιγά σιγά η παγκόσμια αυτοκινητοβιομηχανία στράφηκε σχεδόν εξ' ολοκλήρου στα αυτοκίνητα με ΜΕΚ, με κάποιες ελάχιστες εξαιρέσεις, όπως π.χ. στη Βρετανία, όπου διατηρήθηκε μέχρι τα τέλη του αιώνα μεγάλος στόλος ηλεκτρικών οχημάτων για τη διανομή γάλακτος, ψωμιού και αλληλογραφίας [2]. Τέλος, αρκετές ισχυρές εταιρίες της βιομηχανίας πετρελαίου όπως η Mobil, πολέμησαν και υπέσκαψαν κατά καιρούς την υιοθέτηση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων ως απειλή για την κερδοφορία τους [3].

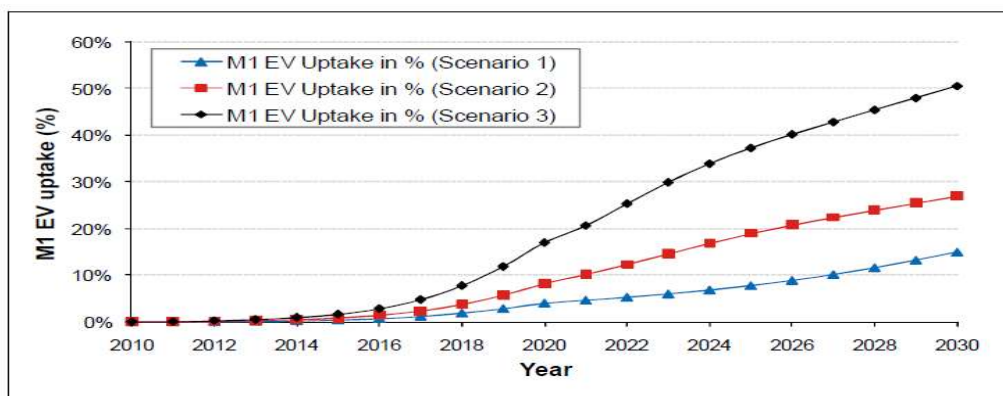


Εικόνα 1.2.2: Ο τομέας των μεταφορών κατά το έτος 2007 στην ΕΕ των 27 ήταν υπεύθυνος για το 23,1% των εκπομπών CO₂, δεύτερο μεγαλύτερο ποσοστό ανά τομέα. Επιπλέον, από το 1990 και μετά είναι ο τομέας που παρουσιάζει τη μεγαλύτερη αύξηση στις εκπομπές CO₂[4].

Η πετρελαϊκή κρίση της δεκαετίας του 1970 και η ανησυχία για την αύξηση των τιμών του πετρελαίου σε συνδυασμό με τη διόγκωση της επιρροής του οικολογικού κινήματος, συντέλεσαν σε μία αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Οι πρώτες προσπάθειες από πλευράς της πολιτείας για την ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης γίνονται στις αρχές του 1990 με την πολιτεία της California να εκδίδει την εντολή ZEV (Zero Emission Vehicle Mandate) σύμφωνα με την οποία μέχρι το 1998 το 2% του συνολικού στόλου των οχημάτων, που κυκλοφορούν στην πολιτεία θα πρέπει να είναι μηδενικής εκπομπής ρύπων, ενώ μέχρι το 2003 το ποσοστό αυτό πρέπει να έχει ανέρθει στο 10% [2]. Οι μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες ξεκινούν προγράμματα ανάπτυξης ηλεκτρικών οχημάτων,

όπως το EV1 της General Motors, το οποίο είναι αμιγώς ηλεκτρικό και τίθεται σε ευρεία παραγωγή. Ακολουθούν και άλλες εταιρίες, παράγοντας υβριδικά ή αμιγώς ηλεκτρικά αυτοκίνητα όπως η Toyota με τα μοντέλα Prius και RAV4-EV, η Honda με το EVPlus, η Ford με το Ranger Pickup EV κ.α. Παρόλα αυτά, οι στόχοι δεν φαίνεται να επιτυγχάνονται και τα πράγματα χειροτερεύουν όταν το 2002 οι εταιρίες G.M DaimlerChrysler κινούνται νομικά και κερδίζουν τη δίκη ενάντια στην πολιτεία της California όσον αφορά στην εντολή ZEV. Μάλιστα η General Motors ανακοινώνει ότι θα αποσύρει όλα τα μοντέλα του EV1 λόγω αδυναμίας παροχής ανταλλακτικών. Ως αποτέλεσμα η εντολή ZEV γίνεται πιο ελαστική, δίνοντας περιθώρια στις αυτοκινητοβιομηχανίες μέχρι το 2018 [2]. Παρόλα αυτά, η συνεχής αύξηση της τιμής του πετρελαίου τα τελευταία χρόνια και τα επακόλουθα ιστορικά χαμηλά που παρουσιάζουν οι πωλήσεις συμβατικών αυτοκινήτων παγκοσμίως σε συνδυασμό με τις δεσμεύσεις των κρατών στα όσα επιτάσσει το πρωτόκολλο του Κιότο αλλά και η οδηγία 20-20-20 της ΕΕ έχουν υπάρξει κινητήριος δύναμη για την περαιτέρω έρευνα και υιοθέτηση των ηλεκτρικών οχημάτων κατά την τελευταία δεκαετία.

Στην ΕΕ σήμερα, 17 από τα 27 κράτη μέλη εισπράττουν φόρους από τα ΙΧ, που σχετίζονται με τις εκπομπές CO₂ και 15 από τα 27 προσφέρουν φορολογικές ελαφρύνσεις για την αγορά και την κυκλοφορία ηλεκτρικών αυτοκινήτων [5]. Πιο συγκεκριμένα, στο Βέλγιο υπάρχει 30% έκπτωση στο φόρο αγοράς ενός ηλεκτρικού οχήματος, στην Κύπρο δίνεται επιχορήγηση 700€, ενώ στην Πορτογαλία τα αμιγώς ηλεκτροκίνητα αυτοκίνητα απαλλάσσονται εντελώς από το τέλος ταξινόμησης. Στη Νορβηγία, τα EVs μπορούν να κινούνται στις λεωφορειολωρίδες, ενώ στην Αγγλία σε ορισμένα σημεία μπορούν να παρκάρουν χωρίς χρέωση. Στη Γαλλία και συγκεκριμένα στο Παρίσι, έχει αναπτυχθεί το σύστημα ενοικίασης ηλεκτρικών αυτοκινήτων “Autolib”, στο οποίο μπορεί κανείς να πάρει ένα EV από τους πολλούς υπάρχοντες σταθμούς μέσα στην πόλη, να το χρησιμοποιήσει για να φτάσει στον προορισμό του και να το αφήσει σε κάποιον άλλον σταθμό με πολύ μικρή χρέωση. Στην Ελλάδα, τα ηλεκτροκίνητα και υβριδικής τεχνολογίας αυτοκίνητα δεν υπόκεινται σε τέλος ταξινόμησης και απαλλάσσονται δια βίου από τα τέλη κυκλοφορίας, ενώ επίσης εξαιρούνται των περιοριστικών μέτρων κυκλοφορίας (δακτύλιος), όπου αυτά εφαρμόζονται [6]. Τέλος, μεγάλα ερευνητικά προγράμματα που σχετίζονται άμεσα με τα EVs αναπτύσσονται με τη χρηματοδότηση της ΕΕ, όπως πχ το πρόγραμμα MERGE (Mobile Energy Resources in Grids of Electricity), που σκοπό έχει να μελετήσει τις επιπτώσεις των EVs στα ευρωπαϊκά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και να προτείνει λύσεις ώστε αυτά να είναι προετοιμασμένα και να επωφεληθούν από τον επικείμενο εξηλεκτρισμό των οχημάτων [7].



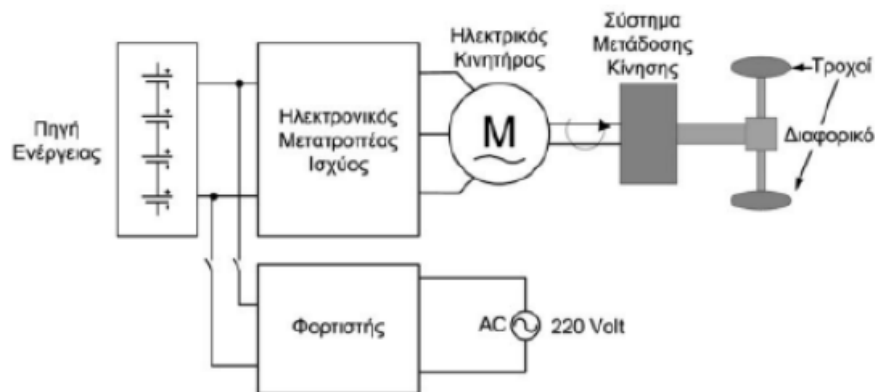
Εικόνα 1.2.3: Από τα συνολικά επιβατικά αυτοκίνητα (κατηγορία M1), που θα πωλούνται στην ΕΕ το 2030, το 15% έως το 50% θα είναι ηλεκτρικά[8].

1.3 Τύποι Ηλεκτρικών Οχημάτων

Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα είναι μία μεγάλη οικογένεια αυτοκινήτων, η οποία συνήθως διακρίνεται στις εξής βασικές κατηγορίες:

1.3.1 Ηλεκτρικά οχήματα με συσσωρευτές (Battery Electric Vehicles/BEVs)

Είναι, θα λέγαμε, τα πιο «καθαρόαιμα» ηλεκτρικά αυτοκίνητα, αφού η μοναδική πηγή ενέργειας τους είναι οι συσσωρευτές, που τροφοδοτούν τον ηλεκτροκινητήρα. Οι συσσωρευτές φορτίζονται κατά τη σύνδεση του οχήματος με το δίκτυο ή με άλλη εξωτερική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής (π.χ. φωτοβολταϊκά) μέσω κατάλληλου ρευματοδότη αλλά και εν κινήσει, μέσω της αναγεννητικής πέδησης (regenerative braking), όπου ένα μέρος της κινητικής ενέργειας του οχήματος μετατρέπεται σε ηλεκτρική, μέσω της ηλεκτρικής μηχανής, που για όσο χρόνο διαρκεί το φρενάρισμα λειτουργεί ως γεννήτρια, φορτίζοντας έτσι τους συσσωρευτές. Κατά την κίνηση τους εκπέμπουν μηδενικούς ρύπους και συνήθως χρησιμοποιούνται ως βοηθητικά οχήματα στα αεροδρόμια, σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, σε γήπεδα γκολφ κ.α. λόγω της μικρής σχετικά αυτονομίας τους [9]. Η κατάσταση αυτή όμως τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει να αλλάζει, καθώς με τη βελτίωση της τεχνολογίας των συσσωρευτών αρκετές εταιρίες έχουν ήδη κυκλοφορήσει ή αναμένεται να κυκλοφορήσουν BEVs στην αγορά των ΙΧ. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι το Nissan Leaf με 22.000 πωλήσεις παγκοσμίως μέχρι το Φεβρουάριο του 2012 και αυτονομία έως και 169 km σύμφωνα με τον κατασκευαστή, το Mitsubishi i-MiEV, το πολυτελές Tesla Roadster κ.α. [10].

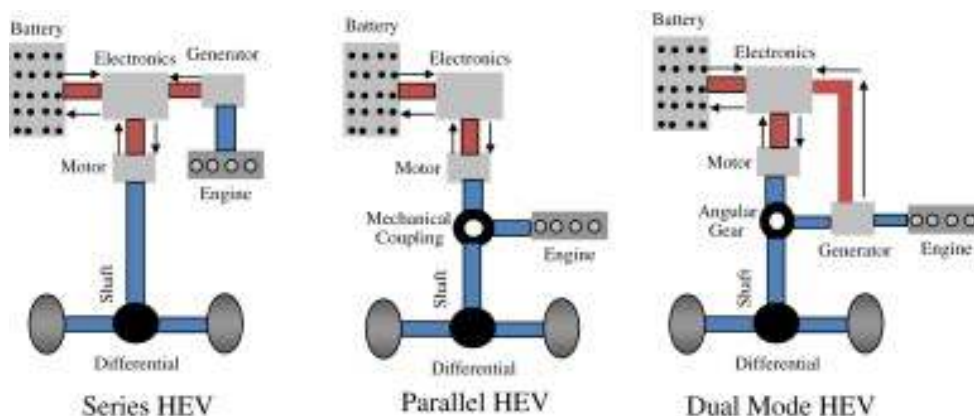


Εικόνα 1.3.1: Βασικά δομικά στοιχεία ενός BEV [11].

1.3.2 Υβριδικά Ηλεκτρικά Οχήματα (Hybrid Electric Vehicles/HEVs)

Είναι η κατηγορία αυτή, που προς το παρόν απολαμβάνει τη μεγαλύτερη εμπορική επιτυχία στην αγορά των ΙΧ ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς για την κίνηση τους είναι εφοδιασμένα τόσο με ηλεκτροκινητήρα όσο και με μηχανή εσωτερικής καύσης, που καίει συμβατικά καύσιμα, όπως βενζίνη ή πετρέλαιο. Αυτό τους επιτρέπει να έχουν αυτονομία ίση ή ακόμα και μεγαλύτερη σε ορισμένες περιπτώσεις, από αυτήν των συμβατικών αυτοκινήτων. Οι συσσωρευτές που φέρουν είναι κατά κανόνα μικρότερης χωρητικότητας από αυτές των BEVs, ενώ χρησιμοποιούν και αυτά την αναγεννητική πέδηση. Εν συγκρίσει με τα βενζινοκίνητα αυτοκίνητα, οι εκπομπές CO₂ αν και δεν είναι μηδενικές είναι πολύ χαμηλότερες και η τιμή αγοράς τους αν και ελαφρώς μεγαλύτερη, θεωρείται πλέον ανταγωνιστική. Εδώ οφείλουμε να κάνουμε μία διάκριση μεταξύ των υβριδικών σειριακής, παράλληλης και σειριακής-παράλληλης λειτουργίας.

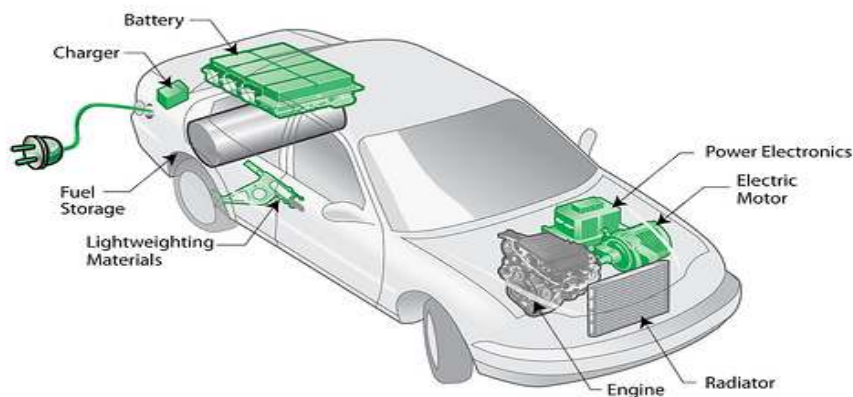
Στην παράλληλη λειτουργία, η πρόωση του οχήματος εξασφαλίζεται κάθε στιγμή είτε αποκλειστικά από τον ηλεκτροκινητήρα, είτε αποκλειστικά από τον κινητήρα εσωτερικής καύσης, οι οποίοι λειτουργούν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλον και υπάρχει η δυνατότητα επιλογής του ενός από τους δύο. Ένα από τα πρώτα υβριδικά αυτοκίνητα που χρησιμοποιούν αυτή την τεχνολογία είναι το Honda Insight. Κατά τη σειριακή λειτουργία η πρόωση του οχήματος επιτυγχάνεται αποκλειστικά και μόνον από τον ηλεκτροκινητήρα, ο οποίος λαμβάνει την απαραίτητη ενέργεια από τους συσσωρευτές. Όταν η αποθηκευμένη ενέργεια κοντεύει να τελειώσει, αναλαμβάνει δράση η μηχανή εσωτερικής καύσης, η οποία απλώς τροφοδοτεί με ενέργεια τους συσσωρευτές χωρίς ποτέ να εμπλέκεται άμεσα στη διαδικασία της πρόωσης. Τα αυτοκίνητα που χρησιμοποιούν αυτή την τεχνολογία, όπως το Opel Ampera (γνωστό και ως Chevrolet Volt στις ΗΠΑ) ονομάζονται συχνά και ηλεκτρικά οχήματα εκτεταμένης αυτονομίας (Extended Range Electric Vehicles/EREVs) διότι ουσιαστικά χρησιμοποιούν τη ΜΕΚ ως μία εφεδρική επέκταση της εμβέλειας τους. Η σειριακή-παράλληλη λειτουργία είναι στην ουσία όπως η παράλληλη λειτουργία με το επιπλέον χαρακτηριστικό ότι η ΜΕΚ μπορεί τώρα να φορτίζει τους συσσωρευτές [9]. Το Toyota Prius χρησιμοποιεί αυτήν την τεχνολογία [12]. Όλες οι παραπάνω λειτουργίες γίνονται πιο κατανοητές κοιτώντας την παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 1.3.2: Δυνατές διατάξεις υβριδικών οχημάτων [13].

1.3.3 Επαναφορτιζόμενα Υβριδικά Οχήματα με Ηλεκτρική Ενέργεια από Εξωτερική Πηγή (Plug-in Hybrid Electric Vehicles /PHEVs)

Πρόκειται για μία τεχνολογία, εξέλιξη της υβριδικής, κατά την οποία ένα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για την κίνησή τους παρέχεται από κάποια εξωτερική πηγή, που μπορεί να είναι το δίκτυο διανομής ή κάποια αυτόνομη μονάδα ηλεκτροπαραγωγής, όπως τα φωτοβολταϊκά. Τα PHEVs είναι συνήθως εφοδιασμένα με συσσωρευτές μεγαλύτερης χωρητικότητας από τα απλά HEVs, για να μπορεί να αποθηκεύεται τόσο η ηλεκτρική ενέργεια, που εγχέεται από την εξωτερική πηγή όσο και αυτή, που παράγεται πάνω στο όχημα (ΜΕΚ και αναγεννητική πέδηση). Για το σκοπό αυτό, θα πρέπει να διαθέτουν ένα ειδικό ακροδέκτη για τη σύνδεσή τους στο δίκτυο ηλεκτρικής παροχής και μία κατάλληλη συσκευή για τη φόρτιση των συσσωρευτών τους (φορτιστής). Ένα σημαντικό μέρος ή ακόμα και το σύνολο της συνήθους καθημερινής κίνησης αυτών των οχημάτων μπορεί να επιτευχθεί τοπικά με μηδενικές εκπομπές ρύπων, διότι μπορούν να κινούνται σε σημαντικές αποστάσεις (από 20 έως 60 χιλιόμετρα) ως αμιγώς ηλεκτροκίνητα με συσσωρευτές. Η λύση αυτή συνδυάζει με τον καλύτερο τρόπο τα οφέλη της ηλεκτροκίνησης για τις αστικές μετακινήσεις χωρίς τον περιορισμό αυτονομίας των BEVs και χωρίς να απαιτούνται εκτεταμένες εγκαταστάσεις δικτύων φόρτισης, διότι οι χρήστες μπορούν να χρησιμοποιούν τα συμβατικά πρατήρια καυσίμων για τον ανεφοδιασμό τους όταν αυτό απαιτείται. Τα ήδη υπάρχοντα HEVs με τις κατάλληλες προσθήκες και τροποποιήσεις μπορούν να αναβαθμιστούν σε PHEVs [14].



Εικόνα 1.3.3: Βασικά στοιχεία ενός PHEV [15].

1.3.4 Ηλεκτρικά Οχήματα με Ενεργειακά Στοιχεία (Fuel Cell Electric Vehicles/FCEVs)

Τα FCEVs είναι στην ουσία μία μορφή υβριδικών ηλεκτροκίνητων οχημάτων σειριακής λειτουργίας, τα οποία όμως για την τροφοδότηση του ηλεκτροκινητήρα και τη φόρτιση των συσσωρευτών τους χρησιμοποιούν ενεργειακά στοιχεία κυψελών καυσίμου (fuel cells) αντί για ΜΕΚ. Το χρησιμοποιούμενο καύσιμο είναι καθαρό υδρογόνο ή υδρογονάνθρακες (όπως μεθανόλη, φυσικό αέριο, κλπ.) τα οποία αποθηκεύονται σε ειδική δεξαμενή ή ακόμα μπορεί να παράγονται επί των οχημάτων. Η ηλεκτροχημική σύνθεση υδρογόνου και οξυγόνου (που απορροφάται από την ατμόσφαιρα) παράγει ηλεκτρική ενέργεια εκπέμποντας στο περιβάλλον μόνο υδρατμούς. Η τεχνολογία των οχημάτων αυτών έχει εφαρμοστεί μόνο πιλοτικά, ενώ στην παρούσα δεκαετία δεν προβλέπονται ευρύτερες εφαρμογές της για λόγους που σχετίζονται με το κόστος της, την ασύμφορη ενεργειακά παραγωγή υδρογόνου και τις δυσχέρειες μεταφοράς και διανομής του. Μακροπρόθεσμα αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία, διότι μπορεί να οδηγήσει στην κατασκευή οχημάτων τοπικής μηδενικής ρύπανσης και μεγάλης απόστασης αυτονομίας ενώ η δυνατότητα αθόρυβης και καθαρής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από αυτά τα οχήματα ίσως επιτρέψει τη χρησιμοποίησή τους και ως κινητές εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής. Τα FCEVs μπορούν να αναβαθμιστούν σε PHEVs, με την προσθήκη επιπλέον εξοπλισμού, ο οποίος θα τους επιτρέπει τη σύνδεση τους με το ηλεκτρικό δίκτυο [14].



Εικόνα 1.3.4: Σχηματική παρουσίαση ενός FCEV [16].

1.4 Γνωρίσματα και τεχνολογίες συσσωρευτών

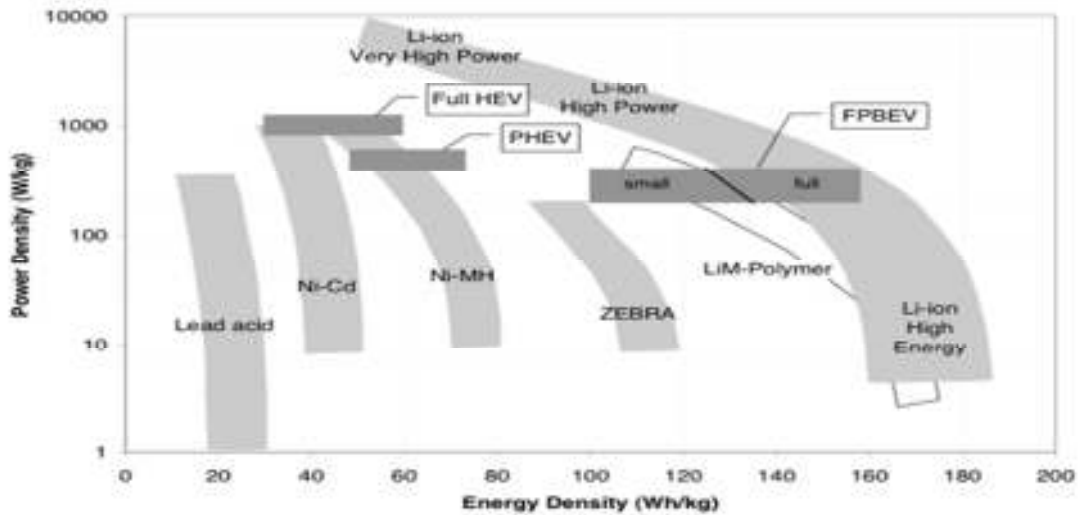
Όπως έγινε φανερό στην προηγούμενη ενότητα, κεντρικό ρόλο για την κίνηση όλων των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, ανεξαρτήτως του είδους τους, παίζει το σύστημα των συσσωρευτών. Επιπλέον, εξετάζοντας λίγο πιο προσεκτικά τα μειονεκτήματα των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, συμπεραίνουμε ότι όλα σχετίζονται με τους περιορισμούς, που επιβάλλουν οι συσσωρευτές. Για το λόγο αυτό, είναι αρκετά σημαντικό να κάνουμε μία μικρή επισκόπηση των χαρακτηριστικών τους και των ειδών τους. Τα στοιχεία που μας ενδιαφέρουν όταν εξετάζουμε έναν συσσωρευτή για ένα ηλεκτρικό όχημα είναι τα εξής [17]:

- **Πυκνότητα ενέργειας:** Μετριέται σε Wh/kg ή σε Wh/l και υποδηλώνει την ενέργεια, που μπορεί να αποθηκευτεί στο συσσωρευτή ανά μονάδα μάζας ή όγκου. Μεγάλη πυκνότητα ενέργειας συνεπάγεται και μεγάλη αυτονομία.
- **Πυκνότητα ισχύος:** Μετριέται σε W/kg ή σε W/l και υποδηλώνει τη μέγιστη ισχύ, που μπορεί να προσφέρει ένας συσσωρευτής ανά μονάδα μάζας ή όγκου. Μεγάλη πυκνότητα ισχύος προσφέρει καλές επιδόσεις στο όχημα (επιτάχυνση, τελική ταχύτητα)
- **Διάρκεια ζωής:** Μετριέται σε κύκλους και υποδηλώνει τις δυνατές επαναφορτίσεις του συσσωρευτή. Σημαντικό ρόλο στον καθορισμό αυτού του μεγέθους επίσης παίζει το βάθος εκφόρτισης.
- **Κόστος:** Μετριέται σε €/kWh και πολλαπλασιασμένο επί την αποθηκευτική ικανότητα ενός συγκεκριμένου συσσωρευτή μας δίνει το κόστος κεφαλαίου του. Το κόστος αυτό μπορεί να προέρχεται από τις απαραίτητες πρώτες ύλες, τη συναρμολόγηση του συσσωρευτή κ.α.
- **Ζητήματα ασφάλειας:** Μας ενδιαφέρει η ασφάλης για την υγεία των επιβατών λειτουργία του συσσωρευτή, τόσο σε κανονικές συνθήκες κίνησης και στάθμευσης (να μην εκτίθενται π.χ. σε πτητικά υγρά) όσο και σε έκτακτες συνθήκες, π.χ. κατά την περίπτωση σύγκρουσης του οχήματος.

Για την όσο το δυνατόν καλύτερη κάλυψη των παραπάνω απαιτήσεων έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνολογίες, οι κυριότερες από τις οποίες είναι [18]:

- Συσσωρευτές μολύβδου-οξέος (Lead-acid)
- Συσσωρευτές νικελίου-καδμίου (Ni-Cd)
- Συσσωρευτές νικελίου-μετάλλου-υδριδίου (Ni-MH)
- Συσσωρευτές τηγμένων αλάτων (ZEBRA)
- Συσσωρευτές ιόντων λιθίου (Li-ion) και λιθίου-πολυμερών (LiM-Polymer)

Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα που ακολουθεί, τι καλύτερες επιδόσεις μέχρι στιγμής τις πετυχαίνει η τεχνολογία ιόντων λιθίου και είναι γενικά αυτή που προτιμάται στα τελευταία μοντέλα των ηλεκτρικών οχημάτων. Τα δύο πιο σημαντικά μειονεκτήματα των συσσωρευτών ιόντων λιθίου είναι το, προς το παρόν, υψηλό τους κόστος και τα σοβαρά ζητήματα ασφαλείας σε υψηλές θερμοκρασίες [9].



Εικόνα 1.4.1: Χαρακτηριστικά απόδοσης των κυριότερων τύπων συσσωρευτών που είναι διαθέσιμοι στην αγορά εν έτει 2012 [14].

1.5 Κατηγορίες φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

Καταρχάς μπορούμε να διακρίνουμε δυο διαφορετικές κατηγορίες φόρτισης ανάλογα με το αν υπάρχει φυσική επαφή μεταξύ φορτιστή και οχήματος. Έτσι, διαχωρίζουμε:

- τη φόρτιση με επαφή (conductive charging), όπου για τη μετάδοση της ισχύος χρησιμοποιούνται ηλεκτρικές επαφές, οι οποίες ενώνονται μεταξύ τους, όπως ακριβώς συμβαίνει όταν βάζουμε μία καθημερινή ηλεκτρική συσκευή στην πρίζα. Το μεγαλύτερο μέρος των κυκλωμάτων φόρτισης και ελέγχου είναι ενσωματωμένο επάνω στο όχημα (on-board).
- τη φόρτιση με επαγωγή (inductive charging). Κατά την επαγωγική φόρτιση, μεταφέρεται εναλλασσόμενη ισχύς μέσω της μαγνητικής σύζευξης δύο τυλιγμάτων, με το ένα να βρίσκεται στην πλευρά της παροχής (φορτιστής) και το άλλο στην πλευρά της κατανάλωσης (όχημα). Έτσι η ισχύς ρέει από το πρωτεύον στο δευτερεύον, όπως ακριβώς και σε ένα μετασχηματιστή 2 τυλιγμάτων. Ακόμη, αφού ο συσσωρευτής έχει DC τάση και μπορεί να φορτιστεί μόνο με DC ρεύμα, το AC ρεύμα εξόδου του δευτερεύοντος τυλίγματος ανορθώνεται με την κατάλληλη διάταξη πριν φτάσει σε αυτόν. Οι επαγωγικοί φορτιστές έχουν τα περισσότερα κυκλώματα φόρτισης και ελέγχου εκτός του οχήματος, και επικοινωνούν με αυτό μέσω υπερύθρων ή ραδιοσυχνοτήτων.

Αν και η διαδικασία της επαγωγικής φόρτισης είναι πιο αυτοματοποιημένη, δεν περιέχει καλώδια και είναι γενικά πιο ασφαλής, προτιμάται η φόρτιση με επαφή,

καθώς έχει μικρότερη περιπλοκότητα και κόστος, ενώ επιτρέπει τη διέλευση ενέργειας με μικρότερες απώλειες [19].

Μία άλλη κατηγοριοποίηση των μορφών φόρτισης γίνεται με βάση με την παρεχόμενη ισχύ. Στην Ευρώπη έχει επικρατήσει ο διαχωρισμός σε 3 επίπεδα (levels)

- **Επίπεδο 1:** το πρώτο επίπεδο περιλαμβάνει τη μονοφασική AC φόρτιση, η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση των συνηθισμένων οικιακών ρευματοδοτών και παρέχει ισχύ η οποία είναι σχετικά χαμηλή σε σύγκριση με την ωρητικότητα του συσσωρευτή. Μια τυπική τιμή της παρεχόμενης ισχύος είναι τα 3 kW, πράγμα που σημαίνει ότι ένας συσσωρευτής 35 kWh θα φόρτιζε σε περίπου 12 ώρες.
- **Επίπεδο 2:** το επίπεδο αυτό περιλαμβάνει τη μονοφασική AC φόρτιση, η οποία όμως πραγματοποιείται μέσω ειδικών εγκαταστάσεων και καλωδιώσεων, καθώς τα ρεύματα είναι υψηλότερα σε σχέση με τα οικιακά. Επιπλέον, στο επίπεδο αυτό συγκαταλέγεται και η τριφασική AC φόρτιση, η οποία όμως απαιτεί πρόσβαση σε μία τριφασική παροχή και μπορεί να παρέχει υψηλότερα επίπεδα φόρτισης από ότι η μονοφασική. Τα συνήθη επίπεδα της ισχύος είναι 10-20 kW και ο συσσωρευτής των 35kWh θα φόρτιζε τώρα σε περίπου 2 με 4 ώρες.
- **Επίπεδο 3:** το επίπεδο αυτό περιλαμβάνει οποιαδήποτε φόρτιση μέσω της οποίας μπορεί να επιτευχθεί γρήγορη φόρτιση, με υψηλές τιμές ισχύος. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με DC φόρτιση, είτε με τριφασική AC φόρτιση. Και στις δύο περιπτώσεις απαιτούνται ξεχωριστές εγκαταστάσεις φόρτισης και καλωδίωσης. Τα επίπεδα της ισχύος, που εμπίπτουν σε αυτό το επίπεδο της γρήγορης φόρτισης είναι μεγαλύτερα ή ίσα των 40 kW, που μπορούν να φορτίσουν τον προαναφερθέντα συσσωρευτή σε λιγότερο από 45 λεπτά [19].

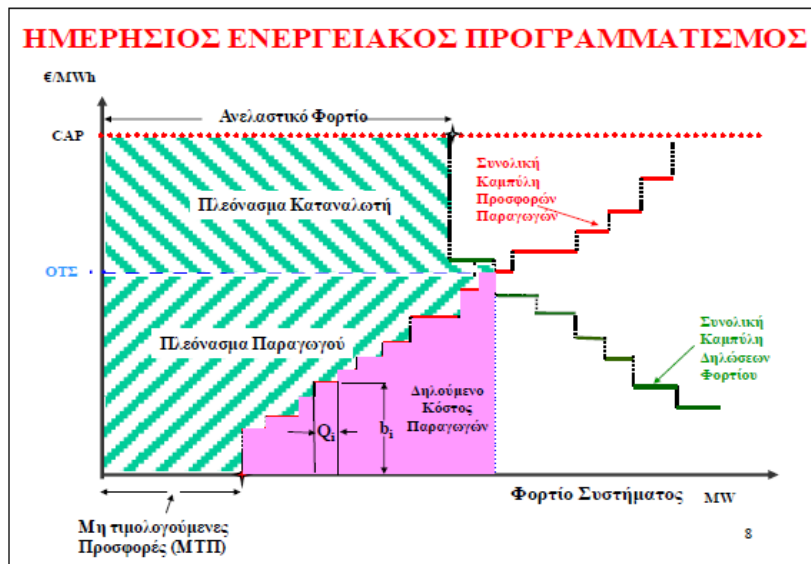
Ένα ακόμα σημαντικό ζήτημα, που άπτεται της φόρτισης, καθώς η τεχνολογία των ηλεκτρικών οχημάτων εξελίσσεται σε παγκόσμιο επίπεδο, είναι η ανάγκη θέσπισης προτύπων όσον αφορά στους ρευματοδότες και στα γενικότερα εξαρτήματα των σταθμών φόρτισης. Εάν δεν υπάρξει μία ομοιομορφία και κάθε εταιρεία παράγει τα δικά της εξαρτήματα, που θα είναι ασύμβατα με τα οχήματα των άλλων εταιρειών, υπάρχει ο κίνδυνος ο κάτοχος ενός EV να μην μπορεί να βρει εύκολα κάποιον συμβατό σταθμό φόρτισης. Από την άλλη, θα αναγκάζει τους ιδιοκτήτες των σταθμών φόρτισης σε επιπλέον έξοδα, ώστε να καλύπτουν όλες τις διαφορετικές διεπαφές. Για το λόγο αυτό, γίνονται πλέον κοινές προσπάθειες από τις αυτοκινητοβιομηχανίες και τις εταιρίες ηλεκτρολογικού εξοπλισμού για την επίτευξη συμφωνιών πάνω στη θέσπιση κάποιων standards. Στις ΗΠΑ, από τον Ιανουάριο του 2010 επικρατεί το πρότυπο SAE J1772, ενώ στην Ευρώπη παρότι δεν έχει ακόμα επιτευχθεί μία συμφωνία, επικρατέστερα πρότυπα είναι το πρότυπο Mennekes, το πρότυπο Walter, αυτό της EDF και αυτό της σύμπραξης Schneider-Legrand-Scame [19]. Όσον αφορά στην DC φόρτιση, ένας οργανισμός, αποτελούμενος κυρίως από ιαπωνικές εταιρίες και φορείς (Nissan, Mitsubishi, Toyota, TEPCO, JARI κ.α.) έχει αναπτύξει μία πατενταρισμένη τεχνολογία εν ονόματι CHAdeMO, η οποία δύναται να προσφέρει πολύ γρήγορη φόρτιση τυπικής ισχύος 50 kW και μέχρι τον Ιανουάριο του 2012 είχε εγκαταστήσει 833 τέτοιους φορτιστές στην Ιαπωνία και 160 στην Ευρώπη [20].

1.6 Αγορές ηλεκτρικής ενέργειας

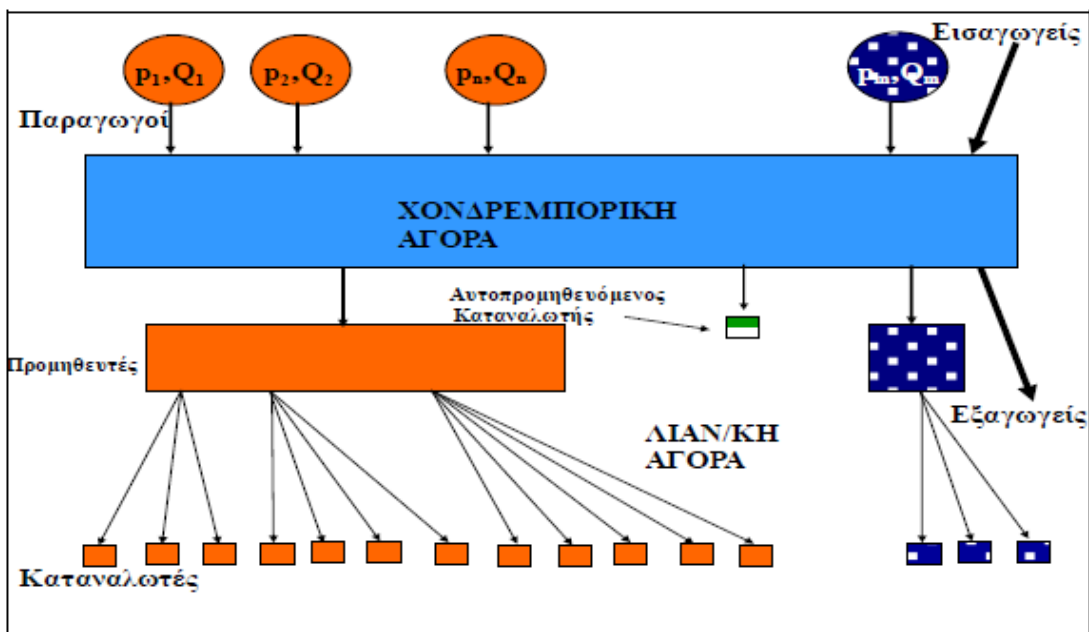
Αρχικά, πρέπει να τονίσουμε ότι οι αγορές ενέργειας ανά τον κόσμο παρουσιάζουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους, τόσο στον τρόπο λειτουργίας τους, όσο και στον ορισμό και την ονοματολογία των διαφόρων μεγεθών και υπηρεσιών. Σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης γίνεται μια προσπάθεια για ομοιομορφία των αγορών με κάποιες οδηγίες που έχουν εκδοθεί (πχ οι οδηγίες 96/92/EK, 2003/54/EK, 2009/72/EK), αλλά αυτή η προσπάθεια δεν έχει ακόμα ολοκληρωθεί. Παρόλα αυτά θα επιχειρήσουμε σε αυτό το κεφάλαιο να κάνουμε μία σύντομη αναφορά σε παράγοντες, ξεχωριστές αγορές και υπηρεσίες των απελευθερωμένων αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, που είναι αρκετά βασικά και κοινά στις διάφορες χώρες.

Η γενική λειτουργία της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας συνοψίζεται στην εφοδιαστική αλυσίδα του προϊόντος «ηλεκτρισμός». Τον αρχικό κρίκο αποτελούν οι παραγωγοί ή οι εισαγωγείς, οι οποίοι πωλούν την ηλεκτρική ενέργεια που διαθέτουν στη χονδρική αγορά (wholesale market). Οι πιθανοί αγοραστές μπορεί να είναι οι προμηθευτές (retailers), που αντιπροσωπεύουν το άθροισμα των πελατών τους, οι εξαγωγείς ή οι αυτοπρομηθευόμενοι καταναλωτές. Η τιμή της ενέργειας στη χονδρική αγορά προκύπτει ως εξής: κάθε ώρα της ημέρας κατατίθενται προσφορές (bids) από πλευράς των παραγωγών για συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας σε συγκεκριμένη τιμή (νόμισμα ανά MWh, πχ €/MWh) και για συγκεκριμένη ώρα παράδοσης του επόμενου εικοσιτετραώρου πχ 11:00-12:00. Η κατάθεση των προσφορών έχει δεσμευτικό χαρακτήρα, δηλαδή εφόσον γίνει δεν μπορεί να αποσυρθεί. Από την αντίθετη πλευρά, οι προμηθευτές καταθέτουν κι αυτοί από την προηγούμενη μέρα τις αναμενόμενες ζητούμενες ποσότητες και η τιμή του συστήματος προκύπτει από τη γραμμική ελαχιστοποίηση του γινομένου της τιμής επί την ποσότητα. Πρόκειται για μια μειοδοτική δημοπρασία, στην οποία το γινόμενο ελαχιστοποιείται στο βαθμό που καλύπτονται οι ζητούμενες ποσότητες. Το σημείο, όπου ισορροπεί η προσφορά με τη ζήτηση, αποτελεί την Οριακή Τιμή του Συστήματος ΟΤΣ (marginal price), δηλαδή την τιμή, στην οποία θα πωλήσουν οι παραγωγοί την ενέργεια τους ανεξάρτητα από την ποσότητα που παρέχουν και στην οποία θα αγοράσουν οι προμηθευτές το ποσό της ενέργειας, που είχαν ζητήσει για την εκάστοτε ώρα της ημέρας. Η παραπάνω διαδικασία ονομάζεται Ημερήσιος Ενεργειακός Προγραμματισμός (HEΠ) και γίνεται από το Διαχειριστή Δικτύου Μεταφοράς (Transfer System Operator/TSO ή Independent System Operator/ISO), ο οποίος και έχει την ευθύνη για την απρόσκοπτη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας.

Το δεύτερο τμήμα της αγοράς, η λιανική, αφορά τους προμηθευτές και τους τελικούς καταναλωτές, οι οποίοι μπορούν να επιλέγουν ελεύθερα ποιά εταιρεία θα τους προμηθεύει με ηλεκτρική ενέργεια. Οι τιμές τη λιανικής αγοράς τείνουν μακροπρόθεσμα προς την ΟΤΣ, καθώς οι προμηθευτές ανταγωνίζονται μεταξύ τους προσφέροντας χαμηλότερα τιμολόγια στους τελικούς καταναλωτές. Τέλος, υπάρχουν ορισμένοι καταναλωτές, κυρίως βιομηχανικοί, οι οποίοι για να μηδενίσουν το ενδιάμεσο κόστος του προμηθευτή, αγοράζουν ηλεκτρική ενέργεια απευθείας από τη χονδρική αγορά. Οι καταναλωτές αυτοί ονομάζονται αυτοπρομηθευόμενοι [21].



Εικόνα 1.6.1: Συνολικές καμπύλες προσφοράς-ζήτησης και καθορισμός OTC [21]



Εικόνα 1.6.2: Σχηματική απεικόνιση της δομής της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας [22]

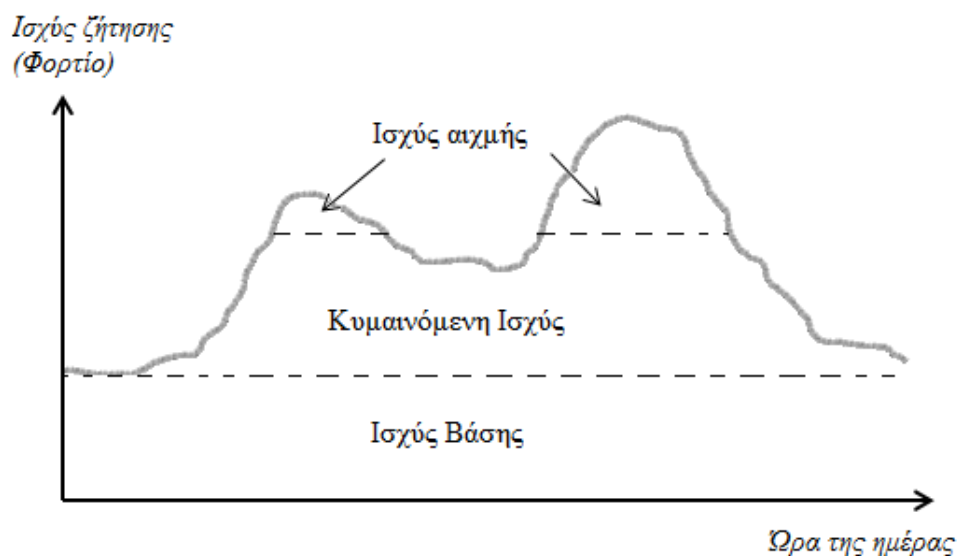
Παρόλο που η χονδρική αγορά ενέργειας είναι μία και μοναδική, είτε η διαπραγματευόμενη ενέργεια πρόκειται να καλύψει ανάγκες του φορτίου βάσης, είτε ανάγκες του φορτίου αιχμής, προχωρούμε σε μία διάκριση των δύο αυτών διαφορετικών πτυχών της διαπραγματευόμενης ενέργειας, για λόγους που θα γίνουν σύντομα κατανοητοί.

- **Ισχύς Βάσης**

Η ισχύς βάσης φορτίου (baseload power) είναι η ισχύς εκείνη, που απαιτείται επί 24ώρου βάσης. Συνήθως προέρχεται από τους μεγάλους σταθμούς παραγωγής ενέργειας, πχ θερμικούς, λιγνιτικούς, πυρηνικούς, μέσω μακροπρόθεσμων συμβολαίων για σταθερή παραγωγή με μικρό κόστος ανά παραγόμενη κιλοβατώρα.

- **Ισχύς Αιχμής**

Η ισχύς αιχμής (peak power) παράγεται ή αγοράζεται τις ώρες εκείνες της ημέρας, κατά τις οποίες αναμένεται μεγάλη κατανάλωση ισχύος, όπως για παράδειγμα ένα καλοκαιρινό απόγευμα, που έχει γίνει πρόγνωση καύσωνα. Συνήθως, η ενέργεια αυτή παράγεται από σταθμούς, που έχουν την ικανότητα να τίθενται σε λειτουργία και να αποσυνδέονται ταχύτατα, όπως είναι οι τουρμπίνες φυσικού αερίου. Δεδομένου πως η ισχύς αιχμής χρειάζεται μόνο για κάποιες εκατοντάδες ώρες το χρόνο, είναι πιο οικονομικά συμφέρον να προέρχεται από γεννήτριες χαμηλότερου κεφαλαιακού κόστους, ακόμα και αν η προκύπτουσα κιλοβατώρα είναι πιο ακριβή.



Εικόνα 1.6.3: Ισχύς βάσης είναι η ζώνη κάτω από το κατώτερο σημείο της χρονολογικής καμπύλης φορτίου. Ισχύς αιχμής είναι η ζώνη, η οποία περιλαμβάνει φορτία, που υπερβαίνουν τα 2/3 της αιχμής. Ενδιάμεσα βρίσκεται η ζώνη κυμαινόμενου φορτίου.

1.7 Αγορές επικουρικών υπηρεσιών

Αν οι απαιτήσεις στην παραγωγή και στην κατανάλωση ενέργειας ταίριαζαν απολύτως κάθε χρονική στιγμή, οι επικουρικές υπηρεσίες δεν θα ήταν απαραίτητες. Στην πραγματικότητα όμως, κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει. Το συνολικό φορτίο δεν είναι δυνατόν να προβλεφθεί επακριβώς, καθώς αυτό καθορίζεται από την ενεργοποίηση και την απενεργοποίηση εκατομμυρίων ξεχωριστών ηλεκτρικών συσκευών. Από την άλλη πλευρά, ούτε η συνολική παραγωγή ενέργειας μπορεί να προβλεφθεί με απόλυτη ακρίβεια, καθώς συμβαίνουν διάφορες απρόβλεπτες βλάβες και αστοχίες στον εξοπλισμό, ενώ η παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εξαρτάται άμεσα από τις καιρικές συνθήκες, που επικρατούν την κάθε διαφορετική στιγμή. Οι επικουρικές υπηρεσίες χρησιμοποιούνται σε αυτές τις περιπτώσεις για την εξισορρόπηση της παραγωγής και της ζήτησης, με σκοπό την εξασφάλιση της ποιότητας της παραγόμενης ισχύος και την ευστάθεια του συστήματος. Αποτελούν δηλαδή ηλεκτρική ισχύ, που βρίσκεται σε αναμονή, έτοιμη να προσφερθεί στο σύστημα, όταν αυτό τη χρειαστεί. Τον εποπτικό έλεγχο όλων των επικουρικών υπηρεσιών έχει ο Διαχειριστής του Συστήματος Μεταφοράς και καθορίζει ποιές από αυτές θα πρέπει να παρέχονται, πότε και από ποιον. Η παροχή των διαφόρων επικουρικών υπηρεσιών, μπορεί να αποτελεί υποχρέωση των διαφόρων παραγωγών ηλεκτρικής ενέργειας και ως εκ τούτου να μην ανταμείβεται από τον TSO, είτε να υφίστανται ειδικές αγορές, ανάλογης (αλλά αρκετά διαφορετικής, όπως θα δούμε παρακάτω) λειτουργίας με αυτήν της χονδρικής αγοράς ενέργειας, οπότε και οι διάφοροι παραγωγοί έχουν οικονομικό κίνητρο να τις παρέχουν στον TSO και ανταγωνίζονται μεταξύ τους για να επιλεγούν από αυτόν. Αν και υπάρχουν διάφορα είδη επικουρικών υπηρεσιών, όπως πχ ο έλεγχος τάσης ή η επανεκκίνηση του συστήματος εμείς θα ασχοληθούμε μόνο με τη στρεφόμενη εφεδρεία και τη ρύθμιση συχνότητας.

1.7.1 Στρεφόμενη εφεδρεία

Στρεφόμενη εφεδρεία (spinning reserve) είναι η διαφορά μεταξύ της ονομαστικής ισχύος των εν λειτουργία γεννητριών από την ισχύ εξόδου τους και αποτελεί ουσιαστικά την επιπλέον παραγωγική ικανότητα, που βρίσκεται σε αναμονή και μπορεί να κληθεί ανά πάσα στιγμή από το διαχειριστή του δικτύου [24]. Ονομάζεται στρεφόμενη διότι οι γεννήτριες που παρέχουν στρεφόμενη εφεδρεία είναι ήδη συγχρονισμένες στο δίκτυο, παρόλο που στρέφονται με ταχύτητα χαμηλότερη της ονομαστικής τους. Υπάρχει και η μη στρεφόμενη (non-spinning reserve), που περιγράφει την επιπλέον ισχύ, που μπορούν να δώσουν γεννήτριες, οι οποίες δεν είναι συγχρονισμένες με το δίκτυο. Ο προβλεπόμενος χρόνος αντίδρασης της στρεφόμενης εφεδρείας καθορίζεται από τον εκάστοτε TSO και είναι συνήθως της τάξης λίγων λεπτών, πχ 10 λεπτών. Ο λόγος ύπαρξης της είναι η εξυπηρέτηση του φορτίου σε περίπτωση που συμβεί κάποιο αναπάντεχο γεγονός, όπως παράδειγμα η απώλεια κάποιας γεννήτριας του δικτύου. Η ποσότητα στρεφόμενης εφεδρείας (σε MW εφόσον μιλάμε για ισχύ), που απαιτείται κάθε στιγμή μπορεί να εκφράζεται ως ποσοστό επί της ισχύος του φορτίου (πχ της τάξης του 10%), ώστε να καλύπτει αβεβαιότητες της πρόβλεψης φορτίου, είτε μπορεί να συνδέεται με την απαίτηση τήρησης «εφεδρείας της μεγαλύτερης μονάδος», ώστε να μπορεί να αντιμετωπιστεί η

απώλεια οποιασδήποτε συμβατικής μονάδος, χωρίς περικοπές φορτίου. Η χρηματική ανταμοιβή της εφεδρείας, σε όποιες αγορές αυτή προβλέπεται, γίνεται με βάση το χρόνο που είναι διαθέσιμη για χρήση. Επί παραδείγματι, μια γεννήτρια 1 MW που κρατείται σε εφεδρεία για 1 ώρα, ακόμα και αν δεν κληθεί ποτέ από τον TSO να παράσχει στο δίκτυο ενέργεια, θα πληρωθεί για μία MW-h (και όχι MWh, που είναι μονάδα μέτρησης ενέργειας) ανάλογα με την τιμή της MW-h που έχει καθοριστεί για εκείνη την ώρα της ημέρας στην αγορά. Εάν τώρα, η παραπάνω γεννήτρια κληθεί να παράγει και κάποια ποσότητα ενέργειας, θα ανταμειφθεί επιπλέον για την ποσότητα αυτή, και μάλιστα με την ΟΤΣ εκείνης της ώρας, όπως αυτή θα έχει διαμορφωθεί στη χονδρική αγορά ενέργειας.

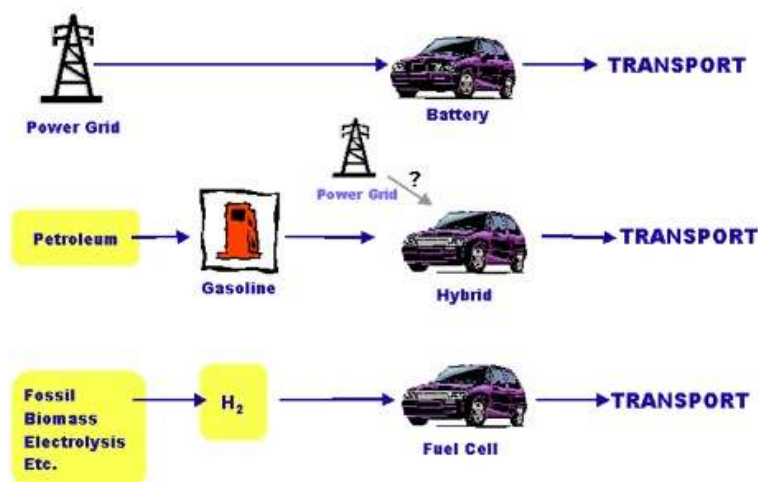
1.7.2 Ρύθμιση συχνότητας

Η ρύθμιση συχνότητας ή απλώς ρύθμιση (regulation) είναι μια επικουρική υπηρεσία, που σκοπό έχει τη διατήρηση της συχνότητας του δικτύου στα επιτρεπτά επίπεδα (στην Ευρώπη στα 50 Hz, στις ΗΠΑ στα 60 Hz), γεγονός που επιτυγχάνεται με την ισοστάθμιση, κάθε στιγμή, της παραγωγής με τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Ο Διαχειριστής του Συστήματος Μεταφοράς πρέπει να έχει τον άμεσο και αυτόματο έλεγχο των μονάδων που λειτουργούν ως μονάδες ρύθμισης και μάλιστα σε πραγματικό χρόνο, ώστε να είναι ικανός να τους στέλνει σήματα, στα οποία πρέπει να απαντούν σε χρονικό ορίζοντα δευτερολέπτων με την κατάλληλη αύξηση ή μείωση της ισχύος εξόδου τους. Η υπηρεσία αυτή χωρίζεται σε αρκετές αγορές σε δύο επιμέρους: Την άνω ρύθμιση (regulation up) που σχετίζεται με τη δυνατότητα αύξησης της παραγωγής ενέργειας από ένα επίπεδο βάσης (συχνά αποκαλούμενο επιθυμητό σημείο λειτουργίας, Preferred Operating Point/POP) και την κάτω ρύθμιση (regulation down), που αφορά τη μείωση της παραγωγής από το ίδιο επίπεδο βάσης. Όταν το φορτίο είναι μεγαλύτερο από την παραγωγή, τότε οι λειτουργούσες στο δίκτυο γεννήτριες επιβραδύνονται, γεγονός που καταδεικνύει πως υπάρχει ανάγκη για περισσότερη ισχύ, οπότε για τη σταθεροποίηση της συχνότητας καλείται η άνω ρύθμιση. Στην αντίθετη περίπτωση, όταν δηλαδή η παραγωγή υπερβαίνει τη ζήτηση, οι γεννήτριες του δικτύου τείνουν να επιταχυνθούν, οπότε καλείται η κάτω ρύθμιση με τη μείωση της παραγόμενης ισχύος από τις μονάδες ρύθμισης. Οι δύο επιμέρους υπό-υπηρεσίες κοστολογούνται εν γένει διαφορετικά. Σε σύγκριση με τη στρεφόμενη εφεδρεία, η ρύθμιση καλείται πολύ πιο συχνά, πχ μερικές εκατοντάδες φορές την ημέρα, απαιτεί ταχύτερη απόκριση όπως είπαμε παραπάνω και έχει μικρότερη διάρκεια, συνήθως λίγα λεπτά, πχ 5. Η ομοιότητα των δύο αγορών έγκειται στο ότι η ανταμοιβή τους γίνεται τόσο για την ισχύ, που υπάρχει διαθέσιμη ανά πάσα στιγμή ακόμα και αν αυτή δεν χρησιμοποιείται εν τέλει, όσο και για την τελική ενέργεια, που θα διακινηθεί.

2 V2G ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

2.1 Η ιδέα της V2G λειτουργίας

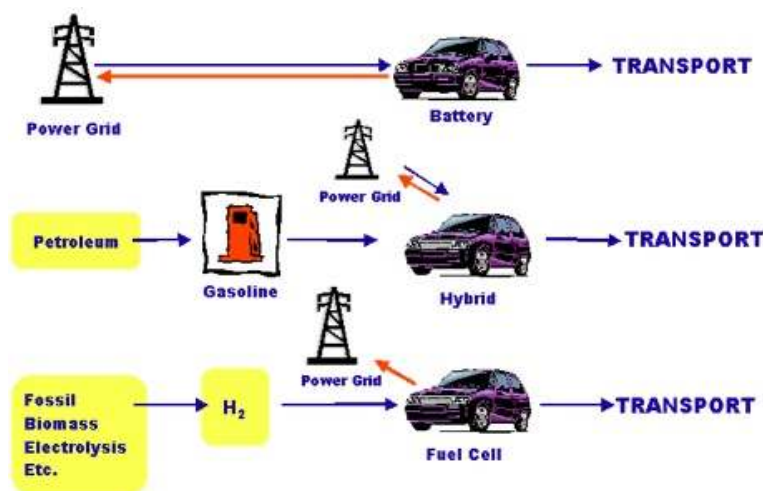
Κατά τη συμβατική θεώρηση, τα ηλεκτρικά οχήματα συμπεριφέρονται ως συσσωρευτές, που εκφορτίζονται κατά τη διάρκεια των μετακινήσεων, ανάλογα με τις ανάγκες και την οδηγική συμπεριφορά του χρήστη και φορτίζονται από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της στάθμευσης τους, ανάλογα πάλι με τις ανάγκες του χρήστη και την τιμολογιακή πολιτική, που επιθυμεί να ακολουθήσει. Τα ηλεκτρικά οχήματα ως παθητικά στοιχεία αποτελούν ένα νέο είδος φορτίου για τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία μπορεί να επιβαρυνθούν αισθητά με τη μελλοντική μεγάλη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων, επηρεάζοντας έτσι αρνητικά τον ενεργειακό και αναπτυξιακό προγραμματισμό τους.



Εικόνα 2.1.1: Ροή ενέργειας κατά τη συμβατική θεώρηση λειτουργίας των ηλεκτρικών οχημάτων [26]

Κατά τη V2G διαδικασία γίνεται δυνατή η παροχή ενέργειας από την πλευρά των ηλεκτρικών οχημάτων, όταν αυτά είναι σταθμευμένα, προς αυτήν του ηλεκτρικού δικτύου, όταν αυτό το ζητήσει. Ο όρος άλλωστε V2G προέρχεται από την αγγλική ορολογία ‘Vehicle to Grid’, που σημαίνει «Όχημα προς Δίκτυο» και είναι αρκετά παραστατικός. Τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν κατά αυτόν τον τρόπο να προσφέρουν πολύτιμες υπηρεσίες στο δίκτυο, συμμετέχοντας στις ανάλογες αγορές και δημιουργώντας έσοδα για τους ιδιοκτήτες τους [27]. Μάλιστα, αντίθετα με την κοινή αντίληψη, και με τις πλέον συντηρητικές εκτιμήσεις και με παραδοχή μεγάλου περιθωρίου λάθους, έχει υπολογιστεί [1] ότι στη χειρίστη περίπτωση (ώρες αιχμής) μόνο ένα ποσοστό της τάξης του 27% των οχημάτων βρίσκεται εν κινήσει κατά τη

διάρκεια μιας τυπικής ημέρας, αφήνοντας έτσι ένα 83% του συνολικού στόλου διαθέσιμο να συμμετάσχει στην V2G λειτουργία.

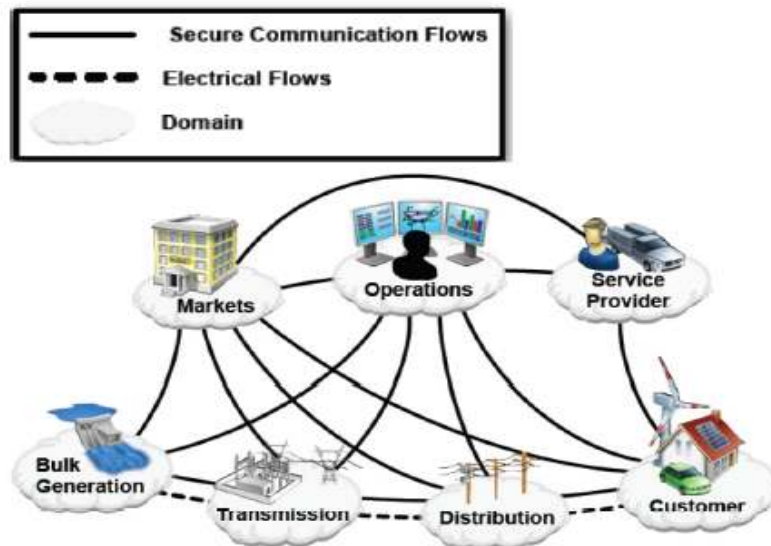


Εικόνα 2.1.2: Ροή ενέργειας κατά τη V2G λειτουργία [28]

Η χρησιμότητα της όλης ιδέας γίνεται περισσότερο κατανοητή εάν αναλογιστούμε τις νέες τάσεις που επικρατούν σε παγκόσμιο επίπεδο όσον αφορά στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ). Λόγω των πολλών προκλήσεων που αντιμετωπίζουν τις τελευταίες δεκαετίες τα ΣΗΕ, όπως η απελευθέρωση της αγοράς, η επιτακτική ανάγκη για μεγαλύτερο σεβασμό στο περιβάλλον, η διεύθυνση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η συνεχώς αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας και πολλοί άλλοι παράγοντες, έχει αναπτυχθεί η ιδέα του έξυπνου δικτύου (smart grid). Εν συγκρίσει με το κλασικό ΣΗΕ, ένα έξυπνο δίκτυο [29]:

- χρησιμοποιεί ψηφιακές μεθόδους αντί για ηλεκτρομηχανικές
- επιτρέπει την αμφίδρομη επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης
- διαθέτει εξελιγμένα ψηφιακά μετρητικά συστήματα σε πολλά σημεία του
- βελτιστοποιεί την αξιοποίηση των ήδη υπαρχόντων εγκαταστάσεων
- παρέχει στους καταναλωτές δυνατότητες πιο ενεργής συμμετοχής, με διάφορες λειτουργίες διαχείρισης από την πλευρά της κατανάλωσης (demand side management), όπως την κατάθεση προσφορών σε διάφορες αγορές (demand-side bidding/DSB)
- έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας
- αποτελείται από πολλά μικρότερα μικροδίκτυα (microgrids) και χρησιμοποιεί δεσπαρμένες πηγές ενέργειας (distributed energy resources/DERs)

Όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά των μελλοντικών ΣΗΕ υποδεικνύουν τη σημαντική θέση, που θα μπορούν να κατέχουν τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα με τη χρήση της V2G λειτουργίας. Χωρίς αυτήν, τα EVs δεν θα μπορούν να λειτουργήσουν ως μονάδες δεσπαρμένης παραγωγής, ούτε οι κάτοχοι τους να συμμετάσχουν σοβαρά στη διαχείριση από την πλευρά της κατανάλωσης.



Εικόνα 2.1.3: Σχηματική απεικόνιση ενός έξυπνου δικτύου[29]

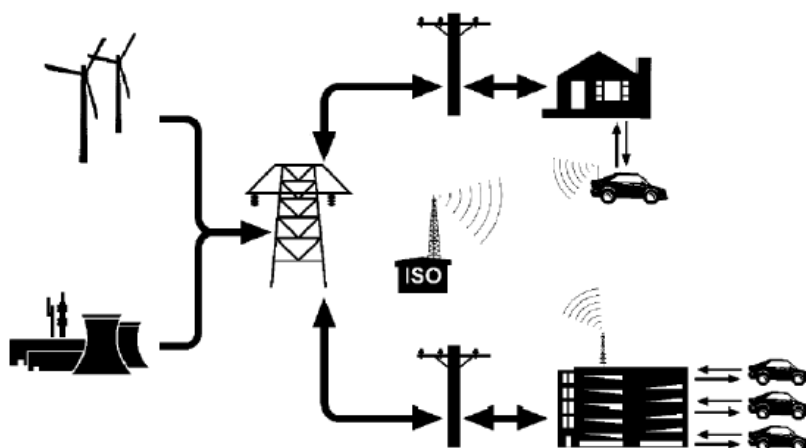
Η παροχή της ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο κατά τη V2G λειτουργία μπορεί να επιτευχθεί με δύο τρόπους: με την αποφόρτιση του συσσωρευτή του οχήματος μέσω της ροής ισχύος από το όχημα προς το δίκτυο, αλλά και με την κατάλληλη διαμόρφωση του ρυθμού φόρτισης του συσσωρευτή κατά τη ροή ισχύος αποκλειστικά από το δίκτυο προς το όχημα. Στην πρώτη περίπτωση, μιλάμε για αμφίδρομη V2G λειτουργία (bidirectional V2G), ενώ στη δεύτερη περίπτωση μιλάμε για μονής κατεύθυνσης V2G λειτουργία (unidirectional V2G). Η μονής κατεύθυνσης V2G λειτουργία παρουσιάζει μικρότερο ενδιαφέρον και έχει σαφώς πιο περιορισμένες δυνατότητες από την αμφίδρομη, αφού πρώτον δεν υπάρχει η δυνατότητα η ήδη αποθηκευμένη ενέργεια στο συσσωρευτή να ρεύσει προς το δίκτυο και δεύτερον οι διακινούμενες και άρα αμειβόμενες ποσότητες ισχύος και ενέργειας είναι σημαντικά μικρότερες. Συγκεκριμένες μελέτες έχουν αποδείξει ότι αυτοί οι περιορισμοί μπορούν να μειώσουν το οικονομικό κέρδος μέχρι και στο $\frac{1}{4}$ από αυτό θα μπορούσε να προκύψει με την εφαρμογή της αμφίδρομης V2G λειτουργίας [30]. Παρόλα αυτά η μονής κατεύθυνσης V2G λειτουργία θεωρείται ότι θα εφαρμοσθεί πρώτη καθώς για την έγχυση ενέργειας πίσω στο δίκτυο απαιτείται επιπρόσθετος εξοπλισμός (κυρίως ηλεκτρονικά ισχύος), ο οποίος δεν υφίσταται στα ήδη υπάρχοντα EVs της αγοράς αλλά και ούτε προβλέπεται στα μοντέλα που πρόκειται να κυκλοφορήσουν σύντομα. Επίσης, πολλοί καταναλωτές μπορεί να μην είναι πρόθυμοι να επιτρέψουν την αποφόρτιση των συσσωρευτών τους για σκοπούς διαφορετικούς από αυτόν της μετακίνησής τους, ή να ανησυχούν για τη φθορά του συσσωρευτή τους, μέσω της συχνής φόρτισης και εκφόρτισης του, κατά την αμφίδρομη V2G λειτουργία. Επομένως, ένας λογικός τρόπος αντιμετώπισης των παραπάνω προκλήσεων είναι η εφαρμογή πρώτα της μονής κατεύθυνσης V2G λειτουργίας, κατά την οποία οι καταναλωτές θα αρχίσουν να αποδέχονται την καινούργια ιδέα και τεχνολογία αλλά και οι υπόλοιποι εμπλεκόμενοι φορείς, όπως οι αγορές και οι διαχειριστές των εκάστοτε συστημάτων, θα αποκτήσουν την απαραίτητη εμπειρία, ώστε να είναι προετοιμασμένοι για την ευρύτερη διάδοση της V2G λειτουργίας αμφίδρομης ροής ισχύος [30]. Στην παρούσα διπλωματική εργασία βέβαια, θα ασχοληθούμε με το bidirectional V2G, οπότε από εδώ και στο εξής όταν αναφερόμαστε στη V2G λειτουργία θα εννοούμε αποκλειστικά και μόνο την αμφίδρομη.

2.2 Η εγκατάσταση της V2G λειτουργίας

Καταρχάς, πρέπει να σημειώσουμε ότι πρακτική εφαρμογή της V2G λειτουργίας σε υπολογίσιμη κλίμακα δεν υπάρχει πουθενά στον κόσμο μέχρι στιγμής και ούτε προβλέπεται να υπάρξει μέσα στην επόμενη δεκαετία. Είναι μία τεχνολογία, προς το παρόν καθαρά θεωρητική, που έχει εφαρμοσθεί μόνο σε ερευνητικό επίπεδο με τη συμμετοχή πολύ λίγων ηλεκτρικών οχημάτων κυρίως στο πανεπιστήμιο του Delaware στις ΗΠΑ με κύριο ερευνητή τον Willet Kempton, που είχε και την αρχική ιδέα. Παρόλα αυτά, έχει μελετηθεί αρκετά και παρακάτω παρουσιάζουμε τις κυριότερες τεχνικές λεπτομέρειες των απαιτούμενων υποδομών και των διεπιφανειών ώστε η τεχνολογία αυτή ξεκινήσει να εφαρμόζεται στον πραγματικό κόσμο.

Τα είδη των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, που είναι ικανά να συμμετάσχουν στη V2G διαδικασία είναι αυτά, που πρώτα απ' όλα έχουν τη δυνατότητα σύνδεσης με το δίκτυο, δηλαδή τα Ηλεκτρικά Οχήματα με Συσσωρευτή (BEVs) και τα Επαναφορτιζόμενα Υβριδικά με Ηλεκτρική Ενέργεια από Εξωτερική Πηγή (PHEVs) είτε αυτά χρησιμοποιούν μηχανή εσωτερικής καύσης, είτε κυψέλες καυσίμου (FCEVs). Τα BEVs μπορούν να φορτίζονται κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης και να εκφορτίζονται όταν το δίκτυο το χρειάζεται, τα FCEVs μπορούν να παράγουν ενέργεια καταναλώνοντας υδρογόνο (ή όποιο άλλο καύσιμο χρησιμοποιούν) λειτουργώντας έτσι ως κλασικές γεννήτριες, ενώ τα PHEVs μπορούν να προσφέρουν ενέργεια και με τους δύο αυτούς τρόπους. Παρόλα αυτά, τα οχήματα που θα είναι εν τέλει ικανά να υποστηρίξουν τη V2G λειτουργία πρέπει να πληρούν τρεις ακόμα προϋποθέσεις [31]:

- 1) να διαθέτουν κατάλληλη σύνδεση με το δίκτυο, που να επιτρέπει τη ροή ενέργειας από το όχημα στο δίκτυο
- 2) να μπορούν να δέχονται ένα σήμα ελέγχου από το δίκτυο και να είναι σε θέση να ανταποκρίνονται σε αυτό σε πραγματικό χρόνο
- 3) να διαθέτουν ένα ψηφιακό μετρητικό σύστημα, ικανό για ακριβείς μετρήσεις



Εικόνα 2.2.1: Σχηματική απεικόνιση της ροής ισχύος και των ασυρμάτων συνδέσεων επικοινωνίας μεταξύ των οχημάτων και του δικτύου κατά τη V2G λειτουργία [32]

Όσον αφορά στην πρώτη προϋπόθεση, έχει δειχθεί ότι στα οχήματα που είναι ικανά να φορτίζονται με AC φόρτιση επαφής και άρα φέρουν ήδη ενσωματωμένο (on-board) φορτιστή, οι απαραίτητες τροποποιήσεις είχε υπολογιστεί εν έτει 2002 από την εταιρεία AC Propulsion Inc., ότι κόστιζαν 400\$ [33], πράγμα που σημαίνει ότι σήμερα αυτό το κόστος θα είναι αρκετά μικρότερο. Αρκετά μεγαλύτερο βέβαια έχει υπολογιστεί το κόστος των πρόσθετων καλωδιώσεων, που θα απαιτηθούν για την υποστήριξη της V2G λειτουργίας όταν αυτή γίνεται μέσω των οικιακών εγκαταστάσεων (από 650\$ έως και 1500\$ [32]) αλλά αυτό αναφέρεται στην πλευρά του δικτύου και όχι του οχήματος, επομένως δεν θα το εξετάσουμε πιο αναλυτικά.

Η δεύτερη προϋπόθεση που τίθεται, γίνεται κατανοητή εάν αναλογιστούμε ότι η ενέργεια από το όχημα έχει έσοδα μεγαλύτερα του κόστους για την παραγωγή της, μόνο όταν ο αγοραστής μπορεί να καθορίσει την ακριβή ώρα της ανταλλαγής. Το σήμα ελέγχου, θα μπορούσε να είναι ένα σήμα που εκπέμπεται σε ραδιοσυχνότητες, ή που μεταφέρεται μέσω ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας, μέσω απευθείας σύνδεσης στο ίντερνετ ή ακόμα και μέσω των ηλεκτρικών καλωδίων. Καθώς η αυτοκινητοβιομηχανία εξελίσσεται, οι πραγματικού χρόνου τηλεπικοινωνίες καθίστανται μέρος του οχήματος. Αυτό ήδη συμβαίνει σε οχήματα πολυτελείας και αναμένεται σύντομα να αποτελεί πραγματικότητα και για κάθε μοντέλο νέου οχήματος, οπότε η διεύθυνση της λεγόμενης «τηλεματικής» είναι κάτι που συμβαίνει ανεξάρτητα από το ηλεκτροκίνητο όχημα.

Η τελευταία προϋπόθεση απαιτεί ένα εξελεγκμένο σύστημα μέτρησης, που να είναι σε θέση να μετράει πόση ακριβώς ενέργεια παρείχε το εκάστοτε όχημα στο δίκτυο και σε ποια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Σε περίπτωση που το ηλεκτροκίνητο όχημα πουλά στο δίκτυο υπηρεσίες από διαφορετικές θέσεις, πρέπει να είναι εφοδιασμένο με ειδικό ενσωματωμένο μετρητή (έξυπνο μετρητή), διάφορο από το γενικό μετρητή ώστε να μπορούν να καθοριστούν οι υπηρεσίες που προσφέρθηκαν και η ισχύς που απορροφήθηκε από κάθε ξεχωριστή θέση φόρτισης. Τέλος, θα πρέπει ο οδηγός να γνωρίζει ανά πάσα στιγμή την κατάσταση φόρτισης (State Of Charge/SOC) του συσσωρευτή του, έχοντας τη δυνατότητα να ορίσει το μέγιστο δυνατό βάθος εκφόρτισης, ώστε να μπορεί να καλύψει τις βασικές ανάγκες μεταφοράς του.

Στις εικόνες 2.2.2 και 2.2.3 φαίνεται μια τέτοια εφαρμογή μέσω internet, που έχει αναπτυχθεί από την εταιρεία AC Propulsion Inc. Ο οδηγός εισέρχεται στην πρώτη σελίδα με ένα όνομα χρήστη και έναν κωδικό. Η σελίδα αυτή καταγράφει την κατάσταση του οχήματος και πιο συγκεκριμένα εάν η V2G λειτουργία είναι ενεργή ή όχι, την κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή (SOC) καθώς επίσης και τον υπολογισμό του μηνιαίου κέρδους του οχήματος από τη συμμετοχή του στη V2G λειτουργία. Η δεύτερη σελίδα επιτρέπει τη διαχείριση των προσωπικών παραμέτρων του προφίλ του οδηγού, όπως είναι ο τύπος του οχήματος και οι βασικές ώρες σύνδεσης του στο δίκτυο. Ο οδηγός μπορεί επίσης να καθορίσει την ακριβή διάρκεια της κάθε περιόδου σύνδεσης, το χώρο στον οποίο είναι σταθμευμένο το όχημα (οικεία ή χώρος εργασίας) και την ελάχιστη απαιτούμενη στάθμη φόρτισης του συσσωρευτή για κάθε χρονική περίοδο.

Στην εικόνα 2.2.4 βλέπουμε μια εφαρμογή για το ηλεκτρικό όχημα Nissan Leaf, όπου εκμεταλλεύεται την τεχνολογική πρόοδο στον τομέα των smart phones και επιτρέπει στον οδηγό να βλέπει κάθε στιγμή τα επίπεδα φόρτισης του συσσωρευτή

του ή την ώρα που προβλέπεται να τελειώσει η φόρτιση. Η τεχνολογία αυτή θα μπορεί στο μέλλον να χρησιμοποιηθεί και για τη V2G λειτουργία.

The screenshot shows a web browser window titled "MyV2G home". The page features the AC Propulsion logo and the following content:

MyV2G Home Page for
Username [\[edit user profile\]](#)
Date and Time
[\[Refresh this page\]](#)

Vehicle Status V2G Active
Location Home
Battery State of Charge 88 %
V2G Value, month to date \$143.36

[Get History](#)

Vehicle Usage Exceptions - away from grid [\[create new away item\]](#)

Start date	Time	End date	Time	Required Start SOC		
12-12-01	9:00 pm	12-13-01	11:00 am	70%	[edit]	[delete]
12-17-01	11:50 am	12-17-01	2:00 pm	60%	[edit]	[delete]

Vehicle Usage Exceptions - connected to grid [\[create new connected item\]](#)

Start date	Time	End date	Time	Location	Required end SOC		
12-23-01	9:00 am	12-23-01	11:00 am	LAX	70%	[edit]	[delete]
1-11-02	2:50 pm	1-13-01	7:00 pm	LAX	50%	[edit]	[delete]

(go to [\[edit user profile\]](#) to see or change default usage profile)

©2001 AC Propulsion Inc., All rights reserved.

Εικόνα 2.2.2: Κεντρική σελίδα χρήση V2G[34]

MyU26 User Profile Setup

V2G User Profile Setup

Last Name	Brooks	<input type="text"/>
First Name	Alec	<input type="text"/>
Street Address	441 Borego Ct	<input type="text"/>
City	San Dimas	<input type="text"/>
State	CA	<input type="text"/>
Zip Code	91773	<input type="text"/>
Phone	909-592-5399	<input type="text"/>
Email	abrooks@carpropulsion.com	<input type="text"/>
Vehicle	Beetle	Select Vehicle Type <input type="button" value="↓"/>
Max allowable SOC during V2G (ending SOC set below)	40%	Min U26 Batt SOC <input type="button" value="↓"/>

Baseline Usage Connect Hours:

	Begin	End	Location [edit location]	Minimum SOC needed at end of period
Weekdays	<input type="text"/>	<input type="text"/>	pick location <input type="button" value="↓"/>	Min Batt SOC <input type="button" value="↓"/>
	12:00 am	7:50 am	Home	90
	<input type="text"/>	<input type="text"/>	pick location <input type="button" value="↓"/>	Min Batt SOC <input type="button" value="↓"/>
	8:30 am	5:40 pm	Work	90
Weekends	<input type="text"/>	<input type="text"/>	pick location <input type="button" value="↓"/>	Min Batt SOC <input type="button" value="↓"/>
	12:00 am	10:00 am	Home	70
	<input type="text"/>	<input type="text"/>	pick location <input type="button" value="↓"/>	Min Batt SOC <input type="button" value="↓"/>
	1:00 pm	6:30 pm	Home	90
	<input type="text"/>	<input type="text"/>	pick location <input type="button" value="↓"/>	Min Batt SOC <input type="button" value="↓"/>
	11:30 pm	12:00 pm	Home	90

[return to V2G home](#)

Εικόνα 2.2.3: Σελίδα διαμόρφωσης προφίλ χρήστη[34]

CARWINGS®

IT'S YOUR CAR CALLING

Stay connected to your Nissan LEAF® with an active CARWINGS® [*] subscription. Use the app to:

- Check on your battery charge
- Begin charging
- See estimated driving range
- Activate the climate control systems

Don't own a Nissan LEAF® yet? Download the free demo to see what the Nissan LEAF® smartphone app can do for you.

Download for:



Εικόνα 2.2.4: Εφαρμογή για smart phones, που ενημερώνει τον ιδιοκτήτη ηλεκτρικού οχήματος “Nissan Leaf” για τις σημαντικότερες παραμέτρους του οχήματός του [35]

2.3 Συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στις αγορές ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών

Τα τελευταία 15 χρόνια, πολλές έρευνες [1], [23], [32] έχουν πραγματοποιηθεί με σκοπό να διερευνηθούν ποιες αγορές ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών είναι κατάλληλες και οικονομικά εκμεταλλεύσιμες για τη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων σε αυτές μέσω της V2G λειτουργίας. Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα των ερευνών αυτών, παραθέτουμε τον παρακάτω πίνακα, στον οποίο φαίνεται συγκεντρωτικά ποιοι τύποι ηλεκτρικών οχημάτων μπορούν να συμμετέχουν ικανοποιητικά στις αγορές, που αναλύσαμε προηγουμένως. Το σύμβολο “√” υποδεικνύει ότι το εκάστοτε όχημα μπορεί να συμμετάσχει ικανοποιητικά στην εκάστοτε αγορά, το σύμβολο “×” ότι δεν μπορεί, ενώ το “?” ότι η συμμετοχή του εξαρτάται από πολλές παραμέτρους και απαιτεί διερεύνηση [1].

Τύπος ηλεκτρικού οχήματος	Πιθανές αγορές διείσδυσης			
	Ισχύς Βάσης	Ισχύς Αιχμής	Στρεφόμενη εφεδρεία	Ρύθμιση συχνότητας
BEV	×	√	√	√
PHEV	×	?	?	√
EREV	×	?	?	?
FCEV	×	√	√	√

Το ηλεκτρικό όχημα δεν μπορεί να παράγει ισχύ βάσης σε ανταγωνιστική τιμή. Αυτό γιατί η ισχύς βάσης δεν εκμεταλλεύεται τα δυνατά σημεία των ηλεκτρικών οχημάτων, που είναι η ταχεία τους απόκριση, το μικρό κόστος αναμονής και το μικρό κόστος κεφαλαίου ανά kWh αλλά αντιθέτως σκοντάφτει σε κάποιες αδυναμίες τους, όπως το σύντομο χρονικό διάστημα που είναι προγραμματισμένα να λειτουργούν και το υψηλό κόστος ανά kWh. Για το λόγο αυτό, στην πορεία της ανάλυσής μας δεν θα αναφερθούμε περαιτέρω σε αυτή την αγορά.

Αντίθετα, με την αναμενόμενη εξέλιξη της τεχνολογίας των συσσωρευτών, που θα καταφέρει να αυξήσει τη χωρητικότητα τους αλλά και λόγω της αναμενόμενης μαζικής παραγωγής τους, που θα μειώσει το κόστος τους, η αγορά της ισχύος αιχμής μπορεί μελλοντικά να είναι επικερδής για την πραγματοποίηση της V2G λειτουργίας.

Η αγορά της στρεφόμενης εφεδρείας μπορεί να είναι προσοδοφόρα για τα ηλεκτρικά οχήματα, που θα εκτελούν V2G λειτουργία, καθώς αυτά θα μπορούν να πληρώνονται ως στρεφόμενη εφεδρεία για πολλές ώρες, απλά με το να παραμένουν συνδεδεμένα στο δίκτυο, χωρίς ουσιαστικά να παράγουν πραγματική ενέργεια και να αποφορτίζουν τους συσσωρευτές τους. Αυτό σημαίνει, πως θα πληρώνονται απλά για

να είναι έτοιμα να προσφέρουν ενέργεια, όποτε αυτό χρειασθεί, κάτι το οποίο σε σωστά διαμορφωμένα δίκτυα δεν είναι συχνό φαινόμενο (πχ στο σύστημα PJM των ΗΠΑ η στρεφόμενη εφεδρεία κλήθηκε μέσα σε ολόκληρο το έτος 2001 μόλις 38 φορές, με μέγιστη διάρκεια 28 λεπτά [25]). Το κόστος λοιπόν που σχετίζεται με τη φθορά του συσσωρευτή είναι πολύ περιορισμένο, ενώ τα κέρδη από τη συμμετοχή στην αγορά μπορεί να είναι αρκετά αυξημένα. Τέλος, η δυνατότητα των EVs να ανταποκρίνονται πολύ γρήγορα στην απότομη ζήτηση ενέργειας, όπως συμβαίνει κατά την οδήγηση, αποτελεί ένα δυνατό τους σημείο ώστε να παρέχουν αυτήν την επικουρική υπηρεσία αποτελεσματικά [1], [32].

Τέλος, τα ηλεκτρικά οχήματα που θα είναι ικανά για V2G λειτουργία, φαίνονται κατάλληλα για την αγορά της ρύθμισης συχνότητας καθώς μπορούν να ανταποκριθούν πολύ γρήγορα σε σήματα ρύθμισης και έχουν τη δυνατότητα να πραγματοποιήσουν τόσο άνω ρύθμιση, με την αύξηση της ροής ισχύος προς το δίκτυο ή τη μείωση του ρυθμού φόρτισης των συσσωρευτών τους, όσο και κάτω ρύθμιση, με την αύξηση του ρυθμού φόρτισης των συσσωρευτών τους ή τη μείωση της ροής ισχύος προς το δίκτυο. Ένας συνδυασμός άνω και κάτω ρύθμισης τελικά προκαλεί πολύ μικρή αποφόρτιση του συσσωρευτή, χωρίς να προκαλεί ιδιαίτερα προβλήματα φθοράς αναφορικά με τους κύκλους λειτουργίας του συσσωρευτή. Τέλος, αξίζει να τονίσουμε πως δεν πρέπει να υποτιμούμε καθόλου αυτές τις αγορές, καθώς ο TSO της Καλιφόρνιας των ΗΠΑ, η CAISO με εγκατεστημένη ισχύ το 2010 περίπου στα 70 GW, ξοδεύει από 1 με 3 εκατομμύρια δολάρια καθημερινά για την υπηρεσία της ρύθμισης [1].

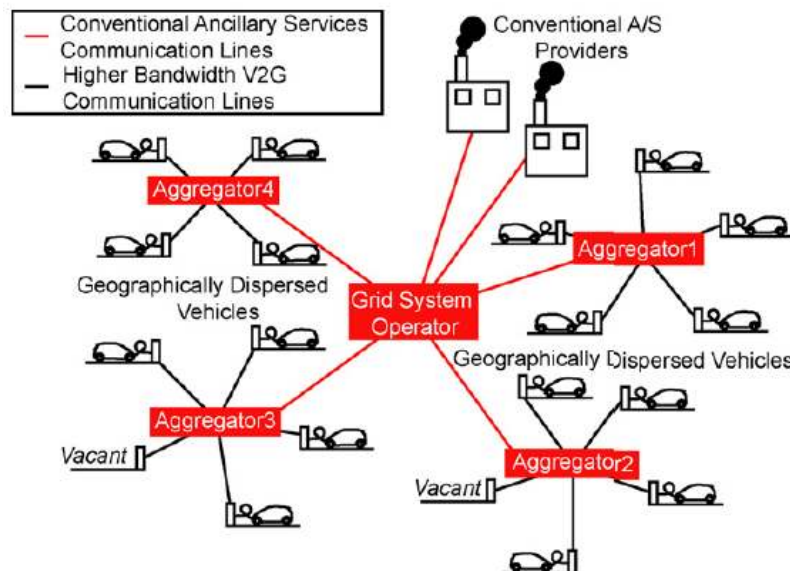
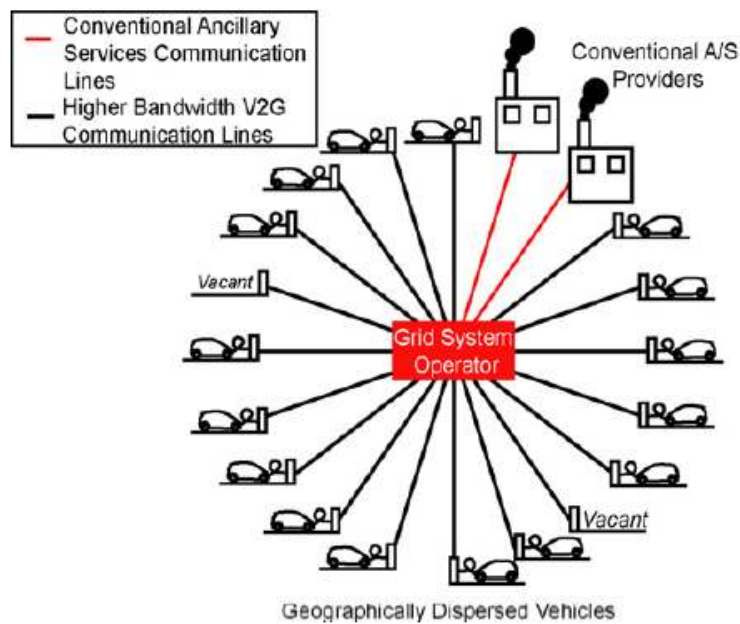
2.4 Πιθανά επιχειρηματικά μοντέλα

Αφού περιγράψαμε προηγουμένως τις αγορές, στις οποίες θα μπορούσε να ευδοκιμήσει η V2G λειτουργία μένει τώρα να απαντηθεί πρώτον ποιες μορφές μπορεί να έχουν οι επιχειρήσεις εκείνες, που θα εκμεταλλεύονται και θα αξιοποιούν τη V2G λειτουργία, και δεύτερον ποιος θα είναι ο τρόπος, που θα εξασφαλίζουν την κερδοφορία τους αλλά και τι έξοδα θα καλούνται να πληρώνουν. Πριν περιγράψουμε τα διάφορα πιθανά σενάρια, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούμε στους νέους παράγοντες της αγοράς που θα εμφανιστούν με την υιοθέτηση της V2G λειτουργίας. Αυτοί είναι [36]:

- **Ο ιδιοκτήτης του οχήματος:** Θεωρείται πάντοτε τελικός καταναλωτής ενέργειας και ποτέ παραγωγός, ακόμα και αν συμμετέχει στη V2G λειτουργία και στέλνει ενέργεια πίσω στο δίκτυο. Αυτό θα γίνει πιο σαφές όταν εισάγουμε την έννοια του συναθροιστή (aggregator).
- **Ο ιδιοκτήτης του συσσωρευτή:** Επειδή για το υψηλό κόστος των ηλεκτρικών οχημάτων ευθύνεται κατά κύριο λόγο ο συσσωρευτής, έχει προταθεί να διαχωριστεί το κόστος ενός EV από αυτό του συσσωρευτή, με σκοπό η αγορά

ενός ηλεκτρικού οχήματος να γίνει πιο ελκυστική στο καταναλωτικό κοινό. Η ιδιοκτησία, η εγγύηση και ο έλεγχος της λειτουργίας του συσσωρευτή μπορεί να είναι το αντικείμενο, οποιουδήποτε από τους υπόλοιπους παράγοντες που εμπλέκονται στη V2G λειτουργία, ή μίας ξεχωριστής επιχείρησης, ασχολούμενης μόνο με αυτόν τον τομέα. Τέλος, ο ιδιοκτήτης του συσσωρευτή μπορεί να είναι και ο ίδιος ο ιδιοκτήτης του οχήματος, όπως συμβαίνει μέχρι στιγμής

- **Ο ιδιοκτήτης της υποδομής φόρτισης:** Μπορεί να είναι ένας οικιακός καταναλωτής ρεύματος, που αγοράζει κάποια υποδομή φόρτισης για το ηλεκτρικό του όχημα, μπορεί να είναι μια οποιαδήποτε επιχείρηση, που θέλει να δώσει στους εργαζομένους της ή/και στους πελάτες της τη δυνατότητα να συνδέουν το όχημα τους στο δίκτυο, ή μπορεί η υποδομή αυτή να βρίσκεται σε κάποιο σταθμό φόρτισης (το ανάλογο του βενζινάδικου για τα ηλεκτρικά οχήματα) είτε δημόσιο, είτε ιδιωτικό. Εάν βρίσκεται σε δημόσιο χώρο και με δημόσια πρόσβαση, τότε υπάγεται στη διαδικασία της διανομής με το διαχειριστή του συστήματος (Distribution System Operator/DSO) να είναι ο ιδιοκτήτης, εναλλακτικά ανήκει σε μια ιδιωτική εταιρία που προσφέρει τις υπηρεσίες της, με συγκεκριμένα συμβόλαια που ορίζει αυτή.
- **Ο συναθροιστής-πάροχος των ηλεκτρικών οχημάτων (Electric Vehicle Supplier-Aggregator/EVS-A):** Πρόκειται για τον παράγοντα κλειδί, όσον αφορά την υιοθέτηση της V2G λειτουργίας και η λειτουργία του είναι διπλή. Από τη μία, είναι ο προμηθευτής, ο οποίος πουλά ηλεκτρική ενέργεια στον ιδιοκτήτη του οχήματος, μέσω ενός συμβολαίου, το οποίο θα ισχύει για πολλά πιθανά σημεία φόρτισης. Η καινοτομία, όσον αφορά αυτή τη μορφή συμβολαίου, είναι ότι δεν περιορίζονται τοπικά αλλά αντίθετα, ικανοποιούν την επιθυμία των ιδιοκτητών ηλεκτρικών οχημάτων να μπορούν να φορτίζουν τους συσσωρευτές τους σε διαφορετικούς σταθμούς φόρτισης, παραμένοντας όμως στον ίδιο προμηθευτή και έχοντας τις ίδιες χρεώσεις. Ο δεύτερος ρόλος ενός aggregator, που έχει και μεγαλύτερη σχέση με τη V2G λειτουργία, προέρχεται από την αδυναμία ενός μεμονωμένου EV να συμμετάσχει απευθείας στις χονδρικές αγορές ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών. Για παράδειγμα, στις περισσότερες αγορές, η ελάχιστη ποσότητα ισχύος που μπορεί να προσφερθεί για ρύθμιση είναι το 1 MW. Γίνεται αντιληπτό, ότι ένα μόνο αυτοκίνητο, του οποίου ο συσσωρευτής είναι της τάξης των μερικών kW, δεν θα μπορούσε ποτέ να προσφέρει αυτήν την ποσότητα. Αντίθετα, μία επιχείρηση, που θα έχει υπό την εποπτεία της ένα στόλο οχημάτων, θα μπορεί να λειτουργεί ως μεσάζοντας και να συμμετάσχει στις διάφορες αγορές, συναθροίζοντας την διαθέσιμη ισχύ ολόκληρου του στόλου.



Εικόνα 2.4.1: Σύγκριση της δομής του μοντέλου χωρίς ύπαρξη συναθροιστή (aggregator), με το μοντέλο ύπαρξης πολλών διαφορετικών [37]

- **Ο πάροχος υπηρεσιών τεχνολογιών πληροφορικής** (Information Technology/IT service provider): Όπως είδαμε προηγουμένως, κατά την υιοθέτηση της V2G λειτουργίας απαιτείται η διακίνηση ενός μεγάλου όγκου πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο και με μεγάλη ακρίβεια. Υπό από αυτήν την έννοια, οι πάροχοι IT υπηρεσιών μπορούν να λειτουργήσουν ως σύνδεσμος μεταξύ των διαφόρων παραγόντων, όπως πχ μεταξύ του ιδιοκτήτη του οχήματος και του EVS-A, μεταξύ του EVS-A και του διαχειριστή του συστήματος, ή συνδέοντας όλους τους προαναφερθέντες παράγοντες με την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι λοιπόν πιθανό, εταιρίες με εμπειρία και τεχνογνωσία στον τομέα της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών να

βρουν πρόσφορο έδαφος για την παροχή υπηρεσιών τηλεματικής ή τη συντήρηση των δικτύων επικοινωνίας κ.α.

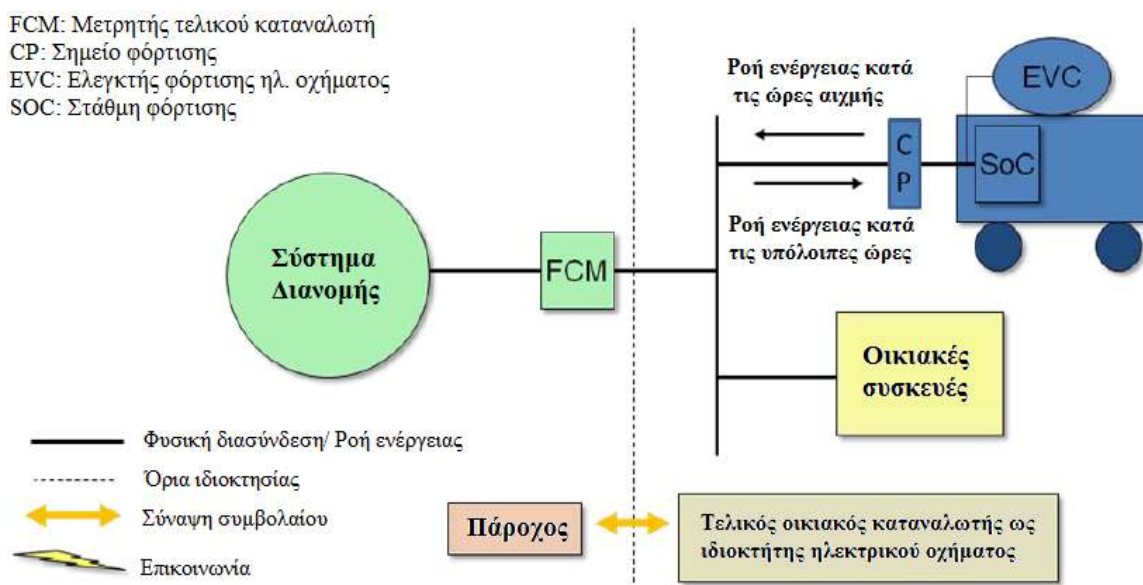
2.4.1 V2G λειτουργία χωρίς την ύπαρξη aggregator

Το πιο απλό μοντέλο είναι αυτό, στο οποίο το κάθε όχημα αποτελεί έναν ανεξάρτητο λογαριασμό με την τοπική εταιρία διανομής ενέργειας. Θεωρούμε πως το όχημα διαθέτει τις απαιτούμενες τηλεματικές συνδέσεις ώστε να λαμβάνει σήματα κατευθείαν από τον TSO και να αποκρίνεται σε αυτά ταχύτατα, που μπορεί να αφορούν στον προσδιορισμό της θέσης, στην εκτίμηση της ισχύος που μπορεί να παράσχει, αν είναι συνδεδεμένο σε κάποιο σταθμό φόρτισης ή όχι. Η επιχειρηματική αξιοποίηση του V2G οχήματος προϋποθέτει την ύπαρξη ενός αριθμού IP για κάθε όχημα ή κάποιου αντίστοιχου μοναδικού αναγνωριστικού και αντίστοιχα ενός ID για κάθε σταθμό φόρτισης. Τέλος, θεωρούμε πως κάθε τέτοιο όχημα φέρει ενσωματωμένο μετρητή ώστε να καταγράφει το χρόνο και τη ροή ισχύος.

Όσο το όχημα είναι σταθμευμένο και συνδεδεμένο σε κάποιο σταθμό, οικιακό, ιδιωτικό ή δημόσιο, έχει τη δυνατότητα να συμμετέχει στις διάφορες αγορές και να ανταποκρίνεται σε αυτές, όταν κάτι τέτοιο ζητείται από το διαχειριστή. Όταν το όχημα αποσυνδεθεί, ο ενσωματωμένος μετρητής καταγράφει το ποσό της ισχύος που απαιτήθηκε συνολικά από το δίκτυο. Κάθε κάποιο προσυμφωνημένο χρονικό διάστημα, η συνολική αξία των υπηρεσιών που προσέφερε το όχημα, θα αποδίδεται στον ιδιοκτήτη του. Αν και το μοντέλο αυτό είναι απλό στη σύλληψη του, έχει κάποιους εγγενείς περιορισμούς, που δεν θα του επιτρέψουν να εφαρμοσθεί σε μεγάλη κλίμακα. Μακροπρόθεσμα, ο διαχειριστής του δικτύου θα είναι υποχρεωμένος να επιβλέπει συνεχώς τη σύνδεση και την αποσύνδεση πάρα πολλών οχημάτων με μοναδικές απαιτήσεις το καθένα και να τα ανταμείβει ανάλογα, γεγονός που είναι προφανώς ένα δύσκολο έργο ελέγχου και επικοινωνιών [1],[37].

Η V2H λειτουργία (Vehicle to Home) αποτελεί μία παραλλαγή της παραπάνω περίπτωσης, μόνο που τώρα το EV δεν προσφέρει καθόλου ενέργεια ή υπηρεσίες στο δίκτυο, αλλά αντίθετα προσφέρει ενέργεια στο σπίτι, εννοώντας τον τελικό οικιακό καταναλωτή. Πιο αναλυτικά, εάν θεωρήσουμε ότι το συμβόλαιο μεταξύ προμηθευτή και τελικού καταναλωτή προβλέπει νυχτερινό τιμολόγιο, είναι δυνατόν το όχημα να φορτίζει το συσσωρευτή του κατά τις ώρες, που η τιμή της ενέργειας είναι χαμηλή και να αποδίδει αυτήν την ενέργεια για την κάλυψη των αναγκών του ίδιου του σπιτιού κατά τις ώρες, που η τιμή αυτή είναι υψηλή. Παρόλο που η λειτουργία αυτή του οχήματος, ως οικιακή γεννήτρια καταφέρνει να μειώσει τα έξοδα του σπιτιού για ηλεκτρική ενέργεια, θα πρέπει να επιβλέπεται και να ελέγχεται από ένα σύστημα διαχείρισης ενέργειας, κάτι που θα απαιτεί μια μεγαλύτερη επένδυση. Η βιωσιμότητα της V2H λειτουργίας εξαρτάται από τις ώρες που είναι παρκαρισμένο το όχημα στο σπίτι, από την αποδοτικότητα και το κόστος υποβάθμισης του συσσωρευτή, αλλά και

από το πόσο μειωμένη θα είναι η τιμή της ενέργειας κατά το νυχτερινό τιμολόγιο εν σχέσει με την τιμή κατά τη διάρκεια της υπόλοιπης ημέρας [36].



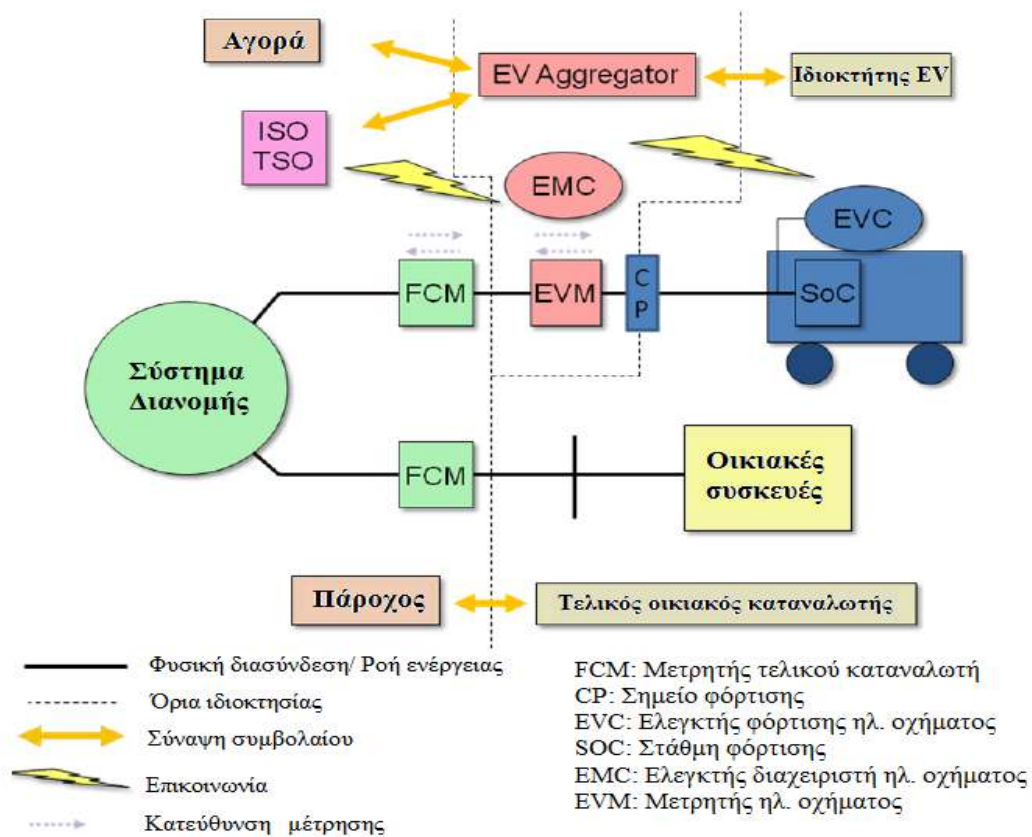
Εικόνα 2.4.1.1: Λειτουργία V2H [36]

2.4.2 V2G λειτουργία με την ύπαρξη aggregator

Πρόκειται για το πιο πιθανό μοντέλο της V2G λειτουργίας, δεδομένης της μέχρι στιγμής λειτουργίας των αγορών ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών, αλλά και των υπαρχουσών υποδομών επικοινωνίας. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, άμεση σχέση με τις αγορές θα έχει ο aggregator και όχι ο κάτοχος του οχήματος. Από τη μία πλευρά, ο aggregator θα συγκεντρώνει τα προφίλ των οχημάτων που έχει υπό τον έλεγχο του, ώστε να δημιουργεί ένα αθροιστικό προφίλ μιας εικονικής μονάδας παραγωγής ενέργειας. Αυτό το συγκεντρωτικό προφίλ, θα εξαρτάται από το πόσα οχήματα αναμένεται να είναι συνδεδεμένα και ικανά για V2G κάθε ώρα της ημέρας αλλά και από το τι περιορισμοί υπάρχουν όσον αφορά στη διαθέσιμη ισχύ και ενέργεια. Από την άλλη πλευρά, θα δέχεται τα σήματα-εντολές από το διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς όπως κάθε άλλη συμβατική μονάδα και εν συνεχεία, θα διαβιβάζει αυτές τις εντολές στο κάθε όχημα, όπως αυτός κρίνει πιο συμφέρον ανάλογα με το συγκεντρωτικό προφίλ που έχει δημιουργήσει. Έτσι, θα είναι σε θέση να κάνει προσφορές επιπέδου MW ή MWh στις διάφορες αγορές, ενόσω τα διάφορα EVs εκτελούν τα προγραμματισμένα τους ταξίδια. Το ρόλο ενός aggregator μπορεί να αναλάβει [1]:

- ο διαχειριστής του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (DSO), αποκτώντας έτσι βελτιωμένη ευστάθεια και αξιοπιστία του δικτύου του

- μια εταιρεία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που δραστηριοποιείται ούτως ή άλλως στην αγοραπωλησία ενέργειας ή/και την προσφορά επικουρικών υπηρεσιών μεγαλώνοντας έτσι το εύρος των δραστηριοτήτων της
- μια κατασκευαστική εταιρία ηλεκτρικών οχημάτων που αποκτά έτσι μια συνεχή πελατειακή σχέση με τον αγοραστή του οχήματος
- ένας πάροχος κινητής τηλεφωνίας, που διαχειρίζεται το δίκτυο τηλεπικοινωνίας για τη μετάδοση της V2G πληροφορίας και αποκτά κέρδη μέσω της σύναψης πολλών μικρών αυτοματοποιημένων συναλλαγών.
- μία ξεχωριστή επιχείρηση, που θα ασχολείται αποκλειστικά με αυτόν τον τομέα.



Εικόνα 2.4.2.1: Ροή ενέργειας, πληροφοριών και χρημάτων κατά τη V2G λειτουργία με την ύπαρξη aggregator[36]

Τα κέρδη, που αποκομίζει ο aggregator από τη συμμετοχή του στις διάφορες αγορές, θα τα μοιράζει στους ιδιοκτήτες των οχημάτων αναλόγως της συμμετοχής τους σε αυτές, κρατώντας προφανώς ένα ποσοστό για τον εαυτό του. Μια πιο ενδιαφέρουσα περίπτωση είναι όταν ο aggregator είναι και ιδιοκτήτης των συσσωρευτών των οχημάτων, που έχει υπό τον έλεγχο του. Ο κάτοχος του EV δεν θα πληρώνεται τότε με βάση την ενέργεια που παρέχει αλλά θα του παρέχεται δωρεάν αντικατάσταση του συσσωρευτή και πολύ φτηνή φόρτιση. Αυτό το μοντέλο έχει το πλεονέκτημα πως ο κάτοχος του οχήματος δεν έχει πλέον να ανησυχεί για τη φθορά που υφίσταται ο συσσωρευτής και επομένως για τη συντήρησή του. Το παραπάνω

μοντέλο, θα μπορούσε να εφαρμοστεί επιτυχώς από εταιρίες που δραστηριοποιούνται στο λεγόμενο «σύστημα ανταλλασσόμενου συσσωρευτή» (swapping batteries system). Το σύστημα αυτό αντικαθιστά την έννοια της φόρτισης του αποφορτισμένου συσσωρευτή με την έννοια της αντικατάστασης του με έναν άλλον, πλήρως φορτισμένο. Το κάθε όχημα δεν διαθέτει το δικό του συσσωρευτή, αλλά «κάποιον» συσσωρευτή, τον οποίο είναι ικανό με έναν αυτοματοποιημένο και γρήγορο τρόπο διάρκειας λίγων λεπτών, να αντικαταστήσει στους ειδικά διαμορφωμένους σταθμούς. Οι εταιρίες λοιπόν αυτές, που διαθέτουν ένα μεγάλο stock συσσωρευτών θα μπορούν να προσφέρουν υπηρεσίες στο δίκτυο, αποτελώντας ένα είδος aggregator συσσωρευτών και όχι οχημάτων, μοντέλο μάλιστα πιο ελαστικό, καθώς απαιτούνται πολύ λιγότερες υποδομές τηλεπικοινωνιών, λόγω της συγκέντρωσης όλης της διαθέσιμης ισχύος στον ίδιο χώρο [36]. Μια τέτοια εταιρία, η Better Place Inc. δραστηριοποιείται ήδη σε αρκετές χώρες παγκοσμίως (Ισραήλ, ΗΠΑ, Δανία, Ολλανδία, Κίνα κ.α) έχοντας κατασκευάσει τις απαραίτητες υποδομές, χωρίς όμως να προσφέρει V2G υπηρεσίες [38]. Τέλος, μία ακόμα περίπτωση άξια αναφοράς είναι η εξής: ο συσσωρευτής του οχήματος κάποια στιγμή θα καταστεί αναποτελεσματικός για τις οδηγικές απαιτήσεις του οχήματος λόγω της φθοράς του, που αναπόφευκτα θα επέλθει από την καθημερινή φόρτιση και εκφόρτιση του. Παρόλα αυτά, αυτό δεν σημαίνει ότι δεν θα μπορούσε να αποδειχθεί χρήσιμος για άλλες λειτουργίες, πέραν της οδήγησης. Ένας aggregator θα μπορούσε να συλλέγει αυτούς τους χρησιμοποιημένους συσσωρευτές προσφέροντας τους μία δεύτερη ζωή (second life batteries) με σκοπό να παρέχει υπηρεσίες στο δίκτυο, όπως κατά την περίπτωση του V2G. Τότε μιλάμε βέβαια για B2G (Battery to Grid). Το συγκριτικό πλεονέκτημα μίας τέτοιας μορφής aggregator με τον κλασικό V2G aggregator είναι η συγκέντρωση όλης της διαθέσιμης ισχύος σε ένα χώρο, αλλά και η απουσία περιορισμών, που έχουν να κάνουν με τις απαιτήσεις των οδηγών για ελάχιστη φόρτιση ή προγραμματισμένα ταξίδια. Βέβαια, η αποδοτικότητα και οι δυνατότητες ενός συσσωρευτή σε αυτήν την περίπτωση είναι σαφώς μειωμένες εν σχέση με έναν καινούργιο, γεγονός που περιορίζει και την οικονομική βιωσιμότητα ενός τέτοιου εγχειρήματος. Διάφορες έρευνες όμως [39] αποδεικνύουν ότι μία τέτοια περίπτωση aggregator μπορεί να είναι οικονομικά προσοδοφόρα.



Εικόνα 2.4.2.2: Επίδειξη του αυτοματοποιημένου συστήματος ανταλλαγής συσσωρευτών της εταιρίας Better Place [38]

2.5 Πλεονεκτήματα της V2G λειτουργίας

Ο εξηλεκτρισμός των μεταφορών, όπως είδαμε στο πρώτο κεφάλαιο, εμφανίζει αρκετά πλεονεκτήματα, εάν συγκριθεί με τη σημερινή κατάσταση χρήσης ορυκτών καυσίμων. Παρόλα αυτά, εκ πρώτης όψεως, φαίνεται ως μία μεγάλη πρόκληση για τα ηλεκτρικά δίκτυα, τα οποία θα κληθούν να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες χιλιάδων ή και εκατομμυρίων νέων φορτίων, τα οποία θα ζητούν ενέργεια σε καθημερινή βάση. Εάν όμως, καταστεί δυνατή η υιοθέτηση σε μεγάλη κλίμακα της V2G λειτουργίας, γίνεται φανερό ότι τα δίκτυα, όχι μόνο δεν θα βγουν ζημιωμένα από τη διείσδυση μεγάλου αριθμού ηλεκτρικών οχημάτων, αλλά αντίθετα θα έχουν μία μεγάλη ευκαιρία να βελτιωθούν προς όφελος δικό τους αλλά και ολόκληρης της κοινωνίας. Παρακάτω αναλύουμε τους τρόπους αυτούς, που η V2G λειτουργία θα ωφελήσει τα ηλεκτρικά δίκτυα, τους καταναλωτές, είτε αυτοί οδηγούν ένα EV είτε όχι, αλλά και το περιβάλλον.

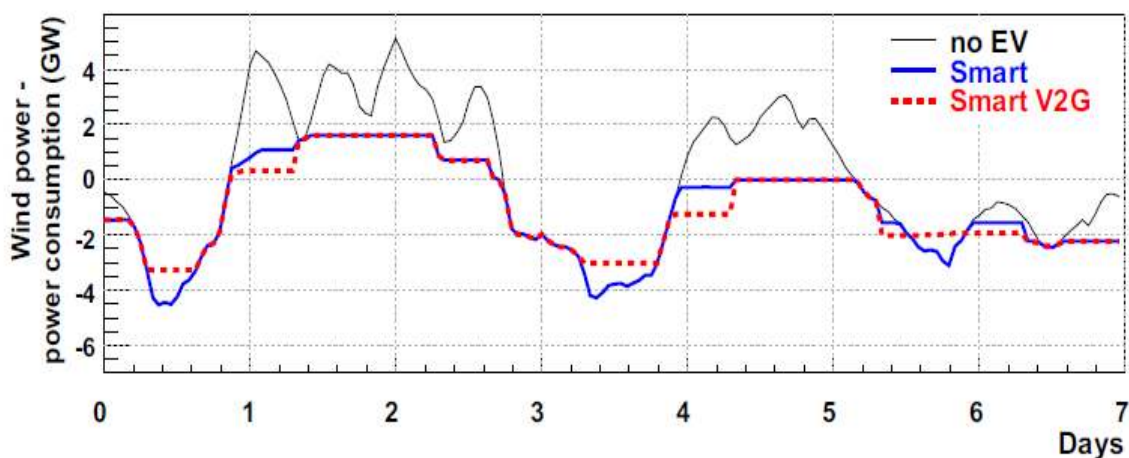
2.5.1 Μεγαλύτερη διείσδυση των ΑΠΕ

Τα τελευταία χρόνια, γίνεται μια παγκόσμια προσπάθεια για την παραγωγή όσο το δυνατόν περισσότερης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα, που έχει η παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ είναι ότι εμφανίζει απρόβλεπτες διακυμάνσεις. Η ισχύς εξόδου ενός φωτοβολταϊκού μπορεί από τη μία στιγμή στην άλλη να μηδενιστεί, επειδή πέρασε ένα σύννεφο, ή μια ανεμογεννήτρια μπορεί αντίστοιχα να σταματήσει να παράγει ενέργεια, εάν η ταχύτητα του ανέμου γίνει μικρότερη ή και μεγαλύτερη από συγκεκριμένες τιμές. Η ισχύς εξόδου λοιπόν δεν μπορεί να προβλεφθεί με βεβαιότητα και να οριστεί ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες του δικτύου, όπως συμβαίνει με τους συμβατικούς σταθμούς των ορυκτών καυσίμων. Για μικρά επίπεδα διείσδυσης, οι διακυμάνσεις αυτές μπορούν να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά με ήδη υπάρχοντες μηχανισμούς. Παρόλα αυτά, καθώς το ποσοστό της παραγόμενης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, ξεπερνάει το 10-30%, επιπλέον μηχανισμοί είναι απαραίτητοι για να εξισορροπηθεί η μεταβαλλόμενη παραγωγή με την επίσης μεταβαλλόμενη ζήτηση. Δύο τέτοιοι μηχανισμοί, που θα μπορούσαν να λύσουν αυτόν τον περιορισμό των ΑΠΕ είναι προφανώς η ύπαρξη εφεδρειών και δεύτερον η ύπαρξη αποθηκευτικών διατάξεων ενέργειας. Η εφεδρεία αναφέρεται στην ύπαρξη γεννητριών, που δεν παράγουν ενέργεια παρά μόνο όταν τους ζητηθεί, δηλαδή εν προκειμένω, όταν η παραγωγή από ΑΠΕ δεν επαρκεί για να καλύψει τη ζήτηση. Αντίθετα, η αποθήκευση, αρχικά απορροφά το πλεόνασμα της ενέργειας, που παράγεται από ΑΠΕ και υπό κανονικές συνθήκες θα απορρίπτονταν, εφόσον η ζήτηση έχει ήδη καλυφθεί και μετέπειτα το επιστρέφει στο δίκτυο, για την κάλυψη μεταγενέστερου φορτίου. Και οι δύο αυτές λύσεις, όπως είναι φανερό, προσθέτουν επιπλέον κόστος κεφαλαίου για τα ηλεκτρικά δίκτυα στην ήδη ακριβή περίπτωση της παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές [40].

Όσον αφορά στην αποθήκευση ενέργειας, υπάρχει η επιλογή να κατασκευαστούν νέες μονάδες μεγάλης κλίμακας όπως τα υδροηλεκτρικά

εργοστάσια, συστήματα πεπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage/CAES) κ.α. ή να αναρωτηθούμε εάν υπάρχει ήδη στο ηλεκτρικό σύστημα κάποια μορφή αποθήκευσης, που όμως δεν χρησιμοποιείται. Η απάντηση είναι ότι με την υιοθέτηση της V2G λειτουργίας, μπορεί να υπάρξει και δεν είναι άλλη από το άθροισμα των συσσωρευτών των ηλεκτρικών οχημάτων. Αυτή η λύση, μπορεί να γλιτώσει τα ηλεκτρικά δίκτυα από την επιπλέον επένδυση σε μεγάλης κλίμακας αποθηκευτικές διατάξεις, καθώς η διείσδυση των EVs στην αγορά της αυτοκίνησης είναι ένα γεγονός, που αναμένεται να συμβεί ανεξάρτητα από τη βούληση και την ευθύνη των διαχειριστών του δικτύου. Τα επιπλέον έξοδα, που θα χρειαστούν για να χρησιμοποιηθούν τα ηλεκτρικά οχήματα ως μονάδες αποθήκευσης είναι αυτά που αναφέραμε σε προηγούμενη ενότητα και έχουν να κάνουν με την εγκατάσταση της V2G λειτουργίας [40]. Στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών, έχει προταθεί το εξής σχήμα [41]: Η ισχύς που μπορεί να δώσει μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση είναι αρκετά προβλέψιμη κατά τη διάρκεια μίας ημέρας. Η μεγαλύτερη δυνατή ισχύς παράγεται κατά το ηλιακό μεσημέρι, ενώ όταν βραδιάσει η παραγωγή είναι μηδενική. Αντίθετα, η αιχμή του φορτίου είναι συνήθως αργά το απόγευμα. Μια απλή λοιπόν στρατηγική για την εκμετάλλευση της V2G λειτουργίας είναι ο προγραμματισμός της φόρτισης των οχημάτων κατά τις μεσημεριανές ώρες και η εκφόρτιση τους κατά τις απογευματινές. Για την περίπτωση των αιολικών, η κατάσταση είναι πιο περίπλοκη, αλλά σε γενικές γραμμές θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι προτιμότερο, η φόρτιση των EVs να γίνεται τις πρώτες πρωινές ώρες, ενώ η εκφόρτιση τους να γίνεται τις απογευματινές, όταν δηλαδή το φορτίο παρουσιάζει την τυπική αιχμή του.

Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα, που καταδεικνύει τις δυνατότητες των ηλεκτρικών οχημάτων να αποθηκεύουν αυτό το πλεόνασμα ενέργειας και να το αποδίδουν αργότερα είναι η περίπτωση της Δανίας, που έχει γίνει αντικείμενο πολλών μελετών [42], λόγω της αυξημένης διείσδυσης αιολικών (περίπου το 20% της εγκατεστημένης ισχύος είναι αιολικά, ποσοστό που αναμένεται να αυξηθεί). Στην εικόνα 2.5.1 βλέπουμε την παραγωγή των αιολικών μείον το φορτίο κατά τη διάρκεια μίας εβδομάδας. Η μαύρη γραμμή αναφέρεται στην υπάρχουσα κατάσταση, χωρίς διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων δηλαδή, η μπλε γραμμή αναφέρεται στην διείσδυση 500.000 EVs ικανά να φορτίζουν έξυπνα, ενώ το σενάριο της κόκκινης γραμμής υποθέτει V2G λειτουργία. Παρατηρούμε ότι με V2G λειτουργία η διαφορά αιολικής παραγωγής και φορτίου είναι πιο κοντά στο μηδέν, από ότι με βάση τα άλλα σενάρια.



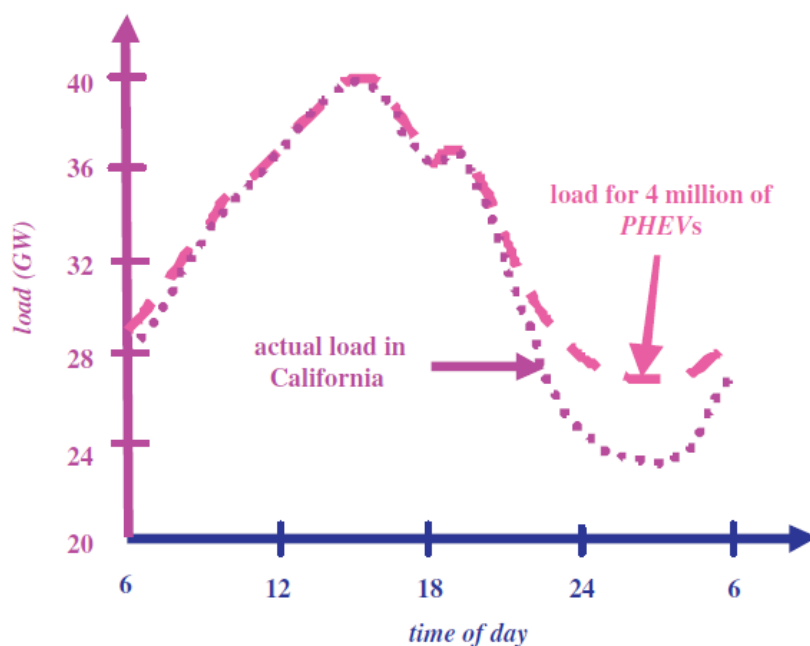
Εικόνα 2.5.1: Σύγκριση σεναρίων για την εξισορρόπηση αιολικής παραγωγής-φορτίου [42]

2.5.2 Αξιοπιστία ηλεκτρικού δικτύου

Η V2G λειτουργία είναι ικανή να συμβάλει στην αξιοπιστία, την ευελιξία και τη σταθερότητα του δικτύου με τους εξής 3 τρόπους:

2.5.2.1 Valley filling (γέμισμα κοιλάδας)

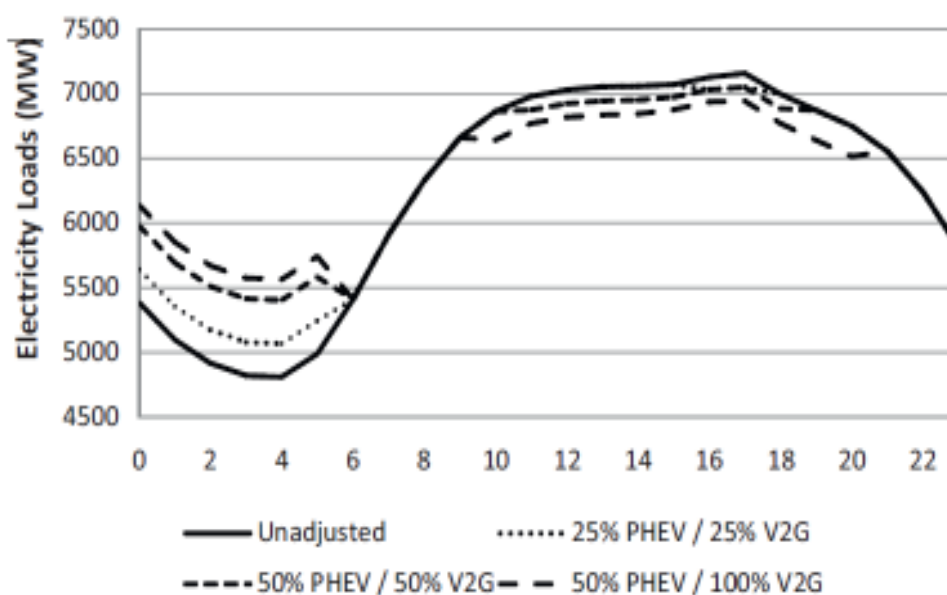
Εάν ένας στόλος ηλεκτρικών οχημάτων, ο οποίος λειτουργεί ως φορτίο είναι αρκετά μεγάλος, μπορεί να παίζει σημαντικό ρόλο όσον αφορά το valley filling. Έχει υπολογιστεί [43] ότι πχ για το σύστημα της California ένας τέτοιος ικανός αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων εξοπλισμένων με συσσωρευτές των 20 kWh που φορτίζουν για 5 ώρες κατά μέσο όρο, είναι 12.500. Κατά αυτόν τον τρόπο αντιπροσωπεύουν ένα φορτίο 50 MW, μέγεθος ικανό να επηρεάσει την καμπύλη φορτίου κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης. Το valley filling μπορεί να επιτευχθεί και χωρίς V2G λειτουργία, απλώς με κάποιο κίνητρο νυχτερινής χρέωσης. Βέβαια, τα αποτελέσματα είναι πολύ καλύτερα κατά το V2G, καθώς τότε οι ιδιοκτήτες των οχημάτων θα έχουν μεγαλύτερο κέρδος, αφού ταυτόχρονα θα παίρνουν μέρος και στις αγορές επικουρικών υπηρεσιών. Ακόμα, η ύπαρξη aggregator εξασφαλίζει μεγαλύτερο valley filling διότι τότε υπάρχει σαφής παρέμβαση με σκοπό να κατανεμηθεί η φόρτιση των διαφόρων EVs κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εξαλειφθούν οι διακυμάνσεις της ζήτησης. Αυτό είναι αρκετά σημαντικό για το ηλεκτρικό δίκτυο, καθώς η εξυπηρέτηση ενός σταθερού και επίπεδου φορτίου είναι πολύ πιο εύκολη και απλή υπόθεση από ότι ενός κυμαινόμενου.



Εικόνα 2.5.2: Valley filling χάρις τη φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων [43]

2.5.2.2 Κάλυψη της ισχύος αιχμής (peak shaving)

Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας ημέρας μπορεί να αυξηθεί δραματικά, ειδικά κατά τις ζεστές μέρες του καλοκαιριού, όταν δηλαδή γίνεται ευρεία χρήση συσκευών, όπως τα κλιματιστικά. Αυτές οι περιόδους, συχνά απαιτούν την παραγωγή ενέργειας από ειδικές μονάδες, γνωστών και ως peakers για την κάλυψη ακριβώς του φορτίου αιχμής. Οι μονάδες αυτές, εξ' ορισμού, λειτουργούν μόνο περιστασιακά και για το λόγο αυτό, δεν μπορούν να είναι οικονομικά βιώσιμες εάν δεν πωλούν την ενέργεια που παράγουν με υψηλή τιμή. Μια έρευνα για το σύστημα PJM των ΗΠΑ έδειξε ότι 1% μείωση της ζήτησης αιχμής μπορούσε να γλιτώσει το κόστος της ενέργειας κατά 3,9%, ποσοστό που αντιπροσωπεύει εκατομμύρια δολάρια στο συγκεκριμένο σύστημα [44]. Για το λόγο αυτό, είναι πολύ σημαντικό για τους σχεδιαστές και τους διαχειριστές των ηλεκτρικών δικτύων να μπορέσουν να μειώσουν τις αιχμές του φορτίου. Το peak shaving αποσκοπεί στην ομαλοποίηση της καμπύλης του φορτίου, κατά την οποία μπορούν να προκύψουν σημαντικά οικονομικά οφέλη. Ένας τρόπος να γίνει αυτή η ομαλοποίηση είναι μέσω της στρατηγικής demand response (απόκριση ζήτησης), όπου οι τελικοί καταναλωτές εν προκειμένω μειώνουν τη ζήτηση ενέργειας σε συγκεκριμένες ώρες, λόγω συνήθως κάποιου οικονομικού κινήτρου. Αυτή τη λογική μπορούν να ακολουθήσουν και τα ηλεκτρικά οχήματα. Προφανώς το peak shaving από τα EVs είναι δυνατό μόνο κατά τη V2G λειτουργία. Εάν δεν υπάρχει αυτή, η ροή ισχύος προς το δίκτυο δεν είναι δυνατή, επομένως η αιχμή δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί από τα οχήματα. Όπως είδαμε και σε προηγούμενη υποενότητα, η συμμετοχή των EVs στην αγορά ισχύος μπορεί να είναι βιώσιμη. Στην εικόνα 2.5.3 φαίνονται οι δυνατότητες που έχει η V2G λειτουργία για peak shaving στο σύστημα της Νέας Υόρκης.



Εικόνα 2.5.3: peak shaving και valley filling μέσω της V2G λειτουργίας [44]

2.5.2.3 Προσφορά επικουρικών υπηρεσιών

Έγινε εκτενής αναφορά στο υποκεφάλαιο 2.3

2.5.3 Οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη

Η υιοθέτηση της V2G λειτουργίας μπορεί πρώτα από όλα να αποφέρει οικονομικό κέρδος στον ιδιοκτήτη ενός ηλεκτρικού οχήματος. Όπως καταδείξαμε προηγουμένως, μέσω τη συμμετοχής του σε συγκεκριμένες αγορές, μπορεί να κερδίζει χρήματα, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι θα αποσβέσει γρηγορότερα την αγορά ενός αρχικά ακριβότερου αυτοκινήτου. Η μείωση αυτή του χρόνου απόσβεσης, θα βοηθήσει περαιτέρω τη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στις μεταφορές. Κάτι τέτοιο είναι επιθυμητό αφού, όπως τονίστηκε στο πρώτο κεφάλαιο τα ηλεκτρικά οχήματα είναι σαφώς πιο οικολογικά από τα συμβατικά. Επιπλέον, η V2H λειτουργία μπορεί να μειώσει σημαντικά τα έξοδα του οικιακού καταναλωτή για ηλεκτρική ενέργεια.

Η V2G λειτουργία μπορεί να γλιτώσει τα ηλεκτρικά δίκτυα από την ανάγκη για δημιουργία καινούργιων μονάδων παραγωγής ενέργειας, που θα ήταν απαραίτητα εάν υπάρξει μια μεγάλη διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων, τα οποία θα συμπεριφέρονται μόνο ως φορτία. Αποφεύγεται ακόμα η δημιουργία αποθηκευτικών διατάξεων μεγάλης κλίμακας, που κοστίζουν πολύ ακριβά αφού στην ουσία το κόστος ενός EV μετατίθεται στον οδηγό. Ήδη υπάρχοντα εργοστάσια μπορούν να αποσυρθούν και τη θέση τους να πάρουν τα οχήματα, αφού θα είναι ικανά να ομαλοποιούν τη ζήτηση και να μην υπάρχει τόσο μεγάλη ανάγκη για peakers. Μονάδες που λειτουργούσαν για την παροχή επικουρικών υπηρεσιών στο δίκτυο επίσης μπορεί να αντικατασταθούν από τα EVs. Όλα τα παραπάνω έχουν όχι μόνο οικονομικά οφέλη για τα δίκτυα και αλλά και περιβαλλοντικά για όλη την κοινωνία, αφού η λειτουργία μίας συμβατικής μονάδας παραγωγής ενέργειας συνεπάγεται συνήθως και μόλυνση του περιβάλλοντος και υψηλά ποσοστά εκπομπών αέριων ρύπων, όπως το CO₂. Τέλος, η V2G λειτουργία ως μια καινούργια τεχνολογία προσφέρει εύφορο έδαφος για την ανάπτυξη της οικονομίας μέσω νέων θέσεων εργασίας, προωθεί την έρευνα τόσο γύρω από τα ηλεκτρικά οχήματα όσο και γύρω από γειτονικά επιστημονικά πεδία, όπως είναι η τεχνολογία των συσσωρευτών και των τηλεπικοινωνιών, ενώ προβάλλει την ιδέα της εξυπνότερης και αποδοτικότερης χρήσης της ενέργειας και των φυσικών πόρων.

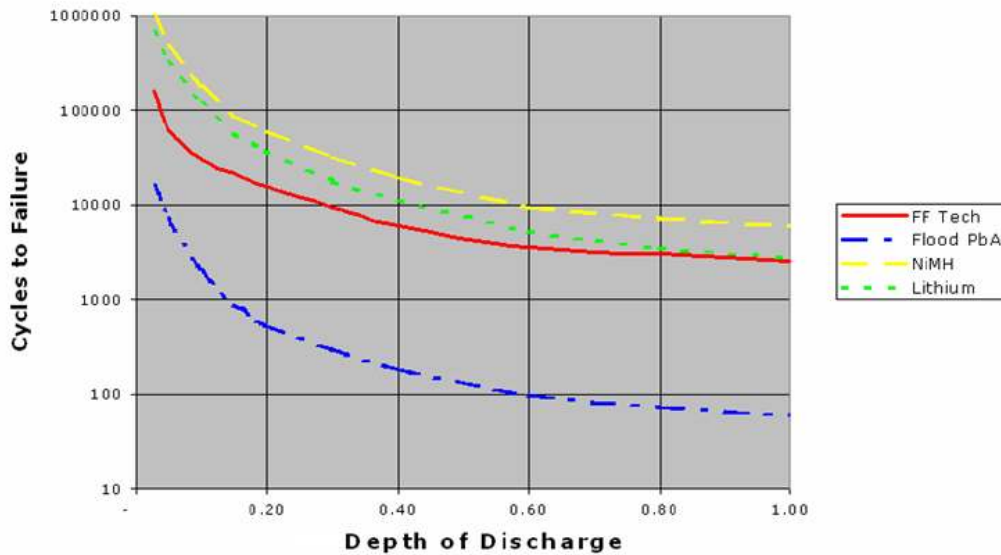
2.6 Περιορισμοί της V2G λειτουργίας

Αν και τα τελευταία χρόνια υπάρχει έντονο ενδιαφέρον και σημαντική ερευνητική δραστηριότητα γύρω από τη V2G λειτουργία, πρόκειται ακόμα για μια θεωρητική ιδέα, που θα αργήσουμε να δούμε να εφαρμόζεται στην πράξη σε μαζικό τουλάχιστον επίπεδο. Θεωρείται [45] ότι για να φτάσουμε στην υιοθέτηση αυτής της τεχνολογίας πρέπει πρώτα να περάσουν 3 προηγούμενα στάδια όσον αφορά στη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων. Το πρώτο στάδιο αναφέρεται στη μη ελεγχόμενη φόρτιση (dumb charging), όπου ο οδηγός συνδέει το όχημα του και το φορτίζει οποτεδήποτε αυτό είναι δυνατό μέχρι να γεμίσει εντελώς το συσσωρευτή του, αδιαφορώντας για τις συνέπειες. Το δεύτερο στάδιο προβλέπει ότι θα υπάρχει μια επιλεκτικότητα του οδηγού για την ώρα ή/και του ρυθμού της φόρτισης, ο οποίος θα θέλει να εκμεταλλευτεί μειωμένες χρεώσεις ενέργειας. Κατά το τρίτο στάδιο της ελεγχόμενης ή έξυπνης φόρτισης (controlled, smart charging), οι εξελιγμένες δυνατότητες επικοινωνίας και ελέγχου του EV από την πλευρά του δικτύου θα του επιτρέπουν να φορτίζουν το κάθε όχημα ανάλογα με τις ανάγκες και τους στόχους του (πχ τη μεγιστοποίηση της χρήσης ΑΠΕ) ικανοποιώντας παράλληλα τις οδηγικές απαιτήσεις του ιδιοκτήτη. Μετά την επιτυχή δοκιμασία όλων των παραπάνω σταδίων, θα έχει έρθει η ώρα για την υιοθέτηση της V2G λειτουργίας με την αμφίδρομη ροή ισχύος. Αυτό διότι, υπάρχουν πολλά θέματα που πρέπει να αντιμετωπιστούν πρωτού καταστεί δυνατή η εφαρμογή του V2G.



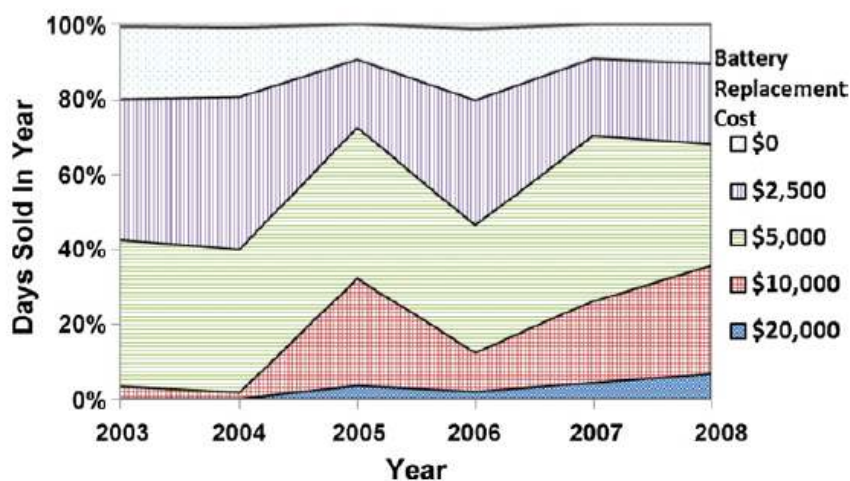
Εικόνα 2.6.1: Τα διάφορα στάδια που μεσολαβούν πριν γίνει δυνατή η υιοθέτηση της V2G λειτουργίας [45]

Το βασικότερο από αυτά τα θέματα, που πρέπει να αντιμετωπιστούν είναι η αυξημένη φθορά στους συσσωρευτές των οχημάτων, που προκαλεί η V2G λειτουργία. Εάν ένα όχημα συμμετέχει μόνο στις αγορές επικουρικών υπηρεσιών, τότε η φθορά στο συσσωρευτή του είναι μικρότερη από ότι αν συμμετέχει και στην αγορά ενέργειας για την κάλυψη της αιχμής. Αυτό εξηγείται αν σκεφτούμε ότι πρώτον η στρεφόμενη εφεδρεία καλείται πολύ σπάνια και δεύτερον ότι στη ρύθμιση η τελική ενέργεια που εκφορτίζεται προσεγγίζει το μηδέν, εφόσον μακροπρόθεσμα τα ποσά που ζητούνται για επάνω και κάτω ρύθμιση είναι συμμετρικά. Αντίθετα, για την εξυπηρέτηση του φορτίου αιχμής απαιτείται μεγάλο ποσό ενέργειας να εκφορτιστεί από το συσσωρευτή, γεγονός που αυξάνει το βάθος εκφόρτισης του (depth of discharge/DOD). Κοινή διαπίστωση για όλες τις διαφορετικές τεχνολογίες του συσσωρευτή είναι ότι υπάρχει αυξημένη φθορά με την αύξηση του βάθους εκφόρτισης. Μια ποσοτικοποίηση αυτής της διαπίστωσης φαίνεται και στην εικόνα 2.6.2.



Εικόνα 2.6.2: Μεγάλα βάθη εκφόρτισης μειώνουν το χρόνο ζωής των συσσωρευτών [45]

Τα αυξημένα κόστη που προέρχονται από τη φθορά των συσσωρευτών μπορεί να καταστήσουν τη V2G λειτουργία μη οικονομικά βιώσιμη ή ελάχιστα επικερδή, ώστε να ασχοληθούν οι ιδιοκτήτες των οχημάτων. Στην εικόνα 2.6.3. βλέπουμε πόσο πολύ επηρεάζει το κόστος αντικατάστασης του συσσωρευτή, την οικονομική βιωσιμότητα της V2G λειτουργίας. Τα αποτελέσματα είναι για την αγορά ηλεκτρισμού της Φιλαδέλφειας (PJM) των ΗΠΑ και για ένα BEV που χρησιμοποιεί συσσωρευτή ιόντων λιθίου συνολικής χωρητικότητας 16 kWh και συμμετέχει μόνο στην αγορά ενέργειας. Οι μέρες που αναμένεται κέρδος για τον ιδιοκτήτη μειώνονται, όσο το κόστος λόγω της φθοράς μεγαλώνει. Σήμερα, για έναν τέτοιο συσσωρευτή το κόστος αντικατάστασης του είναι περίπου στα 5.000\$. Παρόλα αυτά, προβλέπεται ότι στο μέλλον το κόστος αυτό, θα μειωθεί με την εξέλιξη της τεχνολογίας των συσσωρευτών και τη μαζική παραγωγή τους, εάν τα ποσοστά διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι μεγάλα [46].



Εικόνα 2.6.3: Ημέρες που η V2G λειτουργία είναι επικερδής για διάφορα κόστη αντικατάστασης του συσσωρευτή [46]

Επίσης, κάποια σημαντικά θέματα που αξίζει να αναφέρουμε είναι οι απώλειες της ενέργειας κατά τη φόρτιση και εκφόρτιση των συσσωρευτών, η μεγάλη πολυπλοκότητα που εισάγεται, τα προβλήματα πρόβλεψης της οδηγικής συμπεριφοράς και οι πιθανές αναβαθμίσεις στο δίκτυο. Το πρώτο μπορεί να γίνει αντιληπτό, χρησιμοποιώντας ένα παράδειγμα: Εάν το δίκτυο θέλει να αποθηκεύσει 5 kWh σε έναν συσσωρευτή και να τις χρησιμοποιήσει αργότερα, πρέπει να λάβει υπόψην του, ότι θα υπάρξουν απώλειες πρώτον κατά τη μετατροπή της AC τάσης σε DC, δεύτερον κατά την αποθήκευση αυτής της ενέργειας και τρίτον για την εκ νέου μετατροπή της DC τάσης του συσσωρευτή σε AC του δικτύου. Όλη αυτή η διαδικασία με τις υπάρχουσες τεχνολογίες υπολογίζεται ότι έχει μια απόδοση της τάξης του 70 με 80% [45]. Επομένως από τις αρχικές 5 kWh το δίκτυο θα πάρει πίσω 3,5 με 4 kWh, γεγονός που ίσως να κάνει ασύμφορη την V2G λειτουργία. Στη συνέχεια, η ανάγκη για συνεννόηση πολλών διαφορετικών παραγόντων με συχνά αντικρουόμενα οικονομικά συμφέροντα και μάλιστα σε πραγματικό χρόνο και από διαφορετικές τοποθεσίες, εισάγει μεγάλη πολυπλοκότητα στην όλη διαδικασία. Η πρόκληση αυτή αναμένεται να αντιμετωπιστεί κατά ένα βαθμό με την ύπαρξη των aggregators, που θα λειτουργούν ως μεσάζοντες μεταξύ των διαφόρων παραγόντων και σιγά σιγά θα αποκτήσουν την απαραίτητη τεχνογνωσία και εμπειρία. Επιπλέον, ένας παράγοντας, που μπορεί να πλήξει την αξιοπιστία της V2G λειτουργίας είναι η απρόβλεπτη συμπεριφορά των οδηγών. Αν και κάτι τέτοιο δεν παίζει σημαντικό ρόλο, όταν μιλάμε για μεγάλο αριθμό ηλεκτρικών οχημάτων είναι απαραίτητο να γίνουν στατιστικές μελέτες για τις ώρες χρήσης των οχημάτων, για τα διανυόμενα χιλιόμετρα ή για τα έκτακτα και μη προγραμματισμένα ταξίδια. Μία σαφής υπεροχή για την υιοθέτηση της V2G λειτουργίας έχουν στόλοι οχημάτων με πιο αυστηρά προγραμματισμένα ταξίδια, όπως πχ τα οχήματα στο parking ενός αεροδρομίου, τα σχολικά ή τα λεωφορεία σταθερής τροχιάς. Τέλος, ένα ζήτημα που χρίζει μελέτης, για την ασφαλή εφαρμογή της V2G λειτουργίας είναι οι πιθανές αναβαθμίσεις και ενισχύσεις που θα πρέπει να γίνουν στο δίκτυο, αυξάνοντας έτσι το συνολικό κόστος, που σχετίζεται έμμεσα με το V2G. Όταν χιλιάδες ή εκατομμύρια ηλεκτρικά οχήματα συνδεδεμένα στη χαμηλή τάση του δικτύου διανομής στέλνουν πίσω ενέργεια, πρέπει να μελετηθεί η επίδραση τους στα διάφορα στοιχεία του δικτύου, όπως πχ οι μετασχηματιστές

Ακόμα και αν όλα τα παραπάνω θέματα καταφέρουν να λυθούν και η V2G λειτουργία καταφέρει να εφαρμοσθεί επιτυχώς, υπάρχει το αναπόφευκτο πρόβλημα του κορεσμού της αγοράς. Συγκεκριμένα, εξετάζεται η επιρροή, που θα είχε μια μεγάλη διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά της ενέργειας για την κάλυψη της αιχμής και στις αγορές των επικουρικών υπηρεσιών της ρύθμισης και της στρεφόμενης εφεδρείας. Βασική αρχή της ανταγωνιστικής οικονομίας είναι ότι εάν η προσφορά ενός προϊόντος αυξηθεί πολύ, χωρίς την ανάλογη αύξηση της ζήτησης για το προϊόν αυτό, η τιμή πώλησης του θα μειωθεί. Εν προκειμένω, όσο μεγαλύτερα επίπεδα συμμετοχής των ηλεκτρικών οχημάτων στη V2G λειτουργία, τόσο μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας και ισχύος διαθέσιμες για τις αγορές, χωρίς ανάλογη αύξηση της ζήτησης. Αποτέλεσμα λοιπόν είναι η αναμενόμενη μείωση των τιμών και συνεπώς των εσόδων ανά ηλεκτρικό όχημα, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε μη βιωσιμότητα της λειτουργίας.

3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

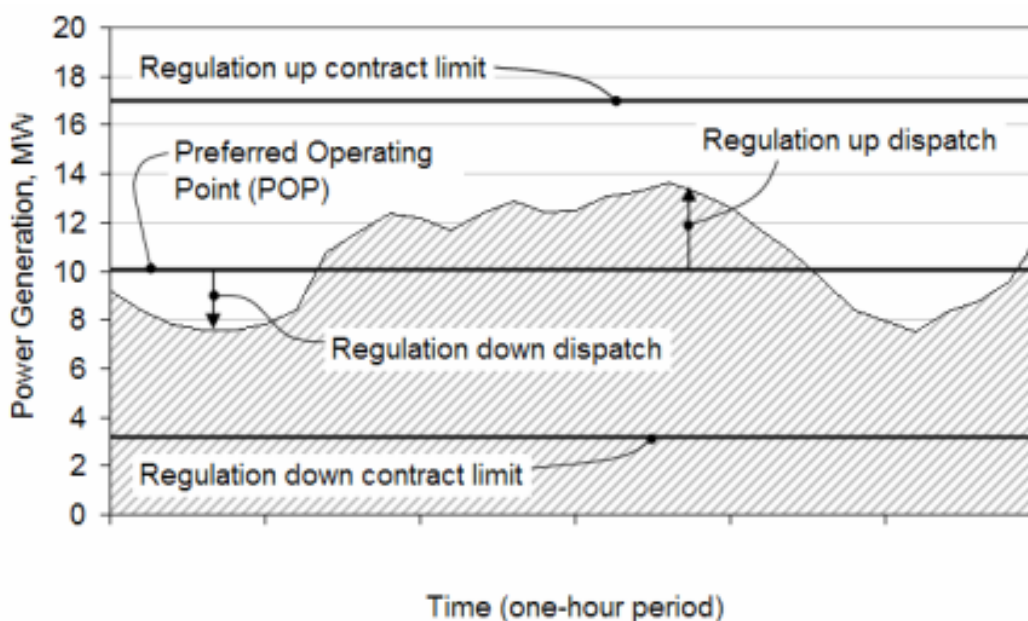
3.1 Σκοπός κεφαλαίου

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η περιγραφή και η εν συνεχεία μοντελοποίηση με μαθηματικές σχέσεις ενός πακέτου αλγορίθμων, το οποίο θα χρησιμοποιείται από έναν aggregator για να προγραμματίσει κατά βέλτιστο τρόπο, την παροχή επικουρικών υπηρεσιών και ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο. Οι επικουρικές υπηρεσίες, που εξετάζονται είναι η ρύθμιση συχνότητας (άνω και κάτω) και η στρεφόμενη εφεδρεία. Θεωρούμε τις υπηρεσίες αυτές καθώς και τις αντίστοιχες αγορές τους εν γένει ξεχωριστές. Η θεώρηση αυτή, επιτρέπει στον aggregator τις ασύμμετρες προσφορές άνω και κάτω ρύθμισης. Επιπρόσθετα, θεωρούμε ότι οι περίοδοι φόρτισης δεν είναι κατ' ανάγκην ανεξάρτητες από τις περιόδους, που τα οχήματα συμμετέχουν στις διάφορες υπηρεσίες, αλλά αυτές οι δύο λειτουργίες, μπορούν να συνδυαστούν. Ο όρος «βέλτιστος» αναφέρεται στη μεγιστοποίηση του οικονομικού κέρδους του aggregator, υπό την προϋπόθεση βέβαια ότι ταυτόχρονα λαμβάνονται υπόψη και τηρούνται οι απαιτήσεις τόσο των οδηγών των ηλεκτρικών οχημάτων, όσο και του διαχειριστή του συστήματος. Επιθυμούμε να κατασκευάσουμε τους αλγορίθμους, βασιζόμενοι σε γραμμικές σχέσεις, ώστε το πρόβλημα να μπορεί να λυθεί γρήγορα και αποτελεσματικά για στόλους πολλών ηλεκτρικών οχημάτων. Επειδή, ο αριθμός των εξισώσεων και των παραμέτρων, που θα χρειαστούν για την υλοποίηση των αλγορίθμων αυτών είναι μεγάλος, ο αναγνώστης παραπέμπεται στο Παράρτημα, όπου εκεί γίνεται μία επισκόπηση των χρησιμοποιούμενων παραμέτρων, με σκοπό την ευκολότερη κατανόηση των αλγορίθμων.

3.2 V2G προγραμματισμός (scheduling)

Όπως ήδη αναφέραμε στο Κεφάλαιο 2, ο aggregator επιτελεί διπλό ρόλο κατά τη V2G διαδικασία. Από τη μία πλευρά, ως άθροισμα των επιμέρους ηλεκτρικών οχημάτων, λειτουργεί ως ένα μεγάλο φορτίο, που επιθυμεί να καταναλώσει ενέργεια ώστε να αναπληρώσει αυτή, που καταναλώθηκε κατά την οδήγηση. Ο βέλτιστος προγραμματισμός, υπό αυτήν την έννοια, έχει να κάνει με τον καθορισμό των ποσοτήτων της ενέργειας, που πρέπει να αγοραστούν αλλά και των χρονικών στιγμών που θα συμβεί αυτό, ώστε να εξυπηρετηθούν οι ανάγκες των οδηγών με όσο το

δυνατόν μικρότερο κόστος. Υπενθυμίζουμε, ότι ο aggregator αγοράζει τη ζητούμενη ενέργεια στη χονδρεμπορική αγορά, όπου οι τιμές της MWh δεν είναι σταθερές κατά τη διάρκεια μίας μέρας, αντίθετα μπορεί να εμφανίζουν μεγάλες διαφορές μεταξύ τους. Από την άλλη πλευρά, λειτουργεί ως μία πλασματική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (VPP) ή καλύτερα ως μία μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής (DER), που επιθυμεί να πουλήσει ενέργεια και υπηρεσίες στο δίκτυο. Οι συμβατικές μονάδες, που παρέχουν υπηρεσίες ρύθμισης έχουν μία προγραμματισμένη ονομαστική ισχύ εξόδου, που αναφέρεται συχνά ως το Βέλτιστο Σημείο Λειτουργίας (Preferred Operating Point/POP), και ένα εύρος ρύθμισης, δηλαδή ένα άνω και ένα κάτω όριο ρύθμισης [47]. Ο προγραμματισμός, λοιπόν μίας τέτοιας μονάδας έχει να κάνει με τον καθορισμό των ποσοτήτων αυτών για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Το διάστημα αυτό καθορίζεται στο συμβόλαιο που συνάπτουν ο παραγωγός με το διαχειριστή του συστήματος και είναι τις περισσότερες φορές μία ώρα.

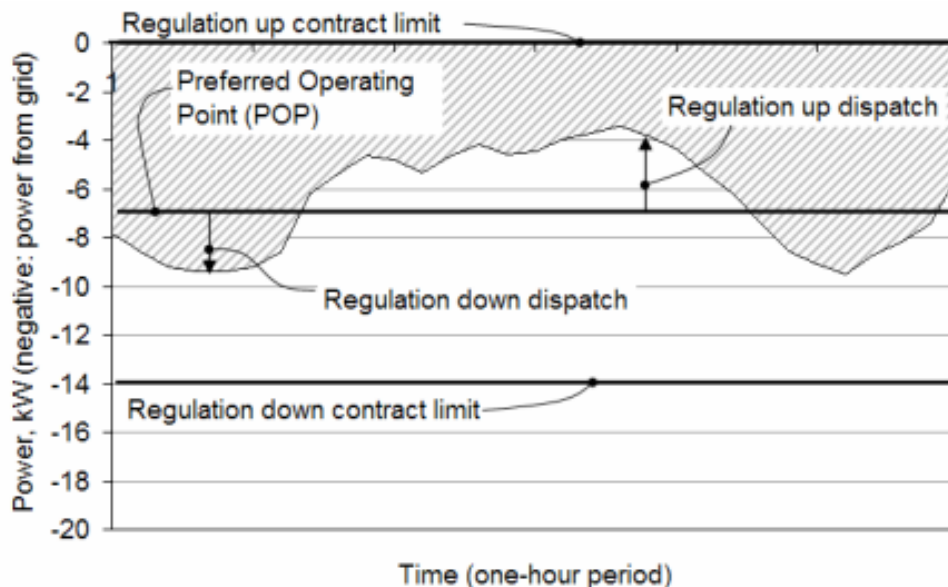


Εικόνα 3.2.1: Παράδειγμα του ωριαίου προφίλ ισχύος εξόδου μίας μονάδας, που παρέχει υπηρεσίες ρύθμισης [47]

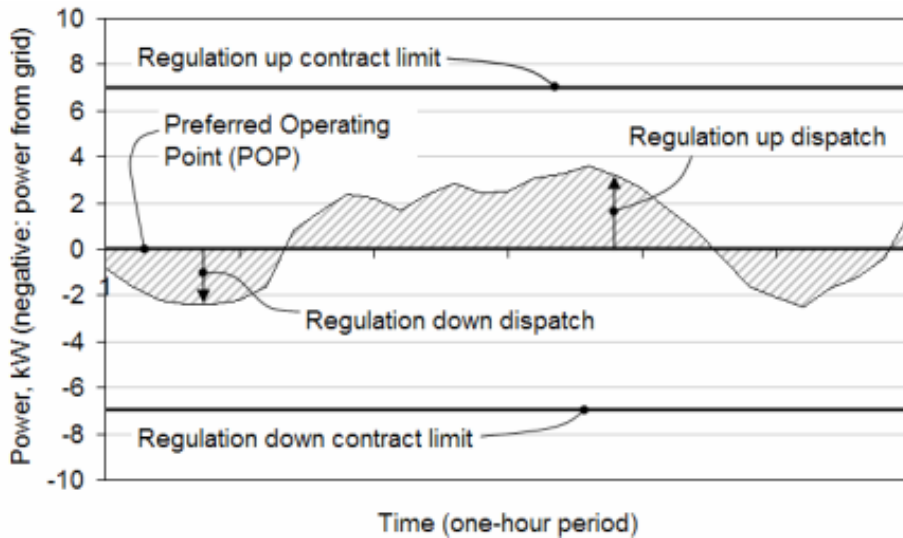
Η εικόνα 3.2.1 δίνει ένα παράδειγμα μίας μονάδας, που παρέχει υπηρεσίες ρύθμισης, δείχνοντας το POP, το άνω και κάτω όριο, καθώς και την πραγματική ισχύ εξόδου της μονάδας. Η πραγματική ισχύς εξόδου δεν καθορίζεται κατά τη φάση του προγραμματισμού, επομένως δεν θα ασχοληθούμε με αυτήν κατά την υλοποίηση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Αντιθέτως, καθορίζεται κατά τη διαδικασία της κατανομής (dispatch), μέσω της ανταπόκρισης της μονάδας στις εντολές, που της αποστέλλει ο διαχειριστής του συστήματος και με αυτό το πεδίο ασχολείται ο

αλγόριθμος της κατανομής. Οι εντολές αυτές είναι κατάλληλα σήματα ρύθμισης, που παράγονται από το σύστημα Αυτόματης Ρύθμισης Παραγωγής (Automatic Generation Control/AGC) και σκοπό έχουν να εξισορροπήσουν σε πραγματικό χρόνο την παραγωγή με τη ζήτηση. Η σκιασμένη περιοχή της εικόνας 3.2.1 επομένως είναι η πραγματική ενέργεια, που παρήχθη κατά τη φάση της κατανομής από τη μονάδα στη διάρκεια της εξεταζόμενης ώρας.

Στην περίπτωση της συμβατικής μονάδας, που μπορεί να διαθέτει μία ή παραπάνω γεννήτριες, η ροή ισχύος είναι δυνατή μόνο από τις γεννήτριες προς το δίκτυο, δηλαδή με τη σύμβαση της εικόνας 3.2.1 το POP μπορεί να πάρει μόνο θετικές τιμές. Όταν όμως έχουμε να κάνουμε με έναν στόλο ηλεκτρικών οχημάτων και υπάρχει και δυνατότητα για V2G λειτουργία, ο προγραμματισμός παραμένει στο ίδιο πνεύμα αλλά με μία σημαντική διαφορά. Η ροή ισχύος μπορεί να γίνεται και προς τις δύο κατευθύνσεις: είτε όπως πριν, από την πλευρά των γεννητριών-οχημάτων προς το δίκτυο (V2G λειτουργία), είτε από την πλευρά του δικτύου προς τα οχήματα-φορτία. Έτσι το POP μπορεί τώρα να λάβει αντίστοιχα θετικές, αρνητικές αλλά και μηδενικές τιμές. Στις εικόνες 3.2.2 και 3.2.3 βλέπουμε τα παραδείγματα δύο οχημάτων, που παρέχουν ρύθμιση. Στην πρώτη εικόνα (3.2.2) πρόκειται για ένα όχημα χωρίς δυνατότητα V2G λειτουργίας, που είναι προγραμματισμένο να απορροφά 7 kW από το δίκτυο. Όταν η πραγματική ισχύς του βρίσκεται στο επάνω όριο, δηλαδή στο 0, το όχημα δεν επιβαρύνει το δίκτυο με επιπλέον φορτίο, ενώ όταν βρίσκεται στο κάτω όριο, συμπεριφέρεται ως ένα φορτίο 14 kW. Η δεύτερη εικόνα (3.2.3) περιγράφει ένα όχημα, ικανό για V2G λειτουργία, καθώς εκτός από το να απορροφά ενέργεια κάνοντας κάτω ρύθμιση, έχει τη δυνατότητα να παρέχει στο δίκτυο ενέργεια, κάνοντας άνω ρύθμιση.



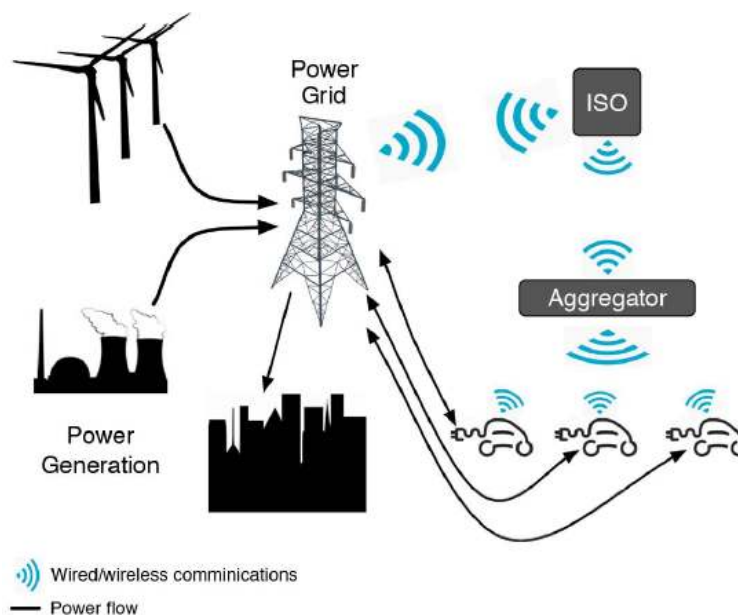
Εικόνα 3.2.2: Παράδειγμα οχήματος που παρέχει ρύθμιση, χωρίς ικανότητα V2G λειτουργίας [47]



Εικόνα 3.2.3: Παράδειγμα οχήματος που παρέχει ρύθμιση, με ικανότητα V2G λειτουργίας [47]

3.3 Ημερήσια έσοδα και έξοδα του aggregator

Καταρχάς θεωρούμε το σύστημα που περιγράφεται σχηματικά από την εικόνα 3.3.1. Ο aggregator μπορεί να είναι μια δημόσια υπηρεσία ή μία ανεξάρτητη επιχείρηση, η οποία έχει υπό την επίβλεψη του συνολικά έναν συγκεκριμένο αριθμό “N” ηλεκτρικών οχημάτων.



Εικόνα 3.3.1: Μοντέλο του συστήματος μελέτης [48]

Το κίνητρο, που δίνει ο aggregator στους οδηγούς, για να συνάψουν ένα οικονομικό συμβόλαιο μαζί του και να συμμετάσχουν στη V2G λειτουργία, είναι διπλό: Από τη μία, μπορούν να φορτίζουν τα οχήματά τους με μία σταθερή και προσυμφωνημένη τιμή ενέργειας “**Mk**”, πολύ χαμηλότερη από την τιμή που θα χρεώνονταν αν αγόραζαν το ίδιο ποσό ενέργειας ως τελικοί καταναλωτές. Από την άλλη, οι οδηγοί θα αποζημιώνονται για την επιπλέον φθορά του συσσωρευτή, που προκύπτει από τη συμμετοχή του οχήματός τους στη V2G λειτουργία, καθώς ο aggregator θα υπολογίζει και θα πληρώνει για κάθε ξεχωριστό όχημα “**i**” ένα κόστος “**Deg**”. Αντίθετα, οι ιδιοκτήτες θα παραχωρούν όλα τα κέρδη, που προέρχονται από τη συμμετοχή των οχημάτων τους στις διάφορες αγορές επικουρικών υπηρεσιών, στον aggregator. Υποθέτουμε ότι υπάρχουν ξεχωριστές αγορές για άνω ρύθμιση, για κάτω και για στρεφόμενη εφεδρεία και ότι για την παροχή των υπηρεσιών αυτών η αμοιβή προέρχεται από δύο πηγές: πρώτον τη διαθέσιμη ισχύ, και δεύτερον την πραγματική ενέργεια που εγχύθηκε στο δίκτυο. Ανακεφαλαιώνοντας, μπορούμε να πούμε ότι το εισόδημα “**In**” του aggregator θα προέρχεται από τρεις πηγές:

- 1) την πώληση διαθέσιμης ισχύος για επικουρικές υπηρεσίες στο δίκτυο
- 2) την πώληση ενέργειας στους ιδιοκτήτες των ηλεκτρικών οχημάτων
- 3) την πώληση ενέργειας στο δίκτυο

Η ακριβής ποσότητα της ενέργειας, που θα διακινείται κάθε χρονική στιγμή “**t**” μεταξύ του δικτύου και ενός οχήματος ή μεταξύ οχήματος και δικτύου δεν μπορεί να είναι γνωστή εκ των προτέρων, εφόσον αυτή εξαρτάται από το σήμα ρύθμισης, που θα στείλει ο διαχειριστής κατά τη φάση της κατανομής σε πραγματικό χρόνο. Επομένως, ο προγραμματισμός θα γίνει με βάση την αναμενόμενη τιμή της ενέργειας “**EFP(i,t)**”, η οποία θα είναι μία συνάρτηση του σημείου βέλτιστης λειτουργίας του κάθε οχήματος για τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή “**POP(i,t)**” και των ποσοτήτων ισχύος στρεφόμενης εφεδρείας, άνω και κάτω ρύθμισης που αναμένεται να ζητηθούν, “**ERR(i,t)**”, “**ERU(i,t)**” και “**ERD(i,t)**” αντίστοιχα. Επειδή, όπως προείπαμε η χρονική διάρκεια, για την οποία ισχύουν τα συμβόλαια ισχύος στις αγορές των επικουρικών υπηρεσιών είναι στις περισσότερες αγορές μία ώρα, η αριθμητική τιμή της ισχύος θα ισούται με αυτής της ενέργειας. Άρα θα ισχύει:

$$EFP(i, t) = ERD(i, t) + POP(i, t) - ERR(i, t) - ERU(i, t) \quad (3.1)$$

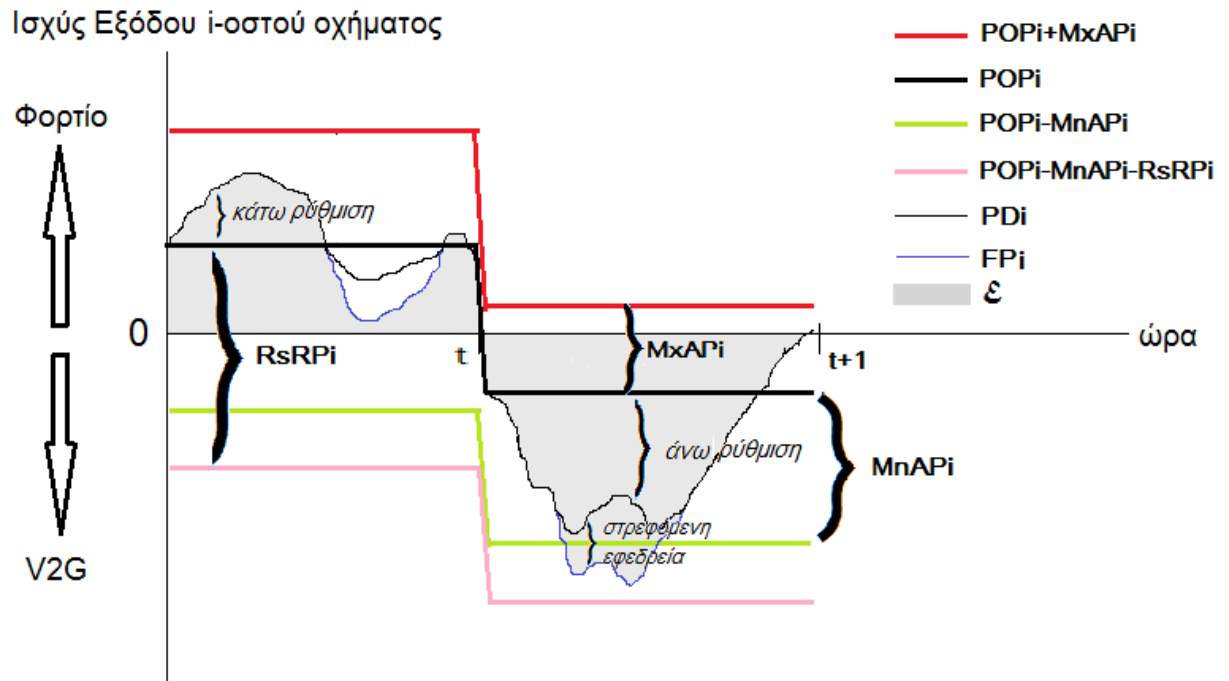
και εφόσον εξετάζουμε μία ημερολογιακή ημέρα $t \in [1, 24]$.

Εδώ πρέπει να τονίσουμε ότι η παραδοχή, που κάνουμε για το πρόσημο της ενέργειας είναι η εξής: ροή ενέργειας από το δίκτυο προς ένα όχημα θεωρείται

θετική, ενώ αντίθετα ροή ενέργειας από το όχημα προς το δίκτυο θεωρείται αρνητική. Επομένως, η ποσότητα της κάτω ρύθμισης που αναμένεται να ζητηθεί, προστίθεται στο POP, ενώ οι αντίστοιχες ποσότητες άνω ρύθμισης και στρεφόμενης εφεδρείας αφαιρούνται. Οι αναμενόμενες αυτές ποσότητες μπορούν να υπολογιστούν από ιστορικά δεδομένα έπειτα από κατάλληλη στατιστική επεξεργασία. Η προσέγγιση που κάνουμε εδώ, είναι ότι η αναμενόμενη ποσότητα της κάθε υπηρεσίας θα είναι κάθε φορά ένα ποσοστό της συνολικής μέγιστης διαθέσιμης ισχύος. Για την κάθε υπηρεσία ορίζουμε λοιπόν:

- Διαθέσιμη ποσότητα ισχύος για κάτω ρύθμιση του i -οστού οχήματος κατά την ώρα t : “ $MxAP(i,t)$ ”
- Διαθέσιμη ποσότητα ισχύος για άνω ρύθμιση του i -οστού οχήματος κατά την ώρα t : “ $MnAP(i,t)$ ”
- Διαθέσιμη ποσότητα ισχύος για στρεφόμενη εφεδρεία του i -οστού οχήματος κατά την ώρα t : “ $RsRP(i,t)$ ”
- Αναμενόμενο ποσοστό κάτω ρύθμισης, που θα ζητήσει ο διαχειριστής δικτύου από ηvagggregator την ώρα t : “ $ExD(t)$ ”
- Αναμενόμενο ποσοστό άνω ρύθμισης, που θα ζητήσει ο διαχειριστής δικτύου από τον aggregator την ώρα t : “ $ExU(t)$ ”
- Αναμενόμενο ποσοστό στρεφόμενης εφεδρείας, που θα ζητήσει ο διαχειριστής δικτύου από τον aggregator την ώρα t : “ $ExR(t)$ ”

Για την καλύτερη κατανόηση των διαθεσίμων ποσοτήτων, κατασκευάζουμε το παρακάτω γράφημα:



Εικόνα 3.3.1: Γραφική απεικόνιση παραμέτρων

Η διαφορά του παραπάνω γραφήματος με τις εικόνες 3.2.1-3.2.3 έγκειται στην διαφορετική σύμβαση, που έχει ακολουθηθεί σε κάθε περίπτωση για τα πρόσημα της ισχύος και της ενέργειας. Η παράμετρος “**PDi**” δηλώνει την ισχύ εξόδου του *i*-οστού ηλεκτρικού οχήματος κατά τη φάση της κατανομής, εάν λάβουμε υπόψην μας μόνο την υπηρεσία της ρύθμισης, ενώ η παράμετρος “**FPI**” δείχνει την τελική ισχύ εξόδου του *i*-οστού οχήματος, λαμβάνοντας δηλαδή υπόψην και τη στρεφόμενη εφεδρεία. Η σκιασμένη περιοχή, δείχνει την ενέργεια, που ανταλλάχθηκε με το δίκτυο. Πάνω από τον οριζόντιο άξονα, το όχημα συμπεριφέρεται ως φορτίο, δηλαδή απορροφά ενέργεια από το δίκτυο, ενώ κάτω από τον άξονα, το όχημα συμπεριφέρεται ως γεννήτρια (V2G λειτουργία) εγγέοντας ενέργεια προς το δίκτυο.

Σύμφωνα με τα παραπάνω μπορούμε να μετασχηματίσουμε την εξίσωση (3.1) ως εξής:

$$\begin{aligned} EFP(i, t) = & MxAP(i, t) \times ExD(i, t) + POP(i, t) \\ & - MnAP(i, t) \times ExU(t) - RsRP(i, t) \times ExR(t) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Σύμφωνα με τη θεωρία πιθανοτήτων [49] για να βρούμε την αναμενόμενη τιμή « \bar{X} » μίας τυχαίας διακριτής μεταβλητής « X », πρέπει να εφαρμόσουμε τον τύπο $\bar{X} = \sum_{-\infty}^{+\infty} x \cdot Pr[x]$, όπου x οι διάφορες πιθανές τιμές της μεταβλητής X και $Pr[x]$ η πιθανότητα να εμφανιστεί η τιμή x . Το σήμα ρύθμισης “**RS(k)**”, που θα στέλνει ο διαχειριστής του δικτύου στον aggregator θα είναι μία διακριτή συνάρτηση του χρόνου, η οποία θα παίρνει κάποιες τιμές μεταξύ “**RSmin**” και “**RSmax**”. Με “**k**” συμβολίζουμε το χρόνο εκείνο, που μεσολαβεί μεταξύ 2 διαδοχικών σημάτων ρύθμισης, ο οποίος είναι εν γένει διαφορετικός από το χρόνο t . Ο κάθε Διαχειριστής Συστήματος ορίζει το διαφορετικά το χρονικό αυτό διάστημα και είναι συνήθως της τάξης ορισμένων δευτερολέπτων, πχ 4s στο σύστημα της California ή 30s στο σύστημα του Texas. Σύμφωνα με τις συμβάσεις που έχουμε κάνει και την εικόνα 3.3.1 οι τιμές [RSmin,0] αναφέρονται στην άνω ρύθμιση, ενώ αντίστοιχα οι τιμές [0,RSmax] αφορούν στην κάτω ρύθμιση. Το σήμα για τη ζήτηση στρεφόμενης εφεδρείας “**RRS(k)**” θα περιέχει μόνο αρνητικές τιμές στο διάστημα [RRSmin,0]. Τέλος, για να παραμείνει γραμμικό το πρόβλημα, θεωρούμε ότι τα ποσοστά παραμένουν σταθερά κατά τη διάρκεια μίας ώρας.

Επομένως, για την κάθε υπηρεσία έχουμε:

$$\bullet \quad \overline{ERU} = \sum_{RSmin}^0 RS \cdot Pr[RS] \quad \text{και} \quad ExU = \frac{\sum_{RSmin}^0 RS \cdot Pr[RS]}{\sum_{RSmin}^0 RS} \quad (3.3)$$

$$\bullet \quad \overline{ERD} = \sum_0^{RSmax} RS \cdot Pr[RS] \quad \text{και} \quad ExD = \frac{\sum_0^{RSmax} RS \cdot Pr[RS]}{\sum_0^{RSmax} RS} \quad (3.4)$$

- $\overline{ERR} = \sum_{RRSmin}^0 RRS \cdot Pr[RRS]$ και $ExR = \frac{\sum_{RRSmin}^0 RRS \cdot Pr[RRS]}{\sum_{RRSmin}^0 RRS}$ (3.5)

Επειδή το δίκτυο αλλά και οι αγορές θα επικοινωνούν μόνο με τον aggregator και όχι με το κάθε όχημα ξεχωριστά, ορίζουμε για κάθε υπηρεσία τη συνολική διαθέσιμη ισχύ του στόλου των N οχημάτων:

- Άνω ρύθμιση

$$Ru(t) = \sum_{i=1}^N MnAP(i, t) \quad (3.6)$$

- Κάτω ρύθμιση:

$$Rd(t) = \sum_{i=1}^N MxAP(i, t) \quad (3.7)$$

- Στρεφόμενη εφεδρεία:

$$Rr(t) = \sum_{i=1}^N RsRP(i, t) \quad (3.8)$$

Οι παραπάνω ποσότητες ισχύος θα είναι και αυτές, τις οποίες θα πληρωθεί ο aggregator, εφόσον βέβαια επιλεγθούν οι προσφορές του στην αγορά. Μπορούμε λοιπόν τώρα να κατασκευάσουμε μία μαθηματική σχέση, που θα μας δίνει το ημερήσιο εισόδημα του aggregator, από τις τρεις πηγές, που αναφέραμε παραπάνω:

$$\begin{aligned} In = & \sum_{t=1}^{24} (PRu(t) \times Ru(t) + PRd(t) \times Rd(t) + PRr(t) \times Rr(t)) \\ & + Mk \times \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (EFP(i, t)) \\ & + \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (-EFP(i, t) \times P(t)), \quad \text{εάν } EFP(i, t) < 0 \end{aligned} \quad (3.9)$$

όπου “ $PRu(t)$ ”, “ $PRd(t)$ ”, “ $PRr(t)$ ” και “ $P(t)$ ” είναι οι προβλεπόμενες τιμές (forecasted prices) της άνω ρύθμισης, της κάτω, της στρεφόμενης εφεδρείας και της ενέργειας στις αντίστοιχες αγορές για την ώρα t . Θεωρούμε ότι ο aggregator έχει στη

διάθεση του κάποιους αλγόριθμους, για την πρόβλεψη των τιμών αυτών. Για την αποφυγή άσκοπων πολλαπλασιασμών και της συνοχής μεταξύ των διαφόρων εξισώσεων, θεωρούμε από εδώ και στο εξής ως μονάδα μέτρησης της ενέργειας την kWh και της ισχύος το kW. Επομένως, οι προαναφερθείσες τιμές θα πρέπει να δίνονται σε χρηματικές μονάδες ανά kW και ανά kWh αντίστοιχα με ακρίβεια ενός δεκαδικού ψηφίου. Ο δεύτερος όρος της εξίσωσης (3.9) αναφέρεται στα έσοδα του aggregator από την ενέργεια, που θα αναγκαστούν να αναπληρώσουν οι οδηγοί λόγω των ταξιδιών τους. Η ενέργεια αυτή θα είναι το αλγεβρικό άθροισμα, της ενέργειας, που φορτίστηκε και της ενέργειας που εκφορτίστηκε κατά τη διάρκεια όλης της ημέρας. Τέλος, ο τρίτος όρος μηδενίζεται για τις περιπτώσεις εκείνες, που η ενέργεια έχει θετικό πρόσημο, δηλαδή το όχημα λειτουργεί ως φορτίο και άρα ο aggregator δεν πουλάει ενέργεια στο δίκτυο.

Από την άλλη πλευρά, τα ημερήσια έξοδα του aggregator “C” προέρχονται από δύο πηγές: πρώτον από το κόστος της ενέργειας, που πρέπει να αγοράσει από τη χονδρεμπορική αγορά για να την παρέχει στα οχήματα και δεύτερον από τη φθορά των συσσωρευτών, που προκαλείται από τη συμμετοχή των οχημάτων στη V2G λειτουργία. Έξοδα, που σχετίζονται με τον τομέα της επικοινωνίας ή των σημείων φόρτισης αγνοούνται, καθώς αυτά θα είναι σταθερά και δεν θα εξαρτώνται από το ποσοστό συμμετοχής των οχημάτων στις διάφορες αγορές. Μπορούμε λοιπόν να γράψουμε:

$$C = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (EFP(i, t) \times P(t)), \quad \text{εάν } EFP(i, t) > 0$$

$$+ \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} Deg(i, t) \quad (3.10)$$

Ο πρώτος όρος της εξίσωσης (3.10) θα είναι μηδέν κατά τις περιπτώσεις που η ενέργεια είναι αρνητική, εφόσον αυτό σημαίνει ότι θα εγχέεται ενέργεια στο δίκτυο, επομένως ο aggregator δεν θα αγοράζει ενέργεια αλλά θα πουλάει. Ο όρος, που έχει να κάνει με τη φθορά του συσσωρευτή είναι δύσκολο να μοντελοποιηθεί μαθηματικά, επομένως θα αναζητήσουμε μία έτοιμη έκφραση του από τη βιβλιογραφία. Συγκεκριμένα, οι S.Peterson, J.Apt και J.Whitacre έχουν προτείνει την εξής φόρμουλα [46], [50]:

$$DC(i) = 0,042 \times \frac{BatC(i)}{5000} \quad (3.11)$$

όπου “DC(i)” είναι το κόστος φθοράς του i-οστού συσσωρευτή από την εκφόρτιση 1 kWh και “BatC(i)” είναι το κόστος αντικατάστασης του i-οστού συσσωρευτή ανά kWh, δηλαδή το κόστος κεφαλαίου ενός συσσωρευτή χωρητικότητας 1 kWh. Παρόλο που ο άνωτι τύπος αναφέρεται αποκλειστικά σε

συσσωρευτές ιόντων λιθίου, μπορεί να διαμορφωθεί κατάλληλα και για διαφορετικούς τύπους συσσωρευτών. Επιπλέον, η φόρμουλα βασίζεται στο μέσο κόστος εκφόρτισης και άρα αγνοούνται οι επιδράσεις του βάθους εκφόρτισης. Οι επιδράσεις αυτές θα μπορούσαν να συνυπολογιστούν μετατρέποντας την εξάρτηση ενέργειας και κόστους φθοράς από γραμμική σχέση, σε μία τμηματικά γραμμική για κάθε επίπεδο βάθους εκφόρτισης. Παρόλα αυτά, ο χαρακτηρισμός των διαφορετικών τύπων συσσωρευτών και των επιδράσεων του βάθους εκφόρτισης είναι έξω από το πεδίο έρευνας αυτής της διπλωματικής, επομένως θα εφαρμόσουμε την παραπάνω φόρμουλα όπως εμφανίζεται στη σχέση (3.11). Θα της προσθέσουμε όμως και ένα δεύτερο όρο, που σκοπό έχει να αποτρέψει τον aggregator να εκμεταλλευτεί την διαφορά, που θα εμφανίζεται στο μετρητή μεταξύ της εισερχόμενης και της εξερχόμενης ενέργειας στο συσσωρευτή λόγω της απόδοσης του φορτιστή “ $Ef(i)$ ”. Για παράδειγμα, αν ο aggregator φορτίσει 10 kWh στο συσσωρευτή με μία απόδοση 90%, τότε ο ιδιοκτήτης του οχήματος θα χρεώνεται για $10/0,9=11,11$ kWh. Εάν μετά ο aggregator εκφορτίσει 10 kWh από το συσσωρευτή με την ίδια απόδοση 90%, ο ιδιοκτήτης θα πληρωθεί $10*0,9=9$ kWh. Κατά αυτόν τον τρόπο, ο aggregator θα μπορούσε να αυξήσει τα κέρδη του εις βάρος των ιδιοκτητών των οχημάτων, φορτίζοντας και εκφορτίζοντας το συσσωρευτή τους. Εισάγοντας έναν όρο, που θα λαμβάνει υπόψη την απόδοση του φορτιστή και το κόστος της ενέργειας, ο aggregator δεν έχει πλέον τέτοιο κίνητρο. Επομένως, η τελική σχέση που θα χρησιμοποιήσουμε για τη μοντελοποίηση του κόστους φθοράς τους συσσωρευτή είναι:

$$DC(i) = 0,042 \times \frac{BatC(i)}{5000} + \frac{1 - Ef(i)^2}{Ef(i)} \times Mk \quad (3.12)$$

Θεωρούμε ότι όταν το πρόσημο της ενέργειας είναι θετικό, δηλαδή όταν ο συσσωρευτής φορτίζεται, δεν υπάρχει φθορά, για την οποία ο aggregator πρέπει να πληρώσει τον ιδιοκτήτη. Αυτό διότι η φόρτιση του συσσωρευτή είναι κάτι που θα συνέβαινε ούτως ή άλλως από τον ιδιοκτήτη για να καλύψει τις οδηγικές του ανάγκες. Τελικά, με βάση όλα τα παραπάνω, η σχέση που δίνει τα ημερήσια έξοδα του aggregator έχει ως εξής:

$$C = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (EFP(i, t) \times P(t)), \quad \text{εάν } EFP(i, t) > 0$$

$$+ \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (EFP(i, t) \times DC(i)), \quad \text{εάν } EFP(i, t) < 0 \quad (3.13)$$

Είναι φανερό ότι το ημερήσιο κέρδος του aggregator “**Prof**” θα είναι η διαφορά εσόδων-εξόδων, επομένως αφαιρώντας κατά μέλη τις εξισώσεις (3.9) και (3.13) παίρνουμε την εξίσωση (3.14), η οποία στη μαθηματική ορολογία ονομάζεται και αντικειμενική συνάρτηση (objective function) και είναι αυτή που επιθυμούμε να μεγιστοποιήσουμε.

$$\mathbf{Prof} = \mathbf{In} - \mathbf{C} =$$

$$\begin{aligned} & \sum_{t=1}^{24} (\mathbf{PRu}(t) \times \mathbf{Ru}(t) + \mathbf{PRd}(t) \times \mathbf{Rd}(t) + \mathbf{PRr}(t) \times \mathbf{Rr}(t)) \\ & + \mathbf{Mk} \times \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (\mathbf{EFP}(i, t)) \\ & + \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (-\mathbf{EFP}(i, t) \times \mathbf{P}(t)), \quad \text{εάν } \mathbf{EFP}(i, t) < 0 \\ & - \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (\mathbf{EFP}(i, t) \times \mathbf{P}(t)), \quad \text{εάν } \mathbf{EFP}(i, t) > 0 \\ & - \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (\mathbf{EFP}(i, t) \times \mathbf{DC}(i)), \quad \text{εάν } \mathbf{EFP}(i, t) < 0 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \mathbf{Prof} =$$

$$\begin{aligned} & \sum_{t=1}^{24} (\mathbf{PRu}(t) \times \mathbf{Ru}(t) + \mathbf{PRd}(t) \times \mathbf{Rd}(t) + \mathbf{PRr}(t) \times \mathbf{Rr}(t)) \\ & + \mathbf{Mk} \times \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (\mathbf{EFP}(i, t)) \\ & - \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (\mathbf{EFP}(i, t) \times \mathbf{P}(t)) \\ & - \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (\mathbf{EFP}(i, t) \times \mathbf{DCi}(i)), \quad \text{εάν } \mathbf{EFP}(i, t) < 0 \quad (3.14) \end{aligned}$$

3.4 Περιορισμοί της βελτιστοποίησης

Οι περιορισμοί, τους οποίους πρέπει να σεβαστεί ο aggregator κατά τον προγραμματισμό έχουν να κάνουν με τους εξής τομείς:

1. Όρια της ενέργειας, που μπορεί να φορτιστεί και να εκφορτιστεί από το συσσωρευτή
2. Μέγιστο δυνατό ρεύμα, που μπορεί να ρεύσει διαμέσου του σημείου φόρτισης
3. Όρια ελάχιστης διαθέσιμης ενέργειας, που καθορίζονται από τους οδηγούς για την κάλυψη των οδηγικών αναγκών τους
4. Όρια, που τίθενται από το διαχειριστή του δικτύου και αφορούν στην ομαλή λειτουργία του δικτύου διανομής
5. Περιορισμοί, που εξασφαλίζουν τη γραμμικότητα του προβλήματος

3.4.1 Περιορισμοί συσσωρευτή

Ο συσσωρευτής κάθε οχήματος έχει μία μέγιστη χωρητικότητα ενέργειας, που εκφράζεται σε kWh και καθορίζεται από τον κατασκευαστή του. Συμβολίζουμε αυτήν την ποσότητα με την παράμετρο “ $Mc(i)$ ”. Η διαθέσιμη ενέργεια, που υπάρχει κάθε ώρα t στον i -στό συσσωρευτή συμβολίζεται με την παράμετρο “ $SOC(i,t)$ ” και αποτελεί ουσιαστικά τη στάθμη φόρτισης (State of Charge) του συσσωρευτή. Η αρχική του στάθμη, δηλαδή για $t=1$ ορίζεται ως “ $SOCI(i)$ ”. Επιπλέον, θεωρούμε ότι τα οχήματα, είναι πιθανό να αναχωρήσουν απροσδόκητα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Είναι λοιπόν σημαντικό για τον aggregator να κάνει μία υποδιαστασιολόγηση της ισχύος, που θα έχει διαθέσιμη κάθε ώρα, με σκοπό να διατηρήσει την αξιοπιστία του σε ανεκτά επίπεδα. Είναι λοιπόν σημαντικό για τον aggregator να λάβει υπόψην του αυτές τις απροσδόκητες αναχωρήσεις, ώστε να είναι σε θέση να διασφαλίζει κάθε ώρα ότι τα συνδεδεμένα οχήματα θα έχουν τη δυνατότητα να ακολουθήσουν το σήμα, που αποστέλλεται από το δίκτυο ακόμα και αν ένα ποσοστό του συνολικού στόλου έχει αναχωρήσει χωρίς προειδοποίηση. Για μεγάλο αριθμό οχημάτων, το ποσοστό των μη προγραμματισμένων ταξιδιών είναι στατιστικά αρκετά προβλέψιμο. Ο aggregator επομένως αναμένει μια συγκεκριμένη μείωση στη συνολική διαθέσιμη ισχύ κάθε ώρα ανάλογη του ποσοστού αυτού και για το λόγο αυτό εισάγουμε μία παράμετρο “ $Comp(i,t)$ ”, η οποία θα μειώνει κατάλληλα την ισχύ και την ενέργεια, που μπορεί να διαθέσει κάθε ώρα το κάθε όχημα. Στη φάση της κατανομής, καθώς συγκεκριμένα οχήματα αναχωρούν χωρίς προειδοποίηση, ο aggregator ζητά από τα υπόλοιπα συνδεδεμένα μεγαλύτερες από τις προγραμματισμένες ποσότητες ισχύος και ενέργειας για να αντισταθμίσει την ξαφνική αυτή μείωση. Για μεγάλους στόλους οχημάτων, η απαιτούμενη αυτή

επιπλέον κατανομή προσεγγίζει την αναμενόμενη τιμή της και μπορεί να αντιμετωπιστεί ντετερμινιστικά [69]. Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω έχουμε:

$$Comp(i, t) = \frac{1}{1 - Dep(i, t)} \quad (3.15)$$

όπου “**Dep(i,t)**” είναι η πιθανότητα το *i*-οστο όχημα να αναχωρήσει απροσδόκητα την ώρα *t*. Τέτοιες πιθανότητες μπορούν να υπολογιστούν από στατιστική επεξεργασία των οδηγικών συμπεριφορών. Μάλιστα, για την περίπτωση οχημάτων, που ανήκουν σε εργαζομένους με σταθερό ωράριο δουλειάς, οι πιθανότητες αυτές μπορούν να καθοριστούν με ικανοποιητική ακρίβεια. Λαμβάνοντας υπόψη τα όσα αναφέρθηκαν στην παραπάνω παράγραφο, μπορούμε να γράψουμε τα εξής:

$$(MxAP(i, t) + POP(i, t)) \times Comp(i, t) \times Ef(i) + SOC(i, t) \leq Mc(i), \forall i \quad (3.16)$$

$$(POP(i, t) - MnAP(i, t) - RsRP(i, t)) \times Comp(i, t) \times Ef(i) + SOC(i, t) \geq 0, \forall i \quad (3.17)$$

Η σχέση (3.16) έχει να κάνει με το επάνω όριο της ενέργειας, που μπορεί να υπάρχει αποθηκευμένο στο συσσωρευτή, ενώ η σχέση (3.17) με το κάτω όριο. Στην προσέγγιση που κάνουμε, έχουμε θεωρήσει ότι το όριο αυτό μπορεί να φτάσει και το μηδέν, δηλαδή να εκφορτιστεί πλήρως ο συσσωρευτής. Αυτό, εν γένει είναι επιβλαβές για τη διάρκεια ζωής ενός συσσωρευτή, αλλά εν προκειμένω το αγνοούμε. Αν θέλουμε πάντως, μπορούμε να θέσουμε ένα άλλο κάτω όριο, πχ ως ένα ποσοστό της παραμέτρου $Mc(i)$.

Αντίστοιχα όρια, θα πρέπει να τεθούν και για το σύνολο της ημέρας λαμβάνοντας υπόψη τη μείωση του $SOC(i,t)$ λόγω της οδήγησης. Εισάγουμε μία παράμετρο “**Trips(i,t)**”, η οποία δείχνει πόση ενέργεια καταναλώθηκε για οδήγηση την κάθε ώρα. Το ποσό αυτό της ενέργειας, μπορεί να υπολογιστεί εάν ξέρουμε την απόσταση, που πρόκειται να διανύσει ο οδηγός και την τυπική κατανάλωση ενέργειας του συγκεκριμένου μοντέλου του οχήματος. Τις ώρες βέβαια, που το όχημα είναι σταθμευμένο και δεν πραγματοποιεί κανένα ταξίδι, η παράμετρος έχει μηδενική τιμή. Επομένως έχουμε:

$$\sum_{t=1}^{time} (EFP(i, t) \times Comp(i, t)) \times Ef(i) + SOCI(i) - \sum_{t=1}^{time} Trips(i, t) \leq Mc(i) \forall i, time \quad (3.18)$$

$$\sum_{t=1}^{time} (EFP(i, t) \times Comp(i, t)) \times Ef(i) + SOCI(i) - \sum_{t=1}^{time} Trips(i, t) \geq 0 \forall i, time \quad (3.19)$$

3.4.2 Περιορισμοί ηλεκτρικής σύνδεσης

Το ρεύμα και άρα η ισχύς, που μπορεί να διαρρεύσει μέσω του σημείου σύνδεσης του οχήματος με το δίκτυο διανομής είναι συγκεκριμένη και εξαρτάται από τις καλωδιώσεις, τις ασφάλειες και τα λοιπά τεχνικά χαρακτηριστικά της ηλεκτρολογική σύνδεσης. Συμβολίζουμε με την παράμετρο “ $MP(i,t)$ ” τη μέγιστη τιμή, που μπορεί να λάβει η διακινούμενη ισχύς στο i -οστό σημείο σύνδεσης κατά την ώρα t . Εάν το σημείο αυτό είναι κάθε φορά το ίδιο, δηλαδή αν πχ μελετάμε τη σύνδεση του οχήματος μόνο στο σπίτι, η παράμετρος $MP(i,t)$ θα έχει σταθερή τιμή και δεν θα εξαρτάται από το χρόνο. Εν γένει όμως έχουμε:

$$MxAP(i,t) + POP(i,t) \leq MP(i,t), \quad \forall i \quad (3.20)$$

$$POP(i,t) - MnAP(i,t) \geq -MP(i,t), \quad \forall i \quad (3.21)$$

$$POP(i,t) - MnAP(i,t) - RsRP(i,t) \geq -MP(i,t), \quad \forall i \quad (3.22)$$

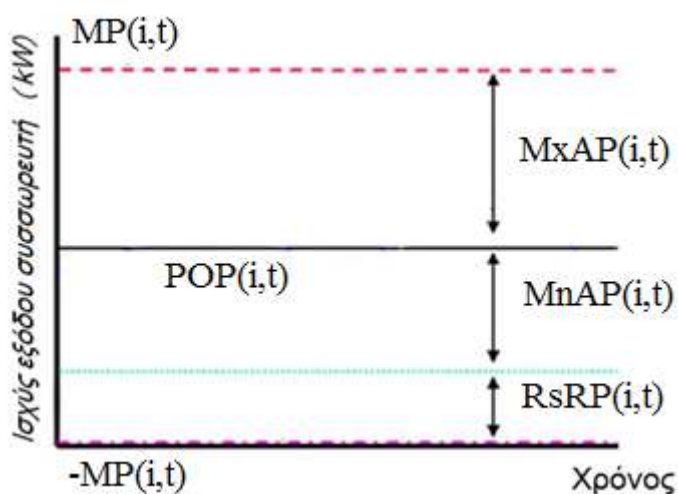
$$POP(i,t) \geq -MP(i,t), \quad \forall i \quad (3.23)$$

$$MxAP(i,t) \geq 0, \quad \forall i \quad (3.24)$$

$$MnAP(i,t) \geq 0, \quad \forall i \quad (3.25)$$

$$RsRP(i,t) \geq 0, \quad \forall i \quad (3.26)$$

Μία γραφική απεικόνιση των παραπάνω εξισώσεων φαίνεται στην εικόνα 3.4.1



Εικόνα 3.4.1: Περιορισμοί ηλεκτρικής σύνδεσης

3.4.3 Περιορισμοί οδήγησης

Θεωρούμε ότι ο aggregator έχει ακριβείς πληροφορίες για τα προγραμματισμένα ταξίδια των οδηγών. Ο προγραμματισμός θα γίνει με βάση αυτά τα ταξίδια, παρόλο που στην πραγματικότητα, τα ταξίδια αυτά μπορεί να μην πραγματοποιηθούν τις δηλωμένες ώρες. Κάτι τέτοιο μπορεί να αντιμετωπιστεί χωρίς προβλήματα από τον aggregator, εφόσον έχουμε εισάγει την παράμετρο “Comp(i,t)”. Επιπλέον, θεωρούμε ότι κάθε όχημα εκτελεί σίγουρα δύο ταξίδια κάθε μέρα. Ένα το πρωί, από το σπίτι για τη δουλειά και ένα δεύτερο το απόγευμα, από τη δουλειά στο σπίτι. Κάθε ώρα, που το *i*-οστό όχημα ταξιδεύει, θεωρούμε ότι δεν είναι ικανό να συμμετάσχει στη V2G λειτουργία. Όλες τις υπόλοιπες ώρες, τα EVs θεωρούνται συνδεδεμένα και διαθέσιμα. Για να ποσοτικοποιήσουμε την παραπάνω πρόταση εισάγουμε την παράμετρο “Plug(i,t)”, για την οποία θα ισχύει:

$$Plug(i,t) = \begin{cases} 0, & \text{αν } Trips(i,t) \neq 0 \\ 1, & \text{αν } Trips(i,t) = 0 \end{cases} \quad (3.27)$$

άρα για να εξασφαλίσουμε τη μη διαθεσιμότητα του εκάστοτε οχήματος, όταν αυτό είναι εν κινήσει, εισάγουμε τους εξής περιορισμούς:

$$POPi(i,t) \times (1 - Plug(i,t)) = 0 \quad (3.28)$$

$$MxAP(i,t) \times (1 - Plug(i,t)) = 0 \quad (3.29)$$

$$MnAP(i,t) \times (1 - Plug(i,t)) = 0 \quad (3.30)$$

$$RsRP(i,t) \times (1 - Plug(i,t)) = 0 \quad (3.31)$$

Μία λογική απαίτηση των οδηγών θα είναι πριν ξεκινήσουν το πρωινό τους ταξίδι, ο συσσωρευτής του οχήματος τους να είναι 100% φορτισμένος. Επίσης, μία άλλη λογική απαίτηση είναι αφού φτάσουν στη δουλειά, η στάθμη φόρτισης των συσσωρευτών τους να μην είναι ποτέ λιγότερη, από αυτήν, που χρειάζονται για να επιστρέψουν στο σπίτι. Η αναμενόμενη στάθμη φόρτισης του κάθε αμαξίου ορίζεται αναδρομικά: Κάθε ώρα θα είναι ίση με τη στάθμη της προηγούμενης ώρας μείον την ενέργεια, που πιθανόν καταναλώθηκε για οδήγηση συν την ενέργεια, που αναμένεται να έχει φορτισθεί ή εκφορτισθεί από τη συμμετοχή του συγκεκριμένου οχήματος στη V2G λειτουργία. Ορίζουμε λοιπόν την παράμετρο “SOC(i,t)” ως εξής:

$$SOC(i, 1) = SOCI(i) \quad (3.32)$$

$$SOC(i, t + 1) = SOC(i, t) - Trips(i, t) + EFP(i, t) \times Ef(i) \times Comp(i, t) \quad (3.33)$$

Με αυτόν τον ορισμό γίνεται φανερό, ότι η στάθμη φόρτισης μετά την τελευταία ώρα μίας ημέρας προγραμματισμού, θα είναι ίση με τη στάθμη φόρτισης της πρώτης ώρας της επόμενης μέρας. Ορίζουμε ως “**T**” την τελευταία ώρα της εκάστοτε μέρας προγραμματισμού και έτσι όσον αφορά την πρώτη απαίτηση των οδηγών έχουμε:

$$SOC(i, T + 1) = Mc(i) \Rightarrow$$

$$SOCI(i) - \sum_{t=1}^T Trips(i, t) + Ef(i) \times \sum_{t=1}^T (EFP(i, t) \times Comp(i, t)) = Mc(i) \quad (3.34)$$

Όσον αφορά στο δεύτερο περιορισμό, πρέπει πρώτα να εισάγουμε μία παράμετρο, η οποία θα ποσοτικοποιεί τη μείωση της στάθμης φόρτισης του συσσωρευτή, λόγω του ταξιδιού επιστροφής. Αυτή η παράμετρος “**Trip2(i,t)**” τις ώρες πριν την πραγματοποίηση του ταξιδιού θα είναι ίση με την ενέργεια που αναμένεται να εκφορτισθεί λόγω του 2^{ου} ταξιδιού και ίση με μηδέν για όλες τις επόμενες ώρες. Έτσι προκύπτει ο περιορισμός:

$$SOC(i, t) \geq Trip2(i, t), \forall i, t \quad (3.35)$$

3.4.4 Περιορισμοί δικτύου διανομής

Η φόρτιση μεγάλου αριθμού ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να έχει αρνητικές συνέπειες στην αξιόπιστη και οικονομική λειτουργία του δικτύου διανομής. Εάν δεν υπάρξει κάποιος έλεγχος, τότε μπορεί να προκληθούν φαινόμενα συμφόρησης, υπερφόρτισης ή υψηλής διακύμανσης της τάσης εκτός των επιτρεπτών ορίων. Κάποιες μέθοδοι για την αντιμετώπιση των προβλημάτων αυτών περιλαμβάνουν τη φόρτιση των οχημάτων με σκοπό τη μεγιστοποίηση του συντελεστή φορτίου ή αντίστοιχα την ελαχιστοποίηση της διακύμανσης του φορτίου. Τέτοιες μέθοδοι, απαιτούν περίπλοκους περιορισμούς, που λαμβάνουν υπόψη τους πολλές παραμέτρους του δικτύου ταυτόχρονα. Στην παρούσα διπλωματική, θέλοντας απλώς

να καταδείξουμε τη δυνατότητα ύπαρξης περιορισμών από πλευράς του δικτύου, θα λάβουμε έναν απλό περιορισμό, ο οποίος θα αποτρέπει τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων κατά τις ώρες αιχμής. Για μικρή διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων, αυτό μπορεί να θεωρηθεί αρκετό. Διαφορετικά, τα προφίλ φόρτισης και εκφόρτισης, που θα προκύψουν από τον αλγόριθμο ίσως χρειαστεί να εξεταστούν από το διαχειριστή του δικτύου διανομής (DSO) πριν γίνουν αποδεκτά. Ονομάζουμε “**L(t)**” το προβλεπόμενο φορτίο μείον την προβλεπόμενη παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η μέγιστη προβλεπόμενη τιμή κατά τη διάρκεια της ημέρας συμβολίζεται με “**MxL**” ενώ η ελάχιστη με “**MnL**”. Η ισχύς που παράγεται από ΑΠΕ έχει προτεραιότητα στην κάλυψη του φορτίου και ο aggregator δεν την ανταγωνίζεται, επομένως αφαιρείται από το τελικό φορτίο. Η μαθηματική σχέση που προκύπτει, εξασφαλίζει ότι η ισχύς, που θα ζητείται κάθε ώρα για τη φόρτιση των συνδεδεμένων στο δίκτυο ηλεκτρικών οχημάτων από τον aggregator θα είναι αντιστρόφως ανάλογη, με τη συνολική ζήτηση. Έτσι, κατά τη διάρκεια ωρών, που υπάρχει υψηλό φορτίο, ο aggregator θα αποθαρρύνεται να προσθέσει επιπλέον ζήτηση ενέργειας και αντίστοιχα κατά τη διάρκεια ωρών, που το φορτίο είναι χαμηλό, θα δίνεται στον aggregator ένα ανάλογο περιθώριο ζήτησης. Αυτή είναι μία αναγκαία, αλλά όχι ικανή συνθήκη για peak shaving. Σύμφωνα με τα άνωθι, έχουμε:

$$\sum_{i=1}^N POP(i, t) \leq \frac{MxL - L(t)}{MxL - MnL} \times \sum_{i=1}^N (MP(i, t) \times plug(i, t)), \forall i, t \quad (3.36)$$

3.4.5 Περιορισμοί γραμμικότητας

Η αντικειμενική συνάρτηση, που έχουμε καταστρώσει με τη μορφή της σχέσης (3.14) δεν είναι γραμμική καθώς εμπεριέχεται ένας όρος (ο τέταρτος), ο οποίος εξαρτάται από το πρόσημο της παραμέτρου “**EFP(i,t)**”, μίας ποσότητας, που δεν είναι εκ των προτέρων γνωστή. Για να απαλείψουμε τη μη-γραμμικότητα αυτή εισάγουμε μία βοηθητική παράμετρο “**Deg(i,t)**”, που θέλουμε να έχει την εξής συμπεριφορά:

$$Deg(i, t) = \begin{cases} 0, & \text{εάν } EFP(i, t) > 0 \\ EFP(i, t) \times DC(i) \times Comp(i, t), & \text{εάν } EFP(i, t) \leq 0 \end{cases} \quad (3.37)$$

Κατασκευάζουμε, επομένως τους ισοδύναμους γραμμικούς περιορισμούς:

$$Deg(i, t) \geq 0 \quad (3.38)$$

$$Deg(i, t) \geq EFP(i, t) \times DC(i, t) \times Comp(i, t) \quad (3.39)$$

Τελικά, η αντικειμενική μας συνάρτηση μετασχηματίζεται ως εξής:

$$\begin{aligned} Prof = In - C &= \sum_{t=1}^{24} (PRu(t) \times Ru(t) + PRd(t) \times Rd(t) + PRr(t) \times Rr(t)) \\ &+ Mk \times \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (EFP(i, t)) \\ &- \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (EFP(i, t) \times P(t)) \\ &- \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^{24} (Deg(i, t)) \end{aligned} \quad (3.40)$$

Αυτή θα είναι και η συνάρτηση, την τιμή της οποίας θέλουμε να μεγιστοποιήσουμε. Οι παράμετροι, των οποίων ψάχνουμε τις βέλτιστες τιμές και ονομάζονται μεταβλητές απόφασης (decision variables) θα είναι οι εξής:

- POP(i,t)
- MxAP(i,t)
- MnAP(i,t)
- RsRP(i,t)
- Deg(i,t)

3.5 Αλγόριθμος για τη φάση της κατανομής (dispatch)

Ο αλγόριθμος, που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα είχε σκοπό να υποδείξει στον aggregator τις βέλτιστες εκείνες ποσότητες κάθε επικουρικής υπηρεσίας, που θα έπρεπε να προσφερθούν στο σύστημα. Εάν και εφόσον ο διαχειριστής του συστήματος αποδεχτεί τις ποσότητες αυτές, είναι χρέος του aggregator να τις διαθέσει σε πραγματικό χρόνο πλέον, σύμφωνα με τα

συμφωνηθέντα. Αυτό θα γίνει με την κατάλληλη απόκριση των ηλεκτρικών οχημάτων, στα σήματα ρύθμισης που θα δέχονται. Για την άνω ρύθμιση και τη στρεφόμενη εφεδρεία, η απόκριση αυτή θα είναι είτε μία μείωση της προγραμματισμένης τους φόρτισης, είτε μία αύξηση της εκφόρτισης, είτε ένας συνδυασμός των δύο. Αντίστοιχα, όταν ζητείται κάτω ρύθμιση τα οχήματα ή θα μειώνουν το ρυθμό εκφόρτισης τους ή θα αυξάνουν το ρυθμό φόρτισης ή κάποια θα εκτελούν την πρώτη διαδικασία και κάποια άλλη, τη δεύτερη. Ο aggregator λαμβάνει ένα σήμα για ρύθμιση και ένα για στρεφόμενη εφεδρεία από το σύστημα κάθε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και μετά πρέπει να υπολογίσει το μερίδιο της απόκρισης στο σήμα αυτό για το κάθε συνδεδεμένο και διαθέσιμο όχημα και τέλος να στείλει το αντίστοιχο σήμα ελέγχου στο κάθε όχημα. Οι υπολογισμοί αυτοί, πρέπει να γίνονται σε κλάσματα δευτερολέπτου, καθώς πλέον μιλάμε για πραγματικό χρόνο και τα σήματα του δικτύου θα αποστέλλονται κάθε κάποια δευτερόλεπτα ή λίγα λεπτά. Ο αλγόριθμος που παρουσιάζεται στην ενότητα αυτή, επιτελεί ακριβώς αυτήν τη δουλειά, υπολογίζει δηλαδή αφενός τα σήματα ελέγχου, που πρέπει να στείλει ο aggregator στο κάθε όχημα, και αφετέρου την απόκριση του κάθε οχήματος σε αυτά. Ο κώδικας αναπτύχθηκε στο περιβάλλον του “Matlab”, για λόγους απλότητας.

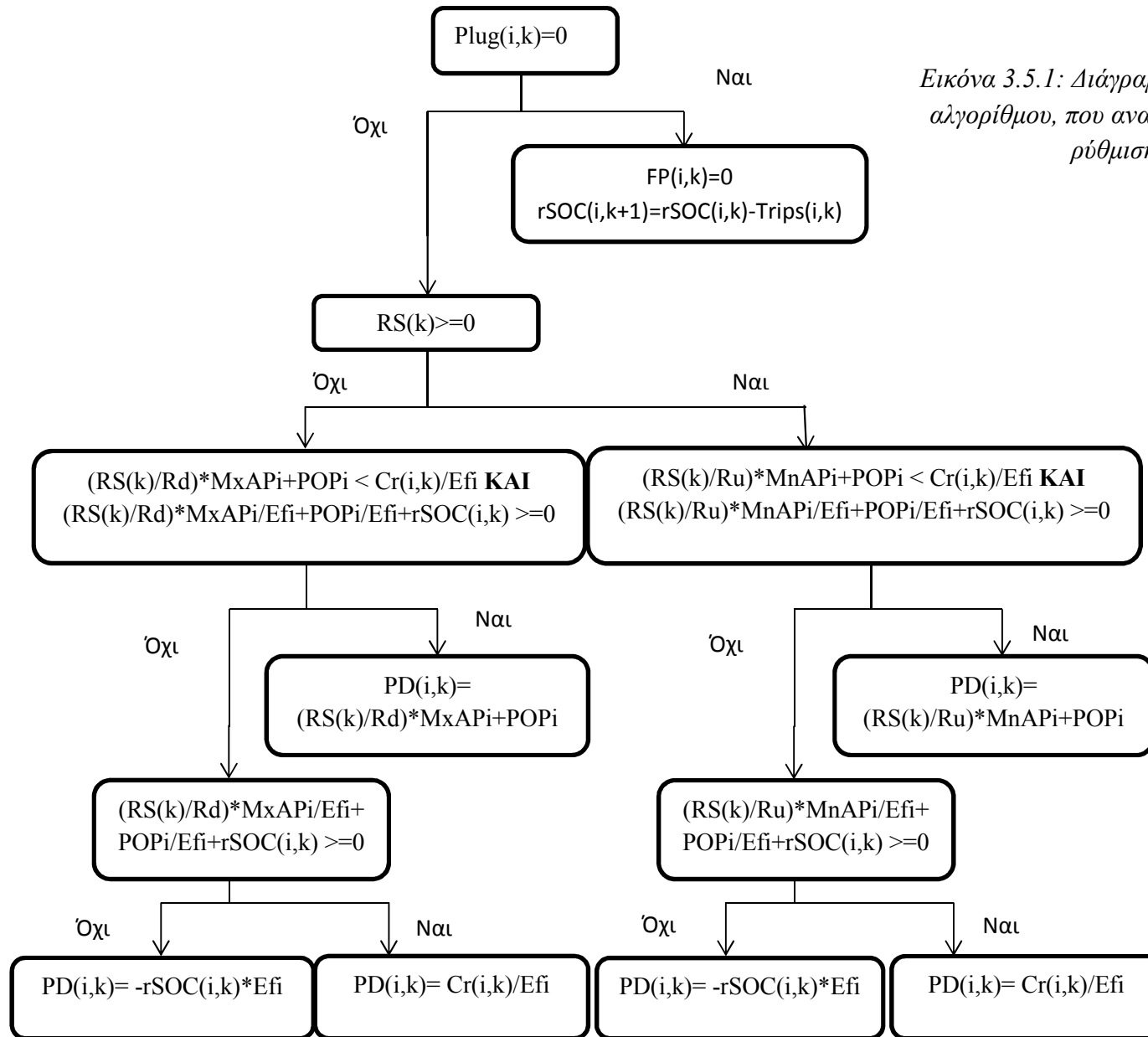
Τα δύο μέρη του αλγορίθμου, που παρουσιάζουμε παρακάτω δουλεύουν διαδοχικά. Πρώτα υπολογίζεται η απόκριση του *i*-οστού οχήματος ώστε να ακολουθήσει το σήμα για τη ρύθμιση και μετά αυτή η απόκριση χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η τελική απόκριση του οχήματος, η οποία προκύπτει αφού προστεθεί και η απόκριση στο σήμα για τη στρεφόμενη εφεδρεία. Εφόσον οι περιορισμοί, που τέθηκαν για τον αλγόριθμο προγραμματισμού, εξασφαλίζουν ότι θα υπάρχει πάντα επαρκής ισχύς για να προσφερθούν οι διάφορες υπηρεσίες, αποκλείεται το ενδεχόμενο η κάλυψη της μίας υπηρεσίας να γίνεται εις βάρος της άλλης. Επομένως, αφού δεν τίθεται θέμα προτεραιότητας κάλυψης κάποιας υπηρεσίας, οι αποκρίσεις των οχημάτων μπορούν να υπολογιστούν ανεξάρτητα και με παράλληλο τρόπο, ώστε εν τέλει με μία απλή πρόσθεση να προκύψει το τελικό αποτέλεσμα.

Όταν μιλάμε για την απόκριση του κάθε οχήματος, ουσιαστικά εννοούμε την ισχύ και την ενέργεια, που ανταλλάσει κάθε χρονική στιγμή με το δίκτυο. Η ισχύς, που αναφέρεται στην υπηρεσία της ρύθμισης “**PD(i,k)**” μπορεί να είναι θετική ή αρνητική. Ομοίως και η ισχύς “**FP(i,k)**”, που αναφέρεται στο συνδυασμό ρύθμισης και στρεφόμενης εφεδρείας. Διατηρούμε τη σύμβαση, που κάναμε και στις προηγούμενες ενότητες, επομένως θετικό “**PD(i,k)**” ή “**FP(i,k)**” σημαίνει απορρόφηση ενέργειας από το δίκτυο, ενώ αρνητικές τιμές συμβολίζουν έγχυση ενέργειας από το όχημα προς το δίκτυο. Εάν το όχημα, τη χρονική στιγμή, που εξετάζουμε είναι εν κινήσει, τότε προφανώς $PD(i,k)=FP(i,k)=0$. Τα χρονικά διαστήματα, δεν είναι πλέον διάρκειας μίας ώρας, και συμβολίζονται με “**k**” για να αποφευχθεί η σύγχυση με την παράμετρο “*t*”. Κάθε ώρα, ο αλγόριθμος τρέχει “**K**” φορές, όπου $K=3600/k_s$ με k_s το σταθερό αριθμό των δευτερολέπτων, που μεσολαβούν μεταξύ 2 διαδοχικών σημάτων ρύθμισης και στρεφόμενης εφεδρείας από το δίκτυο. Το χρονικό διάστημα αυτό, μπορεί να πάρει διάφορες τιμές, που

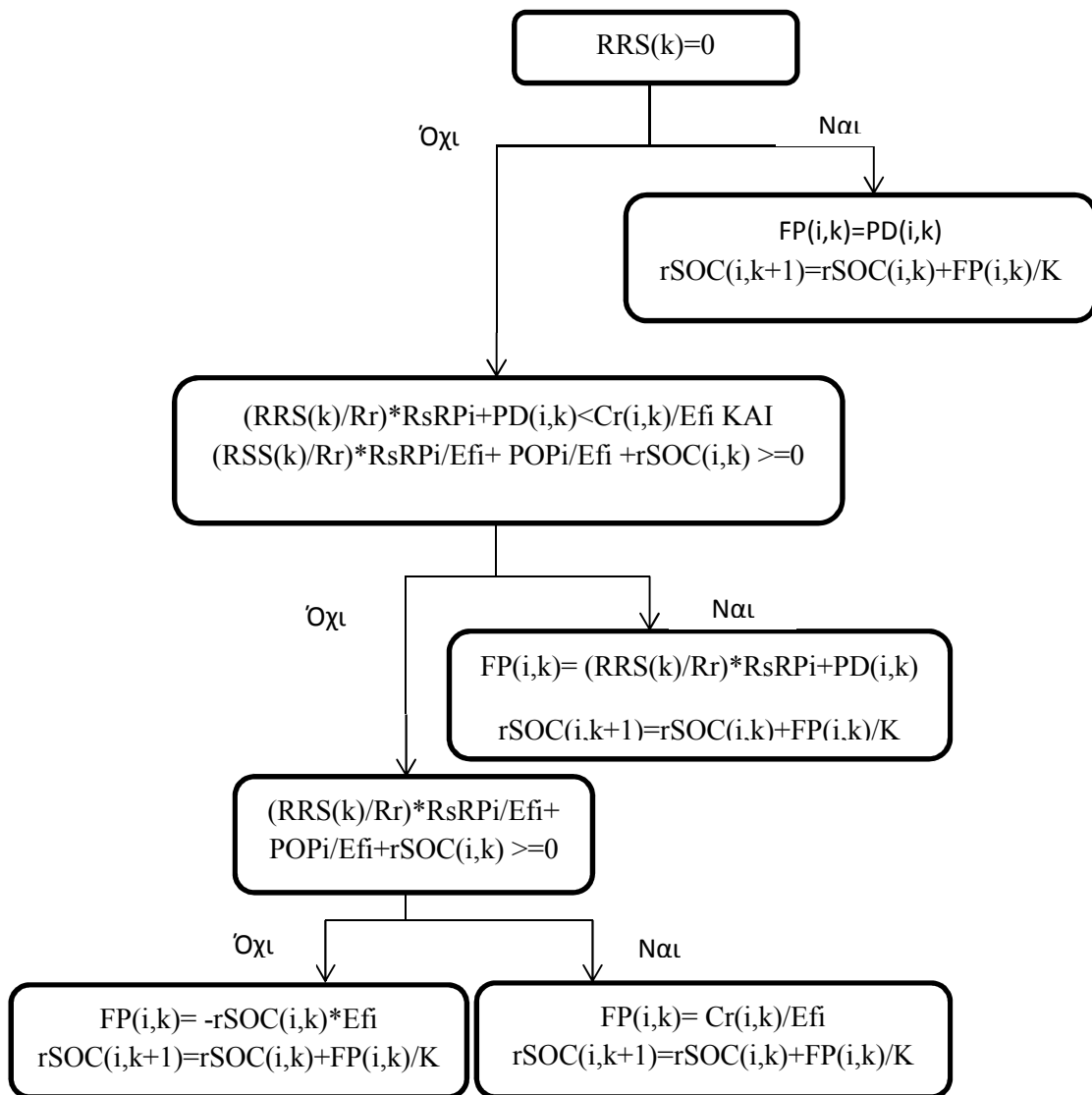
εξαρτώνται από την πολιτική του κάθε δικτύου, αλλά στην παρούσα εργασία θα το θεωρήσουμε ίσο με 5 λεπτά, δηλαδή $ks=5*60=300$ δευτερόλεπτα. Αυτό σημαίνει ότι τα σήματα ελέγχου θα παράγονται κάθε 5 λεπτά, και μέσα σε μία ώρα το κάθε όχημα θα λαμβάνει $K=3600/300=12$ σήματα. Κάθε 12 φορές μέσα σε μία ώρα, το κάθε όχημα θα αλλάζει την ισχύ εξόδου του, επομένως η ενέργεια, που είναι αποθηκευμένη μέσα στους συσσωρευτές θα υπολογίζεται από την ισχύ αυτή, διαιρεμένη με το συντελεστή $K=12$. Η ενέργεια αυτή συμβολίζεται με “ $rSOC(i,k)$ ” και η ενέργεια που υπολείπεται από το συσσωρευτή, για να επιτευχθεί πλήρης φόρτιση συμβολίζεται με “ $Cr(i,k)$ ”. Θα ισχύει λοιπόν:

$$rSOC(i,k) + CR(i,k) = Mc(i), \quad \forall i,k \quad (3.41)$$

Το σήμα ρύθμισης, που θα λαμβάνει ο aggregator μπορεί να είναι θετικό, αρνητικό ή και μηδέν. Με τη σύμβαση, που ακολουθούμε θετικό σήμα σημαίνει ότι το δίκτυο ζητά κάτω ρύθμιση, αρνητικό σήμα σημαίνει άνω ρύθμιση και μηδενικό ότι δεν υπάρχει καθόλου ανάγκη για άνω ή κάτω ρύθμιση. Το σήμα για τη στρεφόμενη εφεδρεία, μπορεί να είναι αρνητικό ή μηδέν. Μηδενικό σήμα, σημαίνει ομοίως ότι δεν υπάρχει ανάγκη για αυτήν την υπηρεσία, ενώ αρνητικό ότι υπάρχει. Η απόλυτη τιμή των σημάτων αυτών, αντιπροσωπεύει την ισχύ, που ζητείται κάθε φορά για την εκάστοτε υπηρεσία. Μπορεί βέβαια όμως, να πρόκειται και για ανά μονάδα τιμή, οπότε τότε οι όροι RS/Rd , RS/Ru και RRS/Rr μετασχηματίζονται αντίστοιχα σε RS , RS και RRS . Αφού λοιπόν λάβει το σήμα ο aggregator για να υπολογίσει την απόκριση του κάθε οχήματος, υπάρχουν 3 ενδεχόμενα: Πρώτον, η ενέργεια, που ζητά το σύστημα να απορροφήσει από το συσσωρευτή υπάρχει ήδη αποθηκευμένη μέσα σε αυτόν, ή αντίστοιχα ο συσσωρευτής έχει το απαραίτητο περιθώριο να αποθηκεύσει την ενέργεια, που του ζητά το σύστημα. Αυτή η περίπτωση είναι και η ιδανική, καθώς τότε το όχημα συμμορφώνεται πλήρως με τις ανάγκες του δικτύου και παρέχει σε αυτό τις ποσότητες ισχύος, που είχαν συμφωνηθεί κατά τον προγραμματισμό. Επειδή, όμως ο προγραμματισμός έχει βασιστεί σε προβλέψεις τόσο των σημάτων ελέγχου, όσο κυρίως των ταξιδιών, η περίπτωση αυτή δεν ισχύει πάντα. Πρέπει επομένως να ορίσουμε τι θα γίνεται σε περιπτώσεις, που δεν ισχύει το πρώτο ενδεχόμενο. Η δεύτερη περίπτωση λοιπόν, είναι η ενέργεια, που ζητείται από το δίκτυο να μην υπάρχει στο συσσωρευτή. Τότε, το καλύτερο που μπορεί να γίνει είναι το όχημα να προσφέρει όση ενέργεια έχει αποθηκευμένη, δηλαδή ποσότητα ίση με “ $rSOC(i,k)$ ”. Τρίτη περίπτωση είναι η ενέργεια, που το σύστημα θέλει να αποθηκεύσει στους συσσωρευτές, να μην «χωράει» σε αυτούς. Τότε, θα αποθηκευτεί αναγκαστικά όση περισσότερη «χωράει», δηλαδή η ποσότητα “ $Cr(i,k)$ ”. Τα δύο κομμάτια του αλγορίθμου, που προκύπτουν από τα όσα αναφέρθηκαν μέχρι στιγμής παρουσιάζονται παρακάτω υπό τη μορφή διαγραμμάτων ροής (flowcharts):



Εικόνα 3.5.1: Διάγραμμα ροής για το κομμάτι του αλγορίθμου, που αναφέρεται στην κατανομή της ρύθμισης συχνότητας



Εικόνα 3.5.2: Διάγραμμα ροής για το κομμάτι του αλγορίθμου κατανομής, που αναφέρεται στη στρεφόμενη εφεδρεία

4 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΗ ΓΛΩΣΣΑ GAMS

4.1 Λόγοι επιλογής της γλώσσας GAMS

Όπως έγινε φανερό από το προηγούμενο κεφάλαιο, καρδιά του αλγορίθμου βελτιστοποίησης είναι η αντικειμενική συνάρτηση. Το αριθμητικό αποτέλεσμα της συνάρτησης αυτής μπορεί να ποικίλλει, και αυτό εξαρτάται από τις αριθμητικές τιμές, που λαμβάνουν οι μεταβλητές απόφασης. Επομένως, αυτό που θα χρειαστούμε είναι ένα εργαλείο, το οποίο θα ψάξει και θα εντοπίσει τις τιμές εκείνες των μεταβλητών απόφασης, για τις οποίες μεγιστοποιείται το αποτέλεσμα της αντικειμενικής συνάρτησης. Ένα τέτοιο εργαλείο είναι το Γενικό Σύστημα Αλγεβρικής Μοντελοποίησης GAMS (General Algebraic Modeling System), το οποίο αναπτύχθηκε για την υποστήριξη της επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης γραμμικού, μη γραμμικού αλλά και μικτού ακέραιου προγραμματισμού. Επιλέξαμε τη συγκεκριμένη γλώσσα προγραμματισμού, για τους εξής λόγους:

- Λόγω της ομοιότητας, που έχει το συντακτικό της γλώσσας με τη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος της βελτιστοποίησης. Το γεγονός αυτό, μας επιτρέπει να πετύχουμε μία αρκετά απλή, αλλά ταυτόχρονα ακριβή και ευανάγνωστη υλοποίηση του μαθηματικού αλγορίθμου, ειδικά εφόσον μιλάμε για ένα μεγάλης έκτασης και σύνθετο πρόβλημα.
- Η γλώσσα, που χρησιμοποιεί το GAMS, είναι τυπικά παρόμοια με τις συνήθως χρησιμοποιημένες γλώσσες προγραμματισμού, καθιστώντας την οικεία σε οποιονδήποτε, που έχει μία έστω μικρή επαφή με τον προγραμματισμό. Επιπλέον, παρέχονται πρότυπα μοντέλα μέσω βιβλιοθήκης πληροφοριών, τα οποία βοηθούν το χρήστη.
- Επιτρέπεται η εύκολη επικοινωνία και ανταλλαγή δεδομένων με άλλες γλώσσες προγραμματισμού ή προγράμματα, όπως είναι το Matlab και το Excel. Αυτό ήταν αρκετά βοηθητικό καθώς υπήρξαν εφαρμογές, που ήταν προτιμότερο και ευκολότερο να υλοποιηθούν στα παραπάνω προγράμματα, όπως πχ η γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν.
- Το μοντέλο σχεδιασμού, μπορεί να τροποποιηθεί ή να επεκταθεί με επιπλέον περιορισμούς, με ιδιαίτερη ευκολία και ασφάλεια.
- Διαθέτει πολλούς και ισχυρούς επίλυτες, οι οποίοι ενημερώνονται με τις πιο πρόσφατες και πιο αποτελεσματικές εκδόσεις. Το GAMS δεν μπορεί να επιλύσει από μόνο του το εκάστοτε πρόβλημα, αλλά αντιθέτως το μεταβιβάζει σε έναν έτοιμο αλγόριθμο επίλυσης, ανάλογα κάθε φορά με τη

φύση του προβλήματος. Οι έτοιμοι αυτοί αλγόριθμοι λέγονται επιλυτές (solvers), και το GAMS λειτουργεί περισσότερο ως διαμεσολαβητής.

4.2 Δομή ενός μοντέλου σε GAMS

Στις επόμενες παραγράφους εξηγούνται τα βασικά συστατικά που αποτελούν τη δομή οποιουδήποτε μοντέλου του GAMS, τα οποία παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

➤ Inputs (Είσοδος Δεδομένων):

- Sets – (Σύνολα)

Declaration - (Δήλωση τους)

Assignment of members - (Καθορισμός των μελών τους)

- Data (Parameters, Tables, Scalars) – Δεδομένα (Παράμετροι, Πίνακες, Πίνακες στοιχείων)

Declaration - (Δήλωση τους)

Assignment of values - (Καθορισμός των τιμών τους)

- Variables - (Μεταβλητές)

Declaration - (Δήλωση τους)

Assignment of type - (Καθορισμός του τύπου τους)

- Assignment of bounds and/or initial values (optional) - (Καθορισμός των ορίων ή των αρχικών τιμών)

- Equations – (Εξισώσεις)

Declaration - (Δήλωση τους)

Definition - (Ορισμός τους)

- Model and Solve statements – (Δήλωση Μοντέλου και Επίλυσης)

- Display statement (optional) – (προαιρετική Εμφάνιση δήλωσης)

- Outputs (Εξοδος Αποτελεσμάτων):
 - Echo Print – (Αποτύπωση προγράμματος)
 - Symbol Reference Maps – (Χάρτες Αναφοράς Συμβόλων)
 - Equation Listings – (Λίστα Εξισώσεων)
 - Status Reports – (Αναφορά Κατάστασης)
 - Results – (Αποτελέσματα)

Σε αυτό το σημείο, είναι απαραίτητο να επισημανθούν κάποιες απαραίτητες παρατηρήσεις που αποτελούν και απαράβατους κανόνες του προγράμματος GAMS:

- Ένα μοντέλο στο GAMS είναι μια συλλογή των δηλώσεων στη γλώσσα GAMS. Κάθε οντότητα (εξαρτημένη ή ανεξάρτητη, μεταβλητή ή σταθερή) στο μοντέλο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αν δεν έχει δηλωθεί προηγουμένως.
- Οι οντότητες στο GAMS μπορούν να δηλωθούν σχεδόν με οποιοδήποτε τρόπο επιθυμεί ο χρήστης. Έτσι, επιτρέπονται οι δηλώσεις σε πολλαπλές γραμμές, οι κενές γραμμές μεταξύ των δηλώσεων όπως και οι πολλαπλές δηλώσεις ανά γραμμή.
- Η ολοκλήρωση κάθε δήλωσης πρέπει να συνοδεύεται με το σύμβολο ελληνικού ερωτηματικού «;» ('semicolon'). Ο μεταγλωττιστής ('compiler') GAMS δε διακρίνει κεφαλαία και πεζά γράμματα, έτσι είναι και τα δύο είδη αποδεκτά.
- Τα επεξηγηματικά σχόλια είναι χρήσιμα για την τεκμηρίωση των μαθηματικών μοντέλων. Είναι καλύτερο να ενσωματώνονται μέσα στο ίδιο το μοντέλο παρά να παρουσιάζονται ξεχωριστά. Υπάρχουν δύο τρόποι να παρεμβληθεί η επεξήγηση μέσα σε μια εφαρμογή του GAMS. Καταρχήν, οποιαδήποτε γραμμή που αρχίζει με έναν αστερίσκο (*) στη πρώτη στήλη λαμβάνεται ως γραμμή σχολίου από το μεταγλωττιστή GAMS. Δεύτερον, ίσως το σημαντικότερο, τα σχόλια μπορούν να παρεμβληθούν μετά από τις δηλώσεις των οντοτήτων του GAMS.
- Η δημιουργία οντοτήτων στο GAMS περιλαμβάνει δύο βήματα: μια δήλωση ('declaration') και μια ανάθεση ή καθορισμός ('assignment'). Η δήλωση περιλαμβάνει την ύπαρξη της οντότητας στο πρόγραμμα δίνοντας ένα όνομα. Η ανάθεση ή καθορισμός δίνει μια συγκεκριμένη τιμή ή μια μορφή. Στην περίπτωση των εξισώσεων, πρέπει να γίνεται δήλωση και ανάθεση σε ξεχωριστές δηλώσεις στο GAMS. Για όλες τις άλλες οντότητες του GAMS, ωστόσο, υπάρχει η επιλογή των δηλώσεων και αναθέσεων στην ίδια δήλωση ή χωριστά

- Τα ονόματα που δίνονται στις οντότητες του μοντέλου πρέπει να αρχίζουν με γράμμα και μπορούν να ακολουθηθούν μέχρι 31 οποιοδήποτε χαρακτήρες ή ψηφία.
- Όλες οι γραμμές δεν είναι μέρος της γλώσσας GAMS. Δύο ειδικά σύμβολα, ο αστερίσκος «*» και το σύμβολο δολαρίου «\$» μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην πρώτη θέση σε μια γραμμή για να δείξει μια μη-γλωσσική γραμμή.

4.2.1 Σύνολα

Τα Σύνολα ('Sets') είναι θεμελιώδεις δομικές μονάδες για οποιοδήποτε μοντέλο του GAMS και του επιτρέπουν να δηλωθεί και να διαβάζεται εύκολα και λειτουργικά. Το σύνολο S που περιλαμβάνει τα στοιχεία a, b και c γράφεται με μαθηματική αναπαράσταση $S = \{ a, b, c \}$. Στο GAMS, λόγω των περιορισμών των χαρακτήρων, το ίδιο σύνολο γράφεται: `set S / a, b, c /`. Η δήλωση του συνόλου αρχίζει με τη λέξη κλειδί `set` (ή `sets`), όπου S το όνομα του συνόλου, και τα μέλη ή στοιχεία του είναι τα a, b, c. Γενικά, η σύνταξη στο GAMS για τα απλά σύνολα είναι η ακόλουθη:

```
SET Set_Name Optional_Explanatory_Text
/ first_Set_Element_Name Optional_Explanatory_Text
second_Set_Element_Name Optional_Explanatory_Text
...
/;
```

Το Όνομα Συνόλου ('Set_Name') είναι το εσωτερικό όνομα του συνόλου (επίσης αποκαλούμενου και ως αναγνωριστής-identifier) στο GAMS, που πρέπει να αρχίζει με ένα γράμμα που ακολουθείται από περισσότερα γράμματα ή ψηφία. Μπορεί μόνο να περιέχει τους αλφαριθμητικούς χαρακτήρες, και μπορεί να είναι μέχρι 31 χαρακτήρες. Το συνοδευτικό κείμενο χρησιμοποιείται για να περιγράψει το σύνολο ή το στοιχείο που προηγείται.

Το Όνομα Στοιχείου Συνόλου ('Set_Element_Name') μπορεί να είναι μέχρι 10 χαρακτήρες. Όπως και στις δηλώσεις έτσι και εδώ ισχύουν τα ίδια σχετικά με τα συνοδευτικά κείμενα (είτε μέσα σε αποστρόφους, είτε χωρίς). Κάθε στοιχείο σε ένα σύνολο πρέπει να χωριστεί από τα άλλα στοιχεία με ένα κόμμα ή με ένα τέλος γραμμής. Αντίθετα, κάθε στοιχείο χωρίζεται από οποιοδήποτε σχετικό κείμενο με κενό.

Το Επεξηγηματικό Κείμενο ('Explanatory_Text') δεν πρέπει να υπερβαίνει τους 254 χαρακτήρες και πρέπει για κάθε στοιχείο που περιγράφει να βρίσκεται στην ίδια γραμμή. Το κείμενο μπορεί να περιέχει ειδικούς χαρακτήρες όπως κάθετους, κόμματα ή ελληνικά ερωτηματικά με την προϋπόθεση ότι βρίσκεται μέσα σε αποστρόφους.

Ο αστερίσκος «*» παίζει έναν ειδικό ρόλο στους ορισμούς συνόλων. Χρησιμοποιείται για την αποφυγή επίπονης δακτυλογράφησης μιας ακολουθίας στοιχείων ενός συνόλου. Παραδείγματος χάριν, για να γράψουμε δέκα χρονολογίες στη σειρά από το 1991 έως το 2000 μπορούμε να γράψουμε: `set t "time" /1991 * 2000 /;`, όπου μέσα το σύνολο περιλαμβάνει τα δέκα στοιχεία το 1991, 1992...2000. Ο αριθμός αριστερά από το αστερίσκο πρέπει να είναι μικρότερος από τον αριθμό στα δεξιά. Οποιοσδήποτε μη αριθμητικές διαφορές ή άλλες ασυνέπειες προκαλούν λάθη, ενώ είναι εφικτό δύο ή και παραπάνω σύνολα να δηλωθούν από κοινού.

4.2.2 Εισαγωγή Δεδομένων

Ένα από τα κλασσικά πρότυπα σχεδιασμού της γλώσσας GAMS είναι η χρήση δεδομένων στη πιο βασική μορφή, η οποία μπορεί να είναι Πίνακας - Στοιχείο, Παράμετροι και Πίνακες δύο ή περισσότερων διαστάσεων. Με βάση αυτό το κριτήριο, τρεις τύποι στοιχείων εισάγονται σε αυτή τη παράγραφο:

- Πίνακες

Τα στοιχεία μπορούν να δηλωθούν και να αρχικοποιηθούν στο GAMS χρησιμοποιώντας μια δήλωση Πίνακα ('Table'). Για δύο ή περισσότερες διαστάσεις προτιμώνται οι πίνακες από τις παραμέτρους για την εισαγωγή δεδομένων. Γενικά, η σύνταξη για μια δήλωση πίνακα είναι:

```
Table Table_Name (Set i, Set j...) Optional_Explanatory_Text
set_j_element_1 set_j_element_2
set_i_element_1 value_11 value_12
set_i_element_2 value_21 value_22;
```

Το Όνομα του Πίνακα ('Table_Name') είναι το εσωτερικό όνομα του πίνακα στο GAMS. Οι ετικέτες σειρών προέρχονται από το σύνολο i, και οι ετικέτες των στηλών από το σύνολο j.

- Πίνακες Στοιχείου

Η δήλωση του Πίνακα Στοιχείου ('Scalars') χρησιμοποιείται για να δηλώσει και να εισάγει τις αρχικές συνθήκες σε μια παράμετρο του GAMS με μηδενική διάσταση. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχει ακριβώς ένας αριθμός που συνδέεται με την παράμετρο. Γενικά, η σύνταξη στο GAMS για μια δήλωση πίνακα στοιχείο είναι:

```
Scalars
```

```
Scalar1_Name Optional_Explanatory_Text / Numerical_Value /
```

```
Scalar2_Name Optional_Explanatory_Text / Numerical_Value /
```

```
... ;
```

Το Όνομα του Πίνακα Στοιχείου ('Scalar_Name') είναι το εσωτερικό όνομα του πίνακα στοιχείου. Το Συνοδευτικό Κείμενο περιγράφει το στοιχείο και ακολουθεί η τιμή του ('Numerical_Value').

- Παράμετροι

Γενικά, η σύνταξη στο GAMS για μια δήλωση Παραμέτρου ('Parameter') είναι:

```
Parameters
```

```
Parameter_Name (set dependency) Optional_Explanatory_Text
```

```
/ first_Set_Element_Name Associated_Value,
```

```
Second_Set_Element_Name Associated_Value,
```

```
... /;
```

Το Όνομα της Παραμέτρου ('Parameter_Name') είναι το εσωτερικό όνομα της παραμέτρου. Η αρχικοποίηση μιας παραμέτρου απαιτεί έναν κατάλογο στοιχείων ('data_element'), κάθε ένα από τα οποία αποτελείται από μια ετικέτα και μια τιμή. Οι κάθετοι '/' πρέπει να χρησιμοποιηθούν στην αρχή και στο τέλος του καταλόγου, και τα κόμματα πρέπει να χωρίζουν τα στοιχεία που εισήχθησαν σε μια γραμμή. Το σύμβολο '=' ή το 'κενό' μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να χωρίσει τις ετικέτες από τις αντίστοιχες τιμές τους.

4.2.3 Μεταβλητές

Ο όρος Μεταβλητές ('Variables') αναφέρεται στις λεγόμενες μεταβλητές απόφασης σύμφωνα με τους συμβούλους επιχειρήσεων ή αλλιώς στις ενδογενείς μεταβλητές σύμφωνα με τους οικονομολόγους. Είναι οι οντότητες, των οποίων οι τιμές είναι γενικά άγνωστες μέχρι να λυθεί το μοντέλο. Μια σημαντική διαφορά μεταξύ των δηλώσεων μεταβλητής και παραμέτρου είναι ότι στη δήλωση μεταβλητής δεν μπορούν να δηλωθούν αρχικές τιμές. Έτσι, τα πολύ μεγάλα μοντέλα μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας έναν μικρό αριθμό μεταβλητών. Είναι σημαντικό ότι οι δηλώσεις μεταβλητών περιλαμβάνουν ένα επεξηγηματικό κείμενο το οποίο είναι όσο το δυνατόν περιγραφικότερο για να σχολιάσει την λύση. Γενικά, η σύνταξη στο GAMS για μια δήλωση Μεταβλητών είναι:

Variable type

```
First_Variable_Name (set_dependency) Optional_Explanatory_
Text
```

```
second_Variable_Name (set_dependency) Optional_Explanatory_
Text
```

...;

Ο τύπος των μεταβλητών ('Variable_type') είναι ο προαιρετικός μεταβλητός τύπος που εξηγείται λεπτομερώς παρακάτω. Το όνομα των μεταβλητών ('Variable_name') είναι το εσωτερικό όνομα της μεταβλητής στο GAMS.

Υπάρχουν πέντε βασικοί τύποι μεταβλητών:

- Free: Ελεύθερες, δεν έχουν κανένα περιορισμό στην τιμή τους, από $-\infty$ έως $+\infty$
- Positive: Θετικές, δέχονται τιμές μόνο από 0 έως $+\infty$
- Negative: Αρνητικές, δέχονται τιμές μόνο από $-\infty$ έως 0
- Binary: Δυαδικές, δέχονται τιμές 0 ή 1
- Integer: Ακέραιες, δέχονται τιμές μόνο από 0 έως 100

Τα όρια είναι πολύ σημαντικά και αν επιβάλλεται να αλλαχθούν πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγονται π.χ. διαιρέσεις με το μηδέν γιατί το GAMS θα προειδοποιήσει για λάθος. Ο τύπος προεπιλογής είναι ελεύθερος, που σημαίνει ότι εάν ο τύπος της μεταβλητής δεν διευκρινίζεται, αυτό δεν θα έχει όρια καθόλου. Οι πιο συχνά χρησιμοποιημένοι τύποι είναι οι ελεύθεροι και οι θετικοί για τις περιγραφές των μεταβλητών για τις οποίες οι αρνητικές τιμές δεν έχουν νόημα,

όπως οι χωρητικότητες, οι ποσότητες και οι τιμές πώλησης. Ο πιο δημοφιλής τρόπος δήλωσης των μεταβλητών είναι η απαρίθμηση κατά ομάδες ανάλογα με τον τύπο.

Ένα πρόσθετο σύνολο λέξεων κλειδιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διευκρινίσει τις διάφορες ιδιότητες των μεταβλητών. Μια μεταβλητή στο GAMS, έχει επτά προθέματα:

- `.lo` Το χαμηλότερο όριο της μεταβλητής
- `.up` Το υψηλότερο όριο της μεταβλητής
- `.fx` Η σταθερή τιμή της μεταβλητής, η οποία έχει άνω και κάτω όριο το ίδιο. Μία μεταβλητή σταθερής τιμής μπορεί να πάρει αργότερα περισσότερες τιμές, αν επαναπροσδιοριστούν τα όριά της.
- `.l` Το επίπεδο δραστηριότητας για τη μεταβλητή. Είναι ισοδύναμο με την τρέχουσα αξία της μεταβλητής. Λαμβάνει τις νέες τιμές όταν λύνεται ένα μοντέλο.
- `.m` Η οριακή τιμή της μεταβλητής. Λαμβάνει τις νέες τιμές όταν λύνεται ένα μοντέλο
- `.scale` Ο κλιμακωτός παράγοντας της μεταβλητής σε μη γραμμικό προγραμματισμό.
- `.prior` Η διακλαδισμένη τιμή προτεραιότητας μιας μεταβλητής χρησιμοποιείται σε προγραμματιστικά μοντέλα με μικτούς ακέραιους αριθμούς.

4.2.4 Εξισώσεις

Με τον όρο Εξισώσεις (`'Equations'`), το GAMS εννοεί τις συμβολικές αλγεβρικές σχέσεις που θα χρησιμοποιηθούν για να παράγουν τους περιορισμούς στο μοντέλο. Όπως με τις μεταβλητές, μια εξίσωση στο GAMS θα συνδέσει αυθαίρετα πολλούς περιορισμούς, ανάλογα με την ιδιότητα των καθορισμένων συνόλων. Γενικά, η σύνταξη στο GAMS για μια δήλωση Εξισώσεων είναι:

```
Equations
```

```
First_Equation_Name (set_dependency) Optional_Explanatory_
Text
```

```
Second_Equation_Name (set_dependency) Optional_Explanatory_
Text
```

```
...;
```

Το όνομα των Εξισώσεων ('Equation_name') είναι το εσωτερικό όνομα της εξίσωσης στο GAMS και ακολουθείται από το επεξηγηματικό κείμενο καταλήγοντας με το ελληνικό ερωτηματικό σύμβολο. Όσον αφορά τον Ορισμό των Τύπων των Εξισώσεων, αυτός γίνεται αφότου έχει δηλωθεί από πριν το όνομα της κάθε εξίσωσης και εν συνεχεία ορίζεται ο τύπος της εξίσωσης ως εξής :

```
Equation_Name (set_dependency)$Optional_Logical_Condition ..
Left_Equation_Terms Equation_Type Right_Equation_Terms;
```

Δηλώνεται εκ νέου το όνομα της Εξίσωσης ακολουθούμενο πάντα από δύο τελείες "." πριν την έναρξη της άλγεβρας. Το Αριστερό μέλος της εξίσωσης ('Left_Term') αποτελεί τον αλγεβρικό τύπο της, ενώ το Δεξιό ('Right_Term') αποτελεί την τελική τιμή, την οποία επιζητείται να λάβει ο αλγεβρικός τύπος.

Το Είδος της Εξίσωσης ('Equation Type') αναφέρεται στο σύμβολο μεταξύ των δύο εκφράσεων που διαμορφώνουν την εξίσωση, και μπορεί να είναι κάποιος από τους ακόλουθους τύπους:

- =E= ('Equality'): το αριστερό μέρος πρέπει να είναι ίσο με το δεξί,
- =G= ('Greater or equal'): το αριστερό μέρος πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο από το δεξί,
- =L= ('Lower or equal'): το αριστερό μέρος πρέπει να είναι μικρότερο ή ίσο από το δεξί,
- =N= καμία σχέση δεν επιβάλλεται μεταξύ αριστερού και δεξιού μέρους. Αυτός ο τύπος εξίσωσης χρησιμοποιείται σπάνια.

Εκφράσεις με δείκτες

Το GAMS παρέχει τις ακόλουθες τρεις διαδικασίες με δείκτες ('Indexed Operations'). Αυτές οι τρεις διαδικασίες εκτελούνται σε έναν ή περισσότερους δείκτες ελέγχου.

- sum: Άθροισμα με χρήση δεικτών ελέγχου.

Χρησιμοποιείται για να υπολογίσει το άθροισμα για μια περιοχή ενός συνόλου. Το πεδίο του ελέγχου είναι το ζευγάρι των παρενθέσεων () που αρχίζει αμέσως μετά από sum και στο οποίο περιέχονται οι Δείκτες Ελέγχου ('Controlling Indices') με τις αντίστοιχες εκφράσεις των μεταβλητών. Για παράδειγμα, το πιο απλό μαθηματικό άθροισμα $\sum_i x_{ij}$, εκφράζεται στο GAMS ως: `sum(i, x(i, j))`, ενώ, ένα πιο πολύπλοκο μαθηματικό άθροισμα, όπως το $\sum_i \sum_j c_{ij} \cdot x_{ij}$, εκφράζεται στο GAMS ως: `sum((i, j), c(i, j) * x(i, j))`

- `smin` : Ελάχιστη τιμή με χρήση δεικτών ελέγχου
- `smax` : Μέγιστη τιμή με χρήση δεικτών ελέγχου

Οι εκφράσεις `'smin'` και `'smax'` αποτελούν διαδικασίες, που χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν οι μικρότερες και μεγαλύτερες τιμές αντίστοιχα σε μια περιοχή του συνόλου. Οι δείκτες `'smin'` και `'smax'` διευκρινίζονται με τον ίδιο τρόπο όπως στο δείκτη για το `'sum'`.

4.2.5 Μοντέλα

Η Δήλωση Μοντέλου (`'Model_Statement'`) χρησιμοποιείται για να οργανώσει τις εξισώσεις σε ομάδες και να τις ονομάσει έτσι ώστε αυτές να μπορούν να επιλυθούν. Γενικά η σύνταξη στο GAMS για ένα μοντέλο απλής δήλωσης είναι :

```
Model Model_Name Optional_Explanatory_Text /Model_Contents/;
```

Το Όνομα του Μοντέλου (`'Model_Name'`) είναι η εσωτερική ονομασία στο μοντέλο του GAMS, που πρέπει να ξεκινά με γράμμα και μπορεί να περιέχει μέχρι 10 αλφαριθμητικούς χαρακτήρες στο μήκος. Το κείμενο επεξήγησης χρησιμοποιείται για να περιγράψει το σύνολο ή το στοιχείο που προηγείται από αυτό και δε πρέπει να ξεπερνά τους 80 χαρακτήρες και όλοι να περιλαμβάνονται στην ίδια γραμμή. Τα Περιεχόμενα του Μοντέλου (`'Model_Contents'`) μπορούν να περιλαμβάνουν όλες τις δηλωμένες εξισώσεις, οπότε αρκεί ο συμβολισμός `'all'` για να εφαρμοστεί το μοντέλο σε όλες τις εξισώσεις. Σε διαφορετική περίπτωση, πρέπει να οριστούν οι ονομασίες των συγκεκριμένων εξισώσεων, που πρόκειται να μοντελοποιηθούν.

Χαρακτηριστικά Μοντέλου

Σε κάθε μοντέλο είναι δυνατό να δηλωθούν από το χρήστη κάποια χαρακτηριστικά για το μοντέλο με τη μορφή αριθμητικών τιμών. Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορούν να δώσουν πληροφορίες για τα αποτελέσματα που θα δώσει ο επίλυτής, είτε για κάποιες επιλογές που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη διαδικασία επίλυσης. Υπάρχει ένας αρκετά αξιόλογος αριθμός χαρακτηριστικών που μπορούν να εισαχθούν. Παρακάτω θα γίνει μια μικρή αναφορά μόνο σε όσα από αυτά χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη:

- `'decimals'` . Λαμβάνει τιμές από 0 έως 8 και αντιπροσωπεύει το πλήθος των δεκαδικών ψηφίων ενός πραγματικού αριθμού, που θα εμφανίζονται στην έξοδο. Η προεπιλογή είναι ορισμένη στα 3 δεκαδικά.

- 'reslim' . Η επιλογή αυτή (resources limit) προκαλεί τον τερματισμό της διαδικασίας επίλυσης, μόλις χρησιμοποιηθούν οι μονάδες, που έχουν καθοριστεί και επιστρέφονται οι τρέχουσες τιμές. Οι μονάδες είναι πραγματικά δευτερόλεπτα για τα PCs, ή CPU δευτερόλεπτα για μεγαλύτερους υπολογιστές. Η προεπιλογή είναι ορισμένη στα 1000 δευτερόλεπτα.
- 'iterlim' . Με την επιλογή αυτή (iteration limit) εννοείται το όριο των επαναλήψεων, που μπορούν να πραγματοποιηθούν για την επίλυση του μοντέλου. Η προεπιλογή είναι ορισμένη στα 2 εκατομμύρια επαναλήψεις.

Ταξινόμηση των μοντέλων

Με το GAMS μπορούν να λυθούν διάφοροι τύποι προβλημάτων. Οι τύποι αυτοί παρουσιάζονται παρακάτω. Σημαντικό είναι να υπάρχει ξεκάθαρη γνώση για τον τύπο του προβλήματος προτού επιχειρηθεί η λύση. Το GAMS έχει τη δυνατότητα να ελέγχει το μοντέλο στην επιλογή του τύπου του προβλήματος που σκέφτεται να χρησιμοποιήσει ο χρήστης και εμφανίζει επεξηγηματικά μηνύματα εάν ανακαλύπτει κακό συνδυασμό στην εφαρμογή των τύπων (π.χ., όταν ένα γραμμικό μοντέλο περιέχει μη γραμμικούς όρους). Αυτό συμβαίνει επειδή μερικά προβλήματα μπορούν να λυθούν με περισσότερους από έναν τρόπους, και ο χρήστης πρέπει να επιλέξει ποιο τρόπο θέλει να χρησιμοποιήσει.

LP : Linear Programming - Γραμμικός Προγραμματισμός. Δεν περιλαμβάνει μη γραμμικούς όρους ή διακριτές (δυαδικές ή ακέραιες) μεταβλητές στο μοντέλο.

NLP : Non-Linear Programming - Μη Γραμμικός Προγραμματισμός. Περιλαμβάνει μη γραμμικούς όρους, που περιέχουν μόνο τις ομαλές συναρτήσεις του μοντέλου, αλλά χωρίς διακριτές μεταβλητές.

DNLP : Discontinuous Non-Linear Programming – Ασυνεχής Μη Γραμμικός Προγραμματισμός. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι μη-ομαλοί μη-γραμμικοί όροι, όχι όμως οι διακριτές μεταβλητές

MIP : Mixed Integer Programming – Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός. Περιλαμβάνει διακριτές μεταβλητές, όχι όμως μη-γραμμικούς όρους.

RMIP : Relaxed Mixed Integer Programming - Χαλαρός Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός. Περιέχονται δυαδικές και ακέραιες μεταβλητές υπό τον όρο να παίρνουν τιμές μεταξύ των ορίων τους.

MINLP : Mixed Integer Nonlinear Programming - Μικτός Ακέραιος Μη Γραμμικός Προγραμματισμός. Περιέχονται μη-ομαλοί μη-γραμμικοί όροι και διακριτές μεταβλητές.

RMINLP : Relaxed Mixed Integer Nonlinear Programming - Χαλαρός Μικτός Ακέραιος Μη Γραμμικός Προγραμματισμός. Σε σχέση με το MINLP, περιέχει δυαδικές και ακέραιες μεταβλητές υπό περιορισμούς.

MPEC: Mathematical Programs with Equilibrium Constraints – Μαθηματικά Προγράμματα με Περιορισμούς Ισορροπίας.

MCP : Mixed Complementarily Problem - Μικτό πρόβλημα συμπληρωματικότητας.

CNS : Constrained Nonlinear System - Μη γραμμικό σύστημα με περιορισμούς.

4.2.6 Δήλωση επίλυσης

Υστερα από τη δήλωση του μοντέλου, το επόμενο βήμα είναι η επίλυση του χρησιμοποιώντας τη Δήλωση Επίλυσης ('Solve Statement'). Όταν το GAMS δει αυτή την εντολή ψάχνει τον κατάλληλο Επιλυτή ('Solver') από τη βιβλιοθήκη του, ώστε να βρει τον τύπο που ταιριάζει στην εφαρμογή. Είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι το GAMS από μόνο του δε μπορεί να λύσει το κάθε πρόβλημα, αλλά περνά το πρόβλημα σε ένα από τους επιλυτές. Με λίγα λόγια το GAMS παίζει το ρόλο του μεσολαβητή στο πρόβλημα. Γενικά η σύνταξη στο GAMS για ένα μοντέλο απλής δήλωσης είναι:

```
Solve Model_Name Using_Model_Type Maximizing/Minimizing  
Equation_Name;
```

Το Όνομα του Μοντέλου καθορίζεται από την πρότυπη δήλωση, το οποίο και επιλύεται Χρησιμοποιώντας ('Using') έναν από τους Τύπους του Μοντέλου ('Model Type'), που περιγράφονται στην ενότητα 4.2.5, μεγιστοποιώντας ή ελαχιστοποιώντας την Αντικειμενική Συνάρτηση.

4.2.7 Επικοινωνία με το Excel

Χρησιμοποιώντας τη λειτουργία GDX (Gams Data Exchange) γίνεται δυνατή η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ GAMS και Excel. Ένας φάκελος GDX είναι ένας φάκελος, που μπορεί να αποθηκεύσει τις τιμές παραμέτρων, μεταβλητών και εξισώσεων που χρησιμοποιούνται σε ένα μοντέλο GAMS. Αυτοί οι φάκελοι μπορεί

να χρησιμοποιηθούν για να προετοιμάσουν δεδομένα για ένα πρόγραμμα στο GAMS, να παρουσιάσουν αποτελέσματα από ένα πρόγραμμα του GAMS και να αποθηκεύσουν αποτελέσματα του ίδιου μοντέλου για διαφορετικές τιμές παραμέτρων κλπ. Για να περάσουν τα δεδομένα ή τα αποτελέσματα από ένα αρχείο GAMS σε ένα αρχείο Excel και αντίστροφα πρέπει πρώτα να περάσουν από ένα αρχείο GDX. Μέσω του εργαλείου 'GDXXRW.exe' γίνεται η μεταφορά από το GAMS στο Excel και μέσω των εντολών 'execute_unload' και 'execute' το αντίστροφο. Πρώτα, πρέπει να δημιουργηθεί το ενδιάμεσο αρχείο, το οποίο πρέπει να έχει το ίδιο όνομα με το αρχείο excel αλλά με κατάληξη '.gdx', και να οριστεί εάν πρόκειται για αρχείο ανάγνωσης ή εγγραφής. Έπειτα δηλώνονται οι τύποι των στοιχείων, που πρόκειται να αναγνωστούν/εγγραφούν ('par'=parameter, 'var'=variable κτλ), καθώς και το επιθυμητό εύρος κελιών (πχ A1:A26 και E1:E26) του αρχείου excel, 'file_name.xls'. Τέλος, με την εντολή load ή unload γίνεται σαφές εάν το GAMS θα λάβει ή θα δώσει δεδομένα αντίστοιχα στο Excel. Η σύνταξη για τις δύο αυτές λειτουργίες φαίνεται παρακάτω:

- GAMS->Excel

```
$CALL GDXXRW.EXE file_name.xls par=parameter_name1
rng=A1:A26 par=parameter_name2 rng=E1:E26...

$GDXIN file_name.gdx

$LOAD parameter_name1 parameter_name2

$GDXIN
```

- Excel->GAMS

```
execute_unload 'file_name.gdx' parameter_name1
parameter_name2

execute 'gdxxrw.exe' file_name.gdx par= parameter_name1
rng=A1:A26 par=parameter_name2 rng=E1:E26...
```

4.2.8 Βρόχοι

Το GAMS μπορεί να πραγματοποιήσει μια σειρά υπολογισμών και να ληφθούν αποτελέσματα, τα οποία θα εμφανιστούν στο αρχείο εξόδου σε μορφή πίνακα στοιχείων. Με τη χρήση της εντολής 'Loop' ('βρόχος'), καθίσταται δυνατή

η εκτέλεση μιας σειράς υπολογισμών για τα στοιχεία ενός συνόλου. Η σύνταξη της εντολής στο GAMS είναι η ακόλουθη:

```
Loop ((sets_to_vary),  
Statement_to_execute  
) ;
```

Με την εντολή αυτή καθορίζονται τα σύνολα των στοιχείων ('sets_to_vary') και με βάση τους δείκτες ('indices') τους, θα γίνουν οι επαναλαμβανόμενοι υπολογισμοί βασιζόμενοι στην εντολή ('statement_to_execute') που ακολουθεί στην επόμενη γραμμή. Η γενική σύνταξη μιας δήλωσης βρόχου 'for' για παράδειγμα είναι η εξής:

```
for (scalar name = startvalue to endvalue,  
statements;  
) ;
```

Όπου:

- 'scalarname' είναι το όνομα της παραμέτρου, της οποίας η τιμή θα αλλάζει συνεχώς με σταθερό βήμα,
- 'startvalue' είναι η αρχική τιμή που θα λάβει η παράμετρος,
- 'endvalue' είναι η τελική της τιμή και όπου θα σταματήσουν οι υπολογισμοί,
- 'statements' είναι οι δηλώσεις στις οποίες εμπεριέχεται η εκάστοτε τιμή της παραμέτρου.

4.2.9 Σχόλια

Ένα σχόλιο ('comment') είναι ένα επεξηγηματικό κείμενο, που δεν υποβάλλεται σε επεξεργασία και δεν διατηρείται από τον υπολογιστή. Υπάρχουν τρεις τρόποι να συμπεριληφθούν τα σχόλια σε ένα πρόγραμμα GAMS, η επιλογή μεταξύ των οποίων είναι ένα θέμα μεμονωμένης προτίμησης ή χρησιμότητας. Ο πρώτος, αναφέρθηκε ήδη παραπάνω, πρόκειται να αρχίσει μια γραμμή με έναν αστερίσκο "*" στην πρώτη θέση χαρακτήρα. Οι υπόλοιποι χαρακτήρες στη γραμμή αγνοούνται αλλά τυπώνονται στο αρχείο output. Δεύτερον, τα σχόλια μπορούν να παρεμβληθούν μετά από τις δηλώσεις των οντοτήτων του GAMS. Ο τρίτος τρόπος πρόκειται να χρησιμοποιήσει τους ειδικούς οριοθέτες ('blocks'), που αναγκάζουν το GAMS να αγνοήσει ένα ολόκληρο τμήμα του προγράμματος. Το σύμβολο δολαρίου

‘\$’ πρέπει να είναι στην πρώτη θέση. Η αρχή ενός σχολίου πρέπει να ξεκινάει στην πρώτη γραμμή με τη φράση ‘\$ontext’ και να καταλήγει με τη φράση ‘\$offtext’.

4.2.10 Έξοδος στο GAMS

Η Έξοδος (‘Output’) στο GAMS περιέχει πολλές επιλογές για τον έλεγχο και την κατανόηση ενός μοντέλου. Η έξοδος από μια εφαρμογή του GAMS παράγεται σε ένα αρχείο το οποίο μπορεί να διαβαστεί χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε συντάκτη κειμένων. Η έξοδος, που δημιουργείται κατά τη διάρκεια του αρχικού ελέγχου του προγράμματος, καλείται σύνταξη (‘Compilation’). Περιέχει τα εξής μέρη:

- Αποτύπωση του προγράμματος

Η Αποτύπωση (‘Echo Print’) του προγράμματος εισάγεται στο πρώτο μέρος του αρχείου εξόδου και ουσιαστικά αποτελεί ένα αντίγραφο του αρχείου εισόδου, όπου απαριθμούνται οι γραμμές του αρχείου εισόδου, τοποθετώντας στην αρχή κάθε γραμμής το αντίστοιχο νούμερο της. Οι αριθμοί γραμμών αναφέρονται πάντα στο φυσικό αριθμό των γραμμών στο αρχείο εισαγωγής.

- Αναφορά σφαλμάτων

Η αποτελεσματική ανίχνευση και αποκατάσταση των σφαλμάτων (‘Error Report’) αποτελούν σημαντικά μέρη οποιουδήποτε συστήματος διαμόρφωσης. Η εμπειρία δείχνει ότι στις περισσότερες εντολές σύνταξης κατά τη διάρκεια των αρχικών σταδίων ανάπτυξης του μοντέλου ανιχνεύονται τα περισσότερα λάθη. Πολλά από τα χαρακτηριστικά λάθη που γίνονται με τις συμβατικές γλώσσες προγραμματισμού συνδέονται με έννοιες που δεν υπάρχουν στο GAMS και δημιουργούν προβλήματα στο χρόνο εκτέλεσης και είναι δύσκολο να εντοπιστούν. Στο GAMS, τα λάθη επισημαίνονται πολύ νωρίς και αναφέρονται με τρόπο κατανοητό προς στο χρήστη συμπεριλαμβανομένων σαφών προτάσεων για το πώς να διορθώσει το πρόβλημα, και να βρει τη προέλευση του λάθους. Όλα τα λάθη σημειώνονται με τέσσερις αστερίσκους «****» στην αρχή κάθε γραμμής στη λίστα εξόδου. Μετά την ανίχνευση του λάθους, πρέπει να γίνει η διόρθωση του και στην συνέχεια να γίνει η επανάληψη για την επίλυση του μοντέλου. Δεν μπορεί να λυθεί ένα μοντέλο ή να αποθηκευτεί ένα αρχείο εάν τα λάθη που έχουν ανιχνευθεί δεν έχουν λυθεί. Τα λάθη ομαδοποιούνται σε τρεις φάσεις στο GAMS: στη σύνταξη, στην εκτέλεση και στην επίλυση του μοντέλου. Στο τέλος, από την αποτύπωση του προγράμματος, ένας κατάλογος με αριθμημένα όλα τα λάθη που υπάρχουν, μαζί με μια περιγραφή της πιθανής αιτίας κάθε λάθους, θα τυπωθούν στο αρχείο εξόδου.

- Χάρτης αναφοράς συμβόλων

Ο Χάρτης Αναφοράς Συμβόλων ('Symbol Reference Map') απαριθμεί όλες τις εντολές δηλώσεων (σύνολα, παράμετροι, πίνακες, μεταβλητές, εξισώσεις, μοντέλα, αρχεία εξόδου κλπ) σε αλφαβητική σειρά, τα ομαδοποιεί ανάλογα με τον τύπο τους, απεικονίζει τον αριθμό της γραμμής όπου εμφανίζονται και κατηγοριοποιεί την κάθε τους εμφάνιση. Ο χάρτης αυτός είναι μια χρήσιμη παράμετρος του προγράμματος με πρακτική σημασία για εκείνους τους χρήστες, που εξετάζουν ένα μοντέλο που είναι φτιαγμένο από άλλον και θέλει να κάνει αλλαγές σε αυτό. Ο χάρτης αναφοράς συμβόλων μπορεί να εισαχθεί με την είσοδο μιας γραμμής που περιέχει το σύμβολο '\$onsymxref' στην αρχή του προγράμματος.

- Λίστα Εξισώσεων

Η Λίστα Εξισώσεων ('Equation Listing') παρέχει εξαιρετική χρησιμότητα στο πρόγραμμα. Παρουσιάζει με τρόπο αναλυτικό όλες τις εξισώσεις οι οποίες έχουν δηλωθεί στο αρχείο εισαγωγής. Συνήθως αναγράφονται σε μορφή μπλοκ, δηλαδή, σε κάθε μπλοκ αναγράφονται οι εξισώσεις υπολογισμού μιας συγκεκριμένης οντότητας για κάθε χρονική στιγμή ή κάθε διαφορετικό διάστημα. Όλοι οι όροι που εξαρτώνται από τις μεταβλητές οι οποίες περιέχονται στην εκάστοτε εξίσωση πηγαίνουν στο αριστερό μέρος ('Left Hand Side' – LHS), και οι σταθεροί όροι στο δεξί μέρος ('Right Hand Side' – RHS) της κάθε εξίσωσης. Συνήθως, οι πρώτες τρεις εξισώσεις παρουσιάζονται σε κάθε μπλοκ. Αν είναι παραπάνω από τρεις, τότε παραλείπονται οι υπόλοιπες και απλώς επισημαίνεται ο ακριβής αριθμός τους. Υπάρχει, φυσικά, η δυνατότητα ο χρήστης να ορίσει τον ελάχιστο αριθμό αναγραφής εξισώσεων για κάθε μπλοκ με χρήση της εντολής: `Option limrow = r ;` (με r, τον ελάχιστο επιθυμητό αριθμό εξισώσεων μπλοκ).

- Λίστα Μεταβλητών

Το επόμενο τμήμα του αρχείου λίστας είναι η Λίστα Μεταβλητών ('Column Listing'). Παρουσιάζει την αριθμητική τιμή των συντελεστών της κάθε μεταβλητής που εμφανίζεται σε κάθε περιορισμό-εξίσωση και ταξινομούνται κατά στήλη μπροστά από το όνομα της εξίσωσης όπου η εκάστοτε μεταβλητή εμφανίζεται. Σε κάθε μπλοκ μεταβλητών αναγράφονται οι τρεις πρώτες καταχωρήσεις για κάθε μεταβλητή, μαζί με τα όρια και τα επίπεδα τιμών. Υπάρχει, φυσικά, η δυνατότητα ο χρήστης να ορίσει τον ελάχιστο αριθμό αναγραφής στηλών για κάθε μπλοκ μεταβλητών με χρήση της εντολής: `Option limcol = c ;` (με c, τον ελάχιστο επιθυμητό αριθμό εξισώσεων μπλοκ). Επίσης αναγράφεται και το εύρος τιμών τις οποίες μπορεί να λάβει η κάθε μεταβλητή οι οποίες μπορεί να κυμαίνονται από απείρως αρνητικό ('- Minus Infinity'), μηδέν (0), γύρω από το μηδέν ('eps') έως και απείρως θετικό ('+ Plus Infinity') ή να είναι απροσδιόριστες ('Undefined'), μη διαθέσιμες ('Not Available') κλπ.

- Στατιστικά Μοντέλου

Τα Στατιστικά του Μοντέλου ('Model Statistics') παρέχουν πληροφορίες για το μέγεθος και τη γραμμικότητα του μοντέλου. Στην παρούσα μελέτη, υπολογίζεται ο συνολικός αριθμός των μπλοκ των εξισώσεων και μεταβλητών, ο αντίστοιχος αριθμός των μονών εξισώσεων και μεταβλητών και τέλος ο αριθμός των μη μηδενικών στοιχείων:

BLOCKS OF EQUATIONS	28	SINGLE EQUATIONS	39,797
BLOCKS OF VARIABLES	13	SINGLE VARIABLES	21,673
NON ZERO ELEMENTS	111,401		

4.2.11 Περίληψη επίλυσης

Το GAMS παρουσιάζει μια σύντομη Περίληψη της Επίλυσης ('Solve Summary'), όπου αναγράφονται:

- το Όνομα του Μοντέλου και των Μεταβλητών Απόφασης,
- το Είδος και την Κατεύθυνση της Επίλυσης,
- το Όνομα της Επίλυσης και τον αριθμό της γραμμής όπου ξεκινά η επίλυση,
- η Βέλτιστη τιμή της Αντικειμενικής Συνάρτησης,
- ο Πραγματικός Χρόνος και ο Μέγιστος Επιτρεπτός Χρόνος Επίλυσης
- ο Πραγματικός και ο Μέγιστος Επιτρεπτός Αριθμός Επαναλήψεων Επίλυσης
- η Κατάσταση της Επίλυσης ('Solver Status'), δηλαδή αν η επίλυση ολοκληρώθηκε κανονικά ('normal completion'), αν οι επαναλήψεις διακόπηκαν ('iteration interrupted'), αν ο χρόνος επίλυσης τελείωσε, αν ο επιλυτής δεν είναι ικανός να βρει λύσεις ('non capable'), αν η επίλυση διεκόπη από το χρήστη κλπ
- η Κατάσταση του Μοντέλου ('Model Status'), δηλαδή αν οι τιμές που προέκυψαν είναι βέλτιστες ('optimal'), τοπικά βέλτιστες, απεριόριστες ('unbounded'), ακατόρθωτες ('infeasible'), τοπικά ακατόρθωτες, ενδιάμεσα ακατόρθωτες, ακέραιες, ενδιάμεσα μη ακέραιες, άγνωστες λόγω κάποιου λάθους ('unknown'), καμία λύση [51].

4.3 Διατύπωση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σε GAMS

Λαμβάνοντας υπόψη τις μαθηματικές σχέσεις, που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3, κατασκευάζουμε τώρα το αντίστοιχο μοντέλο του GAMS. Η κατασκευή αυτή συνίσταται στο να ορίσουμε ποια θα είναι τα εξεταζόμενα σύνολα, ποιες θα είναι οι παράμετροι του προβλήματος ή αλλιώς τα δεδομένα εισόδου του αλγορίθμου, ποιες θα είναι οι μεταβλητές του μοντέλου, δηλαδή τα δεδομένα εξόδου, ποιες οι βοηθητικές παράμετροι, που θα βοηθήσουν στην διατύπωση του προβλήματος αλλά και πώς θα διατυπωθούν οι περιορισμοί και η αντικειμενική συνάρτηση σε μορφή κατανοητή από το GAMS.

4.3.1 Σύνολα

Περιγραφή και Τιμές Συνόλου	Σύμβολο Συνόλου
Ηλεκτρικά οχήματα, που έχουν συνάψει συμβόλαιο με τον aggregator. [1,N]	i
Ώρες μίας ημέρας προγραμματισμού. [1,24] Η πρώτη ώρα δεν είναι εν γένει η πρώτη ώρα της ημερολογιακής ημέρας.	time
Βοηθητικό σύνολο, για τον ορισμό πίνακα-στήλης, ή πίνακα-γραμμής [1]	t

4.3.2 Σταθερές

Περιγραφή και Μονάδες Μέτρησης Σταθεράς	Σύμβολο Σταθεράς
Αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων [φυσικός αριθμός]	N
Κόστος αντικατάστασης συσσωρευτή [χρηματικές μονάδες, πχ €,\$/kWh]	BatC
Κόστος φθοράς συσσωρευτή [χρηματικές μονάδες/kWh]	DC
Βαθμός απόδοσης φορτιστή [ποσοστό 0...1]	Efi

Τιμή χρέωσης ηλεκτρικής ενέργειας οδηγού [χρηματικές μονάδες/kWh]	Mk
Μέγιστο προβλεπόμενο ημερήσιο καθαρό* φορτίο [MW]	maxL
Ελάχιστο προβλεπόμενο ημερήσιο καθαρό* φορτίο [MW]	minL

*καθαρό φορτίο εννοούμε το φορτίο της κατανάλωσης μείον την παραγωγή από ΑΠΕ.

4.3.3 Παράμετροι

Διακρίνουμε 3 κατηγορίες παραμέτρων:

- Παράμετροι εισόδου: αποτελούν τα δεδομένα του προβλήματος
- Παράμετροι εξόδου: παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της επίλυσης
- Βοηθητικές παράμετροι: δεν έχουν κάποια ιδιαίτερη φυσική σημασία, απλώς βοηθούν στη διατύπωση του προβλήματος, ώστε αυτό να γίνεται αποδεκτό από το GAMS

Περιγραφή και Μονάδες Μέτρησης Παραμέτρου εισόδου	Σύμβολο Παραμέτρου Εισόδου
Μέγιστη δυνατή ισχύς του φορτιστή [kW]	MP(i, time)
Χωρητικότητα συσσωρευτή [kWh]	Mc(i, t)
Ωριαίο προβλεπόμενο καθαρό φορτίο [MW]	L(time)
Αναμενόμενο ποσοστό κάτω ρύθμισης [ποσοστό 0..1]	ExD(time)
Αναμενόμενο ποσοστό άνω ρύθμισης [ποσοστό 0..1]	ExU(time)
Αναμενόμενο ποσοστό στρεφόμενης εφεδρείας [ποσοστό 0..1]	ExR(time)
Προβλεπόμενη τιμή ενέργειας [χρηματικές μονάδες/kWh]	P(time)
Προβλεπόμενη τιμή κάτω ρύθμισης [χρηματικές μονάδες/kW]	PRd(time)
Προβλεπόμενη τιμή άνω ρύθμισης [χρηματικές μονάδες/kW]	PRu(time)

Προβλεπόμενη τιμή στρεφόμενης εφεδρείας [χρηματικές μονάδες/kW]	$PRr (time)$
Στάθμη φόρτισης στην αρχή της ημέρας [kWh]	$SOCI (i, time)$
Καταναλισκόμενη ενέργεια για ταξίδια [kWh]	$Trips (i, time)$
Καταναλισκόμενη ενέργεια για το ταξίδι επιστροφής [kWh]	$Trip2 (i, time)$
Συνδεδεμένο ή εν κινήσει όχημα [Διαδική παράμετρος 1 ή 0]	$plug (i, time)$
Πιθανότητα απρόσμενης αναχώρησης [ποσοστό 0..1]	$Dep (i, time)$
Συντελεστής υποδιαστασιολόγησης λόγω απρόσμενων αναχωρήσεων [αδιάστατος πραγματικός αριθμός]	$Comp (i, time)$

Περιγραφή και Μονάδες Μέτρησης Παραμέτρου Εξόδου	Σύμβολο Παραμέτρου Εξόδου
Επιθυμητό σημείο λειτουργίας aggregator [MW]	$POPsum (t, time)$
Όριο κάτω ρύθμισης [MW]	$POPRd (t, time)$
Όριο άνω ρύθμισης [MW]	$POPRu (t, time)$
Όριο στρεφόμενης εφεδρείας [MW]	$POPRuRr (t, time)$
Μέγιστο επιπρόσθετο φορτίο λόγω φόρτισης οχημάτων [MW]	$MaxAddL (t, time)$

Περιγραφή και Μονάδες Μέτρησης Βοηθητικής Παραμέτρου	Σύμβολο Βοηθητικής Παραμέτρου
Συσσωρευτικό άθροισμα καταναλισκόμενης ενέργειας στα ταξίδια για τις ώρες 1 έως t-1 [kWh]	$aTrips (i, time)$
Συσσωρευτικό άθροισμα καταναλισκόμενης ενέργειας στα ταξίδια για τις ώρες 1 έως και t [kWh]	$aTripsH (i, time)$
Η παράμετρος-στήλη Mci με τη μορφή πίνακα 24 στηλών	$McT (i, time)$
Συνδεδεμένο ή εν κινήσει όχημα τις ώρες μεταξύ των 2 προγραμματισμένων ταξιδιών [Διαδική παράμετρος 1 ή 0]	$Tbet (i, time)$
Συνδεδεμένο ή εν κινήσει όχημα τις ώρες πριν το πρώτο ταξίδι [Διαδική παράμετρος 1 ή 0]	$Tprin (i, time)$

4.3.4 Μεταβλητές

Διακρίνουμε και στην περίπτωση των μεταβλητών δύο κατηγορίες:

- Μεταβλητές απόφασης: αποτελούν τις κύριες μεταβλητές, οι τιμές των οποίων θα μεγιστοποιήσουν την αντικειμενική συνάρτηση
- Βοηθητικές Μεταβλητές: αποτελούν μεταβλητές, εφόσον η τιμή τους δεν είναι εκ των προτέρων γνωστή, αλλά δεν επηρεάζουν άμεσα τη βελτιστοποίηση, εφόσον προκύπτουν εμμέσως από τις κύριες μεταβλητές. Μπορεί να έχουν ή να μην έχουν κάποια φυσική σημασία, βοηθούν όμως στη διατύπωση του προβλήματος.

Περιγραφή και Μονάδες Μέτρησης Μεταβλητής Απόφασης	Σύμβολο Μεταβλητής Απόφασης
Επιθυμητό σημείο λειτουργίας οχήματος [kW]	$POP(i, time)$
Μέγιστη διαθέσιμη ισχύς οχήματος για κάτω ρύθμιση [kW]	$MxAP(i, time)$
Μέγιστη διαθέσιμη ισχύς οχήματος για άνω ρύθμιση [kW]	$MnAP(i, time)$
Μέγιστη διαθέσιμη ισχύς οχήματος για στρεφόμενη εφεδρεία [kW]	$RsRP(i, time)$

Περιγραφή και Μονάδες Μέτρησης Βοηθητικής Μεταβλητής	Σύμβολο Βοηθητικής Μεταβλητής
Αναμενόμενη ανταλασσόμενη ενέργεια μεταξύ δικτύου-οχήματος [kWh]	$EFP(i, time)$
Συσσωρευτικό άθροισμα της μεταβλητής $EFP_i(i, time)$ για τις ώρες 1 έως και t [kWh]	$aEFP(i, time)$
Αναμενόμενη στάθμη φόρτισης οχήματος [kWh]	$SOC(i, time)$
Μέγιστη διαθέσιμη ισχύς aggregator για κάτω ρύθμιση [kW]	$Rd(i, time)$
Μέγιστη διαθέσιμη ισχύς aggregator για άνω ρύθμιση [kW]	$Ru(i, time)$
Μέγιστη διαθέσιμη ισχύς aggregator για στρεφόμενη εφεδρεία [kW]	$Rr(i, time)$
Μεταβλητή σχετιζόμενη με την αναμενόμενη αξία της φθοράς του συσσωρευτή [χρηματικές μονάδες]	$Deg(i, time)$

4.3.5 Εξισώσεις μοντέλου

Περιγραφή εξίσωσης	Τύπος εξίσωσης
Μέγιστη διαθέσιμη ισχύς aggregator για κάτω ρύθμιση	$R_u(t, time) = e = \text{sum}(i, MnAP(i, time));$
Μέγιστη διαθέσιμη ισχύς aggregator για άνω ρύθμιση	$R_d(t, time) = e = \text{sum}(i, MxAP(i, time));$
Μέγιστη διαθέσιμη ισχύς aggregator για στρεφόμενη εφεδρεία	$R_r(t, time) = e = \text{sum}(i, RsRP(i, time));$
Αναμενόμενη ανταλασσόμενη ενέργεια μεταξύ δικτύου και οχήματος	$EFP(i, time) = e = MxAP(i, time) * ExD(time) + POP(i, time) - MnAP(i, time) * ExU(time) - RsRP(i, time) * ExR(time);$
Αδυναμία συμμετοχής εν κινήσει οχήματος σε επικουρικές υπηρεσίες	$POP(i, time) * (1 - \text{plug}(i, time)) = e = 0;$
Αδυναμία συμμετοχής εν κινήσει οχήματος στην κάτω ρύθμιση	$MxAP(i, time) * (1 - \text{plug}(i, time)) = e = 0;$
Αδυναμία συμμετοχής εν κινήσει οχήματος στην άνω ρύθμιση	$MnAP(i, time) * (1 - \text{plug}(i, time)) = e = 0;$
Αδυναμία συμμετοχής εν κινήσει οχήματος στη στρεφόμενη εφεδρεία	$RsRP(i, time) * (1 - \text{plug}(i, time)) = e = 0;$
Αδυναμία συμμετοχής εν κινήσει οχήματος σε επικουρικές υπηρεσίες	$POP(i, time) * (1 - \text{plug}(i, time)) = e = 0;$
Όρια ισχύος φορτιστή	$MxAP(i, time) + POP(i, time) = l = MP(i, time);$
Όρια ισχύος φορτιστή	$MnAP(i, time) = l = POP(i, time) + MP(i, time);$
Όρια ισχύος φορτιστή	$RsRP(i, time) = l = POP(i, time) + MP(i, time) - MnAP(i, time);$
Όρια ισχύος φορτιστή	$POP(i, time) = g = -MP(i, time);$
Όρια χωρητικότητας συσσωρευτή	$(MxAP(i, time) + POP(i, time)) * Efi * \text{Comp}(i, time) + SOC(i, time) = l = McT(i, time);$
Όρια χωρητικότητας συσσωρευτή	$(POP(i, time) - MnAP(i, time) - RsRP(i, time)) * Efi * \text{Comp}(i, time) + SOC(i, time) = g = 0;$
Όρια χωρητικότητας συσσωρευτή	$(EFP(i, time) + aEFP(i, time)) * Efi - aTripsH(i, time) + McT(i, time) = l = McT(i, time);$

Όρια χωρητικότητας συσσωρευτή	$(EFP(i, time) + aEFP(i, time)) * Efi - aTripsH(i, time) + McT(i, time) = g = 0;$
Αναδρομικός ορισμός βοηθητικής μεταβλητής aEFP(i,time)	$aEFP(i, '1') = e = 0;$
Αναδρομικός ορισμός βοηθητικής μεταβλητής aEFP(i,time)	$aEFP(i, time) = e = aEFP(i, time-1) + Comp(i, time-1) * EFP(i, time-1);$
Ορισμός στάθμης φόρτισης οχήματος	$SOC(i, time) = e = McT(i, time) - aTrips(i, time) + Efi * aEFP(i, time);$
Ορισμός βοηθητικής μεταβλητής Deg(i,time)	$Deg(i, time) = g = -DCi * (EFPi(i, time)) * Comp(i, time) / Efi;$
Ορισμός βοηθητικής μεταβλητής Deg(i,time)	$Deg(i, time) = g = 0$
Μέγιστο δυνατό επιπρόσθετο φορτίο	$sum(i, POP(i, time)) = l = (maxL - L(time)) / (maxL - minL) * sum(i, plug(i, time)) * MP;$
Απαίτηση οδηγών για επάρκεια φόρτισης για το 2 ^ο ταξίδι	$SOC(i, time) = g = betT(i, time) * Trip2(i, time);$
Απαίτηση οδηγών για πλήρη φόρτιση πριν το 1 ^ο ταξίδι	$SOCi(i, '24') + Efi * EFP(i, '24') * Comp(i, '24') = g = Mc(i, t);$
Απαίτηση οδηγών για πλήρη φόρτιση πριν το 1 ^ο ταξίδι	$SOC(i, time) = g = Tprin(i, time) * McT(i, time);$

4.3.5 Αντικειμενική συνάρτηση και επίλυση

Περιγραφή όρου αντικειμενικής συνάρτησης	Όρος αντικειμενικής συνάρτησης
Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης, μέγιστο δυνατό κέρδος aggregator	Prof=

Αμοιβή διαθέσιμης ισχύος για κάτω ρύθμιση	$\text{sum}(\text{time}, \text{PRd}(t, \text{time}) * \text{Rd}(\text{time}))$
Αμοιβή διαθέσιμης ισχύος για άνω ρύθμιση	$+\text{sum}(\text{time}, \text{PRu}(\text{time}) * \text{Ru}(\text{time}))$
Αμοιβή διαθέσιμης ισχύος για στρεφόμενη εφεδρεία	$+\text{sum}(\text{time}, \text{PRr}(\text{time}) * \text{Rr}(\text{time}))$
Αμοιβή για παροχή ενέργειας στα οχήματα	$+Mk * (\text{sum}((i, \text{time}), \text{EFP}(i, \text{time})))$
Αμοιβή/έξοδα για πώληση/αγορά ενέργειας	$-\text{sum}((i, \text{time}), P(\text{time}) * \text{EFP}(i, \text{time}))$
Έξοδα αποζημίωσης για φθορά συσσωρευτών	$-\text{sum}((i, \text{time}), \text{Deg}(i, \text{time}));$

Το μοντέλο, που προκύπτει επιλύεται γραμμικά, καθώς δεν συμπεριλαμβάνονται μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών του. Πρέπει να σημειωθεί ότι το κύριο χαρακτηριστικό των προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού είναι ότι σε όλες τις περιπτώσεις δίνουν τη βέλτιστη λύση προσδίδοντας στην επίλυση τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια. Συγκεκριμένα το μοντέλο επιλύθηκε ως γραμμικό πρόβλημα (Linear Program), καθώς δεν περιλαμβάνει μη γραμμικούς όρους ή διακριτές (δυναδικές ή ακέραιες) μεταβλητές. Ως επιλυτής (solver) της προσομοίωσης επιλέχθηκε ο CPLEX. Ο CPLEX είναι ένας ισχυρότατος και σταθερός solver του GAMS που επιτρέπει στο χρήστη να συνδυάσει τις υψηλές δυνατότητες του GAMS με τη δύναμη επιλυτών CPLEX. Οι επιλυτές CPLEX είναι αλγόριθμοι σχεδιασμένοι για την επίλυση μεγάλων και δύσκολων προγραμμάτων γρήγορα και με την ελάχιστη παρέμβαση του χρήστη. Στην περίπτωση που ο χρήστης θέλει να ρυθμίσει τις επιλογές του αλγόριθμου ώστε να βελτιώσει την απόδοση, ο CPLEX παρέχει πρόσβαση σε όλες τις ρυθμιστικές παραμέτρους μέσω ενός αρχείου επιλογής. Επιπλέον υπάρχει επιλογή που επιτρέπει την επίλυση διαφορετικών αλγόριθμων παράλληλα.

5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

5.1 Σκοπός κεφαλαίου

Για να ελέγξουμε την αποτελεσματικότητα των αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, πραγματοποιούμε μία προσομοίωση αναφερόμενη σε ένα στόλο 10.000 ηλεκτρικών οχημάτων στην πολιτεία του Τέξας (Texas, US-TX) των Η.Π.Α, Επιλέξαμε την περίπτωση αυτή, καθότι στην ευρύτερη περιοχή του Τέξας και ειδικά στην πόλη Houston, έχουν ήδη αναληφθεί πολλές πρωτοβουλίες στήριξης της διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων, όπως πχ το δίκτυο σταθμών φόρτισης eVgo [52] και επομένως είναι αρκετά ρεαλιστικό να υποθέσουμε ότι η V2G λειτουργία μπορεί στο εγγύς μέλλον να βρει εφαρμογή σε μεγάλο βαθμό. Επιπλέον, συγκεκριμένα δομικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά της αγοράς ενέργειας και των επικουρικών υπηρεσιών στην πολιτεία του Τέξας, όπως πχ το ότι η αγορά μετρά σχεδόν 18 χρόνια, από τότε που έχει απελευθερωθεί (1995) [53], η ύπαρξη ξεχωριστών αγορών άνω και κάτω ρύθμισης αλλά και η δυνατότητα προσφοράς υπηρεσιών από την πλευρά του φορτίου (demand response), μπορούν να καταδείξουν τα πλεονεκτήματα, που προκύπτουν από την εφαρμογή των αλγορίθμων.

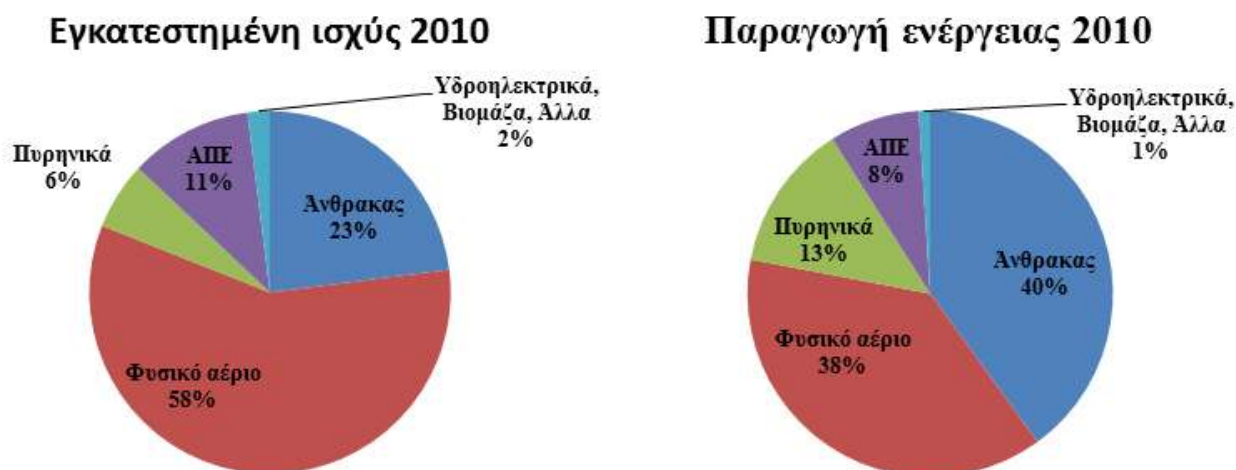
5.2 Το σύστημα ERCOT

Το Τέξας είναι μία από τις 50 πολιτείες των ΗΠΑ, η οποία βρίσκεται στο νότιο κομμάτι της χώρας, συνορεύει με το Μεξικό και έχει 25,7 εκατομμύρια κατοίκους. Ο Διαχειριστής του Συστήματος Μεταφοράς (TSO) της πολιτείας ονομάζεται ERCOT (Electric Reliability Council Of Texas) και επιβλέπει τη ροή ισχύος σε 23 εκατομμύρια πελάτες στο Τέξας, αντιπροσωπεύοντας το 85% του συνολικού ηλεκτρικού φορτίου. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του δικτύου της το Μάρτιο του 2010 έφτανε τα 82,672GW, προερχόμενα από 550 μονάδες παραγωγής. Κάθε ώρα, υπάρχει κατά μέσο όρο απαίτηση για 800 MW τόσο άνω όσο και κάτω ρύθμισης. Η ελάχιστη απαιτούμενη στρεφόμενη εφεδρεία κάθε ώρα έχει οριστεί στα 2.300 MW, αποτέλεσμα που αντικατοπτρίζει την απαραίτητη ποσότητα στρεφόμενης εφεδρείας, η οποία απαιτείται, ώστε να αποφευχθεί η αποκοπή σημαντικού φορτίου ύστερα από την ταυτόχρονη παύση λειτουργίας των δύο μεγαλύτερων μονάδων

παραγωγής του συστήματος. Από το 1995 η ERCOT είναι μία μη κερδοσκοπική επιχείρηση, που διοικείται από ένα συμβούλιο διευθυντών και είναι υπόλογη στην δημόσια κοινωφελή αρχή, που ονομάζεται PUCT (Public Utility Commission of Texas) και την ευρύτερη νομοθεσία της πολιτείας του Τέξας. Οι τρεις βασικοί στόχοι της ERCOT είναι:

- Να εξασφαλίζει ότι το δίκτυο είναι σε θέση να εξυπηρετήσει τις σχεδιασμένες μεταφορές ενέργειας. Η ERCOT ελέγχει τα προγράμματα, που έχουν υποβληθεί από τους αγοραστές και τους πωλητές της χονδρεμπορικής αγοράς ηλεκτρισμού για την επόμενη μέρα και επιβεβαιώνει ότι το σύστημα μπορεί να ακολουθήσει αυτά τα προγράμματα, δημιουργώντας, αν χρειαστεί, μία νέα αγορά για να καλύψει τα κενά.
- Να εξασφαλίζει την αξιοπιστία του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η ERCOT επιβλέπει την εισερχόμενη και εξερχόμενη ροή ισχύος στο δίκτυο, εκδίδοντας οδηγίες στις εταιρίες παραγωγής αλλά και μεταφοράς ώστε να διατηρείται η ισορροπία.
- Να επιβλέπει τη λειτουργία της λιανικής αγοράς, δρώντας ως ένας κεντρικός κόμβος για όλες τις συναλλαγές. Όταν ένας τελικός καταναλωτής επιλέγει έναν πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας, η ERCOT εξασφαλίζει ότι όλες οι απαραίτητες πληροφορίες για τη συναλλαγή αποστέλλονται έγκαιρα στις διάφορες ενδιαφερόμενες οντότητες [53].

Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται κάποια βασικά στοιχεία για τη λειτουργία του συστήματος της ERCOT:



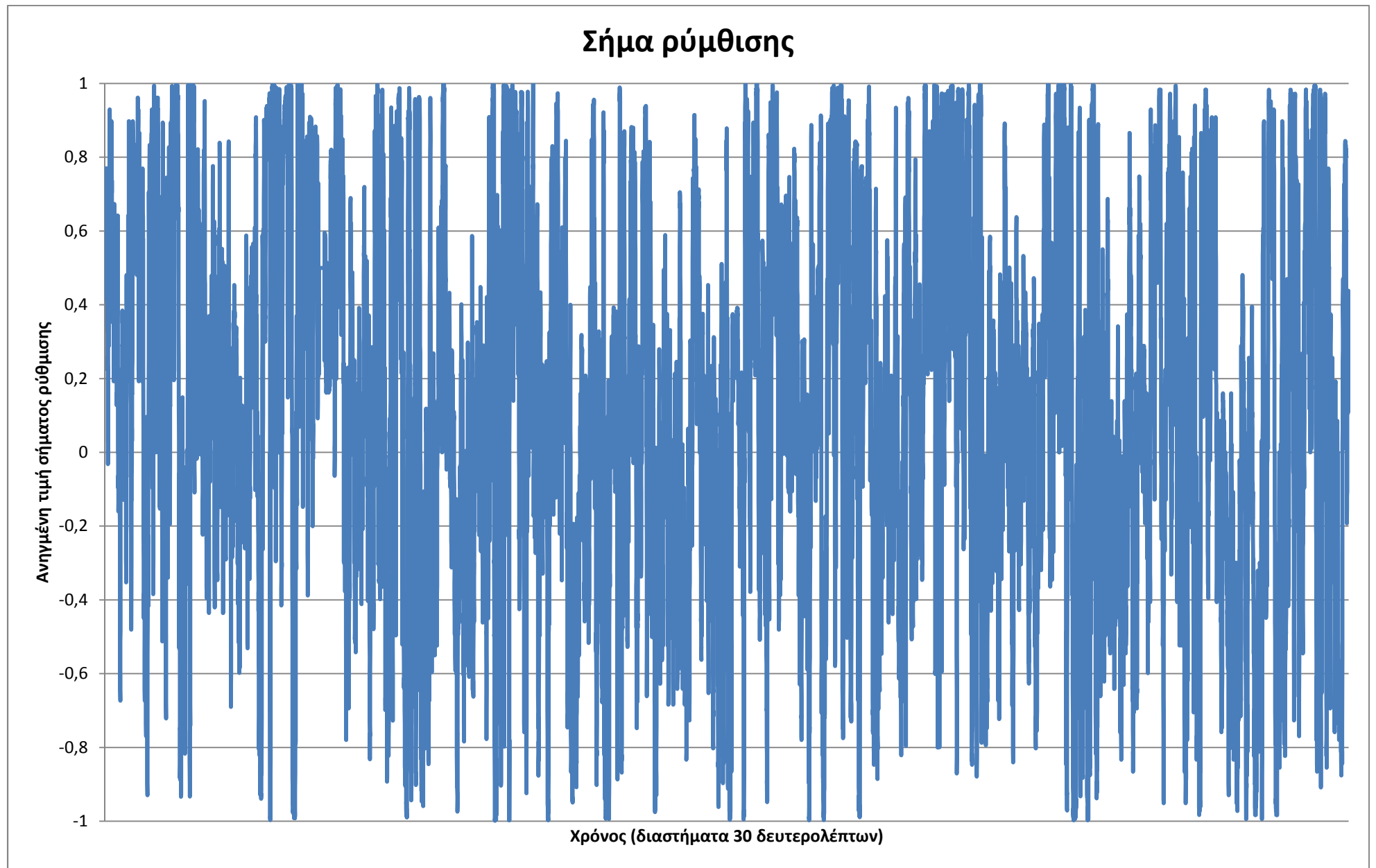
Εικόνα 5.2.1: Εγκατεστημένη ισχύς και ενέργεια, που παράχθηκε για το έτος 2010 στο ηλεκτρικό δίκτυο της ERCOT [54]

5.3 Παραδοχές και δεδομένα εισόδου

Κοιτώντας τη δομή των αλγορίθμων, διαπιστώνουμε ότι τα απαραίτητα αριθμητικά στοιχεία, που σχετίζονται με το σύστημα της ERCOT και πρέπει να διαθέτουμε για να είμαστε σε θέση να τρέξουμε μία προσομοίωση είναι τα εξής:

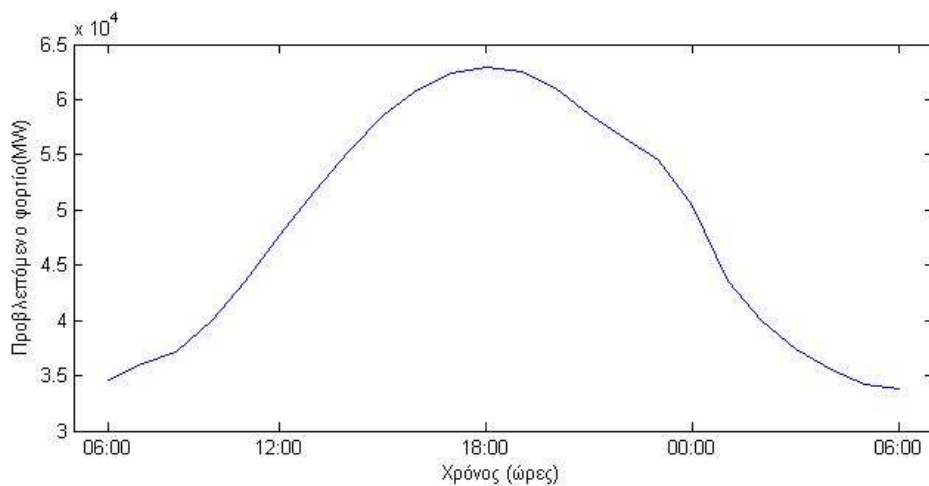
- Προβλέψεις για τις ωριαίες τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας της επόμενης μέρας
- Προβλέψεις για τις ωριαίες τιμές της κάτω ρύθμισης. Οι τιμές αυτές είναι διαφορετικές από αυτές για την άνω ρύθμιση, εφόσον υπάρχουν δύο ξεχωριστές αγορές
- Προβλέψεις για τις ωριαίες τιμές της άνω ρύθμισης
- Προβλέψεις για τις ωριαίες τιμές της στρεφόμενης εφεδρείας
- Προβλέψεις για το ωριαίο φορτίο
- Προβλέψεις για την παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ, καθώς στην ανάλυση μας χρησιμοποιούμε το καθαρό φορτίο
- Προβλέψεις για το σήμα ρύθμισης αλλά και για τη ζήτηση στρεφόμενης εφεδρείας

Οι προβλέψεις για το φορτίο της επόμενης μέρας, καθώς και οι προβλέψεις για την παραγωγή των ΑΠΕ είναι διαθέσιμες από το ίδιο το σύστημα της ERCOT και μπορούν να βρεθούν στο επίσημο site [55]. Οι προβλέψεις για τις τιμές της ενέργειας και των επικουρικών υπηρεσιών, θεωρούμε ότι γίνονται από τον aggregator μέσω κάποιου εργαλείου πρόβλεψης, που διαθέτει. Οι μέθοδοι πρόβλεψης τιμών δεν αποτελούν πεδίο έρευνας της παρούσας εργασίας, επομένως θα υποθέσουμε ότι ο aggregator διαθέτει έναν τρόπο να προβλέπει με 100% ακρίβεια τα παραπάνω μεγέθη, και επομένως θα πάρουμε τις πραγματικές τιμές ως προβλέψεις, σαν να τις γνωρίζαμε δηλαδή εκ των προτέρων. Για την πρόβλεψη του σήματος ρύθμισης σύμφωνα με τη σχέση (3.3) και (3.4) χρειαζόμαστε ιστορικά δεδομένα, που δυστυχώς δεν ήταν δυνατόν να βρούμε, καθώς τα στοιχεία αυτά δεν δημοσιοποιούνται. Βασίζομαστε, επομένως στη στατιστική ανάλυση του πραγματικού σήματος ρύθμισης, που έστειλε ο διαχειριστής του συστήματος της Καλιφόρνια (CaISO) κατά το πρώτο παγκόσμιο πείραμα της V2G λειτουργίας από το πανεπιστήμιο του Delaware και είναι διαθέσιμο στο διαδίκτυο [56]. Το σήμα αυτό είναι διάρκειας 12 ημερών και υποδεικνύει κάθε 30 δευτερόλεπτα την ανά μονάδα ποσότητα άνω ή κάτω ρύθμισης, που ζητήθηκε από ένα συνδεδεμένο στο δίκτυο όχημα και φαίνεται στην εικόνα 5.3.1. Αξίζει να αναφέρουμε ότι πρόκειται για ένα σήμα ρύθμισης, που έχει θετικό μέσο όρο (ίσο με 0,1247), πράγμα που σημαίνει ότι ζητούνται ελαφρώς μεγαλύτερες ποσότητες κάτω ρύθμισης από ότι άνω. Για την πρόβλεψη της ζήτησης στρεφόμενης εφεδρείας, χρησιμοποιώντας τη σχέση (3.5) και λαμβάνοντας υπόψη ότι κατά το έτος 2010 ζητήθηκε στο σύστημα της ERCOT μόλις 36 φορές κάποια ποσότητα στρεφόμενης εφεδρείας με διάρκεια από 5 έως 122 λεπτά [55] θεωρούμε έναν πολύ μικρό συντελεστή πιθανότητας, σταθερό για όλες τις ώρες της ημέρας προγραμματισμού, ίσο με 0,001124.

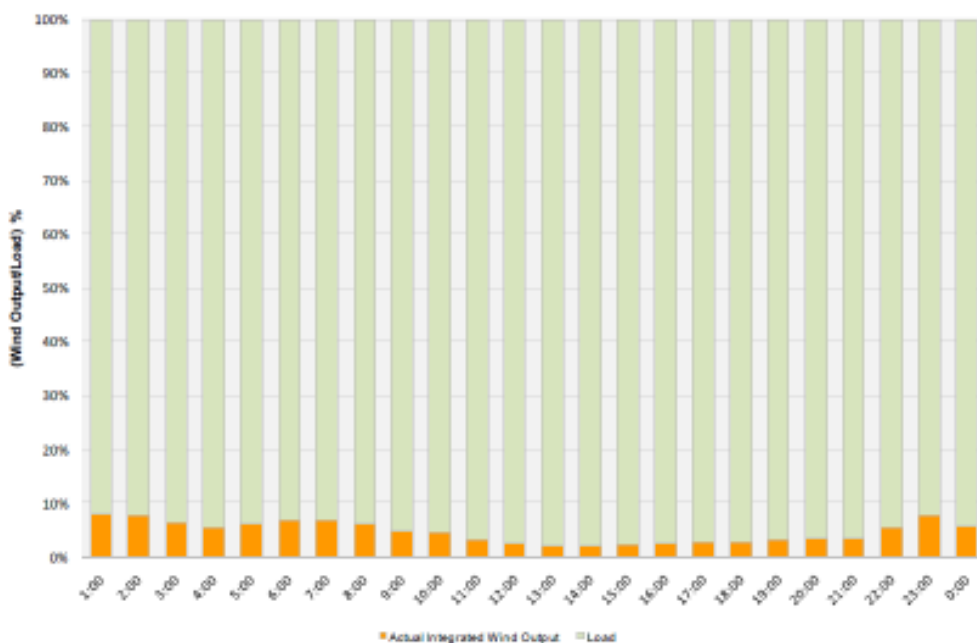


Εικόνα 5.3.1: Το σήμα ρύθμισης, από τη στατιστική επεξεργασία του οποίου, υπολογίσαμε τις αναμενόμενες τιμές άνω και κάτω ρύθμισης

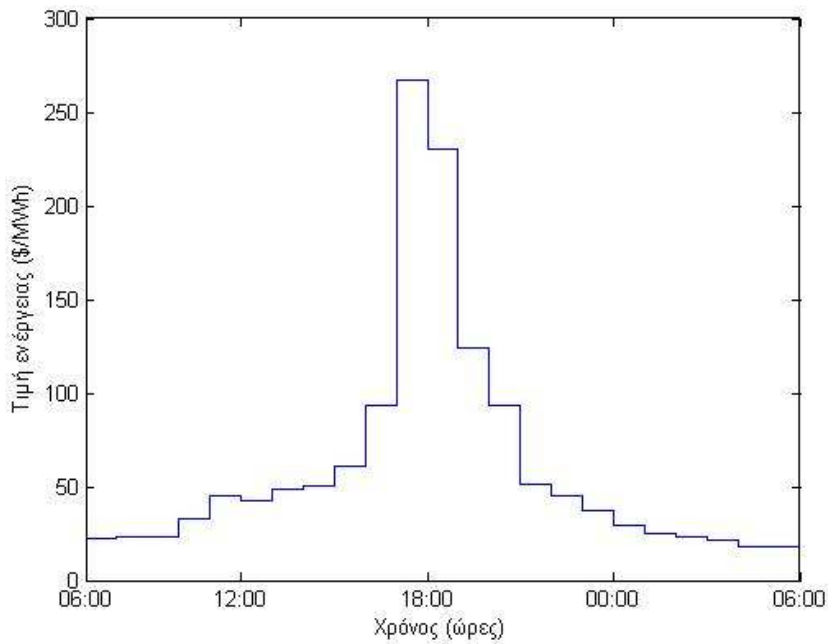
Για λόγους, που θα γίνουν κατανοητοί παρακάτω κάνουμε την εξής σύμβαση, που ακολουθούμε από εδώ και στο εξής όταν αναφερόμαστε σε μία ημέρα: Θεωρούμε ότι μία ημέρα προγραμματισμού ξεκινά στις 06:00 πμ και όχι στις 00:00, όπως συμβαίνει συνήθως στις αγορές ηλεκτρισμού αλλά και ειδικά στην περίπτωση της ERCOT. Για την προσομοίωση επιλέγουμε λοιπόν, τα μεγέθη για τις ημέρες 2 και 3 Αυγούστου 2010 (2/8/2010 από 06:00 έως 24:00 και 3/8/2010 από 01:00 έως 05:00), διότι τότε η διαφορές μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και των διαφόρων επικουρικών υπηρεσιών είναι αρκετά μεγάλες, γεγονός που μπορεί να επισημάνει και να υπογραμμίσει τα πλεονεκτήματα των αλγορίθμων. Με βάση τα παραπάνω έχουμε:



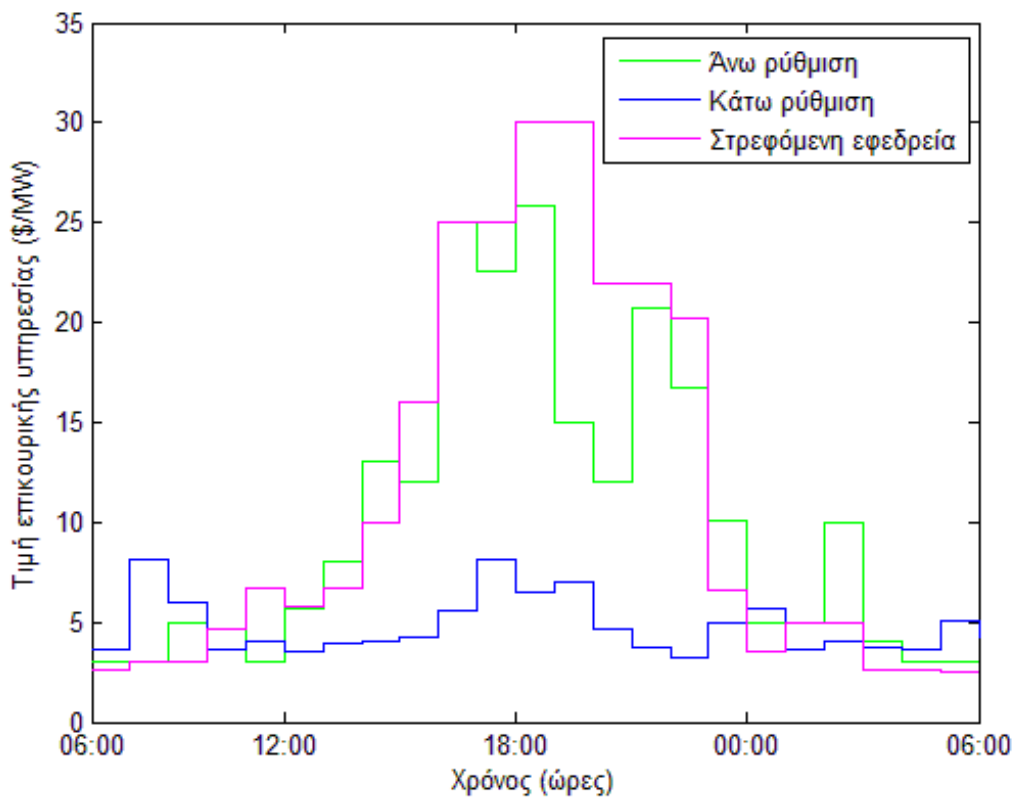
Εικόνα 5.3.2: Αναμενόμενο φορτίο για την ημέρα προγραμματισμού [57]



Εικόνα 5.3.3: Αναμενόμενη παραγωγή ΑΠΕ (αιολικά) ως ποσοστό του φορτίου για την ημέρα προγραμματισμού [58]



Εικόνα 5.3.4: Προβλεπόμενη τιμή της ενέργειας για την ημέρα προγραμματισμού [55]



Εικόνα 5.3.5: Προβλεπόμενες τιμές επικουρικών υπηρεσιών για την ημέρα προγραμματισμού [55]

Η παραδοχή, που κάνουμε είναι ότι ο aggregator καταθέτει τις προσφορές του σε μηδενική τιμή ανά MW για τις ποσότητες ισχύος και ανά MWh για τις ποσότητες ενέργειας, ώστε να διασφαλιστεί ότι οι προσφορές του θα γίνουν αποδεκτές από την ERCOT. Κάτι τέτοιο είναι ρεαλιστικό να υποτεθεί, καθώς οι προσφορές στη

χονδρεμπορική αγορά, που αφορούν σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας είναι μη-τιμολογούμενες και η V2G λειτουργία θα μπορούσε να θεωρηθεί ως μια μορφή εξοικονόμησης ενέργειας. Οι υπόλοιποι παράγοντες της αγοράς θεωρούμε ότι κάνουν τις ίδιες προσφορές, που θα έκαναν, χωρίς τη συμμετοχή του aggregator. Με τον τρόπο αυτό όμως θα προέκυπτε μία μείωση της τελικής τιμής των επικουρικών υπηρεσιών, εφόσον με την αποδοχή των μη τιμολογούμενων V2G ποσοτήτων ισχύος, οι απαιτήσεις του συστήματος θα καλύπτονταν νωρίτερα. Για λόγους απλότητας και για το λόγο ότι οι ποσότητες ισχύος, που μπορεί να προσφέρει ο aggregator εν σχέση με τις συνολικές απαιτήσεις του συστήματος είναι πολύ μικρές, αγνοούμε την επίδραση αυτή και θεωρούμε ότι οι οριακές τιμές θα διαμορφωθούν με τον ίδιο τρόπο, που πραγματικά διαμορφώθηκαν κατά την ημέρα προγραμματισμού.

Για την κατασκευή ενός υποθετικού στόλου 10.000 ηλεκτρικών οχημάτων, τα οποία έχει υπό την επίβλεψη του ο aggregator χρησιμοποιούμε 5 διαφορετικά οχήματα, που είναι αυτή τη στιγμή διαθέσιμα προς αγορά, προφανώς όμως χωρίς δυνατότητα αποστολής ενέργειας πίσω στο δίκτυο. Αν και όλα ανήκουν στην κατηγορία των BEVs, οι αλγόριθμοι θα μπορούσαν να δουλέψουν εξίσου καλά και με στόλους, που περιλαμβάνουν και άλλα είδη ηλεκτρικών οχημάτων, όπως τα PHEVs. Στην περίπτωση αυτή όμως, θα ήταν αναγκαίο να προστεθούν επιπλέον περιορισμοί, που έχουν να κάνουν με το κόστος των καυσίμων, ώστε η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα PHEVs να είναι οικονομικά συμφέρουσα. Τα χαρακτηριστικά των οχημάτων αυτών, που μας ενδιαφέρουν δίνονται παρακάτω:

Κατασκευαστής, Μοντέλο	Πλήθος	Χωρητικότητα συσσωρευτή (kWh)	Τεχνολογία συσσωρευτή	Κατανάλωση ενέργειας (kWh/km)
Tesla Roadster	500	53	Ιόντων λιθίου	0,127
Th!nk City	2000	26	Ιόντων λιθίου	0,157
BMW Mini-E	2000	30	Ιόντων λιθίου	0,14
Mitsubishi i-MiEV	2500	16	Ιόντων λιθίου	0,125
Nissan Leaf	3000	24	Ιόντων λιθίου	0,21

Το πλήθος του κάθε μοντέλου επιλέχθηκε ώστε να αντιπροσωπεύει ρεαλιστικά την απήχηση του καθενός στην αγορά, ενώ τα τεχνικά χαρακτηριστικά (χωρητικότητα συσσωρευτή και κατανάλωση ενέργειας) είναι αυτά που δίνονται σύμφωνα με τους κατασκευαστές στα επίσημα sites τους [59]-[63].



Εικόνα 5.3.6: Tesla Roadster [59]



Εικόνα 5.3.7: Th!nk City [60]



Εικόνα 5.3.8: BMW Mini-E [61]



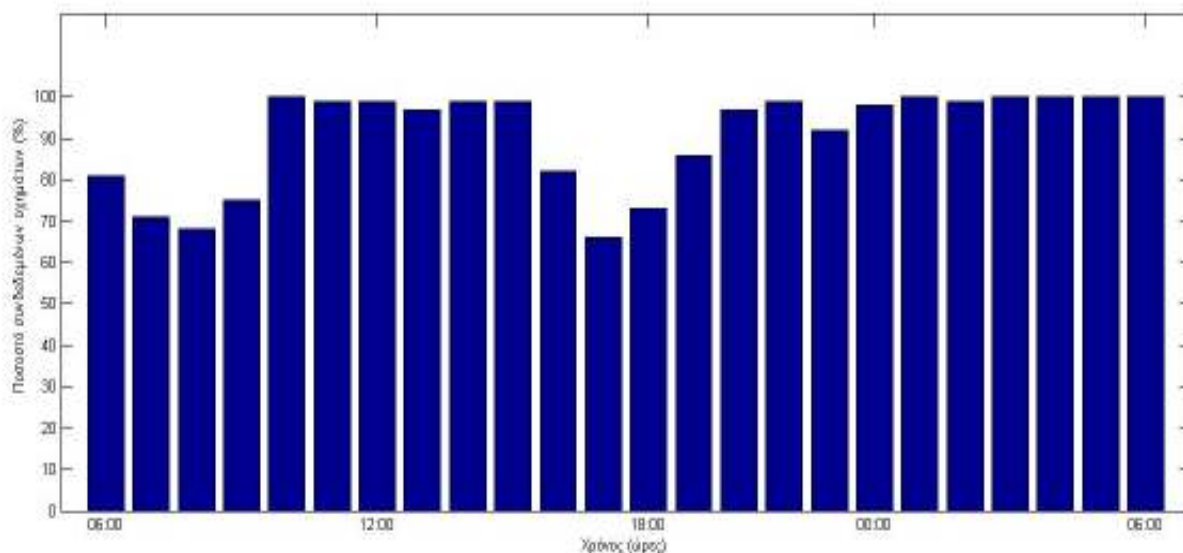
Εικόνα 5.3.9: Mitsubishi i-MiEV [62]



Εικόνα 5.3.10: Nissan Leaf [63]

Θεωρούμε ότι η ημέρα προγραμματισμού είναι μία κλασική καθημερινή ημέρα, κατά την οποία οι οδηγοί των οχημάτων πραγματοποιούν δύο προγραμματισμένα ταξίδια, ένα πρώτο από το σπίτι στη δουλειά και ένα δεύτερο από τη δουλειά στο σπίτι. Ο κάθε οδηγός έχει ένα μοναδικό οδηγικό προφίλ, το οποίο προσομοιώνεται με τη βοήθεια του Matlab και έχει τα εξής χαρακτηριστικά: ώρα αναχώρησης, ώρα άφιξης και διανυόμενη απόσταση πρώτου ταξιδιού και αντιστοίχως ώρα αναχώρησης, ώρα άφιξης και διανυόμενη απόσταση δεύτερου ταξιδιού. Για τη δημιουργία των οδηγικών αυτών προφίλ βασιστήκαμε σε στατιστικά στοιχεία για την οδηγική συμπεριφορά των αμερικανών πολιτών [64]. Τα πρωινά ταξίδια γίνονται μεταξύ 06:00 και 09:00 η ώρα, δικαιολογώντας έτσι την παραδοχή, που έχουμε κάνει ότι μια μέρα προγραμματισμού ξεκινά στις 06:00 και όχι στις 00:00. Τα απογευματινά ταξίδια γίνονται μεταξύ 16:00 και 19:00 η ώρα. Η ταχύτητα, που κινούνται τα οχήματα θεωρείται σταθερή για όλες τις ώρες της ημέρας και για όλα τα οχήματα και ίση με 46,5 km/h. Κάθε ώρα, που ένα όχημα πρόκειται να ταξιδέψει,

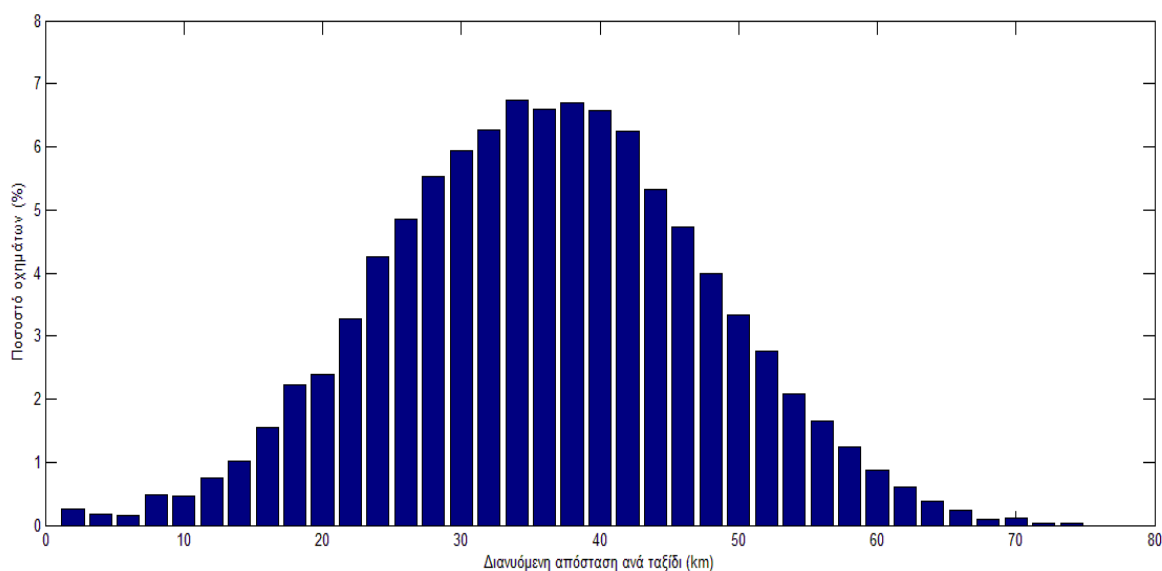
θεωρούμε ότι δεν είναι ικανό να συμμετάσχει στη V2G διαδικασία. Έχουμε θεωρήσει ότι οι ώρες των προγραμματισμένων ταξιδιών ακολουθούν την κατανομή Gauss. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το ποσοστό των ηλεκτρικών οχημάτων του στόλου, που αναμένουμε να είναι κάθε ώρα διαθέσιμο:



Εικόνα 5.3.11: Ποσοστό οχημάτων διαθέσιμων για V2G λειτουργία κάθε ώρα

Κάθε ώρα, που ένα όχημα είναι συνδεδεμένο στο δίκτυο και διαθέσιμο υπάρχει μία πιθανότητα απρόσμενης αναχώρησης. Αυτές οι πιθανότητες μπορούν να υπολογιστούν διαθέτοντας απαραίτητα στοιχεία οδηγικών συμπεριφορών. Στην παρακάτω εργασία του E.Sortomme [65] έχει γίνει η παραδοχή ότι κατά τις ώρες της εργασίας, υπάρχει 10% πιθανότητα για πρόωρη αναχώρηση και 20% πιθανότητα για ένα επιπλέον ταξίδι τις απογευματινές ώρες μετά τη δουλειά. Από τις 03:00 έως τις 06:00 θεωρείται ότι όλα τα οχήματα βρίσκονται συνδεδεμένα με 0% πιθανότητα να αναχωρήσουν για κάποιο ταξίδι. Οι προαναφερθείσες παραδοχές ακολουθούνται και στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Επίσης, θεωρούμε ότι η οδηγική συμπεριφορά του κάθε οδηγού είναι ανεξάρτητη από τις συμπεριφορές των υπολοίπων οδηγών, κάτι που είναι μια απλοποίηση, καθώς εφόσον οι οδηγοί βρίσκονται όλοι στην ίδια ευρύτερη περιοχή του Houston είναι προφανές ότι θα επηρεάζονται από την υπάρχουσα κίνηση στους δρόμους ή από ένα ατύχημα. Γεγονότα, που θα είχαν ως αποτέλεσμα μαζικές αναχωρήσεις (πχ φυσικές καταστροφές) δεν έχουν επίσης προβλεφθεί. Τα παραπάνω για να ληφθούν υπόψη χρειάζονται ανεπτυγμένα μοντέλα οδηγικής συμπεριφοράς, τα οποία θα προσέθεταν κάποιους επιπλέον περιορισμούς ή θα άλλαζαν τις τιμές της παραμέτρου $Comp(i,t)$, αφήνοντας όμως ίδια τη δομή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης.

Όσον αφορά, τις αναμενόμενες διανυόμενες αποστάσεις του κάθε ταξιδιού θεωρούμε ότι αυτές ακολουθούν την κατανομή Gauss με μέση τιμή τα 39,46 km ανά ταξίδι [64]. Κατά το ταξίδι από το σπίτι προς τη δουλειά και κατά το ταξίδι από τη δουλειά προς το σπίτι, θεωρούμε ότι διανύονται τα ίδια χιλιόμετρα. Η διακύμανση για την κατανομή ορίστηκε κατάλληλη ώστε η μικρότερη διανυόμενη απόσταση να είναι 2 km, ενώ η μέγιστη 74 km.



Εικόνα 5.3.12: Αναμενόμενες διανυόμενες αποστάσεις

Στην περιοχή του Texas, όπως προείπαμε υπάρχει ήδη ένα δίκτυο σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων σε δημόσιους χώρους, γνωστοί με το όνομα “eVgo freedom stations”. Στους σταθμούς αυτούς, είναι δυνατή η φόρτιση των οχημάτων με φόρτιση και των τριών επιπέδων [52]. Όσον αφορά το επίπεδο 2, χρησιμοποιείται ο εμπορικός φορτιστής EVSE-CS της εταιρείας “AeroVironment Inc”, που όπως φαίνεται από τις προδιαγραφές του, το ρεύμα εξόδου μπορεί να φτάσει μέχρι τα 30A και επομένως εφόσον στις ΗΠΑ η τάση του δικτύου χαμηλής τάσης είναι στα 240V, η μέγιστη ισχύς, που μπορεί να διαχειριστεί είναι $30 \cdot 240 = 7,2 \text{ kW}$ [66]. Κάνουμε τη θεώρηση λοιπόν ότι οι χώροι δουλειάς των οδηγών είναι εξοπλισμένοι με αυτόν το φορτιστή. Χάριν απλότητας, θεωρούμε ότι και στα σπίτια τους οι οδηγοί διαθέτουν φορτιστή της ίδιας εταιρείας με την ίδιες δυνατότητες φόρτισης. Επιλέγεται το μοντέλο EVSE-RS [67]. Η απόδοση φόρτισης και εκφόρτισης των φορτιστών αυτών κάνουμε την παραδοχή ότι είναι ίση με 90%.

SPECIFICATION	MODEL 1 EVSE
Connector	SAE J1772
Voltage	208VAC to 240VAC
Frequency	50Hz / 60Hz
Input Current	40A max
Output Current	30A max
Operating Temperature	-22°F to 122°F -30°C to 50°C
Storage Temperature	-40°F to 140°F -40°C to 60°C
Relative Humidity	Up to 95% RH, Non-condensing
Cord length	Up to 13' available
Enclosure	NEMA 3R
Connectivity options	IEEE 802.11 (WiFi) GPRS
Safety	GFV/CCID CCID Self-Test Automatic Reclosure
Regulatory Compliance	UL and cUL listed



Εικόνα 5.3.13: Κατασκευαστικές προδιαγραφές φορτιστή χώρου δουλειάς[66]

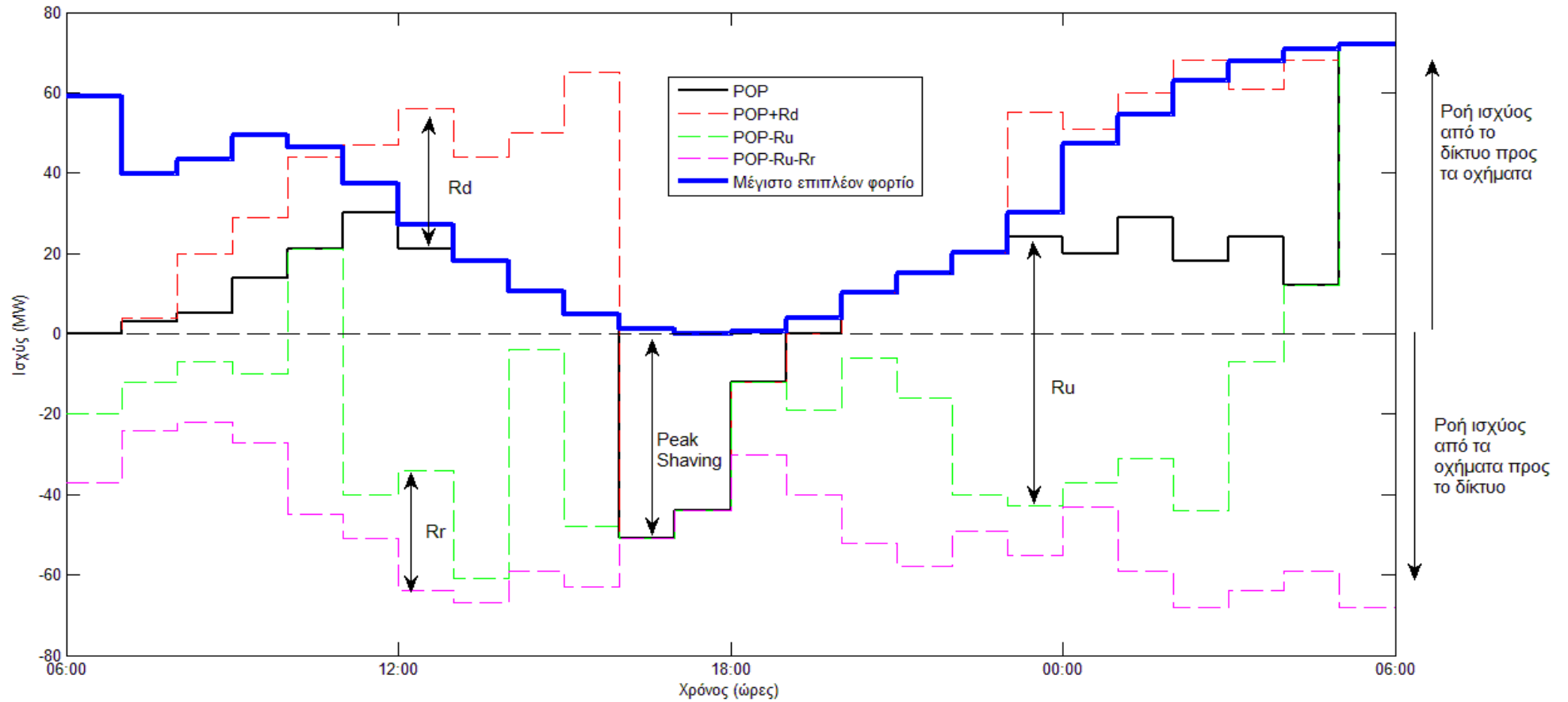
SPECIFICATION	EVSE-RS
Connector	SAE J1772 compliant
Voltage	208VAC to 240VAC
Frequency	60/50Hz
Output Current	30A max
Input Current	40A max
Operating Temperature	-22°F to 122°F -30°C to 50°C
Storage/Transit Temperature	-40°F to 140°F -40°C to 60°C
Relative Humidity	Up to 95% non-condensing
Dimensions	12" x 12" x 8" (approximate)
Weight	10 lbs. (excl. cable)
Cord Length	Up to 25' available
Enclosure	NEMA 3R
Regulatory Compliance	UL, cUL, CE, CTick listed



Εικόνα 5.3.14: Κατασκευαστικές προδιαγραφές οικιακού φορτιστή [67]

Η τιμή που χρεώνονται οι οδηγοί για τη φόρτιση των οχημάτων τους θεωρούμε ότι είναι σταθερή κατά τη διάρκεια της ημέρας και ίση με 0,01 \$/kWh. Η τιμή αυτή είναι κατά πολύ μικρότερη από οποιαδήποτε άλλη τιμή λιανικής πώλησης ενέργειας, που μπορούν να προσφέρουν οι διάφοροι πάροχοι στο Texas [68] εξασφαλίζοντας έτσι το οικονομικό κίνητρο, που έχουν οι οδηγοί να συμμετάσχουν στη V2G λειτουργία. Εφόσον όλα τα εξεταζόμενα οχήματα διαθέτουν συσσωρευτές τεχνολογίας ιόντων λιθίου, ως κόστος αντικατάστασης των συσσωρευτών λαμβάνεται μία τιμή, ίση με 400 \$/kWh [46], [50]. Τέλος, θεωρούμε ότι η επικοινωνία μεταξύ aggregator και κάθε ξεχωριστού ηλεκτρικού οχήματος γίνεται μέσω ήδη υπάρχοντων υποδομών ενός smart grid.

5.4 Αποτελέσματα



Εικόνα 5.4.1: Προφίλ φόρτισης του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων, ποσότητες προσφερόμενων επικουρικών υπηρεσιών, περιορισμοί δικτύου διανομής και peak shaving, που προκύπτουν από την εφαρμογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης

Εισάγοντας τα δεδομένα εισόδου, που αναφέραμε στην ενότητα 5.3 λαμβάνουμε το παραπάνω γράφημα ως έξοδο του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Με μπλε γραμμή, φαίνεται για κάθε ώρα, το μέγιστο δυνατό επιπλέον φορτίο, που μπορεί να εισάγει στο σύστημα ο στόλος των ηλεκτρικών οχημάτων. Με μαύρη συνεχόμενη γραμμή φαίνεται για κάθε ώρα προγραμματισμού το σημείο βέλτιστης λειτουργίας, POP, ή αλλιώς η συνολική «ισχύς εξόδου» του στόλου. Όταν αυτή είναι θετική, σημαίνει ότι λαμβάνει χώρα η διαδικασία της φόρτισης, δηλαδή έχουμε ροή ισχύος από το δίκτυο προς τα οχήματα. Αντιθέτως, όταν το σημείο βέλτιστης λειτουργίας είναι αρνητικό, σημαίνει ότι συμβαίνει εκφόρτιση των οχημάτων και έχουμε προσφορά ενέργειας από τα οχήματα προς το δίκτυο. Οι μέγιστες δυνατές ποσότητες ισχύος επικουρικών υπηρεσιών προκύπτουν από τη διαφορά μεταξύ των διακεκομμένων γραμμών και του βέλτιστου σημείου λειτουργίας, δηλαδή της μαύρης συνεχόμενης γραμμής. Με κόκκινο φαίνεται κάθε ώρα το άνω όριο της δυνατής ισχύος εξόδου του aggregator, και αποτελείται ουσιαστικά από τη μέγιστη δυνατή ποσότητα ισχύος κάτω ρύθμισης που δύναται να παρέχει ο aggregator στο δίκτυο προστιθέμενης στο σημείο βέλτιστης λειτουργίας. Με ροζ αντίστοιχα, φαίνεται το κάτω όριο ισχύος εξόδου του στόλου, που προκύπτει αφαιρώντας από το σημείο βέλτιστης λειτουργίας τη μέγιστη δυνατή ποσότητα ισχύος για άνω ρύθμιση και τη μέγιστη δυνατή για στρεφόμενη εφεδρεία. Επειδή, μας ενδιαφέρει να ξεχωρίσουμε τι ποσότητα προσφέρεται για άνω ρύθμιση και τι ποσότητα για στρεφόμενη εφεδρεία συμβολίζουμε με πράσινη γραμμή το κάτω όριο ισχύος εξόδου του στόλου λαμβάνοντας υπόψη μόνο την άνω ρύθμιση και αγνοώντας τη στρεφόμενη εφεδρεία. Συνοπτικά, δηλαδή η ισχύς που προορίζεται για κάτω ρύθμιση, R_d , είναι η διαφορά μεταξύ κόκκινης και μαύρης συνεχόμενης γραμμής, η ισχύς για άνω ρύθμιση, R_u , είναι η διαφορά μεταξύ μαύρης συνεχόμενης και πράσινης γραμμής, ενώ τέλος η ισχύς για στρεφόμενη εφεδρεία, R_r , είναι η διαφορά μεταξύ πράσινης και ροζ γραμμής.

Για να γίνει κατανοητή η συμπεριφορά του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, προτείνεται στον αναγνώστη να συμβουλευτείται παράλληλα τις εικόνες 5.3.4 και 5.3.5, όπου φαίνονται οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας και των επικουρικών υπηρεσιών αντίστοιχα. Τις πρώτες τρεις ώρες, η επικουρική υπηρεσία, που είναι πιο συμφέρουσα είναι η κάτω ρύθμιση. Παρόλα αυτά όμως, ο aggregator δεν μπορεί να προσφέρει μεγάλες ποσότητες κάτω ρύθμισης, διότι υπάρχει η απαίτηση των οδηγών οι συσσωρευτές των οχημάτων τους πριν τα πρωινά ταξίδια είναι 100% φορτισμένοι. Την πρώτη ώρα μάλιστα (06:00-07:00) δεν μπορεί να προσφέρει καθόλου ισχύ για κάτω ρύθμιση διότι τα οχήματα είτε δεν έχουν ξεκινήσει, είτε αυτά που βρίσκονται εν κινήσει δεν μπορούν να συμμετάσχουν στη V2G λειτουργία. Τις δύο επόμενες ώρες (07:00-09:00), τα οχήματα, που έχουν ήδη πραγματοποιήσει το πρώτο τους ταξίδι εκφορτίζοντας έτσι κατά ένα ποσοστό το συσσωρευτή τους, δίνουν στον aggregator τη δυνατότητα να παρέχει υπηρεσίες κάτω ρύθμισης. Εντωμεταξύ, τις 4 πρώτες ώρες οι ποσότητες για άνω ρύθμιση και στρεφόμενη εφεδρεία είναι συγκριτικά μικρές, λόγω της χαμηλής προβλεπόμενης τιμής τους. Μάλιστα όσο περνάει ο χρόνος και όλο και περισσότερα ταξίδια πραγματοποιούνται, οι ποσότητες αυτές μειώνονται καθώς

οι συσσωρευτές των οχημάτων εκφορτίζονται και επομένως η δυνατότητα του aggregator να προσφέρει ενέργεια στο δίκτυο μειώνεται.

Από την 5^η ώρα μέχρι την 11^η (11:00-16:00), δηλαδή από την ώρα, που όλα τα οχήματα βρίσκονται στο χώρο εργασίας, ο aggregator έχει στόχο να αγοράσει ενέργεια και να φορτίσει τα οχήματα όσο το δυνατόν πιο πολύ, ώστε αφενός αυτά να είναι ικανά να επιστρέψουν στο σπίτι (ώρες επιστροφής 16:00-19:00) αλλά και αφετέρου είναι σε θέση να εκμεταλλευτεί την υψηλή τιμή της ενέργειας τις ώρες αιχμής (16:00-18:00). Πραγματοποιεί δηλαδή το λεγόμενο arbitrage: αγοράζει ενέργεια, για να φορτίσει τα οχήματα τις ώρες, που η τιμή της προβλέπεται να είναι χαμηλή και πουλάει την ενέργεια, που δεν χρησιμοποιήθηκε σε ταξίδια τις ώρες, που η τιμή της προβλέπεται να είναι υψηλή. Βλέπουμε, λοιπόν ότι το σημείο βέλτιστης λειτουργίας είναι θετικό για τις ώρες μέχρι την 11^η ώρα (16:00-17:00), όπου η τιμή της ενέργειας προβλέπεται να μεγιστοποιηθεί. Παρατηρούμε επίσης, ότι ο εφαρμοζόμενος περιορισμός του δικτύου, αποτρέπει το σημείο βέλτιστης λειτουργίας να αυξηθεί περαιτέρω, ώστε να πωληθούν μεγαλύτερες ποσότητες άνω ρύθμισης και στρεφόμενης εφεδρείας, που τις ώρες αυτές είναι πολύ κερδοφόρες. Για να αναπληρωθεί αυτή η «χαμένη» ενέργεια φόρτισης, ο aggregator προσφέρει επίσης σημαντικές ποσότητες ισχύος για κάτω ρύθμιση, που περιμένει να μετατραπούν σε ενέργεια φόρτισης, καθώς τα αναμενόμενα ποσοστά για την κατανομή (dispatch) κάτω ρύθμισης είναι μεγάλα. Κατά την 11^η ώρα, η τιμή της ενέργειας προβλέπεται να είναι η μεγαλύτερη της ημέρας προγραμματισμού και μάλιστα κατά πολύ μεγαλύτερη από τις υπόλοιπες ώρες. Αυτό κάνει τον aggregator να προσφέρει όση περισσότερη ενέργεια διαθέτει, αδιαφορώντας για τη συμμετοχή του στις αγορές επικουρικών υπηρεσιών και διαθέτοντας μηδενικές ποσότητες ισχύος ρύθμισης και στρεφόμενης εφεδρείας εκείνη την ώρα. Το γεγονός ότι η ώρα αυτή, που η τιμή της ενέργειας αναμένεται να είναι πολύ μεγαλύτερη από τις υπόλοιπες ώρες συμπίπτει με την ώρα, που λαμβάνει χώρα η αιχμή του φορτίου, συντελεί στο να συμβεί το επιθυμητό peak shaving. Παρόμοια είναι και η κατάσταση, που επικρατεί κατά την 12^η ώρα, με σαφώς όμως μικρότερη προσφερόμενη ποσότητα ενέργειας, εφόσον η προβλεπόμενη τιμή της είναι μικρότερη από ότι ήταν κατά την 11^η ώρα.

Κατά τις απογευματινές και βραδινές ώρες (18:00-23:00) ο aggregator ξεκινά να φορτίζει ξανά το στόλο, με τέτοιο ρυθμό ώστε αφενός να μην παραβιάσει τον περιορισμό, που του έχει επιβληθεί από το δίκτυο και αφετέρου προσφέροντας κάθε ώρα ποσότητες επικουρικών υπηρεσιών, που έχουν υψηλή αναμενόμενη τιμή (άνω ρύθμιση και στρεφόμενη εφεδρεία). Όταν η τιμή της κάτω ρύθμισης αρχίζει να γίνεται ίση ή και μεγαλύτερη εν σχέση με τις τιμές των άλλων επικουρικών υπηρεσιών (18^η ώρα), τότε το σημείο βέλτιστης λειτουργίας σταματά να αυξάνεται, ώστε να βρεθεί το περιθώριο να προσφερθούν ποσότητες κάτω ρύθμισης. Τις τελευταίες ώρες της ημέρας προγραμματισμού (00:00-05:00) προτεραιότητα έχει η φόρτιση των συσσωρευτών, ώστε να εξασφαλισθεί η απαίτηση των οδηγών, την πρώτη ώρα της επόμενης μέρας προγραμματισμού, οι συσσωρευτές τους να είναι 100% φορτισμένοι. Εφόσον, η στρεφόμενη εφεδρεία είναι μια υπηρεσία, που ζητείται

πολύ σπανιότερα από την άνω ρύθμιση, ο aggregator, παρόλο που επιθυμεί η ροή της ενέργειας να είναι από το δίκτυο στα οχήματα (λειτουργία φόρτισης), είναι σε θέση να προσφέρει μεγάλη ποσότητα στρεφόμενης εφεδρείας εις βάρος της άνω ρύθμισης. Την τελευταία ώρα μάλιστα, παρατηρούμε ότι η ποσότητα αυτή είναι η υψηλότερη της ημέρας, καθώς το σημείο βέλτιστης λειτουργίας ορίζεται στο μέγιστο δυνατό, ώστε να ολοκληρωθεί η πλήρης φόρτιση των συσσωρευτών κατά τις απαιτήσεις των οδηγών.

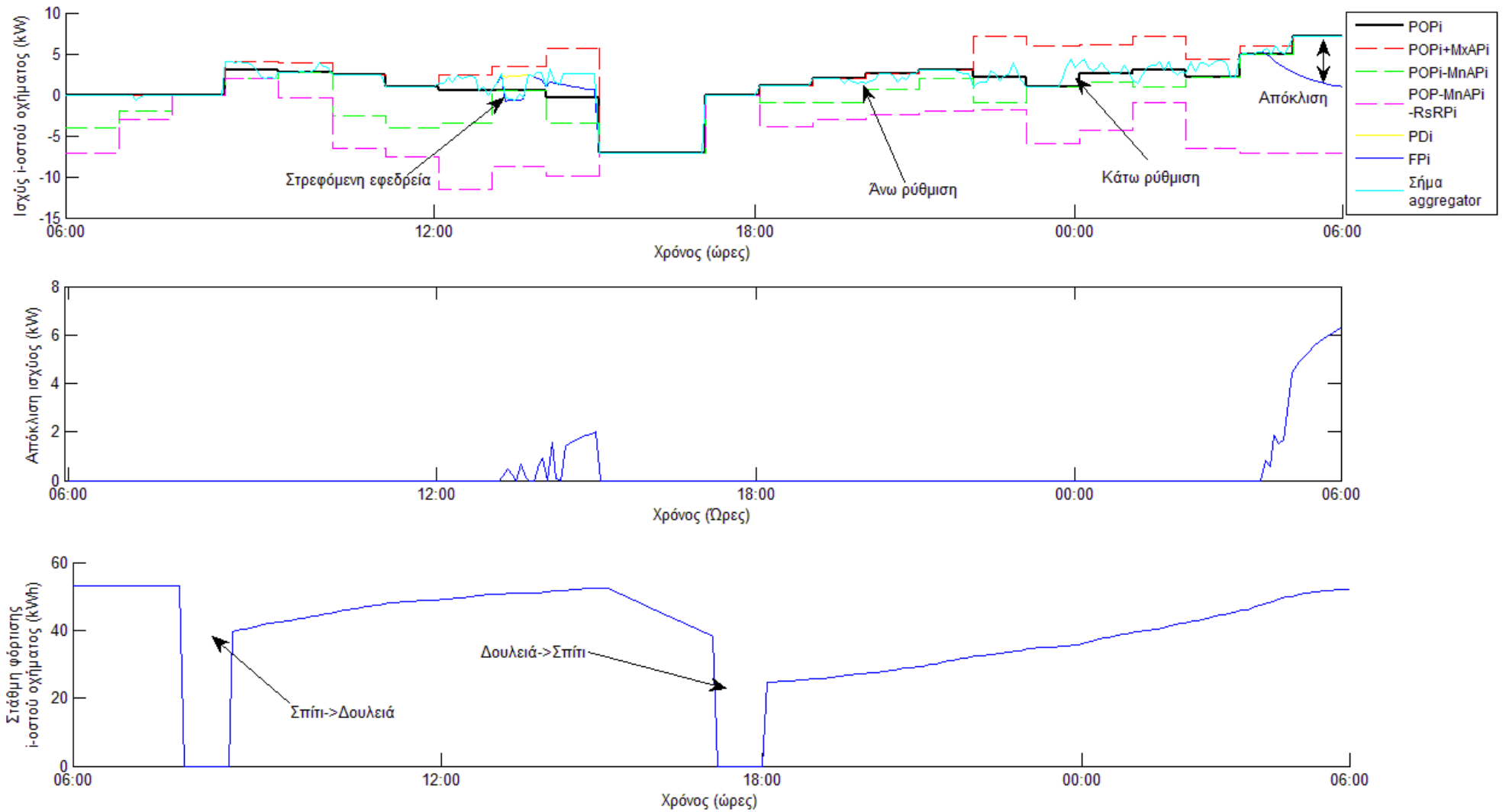
Εκτός από τον ορισμό των προφίλ φόρτισης, μπορούμε να εξάγουμε και άλλα χρήσιμα αποτελέσματα από την προσομοίωση. Εάν θεωρήσουμε ότι η συμμετοχή του aggregator στις αγορές ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών δεν επηρεάζει τις τιμές τους και ότι οι παραπάνω προσφορές, που κάνει ο aggregator γίνονται όλες δεκτές από το διαχειριστή του συστήματος, τότε για τη συγκεκριμένη ημέρα προγραμματισμού προκύπτει για τον aggregator ένα καθαρό κέρδος $\text{Prof}=3.133\$$.

Το σύστημα βγαίνει επίσης κερδισμένο από την εφαρμογή των αλγορίθμων καθώς κατά μέσο όρο έχει διαθέσιμα κάθε ώρα 18,7 MW κάτω ρύθμισης, 29,85 MW άνω ρύθμισης και 34,3 MW στρεφόμενη εφεδρεία, ποσότητες οι οποίες μπορούν πχ να εκμεταλλευθούν για να βοηθήσουν στη διείσδυση περισσότερων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Παρόλα αυτά, οι προαναφερθείσες ποσότητες είναι ένα μικρό ποσοστό των συνολικών απαιτήσεων του δικτύου, οι οποίες για την εξεταζόμενη ημέρα ήταν κατά μέσο όρο 920,667MW για κάτω ρύθμιση, 822,4 MW για άνω ρύθμιση και 2300 MW για στρεφόμενη εφεδρεία [58]. Επιπλέον, το σύστημα επωφελήθηκε από το peak shaving, το οποίο ήταν ίσο με μείωση του φορτίου αιχμής κατά 51 MW, μέγεθος βέβαια σχεδόν μη συγκρίσιμο με την αιχμή των 62,9 GW, που τελικά παρατηρήθηκε τη συγκεκριμένη ημέρα [57]. Παρόλα αυτά, είναι ενδεικτικό ότι ένας στόλος 10.000 ηλεκτρικών οχημάτων είναι σε θέση να επιτύχει ψαλιδισμό του φορτίου κατά σχεδόν 0,1% σε ένα σύστημα ηλεκτρισμού 23 εκατομμυρίων τελικών καταναλωτών.

Όσον αφορά στους ιδιοκτήτες των ηλεκτρικών οχημάτων, το κέρδος που αποκομίζουν από την εφαρμογή των αλγορίθμων δεν είναι άμεσα ορατό καθώς έγκειται στην εξοικονόμηση, που πετυχαίνουν στα έξοδα για την αγορά της ηλεκτρικής ενέργειας, απαραίτητης για τη φόρτιση των οχημάτων τους. Ένας απλός τρόπος να προσεγγίσουμε ποσοτικά το μέγεθος αυτής της εξοικονόμησης, είναι να βρούμε πρώτα τα έξοδα, που θα είχε ο κάθε οδηγός φορτίζοντας το όχημά του χωρίς την ύπαρξη του aggregator, έπειτα τα αντίστοιχα έξοδα με τη σύναψη συμβολαίου με τον aggregator και τέλος να βρούμε τη διαφορά τους. Χάριν απλότητας, θεωρούμε ότι η τιμή λιανικής πώλησης είναι σταθερή κατά τη διάρκεια της ημέρας και δεν εξετάζουμε την περίπτωση να ισχύει μειωμένο τιμολόγιο, πχ κατά τις νυκτερινές ώρες, κάτι που θα απαιτούσε επιπλέον διερεύνηση για το ποιες ώρες συμφέρει τον οδηγό να φορτίζει το όχημα του. Σύμφωνα με την PUCT [71] για το μήνα Αύγουστο του 2010 ο μέσος όρος των τιμών λιανικής πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από τους διάφορους παρόχους στην πολιτεία του Texas κυμάνθησαν από 7,69 \$/kWh έως και 14,35 \$/kWh. Αντίθετα, στο σενάριο με τη μεσολάβηση του aggregator η τιμή που

χρεώνεται ο οδηγός είναι ίση με την παράμετρο “ M_k ”, η οποία στην προσομοίωση λήφθηκε ίση με 0,01 \$/kWh. Οι ενεργειακές ανάγκες για τα ταξίδια είναι ίδιες και στα δύο σενάρια, ίσα με το άθροισμα $\sum_{t=1}^{24} Trips(i, t)$. Βέβαια, στο σενάριο με τον aggregator υπάρχουν επιπλέον ενεργειακές ανάγκες, καθώς η ενέργεια, που εκφορτίζεται κατά τη V2G λειτουργία, πρέπει να αναπληρωθεί. Αυτό το επιπλέον ποσό όμως δεν επιβαρύνει τον ιδιοκτήτη του ηλεκτρικού οχήματος αλλά τον aggregator. Επομένως, οι οδηγοί, συμμετέχοντας στη V2G λειτουργία, πετυχαίνουν μία έκπτωση στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, από 87% έως και 93%, ανάλογα με το ποιος πάροχος τους εξυπηρετούσε, προτού αποφασίσουν να συνάψουν συμβόλαιο με τον aggregator. Η έκπτωση αυτή φαίνεται εκ πρώτης όψεως υπερβολική, αλλά είναι λογική, εάν σκεφτούμε ότι οι οδηγοί δεν συμμετέχουν καθόλου στα κέρδη, που προκύπτουν από την προσφορά των επικουρικών υπηρεσιών, τα οποία καρπώνεται πλήρως ο aggregator. Επομένως, για να εμπλακούν στη V2G λειτουργία πρέπει να τους παρασχεθεί ένα ισχυρό κίνητρο, όπως είναι αυτή η έκπτωση της τάξης του 90%.

Τέλος, εφόσον ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης αποφάσισε ποιες είναι για κάθε ώρα οι βέλτιστες ποσότητες για το σημείο βέλτιστης λειτουργίας ($POP(i,t)$), τις ποσότητες ισχύος για άνω και κάτω ρύθμιση ($MnAP(i,t)$ και $MxAP(i,t)$ αντίστοιχα) και την ισχύ για στρεφόμενη εφεδρεία ($RsRP(i,t)$), μπορούμε να τρέξουμε τον αλγόριθμο για τη φάση της κατανομής. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην εικόνα 5.4.2. Στο πάνω διάγραμμα, βλέπουμε το προφίλ φόρτισης για ένα τυχαίο ηλεκτρικό όχημα, στο μεσαίο διάγραμμα βλέπουμε την διαφορά μεταξύ των απαιτήσεων του aggregator και της πραγματικής ισχύος εξόδου του οχήματος, ενώ στο κάτω διάγραμμα βλέπουμε τη στάθμη φόρτισης του ίδιου οχήματος κατά τη διάρκεια της ημέρας προγραμματισμού. Πρόκειται για ένα Tesla Roadster, με χωρητικότητα συσσωρευτή 53 kWh, το οποίο πραγματοποιεί δύο ταξίδια, ένα κατά την 3^η ώρα (09:00-10:00) από το σπίτι στο χώρο εργασίας και ένα ταξίδι επιστροφής από την εργασία στο σπίτι κατά την 13^η ώρα (17:00-18:00). Τις ώρες αυτές είναι ανίκανο να συμμετάσχει στη V2G λειτουργία, επομένως για $t=3$ και $t=13$, το σημείο βέλτιστης λειτουργίας ($POP(i,3)$ και $POP(i,13)$), η διαθέσιμη ισχύς για άνω ρύθμιση ($MnAP(i,3)$ και $MnAP(i,13)$), για κάτω ρύθμιση ($MxAP(i,3)$ και $MxAP(i,13)$) και για στρεφόμενη εφεδρεία ($RsRP(i,3)$ και $RsRP(i,13)$) είναι όλα μηδενικά. Η μείωση στη στάθμη φόρτισης του κατά τις ώρες αυτές, είναι το γινόμενο των χιλιομέτρων που διένυσε επί την κατανάλωση ενέργειας ανά km. Παρατηρούμε ότι το όχημα είναι ικανό να κάνει άνω ρύθμιση χωρίς απαραίτητα να εκφορτίζει ενέργεια από το συσσωρευτή του, αλλά μειώνοντας το ρυθμό φόρτισης του. Παρατηρούμε επίσης, ότι στο τέλος της ημέρας προγραμματισμού το όχημα καταφέρνει να είναι 100% φορτισμένο. Τέλος, το όχημα καταφέρνει να ανταποκριθεί στο σήμα, που του αποστέλλει ο aggregator εκτός από λίγες χρονικές περιόδους, κάτι που δικαιολογείται λόγω της ύπαρξης σφαλμάτων από τις προβλέψεις.

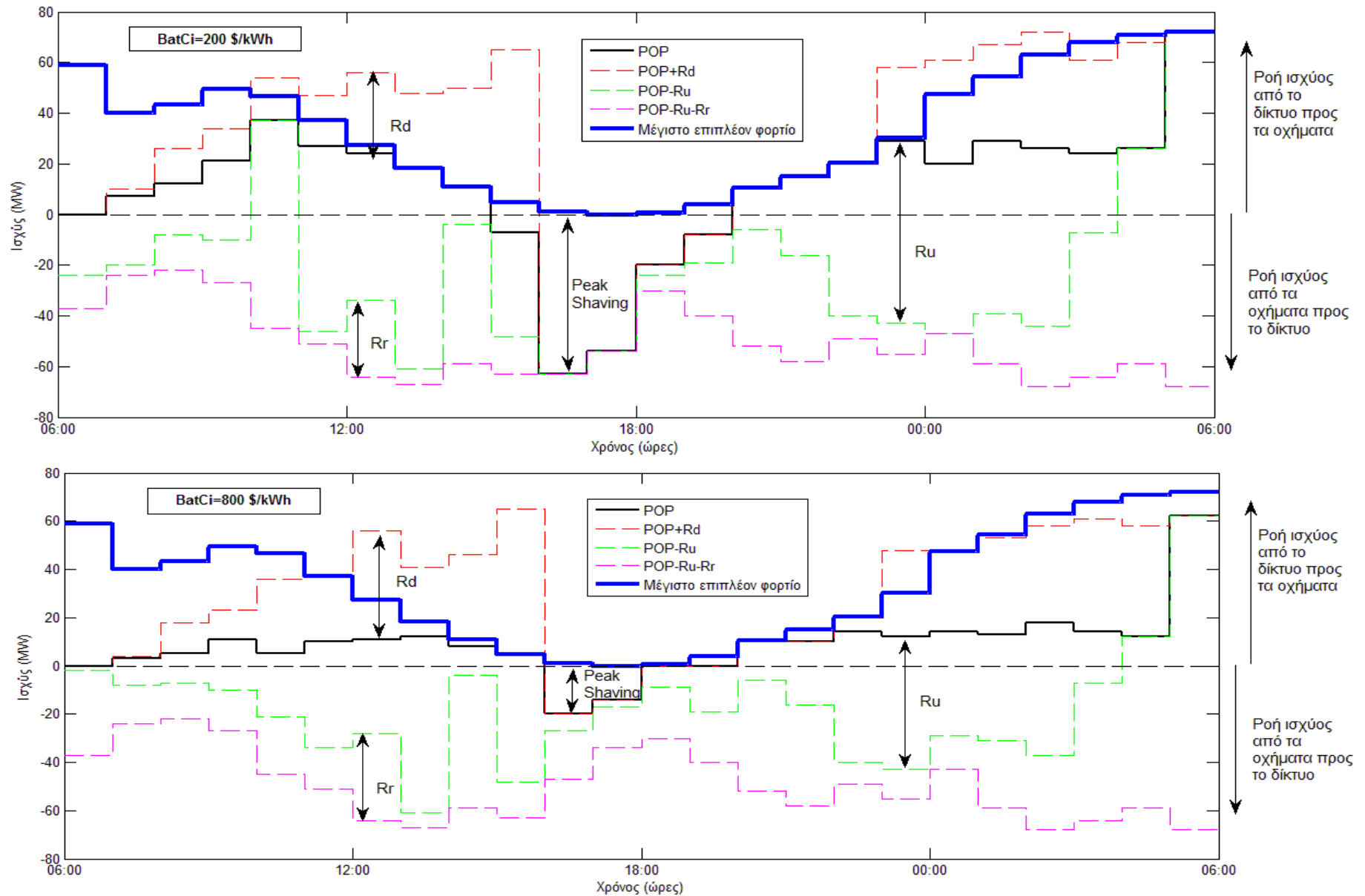


Εικόνα 5.4.2: Προφίλ φόρτισης, απόκλιση σήματος aggregator-πραγματικής ισχύος εξόδου και στάθμη φόρτισης ενός τυχαίου ηλεκτρικού οχήματος κατά τη διάρκεια της ημέρας προγραμματισμού

5.5 Ανάλυση ευαισθησίας για την παράμετρο BatC(i)

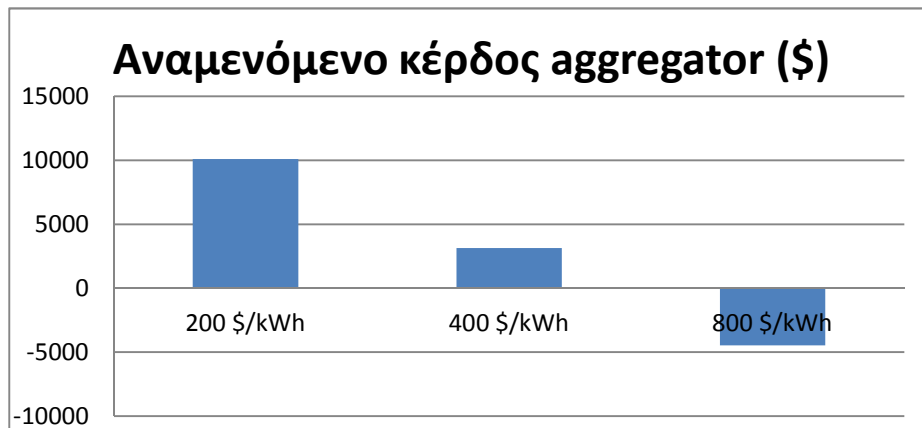
Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες, που μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την οικονομική βιωσιμότητα και κατ' επέκταση την ευρεία διάδοση της V2G λειτουργίας, όπως για παράδειγμα η ανάγκη για την ύπαρξη ακριβών υποδομών, η πολυπλοκότητα των απαραίτητων τηλεπικοινωνιών, η ανάγκη για δομικές αλλαγές στη λειτουργία των σημερινών αγορών ενέργειας ή ακόμα και η δυσκολία αποδοχής της νέας τεχνολογίας από τους οδηγούς. Ένας από τους κυριότερους όμως περιοριστικούς παράγοντες, αν όχι ο κυριότερος είναι η φθορά των συσσωρευτών, που προκύπτει από τις συνεχείς τους φορτίσεις και εκφορτίσεις. Η αύξηση των κύκλων λειτουργίας των συσσωρευτών για την υποστήριξη των δικτύων οδηγεί σε μια γρηγορότερη «γήρανση» τους συσσωρευτές, οι οποίοι πρέπει να αντικατασταθούν νωρίτερα ώστε τα ηλεκτρικά οχήματα να διατηρήσουν την αυτονομία τους, η οποία ούτως ή άλλως είναι περιορισμένη, ειδικά όταν συγκρίνονται με τα αντίστοιχα βενζινοκίνητα ή πετρελαιοκίνητα οχήματα. Από την πλευρά τους οι αυτοκινητοβιομηχανίες, τουλάχιστον μέχρι σήμερα, δεν προβλέπουν αυτήν την επιπλέον καταπόνηση των συσσωρευτών, γεγονός που αναμένεται να ακυρώσει τις εγγυήσεις, που προσφέρουν για την αναμενόμενη ζωή των συσσωρευτών. Επομένως μιλάμε για ένα έξοδο, που θα επιβαρύνει τους aggregators και κατ' επέκταση τους οδηγούς. Παρόλα αυτά η τεχνολογία των συσσωρευτών αναμένεται να παρουσιάσει σημαντική βελτίωση στο εγγύς μέλλον, όχι μόνο λόγω της αναμενόμενης αύξησης των πωλήσεων των ηλεκτρικών οχημάτων αλλά και λόγω της γενικότερης προσπάθειας για βελτίωση των συσσωρευτών, που χρησιμοποιούνται πχ στα κινητά τηλέφωνα ή στα laptops και σε πληθώρα φορητών ηλεκτρονικών συσκευών.

Για το λόγο αυτό, θεωρούμε σκόπιμο να γίνει μια απλή διερεύνηση στα αποτελέσματα του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, που αναπτύξαμε ως προς την ευαισθησία, που παρουσιάζουν αυτά για διαφορετικές τιμές του κόστους αντικατάστασης των συσσωρευτών. Εφόσον έχουμε θεωρήσει ότι όλα τα οχήματα φέρουν συσσωρευτές της ίδιας τεχνολογίας (ιόντων λιθίου) μεταβάλλουμε αναλόγως την τιμή της παραμέτρου BatC(i). Στην υποενότητα 5.3 κάναμε την παραδοχή ότι το κόστος αντικατάστασης των συσσωρευτών ιόντων λιθίου ήταν ίσο με 400 \$/kWh. Αυτή είναι μια μέση τιμή, που αναμένεται να είναι ρεαλιστική κατά το έτος 2020 [70]. Για παράδειγμα, σήμερα το κόστος αντικατάστασης του συσσωρευτή του Tesla Roadster, χωρητικότητας 53 kWh, υπολογίζεται στα 40.000\$ δηλαδή στα 755 \$/kWh [59]. Για το Mini-E η τιμή αυτή αγγίζει τα 1.000 \$/kWh (30.000\$ για συσσωρευτή χωρητικότητας 30 kWh [61]) ενώ για το Nissan Leaf τα 625 \$/kWh (15.000\$ για συσσωρευτή 24 kWh [63]). Τρέχουμε, λοιπόν, ξανά τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης με τιμές 200 \$/kWh, που είναι μία πολύ αισιόδοξη θεώρηση για το μακρινό μέλλον (2030 και μετά [70]) και με 800 \$/kWh, που είναι μια ρεαλιστική τιμή κοντά στη σημερινή κατάσταση. Τα νέα προφίλ φόρτισης φαίνονται στα δύο διαγράμματα της εικόνας 5.5.1.

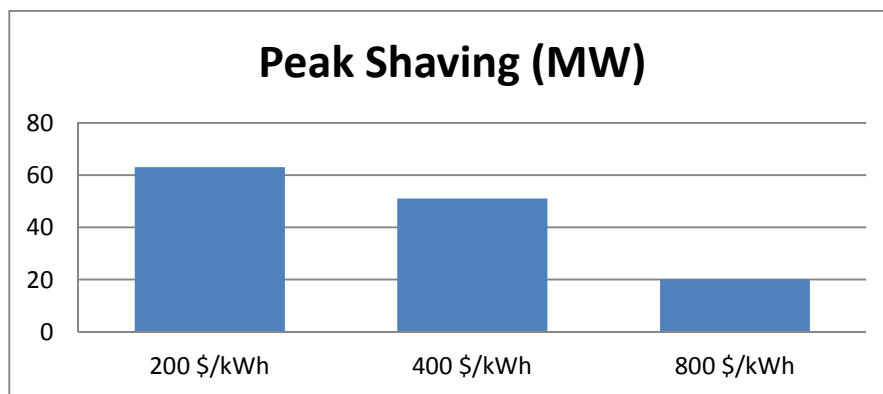


Εικόνα 5.5.1: Προφίλ φόρτισης του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων, ποσότητες ισχύος προσφερόμενων επικουρικών υπηρεσιών, περιορισμοί δικτύου διανομής και peak shaving, που προκύπτουν από την εφαρμογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης για $BatCi=200$ και $800\$/kWh$ αντίστοιχα.

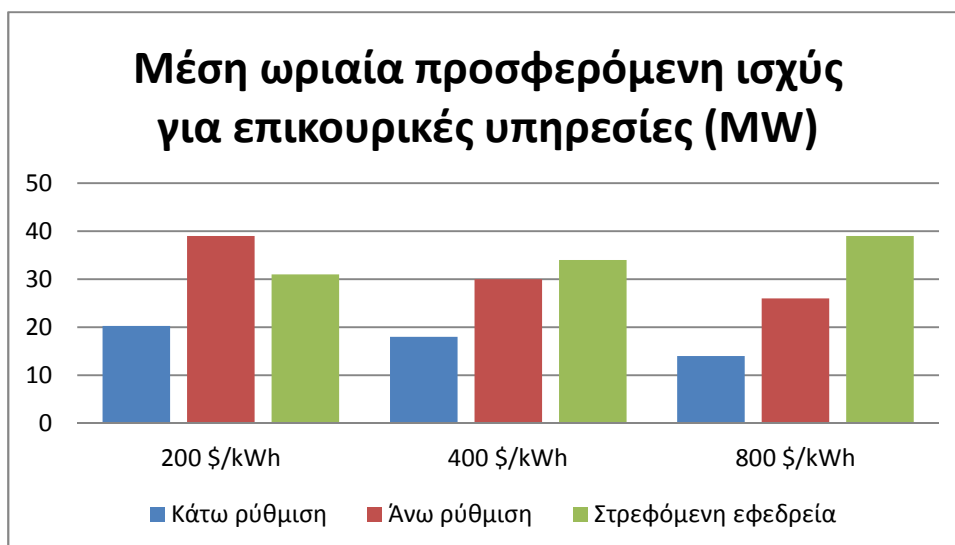
Τα επιμέρους αποτελέσματα, που παίρνουμε για τα διαφορετικά κόστη αντικατάστασης του συσσωρευτή φαίνονται στις παρακάτω εικόνες συγκεντρωτικά.



Εικόνα 5.5.2: Αναμενόμενο κέρδος του aggregator για τα διάφορα κόστη αντικατάστασης του συσσωρευτή



Εικόνα 5.5.3: Αναμενόμενο peak shaving για τα διάφορα κόστη αντικατάστασης του συσσωρευτή

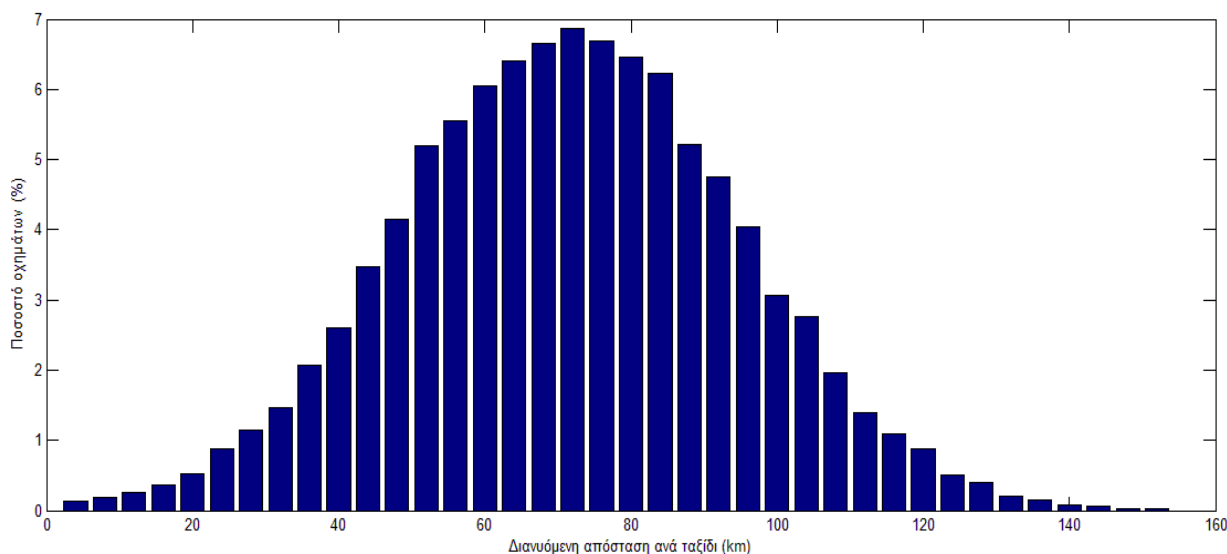


Εικόνα 5.5.4: Μέση ωριαία διαθέσιμη ποσότητα ισχύος για τις διάφορες επικουρικές υπηρεσίες και τα διάφορα κόστη αντικατάστασης του συσσωρευτή

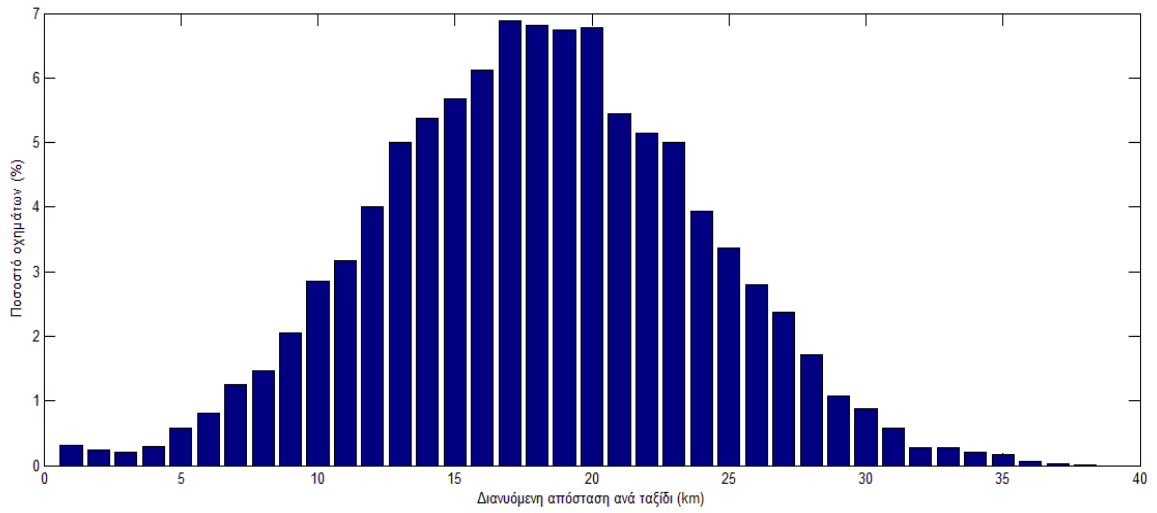
Παρατηρούμε ότι η γενική μορφή των προφίλ παραμένει η ίδια για τα διάφορα κόστη αντικατάστασης. Η κυριότερη διαφορά μεταξύ τους είναι ότι οι ποσότητες ενέργειας, που ανταλλάσσονται κάθε ώρα με το δίκτυο γίνονται μικρότερες, όσο το κόστος αντικατάστασης αυξάνεται. Κατά τις ώρες, που η τιμή της ενέργειας είναι μεγάλη (11^η και 12^η ώρα) η ποσότητα της ενέργειας, που συμφέρει τελικά τον aggregator να προσφέρει στο δίκτυο μειώνεται, καθότι υπάρχει μεγαλύτερη φθορά στους συσσωρευτές και επομένως ο aggregator οφείλει να αποζημιώσει τους πελάτες του με περισσότερα χρήματα για κάθε kWh, που εκφορτίζει για τη V2G λειτουργία. Μάλιστα, επειδή εκείνες οι ώρες είναι και αυτές, που εμφανίζεται η αιχμή του συστήματος, το peak shaving που πραγματοποιείται είναι αναγκαστικά μικρότερο. Όσο λοιπόν η ποσότητα της ενέργειας, που εκφορτίζεται μειώνεται, αντίστοιχα μειώνεται και η ποσότητα της ενέργειας, που πρέπει να επιστρέψει πίσω τους συσσωρευτές, συντελώντας έτσι σε μια συνολική μείωση των ανταλλασσόμενων ποσοτήτων ενέργειας. Επειδή, όπως φαίνεται και από τη σχέση (3.2) η ανταλλασσόμενη ενέργεια με το δίκτυο είναι συνάρτηση και των διαθέσιμων ποσοτήτων ισχύος για επικουρικές υπηρεσίες, παρατηρούμε ότι αυτές μειώνονται όσο το κόστος αντικατάστασης αυξάνεται. Εξαιρεση αποτελεί η στρεφόμενη εφεδρεία, που παρατηρούμε ότι η διαθέσιμη ισχύς για την κάλυψη της αυξάνεται. Αυτό συμβαίνει, διότι η υπηρεσία αυτή, καλείται πολύ σπάνια και επομένως η συμβολή της στην αναμενόμενη ανταλλαγή ενέργειας είναι σχεδόν μηδαμινή. Υπενθυμίζουμε ότι το κόστος φθοράς του συσσωρευτή προέρχεται από τις ποσότητες εκφόρτισης ενέργειας και όχι από τις ποσότητες διαθέσιμης ισχύος. Ως τελικό αποτέλεσμα όλων των παραπάνω προκύπτει ότι αφενός το αναμενόμενο κόστος του aggregator αυξάνεται (μεγαλύτερες αποζημιώσεις για κόστη φθοράς), και αφετέρου το αναμενόμενο εισόδημα του μειώνεται (μικρότερες ποσότητες πωλούμενης ενέργειας και συνολικά μικρότερες ποσότητες επικουρικών υπηρεσιών). Για κόστος αντικατάστασης 800 \$/kWh επομένως η V2G λειτουργία γίνεται οικονομικά ασύμφορη για τη συγκεκριμένη ημέρα προγραμματισμού. Μια λύση, θα ήταν να αυξηθεί η τιμή, την οποία χρεώνει ο aggregator στους πελάτες του για τη φόρτιση των οχημάτων τους, αλλά κάτι τέτοιο θα επηρέαζε την προθυμία των οδηγών να συνάψουν ένα συμβόλαιο μαζί του.

5.6 Ανάλυση ευαισθησίας για την παράμετρο $Trips(i,t)$

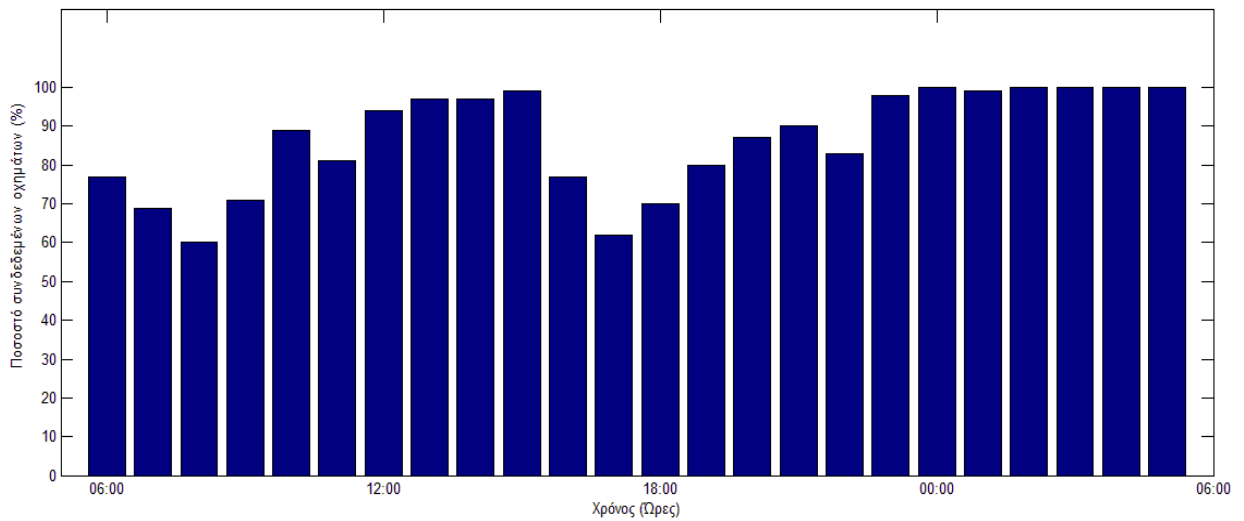
Σε αυτό το υποκεφάλαιο, μελετάμε την επίδραση, που έχουν οι αναμενόμενες αποστάσεις, που πρόκειται να διανύσουν τα οχήματα στα αποτελέσματα του αλγορίθμου βελτιστοποίησης. Οι αποστάσεις αυτές εκφράζονται μέσω της παραμέτρου $Trips(i,t)$, η οποία είναι ένας πίνακας 24×10.000 , ο οποίος δείχνει τι απόσταση αναμένεται να διανύσει κάθε ώρα το κάθε όχημα. Εξετάζουμε δύο ακόμα περιπτώσεις: στην πρώτη περίπτωση ακολουθείται μια κατανομή Gauss με μέση τιμή, μισή από αυτήν του υποκεφαλαίου 5.3 ενώ στην δεύτερη περίπτωση η μέση τιμή είναι διπλάσια από αυτήν του υποκεφαλαίου 5.3. Για την πρώτη περίπτωση ισχύει $\overline{Trips'(i,t)} = 0,5 * \overline{Trips(i,t)}$ ενώ στη δεύτερη ισχύει $\overline{Trips'(i,t)} = 2 * \overline{Trips(i,t)}$. Αντίστοιχη τροποποίηση κλίμακας γίνεται και στη διακύμανση για κάθε περίπτωση ώστε στην πρώτη περίπτωση η ελάχιστη και η μέγιστη διανυόμενη απόσταση να είναι 1 και 38 km αντίστοιχα, ενώ στη δεύτερη 4 και 152 km αντίστοιχα. Η ταχύτητα, με την οποία κινούνται στους δρόμους τα οχήματα παραμένει ίδια με αυτήν που θεωρήθηκε και στο υποκεφάλαιο 5.3 (46,5 km/h). Μεγαλύτερες διανυόμενες αποστάσεις και σταθερή ταχύτητα συνεπάγεται όμως και μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, κατά τα οποία τα οχήματα βρίσκονται στο δρόμο και άρα ανίκανα να συμμετάσχουν στη V2G διαδικασία. Αντίστροφα, στην περίπτωση των μικρότερων αναμενόμενων αποστάσεων, οι ώρες μη διαθεσιμότητας είναι λιγότερες. Οι αναμενόμενες διανυόμενες αποστάσεις, που προκύπτουν ύστερα από αυτήν την επεξεργασία καθώς και οι αντίστοιχες ώρες, κατά τις οποίες προκύπτει ότι τα εκάστοτε οχήματα δεν θα βρίσκονται συνδεδεμένα στο δίκτυο, φαίνονται στις εικόνες 5.6.1, 5.6.2, 5.6.3 και 5.6.4 αντίστοιχα, ενώ τα νέα προφίλ φόρτισης φαίνονται στα δύο διαγράμματα της εικόνας 5.6.5



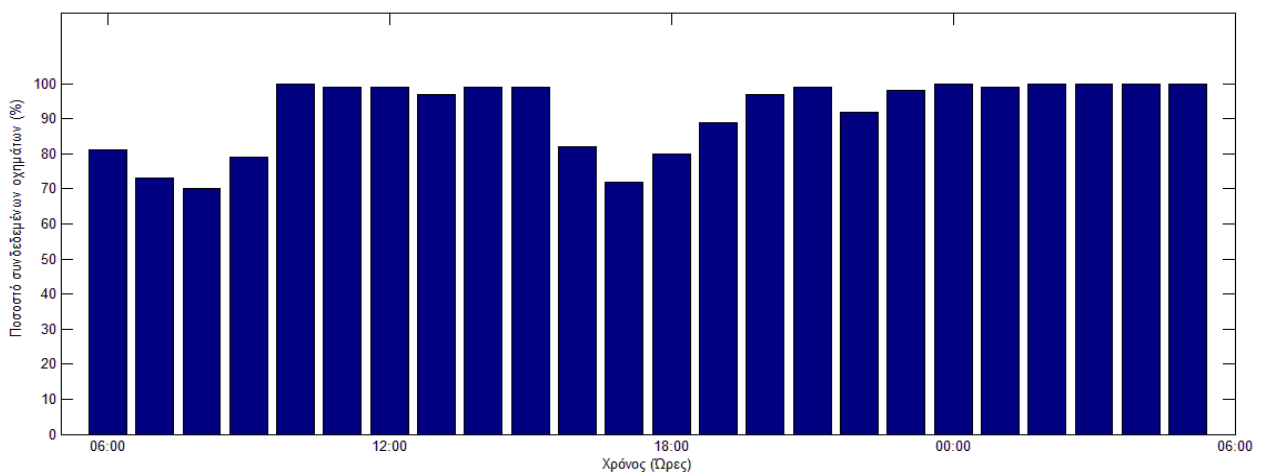
Εικόνα 5.6.1: Αναμενόμενες διανυόμενες αποστάσεις κατά την περίπτωση, όπου $\overline{Trips'(i,t)} = 0,5 * \overline{Trips(i,t)}$



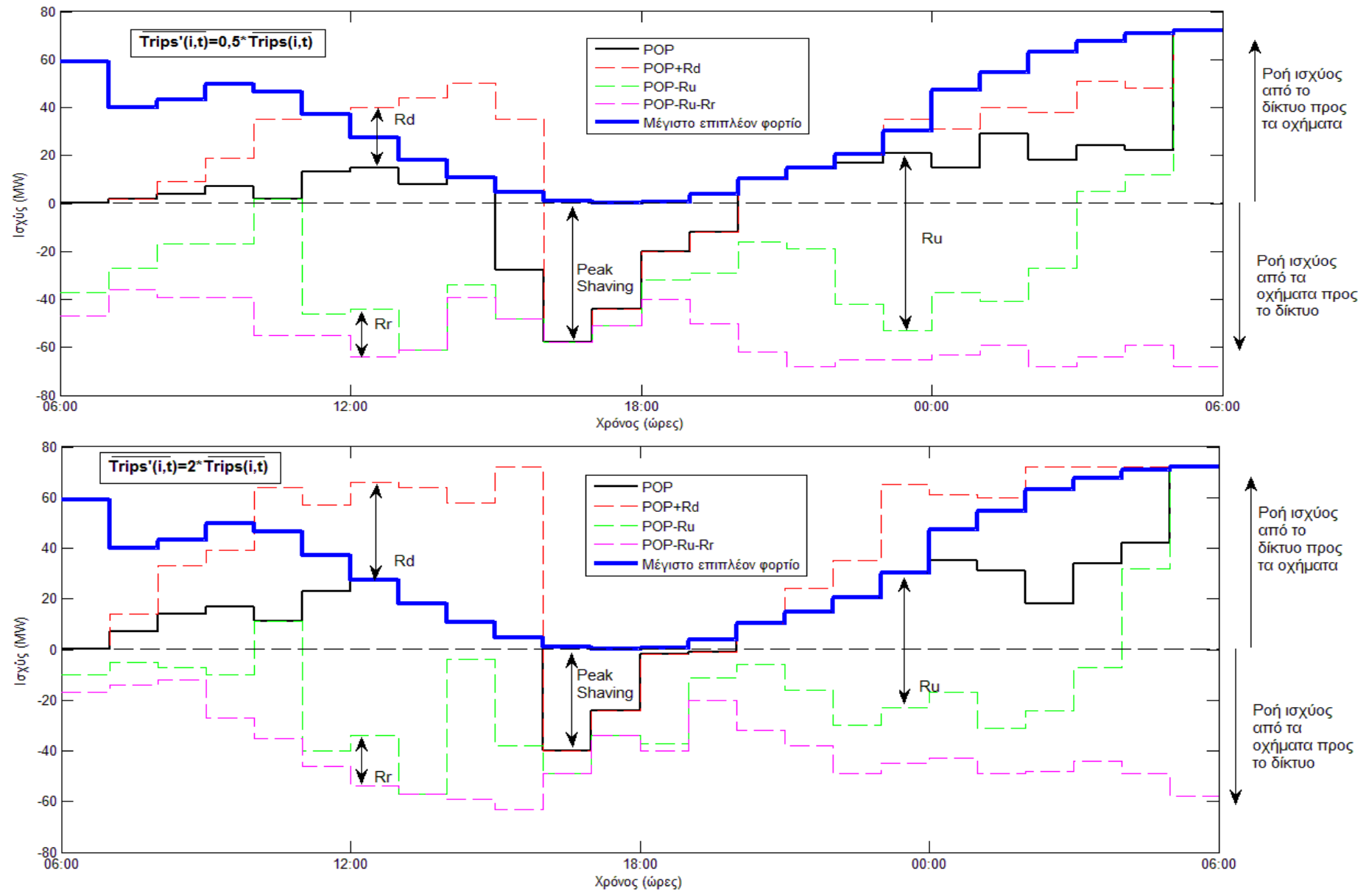
Εικόνα 5.6.2: Αναμενόμενες διανυόμενες αποστάσεις κατά την περίπτωση, όπου $\overline{Trips(i,t)} = 2 * \overline{Trips(i,t)}$



Εικόνα 5.6.3: Ποσοστό οχημάτων διαθέσιμων για V2G λειτουργία κάθε ώρα, κατά την περίπτωση, όπου $\overline{Trips(i,t)} = 0,5 * \overline{Trips(i,t)}$

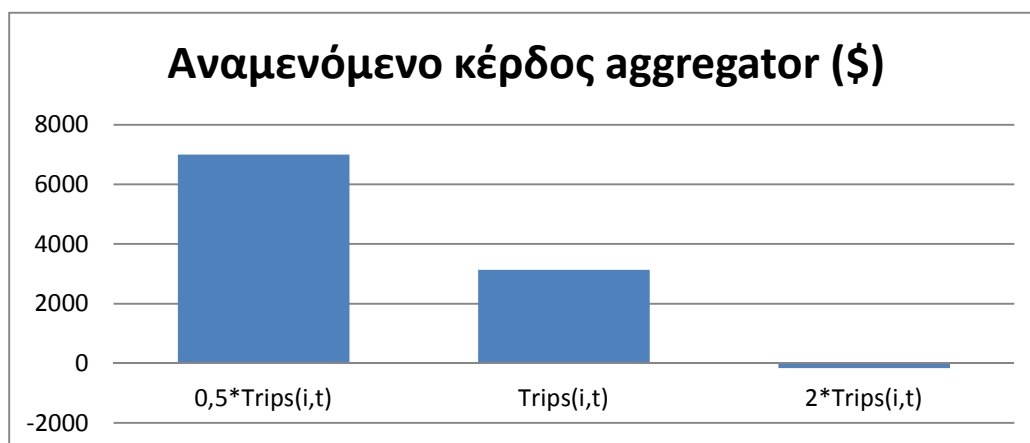


Εικόνα 5.6.4: Ποσοστό οχημάτων διαθέσιμων για V2G λειτουργία κάθε ώρα, κατά την περίπτωση, όπου $\overline{Trips(i,t)} = 2 * \overline{Trips(i,t)}$

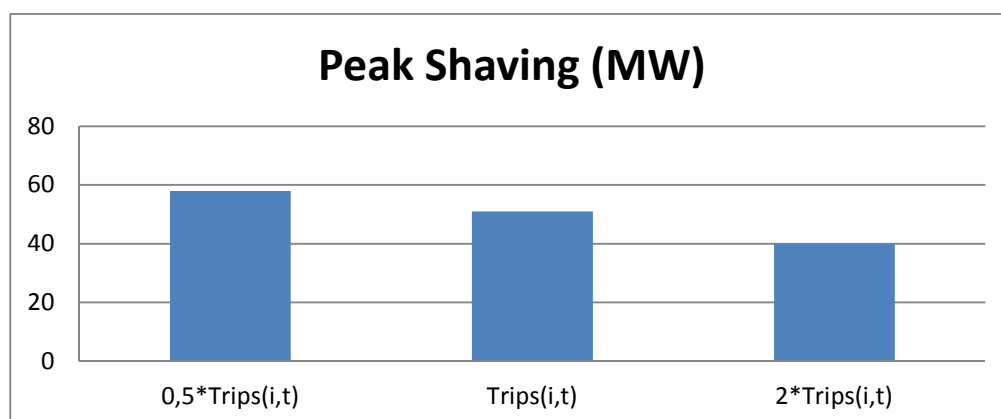


Εικόνα 5.6.5: Προφίλ φόρτισης του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων, ποσότητες ισχύος προσφερόμενων επικουρικών υπηρεσιών, περιορισμοί δικτύου διανομής και peak shaving, που προκύπτουν από την εφαρμογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης για $\text{Trips}'(i,t)=0,5 \cdot \text{Trips}(i,t)$ και $\text{Trips}'(i,t)=2 \cdot \text{Trips}(i,t)$ αντίστοιχα

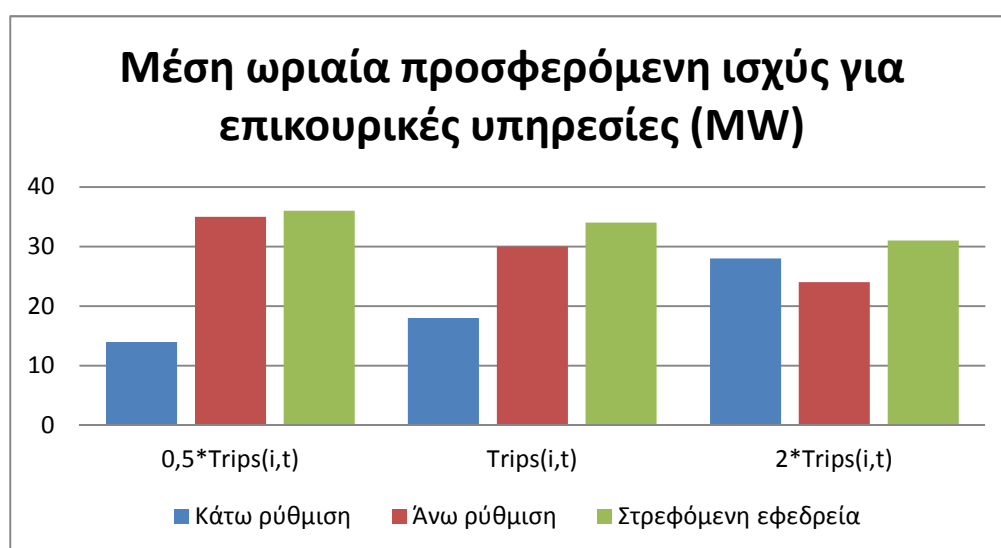
Τα επιμέρους αποτελέσματα, που παίρνουμε για τις διαφορετικές διανυόμενες αποστάσεις φαίνονται στις παρακάτω εικόνες συγκεντρωτικά.



Εικόνα 5.6.6: Αναμενόμενο κέρδος του aggregator για τις διάφορες διανυόμενες αποστάσεις



Εικόνα 5.6.7: Αναμενόμενο peak shaving για τις διάφορες διανυόμενες αποστάσεις



Εικόνα 5.6.8: Μέση ωριαία διαθέσιμη ποσότητα ισχύος για τις διάφορες επικουρικές υπηρεσίες και τις διάφορες διανυόμενες αποστάσεις

Παρατηρούμε ότι η γενική μορφή των προφίλ φόρτισης παραμένει παρόμοια και στις 3 περιπτώσεις: τις πρωινές-μεσημεριανές ώρες τα οχήματα φορτίζουν αναπληρώνοντας τη χαμένη ενέργεια του πρώτου ταξιδιού αλλά και αποθηκεύοντας αποθέματα ενέργειας για να πραγματοποιήσουν arbitrage τις ώρες, που η τιμή της ενέργειας είναι υψηλή. Όσο μεγαλύτερα τα προβλεπόμενα ταξίδια, τόσο πιο υψηλές τιμές λαμβάνει το σημείο βέλτιστης λειτουργίας ($POP(i,t)$), ώστε να εξασφαλισθούν μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας για τη φόρτιση του στόλου. Από την άλλη, όσο μικρότερα τα ταξίδια, τόσο περισσότερη ενέργεια είναι διαθέσιμη για το arbitrage, που μπορεί να γίνει για περισσότερες ώρες. Παραδείγματος χάριν για την περίπτωση με τα μικρότερα ταξίδια, βλέπουμε ότι ο aggregator πουλάει ενέργεια στο δίκτυο για 5 ώρες (από τις 15:00 έως τις 20:00), στη μεσαία περίπτωση για 3 ώρες (16:00-19:00), ενώ στην περίπτωση με τα μεγαλύτερα ταξίδια μόνο για 2 ώρες (16:00-18:00). Επίσης, τα ποσά αυτά είναι κάθε φορά και μικρότερα, με αποτέλεσμα να μειώνεται ανάλογα και το peak shaving, που μπορεί να γίνει στις 16:00 η ώρα, καθώς ο aggregator πρέπει να κρατήσει αρκετά αποθέματα ενέργειας, ώστε τα οχήματα να είναι σε θέση να πραγματοποιήσουν τα ταξίδια επιστροφής τους, που λαμβάνουν χώρα από τις 16:00 έως τις 19:00. Εν συνεχεία ο aggregator πρέπει να αναπληρώσει την ενέργεια, που εκφορτίστηκε τις προηγούμενες ώρες, είτε λόγω του μεγάλου arbitrage, είτε λόγω των μεγάλων διανυόμενων αποστάσεων, επομένως σε κάθε περίπτωση, τηρουμένων των αναλογιών θέτει το σημείο βέλτιστης λειτουργίας σε αρκετά θετική τιμή. Όσον αφορά στις επικουρικές υπηρεσίες, παρατηρούμε τα εξής: Οι ποσότητες της κάτω ρύθμισης αυξάνονται όσο μεγαλώνουν οι διανυόμενες αποστάσεις, καθώς τότε οι συσσωρευτές έχουν αποθηκευμένη λιγότερη ενέργεια, με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγαλύτερο περιθώριο φόρτισης. Υπενθυμίζεται ότι κάτω ρύθμιση σημαίνει αύξηση του ρυθμού φόρτισης (ή αντίστοιχα μείωση του ρυθμού εκφόρτισης). Το αντίθετο συμβαίνει με την άνω ρύθμιση: όσο μεγαλύτερα ταξίδια, τόσο λιγότερη ενέργεια απομένει στους συσσωρευτές, άρα και τόσο λιγότερη δυνατότητα για αύξηση στο ρυθμό εκφόρτισης (ή μείωση στο ρυθμό φόρτισης). Οι ποσότητες της στρεφόμενης εφεδρείας μειώνονται κι αυτές όσο μεγαλώνουν οι αναμενόμενες διανυόμενες αποστάσεις, εφόσον πάλι μιλάμε για αύξηση του ρυθμού εκφόρτισης αλλά με σαφώς μικρότερο ρυθμό, καθώς η πιθανότητα να κληθεί από το σύστημα η διαθέσιμη ισχύς ως ενέργεια είναι πολύ μικρότερη από την αντίστοιχη πιθανότητα για τη ζήτηση άνω ρύθμισης. Τέλος, παρατηρούμε ότι τα αναμενόμενα κέρδη του aggregator μειώνονται όσο τα αναμενόμενα ταξίδια γίνονται μεγαλύτερα, εφόσον τόσο μειώνεται η ικανότητα για arbitrage αλλά και οι διαθέσιμες ποσότητες για άνω ρύθμιση και στρεφόμενη εφεδρεία, που έχουν υψηλότερες τιμές στη χονδρεμπορική αγορά. Για $\overline{Trips}'(i,t) = 2 * \overline{Trips}(i,t)$ μάλιστα, η αύξηση της ποσότητας της κάτω ρύθμισης δεν είναι ικανή να αντισταθμίσει αφενός τα αυξημένα κόστη λόγω της ανάγκης για αγορά μεγαλύτερων ποσοτήτων ενέργειας και αφετέρου τα μικρότερα κέρδη λόγω μικρότερων ποσοτήτων άνω ρύθμισης και στρεφόμενης εφεδρείας. Μία λύση θα ήταν ο aggregator να επιβραβεύει περισσότερο τους οδηγούς, που εκτελούν μικρότερα ταξίδια από αυτούς, που διανύουν μεγάλες αποστάσεις. Ένας τρόπος για να το πετύχει αυτό, θα ήταν να μοιράζει ένα ποσοστό των κερδών του από την προσφορά επικουρικών υπηρεσιών στους οδηγούς, ώστε αυτοί να έχουν κίνητρο να συμμετάσχει το όχημα τους όσο το δυνατόν περισσότερο

στις διάφορες αγορές ή ένας άλλος τρόπος, θα ήταν να υπάρχουν κλιμακωτές χρεώσεις για την ενέργεια φόρτισης από τον aggregator ανάλογα με το ποσοστό του συσσωρευτή, που οι οδηγοί του αφήνουν διαθέσιμο για V2G.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ

6.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε ένα πακέτο αλγορίθμων, το οποίο μπορεί να αξιοποιηθεί από ένα κεντρικό ελεγκτή ηλεκτρικών οχημάτων (Aggregator) για τον προγραμματισμό και τη διαχείριση της ενεργειακής λειτουργίας (φόρτιση-G2V και εκφόρτιση- V2G) ενός στόλου ηλεκτρικών οχημάτων κατά τη διασυνδεδεμένη λειτουργία τους, με τέτοιο τρόπο, ώστε να επιτευχθεί το μέγιστο δυνατό οικονομικό όφελος. Η V2G λειτουργία συνίσταται στην προσφορά ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών, συγκεκριμένα άνω και κάτω ρύθμισης συχνότητας και στρεφόμενης εφεδρείας. Επομένως, το πρόβλημα της βελτιστοποίησης, που πρέπει να απαντηθεί είναι το εξής: «Ποιες είναι εκείνες οι ποσότητες κάθε επικουρικής υπηρεσίας και εκείνες οι ποσότητες ενέργειας, που πρέπει ο aggregator να προσφέρει στο δίκτυο κάθε ξεχωριστή ώρα, ώστε να έχει το μέγιστο δυνατό οικονομικό κέρδος, σεβόμενος παράλληλα ορισμένους περιορισμούς, που τίθενται από διαφορετικούς παράγοντες;». Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης υλοποιείται στη γλώσσα GAMS, ενώ επιπλέον, αναπτύσσεται και ένας αλγόριθμος στο Matlab, ο οποίος εξετάζει την ανταπόκριση του κάθε ξεχωριστού οχήματος στις εντολές του aggregator, κατά τη φάση της κατανομής. Για να ελέγξουμε την αποτελεσματικότητα των αλγορίθμων, προσομοιώνουμε ένα στόλο 10.000 ηλεκτρικών οχημάτων, που συμμετέχουν στη V2G διαδικασία στην πολιτεία του Texas.

Κατά το στάδιο ανάπτυξης του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, προέκυψαν κάποια συμπεράσματα όσον αφορά στον τρόπο λειτουργίας του. Πρώτον, παρατηρούμε ότι η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων δεν είναι απαραίτητο να είναι μια ξεχωριστή διαδικασία από την προσφορά επικουρικών υπηρεσιών, καθώς αυτές οι δύο λειτουργίες μπορούν να γίνονται ταυτόχρονα. Φαίνεται και από τον αλγόριθμο της φάσης κατανομής ότι άνω ρύθμιση ή στρεφόμενη εφεδρεία δεν σημαίνει αναγκαστικά προσφορά ενέργειας προς το δίκτυο, ούτε κάτω ρύθμιση σημαίνει αναγκαστικά αποθήκευση ενέργειας. Είναι πιθανό ένα όχημα να φορτίζει, εκτελώντας ταυτόχρονα άνω ρύθμιση, απλά μειώνοντας το ρυθμό της φόρτισης του. Επιπρόσθετα, παρατηρούμε ότι ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης προτείνει στον aggregator να προσφέρει κάθε ώρα ποσότητες επικουρικών υπηρεσιών μικρότερες από τις συνολικά διαθέσιμες, συνεκτιμώντας τη πιθανότητα απρόβλεπτων αναχωρήσεων των οχημάτων. Στην προσομοίωση που εκτελέσαμε για το σύστημα

του Texas, οι ποσότητες αυτές ήταν της τάξης του 10-20% μικρότερες από τις συνολικά διαθέσιμες, ανάλογα με την εκάστοτε ώρα.

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης των αλγορίθμων για τον ημερήσιο προγραμματισμό των ηλεκτρικών οχημάτων μπορούμε να εξάγουμε τα εξής συμπερασματικά: Ο Aggregator ακολουθεί μια πολιτική «arbitrage», φορτίζοντας τα οχήματα τις ώρες, κατά τις οποίες η τιμή της ενέργειας είναι μικρή και εκφορτίζοντας όση ενέργεια, απομένει από τα ταξίδια τους τις ώρες, που αυτή η τιμή αυξάνεται. Κατά την ημέρα που μελετήσαμε, η ώρα που η προβλεπόμενη τιμή της ενέργειας λάμβανε το μέγιστο της συνέπιπτε με την ώρα, που και το προβλεπόμενο φορτίο του συστήματος λάμβανε το μέγιστο του, γεγονός, που οδήγησε σε peak shaving. Επειδή, μία τέτοια χρονική σύμπτωση είναι αναμενόμενη στις απελευθερωμένες αγορές, το σύστημα μπορεί με αυτόν τον τρόπο να επωφεληθεί από την εφαρμογή των αλγορίθμων. Επιπλέον, οι αλγόριθμοι προσφέρουν επιπρόσθετη ευστάθεια στο σύστημα, μέσω της διάθεσης ποσοτήτων επικουρικών υπηρεσιών, μειώνοντας κατά αυτόν τον τρόπο τις ανάλογες απαιτήσεις από τις συμβατικές μονάδες.

Κατά το στάδιο της διερεύνησης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, συμπεραίνουμε ότι το αναμενόμενο κέρδος ενός aggregator, που υιοθετεί τους προτεινόμενους αλγόριθμους εξαρτάται άμεσα από το κόστος αντικατάστασης των συσσωρευτών. Υπενθυμίζεται ότι το κόστος αντικατάστασης ενός συσσωρευτή (\$/kWh) πολλαπλασιασμένο επί την αποθηκευτική χωρητικότητα του (kWh) μας δίνει το κεφαλαιακό κόστος του. Είναι δηλαδή ένα μέτρο για να αξιολογήσουμε πόσο ακριβός είναι ένας συσσωρευτής στην αγορά τη δεδομένη χρονική περίοδο, που μελετάμε. Συμπερασματικά, παρατηρούμε ότι όσο χαμηλότερες είναι οι τιμές των συσσωρευτών, τόσο λιγότερο κοστίζει στον aggregator η φθορά τους, εφόσον πρέπει να πληρώσει μικρότερες αποζημιώσεις στους οδηγούς και άρα τόσο διευκολύνεται και η συμμετοχή των οχημάτων στις αγορές ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών. Για υψηλές τιμές του κόστους αντικατάστασης των συσσωρευτών, όπως οι σημερινές τιμές για τους συσσωρευτές ιόντων λιθίου (περίπου 800 \$/kWh) και για μία πολύ χαμηλή τιμή χρέωσης της ενέργειας, που αγοράζουν οι οδηγοί (της τάξης του 10% του μέσου όρου της λιανικής τιμής πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας στο Texas) η οικονομική βιωσιμότητα ενός aggregator είναι αμφίβολη ακόμα και κατά τη διάρκεια μιας προνομιακής ημέρας, από την άποψη ότι αφενός η διαφορά μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης τιμής της ενέργειας ήταν αρκετά μεγάλη (περίπου 10 φορές) και αφετέρου οι οριακές τιμές των επικουρικών υπηρεσιών ήταν υψηλές. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει ότι σήμερα ο aggregator δεν είναι σε θέση να προσφέρει τόσο χαμηλές τιμές στους πελάτες του και θα πρέπει να αναθεωρήσει την τιμολογιακή του πολιτική. Παρόλα αυτά, εάν το κόστος των συσσωρευτών μειωθεί στο μισό, κάτι το οποίο προβλέπεται να γίνει μέσα στα 10 επόμενα χρόνια, τα κέρδη του aggregator μπορεί να είναι σημαντικά, ακόμα και με αυτές τις πολύ χαμηλές χρεώσεις ενέργειας. Όσο το κόστος αυτό μειώνεται, τόσο μεγαλύτερα αναμένουμε να είναι τα κέρδη του aggregator αλλά και η εξοικονόμηση των οδηγών, δεδομένου όμως ότι οι τιμές ανταμοιβής των επικουρικών υπηρεσιών και της ενέργειας θα μείνουν σε συγκρίσιμα επίπεδα με τις σημερινές τους τιμές. Στη συνέχεια, από τη σύγκριση των προφίλ

φόρτισης των οχημάτων για τις διαφορετικές τιμές των αναμενόμενων διανυόμενων αποστάσεων προκύπτει ότι παρόλο που υπάρχουν ώρες της ημέρας, κατά τις οποίες η παροχή ενέργειας προς το δίκτυο συμφέρει οικονομικά τον aggregator, κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει, διότι η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών για την μετακίνηση των οδηγών έχει υψηλότερη προτεραιότητα. Αποδεικνύουμε κατά τον τρόπο αυτό, την εξάρτηση της οικονομικής βιωσιμότητας του aggregator από τα αναμενόμενα προφίλ οδήγησης των ηλεκτρικών οχημάτων, δηλαδή τις αποστάσεις, που πρόκειται να διανύσουν μέσα στην ημέρα οι οδηγοί και από τα προκύπτοντα χρονικά διαστήματα, που τα οχήματα τους θα βρίσκονται εν κινήσει και άρα μη διαθέσιμα για συμμετοχή στη V2G λειτουργία. Το γεγονός αυτός υποδεικνύει στον aggregator ότι πρέπει να θέσει κάποια προσυμφωνημένα όρια στο συμβόλαιό του με τους οδηγούς όσον αφορά στην οδηγική τους συμπεριφορά, όπως πχ έναν ελάχιστο αριθμό ωρών, που τα οχήματα θα βρίσκονται συνδεδεμένα στο δίκτυο ή ένα ελάχιστο ποσοστό της στάθμης φόρτισης των συσσωρευτών, το οποίο οι οδηγοί θα υποχρεώνονται να έχουν πάντα διαθέσιμο για V2G.

6.2 Μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας

Η παρούσα διπλωματική αποτελεί ένα πρώτο βήμα για την ανάπτυξη ενός πακέτου αλγορίθμων, που επιτρέπει σε έναν aggregator τη συμμετοχή του στην αγορά ενέργειας και σε αγορές επικουρικών υπηρεσιών (άνω/κάτω ρύθμιση συχνότητας και στρεφόμενη εφεδρεία), αξιοποιώντας την αμφίδρομη ροή ισχύος των ηλεκτρικών οχημάτων. Στην παρούσα μελέτη αυτή έγιναν ορισμένες παραδοχές οι οποίες μπορούν να επεκταθούν σε μελλοντικές μελέτες.

Πιο συγκεκριμένα, δεν μελετήθηκε εις βάθος η προκαλούμενη φθορά των συσσωρευτών λόγω της V2G λειτουργίας. Χάριν απλότητας, αγνοήθηκαν οι επιδράσεις διαφορετικών βαθμών εκφόρτισης και διαφορετικών τεχνολογιών συσσωρευτών. Σε μελλοντική μελέτη, η προκαλούμενη αυτή φθορά θα μπορούσε να προσδιοριστεί λεπτομερώς καθότι οι χρησιμοποιημένοι συσσωρευτές των ηλεκτρικών οχημάτων, οι οποίοι δεν είναι πλέον ικανοί να καλύψουν ικανοποιητικά τις ανάγκες μετακίνησης, δύναται να προσφέρουν υπηρεσίες στο δίκτυο και μάλιστα, χωρίς να υπάρχουν περιορισμοί ώστε να πραγματοποιηθεί κάποιο ταξίδι. Επιπρόσθετα, ο στόλος των ηλεκτρικών οχημάτων θεωρήθηκε ότι αποτελούταν αποκλειστικά από ηλεκτρικά οχήματα με συσσωρευτές (BEVs). Θα ήταν ενδιαφέρον να μελετηθεί και η ύπαρξη υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων με δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο (PHEVs) στο στόλο, εισάγοντας έτσι επιπλέον περιορισμούς, που έχουν να κάνουν με το κόστος των καυσίμων, που αυτά χρησιμοποιούν. Τέλος, δεν μελετήθηκαν οι επιδράσεις στη συνολική αξιοπιστία του aggregator, δηλαδή στην ικανότητά του να

προσφέρει τα προσυμφωνημένα ποσά ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών στο δίκτυο, όταν συμβεί κάποια οχήματα να μην είναι σε θέση να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις, που τους τίθενται κατά τη φάση της κατανομής. Κάτι τέτοιο, συνηθίζεται στις αγορές να επισύρει ένα πρόστιμο, το οποίο μπορεί σε μελλοντική εργασία να καθοριστεί και να συνυπολογιστεί στα ημερήσια έξοδα του aggregator.

Τα συμπεράσματα, που εξήχθησαν παραπάνω από το στάδιο της προσομοίωσης, βασίστηκαν στα αποτελέσματα των αλγορίθμων για μόνο μία ημέρα προγραμματισμού καθώς ο στόχος αυτής της διπλωματικής ήταν περισσότερο η σύλληψη, η ανάπτυξη και η υλοποίηση των αλγορίθμων αυτών και όχι τόσο η μελέτη της συμπεριφοράς τους για ένα μακροχρόνιο διάστημα ή υπό πολλές διαφορετικές συνθήκες. Ως μελλοντική επέκταση προτείνεται η εφαρμογή των αλγορίθμων για διαφορετικά προφίλ τιμών αγοράς ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών (πχ ημέρες που οι τιμές της ενέργειας δεν εμφανίζουν μεγάλες αποκλίσεις από ώρα σε ώρα) έτσι ώστε να εξαχθούν ολοκληρωμένα συμπεράσματα για τη συνολική συμπεριφορά των αλγορίθμων και των κερδών ενός aggregator. Μια τέτοια μελέτη θα δώσει τη δυνατότητα καθορισμού των βέλτιστων αριθμητικών τιμών ορισμένων οικονομικών πτυχών του συναπτόμενου συμβολαίου aggregator-οδηγών, όπως πχ της τιμής της ενέργειας, που θα πρέπει να χρεώνει ο aggregator τους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων για να φορτίσουν τα οχήματά τους ή των ελαχίστων ορίων ενέργειας ή/και χρόνου, που θα πρέπει να τηρούν οι οδηγοί όσον αφορά στη διαθεσιμότητα του οχήματος του για V2G. Τέλος, θα μπορούσαν να μελετηθούν οι επιπτώσεις, που έχει η εισαγωγή ενός aggregator στην ανταγωνιστική χονδρεμπορική αγορά ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών όσον αφορά στις οριακές τιμές συστήματος των μεγεθών αυτών, κάτι που στην παρούσα εργασία δεν μελετήθηκε.

Επιπρόσθετα θα ήταν ενδιαφέρον να γίνει προσομοίωση των αλγορίθμων στο σύστημα της Ελλάδας. Αν και η λειτουργία του ελληνικού συστήματος εμφανίζει ορισμένες διαφορές με αυτό του Texas, οι αλγόριθμοι θα μπορούσαν πάλι να δουλέψουν, με κάποιες όμως τροποποιήσεις. Για παράδειγμα, στην Ελλάδα δεν υπάρχει αγορά στρεφόμενης εφεδρείας, αφού αυτή δεν ανταμείβεται (τουλάχιστον άμεσα) και αποτελεί περισσότερο μία υποχρέωση των παραγωγών. Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων για τα δύο συστήματα, θα μπορούσαν να προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα για τη δομή και τη λειτουργία του ελληνικού συστήματος, ώστε αυτό να είναι θεσμικά έτοιμο για μία μελλοντική ευρεία διάδοση της V2G λειτουργίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ

- [1] W. Kempton, J. Tomic, S. Letendre, A. Brooks, T. Lipman, “Vehicle-to-Grid Power: Battery, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles as Resources for Distributed Electric Power in California”, California Air Resources Board, California Environmental Protection Agency, Ιούλιος 2001
- [2] M. Bellis, “History of electric Vehicles”, [Online]. Διαθέσιμο: <http://inventors.about.com/od/estartinventions/a/History-Of-Electric-Vehicles.htm>, 15/11/2012
- [3] <http://www.whokilledtheelectriccar.com/>, 15/11/2012
- [4] European Commission, Directorate-General for Energy and Transport (DG TREN), 16 Ιανουαρίου 2010. Διαθέσιμο: http://ec.europa.eu/energy/publications/doc/statistics/ext_co2_emissions_by_sector.pdf, 15/11/2012
- [5] European Automobile Manufacturers’ Association, [Online]. Διαθέσιμο: http://www.acea.be/images/uploads/files/20100420_EV_tax_overview.pdf, 15/11/2012
- [6] Νόμος 2960/2001 ΦΕΚ Α! 265 / 22 ΝΟΕΜΒΡΙΟΥ 2001, Άρθρο 121, Παράγραφος 5 και ΔΜΕΟ 1889/Φ.911 ΦΕΚ Β! 1140 / 11 ΑΥΓΟΥΣΤΟΥ 2003, Απόφαση 3, Παράγραφος 2 λδ. Διαθέσιμο: <http://www.heliev.gr/index.php/el/elinio/to-elinio/greek-legislation>, 15/11/2012
- [7] Project “MERGE”, [Online]. Διαθέσιμο: http://www.ev-merge.eu/index.php?option=com_content&view=article&id=115&Itemid=65, 15/11/2012
- [8] B. Hassett, E. Bower, M. Alexander, “EV penetration scenarios”, Deliverable 3.2, Project “MERGE”, 21 Φεβρουαρίου 2011
- [9] Δ. Νέγκας, «Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και ο ανεφοδιασμός τους με ηλεκτρική ενέργεια», ΕΛ.ΙΝ.Η.Ο, Σεπτέμβριος 2011
- [10] M. Millikin, "[Nissan LEAF now available in all 50 states](http://www.greencarcongress.com/2012/02/leaf-20120301.html)", Green Car Congress, [Online]. Διαθέσιμο: <http://www.greencarcongress.com/2012/02/leaf-20120301.html>, 16/11/2012
- [11] Ε.Ι. Ρίκου, «Μέθοδοι εξοικονόμησης ενέργειας σε ηλεκτροκίνητα οχήματα», Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Φεβρουάριος 2005
- [12] <http://www.toyota.gr/innovation/hybrid.tmex>, 16/11/2012

- [13] D. Andress, D. Sujit, F. Joseck, T. Dean Nguyen, “Status of advanced light-duty transportation technologies in the US”, Energy Policy, Volume 41, February 2012, σελίδες 348-364
- [14] Ε. Διαλυνάς, Γ. Γρηγοριάδης, «Διερεύνηση τρόπων ανάπτυξης και διείσδυσης των ηλεκτροκίνητων οχημάτων στην Ελλάδα. Τεχνική Έκθεση», Ιανουάριος 2012
- [15] Argonne National Laboratory, [Online]. Διαθέσιμο: <http://www.flickr.com/photos/argonne/3463107424/sizes/m/in/photostream/>, 15/11/2012
- [16] Electric Drive Transportation Association, Hybrid Electric Vehicles, [Online]. Διαθέσιμο: http://www.electricdrive.org/index.php?ht=d/Releases/cat_id/27080/pid/9675, 17/11/2012
- [17] Κ. Τσατσάκης, «Μελέτη μικροδικτύου με αυξημένη διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων», μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Ε.Μ.Π., Σεπτέμβριος 2010
- [18] A.Khaligh, Zhihao Li, “Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.59, Issue 6, pp 2806-2814, Ιούλιος 2010.
- [19] S.Bending, M.Ferdowsi, S.Channon, K.Strunz, “Specification for an Enabling Smart Technology”, Deliverable 1.1, Project “MERGE”, 24 Αυγούστου 2010
- [20] N. Ogino, “Electric Vehicles in Japan”, Japanese Automobile Research Institute, FC-EV research division, [Online]. Διαθέσιμο: https://documents.eu-japan.eu/seminars/europe/climate/presentation_futuremobility_session2_ogino.pdf, 17/11/2012
- [21] Α. Καραμπούζης, «Χρηματοοικονομικές αγορές ηλεκτρισμού και παράγωγα προϊόντα», μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, ΠΑ.ΜΑΚ., Οκτώβρης 2011
- [22] Α.Δ. Καββαθάς, «Διαμόρφωση της ηλεκτρικής αγοράς στην Ελλάδα τη δεκαετία 2010-2010», διπλωματική εργασία Ε.Μ.Π, Μάρτιος 2012
- [23] W. Kempton, T. Kubo, «Electric-drive vehicles for peak power in Japan», Energy Policy, Volume 28, Issue 1, 1 Ιανουαρίου 2000, Σελίδες 9-18
- [24] Σ. Παπαθανασίου, «Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, σημειώσεις παραδόσεων», Εκδόσεις Ε.Μ.Π, Αθήνα 2008
- [25] PJM, <http://www.pjm.com/markets-and-operations/ancillary-services/synchronized-service.aspx>, 29/11/2012
- [26] <http://www.udel.edu/V2G/conventionalview.html>, 27/11/2012

- [27] W. Kempton, J. Tomic, "Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue," J. Power Sources, vol. 144, no. 1, σελίδες 268–279, 1 Ιουνίου 2005
- [28] <http://www.udel.edu/V2G/V2Gconcept.html>, 27/11/2012
- [29] X. Fang, S. Misra, G. Xue, D. Yang, "Smart Grid — The New and Improved Power Grid: A Survey," Communications Surveys & Tutorials, IEEE , vol.14, no.4, σελίδες 944-980, 2012
- [30] E. Sortomme, M.A. El-Sharkawi, "Optimal Charging Strategies for Unidirectional Vehicle-to-Grid," Smart Grid, IEEE Transactions vol.2, no.1, σελίδες 131-138, Μάρτιος 2011
- [31] W. Kempton, S. Letendre, "Electric vehicles as a new power source for electric utilities", Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 2, Issue 3, σελίδες 157-175, Σεπτέμβρης 1997
- [32] W. Kempton, J. Tomić, "Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue", Journal of Power Sources, Volume 144, Issue 1, σελίδες 268-279, Ιούνιος 2005
- [33] S. Letendre, W. Kempton, "The V2G concept: A new model for power?", Public Utilities Fortnightly, Σελίδες 16-26, 15 Φεβρουαρίου 2002
- [34] A. Brooks, "Vehicle-to-Grid Demonstration Project: Grid Regulation Ancillary Service with a Battery Electric Vehicle", California Air Resources Board, California Environmental Protection Agency, Δεκέμβριος 2002
- [35] Nissan LEAF Electric Car, FAQ: Features, [Online]. Διαθέσιμο: http://www.nissanusa.com/leaf-electric-car/home-charging?next=ev_micro.overview.technology.link#_carwings-section, 27/11/2012
- [36] M. Rivier, T. Gomez, R. Cossent, I. Momber, "New actors and business models for the integration of EV in power systems", Deliverable 5.1, Project MERGE, 4 Φεβρουαρίου 2011
- [37] C. Quinn, D. Zimmerle, T. Bradley, "The effect of communication architecture on the availability, reliability, and economics of plug-in hybrid electric vehicle-to-grid ancillary services", Journal of Power Sources, Volume 195, Issue 5, σελίδες 500-1509, 1 Μαρτίου 2010
- [38] <http://www.betterplace.com>, 29/11/2012
- [39] B. Williams, T. Lipman, "Analysis of the combined vehicle- and post-vehicle-use value of lithium-ion plug-in-vehicle propulsion batteries: Task 3, second life applications and value of 'traction' lithium batteries" University of California, Berkeley, Transportation Sustainability Research Center, Απρίλιος 2011

- [40] W. Kempton, A. Dhanju, “Electric Vehicles with V2G: Storage for Large-Scale Wind Power”, Windtech International 2, σελίδες 18-21, Μάρτιος 2006
- [41] W. Kempton, J. Tomić, “Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy”, Journal of Power Sources, Volume 144, Issue 1, σελίδες 280-294, 1 Ιουνίου 2005
- [42] C. K. Ekman, “On the synergy between large electric vehicle fleet and high wind penetration – An analysis of the Danish case”, Renewable Energy, Volume 36, Issue 2, σελίδες 546-553, Φεβρουάριος 2011
- [43] C. Guille, G. Gross, “A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation”, Energy Policy, Volume 37, Issue 11, σελίδες 4379-4390, Νοέμβριος 2009
- [44] C. D. White, K. M. Zhang, “Using vehicle-to-grid technology for frequency regulation and peak-load reduction”, Journal of Power Sources, Volume 196, Issue 8, σελίδες 3972-3980, 15 Απριλίου 2011
- [45] R. Ball, N. Keers, E. Bower, M. Alexander, “Modeling electric storage devices for EVs”, Deliverable 2.1, Project “MERGE”, 4 Ιανουαρίου 2010
- [46] S. B. Peterson, J. F. Whitacre, J. Apt, “The economics of using plug-in hybrid electric vehicle battery packs for grid storage,” J. Power Sources, vol. 195, no. 8, σελίδες 2377–2384, Αύγουστος 2009
- [47] A. Brooks, S. Thesen, “PG&E and Tesla Motors: Vehicle to Grid demonstration and evaluation program”, Proc. EVS-23, 2007
- [48] J.J. Escudero-Garzas, A. Garcia-Armada, G. Seco-Granados , "Fair Design of Plug-in Electric Vehicles Aggregator for V2G Regulation," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.61, no.8, σελίδες 3406-3419, Οκτώβριος 2012
- [49] Γ.Κοκολάκης, Ι. Σπηλιώτης, «Εισαγωγή στη θεωρία πιθανοτήτων και στατιστική», Εκδόσεις Συμμεών, Οκτώβριος 1999
- [50] S. B. Peterson, J. Apt, J. F. Whitacre, “Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and vehicle-to-grid utilization,” J. Power Sources, vol. 195, no. 8, σελίδες. 2385–2392, 10 Νοεμβρίου 2009
- [51] R. Rosenthal, “GAMS-A user’s guide”, [Online]. Διαθέσιμο: <http://www.gams.com/docs/document.htm>, 19/12/2012
- [52] eVgO, The Network, [Online]. Διαθέσιμο: https://www.evgonetwork.com/The_Network, 4/1/2013
- [53] Electric Reliability Council of Texas, [Online]. Διαθέσιμο: <http://www.ercot.com/about/>, 4/1/2013

- [54] Electric Reliability Council of Texas, ERCOT Quick Facts March 2011, [Online]. Διαθέσιμο: www.ercot.com/content/news/presentations/2011/ERCOT_Quick_Facts_March_%202011.pdf, 4/1/2013
- [55] Electric Reliability Council of Texas, Market Information, [Online]. Διαθέσιμο: <http://www.ercot.com/mktinfo/>, 9/1/2013
- [56] University of Delaware, <http://www.udel.edu/V2G/Tools.html>, 9/1/2013
- [57] Electric Reliability Council of Texas, Hourly Load Data Archives, [Online]. Διαθέσιμο: http://www.ercot.com/gridinfo/load/load_hist/, 9/1/2013
- [58] Electric Reliability Council of Texas, Grid Information, [Online]. Διαθέσιμο: <http://www.ercot.com/gridinfo/generation/windintegration/2010/08/index>, 9/1/2013
- [59] Tesla Motors, Tesla Roadster Spec Sheet, [Online]. Διαθέσιμο: http://www.teslamotors.com/display_data/teslaroadster_specsheet.pdf, 9/1/2013
- [60] Think, Technical Data, Dec. 5, 2009, [Online]. Διαθέσιμο: <http://thinkev.com/The-THINK-City/Specifications/Technical-data>, 9/1/2013
- [61] MINI, MINI-E Specifications [Online]. Διαθέσιμο: <http://www.miniusa.com/minie-usa/pdf/MINI-E-spec-sheet.pdf>, 9/1/2013
- [62] Mitsubishi Motors, Mitsubishi Motors to Bring New-Generation EV I-MiEV to Market, [Online]. Διαθέσιμο: <http://media.mitsubishi-motors.com/pressrelease/e/products/detail1940.html>, 9/1/2013
- [63] Nissan Zero Emission Website, Leaf Specs, [Online]. Διαθέσιμο: <http://www.nissan-zeroemission.com/EN/LEAF/specs.html>, 9/1/2013
- [64] Federal Highway Administration, National Household Travel Survey, [Online]. Διαθέσιμο: <http://nhts.ornl.gov/>, 9/1/2013
- [65] E. Sortomme, M.A. El-Sharkawi, "Optimal Scheduling of Vehicle-to-Grid Energy and Ancillary Services," Smart Grid, IEEE Transactions, vol.3, no.1, σελίδες 351-359, Μάρτιος 2012
- [66] AeroVirnonment EV Solutions, Commercial and Public Electric Vehicle Charging, [Online]. Διαθέσιμο: http://evsolutions.avinc.com/uploads/products/1_AV_EVSE-CS_061010_fleet_ac.pdf, 9/1/2013
- [67] AeroVirnonment EV Solutions, ElectricVehicle Home Charging Dock, [Online]. Διαθέσιμο: http://evsolutions.avinc.com/uploads/products/2_AV_EVSE-S_B2B_061110_retail_charging.pdf, 9/1/2013
- [68] The State of Texas, Texas Electric Choice-Education Program, <http://www.powertochoose.org/>, 9/1/2013

[69] D. Dallinger, D. Krampe, M. Wietschel, “Vehicle-to-grid regulation reserves based on a dynamic simulation of mobility behavior,” IEEE Trans. Smart Grid, vol. 2, no. 2, σελίδες 302–313, Ιούνιος 2011

[70] The Committee on Climate Change, Element Energy Limited, “Cost and performance of EV batteries”, 21 Μαρτίου 2012, [Online]. Διαθέσιμο: <http://ebookbrowse.com/ccc-battery-cost-element-energy-report-march2012-public-pdf-d334217108>, 23/1/2013

[71] Public Utility Committee of Texas, Average Annual Rate Comparison Archive, August 2010, [Online]. Διαθέσιμο: <http://www.puc.texas.gov/industry/electric/rates/RESrate/RESratearc.aspx>, 23/1/2013

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Επισκόπηση Παραμέτρων

Οι παράμετροι, που χρησιμοποιήθηκαν για τη μαθηματική μοντελοποίηση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης και του αλγορίθμου της κατανομής, παρουσιάζονται παρακάτω με αλφαβητική σειρά. Το σύμβολο [/] δίπλα από ορισμένες παραμέτρους σημαίνει ότι αυτές είναι αδιάστατα μεγέθη. Ο χαρακτηρισμός των παραμέτρων ως πρωτεύουσες ή δευτερεύουσες έχει να κάνει με τον τρόπο, που λαμβάνουν την αριθμητική τιμή τους. Εάν αυτή καθορίζεται αυθαίρετα από τον προγραμματιστή ανάλογα με το σύστημα μελέτης, τότε την ονομάζουμε πρωτεύουσα παράμετρο, ενώ εάν η αριθμητική τιμή της προκύπτει από κάποια μαθηματική φόρμουλα, τότε την ονομάζουμε δευτερεύουσα παράμετρο.

- **BatC(i) [\$/kWh]** Κόστος αντικατάστασης συσσωρευτή του i -οστού ηλεκτρικού οχήματος. Πολλαπλασιαζόμενο με τη συνολική χωρητικότητα του συσσωρευτή, μας δίνει το κεφαλαιακό κόστος του. Στην προσομοίωση θεωρήσαμε ότι η παράμετρος αυτή είναι σταθερή για όλα τα ηλεκτρικά οχήματα, καθώς αυτά διαθέτουν συσσωρευτές της ίδιας τεχνολογίας. Πρωτεύουσα παράμετρος.
- **C [\$]** Συνολικά ημερήσια έξοδα του aggregator, τα οποία προέρχονται από 2 πηγές: πρώτον την αποζημίωση, που δίνεται στους οδηγούς για τη φθορά του συσσωρευτή τους και δεύτερον από το κόστος αγοράς ενέργειας από τη χονδρεμπορική αγορά. Δευτερεύουσα παράμετρος, δίνεται από τη σχέση (3.10)
- **Comp(i,t) [/]** Συντελεστής υποδιαστασιολόγησης των προσφερόμενων υπηρεσιών του i -οστού οχήματος για την ώρα t , λόγω της πιθανότητας μη προγραμματισμένης αναχώρησής του. Θεωρούμε ότι για μεγάλους στόλους οχημάτων (10.000) μπορεί να ορισθεί ντετερμινιστικά. Δευτερεύουσα παράμετρος, δίνεται από τη σχέση (3.15)

- **Cr(i,t) [kWh]** Ενέργεια, που υπολείπεται για την πλήρη φόρτιση του συσσωρευτή του i -οστού οχήματος την ώρα t . Στην ουσία, είναι το περιθώριο, που έχει ένας συσσωρευτής να αποθηκεύσει ενέργεια. Δευτερεύουσα παράμετρος, δίνεται από τη σχέση (3.41)
- **DC(i) [\$/kWh]** Παράμετρος, που μοντελοποιεί το κόστος φθοράς του συσσωρευτή του i -οστού οχήματος λόγω της εκφόρτισης ενέργειας. Εμπεριέχει έναν αντισταθμιστικό παράγοντα, ο οποίος διασφαλίζει ότι ο aggregator δεν θα εκμεταλλεύεται τις διαφορές ενέργειας, που προκύπτουν από την απόδοση του φορτιστή, ώστε να χρεώνει επιπλέον τους οδηγούς. Η τιμή της παραμένει σταθερή για τα διαφορετικά βάρη εκφόρτισης, χάριν απλότητας. Δευτερεύουσα παράμετρος, δίνεται από τη σχέση (3.12)
- **Deg(i,t) [\$/]** Βοηθητική παράμετρος, που εισήχθη για να παραμείνει γραμμικό το πρόβλημα. Δείχνει τη χρηματική αποζημίωση, που πρέπει να πληρώσει ο aggregator στο i -οστό όχημα για τη φθορά που προκάλεσε στο συσσωρευτή του κατά την ώρα t . Δευτερεύουσα παράμετρος, δίνεται από τη σχέση (3.37)
- **Dep(i,t) [/]** Πιθανότητα μη προγραμματισμένης αποχώρησης του i -οστού οχήματος την ώρα t . Οι πιθανότητες αυτές, μπορούν να υπολογιστούν στατιστικά μελετώντας τις οδηγικές συμπεριφορές του εξεταζόμενου δείγματος. Πρωτεύουσα παράμετρος
- **Ef(i) [/]** Απόδοση του φορτιστή, που χρησιμοποιεί το i -οστό όχημα. Θεωρούμε ότι είναι κοινός τόσο για τη φόρτιση, όσο και για την εκφόρτιση του συσσωρευτή. Πρωτεύουσα παράμετρος
- **EFP(i,t) [kWh]** Αναμενόμενη ποσότητα ενέργειας, που ανταλλάσσει το i -οστό όχημα με το δίκτυο κατά την ώρα t . Θετικό πρόσημο σημαίνει ροή ενέργειας από το δίκτυο προς το όχημα (φόρτιση συσσωρευτή), ενώ αρνητικό πρόσημο σημαίνει ροή ενέργειας από το όχημα προς το δίκτυο (εκφόρτιση συσσωρευτή). Προκύπτει από το αλγεβρικό άθροισμα του βέλτιστου σημείου λειτουργίας και των ποσοτήτων της κάθε επικουρικής υπηρεσίας, που αναμένουμε να ζητηθούν ως ενέργεια κατά τη φάση της

κατανομής. Δευτερεύουσα παράμετρος, δίνεται από τη σχέση (3.1)

- **ERD(i,t) [kWh]**

Αναμενόμενη ποσότητα ενέργειας, που το δίκτυο θα ζητήσει από το i -οστό όχημα για την κάλυψη των αναγκών του σε κάτω ρύθμιση, κατά την ώρα t . Πρόκειται πάντα για ένα ποσοστό της ισχύος, που διαθέτει το όχημα για κάτω ρύθμιση. Η ποσότητα αυτή, εφόσον μιλάμε για κάτω ρύθμιση, προστίθεται στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας. Δευτερεύουσα παράμετρος, δίνεται από τη σχέση (3.4)
- **ERR(i,t) [kWh]**

Αναμενόμενη ποσότητα ενέργειας, που το δίκτυο θα ζητήσει από το i -οστό όχημα για την κάλυψη των αναγκών του σε στρεφόμενη εφεδρεία, κατά την ώρα t . Πρόκειται πάντα για ένα ποσοστό της ισχύος, που διαθέτει το όχημα για στρεφόμενη εφεδρεία. Η ποσότητα αυτή, εφόσον μιλάμε για στρεφόμενη εφεδρεία, αφαιρείται από το βέλτιστο σημείο λειτουργίας. Δευτερεύουσα παράμετρος, δίνεται από τη σχέση (3.5)
- **ERU(i,t) [kWh]**

Αναμενόμενη ποσότητα ενέργειας, που το δίκτυο θα ζητήσει από το i -οστό όχημα για την κάλυψη των αναγκών του σε άνω ρύθμιση, κατά την ώρα t . Πρόκειται πάντα για ένα ποσοστό της ισχύος, που διαθέτει το όχημα για άνω ρύθμιση. Η ποσότητα αυτή, εφόσον μιλάμε για άνω ρύθμιση, αφαιρείται από το βέλτιστο σημείο λειτουργίας. Δευτερεύουσα παράμετρος, δίνεται από τη σχέση (3.3)
- **ExD(t) [/]**

Ποσοστό της συνολικής διαθέσιμης ισχύος για κάτω ρύθμιση, που αναμένεται να ζητηθεί στη φάση της κατανομής ως ενέργεια, κατά την ώρα t . Για τον υπολογισμό αυτής της ποσότητας χρειάζεται να έχουμε ιστορικά στοιχεία για το πόσο συχνά καλείται η υπηρεσία της κάτω ρύθμισης στο εξεταζόμενο σύστημα και τι ποσοότητες καλούνται κάθε φορά. Δευτερεύουσα παράμετρος, δίνεται από τη σχέση (3.4)
- **ExR(t) [/]**

Ποσοστό της συνολικής διαθέσιμης ισχύος για στρεφόμενη εφεδρεία, που αναμένεται να ζητηθεί στη φάση της κατανομής ως ενέργεια κατά την ώρα t . Για

τον υπολογισμό αυτής της ποσότητας χρειάζεται να έχουμε ιστορικά στοιχεία για το πόσο συχνά καλείται η υπηρεσία της στρεφόμενης εφεδρείας στο εξεταζόμενο σύστημα και τι ποσότητες καλούνται κάθε φορά. Δευτερεύουσα παράμετρος, δίνεται από τη σχέση (3.5)

- **ExU(t) [/]**

Ποσοστό της συνολικής διαθέσιμης ισχύος για άνω ρύθμιση, που αναμένεται να ζητηθεί στη φάση της κατανομής ως ενέργεια κατά την ώρα t. Για τον υπολογισμό αυτής της ποσότητας χρειάζεται να έχουμε ιστορικά στοιχεία για το πόσο συχνά καλείται η υπηρεσία της άνω ρύθμισης στο εξεταζόμενο σύστημα και τι ποσότητες καλούνται κάθε φορά. Δευτερεύουσα παράμετρος, δίνεται από τη σχέση (3.3)
- **FP(i,k) [kWh]**

Η ποσότητα της ενέργειας, που ανταλλάσσει το i-οστό όχημα με το δίκτυο στη φάση της κατανομής, τόσο λόγω των ενεργειακών απαιτήσεων για την εξυπηρέτηση της ρύθμισης όσο και της στρεφόμενης εφεδρείας, κατά το χρονικό διάστημα k. Θετικό πρόσημο σημαίνει ροή ενέργειας από το δίκτυο προς το όχημα (φόρτιση συσσωρευτή), ενώ αρνητικό πρόσημο σημαίνει ροή ενέργειας από το όχημα προς το δίκτυο (εκφόρτιση συσσωρευτή). Δευτερεύουσα παράμετρος, δίνεται από το διάγραμμα ροής (3.5.2)
- **In [\$]**

Ημερήσια έσοδα του aggregator, προερχόμενα από 3 πηγές: πρώτον την πώληση ισχύος για τις επικουρικές υπηρεσίες της ρύθμισης και της στρεφόμενης εφεδρείας, δεύτερον την πώληση ενέργειας στους οδηγούς για την κάλυψη των οδηγιών τους αναγκών και τρίτον την πώληση ενέργειας στο δίκτυο. Δευτερεύουσα παράμετρος, δίνεται από τη σχέση (3.9)
- **k [/]**

Παράμετρος, που συμβολίζει σε ποιο χρονικό διάστημα βρισκόμαστε, κατά τη φάση της κατανομής. Η ημέρα προγραμματισμού χωρίζεται σε “k” χρονικά διαστήματα, τα οποία είναι η ελάχιστη υποδιαίρεση του χρόνου, που μεσολαβεί ανάμεσα σε δύο διαδοχικά σήματα ρύθμισης και στρεφόμενης εφεδρείας. Στην παρούσα προσομοίωση, έχουμε θεωρήσει ότι ο χρόνος αυτός είναι ίσος με 5 λεπτά επομένως η ημέρα προγραμματισμού χωρίζεται σε 288 διαστήματα

($288 \cdot 5 \text{min} = 24\text{h}$) και έτσι η παράμετρος “k” παίρνει τιμές από 1 έως 288.

- **L(t) [MW]** Προβλεπόμενο «καθαρό» φορτίο συστήματος για την ώρα t. Με τον όρο «καθαρό» εννοούμε το φορτίο, που προκύπτει αν από το συνολικό προβλεπόμενο φορτίο, αφαιρέσουμε την προβλεπόμενη παραγωγή από ΑΠΕ. Γίνεται αυτή η θεώρηση για να λάβουμε υπόψη την προτεραιότητα, που έχουν στην κάλυψη φορτίου οι ΑΠΕ. Πρωτεύουσα παράμετρος
- **Mc(i) [kWh]** Συνολική χωρητικότητα ενέργειας του συσσωρευτή του i-οστού οχήματος. Πρωτεύουσα παράμετρος
- **Mk [\$/kWh]** Τιμή, που χρεώνει ο aggregator την ενέργεια, που αγοράζουν οι οδηγοί των ηλεκτρικών οχημάτων για να αναπληρώσουν αυτήν που καταναλώθηκε κατά την πραγματοποίηση των ταξιδιών τους. Θεωρούμε ότι παραμένει σταθερή καθ’ όλη τη διάρκεια της ημέρας. Πρωτεύουσα παράμετρος
- **MnAP(i,t) [kW]** Ισχύς, που μπορεί να προσφέρει το i-οστό όχημα για την υπηρεσία της άνω ρύθμισης, κατά την ώρα t. Ο αλγόριθμος αναζητά τη βέλτιστη τιμή της παραμέτρου αυτής, ώστε να υπάρξει μεγιστοποίηση των κερδών του aggregator.
- **MnL [MW]** Ελάχιστη τιμή, που λαμβάνει το προβλεπόμενο καθαρό φορτίο καθ’ όλη την ημέρα προγραμματισμού. Δευτερεύουσα παράμετρος ίση με $\min\{L(t)\}$.
- **MP(i,t) [kW]** Μέγιστη δυνατή ισχύς, που μπορεί να διαρρεύσει από το σημείο σύνδεσης του i-οστού οχήματος με το δίκτυο, κατά την ώρα t. Στην προσομοίωση, έχουμε θεωρήσει ότι η παράμετρος αυτή παραμένει σταθερή όλες τις ώρες, διότι οι φορτιστές, που χρησιμοποιούν τα οχήματα τόσο στο σπίτι όσο και στο χώρο εργασίας έχουν το ίδιο μέγιστο ρεύμα εξόδου. Πρωτεύουσα παράμετρος.
- **MxAP(i,t) [kW]** Ισχύς, που μπορεί να προσφέρει το i-οστό όχημα για την υπηρεσία της κάτω ρύθμισης, κατά την ώρα t. Ο αλγόριθμος αναζητά τη βέλτιστη τιμή της παραμέτρου

αυτής, ώστε να υπάρξει μεγιστοποίηση των κερδών του aggregator.

- **MxL [MW]** Μέγιστη τιμή, που λαμβάνει το προβλεπόμενο καθαρό φορτίο για όλη την ημέρα προγραμματισμού. Δευτερεύουσα παράμετρος ίση με $\max\{L(t)\}$.
- **$P(t)$ [\$/kWh]** Προβλεπόμενη τιμή της ενέργειας στη χονδρεμπορική αγορά κατά την ώρα t . Παρόλο που οι προσφορές, που κάνει ο aggregator πρέπει να είναι της τάξης των MWh, η παράμετρος πρέπει να δίνεται σε \$/kWh και όχι σε \$/MWh για να αποφεύγονται άσκοποι πολλαπλασιασμοί. Πρωτεύουσα παράμετρος
- **$PD(i,k)$ [kWh]** Η ποσότητα της ενέργειας, που ανταλλάσσει το i -οστό όχημα με το δίκτυο στη φάση της κατανομής, λόγω των ενεργειακών απαιτήσεων μόνο για την εξυπηρέτηση της ρύθμισης, κατά το χρονικό διάστημα k . Θετικό πρόσημο σημαίνει ροή ενέργειας από το δίκτυο προς το όχημα (φόρτιση συσσωρευτή), ενώ αρνητικό πρόσημο σημαίνει ροή ενέργειας από το όχημα προς το δίκτυο (εκφόρτιση συσσωρευτή). Δευτερεύουσα παράμετρος, δίνεται από το διάγραμμα ροής (3.5.1).
- **$Plug(i,t)$ [/]** Δυναδική παράμετρος, ίση με 1 όταν το i -οστό όχημα αναμένουμε να είναι συνδεδεμένο με το δίκτυο και ικανό για V2G λειτουργία κατά την ώρα t , και ίση με 0 όταν αναμένουμε να είναι εν κινήσει και μη διαθέσιμο για V2G. Δευτερεύουσα παράμετρος δίνεται από τη σχέση (3.27)
- **$POP(i,t)$ [kW]** Βέλτιστο Σημείο Λειτουργίας του i -οστού οχήματος κατά την ώρα t . Είναι στην ουσία η προβλεπόμενη ισχύς εξόδου του εκάστοτε οχήματος. Θετική τιμή σημαίνει ότι το δίκτυο αντιμετωπίζει το όχημα ως ένα φορτίο, που οφείλει να εξυπηρετήσει, ενώ αρνητική τιμή σημαίνει ότι το δίκτυο αντιμετωπίζει το όχημα ως μία πηγή έγχυσης ισχύος. Όταν η πραγματική ισχύς εξόδου του οχήματος κατά τη φάση της κατανομής γίνει πιο μεγάλη από το POP συμβαίνει κάτω ρύθμιση, ενώ αντίθετα όταν γίνει πιο μικρή, συμβαίνει άνω ρύθμιση ή/και στρεφόμενη εφεδρεία. Ο αλγόριθμος αναζητά τη

βέλτιστη τιμή της παραμέτρου αυτής, ώστε να υπάρξει μεγιστοποίηση των κερδών του aggregator.

- **Prof [\$]** Αναμενόμενο καθαρό ημερήσιο κέρδος του aggregator, όπως αυτό προκύπτει από τη διαφορά αναμενόμενων ημερήσιων εσόδων μείον αναμενόμενων ημερήσιων εξόδων. Δευτερεύουσα παράμετρος δίνεται από τη σχέση (3.40).
- **PRd(t) [\$/kW]** Προβλεπόμενη οριακή τιμή συστήματος για την επικουρική υπηρεσία της κάτω ρύθμισης, κατά την ώρα t . Παρόλο που οι προσφορές που κάνει ο aggregator πρέπει να είναι της τάξης των MW, η παράμετρος πρέπει να δίνεται σε \$/kW και όχι σε \$/MW για να αποφεύγονται άκοποι πολλαπλασιασμοί. Πρωτεύουσα παράμετρος.
- **PRr(t) [\$/kW]** Προβλεπόμενη οριακή τιμή συστήματος για την επικουρική υπηρεσία της στρεφόμενης εφεδρείας, κατά την ώρα t . Παρόλο που οι προσφορές που κάνει ο aggregator πρέπει να είναι της τάξης των MW, η παράμετρος πρέπει να δίνεται σε \$/kW και όχι σε \$/MW για να αποφεύγονται άκοποι πολλαπλασιασμοί. Πρωτεύουσα παράμετρος.
- **PRu(t) [\$/kW]** Προβλεπόμενη οριακή τιμή συστήματος για την επικουρική υπηρεσία της άνω ρύθμισης, κατά την ώρα t . Παρόλο που οι προσφορές που κάνει ο aggregator πρέπει να είναι της τάξης των MW, η παράμετρος πρέπει να δίνεται σε \$/kW και όχι σε \$/MW για να αποφεύγονται άκοποι πολλαπλασιασμοί. Πρωτεύουσα παράμετρος.
- **Rd(t) [kW]** Συνολική ποσότητα ισχύος, που προσφέρει ο aggregator στο δίκτυο για κάτω ρύθμιση κατά την ώρα t . Είναι το άθροισμα των διαθέσιμων ποσοτήτων όλων των οχημάτων, που έχει υπό τον έλεγχο του ο aggregator και το ποσό αυτό, για το οποίο τελικά θα ανταμειφθεί ανεξάρτητα με το αν κατά τη φάση της κατανομής θα ζητηθούν ποσά κάτω ρύθμισης. Παρόλο που οι προσφορές που κάνει ο aggregator πρέπει να είναι της τάξης των MW, η παράμετρος πρέπει να δίνεται σε \$/kW και όχι σε \$/MW για να αποφεύγονται άκοποι

πολλαπλασιασμοί. Δευτερεύουσα παράμετρος, δίνεται από τη σχέση (3.7).

- **Rr(t) [kW]**

Συνολική ποσότητα ισχύος, που προσφέρει ο aggregator στο δίκτυο για στρεφόμενη εφεδρεία, κατά την ώρα t. Είναι το άθροισμα των διαθέσιμων ποσοτήτων όλων των οχημάτων, που έχει υπό τον έλεγχο του ο aggregator και το ποσό αυτό, για το οποίο τελικά θα ανταμειφθεί ανεξάρτητα με το αν κατά τη φάση της κατανομής θα ζητηθούν ποσά στρεφόμενη εφεδρείας. Παρόλο που οι προσφορές, που κάνει ο aggregator πρέπει να είναι της τάξης των MW, η παράμετρος πρέπει να δίνεται σε \$/kW και όχι σε \$/MW για να αποφεύγονται άκοποι πολλαπλασιασμοί. Δευτερεύουσα παράμετρος, δίνεται από τη σχέση (3.8)
- **RRS(k) [kW]**

Ποσότητα ισχύος στρεφόμενης εφεδρείας, που ζητάει ο Διαχειριστής Συστήματος από τον aggregator κατά τη φάση της κατανομής, κατά το χρονικό διάστημα k. Σύμφωνα με τη σύμβαση, που ακολουθούμε, η παράμετρος αυτή παίρνει μόνο μηδενικές τιμές (όταν δεν ζητείται από το σύστημα η συγκεκριμένη επικουρική υπηρεσία), ή αρνητικές (όταν ζητείται μία ποσότητα). Παρόλο που οι ποσότητες, που ζητά το σύστημα είναι της τάξης των MW, η παράμετρος πρέπει να δίνεται σε kW και όχι σε MW για να αποφεύγονται άκοποι πολλαπλασιασμοί. Πρωτεύουσα παράμετρος
- **RS(k) [kW]**

Ποσότητα ισχύος ρύθμισης, που ζητάει ο Διαχειριστής Συστήματος από τον aggregator κατά τη φάση της κατανομής, κατά το χρονικό διάστημα k. Σύμφωνα με τη σύμβαση, που ακολουθούμε, η παράμετρος αυτή παίρνει μηδενικές τιμές (όταν δεν ζητείται από το σύστημα η συγκεκριμένη επικουρική υπηρεσία), αρνητικές (όταν ζητείται μία ποσότητα άνω ρύθμισης) ή θετικές (όταν ζητείται μία ποσότητα κάτω ρύθμισης). Παρόλο που οι ποσότητες, που ζητά το σύστημα είναι της τάξης των MW, η παράμετρος πρέπει να δίνεται σε kW και όχι σε MW για να αποφεύγονται άκοποι πολλαπλασιασμοί. Πρωτεύουσα παράμετρος
- **rSOC(i,k) [kWh]**

Στάθμη φόρτισης του συσσωρευτή του i-οστού οχήματος ή αλλιώς ποσότητα ενέργειας, που είναι

αποθηκευμένη στο συσσωρευτή κατά το χρονικό διάστημα k της φάσης κατανομής. Η παράμετρος μεταβάλλεται ανάλογα με τα ταξίδια, που έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι στιγμής αλλά και ανάλογα με την ενέργεια, που έχει διακινηθεί με το δίκτυο. Δευτερεύουσα παράμετρος, δίνεται από το διάγραμμα ροής (3.5.2)

- **$R_sRP(i,t)$ [kW]** Ισχύς, που μπορεί να προσφέρει το i -οστό όχημα για την υπηρεσία της στρεφόμενης εφεδρείας, κατά την ώρα t . Ο αλγόριθμος αναζητά τη βέλτιστη τιμή της παραμέτρου αυτής, ώστε να υπάρξει μεγιστοποίηση των κερδών του aggregator.
- **$R_u(t)$ [kW]** Συνολική ποσότητα ισχύος, που προσφέρει ο aggregator στο δίκτυο για άνω ρύθμιση, κατά την ώρα t . Είναι το άθροισμα των διαθέσιμων ποσοτήτων όλων των οχημάτων, που έχει υπό τον έλεγχο του ο aggregator και το ποσό αυτό, για το οποίο τελικά θα ανταμειφθεί, ανεξάρτητα με το αν κατά τη φάση της κατανομής θα ζητηθούν ποσά άνω ρύθμισης. Παρόλο που οι προσφορές, που κάνει ο aggregator πρέπει να είναι της τάξης των MW, η παράμετρος πρέπει να δίνεται σε $\$/kW$ και όχι σε $\$/MW$ για να αποφεύγονται άκοποι πολλαπλασιασμοί. Δευτερεύουσα παράμετρος, δίνεται από τη σχέση (3.6).
- **$SOC(i,t)$ [kWh]** Αναμενόμενη στάθμη φόρτισης του συσσωρευτή του i -οστού οχήματος ή αλλιώς ποσότητα ενέργειας, που αναμένουμε να είναι αποθηκευμένη στο συσσωρευτή κατά την ώρα t . Η παράμετρος μεταβάλλεται ανάλογα με τα ταξίδια, που θεωρούμε ότι έχουν γίνει μέχρι στιγμής αλλά και ανάλογα με την ενέργεια, που περιμένουμε να έχει διακινηθεί με το δίκτυο. Η διαφορά της παραμέτρου $SOC(i,t)$ με την $rSOC(i,k)$ είναι ότι στην πρώτη περίπτωση αναφερόμαστε στη φάση του προγραμματισμού, όπου παίζουν ρόλο τα αναμενόμενα ταξίδια και αναμενόμενη ροή ενέργειας, ενώ στη δεύτερη περίπτωση αναφερόμαστε στη φάση της κατανομής, όπου ρόλο παίζουν τα πραγματικά ταξίδια και η πραγματική ροή ενέργειας. Εάν οι προβλέψεις είναι 100% ακριβείς, οι δύο παράμετροι ταυτίζονται. Δευτερεύουσα παράμετρος, δίνεται από τη σχέση (3.33)

- **SOCI(i) [kWh]** Αρχική στάθμη φόρτισης του συσσωρευτή του i -οστού οχήματος ή αλλιώς η ποσότητα ενέργειας, που είναι αποθηκευμένη στο συσσωρευτή στην αρχή της 1^{ης} ώρας της ημέρας προγραμματισμού. Πρωτεύουσα παράμετρος.
- **t [/]** Ελάχιστη υποδιαίρεση του χρονικού διαστήματος, που χωρίζουμε την ημέρα προγραμματισμού. Επειδή συνηθίζεται στις αγορές ενέργειας η χρονική διάρκεια των συμβολαίων να είναι η μία ώρα, θεωρούμε ότι $t \in [1,24]$.
- **T [/]** Το τελευταίο χρονικό διάστημα της ημέρας προγραμματισμού. Αν τη χωρίσουμε σε διαστήματα της μίας ώρας, τότε προφανώς $T=24$.
- **Trips(i,t) [kWh]** Η ενέργεια, που θα καταναλωθεί για την πραγματοποίηση των ταξιδιών, που αναμένουμε να κάνει το i -οστό όχημα κατά την ώρα t . Θεωρούμε ότι το κάθε όχημα πραγματοποιεί 2 προγραμματισμένα ταξίδια, ένα από το σπίτι προς τη δουλειά και ένα από τη δουλειά προς το σπίτι. Εάν το όχημα δεν αναμένεται να πραγματοποιήσει κάποιο ταξίδι την ώρα t η παράμετρος είναι ίση με μηδέν. Η τιμή της παραμέτρου μπορεί να υπολογιστεί ως το γινόμενο των χιλιομέτρων, που αναμένουμε ότι θα διανυθούν επί την ενεργειακή κατανάλωση ανά km του i -οστού οχήματος. Πρωτεύουσα παράμετρος
- **Trip2(i,t) [kWh]** Η ενέργεια, που θα καταναλωθεί για την πραγματοποίηση μόνο του ταξιδιού επιστροφής του i -οστού οχήματος από τη δουλειά προς το σπίτι. Η παράμετρος είναι μηδενική για όλα τα χρονικά διαστήματα t , εκτός από εκείνο, κατά τη διάρκεια του οποίου, θεωρούμε ότι θα πραγματοποιηθεί το ταξίδι της επιστροφής. Η τιμή της παραμέτρου μπορεί να υπολογιστεί ως το γινόμενο των χιλιομέτρων, που αναμένουμε ότι θα διανυθούν κατά το ταξίδι επιστροφής επί την ενεργειακή κατανάλωση ανά km του i -οστού οχήματος. Πρωτεύουσα παράμετρος