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

Ανάπτυξη αλγορίθμου ενεργειακής διαχείρισης στόλου ηλεκτρικών οχημάτων στα πλαίσια λειτουργίας ενός εικονικού σταθμού παραγωγής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΡΑΚΟΣ Σ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Επιβλέπων : Χατζυαργυρίου Νικόλαος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα,Ιούλιος 2016

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

Ανάπτυξη αλγορίθμου ενεργειακής διαχείρισης στόλου ηλεκτρικών οχημάτων στα πλαίσια λειτουργίας ενός εικονικού σταθμού παραγωγής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΕΩΡΓΙΟΣ Σ. ΔΡΑΚΟΣ

Επιβλέπων : Χατζυαργυρίου Νικόλαος

Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 13 Ιουλίου 2016.

.....	.....	.....
Χατζηαργυρίου Νικόλαος	Παπαθανασίου Σταύρος	Γεωργιλάκης Παύλος

Αθήνα, Ιούλιος 2016

.....

Γεώργιος Σ. Δράκος

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

Copyright © Γεώργιος Σ. Δράκος, 2016
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

Προβλέπεται ότι τα επόμενα χρόνια, τα ηλεκτρικά οχήματα με δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας (plug-in EVs), θα έχουν σημαντικά περιβαλλοντικά και οικονομικά πλεονεκτήματα λόγω της δυνατότητας τους να λειτουργούν ως διεσπαρμένες μονάδες αποθήκευσης ενέργειας. Παραδείγματος χάριν να αποθηκεύουν ενέργεια κατά τις ώρες εκείνες που η τιμή ενέργειας του δικτύου είναι χαμηλή μέσω της G2V λειτουργίας και να υποστηρίζουν την λειτουργία του δικτύου (περιορίζοντας τις αιχμές του δικτύου, ρυθμίζοντας την συχνότητα και τα επίπεδα τάσης του κ.α) εκχύοντας ενέργεια στο δίκτυο μέσω της V2G λειτουργίας τις ώρες με υψηλή ζήτηση φορτίου. Το βασικό χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί τα ηλεκτρικά οχήματα από τις μπαταρίες είναι η κινητικότητα τους. Τα ηλεκτρικά οχήματα τις ώρες που δεν μετακινούνται συνδέονται με το δίκτυο απαιτώντας ένα ημερήσιο ποσό ενέργειας, ώστε να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες μετακινησής τους.

Παρόλο που η ενσωμάτωση διεσπαρμένων μονάδων όπως ευέλικτων φορτίων, ηλεκτρικών οχημάτων και μονάδων παραγωγής είναι επιθυμητή, εντούτοις, η αυξημένη διείσδυση αυτών των τεχνολογιών αναμένεται να τροποποιήσει τον τρόπο που τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργούσαν και κατασκευάζονταν. Είναι απολύτως κατανοητό ότι η ενσωμάτωση αυτών των διεσπαρμένων μονάδων χωρίς την συνεχή παρακολούθηση της λειτουργίας τους αναμένεται να είναι επιζήμια για την ασφαλή και ομαλή λειτουργία του δικτύου. Υπάρχουν κυρίως δύο εναλακτικές για να ενσωματώσουμε αποτελεσματικά τις διεσπαρμένες μονάδες σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, η έννοια του μικροδικτύου (microgrids), ή η έννοια του εικονικού σταθμού παραγωγής (Virtual Power Plant).Η έννοια του μικροδικτύου αφορά κυρίως δίκτυα μέσης ή χαμηλής τάσης που διαθέτουν διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής, διαχειρίσιμα φορτία και μονάδες αποθήκευσης ενέργειας, τα οποία λειτουργούν με ένα εννιαίο τρόπο διαχείρισης επιτυγχάνοντας την θεώρηση τους από το υπόλοιπο δίκτυο ως μια εννιαία οντότητα η οποία έχει την δυνατότητα ακόμα και να λειτουργήσει αυτόνομα. Από την άλλη πλευρά, οι οντότητες ενός εικονικού σταθμού παραγωγής (VPP) δεν είναι απαραιτητο να εντοπίζονται στην ίδια γεωγραφική περιοχή, αλλά χρησιμοποιώντας συστήματα επικοινωνίας καταφέρνουν να λειτουργούν σαν μια ενιαία αγοραστική οντότητα.

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αποσκοπεί, να μελετήσει την ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων σε ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο υιοθετεί την ένοια του εικονικού σταθμού παραγωγής (VPP). Με δεδομένο αυτό, ένα ιεραρχικό μοντέλο λήψης αποφάσεων αναπτύχθηκε, το οποίο έχει ως στόχο να περιγράψει την αληλεπίδραση των αποφάσεων μεταξύ του διαχειριστή του εικονικού σταθμού παραγωγής (aggregator) και των διεσπαρμένων μονάδων, όπως είναι τα ευέλικτα φορτία, τα διακοπτόμενα φορτία, τα ελαστικά φορτία τα οποία ελέγχονται μέσω καμπύλης τιμής, τις μονάδες παραγωγής και τα ηλεκτρικά οχήματα. Το συγκεκριμένο μοντέλο αποτυπώθηκε σαν ένα διεπίπεδο πρόβλημα βελτιστοποίησης για τον διαχειριστή του VPP ο οποίος συμβάλει στον ενεργειακό προγραμματισμό της

επόμενης μέρας, μοντέλο το οποίο είναι παρόμοιο με ένα πρόβλημα παιγνίων του Stackelberg (Stackelberg type gme). Αυτό το διεπίπεδο πρόβλημα βελτιστοποίησης μετατράπηκε σε ένα μικτό ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού πρόβλημα χρησιμοποιώντας τις συνθήκες Karush-Kuhn-Tucker και την αρχή της δυϊκότητας. Ο διαχειριστής του VPP επιτυγχάνει την ενεργειακή διαχείριση των διεσπαρμένων μονάδων έμμεσα χρησιμοποιώντας σήματα τιμών τα οποία μεταφέρονται σε κάθε μια αγοραστική οντότητα του VPP, κάνοντας χρήση των μέσων τηλεπικοινωνίας (the ICT infrastructure) που εισάγει η τεχνολογία των έξυπνων δικτύων (the *Smart Grid* concept). Ο κύριως στόχος του αλγόριθμου είναι να μεγιστοποιήσει τόσο τα κέρδη του διαχειριστή του VPP, όσο και τα κέρδη των διεσπαρμένων μονάδων των οποίων το ενεργειακό προφίλ είναι γνωστό εκ των προτέρων. Τα ηλεκτρικά οχήματα ενσωματώνονται στο VPP θεωρώντας ότι η ροή ενέργειας τους από και προς το δίκτο είναι διττή (φόρτιση, εκφόρτιση).Πιο συγκεκριμένα, στοχεύουν να εξυπηρετήσουν τις ενεργειακές ανάγκες μετακίνησης τους στο χαμηλότερο κόστος καθώς και να παράξουν στο διαχειριστή του VPP υπηρεσίες αποθήκευσης ενέργειας συμβάλλοντας στην οικονομικότερη λειτουργία του.Τέλος, ο ημερήσιος ενεργειακός προγραμματισμός του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων καθορίζει το ενεργειακού του προφίλ βασιζόμενος σε μια στοχαστική πρόβλεψη των μετακινήσεων του.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ηλεκτρικά οχήματα, Πάροχος ηλεκτρικής ενέργειας, Vehicle-to-grid (V2G), Διεπίπεδος προγραμματισμός μεγιστοποίηση κέρδους, Ημερήσιος ενεργειακός προγραμματισμός

ABSTRACT

It is foreseen that, in the upcoming years, plug-in Electric Vehicles (EVs) will have a noteworthy environmental and economic benefit, due to their ability to operate as distributed storage units, i.e. store energy during off-peak hours when the electricity prices are low (*Grid-to-Vehicle operation, G2V*) and support grid operation (peak shaving, voltage/frequency support, etc.) by injecting power to the grid (*Vehicle-to-Grid operation, V2G*) during high consumption periods. The basic characteristic that differentiates electric vehicles from stationary batteries is their mobility. Electric vehicles are only connected to the grid during non-commuting hours and they request a specific amount of energy daily in order to meet their daily travel energy needs.

Although the integration of distributed energy resources (DERs), such as responsive loads, electric vehicles and distributed generation is desirable, the increased penetration of such technologies are expected to modify the way electric networks are operated and designed. It is well understood that the integration of DER units into the power system under the "*fit-and-forget*" principle is not efficient for the secure and reliable operation of power grids. There are two alternatives to integrate efficiently DERs into power grids: *Microgrids* and *Virtual Power Plants (VPPs)*. Microgrids are low or medium voltage networks with DER, controllable loads and storage devices that operate in a co-ordinated, controlled way, that allows them to be considered by the upstream network as one entity, but can also operate in island mode, in case of faults in the upstream network On the other hand, VPP components are not necessarily located on the same physical network, but they are also coordinated using networking infrastructure, in order to operate as one market entity.

This thesis aims to study the integration of electric vehicles into power systems under the VPP concept. In this respect, a hierarchical decision making model is developed describing the interdependence of decisions between the VPP operator (Aggregator) and the distributed resources owners, such as flexible loads, curtailable loads, bid loads, distributed generation and electric vehicles. The model was formulated as a two level decision optimization problem which is equivalent to a Stackelberg-type game for the VPP aggregator in the day-ahead market. This two level decision optimization problem was converted into a mixed-integer linear programing model using the Karush-Kuhn-Tucker optimality conditions and the strong duality theory. The aggregator accomplishes the energy management of the distributed resources indirectly, by using price signals which are communicated to the respective energy stakeholders through the ICT infrastructure introduced by the *Smart Grid* concept. The main goal of the algorithm is to maximize both the profit of the aggregator, as well as the profits of the distributed energy resources which their price signal-depending behaviors are known a priori. Electric vehicles are integrated into VPP considering bi-directional power flow (charging/discharging) aiming to serve their mobility energy needs at the lowest cost as well as to offer storage services to the aggregator contributing to a more cost efficient VPP operation. The EV management approach is the day ahead schedule where the

VPP operator defines the EV fleet market operational profile (charging/discharging) based on the stochastic EV travel patterns.

KEY WORDS

Electric vehicles, Aggregator, Vehicle-to-grid (V2G), Two-level linear programming, Optimization problem, Energy management, Day-ahead market

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2015-2016 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 επετράπη 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.

Γεώργιος Σ. Δράκος
Ιούλιος 2016

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ 13

1.1 Εισαγωγή 13

1.2 Ιστορική αναδρομή 14

1.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσης ηλεκτρικών οχημάτων 19

1.4 Τύποι Ηλεκτρικών Οχημάτων 22

1.4.1 Ηλεκτρικά οχήματα με συσσωρευτές (BEV) 22

1.4.2 Ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου (FCEV) 23

1.4.3 Υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (HEV) 24

1.5 Ηλεκτρικά οχήματα με δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο (Plug-in EVs) 25

1.6 Συσσωρευτές ηλεκτρικών οχημάτων 27

1.7 Τύποι φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων 29

1.7.1 Φόρτιση με επαφή 29

1.7.2 Επαγωγική Φόρτιση 30

1.7.3 Σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων φόρτισης 31

1.8 Κατηγορίες φόρτισης 32

1.9 Σταθμοί φόρτισης 33

1.10 V2G Διαδικασία 34

2 ΑΓΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ 37

2.1 Ιστορική αναδρομή 37

2.2 Μοντέλο αντιπροσώπου αγοράς 38

2.3 Βασικές αρχές της απελευθερωμένης αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας 41

2.4 Ημερήσιος Ενεργειακός Προγραμματισμός (ΗΕΠ) 42

2.5 Επιχειρηματικό μοντέλο με βασικό άξονα τα ηλεκτρικά οχήματα 44

2.6 Μελλοντικές βλέψεις-Αγοραπωλησία σε επίπεδο καταναλωτών 47

2.7 Τεχνολογική Υποστήριξη 48

3 VIRTUAL POWER PLANT 49

3.1 Εισαγωγή 49

3.2 Virtual Power Plant και ηλεκτρικά οχήματα 51

3.3 Διαφορετικές υλοποιήσεις ενός Virtual Power Plant εγχειρήματος 53

3.3.1 Άμεσος έλεγχος ενός Virtual Power Plant 55

3.3.2 Ιεραρχικός έλεγχος ενός Virtual Power Plant 56

3.3.3 Διανεμημένος έλεγχος ενός Virtual Power Plant *57*
3.4 Εφαρμογή του Virtual Power Plant στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία. 58
4 ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ (LP) 60
4.1 Διεπίπεδος προγραμματισμός 63
4.2 Θεωρία παιγνίων 64
5 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ 66
5.1 Σκοπός κεφαλαίου 66
5.2 Μονάδες παραγωγής 67
5.3 Ελαστικά φορτία ελεγχόμενα μέσω καμπυλών τιμής 70
5.4 Διακοπτόμενα φορτία 73
5.5 Ευέλικτα φορτία 76
5.6 Μη ελεγχόμενα φορτία 77
5.7 Ηλεκτρικά οχήματα 77
5.8 Άνω επίπεδο Aggregator-Ηγέτης 79
6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ 82
6.1 Σκοπός κεφαλαίου 82
6.2 Παρουσίαση του VPP χωρίς την ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων 82
6.3 Ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στο VPP με G2V λειτουργία 86
6.3.1 Εφαρμογή ορίου ισχύος 18.5 MW στη ζήτηση του VPP από το ανάντη δίκτυο *91*
6.3.2 Εφαρμογή ορίου ισχύος 16.5 MW στη ζήτηση του VPP από το ανάντη δίκτυο *96*
6.4 Ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στο VPP με V2G λειτουργία 102
6.4.1 Εφαρμογή ορίου ισχύος 18.5 MW στη ζήτηση του VPP από το ανάντη δίκτυο *106*
6.4.2 Εφαρμογή ορίου ισχύος 16.5 MW στη ζήτηση του VPP από το ανάντη δίκτυο *112*
7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ.. 118
7.1 Σύνοψη και συμπεράσματα 118
7.2 Μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας 120
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ 121

1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ

1.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια κατακόρυφη αύξηση των αέριων ρύπων του θερμοκηπίου καθώς και μια έντονη επιβάρυνση της ατμόσφαιρας των αστικών πόλεων. Οι δυο αυτές διαπιστώσεις έδωσε ώθηση στην υιοθέτηση νέων «πράσινων» μέσων μεταφοράς τα οποία δεν θα επιβαρύνουν το περιβάλλον. Διαφαίνεται ότι η ιδανικότερη λύση στο ζήτημα των μεταφορών αποτελούν τα ηλεκτρικά οχήματα. Ραγδαίες ήταν οι εξελίξεις στο χώρο των μπαταριών ενισχύοντας την ανταγωνιστικότητα των ηλεκτρικών οχημάτων τραβώντας το ενδιαφέρον των κυβερνήσεων και μεγάλων αυτοκινητοβιομηχανιών προς τον τομέα αυτό. Ωστόσο, αποτελεί ένα καινούργιο εγχείρημα που ναι μεν κερδίζει αρκετό έδαφος αλλά χρειάζονται ακόμα αρκετές προσπάθειες ώστε τα ηλεκτρικά οχήματα να γίνουν μέρος της καθημερινότητας μας. Τα σημαντικότερα εμπόδια μέχρι στιγμής είναι η έλλειψη κατάλληλων υποδομών και συγκεκριμένου ρυθμιστικού πλαισίου για την διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων.

Στο σημείο αυτό χρήσιμο είναι να δώσουμε τον ορισμό των ηλεκτρικών οχημάτων (Electric Vehicle/EV) ως το κάθε όχημα, το οποίο για την προώθηση του χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια μέσω ενός ή περισσοτέρων ηλεκτρικών κινητήρων, αντί της συνήθους πρακτικής, που επιβάλλει μία μηχανή εσωτερικής καύσης. Παρόλη την ύπαρξη διαφορετικών κατηγοριών ηλεκτρικών οχημάτων, π.χ. 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 για την κίνηση των τροχών. Όταν η αποθηκευμένη ενέργεια τελειώσει λόγω της κατανάλωσης της για την κίνηση του οχήματος 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.

Τέλος, με την υπερκέραση των παραπάνω εμποδίων, η υιοθέτηση ηλεκτρικών οχημάτων αναμένεται να έχει πολλαπλά οφέλη αυξάνοντας την αξιοπιστία και την αποδοτικότητα των συστημάτων. Το σημαντικό αυτό όφελος προκύπτει μέσω της V2G λειτουργίας του ηλεκτρικού οχήματος κατά την οποία κάνουμε χρήση της δυνατότητας της μπαταρίας ενός ηλεκτρικού οχήματος να αποθηκεύουμε και στην συνέχεια να αποδίδουμε ενέργεια στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Η V2G λειτουργία έχει την δυνατότητα να συμβάλει σημαντικά στη μείωση των μέχρι στιγμής εκπεμπόμενων ρύπων στην ατμόσφαιρα με τρεις κύριους τρόπους. Αρχικά, με την δυνατότητα πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο θα προσφέρει έσοδα στον κάτοχο ενός ηλεκτρικού οχήματος παρακινώντας και άλλους πολίτες στην αγορά ενός ηλεκτρικού οχήματος. Δεύτερον, στις ώρες αιχμής ενός δικτύου, όπου αναγκάζονται να λειτουργούν εργοστάσια με ορυκτά καύσιμα, η προσφορά ηλεκτρικής ενέργειας από τα ηλεκτρικά οχήματα θα μείωνε σημαντικά τους εκπεμπόμενους ρύπους αφού θα κάλυπταν ένα μέρος της παραγόμενης τους ενέργεια. Τρίτον, η σύνδεση ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο θα οδηγούσε σε αύξηση της διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών

ενέργειας σε αυτό. Όπως είναι κοινά γνωστό η έλλειψη αποθήκευσης της ενέργειας είναι ένα βασικό εμπόδιο στην εισαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από πηγές διακοπτόμενης παραγωγής όπως είναι τα αιολικά και τα φωτοβολταϊκά. Επομένως, κάνοντας χρήση ενός μεγάλου στόλου οχημάτων όπου θα πρόσφερε αποθήκευση και παραγωγή ενέργειας όποτε ζητείται το κύριο αυτό εμπόδιο στην εισαγωγή ανανεώσιμων πηγών θα ξεπερνιόταν [25],[27].

Στην συνέχεια περιγράφεται μια ιστορική αναδρομή των ηλεκτρικών οχημάτων.

1.2 Ιστορική αναδρομή

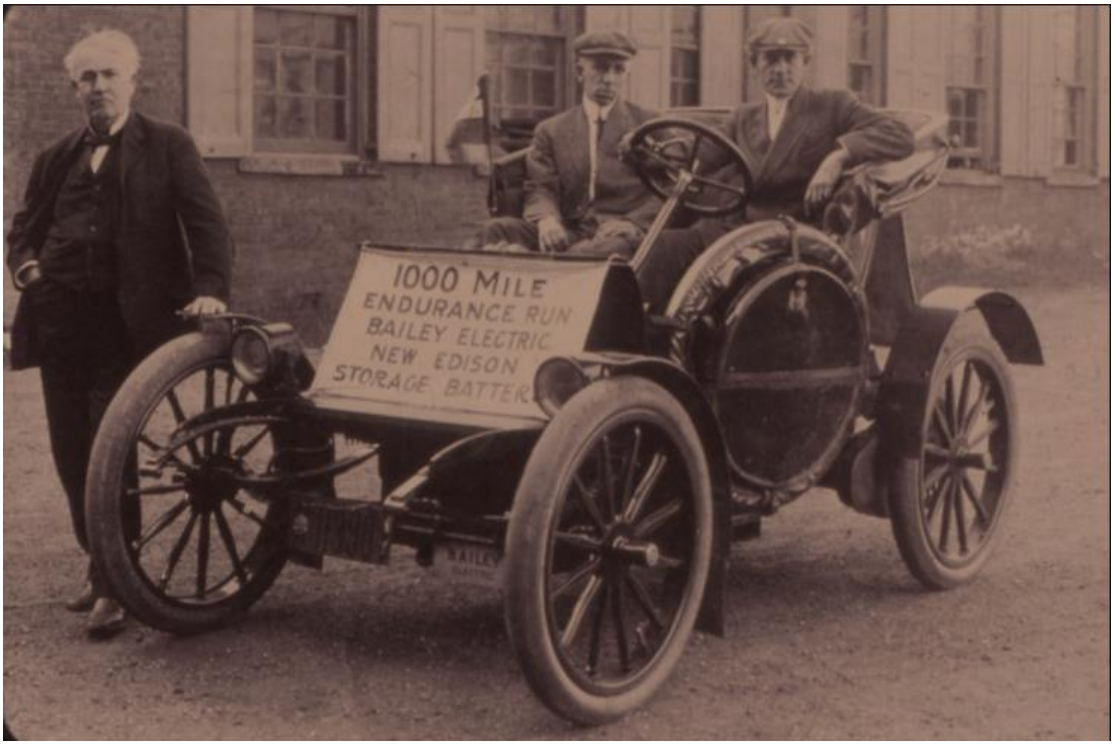
Κάποιοι πιθανόν να έχουν εσφαλμένα την εντύπωση ότι τα ηλεκτρικά οχήματα είναι ένα τεχνολογικό δημιούργημα των τελευταίων ετών. Στην πραγματικότητα τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν μια μακρόχρονη ιστορία που ξεκινά στα μέσα του $19^{ου}$ αιώνα, ταυτόχρονα περίπου με την εμφάνιση των συμβατικών οχημάτων. Μάλιστα υπάρχουν περιγραφές που αναφέρουν ότι το ηλεκτρικό όχημα ήταν τόσο δημοφιλές όσο και ο ανταγωνιστής του που κινείτο με μηχανές εσωτερική καύσης.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα σημαντικότερα γεγονότα που οδήγησαν στην εξέλιξη του ηλεκτρικού οχήματος στην πάροδο του χρόνου.

- 1831: Ο Joseph Henry, Καθηγητής Μαθηματικών στο Albany NY, εφευρίσκει τον ηλεκτροκινητήρα στην προσπάθειά του να κατανοήσει τους ηλεκτρομαγνήτες.
- 1834: Ο αμερικανός Thomas Davenport ένας σιδηρουργός από το Vermont, εφευρίσκει το πρώτο ηλεκτρικό όχημα για εμπορική χρήση. Παρόλα αυτά, οι προσπάθειες του δεν είναι επικερδής λόγω της χρήσης αναξιόπιστων, πρωτόγονων και μη επαναφορτιζόμενων μπαταριών.
- Μεταξύ του 1832 και 1839: Ο Robert Anderson από την Σκωτία εφευρίσκει την πρώτη ηλεκτρική άμαξα.
- 1847: Ο Moses Farmer από τη Μασαχουσέτη των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής, κατασκεύασε ένα όχημα που τροφοδοτούνταν από 48 ηλεκτρικά στοιχεία και μπορούσε να μεταφέρει δύο άτομα. Ενώ, την ίδια εποχή ο καθηγητής Charles Page παρουσιάζει ένα ηλεκτρικό όχημα το οποίο διαθέτει 100 συσσωρευτές, κινητήρα 16 ίππων και έχει την δυνατότητα να μετέφερε 12 άτομα με ταχύτητα μέχρι και 19 μίλια/ώρα.
- 1859: Ο Γάλλος φυσικός Gaston Plante καταφέρνει να αντιμετωπίσει τα προβλήματα των συσσωρευτών που είχαν οι προηγούμενες εφευρέσεις ανακαλύπτοντας για πρώτη φορά τις μπαταρίες Μολύβδου-Οξέως (Pb-Acid) που έχουν δυνατότητα επαναφόρτισης. Με τον τρόπο αυτό έπαψε να είναι

απαραίτητη η συνεχής αντικατάσταση των ηλεκτρικών μπαταριών μετά την εκφόρτισή τους.

- 1889: Ο Thomas Edison κατασκευάζει ένα ηλεκτρικό όχημα χρησιμοποιώντας αλκαλικές μπαταρίες.



Εικόνα 1.2.1. Το ηλεκτρικό όχημα του Thomas Edison [29].

- 1890: Ο William Morrison κατασκευάζει το πρώτο επιτυχημένο ηλεκτρικό αυτοκίνητο στο Des Moines των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής το οποίο μπορεί να ταξιδέψει για 13 ώρες με μια ταχύτητα 14mph (22,53 km/h).
- 1896: Η εταιρία Electric Car Co. εισάγει στους δρόμους της Νέας Υόρκης τα πρώτα ηλεκτροκίνητα ταξί.
- 1897: Η Baker Motor Vehicle Company κατασκευάζει ένα όχημα με αυτονομία 161 χιλιομέτρων ανά φόρτιση και μέγιστη ταχύτητα τα 35,4 χιλιόμετρα την ώρα.
- 1899: Κατασκευάζεται στην Γαλλία το πρώτο αγωνιστικό ηλεκτρικό όχημα που ταξιδεύει με 108 χιλιόμετρα ανά ώρα, το οποίο ονομάζεται “La Jamais Contente”.
- 1900: Τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν φτάσει να κατέχουν το ίδιο μερίδιο αγοράς με τους ανταγωνιστές τους, τα οχήματα εσωτερικής καύσης και τα ατμοκίνητα. Μάλιστα, το ποσοστό τους στην Αμερική φτάνει στο 38%. Την ίδια χρόνια ο Ferdinand Porsche κατασκευάζει το πρώτο υβριδικό ηλεκτρικό όχημα και φτάνει τα 56 χιλιόμετρα ανά ώρα.

- 1908: Ο Henry Ford παρουσιάζει το Model T με κόστος αρκετά μικρότερο από αυτό των ηλεκτρικών οχημάτων. Οι μέθοδοι μαζικής παραγωγής που εφαρμόστηκαν στο εργαστήριο του Φορντ σηματοδότησαν την αρχή του τέλους της ηλεκτροκίνησης.
- 1920: Η παραγωγή ηλεκτρικών αυτοκινήτων σταματά να είναι βιώσιμη, η τιμή πώλησής τους συνεχώς αυξάνεται και οι πωλήσεις ελαχιστοποιούνται. Χαρακτηριστικά η Detroit Electric Car Company από 1139 μονάδες το 1918 φτάνει να πουλά μόνο 191 το 1920. Από την άλλη πλευρά η μαζική παραγωγή των βενζινοκίνητων οχημάτων από τον Henry Ford έκανε τα οχήματα αυτά διαθέσιμα σε αρκετά χαμηλές τιμές μεταξύ 500$ και 1000$.
- 1920-1990: Τα βενζινοκίνητα οχήματα προτιμώνται λόγω των μεγαλύτερων αποστάσεων που μπορούν να διανύσουν, της μεγαλύτερης ιπποδύναμης και της χαμηλής τιμής της βενζίνης σε σχέση με τον ηλεκτρισμό. Μόνο η Μεγάλη Βρετανία διατηρεί ένα σχετικά μεγάλο αριθμό ηλεκτρικών οχημάτων, χρησιμοποιώντας τα για τη διανομή γάλατος, ψωμιού και αλληλογραφίας.
- Δεκαετία 1970: Η ανησυχία για την αύξηση των τιμών του πετρελαίου, που κορυφώθηκε με την πετρελαϊκή κρίση του 1973, καθώς και το διαρκώς εντονότερο περιβαλλοντικό κίνημα οδηγούν σε αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος για τα ηλεκτρικά οχήματα τόσο από την πλευρά των καταναλωτών όσο και από την πλευρά των παραγωγών.
- 1972: Ο Victor Wouk κατασκευάζει το πρώτο υβριδικό όχημα κανονικού μεγέθους.
- 1974: Το ηλεκτρικό όχημα CitiCar της αμερικάνικης εταιρίας Sebring-Vanguard με έδρα στην Φλόριντα των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής, εμφανίζεται στο Συμπόσιο Ηλεκτρικών Οχημάτων στην Ουάσιγκτον. Έχει μέγιστη ταχύτητα περίπου 50km/h και μπορεί να διανύσει απόσταση 60km.

Εικόνα 1.2.2. Το ηλεκτρικό όχημα CitiCar [29].

- 1976: Το Κογκρέσο περνάει νόμο για την προώθηση της έρευνας σχετικής με τα ηλεκτρικά και τα υβριδικά οχήματα με σκοπό κυρίως τη βελτίωση των μπαταριών και των κινητήρων.
- 1988: Η General Motors χρηματοδοτεί ερευνητικές προσπάθειες για την ανάπτυξη ενός πρακτικού ηλεκτρικού οχήματος προς κατανάλωση και σε συνεργασία με την Aero Vironment της California κατασκευάζουν το EV1.
- 1990: Η California εκδίδει την εντολή ZEV (Zero Emission Vehicle), σύμφωνα με την οποία μέχρι το 1998, 2% των οχημάτων της πολιτείας και μέχρι το 2003, 10% των οχημάτων πρέπει να έχουν μηδενικές εκπομπές ρύπων. Στην πορεία ωστόσο ο νόμος αυτός γίνεται πιο ελαστικός.
- 1997-2000: Μερικές χιλιάδες ηλεκτρικά οχήματα παράγονται από καταξιωμένες αυτοκινητοβιομηχανίες όπως για παράδειγμα το Prius και το RAV4-EV (με μπαταρίες NiMH και αυτονομία 190 χιλιομέτρων και μέγιστη ταχύτητα τα 126 χιλιόμετρα ανά ώρα) της Toyota.
- 2002: Οι εταιρίες G.M και DaimlerChrysler μηνύουν το CARB (California Air Resources Board), ζητώντας την απόσυρση του νόμου για τα οχήματα μηδενικών εκπομπών που είχε περάσει το 1990. Ένα χρόνο αργότερα η G.M ανακοινώνει ότι μέχρι το τέλος του 2004 θα έχει αποσύρει το EV1 από την

αγορά, εξαιτίας της αδυναμίας της να παρέχει ανταλλακτικά, γεγονός που προκαλεί μεγάλες αντιδράσεις.

- 2003: Το CARB υποκύπτει στις αυτοκινητοβιομηχανίες και ανακοινώνει ένα «εναλλακτικό σχέδιο», προωθώντας την τεχνολογία κυψελών καυσίμου. Αυτή την φορά οι κατασκευαστές έχουν το περιθώριο να προσαρμοστούν στο υπάρχον θεσμικό πλαίσιο μέχρι το 2018. Την ίδια χρονιά το μοντέλο tZero κατασκευασμένο από την εταιρία AC Propulsion κερδίζει το υψηλότερο βραβείο στον καταξιωμένο διαγωνισμό Michelin Challenge Bibendum έχοντας αυτονομία 300 μίλια, 0-100 χιλιόμετρα ανά ώρα σε 3.6 δευτερόλεπτα και τελική ταχύτητα τα 160 χιλιόμετρα ανά ώρα.

Εικόνα 1.2.3. Το ηλεκτρικό όχημα tZero [29].

- 2007: Μικρή παραγωγή ηλεκτρικών οχημάτων γίνεται από διάφορες εταιρίες όπως η Tesla Motors που παρουσιάζει το Tesla Roadster το οποίο θα πουληθεί ένα χρόνο αργότερα στην τιμή των $98,950.
- 2008: Σε μερικές χώρες όπως το Ισραήλ, τη Δανία, τον Καναδά, την Ιαπωνία, την Αμερική και την Αυστραλία υιοθετούνται προγράμματα υποστήριξης των ηλεκτρικών οχημάτων ενώ η Βρετανική κυβέρνηση δίνει επιχορήγηση 200 λιρών σε κάθε πιθανό αγοραστή ηλεκτρικού οχήματος. Σημαντικό είναι ότι ταυτόχρονα οι πωλήσεις βενζινοκίνητων οχημάτων φτάνουν στα χαμηλότερα επίπεδα της δεκαετίας.
- Σήμερα: Παρότι λίγα ηλεκτρικά οχήματα διατίθενται αυτή τη στιγμή στην αγορά, αρκετά νέα μοντέλα όπως το LEAF της Nissan, το VOLT της Chevrolet, το i MiEV της Mitsubishi, αναμένεται να κυκλοφορήσουν στο κοντινό μέλλον. Ωστόσο, τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν ακόμα αρκετό δρόμο να διανύσουν προκειμένου να αποτελέσουν μια συμφέρουσα επιλογή για πολλούς οδηγούς. Το υψηλό κόστος κατασκευής, ο περιορισμένος χρόνος ζωής της μπαταρίας, η περιορισμένη διανυόμενη απόσταση, καθώς και η

κατασκευή σταθμών φόρτισης κι άλλων υποδομών που απαιτούνται, αποτελούν μερικές από τις προκλήσεις που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν ώστε να επιτευχθεί η επικράτηση των ηλεκτρικών οχημάτων [27], [28].

1.3 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της χρήσης ηλεκτρικών οχημάτων

Αν συγκρίνουμε τα ηλεκτρικά οχήματα με τα συμβατικά θα παρατηρήσουμε και πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα. Τα μειονεκτήματα πηγάζουν από το γεγονός ότι η έρευνα στο χώρο της ηλεκτροκίνησης δεν έχει κάνει τόσο σημαντικά βήματα όσο εκείνα στο χώρο των μηχανών εσωτερικής καύσης. Η πληθώρα των κοιτασμάτων πετρελαίου (φθηνά καύσιμα) και οι τεχνολογικές εξελίξεις των μηχανών εσωτερικής καύσης αποτέλεσαν τροχοπέδη για την εξέλιξη των ηλεκτρικών οχημάτων.

Τα ηλεκτρικά οχήματα παρουσιάζουν πλεονεκτήματα αλλά και ορισμένα μειονεκτήματα έναντι στα συμβατικά οχήματα. Παρακάτω αναφέρονται αυτά αναλυτικά.

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Ο ηλεκτρικός κινητήρας (ειδικά όταν η λειτουργία του συνδυάζεται με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας) σε αντίθεση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης δεν παράγει καθόλου αέρια κατάλοιπα ενώ παρουσιάζει και πολλά κατασκευαστικά αλλά και λειτουργικά πλεονεκτήματα. Για παράδειγμα, έχει καλύτερο τρόπο λειτουργίας, ελέγχεται καλύτερα, έχει υψηλό βαθμό απόδοσης, δεν απαιτεί συχνή συντήρηση κ.α. Πιο συγκεκριμένα, τα ηλεκτρικά οχήματα μετατρέπουν περίπου το 60% της ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο σε ισχύ στις ρόδες, σε αντίθεση με τα συμβατικά βενζινοκίνητα οχήματα που έχουν απόδοση περίπου στο 20%.

Το κυριότερο πλεονέκτημα λοιπόν του ηλεκτρικού οχήματος είναι η συνεισφορά του στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, το μεγαλύτερο μέρος της οποίας οφείλεται στους ρύπους των συμβατικών οχημάτων. Το ηλεκτρικό όχημα έχει θεωρητικά μηδενικούς ρύπους προκαλώντας ελάχιστη ρύπανση του αέρα και του χώρου που κινείται.

Μια μελέτη του Αμερικάνικου Συμβουλίου Αποδοτικής Ενεργειακής Οικονομίας (American Council for an Energy Efficient Economy-ACCEDE) προβλέπει ότι κατά μέσο όρο ένας τυπικός Αμερικανός οδηγός αναμένεται να πετύχει περίπου 15% μείωση στις καθαρές εκπομπές CO_2 σχετικά με ένα συμβατικό όχημα.

Το επόμενο πλεονέκτημα του αφορά στη μείωση της ηχορύπανσης, πρόβλημα που κάνει την ατμόσφαιρα των μοντέρνων πόλεων ανυπόφορη. Το ηλεκτρικό όχημα είναι ουσιαστικά αθόρυβο συγκρινόμενο με τα οχήματα που διαθέτουν μηχανές εσωτερικής καύσεως. Μάλιστα, λόγω της μη εκπομπής ρύπων και θορύβου κατά την

κίνηση του, επιτρέπει την ενσωμάτωση της κίνησης του σε περιοχές «ιστορικά ευαίσθητες» π.χ ιστορικό κέντρο των πόλεων.

Τα ηλεκτρικά οχήματα προσφέρουν την δυνατότητα αποδοτικής διαχείρισης της ηλεκτρικής ενέργειας. Τα οχήματα αυτά φορτίζονται πρωτίστως σε περιόδους όπου υπάρχει χαμηλή ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας (π.χ τη νύχτα) μη επιβαρύνοντας το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Επιπλέον, για την φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και στην περίπτωση αυτή το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της χρήσης ενός ηλεκτρικού οχήματος είναι μικρότερο ενός συμβατικού οχήματος της ίδιας κατηγορίας. Στην περίπτωση όμως που η χρησιμοποιούμενη για την φόρτιση τους ενέργεια προέρχεται από ένα θερμοηλεκτρικό σταθμό παραγωγής με καύσιμη ύλη άνθρακα ή λιγνίτη, τότε η ρύπανση που προκαλεί μπορεί να είναι μεγαλύτερη από αυτή ενός συμβατικού οχήματος.

Άλλο πολύ σημαντικό πλεονέκτημα των ηλεκτρικών οχημάτων είναι η ικανότητα τους στην εξισορρόπηση του φορτίου σε περιόδους αιχμής. Αυτό επιτυγχάνεται με την τεχνολογία μεταφοράς ενέργειας από το όχημα στο δίκτυο. Χρησιμοποιώντας πλεονάζουσα ενέργεια από τις μπαταρίες τους, μπορούν να στέλνουν ενέργεια πίσω στο δίκτυο και να επαναφορτιστούν αργότερα όταν θα έχει πάψει η αιχμή του δικτύου.

Επίσης, τα ηλεκτρικά οχήματα θεωρούνται πιο αξιόπιστα από τα συμβατικά οχήματα. Πιο συγκεκριμένα, είναι πολύ πιο εύκολη η κατασκευή του ηλεκτρικού οχήματος γιατί ο ηλεκτροκινητήρας είναι πιο απλός στην δομή του, σε σχέση με τις μηχανές εσωτερικής καύσεως. Εφόσον τροφοδοτείται μέσω ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος, οι οποίοι ελέγχονται εύκολα ηλεκτρονικά, δεν απαιτείται συνήθως νερό για την ψύξη τους ούτε φίλτρα και λάδι, με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζει προβλήματα που δημιουργούνται από χαμηλή θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Κλείνοντας, τα ηλεκτρικά οχήματα καταναλώνουν ενέργεια μόνο όταν κινούνται. Όταν δεν κινείται π.χ στάση σε σηματοδότες ή σε μεγάλη κυκλοφοριακή συμφόρηση δεν καταναλώνει ενέργεια. Άρα αποτελεί πολύ καλή επιλογή για χρήση σε αστικά κέντρα. Το οποίο ευνοείται από το γεγονός ότι το κόστος λειτουργίας τους σύμφωνα με υπολογισμούς των General Motors και Chrysler είναι πολύ μικρότερο από αυτό των συμβατικών οχημάτων. Εταιρίες που μας πληροφορούν επίσης ότι μια ηλεκτρική μηχανή έχει πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής συγκρινόμενου με του συμβατικού. Υπολογίζεται μάλιστα ίση με 1.000.000 μίλια εν αντιθέσει με τα 100.000 μίλια του συμβατικού.

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Παρά τα όποια πλεονεκτήματα όμως, υπάρχουν επίσης και σημαντικά μειονεκτήματα. Τα μειονεκτήματα αυτά προέρχονται κυρίως από τους συσσωρευτές, και αυτό γιατί μέχρι σήμερα, παρά τη μακρόχρονη πορεία τους (έχουν ζωή πάνω από δύο αιώνες), παρουσιάζουν δύο αδύνατα σημεία. Το ένα σχετίζεται με την πυκνότητα ενέργειας, δηλαδή το λόγο της αποθηκευμένης ενέργειας του συσσωρευτή προς τον όγκο και το βάρος του, η οποία είναι πολύ χαμηλή σε σχέση με την βενζίνη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να περιορίζεται η αυτονομία του οχήματος αφού όσο αυξάνει η ενεργειακή ζήτηση απαιτείται και μεγαλύτερος όγκος και βάρος συσσωρευτών. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το γεγονός ότι ένα χιλιόγραμμο βενζίνης έχει ειδική ενέργεια της τάξεως των 12.000 Wh. Αντίθετα ένα χιλιόγραμμο από τον καλύτερο συσσωρευτή Νατρίου-Θείου έχει ειδική ενέργεια της τάξεως των 80-85 Wh.

Ένα άλλο σημαντικό μειονέκτημα αποτελεί η διάρκεια φόρτισης των συσσωρευτών καθώς μια πλήρης επαναφόρτιση με χαμηλό ρεύμα φόρτισης ώστε να υπάρξει εκμετάλλευση του χαμηλού φορτίου κατά την διάρκεια της νύχτας διαρκεί αρκετές ώρες. Γεγονός που σε συνδυασμό με την χαμηλή διάρκεια ζωής των συσσωρευτών εμποδίζουν την ευρεία εξάπλωση των ηλεκτρικών οχημάτων.

Επιπλέον, το ηλεκτρικό όχημα έχει μικρότερες επιδόσεις από το συμβατικό, εξαιτίας της ανεπάρκειας των συσσωρευτών, και πολύ μικρότερη αυτονομία σε σχέση με τα συμβατικά Ακόμα το υψηλό κόστος των συσσωρευτών επηρεάζει αισθητά το συνολικό κόστος του ηλεκτρικού οχήματος κάνοντας δυσκολότερη την αγορά του.

Τέλος, μια σημαντική δυσκολία στην χρήση του ηλεκτρικού οχήματος είναι η δυσκολία πρόσβασης σε φορτιστή, σε αντίθεση με τους σταθμούς καυσίμου που τους συναντάμε παντού. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται σιγά σιγά με φορητούς φορτιστές ή σταθμούς φόρτισης, που πλέον συναντάμε όλο και συχνότερα σε κάποιες πόλεις του εξωτερικού.

Παρόλα αυτά, οι ερευνητές δουλεύουν πάνω στη βελτίωση της τεχνολογίας των συσσωρευτών με σκοπό να αυξήσουν την αυτονομία και να μειώσουν τους χρόνους επαναφόρτισης, το βάρος και το κόστος τους. Αυτοί οι παράγοντες θα καθορίσουν σε μεγάλο βαθμό το μέλλον των ηλεκτρικών οχημάτων [24], [27].

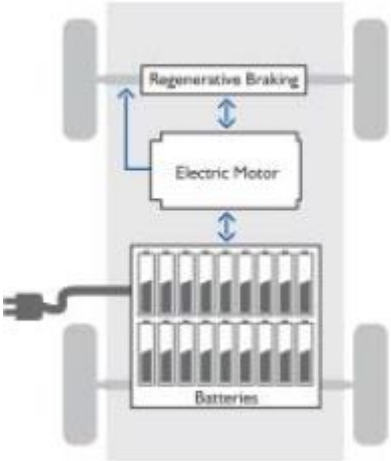
1.4 Τύποι Ηλεκτρικών Οχημάτων

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται οι διαφορετικές κατηγορίες ηλεκτρικών οχημάτων, τα οποία χωρίζονται ανάλογα με τις τεχνολογίες κίνησης που υιοθετούν [22]:

1) Ηλεκτρικά οχήματα με συσσωρευτές (Battery Electric Vehicle ή BEV)
2) Ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου (Fuel Cell Electric Vehicle ή FCEV)
3) Υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (Hybrid Electric Vehicle ή HEV)

1.4.1 Ηλεκτρικά οχήματα με συσσωρευτές (BEV)

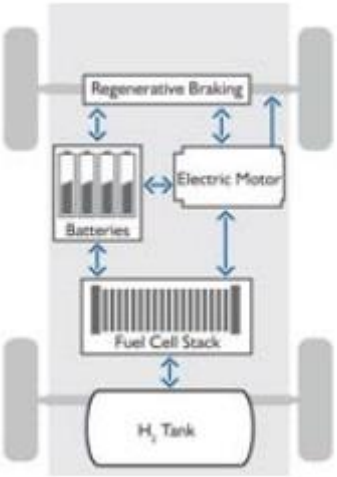
Η κίνηση τους προέρχεται αποκλειστικά από ηλεκτρική ενέργεια η οποία αποθηκεύεται στους επαναφορτιζόμενους συσσωρευτές τους. Οι συσσωρευτές αυτοί είναι που κινούν τους τροχούς του οχήματος με την βοήθεια ηλεκτρικών κινητήρων, επομένως τα ηλεκτρικά οχήματα με συσσωρευτές δεν διαθέτουν κάποιο κινητήρα εσωτερικής καύσης. Γεγονός που τα βοήθησε να επιτύχουν μετακινήσεις με μηδενικές εκπομπές αέριων ρύπων. Ιστορικά, αυτά τα οχήματα προϋπήρχαν των συμβατικών οχημάτων αλλά δεν μπόρεσαν να επικρατήσουν λόγω των γνωστών μειονεκτημάτων της τεχνολογίας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Πλέον, η φόρτιση των συσσωρευτών μπορεί να γίνεται αμέσως από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και σαν εναλλακτικό τρόπο μέσω του επονομαζόμενου «αναπαραγωγικό φρενάρισμα», που στην ουσία χρησιμοποιεί μέρος της θερμότητας που παράγεται κατά το φρενάρισμα για την επαναφόρτιση της μπαταρίας. Αυτή τη στιγμή οι μπαταρίες μολύβδου-οξέως (lead-acid) αποτελούν την φθηνότερη επιλογή, ωστόσο οι νέες μπαταρίες ιόντων λιθίου (Lithium Ion) γίνονται όλο και πιο ανταγωνιστικές λόγω της μεγαλύτερης ισχύς και της ενεργειακής πυκνότητας που διαθέτουν γεγονός που τις καθιστά μικρότερες σε μέγεθος και πιο ελαφριές. Κατά αυτό τον τρόπο μπορούν να οδηγήσουν σε μεγαλύτερη επιτάχυνση του οχήματος και σε μεγαλύτερη αυτονομία του συσσωρευτή. Επιπρόσθετα, τα ηλεκτρικά οχήματα με συσσωρευτές σε μοντέλα μικρού οχήματος πόλης έχουν τεράστια πλεονεκτήματα διότι είναι οικονομικά, αθόρυβα, δεν ρυπαίνουν τοπικά, είναι απλά στην κατασκευή τους, δεν απαιτούν συντήρηση και προσφέρουν απεξάρτηση από τα εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα στις μεταφορές. Οι σημερινές τεχνολογικές εξελίξεις επιτρέπουν την κατασκευή και διάθεση στην αγορά σύγχρονων ηλεκτρικών οχημάτων με συσσωρευτές με απόσταση αυτονομίας 120 έως 200 χιλιομέτρων. Οι ανάγκες της καθημερινής μετακίνησης καλύπτονται πλήρως με εξαίρεση μόνο των ταξιδιών μεγάλης απόστασης.



Εικόνα 1.4.1. Ηλεκτρικό όχημα μπαταρίας (Battery EV) [23].

1.4.2 Ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου (FCEV)

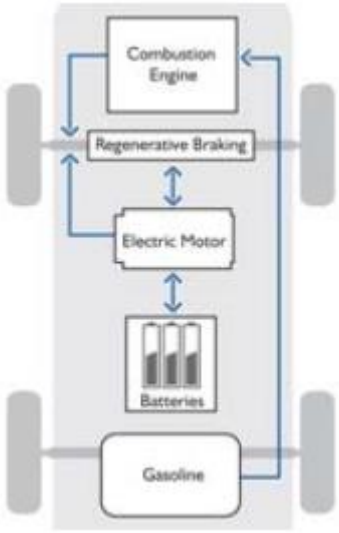
Τα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου αποτελούν μια ξεχωριστή κατηγορία οχημάτων τα οποία χρησιμοποιούν μια συσκευή fuel cell device με την οποία παράγουν ηλεκτρισμό ο οποίος με την σειρά του τροφοδοτεί έναν ηλεκτρικό κινητήρα. Πιο συγκεκριμένα, τα συγκεκριμένα οχήματα αποθηκεύουν ενέργεια με τη μορφή υδρογόνου (H_2), η οποία τροφοδοτεί μια κυψέλη καυσίμου μαζί με ατμοσφαιρικό οξυγόνο (O_2), παράγοντας ηλεκτρισμό με τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης, με μόνα παραπροϊόντα θερμότητα και νερό. Τα οποία παραπροϊόντα όπως είναι προφανές δεν εκπέμπουν ρύπους προς την ατμόσφαιρα. Επιπλέον, οι κυψέλες καυσίμου αποτελούνται από τρία κύρια μέρη: έναν ηλεκτρολύτη, μια άνοδο και μια κάθοδο. Το γενικό πλαίσιο της λειτουργίας τους είναι όμοιο με εκείνο των συσσωρευτών με κύρια διαφορά ότι αντί να επαναφορτίζουμε ένα συσσωρευτή μπορούμε απλά να γεμίσουν τις κυψέλες καυσίμου με υδρογόνο. Διάφοροι τρόποι για την αποθήκευση ή την παραγωγή υδρογόνου πάνω στο ίδιο το όχημα μελετώνται, στους οποίους περιλαμβάνεται η συμπίεση του αερίου H_2, η δέσμευσή του σε μέταλλα, καθώς και η παραγωγή επί του οχήματος από φυσικό αέριο, μεθανόλη, βενζίνη ή άλλο καύσιμο. Σήμερα, ένας αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων κυψελών καυσίμου κυκλοφορεί στους δρόμους παγκοσμίως, συμπεριλαμβανομένων επιβατικών αυτοκινήτων, φορτηγών διανομής, λεωφορείων και στρατιωτικών οχημάτων. Ωστόσο, η απαιτούμενη υποδομή για τη διανομή του H_2, η επί του οχήματος αποθήκευσή του H_2 και οι απώλειες μετατροπής αποτελούν σημαντικά προβλήματα που αφήνουν ανοιχτό το ερώτημα κατά πόσο τα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου θα αποτελέσουν μια πρακτική και συμφέρουσα λύση στο μέλλον.



Εικόνα 1.4.2. Ηλεκτρικό όχημα κυψελών καυσίμου (Fuel Cell EV) [23].

1.4.3 Υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (HEV)

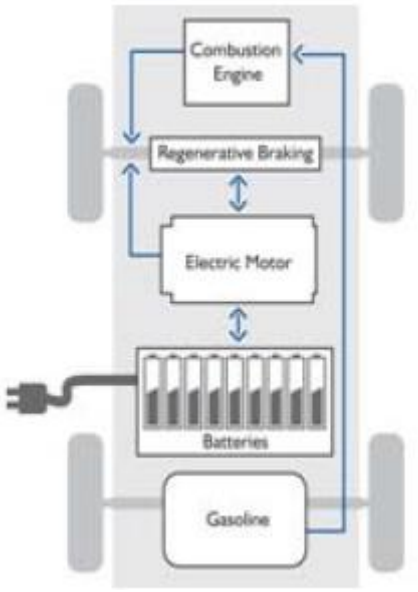
Τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα αποτελούν την πιο γνωστή κατηγορία ηλεκτρικών οχημάτων, η οποία κάνει χρήση δύο ή περισσότερων μορφών παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας. Τα πιο συνηθισμένα είναι εκείνα που διαθέτουν δύο συμπληρωματικά συστήματα οδήγησης, ένα ηλεκτρικό κινητήρα με τους ελεγκτές και τους συσσωρευτές του καθώς και μια μηχανή εσωτερικής καύσης με μια δεξαμενή καυσίμου. Η συνύπαρξη των δύο συστημάτων οδήγησης γίνεται με απώτερο σκοπό είτε για την οικονομία καυσίμου είτε για υψηλότερες και καλύτερες αποδόσεις του οχήματος συνήθως κατά την εκκίνηση ή την επιτάχυνση του οχήματος. Τα σύγχρονα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα κάνουν χρήση του «αναπαραγωγικού φρεναρίσματος», που στην ουσία χρησιμοποιεί μέρος της θερμότητας που παράγεται κατά το φρενάρισμα για την επαναφόρτιση της μπαταρίας. Επιπρόσθετα, η μηχανή εσωτερικής καύσης ενός υβριδικού ηλεκτρικού οχήματος είναι μικρότερη σε μέγεθος από εκείνον ενός οχήματος που διαθέτει αποκλειστικά και μόνο μια μηχανή εσωτερικής καύσης, καταφέρνοντας έτσι να περιορίσει τις εκπομπές ρύπων του προς την ατμόσφαιρα. Η αγορά υβριδικών οχημάτων μεγαλώνει συνεχώς, με όλο και περισσότερα μοντέλα να διατίθενται στους καταναλωτές, τα οποία κατά κύριο λόγο έχουν μεγαλύτερη μηχανική παρά ηλεκτρική ισχύ κίνησης (περίπου 75-25%), και δεν διαθέτουν σύνδεση στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. [24],[25]



Εικόνα 1.4.3. Υβριδικό όχημα (Hybrid EV) [23].

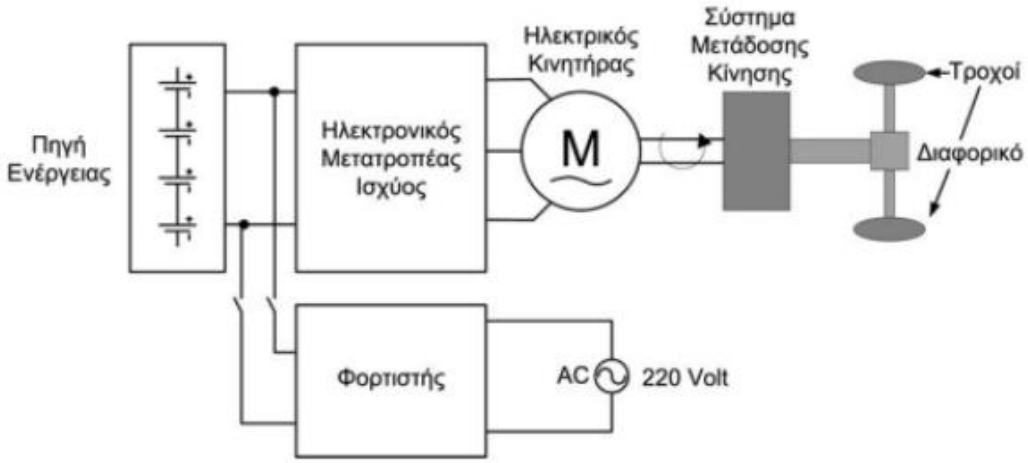
1.5 Ηλεκτρικά οχήματα με δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο (Plug-in EVs)

Τα ηλεκτρικά οχήματα με δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας έχουν τραβήξει την προσοχή του επιστημονικού κόσμου ως ελεγχόμενες μονάδες αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας ενός δικτύου. Η ενσωμάτωση τον συγκεκριμένων οχημάτων στο δίκτυο θα μείωνε αισθητά τους εκπεμπόμενους ρύπους παγκοσμίως δημιουργώντας όμως νέα προβλήματα στο διαχειριστή του δικτύου για τον τρόπο διαχείρισης τους. Στην συγκεκριμένη μεγάλη κατηγόρια οχημάτων περιλαμβάνει και τους προηγούμενους τύπους ηλεκτρικών οχημάτων με την βασική προϋπόθεση της εγκατάστασης ενός εξοπλισμού που θα διευκολύνει την σύνδεση τους στο δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, τα ηλεκτρικά οχήματα με συσσωρευτές διαθέτουν από κατασκευής τους αυτόν τον εξοπλισμό αφού έτσι φορτίζουν τους συσσωρευτές τους. Όσον αφορά τα υβριδικά οχήματα με δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο έχουν μεγαλύτερη μπαταρία από τα απλά υβριδικά. Επιπλέον, για την φόρτιση των συσσωρευτών τους χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό ηλεκτρικής ενέργειας είτε απευθείας από το δίκτυο είτε ενέργειας μέσω του «αναπαραγωγικού φρεναρίσματος» είτε μέσω της παραγόμενης ενέργειας από την μηχανή εσωτερικής καύσης ή την κυψέλη καυσίμου για να κινηθούν. Μέσω της σύνδεσης τους με το δίκτυο όσο είναι σταθμευμένα φορτίζουν τους συσσωρευτές τους οπότε για μικρές διαδρομές δεν χρησιμοποιούν καθόλου καύσιμο. Στο κοντινό μέλλον τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα με δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούν τη πλέον υποσχόμενη κατηγορία οχημάτων.



Εικόνα 1.5.1. Ηλεκτρικό όχημα με δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο (Plug-in EV) [23].

Στην παρούσα διπλωματική εργασία με τον όρο ηλεκτρικά οχήματα (EV) αναφερόμαστε αποκλειστικά σε Plug-in EV που χρησιμοποιούν αποκλειστικά μπαταρίες ως μέσο αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Στην επόμενη εικόνα 1.5.2 παρουσιάζεται ένα 'συμπυκνωμένο' διάγραμμα των κύριων τμημάτων, από τα οποία αποτελείται ένα ηλεκτρικό όχημα.



Εικόνα 1.5.2. Διάγραμμα κυρίων μελών ενός ηλεκτροκίνητου οχήματος [13].

Το κύριο στοιχείο που διαφοροποιεί τα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα από τα υβριδικά είναι η απουσία μηχανής εσωτερικής καύσης. Η ενέργεια του οχήματος προέρχεται από καθαρά ηλεκτρική πηγή και η κίνηση του οχήματος βασίζεται αποκλειστικά σε έναν ή περισσότερους ηλεκτρικούς κινητήρες.

Πηγή Ηλεκτρικής Ενέργειας: Είναι το τμήμα του ηλεκτρικού οχήματος που τροφοδοτεί με ενέργεια το υπόλοιπο σύστημα. Το τμήμα αυτό λειτουργεί είτε ως πηγή είτε ως αποθήκη ηλεκτρικής ενέργειας είτε ως συνδυασμός και των δύο. Για την αποθήκευση ενέργειας χρησιμοποιούνται συσσωρευτές, ενώ η φόρτισή τους συνήθως γίνεται με ηλεκτρονικούς μετατροπείς όπου μετατρέπουν το εναλλασσόμενο ρεύμα σε συνεχές.

Ηλεκτρονικός Μετατροπέας: Το τμήμα αυτό είναι υπεύθυνο για την κατάλληλη μετατροπή της τάσεως της πηγής ώστε να τροφοδοτήσει τον κινητήρα. Επιπλέον ελέγχει και τη λειτουργία του οχήματος ελέγχοντας ουσιαστικά την ταχύτητα και τη ροπή του κινητήρα.

Ηλεκτρικός Κινητήρας: Ο κινητήρας μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική απαραίτητη για την κίνηση του οχήματος.

Σύστημα Μετάδοσης Κίνησης: Το μηχανολογικό αυτό τμήμα του οχήματος μεταδίδει την κίνηση στους τροχούς του οχήματος προσαρμόζοντας κατάλληλα τη ροπή και την ταχύτητα.

Αξίζει εδώ να αναφερθεί ότι ορισμένα τμήματα μπορούν να διαφοροποιούνται ή ακόμα και να μην υπάρχουν. Για παράδειγμα μέρος ή ακόμα και ολόκληρο το σύστημα μετάδοσης κίνησης μπορεί και να μην υπάρχει. Επιπλέον, το όχημα μπορεί να διαθέτει περισσότερους από ένα κινητήρα και μετατροπέα [13], [26].

1.6 Συσσωρευτές ηλεκτρικών οχημάτων

Το μεγαλύτερο πρόβλημα που αντιμετωπίζει η αγορά ηλεκτρικών αυτοκινήτων την παρούσα εποχή είναι οι περιορισμοί που δίνονται από τους συσσωρευτές, δηλαδή τις μπαταρίες. Η απουσία μιας τεχνολογίας μπαταρίας που θα καθιστά το ηλεκτρικό όχημα ανταγωνίσιμο με το συμβατικό, δημιουργεί προβλήματα και αποτρέπει την εμπορευματοποίηση του ηλεκτρικού οχήματος

Αρχικά, οι ηλεκτροχημικοί συσσωρευτές (ή απλούστερα μπαταρίες) είναι μία συσκευή η οποία μετατρέπει χημική ενέργεια σε ηλεκτρική [5]. Αυτό επιτυγχάνεται με την ύπαρξη δύο διαφορετικών στοιχείων που αντιδρούν μέσα σε έναν ηλεκτρολύτη. Τα στοιχεία αυτά, η άνοδος και η κάθοδος ανταλλάσσουν ηλεκτρόνια, τα οποία κινούμενα δίνουν το απαιτούμενο ηλεκτρικό ρεύμα. Κάθε συσσωρευτής έχει κάποια χαρακτηριστικά με τα οποία μπορεί να περιγραφεί ο τρόπος λειτουργίας του. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι η ενεργειακή του πυκνότητα ανά μονάδα βάρους (Wh/kg) ή ανά μονάδα όγκου, η πυκνότητα ισχύος (W/kg), ο αριθμός των κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης που μπορεί να κάνει μέχρι να αχρηστευτεί, ο ρυθμός φόρτισης και εκφόρτισης, η μέγιστη επιτρεπόμενη εκφόρτιση και άλλα.

Πρώτο και κυριότερο πρόβλημα είναι η αυτονομία που μπορεί να παρέχει μία μπαταρία σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα. Λόγω της κατά πολύ μεγαλύτερης πυκνότητας ενέργειας στα συμβατικά καύσιμα όπως βενζίνη και πετρέλαιο, η μπαταρία

προσφέρει πολύ μικρότερη αυτονομία σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα με αποτέλεσμα η επιλογή των ηλεκτρικών αυτοκινήτων να μην είναι ελκυστική από τους καταναλωτές. Για παράδειγμα μία τυπική τιμή πυκνότητας ενέργειας για την βενζίνη είναι περίπου 11500-12000 Wh/kg την στιγμή που οι πιο εξελιγμένες μπαταρίες όπως οι μπαταρίες νατρίου-θείου (NaS) έχουν πυκνότητα ενέργειας ίση με 80Wh/kg περίπου και οι πιο εμπορικές αυτή την στιγμή οι μολύβδου-οξέος, έχουν πυκνότητα ενέργειας περίπου 30Wh/kg. Καταλαβαίνουμε λοιπόν πως μόνο από την πυκνότητα ενέργειας δημιουργείται χαοτικό πρόβλημα αυτονομίας σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα, καθώς τα συμβατικά καύσιμα έχουν πυκνότητα ενέργειας μεγαλύτερη ως και 150 φορές από μία τεχνολογικά εξελιγμένη μπαταρία.

Τα προβλήματα των συσσωρευτών σε σχέση με τα συμβατικά καύσιμα δεν σταματούν εδώ καθώς για την τροφοδότηση ενός ρεζερβουάρ αυτοκινήτου χρειάζονται λίγα λεπτά ενώ για την φόρτιση μιας μπαταρίας σημαντικού μεγέθους, για παράδειγμα 10kW που είναι ένα τυπικό μέγεθος μπαταρίας ηλεκτρικού αυτοκινήτου, χρειάζονται περισσότερα από 1000A ρεύμα σε παροχή τάσης 220V, για να φορτίσει σε περίπου 2,5 λεπτά, κάτι που όπως είναι κατανοητό δεν είναι εφικτό καθώς 1000A σε τάση 220V δεν γίνεται να δώσει ο οποιοσδήποτε ρευματοδότης σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου. Επιπροσθέτως τα όρια φόρτισης-εκφόρτισης της μπαταρίας που αφορούν την πλήρη φόρτιση ή την πλήρη εκφόρτιση δημιουργούν επιπροσθέτως χρονικές καθυστερήσεις στην φόρτιση (ή μειωμένη αυτονομία στην περίπτωση της εκφόρτισης). Για λόγους αύξησης του προσδοκώμενου ορίου ζωής της μπαταρίας, το στάδιο κατά το οποίο η μπαταρία προσεγγίζει το 100% της πλήρους φόρτισης γίνεται αργά με διακριτά βήματα μέσω κατάλληλου φορτιστή, ενώ αντιστοίχως εκφόρτιση πέρα από ένα ελάχιστο όριο της μπαταρίας μειώνει τον χρόνο ζωής της. Αυτό σημαίνει όμως πως η αυτονομία μειώνεται περαιτέρω καθώς αν λάβουμε αυστηρά υπόψη τον περιορισμό του κάτω ορίου εκφόρτισης, πέραν του οποίου αποφεύγουμε εκφόρτιση της μπαταρίας, τότε η υπολογιζόμενη αυτονομία που μπορεί να παρέχει η μπαταρία μειώνεται σημαντικά αναλόγως τον τύπο της μπαταρίας. Τέλος πρέπει να αναφερθεί πως κατά την διάρκεια ζωής του αυτοκινήτου θα χρειαστεί να γίνει τουλάχιστον μία αλλαγή μπαταριών με ότι κόστος αυτό συνεπάγεται.

Στην συνέχεια γίνεται μία αναλυτικότερη αναφορά των χαρακτηριστικών των μπαταριών που ενδιαφέρουν στην περίπτωση που οι μπαταρίες προορίζονται για κίνηση οχημάτων. Πριν αναφερθούν όμως τα χαρακτηριστικά θα ορίσουμε το ρυθμό εκφόρτισης και το βαθμό εκφόρτιση για τη καλύτερη κατανόηση των χαρακτηριστικών που θα αναφερθούν :

- **Ρυθμός εκφόρτισης (C/x):** Το ρεύμα με το οποίο θα εκφορτίζονταν τελείως ένας πλήρως φορτισμένος συσσωρευτής σε x ώρες. Για παράδειγμα, ένας συσσωρευτής χωρητικότητας 1000Ah έχει ρυθμό C/4 τιμής 250 A.
- **Βαθμός εκφόρτισης (DOD):** Το ποσοστό (επί των αμπερώριων πλήρους φόρτισης) που έχει ήδη καταναλωθεί.

Παρακάτω ακολουθούν τα χαρακτηριστικά των μπαταριών που μας ενδιαφέρουν για την κίνηση.

- **Πυκνότητα ισχύος (W/kg):** Η ροή της ισχύος ανά μονάδα μάζας ή βάρους της μπαταρίας. Υποδηλώνει και την μέγιστη ισχύ που μπορεί να προσφέρει ένας

συσσωρευτής και βάση αυτού εξαρτώνται οι επιδόσεις ενός οχήματος (επιτάχυνση, τελική ταχύτητα).

- **Ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα βάρους (Wh/kg):** Εκφράζει την ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί ανά μονάδα μάζας (ή βάρους της μπαταρίας).
- **Βαθμός απόδοσης:** Εκφράζει το ποσοστό της χημικής ενέργειας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ποσοστό το οποίο είναι περίπου 80%. Το αντίστοιχο ποσοστό της χημικής ενέργειας του πετρελαίου που μετατρέπεται σε μηχανική δεν ξεπερνά το 20%.
- **Κύκλος λειτουργίας:** Εκφράζει τον αριθμό των δυνατών επαναφορτίσεων του συσσωρευτή. Λόγω μεγάλης διάρκειας ζωής του ηλεκτρικού οχήματος, ιδανικά θα θέλαμε να έχει και ο συσσωρευτής την ίδια διάρκεια ζωής κάτι εξαιρετικά δύσκολο όμως. Όπως και να έχει το θέμα των κύκλων λειτουργίας της μπαταρίας είναι σημαντικό καθώς από αυτό εξαρτάται και η εμπορική ελκυστικότητα που θα έχει ένα ηλεκτρικό όχημα.

Ωστόσο τα τελευταία χρόνια η αυξανόμενη ζήτηση αποθήκευσης ενέργειας έχει ωθήσει στην εξέλιξη τους και στη δημιουργία νέων ειδών. Μια συστοιχία συσσωρευτών που προορίζεται για ένα ηλεκτρικό όχημα θα πρέπει να έχει υψηλή πυκνότητα ενέργειας, μεγάλο κύκλο ζωής, γρήγορη φόρτιση, υψηλό βαθμό απόδοσης, μεγάλη αξιοπιστία, χαμηλό κόστος, υψηλή απόδοση φόρτισης/εκφόρτισης, χαμηλή εσωτερική αντίσταση, δυνατότητα ανακύκλωσης κ.α. [2],[4],[6]

.

1.7 Τύποι φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

Η σύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων με την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να πραγματοποιηθεί με τους δύο εξής τρόπους:

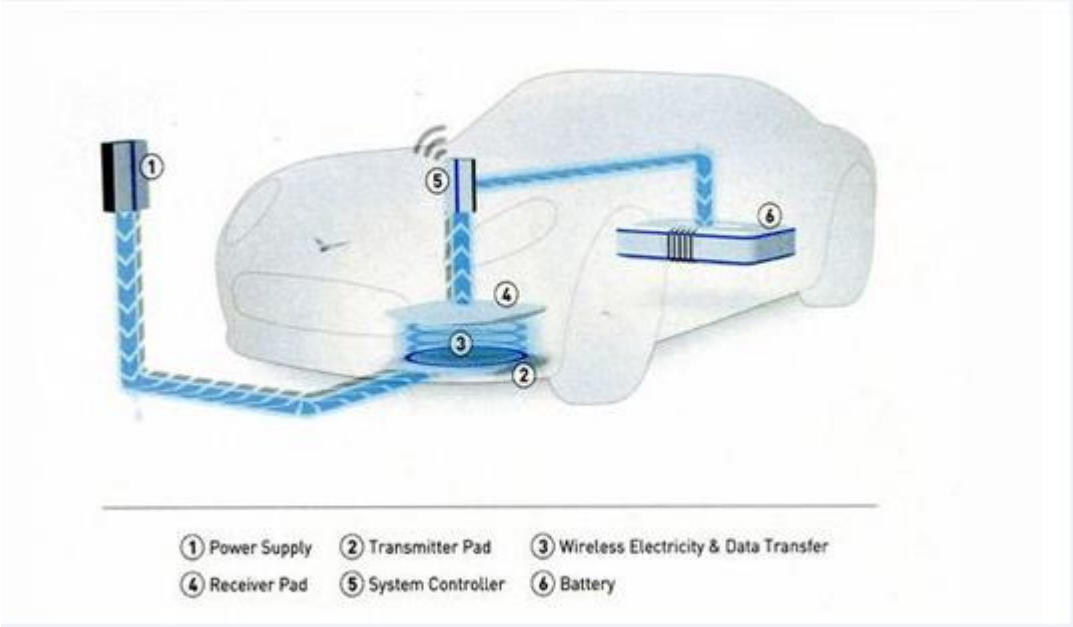
1.7.1 Φόρτιση με επαφή

Η φόρτιση με επαφή απαιτεί την φυσική σύνδεση μεταξύ της μπαταρίας και του σταθμού φόρτισης, όπως γίνεται και με τις περισσότερες ηλεκτρικές συσκευές. Χρειάζονται, δηλαδή, καλώδια και βύσματα για τη σύνδεση του ηλεκτρικού οχήματος με το σταθμό φόρτισης. Τη μέθοδο αυτή ακολουθούν οι περισσότεροι φορτιστές που είναι ενσωματωμένοι στο όχημα, καθώς και συστήματα που έχουν τα κυκλώματα φόρτισης και ελέγχου πάνω στο όχημα. Κάποια βασικά μειονεκτήματα της φόρτισης αυτής είναι τα παρακάτω. Η μη αυτοματοποιημένη διαδικασία που ακολουθείται στην συμβατική φόρτιση, κατά την οποία ο άνθρωπος πρέπει να συνδέσει και να αποσυνδέσει το όχημα, αφήνει μεγάλα περιθώρια λάθους και ελλοχεύει ο κίνδυνος της ηλεκτροπληξίας, ιδίως σε υγρά περιβάλλοντα (υγρασία, βροχή). Ακόμα το μακρύ καλώδιο μπορεί να αποτελέσει αιτία ατυχήματος ή και τροφή για τυχόν τρωκτικά της περιοχής. Στην περίπτωση αυτή η αντικατάσταση επιβάλλεται αυξάνοντας το λειτουργικό κόστος της εγκατάστασης. Τέλος, σε περιοχές που ο πάγος και το χιόνι είναι συνηθισμένο φαινόμενο, το βύσμα φόρτισης μπορεί να παγώσει πάνω στο όχημα κατά την διάρκεια μιας φόρτισης π.χ. 30 λεπτών σε έναν εξωτερικό σταθμό φόρτισης.

Εικόνα 1.7.1 Σταθμός φόρτισης με επαφή [29].

1.7.2 Επαγωγική Φόρτιση

Η επαγωγική φόρτιση, γνωστή και ως «ασύρματη φόρτιση», χρησιμοποιεί ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο για τη μεταφορά της ενέργειας μεταξύ του οχήματος και του σταθμού φόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, τα συστήματα επαγωγικής φόρτισης μεταφέρουν εναλλασσόμενη ισχύ δημιουργώντας μαγνητική σύζευξη μεταξύ ενός πρωτεύοντος τυλίγματος στην μεριά της τροφοδοσίας και ενός δευτερεύοντος τυλίγματος στην μεριά του οχήματος. Επιπλέον, αφού η μπαταρία του οχήματος έχει DC τάση και μπορεί να φορτίσει μόνο με συνεχές ρεύμα, το εναλλασσόμενο ρεύμα εξόδου του δευτερεύοντος τυλίγματος ανορθώνεται πριν καταλήξει στην μπαταρία. Οι επαγωγικοί φορτιστές έχουν τα περισσότερα κυκλώματα φόρτισης και ελέγχου εκτός του οχήματος, και επικοινωνούν με αυτό μέσω υπέρυθρων ή ραδιοσυχνοτήτων. Η επαγωγική φόρτιση προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με την συμβατική φόρτιση καθώς η φόρτιση μπορεί να γίνει απλά και μόνο σταθμεύοντας το όχημα πάνω στο σημείο φόρτισης. Εξελίξεις στην τεχνολογία των υλικών, στα ηλεκτρονικά ισχύος και στους μικροελεγκτές έχουν προσφέρει σημαντική βοήθεια στην ανάπτυξη αυτού του τρόπου φόρτισης [12].



Εικόνα 1.7.2. Σταθμός επαγωγικής φόρτισης [29].

1.7.3 Σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων φόρτισης

Μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1990 δεν υπήρχε έκδηλη προτίμηση του επιστημονικού κλάδου προς ένα συγκεκριμένο τύπο φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Γεγονός, το οποίο άρχισε να αλλάζει αποκτώντας η φόρτιση με επαφή μεγαλύτερη φήμη και να υιοθετείται από περισσότερους κατασκευαστές. Η απλότητα και το χαμηλό κόστος της φόρτισης με επαφή αποτέλεσε την κύρια αιτία της στροφής του επιστημονικού κόσμου. Έκτοτε, η τεχνολογία των φορτιστών με επαφή συνέχισε να εξελίσσεται και να ωριμάζει κάνοντας απίθανο για τους επαγωγικούς φορτιστές να μπορέσουν να τους συναγωνιστούν.

Ακολουθεί ένας συγκριτικός πίνακας των δύο μεθόδων φόρτισης.

	Επαγωγική Φόρτιση	Αγώγιμη Φόρτιση
ΚΟΣΤΟΣ	Ακριβότερη	Φθηνότερη
ΠΟΛΥΠΛΟΚΟΤΗΤΑ	Πολύπλοκη	Πιο απλή
ΑΣΦΑΛΕΙΑ	Ασφαλής/καλύτερη μόνωση	Αρκετά ασφαλής λόγω μεθόδων ανίχνευσης σφάλματος
ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ	Λιγότερο αποδοτική	Πιο αποδοτική

Πίνακας 1.7.3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα επαγωγικής και αγώγιμης φόρτισης [12].

1.8 Κατηγορίες φόρτισης

Βασικό στοιχείο της προδιαγραφής των σταθμών φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι η κατηγορία (mode) φόρτισης που παρέχουν, η επιλογή της οποίας βασίζεται σε οικονομοτεχνικές παραμέτρους, όπως το κόστος εγκατάστασης, οι απαιτούμενες υποδομές σύνδεσης στο δίκτυο και η παρεχόμενη λειτουργική ευελιξία (π.χ. ο προκύπτω χρόνος φόρτισης για κάθε τεχνολογία). Επιπλέον η φόρτιση των συσσωρευτών μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με AC είτε με DC ρεύμα οδηγούμενο στο ηλεκτρικό όχημα.

Επίπεδο 1: Το πρώτο επίπεδο περιλαμβάνει την μονοφασική AC φόρτιση η οποία συνήθως πραγματοποιείται μέσω συνηθισμένων οικιακών συσκευών και παρέχει επίπεδα ισχύος που είναι σχετικά χαμηλά συγκρινόμενα με τη χωρητικότητα της μπαταρίας. Η φόρτιση από μονοφασική παροχή έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- 230V/16A ~ 3kW , 12 ώρες η διάρκεια φόρτισης
- 230V/32A ~ 7,4kW, 5 ώρες η διάρκεια φόρτισης

Επίπεδο 2: Το δεύτερο επίπεδο περιλαμβάνει την τριφασική AC φόρτιση η οποία απαιτεί την πρόσβαση σε τριφασική τροφοδοσία και μπορεί να παρέχει μεγαλύτερα επίπεδα φόρτισης σε σχέση με αυτά της μονοφασικής φόρτισης. Αυτό συμβαίνει επειδή η χρήση των τριών φάσεων αντί για μίας επιτρέπει την μετάδοση περισσότερης ισχύος χωρίς την αύξηση του ρεύματος ή της τάσης. Η φόρτιση από τριφασική παροχή έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- 400V/16A ~ 11kW , 31/2 ώρες η διάρκεια φόρτισης
- 400V/32A ~ 22kW, 11/2 ώρες η διάρκεια φόρτισης

Επίπεδο 3: Το τρίτο επίπεδο περιλαμβάνει την DC φόρτιση. Στη περίπτωση αυτή ο φορτιστής της μπαταρίας βρίσκεται εκτός του οχήματος και η τροφοδοσία είναι συνεχές ρεύμα. Το συνεχές ρεύμα δίνει τη δυνατότητα μεταφοράς υψηλής ισχύος (40kW) επιτυγχάνοντας διάρκεια φόρτισης λιγότερο από 45 λεπτά.

Στον παρακάτω πίνακα ακολουθεί η συνοπτική παρουσίαση των παραπάνω:

ΕΠΙΠΕΔΟ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	ΜΕΘΟΔΟΣ	ΙΣΧΥΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	ΧΡΟΝΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (35kWh)
ΕΠΙΠΕΔΟΥ 1	Μέσω οικιακής παροχής	3 kW	12 ΩΡΕΣ
ΕΠΙΠΕΔΟΥ 2	Μέσω ιδιαίτερης εγκατάστασης φόρτισης και καλωδίωσης	10-20 kW	2-4 ΩΡΕΣ
ΕΠΙΠΕΔΟΥ 3	Μέσω ιδιαίτερης εγκατάστασης και εξωτερικό φορτιστή	40+ kW	<45 ΛΕΠΤΑ

Πίνακας 1.8. Επίπεδα φόρτισης και βασικά χαρακτηριστικά [12].

1.9 Σταθμοί φόρτισης

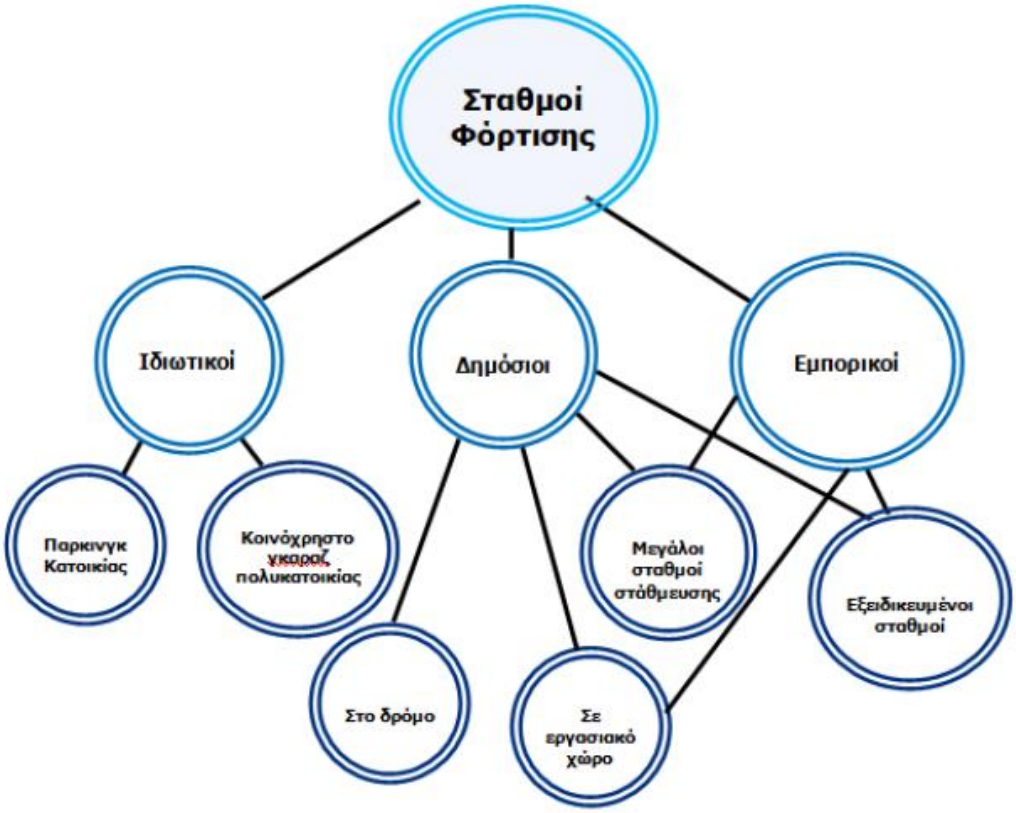
Η μαζική κυκλοφορία των ηλεκτρικών οχημάτων θα φέρει στο προσκήνιο νέες προκλήσεις οι οποίες θα πρέπει να αντιμετωπισθούν. Μία από αυτές είναι ο χώρος φόρτισης των νέων ηλεκτρικών οχημάτων. Ανάλογα με τον τρόπο χρήσης των αμαξιών (χρόνος λειτουργίας διαθέσιμη αυτονομία κλπ), την τεχνολογία των μπαταριών τους και τον διαθέσιμο χρόνο για τη φόρτιση των μπαταριών δημιουργούνται σταθμοί φόρτισης, οι οποίοι θα διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

1) **Ιδιωτικοί με ιδιωτική πρόσβαση(π.χ. προσωπικά γκαράζ).** Η φόρτιση γίνεται από μονοφασική παροχή και συνήθως τις νυχτερινές ώρες, με αποτέλεσμα να ισχύει χαμηλότερο τιμολόγιο κατανάλωσης. Η φόρτιση διαρκεί περίπου 6-8 ώρες και το μέγιστο ρεύμα φόρτισης δεν ξεπερνάει τα 15 A. Δίνεται, ακόμη, η δυνατότητα στους καταναλωτές να κλείνουν συμφωνίες με το κεντρικό δίκτυο ακόμα και για V2G (vehicle to grid) λειτουργία, με αποτέλεσμα να πουλάνε ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο. Τέλος, οι απαιτήσεις σε εξοπλισμό είναι ελάχιστες.

2) **Ιδιωτικοί με δημόσια πρόσβαση(π.χ. μεγάλα παρκινγκ εμπορικών καταστημάτων, εργασιακός χώρος).** Σε αυτή την περίπτωση τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να φορτίζουν τις ώρες που παραμένουν παρκαρισμένα πληρώνοντας το ανάλογο αντίτιμο. Στους ιδιωτικούς χώρους με δημόσια πρόσβαση θα πρέπει να υπάρχουν όλων των επιπέδων 1-3 σταθμοί φόρτισης.

3) **Δημόσιοι με δημόσια πρόσβαση(π.χ. δημόσιοι δρόμοι).** Οι σταθμοί αυτοί φόρτισης είναι απαραίτητοι για τους ιδιοκτήτες αυτοκινήτων οι οποίοι δεν μπορούν να έχουν πρόσβαση σε ιδιωτικά πάρκινγκ, ιδίως οι κάτοικοι πυκνοκατοικημένων περιοχών. Οι απαιτήσεις τέτοιων σταθμών είναι επιπέδου 1 και 2.

Στην εικόνα 1.9 παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση των σταθμών φόρτισης ανάλογα με την τοποθεσία εγκατάστασης [11].



Εικόνα 1.9. Κατηγοριοποίηση σταθμών φόρτισης ανάλογα με τη τοποθεσία εγκατάστασης.

1.10 V2G Διαδικασία

Τα ηλεκτρικά οχήματα δεν αποτελούν απλά μια τεχνολογική εξέλιξη στο τομέα των μεταφορών και της αυτοκινητοβιομηχανίας αλλά και μια πρόκληση για τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Γενικά, ο ρόλος των ηλεκτρικών οχημάτων όσον αφορά το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι διπλός. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη φόρτιση τους από το δίκτυο συμπεριφέρονται ως φορτία, αυξάνοντας την ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Από την στιγμή όμως που διαθέτουν μπαταρίες και τη δυνατότητα σύνδεσης τους με το δίκτυο μπορούν να λειτουργήσουν κι ως μονάδες αποθήκευσης, προσφέροντας ενέργεια στο δίκτυο όταν αυτό τη χρειάζεται. Επίσης, στην διεθνή βιβλιογραφία έχει αρχίσει και κυριαρχεί ο αγγλικός όρος «prosumer» ο οποίος προκύπτει από τις αγγλικές λέξεις producer και consumer, είναι δηλαδή φορείς του συστήματος που άλλοτε συμπεριφέρονται ως καταναλωτές και άλλοτε ως παραγωγοί [7].

Η βασική ιδέα του V2G είναι, πως εφόσον τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα περιέχουν μπαταρίες που χρειάζονται ενέργεια για να φορτίσουν, αντιστοίχως θα μπορούσαν

κάτω υπό κάποιες προϋποθέσεις να προσφέρουν και ενέργεια στο δίκτυο όταν αυτό είναι επιβαρυμένο, π.χ. απογευματινές ώρες για τα νοικοκυριά ή μεσημεριανές ώρες στο ωράριο εργασίας, και να φορτίζονται σε ώρες μη αιχμής, πχ το βράδυ.

Εδώ να διευκρινίσουμε πως θα μιλήσουμε κυρίως για ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας, καθώς μόνον αυτά έχουν ικανοποιητική χωρητικότητα ώστε να είναι σε θέση να προσφέρουν ενέργεια στο δίκτυο. Εν αντιθέσει τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα, που όπως προαναφέραμε έχουν συνήθως μικρές μπαταρίες με μικρή χωρητικότητα, δεν είναι σε θέση να προσφέρουν ένα ικανοποιητικό ποσό ενέργειας στο δίκτυο [10].

Για να πραγματοποιηθεί μία εγκατάσταση που θα εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα του V2G χρειάζονται κάποιες ειδικές διατάξεις που θα εξασφαλίζουν ότι η ανταλλαγή ισχύος μεταξύ ηλεκτρικών οχημάτων και δικτύου θα είναι ορισμένη από προϋποθέσεις και ελεγχόμενη κάθε στιγμή. Συγκεκριμένα, όλα τα ηλεκτρικά οχήματα διαθέτουν ηλεκτρονικά ισχύος που μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου σε συνεχή για τη φόρτιση της μπαταρίας του οχήματος τα οποία με κατάλληλες τροποποιήσεις μπορούν να λειτουργήσουν και αντίστροφα μετατρέποντας την συνεχή τάση από τον συσσωρευτή του οχήματος στην εναλλασσόμενη τάση του δικτύου και στην συχνότητα του δικτύου (50hz για την Ελλάδα). Τα ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας μπορούν να φορτίσουν κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης του φορτίου και να εκφορτίσουν όταν το δίκτυο χρειάζεται ηλεκτρική ενέργεια. Με τον τρόπο αυτό τα ηλεκτρικά οχήματα αποτελούν ένα ελεγχόμενο φορτίο που μπορούν να συμβάλλουν στην εξομάλυνση της καμπύλης της ζήτησης, δηλαδή στην προσέγγιση της ιδανικής καμπύλης. Επίσης, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν τα ηλεκτρικά οχήματα προς αποθήκευσης ενέργειας που προέρχεται από τα εγκατεστημένα συστήματα ανανεώσιμων πηγών (φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες). Έτσι παρουσιάζεται η αναγκαιότητα επικοινωνίας του διαχειριστή του δικτύου με τα ηλεκτρικά οχήματα όταν αυτά θα είναι συνδεδεμένα με το δίκτυο. Σε αυτό το σημείο έρχεται ο ρόλος του Aggregator. Το πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί με την λειτουργία των ηλεκτρικών οχημάτων ως πάροχοι ενέργειας είναι όπως προαναφέραμε πως η χωρητικότητα των μπαταριών τους είναι μικρή και επομένως ικανοποιητική ισχύς μπορεί να προκύψει μόνο από συνδυασμό ενός ικανοποιητικού αριθμού οχημάτων. Το πρόβλημα της οργάνωσης αυτών των οχημάτων μπορεί να επιλυθεί μέσω του Aggregator και την αντίστοιχη οργάνωση του προγράμματος V2G [8].

Όπως προαναφέρθηκε ο στόλος ηλεκτρικών οχημάτων θα βρίσκεται υπό την επίβλεψη ενός διαχειριστή, ο οποίος θα αποτελεί το διαμεσολαβητή μεταξύ του στόλου και του κεντρικού διαχειριστή του ενεργειακού συστήματος. Ο διαμεσολαβητής(aggregator) θα επικοινωνεί με τον κεντρικό διαχειριστή μέσω κατάλληλων σημάτων, τα οποία στη συνέχεια θα διαβιβάζονται σε κάθε όχημα ξεχωριστά. Μάλιστα η αυτοκινητοβιομηχανία έχει μεριμνήσει ώστε το σύστημα επικοινωνίας να αποτελεί βασικό κομμάτι σε κάθε όχημα. Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι το τμήμα αυτό ονομάζεται ‘telematics’ και η βασική λειτουργία που προσφέρει έχει να κάνει με τη δήλωση του οχήματος σε ηλεκτρονική βάση δεδομένων με τη χρήση μοναδικής ηλεκτρονικής ταυτότητας(π.χ. αριθμός διαδικτυακού πρωτοκόλλου, IP), το

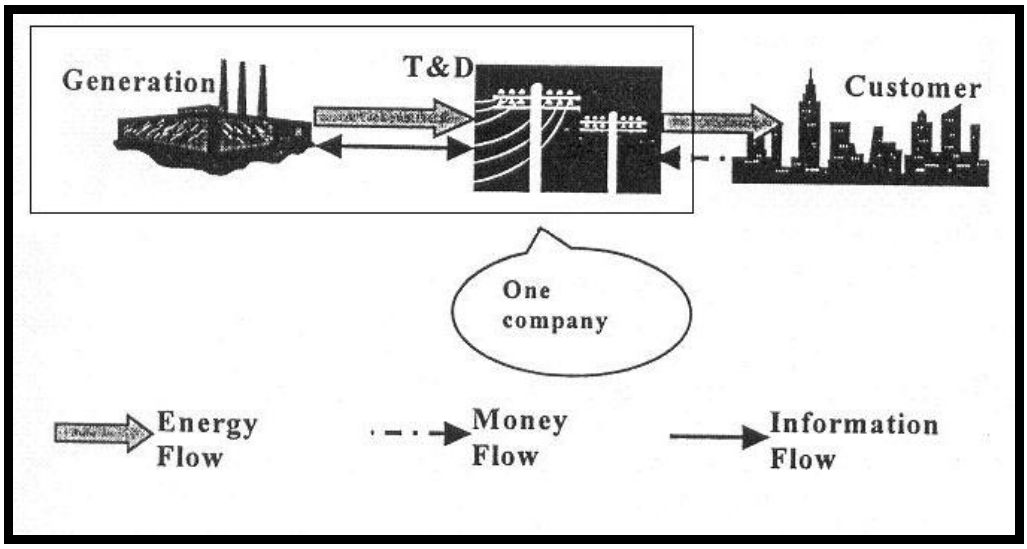
οποίο θα εξυπηρετεί στην καταγραφή της συνολικής ανταλλαγής ενέργειας μεταξύ οχήματος και κεντρικού δικτύου, που θα αποσκοπεί στην ακριβή χρέωση σε κάθε λογαριασμό. Παράλληλα μέσω του 'telematics' θα γίνεται δυνατός ο εντοπισμός θέσης του ηλεκτρικού οχήματος μέσω του Παγκόσμιου Συστήματος Θεσιθεσίας (GPS) ή ακόμη και του υπάρχοντος συστήματος κινητής τηλεφωνίας. Οι δύο παραπάνω λειτουργίες του on-board συστήματος ηλεκτρικών αυτοκινήτων(μέτρηση συναλλασσόμενης ενέργειας, εντοπισμός θέσης) είναι απαραίτητες για τη συμμετοχή τους στα διάφορα μοντέλα αγορών V2G, καθώς ανά πάσα στιγμή ο aggregator θα πρέπει να γνωρίζει τη θέση, τη διαθεσιμότητα και τη στάθμη φόρτισης όλων των οχημάτων που βρίσκονται στο στόλο που διαχειρίζεται [9].

2 ΑΓΟΡΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 Ιστορική αναδρομή

Για πολλές δεκαετίες, υπήρχε μόνο μια επιχείρηση ηλεκτρισμού σε κάθε χώρα η οποία μονοπωλούσε τον τρόπο με τον οποίο γινόταν η παραγωγή, η μεταφορά, ο έλεγχος και η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Σε αυτό το μονοπώλιο, η επιχείρηση διαχειριζόταν τα τρία κύρια στοιχεία ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας :

- την παραγωγή (generation),
- τη μεταφορά (transmission)
- τη διανομή (distribution)



Εικόνα 2.1. Από την παραγωγή στην κατανάλωση-δυνατές ροές

Μια μόνο εταιρεία έχει το μονοπώλιο να παράγει, να μεταφέρει και να διανέμει την ηλεκτρική ενέργεια, μέσω ενός δικτύου μεταφοράς στους τελικούς καταναλωτές ή αν υπάρχει διαφορετική εταιρεία διανομής, αυτή τροφοδοτείται από ένα μόνο προμηθευτή ηλεκτρικής ενέργειας. Δεν υπάρχει επιλογή σε κανένα επίπεδο. Το μεγαλύτερο μέρος του χρηματοοικονομικού κινδύνου περνάει στους καταναλωτές μέσω της κανονικοποίησης κόστος-ανά-υπηρεσία (cost-of-service regulation). Οι καταναλωτές πληρώνουν τα λάθη στις επενδύσεις της εταιρείας, τις αλλαγές στην ζήτηση, τις απρόβλεπτες τεχνολογικές βλάβες, και ουσιαστικά οτιδήποτε δεν πηγαίνει καλά. Οι σταθμοί παραγωγής βρίσκονται πολύ πίσω τεχνολογικά με σοβαρή επίπτωση τόσο στην απόδοσή τους όσο και στους εκλυόμενους ρύπους. Μεγάλες εγκαταστάσεις ενώ παράγουν αναλογικά μικρή ισχύ καταστρέφουν ανεπανόρθωτα, λόγω ρύπανσης, περιοχές γύρω τους.

Το μονοπωλιακό αυτό μοντέλο βέβαια συντέλεσε για την χώρα μας στον εξηλεκτρισμό της υπαίθρου, ενώ επιπλέον καθιστούσε τη ΔΕΗ υπεύθυνη να παρέχει ρεύμα σε απομονωμένα συστήματα, όπως τα μη διασυνδεδεμένα νησιά. ακόμα και αν είναι ασύμφορη η λειτουργία του συστήματος με την τιμή που έχει η kWh στις ηπειρωτικές περιοχές.

Αυτή η μορφή της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας επικρατούσε παγκόσμια μέχρι πρότινος και ισχύει και στην Ελλάδα για πολλά χρόνια. Οι σημερινές διεθνείς τάσεις και αντιλήψεις οδηγούν προς την κατεύθυνση της εγκατάλειψης των μονοπολιακών πρακτικών [36].

2.2 Μοντέλο αντιπροσώπου αγοράς

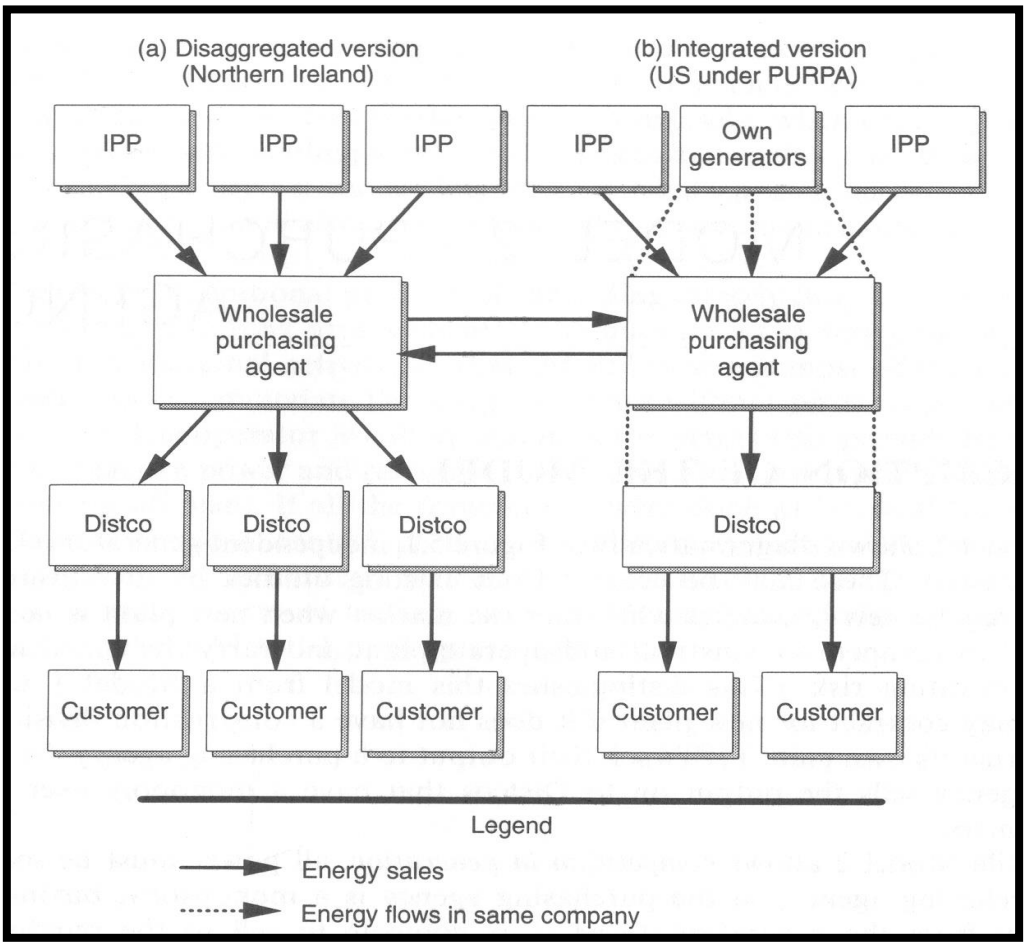
Παράλληλα, η αλλαγή αυτή στον τρόπο λειτουργίας της αγοράς έφερε στο προσκήνιο καινούργια φαινόμενα, νέες καταστάσεις, νέους κίνδυνους και έκανε επιτακτική την ανάγκη για την εύρεση εργαλείων που θα βοηθούσαν στη μελέτη αυτών. Πολλά από αυτά τα νέα θέματα προήλθαν από την έλλειψη εμπειρίας σε μια τέτοια καινοτομία, ενώ κάποια αλλά ήταν αναπόφευκτα λόγω των προτεινόμενων δομών. Απαραίτητο είναι πλέον να βρεθούν εργαλεία που θα βοηθούν στη λήψη αποφάσεων και θα βελτιώνουν την αποτελεσματικότητα του δικτύου ενέργειας. Η μελέτη μοντέλων λειτουργίας άλλων αγορών είναι σχεδόν σίγουρο ότι θα οδηγούσε τους συμμετέχοντες στην αγορά της ενέργειας σε λάθος αποφάσεις. Εργαλεία που βοηθούν στη μελέτη του εμπορίου ενέργειας θα βοηθούσαν τους προμηθευτές και τους καταναλωτές να συνάψουν συμφωνία για διάφορους ενεργειακούς πόρους, για ποικίλα προϊόντα ηλεκτρικής ενέργειας, έχοντας κατά νου τις ιδιαίτερες συνθήκες της ενεργειακής αγοράς.

Για να υπερκεραστούν τα παραπάνω προβλήματα καθώς και για να εξασφαλιστούν η αξιοπιστία, η αποδοτικότητα άλλα και η διαφάνεια του συστήματος κατέστη αναγκαία η ύπαρξη ενός διαχειριστή του Αντιπροσώπου Αγοράς. Ειδικότερα, έχει μόνο αυτός πρόσβαση στις γραμμές μεταφοράς, δηλαδή υπάρχει ένα μονοπώλιο στην μεταφορά προς τους καταναλωτές ενώ παράλληλα έχει τη δυνατότητα να διαλέγει από έναν αριθμό από διαφορετικούς παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι ανεξάρτητοι παραγωγοί (Independent Power Producers-IPP) ανταγωνίζονται στην κατασκευή και λειτουργία σταθμών παίρνοντας και το ανάλογο ρίσκο. Οι IPP πωλούν την παραγωγή τους στον Αντιπρόσωπο Αγοράς. Ακολούθως, αυτός την πουλά στις εταιρείες διανομής (Discos) που είναι μονοπώλιο στους καταναλωτές τους. Έτσι δημιουργείται **ανταγωνισμός στην παραγωγή.** (Εικόνα 2.2.)

Οι παραγωγοί μπορούν να ειδικεύονται ή να διαφοροποιούνται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του φορτίου. Για παράδειγμα, κάποιοι ίσως θέλουν να ανταγωνίζονται για μακροπρόθεσμα συμβόλαια φορτίου βάσης. Αυτοί είναι πολύ πιθανό να έχουν στην κατοχή τους υδροηλεκτρικό ή πυρηνικό σταθμό παραγωγής. Από την άλλη, παραγωγοί

με σταθμούς που χρησιμοποιούν φυσικό καύσιμο επιδιώκουν να καλύψουν βασικό και κυμαινόμενο φορτίο. Επίσης, παραγωγοί με σταθμούς που λειτουργούν με τουρμπίνες ανάφλεξης, συνήθως ανταγωνίζονται για το φορτίο αιχμής. Τέλος, άλλοι παραγωγοί διαφοροποιούνται και είναι έτοιμοι να ανταγωνιστούν για την κάλυψη κάθε είδους φορτίου.[33]



Εικόνα 2.2. Σχηματική αναπαράσταση μοντέλου αντιπροσώπου αγοράς

Ουσιαστικά λοιπόν ο αντιπρόσωπος αγοράς έχει το μονοπώλιο στο δίκτυο μεταφοράς και της πώλησης στον τελικό καταναλωτή. Τη μορφή αυτή αγοράς εισήγαγε στις Η.Π.Α. η νομοθετική ρύθμιση του 1978 (PUPRA). Αν και είναι συζητήσιμο κατά πόσο ο ανταγωνισμός στην παραγωγή μπορεί να ελαχιστοποιήσει το κόστος, αυτή η μορφή διευκολύνει τις κυβερνήσεις να επεκτείνουν την κοινωνική πολιτική τους, πέρα από τα αντικείμενα που ήδη αναφέρθηκαν, στην ποικιλία των σταθμών παραγωγής, τη διαχείριση στην πλευρά της ζήτησης και στην προάσπιση του περιβάλλοντος. Επίσης αποφεύγονται κάποιες επιβαρύνσεις στο κόστος, που υπάρχουν στις πιο απελευθερωμένες αγορές, δηλαδή τα κόστη συναλλαγών και πρόσβασης στα δίκτυα

μεταφοράς και το αυξημένο κόστος κεφαλαίου, που προκύπτει, όταν οι παραγωγοί αναλαμβάνουν τον τεχνολογικό κίνδυνο.

Αυτή η μορφή απελευθέρωσης χρειάζεται συμβόλαια μεταξύ αγοραστών και ανεξάρτητων παραγωγών. Με αυτό τον τρόπο οι παραγωγοί εξασφαλίζονται από τον κίνδυνο αγοράς και διευκολύνονται στην αύξηση των επενδύσεων, αφού δεν απειλούνται από τις μελλοντικές χαμηλότερου κόστους μονάδες παραγωγής. Έτσι το κόστος κινδύνου αγοράς και τεχνολογίας περνά, μέσω του αντιπροσώπου αγοράς, στον καταναλωτή. Απομονώνοντας τους ιδιοκτήτες των σταθμών από την επίδραση των τεχνικών αλλαγών και τις δυνάμεις της αγοράς, αυτή η μορφή απελευθέρωσης δεν μετριάζει το δυναμικό όφελος του ανταγωνισμού, ενώ το πότε και τι θα κατασκευασθεί μάλλον το αποφασίζουν οι κεντρικοί σχεδιαστές και όχι οι επιχειρηματίες.

Τα **πλεονεκτήματα του ανταγωνισμού** στην παραγωγή που επιφέρει την ύπαρξη πολλών και ποικίλου τύπου παραγωγών είναι αρκετά και παρουσιάζονται παρακάτω:

1) Το πρώτο πλεονέκτημα έχει να κάνει με τη μείωση του κόστους. Σε οποιαδήποτε στιγμή, η ενέργεια διοχετεύεται στο δίκτυο μεταφοράς από τον παραγωγό με το χαμηλότερο οριακό κόστος (marginal cost). Έτσι μειώνεται το κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμη, επειδή οι διαφορετικοί σταθμοί παραγωγής έχουν διαφορετικά χαρακτηριστικά φορτίου, η ικανότητα παραγωγής μπορεί να κατανεμηθεί πιο σωστά, με αποτέλεσμα να μειώνεται σε ακόμη μεγαλύτερο βαθμό το κόστος παραγωγής.

2) Το δεύτερο πλεονέκτημα έχει να κάνει με το ότι βοηθά στην ανάπτυξη του χρηματιστηρίου της ενέργειας. Η δυνατότητα να πουλά ο παραγωγός ενέργεια στο χρηματιστήριο της αγοράς ενέργειας, του δίνει μεγαλύτερη ευελιξία στο να μπορεί να προγραμματίζει την παραγωγή του. Έτσι, οι αδρανείς μονάδες παραγωγής που χρειάζεται να συντηρούνται για να ανταποκρίνεται ο παραγωγός στις εκάστοτε ανάγκες είναι πολύ λιγότερες. Η αποτυχία στην κάλυψη των αναγκών και τα επείγοντα περιστατικά μπορούν να αντιμετωπισθούν με το εμπόριο ενέργειας στο ¨χρηματιστήριο¨ της αγοράς. Η ζήτηση και η παραγωγή εξισορροπούνται με ευέλικτη τιμολόγηση της ενέργειας.

3) Το τρίτο πλεονέκτημα έγκειται στο ότι η αγορά θα είναι σε θέση να παρέχει στον καταναλωτή υπηρεσίες που θα ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις του. Οι καταναλωτές έχουν χρέωση τέτοια ανάλογα με τις υπηρεσίες που τους προσφέρονται και αυτή αυξάνει όταν ανεβαίνει και το επίπεδο αξιοπιστίας της υπηρεσίας που προσφέρεται. Φαίνεται λοιπόν ότι ο ανταγωνισμός στην παραγωγή έχει φέρει ποικιλία υπηρεσιών για τον καταναλωτή, κάτι που δεν υπήρχε παλαιότερα.

4) Το τέταρτο πλεονέκτημα είναι ότι τα μακροπρόθεσμα συμβόλαια μεταξύ Αντιπροσώπου Αγοράς και Παραγωγών μειώνουν τους κίνδυνους που επιφέρουν στους παραγωγούς οι νέες τεχνολογίες και η λειτουργία της αγοράς. Έτσι μπορεί να γίνει καλύτερος σχεδιασμός των επεκτάσεων των παραγωγών,

μειώνοντας παράλληλα το κόστος κεφαλαίου κατασκευής των σταθμών που έχει άμεση επίπτωση στην τιμή του ρεύματος.

5) Το πέμπτο πλεονέκτημα είναι ότι σε αυτό το μοντέλο αποφεύγονται κόστη συναλλαγών, κόστη πρόσβασης στο δίκτυο μεταφοράς και κόστη επένδυσης κεφαλαίου. Επιπλέον υπάρχει ακόμα η δυνατότητα άσκησης κοινωνικής πολιτικής με μέτρα που δύναται να λάβει ο Αντιπρόσωπος Αγοράς λόγω της ανεξαρτησίας που έχει στον έλεγχο των εταιρειών διανομής (Discos) και της λειτουργίας του δικτύου μεταφοράς και διανομής.
6) Τέλος, έχουμε να κάνουμε με κάτι εντελώς καινοτόμο. Ο ανταγωνισμός οδηγεί τους παραγωγούς στο να ανταποκρίνονται πιο αποτελεσματικά στις απαιτήσεις του καταναλωτή, να παρακολουθούν τα κόστη πιο επιστάμενα, να ανταγωνίζονται με βάση την τιμή και γενικά να δείχνουν διάθεση για νεωτερισμούς. Αναπτύσσοντας νέες υπηρεσίες για τους καταναλωτές, καλύτερες μεθόδους μείωσης του κόστους και βρίσκοντας τρόπους για καλύτερη αντιμετώπιση των προβλημάτων, κάνει τους παραγωγούς-καινοτόμους άκρως ανταγωνιστικούς.

2.3 Βασικές αρχές της απελευθερωμένης αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Σε μια απελευθερωμένη Αγορά Ηλεκτρισμού, η ύπαρξη πολλών παικτών στην πλευρά της παραγωγής και το δικαίωμα ορισμένων εκ των καταναλωτών να επιλέγουν τον προμηθευτή τους απαιτούν την λύση δύο καίριας σημασίας προβλημάτων:

- Του προβλήματος της κατανομής του φορτίου ανάμεσα στους συμμετέχοντες στην αγορά παραγωγούς και

- Του προβλήματος της εκκαθάρισης της αγοράς, δηλαδή του προσδιορισμού των οικονομικών δοσοληψιών οι οποίες πρέπει να γίνουν από τον Αντιπρόσωπο Αγοράς. Πιο συγκεκριμένα αναλαμβάνει να διαμοιράσει χρηματικά ποσά στις μονάδες ανάλογα με την τιμολογιακή πολιτική που έχει κάθε ξεχωριστή μονάδα και την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που πρόσφερε σε ένα κοινό για όλους δίκτυο. Ανάλογη συμπεριφορά οφείλει να διατελέσει και ως προς τους καταναλωτές. .

Το πρώτο πρόβλημα, της κατανομής του φορτίου, παρουσιάζεται και στην περίπτωση της μονοπωλιακής διάρθρωσης του τομέα ηλεκτρισμού. Στην περίπτωση αυτή ο υπεύθυνος κατανομέας φορτίου υποτίθεται ότι δρα υπέρ των συμφερόντων της μια και μόνης υπάρχουσας επιχείρησης ηλεκτρισμού στην οποία και ο ίδιος ανήκει, κατανέμοντας το φορτίο μεταξύ των μονάδων της επιχείρησης κατά τον οικονομικότερο τρόπο, δηλαδή με το ελάχιστο κόστος. Με καθορισμένες τις τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας από την Αρχή που εποπτεύει την μονοπωλιακή επιχείρηση, η ελαχιστοποίηση του μεταβλητού κόστους παραγωγής μεγιστοποιεί το κέρδος της μονοπωλιακής επιχείρησης.

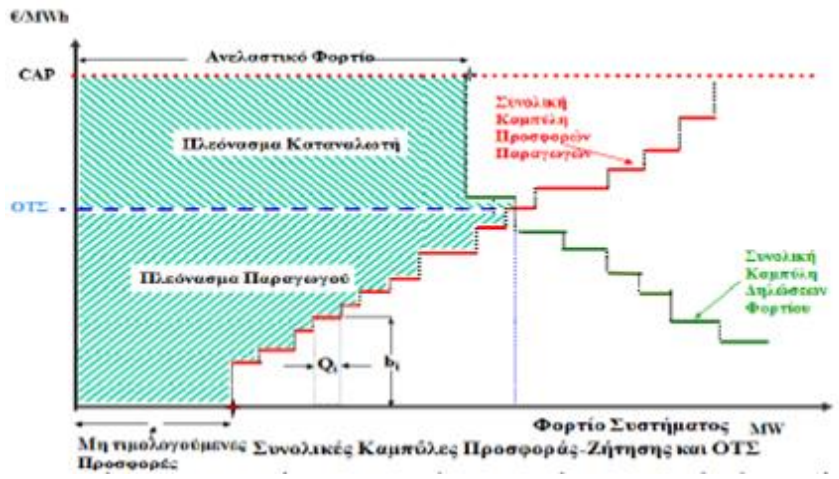
Σε μια απελευθερωμένη αγορά ηλεκτρισμού η ύπαρξη πολλών παικτών με αντιτιθέμενα, λόγω του ανταγωνισμού, συμφέροντα απαιτεί την καθιέρωση ενός αμερόληπτου κατανομέα, που θα μοιράζει το παιχνίδι με δίκαιο και αποδεκτό από όλους τους συμμετέχοντες στην αγορά, τρόπο.

Το πρόβλημα της εκκαθάρισης της αγοράς δεν υφίσταται στη μονοπωλιακή περίπτωση, όπου ο επιμερισμός των εισπραττόμενων από τους καταναλωτές ποσών στα επιμέρους τμήματα της μίας και μόνης υπάρχουσας καθετοποιημένης επιχείρησης ηλεκτρισμού θεωρείται ότι είναι εσωτερικό της πρόβλημα [34].

2.4 Ημερήσιος Ενεργειακός Προγραμματισμός (ΗΕΠ)

Η λειτουργία της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να παρομοιαστεί σαν μια εφοδιαστική αλυσίδα του προϊόντος «ηλεκτρισμός». Το πρώτο κρίκο της αλυσίδας τον αποτελούν κατά κύριο λόγο οι παραγωγοί που διαθέτουν μεγάλες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και πιθανές εισαγωγές οι οποίοι πωλούν την παραγόμενη τους ηλεκτρική ενέργεια στην χονδρική αγορά (wholesale market). Στην συνέχεια η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους προμηθευτές (retailers) οι οποίοι αντιπροσωπεύουν το άθροισμα των πελατών τους, οι εξαγωγείς και τέλος οι αυτοπρομηθευόμενοι καταναλωτές.

Η τιμή της ενέργειας στη χονδρική αγορά προκύπτει με τον εξής τρόπο κάθε παραγωγός από την πλευρά του καταθέτει μια προσφορά (bid) στην οποία για την επόμενη μέρα αναφέρει χαρακτηριστικά το ποσό της 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 εικοσιτετράωρου 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 (ΗΕΠ) (Εικόνα 2.4.1.) και γίνεται από τον Αντιπρόσωπο Αγοράς ο οποίος και έχει την ευθύνη για την απρόσκοπτη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας.



Εικόνα 2.4.1. Προσδιορισμός της ΟΤΣ στην ΗΕΠ από τις καμπύλες προσφοράς και ζήτησης

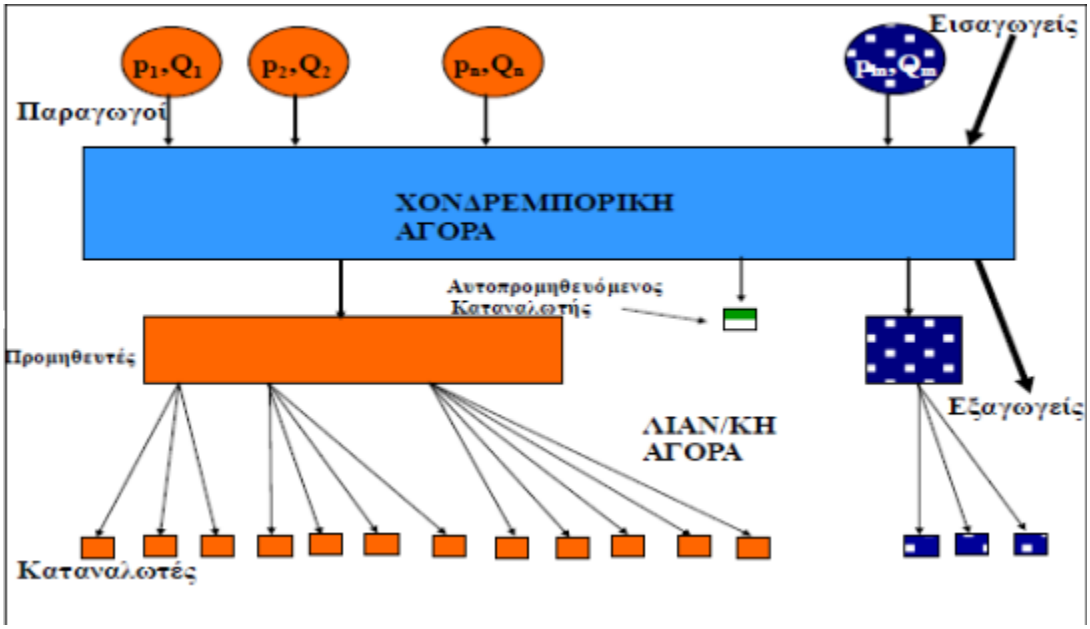
Ειδικότερα, η επίλυση του ΗΕΠ προσδιορίζει τον τρόπο λειτουργίας κάθε μονάδας για κάθε ώρα της επόμενης ημέρας ώστε να μεγιστοποιείται το κοινωνικό όφελος που προκύπτει, λαμβάνοντας υπόψη:

-Την ικανοποίηση του ενεργειακού ισοζυγίου

-Την κάλυψη των βραχυχρόνιων αναγκών για επικουρικές υπηρεσίες

-Την τήρηση του περιορισμού του συστήματος

Το δεύτερο τμήμα της αγοράς (Εικόνα 2.4.2), η λιανική, αφορά τους προμηθευτές και τους τελικούς καταναλωτές, οι οποίοι μπορούν να επιλέγουν ελεύθερα ποια 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 [35].



Εικόνα 2.4.2 Σχηματική απεικόνιση της δομής της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

2.5 Επιχειρηματικό μοντέλο με βασικό άξονα τα ηλεκτρικά οχήματα

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 καινούργιους παράγοντες της αγοράς που θα εμφανιστούν με την υιοθέτηση της V2G λειτουργίας. Οι οποίοι είναι:

- **Τον ιδιοκτήτη-χρήστη του οχήματος**: Θεωρείται πάντοτε τελικός καταναλωτής ενέργειας και όχι παραγωγός, ακόμα και αν λόγω της συμμετοχής τους στη V2G λειτουργία μπορεί να προσφέρει ενέργεια πίσω στο δίκτυο. Αυτό θα γίνει πιο σαφές όταν εισάγουμε την έννοια του συναθροιστή (aggregator).

- **Τον ιδιοκτήτη του συσσωρευτή**: Είναι κοινά γνωστό ότι ο συσσωρευτής είναι υπεύθυνος για το υψηλό κόστος των ηλεκτρικών οχημάτων, επομένως έχει προταθεί να διαχωριστεί το κόστος αγοράς ενός ηλεκτρικού οχήματος 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 ιδιοκτήτες του συσσωρευτή μπορεί να είναι και ο ίδιος ο ιδιοκτήτης του οχήματος, όπως συμβαίνει μέχρι στιγμής

- **Τον ιδιοκτήτη της υποδομής φόρτισης**: Μία υποδομή φόρτισης μπορεί να είναι από μία απλή οικιακή παροχή για την φόρτιση του ηλεκτρικού οχήματος, ή σε πιο σύνθετες περιπτώσεις να είναι ένας ολόκληρος σταθμός φόρτισης με ικανότητα να καλύψει πολλά οχήματα ταυτόχρονα. Παραδείγματος χάριν, 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.

- **Τον πάροχο - συναθροιστή των ηλεκτρικών οχημάτων (EV supplier-aggregator):** Πρόκειται για τον παράγοντα κλειδί, όσον αφορά την υιοθέτηση της V2G λειτουργίας, αφού εκτελεί δύο λειτουργίες ταυτόχρονα. 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. και από την άλλη συνάπτει συμβόλαια για τις αγορές ρύθμισης συχνότητας, στρεφόμενης εφεδρείας ή/και ισχύος αιχμής. Ο δεύτερος ρόλος ενός aggregator προέρχεται από την αδυναμία ενός μεμονωμένου EV να συμμετάσχει απευθείας στις χονδρικές αγορές ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών. Για παράδειγμα, στις περισσότερες από τις αγορές που αναφέρθηκαν παραπάνω, η ελάχιστη ποσότητα ισχύος που μπορεί να προσφερθεί για ρύθμιση είναι το 1MW. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό, ότι ένα μεμονωμένο αυτοκίνητο του οποίου η ισχύς είναι της τάξεως κάποιων KW, δεν θα μπορούσε να συμμετέχει. Αντίθετα μία επιχείρηση, που θα έχει υπό την εποπτεία της ένα στόλο οχημάτων, θα μπορεί να λειτουργήσει ως μεσάζοντας, συναθροίζοντας τη διαθέσιμη ισχύ ολόκληρου του στόλου.

Συγκεκριμένα για τον συναθροιστή (aggregator) πρέπει να αναφερθεί ότι πρόκειται για το πιο πιθανό μοντέλο της V2G λειτουργίας, δεδομένης της μέχρι στιγμής λειτουργίας των αγορών ενέργειας 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.

Τα κέρδη, που αποκομίζει ο aggregator (εικόνα 2.5.) 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. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο ο κάτοχος του οχήματος δεν θα έχει άμεση σχέση με την αγορά ενέργειας μα θα υπάγεται σε κάποια επιχείρηση-αθροιστή που θα λειτουργεί ως μεσάζοντας ανάμεσα στο δίκτυο και το όχημα. Θα συγκεντρώνει και θα διαχειρίζεται την συνολική ικανότητα ισχύος το στόλου οχημάτων που θα είναι πελάτες, ανάλογα με τις ισχύουσες τιμές σε κάθε αγορά ενέργειας [32].

Εικόνα 2.5. Λειτουργία συναθροιστή (aggregator)

Με βάση τα οφέλη, μπορούμε να φανταστούμε τους ακόλουθους αθροιστές:

- Την τοπική εταιρία διανομής ενέργειας που δραστηριοποιείται ούτως ή άλλως στην αγοραπωλησία ενέργειας και αποκτά οφέλη σχετιζόμενα με την ευστάθεια και αξιοπιστία του δικτύου.
- Την κατασκευαστική εταιρία των οχημάτων που αποκτά έτσι μια συνεχή πελατειακή σχέση με τον αγοραστή οχήματος για την πώληση τηλεματικού εξοπλισμού και αντίστοιχων υπηρεσιών.
- Τον πάροχο κινητής τηλεφωνίας, που διαχειρίζεται το δίκτυο τηλεπικοινωνίας για την μετάδοση της V2G πληροφορίας και αποκτά κέρδη μέσω της σύναψης πολλών μικρών αυτοματοποιημένων συναλλαγών.

- Μια ξεχωριστή επιχείρηση που θα ασχολείται αποκλειστικά και μόνο με αυτό τον τομέα.

2.6 Μελλοντικές βλέψεις-Αγοραπωλησία σε επίπεδο καταναλωτών

Τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως για πάνω από εκατό χρόνια δεν έχουν υποστεί μεγάλες αλλαγές με εξαίρεση ορισμένες μικρές αλλαγές με την ηλεκτρική ενέργεια να παράγεται από μεγάλες αποκεντρωμένες μονάδες και διαμέσου του συστήματος διανομής και μεταφοράς να καταλήγει στους καταναλωτές. Παρόλα αυτά τα τελευταία χρόνια λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής, τη διαθεσιμότητα καυσίμων και ορυκτών και για περιβαλλοντικούς λόγους ένα σημαντικό μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας έχει αρχίσει να παράγεται από μικρές διεσπαρμένες μονάδες οι οποίες εντοπίζονται πιο κοντά στους καταναλωτές. Μεταστροφή που ευνοήθηκε σημαντικά από την ανάπτυξη σύγχρονων επικοινωνιακών μέσων.

Γίνεται φανερό ότι αυτή η μεταστροφή στο τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που από μια μεγάλη μονάδα παραγωγής σε ένα πλήθος διάσπαρτων μικρών μονάδων που εντοπίζονται συνήθως πιο κοντά στον καταναλωτή έμελλε να διαφοροποιήσει το επιχειρηματικό πλαίσιο του τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας. Σαν φυσικό επακόλουθο τα επόμενα χρόνια είναι πολύ πιθανό ακόμα και μικρές κατοικίες να διαθέτουν την δικιά τους μικρή μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές οι μικρές μονάδες κατά κύριο λόγο θα ικανοποιούν την κατανάλωση σε ηλεκτρισμό της κατοικίας και πιθανό πλεόνασμα να διοχετεύεται στο δίκτυο για κάλυψη των απαιτήσεων σε ηλεκτρισμό της συνοικίας. Με βάση αυτήν την θεώρηση λαμβάνοντας υπόψη ότι ένα μεγάλο μέρος των κατοικιών θα διαθέτει τέτοιες μονάδες φαντάζει απόλυτα λογικό να έχουν την δυνατότητα πιθανά πλεονάσματα ενέργειας να τα ανταλλάσσουν με τον προμηθευτή-aggregator που έχουν επιλέξει να τους παρέχει ηλεκτρική ενέργεια. Παραδείγματος χάριν, ένα πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο μπορεί να παράγεται από ένα μικρό φωτοβολταϊκό πάνελ στην οροφή μιας κατοικίας θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να καλύψει ένα μέρος της απαιτούμενης ενέργειας ενός άλλου γειτονικού καταναλωτή. Με αυτό τον τρόπο αν ήταν εφικτή η αγοροπωλησία ηλεκτρική ενέργειας το κόστους μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας θα μειωνόταν. Επί προσθέτως, μια μικρή πτώση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας μιας κατοικίας λόγω μιας συννεφιάς ή μιας άπνοιας θα μπορούσε να καλυφθεί από το πλεόνασμα ενέργειας μιας άλλης κατοικίας η οποία δεν θα διέποταν από τις ίδιες καιρικές συνθήκες και θα διέθετε πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας. Σημαντικό ρόλο σε αυτή την εφαρμογή διαδραματίζουν ανεπτυγμένα συστήματα επικοινωνιών (smart meters) όπου σε πραγματικό χρόνο μετρούν και ελέγχουν την ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζεται ή την ηλεκτρική ενέργεια που προσφέρει μια κατοικία στο δίκτυο.

Μέχρι σήμερα η αγοραπωλησία τοπικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές γινόταν μέσω ενός συμβολαίου μακράς διάρκειας όπου

καθοριζόταν μια σταθερή τιμή ευρώ/kWh για την ενέργεια που θα πρόσφεραν στο δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, η συγκεκριμένη τιμολογιακή πολιτική δημιουργήθηκε για να παρακινήσει τους ανθρώπους να επενδύσουν στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η οποία πολιτική σταματάει σταδιακά να εφαρμόζεται καθιστώντας ως επιτακτική ανάγκη την δημιουργία μιας νέας πολιτικής τιμολόγησης που θα βασίζεται στους νόμους που διέπουν την ελεύθερη σύγχρονη αγορά. Εάν μια παρόμοια πολιτική τιμολόγησης μπορέσει να εφαρμοσθεί σε τοπικό επίπεδο παραδείγματος χάριν στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μια περιοχής θα έχει πολλά πλεονεκτήματα για τους εμπλεκόμενους φορείς. Η ανάδυση των συγκεκριμένων αγορών θα φέρει στην επιφάνεια νέες προοπτικές καθώς και εμπόδια που θα πρέπει να υπερκεραστούν αλλάζοντας τα ως τώρα δεδομένα στο τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, το συγκεκριμένο εγχείρημα όπου εμπλέκει όρους της σύγχρονης οικονομίας καθώς και την ενσωμάτωση διεσπαρμένων αιολικών, φωτοβολταϊκών πάρκων όπως και τα ηλεκτρικά οχήματα θα δημιουργήσει ένα πολύπλοκο δυναμικό σύστημα που θα πρέπει να σχεδιαστεί και να υλοποιηθεί πολύ προσεκτικά [31].

2.7 Τεχνολογική Υποστήριξη

Το παραπάνω μοντέλο για να πραγματοποιηθεί προϋποθέτει την ύπαρξη κατάλληλων μέσων όπου σε πραγματικό χρόνο θα αναλαμβάνουν να στέλνουν και να επεξεργάζονται ταχύτατα πληροφορίες. Κάθε εμπλεκόμενος φορέας οφείλει να διαθέτει ένα smart meter μια συσκευή όπου σε πραγματικό χρόνο στέλνει, διαχειρίζεται δεδομένα και προβλέπει την συμπεριφορά καθενός εμπλεκόμενου φορέα. Συσκευή που σε μεγάλο βαθμό έθεσε την βάση ώστε να πραγματοποιηθεί το εγχείρημα της «αγοράς» ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι εμπλεκόμενοι φορείς μέσω των smart meter θα έχουν σαφή αποτύπωση της κατάστασης του δικτύου και των συμπεριφορών των εμπλεκόμενων φορέων ρυθμίζοντας με το βέλτιστο τρόπο την δικιά τους συμπεριφορά. Με αυτό τον τρόπο θα μειωθούν σε μεγάλο βαθμό οι απώλειες και το κόστος μεταφοράς ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας αλλά θα επιτευχθεί και καλύτερος προγραμματισμός της κατανομής φορτίου ενός δικτύου. Σε τελική ανάλυση είναι πιθανό σε ένα μεγάλο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας να δημιουργηθούν αυτόνομα μικροδίκτυα όπου θα ανταλλάσσουν και θα παράγουν ηλεκτρική ενέργεια ως αυτόνομες οντότητες [31].

3 VIRTUAL POWER PLANT

3.1 Εισαγωγή

Τα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας γίνονται όλο και πιο πολύπλοκα με το πέρασμα των χρόνων. Αιτία αυτής της πολυπλοκότητας δεν είναι μόνο η αύξηση σε έκταση ενός συστήματος, αλλά και η εισαγωγή νέων εμπλεκόμενων φορέων, όπως είναι οι διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής, η δημιουργία μικροδικτύων εντός ενός συστήματος, η εισαγωγή της χονδρεμπορικής «αγοράς» ηλεκτρικής ενέργειας και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου και τέλος η διατήρηση της αξιοπιστία του συστήματος. Αυτοί οι νέοι φορείς απαιτούν καινούργια συστήματα όπου θα τα ελέγχουν και θα τα διαχειρίζονται.

Έχοντας αυτά υπόψη, τα τελευταία χρόνια σημαντική έρευνα έχει πραγματοποιηθεί στην εγκατάσταση και στην ανάπτυξη των διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής καθώς και στην ενσωμάτωση τους από το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς να τίθεται σε κίνδυνο η ομαλή λειτουργία του δικτύου. Είναι προφανές ότι η ενσωμάτωση τους από το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι τόσο εύκολη προϋποθέτοντας την ύπαρξη ενός μηχανισμού όπου θα ελέγχει την λειτουργία τους. Για την υπερκέραση αυτού του εμποδίου δημιουργήθηκαν δύο έννοιες-concept το μικροδίκτυο (Microgrids) και το Virtual Power Plant.

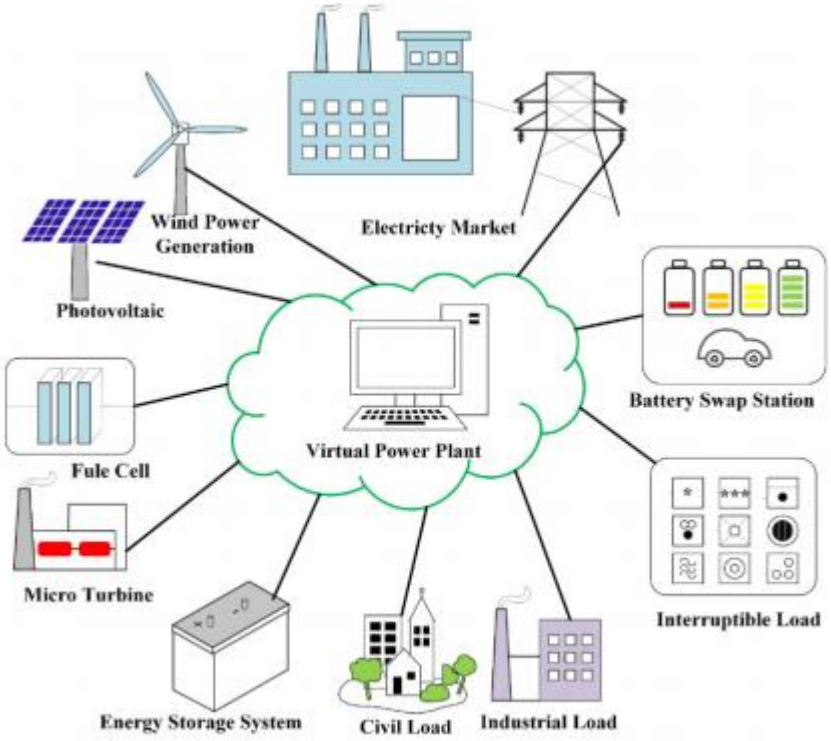
Τα μικροδίκτυα είναι τμήματα χαμηλής ή μέσης τάσης του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας που διαθέτουν σε κάποιο σημείο τους, διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής, ελέγξιμα φορτία και μονάδες αποθήκευσης ενέργειας όπου λειτουργούν ομαλά μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα από το κεντρικό διαχειριστή ορίζονται ως μια ενιαία οντότητα η οποία μπορεί να λειτουργήσει αυτόνομα σε περίπτωση βλάβης του υπόλοιπου δικτύου. Η σύνδεση διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής στην χαμηλή ή στην μέση τάση ενός δικτύου παρέχει σημαντικά οφέλη για τους τελικούς καταναλωτές όσον αφορά οικονομικούς λόγους, μείωση των απωλειών μεταφορά της ενέργειας και μείωση των εκπεμπόμενων αερίων.

Η κύρια ιδέα όπου βασίζεται το Virtual Power Plant είναι ότι τα στοιχεία που διαχειρίζεται δεν είναι απαραίτητο να εντοπίζονται στην ίδια περιοχή αλλά με την χρήση σύγχρονων μέσων επικοινωνίας διαχειρίζονται και λειτουργούν ως μια ενιαία χρηματιστηριακή οντότητα. Δηλαδή, ακόμα και μονάδες παραγωγής οι οποίες μπορούν να συνδέονται με το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας σε διαφορετικούς ζυγούς, τους μελετάμε ως μια ενιαία οντότητα.

Το Virtual Power Plant εκμεταλλευόμενο την διαδραστική επικοινωνία και την δυνατότητα διαχείρισης των διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής, των διακοπτόμενων φορτίων, των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, όπως παραδείγματος χάριν σταθμούς με μπαταρίες, καταφέρνει να τα ενσωματώσει ως μια οντότητα και να τα διαχειριστεί ανταλλάσσοντας βέλτιστα ενέργεια με την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Η

δημιουργία του έγινε επιτακτική από την ανάγκη παραγωγή περισσότερης ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας λόγω περιβαλλοντικών ανησυχιών. Ουσιαστικά, αποτελεί μια ενδιάμεση οντότητα μεταξύ των «μεγάλων» μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (market), των διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής και των φορτίων των καταναλωτών με απώτερο σκοπό την βέλτιστη, οικονομικότερη απόδοση του συστήματος. Επομένως, αναπτύχθηκε για να βοηθήσει ως προς τον βέλτιστο έλεγχο των διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής και της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από τους διαχειριστές του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας προσφέροντας κατάλληλη επικοινωνία μεταξύ αυτών των οντοτήτων του συστήματος.

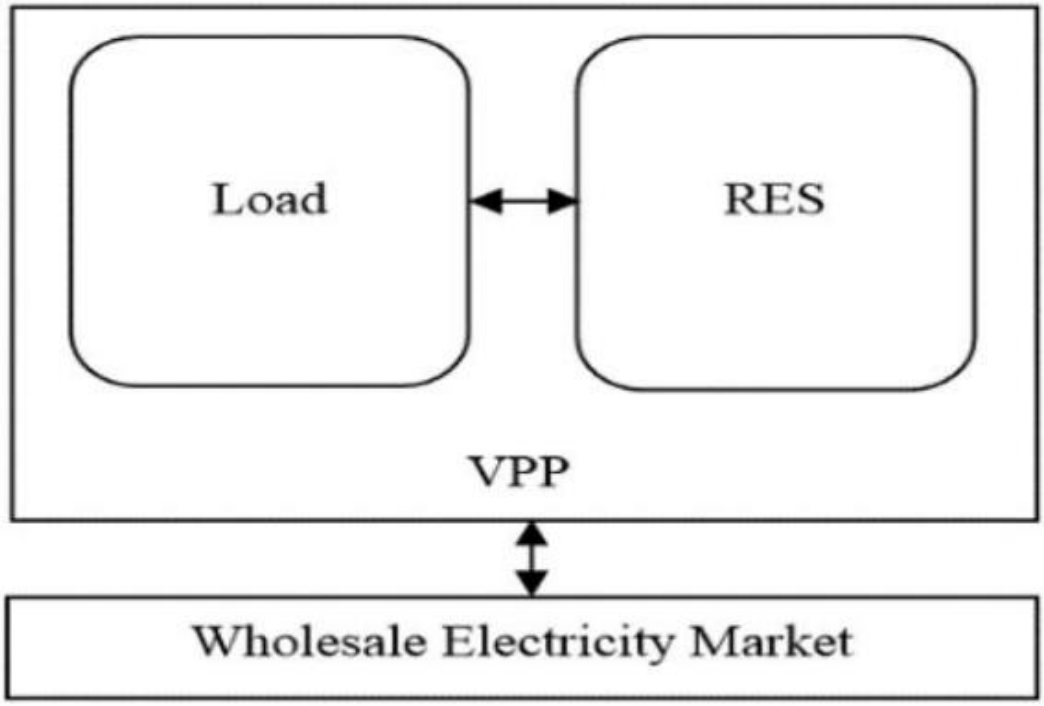
Η δημιουργία ενός Virtual Power Plant (Εικόνα 3.1.1.) το οποίο μπορεί να διαχειριστεί μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας μελλοντικά αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Από την άλλη πλευρά οι καταναλωτές θα έχουν πρόσβαση σε καλύτερες τιμές μέσω συμβολαίων μακράς διάρκειας σε συνεργασία με το διαχειριστή του Virtual Power Plant.



Εικόνα 3.1.1. Τα βασικά στοιχεία που διαχειρίζεται ένα Virtual Power Plant [16].

Συνεχίζοντας, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.1.2. το Virtual Power Plant λειτουργεί ως μεσάζων μεταξύ της διεσπαρμένης παραγωγής και των τελικών καταναλωτών. Ο διαχειριστής του είναι υποχρεωμένος να εξυπηρετεί την ζήτηση των τελικών καταναλωτών προμηθεύοντας την ενέργεια σε πρώτη φάση από τι διεσπαρμένες μονάδες που έχει στην κατοχή του και σε δεύτερη φάση από την «χονδρεμπορική» αγορά ηλεκτρικής ενέργεια. Παράλληλα έχει την δυνατότητα σε περιπτώσεις πλεονάζουσας παραγωγής ενέργειας από τις διεσπαρμένες του μονάδες να αποδώσει ενέργεια στην «χονδρεμπορική» αγορά ηλεκτρικής ενέργεια με το κατάλληλο χρηματικό αντίτιμο.

Το Virtual Power Plant οφείλει να διέπεται από συγκεκριμένους νόμους και χρηματιστηριακούς κανόνες εξασφαλίζοντας την αξιόπιστη και ομαλή λειτουργία όλων των εμπλεκόμενων φορέων του.



Εικόνα 3.1.2 Δομή του Virtual Power Plant [15].

3.2 Virtual Power Plant και ηλεκτρικά οχήματα

Στο μέλλον αναμένουμε τα ηλεκτρικά οχήματα να διαδραματίσουν ένα σημαντικό ρόλο στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Η ειδοποιός διαφορά των ηλεκτρικών οχημάτων σε σύγκριση με τις υπόλοιπες διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής είναι η κινητικότητα τους και η διττότητα του ρόλου τους, αφού μπορούν να «συμπεριφερθούν», είτε ως ελέγξιμα φορτία, είτε ως ελέγξιμες μονάδες παραγωγής

ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν το πλεονέκτημα να μπορούν να συνδέονται σε οποιοδήποτε σημείο του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας και να «προσφέρουν» τις ίδιες υπηρεσίες.

Αξιοσημείωτο είναι ότι τόσο η συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων όσο και των διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει σε κάθε στιγμή να ελέγχεται από τον aggregator. Σε διαφορετική περίπτωση η ενσωμάτωση τους από το δίκτυο θα έθετε σε κίνδυνο την ασφαλή και αξιόπιστη λειτουργία του δικτύου. Με αυτό τον τρόπο γίνεται εμφανής η σημασία του Virtual Power Plant Concept όπου προσφέρει το πλεονέκτημα στον διαχειριστή του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας να «βλέπει» τις διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής και τα ηλεκτρικά οχήματα ως οντότητες εύκολες διαχειρίσιμες. Κοντολογίς, το Virtual Power Plant μας προσφέρει ένα μοντέλο διαχείρισης που σκοπό έχει να διευκολύνει τον διαχειριστή του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας στην επίλυση των προβλημάτων που εμφανίζουν οι διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής ως προς την ενσωμάτωση τους στο δίκτυο και την διαχείριση τους ως μια ενιαία οντότητα, για την συμμετοχή τους στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο σημείο αυτό πρέπον είναι να γίνει μια σαφής διάκριση μεταξύ των τυχαίων, στοχαστικών και των ρυθμιζόμενων κάθε στιγμή μονάδων παραγωγής. Ως τυχαίες-στοχαστικές μονάδες παραγωγής αναφερόμαστε παραδείγματος χάριν στα φωτοβολταϊκά και στα αιολικά πάρκα όπου κατά την διάρκεια μιας μέρας η προσφερόμενη παραγόμενη ενέργεια που προσφέρουν στο δικτύου εξαρτάται από εξωγενούς καιρικούς παράγοντες όπως το ηλιακό φως και η ένταση του αέρα. Για αυτό το λόγο όσο καλή πρόβλεψη της ηλιοφάνειας και της έντασης του αέρα να κάνουμε είναι δύσκολη η πρόβλεψη της προσφερόμενης ενέργειας τους στην διάρκεια ενός εικοσιτετράωρου. Για να γίνει ακόμα πιο προφανές φανταστείτε την περίπτωση ενός μεγάλου φωτοβολταϊκού πάρκου και τον αντίκτυπο που θα είχε μια τοπική συννεφιά στην μείωση της προσφερόμενης ενέργειας του στο δίκτυο. Αντιστοίχως, σε ένα αιολικό πάρκο μιας άπνοιας ακόμα και μικρής χρονικά διάρκειας. Επομένως, ως στοχαστικές, τυχαίες μονάδες παραγωγής θεωρούμε εκείνες στις οποίες η πρόβλεψη της παραγόμενης ενέργειας τους κάθε χρονική στιγμή είναι δύσκολη να προσδιοριστεί με ακρίβεια αφού εξαρτάται από εξωγενούς παράγοντες. Από την άλλη πλευρά, ως ρυθμιζόμενες μονάδες παραγωγής θεωρούμε παραδείγματος χάριν μεγάλους θερμικούς σταθμούς παραγωγής όπου κάθε χρονική στιγμή μπορούμε για μικρές διακυμάνσεις να ρυθμίσουμε την ενέργεια που παράγουν.

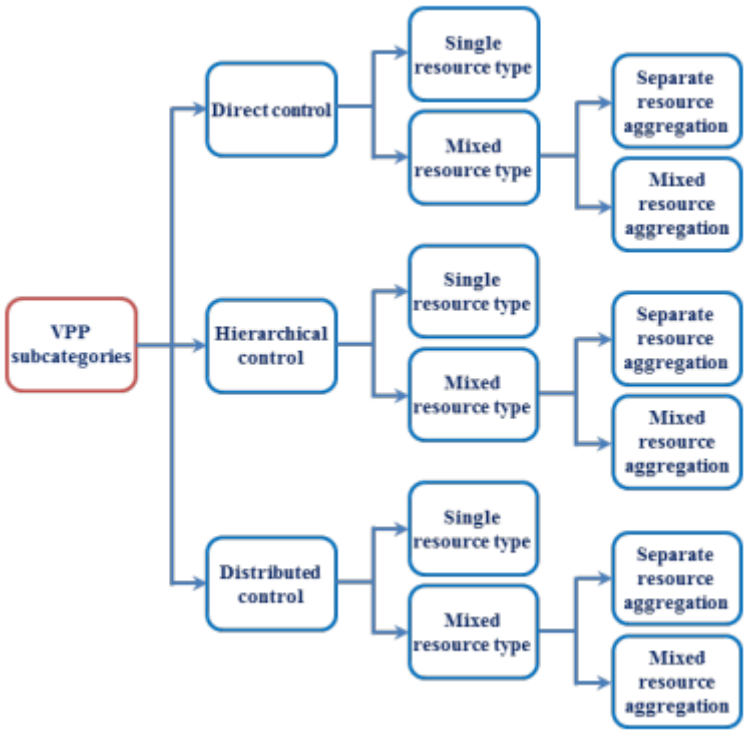
Οι εταιρίες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίες είναι υπεύθυνες για να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές τους συναθροίζοντας την ενέργεια από τις διαθέσιμες μονάδες παραγωγής τους μπορούν να χρησιμοποιήσουν το Virtual Power Plant εγχείρημα ως ένα εργαλείο συσσωμάτωσης και διαχείρισης των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και των καταναλωτών τους. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του Virtual Power Plant εγχειρήματος είναι η δυνατότητα που προσφέρει στον διαχειριστή του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας να αντισταθμίζει τυχόν αποκλίσεις από την προβλεπόμενη παραγόμενη ενέργεια η οποία προέρχεται από

διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής, ανεξαρτήτως της τοπολογίας τους μέσα στο δίκτυο. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση τεχνολογιών επικοινωνίας όπου σε πραγματικό χρόνο ο διαχειριστής του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας έχει πλήρη γνώση και έλεγχο όλων των οντοτήτων του συστήματος [14].

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, θεωρήσαμε ως διεσπαρμένες μονάδες μια μεγάλη ομάδα παραγωγών, η οποία μπορεί να αποτελείται, είτε από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, είτε από μικρές θερμικές μονάδες, υδροηλεκτρικά την κ.α.

3.3 Διαφορετικές υλοποιήσεις ενός Virtual Power Plant εγχειρήματος

Ένα Virtual Power Plant αναλόγως του τρόπου ελέγχου που επιλέγει ο διαχειριστής του δικτύου να ελέγχει τις οντότητες του συστήματος χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες. Πιο συγκεκριμένα, έχουμε τον άμεσο, τον ιεραρχικό και τον διανεμημένο έλεγχο. Η προσέγγιση του απευθείας ελέγχου βασίζεται σε μια κεντρική αρχή όπου λαμβάνονται όλες οι αποφάσεις. Αντιθέτως, η προσέγγιση του διανεμημένου ελέγχου οι αποφάσεις λαμβάνονται σε τοπικό επίπεδο. Τέλος, η προσέγγιση του ιεραρχικού ελέγχου είναι μια ενδιάμεση προσέγγιση ανάμεσα στις δυο προαναφερθείσες, με κάποιες αποφάσεις να λαμβάνονται σε κεντρικό σημείο και κάποιες άλλες σε διάσπαρτα σημεία του δικτύου.



Εικόνα 3.3.1 Κατηγοριοποίηση των διαφόρων Virtual Power Plant εγχειρημάτων ανάλογα με τον επιλεγόμενο τρόπο ελέγχου.

Σε κάθε μια από τις προσεγγίσεις των διαφόρων Virtual Power Plant μοντέλων (Εικόνα 3.3.1.) συναντάμε δύο υποκατηγορίες ανάλογα με το «χαρτοφυλάκιο» των διαχειρίσιμων οντοτήτων, μονάδων του συστήματος. Σε αντίθεση με τη Single Resource Type η Mixed Resource Type χρησιμοποιείται όταν θέλουμε να διαχειριστούμε μια ευρεία ποικιλία διαφορετικών διαχειρίσιμων μονάδων του συστήματος. Επιπλέον, μια υποκατηγορία της Mixed Resource Type είναι να διαχειρίζεται τις διαφορετικές μονάδες του συστήματος χρησιμοποιώντας μια ενιαία μονάδα διαχείρισης. Στην άλλη προσέγγιση κάθε ξεχωριστή μονάδα του συστήματος διαχειρίζεται μεμονωμένα. Παραδείγματος χάριν, μια ξεχωριστή μονάδα διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να οργανωθεί ώστε να ελέγχει αποκλειστικά και μόνο τα ηλεκτρικά οχήματα.

Το Virtual Power Plant διαθέτει κέντρα ελέγχου τα οποία είναι υπεύθυνα για τον βέλτιστο προγραμματισμό των διεσπαρμένων μονάδων του συστήματος αντιπροσωπεύοντας την κάθε μια ως μια ξεχωριστή οντότητα, η οποία συνυπάρχει ομαλά εντός του συστήματος συναλλάσσοντας ενέργεια με το δίκτυο. Συγκεκριμένα, υπάρχει η «αγορά» της ενέργειας (energy market) με την οποία συναλλάσει ενέργεια το Virtual Power Plant με χρηματικά ανταλλάγματα και αντιστοίχως με τον ίδιο τρόπο μοντελοποιεί και τις διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής.

Το κέντρο ελέγχου ενός Virtual Power Plant απαιτεί συνεχώς ενημερωμένες πληροφορίες τόσο για την «αγορά» της ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και την κατάσταση των διαφόρων οντοτήτων του. Τη λύση σε αυτήν την απαίτηση την προσφέρουν κατάλληλα συστήματα επικοινωνίας που ανά πάσα στιγμή ενημερώνουν σε πραγματικό χρόνο το κέντρο ελέγχου.

Σε αυτό το σημείο χρήσιμο είναι να αναφερθεί ότι σε κάθε Virtual Power Plant είναι δυνατόν να υπάρχει μια οντότητα η οποία θα είναι υπεύθυνη για την διαχείριση ενός συνόλου ίδιου τύπου μονάδων. Παραδείγματος χάριν μια οντότητα που θα συντονίζει την λειτουργία όλων των αιολικών πάρκων ενός συστήματος ή μια οντότητα σταθμού φόρτισης των αυτοκινήτων η οποία θα είναι υπεύθυνη ως προς την διαχείριση ενός μεγάλου συνόλου σταθμών φόρτισης.

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα όπου γίνονται εμφανείς οι τρεις κατηγοριοποιήσεις του Virtual Power Plant ανάλογα με τον τρόπο ελέγχου θεωρήσαμε τρεις διαφορετικές κατηγορίες σταθμών φόρτισης των αυτοκινήτων. Δημόσιος σταθμός φόρτισης όπου έχουν πρόσβαση όλα τα ηλεκτρικά οχήματα, ιδιωτικοί σταθμοί φόρτισης όπου έχουν πρόσβαση όλα τα ηλεκτρικά οχήματα και τέλος ιδιωτικοί σταθμοί φόρτισης όπου έχουν πρόσβαση επιλεγμένα ηλεκτρικά οχήματα. Παραδείγματος χάριν, στην τελευταία κατηγορία μπορούμε να θεωρήσουμε ένα σπίτι όπου ο ιδιοκτήτης του έχει ένα κέντρο ελέγχου όπου ενημερώνεται για το ποσό της ενέργειας που καταναλώνει μέσα στο οποίο μπορεί να συμπεριλαμβάνεται και ένας ιδιωτικός σταθμός φόρτισης του αυτοκινήτου του. Χρήσιμο είναι να αναφερθεί ότι αυτό το

κέντρο ελέγχου μιας ιδιωτικής κατοικίας (HEMS) ελέγχει την ενεργειακή κατανάλωση του σπιτιού λαμβάνοντας υπόψη τις προτιμήσεις του ιδιοκτήτη επιτρέποντας αλληλεπιδράσεις με τις συσκευές του σπιτιού.

Κλείνοντας, το κέντρο ελέγχου ενός Virtual Power Plant προβλέπει στοχαστικά την συμπεριφορά των διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής, ενημερώνεται για το προφίλ της συμπεριφοράς των καταναλωτών του συστήματος και των τιμών της ενέργειας που έχει την δυνατότητα να προμηθευτεί από την «αγορά» ηλεκτρικής ενέργειας. Σε πραγματικό χρόνο ενημερώνεται από ελεγκτές που υπάρχουν στο σύστημα για την συμπεριφορά καταναλωτών, διεσπαρμένων μονάδων και της «αγοράς» ηλεκτρικής ενέργειας. Με αυτό τον τρόπο το κέντρο ελέγχου λαμβάνει αποφάσεις και στέλνει σήματα ελέγχου ρυθμίζοντας τις οντότητες του συστήματος. Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφέρουμε ότι στα μελλοντικά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας τα ηλεκτρικά οχήματα αναμένεται να βοηθήσουν σημαντικά το σύστημα εξισορροπώντας τυχόν διακυμάνσεις στην στοχαστική πρόβλεψη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κάνοντας χρήση των συσσωρευτών του οχήματος άλλοτε αποθηκεύοντας ενέργεια από το σύστημα και άλλοτε προσφέροντας του ενέργεια. Ειδικότερα, τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να φορτίζουν όταν έχουμε πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας από αιολικά και φωτοβολταικά πάρκα.

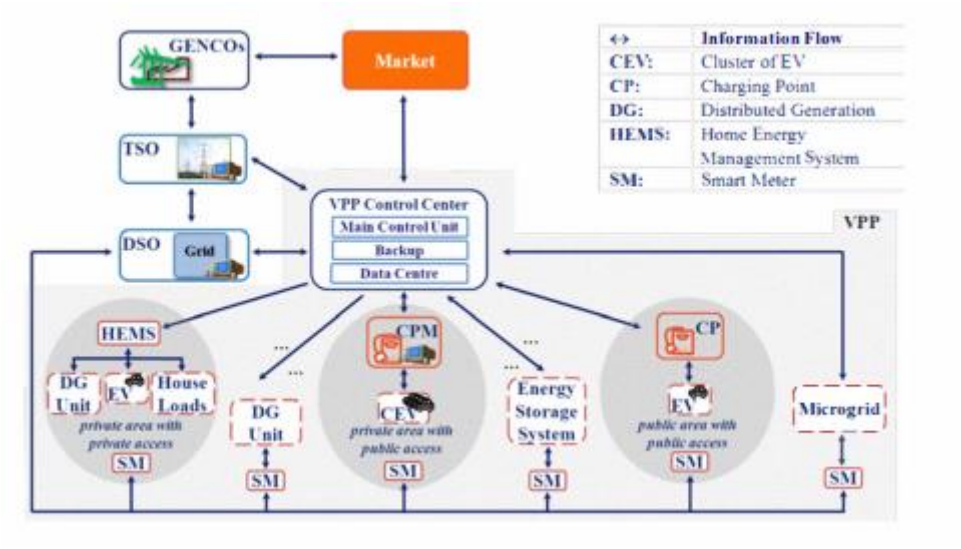
Στην συνέχεια παρουσιάζουμε αναλυτικά τις τρεις κατηγοριοποιήσεις ενός Virtual Power Plant ανάλογα με τον επιλεγμένο τρόπο ελέγχου των οντοτήτων του συστήματος.

3.3.1 Άμεσος έλεγχος ενός Virtual Power Plant

Στον άμεσο έλεγχο, το κέντρο ελέγχου του Virtual Power Plant είναι υπεύθυνο να αποφασίζει και να επικοινωνεί προωθώντας τα σήματα ελέγχου στις οντότητες του συστήματος. Οι αποφάσεις που λαμβάνονται θα πρέπει να βρίσκονται εντός των περιορισμών που έχουν θεσπιστεί από τους ιδιοκτήτες των μονάδων του συστήματος και οι οποίες θα ανταποκριθούν στα σήματα ελέγχου που αποφασίζονται στο κέντρο ελέγχου.

Στην εικόνα 3.3.2 που ακολουθεί γίνεται εμφανής η ροή των σημάτων ελέγχου μεταξύ των μονάδων του συστήματος δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στη συνεισφορά των ηλεκτρικών οχημάτων.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, το κέντρο ελέγχου το οποίο έχει κεντρική θέση στο σύστημα μας λαμβάνει κεντρικά την απόφαση που θα επιφέρει την βέλτιστη λειτουργία του συστήματος βελτιστοποιώντας την λειτουργία κάθε μιας ανεξάρτητης μονάδας του Virtual Power Plant. Η απευθείας επικοινωνία του κέντρου ελέγχου με τις μονάδες του συστήματος και η κεντρική λήψη της απόφασης από το κέντρο ελέγχου καθιστά αυτή την μέθοδο εύκολη στην εφαρμογή της.



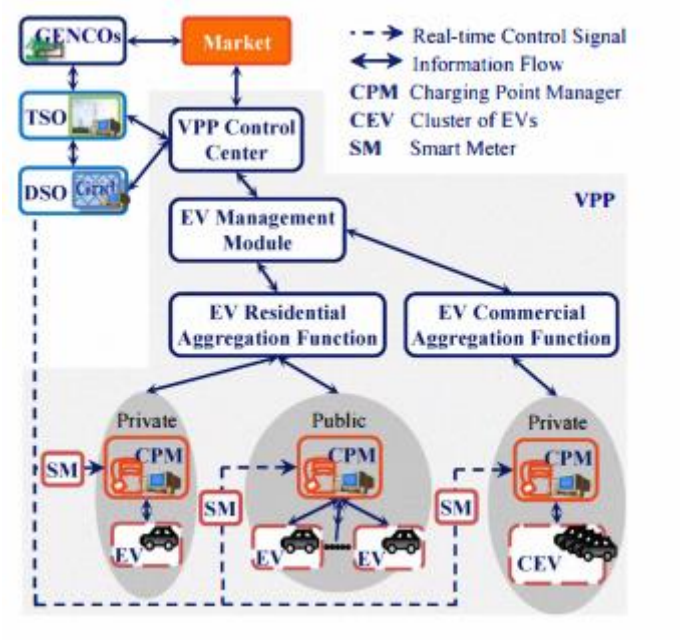
Εικόνα 3.3.2. Αλληλεπιδράσεις μεταξύ των οντοτήτων του Virtual Power Plant και του κέντρου ελέγχου του, το οποίο υιοθετεί τον άμεσο έλεγχο [14].

3.3.2 Ιεραρχικός έλεγχος ενός Virtual Power Plant

Στον ιεραρχικό έλεγχο ενός Virtual Power Plant εισάγονται πλέον ενδιάμεσα επίπεδα κατά την διαδικασία λήψης των αποφάσεων. Παραδείγματος χάριν όπως απεικονίζεται στην εικόνα 3.3.3. το EV Management Module (EVMM) αποτελεί μια οντότητα του συστήματος που είναι υπεύθυνη για την σωστή διαχείριση των ηλεκτρικών οχημάτων υπό την επιτήρηση του VPP Control Venter.

Αναλυτικότερα, το EVMM προετοιμάζει την «συμπεριφορά» των ηλεκτρικών οχημάτων ως προς το κομμάτι της αγοραπωλησίας της ενέργειας στέλνοντας το σαν είσοδο στο κέντρο ελέγχου του Virtual Power Plant με απώτερο σκοπό να ελαχιστοποιήσει το κόστος φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων και να αυξήσει τα κέρδη των ηλεκτρικών οχημάτων τις ώρες που προσφέρουν ενέργεια πίσω στο Virtual Power Plant .

Στην συγκεκριμένη προσέγγιση το EVMM εμπεριέχει δύο κατηγορίες. Στην πρώτη ανήκουν τόσο οι δημόσιοι σταθμοί φόρτισης όπου έχουν πρόσβαση όλα τα ηλεκτρικά οχήματα καθώς και οι ιδιωτικοί σταθμοί φόρτισης όπου προβλέπονται για ιδιωτική φόρτιση επιλεγμένου κατόχου τα οποία ενοποιεί σε μια κατηγορία (EV Residential Aggregation Function) και στην δεύτερη κατηγορία ιδιωτικοί σταθμοί φόρτισης όπου έχουν πρόσβαση όλα τα ηλεκτρικά οχήματα (EV Commercial Aggregation Function). Η κατηγοριοποίηση αυτή συνέβη διότι βελτιώνει την πρόβλεψη των απαιτήσεων σε ενέργεια των οχημάτων καθώς και στον υπολογισμό του ποσού ενέργειας που θα αποδώσουν στο σύστημα.

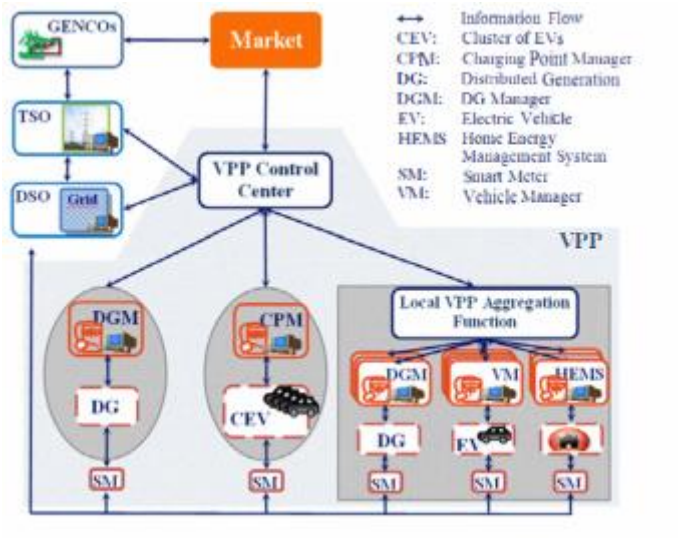


Εικόνα 3.3.3. Αλληλεπιδράσεις μεταξύ των οντοτήτων του Virtual Power Plant και του κέντρου ελέγχου του, το οποίο υιοθετεί τον ιεραρχικό έλεγχο [14].

3.3.3 Διανεμημένος έλεγχος ενός Virtual Power Plant

Σε ένα διανεμημένο ελέγχου Virtual Power Plant, το κέντρο ελέγχου του δεν είναι σε άμεση επικοινωνία με τις οντότητες που διαχειρίζεται αλλά μπορεί να επηρεάσει την λειτουργία τους μέσω των τιμών που τους ανακοινώνει. Το κέντρο ελέγχου του Virtual Power Plant έχει την ευχέρεια να ακολουθεί διαφορετικές πολιτικές τιμολόγησης ως προς την παραγωγή και άλλη ως προς την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Ο πυρήνας αυτής της προσέγγισης έγκειται στην ικανότητα των διαφορετικών μονάδων του συστήματος να αποφασίζουν μόνες τους την βέλτιστη λειτουργία τους. Βέβαια αυτό προϋποθέτει ότι διαθέτουν το κατάλληλο λογισμικό ώστε να επιτύχουν την βέλτιστη λειτουργία τους κάθε στιγμή.

Στην παρακάτω εικόνα 3.3.4 γίνεται εμφανής η ροή της πληροφορίας σε ένα διανεμημένου ελέγχου Virtual Power Plant. Γίνεται εμφανή ότι σε μια προσπάθεια να μειωθεί η ποσότητα της ανταλλασσόμενης πληροφορίας εισήχθη ένα ενδιάμεσο επίπεδο με την ονομασία Local VPP Aggregation functions το οποίο ήταν υπεύθυνο για την ομαδοποίηση ως μια ενιαία οντότητα και τον ομαλό συντονισμό μικρότερων γεωγραφικών περιοχών.



Εικόνα 3.3.4 Αλληλεπιδράσεις μεταξύ των οντοτήτων του Virtual Power Plant και του κέντρου ελέγχου του, το οποίο υιοθετεί τον διανεμημένο έλεγχο [14].

3.4 Εφαρμογή του Virtual Power Plant στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία υιοθετήσαμε τον ιεραρχικό έλεγχο του Virtual Power Plant. Ειδικότερα, θεωρήσαμε δύο επίπεδα όπου διαδραματίζουν ρόλο στην λήψη των αποφάσεων.

Αρχικά, θεωρήσαμε τους εξής καταναλωτές: α) τα ευέλικτα φορτία (flexible loads), β) τα διακοπτόμενα φορτία (curtailable loads), γ) τα ελαστικά φορτία τα οποία ελέγχονται μέσω καμπύλης τιμής (bid loads) και δ) τα μη ελεγχόμενα φορτία, ε) διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής και ζ) τα ηλεκτρικά οχήματα. Κάθε μια ξεχωριστή μονάδα εκτός από τα ηλεκτρικά οχήματα και τα ευέλικτα φορτία, τα οποία θα τα αναλύσουμε παρακάτω αναλυτικά, συντονίζονται ξεχωριστά το καθένα από μια μονάδα που τα διαχειρίζεται. Παραδείγματος χάριν για τα ελαστικά φορτία τα οποία ελέγχονται μέσω καμπύλης τιμής υπάρχει μια μονάδα που συγκεντρώνει όλα τα προφίλ των συγκεκριμένων καταναλωτών με απώτερο σκοπό να μειώσει το κόστος της ενέργειας που θα καταναλώσουν. Έπειτα προωθεί τα προφίλ τους στο βασικό κέντρο ελέγχου του Virtual Power Plant με απώτερο σκοπό να βρεθεί η βέλτιστη τιμή ώστε να είναι μέγιστο το κέρδος του διαχειριστή του Virtual Power Plant και ελάχιστο το ποσό που θα αποδώσουν για την ηλεκτρική ενέργεια που κατανάλωσαν τα ελαστικά φορτία τα οποία ελέγχονται μέσω καμπύλης τιμής.

Γίνεται προφανές ότι η λήψη της απόφασης λαμβάνεται σε δύο επίπεδα (διεπίπεδος προγραμματισμός, θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο). Το επίπεδο που διαχειρίζεται ένα σύνολο του ίδιου τύπου καταναλωτών το οποίο αρχικά συγκεντρώνει τα ξεχωριστά προφίλ των καταναλωτών του και τα αποδίδει στο ανώτερο κέντρο

ελέγχου του Virtual Power Plant (ανώτερο επίπεδο).Με τη σειρά του το επίπεδο αυτό αποφασίζει την κατάλληλη τιμή την οποία αποδίδει ως είσοδο στο προηγούμενο επίπεδο. Δηλαδή, το επίπεδο που διαχειρίζεται ένα σύνολο του ίδιου τύπου καταναλωτών αναλαμβάνει πλέον σύμφωνα με την τιμή που έχει παραλάβει να αποφασίσει την συμπεριφορά των καταναλωτών του.

Η κοστολόγηση της εξυπηρέτησης της ζήτησης των ευέλικτων φορτίων και της ισχύς για φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων διαφέρει. Πιο συγκεκριμένα, και οι δύο οντότητες επισυνάπτουν με τον διαχειριστή του Virtual Power Plant ένα συμβόλαιο μακράς διάρκειας όπου προαποφασίζεται μια ενιαία σταθερή τιμή κοστολόγησης. Στην συνέχεια ο διαχειριστήw του Virtual Power Plant αναλαμβάνει να εξυπηρετήσει την ζήτηση τους με τρόπο τέτοιο ώστε να μην παραβιάζονται οι λειτουργικοί περιορισμοί τους. Παρατηρείται ότι η εξυπηρέτηση της ζήτησης τους γίνεται κυρίως τις ώρες εκείνες που η τιμή ενέργειας από το ανάντη δίκτυο είναι χαμηλή.

Όσον αφορά τα ηλεκτρικά οχήματα θεωρούμε ότι το ανώτερο επίπεδο του Virtual Power Plant αναλαμβάνει να κάνει μια πιθανολογική, στοχαστική πρόβλεψη της συμπεριφοράς των ηλεκτρικών οχημάτων. Αξίζει να αναφερθεί ότι σε αυτό το επίπεδο «βλέπει» τα ηλεκτρικά οχήματα σαν μια ενιαία μεγάλη μπαταρία όπου προβλέπει τις ώρες που θα φορτίζεται και ποιες θα εκφορτίζεται προσφέροντας ενέργεια στο Virtual Power Plant. Αυτή η πληροφορία μεταφέρεται στο κάτω επίπεδο το οποίο θα καθορίσει την συμπεριφορά του κάθε οχήματος ξεχωριστά.

Αξιοσημείωτο είναι ότι ο διαμερισμός και υπολογισμός του προφίλ κάθε αυτοκινήτου δεν είναι τόσο προφανής για αυτό ακολουθεί ένα παράδειγμα.

Παραδείγματος χάριν την n ώρα τα ηλεκτρικά οχήματα εκφορτίζουν προσφέροντας ενέργεια στο Virtual Power Plant, δηλαδή λειτουργούν ως μονάδες παραγωγής. Αυτό δεν σημαίνει απαραίτητα ότι όλα τα ηλεκτρικά οχήματα εκφορτίζονται εκείνη την ώρα αφού μπορεί κάποιο όχημα να έχει ταξίδι την επόμενη ώρα και να πρέπει αναγκαστικά να φορτιστεί, αυτό όμως που πρέπει να ισχύει είναι ότι ανεξάρτητα από την συμπεριφορά του κάθε οχήματος ξεχωριστά η συνολική προσφερόμενη ενέργεια στο δίκτυο να είναι θετική. Προφανώς μπορεί όλα να εκφορτίζονται εκείνη την ώρα αλλά μπορεί και κάποια να φορτίζονται, αυτό όμως που είναι απαραίτητο να ισχύει είναι: το αλγεβρικό άθροισμα των εκφορτίσεων και των φορτίσεων των οχημάτων να έχει τέτοια τιμή ώστε εν τέλει να αποδίδει ενέργεια στο δίκτυο.

Το Virtual Power Plant μπορεί να αποτελέσει μια ενδιαφέρουσα επιλογή για την διαχείριση των διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής αυξάνοντας τα οφέλη των εμπλεκόμενων φορέων. Αυτό καθίσταται ακόμα πιο χρήσιμο όταν υπάρχει η δυνατότητα να αποκόπτουμε κάποια ελέγξιμα φορτία για σύντομο χρονικό διάστημα. Τέλος, γίνεται φανερό ότι η διαχείριση και ο έλεγχος που προσφέρει το Virtual Power Plant σε πραγματικό χρόνο μπορεί να ευνοήσει σημαντικά την εγκατάσταση των

διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής σε διάφορα σημεία ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.

4 ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ (LP)

Ένας ορισμός που θα μπορούσε να δοθεί στην παραπάνω έννοια είναι ο εξής: Ένα μαθηματικό μοντέλο στο οποίο επιχειρείται η βελτιστοποίηση (κριτήρια βελτιστοποίησης) αγνώστων πραγματικών μεταβλητών των οποίων το πεδίο τιμών οριοθετείτε έμμεσα από γραμμικούς περιορισμούς (ανισοεξισώσεις) συναρτήσεις των μεταβλητών αυτών. Οι άγνωστες μεταβλητές προσδιορίζουν (μοντελοποιούν) το αντικείμενο απόφασης του προβλήματος και ονομάζονται για το σκοπό αυτό μεταβλητές απόφασης (decision variables).

Η θεωρία του Γ.Π. μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 70, εξελίχθηκε ως μεθοδολογία βελτιστοποίησης ενός και μόνου κριτηρίου απόφασης με την ονομασία αντικειμενική συνάρτηση (objective function). Όμως, η πολυπλοκότητα των συστημάτων απόφασης καθώς και οι συνθήκες ανταγωνιστικότητας κάτω από τις οποίες παίρνονται οι αποφάσεις καθιστούν τη προσέγγιση αυτή κάθε άλλο παρά ρεαλιστική. Γι' αυτό και αναπτύχθηκε η θεωρία του Γ.Π. με πολλαπλά κριτήρια απόφασης (πολυκριτήριος Γ.Π.) Από την άλλη πλευρά πάλι, αυτή η γενίκευση δεν θα μπορούσε να υλοποιηθεί χωρίς τα αποτελέσματα που έφερε ο κλασικός μονοκριτήριος Γ.Π [1].

Αναλυτικά, ένα μονοκριτήριο πρόγραμμα ορίζεται ως εξής:

Να προσδιοριστούν οι τιμές των μεταβλητών $(x_1, x_2, ..., x_l)$ όπου βελτιστοποιούν (μεγιστοποιούν ή ελαχιστοποιούν) τη γραμμική αντικειμενική συνάρτηση (κριτήριο βελτιστοποίησης):

$$g(x) = z = c_1x_1 + c_2x_2 + ... + c_lx_l$$

υπό τους γραμμικούς περιορισμούς:

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + ... + a_{1l}x_l \leq, =, \geq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + ... + a_{2l}x_l \leq, =, \geq b_2$$

… … … … … … … … … … … …

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + ... + a_{ml}x_l \leq, =, \geq b_m$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, ..., x_l \geq 0$$

όπου το πρόσημο ενός περιορισμού είναι εναλλακτικά: μικρότερο ή ίσο "$\leq$" , ίσο "=" ή μεγαλύτερο ή ίσο "$\geq$" και $a_{ij}, b_{i,} c_j$ για i=1,2,…,m και j=1,2,…,l είναι γνωστοί πραγματικοί συντελεστές. Οι γραμμικοί περιορισμοί είναι συμβατικοί και αποδίδουν (μοντελοποιούν) τη συνήθη φυσική σημασία των μεταβλητών απόφασης.

Με τη βοήθεια μητρών, ένα γραμμικό πρόγραμμα μπορεί να γραφεί συνοπτικά ως ακολούθως:

Να βρεθεί διάνυσμα x για το οποίο έχουμε:

$$[\max] or [\min] z = c' x$$

υπό τους περιορισμούς

$$\mathrm{A}x \leq b$$

$$x \geq 0$$

Όπου **A**, η μήτρα των συντελεστών **(**a_{ij}**)** διαστάσεων $m \times l$ και **b, c, x** διανύσματα - μήτρες αντίστοιχων διαστάσεων $m \times l, l \times 1, l \times 1$ και c' η ανάστροφη μήτρα της **c** .Ένα τέτοιο γραμμικό πρόγραμμα είναι διαστάσεων $\mathrm{m} \times \mathrm{l}$ (δεν υπολογίζονται οι περιορισμοί μη αρνητικότητας).

$$\mathrm{A} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1l} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2l} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{ml} \end{vmatrix} \qquad b = \begin{vmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{vmatrix} \qquad x = \begin{vmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_l \end{vmatrix} \qquad c = \begin{vmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_l \end{vmatrix}$$

Σχήμα 4.1: Μήτρες συντελεστών ενός προβλήματος Γ.Π.

Κανονική μορφή ενός γραμμικού προγράμματος

Ένα Γ.Π. απαντάται συνήθως υπό την κανονική του μορφή (canonical form), η οποία έχει μια από τις δυο παρακάτω μαθηματικές εκφράσεις:

$$[\max] z = c' x$$

s.t

$$\mathrm{A}x \leq b$$

$$x \geq 0$$

ή

$$[\min] z = c' x$$

s.t

$$Ax \le b$$

$$x \ge 0$$

Πρότυπη μορφή ενός Γ.Π

$$[\max] z = c^{'} x$$

s.t

$$Ax = b$$

$$x \ge 0$$

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι ο γραμμικός προγραμματισμός προϋποθέτει ότι τόσο η αντικειμενική συνάρτηση όσο και οι περιορισμοί θα είναι γραμμικές συναρτήσεις καθώς και το x μη αρνητικό και συνεχές. Κάποιες διαφοροποιήσεις στο είδος των συναρτήσεων καθώς και το πεδίο τιμών του x μπορεί να μεταβάλλει το πρόβλημα μας στις παρακάτω κατηγορίες προβλημάτων:

- **Μη γραμμικός προγραμματισμός (NLP):** Προϋποθέτει ότι είτε η αντικειμενική συνάρτηση είτε οι περιορισμοί είτε και οι δύο θα είναι μη γραμμικές συναρτήσεις καθώς και το x μη αρνητικό και συνεχές.
- **Ακέραιος προγραμματισμός (IP):** Προϋποθέτει ότι είτε η αντικειμενική συνάρτηση είτε οι περιορισμοί είτε και οι δύο θα είναι μη γραμμικές συναρτήσεις καθώς και το x ακέραιο.
- **Μικτός ακέραιος προγραμματισμός (MIP):** Προϋποθέτει ότι είτε η αντικειμενική συνάρτηση είτε οι περιορισμοί είτε και οι δύο θα είναι μη γραμμικές συναρτήσεις καθώς και το x ακέραιο και συνεχές.
- **Τετραγωνικός προγραμματισμός (QP):** Προϋποθέτει ότι η αντικειμενική συνάρτηση είναι τετραγωνική, οι περιορισμοί είναι γραμμικές συναρτήσεις και το x μη αρνητικό.

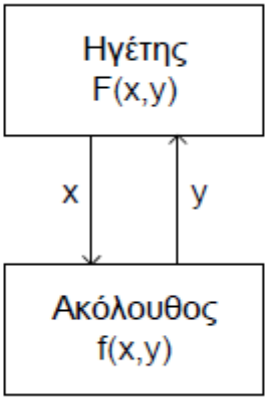
Σε κάθε μια από τις παραπάνω μεθόδους γραμμικού προγραμματισμού κάνουμε χρήση ορισμένων μεταβλητών. Οι μεταβλητές αντιπροσωπεύουν αποφάσεις που πρέπει να παρθούν προκειμένου να λειτουργήσει το σύστημα.

Υπάρχουν έξι βασικές ομάδες μεταβλητών: μεταβλητές απόφασης, οι μεταβλητές εισόδου, μεταβλητές κατάστασης, εξωγενείς μεταβλητές, τυχαίες μεταβλητές και οι μεταβλητές εξόδου.

Σημείωση: Το πρόβλημα που επιλύεται στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία όπως θα διαφανεί σε επόμενο κεφάλαιο, είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης γραμμικού, μικτού, ακέραιου διεπίπεδου προγραμματισμού. (MILP)

4.1 Διεπίπεδος προγραμματισμός

Τα προβλήματα διεπίπεδου προγραμματισμού εμφανίστηκαν για πρώτη φορά από τον Γερμανό οικονομολόγο Heinrich Freiherr von Stackelberg το 1934. Στα συγκεκριμένα προβλήματα τα οποία μπορούν να παρομοιαστούν με ιεραρχικά παιχνίδια, υπάρχουν δύο επίπεδα-φορείς που λαμβάνουν ρόλο στην λήψη της απόφασης. Ο πρώτος φορέας (που ονομάζεται Leader-αρχηγός) έχει τον πρώτο λόγο δηλαδή είναι εκείνος που κάνει την πρώτη επιλογή και ο δεύτερος φορέας (που ονομάζεται Follower-ακόλουθος) αντιδρά βέλτιστα στην ήδη υφιστάμενη εντολή του Αρχηγού. Κύριος στόχος του Αρχηγού είναι να βρει μια απόφαση η οποία θα επιφέρει τον βέλτιστο αποτέλεσμα τόσο ως προς την δική του αντικειμενική συνάρτηση αλλά εξίσου να επιφέρει και την βέλτιστη αντίδραση του Ακόλουθου.



Εικόνα 4.1 Το δυοπώλιο του Stackelberg ή μοντέλο ηγέτη-ακόλουθου [18].

Στα συγκεκριμένα προβλήματα υπάρχει ένα είδους ανταγωνισμού στα συμφέροντα των δύο διαφορετικών φορέων (του Αρχηγού και του Ακόλουθου) οι οποίοι έχουν αλληλοσυγκρουόμενα συμφέροντα. Επομένως, η λύση του προβλήματος έγκειται στην εύρεση της βέλτιστης απόφασης του συστήματος κάνοντας χρήση βασικών όρων και αρχές της θεωρίας παιγνίων και του σημείου ισορροπίας Nash. (έννοιες που θα αναλυθούν στην συνέχεια) [18].

Η ειδοποιός διαφορά των συγκεκριμένων προβλημάτων σε σύγκριση με τα γραμμικά προβλήματα είναι ότι πλέον στους περιορισμούς περιέχεται πρόβλημα βελτιστοποίησης. Αποτελεί ένα είδος πολυεπίπεδου προγραμματισμού και πιο συγκεκριμένα δύο επιπέδων. Τέτοια προβλήματα συναντώνται σε πολλούς τομείς όπως στα οικονομικά, διάφορους τομείς της μηχανικής γενικότερα, κατανομή των πόρων, διαχείριση συμφόρησης, σχεδιασμός δικτύων μεταφοράς κ.α και κυρίως σε πολυεπίπεδα συστήματα αυτών των τομέων [19].

Γενικό μοντέλο προβλημάτων διεπίπεδου προγραμματισμού

$$\min_{x \in X} F(x, y)$$

$$s.t$$

$$G(x, y) \leq 0$$

$$\min_{y \in Y} f(x, y)$$

$$s.t$$

$$g(x, y) \leq 0$$

$$x, y \geq 0$$

ή

$$\min_{x \in X} F(x, y) = c_1 x + d_1 y$$

$$s.t$$

$$A_1 x + B_1 y \leq b_1$$

$$\min_{y \in Y} f(x, y) = c_2 x + d_2 y$$

$$s.t$$

$$A_2 x + B_2 y \leq b_2$$

4.2 Θεωρία παιγνίων

Η θεωρία παιγνίων (game theory) μας βοηθάει στην κατανόηση καταστάσεων στις οποίες αλληλοεπιδρώντα μέλη (παίκτες) πρέπει να πάρουν αποφάσεις σε συνθήκες συναγωνισμού/ανταγωνισμού λαμβάνοντας υπόψη τις πιθανές κινήσεις των αντιπάλων. Δηλαδή με τον όρο παίγνιο, αναφερόμαστε σε ένα σύνολο παικτών που ανταγωνίζονται με βάση ένα προκαθορισμένο σύνολο κανόνων .Επιπλέον, χρησιμοποιεί μαθηματικά μοντέλα για την μοντελοποίηση των προβλημάτων.

Η θεωρία παιγνίων σχετίζεται ιδιαίτερα με κοινωνικά, πολιτικά και οικονομικά αντικείμενα. Παραδείγματος χάριν μπορεί να εφαρμοστεί σε καταστάσεις όπως εταιρίες που ανταγωνίζονται, πολιτικοί που διεκδικούν ψήφους, παίκτες που συμμετέχουν σε έναν πλειστηριασμό κ.α. Απαραίτητη προϋπόθεση που πρέπει να διέπει τους παίκτες είναι η θεωρία της ορθολογικής επιλογής (rational choice) ουσιαστικά διατυπώνει την άποψη ότι ένας παίκτης επιλέγει πάντα να πράξει την καλύτερη ενέργεια που έχει στην διάθεση του.

Σε αυτό το σημείο όμως τίθεται το ερώτημα: ποιες ενέργειες επιλέγουν οι παίκτες ενός παιγνίου; υποθέσαμε ότι οι παίκτες ως ορθολογικές οντότητες επιλέγουν την καλύτερη δυνατή κίνηση ο καθένας όμως σε ένα παίγνιο η καλύτερη κίνηση για οποιοδήποτε παίκτη εξαρτάται από τις κινήσεις των υπόλοιπων παικτών. Επομένως,

γίνεται φανερό ότι ο κάθε παίκτης θα πρέπει να έχει μια εκτίμηση (belief) για τις κινήσεις των άλλων παικτών.

Αυτό το τέλμα λύνεται με την λεγόμενη Ισορροπία Nash (Nash Equilibrium) η οποία αποτελεί μια κατάσταση του παιγνίου στην οποία κανένας παίκτης δεν μπορεί να βελτιώσει τη θέση του επιλέγοντας μια άλλη κίνηση, με την προϋπόθεση ότι όλοι οι υπόλοιποι παίκτες δεν θα αλλάξουν την κίνηση τους. Η ισορροπία Nash και οι παραλλαγές της είναι η δημοφιλέστερη έννοια λύσης παιγνίων. Για την εύρεση της ισορροπίας Nash χρησιμοποιούνται οι εξής στρατηγικές.

- **Αγνή στρατηγική (pure strategy):** Ορίζει ντετερμινιστικά τη συμπεριφορά του παίκτη για κάθε ενέργεια που θα πρέπει να κάνει.
- **Μικτή Στρατηγική (mixed strategy):** Μια κατανομή πιθανότητας πάνω στις κινήσεις του παίκτη.

Ανάλογα με την επιλεγμένη στρατηγική δημιουργούμε και το αντίστοιχο προφίλ.

- **Προφίλ ή περίγραμμα στρατηγιών α (profile):** Ένα διάνυσμα που καθορίζει μια στρατηγική για κάθε παίκτη.
- **Προφίλ ή περίγραμμα μικτών στρατηγιών:** Ένα διάνυσμα που καθορίζει μια μικτή στρατηγική για κάθε παίκτη.

Χρήσιμο είναι να αναφερθεί ότι δεδομένου ενός προφίλ α συμβολίζουμε με το a^{-i} το προφίλ με τις κινήσεις όλων των παικτών εκτός του παίκτη I όπως στο προφίλ α. Με χρήση όλων των προηγούμενων με την έννοια της ισορροπίας Nash ορίζουμε ένα προφίλ ενεργειών a^{*} με την ιδιότητα ότι κανένας παίκτης δεν βελτιώνει τη θέση του επιλέγοντας μια ενέργεια διαφορετική από αυτή στο προφίλ α*, με δεδομένο ότι οι υπόλοιποι παίκτες δεν θα αλλάξουν την κίνησή τους (δηλαδή το a^{-i} θα παραμείνει σταθερό). Παρόλα αυτά εάν το πλήθος των παικτών και των κινήσεων είναι πολύ περιορισμένο τότε είναι δυνατό να εξετάσουμε όλα τα πιθανά προφίλ (brute force search) από την οπτική γωνία κάθε παίκτη για να βρούμε τις pure ισορροπίες Nash.

Πολλές φορές είναι πιο αποτελεσματικό να χρησιμοποιήσουμε τις συναρτήσεις βέλτιστης απόκρισης. Ο ορισμός των οποίων είναι: Δεδομένου ενός προφίλ a^{-i} η συνάρτηση βέλτιστης απόκρισης ή συνάρτηση βέλτιστης αντίδρασης (best response function) του παίκτη i δίνει το σύνολο των κινήσεων του παίκτη που επιτυγχάνουν το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα για αυτόν. Κατά αυτό τον τρόπο κάνοντας χρήση της έννοια του προφίλ ενεργειών μπορούμε να επαναδιατυπώσουμε τον ορισμό της ισορροπίας Nash ως εξής: Ένα προφίλ κινήσεων α* είναι μια ισορροπία Nash εάν η ενέργεια κάθε παίκτη i στο προφίλ είναι η βέλτιστη απόκριση στο προφίλ a^{-i} των υπολοίπων παικτών [18].

5 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

5.1 Σκοπός κεφαλαίου

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η περιγραφή του αλγόριθμου βελτιστοποίησης του κέρδους των δύο αλληλένδετων επιπέδων του παρόχου (**aggregator**) και των μονάδων και καταναλωτών που διαχειρίζεται. Να υπενθυμίσουμε ότι ο aggregator (στα ελληνικά πάροχος-συναθροιστής) είναι ο ενδιάμεσος φορέας μεταξύ της χονδρεμπορικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και των υπόλοιπων οντοτήτων του προβλήματος.

Στο σημείο αυτό απαραίτητο είναι να αναφέρουμε τις κατηγορίες των καταναλωτών που διαχειρίζεται ο aggregator, οι οποίες είναι οι εξής:

- **Ευέλικτα φορτία (Flexible Loads)**
- **Διακοπτόμενα φορτία (Curtailable Loads)**
- **Ελαστικά φορτία ελεγχόμενα μέσω καμπυλών τιμής-φορτίου (Bid Loads/Price Elastic Consumers)**
- **Μη ελεγχόμενα φορτία (Non Flexible Loads)**

Πέρα από τις παραπάνω κατηγορίες καταναλωτών ο aggregator συμμετέχει στη **χονδρεμπορική «αγορά» ηλεκτρικής ενέργειας (energy market)** από την οποία προμηθεύεται ή αποδίδει ενέργεια. Επίσης ο aggregator διαχειρίζεται και ορισμένες **μονάδες παραγωγής (Dispatchable and non dispatchable sources)** οι οποίες είναι, είτε μικρές θερμικές μονάδες, φωτοβολταικά πάρκα ,αιολικά πάρκα, είτε υδροηλεκτρικές μονάδες καθώς και ένα στόλο ηλεκτρικών οχημάτων του οποίου τις ενεργειακές ανάγκες μετακίνησης πρέπει να εξυπηρετήσει ακολουθώντας κάποιους κανόνες και περιορισμούς. Επειδή η συμπεριφορά των ηλεκτρικών οχημάτων είναι δυναμική, ο ενεργειακός προγραμματισμός θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη του τη στοχαστική συμπεριφορά τους.

Γίνεται λοιπόν φανερό ότι σε μια ανοιχτή και ανταγωνιστική αγορά κάθε συμμετέχων επιδιώκει να εξυπηρετήσει το ατομικό του συμφέρον. Πιο συγκεκριμένα, ο aggregator επιδιώκει την αύξηση του κέρδους του, το ίδιο και οι διάσπαρτες μονάδες παραγωγής, ενώ τα ευέλικτα φορτία, τα διακοπτόμενα φορτία, τα ελαστικά φορτία ελεγχόμενα μέσω καμπυλών τιμής-φορτίου καθώς και τα μη ελεγχόμενα φορτία επιδιώκουν την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών με το χαμηλότερο κόστος. Επομένως σε ένα τέτοιο περιβάλλον, όπου κάθε ενεργειακός παίκτης έχει συγκεκριμένη ατομική στρατηγική η οποία μάλιστα ενδέχεται να έρχεται σε σύγκρουση με την στρατηγική ενός άλλου ενεργειακού παίκτη είναι προφανές ότι η ισορροπία του συστήματος απαιτεί την εξισορρόπηση των επιμέρους στρατηγικών κάθε παίκτη.

Για αυτό το λόγο το συγκεκριμένο πρόβλημα μοντελοποιείται σαν ένα πρόβλημα διεπίπεδου προγραμματισμού αφότου υπάρχουν δύο επίπεδα αποφάσεων. Στο ένα επίπεδο αποφάσεων βρίσκεται ο aggregator τον οποίο θεωρούμε τον «ηγέτη» του προβλήματος και από την άλλη πλευρά είναι οι καταναλωτές, οι μονάδες παραγωγής και τα ηλεκτρικά οχήματα (ακόλουθοι) οι οποίοι προσαρμόζονται βέλτιστα στις αποφάσεις του aggregator. Εν κατακλείδι, αποτελεί ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης διεπίπεδου προγραμματισμού που επιλύεται με χρήση του λογισμικού GAMS.

Στον διεπίπεδο προγραμματισμό, οι αποφάσεις που λαμβάνονται στο πρώτο επίπεδο επηρεάζουν την στρατηγική του δεύτερου επιπέδου και αντίθετα. Πιο αναλυτικά, στο πρώτο επίπεδο οι μεταβλητές απόφασης που επηρεάζουν την συμπεριφορά των παικτών του δεύτερου επιπέδου είναι οι ωριαίες τιμές που ανακοινώνει ο aggregator προς α) τις μονάδες παραγωγής που έχει στην κατοχή του, β) τα διακοπτόμενα φορτία και γ) στα ελαστικά φορτία τα οποία ελέγχονται μέσω καμπυλών τιμής. Ενώ μέσω κάποιων συμβολαίων μακράς διάρκειας καθορίζει δυο σταθερές τιμές κοστολόγησης, μια ενιαία για τα ευέλικτα φορτία και τα ηλεκτρικά οχήματα και μια άλλη η οποία είναι υψηλότερη για τα μη ελεγχόμενα φορτία. Έπειτα, ο καθένας ξεχωριστά παραγωγός και καταναλωτής ανάλογα με την τιμή που του ανακοινώθηκε προσαρμόζει και το φορτίο του.

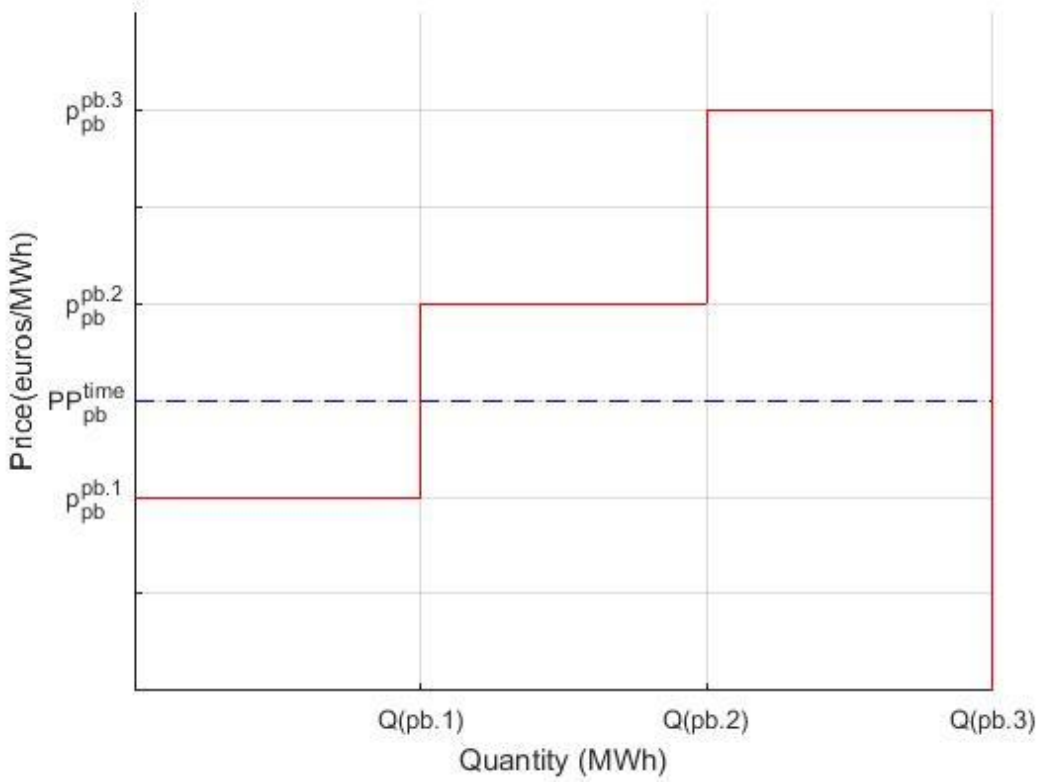
Στις επόμενες υποενότητες του κεφαλαίου θα περιγράψουμε αναλυτικά τους «ακόλουθους» του προβλήματος, δηλαδή το πρόβλημα καθεμιάς οντότητας του προβλήματος του κατώτερου επιπέδου όπου εντάσσονται οι τέσσερις κατηγορίες καταναλωτών (Flexible loads, Curtailable loads, Bid loads, Non flexible loads), οι μονάδες παραγωγής και τα ηλεκτρικά οχήματα. Τέλος, στην τελευταία υποενότητα παρουσιάζεται η μαθηματική περιγραφή του ανώτερου επιπέδου του aggregator (ηγέτης) [30].

5.2 Μονάδες παραγωγής

Όσον αφορά στις μονάδες παραγωγής, η λειτουργία τους καθορίζεται μέσω μια βηματικής καμπύλης τιμών-παραγωγής. Στην εικόνα 4.2 δίνεται ένα παράδειγμα της καμπύλης λειτουργίας για μια μονάδα παραγωγής την οποία καταθέτει την προηγούμενη μέρα στον aggregator. Η μεταβλητή απόφασης του πρώτου επιπέδου που επηρεάζει τις αποφάσεις των διάσπαρτων μονάδων παραγωγής είναι η $PP_{pb}(time)$. Συνεπώς, με βάση αυτή την τιμή και των προφίλ των μονάδων καθορίζεται η προσφερόμενη ενέργεια κάθε μονάδας.

- $PP_{pb}(time)$ είναι η τιμή που ανακοινώνει στο σύνολο των μονάδων παραγωγής ο aggregator για κάθε μια ώρα της ημέρας ξεχωριστά.

- $P_{pb}(pb,z)$ είναι η τιμή κάθε σκαλοπατιού z του παραγωγού pb, δηλαδή $P_{pb}(1,1)$ είναι η ελάχιστη τιμή που πρέπει να ανακοινώσει ο aggregator στον πρώτο παραγωγό ώστε να παράγει ενέργεια ίση με το πρώτο σκαλοπάτι.
- $Q_{pb}(pb,z)$ είναι η ποσότητα ενέργειας κάθε σκαλοπατιού z που θα παρέχει σε μια ώρα ο παραγωγός pb, δηλαδή $Q_{pb}(1,1)$ είναι η ελάχιστη ποσότητα ενέργειας που θα προσφέρει ο πρώτος παραγωγός αν του ανακοινωθεί τιμή από τον aggregator μεγαλύτερη ή ίση από την $P_{pb}(1,1)$.



Εικόνα 4.2. Προφίλ προσφορών για μια μονάδα παραγωγής

Ειδικότερα, οι μονάδες παραγωγής λειτουργούν με την εξής λογική (θα εξετάσουμε την συμπεριφορά ενός παραγωγού-*pb* την κάθε χρονική στιγμή-*time*).

1. Αν $PP_{pb}(time) < P_{pb}(pb,1)$, τότε ο παραγωγός την συγκεκριμένη ώρα δεν θα πρόσφερει καθόλου ενέργεια στο σύστημα.
2. Αν $P_{pb}(pb,1) \le PP_{pb}(time) < P_{pb}(pb,2)$, τότε ο παραγωγός την συγκεκριμένη ώρα θα πρόσφερει ενέργεια στο σύστημα ίση με $Q_{pb}(pb,1)$.

3. Αν $P_{pb}(pb,2) \le PP_{pb}(time) < P_{pb}(pb,3)$, τότε ο παραγωγός την συγκεκριμένη ώρα θα πρόσφερει ενέργεια στο σύστημα ίση με $Q_{pb}(pb,1)+Q_{pb}(pb,2)$.
4. Αν $PP_{pb}(time) \ge P_{pb}(pb,3)$, τότε ο παραγωγός την συγκεκριμένη ώρα θα πρόσφερει ενέργεια στο σύστημα ίση με $Q_{pb}(pb,1)+Q_{pb}(pb,2)+Q_{pb}(pb,3)$.

Αν δοθεί από τον aggregator μια τιμή $PP_{pb}(time) = P_{pb}(pb,1)$ τότε το κέρδος του παραγωγού θα είναι μικρό συγκριτικά με την περίπτωση που θα του δινόταν μια τιμή $P_{pb}(pb,1) < PP_{pb}(time) < P_{pb}(pb,2)$. Το γεγονός αυτό οφείλεται ότι και στις δύο περιπτώσεις θα παράξει το ίδιο ποσό ενέργειας αλλά στην δεύτερη περίπτωση κάθε kWh θα την πληρωθεί ακριβότερα. Η μαθηματική εξήγηση του παραπάνω έγκειται στο γεγονός ότι στην δεύτερη περίπτωση το γινόμενο $(PP_{pb}(time) - P_{pb}(pb,1)) * Q_{pb}(pb,1)$ που αντικατοπτρίζει το κέρδος του παραγωγού θα είναι μεγαλύτερο συγκριτικά με την πρώτη περίπτωση.

Συνεπώς, το πρόβλημα του κάθε παραγωγού μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά με τον εξής τρόπο.

$$\min f_1 = \sum_z (P_{pb}(time, pb, z) - PP_{pb}(time)) e_{pb}(pb, z, time) \qquad \forall time, pb \qquad (1)$$

$$s.t \qquad e_{pb}(pb, z, time) \le Q(pb, z) : w^1_{pb}(time, pb, z), \qquad \forall time, pb, z \qquad (2)$$

$$e_{pb}(pb, z, time) \ge 0, \forall time, pb, z \qquad (3)$$

Όπου $w^1_{pb}(time, pb, z)$ είναι ο πολλαπλασιαστής lagrange του περιορισμού του παραπάνω προβλήματος ελαχιστοποίησης. Κάνοντας χρήση των συνθηκών KKT το παραπάνω πρόβλημα ελαχιστοποίησης (εξισώσεις 1-3) του κάτω επιπέδου μετατρέπεται στις παρακάτω ανισώσεις που πρέπει να συμπεριλάβουμε στο κεντρικό μας πρόβλημα.

$$0 \le P_{pb}(time, pb, z) - PP_{pb}(time) + w^1_{pb}(time, pb, z) \perp e_{pb}(time, pb, z) \ge 0, \forall time, pb, z \qquad (4)$$

$$0 \le Q(pb, z) - e_{pb}(time, pb, z) \perp w^1_{pb}(time, pb, z) \ge 0, \forall time, pb, z. \qquad (5)$$

Οι παραπάνω ανισώσεις (4-5) πρέπει να τροποποιηθούν προκειμένου να συμπεριληφθούν ως περιορισμοί στο τελικό μας πρόβλημα το οποίο είναι ένα πρόβλημα μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού. Κάνοντας χρήση της

transformation of complementary slackness conditions, την big-M formulation και δυαδικών μεταβλητών μετασχηματίζονται παίρνοντας την παρακάτω μορφή (εξισώσεις 6-13) [20],[30].

$$P_{pb}(time, pb, z) - PP_{pb}(time) + w^1_{pb}(time, pb, z) \geq 0, \forall time, pb, z \quad (6)$$

$$P_{pb}(time, pb, z) - PP_{pb}(time) + w^1_{pb}(time, pb, z) \leq (1 - v^2_{pb}(time, pb, z)) * M, \forall time, pb, z \quad (7)$$

$$e_{pb}(time, pb, z) \geq 0, \forall time, pb, z \quad (8)$$

$$e_{pb}(time, pb, z) \leq v^2_{pb}(time, pb, z) * M, \forall time, pb, z \quad (9)$$

$$Q(pb, z) - e_{pb}(time, pb, z) \geq 0, \forall time, pb, z \quad (10)$$

$$Q(pb, z) - e_{pb}(time, pb, z) \leq (1 - v^1_{pb}(time, pb, z)) * M, \forall time, pb, z \quad (11)$$

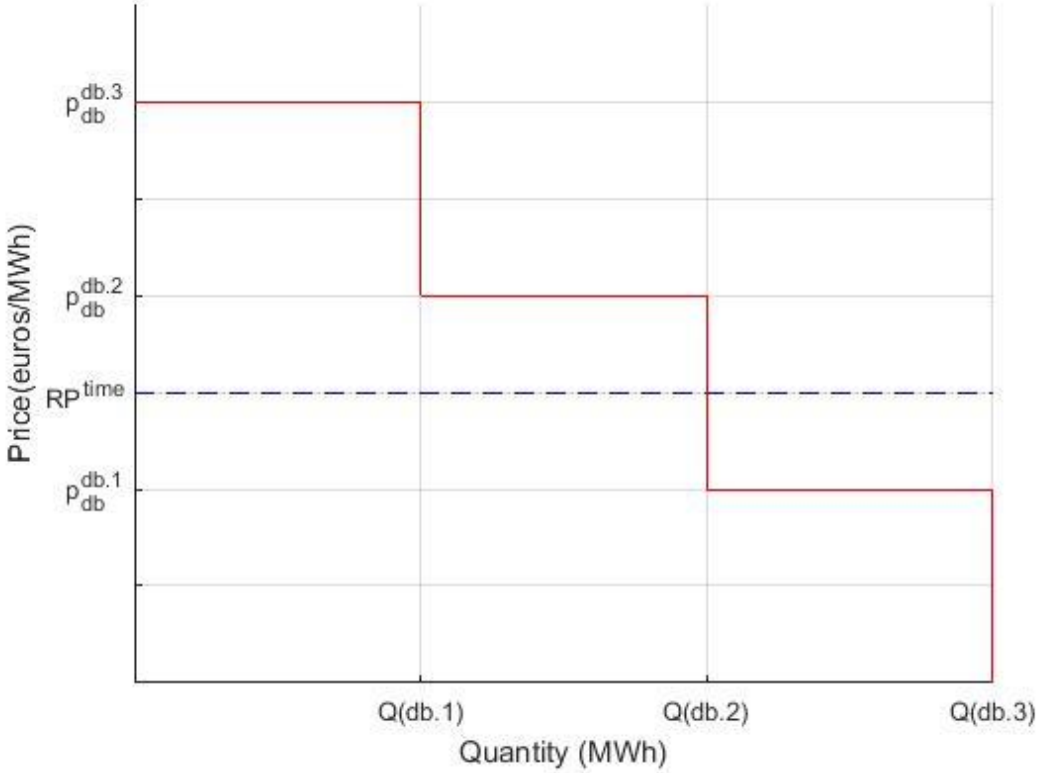
$$w^1_{pb}(time, pb, z) \geq 0, \forall time, pb, z \quad (12)$$

$$w^1_{pb}(time, pb, z) \leq v^1_{pb}(time, pb, z) * M, \forall time, pb, z \quad (13)$$

5.3 Ελαστικά φορτία ελεγχόμενα μέσω καμπυλών τιμής

Όσον αφορά τα ελαστικά φορτία ελεγχόμενα μέσω καμπυλών τιμής, η λειτουργία τους καθορίζεται μέσω μια βηματικής καμπύλης τιμών-καταναλισκόμενων φορτίων. Στην εικόνα 4.3 δίνεται ένα παράδειγμα της καμπύλης λειτουργίας για ένα ελαστικά φορτίο ελεγχόμενο μέσω καμπυλών τιμής την οποία καταθέτει την προηγούμενη μέρα στον aggregator. Η μεταβλητή απόφασης του πρώτου επιπέδου που επηρεάζει τις αποφάσεις των ελαστικών φορτίων ελεγχόμενων μέσω καμπυλών τιμής είναι η $RP(time)$. Συνεπώς, με βάση αυτή την τιμή και των προφίλ των ελαστικών φορτίων καθορίζεται το φορτίο κάθε καταναλωτή.

- RP είναι η ημερήσια τιμή που ανακοινώνει, στο σύνολο των ελαστικών φορτίων ελεγχόμενων μέσω καμπυλών τιμής, ο aggregator.
- $P_{db}(db, z)$ είναι η τιμή κάθε σκαλοπατιού z του ελαστικού φορτίου ελεγχόμενου μέσω καμπυλών τιμής db, δηλαδή $P_{db}(1,1)$ είναι η ελάχιστη τιμή που πρέπει να ανακοινώσει ο aggregator στον πρώτο ελαστικό φορτίο ελεγχόμενο μέσω καμπυλών τιμής ώστε να καταναλώσει φορτίο ίσο με το πρώτο σκαλοπάτι.
- $Q_{db}(db, z)$ είναι το φορτίο κάθε σκαλοπατιού z που θα καταναλώσει σε μια ώρα ο καταναλωτής db, δηλαδή $Q_{db}(1,1)$ είναι το ελάχιστο φορτίο που θα καταναλώσει το πρώτο ελαστικό φορτίο το οποίο ελέγχεται μέσω καμπυλών τιμής αν του ανακοινωθεί τιμή από τον aggregator μεγαλύτερη ή ίση από την $P_{db}(1,1)$.



Εικόνα 4.3. Προφίλ προσφορών ελαστικού φορτίου ελεγχόμενου μέσω καμπυλών τιμής

Ειδικότερα, τα ελαστικά φορτία ελεγχόμενα μέσω καμπυλών τιμής λειτουργούν με την εξής λογική.

1. Αν $RP > P_{db}(db,3)$, τότε το db ελαστικό φορτίο το οποίο ελέγχεται μέσω καμπυλών τιμής την συγκεκριμένη ώρα δεν θα καταναλώσει καθόλου φορτίο.
2. Αν $P_{db}(db,2) < RP \leq P_{db}(db,3)$, τότε το db ελαστικό φορτίο το οποίο ελέγχεται μέσω καμπυλών τιμής την συγκεκριμένη ώρα θα καταναλώσει φορτίο ίσο με $Q_{db}(db,1)$.
3. Αν $P_{db}(db,1) < RP \leq P_{db}(db,2)$, τότε το db ελαστικό φορτίο το οποίο ελέγχεται μέσω καμπυλών τιμής την συγκεκριμένη ώρα θα καταναλώσει φορτίο ίσο με $Q_{db}(db,1) + Q_{db}(db,2)$.
4. Αν $RP \leq P_{db}(db,1)$, τότε το db ελαστικό φορτίο το οποίο ελέγχεται μέσω καμπυλών τιμής την συγκεκριμένη ώρα θα καταναλώσει φορτίο ίσο με $Q_{db}(db,1) + Q_{db}(db,2) + Q_{db}(db,3)$.

Αν δοθεί από τον aggregator μια τιμή $RP = P_{db}(db,3)$ τότε το οφειλόμενο ποσό του ελαστικού φορτίου το οποίο ελέγχεται μέσω καμπυλών τιμής προς τον aggregator θα είναι μεγάλο συγκριτικά με την περίπτωση που θα του δινόταν μια τιμή $P_{db}(db,2) < RP < P_{db}(db,3)$. Το γεγονός αυτό οφείλεται ότι και στις δύο περιπτώσεις θα καταναλώσει το ίδιο ποσό ενέργειας αλλά στην δεύτερη περίπτωση κάθε kWh θα την πληρώσει φθηνότερα. Η μαθηματική εξήγηση του παραπάνω έγκειται στο γεγονός ότι στην δεύτερη περίπτωση το γινόμενο $(RP - P_{db}(db,2)) * Q_{db}(db,1)$ που αντικατοπτρίζει το οφειλόμενο ποσό του ελαστικού φορτίου προ του aggregator θα είναι μικροτερο συγκριτικά με την πρώτη περίπτωση.

Συνεπώς, το πρόβλημα του κάθε διακοπτόμενου φορτίου μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά με τον εξής τρόπο (εξισώσεις 14-16).

$$\min f_3 = \sum_z (RP - P_{db}(time, db, z)) e_{db}(db, z, time) \qquad \forall time, db \qquad (14)$$

$$s.t \qquad e_{db}(db, z, time) \le Q(db, z) : w_{db}^1(time, db, z), \quad \forall time, db, z \qquad (15)$$

$$e_{db}(db, z, time) \ge 0, \forall time, db, z \qquad \forall time, db, z \qquad (16)$$

Όπου $w_{db}^1(time, db, z)$ είναι ο πολλαπλασιαστής lagrange του περιορισμού του παραπάνω προβλήματος ελαχιστοποίησης. Κάνοντας χρήση των συνθηκών KKT το παραπάνω πρόβλημα ελαχιστοποίησης του κάτω επιπέδου μετατρέπεται στις παρακάτω ανισώσεις (17-18) που πρέπει να συμπεριλάβουμε στο κεντρικό μας πρόβλημα.

$$0 \le RP - P_{db}(time, db, z) + w_{db}^1(time, db, z) \perp e_{db}(time, db, z) \ge 0, \forall time, db, z \qquad (17)$$

$$0 \le Q(db, z) - e_{db}(time, db, z) \perp w_{db}^1(time, db, z) \ge 0, \forall time, db, z \qquad (18)$$

Οι παραπάνω ανισώσεις πρέπει να τροποποιηθούν προκειμένου να συμπεριληφθούν ως περιορισμοί στο τελικό μας πρόβλημα το οποίο είναι ένα πρόβλημα μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού. Κάνοντας χρήση της transformation of complementary slackness conditions, την big-M formulation και δυαδικών μεταβλητών μετασχηματίζονται παίρνοντας την παρακάτω μορφή (εξισώσεις 19-25) [20],[30].

$$RP - P_{db}(time, db, z) + w^1_{db}(time, db, z) \geq 0,\ \forall time, db, z \quad (19)$$

$$RP - P_{db}(time, db, z) + w^1_{db}(time, db, z) \leq (1 - v^2_{db}(time, pb, z)) * M,\ \forall time, db, z \quad (20)$$

$$e_{db}(time, pb, z) \geq 0, \forall time, db, z \quad (21)$$

$$e_{db}(time, pb, z) \leq v^2_{db}(time, pb, z) * M\ , \forall time, db, z \quad (22)$$

$$Q(db, z) - e_{db}(time, db, z) \geq 0, \forall time, db, z \quad (23)$$

$$Q(db, z) - e_{db}(time, db, z) \leq (1 - v^1_{db}(time, db, z)) * M, \forall time, db, z \quad (24)$$

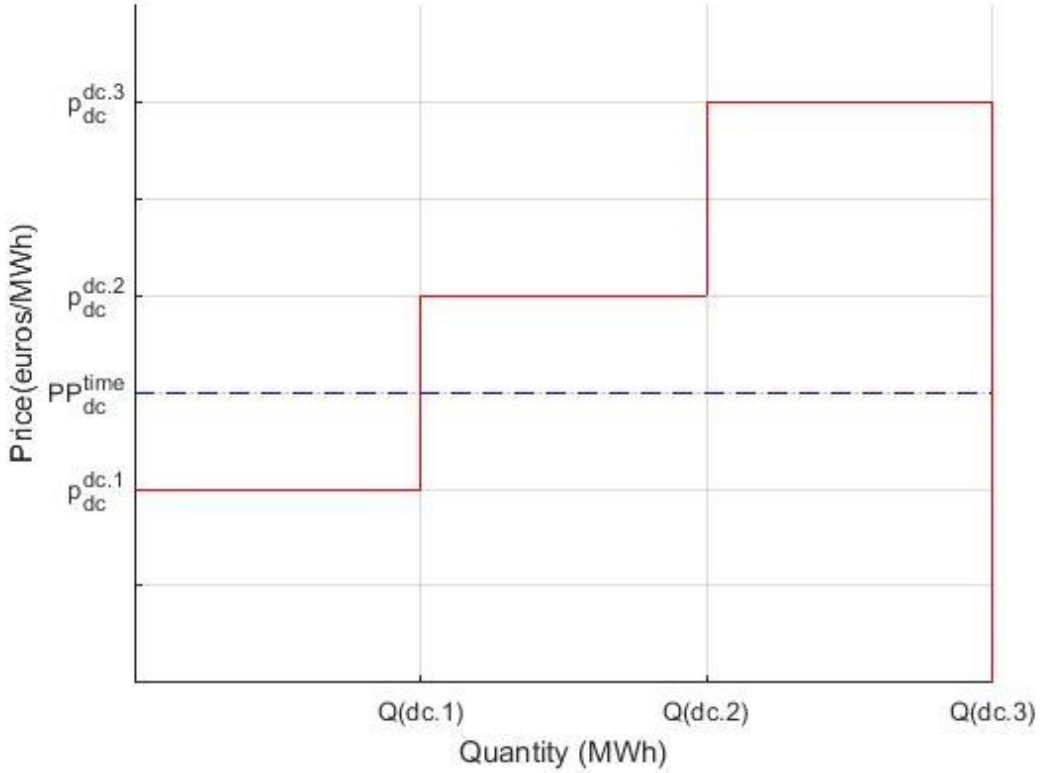
$$w^1_{db}(time, db, z) \geq 0, \forall time, db, z \quad (25)$$

$$w^1_{db}(time, db, z) \leq v^1_{db}(time, db, z) * M\ , \forall time, db, z \quad (26)$$

5.4 Διακοπτόμενα φορτία

Όσον αφορά τα διακοπτόμενα φορτία, η λειτουργία τους καθορίζεται μέσω μιας βηματικής καμπύλης τιμών-αποκοπής. Στην εικόνα 4.3 δίνεται ένα παράδειγμα της καμπύλης λειτουργίας για ένα διακοπτόμενο φορτίο την οποία καταθέτει την προηγούμενη μέρα στον aggregator. Η μεταβλητή απόφασης του πρώτου επιπέδου που επηρεάζει τις αποφάσεις των διάσπαρτων μονάδων παραγωγής είναι η $PP_{dc}(time)$. Συνεπώς, με βάση αυτή την τιμή και των προφίλ των μονάδων καθορίζεται η προσφερόμενη ενέργεια κάθε μονάδας.

- $PP_{dc}(time)$ είναι η τιμή που ανακοινώνει στο σύνολο των διακοπτόμενων φορτίων ο aggregator για κάθε μια ώρα της ημέρας ξεχωριστά.
- $P_{dc}(dc, z)$ είναι η τιμή κάθε σκαλοπατιού z του διακοπτόμενου φορτίου dc, δηλαδή $P_{dc}(1,1)$ είναι η ελάχιστη τιμή που πρέπει να ανακοινώσει ο aggregator στον πρώτο διακοπτόμενο φορτίο ώστε να αποκόψει φορτίο ίσο με το πρώτο σκαλοπάτι.
- $Q_{dc}(dc, z)$ είναι το φορτίο κάθε σκαλοπατιού z που θα αποκόψει σε μια ώρα ο καταναλωτής dc, δηλαδή $Q_{dc}(1,1)$ είναι το ελάχιστο φορτίο που θα αποκόψει ο πρώτος καταναλωτής αν του ανακοινωθεί τιμή από τον aggregator μεγαλύτερη ή ίση από την $P_{dc}(1,1)$.



Εικόνα 4.4. Προφίλ προσφορών διακοπτόμενου φορτίου

Ειδικότερα, τα διακοπτόμενα φορτία λειτουργούν με την εξής λογική.

1. Αν $PP_{dc}(time) < P_{dc}(dc,1)$, τότε το διακοπτόμενο φορτίο την συγκεκριμένη ώρα δεν θα αποκόψει καθόλου φορτίο.
2. Αν $P_{dc}(dc,1) \le PP_{dc}(time) < P_{dc}(dc,2)$, τότε το διακοπτόμενο φορτίο την συγκεκριμένη ώρα θα αποκόψει φορτίο ίσο με $Q_{dc}(dc,1)$.
3. Αν $P_{dc}(dc,2) \le PP_{dc}(time) < P_{dc}(dc,3)$, τότε το διακοπτόμενο φορτίο την συγκεκριμένη ώρα θα αποκόψει φορτίο ίσο με $Q_{dc}(dc,1) + Q_{dc}(dc,2)$.
4. Αν $PP_{dc}(time) \ge P_{dc}(dc,3)$, τότε το διακοπτόμενο φορτίο την συγκεκριμένη ώρα θα αποκόψει φορτίο ίσο με $Q_{dc}(dc,1) + Q_{dc}(dc,2) + Q_{dc}(dc,3)$.

Αν δοθεί από τον aggregator μια τιμή $PP_{dc}(time) = P_{dc}(dc,1)$ τότε το κέρδος του διακοπτόμενου φορτίου θα είναι μικρό συγκριτικά με την περίπτωση που θα του δινόταν μια τιμή $P_{dc}(dc,1) < PP_{dc}(time) < P_{dc}(dc,2)$. Το γεγονός αυτό οφείλεται ότι και στις δύο περιπτώσεις θα αποκόψει το ίδιο φορτίο αλλά στην δεύτερη περίπτωση κάθε kWh θα την πληρωθεί ακριβότερα. Η μαθηματική εξήγηση του παραπάνω έγκειται στο

γεγονός ότι στην δεύτερη περίπτωση το γινόμενο $(PP_{dc}(time) - P_{dc}(dc,1)) * Q_{dc}(dc,1)$ που αντικατοπτρίζει το κέρδος του διακοπτόμενου φορτίου θα είναι μεγαλύτερο συγκριτικά με την πρώτη περίπτωση.

Συνεπώς, το πρόβλημα του κάθε διακοπτόμενου φορτίου μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά με τον εξής τρόπο (εξισώσεις 27-29).

$$\min f_2 = \sum_z (P_{dc}(time, dc, z) - PP_{dc}(time)) e_{dc}(dc, z, time) \qquad \forall time, dc, z \tag{27}$$

$$s.t \qquad e_{dc}(dc, z, time) \le Q(dc, z) : w^1_{dc}(time, dc, z), \quad \forall time, dc, z \tag{28}$$

$$e_{dc}(dc, z, time) \ge 0, \forall time, dc, z \tag{29}$$

Όπου $w^1_{dc}(time, dc, z)$ είναι ο πολλαπλασιαστής lagrange του περιορισμού του παραπάνω προβλήματος ελαχιστοποίησης. Κάνοντας χρήση των συνθηκών KKT το παραπάνω πρόβλημα ελαχιστοποίησης του κάτω επιπέδου μετατρέπεται στις παρακάτω ανισώσεις (30-31) που πρέπει να συμπεριλάβουμε στο κεντρικό μας πρόβλημα.

$$0 \le P_{dc}(time, dc, z) - PP_{dc}(time) + w^1_{dc}(time, dc, z) \perp e(time, dc, z) \ge 0, \forall time, dc, z \tag{30}$$

$$0 \le Q(dc, z) - e_{dc}(time, dc, z) \perp w^1_{dc}(time, dc, z) \ge 0, \forall time, dc, z. \tag{31}$$

Οι παραπάνω ανισώσεις (30-31) πρέπει να τροποποιηθούν προκειμένου να συμπεριληφθούν ως περιορισμοί στο τελικό μας πρόβλημα το οποίο είναι ένα πρόβλημα μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού. Κάνοντας χρήση της transformation of complementary slackness conditions, την big-M formulation και δυαδικών μεταβλητών μετασχηματίζονται παίρνοντας την παρακάτω μορφή (εξισώσεις 32-39) [20].

$$P_{dc}(time, dc, z) - PP_{dc}(time) + w^1_{dc}(time, dc, z) \ge 0, \forall time, dc, z \tag{32}$$

$$P_{dc}(time, dc, z) - PP_{dc}(time) + w^1_{dc}(time, dc, z) \le (1 - v^2_{dc}(time, dc, z)) * M, \forall time, dc, z \tag{33}$$

$$e_{dc}(time, dc, z) \ge 0, \forall time, dc, z \tag{34}$$

$$e_{dc}(time, dc, z) \le v^2_{dc}(time, dc, z) * M, \forall time, dc, z \tag{35}$$

$$Q(dc, z) - e_{dc}(time, dc, z) \ge 0, \forall time, dc, z \tag{36}$$

$$Q(dc, z) - e_{dc}(time, dc, z) \le (1 - v^1_{dc}(time, dc, z)) * M, \forall time, dc, z \tag{37}$$

$$w^1_{dc}(time, dc, z) \ge 0, \forall time, dc, z \tag{38}$$

$$w^1_{dc}(time, dc, z) \le v^1_{dc}(time, dc, z) * M, \forall time, dc, z \tag{39}$$

Χρήσιμο είναι να αναφέρουμε ότι όσο φορτίο δεν αποκόπτεται, κοστολογείται κανονικά με την ίδια τιμή που κοστολογούνται και τα μη ελεγχόμενα φορτία τα οποία ελέγχονται μέσω καμπύλης τιμών.

5.5 Ευέλικτα φορτία

Όσον αφορά τα ευέλικτα φορτία, η λειτουργία τους καθορίζεται εκ των προτέρων μέσω μιας σύμβασης μεταξύ του aggregator και των ευέλικτων φορτίων (η τιμή είναι κοινή και για την κοστολόγηση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων). Πιο συγκεκριμένα, προαποφασίζεται μια σταθερή τιμή κοστολόγησης για την κατανάλωση των ευέλικτων φορτίων. Με τον διαμοιρασμό του συνολικού τους φορτίου σε κάθε μια ώρα του εικοσιτετράωρου να γίνεται από τον aggregator με σεβασμό πάντα στους περιορισμούς που υπάρχουν. Οι οποίοι είναι οι παρακάτω (40-43):

$$e_{df}(time, df) \le HPD_{df}(df), \forall df, time \quad (40)$$

$$\sum_{time=1}^{24} e_{df}(time, df) \ge DET_{df}(df), \forall df \quad (41)$$

$$e_{df}(time, df) - e_{df}(time-1, df) \le RR_{df}(df), \forall df, time \quad (42)$$

$$e_{df}(time, df) - e_{df}(time-1, df) \ge -RR_{df}(df), \forall df, time \quad (43)$$

- $HPD_{df}(df)$ είναι το μέγιστο φορτίο που δύναται να απορροφά κάθε ώρα το ευέλικτο φορτίο df.
- $e_{df}(time, df)$ είναι η ενέργεια που αποδίδει το VPP για την εξυπηρέτηση της ζήτησης του ευέλικτο φορτίο df την ώρα time.
- $DET_{df}(df)$ είναι οι ημερήσιες ενεργειακές ανάγκες του ευέλικτου φορτίου df στην διάρκεια ενός εικοσιτετραώρου.
- $RR_{df}(df)$ είναι η μέγιστη δυνατή διακύμανση που μπορεί να έχει η εξυπηρέτηση της ζήτησης ένος ευέλικτο φορτίο df μεταξύ δύο διαδοχικών ωρών.

Χρήσιμο είναι να ανφερθεί ότι οι παραπάνω ανισότητες υιοθετούνται χωρίς καμία τροποποίηση ως ανισότητες του άνω επιπέδου.

Ειδικότερα, η 40 ανίσωση, αναφέρεται στην μέγιστη ισχύ που μπορούν να απορροφήσουν τα ευέλικτα φορτία ενώ η 41 στην ελάχιστη δυνατή ημερήσια ενέργεια που απαιτείται για την εξυπηρέτηση της ζήτησής τους. Τέλος, ο 42ος και ο 43ος περιορισμός αφορούν την μέγιστη δυνατή διακύμανση που δύναται να έχει η εξυπηρέτηση της ζήτησης των ευέλικτων φορτίων μεταξύ δύο διαδοχικών ωρών.

Συνεπώς, στη συγκεκριμένη κατηγορία καταναλωτών ο aggregator έχει την ευχέρια να ρυθμίζει ελύθερα τα ευέλικτα φορτία από την στιγμή που έχουν

προαποφασίσει μια σταθερή τιμή κοστολόγησης. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψιν, τους περιορισμούς τους, που του γνωστοποιούνται την προηγούμενη μέρα διαμοιράζει τα φορτία τους με αποκλειστικό σκοπό την μεγιστοποίηση των δικών του εσόδων.

5.6 Μη ελεγχόμενα φορτία

Παρόμοια με τα ευέλικτα φορτία, ο aggregator έρχεται σε συμφωνία μεταξύ τους ως προς την κοστολόγηση τους. Συγκεκριμένα συμφωνούν ως προς μια ενιαία τιμή κοστολόγησης κατά την διάρκεια του εικοσιτετράωρου η οποία είναι σαφώς υψηλότερη σε σύγκριση με αυτή των ευέλικτων φορτίων αφού ο aggregator δεν έχει την δυνατότητα διαχείρισης τους.

5.7 Ηλεκτρικά οχήματα

Παρόμοια με την μοντελοποίηση των ευέλικτων φορτίων είναι και αυτή των ηλεκτρικών οχημάτων. Ειδικότερα, στο συγκεκριμένο μοντέλο ο κάτοχος του οχήματος δεν θα έχει άμεση σχέση με την αγορά ενέργειας, μα θα υπάγεται σε κάποια επιχείρηση-αθροιστή που θα λειτουργεί ως μεσάζοντας ανάμεσα στο aggregator και το όχημα. Ο μεσάζων θα συγκεντρώνει και θα διαχειρίζεται την συνολική ικανότητα ισχύος του στόλου οχημάτων που θα τον απαρτίζουν οι πελάτες του. Έτσι έχοντας στην κατοχή του αρκετά MW, αντί για λιγοστά kW που θα είχε ο κάτοχος θα μπορεί να συμμετέχει στον ενεργειακό προγραμματισμό που επιτελεί ο aggregator.

Χαρακτηριστικά αναφέρονται ορισμένες κατηγορίες αθροιστών.

- Την τοπική εταιρία διανομής ενέργειας που δραστηριοποιείται ούτως ή άλλως στην αγοραπωλησία ενέργειας και αποκτά οφέλη σχετιζόμενα με την ευστάθεια και αξιοπιστία του δικτύου.
- Την κατασκευαστική εταιρία των οχημάτων που αποκτά έτσι μια συνεχή πελατειακή σχέση με τον αγοραστή οχήματος για την πώληση τηλεματικού εξοπλισμού και αντίστοιχων υπηρεσιών.
- Τον διαχειριστή της κινητής τηλεφωνίας, που διαχειρίζεται το δίκτυο τηλεπικοινωνίας για την μετάδοση της V2G πληροφορίας και αποκτά κέρδη μέσω της σύναψης πολλών μικρών αυτοματοποιημένων συναλλαγών.

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 , πολύ χαμηλότερη από την τιμή που θα χρεώνονταν αν αγόραζαν το ίδιο ποσό ενέργειας ως τελικοί καταναλωτές. Επίσης, στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, η τιμή αυτή ταυτίζεται με την τιμή που δίνει ο aggregator στα ευέλικτα φορτία. 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 ένα κόστος “BDC-Battery Degradation Cost”.

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, ο αθροιστής των ηλεκτρικών οχημάτων αναλαμβάνει να καταθέσει μια στοχαστική-πιθανοτική πρόβλεψη της συμπεριφοράς καθενός οχήματος στον διαχειριστή του VPP. Έπειτα, ο aggregator επιτελεί τον ημερήσιο ενεργειακό προγραμματισμό όπου καθορίζεται η ενεργειακή συμπεριφορά του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων για την επόμενη μέρα που ακολουθεί. Κατά αυτό τον τρόπο συντελείται η ενεργειακή διαχείριση των ηλεκτρικών οχημάτων.

Στο σημείο αυτό χρήσιμο είναι να αναφερθούν οι περιορισμοί που διέπουν τα ηλεκτρικά οχήματα (εξισώσεις 44-50) που λαμβάνονται υπόψη από τον aggregator κατά την επιτέλεση του ενεργειακού τους προγραμματισμού την προηγούμενη μέρα. Συγκεκριμένα, μοντελοποιούμε τα ηλεκτρικά οχήματα σαν μια ενιαία μεγάλη μπαταρία της οποίας η συμπεριφορά θα διασαφηνιστεί από το πρόβλημα διεπίπεδου προγραμματισμού.

$$\sum_{time=1}^{24}\{e_{ch}(time)\cdot Eff - e_{dch}(time)/Eff - \sum_{dev} Trip(time,dev)\}\geq 0 \qquad time=\{1,...,24\} \qquad (44)$$

$$U_c(time)+U_d(time)\leq 1 \qquad U_c,U_d=\{0,1\}, time=\{1,...,24\} \qquad (45)$$

$$e_{ch}(time)-U_c(time)\cdot MP\cdot\sum_{dev} Plug(time,dev)\leq 0 \qquad time=\{1,...,24\} \qquad (46)$$

$$e_{dch}(time)-U_d(time)\cdot MP\cdot\sum_{dev} Plug(time,dev)\leq 0 \qquad time=\{1,...,24\} \qquad (47)$$

$$\sum_{t=1}^{time}\{e_{ch}(t)\cdot Eff - e_{dch}(t)/Eff - \sum_{dev} Trip(t,dev)\}\geq 0 \qquad time=\{1,...,24\} \qquad (48)$$

$$\sum_{t=1}^{time}\{e_{ch}(t)\cdot Eff - e_{dch}(t)/Eff - \sum_{dev}(Trip(t,dev)+Mc(dev))\}\leq 0 \qquad time=\{1,...,24\} \qquad (49)$$

$$\sum_{time=1}^{24}\{e_{dch}(time)/Eff - Per\cdot\sum_{dev} Mc(dev)\}\leq 0 \qquad (50)$$

- $e_{ch}(time)$ είναι η συνολική ενέργεια που απορροφά ο στόλος των ηλεκτρικών οχημάτων την ώρα time ώστε να ικανοποιήσει τις ενεργειακές του ανάγκες.
- $e_{dch}(time)$ είναι η συνολική ενέργεια που προσφέρει ο στόλος των ηλεκτρικών οχημάτων την ώρα time στον aggregator μέσω της V2G λειτουργίας.
- Eff εκφράζει την αποτελεσματικότητα του εξοπλισμού φόρτισης και εκφορτίσης. Ένα ποσοστό της ενέργειας χάνεται κυρίως σε θερμικά φαινόμενα.

- MP εκφράζει την εγκαταστημένη ισχύς του σταθμού φόρτισης όπου συνδέονται τα ηλεκτρικά οχήματα.
- $Plug(time, dev)$ η συγκεκριμένη μεταβλητή μπορεί να πάρει τιμές 0 ή 1 δηλώνοντας για κάθε ώρα της ημέρας αν το dev ηλεκτρικό όχημα είναι συνδεδεμένο ή όχι σε σταθμό φόρτισης. Συγκεκριμένα εάν έχει την τιμή 1 είναι συνδεδεμένο σε σταθμό φόρτισης.
- $Trip(t, dev)$ η συγκεκριμένη μεταβλητή περιέχει στις ώρες που το όχημα δεν είναι συνδεδεμένο στο σταθμό φόρτισης το ποσό της ενέργειας που κατανάλωσε το ηλεκτρικό όχημα.
- $Mc(dev)$ η συγκεκριμένη μεταβλητή περιέχει την χωρητικότητας της μπαταρίας του dev ηλεκτρικού οχήματος.

Η 44η ανίσωση μας εξασφαλίζει ότι μετά το πέρας του εικοσιτετράωρου η μπαταρία θα είναι πλήρως φορτισμένη. Η 45η ανίσωση αποτρέπει τα ηλεκτρικά οχήματα να φορτίζουν και να εκφορτίζουν την ίδια ώρα. Η 46η μαζί με την 47η ανίσωση καθορίζουν το ανώτατο όριο ισχύος που μπορούν να φορτίσουν ή να εκφορτίσουν σε μία ώρα τα ηλεκτρικά οχήματα. Η 48η και η 49η ανίσωση αποτρέπει το ηλεκτρικό όχημα κατά την διάρκεια της φόρτισης ή της εκφόρτισης να ξεπεράσει τα όρια της μπαταρίας. Τέλος, η 50η ανίσωση καθορίζει το ποσοστό της μπαταρίας που έχει στην διάθεση του ο aggregator για V2G λειτουργία.

Χρήσιμο είναι να ανφερθεί ότι οι παραπάνω ανισότητες υιοθετούνται χωρίς καμία τροποποίηση ως ανισότητες του άνω επιπέδου.

5.8 Άνω επίπεδο Aggregator-Ηγέτης

Το άνω επίπεδο στο συγκεκριμένο διεπίπεδο πρόβλημα καθορίζει τις βέλτιστες τιμές για την αγορά/πώληση ενέργειας στις διαχειριζόμενες οντότητες του VPP (οι μεταβλητές αυτές είναι: για τα διακοπτόμενα φορτία η $PP_{dc}(time)$, για τα ελαστικά φορτία τα οποία ελέγχονται μέσω καμπυλών τιμής η $RP(time)$ και για τις μονάδες παραγωγής η $PP_{pb}(time)$) ενώ παράλληλα καθορίζει τόσο το ποσό της ενέργειας που θα προμηθεύεται από την χονδρεμπορική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας όσο και την εξυπηρέτηση της ζήτησης των ευέλικτων φορτίων και των ηλεκτρικών οχημάτων στην διάρκεια ενός εικοσιτετραώρου.

Η αντικειμενική συνάρτηση η οποία αντικατοπτρίζει τα έξοδα του VPP (κυρίως για την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από την χονδρεμπορική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, τις μονάδες παραγωγής, την εκφόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων και της φθοράς της μπαταρίας τους καθώς και την αποκοπή που επιδέχονται τα αποκοπτόμενα φορτία) μείον τα έσοδα που προσκομίζει λειτουργώντας ως μεσάζων πουλώντας την ενέργεια στους τελικούς καταναλωτές (ευέλικτα φορτία, ελαστικά φορτία ελεγχόμενα

μέσω καμπυλών τιμής, μη ελεγχόμενα φορτία, το μη αποκοπτόμενο μέρος των διακοπτόμενων φορτίων και στην εξυπηρέτηση της ζήτησης για φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων). Με αποτέλεσμα μαθηματικά να έχει την εξής μορφή (51).

$$
\begin{aligned}
\min F = \sum_{time} \; & [P_{grid}(time) * E_{grid}(time) \\
& + PP_{pb}(time) * \sum_{pb,z} e_{pb}(pb, z, time) \\
& + PP_{dc}(time) * \sum_{dc,z} e_{dc}(dc, z, time) \\
& - RP * (\sum_{db,z} e_{db}(db, z, time) \; + (\sum_{dc,z} Q(dc, z) - \sum_{dc,z} e_{dc}(dc, z, time))) \\
& - PP_{df,EV} * (\sum_{df} e_{df}(time, df) + e_{ch}(time) - e_{dch}(time)) \\
& - PP_{nf} * Load(time) - BDC * e_{dch}(time)] \qquad (51)
\end{aligned}
$$

- $P_{grid}(time)$: αντικατοπτρίζει την τιμή του ανάντη δικτύου.
- $E_{grid}(time)$: αντικατοπτρίζει την ενέργεια που λαμβάνει το VPP από το ανάντη δίκτυο για κάθε ώρα του εικοσιτετράωρου.
- $Load(time)$: αντικατοπτρίζει το μη ευέλικτο φορτίο.
- $PP_{df,EV}$: είναι η προσυμφωνημένη τιμή κοστολόγησης της ζήτησης των ευέλικτων φορτίων και των ηλεκτρικών οχημάτων
- PP_{nf}: είναι η προσυμφωνημένη τιμή κοστολόγησης του μη ευέλικτου φορτίου
- BDC: είναι η προσυμφωνημένη τιμή κοστολόγησης που αποδίδει ο aggregator στον διαχειριστή των ηλεκτρικών οχημάτων για την φθορά που επιδέχονται οι μπαταρίες των ηλεκτρικών οχημάτων λόγω της V2G λειτουργία τους.

Χρήσιμο είναι να αναφερθεί ότι όσο φορτίο των διακοπτόμενων φορτίων δεν αποκόπτεται κοστολογείται με τιμή χρέωσης όμοια με εκείνη των ελαστικών φορτίων που ελέγχονται μέσω καμπύλης τιμών.

Επιπλέον, ο aggregator οφείλει για κάθε ώρα του εικοσιτετράωρου να ικανοποιεί το ισοζύγιο ισχύος δηλαδή η ζήτηση ενέργειας να ισοδυναμεί με την εγχεόμενη ενέργεια στο VPP. Το ισοζύγιο ισχύος περιγράφεται μαθηματικά από την παρακάτω ισότητα.

$$E_{grid}(time)+\sum_{pb,z}e_{pb}(pb,z,time)+\sum_{dc,z}e_{dc}(dc,z,time)\ +e_{dch}(time)$$
$$-e_{ch}(time)-\sum_{db,z}e_{db}(db,z,time)\ -\sum_{dc,z}Q(dc,z)$$
$$-\sum_{df}e_{df}(time,df)-Load(time)=0 \qquad (52)$$

Παρόλα αυτά η εξίσωση κέρδους του aggregator (51) περιλάμβανε ορισμένους μη γραμμικούς όρους ιδιαίτερα εκείνους που περιλαμβάνουν τις μεταβλητές απόφασης. Δηλαδή σε αυτή τους τη μορφή δεν ήταν δυνατόν το συγκεκριμένο διεπίπεδο πρόβλημα να μοντελοποιηθεί ως ένα μικτό ακέραιο γραμμικό πρόβλημα χωρίς να γίνουν ορισμένες τροποποιήσεις. Έτσι κάνοντας χρήση της αρχή δυϊκότητας (strong duality theory) πετύχαμε την αντικατάσταση των παρακάτω γινομένων [21].

$$(P_{pb}(time,pb,z)-PP_{pb}(time))*e_{pb}(pb,z,time)=-Q(pb,z)*w^1_{pb}(time,pb,z),\quad \forall time,pb,z \qquad (53)$$
$$(RP-P_{db}(time,db,z))*e_{db}(db,z,time)=-Q(db,z)*w^1_{db}(time,db,z),\quad \forall time,db,z \qquad (54)$$
$$(P_{dc}(time,dc,z)-PP_{dc}(time))*e_{dc}(dc,z,time)=-Q(dc,z)*w^1_{dc}(time,dc,z),\quad \forall time,dc,z \qquad (55)$$

Με βάση τις παραπάνω ισότητες η εξίσωση κέρδους του aggregator την οποία θέλουμε να ελαχιστοποιήσουμε μοντελοποιείται ικανοποιώντας τα κριτήρια ενός μικτού ακέραιου γραμμικού προβλήματος παίρνοντας την παρακάτω μορφή.

$$\min F=\sum_{time}\ [P_{grid}(time)*E_{grid}(time)$$
$$+\sum_{pb,z}\ \{P_{pb}(time,pb,z)*e_{pb}(pb,z,time)+Q(pb,z)*w^1_{pb}(time,pb,z)\}$$
$$-\sum_{db,z}\ \{P_{db}(time,db,z)*e_{db}(db,z,time)\ -Q(db,z)*w^1_{db}(time,db,z)\}$$
$$+\sum_{dc,z}\ \{P_{dc}(time,dc,z)*e_{dc}(dc,z,time)+Q(dc,z)*w^1_{dc}(time,dc,z)-RP*Q(dc,z)\}$$
$$-PP_{df,EV}*(\sum_{df}e_{df}(time,df)+e_{ch}(time)-e_{dch}(time))$$
$$-PP_{nf}*Load(time)-BDC*e_{dch}(time)] \qquad (56)$$

Η παραπάνω αντικειμενική συνάρτηση (56) σε συνδυασμό με την εξίσωση του ισοζυγίου ισχύος (52) και των περιορισμών καθενός από τους ακόλουθους του προβλήματος (εξισώσεις 6-13, 19-26, 32-50) διαμόρφωσαν τον τελικό διεπίπεδο πρόβλημα μας.

6 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

6.1 Σκοπός κεφαλαίου

Αφότου η ανάπτυξη του αλγορίθμου στο GAMS έλαβε τέλος πραγματοποιήθηκε μια προσομοίωση σε πλήθος διαφορετικών σεναρίων όπου εξετάστηκαν τυχόν διακυμάνσεις στο κέρδος του aggregator καθώς και στην κατανομή των διαχειρίσμων μονάδων του VPP.

Η συγκεκριμένη μελέτη επικεντρώθηκε κυρίως στις μεταβολές που επέφερε η συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στην γενικότερη συμπεριφορά του VPP.Στην επόμενη ενότητα που ακολουθεί δεν έχουμε συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στο VPP και παρουσιάζεται αναλυτικά η συμπεριφορά κάθε οντότητας του VPP.

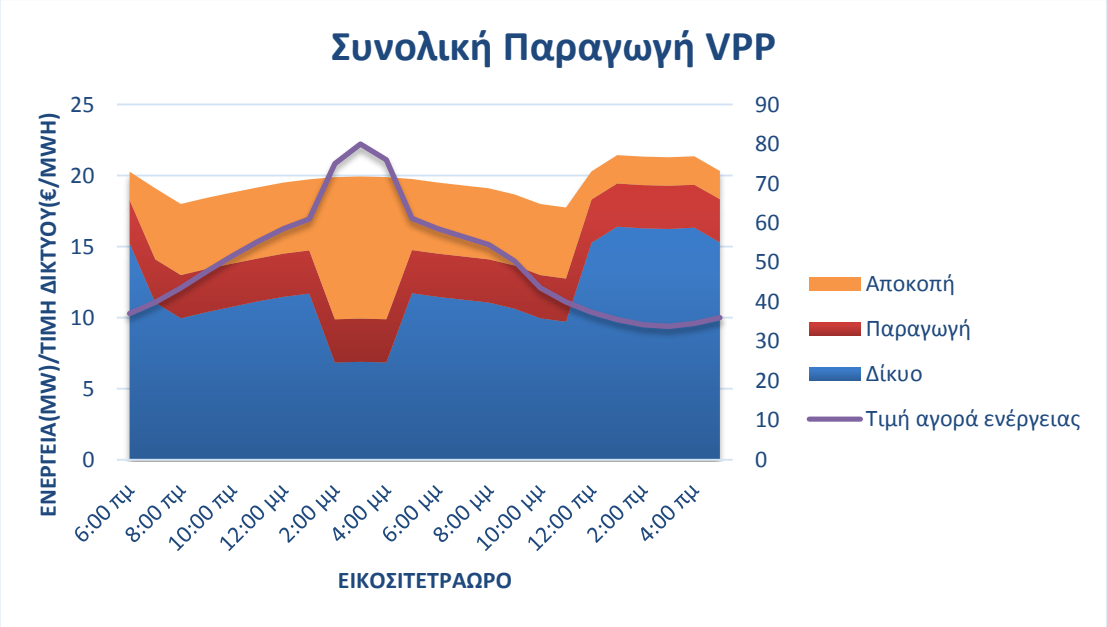
Ειδικότερα, συμπεριλάβαμε από κάθε διαφορετική οντότητα που διαχειρίζεται ο aggregator ένα συγκεκριμένο πλήθος πελατών. Για την παραγωγή θεωρήσαμε 6 μονάδες που καταθέτουν διαφορετικές προσφορές παραγωγής ενέργειας (5-15 €/MWh, 0.1-3 MWh), 6 καταναλωτές με διακοπτόμενα φορτία (21-49,5 €/MWh, 0.4-10 MWh), 6 καταναλωτές με ελαστικά φορτία τα οποία ελέγχονται μέσω καμπυλών τιμής (10-62 €/MWh, 0.5-13 MWh) και 6 καταναλωτές με ευέλικτα φορτία (μέγιστη διακύμανση φορτίου μεταξύ δύο διαδοχικών ωρών:0.9-2 MWh, ημερήσιες ενεργειακές ανάγκες: 2.7-5.7 MWh ,μέγιστο φορτίο που δύναται να απορροφά ανά μια ώρα:0.5-0.8 MWh). Η τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το ανάντη δίκτυο κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 33.8-80 €/MWh ενώ η τιμή κοστολόγησης των μη ευέλικτων φορτίων ορίστηκε στα 50 €/MWh. και η αντίστοιχη για την φθορά της μπαταρίας των ηλεκτρικών οχημάτων στα 0.5 €/MWh και η εγκατεστημένη ισχύς του σταθμού φόρτισης ορίστηκε στα 3.6 MW.

6.2 Παρουσίαση του VPP χωρίς την ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων

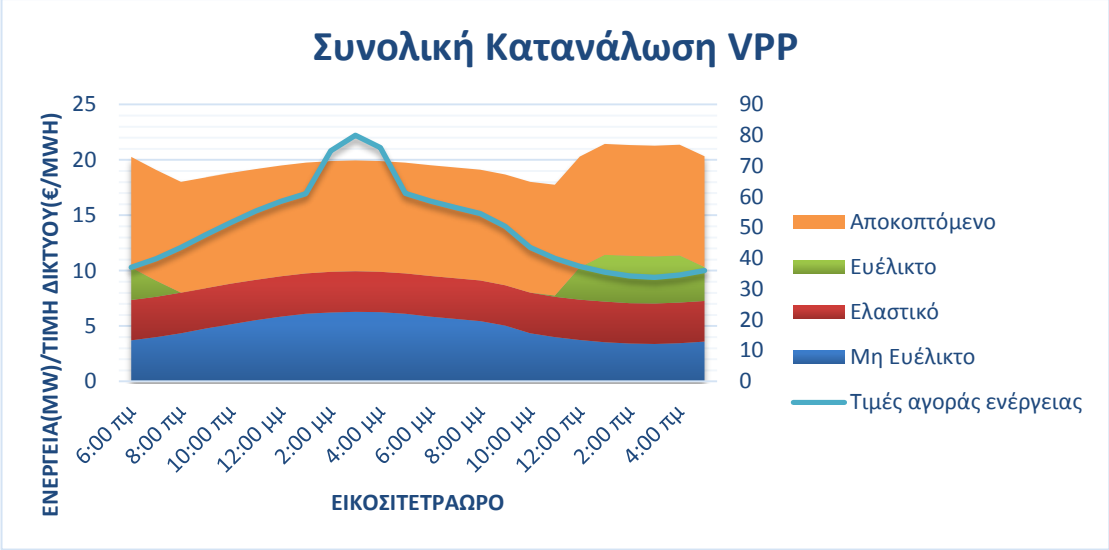
Παρακάτω ακολουθούν τέσσερα διαγράμματα (Εικόνα 5.2) όπου φανερώνεται η συμπεριφορά όλων των οντοτήτων του προβλήματος. Συγκεκριμένα την ενέργεια που λαμβάνει από αυτό ο aggregator θα τη συμβολίζουμε ως «Δίκτυο» ενώ την ενέργεια που λαμβάνει από τις διαχειριζόμενες μονάδες που έχει στην κατοχή του θα τη συμβολίσουμε ως «Παραγωγή». Επιπλέον, όσον αφορά τα αποκοπτόμενα φορτία το μέρος του φορτίου που θα αποκόπτεται θα συμβολίζεται ως «Αποκοπή» ενώ το συνολικό φορτίο που έχει στην διάθεση του ο aggregator να αποκόψει θα το συμβολίσουμε ως «Αποκοπτόμενο» στα διαγράμματα που ακολουθούν. Επίσης, την κατανάλωση των μη ελεγχόμενων φορτίων θα τη συμβολίσουμε ως «Μη ευέλικτα» ενώ εκείνη των ευέλικτων φορτίων (Flexible Loads) θα την απεικονίσουμε ως «Ευέλικτα». Τέλος, η κατανάλωση των ελαστικών φορτίων τα οποία ελέγχονται μέσω

καμπυλών τιμής-φορτίου (Bid Loads) θα την απεικονίσουμε ως «Ελαστικά» στα διαγράμματα που ακολουθούν.

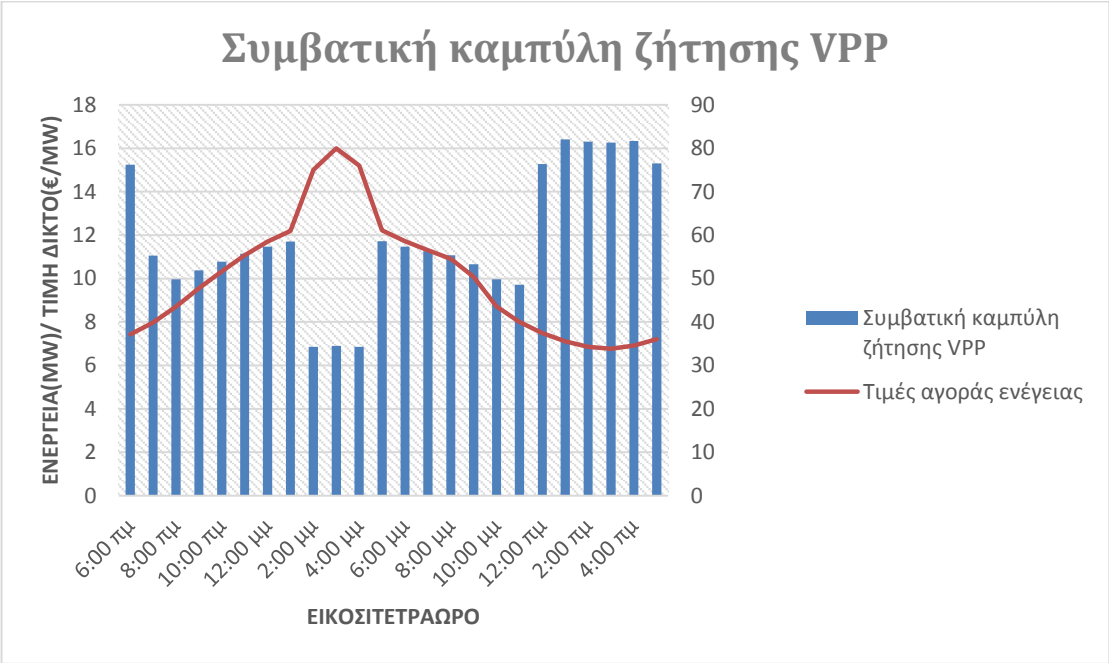
Από τα παρακάτω διαγράμματα (Εικόνα 5.2) γίνεται εμφανές ότι στην διάρκεια του εικοσιτετράωρου οι διαχειριζόμενες μονάδες που διαθέτει το VPP αποδίδουν σταθερά περίπου 3MW(Εικόνα 5.2 Α). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής καταθέτουν χαμηλότερες προσφορές παραγωγής ενέργειας συγκριτικά με το κόστος αγοράς ενέργειας από τη χονδρεμπορική. Σταθερό διατηρείται επίσης το φορτίο των Bid Loads περίπου στα 3,6MW για όλο το εικοσιτετράωρο(Εικόνα 5.2 Α). Από την εικόνα 5.2.Γ είναι εμφανές ότι η ενέργεια που λαμβάνει το VPP από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την τιμή του δικτύου. Δηλαδή τις ώρες που η τιμή του δικτύου είναι υψηλή παρατηρούμε ότι το VPP μειώνει την εισροή ενέργειας από το ανάντη δίκτυο αποκόπτοντας μέρος της ζήτησης του VPP ενώ όταν είναι χαμηλή, η εισροή ενέργειας από το ανάντη δίκτυο αυξάνεται για την εξυπηρέτηση της ζήτησης των μη αποκοπτόμενων και ευέλικτων φορτίων. Η εξυπηρέτηση των ευέλικτων φορτίων γίνεται πάντοτε με τρόπο ώστε να μην παραβιάζονται οι λειτουργικοί περιορισμοί τους. (Εικόνα 5.2 Ε).



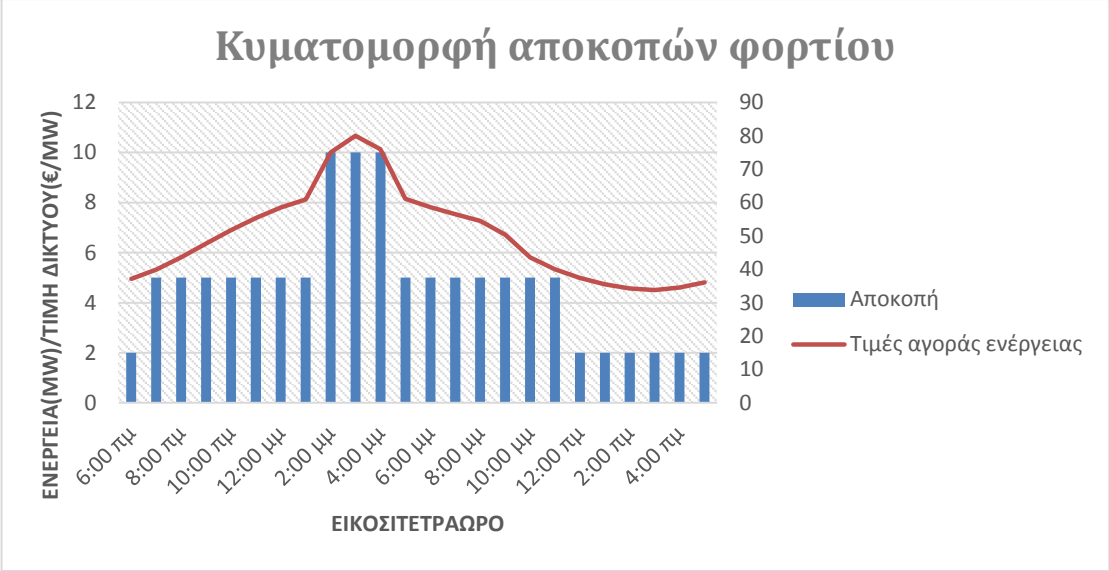
Α)


Συνολική Κατανάλωση VPP
ΕΝΕΡΓΕΙΑ(MW)/ΤΙΜΗ ΔΙΚΤΥΟΥ(€/MWH)
25
20
15
10
5
0
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
6:00 πμ
8:00 πμ
10:00 πμ
12:00 μμ
2:00 μμ
4:00 μμ
6:00 μμ
8:00 μμ
10:00 μμ
12:00 πμ
2:00 πμ
4:00 πμ
ΕΙΚΟΣΙΤΕΤΡΑΩΡΟ
Αποκοπτόμενο
Ευέλικτο
Ελαστικό
Μη Ευέλικτο
Τιμές αγοράς ενέργειας

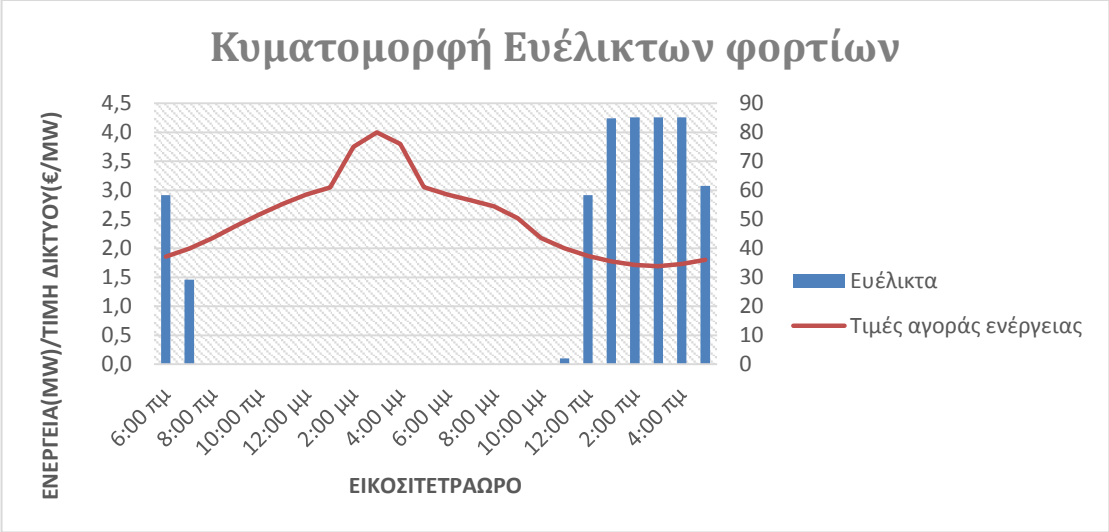
Β)


Συμβατική καμπύλη ζήτησης VPP
ΕΝΕΡΓΕΙΑ(MW)/ ΤΙΜΗ ΔΙΚΤΟ(€/MW)
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
6:00 πμ
8:00 πμ
10:00 πμ
12:00 μμ
2:00 μμ
4:00 μμ
6:00 μμ
8:00 μμ
10:00 μμ
12:00 πμ
2:00 πμ
4:00 πμ
ΕΙΚΟΣΙΤΕΤΡΑΩΡΟ
Συμβατική καμπύλη ζήτησης VPP
Τιμές αγοράς ενέγειας

Γ)



Δ)



Ε)

<u>Εικόνα 5.2</u> Καμπύλες λειτουργίας των συμμετεχόντων στο VPP

Α) Καμπύλες παραγωγής - αποκοπής φορτίων.

Β) Καμπύλες ζήτησης.

Γ)Καμπύλη ζήτησης του VPP από το ανάντη δίκτυο.

Δ)Καμπύλη φορτίου που αποκόπτεται.

Ε)Καμπύλη ζήτησης ευέλικτων φορτίων.

6.3 Ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στο VPP με G2V λειτουργία

Στην συγκεκριμένη ενότητα θα εξεταστεί η λειτουργία του VPP όταν ενσωματώνουμε τα ηλεκτρικά οχήματα χωρίς βέβαια να έχουν την δυνατότητα να προσφέρουν ενέργεια πίσω στο δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή, τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να θεωρηθούν σαν ευέλικτα φορτία με τη διαφορά ότι τα ηλεκτρικά οχήματα απαιτούν κάποιους επιπρόσθετους περιορισμούς που αφορούν τις ανάγκες μετακίνησης τους.

Τα χαρακτηριστικά του στόλου ηλεκτρικών οχημάτων που θα εξετάσουμε παρουσιάζονται παρακάτω.

Ο στόλος των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελείται από οχήματα τύπου L7e και M1 των οποίων τα τεχνικά χαρακτηριστικά αναγράφονται στον πίνακα 5.3 που ακολουθεί. Επίσης, όσον αφορά την στοχαστική πρόβλεψη των ταξιδιών των ηλεκτρικών οχημάτων έχουμε θεωρήσει τα παρακάτω:

- Στο χρονικό διάστημα από τις 6:00 π.μ. μέχρι τις 9:00 π.μ. θεωρούμε ότι όλα τα ηλεκτρικά οχήματα είναι πλήρως φορτισμένα στις 6:00 π.μ. Επιπλέον, κατά το παραπάνω χρονικό διάστημα όλα τα ηλεκτρικά οχήματα θα έχουν πραγματοποιήσει τουλάχιστον ένα ταξίδι.
- Στο χρονικό διάστημα από τις 10:00 π.μ. μέχρι τις 15:00 μ.μ. θεωρούμε ότι όλα ανεξαρτήτως είναι σταθμευμένα και συνδεδεμένα με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Παρόλα αυτά θεωρούμε ότι ένας μικρός αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να επιτελέσει ακόμα ένα ταξίδι.
- Στο χρονικό διάστημα από τις 16:00 μ.μ. μέχρι τις 19:00 μ.μ. θεωρούμε ότι τα ηλεκτρικά οχήματα επιστρέφουν στο σπίτι όπου ξανασυνδέονται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.
- Στο χρονικό διάστημα από τις 20:00 μ.μ. μέχρι τις 3:00 π.μ. θεωρούμε ότι απρόσμενα ένας μικρός αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων επιστρέφει και συνδέεται στο δίκτυο αλλά προπάντων μετά τις 3:00 π.μ. θεωρούμε ότι όλα είναι συνδεδεμένα με το δίκτυο.
- Στο χρονικό διάστημα από τις 3:00 π.μ. μέχρι τις 5:00 π.μ. όλα τα ηλεκτρικά οχήματα είναι συνδεδεμένα με το δίκτυο και δεν συμβαίνει καμία απρόοπτη αναχώρηση κανενός οχήματος.

Όσον αφορά τώρα την ημερήσια χιλιομετρική απόσταση που επιτελούν τα ηλεκτρικά οχήματα θεωρούμε μια κανονική κατανομή με μέση τιμή τα 40 χιλιόμετρα και την τυπική απόκλιση να ισούται με 5 χιλιόμετρα. Ομοίως, για τον χρόνο άφιξης και αναχώρησης των ηλεκτρικών οχημάτων θεωρήσαμε δυο κανονικές κατανομές με μέση τιμή στις 7:30 π.μ. και 17:30 μ.μ., με την τυπική απόκλιση να ισούται με 30 λεπτά αντίστοιχα. Ενδεικτικό παράδειγμα του αριθμού των συνδεδεμένων οχημάτων ανά ώρα ενός στόλου 1000 ηλεκτρικών οχημάτων απεικονίζεται στην εικόνα 5.3.1.

Τέλος, ως προς τον σταθμό φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων θεωρήσαμε ένα μονοφασικό σταθμό φόρτισης σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές IEC 62196-1.

	Πλήθος οχημάτων	**Χωρητικότητα μπαταρίας (kwh)**	**Κατανάλωση (kwh/km)**
Τύπος 1	5%	53	0.127
Τύπος 2	20%	26	0.157
Τύπος 3	20%	30	0.14
Τύπος 4	25%	16	0.125
Τύπος 5	30%	24	0.21

Πίνακας 5.3. Τεχνικών χαρακτηριστικών των οχημάτων

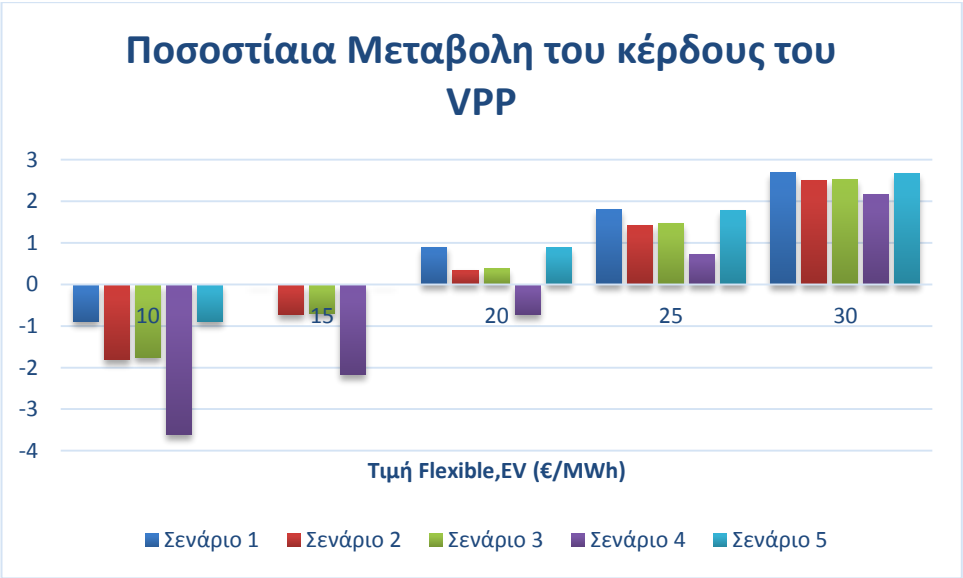
Εικόνα 5.3.1 Αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο ανά ώρα

Αρχικά θα μελετήσουμε 5 διαφορετικά σενάρια όπου ενσωματώνονται διαφορετικοί στόλοι ηλεκτρικών οχημάτων με διαφορετικές ενεργειακές ανάγκες ο καθένας τους.

1. Σενάριο Πρώτο: Στόλος που αποτελείται από 1000 ηλεκτρικά οχήματα με τα χαρακτηριστικά που παρουσιάστηκαν παραπάνω. (1000EVs, Trips)
2. Σενάριο Δεύτερο: Στόλος που αποτελείται από 1000 ηλεκτρικά οχήματα, στον οποίο, το ενεργειακό προφίλ κάθε οχήματος είναι διπλάσιο σε σύγκριση με το αντίστοιχο του πρώτου σεναρίου. (1000EVs, 2*Trips)

3. Σενάριο Τρίτο: Στόλους που αποτελείται από 2000 ηλεκτρικά οχήματα με τα χαρακτηριστικά του πρώτου σεναρίου (2000EVs, Trips)
4. Σενάριο Τέταρτο: Στόλος που αποτελείται από 2000 ηλεκτρικά οχήματα, στον οποίο, το ενεργειακό προφίλ κάθε οχήματος είναι διπλάσιο σε σύγκριση με το αντίστοιχο ενεργειακό προφίλ κάθε ηλεκτρικού οχήματος του τρίτου σεναρίου. (2000EVs, 2*Trips)
5. Σενάριο Πέμπτο: Στόλος που αποτελείται από 500 ηλεκτρικά οχήματα, στον οποίο, το ενεργειακό προφίλ κάθε οχήματος είναι διπλάσιο σε σύγκριση με το αντίστοιχο ενεργειακό προφίλ κάθε ηλεκτρικού οχήματος του πρώτου σεναρίου. (500EVs, 2*Trips).

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ενέργεια που καταναλίσκεται για να φορτίσουν τα ηλεκτρικά οχήματα θα συμβολίζεται ως «Ισχύς φόρτισης HO» ενώ η ενέργεια που προσφέρεται πίσω στο VPP από τα ηλεκτρικά οχήματα όταν εκφορτίζονται θα συμβολίζεται ως «Ισχύς εκφόρτισης HO» στα διαγράμματα που ακολουθούν.



Εικόνα 5.3.2

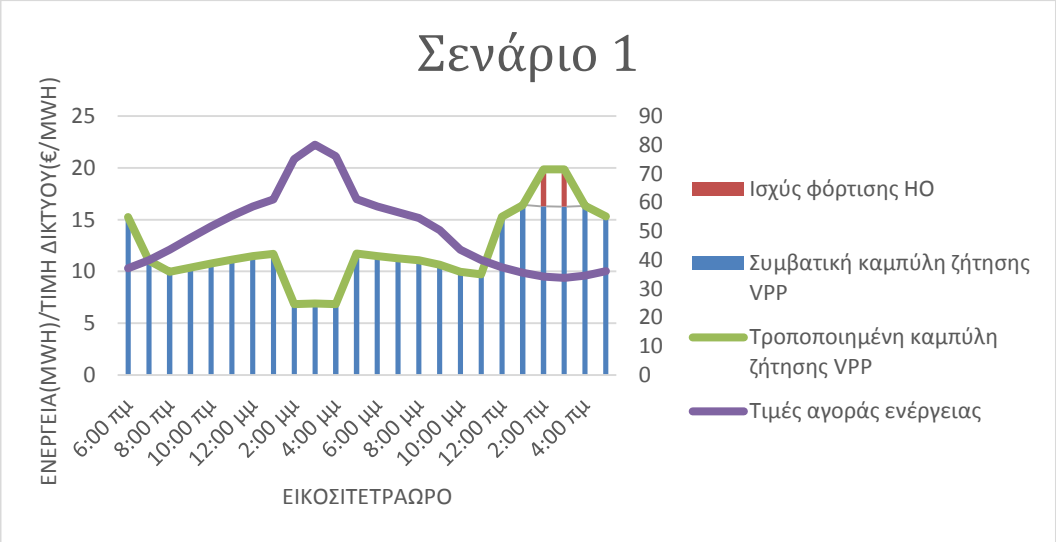
Ποσοστιαία μεταβολή του κέρδους του aggregator καθώς μεταβάλλεται η τιμή των ευέλικτων φορτίων και των ηλεκτρικών οχημάτων για καθένα από τα πέντε σενάρια.

Αξίζει να αναφερθεί ότι στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται η ποσοστιαία μεταβολή του κέρδους σε σύγκριση με το κέρδος του aggregator όταν στο VPP δεν έχουν ενσωματωθεί ακόμα τα ηλεκτρικά οχήματα.Το συγκεκριμένο σενάριο αναλύθηκε στην υποενότητα 5.2.

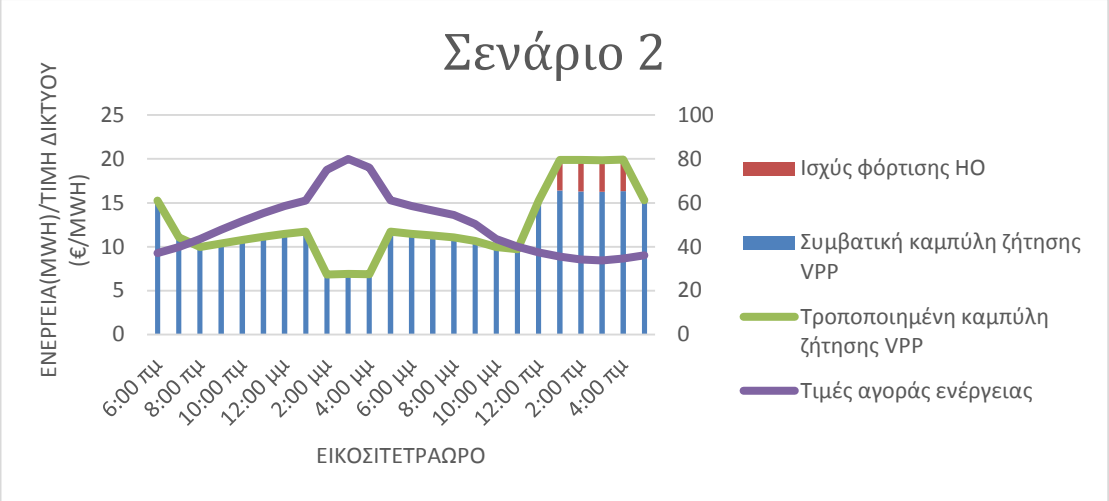
Από το παραπάνω διάγραμμα (Εικόνα 5.3.2) παρατηρούμε ότι για να εξασφαλίσει ο aggregator κέρδος από την λειτουργία του VPP είναι αναγκασμένος να

αυξήσει τη τιμή που χρεώνει τα ευέλικτα φορτία (συμπεριλαμβανομένων και των ηλεκτρικών οχημάτων). Πιο συγκεκριμένα, για χαμηλά ποσοστά διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων (σενάρια 1 και 5) απαιτείται μικρή αύξηση της τιμής χρέωσης 15€/MWh της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων. Αντίθετα, όσο αυξάνεται ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων και οι ενεργειακές τους ανάγκες για μετακίνηση, η προσφερόμενη τιμή χρέωσης της ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων αυξάνεται σημαντικά φτάνοντας ακόμα και τα 30€/MWh. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι παρά το γεγονός ότι οι τιμές χρέωσης των ηλεκτρικών οχημάτων αυξάνονται, εν τούτοις παραμένουν χαμηλότερες σε σχέση με τις τιμές αγοράς λιανικής. Οι τιμές χρέωσης των ευέλικτων φορτίων και των ηλεκτρικών οχημάτων καθορίζουν σε σημαντικό βαθμό την ανταγωνιστικότητα του aggregator έναντι άλλων

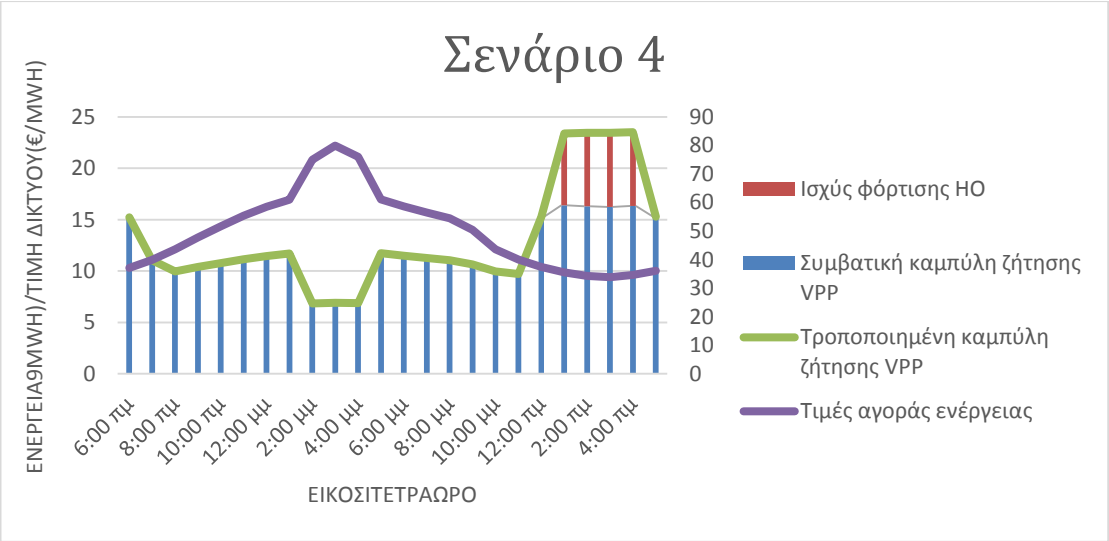
Στη συνέχεια, στην εικόνα 5.3.3 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα προφίλ της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων για τρία από τα εξεταζόμενα σενάρια (Σενάρια 1,2, 4). Η ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων δεν επηρεάζει το προφίλ λειτουργίας των υπόλοιπων φορτίων και μονάδων παραγωγής. Το επιπρόσθετο φορτίο φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων εξυπηρετείται από το ανάντη δίκτυο τις ώρες με χαμηλές τιμές ενέργειας.



A)



Β)



Γ)

<u>Εικόνα 5.3.3</u> Καμπύλες λειτουργίας των συμμετεχόντων του VPP για G2V λειτουργία

Α)Καμπύλη ζήτησης του VPP από το ανάντη δίκτυο όταν ενσωματώνεται σε αυτό ο στόλος του σεναρίου 1.

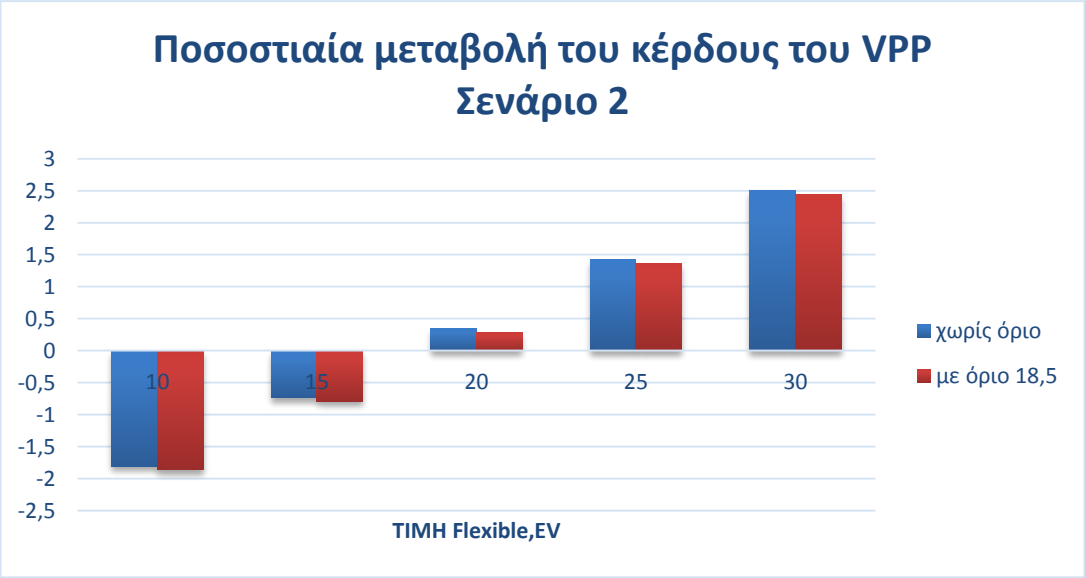
Β) Καμπύλη ζήτησης του VPP από το ανάντη δίκτυο όταν ενσωματώνεται σε αυτό ο στόλος του σεναρίου 2.

Γ) Καμπύλη ζήτησης του VPP από το ανάντη δίκτυο όταν ενσωματώνεται σε αυτό ο στόλος του σεναρίου 4.

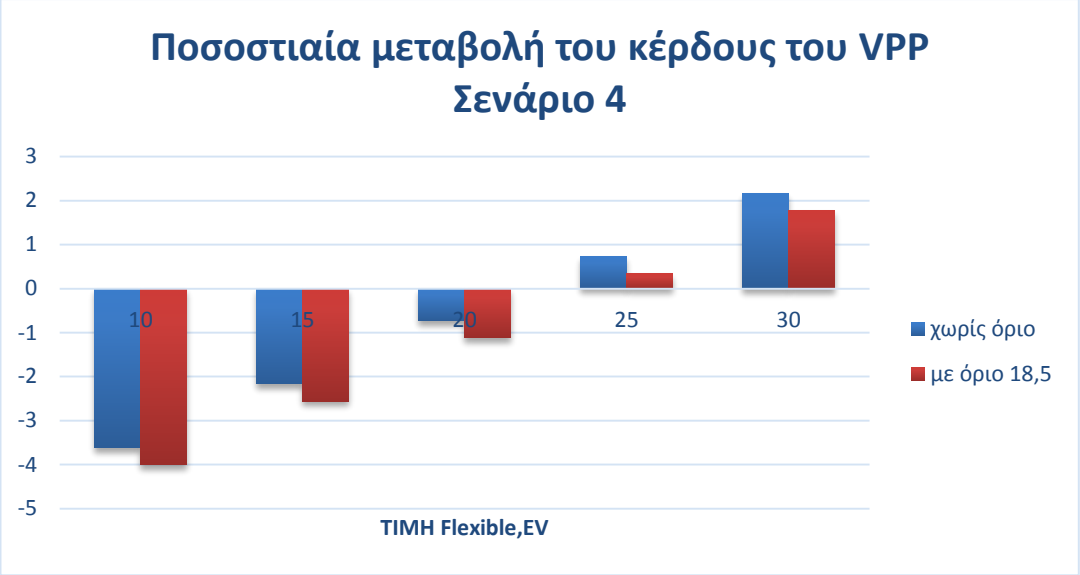
6.3.1 Εφαρμογή ορίου ισχύος 18.5 MW στη ζήτηση του VPP από το ανάντη δίκτυο

Το επιπρόσθετο φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων αυξάνει την αιχμή της ζήτησης από το δίκτυο. Ανάλογα και με το ποσοστό διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων και τη φόρτιση του δικτύου, η αιχμή ζήτησης μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην ομαλή λειτουργία του δικτύου (πχ. Υπερφόρτιση ενός Μ/Σ Υ.Τ/Μ.Τ.). Ο περιορισμός της αιχμής ζήτησης με τη χρήση ενός άνω ορίου ζήτησης θα επηρεάσει την λειτουργία του VPP καθώς και το κέρδος του aggregator. Στην συγκεκριμένη υποενότητα θα εξετάσουμε την συμπεριφορά του VPP όταν υιοθετείται ένα ανώτατο επιτρεπτό όριο ισχύος 18,5 MW που μπορεί να απορροφήσει το VPP από το ανάντη δίκτυο. Ειδικότερα, θα παρουσιάσουμε τυχόν αποκλίσεις στο κέρδος του aggregator καθώς επίσης θα παρουσιάσουμε και εκείνες τις οντότητες του VPP των οποίων η συμπεριφορά μεταβάλλεται.

Αρχικά θα εξετάσουμε την συμπεριφορά του VPP όταν ενσωματώνουμε σε αυτό το στόλο του δεύτερου και του τέταρτου σεναρίου. Η εικόνα 5.3.4 που ακολουθεί φανερώνει την μεταβολή του κέρδους του aggregator μεταξύ των περιπτώσεων που δεν έχει κάποιο όριο ισχύος το VPP ως προς την ισχύ που μπορεί να προμηθευτεί από το ανάντη δίκτυο και της περίπτωσης που έχει περιορισμό στα 18,5 MW.



A)



B)

<u>Εικόνα 5.3.4.</u> Ποσοστιαία μεταβολή του κέρδους του VPP για G2V λειτουργία με και χωρίς όριο(18,5MW)

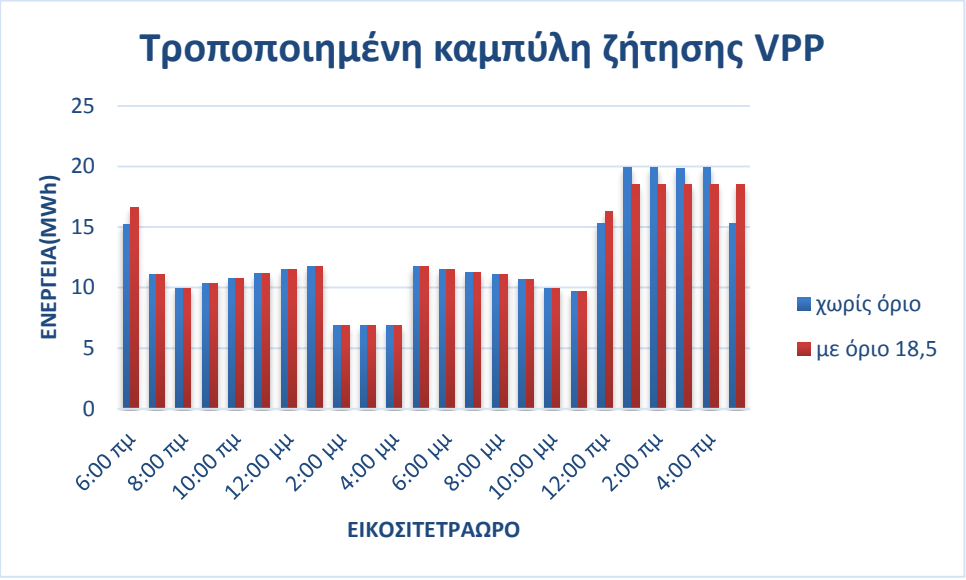
A) Με ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 2.

B) Με ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 4.

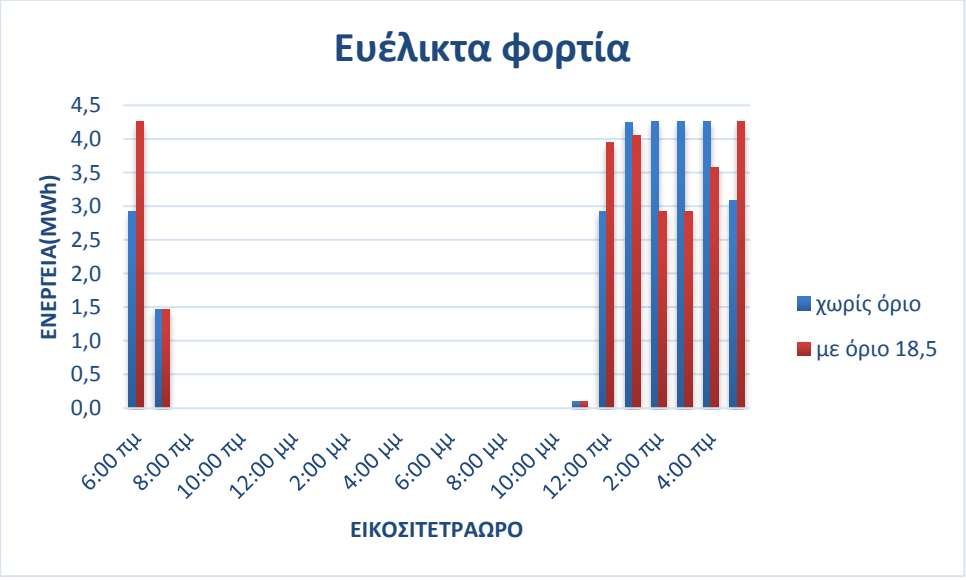
Από την εικόνα 5.3.4 παρατηρούμε ότι με την εφαρμογή του ορίου το VPP για το σενάριο 2 (1000EVs, 2*Trips) καθώς και για το σενάριο 4 (2000EVs, 2*Trips) παρατηρείται μείωση στα έσοδα. Πιο συγκεκριμένα, για τιμή κοστολόγησης των ευέλικτων φορτίων και των ηλεκτρικών οχημάτων με τιμή μικρότερη των 20 €/MWh το κέρδος του aggregator από τη λειτουργία του VPP μειώνεται, ενώ, για τιμή κοστολόγησης μεγαλύτερη ή ίση της 20 €/MWh τα έσοδα του aggregator αυξάνονται για το σενάριο 1 ενώ το αντίστοιχο μέγεθος για το σενάριο 4 είναι 25 €/MWh.

Η υιοθέτηση ορίου αιχμής ζήτησης περιορίζει το κέρδος του aggregator κατά ένα ποσοστό που εξαρτάται από τον αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων και τις ενεργειακές τους ανάγκες. Όσον αφορά στο ενεργειακό προφίλ ζήτησης του VPP, η υιοθέτηση του ορίου συνεπάγεται τη μετατόπιση μέρους της ζήτησης από τις πιο φθηνές ώρες σε μεταγενέστερες πιο ακριβές. Λόγω των περιορισμών μετακίνησης των ηλεκτρικών οχημάτων, δίνεται προτεραιότητα στην εξυπηρέτηση της ζήτησης για τη φόρτιση τους, τις βραδινές ώρες μετατοπίζοντας την εξυπηρέτηση των ευέλικτων φορτίων σε πιο ακριβές ώρες. Συμπεράσματα που προκύπτουν από την εικόνα 5.3.5 που ακολουθεί.

ΣΕΝΑΡΙΟ 2 - 1000EVs, 2*Trips



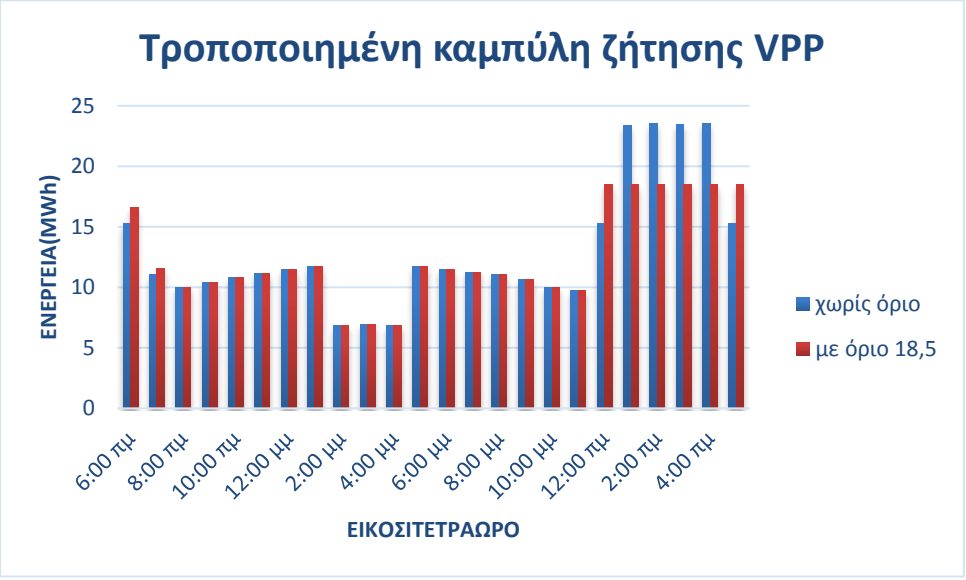
A)



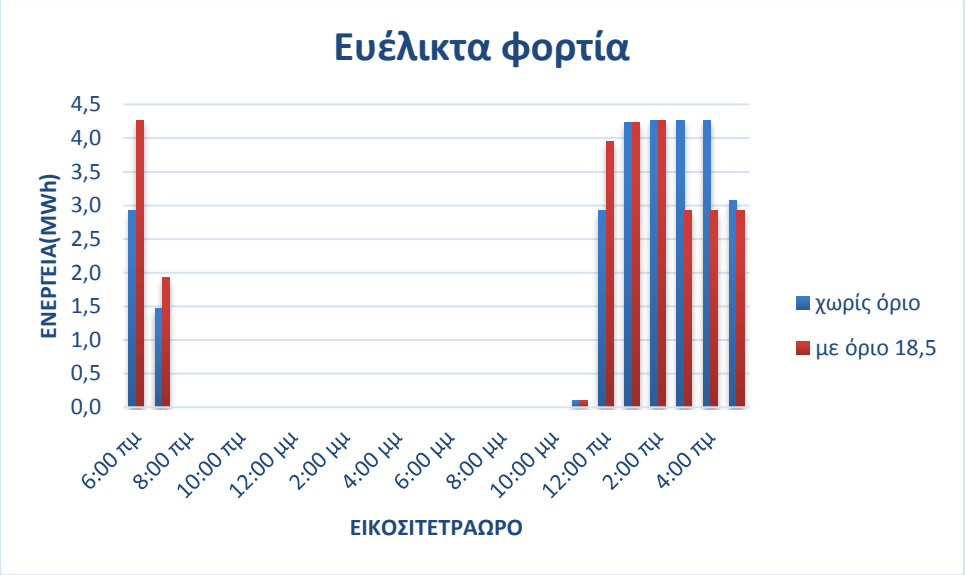
B)

Γ)

ΣΕΝΑΡΙΟ 4 - 1000EVs, 2*Trips



Δ)


Ευέλικτα φορτία
ΕΝΕΡΓΕΙΑ(MWh)
4,5
4,0
3,5
3,0
2,5
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
6:00 πμ
8:00 πμ
10:00 πμ
12:00 μμ
2:00 μμ
4:00 μμ
6:00 μμ
8:00 μμ
10:00 μμ
12:00 πμ
2:00 πμ
4:00 πμ
ΕΙΚΟΣΙΤΕΤΡΑΩΡΟ
χωρίς όριο
με όριο 18,5

Ε)

Ισχύς φόρτισης ΗΟ
ΕΝΕΡΓΕΙΑ(MWh)
8
7
6
5
4
3
2
1
0
6:00 πμ
8:00 πμ
10:00 πμ
12:00 μμ
2:00 μμ
4:00 μμ
6:00 μμ
8:00 μμ
10:00 μμ
12:00 πμ
2:00 πμ
4:00 πμ
ΕΙΚΟΣΙΤΕΤΡΑΩΡΟ
χωρίς όριο
με όριο 18,5

Ζ)

Η)

<u>Εικόνα 5.3.5.</u> Καμπύλες λειτουργίας των συμμετεχόντων στο VPP για G2V λειτουργία με και χωρίς όριο(18.5MW)

Α) Καμπύλη ζήτησης του VPP από το ανάντη δίκτυο με ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 2.

Β) Καμπύλη ζήτησης ευέλικτων φορτίων με ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 2.

Γ) Καμπύλη ισχύς φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων με ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 2.

Δ) Καμπύλη ζήτησης του VPP από το ανάντη δίκτυο με ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 4.

Ε) Καμπύλη ζήτησης ευέλικτων φορτίων με ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 4.

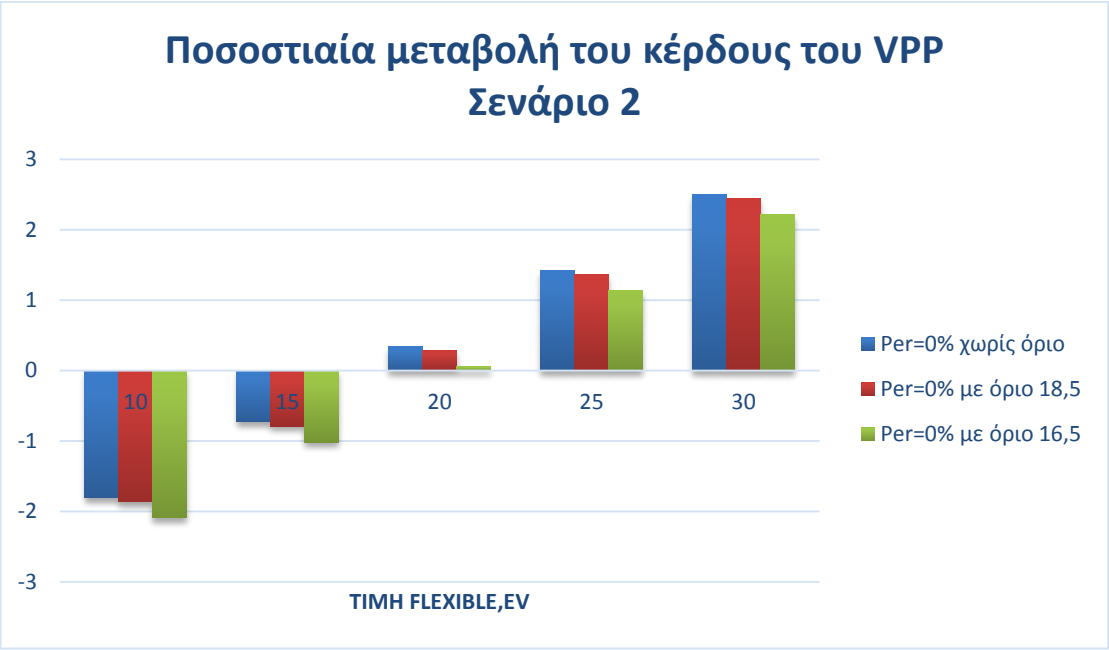
Ζ) Καμπύλη ισχύς φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων με ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 4.

Η) Καμπύλη αποκοπής φορτίου με ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 4.

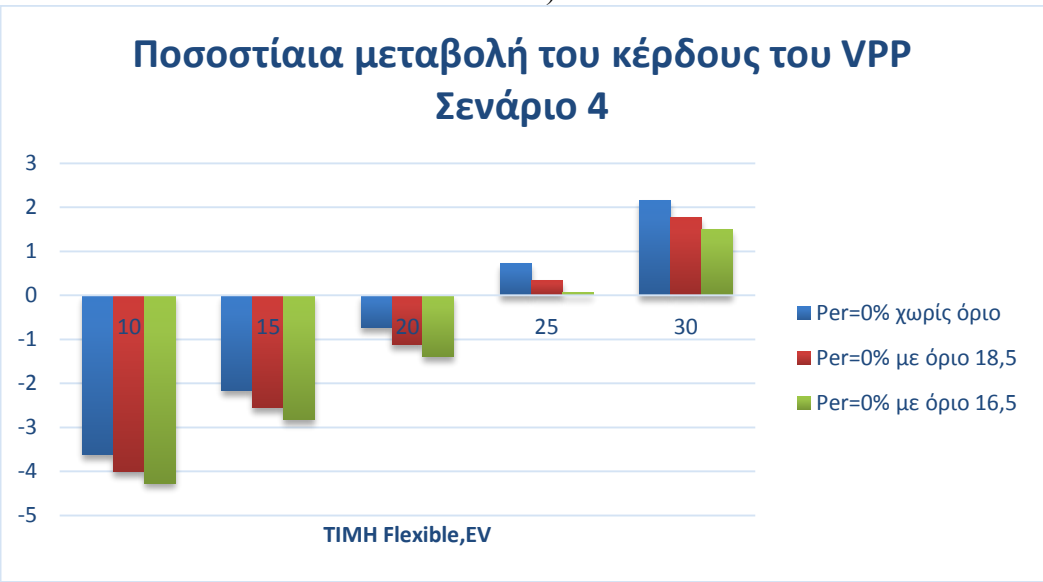
6.3.2 Εφαρμογή ορίου ισχύος 16.5 MW στη ζήτηση του VPP από το ανάντη δίκτυο

Στην προηγούμενη ενότητα, ο περιορισμός της αιχμής ζήτησης έγινε με τη χρήση ενός άνω ορίου στα 18,5 MW, το οποίο, είναι ελαστικό αν συγκριθεί με την αιχμή του VPP πριν την ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων η οποία υπολογιζόταν στα 16,5 MW.Επομένως, στην συγκεκριμένη ενότητα θα εξετάσουμε πως επηρεάζεται η λειτουργία του VPP με την εφαρμογή ενός σφιχτού ορίου ζήτησης στα 16,5 MW.

Ειδικότερα, θα εξετάσουμε την συμπεριφορά του VPP όταν ενσωματώνουμε σε αυτό το στόλο του δεύτερου και του τέταρτου σεναρίου. Η εικόνα 5.3.6 που ακολουθεί φανερώνει την μεταβολή του κέρδους του aggregator μεταξύ των περιπτώσεων που δεν έχει κάποιο όριο το VPP ως προς την ισχύ που μπορεί να προμηθευτεί από το ανάντη δίκτυο και των περιπτώσεων που έχει ένα ελαστικό όριο ισχύος στα 18,5 MW και ένα πιο σφιχτό όριο στα 16,5 MW.



A)



B)

Εικόνα 5.3.6. Ποσοστιαία μεταβολή του κέρδους του VPP για G2V λειτουργία με και χωρίς όριο(18.5MW, 16.5MW)

A) Με ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 2.

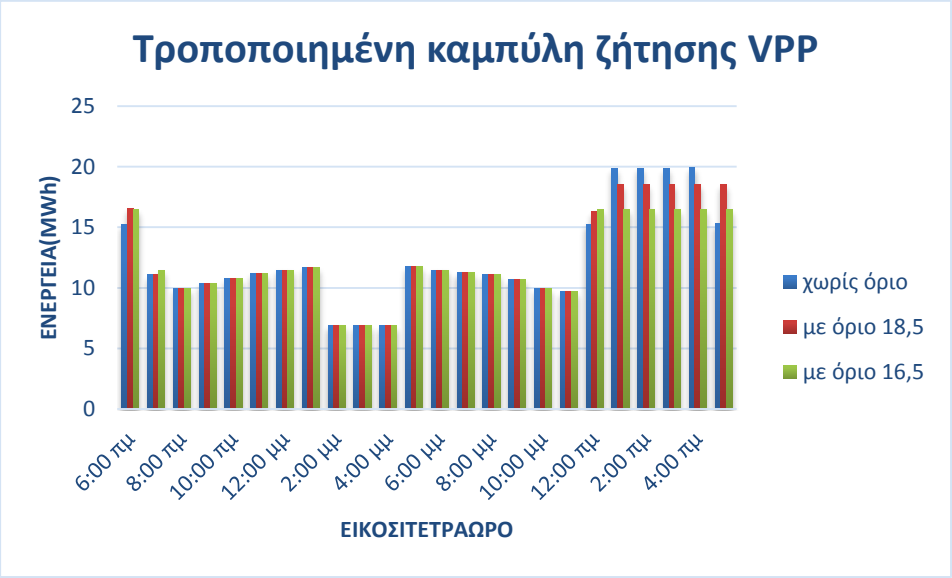
B) Με ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 4.

Με γνώμονα την εικόνα 5.3.6 παρατηρούμε ότι με την εφαρμογή ενός ακόμα πιο σφιχτού ορίου το VPP για το σενάριο 2 (1000EVs, 2*Trips) και για το σενάριο 4 (2000EVs, 2*Trips) επέρχεται περαιτέρω μείωση στα έσοδα του. Πιο συγκεκριμένα, για τιμή κοστολόγησης των ευέλικτων φορτίων και των ηλεκτρικών οχημάτων μεγαλύτερη ή ίση της 20 €/MWh τα έσοδα του aggregator αυξάνονται για το σενάριο 2 ενώ η αντίστοιχη τιμή για το σενάριο 4 είναι 25 €/MWh.

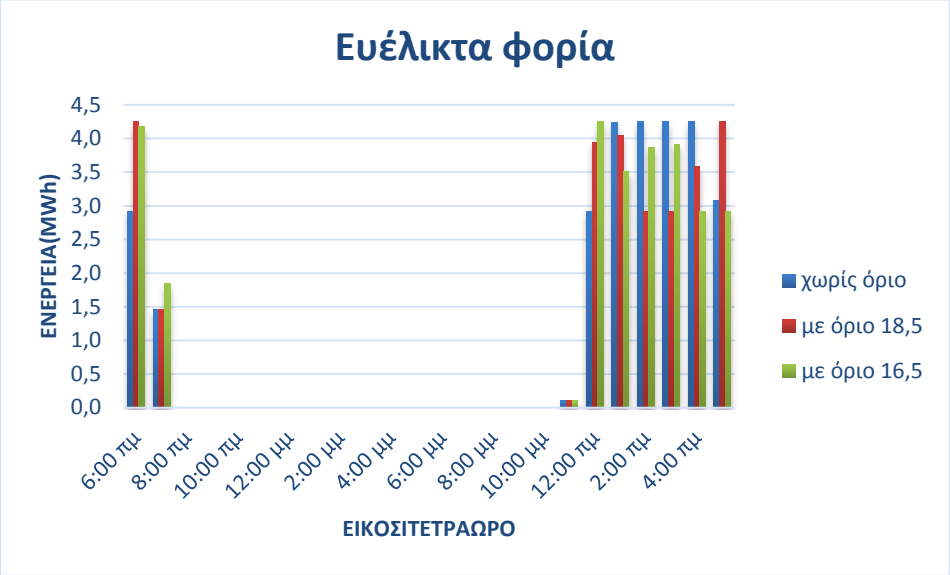
Και πάλι επιβεβαιώνεται το συμπέρασμα ότι η υιοθέτηση ορίου αιχμής ζήτησης περιορίζει το κέρδος του aggregator κατά ένα ποσοστό που εξαρτάται από τον αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων και τις ενεργειακές τους ανάγκες, καθώς όμως, και από το μέγεθος της τιμής του ορίου.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στην εικόνα 5.3.7 τα προφίλ της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων για το σενάριο 1 και 4 με την εφαρμογή ορίων στα 18,5 και 16,5 MW . Φανερώνεται ότι είναι εντονότερη η μετατόπιση μέρους της ζήτησης από τις πιο φθηνές ώρες σε μεταγενέστερες πιο ακριβές δίνοντας βέβαια προτεραιότητα στην εξυπηρέτηση της ζήτησης για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων τις βραδινές ώρες λόγω των περιορισμών μετακίνησης που διαθέτουν. Συγκεκριμένα, μετατοπίζει την εξυπηρέτηση των ευέλικτων φορτίων σε πιο ακριβές ώρες. Επιπλέον για την εξυπηρέτηση των οχημάτων τις βραδινές ώρες εξωθείται ο aggregator να αποκόψει περισσότερο φορτίο εκείνες τις ώρες.

ΣΕΝΑΡΙΟ 2 - 1000EVs, 2*Trips



A)


Ευέλικτα φορία
ΕΝΕΡΓΕΙΑ(MWh)
4,5
4,0
3,5
3,0
2,5
2,0
1,5
1,0
0,5
0,0
6:00 πμ
8:00 πμ
10:00 πμ
12:00 μμ
2:00 μμ
4:00 μμ
6:00 μμ
8:00 μμ
10:00 μμ
12:00 πμ
2:00 πμ
4:00 πμ
ΕΙΚΟΣΙΤΕΤΡΑΩΡΟ
χωρίς όριο
με όριο 18,5
με όριο 16,5

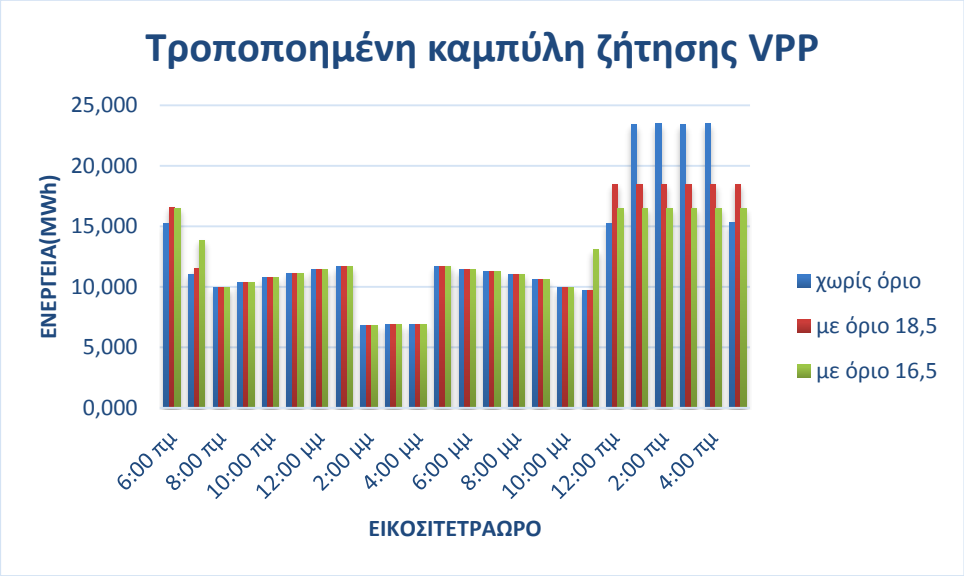
Β)

Ισχύς φόρτισης ΗΟ
ΕΝΕΡΓΕΙΑ(MWh)
4
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
6:00 πμ
8:00 πμ
10:00 πμ
12:00 μμ
2:00 μμ
4:00 μμ
6:00 μμ
8:00 μμ
10:00 μμ
12:00 πμ
2:00 πμ
4:00 πμ
ΕΙΚΟΣΙΤΕΤΡΑΩΡΟ
χωρίς όριο
με όριο 18,5
με όριο 16,5

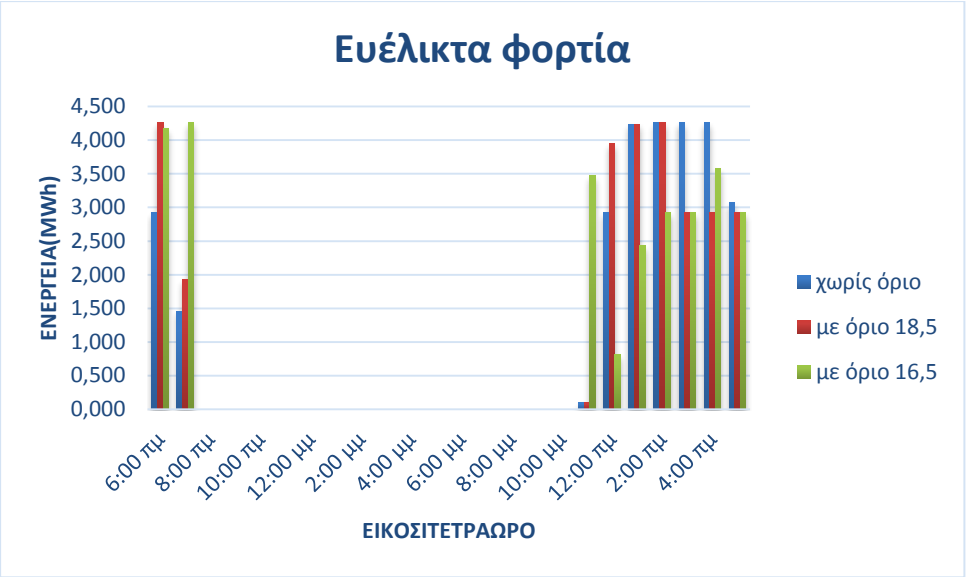
Γ)

Δ)

ΣΕΝΑΡΙΟ 4 - 2000EVs, 2*Trips



Ε)


Ευέλικτα φορτία
ΕΝΕΡΓΕΙΑ(MWh)
4,500
4,000
3,500
3,000
2,500
2,000
1,500
1,000
0,500
0,000
6:00 πμ
8:00 πμ
10:00 πμ
12:00 μμ
2:00 μμ
4:00 μμ
6:00 μμ
8:00 μμ
10:00 μμ
12:00 πμ
2:00 πμ
4:00 πμ
ΕΙΚΟΣΙΤΕΤΡΑΩΡΟ
χωρίς όριο
με όριο 18,5
με όριο 16,5

Z)

Ισχύς φόρτισης ΗΟ
ΕΝΕΡΓΕΙΑ(MWh)
8
7
6
5
4
3
2
1
0
6:00 πμ
8:00 πμ
10:00 πμ
12:00 μμ
2:00 μμ
4:00 μμ
6:00 μμ
8:00 μμ
10:00 μμ
12:00 πμ
2:00 πμ
4:00 πμ
ΕΙΚΟΣΙΤΕΤΡΑΩΡΟ
χωρίς όριο
με όριο 18,5
με όριο 16,5

H)

Θ)

Εικόνα 5.3.7. Καμπύλες λειτουργίας των συμμετεχόντων στο VPP για G2V λειτουργία με και χωρίς όριο(18.5MW, 16.5MW)

Α) Καμπύλη ζήτησης του VPP από το ανάντη δίκτυο με ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 2.

Β) Καμπύλη ζήτησης ευέλικτων φορτίων με ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 2.

Γ) Καμπύλη ισχύς φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων με ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 2.

Δ) Καμπύλη αποκοπής φορτίου με ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 2.

Ε) Καμπύλη ζήτησης του VPP από το ανάντη δίκτυο με ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 4.

Ζ) Καμπύλη ζήτησης ευέλικτων φορτίων με ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 4.

Η) Καμπύλη ισχύς φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων με ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 4.

Θ) Καμπύλη αποκοπής φορτίου με ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 4.

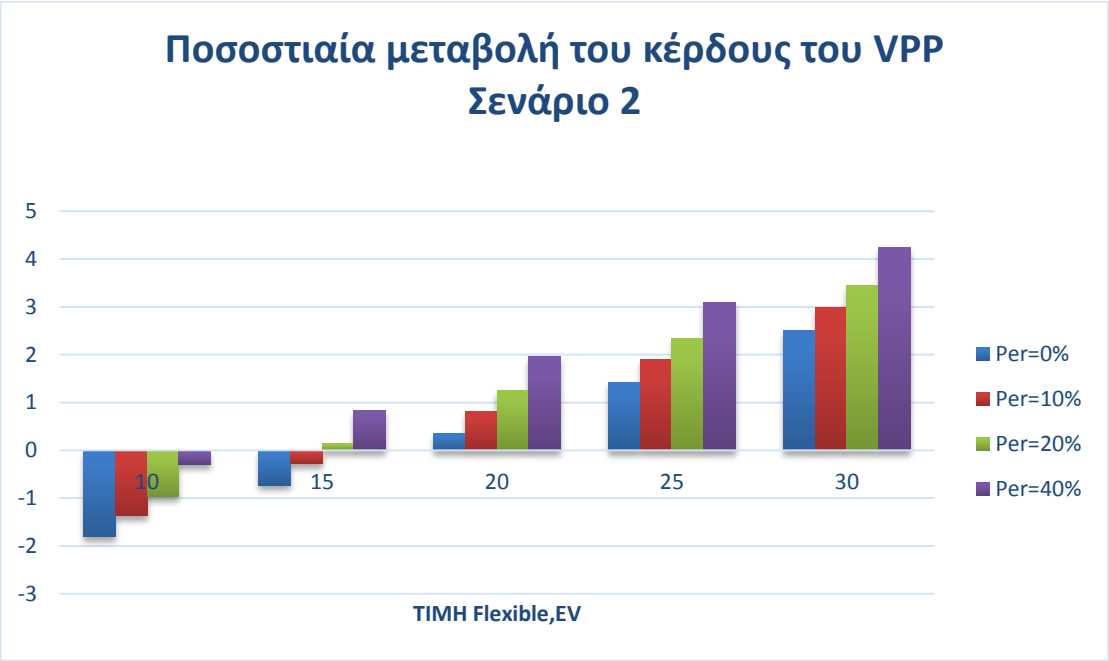
6.4 Ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στο VPP με V2G λειτουργία

Όπως προαναφέραμε το επιπρόσθετο φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων αυξάνει την αιχμή ζήτησης από το δίκτυο, φορτίο το ποιο αυξάνεται ακόμα περισσότερο λόγω της υιοθέτησης της V2G λειτουργίας

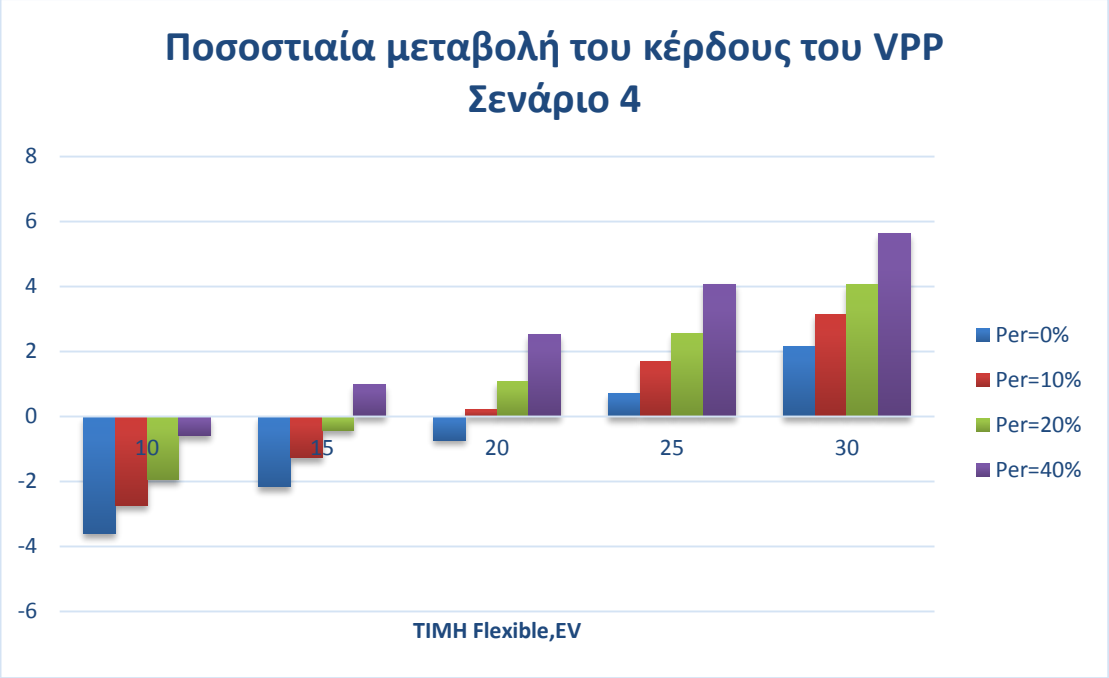
Στην συγκεκριμένη ενότητα θα εξεταστεί η λειτουργία του VPP όταν ενσωματώνουμε τα ηλεκτρικά οχήματα τα οποία πλέον έχουν την δυνατότητα να

προσφέρουν ενέργεια πίσω στο δίκτυο. Το γεγονός αυτό επιτυγχάνεται μέσω της V2G λειτουργίας.

Θα επικεντρωθούμε ξανά στα σενάρια 2 (1000EVs, 2*Trips) και 4 (2000EVs, 2*Trips) στα οποία θα παρουσιάσουμε την μεταβολή του κέρδους του aggregator ανάλογα με το ποσοστό της μπαταρίας των οχημάτων που έχει στην διάθεση του ο aggregator. Η μεταβλητή που μας δηλώνει το ποσοστό της μπαταρίας που δύναται να χρησιμοποιήσει ο aggregator είναι η μεταβλητή Per.Συγκεκριμένα στην εικόνα 5.4.1 που ακολουθεί παρουσιάζεται η ποσοστιαία μεταβολή του κέρδους του aggregator για V2G λειτουργία για τιμές Per=0,10,20,40 %. Αξίζει να αναφερθεί ότι η τιμή Per=0% ταυτίζεται με την θεώρηση των ηλεκτρικών οχημάτων ως ευέλικτα οχήματα τα οποία δεν έχουν την δυνατότητα να προσφέρουν ενέργεια πίσω στο δίκτυο, όπως ακριβώς μελετήθηκαν στην προηγούμενη ενότητα.



A)



B)

<u>Εικόνα 5.4.1.</u> Ποσοστιαία μεταβολή του κέρδους του VPP για V2G (Per=0,10,20,40%)

A) Με ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 2.

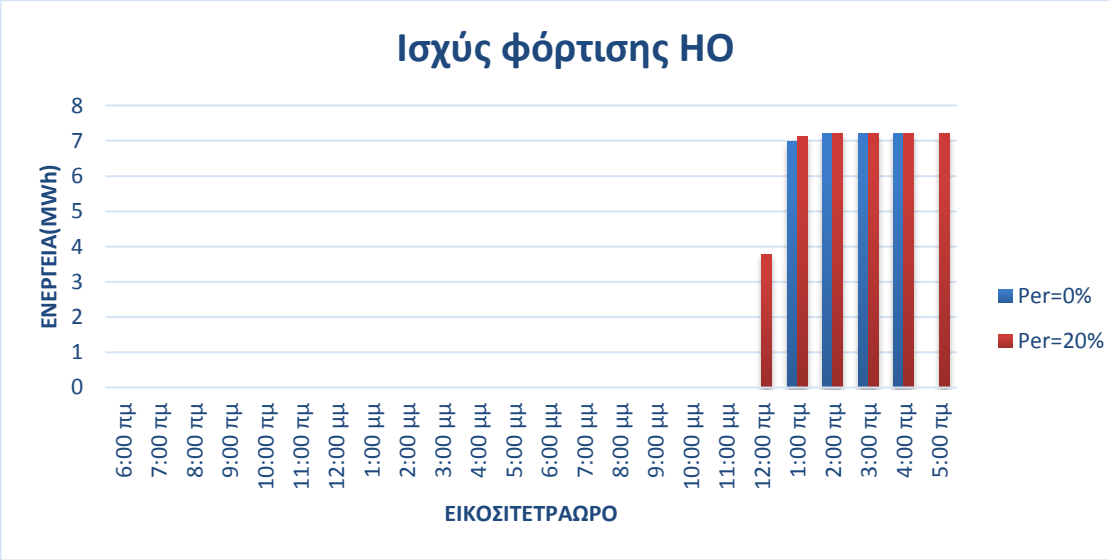
B) Με ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 4.

Από την εικόνα 5.4.1 είναι έκδηλο ότι για να εξασφαλίσει ο aggregator κέρδος από τη λειτουργία του VPP, ανεξαρτήτως της τιμής του Per, είναι αναγκασμένος να αυξήσει την τιμή που χρεώνει τα ευέλικτα φορτία (συμπεριλαμβανομένων και των ηλεκτρικών οχημάτων). Πιο συγκεκριμένα για χαμηλό ποσοστό διείσδυσης (σενάριο 1) και για Per=20 ή 40 % απαιτείται μικρή αύξηση της τιμής χρέωσης 15 €/MWh της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων ενώ για Per=0,10% απαιτείται μεγαλύτερη αύξηση της τιμής χρέωσης 20 €/MWh. Αντίθετα, όσο αυξάνεται ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων και οι ενεργειακές τους ανάγκες για μετακίνηση (σενάριο 4), η προσφερόμενη τιμή χρέωση της ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων αυξάνεται φτάνοντας τα 15 €/MWh για Per=40%, τα 20 €/MWh για Per=10,20% ενώ για Per=0% απαιτείται μεγαλύτερη αύξηση της τιμής χρέωσης στα 25 €/MWh. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι παρά το γεγονός ότι οι τιμές χρέωσης των ηλεκτρικών οχημάτων αυξάνονται, εν τούτοις παραμένουν χαμηλότερες σε σχέση με τις τιμές αγοράς λιανικής ενώ για συγκεκριμένο στόλο ηλεκτρικών οχημάτων όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του Per η αύξηση αυτή είναι ακόμα μικρότερη.

Στην συνέχεια στην εικόνα 5.4.2 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα προφίλ της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων για το σενάριο 4 (2000EVs, 2*Trips) για Per=20%.

Είναι φανερό ότι η ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων δεν επηρεάζει το προφίλ λειτουργίας των υπόλοιπων φορτίων και μονάδων παραγωγής αλλά μόνο την εισροή ενέργειας από το ανάντη δίκτυο. Συγκεκριμένα, μειώνεται η εισροή ενέργειας από το ανάντη δίκτυο τις ώρες εκείνες που η τιμή του δικτύου είναι υψηλή λόγω της εκφόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Ενώ, το επιπρόσθετο φορτίο φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων εξυπηρετείται από το ανάντη δίκτυο τις ώρες με χαμηλές τιμές ενέργειας.

A)



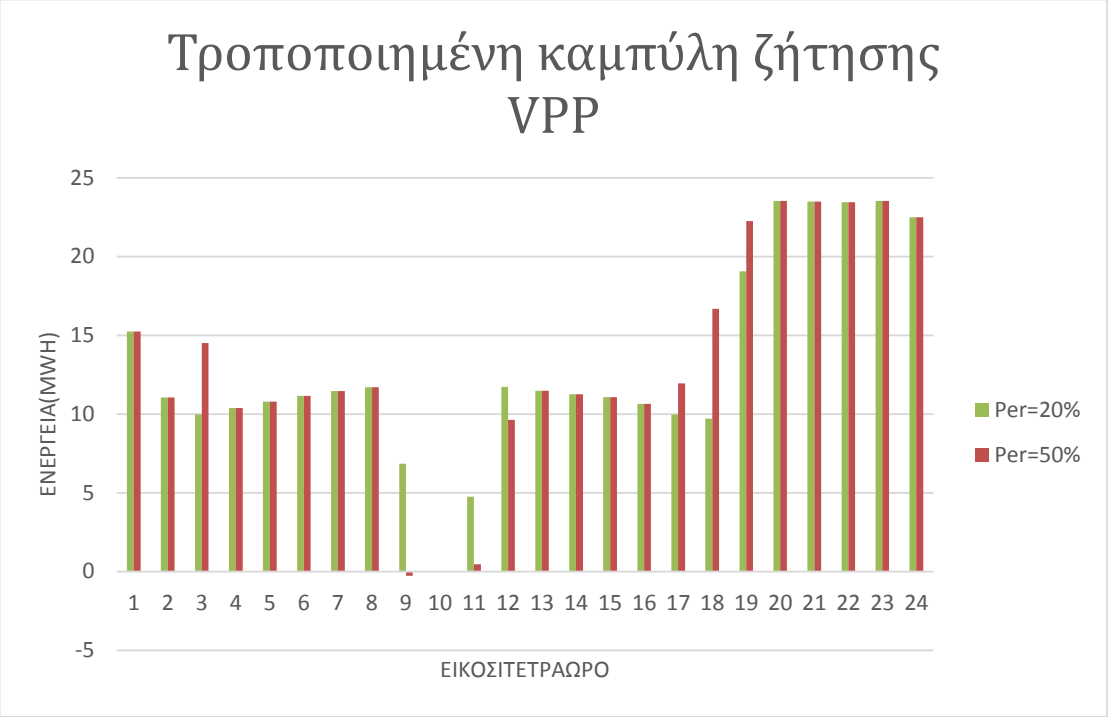
B)

<u>Εικόνα 5.4.2</u> Καμπύλες λειτουργίας των συμμετεχόντων στο VPP για V2G(Per=20%) με ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 4

A) Καμπύλη ζήτησης του VPP από το ανάντη δίκτυο.

B) Καμπύλη ισχύς φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων

Χαρακτηριστικά παρακάτω στην εικόνα 5.4.3 παρουσιάζεται το συγκριτικό διάγραμμα για την ενέργεια που λαμβάνει το VPP από το δίκτυο για το ίδιο σενάριο (2000EVs, 2*Trips) αλλά για μεγαλύτερο Per το οποίο ισούται με 50%, φτάνοντας μάλιστα στο σημείο όπου υπάρχει ανάστροφη ροή ενέργειας προς το ανάντη δίκτυο από το VPP τις ώρες με υψηλές τιμές ενέργειας.



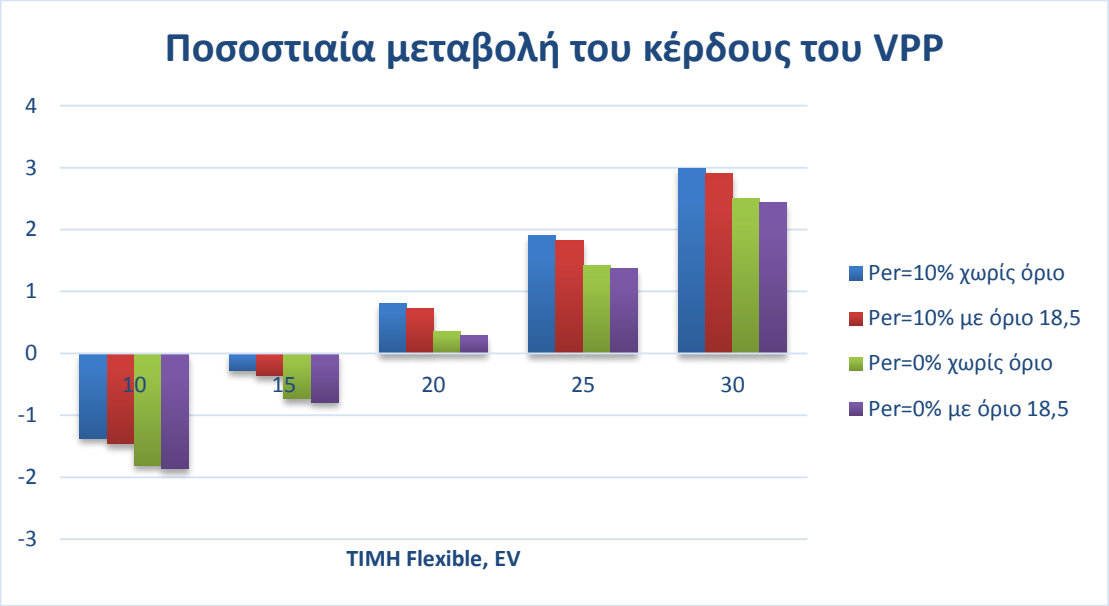
Εικόνα 5.4.3. Καμπύλη ζήτησης του VPP από το ανάντη δίκτυο για V2G(Per=50%) με ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 4

6.4.1 Εφαρμογή ορίου ισχύος 18.5 MW στη ζήτηση του VPP από το ανάντη δίκτυο

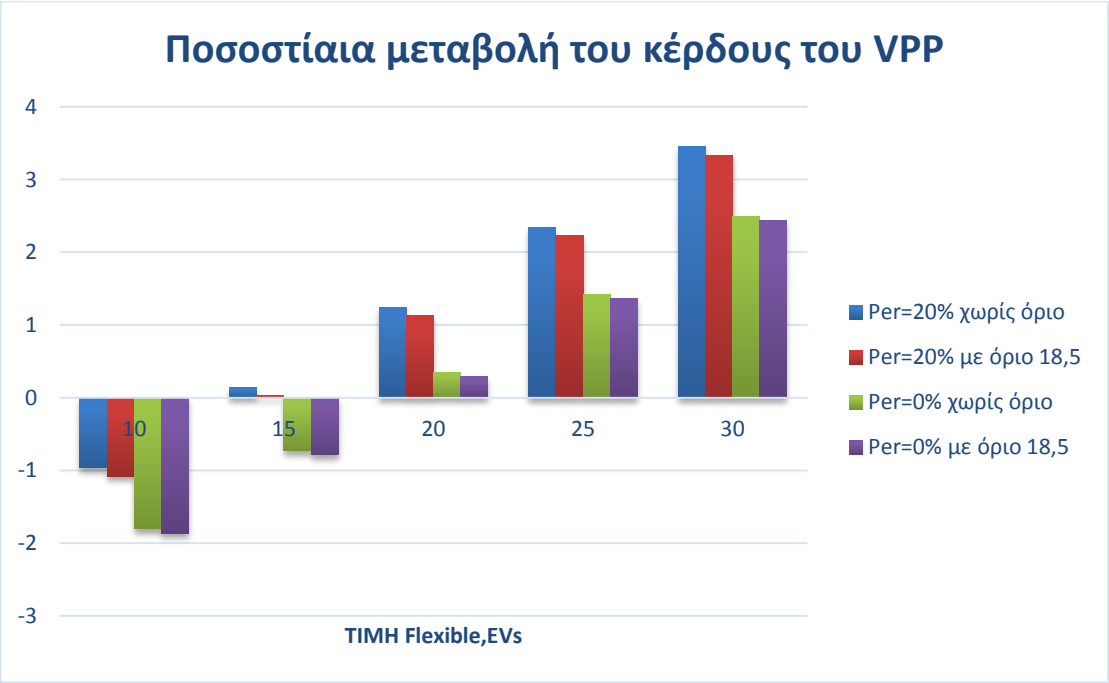
Στην συγκεκριμένη υποενότητα θα εξετάσουμε την συμπεριφορά του VPP όταν σε αυτό ενσωματώνεται στόλος ηλεκτρικών οχημάτων όμοιος με εκείνο του σεναρίου 2 (1000EVs, 2*Trips) και του σεναρίου 4 (2000EVs, 2*Trips) για V2G λειτουργία και για διάφορες τιμές του Per.Επίσης, το VPP υιοθετεί ένα ανώτατο επιτρεπτό όριο ισχύος 18,5 MW που μπορεί να απορροφήσει από το ανάντη δίκτυο.

Στην εικόνα 5.4.4 που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκριτικά διαγράμματα ως προς την ποσοστιαία μεταβολή του κέρδους του aggregator για τιμές Per=10,20,40% για V2G λειτουργία χωρίς όριο ισχύος από το ανάντη δίκτυο και για ανώτατο όριο ίσο με 18,5 MW και για τους δύο στόλους ηλεκτρικών οχημάτων.

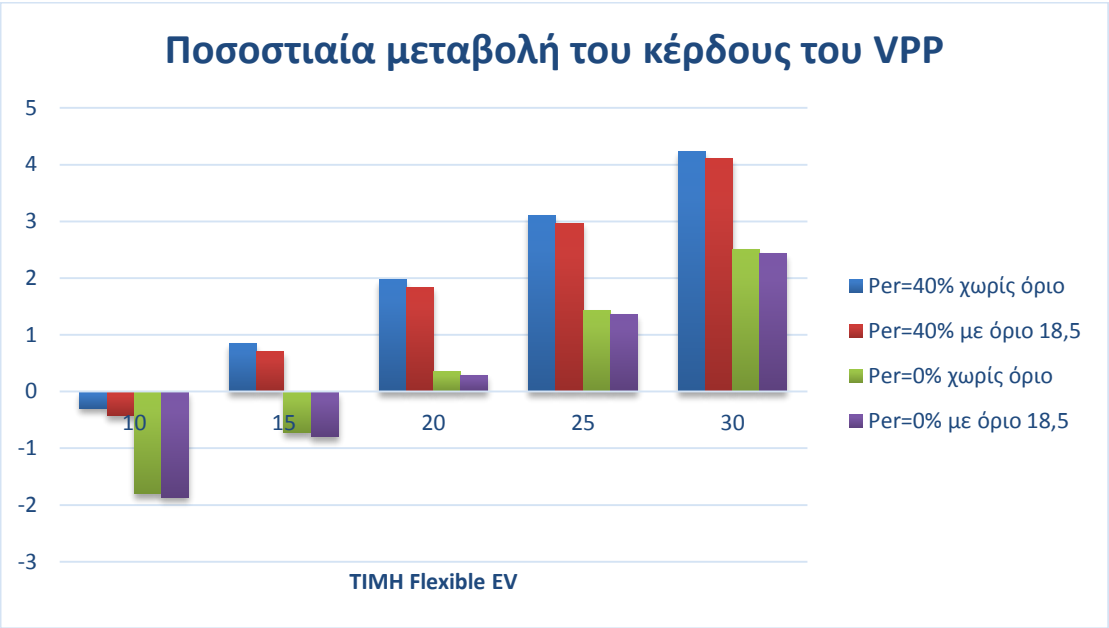
ΣΕΝΑΡΙΟ 2 – 1000EVs, 2*Trips



A)

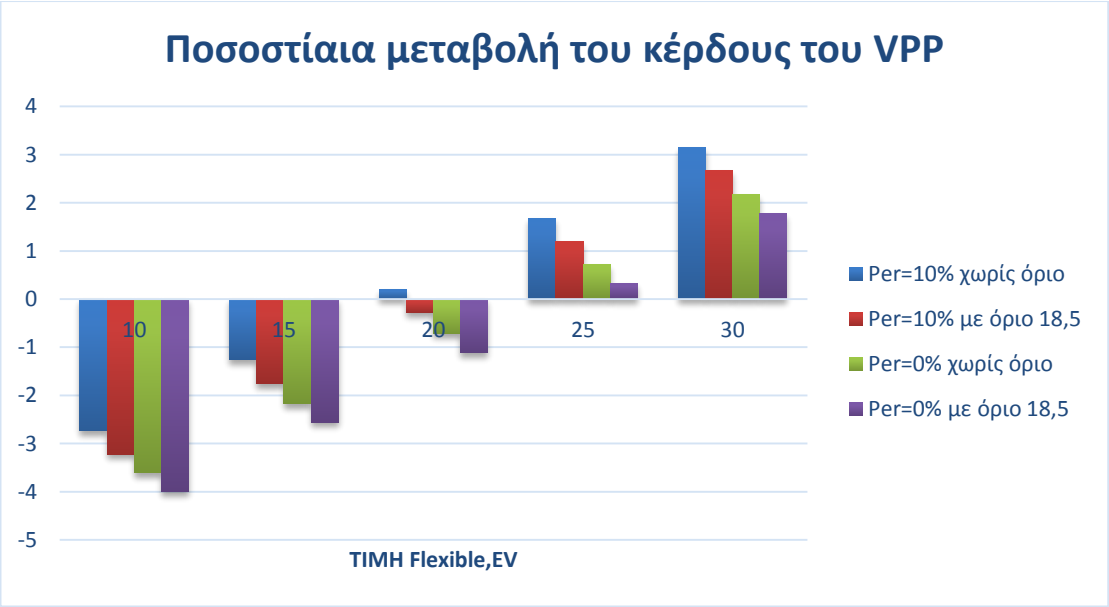


B)

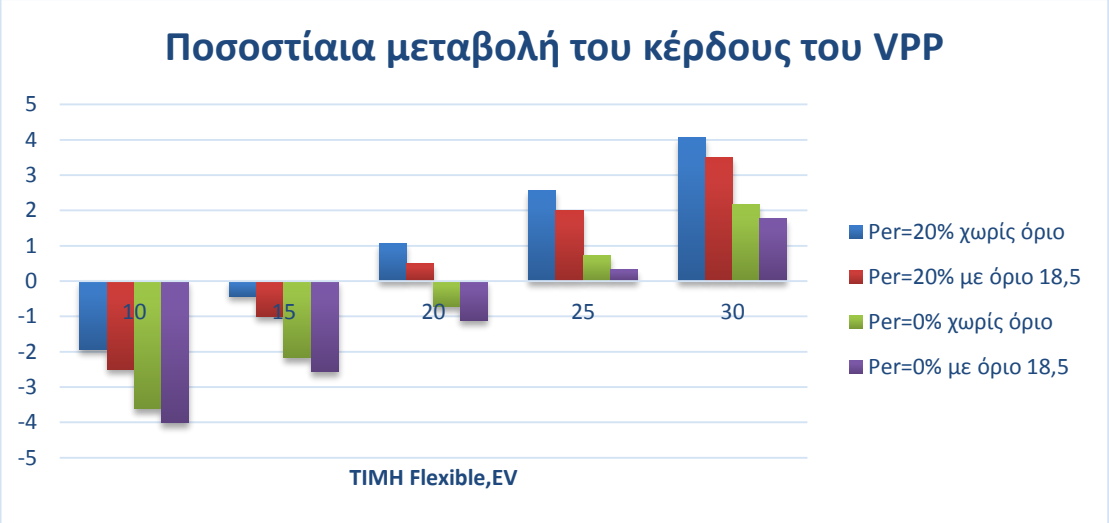


Γ)

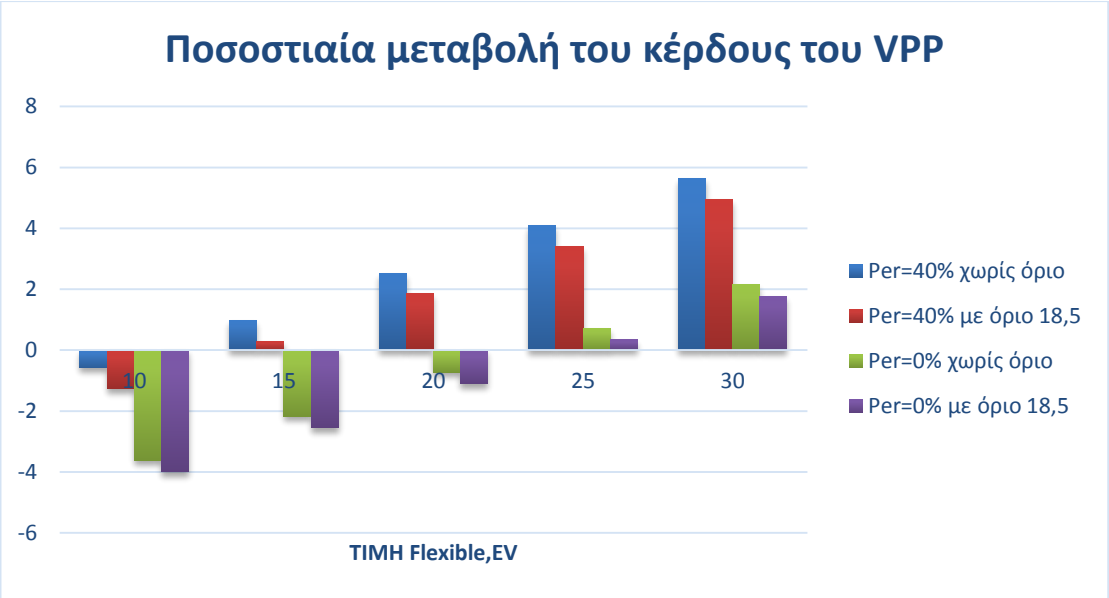
ΣΕΝΑΡΙΟ 4 – 2000EVs, 2*Trips



Δ)



E)



Z)

Εικόνα 5.4.4. Ποσοστιαία μεταβολή του κέρδους του VPP για V2G λειτουργία με και χωρίς όριο (18.5MW)

Α) *Με* ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 2 για τιμές Per=0% και 10%.

Β) *Με* ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 2 για τιμές Per=0% και 20%.

Γ) *Με* ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 2 για τιμές Per=0% και 40%.

Δ) *Με* ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 4 για τιμές Per=0% και 10%.

Ε) *Με* ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 4 για τιμές Per=0% και 20%.

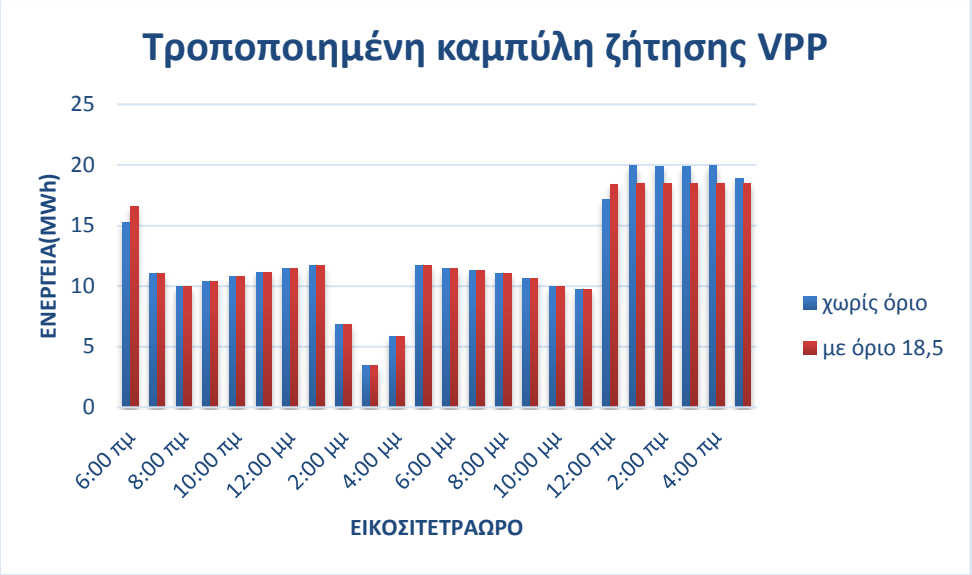
Ζ) *Με* ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 4 για τιμές Per=0% και 40%.

Λαμβάνοντας υπόψιν την παραπάνω εικόνα 5.4.4 παρατηρούμε ότι με την εφαρμογή του ορίου το VPP παρατηρεί μείωση στα έσοδα του ανεξαρτήτως της τιμής που λαμβάνει το Per και του στόλου ηλεκτρικών οχημάτων που διαχειρίζεται. Με αποτέλεσμα ο aggregator να είναι αναγκασμένος να αυξήσει την τιμή που χρεώνει τα ευέλικτα φορτία (συμπεριλαμβανομένων και των ηλεκτρικών οχημάτων). Πιο συγκεκριμένα, για χαμηλό ποσοστό διείσδυσης (σενάριο 1) και για Per=20 ή 40 % απαιτείται και πάλι μικρή αύξηση της τιμής χρέωσης 15 €/MWh της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων ενώ για Per=0,10% απαιτείται μεγαλύτερη αύξηση της τιμής χρέωσης 20 €/MWh. Συμπεραίνουμε δηλαδή ότι η εφαρμογή του ορίου για χαμηλό ποσοστό διείσδυσης δεν μετάβαλε την τιμή χρέωσης των οχημάτων απλά το μερίδιο κέρδους του aggregator.

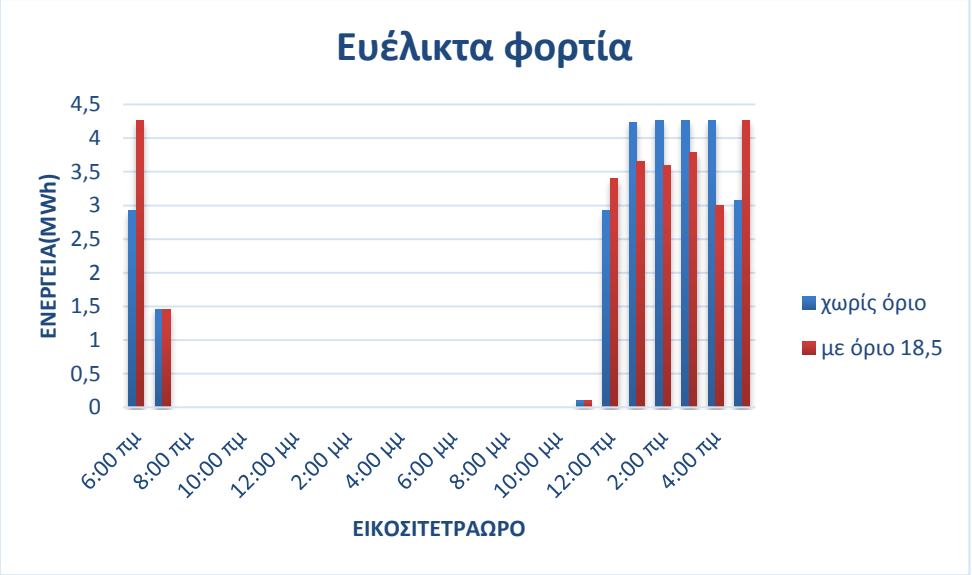
Αντίθετα, όσο αυξάνεται ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων και οι ενεργειακές τους ανάγκες για μετακίνηση (σενάριο 4), η προσφερόμενη τιμή χρέωση της ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων αυξάνεται φτάνοντας τα 20 €/MWh για Per=20,40% ενώ για Per=0% απαιτείται μεγαλύτερη αύξηση της τιμής χρέωσης 25 €/MWh. Παράλληλα η εφαρμογή του ορίου ανάγκασε τον aggregator να αυξήσει την τιμή χρέωσης για Per=10% από 20 €/MWh σε 25 €/MWh. Συμπεραίνουμε δηλαδή ότι η εφαρμογή του ορίου για υψηλό ποσοστό διείσδυσης ενδέχεται να μεταβάλει την τιμή χρέωσης των οχημάτων αλλά σίγουρα θα περιορίσει το μερίδιο κέρδους του aggregator.

Στην συνέχεια στην εικόνα 5.4.5 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα προφίλ της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων για το σενάριο 2 (1000EVs, 2*Trips) για Per=20% όπου τα συγκρίνουμε ενδεικτικά με τις αντίστοιχες οντότητες πριν την εφαρμογή του ορίου. Είναι φανερό ότι πλέον επηρεάζεται και το προφίλ λειτουργίας των ευέλικτων φορτίων και των αποκοπτόμενων φορτίων καθώς και η εισροή ενέργειας από το ανάντη δίκτυο. Όπως προείπαμε, λόγω των περιορισμών μετακίνησης των ηλεκτρικών οχημάτων, δίνεται προτεραιότητα στην εξυπηρέτηση της ζήτησης για τη φόρτιση τους τις βραδινές ώρες, στις οποίες ώρες, αυξάνεται το φορτίο που αποκόπτεται. Παράλληλα, μετατοπίζεται η εξυπηρέτηση των ευέλικτων φορτίων από τις πιο φθηνές ώρες σε μεταγενέστερες πιο ακριβές.

Παρατηρούμε από τα παραπάνω διαγράμματα της εικόνας 5.4.4 ότι η εφαρμογή ενός ορίου στο VPP ως προς την ισχύ που μπορεί να προμηθευτεί από το ανάντη δίκτυο επιδρά αρνητικά στα έσοδα του VPP. Χαρακτηριστικά παρατηρούμε ότι για το σενάριο 2 (1000EVs, 2*Trips) για Per=10% τα έσοδα του VPP είναι μειωμένα κατά 0,0847% ανεξαρτήτως της τιμής κοστολόγησης των ευέλικτων φορτίων και των ηλεκτρικών οχημάτων, το οποίο, επιδεινώνεται ακόμα περισσότερο όσο αυξάνεται η τιμή του Per.Χαρακτηριστικά το ποσοστό αυτό ανεβαίνει και γίνεται 0,11475% για Per=20% και 0,13021 για Per=40%.Παρόμοια είναι η κατάσταση που συμβαίνει και για το σενάριο 4 (2000EVs, 2*Trips) με τα ποσοστά να ανεβαίνουν σημαντικά και να γίνονται 0,4866% για Per=10%, 0,5672% για Per=20% και 0,6801% για Per=40%.


Τροποποιημένη καμπύλη ζήτησης VPP
ΕΝΕΡΓΕΙΑ(MWh)
25
20
15
10
5
0
6:00 πμ
8:00 πμ
10:00 πμ
12:00 μμ
2:00 μμ
4:00 μμ
6:00 μμ
8:00 μμ
10:00 μμ
12:00 πμ
2:00 πμ
4:00 πμ
ΕΙΚΟΣΙΤΕΤΡΑΩΡΟ
χωρίς όριο
με όριο 18,5

Α)


Ευέλικτα φορτία
ΕΝΕΡΓΕΙΑ(MWh)
4,5
4
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
6:00 πμ
8:00 πμ
10:00 πμ
12:00 μμ
2:00 μμ
4:00 μμ
6:00 μμ
8:00 μμ
10:00 μμ
12:00 πμ
2:00 πμ
4:00 πμ
ΕΙΚΟΣΙΤΕΤΡΑΩΡΟ
χωρίς όριο
με όριο 18,5

Β)

Ισχύς φόρτισης ΗΟ
ΕΝΕΡΓΕΙΑ(MWh)
4
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
6:00 πμ
8:00 πμ
10:00 πμ
12:00 μμ
2:00 μμ
4:00 μμ
6:00 μμ
8:00 μμ
10:00 μμ
12:00 πμ
2:00 πμ
4:00 πμ
ΕΙΚΟΣΙΤΕΤΡΑΩΡΟ
χωρίς όριο
με όριο 18,5

Γ)

Δ)

Εικόνα 5.4.5. *Καμπύλες λειτουργίας των συμμετεχόντων στο VPP για V2G(Per=20%) με* ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 2 με και χωρίς όριο (18.5MW)

Α) Καμπύλη ζήτησης του VPP από το ανάντη δίκτυο.

Β) Καμπύλη ζήτησης ευέλικτων φορτίων.

Γ) *Καμπύλη ισχύς φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων.*

Δ) *Καμπύλη αποκοπής φορτίου.*

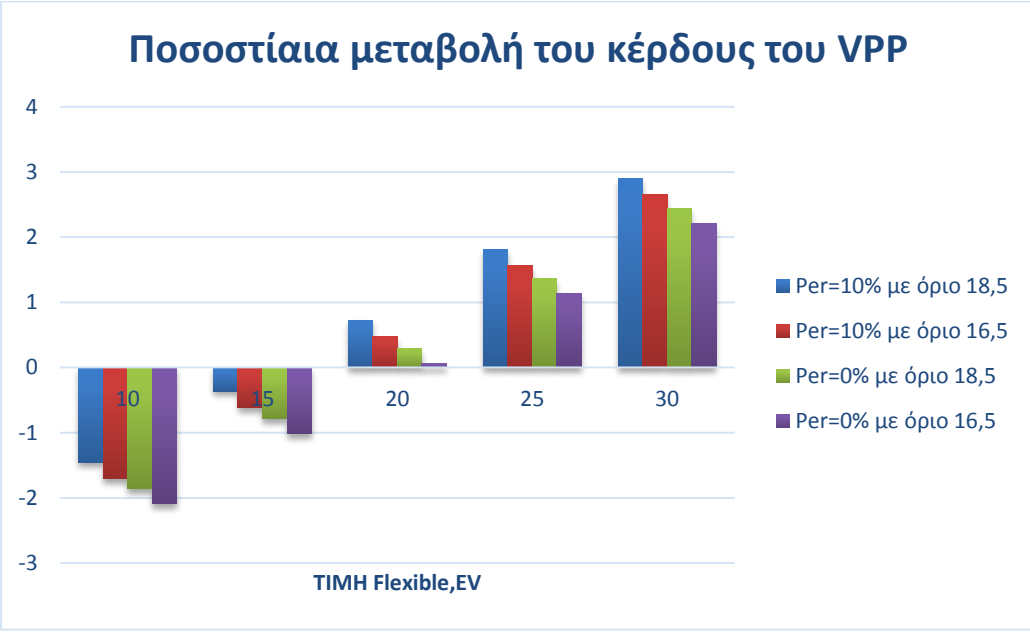
6.4.2 Εφαρμογή ορίου ισχύος 16.5 MW στη ζήτηση του VPP από το ανάντη δίκτυο

Στην συγκεκριμένη ενότητα θα εξετάσουμε πως επηρεάζεται η λειτουργία του VPP καθώς και το κέρδος του aggregator με την εφαρμογή ενός σφιχτού ορίου ζήτησης στα 16,5 MW το οποίο ισούται με το όριο αιχμής του VPP πριν την ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων. Ειδικότερα, θα παρουσιάσουμε τυχόν αποκλίσεις στο κέρδος του aggregator καθώς επίσης θα παρουσιάσουμε και εκείνες τις οντότητες του VPP των οποίων η συμπεριφορά μεταβάλλεται.

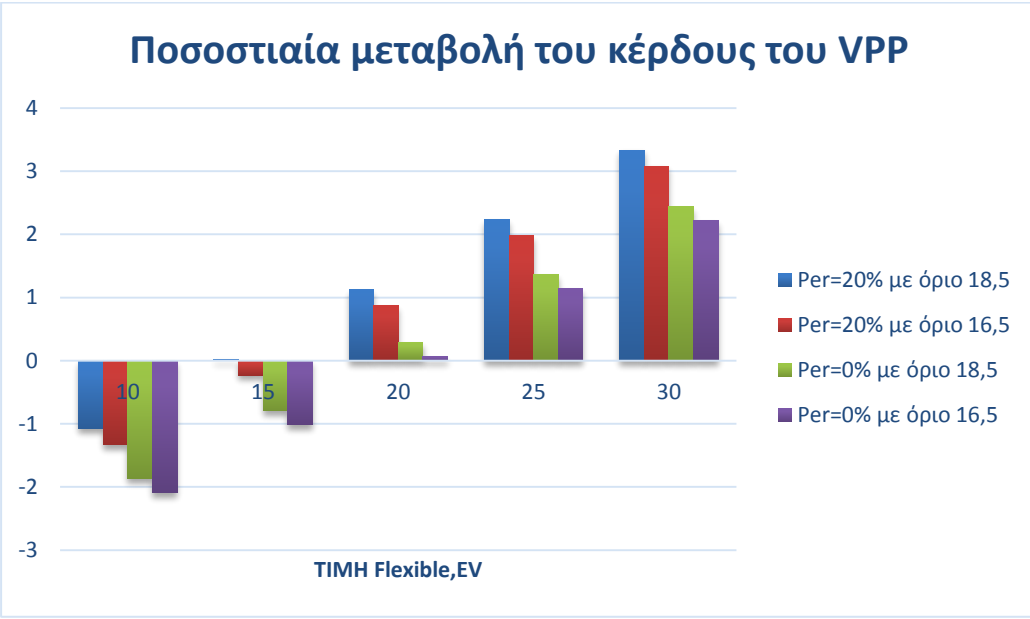
Θα εξετάσουμε την συμπεριφορά του VPP όταν ενσωματώνουμε σε αυτό το στόλο του δεύτερου και του τέταρτου σεναρίου.

Στην εικόνα 5.4.6 ακολουθούν δύο συγκριτικά διαγράμματα ως προς την ποσοστιαία μεταβολή του κέρδους του aggregator για τιμές Per=0,10,20,40% για τιμές ορίου στα 18,5 MW και 16,5 MW.

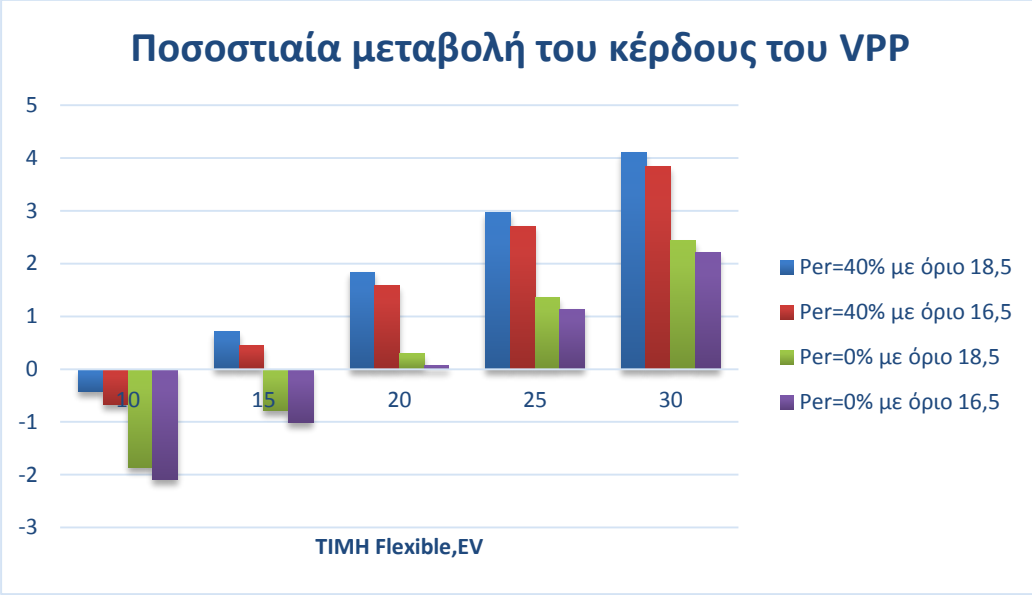
ΣΕΝΑΡΙΟ 2 – 1000EVs, 2*Trips



A)

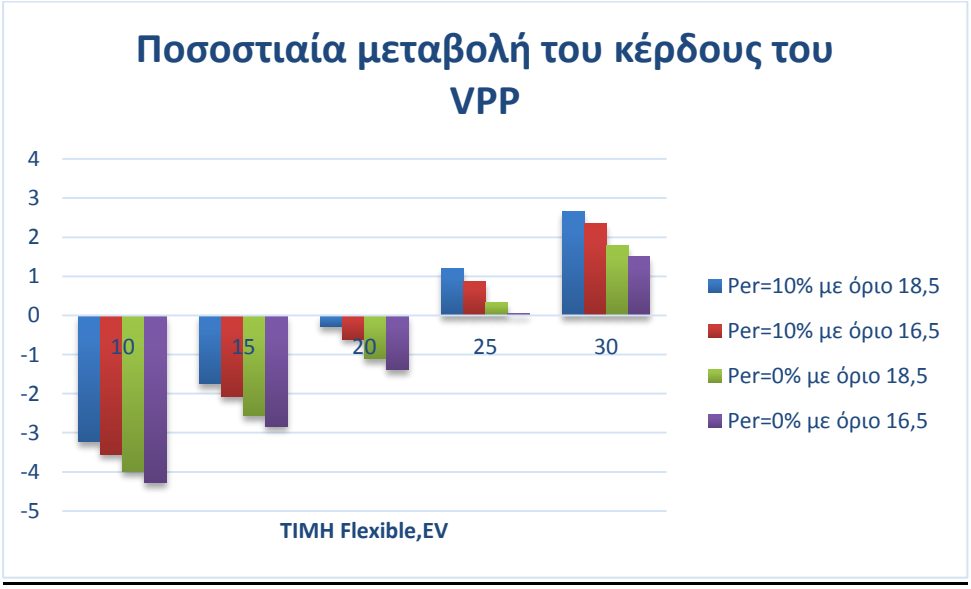


B)

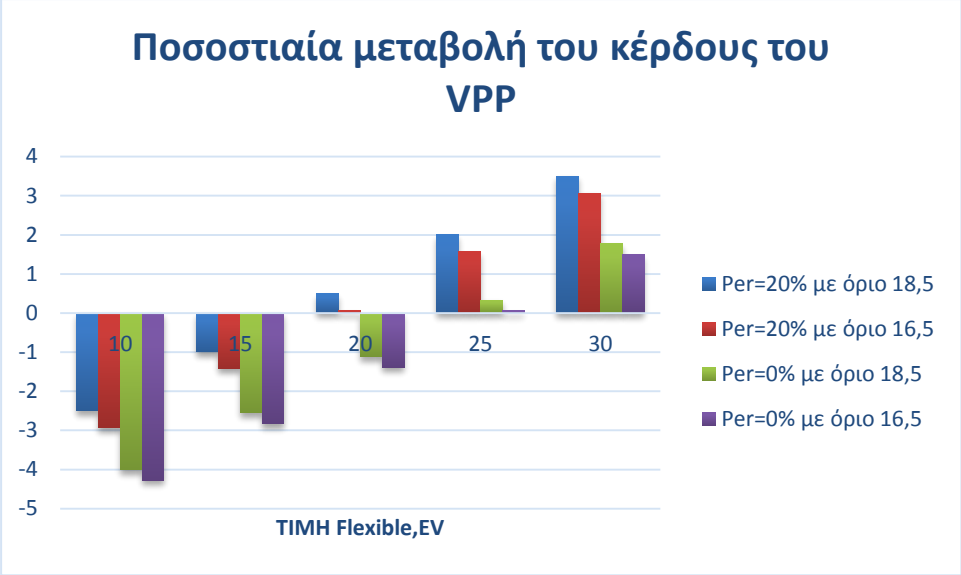


Γ)

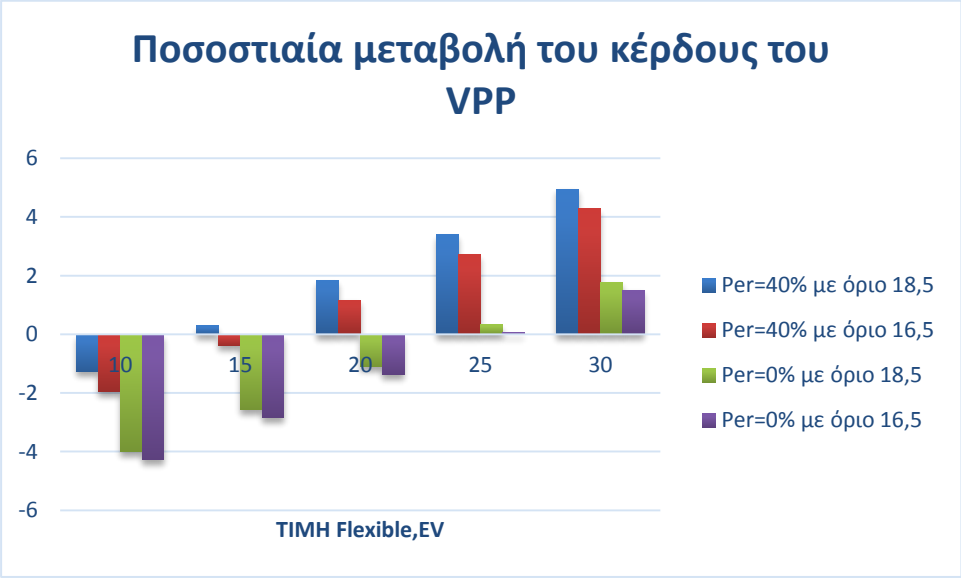
ΣΕΝΑΡΙΟ 4 – 2000 EVs, 2*Trips



Δ)



Ε)



Ζ)

Εικόνα 5.4.6. Ποσοστιαία μεταβολή του κέρδους του VPP για V2G λειτουργία με και χωρίς όριο (18.5MW, 16.5 MW)

Α) *Με* ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 2 για τιμές Per=0% και 10%.

Β) *Με* ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 2 για τιμές Per=0% και 20%.

Γ) *Με* ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 2 για τιμές Per=0% και 40%.

Δ) *Με* ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 4 για τιμές Per=0% και 10%.

Ε) *Με* ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 4 για τιμές Per=0% και 20%.

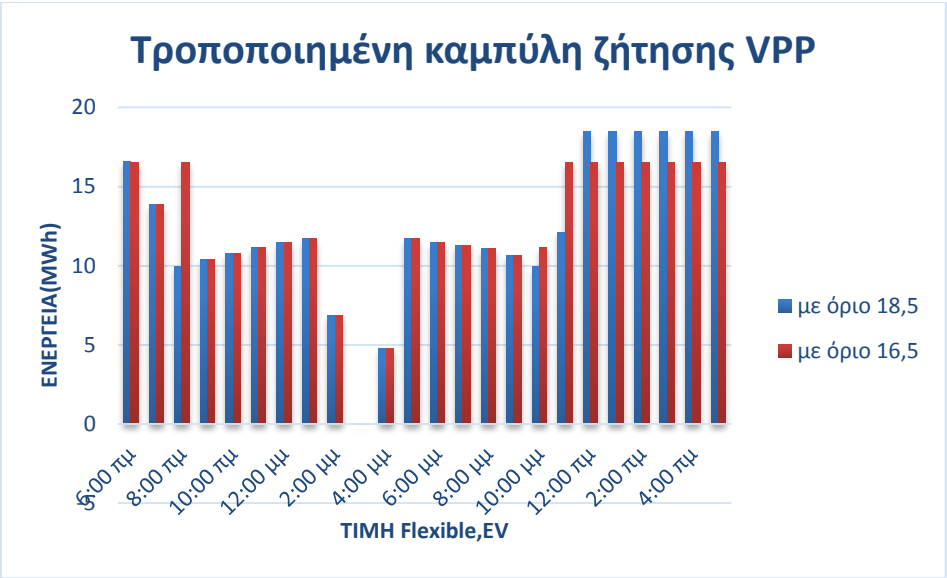
Ζ) *Με* ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 4 για τιμές Per=0% και 40%.

Λαμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω διαγράμματα της εικόνας 5.4.6 παρατηρούμε ότι με την εφαρμογή του σφιχτού ορίου το VPP επέρχεται εκτενέστερη μείωση στα έσοδα του ανεξαρτήτως της τιμής που λαμβάνει το Per και του στόλου ηλεκτρικών οχημάτων που διαχειρίζεται, με αποτέλεσμα ο aggregator να είναι αναγκασμένος να αυξήσει την τιμή που χρεώνει τα ευέλικτα φορτία (συμπεριλαμβανομένων και των ηλεκτρικών οχημάτων). Πιο συγκεκριμένα, για χαμηλό ποσοστό διείσδυσης (σενάριο 1) και για Per=40 % απαιτείται και πάλι μικρή αύξηση της τιμής χρέωσης 15 €/MWh της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων ενώ για Per=0,10,20% απαιτείται μεγαλύτερη αύξηση της τιμής χρέωσης 20 €/MWh.

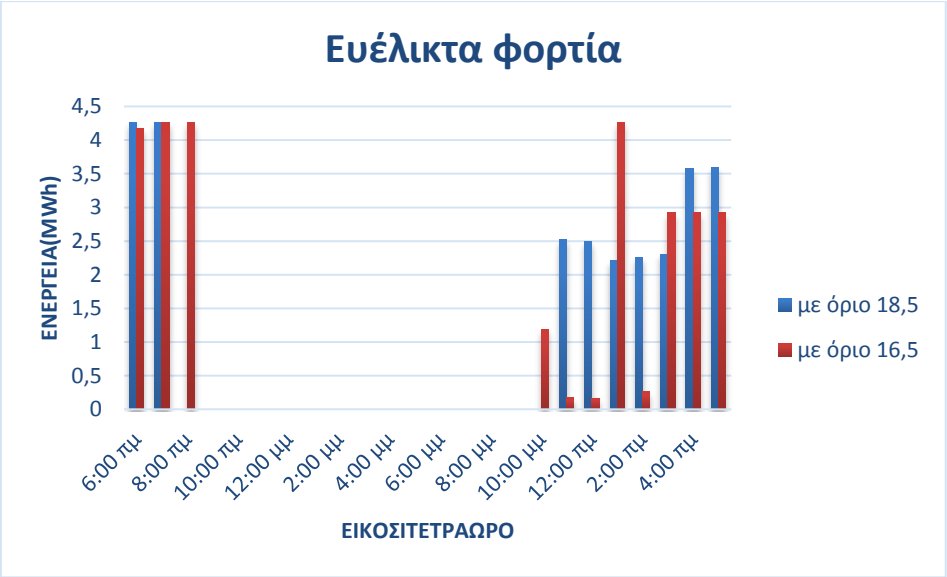
Επιπλέον, όσο αυξάνεται ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων και οι ενεργειακές τους ανάγκες για μετακίνηση (σενάριο 4), η προσφερόμενη τιμή χρέωσης της ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων αυξάνεται φτάνοντας τα 20 €/MWh για Per=20% και 40% ενώ για Per=0 και 10% απαιτείται μεγαλύτερη αύξηση της τιμής χρέωσης 25 €/MWh. Παράλληλα, η εφαρμογή ενός ανώτατου ορίου ζήτησης του VPP από το ανάντη δίκτυο έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του της τιμής χρέωσης από 15 €/MWh σε 20 €/MWh για Per=40%.

Στην συνέχεια στην εικόνα 5.4.7 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα προφίλ της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων για το σενάριο 4 (2000EVs, 2*Trips) για Per=20% με την εφαρμογή σφιχτού ορίου στα 16,5 MW όπου τα συγκρίνουμε ενδεικτικά με τις αντίστοιχες οντότητες με την εφαρμογή του ελαστικού ορίου στα 18,5 MW. Είναι φανερό ότι πλέον επηρεάζεται το προφίλ λειτουργίας των ευέλικτων φορτίων, η εξυπηρέτηση της ζήτησης για την φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων καθώς και η εισροή ενέργειας από το ανάντη δίκτυο. Όπως προείπαμε, λόγω των περιορισμών μετακίνησης των ηλεκτρικών οχημάτων, δίνεται προτεραιότητα στην εξυπηρέτηση της ζήτησης για τη φόρτιση τους τις βραδινές ώρες η οποία πλέον διαμοιράζεται σε περισσότερες ώρες. Παράλληλα, μετατοπίζεται η εξυπηρέτηση των ευέλικτων φορτίων από τις πιο φθηνές ώρες σε μεταγενέστερες πιο ακριβές.

Από τα παραπάνω διαγράμματα της εικόνας 5.4.6 γίνεται φανερό ότι ένα αρκετό σφιχτό όριο επιδρά αρνητικά στα έσοδα του aggregator. Συγκεκριμένα για το σενάριο 2 (1000EVs, 2*Trips) παρατηρούμε ότι για Per=10% μειώνονται τα έσοδα κατά ένα σταθερό ποσοστό 0,250671%, για Per=20% κατά 0,255326% και για Per=40% κατά 0,257043% το οποίο είναι ανεξάρτητο της τιμής κοστολόγησης των ευέλικτων φορτίων και των ηλεκτρικών οχημάτων. Αντίστοιχα για το σενάριο 4 (2000EVs, 2*Trips) παρατηρούμε ότι για Per=10% μειώνεται κατά ένα σταθερό ποσοστό που είναι 0,326432%, για Per=20% κατά 0,434691% και για Per=40% κατά 0,675935% το οποίο, είναι ανεξάρτητο της τιμής κοστολόγησης των ευέλικτων φορτίων και των ηλεκτρικών οχημάτων


Τροποποιημένη καμπύλη ζήτησης VPP
ΕΝΕΡΓΕΙΑ(MWh)
20
15
10
5
0
6:00 πμ
8:00 πμ
10:00 πμ
12:00 μμ
2:00 μμ
4:00 μμ
6:00 μμ
8:00 μμ
10:00 μμ
12:00 πμ
2:00 πμ
4:00 πμ
ΤΙΜΗ Flexible,EV
με όριο 18,5
με όριο 16,5

A)


Ευέλικτα φορτία
ΕΝΕΡΓΕΙΑ(MWh)
4,5
4
3,5
3
2,5
2
1,5
1
0,5
0
6:00 πμ
8:00 πμ
10:00 πμ
12:00 μμ
2:00 μμ
4:00 μμ
6:00 μμ
8:00 μμ
10:00 μμ
12:00 πμ
2:00 πμ
4:00 πμ
ΕΙΚΟΣΙΤΕΤΡΑΩΡΟ
με όριο 18,5
με όριο 16,5

B)

Ισχύς φόρτισης ΗΟ
ΕΝΕΡΓΕΙΑ (MWh)
8
7
6
5
4
3
2
1
0
6:00 πμ
8:00 πμ
10:00 πμ
12:00 μμ
2:00 μμ
4:00 μμ
6:00 μμ
8:00 μμ
10:00 μμ
12:00 πμ
2:00 πμ
4:00 πμ
ΕΙΚΟΣΙΤΕΤΡΑΩΡΟ
με όριο 18,5
με όριο 16,5

Γ)

Εικόνα 5.4.7. *Καμπύλες λειτουργίας των συμμετεχόντων στο VPP για V2G(Per=20%) με* ενσωμάτωση του στόλου του σεναρίου 4 με όριο (18.5MW, 16.5MW)

Α) Καμπύλη ζήτησης του VPP από το ανάντη δίκτυο.

Β) Καμπύλη ζήτησης ευέλικτων φορτίων.

Γ) *Καμπύλη ισχύς φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων.*

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ

7.1 Σύνοψη και συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος, ο οποίος μπορεί να αξιοποιηθεί από ένα κεντρικό ελεγκτή του Virtual Power Plant (Aggregator) για τον προγραμματισμό των ενεργειακών προφίλ διαφόρων οντοτήτων του καθώς και τη διαχείριση της ενεργειακής λειτουργίας (φόρτιση–G2V και εκφόρτιση- V2G) ενός στόλου ηλεκτρικών οχημάτων ώστε να επιτευχθεί το μέγιστο δυνατό οικονομικό όφελος. Η V2G λειτουργία συνίσταται στην προσφορά ενέργειας στο VPP τις ώρες εκείνες που η τιμή ενέργειας του δικτύου είναι υψηλή. Επομένως, το πρόβλημα της βελτιστοποίησης, που πρέπει να απαντηθεί είναι το εξής: «Ποιο είναι το βέλτιστο ενεργειακό προφίλ που πρέπει να ακολουθήσει η κάθε μια ξεχωριστή οντότητα που διαχειρίζεται το VPP ώστε να έχει ο aggregator το μέγιστο δυνατό οικονομικό κέρδος, σεβόμενος παράλληλα τους ξεχωριστούς περιορισμούς της κάθε μιας οντότητας». Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης υλοποιήθηκε με χρήση του προγράμματος GAMS. Για να ελέγξουμε την αποτελεσματικότητα των αλγορίθμων, προσομοιώσαμε διάφορους στόλους ηλεκτρικών οχημάτων οι οποίοι εξετάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Κατά το στάδιο εφαρμογής του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, προέκυψαν κάποια συμπεράσματα όσον αφορά στον τρόπο λειτουργίας του.

Πρώτον, συμπεραίνουμε ότι πριν την ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων το VPP κατανέμει σε κάθε ώρα την ζήτηση των φορτίων με μοναδικό γνώμονα την τιμή αγοράς ενέργειας από το ανάντη δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, στην διάρκεια του εικοσιτετράωρου η ενέργεια που αποδίδουν οι διαχειριζόμενες μονάδες που διαθέτει το VPP παραμένει σταθερή από τη στιγμή που καταθέτουν χαμηλότερες προσφορές παραγωγής ενέργειας συγκριτικά με το κόστος αγοράς ενέργειας από τη χονδρεμπορική. Σταθερό διατηρείται επίσης το φορτίο των ελαστικών φορτίων τα

οποία ελέγχονται μέσω καμπυλών τιμής αφού η μεταβλητή απόφασης που επηρεάζει την συμπεριφορά τους είναι ενιαία για όλο το εικοσιτετράωρο. Από την άλλη πλευρά τα ευέλικτα φορτία μετατοπίζονται τις ώρες που η τιμή του δικτύου είναι χαμηλή ενώ εκείνες τις ώρες που είναι υψηλή αυξάνεται το φορτίο που αποκόπτεται. Αποτέλεσμα της διαχείρισης αυτής είναι ότι όταν η τιμή του δικτύου είναι υψηλή η εισροή ενέργειας από το δίκτυο είναι χαμηλή εξυπηρετώντας ένα μικρό μέρος της ημερήσιας ζήτησης αντίθετα όταν είναι χαμηλή, η εισροή ενέργειας αυξάνεται καλύπτοντας μεγαλύτερος μέρος της ημερήσιας ζήτησης των οντοτήτων του VPP.

Στην δεύτερη περίπτωση όπου τα ηλεκτρικά οχήματα ενσωματώνονται στο VPP αλλά δίχως να έχουν την δυνατότητα προσφοράς ενέργειας πίσω στο VPP, η ενεργειακή διαχείριση τους είναι όμοια με αυτή των ευέλικτων φορτίων. Η ζήτηση του VPP είναι μεγαλύτερη, πλέον λόγω των ενεργειακών αναγκών φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Η επιπρόσθετη ζήτηση δεν μπορεί να καλυφθεί από τις τοπικές παραγωγές, μιας και λειτουργούν στην μέγιστη παραγόμενη ισχύ. Αντιθέτως, το φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων εξυπηρετείται από το ανάντη δίκτυο αυξάνοντας το κόστος λειτουργίας του VPP. Διατηρώντας χαμηλά τη σταθερή τιμή χρέωσης της ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων το κέρδος του Aggregator μειώνεται περίπου 4% για ένα στόλο 2000 οχημάτων. Για να διατηρηθεί το κέρδος του Aggregator στα αρχικά επίπεδο, πριν την ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων, θα πρέπει να αυξηθεί η τιμή χρέωση των ηλεκτρικών οχημάτων (και συνεπώς των ευέλικτων φορτίων) ακόμα και 100%.

Στην τρίτη περίπτωση όπου τα ηλεκτρικά οχήματα ενσωματώνονται στο VPP έχοντας την δυνατότητα να προσφέρουν ενέργεια πίσω στο VPP, ο Aggregator αξιοποιεί την V2G λειτουργία των οχημάτων εξυπηρετώντας μέρος της ζήτησής του από τις μπαταρίες των ηλεκτρικών οχημάτων τις ώρες αιχμής ή πουλώντας ενέργεια στο δίκτυο όταν η τιμή αγορά της ενέργειας είναι υψηλή. Τα κέρδη από την αξιοποίηση της V2G λειτουργίας, επιτρέπουν στον aggregator να διατηρήσει χαμηλότερες τιμές χρέωσης της ενέργειας στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα συγκριτικά με τις αντίστοιχες χωρίς την V2G λειτουργίας. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό συμμετοχής των οχημάτων στη V2G λειτουργία, τόσο χαμηλότερες γίνονται και οι τιμές χρέωσης των ηλεκτρικών οχημάτων.

Η τελευταία περίπτωση επικεντρώνεται στην εφαρμογή κάποιου ανώτατου ορίου στην ενέργεια που μπορεί να προμηθευτεί το VPP από το ανάντη δίκτυο. Η παραγωγή και το φορτίο των ελαστικών φορτίων τα οποία ελέγχονται μέσω καμπυλών τιμής παραμένουν σταθερά. Αντιθέτως, μετατοπίζεται η εξυπηρέτηση των ευέλικτων φορτίων από τις βραδινές σε πιο ακριβές ώρες διότι σε εκείνες τις ώρες δίνεται προτεραιότητα στην εξυπηρέτηση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων λόγω των περιορισμών μετακίνησης που διαθέτουν, αποκόπτοντας παράλληλα περισσότερο φορτίο. Εν πολλοίς δηλαδή, μετατοπίζεται μέρος της ζήτησης από τις πιο φθηνές ώρες σε μεταγενέστερες πιο ακριβές. Όσον αφορά τώρα τα έσοδα του aggregator, συμπεράναμε ότι όσο πιο σφιχτό είναι το όριο τόσο εντονότερη είναι η μείωση τους. Παράγοντες που επιδρούν στην περαιτέρω αύξηση της μείωσης των εσόδων του είναι

το χαμηλό ποσοστό χρήσης της μπαταρίας των ηλεκτρικών οχημάτων και οι υψηλές ενεργειακές τους απαιτήσεις.

7.2 Μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας

Η παρούσα διπλωματική αποτελεί ένα πρώτο βήμα για την ανάπτυξη ενός αλγόριθμου, που επιτρέπει σε έναν VPP το οποίο ενσωματώνει ηλεκτρικά οχήματα τη συμμετοχή του στην χονδρεμπορική αγορά ενέργειας αξιοποιώντας την αμφίδρομη ροή ισχύος των ηλεκτρικών οχημάτων.

Πιο συγκεκριμένα, όσον αφορά τα ηλεκτρικά οχήματα δεν μελετήθηκε εις βάθος η προκαλούμενη φθορά των συσσωρευτών λόγω της V2G λειτουργίας. Σε μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να προσομοιωθεί με μεγαλύτερη λεπτομέρεια η φθορά των συσσωρευτών των ηλεκτρικών οχημάτων.

Τα συμπεράσματα, που παρουσιάστηκαν στην συγκεκριμένη διπλωματική εξάγονται από την προσομοίωση του αλγορίθμου 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. Επομένως, ως αντικείμενο μελλοντικής έρευνας προτείνεται η εφαρμογή των αλγορίθμων για διαφορετικά προφίλ τιμών αγοράς ενέργειας (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 καθώς και για διαφορετικά προφίλ προσφορών που θα καταθέτει κάθε μια ξεχωριστή οντότητα του VPP. Επιπλέον, θα μπορούσαν να μελετηθούν λεπτομερώς και οι επιπτώσεις, που θα έχει η εισαγωγή του VPP και σε αγορές επικουρικών υπηρεσιών (άνω/κάτω ρύθμιση συχνότητας και στρεφόμενη εφεδρεία).

Τέλος, κατεύθυνση μελλοντικής έρευνας αποτελεί η περαιτέρω ανάλυση και διερεύνηση των τρόπων με τους οποίους μπορεί να επιτευχθεί πιο εύκολα και πιο γρήγορα η κατάλληλη δομή και διεπιφάνεια που απαιτείται για την V2G συμμετοχή, για την Ελλάδα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ

[1] http://www.math.ntua.gr/~coletsos/Documents/linearprogramming.pdf

[2] http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf

[3] G.Cornevelis van Kooten, "Introduction to Mathematical and Linear Programming".

[4] http://www.teslamotors.com/

[5] http://pvcdrom.pveducation.org/BATTERY/capacity.htm

[6] http://batteryuniversity.com/learn/article/battery_definitions

[7] Duong Tung Nguyen and Long Bao Le, Senior Member, IEEE "Optimal Bidding Strategy for Microgrids Considering Renewable Energy and Building Thermal Dynamics" IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 5, No. 4, July 2014

[8] Kempton W., Tomic J., "Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue", University of Delaware, Newark, USA, 8 December 2004

[9] C. Guille, G. Gross, "A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) Implementation", Energy Policy, Volume 37, Issue 11, December 2009

[10] Κ. Τσατσάκης, «Μελέτη μικροδικτύου με αυξημένη διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων», μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σεπτέμβριος 2010.

[11] http://www.aegean-energy.gr/gr/academy2013/pdf/AEA_electric_cars.pdf

[12] MERGE (Mobile Energy Resources in Grids of Electricity), "Specifications for EV- Grid interfacing, communication and smart metering technologies, including traffic patterns and human behavior descriptions" 24 August 2010.

[13] Ε.Ι. Ρίκου, «Μέθοδοι εξοικονόμησης ενέργειας σε ηλεκτροκίνητα οχήματα», Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πάτρα 2005.

[14] A. F. Raab, M. Ferdowsi, E. Karfopoulos, I. Grau Unda, S. Skarvelis-Kazakos, P. Papadopoulos, E. Abbasi, L.M. Cipcigan, N. Jenkins, N. Hatziargyriou, and K. Strunz, "Virtual Power Plant Control Concepts with Electric Vehicles", Intelligent System Application to Power Systems (ISAP), 2011 16th International Conference.

[15] Ashot Mnatsakanyan, Graduate Student Member, IEEE, and Scott W. Kennedy, Member, IEEE, " A Novel Demand Response Model with an Application for a Virtual Power Plant", IEEE Transactions on Smart Grid, Volume 6, Issue 1, 2015

[16] Hao Bai, Shihong Miao , Xiaohong Ran and Chang Ye, Article, "Optimal Dispatch Strategy of a Virtual Power Plant Containing Battery Switch Stations in a Unified Electricity Market", Energies 23 March 2015, www.mdpi.com/journal/energies

[17] Huanhai Xin, Deqiang Gan, Naihu Li, Huijie Li, Chensong Dai, "Virtual power plant-based distributed control strategy for multiple distributed generators", Published in IET Control Theory and Applications on 26th October 2012, http://www.theiet.org/

[18] Εφραιμίδης, «Βασικές Έννοιες Θεωρίας Παιγνίων».

[19] Αδριόπουλος, «Μαθηματικές Μέθοδοι στα Μικροοικονομικά και Χρηματοοικονομικά»

[20] J. Fortuny-Amat and B. McCarl, "A representation and economic interpretation of a two-level programming problem," J. Oper. Res. Soc., vol. 32, no. 9, pp. 783–792, Sep. 1981.

[21] D. G. Luenberger and Y. Ye, "Linear and Nonlinear Programming", 3rd ed. New York, NY, USA: Springer, 2008.

[22] M. Ehsani, Y. Gao, S. Gay, A. Emadi, "Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design (Power Electronics and Applications Series)".

[23] Electric Drive Transportation Association, www.electricdrive.org

[24] http://electricvehicles.caa.ca/types-of-electric-vehicles/

[25] "Vehicle-to-grid power: Battery, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles as Resources for Distributed Electric Power in California", W.Kempton, J.Tomic, S.Letendre, A.Brooks, T.Lipman, June 2001.

[26] C. C. Chan, K. T. Chau, "An Overview of Power Electronics in Electric Vehicles", IEEE Transactions on Industrial Electronics, February 1997, Vol. 44, no 1, pp. 3-13.

[27] http://www.aegean-energy.gr/gr/academy2013/pdf/AEA_electric_cars.pdf

[28] Vancouver Electric Vehicle Association, www.veva.bc.ca

[29] Wikipedia, The free encyclopedia http://en.wikipedia.org

[30] Georgia E. Asimakopoulou, Andreas G. Vlachos and Nikos D. Hatziargyriou, "Hierarchical Decision Making for Aggregated Energy Management of Distributed Resources", IEEE Transactions on Power Systems, Volume 30, Issue 6, November 2015.

[31] Dejan Ilic, Per Goncalves Da Silva, Stamatis Karnouskos, Martin Griesemer, “An energy market for trading electricity in smart grid neighbourhoods”, IEEE International Conference on Digital Ecosystems and Technologies (DEST), June 2012.

[32] 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, February 2011

[33] Sally Hunt, Graham Shuttleworth, John Wiley & Sons Ltd, ‘Competition and choice in electricity’, 1996

[34] Ευάγγελος Λεκατσάς-έκδοση ΤΕΕ, «Οικονομική ανάλυση ηλεκτρικών συστημάτων»-προβλήματα προσαρμογής εν όψει της απελευθέρωσης της αγοράς ηλεκτρισμού.

[35] Ευάγγελος Λεκατσάς, «Η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρισμού και οι προκλήσεις για το ρυθμιστικό πλαίσιο, τον ανταγωνισμό και την ασφάλεια εφοδιασμού» διεθνές συνέδριο 2008.

[36] Σημειώσεις για το μάθημα «Χρηματοοικονομική Διοίκηση Δημοσίων Οργανισμών», Καινούργιος.Δ, 2003, Τμήμα λογιστικής και χρηματοοικονομικής Ο.Π.Α