

«ΒΕΛΤΙΣΤΟΣ ΧΡΟΝΟΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΤΗΣ  
ΑΜΦΙΔΡΟΜΗΣ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕΤΑΞΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ  
ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΟΥ: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ V2G»

Ανδρέας Γιάγκος

Επιβλέπων καθηγητής

Δημήτριος Ιψάκης

Χανιά, Οκτώβριος 2021

## Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια, η αυξανόμενη ανησυχία που προκαλεί η Παγκόσμια κλιματική αλλαγή αλλά και η συνεπακόλουθη ανάγκη για την διατήρηση των συμβατικών ενεργειακών αποθεμάτων, έχει στρέψει τις μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες στην προώθηση και βελτίωση των ηλεκτροκίνητων οχημάτων (υβριδικών και μη-). Ωστόσο, η αλλαγή της κατεύθυνσης αυτής προς την ηλεκτροκίνηση, επιφέρει μία πρόσθετη πρόκληση στον τομέα εφαρμογής των ηλεκτρικών δικτύων: Τα νέα αυτά ηλεκτρικά δίκτυα θα κληθούν να διαχειριστούν με βέλτιστο τρόπο το διαθέσιμο ηλεκτρικό φορτίο των οχημάτων ανά ημέρα.

Η τεχνολογία αμφίδρομης ροής ισχύος μεταξύ οχημάτων-δικτύου «Vehicle-to-Grid, V2G», περιγράφει μία (κατά κάποιο τρόπο) συνδεσμολογία όπου ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρίες (BEV), υβριδικά οχήματα (PHEV) ή ηλεκτρικά οχήματα με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, επικοινωνούν με το ηλεκτρικό δίκτυο (συμβατικό ή με χρήση ΑΠΕ), πουλώντας υπηρεσίες ανταπόκρισης στην ζήτηση. Με άλλα λόγια, τα οχήματα αυτά ανάλογα με την κατάσταση φόρτισης τους και τους στόχους της βέλτιστης αξιοποίησης ενέργειας (π.χ. φόρτιση οχημάτων, μηδενική ζήτηση από το δίκτυο), προσφέρουν ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο ή μειώνουν το ρυθμό φόρτισής τους.

Στα ανωτέρω πλαίσια, η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην ανάδειξη των προτερημάτων της τεχνολογίας «V2G», μέσω της ανάπτυξης ενός αλγορίθμου βελτιστοποίησης της κατανομής φόρτισής τους. Ειδικότερα, ο αλγόριθμος αυτός θα συμβάλει στην ομαλότερη λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου, όπου θα επιβλέπει α) τα οχήματα που θα δύναται να φορτίζουν, β) τα οχήματα που θα δύναται να εκφορτίζουν και γ) τις ανάγκες ζήτησης/προσφοράς δικτύου ανά ημέρα.

Ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε για την κατανομή του επιπρόσθετου φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων με στόχο την ελαχιστοποίηση της ζητούμενης ισχύος κατά τις ώρες αιχμής, κατάφερε να βελτιστοποιήσει την λειτουργία φόρτισης/αποφόρτισης σε 215 οχήματα των οποίων το φορτίο κλήθηκε να καλύψει ο υποσταθμός των Βρυσών (case study) στον Δήμο Αποκορώνου. Συγκεκριμένα, κατάφερε να περιορίσει την αύξηση του φορτίου αιχμής (σε μία τυπική ημέρα, Κυριακή του έτους 2020) στα 48 kW ενώ χωρίς την ύπαρξή του και της τεχνολογίας V2G η αύξηση θα ήταν 2080 kW. Σημαντική επιτυχία αποτέλεσε το γεγονός ότι το μέγιστο ημερήσιο φορτίο είναι ίσο με αυτό της περίπτωσης που δεν υπάρχει κανένα ηλεκτρικό όχημα στην περιοχή, φανερώνοντας την άριστη εφαρμογή του αλγορίθμου.

## Abstract

In recent years, the growing concern caused by global climate change and the consequent need to maintain conventional energy reserves, has turned large automakers to the promotion and improvement of electric vehicles (hybrid and non-). However, the change in this direction towards electrification poses an additional challenge in the field of electricity grids: These new grids will be called upon to optimally manage the available electric load of vehicles per day.

Vehicle-to-Grid (V2G) bidirectional power technology describes (in a fashion) a connection where electric vehicles with batteries (BEVs), hybrid vehicles (PHEVs), or electric vehicles with hydrogen fuel cells communicate with the electricity network (conventional or using RES), selling demand response services. In other words, these vehicles, depending on their charging status and the goals of optimal energy utilization (e.g. vehicle charging, zero grid demand), supply the grid with electricity or reduce their charging rate.

In the above context, the present dissertation aims to give prominence to the strengths of "V2G" technology, through the development of an algorithm that optimizes the distribution of charging-discharging rate. In particular, this algorithm will contribute to the smoother operation of the electricity grid, where it will oversee a) vehicles that need to charge, b) vehicles that need to discharge, and c) network supply/demand needs per day.

The algorithm that was built to distribute the additional load of electric vehicles in order to minimize the required power during peak hours, accomplished to manage 215 vehicles whose load was called to cover the substation of Vrises that supplies the Municipality of Apokoronas. Specifically, it managed to limit the increase of peak load (of Sundays of the year 2020) to 48 kW while without its existence and the use of V2G technology, the increase would be 2080 kW. Another significant success was the fact that the maximum daily load is equal to the case where there is no electric vehicle in the area.

## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2020-2021 με επιβλέπων τον Καθηγητή Δ. Ιψάκη, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες και ένα συγγνώμη για τον χρόνο που αφιέρωσε εκτός του εργασιακού του ωραρίου ώστε να με καθοδηγήσει, συμβουλέψει και κυρίως καθησυχάσει.

Οφείλω ακόμη να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, για όλη την στήριξη που μου προσέφερε με οποιαδήποτε μορφή, ψυχολογική ή υλική, κατά την διάρκεια όλων αυτών των φοιτητικών χρόνων.

Τέλος, μιας και γίνεται αναφορά στον θεσμό της οικογένειας, θα ήθελα να ευχαριστήσω το πρότυπό μου Γ. Πάλλα, τον άνθρωπο που με συμβούλεψε να επιλέξω την σχολή των Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, και που με έκανε να αγαπήσω το επάγγελμα του Μηχανικού.

# Περιεχόμενα

|  |                                     |
|--|-------------------------------------|
| Περίληψη .....   | 2                                   |
| Abstract .....   | 3                                   |
| Ευχαριστίες .....  | 4                                   |
| Περιεχόμενα.....   | 5                                   |
| Κεφάλαιο 1: Εισαγωγικά.....  | 7                                   |
| 1.1 Ηλεκτρικά Οχήματα .....  | 7                                   |
| 1.2 Ιστορική Αναδρομή.....   | 8                                   |
| 1.3 Κατηγορίες Φόρτισης Οχημάτων .....                                       | 15                                  |
| 1.4 Χαρακτηριστικά και Τεχνολογίες Συσσωρευτών .....                         | 16                                  |
| 1.5 Αγορές Ηλεκτρικής Ενέργειας .....  | 17                                  |
| 1.6 Στόχοι Διπλωματικής και Καινοτομία.....                                  | 19                                  |
| Κεφάλαιο 2: V2G Τεχνολογία.....  | 21                                  |
| 2.1: V2G και Ευφυή Δίκτυα .....  | 21                                  |
| 2.2: Συντελεστές V2G .....   | 22                                  |
| 2.3: Απαιτήσεις V2G.....   | 23                                  |
| 2.4: Προτερήματα της V2G Τεχνολογίας.....                                    | 24                                  |
| 2.4.1: Αποθήκευση Ενέργειας Ανανεώσιμων Πηγών .....                          | 25                                  |
| 2.4.2: Ομαλή Λειτουργία Ηλεκτρικού Δικτύου .....                             | 26                                  |
| 2.5: Επιχειρηματική Προσέγγιση V2G.....                                      | 29                                  |
| 2.6: Περιοριστικοί Παράγοντες V2G .....                                      | 31                                  |
| Κεφάλαιο 3: Ανάπτυξη Αλγορίθμου και Μαθηματική Μοντελοποίηση .....           | 34                                  |
| 3.1: Σκοπός κεφαλαίου .....  | 34                                  |
| 3.2: Παραδοχές και Αρχικοποίηση Παραμέτρων .....                             | 34                                  |
| 3.3: Ανάπτυξη Αντικειμενικής Συνάρτησης.....                                 | 38                                  |
| 3.4: Περιορισμοί.....  | 41                                  |
| 3.5: MATLAB και TOMLAB.....  | 43                                  |
| 3.6: Διάγραμμα Ροής.....   | <b>Error! Bookmark not defined.</b> |
| Κεφάλαιο 4: Εφαρμογές και Αποτελέσματα Αλγόριθμου στο Λογισμικό Matlab ..... | 44                                  |
| 4.1: Διατύπωση Προβλήματος.....  | 44                                  |
| 4.2: Αποτελέσματα Αλγορίθμου Βελτιστοποίησης V2G.....                        | 46                                  |
| 4.2.1: Σύγκριση με Οχήματα χωρίς δυνατότητα V2G .....                        | 47                                  |
| 4.2.2: Σύγκριση Χωρίς Βελτιστοποιημένη Κατανομή Ισχύος.....                  | 49                                  |

|   |    |
|---|----|
| 4.2.3: Σύγκριση με Απουσία Ηλεκτρικών Οχημάτων .....    | 52 |
| Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και Μελλοντικές Ενέργειες..... | 56 |
| 5.1: Συμπεράσματα .....                                 | 56 |
| 5.2: Μελλοντικές Ενέργειες .....                        | 57 |
| Βιβλιογραφία .....                                      | 58 |

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγικά

### 1.1 Ηλεκτρικά Οχήματα

Με τον όρο «Ηλεκτρικό Όχημα» (Electric Vehicle/EV) θεωρούμε κάθε όχημα, το οποίο για την προώθηση του χρησιμοποιεί ηλεκτρική ενέργεια μέσω ενός ή περισσότερων ηλεκτρικών κινητήρων. Ένα ηλεκτρικό όχημα μπορεί να τροφοδοτείται από ένα σύστημα συλλογής ηλεκτρισμού από πηγές εκτός οχήματος (π.χ. Τραμ, Μετρό), ή να είναι αυτόνομο κάνοντας χρήση μπαταριών, ηλιακών συλλεκτών, κυψελών καυσίμου και ηλεκτρικών γεννητριών. Αν και υπάρχουν διαφορετικές κατηγορίες ηλεκτρικών οχημάτων, η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία απευθύνεται αποκλειστικά στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. [1][2]

Η αυξανόμενη ανησυχία για την παγκόσμια κλιματική αλλαγή, έχει στρέψει πολλούς καταναλωτές στην αγορά ηλεκτροκίνητων οχημάτων. Το βασικό πλεονέκτημα των σύγχρονων ηλεκτρικών αυτοκινήτων, συγκρινόμενα με τα συμβατικά βενζινοκίνητα και πετρελαιοκίνητα, είναι το γεγονός ότι οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου είναι μικρότερες. Πιο συγκεκριμένα, οι εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά την κίνηση ενός ηλεκτρικού οχήματος είναι μηδενικές και μπορούν να είναι μηδενικές και κατά την παραγωγή της απαιτούμενης για την κίνηση τους ηλεκτρικής ενέργειας εάν αυτή προέρχεται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Εκτός όμως από το γεγονός ότι είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον, τα ηλεκτρικά οχήματα υπερτερούν και όσον αφορά την αποδοτικότητα. Το κόστος φόρτισής τους είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με τον ανεφοδιασμό καυσίμου των συμβατικών οχημάτων. 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%. Επιπλέον, οι ηλεκτρικοί κινητήρες προσφέρουν ήσυχη και ομαλή λειτουργία, ενώ ταυτόχρονα απαιτούν λιγότερη συντήρηση. Τέλος, επειδή η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται εγχώρια, συμβάλουν στην μείωση της ενεργειακής εξάρτησης από άλλες χώρες.

Ωστόσο, τα ηλεκτρικά οχήματα υστερούν σε αρκετές κατηγορίες ακόμη εν συγκρίσει με τα συμβατικά. Το σημαντικότερο πρόβλημα τους αφορά την αυτονομία, καθώς τα περισσότερα ηλεκτρικά οχήματα δεν ξεπερνούν τα 450 χιλιόμετρα αυτονομίας ανά πλήρης φόρτιση. Το πρόβλημα αυτό είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με ένα άλλο μειονέκτημα τους, αυτό της δυσκολίας εύρεσης σημείου φόρτισης. Επιπλέον, παρά την συνεχή προσπάθεια των ερευνητών για βελτίωση των μπαταριών και της φόρτισής τους, ο χρόνος που χρειάζεται για να φορτίσει πλήρως μια μπαταρία κυμαίνεται από 4 έως 8 ώρες. Οι μπαταρίες έχουν μεγάλο βάρος και όγκο, ενώ ακόμα και με τις νέες τεχνολογίες ταχείας φόρτισης, η πλήρης φόρτισή τους μπορεί να πάρει έως και μισή ώρα. Εκτός αυτού, η διάρκεια ζωής της μπαταρίας δεν έχει βελτιστοποιηθεί ακόμη με αποτέλεσμα να απαιτείται συχνά αντικατάστασή της. Η διαδικασία αυτή είναι άκρως δαπανηρή, καθώς οι μεγάλες συστοιχίες συσσωρευτών έχουν μεγάλο κόστος.

## 1.2 Ιστορική Αναδρομή

Τα ηλεκτροκίνητα οχήματα δεν αποτελούν μία σύγχρονη τεχνολογία. Αντιθέτως, έχουν μια μακρόχρονη ιστορία που ξεκινά στα μέσα του 19ου αιώνα. Στα αρχικά στάδια της ανάπτυξης της αυτοκίνησης, ανταγωνίστηκαν τα βενζινοκίνητα και τα ατμοκίνητα για την κατάκτηση του μεγαλύτερου μεριδίου της αγοράς. Τα ηλεκτροκίνητα, παρά την περιορισμένη ταχύτητα και αυτονομία τους, υπερίσχυαν έναντι των βενζινοκίνητων καθώς για να τεθεί σε λειτουργία ο κινητήρας δεν απαιτούνταν κάποια χειρωνακτική διαδικασία όπως η χρήση μανιβέλας στις μηχανές εσωτερικής καύσης. Επιπλέον, οι ηλεκτροκινήτες δεν απαιτούσαν αλλαγές στις ταχύτητες, γεγονός που διευκόλυνε σημαντικά την οδήγηση. Τα ατμοκίνητα αμάξια δεν απαιτούσαν ούτε αυτά αλλαγή ταχυτήτων, αλλά υστερούσαν σε αυτονομία καθώς απαιτούνταν συνεχής ανεφοδιασμός νερού. Ακόμη, για την εκκίνηση τους έπρεπε να πραγματοποιηθεί προθέρμανση της μηχανής. Η διάρκεια της διαδικασίας αυτής μια μέρα με χαμηλή θερμοκρασία άγγιζε την μισή ώρα. Βάσει αυτών τους των πλεονεκτημάτων, τα ηλεκτρικά οχήματα είχαν καταφέρει στις αρχές του 20ου αιώνα να κατέχουν το 38% του συνολικού στόλου αυτοκινήτων των ΗΠΑ. Ωστόσο, εξαιτίας των προβλημάτων αυτονομίας που αντιμετώπιζαν, σε συνάρτηση με την στασιμότητα στον τομέα της τεχνολογίας



μπαταριών, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα πέρασαν για χρόνια στην αφάνεια μέχρι την τωρινή τους επανεμφάνιση.[3]

Παρακάτω θα παρουσιαστούν μερικές ημερομηνίες-σταθμοί στην πορεία της ηλεκτροκίνησης:

ο **1832**: Ο Robert Anderson αναπτύσσει το πρώτο ηλεκτρικό όχημα.

ο **1834**: Ο αμερικάνος Thomas Davenport αναπτύσσει το πρώτο κινητήρα τροφοδοτούμενο από μπαταρία. Παρόλα αυτά, οι προσπάθειες του δεν είναι επικερδής λόγω της χρήσης αναξιόπιστων και πρωτόγονων μπαταριών.

ο **1847**: Ο αμερικανός Moses Farmer κατασκευάζει ένα όχημα που μπορεί να μεταφέρει δύο άτομα.

ο **1859**: Ο Γάλλος Gaston Plante εφηύρε την μπαταρία Μολύβδου-Οξέος, το πρώτο είδος επαναφορτιζόμενης μπαταρίας.

ο **1889**: Ο Thomas Edison κατασκευάζει ηλεκτρικό όχημα χρησιμοποιώντας αλκαλικές μπαταρίες, για να αντικαταστήσει τις βαριές μπαταρίες Μολύβδου-Οξέος.

ο **1896**: Η εταιρία Electric Car Co. εισάγει στους δρόμους της Νέας Υόρκης τα πρώτα ηλεκτροκίνητα ταξί, τα οποία μέσα σε τρία χρόνια καταφέρνουν να ξεπεράσουν τα 60.

ο **1899**: Ο Camille Jenatzy κατασκευάζει στη Γαλλία το ηλεκτρικό αυτοκίνητο “La Jamais Contente” (“Η ποτέ ικανοποιημένη” στα γαλλικά). Είναι το πρώτο όχημα στην ιστορία που ξεπερνάει την ταχύτητα των 100km/h.



**Εικόνα 1.1:** Ηλ. Αυτοκίνητο “La Jamais Contente”. Το πρώτο όχημα που ξεπερνούσε την ταχύτητα των 100km/h. [4]

ο **1900:** Τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν καταφέρει να κατέχουν το ίδιο μερίδιο αγοράς με τους ανταγωνιστές τους, τα οχήματα εσωτερικής καύσης και τα ατμοκίνητα. Στις ΗΠΑ κατέχουν το 38% του στόλου αυτοκινήτων της χώρας. Την ίδια χρονιά, η εταιρία Ferdinand Porsche κατασκευάζει το Lohner-Porsche Mixed Hybrid, το πρώτο υβριδικό ηλεκτρικό όχημα.

ο **1908:** Ο Henry Ford παρουσιάζει το μοντέλο Model T. Η τιμή του ξεκίνησε από τα 850\$ και έφτασε τα 265\$. Οι μέθοδοι μαζικής παραγωγής που εφαρμόστηκαν στα εργοστάσια του Φορντ και το χαμηλό κόστος κατασκευής των οχημάτων, σηματοδότησαν την αρχή του τέλους της ηλεκτροκίνησης.

ο **1912:** Ο Charles Kettering εφεύρει το πρώτο ηλεκτρικό σύστημα αυτόματης ανάφλεξης με χρήση κλειδιού. Την ίδια χρονιά, η βιομηχανία της ηλεκτροκίνησης σημειώνει αρνητικό ρεκόρ, έχοντας απόθεμα 30,000 οχημάτων.

ο **1935:** Η κυριαρχία των οχημάτων εσωτερικής καύσης οδηγεί στην εξαφάνιση των ηλεκτρικών οχημάτων.

ο **1966**: Το Κογκρέσο των ΗΠΑ παρουσίασε τα πρώτα νομοσχέδια, συνιστώντας τη χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων ως μέσο για τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Η ηλεκτρική και υβριδική τεχνολογία εμφανίζονται ξανά στο προσκήνιο.

ο **1977**: Η Toyota παρουσιάζει το υβριδικό Toyota Sports 800 με αεροστρόβιλο. Συνδυάζει μια περιβαλλοντικά συμβατή λύση με ένα σπορ αυτοκίνητο υψηλών επιδόσεων.



**Εικόνα 1.2:** Το υβριδικό όχημα Toyota Sports 800 του 1997. [5]

ο **1989**: Η Audi παρουσίασε την πρώτη γενιά του πειραματικού οχήματος Audi Duo βασισμένο στο Audi 100 Avant Quattro. Είχε ηλεκτρικό κινητήρα ο οποίος έδινε ώθηση στους δύο πίσω τροχούς και όχι σε έναν κεντρικό άξονα.

ο **1997**: Το Toyota Prius παρουσιάστηκε στην ιαπωνική αγορά και οι πωλήσεις του πρώτου χρόνου έφτασαν σχεδόν τις 18.000. Την ίδια χρονιά Η Audi έγινε ο πρώτος κατασκευαστής στην Ευρώπη που έβαλε ένα υβριδικό όχημα στη μαζική παραγωγή: το Audi Duo βασισμένο στο A4 Avant. Ωστόσο, το γεγονός ότι δεν υπήρξε εμπορική επιτυχία οδήγησε στην κατάργησή του, και παρακίνησε τις ευρωπαϊκές αυτοκινητοβιομηχανίες να στρέψουν το ενδιαφέρον και τις επενδύσεις τους στην ανάπτυξη οχημάτων ντίζελ.

ο **1999**: Η Honda παρουσίασε το δίπορτο Insight, το πρώτο υβριδικό αυτοκίνητο που έκανε θραύση στη μαζική αγορά των Ηνωμένων Πολιτειών.

ο **2004**: Το Toyota Prius II κερδίζει βραβεία και χαρακτηρίζεται ως το καλύτερο αμάξι της χρονιάς. Η ζήτηση του αποτέλεσε μία θετική έκπληξη για την Toyota και αύξησε την παραγωγή της από 36.000 σε 47.000 αυτοκίνητα για την αγορά των ΗΠΑ.

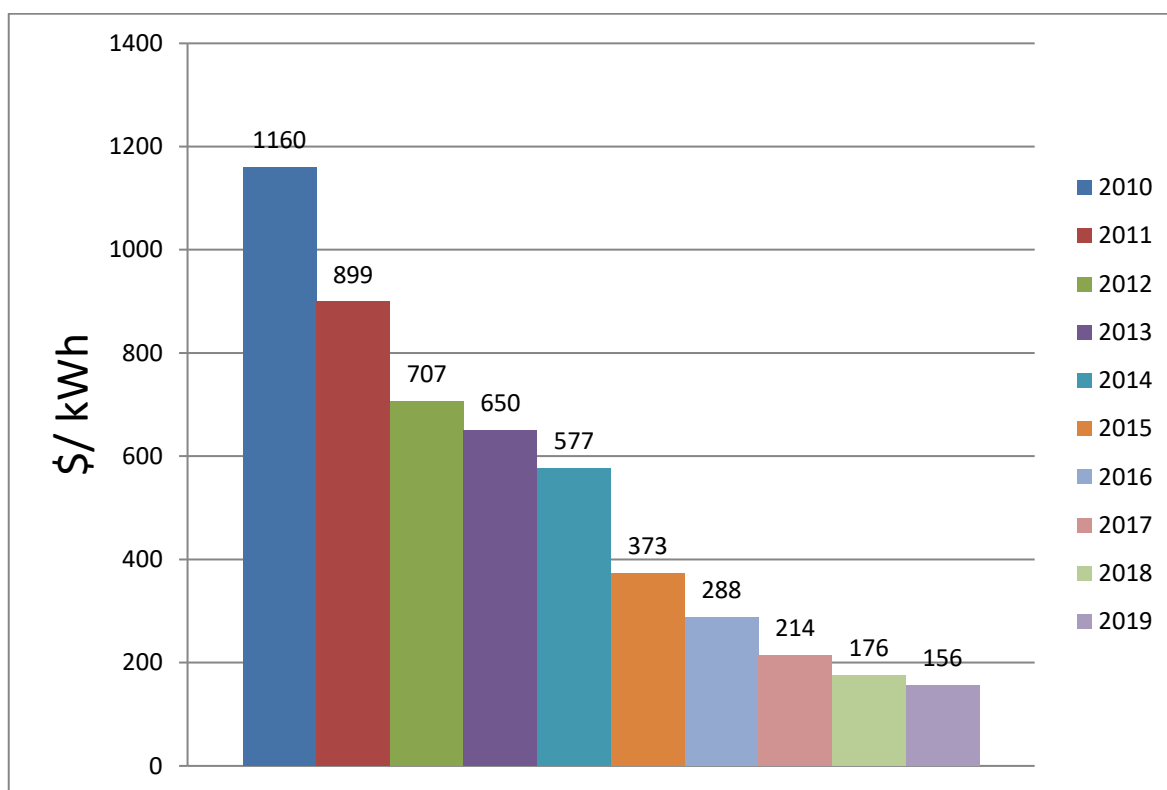
ο **2006**: Η Tesla Motors, μια νεοφυής εταιρεία της Silicon Valley, ανακοινώνει ότι θα παράγει ένα πολυτελές ηλεκτρικό σπορ αυτοκίνητο με εμβέλεια 200+ μιλίων.

ο **2009**: Νέα μοντέλα, όπως τα Tesla Roadster, Honda Jazz, Auris hybrid, Porsche Cayenne, VW Touareg και άλλα, που εμφανίζονται συνεχώς, αποδεικνύουν ότι οι βιομηχανίες αυτοκινήτων έχουν επηρεαστεί από την αυστηρή περιβαλλοντική νομοθεσία και η ηλεκτροκίνηση φαντάζει μονόδρομος.



**Εικόνα 1.3:** Tesla Roadster 2020 [6]

Όπως προαναφέρθηκε, ένα από τα βασικά μειονεκτήματα των ηλεκτρικών αυτοκινήτων αποτελούσε πάντα το κόστος της μπαταρίας τους. Ωστόσο, όπως παρατηρείται και στο επόμενο γράφημα, σε ένα διάστημα 10 ετών (2010-2019) η τιμή των μπαταριών ανά kWh έχει μειωθεί περισσότερο από 85%. [7]

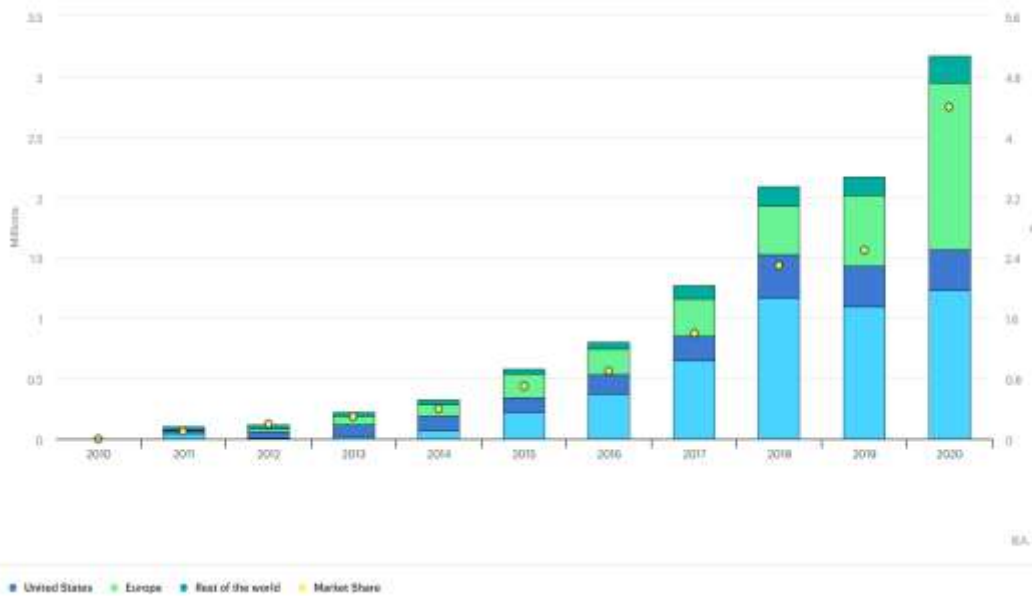


**Διάγραμμα 1.1:** Αναλογία τιμής/kWh των μπαταριών του δημοφιλούς Tesla Model 3 για τα έτη 2010-2019. [7]

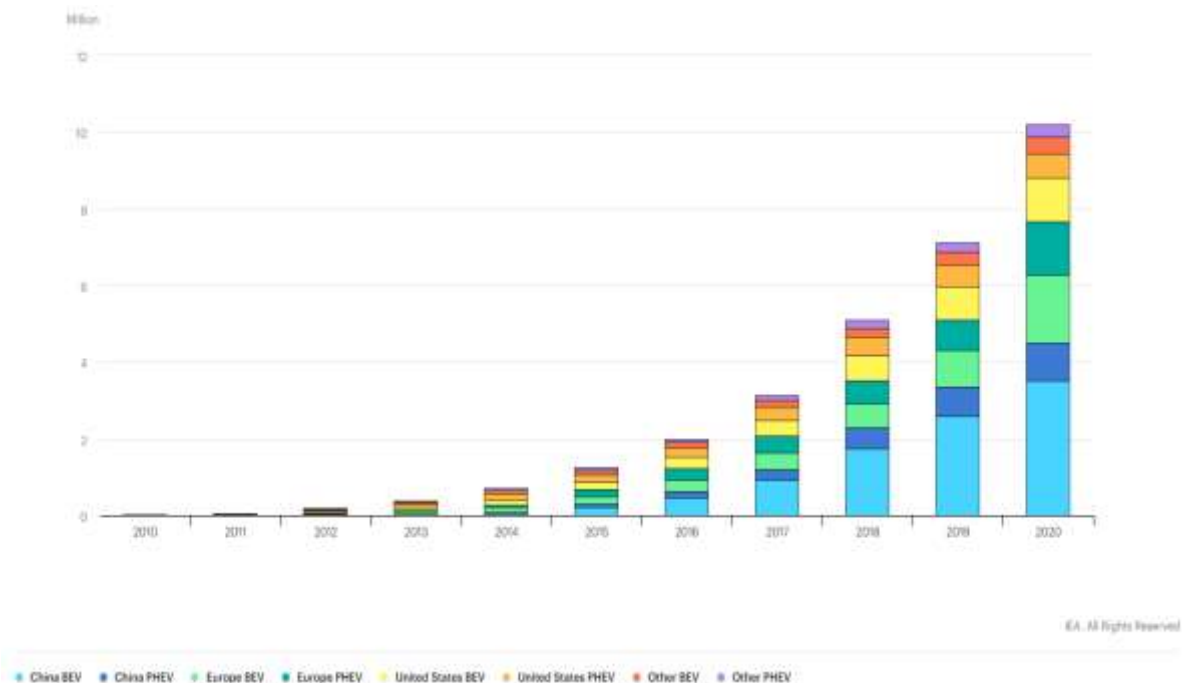
Η μείωση αυτή στις τιμές των μπαταριών, είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την αύξηση του παγκόσμιου στόλου ηλεκτρικών οχημάτων ετησίως. Η αύξηση αυτή αποτυπώνεται στο γράφημα που ακολουθεί. Το 2010 υπήρχαν περίπου 17,000 ηλεκτρικά οχήματα στους δρόμους. Το 2020 οι πωλήσεις ξεπέρασαν τα 3,1 εκατομμύρια (αυξήθηκαν κατά 48% σε σχέση με το 2019 εν μέσω πανδημίας και αποτέλεσαν το 4,4% των συνολικών πωλήσεων αυτοκινήτων παγκοσμίως) καταλήγοντας να έχουμε 10,3 εκατομμύρια στους δρόμους. [8][9].

Η Ελλάδα στο πρώτο εξάμηνο του 2021 αναδείχθηκε η χώρα της Ευρωπαϊκής Ένωσης με την μεγαλύτερη ποσοστιαία αύξηση στις πωλήσεις ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Πιο συγκεκριμένα, κατέγραψε εντυπωσιακή άνοδο της τάξεως 665,2% που αντιστοιχεί σε 1.033 ηλεκτρικά οχήματα, ενώ το πρώτο τρίμηνο το ποσοστό ανόδου ήταν 859,4% καθώς διατέθηκαν 614 αυτοκίνητα έναντι 64 το αντίστοιχο διάστημα του 2020. Στις πωλήσεις των

plug in υβριδικών οχημάτων, κατέγραψε στο εξάμηνο ποσοστό ανόδου 834,9% αύξηση, που αντιστοιχεί σε 2.169 μονάδες. [10][11]



Διάγραμμα 1.2: Πωλήσεις ηλεκτρικών αυτοκινήτων 2010-2020. [8]



Διάγραμμα 1.3: Συνολικός στόλος ηλεκτρικών αυτοκινήτων 2010-2020 στους δρόμους.[9]

### 1.3 Κατηγορίες Φόρτισης Οχημάτων

Η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με φυσική επαφή μεταξύ φορτιστή και οχήματος, ή με επαγωγή.

Κατά την φόρτιση με επαφή (conductive charging) απαιτείται η φυσική σύνδεση του σταθμού φόρτισης και της μπαταρίας με την χρήση καλωδίων και βυσμάτων, όπως γίνεται δηλαδή με τις περισσότερες ηλεκτρικές συσκευές. Η διαδικασία αυτή δεν είναι αυτοματοποιημένη και η χρήση των καλωδίων ελλοχεύει τον κίνδυνο ατυχήματος.

Κατά την επαγωγική φόρτιση (inductive charging), πραγματοποιείται ασύρματη μεταφορά ενέργειας μεταξύ ενός σταθμού φόρτισης και ενός ηλεκτρικού οχήματος. Η βασική αρχή λειτουργίας ενός συστήματος επαγωγικής φόρτισης δεν διαφέρει κατά πολύ με αυτή ενός μετασχηματιστή: ενέργεια μεταφέρεται μεταξύ ενός πρωτεύοντος και ενός δευτερεύοντος πηνίου. Ο συσσωρευτής του ηλεκτρικού οχήματος έχει DC τάση, συνεπώς φορτίζει μόνο με συνεχές ρεύμα. Έτσι λοιπόν, το εναλλασσόμενο ρεύμα εξόδου του δευτερεύοντος πηνίου μετατρέπεται σε συνεχές προτού φτάσει στον συσσωρευτή. Οι επαγωγικοί φορτιστές έχουν τα περισσότερα κυκλώματα φόρτισης και ελέγχου εκτός του οχήματος, και επικοινωνούν με αυτό μέσω υπέρυθρων ή ραδιοσυχνοτήτων.

Παρότι η επαγωγική φόρτιση είναι πιο αυτοματοποιημένη και ασφαλής, η φόρτιση με επαφή είναι πιο διαδεδομένη. Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι έχει μικρότερο κόστος, μεγαλύτερη απόδοση και είναι λιγότερο πολύπλοκη σε σύγκριση με την επαγωγική.

Μία άλλη κατηγοριοποίηση των μορφών φόρτισης γίνεται σε τρία επίπεδα με βάση την παρεχόμενη ισχύ:

- **Επίπεδο 1:** στο πρώτο επίπεδο περιλαμβάνεται η μονοφασική εναλλασσόμενη φόρτιση η οποία πραγματοποιείται με τη χρήση συνηθισμένων οικιακών ρευματοδοτών 120V. Η παροχή ισχύος κυμαίνεται στα 1.3 kW με 2.4kW. Δεν απαιτεί εγκατάσταση εξοπλισμού και χρησιμοποιείται για την κάλυψη μικρών, καθημερινών διαδρομών.

- **Επίπεδο 2:** και σε αυτό το επίπεδο περιλαμβάνεται μονοφασική εναλλασσόμενη φόρτιση, με την διαφορά ότι απαιτούνται ειδικές εγκαταστάσεις και καλωδιώσεις καθώς οι φορτιστές λειτουργούν σε ένα εύρος 208-240V και η παροχή ρεύματος κυμαίνεται στα 3kW με 22kW.
- **Επίπεδο 3:** το επίπεδο αυτό περιλαμβάνει οποιαδήποτε μορφή ταχείας φόρτισης με μεγάλες τιμές παροχής ισχύος. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται συνήθως με την χρήση συνεχούς ρεύματος ή τριφασικού εναλλασσόμενου. Η τεχνολογία CHAdeMO αποτελεί μια τεχνολογία ταχείας φόρτισης συνεχούς ρεύματος η οποία μπορεί να παρέχει ως και 400kW. Επιτρέπει σε ένα ηλεκτρικό όχημα να φορτίσει κατά 80% σε 20 με 40 λεπτά. [12][13]

#### 1.4 Χαρακτηριστικά και Τεχνολογίες Συσσωρευτών

Οι συσσωρευτές ή αλλιώς μπαταρίες, αποτελούν ηλεκτροχημικές διατάξεις οι οποίες αποθηκεύουν χημική ενέργεια και την αποδεσμεύουν με τη μορφή ηλεκτρισμού κατά την αποφόρτισή τους. Αποτελούνται από μικρές κυψέλες, κάθε μία από τις οποίες αποτελεί μια ξεχωριστή μονάδα, οι οποίες συνδέονται είτε παράλληλα είτε σε σειρά με σκοπό την ικανοποίηση των απαιτήσεων ισχύος της εκάστοτε εφαρμογής. Όπως προαναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα, τα μείζονος σημασίας ελαττώματα των ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με περιορισμούς που τους επιβάλλουν οι μπαταρίες. Έτσι λοιπόν, αν είναι επιθυμητή η κατασκευή ενός προγράμματος βελτιστοποίησης φόρτισης και αποφόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων, πρέπει να δοθεί έμφαση σε κάποια χαρακτηριστικά των μπαταριών τους, όπως:

- **Χωρητικότητα:** Μετριέται σε kWh υποδηλώνει την μέγιστη ποσότητα ενέργειας που μπορεί να εξαχθεί από τον συσσωρευτή ή αλλιώς το μέγιστο ηλεκτρικό φορτίο που μπορεί να αποθηκεύσει. Εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ηλικία της μπαταρίας.



- **Διάρκεια Ζωής:** Μετριέται σε κύκλους και υποδηλώνει τις δυνατές επαναφορτίσεις του συσσωρευτή. Σημαντικό ρόλο στον καθορισμό αυτού του μεγέθους επίσης παίζει το βάθος αποφόρτισης.
- **Βαθμός απόδοσης:** ο λόγος της ενέργειας που αποδίδεται κατά την αποφόρτιση προς την ενέργεια που απορροφάται κατά τη φόρτιση.
- **Ρυθμός φόρτισης/αποφόρτισης:** Είναι ο ρυθμός φόρτισης/αποφόρτισης της μπαταρίας σε σχέση με την χωρητικότητα του συσσωρευτή. Μετριέται σε C-rates. Π.χ. 1C σημαίνει ότι μια μπαταρία σε μία ώρα φορτίζει/αποφορτίζει τελείως.

## 1.5 Αγορές Ηλεκτρικής Ενέργειας

Η γενική λειτουργία της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας συνοψίζεται στην εφοδιαστική αλυσίδα του προϊόντος «ηλεκτρισμός». Τον αρχικό κρίκο αποτελούν οι παραγωγοί ή οι εισαγωγείς, οι οποίοι πωλούν την ηλεκτρική ενέργεια που διαθέτουν στη χονδρική αγορά (wholesale market). Οι πιθανοί αγοραστές μπορεί να είναι οι προμηθευτές (retailers), που αντιπροσωπεύουν το άθροισμα των πελατών τους, οι εξαγωγείς ή οι αυτοπρομηθευόμενοι καταναλωτές. Η τιμή της ενέργειας στη χονδρική αγορά προκύπτει ως εξής: κάθε ώρα της ημέρας κατατίθενται προσφορές (bids) από πλευράς των παραγωγών για συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας σε συγκεκριμένη τιμή (νόμισμα ανά MWh, πχ €/MWh) και για συγκεκριμένη ώρα παράδοσης του επόμενου εικοσιτετραώρου πχ 11:00-12:00. Η κατάθεση των προσφορών έχει δεσμευτικό χαρακτήρα, δηλαδή εφόσον γίνει δεν μπορεί να αποσυρθεί. Από την αντίθετη πλευρά, οι προμηθευτές καταθέτουν κι αυτοί από την προηγούμενη μέρα τις αναμενόμενες ζητούμενες ποσότητες και η τιμή του συστήματος προκύπτει από τη γραμμική ελαχιστοποίηση του γινομένου της τιμής επί την ποσότητα. Πρόκειται για μια μειοδοτική δημοπρασία, στην οποία το γινόμενο ελαχιστοποιείται στο βαθμό που

καλύπτονται οι ζητούμενες ποσότητες. Το σημείο, όπου ισορροπεί η προσφορά με τη ζήτηση, αποτελεί την Οριακή Τιμή του Συστήματος ΟΤΣ (marginal price), δηλαδή την τιμή, στην οποία θα πωλήσουν οι παραγωγοί την ενέργεια τους ανεξάρτητα από την ποσότητα που παρέχουν και στην οποία θα αγοράσουν οι προμηθευτές το ποσό της ενέργειας, που είχαν ζητήσει για την εκάστοτε ώρα της ημέρας. Η παραπάνω διαδικασία ονομάζεται Ημερήσιος Ενεργειακός Προγραμματισμός (ΗΕΠ) και γίνεται από το Διαχειριστή Δικτύου Μεταφοράς (Transfer System Operator/TSO ή Independent System Operator/ISO), ο οποίος και έχει την ευθύνη για την απρόσκοπτη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας.

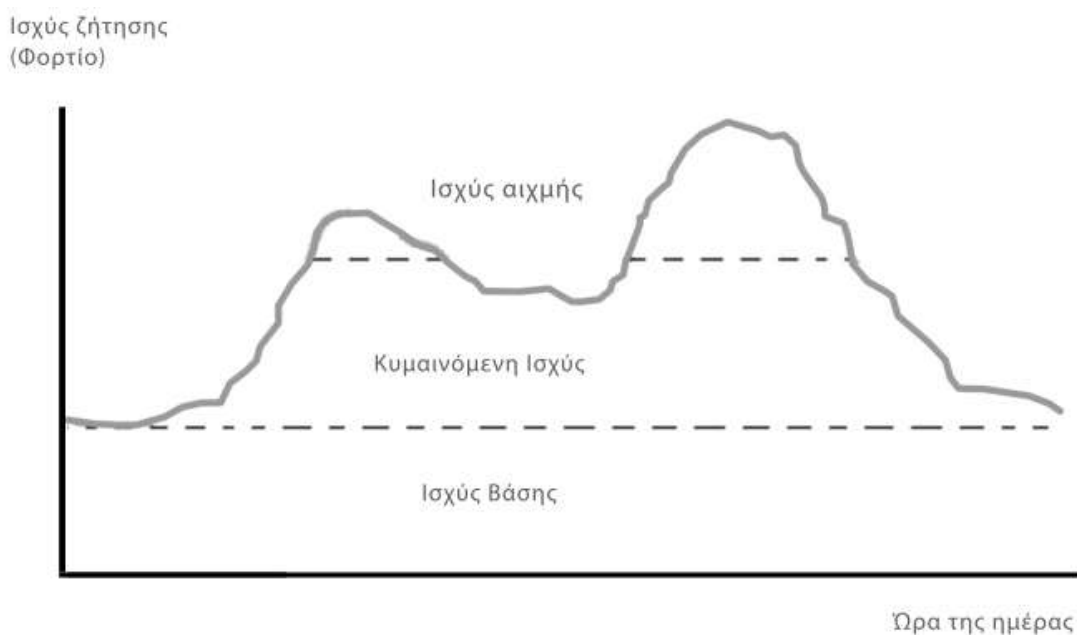
Το δεύτερο τμήμα της αγοράς, η λιανική, αφορά τους προμηθευτές και τους τελικούς καταναλωτές, οι οποίοι μπορούν να επιλέγουν ελεύθερα ποιά εταιρεία θα τους προμηθεύει με ηλεκτρική ενέργεια. Οι τιμές τη λιανικής αγοράς τείνουν μακροπρόθεσμα προς την ΟΤΣ, καθώς οι προμηθευτές ανταγωνίζονται μεταξύ τους προσφέροντας χαμηλότερα τιμολόγια στους τελικούς καταναλωτές. Τέλος, υπάρχουν ορισμένοι καταναλωτές, κυρίως βιομηχανικοί, οι οποίοι για να μηδενίσουν το ενδιάμεσο κόστος του προμηθευτή, αγοράζουν ηλεκτρική ενέργεια απευθείας από τη χονδρική αγορά. Οι καταναλωτές αυτοί ονομάζονται αυτοπρομηθευόμενοι. [4]

Όταν η ζήτηση ισχύος υπερβεί την παραγόμενη, οι συνδεδεμένες στο δίκτυο συσκευές λειτουργούν καταναλώνοντας λιγότερη ενέργεια, ώστε να σταθεροποιηθεί το δίκτυο σε μία μικρότερη συχνότητα. Οι συσκευές ωστόσο, είναι σχεδιασμένες να λειτουργούν σε συγκεκριμένη συχνότητα και τάση. Η πτώση συνεπώς της συχνότητας του δικτύου, οδηγεί σε ανεπανόρθωτες ζημιές στις συσκευές και αν δεν αποτραπεί εγκαίρως προκαλείται «Black Out». Όταν η ζήτηση ισχύος είναι χαμηλότερη από την έξοδο του φορτίου βάσης της μονάδας παραγωγής ενέργειας, η αχρησιμοποίητη ενέργεια χάνεται μάταια.

- **Ισχύς Βάσης:** Η ισχύς φορτίου βάσης (baseload power) είναι η ελάχιστη ισχύς που απαιτείται κατά την διάρκεια της ημέρας. Συνήθως προέρχεται από τους μεγάλους σταθμούς παραγωγής ενέργειας, πχ θερμικούς, λιγνιτικούς, πυρηνικούς, μέσω μακροπρόθεσμων συμβολαίων για σταθερή παραγωγή με μικρό κόστος ανά παραγόμενη κιλοβατώρα.

- **Ισχύς Αιχμής:** Η ισχύς αιχμής (peak power) παράγεται ή αγοράζεται τις ώρες εκείνες της ημέρας, κατά τις οποίες αναμένεται μεγάλη κατανάλωση ισχύος (peak demand). Συνήθως, η ενέργεια αυτή παράγεται από σταθμούς, που έχουν την ικανότητα να τίθενται σε λειτουργία και να αποσυνδέονται ταχύτατα, όπως είναι οι τουρμπίνες φυσικού αερίου.

Οι αγορές ηλεκτρικής ενέργειας θα κληθούν σύντομα να αντιμετωπίσουν την πρόκληση της συνεχούς αύξησης του στόλου ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς θα πρέπει να καλύψουν τις απαιτήσεις φόρτισής τους. Συνεπώς, θα χρειαστεί να βρεθεί τρόπος εξισορρόπησης της ζήτησης μεταξύ των ωρών αιχμής και των ωρών όπου παράγεται ηλεκτρική ενέργεια πολύ κοντά στο φορτίο βάσης.



**Διάγραμμα 1.4:** Η ζώνη χαμηλότερα του κατώτερου σημείου της χρονολογικής καμπύλης φορτίου είναι η Ισχύς Βάσης. Ισχύς αιχμής είναι η ζώνη, η οποία περιλαμβάνει φορτία, που υπερβαίνουν τα 2/3 της αιχμής. Ενδιάμεσα βρίσκεται η ζώνη κυμαινόμενου φορτίου.

## 1.6 Στόχοι Διπλωματικής και Καινοτομία

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην ανάδειξη των προτερημάτων της τεχνολογίας «V2G», μέσω της ανάπτυξης ενός αλγορίθμου βελτιστοποίησης τους κόστους

φόρτισής τους ανάλογα και με την ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου. Ειδικότερα, ο αλγόριθμος αυτός θα συμβάλει στην ομαλότερη λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου, όπου θα επιβλέπει:

*α) τα οχήματα που θα δύναται να φορτίζουν,*

*β) τα οχήματα που θα δύναται να εκφορτίζουν και*

*γ) τις ανάγκες ζήτησης/προσφοράς δικτύου ανά ημέρα.*

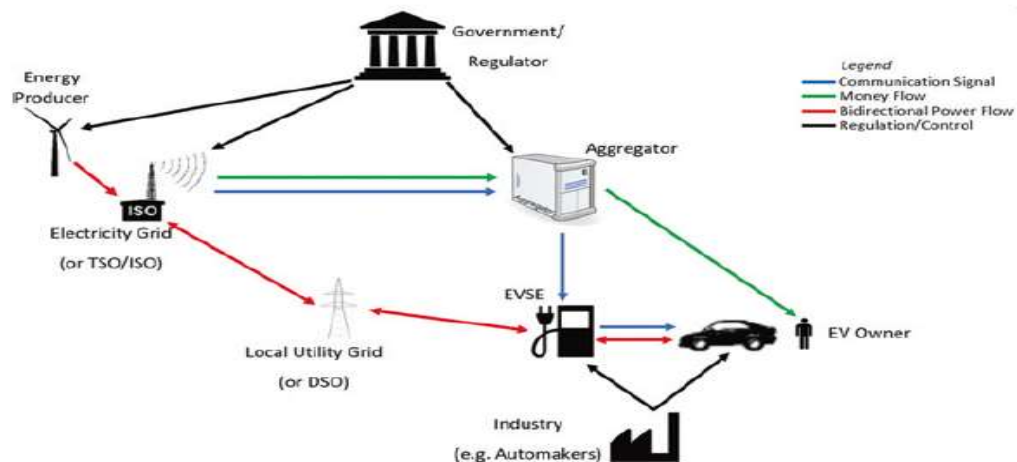
Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται επισκόπηση ορισμένων πτυχών και λειτουργιών της τεχνολογίας V2G και των ευφυών δικτύων. Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφεται η μοντελοποίηση του προβλήματος και αναπτύσσεται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης. Στο κεφάλαιο 4, πραγματοποιείται μεταφορά του παραπάνω προβλήματος στο προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του αλγορίθμου. Τέλος, στο κεφάλαιο 5 γίνεται αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, εξάγονται συμπεράσματα και προτείνονται μελλοντικές κατευθύνσεις όσων αφορά την τεχνολογία V2G.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

## Κεφάλαιο 2: V2G Τεχνολογία

### 2.1: V2G και Ευφυή Δίκτυα

Η μεγάλη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά, αποτελεί ένα νέο είδος φορτίου για τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία καλούνται να αναβαθμιστούν για να τα διαχειριστούν. Η V2G (Vehicle-to-Grid) τεχνολογία αποσκοπεί στην καλύτερη αξιοποίηση των σταθμευμένων οχημάτων. Πιο συγκεκριμένα, ένα ηλεκτρικό όχημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αποθήκη ενέργειας που επιτρέπει την αμφίδρομη ροή ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ της μπαταρίας του οχήματος και του ηλεκτρικού δικτύου όταν αυτό είναι σταθμευμένο, έτσι ώστε να καλύπτει τις ανάγκες του χρήστη ανάλογα με την τιμολογιακή πολιτική, που επιθυμεί να ακολουθήσει. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας τεχνολογίες ΑΠΕ (φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, κυψέλες υδρογόνου) σε ένα όχημα, κάθε καταναλωτής ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να γίνει και παραγωγός και να προσφέρει την ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο ή απλά να καλύπτει μέρος της ζήτησής του.



**Διάγραμμα 2.1:** Οι σχέσεις που αναπτύσσονται κατά την λειτουργία ενός υποθετικού V2G συστήματος, μεταξύ των συντελεστών του. [16]

Η τεχνολογία V2G γίνεται ακόμη πιο ελκυστική όταν έχει αποδειχτεί [14], [15] ότι κατά την διάρκεια μιας μέρας το 95% των οχημάτων είναι σταθμευμένο. Το 95% λοιπόν του στόλου των αυτοκινήτων είναι διαθέσιμο για να εφαρμοστεί η τεχνολογία V2G.

## 2.2: Συντελεστές V2G

Ο πρώτος και σημαντικότερος συντελεστής σε ένα σύστημα V2G είναι ο κάτοχος του ηλεκτρικού οχήματος, καθώς προσφέρει το όχημα «V» (Vehicle). Παρόλαυτά, ο ρόλος του από εκεί και πέρα είναι σχετικά παθητικός διότι από την στιγμή που συνδέει το όχημα στο δίκτυο χρειάζεται μόνο να ενημερώσει το σύστημα για την προβλεπόμενη ώρα αναχώρησης και, το σημαντικότερο, να πραγματοποιήσει ανάληψη των χρημάτων για της υπηρεσίες που προσέφερε το όχημα. Από όλους τους συντελεστές, ο ρόλος του ιδιοκτήτη είναι ο πιο απλός αλλά ταυτόχρονα καθορίζει την διαθέσιμη προσφερόμενη ενέργεια και την διάρκεια της διαδικασίας, δύο χαρακτηριστικά μείζονος σημασίας για την αποδοτικότητα της εξοικονόμησης ενέργειας και χρημάτων του συστήματος. Παράλληλα, το όχημα είναι αρκετά ενεργό στην διαδικασία καθώς επικοινωνεί με τον aggregator και προσφέρει ρεύμα στο δίκτυο ή δέχεται από αυτό.

Ο επόμενος κύριος συντελεστής είναι ο aggregator (δόκιμος όρος συναθροιστής ή πάροχος) ο οποίος αντιπροσωπεύει και το «2» καθώς αποτελεί τον συνδετικό κρίκο ανάμεσα στο όχημα και το ηλεκτρικό δίκτυο. Ο aggregator λαμβάνει ένα κύριο σήμα από το ηλεκτρικό δίκτυο και στη συνέχεια αυτός με τη σειρά του διαδίδει το σήμα σε κάθε μεμονωμένο όχημα που είναι συνδεδεμένο σε αυτόν. Λαμβάνοντας υπόψη ότι τα ηλεκτρικά οχήματα δεν είναι φυσικά συνδεδεμένα με το δίκτυο (μέσω καλωδίου φόρτισης) ανά πάσα στιγμή, ο aggregator πρέπει να συντονίσει και υπολογίσει τον αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων που είναι συνδεδεμένα, καθώς και την διαθέσιμη ισχύ που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις υπηρεσίες δικτύου που απαιτούνται την εκάστοτε στιγμή. Επιπλέον, ανάλογα με τους περιορισμούς ή τις προτιμήσεις φόρτισης/αποφόρτισης που έχει θέσει ο ιδιοκτήτης του εκάστοτε συνδεδεμένου οχήματος, καλείται να συντονίσει την διαδικασία ροής ρεύματος μεταξύ οχημάτων και δικτύου. Ο aggregator συνεπώς, απαιτεί εξειδικευμένο εξοπλισμό και λογισμικό για να διαχειριστεί αυτόν τον όγκο δεδομένων, και πιθανόν να χρειάζεται το 40%-50% των εσόδων που προκύπτουν από την τεχνολογία V2G.

Τέλος, ο τρίτος κύριος συντελεστής του συστήματος είναι το ηλεκτρικό δίκτυο (Electricity Grid) και αντιπροσωπεύει το γράμμα «G». Τα χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών δικτύων έχει περιγραφεί λεπτομερώς στην ενότητα 1.5. Ανάλογα με την κατάσταση του ηλεκτρικού δικτύου, ο διαχειριστής του θα αγοράσει/πουλήσει ενέργεια και στέλνοντας σήμα σε όλους τους συμμετέχοντες, συμπεριλαμβανομένου του aggregator. [17]

### 2.3: Απαιτήσεις V2G

Η πρακτική εφαρμογή της V2G τεχνολογίας σε υπολογίσιμη κλίμακα έχει πραγματοποιηθεί τα τελευταία πέντε χρόνια. Τα είδη των ηλεκτρικών αυτοκινήτων που είναι ικανά να ενστερνιστούν την V2G τεχνολογία είναι τα Ηλεκτρικά Οχήματα με Συσσωρευτή (BEVs), τα Επαναφορτιζόμενα Υβριδικά με Ηλεκτρική Ενέργεια από Εξωτερική Πηγή (PHEVs) και αυτά που χρησιμοποιούν μηχανή εσωτερικής καύσης, είτε κυψέλες καυσίμου (FCEVs). Τα BEVs μπορούν να φορτίζουν κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης και να αποφορτίζουν όταν το δίκτυο το χρειάζεται, τα FCEVs μπορούν να παράγουν ενέργεια καταναλώνοντας υδρογόνο (ή όποιο άλλο καύσιμο χρησιμοποιούν) λειτουργώντας έτσι ως κλασικές γεννήτριες, ενώ τα PHEVs μπορούν να προσφέρουν ενέργεια και με τους δύο αυτούς τρόπους. Ωστόσο, τα οχήματα που θα είναι εν τέλει ικανά να υποστηρίξουν τη V2G λειτουργία πρέπει να πληρούν τρεις προϋποθέσεις:

- 1) *Να διαθέτουν κατάλληλη σύνδεση με το δίκτυο, που να επιτρέπει τη ροή ενέργειας από το όχημα στο δίκτυο. Θα πρέπει δηλαδή οι ιδιοκτήτες των οχημάτων να προμηθευτούν με κατάλληλη καλωδίωση και οι πάροχοι ηλεκτρικού ρεύματος να δημιουργήσουν τις κατάλληλες υποδομές.*
- 2) *Να μπορούν να δέχονται ένα σήμα ελέγχου από το δίκτυο και να είναι σε θέση να ανταποκρίνονται σε αυτό σε πραγματικό χρόνο. Μόνο όταν ο αγοραστής μπορεί να καθορίσει την ακριβή ώρα της ανταλλαγής η ενέργεια από το όχημα έχει έσοδα μεγαλύτερα του κόστους για την παραγωγή της. Το σήμα ελέγχου μπορεί να είναι ένα σήμα που εκπέμπεται σε ραδιοσυχνότητες, ή που*

μεταφέρεται μέσω ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας, μέσω απευθείας σύνδεσης στο ίντερνετ ή ακόμα και μέσω των ηλεκτρικών καλωδίων.

3) Να διαθέτουν ένα ψηφιακό μετρητικό σύστημα, ικανό για ακριβείς μετρήσεις. Το σύστημα αυτό θα πρέπει να είναι ικανό να μετράει πόση ακριβώς ενέργεια παρείχε το εκάστοτε όχημα στο δίκτυο και σε ποια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Επιπλέον, ο οδηγός πρέπει να γνωρίζει ανά πάσα στιγμή την κατάσταση φόρτισης (State Of Charge/SOC) του συσσωρευτή του, έχοντας τη δυνατότητα να ορίσει το μέγιστο δυνατό βάθος αποφόρτισης, ώστε να μπορεί να καλύψει τις βασικές ανάγκες μεταφοράς του.

Υπάρχουν 50 εγχειρήματα V2G παγκοσμίως, εκ των οποίων 25 στην Ευρώπη, 18 σε Βόρεια Αμερική και 7 στην Ασία. Στην Ασία έχει δοθεί μεγαλύτερη έμφαση στις υπηρεσίες Vehicle-to-Home και Vehicle-to-Building (V2H/B). Στα περισσότερα εγχειρήματα έχουν κυριαρχήσει οι λύσεις συνεχούς ρεύματος καθώς προτείνονται στο 93% αυτών. Ωστόσο, το γεγονός ότι αναμένεται τα επόμενα χρόνια αύξηση των οχημάτων συμβατών με φόρτιση εναλλασσόμενου ρεύματος θα μειώσει σίγουρα αυτό το ποσοστό. Παρόλα αυτά, ελάχιστοι φορτιστές και οχήματα αμφίδρομης ροής ρεύματος έχουν κυκλοφορήσει στην αγορά, καθώς το κόστος είναι μεγάλο και σε αρκετά τεχνικά προβλήματα δεν έχει βρεθεί κάποια ικανοποιητική λύση. [16]

## 2.4: Προτερήματα της V2G Τεχνολογίας

Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο, ο εξηλεκτρισμός των μεταφορών αποτελεί ένα παγκόσμιο εγχείρημα ώστε να μειωθεί το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα. Ωστόσο, η κάλυψη των αναγκών εκατομμυρίων νέων φορτίων, τα οποία ζητούν ενέργεια σε καθημερινή βάση αποτελεί πρόκληση για τα ηλεκτρικά δίκτυα. Εάν όμως γίνει εφαρμογή της V2G τεχνολογίας, τα δίκτυα όχι μόνο δεν θα ζημιωθούν από τη διείσδυση μεγάλου αριθμού ηλεκτρικών οχημάτων, αλλά αντίθετα θα έχουν την δυνατότητα να βελτιωθούν προς όφελος δικό τους αλλά και της κοινωνίας. Παρακάτω θα αναλυθούν οι τρόποι με τους οποίους η



εδραίωση της V2G τεχνολογίας στα ηλεκτρικά οχήματα, θα φανεί ωφέλιμη προς τα ηλεκτρικά δίκτυα, τους καταναλωτές αλλά και το περιβάλλον.

#### 2.4.1: Αποθήκευση Ενέργειας Ανανεώσιμων Πηγών

Τα τελευταία χρόνια, γίνεται μια παγκόσμια προσπάθεια για την παραγωγή όσο το δυνατόν περισσότερης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (ΑΠΕ). Ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα, που έχει η παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ είναι ότι εμφανίζει απρόβλεπτες διακυμάνσεις. Η ισχύς εξόδου ενός φωτοβολταϊκού μπορεί από τη μία στιγμή στην άλλη να μηδενιστεί, επειδή πέρασε ένα σύννεφο, ή μια ανεμογεννήτρια μπορεί αντίστοιχα να σταματήσει να παράγει ενέργεια, εάν η ταχύτητα του ανέμου γίνει μικρότερη ή και μεγαλύτερη από συγκεκριμένες τιμές. Η ισχύς εξόδου λοιπόν δεν μπορεί να προβλεφθεί με βεβαιότητα και να οριστεί ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες του δικτύου, όπως συμβαίνει με τους συμβατικούς σταθμούς των ορυκτών καυσίμων. Για μικρά επίπεδα διείσδυσης, οι διακυμάνσεις αυτές μπορούν να αντιμετωπιστούν αποτελεσματικά με ήδη υπάρχοντες μηχανισμούς. Παρόλα αυτά, καθώς το ποσοστό της παραγόμενης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, ξεπερνάει το 10-30%, επιπλέον μηχανισμοί είναι απαραίτητοι για να εξισορροπηθεί η μεταβαλλόμενη παραγωγή με την επίσης μεταβαλλόμενη ζήτηση. Δύο τέτοιοι μηχανισμοί, που θα μπορούσαν να λύσουν αυτόν τον περιορισμό των ΑΠΕ είναι προφανώς η ύπαρξη εφεδρειών και δεύτερον η ύπαρξη αποθηκευτικών διατάξεων ενέργειας. Η εφεδρεία αναφέρεται στην ύπαρξη γεννητριών, που δεν παράγουν ενέργεια παρά μόνο όταν τους ζητηθεί, δηλαδή εν προκειμένω, όταν η παραγωγή από ΑΠΕ δεν επαρκεί για να καλύψει τη ζήτηση. Αντίθετα, κατά την αποθήκευση αρχικά απορροφάται το πλεόνασμα της ενέργειας, που παράγεται από ΑΠΕ και υπό κανονικές συνθήκες θα απορρίπτονταν, εφόσον η ζήτηση έχει ήδη καλυφθεί, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί σε κάποιο μεταγενέστερο φορτίο. Και οι δύο αυτές λύσεις, όπως είναι φανερό, προσθέτουν επιπλέον κόστος κεφαλαίου για τα ηλεκτρικά δίκτυα στην ήδη ακριβή περίπτωση της παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές [18].

Όσον αφορά στην αποθήκευση ενέργειας, υπάρχει η επιλογή να κατασκευαστούν νέες μονάδες μεγάλης κλίμακας όπως τα υδροηλεκτρικά εργοστάσια, συστήματα πεπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage/CAES) κ.α. ή να αξιοποιηθεί κάποια

υπάρχουσα αλλά αναξιοποίητη μορφή αποθήκευσης. Με την υιοθέτηση της V2G λειτουργίας, οι συσσωρευτές των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελούν αυτή την μορφή αποθήκευσης. Κατά αυτόν τον τρόπο, τα ηλεκτρικά δίκτυα μπορούν να αποφύγουν τις επενδύσεις σε μεγάλης κλίμακας αποθηκευτικές διατάξεις, καθώς η εδραίωση των ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά της αυτοκίνησης αποτελεί πλέον γεγονός. Τα επιπλέον έξοδα, που θα χρειαστούν για να χρησιμοποιηθούν τα ηλεκτρικά οχήματα ως μονάδες αποθήκευσης είναι αυτά που αναφέρθηκαν σε προηγούμενη ενότητα και έχουν να κάνουν με την εγκατάσταση της V2G λειτουργίας. Στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών, έχει προταθεί το εξής σχήμα [19]: Η ισχύς που μπορεί να δώσει μια φωτοβολταϊκή εγκατάσταση είναι αρκετά προβλέψιμη κατά τη διάρκεια μίας ημέρας. Η μεγαλύτερη δυνατή ισχύς παράγεται κατά το ηλιακό μεσημέρι, ενώ όταν βραδιάσει η παραγωγή είναι μηδενική. Αντίθετα, η αιχμή του φορτίου είναι συνήθως αργά το απόγευμα. Μια απλή λοιπόν στρατηγική για την εκμετάλλευση της V2G λειτουργίας είναι ο προγραμματισμός της φόρτισης των οχημάτων κατά τις μεσημεριανές ώρες και η εκφόρτιση τους κατά τις απογευματινές. Για την περίπτωση των αιολικών, η κατάσταση είναι πιο περίπλοκη, αλλά σε γενικές γραμμές είναι προτιμότερο, η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων να πραγματοποιείται τις πρώτες πρωινές ώρες, ενώ η εκφόρτιση τους να γίνεται τις απογευματινές, όταν δηλαδή το φορτίο παρουσιάζει την τυπική αιχμή του. [20]

#### 2.4.2: Ομαλή Λειτουργία Ηλεκτρικού Δικτύου

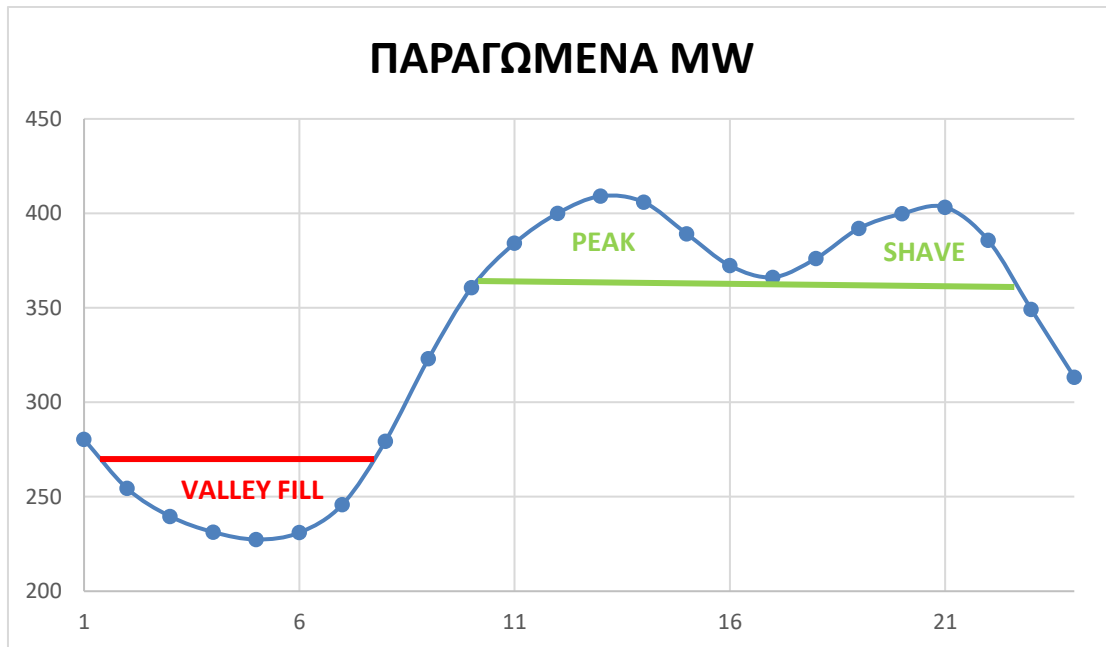
Η συμβολή των ηλεκτρικών οχημάτων με V2G στην ομαλή λειτουργία των ηλεκτρικών δικτύων μπορεί να πραγματοποιηθεί με τους παρακάτω τρόπους:

- **Valley Filling:** Εάν ένας στόλος ηλεκτρικών οχημάτων, ο οποίος λειτουργεί ως φορτίο είναι αρκετά μεγάλος, μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο όσον αφορά το valley filling. Για παράδειγμα, έχει υπολογιστεί για το σύστημα της California ένας τέτοιος ικανός αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων εξοπλισμένων με συσσωρευτές των 20 kWh που φορτίζουν για 5 ώρες κατά μέσο όρο, είναι 12.500. Κατά αυτόν τον τρόπο αντιπροσωπεύουν ένα φορτίο 30 MW, μέγεθος ικανό να επηρεάσει

την καμπύλη φορτίου κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης. [21] Το valley filling μπορεί να επιτευχθεί και χωρίς V2G λειτουργία, απλώς με κάποιο κίνητρο νυχτερινής χρέωσης. Ωστόσο, η ύπαρξη aggregator σε έναν στόλο V2G οχημάτων εξασφαλίζει μεγαλύτερο valley filling διότι τότε υπάρχει σαφής παρέμβαση με σκοπό να κατανεμηθεί η φόρτιση των διαφόρων ηλεκτρικών οχημάτων κατά τέτοιο τρόπο ώστε να εξαλειφθούν οι διακυμάνσεις της ζήτησης. Αυτό είναι αρκετά σημαντικό για το ηλεκτρικό δίκτυο, καθώς η εξυπηρέτηση ενός σταθερού και επίπεδου φορτίου είναι πολύ πιο εύκολη και απλή διαδικασία από ότι ενός κυμαινόμενου.

- **Peak Shaving:** Η ζήτηση ηλεκτρική ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας ημέρας μπορεί να αυξηθεί δραματικά, ειδικά κατά τις ζεστές μέρες του καλοκαιριού, όταν δηλαδή γίνεται ευρεία χρήση συσκευών, όπως τα κλιματιστικά. Αυτές οι περίοδοι, συχνά απαιτούν την παραγωγή ενέργειας από ειδικές μονάδες, γνωστών και ως peakers για την κάλυψη ακριβώς του φορτίου αιχμής. Οι μονάδες αυτές, εξ' ορισμού, λειτουργούν μόνο περιστασιακά και για το λόγο αυτό, δεν μπορούν να είναι οικονομικά βιώσιμες εάν δεν προσφέρουν την ενέργεια που παράγουν σε υψηλή τιμή. Μια έρευνα για το σύστημα PJM των ΗΠΑ έδειξε ότι 1% μείωση της ζήτησης αιχμής μπορούσε να γλιτώσει το κόστος της ενέργειας κατά 3,9%, ποσοστό που αντιπροσωπεύει εκατομμύρια δολάρια στο συγκεκριμένο σύστημα [22]. Για το λόγο αυτό, είναι μείζονος σημασίας για τους σχεδιαστές και τους διαχειριστές των ηλεκτρικών δικτύων να καταφέρουν να μειώσουν τις αιχμές του φορτίου. Το peak shaving έχει ως στόχο την ομαλοποίηση της καμπύλης του φορτίου, κατά την οποία μπορούν να προκύψουν σημαντικά οικονομικά οφέλη. Ένας τρόπος να πραγματοποιηθεί αυτή η ομαλοποίηση είναι μέσω της στρατηγικής demand response (απόκριση ζήτησης), όπου οι τελικοί καταναλωτές εν προκειμένω μειώνουν τη ζήτηση ενέργειας σε συγκεκριμένες ώρες, λόγω συνήθως κάποιου οικονομικού κινήτρου. Αυτή την τακτική μπορούν να ακολουθήσουν και τα ηλεκτρικά οχήματα. Προφανώς το peak shaving από τα ηλεκτροκίνητα οχήματα είναι δυνατό μόνο

κατά τη V2G λειτουργία. Εάν δεν υπάρχει αυτή, η ροή ισχύος προς το δίκτυο δεν είναι δυνατή, επομένως η ζήτηση εν ώρα αιχμής δεν μπορεί να εξυπηρετηθεί.



**Διάγραμμα 2.2:** Μέσος όρος ζητούμενων MW ανά ώρα της ημέρας από την ΔΕΔΔΗΕ στην Κρήτη για το έτος 2020.

- **Στρεφόμενη Εφεδρεία:** Η αγορά της στρεφόμενης εφεδρείας μπορεί να είναι κερδοφόρα για τα ηλεκτρικά οχήματα, που θα εκτελούν V2G λειτουργία, καθώς οι ιδιοκτήτες τους μπορούν να αμείβονται για την χρήση τους ως στρεφόμενη εφεδρεία για πολλές ώρες, απλά με το να παραμένουν συνδεδεμένα στο δίκτυο, χωρίς ουσιαστικά να παράγουν πραγματική ενέργεια και να αποφορτίζουν τους συσσωρευτές τους. Αυτό σημαίνει, πως θα πληρώνονται απλά για να είναι έτοιμα να προσφέρουν ενέργεια, όποτε αυτό χρειασθεί, κάτι το οποίο σε σωστά διαμορφωμένα δίκτυα δεν είναι συχνό φαινόμενο. Επιπλέον, λόγω της διεύδυσης των ΑΠΕ στην αγορά και παραγωγής χαμηλού κόστους ενέργειας από αυτές, το κόστος της ενέργειας που προσφέρεται κατά την χρήση στρεφόμενης εφεδρείας αυξάνεται. Συνεπώς αυξάνεται και το κέρδος αυτών που την παράγουν ενώ το κόστος που σχετίζεται με την φθορά του συσσωρευτή είναι πολύ περιορισμένο.

- **Ρύθμιση Συχνότητας:** τα ηλεκτρικά οχήματα που θα είναι ικανά για V2G λειτουργία, φαίνονται κατάλληλα για την αγορά της ρύθμισης συχνότητας καθώς μπορούν να ανταποκριθούν πολύ γρήγορα σε σήματα ρύθμισης και έχουν τη δυνατότητα να πραγματοποιήσουν τόσο άνω ρύθμιση, με την αύξηση της ροής ισχύος προς το δίκτυο ή τη μείωση του ρυθμού φόρτισης των συσσωρευτών τους, όσο και κάτω ρύθμιση, με την αύξηση του ρυθμού φόρτισης των συσσωρευτών τους ή τη μείωση της ροής ισχύος προς το δίκτυο. Ένας συνδυασμός άνω και κάτω ρύθμισης τελικά προκαλεί πολύ μικρή αποφόρτιση του συσσωρευτή, χωρίς να προκαλεί ιδιαίτερα προβλήματα φθοράς αναφορικά με τους κύκλους λειτουργίας του συσσωρευτή. [20]

## 2.5: Επιχειρηματική Προσέγγιση V2G

Αφού πραγματοποιήθηκε περιγραφή των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας στο προηγούμενο κεφάλαιο, κρίνεται σκόπιμο να γίνει αναφορά στους νέους παράγοντες της αγοράς που θα παρουσιαστούν κατά την υιοθέτηση της V2G λειτουργίας. Αυτοί είναι οι εξής [23]:

- **Ο ιδιοκτήτης του οχήματος:** Θεωρείται πάντοτε τελικός καταναλωτής ενέργειας και ποτέ παραγωγός, ακόμα και αν συμμετέχει στη V2G λειτουργία και στέλνει ενέργεια πίσω στο δίκτυο. Αυτό συμβαίνει λόγω της ύπαρξης του aggregator.
- **Ο συναθροιστής-πάροχος (aggregator) των ηλεκτρικών οχημάτων:** Πρόκειται για τον παράγοντα κλειδί, όσον αφορά την υιοθέτηση της V2G λειτουργίας και η λειτουργία του είναι διπλή. Είναι ο προμηθευτής, ο οποίος πουλά ηλεκτρική ενέργεια στον ιδιοκτήτη του οχήματος, μέσω ενός συμβολαίου. Ο δεύτερος ρόλος ενός aggregator, που έχει και μεγαλύτερη σχέση με τη V2G λειτουργία, προέρχεται από την αδυναμία ενός μεμονωμένου EV να

συμμετάσχει απευθείας στις χονδρικές αγορές ενέργειας και επικουρικών υπηρεσιών. Για παράδειγμα, στις περισσότερες αγορές, η ελάχιστη ποσότητα ισχύος που μπορεί να προσφερθεί για ρύθμιση είναι το 1 MW. Γίνεται αντιληπτό, ότι ένα μόνο αυτοκίνητο, του οποίου ο συσσωρευτής είναι της τάξης των μερικών kWh, δεν θα μπορούσε ποτέ να προσφέρει αυτήν την ποσότητα. Αντίθετα, μία επιχείρηση, που θα έχει υπό την εποπτεία της ένα στόλο οχημάτων, θα μπορεί να λειτουργεί ως μεσάζοντας και να συμμετάσχει στις διάφορες αγορές, συναθροίζοντας την διαθέσιμη ισχύ ολόκληρου του στόλου.

- **Ο ιδιοκτήτης του συσσωρευτή:** Επειδή για το υψηλό κόστος των ηλεκτρικών οχημάτων ευθύνεται κατά κύριο λόγο ο συσσωρευτής, έχει προταθεί να διαχωριστεί το κόστος ενός EV από αυτό του συσσωρευτή, με σκοπό η αγορά ενός ηλεκτρικού οχήματος να γίνει πιο ελκυστική στο καταναλωτικό κοινό. Η ιδιοκτησία, η εγγύηση και ο έλεγχος της λειτουργίας του συσσωρευτή μπορεί να είναι το αντικείμενο, οποιουδήποτε από τους υπόλοιπους παράγοντες που εμπλέκονται στη V2G λειτουργία, ή μίας ξεχωριστής επιχείρησης, ασχολούμενης μόνο με αυτόν τον τομέα.
- **Ο ιδιοκτήτης της υποδομής φόρτισης:** Μπορεί να είναι ένας οικιακός καταναλωτής ρεύματος, που αγοράζει κάποια υποδομή φόρτισης για το ηλεκτρικό του όχημα, μπορεί να είναι μια οποιαδήποτε επιχείρηση, που θέλει να δώσει στους εργαζομένους της ή/και στους πελάτες της τη δυνατότητα να συνδέουν το όχημα τους στο δίκτυο, ή μπορεί η υποδομή αυτή να βρίσκεται σε κάποιο σταθμό φόρτισης (το ανάλογο του βενζινάδικου για τα ηλεκτρικά οχήματα) είτε δημόσιο, είτε ιδιωτικό. Εάν βρίσκεται σε δημόσιο χώρο και με δημόσια πρόσβαση, τότε υπάγεται στη διαδικασία της διανομής με το διαχειριστή του συστήματος (Distribution System Operator/DSO) να είναι ο ιδιοκτήτης, εναλλακτικά ανήκει σε μια ιδιωτική εταιρία που προσφέρει τις υπηρεσίες της, με συγκεκριμένα συμβόλαια που ορίζει αυτή.

- Ο πάροχος υπηρεσιών τεχνολογιών πληροφορικής (Information Technology/IT service provider): Κατά την υιοθέτηση της V2G λειτουργίας απαιτείται η διακίνηση ενός μεγάλου όγκου πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο και με μεγάλη ακρίβεια. Υπό από αυτήν την έννοια, οι πάροχοι IT υπηρεσιών μπορούν να λειτουργήσουν ως σύνδεσμος μεταξύ των διαφόρων παραγόντων, όπως πχ μεταξύ του ιδιοκτήτη του οχήματος και του aggregator, μεταξύ του aggregator και του διαχειριστή του συστήματος, ή συνδέοντας όλους τους προαναφερθέντες παράγοντες με την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι λοιπόν πιθανό, εταιρίες με εμπειρία και τεχνογνωσία στον τομέα της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών να βρουν πρόσφορο έδαφος για την παροχή υπηρεσιών τηλεματικής ή τη συντήρηση των δικτύων επικοινωνίας κ.α.

## 2.6: Περιοριστικοί Παράγοντες V2G

Το σημαντικότερο εμπόδιο στην εδραίωση της χρήσης ηλεκτρικών οχημάτων με V2G είναι η αυξημένη φθορά των συσσωρευτών. Η συμμετοχή ενός οχήματος στην αγορά ενέργειας για την κάλυψη της αιχμής αυξάνει την φθορά του συσσωρευτή του από ότι αν συμμετέχει μόνο στις αγορές επικουρικών υπηρεσιών. Για την εξυπηρέτηση του φορτίου αιχμής απαιτείται μεγάλο ποσό ενέργεια να εκφορτιστεί από το συσσωρευτή, γεγονός που αυξάνει το βάθος αποφόρτισής του (depth of discharge/DOD). Κοινή διαπίστωση, για όλες τις διαφορετικές τεχνολογίες του συσσωρευτή, είναι ότι το βάθος αποφόρτισης είναι ανάλογο του βαθμού φθοράς του συσσωρευτή. [5]

Επίσης, κάποια σημαντικά θέματα που αξίζει να αναφέρουμε είναι οι απώλειες της ενέργειας κατά τη φόρτιση και αποφόρτιση των συσσωρευτών, η μεγάλη πολυπλοκότητα που εισάγεται, τα προβλήματα πρόβλεψης της οδηγικής συμπεριφοράς και οι πιθανές αναβαθμίσεις στο δίκτυο.

Όσον αφορά το πρώτο ζήτημα, εάν το δίκτυο θέλει να αποθηκεύσει ενέργεια σε έναν συσσωρευτή και να την χρησιμοποιήσει αργότερα, πρέπει να λάβει υπόψιν του, ότι θα υπάρξουν απώλειες αρχικά κατά τη μετατροπή της AC τάσης σε DC, έπειτα κατά την

αποθήκευση αυτής της ενέργειας και τέλος για την εκ νέου μετατροπή της DC τάσης του συσσωρευτή σε AC του δικτύου.

Εν συνεχεία, η ανάγκη για συνεννόηση πολλών διαφορετικών παραγόντων με συχνά αντικρουόμενα οικονομικά συμφέροντα, εντείνει την πολυπλοκότητα της διαδικασίας, ιδίως όταν πρέπει να καλύπτονται σε πραγματικό χρόνο. Η πρόκληση αυτή αναμένεται να αντιμετωπιστεί κατά ένα βαθμό με την ύπαρξη των aggregators, που θα λειτουργούν ως μεσάζοντες μεταξύ των διαφόρων παραγόντων και καλούνται να αποκτήσουν την απαραίτητη τεχνογνωσία και εμπειρία.

Ο ανθρώπινος παράγοντας μπορεί και αυτός να πλήξει την αξιοπιστία του V2G εγχειρήματος. Όταν γίνεται λόγος για μεγάλο στόλο ηλεκτρικών οχημάτων, δεν μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την λειτουργία του συστήματος, ωστόσο είναι απαραίτητο να μελετηθούν στατιστικά οι ώρες χρήσης των οχημάτων, τα χιλιόμετρα που διανύονται, η συχνότητα και η διάρκεια των φορτίσεων ή τα έκτακτα και μη προγραμματισμένα ταξίδια. Μία σαφής υπεροχή για την υιοθέτηση της V2G λειτουργίας έχουν στόλοι οχημάτων με πιο αυστηρά προγραμματισμένα ταξίδια, όπως είναι για παράδειγμα τα μέσα μαζικής μεταφοράς σταθερής τροχιάς, ή τα οχήματα στους χώρους στάθμευσης των αεροδρομίων.

Ένας ακόμη παράγοντας που χρίζει μελέτης, είναι οι πιθανές αναβαθμίσεις και ενισχύσεις που θα χρειαστεί να πραγματοποιηθούν στο δίκτυο, έτσι ώστε να είναι εφικτή η αμφίδρομη ροή ενέργειας. Όταν χιλιάδες ή εκατομμύρια ηλεκτρικά οχήματα που βρίσκονται συνδεδεμένα στη χαμηλή τάση του δικτύου διανομής, προσφέρουν ενέργεια πίσω στο δίκτυο, πρέπει να μελετηθεί η επίδρασή τους στα διάφορα στοιχεία του δικτύου, όπως για παράδειγμα οι μετασχηματιστές.

Τέλος, σε περίπτωση που βρεθεί λύση στα παραπάνω προβλήματα και η τεχνολογία V2G καταφέρει να εδραιωθεί, ελλοχεύει ο αναπόφευκτος κίνδυνος του κορεσμού της αγοράς. Βασική αρχή της ανταγωνιστικής οικονομίας είναι ότι εάν η προσφορά ενός προϊόντος αυξηθεί πολύ, χωρίς την ανάλογη αύξηση της ζήτησης για το προϊόν αυτό, η τιμή πώλησης του θα μειωθεί. Ένα πολύ καλό παράδειγμα του φαινομένου αυτού είναι η μείωση στη τιμή αγοράς της κιλοβατώρας από τη ΔΕΗ στο πρόγραμμα «Φωτοβολταϊκά στις Στέγες» στην Ελλάδα. Το 2009 είχε δοθεί η δυνατότητα πώλησης της ενέργειας που παρήγαγαν τα νοικοκυριά στο δίκτυο με περίπου 0,55€/kWh. Η τιμή ωστόσο έφθινε χρόνο με τον χρόνο με αποτέλεσμα το 2019 που έληξε και το πρόγραμμα, να φτάνει τα 0,08€/kWh. Έτσι λοιπόν, όσο μεγαλύτερο είναι το πλήθος των οχημάτων με την ικανότητα χρήσης V2G, συνεπάγεται τόσο



μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας και ισχύος διαθέσιμες για τις αγορές, χωρίς ανάλογη αύξηση της ζήτησης. Αποτέλεσμα λοιπόν είναι η αναμενόμενη μείωση των τιμών και συνεπώς των εσόδων ανά ηλεκτρικό όχημα, γεγονός που δοκιμάζει την βιωσιμότητα της αμφίδρομης ροής ισχύος μεταξύ οχημάτων και δικτύου.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

## Κεφάλαιο 3: Ανάπτυξη Αλγορίθμου και Μαθηματική Μοντελοποίηση

### 3.1: Σκοπός κεφαλαίου

Το κεφάλαιο αυτό έχει ως σκοπό την περιγραφή των αλγορίθμων που εφαρμόζονται στον κώδικα και την μοντελοποίησή τους βάσει μαθηματικών σχέσεων, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν για τον προγραμματισμό και βελτιστοποίηση της αμφίδρομης ροής ισχύος μεταξύ των οχημάτων και του ηλεκτρικού δικτύου, από τον *aggregator*, κατά την διάρκεια μιας μέρας (24hrs). Ο προγραμματισμός κατά βέλτιστο τρόπο επιτυγχάνεται όταν η ζητούμενη ισχύς από τον πάροχο ηλεκτρικού ρεύματος τείνει στο φορτίο βάσης, υπό τον περιορισμό να καλύπτονται οι απαιτήσεις των οδηγών των ηλεκτρικών οχημάτων και του παρόχου. Ο *aggregator* λοιπόν λειτουργεί είτε ως ένα μεγάλο φορτίο ενέργειας για να καλύψει τις ανάγκες των οδηγών που θέλουν να φορτίσουν τα οχήματά τους, ή ως μια μονάδα παραγωγής ενέργειας από αυτούς που θέλουν αποφορτίσουν τα οχήματά τους για κάποιο χρηματικό κέρδος. Πραγματοποιεί ωστόσο τις δύο παραπάνω λειτουργίες, προσπαθώντας να διατηρεί μεταξύ των ορίων της κυμαινόμενης ισχύος. Για να διευκολυνθεί η διατύπωση του προβλήματος στο προγραμματιστικό περιβάλλον της Matlab, το πρόβλημα αντιμετωπίστηκε ως μη γραμμικό, με μη γραμμικούς περιορισμούς. Επιπλέον για να μπορεί να λυθεί γρήγορα και αποτελεσματικά χρησιμοποιήθηκε ο λύτης SNOPT μέσω της TOMLAB.

### 3.2: Παραδοχές και Αρχικοποίηση Παραμέτρων

Για την αντιμετώπιση του προβλήματος γίνονται οι παραδοχές ότι είναι γνωστά στον *aggregator* τα παρακάτω μεγέθη κατά την έναρξη της ημέρας (οι τιμές τους δύναται να τροποποιηθούν κατά βούληση):

- **STATION:** Το ποσοστό συμμετοχής του υποσταθμού ηλεκτρικής ισχύος που εξετάζεται, στην κάλυψη της ζητούμενης ενέργειας.
- **PEOPLE:** Ο πληθυσμός της περιοχής που καλύπτει ο υποσταθμός.
- **CPP:** Ο λόγος αυτοκινήτων ανά άνθρωπο.
- **EVP:** Το ποσοστό των ηλεκτρικών αυτοκινήτων με δυνατότητα συμμετοχής στην V2G λειτουργία σε σχέση με τον συνολικό στόλο των αυτοκινήτων.
- **N:** Ο στόλος των οχημάτων που θα συμμετάσχουν στην λειτουργία V2G κατά την διάρκεια της ημέρας. Γίνεται η παραδοχή ότι ο αριθμός είναι γνωστός από την αρχή της ημέρας στον *aggregator*. Υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση, (προστίθεται το 0.5 για να εξασφαλιστεί πώς στην περίπτωση δεκαδικού θα πραγματοποιηθεί στρογγύλευση προς τον αμέσως επόμενο μεγαλύτερο ακέραιο) :

$$N = fl\left(\frac{PEOPLE}{CPP} \times EVP + 0.5\right)$$

- **DAY:** Η διάρκεια της ημέρας που είναι διαθέσιμη η λειτουργία V2G. Χωρίζεται σε 24 ώρες. Στο τέλος της ημέρας ξεκινάει ο ο προγραμματισμός για την επόμενη ημέρα.
- **MAX\_RATE:** Ο μέγιστος ρυθμός φόρτισης ή αποφόρτισης των οχημάτων. Γίνεται η παραδοχή ότι ο ρυθμός φόρτισης και αποφόρτισης έχει το ίδιο εύρος για όλα τα οχήματα. Μονάδα μέτρησης: kWh.
- **MIN\_RATE:** Ο ελάχιστος ρυθμός φόρτισης ή αποφόρτισης των οχημάτων. Ισούται με το μηδέν καθώς τα οχήματα είναι να δυνατόν να συμμετέχουν ή όχι, οποιαδήποτε χρονική στιγμή της ημέρας που είναι σταθμευμένα. Μονάδα μέτρησης: kWh.

- **SUNDAY (1, DAY):** Ο μέσος όρος του φορτίου ζήτησης ανά ώρα των Κυριακών του έτους 2020. Ο *aggregator* προσπαθεί να βελτιστοποιήσει την αμφίδρομη ροή ισχύος βάση των δεδομένων ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας παρόμοιων ημερών της προηγούμενης χρονιάς. Βάση των δεδομένων (η ζήτηση ανά ημέρα και ώρα για το έτος 2020 για το γεωγραφικό διαμέρισμα της Κρήτης) που δόθηκαν από την ΔΕΔΔΗΕ για την υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής, πραγματοποιήθηκε κατηγοριοποίηση τους ανά ημέρα της εβδομάδας. Εν συνεχεία, υπολογίστηκαν οι μέσοι όροι των ημερών ώστε να δημιουργηθεί ένα μοντέλο πρόβλεψης για τον *aggregator*. Μονάδα μέτρησης: MW.
- **CHARGE (N,1):** Το ποσοστό φόρτισης του κάθε οχήματος που συμμετέχει στην V2G λειτουργία. Λαμβάνει τυχαίες τιμές από 0% έως 100%.
- **CL (181,1):** Διάνυσμα το οποίο παραθέτει την χωρητικότητα της μπαταρίας 181 μοντέλων ηλεκτρικών οχημάτων της αγοράς. [24]
- **CAPACITY (N,1):** Η χωρητικότητα της μπαταρίας των ηλεκτρικών οχημάτων. Λαμβάνει τυχαίες τιμές του πίνακα CL. Μονάδα μέτρησης kWh.
- **PT (N,1):** Ο χρόνος που θα είναι σταθμευμένο το εκάστοτε ηλεκτρικό όχημα κατά την διάρκεια της ημέρας. Λαμβάνει τυχαίες τιμές από 0 έως 24 ώρες ενώ στην πραγματικότητα θα ορίζεται από την οδηγό του οχήματος.
- **PARKED (N,DAY):** Οι ώρες της ημέρας κατά τις οποίες το εκάστοτε ηλεκτρικό όχημα είναι σταθμευμένο. Ορίζει επίσης την ώρα της ημέρας που ξεκινάει το όχημα την στάθμευσή του. Αποτελεί ένα πίνακα διαστάσεων  $N \times DAY$  του οποίου τα στοιχεία είναι 1 εάν το όχημα την δεδομένη χρονική στιγμή είναι σταθμευμένο και 0 εάν δεν είναι. Γίνεται η παραδοχή ότι το όχημα σε περίπτωση που σταματήσει να είναι σταθμευμένο δεν μπορεί να συμμετέχει ξανά στην διαδικασία V2G. Σε περίπτωση που ο χρόνος από την ώρα της ημέρας που σταθμεύει το όχημα μέχρι το τέλος της ημέρας είναι μικρότερος από το  $PT(i,1)$ , το  $PT(i,1)$  μεταβάλλεται έτσι ώστε να ισούται με το

άθροισμα των ωρών του διανύσματος του οχήματος στον πίνακα PARKED (i,24). Επιπλέον γίνεται η παραδοχή ότι το όχημα δεν μπορεί να σταματήσει την στάθμευσή του κάποια άλλη χρονική στιγμή από αυτήν που δηλώθηκε στο PARKED(i,24) αλλά και ότι τις ώρες 11μ.μ έως και 5π.μ. είναι πιθανότερο να είναι σταθμευμένο ένα όχημα.

$$PT(N,1) = \sum_{i=1}^N PARKED(i,24)$$

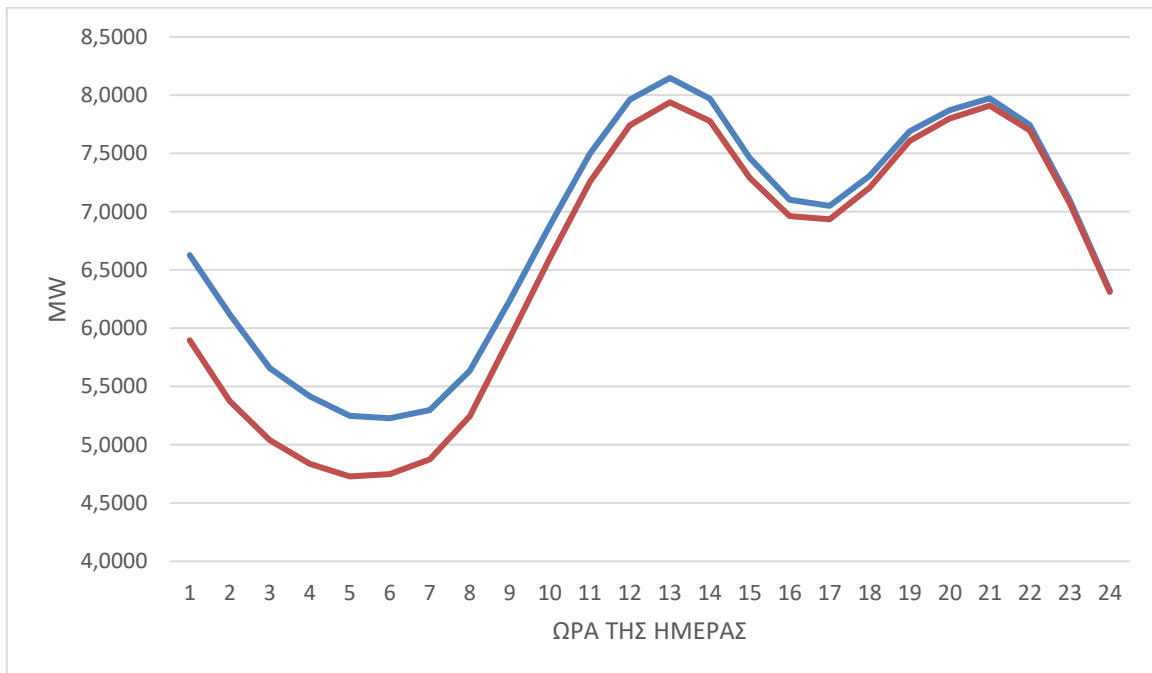
- **SOC(N,1):** Το ποσοστό αποθέματος που επιθυμεί ο οδηγός του εκάστοτε οχήματος, να διαθέτει η μπαταρία του κατά το τέλος της στάθμευσής του. Προγραμματιστικά παίρνει επί της ουσίας τυχαίες τιμές από 20% έως 100%, αλλά στην πραγματικότητα το εύρος είναι λίγο μικρότερο, όπως θα εξηγηθεί και στο υποκεφάλαιο των περιορισμών, για να διευκολυνθεί το έργο του *aggregator*. Επιπλέον, ο οδηγός καλείται να επιλέξει μια τιμή η οποία μπορεί να επιτευχθεί με τον μέγιστο ρυθμό φόρτισης ή αποφόρτισης.
- **LCR(N,1):** Ο ελάχιστος ρυθμός φόρτισης ή αποφόρτισης στον οποίο χρειάζεται να υπόκειται σταθερά, για κάθε μία από τις ώρες που είναι σταθμευμένο, το ηλεκτρικό όχημα, ώστε να επιτευχθεί το **SOC(N,1)**. Μονάδα μέτρησης kWh.

$$|LCR(i,1)| = |SOC(i,1) - CHARGE(i,1)| \times \frac{CAPACITY(i,1)}{100 \times PT(i,1)}, i \in [1, N]$$

Στο σημείο αυτό πρέπει να διευκρινιστεί η παραδοχή όσον αφορά το πρόσημο της ροής ενέργειας που γίνεται για την διαμόρφωση του προβλήματος. Η ροή ενέργειας από ένα ηλεκτρικό όχημα στο δίκτυο μεταφράζεται με αρνητικό πρόσημο ενώ από το δίκτυο στο ηλεκτρικό όχημα μεταφράζεται με θετικό πρόσημο.

### 3.3: Ανάπτυξη Αντικειμενικής Συνάρτησης

Όπως έχει αναφερθεί και στην ενότητα 2.4.2, μια μικρή ελάττωση των ωρών αιχμής στην ζήτηση ηλεκτρικού φορτίου, αποτελεί μεγάλη μείωση του κόστους παραγωγής ενέργειας καθώς περιορίζεται η χρήση των κοστοβόρων *peakers*. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται πως θα επηρεαστεί η ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος στην περίπτωση που δεν εφαρμοστεί η V2G λειτουργία και δεν υπάρχει κάποιος αλγόριθμος βελτιστοποίησης για 560 ηλεκτρικά οχήματα στην δημοτική ενότητα Αποκόρωννα ο οποίος τροφοδοτείται από τον υποσταθμό των Βρυσών. Ο υποσταθμός των Βρυσών καλύπτει το 2.1% της ζήτησης ισχύος της Κρήτης σύμφωνα με την ετήσια έκθεση Κρήτης από την ΔΕΔΔΗΕ.



**Διάγραμμα 3.1:** Απεικόνιση της ζήτησης ισχύος χωρίς το φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων (κόκκινη καμπύλη) και απεικόνιση της ζήτησης ισχύος με ηλεκτρικά οχήματα χωρίς V2G (μπλε καμπύλη), κατά την διάρκεια ενός 24ωρου.

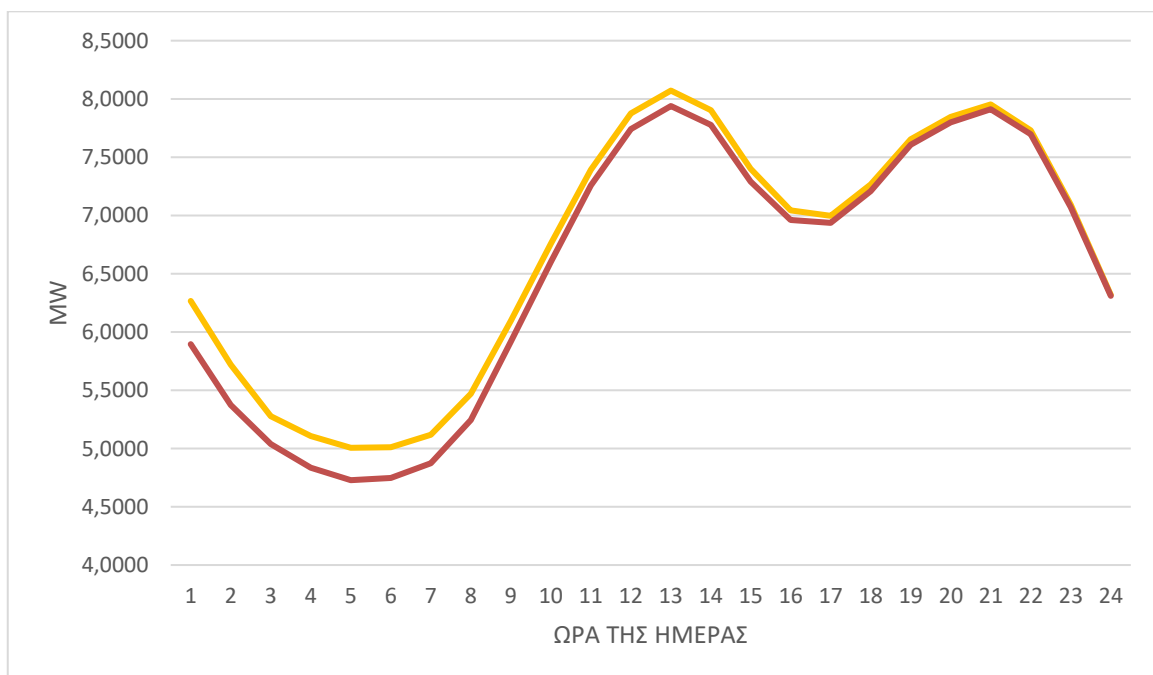
Η συνολική ζήτηση φορτίου χωρίς τα ηλεκτρικά οχήματα είναι 156,8 MW ενώ με την προσθήκη τους 163,5 MW. Τα δύο μέγιστα φορτία έχουν διαφορά μεταξύ τους 4.27%. Η

διαφορά αυτή είναι ικανή να δημιουργήσει σοβαρές επιπλοκές στην λειτουργία του δικτύου πέρα από την δεδομένη αύξηση του κόστους της παραγόμενης ενέργειας.

Έστω ότι τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν διαθέσιμη την τεχνολογία V2G και κατά την διάρκεια της στάθμευσής τους φορτίζουν ή αποφορτίζουν με ρυθμό LCR. Ισχύει δηλαδή ότι:

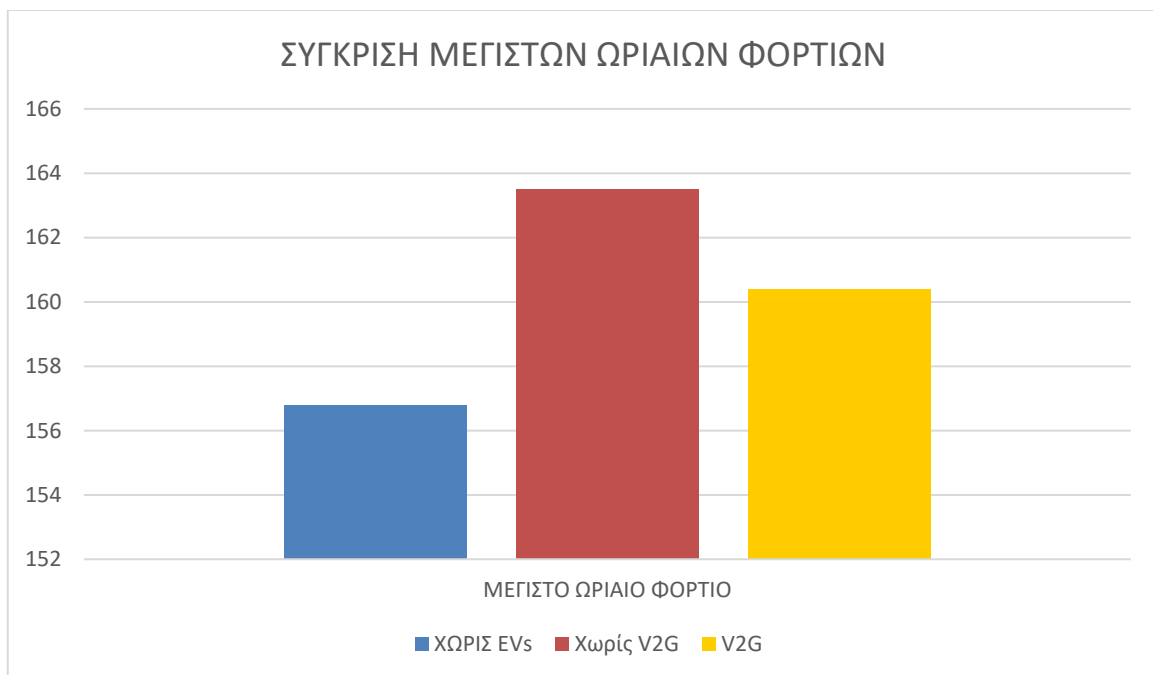
$$x_0(j, i) = LCR(j, 1) \times PARKED(j, i), j \in [1, N], i \in [1, 24] \quad (1)$$

Τότε, η εφαρμογή V2G τεχνολογίας χωρίς την χρήση κάποιου αλγορίθμου για την βέλτιστη κατανομή του φορτίου, θα διαμόρφωνε την καμπύλη ζήτησης ισχύος όπως παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί:



**Διάγραμμα 3.2:** Απεικόνιση της ζήτησης ισχύος χωρίς το φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων (κόκκινη καμπύλη) και απεικόνιση της ζήτησης ισχύος με ηλεκτρικά οχήματα με V2G (κίτρινη καμπύλη), κατά την διάρκεια ενός 24ωρου.

Η συνολική ζήτηση φορτίου με ηλεκτρικά οχήματα το οποία είναι ικανά να συμμετέχουν στην αμφίδρομη ροή ισχύος ισούται με 160,37 MW. Συνεπώς έχουμε απευθείας μία μείωση της τάξεως του 1.94% του συνολικού φορτίου εάν τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν την δυνατότητα να δίνουν ρεύμα στο δίκτυο. Ωστόσο, η σημαντικότερη παρατήρηση που μπορεί να πραγματοποιηθεί είναι ότι από 4.27% τα δύο μέγιστα φορτία έχουν διαφορά 2.27%. Προκύπτει δηλαδή απευθείας μία μείωση της αύξησης της τάξεως του 47%.



**Διάγραμμα 3.3:** Σύγκριση μέγιστων ωριαίων φορτίων ημέρας Κυριακής για τα σενάρια χωρίς ηλεκτρικά οχήματα, με οχήματα χωρίς V2G, και με οχήματα με V2G αλλά χωρίς βελτιστοποίηση.

Για τον λόγο αυτό, με την χρήση της τεχνολογία V2G σε συνδυασμό με τους αλγόριθμους βελτιστοποίησης θα πρέπει να γίνει προσπάθεια να ελαχιστοποιηθούν οι ώρες αιχμής ή το φορτίο τους, για ακόμη πιο ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Ωστόσο δεν θα πρέπει το φορτίο βάσης να υπερβαίνει το συνολικό φορτίο. Το φορτίο βάσης αποτελεί δηλαδή το «σημείο μηδέν». Για κάθε ώρα της ημέρας η ζητούμενη ισχύς καλείται να προσεγγίζει όσο το δυνατόν περισσότερο το φορτίο βάσης. Άρα η αντικειμενική συνάρτηση που θα χρειαστεί να ελαχιστοποιηθεί διαμορφώνεται ως εξής:



$$\min \sum_{i=1}^{DAY} \mathbf{SUNDAY}(1, i) + \sum_{i=1}^{DAY} \sum_{j=1}^N [x(j, i) \times \mathbf{PARKED}(j, i)] - DAY \times \min(\mathbf{SUNDAY})$$

Η παραπάνω συνάρτηση, όπως είναι φανερό ελαχιστοποιείται ως προς  $\mathbf{x}(j, i)$  καθώς όλοι οι υπόλοιποι όροι είναι σταθεροί και έχουν προκαθοριστεί. Το  $x(j, i)$  αποτελεί τον ρυθμό φόρτισης του ηλεκτρικού οχήματος  $j$  την  $i$  ώρα της ημέρας. Συνεπώς αρκεί:

$$\min \sum_{i=1}^{DAY} \sum_{j=1}^N [x(j, i) \times \mathbf{PARKED}(j, i)]$$

### 3.4: Περιορισμοί

Από την στιγμή που η αντικειμενική συνάρτηση έχει σαν μεταβλητή το  $\mathbf{x}(j, i)$  προκύπτει ο πρώτος περιορισμός του προβλήματος. Το  $\mathbf{x}(j, i)$  δεν θα μπορεί να ξεπερνά τον μέγιστο ρυθμό φόρτισης ή αποφόρτισης  $\mathbf{MAX\_RATE}$ .

$$-\mathbf{MAX\_RATE} \leq x(j, i) \leq \mathbf{MAX\_RATE}, \quad j \in [1, N], i \in [1, 24]$$

Αφού ορίστηκε το ανώτατο και κατώτατο όριο των στοιχείων του πίνακα  $\mathbf{x}(j, i)$  πρέπει να δοθεί μία αρχική τιμή για το καθένα από αυτά. Ως αρχική τιμή θα χρησιμοποιηθεί το  $\mathbf{x}_0$  όπως διαμορφώθηκε από την σχέση (1).

Το δεύτερο κομμάτι που χρίζει περιορισμού είναι το σύνολο τιμών στο οποίο θα ανήκει η καμπύλη του αθροίσματος της ζήτησης ενέργειας και του φορτίου των οχημάτων. Ιδανικά το ζητούμενο είναι να ανήκει στο σύνολο τιμών της κυμαινόμενης ισχύος, δηλαδή μεταξύ του φορτίου βάσης και των 2/3 του φορτίου αιχμής. Ωστόσο, επειδή ένας τέτοιος συνδυασμός των φορτίων είναι στην πραγματικότητα αδύνατος, εάν το μέγιστο φορτίο κατά

την διάρκεια της ημέρας δεν αυξηθεί θα αποτελέσει επιτυχία. Έτσι λοιπόν σχηματίζεται ο παρακάτω περιορισμός:

$$\min[SUNDAY(1, i)] \leq SUNDAY + \sum_{j=1}^N x(j, i) \leq \max[SUNDAY(1, i)], i \in [1, DAY]$$

Σκοπός όμως του όλου εγχειρήματος, πέρα από το Peak Shaving, είναι στο τέλος της στάθμευσης του κάθε οχήματος, να έχει επιτευχθεί το **State of Charge (SOC)**. Για την υλοποίηση αυτού του σκοπού, πρέπει το άθροισμα του αποθέματος κατά την έναρξη της στάθμευσης και των kW που φόρτισε ή αποφόρτισε το όχημα να ισούται με το **State of Charge (SOC)**. Επειδή η ισότητα είναι πρακτικά αδύνατο να εφαρμόζεται δίνεται μια ανοχή και μετατρέπεται σε ανισότητα. Αυτός είναι και ο λόγος, που το εύρος τιμών του SOC περιορίζεται σε:

$$20 + a \leq SOC(j, i) \leq 100 - a$$

- **a**: Η ποσοστιαία απόκλιση που μπορεί να έχει από το SOC το απόθεμα του κάθε οχήματος με το πέρας της στάθμευσής του.

Έτσι λοιπόν σχηματίζονται οι εξής περιορισμοί:

$$SOC + 5 \leq CHARGE(j, 1) + \left[ \sum_{i=1}^{DAY} x(j, i) \times PARKED(j, i) \right] \times \frac{100}{CAPACITY(j, 1)}$$

$$CHARGE(j, 1) + \left[ \sum_{i=1}^{DAY} x(j, i) \times PARKED(j, i) \right] \times \frac{100}{CAPACITY(j, 1)} \leq SOC(j, 1) - 5$$

Τέλος, θα πρέπει να δοθεί προσοχή στο γεγονός ότι το ποσοστό αποθέματος του κάθε

οχήματος, οποιαδήποτε χρονική στιγμή, θα πρέπει να ανήκει στο σύνολο τιμών: [0,100]. Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου θα πρέπει να εξετάζεται εάν το απόθεμα του οχήματος την προηγούμενη ώρα συν το ποσό της φόρτισης ή αποφόρτισής τους, βρίσκεται εντός του παραπάνω συνόλου τιμών. Ο περιορισμός αυτός διατυπώνεται υπολογιστικά με τον εξής τρόπο:

$$0 \leq CHARGE(j, 1) + \sum_{i=1}^{TOD} x(j, i) \times PARKED(j, i) \leq 100$$

- TOD (DAY,1): Ώρα της ημέρας.

$$1 \leq TOD \leq DAY$$

### 3.5: MATLAB και TOMLAB

Οι μαθηματικές σχέσεις που περιεγράφησαν ανωτέρω διατυπώθηκαν στο προγραμματιστικό περιβάλλον της MATLAB. Η MATLAB αποτελεί μια ιδανική γλώσσα προγραμματισμού για την αντιμετώπιση προβλημάτων βελτιστοποίησης καθώς είναι εύχρηστη στην κατασκευή και διαχείριση πινάκων. Επιπλέον διαθέτει αρκετούς λύτες (solvers) όπως είναι η fmincon για την αντιμετώπιση προβλημάτων με μη-γραμμικούς περιορισμούς. Ωστόσο, επειδή το συγκεκριμένο πρόβλημα διαθέτει πολύ μεγάλα μεγέθη και πράξεις μεταξύ πινάκων πολλών διαστάσεων, η χρήση μόνο της fmincon δεν συνιστάται καθώς είναι άκρως χρονοβόρα. Για τον λόγο αυτό, έγινε χρήση του επιπρόσθετου της TOMLAB το οποίο χρησιμοποιεί τον λύτη SNOPT, διατυπώνοντας το πρόβλημα όπως και με την fmincon, για την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Ο SNOPT (Sparse Nonlinear OPTimizer) αποτελεί έναν ιδανικό λύτη για μη γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης μεγάλης κλίμακας. [25][26][27][28]

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

## Κεφάλαιο 4: Εφαρμογές και Αποτελέσματα Αλγόριθμου στο Λογισμικό Matlab

### 4.1: Διατύπωση Προβλήματος (*case study*)

Για την επίλυση του προβλήματος μελετήθηκε ο υποσταθμός του Νομού Χανίων της ΔΕΔΔΗΕ στις Βρύσες. Ο υποσταθμός των Βρυσών καλύπτει την ζήτηση ισχύος στον Δήμο Αποκορώνου ο οποίος έχει πληθυσμό **12,807** [29]. Γίνεται η υπόθεση ότι αντιστοιχεί ένα αυτοκίνητο σε κάθε **3** κατοίκους και πως το **5%** αυτών των οχημάτων είναι ηλεκτρικά με την δυνατότητα εκτέλεσης V2G. Προκύπτει λοιπόν, πως μελετώνται **215** οχήματα. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 3.2, γίνεται η παραδοχή ότι όλα τα οχήματα που λαμβάνουν μέρος στην διαδικασία της αμφίδρομης ροής ισχύος, έχουν την ικανότητα να φορτίσουν ή να εκφορτίσουν τον συσσωρευτή τους με μέγιστο ρυθμό **22kWh (Επίπεδο 2 Φόρτισης)**. Επιπλέον υπάρχει διαθέσιμος σταθμός φόρτισης με την τεχνολογία V2G για καθένα από τα οχήματα που συμμετέχουν με την ικανότητα να εξυπηρετεί τις ανάγκες τους.

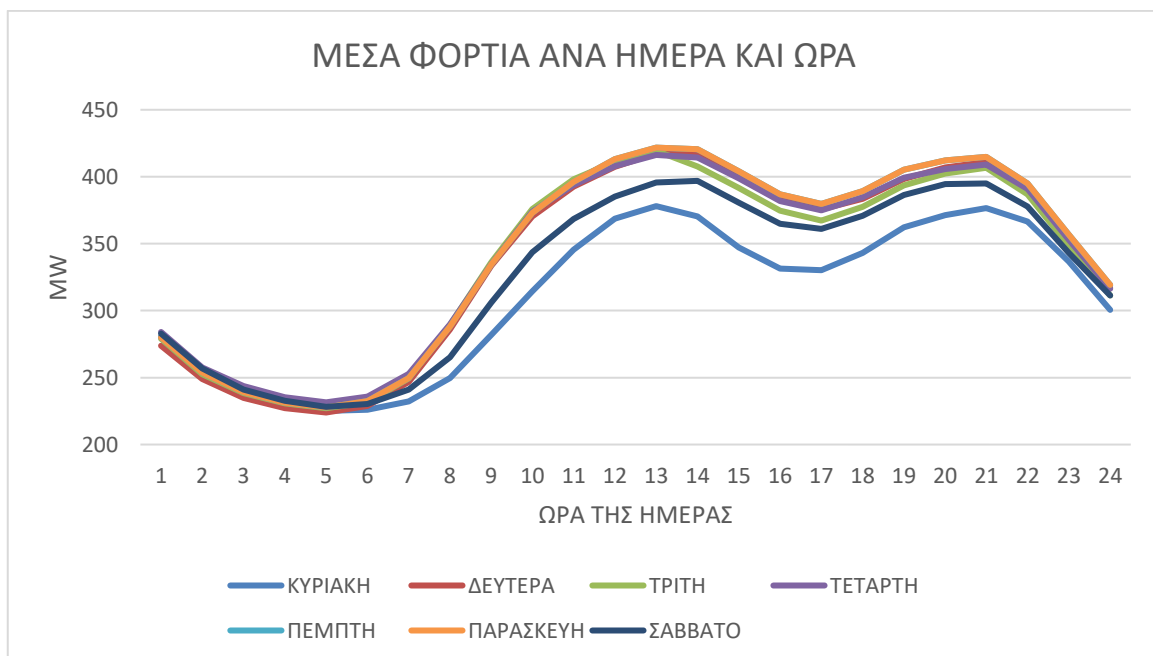
Σύμφωνα με το «Ετήσιο Δελτίο Εκμετάλλευσης Συστήματος Κρήτης» για το έτος 2020 ο υποσταθμός των Βρυσών, κάλυψε το **2.1%** (59,309 MW) της συνολικής ζήτησης ισχύος στην Κρήτη (613,710.3 MW) [30]. Επιπλέον, γίνεται διαχωρισμός των μέσων φορτίων του έτους 2020 ανά ημέρα και ώρα έτσι ώστε να δημιουργηθεί ένα ημερήσιο μοντέλο πρόβλεψης για τον aggregator. Για την παρουσίαση των αποτελεσμάτων επιλέγεται να μελετηθεί η διαχείριση του 2.1% της ζήτησης ισχύος για την ημέρα Κυριακή. Η Κυριακή αποτελεί την ημέρα της εβδομάδας με την μικρότερη ζήτηση ισχύος, κάνοντας έτσι το έργο του αλγόριθμου ακόμη πιο δύσκολο, καθώς το μέγιστο της ημέρας μικραίνει και δεν πρέπει να ξεπεραστεί.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τιμές των αρχικών παραμέτρων:

| ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ | ΤΙΜΕΣ  |
|------------|--------|
| PEOPLE     | 12807  |
| CPP        | 3      |
| EVP        | 5%     |
| N          | 215    |
| MAX RATE   | 22 kWh |
| DAY        | 24     |

**Πίνακας 4.1:** Παρουσίαση τιμών των αρχικών παραμέτρων του προβλήματος.

Αφού ορίστηκαν οι παράμετροι αυτοί με τις τιμές τους, συμπληρώνονται οι παράμετροι **PARKED-ΩΡΕΣ ΣΤΑΘΜΕΥΣΗΣ**, **CAPACITY-ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ**, **CHARGE-ΑΠΟΘΕΜΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΝΑΡΞΗ** και **SOC-ΑΠΟΘΕΜΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΛΗΞΗ** με τυχαίες τιμές ώστε να εξεταστεί η ικανότητα του αλγορίθμου να προσαρμόζεται στην προσωπική επιθυμία του κάθε οδηγού. Ορίζοντας και μια τιμή για το **LCR-ΕΛΑΧΙΣΤΟΣ ΡΥΘΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΓΙΑ ΝΑ ΕΠΙΤΕΥΧΘΕΙ ΤΟ SOC** σχηματίζεται ο πίνακας x0 και από εκεί ο αλγόριθμος τίθεται σε λειτουργία.



**Διάγραμμα 4.1:** Απεικόνιση κατανομής ζήτησης ισχύος στο ηλεκτρικό δίκτυο της Κρήτης, ανά ημέρα και ώρα.

|                         |                | 2020               |             |
|-------------------------|----------------|--------------------|-------------|
|                         |                | MWh                | %           |
| ΚΑΘΑΡΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ         |                | 2.778.872,9        | 100,0       |
| ΑΥΤ/ΣΕΙΣ ΠΑΡΑΓΩ.        |                | 8.871,3            | 0,3         |
| ΚΑΘΑΡΗ ΖΗΤΗΣΗ           |                | 2.773.669,2        | 99,8        |
| Ε.Υ. ΥΠΟΣΤΑΘΜΩΝ         |                | 2.403,4            | 0,1         |
| ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΓΜ & ΥΣ        |                | 130.813,0          | 4,7         |
| ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ            |                | 136.554,3          | 4,9         |
| <b>ΣΥΝΟΛΟ ΔΙΑΝΟΜΗΣ</b>  |                | <b>2.739.964,5</b> | <b>98,6</b> |
| ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΙ              | ΣΗΤΕΙΑ         | 77.191,3           | 2,8         |
| ΝΟΜΟΥ                   | ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ      | 101.782,7          | 3,7         |
| ΛΑΣΙΘΙΟΥ                | ΑΓ. ΝΙΚΟΛΑΟΣ   | 138.627,6          | 5,0         |
| <b>ΣΥΝΟΛΟ ΛΑΣΙΘΙΟΥ</b>  |                | <b>317.601,5</b>   | <b>11,4</b> |
|                         | ΣΤΑΛΙΔΑ        | 146.301,1          | 5,3         |
|                         | ΗΡΑΚΛΕΙΟ I GIS | 224.729,4          | 8,1         |
|                         | ΗΡΑΚΛΕΙΟ II    | 418.483,2          | 15,1        |
|                         | ΗΡΑΚΛΕΙΟ III   | 192.024,6          | 6,9         |
| ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΙ              | ΠΡ. ΛΙΝ/ΤΑ     | 15.955,7           | 0,6         |
| ΝΟΜΟΥ                   | ΜΟΙΡΕΣ         | 116.874,0          | 4,2         |
| ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ               | ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ      | 69.475,6           | 2,5         |
|                         | ΑΓ.ΒΑΡΒΑΡΑ     | 10.951,7           | 0,4         |
| <b>ΣΥΝΟΛΟ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ</b> |                | <b>1.194.795,3</b> | <b>43,0</b> |
| ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΙ              | ΡΕΘΥΜΝΟ        | 271.915,8          | 9,8         |
| ΝΟΜΟΥ ΡΕΘΥΜΝΟΥ          | ΣΠΗΛΙ          | 31.963,5           | 1,2         |
| <b>ΣΥΝΟΛΟ ΡΕΘΥΜΝΟΥ</b>  |                | <b>303.879,3</b>   | <b>10,9</b> |
| ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΙ              | ΧΑΝΙΑ          | 406.506,7          | 14,6        |
| ΝΟΜΟΥ                   | ΚΑΣΤΕΛΛΙ       | 82.148,1           | 3,0         |
| ΧΑΝΙΩΝ                  | ΑΓΥΙΑ          | 65.746,5           | 2,4         |
|                         | ΒΡΥΣΕΣ         | 59.309,0           | 2,1         |
| <b>ΣΥΝΟΛΟ ΧΑΝΙΩΝ</b>    |                | <b>613.710,3</b>   | <b>22,1</b> |

Εικόνα 4.1: Η παραγόμενη ισχύς και οι πηγές της για το έτος 2020 στην Κρήτη. [30]

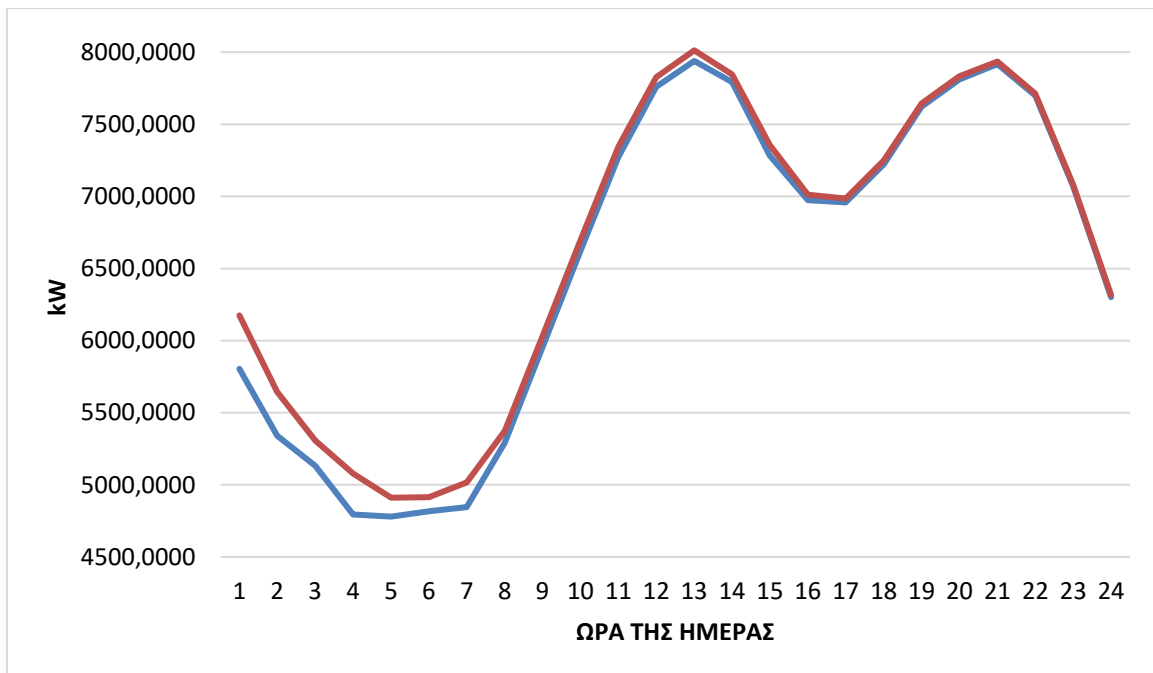
## 4.2: Αποτελέσματα Αλγορίθμου Βελτιστοποίησης V2G

Για να γίνει αντιληπτή η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου, θα πρέπει η ημερήσια καμπύλη ζήτησης που διαμορφώνεται με την χρήση του, να συγκριθεί με τις ακόλουθες τρεις περιπτώσεις (η κάθε μία από τις παρακάτω περιπτώσεις/σενάρια συγκρίνεται οριζόντια με τα αποτελέσματα του αλγορίθμου βελτιστοποίησης που αναπτύχθηκε σε αυτήν την διπλωματική):

1. Με την καμπύλη των οχημάτων χωρίς δυνατότητα V2G.
2. Με την καμπύλη των οχημάτων που είναι ικανά να εκτελέσουν V2G αλλά χωρίς αλγόριθμο βελτιστοποίησης.
3. Με την καμπύλη του υποσταθμού, χωρίς την συμμετοχή ηλεκτρικών οχημάτων.

#### 4.2.1: Σύγκριση με Οχήματα χωρίς δυνατότητα V2G

Στόχος του αλγόριθμου είναι να ελαχιστοποιήσει την ημερήσια καμπύλη φορτίου, και ιδίως κατά τις ώρες αιχμής. Συνεπώς η πρώτη σύγκριση που πρέπει να πραγματοποιηθεί είναι σε σχέση με την απλή φόρτιση οχημάτων, τα οποία δεν έχουν την ικανότητα να προσφέρουν ισχύ στο δίκτυο:



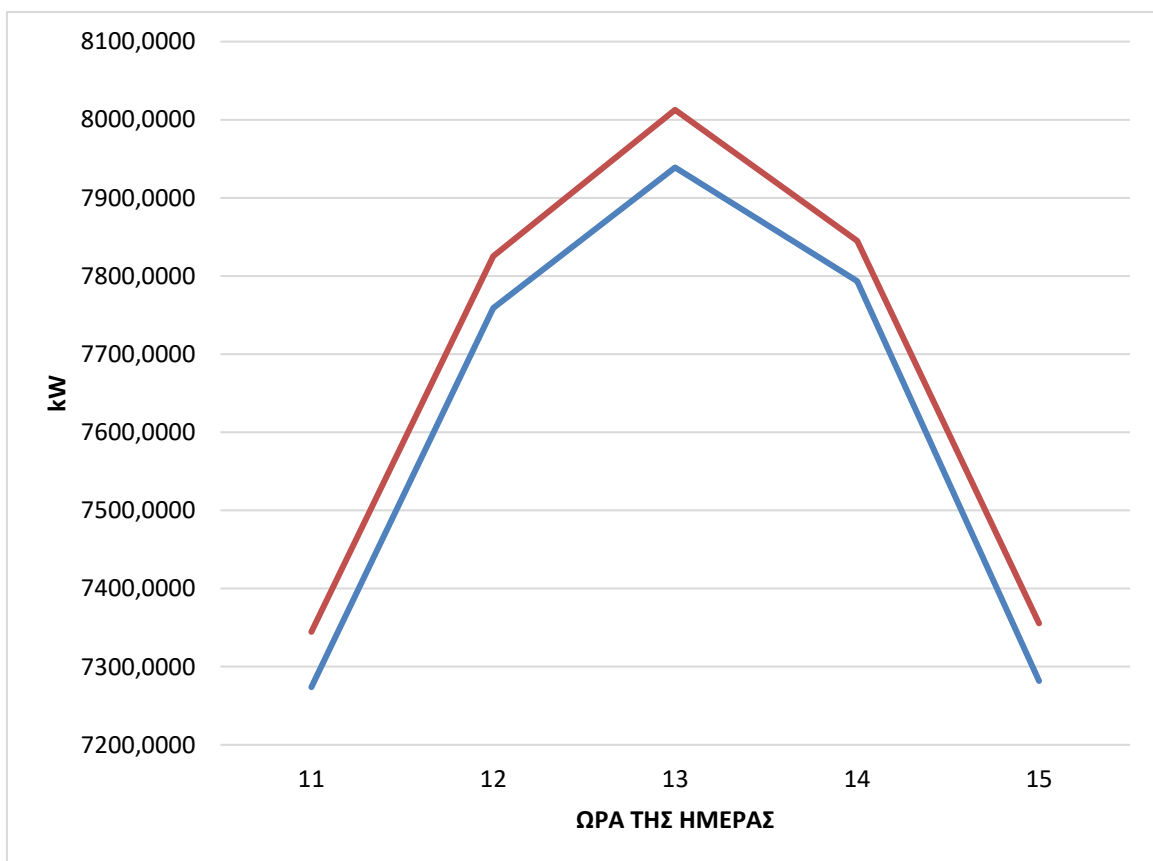
**Διάγραμμα 4.2:** Σύγκριση φόρτισης με εφαρμογή αλγορίθμου βελτιστοποίησης και τεχνολογίας V2G (μπλε καμπύλη) έναντι απλής μη-ελεγχόμενης φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων (κόκκινη καμπύλη).

Παρατηρείται ότι η καμπύλη με χρήση του αλγορίθμου βρίσκεται συνέχεια κάτω από την καμπύλη της απλής φόρτισης, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το ημερήσιο φορτίο είναι σίγουρα μικρότερο. Πιο συγκεκριμένα, το συνολικό ημερήσιο φορτίο κατά την μη-ελεγχόμενη φόρτιση των αυτοκινήτων είναι 159,299 kW ενώ με την χρήση του αλγορίθμου σε συνδυασμό με την τεχνολογία V2G έχει περιοριστεί κατά 2,296 kW, δηλαδή στα 157,003 kW. Η μεγαλύτερη τους διαφορά βρίσκεται τις πρώτες πρωινές ώρες και είναι της τάξεως των 371 kW. Ωστόσο η σημαντικότερη διαφορά βρίσκεται στο γεγονός ότι υπάρχει μείωση του φόρτου των ωρών αιχμής. Πιο συγκεκριμένα το φορτίο των ωρών αιχμής

περιορίζεται κατά 12,003 kW. Το φορτίο αιχμής, όπως έχει αναφερθεί αποτελείται από τις ώρες εκείνες που υπερβαίνουν τα 2/3 του μέγιστου φορτίου ζήτησης. Για να υπάρχει μέτρο σύγκρισης, έχει θεωρηθεί ως μέγιστο, το φορτίο ζήτησης της Κυριακής χωρίς την προσθήκη κανενός οχήματος. Για τον λόγο αυτό και η διαφορά των δύο καμπυλών είναι μικρότερη από την διαφορά των φορτίων αιχμής.

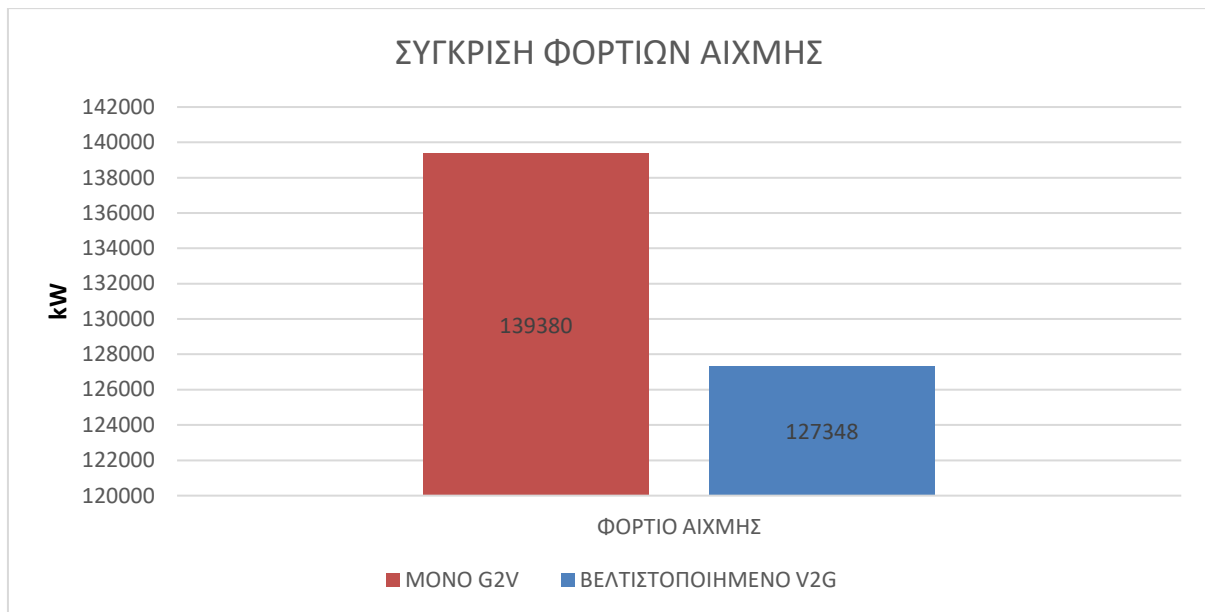
$$\Phi O P T I O \ A I X M H \Sigma = \sum_{i=1}^{DAY} [SUNDAY(i) + x(:, i)],$$

$$\text{αν } SUNDAY(i) + x(:, i) \geq \frac{2}{3} \times \max(SUNDAY)$$



**Διάγραμμα 4.3:** Απεικόνιση του *Peak Shaving* που πραγματοποιείται κατά τις ώρες αιχμής λόγω της χρήσης του αλγόριθμου.



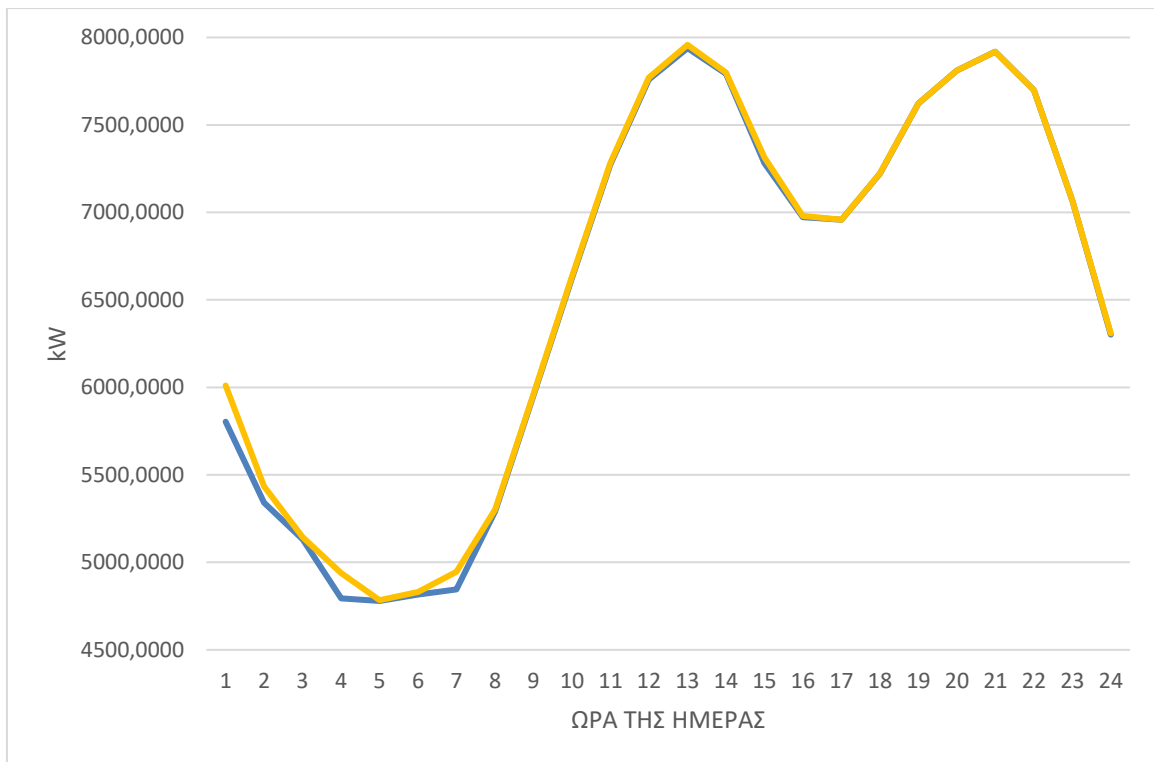


**Διάγραμμα 4.4:** Απεικόνιση Φορτίων Αιχμής

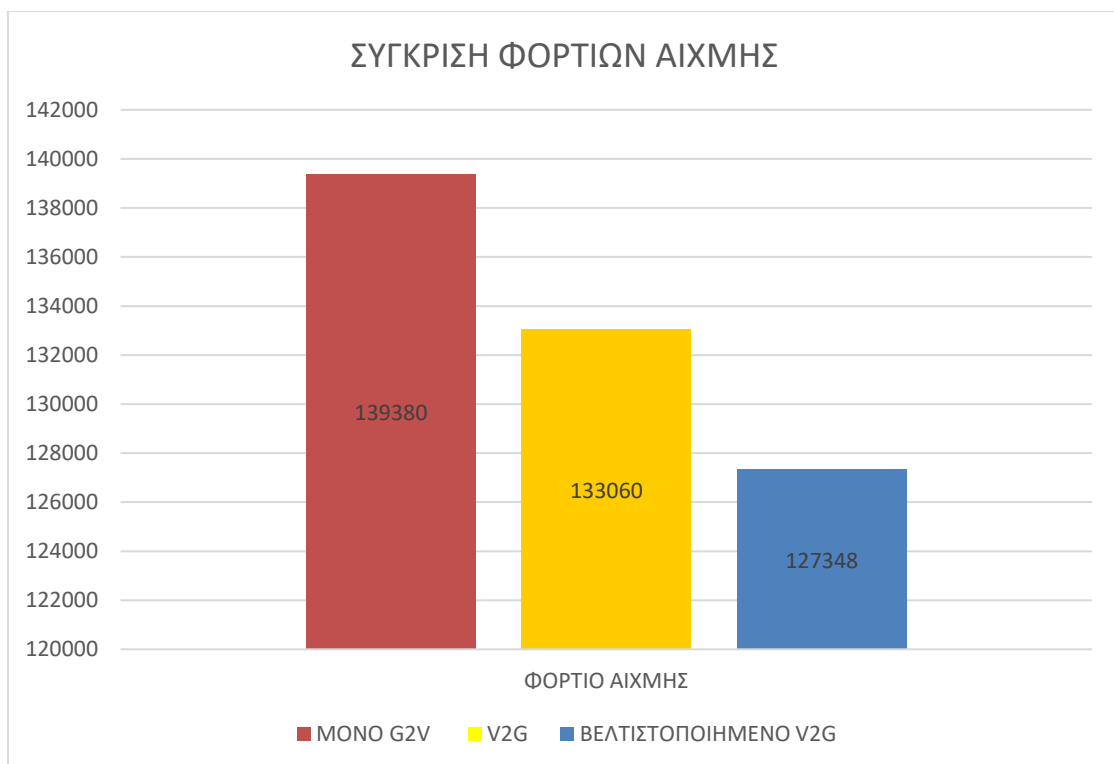
#### 4.2.2: Σύγκριση Χωρίς Βελτιστοποιημένη Κατανομή Ισχύος

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης κατάφερε να επιφέρει μια σημαντική ελάττωση στο ημερήσιο φορτίο συγκριτικά με την περίπτωση που από τα 215 οχήματα συμμετέχουν μόνο όσα οι ιδιοκτήτες τους θέλουν να τα φορτίσουν. Ωστόσο, όπως φάνηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, ένα σταθερό σύστημα φόρτισης και αποφόρτισης με ηλεκτρικά οχήματα ικανά να συμμετέχουν στην διαδικασία της αμφίδρομης ροής ισχύος, μπορεί χωρίς την χρήση κάποιου αλγορίθμου να μειώσει αρκετά την καμπύλη ζήτησης.

Παρατηρείται ξανά ότι η καμπύλη με χρήση του αλγορίθμου βρίσκεται συνέχεια κάτω από την καμπύλη χωρίς την χρήση αυτού, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το ημερήσιο φορτίο είναι σίγουρα μικρότερο. Πιο συγκεκριμένα, το συνολικό ημερήσιο φορτίο κατά την μη-ελεγχόμενη φόρτιση των αυτοκινήτων είναι 157,770 kW ενώ με την χρήση του αλγορίθμου σε συνδυασμό με την τεχνολογία V2G έχει περιοριστεί κατά 697 kW. Η μεγαλύτερη τους διαφορά βρίσκεται τις πρώτες πρωινές ώρες και είναι της τάξεως των 206 kW. Όσον αφορά τις ώρες αιχμής τους, η διαφορά τους είναι στα 5,715 kW.



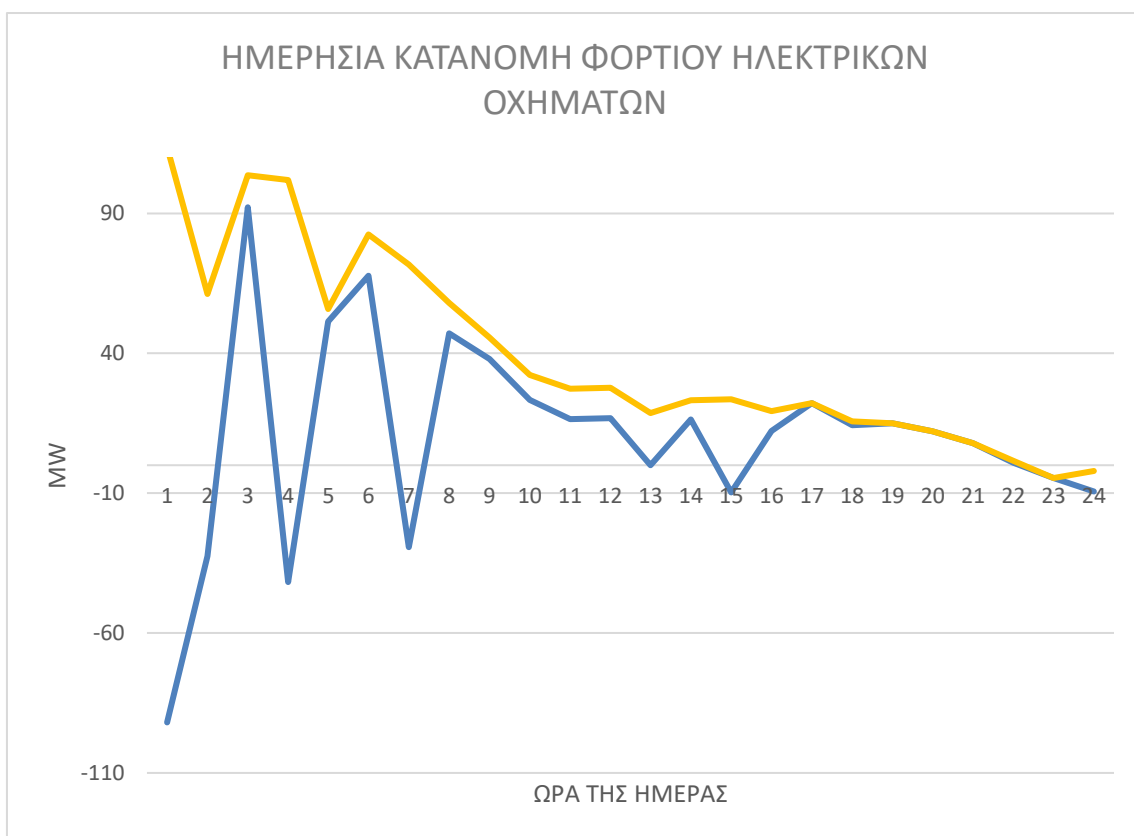
**Διάγραμμα 4.5:** Σύγκριση φόρτισης με εφαρμογή αλγορίθμου βελτιστοποίησης και τεχνολογίας V2G (μπλε καμπύλη) έναντι απλής μη-ελεγχόμενης V2G λειτουργίας ηλεκτρικών αυτοκινήτων (κίτρινη καμπύλη).



**Διάγραμμα 4.6:** Απεικόνιση Φορτίων Αιχμής

Γίνεται αντιληπτό ότι ενώ η διαφορά στο ημερήσιο φορτίο ζήτησης ισχύος είναι μικρή, η κατανομή των φορτίων από τον αλγόριθμο οδηγεί ξανά σε μείωση του φορτίου αιχμής. Έχει λοιπόν ενδιαφέρον να παρατηρήσει κανείς την κατανομή αυτή.

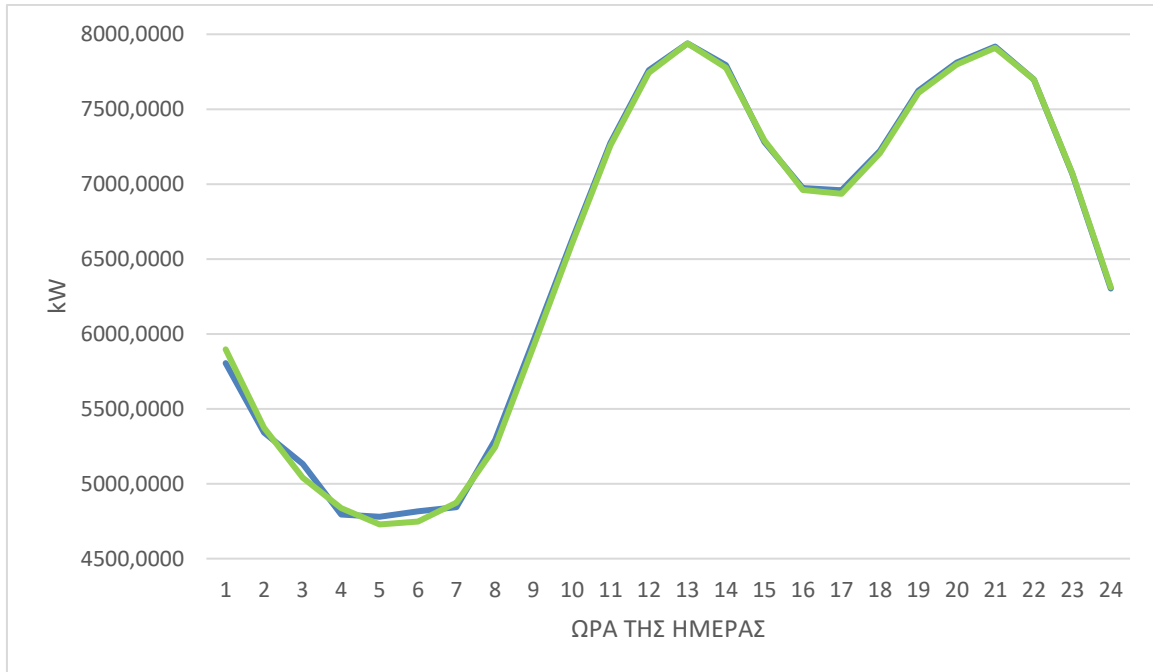
Όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα, η ωριαία μεταβολή των φορτίων είναι πολύ πιο έντονη με την χρήση του αλγορίθμου. Ακόμη στο χρονικό διάστημα των ωρών 13 έως 15 όπου πλησιάζει το μέγιστο φορτίο της ημέρας, προσπαθεί να αποφορτίσει όσο περισσότερο είναι δυνατόν βάση των περιορισμών. Ακόμη είναι εμφανές ότι χωρίς τον αλγόριθμο, το συνολικό φορτίο των οχημάτων ανά ώρα, σπάνια έως ποτέ θα είναι αρνητικό. Ο αλγόριθμος ουσιαστικά δίνει την δυνατότητα σε ένα όχημα που θέλει μετά το πέρας της στάθμευσής του να έχει μεγαλύτερο απόθεμα από ότι στην έναρξη της, αντί να φορτίζει με σταθερό ρυθμό, να έχει είτε μεταβαλλόμενο ρυθμό ή ακόμη και να αποφορτίζει, με τον περιορισμό όμως πάντα να απέχει στο πέρας της στάθμευσης το μέγιστο  $a\%$  από το **SOC**.



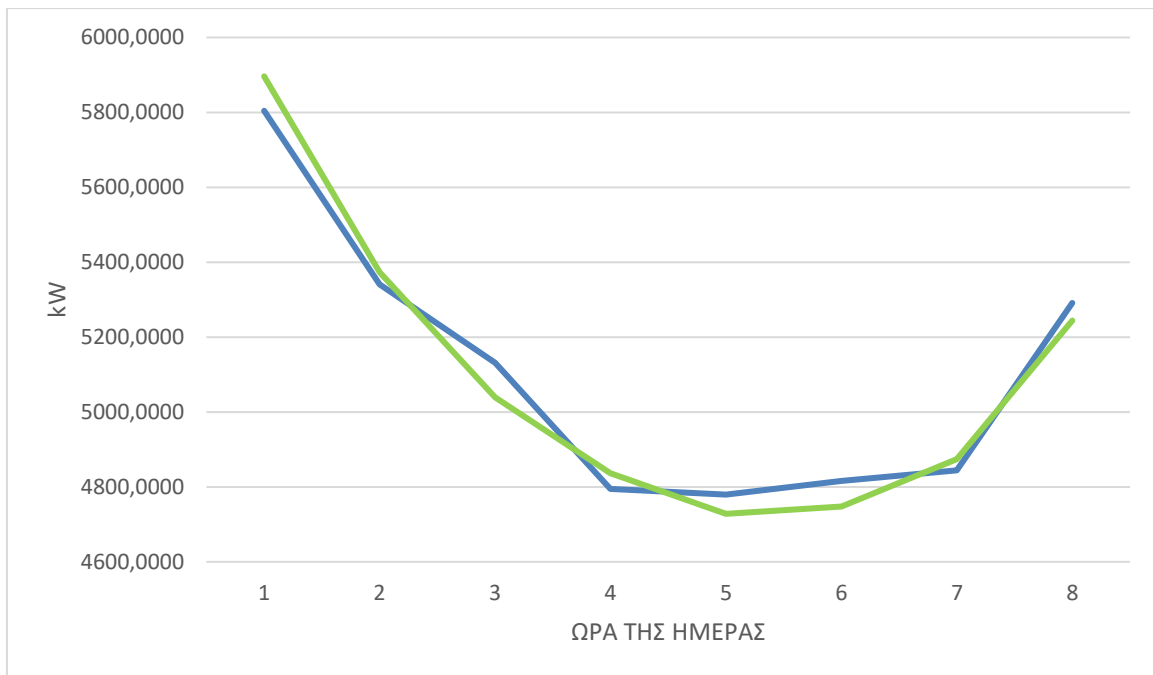
**Διάγραμμα 4.7:** Κατανομή αμφίδρομης ροής ισχύος με αλγόριθμο βελτιστοποίησης (μπλε γραμμή) και χωρίς αλγόριθμο βελτιστοποίησης (κίτρινη γραμμή).

### 4.2.3: Σύγκριση με Απουσία Ηλεκτρικών Οχημάτων

Τέλος, πρέπει να πραγματοποιηθεί μια σύγκριση μεταξύ της ημερήσιας καμπύλης φορτίου με χρήση αλγορίθμου βελτιστοποίησης σε οχήματα με τεχνολογία V2G, και της αρχικής καμπύλης του υποσταθμού, στην οποία δεν συμμετέχει κανένα ηλεκτρικό όχημα.

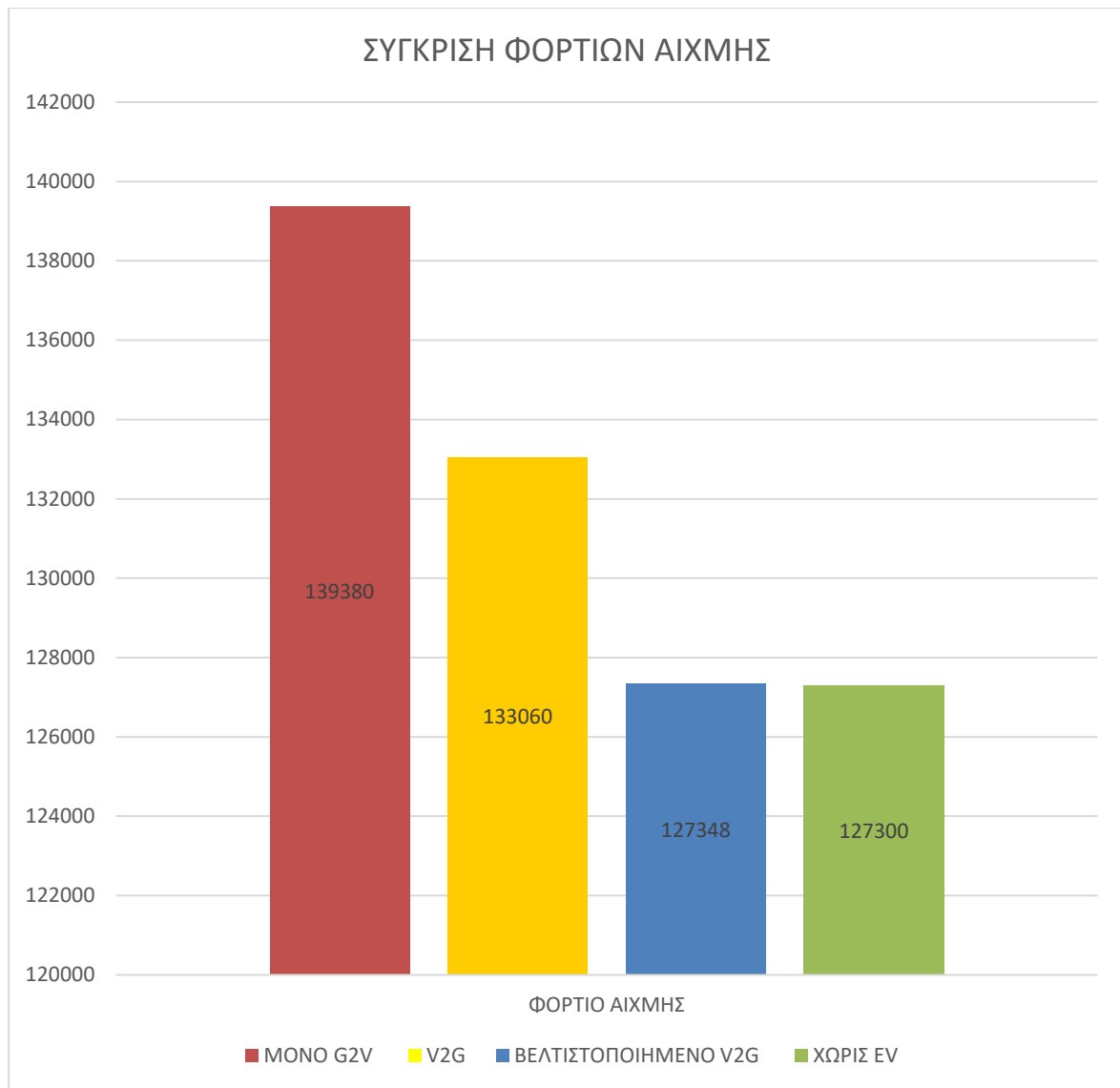


**Διάγραμμα 4.8:** Σύγκριση φόρτισης με εφαρμογή αλγορίθμου βελτιστοποίησης και τεχνολογίας V2G (μπλε καμπύλη) με την Ημερήσια Ζήτηση Ισχύος του 2020 (πράσινη καμπύλη).

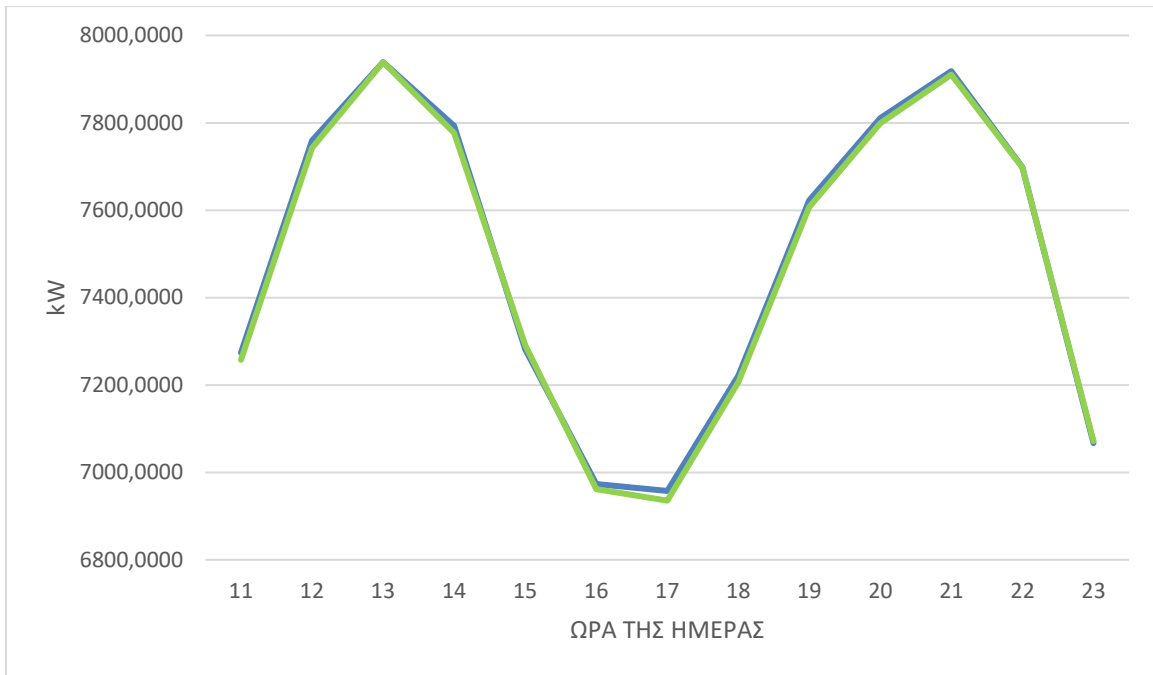


**Διάγραμμα 4.5:** Απεικόνιση του *Valley Filling* που πραγματοποιείται για να μην αυξηθεί το φορτίο αιχμής.

Στην σύγκριση αυτή φαίνεται ξεκάθαρα ότι πραγματοποιείται *Valley Filling* τις ώρες 2 έως 7, έτσι ώστε να αυξηθεί όσο το δυνατόν λιγότερο το φορτίο των ωρών αιχμής. Στο σημείο αυτό, πρέπει να γίνει η σημαντική παρατήρηση ότι ο αλγόριθμος κατάφερε να μην ξεπεραστεί το ημερήσιο μέγιστο. Επιπλέον, το ημερήσιο φορτίο ωρών αιχμής αυξήθηκε μόνο κατά 48 kW. Τέλος το συνολικό φορτίο που προστέθηκε είναι 235 kW ενώ που διακινήθηκε κατά την αμφίδρομη ροή ισχύος 4,450 kW.



**Διάγραμμα 4.9:** Απεικόνιση Φορτίων Αιχμής



**Διάγραμμα 4.10:** Απεικόνιση των φορτίων αιχμής και της ικανότητας του αλγορίθμου να διαχειριστεί το φορτίο 215 οχημάτων χωρίς ουσιαστικά να το υπερβεί.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

## Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα και Μελλοντικές Ενέργειες

### 5.1: Συμπεράσματα

Όπως έγινε αντιληπτό από τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο αλγόριθμος που κατασκευάστηκε, επιτυγχάνει τον στόχο του. Το επιπρόσθετο φορτίο που καλείται να καλύψει ο πάροχος ηλεκτρικού ρεύματος κατανέμεται κατά τέτοιο τρόπο από τον aggregator ώστε να μην ξεπεραστεί το μέγιστο ημερήσιο φορτίο αλλά και η αύξηση του φορτίου αιχμής να είναι μηδαμινή. Σημαντικό είναι ακόμη να αναφερθεί ότι, οι παράμετροι του προβλήματος δεν ακολούθησαν κάποιο συγκεκριμένο μοτίβο, έτσι ώστε να δοκιμαστεί σε όσο το δυνατόν πιο απρόβλεπτες συνθήκες ο αλγόριθμος. Για παράδειγμα, τυχαίνει αρκετά οχήματα να θέλουν να φορτίσουν τις ώρες αιχμής ενώ κάποια άλλα να αποφορτίσουν τις ώρες που δεν υπάρχει μεγάλη ζήτηση ισχύος. Η περίπτωση αυτή είναι μια δυνατή δοκιμασία για τον αλγόριθμο, ο οποίος έχει τον περιορισμό το φορτίο κάθε ώρα της ημέρας να μην ξεπερνάει το μέγιστο αλλά να μην είναι και μικρότερο από το φορτίο βάσης. Υπό φυσιολογικές συνθήκες, οι ιδιοκτήτες των ηλεκτρικών οχημάτων επιδιώκουν επί το πλείστον, να φορτίζουν τις βραδινές ώρες και να αποφορτίζουν τις ώρες αιχμής. Αυτή η στρατηγική πέρα από τη χρηστικότητα που προσφέρει για ευνόητους λόγους, δύναται να δημιουργεί και οικονομικό όφελος για τους ιδιοκτήτες καθώς η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος είναι χαμηλότερη τις ώρες που δεν υπάρχει μεγάλη ζήτηση. Έτσι λοιπόν, ο αλγόριθμος θα είναι πιο εύκολο να διαχειριστεί το πρόσθετο φορτίο εντός των περιορισμών και αφού στις δυσμενείς συνθήκες κατάφερε να αποφέρει τέτοια αποτελέσματα, είναι ασφαλής η υπόθεση ότι υπό φυσιολογικές συνθήκες δεν θα μειωθεί μόνο το φορτίο αιχμής, αλλά ολόκληρο το ημερήσιο φορτίο. Τα περισσότερα οχήματα δηλαδή θα χρησιμοποιούνται ως αποθήκες ενέργειας τις ώρες αιχμής.



## 5.2: Μελλοντικές Ενέργειες

Ο αλγόριθμος όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως λειτούργησε και δοκιμάστηκε με την χρήση αρκετών τυχαίων τιμών σε αρκετές παραμέτρους. Το πρώτο βήμα για την βελτίωση των αποτελεσμάτων του είναι να τιθασευτεί αυτή η τυχαιότητα με μοντέλα πρόβλεψης. Για παράδειγμα, με την ύπαρξη δεδομένων για την κίνηση στους δρόμους ή με την δημιουργία ενός αρχείου δεδομένων όσον αφορά τις ώρες που είναι σταθμευμένο ανά ημέρα το κάθε όχημα, ο αλγόριθμος θα μπορέσει να αντιμετωπίσει το πρόβλημα, αποφεύγοντας αρκετές από τις παραδοχές που πραγματοποιήθηκαν. Επιπλέον, μία από τις σημαντικότερες ενέργειες που πρέπει να πραγματοποιηθούν για την λειτουργία του αλγορίθμου σε μεγαλύτερη κλίμακα και με περισσότερα οχήματα, είναι η ύπαρξη επαρκούς υπολογιστικής ισχύς. Η έλλειψη υπολογιστικής ισχύς αποτέλεσε ένα από τα πιο μείζων εμπόδια που χρειάστηκε να αντιμετωπιστούν στην παρούσα διπλωματική εργασία. Παρότι παρουσιάστηκαν αποτελέσματα για μια τυπική ημέρα Κυριακής, ο αλγόριθμος είναι ικανός να βελτιστοποιήσει την κατανομή φορτίο και σε εβδομαδιαία αλλά και μηνιαία βάση. Για να επιτευχθεί όμως κάτι τέτοιο απαιτείται μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύς για την επεξεργασία των δεδομένων και την εκτέλεση των πράξεων.

Ωστόσο, το επόμενο μεγάλο βήμα είναι να καταφέρει ο αλγόριθμος πέρα από την ελαχιστοποίηση του επιπρόσθετου φορτίου που αποτελούν τα ηλεκτρικά οχήματα, να μεγιστοποιεί το κέρδος των ιδιοκτητών τους. Η ύπαρξη κέρδους για τους ιδιοκτήτες είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ελαχιστοποίηση του φορτίου αιχμής καθώς ο αλγόριθμος δεν θα καλείται να βρει τρόπο να φορτιστούν οχήματα, την ώρα που η συνολική ζήτηση ισχύος βρίσκεται στο μέγιστό της, χωρίς να το ξεπεράσει.

Τέλος, ο αλγόριθμος είναι πολύ σημαντικό να λάβει υπόψιν την διάρκεια ζωής της μπαταρίας των ηλεκτρικών οχημάτων. Θα πρέπει να μελετηθούν οι συσσωρευτές των ηλεκτρικών αυτοκινήτων όσον αφορά το πλήθος των φορτίσεων και των αποφορτίσεων που μπορούν να πραγματοποιήσουν ημερησίως, τον ρυθμό με τον οποίο θα το κάνουν, αλλά και το ιδανικό βάθος αποφόρτισης ώστε να μην χρειάζεται οι ιδιοκτήτες να τους αντικαθιστούν συχνά.

## Βιβλιογραφία

- [1] “All-Electric Vehicles.” <https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml> (accessed Oct. 10, 2021).
- [2] S. Lixin, “Electric vehicle development: The past, present & future,” *2009 3rd Int. Conf. Power Electron. Syst. Appl. PESA 2009*, pp. 2–4, 2009.
- [3] C. D. A. and J. Anderson, “Electric and Hybrid Cars,” *Angew. Chemie Int. Ed.*, vol. 40, no. 6, p. 9823, 2010, [Online]. Available: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.370.4192&rep=rep1&type=pdf%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Difco?+&+BBL?+Manual+Manual+of+Microbiological+Culture+Media#0%0Ahttp://doi.wiley.com/10.1002/1521-3773%28>.
- [4] “La jamais contente, voiture électrique !” <https://dusternco.forumactif.com/t272-la-jamais-contente-voiture-electrique> (accessed Oct. 10, 2021).
- [5] S. B. Peterson, J. F. Whitacre, and J. Apt, “The economics of using plug-in hybrid electric vehicle battery packs for grid storage,” *J. Power Sources*, vol. 195, no. 8, pp. 2377–2384, 2010, doi: 10.1016/j.jpowsour.2009.09.070.
- [6] “Roadster | Tesla.” <https://www.tesla.com/roadster> (accessed Oct. 10, 2021).
- [7] “• Chart: Can Falling Battery Prices Power EV Breakthrough? | Statista.” <https://www.statista.com/chart/7713/electric-car-battery-prices/> (accessed Nov. 16, 2020).
- [8] “How global electric car sales defied Covid-19 in 2020 – Analysis - IEA.” <https://www.iea.org/commentaries/how-global-electric-car-sales-defied-covid-19-in-2020> (accessed Sep. 05, 2021).
- [9] “Global EV Outlook 2020 – Analysis - IEA.” <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020> (accessed Nov. 16, 2020).
- [10] E. automobile manufacturers Association, “NEW PASSENGER CAR REGISTRATIONS BY FUEL TYPE IN THE EUROPEAN UNION Quarter 1 2021,” *Eur. Automob. Manuf. Assoc.*,

- vol. 2021, no. April, p. 10, 2021.
- [11] N. E. W. Car, R. By, F. Type, E. Union, P. Embargo, and D. Cars, “Fuel types of new cars: battery electric 7.5%, hybrid 19.3%, petrol 41.8% market share in Q2 2021,” no. July, pp. 1–9, 2021.
- [12] S. Bending, M. Fedorwsi, S. Channon, and K. Strunz, “Specifications for Enabling Smart Techonolgy, Deliverable D1.1 European Project MERGE,” no. August, 2010, [Online]. Available: <http://www.ev-merge.eu/>.
- [13] “CHAdEMO to jointly develop next-gen Ultra-Fast Charging Standard with China – Chademo Association.” <https://www.chademo.com/chademo-to-jointly-develop-next-gen-ultra-fast-charging-standard-with-china/> (accessed Oct. 10, 2021).
- [14] D. Shoup, *The High Cost of Free Parking*. 2017.
- [15] P. Barter, “‘Cars are parked 95% of the time’. Let’s check!” <https://www.reinventingparking.org/2013/02/cars-are-parked-95-of-time-lets-check.html> (accessed Nov. 30, 2020).
- [16] L. Noel, G. Zarazua de Rubens, J. Kester, and B. K. Sovacool, *Vehicle-to-Grid*. 2019.
- [17] Ξ. Μαυρούδης, “Τεχνολογίες Επικοινωνιών για Διασύνδεση των Ηλεκτρικών Οχημάτων με το Ευφυές Δίκτυο Ενέργειας Διπλωματική Εργασία,” National Technical University of Athens, 2016.
- [18] W. Kempton and A. Dhanju, “Electric Vehicles with V2G,” *Wind. Int.*, vol. 2, no. July, pp. 18–21, 2006, [Online]. Available: <http://www.udel.edu/V2G/docs/KemptonDhanju06-V2G-Wind.pdf>.
- [19] W. Kempton and J. Tomić, “Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy,” *J. Power Sources*, vol. 144, no. 1, pp. 280–294, 2005, doi: 10.1016/j.jpowsour.2004.12.022.
- [20] Ε. Ε. Τσιγγούνης, “Βέλτιστος Προγραμματισμός Της V2G Λειτουργίας Των Ηλεκτρικών Οχημάτων Για Την Παροχή Ενέργειας Και Επικουρικών Υπηρεσιών Στο Δίκτυο Διπλωματικη Εργασια Ευάγγελος Ε . Τσιγγούνης,” National Technical University of Athens, 2013.
- [21] C. Guille and G. Gross, “A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation,” *Energy Policy*, vol. 37, no. 11, pp. 4379–4390, 2009, doi: 10.1016/j.enpol.2009.05.053.
- [22] C. D. White and K. M. Zhang, “Using vehicle-to-grid technology for frequency regulation

- and peak-load reduction,” *J. Power Sources*, vol. 196, no. 8, pp. 3972–3980, 2011, doi: 10.1016/j.jpowsour.2010.11.010.
- [23] E. V Aggregation, F. O. R. Virtual, and P. Plants, “M Obile E Nergy R Esources in G Rids of E Lectricity,” *October*, no. October, pp. 1–52, 2010.
- [24] “Useable battery capacity of full electric vehicles cheatsheet - EV Database.” <https://ev-database.org/cheatsheet/useable-battery-capacity-electric-car> (accessed Oct. 05, 2021).
- [25] P. E. Gill, W. Murray, and M. A. Saunders, “SNOPT: An SQP algorithm for large-scale constrained optimization,” *SIAM Rev.*, vol. 47, no. 1, pp. 99–131, 2005, doi: 10.1137/S0036144504446096.
- [26] P. E. Gill, W. Murray, and M. a Saunders, “User Guide for SNOPT Version 7,” *Office*, vol. 11, pp. 1–116, 2008, [Online]. Available: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:User's+Guid+for+SNOPT+Version+7#0>.
- [27] E. Giunchiglia and M. Maratea, “Solving optimization problems with DLL,” *Front. Artif. Intell. Appl.*, vol. 141, pp. 377–381, 2006.
- [28] K. Holmstr, O. G. Anders, and M. M. Edvall, “User ' S Guide for Tomlab / Snopt 1,” *Direct*, pp. 1–212, 2008.
- [29] “Dejure\_Population\_Census2011Rev\_Gr.” .
- [30] Δ. Δ. Νησιων, Σ. Μ. Κρητησ, and Ι. Σπανουδακησ, “ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΚΡΗΤΗΣ ΕΤΟΥΣ 2020,” 2021.