



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

**Ανάλυση της Επίδρασης της Βέλτιστης Αμφίδρομης Λειτουργίας
(Vehicle-to-Grid, V2G) των Ηλεκτρικών Οχημάτων στα Δίκτυα
Ηλεκτρικής Ενέργειας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΩΑΝΝΗΣ Ξ. ΑΘΑΝΑΣΟΓΛΟΥ

Επιβλέπων: Ν. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2015



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

**Ανάλυση της Επίδρασης της Βέλτιστης Αμφίδρομης Λειτουργίας
(Vehicle-to-Grid, V2G) των Ηλεκτρικών Οχημάτων στα Δίκτυα
Ηλεκτρικής Ενέργειας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΙΩΑΝΝΗΣ Ξ. ΑΘΑΝΑΣΟΓΛΟΥ

Επιβλέπων: Ν. Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 18/3/2015.

.....
Χατζηαργυρίου Νικόλαος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κορρές Γεώργιος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεωργιάκης Παύλος
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2015

.....

Ιωάννης Ξ. Αθανάσογλου

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

Copyright © Ιωάννης Ξ. Αθανάσογλου, 2015

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε το ακαδημαϊκό έτος 2013-2014 στα πλαίσια του τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Νικόλαο Χατζυαργυρίου, για την εμπιστοσύνη που επέδειξε στο πρόσωπό μου προκειμένου να μου ανατεθεί αυτή η διπλωματική εργασία, καθώς και για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Ιδιαίτερα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Ευάγγελο Καρφόπουλο, για την αμέριστη βοήθεια και υποστήριξη που μου έδειξε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Χάρη στις πολύτιμες συμβουλές του και την άψογη συνεργασία μας κατάφερα να φέρω εις πέρας την εργασία αυτή.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για την στήριξη και την αγάπη που μου προσέφερε όλα αυτά τα χρόνια καθώς και στους φίλους και συμφοιτητές μου, οι οποίοι βρίσκονταν δίπλα μου σε όλες τις δύσκολες καταστάσεις που είχα να αντιμετωπίσω κατά τη διάρκεια της φοίτησης μου στο παρόν Ίδρυμα.

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται ραγδαία ανάπτυξη του κλάδου των ηλεκτρικών οχημάτων, η οποία οφείλεται κυρίως στις συνεχείς αυξήσεις στις τιμές των καυσίμων καθώς και στα πολύ σημαντικά προβλήματα που δημιουργούνται από τους εκπεμπόμενους ρύπους των συμβατικών αυτοκινήτων στο περιβάλλον. Η εξάπλωσή τους στον τομέα των μεταφορών αναμένεται να είναι ευρεία τα επόμενα χρόνια σε παγκόσμια κλίμακα. Ωστόσο, η επερχόμενη μαζική διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελεί μια πρόκληση για τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, εξαιτίας του επιπρόσθετου φορτίου που δημιουργούν στο δίκτυο. Έτσι, κρίνεται απαραίτητο να ευρεθούν τρόποι εξυπηρέτησης των ενεργειακών αναγκών των ηλεκτρικών οχημάτων οι οποίοι θα οδηγήσουν στην ομαλότερη λειτουργία του δικτύου και στο βέλτιστο οικονομικό αποτέλεσμα.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός αλγορίθμου φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων ο οποίος μας δίνει τη δυνατότητα να έχουμε ροή ισχύος τόσο από το δίκτυο προς το ηλεκτρικό όχημα (Grid-to-Vehicle, G2V) όσο και αντίστροφα (Vehicle-to-Grid, V2G), καθώς και η μελέτη της επίδρασης που έχει αυτός ο αλγόριθμος σε ένα πραγματικό δίκτυο. Τα αποτελέσματα αυτού του αλγορίθμου θα συγκριθούν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα άλλων τριών αλγορίθμων υπολογισμού των ενεργειακών αναγκών ενός στόλου ηλεκτρικών οχημάτων για να παρουσιαστούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου. Οι τρεις εναλλακτικές στρατηγικές φόρτισης είναι: η μη ελεγχόμενη φόρτιση, η οποία ξεκινά με την επιστροφή του οχήματος στο σπίτι μετά την τελευταία μετακίνηση, η φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο, στην οποία έχουμε μετατόπιση της φόρτισης των οχημάτων σε ώρες όπου έχουμε το ελάχιστο ενεργειακό κόστος, και η ελεγχόμενη φόρτιση με ελαχιστοποίηση κόστους και ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου (Valley Filling). Στη συνέχεια, οι τέσσερις αυτοί αλγόριθμοι εφαρμόζονται σε δύο διαφορετικά δίκτυα, στο δίκτυο διανομής της Σπερχειάδας και στο ενεργειακό δίκτυο της Κρήτης. Στη Σπερχειάδα, στόχος μας είναι να δούμε τι πλεονεκτήματα παρουσιάζει η στρατηγική V2G έναντι των άλλων στρατηγικών στην ομαλότητα του δικτύου, μελετώντας τις απώλειες του δικτύου και το προφίλ και τη διακύμανση της τάσης στους ζυγούς. Όσο για την Κρήτη, στόχος μας είναι να βρούμε το πως επηρεάζουν οι διαφορετικοί αλγόριθμοι την οικονομική λειτουργία του δικτύου της, υπολογίζοντας την επίδραση τους στο συνολικό κόστος του συστήματος, στον προγραμματισμό των μονάδων παραγωγής, στους εκπεμπόμενους ρύπους από τις μονάδες παραγωγής και άλλα παρόμοια στοιχεία. Η ανάπτυξη των αλγορίθμων γίνεται στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Matlab.

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια ανασκόπηση της τεχνολογίας των ηλεκτρικών οχημάτων, των υποδομών φόρτισής τους και των προτύπων που έχουν δημιουργηθεί για τη σύνδεσή τους στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Στα κεφάλαια 2 με 4 παρουσιάζονται τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των ενεργειακών αναγκών των ηλεκτρικών οχημάτων, για τη δικτυακή ανάλυση της διείσδυσής τους και για την οικονομική αποτίμηση της διείσδυσής τους, αντίστοιχα. Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στη

λειτουργία των δύο δικτύων για κάθε στρατηγική φόρτισης αλλά και συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ αυτών. Τέλος, στο κεφάλαιο 6 έχουμε μια σύνοψη των κυριότερων συμπερασμάτων της παραπάνω ανάλυσης.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ηλεκτρικά οχήματα, διακύμανση τάσης, απώλειες συστήματος, οικονομική κατανομή, vehicle-to-grid (V2G)

Abstract

Recent years have seen a rapid growth in the sector of electric vehicles, mainly due to the continuous increase in fuel prices and the very serious problems arising from the pollutant emissions of conventional cars on the environment. Their presence in the transport sector is expected to be widespread in the coming years on a global scale. However, the upcoming massive penetration of electric vehicles is a challenge for the power grids, because of the extra load they add to the grid. Thus, it is necessary to find ways to serve the energy requirements of electric vehicles which will lead to the smoother operation of the electrical grid and the optimal economic outcome.

The purpose of this diploma thesis is first to develop an algorithm of electric vehicle charging, which enables the bidirectional power flow from the grid to the electric vehicle (Grid-to-vehicle, G2V) and vice versa (Vehicle-to-grid, V2G), and second to study the influence of this algorithm in a real electrical grid. The results of this algorithm will be compared with those of other three algorithms which calculate the energy requirements of a fleet of electric vehicles, in order to present the advantages and disadvantages of this method. The three alternative strategies are: uncontrolled charging, which begins after the last trip of the day, dual tariff charging, in which we have a shift of vehicle charging to hours with the minimum energy cost, and controlled charging with the minimization of cost and simultaneous optimization of the electrical grid operation (Valley filling). Subsequently, these four algorithms are implemented in two different electrical grids, the energy distribution system of Sperchiada and the electrical grid of Crete. In Sperchiada, our goal is to find the advantages strategy V2G has to offer, compared to the other strategies, in the smooth operation of the grid, by studying the actual losses of the grid, the voltage profile and the voltage deviation of the grids' buses. Regarding the electrical grid of Crete, the goal is to find how different algorithms affect the economic functioning of this grid, by calculating the algorithms' impact on the total system cost, the unit commitment, the pollutants emitted from the plants and other similar data. The algorithms are developed in Matlab programming environment.

Chapter 1 gives an overview of the technology of electric vehicles, their charging infrastructure, as well as the standards that have been created for their connection to the electric power system. Chapters 2-4 present the tools used to determine the energy requirements of electric vehicles, the grid analysis and the economic evaluation of their penetration, respectively. Chapter 5 presents the results of the simulations in the operation of the two electrical grids for every charging strategy, as well as comparative results between the strategies. Finally, in Chapter 6 the conclusions of the above analysis are summarised.

KEY WORDS

Electric vehicles, voltage deviation, actual losses, economic dispatch, vehicle-to-grid (V2G)

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	1
Τεχνολογίες ηλεκτρικών οχημάτων και υποδομών φόρτισης	1
1.1 Εισαγωγή.....	2
1.2 Σύγκριση μεταξύ ηλεκτρικών αυτοκινήτων και συμβατικών.....	9
1.3 Τύποι ηλεκτρικών οχημάτων	10
1.3.1 Ηλεκτρικά Σχήματα με Συσσωρευτές (BEV)	11
1.3.2 Υβριδικά Ηλεκτροκίνητα Οχήματα (HEV).....	11
1.3.3 Επαναφορτιζόμενα από το Δίκτυο Υβριδικά Ηλεκτροκίνητα Οχήματα (PHEV).....	12
1.3.4 Ηλεκτροκίνητα Οχήματα με Συσσωρευτές και Μονάδα Επέκτασης της Αυτονομίας (E-REV)	13
1.3.5 Σύγκριση κόστους μεταξύ των διαφόρων τύπων ηλεκτρικών οχημάτων	13
1.4 Κατηγορίες συσσωρευτών	15
1.4.1 Συσσωρευτές Μολύβδου-Οξέος (lead-acid)	16
1.4.2 Συσσωρευτές Νικελίου-Καδμίου (Nickel-Cadmium)	17
1.4.3 Συσσωρευτές Νικελίου-μετάλλου-υδριδίου (Nickel-metal-hydride).....	18
1.4.4 Συσσωρευτές Ιόντων λιθίου (lithium ion).....	18
1.5 Τύποι φόρτισης οχημάτων	22
1.5.1 Φόρτιση με επαφή	22
1.5.2 Επαγωγική φόρτιση.....	22
1.5.3 Σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων φορτίσεως	23
1.6 Επίπεδα φόρτισης.....	23
1.7 Υποδομές φόρτισης	25
1.8 Διεθνή πρότυπα σταθμών φόρτισης.....	26
1.8.1 Πρότυπο SAE (Society of Automotive Engineers)	26
1.8.2 Πρότυπα IEC (The International Electrotechnical Commission).....	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	33
Εργαλεία ενεργειακής ανάλυσης διεύθυνσης ηλεκτρικών οχημάτων	33
2.1 Εισαγωγή.....	34
2.2 Προσδιορισμός της ζήτησης ηλεκτρικών οχημάτων	34
2.3 Μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού ζήτησης ηλεκτρικών οχημάτων	41
2.4 Υλοποίηση των αλγορίθμων προσδιορισμού των ενεργειακών αναγκών των οχημάτων.....	43

2.4.1 Υλοποίηση στρατηγικής A (dumb charging)	46
2.4.2 Υλοποίηση στρατηγικής B (dual tariff charging).....	47
2.4.3 Υλοποίηση στρατηγικής C (smart charging).....	48
2.4.4 Υλοποίηση στρατηγικής D (vehicle to grid)	50
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	54
Εργαλεία δικτυακής ανάλυσης διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων.....	54
3.1 Εισαγωγή.....	55
3.2 Μοντέλο	56
3.2.1 Μορφή Αρχείων.....	56
3.2.2 Γραμμή.....	56
3.2.3 Γεννήτρια	57
3.2.4 Φορτία	58
3.2.5 Shunt Elements.....	58
3.2.6 Εξισώσεις δικτύου.....	59
3.2.7 Το μοντέλο DC.....	60
3.3 Ροή Ισχύος.....	61
3.3.1 Ροή Ισχύος AC	62
3.3.2 DC Power Flow- ροή ρεύματος DC	63
3.3.3 Linear Shift Factors	64
3.4. Βέλτιστη Ροή Ισχύος	65
3.4.1 Standard AC OPF.....	65
3.4.2 Standard DC OPF.....	66
3.4.3 Εκτεταμένος σχηματισμός του OPF.....	67
3.4.4 Πρότυπες Επεκτάσεις.....	68
3.4.5 Λύτες	69
3.4.6 Πρόσθετη λειτουργικότητα	70
3.5 Αποτελέσματα και συμπεράσματα.....	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	75
Εργαλεία οικονομικής αποτίμησης διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων.....	75
4.1 Περιγραφή του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής.....	77
4.2 Καθορισμός ορίων απορρόφησης αιολικής ενέργειας.....	77
4.3 Ένταξη - φόρτιση συμβατικών μονάδων και στρεφόμενη εφεδρεία συστήματος.....	78

4.4 Οικονομική αποτίμηση της λειτουργίας του συστήματος	81
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	84
Μελέτη συστήματος διανομής Σπερχειάδας και ενεργειακού συστήματος Κρήτης.....	84
5.1 Παρουσίαση και μελέτη του συστήματος διανομής της Σπερχειάδας.....	85
5.1.1. Περιγραφή των χαρακτηριστικών του συστήματος διανομής της Σπερχειάδας	85
5.1.2. Παρούσα κατάσταση του συστήματος διανομής της Σπερχειάδας χωρίς ηλεκτρικά οχήματα.	86
5.1.3. Συμπεριφορά δικτύου διανομής με μη ελεγχόμενη φόρτιση (dumb charging).....	89
5.1.4. Συμπεριφορά δικτύου διανομής με ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο (dual tariff charging).....	93
5.1.5. Συμπεριφορά δικτύου διανομής με έξυπνη φόρτιση (smart charging)	96
5.1.6. Συμπεριφορά δικτύου διανομής με φόρτιση που περιλαμβάνει εφαρμογή V2G (vehicle-to-grid).....	100
5.1.7. Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των 4 στρατηγικών φόρτισης στο δίκτυο διανομής της Σπερχειάδας.....	107
5.2 Παρουσίαση και μελέτη του ενεργειακού συστήματος της Κρήτης.....	111
5.2.1. Περιγραφή του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής της Κρήτης και των χαρακτηριστικών του στόλου ηλεκτρικών οχημάτων	111
5.2.2. Παρούσα κατάσταση του ενεργειακού συστήματος της Κρήτης χωρίς ηλεκτρικά οχήματα..	115
5.2.3. Συμπεριφορά του ενεργειακού συστήματος της Κρήτης με μη ελεγχόμενη φόρτιση (dumb charging).....	122
5.2.4. Συμπεριφορά του ενεργειακού συστήματος της Κρήτης με ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο (dual tariff charging).....	130
5.2.5. Συμπεριφορά του ενεργειακού συστήματος της Κρήτης με έξυπνη φόρτιση (smart charging)	137
5.2.6. Συμπεριφορά του ενεργειακού συστήματος της Κρήτης με φόρτιση που περιλαμβάνει εφαρμογή V2G (vehicle-to-grid).....	144
5.2.7. Συμπεράσματα.....	151
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	160
Συμπεράσματα	160
6.1 Δίκτυο Διανομής Σπερχειάδας	161
6.2 Ενεργειακό σύστημα Κρήτης.....	162
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	165

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

**Τεχνολογίες ηλεκτρικών οχημάτων και
υποδομών φόρτισης**

1.1 Εισαγωγή

Τα ηλεκτρικά οχήματα θεωρούνται από πολλούς ως μια καινούρια τεχνολογία, η οποία έχει κάνει την εμφάνισή της τις τελευταίες δεκαετίες. Στην πραγματικότητα, όμως, τα ηλεκτροκίνητα οχήματα έχουν μια μακρόχρονη ιστορία που ξεκινά στα μέσα του 19^{ου} αιώνα, ταυτόχρονα περίπου με την εμφάνιση των συμβατικών οχημάτων. Μάλιστα, υπάρχουν ενδείξεις ότι στις απαρχές της αυτοκίνησης το ηλεκτρικό αυτοκίνητο ήταν τόσο δημοφιλές όσο και ο ανταγωνιστής του που κινείτο με μηχανή εσωτερικής καύσης. Παρόλο που πέρασαν τα επόμενα χρόνια στην αφάνεια λόγω των προβλημάτων που αντιμετώπιζαν, με σημαντικότερο ζήτημα όλων αυτό της μπαταρίας, τα ηλεκτρικά οχήματα επανήλθαν στο προσκήνιο τα τελευταία χρόνια ως μια περιβαλλοντικά φιλική επιλογή, η οποία ταυτόχρονα θα έχει ως στόχο την αντιμετώπιση της πετρελαϊκής κρίσης. [1]

Παρακάτω θα παρουσιάσουμε μερικές ημερομηνίες-σταθμούς στην πορεία της ηλεκτροκίνησης:

- **Δεκαετία του 1830:** Γίνονται οι πρώτες προσπάθειες, πειραματικού χαρακτήρα, για την κατασκευή του πρώτου οχήματος που θα κινείται με ηλεκτρισμό.
- **1834:** Ο αμερικάνος Thomas Davenport αναπτύσσει το πρώτο ηλεκτρικό όχημα για εμπορική χρήση. Παρόλα αυτά, οι προσπάθειες του δεν είναι επικερδής λόγω της χρήσης αναξιόπιστων και προτώγωνων μπαταριών.
- **1847:** Ο αμερικανός Moses Farmer κατασκευάζει ένα όχημα που μπορεί να μεταφέρει δύο άτομα, ενώ την ίδια χρονιά ο καθηγητής Charles Page παρουσιάζει ένα ηλεκτρικό όχημα με 100 συσσωρευτές, με δυνατότητα να μεταφέρει έως και 12 άτομα.
- **1859:** Ο Γάλλος Gaston Plante καταφέρνει να αντιμετωπίσει τα προβλήματα των συσσωρευτών που είχαν οι προηγούμενες εφευρέσεις ανακαλύπτοντας για πρώτη φορά το στοιχείο Μολύβδου-Οξέως με δυνατότητα επαναφόρτισης. Τα επόμενα χρόνια εμφανίστηκαν και άλλοι, βελτιωμένοι, τύποι συσσωρευτών.
- **1889:** Ο Thomas Edison κατασκευάζει ηλεκτρικό όχημα χρησιμοποιώντας αλκαλικές μπαταρίες.
- **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.
- **1897:** Η Baker Motor Vehicle Company κατασκευάζει ένα όχημα με αυτονομία 160,9km ανά φόρτιση και με μέγιστη ταχύτητα τα 35,4 χιλιόμετρα την ώρα.
- **1899:** Κατασκευάζεται στη Γαλλία το πρώτο ηλεκτρικό όχημα που ταξιδεύει με 100 km/h, το οποίο ονομάζεται “La Jamais Contente”.
- **1900:** Τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν φτάσει να κατέχουν το ίδιο μερίδιο αγοράς με τους ανταγωνιστές του, τα οχήματα εσωτερικής καύσης και τα ατμοκίνητα. Μάλιστα, το ποσοστό τους στην Αμερική φτάνει στο 38%. Την ίδια χρονιά, η εταιρία Ferdinand Porsche κατασκευάζει το πρώτο υβριδικό ηλεκτρικό όχημα.
- **1908:** Ο Henry Ford παρουσιάζει το μοντέλο 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.



Εικόνα 1: Το μοντέλο T του Henry Ford

- **1909:** Ο William Taft γίνεται ο πρώτος Αμερικάνος Πρόεδρος που αγοράζει ηλεκτροκίνητο όχημα, της εταιρείας Baker Electric.
- **1912:** Ο Charles Kettering εφεύρει τον πρώτο ηλεκτρικό εκκινητή, ο οποίος διευκολύνει τους ανθρώπους να οδηγούν βενζινοκίνητα αυτοκίνητα. Την ίδια χρονιά το απόθεμα σε EVs σπάει κάθε ρεκόρ φτάνοντας τις 30,000.
- **1935:** Η εξαφάνιση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι γεγονός, τα οποία αντικαθίστανται από τα οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης.

Από εκείνη τη δεκαετία και μετά είχαμε μεταστροφή της αγοράς στα βενζινοκίνητα οχήματα, με αποτέλεσμα να μην υπάρξει αξιοσημείωτη παραγωγή ηλεκτρικών αυτοκινήτων σε μεγάλη κλίμακα. Οι βασικότεροι λόγοι που οδήγησαν σε αυτό το αποτέλεσμα ήταν οι εξής:

- Η βελτίωση του υπεραστικού οδικού δικτύου έκανε αναγκαία τα οχήματα μεγάλης αυτονομίας,
- Η ανακάλυψη μεγάλων αποθεμάτων πετρελαίου οδήγησε σε μείωση του κόστους των καυσίμων,
- η δυνατότητα των βενζινοκίνητων οχημάτων για εύκολη εκκίνηση, που έγινε πραγματικότητα με την εφεύρεση του ηλεκτρικού εκκινητή και τέλος,
- η μαζική παραγωγή οχημάτων εσωτερικής καύσης σε χαμηλή τιμή από τον Henry Ford, έκανε αυτά τα οχήματα ευρέως διαθέσιμα και προσιτά σε όλο τον κόσμο. Ενδεικτικά, η τιμή των τελευταίων οχημάτων κυμαινόταν μεταξύ 500 και 1000 δολλαρίων, ενώ εκείνη την περίοδο τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα στοίχιζαν κοντά στα 2000 δολλάρια.

Δεν ήταν, όμως, μόνο αυτοί οι λόγοι που οδήγησαν στην εξαφάνιση των ηλεκτρικών οχημάτων. Σε αυτό συνετέλεσε και το γεγονός ότι οι εταιρείες πετρελαιοειδών της εποχής, αλλά και αργότερα, υπονόμευαν της προσπάθειες παραγωγής αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων λόγω του φόβου ότι η συνεπακόλουθη απεξάρτηση από το πετρέλαιο θα έθιγε τα συμφέροντά τους.

Μπροστά στο φόβο του να χάσουν μεγάλο μερίδιο της αγοράς, αποφάσισαν να καταφύγουν σε άλλες οδούς για να αντιμετωπίσουν τη νέα αυτή απειλή. Ένα παράδειγμα αυτού αποτελεί η εταιρεία Mobil, η οποία δημιούργησε σωρεία διαφημίσεων με τις οποίες κατέκρινε τα γνωρίσματα των ηλεκτρικών αυτοκινήτων.

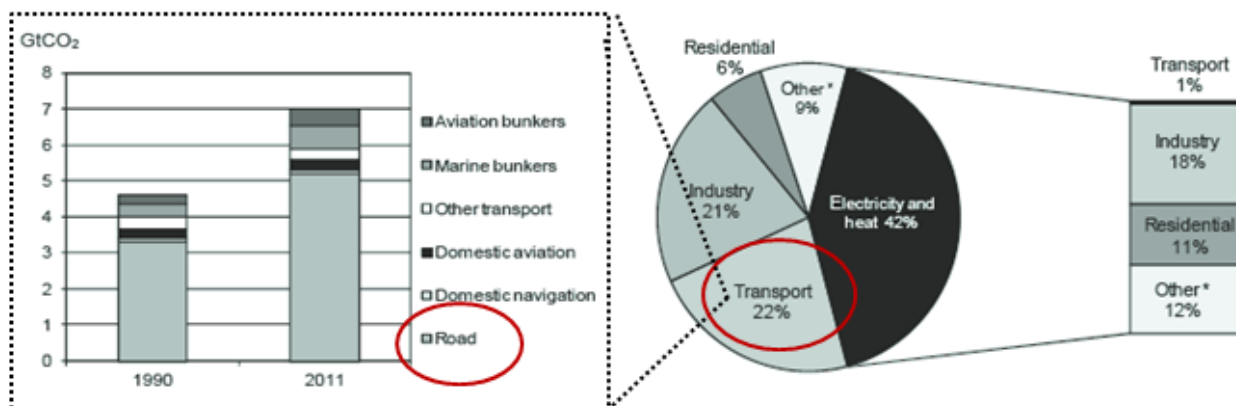
Αυτή η περίοδος της παρακμής κράτησε περίπου από το 1930 μέχρι και το 1960. Η πλειοψηφία των ηλεκτρικών οχημάτων που υπήρχαν εκείνη την περίοδο ήταν πρωτότυπου σχεδιασμού ή πειραματικά, τα οποία γίνονταν δημοφιλή μόνο σε ειδικές περιπτώσεις. Μια τέτοια περίπτωση ήταν χρήση τους για μεταφορές στην Αγγλία κατά τη διάρκεια των δύο Παγκόσμιων Πολέμων, με στόχο την εξοικονόμηση καυσίμων.

Ήταν τη χρονιά του 1960 όπου άρχισε και πάλι να αναζωπυρώνεται το ενδιαφέρον, καθώς το πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης από τα αυτοκίνητα στα αστικά κέντρα είχε αρχίσει να γίνεται ορατό, ενώ παράλληλα έπρεπε να αναζητηθούν και εναλλακτικές ενεργειακές λύσεις. Μερικές εταιρείες που άρχισαν εκείνη την περίοδο να κατασκευάζουν ηλεκτροκίνητα μοντέλα ήταν οι General Motors, Ford, Fiat, American Motors, Mercedes, VolksWagen, Nissan, Toyota κ.α. Ένα από τα οχήματα εκείνης της περιόδου που αξίζει να αναφερθεί είναι το GMC Handivan του 1966, το οποίο διέθετε καινοτομικό σύστημα τροφοδοσίας που αποτελούνταν από κυψέλες καυσίμου υδρογόνου. Ωστόσο, είχε και αρκετά μειονεκτήματα όπως μεγάλο βάρος και κόστος, διαρροές υδρογόνου καθώς και πολυπλοκότητα κατασκευής. Εκτός των αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων, εκείνη την εποχή παρουσιάστηκαν και ορισμένα υβριδικά οχήματα, τα οποία συνδυάζαν χρήση ηλεκτροκινητήρα και βενζινοκινητήρα. Ακόμη, όμως, και η κατασκευή των τελευταίων μοντέλων δεν μπόρεσε να καθιερώσει στην αγορά τα ηλεκτρικά οχήματα, με αποτέλεσμα να συνεχίσει η περίοδος της παρακμής μέχρι και το 1990.



Εικόνα 2: Το μοντέλο GMC Handivan του 1966

Τα δεδομένα άλλαξαν από το 1990 και ύστερα. Η παγκόσμια οικονομική κρίση η οποία άρχισε να κάνει την εμφάνισή της στα τέλη του 2000, σε συνδυασμό με την ραγδαία αύξηση της ρύπανσης της ατμόσφαιρας, ανάγκασε τις αυτοκινητοβιομηχανίες να στρέψουν την προσοχή τους σε υβριδικά και ηλεκτρικά οχήματα, τα οποία είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον. [2]



Εικόνα 3: Έρευνα της IEA στις εκπομπές CO2 που οφείλονται στις μετακινήσεις

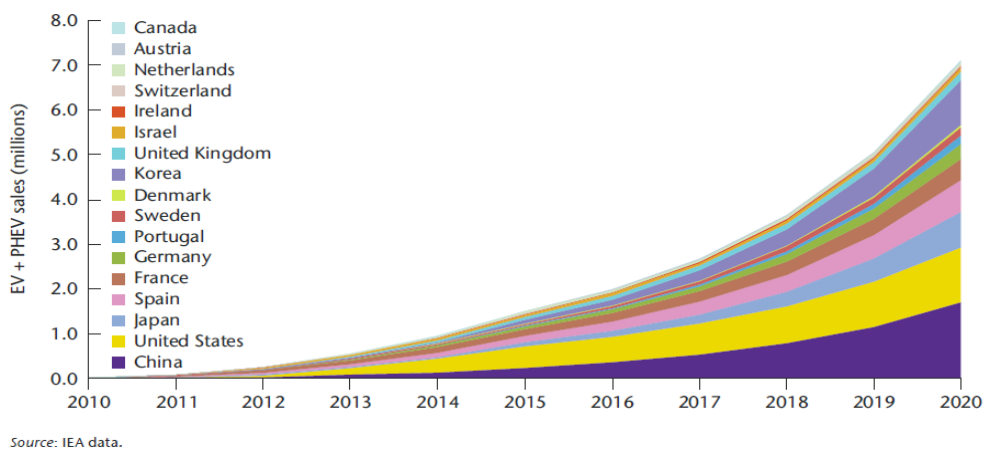
Ανεπηρέαστη από όλα αυτά τα προβλήματα δεν θα μπορούσε να μείνει και η Ευρωπαϊκή Ένωση. Έτσι, τον Μάρτιο του 2007 το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο ενέκρινε μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για την κλιματική και ενεργειακή πολιτική με στόχο την καταπολέμηση της αλλαγής του κλίματος και την αύξηση της ενεργειακής ασφάλειας της ΕΕ, ενισχύοντας παράλληλα την ανταγωνιστικότητα της και την μετατροπή της σε μια ιδιαίτερα αποδοτική από ενεργειακής άποψης οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Οι απαιτήσεις που υιοθετήθηκαν από τους αρχηγούς κρατών και κυβερνήσεων είναι γνωστές ως στόχοι "20-20-20" και είναι οι εξής:

- Μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά τουλάχιστον 20% κάτω από τα επίπεδα του 1990,
- 20% της κατανάλωσης ενέργειας της ΕΕ να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τέλος,
- μείωση κατά 20% στη χρήση πρωτογενούς ενέργειας σε σύγκριση με τα προβλεπόμενα επίπεδα μέσω της βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης.

Επιπλέον, πέραν των στόχων 20-20-20, κατά τη διάσκεψη των Ηνωμένων Εθνών για την κλιματική αλλαγή που έγινε το 2009 στην Κοπεγχάγη, οι χώρες που αντιπροσωπεύουν πάνω από το 80% των παγκόσμιων εκπομπών υπέγραψαν τη «Συμφωνία της Κοπεγχάγης» με την οποία κατέστη σαφές ότι η υπερθέρμανση του πλανήτη πρέπει να διατηρηθεί κάτω από 2° C ώστε να αποφευχθούν οι επικίνδυνες επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής. Για να γίνει πραγματικότητα αυτό, θα πρέπει να οδηγηθούμε σε μια οικονομία χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

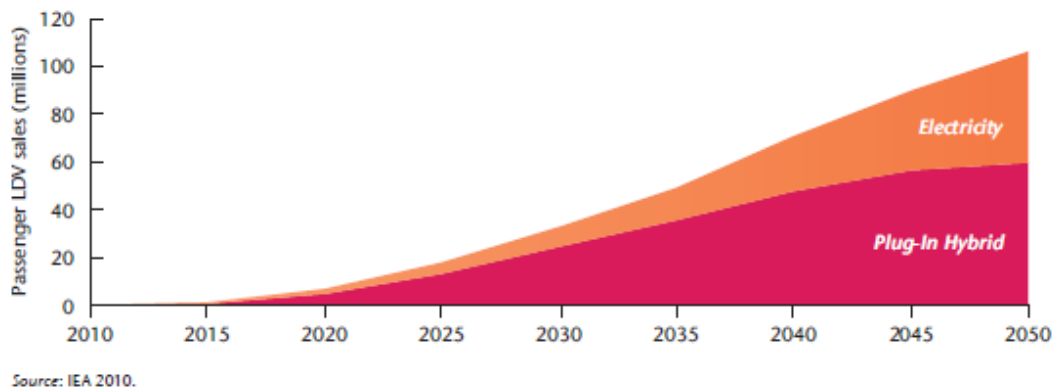
Τέλος, σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα χρόνου η ΕΕ έχει θέσει ως κεντρικό στόχο να μειώσει έως το 2050 τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 80%-95% σε σχέση αυτές του 1990. Για να το καταφέρει αυτό, θα χρειαστεί η απανθρακοποίηση του ενεργειακού τομέα καθώς και η εξασφάλιση του ενεργειακού εφοδιασμού και της ανταγωνιστικότητας της Ευρωπαϊκής Οικονομίας.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι η χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων κρίνεται απαραίτητη πλέον, καθώς αποτελεί μια σημαντική προσπάθεια αντιμετώπισης του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής και χωρίς αυτήν δεν είναι δυνατόν να επιτευχθούν οι στόχοι της ΕΕ. Απόδειξη αυτού αποτελεί το παρακάτω διάγραμμα, το οποίο παρουσιάζει τους διεθνείς στόχους πωλήσεων ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων μέχρι το 2020: [3]



Εικόνα 4: Διεθνείς στόχοι πωλήσεων ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων μέχρι το 2020

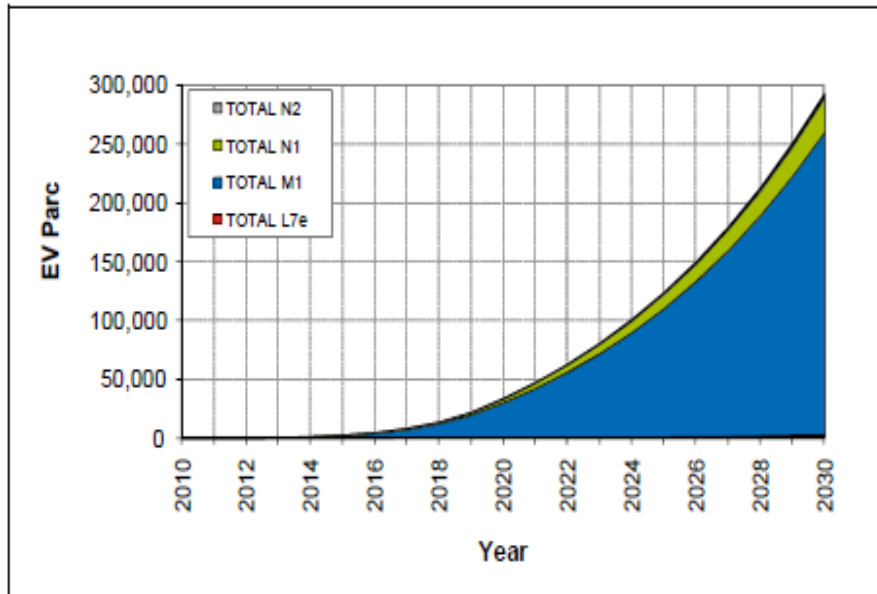
Επιπλέον, αισιόδοξα πλάνα έχουν ανακοινωθεί από τις εθνικές κυβερνήσεις και σε μακροπρόθεσμο επίπεδο. Πιο συγκεκριμένα, προβλέπεται ότι το 2030 οι πωλήσεις των ηλεκτρικών οχημάτων θα ξεπεράσουν τα 30 εκ. ενώ το 2050 θα πλησιάσουν τα 110 εκ.



Εικόνα 5: Διεθνείς στόχοι πωλήσεων ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων μέχρι το 2050

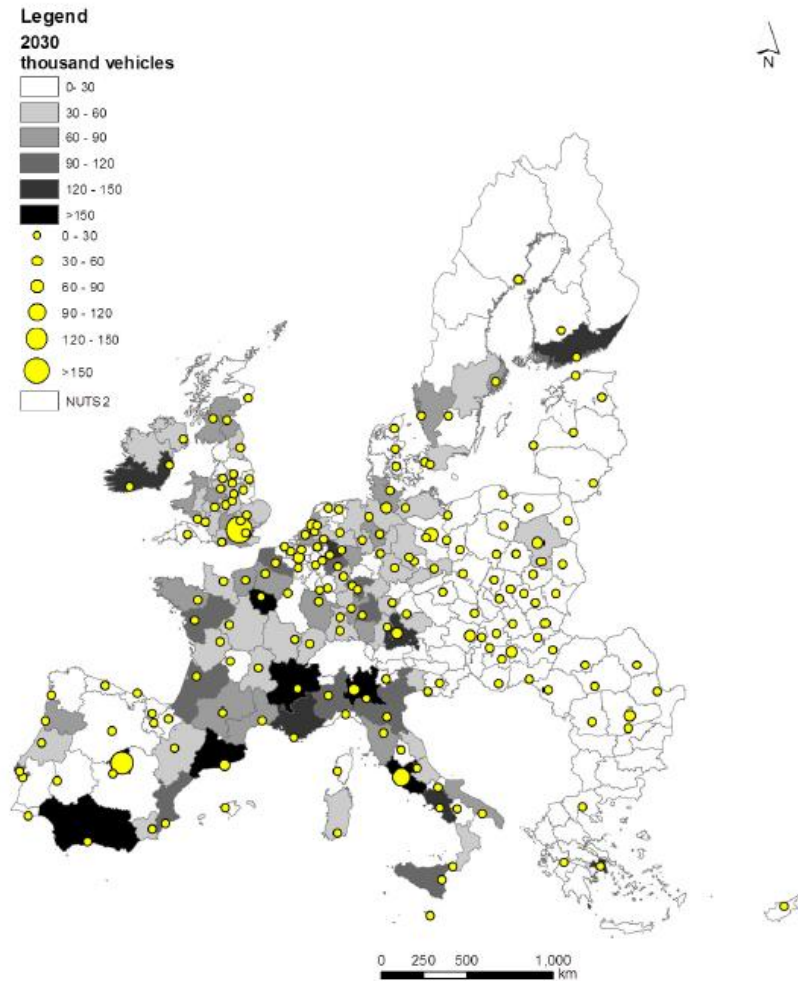
Όσον αφορά την Ελλάδα, έχουν αναπτυχθεί τρία πιθανά σενάρια:

- 1) **το ρεαλιστικό σενάριο**, με 34.000 EVs το 2020 και 293.000 EVs το 2030,
- 2) **το αισιόδοξο σενάριο**, με 70.000 EVs το 2020 και 625.000 EVs το 2030 και
- 3) **το υπεραισιόδοξο σενάριο**, με 142.000 EVs το 2020 και 1.219.000 EVs το 2030,



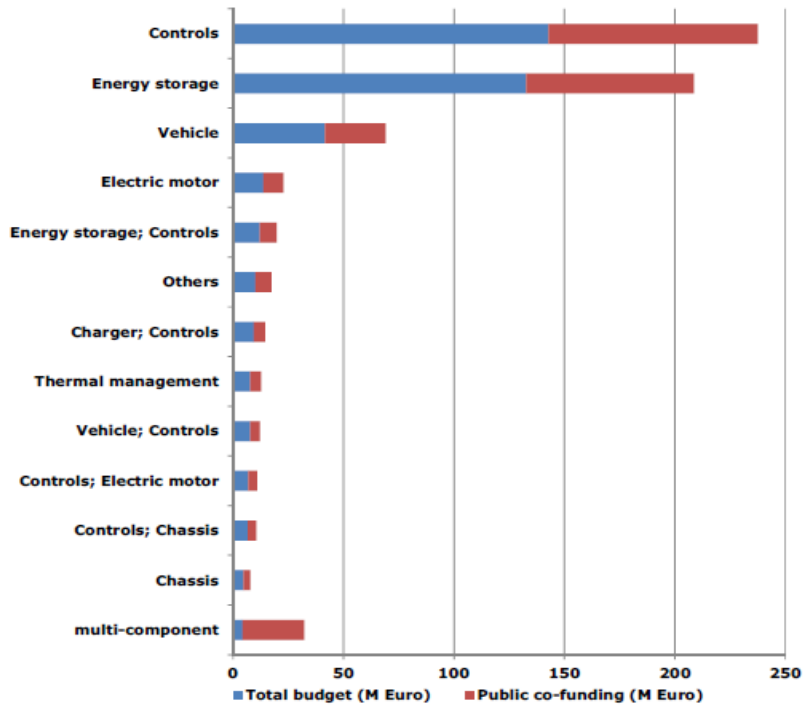
Εικόνα 6: Το ρεαλιστικό σενάριο διείσδυσης EV για την Ελλάδα

Για την Ευρώπη συγκεκριμένα, έρευνες έχουν δείξει ότι οι 3 Ευρωπαϊκές πόλεις που αναμένεται να είναι πρωτοπόρες στον τομέα της ηλεκτροκίνησης είναι η **Μαδρίτη**, το **Λονδίνο** και η **Ρώμη**. Ακόμη, αυξημένα ποσοστά διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων αναμένονται σε **Γαλλία** και **Γερμανία**. Τα αποτελέσματα αυτά της έρευνας παρουσιάζονται συνολικά στο παρακάτω γράφημα: [4]



Εικόνα 7: Πιθανές μελλοντικές κυρίαρχες αγορές στην Ευρώπη το 2030

Τέλος, είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι τα ηλεκτρικά οχήματα αποτελούνται από πολλά διαφορετικά εξαρτήματα τα οποία χρειάζεται να ερευνηθούν περαιτέρω και να βελτιωθούν. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η κατανομή των επενδύσεων σε αυτά τα διαφορετικά κομμάτια: [4]



Εικόνα 8: Κατανομή των επενδύσεων στα διάφορα εξαρτήματα

1.2 Σύγκριση μεταξύ ηλεκτρικών αυτοκινήτων και συμβατικών

Είναι δεδομένο ότι η εισαγωγή όλο και περισσότερων ηλεκτροκίνητων οχημάτων στην αγορά, έχει ως σκοπό και ως αποτέλεσμα τη μείωση της χρήσης των συμβατικών αυτοκινήτων. Έτσι, η σύγκριση μεταξύ αυτών των δύο τύπων αυτοκινήτων είναι αναπόφευκτη. Παρακάτω παρουσιάζεται μια σύγκριση μεταξύ των δύο: [7]

Πλεονεκτήματα ηλεκτρικών οχημάτων:

- a) **Είναι περισσότερο αποδοτικά.** 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%.

- b) **Είναι φιλικά προς το περιβάλλον.** Οι εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων είναι μηδενικές, και συνεπώς οδηγούν στην αντιμετώπιση σοβαρών περιβαντολλογικών προβλημάτων, όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου.
- c) **Οφέλη απόδοσης.** Οι ηλεκτρικοί κινητήρες προσδίδουν ήσυχη και ομαλή λειτουργία, καθώς, επίσης, απαιτούν λιγότερη συντήρηση σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα.
- d) **Μείωση της ενεργειακής εξάρτησης.** Η ηλεκτρική ενέργεια είναι μια εγχώρια πηγή ενέργειας.
- e) **Χαμηλότερο κόστος σε βάθος χρόνου.** Δεν επηρεάζονται από την αύξηση της τιμής της βενζίνης, και επιπλέον έχουν χαμηλότερο κόστος συντήρησης.

Ταυτόχρονα, όμως, τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν και κάποια μειονεκτήματα τα οποία αξίζει να σημειωθούν:

- a) **Αυτονομία οδήγησης.** Τα περισσότερα οχήματα αυτού του τύπου δεν μπορούν να ξεπεράσουν τα 300 χιλιόμετρα ανά φόρτιση, ενώ τα βενζινοκίνητα αυτοκίνητα μπορούν να φτάσουν μέχρι και τα 600-700 χιλιόμετρα χωρίς ανεφοδιασμό.
- b) **Χρόνος επαναφόρτισης.** Ο χρόνος που χρειάζεται για να φορτίσει πλήρως μια μπαταρία κυμαίνεται από 4 έως 8 ώρες. Ακόμα και με τις νέες τεχνολογίες ταχείας φόρτισης, η πλήρης φόρτιση της μπαταρίας μπορεί να πάρει έως και μία ώρα.
- c) **Κόστος μπαταρίας.** Οι μεγάλες συστοιχίες συσσωρευτών έχουν μεγάλο κόστος και μπορεί να χρειαστεί να αντικατασταθούν πάνω από μια φορά.
- d) **Όγκος και βάρος.** Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά οχήματα έχουν μεγάλο βάρος και καταλαμβάνουν σημαντικό χώρο στα οχήματα.

Παρόλα αυτά, οι ερευνητές δουλεύουν πάνω στη βελτίωση της τεχνολογίας των μπαταριών με σκοπό να αυξήσουν την αυτονομία και να μειώσουν τους χρόνους επαναφόρτισης, το βάρος και το κόστος. Αυτοί οι παράγοντες είναι που θα καθορίσουν πλήρως το μέλλον των ηλεκτρικών οχημάτων.

1.3 Τύποι ηλεκτρικών οχημάτων

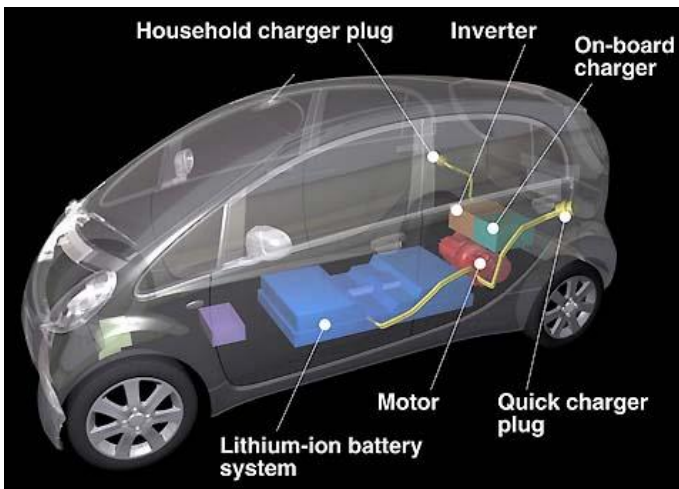
Υπάρχουν διάφορα είδη ηλεκτρικών οχημάτων, τα οποία χωρίζονται ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιούν: [6],[7]

- 1) ηλεκτρικά οχήματα με συσσωρευτές (**Battery Electric Vehicle ή BEV**)
- 2) υβριδικά οχήματα (**Hybrid Electric Vehicle ή HEV**)
- 3) επαναφορτιζόμενα από το δίκτυο υβριδικά ηλεκτροκίνητα οχήματα (**Plug-in Hybrid Electric Vehicle ή PHEV**)

- 4) ηλεκτροκίνητα οχήματα με συσσωρευτές και μονάδα επέκτασης της αυτονομίας (**Extended Range Battery Vehicles ή E-REV**)

1.3.1 Ηλεκτρικά Σχήματα με Συσσωρευτές (BEV)

Πρόκειται για ηλεκτρικά οχήματα που χρησιμοποιούν χημική ενέργεια, η οποία αποθηκεύεται σε επαναφορτιζόμενους συσσωρευτές. Οι συσσωρευτές αυτοί είναι που κινούν τους τροχούς του αυτοκινήτου με τη βοήθεια ηλεκτρικών κινητήρων, επομένως τα BEVs δε χρειάζονται κάποιο κινητήρα εσωτερικής καύσης. Η φόρτιση των συσσωρευτών γίνεται αμέσως από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, ένας άλλος εναλλακτικός τρόπος φόρτισης είναι η αναγεννητική πέδηση, η οποία βοηθάει στην φόρτιση των μπαταριών καθώς τα οχήματα βρίσκονται στο δρόμο. Ο τύπος αυτόν των αυτοκινήτων εμφανίστηκε για πρώτη φορά το 2010,



Εικόνα 9: Ηλεκτρικό όχημα BEV

και από τότε οι πωλήσεις του όλο και αυξάνονται. Τα στοιχεία που κάνουν ολοένα και πιο ελκυστικά αυτά τα οχήματα είναι τόσο η μηδενικές εκπομπές αερίων ρύπων CO₂, όσο και οι ραγδαίες εξελίξεις που υπάρχουν στον τομέα των συσσωρευτών. Για παράδειγμα, η ανακάλυψη των νέων **μπαταριών Ιόντων Λιθίου (Lithium Ion)** που έχουν μεγαλύτερη ισχύ και ενεργειακή πυκνότητα, μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη επιτάχυνση του οχήματος καθώς και σε μεγαλύτερη αυτονομία της μπαταρίας. Τα βασικά πλεονεκτήματα

των BEVs είναι ότι αποτελούν μια οικονομική λύση, δεν απαιτούν συντήρηση και επίσης είναι απλά στην κατασκευή τους. Η απόσταση αυτονομίας τους κυμαίνεται από 120 έως 200 χιλιόμετρα, ικανοποιώντας έτσι τις ανάγκες μετακίνησης του μέσου ανθρώπου μέσα στην πόλη.

1.3.2 Υβριδικά Ηλεκτροκίνητα Οχήματα (HEV)

Πρόκειται για την πιο γνωστή κατηγορία ηλεκτρικών αυτοκινήτων, η οποία **χρησιμοποιεί δύο ή περισσότερες μορφές παραγωγής** ενέργειας, καθώς και αποθήκευση ενέργειας. Τα οχήματα αυτά έχουν δύο συμπληρωματικά συστήματα οδήγησης, ένα βενζινοκινητήρα με μια δεξαμενή καυσίμων, και έναν ηλεκτρικό κινητήρα, με τους συσσωρευτές και τους ελεγκτές του. Τα συστήματα αυτά μπορούν να δουλεύουν είτε σε συνδυασμό είτε μόνα τους ξεχωριστά. Τα HEVs δεν μπορούν να **επαναφορτιστούν** από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Συνήθως η φόρτιση των μπαταριών γίνεται μετατρέποντας τον ηλεκτρικό κινητήρα σε γεννήτρια, με τη βοήθεια του βενζινοκινητήρα, όταν δεν απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια για τη μετακίνηση του οχήματος.

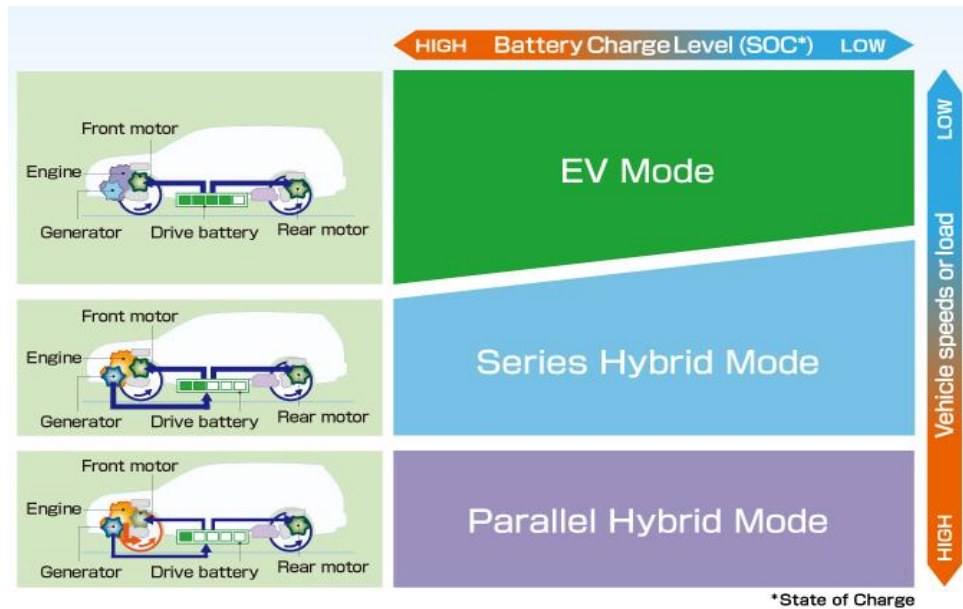
Επίσης, όπως αναφέραμε και στην περίπτωση των BEVs, υπάρχει και η πιθανότητα εκ νέου φόρτισης των συσσωρευτών μέσω της αναγεννητικής πέδησης, με την οποία έχουμε μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

1.3.3 Επαναφορτιζόμενα από το Δίκτυο Υβριδικά Ηλεκτροκίνητα Οχήματα (PHEV)

Πρόκειται για μια εξέλιξη της υβριδικής τεχνολογίας. Τα οχήματα αυτά χρησιμοποιούν επαναφορτιζόμενες μπαταρίες, ή κάποιο άλλο μηχάνημα αποθήκευσης ενέργειας, που μπορούν να επανέλθουν σε πλήρη φόρτιση συνδέοντάς τα με το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα PHEVs συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά των συμβατικών υβριδικών οχημάτων (HEVs) και των ηλεκτρικών οχημάτων με συσσωρευτές (BEVs). Μερικά πλεονεκτήματα αυτού του τύπου αυτοκινήτων είναι τα παρακάτω:

- Σε σύγκριση με τα συμβατικά οχήματα, μειώνουν τη ρύπανση του αέρα και μειώνουν την εξάρτηση από το πετρέλαιο.
- Είναι φιλικά προς το περιβάλλον και έτσι μπορούν να βοηθήσουν στην αντιμετώπιση του φαινομένου του θερμοκηπίου.
- Εξαλείφουν το πρόβλημα της αυτονομίας που αντιμετωπίζουν τα υπόλοιπα ηλεκτρικά οχήματα, αφού έχει αποδειχθεί πως η αυτονομία τους είναι ίση ή και μεγαλύτερη από αυτή των οχημάτων που λειτουργούν με βενζινοκινητήρα.
- Δίνουν την ευκολία στους καταναλωτές να τα φορτίζουν στο σπίτι τους.
- Έχουν τη δυνατότητα να προσφέρουν εφεδρική ισχύ σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης στο σπίτι, καθώς και να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές V2G (Vehicle-to-Grid).

Τα PHEVs συνήθως διακρίνονται σε κατηγορίες ανάλογα με την απόσταση αυτονομίας που τους προσφέρει το καθαρά ηλεκτρικό κομμάτι, και με τη χωρητικότητα των συσσωρευτών τους. [8]



Εικόνα 10: Κατηγορίες των οχημάτων PHEV

1.3.4 Ηλεκτροκίνητα Οχήματα με Συσσωρευτές και Μονάδα Επέκτασης της Αυτονομίας (E-REV)

[4] Πρόκειται για μια κατηγορία οχημάτων τα οποία αντιπροσωπεύουν τη μετάβαση από τις υβριδικές λύσεις στην πλήρη ηλεκτροκίνηση. Η λειτουργία τους έχει ως εξής: η μηχανή εσωτερικής καύσης εκκινεί την ηλεκτρική γεννήτρια, η οποία με τη σειρά της φορτίζει το σύστημα των συσσωρευτών. Η διαφορά τους, δηλαδή, σε σχέση με τα υπόλοιπα υβριδικά οχήματα είναι ότι ο ηλεκτρικός κινητήρας είναι ο μόνος που μπορεί να οδηγήσει στην κίνηση των τροχών του οχήματος, αφού η μηχανή εσωτερικής καύσης συνδέεται μόνο με τους συσσωρευτές. Επομένως, η κίνηση του οχήματος είναι πάντοτε ηλεκτρική. Ένα θετικό των E-REV είναι ότι η χρήση τους είναι απλή, παρόμοια με αυτή των οχημάτων με συσσωρευτές. Όταν η αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια φτάσει μια οριακή τιμή, τότε ενεργοποιείται η ηλεκτροπαραγωγική μονάδα η οποία, καταναλώνοντας κάποιο εναλλακτικό καύσιμο, φορτίζει τη μπαταρία έτσι ώστε το όχημα να συνεχίσει κανονικά την πορεία του. Η ηλεκτροπαραγωγική μονάδα σταματάει τη λειτουργία της όταν η στάθμη της αποθηκευμένης ενέργειας ξεπεράσει την επιθυμητή τιμή.

1.3.5 Σύγκριση κόστους μεταξύ των διαφόρων τύπων ηλεκτρικών οχημάτων

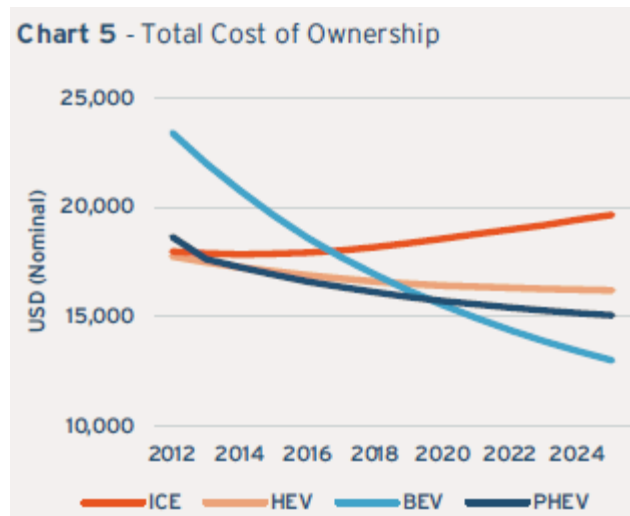
[9] Σύμφωνα με έρευνες που έχουν γίνει, την τωρινή εποχή το πιο ακριβό όχημα για έναν καταναλωτή είναι το ηλεκτρικό όχημα με συσσωρευτές (BEV). Πιο συγκεκριμένα, το 2013 το κόστος του ήταν κατά 4000\$ περίπου μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα κόστη των υπόλοιπων

ηλεκτρικών οχημάτων καθώς και των συμβατικών οχημάτων. Το παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζει τα κόστη πιο αναλυτικά:

	ICE	HEV	BEV-100	PHEV-10
Acquisition Cost	17,978	21,924	28,938	22,037
Infrastructure Cost			2,036	436
Fuel Cost	6,710	4,242	2,578	3,537
Maintenance & Repair	2,230	1,873	1,615	2,091
Vehicle Residual Value	(9,021)	(10,172)	(8,164)	(9,587)
Battery Residual Value		(382)	(5,003)	(895)
Total Cost Of Ownership	17,897	17,486	22,000	17,619

Εικόνα 11: Συνολικό κόστος ιδιοκτησίας για διάφορους τύπους οχημάτων το 2013

Ο βασικότερος παράγοντας που οδηγεί σε αυτή την διαφορά κόστους των BEVs με τα υπόλοιπα οχήματα είναι το τεράστιο κόστος της μπαταρίας του. Η συνεχής μείωση, όμως, του κόστους της μπαταρίας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι με την πάροδο του χρόνου τα BEVs θα αποτελέσουν μια πιο οικονομική επιλογή. Το συμπέρασμα αυτό παρουσιάζεται στο αμέσως επόμενο διάγραμμα:



Εικόνα 12: Συνολικό κόστος ιδιοκτησίας ενός ηλεκτρικού οχήματος

Σύμφωνα με αυτό το διάγραμμα, αναμένεται ότι από το 2018 και μετά τα οχήματα με συσσωρευτές θα αποτελεί την πιο οικονομική επιλογή της αγοράς, καθώς το κόστος του θα είναι μικρότερο τόσο από τα συμβατικά οχήματα όσο και από τα υπόλοιπα είδη ηλεκτροκίνητων.

1.4 Κατηγορίες συσσωρευτών

Οι συσσωρευτές, γνωστοί στους περισσότερους με τον όρο «μπαταρίες», είναι εκείνες οι ηλεκτροχημικές διατάξεις που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική κατά την εκφόρτισή τους και αντίστροφα. Αποτελούνται από μικρές κυψέλες, κάθε μία από τις οποίες αποτελεί μια ξεχωριστή μονάδα, οι οποίες συνδέονται είτε σε σειρά είτε παράλληλα με σκοπό την ικανοποίηση των απαιτήσεων ισχύος της εκάστοτε εφαρμογής. Μια συστοιχία συσσωρευτών που προορίζεται για ένα ηλεκτρικό όχημα θα πρέπει να έχει μερικά από τα εξής χαρακτηριστικά:

- υψηλή πυκνότητα ενέργειας,
- μεγάλο κύκλο ζωής,
- απουσία φαινομένων επίδρασης των προηγούμενων φορτίσεων/εκφορτίσεων στην απόδοση της μπαταρίας,
- υψηλό βαθμό απόδοσης,
- χαμηλό κόστος,
- υψηλή απόδοση φόρτισης/εκφόρτισης,
- μεγάλο εύρος λειτουργίας μεταξύ χαμηλών και υψηλών θερμοκρασιών,
- καλό βαθμό θερμοκρασίας αποθήκευσης,
- χαμηλή εσωτερική αντίσταση,
- δυνατότητα ανακύκλωσης κ.α.

Κάθε συσσωρευτής χαρακτηρίζεται από κάποια βασικά μεγέθη που αποτελούν τα χαρακτηριστικά του. Αυτά τα χαρακτηριστικά μας δίνουν τη δυνατότητα να συγκρίνουμε και να επιλέγουμε τον κατάλληλο συσσωρευτή για κάθε εφαρμογή. Παρακάτω αναλύονται τα βασικά αυτά χαρακτηριστικά: [10],[11],[12]

- **Τάση (V):** Πρόκειται για την τάση αναφοράς. Η τάση ανοιχτοκύκλωσης (open circuit voltage) ενός πλήρως φορτισμένου συσσωρευτή μπορεί να είναι λίγο μεγαλύτερη της τάσης αναφοράς. Η τάση βραχυκύκλωσης (closed circuit voltage) αντικατοπτρίζει την τάση του συσσωρευτή υπό φορτίο.
- **Χωρητικότητα (Ah):** Η ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου που μπορεί να αποθηκεύσει ένας συσσωρευτής. Δείχνει τη μέγιστη ποσότητα ενέργειας που μπορεί να εξαχθεί από τον συσσωρευτή κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Παρόλα αυτά, οι πραγματικές δυνατότητες αποθήκευσης ενέργειας ενός συσσωρευτή μπορεί να αποκλίνουν από την «ονομαστική» χωρητικότητα, καθώς η χωρητικότητα εξαρτάται πολύ από την ηλικία της μπαταρίας, από τη θερμοκρασία και από τις παρελθοντικές φορτίσεις/εκφορτίσεις της. Επίσης, εξαρτάται από την ποσότητα των ενεργών υλικών του συσσωρευτή.
- **Ειδική ισχύς (W/kg):** η μέγιστη διαθέσιμη ισχύς ανά μονάδα μάζας. Η ειδική ισχύς είναι χαρακτηριστικό της χημικής σύστασης του συσσωρευτή. Καθορίζει το βάρος του συσσωρευτή που απαιτείται για να επιτευχθεί η απαιτούμενη απόδοση.

- **Ειδική ενέργεια (Wh/kg):** εκφράζει την ποσότητα ενέργειας που μπορεί να παραχθεί ανά μονάδα βάρους. Αποτελεί χαρακτηριστικό της χημικής σύστασης του συσσωρευτή και της **συσκευασίας**. Καθορίζει, σε συνεργασία με την ενεργειακή κατανάλωση του οχήματος, το βάρος του συσσωρευτή που απαιτείται για να επιτευχθεί η απαιτούμενη απόδοση.
- **Ενεργειακή πυκνότητα (Wh/L):** το συνολικό φορτίο που μπορεί να αποθηκεύσει ένας συσσωρευτής ανά μονάδα του όγκου. Ισχύει για συγκεκριμένη περίοδο φόρτισης/εκφόρτισης και καθορίζει το μέγεθος.
- **Βαθμός απόδοσης:** ο λόγος της ενέργειας που αποδίδεται κατά την εκφόρτιση προς την ενέργεια που απορροφάται κατά τη φόρτιση.
- **Μέγιστο συνεχές ρεύμα εκφόρτισης:** Το μέγιστο ρεύμα με το οποίο μπορεί να εκφορτίζει ένας συσσωρευτής συνεχόμενα. Αυτό το όριο συνήθως χρησιμοποιείται από τους κατασκευαστές με στόχο να αποφευχθούν υπερβολικοί ρυθμοί εκφόρτισης οι οποίοι θα δημιουργούσαν πρόβλημα στον συσσωρευτή.
- **Εσωτερική αντίσταση:** Η αντίσταση του συσσωρευτή, η οποία συνήθως διαφέρει μεταξύ φόρτισης και εκφόρτισης. Εξαρτάται από τη χημική σύσταση της μπαταρίας καθώς και από την ηλικία και το ρεύμα εκφόρτισης.

1.4.1 Συσσωρευτές Μολύβδου-Οξέος (lead-acid)

Οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέως αποτελούν τις πιο διαδεδομένες μπαταρίες του εμπορίου. Υπάρχουν δύο ειδών μπαταρίες: οι μπαταρίες εκκίνησης και οι μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης. Οι εναλλάκτες των αυτοκινήτων είναι σχεδιασμένοι με τέτοιο τρόπο ώστε να προσφέρουν υψηλούς ρυθμούς φόρτισης στην μπαταρία, σε αντίθεση με τις μπαταρίες βαθιάς εκφόρτισης οι οποίες απαιτούν φόρτιση πολλαπλών σταδίων (multi-stage charging). Οι μπαταρίες μολύβδου-οξέως δεν πρέπει ποτέ να πέφτουν χαμηλότερα από το 50% της χωρητικότητάς τους καθώς αυτό συντελεί στη μείωση της ζωής τους. Επιπλέον, οι συσσωρευτές αυτού του τύπου απαιτούν συνεχή επιθεώρηση του επιπέδου ηλεκτρολυτών και περιστασιακή αντικατάσταση του νερού, το οποίο εξατμίζεται κατά τη διάρκεια του φυσιολογικού κύκλου φόρτισης. [13],[14]

Η πλειοψηφία των ηλεκτρικών οχημάτων χρησιμοποιεί τις μπαταρίες μολύβδου-οξέως λόγω της προχωρημένης τεχνολογίας τους, της υψηλής διαθεσιμότητας τους και του χαμηλού κόστους τους. Όπως και οι υπόλοιπες μπαταρίες, μέσω της κατασκευής, της χρήσης και της ανακύκλωσής τους επηρεάζουν ως ένα βαθμό το περιβάλλον. Οι συσσωρευτές βαθιάς εκφόρτισης είναι ακριβοί και έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής από ότι το ίδιο το όχημα, με αποτέλεσμα να θέλουν συχνά αντικατάσταση. Συνήθως, η αντικατάσταση αυτή γίνεται ανά 3 χρόνια. Ο όγκος των μπαταριών αυτών είναι πολύ μεγάλος, το οποίο φαίνεται από το γεγονός ότι σε εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων, οι μπαταρίες καταλήγουν να κατέχουν ένα τεράστιο ποσοστό της τάξης του 25-50% της συνολικής μάζας του οχήματος. Όπως όλες οι μπαταρίες, έχουν αρκετά μικρότερη ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με τα καύσιμα πετρελαίου,

συνήθως 30-40 Wh/kg. Η απόδοση (70-75%) και η ικανότητα αποθήκευσης της τρέχουσας γενιάς μπαταριών μολύβδου-οξέως βαθιάς εκφόρτισης μειώνονται με τη μείωση της θερμοκρασίας. Μάλιστα, σε ιδιαίτερα υψηλές θερμοκρασίες η απόδοση μπορεί να μειωθεί έως και 40%. Τα νέα επιτεύγματα στην απόδοση, τη χωρητικότητα, το υλικό κατασκευής, την ασφάλεια, την τοξικότητα και την αντοχή είναι δυνατό να επιτρέχουν σε αυτά τα μοναδικά χαρακτηριστικά να εφαρμοστούν και σε ηλεκτρικά οχήματα κανονικού μεγέθους.

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται συγκεντρωμένα μερικά από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των συσσωρευτών μολύβδου οξέως: [15]

Συσσωρευτές Μολύβδου-Οξέος	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Φθινοί και απλοί στην κατασκευή	Έχουν χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα
Αξιόπιστη και ώριμη τεχνολογία, αφού αναπτύσσονται για περισσότερο από 140 χρόνια	Επιτρέπουν μόνο έναν περιορισμένο αριθμό πλήρους φορτίσεως.
Χαμηλή αυτο-εκφόρτιση. Έχουν έναν από τους χαμηλότερους ρυθμούς αυτοεκφόρτισης μεταξύ των επαναφορτιζόμενων μπαταριών	Όχι ιδιαίτερα φιλικό προς το περιβάλλον. Ο ηλεκτρολύτης μπορεί να προκαλέσει ζημιά στο περιβάλλον.
Χαμηλή εσωτερική αντίσταση	Είναι πιθανό να δημιουργηθεί θερμική διαφυγή σε περίπτωση εσφαλμένης φόρτισης
Ικανοί για υψηλούς ρυθμούς εκφόρτισης	Όχι κατάλληλοι για ταχεία φόρτιση
Αποτελούν το περισσότερο ανακυκλωμένο προϊόν στον κόσμο	Έχουν τεράστιο βάρος και όγκο
Ανθεκτικοί σε υπερφορτίσεις	

1.4.2 Συσσωρευτές Νικελίου-Καδμίου (Nickel-Cadmium)

Συνήθως χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ταχείας φόρτισης και όχι αργής. Η ενεργειακή τους πυκνότητα κυμαίνεται από 45 έως 80 Wh/kg. Στην πραγματικότητα, είναι οι μόνες μπαταρίες που αποδίδουν καλά κάτω από δύσκολες συνθήκες. Η περιοδική πλήρης φόρτιση είναι πολύ σημαντική για τους συσσωρευτές νικελίου-καδμίου, αφού σε αντίθετη περίπτωση είναι πιθανό να δημιουργηθούν μεγάλοι κρύσταλλοι στις πλάκες, με αποτέλεσμα η μπαταρία να χάσει της απόδοσή της. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά από τα θετικά και τα αρνητικά αυτής της κατηγορίας συσσωρευτών: [13],[14]

Συσσωρευτές Νικελίου-Καδμίου	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα

Ταχεία και απλή φόρτιση, ακόμα και μετά από παρατεταμένη αποθήκευση	Χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα
Μεγάλος αριθμός κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης	Είναι επιρρεπής στο φαινόμενο μνήμης
Πολύ καλή απόδοση υπό φορτίο	Δεν είναι φιλικό προς το περιβάλλον, αφού περιέχουν τοξικά μέταλλα
Υψηλή απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες	Σχετικά μεγάλη αυτοεκφόρτιση
Χαμηλό κόστος ανά κύκλο	Δεν είναι ανθεκτικοί σε υπερφορτίσεις

1.4.3 Συσσωρευτές Νικελίου-μετάλλου-υδριδίου (Nickel-metal-hydride)

Οι συσσωρευτές Νικελίου-μετάλλου-υδριδίου θεωρούνται μια σχετικά ώριμη τεχνολογία. Αν και έχουν μικρότερη απόδοση (60-70%) στη φόρτιση και την εκφόρτιση από τους τελευταίους, έχουν το πλεονέκτημα της πολύ υψηλής ενεργειακής πυκνότητας (30-80 Wh/kg), διπλάσια από αυτή των συσσωρευτών μολύβδου-οξέως και περίπου 40% μεγαλύτερη από αυτή των συσσωρευτών νικελίου-καδμίου. Όταν χρησιμοποιούνται σωστά, μπορούν να έχουν εξαιρετικά μεγάλη διάρκεια ζωής. Πιο συγκεκριμένα, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα αυτών των συσσωρευτών παρουσιάζονται συγκεντρωμένα στον ακόλουθο πίνακα: [14]

Συσσωρευτές Νικελίου-Καδμίου	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Ιδιαίτερα υψηλή ενεργειακή πυκνότητα	Επιδεινώνεται η κατάστασή τους σε περίπτωση μακρόχρονης αποθήκευσης
Μεγάλος τυπικός κύκλος ζωής: 3000	Περιορισμένο ρεύμα εκφόρτισης
Λιγότερο επιρρεπής στο φαινόμενο μνήμης σε σύγκριση με τους συσσωρευτές νικελίου-καδμίου	Έχουν υψηλό ρυθμό αυτοεκφόρτισης, περίπου 50% περισσότερο από τους νικελίου-καδμίου
Φιλικό προς το περιβάλλον	Είναι περίπου 20% πιο ακριβές από τις νικελίου καδμίου
Ομαλή χαρακτηριστική εκφόρτισης	Η απόδοση μειώνεται εάν είναι αποθηκευμένοι σε μέρος με υψηλές θερμοκρασίες
Περισσότερο ασφαλείς, σε σχέση με άλλες μπαταρίες, σε περίπτωση ατυχήματος	

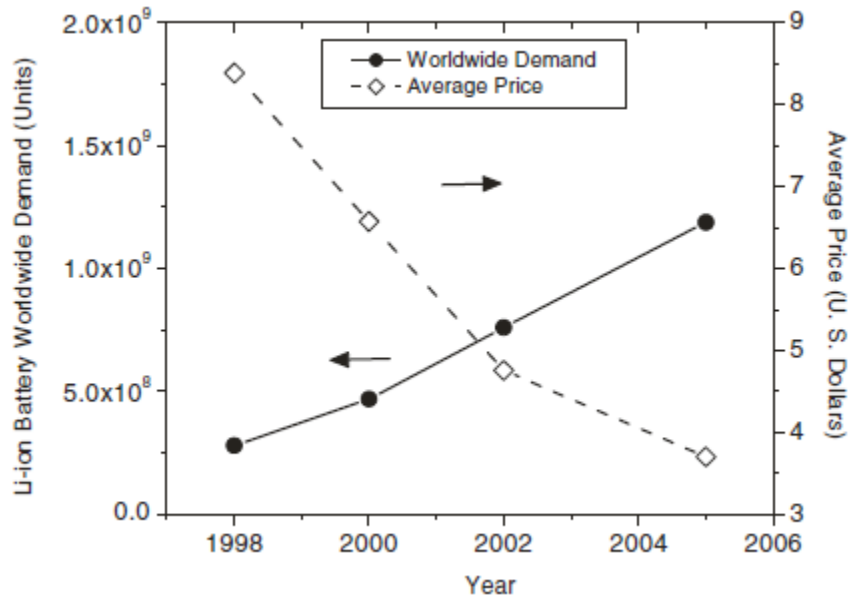
1.4.4 Συσσωρευτές Ιόντων λιθίου (lithium ion)

Οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου, οι οποίοι είναι γνωστοί για τη χρήση τους σε φορητούς υπολογιστές και σε άλλα ηλεκτρονικά είδη, κυριαρχούν πλέον στην ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων. Τα ενεργά υλικά ενός συσσωρευτή ιόντων λιθίου είναι μεταλλικό οξείδιο λιθίου για την άνοδο και ενώσεις γραφίτη για την κάθοδο. Χάρη σε αυτή τη χημική σύσταση καταφέρνουν

να έχουν τεράστια ενεργειακή πυκνότητα, της τάξης των 200 Wh/kg, καλή πυκνότητα ισχύος και τέλος μεγάλη απόδοση φόρτισης και εκφόρτισης της τάξης του 80-90%. Ταυτόχρονα, όμως, παρουσιάζουν και διάφορα μειονεκτήματα τα οποία θα παρουσιαστούν συγκεντρωμένα στον πίνακα που ακολουθεί. [14]

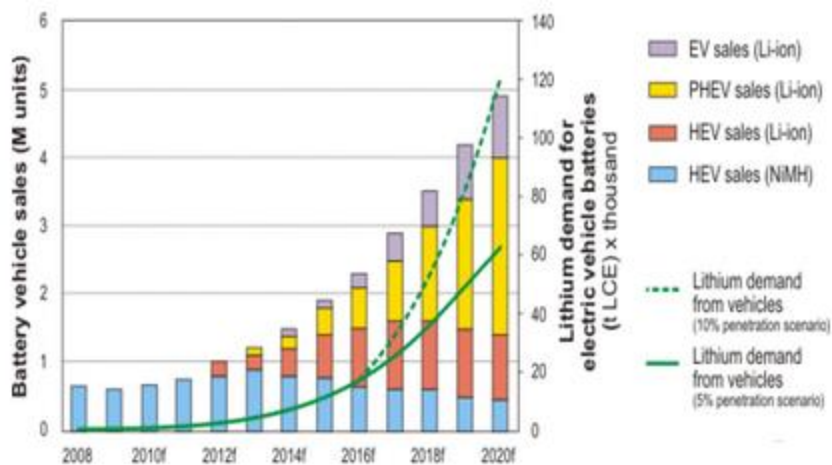
Συσσωρευτές Ιόντων Λιθίου	
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Τεράστια ενεργειακή πυκνότητα	Σύντομος κύκλος ζωής
Σχετικά χαμηλή αυτοεκφόρτιση	Χάνουν την απόδοσή τους με το χρόνο ακόμα και όταν δεν χρησιμοποιούνται
Χαμηλή συντήρηση	Μέτριο ρεύμα εκφόρτισης
	Επικίνδυνοι για πρόκληση φωτιάς εάν δεν φορτιστούν σωστά
	Ακριβοί στην παραγωγή. Το κόστος τους είναι περίπου 40% μεγαλύτερο από αυτό των συσσωρευτών νικελίου-καδμίου
	Δεν αποτελούν ακόμη μια ώριμη τεχνολογία, καθώς διάφορες αλλαγές στα μέταλλα και τους χημικούς συνδυασμούς επηρεάζουν τα αποτελέσματά τους

[16] Η αγορά των μπαταριών ιόντων λιθίου κατάφερε μέσα σε μια δεκαετία να μεταβεί από το στάδιο της έρευνας στην εμπορευματοποίηση, ξεπερνώντας τα 400 εκ. κομμάτια το 1999. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η αύξηση της ζήτησης των συσσωρευτών ιόντων λιθίου καθώς και η μείωση του κόστους τους στην πορεία των χρόνων:



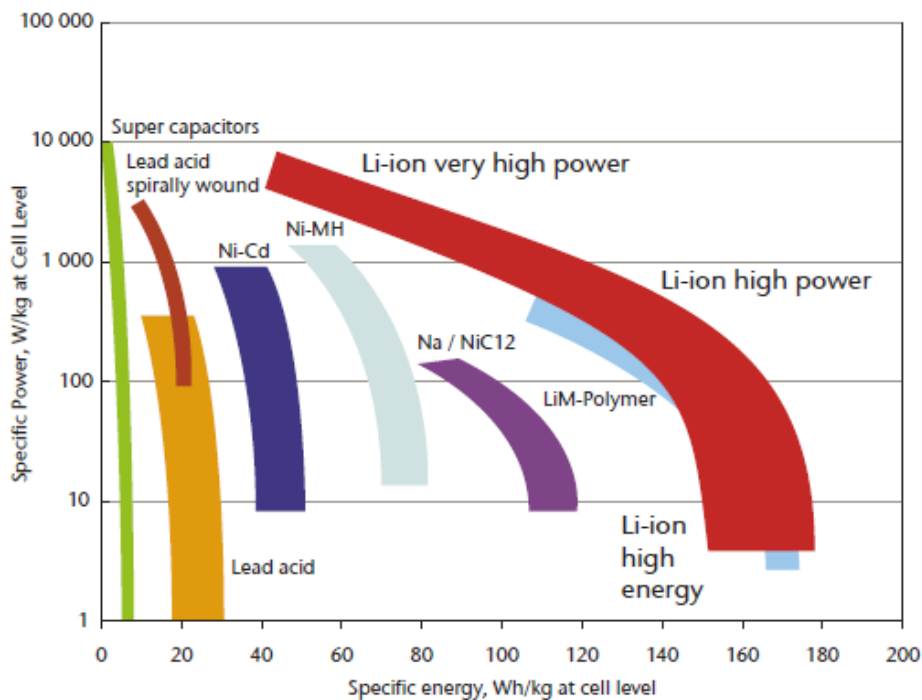
Εικόνα 13: Ζήτηση και κόστος μπαταριών ιόντων-λιθίου κατά την περίοδο 1998-2005

Η τεχνολογία αυτή έχει γίνει ιδιαίτερα δημοφιλής σε πολλές εφαρμογές, μία από τις οποίες είναι και η ηλεκτροκίνηση. Αυτό αποδεικνύεται και από το παρακάτω γράφημα, το οποίο αποτυπώνει την προβλεπόμενη ζήτηση λιθίου για χρήση σε ηλεκτρικά οχήματα μέχρι και το έτος 2020: [17]



Εικόνα 14: Προβλεπόμενη ζήτηση ιόντων-λιθίου για μπαταρίες ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Στη συνέχεια ακολουθεί μια γενική σύγκριση μεταξύ των συσσωρευτών που προαναφέραμε καθώς και μερικών άλλων, σχετικά με την ειδική ισχύ και την ειδική ενέργειά τους:



Εικόνα 15: Σύγκριση συσσωρευτών ανάλογα με την ειδική ισχύ και την ειδική ενέργειά τους

Αποδεικνύεται ότι, ανάμεσα στις διάφορες τεχνολογίες μπαταριών, οι ιόντων λιθίου έχουν ξεκάθαρο προβάδισμα όταν μας ενδιαφέρει η πυκνότητα ισχύος και ενέργειας. [18]

Όσον αφορά το μέλλον, σε βραχυπρόθεσμο επίπεδο οι ιόντων λιθίου, μαζί με ορισμένους άλλους τύπους μπαταριών, θα χρησιμοποιούνται κυρίως στις εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων. Στο μακροπρόθεσμο, όμως, μέλλον αναμένεται να κάνουν την εμφάνισή τους νέες μπαταρίες με πολύ υψηλότερες ενεργειακές πυκνότητες, οι οποίες θα προσδώσουν τα ηλεκτρικά οχήματα μεγαλύτερη αυτονομία. Επιπλέον, οι νέες χημικές συστάσεις των μπαταριών θα οδηγήσουν σε μεγάλες αλλαγές στο σχεδιασμό των συσσωρευτών. Η αυξημένη πυκνότητα ενέργειας σημαίνει ότι τα ενεργειακά αποθηκευτικά συστήματα θα χρειάζονται λιγότερο υλικό και μικρότερο αριθμό κελιών. Αυτές οι βελτιώσεις, με τη σειρά τους, θα έχουν ως αποτέλεσμα μπαταρίες, και άρα ηλεκτρικά οχήματα, τα οποία θα είναι ελαφρύτερα, μικρότερα και λιγότερο ακριβά.

1.5 Τύποι φόρτισης οχημάτων

Η φόρτιση των οχημάτων μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους, τ φόρτιση με επαφή και την επαγωγική φόρτιση. Παρακάτω παρουσιάζονται αυτές οι δύο μέθοδοι:

1.5.1 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. Η ανάγκη αυτή για σύνδεση μέταλλο-με-μέταλλο μεταξύ του οχήματος και της συσκευής φόρτισης είναι που κάνει αυτή τη μέθοδο λιγότερη δημοφιλή. Άλλωστε, επειδή δεν είναι αυτοματοποιημένη διαδικασία αφήνει περιθώρια λάθους, καθώς επίσης λόγω των καλωδίων μπορεί να αποτελέσει αιτία ατυχήματος.



Εικόνα 16: Φόρτιση με επαφή ενός ηλεκτρικού Nissan Leaf στην California

1.5.2 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. [19]

1.5.3 Σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων φορτίσεως

Και οι δύο τύποι φορτίσεως ήταν διαδεδομένοι στα τέλη της δεκαετίας του 1990, αλλά σιγά σιγά η φόρτιση με επαφή άρχισε να αποκτάει μεγαλύτερη φήμη και να υιοθετείται από τους περισσότερους κατασκευαστές. Ο βασικός λόγος που συνέβη αυτό είναι η απλότητα και το χαμηλότερο κόστος που επιδεικνύουν οι φορτιστές με επαφή. Από εκείνη την περίοδο και μετά η τεχνολογία των συμβατικών φορτιστών συνέχισε να εξελίσσεται, κερδίζοντας σημαντικό έδαφος σε σχέση με τους ασύρματους φορτιστές και τοποθετώντας τους για πάντα στη δεύτερη θέση των προτιμήσεων. Μάλιστα, το 2010 η πλειοψηφία των φορτιστών που χρησιμοποιούνταν ήταν συμβατικοί.

Στον παρακάτω πίνακα γίνεται μια σύγκριση μεταξύ των δύο μεθόδων: [19]

Αντικείμενο	Επαγωγική φόρτιση	Φόρτιση με επαφή
Κόστος	περισσότερο ακριβή	περισσότερο οικονομική
Πολυπλοκότητα	Πολύπλοκη	απλή
Ασφάλεια	μεγαλύτερη από αυτή της δεύτερης μεθόδου λόγω της ηλεκτρικής μόνωσης του ηλεκτρικού οχήματος και της τροφοδοσίας	αρκετά καλή χάρη στην εφαρμογή αποτελεσματικών τεχνικών ανίχνευσης σφάλματος
Ενεργειακή απόδοση	όχι τόσο αποδοτική όσο της φόρτισης με επαφή	περισσότερο αποδοτική

1.6 Επίπεδα φόρτισης

Η φόρτιση των συσσωρευτών των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να γίνει είτε με AC είτε με DC ρεύμα τροφοδοτούμενο στο ηλεκτρικό όχημα. Έχουμε τις εξής πιθανές φορτίσεις:

- **Μονοφασική AC φόρτιση:** συνήθως πραγματοποιείται μέσω συνηθισμένων οικιακών συσκευών και παρέχει επίπεδα ισχύος που είναι σχετικά χαμηλά συγκρινόμενα με τη χωρητικότητα της μπαταρίας. Παρόλα αυτά, η μονοφασική φόρτιση σε σχετικά υψηλά επίπεδα ισχύος είναι συνηθισμένη σε εφαρμογές φόρτισης που δεν θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν χρησιμοποιώντας συνηθισμένες οικιακές συσκευές. Οι δύο αυτοί μέθοδοι φόρτισης αναφέρονται και ως **Επίπεδο 1** και **Επίπεδο 2** φόρτισης.
- **Τριφασική AC φόρτιση:** 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.

- **DC φόρτιση:** απαιτεί έναν ειδικό εξωτερικό φορτιστή ο οποίος θα παρέχει συνεχές ρεύμα στο ηλεκτρικό όχημα. Αυτή η μέθοδος μπορεί να υλοποιηθεί με σκοπό να παρέχει υψηλά επίπεδα φόρτισης σε δημόσιους χώρους.

Εξαιτίας του λίγου χρόνου που απαιτείται για τη φόρτιση των μπαταριών μέσω της τριφασικής AC φόρτισης ή της DC φόρτισης, αυτές οι μέθοδοι θα μπορούσαν να αποτελούν τη βάση της ταχείας φόρτισης, η οποία αναφέρεται και ως φόρτιση **Επιπέδου 3**. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει μερικά χαρακτηριστικά αυτών των τριών επιπέδων φόρτισης: [19]

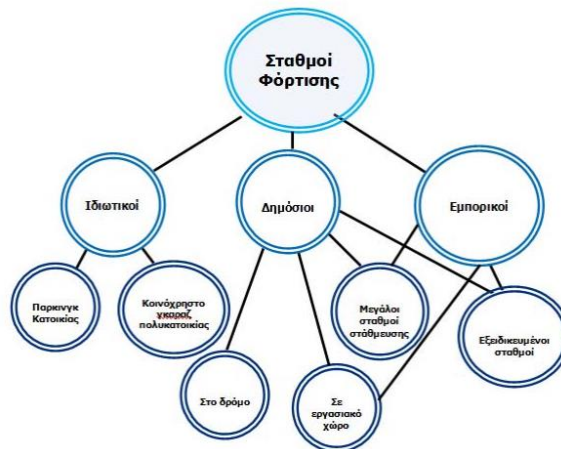
Επίπεδο φόρτισης	Απαιτήσεις	Τυπική ισχύς φόρτισης	Διάρκεια φόρτισης για μπαταρία 35 kWh
Επίπεδο 1	Μέσω οικιακής παροχής	3 kW	12 ώρες
Επίπεδο 2	Μέσω ειδικής εγκατάστασης φόρτισης και καλωδίωσης	10-20 kW	2-4 ώρες
Επίπεδο 3	Μέσω ειδικής εγκατάστασης φόρτισης και καλωδίωσης καθώς και ειδικής εγκατάστασης εξωτερικού φορτιστή για τη μέθοδο DC φόρτισης	40 kW και άνω	45 λεπτά ή και λιγότερο

1.7 Υποδομές φόρτισης

Η διείσδυση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην αγορά και η ένταξή τους στην καθημερινότητα των σύγχρονων πόλεων απαιτεί την κατασκευή κατάλληλων υποδομών φόρτισης. Μια σημαντική πρόκληση που δημιουργείται με τη μαζική κυκλοφορία ηλεκτρικών οχημάτων είναι ο χώρος φόρτισης των οχημάτων. Ανάλογα με τον τρόπο χρήσης των οχημάτων, τον συσσωρευτή τους και το διαθέσιμο χρόνο που έχουν για τη φόρτιση, θα πρέπει να υπάρχουν σταθμοί φόρτισης οι οποίοι θα διακρίνονται στις εξής τρεις κατηγορίες:

- **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.
- **Ιδιωτικοί με δημόσια πρόσβαση (π.χ. πάρκινγκ εμπορικών καταστημάτων).** 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.
- **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.

Παρακάτω παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση των σταθμών φόρτισης ανάλογα με την τοποθεσία εγκατάστασης: [20]



Εικόνα 17: Κατηγοριοποίηση σταθμών φόρτισης ανάλογα με την τοποθεσία εγκατάστασης

1.8 Διεθνή πρότυπα σταθμών φόρτισης

Είναι γνωστό ότι η εξέλιξη των οχημάτων έχει σημειωθεί διάσπαρτα σε ολόκληρο σχεδόν τον τεχνολογικά προηγμένο κόσμο, χωρίς ενιαίες κατευθυντήριες γραμμές. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να χρησιμοποιηθούν διατάξεις, συστήματα και εξαρτήματα πολυποίκιλα ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες και την ισχύουσα διαθεσιμότητα. Έτσι, κρίνεται πλέον απαραίτητο να υπάρχουν μια σειρά από ορισμένα πρότυπα, τα οποία θα υιοθετούνται από όλες τις χώρες και τα οποία θα συντελούν στην διευκόλυνση της ευρείας διάθεσης των ηλεκτρικών οχημάτων στην παγκόσμια αγορά.

Το πρώτο πράγμα που διαπιστώθηκε ότι απαιτεί τυποποίηση είναι τα συστήματα φόρτισης και τα εξαρτήματα που χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια της φόρτισης, όπως υποδοχές, καλώδια κ.τ.λ. Με αυτό τον τρόπο οι κατασκευαστές σε όλο τον κόσμο θα μπορούν να μειώσουν το συνολικό κόστος παραγωγής λόγω της μαζικότητάς της και επιπλέον οι υποδομές των σταθμών φόρτισης θα έχουν μια ομοιογένεια, άρα και χαμηλότερο κόστος και υψηλότερη λειτουργικότητα. Παρακάτω παρουσιάζονται μερικά από τα προαναφερθέντα πρότυπα:

1.8.1 Πρότυπο SAE (Society of Automotive Engineers)

Το συνιστώμενο πρότυπο «SAE J1772 – Σύνδεσμος για τη φόρτιση ηλεκτρικών και επαναφορτιζόμενων υβριδικών αυτοκινήτων», όπως αυτό αναφέρεται, δημοσιοποιήθηκε τον Ιανουάριο του 2010. Περιλαμβάνει προδιαγραφές για τις επί των οχημάτων υποδοχές αλλά και για τα αντίστοιχα βύσματα αγωγίμης επαφής για τη φόρτιση των ηλεκτρικών και των επαναφορτιζόμενων υβριδικών αυτοκινήτων με εναλλασσόμενο ρεύμα. Προδιαγραφές για την αντίστοιχη λειτουργία αλλά με χρήση συνεχούς ρεύματος βρίσκονται ακόμα σε επεξεργασία από την αντίστοιχη ομάδα έργου της SAE. Οι προδιαγραφές υποδοχής και βύσματος που περιλαμβάνει το πρότυπο SAE J1772 είναι κατάλληλες για δύο επίπεδα φόρτισης με αγωγή επαφή και είναι τα εξής: [21]

- 1) Εναλλασσόμενου ρεύματος – Επίπεδο 1: Μονοφασική σύνδεση στα 120 V AC και 12A/16A.
- 2) Εναλλασσόμενου ρεύματος – Επίπεδο 2: Μονοφασική σύνδεση στα 208-240 V AC και μέχρι 80 A.

Η σχεδίαση της υποδοχής και του βύσματος είναι πέντε ακροδεκτών με σύστημα ασφάλισης προς αποφυγή αθέλητης απομάκρυνσης του βύσματος και διακοπής της φόρτισης.

Οι λειτουργίες των πέντε ακροδεκτών προσδιορίζονται ως εξής:

- Επαφή 1: η μία γραμμή τροφοδοσίας L1
- Επαφή 2: η άλλη γραμμή τροφοδοσίας L2 ή ο ουδέτερος N
- Επαφή 3: Γείωση (Ground)
- Επαφή 4: Σηματοδοσία επικοινωνίας μεταξύ του οχήματος και του συστήματος παροχής της ηλεκτρικής ενέργειας.

- Επαφή 5: Διακόπτης διασύνδεσης. Επιβεβαίωση της σύνδεσης του οχήματος με την πηγή της ηλεκτρικής παροχής με σκοπό την ακινητοποίησή του για όσο χρόνο υφίσταται αυτή η σύνδεση.

Το πρότυπο αυτό επίσης περιλαμβάνει τις απαιτήσεις του συστήματος επικοινωνίας δεδομένων, της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, της αντοχής και αξιοπιστίας, της εσωρετικής αντίστασης και των περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών της υποδοχής και του βύσματος. Σημειώνεται, επίσης, ότι το πρότυπο SAE J1772 καλύπτει μόνο την επί του οχήματος υποδοχή και το αντίστοιχο βύσμα και δεν ασχολείται με τις υποδοχές και τα βύσματα προς την πλευρά της ηλεκτρικής παροχής. Οι λόγοι που συμβαίνει αυτό είναι αφενός γιατί για τις φορτίσεις εναλλασσομένου ρεύματος επιπέδου 1 συνήθως χρησιμοποιούνται οι οικιακού τύπου ρευματοδότες και βύσματα τα οποία διαφέρουν από τόπο σε τόπο και αφετέρου γιατί στις ΗΠΑ συνήθως το καλώδιο που χρησιμοποιείται για τη φόρτιση εναλλασσομένου ρεύματος επιπέδου 2 αποτελεί μόνιμη προέκταση της συσκευής φόρτισης και δεν συνδέεται με αυτή μέσω υποδοχής και βύσματος.



Εικόνα 18: Βύσμα και υποδοχή τύπου SAE J1772

1.8.2 Πρότυπα IEC (The International Electrotechnical Commission)

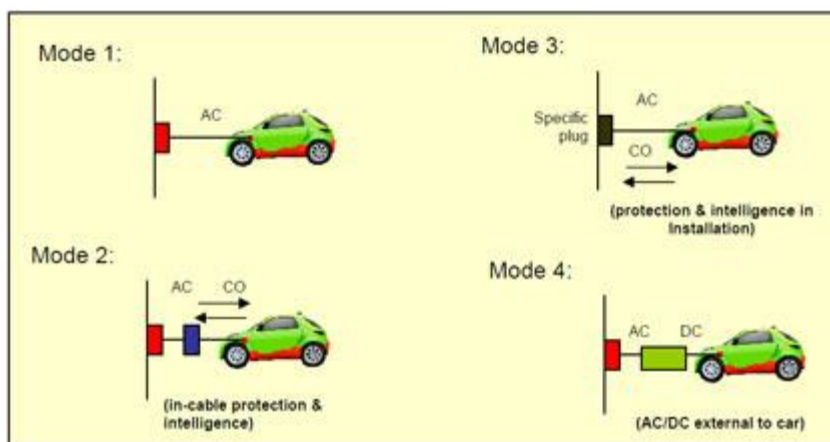
a) IEC 61851

Καλύπτει το σύνολο του συστήματος φόρτισης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων με αγώγιμη επαφή. Περιλαμβάνει προδιαγραφές εξαρτημάτων για τυποποιημένες τάσεις εναλλασσομένου ρεύματος μέχρι και 690 V και για τάσεις συνεχούς ρεύματος μέχρι τα 1000 V. Το πρότυπο κυκλοφορεί σε Μέρη υπό τον γενικό τίτλο «Σύστημα φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων δια αγώγιμης επαφής». Τα κύρια Μέρη του είναι: [21]

- Μέρος 1 – Γενικές απαιτήσεις
- Μέρος 21 – Απαιτήσεις των ηλεκτρικών αυτοκινήτων προκειμένου να συνδεθούν με παροχή εναλλασσομένου ή συνεχούς ρεύματος
- Μέρος 22 - Σταθμός φόρτισης ηλεκτρικού αυτοκινήτου με εναλλασσόμενο ρεύμα
- Μέρος 23 - Σταθμός φόρτισης ηλεκτρικού αυτοκινήτου με συνεχές ρεύμα

Το Μέρος 1 περιλαμβάνει ορολογία και προδιαγραφές των διαφόρων τρόπων φόρτισης όπως και των εφαρμογών αγώγιμης σύνδεσης. Τα στοιχεία αυτά αναφέρονται παρακάτω:

- **Τρόπος 1 φόρτισης** – Αγώγιμη σύνδεση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου σε παροχή εναλλασσομένου ρεύματος με χρήση συνήθους οικιακού τύπου ρευματοδότη προς την πλευρά της ηλεκτρικής παροχής για ένταση ρεύματος μέχρι 16 A, μονοφασικής ή τριφασικής σύνδεσης και με αξιοποίηση των αγωγών των φάσεων, του ουδετέρου και της γείωσης προστασίας. Αυτός ο τρόπος φόρτισης απαιτεί την παρουσία προστατευτικής διάταξης ισοζυγισμού έντασης RCD (Residual Current Device) προς την πλευρά της παροχής. Όταν η παρουσία μιας τέτοιας διάταξης δεν εξασφαλίζεται από την ισχύουσα σε κάθε χώρα νομοθεσία, τότε δεν συνιστάται αυτός ο τρόπος φόρτισης.
- **Τρόπος 2 φόρτισης** - Αγώγιμη σύνδεση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου σε παροχή εναλλασσομένου ρεύματος με χρήση συνήθους οικιακού τύπου ρευματοδότη προς την πλευρά της ηλεκτρικής παροχής μονοφασικής ή τριφασικής σύνδεσης και με αξιοποίηση των αγωγών των φάσεων, του ουδετέρου και της γείωσης προστασίας, μαζί όμως με αγωγό μεταβίβασης σημάτων επικοινωνίας από το ηλεκτρικό αυτοκίνητο προς τη συσκευή ελέγχου της φόρτισης, η οποία βρίσκεται σε κάποιο ενδιάμεσο σημείο του καλωδίου φόρτισης.
- **Τρόπος 3 φόρτισης** – Απ'ευθείας αγώγιμη σύνδεση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου σε παροχή εναλλασσομένου ρεύματος με αξιοποίηση ειδικής μόνιμης ηλεκτρικής παροχής εφοδιασμένης με μονάδα εποπτείας και διαχείρισης της φόρτισης, επί της οποίας και συνδέεται ο αγωγός σημάτων επικοινωνίας.
- **Τρόπος 4 φόρτισης** – Έμμεση αγώγιμη σύνδεση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου με το δίκτυο ηλεκτρικής παροχής διαμέσου συσκευής φορτιστή, ο οποίος δεν είναι τοποθετημένος επί του αυτοκινήτου αλλά βρίσκεται εκτός αυτού και είναι μόνιμα συνδεδεμένος με το δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσομένου ρεύματος.



Εικόνα 19: Οι 4 τρόποι φόρτισης για το πρότυπο IEC 61851

Επιπλέον, έχουν και διάφορους τύπους καλωδίων φόρτισης στο πρότυπο IEC 61851. Πρόκειται για τα εξής:

- Περίπτωση Α: Καλώδιο σύνδεσης με την παροχή εναλλασσομένου ρεύματος το οποίο στη μία άκρη του είναι εφοδιασμένο με κατάλληλο βύσμα για τη διασύνδεσή του με την ηλεκτρική παροχή ενώ η άλλη του άκρη είναι μόνιμα συνδεδεμένη με το ηλεκτρικό αυτοκίνητο.
- Περίπτωση Β: Καλώδιο σύνδεσης με την παροχή εναλλασσομένου ρεύματος το οποίο στη μία άκρη του είναι εφοδιασμένο με κατάλληλο βύσμα για την υποδοχή του ηλεκτρικού αυτοκινήτου, ενώ στην άλλη είναι εφοδιασμένο με βύσμα κατάλληλο για τη διασύνδεσή του με την ηλεκτρική παροχή.
- Περίπτωση Γ: Διαδύνδεση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου με την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσομένου ρεύματος με τη χρήση καλωδίου το οποίο στη μια άκρη φέρει βύσμα κατάλληλο για την υποδοχή του αυτοκινήτου ενώ η άλλη του άκρη είναι μόνιμα συνδεδεμένη και αποτελεί προέκταση της συσκευής παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.

b) IEC 62196

Το πρότυπο αυτό περιλαμβάνει τις ειδικότερες απαιτήσεις για τα φισ, τους ρευματοδότες, τις υποδοχές των αυτοκινήτων και τα αντίστοιχα βύσματά τους για τις αγωγίμες συνδέσεις φόρτισης του προτύπου IEC 61851. Αντίστοιχα με το πρότυπο IEC 61851, δημοσιεύεται και αυτό σε Μέρη, υπό τον γενικό τίτλο «Βύσματα, ρευματοδότες, Βύσματα και υποδοχές των ηλεκτρικών αυτοκινήτων για αγωγήμη διασύνδεση». Τα κύρια Μέρη αυτού του προτύπου είναι:

- Μέρος 1 – Γενικές απαιτήσεις

- Μέρος 2 – Απαιτήσεις διαστασιολογικής συμβατότητας για τους ακροδέκτες και τις υποδοχές τους, και των εξαρτημάτων για εναλλασσόμενο ρεύμα
- Μέρος 3 - Απαιτήσεις διαστασιολογικής συμβατότητας για τους ακροδέκτες και τις υποδοχές τους, και των εξαρτημάτων για συνεχές ρεύμα

Το πρότυπο IEC 62196 καλύπτει υποδοχές και βύσματα προς την πλευρά του ηλεκτρικού αυτοκινήτου αλλά και ρευματοδότες και ρευματολήπτες προς την πλευρά της ηλεκτρικής παροχής.

Οι τύποι των βυσμάτων και των υποδοχών επί των ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι τρεις και παρουσιάζονται στη συνέχεια:

1) Τύπος 1

Αντιστοιχεί στο πρότυπο SAE J1771. Διαθέτει 5 ακροδέκτες και χρησιμοποιείται προς την πλευρά του αυτοκινήτου για αγωγή φόρτιση εναλλασσομένου ρεύματος μονοφασική μέχρι 250 V με ένταση μέχρι 32 A. Οι λειτουργίες των πέντε ακροδεκτών προσδιορίζονται ως εξής:

- Επαφή 1: η μία γραμμή τροφοδοσίας L1
- Επαφή 2: η άλλη γραμμή τροφοδοσίας L2 ή ο ουδέτερος N
- Επαφή 3: Γείωση (Ground)
- Επαφή 4: Σηματοδοσία επικοινωνίας μεταξύ του οχήματος και του συστήματος παροχής της ηλεκτρικής ενέργειας
- Επαφή 5: Διακόπτης διασύνδεσης. Επιβεβαίωση της σύνδεσης του οχήματος με την πηγή της ηλεκτρικής παροχής με σκοπό την ακινητοποίησή του για όσο χρόνο υφίσταται αυτή η σύνδεση

2) Τύπος 2

Αυτός ο τύπος διαθέτει 7 ακροδέκτες και χρησιμοποιείται τόσο προς την πλευρά του αυτοκινήτου όσο και προς την πλευρά της ηλεκτρικής παροχής για αγωγή φόρτιση εναλλασσομένου ρεύματος μονοφασική μέχρι 250 V με εντάσεις ρεύματος 20, 32, 63, ή 70 A, όπως και για τριφασική 380-480 V με εντάσεις ρεύματος 20, 32 ή 63 A. Οι λειτουργίες των επτά ακροδεκτών προσδιορίζονται ως εξής:

- Επαφή 1: η πρώτη γραμμή τροφοδοσίας L1
- Επαφή 2: η δεύτερη γραμμή τροφοδοσίας L2
- Επαφή 3: η τρίτη γραμμή τροφοδοσίας L3
- Επαφή 4: ο ουδέτερος N
- Επαφή 5: Γείωση
- Επαφή 6: Σηματοδοσία επικοινωνίας μεταξύ του οχήματος και του συστήματος παροχής της ηλεκτρικής ενέργειας

- Επαφή 7: Διακόπτης διασύνδεσης. Επιβεβαίωση της σύνδεσης του οχήματος με την πηγή της ηλεκτρικής παροχής με σκοπό την ακινητοποίησή του για όσο χρόνο υφίσταται αυτή η σύνδεση

Ο Τύπος 2 αναπτύχθηκε από μια συνεργασία Γερμανικών εταιρειών κατασκευαστών αυτοκινήτων, ηλεκτρικής ενέργειας, κατασκευαστών ηλεκτρικών εξαστημάτων κ.λ.π. Βρήκε σημαντική ανταπόκριση στα προγράμματα εξέλιξης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στη Γερμανία και έγινε επίσης αποδεκτός από πολλούς άλλους Ευρωπαίους κατασκευαστές ηλεκτρικών αυτοκινήτων.

Ο κύριος λόγος για τον οποίο δεν κατέστη ακόμα γενικώς αποδεκτό πρότυπο για ολόκληρη την Ευρώπη και για χρήση τόσο προς την πλευρά του αυτοκινήτου όσο και προς την πλευρά της ηλεκτρικής παροχής είναι το ότι σε πολλές Ευρωπαϊκές χώρες οι εθνικές νομοθεσίες απαιτούν οι ρευματοδότες να είναι εφοδιασμένοι με κλείστρα προστασίας. Η IEC βρίσκεται ακόμα στο στάδιο της διαπίστωσης του αριθμού αυτών των χωρών προκειμένου να εκτιμηθεί το μέγεθος αυτού του προβλήματος.

3) Τύπος 3

Διαθέτει 4, 5 ή 7 ακροδέκτες εφοδιασμένους με σύστημα κλείστρου προστασίας για την εποφυγή επαφής με υπό τάση μέρη. Χρησιμοποιείται τόσο προς την πλευρά του αυτοκινήτου όσο και προς την πλευρά της ηλεκτρικής παροχής για την αγωγή φόρτιση εναλλασσομένου ρεύματος μονοφασική 250 V με εντάσεις ρεύματος 16 ή 32 A, όπως και για τριφασική με 380-480 V και με εντάσεις ρεύματος μέχρι 32 A. Οι λειτουργίες των επτά ακροδεκτών προσδιορίζονται ως εξής:

- Επαφή 1: η πρώτη γραμμή τροφοδοσίας L1
- Επαφή 2: η δεύτερη γραμμή τροφοδοσίας L2
- Επαφή 3: η τρίτη γραμμή τροφοδοσίας L3
- Επαφή 4: ο ουδέτερος N
- Επαφή 5: Γείωση
- Επαφή 6: Σηματοδοσία επικοινωνίας μεταξύ του οχήματος και του συστήματος παροχής της ηλεκτρικής ενέργειας
- Επαφή 7: Διακόπτης διασύνδεσης. Επιβεβαίωση της σύνδεσης του οχήματος με την πηγή της ηλεκτρικής παροχής με σκοπό την ακινητοποίησή του για όσο χρόνο υφίσταται αυτή η σύνδεση

Ο Τύπος 3 αναπτύχθηκε ειδικώς για να αντιμετωπισθεί το πρόβλημα της υποχρεωτικής ύπαρξης κλείστρων ασφαλείας στα εξαρτήματα τόσο προς την πλευρά του αυτοκινήτου όσο και προς την πλευρά της ηλεκτρικής παροχής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

**Εργαλεία ενεργειακής ανάλυσης διεξόδου
ηλεκτρικών οχημάτων**

2.1 Εισαγωγή

Στόχος όλων των χωρών παγκοσμίως είναι να αναπτυχθούν προγράμματα τα οποία θα οδηγήσουν στην ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης και στη μαζική παραγωγή ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Ωστόσο, η μαζική παραγωγή αυτή, πέραν των θετικών που έχει να προσφέρει, είναι ικανή να δημιουργήσει και διάφορα προβλήματα εκ των οποίων το σημαντικότερο είναι η κατάρρευση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι ενεργειακές απαιτήσεις των ηλεκτρικών αυτοκινήτων εξαρτώνται ιδιαίτερα από τις συνήθειες που έχουν οι ιδιοκτήτες τους. Για παράδειγμα, υπάρχουν ιδιοκτήτες που τα φορτίζουν το βράδυ αφού επιστρέφουν σπίτι τους από τη δουλειά, με αποτέλεσμα να έχουμε ακόμα υψηλότερη ζήτηση φορτίου στις ώρες αιχμής. Σε αυτή την περίπτωση, είναι φανερό ότι εάν η διαδικασία φόρτισης γίνει ανεξέλεγκτα και δεν ακολουθήσει κάποιους κανόνες, είναι πιθανό η δυναμικότητα του ηλεκτρικού δικτύου να μην επαρκεί και τα δίκτυα διανομής να αντιμετωπίσουν προβλήματα διακύμανσης τάσης και υπερφόρτισης του εξοπλισμού. Επομένως, κρίνεται απαραίτητο να γίνεται με τέτοιο τρόπο η διαχείριση της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων ώστε να αποφεύγονται τέτοιου είδους προβλήματα. Για το λόγο αυτό, θα πρέπει να εφαρμοστεί κάποια ρύθμιση διαχείρισης του δικτύου, η οποία θα αποτρέψει την ανάγκη δαπανηρών αλλαγών στις υποδομές. Επιπλέον, αυτή θα πρέπει να επιτρέπει στους ιδιοκτήτες των ηλεκτρικών οχημάτων να εκμεταλλευτούν τις ευκαιρίες της αγοράς.

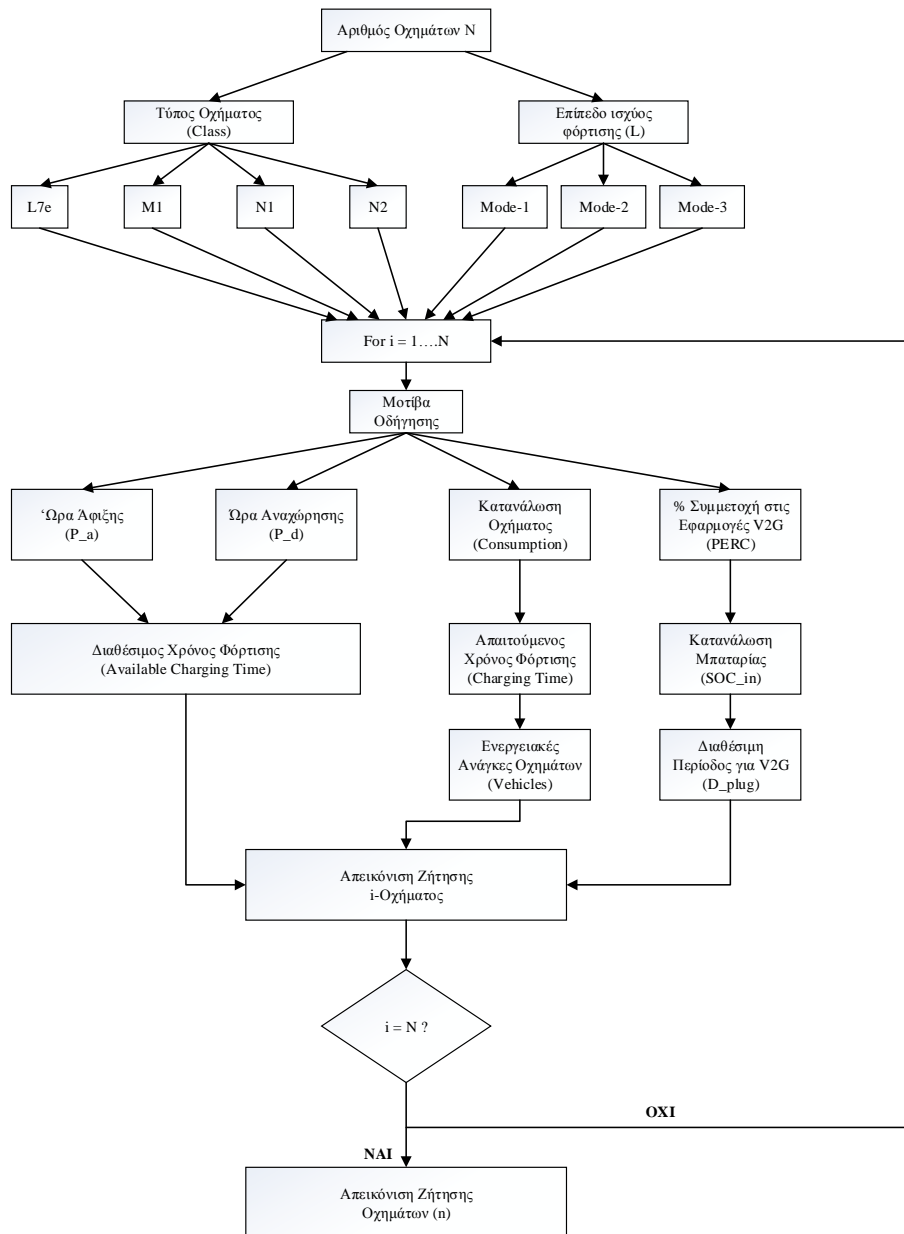
Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγράψουμε τα εργαλεία και τους αλγορίθμους που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της καμπύλης ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι στρατηγικές φόρτισης που μελετήθηκαν κατά τη διάρκεια αυτής της διπλωματικής εργασίας ήταν τέσσερις.

2.2 Προσδιορισμός της ζήτησης ηλεκτρικών οχημάτων

Οι ενεργειακές ανάγκες ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου εξαρτώνται από πολλές παραμέτρους, τις οποίες θα περιγράψουμε στη συνέχεια. Για παράδειγμα, η ισχύς που χρειάζεται ένα ηλεκτρικό όχημα για να καλύψει τις ημερήσιες του ανάγκες αλλά και για να είναι πλήρως φορτισμένο πριν την επόμενη του χρήση, επηρεάζει τις ενεργειακές του ανάγκες. Άλλες παράμετροι που επηρεάζουν είναι η κλάση και η τεχνολογία του οχήματος, η χωρητικότητα του συσσωρευτή, η κατανάλωση του οχήματος καθώς και οι ημερήσιες διακοπές που κάνει κάθε οδηγός. Πρόκειται για μεγάλο αριθμό παραμέτρων, γι'αυτό και απαιτείται εκτεταμένη μελέτη των ενεργειακών αναγκών.

Επιπλέον, το τελικό φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων που θα εξυπηρετηθεί από το δίκτυο εξαρτάται από τον αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων που βρίσκονται σε κυκλοφορία, από το επίπεδο φόρτισης του καθενός αλλά φυσικά και τη στρατηγική φόρτισης που ακολουθείται.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται συνοπτικά όλοι αυτοί οι παράμετροι που καθορίζουν τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων.



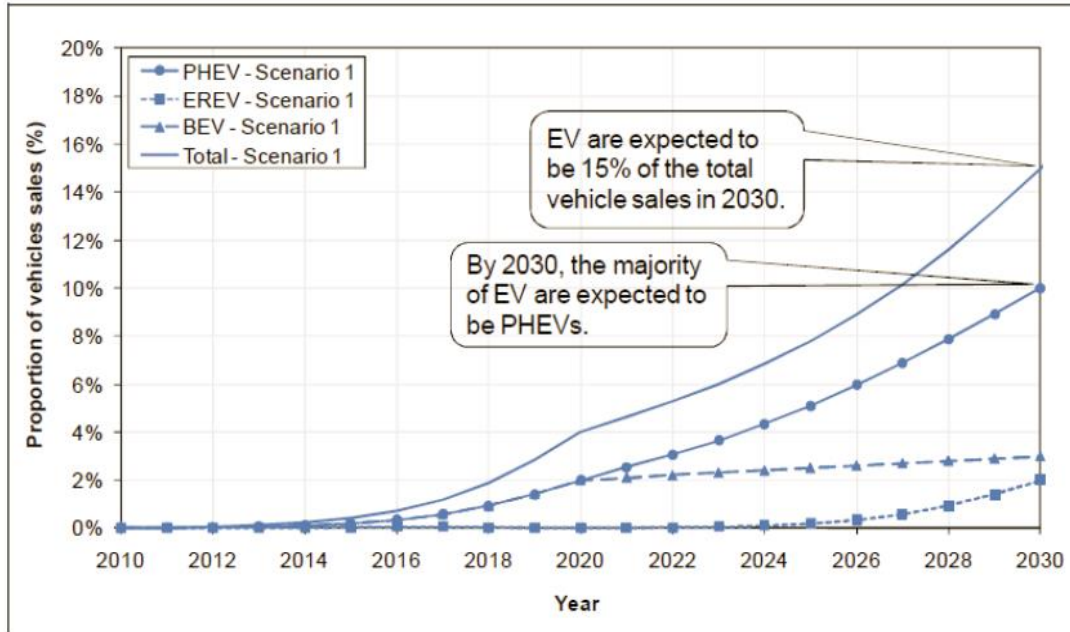
Διάγραμμα 1: Διάγραμμα μπλοκ λειτουργίας αλγορίθμου πρόβλεψης στόλου

Αυτό το διάγραμμα αποτελεί ουσιαστικά το εργαλείο μας για την εκτίμηση της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων.

Αριθμός οχημάτων N

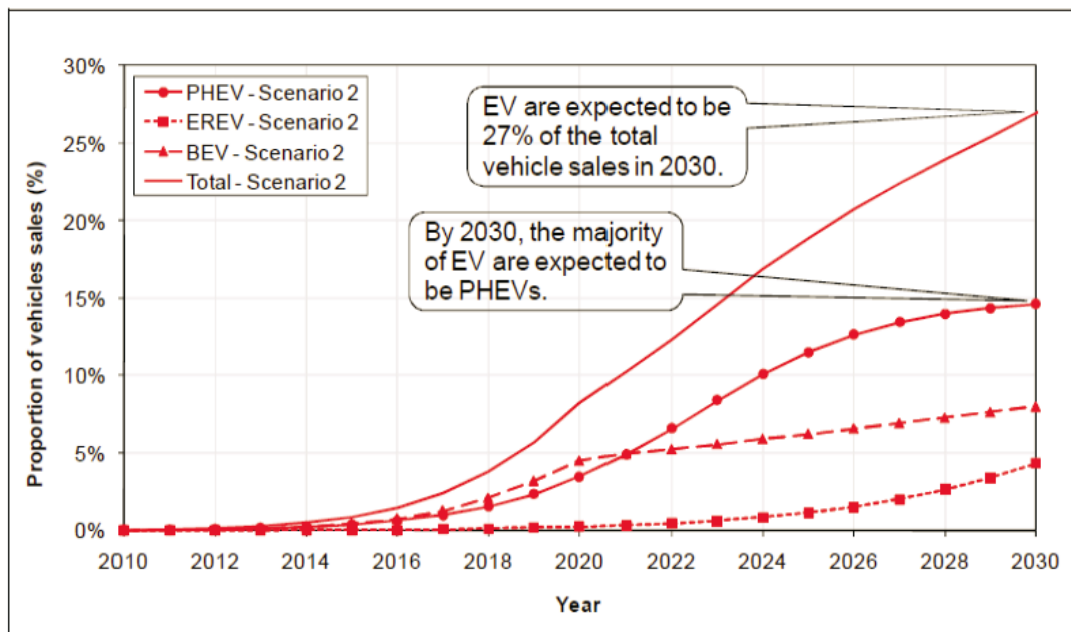
Η παράμετρος αυτή μας δείχνει τον συνολικό αριθμό οχημάτων που αναμένεται να προσέλθουν την επόμενη μέρα προς φόρτιση. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας εφαρμόσαμε τρία διαφορετικά πιθανά σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων, ένα συντηρητικό, ένα αισιόδοξο και ένα υπεραισιόδοξο σενάριο. Αυτά παρουσιάζονται παρακάτω:

- a) **Σενάριο 1:** Συντηρητικό σενάριο, στο οποίο αναμένεται οι πωλήσεις των ηλεκτρικών οχημάτων να αγγίξουν το 15% των συνολικών πωλήσεων οχημάτων μέχρι το 2030.



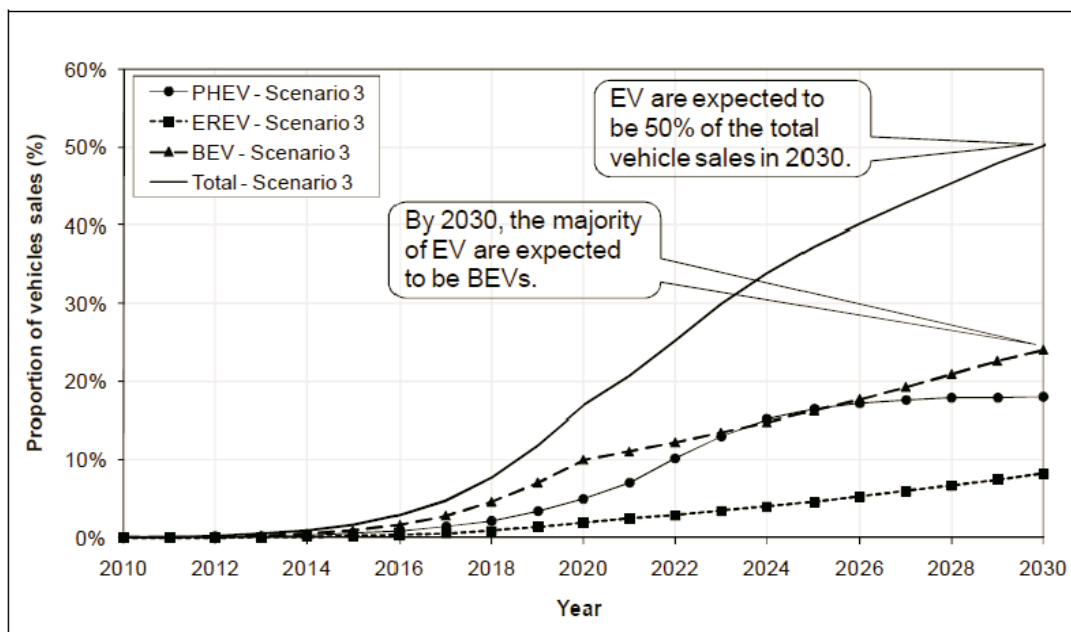
Διάγραμμα 2: Διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων για το συντηρητικό σενάριο την περίοδο 2010-2030

- b) **Σενάριο 2:** Αισιόδοξο σενάριο, στο οποίο αναμένεται οι πωλήσεις των ηλεκτρικών οχημάτων να αγγίξουν το 27% των συνολικών πωλήσεων οχημάτων μέχρι το 2030.



Διάγραμμα 3: Διείδυση ηλεκτρικών οχημάτων για το αισιόδοξο σενάριο την περίοδο 2010-2030

c) **Σενάριο 3:** Υπεραισιόδοξο σενάριο, στο οποίο αναμένεται οι πωλήσεις των ηλεκτρικών οχημάτων να εκτοξευτούν στο 50% των συνολικών πωλήσεων οχημάτων μέχρι το 2030.



Διάγραμμα 4: Διείδυση ηλεκτρικών οχημάτων για το υπεραισιόδοξο σενάριο την περίοδο 2010-2030

Τύπος οχημάτων Class

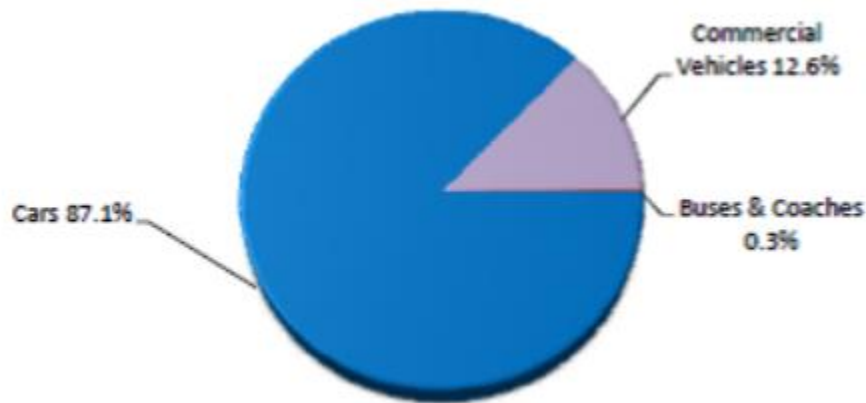
Τα ηλεκτρικά οχήματα χωρίζονται σε τέσσερις διαφορετικές κλάσεις:

- a) L7E
- b) M1
- c) N1
- d) N2

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται πιο λεπτομερώς οι 4 αυτές κλάσεις αυτοκινήτων [22]:

VEHICLE CLASS	DESCRIPTION
L7E	Τέσσερις τροχοί, με μέγιστη μάζα 400-550 kg (χωρίς να συμπεριλαμβάνεται η μάζα των μπαταριών σε ένα ηλεκτροκίνητο όχημα), και μέγιστη καθαρή ισχύ, ανεξαρτήτως μηχανής ή κινητήρα, 15 kW
M1	Επιβατικό όχημα, με τέσσερις τροχούς και μέχρι 8 θέσεις επιπλέον της θέσης του οδηγού
N1	Μεταφορικό όχημα, με τέσσερις τροχούς και μέγιστη μάζα 3.500 kg
N2	Μεταφορικό όχημα, με τέσσερις τροχούς και μέγιστη μάζα 3.500-12.000 kg

Σύμφωνα με έρευνες, η πλειοψηφία των οχημάτων που είχαν πωληθεί στην Ευρώπη το 2008 ήταν κατηγορίας M1. Αυτό φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 5: Στόλος ηλεκτρικών οχημάτων ανά τύπο στην Ευρώπη το 2008

Απώλειες φόρτισης

Οι απώλειες φόρτισης περιλαμβάνουν τις απώλειες λόγω μετατροπής του εναλλασσομένου ρεύματος σε συνεχές προκειμένου να πραγματοποιηθεί η φόρτιση ή η εκφόρτιση του ηλεκτρικού οχήματος, με τα ηλεκτρονικά ισχύος που χρησιμοποιούνται κάθε φορά. Στην εργασία αυτή έχει θεωρηθεί ότι οι απώλειες αυτές είναι 15%.

Ωρα άφιξης P_a

Είναι ένας μονοδιάστατος πίνακας που δείχνει την ώρα της ημέρας που το όχημα φεύγει από το σπίτι και βρίσκεται στο δρόμο. Στην εργασία μας έχουμε πάρει τρεις διαφορετικές ομάδες οχημάτων με διαφορετική ώρα άφιξης η κάθε μία.

Ωρα αναχώρησης P_d

Είναι ένας μονοδιάστατος πίνακας που δείχνει την ώρα της ημέρας που το όχημα αρχίζει να επιστρέφει στο σπίτι και βρίσκεται στο δρόμο. Στην εργασία μας έχουμε πάρει τρεις διαφορετικές ομάδες οχημάτων με διαφορετική ώρα άφιξης η κάθε μία.

Επίπεδο ισχύος φόρτισης L

Όπως περιγράφηκε και στο πρώτο κεφάλαιο, κατανέμεται σε τρία επίπεδα. Το Επίπεδο-1 που αναφέρεται στη μονοφασική φόρτιση, το Επίπεδο-2 που αναφέρεται στην τριφασική φόρτιση και το Επίπεδο-3 που αναφέρεται στην ταχεία φόρτιση.

Κατανάλωση οχήματος Consumption

Μας δείχνει την ισχύ που καταναλώνουν τα οχήματα κατά τη διάρκεια των ταξιδιών τους μέσα στη μέρα. Κάθε ομάδα οχημάτων έχει και διαφορετική κατανάλωση.

Διαθέσιμος χρόνος φόρτισης

Πρόκειται για τις συνολικές ώρες μέσα στην ημέρα στις οποίες τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να φορτίζουν. Η παράμετρος αυτή εξαρτάται από τις ώρες άφιξης, τις ώρες αναχώρησης καθώς και την στρατηγική φόρτισης που ακολουθείται.

Απαιτούμενος χρόνος φόρτισης

Αυτή η παράμετρος καθορίζει την ελάχιστη χρονική περίοδο κατά την οποία το ηλεκτρικό όχημα πρέπει να παραμένει συνδεδεμένο στο δίκτυο έτσι ώστε να φορτιστεί πλήρως. Αυτή η περίοδος φόρτισης καθορίζεται από τη χρήση του οχήματος και από τη μέγιστη ισχύ φόρτισης των διαθέσιμων υποδομών φόρτισης.

Συμμετογή στις εφαρμογές V2G (PERC)

Η παράμετρος αυτή μας δείχνει το ποσοστό της μπαταρίας που συμμετέχει στη V2G λειτουργία. Το PERC είναι μηδέν για όλες τις στρατηγικές πέραν αυτής που περιλαμβάνει τη V2G λειτουργία.

Διαθέσιμη περίοδος για V2G (Dplug)

Η παράμετρος αυτή μας δείχνει τις ώρες της ημέρας που το όχημα έχει τη δυνατότητα να εκφορτίζει, επιστρέφοντας ενέργεια στο δίκτυο. Μας ενδιαφέρει μόνο στη στρατηγική που περιλαμβάνει τη V2G λειτουργία.

Κατανάλωση μπαταρίας (SOC in)

Με τον καθορισμό της συνολικής απόστασης που ταξιδεύει ένα όχημα μπορεί να υπολογιστεί η ποσότητα της ενέργειας που καταναλώθηκε. Η παράμετρος αυτή εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες, την ταχύτητα οδήγησης, την κατάσταση του δρόμου και άλλους παράγοντες, γι' αυτό και χρησιμοποιείται στην εργασία μια μέση τιμή για την ανάλυση των ηλεκτρικών οχημάτων.

Στρατηγική φόρτισης

Πρόκειται, ίσως, για την πιο σημαντική παράμετρο στον υπολογισμό της τελικής καμπύλης ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων. Οι στρατηγικές φόρτισης είναι τέσσερις και παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω:

- **Στρατηγική A – Μη ελεγχόμενη φόρτιση (Dumb charging):** Είναι η φόρτιση η οποία γίνεται χωρίς κάποιο συγκεκριμένο πλάνο, όποτε το αποφασίσει ο κάθε οδηγός. Στη συγκεκριμένη εργασία έχουμε θεωρήσει ότι οι οδηγοί των αυτοκινήτων φορτίζουν τα οχήματά τους από τη στιγμή που γυρνάνε σπίτι τους μέχρι το πρωί της επόμενης μέρας. Οι ώρες αυτές διαφέρουν για κάθε μία από τις τρεις ομάδες οχημάτων που έχουμε στην παρούσα εργασία.
- **Στρατηγική B – Ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο (dual tariff charging):** Σε αυτή τη στρατηγική φόρτισης, οι οδηγοί των ηλεκτρικών οχημάτων πραγματοποιούν τη φόρτιση κατά τη διάρκεια της νύχτας που η χρέωση είναι μικρότερη. Σε αντίθεση με πριν, εδώ έχουμε σταθερές ώρες φόρτισης για όλα τα οχήματα.
- **Στρατηγική C – Έξυπνη φόρτιση (Smart charging):** Σε αυτό το σενάριο η φόρτιση γίνεται κατά κύριο λόγο στις περιόδους μη αιχμής, ώστε να έχουμε μια πιο ήπια φόρτιση αλλά και ελαχιστοποίηση της διακύμανσης του φορτίου, το οποίο κατ' επέκταση συνεπάγεται την ελαχιστοποίηση των απωλειών. Συνήθως τις ώρες μη αιχμής, όπως για παράδειγμα τα ξημερώματα, τα οχήματα είναι σταθμευμένα, κάτι που επιτρέπει την αποτελεσματική διαχείριση της φόρτισης.
- **Στρατηγική D – Από το Όχημα στο δίκτυο (Vehicle-to-grid):** Αποτελεί μια επέκταση της έξυπνης φόρτισης, στην οποία οι οδηγοί έχουν τη δυνατότητα τόσο να φορτίζουν όσο

και να εκφορτίζουν τα οχήματά τους, επιστρέφοντας ενέργεια στο δίκτυο. Έτσι, δίνεται η ευκαιρία στους κατόχους ηλεκτρικών οχημάτων να μπορούν να χρησιμοποιούν τα οχήματά τους και ως πηγή ενέργειας ή ως παροχή βοηθητικών υπηρεσιών στο δίκτυο κατά τη διάρκεια των ωρών αιχμής. Με αυτό τον τρόπο βγαίνουν κερδισμένοι, οικονομικά, οι οδηγοί, αλλά και το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας καθώς έχει μια πιο σταθερή λειτουργία.

Παρατήρηση:

Για λόγους μεγαλύτερης ακρίβειας έχει ορισθεί στην εργασία μια νέα μονάδα χρόνου, το time slot, το οποίο είναι το μικρότερο χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο το εξωτερικό περιβάλλον θεωρείται αμετάβλητο. Επομένως, μια ενδοχόμενη σύνδεση-αποσύνδεση ενός οχήματος από τη συσκευή φόρτισης καθώς και η έναρξη και ολοκλήρωση της φόρτισης μπορούν αν γίνουν αντιληπτά μόνο σε ακέραια πολλαπλάσια αυτού του διαστήματος. Μέσα στο διάστημα του ενός timeslot δεν γίνεται να υπάρξει κάποια αλλαγή. Στην παρούσα εργασία η διάρκεια του time slot είναι 1 ώρα.

2.3 Μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού ζήτησης ηλεκτρικών οχημάτων

Προτού παρουσιάσουμε το μαθηματικό μοντέλο στο οποίο βασιστήκαμε έτσι ώστε να καταλήξουμε στην τελική ζήτηση ηλεκτρικών οχημάτων για τις στρατηγικές έξυπνης φόρτισης, θα πρέπει να αναφέρουμε ότι υπάρχουν διαφορετικές μέθοδοι διαχείρισης του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων. Η μία κατηγορία είναι οι κεντρικές μέθοδοι διαχείρισης [23]-[33] και η άλλη οι αποκεντρωμένες μέθοδοι [34]-[43]. Το βασικό πλεονέκτημα των αποκεντρωμένων μεθόδων είναι ότι σπάνε το πρόβλημα σε επιμέρους κομμάτια, μειώνοντας έτσι τις υπολογιστικές απαιτήσεις και οδηγώντας σε ευκολότερη επίλυση του προβλήματος. Πέραν των μεθόδων διαχείρισης του φορτίου, έχουμε και διαφορετικούς αλγόριθμους διαχείρισης του φορτίου, ο καθένας από τους οποίους λύνει το πρόβλημα με βάση τους δικούς του περιορισμούς. Μερικά παραδείγματα τέτοιων διαφορετικών αλγορίθμων, οι οποίοι υλοποιούν την έννοια του “valley filling”, αναφέρονται στις δημοσιεύσεις [23]-[26].

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής και μελετώντας την επίδραση της φόρτισης των οχημάτων από τη σκοπιά του δικτύου, υιοθετούμε έναν κεντρικό αλγόριθμο ο οποίος έχει σκοπό την ελαχιστοποίηση της διακύμανσης του φορτίου. Το μαθηματικό μοντέλο αυτού του αλγορίθμου παρουσιάζεται παρακάτω:

Αντικειμενική Συνάρτηση (Objective Function)

- $\sum_{t=1}^T (\sum_{i=1}^N \{P_{ch,i}^{EV}(t) - P_{dch}^{EV}(t)\} - \sum_{j=1}^M P_j^{DG} + D(t))^2$

Περιορισμοί

- $h_{1,i} = \sum_{t=1}^T \frac{1}{C_{bat}} \cdot \left(P_{ch,i}^{EV}(t) \cdot C_{eff} - \frac{P_{dch,i}^{EV}(t)}{C_{eff}} \right) - (SOC_{des} - SOC_{in}) = 0$ (1)

- $h_{2,i} = P_{ch,i}^{EV}(t) \cdot P_{dch,i}^{EV}(t) = 0$ (2)

- $h_{3,i} = (1 - D_{plug,i}(t)) \cdot (P_{ch,i}^{EV}(t) + P_{dch,i}^{EV}(t)) = 0$ (3)

- $g_{1,i} = \sum_{t=1}^T \frac{P_{dch,i}^{EV}(t)}{C_{eff}} - \min\{PERC, (SOC_{in,i} - P_{bat_{low}})\} \cdot C_{bat} \leq 0$ (4)

- $g_{2,i} = SOC_i(t) + \sum_{Tar,i}^{Tdep,i} P_{ch,i}^{EV}(t) \cdot \frac{C_{eff}}{C_{bat}} - 1 \leq 0$ (5)

- $g_{3,i} = P_{bat_{low}} - SOC_i(t) + \frac{P_{dch,i}^{EV}(t)}{C_{bat} \cdot C_{eff}} \leq 0$ (6)

- $g_{4,i} = (P_{ch,i}^{EV}(t) - P_{plug}) \cdot (P_{dch,i}^{EV}(t) - P_{plug}) \leq 0$ (7)

- $g_{5,i} = P_{ch,i}^{EV}(t), P_{dch,i}^{EV}(t) \geq 0$ (8)

όπου:

t = το time slot

N = ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων

$P_{ch,i}^{EV}(t)$ = η ισχύς φόρτισης ανά time slot

$P_{dch}^{EV}(t)$ = η ισχύς εκφόρτισης ανά time slot

P_j^{DG} = η παραγόμενη ισχύς των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

$D(t)$ = η αρχική ζήτηση του δικτύου

C_{bat} = η χωρητικότητα του συσσωρευτή των οχημάτων

C_{eff} = η απόδοση κατά τη φόρτιση ή την εκφόρτιση της μπαταρίας

SOC_{des} = το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας πριν αρχίσει να φορτίζει για πρώτη φορά μέσα στη μέρα

SOC_{in} = το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας αφού σταματήσει να φορτίζει για τη συγκεκριμένη μέρα

$$D_{plug,i}(t) =$$

$PERC$ = το ποσοστό της μπαταρίας που συμμετέχει στη V2G λειτουργία

$P_{bat_{low}}$ = το ελάχιστο ποσοστό μέχρι το οποίο επιτρέπεται να εκφορτίσει η μπαταρία

T_{ar} = ο χρόνος άφιξης του οχήματος

T_{dep} = ο χρόνος αναχώρησης του οχήματος

$SOC_i(t)$ = το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας ανά time slot

P_{plug} = η μέγιστη ισχύς φόρτισης της μπαταρίας σε ένα time slot

Οι περιορισμοί που προαναφέραμε λειτουργούν ως εξής:

Ο περιορισμός (1) δείχνει ότι η διαφορά της συνολικής ισχύος φόρτισης μέσα στη διάρκεια της μέρας τη συνολική ισχύ εκφόρτισης, δεν μπορεί να ξεπερνά το επίπεδο φόρτισης που έχουμε ορίσει ως $SOC_{des}-SOC_{in}$. Η ισότητα (2) δείχνει ότι ένα όχημα δεν μπορεί να κάνει και τις δύο λειτουργίες ταυτόχρονα, δηλαδή να φορτίζει και να εκφορτίζει. Ο τρίτος περιορισμός φανερώνει ουσιαστικά ποιες από τις ώρες τις μέρας μπορούμε να έχουμε φόρτιση και εκφόρτιση, ανάλογα με την τιμή του D_{plug} .

Όσον αφορά την πρώτη ανίσωση, δηλαδή τον περιορισμό (4), αυτός χρησιμοποιείται ώστε η εκφόρτιση του κάθε οχήματος μέσα στη μέρα να μην ξεπερνάει τα επιτρεπτά όρια, τα οποία τίθενται είτε από την μπαταρία είτε από τους οδηγούς του εκάστοτε οχήματος. Ο περιορισμός (5) είναι απαραίτητος ώστε το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας να μην ξεπερνάει για καμία στιγμή το 100%. Επιπλέον, ο περιορισμός (6) μας δείχνει ότι η εκφόρτιση πρέπει να είναι τόση, ώστε να μην πέφτει ποτέ η μπαταρία κάτω από το επιτρεπτό όριο φόρτισης, δηλαδή το $P_{bat_{low}}$. Τέλος, οι περιορισμοί (7) και (8) παρουσιάζουν το άνω και κάτω όριο αντίστοιχα, της ισχύος φόρτισης του οχήματος ανά time slot.

2.4 Υλοποίηση των αλγορίθμων προσδιορισμού των ενεργειακών αναγκών των οχημάτων

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα παρουσιάσουμε μια απλή υλοποίηση των διαφόρων αλγορίθμων-στρατηγικών φόρτισης που χρησιμοποιήσαμε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, έτσι ώστε να γίνει κατανοητή η λειτουργία τους και οι δυνατότητές τους.

Αρχικά, θα αναφέρουμε τις τιμές ορισμένων βασικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν στους αλγορίθμους αυτούς αυτούς και οι οποίες έχουν δοθεί βασισμένες σε θεωρήσεις που ειπώθηκαν προηγουμένως.

- Αριθμός οχημάτων
Στα παραδείγματα που ακολουθούν έχουμε θεωρήσει έναν στόλο 800 ηλεκτρικών οχημάτων.
- Ισχύς φόρτισης
Για λόγους απλούστευσης, στην εργασία αυτή έχουμε θεωρήσει ότι όλα τα οχήματα φορτίζονται με τον ίδιο τρόπο, έχοντας ισχύ φόρτισης τα 3,6 kW.
- Καταναλώσεις οχημάτων
Για τις καταναλώσεις οχημάτων έχουμε κάνει την εξής θεώρηση: έχουμε χωρίσει τα οχήματα σε τρεις ομάδες οχημάτων. Η κάθε μία από αυτές έχει και τη δικιά της ημερήσια κατανάλωση μέσα στη μέρα. Πιο συγκεκριμένα, η κατανάλωση για κάθε ομάδα οχημάτων φαίνεται παρακάτω:

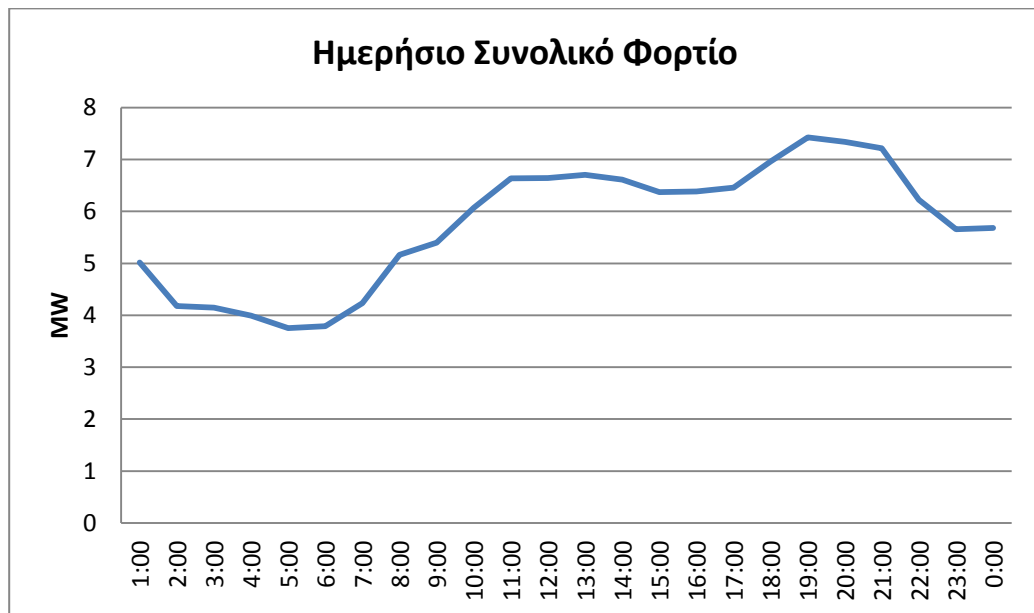
Ομάδα οχημάτων	Ημερήσια κατανάλωση
Ομάδα 1	30% της συνολικής ισχύος της μπαταρίας
Ομάδα 2	20% της συνολικής ισχύος της μπαταρίας
Ομάδα 3	40% της συνολικής ισχύος της μπαταρίας

- Τεχνολογία συσσωρευτών
Και σε αυτή την παράμετρο έχουμε κάνει μια γενίκευση, θεωρώντας ότι όλα τα οχήματα έχουμε συσσωρευτές με χωρητικότητα **21 kW**.
- Ημερήσια καμπύλη φορτίου
Προτού δείξουμε παραδείγματα του πως επηρεάζει η κάθε στρατηγική τη λειτουργία του υπόλοιπου δικτύου, θα παρουσιάσουμε πρώτα μια ημερήσια καμπύλη φορτίου, καθώς και την ημερήσια καμπύλη παραγωγής ΑΠΕ, στις οποίες βασίστηκαν τα παραδείγματα που ακολουθούν:

Ωρα	Φορτίο (MW)
1:00	4.182877
2:00	3.484298
3:00	3.458256
4:00	3.197117
5:00	3
6:00	3.032842
7:00	3.526756
8:00	4.303878

9:00	5.396325
10:00	6.072074
11:00	6.639882
12:00	6.7785
13:00	6.842678
14:00	6.748837
15:00	6.245374
16:00	6.079886
17:00	6.33142
18:00	7.03403
19:00	7.5
20:00	7.415728
21:00	7.21499
22:00	6.288547
23:00	5.389047
0:00	5.413193

Και σε διάγραμμα:



Διάγραμμα 6: Ημερήσιο συνολικό φορτίο

2.4.1 Υλοποίηση στρατηγικής A (dumb charging)

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, σε αυτή τη στρατηγική φόρτισης οι οδηγοί φορτίζουν τα οχήματά τους από την ώρα που επιστρέφουν στο σπίτι τους από τη δουλειά μέχρι και το πρωί της επόμενης μέρας που τα χρειάζονται ξανά.

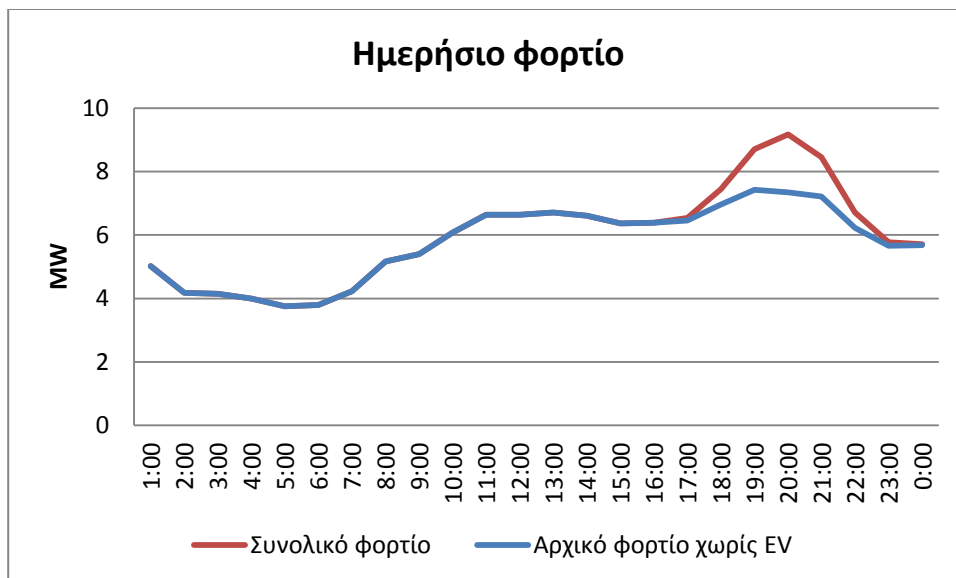
Για στόλο 500 οχημάτων, η καμπύλη ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων που προκύπτει υλοποιώντας τη στρατηγική A είναι:



Διάγραμμα 7: Ημερήσια ζήτηση ηλεκτρικών οχημάτων (dumb charging)

Παρατηρούμε ότι η αιχμή του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων βρίσκεται στις 8 το βράδυ, το οποίο είναι λογικό αφού οι περισσότεροι οδηγοί έχουν επιστρέψει στο σπίτι τους εκείνη την ώρα και έχουν αρχίσει να φορτίζουν τα οχήματά τους. Επίσης, παρατηρούμε ότι η φόρτιση ολοκληρώνεται στις 2 τα ξημερώματα.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το τελικό αποτέλεσμα που έχουμε στη συνολική ζήτηση του φορτίου, έχοντας προσθέσει και το φορτίο των οχημάτων:



Διάγραμμα 8: Ημερήσιο φορτίο (dumb charging)

Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι με αυτή τη στρατηγική φόρτισης, όλο το φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων εμφανίζεται τις ώρες αιχμής του δικτύου, με αποτέλεσμα να καταλήγουμε σε ακόμα μεγαλύτερο peak.

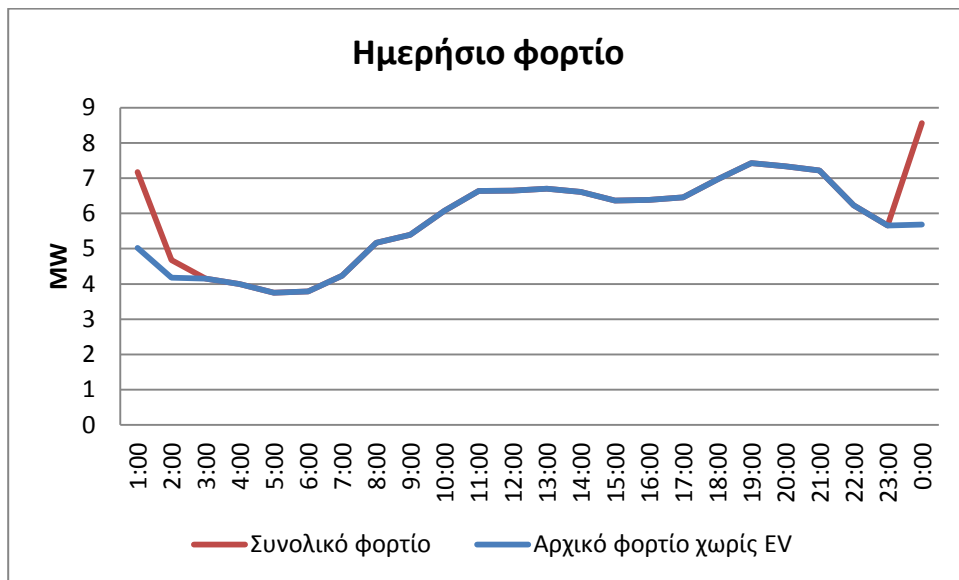
2.4.2 Υλοποίηση στρατηγικής B (dual tariff charging)

Σε αυτή τη στρατηγική φόρτισης, οι οδηγοί των ηλεκτρικών οχημάτων πραγματοποιούν τη φόρτιση κατά τη διάρκεια της νύχτας που η χρέωση είναι μικρότερη. Η καμπύλη ζήτησης των 500 ηλεκτρικών οχημάτων φαίνεται παρακάτω:



Διάγραμμα 9: Ημερήσια ζήτηση ηλεκτρικών οχημάτων (dual tariff)

Παρατηρούμε ότι στη στρατηγική dual tariff η φόρτιση πραγματοποιείται μεταξύ του διαστήματος 11 το βράδυ με 3 τα ξημερώματα. Το συνολικό αποτέλεσμα θα είναι:



Διάγραμμα 10: Ημερήσιο φορτίο (dual tariff)

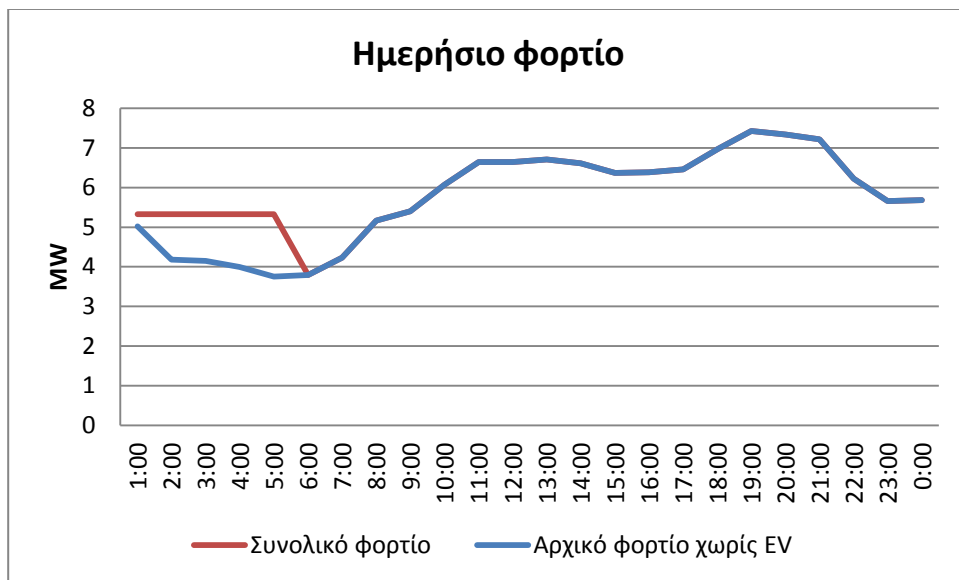
2.4.3 Υλοποίηση στρατηγικής C (smart charging)

Εδώ έχουμε φόρτιση κυρίως τις ώρες μη αιχμής του δικτύου. Ένα παράδειγμα λειτουργίας αυτής της στρατηγικής είναι το παρακάτω:



Διάγραμμα 11: Ημερήσια ζήτηση ηλεκτρικών οχημάτων (smart charging)

Και η συνολική ζήτηση του δικτύου προκύπτει ως εξής:



Διάγραμμα 12: Ημερήσιο φορτίο (smart charging)

Συμπέρασμα: Με αυτή τη στρατηγική η φόρτιση πραγματοποιείται κυρίως τις πρώτες πρωινές ώρες, εκεί που η ζήτηση του δικτύου είναι χαμηλή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη σταθερότητα του δικτύου. Επίσης, οδηγεί σε καλύτερα οικονομικά αποτελέσματα για το δίκτυο, όπως θα αποδείξουμε και στο τελευταίο κεφάλαιο αυτής της εργασίας.

2.4.4 Υλοποίηση στρατηγικής D (vehicle to grid)

Πρόκειται για μια βελτίωση της στρατηγικής smart charging η οποία οδηγεί σε ακόμη καλύτερα αποτελέσματα. Ουσιαστικά, εκμεταλλεύεται το γεγονός ότι τα οχήματα μπορούν, όχι μόνο να απαιτούν, αλλά και να δίνουν ενέργεια στο δίκτυο βοηθώντας έτσι τη λειτουργία του.

Η στρατηγική αυτή εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, και έτσι υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τρόποι υλοποίησής της. Για παράδειγμα, μια παράμετρος που παίζει σημαντικό ρόλο είναι το ποσοστό συμμετοχής του συσσωρευτή του οχήματος για V2G λειτουργίες (PERC). Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα δύο πιθανών περιπτώσεων, μία να έχουμε PERC ίσο με 10% και μία να έχουμε PERC ίσο με 20%. Ακολουθούν τα αποτελέσματα αυτών των δύο περιπτώσεων.

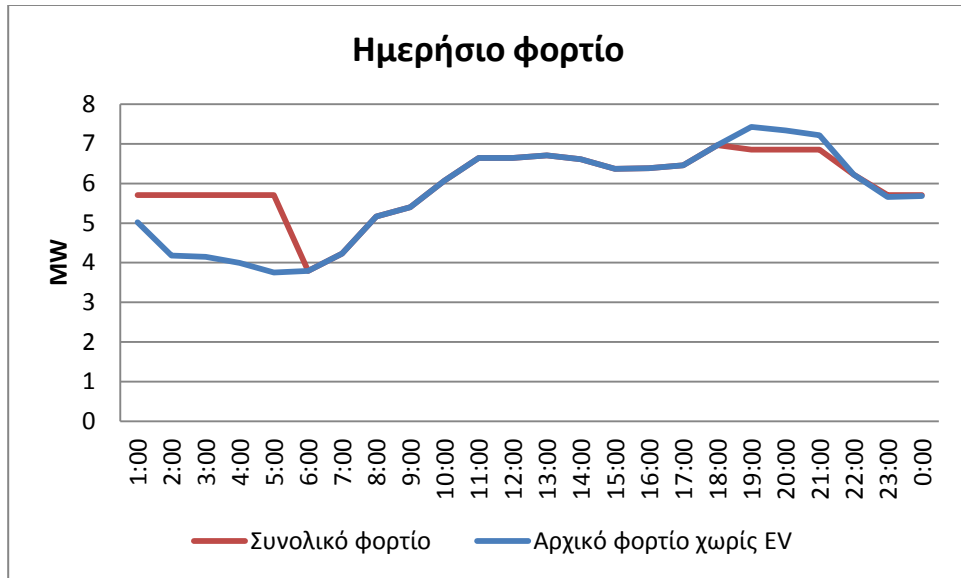
a) PERC = 10%

Η συνολική ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζεται στη συνέχεια:



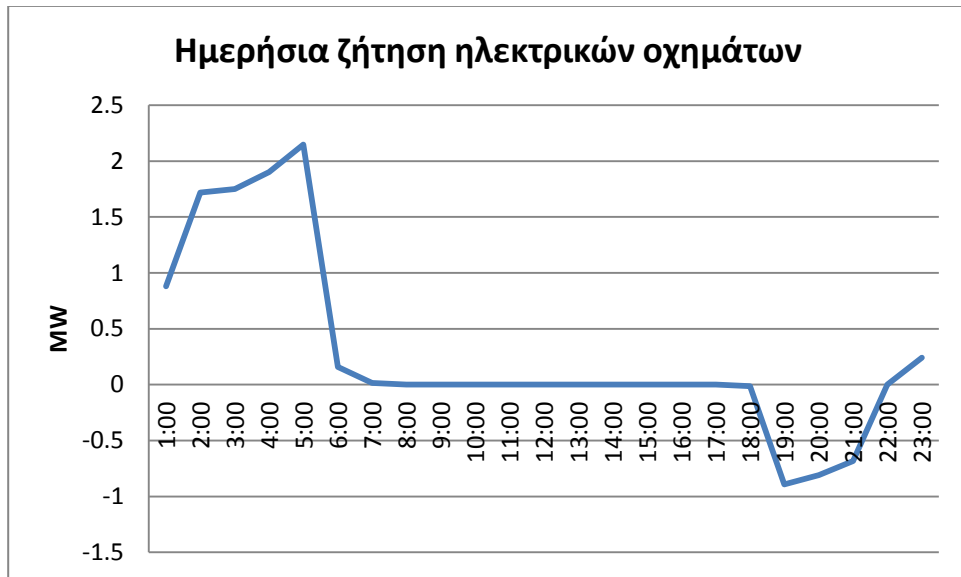
Διάγραμμα 13: Ημερήσια ζήτηση ηλεκτρικών οχημάτων (V2G με PERC=10%)

Παρατηρούμε ότι τα οχήματα φορτίζουν μεταξύ 11 το βράδυ και 6 τα ξημερώματα και εκφορτίζουν τις ώρες 6 με 10 το βράδυ. Το αποτέλεσμα αυτού είναι να μειώνεται το peak που εμφανίζει το δίκτυο εκείνες τις ώρες. Αυτό φαίνεται καλύτερα και στο επόμενο διάγραμμα:



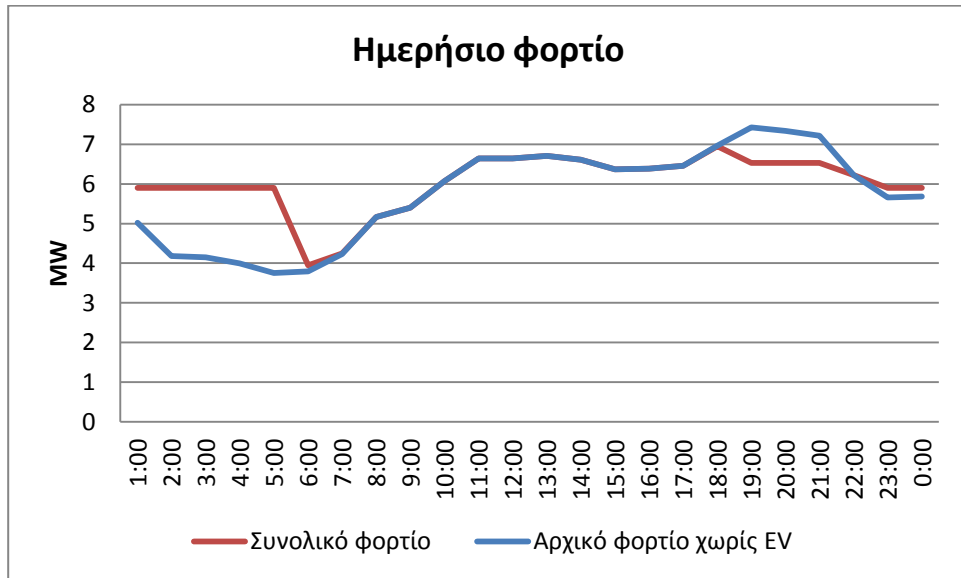
Διάγραμμα 14: Ημερήσιο φορτίο (V2G με PERC=10%)

b) PERC = 20%
Ζήτηση οχημάτων:



Διάγραμμα 15: Ημερήσια ζήτηση ηλεκτρικών οχημάτων (V2G με PERC=20%)

Τελικό ημερήσιο φορτίο:



Διάγραμμα 16: Ημερήσιο φορτίο (V2G με PERC=20%)

Συμπέρασμα: Με την αύξηση του ποσοστού συμμετοχής στις V2G λειτουργίες κερδίζουμε μεγαλύτερη σταθεροποίηση της συνολικής ζήτησης του δικτύου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

**Εργαλεία δικτυακής ανάλυσης διείδυσης
ηλεκτρικών οχημάτων**

3.1 Εισαγωγή

Το Matpower είναι ένα πακέτο λογισμικού ανοικτού κώδικα Matlab που προσομοιώνει την ηλεκτρική ενέργεια. Χρησιμοποιείται ευρέως για την προσομοίωση για σκοπούς έρευνας και εκπαίδευσης τόσο της AC και DC ροής ισχύος όσο και της βέλτιστης ροής ισχύος (OPF). Επίσης, περιλαμβάνει εργαλεία για να υλοποιήσουν την δημοπράτηση αγοράς που βασίζεται στο OPF και την βελτιστοποίηση ενέργειας κα εφεδρείας. Στη διανομή συμπεριλαμβάνεται πληθώρα παραδειγμάτων περιπτώσεων ροής ισχύος και OPF, τα οποία κυμαίνονται από απλά παραδείγματα τεσσάρων ζυγών έως πραγματικές περιπτώσεις μερικών εκατοντάδων ζυγών.

Το MATPOWER αποτελείται από μια σειρά φακέλων-m σχεδιασμένων να αποδίδουν την όσο δυνατόν καλύτερη επίδοση ενώ ταυτόχρονα χρησιμοποιούν έναν εύκολο κώδικα, ο οποίος είναι εύκολα κατανοητός και προσαρμόσιμος. Το Matlab έχει γίνει ένα γνωστό εργαλείο για επιστημονικούς υπολογισμούς, συνδυάζει μια υψηλού επιπέδου γλώσσα ιδανική για υπολογισμούς διανυσμάτων και πινάκων, μια πλατφόρμα διασταύρωσης του χρόνου εκτέλεσης στηριζόμενο σε ισχυρές μαθηματικές βιβλιοθήκες, ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης και γραφικό περιβάλλον (GUI) με εξαιρετικές δυνατότητες απεικόνισης, και μια ενεργή κοινότητα χρηστών και προγραμματιστών. Καθώς είναι μια υψηλού επιπέδου επιστημονική γλώσσα υπολογισμού, είναι κατάλληλη για αριθμητικούς υπολογισμούς χαρακτηριστικής σταθερής κατάστασης προσομοίωσης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Το αρχικό κίνητρο για την ανάπτυξη της Matlab που βασίζεται στη ροή ισχύος και στον κώδικα OPF που τελικά θα γίνει MATPOWER, προέκυψε από τις υπολογιστικές απαιτήσεις της πλατφόρμας PowerWeb. Ως μια πλατφόρμα προσομοίωσης, που βασίζεται στη διαδικτυακή αγορά, χρησιμοποιείται για να ελέγξει τις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, το PowerWeb απαιτεί μια «έξυπνη αγορά» πλειστηριασμού εκκαθάρισης του λογισμικού το οποίο χρησιμοποιεί την OPF για να υπολογίσει τις επιχορηγήσεις και τις τιμές. Έχοντας την δυνατότητα να είναι χρήσιμο και σε άλλους ερευνητές και εκπαιδευτές, το λογισμικό κυκλοφόρησε το 1997 μέσω διαδικτύου ως ένα ανοικτού πακέτου προσομοίωσης της ηλεκτρικής ενέργειας και τώρα διανέμεται από το GNU GPL. Εκτός από την αρχική κυκλοφορία του, ένα μεγάλο μέρος της συνεχιζόμενης ανάπτυξης του MATPOWER είναι οι ανάγκες που προέκυψαν από τις ανάγκες του PowerWeb. Αυτό εξηγεί εν μέρει την έλλειψη γραφικής διεπαφής του χρήστη που χρησιμοποιείται από κάποια παρόμοια εργαλεία, όπως το PSAT.

Ενώ συχνά χρησιμοποιείται ως ένα εργαλείο προσομοιώσεων για να εκτελεί απλώς ένα στιγμιότυπο του δικτύου όπως ορίζεται μέσω ενός φακέλου εισόδου, μπορεί ωστόσο να αποτελέσει μια πολύτιμη βιβλιοθήκη λειτουργιών για χρήση σε ένα κώδικα που θα δημιουργηθεί από κάποιον ερευνητή προσαρμοσμένο στην έρευνά του. Σε αυτό το χαμηλότερο επίπεδο, το MATPOWER παρέχει εύκολες στη χρήση λειτουργίες για τη διαμόρφωση σταθερών δικτύων Υbus και πίνακες B, υπολογίζει τη μεταφορά ενέργειας και τους παράγοντες διανομής της διακοπής λειτουργίας (PTDFs and LODFs), και υπολογίζει αποτελεσματικά, μεταξύ άλλων, τους πρώτους και δεύτερους παράγωγους των εξισώσεων ροής ισχύος. Σε ένα υψηλότερο επίπεδο, η δομή της εφαρμογής OPF έχει ρητά σχεδιαστεί για να είναι αναλυτική, επιτρέποντας την

προσθήκη μεταβλητών, τις οποίες ορίζει ο χρήστης, του κόστους και γραμμικούς περιορισμούς.

Ο προεπιλεγμένος λύτης OPF είναι ένα υψηλής απόδοσης αλγόριθμος μονού-διπλού εσωτερικού σημείου που εφαρμόζεται αμιγώς από τη Matlab. Αυτός ο λύτης έχει εφαρμογή στα γενικά μη γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης εκτός του MATPOWER και έχει μια απλή λειτουργία που κάνει τη δημιουργία και επίλυση των γραμμικού προγραμματισμού (LP) και των τετραγωνικού προγραμματισμού (QP) προβλημάτων εύκολη.

Έχει αναπτυχθεί μια σειρά από λογισμικά πακέτα βασιζόμενα στο Matlab που σχετίζονται με την προσομοίωση της ηλεκτρικής ενέργειας, από άλλους. Η περίληψη των χαρακτηριστικών αυτών παρουσιάζεται στο. Τα κύρια διακριτά χαρακτηριστικά του MATPOWER, εκτός από το ότι είναι ένα από τα πρώτα που διατέθηκαν δημόσια και ελεύθερα ως ανοικτού τύπου προγράμματα, είναι η επέκταση της αρχιτεκτονικής σύνθεσης του OPF εργαλείου και η ευκολία χρήσης του ως μια εργαλειοθήκη με συναρτήσεις που έχει τη δυνατότητα να ενσωματώνεται στα προγράμματα κάποιου άλλου. Επίσης είναι συμβατό με το Octave. Η περιγραφή του πακέτου MATPOWER που ακολουθεί αφορά την 4^η έκδοση.

3.2 Μοντέλο

Το MATPOWER εφαρμόζει όλα τα συνηθισμένα μοντέλα μόνιμης κατάστασης που χρησιμοποιούνται συνήθως για την ανάλυση της ροής ισχύος. Τα μοντέλα AC περιγράφονται πρώτα και στη συνέχεια τα απλοποιημένα μοντέλα DC. Όλα τα μεγέθη των αξιών μετρούνται ανά μονάδα και οι γωνίες των πολύπλοκων ποσοτήτων εκφράζονται σε ακτίνια. Λόγω της δυνατότητας της γλώσσας προγραμματισμού του Matlab στο χειρισμό πινάκων και διανυσμάτων, τα μοντέλα και οι εξισώσεις που παρουσιάζονται εδώ είναι σε μορφή πινάκων και διανυσμάτων.

3.2.1 Μορφή Αρχείων

Τα αρχεία δεδομένων που χρησιμοποιούνται από το MATPOWER είναι τα αρχεία-m Matlab ή τα αρχεία-mat που καθορίζουν και αποδίδουν μία απλή δομή Matlab. Η μορφή του αρχείου-m είναι ένα απλό κείμενο, το οποίο μπορεί κάποιος να επεξεργαστεί χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε πρόγραμμα επεξεργαστή κειμένου. Τα πεδία της δομής είναι baseMVA, ζυγός, γραμμή, γεννήτρια (gen), και προαιρετικά το κόστος παραγωγής ενέργειας από την γεννήτρια (gencost), όπου η baseMVA είναι μονοδιάστατη και τα υπόλοιπα είναι πίνακες. Στους πίνακες, η κάθε σειρά αντιστοιχεί σε ένα ζυγό, μία γραμμή, ή μία γεννήτρια. Οι στήλες είναι παρόμοιες με τις στήλες στις συνηθισμένες IEEE, CDF και PTI μορφές. Ο αριθμός των σειρών στους ζυγούς, στις γραμμές και στις γεννήτριες είναι n_b , n_l και n_g αντίστοιχα.

3.2.2 Γραμμή

Όλες οι γραμμές μεταφοράς, οι μετασχηματιστές και οι μετατροπείς φάσεως έχουν

μοντελοποιηθεί με ένα κοινό μοντέλο γραμμών, που αποτελείται από ένα πρότυπο μοντέλο γραμμή μετάδοσης π (με μια εν σειρά αντίσταση $z_s = r_s + jx_s$ και μια συνολική χωρητικότητα φόρτισης b_c) σε σειρά με μια ιδανική φάση μετατόπισης μετασχηματιστή. Ο μετασχηματιστής, του οποίου ο δείκτης tap έχει μέγεθος τ και φάση γωνίας μετατόπισης θ_{shift} , βρίσκεται στην αρχή της γραμμής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5.

Οι σύνθετες εισφορές ρεύματος από την από και προς τα άκρα της γραμμής, αντίστοιχα, μπορούν να εκφραστούν σύμφωνα με τον 2×2 πίνακα αγωγιμότητας του branch Y_{br} και τον αντίστοιχο ακροδέκτη τάσεων (voltages) v_f και v_t .

$$\begin{bmatrix} i_f \\ i_t \end{bmatrix} = Y_{br} \begin{bmatrix} v_f \\ v_t \end{bmatrix} \quad (1)$$

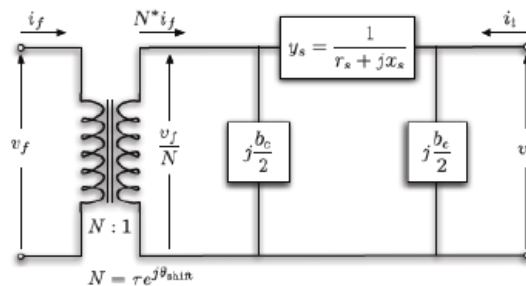
Με την εν σειρά αγωγιμότητα στο μοντέλο π που συμβολίζεται με το $y_s = 1/z_s$, ο πίνακας αγωγιμότητας της γραμμής μπορεί να γραφτεί ως εξής

$$Y_{br} = \begin{bmatrix} (y_s + j\frac{b_c}{2})\frac{1}{\tau^2} & -y_s\frac{1}{\tau e^{-j\theta_{shift}}} \\ -y_s\frac{1}{\tau e^{j\theta_{shift}}} & y_s + j\frac{b_c}{2} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Τα τέσσερα στοιχεία αυτού του πίνακα για την γραμμή i γράφονται ως εξής:

$$Y_{br}^i = \begin{bmatrix} y_{ff}^i & y_{ft}^i \\ y_{tf}^i & y_{tt}^i \end{bmatrix} \quad (3)$$

τότε τέσσερα $n_l \times 1$ διανύσματα Y_{ff} , Y_{ft} , Y_{tf} και Y_{tt} μπορούν να κατασκευαστούν, όπου το i στοιχείο του καθενός προέρχεται από το αντίστοιχο στοιχείο του Y_{br}^i . Επιπλέον οι $n_l \times n_b$ αραιές σύνδεσης πίνακες (sparse connection matrices) C_f και C_t που χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή των μητρών αγωγιμότητας του συστήματος και μπορούν να οριστούν όπως περιγράφεται στη συνέχεια. Το στοιχείο (i, j) του C_f και το στοιχείο (i, k) του C_t είναι ίσο με 1 για κάθε i γραμμή, όπου η i γραμμή συνδέει τον ζυγό j με τον ζυγό k . Τα υπόλοιπα στοιχεία του C_f και του C_t είναι μηδέν.



Διάγραμμα 17: Μοντέλο γραμμής

3.2.3 Γεννήτρια

Μια γεννήτρια διαμορφώνεται ως μια σύνθετη έγχυση ενέργειας σε ένα συγκεκριμένο ζυγό. Για

τη γεννήτρια i , η έγχυση είναι

$$s_g^i = p_g^i + jq_g^i \quad (4)$$

Η εξίσωση $S_g = P_g + jQ_g$ μπορεί να γίνει $n_g \times 1$ διάνυσμα αυτών των εγχύσεων των γεννητριών. Ένας διάσπαρτος-αραιός $n_b \times n_g$ πίνακας C_g σύνδεσης της γεννήτρας (sparse generator connection) μπορεί να οριστεί έτσι ώστε το (i, j) στοιχείο του να είναι 1 αν η γεννήτρια j βρίσκεται στο ζυγό i και μηδέν στις υπόλοιπες περιπτώσεις. Το $n_b \times 1$ διάνυσμα όλων των ζυγών εγχύσεων από τις γεννήτριες μπορεί να εκφραστεί ως

$$S_{g,bus} = C_g \cdot S_g \quad (5)$$

3.2.4 Φορτία

Τα σταθερά φορτία ενέργειας διαμορφώνονται ως μια σταθερή ποσότητα ενεργής και άεργης ισχύος που καταναλώνεται σε ένα ζυγό. Για τον ζυγό i , το φορτίο είναι

$$s_d^i = p_d^i + jq_d^i \quad (6)$$

και η εξίσωση $S_g = P_g + jQ_g$ υποδηλώνει το $n_b \times 1$ διάνυσμα των πολύπλοκων φορτίων όλων των ζυγών. Η σταθερή αντίσταση και τα φορτία σταθερού ρεύματος δεν εφαρμόζονται άμεσα, αλλά τα σταθερά τμήματα αντίστασης μπορούν να μοντελοποιηθούν ως ένα στοιχείο διακλάδωσης, το οποίο περιγράφεται παρακάτω. Τα κατανεμόμενα φορτία μοντελοποιούνται ως αρνητικές γεννήτριες και εμφανίζονται με αρνητικές τιμές στο S_g .

3.2.5 Shunt Elements

Ένα συνδεδεμένο shunt στοιχείο όπως ένας πυκνωτής ή ένα πηνίο είναι μοντελοποιημένο ως μία σταθερή αντίσταση για γείωση σε έναν ζυγό. Η αγωγιμότητα του στοιχείου εκτροπής (shunt element) στον i ζυγό δίνεται ως εξής

$$y_{sh}^i = g_{sh}^i + jb_{sh}^i \quad (7)$$

και η εξίσωση $Y_{sh} = G_{sh} + jB_{sh}$ εκφράζει το $n_b \times 1$ διάνυσμα της εκτροπής της αγωγιμότητας σε όλους τους ζυγούς.

3.2.6 Εξισώσεις δικτύου

Για ένα δίκτυο με n_b buses, όλα τα σταθερά στοιχεία της αντίστασης του μοντέλου ενσωματώνονται σε ένα σύνθετο $nb \times nb$ πίνακα αγωγιμοτήτων του ζυγού Y_{bus} που σχετίζει τις σύνθετες κομβικές εισροές ηλεκτρικού ρεύματος I_{bus} με τις πολύπλοκες κομβικές τάσεις V :

$$I_{bus} = Y_{bus} \cdot V \quad (8)$$

Ομοίως, για ένα δίκτυο με nl γραμμές, το $nl \times nb$ σύστημα γραμμών μητρών αγωγιμοτήτων Y_f και Y_t σχετίζουν τις τάσεις στους ζυγούς με τα $nl \times 1$ διανύσματα I_f και I_t ηλεκτρικού ρεύματος των γραμμών από και προς τα άκρα όλων των γραμμών, αντίστοιχα:

$$I_f = Y_f \cdot V \quad (9)$$

$$I_t = Y_t \cdot V \quad (10)$$

Αν το σύμβολο $[\cdot]$ χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει ένα χρήστη που παίρνει ένα $n \times 1$ διάνυσμα και δημιουργεί τον αντίστοιχο $n \times n$ διαγώνιο πίνακα με τα στοιχεία του διανύσματος στη διαγώνιο, αυτό το σύστημα πινάκων αγωγιμότητας μπορεί να σχηματιστεί ως εξής:

$$Y_f = [Y_{ff}]C_f + [Y_{ft}]C_t \quad (11)$$

$$Y_t = [Y_{tf}]C_f + [Y_{tt}]C_t \quad (12)$$

$$Y_{bus} = C_f Y_f + C_t^T Y_t + [Y_{sh}] \quad (13)$$

Οι εγχύσεις ρεύματος των (8)–(10) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να υπολογίσουν τις αντίστοιχες σύνθετες εισροές ηλεκτρικής ενέργειας ως συναρτήσεις των μιγαδικών τάσεων των ζυγών V :

$$S_{bus}(V) = [V]I_{bus}^* = [V]Y_{bus}^*V^* \quad (14)$$

$$S_f(V) = [C_f V]I_f^* = [C_f V]Y_f^*V^* \quad (15)$$

$$S_t(V) = [C_t V]I_t^* = [C_t V]Y_t^*V^* \quad (16)$$

Οι κομβικές εισροές του ζυγού στη συνέχεια συμφωνούν με τις εισροές των φορτίων και των γεννητριών για να σχηματιστούν οι εξισώσεις ισορροπίας της ενέργειας του AC κόμβου, εκφραζόμενες ως συναρτήσεις των πολύπλοκων τάσεων των ζυγών και των εγχύσεων της γεννήτριας σε μία σύνθετη μορφή πίνακα όπως η ακόλουθη

$$g_s(V, S_g) = S_{bus}(V) + S_d - C_g S_g = 0 \quad (17)$$

3.2.7 Το μοντέλο DC

Η σύνθεση του DC βασίζεται στις ίδιες παραμέτρους, αλλά με τις ακόλουθες τρεις επιπλέον απλουστευτικές υποθέσεις.

- Οι γραμμές μπορούν να θεωρηθούν χωρίς απώλειες. Ειδικότερα, οι αντιστάσεις της γραμμής r_s και η χωρητικότητα φόρτισης bc είναι αμελητέες.

$$y_s = \frac{1}{r_s + jx_s} \approx \frac{1}{jx_s}, \quad b_c \approx 0 \quad (18)$$

- Όλα τα μεγέθη τάσης των ζυγών είναι κοντά στο 1 p.u.

$$v_i \approx e^{j\theta_i} \quad (19)$$

- Οι διαφορές στη γωνία τάσης μεταξύ των γραμμών είναι μικρή

$$\sin(\theta_f - \theta_t - \theta_{shift}) \approx \theta_f - \theta_t - \theta_{shift} \quad (20)$$

Με το συνδυασμό του (1) και του (2) με τα (18) και (19), η πολυσύνθετη ροή ρεύματος σε μία γραμμή μπορεί να προσεγγιστεί ως εξής

$$i_f \approx \frac{1}{jx_s \tau} \left(\frac{1}{\tau} e^{j\theta_f} - e^{j(\theta_t + \theta_{shift})} \right) \quad (21)$$

Επιπλέον χρησιμοποιώντας τη (19) και αυτή τη προσέγγιση ρεύματος για να υπολογιστεί η περίπλοκη ροή ισχύος, στη συνέχεια εξάγοντας το πραγματικό μέρος και εφαρμόζοντας την τελευταία από τις υποθέσεις του μοντέλου DC από τις αποδόσεις (20), προκύπτει ότι

$$p_f \approx \frac{1}{x_s \tau} (\theta_f - \theta_t - \theta_{shift}) \quad (22)$$

Όπως ήταν αναμενόμενο, δεδομένης της χωρίς απώλειες παραδοχής, μια παρόμοια παραγωγή για το p_t οδηγεί στο $p_t = -p_f$. Η σχέση μεταξύ της πραγματικής ροής ισχύος και των γωνιών τάσης για μια ξεχωριστή γραμμή i μπορεί να δοθεί συνοπτικά ως εξής:

$$\begin{bmatrix} p_f \\ p_t \end{bmatrix} = B_{br}^i \begin{bmatrix} \theta_f \\ \theta_t \end{bmatrix} + P_{shift}^i \quad (23)$$

Όπου το $B = \begin{bmatrix} b_i & -b_i \\ -b_i & b_i \end{bmatrix}$, $P_{shift}^i = \theta \begin{bmatrix} b_i \\ b_i \end{bmatrix}$, και το b_i καθορίζονται σύμφωνα με τις αντιστάσεις σειράς και ο δείκτης ratio tap για αυτή τη γραμμή ως $b_i = 1/x_s^i \tau^i$.

Με ένα μοντέλο DC, οι γραμμικές εξισώσεις του δικτύου σχετίζουν την ενεργή ισχύ με τις γωνίες τάσης του ζυγού, έναντι της περιπτώσεως του εναλλασσόμενου ρεύματος λόγω του περίπλοκου ρεύματος και των πολύπλοκων τάσεων στο ζυγό. Το $n_l \times 1$ διάνυσμα B_{ff} κατασκευάζεται παρόμοια με το Y_{ff} , όπου το στοιχείο i είναι το b_i . Ενώ το $P_{f,shift}$ είναι το διάνυσμα $n_l \times 1$ του οποίου το στοιχείο i είναι ίσο με $-\theta_{shift}^i b_i$. Στη συνέχεια, οι πραγματικές κομβικές εγχύσεις ισχύος μπορούν να εκφραστούν ως μια γραμμική συνάρτηση του Θ , το διάνυσμα $n_b \times 1$ των γωνιών τάσης του ζυγού

$$P_{bus}(\Theta) = B_{bus} \Theta + P_{bus,shift} \quad (24)$$

Όπου $P_{bus,shift} = (C_f - C_t)^T P_{f,shift}$. Παρομοίως η ροή της γραμμής από τα άκρα της κάθε γραμμής είναι γραμμικές συναρτήσεις των γωνιών τάσης του ζυγού

$$P_f(\theta) = B_f \theta + P_{f,shift} \quad (25)$$

και λόγω της χωρίς απώλειες παραδοχής, οι ροές στα προς τα άκρα δίνονται από τον τύπο $P_t = -P_f$. Η κατασκευή των πινάκων του συστήματος B είναι ανάλογη προς τους πίνακες του συστήματος Y για το μοντέλο AC:

$$B_f = [B_{ff}](C_f - C_t) \quad (26)$$

$$B_{bus} = (C_f - C_t)B_f \quad (27)$$

Οι κομβικές εξισώσεις της ισορροπίας ισχύος DC για το σύστημα μπορούν να εκφραστούν με τον ακόλουθο τύπο

$$g_P(\theta, P_g) = B_{bus}\theta + P_{bus,shift} + P_d + G_{sh} - C_g P_g = 0 \quad (28)$$

όπου το G_{sh} προσεγγίζει το ποσό της ενέργειας που καταναλώνεται από τα σταθερά στοιχεία εκτροπής της αντίστασης υπό την υπόθεση της τάσης του (19).

3.3 Ροή Ισχύος

Το πρότυπο ροής ισχύος ή το πρόβλημα ροής φορτίου περιλαμβάνει επίλυση για το σύνολο των τάσεων και των ροών σε ένα δίκτυο που αντιστοιχεί σε ένα καθορισμένο μοτίβο φορτίου και παραγωγής. Το MATPOWER περιλαμβάνει λύτες για τα προβλήματα ροής ισχύος και για την AC και την DC, και τα δύο εκ των οποίων περιλαμβάνουν την επίλυση μιας σειράς εξισώσεων της μορφής

$$g(x) = 0 \quad (29)$$

η οποία κατασκευάστηκε εκφράζοντας ένα υποσύνολο της εξίσωσης της κομβικής ισορροπίας της ενέργειας ως συναρτήσεις των άγνωστων ποσοτήτων τάσης. Όλοι οι λύτες του MATPOWER αξιοποιούν τις ελάχιστες αναφορές του προβλήματος και, εκτός από την Gauss-Seidel, αποδίδουν καλά σε πολύ μεγάλα συστήματα. Προς το παρόν κανένα από αυτά δεν περιλαμβάνει κάποια αυτόματη αναβάθμιση των μετασχηματιστών taps ή άλλες τεχνικές στην προσπάθεια να ικανοποιήσουν τους τυπικούς OPF περιορισμούς, όπως είναι η γεννήτρια, η τάση ή τα όρια ροής των γραμμών.

3.3.1 Ροή Ισχύος AC

Στο MATPOWER, κατά συνθήκη, ένας ζυγός με μια γεννήτρια ορίζεται ως ζυγός αναφοράς ώστε με βάση αυτό τον ζυγό να ορίζονται οι τάσεις, οι γωνίες και η ενεργός ισχύς αυτού. Η γωνία τάσης στον ζυγό αναφοράς έχει γνωστή τιμή, αλλά η ενεργός ισχύς της γεννήτριας στο ζυγό αναφοράς είναι άγνωστη για την αποφυγή υπερβολικής ανάλυσης του προβλήματος. Οι υπόλοιποι ζυγοί με γεννήτριες κατατάσσονται ως ζυγοί PV, με δεδομένες τις τιμές του μεγέθους της τάσης και της έγχυσης της ενεργού ισχύος. Δεδομένου ότι τα φορτία P_d και Q_d έχουν επίσης δοθεί, όλοι οι ζυγοί που δεν αποτελούνται από γεννήτριες κατηγοριοποιούνται ως PQ ζυγοί, με ενεργές και άεργες εγχύσεις πλήρως καθορισμένες. Έστω ότι τα I_{ref} , I_{PV} , και I_{PQ} δηλώνουν τα σύνολα των δεικτών των ζυγών αναφοράς, των PV και των PQ ζυγών αντίστοιχα. Στην παραδοσιακή διατύπωση του προβλήματος της ροής ισχύος του AC, η εξίσωση του ισοζυγίου της ενέργειας στο (17) διαχωρίζεται στα ενεργά και στα άεργα μέρη, εκφρασμένα ως συναρτήσεις των γωνιών τάσης θ και των μεγεθών V_m και των εγχύσεων της γεννήτριας P_g και Q_g , όπου οι εγχύσεις του φορτίου θεωρούνται σταθερές και δεδομένες:

$$g_P(\theta, V_m, P_g) = P_{bus}(\theta, V_m) + P_d - C_g P_g = 0 \quad (30)$$

$$g_Q(\theta, V_m, P_g) = Q_{bus}(\theta, V_m) + Q_d - C_g Q_g = 0 \quad (31)$$

Για το πρόβλημα ροής ισχύος στο AC, η εξίσωση $g(x)$ από την (29) σχηματίζεται με τη λήψη της αριστερής πλευράς της εξίσωσης ισοζυγίου της πραγματικής ισχύος (30) για όλους του ζυγούς εκτός από τον ζυγό αναφοράς. Στην εξίσωση ισορροπίας της άεργου ισχύος (31) για όλους τους ζυγούς PQ εισάγοντα οι γωνίες αναφοράς, τα φορτία και οι γνωστές εγχύσεις ενέργειας από τις γεννήτριες και τα μεγέθη των τάσεων:

$$g(x) = \begin{cases} g_P^{(i)}(\theta, V_m, P_g) \\ g_Q^{(i)}(\theta, V_m, Q_g) \end{cases} \quad \begin{array}{l} \forall i \in I_{PV} \cup I_{PQ} \\ \forall i \in I_{PQ} \end{array} \quad (32)$$

Το διάνυσμα x αποτελείται από την τις εναπομείναντες άγνωστες ποσότητες τάσης, δηλαδή τις γωνίες τάσης σε όλους τους ζυγούς μη αναφοράς και τα μεγέθη τάσης στους ζυγούς PQ:

$$x = \begin{cases} \theta^{(i)} \\ v_m^{(j)} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \forall i \notin I_{ref} \\ \forall j \in I_{PQ} \end{array} \quad (33)$$

Αυτό παράγει ένα σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων με $n_{pv} + 2n_{pq}$ εξισώσεις και αγνώστους, όπου n_{pv} και n_{pq} είναι ο αριθμός των PV και PQ ζυγών αντίστοιχα. Με την επίλυση του x , η εναπομένουσα ενεργή ισχύ της εξίσωσης του ισοζυγίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της έγχυσης της ενεργού ισχύος από τη γεννήτρια στο ζυγό αναφοράς. Ομοίως οι υπόλοιπες $n_{pv} + 1$ εξισώσεις ισοζυγίου της άεργης ισχύος αποδίδουν τις εγχύσεις της άεργης ενέργειας της γεννήτριας.

Το MATPOWER περιλαμβάνει τέσσερις διαφορετικούς αλγόριθμους για την επίλυση του προβλήματος της ροής ισχύος του AC. Ο προεπιλεγμένος λύτης βασίζεται στην σταθερή μέθοδο του Newton χρησιμοποιώντας μια πολική μορφή και ένα πλήρη ενημερωμένο ιακωβιανό πίνακα σε κάθε επανάληψη. Κάθε βήμα, στη μέθοδο Newton, περιλαμβάνει τον υπολογισμό της αναντιστοιχίας $g(x)$, σχηματίζοντας τον ιακωβιανό πίνακα ο οποίος βασίζεται στις ευαισθησίες

αυτών των αναντιστοιχιών στις αλλαγές του x και λύνει για την αναθεωρημένη μεταβλητή x παραγοντοποιώντας τα στοιχεία του ιακωβιανού πίνακα. Αυτή η μέθοδος περιγράφεται λεπτομερώς σε πολλά εγχειρίδια.

Επίσης περιλαμβάνονται οι λύτες που βασίζονται σε παραλλαγές της μεθόδου της ταχείας αποσύνδεσης, και συγκεκριμένα οι μέθοδοι XB και BX περιγράφονται στο. Αυτοί οι λύτες μειώνουν σημαντικά το ποσό του υπολογισμού ανά επανάληψη, με την ενημέρωση των μεγεθών τάσης και των γωνιών, ξεχωριστά στηριζόμενοι στη προσέγγιση των σταθερών του ιακωβιανού που συνυπολογίζονται μόνο μία φορά στην αρχή της διαδικασίας επίλυσης. Αυτές οι εξοικονομήσεις ανά επανάληψη, όμως, έχουν ως τίμημα περισσότερες επαναλήψεις. Ο τέταρτος αλγόριθμος είναι η πρότυπη μέθοδος Gauss- Seidel από τους Glimm και Stagg. Έχει πολλά μειονεκτήματα σε σχέση με τη μέθοδο Newton και περιλαμβάνεται για ακαδημαϊκούς λόγους.

Από την προεπιλογή, οι λύτες της ροής ισχύος του AC απλώς λύνουν το πρόβλημα που περιγράφηκε παραπάνω, αγνοώντας οποιαδήποτε όρια της γεννήτριας, τα όρια ροής της γραμμής, τα όρια του μεγέθους της τάσης, κλπ. Ωστόσο υπάρχει μια επιλογή που επιτρέπει στα όρια της άεργου ισχύος της γεννήτριας να τηρούνται εις βάρος της επιθυμητής τιμής της τάσης. Αυτό γίνεται προσθέτοντας έναν εξωτερικό βρόχο γύρω από την επίλυση της AC ροής φορτίου. Αν κάθε γεννήτρια έχει παραβιασμένο το όριο της άεργου ισχύος, τότε η έγχυση της αέργου ισχύος ορίζεται στο όριο, ο αντίστοιχος ζυγός μετατρέπεται σε ζυγό PQ, και η ροή ισχύος επιλύεται ξανά. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου δεν υπάρχουν πλέον άλλες παραβιάσεις.

3.3.2 DC Power Flow- ροή ρεύματος DC

Για το πρόβλημα της ροής ισχύος DC [162], το διάνυσμα x αποτελείται από το σύνολο των γωνιών τάσης σε όλους τους ζυγούς εκτός από τον ζυγό αναφοράς

$$x = [\theta_{\{i\}}], \forall i \notin I_{ref} \quad (34)$$

και το (29) παίρνει τη εξής μορφή

$$B_{dc}x - P_{dc} = 0 \quad (35)$$

όπου το B_{dc} είναι ο ένας $(n_b - 1) \times (n_b - 1)$ πίνακας που λαμβάνεται από την απλή εξάλειψη από το B_{bus} την γραμμή και στήλη που αντιστοιχεί στο ζυγό αναφοράς και αντίστοιχα στη γωνία αναφοράς. Δεδομένου ότι καθορίζονται οι εισροές P_g της γεννήτριας σε όλους του ζυγούς εκτός από τον ζυγό αναφοράς, το P_{dc} μπορεί να σχηματιστεί από τις σειρές των τεσσάρων τελευταίων όρων του (28) δηλαδή από αυτές τις μη αναφοράς.

Οι γωνίες τάσης του x υπολογίζονται από μια άμεση λύση του συνόλου των γραμμικών εξισώσεων. Στη συνέχεια υπολογίζονται οι ροές της γραμμής και οι εγχύσεις της γεννήτριας στο ζυγό αναφοράς, απευθείας από τις γωνίες τάσης του ζυγού μέσω του (25) και της κατάλληλης γραμμής του (28), αντίστοιχα.

3.3.3 Linear Shift Factors

Το μοντέλο ροής ισχύος DC μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστούν οι ευαισθησίες των ροών γραμμής στις αλλαγές των εγχύσεων ενεργή ισχύος στους κόμβους, μερικές φορές ονομάζονται παράγοντες μετατόπισης εγχύσεων (ISF) ή παράγοντες μετατόπισης παραγωγής. Αυτοί οι πίνακες ευαισθησίας $n_l \times n_b$, που ονομάζονται επίσης παράγοντες διανομής της μεταβίβασης της ενέργειας ή PTDFs, και φέρουν μια έμμεση παραδοχή σχετικά με τη βαρύτητα του κάθε ζυγού διανομής. Αν το H χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει έναν PTDF πίνακα, τότε το στοιχείο στη σειρά i και στη στήλη j , h_{ij} , αντιπροσωπεύει την αλλαγή της ροής της ενεργούς ισχύος στη γραμμή i δίνοντας μια μοναδιαία αύξηση στην ενέργεια που θα εγχυθεί στο ζυγό j , με την παραδοχή ότι η πρόσθετη μονάδα ισχύος εξάγεται σύμφωνα με μια καθορισμένη κατανομή με βάση τον ζυγό αναφοράς:

$$\Delta P_f = H \Delta P_{bus} \quad (36)$$

Αυτή η βαρύτητα των ζυγών διανομής μπορεί να εκφραστεί ως ένα $n_b \times 1$ διάνυσμα w των μη-αρνητικών βαρών των οποίων τα στοιχεία αθροίζονται σε 1. Κάθε στοιχείο καθορίζεται από το ποσοστό του ζυγού αναφοράς που λαμβάνεται σε κάθε ζυγό. Για την ειδική περίπτωση ενός ζυγού αναφοράς k , το w είναι ίσο με το διάνυσμα e_k . Ο αντίστοιχος PTDF πίνακας H_k μπορεί να κατασκευαστεί δημιουργώντας πρώτα τον $n_l \times (n_b - 1)$ πίνακα

$$\tilde{H}_k = \tilde{B}_f \cdot B_{dc}^{-1} \quad (37)$$

εισάγοντας στη συνέχεια μια μηδενική στήλη στη στήλη k . Εδώ το \tilde{B}_f και το B_{dc} λαμβάνονται από το B_f και B_{bus} , αντίστοιχα, εξαλείφοντας τις στήλες των ζυγών στους οποίους αναφέρονται και, στην περίπτωση του B_{dc} , αφαιρώντας τη γραμμή k που αντιστοιχεί στον ζυγό αναφοράς. Ο PTDF πίνακας H_w , που αντιστοιχεί σε μια γενική διανομή slack w , μπορεί να ληφθεί από οποιαδήποτε άλλο PTDF, όπως ο H_k , αφαιρώντας το w από κάθε στήλη, που ισοδυναμεί με τον ακόλουθο απλό πολλαπλασιασμό της μήτρας:

$$H_w = H_k (I - w \cdot 1^T) \quad (38)$$

Αυτοί οι παράγοντες γραμμικής μετατόπισης μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να υπολογιστούν οι ευαισθησίες των ροών των γραμμών σε διακοπές παροχής των γραμμών, που είναι γνωστοί ως παράγοντες διανομής της γραμμής προσωρινής διακοπής της παροχής ή LODFs. Δεδομένου ότι ο πίνακας PTDF H_w , ο αντίστοιχος πίνακας $n_l \times n_l$ LODF L μπορεί να κατασκευαστεί ως εξής, όπου l_{ij} είναι το στοιχείο στη σειρά i και στη στήλη j , που αντιπροσωπεύει την αλλαγή της ροής στη γραμμή i (ως κλάσμα της αρχικής ροής του) για μια διακοπή της λειτουργίας της γραμμής j .

Πρώτον, το H αντιπροσωπεύει τον πίνακα των ευαισθησιών της ροής της γραμμής προς τις ροές της γραμμής, το οποίο προέκυψε από τον πολλαπλασιασμό του πίνακα PTDF από τον πίνακα συμβάντων του κόμβου γραμμής:

$$H = H_w (C_f - C_t)^T \quad (39)$$

Αν το h_{ij} είναι η ευαισθησία της ροής στη γραμμή i σε σχέση με τη ροή στη γραμμή j , τότε το l_{ij} μπορεί να εκφραστεί ως εξής

$$I_{i,j} = \begin{cases} \frac{h_{i,j}}{1 - h_{i,j}}, & i \neq j \\ -1, & i = j \end{cases} \quad (40)$$

Το MATPOWER περιλαμβάνει συναρτήσεις για τον υπολογισμό του πίνακα DC PTDF και του αντίστοιχου πίνακα LODF είτε για ένα ζυγό αναφοράς k ή για ένα ζυγό διανομής του διανύσματος w .

3.4. Βέλτιστη Ροή Ισχύος

Το MATPOWER περιλαμβάνει κώδικα για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης ροής ισχύος τόσο των AC όσο και των DC εκδόσεων. Η βασική έκδοση του καθενός παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$\min_x f(x) \quad (41)$$

$$\text{subject to } g(x) = 0 \quad (42)$$

$$h(x) \leq 0 \quad (43)$$

$$x_{min} \leq x \leq x_{max} \quad (44)$$

3.4.1 Standard AC OPF

Το διάνυσμα βελτιστοποίησης x για το πρότυπο πρόβλημα του AC OPF αποτελείται από τα διανύσματα $n_b \times 1$ των γωνιών τάσης θ και μεγέθη V_m και τα διανύσματα $n_g \times 1$ των εγχύσεων της ενεργού και άεργου ισχύος P_g και Q_g της γεννήτριας:

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ V_m \\ P_g \\ Q_g \end{bmatrix} \quad (45)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (41) είναι απλώς μια άθροιση των ατομικών πολυώνυμων συναρτήσεων κόστους f_P και f_Q των εγχύσεων της ενεργού και άεργου ισχύος αντίστοιχα, για κάθε γεννήτρια:

$$\min_{\theta, V_m, P_g, Q_g} \sum_{i=1}^{n_g} f_P^i(p_g^i) + f_Q^i(q_g^i) \quad (46)$$

Οι περιορισμοί ισότητας (42) είναι απλά το πλήρες σύνολο των $2 \cdot n_b$ μη γραμμικών εξισώσεων ισορροπίας της ενεργού και άεργου ισχύος από το (30) και το (31). Οι περιορισμοί ανισότητας

(43) αποτελούνται από δύο σύνολα ορίων ροής της γραμμής n_l ως μη γραμμικών συναρτήσεων των γωνιών και μεγεθών τάσης του ζυγού, ένα για το *από* το άκρο και το *άλλο* για το *προς* το τέλος κάθε γραμμής:

$$h_f(\theta, V_m) = |F_f(\theta, V_m)| - F_{max} \leq 0 \quad (47)$$

$$h_t(\theta, V_m) = |F_t(\theta, V_m)| - F_{max} \leq 0 \quad (48)$$

Οι ροές είναι τυπικά φαινόμενη ροή ισχύος που εκφράζονται σε MVA, αλλά μπορεί να είναι ροές ενεργούς ισχύος ή ηλεκτρικού ρεύματος, οι οποίες αποδίδουν τις ακόλουθες τρεις πιθανές μορφές για τους περιορισμούς της ροής:

$$F_f(\theta, V_m) = \begin{cases} S_f(\theta, V_m), & \text{apparent power} \\ P_f(\theta, V_m), & \text{real power} \\ I_f(\theta, V_m), & \text{current} \end{cases} \quad (49)$$

όπου το I_f καθορίζεται στο (9), το S_f στο (15), το $P_f = R\{S_f\}$ και το διάνυσμα των ορίων ροής F_{max} έχει τις κατάλληλες μονάδες για τον τύπο του περιορισμού. Το ίδιο ισχύει και για το $F_t(\theta, V_m)$. Τα μεταβλητά όρια (44) περιλαμβάνουν έναν περιορισμό ισότητας σε οποιαδήποτε γωνία του ζυγού αναφοράς καθώς και τα ανώτερα και κατώτερα όρια όλων των μεγεθών τάσεως του ζυγού αλλά και των ενεργών και άεργων εγχύσεων της γεννήτριας:

$$\theta_i^{ref} \leq \theta_i \leq \theta_i^{ref}, \quad i \in I_{ref} \quad (50)$$

$$v_m^{i,min} \leq v_m^i \leq v_m^{i,max}, \quad i = 1, \dots, n_b \quad (51)$$

$$p_g^{i,min} \leq p_g^i \leq p_g^{i,max}, \quad i = 1, \dots, n_g \quad (52)$$

$$q_g^{i,min} \leq q_g^i \leq q_g^{i,max}, \quad i = 1, \dots, n_g \quad (53)$$

3.4.2 Standard DC OPF

Όταν χρησιμοποιούνται υποθέσεις μοντελοποίησης του δικτύου DC και περιορίζοντας τα πολυωνυμικά κόστη δευτέρου βαθμού το συνηθισμένο πρόβλημα του OPF όπως αναφέρθηκε προηγουμένως μπορεί να απλοποιηθεί σε ένα πρόβλημα τετραγωνικού προγραμματισμού, με γραμμικούς περιορισμούς και μια τετραγωνική συνάρτηση κόστους. Σε αυτή την περίπτωση τα μεγέθη τάσης και άεργου ισχύος εξαλείφονται από το πρόβλημα και οι ενεργές ροές ισχύος διαμορφώνονται ως μια γραμμική συνάρτηση των γωνιών τάσης. Η μεταβλητή μεγιστοποίησης είναι

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ P_g \end{bmatrix} \quad (54)$$

και το συνολικό πρόβλημα μειώνει το (55)–(60) όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\min_{\theta, P_g} \sum_{i=1}^{n_g} f_P^i(p_g^i) \quad (55)$$

$$\text{Subject to } g_p(\theta, P_g) = B_{bus}\theta + P_{bus,shift} + P_d + G_{sh} + C_g P_g \quad (56)$$

$$h_f(\theta) = B_f\theta + P_{f,shift} - F_{max} \leq 0 \quad (57)$$

$$h_t(\theta) = -B_f\theta - P_{f,shift} - F_{max} \leq 0 \quad (58)$$

$$\theta_i^{ref} \leq \theta_i \leq \theta_i^{ref}, \quad i \in I_{ref} \quad (59)$$

$$p_g^{i,min} \leq p_g^i \leq p_g^{i,max}, \quad i = 1, \dots, n_g \quad (60)$$

3.4.3 Εκτεταμένος σχηματισμός του OPF

Το MATPOWER χρησιμοποιεί μια εκτεταμένη δομή του OPF που επιτρέπει στο χρήστη να τροποποιήσει ή να αυξήσει τη σύνθεση του προβλήματος χωρίς να ξαναγράψει τα τμήματα που είναι κοινά με την τυπική σύνθεση του OPF. Αυτό γίνεται μέσω των προαιρετικών παραμέτρων εισόδου, διατηρώντας την ικανότητα να χρησιμοποιούν pre-compiled λύτες. Η πρότυπη σύνθεση έχει τροποποιηθεί μέσω της εισαγωγής συμπληρωματικών προαιρετικών κοστών f_u που ορίζονται από το χρήστη, περιορισμών και μεταβλητών z και μπορεί να γραφτεί με την ακόλουθη τυπολογία:

$$\min_{x,z} f(x) + f_v(x, z) \quad (61)$$

$$\text{Subject to } g(x) = 0 \quad (62)$$

$$h(x) \leq 0 \quad (63)$$

$$x_{min} \leq x \leq x_{max} \quad (64)$$

$$l \leq A \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} \leq v \quad (65)$$

$$z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (66)$$

Η οριζόμενη από το χρήστη συνάρτηση κόστους ορίζεται ως ένα σύνολο παραμέτρων σε μια προκαθορισμένη μορφή που περιγράφεται λεπτομερώς στο. Αυτή η μορφή παρέχει την ευελιξία

για τον χειρισμό ενός ευρύ φάσματος κόστους, από απλές γραμμικές συναρτήσεις βελτιστοποίησης των μεταβλητών έως τετραγωνικής κλίμακας κυρώσεις, όπως τάσεις που βρίσκονται εκτός του επιθυμητού εύρους, έως συναρτήσεις γραμμικών συνδυασμών των μεταβλητών, εμπνευσμένες από τις απαιτήσεις των όρων συντονισμού των τιμών. που βρέθηκαν στην αποσύνθεση των μεγάλων χαλαρά συνδεδεμένων προβλημάτων που ανέκυψαν και στην έρευνα των.

3.4.4 Πρότυπες Επεκτάσεις

Εκτός από τη διάθεση της επεκτάσιμης δομής του OPF στους τελικούς χρήστες, το MATPOWER προσφέρει το πλεονέκτημα της εσωτερικής εφαρμογής πολλών πρόσθετων δυνατοτήτων.

- 1) *Τμηματική γραμμική του κόστους (Piecewise Linear Costs)*: Η τυπική σύνθεση του OPF στο (41)- (44) δεν χειρίζεται άμεσα τις μη-ομαλές τμηματικές γραμμικές συναρτήσεις κόστους που συνήθως προκύπτουν από διακριτές προσφορές και προσφορές στις αγορές της ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν όμως τέτοιες συναρτήσεις κόστους είναι κυρτές, μπορούν να μοντελοποιηθούν χρησιμοποιώντας μια μέθοδο με περιορισμένου κόστους μεταβλητή (CCV). Η τμηματική γραμμική συνάρτηση κόστους $c(x)$ αντικαθίσταται από μια βοηθητική μεταβλητή y και από ένα σύνολο γραμμικών περιορισμών που σχηματίζουν μια κυρτή «δεξαμενή» που απαιτούν το μεταβλητό κόστος y να βρίσκεται στην επιγραφή της συνάρτησης $c(x)$.

Μια κυρτή n -τμημάτων τμηματικά γραμμικής συνάρτησης κόστους

$$c(x) = \begin{cases} m_1(x - x_1) + c_1, & x \leq x_1 \\ m_2(x - x_2) + c_2, & x_1 \leq x \leq x_1 \\ \vdots \\ m_n(x - x_n) + c_n, & x_{n-1} < x \end{cases} \quad (67)$$

μπορεί να ορίζεται από μια ακολουθία σημείων (x_j, c_j) , $j = 0 \dots n$, όπου m_j δηλώνει την κλίση του τμήματος j

$$m_j = \frac{c_j - c_{j-1}}{x_j - x_{j-1}}, j = 1, \dots, n \quad (68)$$

και $x_0 < x_1 < \dots < x_n$ και $m_1 \leq m_2 \leq \dots \leq m_n$. Η δεξαμενή που αντιστοιχεί σε αυτή τη συνάρτηση κόστους σχηματίζεται από τους ακόλουθους n περιορισμούς στη βοηθητική μεταβλητή κόστους y :

$$y \geq m_j(x - x_j) + c_j, j = 1, \dots, n \quad (69)$$

Ο όρος του κόστους που προστίθεται στην αντικειμενική συνάρτηση στη θέση του $c(x)$ είναι απλώς η μεταβλητή y . Για ένα AC ή DC OPF, το MATPOWER χρησιμοποιεί την

προσέγγιση του CCV εσωτερικά για να δημιουργήσει αυτόματα τη βοηθητική μεταβλητή, τον όρο του κόστους, και το αντίστοιχο σύνολο των περιορισμών για οποιοδήποτε τμηματικά γραμμική συνάρτηση κόστους της γεννήτριας.

- 2) *Κατανεμόμενα Φορτία*: μια απλή προσέγγιση για τα κατανεμόμενα ή ευαίσθητα στην τιμή φορτία είναι η μοντελοποίησή τους ως εγχύσεις αρνητικής ενεργής ισχύος με συσχετισμένα αρνητικά κόστη. Αυτό γίνεται με τον καθορισμό μιας γεννήτριας με αρνητική παραγωγή, που κυμαίνεται από μια ελάχιστη έγχυση ίση με το αρνητικό μέγιστο δυνατό φορτίο σε μια μέγιστη έγχυση ίση με το μηδέν. Με αυτό το μοντέλο, αν το αρνητικό κόστος αντιστοιχεί σε όφελος για κατανάλωση, η ελαχιστοποίηση του κόστους $f(x)$ της παραγωγής ισοδυναμεί με τη μεγιστοποίηση της κοινωνικής πρόνοιας. Με ένα μοντέλο δικτύου AC, προκύπτει επίσης το ερώτημα της άεργου κατανομής για τέτοια φορτία. Στο MATPOWER, θεωρούνται ότι τα κατανεμόμενα φορτία διατηρούν ένα σταθερό συντελεστή ισχύος και ότι ένας πρόσθετος περιορισμός ισότητας προστίθεται αυτόματα για να επιβάλλει αυτή την προϋπόθεση για κάθε «αρνητική γεννήτρια» που χρησιμοποιείται για να διαμορφώσει ένα μοντέλο κατανεμημένου φορτίου.
- 3) *Καμπύλες ικανότητας της γεννήτριας (Generator Capability Curves)*: Ο τυπικός σχηματισμός του AC OPF περιλαμβάνει περιορισμούς για τις εγχύσεις ενεργούς και άεργου ισχύος μίας γεννήτριας. Παρ' όλα αυτά οι πραγματικές δυνατότητες καμπύλης P-Q των φυσικών γεννητριών (physical generators) συνήθως περιλαμβάνουν κάποια εξισορρόπηση μεταξύ της ενεργού και άεργου ικανότητας. Αν ο χρήστης παρέχει τις παραμέτρους που καθορίζουν αυτή τη συναλλαγή για μια γεννήτρια, το MATPOWER αυτόματα κατασκευάζει τους αντίστοιχους περιορισμούς.
- 4) *Διαφορά Ορίων της Γωνίας της Γραμμής (Branch Angle Difference Limits)*: Η διαφορά μεταξύ της γωνίας τάσης θ_f του ζυγού στο από το τέλος της γραμμής και η γωνία θ_t στο προς το τέλος μπορεί για παράδειγμα να οριοθετείται πάνω και κάτω για να ενεργεί ως ένα υποκατάστατο για ένα παροδικό όριο σταθερότητας. Αν αυτά τα όρια παρέχονται, το MATPOWER δημιουργεί τους αντίστοιχους περιορισμούς στις μεταβλητές της γωνίας τάσης.

3.4.5 Λύτες

Οι αρχικές εκδόσεις του MATPOWER στηριζόντουσαν στη βελτιστοποίηση του Toolbox του Matlab για την παροχή των λυτών NLP και QP που χρειάζονταν για την επίλυση των προβλημάτων των AC και DC OPF, αντίστοιχα. Ενώ λειτούργησαν αρκετά καλά για πολύ μικρά συστήματα, δεν μπόρεσαν να αποδώσουν καλά για μεγαλύτερα δίκτυα. Τελικά προστέθηκαν προαιρετικά πακέτα επιλογής με πρόσθετους λύτες για να βελτιωθεί η επίδοση, τυπικά στηριζόμενων στην επέκταση αρχείων του Matlab (MEX) που εφαρμόζονταν στη Fortran ή στη C. Για τη βέλτιστη ροή ισχύος DC, υπάρχει μία δομή MEX του ύψιστου επίδοσης λύτη BPMPD για LP/QP προβλήματα. Για το πρόβλημα του AC OPF, τα πακέτα MINOPF και TSPOPF παρέχουν λύτες κατάλληλους για πολύ μεγαλύτερα συστήματα. Το πρώτο στηρίζεται στο MINOS και το τελευταίο περιλαμβάνει το μονού – διπλού εσωτερικού σημείου και την περιοχή εμπιστοσύνης που βασίζεται στην επαυξημένη μέθοδο Lagrangian.

3.4.6 Πρόσθετη λειτουργικότητα

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το MATPOWER δημιουργήθηκε από την ανάγκη ενός μηχανισμού εκκαθάρισης βασισμένο στην δημοπράτηση της ηλεκτρικής ενέργειας η οποία βασίζεται στο OPF για την «Εξυπνη αγορά». Σε αυτό το πλαίσιο, προσφέρει προς πώληση και δίνει προσφορές για να αγοραστεί ηλεκτρική ενέργεια από γεννήτριες ενώ τα φορτία ορίζουν το «κόστος» για το OPF που καθορίζει την κατανομή και τις τιμές που χρησιμοποιούνται για να κλείσουν τη δημοπρασία. Το MATPOWER περιλαμβάνει έναν κώδικα που παίρνει την προσφορά και την ζήτηση για την ενεργό ή άεργο ισχύ, διαμορφώνει και εκτελεί την αντίστοιχη OPF, και επιστρέφει την τελική προσφορά και ζήτηση των δημοπρασιών.

Η τυπική σύνθεση OPF που περιγράφεται παραπάνω δεν περιλαμβάνει μηχανισμό για να κλείσει εντελώς τις γεννήτριες, οι οποίες είναι πολύ ακριβές κατά την λειτουργία τους. Αντιθέτως, είναι απλώς ρυθμισμένες στα ελάχιστα όρια παραγωγής τους. Το MATPOWER περιλαμβάνει την ικανότητα να εκτελέσει ένα OPF σε συνδυασμό με μια μονάδα μη-δέσμευσης για ένα ενιαίο χρονικό διάστημα, που του επιτρέπει να κλείσει αυτές τις ακριβές μονάδες και να βρει μια δέσμευση από τους παραγωγούς με μικρότερο κόστος και να τα καταναίμει χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο παρόμοιο με δυναμικό προγραμματισμό.

Σε μερικές περιπτώσεις, μπορεί να είναι επιθυμητός ο περαιτέρω περιορισμός της OPF λύσης με την απαίτηση να διαθέτουν ένα συγκεκριμένο επίπεδο ικανότητας εφεδρείας για την κάλυψη έκτακτων αναγκών. Το MATPOWER περιλαμβάνει επεκτάσεις OPF που του επιτρέπουν να συνβελτιστοποιήσει την ενέργεια και την εφεδρεία, βάσει μιας σειράς σταθερών ανά ζώνες υποχρέωσης τήρησης ορισμένων απαιτήσεων όσο αναφορά την εφεδρεία. Αυτός ο κωδικός χρησιμεύει επίσης ως ένα παράδειγμα του τρόπου προσαρμογής του προτύπου OPF με επιπλέον μεταβλητές, κόστος και περιορισμούς.

3.5 Αποτελέσματα και συμπεράσματα

Υπάρχουν αρκετές περιπτώσεις παραδειγμάτων που χρησιμοποιούνται για να συγκριθεί η επίδοση διαφόρων λυτών OPF σε δίκτυα που χρησιμοποιούνται ως παράδειγμα, που κυμαίνονται σε μέγεθος από εννέα ζυγούς και τρεις γεννήτριες ως δεκάδες χιλιάδες ζυγούς, χιλιάδες γεννήτριες και δεκάδες χιλιάδες επιπλέον μεταβλητών και περιορισμών των χρηστών. Ο Πίνακας 2.3 συνοψίζει τις βασικές δοκιμές όσον αφορά τη σειρά της συνάρτησης κόστους (τετραγωνική ή γραμμική), τον αριθμό των ζυγών, των γεννητριών και των γραμμών (n_b , n_g και n_l), τον αριθμό των μεταβλητών και των περιορισμών (n_x και n_{gh}) για τους σχηματισμούς τόσο του AC όσο και του DC OPF, και τον αριθμό των δεσμευτικών κατώτερων ορίων τάσης (V_m^{min}) και των ορίων ροής της γραμμής ($|S_{f/t}^{max}|$) για το πρόβλημα του AC και των ορίων ροής ($|P_{f/t}^{max}|$) για την περίπτωση DC.

Πίνακας 1: OPF Test cases

Case Name	Cost	Sizes			AC OPF		DC OPF		Binding Constraints		
		n_b	n_g	n_l	n_x	n_{gh}	n_x	n_{gh}	V_m^{\min}	$ S_{f/t}^{\max} $	$ P_{f/t}^{\max} $
case9	Q	9	3	9	24	36	12	27	0	0	0
case30	Q	30	6	41	72	142	36	112	0	2	0
case_ηpcc36	L	36	43	121	158	314	79	278	0	0	0
case118	Q	118	54	186	344	608	172	490	0	0	0
case300	Q	300	69	411	738	1,422	369	1,122	0	0	0
case2383wp	L	2,383	327	2,896	5,420	10,558	2,710	8,175	2	6	5
case2736sp	L	2,736	270	3,269	6,012	12,010	3,006	9,274	0	1	1
case3120sp	L	3,120	298	3,693	6,836	13,626	3,418	10,506	0	8	10
case2935	Q	2,935	1,024	7,028	7,918	6,314	3,959	3,379	19	7	9
case21k	L	21,084	2,692	25,001	54,091	111,784	30,315	90,700	3	64	40
case42k	L	42,168	5,384	50,001	107,027	222,796	59,475	180,628	3	137	66

Ο Πίνακας 2.4 δίνει τους χρόνους τρεξίματος σε δευτερόλεπτα για τους λύτες που ήταν επιτυχημένοι, με τον τάχιστο χρόνο σημειωμένο με έντονα γράμματα για κάθε παράδειγμα. Ο πρώτος αλγόριθμος που παρατίθεται για το κάθε ένα είναι από το Toolbox βελτιστοποίησης του Matlab, η fmincon για την περίπτωση του AC OPF και linprog ή quadprog για το πρόβλημα του DC. Οι επόμενοι είναι οι πρότυπες και ανά βήμα ελεγχόμενες αλλαγές της καθαρής εφαρμογής Matlab του μονού – διπλού εσωτερικού σημείου μεθόδου και οι τελευταίοι είναι κάποιιοι από τους C και MEX βασισμένη στο Fortran λύτες που διανέμονται ως προαιρετικά πακέτα MATPOWER.

Για τα μικρά συστήματα, οι καλύτερες συναρτήσεις είναι η MINOPF για το AC και η BPMPD για το DC, οι οποίες είναι αρχεία MEX που βασίζονται στη Fortran. Για μεγαλύτερα αρχεία, οι μονού – διπλού εσωτερικού σημείου λύτες έχουν σαφές πλεονέκτημα, με την καθαρή εφαρμογή του Matlab να προσφέρει αξιοσέβαστη επίδοση σε σχέση με τις εκδόσεις MEX που στηρίζονται στη C.

Πίνακας 2: Χρόνος τρεξίματος του OPF

Case Name	AC OPF Times (in seconds)						DC OPF Times (in seconds)			
	Opt Tbx	pure Matlab		MEX			Opt Tbx	pure Matlab		MEX
		MIPS	MIPS-sc	MINOPF	PDIPM	SC-PDIPM		MIPS	MIPS-sc	
case9	0.147	0.080	0.120	0.012	0.024	0.027	0.014	0.019	0.020	0.009
case30	0.935	0.133	0.169	0.064	0.056	0.062	0.016	0.022	0.035	0.012
case_ηpcc36	13.5	0.247	0.332	0.346	0.150	0.216	0.070	0.027	0.031	0.020
case118	-	0.313	0.492	0.428	0.232	0.322	0.244	0.051	0.065	0.023
case300	-	0.795	-	4.07	0.713	4.04	0.369	0.077	0.138	0.043
case2383wp	-	8.24	10.2	94.8	7.80	8.94	9.00	5.62	5.91	-
case2736sp	-	8.36	10.4	86.8	7.69	8.84	-	1.74	1.84	-
case3120sp	-	14.1	17.7	384.9	12.8	15.0	9.96	6.98	7.32	7.95
case2935	-	15.2	18.1	1,262	15.3	17.5	-	5.28	5.68	-
case21k	-	822.1	1,027	-	578.8	610.4	-	256.9	263.8	-
case42k	-	5,232	5,933	-	3,700	3,701	-	1,241	1,224	-

Τέλος, το MATPOWER προσφέρει υψηλού επιπέδου εργαλεία ροής ενέργειας και βέλτιστη ροή ισχύος για τους ερευνητές και τους εκπαιδευτικούς. Η βέλτιστη ροή ισχύος είναι επεκτάσιμη, επιτρέποντας την εύκολη τροποποίηση της σύνθεσης του προβλήματος. Η απόδοση των περιλαμβανόμενων λυτών OPF, μαζί με άλλες διαθέσιμες προαιρετικές εφαρμογές, αποδίδει αρκετά καλά σε πολύ μεγάλα συστήματα. Το 2011 έχουν γίνει πάνω από 20.000 λήψεις του

MATPOWER, με περίπου 50% κυρίως για την εκπαίδευση, 43% για έρευνα, και 7% για τη βιομηχανία και άλλους λόγους.

Ενδεικτικά παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες η τυποποίηση των ζυγών και των γραμμών στο MATPOWER και την περιγραφή αυτής καθώς και τι αντιπροσωπεύει.

Πίνακας 3: Bus Data (mpc.bus)

Name	Column	Description
BUS_I	1	bus number (positive integer)
BUS_TYPE	2	bus type (1 = PQ, 2 = PV, 3 = ref, 4 = isolated)
PD	3	real power demand (MW)
QD	4	reactive power demand (MVar)
GS	5	shunt conductance (MW demanded at V = 1.0 p.u.)
BS	6	shunt susceptance (MVar injected at V = 1.0 p.u.)
BUS_AREA	7	area number (positive integer)
VM	8	voltage magnitude (p.u.)
VA	9	voltage angle (degrees)
BASE_KV	10	base voltage (kV)
ZONE	11	loss zone (positive integer)
VMAX	12	maximum voltage magnitude (p.u.)
VMIN	13	minimum voltage magnitude (p.u.)
LAM_P†	14	Lagrange multiplier on real power mismatch (u/MW)
LAM_Q†	15	Lagrange multiplier on reactive power mismatch (u/MVar)
MU_VMAX†	16	Kuhn-Tucker multiplier on upper voltage limit (u/p.u.)
MU_VMIN†	17	Kuhn-Tucker multiplier on lower voltage limit (u/p.u.)

† Included in OPF output, typically not included (or ignored) in input matrix. Here we assume the objective function has units u.

Πίνακας 4. Branch Data (mpc.branch)

Name	Column	Description
F_BUS	1	'from' bus number
T_BUS	2	'to' bus number
BR_R	3	resistance (p.u.)
BR_X	4	reactance (p.u.)
BR_B	5	total line charging susceptance (p.u.)
RATE_A	6	MVA rating A (long term rating)
RATE_B	7	MVA rating B (short term rating)
RATE_C	8	MVA rating C (emergency rating)
TAP	9	transformer off nominal turns ratio, (taps at 'from' bus, impedance at 'to' bus, i.e. if $r = x = 0$, $\text{tap} = V_f / V_t $)
SHIFT	10	transformer phase shift angle (degrees), positive => delay
BR_STATUS	11	initial branch status, 1 = in-service, 0 = out-of-service
ANGMIN*	12	minimum angle difference, $\theta_f - \theta_t$ (degrees)
ANGMAX*	13	maximum angle difference, $\theta_f - \theta_t$ (degrees)
PF†	14	real power injected at 'from' bus end (MW)
QF†	15	reactive power injected at 'from' bus end (MVA _r)
PT†	16	real power injected at 'to' bus end (MW)
QT†	17	reactive power injected at 'to' bus end (MVA _r)
MU_SF‡	18	Kuhn-Tucker multiplier on MVA limit at 'from' bus (u/MVA)
MU_ST‡	19	Kuhn-Tucker multiplier on MVA limit at 'to' bus (u/MVA)
MU_ANGMIN‡	20	Kuhn-Tucker multiplier lower angle difference limit (u/degree)
MU_ANGMAX‡	21	Kuhn-Tucker multiplier upper angle difference limit (u/degree)

* Not included in version 1 case format.

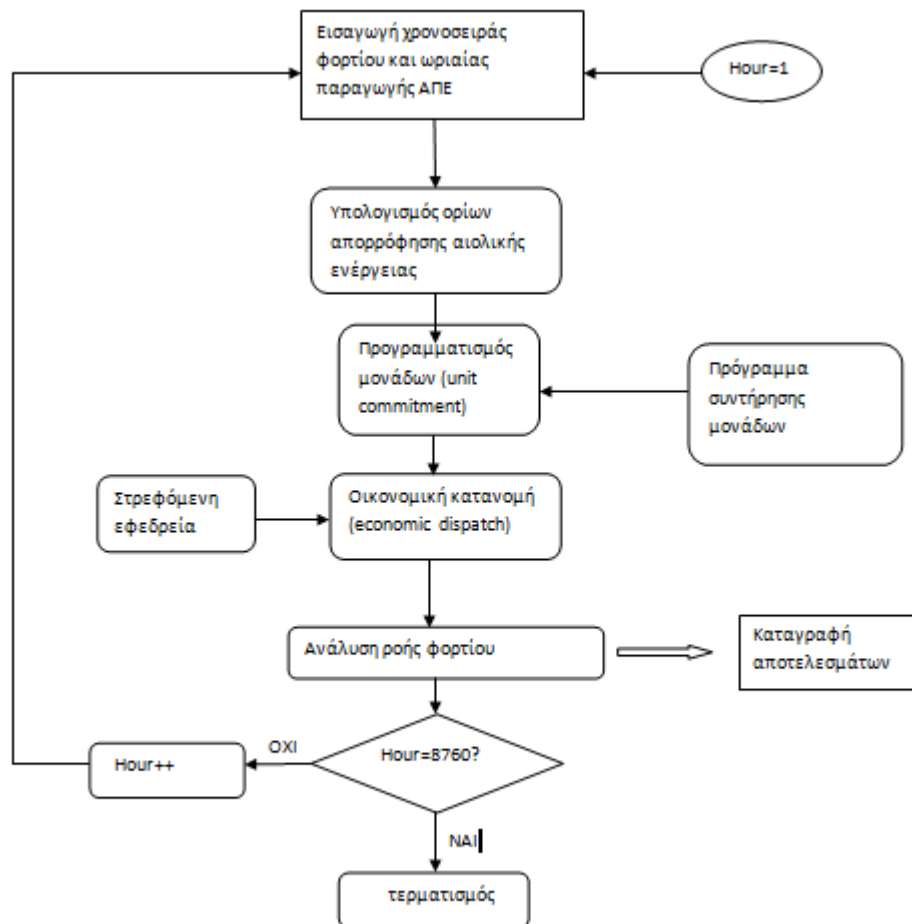
† Included in power ow and OPF output, ignored on input.

‡ Included in OPF output, typically not included (or ignored) in input matrix. Here we assume the objective function has units u.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

**Εργαλεία οικονομικής αποτίμησης
διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων**

Το παρακάτω διάγραμμα μπλοκ περιγράφει την ωριαία προσομοίωση που διεξάγεται για ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό να γίνει κατανοητός ο τρόπος με τον οποίο λειτουργεί ο αλγόριθμος για τη μελέτη του συστήματος παραγωγής. Για κάθε ώρα ενός έτους εισάγονται τα δεδομένα, όπως η χρονοσειρά του φορτίου και η παραγωγή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, και στη συνέχεια συνδυάζονται σε μια επαναληπτική διαδικασία. Η διαδικασία αυτή λαμβάνει υπόψη της το τεχνικό ελάχιστο των δεσμευμένων μονάδων. Για αυτό και θα πρέπει να έχει υπολογιστεί η μέγιστη επιτρεπόμενη ενέργεια που δέχεται το σύστημα από τα ΑΠΕ. Επιπρόσθετα, γίνεται ο προγραμματισμός των συμβατικών μονάδων με οικονομική κατανομή (unit commitment and economic dispatch), ο οποίος λαμβάνει υπόψη του διάφορα προγράμματα συντήρησης μονάδων καθώς και την απαραίτητη στρεφόμενη εφεδρεία. Όλες οι προαναφερθείσες παράμετροι συντελούν στην επίτευξη της ανάλυσης της ροής φορτίου.



Διάγραμμα 18: Διάγραμμα μπλοκ του αλγορίθμου για τη μελέτη του συστήματος παραγωγής

Στις παρακάτω παραγράφους περιγράφονται αναλυτικά τα στοιχεία που αποτελούν το διάγραμμα μπλοκ του αλγορίθμου.

4.1 Περιγραφή του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής

- ❖ Υφιστάμενες συμβατικές μονάδες και μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Σε ένα αυτόνομο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργούν σταθμοί παραγωγής οι οποίοι αποτελούνται από διάφορες μονάδες παραγωγής.

Ακόμη σε ένα αυτόνομο σύστημα βρίσκονται σε λειτουργία αιολικά πάρκα και φωτοβολταϊκοί σταθμοί. Τα Αιολικά Πάρκα λειτουργούν παράλληλα με τις συμβατικές μονάδες και λαμβάνουν φορτίο ως την εκάστοτε ισχύουσα μέγιστη επιτρεπόμενη διείσδυση μη ελεγχόμενων σταθμών ΑΠΕ στο Αυτόνομο Σύστημα.

4.2 Καθορισμός ορίων απορρόφησης αιολικής ενέργειας

Στην περίπτωση αυτόνομου συστήματος, θεωρείται ένας συντελεστής μέγιστης απορρόφησης αιολικής ενέργειας που συνήθως λαμβάνει τιμές από 25% έως 40% του φορτίου.

Η αιολική ενέργεια περιορίζεται, επίσης, από το τεχνικό ελάχιστο των μονάδων. Το συνολικό τεχνικό ελάχιστο των δεσμευμένων μονάδων καθορίζεται ως εξής:

- i. Πρώτα θεωρείται ότι όλα η διαθέσιμη αιολική ενέργεια μπορεί να εισαχθεί στο σύστημα.

$$P_w = P_{w_{av}}$$

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

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

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

όπου P_{max}^i είναι η μέγιστη ισχύς που εγχέεται στο σύστημα από τη μονάδα I , P_L είναι το φορτίο του συστήματος, P_{SR} είναι η στρεφόμενη εφεδρεία, P_w και P_{PV} είναι η αιολική

και ηλιακή ενέργεια που εγχέεται στο σύστημα αντίστοιχα και P_{ch}^{EV} , P_{dch}^{EV} είναι το συνολικό προφίλ φόρτισης και εκφόρτισης του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων. Η μέγιστη αιολική ενέργεια που μπορεί να απορροφηθεί είναι:

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

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

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

4.3 Ένταξη - φόρτιση συμβατικών μονάδων και στρεφόμενη εφεδρεία συστήματος

❖ Ένταξη συμβατικών μονάδων

Γενικά τα κριτήρια φόρτισης μιας μονάδας σχετίζονται με την ειδική κατανάλωση καυσίμου, την τρέχουσα κατάσταση της μονάδας και τις καιρικές και φορτιακές συνθήκες. Πιο συγκεκριμένα η λειτουργία των συμβατικών μονάδων ενός αυτόνομου νησιωτικού Συστήματος βασίζεται στους ακόλουθους κανόνες:

- Οι μονάδες που λειτουργούν με μαζούτ προηγούνται αυτών που χρησιμοποιούν ντίζελ λόγω κόστους καυσίμου.
- Σύμφωνα με την ειδική κατανάλωση καυσίμου προηγούνται οι πλέον αποδοτικές μονάδες και έπονται οι λιγότερο αποδοτικές.
- Εν γένει οι μεγάλες μονάδες εντάσσονται πριν από τις μικρές. Αυτό δεν είναι απόλυτο καθώς πολλές φορές η ημερήσια διακύμανση φορτίου επιβάλλει τη λειτουργία μικρότερων μονάδων όταν πρόκειται να αντιμετωπισθούν μικρής διάρκειας αιχμές.
- Η σειρά ένταξης μεταβάλλεται ανάλογα με τη διαθεσιμότητα των μονάδων (μονάδες σε συντήρηση ή σε βλάβη).

- Οι μονάδες βάσης δε σβήνουν παρά μόνο όταν αυτό επιβάλλεται από το μακροπρόθεσμο προγραμματισμό (εβδομαδιαίο ή μηνιαίο). Ομοίως μονάδες που χρησιμοποιούνται για ατμοπαραγωγή δεν είναι δυνατό να σβήσουν.
- Ιδιαίτερη φροντίδα δίνεται στην όσο το δυνατό περιορισμένη λειτουργία των Αεριοστροβίλων που καταναλώνουν ντήζελ.
- Μονάδες παλαιές με προβλήματα εντάσσονται τελευταίες.

Όταν υπάρχουν περισσότεροι του ενός σταθμοί στο ίδιο σύστημα θα πρέπει να υπάρχει σε λειτουργία τουλάχιστον μία μονάδα σε κάθε σταθμό.

Παρατηρήσεις:

1. Αντίστοιχα οι μελλοντικές μονάδες θα ακολουθούν την παραπάνω σειρά και θα λαμβάνουν φορτίο ακριβώς πριν τις υφιστάμενες μονάδες του ίδιου τύπου.
2. Σημειώνεται επίσης ότι οι μονάδες που έχουν τεθεί σε ψυχρή εφεδρεία δε λαμβάνονται υπόψη.
3. Στα σενάρια όπου λαμβάνεται υπόψη η παρουσία μονάδων ΑΠΕ οι μονάδες αυτές εντάσσονται κατά προτεραιότητα εφόσον ικανοποιούνται οι τιθέμενες προϋποθέσεις οι οποίες συνεισφέρουν μέχρι ενός ορίου μέγιστης αποδιδόμενης αιολικής ισχύος.
4. Για τα σενάρια εισαγωγής φυσικού αερίου στο ενεργειακό ισοζύγιο του συστήματος η παραπάνω σειρά τροποποιείται ως προς το σημείο ότι μετά τους ατμοστροβίλους αναλαμβάνουν φορτίο οι συνδυασμένοι κύκλοι.

Σχετικά με τις δυνατές εναύσεις και σβέσεις των μονάδων λαμβάνονται υπόψη οι ακόλουθοι κανόνες:

- ❖ Οι ατμοστροβιλικές μονάδες δεν σβήνουν παρά μόνο για λόγους συντήρησης
- ❖ Οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου είναι δυνατό να σβήνουν έως και μία φορά την εβδομάδα και συγκεκριμένα εντός του Σαββατοκύριακου οπότε και εμφανίζονται χαμηλά φορτία. Στην περίπτωση αυτή δεν επιτρέπεται να ενταχθούν σε λειτουργία πριν από το πρωί της Δευτέρας. Επίσης σχετικά με την ένταξη των μονάδων συνδυασμένου κύκλου λαμβάνεται υπόψη η δυνατότητα λειτουργία τους με περιορισμένο αριθμό αεριοστροβίλων και η ένταξή τους πραγματοποιείται σε στάδια.
- ❖ Για τις μονάδες Diesel δεχόμαστε έως και 3 σβέσεις ανά εβδομάδα. Επίσης η ένταξη των μονάδων Diesel πραγματοποιείται στο βαθμό όπου υπάρχει πρόβλεψη για την

αναγκαιότητα παραγωγής από αυτές για περισσότερο από 6 ώρες μέσα στο επόμενο 24ωρο. Εναλλακτικά όταν οι ανάγκες περιορίζονται σε λιγότερες ώρες προτιμάται η ένταξη αεριοστροβίλων.

- ❖ Για τους αεριοστροβίλους δεν τίθεται κανένας περιορισμός και οι εναύσεις/σβέσεις τους εξαρτώνται από τις ανάγκες του συστήματος για την κάλυψη των ημερήσιων αιχμών.

Κατά τη φόρτιση των μονάδων σε ωριαία βάση λαμβάνονται επίσης υπόψη οι ρυθμοί ανόδου και καθόδου της ισχύος που μπορούν να αναλάβουν οι μονάδες παραγωγής.

Παρατήρηση:

1. Για τη συντήρηση των μονάδων θεωρείται προκαθορισμένο πρόγραμμα συντήρησής τους ανά έτος.

- ❖ Στρεφόμενη εφεδρεία συστήματος

Η στρεφόμενη εφεδρεία που τηρείται στο σύστημα εξαρτάται από την λειτουργία ή όχι των Αιολικών Πάρκων. Επομένως ισχύουν τα ακόλουθα:

1. Όταν δεν λαμβάνονται υπόψη τα Αιολικά Πάρκα ή όταν βρίσκονται εκτός λειτουργίας (π.χ. όταν δεν υπάρχει άνεμος και συνεπώς δεν παράγουν) η στρεφόμενη εφεδρεία που τηρείται για λόγους ευστάθειας του συστήματος είναι μεγαλύτερη ή ίση από το 15% του εκάστοτε φορτίου της ζήτησης.

2. Όταν λειτουργούν τα Αιολικά Πάρκα η στρεφόμενη εφεδρεία είναι τουλάχιστον ίση με την εκάστοτε Αιολική Παραγωγή. Στην περίπτωση όμως όπου η Αιολική Παραγωγή είναι μικρότερη από το 15% του εκάστοτε φορτίου της ζήτησης, η στρεφόμενη εφεδρεία διατηρείται σε αυτό το ποσοστό.

Σε κάθε περίπτωση η στρεφόμενη εφεδρεία που διατηρείται επιμερίζεται στις εν λειτουργία τοπικές μονάδες παραγωγής .

4.4 Οικονομική αποτίμηση της λειτουργίας του συστήματος

Το πρόβλημα της οικονομικής αποτίμησης μπορεί να διαμορφωθεί και ως εξής:

$$\min C_{TC}^t = \sum_{m=1}^M C_{G,m}^t(P_{G,m}^t)$$

όπου t είναι το χρονικό διάστημα, M είναι ο αριθμός των μονάδων παραγωγής που υπάρχουν στην αγορά ενέργειας, $C_{G,m}^t$ είναι το κόστος της ενεργού ισχύος που προσφέρεται από τη μονάδα m , και $P_{G,m}^t$ είναι η παραγωγή ενεργού ισχύος της μονάδας.

Το φορτίο του συστήματος αποστέλλεται στις γεννήτριες ανάλογα με τους παρακάτω περιορισμούς:

- i. Περιορισμός της ισορροπίας της πραγματικής ισχύος

$$\sum_{n=1}^N P_{G,n} - P_D + P_{ch}^{EV} - P_{dch}^{EV} - P_{losses} = 0$$

όπου $P_{G,n}$ είναι η παραγωγή ενεργού ισχύος της μονάδας n , N είναι ο συνολικός αριθμός των μονάδων, P_D ζήτηση ενέργειας, P_{ch}^{EV} και P_{dch}^{EV} το προφίλ φόρτισης και εκφόρτισης του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων αντίστοιχα, και P_{losses} είναι οι απώλειες του συστήματος μεταφοράς.

- ii. Όρια πραγματικής ισχύος

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

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

- iii. Περιορισμοί της στρεφόμενης εφεδρείας

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

όπου $P_{G,n}$ είναι η παραγωγή ενεργού ισχύος της μονάδας n και $P_{G,n}^{min}$, $P_{G,n}^{max}$ αποτελούν την ελάχιστη και τη μέγιστη ισχύ που η μονάδα n μπορεί να εγχύσει στο σύστημα, $P_{SR,n}$ η στρεφόμενη εφεδρεία που δίνει η μονάδα n , και $P_{SR,n}^{min}$ η ελάχιστη στρεφόμενη εφεδρεία της μονάδας n .

Με βάση τις ειδικές καταναλώσεις των μονάδων και τα κόστη του καυσίμου που χρησιμοποιούν προκύπτει το μεταβλητό κόστος καυσίμου για κάθε μονάδα (σε €/MWh) στα τρία επίπεδα φόρτισης. Για τα ενδιάμεσα σημεία φόρτισης της μονάδας το αντίστοιχο μεταβλητό κόστος λειτουργίας της προκύπτει με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

**Μελέτη συστήματος διανομής Σπερχειάδας
και ενεργειακού συστήματος Κρήτης**

Έχοντας παρουσιάσει στα προηγούμενα κεφάλαια όλους τους αλγορίθμους και τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση αυτής της εργασίας, θα προχωρήσουμε σε αυτό το κεφάλαιο στη μελέτη της επίδρασης που έχει η εισαγωγή ενός στόλου ηλεκτρικών οχημάτων σε ένα πραγματικό ενεργειακό σύστημα. Το κεφάλαιο αυτό θα χωριστεί σε δύο ενότητες.

Στην πρώτη ενότητα θα μελετηθεί η επίδραση που έχει η στρατηγική φόρτισης Vehicle-to-grid, σε σύγκριση με τις προηγούμενες στρατηγικές φόρτισης, στο σύστημα διανομής της Σπερχειάδας και θα παρουσιαστούν τα πλεονεκτήματα αυτού του τρόπου φόρτισης.

Στη δεύτερη ενότητα θα παρουσιαστεί και θα μελετηθεί το σύστημα της Κρήτης για τέσσερις διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης, συμπεριλαμβανομένου φυσικά και της φόρτισης V2G. Στο κομμάτι αυτό θα σχολιαστεί ο προγραμματισμός των μονάδων που χρησιμοποιούνται, το κόστος λειτουργίας, οι ρύποι που εκπέμπονται και το κόστος τους και άλλες σημαντικές παράμετροι.

5.1 Παρουσίαση και μελέτη του συστήματος διανομής της Σπερχειάδας

5.1.1. Περιγραφή των χαρακτηριστικών του συστήματος διανομής της Σπερχειάδας

Στην ενότητα αυτή θα εξετάσουμε πως επηρεάζεται το σύστημα διανομής της Σπερχειάδας με την αλλαγή των στρατηγικών φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Η υλοποίηση των στρατηγικών φόρτισης θα γίνει για μια τυχαία μέρα του χρόνου.

Όσον αφορά τις στρατηγικές φόρτισης, όπως αναφέραμε και στο Κεφάλαιο 2 θα παρουσιάσουμε 4 οι οποίες είναι οι παρακάτω:

1. Στρατηγική A: Μη ελεγχόμενη φόρτιση (Dumb charging)
2. Στρατηγική B: Ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο (dual tariff charging)
3. Στρατηγική C: Έξυπνη φόρτιση (Smart charging)
4. Στρατηγική D: Από το Όχημα στο Δίκτυο (Vehicle-to-grid)

Παρόλα αυτά, για το σύστημα διανομής της Σπερχειάδας θα αναπτύξουμε τη στρατηγική D σε τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις, οι οποίες θα διαφέρουν είτε στο ποσοστό συμμετοχής στις εφαρμογές V2G (PERC) είτε στο επίπεδο της μπαταρίας που θεωρούμε ότι πρέπει να έχουν όλα τα οχήματα στις 7 το πρωί (την ώρα δηλαδή που όλοι οι οδηγοί αρχίζουν να κινούνται προς τις δουλειές τους). Πιο συγκεκριμένα, οι επιπλέον στρατηγικές V2G που θα μελετήσουμε θα είναι:

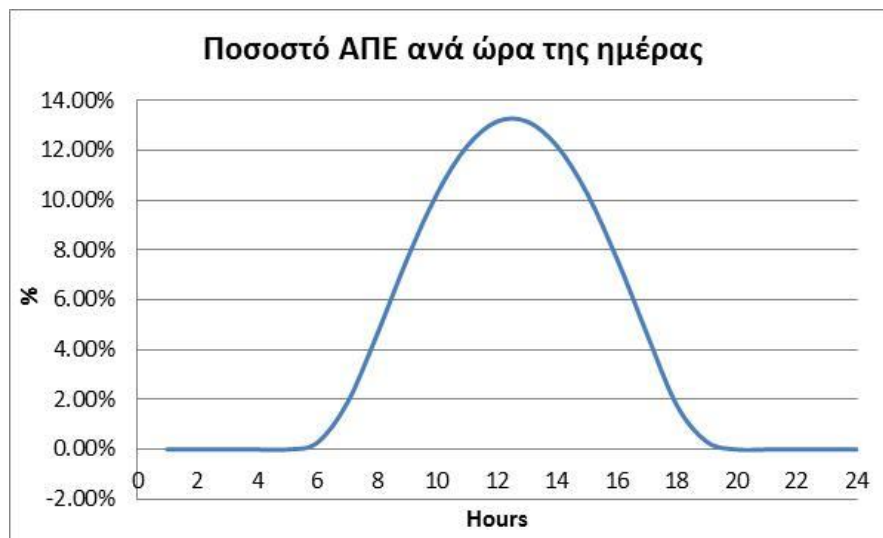
- a) Στρατηγική D1: φόρτιση με PERC=10% και SOC μπαταρίας=100%
- b) Στρατηγική D2: φόρτιση με PERC=20% και SOC μπαταρίας=100%
- c) Στρατηγική D3: φόρτιση με PERC=10% και SOC μπαταρίας=90%
- d) Στρατηγική D4: φόρτιση με PERC=10% και SOC μπαταρίας=80%

Όσον αφορά το στόλο των ηλεκτρικών οχημάτων, αυτός κυμαίνεται ανάμεσα στα 0 και τα 2000. Επιπλέον, θεωρούμε ότι η διείσδυση των ΑΠΕ κατά τη μελέτη μπορεί να είναι από 0 έως και 12 MW.

Τα στοιχεία τα οποία μελετάμε σε αυτή την ενότητα είναι η διακύμανση της τάσης ανά ζυγό, το προφίλ της τάσης των ζυγών καθώς και οι απώλειες του δικτύου. Ουσιαστικά, θα δείξουμε πως επηρεάζονται αυτές οι μεταβλητές σε σχέση με τις διάφορες στρατηγικές φόρτισης, με τον αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων που υπάρχουν στο δίκτυο και με την ποσότητα διείσδυσης των ΑΠΕ.

Σημείωση 1: Για όλες τις στρατηγικές φόρτισης, οι απώλειες του συστήματος θα συγκρίνονται με τις απώλειες του συστήματος στην περίπτωση που δεν έχουμε ούτε οχήματα ούτε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτή η τιμή είναι **2.025 MW**.

Σημείωση 2: Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που έχουμε διαθέσιμες στο δίκτυο της Σπερχειάδας είναι φωτοβολταϊκές μονάδες, επομένως δίνουν ισχύ κατά τη διάρκεια της ημέρας. Παρακάτω φαίνεται το ποσοστό των ΑΠΕ για κάθε ώρα της ημέρας:



Διάγραμμα 19: Ποσοστό ΑΠΕ ανά ώρα της ημέρας

5.1.2. Παρούσα κατάσταση του συστήματος διανομής της Σπερχειάδας χωρίς ηλεκτρικά οχήματα

Εδώ θα παρουσιάσουμε την τωρινή κατάσταση του συστήματος διανομής της Σπερχειάδας για μια τυχαία μέρα του χρόνου.

- ❖ Ημερήσια καμπύλη φορτίου

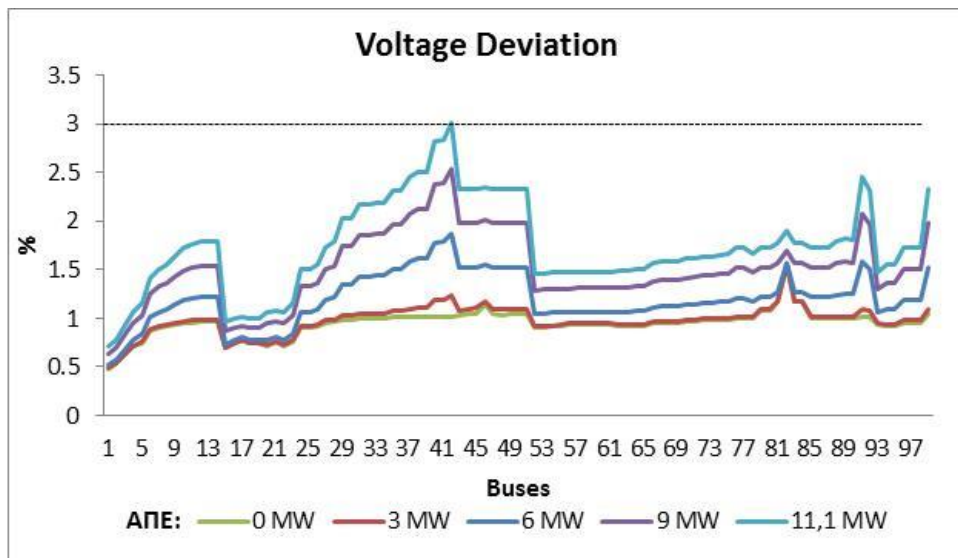
Στο επόμενο διάγραμμα φαίνεται η ημερήσια καμπύλη του φορτίου χωρίς την εισαγωγή οχημάτων, για δύο διαφορετικές τιμές ΑΠΕ (0 και 3 MW):



Διάγραμμα 20: Ημερήσιο φορτίο (Non EV case)

❖ Διακύμανση και προφίλ τάσης

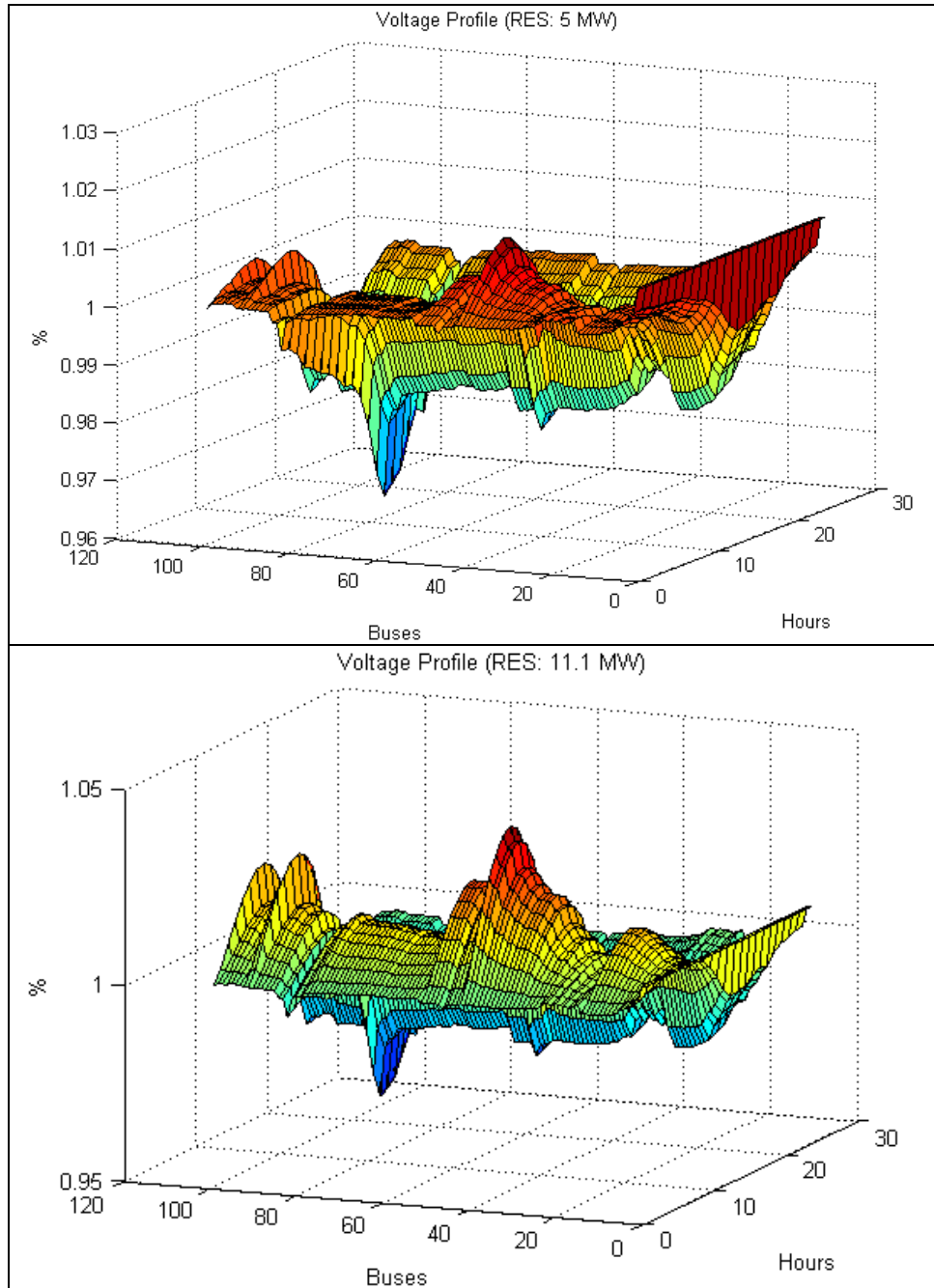
Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η διακύμανση της τάσης για την περίπτωση χωρίς οχήματα, για διάφορες τιμές ΑΠΕ.



Διάγραμμα 21: Διακύμανση τάσης για διάφορες τιμές ΑΠΕ (Non EV case)

Παρατηρούμε ότι με την αύξηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχουμε και αύξηση της διακύμανσης τάσης. Η διακύμανση της τάσης οφείλεται στο γεγονός ότι η διείσδυση των ΑΠΕ έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της τάσης των ζυγών στους οποίους συνδέονται. Αυτό φαίνεται

και στο διάγραμμα που δείχνει το προφίλ της τάσης. Όπως βλέπουμε το όριο των ΑΠΕ είναι κοντά στα 11 MW, αφού μετά από αυτή την τιμή η διακύμανση τάσης βγαίνει εκτός ορίων. Όσο για το προφίλ της τάσης ανά ζυγό και ανά ώρα της μέρας, παρουσιάζουμε παρακάτω την τιμή του για 2 τιμές ΑΠΕ:

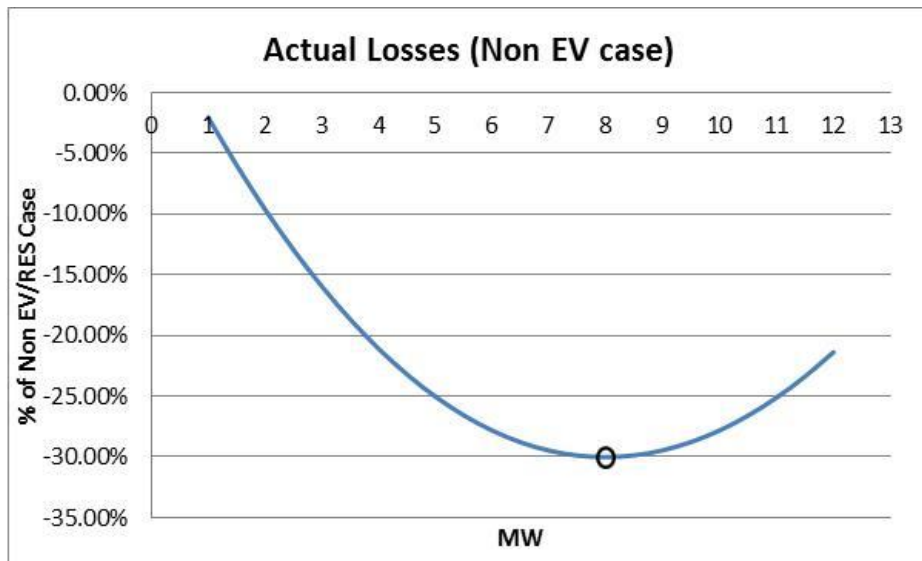


Διάγραμμα 22: Προφίλ τάσης για τιμές ΑΠΕ 5 και 11.1 MW (Non EV case)

Αυτό που παρατηρούμε από το παραπάνω διάγραμμα είναι ότι το προφίλ της τάσης είναι εντός των ορίων ($0.95 < \text{Voltage Profile \%} < 1.05$) ανεξαρτήτως της τιμής των εγκατεστημένων ΑΠΕ. Επομένως, η μέγιστη τιμή των ΑΠΕ καθορίζεται από τη διακύμανση της τάσης.

❖ Απώλειες συστήματος

Με την εισαγωγή των ΑΠΕ παρατηρείται μια μείωση των απωλειών του συστήματος. Η μείωση αυτή φτάνει την μέγιστη τιμή της σε μια δεδομένη τιμή ΑΠΕ, η οποία στην περίπτωση χωρίς οχήματα είναι τα 8 MW. Αυτό φαίνεται και στο επόμενο διάγραμμα:

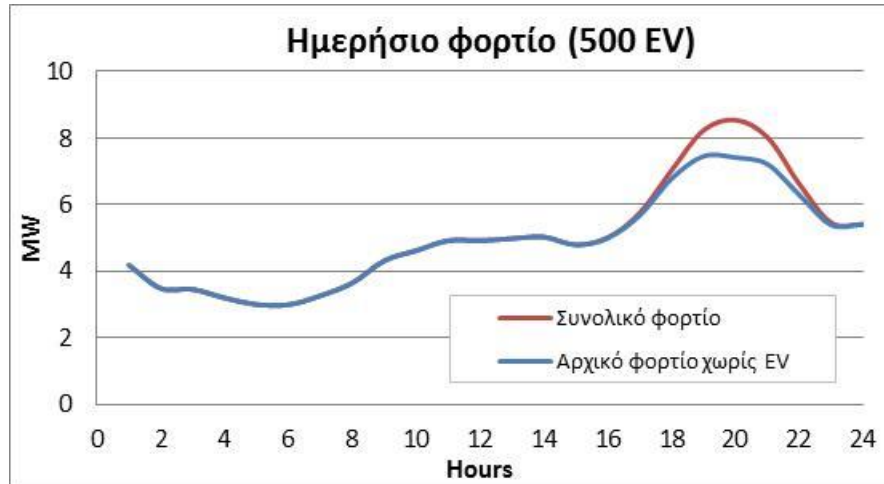


Διάγραμμα 23: Απώλειες συστήματος ανά MW (Non EV case)

5.1.3. Συμπεριφορά δικτύου διανομής με μη ελεγχόμενη φόρτιση (dumb charging)

❖ Ημερήσια καμπύλη φορτίου

Αρχικά, θα παρουσιάσουμε την καμπύλη φορτίου για την τυχαία μέρα που μελετάμε έτσι ώστε να δούμε πως πραγματοποιείται η φόρτιση με αυτή τη στρατηγική. Έστω ότι έχουμε αριθμό οχημάτων ίσο με 500:



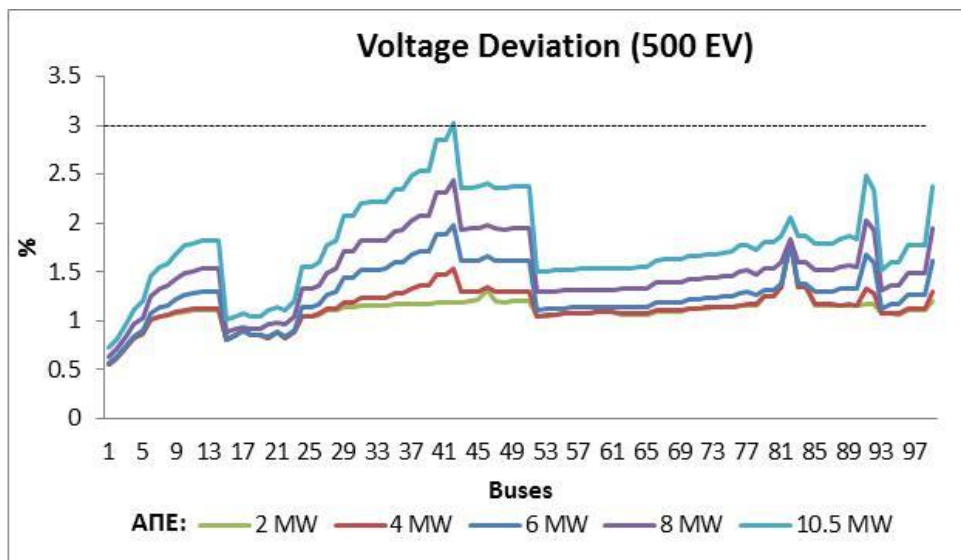
Διάγραμμα 24: Ημερήσιο φορτίο (dumb charging - 500 EV)

Παρατηρούμε ότι η φόρτιση γίνεται το βράδυ, όπως είχαμε πει και στο Κεφάλαιο 2.

❖ Διακύμανση και προφίλ τάσης

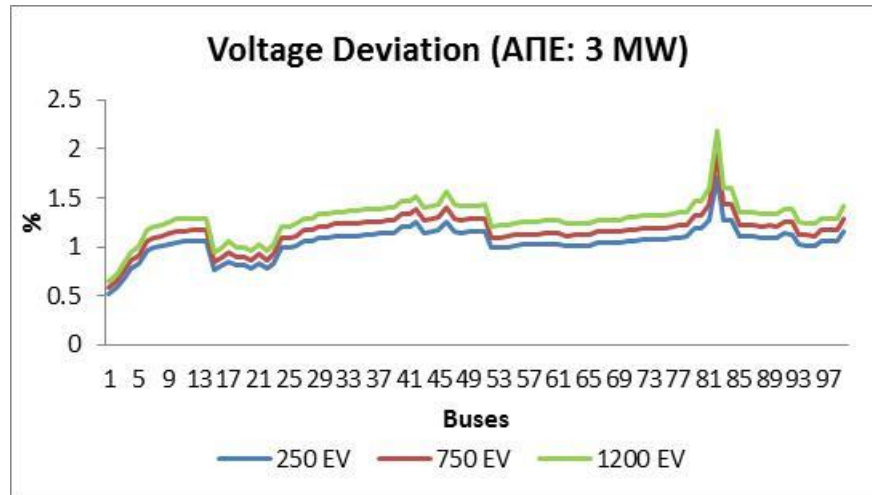
Όσον αφορά τη διακύμανση της τάσης, θα μελετήσουμε πως επηρεάζεται ανάλογα με τον αριθμό των οχημάτων που εισέρχονται καθώς και ανάλογα με το πόσα ΑΠΕ έχουμε στο δίκτυο.

Πρώτα θα δούμε το κατά πόσο επηρεάζεται η διακύμανση της τάσης του δικτύου από την εισαγωγή επιπλέον μονάδων ΑΠΕ στο σύστημα, για ένα τυχαίο αριθμό οχημάτων:



Διάγραμμα 25: Διακύμανση τάσης για διάφορες τιμές ΑΠΕ (dumb charging - 500 EV)

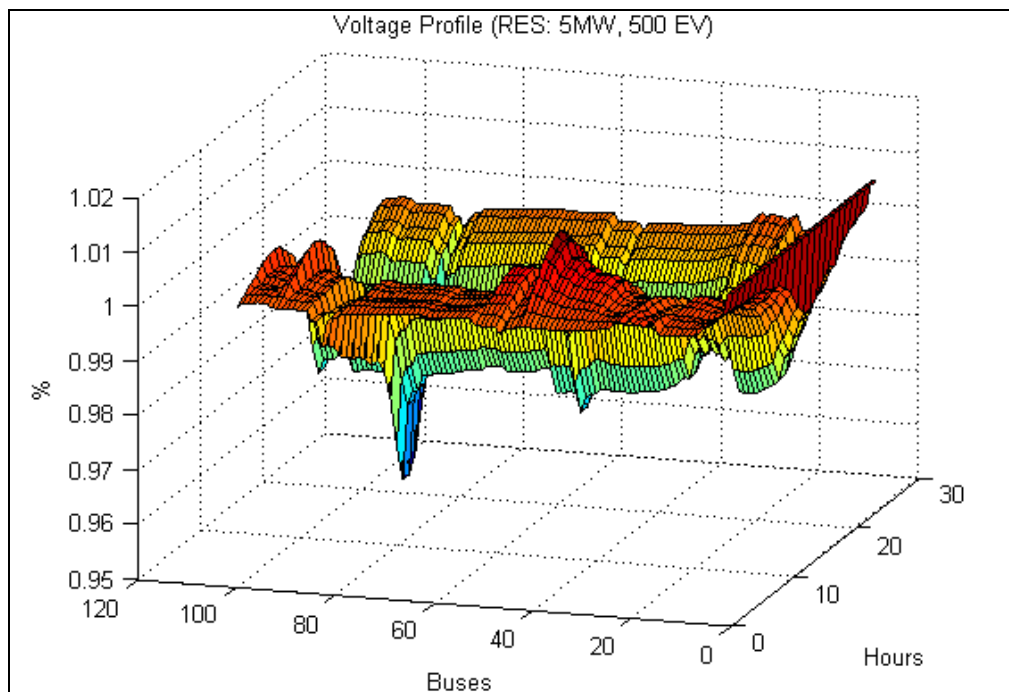
Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε την εξάρτηση της διακύμανσης τάσης από τον αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων, για συγκεκριμένη τιμή ΑΠΕ:

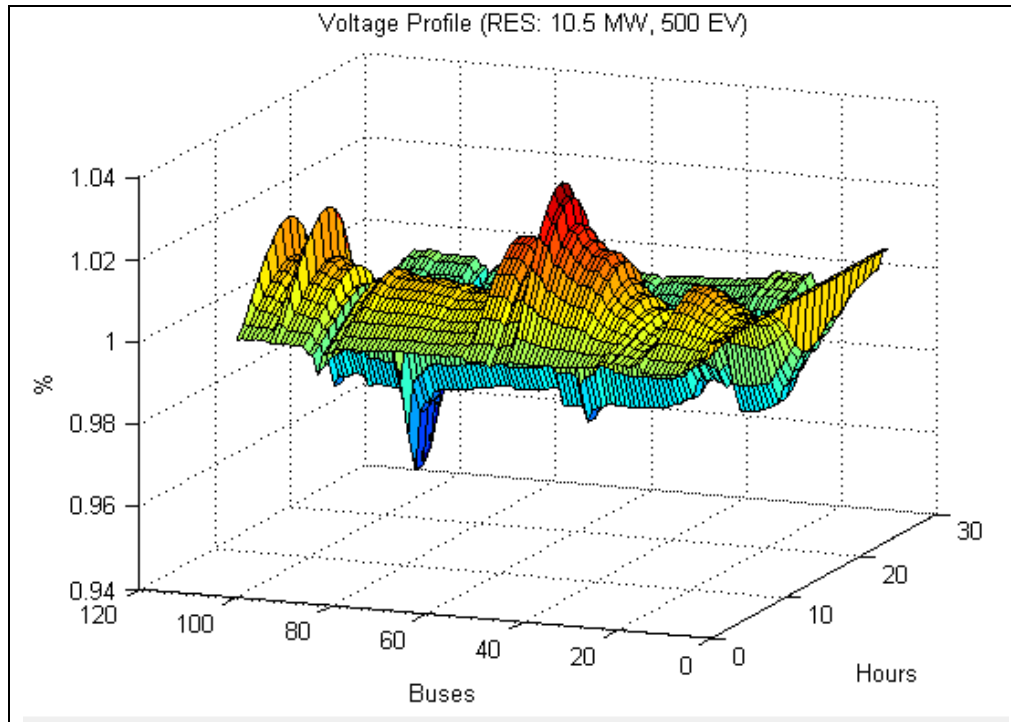


Διάγραμμα 26: Διακύμανση τάσης για διαφορετικό αριθμό οχημάτων (dumb charging – 3 MW)

Αποδεικνύεται ότι η εισαγωγή επιπλέον οχημάτων έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της διακύμανσης της τάσης, το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι το επιπλέον φορτίο των οχημάτων προστίθεται εκεί που έχουμε μέγιστο φορτίο δικτύου.

Όσον αφορά το προφίλ της τάσης, αυτό είναι μέσα στα όρια για όλες τις τιμές ΑΠΕ. Παρακάτω παρουσιάζεται σε 3D διάγραμμα το προφίλ της τάσης για δύο ενδεικτικές τιμές ΑΠΕ και για στόλο 500 ηλεκτρικών οχημάτων:



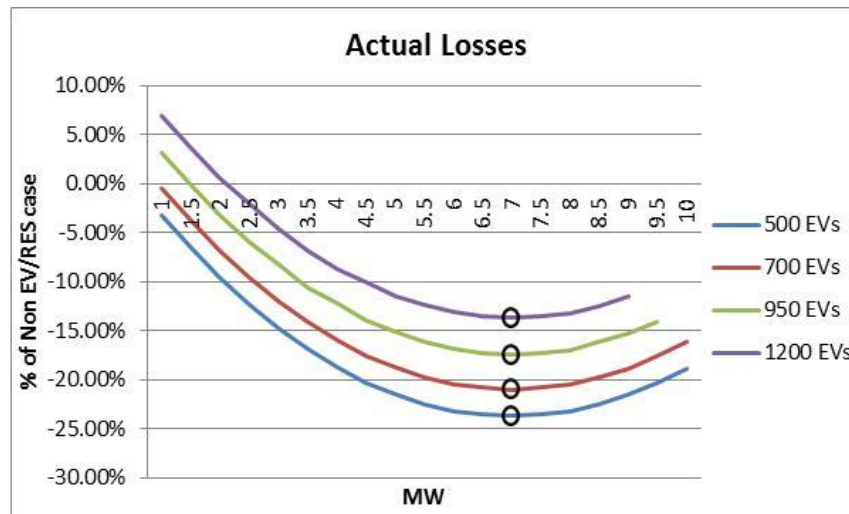


Διάγραμμα 27: Προφίλ τάσης για τιμές ΑΠΕ 5 και 10.5 MW (dumb charging - 500 EV)

Αφού το προφίλ της τάσης δεν βγαίνει εκτός ορίων, η μέγιστη τιμή των ΑΠΕ καθορίζεται από τη διακύμανση της τάσης.

❖ Απώλειες συστήματος

Οι απώλειες του συστήματος μετά την εισαγωγή των οχημάτων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Παρατηρούμε ότι οι ελάχιστες απώλειες εμφανίζονται για τιμή διείσδυσης ΑΠΕ ίση με 7 MW.



Διάγραμμα 28: Απώλειες συστήματος ανά MW για διαφορετικό αριθμό οχημάτων (dumb charging)

Οι απώλειες του συστήματος είναι λιγότερες όσο λιγότερα είναι τα ηλεκτρικά οχήματα, το οποίο είναι λογικό αφού με την εισαγωγή τους στο δίκτυο αυξάνεται το φορτίο της γραμμής. Ένα άλλο στοιχείο που παρατηρούμε στο παραπάνω διάγραμμα είναι ότι με την αύξηση των ηλεκτρικών οχημάτων μειώνεται η μέγιστη τιμή των ΑΠΕ που μπορούμε να έχουμε στο δίκτυο. Έτσι, ενώ με 500 οχήματα μπορούμε να έχουμε μέχρι και 10 MW ΑΠΕ, με 1200 οχήματα η ικανότητα για ΑΠΕ μειώνεται στα 9 MW. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με την dumb στρατηγική τα οχήματα προκαλούν αύξηση της πτώσης της τάσης κατά μήκος της γραμμής.

5.1.4. Συμπεριφορά δικτύου διανομής με ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο (dual tariff charging)

❖ Ημερήσια καμπύλη φορτίου

Αρχικά, θα παρουσιάσουμε την καμπύλη φορτίου για την τυχαία μέρα που μελετάμε έτσι ώστε να δούμε πως πραγματοποιείται η φόρτιση με αυτή τη στρατηγική. Έστω ότι έχουμε αριθμό οχημάτων ίσο με 500:



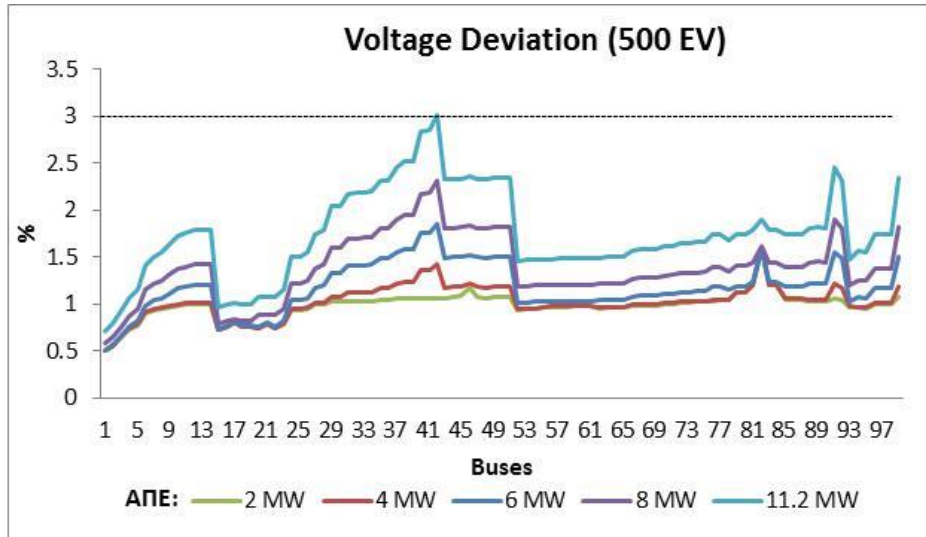
Διάγραμμα 29: Ημερήσιο φορτίο (dual tariff - 500 EV)

Παρατηρούμε ότι η φόρτιση πραγματοποιείται την ώρα έναρξης της χαμηλής τιμολόγησης της ενέργειας. Θα πρέπει να σημειώσουμε εδώ ότι αν και στην περίπτωση των 500 οχημάτων δεν έχουμε αλλαγή στο peak, με την αύξηση του αριθμού των οχημάτων είναι πιθανό η αιχμή του φορτίου του δικτύου να φτάσει σε μεγαλύτερα επίπεδα.

❖ Διακύμανση και προφίλ τάσης

Όσον αφορά τη διακύμανση της τάσης, θα μελετήσουμε πως επηρεάζεται ανάλογα με τον αριθμό των οχημάτων που εισέρχονται καθώς και ανάλογα με το πόσα ΑΠΕ έχουμε στο δίκτυο.

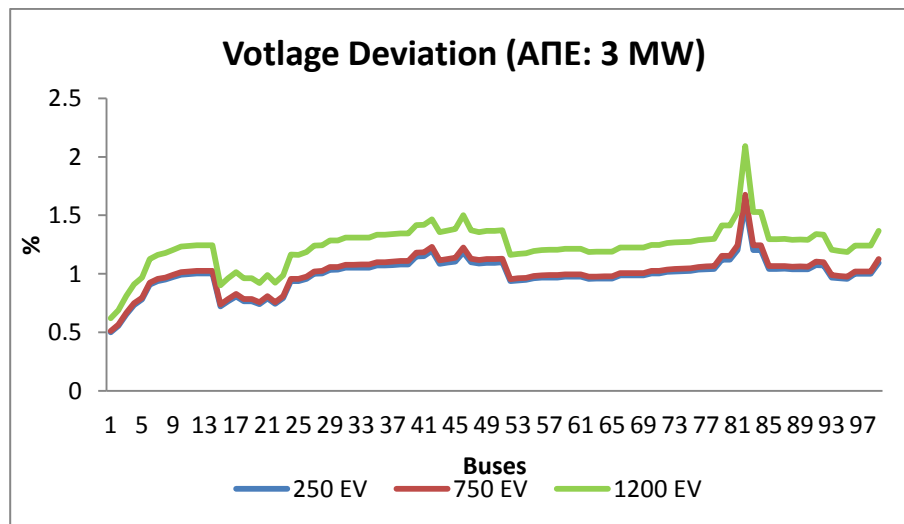
Πρώτα θα δούμε το κατά πόσο επηρεάζεται η διακύμανση της τάσης του δικτύου από την εισαγωγή επιπλέον μονάδων ΑΠΕ στο σύστημα, για ένα τυχαίο αριθμό οχημάτων:



Διάγραμμα 30: Διακύμανση τάσης για διάφορες τιμές ΑΠΕ (dual tariff - 500 EV)

Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά της στρατηγικής Α.

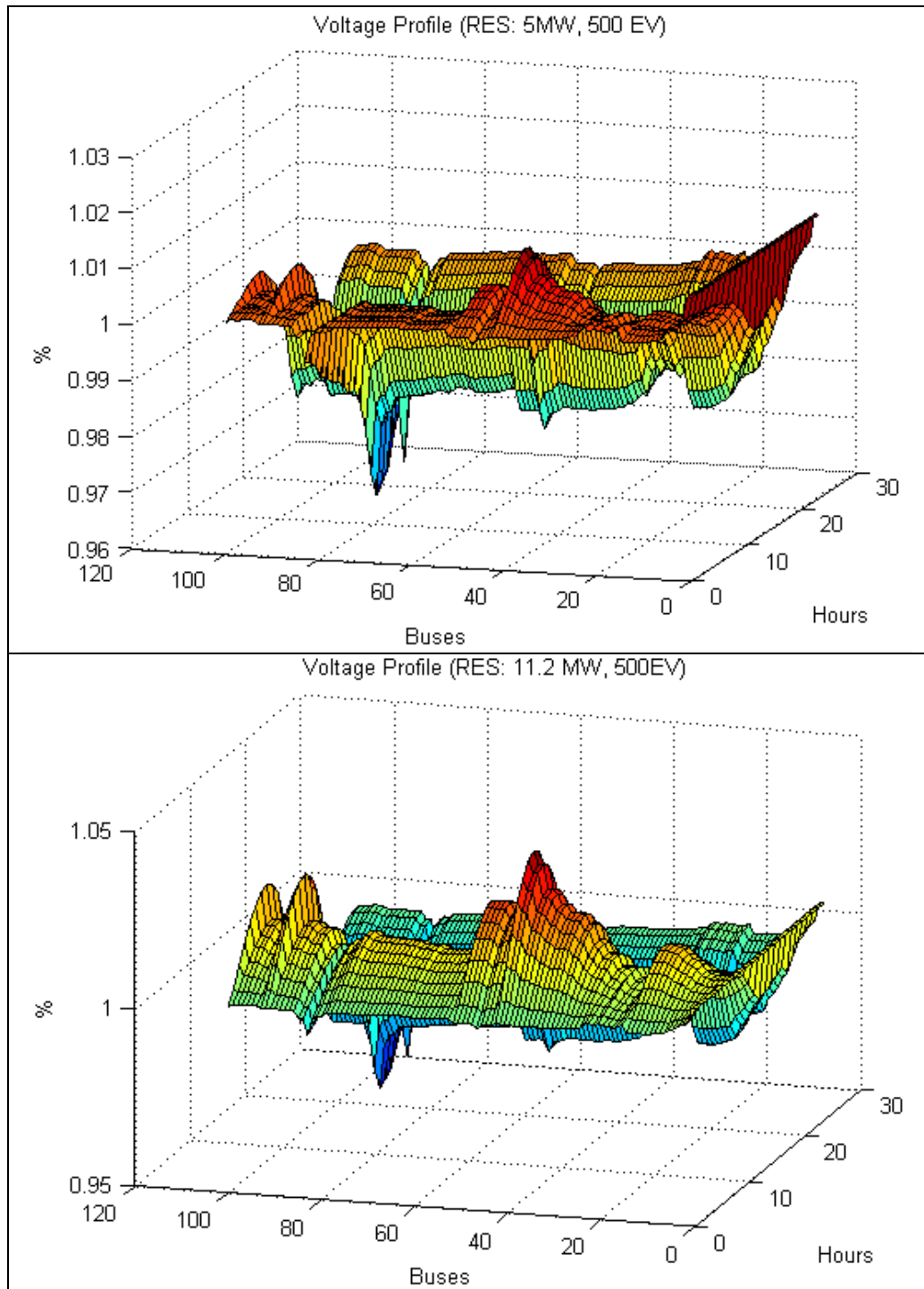
Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε την εξάρτηση της διακύμανσης τάσης από τον αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων, για συγκεκριμένη τιμή ΑΠΕ:



Διάγραμμα 31: Διακύμανση τάσης για διαφορετικό αριθμό οχημάτων (dual tariff - 3 MW)

Από το παραπάνω διάγραμμα καταλαβαίνουμε ότι μέχρι τα 750 ηλεκτρικά οχήματα, η διακύμανση της τάσης μένει ανεπηρέαστη καθώς δεν αλλάζουν τα όρια του φορτίου ζήτησης, ενώ για μεγαλύτερες τιμές οχημάτων έχουμε και αύξηση της διακύμανσης. Αυτό συμβαίνει διότι έχουμε αύξηση του φορτίου αιχμής του δικτύου.

Όσον αφορά το προφίλ της τάσης, αυτό είναι μέσα στα όρια για όλες τις τιμές ΑΠΕ. Παρακάτω παρουσιάζεται σε 3D διάγραμμα το προφίλ της τάσης για δύο ενδεικτικές τιμές ΑΠΕ και για στόλο 500 ηλεκτρικών οχημάτων:

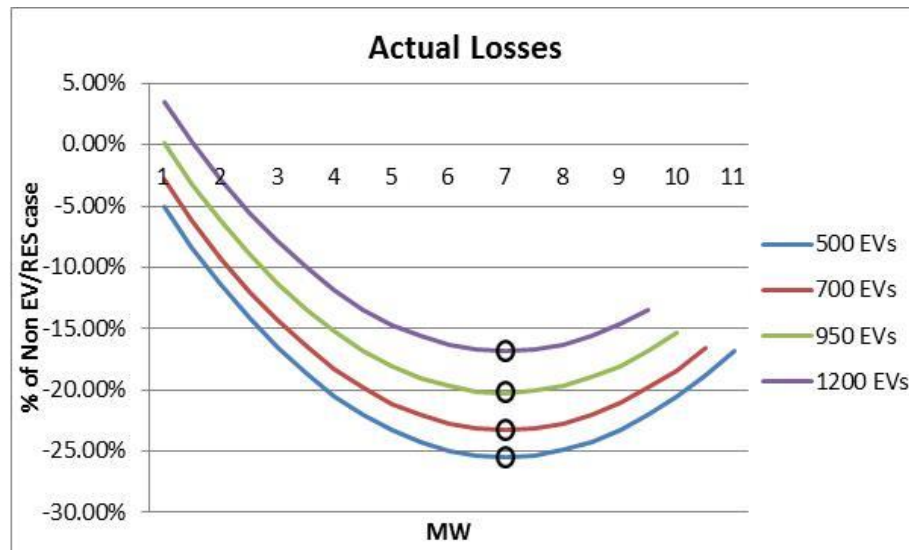


Διάγραμμα 32: Προφίλ τάσης για τιμές ΑΠΕ 5 και 11.2 MW (dual tariff - 500 EV)

Αφού το προφίλ της τάσης δεν βγαίνει εκτός ορίων, η μέγιστη τιμή των ΑΠΕ καθορίζεται από τη διακύμανση της τάσης.

❖ Απώλειες συστήματος

Οι απώλειες του συστήματος μετά την εισαγωγή των οχημάτων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Παρατηρούμε ότι οι ελάχιστες απώλειες εμφανίζονται για τιμή διείσδυσης ΑΠΕ ίση με 7 MW.



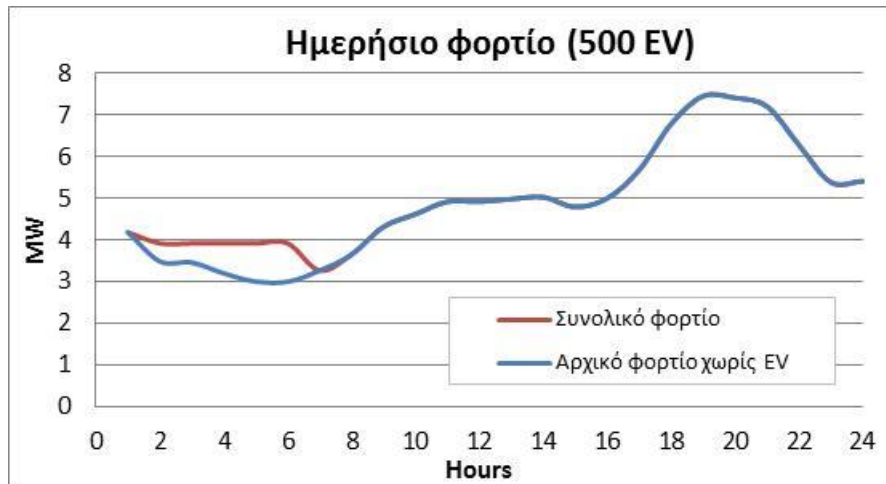
Διάγραμμα 33: Απώλειες συστήματος ανά MW για διαφορετικό αριθμό οχημάτων (dual tariff)

Παρατηρούμε και πάλι ότι με την αύξηση των ηλεκτρικών οχημάτων μειώνεται η μέγιστη τιμή των ΑΠΕ που μπορούμε να έχουμε στο δίκτυο. Έτσι, ενώ με 500 οχήματα μπορούμε να έχουμε μέχρι και 11 MW ΑΠΕ, με 1200 οχήματα η ικανότητα για ΑΠΕ μειώνεται στα 9.5 MW.

5.1.5. Συμπεριφορά δικτύου διανομής με έξυπνη φόρτιση (smart charging)

❖ Ημερήσια καμπύλη φορτίου

Αρχικά, θα παρουσιάσουμε την καμπύλη φορτίου για την τυχαία μέρα που μελετάμε έτσι ώστε να δούμε πως πραγματοποιείται η φόρτιση με αυτή τη στρατηγική. Έστω ότι έχουμε αριθμό οχημάτων ίσο με 500:



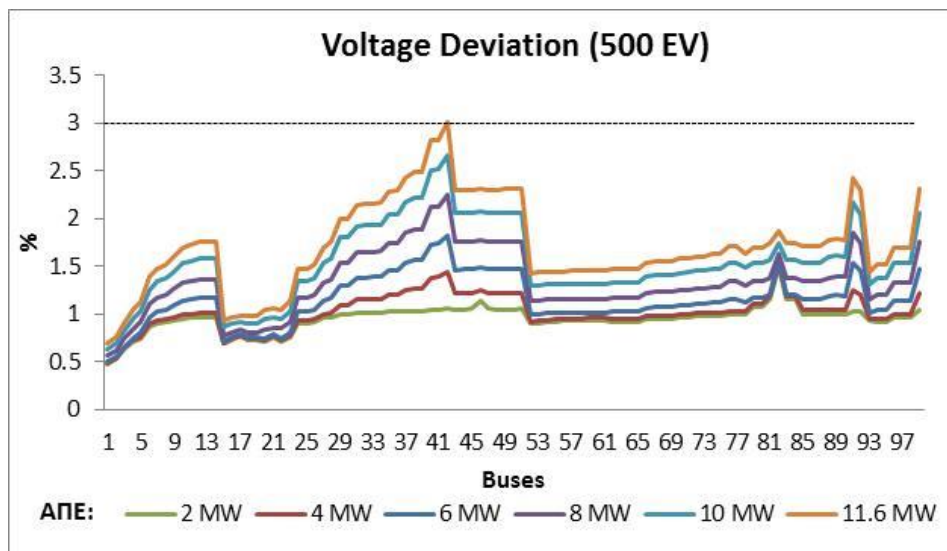
Διάγραμμα 34: Ημερήσιο φορτίο (smart charging - 500 EV)

Παρατηρούμε ότι η φόρτιση πραγματοποιείται τις πρώτες πρωινές ώρες, εκεί όπου η ζήτηση είναι χαμηλότερη.

❖ Διακύμανση και προφίλ τάσης

Όσον αφορά τη διακύμανση της τάσης, θα μελετήσουμε πως επηρεάζεται ανάλογα με τον αριθμό των οχημάτων που εισέρχονται καθώς και ανάλογα με το πόσα ΑΠΕ έχουμε στο δίκτυο.

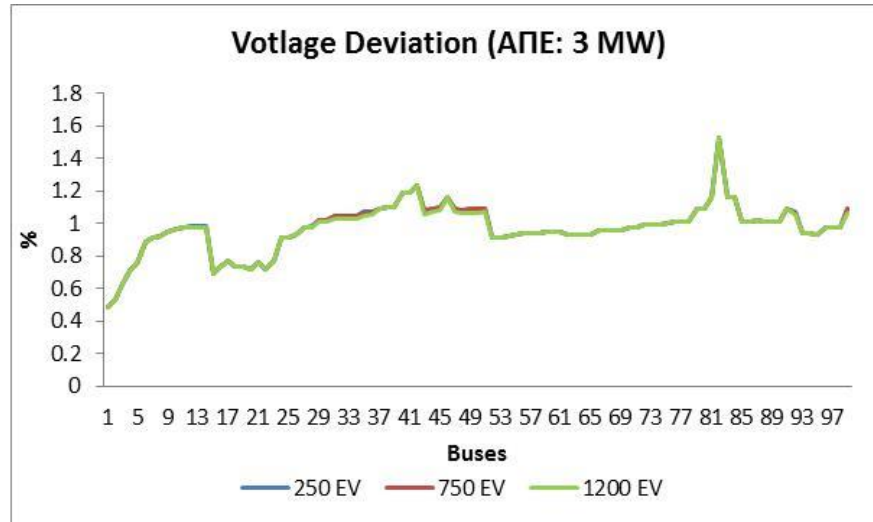
Πρώτα θα δούμε το κατά πόσο επηρεάζεται η διακύμανση της τάσης του δικτύου από την εισαγωγή επιπλέον μονάδων ΑΠΕ στο σύστημα, για ένα τυχαίο αριθμό οχημάτων:



Διάγραμμα 35: Διακύμανση τάσης για διάφορες τιμές ΑΠΕ (smart charging - 500 EV)

Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά των στρατηγικών Α και Β.

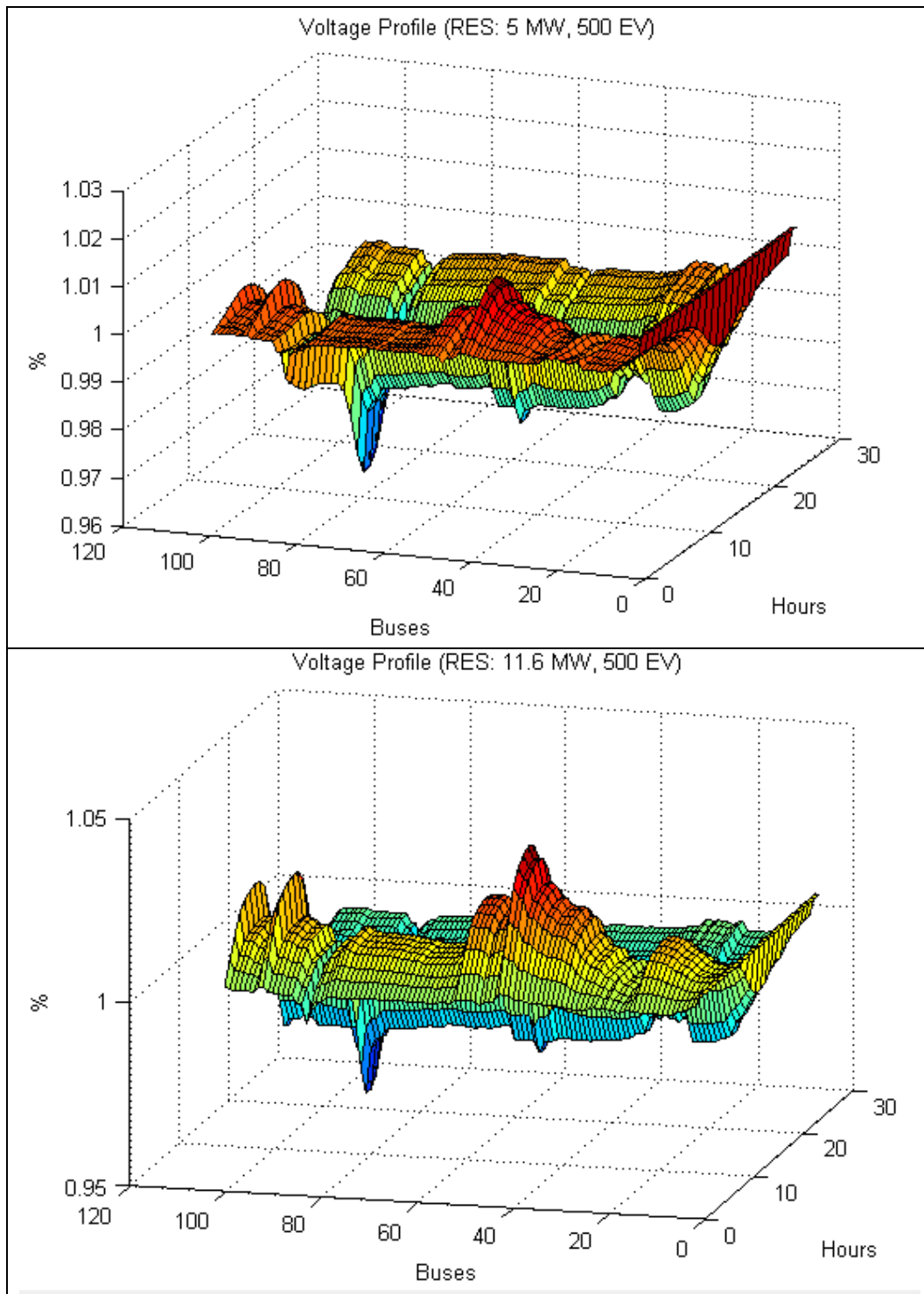
Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε την εξάρτηση της διακύμανσης τάσης από τον αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων, για συγκεκριμένη τιμή ΑΠΕ:



Διάγραμμα 36: Διακύμανση τάσης για διαφορετικό αριθμό οχημάτων (smart charging – 3 MW)

Από το διάγραμμα αυτό καταλαβαίνουμε ότι εξαιτίας του ότι τα οχήματα δεν φορτίζουν τις ώρες αιχμής, η διακύμανση της τάσης παραμένει σταθερή. Έτσι, μπορούμε να έχουμε μεγαλύτερη εισαγωγή οχημάτων χωρίς προβλήματα στη διακύμανση της τάσης.

Όσον αφορά το προφίλ της τάσης, αυτό είναι μέσα στα όρια για όλες τις τιμές ΑΠΕ. Παρακάτω παρουσιάζεται σε 3D διάγραμμα το προφίλ της τάσης για δύο ενδεικτικές τιμές ΑΠΕ και για στόλο 500 ηλεκτρικών οχημάτων:

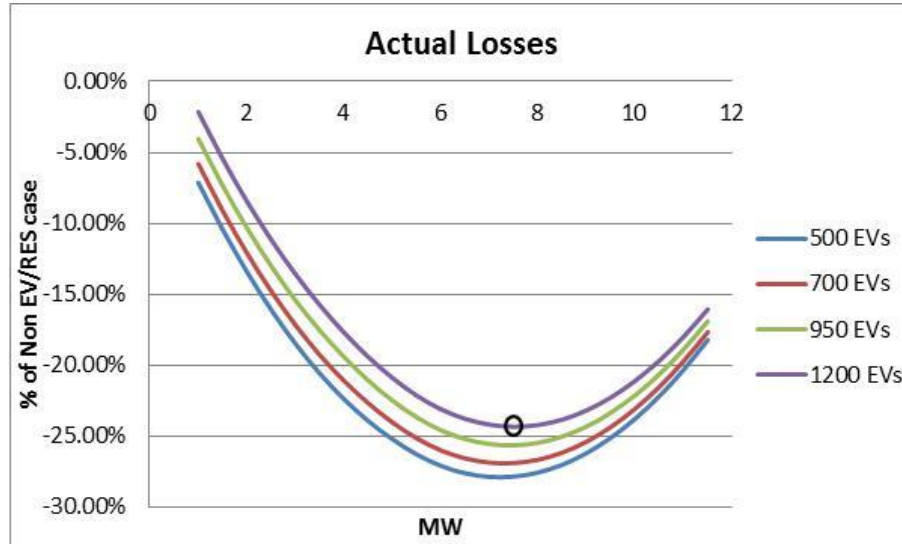


Διάγραμμα 37: Προφίλ τάσης για τιμές ΑΠΕ 5 και 11.6 MW (smart charging - 500 EV)

Αφού το προφίλ της τάσης δεν βγαίνει εκτός ορίων, η μέγιστη τιμή των ΑΠΕ καθορίζεται από τη διακύμανση της τάσης.

❖ Απώλειες συστήματος

Οι απώλειες του συστήματος μετά την εισαγωγή των οχημάτων φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Παρατηρούμε ότι οι ελάχιστες απώλειες εμφανίζονται για τιμή διείσδυσης ΑΠΕ ίση με 7 MW.



Διάγραμμα 38: Απώλειες συστήματος ανά MW για διαφορετικό αριθμό οχημάτων (smart charging)

Σε αντίθεση με τις προηγούμενες στρατηγικές, όταν εφαρμόζουμε έξυπνη φόρτιση δεν έχουμε μείωση της μέγιστης τιμής εισαγωγής ΑΠΕ με την αύξηση του αριθμού των οχημάτων, καθώς το φορτίο που προστίθεται από τα οχήματα κατανέμεται τις ώρες που έχουμε μειωμένη ζήτηση, και έτσι τα επιπλέον οχήματα δεν δημιουργούν προβλήματα στο δίκτυο.

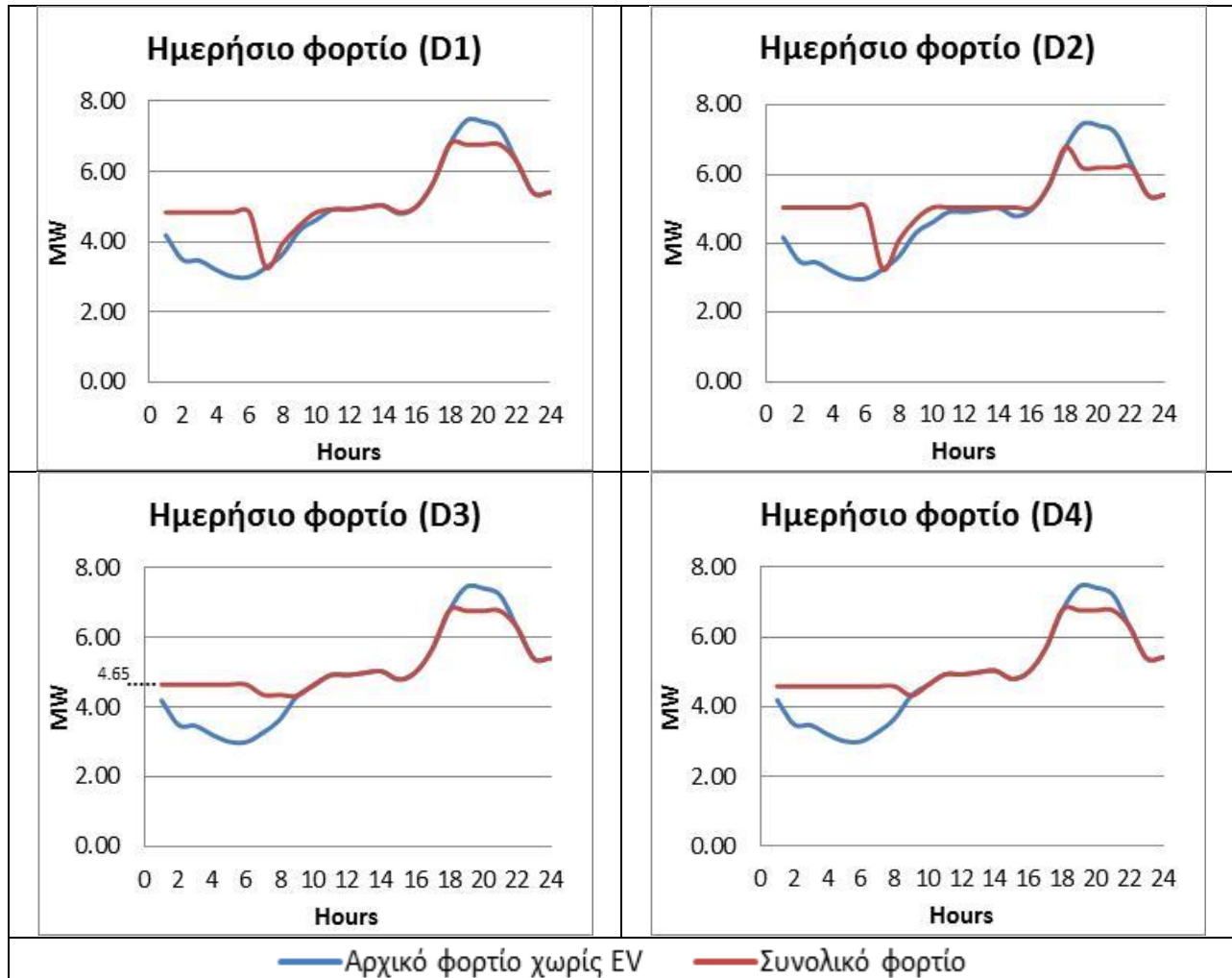
5.1.6. Συμπεριφορά δικτύου διανομής με φόρτιση που περιλαμβάνει εφαρμογή V2G (vehicle-to-grid)

Όπως αναφέραμε και στην αρχή της ενότητας, θα αναλύσουμε και θα μελετήσουμε 4 διαφορετικές περιπτώσεις για τη στρατηγική D, με σκοπό να δούμε ποια παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα. Αυτές είναι οι:

- Στρατηγική D1: φόρτιση με PERC=10% και SOC μπαταρίας=100%
- Στρατηγική D2: φόρτιση με PERC=20% και SOC μπαταρίας=100%
- Στρατηγική D3: φόρτιση με PERC=10% και SOC μπαταρίας=90%
- Στρατηγική D4: φόρτιση με PERC=10% και SOC μπαταρίας=80%

❖ Ημερήσια καμπύλη φορτίου

Οι καμπύλες φορτίου για τις 4 διαφορετικές περιπτώσεις, για αριθμό οχημάτων ίσο με **1000** και ΑΠΕ **3 MW**, φαίνονται παρακάτω:



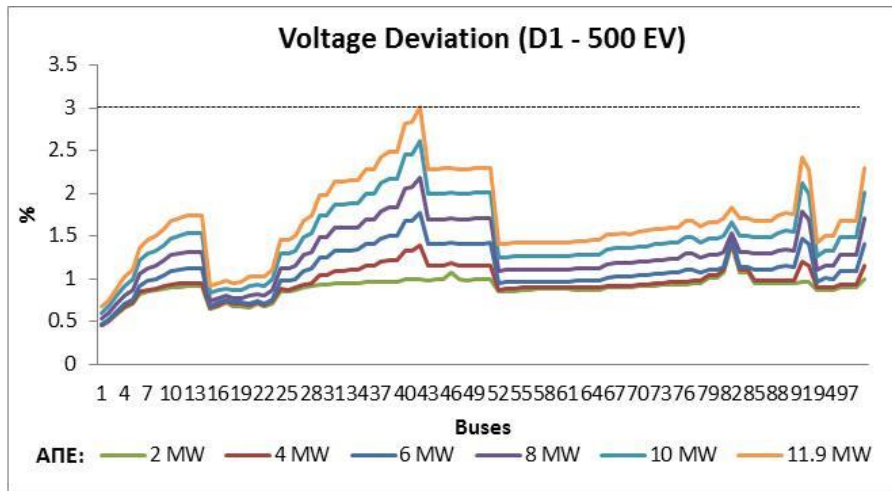
Διάγραμμα 39: Ημερήσιο φορτίο για τις 4 περιπτώσεις της στρατηγικής D (1000 EV)

Από τα παραπάνω διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι στις περιπτώσεις όπου το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας είναι μικρότερο από 100% στις 7 το πρωί, όπως έχουμε υποθέσει, έχουμε καλύτερη κατανομή του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων. Πιο συγκεκριμένα, στις περιπτώσεις D1, D2 με 100% SOC η ζήτηση κάνει μια απότομη κλίση στις 7 το πρωί η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι τα οχήματα τις ώρες 7, 8 και 9 αρχίζουν τις μετακινήσεις τους και δεν υπάρχει διαθεσιμότητα για φόρτιση. Αντίθετα, όταν το SOC στις 7 το πρωί είναι μικρότερο από 100% τότε ακόμα και όταν αρχίζει να φεύγει η μία ομάδα οχημάτων, οι άλλες δύο ομάδες οχημάτων εκείνη την ώρα συνεχίζουν να φορτίζουν.

❖ Διακύμανση και προφίλ τάσης

Όσον αφορά τη διακύμανση της τάσης, θα μελετήσουμε πως επηρεάζεται ανάλογα με τον αριθμό των οχημάτων που εισέρχονται καθώς και ανάλογα με το πόσα ΑΠΕ έχουμε στο δίκτυο.

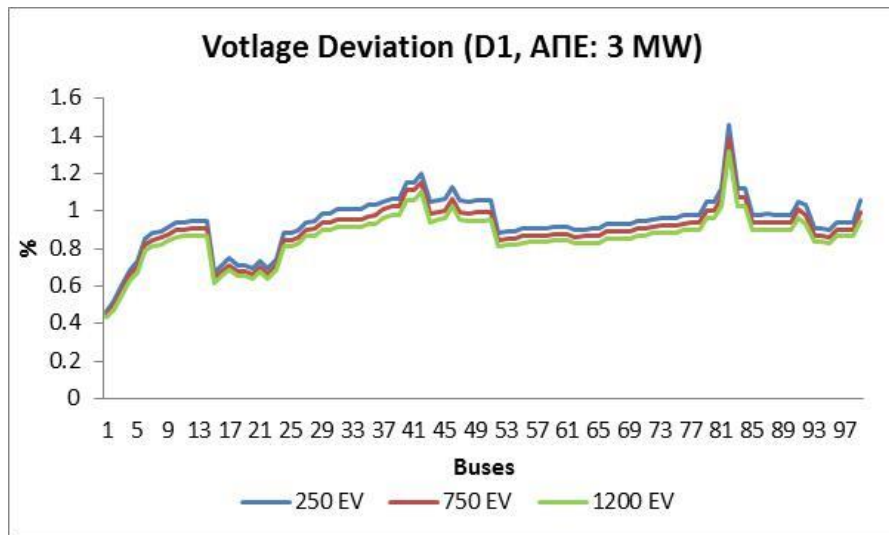
Πρώτα θα δούμε το κατά πόσο επηρεάζεται η διακύμανση της τάσης του δικτύου από την εισαγωγή επιπλέον μονάδων ΑΠΕ στο σύστημα, για μία από τις τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις. Αναφέρουμε μόνο μία από τις τέσσερις καθώς όσον αφορά τη διακύμανση τάσης παρουσιάζουν όλες παρόμοια συμπεριφορά:



Διάγραμμα 40: Διακύμανση τάσης για διάφορες τιμές ΑΠΕ (στρατηγική V2G - 500 EV)

Τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με των προηγούμενων στρατηγικών φόρτισης.

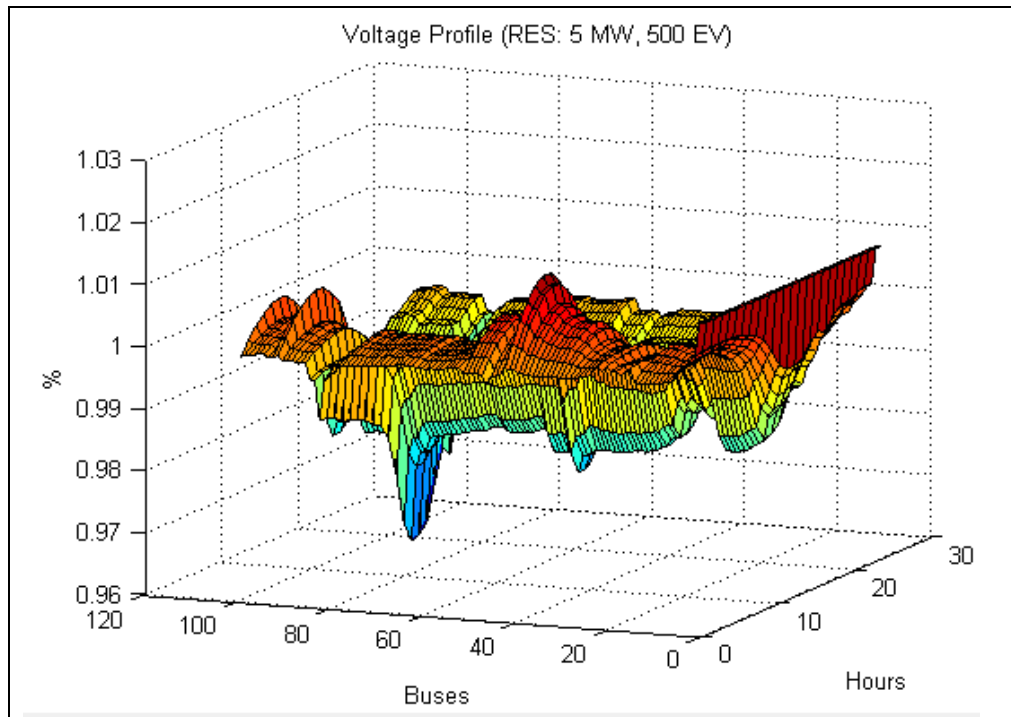
Στη συνέχεια θα εξετάσουμε τη σχέση που έχει η αύξηση των ηλεκτρικών οχημάτων με τη διακύμανση της τάσης:

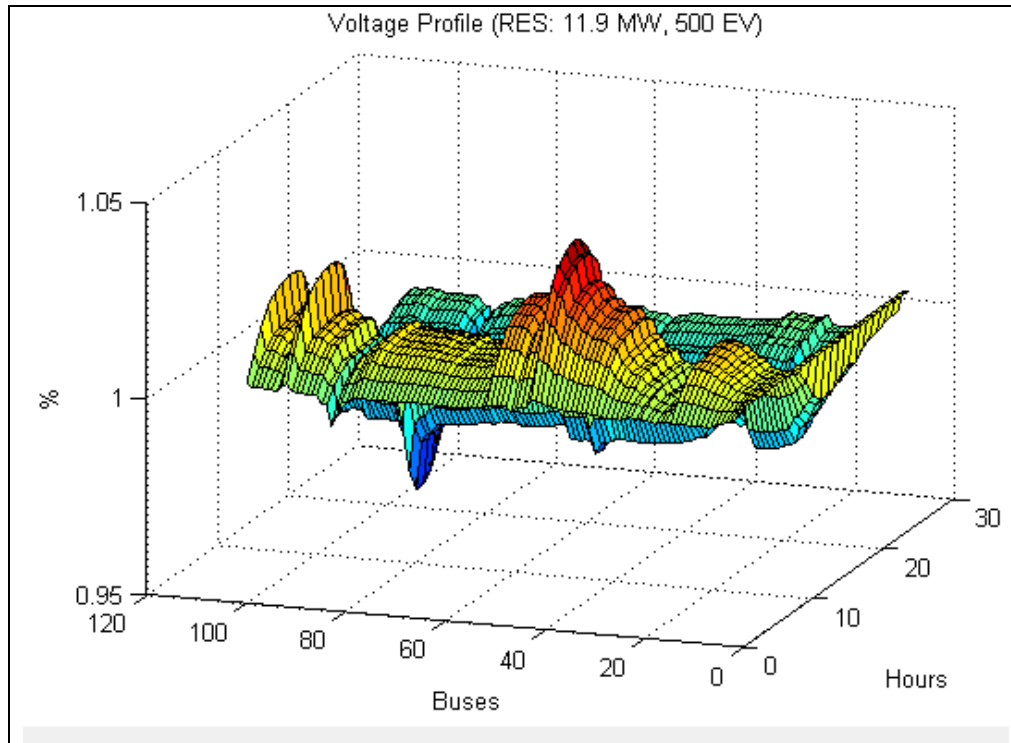


Διάγραμμα 41: Διακύμανση τάσης για διαφορετικό αριθμό οχημάτων (στρατηγική V2G - 3 MW)

Από το παραπάνω διάγραμμα καταλαβαίνουμε ότι, σε αντίθεση με τις προηγούμενες στρατηγικές A, B και C, στις στρατηγικές D (ισχύει για όλες τις περιπτώσεις) έχουμε μείωση της διακύμανσης τάσης όσο αυξάνουμε τον αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο συνδυασμός φόρτισης στις ώρες μη αιχμής και η επιστροφή ενέργειας στο δίκτυο τις ώρες αιχμής μειώνει τις διακυμάνσεις τάσεις που παρουσιάζονται στο ζυγούς του συστήματος.

Όσον αφορά το προφίλ της τάσης, αυτό είναι μέσα στα όρια για όλες τις τιμές ΑΠΕ. Παρακάτω παρουσιάζεται σε 3D διάγραμμα το προφίλ της τάσης για δύο ενδεικτικές τιμές ΑΠΕ και για στόλο 500 ηλεκτρικών οχημάτων και για την περίπτωση D1:



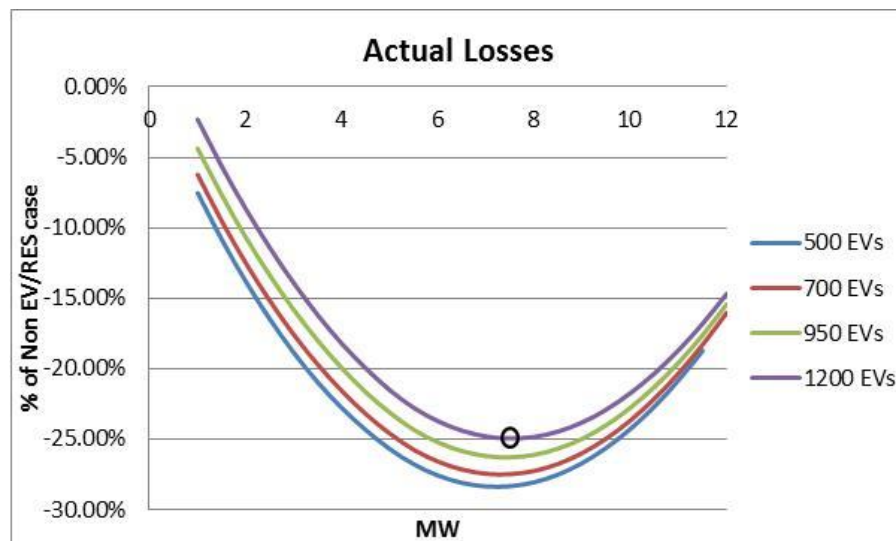


Διάγραμμα 42: Προφίλ τάσης για τιμές ΑΠΕ 5 και 11.9 MW (στρατηγική V2G - 500 EV)

Αφού το προφίλ της τάσης δεν βγαίνει εκτός ορίων, η μέγιστη τιμή των ΑΠΕ καθορίζεται από τη διακύμανση της τάσης.

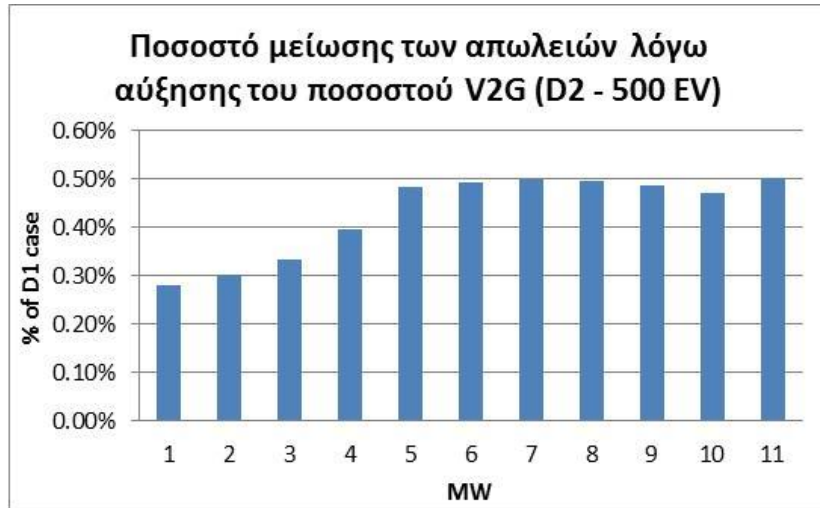
❖ Απώλειες συστήματος

Για οποιαδήποτε από τις στρατηγικές D, η σχέση μεταξύ απωλειών και ισχύος ΑΠΕ είναι η εξής:



Διάγραμμα 43: Απώλειες συστήματος ανά MW για διαφορετικό αριθμό οχημάτων (στρατηγική V2G)

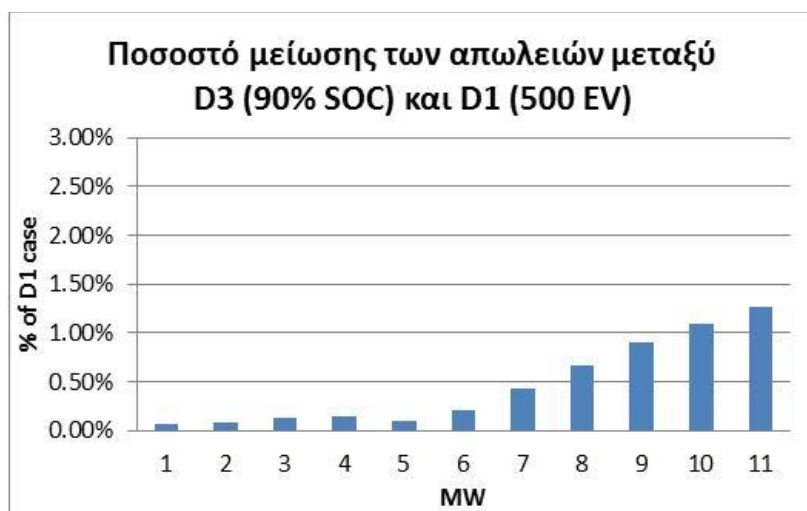
Μεταξύ των στρατηγικών D1 και D2 στις οποίες έχουμε ίδιο επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας αλλά διαφορετικό ποσοστό PERC (10% και 20% αντίστοιχα), οι απώλειες έχουν ως εξής:



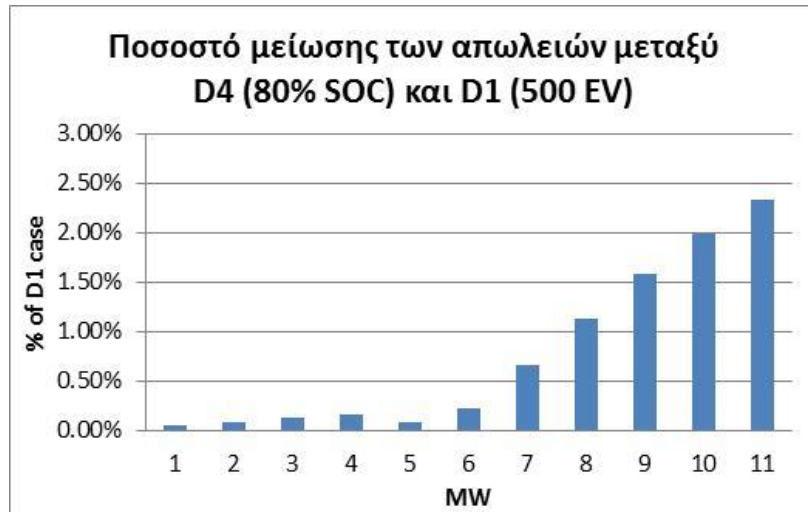
Διάγραμμα 44: Ποσοστό μείωσης των απωλειών συστήματος λόγω αύξησης του ποσοστού PERC

Το συμπέρασμα που προκύπτει από το παραπάνω διάγραμμα είναι ότι με την αύξηση του ποσοστού συμμετοχής της V2G λειτουργίας έχουμε μια μικρή μείωση στις απώλειες του συστήματος. Μάλιστα, το ποσοστό αυτό γίνεται μέγιστο για μεγαλύτερες τιμές ΑΠΕ, δηλαδή για 7 και 8 MW.

Στη συνέχεια, θα δείξουμε το ποσοστό κατά το οποίο μειώνονται οι απώλειες του συστήματος όταν υλοποιούμε στρατηγικές φόρτισης στις οποίες το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας στις 7 το πρωί είναι χαμηλότερο του 100% (π.χ. 90 ή 80%).



Διάγραμμα 45: Ποσοστό μείωσης των απωλειών της στρατηγικής D3 συναρτήσει της D1



Διάγραμμα 46: Ποσοστό μείωσης των απωλειών της στρατηγικής D4 συναρτήσει της D1

Συμπέρασμα: Αν και για διείσδυση ΑΠΕ μέχρι 5 MW το αρχικό επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας δεν παίζει σημαντικό ρόλο στις απώλειες, για διείσδυση από 6 MW και πάνω οι απώλειες μειώνονται αρκετά με τη μείωση του επιπέδου φόρτισης της μπαταρίας. Μάλιστα, όσο μειώνεται το επίπεδο της μπαταρίας τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση των απωλειών.

❖ Διείσδυση ΑΠΕ

Πέραν των απωλειών του συστήματος, οι εναλλακτικές περιπτώσεις της στρατηγικής D μπορούν να οδηγήσουν και στην καλύτερη εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το αποτέλεσμα αυτό φαίνεται στον παρακάτω πίνακα, όπου απεικονίζεται η μέγιστη διείσδυση ΑΠΕ που μπορούμε να έχουμε για κάθε μία από τις 4 περιπτώσεις (για αριθμούς οχημάτων 2000, 3000 και 4000):

Αριθμός Οχημάτων	Μέγιστη απορρόφηση ΑΠΕ ανά στρατηγική			
	D1	D2	D3	D4
2,000	12.9 MW	13.2 MW	13.5 MW	14 MW
3,000	13.4 MW	13.65 MW	14.25 MW	14.9 MW
4,000	13.65 MW	13.9 MW	14.75 MW	15.85 MW

Παρατηρούμε ότι για κάθε περίπτωση φόρτισης έχουμε διαφορετική τιμή μέγιστης εγκατεστημένης ισχύος ΑΠΕ. Αυτή η διαφορά γίνεται ακόμα μεγαλύτερα με την αύξηση του συνολικού αριθμού των ηλεκτρικών οχημάτων.

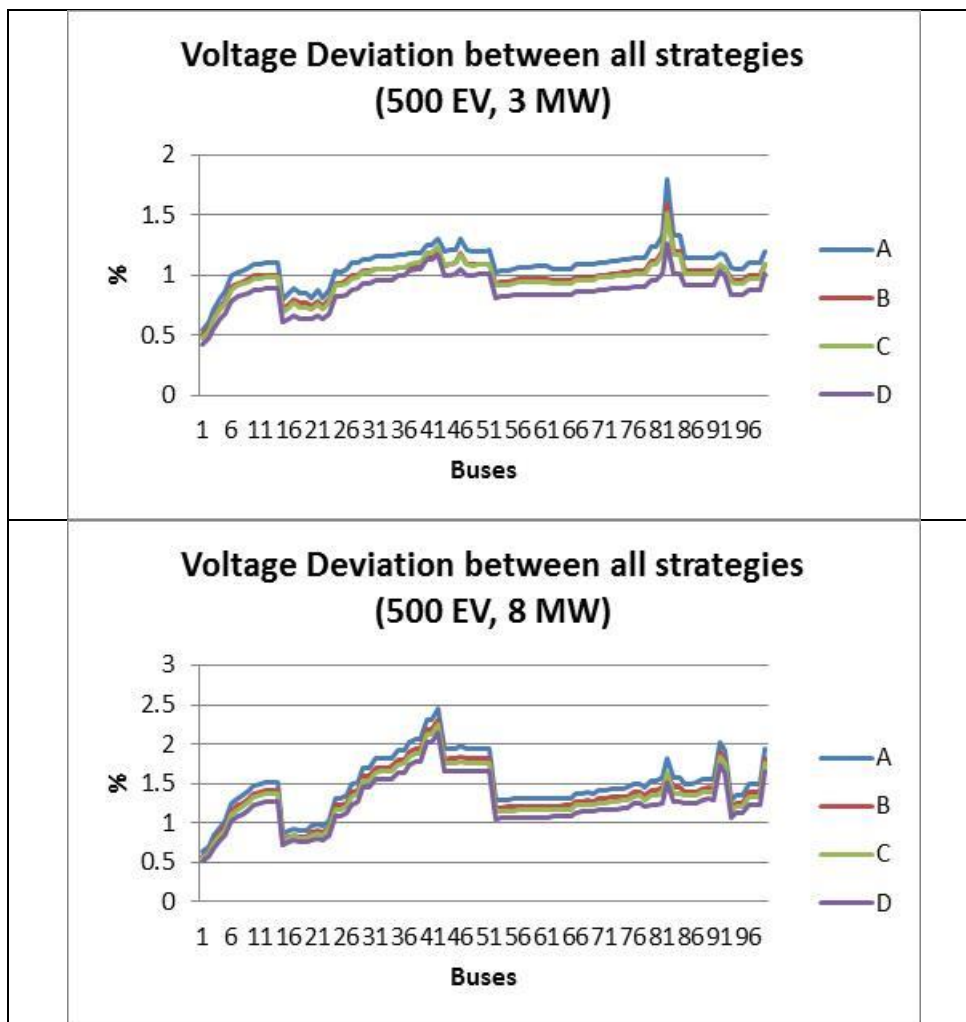
5.1.7. Σύγκριση αποτελεσμάτων μεταξύ των 4 στρατηγικών φόρτισης στο δίκτυο διανομής της Σπερχειάδας

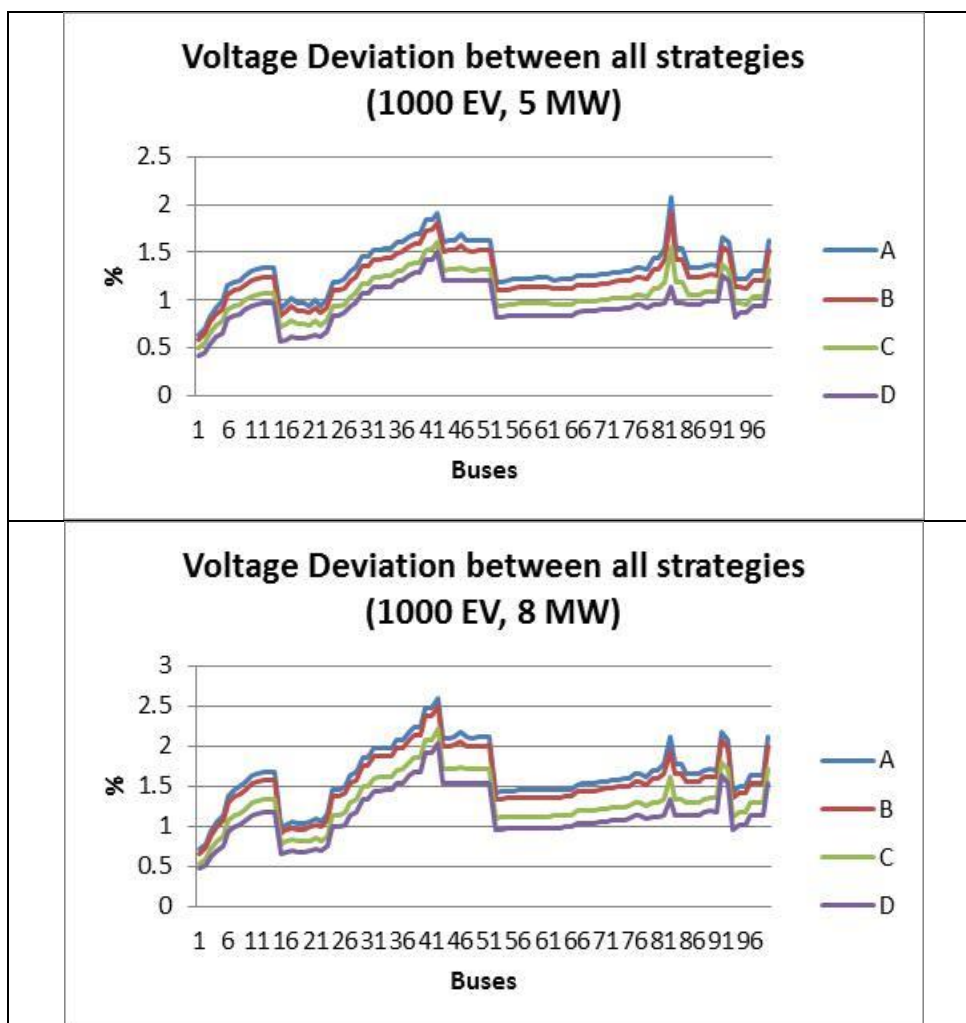
Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε τα συνολικά αποτελέσματα της υλοποίησης των τεσσάρων διαφορετικών στρατηγικών φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο της Σπερχειάδας, με σκοπό να βρούμε τα πλεονεκτήματα που υπάρχουν με την εφαρμογή της στρατηγικής φόρτισης V2G.

Σημείωση: Στη σύγκριση μεταξύ των στρατηγικών θα χρησιμοποιήσουμε τη στρατηγική D4 από τις πιθανές D λόγω του ότι καταλήγει σε καλύτερα αποτελέσματα όπως φάνηκε και παραπάνω.

❖ Διακύμανση τάσης

Θα παρουσιάσουμε τη διακύμανση της τάσης του δικτύου για τυχαίους συνδυασμούς ΑΠΕ και ηλεκτρικών οχημάτων:





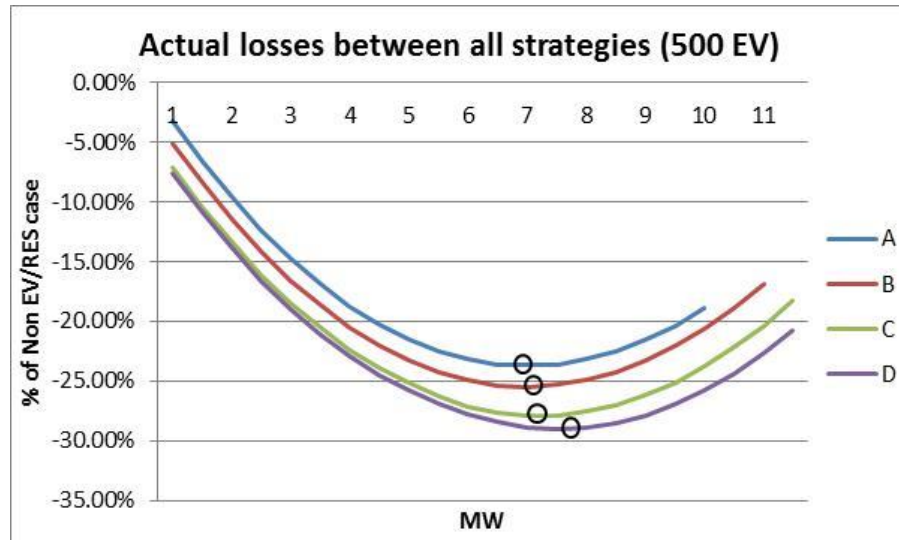
Διάγραμμα 47: Διακύμανση τάσης των 4 περιπτώσεων της στρατηγικής D για διάφορους συνδυασμούς οχημάτων-ΑΠΕ

Συμπεράσματα: Ανεξαρτήτως συνδυασμού οχημάτων και διείσδυσης ΑΠΕ, οι έξυπνες στρατηγικές (C και D) παρουσιάζουν καλύτερα αποτελέσματα από τις στρατηγικές A και B. Μάλιστα, η στρατηγική D παρουσιάζει τη χαμηλότερη διακύμανση για κάθε πιθανό συνδυασμό.

Επιπλέον, παρατηρούμε ότι για την ίδια ισχύ ΑΠΕ, όσο αυξάνουμε τον αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων τόσο περισσότερο μεγαλώνει η διαφορά μεταξύ των στρατηγικών C, D με τις στρατηγικές A, B.

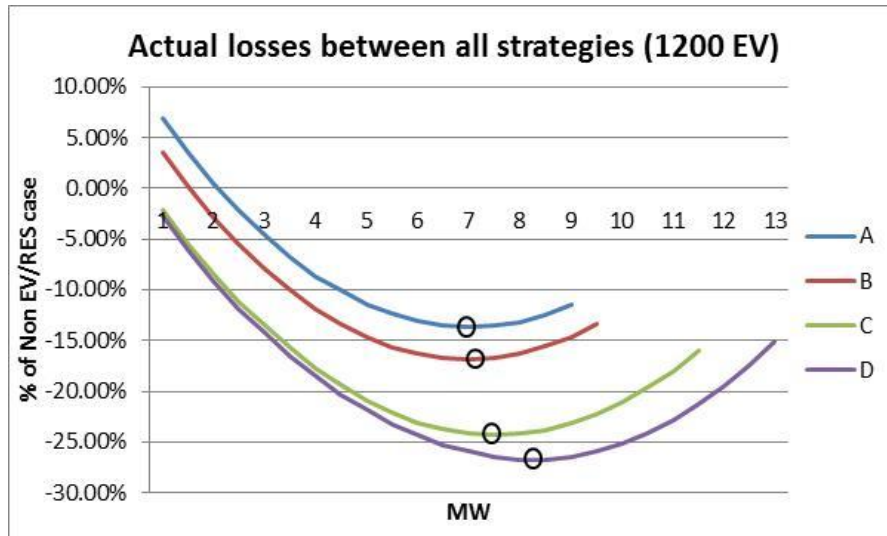
❖ Απώλειες συστήματος

Τέλος, θα δείξουμε κατά πόσο επηρεάζονται οι απώλειες του συστήματος για τις διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης. Όπως και πριν, θα χρησιμοποιήσουμε τυχαίους συνδυασμούς ισχύος ΑΠΕ και ηλεκτρικών οχημάτων.



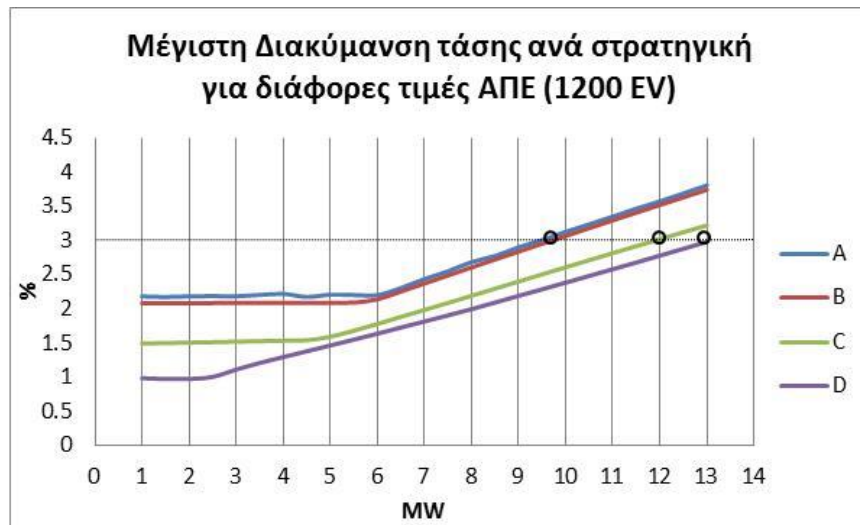
Διάγραμμα 48: Απώλειες συστήματος μεταξύ των 4 περιπτώσεων της στρατηγικής D (500 EV)

Το παραπάνω διάγραμμα αποδεικνύει ότι για συγκεκριμένη διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο της Σπερχειάδας, οι απώλειες που παρουσιάζει το σύστημα είναι αρκετά πιο μειωμένες όταν εφαρμόζουμε τις στρατηγικές C και D, με το ποσοστό μείωσης να είναι μεγαλύτερο στη στρατηγική D. Επίσης, παρατηρούμε ότι μέχρι τα 5 MW ΑΠΕ η διαφορά των δύο τελευταίων στρατηγικών δεν είναι μεγάλη, αλλά αυξάνεται όσο αυξάνεται η διείσδυση των ΑΠΕ. Αυτό σημαίνει ότι με την χρήση V2G λειτουργίας μπορούμε να εκμεταλλευτούμε ακόμα περισσότερο τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτό γίνεται κατανοητό και από το γεγονός ότι για αριθμό οχημάτων ίσο με 500, αν υλοποιήσουμε τη στρατηγική A μπορούμε να έχουμε μέχρι 10 MW ΑΠΕ ενώ με τις στρατηγικές C και D μπορούμε να έχουμε μέχρι 11.5 MW. Μάλιστα, όσο μεγαλώνει ο αριθμός των οχημάτων τόσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά των ΑΠΕ. Για παράδειγμα, αν θεωρήσουμε ότι έχουμε σενάριο με στόλο οχημάτων 1200 οχήματα το αποτέλεσμα θα έχει ως εξής:



Διάγραμμα 49: Απώλειες συστήματος μεταξύ των 4 περιπτώσεων της στρατηγικής D (1200 EV)

Στην περίπτωση των 1200 οχημάτων η διαφορά είναι ακόμα μεγαλύτερη. Πιο συγκεκριμένα, ενώ με τις στρατηγικές A και B δεν μπορούμε να ξεπεράσουμε τα 9.5 MW ΑΠΕ, υλοποιώντας τη στρατηγική φόρτισης D μπορούμε να έχουμε διείσδυση ΑΠΕ μέχρι και 13 MW, δηλαδή έχουμε αύξηση 36.8% της ικανότητας για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Θα πρέπει να αναφέρουμε σε αυτό το σημείο ότι ο λόγος που δεν μπορούμε να έχουμε παραπάνω ΑΠΕ είναι γιατί η διακύμανση της τάσης βγαίνει εκτός ορίων. Αυτό φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



Διάγραμμα 50: Μέγιστη διακύμανση τάσης ανά στρατηγική (1200 EV)

Τέλος, είναι σημαντικό να πούμε ότι μετά από μια συγκεκριμένη τιμή ηλεκτρικών οχημάτων και μετά, οι στρατηγικές φόρτισης dumb και dual tariff δεν είναι ικανές για τη σωστή λειτουργία του συστήματος διανομής. Σε αυτή την περίπτωση κρίνεται αναγκαίο η φόρτιση των οχημάτων να

γίνεται με βάση τις δύο τελευταίες στρατηγικές. Σύμφωνα με την έρευνα που κάναμε κατά τη διάρκεια αυτής της εργασίας, αποφανθήκαμε ότι αυτό το όριο οχημάτων είναι το εξής:

Στρατηγική	Ανώτατο όριο ηλεκτρικών οχημάτων
A – dumb	1230 EV
B – dual tariff	1330 EV

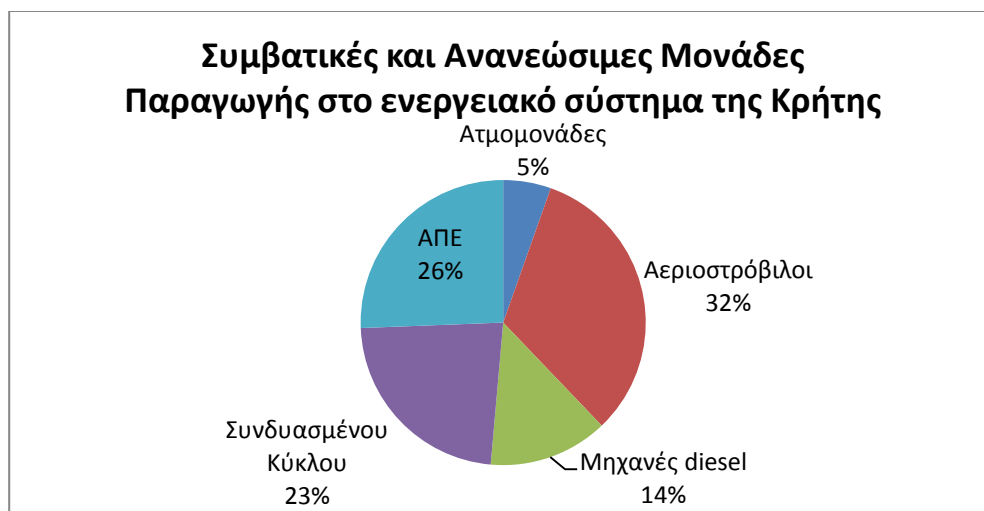
5.2 Παρουσίαση και μελέτη του ενεργειακού συστήματος της Κρήτης

5.2.1. Περιγραφή του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής της Κρήτης και των χαρακτηριστικών του στόλου ηλεκτρικών οχημάτων

Στο αυτόνομο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης λειτουργούν σήμερα 3 θερμικοί Σταθμοί Παραγωγής:

- ΑΗΣ Χανίων στη θέση Ξυλοκαμάρα
- ΑΗΣ Λινοπεραμάτων στο Ηράκλειο
- ΑΗΣ Αθρινόλακκου στο Λασίθι

Στους σταθμούς αυτούς λειτουργούν συνολικά 24 συμβατικές μονάδες παραγωγής εκ των οποίων οι δύο είναι ατμομονάδες συνολικής ισχύος 93 MW, οι δέκα είναι μηχανές ντίζελ συνολικής ισχύος 557,4 MW, οι έξι είναι αεριοστρόβιλοι συνολικής ισχύος 232,74 MW και οι υπόλοιπες έξι είναι μονάδες συνδυασμένου κύκλου συνολικής ισχύος 395 MW. Στο σύστημα της Κρήτης βρίσκονται, επίσης, σε λειτουργία αιολικά πάρκα και φωτοβολταϊκοί σταθμοί με εγκατεστημένη ισχύ 440 MW. Παρακάτω φαίνεται συνοπτικά το ποσοστό κάθε μονάδας παραγωγής επί της συνολικής παραγωγής στην Κρήτη:



Διάγραμμα 51: Ποσοστό συμβατικών μονάδων και μονάδων ΑΠΕ στο σύστημα της Κρήτης

❖ Όρια απορρόφησης αιολική ισχύος

Στο αυτόνομο σύστημα της Κρήτης η μέγιστη επιτρεπόμενη ωριαία διείσδυση σταθμών ΑΠΕ είναι ίση με το 40% του φορτίου. Η τιμή αυτή ισχύει ως μέγιστη επιτρεπόμενη εφόσον επικρατούν ομαλές καιρικές συνθήκες και με ταυτόχρονη απουσία λειτουργικών προβλημάτων στο δίκτυο. Σε περίπτωση ανώμαλων συνθηκών το ποσοστό αυτό διείσδυσης περιορίζεται ανάλογα με τη σοβαρότητα της κατάστασης.

❖ Ένταξη και φόρτιση συμβατικών μονάδων

Η κανονική σειρά ένταξης των υφιστάμενων συμβατικών μονάδων για το σύστημα της Κρήτης είναι:

- a) Πρώτα φορτίζονται οι δύο νέοι ατμοστρόβιλοι του ΑΗΣ Αθρινόλακκου και οι ατμοστρόβιλοι του ΑΗΣ Λινοπεραμάτων οι οποίοι χρησιμοποιούνται ως μονάδες βάσης, δεδομένου ότι, λόγω της χρήσης ατμού δεν είναι εφικτή η διακεκομμένη λειτουργία τους.
- b) Στη συνέχεια λαμβάνουν φορτίο οι μονάδες diesel του ΑΗΣ Αθρινόλακκου και του ΑΗΣ Λινοπεραμάτων.
- c) Αμέσως μετά φορτίζεται ο Συνδυασμένος κύκλος του ΑΗΣ Χανίων.
- d) Τέλος, λαμβάνουν φορτίο οι Αεριοστρόβιλοι σύμφωνα με την οικονομική (τυπική) σειρά ένταξης και τους περιορισμούς του συστήματος μεταφοράς.

❖ Υπολογισμός των εκπεμπόμενων ρύπων από το σύστημα παραγωγής

Οι εκπεμπόμενοι ρύποι από το σύστημα παραγωγής υπολογίζονται ξεχωριστά για κάθε τύπο μονάδας. Για τον υπολογισμό τους, πολλαπλασιάζουμε την παραγωγή της κάθε μονάδας με έναν

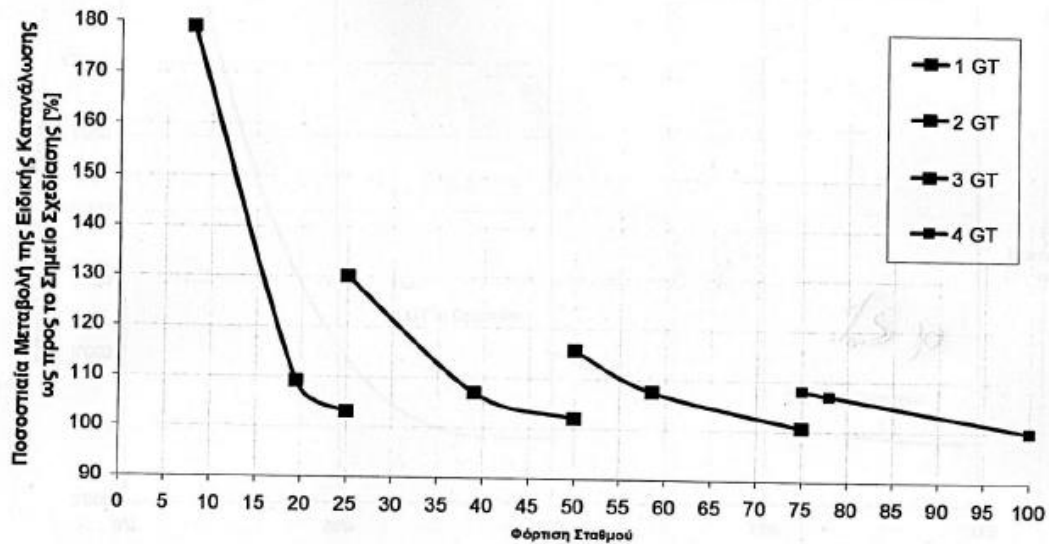
συντελεστή ο οποίος είναι χαρακτηριστικός του κάθε τύπου μονάδας. Οι συντελεστές αυτοί παρουσιάζονται παρακάτω:

Τύπος μονάδας	Συντελεστής (tn/MWh)
Ατμομονάδες	0.56716
Αεριοστρόβιλοι	0.45195
Μηχανές Diesel	0.39099
Συνδυασμένου κύκλου	0.57143

❖ Οικονομική αποτίμηση του συστήματος Κρήτης

Για τον υπολογισμό του κόστους της λειτουργίας του ενεργειακού συστήματος της Κρήτης είναι απαραίτητο να εισαχθούν τα δεδομένα των ειδικών καταναλώσεων των τριών ΑΗΣ στα επίπεδα 50%, 75% και 100% της ονομαστικής τους ισχύος. Τα στοιχεία αυτά προέρχονται από απολογιστικά στοιχεία της παραγωγής - κατανάλωσης των μονάδων από την τεχνική έκθεση. Ειδικά για τις ατμοστροβιλικές μονάδες του ΑΗΣ Αθρινόλακκου που εγκαταστάθηκαν πρόσφατα δεν υπάρχουν απολογιστικά στοιχεία και χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία από τη σχετική σύμβαση. Σημειώνεται επίσης ότι για τις μονάδες οποίες όπου υπάρχει έλλειψη έχει θεωρηθεί ότι παρουσιάζουν αντίστοιχα χαρακτηριστικά με τις με μονάδες ίδιου τύπου των οποίων τα δεδομένα είναι γνωστά.

Σχετικά με τις μονάδες Συνδυασμένου κύκλου ελήφθη ως παραδοχή ότι θα έχουν διάταξη 4+4+1 (4 αεριοστρόβιλοι + 4 λέβητες ανάκτησης θερμότητας + 1 ατμοστρόβιλος). Στην περίπτωση αυτή ο βαθμός απόδοσης στο μέγιστο ελήφθη ίσος με 52%. Σχετικά με την μεταβολή της ειδικής κατανάλωσης ως προς τη φόρτιση της μονάδας θεωρήθηκαν οι αναλυτικές καμπύλες ποσοστιαίας μεταβολής της ειδικής κατανάλωσης για σταθμό Συνδυασμένου Κύκλου διάταξης (4+4+1) που δίνονται στο παρακάτω διάγραμμα, που προέρχονται από μελέτη που εκπονήθηκε για λογαριασμό της ΔΕΗ από το ΕΜΠ.



Διάγραμμα 52: Καμπύλες ποσοστιαίας μεταβολής της ειδικής κατανάλωσης για σταθμό συνδυασμένου κύκλου διάταξης (4+4+1)

❖ Κόστος ανανεώσιμων μονάδων και εκπεμπόμενων ρύπων

Το κόστος των ανανεώσιμων μονάδων βασίζεται σε σημερινά δεδομένα πώλησης της παραγόμενης ενέργειας από ΑΠΕ και δεν συμπεριλαμβάνει τα έξοδα εγκατάστασης των ανανεώσιμων μονάδων. Έτσι, στην εργασία αυτή έχουμε θεωρήσει κόστος παραγόμενης ενέργειας από ΑΠΕ ίσο με 84,6€ ανά μεγαβατώρα.

Στην εργασία αυτή θα ονομάζουμε κόστος λειτουργίας και συντήρησης το άθροισμα του κόστους των συμβατικών και ανανεώσιμων μονάδων παραγωγής.

Το κόστος των εκπεμπόμενων ρύπων αφορά την οικονομική αποτίμηση των ρύπων οι οποίοι εκπέμπονται αποκλειστικά από τις μονάδες παραγωγής. Η τιμή του ανέρχεται στα 20€ ανά τη CO₂.

Το άθροισμα του κόστους λειτουργίας και συντήρησης με το κόστος των εκπεμπόμενων ρύπων θα το ονομάζουμε συνολικό κόστος του ενεργειακού συστήματος.

❖ Υπολογισμός υπερχειλίσης παραγόμενης αιολικής ενέργειας (wind spillage)

Για τον υπολογισμό της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας η οποία τελικά δεν χρησιμοποιείται, λαμβάνουμε υπόψη την παραγωγή των μονάδων ΑΠΕ και τους περιορισμούς απορρόφησης αιολικής ισχύος.

Όσον αφορά τα ηλεκτρικών οχημάτων, ισχύουν τα εξής:

❖ Στόλος ηλεκτρικών οχημάτων

Θα παρουσιάσουμε τρία σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο της Κρήτης:

1. Το ρεαλιστικό σενάριο, με τον αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων να φτάνει τα 10.000.
2. Το αισιόδοξο σενάριο, με τον αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων να φτάνει τα 30.000.
3. Το υπεραισιόδοξο σενάριο, στο οποίο αναμένουμε πολύ δυναμική διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων, με τον αριθμό τους να φτάνει τα 50.000.

❖ Σενάρια φόρτισης

Όπως αναφέραμε και στο κεφάλαιο 2, τα σενάρια φόρτισης που θα παρουσιάσουμε είναι 4.

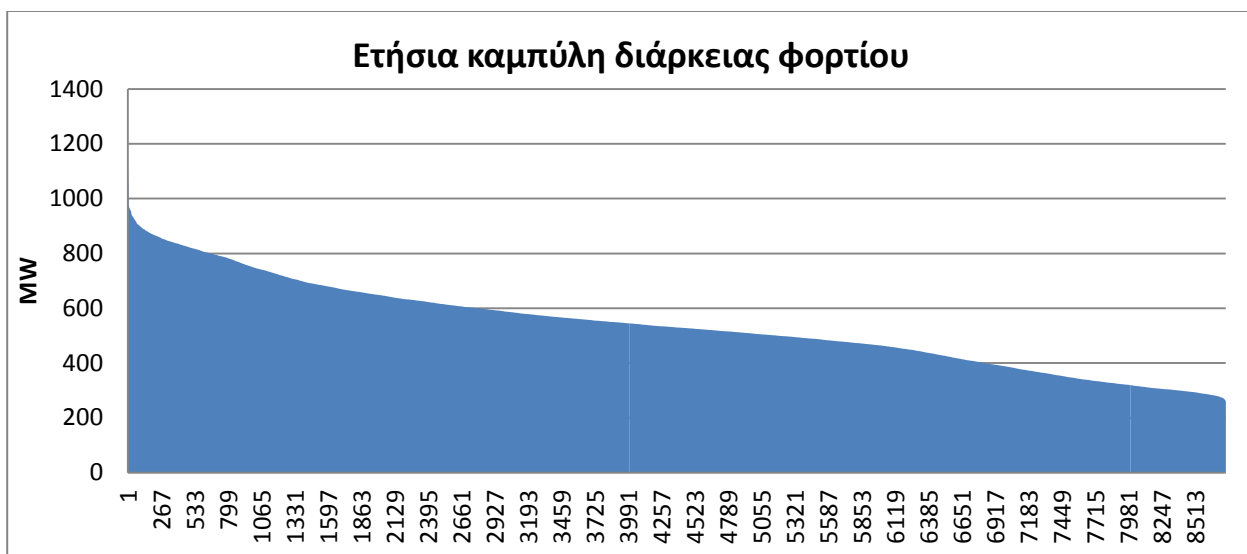
5. Στρατηγική A: Μη ελεγχόμενη φόρτιση (Dumb charging)
6. Στρατηγική B: Ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο (dual tariff charging)
7. Στρατηγική C: Έξυπνη φόρτιση (Smart charging)
8. Στρατηγική D: Από το Όχημα στο Δίκτυο (Vehicle-to-grid)

5.2.2. Παρούσα κατάσταση του ενεργειακού συστήματος της Κρήτης χωρίς ηλεκτρικά οχήματα

Εδώ θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα της μελέτης που έγινε στο ενεργειακό σύστημα της Κρήτης, πριν την εισαγωγή ηλεκτρικών οχημάτων. Τα αποτελέσματα που θα αποτυπώσουμε θα αφορούν τη συνολική ετήσια συμπεριφορά του δικτύου της Κρήτης και των μονάδων που το απαρτίζουν.

❖ Καμπύλη διάρκειας φορτίου

Θα ξεκινήσουμε με την ετήσια καμπύλη διάρκειας φορτίου, η οποία φαίνεται στο αμέσως επόμενο διάγραμμα:

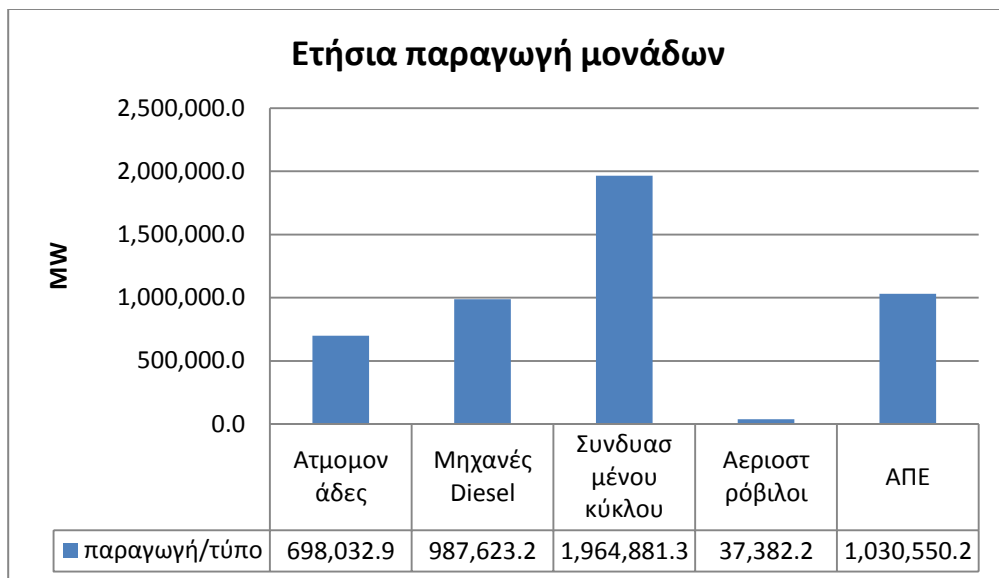


Διάγραμμα 53: Ετήσια καμπύλη διάρκειας φορτίου (Non EV case)

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ότι το μέγιστο φορτίο που μπορεί να ζητηθεί είναι περίπου 1100 MW, και μάλιστα αυτό γίνεται μόνο τρεις ημέρες το χρόνο. Επιπλέον, το ελάχιστο φορτίο που μπορεί να ζητηθεί κατά τη διάρκεια του χρόνου είναι τα 260 MW.

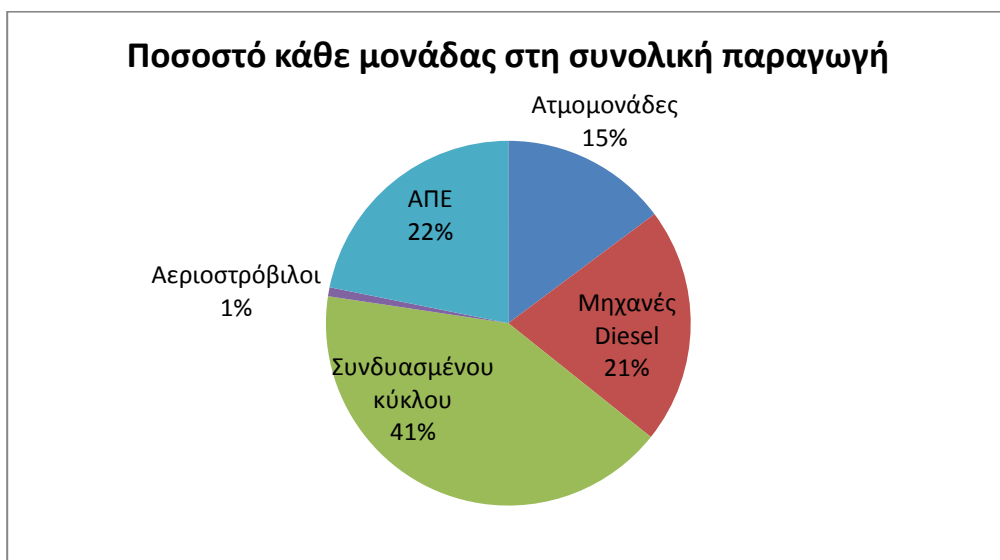
❖ Προγραμματισμός των μονάδων

Ο προγραμματισμός των μονάδων παραγωγής για όλο το έτος φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι η μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας προέρχεται από τις μονάδες συνδυασμένου κύκλου, και μάλιστα είναι σχεδόν διπλάσια από την ενέργεια που προέρχεται από τα ΑΠΕ ή από τις μηχανές diesel. Τέλος, η συνεισφορά των αεριοστρόβιλων είναι αρκετά χαμηλή.



Διάγραμμα 54: Ετήσια παραγωγή μονάδων (Non EV case)

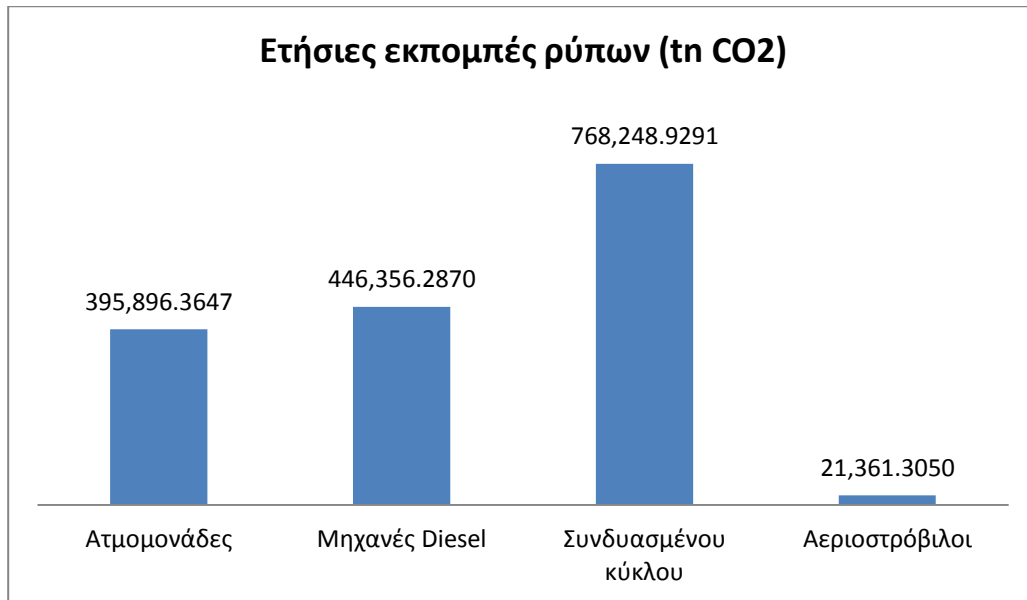
Το ακριβές ποσοστό με το οποίο συμμετέχει κάθε μονάδα στη συνολική παραγωγή φαίνεται και στο επόμενο διάγραμμα. Όπως είδαμε και πριν, οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου ξεπερνούν το ένα τρίτο της συνολικής παραγωγής.



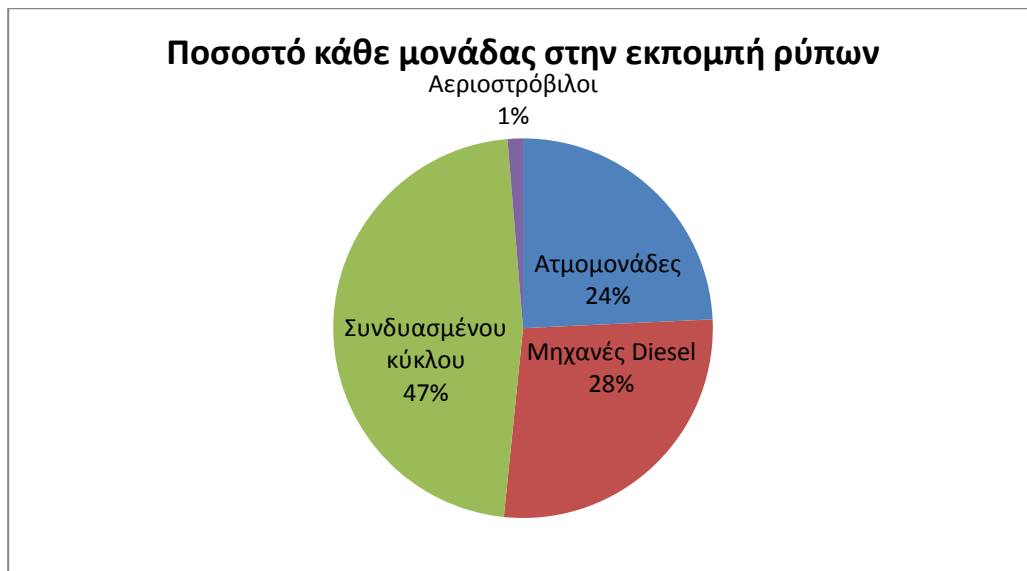
Διάγραμμα 55: Ποσοστό κάθε μονάδας παραγωγής στη συνολική παραγωγή (Non EV case)

❖ Εκπεμπόμενοι ρύποι

Όπως είδαμε και στις αρχές αυτού του κεφαλαίου, οι μηχανές diesel έχουν το μικρότερο συντελεστή ρύπανσης σε σχέση με τις υπόλοιπες συμβατικές μονάδες παραγωγής ενώ οι ατμομονάδες και οι αεριοστρόβιλοι έχουν το μεγαλύτερο. Οι συνολικές ετήσιες εκπομπές ρύπων ανά μονάδα παραγωγής, καθώς και το ποσοστό της κάθε μίας ως προς το σύνολο φαίνονται στα δύο σχήματα που ακολουθούν:



Διάγραμμα 56: Ετήσιες εκπομπές ρύπων (Non EV case)

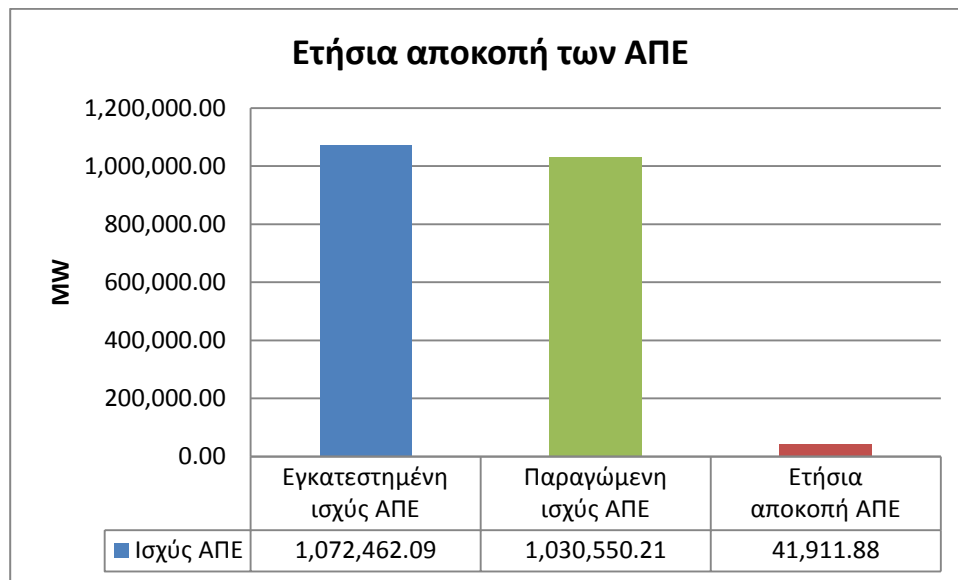


Διάγραμμα 57: Ποσοστό κάθε μονάδας παραγωγής στην εκπομπή ρύπων (Non EV case)

Αντίστοιχα με πριν, οι μηχανές συνδυασμένου κύκλου είναι αυτές που εκπέμπουν το μεγαλύτερο ποσοστό ρύπων προς το περιβάλλον, με το ποσοστό τους να πλησιάζει το 50% των συνολικών ρύπων. Θα πρέπει, επίσης, εδώ να σημειωθεί ότι το κόστος των ρύπων είναι σταθερό, ανεξάρτητα από το που προέρχεται, επομένως το ποσοστό κάθε μονάδας στο συνολικό κόστος των ρύπων είναι το ίδιο με το αμέσως προηγούμενο διάγραμμα.

❖ Αποκοπή των ΑΠΕ

Είναι γνωστό ότι η εγκατεστημένη ισχύς των ΑΠΕ είναι μεγαλύτερη από αυτή που πραγματικά παράγεται μέσα στο χρόνο. Πάντα υπάρχει ένα μέρος της ισχύος που δεν χρησιμοποιείται. Αυτό φαίνεται καλύτερα και στο επόμενο διάγραμμα:

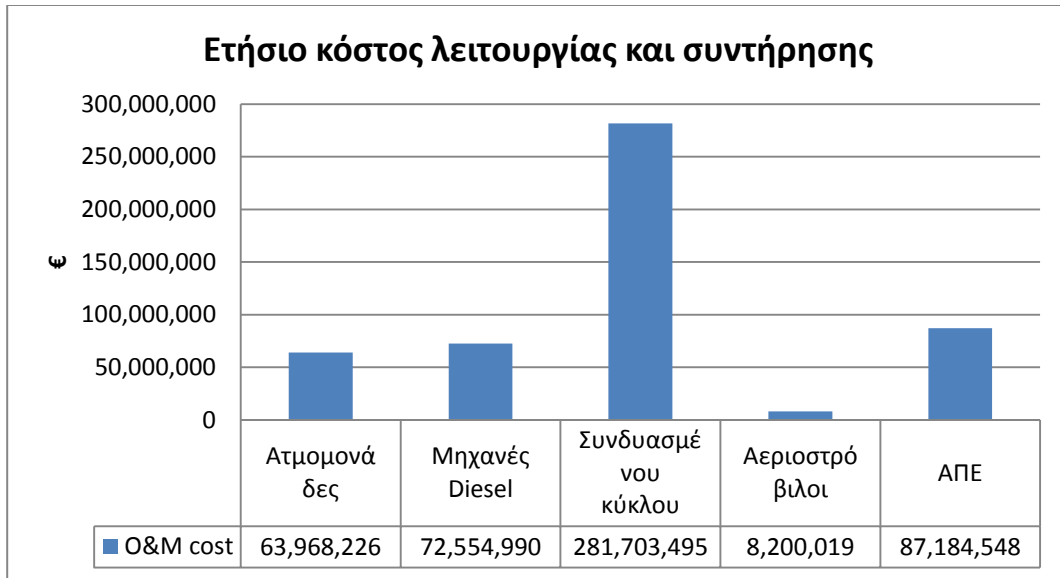


Διάγραμμα 58: Ετήσια αποκοπή ΑΠΕ (Non EV case)

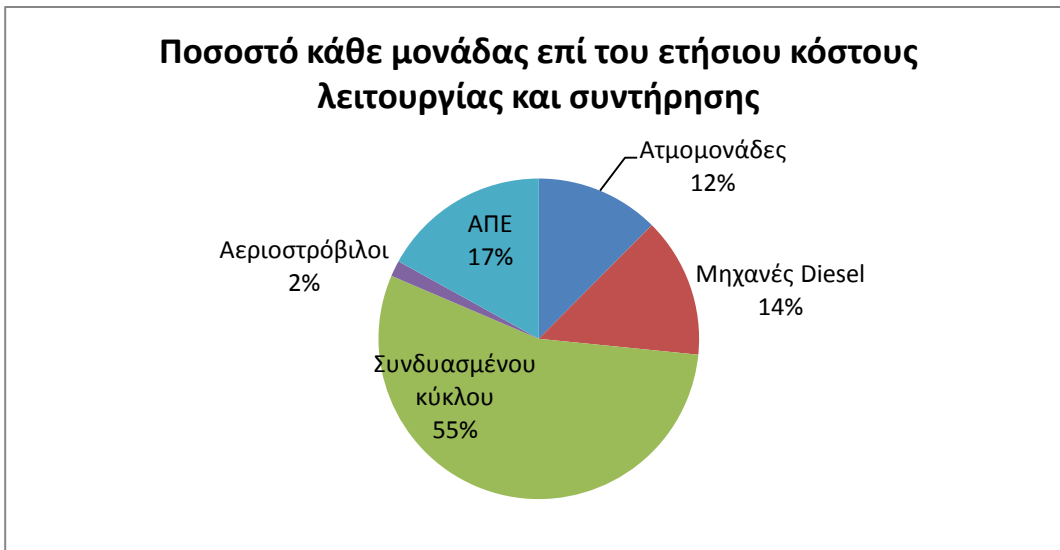
Παρατηρούμε, δηλαδή, ότι από τα συνολικά 1.700,462 GW που μπορούν να παραχθούν από τα ΑΠΕ, σχεδόν τα 42 από αυτά αποκόπτονται. Αυτό σημαίνει ότι χάνουμε ετησίως περίπου στο **3,9 %** της παραγωγής των ΑΠΕ, η οποία πάει ανεκμετάλλευτη.

❖ Οικονομική αποτίμηση

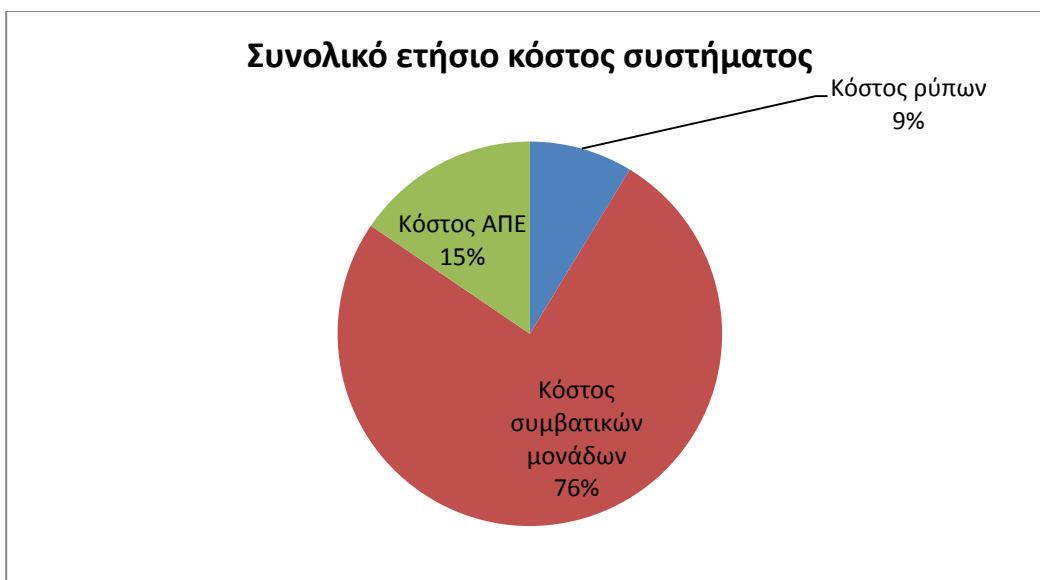
Σε αυτό το σημείο θα παρουσιάσουμε το κόστος λειτουργίας και συντήρησης κάθε μονάδας παραγωγής, τη συμμετοχή της κάθε μονάδας στο συνολικό αυτό κόστος, καθώς και το συνολικό ετήσιο κόστος το οποίο περιλαμβάνει, εκτός του κόστους λειτουργίας και συντήρησης, και το κόστος των εκπεμπόμενων ρύπων.



Διάγραμμα 59: Ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης (Non EV case)



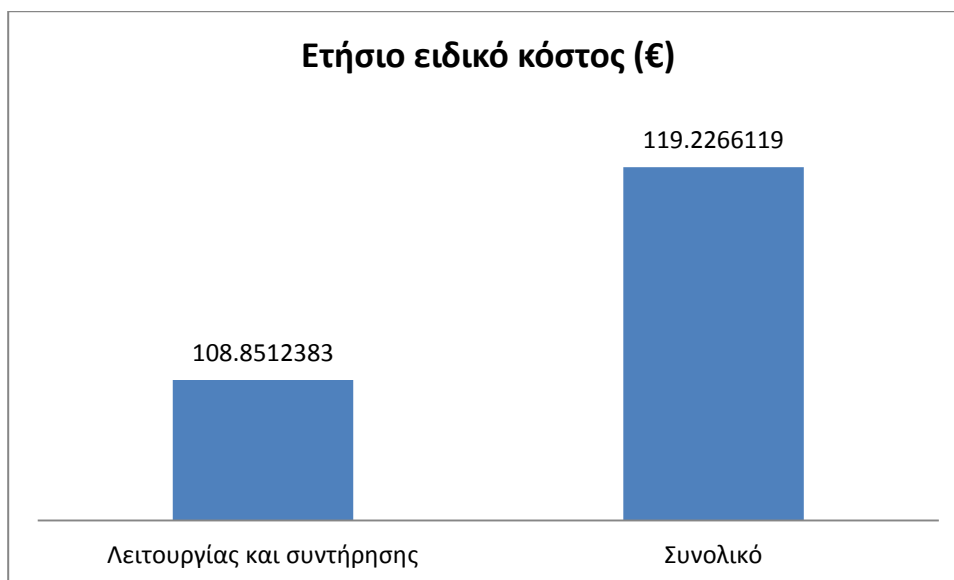
Διάγραμμα 60: Ποσοστό κάθε μονάδας παραγωγής επί του κόστους λειτουργίας και συντήρησης (Non EV case)



Διάγραμμα 61: Συνολικό ετήσιο κόστος συστήματος (Non EV case)

Παρατηρούμε ότι το κόστος των ΑΠΕ αποτελεί το 15% του συνολικού κόστους του συστήματος, ενώ οι εκπεμπόμενοι ρύποι καταλαμβάνουν ένα 9%.

Ένα άλλο μέγεθος που παίζει πολύ σημαντικό ρόλο και θα πρέπει να παρουσιάσουμε, είναι το ειδικό κόστος. Το ειδικό κόστος μας δείχνει το κόστος ανά μεγαβατώρα. Στην εργασία αυτή έχουμε υπολογίσει δύο ειδικά κόστη, το ειδικό κόστος λειτουργίας και συντήρησης και το ειδικό συνολικό κόστος. Και τα δύο αυτά φαίνονται στο παρακάτω διάγραμμα:

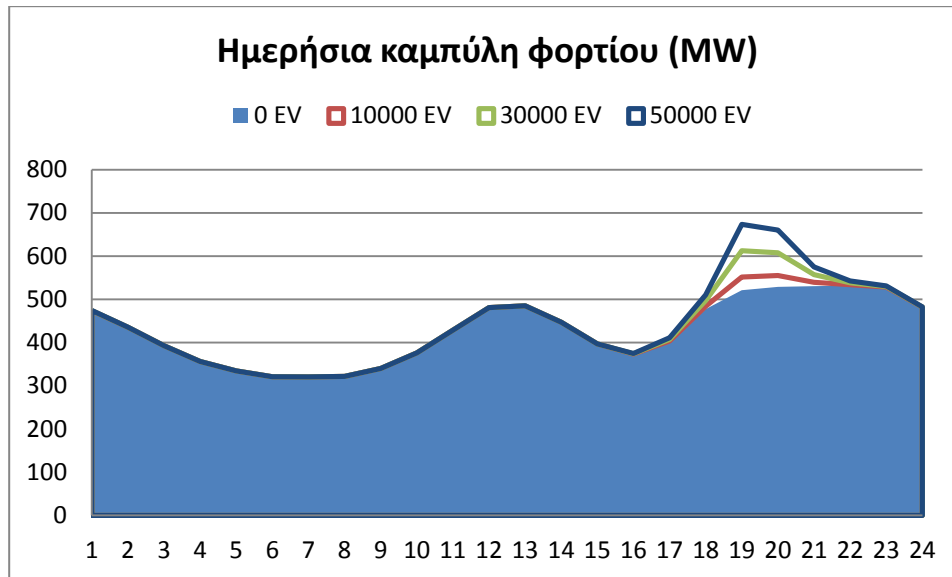


Διάγραμμα 62: Ετήσιο ειδικό κόστος (Non EV case)

5.2.3. Συμπεριφορά του ενεργειακού συστήματος της Κρήτης με μη ελεγχόμενη φόρτιση (dumb charging)

Σε αυτό το κομμάτι θα θεωρήσουμε ότι όλος ο στόλος των ηλεκτρικών οχημάτων ακολουθεί τη στρατηγική φόρτισης A, δηλαδή τη μη ελεγχόμενη φόρτιση. Η εισαγωγή των ηλεκτρικών οχημάτων ακολουθεί τα τρία σενάρια διείσδυσης που περιγράφηκαν στην εισαγωγή της ενότητας.

Αρχικά, θα παρουσιάσουμε την καμπύλη φορτίου μιας τυχαίας μέρας μέσα στο χρόνο ώστε να φανεί πως λειτουργεί αυτός ο αλγόριθμος φόρτισης, δηλαδή να δούμε περίπου ποιες ώρες πραγματοποιείται η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων.

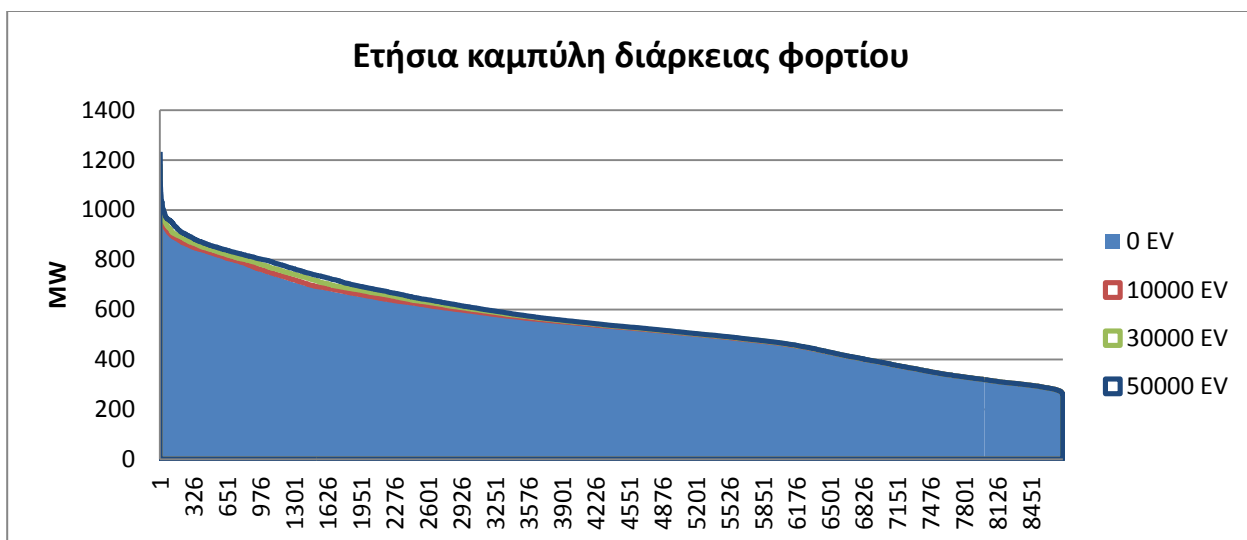


Διάγραμμα 63: Ημερήσια καμπύλη φορτίου (dumb charging)

Παρατηρούμε ότι την τυχαία αυτή μέρα, η φόρτιση γίνεται τις απογευματινές ώρες, με αποτέλεσμα το peak του φορτίου να γίνεται όλο και πιο υψηλό με την εισαγωγή περισσότερων ηλεκτρικών οχημάτων.

❖ Καμπύλη διάρκειας φορτίου

Θα ξεκινήσουμε με την ετήσια καμπύλη διάρκειας φορτίου, η οποία φαίνεται στο αμέσως επόμενο διάγραμμα:

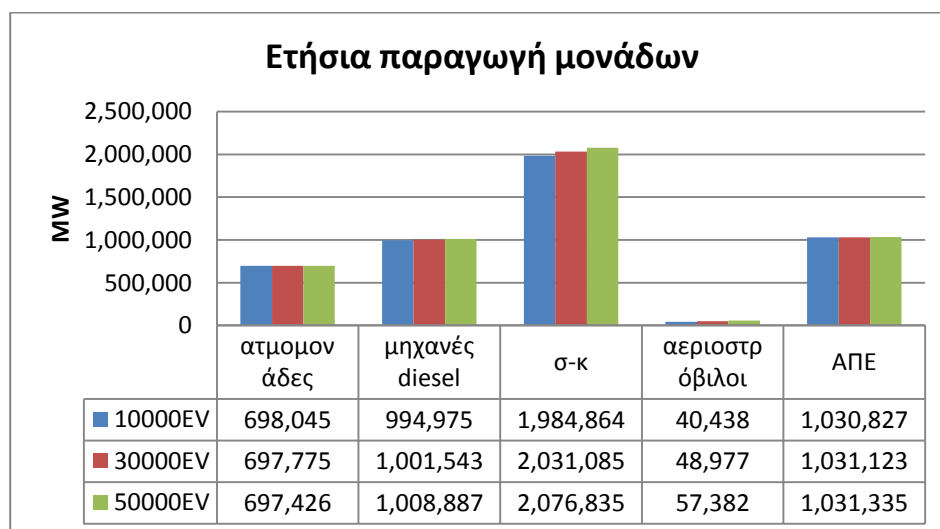


Διάγραμμα 64: Ετήσια καμπύλη διάρκειας φορτίου για τα 3 σενάρια διείσδυσης οχημάτων (dumb charging)

Από το παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε ακριβώς αυτό που αναμέναμε, ότι δηλαδή στην περίπτωση της μη ελεγχόμενης φόρτισης, το επιπλέον φορτίο που προέρχεται από τα ηλεκτρικά οχήματα, προστίθεται στις ώρες αιχμής του συστήματος.

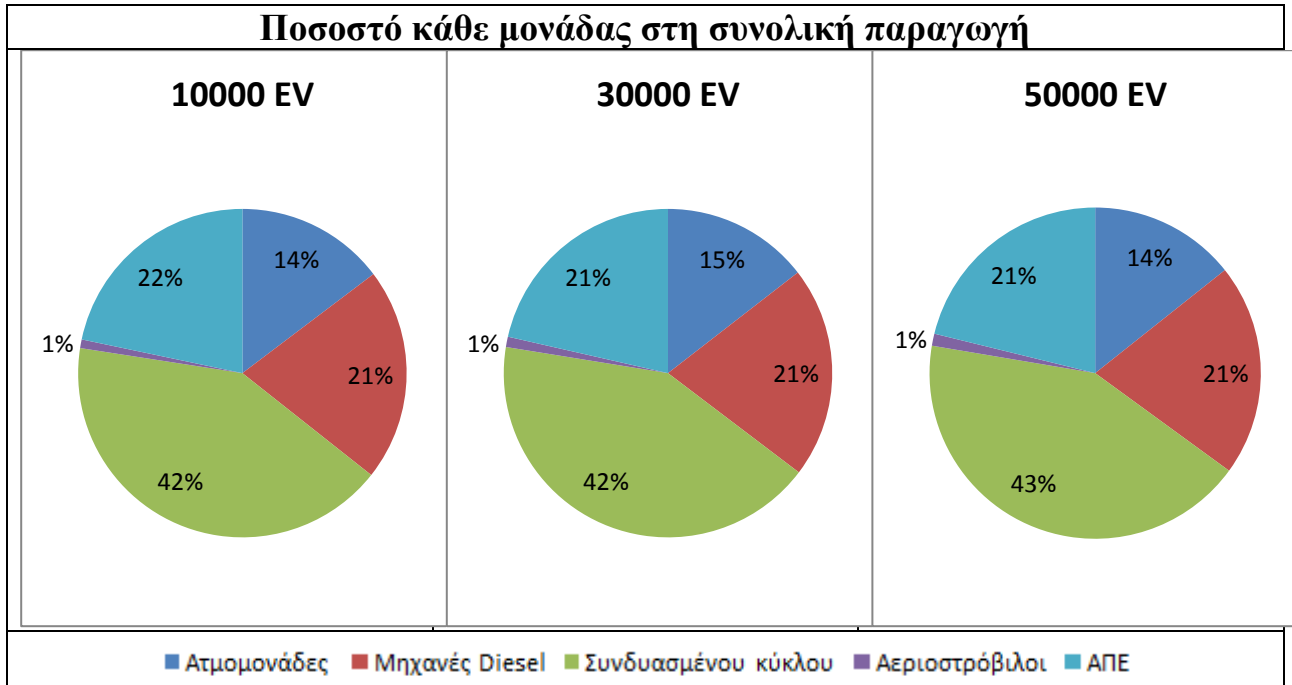
❖ Προγραμματισμός των μονάδων

Ο προγραμματισμός των μονάδων παραγωγής για όλο το έτος φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Αυτό που παρατηρούμε είναι και πάλι είναι ότι το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής προέρχεται από τις μονάδες συνδυασμένου κύκλου ενώ δεύτερες έρχονται οι μηχανές diesel και τα ΑΠΕ. Η συνεισφορά των αεριοστρόβιλων είναι αρκετά χαμηλή.



Διάγραμμα 65: Ετήσια παραγωγή μονάδων για τα 3 σενάρια διείσδυσης οχημάτων (dumb charging)

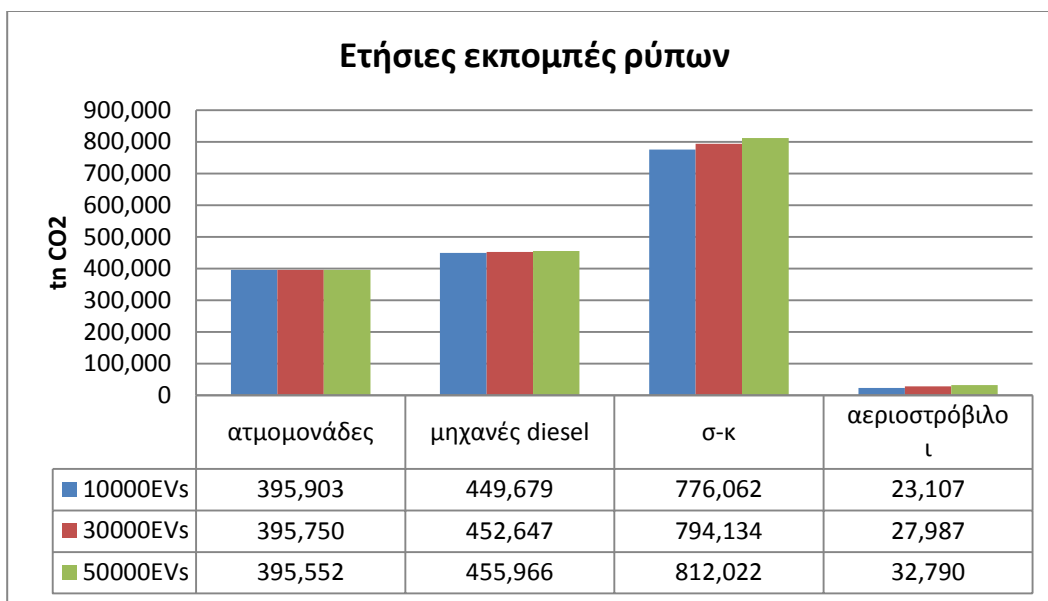
Το ακριβές ποσοστό με το οποίο συμμετέχει κάθε μονάδα στη συνολική παραγωγή φαίνεται και στο επόμενο διάγραμμα. Όπως είδαμε και πριν, οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου ξεπερνούν το ένα τρίτο της συνολικής παραγωγής.



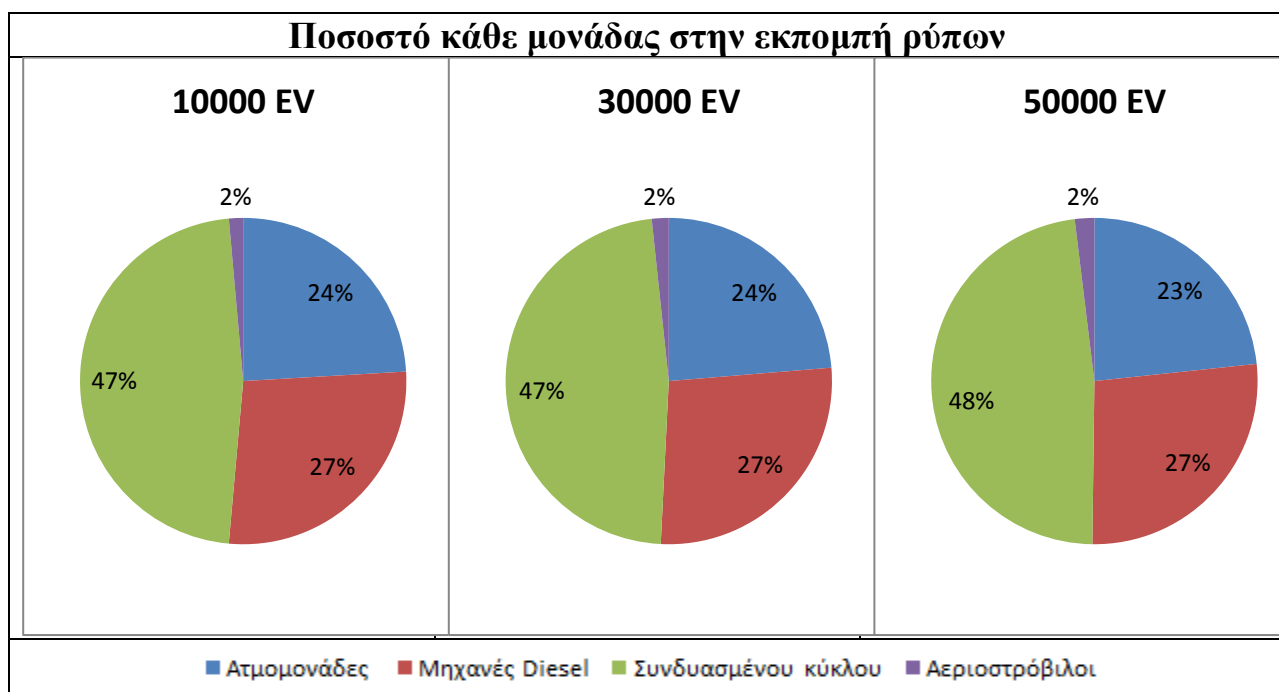
Διάγραμμα 66: Ποσοστό κάθε μονάδας στη συνολική παραγωγή για τα 3 σενάρια διείσδυσης οχημάτων (dumb charging)

❖ Εκπεμπόμενοι ρύποι

Όπως είδαμε και στις αρχές αυτού του κεφαλαίου, οι μηχανές diesel έχουν το μικρότερο συντελεστή ρύπανσης σε σχέση με τις υπόλοιπες συμβατικές μονάδες παραγωγής ενώ οι ατμομονάδες και οι αεριοστρόβιλοι έχουν το μεγαλύτερο. Οι συνολικές ετήσιες εκπομπές ρύπων ανά μονάδα παραγωγής, καθώς και το ποσοστό της κάθε μίας ως προς το σύνολο φαίνονται στα δύο σχήματα που ακολουθούν:



Διάγραμμα 67: Ετήσιες εκπομπές ρύπων για τα 3 σενάρια διείσδυσης οχημάτων (dumb charging)

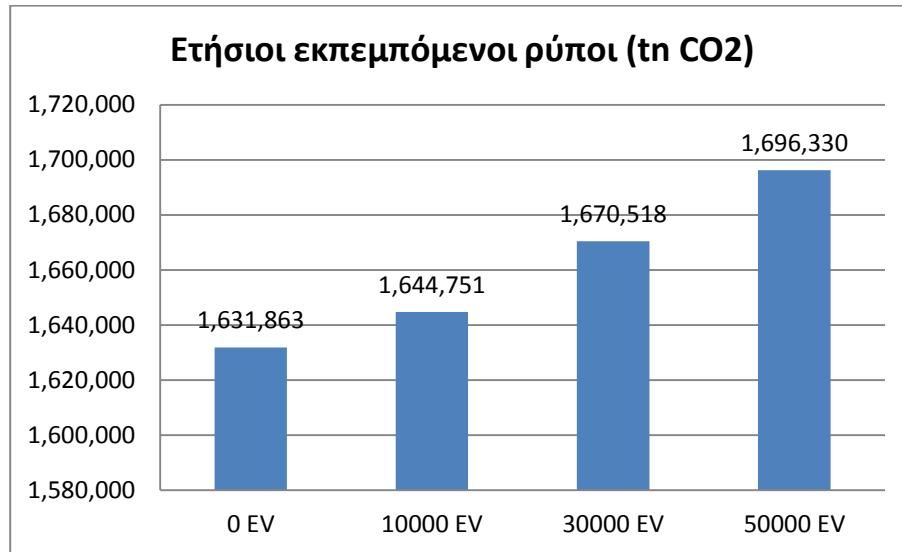


Διάγραμμα 68: Ποσοστό κάθε μονάδας στην εκπομπή ρύπων για τα 3 σενάρια διείσδυσης οχημάτων (dumb charging)

Αντίστοιχα με πριν, οι μηχανές συνδυασμένου κύκλου είναι αυτές που εκπέμπουν το μεγαλύτερο ποσοστό ρύπων προς το περιβάλλον, με το ποσοστό τους να πλησιάζει το 50% των συνολικών ρύπων. Θα πρέπει, επίσης, εδώ να σημειωθεί ότι το κόστος των ρύπων είναι σταθερό,

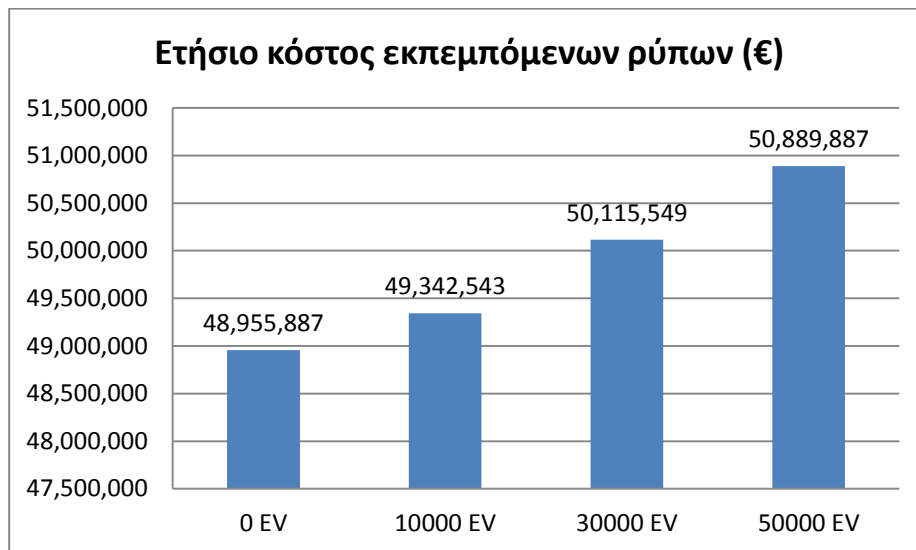
ανεξάρτητα από το που προέρχεται, επομένως το ποσοστό κάθε μονάδας στο συνολικό κόστος των ρύπων είναι το ίδιο με το αμέσως προηγούμενο διάγραμμα.

Επιπλέον, είναι χρήσιμο να παρουσιάσουμε τους συνολικούς ετήσιους εκπεμπόμενους ρύπους για τα διάφορα σενάρια διείσδυσης οχημάτων.



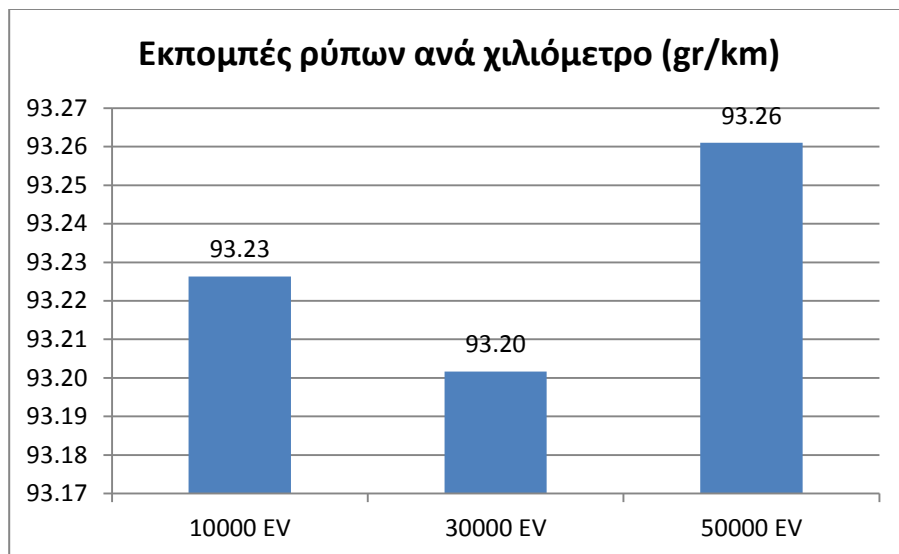
Διάγραμμα 69: Ετήσιες εκπομπές ρύπων (dumb charging)

και το κόστος τους, το οποίο ακολουθεί την ίδια ακριβώς τάση:



Διάγραμμα 70: Ετήσιο κόστος εκπεμπόμενων ρύπων (dumb charging)

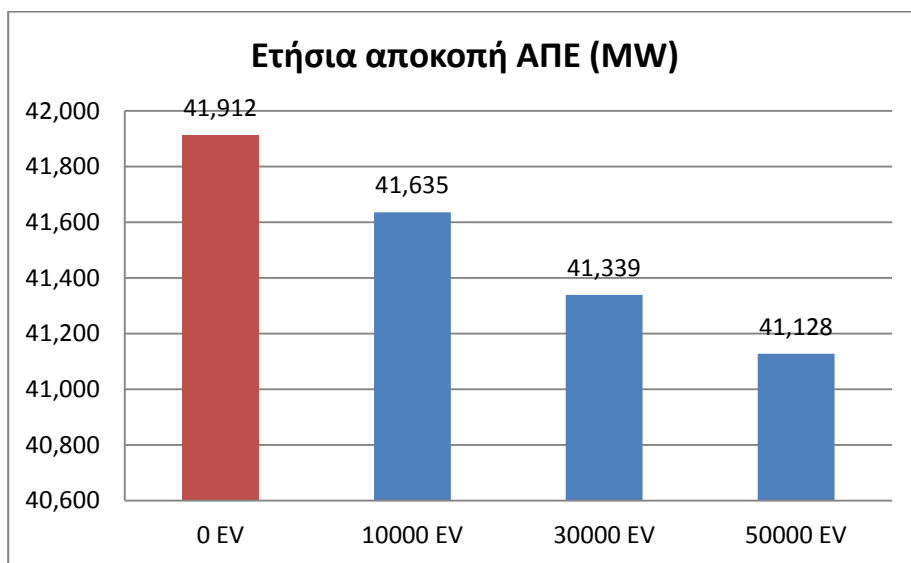
Επιπλέον, γνωρίζοντας την ποσότητα των συνολικών ρύπων που εκπέμπονται και το σύνολο των ηλεκτρικών οχημάτων και της ημερήσιας διαδρομής που αυτά κάνουν, μπορούμε να υπολογίσουμε τους ρύπους ανά χιλιόμετρο. Αυτό το στατιστικό παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 71: Εκπομπές ρύπων ανά χιλιόμετρο (dumb charging)

❖ Αποκοπή των ΑΠΕ

Το ποσοστό της παραγωγής των ΑΠΕ που αποκόπτεται υλοποιώντας τη στρατηγική φόρτισης Α, για τα 3 σενάρια διείσδυσης των οχημάτων σε σύγκριση με την περίπτωση χωρίς οχήματα, αποτυπώνεται στο παρακάτω διάγραμμα:

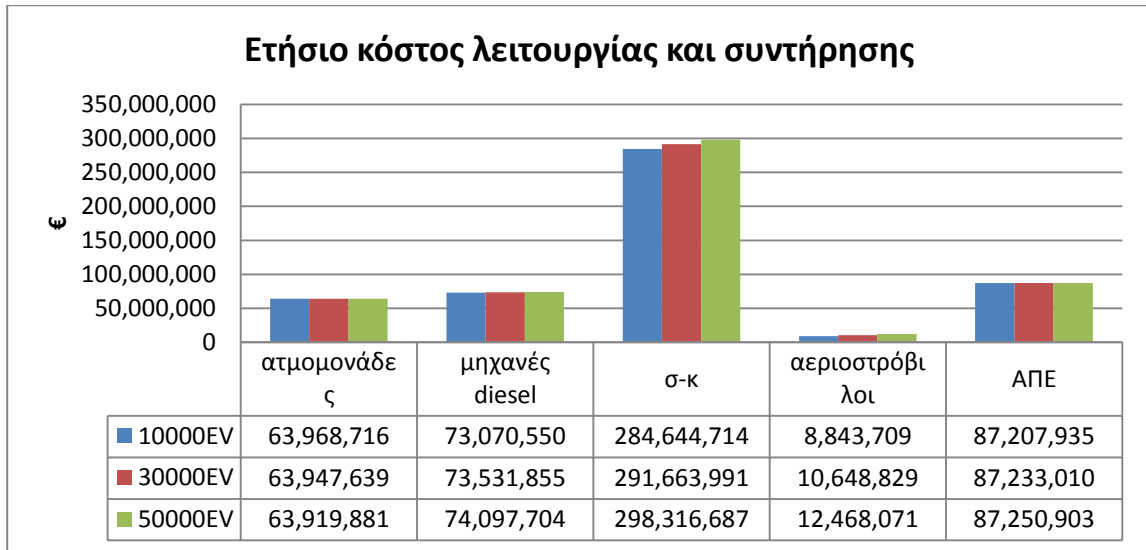


Διάγραμμα 72: Ετήσια αποκοπή ΑΠΕ (dumb charging)

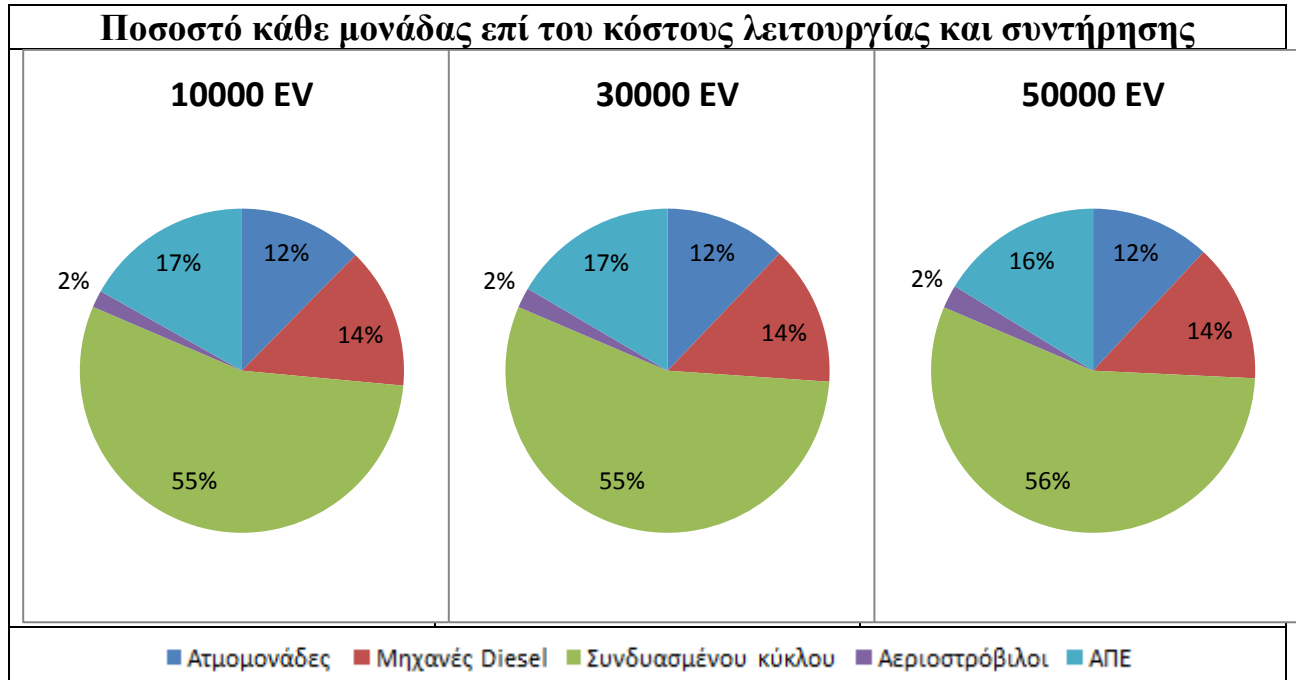
Παρατηρούμε, δηλαδή, ότι με την είσοδο οχημάτων μειώνεται το ποσοστό της ισχύος που μένει ανεκμετάλλετο από τα ΑΠΕ, και μάλιστα αυτή η μείωση μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 784 MW.

❖ Οικονομική αποτίμηση

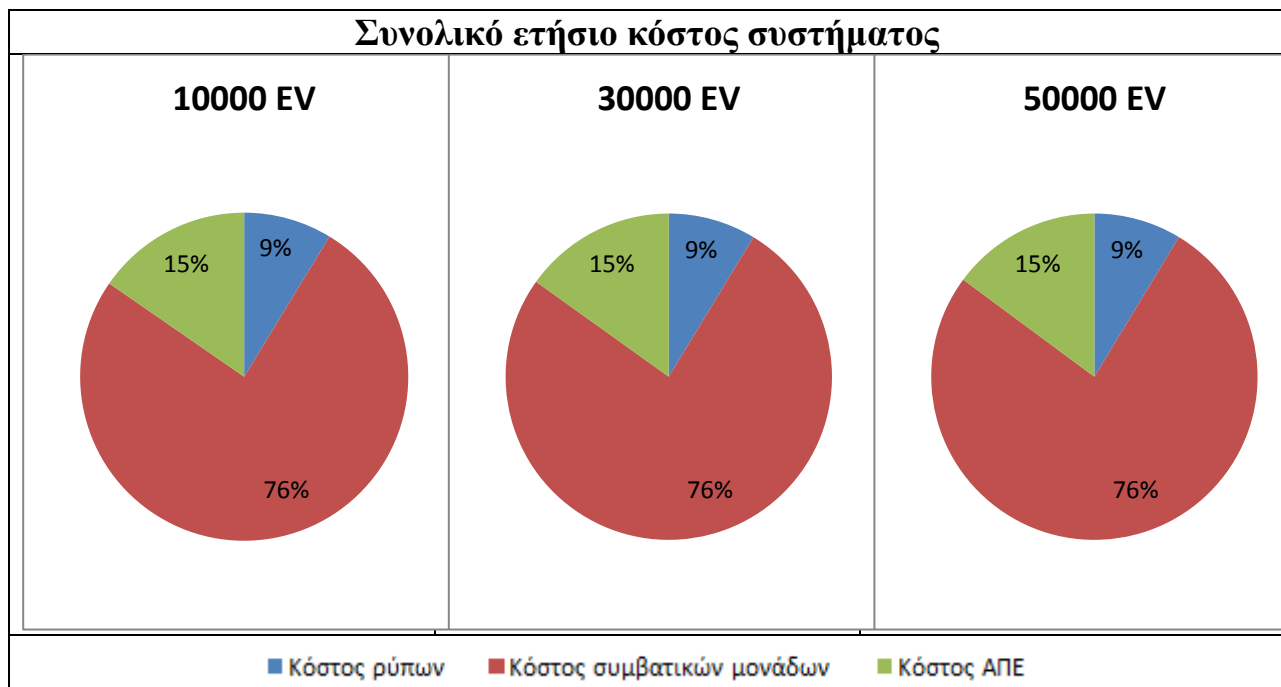
Στη συνέχεια ακολουθούν τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης κάθε μονάδας παραγωγής, η συμμετοχή της κάθε μονάδας στο συνολικό αυτό κόστος και το συνολικό ετήσιο κόστος.



Διάγραμμα 73: Ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης (dumb charging)



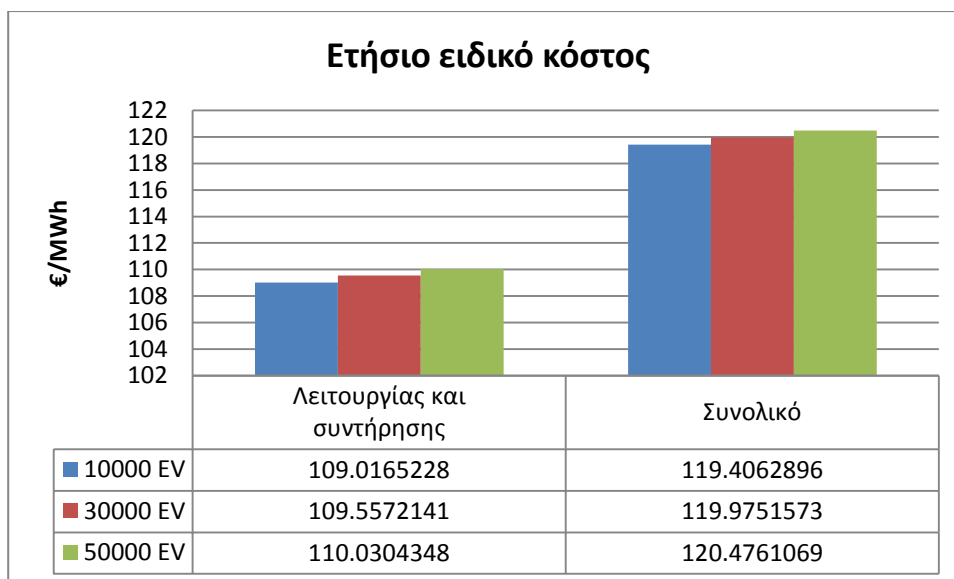
Διάγραμμα 74: Ποσοστό κάθε μονάδας επί του κόστους λειτουργίας και συντήρησης (dumb charging)



Διάγραμμα 75: Συνολικό ετήσιο κόστος συστήματος (dumb charging)

Παρατηρούμε ότι ο επιμερισμός του κόστους εξακολουθεί να είναι ο ίδιος, ανεξαρτήτως του αριθμού οχημάτων.

Τέλος, θα δείξουμε με ένα διάγραμμα την χρέωση της παραγωγής ανά μεγαβατώρα, με και χωρίς το κόστος των ρύπων.

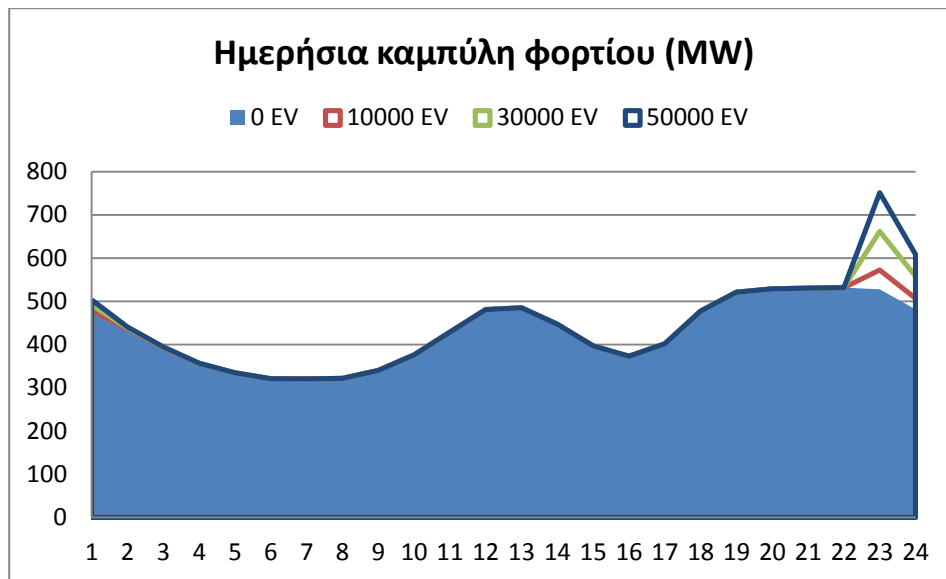


Διάγραμμα 76: Ετήσιο ειδικό κόστος (dumb charging)

5.2.4. Συμπεριφορά του ενεργειακού συστήματος της Κρήτης με ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο (dual tariff charging)

Σε αυτό το κομμάτι θα θεωρήσουμε ότι όλος ο στόλος των ηλεκτρικών οχημάτων ακολουθεί τη στρατηγική φόρτισης Β, δηλαδή την ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο. Η εισαγωγή των ηλεκτρικών οχημάτων ακολουθεί τα τρία σενάρια διεξόδου που περιγράφηκαν στην εισαγωγή της ενότητας.

Αρχικά, θα παρουσιάσουμε την καμπύλη φορτίου μιας τυχαίας μέρας μέσα στο χρόνο ώστε να φανεί πως λειτουργεί αυτός ο αλγόριθμος φόρτισης, δηλαδή να δούμε περίπου ποιες ώρες πραγματοποιείται η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων.

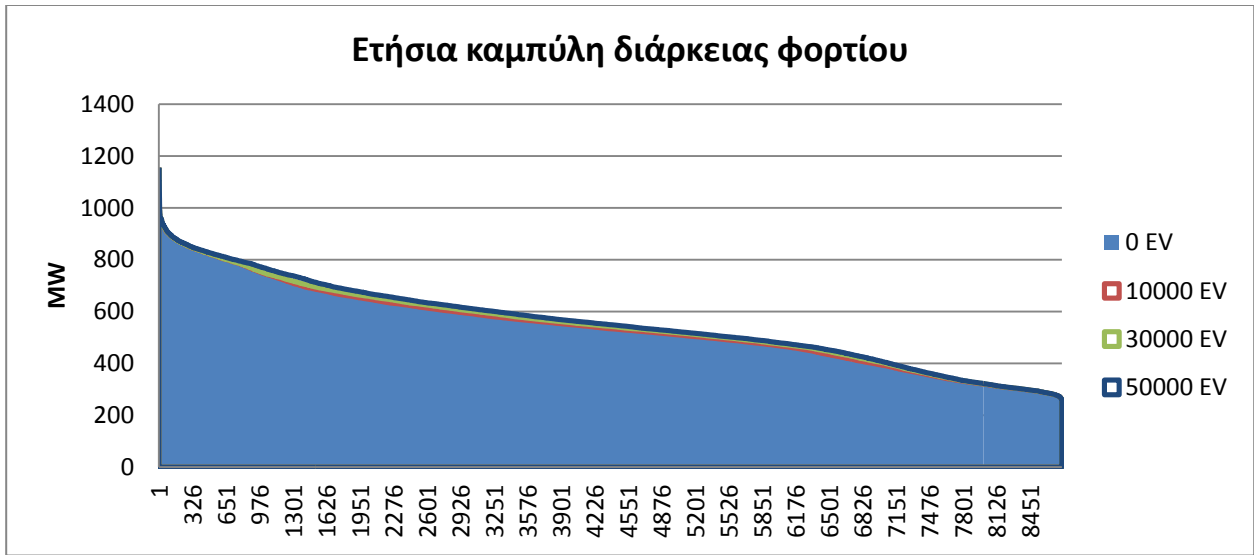


Διάγραμμα 77: Ημερήσια καμπύλη φορτίου (dual tariff)

Παρατηρούμε ότι την τυχαία αυτή μέρα, η φόρτιση γίνεται το βράδυ, από τις 10 έως τις πρώτες πρωινές ώρες.

❖ Καμπύλη διάρκειας φορτίου

Η ετήσια καμπύλη διάρκεια φορτίου για τη στρατηγική Β είναι:

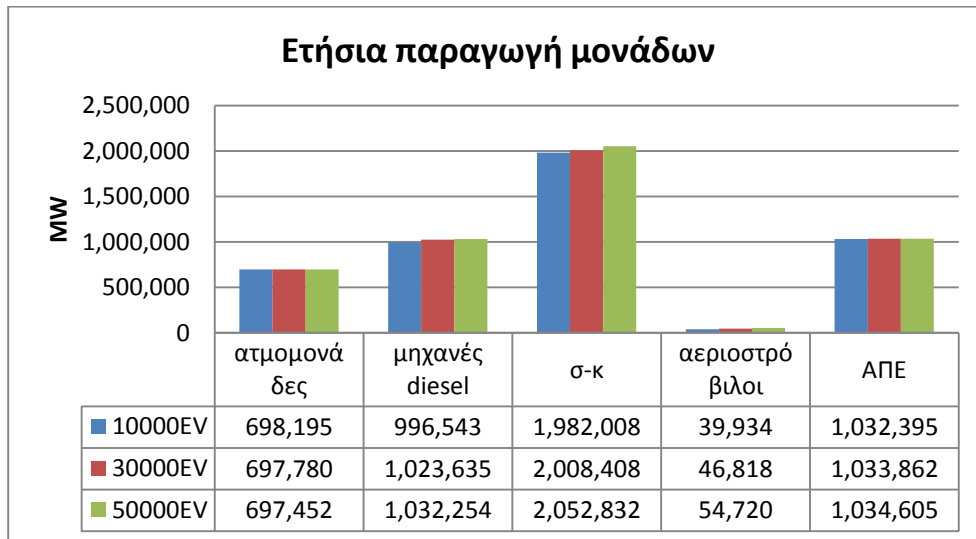


Διάγραμμα 78: Ετήσια καμπύλη διάρκειας φορτίου (dual tariff)

Εδώ παρατηρούμε ότι στην περίπτωση της ελεγχόμενης φόρτισης, το επιπλέον φορτίο που προέρχεται από τα ηλεκτρικά οχήματα, δεν προστίθεται μόνο στις ώρες αιχμής του συστήματος αλλά κατανέμεται λίγο καλύτερα.

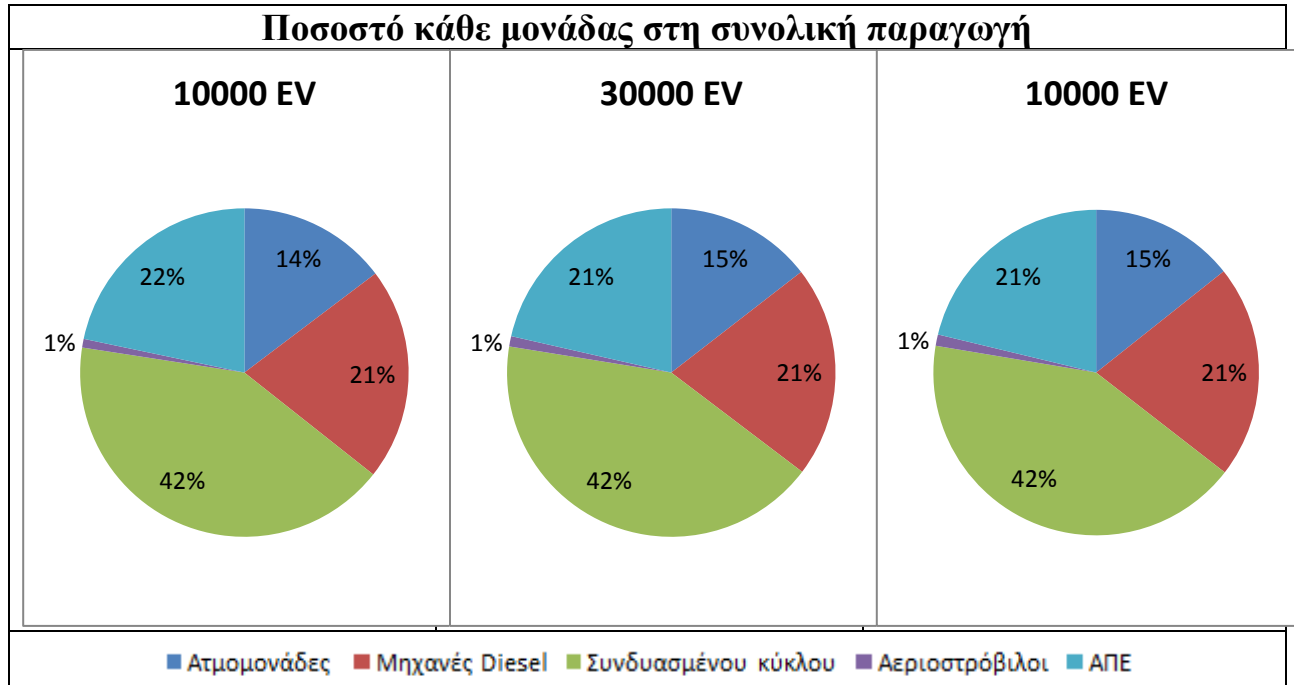
❖ Προγραμματισμός των μονάδων

Ο προγραμματισμός των μονάδων παραγωγής για όλο το έτος φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Αυτό που παρατηρούμε είναι και πάλι είναι ότι το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής προέρχεται από τις μονάδες συνδυασμένου κύκλου ενώ δεύτερες έρχονται οι μηχανές diesel και τα ΑΠΕ. Η συνεισφορά των αεριοστρόβιλων είναι αρκετά χαμηλή.



Διάγραμμα 79: Ετήσια παραγωγή μονάδων (dual tariff)

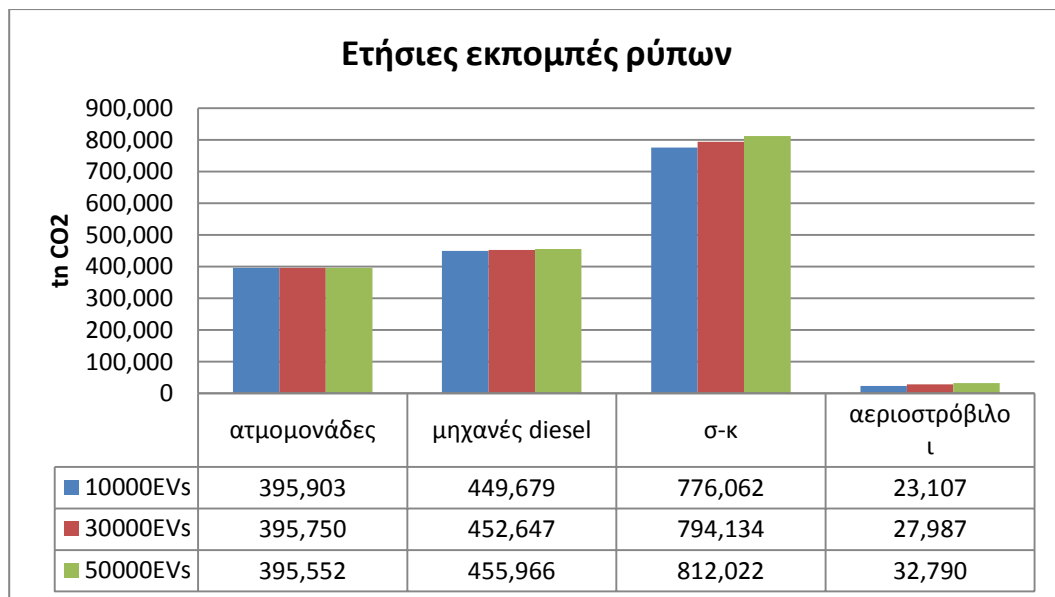
Το ακριβές ποσοστό με το οποίο συμμετέχει κάθε μονάδα στη συνολική παραγωγή φαίνεται και στο επόμενο διάγραμμα.



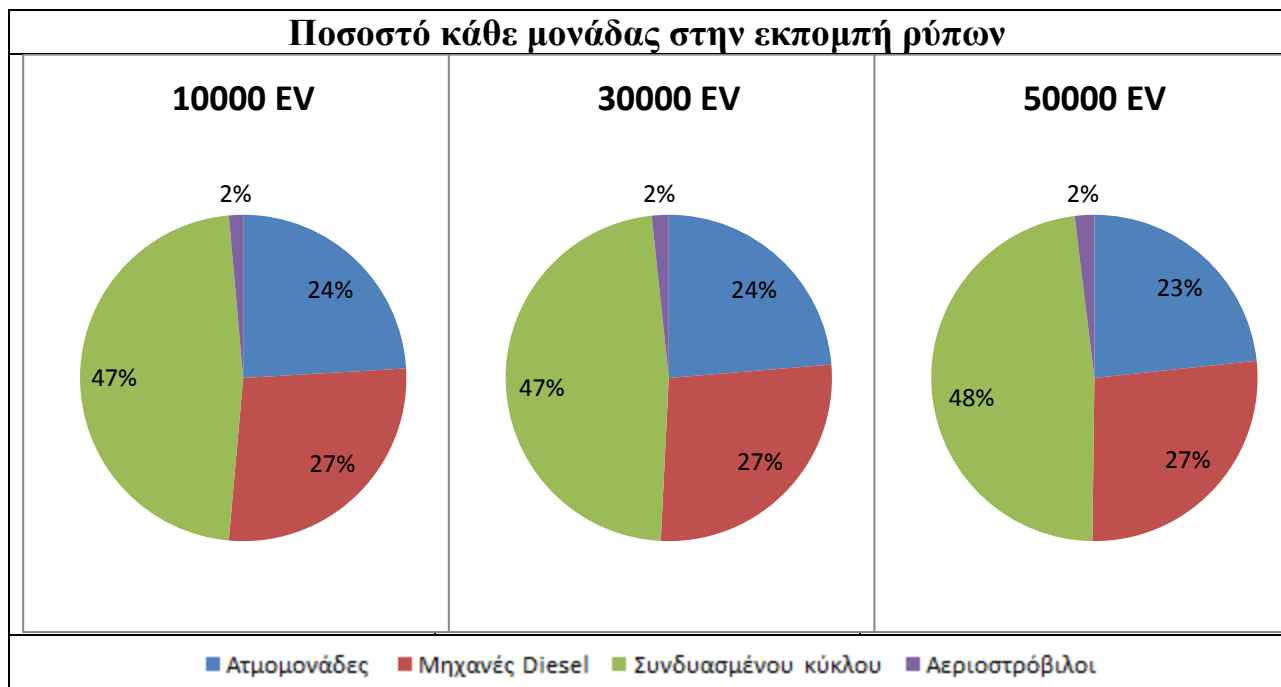
Διάγραμμα 80: Ποσοστό κάθε μονάδας στη συνολική παραγωγή (dual tariff)

❖ Εκπεμπόμενοι ρύποι

Οι εκπεμπόμενοι ρύποι του έτους για τα τρία σενάρια διεύθυνσης ηλεκτρικών οχημάτων τα οποία πραγματοποιούν ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο φαίνονται παρακάτω:



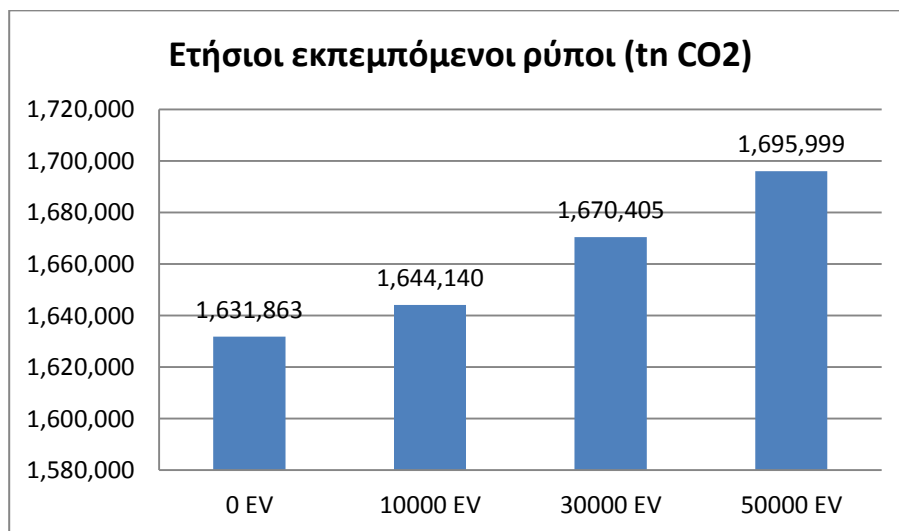
Διάγραμμα 81: Ετήσιες εκπομπές ρύπων (dual tariff)



Διάγραμμα 82: Ποσοστό κάθε μονάδας στην εκπομπή ρύπων (dual tariff)

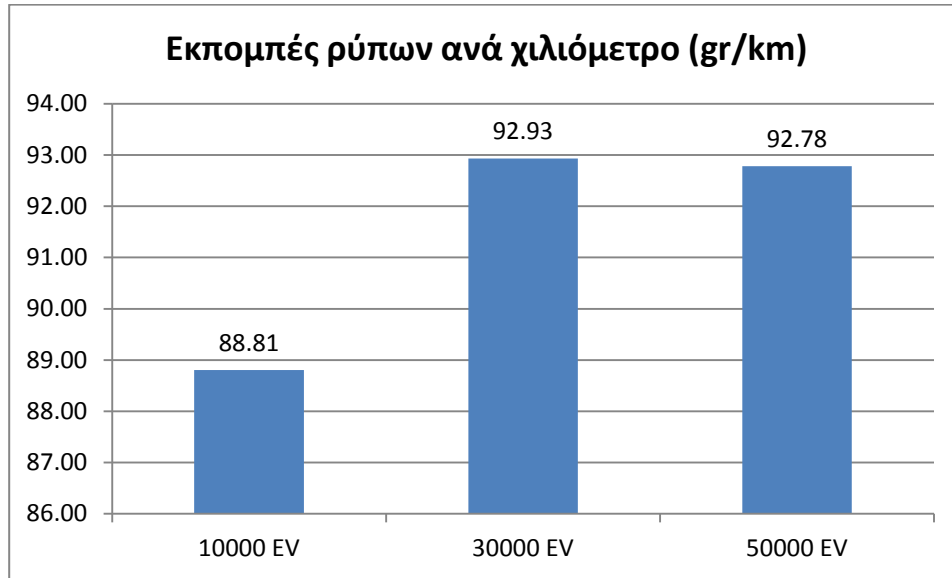
Αντίστοιχα με πριν, οι μηχανές συνδυασμένου κύκλου είναι αυτές που εκπέμπουν το μεγαλύτερο ποσοστό ρύπων προς το περιβάλλον, με το ποσοστό τους να πλησιάζει το 50% των συνολικών ρύπων.

Όσον αφορά τους συνολικούς ετήσιους εκπεμπόμενους ρύπους για τα διάφορα σενάρια διεύθυνσης οχημάτων, αυτοί είναι οι εξής:



Διάγραμμα 83: Ετήσιοι εκπεμπόμενοι ρύποι (dual tariff)

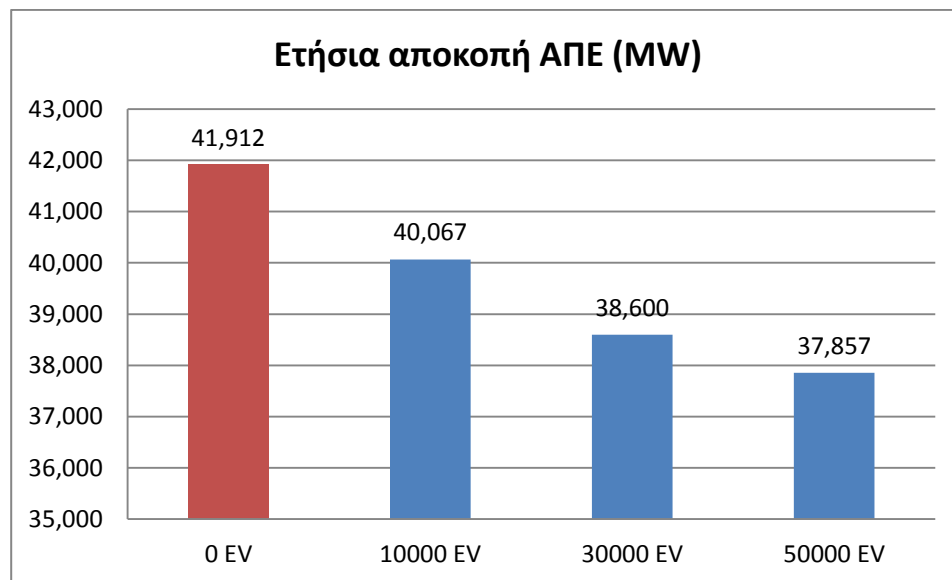
Επιπλέον, γνωρίζοντας την ποσότητα των συνολικών ρύπων που εκπέμπονται και το σύνολο των ηλεκτρικών οχημάτων και της ημερήσιας διαδρομής που αυτά κάνουν, μπορούμε να υπολογίσουμε τους ρύπους ανά χιλιόμετρο. Αυτό το στατιστικό παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 84: Εκπομπές ρύπων ανά χιλιόμετρο (dual tariff)

❖ Αποκοπή των ΑΠΕ

Το ποσοστό της παραγωγής των ΑΠΕ που αποκόπτεται υλοποιώντας τη στρατηγική φόρτισης Α, αποτυπώνεται στο παρακάτω διάγραμμα:

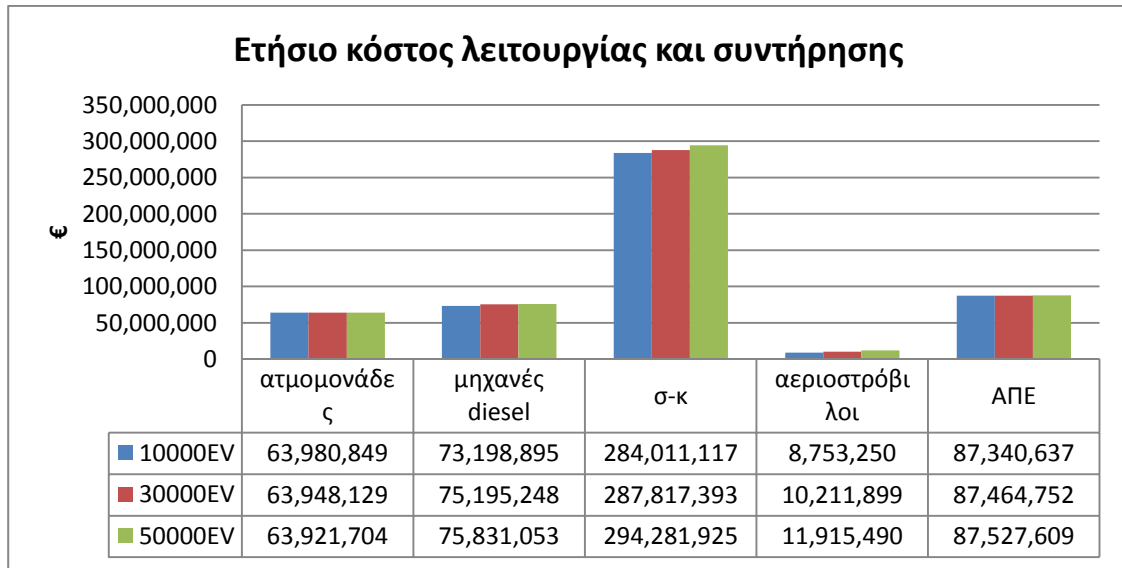


Διάγραμμα 85: Ετήσια αποκοπή ΑΠΕ (dual tariff)

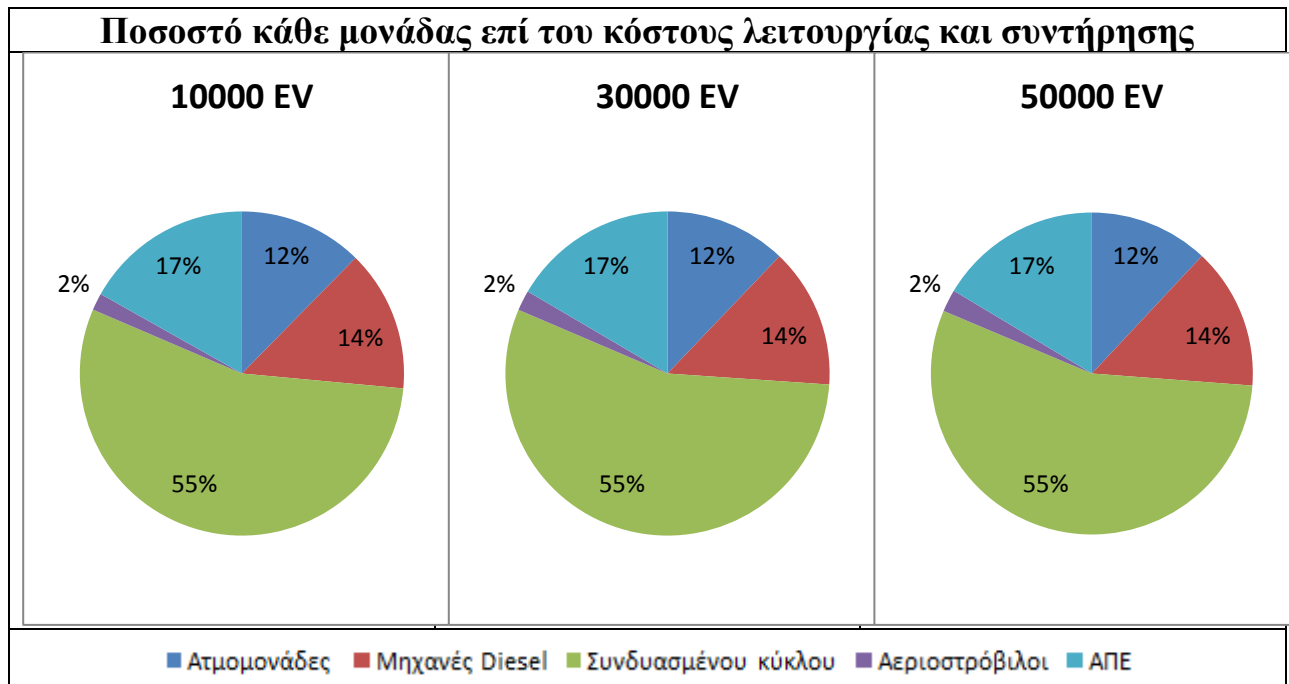
Παρατηρούμε, δηλαδή, ότι με την είσοδο οχημάτων μειώνεται το ποσοστό της ισχύος που μένει ανεκμετάλλευτο από τα ΑΠΕ, και μάλιστα αυτή η μείωση μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 784 MW.

❖ Οικονομική αποτίμηση

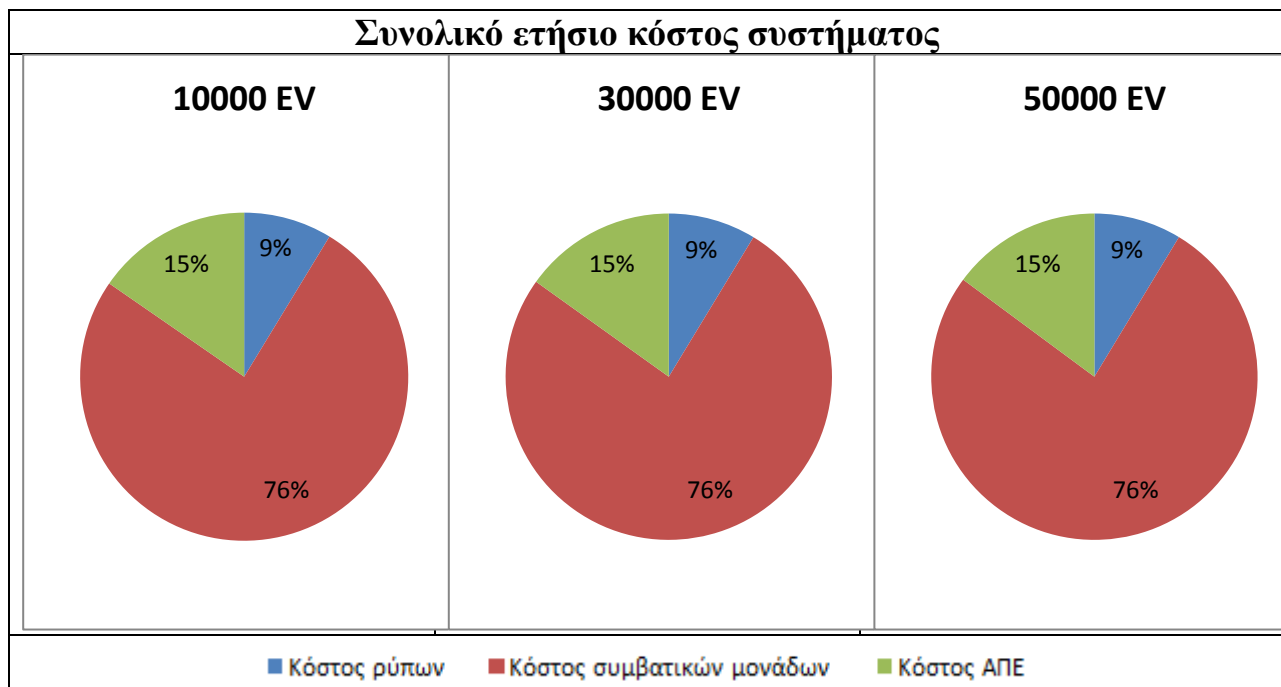
Στη συνέχεια ακολουθούν τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης κάθε μονάδας παραγωγής, η συμμετοχή της κάθε μονάδας στο συνολικό αυτό κόστος και το συνολικό ετήσιο κόστος.



Διάγραμμα 86: Ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης (dual tariff)



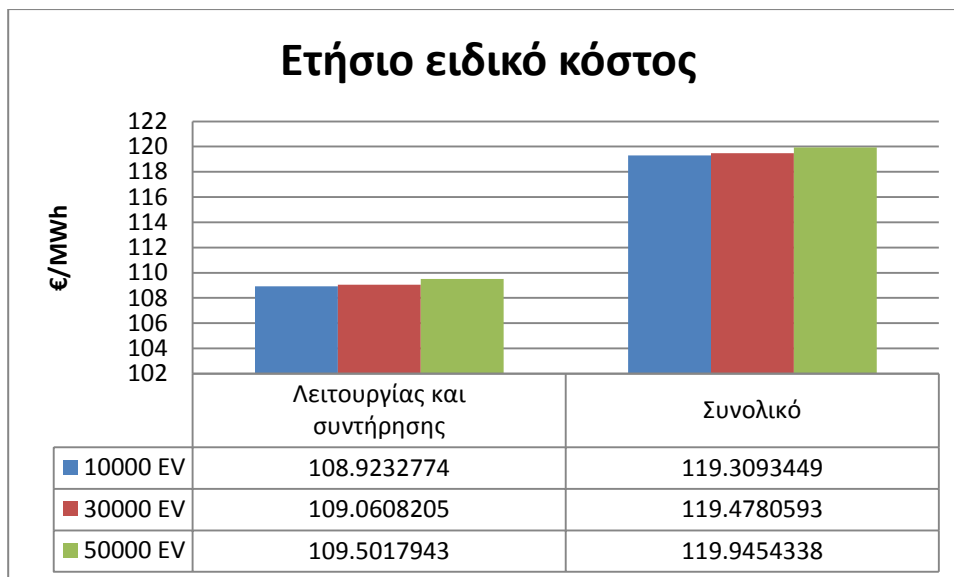
Διάγραμμα 87: Ποσοστό κάθε μονάδας επί του κόστους λειτουργίας και συντήρησης (dual tariff)



Διάγραμμα 88: Συνολικό ετήσιο κόστος συστήματος (dual tariff)

Παρατηρούμε ότι ο επιμερισμός του κόστους εξακολουθεί να είναι ο ίδιος, ανεξαρτήτως του αριθμού οχημάτων.

Τέλος, θα δείξουμε με ένα διάγραμμα την χρέωση της παραγωγής ανά μεγαβατώρα, με και χωρίς το κόστος των ρύπων.

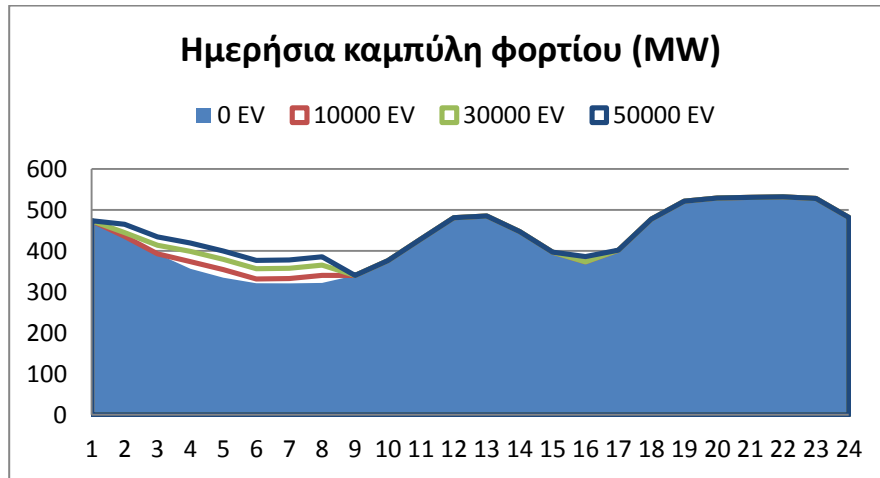


Διάγραμμα 89: Ετήσιο ειδικό κόστος (dual tariff)

5.2.5. Συμπεριφορά του ενεργειακού συστήματος της Κρήτης με έξυπνη φόρτιση (smart charging)

Σε αυτή την περίπτωση όλος ο στόλος θεωρούμαι ότι ακολουθεί την έξυπνη φόρτιση (smart charging).

Αρχικά, θα παρουσιάσουμε την καμπύλη φορτίου μιας τυχαίας μέρας μέσα στο χρόνο ώστε να φανεί πως λειτουργεί αυτός ο αλγόριθμος φόρτισης, δηλαδή να δούμε περίπου ποιες ώρες πραγματοποιείται η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων.

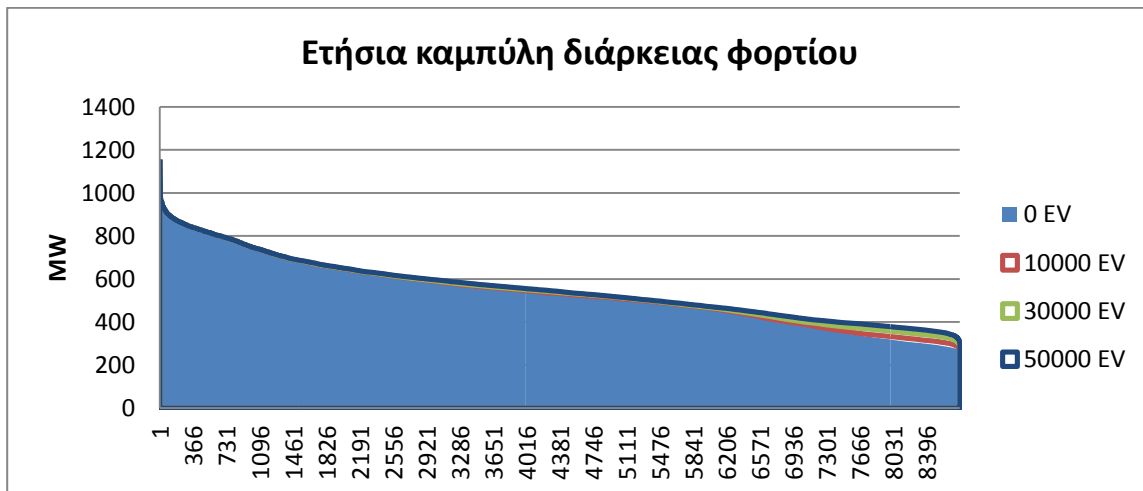


Διάγραμμα 90: Ημερήσια καμπύλη φορτίου (smart charging)

Παρατηρούμε ότι την τυχαία αυτή μέρα, η φόρτιση γίνεται κυρίως τις πρώτες πρωινές ώρες που η ζήτηση είναι χαμηλή.

❖ Καμπύλη διάρκειας φορτίου

Η ετήσια καμπύλη διάρκειας φορτίου για τη στρατηγική C είναι:

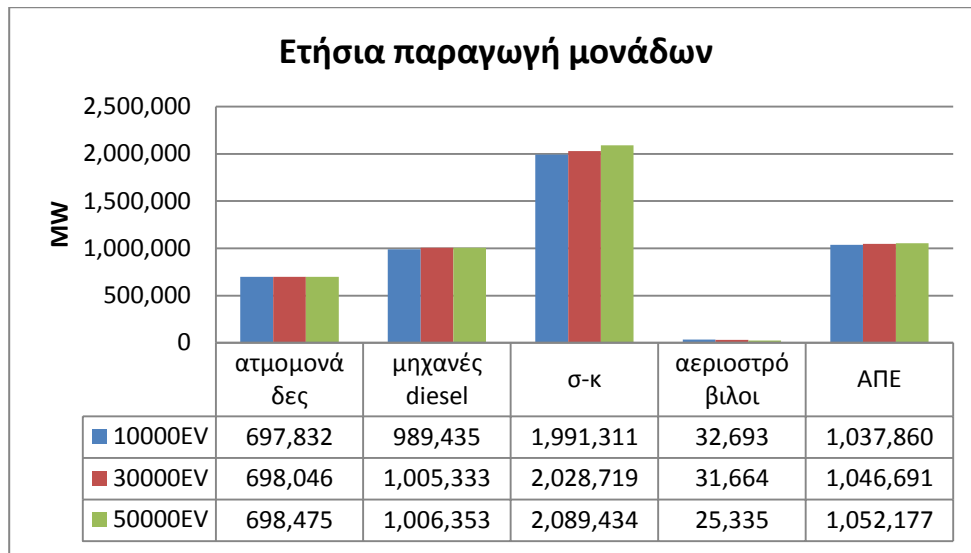


Διάγραμμα 91: Ετήσια καμπύλη διάρκειας φορτίου (smart charging)

Εδώ παρατηρούμε ότι στην περίπτωση της έξυπνης φόρτισης, το επιπλέον φορτίο που προέρχεται από τα ηλεκτρικά οχήματα, προστίθεται στις ώρες που έχουμε χαμηλότερη ζήτηση.

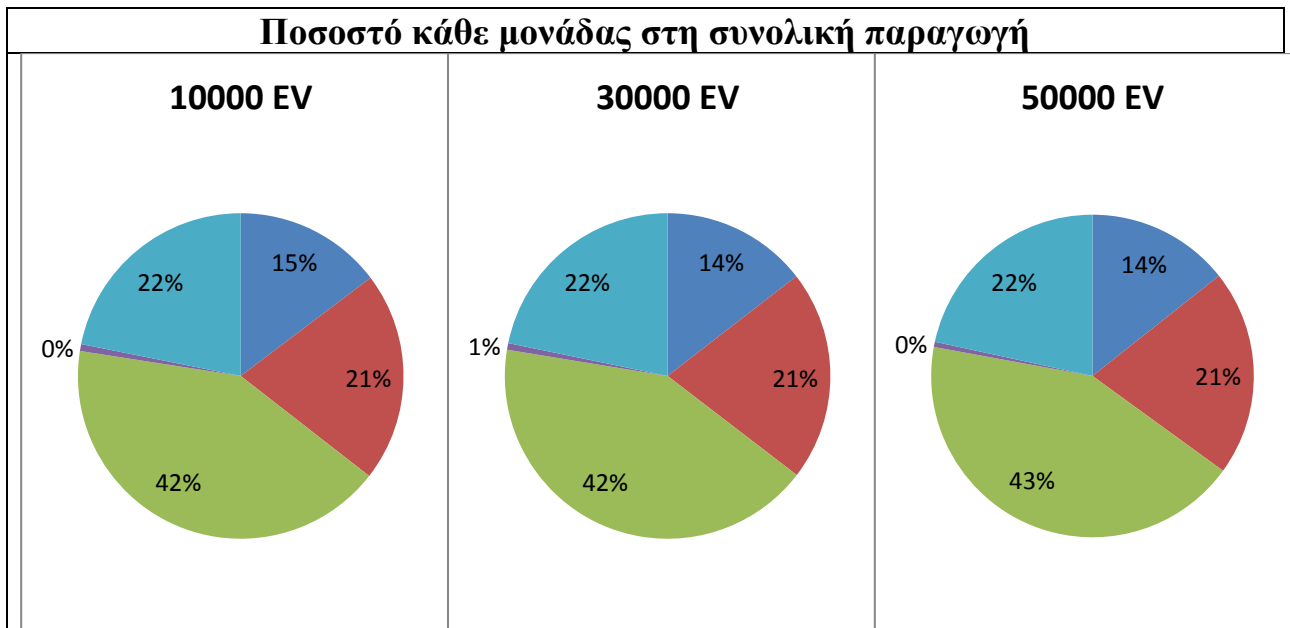
❖ Προγραμματισμός των μονάδων

Ο προγραμματισμός των μονάδων παραγωγής για όλο το έτος φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Διάγραμμα 92: Ετήσια παραγωγή μονάδων (smart charging)

Το ακριβές ποσοστό με το οποίο συμμετέχει κάθε μονάδα στη συνολική παραγωγή φαίνεται και στο επόμενο διάγραμμα.

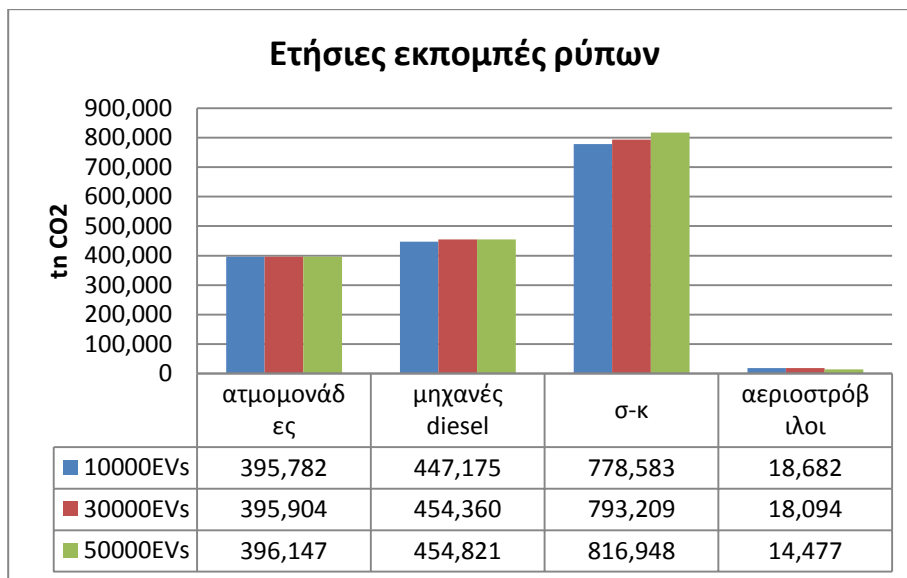


■ Ατμομονάδες ■ Μηχανές Diesel ■ Συνδυασμένου κύκλου ■ Αεριοστρόβιλοι ■ ΑΠΕ

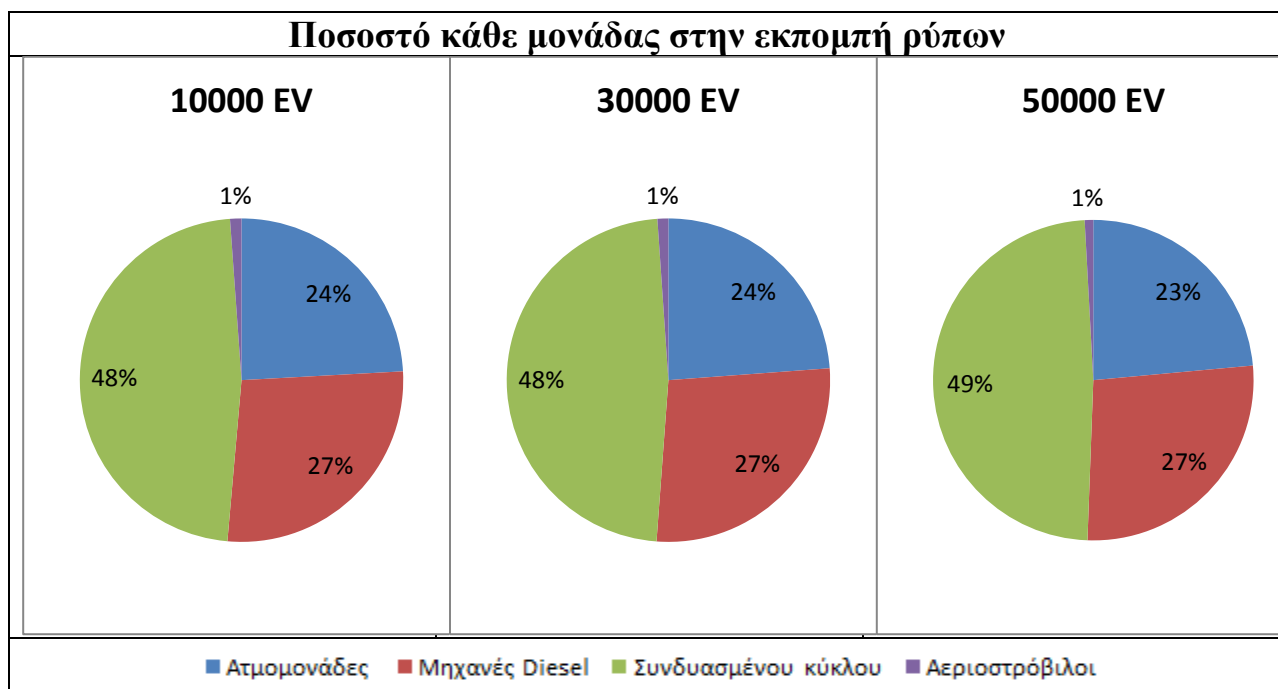
Διάγραμμα 93: Ποσοστό κάθε μονάδας στη συνολική παραγωγή (smart charging)

❖ Εκπεμπόμενοι ρύποι

Οι εκπεμπόμενοι ρύποι του έτους για τα τρία σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων τα οποία πραγματοποιούν ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο φαίνονται παρακάτω:



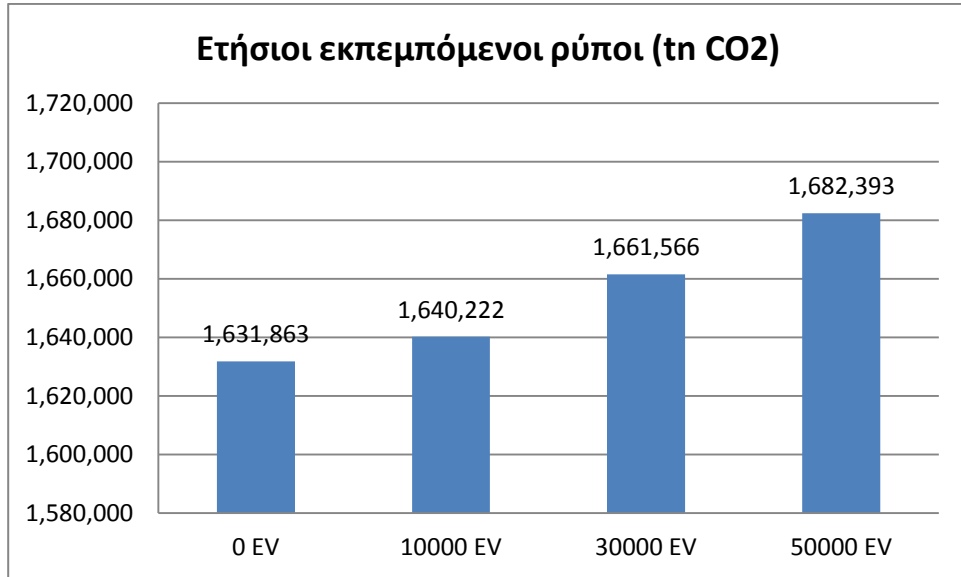
Διάγραμμα 94: Ετήσιες εκπομπές ρύπων (smart charging)



Διάγραμμα 95: Ποσοστό κάθε μονάδας στην εκπομπή ρύπων (smart charging)

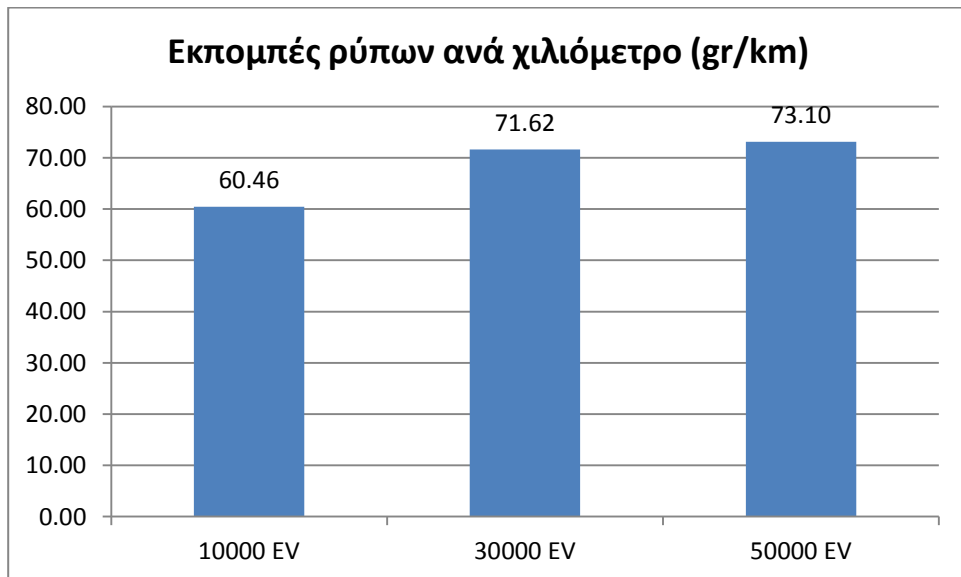
Αντίστοιχα με πριν, οι μηχανές συνδυασμένου κύκλου είναι αυτές που εκπέμπουν το μεγαλύτερο ποσοστό ρύπων προς το περιβάλλον, με το ποσοστό τους να πλησιάζει το 50% των συνολικών ρύπων.

Όσον αφορά τους συνολικούς ετήσιους εκπεμπόμενους ρύπους για τα διάφορα σενάρια διείσδυσης οχημάτων, αυτοί είναι οι εξής:



Διάγραμμα 96: Ετήσιοι εκπεμπόμενοι ρύποι (smart charging)

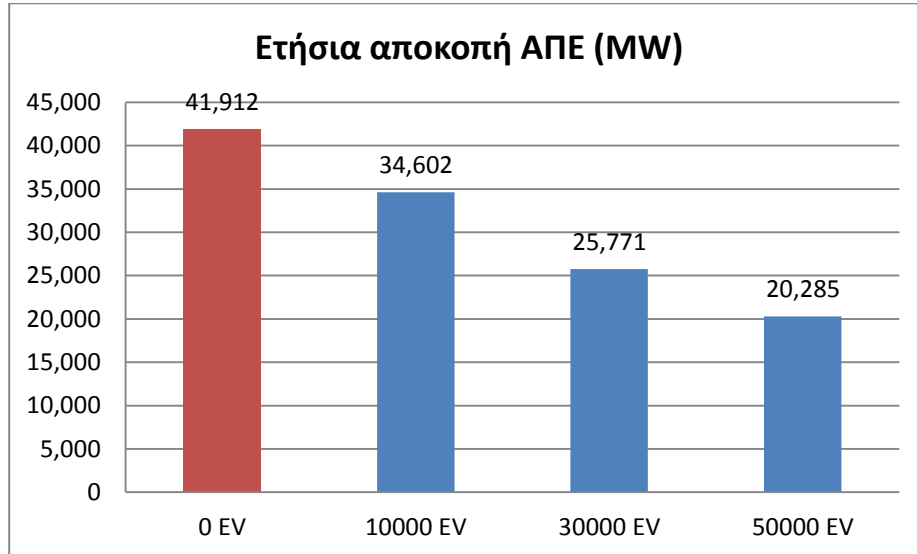
Επιπλέον, γνωρίζοντας την ποσότητα των συνολικών ρύπων που εκπέμπονται και το σύνολο των ηλεκτρικών οχημάτων και της ημερήσιας διαδρομής που αυτά κάνουν, μπορούμε να υπολογίσουμε τους ρύπους ανά χιλιόμετρο. Αυτό το στατιστικό παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 97: Εκπομπές ρύπων ανά χιλιόμετρο (smart charging)

❖ Αποκοπή των ΑΠΕ

Το ποσοστό της παραγωγής των ΑΠΕ που αποκόπτεται υλοποιώντας τη στρατηγική φόρτισης Α, αποτυπώνεται στο παρακάτω διάγραμμα:

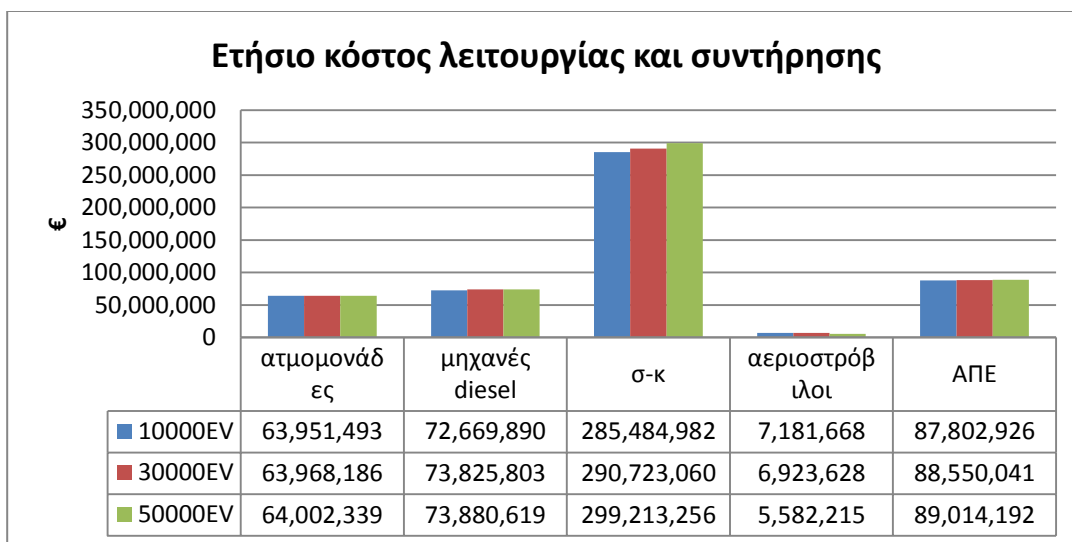


Διάγραμμα 98: Ετήσια αποκοπή ΑΠΕ (smart charging)

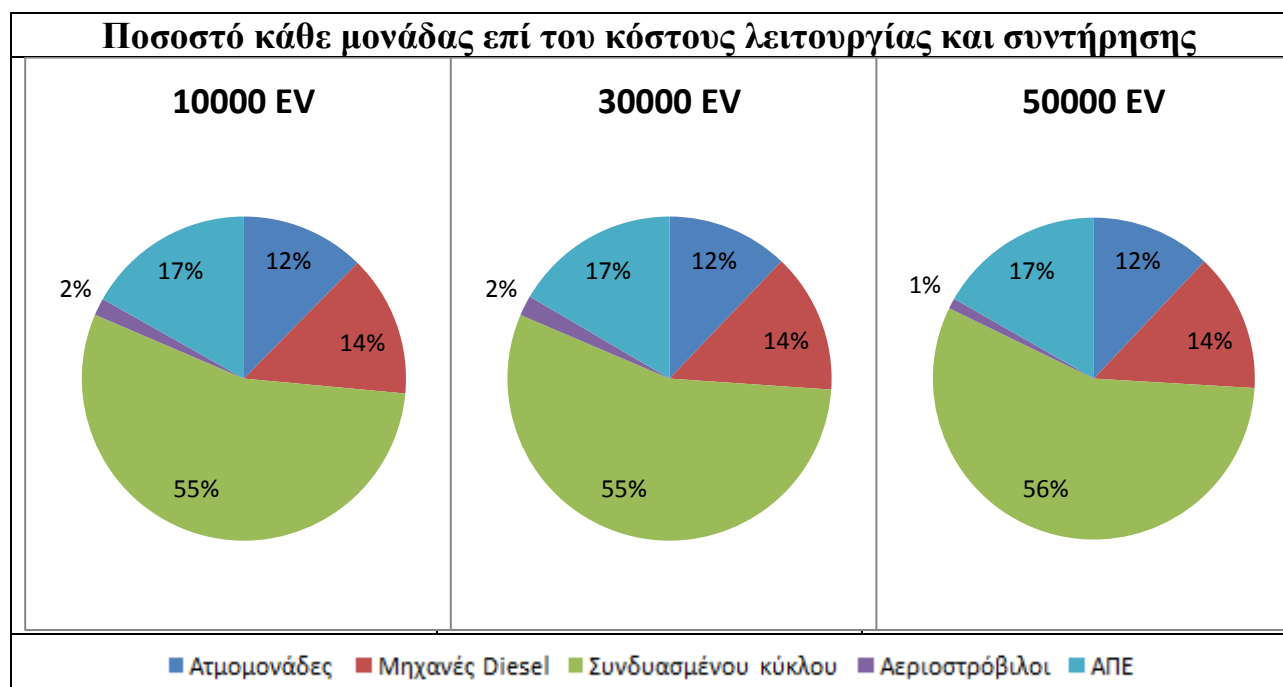
Παρατηρούμε, δηλαδή, ότι με την είσοδο οχημάτων μειώνεται το ποσοστό της ισχύος που μένει ανεκμετάλλευτο από τα ΑΠΕ, και μάλιστα αυτή η μείωση μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 784 MW.

❖ Οικονομική αποτίμηση

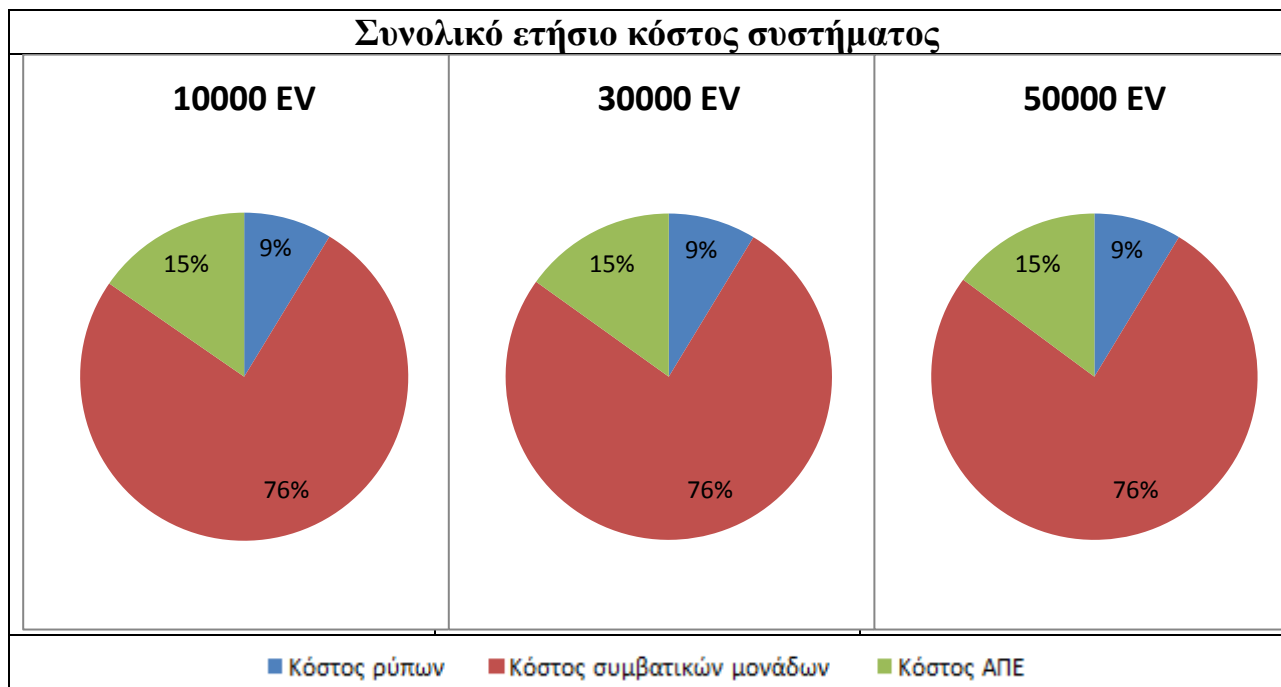
Στη συνέχεια ακολουθούν τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης κάθε μονάδας παραγωγής, η συμμετοχή της κάθε μονάδας στο συνολικό αυτό κόστος και το συνολικό ετήσιο κόστος.



Διάγραμμα 99: Ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης (smart charging)

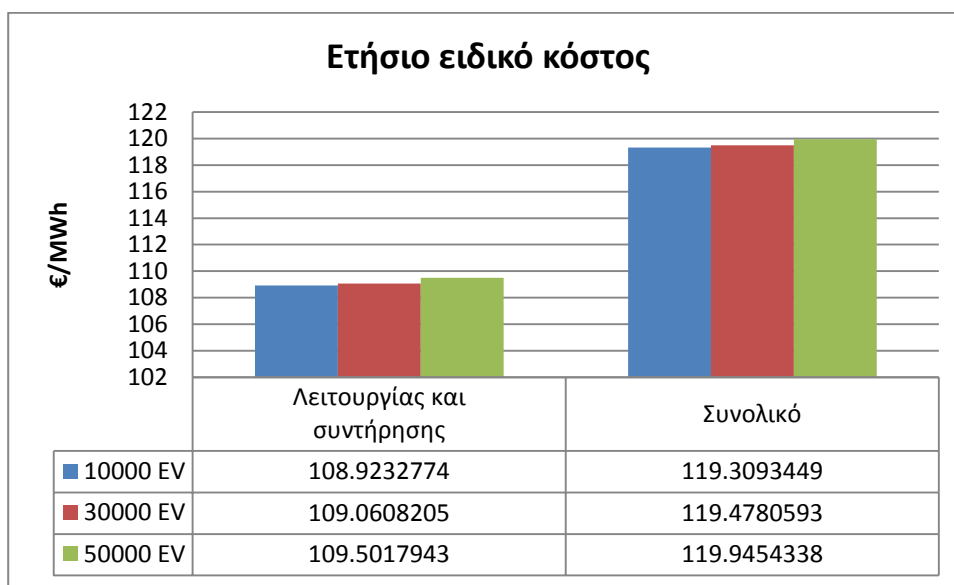


Διάγραμμα 100: Ποσοστό κάθε μονάδας επί του κόστους λειτουργίας και συντήρησης (smart charging)



Διάγραμμα 101: Συνολικό ετήσιο κόστος συστήματος (smart charging)

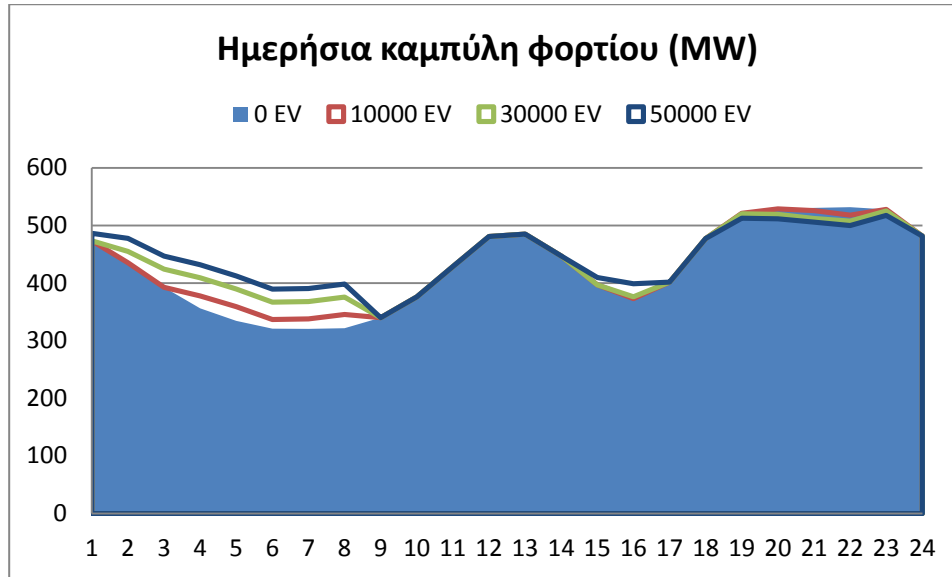
Τέλος, θα δείξουμε με ένα διάγραμμα την χρέωση της παραγωγής ανά μεγαβατώρα, με και χωρίς το κόστος των ρύπων.



Διάγραμμα 102: Ετήσιο ειδικό κόστος (smart charging)

5.2.6. Συμπεριφορά του ενεργειακού συστήματος της Κρήτης με φόρτιση που περιλαμβάνει εφαρμογή V2G (vehicle-to-grid)

Αρχικά, θα παρουσιάσουμε την καμπύλη φορτίου μιας τυχαίας μέρας μέσα στο χρόνο ώστε να φανεί πως λειτουργεί αυτός ο αλγόριθμος φόρτισης, δηλαδή να δούμε περίπου ποιες ώρες πραγματοποιείται η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων.

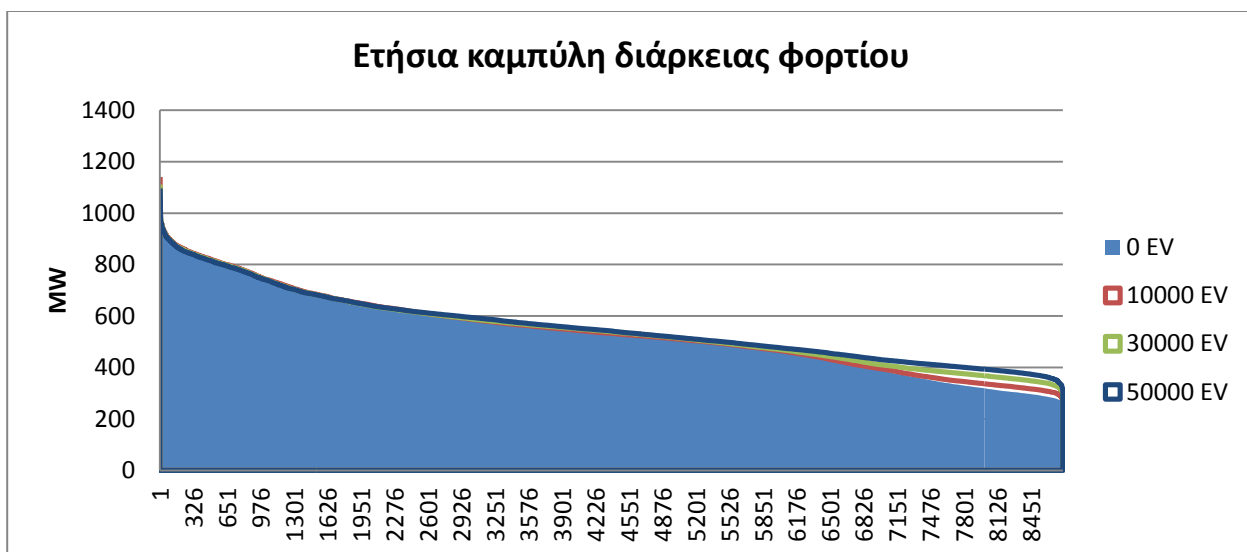


Διάγραμμα 103: Ημερήσια καμπύλη φορτίου (στρατηγική V2G)

Εδώ βλέπουμε ότι πέραν του ότι η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων γίνεται τις ώρες χαμηλής ζήτησης, έχουμε και μείωση της συνολικής ζήτησης στις ώρες αιχμής, χάρη στη V2G λειτουργία.

❖ Καμπύλη διάρκειας φορτίου

Η ετήσια καμπύλη διάρκεια φορτίου για τη στρατηγική D είναι:

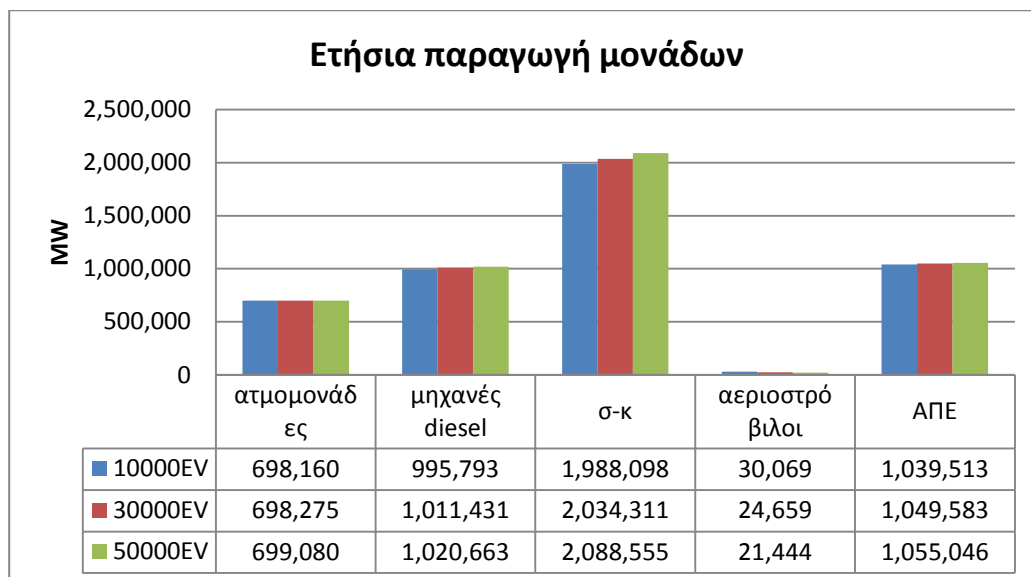


Διάγραμμα 104: Ετήσια καμπύλη διάρκειας φορτίου (στρατηγική V2G)

Εδώ παρατηρούμε ότι στην περίπτωση αυτή, το επιπλέον φορτίο που προέρχεται από τα ηλεκτρικά οχήματα, προστίθεται στις ώρες που έχουμε χαμηλότερη ζήτηση.

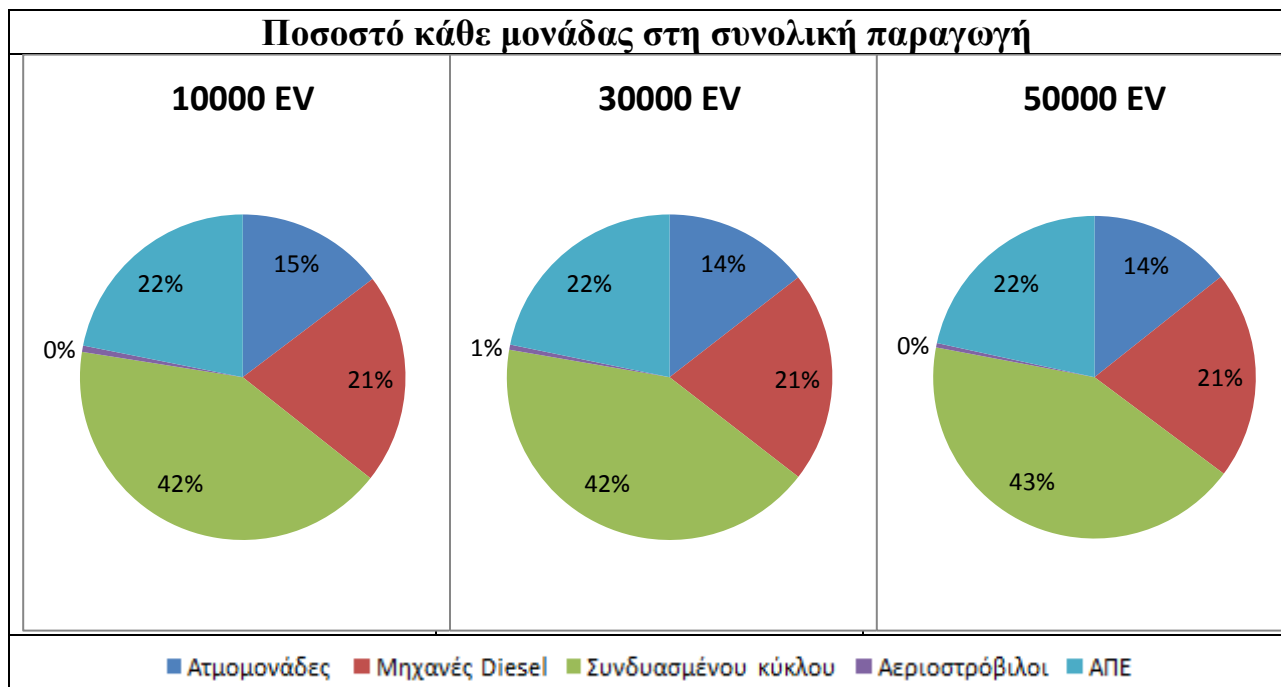
❖ Προγραμματισμός των μονάδων

Ο προγραμματισμός των μονάδων παραγωγής για όλο το έτος φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Διάγραμμα 105: Ετήσια παραγωγή μονάδων (στρατηγική V2G)

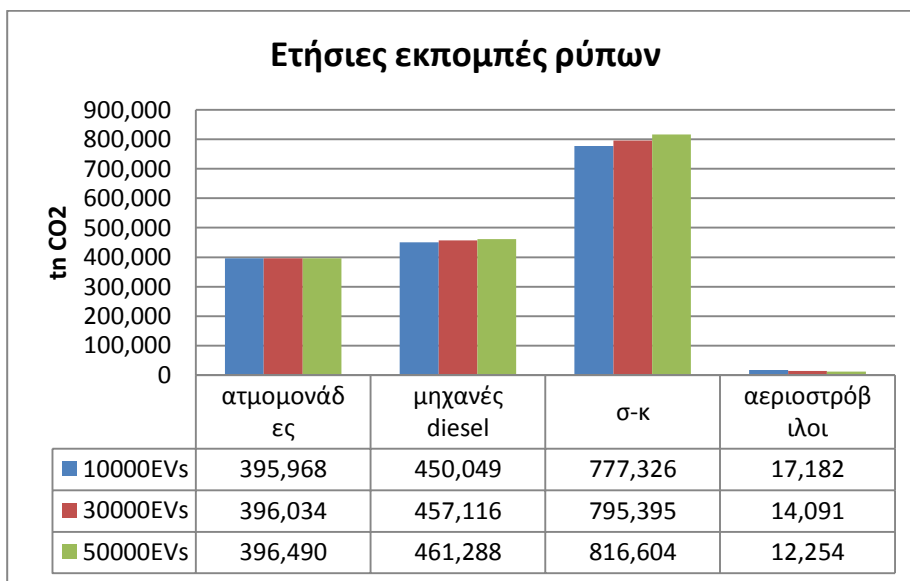
Το ακριβές ποσοστό με το οποίο συμμετέχει κάθε μονάδα στη συνολική παραγωγή φαίνεται και στο επόμενο διάγραμμα.



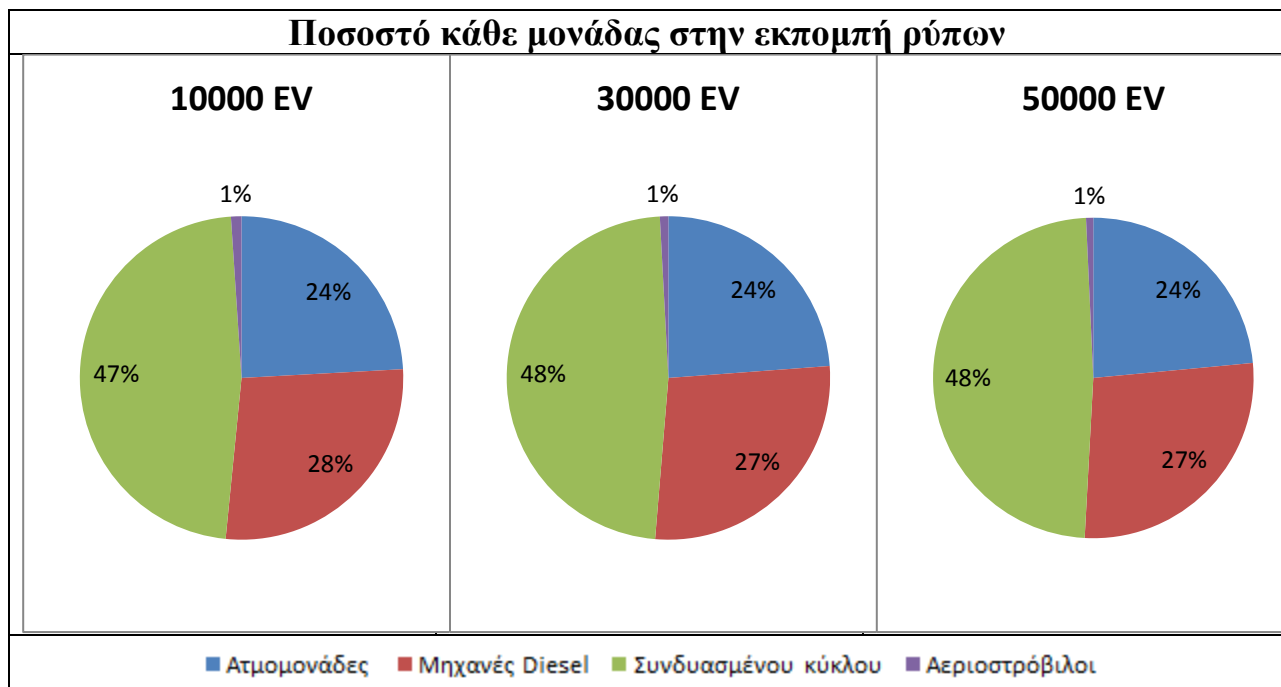
Διάγραμμα 106: Ποσοστό κάθε μονάδας στη συνολική παραγωγή (στρατηγική V2G)

❖ Εκπεμπόμενοι ρύποι

Οι εκπεμπόμενοι ρύποι του έτους για τα τρία σενάρια διεξόδου ηλεκτρικών οχημάτων τα οποία πραγματοποιούν ελεγχόμενη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο φαίνονται παρακάτω:



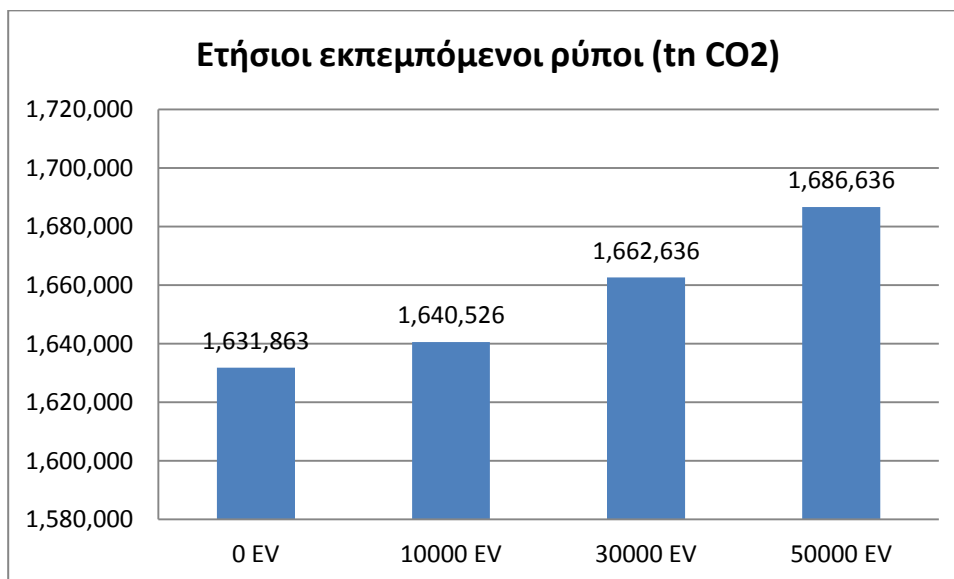
Διάγραμμα 107: Ετήσιες εκπομπές ρύπων (στρατηγική V2G)



Διάγραμμα 108: Ποσοστό κάθε μονάδας στην εκπομπή ρύπων (στρατηγική V2G)

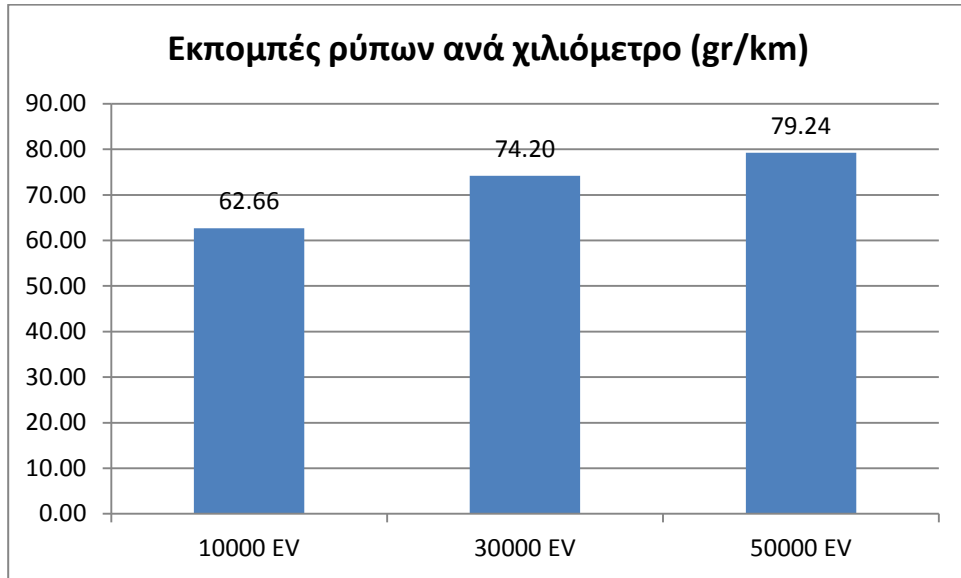
Αντίστοιχα με πριν, οι μηχανές συνδυασμένου κύκλου είναι αυτές που εκπέμπουν το μεγαλύτερο ποσοστό ρύπων προς το περιβάλλον, με το ποσοστό τους να πλησιάζει το 50% των συνολικών ρύπων.

Όσον αφορά τους συνολικούς ετήσιους εκπεμπόμενους ρύπους για τα διάφορα σενάρια διεύθυνσης οχημάτων, αυτοί είναι οι εξής:



Διάγραμμα 109: Ετήσιοι εκπεμπόμενοι ρύποι (στρατηγική V2G)

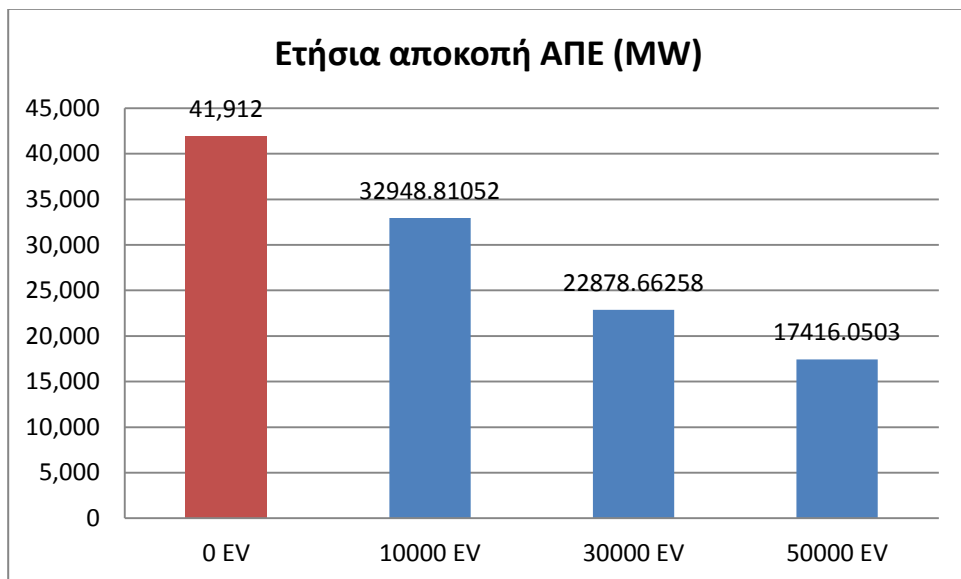
Επιπλέον, γνωρίζοντας την ποσότητα των συνολικών ρύπων που εκπέμπονται και το σύνολο των ηλεκτρικών οχημάτων και της ημερήσιας διαδρομής που αυτά κάνουν, μπορούμε να υπολογίσουμε τους ρύπους ανά χιλιόμετρο. Αυτό το στατιστικό παρουσιάζεται παρακάτω:



Διάγραμμα 110: Εκπομπές ρύπων ανά χιλιόμετρο (στρατηγική V2G)

❖ Αποκοπή των ΑΠΕ

Το ποσοστό της παραγωγής των ΑΠΕ που αποκόπτεται υλοποιώντας τη στρατηγική φόρτισης A, αποτυπώνεται στο παρακάτω διάγραμμα:

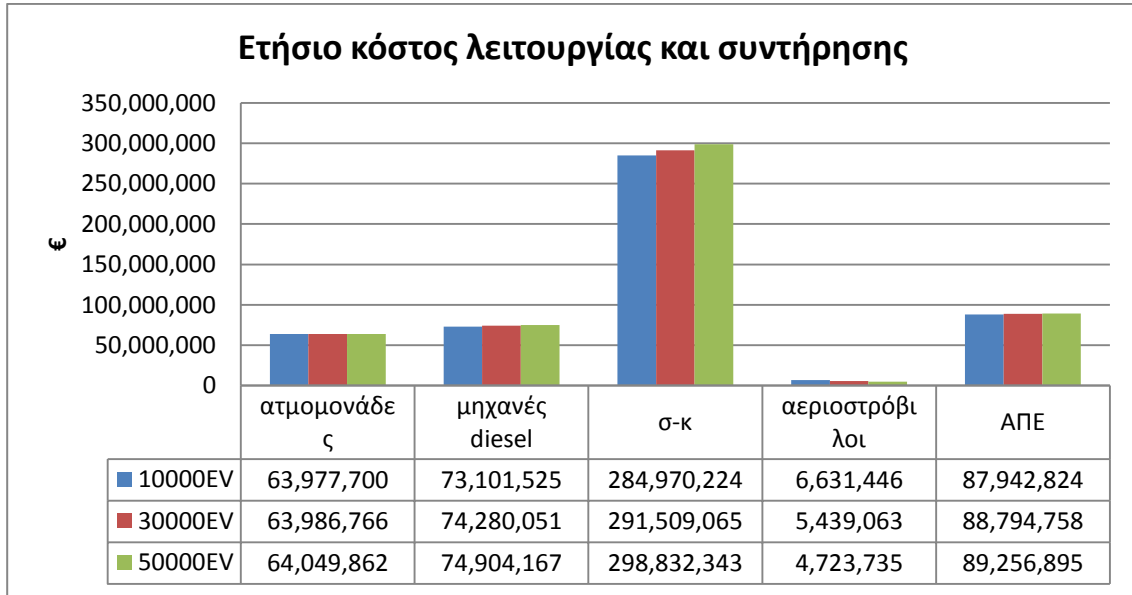


Διάγραμμα 111: Ετήσια αποκοπή ΑΠΕ (στρατηγική V2G)

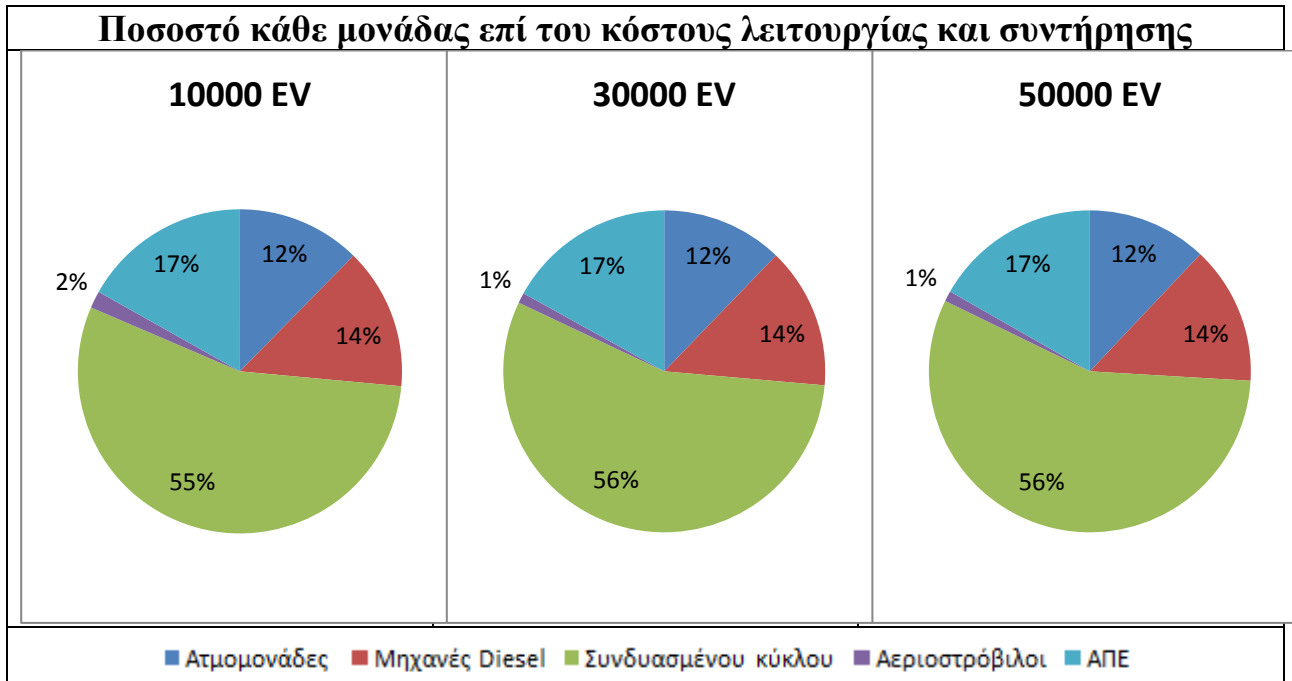
Παρατηρούμε, δηλαδή, ότι με την είσοδο οχημάτων μειώνεται το ποσοστό της ισχύος που μένει ανεκμετάλλευτο από τα ΑΠΕ, και μάλιστα αυτή η μείωση μπορεί να φτάσει μέχρι και τα 784 MW.

❖ Οικονομική αποτίμηση

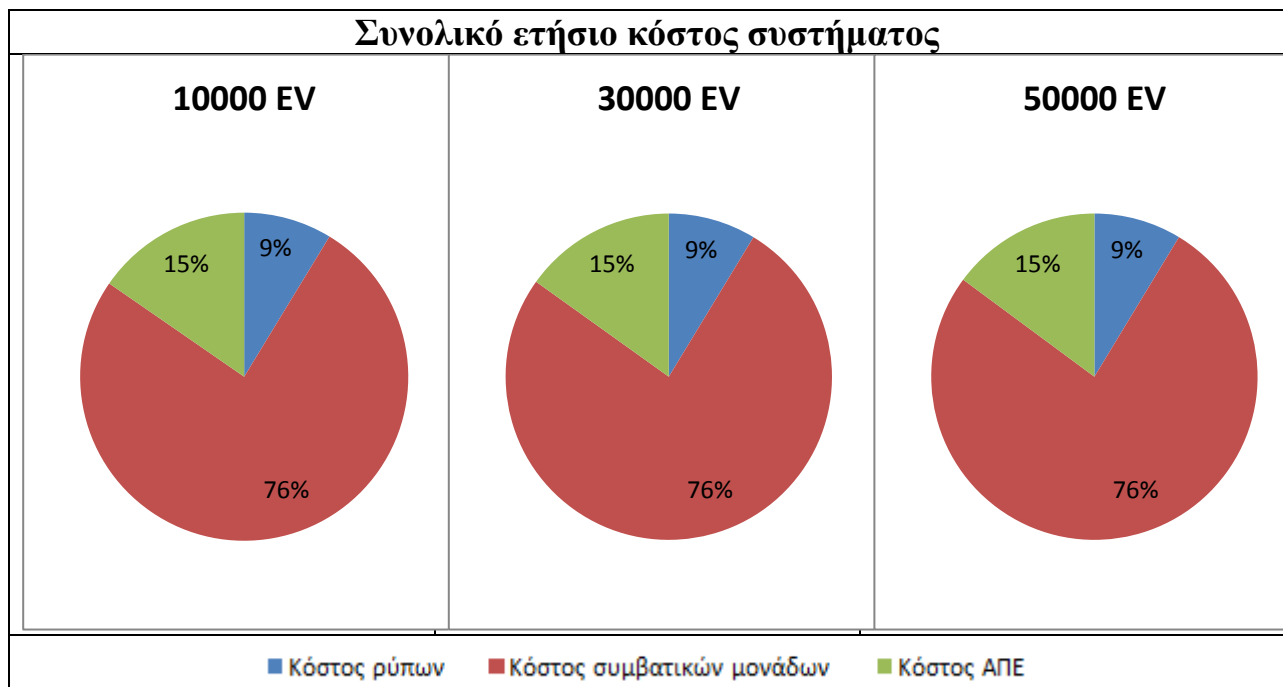
Στη συνέχεια ακολουθούν τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης κάθε μονάδας παραγωγής, η συμμετοχή της κάθε μονάδας στο συνολικό αυτό κόστος και το συνολικό ετήσιο κόστος.



Διάγραμμα 112: Ετήσιο κόστος λειτουργίας και συντήρησης (στρατηγική V2G)

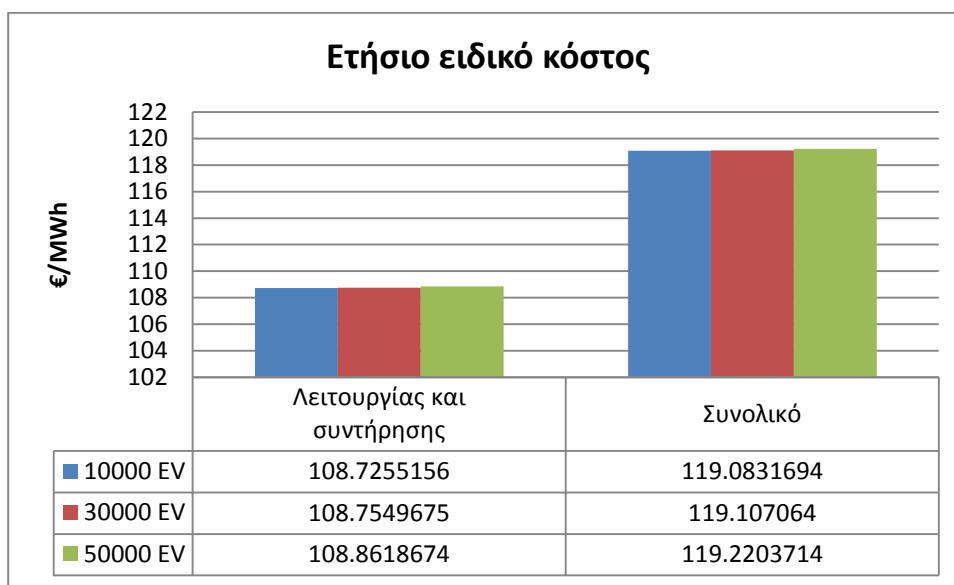


Διάγραμμα 113: Ποσοστό κάθε μονάδας επί του κόστους λειτουργίας και συντήρησης (στρατηγική V2G)



Διάγραμμα 114: Συνολικό ετήσιο κόστος συστήματος (στρατηγική V2G)

Τέλος, θα δείξουμε με ένα διάγραμμα την χρέωση της παραγωγής ανά μεγαβατώρα, με και χωρίς το κόστος των ρύπων.



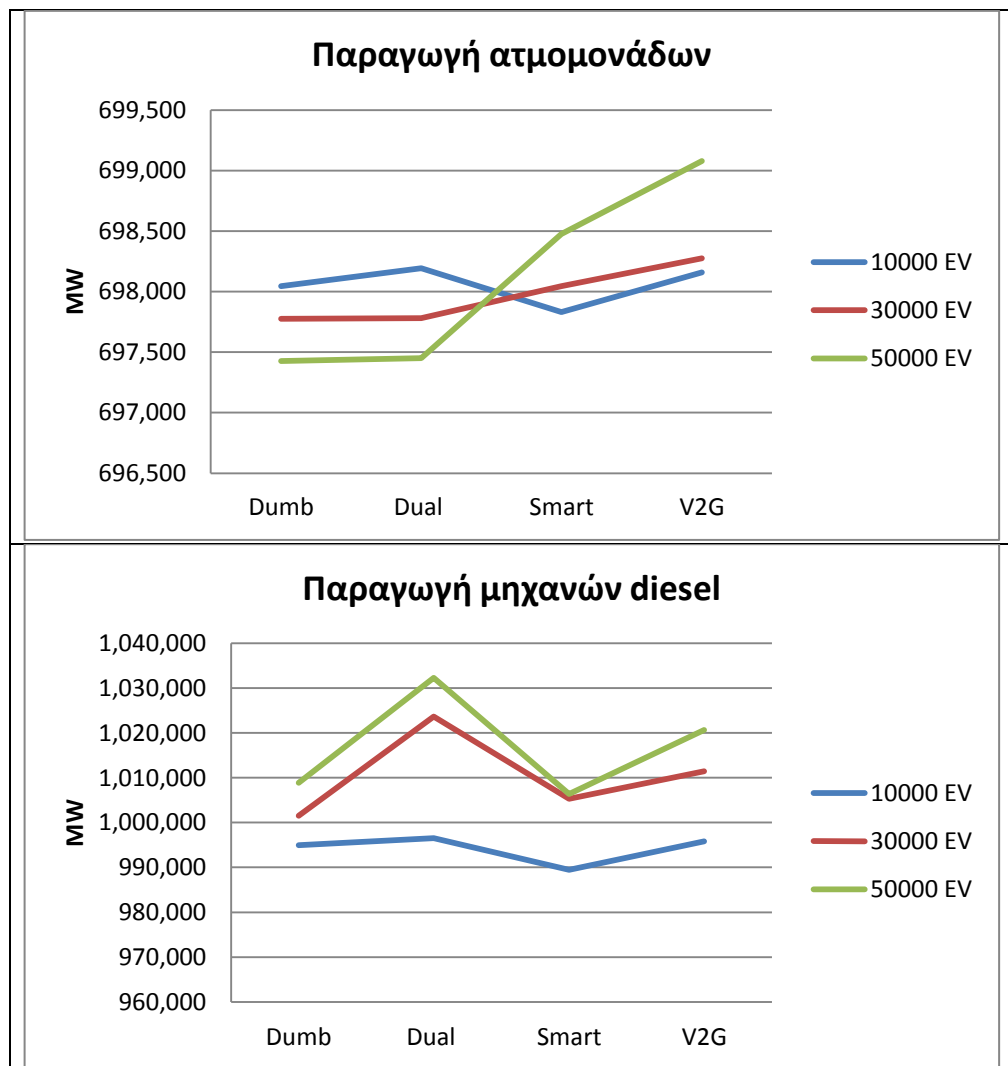
Διάγραμμα 115: Ετήσιο ειδικό κόστος (στρατηγική V2G)

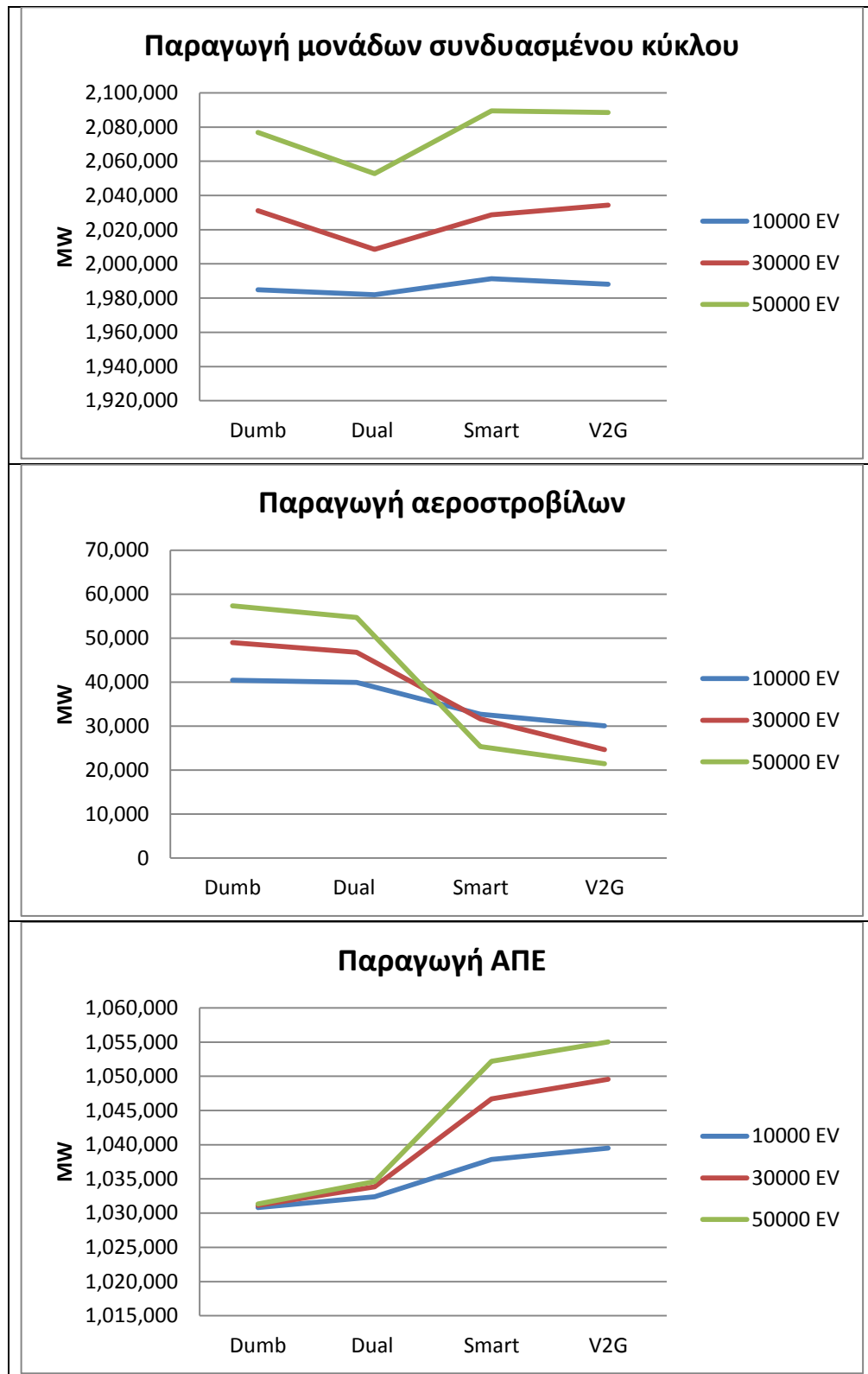
5.2.7. Συμπεράσματα

Σε αυτή την ενότητα θα συγκρίνουμε τις τέσσερις στρατηγικές που χρησιμοποιήσαμε ως προς την επίδραση που έχουν στη συνολική παραγωγή, στο κόστος του ενεργειακού συστήματος κ.τ.λ. και θα συνοψίσουμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που προκύπτουν από την χρησιμοποίηση της τελευταίας στρατηγικής που περιλαμβάνει και εφαρμογές V2G.

❖ Προγραμματισμός των μονάδων

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η συνολική παραγωγή των μονάδων παραγωγής για κάθε σενάριο διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων και για κάθε στρατηγική φόρτισης.



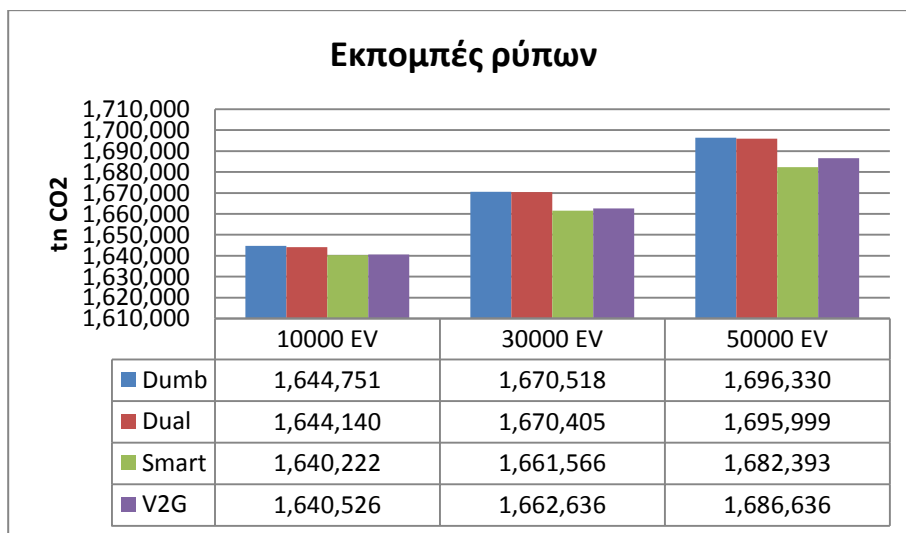


Διάγραμμα 116: Συνολική παραγωγή των μονάδων παραγωγής για κάθε στρατηγική φόρτισης

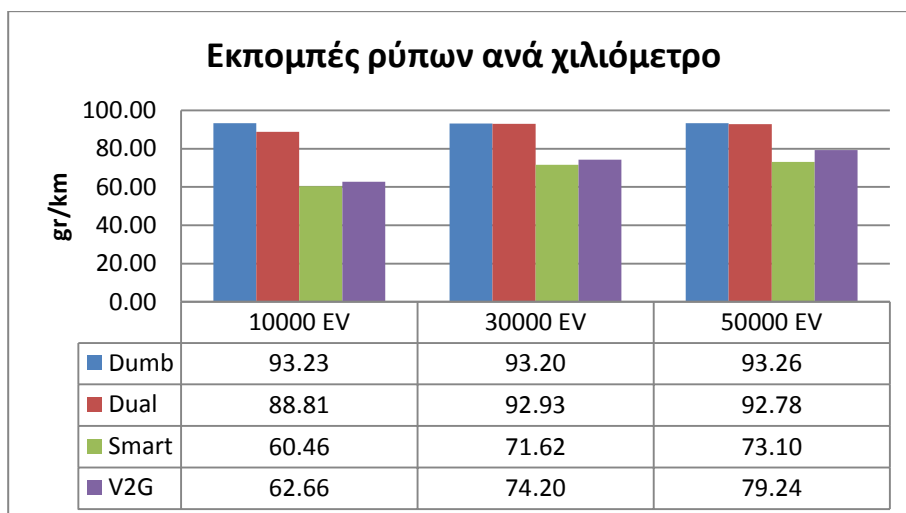
Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι για την τελευταία στρατηγική στην οποία έχουμε παροχή ενέργειας και από τα ηλεκτρικά οχήματα προς το δίκτυο, έχουμε αρκετά μεγαλύτερη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ενώ επίσης η παραγωγή που προέρχεται από τους αριστρόβιλους έχει μειωθεί σημαντικά. Επιπλέον, βλέπουμε ότι υπάρχει και μια αύξηση στην παραγωγή των ατμομονάδων, ειδικά στην περίπτωση των 50000 οχημάτων. Όσον αφορά τις μηχανές diesel, η παραγωγή τους στη V2G λειτουργία είναι λίγο μεγαλύτερη από αυτή στη στρατηγική C, αλλά μικρότερη από τις στρατηγικές dumb και dual tariff.

❖ Εκπεμπόμενοι ρύποι

Στα επόμενα δύο διαγράμματα αποτυπώνονται οι συνολικοί εκπεμπόμενοι ρύποι ανά στρατηγική, καθώς και η ποσότητα των ρύπων ανά χιλιόμετρο:



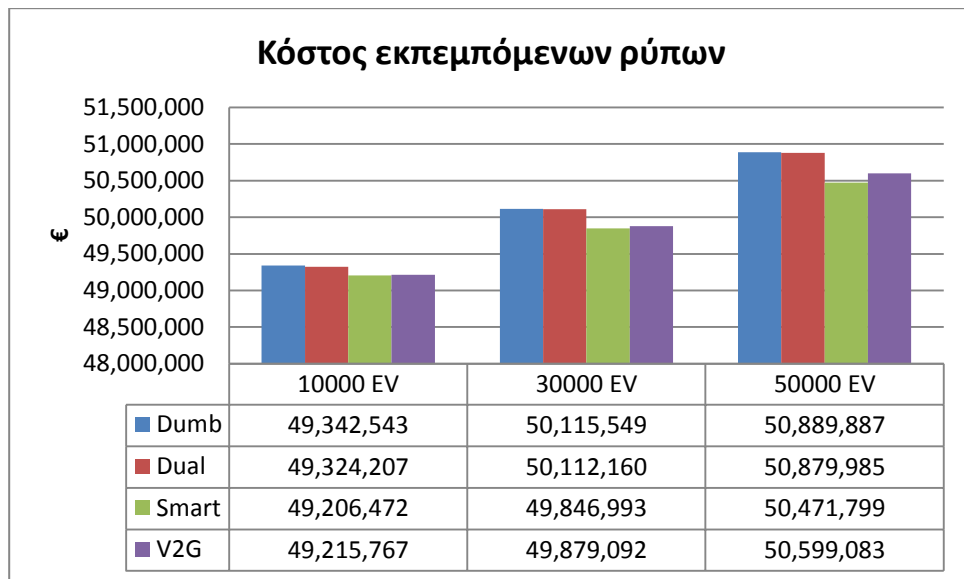
Διάγραμμα 117: Εκπομπές ρύπων για τις 4 στρατηγικές φόρτισης



Διάγραμμα 118: Εκπομπές ρύπων ανά χιλιόμετρο για τις 4 στρατηγικές φόρτισης

Παρατηρούμε ότι, στις στρατηγικές που έχουμε έξυπνη φόρτιση οι εκπομπές ρύπων έχουν μειωθεί αρκετά. Παρόλα αυτά, μεταξύ των δύο τελευταίων στρατηγικών όπου έχουμε έξυπνη φόρτιση, παρατηρούμε ότι οι εκπεμπόμενοι ρύποι της V2G στρατηγικές είναι περισσότεροι. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι, εξαιτίας των απωλειών ενέργειας που υπάρχουν κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων, στην στρατηγική της V2G λειτουργίας η συνολική παραγωγή είναι αυξημένη σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες στρατηγικές, άρα και οι ρύποι που εκπέμπονται συνολικά.

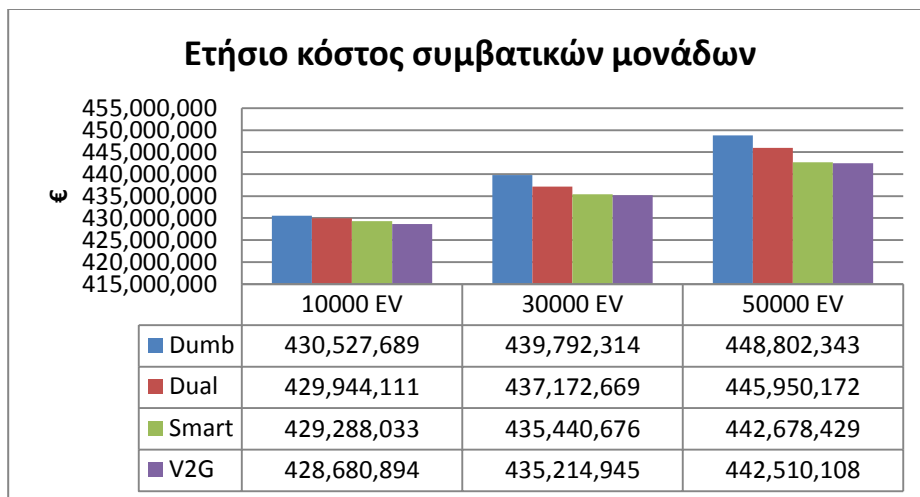
Εντελώς αντίστοιχο είναι και το κόστος των εκπεμπόμενων ρύπων, το οποίο φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



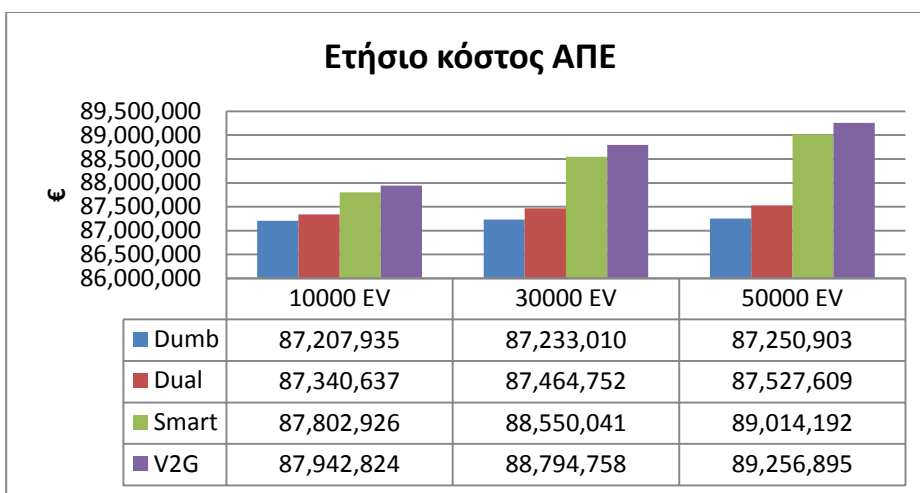
Διάγραμμα 119: Κόστος εκπεμπόμενων ρύπων για τις 4 στρατηγικές φόρτισης

❖ Οικονομική αποτίμηση

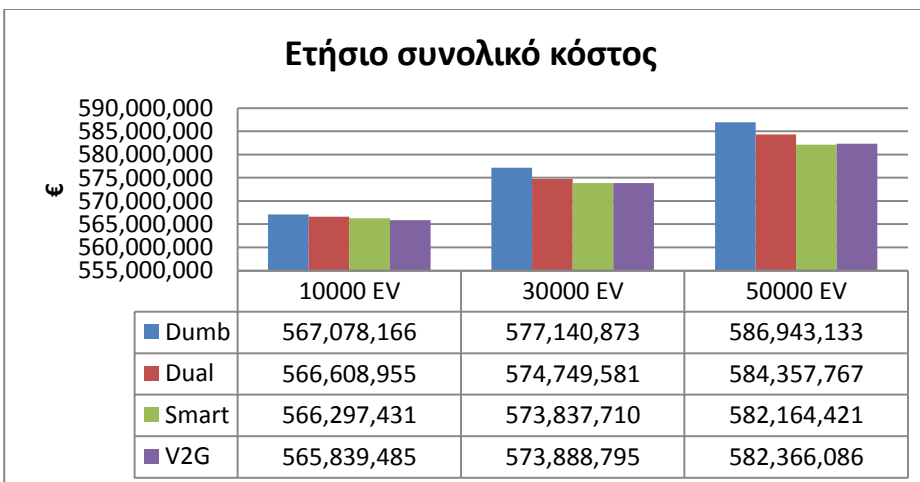
Σε αυτό το σημείο θα παρουσιάσουμε και το πιο σημαντικό αποτέλεσμα, δηλαδή τις διαφορές του κόστους μεταξύ των διαφόρων στρατηγικών φόρτισης. Ξεκινάμε με το ετήσιο κόστος των συμβατικών μονάδων, των μονάδων ΑΠΕ αλλά και του συνολικού κόστους του συστήματος της Κρήτης:



Διάγραμμα 120: Ετήσιο κόστος συμβατικών μονάδων για τις 4 στρατηγικές φόρτισης



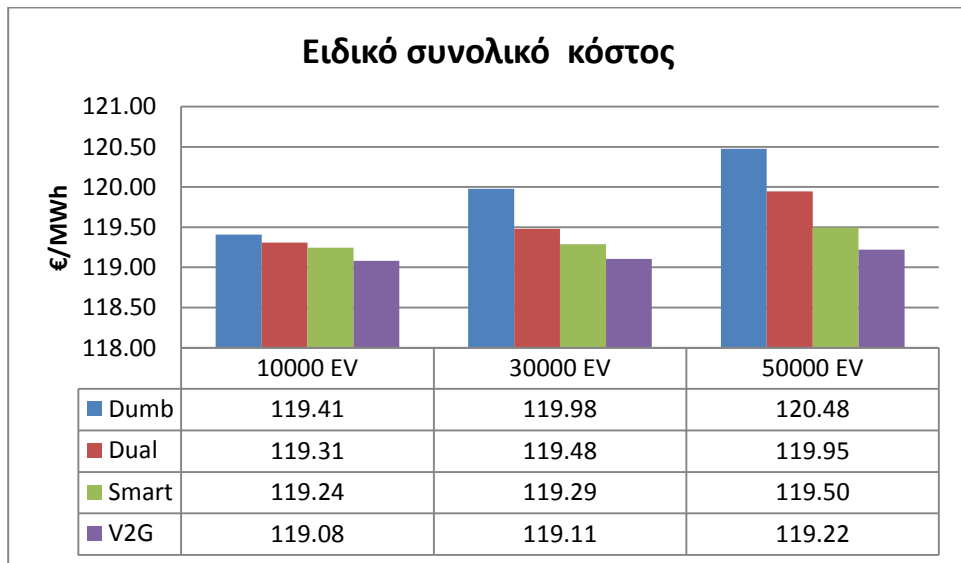
Διάγραμμα 121: Ετήσιο κόστος ΑΠΕ για τις 4 στρατηγικές φόρτισης



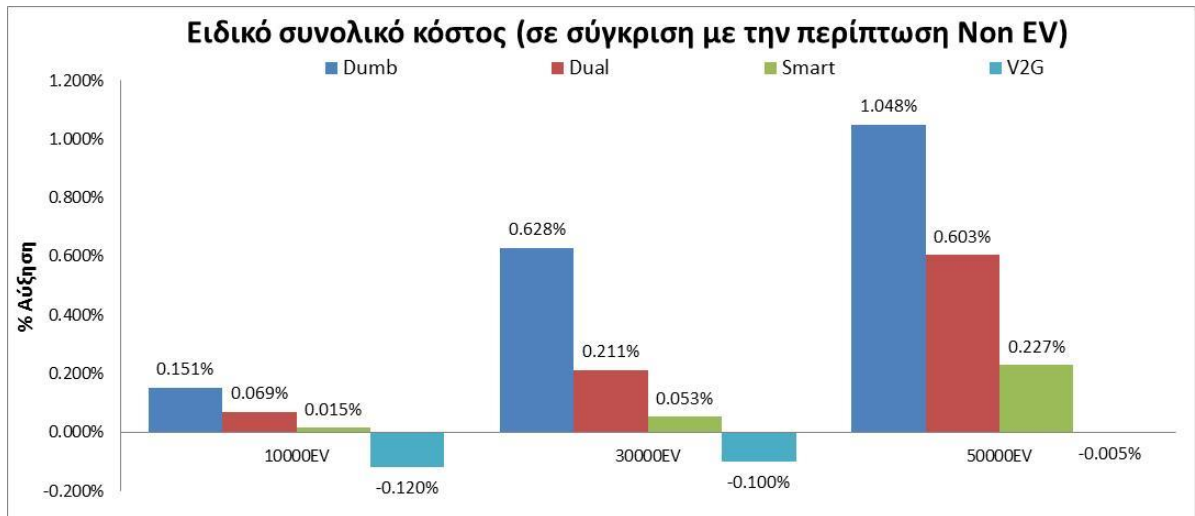
Διάγραμμα 122: Ετήσιο συνολικό κόστος για τις 4 στρατηγικές φόρτισης

Συμπέρασμα: Η στρατηγική Vehicle-to-Grid οδηγεί σε μικρότερα κόστη συμβατικών μονάδων, αλλά σε μεγαλύτερο κόστος λόγω ΑΠΕ. Αυτό είναι λογικό αφού η παραγωγή των ΑΠΕ σε αυτή την περίπτωση είναι μεγαλύτερη. Όσον αφορά το συνολικό κόστος του συστήματος, αυτό είναι ελάχιστο όταν χρησιμοποιούμε τη στρατηγική V2G και διείσδυση οχημάτων μέχρι 10000 οχήματα. Από εκεί και πέρα, η περαιτέρω διείσδυση οχημάτων αυξάνει το κόστος της και τότε το ελάχιστο κόστος παρουσιάζεται κατά την υλοποίηση της στρατηγικής Smart Charging.

Ένα άλλο στοιχείο το οποίο μας ενδιαφέρει ιδιαίτερος, είναι το κόστος παραγωγής ανά μεγαβατώρα. Παρακάτω παρουσιάζεται το ειδικό συνολικό κόστος για τις τέσσερις στρατηγικές φόρτισης, καθώς και η επί τοις εκατό αύξηση αυτού του κόστους σε σχέση με την περίπτωση που δεν έχουμε ηλεκτρικά οχήματα:



Διάγραμμα 123: Ειδικό συνολικό κόστος για τις 4 στρατηγικές φόρτισης

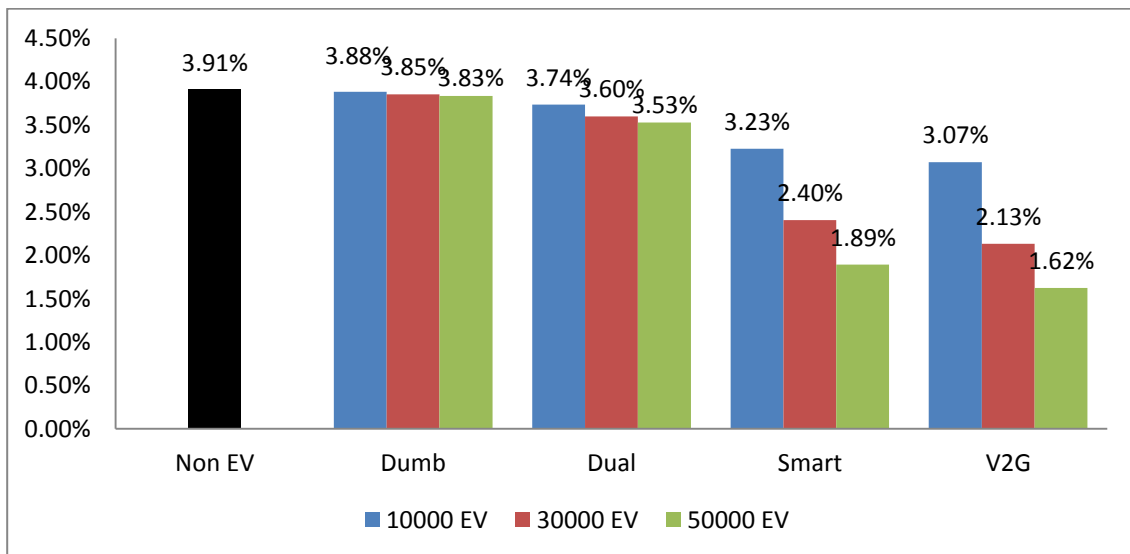


Διάγραμμα 124: Ειδικό συνολικό κόστος συναρτήσει της περίπτωσης Non EV για τις 4 στρατηγικές φόρτισης

Όπως βλέπουμε και στα παραπάνω διαγράμματα, η V2G λειτουργία οδηγεί σε καλύτερα οικονομικά αποτελέσματα όσον αφορά το ειδικό κόστος, δηλαδή το κόστος ανά μεγαβατώρα.

❖ Αποκοπή των ΑΠΕ

Τέλος, θα παρουσιάσουμε σε ένα διάγραμμα το ποσοστό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας το οποίο μένει ανεκμετάλλευτο για κάθε μία στρατηγική φόρτισης. Σύμφωνα με αυτά που έχουμε αναφέρει και παραπάνω, αναμένουμε ότι στις έξυπνες στρατηγικές φόρτισης και κυρίως στη στρατηγική όπου εφαρμόζεται η V2G λειτουργία η αποκοπή των ΑΠΕ θα είναι μικρότερη.



Διάγραμμα 125: Αποκοπή των ΑΠΕ για τις 4 στρατηγικές φόρτισης και την περίπτωση χωρίς οχήματα

Πράγματι, η υλοποίηση της V2G λειτουργίας μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα το ποσοστό της ανεκμετάλλευτης ενέργειας να πέσει μέχρι και το 1,62% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος

των ΑΠΕ. Πιο συγκεκριμένα, ενώ στην περίπτωση χωρίς οχήματα χάνουμε περίπου 42GW παραγωγής ΑΠΕ, με τη βοήθεια της στρατηγικής D το ποσό αυτό μπορεί να πέσει μέχρι και τα 17,5GW. Αυτό σημαίνει ότι κερδίζουμε **24,5 GW** συνολικά από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Συμπεράσματα

Στη διπλωματική αυτή εξετάστηκε η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων σε ένα υπαρκτό δίκτυο με τέσσερα σενάρια φόρτισης αυτών. Στόχος ήταν να δείξουμε την επίδραση που έχει η κάθε μία στρατηγική στη λειτουργία του δικτύου και κυρίως να μελετήσουμε τα πλεονεκτήματα της μεθόδου φόρτισης οχημάτων με λειτουργία V2G έναντι των υπολοίπων στρατηγικών. Η ανάλυσή μας χωρίστηκε σε δύο κομμάτια: στη μελέτη της επίδρασης της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο διανομής της Σπερχειάδας, και στη μελέτη της επίδρασης της φόρτισης στο ενεργειακό σύστημα της Κρήτης. Τα συμπεράσματα των δύο αναλύσεων παρουσιάζονται παρακάτω:

6.1 Δίκτυο Διανομής Σπερχειάδας

Από τη μελέτη που διεξήχθη στο δίκτυο διανομής της Σπερχειάδας αποδείχθηκε ότι η μη ελεγχόμενη φόρτιση (dumb charging) και η φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο (dual tariff charging) οδηγούν σε αύξηση του συνολικού φορτίου του δικτύου κυρίως κατά τις ώρες αιχμής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η διακύμανση της τάσης στους ζυγούς να είναι μεγάλη, και μάλιστα να μεγαλώνει με την αύξηση του αριθμού των οχημάτων που διεισδύουν. Επιπλέον, με την υλοποίηση αυτών των στρατηγικών φόρτισης η ελάχιστη τιμή της τάσης στο χειρότερο ζυγό είναι ελαφρώς πάνω από το κατώτατο αποδεκτό όριο του 0.95 p.u. και έτσι όταν αυξάνουμε τον αριθμό των οχημάτων κινδυνεύουμε να βγούμε εκτός ορίων. Αυτό σημαίνει, ότι με την υλοποίηση αυτών των στρατηγικών δεν μπορούμε να έχουμε μεγάλη διείσδυση οχημάτων στο δίκτυο. Ένα άλλο πρόβλημα, επίσης, είναι ότι εξαιτίας αυτών των περιορισμών δεν μπορούμε να έχουμε την εκμετάλλευση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο βαθμό που θα θέλαμε. Μάλιστα, αποδείχτηκε ότι όσο πιο πολλά οχήματα φορτίζονται με αυτό τον τρόπο φόρτισης, τόσο πιο μικρός είναι ο αριθμός των ΑΠΕ που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο δίκτυο της Σπερχειάδας.

Αντίθετα, με την υλοποίηση των έξυπνων στρατηγικών φόρτισης (C και D) παρατηρούμε ότι αυτά τα προβλήματα ελαχιστοποιούνται έως ένα βαθμό. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με αυτά τα σενάρια φόρτισης έχουμε καλύτερη κατανομή του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων σε ώρες μη αιχμής, με αποτέλεσμα να μειώνονται τόσο οι διακυμάνσεις της τάσης των ζυγών όσο και οι συνολικές απώλειες του δικτύου. Επίσης, οι ελάχιστες τάσεις των ζυγών παρατηρείται ότι βρίσκονται σε καλύτερα επίπεδα, και έτσι δεν υπάρχει το ενδεχόμενο να ξεπεράσουμε τα αποδεκτά όρια. Όσον αφορά τα ΑΠΕ, οι στρατηγικές C και D μας δίνουν τη δυνατότητα να έχουμε μεγαλύτερη διείσδυση. Τέλος, ο μέγιστος επιτρεπόμενος αριθμός διασυνδεδεμένων ηλεκτρικών οχημάτων με αυτές τις στρατηγικές είναι πολύ μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο των στρατηγικών A και B.

Όσον αφορά τις έξυπνες στρατηγικές μεταξύ τους, οι προσωμοιώσεις απέδειξαν ότι τα αποτελέσματα στα οποία καταλήγουμε με την εφαρμογή της V2G λειτουργίας είναι καλύτερα από αυτά της απλής έξυπνης φόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, το επιπρόσθετο φορτίο των οχημάτων κατανέμεται καλύτερα μέσα στη μέρα, ενώ η διακύμανση της τάσης βρίσκεται σε χαμηλότερα επίπεδα όπως και οι απώλειες του συστήματος. Επιπλέον, διαπιστώνουμε ότι με τη στρατηγική φόρτισης D αυξάνεται η βέλτιστη χωρητικότητα των ΑΠΕ στο δίκτυο καθώς

αυξάνεται ο αριθμός των EV που υιοθετούν και μάλιστα όσο πιο μεγάλος ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων τόσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά της εγκατεστημένης ισχύος των ΑΠΕ μεταξύ των δύο στρατηγικών. Τέλος, είναι σημαντικό να αναφέρουμε εδώ ότι η στρατηγική D μπορεί να εφαρμοστεί με διάφορες παραλλαγές η κάθε μία από τις οποίες παρουσιάζει τα δικά της πλεονεκτήματα. Για παράδειγμα, είδαμε από τις προσωμοιώσεις ότι με την εφαρμογή ενός σεναρίου φόρτισης στο οποίο τα οχήματα είναι κατά το 80% φορτισμένα το πρωί (και όχι πλήρως φορτισμένα) πριν την πρώτη τους διαδρομή, καταλήγουμε σε αισθητά καλύτερη λειτουργία του δικτύου διανομής της Σπερχειάδας (μειώνονται οι απώλειες του συστήματος). Επιπρόσθετα, με την τροποποίηση της στρατηγικής V2G έχουμε τη δυνατότητα να εκμεταλλευτούμε περισσότερο τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Γίνεται κατανοητό, δηλαδή, ότι ανάλογα με το δίκτυο που έχουμε, θα μπορούν να εφαρμόζονται και διαφορετικές παραλλαγές της στρατηγικής D οι οποίες θα οδηγούν στα βέλτιστα αποτελέσματα του εκάστοτε δικτύου.

6.2 Ενεργειακό σύστημα Κρήτης

Ξεκινώντας από τον ετήσιο προγραμματισμό των μονάδων παραγωγής, στη μελέτη του ενεργειακού συστήματος της Κρήτης που κάναμε παρατηρήσαμε ότι με την εφαρμογή της λειτουργίας V2G έχουμε αύξηση της παραγωγής που προέρχεται από ατμομονάδες και μονάδες συνδυασμένου κύκλου, αλλά μείωση στην αντίστοιχη παραγωγή μηχανών diesel και ατμομηχανών. Επιπλέον, μεγάλη αύξηση πραγματοποιείται και στην παραγωγή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στις στρατηγικές έξυπνης φόρτισης, το οποίο αποτελεί απόδειξη του γεγονότος ότι με αυτές τις στρατηγικές έχουμε καλύτερη εκμετάλλευση των ΑΠΕ.

Όσον αφορά τους εκπεμπόμενους ρύπους αποδεικνύεται ότι η βέλτιστη επιλογή είναι η έξυπνη φόρτιση (στρατηγική C) καθώς με αυτό το σενάριο φόρτισης έχουμε τις λιγότερες εκπομπές ρύπων ανεξαρτήτως του αριθμού των ηλεκτρικών οχημάτων. Οι εκπεμπόμενοι ρύποι που προκύπτουν αν υλοποιήσουμε τη στρατηγική D (V2G) είναι εξίσου χαμηλοί, ειδικά σε σχέση με τη μη ελεγχόμενη φόρτιση και τη φόρτιση με διζωνικό τιμολόγιο, αλλά είναι ελάχιστα περισσότεροι από αυτούς της στρατηγικής C και άρα οδηγούν σε μεγαλύτερο κόστος ρύπων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι εξαιτίας των απωλειών που έχουμε κατά τη φόρτιση και την εκφόρτιση των οχημάτων, η στρατηγική φόρτισης D απαιτεί από το δίκτυο μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας σε σχέση με τις υπόλοιπες στρατηγικές, και έτσι αυξάνονται οι εκπεμπόμενοι ρύποι.

Παρά την αυξημένη παραγωγή των ρύπων που έχουμε με τη στρατηγική D έναντι της στρατηγικής C, παρατηρούμε ότι η λειτουργία V2G μας οδηγεί σε αντίστοιχα καλά ή και σε καλύτερα οικονομικά αποτελέσματα. Πιο συγκεκριμένα, το ειδικό συνολικό κόστος του δικτύου, δηλαδή το κόστος παραγωγής ανά μεγαβατώρα, είναι ελάχιστο όταν υλοποιούμε τη στρατηγική D, με δεύτερη καλύτερη επιλογή να είναι η έξυπνη φόρτιση C και τελευταίες οι στρατηγικές dual και dumb αντίστοιχα. Μάλιστα, με την αύξηση του αριθμού των ηλεκτρικών οχημάτων που διεισδύουν στο δίκτυο της Κρήτης παρατηρείται και μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ του ειδικού κόστους της V2G στρατηγικής έναντι των άλλων. Ο λόγος που οι στρατηγικές έξυπνης φόρτισης των EV είναι περισσότερο οικονομικές, είναι γιατί εκμεταλλεύονται καλύτερα τις ανανεώσιμες

πηγές ενέργειας με αποτέλεσμα να οδηγούν σε μικρότερο ετήσιο κόστος των συμβατικών μονάδων. Μπορεί το κόστος των ΑΠΕ σε αυτές ταυτόχρονα να αυξάνεται, αλλά το ποσό της αύξησης αυτής είναι μικρότερο από το κόστος μείωσης του κόστους των συμβατικών μονάδων.

Τέλος, πρέπει να αναφέρουμε ότι με την εφαρμογή της V2G λειτουργίας καταφέρνουμε να εκμεταλλευτούμε καλύτερα τις εγκατεστημένες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθώς με αυτήν έχουμε μεγαλύτερη απορρόφηση των ΑΠΕ, για όλα τα σενάρια διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Curtis D. Anderson and Judy Anderson, Electric and Hybrid Cars: A History, McFarland and Company, 2012; burnanenergyjournal.com;
- [2] IEA report on transportation CO₂ emissions 2013 Edition, <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/co2emissionsfromfuelcombustionhighlights2013.pdf>
- [3] Technology Roadmap, Electric and plug-in hybrid electric vehicles available online at: http://www.iea.org/papers/2011/EV_PHEV_Roadmap.pdf
- [4] Publicly funded research, development and demonstration projects on electric and plug-in vehicles in Europe, Alyona Zubaryeva, Christian Thiel 2013
- [5] <http://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml>
- [6] http://www.tva.gov/environment/technology/car_vehicles.htm
- [7] <http://electricvehicles.caa.ca/types-of-electric-vehicles/>
- [8] <http://www.mitsubishi-motors.com/en/spirit/technology/library/phev.html>
- [9] State of the Plug-in Electric Vehicle Market, EV Market Outlook, July 25, 2013
- [10] http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf
- [11] http://batteryuniversity.com/learn/article/battery_definitions
- [12] <http://pvc-drom.pveducation.org/BATTERY/capacity.htm>
- [13] http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_vehicle_battery#Lead-acid
- [14] http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_best_battery
- [15] <http://www.mpoweruk.com/leadacid.htm>
- [16] Handbook of Batteries, Third Edition
- [17] <http://www.wealthdaily.com/articles/investing-in-lithium-ion-batteries/5266>
- [18] Technology Roadmap, Electric and plug-in hybrid electric vehicles by IEA
- [19] Projeto-MERGE-“Specifications for EV-Grid interfacing, communication and smart metering technologies, including traffic patterns and human behaviour descriptions” available at: http://www.transport-research.info/Upload/Documents/201402/20140203_154525_77343_D1.1_Specifications_for_EV_Grid_interfacing_communication_and_smart_metering_technologies.pdf
- [20] http://www.aegean-energy.gr/gr/academy2013/pdf/AEA_electric_cars.pdf

- [21] Διονύσιος Νέγκας, ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ – ‘Τα Ηλεκτρικά Αυτοκίνητα και ο ανεφοδιασμός τους με Ηλεκτρική Ενέργεια’
- [22] Projeto-MERGE-“Modelling electric storage devices for EV” available at: http://www.transport-research.info/Upload/Documents/201402/20140203_154622_76425_Deliverable_2.1_Modelling_Electric_Storage_devices_for_Electric_Vehicles.pdf
- [23] E. Karfopoulos, N. Hatziaargyriou, “A multi-agent System for Controlled Charging of a large Population of Electric Vehicles”, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, issue 2, pp. 1196-1204, Sept 2012.
- [24] Zhongjing Ma, Callaway, D., Hiskens, I., “Decentralised charging control for large population of plug-in electric vehicles: Application of the Nash certainty equivalence principle”, in IEEE International Control applications (CCA) Conference, Yokohama, Sept. 2010.
- [25] L. Gan, U. Topcu, S. Low, “Optimal decentralized protocol for electric vehicle charging”, IEEE Trans. On Power Systems, vol. 28, No.2, pp.940-951, May 2013.
- [26] Q. Li, T. Cui, R. Negi, F. Franchetti, M. Ilic, “Online Decentralised Charging of Plug-In Electric Vehicles in Power Systems”, eprint arXiv:1106.5063, Nov. 2011, [ONLINE]. Available: <http://arxiv.org/pdf/1106.5063.pdf>.
- [27] S. Vandael, N. Boucké, T. Holvoet, G. Deconinck, “Decentralized demand side management of plug-in hybrid vehicles in a Smart Grid”, Proc. Of 10th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems – Innovative Applications track, Taiwan, May 2011.
- [28] A. Mohsenian-Rad, V.W.S. Wong, J. Jatskev, R. Schrober, A. Leon-Garcia, “Autonomous Demand Side Management Bases on Game-Theoretic Energy Consumption Scheduling for the Future Smart Grid”, IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 1, Issue 3, pp. 320-331, Dec. 2010.
- [29] Ota, Y.; Taniguchi, H.; Nakajima, T.; Liyanage, K.M.; Baba, J.; Yokoyama, A, "Autonomous Distributed V2G (Vehicle-to-Grid) Satisfying Scheduled Charging," Smart Grid, IEEE Transactions on , vol.3, no.1, pp.559,564, March 2012
- [30] B. Roossien, P.C. van der Laag, “Universal Power Manager: Integrating ECN’s PowerMatcher with Nedap’s Atrium”, Tech. Rep., Energy research Center of the Netherlands, Jan. 2010
- [31] S. De Breucker, P. Jacqmaer, K. De Brabandere, J. Driesen, R. Belmans, “Grid Power Quality Improvements Using Grid-Coupled Hybrid Electric Vehicles”, 3rd IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, 2006
- [32] M. Prodanovic , K. De Brabandere, J. Van den Keybus, T. Green and J. Driesen, “Harmonic and reactive power compensation as ancillary services in inverter-based distributed generation”, The Institution of Engineering and Technology, Dec. 2006
- [33] S. Bashash, S.J. Moura, H.K. Fathy , “Charge Trajectory Optimization of Plug-in Hybrid Electric Vehicles for Energy Cost Reduction and Battery Health Enhancemen”, American Control Conference, Baltimore, USA, June 2010
- [34] Y. Cao, S. Tang, C. Li, P. Zhang,, Y. Tan, Z. Zhang, J. Li, “An Optimized EV Charging Model Considering TOU Price and SOC Curve”, to be published in IEEE Trans. on Smart Grids, 2011.

- [35] A. Bandyopadhyay, L. Wang, V. K. Devabhaktuni, R. C. Green II, "Aggregator Analysis for efficient Day-Time Charging of Plug-in Hybrid Electric Vehicles", IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit Michigan, USA, July 2011.
- [36] E. Sortomme, M. M. Hindi, S.D.J. MacPherson, S.S. Venkata, "Coordinated Charging of Plug-In Hybrid Electric Vehicles to Minimize Distribution System Losses", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 2, Issue 1, pp 198-205, March 2011.
- [37] P. Zhang, K. Qian, C. Zhou, B. Stewart, D. Hepburn, "A Methodology for optimization of Power Systems Demand Due to Electric Vehicle Charging Load ", IEEE Trans. On PWRS, vol. 27, no. 3, pp.1628-1636, Aug. 2012.
- [38] F. O. Resende, J. A. Peças Lopes, "Optimal Management of Battery Charging of Electric Vehicles: A new Microgrid Feature", IEEE PowerTech Conference, Trondheim, Norway, June 2011.
- [39] K/ Mets, T. Verschueren, W. Haerick, C. Develder, "Optimizing smart energy control strategies for plug-in hybrid electric vehicle charging", IEEE Network Operations and Management Symposium Workshops, Osaka, Japan, April 2010.
- [40] N. Roterig, M. Ilic, "Optimal Charge Control of Plug-In Hybrid Vehicles in Deregulated Electricity Markets", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, no. 3, pp. 1021-1029, Aug. 2011
- [41] S. Deilami, A.S. Masoum, P.S. Moses, M.A.S. Masoum, "Real-Time Coordination of Plug-In Electric Vehicle Charging in Smart Grids to Minimize Power Losses and Improve Voltage Profile", in IEEE Trans. on Smart Grid, vol. 2, Issue 3, pp 456-467, Sept. 2011.
- [42] Eric Sortomme, Mohamed A. El-Sharkawi "Optimal Charging Strategies for Unidirectional Vehicle-to-Grid", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 2, No. 1, March 2011
- [43] S.W. Hadley, A. Tsvetkova, "Potential Impacts of Plug-in Hybrid Electric Vehicles on Regional Power Generation", The Electricity Journal, vol. 22, no. 10, pp, 56-68, 2009