



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ, ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ
ΦΟΡΤΙΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΒΑΣΕΙ
ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑΚΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ Ε. ΜΑΡΜΑΡΑΣ

Επιβλέπων : Χατζηαργυρίου Νικόλαος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ, ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΦΟΡΤΙΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΒΑΣΕΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑΚΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ Ε. ΜΑΡΜΑΡΑΣ

Επιβλέπων : Χατζηαργυρίου Νικόλαος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 2012

.....

Χατζηαργυρίου Νικόλαος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Παπαθανασίου Σταύρος

Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Γεωργιλιάκης Παύλος

Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....
ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ Ε. ΜΑΡΜΑΡΑΣ

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

Copyright © Χαράλαμπος Ε. Μαρμαράς, 2012

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 το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Στον πατέρα μου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαρκής ανάπτυξη και εξέλιξη της ηλεκτροκίνησης φέρνει τους εμπλεκόμενους φορείς στον χώρο των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας αντιμέτωπους με νέες προκλήσεις, καθώς το προφίλ του ηλεκτρικού φορτίου αλλάζει, και τίθενται νέες παράμετροι. Τα πρώτα χρόνια το ποσοστό διείσδυσης αναμένεται να είναι σχετικά μικρό, και να μην επηρεάσει αισθητά την λειτουργία του δικτύου. Με τον αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων όμως σταδιακά να αυξάνεται, υπάρχει κίνδυνος να εμφανιστούν προβλήματα σε βασικά χαρακτηριστικά του δικτύου όπως τάσεις ζυγών και φόρτιση γραμμών. Επομένως κρίνεται απαραίτητη η ανάπτυξη συστημάτων ελέγχου κατάλληλων για την αντιμετώπισή τους.

Σκοπός της διπλωματικής αυτής είναι η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου μοντέλου ελέγχου της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Αναπτύσσονται και παρουσιάζονται αλγόριθμοι για τον προγραμματισμό, την κατανομή και την διαχείριση του φορτίου των οχημάτων με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους. Στην συνέχεια οι αλγόριθμοι αυτοί επεκτείνονται έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψη η επίδραση της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων στην λειτουργία του δικτύου. Ακολουθούν προσομοιώσεις σε ένα ρεαλιστικό αστικό δίκτυο διανομής και μελετάται η συνεισφορά της χρήσης αυτών στα τεχνικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του δικτύου, όπως τάσεις ζυγών, φόρτιση γραμμών και μετασχηματιστών, και απώλειες δικτύου. Για την ανάπτυξη των αλγορίθμων χρησιμοποιείται το προγραμματιστικό περιβάλλον του MATLAB, ενώ η προσομοίωση στο δίκτυο πραγματοποιείται με την βοήθεια του λογισμικού EUROSTAG.

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια σύντομη ανασκόπηση της υπάρχουσας τεχνολογίας των ηλεκτρικών οχημάτων και των υποδομών φόρτισης, καθώς και των προτύπων που έχουν καθιερωθεί για την σύνδεση αυτών με το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Στο κεφάλαιο 2 περιγράφονται οι φάσεις διείσδυσης των οχημάτων και τα νέα επιχειρηματικά μοντέλα που προκύπτουν. Στο κεφάλαιο 3 επεξηγούνται αναλυτικά οι διαδικασίες ελέγχου που προτείνονται και οι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν γι' αυτό το σκοπό, ενώ στο κεφάλαιο 4 εμφανίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτών σε ένα υπαρκτό δίκτυο διανομής. Τέλος, στο κεφάλαιο 5 συνοψίζονται τα καταληκτικά συμπεράσματα, όπως προκύπτουν από την μελέτη της επίδρασης της φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στην λειτουργία του δικτύου.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Σύστημα διαχείρισης ενέργειας, ηλεκτρικά οχήματα, ενεργειακό κόστος, δίκτυο διανομής, βέλτιστη κατανομή

ABSTRACT

The continuous growth and evolve of vehicle electrification causes the electric power systems to confront new challenges, since the load profile changes, and new parameters are being set. Initially, the EV uptake is expected to be relatively small, and the network operation will not be considerably affected. However, with the number of EVs gradually rising, problems may occur in technical characteristics of the network, like bus voltages and line congestion. Therefore, it is necessary to develop new EV management systems so as to prevent such phenomena.

This diploma thesis intends to propose a complete model for the control of EV charging. Algorithms for schedule, distribution and management of EV load are presented, focusing on minimizing the energy cost. Then, these algorithms are being modified so as the effect on network's parameters is taken into account. With the simulations that follow on a real urban distribution network, we have the chance to study the contribution of their use in the technical and quality specifications of the network, like bus voltages, line and transformer loading, and losses. The algorithms are developed in MATLAB programming language, whilst the network simulation is carried out with the software EUROSTAG.

In chapter 1, one can find a brief overview of existing EV and charging infrastructure technologies as well as the basic established standards for their connection with electric power systems. In chapter 2, the penetration phases and the new business models that arise, are described. In chapter 3, there is a detailed analysis of the proposed control procedures and the algorithms developed for this purpose, while in chapter 4 the simulation results are shown. Finally, in chapter 5, the comparative conclusions from the study of EV charging and its effect on the network are summarized.

KEY WORDS

Energy management system (EMS), electric vehicles (EVs), energy cost, distribution network, optimal distribution

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2011-2012 υπό την επίβλεψη του κ. Νικολάου Χατζηαργυρίου, καθηγητή του ΕΜΠ, της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω προς τον Ευάγγελο Καρφόπουλο, υποψήφιο Διδάκτορα ΕΜΠ, η συνεχής καθοδήγηση, υπομονή και βοήθεια του οποίου υπήρξε καθοριστική για την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας.

Θέλω ακόμα να ευχαριστήσω όλα τα παιδιά του εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του ΕΜΠ που ανέχτηκαν την παρουσία μου εκεί, και ιδιαίτέρως τον εξωτ. συνεργάτη Νίκο Κορρέ, για τις επικοινωνητικές μας συζητήσεις.

Τέλος, δεν μπορώ να παραλείψω την οικογένειά μου και τους φίλους μου, οι οποίοι ήταν πάντοτε παρόντες και με στήριξαν σε όλη την διάρκεια της φοιτητικής μου ζωής.

Μπάμπης Μαρμαράς
Μάρτιος 2012

Περιεχόμενα

1	Τεχνολογίες Ηλεκτρικών Οχημάτων και Υποδομών Φόρτισης	13
1.1	Εισαγωγή.....	13
1.2	Τύποι Ηλεκτρικών Οχημάτων	19
1.2.1	Τεχνολογίες Ηλεκτρικών Οχημάτων	19
1.2.2	Κατηγορίες Ηλεκτρικών οχημάτων	21
1.3	Τεχνολογίες Συσσωρευτών.....	22
1.3.1	Μολύβδου-Οξέος	24
1.3.2	Νικελίου-Υδριδίου Μετάλλου	25
1.3.3	Ιόντων-Λιθίου	25
1.3.4	Νικελίου – Καδμίου	27
1.3.5	Υπερπυκνωτές	30
1.3.6	Κυψέλες καυσίμου	30
1.4	Τεχνολογίες Σταθμών Φόρτισης	32
1.4.1	Φόρτιση με επαφή	32
1.4.2	Φόρτιση με Επαγωγή	32
1.5	Διεθνή Πρότυπα Σύνδεσης για Φόρτιση	40
1.5.1	Το πρότυπο SAE J1772.....	41
1.5.2	Το πρότυπο IEC 61851	42
1.5.3	Το πρότυπο IEC 62196.....	44
1.5.4	Η DC φόρτιση.....	46
1.6	Εμπορικοί υποδοχείς φόρτισης	49
2	Ένταξη Ηλεκτρικών Οχημάτων Στο Ηλεκτρικό Δίκτυο	53
2.1	Φάσεις Διείσδυσης	53
2.2	Νέα Επιχειρηματικά Μοντέλα	55
2.2.1	Διαχειριστής της Φόρτισης των Ηλεκτρικών Οχημάτων ή Διαχειριστής του Σημείου Φόρτισης (ΔΣΦ)	55
2.2.2	Προμηθευτής-Συναθροιστής Ηλεκτρικής Ενέργειας Ηλεκτρικών Οχημάτων (Π-ΣΗΟ, Electric Vehicle Supplier Aggregator-EVS/A)	55
2.3	Μοντέλα Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων	56
2.4	Αρχιτεκτονική Επικοινωνίας.....	58
3	Αλγόριθμοι ελέγχου φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων	60
3.1	Μοντέλο Ελέγχου φόρτισης	60
3.2	Αλγόριθμος 1: Πρόβλεψη Ενεργειακών αναγκών και Κατανομή ελαχίστου κόστους	63
3.2.1	Πρόβλεψη Ενεργειακών Αναγκών.....	63
3.2.2	Κατανομή Ελαχίστου Κόστους	69
3.3	Αλγόριθμος 2: Διαχείριση του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων σε πραγματικό χρόνο (dispatch)	73

3.4	Υλοποίηση Μοντέλου Ελέγχου φόρτισης.....	76
3.4.1	Αλγόριθμος 1	76
3.4.2	Αλγόριθμος 2	85
3.5	Μοντέλο Ελέγχου Φόρτισης με Περιορισμούς Δικτύου	103
3.5.1	Έλεγχος Φόρτισης με άνω όριο	103
3.5.2	Έλεγχος Φόρτισης με άνω όριο – “Valley Filling”	106
4	Μελέτη Δικτύου Διανομής Μ/Τ.....	110
4.1	Εισαγωγή.....	110
4.2	Αστικό Δίκτυο Διανομής ΜΤ	111
4.3	Eurostag.....	116
4.4	Σενάρια Μελέτης	118
4.4.1	Στόλος Ηλεκτρικών Οχημάτων	118
4.4.2	Σενάρια Φόρτισης	121
4.4.3	Σενάρια Τάσης	123
4.5	Αποτελέσματα	124
4.5.1	Μη ελεγχόμενη φόρτιση (Dumb Charging)	124
4.5.2	Ελεγχόμενη φόρτιση με ελαχιστοποίηση κόστους	130
4.5.3	Ελεγχόμενη φόρτιση ελαχιστοποίησης κόστους και περιορισμό αιχμής φόρτισης	136
4.5.4	Ελεγχόμενη φόρτιση με ελαχιστοποίηση κόστους και ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου («Valley-Filling»).....	141
5	Συμπεράσματα	147
6	Βιβλιογραφία	157
7	Παράρτημα.....	160

Κεφάλαιο 1

Τεχνολογίες Ηλεκτρικών Οχημάτων και Υποδομών Φόρτισης

1.1 Εισαγωγή

Οι ολοένα και αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες του ανθρώπου, σε συνδυασμό με την κάλυψη αυτών κυρίως μέσω διαδικασιών καύσης, έχουν δημιουργήσει ένα οικολογικό πρόβλημα το οποίο δεν είναι πλέον αμελητέο. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου, όπως ονομάζεται, έχει προκύψει από τα αέρια απόβλητα των καύσεων, και ευθύνεται για την αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη. Στα πλαίσια μιας παγκόσμιας προσπάθειας για την μείωση της οικολογικής αυτής επιβάρυνσης, η Ευρωπαϊκή Ένωση έθεσε το 2007 στόχους, γνωστούς ως «20-20-20» που πρέπει να έχουν ικανοποιηθεί μέχρι το 2020. Οι στόχοι αυτοί συνίστανται στην μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κατά 20% χαμηλότερα από τα επίπεδα του 1990, στην διεύθυνση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στον ενεργειακό χάρτη της Ευρώπης σε τέτοιο βαθμό ώστε το 20% των ενεργειακών αναγκών της να καλύπτεται εξ' ολοκλήρου από αυτές, και στην αύξηση της ενεργειακής απόδοσης κατά 20%.

Ένας κυρίαρχος τομέας της ανθρώπινης ζωής που χρησιμοποιείται η καύση (και συγκεκριμένα η καύση πετρελαίου) είναι οι μεταφορές. Η συντριπτική πλειοψηφία των μέσων μεταφοράς σήμερα χρησιμοποιούν θερμικούς κινητήρες (κινητήρες καύσης πετρελαίου ή παράγωγα αυτού όπως βενζίνη) με αποτέλεσμα να εκλύουν στην ατμόσφαιρα τα αέρια παράγωγα των καύσεων αυτών. Η διεθνής αυτοκινητοβιομηχανία, παρακολουθώντας στενά τις εξελίξεις και τις απαιτήσεις των καιρών για ολοένα και φιλικότερα προς το περιβάλλον αυτοκίνητα αποφάσισε να στραφεί προς την ηλεκτροκίνηση. Τα ηλεκτρικά οχήματα αποβάλλουν κατά την λειτουργία τους πολύ μικρές (ή ακόμα και μηδαμινές) ποσότητες ρύπων και αερίων του θερμοκηπίου. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα εθνικά σχέδια διαφόρων από διάφορες χώρες ανά τον κόσμο τα οποία αποδεικνύουν την παγκόσμια τάση προς τα ηλεκτρικά οχήματα:

Πίνακας 1.1 : Διεθνείς Στόχοι [1.1]

Χώρα	Στόχος
Αυστρία	2020 : 100.000 ηλεκτρικά οχήματα στην αγορά
Αυστραλία	2012 : Τα πρώτα ηλεκτρικά οχήματα στον δρόμο 2018 : Μαζική παραγωγή

	2050 : Στοκ ηλεκτρικών οχημάτων της τάξης του 65%
Καναδάς	2018 : 500.000 ηλεκτρικά οχήματα στην αγορά
Κίνα	2012 : Ετήσια παραγωγή 500.000 ηλεκτρικών οχημάτων
Δανία	2020 : 200.000 ηλεκτρικά οχήματα στην αγορά
Γαλλία	2020 : 2.000.000 ηλεκτρικά οχήματα στην αγορά
Γερμανία	2020 : 1.000.000 ηλεκτρικά οχήματα στην αγορά
Ιρλανδία	2020 : Το 10% των αυτοκινήτων που αγοράζονται να είναι ηλεκτρικά
Ισραήλ	2012 : 40.000 με 100.000 ηλεκτρικά οχήματα στην αγορά
Ιαπωνία	2020 : Το 50% των αυτοκινήτων που αγοράζονται να είναι επόμενης γενιάς (ηλεκτρικά, υβριδικά)
Νέα Ζηλανδία	2020 : Το 5% των αυτοκινήτων που αγοράζονται να είναι ηλεκτρικά 2040 : Το 60% των αυτοκινήτων που αγοράζονται να είναι ηλεκτρικά
Ισπανία	2014 : 1.000.000 ηλεκτρικά οχήματα στην αγορά
Σουηδία	2020 : 600.000 ηλεκτρικά οχήματα στην αγορά
Ηνωμένο Βασίλειο	Έχουν θεσμοθετηθεί πολιτικές στήριξης των ηλεκτρικών οχημάτων
Η.Π.Α.	2015 : Στοκ 1.000.000 επαναφορτιζόμενων υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων

Με τον όρο ηλεκτρικό όχημα (EV) αναφερόμαστε σε οχήματα που χρησιμοποιούν για την κίνησή τους έναν ή περισσότερους ηλεκτροκινητήρες.

Τα ηλεκτρικά οχήματα δεν είναι σημερινή ανακάλυψη. Στην πραγματικότητα έχουν κατασκευαστεί εδώ και πάνω από 100 χρόνια και συνεχώς εξελίσσονται. Οι σημαντικότερες χρονολογίες-κλειδιά παρατίθενται στο κάτωθεν συνοπτικό χρονολόγιο [1.2] :

1831 : Ο Joseph Henry, καθηγητής Μαθηματικών στο Albany NY, εφευρίσκει τον ηλεκτροκινητήρα στην προσπάθειά του να κατανοήσει τον ηλεκτρομαγνήτη.

1834 : Ο Thomas Davenport, ένας σιδηρουργός από το Vermont, χρησιμοποιεί την ιδέα του Henry για να κατασκευάσει ένα μικρό ηλεκτρικό όχημα κινούμενο σε ράγες, προσπαθώντας να αντικαταστήσει τον ατμό στην κίνηση των αμαξοστοιχιών.

Κάπου ανάμεσα στο 1832 και 1839 (η ακριβής χρονολογία δεν είναι γνωστή) ο Robert Anderson από την Σκωτία εφευρίσκει την πρώτη ηλεκτρική άμαξα.

1842 : Οι Thomas Davenport και Robert Anderson, ανεξάρτητα , κατασκευάζουν ηλεκτρικά οχήματα που χρησιμοποιούν μη επαναφορτιζόμενες μπαταρίες.

1865 : Ο Γάλλος φυσικός Gaston Plante ανακαλύπτει την επαναφορτιζόμενη μπαταρία μολύβδου-οξέος, την οποία βελτιώνει το 1881 ο επίσης Γάλλος Camille Faure, ανοίγοντας τον δρόμο για την εμπορική παραγωγή ηλεκτρικών οχημάτων.

1890 : Ο William Morrison από την Iowa κατασκευάζει το πρώτο επιτυχημένο ηλεκτρικό αυτοκίνητο στις ΗΠΑ. Μπορεί να κινηθεί με 22km/h για 13 ώρες.

Τα επόμενα χρόνια τα ηλεκτρικά οχήματα σπάνε το ένα μετά το άλλο το ρεκόρ ταχύτητας και μέγιστης διανυόμενης απόστασης. Μάλιστα, το 1898, το βελγικής κατασκευής αγωνιστικό ηλεκτρικό αυτοκίνητο «La Jamais Contente» φτάνει τα 108 km/h. Ο Ferdinand Porsche σχεδιάζει το πρώτο του αυτοκίνητο, που είναι ηλεκτρικό και φτάνει τα 56km/h. Στη Νέα Υόρκη το 90% των ταξί είναι ηλεκτρικά.



Εικόνα 1.1 : Αυτοκίνητο «La Jamais Contente» [1.2]

1900 : Ο Thomas Edison κατασκευάζει την μπαταρία Νικελίου-Σιδήρου με σκοπό να χρησιμοποιηθεί σε ηλεκτρικά οχήματα, αλλά μια δεκαετία αργότερα λόγω των προβλημάτων που εμφανίστηκαν εγκαταλείπει την προσπάθεια. Την ίδια χρονιά η αγορά των ηλεκτρικών οχημάτων βρίσκεται στην ακμή της. Περίπου το 1/3 των οχημάτων στους δρόμους της Νέας Υόρκης, της Βοστώνης και του Σικάγο είναι ηλεκτροκίνητα.



Εικόνα 1.2 : Ηλεκτροκίνητο όχημα της εποχής [1.2]

1908 : Ο Henry Ford εισάγει το πρώτο βενζινοκίνητο όχημα μαζικής παραγωγής, το Model T, που έχει τεράστια επίδραση στην αγορά αυτοκινήτων των ΗΠΑ.



Εικόνα 1.3 : Αυτοκίνητο «Model T» [1.2]

1920 : Η παραγωγή ηλεκτρικών αυτοκινήτων σταματά να είναι βιώσιμη, οι πωλήσεις ελαχιστοποιούνται. Χαρακτηριστικά η Detroit Electric Car Company από 1139 μονάδες το 1918 φτάνει να πουλά μόνο 191 το 1920.

1920 – 1990 : Τα βενζινοκίνητα οχήματα αναπτύσσονται ραγδαία, και προτιμώνται λόγω των μεγαλύτερων αποστάσεων που μπορούν να διανύσουν, της μεγαλύτερης ιπποδύναμης, και της χαμηλής τιμής της βενζίνης σε σχέση με την ηλεκτρική ενέργεια. Μόνο η Βρετανία διατηρεί ένα σχετικά μεγάλο αριθμό ηλεκτρικών οχημάτων, χρησιμοποιώντας τα για την διανομή γάλακτος, ψωμιού και αλληλογραφίας.

Δεκαετία **1970** : Η ανησυχία για την αύξηση των τιμών του πετρελαίου, που κορυφώνεται με την πετρελαϊκή κρίση του 1973, καθώς και το διαρκώς εντονότερο περιβαλλοντικό κίνημα, οδηγούν σε αναζωπύρωση του ενδιαφέροντος για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, τόσο από την μεριά των καταναλωτών όσο και των παραγωγών.

1972 : Ο Victor Wouk κατασκευάζει το πρώτο υβριδικό αυτοκίνητο κανονικού μεγέθους.

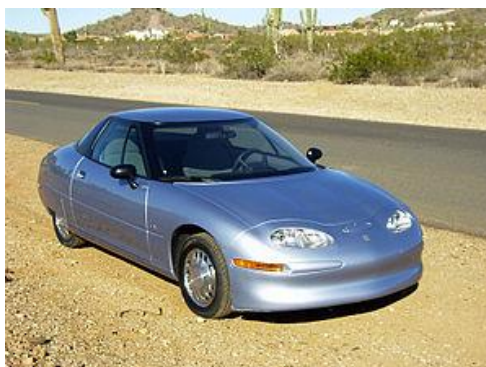
1974 : Το ηλεκτρικό όχημα Vanguard - Sebring's CitiCar εμφανίζεται στο Συμπόσιο Ηλεκτρικών Οχημάτων στην Washington D.C. Έχει μέγιστη ταχύτητα περίπου 50km/h και αυτονομία 60km.



Εικόνα 1.4 : Αυτοκίνητο «Vanguard - Sebring's CitiCar» [1.2]

1974 : Το Αμερικανικό Κογκρέσο περνάει νόμο για την προώθηση της έρευνας σχετικής με τα ηλεκτρικά και τα υβριδικά οχήματα.

1988 : Η General Motors χρηματοδοτεί ερευνητικές προσπάθειες για την ανάπτυξη ενός πρακτικού ηλεκτρικού οχήματος προς κατανάλωση και σε συνεργασία με την AeroVironment της California κατασκευάζει το EV1.



Εικόνα 1.5 : Αυτοκίνητο «EV1» [1.2]

1990 : Η California εκδίδει την εντολή ZEV (Zero Emission Vehicle Mandate), σύμφωνα με την οποία μέχρι το 1998, 2% των οχημάτων της πολιτείας ,και μέχρι το 2003 το 10% των οχημάτων πρέπει να έχουν μηδενικές εκπομπές ρύπων. Στην πορεία όμως ο νόμος αυτός γίνεται πιο ελαστικός.

1997 – 2000 : Μερικές χιλιάδες ηλεκτρικά οχήματα παράγονται από τις μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες, όπως για παράδειγμα το Prius και το RAV4-EV (με μπαταρίες NiMH, αυτονομία 190km και μέγιστη ταχύτητα 126km/h) της Toyota, το EV-Plus (με μπαταρίες NiMH και αυτονομία 160km) της Honda, το Ranger Pickup EV της Ford, το Altra EV της Nissan και το S-10 EV της Chevy. Ωστόσο, τα περισσότερα από αυτά διατίθεται μόνο για ενοικίαση.

2002 : Οι εταιρίες General Motors και Daimler – Chrysler μηνύουν το CARB (California Air Resources Board), ζητώντας την απόσυρση του νόμου για τα οχήματα μηδενικών εκπομπών που είχε περάσει το 1990. Ένα χρόνο αργότερα η General Motors ανακοινώνει ότι μέχρι το τέλος του 2004 θα έχει αποσύρει τα EV1 από την αγορά εξαιτίας της αδυναμίας της να παρέχει ανταλλακτικά, γεγονός που προκαλεί μεγάλες αντιδράσεις.



Εικόνα 1.6 : Απόσυρση εκατοντάδων «EV1» [1.2]

2003 : Το CARB υποκύπτει στις αυτοκινητοβιομηχανίες και ανακοινώνει ένα εναλλακτικό σχέδιο, προωθώντας την τεχνολογία κυψελών καυσίμου. Αυτή την φορά οι κατασκευαστές οχημάτων έχουν περιθώριο προσαρμογής μέχρι το 2018.

2006 : Το περίφημο ντοκιμαντέρ “Who killed the Electric Car” βγαίνει στην δημοσιότητα.

2007 : Μικρή παραγωγή ηλεκτρικών οχημάτων γίνεται από διάφορες εταιρίες όπως η Tesla Motors, που παρουσιάζει το Tesla Roadster το οποίο θα πουληθεί ένα χρόνο αργότερα στην τιμή των \$98,950.



Εικόνα 1.7 : Αυτοκίνητο «Tesla Roadster» [1.2]

Με βελτιώσεις στην τεχνολογία φόρτισης, στην μπαταρία, στους ηλεκτρονικούς ελεγκτές και στο σχεδιασμό, τα νέα οχήματα ανταγωνίζονται σε διανυόμενη απόσταση και ταχύτητα τα βενζινοκίνητα. Μετά το Πρωτόκολλο του Kyoto, και σε μια προσπάθεια επίτευξης των στόχων που τίθενται από αυτό αναζωπυρώνεται το ενδιαφέρον για τα ηλεκτρικά οχήματα.

2008 : Σε πολλές χώρες όπως Ισραήλ, Δανία, Καναδάς, Ιαπωνία, Αυστραλία, ΗΠΑ υιοθετούνται προγράμματα υποστήριξης ηλεκτρικών οχημάτων. Λόγω της αυξημένης τιμής του πετρελαίου οι πωλήσεις βενζινοκίνητων οχημάτων φτάνουν στα χαμηλότερα επίπεδα της δεκαετίας.

2009 : Στις ΗΠΑ διατίθενται \$2 δισεκατομμύρια για την ανάπτυξη των μπαταριών και άλλα \$400 εκατομμύρια για την κατασκευή των απαραίτητων υποδομών για την χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων. Στο San Francisco εγκαθίστανται σταθμοί φόρτισης στο κέντρο της πόλης. Ο απερχόμενος CEO Rick Wagoner της General Motors ανακοινώνει πως η διακοπή της παραγωγής των EV από την GM ήταν το μεγαλύτερο λάθος της καριέρας του. Η Βρετανική κυβέρνηση προωθεί την χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων χορηγώντας 2000 λίρες σε κάθε αγοραστή. Η BMW ξεκινά δοκιμές σε 500 Mini-EV σε Νέα Υόρκη και Λος Άντζελες.

2010 : Το κόστος των μπαταριών Ιόντων-Λιθίου πέφτει από τα \$650/kWh στα \$450/kWh σύμφωνα με την Deutsche Bank [1.3], [1.4]. Η Nissan ξεκινά την ευρεία

παραγωγή του τελευταίου της επιβατικού ηλεκτρικού οχήματος, του Nissan LEAF (Leading, Environmentally Friendly, Affordable, Family Car). Παράλληλα η Chevrolet ρίχνει στην αγορά το Chevy Volt.

Σήμερα η αυτοκινητοβιομηχανία έχει μια μεγάλη ποικιλία ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων να προσφέρει στον καταναλωτή, με τις περισσότερες κατασκευάστριες εταιρίες να έχουν ήδη από ένα ή και περισσότερα μοντέλα. Ολοένα και περισσότεροι οικονομικοί πόροι και χρόνος επενδύονται στην ανάπτυξη της τεχνολογίας αυτής που δεν θα αργήσει να κυριαρχήσει στον χώρο των επιβατικών αυτοκινήτων. Σύμφωνα με τελευταίες μελέτες της Deutsche Bank [1.4], το κόστος της μπαταρίας που είναι ένας από τους ανασταλτικούς παράγοντες της διαδικασίας αυτής, μέχρι το 2020 θα έχει πέσει στα \$250/kWh, πράγμα που θα εκτινάξει τις πωλήσεις των ηλεκτρικών οχημάτων στα ύψη.

1.2 Τύποι Ηλεκτρικών Οχημάτων

1.2.1 Τεχνολογίες Ηλεκτρικών Οχημάτων

Τα ηλεκτρικά οχήματα που διατίθενται σήμερα στην αγορά και που από ότι φαίνεται θα συνεχίσουν και στο μέλλον μπορούν να διαιρεθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες [1.5] :

- ❖ **Ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας (Battery Electric Vehicles – BEV's)**
- ❖ **Ηλεκτρικά οχήματα με μονάδα επέκτασης της αυτονομίας τους (Battery Electric Vehicles with Range Extender)**
- ❖ **Επαναφορτιζόμενα Υβριδικά Ηλεκτρικά Οχήματα (Plug-in Hybrid Electric Vehicles – PHEV)**

1.2.1.1 Ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας (Battery Electric Vehicles – BEV's)

Είναι τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα που κινούνται αποκλειστικά με την ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται σε συσσωρευτές εγκατεστημένους εντός του οχήματος, και η οποία μπορεί να προσληφθεί από το δίκτυο, ή από κάποια εξωτερική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής. Εφαρμόζονται επίσης και τεχνικές φόρτισης των συσσωρευτών με το λεγόμενο «αναπαραγωγικό φρενάρισμα», που αξιοποιεί την θερμότητα που παράγεται κατά το φρενάρισμα του οχήματος. Επί του παρόντος, οι μπαταρίες

μολύβδου - οξέος (lead-acid) αποτελούν την οικονομικότερη επιλογή, όμως τεχνολογίες όπως οι υδριδίου μετάλλων νικελίου (NiMH), ιόντων λιθίου (Li-Ion), και πολυμερών ιόντων λιθίου κερδίζουν συνεχώς έδαφος λόγω της μεγαλύτερης διάρκειας ζωής, του μικρότερου μεγέθους και βάρους. Σήμερα, ορισμένοι τύποι ηλεκτρικών οχημάτων που χρησιμοποιούνται ευρέως είναι τα χαμηλής ταχύτητας, τα ηλεκτρικά οχήματα γειτονιάς (NEV's), τα οχήματα που αποτελούν τον εξοπλισμό εδάφους των αεροδρομίων, καθώς και οχήματα βιομηχανικού εξοπλισμού, όπως για παράδειγμα περνοφόροι ανυψωτές κ.ά.

1.2.1.2 Ηλεκτρικά οχήματα με μονάδα επέκτασης της αυτονομίας τους (Battery Electric Vehicles with Range Extender)

Είναι τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, τα οποία έχουν συσσωρευτές όπως ακριβώς και τα προαναφερθέντα, και επιπλέον διαθέτουν μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (γεννήτρια) επί του οχήματος. Η γεννήτρια αυτή χρησιμοποιείται κατά περίπτωση είτε για να φορτιστούν οι συσσωρευτές του οχήματος όταν αυτοί εκφορτιστούν, είτε για την απευθείας τροφοδότηση των ηλεκτροκινητήρων όταν αυτό απαιτείται. Τα οχήματα ανεφοδιάζονται με ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο όπως ακριβώς και τα BEV's, αλλά παράλληλα πρέπει να ανεφοδιάζονται και με το είδος καυσίμου με το οποίο λειτουργεί η μονάδα επέκτασης της αυτονομίας τους (είτε αυτό είναι βενζίνη, πετρέλαιο ή φυσικό αέριο).

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

Τα αυτοκίνητα αυτά κινούνται χρησιμοποιώντας συνδυασμό ηλεκτροκινητήρα και κινητήρα εσωτερικής καύσης, και τα οποία εκτός από τον εφοδιασμό τους με το συμβατικό καύσιμο του θερμικού κινητήρα, έχουν επιπρόσθετα την δυνατότητα να φορτίζουν τους συσσωρευτές τους με ηλεκτρική ενέργεια απευθείας από το δίκτυο, ή από κάποια εξωτερική μονάδα ηλεκτροπαραγωγής. Στην «παράλληλη» όπως ονομάζεται σχεδίαση του κινητήρα, ο κινητήρας εσωτερικής καύσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μετάδοση της κίνησης στο όχημα, ενώ στην «σειριακή» σχεδίαση ο κινητήρας εσωτερικής καύσης σρέφει μια γεννήτρια η οποία με την σειρά της τροφοδοτεί τον ηλεκτροκινητήρα. Επίσης υπάρχουν μοντέλα που εφαρμόζουν και τις 2 αρχιτεκτονικές με στόχο την μέγιστη ευελιξία.

1.2.2 Κατηγορίες Ηλεκτρικών οχημάτων

Τα ηλεκτρικά οχήματα κατηγοριοποιούνται περαιτέρω ανάλογα με το μέγεθος και τη χρήση τους στις εξής κατηγορίες [1.14] :

❖ **L7e** : Στην κατηγορία αυτή ανήκουν όλα τα πολύ μικρά αυτοκίνητα με μέγιστο καθαρό βάρος τα 550kg (χωρίς να υπολογίζεται το βάρος του καυσίμου ή των συσσωρευτών), και μέγιστη ισχύ τα 15kW ανεξαρτήτως του κινητήρα.



Εικόνα 1.8 : Όχημα τάξης L7e [1.14]

❖ **M1** : Ως τύπου M1 μπορούν να χαρακτηριστούν όλα τα επιβατικά οχήματα που περιλαμβάνουν μέχρι 8 θέσεις επιβατών επιπλέον της θέσης του οδηγού.



Εικόνα 1.9 : Όχημα τάξης M1 [1.14]

❖ **N1** : Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει όλα τα επαγγελματικά οχήματα, με μέγιστο βάρος φορτίου τα 3.500kg.



Εικόνα 1.10 : Όχημα τάξης N1 [1.14]

❖ **N2** : Τέλος, η τελευταία κατηγορία περιλαμβάνει τα επαγγελματικά οχήματα με βάρος φορτίου μεταξύ 3.500kg και 12.000kg.



Εικόνα 1.11 : Όχημα τάξης N2 [1.14]

Οι λόγοι για τους οποίους η κατηγοριοποίηση των οχημάτων έχει περιοριστεί στις παραπάνω 4 κατηγορίες είναι οι εξής:

- Υπάρχει ήδη ένας αριθμός από οχήματα τύπου L7e διαθέσιμος στην αγορά, αλλά το ποσοστό τους επί των συνολικών πωλήσεων των ηλεκτρικών οχημάτων θα μειωθεί δραστικά, καθώς οικονομικότερα, ασφαλέστερα και πρακτικότερα οχήματα τύπου M1 θα εισαχθούν στην αγορά των ηλεκτρικών οχημάτων.
- Η κυρίαρχη τάξη ηλεκτρικών οχημάτων θα είναι ο τύπος M1. Αυτό επιβεβαιώνεται καθημερινά από τις συνεχείς ανακοινώσεις των διαφόρων κατασκευαστών αυτοκινήτων περί κυκλοφορίας νέων μοντέλων ηλεκτρικών οχημάτων τύπου M1.
- Πολλά ηλεκτρικά οχήματα τύπου N1 αναμένεται να κυκλοφορήσουν στο μέλλον, καθώς σε πολλές περιπτώσεις τα μοντέλα χρήσης (πχ διανυόμενη απόσταση) καθώς και οι χρόνοι και οι τοποθεσίες φόρτισης (πχ κατά την διάρκεια της νύχτας σε σταθμό φόρτισης) μπορούν να προβλεφθούν με αξιοπιστία και αποδεκτή ακρίβεια.
- Το άνω όριο τέθηκε με τα οχήματα τύπου N2, με μέγιστη δυνατότητα φορτίου τα 12.000kg. Οι μέχρι τώρα πληροφορίες αναφέρουν πως μεγαλύτερα οχήματα είναι απίθανο να χρησιμοποιούν ηλεκτροκίνηση.

1.3 Τεχνολογίες Συσσωρευτών

Ένα από τα βασικότερα μέρη του Ηλεκτρικού Οχήματος, αν όχι το βασικότερο, είναι η συστοιχία συσσωρευτών. Τα τελευταία χρόνια επενδύονται σημαντικά κεφάλαια και παρουσιάζεται παγκοσμίως έντονη επιστημονική δραστηριότητα για την βελτίωση των χαρακτηριστικών διαφόρων τύπων συσσωρευτών που θεωρήθηκαν αρχικά ως κατάλληλοι για την ηλεκτροκίνηση των οχημάτων, αλλά και για την επινόηση νέων τύπων συσσωρευτών. Τελικός στόχος είναι η ευρεία παραγωγή

συσσωρευτών με μικρότερο κόστος, μεγαλύτερη χωρητικότητα και ισχύ, καθώς και υψηλότερο μέσο όρο ζωής. Η τρέχουσα τεχνολογία στον τομέα των συσσωρευτών, βρίσκεται ήδη σε πολύ υψηλότερα επίπεδα σε σχέση με την τεχνολογία της περασμένης δεκαετίας. Το γεγονός αυτό επέτρεψε να κατασκευαστούν και να διατεθούν στην αγορά ηλεκτρικά και επαναφορτιζόμενα υβριδικά αυτοκίνητα χωρίς βέβαια αυτό να σημαίνει ότι έπαυσε η προσπάθεια για περαιτέρω βελτίωση. Το αντίθετο μάλιστα, όσο η ηλεκτροκίνηση των αυτοκινήτων αρχίζει να διαδίδεται, ολοένα και περισσότερες επενδύσεις γίνονται σε κεφάλαια, ανθρώπινο δυναμικό και υλικά μέσα, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα μειονεκτήματα που παρουσιάζει η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, όσο και του χρόνου ανεφοδιασμού από το δίκτυο ή την όποια άλλη πηγή. Το βάρος και ο όγκος της συστοιχίας των συσσωρευτών, η οποία εξασφαλίζει τις επιθυμητές επιδόσεις του ηλεκτρικού αυτοκινήτου και την αναγκαία αυτονομία του, αναδεικνύονται σε καθοριστικούς παράγοντες, δεδομένου ότι ο χώρος και η μάζα αποτελούν μεγέθη αυστηρά ελεγχόμενα, και βέλτιστα αξιοποιούμενα σε κάθε κατασκευή οχήματος. Επιπλέον το αρχικό κόστος αγοράς και η διάρκεια ζωής της συστοιχίας των συσσωρευτών αποτελούν επίσης καθοριστικά στοιχεία για την επιδιωκόμενη εμπορική επιτυχία και διάδοση της ηλεκτροκίνησης.

Για την μέτρηση και σύγκριση των χαρακτηριστικών μεγέθους και βάρους των διαφόρων τύπων συσσωρευτών, χρησιμοποιούνται τα κάτωθι τυποποιημένα μεγέθη [1.6] :

- ❖ **Ογκομετρική Πυκνότητα Ενέργειας (Volumetric Energy Density)** η οποία εκφράζεται σε Wh/l (Βατώρες ανά λίτρο)
- ❖ **Ογκομετρική Πυκνότητα Ισχύος (Volumetric Power Density)** η οποία εκφράζεται σε W/l (Βατ ανά λίτρο)
- ❖ **Βαρυμετρική Πυκνότητα Ενέργειας (Gravimetric Energy Density)** η οποία εκφράζεται σε Wh/kg (Βατώρες ανά χιλιόγραμμο)
- ❖ **Βαρυμετρική Πυκνότητα Ισχύος (Gravimetric Power Density)** η οποία εκφράζεται σε W/kg (Βατ ανά χιλιόγραμμο)
- ❖ **Διάρκεια Ζωής**, η οποία εκφράζεται σε κύκλους, και προσδιορίζεται θεωρητικά από τον αριθμό των κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης μετά την συμπλήρωση του οποίου η χωρητικότητα των στοιχείων έχει μειωθεί κατά 20% σε σχέση με την αρχική της τιμή. Το υπόλοιπο 80% επαρκεί για την συνέχιση της λειτουργίας του συστήματος με μειωμένο βαθμό απόδοσης, και ο συσσωρευτής θα συνεχίσει να προσφέρει τις υπηρεσίες του για μία ή

περισσότερες τέτοιες θεωρητικές διάρκειες ζωής πριν γίνει τελείως ακατάλληλος και πρέπει να αντικατασταθεί.

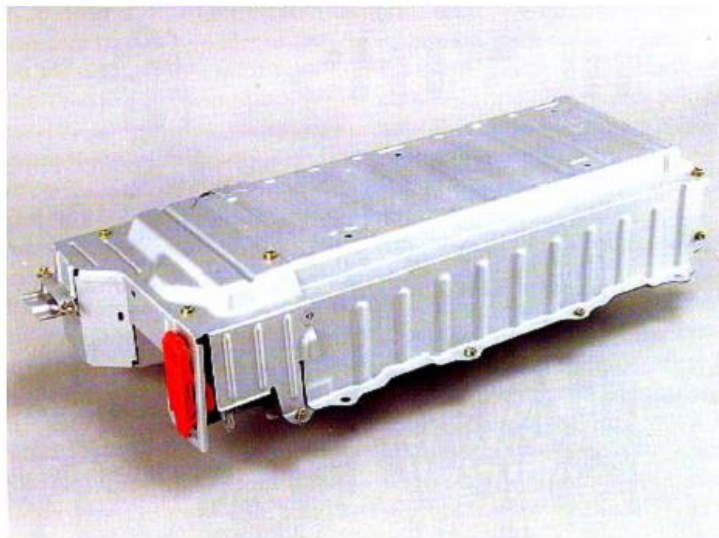
Οι συσσωρευτές που χρησιμοποιούνται σήμερα μπορούν να χωριστούν σε διάφορους τύπους-οικογένειες κάθε ένας από τους οποίους έχει διαφορετική σύσταση και χαρακτηριστικά. Μια σύντομη περιγραφή των βασικότερων τύπων ακολουθεί παρακάτω [1.7], [1.10] :

1.3.1 Μολύβδου-Οξέος

Οι συσσωρευτές μολύβδου - εκχυλίσματος οξέος είναι οι φθηνότεροι και πιο συνηθισμένοι. Επιτρέπουν υψηλούς ρυθμούς φόρτισης στην περίπτωση της γρήγορης φόρτισης. Απαιτείται όμως επιθεώρηση του επιπέδου των ηλεκτρολυτών και αντικατάσταση του νερού. Παραδοσιακά, τα περισσότερα ηλεκτρικά οχήματα έχουν χρησιμοποιήσει συσσωρευτές μολύβδου-οξέος εξαιτίας της ώριμης τεχνολογίας τους, της υψηλής διαθεσιμότητάς τους, και του χαμηλού κόστους. Έχουν όμως σχετικά χαμηλή βαρομετρική πυκνότητα ενέργειας περίπου 30-40Wh/kg και καταλήγουν να αποτελούν το 25%-50% της τελικής μάζας του ηλεκτρικού οχήματος. Παρόλο που η διαφορά στο βάρος δεν είναι τόσο μεγάλη, λόγω του ελαφρύτερου αμαξώματος των ηλεκτρικών οχημάτων, ακόμη και οι αποδοτικότεροι συσσωρευτές τείνουν να οδηγήσουν σε υψηλότερες μάζες όταν εφαρμόζονται σε οχήματα με σχετικά υψηλή αυτονομία. Η απόδοση (70-75%) και η ικανότητα αποθήκευσης της σημερινής γενιάς των κοινών συσσωρευτών μολύβδου οξέος μειώνεται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες περιβάλλοντος. Σε ακραίες καιρικές συνθήκες είναι απαραίτητη η εκτροπή ενέργειας από τις μπαταρίες για τη λειτουργία του συστήματος θέρμανσης τους, με αποτέλεσμα να μειώνεται η απόδοση τους μέχρι και 40%. Ακόμα έχει παρατηρηθεί πως η διάρκεια ζωής μειώνεται από συνεχόμενες εκφορτίσεις σε επίπεδα κάτω του 20% της ονομαστικής χωρητικότητας. Πρόσφατα επιτεύγματα στην απόδοση, τη χωρητικότητα, το υλικό κατασκευής, την ασφάλεια, την τοξικότητα και την ανθεκτικότητα είναι πιθανόν να επιτρέψουν την εφαρμογή αυτών των εξέχοντων χαρακτηριστικών της μπαταρίας σε κανονικού μεγέθους ηλεκτρικά οχήματα. Η φόρτιση και η λειτουργία των συσσωρευτών αυτών συνήθως έχει ως αποτέλεσμα τις εκπομπές υδρογόνου, οξυγόνου και θείου, οι οποίες είναι αναμενόμενες και αβλαβείς αν εξαερίζονται σωστά.

1.3.2 Νικελίου-Υδριδίου Μετάλλου

Οι συσσωρευτές νικελίου-υδριδίου μετάλλου θεωρούνται πλέον μια σχετικά ώριμη τεχνολογία. Ενώ είναι λιγότερο αποδοτικοί (60-70%) σε φόρτιση και εκφόρτιση από ό,τι οι μολύβδου-οξέος, έχουν να καυχώνται για μια ενεργειακή πυκνότητα της τάξης του 60-120Wh/kg, πολύ υψηλότερη από αυτήν του μολύβδου-οξέος. Όταν χρησιμοποιούνται σωστά, οι συσσωρευτές νικελίου-υδριδίου μετάλλου μπορούν να έχουν εξαιρετικά μεγάλη διάρκεια ζωής, όπως έχει αποδειχθεί κατά τη χρήση τους σε υβριδικά αυτοκίνητα, όπως για παράδειγμα στο RAV4 EV όπου εξακολουθούν να λειτουργούν καλά μετά από 160.000 χιλιόμετρα και πάνω από μια δεκαετία χρήσης. Μειονεκτήματα αποτελούν η χαμηλή απόδοση, η υψηλή αυτό - εκφόρτιση, οι πολύ απαιτητικοί κύκλοι φόρτισης, και η κακή απόδοση σε ψυχρές καιρικές συνθήκες. Η καλύτερη λειτουργία επιτυγχάνεται όταν η εκφόρτιση γίνεται στο 20% - 50% της ονομαστικής χωρητικότητας, μακροπρόθεσμα όμως το SOC (State of Charge) θα μειωθεί κάτω από το 100%. Τα υλικά κατασκευής των συσσωρευτών αυτών δεν είναι βλαβερά για το περιβάλλον, και μάλιστα οι συστοιχίες είναι ανακυκλώσιμες.

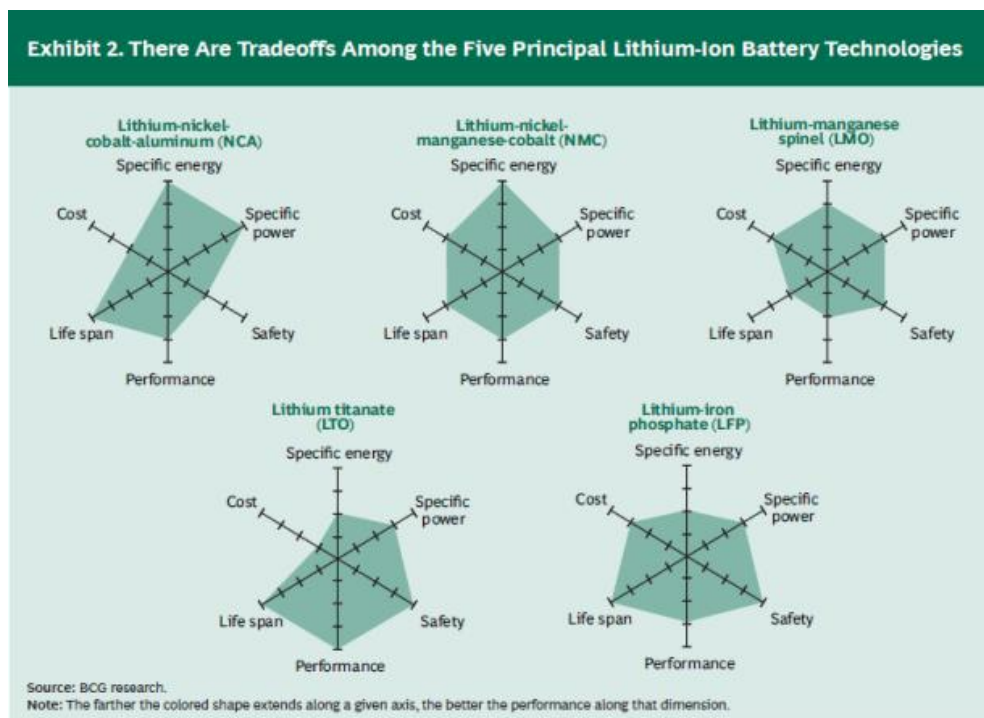


Εικόνα 1.12 : Η μπαταρία Νικελίου – Υδριδίου Μετάλλου του Prius [1.8]

1.3.3 Ιόντων-Λιθίου

Οι συσσωρευτές Ιόντων-Λιθίου αποτελούνται από μια οικογένεια συσσωρευτών που χρησιμοποιούν διάφορους συνδυασμούς υλικών ανόδου και καθόδου. Κάθε συνδυασμός έχει σαφή πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα όσον αφορά την ασφάλεια, τις επιδόσεις, το κόστος, και άλλες παραμέτρους. Οι πιο χαρακτηριστικές τεχνολογίες για εφαρμογή στην αυτοκινητοβιομηχανία είναι η λιθίου-νικελίου-κοβαλτίου-αλουμινίου (NCA), λιθίου-νικελίου-μαγγάνιου κοβαλτίου (NMC), λίθιο-μαγγάνιο

σπινελίου (ZTO), τιτανικού λιθίου (LTO), και λιθίου-φωσφορικού σιδήρου (LFP) . Τα πλεονεκτήματα των πέντε κύριων τεχνολογιών συσσωρευτών ιόντων λιθίου αντισταθμίζονται, όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:



Εικόνα 1.13 : Τα πλεονεκτήματα των συσσωρευτών Ιόντων - Λιθίου [1.9]

Οι συσσωρευτές ιόντων-λιθίου έχουν αποδείξει την πολύ καλή τους απόδοση σε εφαρμογές φορητών ηλεκτρονικών ή και ιατρικών συσκευών. Έχουν υψηλή πυκνότητα ισχύος, καλή απόδοση σε υψηλές θερμοκρασίες και είναι ανακυκλώσιμες. Το Λίθιο είναι το τρίτο πιο ελαφρύ χημικό στοιχείο, προσφέροντας έτσι ένα συγκριτικό πλεονέκτημα σχετικά με άλλες μπαταρίες που χρησιμοποιούν βαρύτερα μέταλλα. Ένα ακόμα πλεονέκτημα που έχουν οι μπαταρίες Li-ion είναι η υψηλή τάση ανοιχτού κυκλώματος που επιτυγχάνουν σε σχέση με άλλες υδατινές μπαταρίες όπως οι μπαταρίες μολύβδου οξέος, οι μπαταρίες Νικελίου-Υδριδίου Μετάλλου και οι μπαταρίες Νικελίου-Καδμίου. Οι πυκνότητες ισχύος της τάξης του 300W/kg και ενέργειας της τάξης του 100Wh/kg σε συνδυασμό με την μεγάλη διάρκεια ζωής (1000 κύκλοι) αποτελούν χαρακτηριστικά που δίνουν στους συσσωρευτές ιόντων-λιθίου προοπτικές αντικατάστασης των συσσωρευτών NiMH στα ηλεκτρικά οχήματα της επόμενης γενιάς. Μοναδικό μειονέκτημα, ωστόσο, των μπαταριών Li-ion είναι ότι η διάρκεια ζωής τους εξαρτάται και από το χρόνο που έχει περάσει από τη στιγμή της κατασκευής τους, ανεξάρτητα από το αν αυτές έχουν φορτιστεί και ανεξάρτητα από τον αριθμό των κύκλων

φόρτισης/αποφόρτισης. Έτσι, μια παλιότερη χρονολογικά μπαταρία θα διαρκέσει λιγότερο απ' ό τι μια καινούρια εξαιτίας της ηλικίας της και μόνο, κάτι που δεν συμβαίνει με τις άλλες μπαταρίες.



Εικόνα 1.14 : Η μπαταρία Li – ion που ανέπτυξε η θυγατρική εταιρία της LG Chemical, η CPI και την οποία προορίζει για τα νέα υβριδικά αυτοκίνητα [1.11]

Ο πίνακας παρακάτω δείχνει κάποια χαρακτηριστικά μερικών εμπορικά διαθέσιμων συσσωρευτών από τα ήδη που έχουν αναφερθεί :

Πίνακας 1.2 : Χαρακτηριστικά διαφόρων συσσωρευτών [1.10]

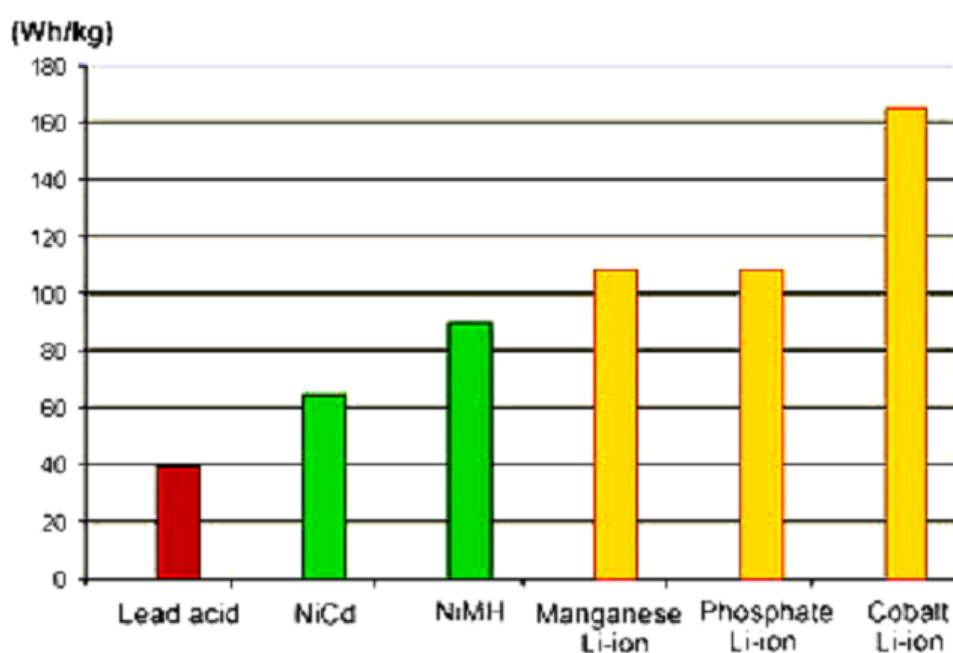
	Capacity (Ah)	Voltage (V)	Resistance (mΩ)	W/kg 95%eff	Usable SoC
<u>NiMH</u>					
<i>Panasonic</i>	6.5	7.2	11.4	207	40%
<i>Ovonic</i>	12	12	10	195	30%
<i>Saft</i>	14	1.2	1.1	172	30%
<u>Li-ion</u>					
<i>Saft</i>	12	4	7.0	256	20%
<i>Shin-kobe</i>	4	4	3.4	745	18%
<u>Lead-acid</u>					
<i>Panasonic</i>	25	12	7.8	77	28%

1.3.4 Νικελίου – Καδμίου

Οι συσσωρευτές νικελίου-καδμίου έχουν υψηλή διάρκεια ζωής και μπορούν να εκφορτιστούν πλήρως χωρίς επιπτώσεις. Η πυκνότητα ενέργεια κυμαίνεται από 45 μέχρι 80 Wh/kg. Μπορούν να ανακυκλωθούν, αλλά το κάδμιο ανήκει στα βαρέα μέταλλα και απαιτείται ειδική μεταχείριση ώστε να μην βάψει το περιβάλλον. Ένα

άλλο μειονέκτημα των συσσωρευτών νικελίου-καδμίου είναι το κόστος το οποίο είναι το υψηλότερο από όλα τα υπόλοιπα είδη συσσωρευτών.

Το παρακάτω διάγραμμα απεικονίζει τις πυκνότητες ενέργειας των μπαταριών μολύβδου, νικελίου και ιόντων-λιθίου στις τρεις εκδοχές του. Παρατηρείται εύκολα ότι οι μπαταρίες ιόντων-λιθίου έχουν το πλεονέκτημα της υψηλότερης πυκνότητας ενέργειας με το κόστος όμως της χαμηλότερης ασφάλειας και του μειωμένου κύκλου ζωής.



Διάγραμμα 1.1 : Πυκνότητες Ενέργειας των διαφόρων μπαταριών [1.7]

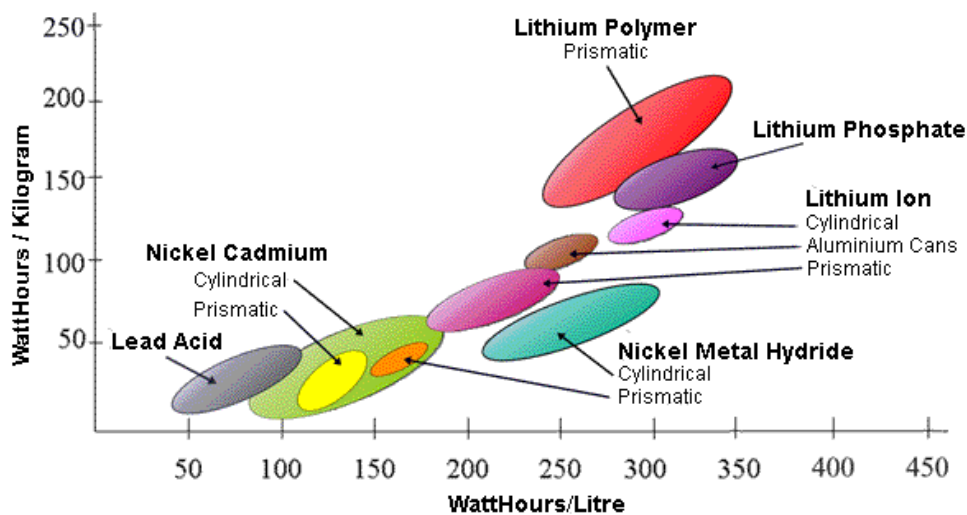
Ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τα χαρακτηριστικά των διαφόρων τύπων συσσωρευτών φαίνεται παρακάτω :

Πίνακας 1.3 : Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά [1.6], [1.7]

Τύπος Συσσωρευτή	Ενέργεια κατ' όγκο (Wh/l)	Ενέργεια κατά βάρος (Wh/kg)	Ισχύς κατά βάρος (W/kg)	Διάρκεια Ζωής σε Cycles	Κόστος (€/kWh)
Μολύβδου – Θειϊκού Οξέος (LeadAcid)	60 - 75	30 - 40	75 - 180	200 - 400	70 - 110
Μολύβδου – Θειϊκού Οξέος (VLRA Lead Acid)	75 - 100	35 - 42	240 - 412	500 - 800	85 - 140

Νικελίου – Καδμίου (NiCd)	50 - 150	45 - 80	50 - 200	1000 - 2000	280 - 560
Νικελίου – Μεταλλικών Υδριδίων	140 - 300	60 - 120	250 - 1000	600 - 1500	180 - 250
Ιόντων – Λιθίου Κοβάλτιο (Li-ion Cobalt)	220 - 350	150 - 220	300 - 760	500 - 1000	150 - 220
Ιόντων – Λιθίου Μαγγάνιο (Li-ion Manganese)	270	100 - 160	100 - 315	500 - 1800	150 - 220
Ιόντων – Λιθίου Φωσφορικού άλατος (Li-ion Phosphate)	250	90 - 150	150 - 300	1000 - 2000	180 - 250
Ψευδαργύρου – Βρωμίου (Zinc – Bromide)	140	90	100	270 - 350	120
Νατρίου – Χλωριούχου Νικελίου (Na-NiCl) - Zebra	160	120	150	500 - 1000	220
Ψευδαργύρου Αέρος (Zinc Air)	220	200	80 - 140	400	65

Μια εποπτική παράσταση των στοιχείων ενεργειακής πυκνότητας των διαφόρων τύπων συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτροκίνηση των οχημάτων δίνεται επίσης από το κάτωθι διάγραμμα :

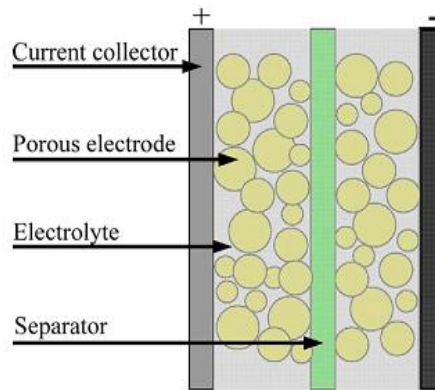


Διάγραμμα 1.2 : Η ενεργειακή πυκνότητα διαφόρων ειδών συσσωρευτών [1.7]

Από όλα τα πιο πάνω στοιχεία, αλλά και από την ευρύτερη σχετική βιβλιογραφία προκύπτει ότι οι συσσωρευτές Ιόντων-Λιθίου σε διάφορες παραλλαγές επιτυγχάνουν τα μέχρι τώρα καλύτερα χαρακτηριστικά ενεργειακής πυκνότητας, φτάνοντας μέχρι τις 350Wh/l και 220Wh/kg υποσχόμενοι πολλά για το μέλλον της ηλεκτροκίνησης.

1.3.5 Υπερπυκνωτές

Μια σχετικά νέα τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας είναι οι υπερπυκνωτές [1.10]. Σε αυτούς η αποθήκευση της ενέργειας γίνεται μέσα από τον φυσικό διαχωρισμό θετικού και αρνητικού ηλεκτρικού φορτίου. Τα φορτία αποθηκεύονται σε δύο παράλληλες οπλισμούς χωρισμένους με μονωτικό υλικό.



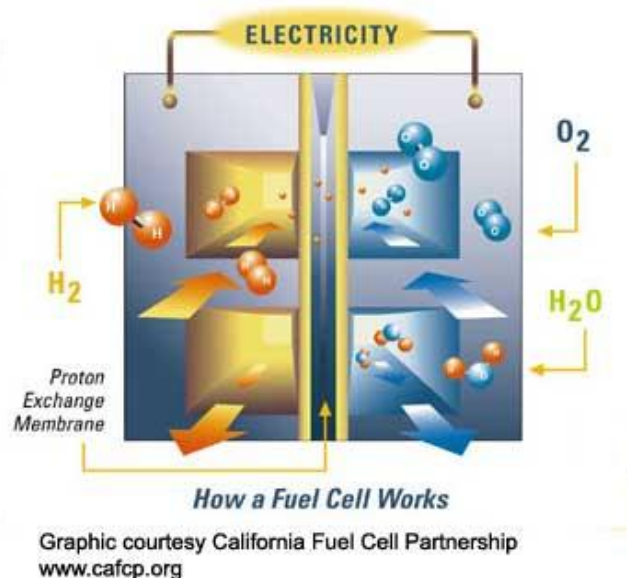
Εικόνα 1.15 : Υπερπυκνωτής [1.10]

Αφού δεν λαμβάνουν χώρα χημικές αντιδράσεις στα ηλεκτρόδια, οι υπερπυκνωτές έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής. Η χαμηλή πυκνότητα ενέργειας σε συνδυασμό με το μεγάλο κόστος κάνει την χρήση των υπερπυκνωτών κυρίως βοηθητική. Μπορούν κάλλιστα να χρησιμοποιηθούν ως βοηθητικές συσκευές αποθήκευσης ενέργειας σε υβριδικά οχήματα ιδίως σε αστικό περιβάλλον, που το συνεχόμενο «σταμάτα-ξεκίνα» στην οδήγηση απαιτεί μικρή ισχύ. Είναι ιδανικοί για φόρτιση μέσω του αναπαραγωγικού φρεναρίσματος και μπορούν γρήγορα να προσφέρουν μεγάλα ποσά ισχύος κατά την επιτάχυνση λόγω των υψηλών ρυθμών φόρτισης/αποφόρτισης και της υψηλής πυκνότητας ισχύος.

1.3.6 Κυψέλες καυσίμου

Η τελευταία δεκαετία χαρακτηρίζεται από αλματώδη ανάπτυξη της ερευνητικής δραστηριότητας στο πεδίο των κυψελών καυσίμου, δημιουργώντας έτσι τις προϋποθέσεις για υιοθέτησή τους στα συστήματα ηλεκτροκίνησης. Η βασική αρχή λειτουργίας των κυψελών καυσίμου είναι γνωστή εδώ και 150 χρόνια, ωστόσο, μια ποικιλία τεχνικών και οικονομικών προβλημάτων τις είχαν κρατήσει στο περιθώριο των τεχνολογικών εφαρμογών. Η διαφορά των κυψελών καυσίμου με τις μπαταρίες μπορεί να συνοψιστεί ως εξής : οι μπαταρίες αποθηκεύουν ενέργεια, ενώ οι κυψέλες

καυσίμου μετατρέπουν απευθείας τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρική μέσω ηλεκτροχημικής αντίδρασης [1.12].



Εικόνα 1.16 : Η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου [1.12]

Μια κυψέλη καυσίμου υδρογόνου παράγει ενέργεια όσο της παρέχεται υδρογόνο και οξυγόνο. Η ίδια η κυψέλη δεν εκφορτίζεται ούτε εξαντλείται η ενέργειά της, όπως συμβαίνει με τις μπαταρίες. Σε ένα ηλεκτρικό όχημα με κυψέλη καυσίμου, η αποθήκευση γίνεται στη δεξαμενή καυσίμου, όπως στα συμβατικά οχήματα. Παρότι το υδρογόνο έχει υψηλή πυκνότητα ενέργειας (περίπου ίση με 42kWh/kg) είναι τόσο ελαφρύ που ένα λίτρο, πεπιεσμένο σε 35 Μρα (περίπου 350 ατμόσφαιρες) ζυγίζει μόνο 31 γραμμάρια και αποδίδει μόνο $1,3\text{kWh}$. Αντίθετα, η βενζίνη έχει χαμηλότερη πυκνότητα ενέργειας (περίπου ίση με 14kWh/kg), αλλά ένα λίτρο της είναι ισοδύναμο με $8,3\text{kWh}$. Ομολογουμένως, οι κυψέλες καυσίμου και οι ηλεκτρικοί κινητήρες είναι πιο αποδοτικοί από τις μηχανές εσωτερικής καύσης, ωστόσο, για να παρασχεθεί σε ένα ηλεκτρικό όχημα εύρος απόδοσης 500 km απαιτούνται 6 kg υδρογόνου. Συμπιεσμένο στα 35 Μρα, το υδρογόνο θα καταλάβει 200 λίτρα, ενώ με την προσθήκη των σωληνώσεων, βαλβίδων και συστημάτων ρύθμισης και συμπίεσης, ο απαιτούμενος χώρος αποθήκευσης είναι διπλάσιος. Εταιρείες με μεγάλη τεχνογνωσία σε μπαταρίες νικελίου μετάλλου υβριδίου έχουν χρησιμοποιήσει τη γνώση στα υβρίδια μετάλλου για την ανάπτυξη κραμάτων μετάλλου που μπορούν να αποθηκεύσουν 7% του βάρους τους σε υδρογόνο και σε χαμηλή πίεση των 200 kPa. Με αυτήν την τεχνολογία μπορούν να αποθηκευτούν 6 kg υδρογόνου σε 120 λίτρα, δηλαδή σε περίπου διπλάσιο μέγεθος δεξαμενής από αυτό που χρησιμοποιείται σε

συμβατικά οχήματα μέσου μεγέθους. Ωστόσο, το βάρος αποθήκευσης παραμένει σημαντικό πρόβλημα, ενώ η παραγωγή υδρογόνου είναι ένα ακόμη ζήτημα προς επίλυση, καθώς δεν υπάρχουν αντίστοιχες υποδομές ή προοπτικές εγκατάστασής τους. Μία εναλλακτική λύση για την αποθήκευση υδρογόνου είναι η συνεχής παροχή του, μέσω παραγωγής από πιο εύχρηστα υλικά. Διάφορες αυτοκινητοβιομηχανίες έχουν στραφεί στη δημιουργία συνεπτιγμένων χημικών συστημάτων για την παραγωγή υδρογόνου από κοινά καύσιμα. Η εναλλακτική αυτή εξαλείφει τα προβλήματα υποδομής, δημιουργεί όμως προβλήματα πολυπλοκότητας και κινδύνους ρύπανσης παρόμοιους με αυτούς των συμβατικών οχημάτων. Τέλος, η ασφάλεια του υδρογόνου σε σχέση με τη βενζίνη κατά τη μετακίνηση των οχημάτων παραμένει ακόμη ένα ανοιχτό ζήτημα.

1.4 Τεχνολογίες Σταθμών Φόρτισης

Η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να ακολουθήσει δύο μεθόδους οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω [1.14] :

1.4.1 Φόρτιση με επαφή

Στην φόρτιση με επαφή η μετάδοση της ισχύος γίνεται χρησιμοποιούνται ηλεκτρικές επαφές οι οποίες ενώνονται μεταξύ τους, όπως ακριβώς συμβαίνει και με τις καθημερινές ηλεκτρικές συσκευές. Την μέθοδο αυτή ακολουθούν οι περισσότεροι on-board (ενσωματωμένοι στο όχημα) φορτιστές, ή συστήματα που έχουν τα κυκλώματα φόρτισης και ελέγχου πάνω στο όχημα.

1.4.2 Φόρτιση με Επαγωγή

Τα συστήματα επαγωγικής φόρτισης μεταφέρουν εναλλασσόμενη ισχύ δημιουργώντας ένα μαγνητικό κύκλωμα μεταξύ ενός πρωτεύοντος τυλίγματος στην μεριά της τροφοδοσίας και ενός δευτερεύοντος τυλίγματος στην μεριά του οχήματος. Έτσι η ισχύς ρέει από το πρωτεύον στο δευτερεύον όπως ακριβώς και σε ένα μετασχηματιστή 2 τυλιγμάτων. Και φυσικά αφού ο συσσωρευτής έχει DC τάση και μπορεί να φορτιστεί μόνο με DC ρεύμα, το AC ρεύμα εξόδου του δευτερεύοντος τυλίγματος ανορθώνεται με την κατάλληλη διάταξη πριν φτάσει σε αυτόν. Οι επαγωγικοί φορτιστές έχουν τα περισσότερα κυκλώματα φόρτισης και ελέγχου εκτός του οχήματος, και επικοινωνούν με αυτό μέσω υπέρυθρων ή ραδιοσυχνότητας.



Εικόνα 1.17 : Υποδοχέας και Λειτουργία Επαγωγικού Φορτιστή [1.14]

Η επαγωγική φόρτιση προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με την συμβατική φόρτιση (με επαφή) [1.15]. Επειδή η ισχύς που μεταφέρεται στα διάφορα συστήματα φόρτισης είναι αρκετά μεγάλη. Η μη αυτοματοποιημένη διαδικασία που ακολουθείται στην συμβατική φόρτιση, κατά την οποία ο άνθρωπος πρέπει να συνδέσει και να αποσυνδέσει το όχημα, αφήνει μεγάλα περιθώρια λάθους και ελλοχεύει ο κίνδυνος της ηλεκτροπληξίας, ιδίως σε υγρά περιβάλλοντα (υγρασία, βροχή). Ακόμα το μακρύ καλώδιο μπορεί να αποτελέσει αιτία ατυχήματος ή και τροφή για τυχόν τρωκτικά της περιοχής. Στην δεύτερη περίπτωση η αντικατάσταση επιβάλλεται αυξάνοντας το λειτουργικό κόστος της εγκατάστασης. Τέλος, σε περιοχές που ο πάγος και το χιόνι είναι συνηθισμένο φαινόμενο, το βύσμα φόρτισης μπορεί να παγώσει πάνω στο όχημα κατά την διάρκεια μιας φόρτισης π.χ. 30 λεπτών σε έναν εξωτερικό σταθμό φόρτισης. Η τεχνολογία της επαγωγικής φόρτισης μπορεί να δώσει λύση σε όλα αυτά τα θέματα καθώς η φόρτιση μπορεί να γίνει απλά και μόνο σταθμεύοντας το όχημα πάνω στο σημείο φόρτισης. Εξελίξεις στην τεχνολογία των υλικών, στα ηλεκτρονικά ισχύος και στους μικροελεγκτές έχουν προσφέρει σημαντική βοήθεια στην ανάπτυξη αυτού του τρόπου φόρτισης.

Σημαντικοί παράμετροι που αξίζει να σημειωθούν είναι η απόδοση, το επίπεδο ισχύος, η μέγιστη απόσταση των 2 τυλιγμάτων, η ανεκτικότητα στην ευθυγράμμιση του οχήματος, και οι διαστάσεις του τυλίγματος στην μεριά του ηλεκτρικού οχήματος.

Αναφέρονται ενδεικτικά κάποια πρωτότυπα συστήματα :

Το πανεπιστήμιο του Auckland ανέπτυξε ένα πατενταρισμένο μοντέλο φορτιστή ο οποίος λειτουργεί στα 38,4kHz αποδίδοντας 2kW. Η απόσταση των 2 τυλιγμάτων πρέπει να είναι μεταξύ 4 και 8,5 cm, και το πηνίο είναι κυκλικό με διάμετρο 42cm, και βάρος 7kg. Ο βαθμός απόδοσης στο δευτερεύον τύλιγμα αγγίζει το 95%, φτάνοντας όμως στους συσσωρευτές μετά από τις ανορθωτικές διατάξεις έχει πέσει στο 85%.

Περαιτέρω βελτιώσεις έχουν γίνει αυξάνοντας την ισχύ στα 5kW και την απόσταση στα 8 - 10 cm.



Εικόνα 1.18 : Το Πρωτεύον και Δευτερεύον του φορτιστή που ανέπτυξε το Πανεπιστήμιο του Auckland [1.15], [1.16]

Το σύστημα OLEV (On-Line Electric Vehicle) αναπτύχθηκε από το Ινστιτούτο Προηγμένης Επιστήμης και Τεχνολογίας της Κορέας (KAIST) θεωρεί ένα όχημα που μπορεί να φορτίσει καθώς κινείται με μικρή ταχύτητα σε έναν ειδικά διαμορφωμένο «ηλεκτρισμένο» δρόμο [1.15], [1.16]. Το πηνίο του πρωτεύοντος εδώ είναι θαμμένο κατά μήκος του δρόμου και καθώς το όχημα περνά από πάνω το μαγνητικό κύκλωμα κλείνει και υπάρχει ροή ισχύος. Παρόλο που το ύψος μπορεί να φτάσει τα 17cm η απόδοση είναι δεν ξεπερνά το 80%.



Εικόνα 1.19 : Όχημα με σύστημα OLEV που αναπτύχθηκε από το KAIST [1.17]

Τα μαγνητικά πεδία που δημιουργούνται κατά την επαγωγική φόρτιση δεν άφησαν αδιάφορη την ICNIRP (International Committee on Non-Ionizing Radiation Protection), η οποία έσπευσε να θέσει όρια προασπίζοντας την ασφάλεια των επιβατών. Στις συχνότητες λειτουργίας των συστημάτων επαγωγικής φόρτισης (10-150 kHz) η μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση είναι 6,25μT, το οποίο για ένα σύστημα 5kW μεταφράζεται σε απόσταση περίπου 90cm από το πρωτεύον. Δεδομένων και των διαστάσεων των οχημάτων η απόσταση αυτή καλύπτεται.

Ο παρακάτω πίνακας συγκεντρώνει τα χαρακτηριστικά που αναφέρθηκαν :

Πίνακας 1.4 : Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά μεθόδων Επαγωγικής Φόρτισης [1.15]

	Πανεπιστήμιο του Auckland	On-Line Electric Vehicle (KAIST)
Ισχύς	2 – 5 kW	20 kW
Απόδοση	85%	80%
Ύψος	10 – 30 cm	10 – 20 cm
Ανοχή λανθασμένης ευθυγράμμισης	4 – 10 cm	10 – 20 cm
ICNIRP	Εντός ορίων	Εντός ορίων
Διαστάσεις	Διαχειρίσιμες	Διαχειρίσιμες

Γενικότερα η επαγωγική φόρτιση είναι μια αρκετά νέα τεχνολογία με πολλές προοπτικές εξέλιξης στο μέλλον αν αντιμετωπιστούν θέματα όπως μεγάλο κόστος και σύνθετη υποδομή. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει συνοπτικά τα κύρια χαρακτηριστικά των 2 μεθόδων φόρτισης :

Πίνακας 1.5 : Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά των δύο μεθόδων Φόρτισης [1.14]

	Φόρτιση με Επαγωγή	Φόρτιση με Επαφή
Κόστος	Πιο ακριβή	Πιο οικονομική
Περιπλοκότητα	Αρκετά σύνθετη	Απλούστερη
Ασφάλεια	Καλύτερη από την Φόρτιση με Επαφή, λόγω της ηλεκτρικής απομόνωσης του οχήματος με την τροφοδοσία	Αρκετά καλή λόγω των αποδοτικών τεχνικών ανίχνευσης σφάλματος που εφαρμόζονται
Ενεργειακή Απόδοση	Όχι τόσο αποδοτική (απώλειες μαγνητικού κυκλώματος κ.λ.π.)	Πιο αποδοτική

Μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του 1990 και τα δύο είδη φορτιστών ήταν διαδεδομένα, σταδιακά όμως η απλότητα και το χαμηλό κόστος επικράτησαν και οι συμβατικοί φορτιστές υιοθετήθηκαν από τους περισσότερους κατασκευαστές. Έκτοτε η τεχνολογία των συμβατικών φορτιστών συνέχισε να εξελίσσεται και να ωριμάζει κάνοντας απίθανο για τους επαγωγικούς φορτιστές να μπορέσουν να τους συναγωνιστούν. Σήμερα η πλειοψηφία των φορτιστών που χρησιμοποιούνται και έχουν ελπίδες επιβίωσης και εξέλιξης είναι συμβατικοί.

Η φόρτιση των συσσωρευτών μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με AC είτε με DC ρεύμα οδηγούμενο στο ηλεκτρικό όχημα. Τα επίπεδα ισχύος φόρτισης είναι 3 και παρουσιάζονται παρακάτω [1.14] :

- ❖ **Mode-1:** Το πρώτο επίπεδο περιλαμβάνει την 1-Φ AC φόρτιση που μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω των κοινών οικιακών παροχών και δίνει χαμηλή ισχύ συγκριτικά με την χωρητικότητα των συσσωρευτών.
- ❖ **Mode-2:** Το δεύτερο επίπεδο περιλαμβάνει την 3-Φ AC φόρτιση και παρέχει αρκετά μεγαλύτερη ισχύ από αυτήν του Mode-1, όπως είναι αναμενόμενο μετά την συμβολή των 2 πρόσθετων φάσεων. Επίσης υψηλά επίπεδα ισχύος που την τοποθετούν στο Mode-2, παρουσιάζει και η 1-Φ φόρτιση από ειδικές εγκαταστάσεις τα ρεύματα των οποίων είναι κατά πολύ αυξημένα από αυτά των οικιακών.
- ❖ **Mode-3:** Το επίπεδο αυτό προσφέρει εξαιρετικά γρήγορη φόρτιση σε σχέση με τα δύο προηγούμενα λόγω των πολύ υψηλότερων επιπέδων της παρεχόμενης ισχύος. Μπορεί να επιτευχθεί είτε με 3-Φ φόρτιση με ρεύματα αρκετά υψηλότερα του Mode-2, είτε με απευθείας παροχή DC ρεύματος στο ηλεκτρικό όχημα. Και οι δύο τρόποι αυτοί απαιτούν ιδιαίτερη εγκατάσταση και μελέτη, όμως ειδικά η περίπτωση της DC φόρτισης είναι πολλά υποσχόμενη και αναμένεται μεγάλη εξέλιξη στο μέλλον.

Ο πίνακας που ακολουθεί παραθέτει τα 3 αυτά επίπεδα φόρτισης και μια συνοπτική επισκόπηση των χαρακτηριστικών τους :

Πίνακας 1.6 : Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά των επιπέδων ισχύος φόρτισης [1.14]

Επίπεδο Φόρτισης	Απαιτούμενη Υποδομή	Τυπική Ισχύς Φόρτισης	Μέσος Χρόνος Φόρτισης (35kWh)
Mode 1	Πραγματοποιήσιμη μέσω μιας κοινής οικιακής παροχής	3 – 4 kW (3,6kW στην περίπτωση των 230V/16A)	10 ώρες
Mode 2	Απαιτείται ιδιαίτερη κατασκευή και καλωδίωση, η ισχύς όμως καλύπτεται από μια κοινή τριφασική παροχή	10 – 20 kW (11kW στην περίπτωση των 3 x 230V/16A)	2 – 4 ώρες
Mode 3	Μια ιδιαίτερη κατασκευή μπορεί να καλύψει την 3-Φ φόρτιση, αλλά στην περίπτωση της DC φόρτισης απαιτείται ειδική υποδομή με εξωτερικό φορτιστή	40kW και πάνω	45 λεπτά ή και λιγότερο

Ένα τυπικό παράδειγμα χρήσης του κάθε επιπέδου φαίνεται στον παρακάτω πίνακα, στον οποίο ανάλογα με την ανάγκη που υπάρχει μπορεί να επιλεγεί το κατάλληλο επίπεδο ώστε να πραγματοποιηθεί μια πλήρης ή μερική φόρτιση. Οι τιμές αναφέρονται σε δεδομένα του δικτύου της Ιρλανδίας.

Πίνακας 1.7 : Τα επίπεδα ισχύος φόρτισης στην Ιρλανδία [1.1]

Επίπεδο Φόρτισης	Ισχύς Φόρτισης	Σενάριο	Επίπεδο Φόρτισης	Χρόνος Φόρτισης
Mode - 1	3 – 4 kW	Οικιακή φόρτιση	100%	6 – 8 ώρες
Mode - 2	22 kW	Ευκαιριακή φόρτιση	50%	30 λεπτά
Mode - 2	22 kW	Έκτακτη φόρτιση ανάγκης	20km	10 λεπτά
Mode - 3	44 kW	Φόρτιση για επέκταση αυτονομίας	80%	30 λεπτά

Όπως είναι φυσικό, οι ανάγκες φόρτισης ποικίλουν ανάλογα με την χρήση του αυτοκινήτου, όπως επίσης και το ίδιο το αυτοκίνητο ποικίλει ανάλογα με τις ανάγκες του οδηγού. Συνεπώς, μικρά οχήματα πόλης όπως π.χ. Smart δεν έχουν ίδιες ανάγκες φόρτισης με αρκετά μεγαλύτερα επιβατικά ή ακόμα περισσότερο με μεγάλα επαγγελματικά οχήματα. Η κατανάλωση παίζει κυρίαρχο ρόλο στην επιλογή του επιπέδου φόρτισης.

Παραδείγματα οχημάτων από κάθε μια κατηγορία με μια ενδεικτική κατανάλωση παρουσιάζονται στην παρακάτω λίστα :

Πίνακας 1.8 : Οι καταναλώσεις των συνηθέστερων ηλεκτρικών οχημάτων [1.18]

L7e		M1	
Όχημα	Κατανάλωση kWh/km	Όχημα	Κατανάλωση kWh/km
Dynasty IT	0,23	Subaru Stella	0,10
Americal Electric Kurrent	0,12	Stevens Zecar	0,13
Zenn	0,20	Nissan Leaf	0,15
ZEV Smiley 4	0,12	Mitsubishi i-MiEV	0,10
GEM e4	0,18	Volvo C30 BEV	0,16

Reva L-ion	0,08
Reva -i	0,15
Nice Mega City	0,09
CityEl	0,05
Citroen C1	0,13
Kewet Buddy	0,18
My Car EV	0,11
Citroen C-ZERO EV	0,12
Pinifarina Nido EV	0,15
Tata Nano EV	0,09
Godon Muray T.27	0,08
Smart ed	0,12
Tango	0,16
Think City	0,13
Average	0,13

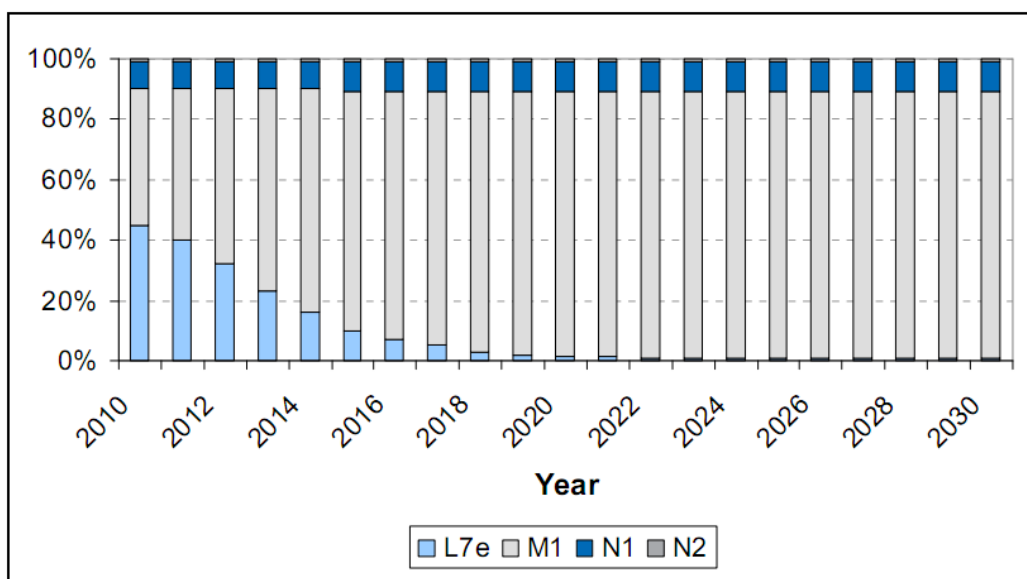
Ford Focus BEV	0,14
Renault Fluence Z.E.	0,14
Toyota RAV4 EV	0,15
BMW Megacity	0,22
Audi A1 e-tron	0,20
Citroen Survolt	0,31
BMW Mini e	0,14
BYD e6	0,21
Blade Electron MkV	0,16
Venturi Fetish	0,10
Coda Sedan	0,18
Chevy Volt	0,16
Opel Ampera	0,16
Average	0,16

N1	
Όχημα	Κατανάλωση kWh/km
Ford Transit BEV	0,22
Mercedes-Benz Vito BEV	0,25
Average	0,24

N2	
Όχημα	Κατανάλωση kWh/km
Smith Newton	0,80
Average	0,80

Βλέπουμε ξεκάθαρα πως μεγαλύτερο μέγεθος οχήματος οδηγεί σε αυξημένες καταναλώσεις, και συνεπώς σε μεγαλύτερες ανάγκες φόρτισης. Έτσι είναι πιο πιθανό να συναντήσουμε ένα ηλεκτροκίνητο φορτηγό να φορτίζει σε Mode – 3 ισχύ, παρά ένα όχημα τύπου L7e.

Η εξέλιξη των ηλεκτρικών οχημάτων και η κατανομή αυτών στις 4 προαναφερθείσες κατηγορίες έχει μελετηθεί εκτενώς από το Ricardo [1.13]. Αποτέλεσμα της μελέτης αυτής είναι μια πρόβλεψη σε βάθος 20ετίας (2010-2030) που εμφανίζεται στο παρακάτω διάγραμμα και πίνακα :



Διάγραμμα 1.2 : Η πρόβλεψη του Ricardo [1.13]

Πίνακας 1.9 : Η πρόβλεψη του Ricardo [1.13]

	2010	2015	2020	2025	2030
L7e	45%	10%	1%	1%	1%
M1	45%	79%	88%	88%	88%
N1	9%	10%	10%	10%	10%
N2	1%	1%	1%	1%	1%

Αρχικά υπάρχει μεγάλο ποσοστό των οχημάτων του τύπου L7e λόγω της διαθέσιμης τεχνολογίας και του χαμηλού κόστους παραγωγής. Όσο όμως η τεχνολογία βελτιώνεται, το κόστος παραγωγής και άρα το κόστος αγοράς από τον καταναλωτή μειώνεται. Όσο το κόστος αγοράς μειώνεται, τα οχήματα τύπου M1 θα γίνουν δημοφιλέστερα, κατακτώντας σημαντικό μερίδιο αγοράς εις βάρος των οχημάτων τύπου L7e. Αυτό φαίνεται ξεκάθαρα στον παραπάνω πίνακα όπου τα οχήματα τύπου M1 θα αποτελούν το 88% του συνόλου περί το 2020, ποσοστό σχεδόν διπλάσιο από το σημερινό. Από την άλλη μεριά οι ετήσιες πωλήσεις των οχημάτων τύπου N1 και N2 δεν αναμένεται να μεταβληθούν ιδιαίτερα κυρίως λόγω της περιορισμένης στον επαγγελματικό χώρο, χρήσης των.

Φορτίζουν όμως όλα τα οχήματα σε οποιοδήποτε επίπεδο ισχύος φόρτισης; Αν αναφερόμαστε σε φόρτιση κατά τη διάρκεια της ημέρας η απάντηση είναι θετική. Ακόμα και τα μικρά οχήματα μπορεί να χρειαστούν μια φόρτιση τύπου Mode-3 σε ειδικές περιπτώσεις. Όταν όμως αναφερόμαστε σε βραδινή φόρτιση, η κατανάλωση και η χρήση του οχήματος είναι αυτά που θα καθορίσουν το επίπεδο ισχύος φόρτισης. Όσο μη πρακτικό και ανούσιο είναι να θεωρήσουμε ένα ηλεκτρικό φορτηγό

που θα φορτίζει από μια μονοφασική παροχή και θα χρειάζεται 15 με 20 ώρες για να φορτιστεί πλήρως, άλλο τόσο ανούσιο είναι να θεωρήσουμε πως ένα μικρό όχημα του τύπου L7e θα χρειαστεί να φορτίσει σε επίπεδα ισχύος Mode-3.

Η κατανομή των οχημάτων σε επίπεδα ισχύος φόρτισης είναι η παρακάτω σύμφωνα με μελέτες του Ricardo [1.13] :

- **Στα ηλεκτρικά οχήματα τύπου L7e** το 90% φορτίζει σε Mode-1 ενώ το υπόλοιπο 10% φορτίζει σε Mode-2. Δεν υπάρχει ούτε προβλέπεται φόρτιση αυτού του τύπου σε Mode-3.
- **Στα ηλεκτρικά οχήματα τύπου M1** το 85% φορτίζει σε Mode-1, το 10% σε Mode-2, ενώ το υπόλοιπο 5% φορτίζει σε Mode-3.
- Η ίδια αναλογία ακολουθείται και από τα **ηλεκτρικά οχήματα τύπου N1** και έτσι το 85% φορτίζει σε Mode-1, το 10% σε Mode-2, και το υπόλοιπο 5% φορτίζει σε Mode-3.
- **Στα ηλεκτρικά οχήματα τύπου N2** το 80% φορτίζει σε Mode-2 ενώ το υπόλοιπο 20% φορτίζει σε Mode-3. Δεν προβλέπεται φόρτιση αυτών σε Mode-1.

Έτσι καταλήγουμε στον παρακάτω πίνακα που φαίνονται τα ποσοστά των οχημάτων από κάθε είδος που φορτίζουν στο εκάστοτε επίπεδο ισχύος :

Πίνακας 1.10 : Ποσοστιαία κατανομή των οχημάτων ανά τύπο και ισχύ φόρτισης [1.13]

	L7e %	M1 %	N1 %	N2 %
Mode-1 (3,6kW)	90	85	85	0
Mode-2 (11kW)	10	10	10	80
Mode-3 (45kW)	0	5	5	20

1.5 Διεθνή Πρότυπα Σύνδεσης για Φόρτιση

Η εξέλιξη των ηλεκτρικών οχημάτων, όπως είχε πραγματοποιηθεί τα τελευταία χρόνια χωρίς ενιαίες κατευθυντήριες γραμμές, είχε ως αποτέλεσμα την χρησιμοποίηση ποικίλων διατάξεων, συστημάτων και εξαρτημάτων που υπάκουαν στις κατά περίπτωση συνθήκες και προδιαγραφές που έθετε η εκάστοτε κατασκευάστρια εταιρία. Όσο η διάδοση και εξέλιξη της ηλεκτροκίνησης όμως συνεχίζεται, κάτι τέτοιο δεν μπορεί να είναι αποδεκτό. Σχετικά πρόσφατα

προκλήθηκε προβληματισμός, και σημειώθηκε έντονα η ανάγκη ύπαρξης ορισμένων προτύπων ώστε να διασφαλιστεί μια σχετική ομοιομορφία, και να διευκολυνθεί η μαζική παραγωγή των ηλεκτρικών οχημάτων. Ένας από τους πρώτους τομείς που διαπιστώθηκε η ανάγκη αυτή ήταν η τυποποίηση των συστημάτων φόρτισης και των εξαρτημάτων που θα έπρεπε να χρησιμοποιούνται (φορτιστές, καλώδια, υποδοχές κ.ά.) έτσι ώστε οι κατασκευαστές να κατηγοριοποιήσουν τα σχετικά εξαρτήματα και να μειώσουν το κόστος παραγωγής των, αλλά και υποδομές υποστήριξης των ηλεκτρικών οχημάτων να αναπτυχθούν με ομοιογένεια, χαμηλό κόστος και υψηλή λειτουργικότητα. Οι μεγαλύτεροι οργανισμοί τυποποίησης έχουν ξεκινήσει μια τέτοια προσπάθεια συνθέτοντας πρότυπα κάποια από τα οποία παρουσιάζονται ενδεικτικά παρακάτω.

1.5.1 Το πρότυπο SAE J1772

Η Αμερικανική SAE (Society of Automotive Engineers) έχει δημοσιοποιήσει μια σειρά από πρότυπα κάνοντας ένα τεράστιο βήμα προς αυτή την κατεύθυνση. Ένα από τα πιο βασικά είναι το πρότυπο SAE J1772, η τελική μορφή του οποίου δημοσιοποιήθηκε τον Φεβρουάριο του 2010 [1.20]. Το πρότυπο αυτό περιλαμβάνει προδιαγραφές για τις επί των οχημάτων υποδοχές αλλά και για τα αντίστοιχα βύσματα αγωγίμης επαφής για την φόρτιση των ηλεκτρικών και των επαναφορτιζόμενων ηλεκτρικών αυτοκινήτων με AC ρεύμα. Προδιαγραφές για την αντίστοιχη λειτουργία, αλλά με την χρήση συνεχούς (DC) ρεύματος βρίσκονται ακόμα σε επεξεργασία.

Οι προδιαγραφές υποδοχής και βύσματος που περιλαμβάνει το πρότυπο SAE J1772 είναι κατάλληλες για 2 επίπεδα φόρτισης με αγωγή επαφή τα οποία προσδιορίζονται και παρακάτω :

α) AC Mode-1 : 1-Φ παροχή, 120V AC με ρεύμα 12-16A

β) AC Mode-2 : 1-Φ παροχή, 208-240V AC με ρεύμα μέχρι 80A

Η σχεδίαση της υποδοχής και του βύσματος είναι 5 ακροδεκτών, με σύστημα ασφάλισης προς αποφυγή της αθέλητης απομάκρυνσης του βύσματος και διακοπής της φόρτισης [1.19], [1.21].

Οι λειτουργίες των 5 ακροδεκτών προσδιορίζονται ως εξής :

Επαφή-1 : Γραμμή τροφοδοσίας L1

Επαφή-2 : Γραμμή τροφοδοσίας L2, ή ο ουδέτερος N

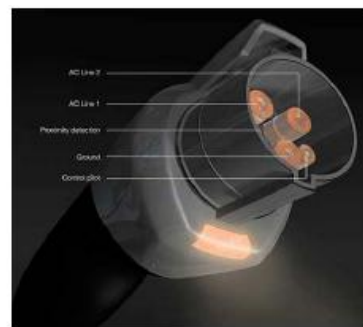
Επαφή-3 : Γείωση (Ground)

Επαφή-4: Επαφή Ελέγχου/Επικοινωνίας (Control Pilot). Επιβεβαιώνει την ορθή λειτουργία όλων των συστημάτων στην αρχή, κατά την διάρκεια, και στο πέρας της φόρτισης.

Επαφή-5: Έλεγχος Διασύνδεσης (Proximity Detection). Επιβεβαίωση παρουσίας του βύσματος φόρτισης ώστε να ακινητοποιηθεί το όχημα για όση ώρα φορτίζει.

Το πρότυπο επίσης περιλαμβάνει τις απαιτήσεις του συστήματος επικοινωνίας δεδομένων, της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας, της αντοχής και αξιοπιστίας, της εσωτερικής αντίστασης και των περιβαλλοντικών χαρακτηριστικών της υποδοχής και του βύσματος.

Μια κατασκευή βύσματος που συμμορφώνεται στο πρότυπο αυτό είναι το ιαπωνικής κατασκευής βύσμα Yazaki που φαίνεται στις εικόνες παρακάτω και έχει ευρεία εφαρμογή στις ΗΠΑ :



Εικόνα 1.20 : Το βύσμα Yazaki και οι ακροδέκτες του [1.6], [1.20]

1.5.2 Το πρότυπο IEC 61851

Αντίστοιχες προσπάθειες τυποποίησης έχει κάνει και η IEC (International Electrotechnical Commission), δημοσιεύοντας και αυτή με την σειρά της μια οικογένεια προτύπων με κωδικό IEC 61851 [1.22], [1.23]. Το πρότυπο αυτό καλύπτει το σύνολο του συστήματος φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με αγώγιμη επαφή. Περιλαμβάνει προδιαγραφές εξαρτημάτων για τυποποιημένες τάσεις εναλλασσόμενου ρεύματος μέχρι και 690Volts, και για τάσεις συνεχούς ρεύματος μέχρι 1000 Volts. Κυκλοφορεί σε «Μέρη» υπό τον γενικό τίτλο «Σύστημα Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων Δια Αγώγιμης Επαφής».

Τα «Μέρη» αυτά παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω :

Μέρος 1 – Γενικές Απαιτήσεις

Μέρος 2.1 – Απαιτήσεις των ηλεκτρικών αυτοκινήτων προκειμένου να συνδεθούν με παροχή Εναλλασσόμενου ή Συνεχούς Ρεύματος

Μέρος 2.2 – Σταθμός Φόρτισης ηλεκτρικού αυτοκινήτου με Εναλλασσόμενο Ρεύμα

Μέρος 2.3 – Σταθμός Φόρτισης ηλεκτρικού αυτοκινήτου με Συνεχές Ρεύμα

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

Τρόποι φόρτισης :

- ❖ **Τρόπος 1** – Αγωγήμη σύνδεση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου σε παροχή AC με χρήση κοινού οικιακού τύπου ρευματοδότη προς την πλευρά της ηλεκτρικής παροχής για ένταση ρεύματος μέχρι 16A, μονοφασικής ή τριφασικής σύνδεσης και με αξιοποίηση των αγωγών των φάσεων, του ουδέτερου και της γείωσης. Ο τρόπος αυτός απαιτεί την παρουσία μιας προστατευτικής διάταξης ισοζυγισμού RCD (Residual Current Device) προς την πλευρά της παροχής. Όταν η παρουσία μιας τέτοιας διάταξης δεν εξασφαλίζεται από την ισχύουσα σε κάθε χώρα νομοθεσία, αυτός ο τρόπος δεν συνιστάται.
- ❖ **Τρόπος 2** : Αγωγήμη σύνδεση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου σε παροχή AC με χρήση κοινού οικιακού τύπου ρευματοδότη προς την πλευρά της ηλεκτρικής παροχής, μονοφασικής ή τριφασικής σύνδεσης και με αξιοποίηση των αγωγών των φάσεων, του ουδέτερου και της γείωσης, μαζί όμως με αγωγό μεταβίβασης σημάτων επικοινωνίας από το ηλεκτρικό αυτοκίνητο προς την συσκευή ελέγχου της φόρτισης, η οποία βρίσκεται σε κάποιο ενδιάμεσο σημείο του καλωδίου φόρτισης.
- ❖ **Τρόπος 3** : Απευθείας αγωγήμη σύνδεση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου σε παροχή εναλλασσόμενου 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** : Έμμεση αγωγήμη σύνδεση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου με το δίκτυο ηλεκτρικής παροχής δια μέσου συσκευής φόρτισης η οποία δεν είναι τοποθετημένη επί του οχήματος, αλλά βρίσκεται εκτός αυτού και είναι

μόνιμα συνδεδεμένη με το δίκτυο παροχής ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσομένου ρεύματος.

Τύποι Καλωδίων Φόρτισης :

- ❖ **Περίπτωση Α :** Καλώδιο σύνδεσης με την παροχή εναλλασσομένου ρεύματος το οποίο στην μια του άκρη είναι εφοδιασμένο με κατάλληλο βύσμα για την 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 στην μια του άκρη είναι εφοδιασμένο με κατάλληλο βύσμα για την διασύνδεσή του με την ηλεκτρική παροχή, ενώ η άλλη του άκρη με βύσμα κατάλληλο για την υποδοχή του ηλεκτρικού αυτοκινήτου.
- ❖ **Περίπτωση Γ :** Διασύνδεση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου με την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος με την χρήση καλωδίου το οποίο στην μια του άκρη φέρει βύσμα κατάλληλο για την υποδοχή του οχήματος, ενώ η άλλη του άκρη είναι μόνιμα συνδεδεμένη και αποτελεί προέκταση της συσκευής φόρτισης.

1.5.3 Το πρότυπο IEC 62196

Οι ειδικές απαιτήσεις για τα φις, τους ρευματοδότες, τις υποδοχές των αυτοκινήτων και τα αντίστοιχα βύσματά τους για τις αγώγιμες συνδέσεις φόρτισης του προτύπου IEC 61851 περιλαμβάνονται σε ένα ιδιαίτερο πρότυπο, το IEC 62196 [1.23]. Το πρότυπο αυτό δημοσιεύεται επίσης σε «Μέρη», με τον γενικό τίτλο «Φις, Ρευματοδότες, Βύσματα και Υποδοχές των ηλεκτρικών οχημάτων για αγώγιμη διασύνδεση». Τα κύρια Μέρη του προτύπου αυτού είναι :

Μέρος 1 – Γενικές Απαιτήσεις

Μέρος 2 – Απαιτήσεις διαστασιολογικής συμβατότητας για τους ακροδέκτες και τις υποδοχές αυτών, των εξαρτημάτων για εναλλασσόμενο ρεύμα.

Μέρος 3 – Απαιτήσεις διαστασιολογικής συμβατότητας για τους ακροδέκτες και τις υποδοχές αυτών, των εξαρτημάτων για συνεχές ρεύμα.

Το Μέρος 1 καλύπτει εξαρτήματα αγώγιμης σύνδεσης κατάλληλα για τάση μέχρι 690 Volts AC και εντάσεως μέχρι 250A, ή 1500 Volts DC και εντάσεως μέχρι 400A. Περιλαμβάνει προδιαγραφές για την κατασκευή, ηλεκτρική επίδοση, ασφάλεια,

ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα, αξιοπιστία, εσωτερική αντίσταση και τα περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά αυτών των εξαρτημάτων.

Το Μέρος 2 περιλαμβάνει προδιαγραφές και διαστασιολόγιο για τρεις τύπους βυσμάτων και υποδοχών επί των ηλεκτρικών οχημάτων : Τον Τύπο 1, τον Τύπο 2 και τον Τύπο 3.

Ο Τύπος 1, ο οποίος αντιστοιχεί στο πρότυπο SAE J1772, διαθέτει 5 ακροδέκτες και χρησιμοποιείται προς την πλευρά του αυτοκινήτου για αγωγήμη φόρτιση εναλλασσομένου ρεύματος 1-Φ μέχρι 250 Volts και 32A. Εντούτοις, μια σημείωση στο πρότυπο επιτρέπει την χρήση των εξαρτημάτων Τύπου 1 για εντάσεις μέχρι 80A στις ΗΠΑ.

Οι λειτουργίες των 5 ακροδεκτών προσδιορίζονται ως εξής :

Επαφή-1 : Γραμμή τροφοδοσίας L1

Επαφή-2 : Γραμμή τροφοδοσίας L2, ή ο ουδέτερος N

Επαφή-3 : Γείωση (Ground)

Επαφή-4 : Επαφή Ελέγχου/Επικοινωνίας (Control Pilot). Επιβεβαιώνει την ορθή λειτουργία όλων των συστημάτων στην αρχή, κατά την διάρκεια, και στο πέρας της φόρτισης.

Επαφή-5 : Έλεγχος Διασύνδεσης (Proximity Detection). Επιβεβαίωση παρουσίας του βύσματος φόρτισης ώστε να ακινητοποιηθεί το όχημα για όση ώρα φορτίζει.

Ο Τύπος 2 διαθέτει 7 ακροδέκτες και χρησιμοποιείται τόσο προς την πλευρά του αυτοκινήτου, όσο και προς την πλευρά της ηλεκτρικής παροχής για αγωγήμη φόρτιση AC 1-Φ μέχρι 250 Volts με εντάσεις ρεύματος 20, 32, 63 ή 70A , όπως και για 3-Φ 380-480 Volts με εντάσεις ρεύματος 20, 32 ή 63A.

Οι λειτουργίες των 7 ακροδεκτών προσδιορίζονται ως εξής :

Επαφή-1 : Γραμμή τροφοδοσίας L1

Επαφή-2 : Γραμμή τροφοδοσίας L2

Επαφή-3 : Γραμμή τροφοδοσίας L3

Επαφή-4 : Ο ουδέτερος N

Επαφή-5 : Γείωση (Ground)

Επαφή-6 : Επαφή Ελέγχου/Επικοινωνίας (Control Pilot). Επιβεβαιώνει την ορθή λειτουργία όλων των συστημάτων στην αρχή, κατά την διάρκεια, και στο πέρας της φόρτισης.

Επαφή-7: Έλεγχος Διασύνδεσης (Proximity Detection). Επιβεβαίωση παρουσίας του βύσματος φόρτισης ώστε να ακινητοποιηθεί το όχημα για όση ώρα φορτίζει.

Ο Τύπος 3 διαθέτει 4 ή 5 ή 7 ακροδέκτες εφοδιασμένους με σύστημα κλείστρου προστασίας για την αποφυγή επαφής με υπό τάση μέρη και χρησιμοποιείται τόσο προς την πλευρά του αυτοκινήτου όσο και προς την πλευρά της ηλεκτρικής παροχής για αγωγή φόρτιση AC 1-Φ μέχρι 250 Volts με εντάσεις ρεύματος 20, 32A , όπως και για 3-Φ 380-480 Volts με εντάσεις ρεύματος μέχρι 32A. Οι λειτουργίες των ακροδεκτών είναι ακριβώς όμοιες με αυτές του Τύπου 2.. Όπως ήδη αναφέρθηκε, ο Τύπος 1 είναι ισοδύναμος με το πρότυπο SAE J1772, και εφαρμόζεται στο βύσμα Yazaki.

Ο Τύπος 2 αναπτύχθηκε από μια συνεργασία Γερμανικών κατασκευαστών αυτοκινήτων (Daimler, BMW), ηλεκτρικής ενέργειας (RWE, Vattenfall) και κατασκευαστών ηλεκτρονικών εξαρτημάτων (Mennekes). 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 που δεν κατέστη ακόμα γενικώς αποδεκτό πρότυπο για όλη την Ευρώπη είναι ότι σε πολλές Ευρωπαϊκές χώρες η νομοθεσία επιβάλλει την χρήση προστατευτικών κλείστρων στους ρευματοδότες. Η IEC βρίσκεται ακόμα στο στάδιο της διαπίστωσης του αριθμού των χωρών αυτών για να εκτιμηθεί το μέγεθος του προβλήματος.

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

Έργο προτυποποίησης έχουν να προσφέρουν και άλλοι μεγάλοι οργανισμοί όπως το Γερμανικό Ινστιτούτο DIN με τα πρότυπα DIN VDE V 0510-11 και DIN 43538 που περιγράφουν κυρίως προδιαγραφές των συστοιχιών συσσωρευτών, ο ISO (International Standards Organization) με την οικογένεια προτύπων ISO 6469 που ασχολούνται κυρίως με την ασφάλεια του ηλεκτρικού οχήματος, και φυσικά ο JEVS (Japan Electric Vehicle Association Standards) ο οποίος από το 1994 έχει δημοσιεύσει μεγάλη ποσότητα υλικού με μετρήσεις και πρότυπα πάνω στα ηλεκτρικά οχήματα [1.15].

1.5.4 Η DC φόρτιση

Όπως ακριβώς και στα συμβατικά αυτοκίνητα, έτσι και με τα ηλεκτρικά οχήματα η ύπαρξη σταθμών ανεφοδιασμού-φόρτισης σε δημόσιους χώρους είναι αναγκαία προκειμένου να αντιμετωπιστούν τυχόν έκτακτα περιστατικά, και ο κίνδυνος

ακινητοποίησης κάποιου οχήματος λόγω έλλειψης ενέργειας. Το πρόβλημα που παρουσιάζεται εδώ είναι η διάρκεια φόρτισης, που αν μιλάμε για επίπεδα ισχύος Mode-2 μπορεί να κυμανθεί από 2 μέχρι 4 ώρες για πλήρη φόρτιση, και 1 με 1,5 ώρα για τον ανεφοδιασμό μόνο με την απαιτούμενη ενέργεια για να μεταβεί σε σημείο που μπορεί να φορτίσει κανονικά χωρίς την πίεση του χρόνου (πχ στο σπίτι). Τέτοιοι χρόνοι καθιστούν μη πρακτική την δημιουργία σταθμών φόρτισης σε αυτά τα επίπεδα ισχύος. Γι' αυτό ακριβώς τον λόγο, τα επίπεδα ισχύος στους σταθμούς φόρτισης πρέπει να είναι μεγαλύτερα, της τάξης των 50kW (Mode-3), έτσι ώστε η φόρτιση να γίνεται σε συντομότερους χρόνους. Σε αυτή τη βάση, και με τους μεγάλους οργανισμούς τυποποίησης να μην έχουν ακόμα καταλήξει σε μια οριστική λύση, γίνεται μια προσπάθεια τυποποίησης των σταθμών φόρτισης και των εξαρτημάτων που θα χρησιμοποιούνται από έναν οργανισμό ο οποίος ονομάζεται CHAdeMO (Charge and Move) [1.30], [1.31].



Εικόνα 1.21 : Το λογότυπο CHAdeMO [1.29]

Ο οργανισμός αυτός συγκροτήθηκε με την συμβολή των εταιριών Nissan, Mitsubishi, Fuji Heavy Industries (κατασκευαστής Subaru), Toyota και TEPCO (Tokyo Power Electric Company), και έχει αναπτύξει μια πατενταρισμένη τεχνολογία, καθώς και τις προδιαγραφές ταχείας φόρτισης με τάση έως 500V DC και ένταση έως 125A. Πρωθεί την διάδοση ενός φορτιστή ο οποίος καθορίζεται με το πρότυπο JEVS (Japan Electric Vehicle Standard) G105-1993 του ινστιτούτου JARI (Japan Automobile Research Institute) [1.31]. Με μια τυπική ισχύ 50kW, ο φορτιστής τύπου CHAdeMO μπορεί να φορτίσει κατά 80% τους συσσωρευτές ενός μεσαίου μεγέθους ηλεκτρικού αυτοκινήτου σε 30 λεπτά. Μπορεί επίσης με μια φόρτιση 5 λεπτών, σχεδόν ίδια με την στάση ανεφοδιασμού ενός συμβατικού αυτοκινήτου να προσδώσει στους συσσωρευτές ηλεκτρική ενέργεια επαρκή για τα επόμενα 30 – 40 km προκειμένου να καταστεί δυνατή η μετάβαση στο μόνιμο σημείο ανεφοδιασμού, για την κανονική φόρτιση. Το πρόβλημα της αυτονομίας έτσι σχεδόν εξαλείφεται, καθώς τώρα ο κίνδυνος της ακινησίας από πιθανή εξάντληση της αποθηκευμένης

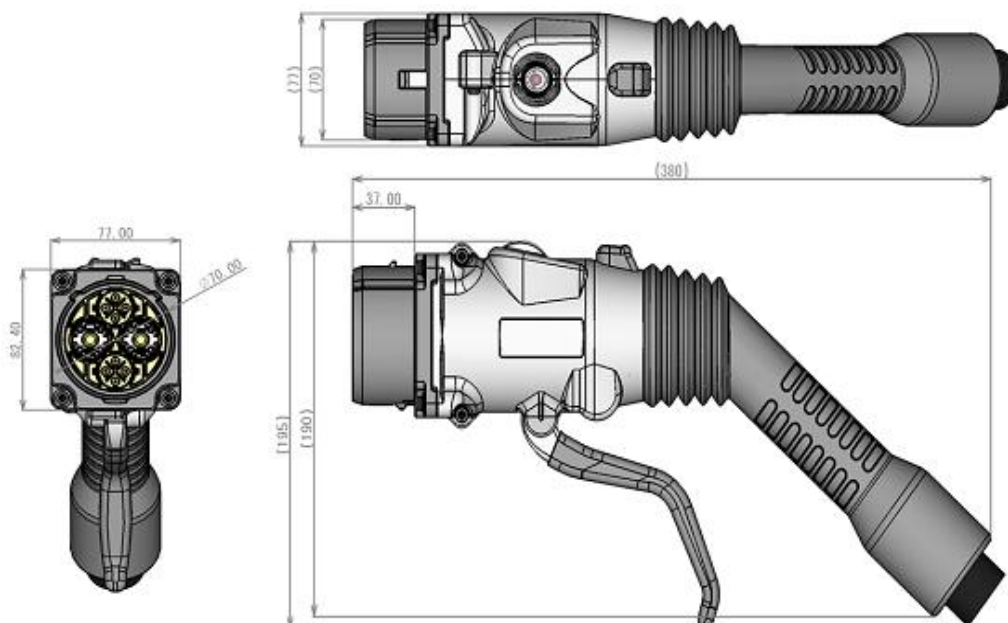
στους συσσωρευτές ενέργεια γίνεται ελάχιστος, όσος και αυτός του συμβατικού αυτοκινήτου (με την προϋπόθεση πάντα της αντίστοιχης υποδομής).

Το σύστημα φόρτισης CHAdeMO που φαίνεται παρακάτω, κατασκευάστηκε στην Ιαπωνία και είναι ιδιαίτερα διαδεδομένο εκεί, αριθμώντας 801 σταθμούς φόρτισης. Η Ευρώπη ακολουθεί με 157, ενώ άλλοι 7 υπάρχουν σε διάφορες χώρες.



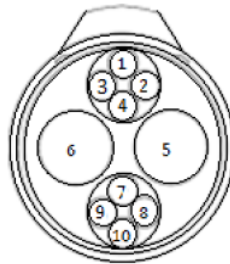
Εικόνα 1.22 : Αναπαράσταση ταχείας φόρτισης με φορτιστή τύπου CHAdeMO [1.29]

Το βύσμα CHAdeMO είναι ένα βύσμα 10 ακροδεκτών, η χρησιμότητα των οποίων παρουσιάζεται παρακάτω :



Εικόνα 1.23 : Το βύσμα CHAdeMO [1.29]

- | | | |
|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1) Reference ground | 2) Control EV relay 1 | 3) Not assigned |
| 4) Ready to charge | 5) Negative power line | 6) Positive power line |
| 7) Proximity detection | 8) Communication + | 9) Communication - |
| 10) Control EV relay 2 | | |

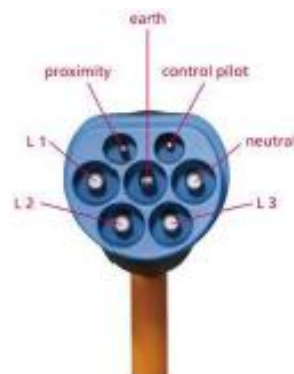


Εικόνα 1.24 : Οι ακροδέκτες του βύσματος CHAdeMO [1.29]

1.6 Εμπορικοί υποδοχείς φόρτισης

1.6.1.1 Βύσμα Mennekes

Το βύσμα αυτό συμμορφώνεται πλήρως με τις προδιαγραφές των προτύπων IEC 61851 και 62196 και χαρακτηρίζεται ως Τύπου 2, δηλαδή με 7 ακροδέκτες, αλλά χωρίς προστατευτικά κλείστρα [1.24].



Εικόνα 1.25 : Το βύσμα Mennekes και οι ακροδέκτες του [1.25]

1.6.1.2 Βύσμα Walther

Το βύσμα αυτό είναι πανομοιότυπο με το Mennekes, διαφέροντας μόνο στα επίπεδα της παρεχόμενης ισχύος και στο γεγονός ότι το βύσμα Walther είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί με ένα κατάλληλο μετατροπέα για χρήση σε κοινό 1-Φ ρευματοδότη, ακυρώνοντας την λειτουργία των επαφών ελέγχου και των 2 επιπλέον φάσεων [1.26].



Εικόνα 1.26 : Το βύσμα Walthers με και χωρίς κατάληξη οικιακού φως [1.26]

1.6.1.3 Βύσμα EDF

Η εταιρία παροχής ηλεκτρισμού EDF, υποστηρίζει ένα βιομηχανικό βύσμα 3 ακροδεκτών, για 1-Φ AC παροχή σε ισχείς 3,6kW (240V/16A) και 15kW (240V/63A) [1.14]. Δεν υποστηρίζεται ο έλεγχος του οχήματος, ούτε και η επικοινωνία με αυτό. Κατασκευάζεται από την Elektromotive Company.



Εικόνα 1.27 : Το βύσμα EDF [1.14]

1.6.1.4 Βύσμα EV Plug

Το βύσμα αυτό, όπως και η αντίστοιχη υποδοχή, προέκυψε από την σύμπραξη των εταιριών Shame, Schneider και Legrand, και συμμορφώνεται πλήρως με τις διατάξεις ασφαλείας του Τύπου 3 της IEC περί προστατευτικών κλείστρων [1.27], [1.28]. Επιτρέπει διάφορα επίπεδα ισχύος φόρτισης, με μέγιστο τα 27,7kW, χρησιμοποιώντας και τις 3 φάσεις.



Εικόνα 1.28 : Το βύσμα και η υποδοχή EV Plug με τα προστατευτικά τους κλείστρα [1.28]

1.6.1.5 CHAdEMO DC Φορτιστές

Αυτή την στιγμή υπάρχουν πολλοί φορτιστές CHAdEMO στην αγορά, που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1.11 : Φορτιστές CHAdEMO στην αγορά σήμερα [1.29], [1.30]

					
SGTE (Γαλλία)	ABB (Σουηδία)	EVTRONIC (Γαλλία)	Efacec (Πορτογαλία)	Aerovironment (Αμερική)	Aker Wade (Αμερική)
					
MAGNUM CAP (Πορτογαλία)	GH Electrotermia (Ισπανία)	Schneider (Γαλλία)	SIGNET Systems (Κορέα)	DBT (Γαλλία)	Delta Electronics (Ταϊβάν)
					
Circontrol (Ισπανία)	Hasetec	Takaoka	Takasago	Tempearl	ULVAC
					
SINFONIA Technology	Nichicon	Nissan	GS Yuasa	JFE Engineering	Kikusui
					
NTT Facilities	Fuji Electric	Kyuki			

Οχήματα όπως τα παρακάτω, υποστηρίζουν εργοστασιακά το σύστημα φόρτισης CHAdeMO, και αποτελούν μια νέα πνοή στον χώρο της ηλεκτροκίνησης, καθώς πλέον μπορούν να φορτίσουν ταχύτατα από εξωτερικούς φόρτισης.



Subaru Plug-in STELLA



Mitsubishi i-MiEV



Nissan LEAF



Protoscar LAMPO2



Peugeot iON



Citroen C-ZERO



TOYOTA iQ-based EV



THINK City



Micro-Vett Fiorino

Εικόνα 1.29 : Οχήματα που υποστηρίζουν την ταχεία φόρτιση CHAdeMO [1.30]

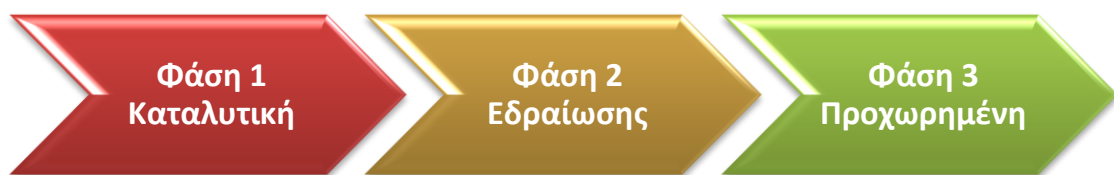
Κεφάλαιο 2

Ένταξη Ηλεκτρικών Οχημάτων Στο Ηλεκτρικό Δίκτυο

2.1 Φάσεις Διείσδυσης

Η ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να γίνει σταδιακά έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η εξυπηρέτηση αυτού του επιπρόσθετου φορτίου χωρίς να διαταράσσεται η ομαλή λειτουργία του δικτύου. Παράλληλα, θα πρέπει να αναπτυχθούν και τα απαραίτητα νομοθετικά πλαίσια που καθορίζουν τα ρυθμιστικά ζητήματα για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων και τις διμερείς συμφωνίες που μπορούν να επισυναφθούν.

Στο διάγραμμα 2.1 παρουσιάζονται οι τρεις φάσεις ενσωμάτωσης των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας όπως καθορίστηκαν στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος MERGE [2.1]. Κάθε μια φάση εξυπηρετεί έναν συγκεκριμένο στόχο και απαιτεί είτε την επέκταση των αρμοδιοτήτων των υπάρχοντων παικτών στο χώρο της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας είτε την ανάπτυξη νέων που εξυπηρετούν συγκεκριμένες διεργασίες για την αποδοτική σύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο.



Διάγραμμα 2.1 Φάσεις ομαλής ένταξης των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας [2.1]

Καταλυτική Φάση

Η σημαντικότερη τροχοπέδη στην ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι ψυχολογικοί ενδοιασμοί των υποψήφιων ιδιοκτητών ηλεκτρικών οχημάτων σχετικά με την επάρκεια σταθμών φόρτισης σε πολλαπλά σημεία. Αυτό θα επιτρέψει την φόρτιση των οχημάτων και σε ιδιωτικούς ή

δημόσιους χώρους, εκτός οικίας, προσφέροντας τη δυνατότητα για μεγαλύτερες διανυόμενες ημερήσιες αποστάσεις. Στόχος της καταλυτικής φάσης είναι η ανάπτυξη επαρκούς δικτύου φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων που θα λειτουργήσει ως κίνητρο για την διευκόλυνση της διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων.

Ο διαχειριστής του συστήματος θα πρέπει να εξασφαλίζει την ομαλή παροχή ισχύος προς τα ηλεκτρικά οχήματα χωρίς να γίνεται διάκριση, υπέρ ή κατά, των υπολοίπων καταναλωτών.

Στο συγκεκριμένο στάδιο, δεν αναμένεται να υπάρξουν πολύπλοκοι μηχανισμοί φόρτισης, οπότε δεν θα προσφέρεται η δυνατότητα αυτοματοποιημένου ελέγχου της φόρτισης.

Φάση Εδραίωσης

Η έναρξη της φάσης εδραίωσης αναμένεται να αρχίσει όταν η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων γίνει σχετικά έντονη σε σύγκριση με τα υπόλοιπα φορτία του δικτύου. Εκτιμάται ότι θα ξεκινήσει στο μεσοπρόθεσμο διάστημα και επομένως δεν απαιτεί άμεση μέριμνα. Η φάση εδραίωσης είναι ουσιαστικά η φάση κατά την οποία θα πρέπει να αναπτυχθούν συστήματα ελεγχόμενης φόρτισης του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων, με σκοπό να μην διαταραχθεί η ομαλή λειτουργία του δικτύου.

Ο έλεγχος της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων δίνει την δυνατότητα ανάπτυξης νέων επιχειρηματικών μοντέλων, όπως του Προμηθευτή/Συναθροιστή Ηλεκτρικής ενέργειας (EV Supplier/Aggregator - EVS/A), ο οποίος είναι υπεύθυνος για την αγορά της απαιτούμενης ισχύος από την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και τη διαχείριση του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων.

Ο προγραμματισμός της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων από τον EVS/A θα πρέπει να μην επηρεάζει τη λειτουργία του δικτύου. Για το λόγο αυτό, η έγκριση του προγραμματισμού από τον διαχειριστή του συστήματος είναι απαραίτητη.

Προχωρημένη Φάση

Η φάση αυτή ανταποκρίνεται σε μακροπρόθεσμα και ιδιαίτερα αισιόδοξα σενάρια. Στη φάση αυτή τα ηλεκτρικά οχήματα είναι σε θέση να προσφέρουν επικουρικές υπηρεσίες (Vehicle-to-Grid, V2G), ωστόσο, μία τέτοια χρήση των οχημάτων βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο και δεν είναι γνωστό αν μπορεί να αποδειχθεί κερδοφόρα. Η συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων σε επικουρικές υπηρεσίες, όπως ο έλεγχος της τάσης και η ρύθμιση της συχνότητας, μπορεί να αποδειχθεί

ωφέλιμη τόσο για την λειτουργία του δικτύου όσο και την για την αύξηση της διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

2.2 Νέα Επιχειρηματικά Μοντέλα

2.2.1 Διαχειριστής της Φόρτισης των Ηλεκτρικών Οχημάτων ή Διαχειριστής του Σημείου Φόρτισης (ΔΣΦ)

Ο ρόλος του ΔΣΦ [2.2] δύναται να είναι διπλός: α) ως τελικός πελάτης ο ΔΣΦ μπορεί να αγοράζει την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για να φορτίσει το ηλεκτρικό όχημα που έχει στη κατοχή του ή β) ως ένα νέο επιχειρηματικό μοντέλο μπορεί να προμηθεύεται από την αγορά ένα ποσό ενέργειας, το οποίο μπορεί να μεταπουλά, μέσω διμερών συμβολαίων, σε άλλους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων που συνδέονται σε έναν σταθμό φόρτισης.

Παραδείγματα επιχειρηματικών μοντέλων διαχείρισης της φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων παρουσιάζονται παρακάτω [2.2] :

- ❖ Ένας αστικός πελάτης που εγκαθιστά ένα σημείο φόρτισης στο γκαράζ του σπιτιού του/της για ιδιωτική χρήση
- ❖ Ένας ιδιοκτήτης κτιρίου γραφείων που εγκαθιστά ορισμένα σημεία φόρτισης στο χώρο στάθμευσης για ιδιωτική χρήση από του υπαλλήλους
- ❖ Ένας ιδιοκτήτης εμπορικού κτιρίου που εγκαθιστά ορισμένα σημεία φόρτισης στο χώρο στάθμευσης για χρήση από τους πελάτες του.
- ❖ Ένας σταθμός φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων που εγκαθιστά κάποια σημεία φόρτισης με διαφορετικές επιλογές φόρτισης και συγκεκριμένα μεθόδους γρήγορης φόρτισης, ώστε να παρέχει τη συγκεκριμένη υπηρεσία στο κοινό.

2.2.2 Προμηθευτής-Συναθροιστής Ηλεκτρικής Ενέργειας Ηλεκτρικών Οχημάτων (Π-ΣΗΟ, Electric Vehicle Supplier Aggregator-EVS/A)

Ο Προμηθευτής-Συναθροιστής [2.2] ηλεκτρικής ενέργειας αποκλειστικά για ηλεκτρικά οχήματα αναμένεται να εμφανιστεί σε δύο περιπτώσεις: περιοχές φόρτισης ιδιωτικής ιδιοκτησίας με δημόσια ή ιδιωτική πρόσβαση και δημόσιες περιοχές φόρτισης με δημόσια πρόσβαση για τους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων.

Ο παράγοντας αυτός πουλάει ενέργεια στον ιδιοκτήτη του ηλεκτρικού οχήματος, με σύμβαση που παρέχει πρόσβαση σε συγκεκριμένα σημεία φόρτισης. Η καινοτομία του συγκεκριμένου παράγοντα είναι ότι οι συμβάσεις δεν περιορίζονται σε μία συγκεκριμένη τοποθεσία ή μία συγκεκριμένη παροχή ηλεκτρισμού, αλλά προσφέρει την ελευθερία επιλογής μεταξύ διαφόρων σημείων φόρτισης. Οι Προμηθευτές Ηλεκτρικών Οχημάτων είναι λιανοπωλητές και επομένως η επιχείρησή τους πρέπει να ορίζεται ως ανταγωνιστική δραστηριότητα αποδεδειγμένη από άλλες λειτουργίες στο σύστημα ηλεκτρικής ισχύος. Οι Προμηθευτές γενικά αναμένεται να συγκεντρώνουν πολλές συμβάσεις με ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων, ώστε να διεξάγουν μία ενιαία διαχείριση, γεγονός που θα τους δώσει μελλοντικά τη δυνατότητα για παροχή επικουρικών υπηρεσιών στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της V2G λειτουργίας. Ο Προμηθευτής Ηλεκτρικών Οχημάτων θα θεωρείται ως ανταγωνιστική επιχείρηση όπως και άλλες εμπορικές επιχειρήσεις στην αγορά.

2.3 Μοντέλα Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων

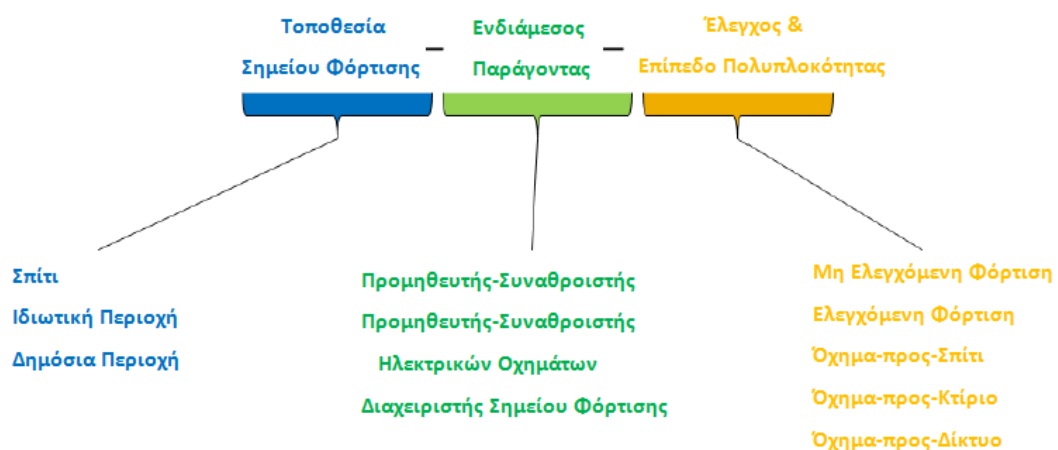
Αναμένεται ότι στο βραχυπρόθεσμο διάστημα η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων στο σπίτι κατά τη διάρκεια της νύχτας θα είναι ο πιο πρακτικός και συνεπώς ο πιο συνηθισμένος τρόπος φόρτισης, καθώς είναι σύμφωνος με τη συμπεριφορά οδήγησης των περισσότερων ανθρώπων. Ωστόσο φόρτιση σε δημόσιους χώρους, καθώς και σε κατάλληλα διαμορφωμένους σταθμούς φόρτισης θα μπορούσε να καλύψει τις ανάγκες των ιδιοκτητών ηλεκτρικών οχημάτων. Μακροπρόθεσμα αναμένεται και η εμφάνιση πιο εξεζητημένων τρόπων φόρτισης με τα ηλεκτρικά οχήματα να προσφέρουν ενέργεια και συγκεκριμένες υπηρεσίες στο δίκτυο (υπηρεσίες V2G : Vehicle to Grid).

Για να ενισχυθεί η όσο το δυνατό γρηγορότερη αποδοχή των νέων τεχνολογιών τα ρυθμιστικά πλαίσια πρέπει αρχικά να επικεντρώνουν στα πιο ρεαλιστικά σενάρια, όπως η φόρτιση στο σπίτι με έναν μετρητή που βρίσκεται ενσωματωμένος στο όχημα και μία απλή επικοινωνία με τον προμηθευτή ηλεκτρικής ενέργειας. Κάθε άλλος τρόπος φόρτισης θα χρησιμοποιούνταν σαν βοηθητική υπηρεσία σε σπάνιες περιπτώσεις.

Οι τρόποι φόρτισης προβλέπεται να συνυπάρχουν μεταξύ τους και επομένως ο σχεδιασμός του ενός δεν πρέπει να αποκλείει κάποιον άλλο, αλλά αντίθετα να ενισχύει τον ανταγωνισμό, με στόχο το όφελος των τελικών χρηστών, παρέχοντας

κίνητρα για αποδοτική και επικερδή λειτουργία. Οι αγορές και ο ανταγωνισμός μεταξύ των διαφόρων παραγόντων βοηθούν στην εύρεση μίας αποδοτικής έκβασης και επομένως η ρύθμιση των αλληλεπιδράσεων αυτών πρέπει να εφαρμόζεται μόνο όταν είναι αναγκαία και κοινωνικά επιθυμητή. Επιπλέον αν η οδήγηση ηλεκτρικών οχημάτων που είναι ιδιαίτερα αποδοτικά, άνετα και αθόρυβα, θεωρηθεί ως γενικός στόχος της κοινωνίας, τότε η ανάπτυξη υποδομών φόρτισης που παρέχουν επαρκή ενέργεια για την κίνηση των οχημάτων θα ήταν δημόσιο καθήκον. Επομένως η πρόσβαση στις υποδομές αυτές θα έπρεπε να θεωρείται δημόσιο αγαθό, για το οποίο θα απαιτούνταν ειδική ρύθμιση.

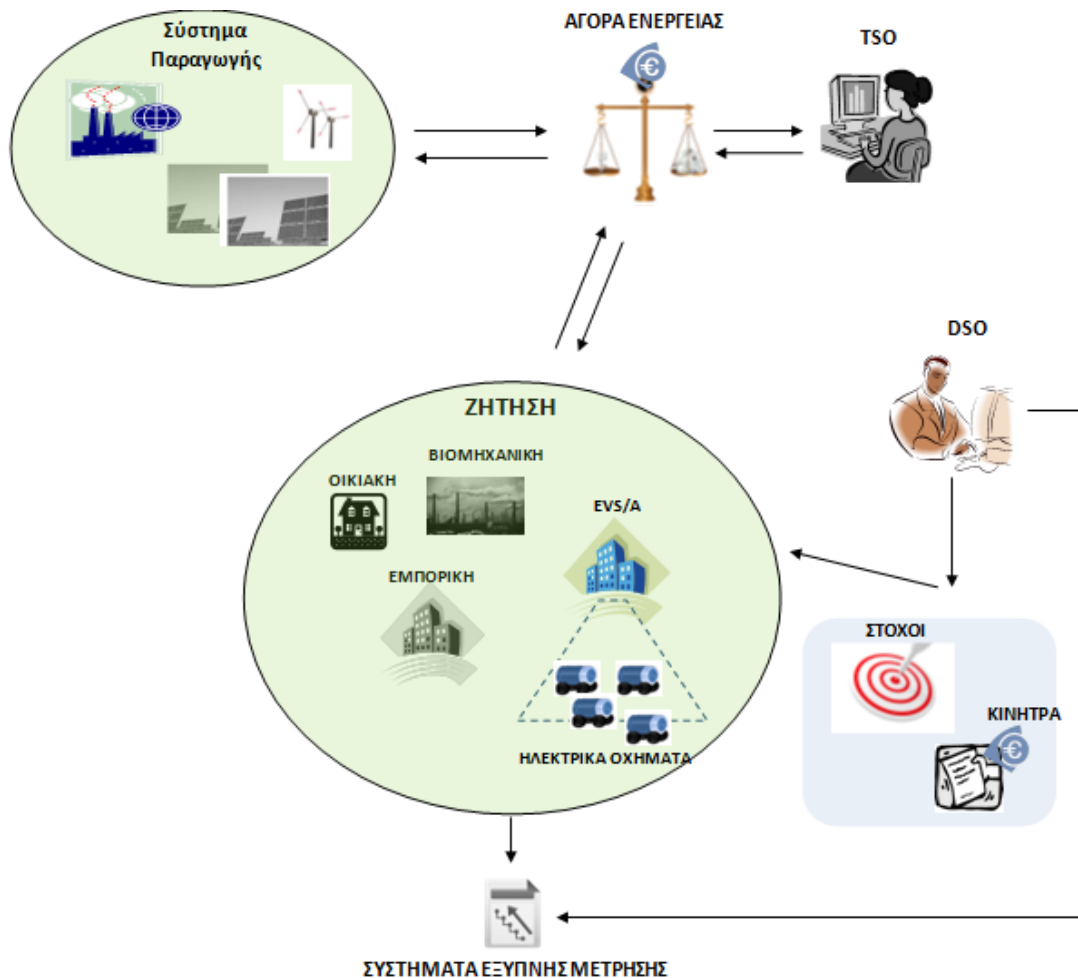
Στο διάγραμμα 2.2 παρέχεται μία επισκόπηση όλων των δυνατών τρόπων φόρτισης ανάλογα με την τοποθεσία του σημείου φόρτισης, τους ενδιάμεσους παράγοντες για την οργάνωση της προμήθειας ενέργειας ή των υπηρεσιών του συστήματος και το βαθμό πολυπλοκότητας και ελέγχου κατά τη διαδικασία φόρτισης.



Διάγραμμα 2.2: Λογική κατηγοριοποίηση για τους τρόπους φόρτισης [2.2]

2.4 Αρχιτεκτονική Επικοινωνίας

Στο διάγραμμα 2.3 απεικονίζονται οι απαιτούμενες επικοινωνίες για τη διαχείριση της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων.



Διάγραμμα 2.3: Διάγραμμα επικοινωνιών για τη διαχείριση ηλεκτρικών οχημάτων

Ο Κεντρικός ελεγκτής EVS/A είναι υπεύθυνος για την προμήθεια της απαιτούμενη ισχύος από την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας και για τη διαχείριση του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων. Ο EVS/A προβλέπει την ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων και κλείνει τις αντίστοιχες συμφωνίες για την προμήθεια της στην «day-ahead» αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Την επόμενη ημέρα και σε πραγματικό χρόνο, ο EVS/A εξυπηρετεί την πραγματική ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων βάσει του συμφωνηθέντος προγραμματισμού.

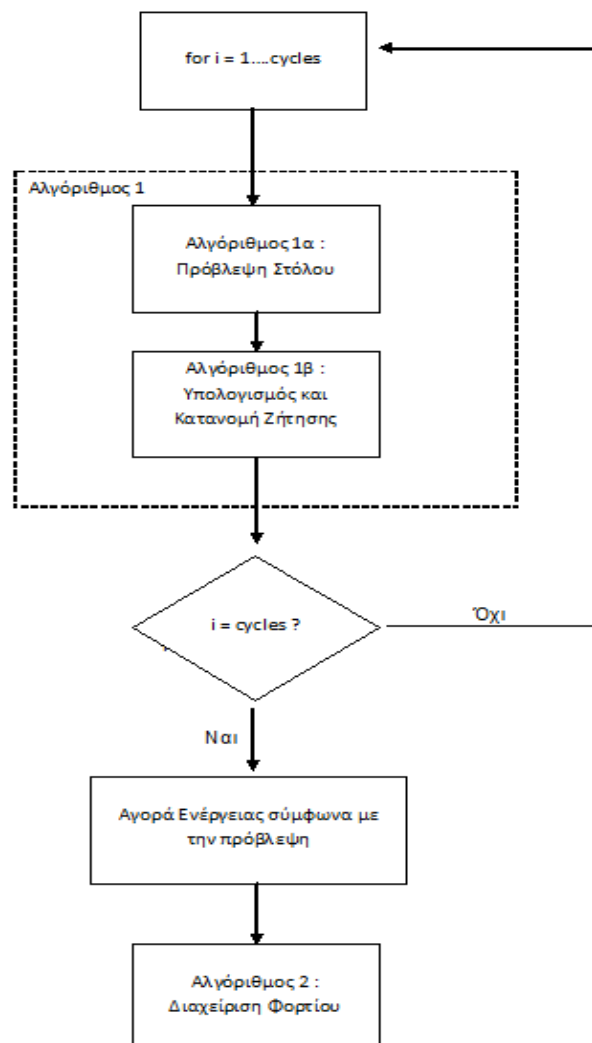
Ο Διαχειριστής του δικτύου διανομής διαθέτει ένα σύστημα τηλε-μέτρησης σε πραγματικό χρόνο για να ελέγχει τη λειτουργία του δικτύου. Για την αποδοτικότερη λειτουργία του δικτύου ο DSO δύναται να δώσει οικονομικά κίνητρα στον EVS/A έτσι ώστε η ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων να μην επιβαρύνει περαιτέρω το δίκτυο σε ώρες αυξημένης ζήτησης αλλά να κατανέμεται κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης.

Κεφάλαιο 3

Αλγόριθμοι ελέγχου φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

3.1 Μοντέλο Ελέγχου φόρτισης

Στο κεφάλαιο αυτό θα περιγραφούν οι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν για τον προγραμματισμό της απαιτούμενης προς αγορά ενέργειας για την κάλυψη του φορτίου της επόμενης μέρας (**day ahead scheduling**) και για την διαχείριση του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων με βάση την πρόβλεψη που έχει γίνει την προηγούμενη ημέρα (**dispatch**) [3.1]. Στο διάγραμμα 3.1 παρουσιάζεται το γενικευμένο διάγραμμα της λειτουργίας του ελέγχου των οχημάτων :



Διάγραμμα 3.1 : Διάγραμμα Μπλοκ λειτουργίας συστήματος

Πιο συγκεκριμένα, ο αλγόριθμος 1 χρησιμοποιεί στοχαστικές και ντετερμινιστικές μεταβλητές που αφορούν τα ηλεκτρικά οχήματα, τους σταθμούς φόρτισης και τα μοτίβα οδήγησης για να παράξει μια πρόβλεψη των ενεργειακών αναγκών του στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων για την επόμενη ημέρα (day-ahead). Για την πρόβλεψη αυτή απαιτείται η επιλογή τυχαίων τιμών από την κατανομή κάθε στοχαστικής μεταβλητής.

Ντετερμινιστικές μεταβλητές:

1. Στόλος ηλεκτρικών οχημάτων
2. Επίπεδα φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (Modes 1,2&3)
3. Απώλειες φόρτισης
4. Είδος φόρτισης (ελεγχόμενη ή μη)

Στοχαστικές μεταβλητές:

1. Τύποι ηλεκτρικών οχημάτων (*PHEV, BEV, L7e, M1, N1, N2*)
2. Επιλογή τεχνολογιών σταθμών φόρτισης ανά τύπο οχήματος
3. Διανυόμενη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών φορτίσεων
4. Συνδεσιμότητα ηλεκτρικών οχημάτων (ώρα και διάρκεια σύνδεσης των ηλεκτρικών οχημάτων με το δίκτυο)

Στόχος του αλγορίθμου είναι η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών τους με το μικρότερο κόστος. Η ελαχιστοποίηση του κόστους απαιτεί την γνώση ή την πρόβλεψη των τιμών αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για την επόμενη ημέρα. Βάσει της χρονοσειράς των τιμών αγοράς ενέργειας αποφασίζεται η κατανομή της ζητούμενης ισχύος στις ώρες με το χαμηλότερο ενεργειακό κόστος. Η εξαγόμενη κατανομή της ζήτησης στηρίζεται σε ένα σύνολο τυχαίων επιλογών για τις στοχαστικές μεταβλητές.

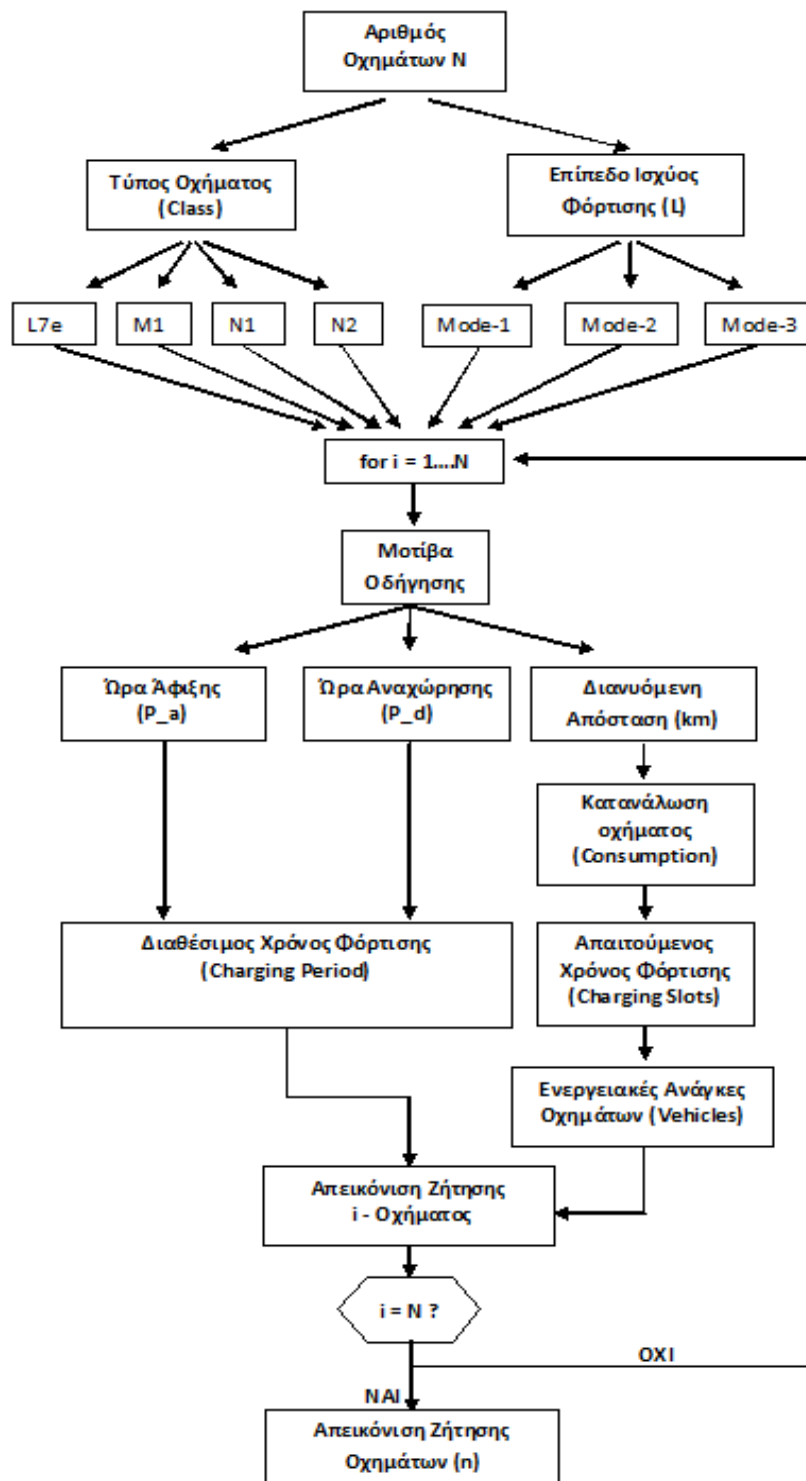
Η «απόζευξη» της κατανομής αυτής από την τυχαιότητα των στοχαστικών μεταβλητών μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση της μεθόδου Monte Carlo. Με τη μέθοδο Monte Carlo προσομοιώνονται διαφορετικά σενάρια δεδομένων αναθέτοντας τυχαίες τιμές κάθε φορά στις στοχαστικές μεταβλητές. Η τελική κατανομή προκύπτει από το μέσο όρο των επιμέρους κατανομών κάθε σεναρίου.

Το αποτέλεσμα του αλγορίθμου 1 σε συνδυασμό με τη μέθοδο Monte Carlo είναι ένας πίνακας ο οποίος δείχνει την ισχύ που πρέπει να αγορασθεί από την day-ahead αγορά ενέργειας για να καλυφθεί η προβλεπόμενη ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων με το ελάχιστο δυνατό (προβλεπόμενο ή μη) κόστος.

Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος 2 εφαρμόζεται σε πραγματικό χρόνο. Κάθε φορά που ένα ηλεκτρικό όχημα συνδέεται στο ηλεκτρικό δίκτυο για να φορτίσει, η φόρτιση του αποφασίζεται από τον κεντρικό ελεγκτή βάσει των προτιμήσεων του οδηγού (διάρκεια φόρτισης, επίπεδο φόρτισης, τύπος φόρτισης) και της διαθέσιμης αγορασθείσας ισχύος (αλγόριθμος 1). Στόχος του αλγορίθμου 2 είναι η ενεργειακή ισορροπία μεταξύ προβλεπόμενης και πραγματικής ζήτησης.

3.2 Αλγόριθμος 1: Πρόβλεψη Ενεργειακών αναγκών και Κατανομή ελαχίστου κόστους

3.2.1 Πρόβλεψη Ενεργειακών Αναγκών



Διάγραμμα 3.2 : Διάγραμμα Μπλοκ λειτουργίας Αλγορίθμου 1α : Πρόβλεψη Στόλου

N

Η παράμετρος N αυτή αναφέρεται στον συνολικό αριθμό των οχημάτων που αναμένεται να προσέλθουν την επόμενη ημέρα προς φόρτιση. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας εφαρμόζουμε διαφορετικά σενάρια διείσδυσης, κάθε ένα από τα οποία έχει και διαφορετική τιμή για το N .

ts

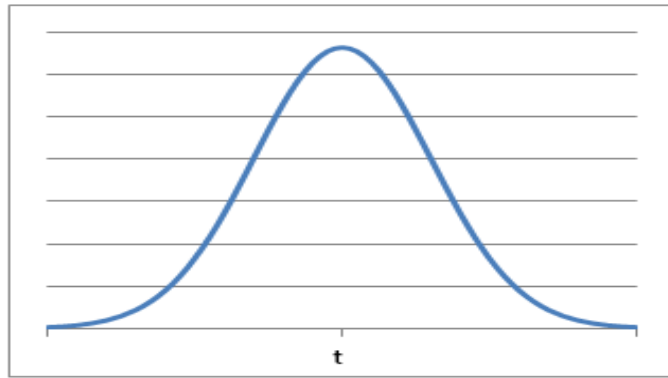
Για λόγους πρακτικότητας έχει ορισθεί μια νέα μονάδα μέτρησης χρόνου : το time slot (χρονοθυρίδα) ts . Το time slot είναι το μικρότερο χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο το εξωτερικό περιβάλλον θεωρείται αμετάβλητο. Έτσι μια ενδεχόμενη σύνδεση / αποσύνδεση ενός οχήματος από την συσκευή φόρτισης, είτε η έναρξη / ολοκλήρωση της φόρτισής του θα γίνουν αντιληπτές μόνο σε ακέραια πολλαπλάσια αυτού του χρονικού διαστήματος ακόμα και αν έχουν συμβεί νωρίτερα. Μπορούμε να το φανταστούμε σαν ένα ρολόι στον κάθε χτύπο του οποίου μπορεί να αλλάξει η εκτελούμενη διεργασία. Όλες οι διεργασίες εκτελούνται αδιάλειπτες και με ακριβώς ίδιο τρόπο στην χρονική απόσταση μεταξύ 2 χτύπων του ρολογιού, και καμία συσκευή ή όχημα δεν μπορεί να «δει» χρονικό διάστημα μικρότερο από ένα time slot. Όπως είναι φυσικό όλα τα χρονικά διαστήματα/μεγέθη από εδώ και πέρα εκφράζονται σε time slots. Η παράμετρος ts επιλέγεται κατά περίπτωση. Μέσα στο διάστημα αυτό η φόρτιση είναι αδιάλειπτη και σε σταθερό επίπεδο ισχύος. Τυπικά παραδείγματα διάρκειας ενός time slot είναι 1 ώρα, 30λεπτά, 15 λεπτά κτλ.

Arrival Period

Είναι το χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο θεωρείται ότι μπορεί να προσέλθει ένα όχημα προς φόρτιση και μετριέται σε ώρες (h).

P_a

Το P_a είναι ένας μονοδιάστατος πίνακας που δείχνει την πιθανότητα που έχει κάποιο όχημα να έλθει προς φόρτιση στο time slot a . Προφανώς τα time slot άφιξης δεν έχουν όλα την ίδια πιθανότητα. Όπως φαίνεται και από το παρακάτω διάγραμμα, η προσέλευση των οχημάτων ακολουθεί μια καμπύλη η οποία θυμίζει κανονική κατανομή, με κεντρική τιμή την t .



Διάγραμμα 3.3 : Κατανομή του P_a

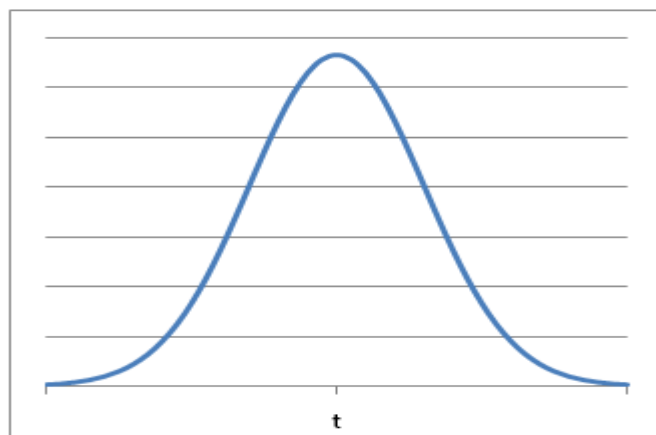
Άρα μπορεί να θεωρηθεί πως η μεταβλητή a ακολουθεί κατανομή Gauss, και συνεπώς το P_a είναι το σύνολο τιμών της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Gauss με κεντρική τιμή την t . Φυσικά, οι τιμές του πίνακα P_a μπορούν να αλλάξουν κατάλληλα θεωρώντας διαφορετικό σενάριο προσέλευσης.

Departure Period

Είναι το διάστημα στο οποίο θεωρείται ότι ένα όχημα μπορεί να διακόψει την φόρτισή του, και να αναχωρήσει και μετριέται σε ώρες (h).

P_d

Το P_d με την σειρά του, είναι κι αυτό ένας μονοδιάστατος πίνακας που δείχνει την πιθανότητα που έχει κάποιο time slot να είναι time slot αναχώρησης, δηλαδή να μπορεί το όχημα να αναχωρήσει σε αυτό (για την ακρίβεια, αμέσως μετά από αυτό). Συμβουλευόμενοι το παρακάτω διάγραμμα, μπορεί να θεωρηθεί πως η αναχώρηση των οχημάτων ακολουθεί και αυτή μια κανονική κατανομή με κεντρική τιμή την t .



Διάγραμμα 3.4 : Κατανομή του P_d

L(j)

Η ισχύς φόρτισης, όπως περιγράφηκε εκτενώς στο πρώτο κεφάλαιο, μπορεί να καταναμεηθεί σε τρία επίπεδα. Το Mode-1 που αναφέρεται στην μονοφασική φόρτιση, το Mode-2 που αναφέρεται στην τριφασική φόρτιση, και το Mode-3 που αναφέρεται στην ταχεία DC φόρτιση. Αυτά ακριβώς τα επίπεδα ισχύος εκφράζει και ο πίνακας $L(j)$, ο οποίος αποτελείται από τρία στοιχεία, το $L(1)$, το $L(2)$, και το $L(3)$, με τιμές αντίστοιχες του κάθε επιπέδου. Βλέπουμε πως το j παίρνει τις τιμές 1, 2, 3 δείχνοντας έτσι τον τύπο του φορτιστή, και φυσικά το αντίστοιχο επίπεδο της ισχύος φόρτισης.

Class

Παράμετρος που δείχνει την τάξη των οχημάτων. Όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο οι τάξεις είναι 4 (L7e, M1, N1, N2) συνεπώς class είναι ένας δείκτης της κάθε τάξης και παίρνει τιμές από 1 μέχρι 4.

P

Η παράμετρος αυτή δείχνει την ποσοστιαία κατανομή των ηλεκτρικών οχημάτων στις 4 κατηγορίες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Είναι πίνακας με μια στήλη και 4 γραμμές κάθε μια από τις οποίες δείχνει το ποσοστό της κάθε τάξης επί του συνόλου των ηλεκτρικών οχημάτων.

P L

Ο πίνακας αυτός δείχνει την ποσοστιαία κατανομή των ηλεκτρικών οχημάτων ως προς την τάξη τους αλλά και ως προς το επίπεδο της ισχύος φόρτισής τους. Είναι πίνακας 2 διαστάσεων στις γραμμές του οποίου είναι τα επίπεδα ισχύος και στις στήλες οι διάφορες τάξεις.

km

Η παράμετρος αυτή δείχνει την μέση ημερήσια διανυόμενη απόσταση του κάθε οχήματος. Για να είναι το αποτέλεσμα πιο ρεαλιστικό, θεωρείται ότι η απόσταση αυτή ακολουθεί μια κανονική κατανομή τα χαρακτηριστικά όμως της οποίας (μέση τιμή, τυπική απόκλιση) διαφέρουν ανάλογα με την τάξη του οχήματος και την ημέρα.

AverCon

Θέλοντας να υπολογίσουμε την ημερήσια κατανάλωση ενέργειας των οχημάτων ήταν απαραίτητο να βρεθεί πρώτα μια μέση κατανάλωση της κάθε τάξης των ηλεκτρικών οχημάτων η οποία να δείχνει τις καταναλισκόμενες kWh ανά km. Η

μεταβλητή αυτή είναι πολύ απλά ένας πίνακας που δείχνει τον μέσο όρο των καταναλώσεων των διαφόρων τάξεων των ηλεκτρικών οχημάτων.

Consumption

Πολλαπλασιάζοντας τώρα τους παραπάνω μέσους όρους των καταναλώσεων (AverCon) με την ημερήσια διανυόμενη απόσταση (km) του κάθε οχήματος, προκύπτει η μέση ημερήσια κατανάλωση ενέργειας ανά όχημα.

$$\text{Consumption (kWh)} = \text{AverCon (kWh/km)} \times \text{km (km)}$$

CP (Charging Period)

Το διάστημα φόρτισης μετρείται σε ώρες (h) και αναφέρεται στην συνολική χρονική περίοδο μέσα στην οποία πρέπει όλα τα οχήματα να έχουν φορτιστεί με τον βέλτιστο οικονομικά τρόπο. Κανένα όχημα δεν μπορεί να φορτίσει εκτός αυτής της περιόδου, ακόμα κι αν είναι συνδεδεμένο με την συσκευή φόρτισης. Το διάστημα φόρτισης επιλέγεται βάσει στατιστικών στοιχείων που δείχνουν τις ώρες που ένα όχημα είναι σταθμευμένο στο σπίτι, αλλά φυσικά και βάσει της καμπύλης του κόστους, καθώς θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε τα οικονομικότερα time slots για την φόρτιση των οχημάτων.

Charging Time

Έχοντας λοιπόν τις ημερήσιες καταναλώσεις ανά τύπο οχήματος (Consumption), καθώς και τα διαφορετικά επίπεδα ισχύος φόρτισης (L(j)), εύκολα μπορεί να υπολογισθεί ο χρόνος φόρτισης του κάθε οχήματος διαιρώντας την κατανάλωσή του με την ισχύ φόρτισης που υπαγορεύει η τάξη του.

Charging Slots

Με γνωστή πια την απαιτούμενη ώρα φόρτισης του κάθε οχήματος, μπορούμε να βρούμε τον αριθμό των time slots που απαιτούνται για την φόρτιση, διαιρώντας την ώρα φόρτισης (Charging Time) με την διάρκεια του time slot (ts). Το αποτέλεσμα στρογγυλοποιείται για να είναι ακέραιος αριθμός, πράγμα που οδηγεί σε σφάλματα, αλλά με την παραδοχή ότι οι στρογγυλοποιήσεις προς τα πάνω είναι περίπου ίσες σε αριθμό με αυτές προς τα κάτω το σφάλμα ελαχιστοποιείται.

Vehicles

Οι παραπάνω ταξινομήσεις είναι όλες πολύ χρήσιμες, αυτό που ενδιαφέρει το σύστημα όμως είναι το προς ζήτηση φορτίο. Κι όταν αναφερόμαστε σε φορτίο

εννοούμε ένα πράγμα : Ενέργεια, δηλαδή ισχύ και χρόνο. Συνεπώς, από την μελέτη δεν θα μπορούσε να λείπει ένας πίνακας που να δείχνει ακριβώς τον αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων που θα ζητήσουν ισχύ σε ένα από τα 3 προκαθορισμένα επίπεδα (Mode-1, Mode-2, Mode-3), και για πόσο χρόνο (ή μάλλον για πόσα time slots) θα το κάνουν αυτό. Ο πίνακας Vehicles την παρακάτω μορφή :

Πίνακας 3.1 : Η μεταβλητή Vehicles

Time-slots	<u>Vehicles</u>		
	Mode-1	Mode-2	Mode-3
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
9	.	.	.
10		5	
11	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

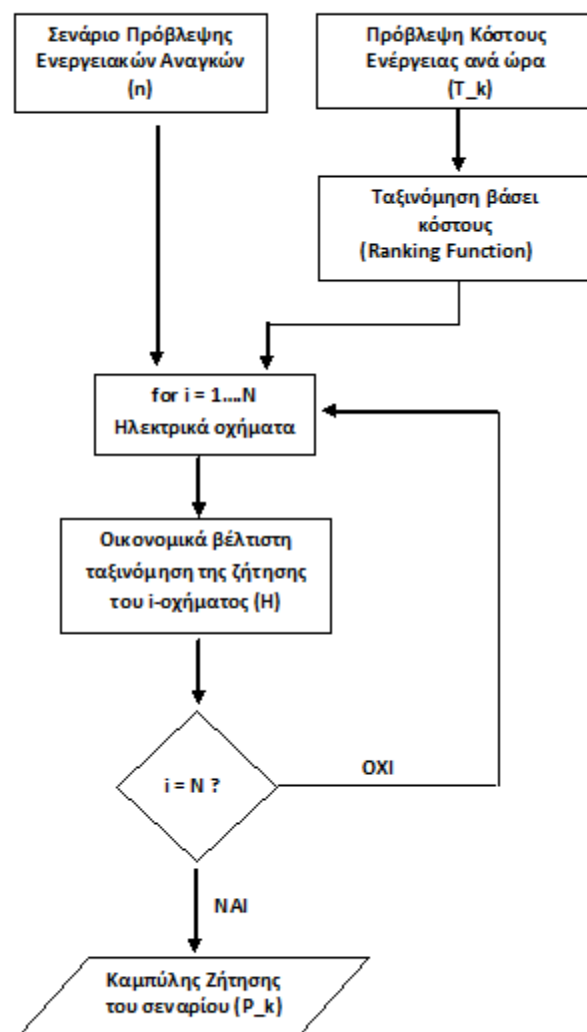
Ο αριθμός της γραμμής είναι ταυτόχρονα και ο αριθμός των time slot για τα οποία θα ζητείται η εκάστοτε ισχύς (αντίστοιχη της στήλης). Για παράδειγμα, η θέση που εμφανίζεται ο αριθμός 5 υποδηλώνει ότι 5 οχήματα θα ζητήσουν να φορτίσουν σε Mode-2 για 10 time slots, κάποια στιγμή μέσα στο συνολικό διάστημα φόρτισης. Δεν σημαίνει όμως ότι αυτά τα 5 θα έλθουν ταυτόχρονα και θα ζητήσουν την ισχύ αυτή (ο αναγνώστης παραπέμπεται στον ορισμό των μεταβλητών άφιξης και αναχώρησης).

n

Συνδυάζοντας όλες τις παραπάνω κατανομές (Vehicles, P_a, P_d) καταλήγουμε σε μια συνολική απεικόνιση του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων, στην οποία φαίνεται η ισχύς φόρτισης, η χρονική διάρκεια φόρτισης (μετρημένη σε time slots), το time slot άφιξης και αναχώρησης, και φυσικά ο αριθμός των οχημάτων που συγκεντρώνουν όλα αυτά τα χαρακτηριστικά. Πρόκειται για μια συνάρτηση τεσσάρων μεταβλητών $n(j,l,a,d)$ που το j δείχνει το επίπεδο ισχύος φόρτισης, το l δείχνει την διάρκεια φόρτισης, το a και το d είναι αντίστοιχα το time slot άφιξης και αναχώρησης, και το n είναι η τιμή της συνάρτησης, δηλαδή το πόσα οχήματα θα φορτίσουν με ισχύ $L(j)$, για l time slots, θα συνδεθούν στο a time slot και θα αποσυνδεθούν στο d . Προφανώς πρέπει $l \leq (d-a)$ αλλιώς το όχημα δεν θα προλάβει να φορτίσει τελείως. Φυσικά ο πίνακας αυτός, που αποτελεί την πρόβλεψη του φορτίου της επόμενης ημέρας, θα

είναι διαφορετικός για κάθε ημέρα, αφού κάθε φορά που θα δημιουργείται λόγω της σχετικότητας των παραμέτρων του (το a και το d επιλέγονται τυχαία από μια κανονική κατανομή, το ίδιο και η απαιτούμενη διάρκεια φόρτισης l η οποία εξαρτάται από την ημερήσια κατανάλωση που και αυτή έχει θεωρηθεί πως ακολουθεί κανονική κατανομή) θα έχει διαφορετικές τιμές.

3.2.2 Κατανομή Ελαχίστου Κόστους



Διάγραμμα 3.5 : Διάγραμμα Μπλοκ Αλγορίθμου 1β : Υπολογισμός και Κατανομή Ζήτησης

T_k

Είναι η χρονοσειρά του κόστους αγοράς της ενέργειας ανά time slot. Φυσικά η χρονοσειρά αυτή δείχνει το κόστος να μεταβάλλεται ωριαία, με μια απλή επεξεργασία όμως μπορούμε να πάρουμε το κόστος ανά time slot. Αυτό που θέλουμε να επιτύχουμε είναι τα προς φόρτιση οχήματα να κατανεμηθούν με τέτοιο τρόπο ώστε η μεγαλύτερη ζήτηση να εμφανιστεί στο οικονομικότερο time slot.

Ranking Function

Με αυτό το όνομα ορίστηκε μια βοηθητική συνάρτηση η οποία κάνει αυτό που υποδηλώνει και το όνομά της : Βαθμονομεί. Στα πλαίσια της οικονομικά βέλτιστης πολιτικής που ακολουθείται, είναι φυσικό όταν έλθει ένα όχημα να ζητήσει ενέργεια για χρόνο πχ 5 time slots, να εξυπηρετηθεί στα time slots αυτά που το κόστος αγοράς της ενέργειας είναι το χαμηλότερο. Για αυτό το λόγο ήταν απαραίτητο να ορισθεί μια συνάρτηση η οποία ακριβώς θα αξιολογεί τα time slots από το φθηνότερο στο ακριβότερο. Η συνάρτηση αυτή ονομάζεται Ranking Function και παράγει μια λίστα που κατατάσσει πρώτο το πιο φθηνό time slot, δεύτερο το αμέσως ακριβότερο κ.ο.κ. Αν τυχόν σε δύο ή περισσότερα time slots η ενέργεια έχει το ίδιο κόστος τότε τα time slots αυτά ταξινομούνται σύμφωνα με το ποιο είναι χρονικά κοντύτερα στο φθηνότερο. Ας δούμε ένα παράδειγμα :

Έστω ότι το κόστος της ενέργειας σε 10 συνεχόμενα time slots μεταβάλλεται σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα :

Πίνακας 3.2 : Παράδειγμα κόστους ανά time slot

T _k	
α/α Time slot	Κόστος (€/MWh)
1	28
2	22
3	19
4	17
5	16
6	14
7	15
8	16
9	20
10	26

Έστω ότι έρχεται ένα όχημα στο time slot 1 ($a = 1$), φεύγει στο time slot 10 ($d = 10$), και θέλει να φορτίσει για 6 time slots ($l = 6$). Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως τα time slot στα οποία μπορεί να φορτίσει το όχημα είναι από το 2

μέχρι και το 9, οπότε αυτό που πρέπει να γίνει είναι να επιλεγθούν τα 6 οικονομικότερα time slots από το 2 μέχρι και το 9. Δηλαδή θα έχουμε :

Πίνακας 3.3 : Παράδειγμα βαθμολόγησης των time slot

Ranking Function (T _k)		Rank T _k	
α/α Time slot	Κόστος (€/MWh)	α/α Time slot	Κατάταξη Time slot
6	14	3	6 ^ο
7	15	4	5 ^ο
5	16	5	3 ^ο
8	16	6	1 ^ο
4	17	7	2 ^ο
3	19	8	4 ^ο
9	20		
2	22		
10	26		
1	28		

Φαίνεται ξεκάθαρα ότι το time slot με το χαμηλότερο κόστος είναι το υπ' αριθμόν 6 γι' αυτό και κατατάσσεται πρώτο στον πίνακα Rank. Για την φόρτιση του οχήματος τα time slot που θα χρησιμοποιηθούν είναι αυτά για τα οποία η κατάταξή τους είναι μικρότερη ή ίση από το 1 δηλαδή από 6. Επιτυγχάνεται έτσι η οικονομικά βέλτιστη κατανομή του φορτίου.

P_k

Έχοντας τον στόλο των οχημάτων καθορισμένο (n), εύκολα μπορούμε να τον διατρέξουμε κ να υπολογίσουμε την ισχύ που θα ζητηθεί ανά time slot. Φυσικά ο υπολογισμός αυτός πρέπει να γίνει διατηρώντας το κόστος ελάχιστο, γι' αυτό και η προς ζήτηση ισχύς του κάθε οχήματος, με την βοήθεια της συνάρτησης Ranking Function ταξινομείται κατάλληλα στα οικονομικότερα time slots. Μετά, η ισχύς του κάθε οχήματος ανά time slot αθροίζεται και παράγεται ένας πίνακας που δείχνει την συνολική ισχύ ανά time slot που πρόκειται να ζητηθεί. Ο πίνακας αυτός αποτελεί την πρόβλεψη του φορτίου της επόμενης ημέρας και είναι η έξοδος του πρώτου αλγορίθμου.

H

Η μεταβλητή αυτή περιλαμβάνει το σύνολο των time slot στα οποία προγραμματίζεται ότι θα φορτίσει το κάθε όχημα. Για παράδειγμα, αν το πρώτο όχημα είναι προγραμματισμένο να φορτίσει στα time slots 15, 16, 20, 22, και το

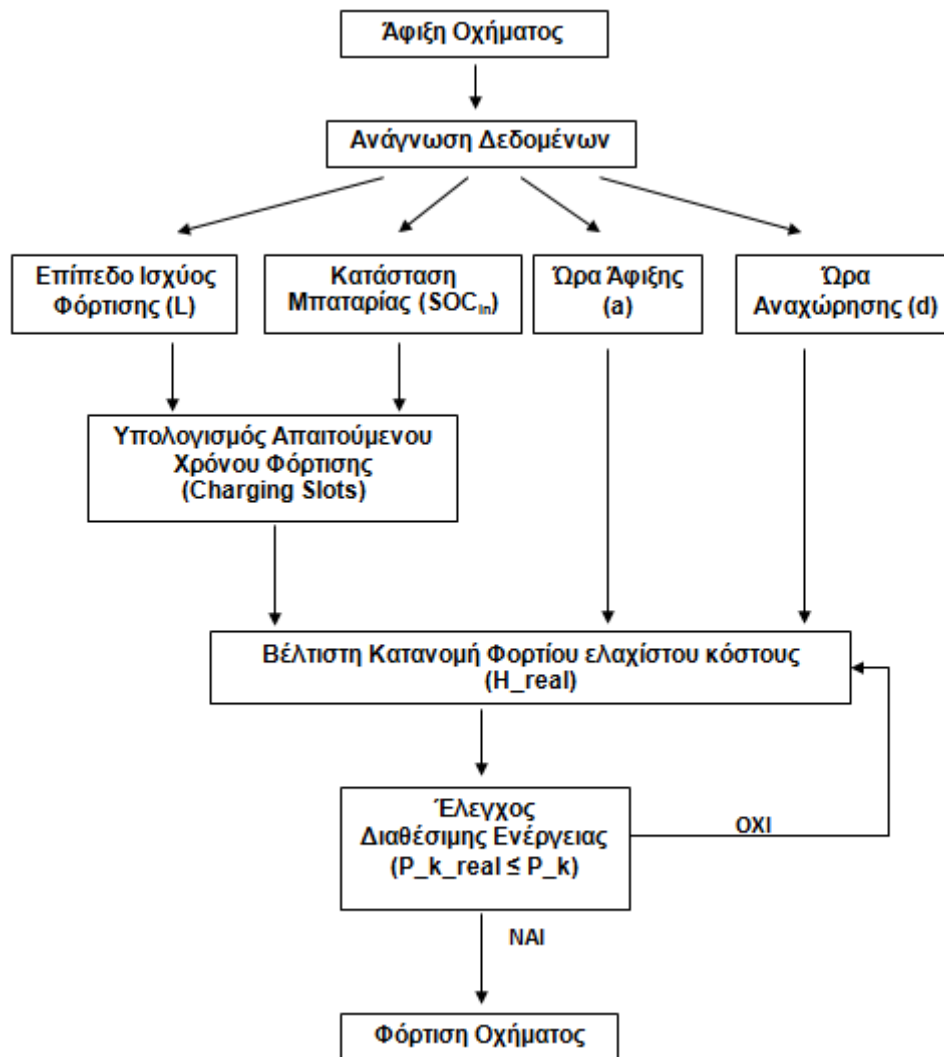
δεύτερο στα 3, 9, 35, 38, 40 τότε η μεταβλητή H θα είναι ένας πίνακας όπως ο παρακάτω :

Πίνακας 3.4 : Παράδειγμα μεταβλητής H για 2 τυχαία οχήματα

N \		Charging Timeslots				
		1	2	3	4	5
1		15	16	20	22	
2		3	9	35	38	40

Η πρώτη σειρά που αντιστοιχεί στο πρώτο όχημα έχει τα time slot στα οποία αυτό θα φορτίσει, η δεύτερη σειρά τα αντίστοιχα του δεύτερου οχήματος, κ.ο.κ. Είναι πολύ σημαντική μεταβλητή καθώς μας επιτρέπει να παρακολουθήσουμε ακριβώς την ταξινόμηση των οχημάτων ανά time slot από τον αλγόριθμο.

3.3 Αλγόριθμος 2: Διαχείριση του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων σε πραγματικό χρόνο (dispatch)



Διάγραμμα 3.6 : Διάγραμμα Μπλοκ Αλγορίθμου 2 : Διαχείριση Φορτίου

L(j)

Η ισχύς φόρτισης, όπως περιγράφηκε εκτενώς στο πρώτο κεφάλαιο, μπορεί να καταναμηθεί σε τρία επίπεδα. Το Mode-1 που αναφέρεται στην μονοφασική φόρτιση, το Mode-2 που αναφέρεται στην τριφασική φόρτιση, και το Mode-3 που αναφέρεται στην ταχεία DC φόρτιση. Αυτά ακριβώς τα επίπεδα ισχύος εκφράζει και ο πίνακας $L(j)$, ο οποίος αποτελείται από τρία στοιχεία, το $L(1)$, το $L(2)$, και το $L(3)$, με τιμές αντίστοιχες του κάθε επιπέδου. Βλέπουμε πως το j παίρνει τις τιμές 1, 2, 3 δείχνοντας έτσι τον τύπο του φορτιστή, και φυσικά το αντίστοιχο επίπεδο της ισχύος φόρτισης.

SOC_{in}

Η μεταβλητή αυτή αναφέρεται στο επίπεδο (State Of Charge) της συστοιχίας συσσωρευτών του κάθε οχήματος. Πρωταρχικός σκοπός του αλγορίθμου είναι να φορτίσει πλήρως το όχημα, δηλαδή το SOC να φτάσει στο 100%. Από το SOC του συσσωρευτή κατά την άφιξη του οχήματος υπολογίζονται οι ενεργειακές ανάγκες του κάθε ηλεκτρικού οχήματος.

Charging Slots

Η μεταβλητή αυτή όπως και στον αλγόριθμο 1 δείχνει τον αριθμό των time slots που απαιτούνται για την πλήρη φόρτιση της μπαταρίας. Το αποτέλεσμα στρογγυλοποιείται για να είναι ακέραιος αριθμός.

a

Ο αύξων αριθμός του time slot στο οποίο έρχεται να φορτίσει (συνδέεται) ένα όχημα. Πρέπει να ξεκαθαρίσουμε εδώ πως αν π.χ. ένα όχημα συνδεθεί στο έκτο κατά σειρά time slot ($a=6$), τότε αυτό μπορεί να ξεκινήσει την φόρτιση από το επόμενο time slot, δηλαδή το έβδομο.

d

Ο αύξων αριθμός του time slot αναχώρησης ενός οχήματος. Αν για κάποιο όχημα το time slot αναχώρησης είναι π.χ. το εικοστό πρώτο ($d=21$) τότε το όχημα αυτό θα φορτίζει καθ' όλη την διάρκεια του εικοστού time slot, και θα έχει αποσυνδεθεί στο επόμενο. Έτσι το τελευταίο time slot στο οποίο το όχημα μπορεί να φορτίσει είναι το $d - 1$.

H_{real}

Η μεταβλητή αυτή είναι παρόμοια με την H που αναφέρθηκε και προηγουμένως με την εξής διαφορά : Η μεταβλητή H_{real} περιλαμβάνει το σύνολο των time slot στα οποία τα οχήματα φορτίζουν τελικά. Για παράδειγμα, αν το πρώτο όχημα φορτίζει τελικά στα time slots 15, 16, 20, 23, και το δεύτερο στα 3, 9, 35, 38, 41 τότε η μεταβλητή H_{real} θα είναι ένας πίνακας όπως ο παρακάτω :

Πίνακας 3.5 : Παράδειγμα μεταβλητής H_{real} για 2 τυχαία οχήματα

		Charging Timeslots				
		N				
1	15	16	20	23		
2	3	9	35	38	41	

P k real

Η μεταβλητή αυτή είναι μια απεικόνιση της ζητούμενης τελικά ισχύος ανά time slot. Είναι ο λόγος που μπορεί να υπάρξουν σφάλματα κατά την πρόβλεψη, καθώς αυτό που ζητείται δεν συμπίπτει πάντα με αυτό που έχει προβλεφθεί και αγορασθεί. Η εξυπηρετούμενη ισχύς θα πρέπει να είναι πάντα μικρότερη από την αγορασθείσα, και γι' αυτό απαιτείται να υπάρχει έλεγχος της διαθέσιμης ισχύος.

Final

Τέλος η μεταβλητή final περιέχει για κάθε όχημα τον αριθμό των time slot που χρειαζόταν να φορτίσει για να φτάσει στο 100%, και τον αριθμό των time slot που τελικά φόρτισε κατά το διάστημα της περιόδου φόρτισης. Η μεταβλητή αυτή έχει πολύ μεγάλο ενδιαφέρον καθώς μέσω αυτής μπορούμε να παρακολουθήσουμε ποια οχήματα δεν φορτίζουν τελικά στο 100%, λόγω λανθασμένης πρόβλεψης, έχοντας έτσι μια πραγματική εκτίμηση του σφάλματος. Για παράδειγμα έστω δύο οχήματα που ζητούν φόρτιση διάρκειας 10 time slot το κάθε ένα. Και έστω επίσης ότι ο αλγόριθμος φορτίζει το πρώτο όχημα πλήρως (δηλαδή του δίνει ισχύ για 10 time slots), και στο δεύτερο μπορεί να δώσει ισχύ μόνο για 9 time slots. Η μεταβλητή final θα έχει τα εξής :

Πίνακας 3.6 : Παράδειγμα μεταβλητής Final για 2 τυχαία οχήματα

α/α Οχήματος	Time-slots	
	Ζήτηση	Φόρτιση
1	10	10
2	10	9

Βλέπουμε ότι το πρώτο όχημα φορτίστηκε στο 100%, ενώ το δεύτερο στο 90%. Προσοχή όμως : Φόρτιση 90% σημαίνει ότι από αυτό που ζήτησε πήρε το 90%. Δεν σημαίνει ότι το επίπεδο της ενέργειας στην μπαταρία του οχήματος θα είναι 90%, εκτός φυσικά εάν η μπαταρία ήταν εντελώς άδεια όταν το όχημα προσήλθε για φόρτιση. Δεδομένου ότι το όχημα προσέρχεται για φόρτιση με το επίπεδο της μπαταρίας στο 75% π.χ. , αυτό που θα ζητήσει από το σύστημα είναι ενέργεια για το υπόλοιπο 25%. Άρα το πιθανό σφάλμα που έχουμε δεν είναι 10%, αλλά $25\% \times 10\% = 2,5\%$. Άρα το όχημα θα φύγει από τον σταθμό φόρτισης με την μπαταρία στο 97,5%, ποσοστό ικανοποιητικό και οπωσδήποτε αρκετό να καλύψει τις ανάγκες του μέσου οδηγού μέχρι την επόμενη φόρτιση.

3.4 Υλοποίηση Μοντέλου Ελέγχου φόρτισης

Το παράδειγμα που ακολουθεί εξηγεί πλήρως τους αλγορίθμους που αναπτύχθηκαν αναδεικνύοντας τις δυνατότητες του μοντέλου ελέγχου φόρτισης..

3.4.1 Αλγόριθμος 1

Θεωρείται στόλος 1.000 ηλεκτρικών οχημάτων που ακολουθεί την κατανομή που περιγράφεται από τον Πίνακα 10 του κεφαλαίου 1 για το έτος 2020. Δηλαδή

- ❖ L7e: 1%
- ❖ M1: 88%
- ❖ N1: 10%
- ❖ N2: 1%

Τα επίπεδα ισχύος φόρτισης είναι τρία, σύμφωνα πάλι με το πρώτο κεφάλαιο:

$$L(j) = \begin{bmatrix} 3,6kW \\ 11kW \\ 45kW \end{bmatrix}$$

Η συσχέτιση των διαφορετικών τύπων οχημάτων με τα διαφορετικά επίπεδα φόρτισης παρουσιάζονται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3.7 : Ποσοστιαία κατανομή οχημάτων ανά τύπο και ισχύ φόρτισης

	L7e %	M1 %	N1 %	N2 %
Mode-1 (3,6kW)	90	85	85	0
Mode-2 (11kW)	10	10	10	80
Mode-3 (45kW)	0	5	5	20

Συνδυάζοντας τον παραπάνω πίνακα με τα ποσοστά κατανομής του στόλου ανά κατηγορία ηλεκτρικού οχήματος προκύπτει η ακριβής απεικόνιση του στόλου ανά τύπο και ισχύ φόρτισης :

Πίνακας 3.8 : Κατανομή 1000 οχημάτων ανά τύπο και ισχύ φόρτισης σε απόλυτα νούμερα

	L7e	M1	N1	N2
Mode-1 (3,6kW)	9	748	85	0
Mode-2 (11kW)	1	88	10	8
Mode-3 (45kW)	0	44	5	2

Επίσης όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, φόρτιση των L7e σε Mode-3 ,και των N2 σε Mode-1 δεν έχει νόημα μελέτης ειδικότερα όταν αναλύεται η βραδινή φόρτιση στο σπίτι, όπως στη παρούσα περίπτωση, γι' αυτό και εμφανίζεται η τιμή 0 στον αντίστοιχο συνδυασμό.

Οι καταναλώσεις ανά τάξη επιλέγονται να είναι οι μέσες τιμές των καταναλώσεων των οχημάτων όπως παρουσιάζονται παρακάτω:

$$AverCon = \begin{bmatrix} 0,13 \\ 0,16 \\ 0,24 \\ 0,80 \end{bmatrix} kWh/km$$

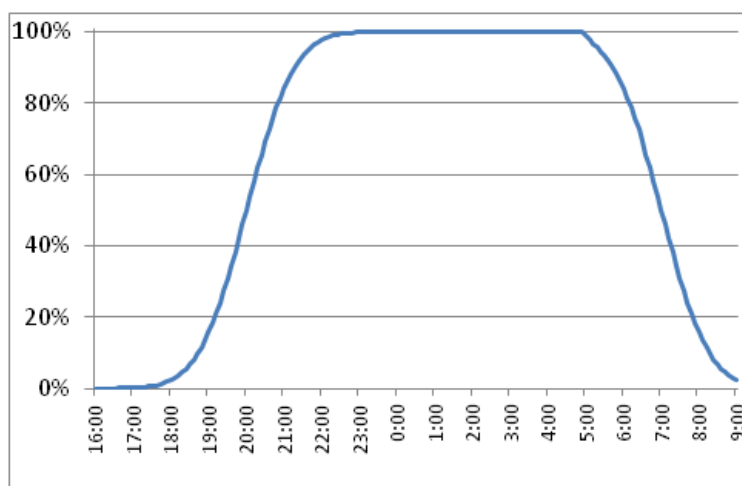
Οι ημερήσιες διανυόμενες αποστάσεις επιλέγονται τυχαία και είναι διαφορετικές για κάθε όχημα και πιο συγκεκριμένα θεωρείται ότι τα οχήματα τύπου L7e και M1 διανύουν αποστάσεις που ακολουθούν κανονική κατανομή με μέση τιμή 40 km, τα οχήματα τύπου N1 διανύουν αποστάσεις που ακολουθούν κανονική κατανομή με μέση τιμή 70 km και τα οχήματα τύπου N2 διανύουν αποστάσεις που ακολουθούν κανονική κατανομή με μέση τιμή 100. Οι μετακινήσεις το σαββατοκύριακο θεωρούνται μεγαλύτερες με τη μέση τιμή να αυξάνει κατά περίπου 10-25%.

Πολλαπλασιάζοντας τώρα τις μέσες καταναλώσεις με την διανυόμενη απόσταση παίρνουμε την τελική ημερήσια κατανάλωση ανά τάξη οχήματος. Ένα όχημα π.χ. τύπου L7e που θα διανύσει 40km με κατανάλωση 0,13kWh/km (από τον πίνακα AverCon αυτή είναι η κατανάλωση αυτού του τύπου) θα έχει καταναλώσει $40 \times 0,13 = 5,2kWh$. Διαιρώντας τις καταναλισκόμενες κιλοβατώρες με το επίπεδο της ισχύος στην οποία φορτίζει το κάθε όχημα παίρνουμε την απαιτούμενη ώρα φόρτισης σε ώρες. Για παράδειγμα, το εν λόγω όχημα που θα καταναλώσει 5,2kWh σε μια ημέρα θα χρειαστεί να φορτίσει για $5,2kWh / 3,6kW = 1,44h$.

Η θεώρηση του time slot, και ο ορισμός αυτού ως μονάδα μέτρησης του χρόνου, απαιτεί τον υπολογισμό διακριτών διαστημάτων φόρτισης, το οποίο έχει ως συνέπεια την εμφάνιση αποκλίσεων από τη πραγματική κατάσταση. Για παράδειγμα, αν η απαιτούμενη ώρα φόρτισης ενός οχήματος είναι 1,44 h όπως η παραπάνω, και θεωρήσουμε time slot εύρους 1 ώρας, δηλαδή το χρονικό βήμα του αλγορίθμου είναι

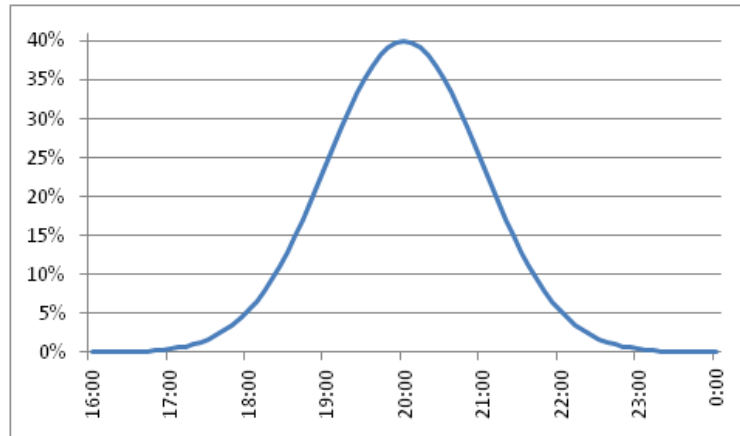
μια ώρα, τότε το 1,44 θα στρογγυλοποιηθεί σε 1 και έτσι θα χαθούν περίπου 25 λεπτά φόρτισης, που αντιστοιχούν σε σημαντικό ποσό ενέργειας. Έτσι για να ελαχιστοποιηθούν οι στρογγυλοποιήσεις θα πρέπει να μειωθεί το χρονικό βήμα του αλγορίθμου, δηλαδή το εύρος του time slot. Η τιμή που πρέπει να επιλεγεί πρέπει να ισοσταθμίζει δύο σημαντικούς παράγοντες: Οι όποιες στρογγυλοποιήσεις γίνουν να μην οδηγούν σε μεγάλα σφάλματα και παράλληλα η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου και κατά συνέπεια ο χρόνος υπολογισμού να μην αυξηθούν σε μη πρακτικά επίπεδα. Στην παρούσα διπλωματική το εύρος του time-slot θεωρήθηκε 15 λεπτά.

Το διάστημα φόρτισης που μελετάται είναι από 18:00 έως 09:00. Όπως φαίνεται και από το παρακάτω διάγραμμα η συντριπτική πλειοψηφία των οχημάτων είναι σταθμευμένα και συνδεδεμένα στην υποδοχή φόρτισης του σπιτιού από 20:30 έως 7:00.

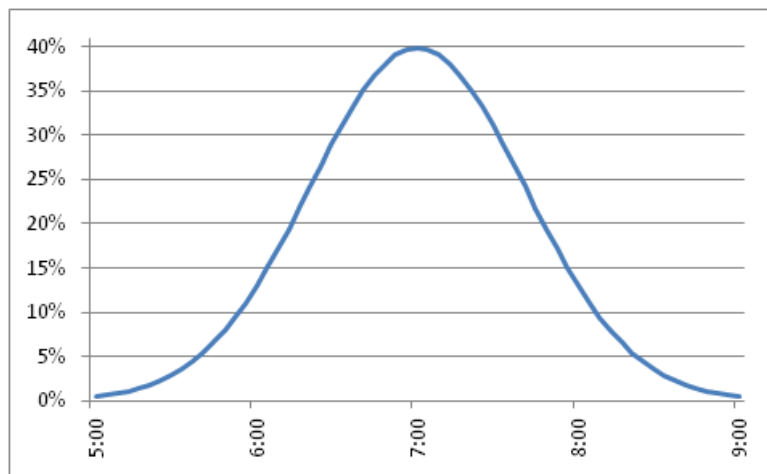


Διάγραμμα 3.7 : Ποσοστό οχημάτων που είναι παρκαρισμένα στο σπίτι

Το διάστημα άφιξης των οχημάτων (Arrival Period) θεωρείται από τις 18:00 μέχρι τις 0:00 δηλαδή 6h, ενώ το διάστημα αναχώρησης (Departure Period) θεωρείται από τις 05:00 μέχρι τις 09:00, δηλαδή 4h. Θεωρείται επίσης πως η άφιξη και η αναχώρηση των οχημάτων ακολουθούν κανονικές κατανομές με μέσες τιμές 20:00 και 07:00 αντίστοιχα.



Διάγραμμα 3.8 : Κατανομή άφιξης οχημάτων στο σπίτι



Διάγραμμα 3.9 : Κατανομή αναχώρησης οχημάτων από το σπίτι

Με την διάρκεια του time slot ορισμένη στις 15 λεπτά, το πλήθος των time slots μέσα στο συνολικό διάστημα φόρτισης είναι 60 time-slots. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τον αριθμό των οχημάτων ανά τύπο φόρτισης που απαιτούν συγκεκριμένο αριθμό time-slots για την πλήρη φόρτιση τους. Για παράδειγμα, τις καθημερινές 238 οχήματα που επιλέγουν κανονική φόρτιση (Mode 1) χρειάζονται 6 timeslots για να φορτίσουν πλήρως, ενώ τον ίδιο χρόνο χρειάζονται μόνο 2 οχήματα που έχουν επιλέξει φόρτιση Mode-2

Πίνακας 3.9 : Κατανομή οχημάτων ανά τύπο και απαιτούμενων time slot φόρτισης

Μεταβλητή Vehicles						
	Καθημερινές			Σαββατοκύριακα		
	Mode-1	Mode-2	Mode-3	Mode-1	Mode-2	Mode-3
1	0	0	44	0	0	43
2	0	22	5	0	0	6
3	0	67	2	0	53	2
4	0	1	0	0	36	0
5	22	9	0	0	4	0
6	238	2	0	3	5	0
7	360	6	0	51	5	0
8	132	0	0	333	4	0
9	5	0	0	324	0	0
10	5	0	0	44	0	0
11	31	0	0	2	0	0
12	33	0	0	3	0	0
13	12	0	0	38	0	0
14	4	0	0	31	0	0
15	0	0	0	12	0	0
16	0	0	0	1	0	0
17	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0

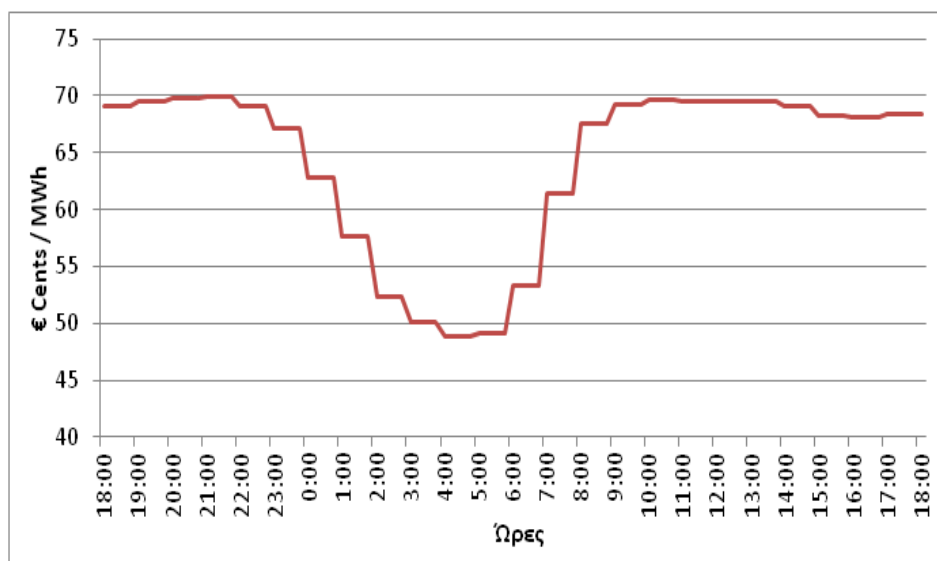
Από τον παραπάνω πίνακα αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές του πίνακα για το σαββατοκύριακο είναι παρόμοιες με τις τιμές των καθημερινών με μια μικρή ολίση προς τα κάτω. Αυτό είναι αληθές και αναμενόμενο, καθ' ότι το σαββατοκύριακο λόγω μεγαλύτερης διανυόμενης απόστασης έχουμε μεγαλύτερες καταναλώσεις, και άρα μεγαλύτερες ανάγκες φόρτισης, το οποίο μεταφράζεται σε αύξηση του αριθμού των απαιτούμενων time-slots.

Τέλος πρέπει να αναφερθεί πως κανονικά ο πίνακας αυτός πρέπει να έχει διάσταση ίση με τον αριθμό των time slots του συνολικού διαστήματος φόρτισης (στην προκειμένη περίπτωση 60) όμως επειδή όπως φάνηκε από διαδοχικές προβλέψεις δεν προβλέπεται κάποιο όχημα να ζητήσει ισχύ για πάνω από 20 time slots, οι γραμμές σταματούν στο 20 και εννοείται πως όλες οι τιμές από εκεί και κάτω είναι μηδενικές.

Ο Αλγόριθμος 1 λοιπόν αφού δημιουργήσει τον πίνακα Vehicles, επιλέγει τις χρονικές στιγμές άφιξης και αναχώρησης, για κάθε ένα όχημα και δημιουργεί τον πίνακα $n(i,j,a,d)$ που είναι η πρόβλεψη στόλου της επόμενης ημέρας. Η κατανομή των οχημάτων στον στόλο αυτό σύμφωνα με την ισχύ φόρτισής τους, τα time slot

φόρτισης, και την ώρα (time slot) άφιξης και αναχώρησης είναι διαφορετική κάθε φορά που υπολογίζεται, λόγω της στοχαστικής συμπεριφοράς των ηλεκτρικών οχημάτων. Τα ημερησίως διανυόμενα χιλιόμετρα (km) π.χ. επιλέγονται κάθε φορά με διαφορετικό τρόπο (η κατανομή αλλάζει ανάλογα με την ημέρα και τον τύπο του οχήματος), και μάλιστα η επιλογή της τιμής είναι επίσης τυχαία και διαφορετική για κάθε όχημα. Προσδίδεται έτσι τυχαιότητα σε μεταβλητές όπως η κατανάλωση, και ο απαιτούμενος χρόνος φόρτισης. Το ίδιο συμβαίνει και με τα time slot άφιξης και αναχώρησης η επιλογή των οποίων γίνεται επίσης τυχαία ακολουθώντας μια καθορισμένη κατανομή.

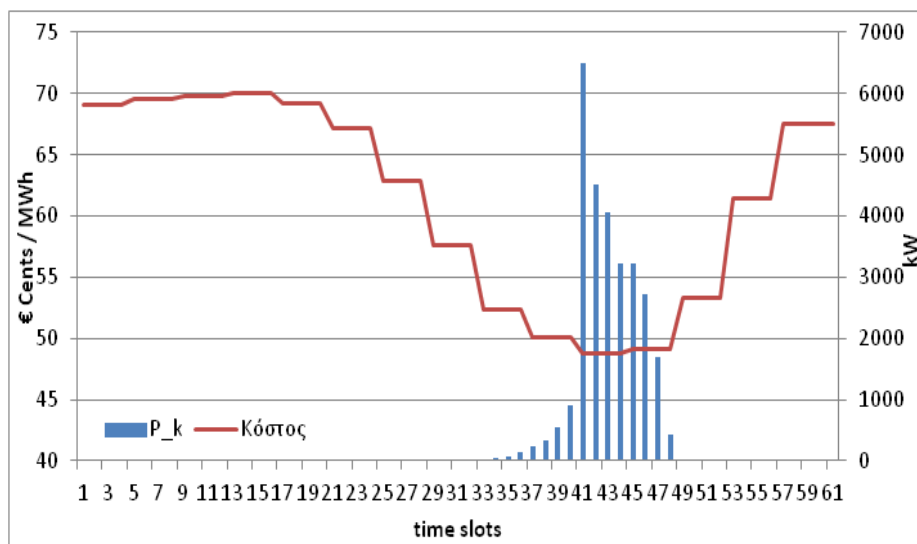
Ας υποθέσουμε τη παρακάτω χρονοσειρά κόστους ενέργειας. Σημειώνεται εδώ πως το κόστος που απεικονίζεται αφορά την ημερήσια διακύμανση της τιμής της ενέργειας και όχι μόνο το διάστημα φόρτισης. Για το διάστημα φόρτισης που μας ενδιαφέρει θα περιοριστούμε μόνο στο κόστος από τις 18:00 μέχρι τις 09:00.



Διάγραμμα 3.10 : Υποθετική καμπύλη Κόστους Ενέργειας ανά ώρα

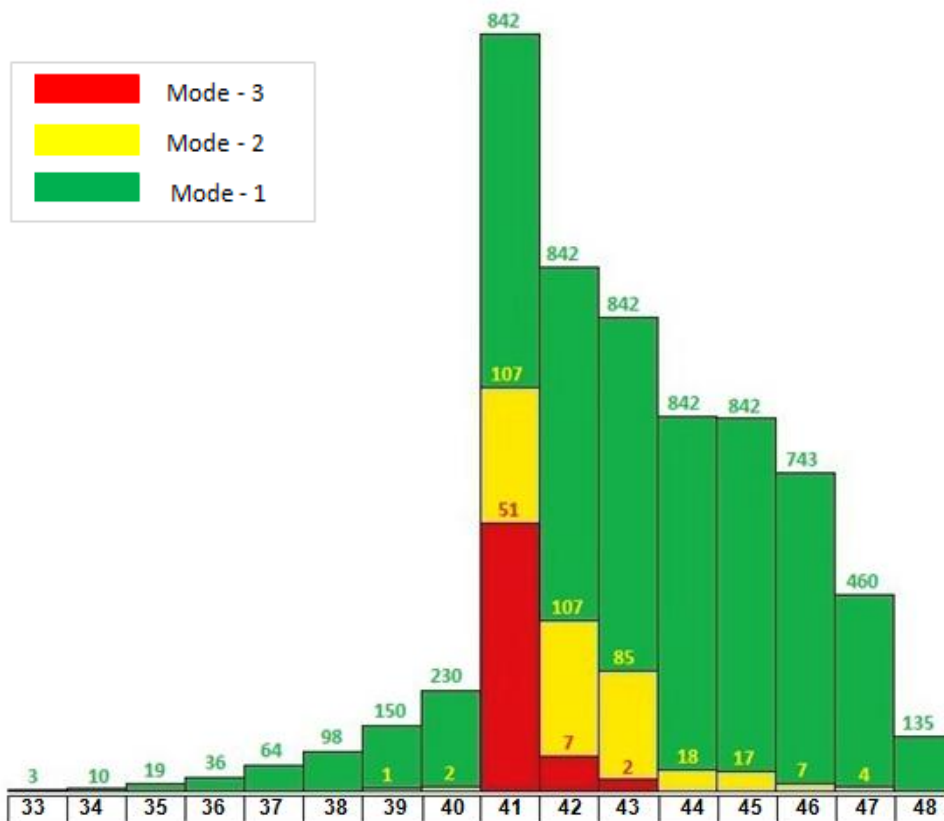
Με δεδομένη την πρόβλεψη του στόλου που έχει γίνει και την χρονοσειρά του κόστους αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας ανά time slot, διαμορφώνεται ένας πίνακας που δείχνει την ισχύ που πρέπει να αγορασθεί ανά time slot για να ικανοποιηθεί η ζήτηση του υποθετικού στόλου. Πιο αναλυτικά, τα βήματα περιγράφονται στη συνέχεια: Με την βοήθεια της συνάρτησης Ranking Function ταξινομούνται όλα τα time slot στα οποία μπορεί να φορτίσει το όχημα. Ύστερα ανάλογα με τον αριθμό των time slots που χρειάζεται να φορτίσει επιλέγονται τα time slot αυτά στα οποία τα κόστος είναι το χαμηλότερο (αναφέρονται στον Πίνακα Η). Κατόπιν η τιμή της

προβλεπόμενης προς ζήτηση ισχύος σε αυτά τα time slot αυξάνεται κατά την ισχύ φόρτισης του οχήματος (Πίνακας P_k). Έτσι σταδιακά κατασκευάζεται ο Πίνακας P_k που δείχνει ακριβώς την πρόβλεψη ζήτησης ανά time slot μέσα στην περίοδο φόρτισης. Η ζήτηση αυτή για το παράδειγμά μας φαίνεται παρακάτω :



Διάγραμμα 3.11 : Ζήτηση οχημάτων, ταξινομημένων με βάση το ελάχιστο κόστος

Παρατηρούμε πως στο φθηνότερο time slot θα ζητηθεί η μεγαλύτερη ισχύς (το κατά σειρά 41), και όσο αυξάνεται το κόστος μειώνεται η ζητούμενη ισχύς επιβεβαιώνοντας ότι ο αλγόριθμος συντελεί στην ελαχιστοποίηση του κόστους. Η πρόβλεψη εδώ έγινε για καθημερινή. Σύμφωνα με αυτήν την πρόβλεψη λοιπόν τα οχήματα θα κατανεμηθούν όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3.12. Σημειώνεται πως στο παρακάτω διάγραμμα με κόκκινο αναφερόμαστε στα οχήματα που θα φορτίσουν σε επίπεδα ισχύος Mode-3, με κίτρινο σε αυτά που φορτίζουν σε Mode-2, και με πράσινο σε αυτά που φορτίζουν σε Mode-1. Το ύψος της κάθε μπάρας είναι ανάλογο με την ισχύ που απαιτείται για να φορτίσουν τα εκάστοτε οχήματα, και τα νούμερα από κάτω αντιστοιχούν στον αύξοντα αριθμό του time slot στο οποίο γίνεται η φόρτιση.



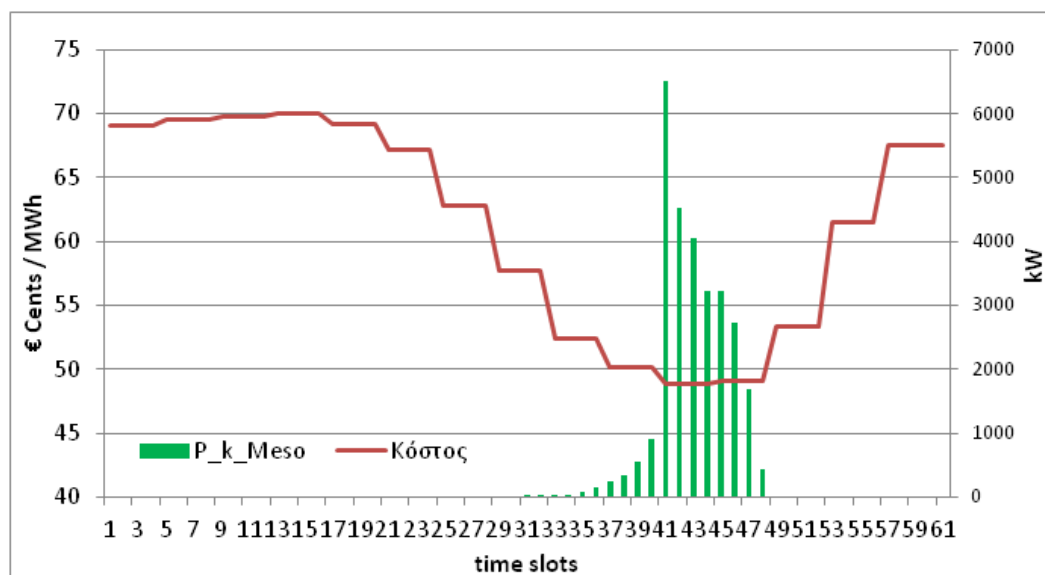
Διάγραμμα 3.12 : Γραφική απεικόνιση της κατανομής των οχημάτων στα time slots

Η κατανομή των οχημάτων όπως έχει ήδη αναφερθεί γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε το κάθε όχημα να φορτίζει στα time slots με το μικρότερο ενεργειακό κόστος. Έτσι παραδείγματος χάριν έχουμε 51 οχήματα που φορτίζουν σε Mode-3, τα 44 από τα οποία απαιτούν 1 time slots, τα 5 απαιτούν 2 time slots, και τα 2 απαιτούν 3 time slots. Συνεπώς όλα μπορούν να φορτίσουν στο πιο οικονομικό time slot (το 41) (πίνακας Vehicles), όσα δεν ολοκλήρωσαν την φόρτισή τους (δηλαδή τα 7 εξ' αυτών) θα συνεχίσουν στο αμέσως ακριβότερο (το 42) και ομοίως τα 2 που ούτε τώρα ολοκλήρωσαν την φόρτισή τους θα συνεχίσουν στο 3^ο φθηνότερο time slot (το 43). Η τοποθέτηση οχημάτων επιπέδου Mode-2 και Mode-1 σε time slot προηγούμενα του 41 οφείλεται σε 2 παράγοντες : Πρώτον η διάρκεια φόρτισης αυτών είναι τόσο μεγάλη (πχ 9 time slots) που ο αλγόριθμος θέλοντας στην φόρτισή τους να συμπεριλάβει τα 9 οικονομικότερα time slots ξεκίνησε την φόρτιση από πιο νωρίς αφού το κόστος του 49^{ου} time slot είναι μεγαλύτερο από αυτό του 40^{ου}. Οπότε το όχημα αυτό φόρτισε στα time slots (40 – 48) μιας που αυτά είναι τα φθηνότερα. Επιπροσθέτως, υπάρχουν οχήματα πχ Mode-2 (φαίνεται εύκολα από το παραπάνω διάγραμμα αυτό) που φορτίζουν στο 40^ο time slot ενώ φαινομενικά θα μπορούσαν να φορτίσουν στο 48^ο το οποίο είναι φθηνότερο από το 40^ο, και είναι ο εξής : Τα οχήματα που ο αλγόριθμος αναγκάστηκε να μην συμπεριλάβει στο 48^ο time slot αλλά

στο 40^ο είναι αυτά που αναχωρούν στο time slot 48 (d=48) και άρα προφανώς δεν μπορούν να φορτίσουν σε αυτό. Άρα ο αλγόριθμος επιλέγει τα 9 οικονομικότερα time slots που βρίσκονται μέσα στο διάστημα που το όχημα παραμένει συνδεδεμένο και μπορεί να φορτίσει.

Η αναλυτική παρουσίαση των time slot πρέπει να φορτίσει το κάθε όχημα αναφέρεται στον πίνακα Η και μας επιτρέπει να έχουμε την πλήρη εποπτεία του στόλου.

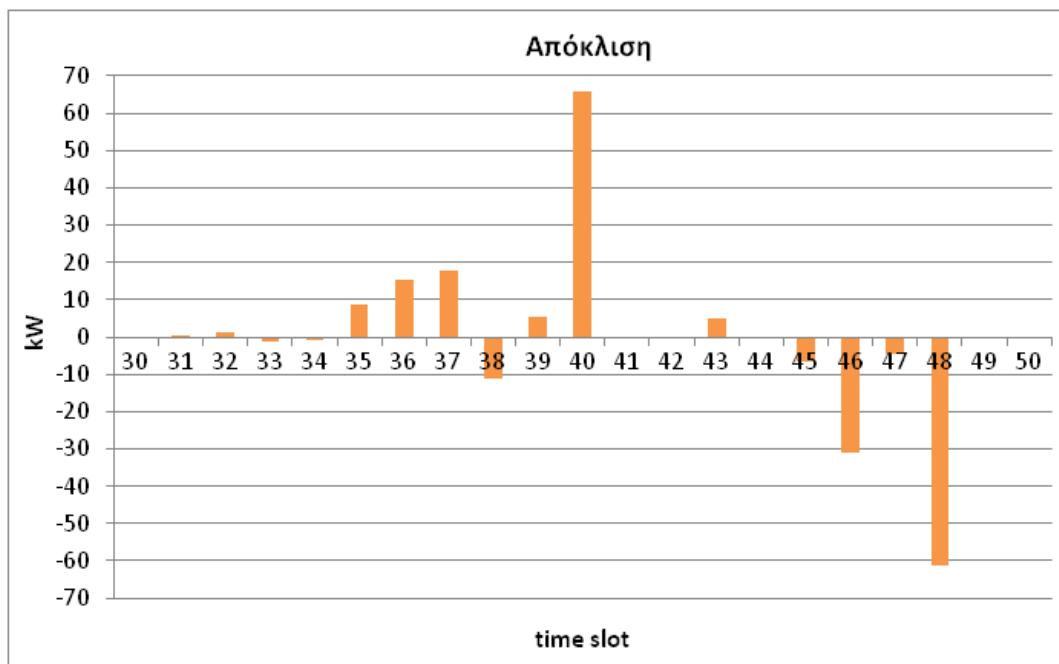
Πριν προχωρήσουμε όμως στον δεύτερο αλγόριθμο που αναλαμβάνει την διαχείριση του πραγματικού φορτίου, καλό είναι η ενέργεια που θα έχει αγοραστεί να μην βασίζεται μόνο σε μια πρόβλεψη. Έτσι υιοθετείται η μέθοδος Monte Carlo σύμφωνα με την οποία θα ληφθεί ο μέσος όρος από ένα μεγάλο αριθμό προβλέψεων, για να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα της πρόβλεψης. Αφού πήραμε αποτελέσματα μέσω 1000, 2000, 3000 και 5000 επαναλήψεων, είδαμε ότι οι τιμές της πρόβλεψης με πάνω από 2000 επαναλήψεις έχουν πολύ μικρή απόκλιση και έτσι οι 5000 επαναλήψεις θεωρήθηκαν μια αρκετά ασφαλής επιλογή. Έτσι τρέχουμε τον πρώτο αλγόριθμο 5.000 φορές, παράγοντας 5.000 καμπύλες P_k που αφορούν 5.000 πιθανούς στόλους, ο μέσος όρος των οποίων θα αποτελέσει την τελική πρόβλεψη σύμφωνα με την οποία θα αγορασθεί η ενέργεια. Το αποτέλεσμα του μέσου όρου 5000 επαναλήψεων (P_k_Meso) απεικονίζεται παρακάτω :



Διάγραμμα 3.13 : Μέσος όρος 5000 καμπυλών ζήτησης 1000 οχημάτων (P_k_Meso)

3.4.2 Αλγόριθμος 2

Ο αλγόριθμος αυτός είναι υπεύθυνος για την διαχείριση του φορτίου ενός στόλου ηλεκτρικών οχημάτων. Ένας στόλος $n(i,j,a,d)$ δίνεται ως είσοδος (στην προκειμένη περίπτωση θεωρούμε ένα τυχαίο στόλο), και ο αλγόριθμος καλείται να ικανοποιήσει αυτή την ζήτηση (P_{k_new}), σύμφωνα με τη συμφωνημένη ποσότητα ενέργειας από την day-ahead αγορά ενέργεια. Η ενέργεια έχει αγορασθεί με βάση την πρόβλεψη ζήτησης, και πιο συγκεκριμένα σύμφωνα με την καμπύλη P_{k_Meso} που ορίσθηκε παραπάνω. Για κάθε ένα όχημα το οποίο συνδέεται στο σύστημα αναγνωρίζεται το επίπεδο ισχύος φόρτισης, ο αριθμός των απαιτούμενων time slots φόρτισης και το time slot αναχώρησης. Ο αλγόριθμος καθορίζει σε ποιιά time slots πρέπει να φορτίσει το όχημα για να είναι το κόστος αγοράς της ενέργειας το ελάχιστο δυνατό, μειώνοντας παράλληλα το απόθεμα ισχύος στα συγκεκριμένα time slots κατά το επίπεδο της ισχύος που απορροφάται. Σταδιακά θα αξιοποιηθεί το μεγαλύτερο μέρος της αγορασμένης ενέργειας και θα ικανοποιηθεί η ζήτηση. Είναι όμως πιθανό η ζήτηση να μην είναι η προβλεπόμενη, αλλά σε κάποια time slots να έχω μικρότερη ζήτηση και σε κάποια άλλα μεγαλύτερη. Αυτό εξαρτάται από την ζήτηση του στόλου τον οποίο τελικά κλήθηκε να εξυπηρετήσει ο αλγόριθμος έχοντας αγοράσει ενέργεια που αντιστοιχούσε στον μέσο όρο 5000 στόλων. Το σφάλμα αυτό (η διαφορά δηλαδή $P_{k_Meso} - P_{k_real}$) για την εκδοχή του προαναφερθέντος στόλου 1000 οχημάτων (βλ. Πίνακα 3.9) απεικονίζεται γραφικά παρακάτω (εστιάζουμε στα time slots που φορτίζουν τα οχήματα).



Διάγραμμα 3.14 : Απόκλιση Αγορασμένης ισχύος από την Ζητούμενη
(Διαφορά $P_{k_Meso} - P_{k_real}$)

Στο διάγραμμα αυτό βλέπουμε ότι υπάρχουν time slot με θετικό σφάλμα και άλλα με αρνητικό. Θετικό σφάλμα σημαίνει ότι έχω περίσσεια ισχύος, δηλαδή ότι αγοράστηκε ενέργεια περισσότερη από αυτή που τελικά ζητήθηκε, και αρνητικό ότι έχω έλλειμμα, δηλαδή ότι αγοράστηκε λιγότερη. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς είναι πολύ πιθανό ο μέσος όρος να υποδεικνύει ότι π.χ. θα έλθουν 10 οχήματα και θα ζητήσουν ισχύ για 5 time slots οπότε η ισχύς να έχει αγοραστεί σύμφωνα με αυτή την υπόδειξη, και τελικά να έλθουν 11 οχήματα. Αυτόματα το 11^ο όχημα θα δημιουργήσει ένα έλλειμμα καθώς δεν θα μπορέσει να εξυπηρετηθεί στα προβλεπόμενα time slots. Είναι όμως πολύ πιθανό σε κάποια άλλα time slot να είχε αγοραστεί ισχύς για περισσότερα οχήματα από όσα τελικά ζήτησαν και να υπάρχει περίσσεια. Ο αλγόριθμος φροντίζει να τοποθετήσει το 11^ο αυτό όχημα σε αυτά τα time slots που υπάρχει περίσσεια ώστε να φορτίσει και αυτό, απορροφώντας έτσι το σφάλμα. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις που το σφάλμα δεν μπορεί να απορροφηθεί με την τακτική αυτή από τον αλγόριθμο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το εξής : Σε ένα όχημα που χρειάζεται να φορτίσει για 6 time slot, αποφασίζεται η φόρτισή του στα 5 πρώτα time slot και όταν φτάνει στο 6^ο αυτό δεν έχει ισχύ (έλλειμμα) οπότε σύμφωνα με την λογική της απορρόφησης ο αλγόριθμος θα εξετάσει όλα τα time slot μήπως κάποιο έχει περίσσεια και μπορέσει το όχημα να φορτίσει εκεί. Αν το μόνο time slot που έχει περίσσεια είναι το 3^ο κατά σειρά τότε το όχημα δεν μπορεί να φορτίσει εκεί καθώς το time slot αυτό έχει ήδη καταχωρηθεί στα time slot προς φόρτιση και δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί δεύτερη φορά. Έτσι το 6^ο time slot θα παρουσιάσει έλλειμμα και το 3^ο θα παρουσιάσει περίσσεια η οποία τελικά θα μείνει αναξιοποίητη.

Μια μέθοδος που μπορεί να ακολουθηθεί για την αντιμετώπιση αυτών των περιπτώσεων είναι να υποθεθεί ότι το σύστημα έχει την δυνατότητα να αποθηκεύει προσωρινά το περίσσειμα ισχύος και να το καταναλώνει εκεί που υπάρχει έλλειψη, ίσως με την χρήση κάποιας μπαταρίας η οποία φορτίζεται με την περίσσεια και εκφορτίζεται στο έλλειμμα. Η μπαταρία έχει την δυνατότητα να μεταφέρει περίσσεια από την μια ημέρα στην επόμενη (δηλαδή η διαδικασία της φόρτισης των οχημάτων δεν ξεκινά με άδεια μπαταρία) ή και το σύστημα μπορεί να φροντίζει ώστε η μπαταρία στην αρχή να είναι φορτισμένη κατά το ήμισυ οπότε να μπορούν να καλυφθούν τα όποια ελλείμματα προηγούνται των περισεσιών. Έτσι τα σφάλματα θα εξαιρεθούν εντελώς. Εν προκειμένω όμως στο συγκεκριμένο παράδειγμά μας δεν υιοθετήθηκε τέτοιο σύστημα οπότε όποια οχήματα δεν μπορούν να φορτίσουν πλήρως πολύ απλά φορτίζουν όσο μπορούν και ο αλγόριθμος τα χαρακτηρίζει ως

ελλιπώς φορτισμένα αναφέροντας το ποσοστό στο οποίο φόρτισαν (τα οχήματα αυτά μπορούν να φανούν και στον πίνακα Final).

Το σφάλμα φυσικά είναι διαφορετικό κάθε φορά που θεωρούμε διαφορετικό στόλο ως είσοδο γιατί παρά το γεγονός ότι ο αριθμός των οχημάτων είναι ίδιος, η άφιξη, η αναχώρηση και η κατανάλωση του κάθε οχήματος αλλάζει (όπως έχει ήδη αναφερθεί) με αποτέλεσμα οι απαιτήσεις των οχημάτων, δηλαδή η ζήτηση P_k να αλλάζει.

Έτσι για να εξηγήσουμε καλύτερα την λειτουργία του δεύτερου αλγόριθμου θα θεωρηθούν δύο στόλοι προς εξυπηρέτηση, επιλεγμένοι κατάλληλα ώστε ο ένας να παρουσιάζει πολύ μικρό σφάλμα (δηλαδή απόκλιση από την καμπύλη του μέσου όρου με βάση την οποία εξυπηρετείται) και ο άλλος αρκετά μεγάλο..

Έχοντας λοιπόν την καμπύλη του μέσου όρου 5000 στόλων η ισχύς έχει αγορασθεί, και θεωρούμε τον πρώτο στόλο 1000 οχημάτων με κατανομή την εξής :

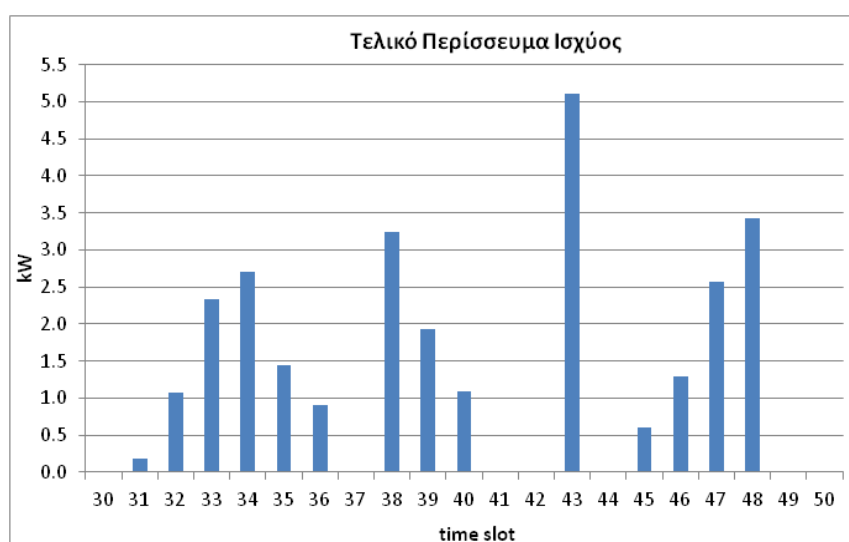
Πίνακας 3.10 : Κατανομή οχημάτων ανά τύπο και απαιτούμενων time slot φόρτισης

Vehicles			
Time-Slots	<i>Καθημερινές</i>		
	<i>Mode-1</i>	<i>Mode-2</i>	<i>Mode-3</i>
1	0	0	44
2	0	22	5
3	0	67	2
4	0	1	0
5	22	9	0
6	238	2	0
7	360	6	0
8	132	0	0
9	5	0	0
10	5	0	0
11	31	0	0
12	33	0	0
13	12	0	0
14	4	0	0
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0
20	0	0	0

Μετά την ολοκλήρωση του αλγορίθμου 2 κάποια οχήματα δεν ήταν δυνατόν να φορτιστούν στο 100% (βλ. Πίνακα 3.11) παρά το γεγονός ότι υπήρχαν time-slots με περίσσεια ισχύος όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3.15.

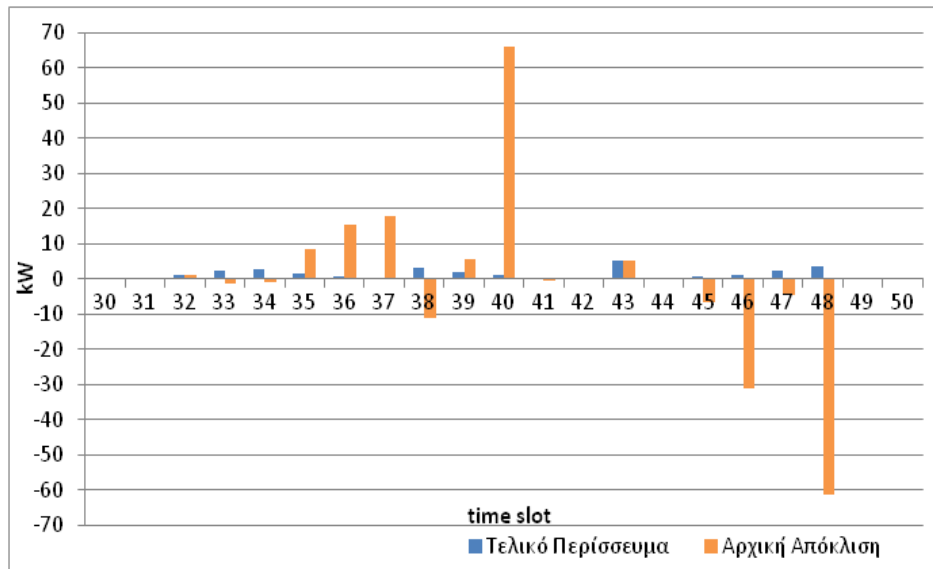
Πίνακας 3.11 : Τελική αναφορά ελλιπώς φορτισμένων οχημάτων (Πίνακας Final)

α/α Οχήματος	Επίπεδο Ισχύος Φόρτισης	Απαιτούμενα time slot φόρτισης	Time slot τελικής φόρτισης	Ποσοστό φόρτισης
171	Mode-1	13	12	92,3%
203	Mode-1	12	11	91,6%
976	Mode-1	6	5	83,3%
977	Mode-1	6	5	83,3%
978	Mode-1	6	5	83,3%
999	Mode-1	5	4	80%
1000	Mode-1	5	4	80%



Διάγραμμα 3.15 : Ισχύς που τελικά δεν μπόρεσε να αξιοποιηθεί (περισσευόμενη)

Στο διάγραμμα 3.16 παρουσιάζονται οι αποκλίσεις της ζήτησης του στόλου από την αγορασθείσα ισχύ. Η αρχική απόκλιση αναφέρεται στο σφάλμα μεταξύ της αγορασθείσας ισχύος και της ισχύος που θα απαιτηθεί από το σύνολο των οχημάτων αν αυτά καταμετρηθούν με οικονομικά βέλτιστο τρόπο χωρίς κανένα περιορισμό. Το τελικό περίσσευμα δείχνει το απόθεμα ισχύος που αγοράστηκε αλλά δεν χρησιμοποιήθηκε στην πραγματική κατανομή των οχημάτων.



Διάγραμμα 3.16 : Συγκριτική παράθεση Τελικού Περισσεύματος και Αρχικής Απόκλισης

Από το διάγραμμα 3.16, όμως, γεννώνται δύο ερωτήματα: Πρώτον, για ποιο λόγο ενώ υπάρχει ακόμα περίσσευμα ισχύος σε κάποια time slots, αυτό δεν μπορεί να αξιοποιηθεί και μένουν οχήματα ελλιπώς φορτισμένα και δεύτερον με ποιον τρόπο μειώνονται τόσο πολύ οι αποκλίσεις, και μάλιστα σε ορισμένες περιπτώσεις εκεί που υπήρχε έλλειμμα τελικά υπάρχει περίσσευμα.

Όσον αφορά το πρώτο ερώτημα, αυτό συμβαίνει όταν η απομένουσα ισχύς είναι λιγότερη από την ελάχιστη απαιτούμενη ισχύ ανά σταθμό φόρτισης (η φόρτιση είτε γίνεται στη μέγιστη επιτρεπτή τιμή από το τύπο σταθμού είτε είναι μηδενική) και δεν φτάνει για τη φόρτιση ενός οχήματος. Αυτό συμβαίνει σε όλες τις περιπτώσεις εκτός από αυτήν του time slot 43. Στη περίπτωση αυτή, τα οχήματα που φορτίστηκαν ελλιπώς δεν μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν το time slot 43 γιατί το time-slot αυτό έχει ήδη χρησιμοποιηθεί από αυτά τα οχήματα. Αυτό μπορεί εύκολα να αποδειχθεί ελέγχοντας τον πίνακα που αναφέρει σε ποιο time slot φόρτισε το κάθε όχημα. Απόσπασμα του πίνακα αυτού για τα ελλιπώς φορτισμένα οχήματα παρουσιάζεται παρακάτω:

Πίνακας 3.12 : Απόσπασμα Πίνακα φόρτισης οχημάτων (H_real)

α/α Οχήματος	Time slots στα οποία φόρτισαν τα ελλιπώς φορτισμένα οχήματα												
	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	
171											43		
203										43	44	45	
976			43	44	45								
977			43	44	45								

978	41	42	43	44	45							
999	41	42	43	44								
1000	41	42	43	44								

Όσον αφορά το δεύτερο ερώτημα, ο αλγόριθμος του dispatch βλέποντας το φορτίο που έχει να ικανοποιήσει με ένα δεδομένο (αγορασμένο) ποσό ισχύος επαναυπολογίζει τα time slots στα οποία πρέπει να φορτίσει το κάθε όχημα ώστε να καλυφθεί όσο το δυνατό μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης. Ας πάρουμε για παράδειγμα το time slot 34. Στο time slot αυτό αρχικά υπάρχει έλλειμμα δηλαδή έχει αγορασθεί ισχύς μικρότερη από αυτήν που ζητείται αρχικά από τον στόλο. Έστω ότι έχει αγορασθεί ισχύς ίση με 20kW. Αν υποθέσουμε ότι 6 οχήματα με φόρτιση Mode-1 πρέπει να φορτίσουν στο time slot 34 τότε αυτά θα ζητήσουν ισχύ $6 \times 3,6\text{kW} = 21,6\text{kW}$, που σε πρώτη φάση θα δώσει έλλειμμα $20 - 21,6 = -1,6\text{kW}$. Ο αλγόριθμος βλέποντας το έλλειμμα αυτό θα αλλάξει την κατανομή των οχημάτων στα time slots έτσι ώστε το έκτο όχημα να φορτίσει όπου αλλού υπάρχει δυνατότητα. Άρα στο 34^ο time slot τελικά θα ικανοποιηθούν 5 οχήματα δηλαδή ισχύ $5 \times 3,6 = 18\text{kW}$ που θα μας αφήσει ένα τελικό περίσσειμα 2kW. Αυτή η ισχύς όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως δεν μπορεί να αξιοποιηθεί από κανένα όχημα. Έτσι ένα έλλειμμα που εμφανίζεται στην αρχική απόκλιση, μπορεί να μετατραπεί σε περίσσειμα λόγω της τροποποιημένης τελικής κατανομής. Με την ίδια λογική μειώνονται και τα αρχικά θετικά σφάλματα που δηλώνουν πως έχει αγορασθεί περισσότερη ισχύς από αυτήν που αρχικά ζητείται και για τα οποία ο αλγόριθμος μεταφέρει εκεί οχήματα αυξάνοντας την ζήτηση.

Οι περιπτώσεις μετακίνησης για τον στόλο των 1000 οχημάτων που έχουμε θεωρήσει είναι αρκετές και δεν θα παρουσιαστούν όλες εδώ, αλλά θα δειχθούν ενδεικτικά μερικές. Συγκρίνοντας την αρχική πρόβλεψη φόρτισης του πίνακα 3.15 με την τελική φόρτιση του Πίνακα 3.16, μπορούμε να δούμε ότι για παράδειγμα το όχημα με αριθμό 346 ιδανικά θα έπρεπε να φορτίσει στα time slots 41 - 48 αλλά λόγω του ότι η αγορασμένη ισχύς δεν επαρκούσε στο time slot 48 (προφανώς γιατί κάποιο/-α προηγούμενα οχήματα λόγω αυξημένης κατανάλωσης ζήτησαν παραπάνω time slots από τα υπολογισμένα και ο αλγόριθμος στην προσπάθειά του να τα εξυπηρετήσει άντλησε ισχύ από το time slot 48) ο αλγόριθμος επέλεξε το αμέσως ακριβότερο time slot που είχε ακόμα ισχύ το οποίο είναι το 40. Έτσι η φόρτιση του οχήματος ξεκινά και τελειώνει νωρίτερα (το όχημα φορτίζει τελικά στα time slots 40 – 47) και το όχημα φορτίζεται πλήρως. Το ίδιο συμβαίνει και με όλα τα επόμενα οχήματα που αρχικά υπολογίσθηκε πως θα φορτίσουν στο time slot 48 όπως μπορεί να φανεί και στο παρακάτω απόσπασμα από τους δύο πίνακες :

Πίνακας 3.13 : Αρχική πρόβλεψη φόρτισης στα time slots

α/α Οχήματος	Αρχική πρόβλεψη φόρτισης στα time slots							
346	41	42	43	44	45	46	47	48
347	41	42	43	44	45	46	47	48
348	41	42	43	44	45	46	47	48
349	41	42	43	44	45	46	47	48
350	41	42	43	44	45	46	47	48
351	41	42	43	44	45	46	47	48
352	41	42	43	44	45	46	47	48
353	41	42	43	44	45	46	47	48

Πίνακας 3.14 : Τελική φόρτιση των οχημάτων στα time slots

α/α Οχήματος	Τελική φόρτιση των οχημάτων στα time slots							
346	40	41	42	43	44	45	46	47
347	40	41	42	43	44	45	46	47
348	40	41	42	43	44	45	46	47
349	40	41	42	43	44	45	46	47
350	40	41	42	43	44	45	46	47
351	40	41	42	43	44	45	46	47
352	40	41	42	43	44	45	46	47
353	40	41	42	43	44	45	46	47

Αυτό που επίσης έχει ενδιαφέρον είναι να εξεταστεί εάν με την χρήση κάποιου αποθηκευτικού μέσου μπορεί η ισχύς που περισσεύει να αποθηκευτεί και να αποδοθεί σε κάποιο άλλο time slot έτσι ώστε αυτά τα οχήματα που μένουν αφόρτιστα να μπορούν να φορτίσουν. Έτσι για το συγκεκριμένο παράδειγμα, έχουμε τον εξής πίνακα :

Πίνακας 3.15 : Απόσπασμα Πίνακα φόρτισης οχημάτων (H_real)

α/α Οχήματος	Time slot στα οποία φόρτισε τελικά												Time slot αναχώρησης
171	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46
203	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45		46
976	41	42	43	44	45								51
977	41	42	43	44	45								51
978	41	42	43	44	45								48
999	41	42	43	44									46
1000	41	42	43	44									48

Το όχημα 171 βλέπουμε ότι φορτίζει σε όλα τα time slots από το 34 μέχρι και το 45, μετά από το οποίο αναχωρεί. Άρα τα μόνα time slots που θα μπορούσε να φορτίσει το συγκεκριμένο όχημα είναι αυτά που βρίσκονται πριν από το 34°. Θεωρώντας ότι μπορούμε να αποθηκεύσουμε κάπου την περισσευούμενη ισχύ, μέχρι το 32° time slot θα είχαμε αποθηκεύσει 1,26kW (ο αριθμός προκύπτει αθροίζοντας τις στήλες του Διαγράμματος 3.15 - Τελικό Περίσσευμα Ισχύος μέχρι το time slot 32). Η ισχύς αυτή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στο time slot 33 έτσι ώστε η φόρτιση του οχήματος 171 να παραταθεί κατά ένα time slot και έτσι να φορτίσει πλήρως. Επειδή όμως η αποθηκευμένη ισχύς 1,26kW είναι μικρότερη από το ελάχιστο επίπεδο φόρτισης (Mode-1 : 3,6kW) , η ισχύς δεν μπορεί να αξιοποιηθεί και έτσι το όχημα 171 θα παραμείνει ελλιπώς φορτισμένο. Στη περίπτωση αυτή το αποθηκευτικό μέσο δεν έχει προλάβει να αποθηκεύσει σημαντική ποσότητα ισχύος από το περίσσευμα και καλείται να αποδώσει ισχύ που δεν έχει. Το επόμενο όχημα (203) φορτίζει στα time slots 35 – 45 και άρα μπορεί να φορτίσει και στο time slot 34. Μιας που η μέχρι τώρα αποθηκευμένη ισχύς δεν καταναλώθηκε, η περισσευούμενη ισχύς του time slot 33 έρχεται να προστεθεί σε αυτήν και έτσι έχουμε τώρα 3,6kW στο αποθηκευτικό μέσο που επαρκούν για την φόρτιση ενός οχήματος σε Mode-1, και μπορούν να αποδοθούν στο time slot 34. Το όχημα 203 θα μπορέσει να φορτίσει και στο time slot 34, απορροφώντας την αποθηκευμένη ισχύ των 3,6kW και έτσι θα φορτίσει πλήρως. Από τα επόμενα οχήματα που δεν φορτίζουν πλήρως αυτό που θα κάνει πρώτο χρήση του αποθηκευτικού μέσου είναι αυτό που αναχωρεί νωρίτερα. Το όχημα αυτό είναι το 999 το οποίο ενώ φορτίζει στο time slot 44, αναχωρεί αμέσως μετά το πέρας του time slot 45 οπότε το time slot αυτό είναι το τελευταίο διαθέσιμο για να φορτίσει πλήρως. Η ισχύς που έχει απομείνει στο αποθηκευτικό μέσο μέχρι το time slot 44 είναι 16,4kW. Επομένως το όχημα 999 φορτίζει στο time slot 45 και

ολοκληρώνει επιτυχώς την φόρτισή του. Τα οχήματα που αναχωρούν μετά το 999 είναι τα 978 και 1000 τα οποία αναχωρούν μετά από το time slot 47. Το όχημα 1000 φορτίζει μέχρι το time slot 44 οπότε το ιδανικό θα ήταν να συνεχίσει την φόρτισή του και στο time slot 45. Όπως και για το όχημα 999, η ισχύς στο αποθηκευτικό μέσο μέχρι το time slot 44 είναι αρκετή και έτσι εκτός από το όχημα 999, στο time slot 45 θα φορτίσει και το όχημα 1000. Έτσι η συνολική ισχύς που θα αντληθεί από το αποθηκευτικό μέσο σε αυτό το time slot είναι $7,2\text{kW}$. Η απομένουσα ισχύς στο αποθηκευτικό μέσο είναι τώρα $16,4 - 7,2 = 9,2\text{kW}$. Το όχημα 978 φορτίζει στο time slot 45 και έτσι δεν μπορεί να το ξαναχρησιμοποιήσει. Συνεπώς πρέπει να φορτίσει στο time slot 46. Τα αποθέματα ισχύος στο αποθηκευτικό μέσο επιτρέπουν την φόρτιση μέχρι 2 οχημάτων σε αυτό το time slot οπότε το 978 καθώς και ένα από τα 976 – 977 (έστω το 976) μπορούν να φορτίσουν εκεί αντλώντας ισχύ ίση με $7,2\text{kW}$. Το τελευταίο όχημα είναι το 977 το οποίο αναχωρεί μετά από το time slot 50. Η φόρτισή του σταματά στο time slot 45 και ιδανικά θα θέλαμε να φορτίσει στο time slot 46. Αυτό όμως δεν είναι δυνατό και έτσι το όχημα 977 περιμένει μήπως μετά το πέρας του time slot 46 η ισχύς στο αποθηκευτικό μέσο είναι τέτοια που να επιτρέπει την φόρτισή του στο time slot 47. Πράγματι, μετά το πέρας του time slot 46 η ισχύς του αποθηκευτικού μέσου γίνεται $3,91\text{kW}$ και μπορεί να αποδοθεί στο time slot 47 στο όχημα 977. Έτσι και αυτό το όχημα φορτίζει πλήρως. Η διαδικασία αυτή μπορεί να περιγραφεται και στον παρακάτω πίνακα

Πίνακας 3.16 : Αξιοποίηση περίσσειας ισχύος με χρήση ενδιάμεσου αποθηκευτικού μέσου

Time slot	Τελικό περίσσειμα ισχύος (kW)	Ισχύς του αποθηκευτικού μέσου (kW)	Ισχύς που αντλείται (kW)	Όχημα που φορτίζει	Time slot	Τελικό περίσσειμα ισχύος (kW)	Ισχύς του αποθηκευτικού μέσου (kW)	Ισχύς που αντλείται (kW)	Όχημα που φορτίζει
30	0,00				41	0,00			
		0,00					11,30		
31	0,18				42	0,00			
		0,18					11,30		
32	1,08				43	5,10			
		1,26					16,40		
33	2,34				44	0,00			
		3,60					16,40		
34	2,70	0	-3,60	203	45	0,61	9,20	-7,20	999 1000
		2,70					9,81		
35	1,44				46	1,30	2,61	-7,20	976 978
		4,14					3,91		
36	0,90				47	2,57	0,31	-3,60	977
		5,04					2,88		
37	0,00				48	3,43			
		5,04					6,31		
38	3,24				49	0,00			
		8,28					6,31		
39	1,93				50	0,00			
		10,21					6,31		
40	1,09				51	0,00			
		11,30							



Η συνολική ισχύς που περισσεύει χωρίς την χρήση του αποθηκευτικού μέσου είναι 27,91kW , και στην περίπτωση αυτή 7 οχήματα Mode-1 δεν φορτίζονται πλήρως

δημιουργώντας ένα έλλειμμα $7 \times 3,6 = 25,2\text{kW}$. Με την χρήση ενός αποθηκευτικού μέσου που φορτίζεται αποκλειστικά και μόνο από τις περισσείες εκείνης της ημέρας είδαμε πως μπορούν να καλυφθούν οι 6 από τις 7 περιπτώσεις ελλιπούς φόρτισης οπότε τώρα η ισχύς που θα περισσέψει είναι $6,31\text{kW}$ και θα χαθούν μόνο $3,6\text{kW}$. Στην περίπτωση μάλιστα που το αποθηκευτικό μας μέσο δεν ήταν άδειο στην αρχή της διαδικασίας αλλά είχε κάποιο περίσσειμα από την προηγούμενη ημέρα (πράγμα εξαιρετικά πιθανό), τότε θα μπορούσε να καλυφθεί και η περίπτωση του οχήματος 171 (που ζήτησε $3,6\text{kW}$ στο time slot 33 και υπήρχαν διαθέσιμα μόνο $1,26\text{kW}$ από τις προηγούμενες περισσείες) και έτσι θα φορτιζόνταν πλήρως όλα τα οχήματα αφήνοντας ένα περίσσειμα $2,71\text{kW}$. Το ποσό αυτό της ισχύος σε σχέση με την συνολική ισχύ που αγοράστηκε η οποία είναι $28.699,51\text{kW}$ (προκύπτει από την άθροιση των τιμών του πίνακα P_k_Meso) είναι πολύ μικρό της τάξης του $0,01\%$. Στην περίπτωση που δεν είχαμε το αποθηκευτικό μέσο η ισχύς που θα περίσσειε θα ήταν $27,91\text{kW}$ δηλαδή ένα σφάλμα της τάξης του $0,1\%$, δηλαδή περίπου δεκαπλάσιο από το προηγούμενο αλλά και πάλι αρκετά μικρό.

Στην περίπτωση αυτή θα έχω και έλλειμμα δηλαδή υπάρχουν οχήματα που μένουν ελλιπώς φορτισμένα η ισχύς του οποίου είναι $25,2\text{kW}$. Το ποσοστιαίο σφάλμα πρόβλεψης του ελλείμματος επί της ζητούμενης ισχύος είναι $-0,088\%$ που είναι επίσης πολύ μικρό.

Είπαμε όμως πως ο στόλος που μελετήθηκε ήταν κατάλληλα επιλεγμένος για να παρουσιάσει μικρό σφάλμα. Τι γίνεται όταν λόγω της τυχαιότητας των μεταβλητών το σφάλμα της πρόβλεψης είναι μεγαλύτερο; Η απάντηση σε αυτά το ερώτημα ακολουθεί παρακάτω όπου τώρα με την ίδια αγορασμένη ισχύ ο αλγόριθμος του dispatch καλείται να φορτίσει έναν στόλο με μεγαλύτερες καταναλώσεις και άρα μεγαλύτερες απαιτήσεις σε ενέργεια.

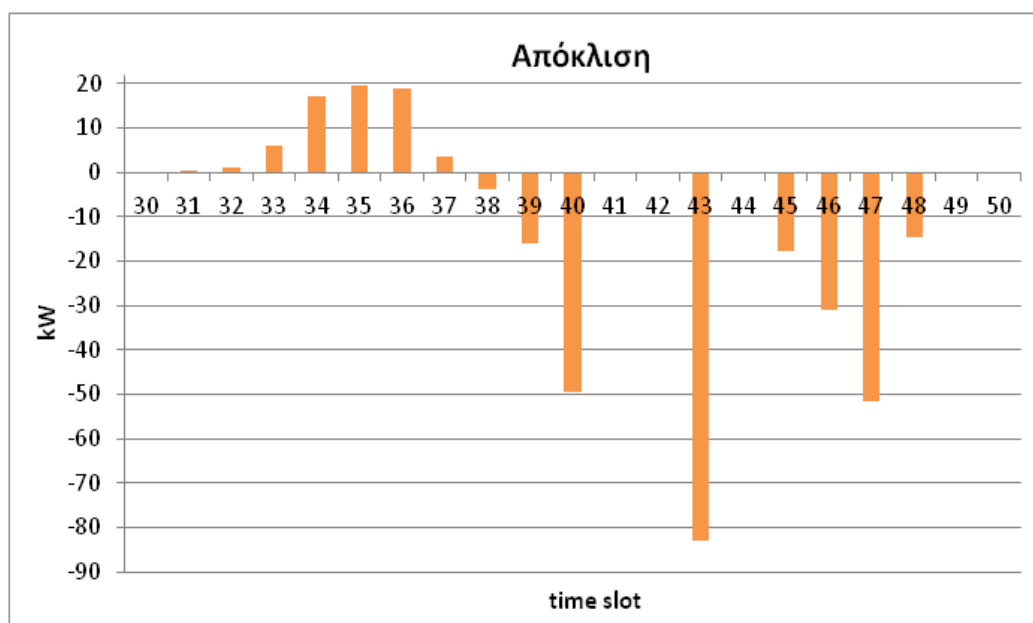
Έτσι θεωρούμε τον στόλο με την παρακάτω κατανομή που αποτελεί μια τέτοια περίπτωση :

Πίνακας 3.17 : Κατανομή οχημάτων ανά τύπο και απαιτούμενων time slot φόρτισης

Vehicles			
	Καθημερινές		
	Mode-1	Mode-2	Mode-3
1	0	0	44
2	0	14	5
3	0	75	2
4	0	0	0
5	19	10	0

6	207	0	0
7	419	8	0
8	107	0	0
9	5	0	0
10	1	0	0
11	24	0	0
12	45	0	0
13	14	0	0
14	1	0	0
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0
20	0	0	0

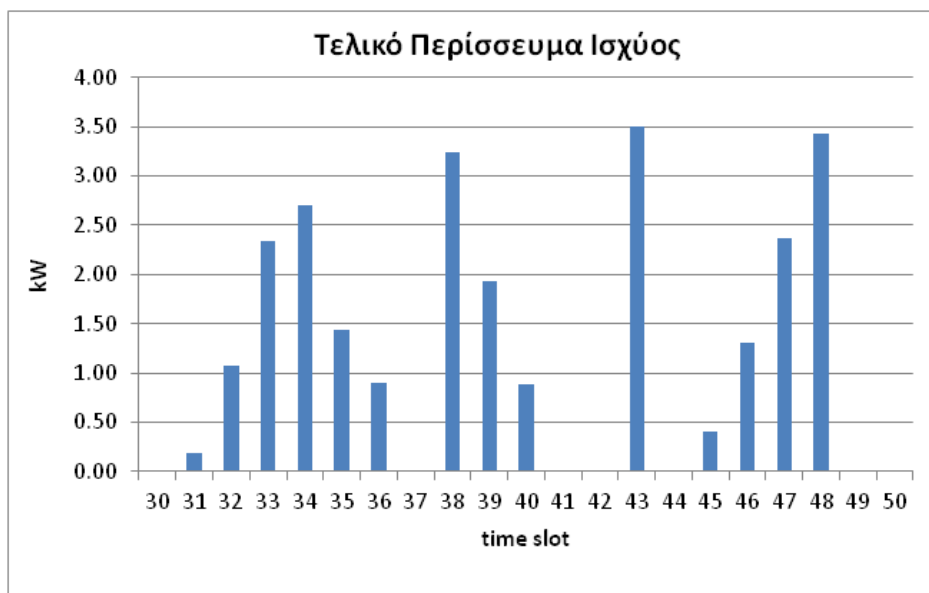
Η συνολική ζήτηση του στόλου αυτού είναι 28.900,6kW. Η αγορασμένη ισχύς είναι 28.699,51kW όπως είδαμε και παραπάνω, και έτσι εκ των πραγμάτων θα έχουμε μεγάλο έλλειμμα αφού ζητείται ισχύς (περίπου 200kW) που δεν έχει αγορασθεί. Η απόκλιση της ζήτησης του στόλου αυτού από την αγορασμένη ισχύ φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα :



Διάγραμμα 3.17 : Απόκλιση Αγορασμένης ισχύος από την Ζητούμενη ($P_{k_Meso} - P_{k_real}$)

Τα αποτελέσματα από την εκτέλεση του αλγορίθμου 2 (dispatch) δείχνουν ότι αρκετά οχήματα έμειναν ελλιπώς φορτισμένα (βλ. Πίνακας 3.18). Τα οχήματα που

μένουν ελλιπώς φορτισμένα είναι πολύ περισσότερα (53 για την ακρίβεια) και γι' αυτό ευθύνεται η αυξημένη ζήτηση που είναι μεγαλύτερη από την προβλεπόμενη. Το τελικό περίσσευμα ισχύος παρουσιάζεται στο διάγραμμα 3.18.



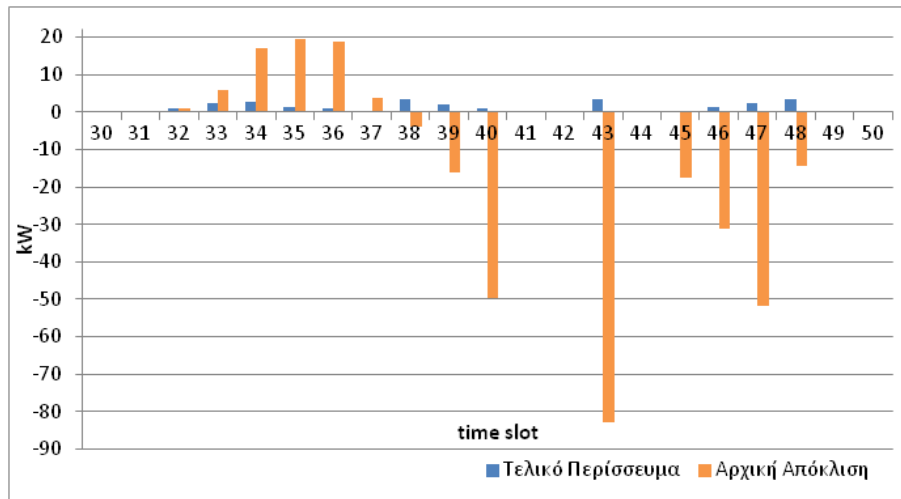
Διάγραμμα 3.18 : Ισχύς που τελικά δεν μπόρεσε να αξιοποιηθεί (περισσευόμενη)

Πίνακας 3.18 : Τελική Αναφορά Ελλιπώς φορτισμένων οχημάτων (Final)

α/α Οχήματος	Επίπεδο Ισχύος Φόρτισης	Απαιτούμενα time slot φόρτισης	Time slot φόρτισης που τελικά δόθηκαν	Ποσοστό φόρτισης
772	Mode-1	7	6	85,7%
773	Mode-1	7	6	85,7%
774	Mode-1	7	6	85,7%
788	Mode-1	6	5	83,3%
789	Mode-1	6	5	83,3%
797	Mode-1	6	5	83,3%
798	Mode-1	6	5	83,3%
799	Mode-1	6	5	83,3%
809	Mode-1	6	5	83,3%
823	Mode-1	6	5	83,3%
824	Mode-1	6	5	83,3%
837	Mode-1	6	5	83,3%
838	Mode-1	6	5	83,3%
839	Mode-1	6	5	83,3%
849	Mode-1	6	5	83,3%
873	Mode-1	6	5	83,3%
874	Mode-1	6	5	83,3%
895	Mode-1	6	5	83,3%
896	Mode-1	6	5	83,3%
931	Mode-1	6	5	83,3%

932	Mode-1	6	5	83,3%
933	Mode-1	6	5	83,3%
953	Mode-1	6	5	83,3%
954	Mode-1	6	5	83,3%
961	Mode-1	6	5	83,3%
973	Mode-1	6	5	83,3%
974	Mode-1	6	5	83,3%
975	Mode-1	6	5	83,3%
976	Mode-1	6	5	83,3%
977	Mode-1	6	4	66,7%
978	Mode-1	6	4	66,7%
979	Mode-1	6	4	66,7%
980	Mode-1	6	4	66,7%
981	Mode-1	6	4	66,7%
982	Mode-1	5	4	80%
983	Mode-1	5	4	80%
984	Mode-1	5	4	80%
985	Mode-1	5	4	80%
986	Mode-1	5	4	80%
987	Mode-1	5	4	80%
988	Mode-1	5	4	80%
989	Mode-1	5	4	80%
990	Mode-1	5	4	80%
991	Mode-1	5	4	80%
992	Mode-1	5	4	80%
993	Mode-1	5	4	80%
994	Mode-1	5	4	80%
995	Mode-1	5	4	80%
996	Mode-1	5	3	60%
997	Mode-1	5	3	60%
998	Mode-1	5	3	60%
999	Mode-1	5	3	60%
1000	Mode-1	5	3	60%

Στο διάγραμμα 3.19 παρουσιάζονται οι αποκλίσεις της ζήτησης του στόλου από την αγορασθείσα ισχύ. Η αρχική απόκλιση αναφέρεται στο σφάλμα μεταξύ της αγορασθείσας ισχύος και της ισχύος που θα απαιτηθεί από το σύνολο των οχημάτων αν αυτά καταμετρηθούν με οικονομικά βέλτιστο τρόπο χωρίς κανένα περιορισμό. Το τελικό περίσσειμα δείχνει το απόθεμα ισχύος που αγοράστηκε αλλά δεν χρησιμοποιήθηκε στην πραγματική κατανομή των οχημάτων. Η περισσευούμενη ισχύς σε παράθεση με την αρχική απόκλιση εμφανίζεται στο παρακάτω διάγραμμα :



Διάγραμμα 3.19 : Συγκριτική παράθεση Τελικού Περισσεύματος και Αρχικής Απόκλισης

Βλέπουμε ότι η λειτουργία της απορρόφησης του αλγορίθμου επέτρεψε την αξιοποίηση κάποιων θετικών αποκλίσεων έτσι ώστε να εξυπηρετηθούν όσο το δυνατό περισσότερα οχήματα. Το έλλειμμα που προκύπτει αθροίζοντας την ισχύ που ζήτησαν τα 53 οχήματα αλλά τελικά δεν πήραν είναι 226,8kW . Χωρίς την χρήση κάποιου αποθηκευτικού μέσου το σφάλμα πρόβλεψης είναι -0,78%. Με την χρήση κάποιου αποθηκευτικού μέσου μπορούν να αξιοποιηθούν και αυτά τα μικρά ποσά ισχύος που περισσεύουν και έτσι το έλλειμμα αυτό μπορεί να μειωθεί κατά 25,71kW, άρα το τελικό σφάλμα αγοράς θα είναι -0.7% Βλέπουμε δηλαδή πως και σε περίπτωση που η πρόβλεψη παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις από τη πραγματική ζήτηση, το συνολικό σφάλμα πρόβλεψης δεν ξεπερνά το 1%, οπότε ικανοποιείται σε κάθε περίπτωση το 99% της συνολικής ζήτησης.

Μια ακόμα μέθοδος που οδηγεί σε βελτίωση της πρόβλεψης και άρα στην μείωση των σφαλμάτων είναι η τροποποίηση του μέσου όρου με βάση τον οποίο αγοράζεται η ισχύς. Η τροποποίηση αυτή γίνεται ως εξής : Γνωρίζοντας κατά μέσο όρο τις καταναλώσεις των οχημάτων μπορούμε να παρατηρήσουμε πως (κατά προσέγγιση πάντα) τα οχήματα Mode-3 φορτίζουν το πολύ για 3 time slot ενώ τα οχήματα Mode-2 χρειάζονται το πολύ 8 time slots. Αυτό σημαίνει ότι αν όλα τα οχήματα φορτίζουν σε 15 time slots τότε στα 3 οικονομικότερα έχουν φορτίσει τα Mode-3, στα 8 οικονομικότερα τα Mode-2 και στα υπόλοιπα 7 φορτίζουν μόνο οχήματα Mode-1. Αυτό μας δίνει μια σημαντική πληροφορία για την ισχύ που πρέπει να αγορασθεί, καθώς αφού δεν προβλέπεται η φόρτιση άλλων οχημάτων πλην των Mode-1 σε κάποια time slot, μπορούμε να απαιτήσουμε η ισχύς που θα αγορασθεί στα time slot αυτά να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της ισχύος που θα τραβήξει ένα τέτοιο όχημα, δηλαδή του 3,6kW. Αν ο μέσος όρος από 5000 επαναλήψεις υποδεικνύει ότι στο 10^ο

ακριβότερο time slot η ισχύς που πρέπει να αγορασθεί είναι 40kW, τότε εμείς γνωρίζοντας ότι στο 10^ο ακριβότερο time slot θα φορτίσουν μόνο τα οχήματα που απαιτούν φόρτιση διάρκειας 10 time slot και άνω, και γνωρίζοντας επίσης ότι τέτοια οχήματα φορτίζουν μόνο σε Mode-1, μπορούμε να καταλάβουμε ότι από αυτά τα 40kW θα μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν μόνο τα 39,6kW καθ' ότι $11 \times 3,6kW = 39,6kW$. Άρα αυτά τα παραπάνω 0,4kW που θα αγορασθούν δεν επαρκούν για να καλύψουν τις ελάχιστες απαιτήσεις ενός οχήματος, συνεπώς είναι σφάλμα του μέσου όρου που πρέπει να εξαλειφθεί. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση που η πρόβλεψη του μέσου όρου για το ίδιο time slot ήταν 42kW. Τώρα τα kW της απόκλισης είναι 2,4 πράγμα που σημαίνει ότι η ισχύς που πρέπει να αγορασθεί είναι 43,2kW έτσι ώστε να επαρκεί για 12 οχήματα. Ακολουθώντας την λογική αυτή ο μέσος όρος μπορεί να αλλάξει για κάποια time slots, έτσι για την περίπτωση του πρώτου στόλου του παραδείγματος τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Πίνακα 3.19 και στο διάγραμμα 3.20 :

Πίνακας 3.19 : Τελική αναφορά ελλιπώς φορτισμένων οχημάτων (Πίνακας Final) μετά την τροποποίηση του Μέσου Όρου

α/α Οχήματος	Επίπεδο Ισχύος Φόρτισης	Απαιτούμενα time slot φόρτισης	Time slot φόρτισης που τελικά δόθηκαν	Ποσοστό φόρτισης
977	Mode-1	6	5	83,3%
978	Mode-1	6	5	83,3%
999	Mode-1	5	4	80%
1000	Mode-1	5	4	80%



Διάγραμμα 3.20 : Ισχύς που τελικά δεν μπόρεσε να αξιοποιηθεί (περισσευόμενη) μετά από την τροποποίηση του Μέσου Όρου

Τα αποτελέσματα αυτά σε παράθεση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα χωρίς την τροποποίηση του μέσου όρου που παρουσιάστηκαν νωρίτερα στο κεφάλαιο φαίνονται στο Πίνακα 3.20. Στη περίπτωση αυτή δεν έχει θεωρηθεί η δυνατότητα αποθήκευσης.

Πίνακας 3.20 : Συγκριτική παράθεση αποτελεσμάτων πριν και μετά την τροποποίηση του Μέσου Όρου για τον πρώτο στόλο του παραδείγματος

Χωρίς τροποποίηση Μέσου Όρου



Με τροποποίηση Μέσου Όρου



Οχήματα που φόρτισαν ελλιπώς	
α/α Οχήματος	Ποσοστό Φόρτισης
171	92,3%
203	91,6%
976	83,3%
977	83,3%
978	83,3%
999	80%
1000	80%

Οχήματα που φόρτισαν ελλιπώς	
α/α Οχήματος	Ποσοστό Φόρτισης
977	83,3%
978	83,3%
999	80%
1000	80%

Συνολικό έλλειμμα : 25,2 kW
Συνολικό περίσσειμα : 27,91 kW

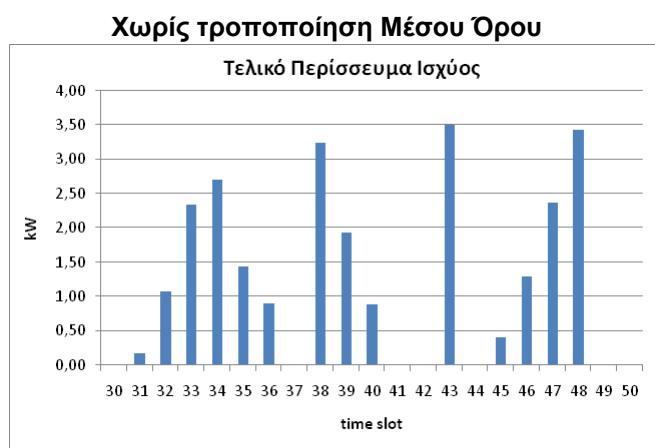
Συνολικό έλλειμμα : 14,4 kW
Συνολικό περίσσειμα : 16,18 kW

Βλέπουμε λοιπόν πως η πρόβλεψη βελτιώνεται και μπορούν να ικανοποιηθούν τα οχήματα 171, 203, 976 που δεν μπορούσαν να φορτίσουν πλήρως πριν. Η ισχύς που θα έπρεπε να καλυφθεί από κάποιο αποθηκευτικό μέσο προκειμένου να φορτίσουν όλα τα οχήματα ήταν στην πρώτη περίπτωση 50,4kW (φόρτιση και εκφόρτιση), ενώ στην δεύτερη περίπτωση είναι 28,8kW. Στην ουσία δηλαδή

μειώνεται η χρήση του αποθηκευτικού μέσου συμβάλλοντας στην επιμήκυνση της διάρκειας ζωής του.

Όταν ακολουθηθεί η ίδια μέθοδος για τον δεύτερο στόλο που εξετάστηκε έγινε δυνατή η φόρτιση τριών παραπάνω οχημάτων όπως προκύπτει από τον Πίνακα 3.21.

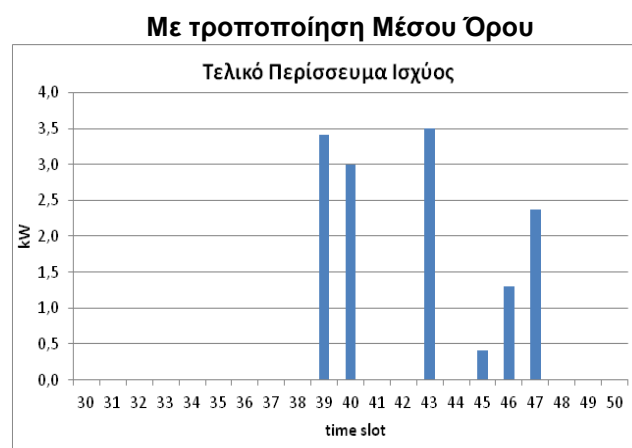
Πίνακας 3.21 : Συγκριτική παράθεση αποτελεσμάτων πριν και μετά την τροποποίηση του Μέσου Όρου για τον δεύτερο στόλο του παραδείγματος



Οχήματα που φόρτισαν ελλιπώς : 53

Συνολικό έλλειμμα : 226,8 kW

Συνολικό περίσσευμα : 25,71 kW



Οχήματα που φόρτισαν ελλιπώς : 50

Συνολικό έλλειμμα : 216 kW

Συνολικό περίσσευμα : 13,98 kW

3.5 Μοντέλο Ελέγχου Φόρτισης με Περιορισμούς Δικτύου

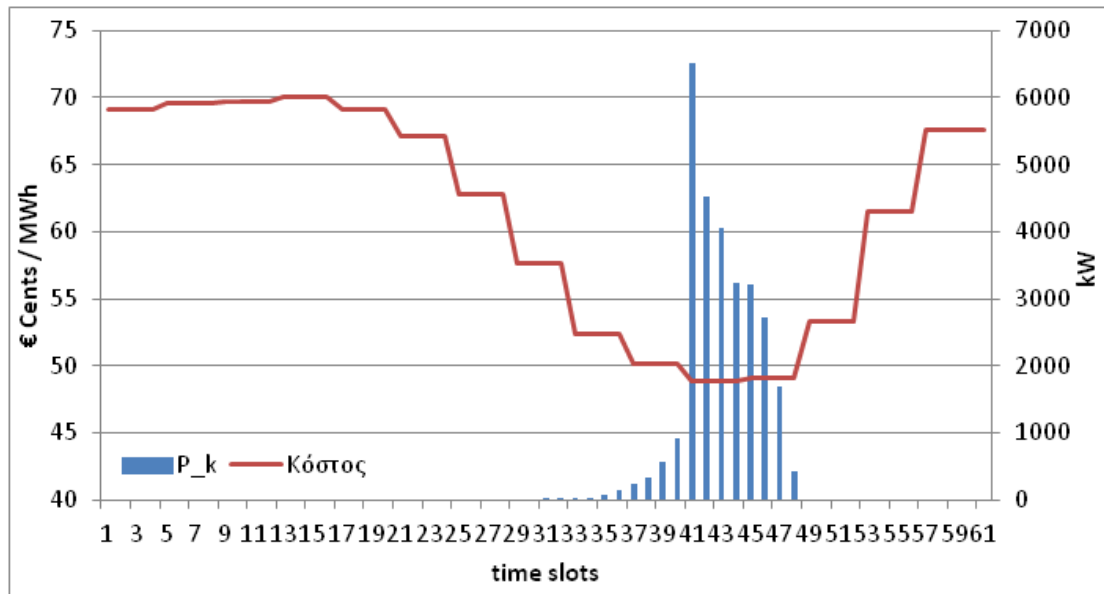
Είδαμε λοιπόν πώς τα οχήματα ταξινομούνται κατάλληλα έτσι ώστε η φόρτισή τους να είναι πλήρης και το κόστος της ενέργειας που απαιτείται για την φόρτισή τους να είναι το ελάχιστο δυνατό. Για να επιτευχθεί αυτό, όπως είδαμε και στα παραπάνω παραδείγματα, επιδιώκεται όλα τα οχήματα να φορτίζονται στα οικονομικότερα time slots. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στα time slot αυτά να έχω μεγάλη συσσώρευση κατανάλωσης η οποία ενδέχεται να υπερφορτίζει το δίκτυο και να αυξάνει τις απώλειες του. Σε ακραίες περιπτώσεις μεγάλης διείσδυσης οχημάτων, μπορεί να εμφανιστούν προβλήματα συμφόρησης των γραμμών (line congestion) ή τάσεων.

Για να αποφευχθούν τέτοια προβλήματα, ο Κεντρικός Ελεγκτής (EV Supplier/Aggregator) μπορεί να περιορίσει την αιχμή ζήτησης της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων με άνω κατώφλι συμβάλλει στον περιορισμό της καταπόνησης του δικτύου καθώς και στη μείωση των απωλειών ισχύος για την εξυπηρέτηση του επιπρόσθετου φορτίου τους.

Ένα τέτοιο μοντέλο φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων που λαμβάνει υπόψη την λειτουργία του δικτύου θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για την παροχή επιπρόσθετων υπηρεσιών προς τον διαχειριστή του συστήματος (Distribution System Operator – DSO). Σε μια τέτοια περίπτωση, ο διαχειριστή του δικτύου θα πρέπει να δίνει τα κατάλληλα οικονομικά κίνητρα στον Κεντρικό ελεγκτή καθώς η μετατόπιση μέρους της ζήτησης των οχημάτων, για την αποδοτικότερη λειτουργία του δικτύου, σε ώρες με υψηλότερο ενεργειακό κόστος αυξάνει το συνολικό κόστος και καθιστά την κατανομή των ηλεκτρικών οχημάτων οικονομικά μη βέλτιστη.

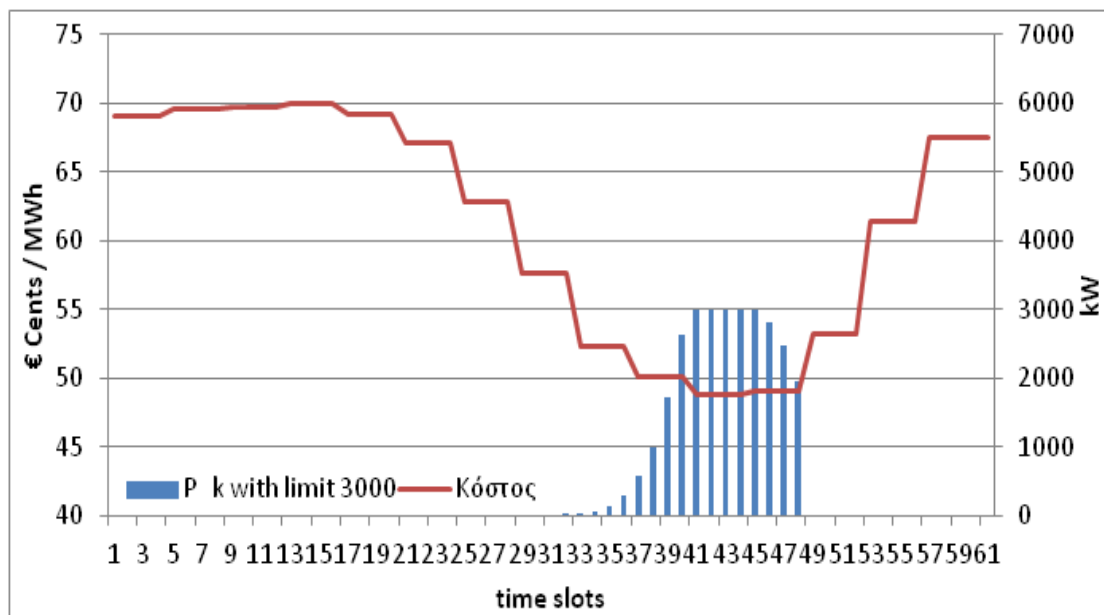
3.5.1 Έλεγχος Φόρτισης με άνω όριο

Στο πρώτο παράδειγμα που αναφέρθηκε παραπάνω σύμφωνα με την αρχική πρόβλεψη τα οχήματα θα ζητήσουν την παρακάτω ισχύ του διαγράμματος 3.21. Η αιχμή ζήτησης φτάνει τα 6.500kW.



Διάγραμμα 3.21 : Ζήτηση οχημάτων ανά time slot

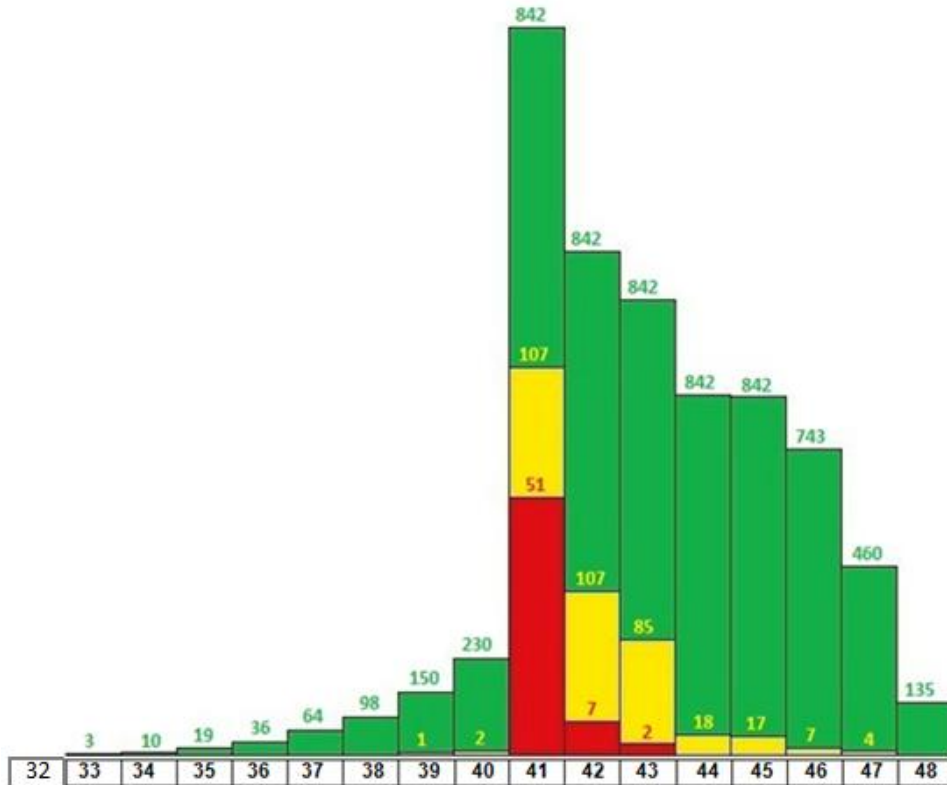
Ας υποθέσουμε ότι η ζήτηση των οχημάτων δεν πρέπει να ξεπερνά ένα άνω όριο π.χ. των 3.000kW. Ο EV Supplier/Aggregator πρέπει τώρα να ικανοποιήσει αυτό τον περιορισμό και παράλληλα φυσικά να φορτίσει πλήρως όλα τα οχήματα. Έτσι ο αλγόριθμος της πρόβλεψης καθώς και της διαχείρισης πρέπει να τροποποιηθούν έτσι ώστε να υποστηρίζουν την δυνατότητα εκτέλεσης μιας τέτοιας λειτουργίας. Για τον ίδιο στόλο λοιπόν η καμπύλη της ζήτησης θα αλλάξει έτσι ώστε να μην παρουσιάζει τιμές ανώτερες του 3.000 όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3.22.



Διάγραμμα 3.22 : Ζήτηση οχημάτων ανά time slot μετά την θέσπιση ορίου

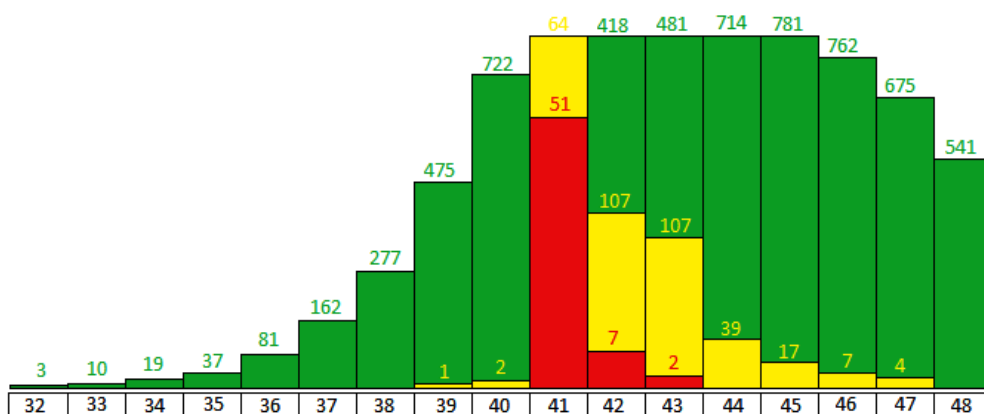
Για να επιτευχθεί αυτό έπρεπε να αλλάξει η κατανομή των οχημάτων στα time slots με κατάλληλο τρόπο όπως φαίνεται στα παρακάτω διαγράμματα 3.23 και 3.24.

Αρχικά η κατανομή των οχημάτων ήταν η εξής :



Διάγραμμα 3.23 : Γραφική αναπαράσταση της κατανομής των οχημάτων στα time slot πριν την θέσπιση του ορίου

και μετά την θέσπιση του ορίου έγινε :



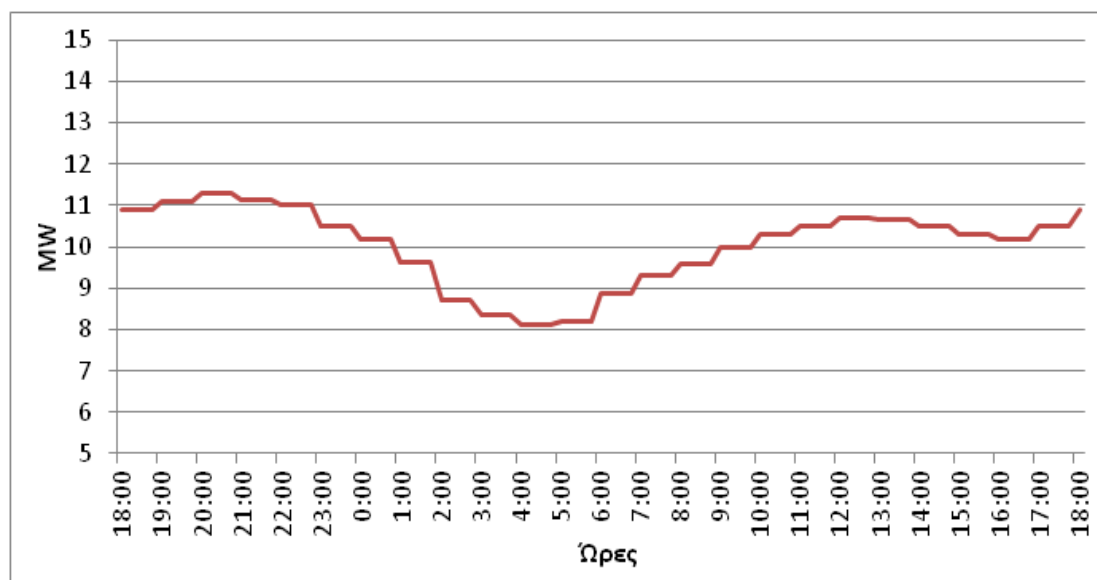
Διάγραμμα 3.24 : Γραφική αναπαράσταση της κατανομής των οχημάτων στα time slot μετά την θέσπιση του ορίου

Βλέπουμε πως επειδή η ζήτηση δεν έπρεπε να ξεπεράσει μια καθορισμένη τιμή (3.000kW) ο αλγόριθμος άλλαξε την αρχική ταξινόμηση των οχημάτων στα time slot και δημιούργησε μια νέα η οποία δεν ξεπερνά το όριο. Έτσι για παράδειγμα ενώ αρχικά στο οικονομικότερο time slot (41) υπήρχαν 51 οχήματα ισχύος φόρτισης Mode-3 , 107 οχήματα Mode-2 και 842 οχήματα Mode-1 , επειδή η συνολική ισχύς εκεί έφτανε τα $(51 \times 45\text{kW}) + (107 \times 11\text{kW}) + (842 \times 3,6\text{kW}) = 6.503,2\text{kW}$, ο αλγόριθμος μετακίνησε κάποια από αυτά τα οχήματα αφήνοντας εκεί μόνο τα Mode-3 οχήματα, και 64 από τα Mode-2 , δηλαδή ισχύ $(51 \times 45\text{kW}) + (64 \times 11\text{kW}) = 2.999\text{kW}$, που δεν ξεπερνά το καθορισμένο όριο. Ομοίως έγιναν αλλαγές και στα επόμενα time slots έτσι ώστε να μην ξεπεραστεί πουθενά το όριο.

Πρέπει να σημειωθεί εδώ πως ο καθορισμός του ορίου πρέπει να γίνει πριν την αγορά της ισχύος ανά time slot, έτσι ώστε ο αλγόριθμος να μπορέσει να μεταβάλλει την πρόβλεψή του, και να αγοραστεί η σωστή ισχύς ανά time slot.

3.5.2 Έλεγχος Φόρτισης με άνω όριο - “Valley Filling”

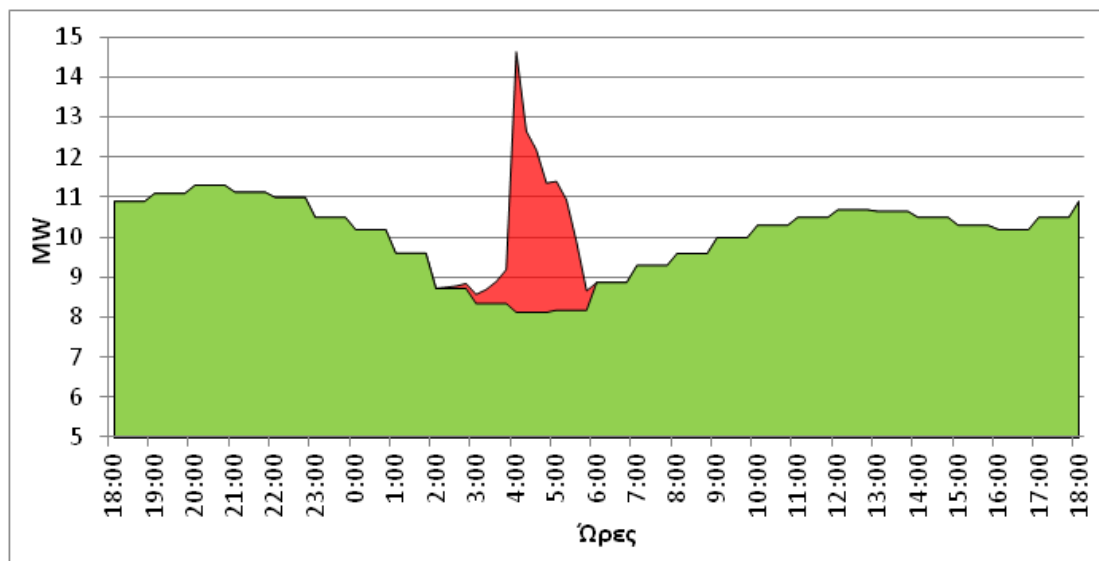
Θεωρείται τώρα μια ημερήσια καμπύλη ζήτησης όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3.25.



Διάγραμμα 3.25 : Υποθετική καμπύλη ζήτησης συστήματος σε μια ημέρα

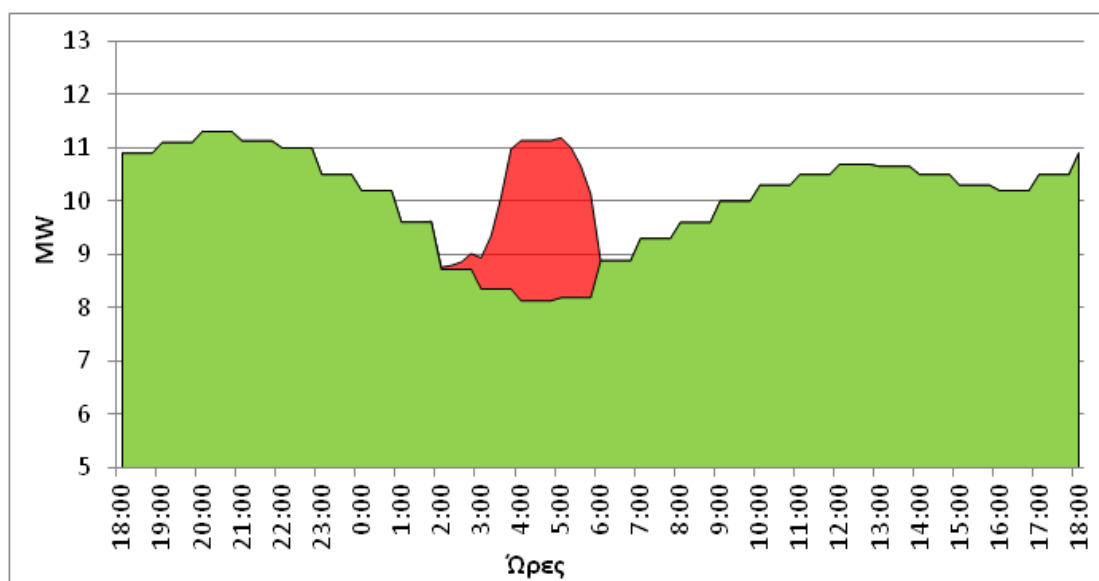
Είδαμε πως αν διαχειριστούμε το φορτίο των οχημάτων με γνώμονα μόνο το ελάχιστο κόστος, τότε όλη η ζήτηση θα συσσωρευτεί στα πιο οικονομικά time slots με

αποτέλεσμα η καμπύλη ζήτησης του συστήματος να τροποποιηθεί όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3.26



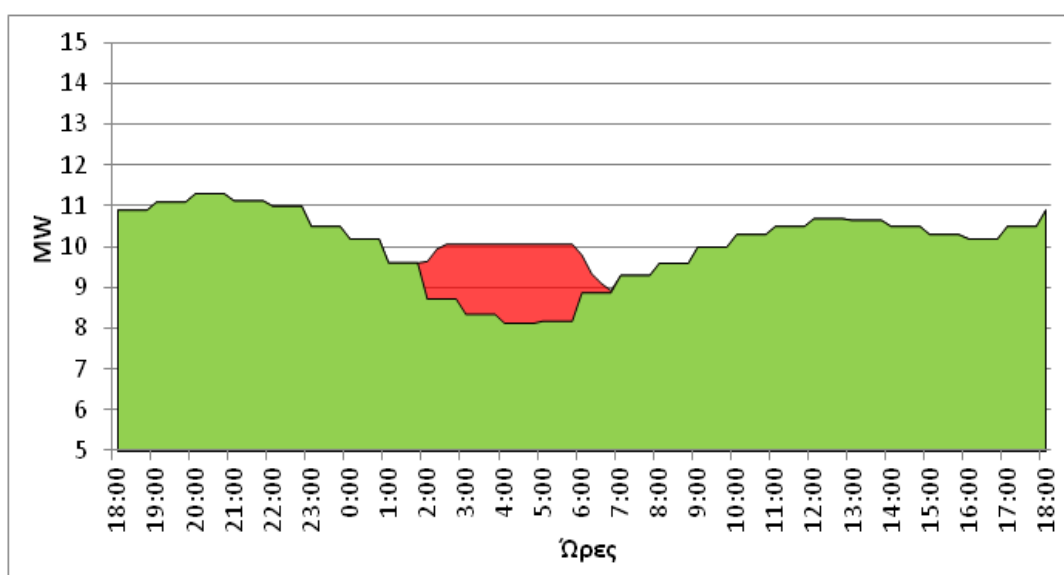
Διάγραμμα 3.26 : Παράθεση ζήτησης οχημάτων με την ζήτηση του συστήματος

Η αιχμή που δημιουργείται δεν είναι αποδεκτή καθώς σχεδόν διπλασιάζει το φορτίο (+6.503,2kW στα ήδη υπάρχοντα 8MW) καταπονώντας το σύστημα. Για τον λόγο αυτό, όπως δείχθηκε και παραπάνω, μπορεί να τεθεί ένα άνω όριο στον αλγόριθμο το οποίο θα έχει ως αποτέλεσμα την πιο ομοιόμορφη κατανομή του φορτίου. Έτσι η αιχμή εξαλείφεται και η καμπύλη ζήτησης των οχημάτων πλαταίνει καθώς απαιτούνται περισσότερα time slots για την πλήρη φόρτιση αυτών. Έτσι στη περίπτωση ελέγχου φόρτισης με άνω όριο την αιχμή της ζήτησης η καμπύλη φορτίου του συστήματος τροποποιείται όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3.27 :



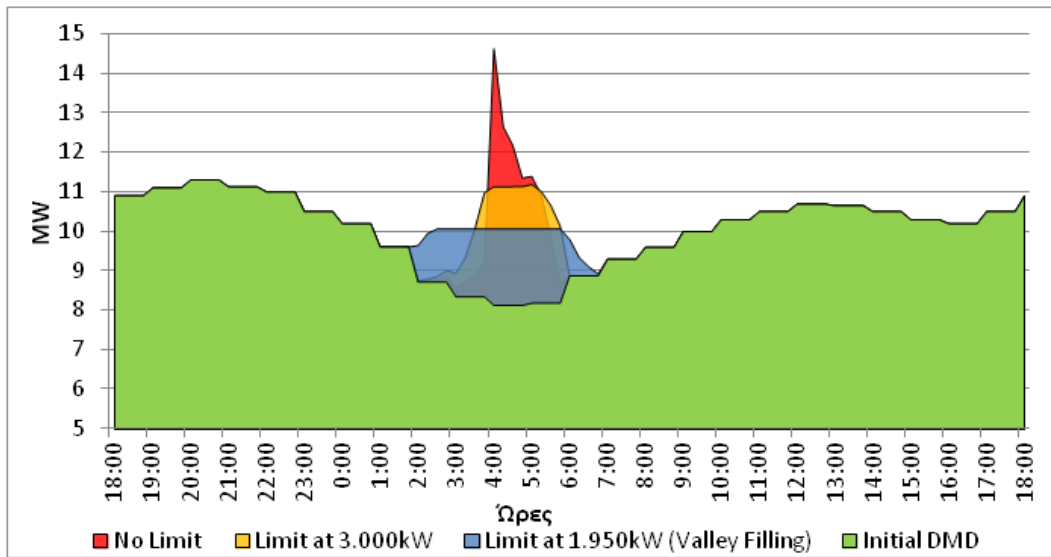
Διάγραμμα 3.27 : Παράθεση ζήτησης οχημάτων με την ζήτηση του συστήματος μετά την θέσπιση του ορίου

Η λειτουργία του δικτύου θα είναι αποδοτικότερη αλλά και πάλι όπως παρατηρούμε η ζήτηση του συστήματος κατά τις νυχτερινές ώρες παραμένει ακόμα υψηλή. Η ιδανική κατάσταση θα ήταν να πετύχουμε το λεγόμενο «Valley-Filling» (γέμισμα κοιλάδας), δηλαδή το φορτίο των οχημάτων να ταξινομηθεί με τέτοιο τρόπο ώστε η εμφανιζόμενη κοιλάδα κατά τις νυχτερινές ώρες να εξομαλυνθεί όσο είναι δυνατό. Για να επιτευχθεί αυτό, πρέπει να βρεθεί το ελάχιστο άνω όριο που αν τεθεί στον αλγόριθμο, αυτός θα καταφέρει να φορτίσει πλήρως όλα τα οχήματα. Το όριο αυτό βρέθηκε να είναι τα 1.950kW, και με βάση αυτό η καμπύλη ζήτησης τροποποιείται όπως φαίνεται στο διάγραμμα 3.28.



Διάγραμμα 3.28 : Παράθεση ζήτησης οχημάτων με την ζήτηση του συστήματος μετά την θέσπιση του κατώτατου δυνατού άνω ορίου («Valley-Filling»)

Βλέπουμε πως τώρα έχουμε πετύχει την μέγιστη δυνατή εξομάλυνση της καμπύλης του φορτίου του συστήματος τοποθετώντας τα οχήματα σε time slot που καταπονούν λιγότερο το σύστημα. Πρέπει να σημειωθεί εδώ πως ακόμα πιο ομαλή εξομάλυνση μπορεί να είχαμε αν είχε τεθεί ακόμα μικρότερο όριο στον αλγόριθμο, απλά σε αυτή την περίπτωση θα υπήρχαν οχήματα που δεν θα μπορούσαν να φορτίσουν πλήρως ή ακόμα και καθόλου. Μια συνολική εικόνα των περιπτώσεων ταξινόμησης των οχημάτων φαίνεται παρακάτω διάγραμμα 3.29



Διάγραμμα 3.29 : Παράθεση ζήτησης οχημάτων με την ζήτηση του συστήματος στις διάφορες μεθόδους φόρτισης

Κεφάλαιο 4

Μελέτη Δικτύου Διανομής Μ/Τ

4.1 Εισαγωγή

Αφού παρουσιάστηκε ο αλγόριθμος και οι δυνατότητές του, είναι χρήσιμο να εξεταστούν οι επιπτώσεις της φόρτισης οχημάτων στη λειτουργία ενός πραγματικού δικτύου. Σκοπός είναι να μελετηθεί η συνεισφορά του βελτιωμένου μοντέλου ελέγχου φόρτισης στην αποδοτικότερη λειτουργία του δικτύου, και πιο συγκεκριμένα θα μελετηθούν η καταπόνηση των γραμμών και των μετασχηματιστών, οι μεταβολές στην τάση των ζυγών και οι απώλειες του δικτύου που θα προκληθούν από την αύξηση του φορτίου.

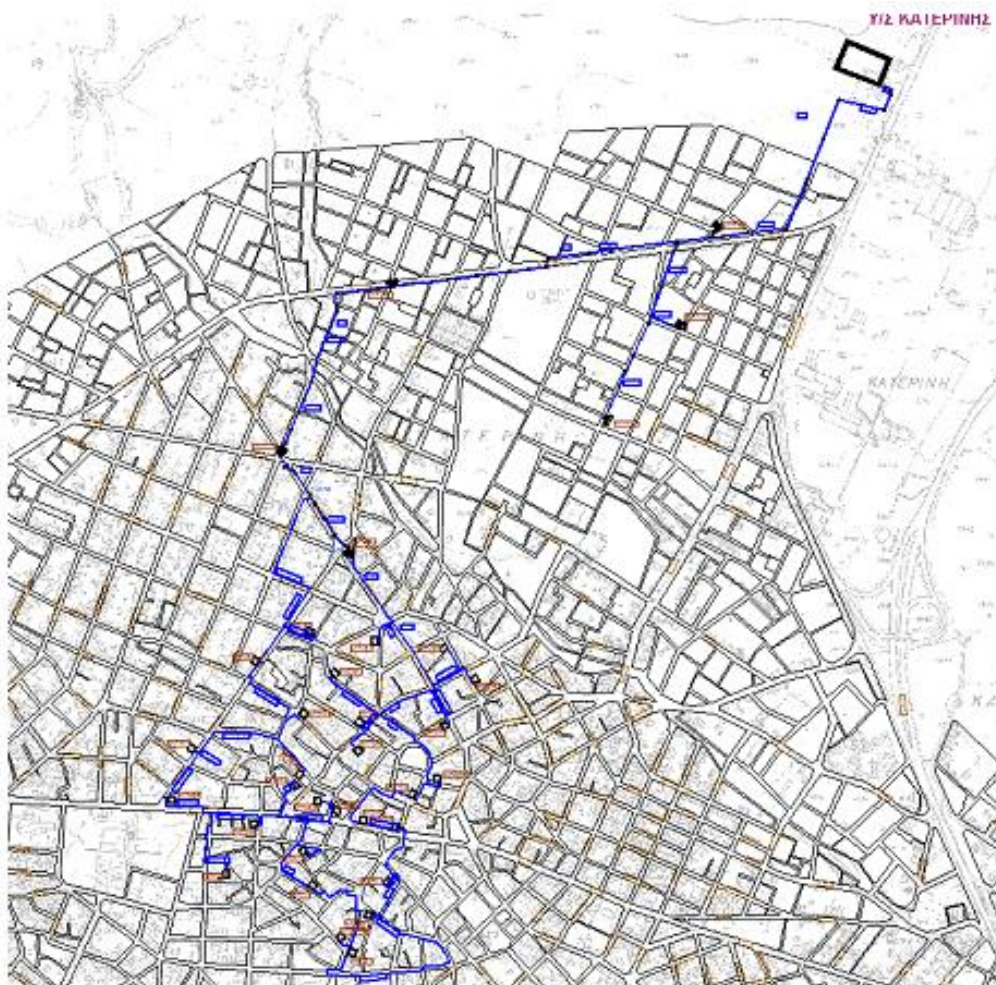
Διαφορετικά σενάρια φόρτισης των ηλεκτρικών έχουν μελετηθεί:

- ✓ μη ελεγχόμενη φόρτιση,
- ✓ ελεγχόμενη φόρτιση με ελαχιστοποίηση κόστους,
- ✓ ελεγχόμενη φόρτιση με ελαχιστοποίηση κόστους και περιορισμό αιχμής φόρτισης ώστε η συνολική ζήτηση του συστήματος να μην ξεπερνά την αιχμή της οικιακής ζήτησης,
- ✓ ελεγχόμενη φόρτιση με ελαχιστοποίηση κόστους και ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου.

Οι προσομοιώσεις για τη συμπεριφορά του δικτύου έχουν γίνει με τη βοήθεια του λογισμικού πακέτου Eurostag. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.

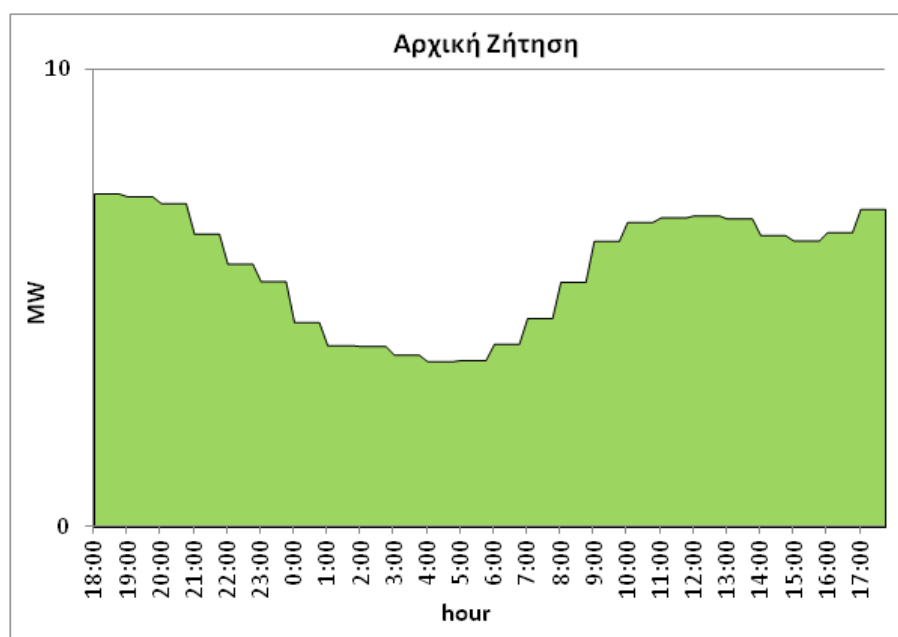
4.2 Αστικό Δίκτυο Διανομής ΜΤ

Το δίκτυο που εξετάζεται είναι μια διασυνδεδεμένη αστική γραμμή διανομής μέσης τάσης (20V) της Κατερίνης, που περιλαμβάνει 35 Υποσταθμούς φορτίου ΜΤ/ΧΤ η ισχύς των οποίων παρουσιάζεται στο Παράρτημα. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του κέντρου υψηλής τάσης (ΥΤ/ΜΤ) είναι 25ΜVΑ. Η γραμμή αποτελεί τμήμα του δικτύου της Κατερίνης και παρουσιάζεται στο ακόλουθο διάγραμμα 4.1 με μπλε χρώμα. Το αναλυτικό σχέδιο βρίσκεται στο Παράρτημα.



Εικόνα 4.1 : Η γραμμή του δικτύου της Κατερίνης που μελετείται

Η καμπύλη ζήτησης του φορτίου για μια τυχαία ημέρα του χειμώνα φαίνεται στο διάγραμμα 4.2



Διάγραμμα 4.1 : Καμπύλη ημερήσιας ζήτησης

Το δίκτυο διανομής που εξετάζεται περιλαμβάνει 5 διαφορετικούς τύπους γραμμών, τα χαρακτηριστικά των οποίων παρουσιάζονται στο Πίνακα 4.1 :

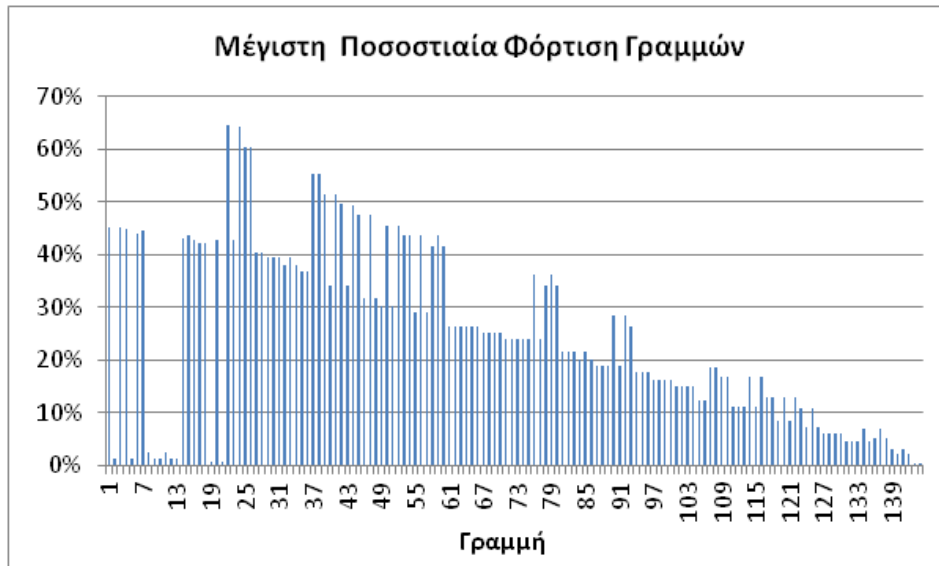
Πίνακας 4.1 : Χαρακτηριστικά των γραμμών του δικτύου

Τύπος Γραμμής	R (Ω/km)	X (Ω/km)	Θερμικό Όριο Ισχύος (MVA)
ACSR-95	0,215	0,334	15,5
ACSR-16	1,268	0,422	4
NAHEKBA-240	0,15	0,108	15
NAHEKBA-120	0,245	0,116	15
XLPE-240	0,162	0,115	10

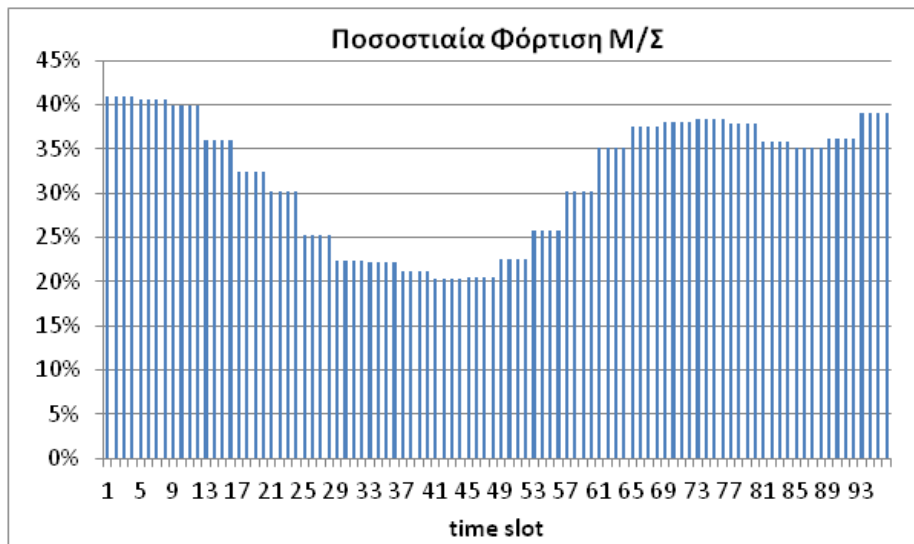
Η γραμμή τύπου ACSR-95 χρησιμοποιείται για τον κύριο κορμό του δικτύου, δηλαδή μεταξύ των υποσταθμών (MV)-(N1)-(N2)-(KT-A15-1)-(KT-D11-2)-(N4)-(KT-D8-1). Η γραμμή ACSR-16 χρησιμοποιείται για τις διακλαδώσεις χαμηλής ισχύος και ειδικότερα στις διαδρομές (N2)-(N3)-(KT-A12-6), (N3)-(KT-A14-9) και (N1)-(KT-0180). Οι υπόλοιπες γραμμές χρησιμοποιούνται στην διαδρομή από το N4 και κάτω.

Η επιβάρυνση των γραμμών και των μετασχηματιστών για την παραπάνω ζήτηση ως ποσοστό επί του θερμικού ορίου αυτών, καθώς και οι τάσεις των ζυγών φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα 4.2 και 4.3. Στο διάγραμμα 4.2 φαίνεται μόνο η μέγιστη

φόρτιση των γραμμών. Στο διάγραμμα 4.3 φαίνεται η μεταβολή του φορτίου στον πιο επιβαρυσμένο μετασχηματιστή ως ποσοστό της ονομαστικής ισχύος του. Βλέπουμε ότι στις ώρες αιχμής λειτουργεί στο 41% περίπου, δηλαδή υπάρχει περιθώριο και για περαιτέρω επιβάρυνση του Μ/Σ.



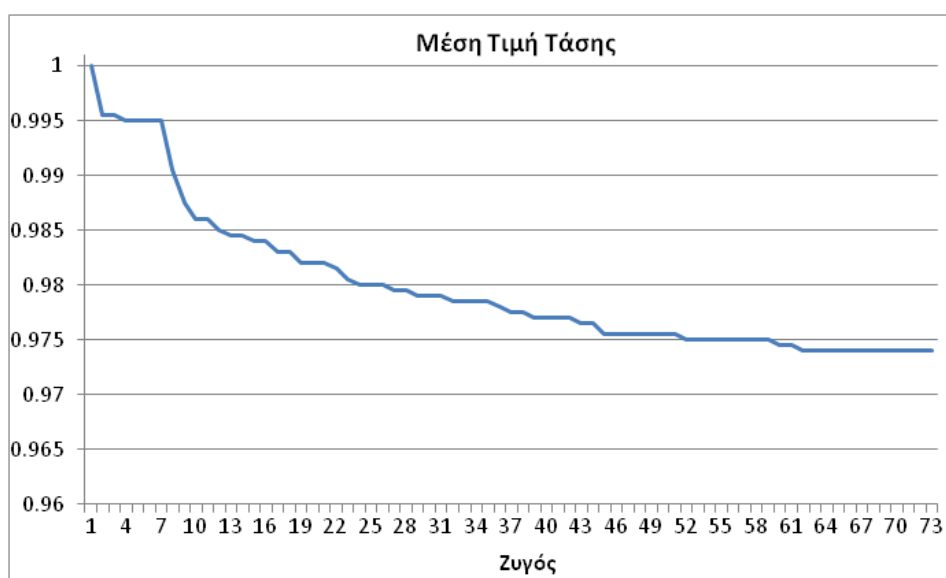
Διάγραμμα 4.2 : Η μέγιστη φόρτιση των γραμμών



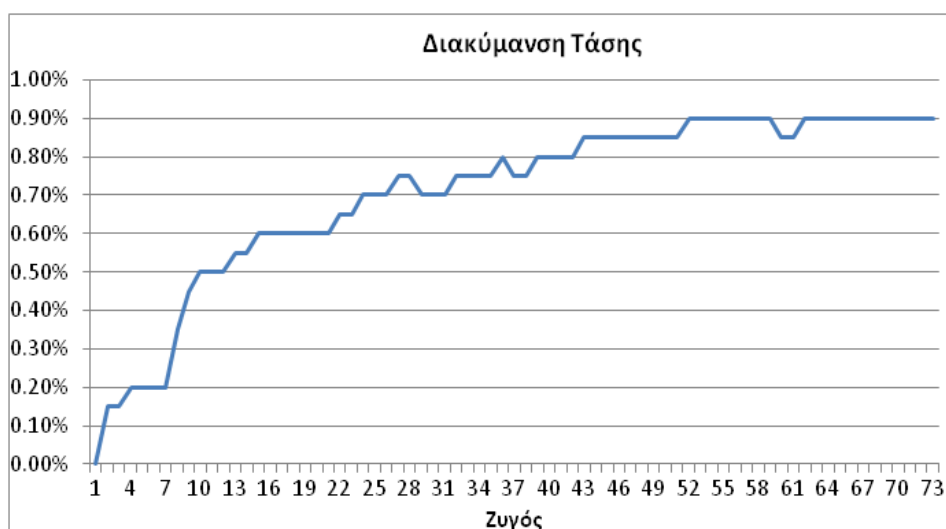
Διάγραμμα 4.3 : Καμπύλη Φόρτισης του Μ/Σ με την μέγιστη επιβάρυνση (ποσοστό επί της ονομαστικής ισχύος)

Η μέση τιμή και η διακύμανση της τάσης στους ζυγούς με και χωρίς tap changer στον slack bus φαίνονται στα διαγράμματα 4.4 - 4.7. Για την τάση παρατηρούμε ότι τόσο η μέση τιμή της όσο και η διακύμανση σε κάθε ζυγό παραμένουν εντός των ρυθμιστικών ορίων (5% για την μέση τιμή και 3% για την διακύμανση). Συγκεκριμένα μπορούμε να δούμε ότι όσο απομακρυνόμαστε από τον slack bus η μέση τιμή της τάσης πέφτει (έχουμε πτώση τάσης) και ανάλογα με την ύπαρξη ή μη του tap changer η διακύμανση είναι μικρότερη ή αντίστοιχα μεγαλύτερη στον τελευταίο ζυγό.

Χωρίς tap changer

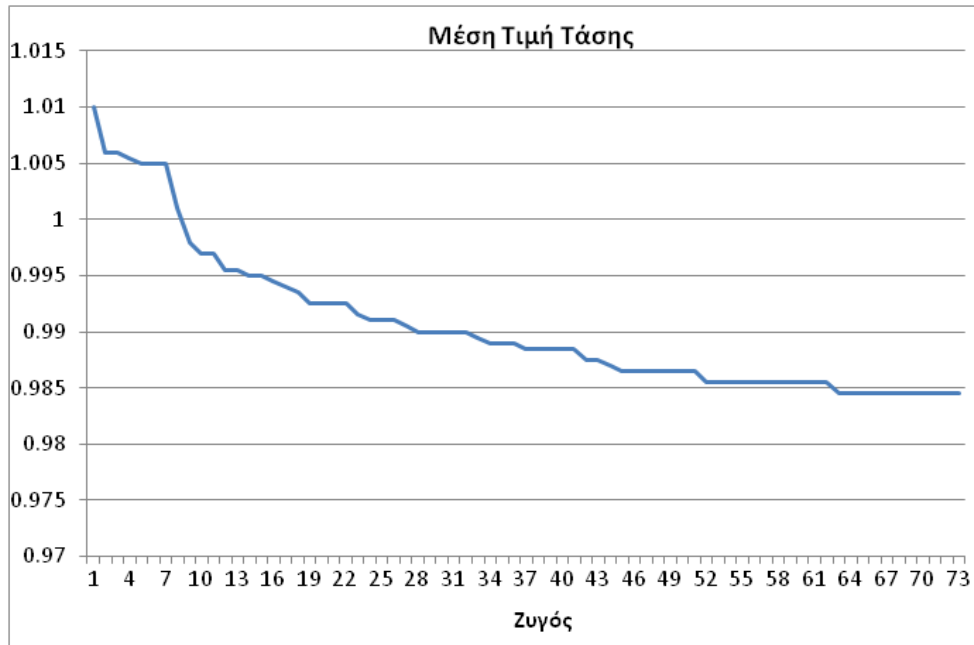


Διάγραμμα 4.4 : Η μέση τιμή της τάσης στους ζυγούς χωρίς tap changer

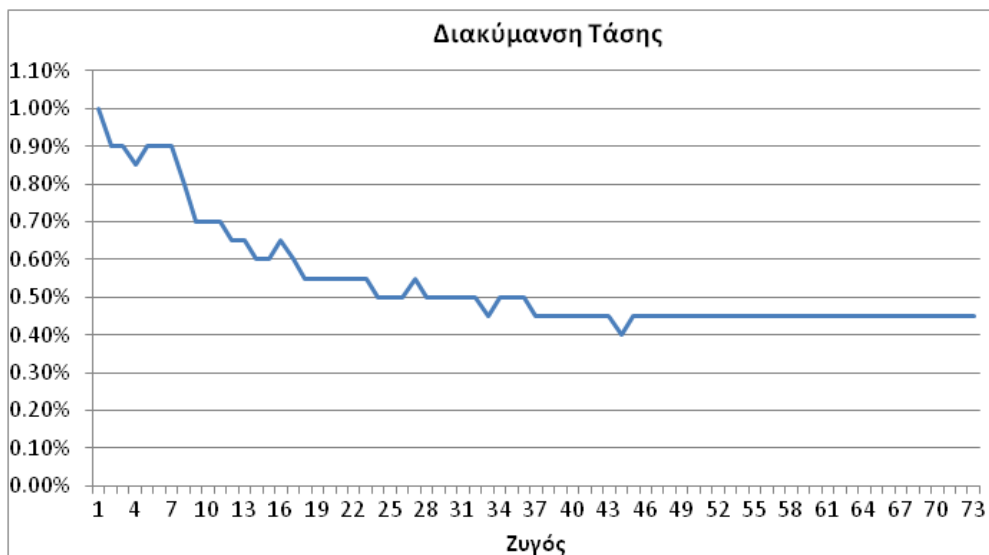


Διάγραμμα 4.5 : Η διακύμανση της τάσης στους ζυγούς χωρίς tap changer

Με tap changer



Διάγραμμα 4.6 : Η μέση τιμή της τάσης στους ζυγούς με tap changer



Διάγραμμα 4.7 : Η διακύμανση της τάσης στους ζυγούς με tap changer

Οι απώλειες του δικτύου υπολογίστηκαν 219,904 kVA.

4.3 Eurostag

Καθώς η δομή των ηλεκτρικών δικτύων γίνεται όλο και πιο πολύπλοκη, δεδομένης της επέκτασης των διασυνδεδεμένων περιοχών, της πολυπλοκότητας του εξοπλισμού και του μεγάλου αριθμού των περιορισμών (οικονομικών, περιβαλλοντικών, ασφαλείας) που πρέπει να ληφθούν υπόψη, απαιτούνται ισχυρά εργαλεία λογισμικού ώστε να διευκολύνουν την μελέτη των δικτύων αυτών. Στην παρούσα εργασία το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση του δικτύου που εξετάζεται είναι το Eurostag. Το πρόγραμμα αυτό αναπτύχθηκε μετά από συνεργασία των εταιριών TRACTEBEL και RTE, έχει μεγάλες δυνατότητες και είναι αρκετά φιλικό προς τον χρήστη, γεγονός που αποτελεί και έναν από τους λόγους που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Με την χρήση του προγράμματος Eurostag καθίσταται δυνατή η ακριβής παρακολούθηση της συμπεριφοράς του δικτύου και η εξαγωγή όλων των απαραίτητων αποτελεσμάτων ανεξάρτητα από το μέγεθος του δικτύου και τον τύπο των διαταραχών. Εκτελείται ένας επαναληπτικός αλγόριθμος με αυτόματο έλεγχο την ακρίβεια του οποίου καθορίζει ο χρήστης. Η χρήση του Eurostag επιτρέπει την μελέτη μεγάλων συστημάτων για μεγάλες περιόδους χωρίς την ανάγκη μεταβολής του αρχικού μοντέλου του συστήματος.

Ορισμένες από τις εφαρμογές του λογισμικού αυτού είναι οι εξής :

- Έλεγχος της διατήρησης του συγχρονισμού μετά από τις διάφορες διαταραχές.
- Μελέτη της συμπεριφοράς του δικτύου σε περιπτώσεις έκτακτης ανάγκης ή γενικά σε ακραίες περιπτώσεις (κατάρρευσης τάσης, απώλεια συγχρονισμού, επανασυγχρονισμός κ.ά.).
- Διαμόρφωση στρατηγικών σε δίκτυα σε περιπτώσεις απόρριψης φορτίου.
- Σχεδιασμός και καθορισμός των συστημάτων προστασίας σταθμών παραγωγής και δικτύων διανομής κ.ά.

Το Eurostag βασίζεται σε έναν επαναληπτικό αλγόριθμο με χρονομεταβλητό βήμα και είναι κατάλληλο για την μελέτη βραχυπρόθεσμων, αλλά και μακροπρόθεσμων μεταβατικών φαινομένων. Έτσι οι μελέτες μεταβατικής ευστάθειας (φαινόμενα που διαρκούν από μερικά ms έως λίγα δευτερόλεπτα), καθώς και οι μακροπρόθεσμες

δυναμικές μελέτες (αλλαγές που συμβαίνουν σε ένα διάστημα από μερικά δευτερόλεπτα έως κάποιες ώρες), μπορούν να καλυφθούν από την ίδια προσομοίωση.

Το πρόγραμμα αυτό αποτελείται από τα ακόλουθα πέντε βασικά μέρη :

- Ένα πρόγραμμα ροής φορτίου (load flow), του οποίου τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται ως σημείο αναφοράς στην προσομοίωση.
- Ένα διαδραστικό προσομοιωτή που επιτρέπει στον χρήστη να απεικονίζει τις διάφορες μεταβλητές, αλλά και να επεμβαίνει στην διαδικασία κατά την διάρκεια της προσομοίωσης.
- Ένα γραφικό προ-επεξεργαστή, που επιτρέπει την εισαγωγή νέων μοντέλων χρησιμοποιώντας διαγράμματα μπλοκ.
- Ένα γραφικό επεξεργαστή που χρησιμοποιείται για την ανάλυση των αποτελεσμάτων μετά το πέρας της προσομοίωσης.
- Ένα τμήμα για την αξιοποίηση των αποτελεσμάτων.

Το Eurostag είναι γραμμένο σε Fortran 77 και σε C, και μπορεί να εγκατασταθεί σε σταθμούς εργασίας με UNIX καθώς και σε προσωπικούς Η/Υ με λειτουργικό σύστημα WINDOWS.

Στην παρούσα διπλωματική πραγματοποιείται ανάλυση του δικτύου σε μόνιμη κατάσταση. Συνεπώς μας ενδιαφέρει μόνο το πρόγραμμα ροής φορτίου που διαθέτει το Eurostag, και όλα τα απαραίτητα αποτελέσματα θα προκύψουν από εκεί.

4.4 Σενάρια Μελέτης

4.4.1 Στόλος Ηλεκτρικών Οχημάτων

Όπως ακριβώς και στο παράδειγμα του προηγούμενου κεφαλαίου, έτσι και εδώ πρέπει να θεωρηθεί ένας στόλος από ηλεκτρικά οχήματα, τα οποία θα κληθεί το σύστημα να εξυπηρετήσει/φορτίσει. Έχοντας τον στόλο αυτό θα δοκιμαστούν διαφορετικά μοντέλα φόρτισης και θα αναλυθούν οι επιδράσεις του κάθε ενός στο δίκτυο. Ο στόλος παράγεται με την βοήθεια του αλγορίθμου 1α και για την παραγωγή του έγιναν οι παρακάτω θεωρήσεις :

Ακολουθείται κατανομή οχημάτων σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα 4.2

Πίνακας 4.2 : Κατανομή των οχημάτων ανά τάξη

Στόλος	
L7e	1%
M1	88%
N1	10%
N2	1%

Τα επίπεδα ισχύος φόρτισης είναι τα εξής :

$$L(j) = \begin{bmatrix} 3,6kW \\ 11kW \\ 45kW \end{bmatrix}$$

Ο πίνακας 4.3 παρουσιάζει την κατανομή των οχημάτων ανά τύπο και ισχύ.

Πίνακας 4.3 : Η κατανομή των οχημάτων ανά τάξη και ισχύ φόρτισης

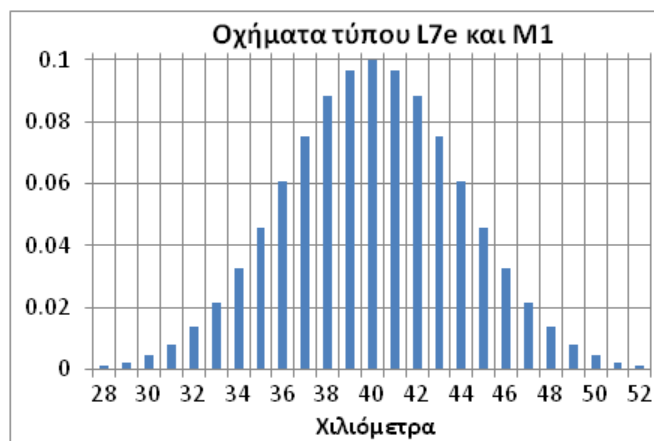
	L7e %	M1 %	N1 %	N2 %
Mode-1 (3,6kW)	90	85	85	0
Mode-2 (11kW)	10	15	15	100
Mode-3 (45kW)	0	0	0	0

Επειδή η φόρτιση θεωρείται ότι είναι οικιακή, δεν έχει νόημα να υποθέσουμε οχήματα που φορτίζουν σε ισχύ επιπέδου Mode-3 (μιας που τέτοιοι φορτιστές είναι ασύμφορο να αγοραστούν για οικιακή χρήση) και συνεπώς όλα τα οχήματα φορτίζουν είτε σε Mode-1 είτε σε Mode-2.

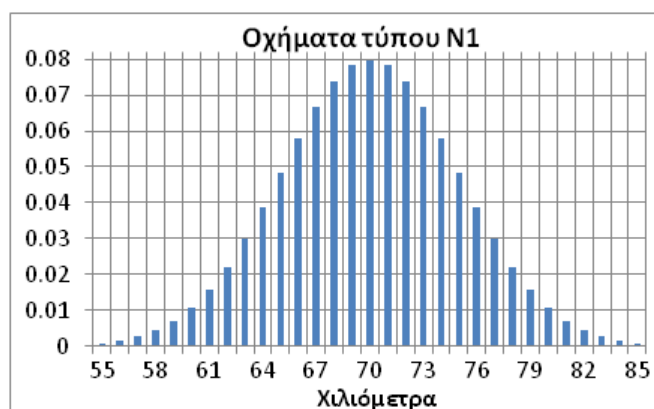
Οι καταναλώσεις των οχημάτων ανά τάξη είναι:

$$AverCon = \begin{bmatrix} 0,13 \\ 0,16 \\ 0,24 \\ 0,80 \end{bmatrix} kWh/km$$

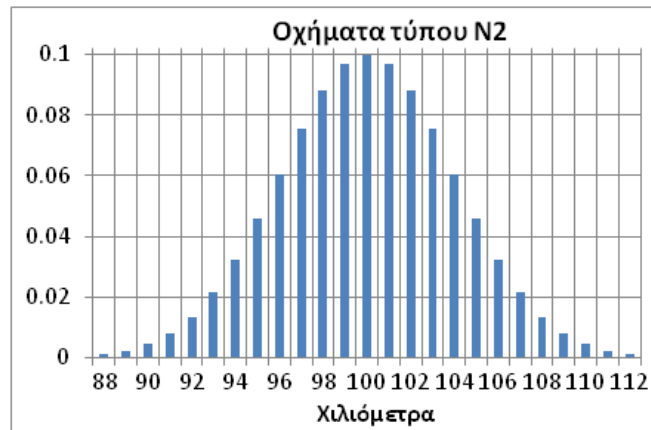
Η διανυόμενη απόσταση του κάθε οχήματος ακολουθεί κατανομή που είναι διαφορετική ανάλογα με την τάξη του κάθε οχήματος :



Διάγραμμα 4.8 : Η κατανομή της ημερήσιας διανυόμενης απόστασης των οχημάτων τύπου L7e και M1

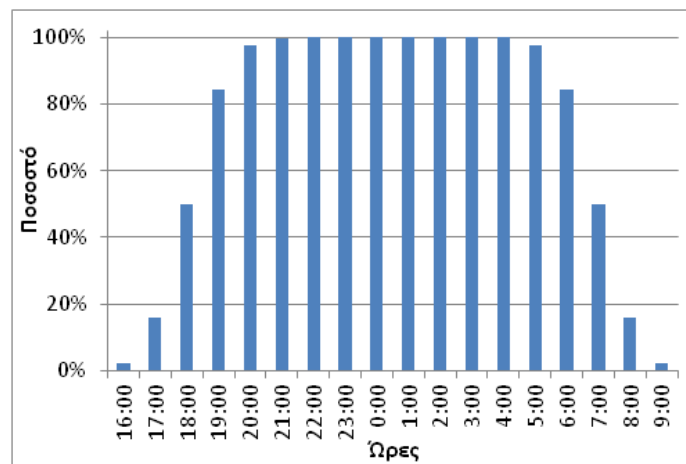


Διάγραμμα 4.9 : Η κατανομή της ημερήσιας διανυόμενης απόστασης των οχημάτων τύπου N1



Διάγραμμα 4.10 : Η κατανομή της ημερήσιας διανυόμενης απόστασης των οχημάτων τύπου N2

Το διάστημα φόρτισης επιλέγεται να είναι 14:00 με 09:00 δηλαδή CP = 17h, μια ασφαλής επιλογή, καθώς όπως φαίνεται και από το παρακάτω διάγραμμα η συντριπτική πλειοψηφία των οχημάτων είναι στο σπίτι.



Διάγραμμα 4.11 : Ποσοστό οχημάτων που είναι παρκαρισμένα στο σπίτι

Το διάστημα άφιξης των οχημάτων (Arrival Period) θεωρείται από τις 16:00 μέχρι τις 20:00 δηλαδή 6h, ενώ το διάστημα αναχώρησης (Departure Period) θεωρείται από τις 05:00 μέχρι τις 09:00, δηλαδή 4h. Θεωρείται επίσης πως η άφιξη και η αναχώρηση των οχημάτων ακολουθούν κανονικές κατανομές με κεντρικές τιμές τις 18:00 και 07:00 αντίστοιχα.

4.4.2 Σενάρια Φόρτισης

Οι στρατηγικές φόρτισης που ακολουθούνται είναι οι εξής τέσσερις :

- ❖ Μη ελεγχόμενη φόρτιση,
- ❖ Ελεγχόμενη φόρτιση με ελαχιστοποίηση κόστους,
- ❖ Ελεγχόμενη φόρτιση με ελαχιστοποίηση κόστους και περιορισμό αιχμής φόρτισης ώστε η συνολική ζήτηση του συστήματος να μην ξεπερνά την αιχμή της οικιακής ζήτησης,
- ❖ Ελεγχόμενη φόρτιση με ελαχιστοποίηση κόστους και ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου.

Κάθε μέθοδος είναι διαφορετική, και παρουσιάζεται εν συντομία παρακάτω.

4.4.2.1 Μη ελεγχόμενη φόρτιση (*Dumb Charging*)

Σύμφωνα με την στρατηγική αυτή, τα οχήματα φορτίζονται αμέσως μόλις φτάσουν στο σπίτι και συνδεθούν στο σύστημα (plug-and-play). Δεν γίνεται κανένας έλεγχος κόστους, αντίθετα μάλιστα η πρόβλεψη της ζήτησης και η φόρτιση των οχημάτων γίνεται με γνώμονα την ώρα άφιξης του οχήματος. Αυτό έχει αρνητικές συνέπειες για το σύστημα καθώς η φόρτιση των οχημάτων συμπίπτει χρονικά με την αυξημένη κατανάλωση του συστήματος με αποτέλεσμα η συνολική ζήτηση να είναι πολύ μεγάλη αυτές τις ώρες. Η αιχμή του συστήματος αυξάνεται γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε υπερφόρτιση των γραμμών και των μετασχηματιστών και γενικότερα σε καταπόνηση των στοιχείων του δικτύου όταν το επίπεδο διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι υψηλό. Λόγω του αυξημένου φορτίου θα υπάρξουν μεγαλύτερες πτώσεις τάσης με κίνδυνο οι τελευταίοι ζυγοί να έχουν τάση εκτός των αποδεκτών ορίων. Οι χωρητική ικανότητα του συστήματος είναι αρκετά περιορισμένη όταν ακολουθείται αυτή η μέθοδος φόρτισης και δεν επιτρέπει την διείσδυση μεγάλου αριθμού ηλεκτρικών οχημάτων.

4.4.2.2 Ελεγχόμενη φόρτιση με ελαχιστοποίηση κόστους

Η μέθοδος αυτή επιτρέπει τον έλεγχο του κόστους της ενέργειας και την κατανομή των οχημάτων με τέτοιο τρόπο ώστε το κόστος να είναι ελάχιστο. Τα οχήματα φτάνουν στο σπίτι και συνδέονται στο δίκτυο, αλλά ο Κεντρικός Ελεγκτής μετατοπίζει

την φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων σε ώρες που το ελάχιστο δυνατό ενεργειακό κόστος. Έτσι τα οχήματα φορτίζουν με τον βέλτιστο οικονομικά τρόπο. Αυτό όμως έχει ως αποτέλεσμα την συσσώρευση μεγάλου φορτίου τις «φθηνές» ώρες πράγμα το οποίο δημιουργεί μια αιχμή στις ώρες που υπάρχει χαμηλή ζήτηση (valley hours). Η αιχμή αυτή ανάλογα με τον αριθμό των οχημάτων μπορεί να ξεπεράσει την αιχμή του συστήματος και να φτάσει σε επίπεδα μη αποδεκτά από το σύστημα. Οπότε και πάλι μπορεί να υπάρξουν προβλήματα σε γραμμές, μετασχηματιστές και ζυγούς λόγω αυξημένων ρευμάτων ή μειωμένων τάσεων, με αποτέλεσμα ο αριθμός των οχημάτων που μπορεί να φορτίσει με αυτήν την μέθοδο να είναι περιορισμένος, αν και μεγαλύτερος από αυτόν της μη ελεγχόμενης φόρτισης.

4.4.2.3 Ελεγχόμενη φόρτιση ελαχιστοποίησης κόστους και περιορισμό αιχμής φόρτισης

Στην μέθοδο αυτή τα οχήματα φορτίζουν και πάλι με την ίδια λογική όπως και στην προηγούμενη μέθοδο αλλά τώρα έχει προστεθεί και δυνατότητα ορισμού ανώτατου ορίου στην αποδιδόμενη ισχύ από τον Διαχειριστή του Συστήματος Διανομής (Distribution System Operator – DSO). Τίθεται λοιπόν ένα άνω όριο ζήτηση φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων τέτοιο ώστε το επιπρόσθετο φορτίο των ηλεκτρικών οχημάτων να μην συντελεί στη δημιουργία μια νέα ημερήσιας αιχμής στο φορτίο του συστήματος. Τα οχήματα εκείνα που η φόρτιση τους οδηγούσε σε επίπεδα ισχύος άνω του επιτρεπτού ορίου, ανακατανέμονται σε ώρες με το αμέσως μεγαλύτερο ενεργειακό κόστος που έχουν περιθώρια εξυπηρέτησης ζήτησης. .

4.4.2.4 Ελεγχόμενη φόρτιση με ελαχιστοποίηση κόστους και ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου

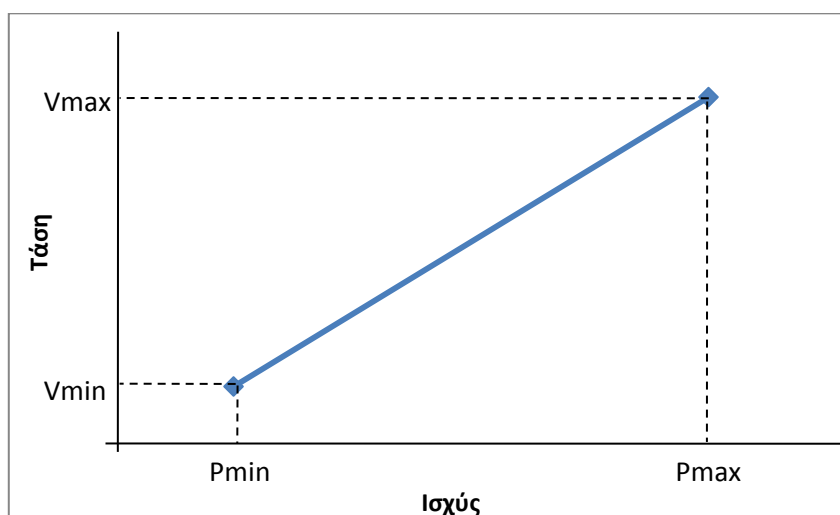
Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί την θέσπιση του κατώτατου δυνατού ορίου, κάτω από το οποίο τα οχήματα του στόλου δεν φορτίζουν πλήρως, για να τοποθετήσει τα οχήματα με τέτοιο τρόπο ώστε η μειωμένη ζήτηση που υπάρχει στις κοιλάδες της καμπύλης να αυξηθεί ομοιόμορφα («Valley-Filling»). Η εξομάλυνση της καμπύλης φορτίου που επιτυγχάνεται έχει πολλά οφέλη για το σύστημα καθώς το φορτίο δεν συσσωρεύεται σε μικρό χρονικό διάστημα αλλά κατανέμεται σε ένα αρκετά μεγάλο διάστημα. Σκοπός δεν είναι πλέον να ελαχιστοποιηθεί μόνο το κόστος αλλά να επιτευχθεί αυτό με την μικρότερη δυνατή επιβάρυνση του συστήματος. Η

χωρητικότητα του συστήματος σε ηλεκτρικά οχήματα μεγιστοποιείται χωρίς να παραβιάζονται οι τεχνικοί περιορισμοί του ηλεκτρικού δικτύου.

4.4.3 Σενάρια Τάσης

Θεωρούνται δύο διαφορετικά σενάρια που αφορούν το δίκτυο, κάθε ένα από τα οποία οδηγεί σε διαφορετικά αποτελέσματα για την τάση.

- Στην πρώτη περίπτωση θεωρείται ότι ο πρώτος ζυγός του συστήματος (slack bus) δεν έχει tap changer, και η τάση του θεωρείται σταθερή στο 1ρ.υ. (20kV). Το σενάριο αυτό παρά το γεγονός ότι μπορεί να μην συναντιέται στην πραγματικότητα, είναι εξαιρετικά χρήσιμο να μελετηθεί καθώς τα αποτελέσματα που προκύπτουν επιτρέπουν την απευθείας σύγκριση των διαφορετικών μεθόδων.
- Στην δεύτερη περίπτωση ο slack bus έχει tap changer που του επιτρέπει να αλλάζει την τάση του ανάλογα με την ισχύ. Η χαρακτηριστική συνάρτηση που ακολουθεί ο tap changer είναι κοινή για όλες τις μεθόδους, και το ελάχιστο βήμα του είναι 0,01ρ.υ. δηλαδή 0,2kV. Η γραφική παράσταση της συνάρτησης που ακολουθείται εμφανίζεται παρακάτω :



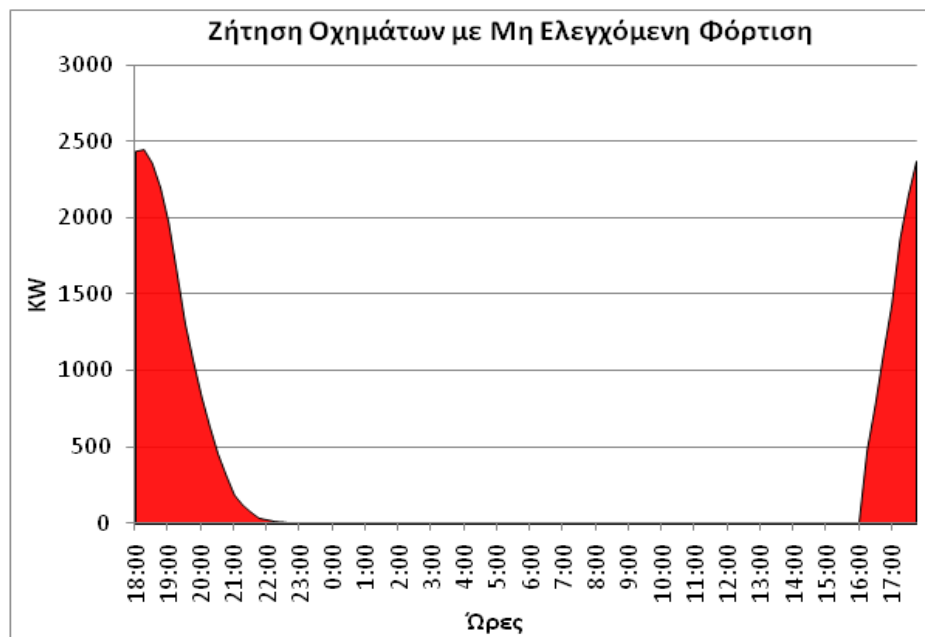
Διάγραμμα 4.12 : Γραφική παράσταση της χαρακτηριστικής συνάρτησης του tap changer

Δηλαδή οι τιμές της τάσης που παίρνει ο tap changer είναι μια γραμμική παρεμβολή μεταξύ μιας ελάχιστης και μιας μέγιστης τιμής (1 – 1,05 ρ.υ.)

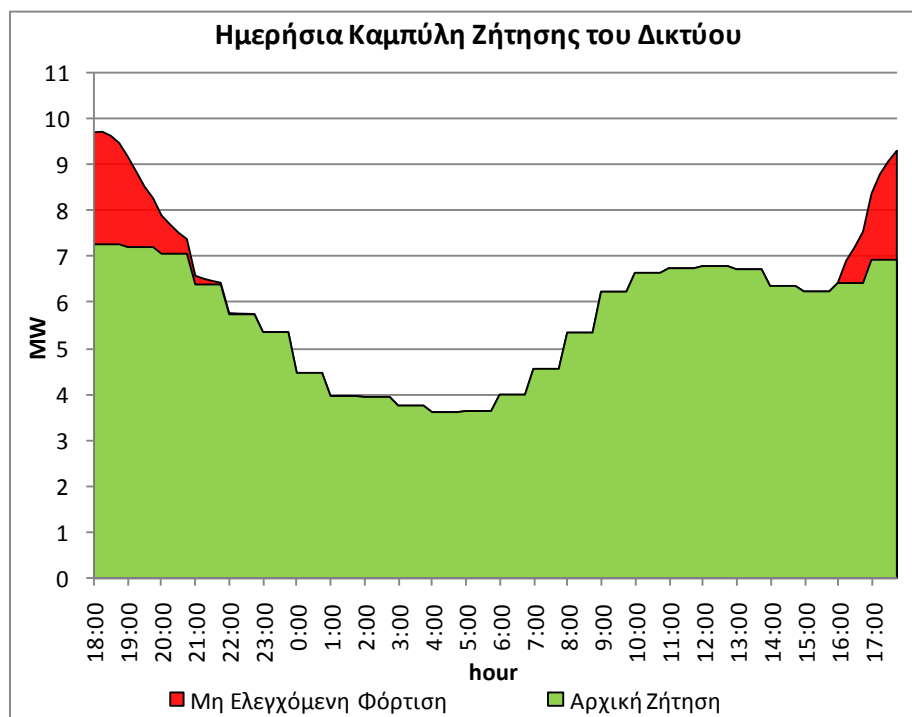
4.5 Αποτελέσματα

4.5.1 Μη ελεγχόμενη φόρτιση (Dumb Charging)

Η ζήτηση των οχημάτων παρουσιάζεται στο διάγραμμα 4.13

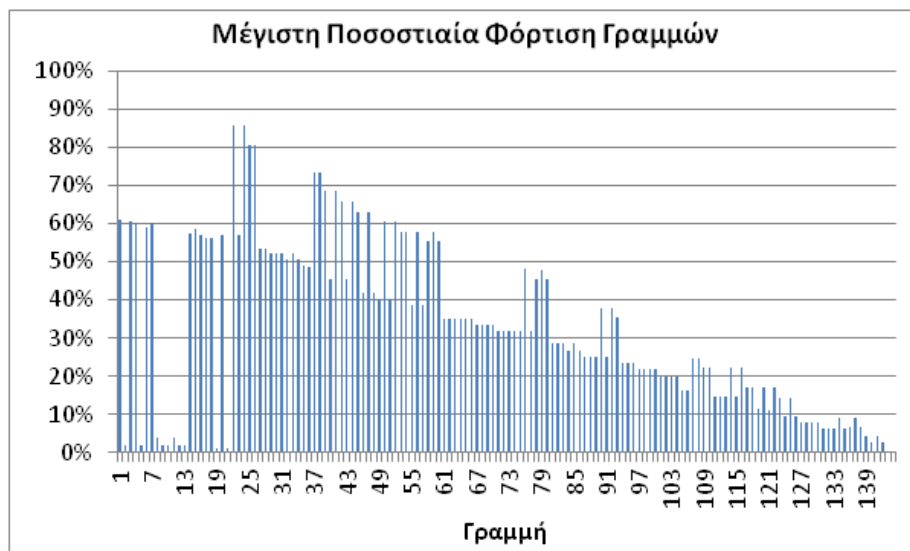


Διάγραμμα 4.13 : Καμπύλη ζήτησης οχημάτων με μη ελεγχόμενη φόρτιση



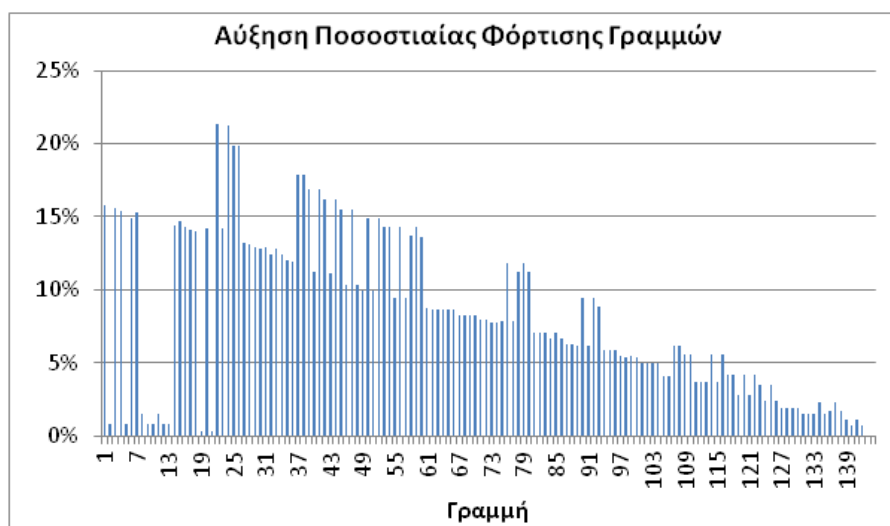
Διάγραμμα 4.14 : Παράθεση Αρχικής Ζήτησης με την Ζήτηση των οχημάτων για μη ελεγχόμενη φόρτιση

Οι μέγιστες ποσοστιαίες φορτίσεις των γραμμών φαίνονται στο διάγραμμα 4.15. Η πιο επιβαρυσμένη γραμμή είναι φορτισμένη στο 85.97% του θερμικού της ορίου.



Διάγραμμα 4.15 : Ποσοστιαία φόρτιση των γραμμών – μη ελεγχόμενη φόρτιση

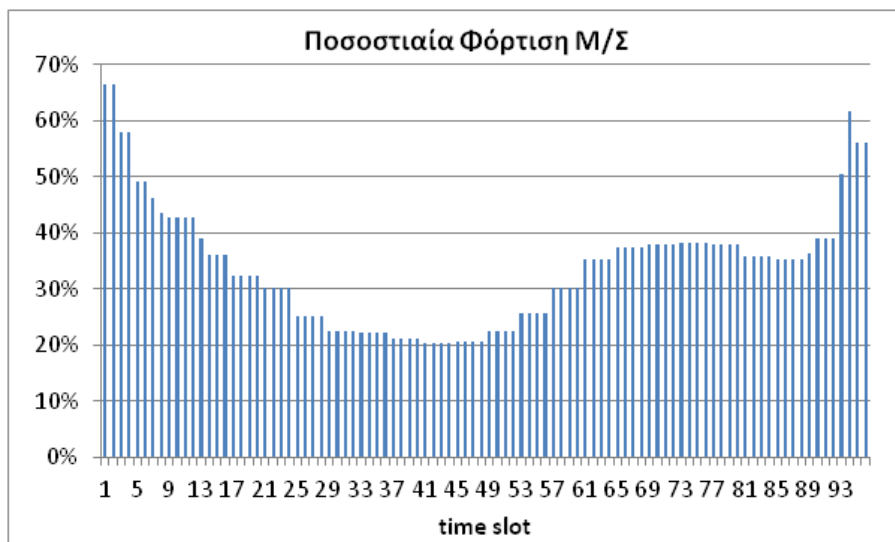
Δηλαδή παρατηρείται μια αύξηση της ποσοστιαίας φόρτισης των γραμμών που παρουσιάζεται στο διάγραμμα 4.16.



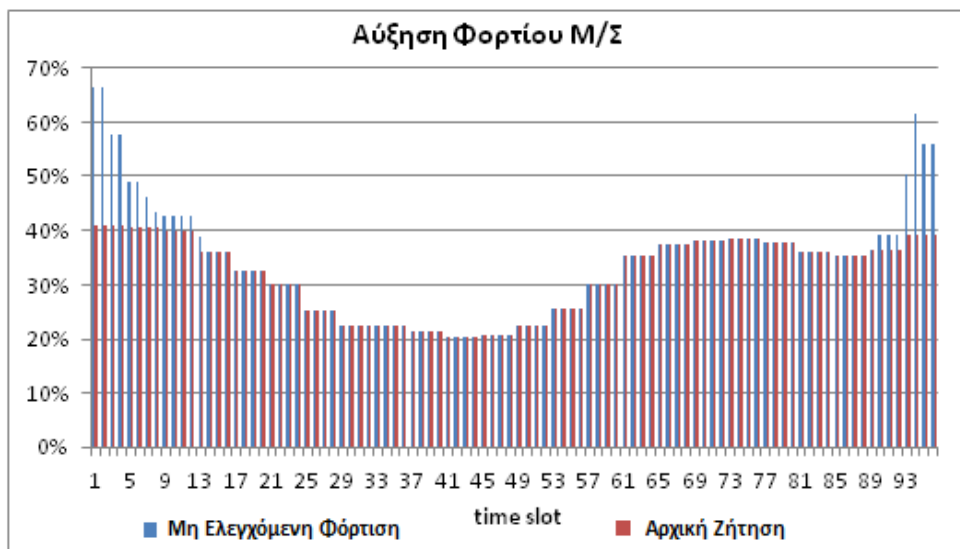
Διάγραμμα 4.16 : Αύξηση μέγιστης φόρτισης γραμμών - μη ελεγχόμενη φόρτιση

Η μεταβολή του φορτίου στον Μ/Σ με την μεγαλύτερη επιβάρυνση φαίνεται στα διαγράμματα 4.17 και 4.18. Από το διάγραμμα 4.18 παρατηρούμε ότι η αιχμή του φορτίου του Μ/Σ αυξάνεται κατά περίπου 25% σε σχέση με αυτή της μη ύπαρξης

οχημάτων. Η αιχμή της φόρτισης των οχημάτων που εμφανίζεται στην μη ελεγχόμενη φόρτιση συμπίπτει χρονικά με την αιχμή της καμπύλης οικιακής ζήτησης του συστήματος. Αυτό δημιουργεί αύξηση του μεγίστου της καμπύλης με αποτέλεσμα τόσο οι γραμμές όσο και οι μετασχηματιστές να επιβαρύνονται αρκετά περισσότερο.



Διάγραμμα 4.17 : Καμπύλη φόρτισης Μ/Σ - μη ελεγχόμενη φόρτιση



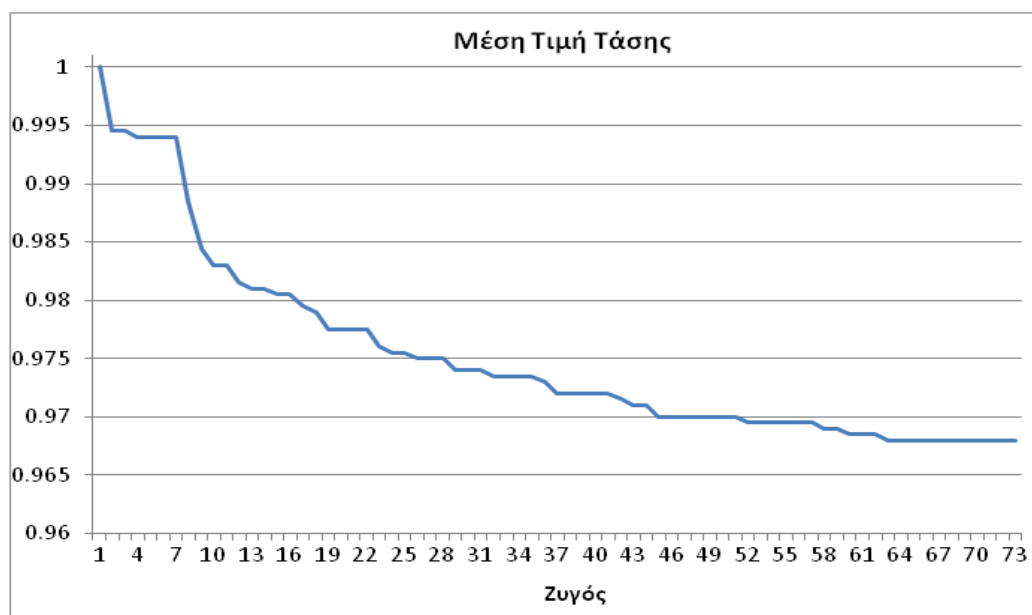
Διάγραμμα 4.18 : Αύξηση φορτίου Μ/Σ - μη ελεγχόμενη φόρτιση

Οι απώλειες δικτύου αυξάνονται κατά 14,57%, λόγω της αύξησης του φορτίου, φτάνοντας στα 251,952 kVA.

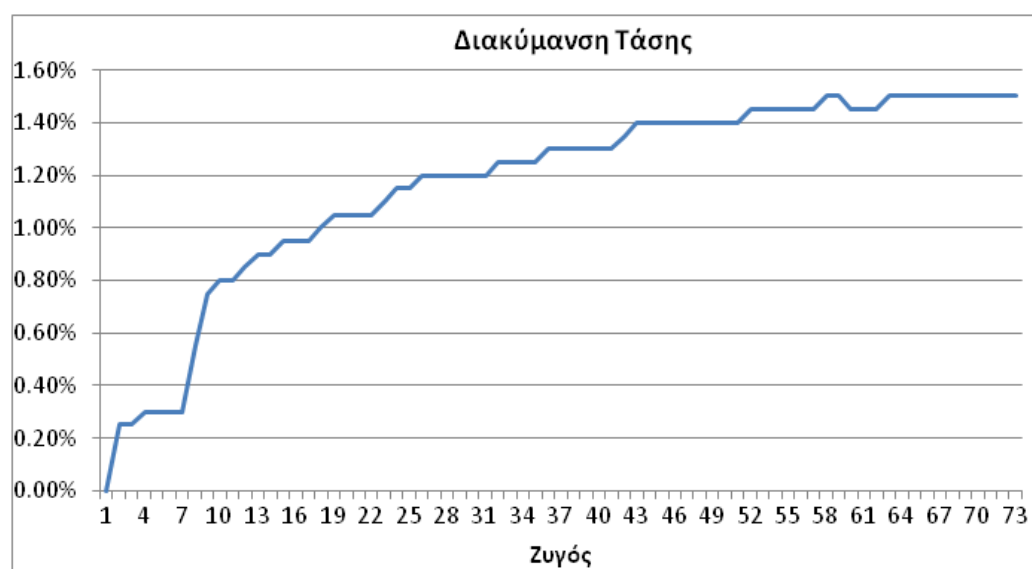
Το προφίλ της τάσης των ζυγών παρουσιάζεται στα διαγράμματα 4.19- 4.22. Όπως είναι φυσικό λόγω του αυξημένου φορτίου υπάρχει μεγαλύτερη πτώση τάσης

πράγμα που δικαιολογεί χαμηλότερες τάσεις στους ακραίους ζυγούς, ενώ παράλληλα η αύξηση της διαφοράς μέγιστης και ελάχιστης τιμής στην συνολική καμπύλη είναι η αιτία για την αύξηση της διακύμανσης. Παρά την στιγμιαία αύξηση της ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων οι ρυθμιστικοί περιορισμοί για τη μέση τιμή και τη διακύμανση της τάσης δεν παραβιάζονται.

Χωρίς tap changer

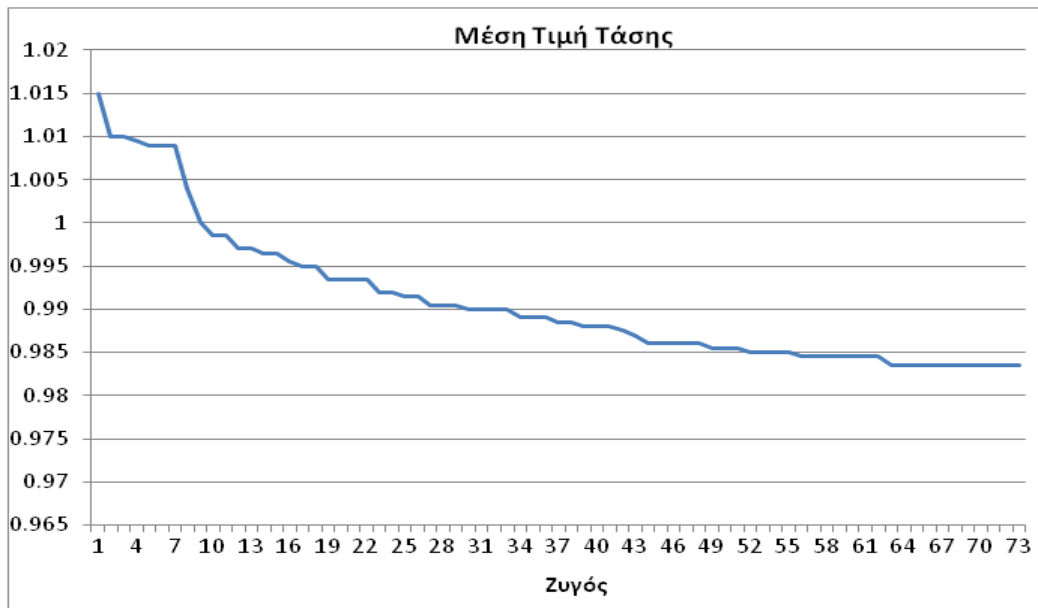


Διάγραμμα 4.19 : Η μέση τιμή της τάσης στους ζυγούς (χωρίς tap changer) - μη ελεγχόμενη φόρτιση

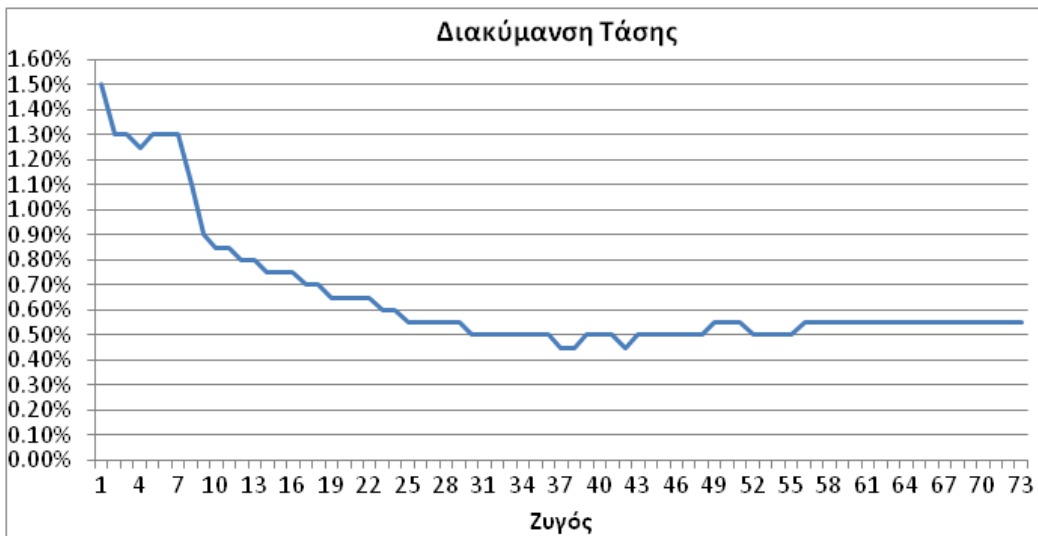


Διάγραμμα 4.20 : Η διακύμανση της τάσης στους ζυγούς (χωρίς tap changer) - μη ελεγχόμενη φόρτιση

Με tap changer



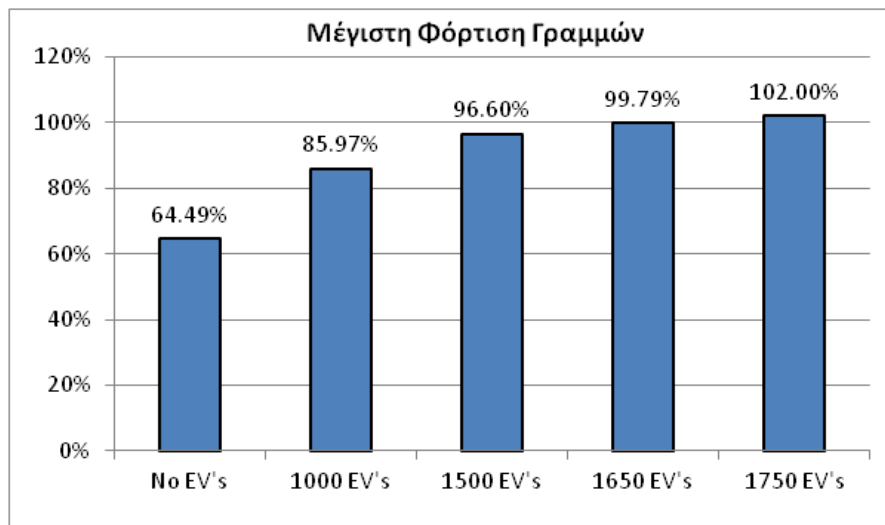
Διάγραμμα 4.21 : Η μέση τιμή της τάσης στους ζυγούς (με tap changer) - μη ελεγχόμενη φόρτιση



Διάγραμμα 4.22 : Η διακύμανση της τάσης στους ζυγούς (με tap changer) - μη ελεγχόμενη φόρτιση

Τα παραπάνω αποτελέσματα όμως αναφέρονται σε στόλο 1000 οχημάτων. Προσομοιώνοντας περαιτέρω σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων παρατηρήθηκε ότι η πτώση τάσης του δικτύου, παρά το γεγονός ότι αυξανόταν, παρέμενε εντός ρυθμιστικών ορίων. Εκεί που εμφανίζεται πρόβλημα είναι στην συμφόρηση των γραμμών, τα όρια των οποίων είναι περιορισμένα και όπως φαίνεται

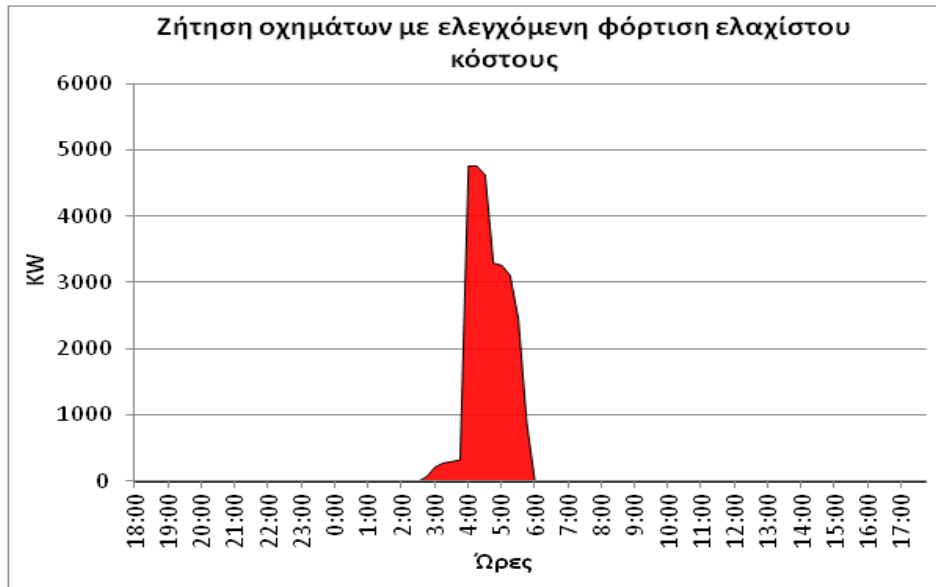
και από το παρακάτω διάγραμμα δεν επιτρέπουν την διείσδυση περισσότερων από 1650 περίπου οχημάτων με μη ελεγχόμενη φόρτιση.



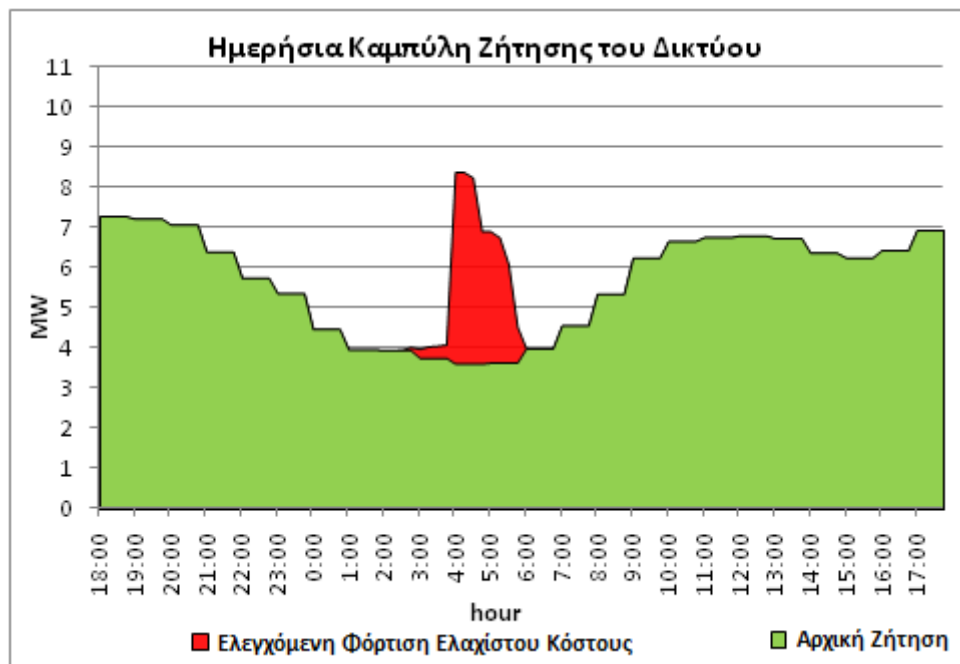
Διάγραμμα 4.23 : Η μέγιστη φόρτιση των γραμμών για διάφορους στόλους - μη ελεγχόμενη φόρτιση

4.5.2 Ελεγχόμενη φόρτιση με ελαχιστοποίηση κόστους

Σύμφωνα με αυτή την μέθοδο, γίνεται έλεγχος του κόστους και τα οχήματα φορτίζουν με τέτοιο τρόπο ώστε το κόστος να είναι ελάχιστο. Αυτό μπορεί να είναι συμφέρον από οικονομικής άποψης, αλλά επειδή ακριβώς η ζήτηση συσσωρεύεται στα πιο οικονομικά time slots παρατηρείται αιχμή στις ώρες αυτές και μάλιστα τέτοια που μπορεί να ξεπεράσει το μέγιστο της αρχικής ζήτησης για αυξημένα επίπεδα διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων.

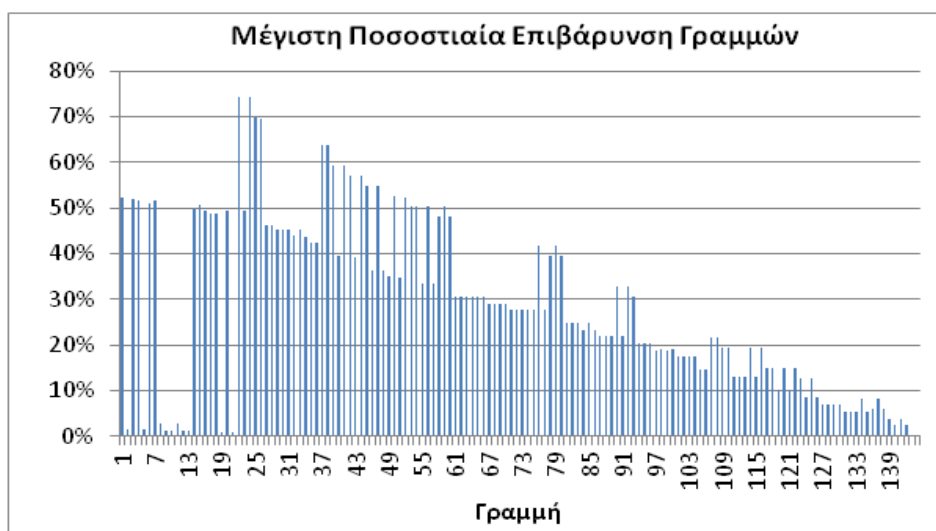


Διάγραμμα 4.24 : Καμπύλη ζήτησης οχημάτων με ελεγχόμενη φόρτιση ελαχιστοποίησης κόστους

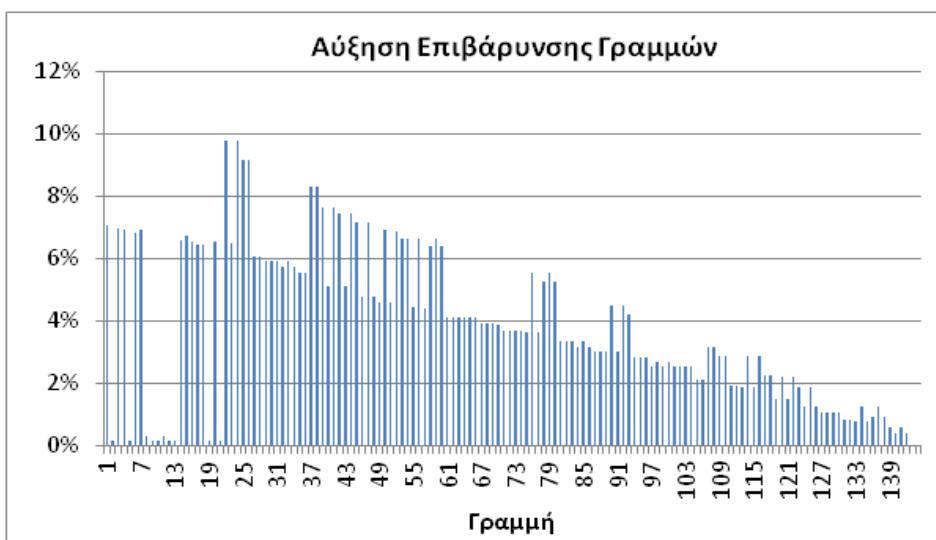


Διάγραμμα 4.25 : Παράθεση Αρχικής Ζήτησης με την Ζήτηση των οχημάτων με ελεγχόμενη φόρτιση ελαχίστου κόστους

Οι μέγιστες ποσοστιαίες φορτίσεις των γραμμών φαίνονται στο διάγραμμα 4.26, Η μέγιστη ποσοστιαία επιβάρυνση της χειρότερης γραμμής μειώνεται κατά περίπου 12% λόγω της μετατόπισης του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων σε ώρες με χαμηλή ζήτηση. Η αύξηση της επιβάρυνσης των γραμμών από την ελεγχόμενη φόρτιση των οχημάτων, εν συγκρίσει με την περίπτωση χωρίς οχήματα, παρουσιάζεται στο διάγραμμα 4.27.

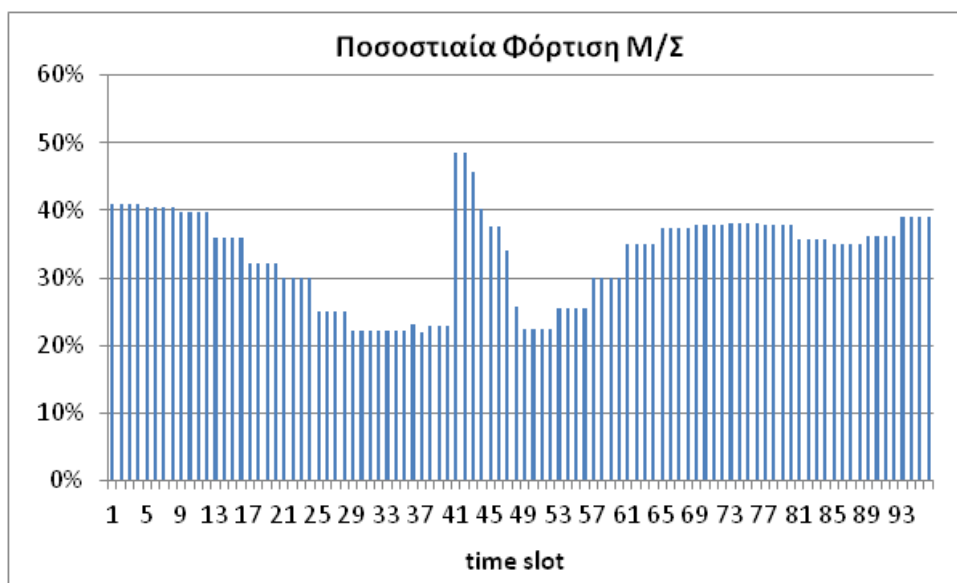


Διάγραμμα 4.26 : Ποσοστιαία φόρτιση των γραμμών - ελεγχόμενη φόρτιση ελαχίστου κόστους

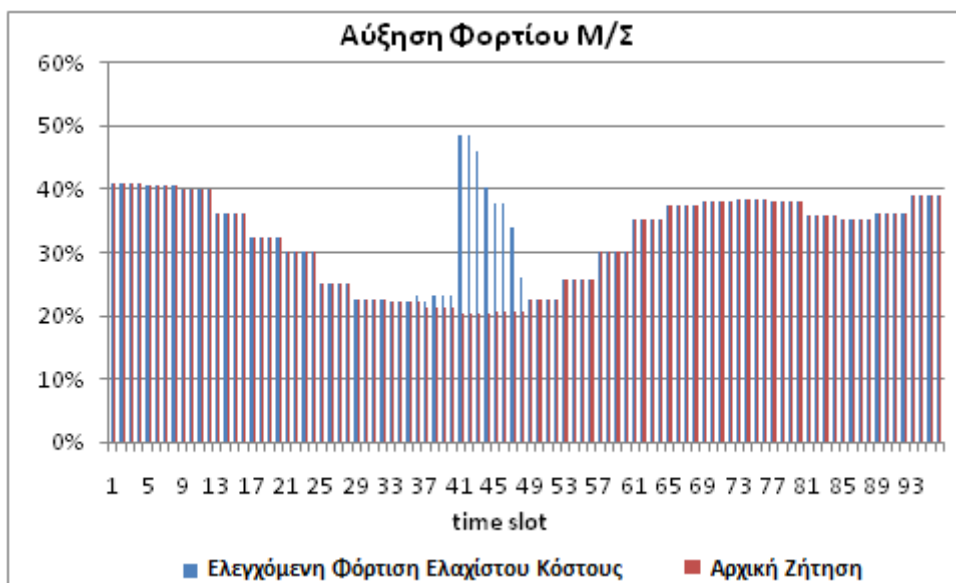


Διάγραμμα 4.27 : Αύξηση μέγιστης φόρτισης γραμμών - ελεγχόμενη φόρτιση ελαχίστου κόστους

Η μεταβολή του φορτίου στον Μ/Σ με την μεγαλύτερη επιβάρυνση φαίνεται στα διαγράμματα 4.28 και 4.29. Η μέγιστη φόρτιση του Μ/Σ αυξήθηκε κατά 8% σε σχέση με αυτή της περίπτωσης χωρίς οχήματα, ενώ μειώθηκε κατά 19% σε σχέση με αυτή της μη ελεγχόμενης φόρτισης των οχημάτων. Αυτό που μπορεί να παρατηρηθεί εδώ είναι πως ενώ το φορτίο που προστίθεται στο δίκτυο είναι το ίδιο (1000 οχήματα) με αυτό της μη ελεγχόμενης φόρτισης, όμως επειδή έχει τοποθετηθεί σε ώρες χαμηλής ζήτησης, η αιχμή ζήτησης δεν αυξάνεται τόσο πολύ όσο στην πρώτη περίπτωση, και έτσι η επιβάρυνση στις γραμμές και τους μετασχηματιστές είναι μικρότερη.

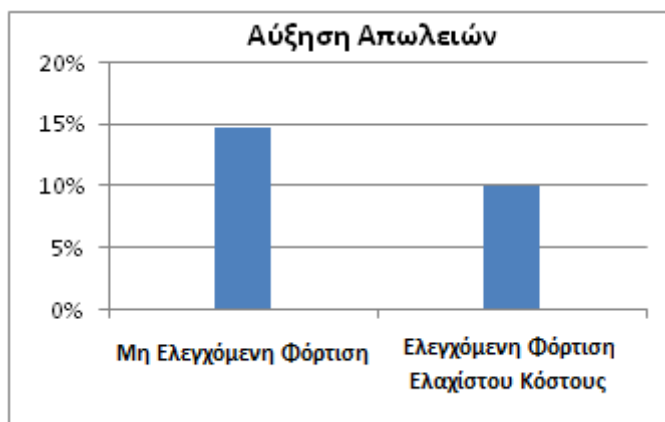


Διάγραμμα 4.28 : Καμπύλη φόρτισης Μ/Σ - ελεγχόμενη φόρτιση ελαχίστου κόστους



Διάγραμμα 4.29 : Αύξηση φορτίου Μ/Σ - ελεγχόμενη φόρτιση ελαχίστου κόστους

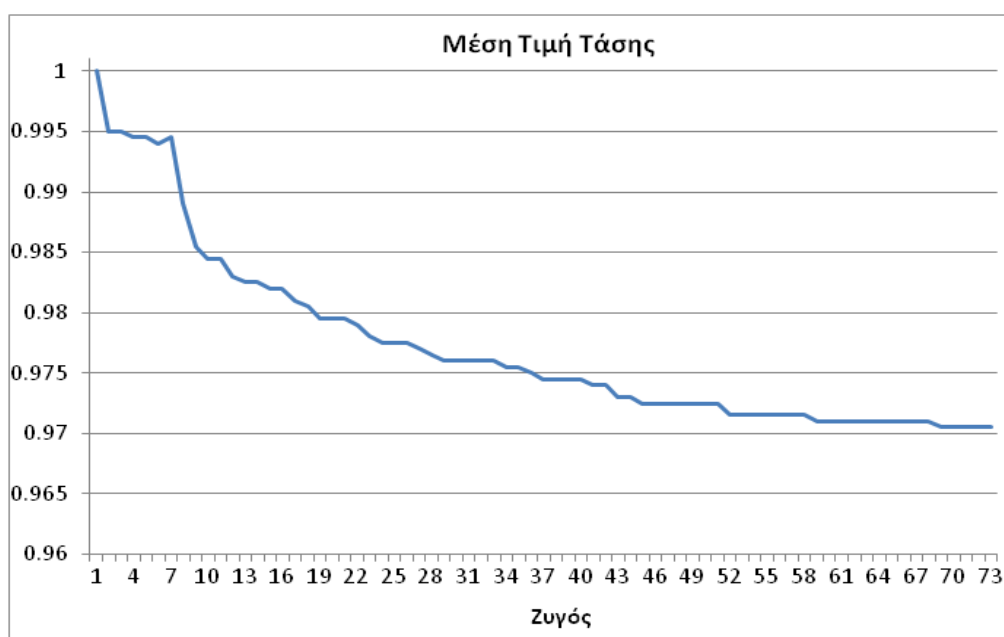
Οι απώλειες είναι μειωμένες, κατά περίπου 5%, σε σχέση με την μη ελεγχόμενη φόρτιση, όπως φαίνεται και από το παρακάτω διάγραμμα 4.30, και είναι συνολικά 241,818 kVA.



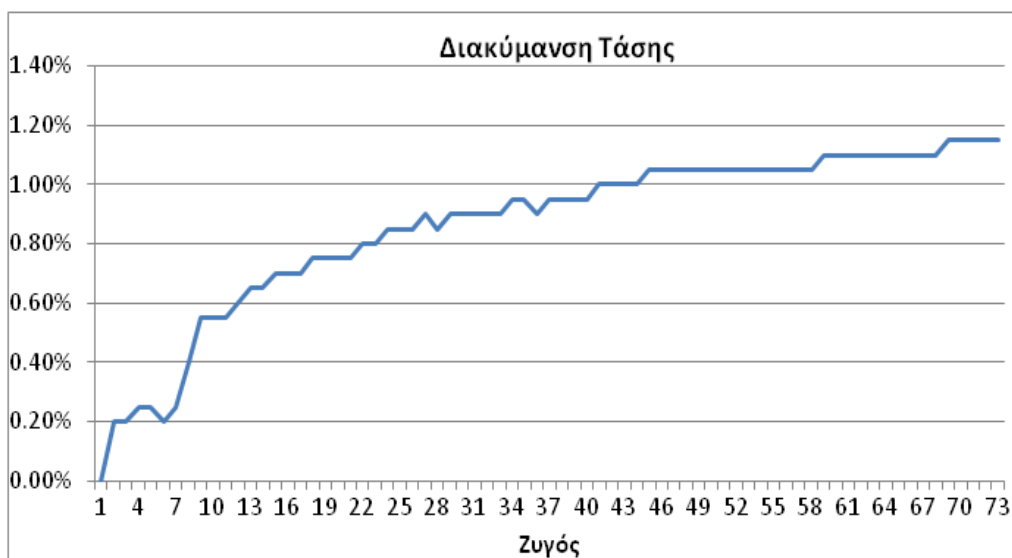
Διάγραμμα 4.30 : Ποσοστά αύξησης απωλειών για μη ελεγχόμενη φόρτιση και ελεγχόμενη φόρτιση ελαχίστου κόστους

Το προφίλ της τάσης των ζυγών παρουσιάζεται στα διαγράμματα 4.31- 4.34. Η μέγιστη πτώση τάσης (0.9705 p.u.) είναι μικρότερη από ότι την αντίστοιχη της μη ελεγχόμενης φόρτισης (0.968p.u.) κατά 0.25%.

Χωρίς tap changer

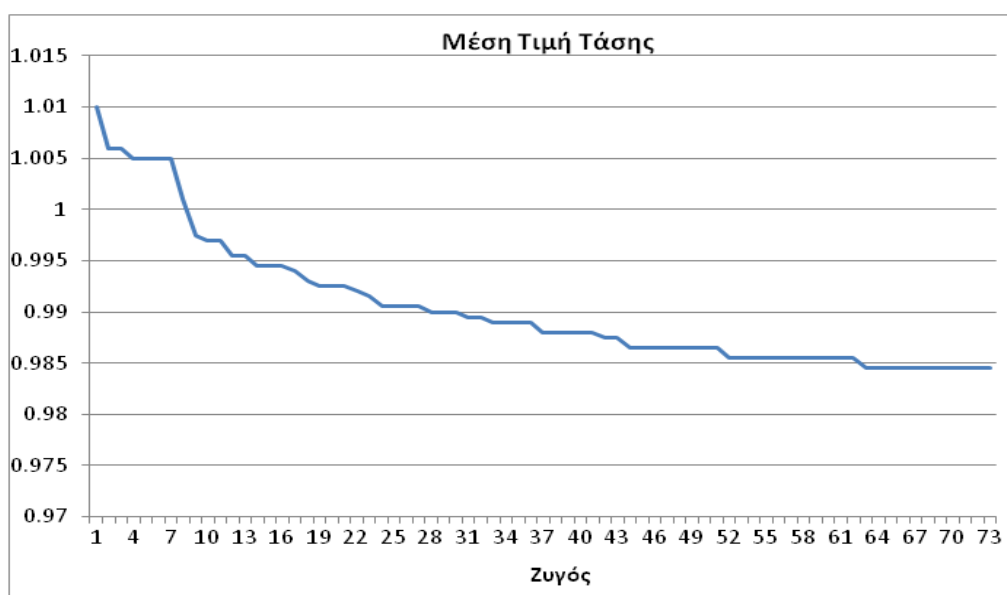


Διάγραμμα 4.31 : Η μέση τιμή της τάσης στους ζυγούς (χωρίς tap changer) - ελεγχόμενη φόρτιση ελαχίστου κόστους

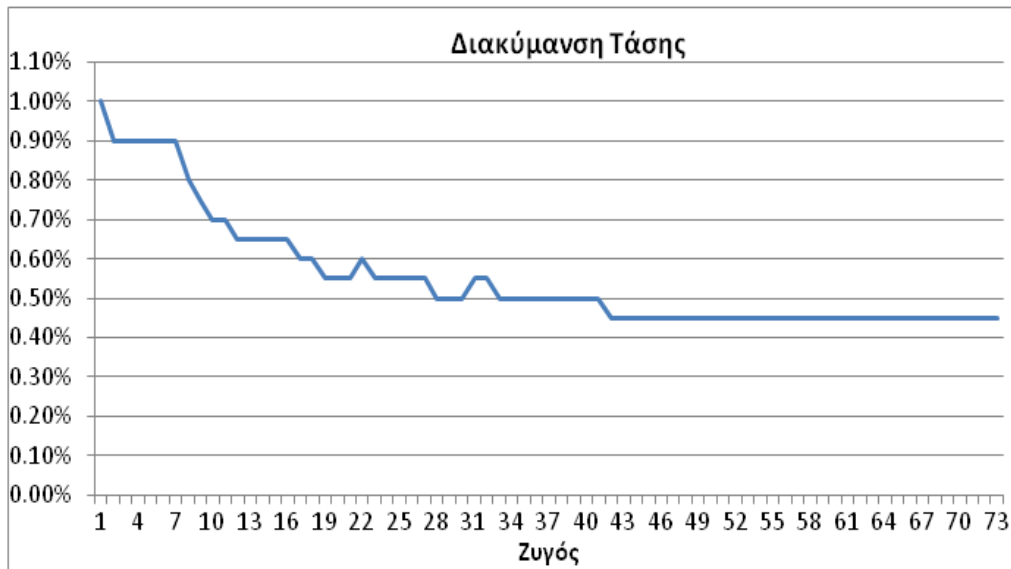


Διάγραμμα 4.32 : Η διακύμανση της τάσης στους ζυγούς (χωρίς tap changer) - ελεγχόμενη φόρτιση ελαχίστου κόστους

Με tap changer

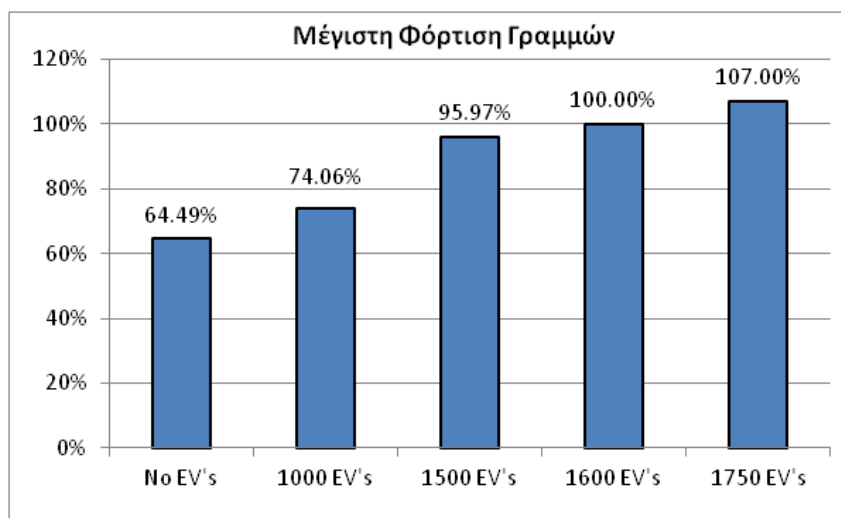


Διάγραμμα 4.33 : Η μέση τιμή της τάσης στους ζυγούς (με tap changer) - ελεγχόμενη φόρτιση ελαχίστου κόστους



Διάγραμμα 4.34 : Η διακύμανση της τάσης στους ζυγούς (με tap changer) - ελεγχόμενη φόρτιση ελαχίστου κόστους

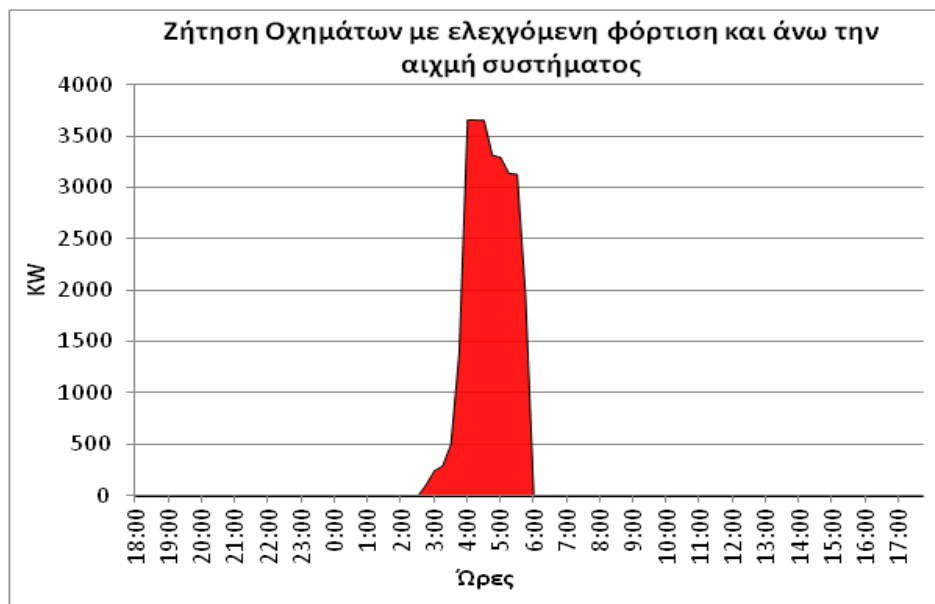
Αντίστοιχα και εδώ, όταν αυξάνονται τα οχήματα, πρόβλημα εμφανίζεται στη φόρτιση των γραμμών και όχι στις τάσεις των ζυγών. Ο μέγιστος αριθμός εξυπηρέτησης υπολογίστηκε στα 1600 οχήματα.



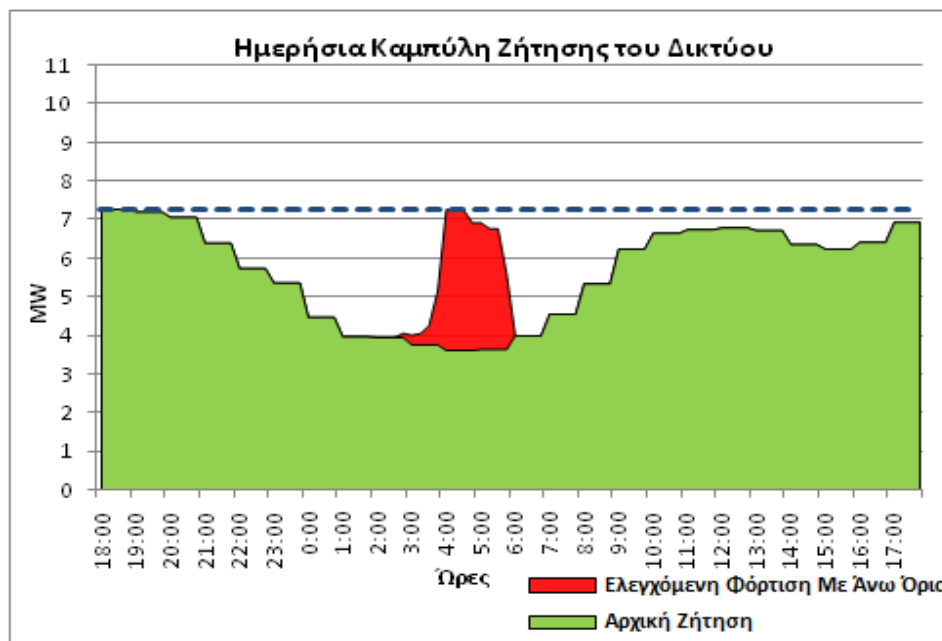
Διάγραμμα 4.35 : Η μέγιστη φόρτιση των γραμμών για διάφορους στόλους - ελεγχόμενη φόρτιση ελαχίστου κόστους

4.5.3 Ελεγχόμενη φόρτιση ελαχιστοποίησης κόστους και περιορισμό αιχμής φόρτισης

Με την μέθοδο αυτή έγινε μια προσπάθεια να ελαττωθεί η αιχμή που παρατηρείται κατά την οικονομικά βέλτιστη κατανομή των ηλεκτρικών οχημάτων όπως παρουσιάστηκε στη προηγούμενη ενότητα. Έτσι τέθηκε ένα άνω όριο (ίση με την αιχμή της ζήτησης του συστήματος) στον αλγόριθμο έτσι ώστε τα οχήματα να φορτίζουν μεν με το ελάχιστο κόστος αλλά παράλληλα η ζήτηση τους να μην ξεπερνά την αιχμή του συστήματος.

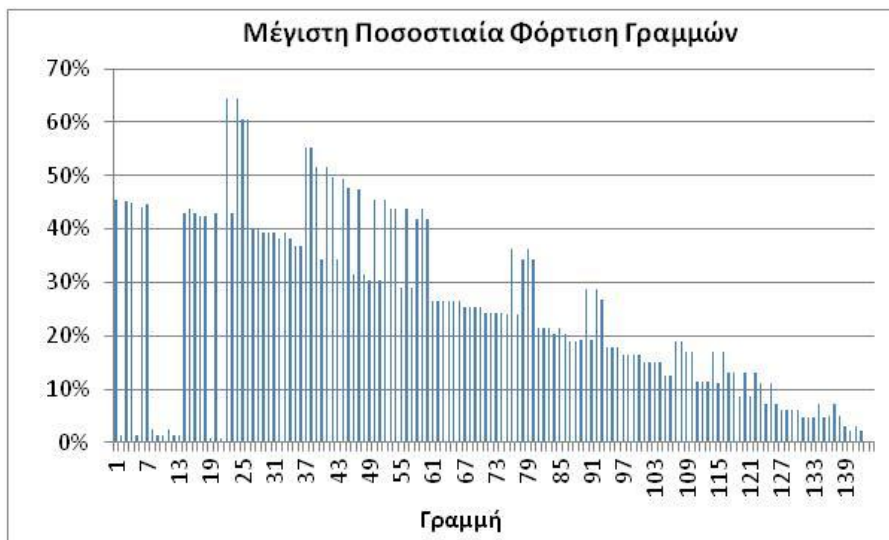


Διάγραμμα 4.36 : Καμπύλη ζήτησης οχημάτων - ελεγχόμενη φόρτιση με όριο την αιχμή ζήτησης του συστήματος

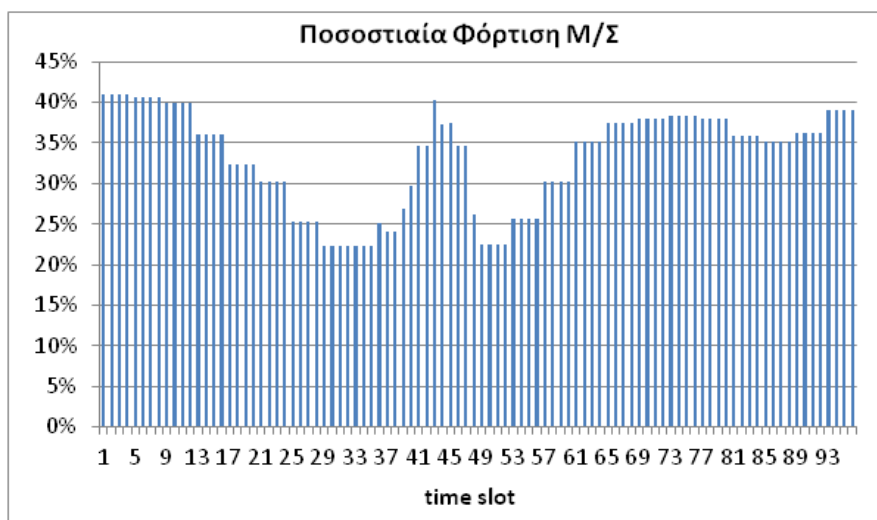


Διάγραμμα 4.37 : Παράθεση Αρχικής Ζήτησης με την Ζήτηση των οχημάτων - ελεγχόμενη φόρτιση με όριο την αιχμή ζήτησης του συστήματος

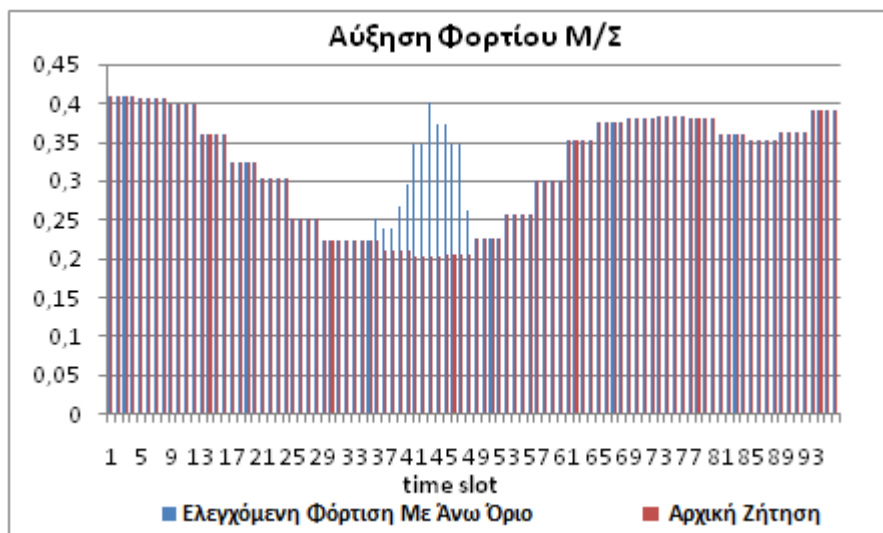
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση για την φόρτιση των γραμμών και των μετασχηματιστών καθώς και οι τάσεις στους ζυγούς εμφανίζονται στα διαγράμματα 4.38 – 4.40. Παρατηρούμε πως η επιβάρυνση των γραμμών και των Μ/Σ είναι σαφώς μικρότερη, περίπου 10%, από την αντίστοιχη περίπτωση της ελεγχόμενης φόρτισης ελαχίστου κόστους.



Διάγραμμα 4.38 : Ποσοστιαία φόρτιση των γραμμών - ελεγχόμενη φόρτιση με όριο την αιχμή ζήτησης του συστήματος

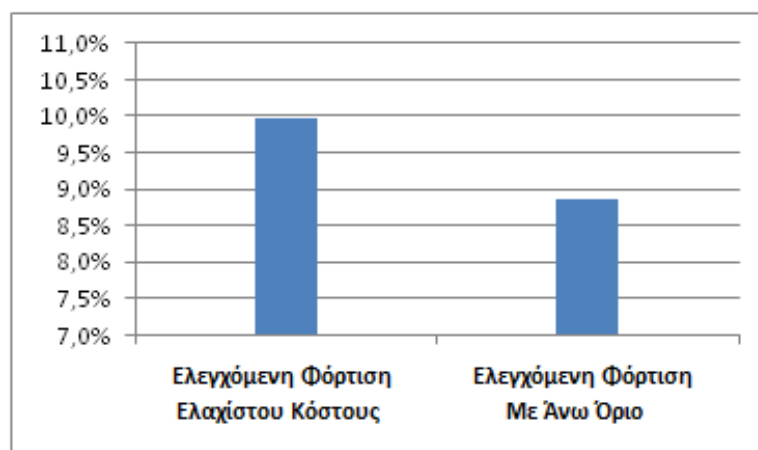


Διάγραμμα 4.39 : Καμπύλη φόρτισης Μ/Σ - ελεγχόμενη φόρτιση με όριο την αιχμή ζήτησης του συστήματος



Διάγραμμα 4.40 : Αύξηση φορτίου Μ/Σ - ελεγχόμενη φόρτιση με όριο την αιχμή ζήτησης του συστήματος

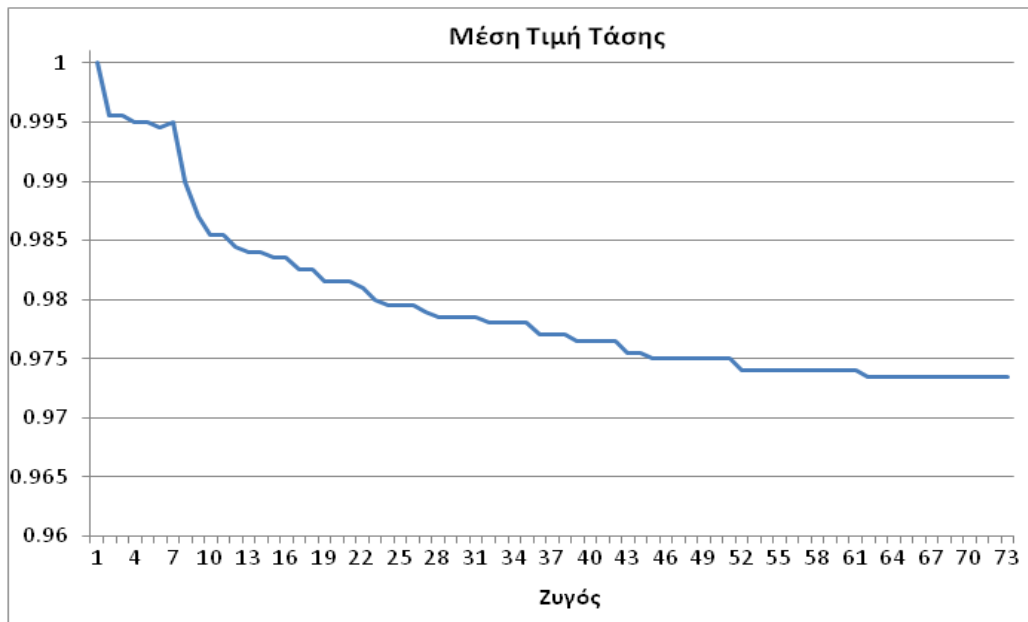
Όσον αφορά τις απώλειες, αυτές εμφανίζονται μειωμένες, κατά 1,2%, σε σχέση με την ελεγχόμενη φόρτιση ελαχίστου κόστους, και είναι 239,358 kVA.



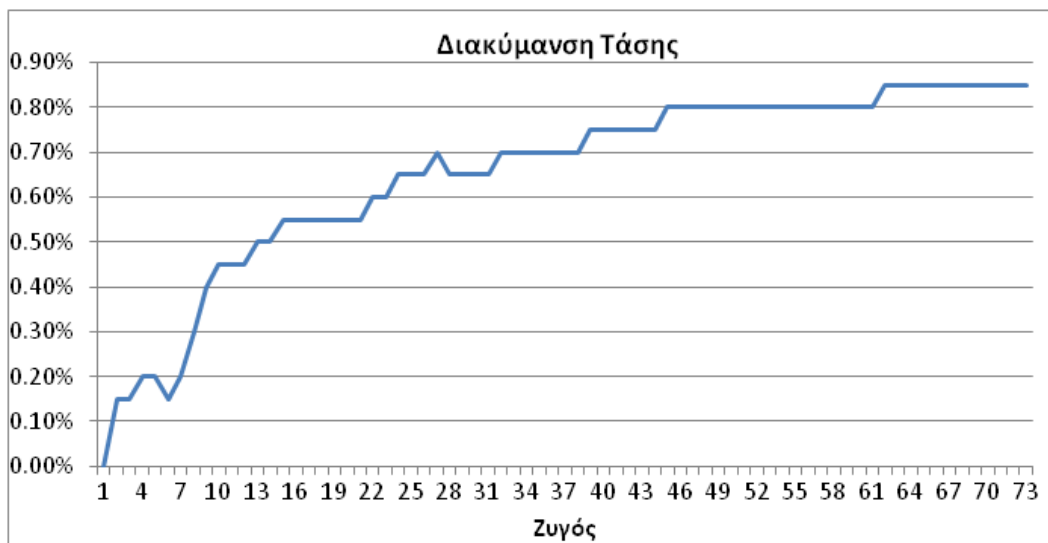
Διάγραμμα 4.41 : Ποσοστά αύξησης απωλειών - ελεγχόμενη φόρτιση με όριο την αιχμή ζήτησης του συστήματος

Το προφίλ της τάσης των ζυγών παρουσιάζεται στα διαγράμματα 4.42- 4.45. Η μέγιστη πτώση τάσης είναι μικρότερη από ότι την αντίστοιχη της μη ελεγχόμενης φόρτισης (κατά 0.57%) και της ελεγχόμενης φόρτισης ελαχίστου κόστους (κατά 0.31%).

Χωρίς tap changer

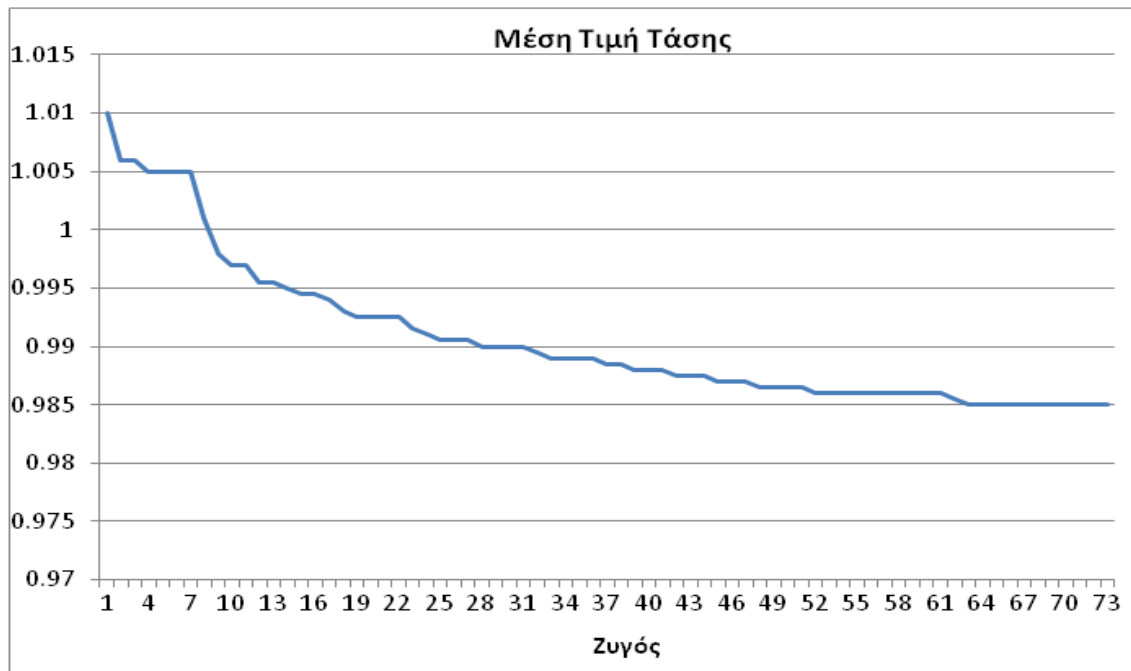


Διάγραμμα 4.42 : Η μέση τιμή της τάσης στους ζυγούς (χωρίς tap changer) - ελεγχόμενη φόρτιση με όριο την αιχμή ζήτησης του συστήματος

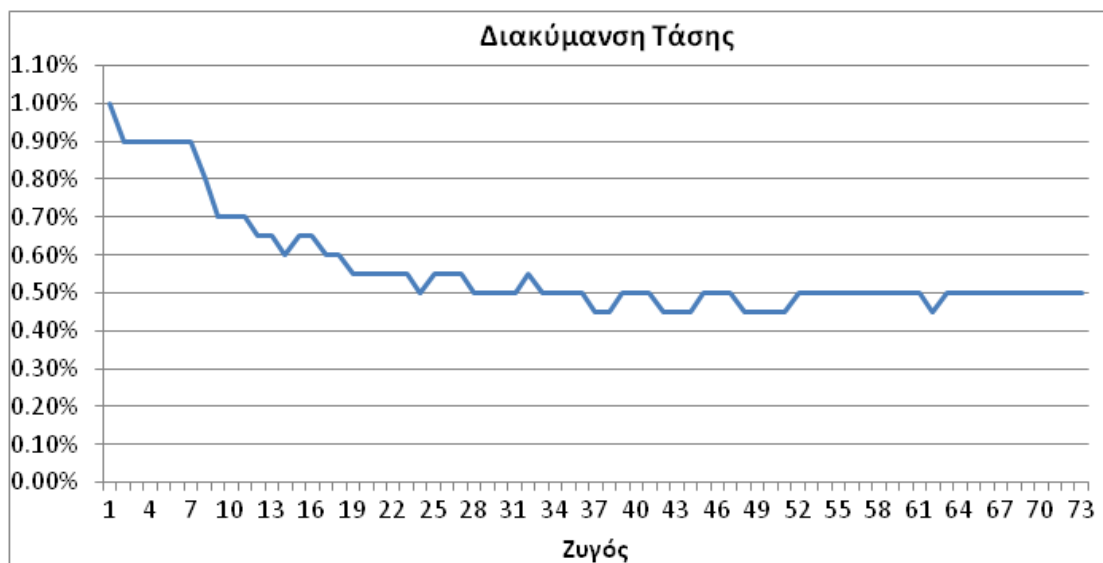


Διάγραμμα 4.43 : Η διακύμανση της τάσης στους ζυγούς (χωρίς tap changer) - ελεγχόμενη φόρτιση με όριο την αιχμή ζήτησης του συστήματος

Με tap changer



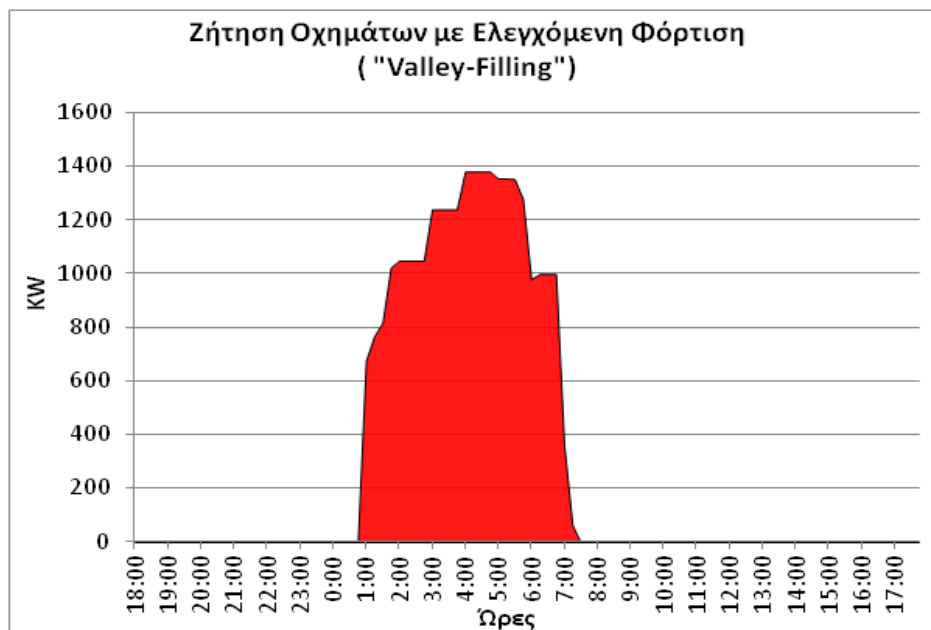
Διάγραμμα 4.44 : Η μέση τιμή της τάσης στους ζυγούς (με tap changer) -- ελεγχόμενη φόρτιση με όριο την αιχμή ζήτησης του συστήματος



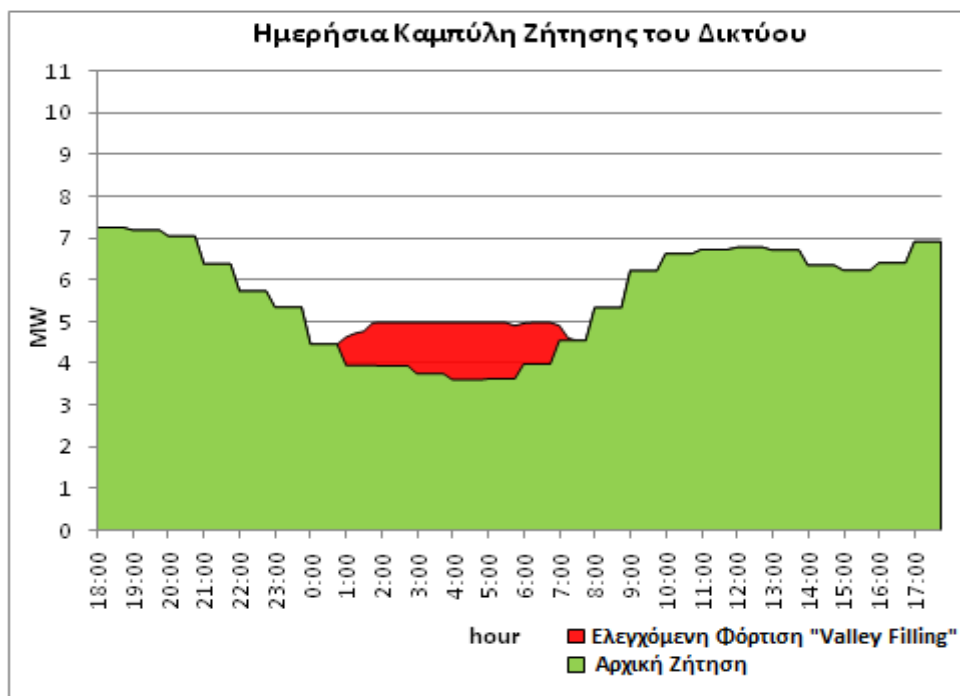
Διάγραμμα 4.45 : Η διακύμανση της τάσης στους ζυγούς (με tap changer) - ελεγχόμενη φόρτιση με όριο την αιχμή ζήτησης του συστήματος

4.5.4 Ελεγχόμενη φόρτιση με ελαχιστοποίηση κόστους και ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου («Valley-Filling»)

Η μέθοδος αυτή στοχεύει στην οικονομική φόρτιση των οχημάτων με παράλληλη εξομάλυνση της καμπύλης ζήτησης του δικτύου. Έτσι το όριο τίθεται αρκετά χαμηλά, τόσο χαμηλά έτσι ώστε να είναι το ελάχιστο δυνατό όριο που να μπορεί να τεθεί κάτω από το οποίο η αγορασμένη ισχύς δεν θα επαρκεί για την πλήρη φόρτιση όλων των οχημάτων. Το αποτέλεσμα αυτής της μεθόδου φόρτισης είναι η εξομάλυνση της καμπύλης ζήτησης των οχημάτων σε τέτοιο βαθμό που αν παρατεθεί με την αρχική καμπύλη ζήτησης του δικτύου, θα σταθεροποιήσει το επίπεδο ζήτησης καθ' όλη την διάρκεια των ωρών μη αιχμής («Valley-Filling»).

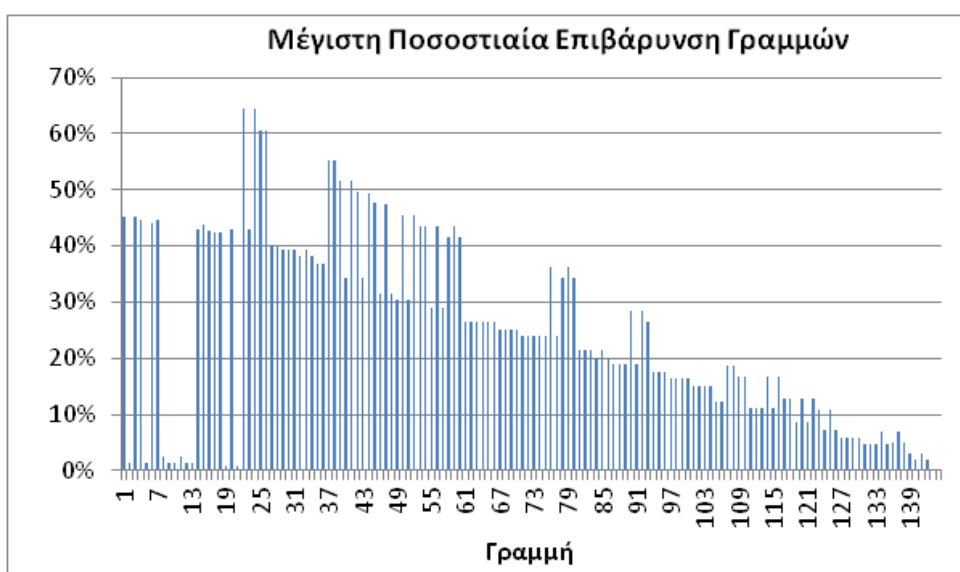


Διάγραμμα 4.46 : Καμπύλη ζήτησης οχημάτων με ελεγχόμενη φόρτιση – «Valley-Filling»

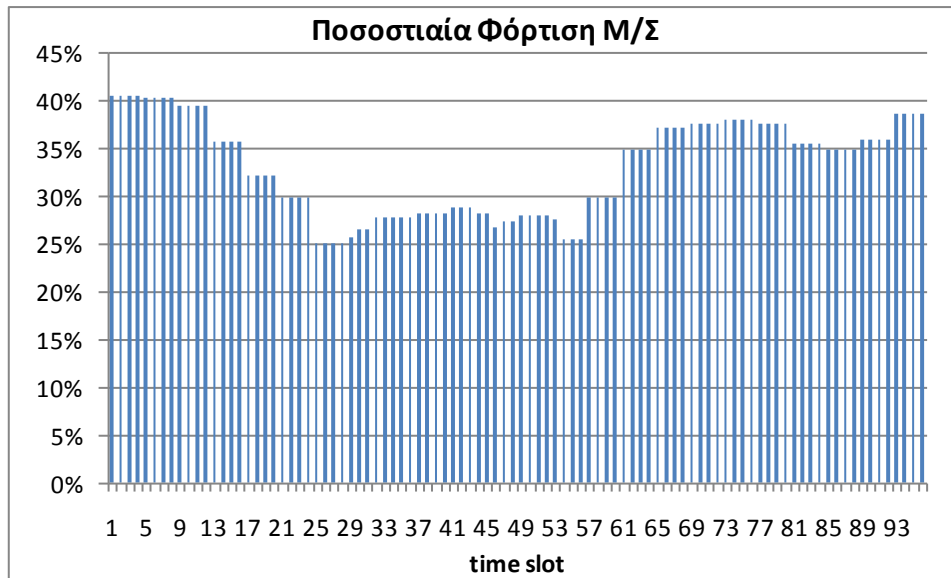


Διάγραμμα 4.47 : Παράθεση Αρχικής Ζήτησης με την Ζήτηση των οχημάτων που φορτίζουν με την μέθοδο «Valley-Filling»

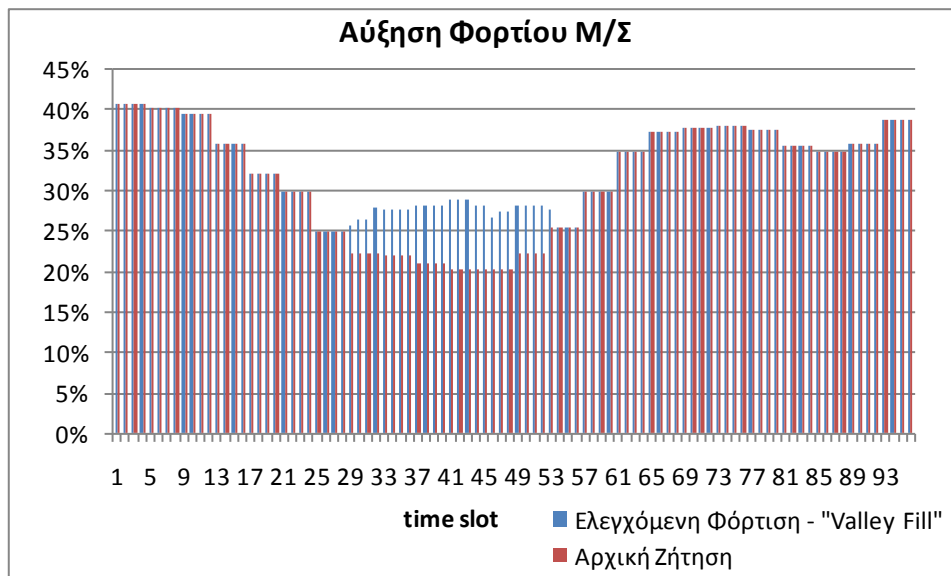
Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την προσομοίωση για την φόρτιση των γραμμών και των μετασχηματιστών καθώς και οι τάσεις στους ζυγούς εμφανίζονται στα διαγράμματα 4.48 – 4.50. Με την μέθοδο αυτή η επιβάρυνση του δικτύου ελαχιστοποιείται καθώς η ζήτηση των οχημάτων κατανέμεται ομοιόμορφα κατά τις ώρες χαμηλής ζήτησης (off-peak hours). Οπότε όπως είναι αναμενόμενο δεν θα αυξηθεί η μέγιστη φόρτιση των γραμμών και των μετασχηματιστών.



Διάγραμμα 4.48 : Ποσοστιαία φόρτιση των γραμμών – «Valley-Filling»

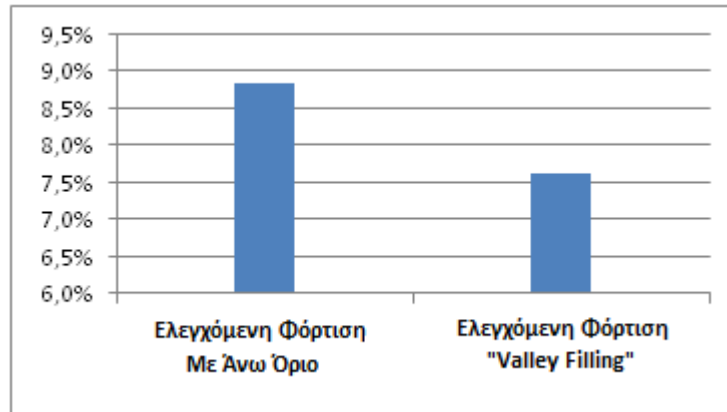


Διάγραμμα 4.49 : Καμπύλη φόρτισης Μ/Σ – «Valley-Filling»



Διάγραμμα 4.50 : Αύξηση φορτίου Μ/Σ – «Valley-Filling»

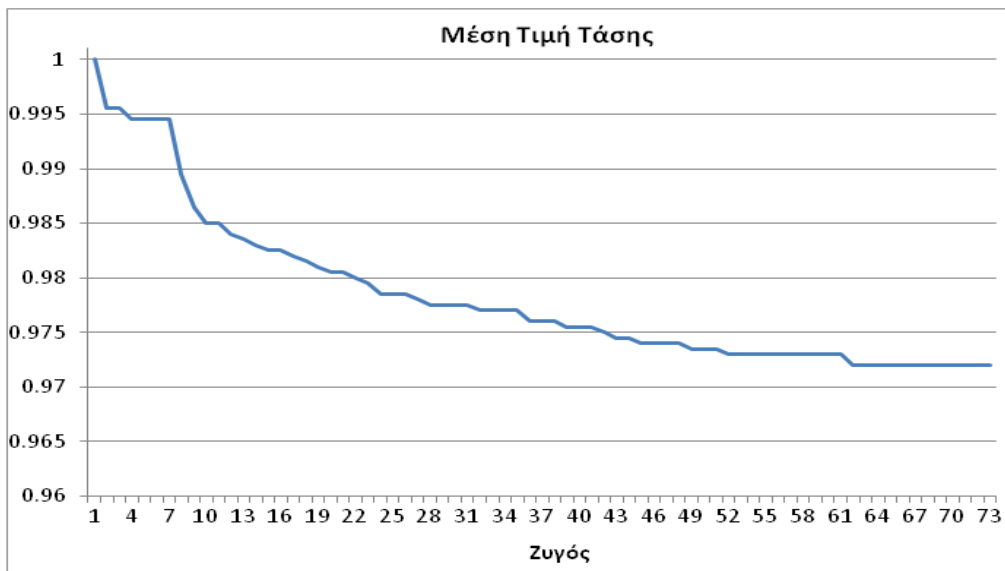
Οι απώλειες του συστήματος είναι ακόμα μικρότερες κατά 1.2%, παρουσιάζουν την μικρότερη αύξηση από όλες τις μεθόδους, σε σχέση με τις απώλειες στην ελεγχόμενη φόρτιση με άνω όριο την αιχμή ζήτησης του δικτύου και είναι 236,700 kVA.



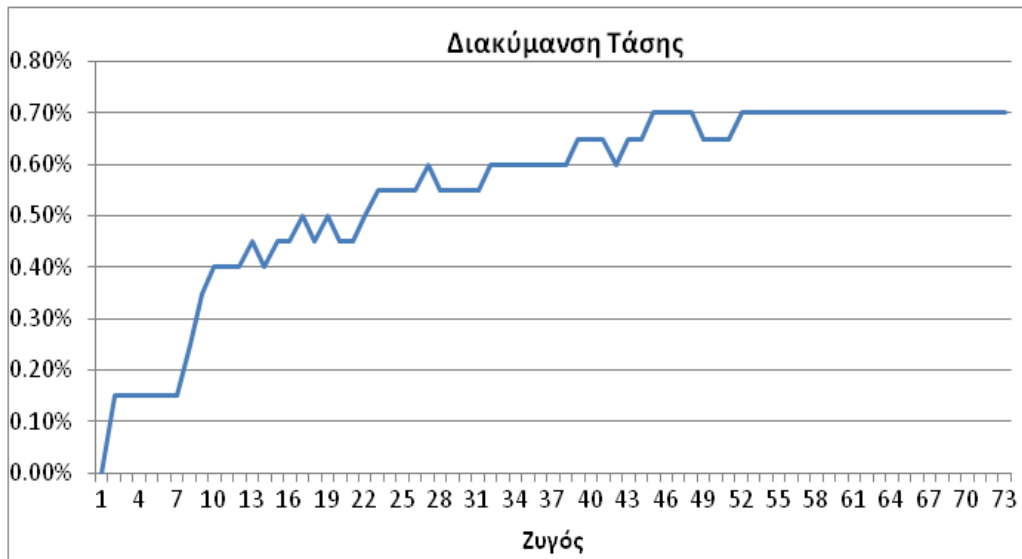
Διάγραμμα 4.51 : Ποσοστά αύξησης απωλειών στις μεθόδους ελεγχόμενης φόρτισης με όριο την αιχμή του συστήματος και ελεγχόμενη φόρτιση «Valley-Filling»

Το προφίλ της τάσης των ζυγών παρουσιάζεται στα διαγράμματα 4.52- 4.55. Η πτώση τάσης είναι μικρότερη από ότι την αντίστοιχη της μη ελεγχόμενης φόρτισης (κατά 0.41%), της ελεγχόμενης φόρτισης ελαχίστους κόστους (κατά 0.15%) και σχεδόν ίδια σε σχέση με την ελεγχόμενη φόρτιση με άνω όριο την αιχμή του συστήματος.

Χωρίς tap changer

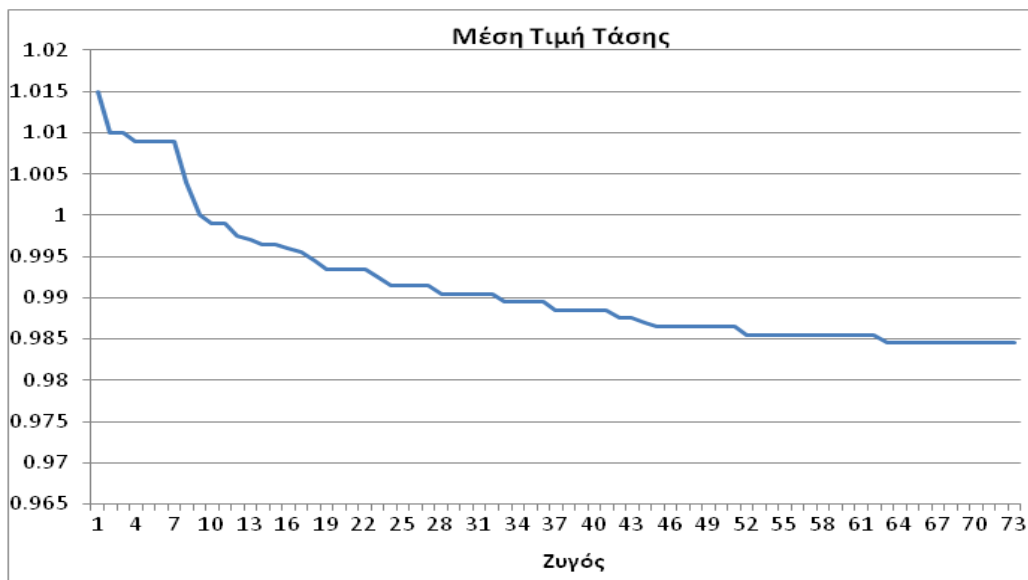


Διάγραμμα 4.52 : Η μέση τιμή της τάσης στους ζυγούς (χωρίς tap changer) - «Valley-Filling»

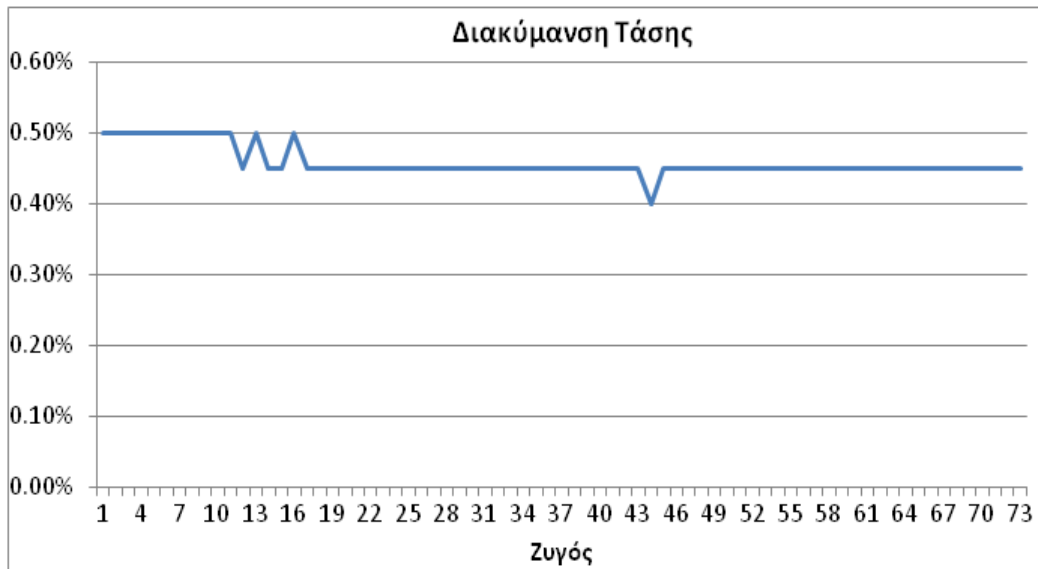


Διάγραμμα 4.53 : Η διακύμανση της τάσης στους ζυγούς (χωρίς tap changer) - «Valley-Filling»

Με tap changer



Διάγραμμα 4.54 : Η μέση τιμή της τάσης στους ζυγούς (με tap changer) - «Valley-Filling»



Διάγραμμα 4.55 : Η διακύμανση της τάσης στους ζυγούς (με tap changer) - «Valley-Filling»

Σε αυτήν και την προηγούμενη μέθοδο δεν έχει νόημα να εξεταστεί ο αριθμός των οχημάτων πάνω από τα οποία εμφανίζεται πρόβλημα στο δίκτυο, γιατί πολύ απλά οι δύο τελευταίοι αλγόριθμοι υλοποιήθηκαν προκειμένου να μην ξεπερνιέται το peak του συστήματος, και συνεπώς δεν μπορεί να παρουσιαστεί μεγαλύτερη φόρτιση από αυτήν του peak. Αυτό που έχει νόημα να εξεταστεί είναι ο αριθμός των οχημάτων πάνω από τον οποίο οι αλγόριθμοι δεν φορτίζουν πλήρως όλα τα οχήματα προκειμένου ακριβώς να μην ξεπεραστεί η αιχμή του συστήματος. Βρέθηκε λοιπόν ότι το όριο αυτό είναι τα 3000 οχήματα, και πάνω από αυτόν το αριθμό κάποια θα μείνουν είτε ελλιπώς φορτισμένα, είτε εντελώς αφόρτιστα. Βέβαια κάποιος μπορεί να απορήσει με το γεγονός ότι και με λιγότερα από 3000 οχήματα έμεναν κάποια αφόρτιστα όπως εδείχθη και στο παράδειγμα του Κεφαλαίου 3,. Η εξήγηση στην απορία αυτή είναι ότι τα οχήματα που μένουν αφόρτιστα εκεί (στο παράδειγμα) οφείλονται στο σφάλμα της πρόβλεψης που ούτως η άλλως θα υπάρχει με κάθε αριθμό οχημάτων. Στη περίπτωση της ελεγχόμενης φόρτισης με άνω όριο, η μέγιστη ποσότητα ζήτησης που μπορεί να διατεθεί δεν επαρκεί για την πλήρη φόρτιση όλων των οχημάτων όταν αυτά ξεπεράσουν τον αριθμό των 3000. Στη περίπτωση αυτή, δεν μιλάμε για σφάλμα πρόβλεψης αλλά για αδυναμία του EV Supplier/Aggregator να διαθέσει περισσότερη ισχύ λόγω των περιορισμών που τίθενται από το άνω όριο ισχύος.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα

Η μεγάλη ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης απαιτεί αλλαγές σε διαδικασίες και πρακτικές των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Τα μελλοντικά σενάρια μεγάλης διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας οδηγούν στην ανάγκη επένδυσης χρήματος και ανθρώπινου δυναμικού έτσι ώστε να αναπτυχθούν καινοτόμες ιδέες και συστήματα που θα επιτρέπουν τον έλεγχο και την εξυπηρέτηση αυτών με τρόπο οικονομικό και χωρίς να προκαλούν πρόωρες επενδύσεις για την αναβάθμιση των δικτύων.

Στην διπλωματική αυτή αναπτύχθηκαν αλγόριθμοι για τον προγραμματισμό, την κατανομή και την διαχείριση του φορτίου των οχημάτων με διαφορετικές μεθόδους που θα ελαχιστοποιούν το κόστος και θα φροντίζουν για την βέλτιστη και απρόσκοπτη λειτουργία του συστήματος. Κάθε μία από τις μεθόδους αυτές εξετάζεται αναλυτικά, προσομοιώνεται σε ένα υπαρκτό δίκτυο και μελετώνται οι επιδράσεις της χρήσης της για την εξυπηρέτηση του φορτίου των ηλεκτρικών οχημάτων στα τεχνικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά του δικτύου.

Οι αλγόριθμοι αναπτύχθηκαν σε προγραμματιστικό περιβάλλον MATLAB, και επιτρέπουν την φόρτιση των οχημάτων με τέσσερις διαφορετικές στρατηγικές. Οι στρατηγικές αυτές είναι οι :

- ❖ Μη ελεγχόμενη φόρτιση,
- ❖ Ελεγχόμενη φόρτιση με ελαχιστοποίηση κόστους,
- ❖ Ελεγχόμενη φόρτιση με ελαχιστοποίηση κόστους και περιορισμό αιχμής φόρτισης ώστε η συνολική ζήτηση του συστήματος να μην ξεπερνά την αιχμή της οικιακής ζήτησης,
- ❖ Ελεγχόμενη φόρτιση με ελαχιστοποίηση κόστους και ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του δικτύου.

Η μεταβολή των χαρακτηριστικών του δικτύου στην κάθε μία μέθοδο εξετάστηκε με την βοήθεια του λογισμικού EUROSTAG, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τις απαιτούμενες προσομοιώσεις. Τα χαρακτηριστικά που εξετάζονται αφορούν τάσεις ζυγών, φόρτιση γραμμών και μετασχηματιστών, και απώλειες δικτύου.

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις συνοψίζονται στις επόμενες παραγράφους.

Η μη ελεγχόμενη στρατηγική φόρτισης προκαλεί σημαντική αύξηση των απωλειών του συστήματος και έχει μικρό περιθώριο διείσδυσης οχημάτων. Στην ελεγχόμενη φόρτιση των οχημάτων για τη μελέτη αστικού δικτύου διανομής παρατηρήσαμε ότι η διείσδυση οχημάτων δεν επηρεάζει τόσο έντονα την τάση του δικτύου όσο την φόρτιση των γραμμών. Αυτό συμβαίνει γιατί τα αστικά δίκτυα αποτελούνται από μικρές σε μήκος γραμμές που εξυπηρετούν αυξημένη ζήτηση. Ως Η υπερφόρτισης γραμμών επιτυγχάνονται με σχετικά μικρό αριθμό οχημάτων, και έτσι δεν δίνεται η δυνατότητα εξυπηρέτησης μεγάλου αριθμού διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων. Η μέθοδος αυτή λοιπόν είναι πολύ απαιτητική για το δίκτυο και χρειάζονται περαιτέρω επενδύσεις στην υποδομή του δικτύου για να αποφευχθούν υπερφορτίσεις και άλλα τεχνικά προβλήματα, και να διασφαλισθεί η αξιοπιστία και η ποιότητα του συστήματος.

Η φόρτιση των οχημάτων με ελεγχόμενη φόρτιση για την ελαχιστοποίηση του κόστους στοχεύει στην αποσυμφόρηση του δικτύου τις ώρες αιχμής, καθώς η φόρτιση των οχημάτων συγκεντρώνεται στις ώρες χαμηλής ζήτησης και κόστους. Παρ' όλα αυτά, η φόρτιση μεγάλου αριθμού οχημάτων τις νυκτερινές ώρες δημιουργεί μια νέα αιχμή ζήτησης, πράγμα που σημαίνει, για την περίπτωση του δικτύου που εξετάζεται, ότι παρουσιάζονται υπερφορτίσεις γραμμών ακόμα μεγαλύτερες από ότι στην μη ελεγχόμενη μέθοδο όταν η διείσδυση των οχημάτων είναι αυξημένη. **Οι απώλειες στο σύστημα μειώνονται, αλλά η αιχμή που δημιουργείται καθιστά αυτήν την μέθοδο ακατάλληλη για την εξυπηρέτηση μεγάλου αριθμού οχημάτων.**

Στοχεύοντας στον έλεγχο των πιθανών μη αναμενόμενων αιχμών, **η μέθοδος της ελεγχόμενης φόρτισης με ελαχιστοποίηση κόστους και περιορισμό αιχμής φόρτισης** μετατοπίζει τα οχήματα κατάλληλα προκειμένου να μην ξεπεραστεί το επιθυμητό όριο. Αυτό **έχει ως αποτέλεσμα την αποδοτικότερη λειτουργία του συστήματος (λιγότερες απώλειες και μικρότερη καταπόνηση του δικτύου), και επιτρέπει την μέγιστη διείσδυση των οχημάτων στο δίκτυο.**

Μια παραλλαγή της προηγούμενης μεθόδου είναι **η ελεγχόμενη φόρτιση με ελαχιστοποίηση κόστους και ταυτόχρονη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του**

δικτύου. Σε αυτήν την μέθοδο το όριο τίθεται αρκετά χαμηλά έτσι ώστε να επιτευχθεί **το λεγόμενο «Valley-Filling», εξομαλύνοντας την καμπύλη ζήτησης του συστήματος, και παρουσιάζει συνολικά την καλύτερη εικόνα από όλες τις προηγούμενες μεθόδους, επιβαρύνοντας στο ελάχιστο το δίκτυο και ελαχιστοποιώντας τις απώλειες.** Η αποδοτικότερη λειτουργία όμως του δικτύου έχει ως αποτέλεσμα την εξυπηρέτηση του φορτίου σε ώρες με μεγαλύτερο ενεργειακό κόστος. Ως εκ τούτου, η αποδοτικότητα της μεθόδου αυτής εξαρτάται και από τα οικονομικά κίνητρα που λαμβάνει ο Κεντρικός ελεγκτής, που καθορίζει τη φόρτιση του στόλου. Η μέθοδος αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί από τον Κεντρικό Ελεγκτή για την παροχή επιπρόσθετων υπηρεσιών στον Διαχειριστή του συστήματος με απώτερο στόχο την αποδοτικότερη λειτουργία του δικτύου.

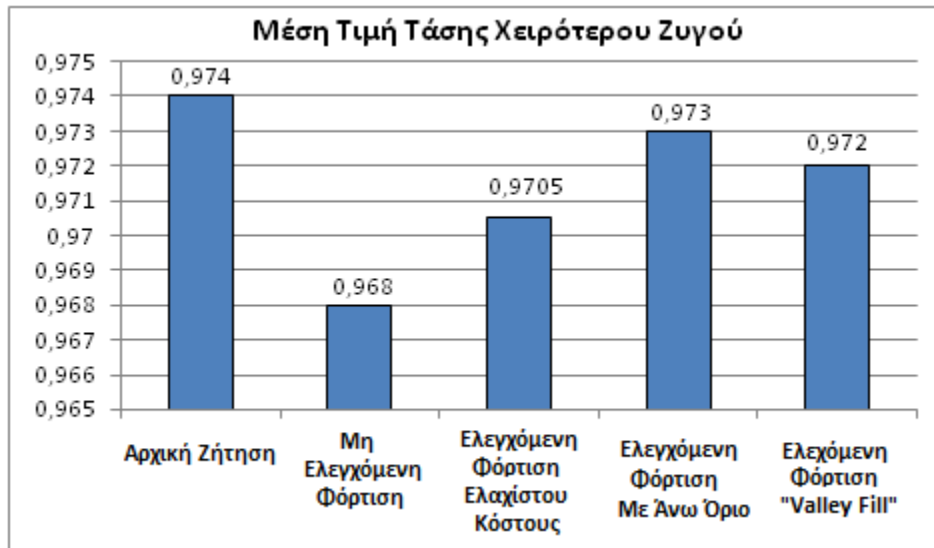
Καταλαβαίνουμε ότι οι επιδράσεις της φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων εξαρτώνται από μια πληθώρα παραμέτρων και μεταβλητών όπως είναι τα μοτίβα οδήγησης και το είδος του κάθε οχήματος, αλλά και τη φόρτιση του εκάστοτε δικτύου. Αναλύοντας τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις προσομοιώσεις, καταλήγουμε στα εξής αποτελέσματα :

Τάσεις Ζυγών

Όπως είναι αναμενόμενο, διαφορετικά σενάρια φόρτισης οδηγούν σε διαφορετικές τάσεις στους ζυγούς. Υπάρχουν κάποια όρια στην τάση τα οποία δεν πρέπει να ξεπεραστούν, για να διασφαλίζεται η ποιότητα του συστήματος. Αυτά αφορούν την μέση τιμή και την διακύμανση της τάσης :

- $0,90 \text{ p. u.} \leq V \leq 1,10 \text{ p. u.}$
- Μέση Τιμή : $0,95 \text{ p. u.} \leq \frac{V_{\max}+V_{\min}}{2} \leq 1,05 \text{ p. u.}$
- Διακύμανση : $\left| \frac{V_{\max}-V_{\min}}{2} \right| \cdot 100\% \leq 3\%$

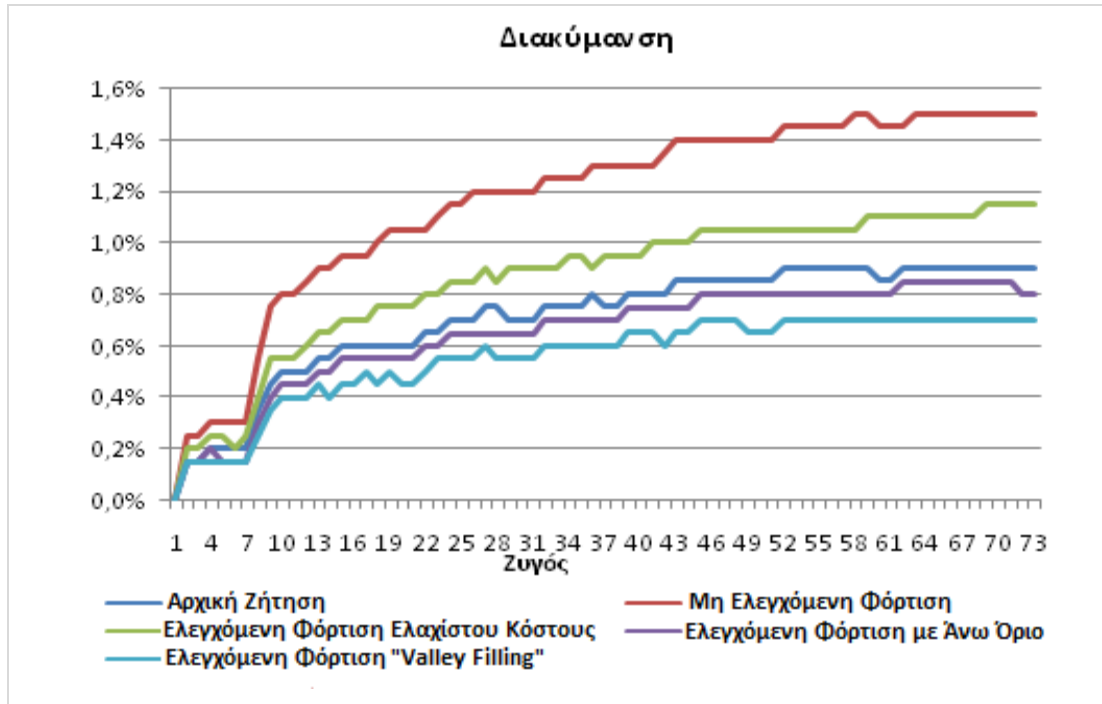
Για την μέση τιμή εξετάζεται η τάση του χειρότερου ζυγού, που για ακτινωτό δίκτυο όπως είναι αυτό που εξετάζεται είναι ο πιο απομακρυσμένος από τον slack bus. Έτσι έχουμε :



Διάγραμμα 5.1 : Μέση τιμή της τάσης του χειρότερου ζυγού

Βλέπουμε όλες οι τάσεις είναι εντός ορίων, και ότι η μέθοδος της μη ελεγχόμενης φόρτισης παρουσιάζει την μεγαλύτερη πτώση τάσης πράγμα που ήταν αναμενόμενο καθώς αυτή είναι που εμφανίζει την μεγαλύτερη αιχμή. Αυτό που ίσως γεννά απορίες είναι το ότι η μέθοδος του «Valley-Filling» φαίνεται να παρουσιάζει μεγαλύτερη μέση τιμή τάσης από ότι η ελεγχόμενη φόρτιση με άνω όριο. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η ελεγχόμενη φόρτιση με άνω όριο εμφανίζει αυξημένο φορτίο για μικρότερο χρονικό διάστημα από ότι η κατανομή της μεθόδου «Valley-Filling», και έτσι η πτώση τάσης διαρκεί λιγότερο. Οπότε, ακόμα κι αν η ελεγχόμενη φόρτιση με άνω όριο εμφανίζει μεγαλύτερη πτώση τάσης αυτή είναι μικρής διάρκειας και άρα επιδρά λιγότερο στη συνολική μέση τιμή της τάσης.

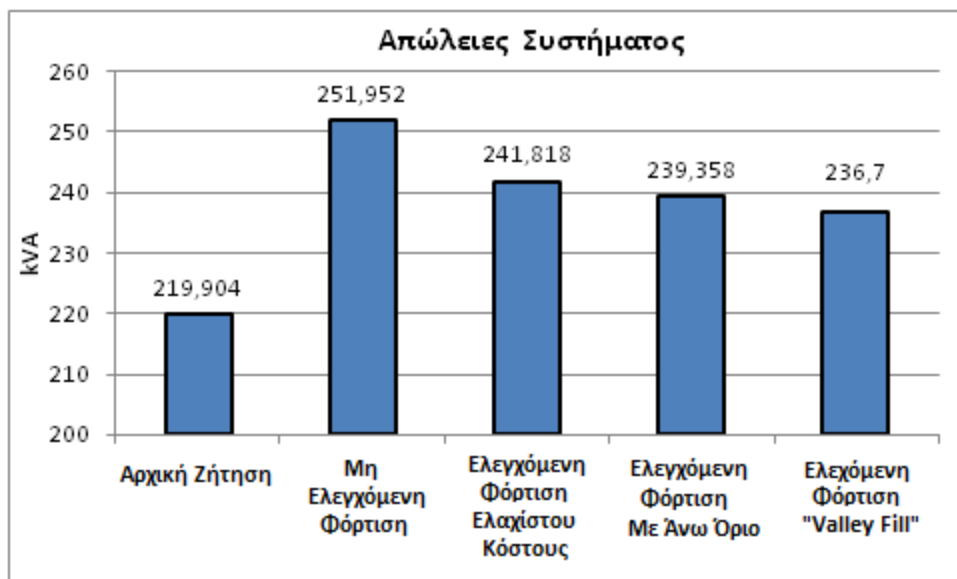
Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η διακύμανση της τάσης σε όλους τους ζυγούς, κατά την διάρκεια της ημέρας. Η χειρότερη διακύμανση εμφανίζεται στην μη ελεγχόμενη φόρτιση, ενώ η μικρότερη στη μέθοδο «Valley-Filling». Αυτό είναι αναμενόμενο γιατί στην μεν μη ελεγχόμενη φόρτιση το μέγιστο της καμπύλης αυξάνει, ενώ το ελάχιστο παραμένει σταθερό ενώ με στη μέθοδο «Valley-Filling» το μέγιστο παραμένει σταθερό και αυξάνεται το ελάχιστο της καμπύλης. Άρα η διαφορά τους μειώνεται, και η διακύμανση είναι η ελάχιστη.



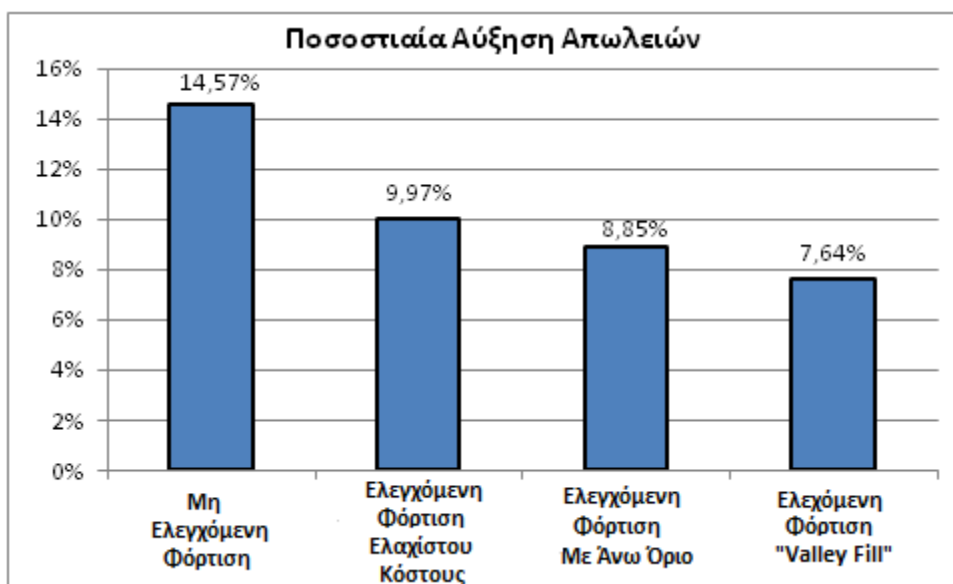
Διάγραμμα 5.2 : Διακύμανση της τάσης σε όλους τους ζυγούς

Απώλειες Συστήματος

Όπως είναι αναμενόμενο, η φόρτιση οχημάτων από το δίκτυο, με οποιοδήποτε τρόπο κι αν αυτή γίνει, θα αυξήσει τις απώλειες του δικτύου. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι συνολικές απώλειες του συστήματος για κάθε μέθοδο και η ποσοστιαία αύξηση αυτών σε σχέση με τις αρχικές απώλειες του συστήματος.



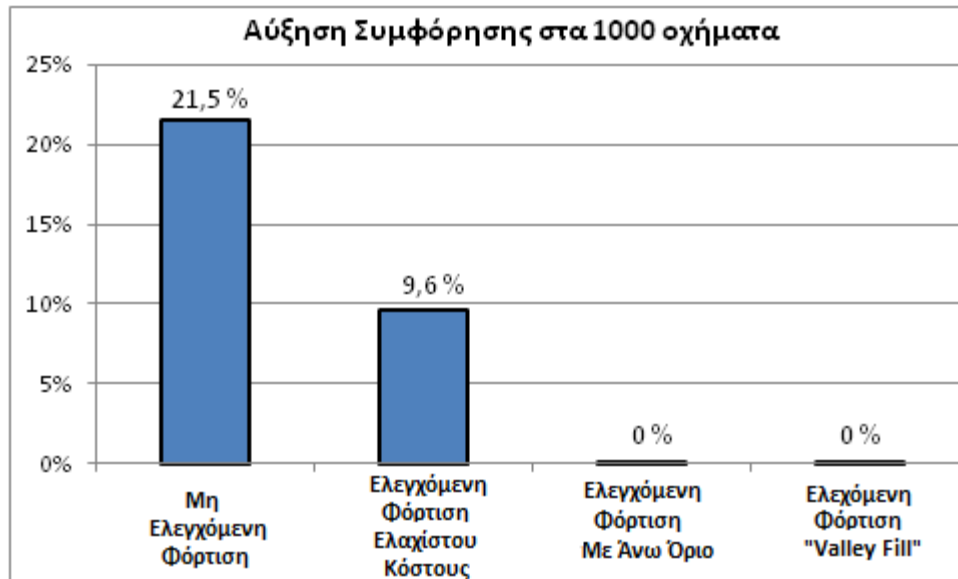
Διάγραμμα 5.3 : Απώλειες Συστήματος (απόλυτα μεγέθη) για 1000 οχήματα



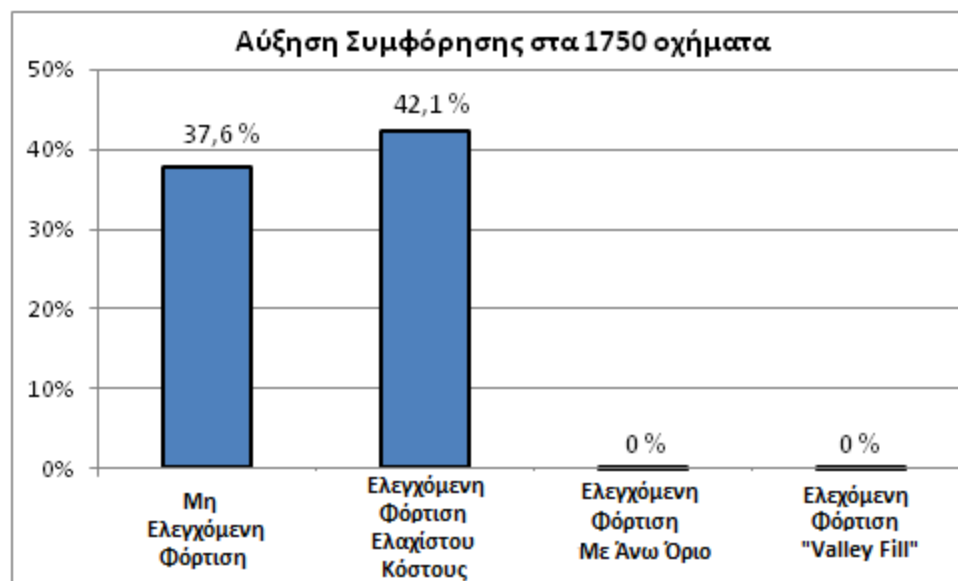
Διάγραμμα 5.4 : Αύξηση απωλειών συστήματος για 1000 οχήματα

Συμφόρηση Γραμμών

Εξετάζεται η αύξηση της μέγιστης συμφόρησης της χειρότερης γραμμής στις διαφορετικές στρατηγικές φόρτισης. Στην ουσία βλέπουμε την επίδραση της νέας αιχμής. Για 1000 οχήματα η μη ελεγχόμενη φόρτιση αυξάνει την αιχμή περισσότερο από την ελεγχόμενη φόρτιση ελαχίστου κόστους, και άρα αυτή αναμένουμε να επιβαρύνει περισσότερο τις γραμμές. Αν τα οχήματα είναι 1750, η μέθοδος της ελεγχόμενης φόρτισης ελαχίστου κόστους λόγω του περιορισμένου εύρους της καμπύλης της δημιουργεί μεγαλύτερη αιχμή από ότι η μη ελεγχόμενη φόρτιση. Αυτό συνεπάγεται μεγαλύτερη επιβάρυνση του δικτύου όπως φαίνεται και στα παρακάτω διαγράμματα 5,5 και 5.6. Η ελεγχόμενη φόρτιση με άνω όριο και η «Valley-Filling» δεν επηρεάζουν τη μέγιστη συμφόρηση των γραμμών,.



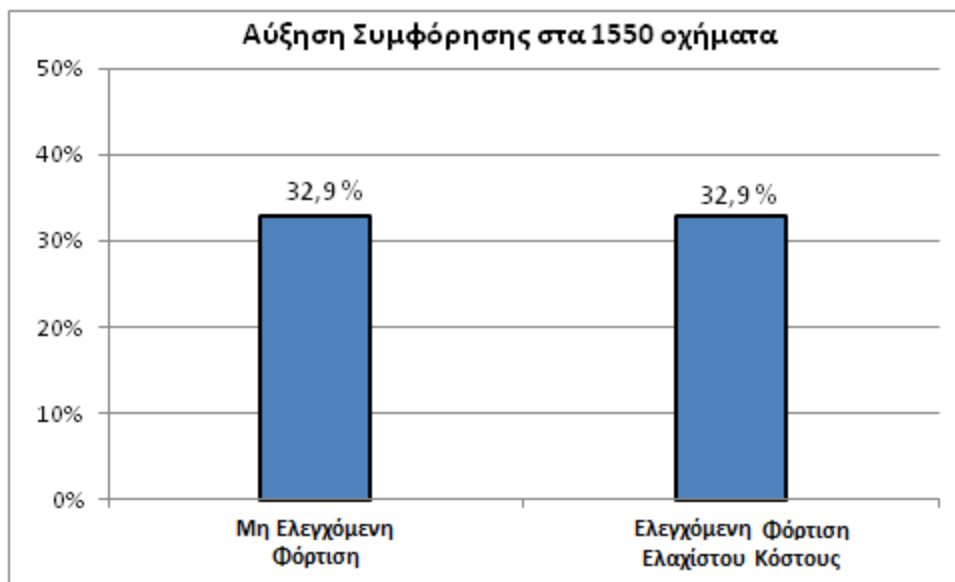
Διάγραμμα 5.5 : Αύξηση της συμφόρησης στην χειρότερη γραμμή για 1000 οχήματα σε σχέση με την αρχική του συστήματος



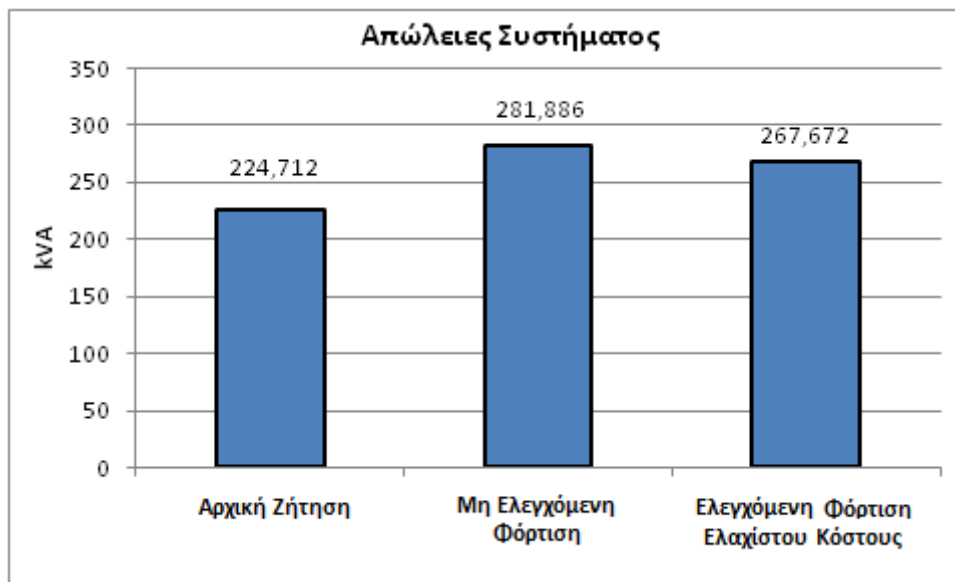
Διάγραμμα 5.6 : Αύξηση της συμφόρησης στην χειρότερη γραμμή για 1750 οχήματα σε σχέση με την αρχική του συστήματος

Υπάρχει ένας οριακός αριθμός οχημάτων στον οποίο οι αιχμές που δημιουργούνται από την μη ελεγχόμενη φόρτιση και την ελεγχόμενη φόρτιση ελαχίστου κόστους μέθοδο είναι ίσες. Ο αριθμός αυτός βρέθηκε μέσω προσομοιώσεων ότι είναι το 1550, πράγμα που σημαίνει ότι περισσότερα από 1550 οχήματα, αν φορτίζουν με τη μη ελεγχόμενη μέθοδο, θα προκαλέσουν μικρότερη αύξηση της συμφόρησης στο σύστημα από αυτήν που θα προκαλούσαν αν φόρτιζαν με την με την ελεγχόμενη μέθοδο ελαχιστοποίησης κόστους. Γενικά όμως η ελεγχόμενη μέθοδος ελαχιστοποίησης κόστους είναι προτιμότερη από την μη

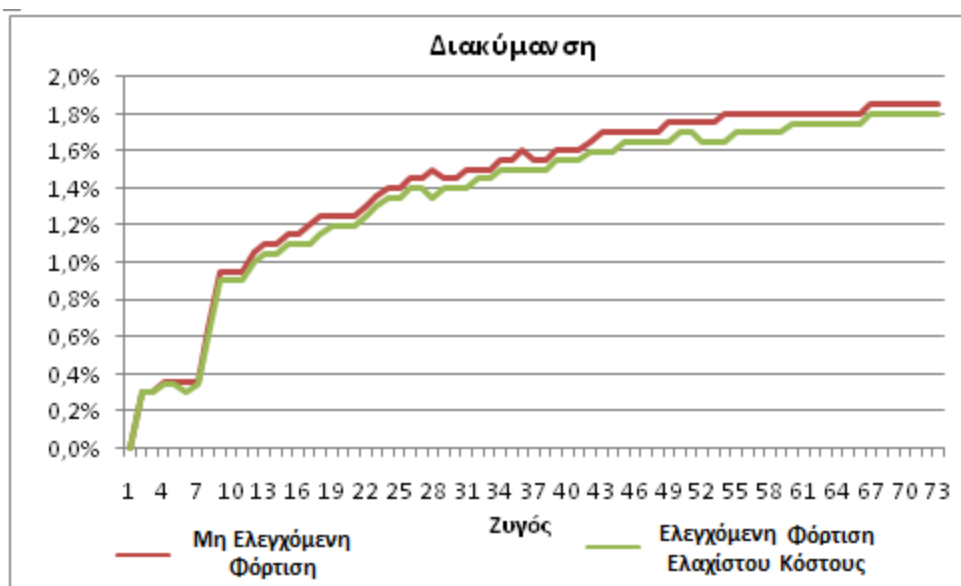
ελεγχόμενη φόρτιση για χαμηλά ή και μέτρια επίπεδα διείσδυσης καθώς εμφανίζει μικρότερες απώλειες και καλύτερο προφίλ τάσεων. Όπως φαίνεται και στα παρακάτω διαγράμματα για 1550 οχήματα, ενώ η μέγιστη αύξηση της συμφόρησης είναι ίδια, οι απώλειες του δικτύου και η διακύμανση της τάσης των ζυγών είναι μικρότερες στην ελεγχόμενη μέθοδο ελαχιστοποίησης κόστους.



Διάγραμμα 5.7 : Αύξηση της συμφόρησης στην χειρότερη γραμμή για 1550 οχήματα σε σχέση με την αρχική του συστήματος



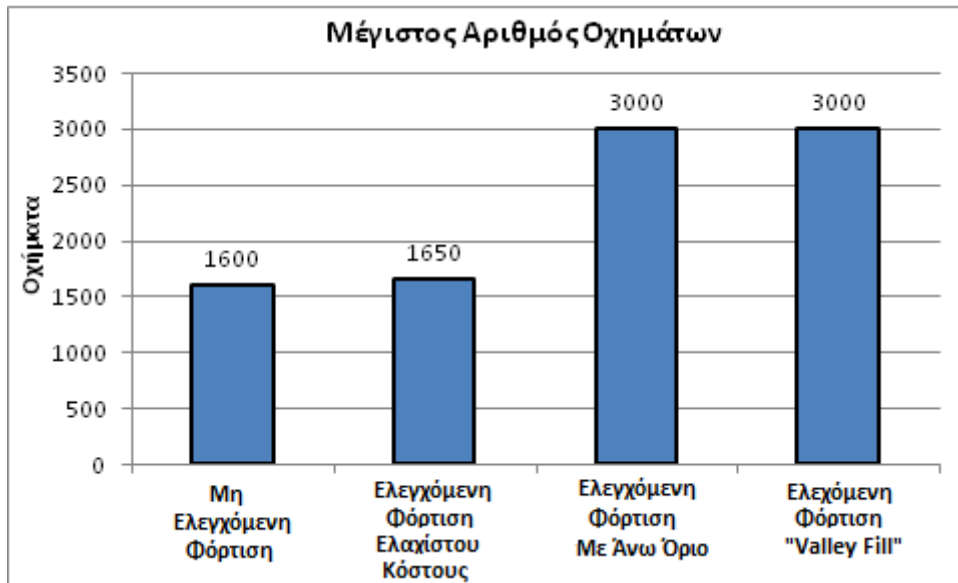
Διάγραμμα 5.8 : Απώλειες Συστήματος (απόλυτα μεγέθη) για 1550 οχήματα για μη ελεγχόμενη φόρτιση και ελεγχόμενη φόρτιση ελαχίστου κόστους



Διάγραμμα 5.9 : Διακύμανση της τάσης σε όλους τους ζυγούς για μη ελεγχόμενη φόρτιση και ελεγχόμενη φόρτιση ελαχίστου κόστους

Μέγιστο Επίπεδο Διείδυσης

Τέλος αυτό που αξίζει να αναφερθεί είναι ο μέγιστος αριθμός οχημάτων που μπορεί να εξυπηρετηθεί από την κάθε μέθοδο χωρίς να παρουσιαστεί κάποιο πρόβλημα στα τεχνικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά του δικτύου. Συγκεντρώνοντας τα αποτελέσματα του Κεφαλαίου 4, μπορούμε να δούμε ότι η μέγιστη χωρητικότητα σε οχήματα επιτυγχάνεται με την ελεγχόμενη φόρτιση με άνω όριο και τη φόρτιση «Valley-Filling», οι οποίες στις οριακές καταστάσεις εμφανίζουν τα ίδια αποτελέσματα. Υπενθυμίζεται ότι στις μεθόδους αυτές ο μέγιστος βαθμός διείδυσης λαμβάνεται ως ο αριθμός των οχημάτων των οποίων η ζήτηση για την πλήρη φόρτιση τους δεν ξεπερνά σε κανένα χρονικό διάστημα την ημερήσια αιχμή οικιακής ζήτησης του δικτύου άνευ οχημάτων (Διάγραμμα 5.10).



Διάγραμμα 5.10 : Μέγιστη δυνατή διείσδυση οχημάτων στο δίκτυο ανά μέθοδο

Από ότι αναφέρθηκε λοιπόν, είναι ξεκάθαρο ότι προκειμένου να ενσωματωθεί μεγάλος αριθμός ηλεκτρικών οχημάτων στα συστήματα διανομής χωρίς να υπερβαίνονται τα τεχνικά όρια αυτού, και να απαιτούνται πρόωρες επενδύσεις σε έργα υποδομής, πρέπει να αναπτυχθούν μηχανισμοί και διαδικασίες που λαμβάνουν υπόψη όχι μόνο το ενεργειακό κόστος, αλλά και την λειτουργία του δικτύου.

Βιβλιογραφία

- [1.1] A.M. Foley, I.J. Winning, B.P. Ó Gallachóir, “State-of-the-Art in Electric Vehicle Charging Infrastructure”, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Lille, pp.1-6, Σεπτέμβριος 2010.
- [1.2] “Timeline: History of the Electric Car”, Available at: <http://www.pbs.org/now/shows/223/electric-car-timeline.html> (published at 30/10/2009).
- [1.3] Eric Loveday, “Deutsche Bank revises li-ion battery cost forecasts downward to \$250/kWh by 2020”, Available at : <http://green.autoblog.com/2011/01/06/deutsche-bank-li-ion-battery-cost-forecast-per-kwh/> (published at 6/1/2011).
- [1.4] Rod Lache, Dan Galves, Patrick Nolan, “Vehicle Electrification : More Rapid Growth ; steeper price declines for batteries – Deutsche Bank, Available at : http://gm-volt.com/files/DB_EV_Growth.pdf (published at 7/3/2010).
- [1.5] M. Ehsani, Y. Gao, S. Gay, A. Emadi, “Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design (Power Electronics and Applications Series).
- [1.6] Διονύσιος Νέγκας, “Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και ο ανεφοδιασμός τους με ηλεκτρική ενέργεια” Σεπτέμβριος 2011.
- [1.7] Woodbank Communications Ltd, “Electropaedia” Available at : www.mpoweruk.com.
- [1.8] “Nickel – metal hydride battery”, Available at : http://en.wikipedia.org/wiki/Nickel%E2%80%93metal_hydride_battery.
- [1.9] A.Dinger, R.Martin, X.Mosquet, M.Rabl, D.Rizoulis, M.Russo, G.Sticher, The Boston Consulting Group, “Batteries for the electric cars: Challenges, Opportunities and the Outlook to 2020”, Available at : <http://www.bcg.com/documents/file36615.pdf> .
- [1.10] A.Khaligh, Zhihao Li, “Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol.59, Issue 6, pp 2806-2814, Ιούλιος 2010.
- [1.11] Patrick Ponticel, “GM and LG Chem to jointly develop electric vehicles” Available at : <http://ev.sae.org/article/10159> (published at 26/8/2011).
- [1.12] California Energy Commission, “Fuel Cell Vehicles”, Available at : <http://www.consumerenergycenter.org/transportation/fuelcell/index.html> .
- [1.13] Ben Hassett, Ed Bower, Marcus Alexander, Project “MERGE”, Deliverable 3.2 “EV Penetration Scenarios”, Part 1, 21/2/2011, Available at : <http://www.ev->

- merge.eu/images/stories/uploads/MERGE_D32_EV_penetration_scenarios.pdf.
- [1.14] S.Bending, M.Ferdowsi, S.Channon, K.Strunz, Project “MERGE”, Deliverable 1.1 “Specification for an Enabling Smart Technology”, 3/8/2010, Available at : http://www.ev-merge.eu/images/stories/uploads/MERGE_WP1_D1.1.pdf.
- [1.15] Hunter Hanzhuo Wu, Aaron Gilchrist, Ky Sealy, Paul Israelsen, Jeff Muhs, “A Review on Inductive Charging for Electric Vehicles”, IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), pp 143-147, 2011.
- [1.16] R. Bailey, P. Kazemersky, A. Bonner, M. Chatham-tombs, W. Dawson, B. Gordon, N. Holland, W. Hooper, A. Malekzadeh, M. Murphy and E. Young, “Inductive Power Transfer Project”, Available at <http://www.utc.edu/Academic/EngineeringProjects/SmartCart/documents/ICFinalReport.doc> .
- [1.17] Anupam Jolly, “Eco Cars: KAIST’s OLEV - An electric car sans batteries” Available at <http://www.ecofriend.com/entry/eco-cars-kaist-s-olev-an-electric-car-sans-batteries/>, (published at 17/8/2009).
- [1.18] Μ.Σταμούλης, Κ.Τσατσάκης, “Ηλεκτρικά Οχήματα”, Φεβρουάριος 2010.
- [1.19] “SAE J1772” Available at http://www.enotes.com/topic/SAE_J1772#Connector
- [1.20] Gery Kissel, “SAE J1772 Update For IEEE Standard 1809 Guide for Electric-Sourced Transportation Infrastructure”, SAE J1772 Task Force Lead Meeting 18/2/2010
- [1.21] “SAE J1772” Available at http://en.wikipedia.org/wiki/SAE_J1772
- [1.22] “A step forward for global EV roll out”, IEC International Standard for EV Charging, Available at <http://www.iec.ch/newslog/2011/nr0411.htm>
- [1.23] “ACEA position and recommendations for the standardization of the charging of electrically chargeable vehicles”, Available at http://www.acea.be/images/uploads/files/20100630_Standardisation_e-vehicles.pdf, (published at 14/6/2010)
- [1.24] “Mennekes, Plugs for the world”, Available at : [http://www.mennekes.co.uk/latest.html?tx_ttnews\[tt_news\]=25&cHash=703048b7ef30c4c73613a03906723abe](http://www.mennekes.co.uk/latest.html?tx_ttnews[tt_news]=25&cHash=703048b7ef30c4c73613a03906723abe)
- [1.25] “Mennekes plug”, Available at <http://visforvoltage.org/forum/9101-mennekes-plug>
- [1.26] “Walther, Charging plugs and sockets Charging cables”, Available at : http://www.walther-werke.de/fileadmin/public/Kurzuebersicht/e-mobility-2011-2012_E.pdf

- [1.27] "Scame Electrical Solutions, Behind the wheel of innovation, Libera Series", Available at : <http://www.scame.com/doc/ZP00833-GB-1.pdf>
- [1.28] "EVs Ready to Charge Ahead: IEC Publishes Globally Relevant EV Charging Standards" Available at <http://www.prweb.com/releases/2011/10/prweb8887471htm>, (published 19/10/2011).
- [1.29] "EV Quick Charger Installation and Operation Manual", Available at <http://www.chademo.com/>
- [1.30] "CHAdeMO Annual Report 2010", Available at <http://www.chademo.com/>, (published at 17/5/2011)
- [1.31] "TEPCO, Press Release (Mar 15, 2010) Establishment of CHAdeMO Association", Available at : <http://www.tepco.co.jp/en/press/corpcom/release/10031501-e.html>.
- [2.1] I. Momber, M. Rivier, R. Cossent, J. T. Saraiva, K. Kanellopoulos, P. Andrianesis, MERGE Deliverable D5.2: "Identification of regulatory issues regarding market design and network regulation to efficiently integrate electric vehicles in electricity grids", pp 14-17, October 2011. Available at : http://www.ev-merge.eu/images/stories/uploads/MERGE_WP5_%20D52final.pdf
- [2.2] M. Rivier, T. Gomez, R. Cossent, I. Momber, MERGE Deliverable D5.1: " New actors and business models for the integration of EV in power systems", Φεβρ. 2011. Available at : http://www.ev-merge.eu/images/stories/uploads/MERGE_WP5_%20D51Final.pdf
- [3.1] Di Wu, Dionysios C. Aliprantis, Lei Ying, "Load Scheduling and Dispatch for Aggregators of Plug-In Electric Vehicles", IEEE Transactions on Smart Grids, Vol. 3, Issue 1, pp. 368-376, 2012

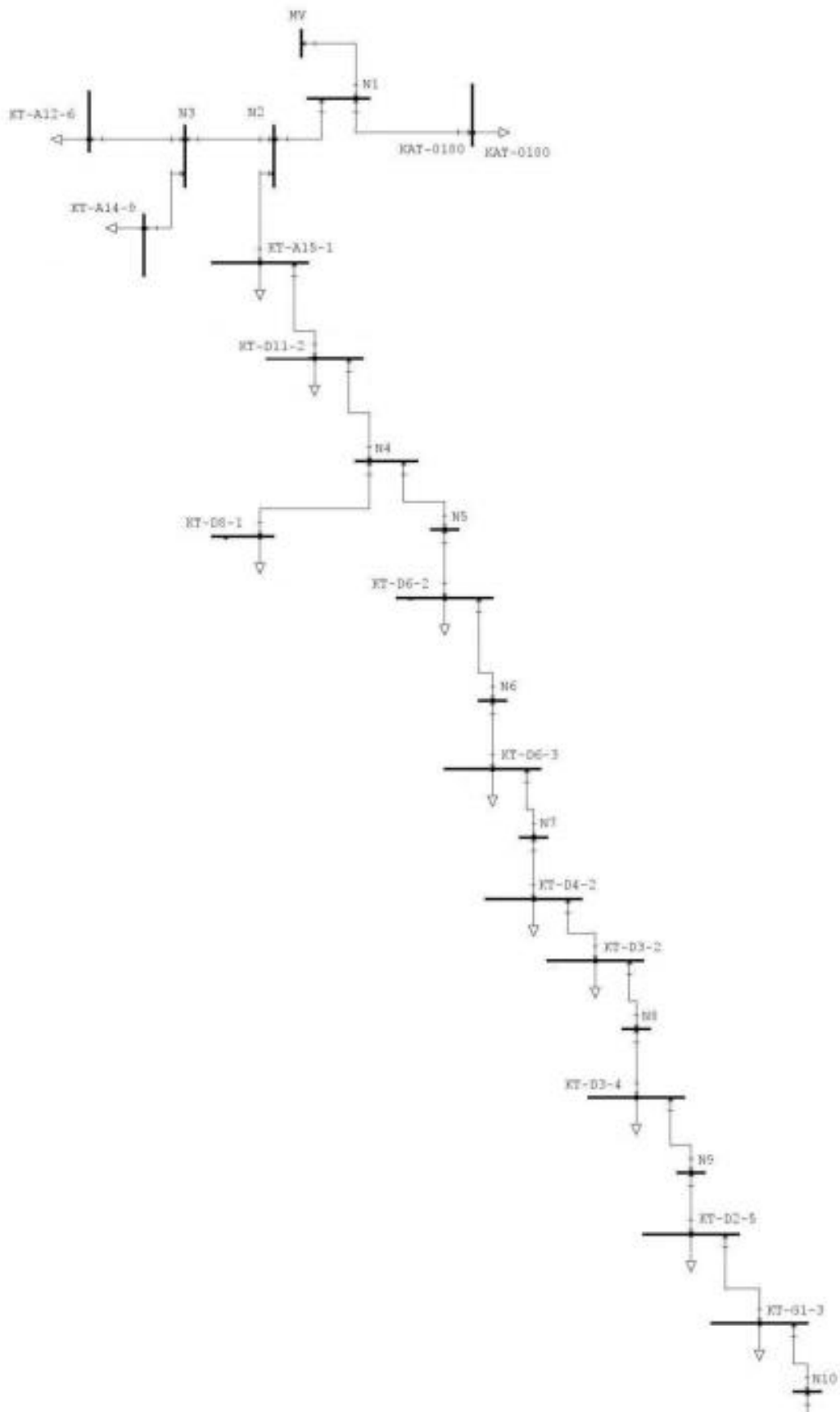
Παράρτημα

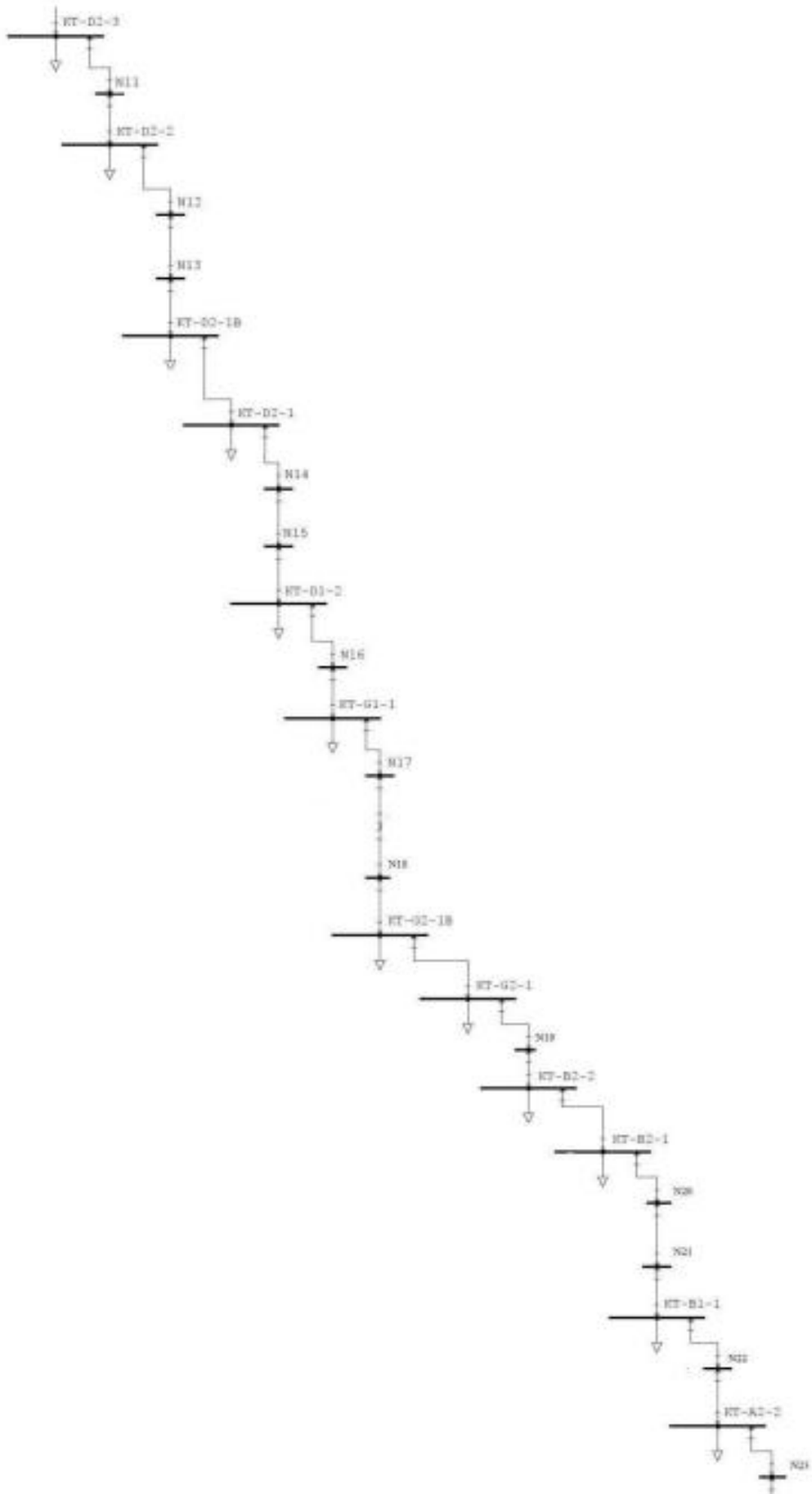
Δίκτυο Κατερίνης

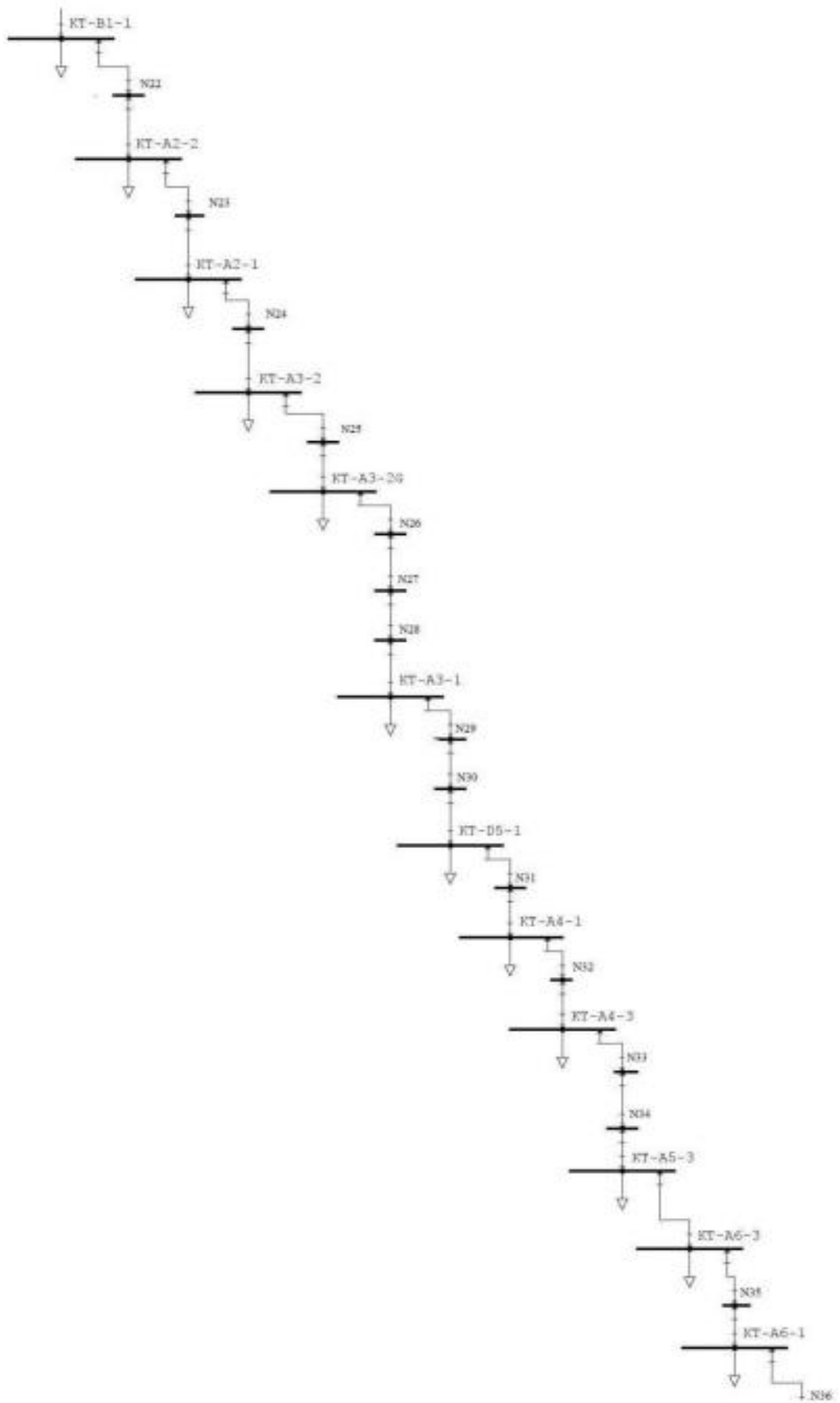
1. Εγκατεστημένη Ισχύς Υποσταθμών

Όνομασία Υ/Σ	Εγκατεστημένη Ισχύς (kVA)
ΚΑΤ-0180	160
ΚΑΤ-A12-6	160
ΚΑΤ-A14-9	160
ΚΑΤ-A15-1	400
ΚΑΤ-Δ11-2	250
ΚΑΤ-Δ8-1	400
ΚΑΤ-Δ6-2	1260
ΚΑΤ-Δ6-3	400
ΚΑΤ-Δ4-2	630
ΚΑΤ-Δ3-2	630
ΚΑΤ-Δ3-4	1260
ΚΑΤ-Δ2-5	630
ΚΑΤ-Γ1-3	630
ΚΑΤ-Δ2-3	630
ΚΑΤ-Δ2-2	630
ΚΑΤ-Δ2-1B	630
ΚΑΤ-Δ2-1	630
ΚΑΤ-Δ1-2	630
ΚΑΤ-Γ1-1	500
ΚΑΤ-Γ2-1B	630
ΚΑΤ-Γ2-1	630
ΚΑΤ-B2-2	630
ΚΑΤ-B2-1	630
ΚΑΤ-B1-1	630
ΚΑΤ-A2-2	630
ΚΑΤ-A2-1	630
ΚΑΤ-A3-2	1260
ΚΑΤ-A3-2Γ	630
ΚΑΤ-A3-1	1260
ΚΑΤ-A4-3	630
ΚΑΤ-A4-1	630
ΚΑΤ-Δ5-1	630
ΚΑΤ-A5-3	630
ΚΑΤ-A6-3	630
ΚΑΤ-A6-1	1000

2. Διάγραμμα Δικτύου







Να σημειωθεί πως οι ζυγοί με την ονομασία KAT-...-... αποτελούν τους υποσταθμούς του δικτύου με τα αντίστοιχα φορτία τους, ενώ οι ζυγοί με την ονομασία N... χρησιμεύουν απλά για την ζεύξη των γραμμών.

