Εθνικο Μετσοβιο Πολυτεχνειο
Σχολη Ηλεκτρολογων Μηχανικων
και Μηχανικων Υπολογιστων
Τομεας Ηλεκτρικης Ισχυος

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΤΩΝ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΩΣ ΔΙΑΣΠΑΡΜΕΝΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ GAMS

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ Β. ΜΠΕΛΟΚΑΣ

Επιβλέποντες :	Χατζηαργυρίου	Νικόλαος	Καθηγητής	Ε.Μ.Π.
	Γεωργιλάκης	Παύλος	Λέκτορας	Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2011

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

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗΣ ΤΩΝ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΩΣ ΔΙΑΣΠΑΡΜΕΝΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ GAMS

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ Β. ΜΠΕΛΟΚΑΣ

Επιβλέποντες :	Χατζηαργυρίου	Νικόλαος	Καθηγητής	Ε.Μ.Π.
	Γεωργιλάκης	Παύλος	Λέκτορας	Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 2011

.....	.....	.....
Χατζηαργυρίου Νικόλαος	Παπαθανασίου Σταύρος	Γεωργιλάκης Παύλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....

ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ Β. ΜΠΕΛΟΚΑΣ

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

Copyright © Απόστολος Β. Μπελόκας, 2011

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.

Στη μητέρα μου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η τάση για τον εξηλεκτρισμό του τομέα των μεταφορών γίνεται ολοένα και πιο έντονη τα τελευταία χρόνια. Περιορισμός της εξάρτησης του τομέα μεταφορών από τις ευμετάβλητες τιμές του πετρελαίου καθώς και η έντονη ανησυχία για τους εκπεμπόμενους ρύπους είναι δύο από τους σημαντικότερους παράγοντες της ευρύτερης αποδοχής της ιδέας του εξηλεκτρισμού των μεταφορών.

Η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων είναι μια μεγάλη πρόκληση για τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Η αύξηση της ζήτησης λόγω της φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι ένας παράγοντας που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην ομαλή λειτουργία του δικτύου καθώς επίσης και στο προγραμματισμό των επενδύσεων. Ωστόσο, μεγαλύτερη πρόκληση για το δίκτυο είναι η αξιοποίηση της χωρητικότητας των μπαταριών των διασυνδεδεμένων οχημάτων. Τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να θεωρηθούν ως κινητές μονάδες αποθήκευσης ενέργειας με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, οι οποίες μπορούν να υποστηρίξουν το δίκτυο παρέχοντας επικουρικές υπηρεσίες.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται η αξιοποίηση της πλεονάζουσας ισχύος των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων από το σύστημα διαχείρισης ενέργειας ενός κτιρίου εμπορικής χρήσης. Λαμβάνοντας υπόψη τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών οχημάτων καθώς επίσης και τις ανάγκες των ιδιοκτητών τους για τις ημερήσιες μετακινήσεις τους, μελετώνται τα οικονομικά οφέλη από την αξιοποίηση των ηλεκτρικών οχημάτων. Για το σκοπό αυτό, αναπτύχθηκε ένα οικονομικό μοντέλο με το οποίο αναλύεται η εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται από τον περιορισμό της κατανάλωσης και της αιχμής ζήτησης του κτιρίου.

Στο Κεφάλαιο 1 της παρούσας διπλωματικής εργασίας γίνεται αναφορά στην ιστορική εξέλιξη των ηλεκτρικών οχημάτων και παρουσιάζονται οι τρέχουσες τεχνολογίες που θα επιτρέψουν την ομαλή διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπρόσθετα γίνεται αναφορά στις τάσεις τόσων των αυτοκινητοβιομηχανιών όσο και των εταιρειών ηλεκτρικής ενέργειας. Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφονται οι βασικές αρχές του προγράμματος GAMS το οποίο δίνει τη δυνατότητα προσομοίωσης ενός συστήματος γραμμικών εξισώσεων με περιορισμούς. Μία εφαρμογή του προγράμματος GAMS στην ενέργεια μελετάται στο τέλος του κεφαλαίου 2. Στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται το μαθηματικό μοντέλο του προβλήματος της αξιοποίησης των ηλεκτρικών οχημάτων από το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου εμπορικής χρήσης. Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και αναλύονται τα οικονομικά οφέλη τόσο του ιδιοκτήτη του κτιρίου όσο και των ιδιοκτητών των ηλεκτρικών οχημάτων. Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται συνοπτικά τα κυριότερα συμπεράσματα της ανάλυση αυτής.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Σύστημα διαχείρισης ενέργειας, μικροδίκτυο, ηλεκτρικά οχήματα, μέθοδοι βελτιστοποίησης, αιχμή ζητούμενης ισχύος

ABSTRACT

The trend towards the electrification of transport sector becomes more and more intense through the years. The reduction of oil dependency and the strong concern about the emitted pollutants in the transport sector are the most important factors at the acceptance of the idea of transport electrification.

The penetration of electric vehicles is a big challenge for the power grid. The increase of demand because of electric vehicles charging should be taken into account at the operation of the grid and the investment planning. However a greater challenge for the power grid is to utilize the capacity of plugged-in vehicles. Electric vehicles can be considered as mobile energy storage units, which support the grid providing ancillary services.

This thesis deals with the utilization of surplus power at the batteries of electric vehicles by the energy management system of a commercial use building. Taking into account all the technical characteristics of electric vehicles as well as the needs of their owners for daily transport, the thesis examines the economic benefits from the use of electric vehicles. Therefore is built an economic model, which analyzes the power savings achieved by reducing consumption and peak demand charges.

The first chapter refers to the history of electric vehicles and the current technology which will enable the penetration of electric vehicles on the power grid. The second chapter describes the basic principles of GAMS program, which simulates easily the model described by linear equations and constraints. Also one application is described at the end of the chapter. The third chapter analyzes the mathematical model of the problem and the interactions of the energy management system with the electric vehicles. The fourth chapter presents the simulation results and analyzes the economic benefits both for electric vehicles and the owner of the building. The fifth chapter summarizes the main conclusions of this analysis.

KEY WORDS

Energy management system (EMS), microgrid, electric vehicles (EVs), optimization methods, peak demand

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2010-2011 υπό την επίβλεψη του κ. Νικολάου Χατζηαργυρίου, Καθηγητή του ΕΜΠ και του κ. Παύλου Γεωργιλάκη, Λέκτορα του ΕΜΠ της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της.

Με την ευκαιρία θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Ευάγγελο Καρφόπουλο για τις πολύτιμες συμβουλές και την υποστήριξή του καθόλη τη διάρκεια της εργασίας.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους φίλους μου για την αμέριστη στήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια της φοιτητικής μου σταδιοδρομίας.

Απόστολος Μπελόκας
Μάρτιος 2011

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ..... - 15 -
1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ..... - 15 -
1.2 ΤΥΠΟΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ(ΕV) ..... - 20 -
1.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ..... - 24 -
1.4 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΙΣΧΥΟΣ ..... - 25 -
1.5 ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ..... - 28 -
1.6 ΦΟΡΤΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ..... - 31 -
1.6.1 Κατηγορίες φόρτισης ..... - 31 -
1.6.2 Καλώδια σύνδεσης ..... - 33 -
1.6.3 Σταθμοί φόρτισης ..... - 34 -
1.7 V2G ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ..... - 37 -
1.8 ΕΘΝΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ-ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ ..... - 39 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 GAMS ..... - 43 -
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ..... - 43 -
2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ ..... - 44 -
2.2.1 Κίνητρα για τη δημιουργία του GAMS ..... - 44 -
2.2.2 Ιστορική αναδρομή ..... - 44 -
2.3 ΒΑΣΙΚΗ ΔΟΜΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ GAMS ..... - 46 -
2.3.1 Σύνολα(Sets) ..... - 48 -
2.3.2 Σταθερές(Scalars) ..... - 49 -
2.3.3 Παράμετροι και Πίνακες (Parameters & Tables) ..... - 49 -
2.3.4 Κανόνες μαθηματικής αναπαράστασης κατά την ανάθεση τιμών ... - 50 -
2.3.5 Μεταβλητές (Variables) ..... - 50 -
2.3.6 Εξισώσεις(Equations) ..... - 53 -
2.3.7 Μοντέλο (Model) ..... - 54 -
2.3.8 Επίλυση (Solve) ..... - 54 -
2.3.9 GAMS Output(Έξοδος στο GAMS) ..... - 55 -
2.3.10 Δηλώσεις υπό συνθήκη και επαναληπτικές δομές ..... - 55 -
2.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ GAMS ..... - 57 -
2.5 Διασύνδεση GAMS με άλλα προγράμματα ..... - 62 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ..... - 63 -
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ..... - 63 -

3.2 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ..... - 64 -
3.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ-ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ..... - 65 -
3.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ..... - 68 -
3.4.1 Παράμετροι ..... - 68 -
3.4.2 Μεταβλητές ..... - 70 -
3.4.3 Εξισώσεις μοντέλου ..... - 71 -
3.4.4 Αντικειμενική συνάρτηση ..... - 72 -
3.4.5 Δευτερεύουσες μεταβλητές ..... - 73 -
3.5 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΣΕ GAMS ..... - 74 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ..... - 75 -
4.1 ΑΡΧΙΚΟ ΤΙΜΟΛΟΓΙΟ ..... - 75 -
4.2 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΑΙΧΜΗΣ ΖΗΤΟΥΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ……...- 77 -
4.3 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ(NEVs) …… - 80 -
4.4 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ Pex ..... - 83 -
4.5 ΕΥΡΕΣΗ ΣΗΜΕΙΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ Pex($/kWh) ..... - 95 -
4.5.1 Υπολογισμός σημείου ισορροπίας (Pex) ..... - 95 -
4.5.2 Ανάλυση της λειτουργίας του συστήματος στο σημείο ισορροπίας. - 96 -
4.5.3 Ανάλυση ως προς την τιμή χρέωσης αιχμής ζητούμενης ισχύος ... - 101 -
4.6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ SOC ..... - 104 -
4.7 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΕΤΗΣΙΟ ΠΑΓΙΟ ΤΕΛΟΣ ΑΠΟΖΗΜΙΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ - 107 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ..... - 109 -
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ ..... - 113 -
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ..... - 117 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

1.1 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η παγκόσμια ανησυχία για την κατακόρυφη αύξηση των αέριων ρύπων του θερμοκηπίου και ειδικότερα η έντονη επιβάρυνση της ατμόσφαιρας των αστικών πόλεων σε συνδυασμό με την πρόσφατη απότομη αύξηση των τιμών του πετρελαίου έδωσε ώθηση στην υιοθέτηση εναλλακτικών μέσων μεταφοράς φιλικότερων προς το περιβάλλον. Ιδανική λύση στο ζήτημα των μεταφορών αποτελούν τα ηλεκτρικά οχήματα. Οι πρόσφατες τεχνολογικές εξελίξεις στο χώρο των μπαταριών ενίσχυσαν την ανταγωνιστικότητα των ηλεκτροκίνητων οχημάτων ωθώντας την προσοχή των κυβερνήσεων και των αυτοκινητοβιομηχανιών προς το τομέα αυτό. Ωστόσο, χρειάζονται αρκετές ακόμα προσπάθειες ώστε τα ηλεκτρικά οχήματα να γίνουν μέρος της καθημερινότητάς μας. Η έλλειψη κατάλληλων υποδομών και συγκεκριμένου ρυθμιστικού πλαισίου για την διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων είναι τα σημαντικότερα εμπόδια.

Κάποιοι πιθανόν να έχουν εσφαλμένα την εντύπωση ότι τα ηλεκτρικά οχήματα είναι ένα τεχνολογικό δημιούργημα των τελευταίων ετών. Στην πραγματικότητα τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν μια ιστορία πάνω από 150 έτη κατά τη διάρκεια των οποίων οι τεχνολογίες τους τόσο στα συστήματα οδήγησης των ηλεκτρικών κινητήρων για τη βέλτιστη απόδοσή τους όσο και στις ίδιες τις συστοιχίες συνεχώς εξελίσσονταν. Παρακάτω παρουσιάζονται τα σημαντικότερα γεγονότα που οδήγησαν στην εξέλιξη του ηλεκτρικού οχήματος στην πάροδο του χρόνου.

- 1831: Ο Joseph Henry, Καθηγητής Μαθηματικών στο Albany NY, εφευρίσκει τον ηλεκτροκινητήρα στην προσπάθειά του να κατανοήσει τους ηλεκτρομαγνήτες.
- 1834: Ο Thomas Davenport, εφευρίσκει το πρώτο ηλεκτρικό όχημα κινούμενο σε ράγες, χωρίς τη δυνατότητα επαναφόρτισης της μπαταρίας του.
- 1847: Ο Moses Farmer από τη Μασαχουσέτη, κατασκεύασε ένα όχημα που τροφοδοτούνταν από 48 ηλεκτρικά στοιχεία και μπορούσε να μεταφέρει δύο άτομα. Την ίδια εποχή ο καθηγητής Charles Page έφτιαξε ένα όχημα με 100 συσσωρευτές και κινητήρα 16 ίππων που μετέφερε 12 άτομα με ταχύτητα μέχρι και 19 μίλια/ώρα.
- 1859: Ο Γάλλος φυσικός Gaston Plante ανακαλύπτει για πρώτη φορά τις μπαταρίες Μολύβδου-Οξέως (Pb-Acid) που έχουν δυνατότητα επαναφόρτισης. Με τον τρόπο αυτό έπαψε να είναι απαραίτητη η συνεχής αντικατάσταση των ηλεκτρικών μπαταριών μετά την εκφόρτισή τους.
- 1890: Ο William Morrison από την Iowa κατασκευάζει το πρώτο επιτυχημένο ηλεκτρικό αυτοκίνητο στις Η.Π.Α. Μπορεί να κινηθεί με 22km/h για 13 ώρες.

- Τα επόμενα χρόνια τα ηλεκτρικά οχήματα κατέχουν τα ρεκόρ ταχύτητας και μέγιστης διανυόμενης απόστασης. Μάλιστα το 1898 το βελγικής κατασκευής αγωνιστικό ηλεκτρικό αυτοκίνητο “La Jamais Contente” φτάνει τα 108km/h.
- 1900: Τα ηλεκτρικά οχήματα βρίσκονται στη άνθισή τους. Από τα 4192 αυτοκίνητα που κατασκευάστηκαν στην Αμερική σχεδόν το ένα τρίτο είναι ηλεκτρικά.
- 1908: Ο Henry Ford εισάγει το πρώτο βενζινοκίνητο όχημα μαζικής παραγωγής, το Model T, που επιδρά σημαντικά στην αγορά αυτοκινήτων των Η.Π.Α.
- 1920: Η παραγωγή ηλεκτρικών αυτοκινήτων σταματά να είναι βιώσιμη, η τιμή πώλησής τους συνεχώς αυξάνεται και οι πωλήσεις ελαχιστοποιούνται. Χαρακτηριστικά η Detroit Electric Car Company από 1139 μονάδες το 1918 φτάνει να πουλά μόνο 191 το 1920. Από την άλλη πλευρά η μαζική παραγωγή των βενζινοκίνητων οχημάτων από τον Henry Ford έκανε τα οχήματα αυτά διαθέσιμα σε αρκετά χαμηλές τιμές μεταξύ 500$ και 1000$.
- 1920-1970: Τα ηλεκτρικά οχήματα παρακμάζουν καθώς τα βενζινοκίνητα οχήματα προτιμώνται λόγω των μεγαλύτερων αποστάσεων που μπορούν να διανύσουν, της μεγαλύτερης ιπποδύναμης και της χαμηλής τιμής της βενζίνης σε σχέση με τον ηλεκτρισμό. Μόνο η Βρετανία διατηρεί ένα σχετικά μεγάλο αριθμό ηλεκτρικών οχημάτων, χρησιμοποιώντας τα για τη διανομή γάλακτος, ψωμιού και αλληλογραφίας. Η επαναφορά των ηλεκτρικών οχημάτων άρχισε να γίνεται δειλά δειλά πάλι στη δεκαετία του ‘70 ύστερα από την ανησυχία την αύξηση των τιμών του πετρελαίου, που κορυφώθηκε με την πετρελαϊκή κρίση του 1973, καθώς και το διαρκώς εντονότερο περιβαλλοντικό κίνημα που συνέδεε την ατμοσφαιρική ρύπανση με τους ρύπους των συμβατικών οχημάτων.
- 1974: Το ηλεκτρικό όχημα CitiCar, κατασκευασμένο από τον Vanguard Sebring, εμφανίζεται στο Συμπόσιο Ηλεκτρικών Οχημάτων στην Ουάσινγκτον. Έχει μέγιστη ταχύτητα περίπου 50km/h και μπορεί να διανύσει απόσταση 60km.
- 1976: Το Κογκρέσο περνάει νόμο για την προώθηση της έρευνας σχετικής με τα ηλεκτρικά οχήματα με σκοπό κυρίως τη βελτίωση των μπαταριών και των κινητήρων.
- 1990: Η California εκδίδει την εντολή ZEV (Zero Emission Vehicle), σύμφωνα με την οποία μέχρι το 1998, 2% των οχημάτων της πολιτείας και μέχρι το 2003, 10% των οχημάτων πρέπει να έχουν μηδενικές εκπομπές ρύπων.
- 1997-2003: Καταξιωμένες αυτοκινητοβιομηχανίες όπως η GM και η TOYOTA κατασκευάζουν μερικές χιλιάδες ηλεκτρικά οχήματα προς μαζική πώληση με πολύ ενθαρρυντική ανταπόκριση από το αγοραστικό κοινό.
- 2003: Το μοντέλο tZero της εταιρείας AC Propulsion κερδίζει το υψηλότερο βραβείο στον καταξιωμένο διαγωνισμό Michelin Challenge Bibendum. Είναι

εντυπωσιακό ότι το tZero έχει αυτονομία 300 μίλια, 0-60mph σε 3.6 δευτερόλεπτα και τελική ταχύτητα 100 mph.

- 2007-Σήμερα: Μετά το Πρωτόκολλο του Kyoto και σε μια προσπάθεια επίτευξης των στόχων που τίθενται απ' αυτό αναζωπυρώνεται το ενδιαφέρον για τα ηλεκτρικά οχήματα. Προς αυτή την κατεύθυνση πολλές χώρες όπως Ισραήλ, Δανία, Καναδάς, Ιαπωνία, Αυστραλία και Η.Π.Α. υιοθετούν προγράμματα υποστήριξης ηλεκτρικών οχημάτων. Παρότι λίγα ηλεκτρικά οχήματα διατίθενται αυτή τη στιγμή στην αγορά, αρκετά νέα μοντέλα όπως το LEAF της Nissan, το VOLT της Chevrolet, το i MiEV της Mitsubishi, αναμένεται να κυκλοφορήσουν στο κοντινό μέλλον. Ωστόσο, τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν ακόμα αρκετό δρόμο να διανύσουν προκειμένου να αποτελέσουν μια συμφέρουσα επιλογή για πολλούς οδηγούς. Το υψηλό κόστος κατασκευής, ο περιορισμένος χρόνος ζωής της μπαταρίας, η περιορισμένη διανυόμενη απόσταση, καθώς και η κατασκευή σταθμών φόρτισης κι άλλων υποδομών που απαιτούνται, αποτελούν μερικές από τις προκλήσεις που θα πρέπει να αντιμετωπιστούν ώστε να επιτευχθεί η επικράτηση των ηλεκτρικών οχημάτων.

Εικόνα 1.1 Διαφήμιση ηλεκτρικού οχήματος σε εφημερίδα το 1917 στην Αμερική.[21]

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

ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

- ✓ *Είναι φιλικά προς το περιβάλλον*, δηλαδή δεν εκπέμπουν ρύπους κι έτσι δε συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Ακόμα και αν προσθέσουμε τις εκπομπές CO2 της ηλεκτροπαραγωγής για τη φόρτιση των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων, οι εκπομπές είναι το ένα τρίτο ή το πολύ ένα δεύτερο από αυτές των συμβατικών οχημάτων. Επίσης τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν πολύ λιγότερη ηχορύπανση από ένα όχημα με κινητήρα εσωτερικής καύσης. Τέλος δεν εκπέμπουν ρύπους όπως NOx, NMHC, CO και PM.
- ✓ *Ενεργειακή απόδοση*. Μια μηχανή καύσεως δεν είναι ενεργειακά αποδοτική και καταναλώνει πολλά καύσιμα. Με τα υπάρχοντα δεδομένα οι ηλεκτροκινητήρες αποδίδουν το 75% της χημικής ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στις μπαταρίες σε κίνηση των τροχών, ενώ αντίθετα οι μηχανές εσωτερικής καύσης μετατρέπουν μόνο το 20% της ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στη βενζίνη.
- ✓ *Μειώνουν την ενεργειακή εξάρτηση*. Ο περιορισμός της ζήτησης πετρελαίου για τον τομέα των μεταφορών μειώνει την ενεργειακή εξάρτηση από τις χώρες κυρίως της Μέσης Ανατολής. Σε πολιτικό επίπεδο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό αν αναλογιστούμε το ασταθές περιβάλλον που έχει δημιουργηθεί τα τελευταία χρόνια στη Μέση Ανατολή. Επιπρόσθετα, οι ανοδικές τάσεις της τιμής του πετρελαίου ιδιαίτερα μετά το πόλεμο στο Ιράκ έχουν μετατρέψει την μετακίνηση με συμβατικό όχημα σε ένα σημαντικό κόστος της καθημερινή ζωής.
- ✓ Τέλος, είναι δυνατόν τα ηλεκτρικά οχήματα να προσφέρουν πολύτιμες *υπηρεσίες στο ηλεκτρικό δίκτυο* και να αυξήσουν την αξιοπιστία και την αποδοτικότητά του, όπως θα δούμε και παρακάτω όπου περιγράφεται η V2G διαδικασία.

ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

Για την καθιέρωση των ηλεκτρικών οχημάτων χρειάζεται περαιτέρω έρευνα ώστε να αντιμετωπιστούν σημαντικές προκλήσεις που σχετίζονται κυρίως με την τεχνολογία των συσσωρευτών:

- ✓ *Περιορισμένη απόσταση ταξιδιού* μεταξύ κάθε επαναφόρτισης της μπαταρίας. Στο παρελθόν κάθε 60 χιλιόμετρα χρειάζονταν επαναφόρτιση. Ωστόσο, τα πιο σύγχρονα μοντέλα επιτυγχάνουν αυτονομία που ξεκινάει από 100 έως 120 χιλιόμετρα στα αυτοκίνητα πόλης και φτάνει τα 250-300 χιλιόμετρα σε αυτοκίνητα μεγάλης ισχύος. Αξίζει να σημειωθεί ότι το σημερινό ρεκόρ χιλιομέτρων χωρίς επαναφόρτιση ανήκει σε ένα σπορ ηλεκτροκίνητο όχημα το Tesla Roadster, που κατάφερε να διανύσει 504 χιλιόμετρα με μία μόνο φόρτιση ταξιδεύοντας με μέση ταχύτητα 56 χιλιόμετρα/ώρα. Το ρεκόρ επετεύχθη στις 27 Οκτωβρίου 2009 στον παγκόσμιο διαγωνισμό Global Green Challenge στην Αυστραλία.

Εικόνα 1.2 Το Tesla Roadster σε έκθεση αυτοκινήτου.[23]

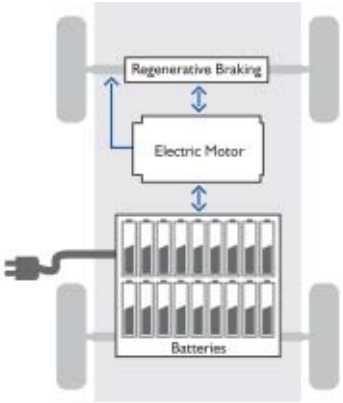
- ✓ *Μεγάλος χρόνος επαναφόρτισης.* Πλήρης επαναφόρτιση της συστοιχίας μπαταριών μπορεί να διαρκέσει από 4 έως 8 ώρες για μια τυπική φόρτιση. Αυτό σε συνδυασμό με τον περιορισμό στη διανυόμενη απόσταση καθιστά το ηλεκτρικό όχημα απαγορευτικό για μεγάλες αποστάσεις ή ταξίδια. Η προώθηση των ηλεκτρικών οχημάτων προϋποθέτει ικανοποίηση των ιδιοκτητών τους αντίστοιχη με αυτή των συμβατικών οχημάτων.
- ✓ *Περιορισμένη διάρκεια ζωής μπαταριών.* Η διάρκεια ζωής μπαταριών είναι συνήθως 3 - 4 χρόνια ή περίπου 1500 κύκλοι λειτουργίας (300-400 κύκλοι λειτουργίας ανά έτος). Παρ' όλα αυτά, για το αναμενόμενο μέσα στο 2010 Chevrolet Volt, η General Motors ανακοίνωσε πως θα δίνει εγγύηση 8 έτη ή 100.000 μίλια (160.000 χιλιόμετρα).
- ✓ *Όγκος και βάρος μπαταριών.* Οι συστοιχίες μπαταριών είναι βαριές και καταλαμβάνουν σημαντικό χώρο στο όχημα. Στον όγκο των συσσωρευτών θα πρέπει θα προστεθεί και ο όγκος των συστημάτων ασφαλείας για την προστασία από εκδήλωση φωτιάς στις μπαταρίες λόγω υπερθέρμανσης ή βραχυκυκλώματος.
- ✓ Υψηλές δαπάνες κατασκευής, με αποτέλεσμα την *υψηλή τιμή πώλησης*. Τα χαμηλά ποσοστά διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων μέχρι σήμερα, και άρα η χαμηλή ζήτηση, είναι λογικό να διατηρούν τα επίπεδα των τιμών της αγοράς μπαταριών σε υψηλά επίπεδα.

1.2 ΤΥΠΟΙ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ(EV)

Στην ενότητα αυτή περιγράφονται οι διαφορετικές κατηγορίες ηλεκτρικών οχημάτων ανάλογα με τις τεχνολογίες κίνησης που υιοθετούν.

I. *Ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας (Battery EVs)*

Τα οχήματα μπαταρίας αποθηκεύουν ηλεκτροχημική ενέργεια στις μπαταρίες και εκπέμπουν μηδενικούς ρύπους κατά την κίνησή τους. Αυτή τη στιγμή οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος (lead-acid) αποτελούν τη φθηνότερη επιλογή, ωστόσο οι υδριδίου μετάλλων νικελίου (NiMH), ιόντος λιθίου (Li-ion) και λιθίου-ιόντων πολυμερών γίνονται όλο και πιο ανταγωνιστικές λόγω του ότι έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, μικρότερο μέγεθος και είναι πιο ελαφριές. Οι μπαταρίες φορτίζονται με σύνδεση στο δίκτυο καθώς και με το λεγόμενο «αναπαραγωγικό φρενάρισμα», που είναι στην ουσία η χρησιμοποίηση μέρους της θερμότητας που παράγεται κατά το φρενάρισμα για την επαναφόρτιση της μπαταρίας. Σήμερα, ορισμένοι τύποι ηλεκτρικών οχημάτων μπαταρίας 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 περονοφόροι ανυψωτές.

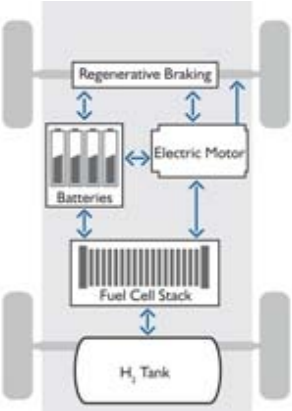


Εικόνα 1.3 Ηλεκτρικό όχημα μπαταρίας (Battery EV).[25]

II. *Ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου (Fuel Cell EVs)*

Τα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου αποθηκεύουν ενέργεια με τη μορφή υδρογόνου (H_2), η οποία τροφοδοτεί μια κυψέλη καυσίμου μαζί με ατμοσφαιρικό οξυγόνο (O_2), παράγοντας ηλεκτρισμό με τη διαδικασία της ηλεκτρόλυσης, με μόνα παραπροϊόντα θερμότητα και νερό. Ούτε κι αυτά επομένως εκπέμπουν ρύπους. Διάφοροι τρόποι για την αποθήκευση ή την παραγωγή υδρογόνου πάνω στο ίδιο το όχημα μελετώνται, στους οποίους περιλαμβάνεται η συμπίεση του αερίου H_2, η δέσμευσή του σε μέταλλα, καθώς και η παραγωγή επί του οχήματος από φυσικό αέριο, μεθανόλη, βενζίνη ή άλλο καύσιμο. Σήμερα, ένας αριθμός ηλεκτρικών

οχημάτων κυψελών καυσίμου κυκλοφορεί στους δρόμους παγκοσμίως, συμπεριλαμβανομένων επιβατικών αυτοκινήτων, φορτηγών διανομής, λεωφορείων και στρατιωτικών οχημάτων. Ωστόσο, η απαιτούμενη υποδομή για τη διανομή του H_2, η επί του οχήματος αποθήκευσή του H_2 και οι απώλειες μετατροπής αποτελούν σημαντικά προβλήματα που αφήνουν ανοιχτό το ερώτημα κατά πόσο τα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου θα αποτελέσουν μια πρακτική και συμφέρουσα λύση στο μέλλον.

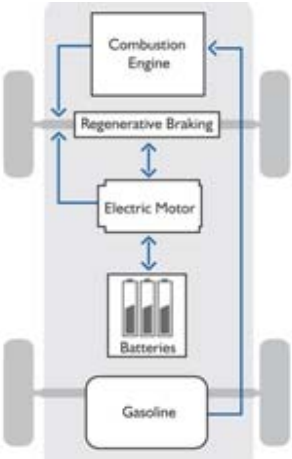


Εικόνα 1.4 Ηλεκτρικό όχημα κυψελών καυσίμου (Fuel Cell EV).[25]

III. *Υβριδικά οχήματα (Hybrid EVs)*

Τα σύγχρονα υβριδικά οχήματα χρησιμοποιούν και ηλεκτροκινητήρα και μηχανή εσωτερικής καύσης για την κίνηση τους. Κάθε υβριδικό όχημα είναι με τρόπο τέτοιο σχεδιασμένο ώστε να φορτίζει τις μπαταρίες του μέσω του «αναπαραγωγικού φρεναρίσματος» όπως εξηγήθηκε παραπάνω. Την ενέργεια αυτή τη χρησιμοποιεί στη συνέχεια για τη λειτουργία του ηλεκτροκινητήρα χωρίς να χρειάζεται να συνδεθεί στο δίκτυο.

Ένα υβριδικό όχημα «παράλληλης» λειτουργίας χρησιμοποιεί τον ηλεκτροκινητήρα ή τη μηχανή εσωτερικής καύσης για την κίνηση του οχήματος. Ένα υβριδικό «σειριακής» λειτουργίας χρησιμοποιεί τον ηλεκτροκινητήρα για να παράγει την επιπλέον ενέργεια στη μηχανή εσωτερικής καύσης όταν τη χρειάζεται, για παράδειγμα κατά την εκκίνηση ή την επιτάχυνση. Όλα έχουν τη δυνατότητα να πετύχουν μεγαλύτερη οικονομία καυσίμων σε σχέση με τα συμβατικά βενζινοκίνητα οχήματα. Η αγορά υβριδικών οχημάτων μεγαλώνει συνεχώς, με όλο και περισσότερα μοντέλα να διατίθενται στους καταναλωτές.

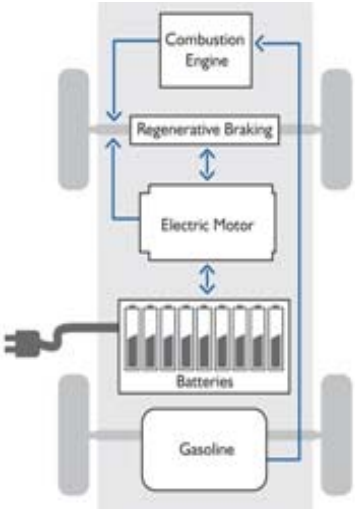


Εικόνα 1.5 Υβριδικό όχημα (Hybrid EV).[25]

Τα υβριδικά οχήματα που παράγονται μαζικά μέχρι τώρα έχουν μεγαλύτερη μηχανική παρά ηλεκτρική ισχύ κίνησης (περίπου 75-25%), μικρές μπαταρίες (1-2kWh), και δε διαθέτουν τη δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο.

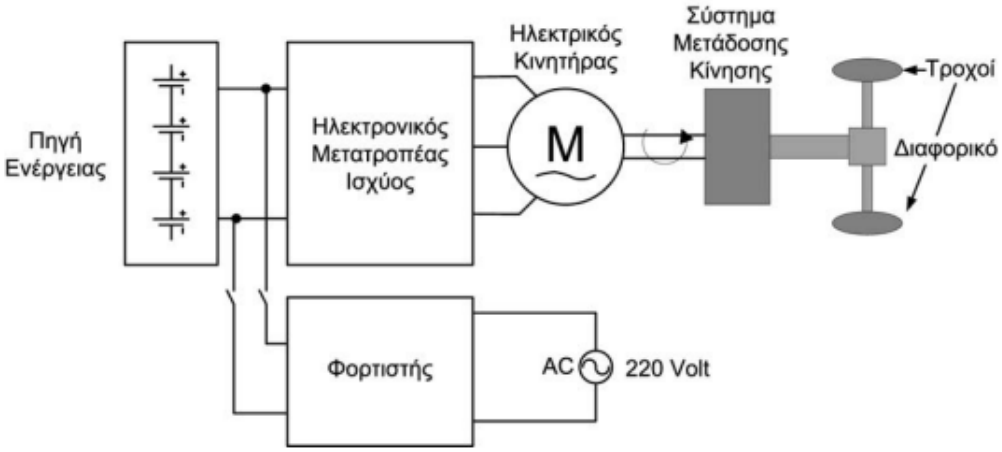
IV. <u>Ηλεκτρικά οχήματα με δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο (Plug-in EVs)</u>

Με τον όρο 'Plug-in EVs' εννοούμε τα ηλεκτρικά οχήματα που έχουν τη δυνατότητα να συνδέονται στο δίκτυο και να ανταλλάσσουν ηλεκτρική ενέργεια με αυτό. Κάθε ένας από τους τύπους οχημάτων που προαναφέρθηκαν μπορεί με την προσθήκη του κατάλληλου εξοπλισμού να αποκτήσει αυτή τη δυνατότητα. Συγκεκριμένα, τα ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας έχουν από κατασκευής τους τον εξοπλισμό που απαιτείται για σύνδεση στο δίκτυο καθώς έτσι φορτίζουν τις μπαταρίες τους (ή τις εκφορτίζουν σε περίπτωση που το δίκτυο έχει ανάγκη την αποθηκευμένη σε αυτές ενέργεια). Τα υβριδικά οχήματα με δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο έχουν μεγαλύτερη μπαταρία από τα απλά υβριδικά και χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο, ενέργειας απο το «αναπαραγωγικό φρενάρισμα» καθώς και ενέργειας από μηχανή εσωτερικής καύσης ή κυψέλη καυσίμου για να κινηθούν. Στην ουσία, φορτίζουν όσο είναι σταθμευμένα κι έτσι για μικρές διαδρομές δε χρειάζεται να χρησιμοποιήσουν καθόλου καύσιμο.



Εικόνα 1.6 Ηλεκτρικό όχημα με δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο (Plug-in EV).[25]

Στην παρούσα διπλωματική εργασία με τον όρο ηλεκτρικά οχήματα(EV) αναφερόμαστε αποκλειστικά σε Plug-in EV που χρησιμοποιούν αποκλειστικά μπαταρίες ως μέσο αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται ένα 'χονδρικό' διάγραμμα των κύριων τμημάτων, από τα οποία αποτελείται ένα ηλεκτρικό όχημα και θα αναλυθούν διεξοδικά στα επόμενα υποκεφάλαια.



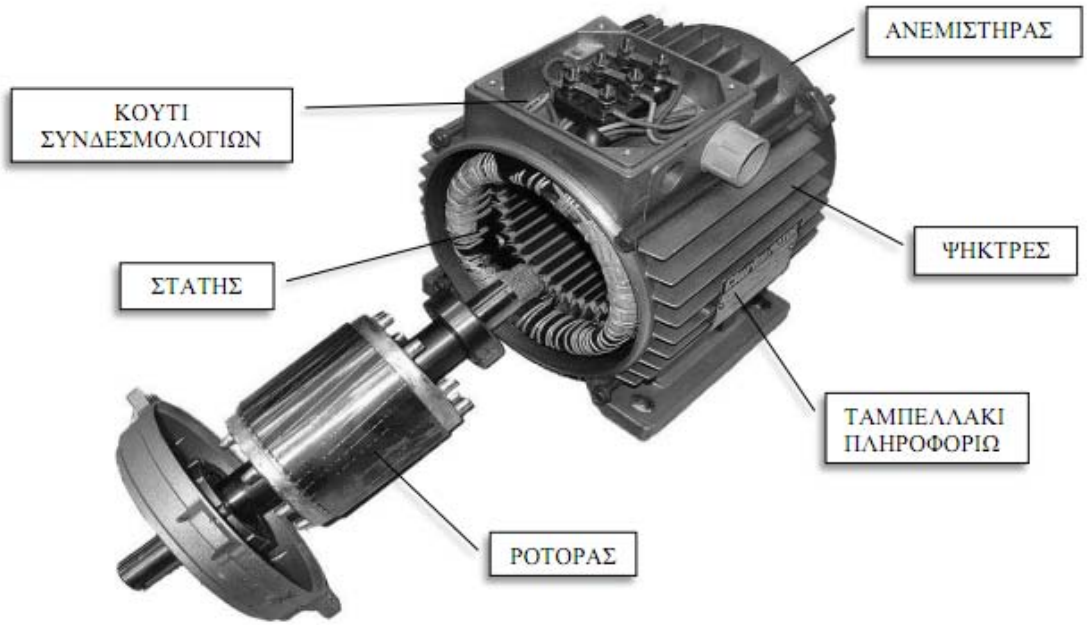
Εικόνα 1.7 Χονδρικό διάγραμμα κυρίων μελών ενός ηλεκτροκίνητου οχήματος.[11]

Η πηγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι το τμήμα που τροφοδοτεί με ενέργεια το υπόλοιπο σύστημα. Το τμήμα αυτό λειτουργεί είτε ως πηγή, είτε ως αποθήκη ηλεκτρικής ενέργειας, είτε ως συνδυασμός και των δύο. Για την αποθήκευση ενέργειας χρησιμοποιούνται συσσωρευτές(μπαταρίες), ενώ η φόρτισή τους συνήθως γίνεται με ηλεκτρονικούς μετατροπείς AC/DC. Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας είναι το τμήμα, το οποίο είναι υπεύθυνο για την κατάλληλη μετατροπή της τάσεως της πηγής ώστε να τροφοδοτήσει τον κινητήρα. Επιπλέον ελέγχει και τη λειτουργία του οχήματος ελέγχοντας ουσιαστικά την ταχύτητα και τη ροπή του κινητήρα. Ο ηλεκτρικός κινητήρας μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική για την

κίνηση του οχήματος. Ενώ τέλος το σύστημα μετάδοσης κίνησης μεταδίδει την κίνηση στους τροχούς προσαρμόζοντας κατάλληλα τη ροπή και την ταχύτητα.

1.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ

Ο ηλεκτρικός κινητήρας μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Ένας ηλεκτρικός κινητήρας αποτελείται(Εικόνα1.8) από το ρότορα που εφαρμόζονται πάνω τα εσωτερικά πηνία ή μόνιμοι μαγνήτες και τον στάτη που εφαρμόζονται τα εξωτερικά πηνία. Αυτά δημιουργούν δύο ή περισσότερα μαγνητικά πεδία τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους περιστρέφοντας τον κεντρικό άξονα(ρότορα). Τα πηνία του ρότορα στους περισσότερους ηλεκτροκινητήρες είναι σχεδόν τα ίδια και αυτά που διαφέρουν είναι του στάτη. Το περίβλημα του κάθε κινητήρα είναι καλυμμένο με ψήκτρες για να αποβάλλει τη θερμότητα καθώς φέρει και έναν ανεμιστήρα στο πίσω μέρος για τον ίδιο λόγο. Όλοι οι κινητήρες έχουν στερεωμένο στο περίβλημά τους ένα καρτελάκι με όλες τις πληροφορίες που αφορούν τον κινητήρα καθώς και ένα κουτί μέσα στο οποίο βρίσκονται οι ηλεκτρικές συνδεσμολογίες τροφοδότησής του.



Εικόνα 1.8 Κύρια μέρη ηλεκτρικού κινητήρα.[17]

Οι ηλεκτροκινητήρες που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά οχήματα διακρίνονται σε κινητήρες Συνεχούς και Εναλλασσόμενου Ρεύματος.(Εικόνα 1.9) Οι χρησιμοποιούμενοι τύποι κινητήρων Σ.Ρ. είναι α) Κινητήρας Σ.Ρ. με διέγερση εν σειρά, β) Κινητήρας Σ.Ρ. με παράλληλη διέγερση, γ) Κινητήρας Σ.Ρ. με ξένη διέγερση και δ) Κινητήρας Σ.Ρ. με μόνιμο μαγνήτη. Από τους κινητήρες Ε.Ρ. έχουμε κινητήρες με ημιτονοειδή τάση τροφοδοσίας όπως: α) Ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού, β) Ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα και γ) Σύγχρονος τριφασικός με ή χωρίς μόνιμο μαγνήτη,

ενώ έχουμε και τους κινητήρες που τροφοδοτούνται με τετραγωνικούς παλμούς όπως: α) Κινητήρας τύπου Brushless DC και β) Κινητήρας τύπου Switched Reluctance.

Εικόνα 1.9 Είδη ηλεκτρικών κινητήρων στα ηλεκτροκίνητα οχήματα.[11]

Ένα υβριδικό αυτοκίνητο χρειάζεται μεγάλη ροπή αφού το βάρος του είναι μεγάλο. Χρειάζεται επίσης ανάλογα με τις απαιτήσεις του κατασκευαστή ταχύτητα, ακρίβεια και έλεγχο στροφών για τη σωστή λειτουργία και συμπεριφορά του στο δρόμο. Στη βιομηχανία ηλεκτροκίνητων οχημάτων δύο τύποι κινητήρων έχουν επικρατήσει: ο brushless κινητήρας και ο 3Φ ασύγχρονος κινητήρας. Στα υβριδικά οχήματα Prius και Civic έχει επιλεγεί η λύση του brushless κινητήρα, ενώ σε καθαρά ηλεκτροκίνητα οχήματα, όπως το υψηλών επιδόσεων Tesla Roadster, χρησιμοποιείται ο ασύγχρονος. Λιγότερο διαδεδομένη και σε εφαρμογές μικρότερης ισχύος, όπως scooters είναι η χρήση κινητήρων συνεχούς ρεύματος, ξένης ή παράλληλης διέγερσης, ενώ παλιότερα τέτοιοι κινητήρες είχαν χρησιμοποιηθεί σε ηλεκτροκίνητα μέσα μαζικής μεταφοράς.

1.4 ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΣ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑΣ ΙΣΧΥΟΣ

Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας είναι το τμήμα εκείνο του συστήματος που παίρνει τη συνεχή τάση των συσσωρευτών και τη μετατρέπει σε κατάλληλη μορφή για την τροφοδότηση του κινητήρα. Ανάλογα με το είδος κινητήρα που χρησιμοποιείται, επιλέγεται και αντίστοιχος μετατροπέας ισχύος (Εικόνα1.10). Έτσι, με βάση τους κινητήρες που χρησιμοποιούνται (Σ.Ρ ή Ε.Ρ) έχουμε μετατροπείς Σ.Τ/Σ.Τ τύπου chopper και μετατροπείς Σ.Τ/Ε.Τ τύπου αντιστροφέα (inverter). Οι διατάξεις αντιστροφέα μπορούν να οδηγούν κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος που απαιτούν είτε ημιτονοειδή τάση (ασύγχρονος κινητήρας, σύγχρονος κινητήρας) είτε τετραγωνικούς παλμούς (κινητήρας τύπου Brushless, κινητήρας τύπου switched reluctance). Για κάθε μία κατηγορία μετατροπέων ισχύος σημειώνονται τα ακόλουθα:

- ✓ *Μετατροπείς Σ.Τ/Σ.Τ τύπου chopper:*

Υπάρχουν δύο τύποι μετατροπέων chopper. Ο ένας χρησιμοποιεί ως διακοπτικό στοιχείο το θυρίστορ και επιπλέον περιέχει βοηθητικό κύκλωμα για τη σβέση του. Βασικό πλεονέκτημα αυτού του τύπου είναι η δυνατότητα για έλεγχο μεγάλης ισχύος. Όμως από την άλλη, λόγω του κυκλώματος σβέσης έχει πολύ μεγαλύτερη πολυπλοκότητα. Επιπλέον η συχνότητα λειτουργίας του διακοπτικού στοιχείου είναι σχετικά χαμηλή με αποτέλεσμα η εξομάλυνση του ρεύματος να απαιτεί μια σχετικά μεγάλη επαγωγή εξομάλυνσης.

Τα μειονεκτήματα αυτής της τοπολογίας αντισταθμίζει η δεύτερη κατηγορία που χρησιμοποιεί διακοπτικά στοιχεία με έλεγχο στη σβέση τους, όπως για παράδειγμα MOSFET,IGBT,GTO ή MCT. Με τη χρήση των στοιχείων αυτών επιτυγχάνουμε μικρό αριθμό ημιαγωγικών και παθητικών στοιχείων και κατά συνέπεια έχουμε χαμηλό μέγεθος και κόστος. Επιπλέον η διακοπτική συχνότητα του μετατροπέα μεγαλώνει με αποτέλεσμα να μικραίνει ο όγκος των απαιτούμενων παθητικών στοιχείων, ενώ το κύκλωμα έχει και καλύτερη απόκριση στον έλεγχο. Ένα τελευταίο πλεονέκτημα είναι το μεγαλύτερο εύρος ρύθμισής του λόγω κατάτμησης, γεγονός που συνεπάγεται μεγαλύτερο εύρος ρύθμισης της τάσης εξόδου.

- ✓ *Μετατροπείς Σ.Τ/Ε.Τ τύπου αντιστροφέα*

Οι μετατροπείς αυτού του τύπου χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Η μια περιλαμβάνει τους κλασικούς μετατροπείς με Διαμόρφωση Εύρους Παλμών (PWM) και η άλλη τους αντιστροφείς συντονισμού.

Οι αντιστροφείς PWM χωρίζονται με τη σειρά τους σε αντιστροφείς τάσης και σε αντιστροφείς ρεύματος, ανάλογα με το αν τροφοδοτούνται από πηγή τάσης ή ρεύματος .

Οι σπουδαιότερες μέθοδοι P.W.M που χρησιμοποιούνται για αντιστροφείς τάσης είναι οι εξής:

- Φυσικής P.W.M
- Κανονικής P.W.M
- Βέλτιστης P.W.M
- Δέλτα P.W.M
- P.W.M ίσης περιοχής

Αντίστοιχα οι μέθοδοι για έλεγχο ρεύματος είναι:

- Μέθοδος Υστέρησης
- Έλεγχος στιγμιαίου ρεύματος μέσω ρύθμισης της τάσης
- P.W.M χωρικού διανύσματος

Από όλες αυτές τις τεχνικές επιλέγεται η καταλληλότερη με βάση ορισμένα κριτήρια που σχετίζονται με τις ανώτερες αρμονικές, την καλύτερη εκμετάλλευση της συνεχούς τάσης εισόδου, την ανοχή σε διακυμάνσεις της συνεχούς τάσης εισόδου, ενώ ένα πολύ σημαντικό κριτήριο αποτελεί και η καταλληλότητα της μεθόδου για εφαρμογές πραγματικού χρόνου και εφαρμογές βασιζόμενες σε Μικροελεγκτές και DSP's. Η πολυπλοκότητα του όλου συστήματος απαιτεί τη χρήση ενός μικροϋπολογιστικού συστήματος με τη βοήθεια του οποίου μπορούν να επιτευχθούν περίπλοκες τεχνικές παλμοδότησης αλλά και ελέγχου.

Μια εναλλακτική κατηγορία αντιστροφέων που προτείνεται για χρήση σε ηλεκτροκίνητα οχήματα είναι οι Αντιστροφείς Συντονισμού. Στους αντιστροφείς συντονισμού γίνεται προσθήκη ενός κυκλώματος ταλάντωσης ούτως ώστε να επιτευχθούν οι ελάχιστες δυνατές απώλειες του μετατροπέα. Ανάλογα με την τοποθέτηση του κυκλώματος συντονισμού διακρίνουμε τους αντιστροφείς με *κύκλωμα συντονισμού εν σειρά* και με *παράλληλο κύκλωμα συντονισμού*. Το κύκλωμα συντονισμού λειτουργεί με τέτοιο τρόπο ώστε η μετάβαση στην κατάσταση αγωγής του στοιχείου να γίνεται είτε υπό μηδενική τάση είτε υπό μηδενικό ρεύμα. Με τον τρόπο αυτό οι απώλειες επάνω στα στοιχεία μειώνονται δραστικά αφού οι διακοπτικές απώλειες μηδενίζονται.

Εκτός από το βασικό αυτό πλεονέκτημα έχουμε τα ακόλουθα:

- Μικρότερες ψυκτικές απαιτήσεις, καθώς οι θερμικές απώλειες είναι ελάχιστες.
- Απουσία κυκλωμάτων snubber τα οποία περιπλέκουν την τοπολογία του κυκλώματος και καταναλώνουν σημαντικά ποσά ενέργειας.
- Μεγάλη πυκνότητα ισχύος.
- Μικρότερες ηλεκτρομαγνητικές παρενοχλήσεις λόγω της μορφής των τάσεων και των ρευμάτων.
- Ελάχιστος ακουστικός θόρυβος
- Αυξημένη αξιοπιστία.

Παρά όμως τα τόσα τους πλεονεκτήματα παρουσιάζουν και δύο σημαντικά μειονεκτήματα που εμποδίζουν την διάδοσή τους: Το κόστος κατασκευής είναι αυξημένο λόγω του κυκλώματος συντονισμού και ο έλεγχος μιας τέτοιας διάταξης είναι ιδιαίτερα δύσκολος.

Εικόνα 1.10 Είδη ηλεκτρονικών μετατροπέων ισχύος.[11]

1.5 ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Η μπαταρία είναι ένας συνδυασμός από ένα ή περισσότερα ηλεκτροχημικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται για να μετατρέπουν την αποθηκευμένη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική (ηλεκτρικό ρεύμα). Από την εποχή της εφεύρεσης της πρώτης βολταϊκής στήλης από τον Αλεσάντρο Βόλτα, το 1800, η μπαταρία αποτελεί την πιο διαδεδομένη πηγή ενέργειας για πάρα πολλές οικιακές και βιομηχανικές εφαρμογές. Οι μπαταρίες των αυτοκινήτων ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των επαναφορτιζόμενων (συσσωρευτές) και μπορούν να πραγματοποιούν και την αντίστροφη διαδικασία, μετατρέποντας την ηλεκτρική ενέργεια σε χημική.

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών οι τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των μπαταριών έχει συμβάλλει τα μέγιστα ώστε να ξεπεραστούν ως ένα βαθμό εμπόδια όπως ο μεγάλος όγκος, το βάρος και το υψηλό κόστος κατασκευής των μπαταριών που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά οχήματα. Παρακάτω γίνεται αναφορά στα κυριότερα είδη μπαταριών που χρησιμοποιούνται στην ηλεκτρική αυτοκινητοβιομηχανία και έχουν πολλά πλεονεκτήματα, όπως μειωμένο βάρος και υψηλή χωρητικότητα ενέργειας [Wh], που αυξάνει την αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων.

1) Οι «κλασικοί» *συσσωρευτές μολύβδου-οξέος (lead-acid)* με ηλεκτρολύτη σε στερεά μορφή - gel ήταν, μέχρι και τις αρχές της δεκαετίας του '90, η πρώτη επιλογή των διάφορων ηλεκτρικών προσπαθειών, λόγω -κυρίως- του χαμηλού κόστους τους. Βεβαίως, δεν είναι αυτό το μοναδικό τους προσόν. Στα πλεονεκτήματά τους πρέπει να συμπεριλάβουμε τη μεγάλη αξιοπιστία και τη σχετικά χαμηλή αυτοεκφόρτιση. Από την άλλη μεριά, όμως, έχουν μεγάλο βάρος (και κατά συνέπεια μικρή ενεργειακή πυκνότητα), οπότε επιβαρύνουν το όχημα με αρκετά επιπλέον κιλά. Επίσης μειώνεται σημαντικά η διάρκεια ζωής τους σε

περιπτώσεις ταχείας φόρτισης και σχεδόν πλήρους εκφόρτισης που απαιτείται κατά τη χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων. Στην περίπτωση, μάλιστα, που έχουμε να κάνουμε με μπαταρίες ανοιχτού τύπου και υγρό ηλεκτρολύτη απαιτείται και ο ανεφοδιασμός τους με αποσταγμένο νερό.

2) Οι μπαταρίες *νικελίου-καδμίου (Ni-Cd)* έχουν περίπου 1,3 φορά μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα από αυτές μολύβδου-οξέος, δεν επηρεάζονται τόσο πολύ από τις μεταβολές της θερμοκρασίας, μπορούν να φορτιστούν σε μικρό χρονικό διάστημα αν χρειαστεί (ταχεία φόρτιση), ενώ μπορούν επίσης να ανακτήσουν τη χωρητικότητά τους αν αφεθούν αφόρτιστες για μεγάλο χρονικό διάστημα. Στα μειονεκτήματα των συσσωρευτών αυτού του τύπου περιλαμβάνεται το αυξημένο κόστος, αλλά και το πρόβλημα περισυλλογής του Cd, μετά το τέλος της ζωής των συσσωρευτών, καθώς αυτό είναι υλικό που μολύνει το περιβάλλον.

3) Οι συσσωρευτές *νικελίου-υδριδίου μετάλλου (Ni-MH)* έχουν ακόμα μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα (1,7 φορές μεγαλύτερη από εκείνη των μπαταριών μολύβδου-οξέος), δηλαδή περίπου 70 Wh/kg (140 Wh/L). Μια μπαταρία Ni-MH χρησιμοποιεί ως αρνητικό ηλεκτρόδιο ένα κράμα που έχει την ικανότητα να απορροφά το υδρογόνο. Το μέταλλο (M) στο αρνητικό ηλεκτρόδιο είναι μια διαμεταλλική ένωση που περιέχει νικέλιο, ενώ ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται υδροξείδιο του καλίου. Η τάση κατά τη φόρτιση είναι 1,4-1,6 V ανά στοιχείο, ενώ κατά την εκφόρτιση η τάση του ρεύματος είναι 1,25 V. Οι μπαταρίες Ni-MH έχουν το μειονέκτημα ότι η απόδοσή τους επηρεάζεται αρνητικά στις υψηλές θερμοκρασίες, από την άλλη όμως χαρακτηρίζονται από μεγάλη διάρκεια ζωής, ενώ το κόστος τους είναι μεν υψηλό, αλλά αισθητά χαμηλότερο από εκείνο των μπαταριών λιθίου. Επιπλέον, η εσωτερική τους αντίσταση είναι χαμηλή, ενώ έχουν επιδείξει επίσης αξιοσημείωτη αξιοπιστία και αντοχή στα υβριδικά αυτοκίνητα όπου τοποθετήθηκαν, έχοντας στην πράξη επικρατήσει στον τομέα της οικολογικής αυτοκίνησης. Μπαταρίες αυτού του τύπου συναντάμε στα υβριδικά Toyota και Honda, οι συνολικές πωλήσεις των οποίων έχουν προ πολλού σπάσει το φράγμα των 2 εκατομμυρίων αυτοκινήτων.

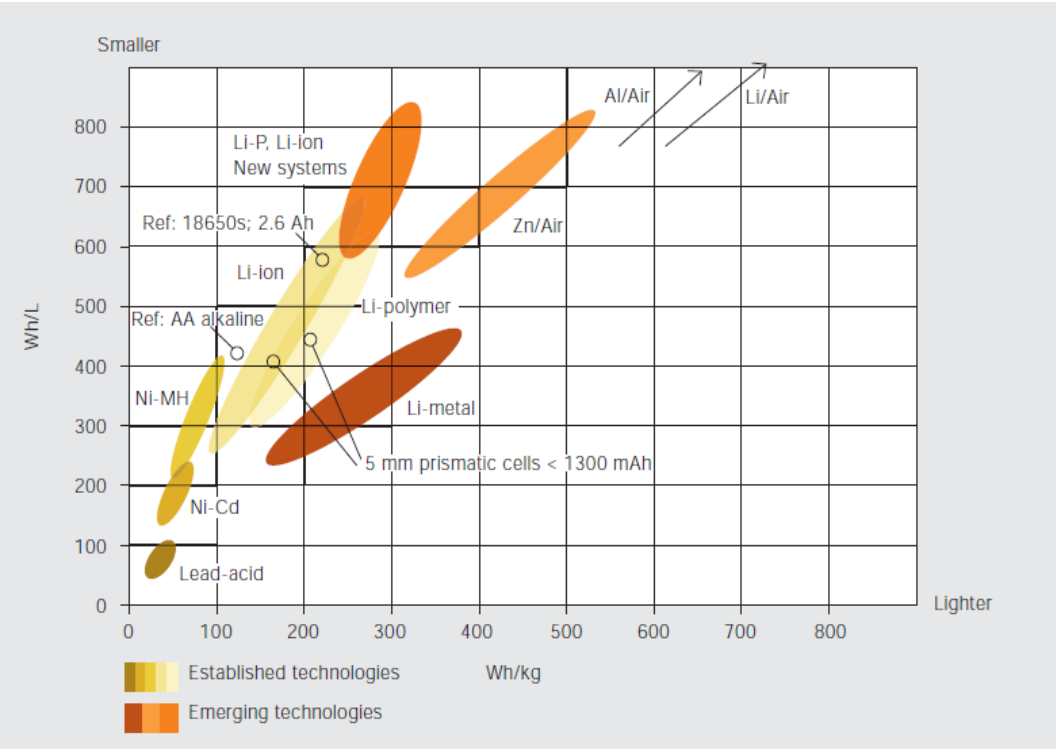
4) Οι πλέον υποσχόμενες για το μέλλον μπαταρίες είναι σήμερα *οι ιόντων λιθίου (Li-ion)*, γνωστές από πολλές εφαρμογές εκτός αυτοκίνησης. Η ενεργειακή τους πυκνότητα είναι τουλάχιστον 3 φορές μεγαλύτερη, σε σχέση πάντα με τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος, έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και η αυτοεκφόρτιση διατηρείται σε χαμηλά επίπεδα. Στα μειονεκτήματά τους περιλαμβάνεται η πτώση της απόδοσής τους στις υψηλές θερμοκρασίες. Με βάση το υλικό κατασκευής της ανόδου, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου χωρίζονται σε τέσσερις μεγάλες ομάδες: λιθίου-οξειδίου κοβαλτίου, λιθίου-οξειδίου μαγγανίου, τριών στοιχείων και λιθίου-φωσφορικού σιδήρου (LiFe-PO4). Το οξείδιο του κοβαλτίου είναι το επικρατέστερο αυτήν τη στιγμή υλικό κατασκευής της ανόδου σε μπαταρίες που συναντάμε σε καταναλωτικά προϊόντα. Υπερέχει σε ενεργειακή πυκνότητα, αλλά δεν τα καταφέρνει τόσο καλά στον τομέα της θερμικής ευστάθειας (ο κίνδυνος εμφάνισης πυρκαγιάς είναι υπαρκτός), ενώ και ο κύκλος ζωής του είναι σχετικά μέτριος. Οι μπαταρίες λιθίου-οξειδίου μαγνησίου επιδεικνύουν μεγαλύτερη θερμική σταθερότητα, αλλά η απόδοσή τους πέφτει με την άνοδο της

θερμοκρασίας και δεν θεωρούνται οι καλύτερες για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Οι μπαταρίες τριών στοιχείων έχουν μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα, αλλά η απόδοσή τους πέφτει στις πολύ υψηλές και στις πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Οι μπαταρίες λιθίου-φωσφορικού σιδήρου έχουν σχετικά μικρή ενεργειακή πυκνότητα, αλλά υπερέχουν στον τομέα της ασφάλειας, κοστίζουν λιγότερο, ενώ διαθέτουν και ιδιαίτερα μεγάλο κύκλο ζωής.

Ο παρακάτω πίνακας συνοψίζει τα κυριότερα χαρακτηριστικά των μπαταριών ανά κατηγορία.

Πίνακας 1.1 Χαρακτηριστικά μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων.

Τύπος μπαταρίας	Πυκνότητα Ενέργειας (Wh/kg)	Ισχύς/Βάρος (W/kg)	Κόστος ενέργειας (Wh/$)	Βάθος εκφόρτισης (%)	Τάση κυττάρου (V)
Lead-Acid	30-40	180	7-18	50-70	2
NiCd	40-60	150	5-10	70-90	1.2
NiMH	30-80	250-1000	2,75	60-70	1.2
Li-ion	100-160	250-340	1,5	80-90	3.7



Εικόνα 1.11 Συγκριτικό διάγραμμα χωρητικότητας ενέργειας (Wh) μπαταριών ανά όγκο και βάρος.[30]

1.6 ΦΟΡΤΙΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

1.6.1 Κατηγορίες φόρτισης

Ένα από τα μεγαλύτερα ζητήματα που αφορούν τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων είναι οι υποδομές για τη φόρτισή τους. Στη ενότητα αυτή θα περιγράψουμε τα είδη φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους.

Η γενικότερη κατηγοριοποίηση σταθμών φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων αφορά τη σύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων με την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Δύο κατηγορίες διακρίνονται [19]:

- ✓ Ενσύρματη σύνδεση: Το όχημα συνδέεται με ηλεκτροφόρους αγωγούς στην παροχή. Το σύστημα ελέγχου της φόρτισης είναι τοποθετημένο εντός του ηλεκτρικού οχήματος. Η σύνδεση αυτή είναι τόσο απλή όσο και η σύνδεση μιας οποιασδήποτε συσκευής στο ηλεκτρικό δίκτυο.

- ✓ Επαγωγική σύνδεση: Η ηλεκτρική σύνδεση του οχήματος με την παροχή γίνεται μέσω επαγωγών και όχι με αγωγούς απευθείας. Η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται μέσω μαγνητικού πεδίου. Στη περίπτωση αυτή το μεγαλύτερο μέρος των υποδομών φόρτισης και ελέγχου της βρίσκονται εκτός του ηλεκτρικού οχήματος.

Η επαγωγική σύνδεση δεν είναι τόσο διαδεδομένη σε σύγκριση με την ενσύρματη σύνδεση. Στην επαγωγική φόρτιση γίνεται φόρτιση με πηγή ρεύματος 220 V/AC. Το ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρεται από ένα φορτιστή στο EV με βάση την αρχή της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Κατά τη φόρτιση των μπαταριών εισάγεται η συσκευή στη θύρα επαναφόρτισης (charge port) του EV. Η συσκευή (paddle) και η θύρα του EV δημιουργούν μαγνητική σύζευξη. Η μονάδα εξωτερικής επαναφόρτισης στέλνει ρεύμα μέσω του πρωτεύοντος τυλίγματος στο εσωτερικό της συσκευής (paddle). Η δημιουργηθείσα μαγνητική ροή προκαλεί εναλλασσόμενο ρεύμα στο δευτερεύον τύλιγμα, το οποίο είναι στη θύρα επαναφόρτισης (charge port). Το δημιουργηθέν εναλλασσόμενο ρεύμα μετατρέπεται σε συνεχές (εντός του EV) για να φορτιστούν οι μπαταρίες . Ο τρόπος αυτός είναι ασφαλής καθώς δεν υπάρχει μέταλλο ή μεταλλική επαφή ανάμεσα στη συσκευή φόρτισης (charge paddle) και στη θύρα φόρτισης του EV.

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα βασικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δύο τεχνολογιών φόρτισης.

Πίνακας 1.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα επαγωγικής και αγώγιμης φόρτισης.[19]

	Επαγωγική φόρτιση	***Αγώγιμη Φόρτιση***
ΚΟΣΤΟΣ	ακριβότερη	φθηνότερη
ΠΟΛΥΠΛΟΚΟΤΗΤΑ	πολύπλοκη	πιο απλή
ΑΣΦΑΛΕΙΑ	ασφαλής/καλύτερη μόνωση	αρκετά ασφαλής λόγω μεθόδων ανίχνευσης σφάλματος
ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ	λιγότερο αποδοτική	πιο αποδοτική

Οι σταθμοί φόρτισης με τεχνολογία ενσύρματης σύνδεση χωρίζονται σε περαιτέρω υποκατηγορίες ανάλογα με το επίπεδο της ισχύος της φόρτισης. Υπάρχουν σταθμοί φόρτισης που παρέχουν AC σύνδεση (μονοφασική ή τριφασική) αλλά και σταθμοί φόρτισης με DC σύνδεση.

- ✓ ***Μονοφασική AC παροχή***: Αντίστοιχες παροχές υπάρχουν και στις οικιακές κατοικίες για την ηλεκτροδότηση καθημερινών συσκευών. Η φόρτιση από μονοφασική παροχή έχει τα εξής χαρακτηριστικά:
  - 230V/16A ~ 3kW , 12 ώρες η διάρκεια φόρτισης
  - 230V/32A ~ 7,4kW, 5 ώρες η διάρκεια φόρτισης

- ✓ ***Τριφασική AC παροχή***: Παρέχει τη δυνατότητα μεταφοράς μεγάλης ποσότητας ισχύος χωρίς να απαιτούνται μεγάλες τάσεις ή ρεύματα. Η φόρτιση από τριφασική παροχή έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

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

✓ ***DC παροχή***: Στη περίπτωση αυτή ο φορτιστής της μπαταρίας βρίσκεται εκτός του οχήματος και η τροφοδοσία είναι συνεχές ρεύμα. Το συνεχές ρεύμα δίνει τη δυνατότητα μεταφοράς υψηλής ισχύος (40kW) επιτυγχάνοντας διάρκεια φόρτισης λιγότερο από 45 λεπτά.

Σταθμοί αντικατάστασης μπαταριών: Στους σταθμούς αυτούς η χρησιμοποιημένη μπαταρία αντικαθίσταται από μια πλήρως φορτισμένη μπαταρία σε χρόνο αντίστοιχο με αυτό του ανεφοδιασμού ενός συμβατικού οχήματος σε πρατήριο υγρών καυσίμων. Ο χρόνος ο οποίος απαιτείται για να φορτιστούν οι μπαταρίες, είναι πολύ σημαντικός. Για αυτό το λόγο συνηθίζεται ανάλογα με το χρόνο και την παρεχόμενη ισχύ να αναφερόμαστε σε φόρτιση επιπέδου 1,2 και 3,στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά κάθε επιπέδου.

Πίνακας 1.3 Επίπεδα φόρτισης και βασικά χαρακτηριστικά.[19]

	ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ	***ΙΣΧΥΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ***	***ΧΡΟΝΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (35kWh)***
ΕΠΙΠΕΔΟΥ 1	ΚΑΜΙΑ	3 kW	12 ΩΡΕΣ
ΕΠΙΠΕΔΟΥ 2	ΕΙΔΙΚΗ ΚΑΛΩΔΙΩΣΗ	10-20 kW	2-4 ΩΡΕΣ
ΕΠΙΠΕΔΟΥ 3	ΕΙΔΙΚΗ ΚΑΛΩΔΙΩΣΗ & ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΣ ΦΟΡΤΙΣΤΗΣ (DC ΦΟΡΤΙΣΗ)	40+ kW	<45 ΛΕΠΤΑ

1.6.2 Καλώδια σύνδεσης

Μέχρι σήμερα δεν υπάρχει κάποια προτυποποίηση για τις καλωδιώσεις σύνδεσης των ηλεκτρικών οχημάτων με τους σταθμούς φόρτισης. Οι ιδιοκτήτες των ηλεκτρικών οχημάτων επιθυμούν το καλώδιο φόρτισης και η υποδοχή να είναι συμβατή με όλους τους σταθμούς φόρτισης ανεξάρτητα από την τεχνολογία αυτών ή τον κατασκευαστή τους. Έτσι θα μπορούν να φορτίζουν σε διαφορετικά σημεία, όπως επίσης ένα καλώδιο θα μπορεί να συνδεθεί σε διαφορετικά μοντέλα οχημάτων. Παρακάτω

συνοψίζοντας παρουσιάζεται ένας πίνακας με τα υπάρχοντα καλώδια φόρτισης και τα βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας τους.

Πίνακας 1.1 Καλώδια σύνδεσης για φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων και δυνατότητες φόρτισης.[19]

Connector name	Multi-phase charging support	DC charging support	Control signal support	Output power
SAE J1772	✗	✗ (not as of early 2010)	✓	1.9, 19 kW
Mennekes	✓	✗	✓	3, 10, 20, 30, 43 kW
Walther	✓	✗	✓	3.7, 7.4, 11, 14.5, 22, 43 kW
EDF	✗	✗	✗	3.6, 15 kW
Scame-Schneider-Legrand	✓	✗	✓	4, 8, 27.7 kW
TEPCO/JARI	✗	✓	✓	50 kW

1.6.3 Σταθμοί φόρτισης

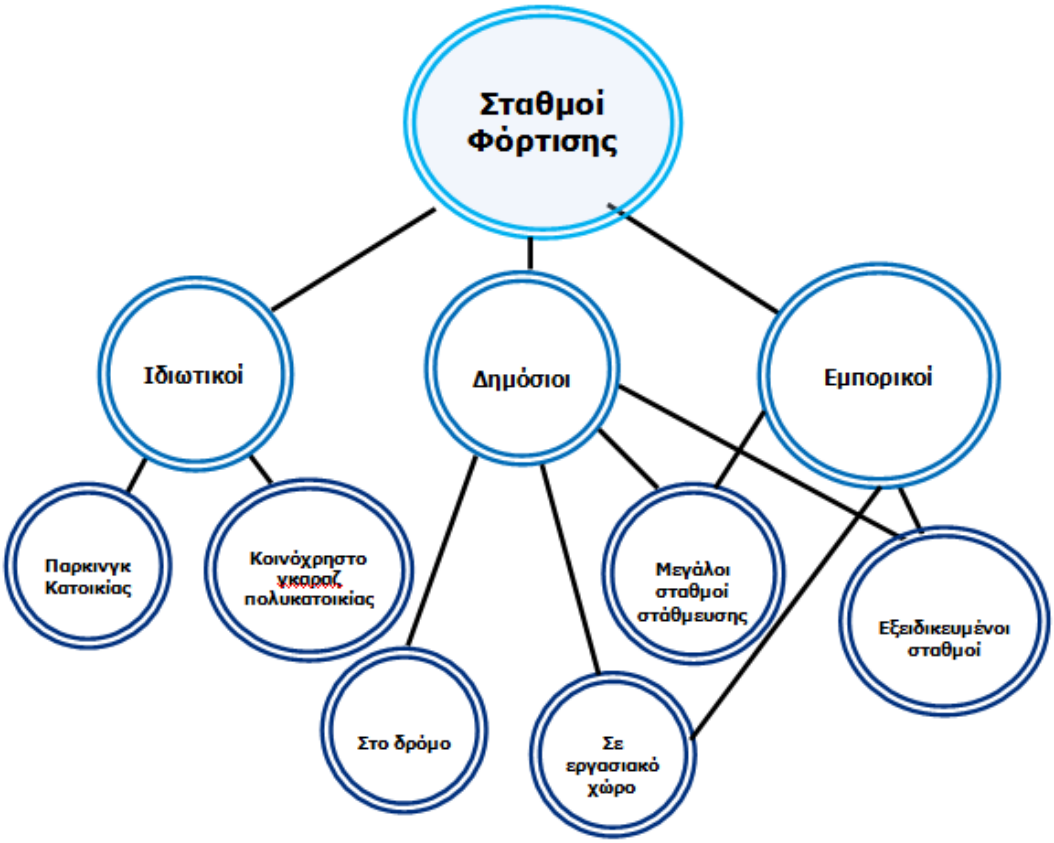
Η μαζική κυκλοφορία των ηλεκτρικών οχημάτων θα φέρει στο προσκήνιο νέες προκλήσεις οι οποίες θα πρέπει να αντιμετωπισθούν. Μία από αυτές είναι ο χώρος φόρτισης των νέων ηλεκτρικών οχημάτων. Ανάλογα με τον τρόπο χρήσης των αμαξιδίων(χρόνος λειτουργίας διαθέσιμη αυτονομία κλπ), την τεχνολογία των μπαταριών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

- Ιδιωτικοί με ιδιωτική πρόσβαση(π.χ. προσωπικά γκαράζ). Η διαδικασία φόρτισης έχει ορισμένα σημαντικά χαρακτηριστικά όπως για παράδειγμα το ότι γίνεται από μονοφασική παροχή και συνήθως νυχτερινές ώρες. Έτσι έχουμε χαμηλότερο τιμολόγιο κατανάλωσης. Με τον τρόπο αυτό η φόρτιση διαρκεί περίπου 6-8 ώρες ενώ το μέγιστο ρεύμα της φόρτισης δεν ξεπερνάει τα 15 Α. Επίσης οι καταναλωτές μπορούν να ανήκουν σε στόλο οχημάτων, όπου θα πληρώνει ο

καθένας το μερίδιό του, αλλά θα μπορούν να κλείνουν καλύτερες συμφωνίες με το κεντρικό δίκτυο ακόμα και για V2G(vehicle to grid) λειτουργία(πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στο κεντρικό δίκτυο). Εδώ οι απαιτήσεις σε εξοπλισμό είναι ελάχιστες.

- Ιδιωτικοί με δημόσια πρόσβαση(π.χ. μεγάλα παρκινγκ εμπορικών καταστημάτων, εργασιακός χώρος). Εδώ τα EV θα μπορούν να φορτίζουν τις ώρες που παραμένουν παρκαρισμένα, πληρώνοντας το ανάλογο αντίτιμο. Ανάλογα με τη φύση του χώρου και τις απαιτήσεις του πελάτη θα δημιουργηθούν σταθμοί όλων των επιπέδων 1-3(αργή-γρήγορη φόρτιση).
- Δημόσιοι με δημόσια πρόσβαση(π.χ. δημόσιοι δρόμοι). Πολλοί ιδιοκτήτες αυτοκινήτων, ιδίως στις πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές δεν έχουν πρόσβαση σε ιδιωτικά παρκινγκ. Η δημιουργία σταθμών φόρτισης στις λωρίδες παρκαρίσματος των δρόμων αποτελεί έναν έξυπνο και συνάμα αποτελεσματικό τρόπο αντιμετώπισης τέτοιων προβλημάτων. Οι απαιτήσεις τέτοιων σταθμών είναι επιπέδου 1 και 2.

Η πληρωμή σε περίπτωση χρησιμοποίησης κάποιου σταθμού φόρτισης μπορεί να γίνει είτε εκ των προτέρων ή με ένα συνολικό λογαριασμό στο τέλος μιας προσυμφωνημένης χρονικής περιόδου. Στην εικόνα 1.12 παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση των σταθμών φόρτισης ανάλογα με την τοποθεσία εγκατάστασης



Εικόνα 1.12 Κατηγοριοποίηση σταθμών φόρτισης ανάλογα με τη τοποθεσία εγκατάστασης.[19]

Τέλος πολλές εταιρείες έχουν αρχίσει την εγκατάσταση σταθμών φόρτισης με δίκτυο χρέωσης. Οι σημαντικότερες από αυτές είναι: Elektromotive, Park and Power, Aerovironment Inc., PEP stations, POD Point, Ville de Paris, CirCarLife, Mobi.e, Better Place και Coulomb Technologies. Δύο από τις σημαντικότερες προκλήσεις που έχουν να συναντήσουν αυτές οι εταιρείες είναι η ιδέα της άμεσης αντικατάστασης της άδειας μπαταρίας με πλήρως φορτισμένης, έτσι ώστε να μην τίθεται θέμα φόρτισης από τη μεριά του πελάτη, καθώς επίσης και η φόρτιση μέσω φωτοβολταϊκών κυττάρων τα οποία είναι τοποθετημένα σε στέγαστρα σε παρκινγκ. Αυτού του είδους φόρτιση είναι πολύ εύκολη αφού δεν χρειάζεται κάποια εξωτερική παρέμβαση, όμως ο χαμηλός βαθμός απόδοσης των φωτοβολταϊκών κυττάρων, το υψηλό κόστος καθώς και ο κίνδυνος της φθοράς που διατρέχουν είναι πολύ σημαντικά μειονεκτήματα που εμποδίζουν προς το παρόν την εξάπλωσή τους στη χρήση ηλεκτροκίνητων οχημάτων.

Εικόνα 1.13 Το «Ηλιακό Δάσος» του σχεδιαστή Νέβιλ Μαρς προφυλάσσει τα ηλεκτρικά οχήματα από τον ήλιο ως χώρος στάθμευσης, ενώ τα φορτίζει παράλληλα.[24]

1.7 V2G ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Τα ηλεκτρικά οχήματα δεν αποτελούν απλά μια τεχνολογική εξέλιξη στο τομέα των μεταφορών και της αυτοκινητοβιομηχανίας αλλά και μια πρόκληση για τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας. Τα ηλεκτρικά οχήματα συμπεριφέρονται σαν μπαταρίες που εκφορτίζονται κατά τη διάρκεια των μετακινήσεων, ανάλογα με ανάγκες και την οδηγική συμπεριφορά του χρήστη, και φορτίζονται από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της στάθμευσης τους, ανάλογα με τις ανάγκες του χρήστη και την τιμολογιακή πολιτική που επιθυμεί να ακολουθήσει. Τα ηλεκτρικά οχήματα ως παθητικά στοιχεία αποτελούν ένα νέο είδος φορτίου για τα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας και πιθανή μεγάλη διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να επιβαρύνει αισθητά το ηλεκτρικό δίκτυο και να επηρεάσει αρνητικά τον ενεργειακό και αναπτυξιακό προγραμματισμό τους.

Αναλογιζόμενοι τη λειτουργία των μπαταριών σε ένα μικροδίκτυο με την αμφίδρομη ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ μπαταρίας-δικτύου, η στατική θεώρηση των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να επεκταθεί σε μια πιο δυναμική συμπεριφορά σύμφωνα με την οποία τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να παρέχουν ενέργεια στο δίκτυο όταν αυτό είναι επιβαρυμένο, π.χ. απογευματινές ώρες για τα νοικοκυριά ή μεσημεριανές ώρες στο ωράριο εργασίας, και να φορτίζονται σε ώρες μη αιχμής, πχ το βράδυ (V2G concept).

Με τον όρο V2G(vehicle to grid) αναφερόμαστε στη διαδικασία μεταφοράς ενέργειας από την πλευρά των οχημάτων προς την αντίστοιχη των συστημάτων ενέργειας, όταν τα ηλεκτρικά οχήματα είναι σταθμευμένα. Τα ηλεκτρικά οχήματα που θεωρούμε εδώ μπορεί να είναι μπαταρίας, κυψελών καυσίμου ή υβριδικά οχήματα με δυνατότητα σύνδεσης στο δίκτυο (plug-in hybrid). Επίσης διαθέτουν ηλεκτρονικά ισχύος που μετατρέπουν την εναλλασσόμενη τάση του δικτύου σε συνεχή για τη φόρτιση της μπαταρίας του οχήματος ή μπορούν να λειτουργήσουν κι αντίστροφα, μετατρέποντας τη συνεχή τάση από το όχημα στην εναλλασσόμενη τάση του δικτύου και στη συχνότητα του δικτύου.

Σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται παραπάνω, τα ηλεκτρικά οχήματα θα μπορούν να φορτίζουν κατά τη διάρκεια χαμηλής ζήτησης της ισχύος και να εκφορτίζουν όταν η ζήτηση είναι υψηλή. Παράλληλα η δομή των ενεργειακών συστημάτων είναι τέτοια, που θα πρέπει ανά πάσα στιγμή να ισχύει το ισοζύγιο ανάμεσα στην παραγωγή και το φορτίο. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η σταθερότητα των τιμών τάσης και συχνότητας που με τη σειρά τους καθορίζουν την ποιότητα της προσφερόμενης ισχύος. Έτσι δημιουργώντας κανείς ένα στόλο οχημάτων και εκμεταλλεύοντας τόσο τη χωρητικότητα όσο και την ταχεία απόκριση των μπαταριών, θα μπορούσε να συγκεντρώσει ένα σημαντικό ποσό ισχύος προς εφεδρεία για τις αιχμές που θα παρουσιάζονται στη ζήτηση ισχύος. Επίσης ο στόλος των οχημάτων μπορεί να συμμετέχει στη ρύθμιση συχνότητας, ενώ μελλοντικές σκέψεις κάνουν λόγο και για χρησιμοποίηση των οχημάτων προς αποθήκευση

ενέργειας η οποία θα προέρχεται από τα εγκατεστημένα συστήματα ανανεώσιμων πηγών (φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες).

Για την 'επικοινωνία' μεταξύ οχημάτων και δικτύου απαιτούνται δύο συνδέσεις:

- ✓ *Σύνδεση ισχύος* που θα επιτρέπει τη ροή ισχύος και τη σύνδεση ελέγχου, η οποία θα αναλύει το σήμα ενέργειας που θα φτάνει στο όχημα και θα ρυθμίζει και θα καταγράφει τη μεταφερόμενη V2G ενέργεια ανά πάσα στιγμή.
- ✓ *Σύνδεση ελέγχου* μπορεί να είναι εγκατεστημένη σε ειδικό on-board σύστημα κάθε ηλεκτρικού αυτοκινήτου, σε ένα δημόσιο σταθμό φόρτισης ή ακόμα να είναι υπό την επίβλεψη του διαχειριστή στόλου ηλεκτρικών αυτοκινήτων(aggregator). Η σημασία του συστήματος ελέγχου είναι ακόμα μεγαλύτερη αν αναλογιστεί κανείς ότι η V2G ενέργεια συνήθως κοστολογείται πολύ περισσότερο από το κόστος παραγωγής της και άρα θα πρέπει να υπάρχει ακρίβεια στη ζητούμενη ποσότητα ανά πάσα στιγμή συναλλαγής.

Όπως προαναφέρθηκε ο στόλος ηλεκτρικών οχημάτων θα βρίσκεται υπό την επίβλεψη ενός διαχειριστή, ο οποίος θα αποτελεί το διαμεσολαβητή μεταξύ του στόλου και του κεντρικού διαχειριστή του ενεργειακού συστήματος. Ο διαμεσολαβητής(aggregator) θα επικοινωνεί με τον κεντρικό διαχειριστή(στην περίπτωση του ελληνικού ενεργειακού συστήματος το ρόλο αυτό έχει το ΔΕΣΜΗΕ) μέσω σημάτων, τα οποία στη συνέχεια θα διαβιβάζονται σε κάθε όχημα ξεχωριστά. Μάλιστα η αυτοκινητοβιομηχανία έχει μεριμνήσει ώστε το σύστημα επικοινωνίας να αποτελεί βασικό κομμάτι σε κάθε όχημα. Επίσης πρέπει να αναφερθεί ότι το τμήμα αυτό ονομάζεται 'telematics' και η βασική λειτουργία που προσφέρει έχει να κάνει με τη δήλωση του οχήματος σε ηλεκτρονική βάση δεδομένων με τη χρήση μοναδικής ηλεκτρονικής ταυτότητας(π.χ. αριθμός διαδικτυακού πρωτοκόλλου, IP), το οποίο θα εξυπηρετεί στην καταγραφή της συνολικής ανταλλαγής ενέργειας μεταξύ οχήματος και κεντρικού δικτύου, που θα αποσκοπεί στην ακριβή χρέωση σε κάθε λογαριασμό. Παράλληλα μέσω του 'telematics' θα γίνεται δυνατός ο εντοπισμός θέσης του ηλεκτρικού οχήματος μέσω του Παγκόσμιου Συστήματος Θεσιθεσίας (GPS) ή ακόμη και του υπάρχοντος συστήματος κινητής τηλεφωνίας. Οι δύο παραπάνω λειτουργίες του on-board συστήματος ηλεκτρικών αυτοκινήτων(μέτρηση συναλλασσόμενης ενέργειας, εντοπισμός θέσης) είναι απαραίτητες για τη συμμετοχή τους στα διάφορα μοντέλα αγορών V2G, καθώς ανά πάσα στιγμή ο aggregator θα πρέπει να γνωρίζει τη θέση, τη διαθεσιμότητα και τη στάθμη φόρτισης όλων των οχημάτων που βρίσκονται στο στόλο που διαχειρίζεται.

1.8 ΕΘΝΙΚΑ ΣΧΕΔΙΑ-ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ

Ολοένα και περισσότερες κυβερνήσεις ανά τον κόσμο δίνουν οικονομικά κίνητρα στους πολίτες για να αγοράσουν ηλεκτρικά οχήματα ενώ παράλληλα διάφορα έργα (projects) με θέμα τα ηλεκτρικά οχήματα βρίσκονται σε εξέλιξη ή σχεδιάζονται για το μέλλον. Τα αναμενόμενα οφέλη από τη διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων είναι πολλαπλά, καθώς εκτός από μείωση ρύπων, θα αυξηθεί η διείσδυση των ΑΠΕ για τη φόρτιση των μπαταριών των οχημάτων και αναμένεται να δημιουργηθούν νέες θέσεις εργασίας. Παρακάτω θα γίνει μία συνοπτική παρουσίαση των σημαντικότερων αυτών ενεργειών στην Αμερική και την Ευρώπη.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής ο Πρόεδρος Μπάρακ Ομπάμα πρόσφατα ανακοίνωσε την επιχορήγηση ύψους 2,4 δισεκατομμυρίων δολαρίων για την ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων. Το μεγαλύτερο μερίδιο, συγκεκριμένα 1,5 δις δολάρια αφορά την επιχορήγηση κατασκευαστριών εταιριών με σκοπό την έρευνα και ανάπτυξη νέων πιο αποδοτικών μπαταριών. Ενώ το υπόλοιπο ποσό αφορά την επιχορήγηση έρευνας και ανάπτυξης σε ηλεκτρικούς κινητήρες, κατασκευή σταθμών φόρτισης και την εκπαίδευση τεχνιτών για κατασκευή και επισκευή ηλεκτρικών οχημάτων. Επίσης στις 21 Μαΐου του 2009 ψηφίστηκε από την επιτροπή Ενέργειας και Εμπορίου το νομοσχέδιο με τίτλο ACES (American Clean Energy and Security Act) το οποίο έχει αναλυτικές διατάξεις για τα ηλεκτρικά οχήματα. Το νομοσχέδιο καλεί όλες τις ηλεκτρικές επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας να αναπτύξουν ένα πλάνο για τη στήριξη της χρήσης ηλεκτρικών οχημάτων μέσα από την έξυπνη ενσωμάτωση των οχημάτων στο δίκτυο και την πιο αποδοτική και αποτελεσματική διανομή ηλεκτρικής ενέργειας στα ηλεκτρικά οχήματα. Παράλληλα η Βουλή των Αντιπροσώπων ψήφισε νόμο στα τέλη του 2008 για φορολογικές απαλλαγές που κυμαίνονται από 2500 έως 7500$ για την αγορά ηλεκτρικών οχημάτων, ανάλογα με τη χωρητικότητα της μπαταρίας. Συγκεκριμένα η πίστωση φόρου είναι 2500$ συν 417$ για κάθε κιλοβατώρα της μπαταρίας πάνω από 5kWh και δεν ξεπερνά το συνολικό ποσό των 7500$. Επίσης ανάλογα με την εκάστοτε πολιτεία των ΗΠΑ έχουν αρχίσει να δίνονται επιπλέον κίνητρα όπως έκπτωση στην αγορά ηλεκτρικού οχήματος, χαμηλότερα ασφάλιστρα και μειωμένα τέλη κυκλοφορίας. Τέλος έχει αρχίσει να τίθεται σε εφαρμογή σε κάποιες πολιτείες (και στο Οντάριο του Καναδά) η χορήγηση πράσινων πινακίδων στα ηλεκτρικά οχήματα και η αποκλειστική χρήση λωρίδων κυκλοφορίας σε αυτοκινητόδρομους.

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση 15 από τα 27 κράτη μέλη της από τον Απρίλιο του 2010 προβλέπουν οικονομικά κίνητρα για την αγορά ηλεκτρικών οχημάτων. Τα κίνητρα έχουν να κάνουν με φορολογική ελάφρυνση και απαλλαγή και οικονομική πριμοδότηση για την αγορά ηλεκτρικών οχημάτων. Στην κίνηση αυτή συμμετέχουν όλα τα κράτη μέλη της δυτικής Ευρώπης (εκτός του Λουξεμβούργου και της Ιταλίας)

μαζί με τη Ρουμανία και την Τσεχία. Παρακάτω θα αναφερθούν οι σημαντικότερες δράσεις ανά χώρα της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Στη Γερμανία το εθνικό σχέδιο NEMP (National Electric Mobility Platform) είναι μία κυβερνητική πρωτοβουλία για την ανάπτυξη της χώρας σε κορυφαία αγορά ηλεκτρικών οχημάτων, στοχεύοντας σε 1 εκατομμύριο ηλεκτρικά οχήματα μέχρι το 2020. Παράλληλα τα ηλεκτρικά οχήματα απαλλάσσονται από ετήσια τέλη κυκλοφορίας για μια περίοδο πέντε ετών από την ημερομηνία αγοράς τους.

Η Πορτογαλία ξεκίνησε στις αρχές του 2008 ένα εθνικό πρόγραμμα για τα ηλεκτρικά οχήματα με τίτλο Mobi.E και είναι από τις πρώτες χώρες παγκοσμίως, οι οποίες έχουν μία ολοκληρωμένη πολιτική για την ηλεκτροκίνηση. Συγκεκριμένα το πρώτο εξάμηνο του 2011 αναμένεται η δημιουργία 1300 σταθμών φόρτισης και 25 γρήγορης φόρτισης σε 25 πόλεις της χώρας. Με αυτόν τον τρόπο θα είναι δυνατή η χρήση ηλεκτρικών οχημάτων με ασφάλεια και άνεση σε όλη τη χώρα. Τέλος πολλά μέτρα ελήφθησαν για την αύξηση ζήτησης των ηλεκτρικών οχημάτων. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι η απαλλαγή από τέλη ταξινόμησης και κυκλοφορίας για αγορά ηλεκτρικού οχήματος, η μείωση του προσωπικού φόρου εισοδήματος κατά 803€, 5000 € έκπτωση για τα πρώτα 5000 ηλεκτρικά οχήματα και 1500€ επιπλέον επιχορήγηση από το πρόγραμμα Cash-for-Clunkers αν κατά την αγορά ηλεκτρικού οχήματος αποσυρθεί βενζινοκίνητο όχημα με άδεια κυκλοφορίας προ του 2000.

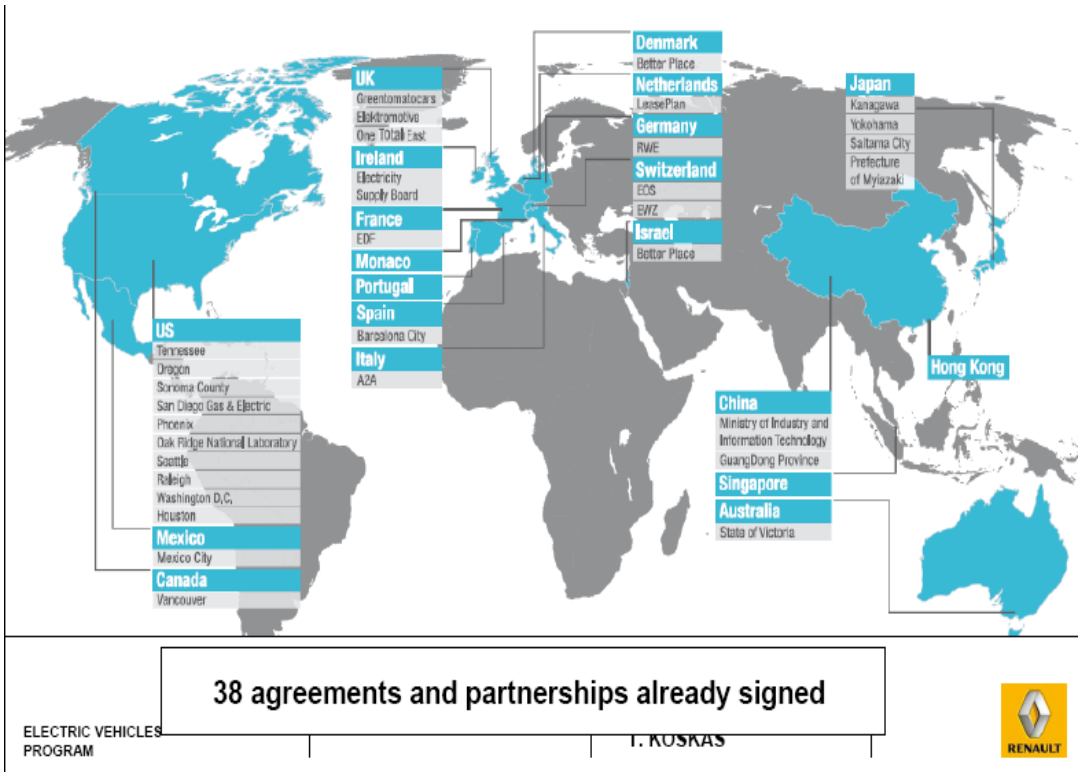
Στο Ηνωμένο Βασίλειο τον Οκτώβριο του 2008 ο τότε βρετανός πρωθυπουργός Γκόρντον Μπράουν ανακοίνωσε τη χρηματοδότηση σχεδίων (projects) ύψους 100 εκατομμυρίων λιρών με σκοπό να καταστήσει τη Βρετανία σε μία περίοδο πέντε ετών την ευρωπαϊκή πρωτεύουσα για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Ένα από αυτά τα projects είναι το Plugged-in-Places , η πρώτη φάση του οποίου προβλέπει τη δημιουργία 11000 σταθμών φόρτισης στο Λονδίνο, το Μίλτον Κέυνς (βιομηχανική περιοχή πλησίον Λονδίνου) και τη βορειοανατολική Αγγλία. Ενώ η δεύτερη φάση του σχεδίου περιλαμβάνει τα Μίντλαντς, το Μάντσεστερ, την ανατολική Αγγλία, τη Σκωτία και τη Βόρεια Ιρλανδία. Τέλος τον Ιούλιο του 2010 η βρετανική κυβέρνηση ανακοίνωσε το πρόγραμμα επιδότησης Plug-in Car, το οποίο προβλέπει έκπτωση υπό όρους μέχρι και 25% ή 5000£ για την αγορά ηλεκτροκίνητου οχήματος.

Στην Ισπανία στόχος είναι να έχουν στους δρόμους ένα εκατομμύριο ηλεκτρικά οχήματα μέχρι το τέλος του 2014, έτσι ώστε να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας και την εξάρτηση από την ακριβή εισαγωγή πετρελαιοειδών. Προς αυτή την κατεύθυνση η ισπανική κυβέρνηση δεσμεύτηκε τον Απρίλιο του 2010 για την καταβολή 590 εκατομμυρίων ευρώ για την προώθηση ηλεκτρικών οχημάτων, η οποία θα περιλαμβάνει επιδότηση έως και 20% ή 6000€ για την αγορά ηλεκτρικού οχήματος.

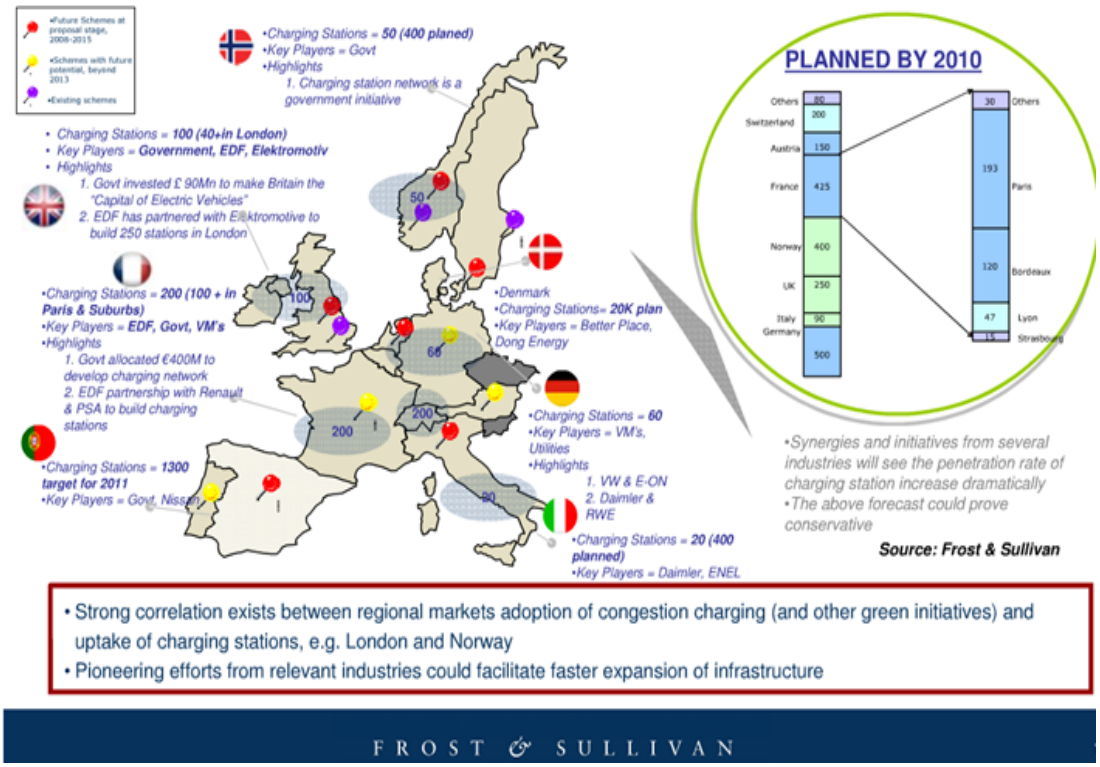
Από τις υπόλοιπες ευρωπαϊκές χώρες ξεχωρίζουν δράσεις όπως στη Δανία, όπου σχεδιάζεται η αποκλειστική φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων από τις πολλές ανεμογεννήτριες της χώρας. Ενώ τέλος στη Νορβηγία τα ηλεκτρικά οχήματα

εξαιρούνται από ετήσια τέλη κυκλοφορίας, από δημόσια τέλη στάθμευσης και τέλη διοδίων καθώς επίσης είναι σε θέση να χρησιμοποιούν τις λεωφορειολωρίδες.

Στην εικόνα 1.14 παρουσιάζεται μια εποπτική εικόνα των τάσεων της αυτοκινητοβιομηχανίας σε παγκόσμιο επίπεδο. Παρατηρούμε ότι το ενδιαφέρον τους είναι ιδιαίτερα σημαντικό και μάλιστα τα τελευταία χρόνια εντείνεται ακόμα περισσότερο. Αυτό αποδεικνύεται από τα πιλοτικά προγράμματα που εφαρμόζονται, εικόνα 1.15 για την Ευρωπαϊκή Ένωση, στα οποία συνεργάζονται αυτοκινητοβιομηχανίες, εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας και ερευνητικά κέντρα.



Εικόνα 1.14 Τάσεις αυτοκινητοβιομηχανιών σε παγκόσμιο επίπεδο.[28]



Εικόνα 1.15 Πιλοτικά προγράμματα σταθμών φόρτισης σε Ευρωπαϊκό Επίπεδο.[29]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 GAMS

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Το Γενικό Αλγεβρικό Σύστημα Μοντελοποίησης (General Algebraic Modeling System - GAMS) είναι ένα υψηλού επιπέδου σύστημα μοντελοποίησης για μαθηματικό προγραμματισμό και βελτιστοποίηση. Το GAMS είναι αποκλειστικά σχεδιασμένο για μοντελοποίηση γραμμικών, μη γραμμικών και μεικτού ακεραίου προβλημάτων βελτιστοποίησης. Το σύστημα αυτό είναι ιδανικό για περίπλοκες, ευρείας κλίμακας εφαρμογές βελτιστοποίησης και επιτρέπει στο χρήστη να κατασκευάσει μεγάλα, εύχρηστα μοντέλα, με ιδιαίτερα συμπαγή και φυσικό τρόπο, τα οποία μπορούν εύκολα να προσαρμοσθούν σε νέες συνθήκες. Επίσης επιτρέπει στο χρήστη να αφοσιωθεί στη μοντελοποίηση του προβλήματος κάνοντας την οργάνωση εύκολη.

Το GAMS είναι κατάλληλο για χρήση σε διάφορες υπολογιστικές πλατφόρμες καθώς τα μοντέλα προσομοίωσης χαρακτηρίζονται από φορητότητα. Επίσης είναι διαθέσιμο για χρήση από προσωπικούς υπολογιστές, workstations, υπολογιστές mainframe, και υπερυπολογιστές. Το σύστημα επιμελείται των χρονοβόρων λεπτομερειών για την υλοποίηση σε συγκεκριμένο μηχάνημα και σύστημα λογισμικού. Παράλληλα ο χρήστης μπορεί εύκολα και γρήγορα να αλλάξει τη διατύπωση του προβλήματος, τον επιλύτη, ακόμα και να μετατρέψει ένα πρόβλημα από γραμμικό σε μη γραμμικό χωρίς ιδιαίτερη δυσκολία. Τέλος το GAMS συμπεριλαμβάνει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (integrated development env3ironment -IDE) και μία ομάδα ολοκληρωμένων solvers.

2.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ

2.2.1 Κίνητρα για τη δημιουργία του GAMS

Ουσιαστική πρόοδος στην επίλυση μεγάλων μαθηματικών προγραμματιστικών προβλημάτων έγινε τις δεκαετίες του ’50 και του ’60 με την ανάπτυξη αλγορίθμων και υπολογιστικού κώδικα. Τη δεκαετία του ’70 ο αριθμός των εφαρμογών αυτού του είδους ήταν σαφώς μικρότερος από τον αναμενόμενο, διότι οι διαδικασίες επίλυσης αποτελούσαν μόνο ένα μικρό μέρος της προσπάθειας μοντελοποίησης. Ένα μεγάλο μέρος του χρόνου απαιτείτο για την ανάπτυξη ενός μοντέλου που περιελάμβανε προετοιμασία και μετασχηματισμό δεδομένων και αναφορά αποτελεσμάτων. Το κάθε μοντέλο απαιτούσε πολλές ώρες ανάλυσης και προγραμματισμού, ώστε να οργανωθούν τα δεδομένα και να γραφτεί το πρόγραμμα το οποίο θα μετασχημάτιζε τα δεδομένα στην απαραίτητη από τους βελτιστοποιητές-optimizers μαθηματικού προγραμματισμού μορφή. Επιπροσθέτως η ανίχνευση και εξάλειψη των λαθών ήταν μία πολύ επίπονη και κουραστική διαδικασία, καθώς τα προγράμματα ήταν προσβάσιμα μόνο από τον ειδικό που τα έγραψε και όχι στους αναλυτές-υπεύθυνους για το μοντέλο. Προς αυτή την κατεύθυνση τις τελευταίες δεκαετίες του 20^{ου} αιώνα αναπτύχθηκαν λογισμικά μοντελοποίησης πιο φιλικά στο χρήστη, που έκαναν πιο εύκολη τόσο την αναπαράσταση όσο και την επίλυση των μοντέλων. Ένα από αυτά είναι και το GAMS, το οποίο αναπτύχθηκε ώστε:

- ✓ να παρέχει μία υψηλού επιπέδου γλώσσα για τη συμπαγή αναπαράσταση μεγάλων και πολύπλοκων μοντέλων
- ✓ τα μοντέλα να είναι συμβατά και επιλύσιμα σε διαφορετικούς τύπους υπολογιστών
- ✓ να επιτρέπει αλλαγές με απλό και κατανοητό τρόπο, κάτι το οποίο το κάνει ιδανικό για πραγματοποίηση ανάλυσης ευαισθησίας στις παραμέτρους του προβλήματος επίλυσης
- ✓ να επιτρέπει σαφείς δηλώσεις αλγεβρικών σχέσεων

2.2.2 Ιστορική αναδρομή

Η ιδέα της κατασκευής του GAMS παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1975 κατά τη διάρκεια του ISMP (International Symposium on Mathematical Programming). Έπειτα κατόπιν στενής συνεργασίας οικονομολόγων και μαθηματικών το σύστημα αναπτύχθηκε ταχύτατα και καταξιώθηκε ως ένα από τα ισχυρότερα συστήματα επίλυσης μοντέλων βελτιστοποίησης. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά και με χρονολογική σειρά τα σημαντικότερα γεγονότα που συνέβαλλαν στην εξέλιξη του GAMS.

- 1975 η ιδέα του GAMS παρουσιάζεται στο ISMP στη Βουδαπέστη
- 1978 Φάση I: Το GAMS υποστηρίζει το γραμμικό προγραμματισμό. Υποστηριζόμενες πλατφόρμες: Mainframes και Unix Workstations
- 1979 Φάση II: Το GAMS υποστηρίζει και μη γραμμικό προγραμματισμό
- 1987 Το GAMS γίνεται εμπορικό προϊόν
- 1988 Το πρώτο σύστημα PC (16 bit)
- 1988 Ο Alex Meeraus, ο πρωτοστάτης του GAMS και ιδρυτής της GAMS Development Corporation, επιβραβεύεται με το βραβείο INFORMS Computing Society Price
- 1990 32 bit επέκταση για τα DOS
- 1990 Το GAMS μετακομίζει στο Georgetown, Washington, D.C.
- 1991 Δυνατότητα για μη γραμμικά προγράμματα μεικτού ακεραίου
- 1994 Το GAMS υποστηρίζει μεικτά συμπληρωματικά προβλήματα
- 1995 Η γλώσσα MPSGE προστίθεται για μοντελοποίηση CGE (Computable General Equilibrium – Οικονομικά μοντέλα που συνδέουν εξωτερικούς παράγοντες με οικονομικές μεταβολές)
- 1996 Ευρωπαϊκό παράρτημα ανοίγει στη Γερμανία
- 1998 32 bit έκδοση για τα Windows
- 1998 Δυνατότητα στοχαστικού προγραμματισμού (OSL/SE, DECIS)
- 1999 Εισαγωγή του GAMS στο ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (Integrated development environment- IDE)
- 2000 Ξεκινά η πρωτοβουλία GAMS World
- 2001 Εισάγεται η λειτουργία GAMS Data Exchange (GDX)
- 2002 Το GAMS συμπεριλαμβάνεται στη λίστα OR/MS για την 50η επέτειο της λίστας των οροσήμων (list of milestones)
- 2003 Προστέθηκε η δυνατότητα κωνικού προγραμματισμού
- 2004 Ξεκινάει η πρωτοβουλία για ασφάλεια ποιότητας
- 2004 Υποστήριξη για προγράμματα δευτεροβάθμιου περιορισμού (Quadratic Constrained)
- 2005 Υποστήριξη λειτουργικών συστημάτων 64 bit
- 2006 Το GAMS υποστηρίζει παράλληλους δικτυακούς υπολογισμούς (parallel grid computing)
- 2007 Το GAMS υποστηρίζει επιλογές ανοιχτής-πηγής (open-source) από την COIN-OR (Computational Infrastructure for Operations Research)

2.3 ΒΑΣΙΚΗ ΔΟΜΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ GAMS

Ένα μοντέλο GAMS δομείται από ένα σύνολο εντολών, οι οποίες προσδιορίζουν διαφορετικό κομμάτι του μαθηματικού προβλήματος. Πριν γίνει συνοπτική παρουσίαση της δομής του GAMS καλό θα ήταν να αναφερθούν οι σημαντικότεροι κανόνες που διέπουν τη λειτουργία του προγράμματος. Αυτοί είναι:

- ✓ Η δημιουργία οντοτήτων στο GAMS περιλαμβάνει δύο βήματα: μια δήλωση (declaration) και μια ανάθεση (assignment) ή καθορισμός. Η δήλωση περιλαμβάνει την ύπαρξη της οντότητας στο πρόγραμμα δίνοντάς της ένα όνομα. Η ανάθεση ή καθορισμός δίνει μια συγκεκριμένη τιμή ή μια μορφή. Στην περίπτωση των εξισώσεων, πρέπει να γίνεται δήλωση και ανάθεση σε ξεχωριστές δηλώσεις στο GAMS. Για όλες τις άλλες οντότητες του GAMS, ωστόσο, υπάρχει η επιλογή των δηλώσεων και αναθέσεων στην ίδια δήλωση ή χωριστά.
- ✓ Οι οντότητες στο GAMS μπορούν να δηλωθούν σχεδόν με οποιοδήποτε τρόπο επιθυμεί ο χρήστης. Έτσι επιτρέπονται οι δηλώσεις σε πολλαπλές γραμμές, οι κενές γραμμές μεταξύ των δηλώσεων όπως και οι πολλαπλές δηλώσεις ανά γραμμή.
- ✓ Ένα μοντέλο στο GAMS είναι μία συλλογή των δηλώσεων στη γλώσσα GAMS. Ο κανόνας που οδηγεί τις δηλώσεις είναι ότι κάθε οντότητα (εξαρτημένη ή ανεξάρτητη, σταθερή ή μεταβλητή) στο μοντέλο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αν δεν έχει οριστεί παραπάνω.
- ✓ Οι οντότητες στο GAMS μπορούν να δηλωθούν σχεδόν με οποιοδήποτε τρόπο επιθυμεί ο χρήστης. Έτσι επιτρέπονται οι δηλώσεις σε πολλαπλές γραμμές, οι κενές γραμμές μεταξύ των δηλώσεων όπως και οι πολλαπλές δηλώσεις ανά γραμμή.
- ✓ Τα επεξηγηματικά σχόλια είναι χρήσιμα για την τεκμηρίωση των μαθηματικών μοντέλων. Είναι καλύτερα εάν ενσωματώνονται μέσα στο ίδιο το μοντέλο παρά να παρουσιάζονται ξεχωριστά. Υπάρχουν δύο τρόποι να παρεμβληθεί η επεξήγηση μέσα σε μια εφαρμογή του GAMS. Καταρχήν, οποιαδήποτε γραμμή που αρχίζει με έναν αστερίσκο (*) στη πρώτη στήλη λαμβάνεται ως σχόλιο από το μεταγλωττιστή GAMS. Δεύτερον, ίσως το σημαντικότερο, τα σχόλια μπορούν και πολλές φορές επιβάλλεται να παρεμβληθούν μετά από τις δηλώσεις των οντοτήτων του GAMS.
- ✓ Το GAMS δεν κάνει διάκριση μεταξύ κεφαλαίων και πεζών γραμμάτων, δίνοντας τη δυνατότητα στο χρήστη να τα χρησιμοποιεί όπως αυτός θέλει.
- ✓ Κάθε εντολή πρέπει να τελειώνει με το σύμβολο «;» (semicolon).
- ✓ Τα ονόματα που δίνονται στις οντότητες του μοντέλου για να είναι έγκυρα πρέπει να αρχίζουν με γράμμα και μπορούν να ακολουθούν μέχρι και τριάντα οποιοιδήποτε χαρακτήρες ή ψηφία.
- ✓ Το GAMS, ως γλώσσα προγραμματισμού, έχει κάποιες δεσμευμένες λέξεις οι οποίες θα πρέπει να χρησιμοποιούνται με μεγάλη προσοχή.

Η δομή ενός κώδικα σε GAMS, δηλαδή τα στοιχεία εισόδου και εξόδου που τον απαρτίζουν, είναι η εξής:

Πίνακας 2.1 Δομή ενός μοντέλου GAMS.

ΕΙΣΟΔΟΙ	ΕΞΟΔΟΙ
• **Σύνολα (Sets)** Δήλωση Ανάθεση Μελών	• **Εκτύπωση ηχούς** (Echo Print)
• **Δεδομένα** (πίνακες, παράμετροι, σταθερές) Δήλωση Ανάθεση Τιμών	• **Χάρτες αναφοράς** (Reference Maps)
• **Μεταβλητές** (Variables) Δήλωση Ανάθεση Είδους	• **Λίστες εξισώσεων** (Equation Listings)
• **Προσδιορισμός ορίων ή/και αρχικών τιμών** (προαιρετικό)	• **Αναφορές κατάστασης** (Status Reports)
• **Εξισώσεις** (Equations) Δήλωση Ορισμός	• **Αποτελέσματα** (Results)
• **Εντολές μοντέλου και επίλυσης** (Model and Solve statements)	
• **Εντολές απεικόνισης** (display)	

Όταν το GAMS «τρέχει», το αρχείο που περιέχει το πρόγραμμα (input file), υποβάλλεται σε επεξεργασία και μερικές γραμμές εμφανίζονται στο αρχείο εξόδου (output file) που κρατούν το χρήστη ενήμερο για την πρόοδο και τα πιθανά λάθη που παρουσιάζονται. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας αποθηκεύονται στο αρχείο εξόδου και μπορούν να επιθεωρηθούν με ένα συντάκτη κειμένων (text editor), αλλά είναι ευθύνη του χρήστη να επιθεωρήσει το αρχείο εξόδου για να δει προσεκτικά τα αποτελέσματα και να εντοπίσει τυχόν λάθη.

Στα επόμενα υποκεφάλαια θα περιγραφούν πιο αναλυτικά τα στοιχεία που απαρτίζουν τη βασική δομή ενός μοντέλου σε GAMS, όπως αυτά αναφέρθηκαν αποσπασματικά στον πίνακα 2.1.

2.3.1 Σύνολα(Sets)

Η δεσμευμένη λέξη `Set` ή `Sets` χρησιμοποιείται στο GAMS για να δηλώσει δείκτες και για να ορίσει τις δυνατές τιμές που απαρτίζουν το σύνολο. Τα σύνολα είναι θεμελιώδεις δομικές μονάδες και χρησιμεύουν σε οποιοδήποτε μοντέλο του GAMS καθώς επιτρέπουν στο μοντέλο να δηλωθεί καλά και να διαβάζεται πιο εύκολα. Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα δήλωσης δύο συνόλων (i και j) με την εντολή `Sets.`

```
Sets

i sxolio1 /a1, a2, a3, a4/

t sxolio2 /1991 * 2000/;
```

,όπου οι χαρακτήρες μετά τα ονόματα των συνόλων(sxolio1,sxolio2) χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν με τη μορφή σχολίου το σύνολο ή το στοιχείο που προηγείται και ο προσδιορισμός των μελών του συνόλου γίνεται ανάμεσα στα δύο σύμβολα ΄΄/΄΄. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι ο αστερίσκος «*» παίζει έναν ειδικό ρόλο στους ορισμούς συνόλων, καθώς χρησιμοποιείται για την αποφυγή επίπονης δακτυλογράφησης μιας ακολουθίας στοιχείων ενός συνόλου. Έτσι στο παράδειγμά μας το /1991 * 2000/ είναι ισοδύναμο του /1991, 1992, 1993,...,2000/. Τέλος το GAMS μεταχειρίζεται τιμές των συνόλων σαν αλφαριθμητικά και η εντολή λήγει πάντα με τη χρήση του ΄΄;΄΄.

Σύνολα σαν τα παραπάνω είναι γνωστά ως **στατικά σύνολα** και τα στοιχεία τους δεν αλλάζουν κατά την εκτέλεση του προγράμματος. Είναι δυνατός ο ορισμός **δυναμικών συνόλων** που θα περιέχουν κάποια από τα στοιχεία ενός δεδομένου στατικού συνόλου και τα στοιχεία τους μπορούν να αλλάξουν κατά την εκτέλεση του προγράμματος. Επιπλέον μπορούν να ορισθούν πολυδιάστατα σύνολα για την αντιστοίχηση στοιχείων που ανήκουν σε διαφορετικά σύνολα. Για παράδειγμα, για τη μοντελοποίηση ενός δικτύου με κόμβους K1 έως K4 μπορεί να ορισθεί ένα δυσδιάστατο σύνολο που να περιλαμβάνει όλες τις έγκυρες μεταβάσεις:

```
Sets

K Set komvon / K1 * K4/
Pairs(K, K) Antistoixisi /K1.K2,K1.K3,K2.K4,K3.K4/;
```

Σε μερικά προγράμματα παρουσιάζεται η ανάγκη ταυτόχρονης αναφοράς σε στοιχεία του ίδιου συνόλου. Στην περίπτωση αυτή παρέχεται από το GAMS η εντολή `alias`, η οποία δηλώνει ένα διαφορετικό όνομα για ένα ήδη ορισμένο σύνολο. Π.χ.

```
Alias(K,KP);
```

Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι στο GAMS υπάρχουν έξι επιτρεπτοί χειριστές διατεταγμένων συνόλων: `card`,`ord`,`+`,`-`,`++` και `--`. Ως διατεταγμένα ορίζονται τα μονοδιάστατα σύνολα που αποτελούνται από μια διατεταγμένη ακολουθία στοιχείων, τα οποία είτε δεν ανήκουν σε κάποιο προηγουμένως ορισμένο σύνολο είτε ανήκουν αλλά διατηρούν ανέπαφη τη σχετική θέση τους.
Δοσμένου ενός στοιχείου ενός `set` μπορούμε να αναφερθούμε στο επόμενο ή στο προηγούμενο στοιχείο χρησιμοποιώντας τους χειριστές `+1` ή `-1` αντίστοιχα. Επίσης οι χειριστές `++` και `–` μας δίνουν τη δυνατότητα χειρισμού του set ως μίας κυκλικής λίστας, όπου πάντα θα υπάρχει προηγούμενο και επόμενο στοιχείο. Επιπρόσθετα ο χειριστής `card` επιστρέφει τον αριθμό των στοιχείων ενός συνόλου και ο χειριστής `ord` τη θέση του ζητούμενου στοιχείου μέσα στο σύνολο.

2.3.2 Σταθερές(Scalars)

Στο GAMS οι σταθερές δηλώνονται και προαιρετικά ανατίθεται σε αυτές μία τιμή χρησιμοποιώντας τη δεσμευμένη λέξη `Scalar` ή `Scalars`.Η σύνταξη της εντολής για μια δήλωση σταθεράς είναι η εξής:

`Scalar` όνομα_παραμέτρου κείμενο /τιμή_παραμέτρου/;

Το όνομα της παραμέτρου ακολουθείται από προαιρετικά σχόλια και η τιμή της δίνεται εντός των συμβόλων ΄΄/΄΄. Οι σταθερές χρησιμοποιούνται συχνά για ανάθεση τιμών σε μεγέθη τα οποία δεν αλλάζουν κατά τη διάρκεια προσομοίωσης ενός μοντέλου και είναι πολύ χρήσιμες για εποπτικούς κυρίως λόγους.

2.3.3 Παράμετροι και Πίνακες (Parameters & Tables)

Οι παράμετροι και οι πίνακες είναι δομές στο GAMS που χρησιμοποιούνται για να ορίσουν τα δεδομένα ενός μοντέλου. Συμπεριφέρονται ακριβώς με τον ίδιο τρόπο με μόνη διαφορά ότι οι πίνακες στο GAMS πρέπει να έχουν δύο ή και περισσότερες διαστάσεις και ότι οι παράμετροι ουσιαστικά είναι μονοδιάστατοι πίνακες. Η σύνταξη στο GAMS για μια δήλωση παραμέτρου είναι:

`parameter(s)` όνομα_παραμέτρου κείμενο /τιμή_παραμέτρου/;

, όπου οι κάθετοι / πρέπει να χρησιμοποιηθούν στην αρχή και στο τέλος του καταλόγου, τα κόμματα πρέπει να χωρίζουν τα στοιχεία που εισήχθησαν σε μια γραμμή και το σύμβολο « = » ή το κενό χρησιμοποιείται για να χωρίσει τις ετικέτες από τις αντίστοιχες τιμές τους. Τέλος η τιμή που αναθέτει το GAMS σε παραμέτρους που δεν έχει προσδιοριστεί η τιμή είναι το μηδέν (by default value).

Η δεσμευμένη λέξη `table` ή `tables` χρησιμοποιείται για τον ορισμό ενός πίνακα. Οι πίνακες δηλώνονται με τη χρήση δύο ή περισσοτέρων δεικτών ενώ σχόλιο μπορεί προαιρετικά να ακολουθεί το όνομα του πίνακα όπως στο παράδειγμα:

```
Table z(i, j) Keimeno
     y1   y2    y3
x1  6.5  2.4   2.7
x2  7.9  0.7   3.2 ;
```

Στο παράδειγμα αυτό ο πίνακας z ορίζεται χρησιμοποιώντας τους δείκτες ΄΄i΄΄ και ΄΄j΄΄ και ανατίθεται μια τιμή σε κάθε ζευγάρι στοιχείων (x1.y1, x1.y2, x1.y3, x2.y1, x2.y2, x3.y3). Οι σχετικές θέσεις όλων των καταχωρήσεων σε έναν πίνακα είναι πολύ σημαντικές καθώς το τμήμα στηλών πρέπει να χωράει σε μία γραμμή και η ακολουθία των αριθμών που διαμορφώνουν μία σειρά πρέπει να είναι στην ίδια γραμμή στοιχειοθετημένη.

2.3.4 Κανόνες μαθηματικής αναπαράστασης κατά την ανάθεση τιμών

Οι παρακάτω κανόνες ισχύουν για την ανάθεση τιμών σε παραμέτρους με τη χρήση μαθηματικών εκφράσεων:

1. Μπορεί να αποδοθεί μια συγκεκριμένη τιμή στο σύνολο των στοιχείων ενός διανύσματος με μία μόνο εντολή:

```
Z(i,j)=3;
```

2. Η απόδοση τιμής σε συγκεκριμένο στοιχείο μπορεί να γίνει με την αναγραφή των τιμών του δείκτη σε εισαγωγικά:

```
Z('x1', 'y1')=3.333;
```

3. Μπορεί να γίνει ανάθεση τιμών σε παράμετρο περισσότερες από μία φορές. Οι καινούριες τιμές αντικαθιστούν τις παλιές.
4. Οι μαθηματικές εκφράσεις μπορούν να ενσωματώνουν κάποιες μαθηματικές λειτουργίες και διαδικασίες, πχ:

```
Set I /I1*I10/; Parameter x(I);
x(I)=exp(6,7)*0,4;
```

2.3.5 Μεταβλητές (Variables)

Η δεσμευμένη λέξη `Variable` ή `Variables` χρησιμοποιείται από το GAMS για να δηλώσει τις μεταβλητές βελτιστοποίησης που θα κληθεί αργότερα να επιλύσει το μοντέλο. Όπως αντιλαμβάνεται κανείς οι μεταβλητές απαγορεύεται να πάρουν τιμές πριν την επίλυση του προβλήματος. Η εντολή σύνταξης των μεταβλητών, είναι η ακόλουθη:

Variables όνομα_μεταβλητής (σύνολο δεικτών) κείμενο;

Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα δήλωσης μεταβλητών στο GAMS:

```
Variables

x(i,j) keimeno
Z keimeno;
```

,όπου τα είδη μεταβλητών (var-type) με τα αντίστοιχα όριά τους είναι τα εξής:

Πίνακας 2.2 Τύποι μεταβλητών στο GAMS.

Λέξη Κώδικα	Τύπος Μεταβλητής	Κατώτατο Όριο	Ανώτατο Όριο	Περιγραφή
free	ελεύθερη	*- inf*	*+ inf*	Χωρίς περιορισμούς. Τα προκαθορισμένα όρια μπορούν να αλλαχθούν από το χρήστη.
positive	θετική	*0*	*+ inf*	Δεν επιτρέπονται αρνητικές τιμές. Το προκαθορισμένο ανώτατο όριο μπορεί να αλλαχθεί από το χρήστη.
negative	αρνητική	*- inf*	0	Δεν επιτρέπονται θετικές τιμές. Το προκαθορισμένο κατώτατο όριο μπορεί να αλλαχθεί από το χρήστη.
binary	δυαδική	0	1	Διακριτή μεταβλητή που παίρνει τιμή '0' ή '1'.
integer	ακέραιη	0	100	Διακριτή μεταβλητή που παίρνει ακέραιες τιμές μεταξύ των ορίων. Ο χρήστης μπορεί να αλλάξει τα προκαθορισμένα όρια.

Πολύ σημαντικό ρόλο παίζουν τα επιτρεπτά όρια μέσα στα οποία ανήκει το σύνολο τιμών μιας μεταβλητής. Για το λόγο αυτό το GAMS διαθέτει τρεις καταλήξεις (suffixes) ώστε να μπορεί κάποιος να επέμβει στο άνω και κάτω όριο των μεταβλητών. Οι καταλήξεις `.up` και `.lo` χρησιμοποιούνται για να ορίσουν το άνω και κάτω όριο μιας μεταβλητής και η κατάληξη `.fx` για να δώσει μία συγκεκριμένη τιμή σε μία μεταβλητή. Άλλες καταλήξεις που διαθέτει το GAMS για την επεξεργασία και την εποπτεία μεταβλητών είναι η κατάληξη `.l`, η οποία επιστρέφει τη βέλτιστη τιμή μιας μεταβλητής και η κατάληξη `.m`, που επιστρέφει την οριακή τιμή μιας μεταβλητής.

Στον επόμενο πίνακα γίνεται μία αναφορά στις σημαντικότερες συναρτήσεις που προσφέρει το GAMS για επεξεργασία μεταβλητών :

Πίνακας 2.3 Οι σημαντικότερες συναρτήσεις του GAMS.

Συνάρτηση	**Περιγραφή**
exp(x)	Εκθέτης, e^x
log(x)	Φυσικός λογάριθμος, $\log_e x$
log10(x)	Κοινός λογάριθμος, $\log_{10} x$
normal(x,y)	Τυχαίος αριθμός που κατανέμεται κανονικά με μέσο όρο x και σταθερή απόκλιση y
uniform(x,y)	Τυχαίος αριθμός με ομοιόμορφη κατανομή μεταξύ x και y
abs(x)	Απόλυτη τιμή του x, π.χ. |x|
ceil(x)	Ανώτατο όριο του x .Μικρότερος ακέραιος αριθμός $\geq$x
floor(x)	Κατώτατο όριο του x. Μεγαλύτερος ακέραιος αριθμός $\leq$ x
max(x,y,..)	Μεγαλύτερη τιμή μεταξύ όλων των ορισμάτων.
min(x,y,..)	Μικρότερη τιμή μεταξύ όλων των ορισμάτων
mod(x,y)	Υπόλοιπο κατά τη διαίρεση του x από το y.
power(x,y)	Δύναμη ακέραιων αριθμών. x^y, όπου y πρέπει να είναι ένας ακέραιος αριθμός.
round(x)	μετατρέπει το x στον κοντινότερο ακέραιο
round(x,y)	μετατρέπει το x σε y δεκαδικές θέσεις δεξιά (+) ή αριστερά (-) από την υποδιαστολή
sign(x)	παραμένει 1 εάν x > 0, -1 αν x < 0, και 0 αν x = 0
sqr(x)	Τετράγωνο του x. Δηλαδή x^2
sqrt(x)	Τετραγωνική ρίζα του x. Δηλαδή $\sqrt{x}$
arctan(x)	$\tan^{-1}$ x. Αποτέλεσμα σε ακτίνια
cos(x)	cos x, x σε ακτίνια
sin(x)	sin x,x σε ακτίνια

2.3.6 Εξισώσεις(Equations)

Ο όρος Equations χρησιμοποιείται στο GAMS για να δηλώσει τις αλγεβρικές σχέσεις που θα χρησιμοποιηθούν για να παράγουν τους περιορισμούς του επιλυόμενου μοντέλου. Στο GAMS μία εξίσωση πρέπει πρώτα να δηλωθεί και ύστερα να συνταχθεί η αλγεβρική της σχέση.

Για τη δήλωση μιας εξίσωσης χρησιμοποιείται η παρακάτω σύνταξη:

`Equations` όνομα_εξίσωσης(σύνολο δεικτών) κείμενο**`;`**

Ενώ για τη σύνταξή της:

όνομα_εξίσωσης(σύνολο δεικτών)**..** παράσταση ***τύπος_σχέσης*** παράσταση;

Πρέπει να σημειωθεί ότι οι δύο τελείες "**..**" απαιτούνται πάντα μεταξύ του ονόματος της εξίσωσης και της έναρξης της αλγεβρικής σχέσεις. Ο τύπος_σχέσης αναφέρεται στο σύμβολο μεταξύ των δύο εκφράσεων που διαμορφώνουν την εξίσωση, και μπορεί να είναι κάποιο από τα ακόλουθα :

`=e=` Ισότητα-Equality: το δεξί μέρος της εξίσωσης πρέπει να είναι ίσο με το αριστερό μέρος

`=g=` Μεγαλύτερο ίσο: το αριστερό μέρος της εξίσωσης πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο από το δεξί

`=l=` Μικρότερο ίσο: το αριστερό μέρος της εξίσωσης πρέπει να είναι μεγαλύτερο ή ίσο από το δεξί

`=n=` Διάφορο: δεν επιτρέπει στο αριστερό και στο δεξί μέρος της εξίσωσης να πάρουν την ίδια τιμή . Αυτός ο τύπος εξίσωσης χρησιμοποιείται σπάνια.

Τέλος σημειώνεται ότι πάντα αντικειμενική συνάρτηση δηλώνεται και συντάσσεται στο μέρος των equations.

2.3.7 Μοντέλο (Model)

Ως μοντέλο στο GAMS νοείται μια συλλογή εξισώσεων. Γι' αυτό το λόγο η εντολή Model χρησιμοποιείται για να καθορίσει ποιες εξισώσεις (equations) θα περιληφθούν κατά την επίλυση του μοντέλου. Γενικά η σύνταξη στο GAMS για ένα μοντέλο είναι:

`Models` όνομα_μοντέλου κείμενο /σύνολο εξισώσεων/;

Το σύνολο εξισώσεων αποτελεί μια αναγραφή των ονομάτων των εξισώσεων που θα συμπεριληφθούν στο μοντέλο, διαχωρισμένα με κόμμα ΄΄,΄΄. Αν στη θέση του συνόλου των εξισώσεων χρησιμοποιηθεί η λέξη `all`, το GAMS θα συμπεριλάβει όλες τις προηγουμένως ορισμένες εξισώσεις στο μοντέλο.

2.3.8 Επίλυση (Solve)

Η δεσμευμένη λέξη Solve χρησιμοποιείται στο GAMS για την διαδικασία επίλυσης ενός προβλήματος που έχει μοντελοποιηθεί. Μια εντολή επίλυσης έχει την παρακάτω μορφή:

`Solve` όνομα_μοντέλου **using** είδος_solver **minimizing/maximizing** όνομα_μεταβλητής

όπου το όνομα_μοντέλου καθορίζεται από προηγούμενη δήλωσή του και είδος_solver είναι ένας από τους διάφορους τύπους προβλημάτων που επιλύονται μέσω GAMS:

- ✓ **LP**: Linear Programming, Γραμμικός Προγραμματισμός
- ✓ **MIP**: Mixed-Integer Programming, Προγραμματισμός Μεικτού Ακεραίου
- ✓ **NLP**: Non-Linear Programming, Μη Γραμμικός Προγραμματισμός
- ✓ **MCP**: Mixed Complementarity Problems, Προβλήματα Μεικτής Συμπληρωματικότητας
- ✓ **MPEC**: Mathematical Programs with Equilibrium Constraints, Μαθηματικά Προγράμματα με Περιορισμούς Ισορροπίας
- ✓ **CNS**: Constrained Nonlinear Systems, Περιορισμένα Μη-Γραμμικά Συστήματα
- ✓ **DNLP**: Non-Linear Programming with Discontinuous Derivatives, Μη Γραμμικός Προγραμματισμός με Ασυνεχείς Παραγώγους
- ✓ **MINLP**: Mixed-Integer Non-Linear Programming, Μη Γραμμικός Προγραμματισμός Μεικτού Ακεραίου

- ✓ **QCP** – Quadratically Constrained Programs, Προγράμματα με Περιορισμούς Δεύτερης Τάξης

- ✓ **MIQCP**: Mixed Integer Quadratically Constrained Programs, Μη Γραμμικά Προγράμματα με Περιορισμούς Δεύτερης Τάξης

2.3.9 GAMS Output(Έξοδος στο GAMS)

Στο GAMS κατά την επίλυση του μοντέλου δημιουργείται πάντα ένα αρχείο εξόδου με κατάληξη .lst ,όπου εμφανίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Το πρώτο μέρος του αρχείου εξόδου είναι πάντα το Echo Print, το οποίο απαριθμεί τις εντολές που έχει δώσει ο χρήστης και ελέγχει για τυχόν σφάλματα. Το επόμενο μέρος του αρχείου εξόδου είναι το Reference Map, το οποίο απαριθμεί με αλφαβητική σειρά τις εμφανίσεις οποιασδήποτε οντότητας (set,parameter,variable,equation,…). Μετά το Reference Map ακολουθεί το Equation Listing το οποίο αναπαριστά τις εξισώσεις/περιορισμούς μαζί με το επεξηγηματικό κείμενο που έχει δώσει ο χρήστης. Η λίστα εξισώσεων είναι εξαιρετικά χρήσιμη για τυχόν διόρθωση στο πρόγραμμα. Όλοι οι όροι που εξαρτώνται από τις μεταβλητές πηγαίνουν στο αριστερό μέρος, και οι σταθεροί όροι στο δεξί μέρος του της λίστας εξισώσεων. Τέλος το αρχείο εξόδου εμφανίζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Μάλιστα μπορεί κανείς χρησιμοποιώντας την εντολή display να πάρει πληροφορίες για την τιμή οποιασδήποτε μεταβλητής ή αλγεβρικής σχέσης που συνδέει τις βέλτιστες τιμές των εξαγόμενων μεταβλητών.

2.3.10 Δηλώσεις υπό συνθήκη και επαναληπτικές δομές

Το σύμβολο ΄΄$΄΄ έχει ιδιαίτερη σημασία στο GAMS και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δηλώσεις υπό συνθήκη. Αν και το ΄΄$΄΄ έχει διαφορετικά αποτελέσματα σε κάθε είδος χρήσης, η λειτουργία του μπορεί να συνοψιστεί σε αυτήν ενός ΄΄εφόσον΄΄ ή ΄΄Αν΄΄. Για παράδειγμα μετά το σύνολο δεικτών στον ορισμό εξισώσεων ελέγχει τις τιμές των δεικτών δημιουργώντας εξισώσεις μόνο για τις τιμές εκείνες του δείκτη που ικανοποιούν τη συνθήκη. Η μορφή χρήσης του ‘$’ είναι:

παράσταση **$** (παράσταση)

Η αριστερή παράσταση ικανοποιείται εφόσον η τιμή της παράστασης στην παρένθεση είναι μη μηδενική. Μια σχεσιακή παράσταση επιστρέφει ΄΄1΄΄ εφόσον ισχύει και ΄΄0΄΄ αλλιώς. Σε λειτουργίες του GAMS πέραν του ορισμού εξισώσεων η

λειτουργία του ΄΄$΄΄ μπορεί να υποκατασταθεί από μια δήλωση ΄΄if – then – else΄΄. Αυτή έχει την μορφή:

if (συνθήκη1,εντολές1
elseif συνθήκη2, εντολές2
...
elseif συνθήκηN-1, εντολές N-1
else εντολέςN);

Ένα παράδειγμα της αντιστοιχίας μεταξύ του συμβόλου ΄΄$΄΄ και του ΄΄if – then – else΄΄ δίνεται παρακάτω:

Πίνακας 2.4 Αντιστοιχία μεταξύ του συμβόλου ΄΄$΄΄ και του ΄΄if – then – else΄΄.[33]

Έκφραση΄΄$΄΄	**Έκφραση ΄΄if – then – else΄΄**

`c('p2','m1')$(z.l >= 70)=0.01;`	`If(z.l >= 70,`
	`c('p2','m1')=0.01;`
	`);`

`c('p2','m1') =0.01$(z.l >= 70)`	`If(z.l >= 70,`
	`c('p2','m1')=0.01;`
	`else`
	`c('p2','m1')=0.0;`
	`);`

Τυπικοί τελεστές άλλων γλωσσών προγραμματισμού που είναι επίσης έγκυροι στο GAMS είναι οι:

- ✓ not, and, or, xor ως λογικοί τελεστές
- ✓ <, <=, =, >, <>, >=, > ως σχεσιακοί τελεστές

Τέλος, το GAMS υποστηρίζει επίσης μια σειρά επαναληπτικών διαδικασιών όπως *loop*, *for* και *while*.

2.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ GAMS

Πριν την ενασχόληση με το θέμα που διαπραγματεύεται η διπλωματική εργασία και στα πλαίσια εκμάθησης του GAMS μελετήθηκε το πρόβλημα οικονομικής κατανομής φορτίου σε σύστημα ισχύος τριών ζυγών, το οποίο συνοψίζει πολλά χαρακτηριστικά της γλώσσας, όπως αυτά περιγράφηκαν παραπάνω και αποτελεί ιδανικό ξεκίνημα για έναν αρχάριο στο πρόγραμμα GAMS.

Ο στόχος του προβλήματος κατανομής ισχύος είναι να υπολογίσει για μία δεδομένη χρονική στιγμή την παραγωγή ισχύος των γεννητριών και τις γωνίες τάσης σε κάθε ζυγό έτσι ώστε να ικανοποιούνται όλα τα φορτία ζήτησης με το βέλτιστο οικονομικά τρόπο και ταυτόχρονα να ικανοποιούνται όλοι οι τεχνολογικοί περιορισμοί του συστήματος.

Η ενέργεια που μεταφέρεται σε μια γραμμή μεταφοράς περιορίζεται από θερμικές απώλειες και άλλες αιτίες που εκφράζονται μέσω του ορίσματος. Η μεταφερόμενη ισχύς από το ζυγό i στο ζυγό j μέσω της γραμμής i-j είναι:

$$P_i^{\min} \le B_{ij}\left(\delta_i - \delta_j\right) \le P_i^{\max} \tag{2.1}$$

Αφού $P_{ij} = \frac{E_i E_j}{X_{ij}} \cdot \sin(\theta_i - \theta_j)$ και θεωρούμε για την DC ανάλυση $\sin(\theta_i-\theta_j)=(\theta_i-\theta_j)$ και για το ανά μονάδα σύστημα καταλήγουμε : $P_{ij} = \frac{1}{X_{ij}} \cdot (\theta_i - \theta_j) \Rightarrow P_{ij} = B_{ij}(\delta_i - \delta_j)$

, όπου $P_i^{\min}$: το ελάχιστο όριο παραγωγής της γεννήτριας i (kW)

$P_i^{\max}$: το μέγιστο όριο παραγωγής της γεννήτριας j (kW)

B_{ij} : αγωγιμότητα της γραμμής μεταφοράς που ενώνει τους ζυγούς i και j

δ_i : η γωνία τάσης στο ζυγό I

Επίσης η παραγόμενη ισχύς μιας γεννήτριας έχει ένα ελάχιστο και ένα μέγιστο όριο. Το ελάχιστο όριο οφείλεται σε λόγους σταθερότητας και το μέγιστο σε θερμικά όρια. Οι προαναφερόμενοι περιορισμοί μπορούν να εκφραστούν μέσω της σχέσης:

$$P_i^{\min} \le P_i \le P_i^{\max} \tag{2.2}$$

,όπου P_i : η παραγόμενη ισχύς στη γεννήτρια i

Επίσης σε κάθε ζυγό η ισχύς που έρχεται σε αυτόν πρέπει να είναι ίση με αυτή που φεύγει από αυτόν(αρχή διατήρησης της ενέργειας). Αυτό αποτυπώνεται μέσω της σχέσης :

$$P_i = P_{Di} + \sum B_{ij|}(\delta_i - \delta_j) \tag{2.3}$$

, όπου P_{Di} : το ζητούμενο φορτίο στο ζυγό i (kW)

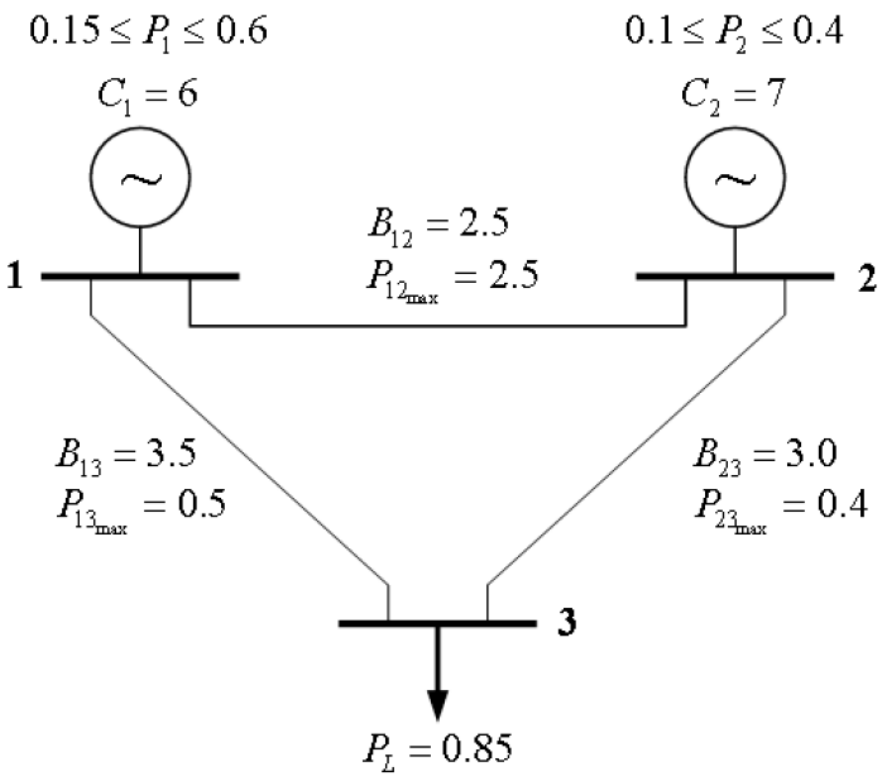
Ο στόχος του προβλήματος οικονομικής κατανομής ισχύος είναι να ελαχιστοποιήσει τα έξοδα παραγωγής ισχύος λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς 2.1-2.3. Η σχέση από την οποία προκύπτουν τα έξοδα παραγωγής, είναι :

$$z = \sum_{i=1}^{n} \{P_i C_i\} \tag{2.4}$$

,όπου C_i : το μοναδιαίο κόστος παραγωγής στο ζυγό i ($/kW)

n : ο συνολικός αριθμός ζυγών

Συγκεκριμένα μελετήθηκε πρόβλημα κατανομής ισχύος σε σύστημα τριών ζυγών, δύο παραγωγής(1 και 2) και ένας φορτίου(3), το μονογραμμικό διάγραμμα του οποίου μαζί με τις παραμέτρους παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα :



Εικόνα 2.1 Μονογραμμικό διάγραμμα επιλυόμενου προβλήματος.[33]

Το παραπάνω πρόβλημα έτσι όπως διατυπώθηκε στην προηγούμενη ενότητα προσομοιώθηκε σε κώδικα GAMS. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται βήμα προς βήμα ο κώδικας επίλυσης του προβλήματος με αναλυτικά σχόλια. Είναι σημαντικό ο χρήστης να δίνει χαρακτηριστικά ονόματα στα δεδομένα και τις μεταβλητές του προβλήματος και να εισάγει στοχευμένα σχόλια έτσι ώστε να αποφεύγονται τυχόν λάθη και να γίνεται πιο κατανοητός ο κώδικας από τρίτους.

Αρχικά δηλώνονται τα σύνολα που απαρτίζουν το πρόβλημα, με τα επί μέρους στοιχεία που τα απαρτίζουν. Το σύνολο G περιέχει τις γεννήτριες του συστήματος και το N τους τρεις ζυγούς του προβλήματος. Επίσης δημιουργείται το υποσύνολο MAP(G,N) για να υποδείξει τις δυνατές συνδέσεις μεταξύ των δύο συνόλων (συσχετίζει γεννήτριες με ζυγούς).

```
SETS
  G    αριθμός γεννητριών   /G1*G2/
  N    αριθμός ζυγών    /N1*N3/
  MAP(G,N) αντιστοίχιση γεννήτριας σε κάθε ζυγό /G1.N1,G2.N2/;
```

Έπειτα εισάγονται δύο πίνακες με τα δεδομένα του προβλήματος, όπως αυτά παρουσιάστηκαν στην εικόνα 2.1. Ο πρώτος πίνακας περιέχει τα δεδομένα που αφορούν τις δύο γεννήτριες και ο δεύτερος αυτά για τις γραμμές μεταφοράς του συστήματος.

```
TABLE GDATA(G,*)   δεδομένα γεννητριών
          PMIN      PMAX      COST
*         (kW)      (kW)    (ευρώ/kWh)
  G1      0.15      0.6        6
  G2      0.10      0.4        7;

TABLE LDATA(N,N,*) δεδομένα ζυγών
            B      LIMIT
*          (S)     (kW)
  N1.N2    2.5      0.3
  N1.N3    3.5      0.5
  N2.N3    3.0      0.4;
```

Για να δηλώσουμε ότι μόνο ο ζυγός 3 έχει απαίτηση ηλεκτρικού φορτίου, δηλώνεται η παρακάτω παράμετρος. Υπενθυμίζεται ότι το φορτίο στους ζυγούς N1 και N2 δεν χρειάζεται να δηλωθεί καθώς παίρνει εκ συμβάσεως (by default) την τιμή μηδέν.

```
PARAMETER
  LOAD(N)   φορτίο στο ζυγό N
            / N3  0.85 /
```

Παρακάτω δηλώνονται οι μεταβλητές του προβλήματος μαζί με τα επιτρεπτά όρια παραγωγής των γεννητριών (εξίσωση 2.2). Επίσης η γωνία τάσης του ζυγού 3 επιλέγεται ως γωνία αναφοράς και ανατίθεται σε αυτήν η τιμή μηδέν.

```
VARIABLES
  z                 αντικειμενική μεταβλητή
  p(G)              ισχύς εξόδου για τη γεννήτρια G
  d(N)              γωνία τάσης στο ζυγό N;
  p.lo(G)=GDATA(G,'PMIN');
  p.up(G)=GDATA(G,'PMAX');
  d.fx('N3')=0;
```

Παρακάτω εισάγονται οι συναρτήσεις που απαρτίζουν το σύστημα και περιγράφονται από τις εξισώσεις 2.1,2.3 και 2.4. Σημειώνεται ότι το άθροισμα $\sum_i x_{ij}$ εκφράζεται στο GAMS ως sum(i,x(i,j)).

```
EQUATIONS
  COST            αντικειμενική συνάρτηση
  MAXPOW(N,N)     όριο μέγιστης ισχύος στη γραμμή μεταφοράς
  MINPOW(N,N)     όριο ελάχιστης ισχύος στη γραμμή μεταφοράς
  LOADBAL(N)      εξίσωση ροής φορτίου (load balance);
ALIAS(N,NP);
COST..          z =e= SUM(G,GDATA(G,'COST')*p(G));
MAXPOW(N,NP).. LDATA(N,NP,'B')*(d(N)-d(NP))=l= LDATA(N,NP,'LIMIT');
MINPOW(N,NP).. LDATA(N,NP,'B')*(d(N)-d(NP))=g=-LDATA(N,NP,'LIMIT');
LOADBAL(N)..    SUM(G$MAP(G,N),p(G))+SUM(NP,LDATA(N,NP,'B')*(d(N)-d(NP))+
                LDATA(NP,N,'B')*(d(N)-d(NP)))=e=LOAD(N);
```

Στη συνέχεια δηλώνουμε ποιες συναρτήσεις θα χρησιμοποιηθούν για την επίλυση του προβλήματος (στο μοντέλο αυτό επιλέγουμε όλες τις συναρτήσεις γράφοντας `all`). Επίσης με την εντολή `solve` επιλέγουμε τον τρόπο που θα λυθεί το μοντέλο, ο οποίος εδώ είναι ο γραμμικός προγραμματισμός (**l**inear **p**rogramming) ελαχιστοποιώντας την αντικειμενική μεταβλητή z, που ισούται με τα συνολικά έξοδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος.

```
MODEL economic_dispatch /all/;
SOLVE economic_dispatch using lp minimizing z;
```

Η λύση του προβλήματος έτσι όπως αυτή παρουσιάζεται στο αρχείο εξόδου του GAMS είναι η παρακάτω:

```
                        LOWER     LEVEL     UPPER    MARGINAL

---- VAR z               -INF      5.385     +INF       .

  z  κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

---- VAR p  ισχύς εξόδου για τη γεννήτρια G

      LOWER     LEVEL     UPPER    MARGINAL

G1     0.150     0.565     0.600      .
G2     0.100     0.285     0.400      .

---- VAR d  γωνία τάσης στο ζυγό N

      LOWER     LEVEL     UPPER    MARGINAL

N1     -INF     -0.143     +INF       .
N2     -INF     -0.117     +INF       .
N3      .         .         .    2.887E-15
```

2.5 Διασύνδεση GAMS με άλλα προγράμματα

Οι γλώσσες μοντελοποίησης, όπως το GAMS, έχουν σαφώς καλύτερες δυνατότητες στην κατασκευή ενός μοντέλου βελτιστοποίησης από προγράμματα, όπως το Excel και το MATLAB. Παρόλα αυτά, μικρής κλίμακας μη γραμμικά μοντέλα (και ορισμένα μεγαλύτερα γραμμικά) μπορούν να επιλυθούν με τη μέθοδο της βελτιστοποίησης και σε αυτά τα προγράμματα. Ωστόσο, είναι σαφές, ότι σε προβλήματα μεγαλύτερης κλίμακας, όπου απαιτείται ο αυτόματος υπολογισμός παραγώγων και άλλες απαραίτητες διαδικασίες και πράξεις, τα προγράμματα αυτά είναι μη πρακτικά σε σχέση με το GAMS. Από την άλλη πλευρά, παρότι το GAMS έχει τη δυνατότητα επεξεργασίας και απεικόνισης δεδομένων και αποτελεσμάτων, το Excel και το MATLAB είναι σαφώς αποδοτικότερα στον τομέα αυτό.

Για το λόγο αυτό, έχει γίνει από Αμερικάνους ερευνητές προσπάθεια για σύνδεση και συνεργασία των προγραμμάτων GAMS και MATLAB με επιτυχία, ώστε η αρτιότερη βελτιστοποίηση να απεικονιστεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Έτσι προέκυψε το πρόγραμμα σύνδεσης GAMS/MATLAB από τον Michael C. Ferris, καθηγητή του πανεπιστημίου του Wisconsin, το οποίο βοηθά τους χρήστες του ενός προγράμματος να αξιοποιήσουν τις σημαντικότατες δυνατότητες που προσφέρει το άλλο. Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι το MATLAB μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πακέτο απεικόνισης για μοντέλα GAMS και ότι το GAMS μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σύνθετο εργαλείο βελτιστοποίησης για το MATLAB.

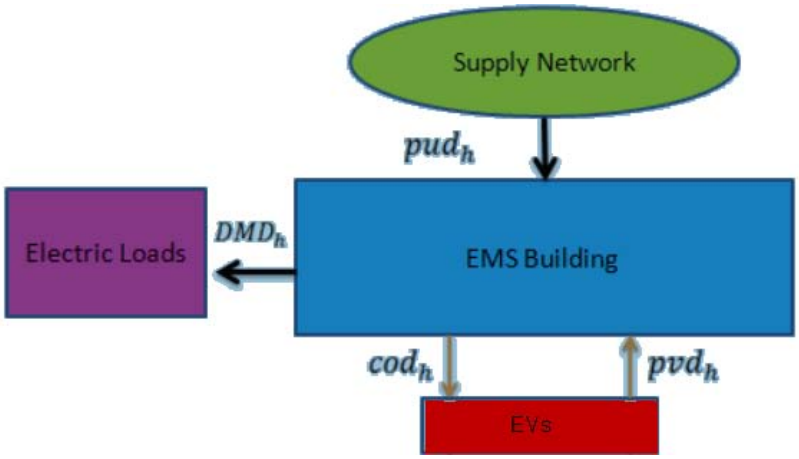
Παράλληλα χρησιμοποιώντας τη λειτουργία GDX (Gams Data Exchange) γίνεται δυνατή η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ GAMS και Excel. Ένας φάκελος GDX είναι ένας φάκελος που μπορεί να αποθηκεύσει τις τιμές παραμέτρων, μεταβλητών και εξισώσεων που χρησιμοποιούνται σε ένα μοντέλο GAMS. Αυτοί οι φάκελοι μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να προετοιμάσουν δεδομένα για ένα πρόγραμμα στο GAMS, να παρουσιάσουν αποτελέσματα από ένα πρόγραμμα του GAMS και να αποθηκεύσουν αποτελέσματα του ίδιου μοντέλου για διαφορετικές τιμές παραμέτρων κλπ. Για να περάσουν τα δεδομένα ή τα αποτελέσματα από ένα αρχείο GAMS σε ένα αρχείο Excel και αντίστροφα πρέπει πρώτα να περάσουν από ένα αρχείο GDX. Μέσω του εργαλείου GDXXRW.exe γίνεται η μεταφορά από το GAMS στο Excel και μέσω των εντολών execute_unload και execute το αντίστροφο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της αλληλεπίδρασης των PEVs(Plug-in Electric Vehicles) με το σύστημα διαχείρισης ενέργειας(Energy Management System) ενός μικρομεσαίου γραφείου εμπορικής χρήσης στην Καλιφόρνια, αναζητώντας για τυχόν οφέλη αλληλεπίδρασης μικροδικτύου-ηλεκτρικών οχημάτων. Άλλωστε σε προηγούμενες μελέτες έχει φανεί ότι τα μικροδίκτυα μπορούν να αλληλεπιδρούν ευεργετικά με φωτοβολταικά, μικρές ανεμογεννήτριες, microturbines κτλ. Έτσι εκτός από οφέλη της σύνδεσης οχημάτων στο μακροδίκτυο(V2G λειτουργία), όπου τα αποτελέσματα είναι δεδομένα και ξεκάθαρα αρχίζουν δειλά δειλά να γίνονται μελέτες για σύνδεση οχημάτων στο μικροδίκτυο (V2m λειτουργία), όπου τα αποτελέσματα ακόμα είναι ασαφή. Προς αυτή την κατεύθυνση κινείται και η παρούσα μελέτη, αναζητώντας οφέλη μέσα από την εκμετάλλευση στόλου οχημάτων στο κτίριο για εξοικονόμηση ενέργειας και μείωση της αιχμής ζητούμενης ισχύος.

Η κεντρική ιδέα του μοντέλου είναι το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου να εκμεταλλεύεται με το βέλτιστο(οικονομικά) δυνατό τρόπο τον στόλο ηλεκτρικών οχημάτων, ο οποίος στην πράξη θα αποτελείται από τους ίδιους τους εργαζόμενους του κτιρίου, ικανοποιώντας παράλληλα μέρος των απαιτήσεων του κτιρίου σε ηλεκτρική ενέργεια. Όπως φαίνεται και από το παρακάτω σχήμα το σύστημα διαχείρισης ενέργειας θα πρέπει κάθε ώρα να παίρνει απόφαση για το πως θα καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες του κτιρίου(*DMDh*), αποφασίζοντας τόσο για το ποσό της ενέργειας που θα αγοράσει από τον κεντρικό διαχειριστή(*pudh*) όσο και για το εάν θα φορτίσει(*codh*) ή θα εκφορτίσει(*pvdh*) τα ηλεκτρικά οχήματα, που είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο του κτιρίου. Ως βήμα απόφασης του συστήματος διαχείρισης ενέργειας στην εργασία επιλέχθηκε το διάστημα της μίας ώρας.



Εικόνα 3.1 Ο σημαντικός ρόλος του συστήματος διαχείρισης ενέργειας.[1]

3.2 ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

Προκειμένου οι εργαζόμενοι του κτιρίου να παραδίδουν τα αυτοκίνητά τους στο σύστημα διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου και αυτό να τα εκμεταλλεύεται με βέλτιστο τρόπο θα πρέπει να συμφωνήσουν και οι δύο πλευρές στους όρους σύνδεσης και στη χρηματική ανταμοιβή που θα καταβάλλεται στους ιδιοκτήτες των ηλεκτρικών οχημάτων από το κτίριο. Στη συγκεκριμένη μελέτη έχουν συμφωνηθεί οι εξής όροι διάρκειας ενός χρόνου από τις δύο πλευρές:

- Κάθε ιδιοκτήτης οχήματος θα συνδέει το όχημά του το πρωί στις 9 στο δίκτυο του κτιρίου με επίπεδο μπαταρίας (SOCin) στο 80% της συνολικής χωρητικότητας. Επίσης θα παίρνει πίσω το όχημά του, φεύγοντας από τη δουλειά στις 6 το απόγευμα με επίπεδο μπαταρίας (SOCout) το λιγότερο στο 40% της συνολικής χωρητικότητας. Στο διάστημα που παραμένουν συνδεδεμένα τα οχήματα, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας θα έχει δικαίωμα να χρησιμοποιεί βέλτιστα την μπαταρία των οχημάτων με ανώτατο όριο (SOCmax) ίσο με 90% και κατώτατο όριο (SOCmin) ίσο με 20%,για λόγους μη καταπόνησης της μπαταρίας. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι οι μπαταρίες στη συγκεκριμένη μελέτη έχουν υποτεθεί Li-ion χωρητικότητας C=16 kWh και ότι η ενέργεια που απαιτείται ανά χιλιόμετρο κίνησης των συγκεκριμένων EVs είναι 0,16kWh/km. Άρα τα EVs μπορούν να διανύσουν μέχρι και 20 km από το σπίτι μέχρι το κτίριο εργασίας και αντίθετα.
- Το κτίριο θα καταβάλλει σε κάθε ιδιοκτήτη EV ένα ετήσιο πάγιο τέλος σύνδεσης ανά χωρητικότητα μπαταρίας οχήματος V=5 $/kWh, προκειμένου να συνδέει το όχημά του στο κτίριο κάθε πρωί στις 9 και να το παίρνει πίσω το απόγευμα στις 6.
- Το κτίριο θα καταβάλλει επίσης ημερήσια αποζημίωση ανάλογα με την ενέργεια που απορροφά από τις μπαταρίες των οχημάτων. Το ποσό ενέργειας που απορρόφησε το σύστημα διαχείρισης ενέργειας από τις μπαταρίες μεταξύ εισόδου και εξόδου των οχημάτων, δηλαδή (SOCin- SOCout)*C διαιρεμένο με το

συντελεστή μετατροπής ενέργειας AC/DC (Geff), γιατί τόση ενέργεια χρειάστηκε να φορτίσουν στο σπίτι τους οι EV ιδιοκτήτες. Όλο αυτό πολλαπλασιασμένο με μία προσυμφωνημένη τιμή Pex($/kWh) είναι η χρηματική αποζημίωση στους ιδιοκτήτες EV. Δηλαδή συνολικά παίρνουν ως αποζημίωση την ενέργεια που χρησιμοποιήθηκε από το κτίριο και χρειάστηκε να φορτίσουν στα οχήματά τους από πριν πολλαπλασιασμένη με μία τιμή Pex($/kWh) η οποία θα αναλυθεί διεξοδικά παρακάτω.

- Καταβολή αποζημίωσης λόγω φθοράς μπαταρίας από τη χρησιμοποίηση της από τον διαχειριστή του κτιρίου. Έχει υπολογιστεί ότι μία Li-ion μπαταρία ηλεκτρικού οχήματος έχει φθορά λόγω φόρτισης/εκφόρτισης από το ηλεκτρικό δίκτυο D=0,0027% επί της συνολικής χωρητικότητας (C) για κάθε κύκλο φορτοεκφόρτισης. Για τον υπολογισμό της αποζημίωσης το κόστος αγοράς των μπαταριών έχει υποτεθεί CP=1000$/kWh.

Η συγκεκριμένη μελέτη έγινε με στόχο την ελαχιστοποίηση του ετήσιου κόστους αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από τη μεριά του κτιρίου, όμως για να είναι ρεαλιστική σε αρκετά σημεία γίνεται λόγος στη συνολική αποζημίωση των ιδιοκτητών EV (άθροισμα των τεσσάρων παραπάνω όρων) καθώς και στο ετήσιο καθαρό κέρδος ανά ιδιοκτήτη οχήματος (το οποίο θα ισούται με το πάγιο τέλος σύνδεση συν την αποζημίωση λόγω χρησιμοποίησης της μπαταρίας μείον το ποσό που χρειάστηκε να πληρώσουν οι ιδιοκτήτες σπίτι τους για να φορτίσουν το συγκεκριμένο ποσό ενέργειας στο σπίτι).

3.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ-ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

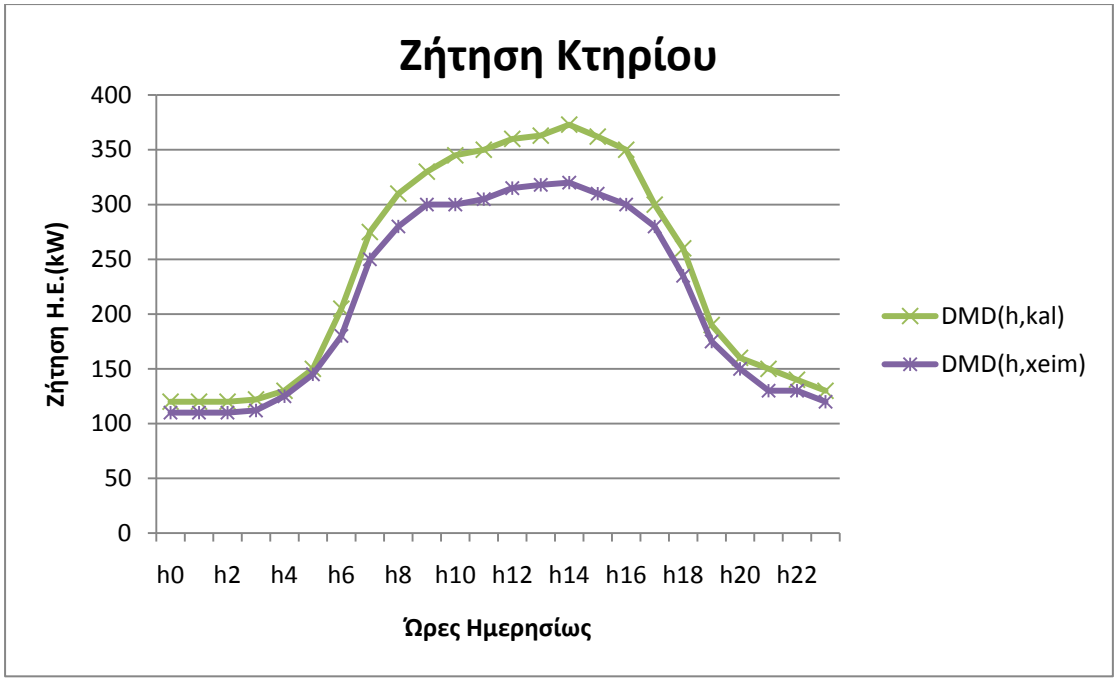
Παρακάτω θα αναφερθούν αναλυτικά οι παράμετροι του προβλήματος, κάνοντάς το ακόμα πιο κατανοητό. Πρέπει να σημειωθεί ότι όπου γίνεται αναφορά σε μεταβλητές ή παραμέτρους που αφορούν ροή ενέργειας από τη μία ώρα στην άλλη, η σύμβαση που έχει χρησιμοποιηθεί είναι αυτές να αναφέρονται μεταξύ των ωρών h και h+1.

I. Το φορτίο που πρέπει να ικανοποιηθεί (ανάγκες του κτιρίου σε ηλεκτρική ισχύ) ανά ώρα DMD(h) είναι το εξής ανά ώρα και εποχή(έχει γίνει υπολογισμός της μέσης τιμής ανά μέρας καλοκαιριού και χειμώνα), υπολογισμένο σε kW:

Πίνακας 3.1 Ζήτηση ανά ώρα και εποχή.

Ώρες ημερησίως	DMD(h,sum)	DMD(h,wint)
h0	120	110
h1	120	110
h2	120	110
h3	122	112
h4	130	125
h5	150	145
h6	205	180
h7	275	250
h8	310	280
h9	330	300
h10	345	300
h11	350	305
h12	360	315
h13	363	318
h14	373	320
h15	362	310
h16	350	300
h17	300	280
h18	260	235
h19	190	175
h20	160	150
h21	150	130
h22	140	130
h23	130	120

Σημειώνεται ότι ως χειμώνα αναφερόμαστε στους μήνες Νοέμβρη με Απρίλη και ως καλοκαίρι στους μήνες Μάη με Οκτώβρη.



Εικόνα 3.2 Φορτίο που πρέπει να ικανοποιηθεί (Το καλοκαίρι η αιχμή είναι 373kWh και το χειμώνα 320kWh).

Η μέση ζήτηση το καλοκαίρι είναι 238,1kWh και το χειμώνα 212,9 kWh. Επίσης οι συνολικές ετήσιες ανάγκες του κτιρίου σε ηλεκτρική ενέργεια είναι 1,9485GWh.

II. Το τιμολόγιο που χρησιμοποιήθηκε είναι του κεντρικού δικτύου παροχής ηλεκτρικής ενέργειας είναι της PG&E(Pacific Gas and Electric) για μικρομεσαίους καταναλωτές εμπορικής χρήσης και είναι το ακόλουθο:

Πίνακας 3.2 Τιμολόγιο της PG&E για μικρομεσαίους καταναλωτές εμπορικής χρήσης.

	Καλοκαίρι (Μάιος-Οκτώβριος)	**Χειμώνας (Νοέμβριος-Απρίλιος)**
On-peak($/kWh)	0.16	-
Mid-peak ($/kWh)	0.14	0.11
Off-peak ($/kWh)	0.13	0.10
Αιχμή ($/kW/μήνα)	10.27	5.76

Το χειμώνα οι περίοδοι χρέωσης είναι mid-peak 8 το πρωί με 9 το βράδυ και off-peak όλη την υπόλοιπη ημέρα. Επιπρόσθετα το καλοκαίρι έχουμε και την on-peak χρέωση από τις 12 το μεσημέρι μέχρι και τις 6 το απόγευμα. Όπως φαίνεται και από τον

πίνακα η χρέωση της ζητούμενης ισχύος είναι 10.27$/kWh για κάθε μήνα του καλοκαιριού και 5.76$/kWh για τους μήνες του χειμώνα.

III. Υπόλοιπες παράμετροι

Για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης χρειάστηκαν τα παρακάτω δεδομένα:

- Το επενδυτικό επιτόκιο, που χρησιμοποιήθηκε είναι ίσο με το πραγματικό ετήσιο της Αμερικής ii=0.06%.
- Το συνολικό ετήσιο κόστος για εξοπλισμό σύνδεσης(πρίζες, καλώδια κτλ.) του κτιρίου με τα οχήματα υπολογίζεται F=100$.
- Ο συντελεστής εκφόρτισης μπαταρίας λόγω αναμονής από τη μία ώρα στην επόμενη είναι Fdecay=0.1% επί της συνολικής χωρητικότητας της μπαταρίας.
- Ο συντελεστής μετατροπής AC/DC(Geff) και αντίστροφα (Deff) που χρησιμοποιήθηκε είναι ίσος με 0.954,δηλαδή έχουμε απώλειες διαμόρφωσης ίσες με 4.46%.
- Λόγω περιορισμών δικτύου, η μέγιστη μεταφερόμενη ενέργεια από(CR) και προς(DR) το δίκτυο ορίστηκε 3.36kWh ανά ώρα. Άρα κάθε όχημα μπορεί να φορτίσει και να εκφορτίσει το πολύ στο $\pm$21% της συνολικής του χωρητικότητας κάθε ώρα.

3.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ

Στο υποκεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν συγκεντρωτικά οι παράμετροι, οι μεταβλητές, οι περιορισμοί του μοντέλου, η τελική αντικειμενική συνάρτηση και οι υπολογισμοί δεδομένων που μπορούν να πραγματοποιηθούν μετά το πέρας της προσομοίωσης.

3.4.1 Παράμετροι

Πίνακας 3.3 Περιγραφή παραμέτρων μοντέλου.

Περιγραφή Παραμέτρου	Σύμβολο
Ώρες ημερησίως (H={0,1,..23})	*H*
Περίοδοι χρόνου (sum,wint)	*per*
Απαίτηση κτιρίου σε ηλ. ενέργεια(Φορτίο Κτιρίου kWh)	*DMD(h,per)*
Τιμολόγηση ηλ. ενέργειας ($/kWh)	*Psup(h,per)*
Τιμολόγηση ζητούμενης αιχμής ισχύος	*Ppeak(per)*

Επενδυτικό επιτόκιο	*Ii*
Σταθερό κόστος επένδυσης ($)	*F*
Πάγιο τέλος σύνδεσης οχημάτων($/kWh)	*V*
Συμφωνημένη τιμή ανταλλαγής ενέργειας μεταξύ κτιρίου και οχημάτων($/kWh)	*Pex*
Κόστος μπαταριών Li-ion($/kWh)	*CP*
Φθορά μπαταριών λόγω φορτοεκφόρτωσης % της συνολικής χωρητικότητας	*D*
Απώλειες αναμονής μπαταριών από τη μία ώρα στην επόμενη	*Fdecay*
Προσυμφωνημένο επίπεδο σύνδεσης μπαταριών στο δίκτυο του κτιρίου % της συνολικής χωρητικότητας	*SOCin*
Προσυμφωνημένο επίπεδο αποσύνδεσης μπαταριών από το δίκτυο του κτιρίου % της συνολικής χωρητικότητας	*SOCout*
Ανώτατο όριο φόρτισης μπαταριών % της συνολικής χωρητικότητας	*SOCmax*
Κατώτατο όριο αποφόρτισης μπαταριών % της συνολική χωρητικότητας	*SOCmin*
Μέγιστος ρυθμός φόρτισης λόγω περιορισμών δικτύου % της συνολική χωρητικότητας των μπαταριών	*CR*
Μέγιστος ρυθμός αποφόρτισης λόγω περιορισμών δικτύου % της συνολική χωρητικότητας των μπαταριών	*DR*
Συντελεστής μετατροπής AC/DC	*Geff*
Συντελεστής μετατροπής DC/ AC	*Deff*

3.4.2 Μεταβλητές

Οι μεταβλητές του προβλήματος αποτελούν τους αγνώστους που καλείται το πρόβλημα βελτιστοποίησης να προσδιορίσει.

Πίνακας 3.4 Περιγραφή μεταβλητών μοντέλου.

Περιγραφή Μεταβλητών	Σύμβολο
Συνολική χωρητικότητα συνδεδεμένων οχημάτων(kWh)	*C*
Στάθμη μπαταρίας συνδεδεμένων οχημάτων(kWh)	*SOC(h,per)*
Αριθμός συνδεδεμένων οχημάτων	*NEVs*
Αγορασθείσα ενέργεια από κεντρικό δίκτυο(kWh)	*Pud(h,per)*
Αιχμή ζητούμενης ισχύος(kW)	*Pmax(per)*
Καθαρή ροή ενέργειας από οχήματα σε κτίριο(kWh)	*Pvd(h,per)*
Συνολική ροή ενέργειας από οχήματα σε κτίριο(kWh)	*O(h,per)*
Καθαρή ροή ενέργειας από κτίριο σε οχήματα(kWh)	*I(h,per)*
Συνολική ροή ενέργειας από κτίριο σε οχήματα(kWh)	*Cod(h,per)*
Απώλειες αναμονής μπαταρίας(kWh)	*L(h,per)*

3.4.3 Εξισώσεις μοντέλου

I. $C=NEVs*16$ (3.1)
Συνολική χωρητικότητα συνδεδεμένων οχημάτων

II. $SOC('h9', per) = SOCin * C$ (3.2)
Προσυμφωνημένο επίπεδο μπαταρίας την ώρα άφιξης του EV στο κτίριο

III. $SOC('h18', per) = SOCout * C$ (3.3)
Προσυμφωνημένο επίπεδο μπαταρίας την ώρα αναχώρησης του EV από το κτίριο

IV. $SOC(h, per) \leq C * SOCmax$ (3.4)
Περιορισμός ανώτατου ορίου φόρτισης μπαταριών

V. $SOC(h, per) \geq C * SOCmin$ (3.5)
Περιορισμός κατώτατου όριου αποφόρτισης μπαταριών

VI. $O(h, per) < C * DR$ (3.6)
Περιορισμός δικτύου για μέγιστη εκφόρτιση μπαταριών

VII. $I(h, per) < C * CR$ (3.7)
Περιορισμός δικτύου για μέγιστη φόρτιση μπαταριών

VIII. $pvd(h, per) = O(h, per) * Deff$ (3.8)
DC/AC μετατροπή ενέργειας για μεταφορά ενέργειας από μπαταρίες EV στο κτίριο

IX. $I(h, per) = I(h, per) * Geff$ (3.9)
AC/DC μετατροπή ενέργειας για φόρτιση μπαταριών

X. $L(h, per) = soc(h, per) * Fdecay$ (3.10)
Απώλειες αναμονής μπαταρίας

XI. $SOC(h, per) = SOC(h + 1, per) - I(h, per) + O(h, per) + L(h, per)$ (3.11)
Εξίσωση μεταφοράς ενέργειας από και προς τις μπαταρίες

XII. $DMD(h, per) = pud(h, per) + pvd(h, per) - cod(h, per)$ (3.12)
Εξίσωση ικανοποίησης φορτίου

XIII. $Pmax(per) \geq pud(h, per)$ (3.13)

3.4.4 Αντικειμενική συνάρτηση

$$\text{MIN (total energy cost)} = \frac{ii}{1-\left(\frac{1}{(1+ii)^{T}}\right)}\{(F+V*C)$$

$$+\ (CP*C)*D*\left(\frac{\sum_{per}\sum_{h} O(h,per)+I(h,per)}{C}\right)\}$$

$$+\ \sum_{per}\frac{(\text{soc('h9',per)-soc('h18',per))*Pex})}{Geff}$$

$$+\ \sum_{per}\sum_{h}\left(\text{pud(h,per)*Psup(h,per)}\right)$$

$$+\sum_{per}\text{Ppeak(per)*Pmax(per)}$$

-Έξοδα εγκατάστασης και πάγια αποζημίωση EV

-Αποζημίωση φθοράς μπαταρίας

-Χρέωση ενέργειας από μπαταρίες EV

-Χρέωση ενέργειας από κεντρικό δίκτυο

-Χρέωση Αιχμής

3.4.5 Δευτερεύουσες μεταβλητές

Με τον όρο δευτερεύουσες μεταβλητές υπονοούνται οι μεταβλητές απόφασης που δεν απαιτούνται στην επίλυση της χαρακτηριστικής εξίσωσης, αλλά υπολογίζονται ύστερα από τις πρωτεύουσες μεταβλητές του μοντέλου, οι οποίες περιγράφηκαν παραπάνω. Παρακάτω παρατίθενται όλες οι μεταβλητές, που χρησιμοποιήθηκαν στην αναπαράσταση των αποτελεσμάτων του μοντέλου.

I. *Κέρδος εταιρίας = Αρχική συνολική δαπάνη αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας*
−Τελική συνολική δαπάνη αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας
(αποτέλεσμα αντικειμενικής συνάρτησης) (3.14)

II. *Εξοικονόμηση Αιχμής= Αρχικό κόστος αιχμής*
−Τελικό κόστος αιχμής (3.15)

,όπου *Τελικό κόστος αιχμής*= $\sum_{per}$ Ppeak(per)*Pmax(per)

III. *Εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας από κεντρικό δίκτυο =*
Αρχικό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας από κεντρικό δίκτυο
−Τελικό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας από κεντρικό δίκτυο (3.16)

,όπου *Τελικό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας*= $\sum_{per}\sum_{h}\left(\text{pud(h,per)*Psup(h,per)}\right)$

IV. *Πληρωμή EV = Αποζημίωση φθοράς μπαταρίας*
+ Χρέωση ενέργειας από μπαταρίες EV
+ Πάγια Αποζημίωση EV (3.17)

,όπως αυτά έχουν περιγραφεί παραπάνω

V. *Κέρδος EV = Πάγια Αποζημίωση EV*
+Χρέωση ενέργειας από μπαταρίες EV (3.18)
−Χρέωση φόρτισης μπαταριών στο σπίτι Νυχτερινή Φόρτιση

VI. *Κέρδος 1 EV = Κέρδος EV / Αριθμός EVs* (3.19)

Πρέπει να σημειωθεί ότι τα μεγέθη *Αρχική συνολική δαπάνη αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, Αρχικό κόστος αιχμής* και *Αρχικό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας από κεντρικό δίκτυο* υπολογίζονται εύκολα αν τρέξει το μοντέλο για την ικανοποίηση της ζήτησης του κτιρίου χωρίς τη δυνατότητα επένδυσης σε ηλεκτρικά οχήματα. Επίσης για τον υπολογισμό του κέρδους των EV η νυχτερινή φόρτιση γίνεται με κόστος 0,06$/kWh, όπως αυτό προκύπτει από το τιμολόγιο της PG&E, στο σπίτι των ιδιοκτητών EV.

3.5 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΣΕ GAMS

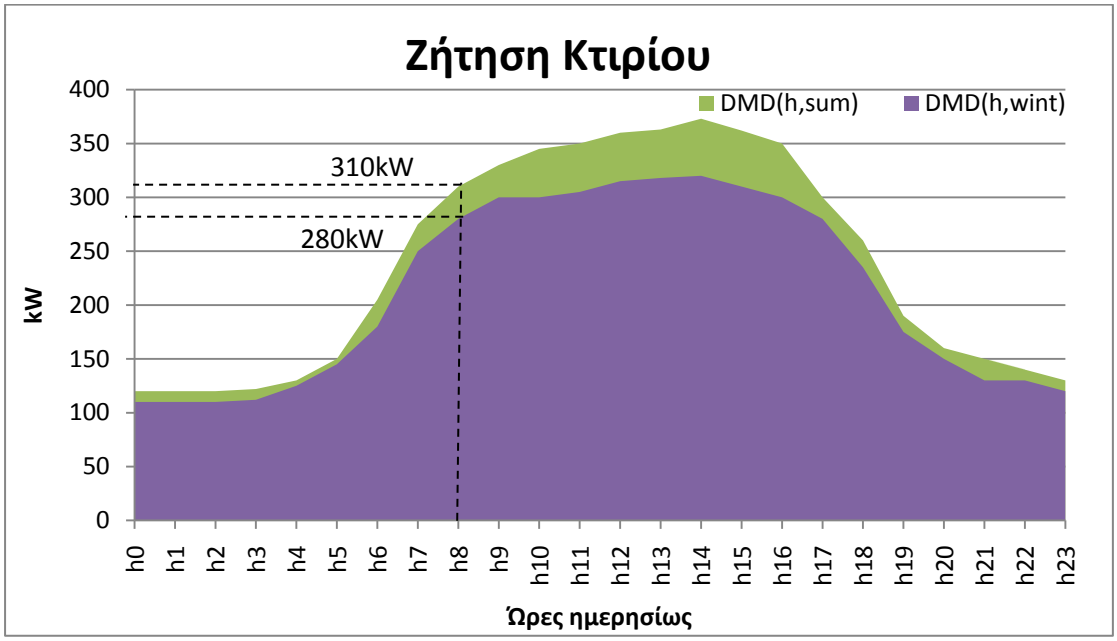
Το παραπάνω μοντέλο, έτσι όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο η μαθηματική διατύπωσή του, επιλύεται γραμμικά, καθώς δεν συμπεριλαμβάνονται μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών του. Πρέπει να σημειωθεί ότι το κύριο χαρακτηριστικό των προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού είναι ότι σε όλες τις περιπτώσεις δίνουν τη βέλτιστη λύση προσδίδοντας στην επίλυση τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια. Συγκεκριμένα το μοντέλο επιλύθηκε ως γραμμικό πρόβλημα μεικτού ακέραιου προγραμματισμού (Mixed Integer Program), καθώς περιέχει δύο ακέραιες μεταβλητές (τον αριθμό των οχημάτων NEVs και τη συνολική χωρητικότητα των μπαταριών C) και οι υπόλοιπες είναι συνεχής.

Ως αλγόριθμος επίλυσης (solver) της προσομοίωσης επιλέχθηκε ο CPLEX. Ο επιλυτής είναι το πρόγραμμα που αναλαμβάνει την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Ο solver μπορεί να χρησιμοποιήσει τα δεδομένα του προβλήματος μόνο όταν αυτά είναι σε κατάλληλη μορφή, συνεπώς είναι ευθύνη του συστήματος μοντελοποίησης να εφαρμόσει τους απαραίτητους μετασχηματισμούς και να προετοιμάσει το πρόγραμμα για επίλυση. Ο solver CPLEX είναι ένας ισχυρότατος και σταθερός solver του GAMS που επιτρέπει στο χρήστη να συνδυάσει τις υψηλές δυνατότητες του GAMS με τη δύναμη επιλυτών CPLEX. Οι επιλυτές CPLEX είναι αλγόριθμοι σχεδιασμένοι για την επίλυση μεγάλων και δύσκολων προγραμμάτων γρήγορα και με την ελάχιστη παρέμβαση του χρήστη. Στην περίπτωση που ο χρήστης θέλει να ρυθμίσει τις επιλογές του αλγόριθμου ώστε να βελτιώσει την απόδοση, ο CPLEX παρέχει πρόσβαση σε όλες τις ρυθμιστικές παραμέτρους μέσω ενός αρχείου επιλογής. Επιπλέον υπάρχει επιλογή που επιτρέπει την επίλυση διαφορετικών αλγόριθμων παράλληλα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

4.1 ΑΡΧΙΚΟ ΤΙΜΟΛΟΓΙΟ

Πριν την ανάλυση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης του μοντέλου με τη διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων, πρέπει να υπολογιστεί το αρχικό κόστος λειτουργίας του κτιρίου για την ικανοποίηση της ζήτησης ισχύος της εικόνας 4.1. Το αρχικό αυτό κόστος θα αποτελέσει σημείο αναφοράς για σύγκριση με το κόστος λειτουργίας του κτιρίου με διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων.



Εικόνα 4.1 Ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος κτιρίου.(Σύνδεση οχημάτων μεταξύ 9πμ. και 6μμ.).

Επιλύοντας το μοντέλο, έτσι όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο από τις εξισώσεις 3.1-3.19 χωρίς επένδυση σε ηλεκτρικά οχήματα (θεωρούμε μηδενική χωρητικότητα μπαταριών), παίρνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα:

Αρχικό συνολικό κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας =281103,1 $

το οποίο αναλύεται σε:

- ✓ *Αρχικό κόστος αιχμής=34043,5$*
- ✓ *Αρχικό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας από κεντρικό δίκτυο=247053,6$*

Εικόνα 4.2 Ανάλυση αρχικής δαπάνης για την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.

Σκοπός της διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι η εξυπηρέτηση μέρους της αρχικής ζήτησης σε τιμές χαμηλότερες από αυτές της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Το κέρδος από την αξιοποίηση της αποθηκευμένης ενέργειας στις μπαταρίες των ηλεκτρικών οχημάτων μεγιστοποιείται στις ώρες αιχμής. Στην τελευταία περίπτωση το κέρδος είναι διπλό: αγορά ενέργειας σε χαμηλότερες τιμές και μείωση της αιχμής μέγιστης ισχύος που ζητείται από το δίκτυο. Η συμβολή των ηλεκτρικών οχημάτων στη μείωση της αιχμής ζήτησης είναι σημαντική γιατί όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.2 το κόστος της αιχμής αποτελεί το 12% της συνολικής δαπάνης.

Όσο μεγαλύτερη είναι η μείωση της αιχμής ζητούμενης ισχύος τόσο μεγαλύτερη είναι και η εξοικονόμηση. Η μείωση όμως που μπορεί να επιτευχθεί στην αιχμή ζήτησης έχει ένα ανώτατο όριο. Η σύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων στον χώρο στάθμευση του γραφείου πραγματοποιείται μεταξύ 9πμ. και 6 μμ.. Επομένως η ελάχιστη ημερήσια αιχμή ζητούμενης ισχύος που μπορεί να επιτευχθεί είναι ίση με τη μέγιστη αιχμή ζήτησης των ωρών που τα ηλεκτρικά οχήματα δεν συνδέονται στο κτίριο. Μελετώντας προσεκτικά τη ζήτηση της εικόνας 4.1 για χειμώνα και καλοκαίρι συμπεραίνουμε ότι η εν δυνάμει ελάχιστη αιχμή ζήτησης είναι ίση με 310kW για το καλοκαίρι και 280kW για το χειμώνα. Οι τιμές αυτές προκύπτουν προσεγγιστικά από την κατανάλωση ενέργειας στις 8πμ.

$$min_{Ppeak} = \begin{cases} 310kW\ , \kappa\alpha\lambda o\kappa\alpha\acute{\iota}\rho\iota \\ 280kW\ , \chi\varepsilon\iota\mu\acute{\omega}\nu\alpha \end{cases}$$

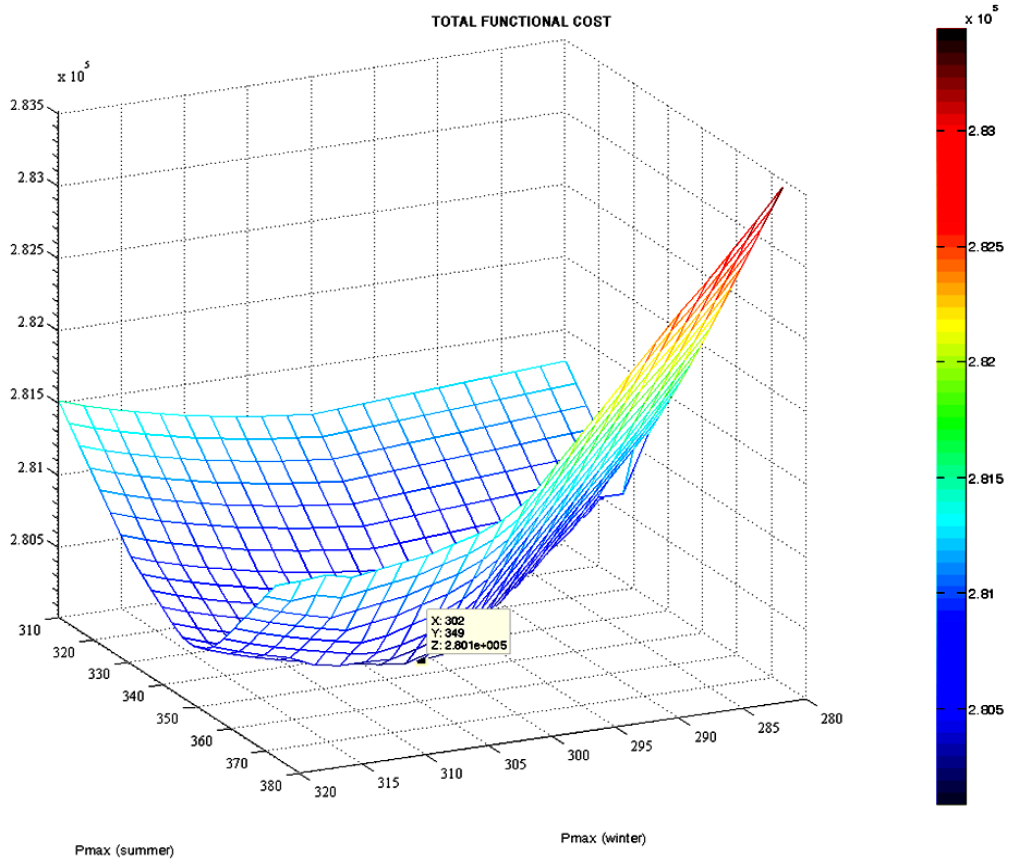
4.2 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΑΙΧΜΗΣ ΖΗΤΟΥΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Στην παρούσα ενότητα θα διερευνήσουμε την εξοικονόμηση στο κόστος λειτουργίας του κτιρίου θεωρώντας τη μείωση της αιχμής, που επιτυγχάνεται με την αξιοποίηση της πλεονάζουσας ισχύος των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων, ως παράμετρο του προβλήματος. Η αιχμή ζήτησης είναι άνω και κάτω φραγμένη και για τις δύο εποχές όπως αναλύθηκε στη προηγούμενη ενότητα. Το πεδίο ορισμού της παραμέτρου για την επιθυμητή μέγιστη αιχμή για τις δύο εποχές δίνεται παρακάτω:

$$Ppeak_{summer} \in [310, 373] \quad \text{και} \quad Ppeak_{winter} \in [280, 320]$$

Η μειωμένη αιχμή ζητούμενης ισχύος μπορεί να αποκτήσει οποιαδήποτε τιμή εντός του πεδίου ορισμού της ανάλογα με τις προτιμήσεις του συστήματος διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου. Η επιθυμία για μείωση της αιχμής ζήτησης χειμώνα και καλοκαιριού (για παράδειγμα μείωση της αιχμής ζήτησης 5%) αποτυπώνεται στο πρόβλημα μέσω της παραμέτρου Pmax (για το συγκεκριμένο παράδειγμα είναι ίση με 354.35 kW για το καλοκαίρι και 304 kW για το χειμώνα. Η μείωση της αιχμής των δύο εποχών δεν είναι δεσμευτικό να είναι η ίδια. Ο τρόπος με τον οποίο κάθε φορά το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου αξιοποιεί την αποθηκευμένη ενέργεια των μπαταριών καθορίζει και τη μείωση της αιχμής ζήτησης.

Μελετώντας όλες τις δυνατές περιπτώσεις μείωσης της αιχμής ζήτησης για χειμώνα και καλοκαίρι, λαμβάνοντας υπόψη το πεδίο ορισμού της, παρουσιάζεται το κόστος λειτουργίας του κτιρίου στην εικόνα 4.3. Από τη 3D – καμπύλη της εικόνας 4.3 παρατηρούμε ότι η αξιοποίηση της αποθηκευμένης ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων μειώνει το ενεργειακό κόστος του κτιρίου για οποιοδήποτε ζευγάρι αιχμής ζήτησης (Pmax_sum, Pmax_wint). Αν θεωρήσουμε μια συγκεκριμένη τιμή για την αιχμή μια εποχής, έστω για παράδειγμα την αιχμή του χειμώνα (εικόνα 4.4), θα παρατηρήσουμε ότι η μείωση της αιχμής της άλλης εποχής, δηλαδή του καλοκαιριού, είναι μια καμπύλη η οποία μάλιστα παρουσιάζει ολικό ελάχιστο στη σημείο Pmax_sum=349kW.

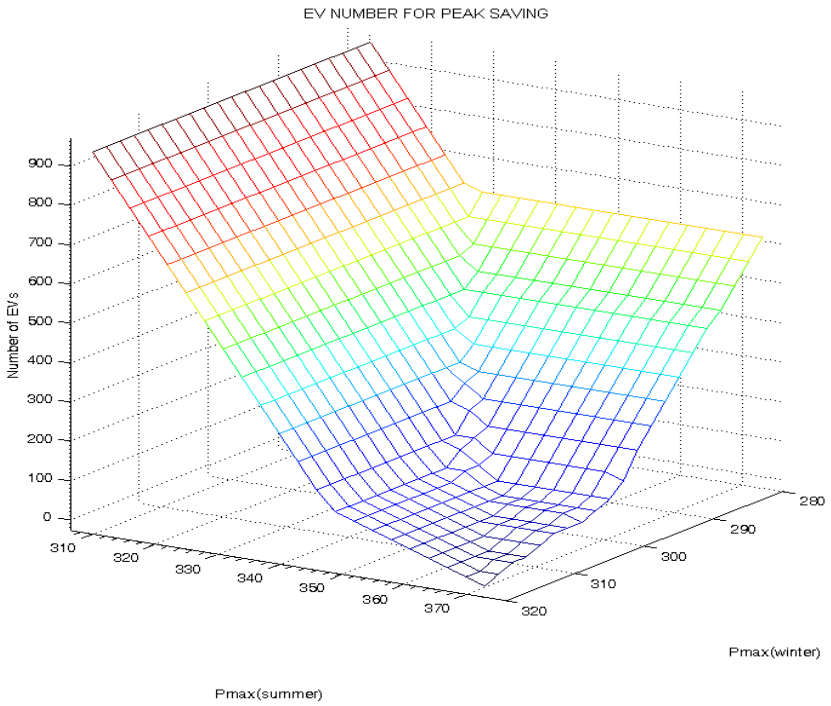


Εικόνα 4.3 Κόστος κτιρίου ανάλογα με επιθυμητή αιχμή

Εικόνα 4.4 Κόστος κτιρίου για Pmax_wint σταθερό.

Αν αυτό επαναληφθεί για όλες τις τιμές της αιχμής του χειμώνα θα παρατηρήσουμε ότι πάντοτε υπάρχει μια τιμή του Pmax_sum για την οποία το κόστος ενεργειακής λειτουργίας του κτιρίου ελαχιστοποιείται. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι υπάρχουν ζεύγη (Pmax_wint, Pmax_sum) που μεγιστοποιούν την εξοικονόμηση του κόστους λειτουργίας του κτιρίου. Αυτά τα ζεύγη σχηματίζουν μια καμπύλη η οποία παρουσιάζει ολικό ελάχιστο στο σημείο (302kW,349kW) όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.3. Το ζεύγος αυτό αποτελεί τη βέλτιστη λύση του συστήματος μας το οποίο μεταφράζεται ως το σημείο ελαχιστοποίησης του κόστους λειτουργίας της εταιρεία λόγω αξιοποίησης της πλεονάζουσας ισχύος των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων.

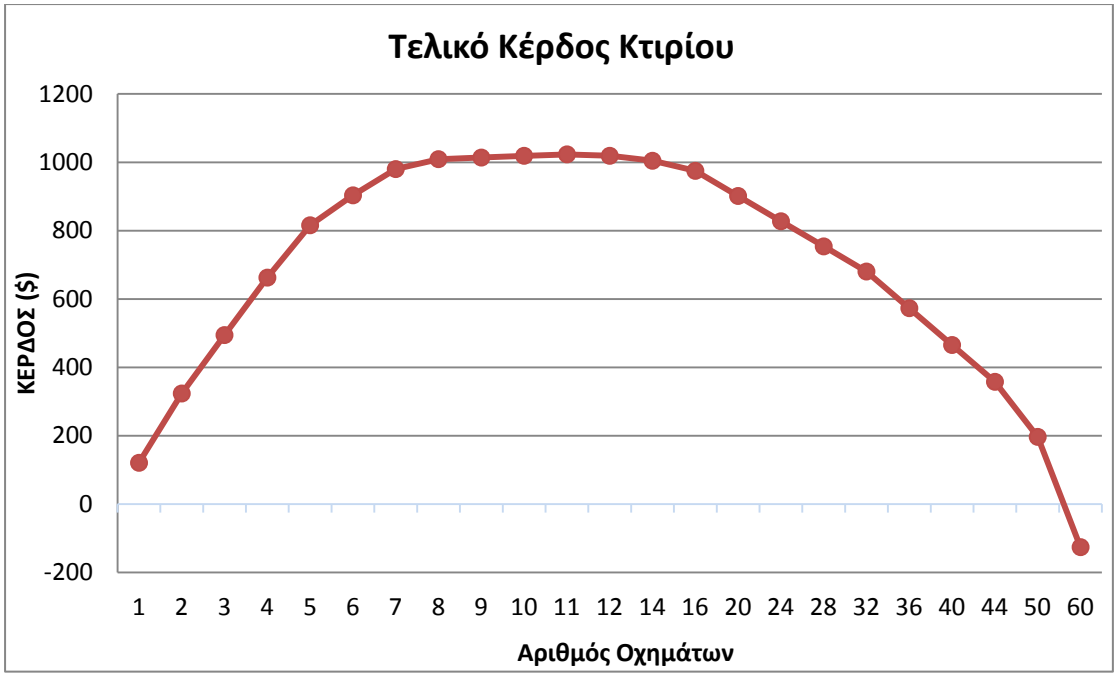
Η μείωση του κόστους λειτουργίας του κτιρίου οφείλεται στη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων. Η εξοικονόμηση της ενέργειας και η μείωση της αιχμής ζήτησης επιτυγχάνονται με την απορρόφηση της πλεονάζουσας ισχύος των μπαταριών για την κάλυψη μέρους της ζήτησης του κτιρίου. Η εικόνα 4.5 δείχνει τη συσχέτιση μεταξύ της μείωσης της αιχμής ζήτησης (χειμώνα και καλοκαιριού) και του αριθμού των ηλεκτρικών οχημάτων. Παρατηρούμε ότι η ταυτόχρονη μείωση των αιχμών των δύο εποχών συνοδεύεται από αύξηση του αριθμού των ηλεκτρικών οχημάτων. Παρατηρώντας το 3-D διάγραμμα της εικόνας 4.5, διαπιστώνουμε ότι υπάρχουν ζεύγη λύσεων (Pmax_wint, Pmax_sum) για τα οποία ο αριθμός των οχημάτων παραμένει ο ίδιος. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι κάθε σημείο επιβάλλει διαφορετική αξιοποίηση της αποθηκευμένης ενέργειας των οχημάτων. Αυτό μπορεί πρακτικά σημαίνει διαφορετικά επίπεδα εκφόρτισης ή ακόμα και εναλλαγές φόρτισης/εκφόρτισης των οχημάτων. Αυτή η διαπίστωση θα αναλυθεί εκτενέστερα στις επόμενες παραγράφους.



Εικόνα 4.5 Συνολική χωρητικότητα οχημάτων ανά επιθυμητή ισχύ.

4.3 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ(NEVs)

Στην προηγούμενη ενότητα μελετήσαμε τη μείωση της αιχμής ζητούμενης ισχύος (και για τις δύο εποχές) και διαπιστώσαμε ότι η μείωσή της είναι αποτέλεσμα της αύξησης της διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων. Ένας συγκεκριμένος αριθμός οχημάτων μπορεί να δώσει πολλαπλές λύσεις μείωσης της αιχμής ζήτησης ανάλογα με τα επίπεδα αξιοποίησης της αποθηκευμένης ενέργειας . Όμως μία από αυτές τις λύσεις είναι η βέλτιστη, που ελαχιστοποιεί το κόστος λειτουργίας για συγκεκριμένο αριθμό οχημάτων. Στην εικόνα 4.6 παρουσιάζεται η βέλτιστη απόκριση του συστήματος για διαφορετικό αριθμό διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων.

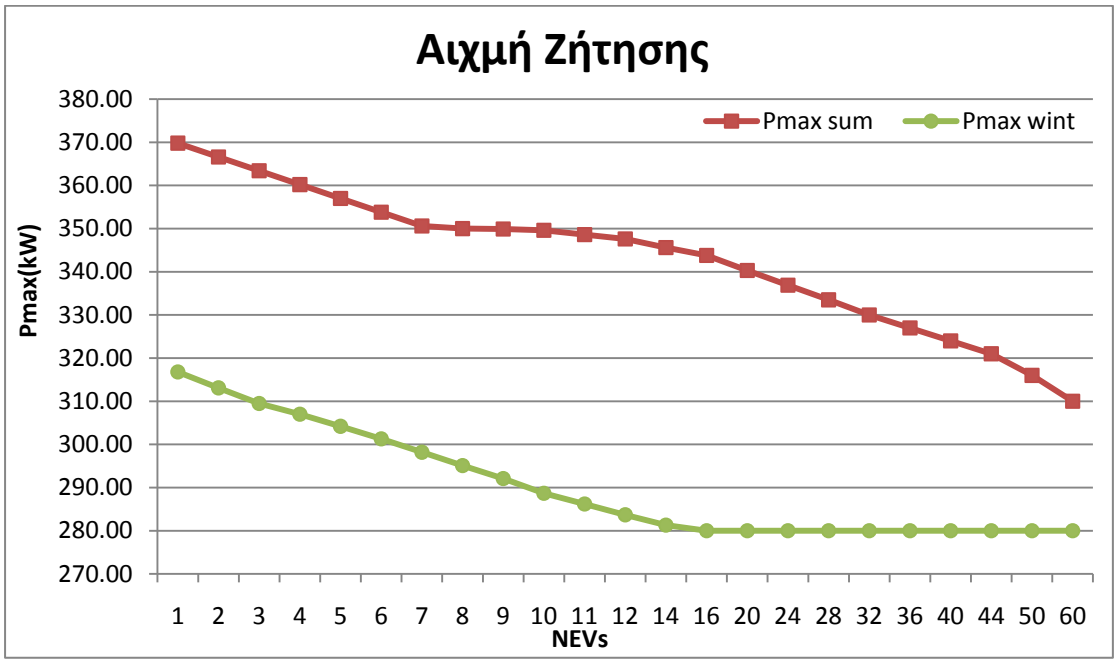


Εικόνα 4.6 Κέρδος κτιρίου ανάλογα με τον αριθμό οχημάτων Pex=0,10$/kWh.

Αρχικά όσο αυξάνεται η διείσδυση των οχημάτων, το κέρδος του κτιρίου αυξάνεται με μεγάλο ρυθμό. Με ένα μόνο όχημα το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου καταφέρνει να εξοικονομεί 120,9$ και από 7 μέχρι 16 οχήματα το κέρδος του κτιρίου παραμένει κοντά στα 1000$ το χρόνο, με μέγιστη τιμή τα 1023$ όταν και έχουν συνδεθεί 11 οχήματα. Όσα οχήματα και αν συνδέονται πέραν του αριθμού των 16, το κέρδος του κτιρίου πέφτει με μεγάλο ρυθμό, αφού η περαιτέρω διείσδυση σε οχήματα δεν δημιουργεί περεταίρω εξοικονόμηση στο κόστος της εταιρίας και για 60 οχήματα και άνω το κτίριο εμφανίζει ζημιά. Για να εξηγηθεί η συμπεριφορά αυτή του κέρδους της εταιρείας εν συναρτήσει της διείσδυσης οχημάτων θα πρέπει να μελετήσουμε τη συμπεριφορά της αιχμής.

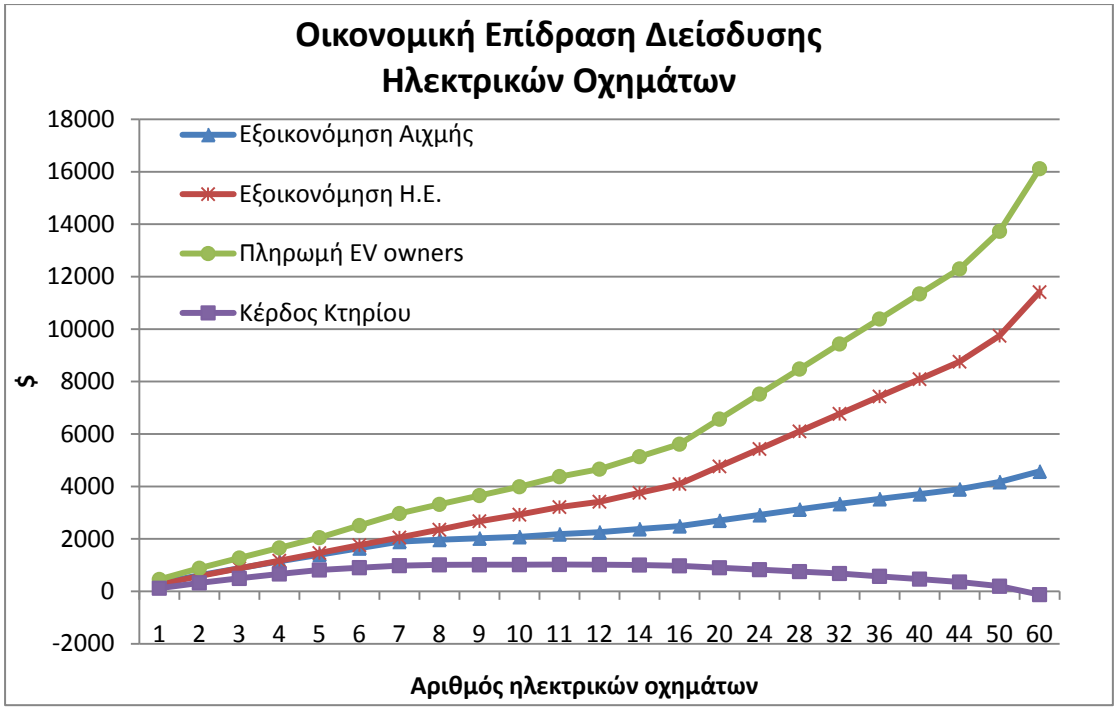
Στην εικόνα 4.7 παρουσιάζεται η συμπεριφορά της αιχμής του χειμώνα και του καλοκαιριού ανάλογα με τη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων. Στο σημείο αυτό να τονίσουμε ότι τα ζεύγη λύσεων (Pmax_wint, Pmax_sum) είναι τα βέλτιστα για κάθε επίπεδο διείσδυσης. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η διαθέσιμη αποθηκευμένη ενέργεια των ηλεκτρικών οχημάτων αξιοποιείται εξολοκλήρου και με τον οικονομικότερο τρόπο. Αρχικά η αύξηση των ηλεκτρικών οχημάτων (μέχρι 11 ηλεκτρικά οχήματα) προκαλεί ταυτόχρονη μείωση της αιχμής χειμώνα και καλοκαιριού. Αυτό συντελεί στη μείωση του κόστους λειτουργίας του κτιρίου, και άρα στην αύξηση του κέρδους του όπως αποδείχθηκε στην εικόνα 4.6, με μεγάλο ρυθμό. Στη συνέχεια, περαιτέρω αύξηση των ηλεκτρικών οχημάτων μειώνει ακόμα περισσότερο την αιχμή καλοκαιριού εν αντίθεση με την αιχμή χειμώνα που για περισσότερα από 16 οχήματα παραμένει σταθερή. Η σταθεροποίηση της αιχμής του χειμώνα αιτιολογείται από το γεγονός ότι έχει φτάσει στο ελάχιστο όριο της (280kW) και επομένως δεν υπάρχει περαιτέρω εξοικονόμηση λόγω μείωσης της αιχμής για την

περίοδο του χειμώνα. Όσο αυξάνεται η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων και μειώνεται η αιχμή του καλοκαιριού, η εταιρεία συνεχίζει να έχει κέρδος το οποίο όμως μειώνεται. Όταν ο αριθμός των οχημάτων γίνει αρκετά μεγάλος (άνω των 60 οχημάτων) ώστε η αιχμή καλοκαιριού και χειμώνα να φτάσει στο κατώτερο όριο, το κόστος διείσδυσης νέων οχημάτων προκαλεί ζημία στην εταιρεία μιας και ξεπερνά το κόστος αγοράς ενέργειας από το δίκτυο.



Εικόνα 4.7 Αιχμή ζητούμενης ισχύς ανάλογα με τον αριθμό διείσδυσης των οχημάτων.

Στην εικόνα 4.8 παρουσιάζεται αναλυτικά η μεταβολή των εσόδων και των εξόδων της εταιρείας για τα διάφορα σενάρια διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων. Παρατηρώντας τη μεταβολή αυτή των μεγεθών για μικρή διείσδυση οχημάτων, διαπιστώνουμε ότι η αύξηση του αριθμού των ηλεκτρικών οχημάτων αυξάνει τα κέρδη του κτιρίου με τέτοιο τρόπο ώστε να υπερκαλύπτει τα έξοδα από την αξιοποίηση της ενέργειας των οχημάτων (σταθερά και μεταβλητά έξοδα). Όταν η διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων αυξηθεί περαιτέρω των 16, όπου η αιχμή χειμώνα δεν μειώνεται περαιτέρω, τότε ο ρυθμός αύξησης των εξόδων για την αξιοποίηση των ηλεκτρικών οχημάτων αυξάνεται ταχύτερα εν συγκρίσει με το ρυθμό αύξησης της εξοικονόμησης αιχμής.



Εικόνα 4.8 Ανάλυση επιμέρους συνιστωσών από τις οποίες προκύπτει το Κέρδος της εταιρίας, για ανάλυση ευαισθησίας στον αριθμό διείσδυσης των οχημάτων.

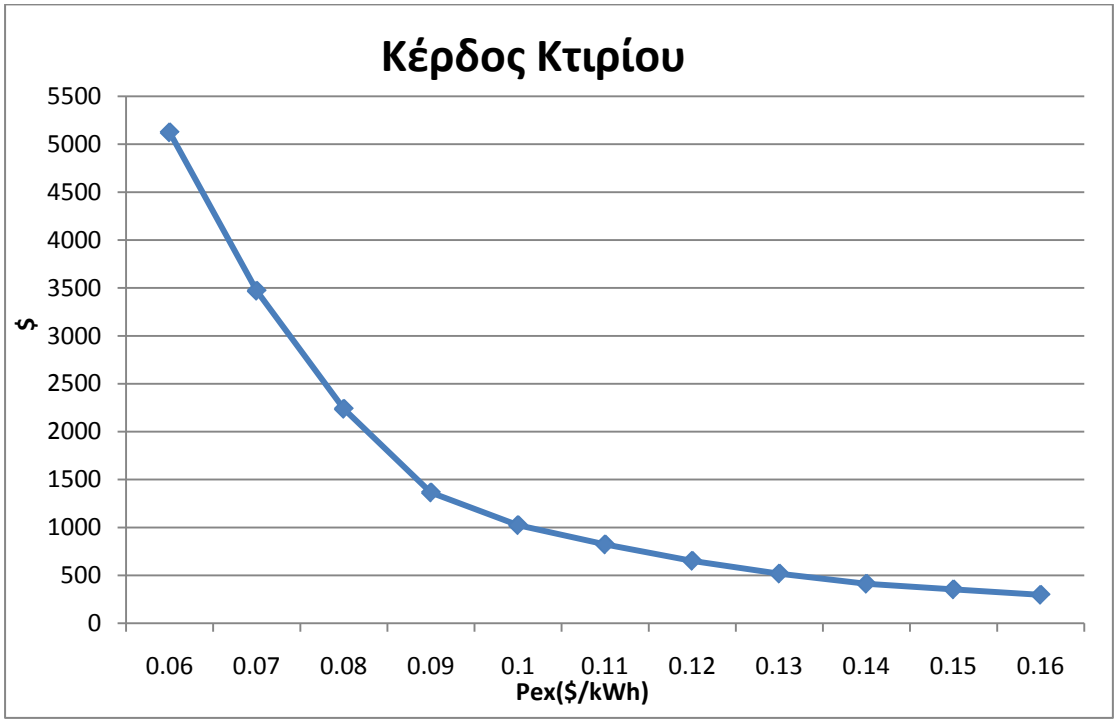
4.4 ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΗΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥ Pex

Στις προηγούμενες ενότητες μελετήσαμε την επίδραση της διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων τόσο στην αιχμή ζήτησης όσο και στο κέρδος της εταιρείας. Για τις παραπάνω αναλύσεις η παράμετρος του κόστους ανταλλαγής ενέργειας από και προς τα οχήματα θεωρήθηκε σταθερή και ίση με 0,10$/kWh. Στην ενότητα αυτή θα μελετήσουμε πως επηρεάζεται η λειτουργία του συστήματος αν μεταβληθεί η τιμή αυτή. Να τονίσουμε στο σημείο αυτό ότι μεγάλη αύξηση της τιμής της παραμέτρου Pex, σε επίπεδα μεγαλύτερα από τη μέγιστη τιμή αγοράς από το δίκτυο (0,16$/kWh) δεν έχει πρακτική αξία. Το πεδίο τιμών για τη μεταβλητή Pex ορίζεται από 0,06$/kWh μέχρι και 0,16$/kWh.

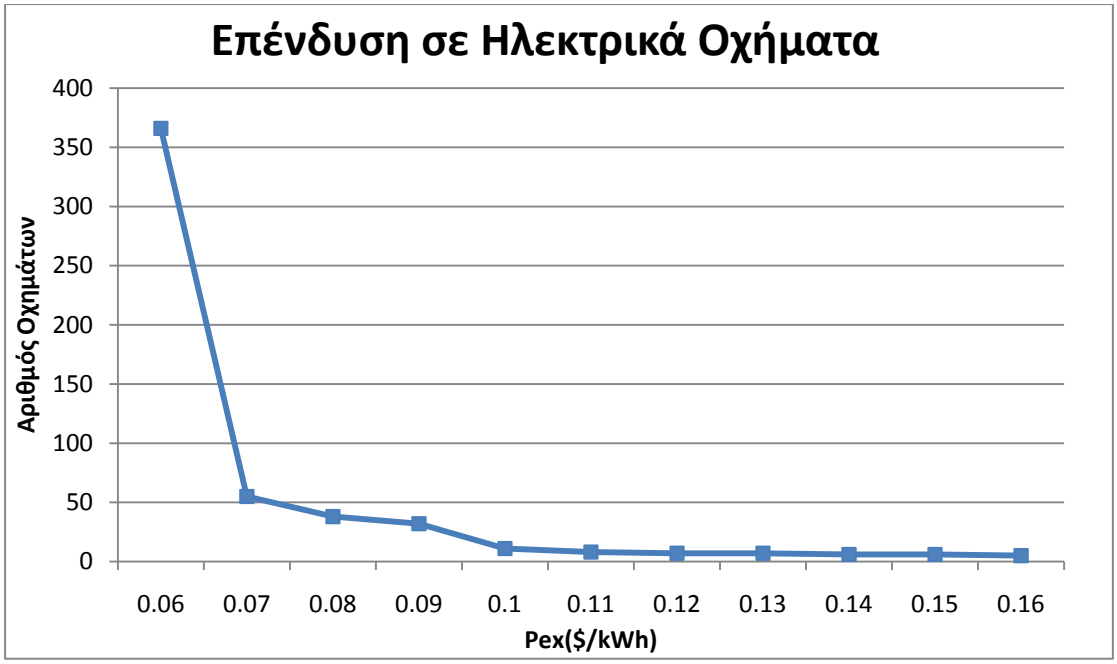
Για την ανάλυση της λειτουργίας του συστήματος ως προς τη παράμετρο Pex, προσομοιώνουμε το μοντέλο λειτουργίας στο GAMS έχοντας ως μεταβλητή τον αριθμό διείσδυσης των οχημάτων. Αυτό σημαίνει ότι το πρόγραμμα αυτόματα αποφασίζει για το ποιος είναι ο βέλτιστος αριθμός οχημάτων.

Στην εικόνα 4.9 παρουσιάζεται το κέρδος της εταιρείας εν συναρτήσει του Pex. Παρατηρούμε ότι το κέρδος της εταιρείας μειώνεται όσο αυξάνεται το Pex. Αυτό είναι αναμενόμενο γιατί η αύξηση του Pex μεταφράζεται σε αύξηση του κόστους αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από τα οχήματα.

Μελετώντας τον βέλτιστο αριθμό οχημάτων(εικόνα 4.10) που εξάγεται από το πρόγραμμα εν συναρτήσει της μεταβλητής Pex, παρατηρούμε ότι για χαμηλά Pex το κτίριο έχει μεγαλύτερο κέρδος, αφού η αγορά ενέργειας από τις μπαταρίες των οχημάτων είναι φθηνή και πολύ πιο χαμηλή από την τιμή του δικτύου και μπορεί επενδύοντας σε μεγάλο στόλο οχημάτων κάνει μεγάλη εξοικονόμηση στην αιχμή(εικόνα 4.11) και στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Από την άλλη πλευρά όσο το Pex αυξάνεται το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου βλέπει την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από τα οχήματα ολοένα και πιο ακριβή και επενδύει σε μικρότερο αριθμό στόλου αξιοποιώντας την ενέργεια τους μόνο τις ώρες που η τιμή αγοράς από το δίκτυο είναι η υψηλότερη. Ακόμα και στη περίπτωση που η τιμή αγοράς από τα ηλεκτρικά οχήματα εξισώνεται με αυτή του δικτύου, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας έχει κίνητρο να αγοράσει την αποθηκευμένη ενέργεια των οχημάτων, έστω και αν το κέρδος του είναι πολύ μικρό, εξοικονομώντας από τη μείωση της αιχμής. Σε περιπτώσεις όπου η τιμή αγοράς ενέργειας από το δίκτυο στο χρονικό διάστημα 9:00-18:00 είναι πολύ μικρότερη της τιμής χρέωσης της αιχμής τότε η εταιρεία μπορεί να έχει κέρδος και για τιμές του Pex μεγαλύτερες από αυτές του δικτύου.

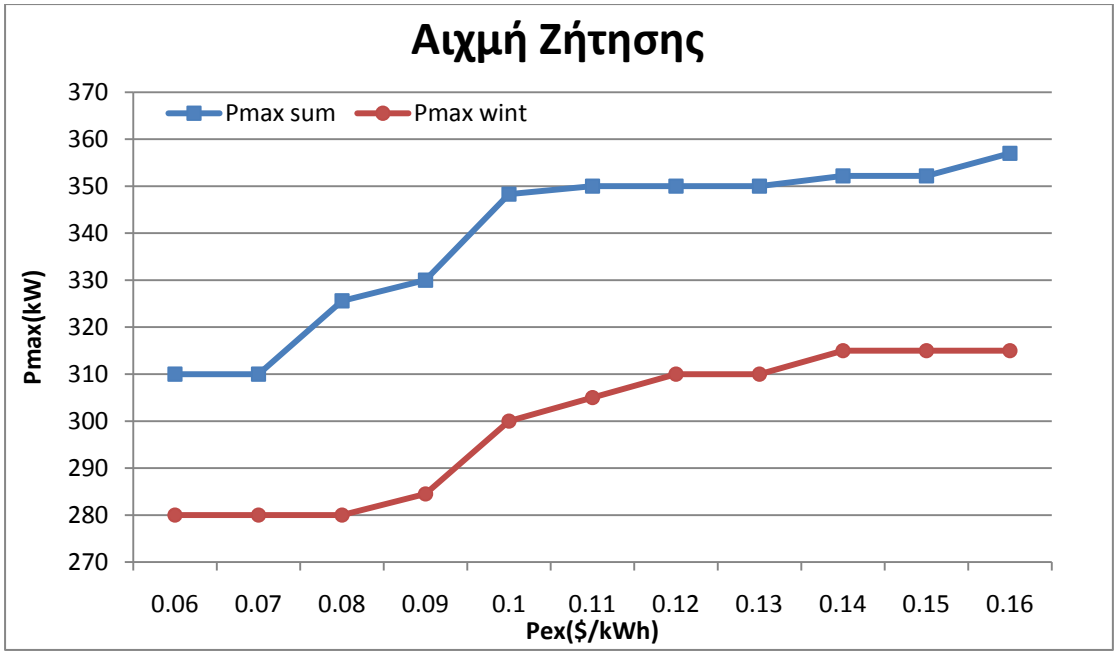


Εικόνα 4.9 Κέρδος εταιρίας ανάλογα με το προσυμφωνημένο Pex.



Εικόνα 4.10 Αριθμός οχημάτων για διαφορετικά Pex.

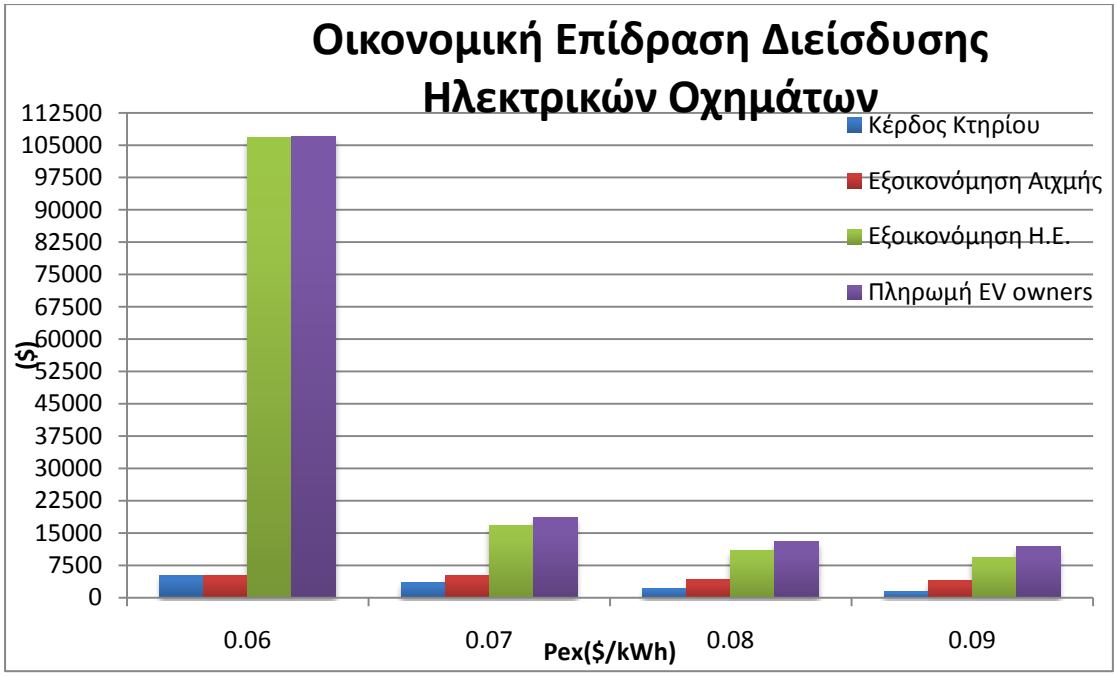
Η μείωση του αριθμού των ηλεκτρικών οχημάτων λόγω της αύξησης της τιμής αγοράς της αποθηκευμένης ενέργειας τους έχει αρνητική επίπτωση και στη μείωση της αιχμής όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.11. Χαμηλές τιμές για το κόστος αγοράς ενέργειας από τα ηλεκτρικά οχήματα συνεισφέρει στην αύξηση της διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων, εξετάζοντας την ζήτηση αποθηκευμένης ενέργειας από τη πλευρά του συστήματος διαχείρισης ενέργειας.



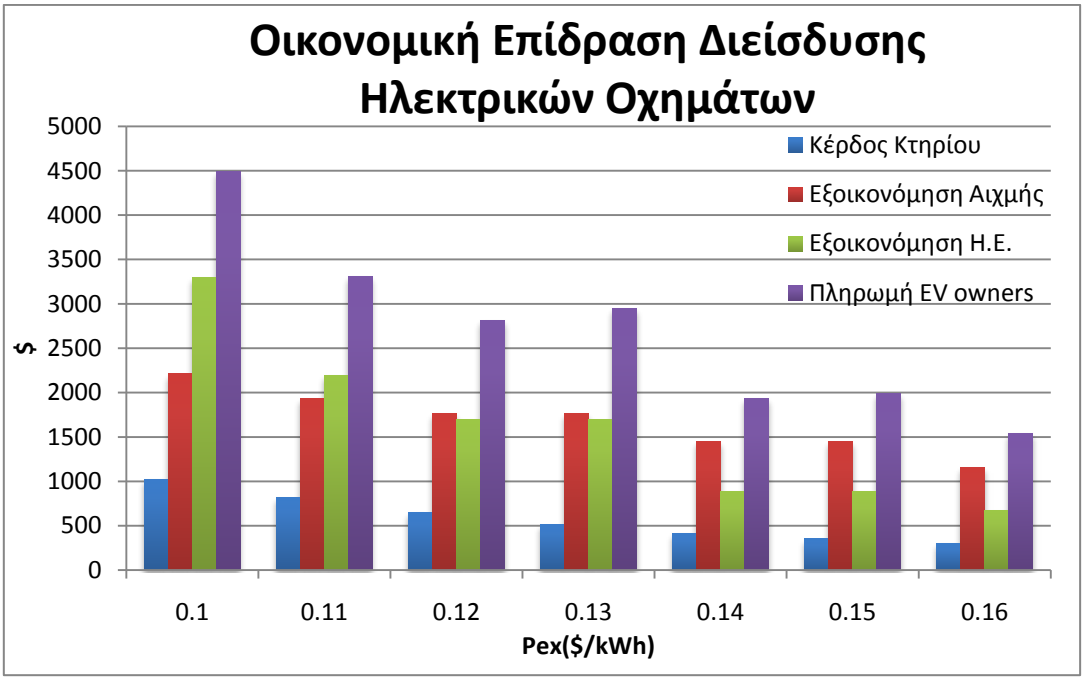
Εικόνα 4.11 Αιχμή ζητούμενης ισχύος χειμώνα και καλοκαίρι για διαφορετικά Pex.

Στις εικόνες 4.12(α) και 4.12(β) παρουσιάζεται συγκεντρωτικά η μεταβολή των σημαντικότερων αποτελεσμάτων της επίλυσης του προβλήματος. Το κέρδος από την εξοικονόμηση ενέργειας και το κέρδος από τη μείωση της αιχμής μειώνεται καθώς η τιμή αγοράς της αποθηκευμένης ενέργειας αυξάνεται, αφού η επένδυση σε ηλεκτρικά οχήματα και άρα η συνολική χωρητικότητα περιορίζεται. Συνοψίζοντας τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι το σύστημα διαχείρισης ενέργειας θα προσπαθήσει να συμπιέσει προς τα κάτω όσο το δυνατόν περισσότερο τις τιμές αγοράς από τα ηλεκτρικά οχήματα για να μεγιστοποιήσει το κέρδος του.

Η μεταβολή της τιμής αγοράς αποθηκευμένης ενέργειας από τα ηλεκτρικά οχήματα έχει αντίρροπη επίδραση συγκρίνοντας το κέρδος της εταιρείας με αυτό των ιδιοκτητών ηλεκτρικών οχημάτων όπως φαίνεται στις εικόνες 4.12 και 4.13. Οι δύο αυτές αντίρροπες πολιτικές θα πρέπει να εξισορροπήσουν σε μια τιμή Pex. Η αναζήτηση του σημείου ισορροπίας που να ικανοποιεί και τις δύο πλευρές αναλύεται σε επόμενη ενότητα.

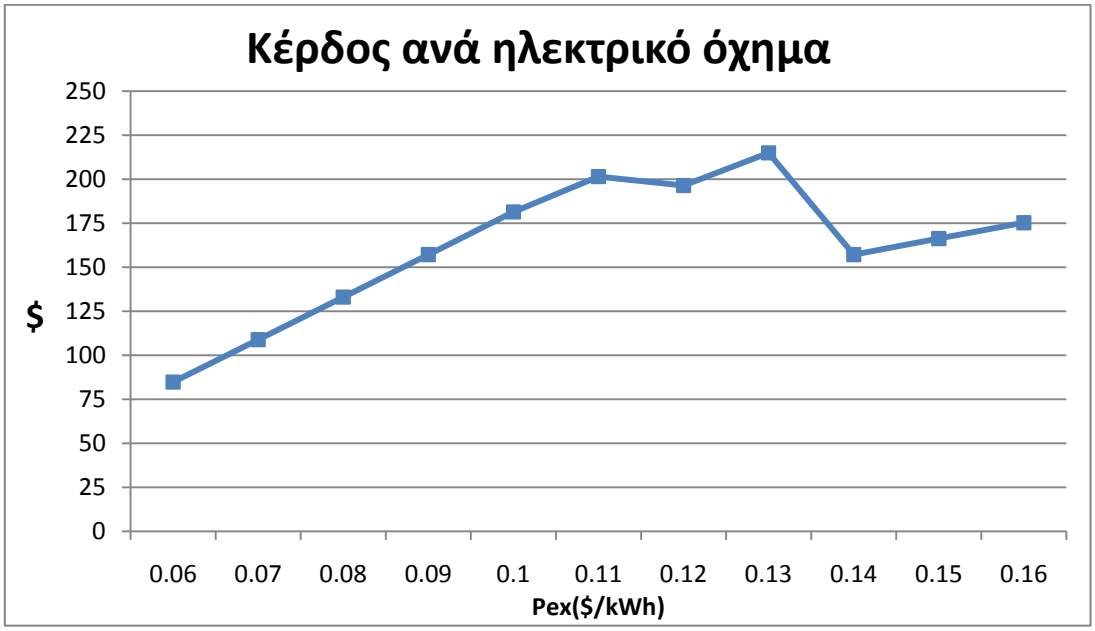


Εικόνα 4.12.α Ανάλυση επιμέρους συνιστωσών από τις οποίες προκύπτει το Κέρδος της εταιρίας, για Pex=0,06-0,09$/kWh,σε ραβδόγραμμα.



Εικόνα 4.12.β Ανάλυση επιμέρους συνιστωσών από τις οποίες προκύπτει το Κέρδος της εταιρείας, για Pex=0,06-0,09$/kWh,σε ραβδόγραμμα.

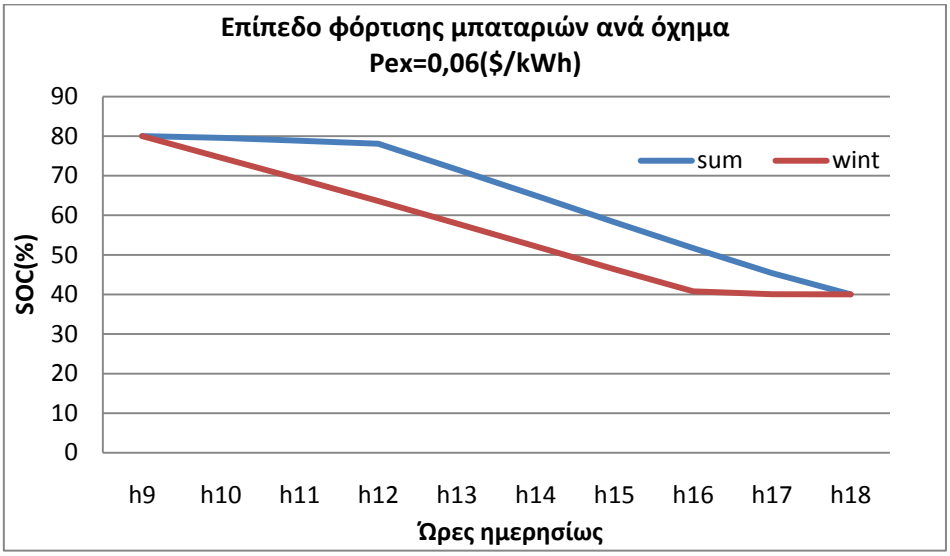
Αν παρατηρήσουμε το κέρδος ανά όχημα εν συναρτήσει της τιμής Pex (εικόνα 4.13) διαπιστώνουμε ότι η αύξηση της τιμής Pex όταν είναι σε χαμηλά επίπεδα (0,06-0,12$/kWh) αυξάνει γραμμικά το κέρδος των οχημάτων. Η μέγιστη τιμή κέρδους ανά όχημα παρατηρείται για Pex=0,13$/kWh όπου γίνεται 215$ το χρόνο. Για τιμές μεγαλύτερες του 0,11$/kWh το κέρδος των ηλεκτρικών οχημάτων δεν παρουσιάζει ομοιόμορφη μεταβολή. Οι αυξομειώσεις αυτές οφείλονται τόσο στη μεταβολή του αριθμού των οχημάτων όσο και στα επίπεδα φόρτισης των μπαταριών. Έχοντας αναλύσει τον αριθμό των οχημάτων στην εικόνα 4.10 είναι απαραίτητο να μελετήσουμε και τη συμπεριφορά της μπαταρίας ως προς τις μεταβολές του Pex.



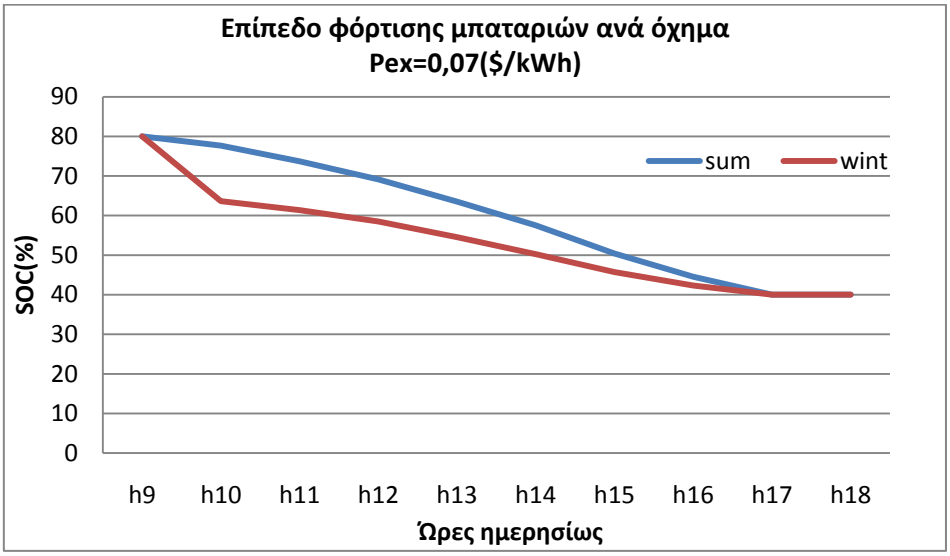
Εικόνα 4.13 Κέρδος ενός συνδεδεμένου οχήματος ανά προσυμφωνημένο Pex($/kWh).

Στα επόμενα διαγράμματα φαίνεται αναλυτικά το πως εκμεταλλεύεται κάθε ώρα το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου τις μπαταρίες των οχημάτων το χειμώνα και το καλοκαίρι για κάθε Pex(0,06-0,16$/kWh). Στον κάθετο άξονα έχει τοποθετηθεί το SOC(%), που δείχνει το ποσοστό της συνολικής στάθμης των συνδεδεμένων οχημάτων κάθε ώρα. Υπενθυμίζεται για την καλύτερη ανάγνωση των παρακάτω διαγραμμάτων ότι σύμφωνα με τη συμφωνία του συστήματος διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου και των EV owners τα αμάξια συνδέονται στις 9πμ.(h9) στο 80% της συνολικής χωρητικότητάς τους και αποσυνδέονται στις 6μμ.(h18) τουλάχιστον στο 40%. Επίσης κατά τη διάρκεια σύνδεσης το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου έχει το δικαίωμα να εκμεταλλεύεται τις μπαταρίες των οχημάτων όπως αυτό θεωρεί βέλτιστα αρκεί να μην υπερβαίνει το 90% της μέγιστης χωρητικότητας και να μην εκφορτίζει κάτω από 20% τις μπαταρίες.

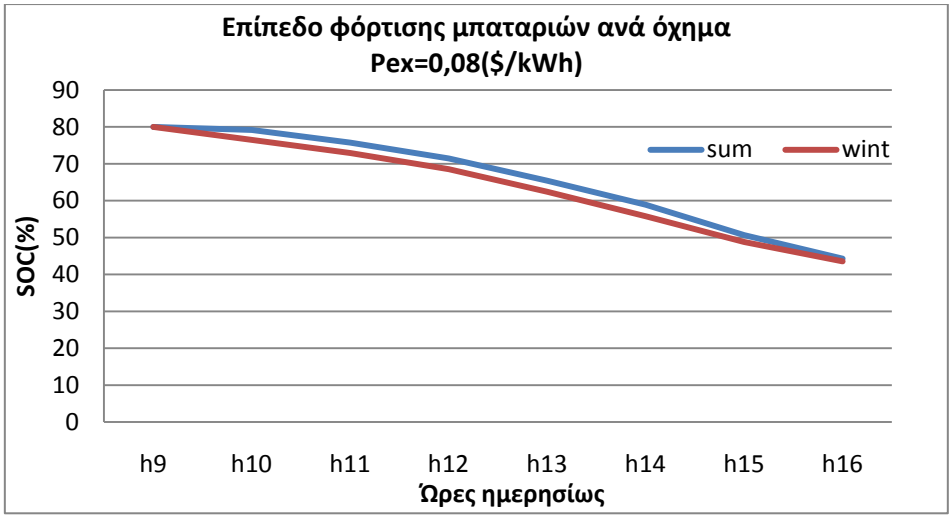
Για χαμηλές τιμές του Pex, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου χρησιμοποιεί την αποθηκευμένη ενέργεια των οχημάτων δίνοντας προτεραιότητα στις ώρες αιχμής. Όσο αυξάνεται η τιμή αγοράς της αποθηκευμένη ενέργειας και μειώνεται ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων η διαθέσιμη ενέργεια των μπαταριών, που είναι φραγμένη λόγω των περιορισμών SOCin και SOCout, δεν είναι πλέον επαρκής για να μειώσει των αιχμή στα επιθυμητά επίπεδα. Για να μπορέσει να εξασφαλίσει μεγαλύτερο κέρδος και να κάνει την επένδυση σε ηλεκτρικά οχήματα βιώσιμη το σύστημα διαχείρισης ενέργειας εκμεταλλεύεται τις χαμηλές τιμές αγοράς από το δίκτυο τις πρωινές ώρες και αποθηκεύει ενέργεια στις μπαταρίες των οχημάτων (βλέπε Pex= 0,11($/kWh)). Την ενέργεια αυτή την αξιοποιεί αργότερα που οι τιμές της αγοράς είναι υψηλότερες.



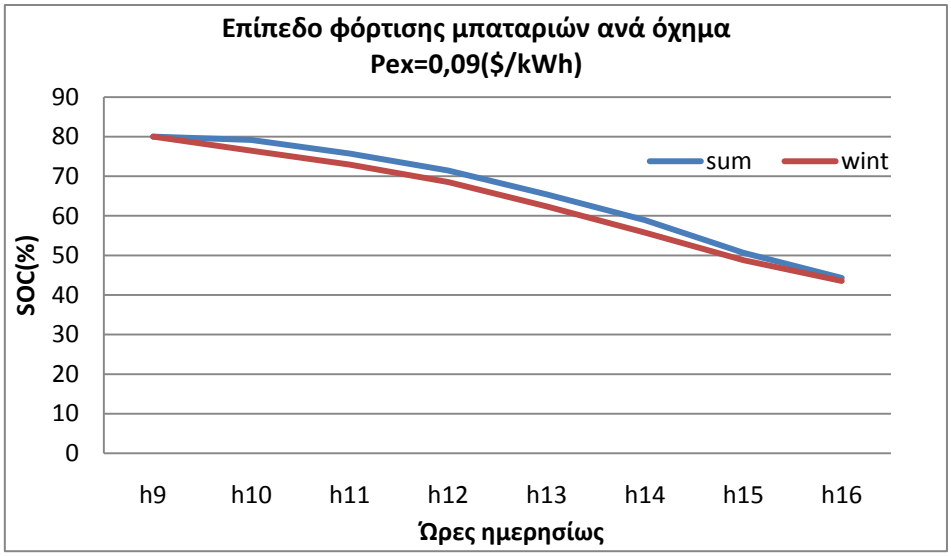
Εικόνα 4.14.α (Αριθμός οχημάτων:366EVs)



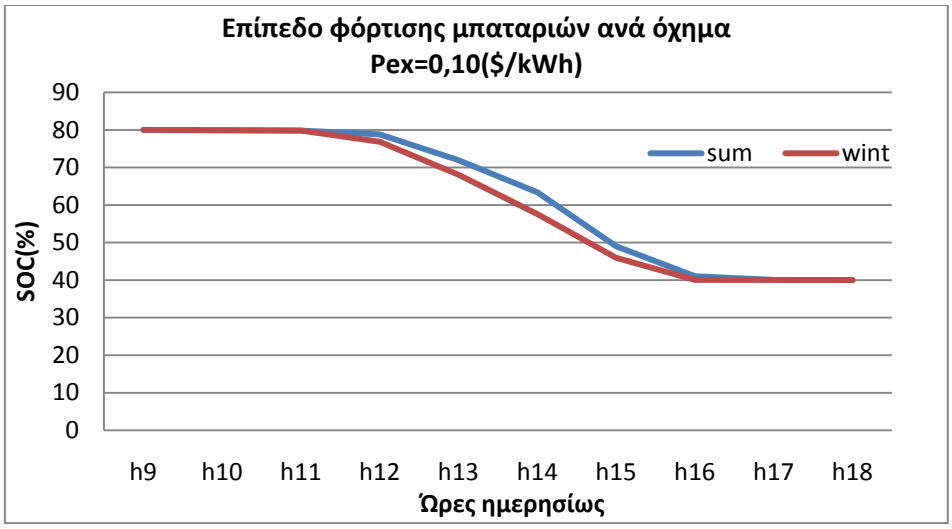
Εικόνα 4.14.β (Αριθμός οχημάτων:55EVs)



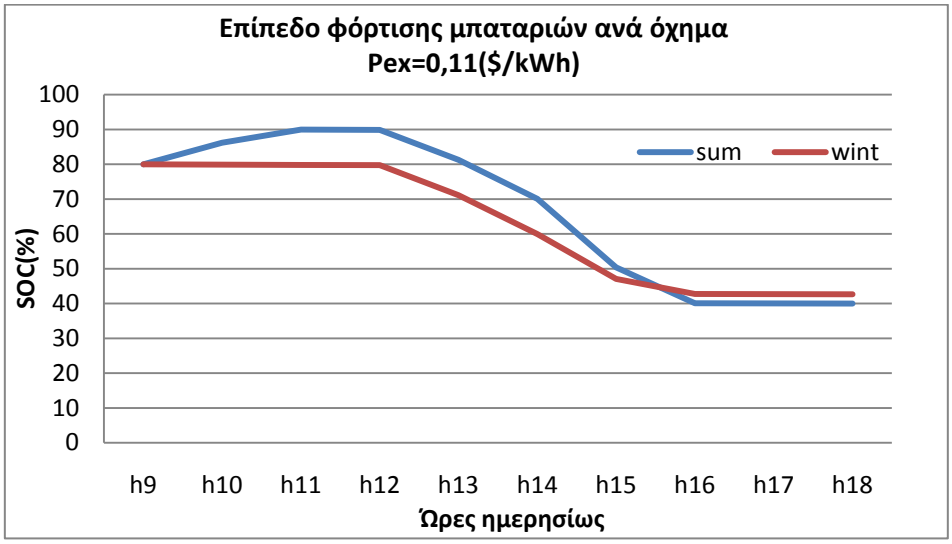
Εικόνα 4.14.γ (Αριθμός οχημάτων:38EVs)



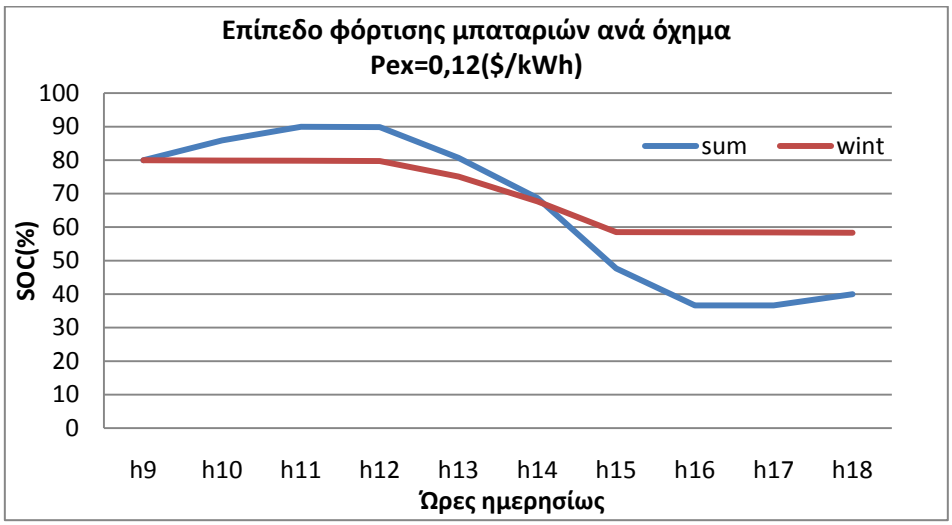
Εικόνα 4.14.δ (Αριθμός οχημάτων:32EVs)



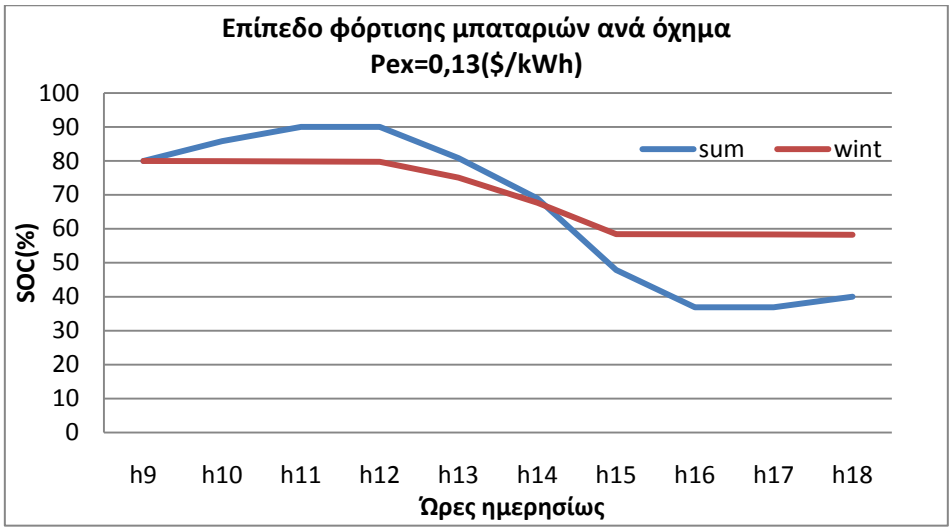
Εικόνα 4.14.ε (Αριθμός οχημάτων:11EVs)



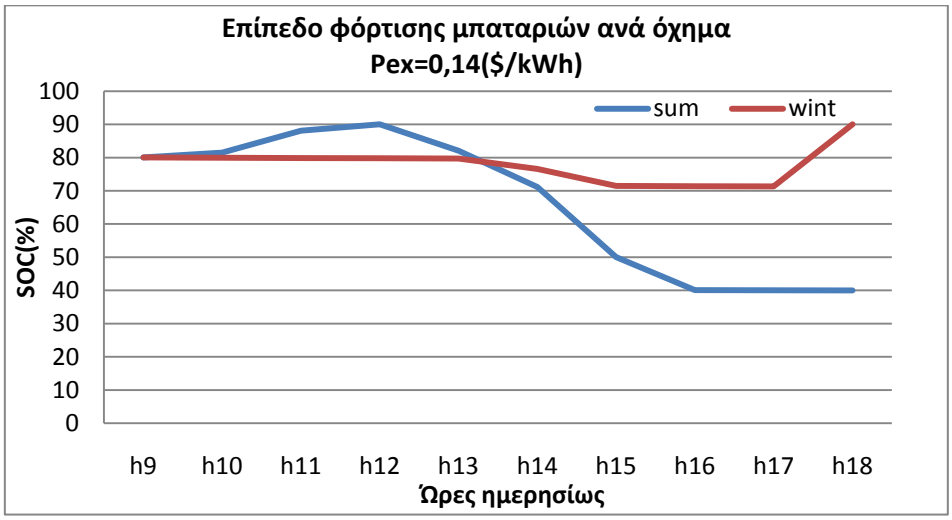
Εικόνα 4.14.στ (Αριθμός οχημάτων:8EVs)



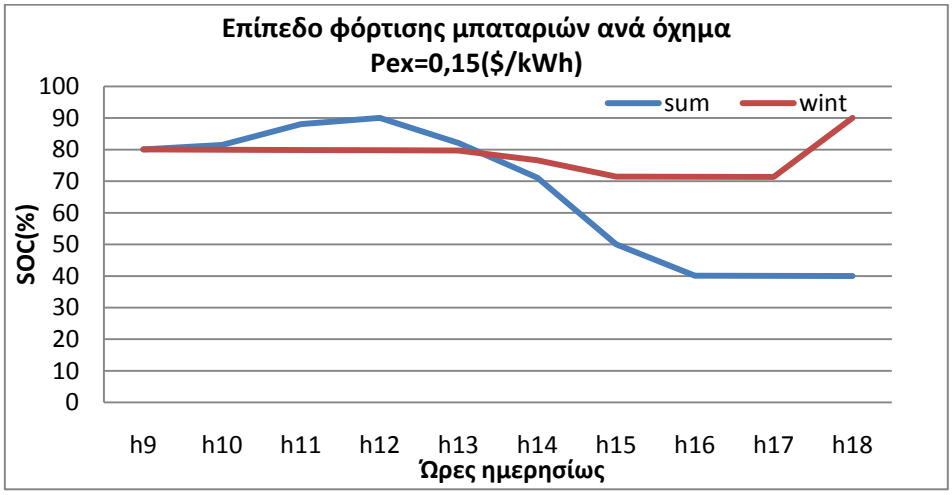
Εικόνα 4.14.ζ (Αριθμός οχημάτων:7EVs)



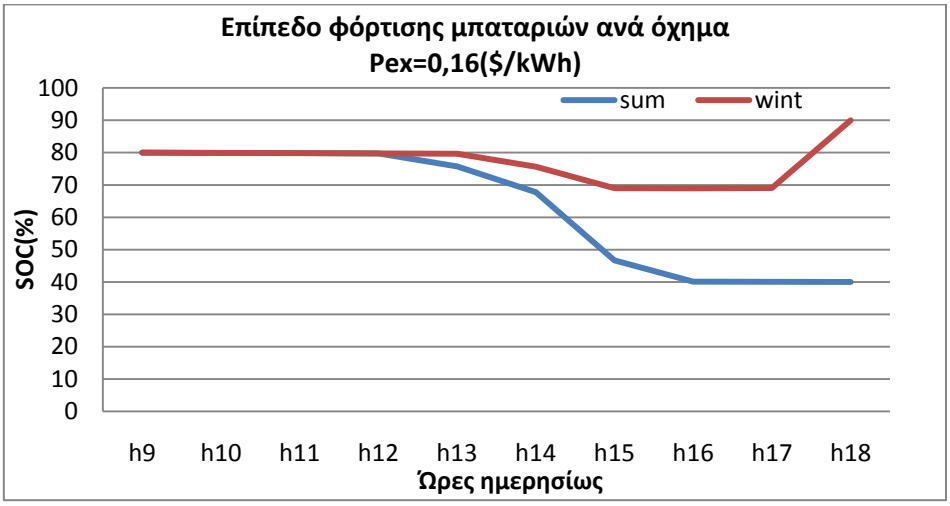
Εικόνα 4.14.η (Αριθμός οχημάτων:7EVs)



Εικόνα 4.14.θ (Αριθμός οχημάτων:6EVs)



Εικόνα 4.14.ι (Αριθμός οχημάτων:6EVs)



Εικόνα 4.14.ια (Αριθμός οχημάτων:5EVs)

Εικόνες 4.14.α-4.14ια. Διαγραμματική αναπαράσταση SOC(%) ανά ώρα σύνδεσης των οχημάτων, για Pex=0,06-0,16($/kWh).

Αναλυτικότερα, στα παραπάνω σχήματα μπορούμε να εντοπίσουμε δύο διαφορετικούς τρόπους χρησιμοποίησης των μπαταριών ανάλογα με το Pex. Το καλοκαίρι για Pex=0,06 μέχρι και 0,10$/kWh, επειδή η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από τα αυτοκίνητα είναι πολύ φθηνή σε σχέση με αυτή του δικτύου το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου προτιμά να επενδύει σε μεγάλο στόλο οχημάτων και μόνο να εκφορτίζει τις μπαταρίες των οχημάτων προς εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας και αιχμής. Ο κύριος λόγος που δεν παρατηρούμε φόρτιση των οχημάτων είναι ότι οποιαδήποτε φόρτιση θα αύξανε τη ζήτηση ενέργειας από το κεντρικό δίκτυο και θα είχε ως αποτέλεσμα και την αύξηση του Pmax, η βέλτιστη τιμή του οποίου είναι σε χαμηλά επίπεδα(εικόνα 4.11). Για Pex 0,11 μέχρι 0,15$/kWh εκμεταλλεύεται την mid-peak χρέωση του δικτύου μέχρι τις 12 το μεσημέρι, φορτίζοντας μέχρι το ανώτατο όριο (90%) τις μπαταρίες των οχημάτων με σκοπό να απορροφήσει ενέργεια από αυτές μετά τις 12 το μεσημέρι, όπου έχουμε on-peak χρέωση από το κεντρικό δίκτυο. Με αυτόν τον τρόπο εκμεταλλεύεται βέλτιστα το μικρότερο στόλο οχημάτων που έχει στη διάθεσή του κάνοντας peak-saving και εξοικονόμηση ενέργειας. Χαρακτηριστική περίπτωση είναι για Pex=0,12 και 0,13 όπου το σύστημα διαχείρισης ενέργειας αποφασίζει να εκφορτίσει τις μπαταρίες των οχημάτων μεταξύ 12μμ. και 5μμ. κάνοντας peak-saving και τις φορτίζει μεταξύ 5μμ. και 6μμ. για να τις φτάσει στο επιθυμητό όριο του 40%, εκμεταλλευόμενο τη χαμηλότερη ζήτηση από το κεντρικό δίκτυο στο διάστημα μεταξύ 5μμ. και 6μμ. Οπότε η συγκεκριμένη φόρτιση των οχημάτων δεν θα αυξήσει το Pmax. Η τιμή Pex=0,16$/kwh, αποτελεί και τη μέγιστη τιμή όπου το Pex εξισώνεται με τη μέγιστη τιμή δικτύου (on-peak χρέωση).

Επομένως, σύμφωνα με τα παραπάνω διαμορφώνονται δύο πολιτικές διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων από το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου ανάλογα με τα επίπεδα της τιμής αγοράς ενέργειας από τις μπαταρίες τους. Για χαμηλές τιμές Pex η πολιτική που ακολουθεί το σύστημα διαχείρισης ενέργειας είναι η επένδυση σε αριθμό οχημάτων ώστε να βελτιστοποιήσει την εξοικονόμηση λόγω μείωσης της αιχμής η οποία φτάνει στο κατώτατο όριο της για χειμώνα και καλοκαίρι. Αντίθετα, η αύξηση των τιμών Pex σε τιμές μεγαλύτερες από 0.10 ($/kWh) μετατρέπει την επένδυση σε ηλεκτρικά οχήματα μη οικονομικά βιώσιμη λύση. Μείωση όμως του αριθμού των οχημάτων συνεπάγεται τη μείωση της συνολικής διαθέσιμης χωρητικότητας μπαταριών περιορίζοντας τις δυνατότητες για βέλτιστη μείωση της αιχμής. Το γεγονός ότι η αιχμή δεν φτάνει το κατώτερο όριο δίνει τη δυνατότητα στο σύστημα διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου να αποθηκεύσει ενέργεια τις πρωινές ώρες, που οι τιμές είναι χαμηλότερες συγκρινόμενες με αυτές τις ώρες αιχμής και να αξιοποιήσει την ενέργεια σε επόμενες ώρες. Η μέγιστη ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί θα πρέπει αθροιζόμενη με την ωριαία ζήτηση να μην ξεπερνά τη νέα βελτιστοποιημένη μέγιστη ημερήσια αιχμή του κτιρίου.

Το χειμώνα η ανάγκη για peak-saving είναι χαμηλότερη αφού η αιχμή του φορτίου είναι στα 320kW και η μέγιστη τιμή που μπορεί να φτάσει χρησιμοποιώντας ηλεκτρικά οχήματα στα 280kW. Σε αντίθεση με το καλοκαίρι παρατηρείται και μία

τρίτη συμπεριφορά, καθώς για τιμές Pex μεγαλύτερες από 0,11$/kWh το σύστημα ενεργειακής διαχείρισης του κτιρίου αποφασίζει το SOCout των αυτοκινήτων όταν είναι να φύγουν να είναι μεγαλύτερο του 40%,αφού δεν το συμφέρει να απορροφήσει τη μέγιστη δυνατή ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας από τις μπαταρίες των ηλεκτρικών οχημάτων. Επίσης το χειμώνα δεν παρατηρείται καθόλου φόρτιση των μπαταριών. Η συμπεριφορά του EMS που παρατηρούμε μπορεί να συνοψιστεί σε δύο περιοχές:

1. Pex=0,06-0,10($/kWh),επένδυση σε μεγάλο στόλο οχημάτων και μόνο εκφόρτιση (υψηλό peak-saving).
2. Pex=0,11$/kWh οριακή τιμή(ίση με μέγιστη τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το κεντρικό δίκτυο) πέραν της οποίας το σύστημα διαχείρισης ενέργειας επενδύει σε μικρότερο στόλο οχημάτων, ενώ για τιμές άνω του 0,14$/kWh πουλά ενέργεια στους EV owners(χαμηλότερο peak-saving).

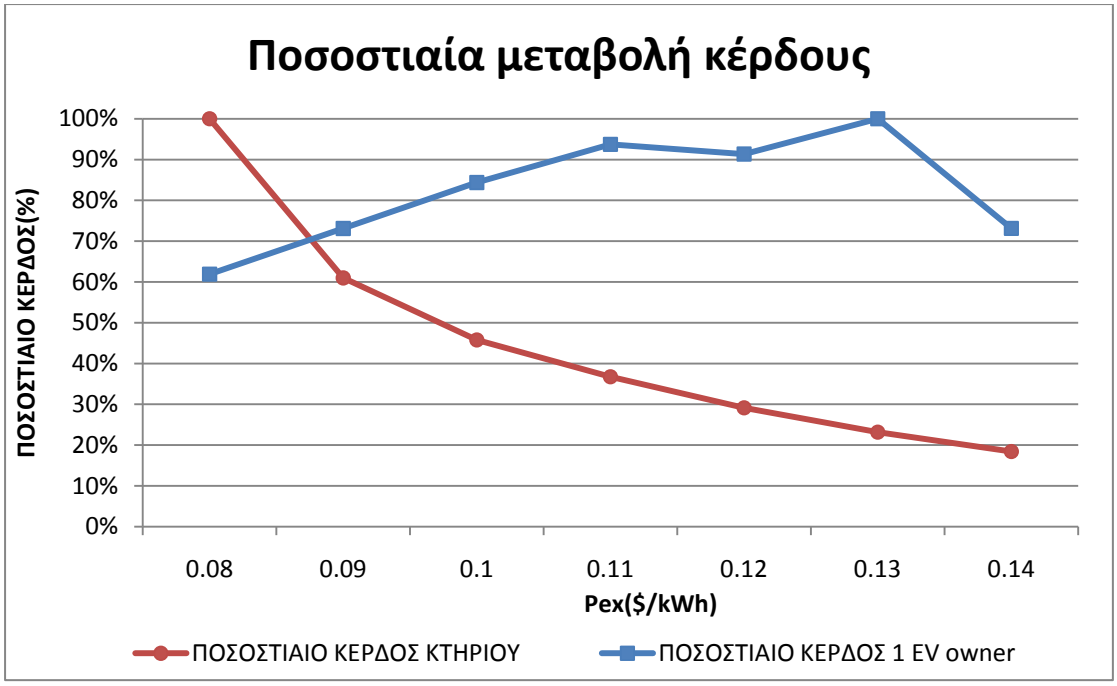
4.5 ΕΥΡΕΣΗ ΣΗΜΕΙΟΥ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ Pex($/kWh)

4.5.1 Υπολογισμός σημείου ισορροπίας (Pex)

Στη προηγούμενη ενότητα μελετήσαμε την μεταβολή του κέρδους της εταιρείας και του ιδιοκτήτη ενός ηλεκτρικού οχήματος όταν μεταβάλλεται η τιμή ανταλλαγής ενέργειας από και προς τα οχήματα. Τα συμφέροντα των δύο αυτών πλευρών είναι αναμενόμενο να είναι συγκρουόμενα. Αύξηση του κέρδος του ενός προκαλεί μείωση του κέρδους του άλλου. Χαμηλές τιμές Pex ευνοούν το κέρδος της εταιρείας ενώ αντίθετα υψηλές τιμές Pex μεγιστοποιούν το κέρδος του ιδιοκτήτη ηλεκτρικών οχημάτων.

Στην ενότητα αυτή θα μελετήσουμε την ύπαρξη ενός σημείου ισορροπίας που να ικανοποιεί και τις δύο πλευρές ταυτόχρονα με τον ίδιο ακριβώς τρόπο. Το σημείο αυτό ισορροπίας ορίζεται ως το σημείο στο οποίο το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου καθώς και ο ιδιοκτήτης ηλεκτρικού οχήματος επιτυγχάνουν το ίδιο ποσοστό κέρδους ως προς το μέγιστο κέρδος που μπορεί να επιτευχθεί από τον καθένα ξεχωριστά. Το πεδίο τιμών του Pex στο οποίο μελετήθηκε η εύρεση του σημείου ισορροπίας είναι 0,08$/kWh έως και 0,14$/kWh. Οι ακραίες τιμές 0.06-0.08$/kWh δεν εξετάζονται γιατί δεν έχουν πρακτική αξία για τον ιδιοκτήτη ενός οχήματος όπως αντίστοιχα και οι τιμές 0.15-0.16$/kWh δεν έχουν πρακτική αξία για το διαχειριστή του κτιρίου. Το κέρδος τους στις ακραίες περιπτώσεις είναι ελάχιστο και πρακτικά μη βιώσιμες λύσεις.

Στο διάστημα που εξετάζουμε το μέγιστο κέρδος της εταιρίας είναι 2237,9$ για Pex=0,08$/kWh,ενώ αυτό των EV owners 201,5$ για Pex=0,11$/kWh. Έτσι διαιρώντας όλα τα επιμέρους κέρδη (για όλα τα Pex από 0,08 έως και 0,14$/kWh) με το μέγιστο προαναφερθέν κέρδος και κάνοντας διαγραμματική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων βρίσκουμε το σημείο στο οποίο τα δύο κέρδη (του κτιρίου και των EV owners) έχουν το ίδιο ποσοστιαίο κέρδος. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο επόμενο σχήμα (εικόνα 4.15). Το κοινά αποδεκτό Pex είναι 0,0876$/kWh ,όπου το ποσοστιαίο κέρδος του ιδιοκτήτη ηλεκτρικού οχήματος και αυτό του κτιρίου είναι στο 70,24% του μέγιστου δυνατού.



Εικόνα 4.14 Ποσοστιαίο κέρδος κτιρίου και 1EV owner για κάθε Pex ($/kWh).

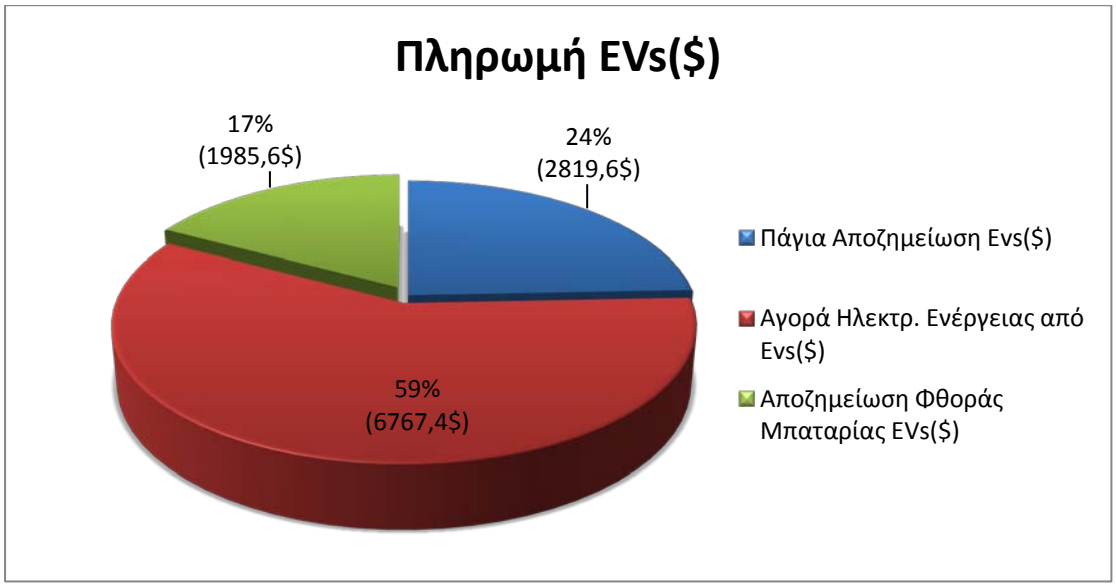
4.5.2 Ανάλυση της λειτουργίας του συστήματος στο σημείο ισορροπίας

Προσομοιώνοντας το μοντέλο που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3 με Pex=0,0876$/kWh θα μελετήσουμε πως διαμορφώνεται το κέρδος και για τις δύο πλευρές, ποια είναι η συμπεριφορά του συστήματος όσον αφορά την εξοικονόμηση ενέργειας/ισχύος καθώς και ποια είναι τα επίπεδα φόρτισης των μπαταριών. Στον επόμενο πίνακα (Πίνακας4.1) παρουσιάζεται το κέρδος του κτιρίου και πως αυτό προκύπτει από τις επιμέρους συνιστώσες αντιπαραθέτοντας την αρχική κατάσταση, όπου δεν υπάρχει επένδυση σε ηλεκτρικά οχήματα και την τελική βέλτιστη κατάσταση.

Πίνακας4.1 Κέρδος εταιρείας για το σημείο ισορροπίας Pex=0,0876$/kWh.

	Αρχική Κατάσταση (χωρίς ηλεκτρικά οχήματα)	Σημείο ισορροπίας (ηλεκτρικά οχήματα)	Κέρδος
Χρέωση Ισχύος ($)	*34043,5*	*30166,6*	*3876,9*
Αγορά Ηλεκτρ. Ενέργειας($)	*247053,6*	*237813,7*	*9239,9*
Πληρωμή Evs($)	*0*	*11572,6*	*11572,6*
Σύνολο($)	***281097,1***	***279552,9***	***1544,2***

Παρατηρούμε ότι στο σημείο ισορροπίας το συνολικό κέρδος του κτιρίου προκύπτει 1544,2$(μειώνοντας κατά 5,49 ‰ το συνολικό κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας του κτιρίου) και για να επιτευχθεί ο το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου επενδύει σε 32 οχήματα (NEVs) πληρώνοντάς τους το συνολικό ποσό των 11572,6$. Στο επόμενο διάγραμμα (εικόνα 4.16) φαίνονται αναλυτικά οι επιμέρους συνιστώσες από τις οποίες προκύπτει το κόστος πληρωμής των EVs.

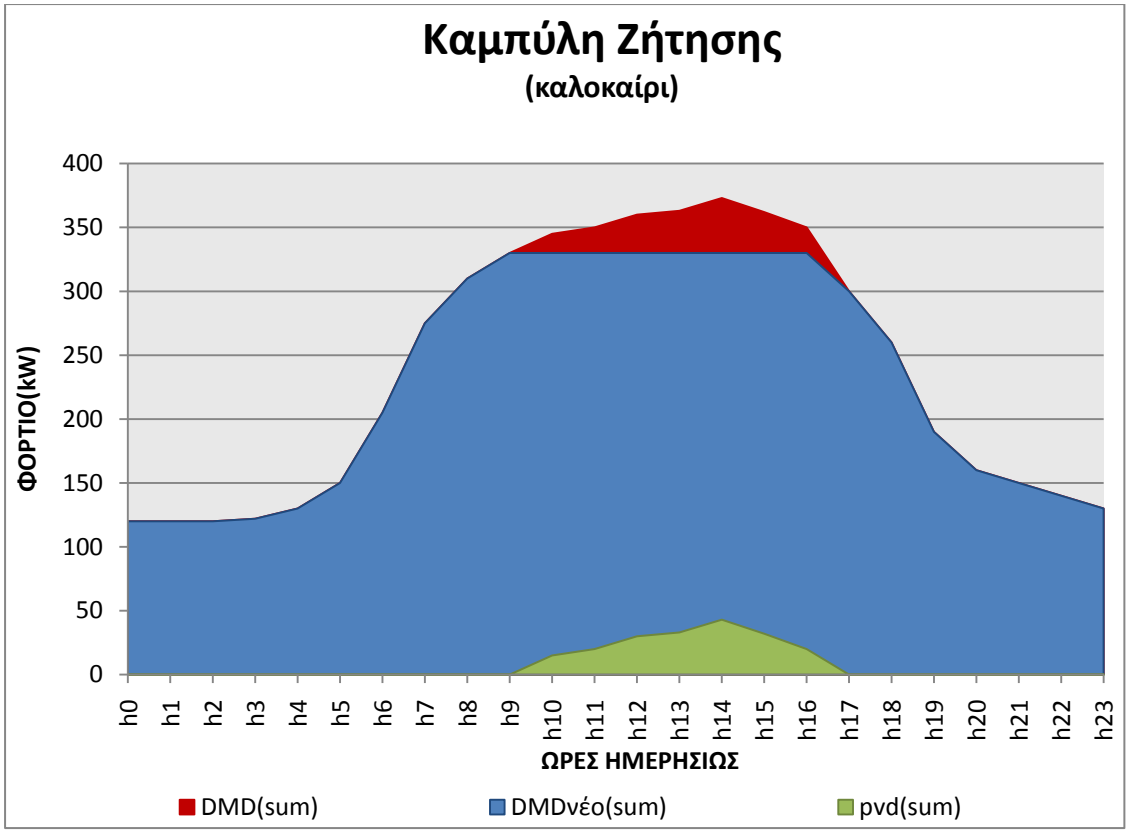


Εικόνα 4.16 Ανάλυση επιμέρους συνιστωσών από τις οποίες προκύπτει το κόστος πληρωμής των EVs.

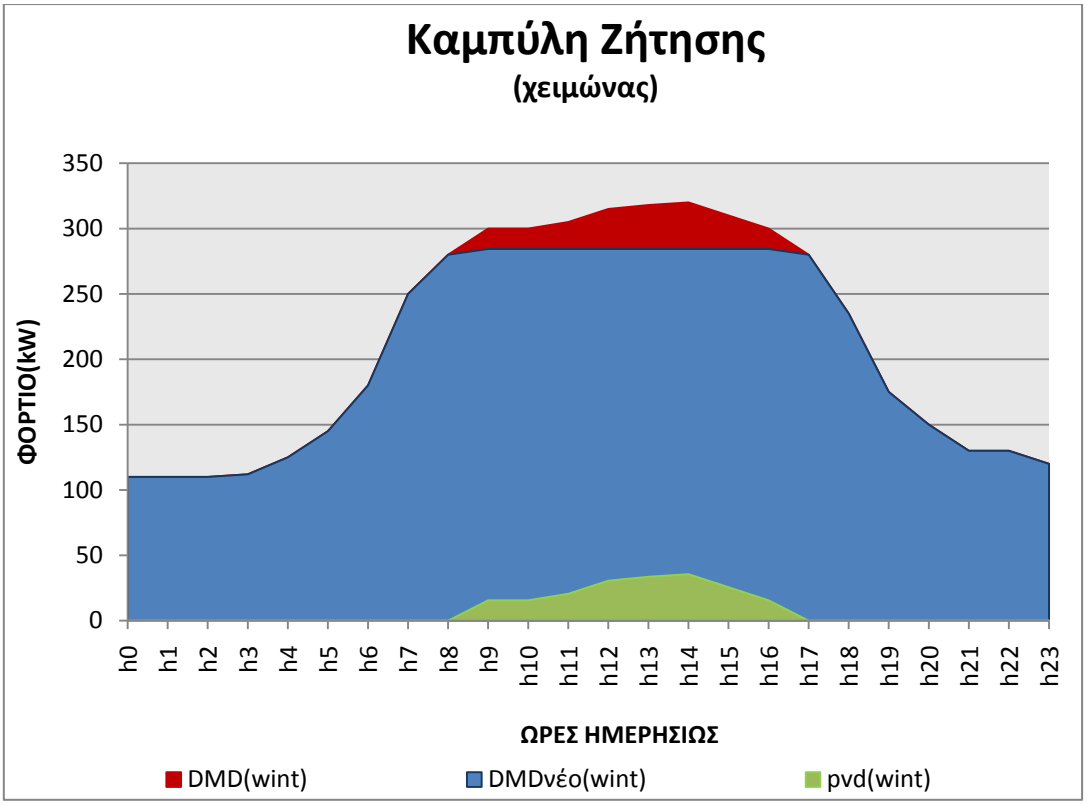
Η αποζημίωση φθοράς της μπαταρίας των οχημάτων κατέχει το μικρότερο μερίδιο, μόλις το 17%. Ωστόσο είναι πολύ σημαντική συνιστώσα γιατί η φθορά της μπαταρίας από την επιπρόσθετης χρήση τους είναι ανασταλτικός παράγοντας για τη συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στην εξοικονόμηση ενέργειας, δεδομένου του υψηλού κόστους των μπαταριών σήμερα. Τα πάγια της αποζημίωσης είναι 2819,6$ και το 24% του συνολικού κόστους. Η παράμετρος αυτή εκφράζει τα κίνητρα από τη πλευρά του συστήματος διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου προς του ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων για να συνδέονται στο δίκτυο και να αξιοποιείται η αποθηκευμένη ισχύς των μπαταριών. Δηλαδή αποτελεί το κόστος ισχύος των μπαταριών. Το μεγαλύτερο ποσοστό της πληρωμής των ιδιοκτητών ηλεκτρικών οχημάτων αποτελεί η μεταφερόμενη ενέργεια από τις μπαταρίες στο κτίριο. Το ποσοστό αυτό ανέρχεται στο 59% της συνολικής πληρωμής των ιδιοκτητών. Το κέρδος αυτό των ιδιοκτητών αυξάνεται όσο αυξάνεται και η ποσότητα της ενέργειας που μεταφέρεται από τις μπαταρίες στο κτίριο. Επομένως, η δυνατότητα βαθύτερης εκφόρτισης των μπαταριών (deep discharge) όπως καθορίζεται από τον ιδιοκτήτη οχημάτων, μέσω του SOCin και SOCout μεγιστοποιεί το κέρδος από την πώληση ενέργειας. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της ορθολογικής χρήσης του ηλεκτρικού οχήματος (εξοικονόμηση ενέργειας κατά τη μεταφορά από το σπίτι στη δουλειά- μεγαλύτερο SOCin) αλλά και την ορθή εκτίμηση των αναγκών για τη μετακίνηση του οχήματος κατά την αποσύνδεση (SOCout).

Το κέρδος των ιδιοκτητών από την πώληση ενέργειας (6767,4$) δεν είναι καθαρό. Θα πρέπει να αφαιρεθεί το κόστος επαναφόρτισης του συγκεκριμένου ποσοστού εκφόρτισης των μπαταριών. Η φόρτιση γίνεται το βράδυ με νυχτερινή τιμολόγηση (0,06$/kWh). Επομένως, το καθαρό κέρδος από την εκφόρτιση των μπαταριών θα είναι ίσο με την ποσότητα ενέργειας που διατίθεται επί την διαφορά τιμολόγησης (Pex- 0,06$/kWh). Πιο συγκεκριμένα το ποσό από την πώληση της αποθηκευμένης ενέργειας είναι ίσο με 2026,2$. Το κέρδος αυτό είναι το συνολικό κέρδος όλων των ιδιοκτητών. Αναλογιζόμενοι τον αριθμό των οχημάτων, τότε το κέρδος από την πώληση ενέργειας είναι 151,2$ ανά όχημα.

Στην παρούσα προσομοίωση η αιχμή ζητούμενης ισχύος ανέρχεται σε 330,05kW το καλοκαίρι (από 373kW που ήταν αρχικά χωρίς επένδυση σε EVs) και σε 284,4kW το χειμώνα (από 320kW). Στα επόμενα δύο διαγράμματα παρουσιάζονται η αρχική και η τελική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από το κεντρικό δίκτυο για το καλοκαίρι και το χειμώνα και πως η χρησιμοποίηση των ηλεκτρικών οχημάτων συμβάλει τόσο στη μείωση της αιχμής ζητούμενης ισχύος όσο και στην εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας.

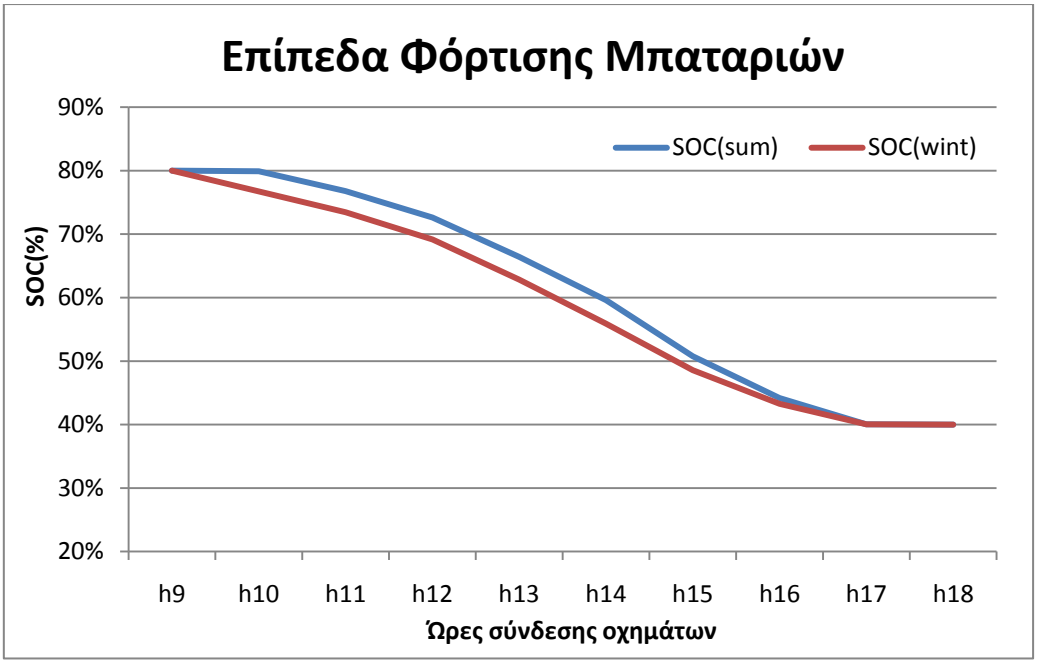


Εικόνα 4.17 Ζητούμενο φορτίο πριν και μετά την επένδυση σε ηλεκτρικά οχήματα και αποφόρτιση EVs το καλοκαίρι.(Αιχμή ζητούμενης ισχύος 330,05kW/Μείωση ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας 193kWh ημερησίως).



Εικόνα 4.18 Ζητούμενο φορτίο πριν και μετά την επένδυση σε ηλεκτρικά οχήματα και αποφόρτιση EVs το χειμώνα.(Αιχμή ζητούμενης ισχύος 284,4kW/Μείωση ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας 192,8kWh ημερησίως).

Αναλυτικά ο τρόπος με τον οποίο χρησιμοποιεί το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου τις μπαταρίες των ηλεκτρικών οχημάτων το χειμώνα και το καλοκαίρι φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα όπου παρουσιάζεται η στάθμη της μπαταρίας τους ως ποσοστό της συνολικής τους χωρητικότητας (%SOC) κατά το 9ωρο, στο οποίο παραμένουν συνδεδεμένα στο δίκτυο του κτιρίου.



Εικόνα 4.15 Διαγραμματική αναπαράσταση του SOC(%) ανά ώρα σύνδεσης των οχημάτων, για Pex=0,0876 $/kWh (NEVs=32,C=512kWh).

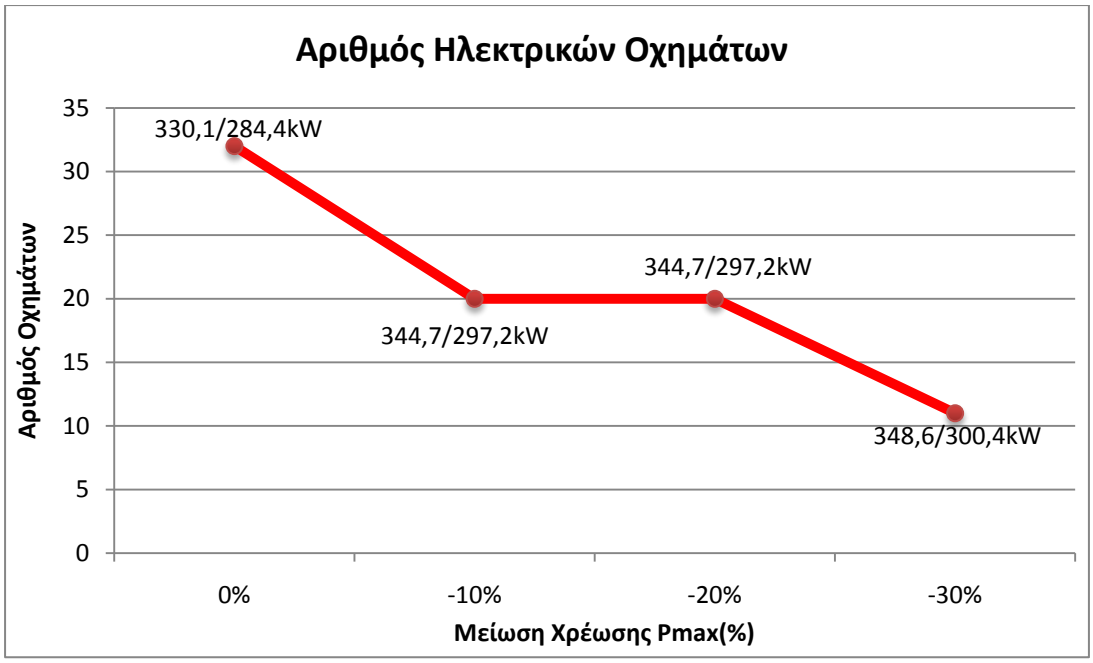
Όπως παρατηρούμε το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου εκφορτίζει γραμμικά τις μπαταρίες των ηλεκτρικών οχημάτων. Συγκεκριμένα το καλοκαίρι η εκφόρτιση ξεκινά στις 10πμ., αφού στο διάστημα μεταξύ 9πμ. και 10πμ. το φορτίο είναι ακόμα σε χαμηλά επίπεδα και δεν υπάρχει κίνητρο μείωσής του περαιτέρω. Ειδικά μετά τις 12 το μεσημέρι ο ρυθμός εκφόρτισης γίνεται πιο έντονος και κορυφώνεται μεταξύ 1μμ. και 3μμ., καθώς η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνει. Τέλος στο διάστημα μεταξύ 5μμ. και 6μμ. το EMS δεν παρατηρείται μεταβολή στη στάθμη των μπαταριών των οχημάτων, καθώς η ζήτηση φορτίου είναι χαμηλή και το EMS 'διώχνει' τα ηλεκτρικά οχήματα στις 6μμ. στο όριο του 40%. Ανάλογη συμπεριφορά παρατηρούμε και το χειμώνα, με μόνη διαφορά ότι η εκφόρτιση των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων ξεκινάει από την ώρα σύνδεσής τους στο δίκτυο του κτιρίου στις 9πμ.

4.5.3 Ανάλυση ως προς την τιμή χρέωσης αιχμής ζητούμενης ισχύος

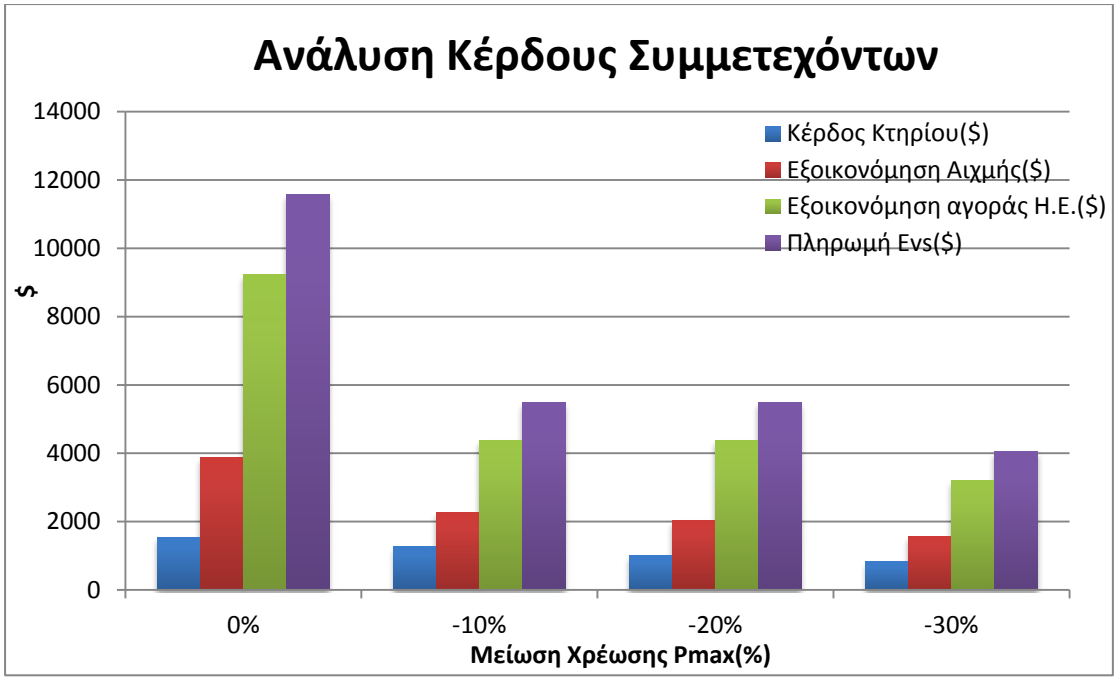
Στη παρούσα ενότητα θα μελετήσουμε την επίδραση της τιμολόγησης της αιχμής τόσο στο κέρδος του ιδιοκτήτη όσο και στο κέρδος των ιδιοκτητών ηλεκτρικών οχημάτων. Για το σκοπό αυτό προσομοιώθηκε το μοντέλο των εξισώσεων 3.1-3.13 για το σημείο ισορροπίας (Pex=0,0876$/kWh), ενώ η τιμή χρέωσης της ισχύος μεταβάλλεται από 0 - 30% της αρχικής τιμής.

Στην εικόνα 4.20 παρατηρούμε πως επηρεάζεται ο αριθμός των οχημάτων που επιλέγει το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου λόγω μείωσης της αιχμής

χρέωσης. Μείωση της αιχμής χρέωσης αποτελεί τροχοπέδη στη διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων. Αυτό συμβαίνει γιατί το κόστος αγοράς της ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων καλύπτεται από το κέρδος λόγω μείωσης του κόστους ισχύος από το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου. Μείωση του κέρδους αυτού κάνει αντιοικονομική την επένδυση σε οχήματα. Αυτό έχει άμεση επίπτωση στο κέρδος του κτιρίου το οποίο μειώνεται αισθητά σε κάθε βήμα μείωσης της αιχμής (εικόνα 4.21). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το σενάριο όπου μειώνεται η χρέωση της αιχμής 10% και 20%, ενώ το σύστημα διαχείρισης του κτιρίου επενδύει στον ίδιο αριθμό οχημάτων το κέρδος του μειώνεται από 1272,5$ σε 1021,2$. Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι για μείωση της αιχμής πάνω από 33%, που αντιστοιχεί σε 6,88$/kW το καλοκαίρι και 3,86$/kW το χειμώνα το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου δεν επενδύει σε οχήματα, καθώς οι τιμές χρέωσης της αιχμής είναι πολύ χαμηλές και δεν δημιουργούν κίνητρο επένδυσης.



Εικόνα 4.16 Ανάλυση ευαισθησίας στην τιμή χρέωσης της ζητούμενης ισχύος και παρουσίαση του αριθμού επένδυσης σε οχήματα και της εκάστοτε αιχμής ζήτησης ισχύος.



Εικόνα 4.17 Ανάλυση ευαισθησίας στην τιμή χρέωσης της ζητούμενης ισχύος και παρουσίαση των επιμέρους συνιστωσών από τις οποίες προκύπτει το κέρδος της επιχείρησης σε ραβδόγραμμα.

4.6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ SOC

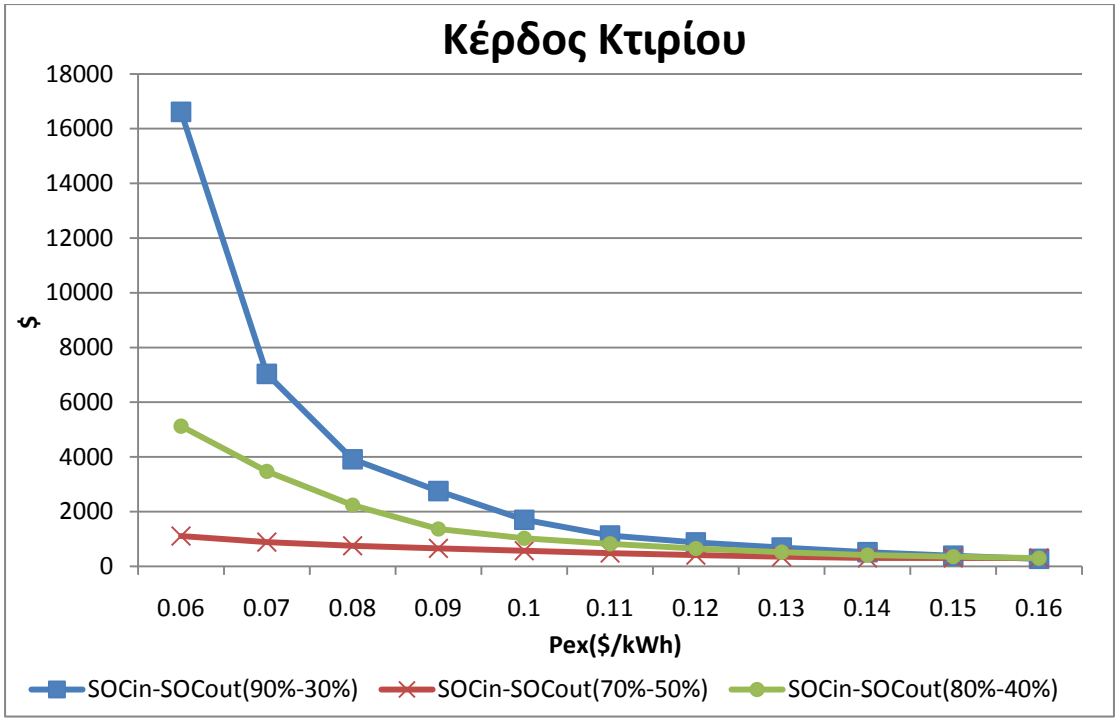
Στην ενότητα αυτή θα μελετήσουμε την επίδραση που έχει η μεταβολή του προσυμφωνημένου SOCin(%) και SOCout(%) στο κέρδος τόσο του κτιρίου όσο και στο κέρδος των ιδιοκτητών των ηλεκτρικών οχημάτων. Για το σκοπό αυτό προσομοιώσαμε το μοντέλο των εξισώσεων 3.1-3.13 για διαφορετικά επίπεδα βαθειάς εκφόρτισης (deep discharge) των μπαταριών. Το βάθος εκφόρτισης των μπαταριών εξαρτάται από το προφίλ οδήγησης των ιδιοκτητών ηλεκτρικών οχημάτων και τη διανυόμενη απόσταση που πρέπει να καλύψουν καθημερινώς. Μικρό/Μεγάλο βάθος εκφόρτισης μεταφράζεται σε αυξημένες/μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις για μετακίνηση του ηλεκτρικού οχήματος.

Για το λόγο αυτό εκτός από το βασικό σενάριο όπου τα οχήματα συνδέονται στο 80% και αποσυνδέονται στο 40% της συνολικής χωρητικότητάς τους, προσομοιώθηκε το μοντέλο για δύο σενάρια σύνδεσης των οχημάτων:

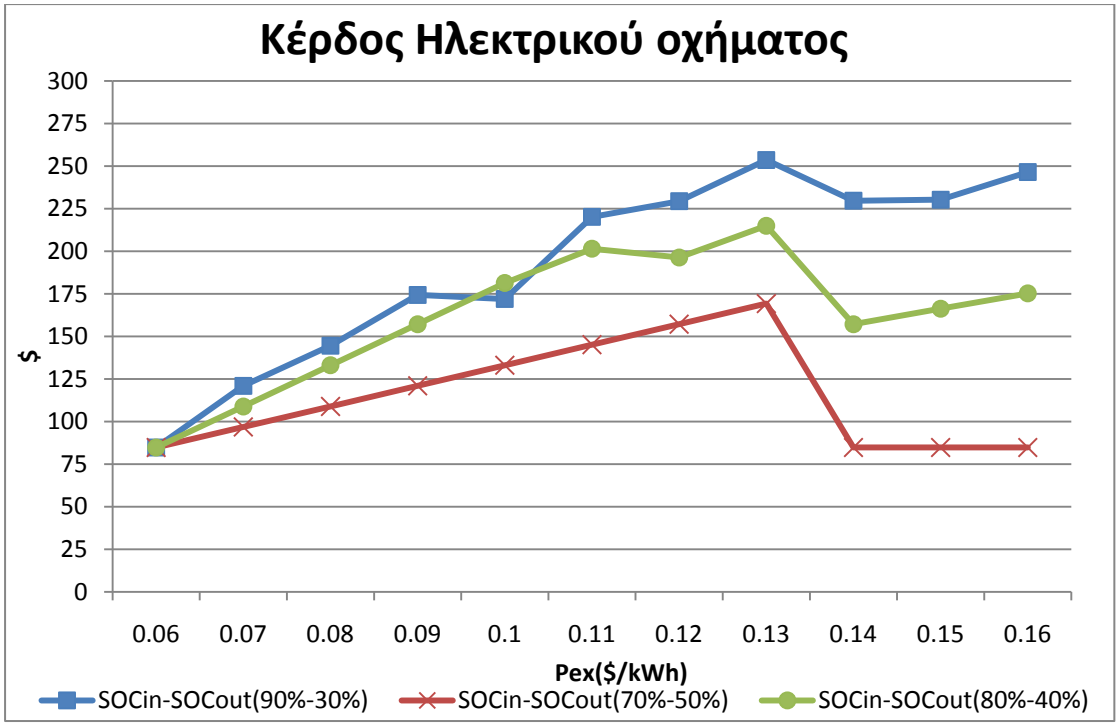
I. SOCin 90% και SOCout 30% για οχήματα που διανύουν μικρές αποστάσεις και οι ενεργειακές απαιτήσεις μετακίνησης είναι μειωμένες
II. SOCin 70% και SOCout 50% για οχήματα που διανύουν μεγάλες αποστάσεις και οι ενεργειακές απαιτήσεις μετακίνησης είναι αυξημένες.

Στο σημείο αυτό πρέπει να υπενθυμίσουμε ότι η μέση καταναλισκόμενη ενέργεια που απαιτείται από ένα μέσο ηλεκτρικό όχημα είναι 0,16kWh/km. Άρα στο σενάριο SOCin/SOCout(90% / 30%),οχήματα παρέχουν τη δυνατότητα μετακίνησης 20km συνολικά ενώ στο σενάριο SOCin/SOCout (70% / 50%) η δυνατότητα μετακίνησης είναι συνολικά 60km.

Στα επόμενα δύο διαγράμματα (4.22, 4.23) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για κάθε σενάριο. Οι προσομοιώσεις έχουν πραγματοποιηθεί για διαφορετικές τιμές αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από τις μπαταρίες. Η δυνατότητα βαθύτερης εκφόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων αυξάνει τη διαθέσιμη ισχύ που μπορεί να αξιοποιήσει το σύστημα διαχείρισης του κτιρίου. Κατάλληλη χρήση αυτής της διαθέσιμης ισχύος, όπως παρουσιάστηκε στις προηγούμενες ενότητες, αυξάνει το κέρδος του κτιρίου (εικόνα 4.22). Όταν η τιμή αγοράς ενέργειας από ηλεκτρικά οχήματα είναι χαμηλή η απόκλιση κέρδους μεταξύ των τριών σεναρίων εκφόρτισης είναι μεγάλη. Αυτό συμβαίνει γιατί το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου πρέπει να επενδύσει σε μεγαλύτερο στόλο οχημάτων λόγω μείωσης της διαθέσιμης ισχύος που δίνουν τα ηλεκτρικά οχήματα και μειώνει συνεπακόλουθα το κέρδος του κτιρίου. Όσο αυξάνεται η τιμή αγοράς τότε η απόκλιση στα περιθώρια κέρδους είναι μικρότερη, ενώ για μεγάλες τιμές (κοντά στη τιμή αγοράς από το δίκτυο) το κέρδος και των τριών σεναρίων είναι σχεδόν ίδιο. Για ακραίες τιμές αγοράς ενέργειας από τα οχήματα η επένδυση σε ηλεκτρικά οχήματα είναι οικονομικά ασύμφορη και το ποσοστό ενέργειας που απορροφάται από αυτά είναι μικρή.



Εικόνα 4.18 Κέρδος κτιρίου ανά σενάριο SOCin/SOCout για κάθε Pex.



Εικόνα 4.23 Κέρδος ανά όχημα ανά σενάριο SOCin/SOCout για κάθε Pex.

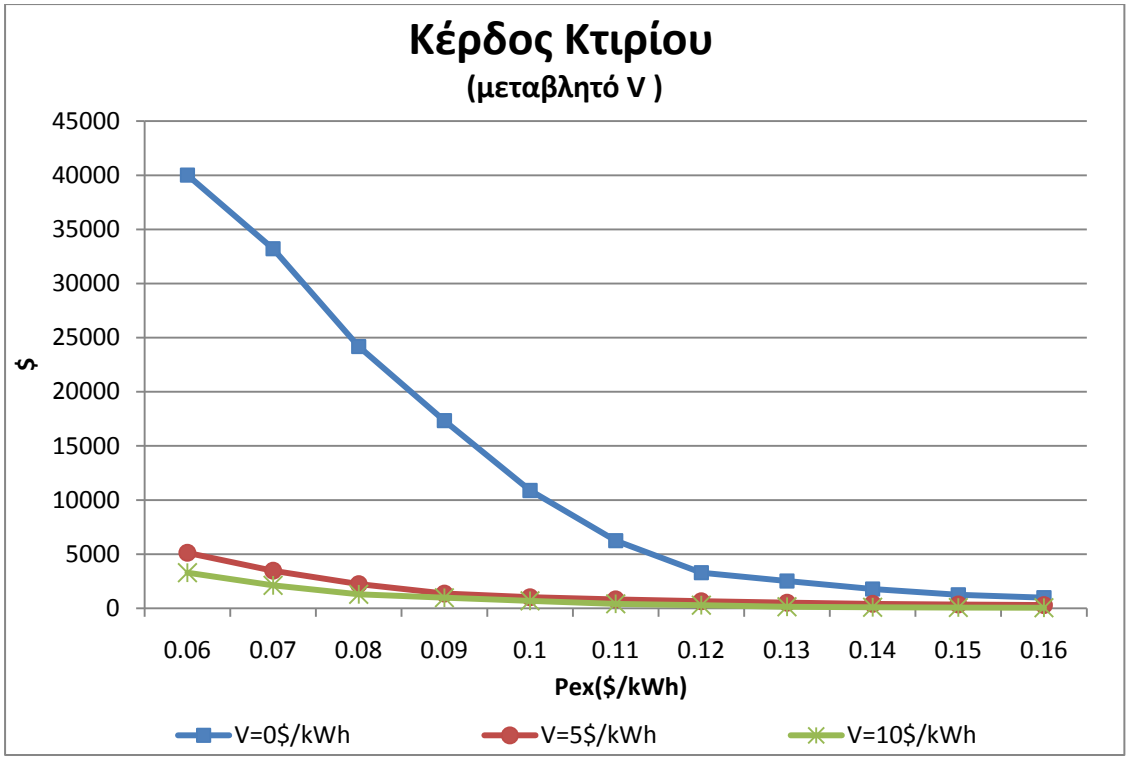
Από τη πλευρά των ιδιοκτητών ηλεκτρικών οχημάτων, αύξηση του βάθους εκφόρτισης (σενάριο90%-30%), δίνει τη δυνατότητα ανταλλαγής μεγαλύτερου μέρους ηλεκτρικής ενέργειας ανά όχημα και επομένως αυξάνουν το καθαρό κέρδος τους από την πώληση της επιπρόσθετης ισχύος (εικόνα 4.23). Για ακραίες τιμές αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από τα οχήματα, (άνω των 0.13$/kWh) παρατηρούμε ότι το κέρδος των οχημάτων μειώνεται. Αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι το κόστος (σταθερό και μεταβλητό) από την απόκτηση ενέργειας από αυτά είναι αρκετά υψηλό και το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου αξιοποιεί μόνο ένα μικρό μέρος της διαθέσιμης ισχύος.

Οι παραπάνω παρατηρήσεις μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου θα προτιμήσει να επισυνάψει συμβόλαια αρχικά με εργαζόμενους, οι οποίοι θα έχουν τη δυνατότητα να πηγαίνουν στη δουλειά τους με όσο το δυνατόν μεγαλύτερο SOCin και να φεύγουν από αυτή με όσο το δυνατόν μικρότερο SOCout και άρα θα μένουν κοντά στο χώρο εργασίας τους ώστε να χρειάζονται μικρό ταξίδι προς και από αυτήν. Τέλος από τη μεριά τους οι ιδιοκτήτες EV για να αυξήσουν το κέρδος τους έχουν υψηλό κίνητρο να προσυμφωνήσουν σε όσο το δυνατόν μεγαλύτερο SOCin και μικρότερο SOCout και άρα θα πρέπει να είναι πολύ προσεκτικοί στην επιλογή αυτών.

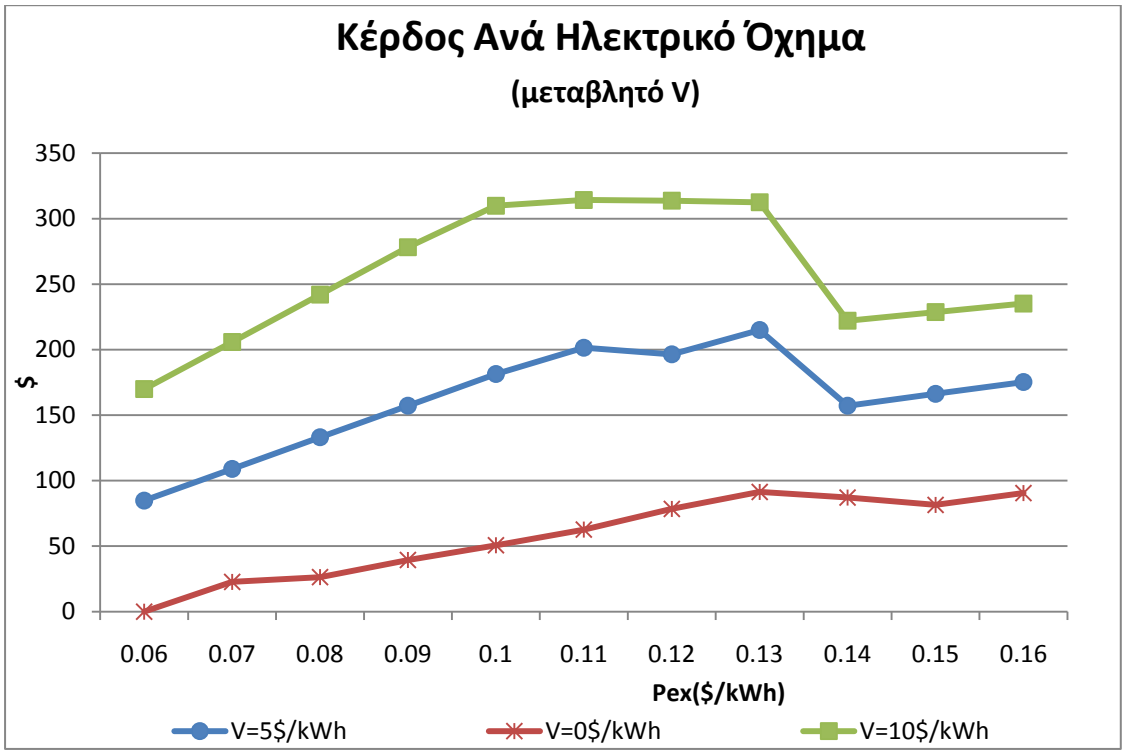
4.7 ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΕΤΗΣΙΟ ΠΑΓΙΟ ΤΕΛΟΣ ΑΠΟΖΗΜΙΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Σε αυτή την ενότητα θα μελετήσουμε την επίδραση που έχει η μεταβολή του προσυμφωνημένου παγίου τέλους V στο κέρδος του κτιρίου και στο κέρδος των ιδιοκτητών των ηλεκτρικών οχημάτων για όλα τα δυνατά Pex. Υπενθυμίζουμε ότι το ποσό αυτό δίνεται στους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων ως αποζημίωση για να συνδέουν τα οχήματά τους τη συμφωνημένη ώρα στο επιθυμητό επίπεδο και δεν αφορά αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από τις μπαταρίες των ηλεκτρικών οχημάτων. Για το λόγο αυτό εκτός από το βασικό σενάριο όπου κάθε όχημα λαμβάνει αποζημίωση ύψους 5$/kWh χωρητικότητας της μπαταρίας του, εξετάζουμε ένα ακραίο σενάριο με V=0$/kWh και ένα δεύτερο για V=10$/kWh.

Στις εικόνες (4.24,4.25) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για κάθε σενάριο, όσον αφορά το κέρδος του κτιρίου και το κέρδος ανά όχημα. Μεταβολή της τιμής του παγίου τέλους σύνδεσης δημιουργεί αντίρροπες μεταβολές στο κέρδος της εταιρείας και των ιδιοκτητών ηλεκτρικών οχημάτων, κάτι που ήταν αναμενόμενο. Επιπρόσθετα, παρατηρούμε ότι και πάλι για ακραίες τιμές αγοράς ενέργειας από τα οχήματα η μεταβολή του κέρδους του κτιρίου είναι μικρή μιας και η επένδυση σε οχήματα για εξοικονόμηση δεν είναι κατάλληλη. Αντίθετα, το κέρδος ανά όχημα (εικόνα 4.25) διαφοροποιείται λόγω της μείωσης του αριθμού των οχημάτων που αξιοποιούνται από το σύστημα διαχείρισης ενέργειας.



Εικόνα 4.19 Κέρδος κτιρίου ανά σενάριο αποζημίωσης V($/kWh) για κάθε Pex.



Εικόνα 4.20 Κέρδος 1 EV ανά σενάριο αποζημίωσης V($/kWh) για κάθε Pex.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η ενσωμάτωση των ηλεκτρικών οχημάτων ως διεσπαρμένων μονάδων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα διαχείρισης ενέργειας ενός κτιρίου εμπορικής χρήσης. Σκοπός της εργασίας είναι η ανάλυση των οικονομικών ωφελειών από την εξοικονόμηση ενέργειας στο εμπορικό κτίριο. Η μαθηματική μοντελοποίηση της ενσωμάτωσης της ηλεκτρικής ενέργειας περιγράφτηκε στο κεφάλαιο 3. Για την προσομοίωση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό βελτιστοποίησης GAMS.

Η σημαντικότερη συνιστώσα του κόστους λειτουργίας του κτιρίου είναι το κόστος της ενέργειας. Μέρος της ενέργειας αυτής μπορεί να απορροφηθεί από τη πλεονάζουσα ενέργεια των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων. Το χαμηλό κόστος της ενέργειας αυτής λόγω νυχτερινής φόρτισης μπορεί να επιφέρει οικονομικά οφέλη τόσο στον ιδιοκτήτη του κτιρίου όσο και στους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων αν αξιοποιηθεί σε ώρες αιχμής όπου οι τιμές της αγοράς ενέργειας είναι υψηλές. Σημαντικά οφέλη για το κτίριο προκύπτουν επίσης και από τη μείωση της χρέωσης αιχμής η οποία αποτελεί το 12% του συνολικού κόστους λειτουργίας. Όσο μεγαλύτερη είναι η μείωση της αιχμής ζητούμενης ισχύος και η ενέργεια που απορροφάται από το δίκτυο τόσο μεγαλύτερη είναι και η εξοικονόμηση. Η εξοικονόμηση της αιχμής όμως έχει ένα κάτω φράγμα το οποίο ισούται με την μέγιστη ισχύ των μη διασυνδεδεμένων ωρών.

Αύξηση της διείσδυσης των οχημάτων στο σύστημα διαχείρισης της ενέργειας του κτιρίου έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της διαθέσιμης πλεονάζουσας ισχύος των μπαταριών. Ο τρόπος αξιοποίησης της αποθηκευμένης ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων, με διαφορετικά επίπεδα εκφόρτισης ή ακόμα και εναλλαγές φόρτισης/εκφόρτισης των οχημάτων, διαφοροποιεί την επίδραση στην αιχμή χειμώνα και καλοκαιριού όπως περιγράφηκε στο διάγραμμα 4.3. Η εξοικονόμηση ενέργειας αυξάνεται όταν η επίδραση της διείσδυση των οχημάτων μελετάται ταυτόχρονα και για τις δύο αιχμές και όχι ανεξάρτητα. Κάθε επίπεδο διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων, βελτιστοποιώντας την αξιοποίηση τους, επιφέρει ένα ζεύγος μείωσης αιχμής χειμώνα και καλοκαιριού. Αυτά τα ζεύγη παρουσιάζονται ως τοπικά ελάχιστα στο διάγραμμα 4.3. Ωστόσο, υπάρχει ένα επίπεδο διείσδυσης που μεγιστοποιεί την εξοικονόμηση και αποτελεί το ολικό ελάχιστο. Η βέλτιστη αυτή λύση καθορίζεται από την αιχμή της εποχής με το μικρότερο εύρος μείωσης.

Η τιμή ανταλλαγής ηλεκτρικής ενέργειας(Pex) επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου αξιοποιεί τα ηλεκτρικά οχήματα. Χαμηλές τιμές του Pex επιφέρουν μεγαλύτερο κέρδος στον ιδιοκτήτη του κτιρίου αφού η αγορά ενέργειας από τις μπαταρίες των οχημάτων είναι φθηνή και πολύ πιο χαμηλή από την τιμή του δικτύου και μπορεί επενδύοντας σε μεγάλο στόλο οχημάτων να κάνει μεγάλη εξοικονόμηση στην αιχμή και στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.

Από την άλλη πλευρά όσο το Pex αυξάνεται το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου βλέπει την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από τα οχήματα ολοένα και πιο ακριβή και επενδύει σε μικρότερο αριθμό στόλου αξιοποιώντας την ενέργεια τους μόνο τις ώρες που η τιμή αγοράς από το δίκτυο είναι η υψηλότερη.

Παράλληλα ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζεται στον τρόπο με τον οποίο το σύστημα διαχείρισης ενέργειας χρησιμοποιεί κάθε ώρα την αποθηκευμένη ενέργεια στις μπαταρίες των ηλεκτρικών οχημάτων. Για χαμηλές τιμές του Pex, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου χρησιμοποιεί την αποθηκευμένη ενέργεια των οχημάτων δίνοντας προτεραιότητα στις ώρες αιχμής. Όσο αυξάνεται η τιμή αγοράς της αποθηκευμένη ενέργειας και μειώνεται ο αριθμός των ηλεκτρικών οχημάτων η διαθέσιμη ενέργεια των μπαταριών δεν είναι πλέον επαρκής για να μειώσει των αιχμή στα επιθυμητά επίπεδα. Για να μπορέσει να εξασφαλίσει μεγαλύτερο κέρδος και να κάνει την επένδυση σε ηλεκτρικά οχήματα βιώσιμη το σύστημα διαχείρισης ενέργειας εκμεταλλεύεται τις χαμηλές τιμές αγοράς από το δίκτυο τις πρωινές ώρες και αποθηκεύει ενέργεια στις μπαταρίες των οχημάτων. Την ενέργεια αυτή την αξιοποιεί αργότερα που οι τιμές της αγοράς είναι υψηλότερες.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι το σύστημα διαχείρισης ενέργειας θα προσπαθήσει να συμπιέσει προς τα κάτω όσο το δυνατόν περισσότερο τις τιμές αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από τις μπαταρίες των ηλεκτρικών οχημάτων για να μεγιστοποιήσει το κέρδος του, αλλά συνάμα θα πρέπει τα προνόμια που προσφέρει στους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων να είναι τέτοια ώστε να τους προσελκύσει. Για το λόγο αυτό στην επόμενη εφαρμογή υπολογίστηκε ένα σημείο ισορροπίας, που να ικανοποιεί όσο το δυνατόν περισσότερο και τις δύο πλευρές. Το σημείο αυτό ορίστηκε ως η τιμή ανταλλασσόμενης ενέργειας στην οποία το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου καθώς και ο ιδιοκτήτης ηλεκτρικού οχήματος επιτυγχάνουν το ίδιο ποσοστό κέρδους ως προς το μέγιστο κέρδος που μπορεί να επιτευχθεί από τον καθένα ξεχωριστά. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης που προκύπτουν από το σημείο αυτό είναι εν μέρει ενθαρρυντικά καθώς αποκομίζουν κέρδος και οι δύο πλευρές. Από την άλλη πλευρά όμως το κέρδος αυτό είναι μικρό τόσο για το κτίριο όσο και για τους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων και συνεπώς λειτουργεί ως ανασταλτικός παράγοντας για τυχόν εφαρμογή της παρούσας μελέτης στην πράξη. Συνεπώς έγιναν τρεις αναλύσεις ευαισθησίας ως προς την τιμή χρέωσης της αιχμής ζητούμενης ισχύος, τα προσυμφωνημένα επίπεδα φόρτισης(SOCin και SOCout) των ηλεκτρικών οχημάτων τη στιγμή σύνδεσης και αποσύνδεσής τους από το δίκτυο του κτιρίου και για το ετήσιο πάγιο τέλος αποζημίωσης για τη σύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων(V).

Αυτό που παρατηρείται από την πρώτη επί μέρους ανάλυση είναι ότι η χαμηλή χρέωση της αιχμής ζητούμενης ισχύος αποτελεί τροχοπέδη στη διείσδυση ηλεκτρικών οχημάτων. Άρα η συγκεκριμένη εφαρμογή είναι πιο συμφέρουσα σε τιμολόγια όπου η αιχμή ζητούμενης ισχύος είναι υψηλή και σε αυτά όπου υπάρχει επιλογή μεταξύ υψηλότερης χρέωσης αιχμής και χαμηλότερης ηλεκτρικής ενέργειας.

Στη δεύτερη ανάλυση παρατηρείται ότι η δυνατότητα βαθύτερης εκφόρτισης των μπαταριών (deep discharge) όπως καθορίζεται από το προσυμφωνημένο SOCin και SOCout μεγιστοποιεί το κέρδος τόσο των ιδιοκτητών ηλεκτρικών οχημάτων από την πώληση περισσότερης ενέργειας όσο και αυτό του κτιρίου, το ενεργειακό σύστημα του οποίου αγοράζει έχει τη δυνατότητα να αγοράσει περισσότερη ενέργεια σε χαμηλότερη τιμή από αυτή του δικτύου. Οι παραπάνω παρατηρήσεις μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το σύστημα διαχείρισης ενέργειας του κτιρίου θα προτιμήσει να επισυνάψει συμβόλαια αρχικά με εργαζόμενους οι οποίοι θα έχουν τη δυνατότητα να πηγαίνουν στη δουλειά τους με όσο το δυνατόν μεγαλύτερο SOCin και να φεύγουν από αυτή με όσο το δυνατόν μικρότερο SOCout και άρα θα μένουν κοντά στο χώρο εργασίας τους ώστε να χρειάζονται μικρό ταξίδι από και προς αυτήν.

Στην τελευταία ανάλυση ευαισθησίας, παρατηρούμε ότι μεταβολή της τιμής του παγίου σύνδεσης δημιουργεί αντίρροπες μεταβολές στο κέρδος της εταιρείας και των ιδιοκτητών ηλεκτρικών οχημάτων. Επομένως, το σύστημα διαχείρισης ενέργειας θα επιλέξει να αυξήσει το πάγιο σύνδεσης, και άρα να μειώσει το κέρδος του, μόνο στη περίπτωση που θέλει να γίνει ανταγωνιστικότερο δίνοντας οικονομικά κίνητρα για να να προσελκύσει περισσότερους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων.

Η παρουσία των ηλεκτρικών οχημάτων στα μικροδίκτυα και η αλληλεπίδρασή τους με αυτά αποτελεί ένα νέο στοιχείο το οποίο αναμένεται να απασχολήσει ιδιαίτερα τη μελλοντική έρευνα. Η παρούσα διπλωματική αποτελεί μια πρώτη μελέτη των επιδράσεων της σύνδεσης των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο ενός κτιρίου εμπορικής χρήσης. Μια επόμενη έρευνα θα μπορούσε να διευρύνει την ύπαρξη διεσπαρμένης παραγωγής προσθέτοντας κι άλλες μονάδες όπως για παράδειγμα με φωτοβολταικά, μικρές ανεμογεννήτριες, microturbines κτλ. στο μικροδίκτυο του κτιρίου και αναζητώντας για περισσότερα οικονομικά οφέλη. Τέλος μία επόμενη μελέτη θα μπορούσε να συμπεριλάβει τη φορολογία άνθρακα ως κίνητρο μείωσης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το κεντρικό δίκτυο.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΑΚΟΙ ΤΟΠΟΙ

[1] Ilan Momber, Tomás Gómez, Giri Venkataramanan, Michael Stadler, Sebastian Beer, Judy Lai, Chris Marnay, and Vincent Battaglia "Plug-in Electric Vehicle Interactions with a Small Office Building: An Economic Analysis using DER-CAM".

[2] Michael Stadler, Ilan Momber, Olivier Mégel, Tomás Gómez,Chris Marnay, Sebastian Beer, Judy Lai, and Vincent Battaglia "The added economic and environmental value of plug-in electric vehicles connected to commercial building microgrids".

[3] M.J. Scott, M. Kintner-Meyer, D. Elliott, and W. Warwick,"Economic Assessment and Impacts Assessment of Plug-In Hybrid Vehicles on Electric Utilities And Regional U.S. Power Grids, Part II"Pacific North West National Laboratory, Richland, WA, PNNL-SA-61687, January 2007.

[4] S.B. Peterson, J.F. Whitacre, and Jay Apt, "The economics of using plug-in hybrid electric vehicle battery packs for grid storage," *J. of Power Sources*, vol. 195(8), pp 2377-2384, April 2010.

[5] J. A. Peças Lopes, F. J. Soares and P. M. Rocha Almeida "Identifying Management Procedures to Deal with Connection of Electric Vehicles in the Grid," presented at IEEE Power Tech Conference. Bucharest,Romania. July 2009.

[6] Hatziargyriou, N. et al., (2007), "Microgrids, An Overview of Ongoing Research,Development, and Demonstration Projects," IEEE power & energy magazine,July/August 2007.

[7] C. Marnay, G. Venkataramanan, M. Stadler, A. Siddiqui, R. Firestone,and B. Chandran, "Optimal Technology Selection and Operation of Commercial Building Microgrids," *IEEE Transactions on Power Systems*, 10.1109/TPWRS.2008.922654, vol. 23(3), August 2008.

[8] Pacific Gas and Electric Company. (2010, Jan 19). Medium General Demand Metered Service. Retrieved from http://www.pge.com/tariffs/tm2/pdf/ELEC_SCHEDS_A-10.pdf

[9] Internal Revenue Service. (19 Jan 2010). Energy Provisions of the American Recovery and Reinvestment Act of 2009. Retrieved from http://www.irs.gov/newsroom/article/0,,id=206871,00.html.

[10] Peterson, S.B., J. Apt, and J.F. Whitacre, “Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and vehicle-to-grid utilization,” *J. of Power Sources*, vol. 195(8), pp 2385-2392, April 2010.

[11] Ε.Ι. Ρίκου, «ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΤΑ ΟΧΗΜΑΤΑ», Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πάτρα 2005.

[12] Ν. Μαρτίνος, Ε. Τατάκη, Δ. Κωτσοβόλης, Γ. Κωστάκης, Σ. Μανιάς, Δ. Μερτίνος, “Τεχνολογία Δυνατότητες και Προοπτικές του Ηλεκτροκίνητου Οχήματος”, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Τεχνική Έκθεση, Αθήνα, Απρίλιος 1993.

[13] S. R. Shacket, “The Complete Book of Electric Vehicles”, Domus Books, New York, 1981.

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

[15] Σ. Μανιάς, Α. Κλαδάς, Σ. Ξέπαπας, “Επιλογή των Ηλεκτρικών Στοιχείων για το Ηλεκτρικό Υβριδικό Αυτοκίνητο”, Τεχνολογία και βιομηχανικές εφαρμογές των ηλεκτρονικών ισχύος, Τ.Ε.Ε. 28 – 29 Σεπτεμβρίου 2000.

[16] “The Great Battery Barrier”, Special Report/Electric Vehicles, IEEE Spectrum, pp. 97-101, November, 1992.

[17] Stephen J. Chapman, Ηλεκτρικές Μηχανές AC-DC, 3η Έκδοση, Α. Τζιόλα.

[18] Α. Ν. Σαφάκας, “Ηλεκτρονικά Ισχύος, Θυρίστορ- Μετατροπείς- Εφαρμογές”, Οργανισμός Εκδόσεων Διδακτικών Βιβλίων, Αθήνα, 1985.

[19] MERGE (MOBILE ENERGY RESOURCES IN GRIDS OF ELECTRICITY), “SPECIFICATIONS FOR EV-GRID INTERFACING, COMMUNICATION AND SMART METERING TECHNOLOGIES, INCLUDING TRAFFIC PATTERNS AND HUMAN BEHAVIOUR DESCRIPTIONS” 24 August 2010.

[20] Alternative cars in the 21st century-Robert Q.Riley

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

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

[23] www.teslamotors.com

[24] www.energia.gr

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

[26] International Energy Agency, www.iea.org

[27] www.teslamotors.com

[28] www.automotiveforum.eu

[29] www.frost.com

[30] http://www.altenergymag.com

[31] GAMS — A User's Guide. **(**Tutorial by Richard E. Rosenthal), (©2004 GAMS Development Corporation, Washington, DC, USA).

[32] Bruce A. McCarl, "McCarl GAMS User Guide".

[33] Enrique Castillo, Antonio J. Conejo, Pablo Pedregal, Ricardo García, Natalia Alguacil "Building and Solving Mathematical Programming Models in Engineering and Science".

[34] Michael C. Ferris (2005). MATLAB and GAMS: Interfacing Optimization andVisualization Software.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΤΗΡΙΟΥ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΕΠΙΘΥΜΗΤΗ ΑΙΧΜΗ ΖΗΤΟΥΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Pmax(win) \ Pmax(sum)	373	370	367	364	361	358	355	352	349	346	343	340	337	334	331	328	325	322	319	316	313	310
320	281203.1	281083	280963	280844	280724	280605	280504	280443	280418	280429	280481	280549	280616	280684	280757	280862	280970	281079	281187	281295	281403	281512
318	281209.2	281024	280904	280785	280665	280546	280445	280384	280359	280370	280422	280490	280557	280625	280698	280803	280911	281020	281128	281236	281344	281453
316	281225.5	281040	280855	280736	280616	280497	280396	280335	280311	280321	280373	280441	280508	280576	280649	280754	280862	280971	281079	281187	281295	281404
314	281181.5	280996	280811	280692	280572	280453	280352	280291	280267	280277	280329	280397	280464	280532	280605	280710	280818	280927	281035	281143	281252	281360
312	281207.8	281023	280838	280653	280533	280414	280274	280252	280228	280238	280291	280358	280425	280493	280567	280671	280780	280888	280996	281104	281213	281321
310	281234.1	281049	280864	280679	280495	280375	280246	280213	280189	280199	280252	280319	280386	280454	280528	280632	280741	280849	280957	281065	281174	281282
308	281257.9	281073	280888	280703	280518	280353	280246	280185	280160	280170	280223	280290	280358	280425	280499	280604	280712	280820	280928	281037	281145	281253
306	281309.4	281124	280939	280755	280570	280385	280239	280156	280131	280141	280194	280262	280329	280396	280470	280575	280683	280791	280900	281008	281116	281224
304	281354.6	281169	280984	280800	280615	280431	280283	280138	280108	280118	280170	280238	280305	280373	280446	280551	280659	280768	280876	280984	281092	281201
302	281431.4	281246	281061	280877	280692	280507	280341	280194	280088	280099	280152	280219	280286	280354	280428	280532	280641	280749	280857	280965	281074	281182
300	281546.2	281361	281176	280991	280807	280622	280437	280253	280111	280093	280133	280200	280268	280335	280409	280514	280622	280730	280838	280947	281055	281163
298	281737.2	281552	281367	281182	280998	280813	280628	280444	280263	280131	280144	280212	280279	280346	280420	280525	280633	280741	280850	280958	281066	281174
296	281928.2	281743	281558	281373	281189	281004	280819	280635	280454	280281	280171	280223	280290	280358	280431	280536	280644	280753	280861	280969	281077	281186
294	282119.2	281934	281749	281564	281380	281195	281010	280826	280645	280471	280305	280246	280302	280369	280443	280547	280656	280764	280872	280981	281089	281197
292	282310.2	282125	281940	281755	281571	281386	281201	281017	280836	280662	280496	280333	280313	280380	280454	280559	280667	280775	280884	280992	281100	281208
290	282501.4	282316	282131	281947	281762	281577	281392	281208	281027	280853	280687	280524	280361	280392	280465	280570	280678	280787	280895	281003	281111	281220
288	282692.4	282507	282322	282138	281953	281768	281584	281399	281218	281044	280878	280715	280552	280413	280477	280581	280690	280798	280906	281014	281123	281231
286	282864.1	282679	282494	282309	282124	281940	281755	281571	281389	281216	281049	280886	280724	280561	280488	280593	280701	280809	280917	281026	281134	281242
284	283055.1	282870	282685	282500	282315	282131	281946	281762	281581	281407	281240	281077	280914	280752	280589	280604	280712	280820	280929	281037	281145	281253
282	283246.1	283061	282876	282691	282507	282322	282137	281953	281772	281598	281431	281268	281105	280752	280780	280624	280723	280832	280940	281048	281157	281265
280	283444.2	283259	283074	282889	282705	282520	282335	282151	281970	281796	281629	281466	281303	281140	280978	280822	280735	280843	280951	281060	281168	281276

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΤΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΑΝΑΛΟΓΑ ΜΕ ΤΗΝ ΕΠΙΘΥΜΗΤΗ ΑΙΧΜΗ ΖΗΤΟΥΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Pmax(win) \ Pmax(sum)	373	370	367	364	361	358	355	352	349	346	343	340	337	334	331	328	325	322	319	316	313	310
320	0	16	32	48	64	80	96	112	128	176	240	304	368	432	496	560	624	688	752	816	880	944
318	16	16	32	48	64	80	96	112	128	176	240	304	368	432	496	560	624	688	752	816	880	944
316	32	32	32	48	64	80	96	112	128	176	240	304	368	432	496	560	624	688	752	816	880	944
314	32	32	32	48	64	80	96	112	128	176	240	304	368	432	496	560	624	688	752	816	880	944
312	48	48	48	48	64	80	96	112	128	176	240	304	368	432	496	560	624	688	752	816	880	944
310	64	64	64	64	64	80	96	112	128	176	240	304	368	432	496	560	624	688	752	816	880	944
308	64	64	64	64	64	80	96	112	128	176	240	304	368	432	496	560	624	688	752	816	880	944
306	64	80	80	80	80	80	96	112	128	176	240	304	368	432	496	560	624	688	752	816	880	944
304	80	80	80	80	80	80	96	128	128	176	240	304	368	432	496	560	624	688	752	816	880	944
302	96	96	96	96	96	96	96	128	160	176	240	304	368	432	496	560	624	688	752	816	880	944
300	128	144	144	144	144	144	144	144	176	176	240	304	368	432	496	560	624	688	752	816	880	944
298	192	192	192	192	192	192	192	192	192	224	240	304	368	432	496	560	624	688	752	816	880	944
296	240	240	240	240	240	240	240	240	240	240	272	304	368	432	496	560	624	688	752	816	880	944
294	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	304	368	432	496	560	624	688	752	816	880	944
292	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	336	368	432	496	560	624	688	752	816	880	944
290	384	384	384	384	384	384	384	384	384	384	384	384	384	432	496	560	624	688	752	816	880	944
288	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	432	496	560	624	688	752	816	880	944
286	464	464	464	464	464	464	464	464	464	464	464	464	464	464	496	560	624	688	752	816	880	944
284	512	512	512	512	512	512	512	512	512	512	512	512	512	512	512	560	624	688	752	816	880	944
282	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	560	624	688	752	816	880	944
280	608	608	608	608	608	608	608	608	608	608	608	608	608	608	608	608	624	688	752	816	880	944

NEVS	Pmax sum	Pmax wint	Κέρδος Κτηρίου	Εξοικονόμηση Αιχμής	Εξοικονόμηση Η.Ε.	Πληρωμή EV owners	Κέρδος EV	Κέρδος 1EV
1	369.8	316.8	120.9	308.4	260.8	454.4	168.7	168.7
2	366.6	313.1	323.3	614.5	585.3	882.5	181.4	362.8
3	363.4	309.5	494.6	881.5	877.9	1270.8	544.1	181.4
4	360.2	307	662.7	1145.3	1170.3	1659	725.4	181.4
5	357	304.2	815.9	1394.9	1462.7	2047.7	906.8	181.4
6	353.8	301.3	903.3	1644.5	1762.3	2509.6	1085.2	181.4
7	350.6	298.2	980.1	1894.1	2051.4	2971.4	1269.6	181.4
8	350	295.1	1009.1	1971.3	2350.4	3318.6	1450.9	181.4
9	349.9	292.1	1013.9	2022.2	2673.2	3651.4	1632.3	181.4
10	349.6	288.7	1018.9	2077.1	2924.2	3988.4	1813.7	181.4
11	348.6	286.2	1023	2180.5	3213.2	4376.7	1995	181.4
12	347.6	283.7	1019.2	2254.5	3418	4659.3	2142.9	178.6
14	345.6	281.3	1004.6	2378.1	3759	5138.6	2411.4	172.2
16	343.8	280	975.1	2489.6	4093.4	5613.9	2678.7	167.4
20	340.3	280	901.4	2701.7	4762.5	6568.8	3214.5	160.7
24	336.9	280	827.6	2913.3	5430.2	7522	3749.8	156.2
28	333.5	280	753.9	3125.9	6101	8478.6	4286.2	153.1
32	330	280	680.2	3337.7	6769.1	9432.7	4821.7	150.7
36	327	280	573.1	3523.9	7431.3	10388.1	5357.7	148.8
40	324	280	465.2	3709.3	8092.8	11343	5893.5	147.3
44	321	280	357.9	3895.2	8754.4	12297.8	6429.3	146.1
50	316	280	196.4	4173.7	9746.8	13730	7233	145
60	310	280	-126.2	4573.2	11412.2	16117.6	8572.6	142.9

Pex	Pmax sum	Pmax wint	C	NEVs	Κέρδος Κτηρίου	Εξοικονόμηση Αιχμής	Εξοικονόμηση Η.Ε.	Πληρωμή EV owners	Κέρδος EV	Κέρδος 1 EV
0.06	310	280	5856	366	5123.9	5264.5	106812	106958.6	31066.4	84.8
0.07	310	280	994	55	3470.1	5263.4	16812.5	18611.8	6382.5	108.9
0.08	325.6	280	608	38	2237.9	4300.9	10905.1	12974.1	5037	133.1
0.09	330	284.5	512	32	1364.8	3881	9254.9	11777.1	5039.5	157.2
0.1	348.3	300	176	11	1024.1	2210.5	3297.3	4489.6	2289.6	181.4
0.11	350	305	128	8	822.6	1935.8	2192.9	3312.2	1544.9	201.5
0.12	350	310	112	7	651.8	1762.3	1699.9	2816.4	1408.8	196.4
0.13	350	310	112	7	518.4	1762.3	1699.8	2949.8	1542.2	215
0.14	352.2	315	96	6	412.1	1452.6	886.6	1933	1018.5	157.2
0.15	352.2	315	96	6	353.4	1452.6	886.6	1991.7	1077.1	166.3
0.16	357	315	80	5	296.8	1156.9	671.8	1537.9	874.7	175.3

	Pex=0,06$/kWh		Pex=0,07$/kWh		Pex=0,08$/kWh		Pex=0,09$/kWh		Pex=0,10$/kWh		Pex=0,11$/kWh		Pex=0,12$/kWh		Pex=0,13$/kWh		Pex=0,14$/kWh		Pex=0,15$/kWh		Pex=0,16$/kWh	
SOC(%)	sum	wint	sum	wint	sum	wint	sum	wint	sum	wint	sum	wint	sum	wint	sum	wint	sum	wint	sum	wint	sum	wint
h9	80.0002	80.0002	79.9958	79.9958	79.9949	79.9949	79.9979	79.9979	79.9989	79.9989	79.987	79.987	79.973	79.973	70.0411	70.0411	80.0347	80.0347	80.0347	80.0347	79.9975	79.9975
h10	79.5626	74.5559	77.6812	63.6545	79.1602	76.4544	79.9179	76.7233	79.9186	79.9186	86.1826	79.9071	85.899	79.8929	75.4663	69.9712	81.4971	79.9546	81.4971	79.9546	79.9174	79.9174
h11	78.8572	69.1171	73.6929	61.3563	75.7308	72.9176	76.7736	73.4519	79.839	79.839	89.9853	79.8272	89.9695	79.8136	78.7963	69.9012	88.0743	79.8745	88.0743	79.8745	79.8373	79.8373
h12	78.0631	63.5943	69.1499	58.5016	71.4397	68.5192	72.611	69.1624	78.7952	76.8594	89.8957	79.7474	89.8798	79.7334	78.7178	69.8313	90.0386	79.7944	90.0386	79.7944	79.7572	79.7572
h13	71.5479	57.8982	63.4941	54.5324	65.4229	62.3948	66.4096	62.8343	71.9541	68.0847	81.2657	71.128	80.6629	75.0897	71.1608	62.2837	82.0878	79.7143	82.0878	79.7143	75.7272	79.6771
h14	64.9855	52.1541	57.5089	50.2321	58.8928	55.7576	59.6015	55.8994	63.3796	57.5789	70.0831	59.9552	68.716	67.7134	61.3688	52.5002	71.111	76.6004	71.111	76.6004	67.766	75.6633
h15	58.251	46.3801	50.4122	45.7126	50.6392	48.7809	50.7573	48.5631	49.0155	45.9242	50.3716	47.0856	47.6551	58.5183	44.1083	41.2308	50.0309	71.4672	50.0309	71.4672	46.6984	69.0313
h16	51.7198	40.7906	44.5518	42.3149	44.2971	43.5414	44.169	43.2769	41.0443	40.0797	40.0733	42.7685	36.6542	58.4591	35.0905	37.4506	40.0975	71.3958	40.0975	71.3958	40.0788	68.9625
h17	45.4098	40.0401	40.038	40.038	40.0375	40.0375	40.039	40.039	40.0393	40.0393	40.0334	42.7262	36.6176	58.4007	35.0555	37.4135	40.0569	71.3243	40.0569	71.3243	40.0388	69.0663
h18	40.0001	40.0001	39.9979	39.9979	39.9975	39.9975	39.999	39.999	39.9994	39.9994	39.9935	42.683	39.9869	58.3423	35.0206	37.3756	40.0174	90.0386	40.0174	90.0386	39.9987	89.9962

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ Pex=0,0876$/kWh

TIME	DMD(sum)	DMDνέο(sum)	pvd(sum)	SOC(sum)	DMD(wint)	DMDνέο(wint)	pvd(wint)	SOC(wint)
h0	120	120	0	-	110	110	0	-
h1	120	120	0	-	110	110	0	-
h2	120	120	0	-	110	110	0	-
h3	122	122	0	-	112	112	0	-
h4	130	130	0	-	125	125	0	-
h5	150	150	0	-	145	145	0	-
h6	205	205	0	-	180	180	0	-
h7	275	275	0	-	250	250	0	-
h8	310	310	0	-	280	280	0	-
h9	330	330	0	80%	300	284.4	15.6	80%
h10	345	330	15	79.91%	300	284.4	15.6	76.73%
h11	350	330	20	76.78%	305	284.4	20.6	73.46%
h12	360	330	30	72.61%	315	284.4	30.6	69.17%
h13	363	330	33	66.42%	318	284.4	33.6	62.84%
h14	373	330	43	59.61%	320	284.4	35.6	55.90%
h15	362	330	32	50.76%	310	284.4	25.6	48.56%
h16	350	330	20	44.17%	300	284.4	15.6	43.28%
h17	300	300	0	40.04%	280	280	0	40.04%
h18	260	260	0	40%	235	235	0	40%
h19	190	190	0	-	175	175	0	-
h20	160	160	0	-	150	150	0	-
h21	150	150	0	-	130	130	0	-
h22	140	140	0	-	130	130	0	-
h23	130	130	0	-	120	120	0	-

ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ SOC

	SOCin-SOCout(90%-30%)		SOCin-SOCout(80%-40%)		SOCin-SOCout(70%-30%)	
Pex	**Κέρδος Κτηρίου**	**Κέρδος 1 EV**	**Κέρδος Κτηρίου**	**Κέρδος 1 EV**	**Κέρδος Κτηρίου**	**Κέρδος 1 EV**
0,06	16612,3	84,8	5123,9	84,8	1107,9	84,8
0,07	7035,1	121	3470,1	108,9	884,8	96,9
0,08	3912,7	144,6	2237,9	133,1	751,1	108,9
0,09	2750,3	174,4	1364,8	157,2	657,7	121
0,1	1700,9	172	1024,1	181,4	569,8	133,1
0,11	1124	220,2	822,6	201,5	483,4	145,2
0,12	873,3	229,4	651,8	196,4	410,3	157,2
0,13	683,7	253,6	518,4	215	349,8	169,3
0,14	517,4	229,7	412,1	157,2	305,1	84,8
0,15	388,2	230,3	353,4	166,3	305,1	84,8
0,16	272,2	246,5	296,8	175,3	305,1	84,8

ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΕΤΗΣΙΟ ΠΑΓΙΟ ΤΕΛΟΣ ΑΠΟΖΗΜΙΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΝΔΕΣΗ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

	V=0$/kWh		V=5$/kWh		V=10$/kWh	
Pex	**Κέρδος Κτηρίου**	**Κέρδος 1 EV**	**Κέρδος Κτηρίου**	**Κέρδος 1 EV**	**Κέρδος Κτηρίου**	**Κέρδος 1 EV**
0,06	40012,7	0	5123,9	84,8	3291,1	169,9
0,07	33211,7	22,7	3470,1	108,9	2121,8	205,8
0,08	24179,4	26,3	2237,9	133,1	1292,9	242
0,09	17338,8	39,4	1364,8	157,2	978	278,2
0,1	10883,5	50,6	1024,1	181,4	691,6	309,9
0,11	6251,7	62,6	822,6	201,5	413,2	314,3
0,12	3285,1	78,4	651,8	196,4	288,6	313,7
0,13	2519,7	91,4	518,4	215	140,2	312,5
0,14	1785,1	87,1	412,1	157,2	91,3	222,1
0,15	1249,5	81,5	353,4	166,3	71,7	228,7
0,16	984,7	90,5	296,8	175,3	56,5	235,2