



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

**Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων και εκτίμηση της διείσδυσης της  
ηλεκτρικής ενέργειας στις επιβατικές μεταφορές με την χρήση του  
ενεργειακού οικονομικού μοντέλου PRIMES-TREMOVE**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Κωνσταντίνος Ε. Ζαχαριάκης

Επιβλέπων : Παντελής Κάπρος  
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιανουάριος 2016





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

**Ανάλυση ευαισθησίας παραμέτρων και εκτίμηση της διείσδυσης της ηλεκτρικής ενέργειας στις επιβατικές μεταφορές με την χρήση του ενεργειακού οικονομικού μοντέλου PRIMES-TREMOVE**

## **ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

Κωνσταντίνος Ε. Ζαχαριάκης

Επιβλέπων : Κάπρος Παντελής  
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμέλη εξεταστική επιτροπή την 13<sup>η</sup> Ιανουαρίου 2016

.....

Παντελής Κάπρος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Γεώργιος Κορρές

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Σταύρος Παπαθανασίου

Αν.Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιανουάριος 2016

.....  
Κωνσταντίνος, Ε. Ζαχαριάκης

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

Copyright© Κωνσταντίνος Ζαχαριάκης, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

## Περίληψη

Οι δεσμεύσεις για τη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> στο μεσομακροπρόθεσμο ορίζοντα δημιουργούν την ανάγκη για την διείσδυση εναλλακτικών, πιο αποδοτικών και πιο καθαρών οχημάτων. Στην παρούσα εργασία διερευνάται ο ρόλος του εξηλεκτρισμός του στόλου των ιδιωτικών και των επαγγελματικών (<3.5 τόνων) οχημάτων στην ευρωπαϊκή αγορά με στόχο τη μείωση των εκπομπών στην Ευρώπη. Η μελέτη γίνεται με την χρήση του οικονομοτεχνικού μοντέλου, PRIMES-TREMOVE, για τις μεταφορές στην Ευρώπη έως το έτος 2050 με βήμα πενταετίας. Για τον λόγο αυτό αρχικά μελετώνται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών οχημάτων, τόσο σε σχέση με τα συμβατικά όσο και ως προς τις καινοτομίες που αυτά εισάγουν προκειμένου να μοντελοποιηθούν και να εισαχθούν στο μοντέλο PRIMES-TREMOVE. Οι κρίσιμοι παράγοντες που επηρεάζουν την ωρίμανση και την διείσδυση της νέας τεχνολογίας στην ευρωπαϊκή αγορά αυτοκινήτου είναι: το κόστος των μπαταριών, η ηλεκτρική αυτονομία των αυτοκινήτων, η επαρκής ανάπτυξη δικτύου φόρτισης. Η συμβολή της παρούσας διπλωματικής, πέραν της συγκέντρωσης των απαραίτητων δεδομένων έγκειται στην πραγματοποίηση συνόλου σεναρίων που υποθέτουν διαφορετικές τιμές για τους κρίσιμους παράγοντες με τελικό σκοπό την ανάλυση των επιπτώσεων κάθε κριτικής παραμέτρου στο ρυθμό διείσδυσης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην Ευρωπαϊκή αγορά. Τα αποτελέσματα των επιμέρους σεναρίων δείχνουν συσχέτιση μεταξύ της τεχνολογικής προόδου και του ρυθμού διείσδυσης της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή αγορά. Τέλος, ο ρόλος της εφαρμογής πολιτικών προώθησης της ηλεκτρικής ενέργειας και η ανάπτυξη της υποδομής είναι θετικά αναφορικά με τον εξηλεκτρισμό του συστήματος των μεταφορών.

**Λέξεις κλειδιά:** Ηλεκτρικά οχήματα, Εξηλεκτρισμός ευρωπαϊκής αγοράς αυτοκινήτου, Κόστος μπαταριών, Εκπομπές CO<sub>2</sub>

# Abstract

Commitments to reduce CO<sub>2</sub> emissions in the medium or long term create the need for penetration of alternative, more efficient and cleaner vehicles. This thesis investigates the role of electrification of the fleet of private and commercial (<3.5 tons) vehicles in the European market with the aim of reducing emissions in Europe. The study is carried out using the economic and technical model, PRIMES-TREMOVE, for the transports in Europe until the year 2050 with a five-year step. For this reason, the characteristics of electric vehicles are initially studied in detail, both in relation to the conventional ones and to the innovations they introduce in order to be modeled and introduced into the PRIMES-TREMOVE model. The critical factors affecting the maturation and penetration of the new technology in the European car market are: the cost of batteries, the electric range of cars, the sufficient development of charging network. The contribution of this thesis, besides from the gathering of the necessary data, lies in the realization of a set of scenarios that assume different values for the critical factors with the final aim of analyzing the effects of each critical parameter on the penetration rate of electric cars in the European market. The results of the individual scenarios show a correlation between technological progress and the penetration rate of electricity in the European market. Finally, the role of the implementation of electricity promotion policies and the development of the infrastructure are positive regarding the electrification of the transport system.

**Keywords:** Electric vehicles, Electrification of the European car market, Battery costs, CO<sub>2</sub> emissions

## Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση τη διπλωματικής αυτής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω των επιβλέποντα καθηγητή Δρ. Κάπρο Παντελή για την ευκαιρία που μου έδωσε αφενός να ασχοληθώ με το παρόν ερευνητικό αντικείμενο, αφετέρου να γίνω μέλος του εργαστηρίου E<sup>3</sup>MLAB . Στην συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδακτορικό ερευνήτη κ. Πελοπίδα Σίσκο για την συνέχη καθοδήγησή καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησής της.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή.....</b>	<b>15</b>
1.1	Προβληματική της διπλωματικής εργασίας.....	15
1.2	Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....	16
1.3	Οργάνωση κειμένου.....	17
<b>2</b>	<b>Στοιχεία Δομής και λειτουργίας ηλεκτροκινούμενων οχημάτων .....</b>	<b>18</b>
2.1	Εισαγωγή .....	18
2.2	<b>Ηλεκτρικό όχημα – Battery electric vehicle (BEV) .....</b>	<b>18</b>
2.2.1	Ηλεκτρικός Κινητήρας.....	19
2.2.2	Έλεγχος κινητήρα.....	24
2.2.3	Βάρος .....	26
2.2.4	Αμάξωμα.....	27
2.2.5	Σύστημα πέδησης.....	28
2.2.6	Σύστημα κλιματισμού .....	29
2.2.7	Μετάδοση κίνησης .....	29
2.2.8	Φόρτιση Μπαταρίας.....	30
2.2.9	Βοηθητικά συστήματα οχήματος .....	30
2.2.10	Κατανάλωση EV .....	30
2.2.11	Σύνοψη .....	31
2.3	<b>Plug-In Hybrid όχημα – PHEV.....</b>	<b>32</b>
2.3.1	Εισαγωγή .....	32
2.3.2	Ηλεκτρική μηχανή και έλεγχος .....	32
2.3.3	Βάρος .....	34
2.3.4	Αμάξωμα.....	35
2.3.5	Πέδηση.....	35
2.3.6	Σύστημα κλιματισμού .....	35
2.3.7	Μετάδοση κίνησης .....	35
2.3.8	Φόρτιση Μπαταρίας.....	37
2.3.9	Βοηθητικά συστήματα .....	37
2.3.10	Συμπέρασμα .....	38
2.3.11	Κατανάλωση PHEV.....	39
2.4	<b>Μπαταρίες .....</b>	<b>40</b>
2.4.1	Είδη μπαταριών .....	40
2.4.2	Μπαταρίες Λιθίου- Ιόντος (Li-ion batteries).....	41
2.4.3	Απαιτήσεις ενέργειας και ισχύος ηλεκτρικών οχημάτων .....	42
2.4.4	Δομή μπαταριών- Υλικά κατασκευής .....	44
2.4.5	Βοηθητικά συστήματα μπαταριών .....	46
2.4.6	Τεχνικοί περιορισμοί και κατασκευαστικές προκλήσεις για τις μπαταρίες λιθίου.....	47
2.4.7	Κόστος Μπαταριών.....	49
2.4.8	Ενδεικτικό κόστος μπαταρίας.....	53
2.5	<b>Ηλεκτρικά οχήματα και ηλεκτρικό δίκτυο .....</b>	<b>55</b>
2.5.1	Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.....	58
2.6	<b>Ηλεκτρικά οχήματα και Smart grid .....</b>	<b>59</b>
<b>3</b>	<b>Τεχνο-οικονομικά χαρακτηριστικά ηλεκτρικών αυτοκινήτων .....</b>	<b>60</b>



3.1	Εισαγωγή .....	60
3.2	Τιμή απόκτησης.....	60
3.2.1	Πλήρως ηλεκτρικά οχήματα (EV).....	60
3.2.2	Plug in hybrid οχήματα .....	61
3.2.3	Σύνοψη .....	62
3.3	Κόστος συντήρησης.....	62
3.3.1	EV .....	62
3.3.2	PHEV.....	64
3.4	Κόστος καυσίμων .....	65
3.4.1	EV .....	65
3.4.2	PHEV.....	65
3.5	Υπόλοιπα κόστη .....	66
3.6	Συνοψη ετήσιου μεταβλητού κόστους.....	66
3.7	Περιβαλλοντικές επιπτώσεις.....	66
3.7.1	Εκπομπές CO <sub>2</sub> .....	67
<b>4</b>	<b>Σχεδιασμός και κατάστρωση σεναρίων διεύθυνσης ηλεκτρικής ενέργειας στις επιβατικές μεταφορές.....</b>	<b>69</b>
4.1	Εισαγωγή και Σκοπός .....	69
4.2	Μεθοδολογία κατάστρωσης σεναρίων ενεργειακής πολιτικής .....	71
4.2.1	Συνοπτική παρουσίαση του ενεργειακού οικονομικού μοντέλου PRIMES-TREMOVE	71
4.2.2	Μοντελοποίηση .....	72
4.3	Κατασκευή και σχεδιασμός σεναρίων .....	75
4.3.1	Γενικές Υποθέσεις .....	75
4.3.2	Άξονες κατάστρωσης σεναρίων.....	76
4.4	<b>1ος άξονας: Τεχνικά χαρακτηριστικά και κόστος μπαταριών .....</b>	<b>77</b>
4.4.1	Κεφαλαιουχικό κόστος μπαταρίας .....	77
4.4.2	Αυτονομία .....	78
4.4.3	Ηλεκτρική κατανάλωση .....	79
4.4.4	Αντικατάσταση μπαταρίας .....	79
4.4.5	Σύνοψη πρώτου άξονα .....	80
4.5	<b>2<sup>ος</sup> Άξονας: Ανάπτυξη υποδομής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων .....</b>	<b>80</b>
4.6	<b>3<sup>ος</sup> Άξονας: Εφαρμογή πολιτικής για τη ρύθμιση των εκπομπών CO<sub>2</sub> των αυτοκινήτων</b>	<b>81</b>
4.7	Σύνοψη εναλλακτικών σεναρίων .....	82
<b>5</b>	<b>Αποτελέσματα σεναρίων εξηλεκτισμού.....</b>	<b>84</b>
5.1	Επίδραση τεχνοοικονομικών παραγόντων στον εξηλεκτισμό των μεταφορών.....	84
5.1.1	Δραστηριότητα .....	84
5.1.2	Συνολικός Στόλος Ηλεκτρικών Οχημάτων .....	86
5.1.3	Κατανάλωση Ενέργειας .....	88
5.1.4	Εκπομπές CO <sub>2</sub> .....	91
5.1.5	Κόστος.....	92
5.2	Επίδραση της επαρκούς ανάπτυξης δικτύου φόρτισης στον εξηλεκτισμό των μεταφορών	94
5.2.1	Εισαγωγή .....	94
5.2.2	Δραστηριότητα .....	94
5.2.3	Στόλος .....	97
5.2.4	Κατανάλωση Ενέργειας .....	98

5.2.5	Εκπομπές CO <sub>2</sub> .....	100
5.2.6	Κόστος.....	101
<b>6</b>	<b>Επίδραση της πολιτικής CO<sub>2</sub> standards στις προοπτικές εξηλεκτισμού της Ευρώπης</b>	<b>102</b>
6.1	Εισαγωγή .....	102
6.2	Ποια η εξέλιξη της ηλεκτροκίνησης αν αναπτυχθεί επαρκώς το δίκτυο φόρτισης, η τεχνολογία των μπαταριών και επιπλέον εφαρμοστούν αυστηρά CO <sub>2</sub> standards? .....	102
6.2.1	Δραστηριότητα .....	103
6.2.2	Στόλος .....	104
6.2.3	Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.....	105
6.2.4	Κόστος.....	106
6.2.5	Συμπέρασμα .....	107
6.3	Ποια η εξέλιξη της ηλεκτροκίνησης αν δεν αναπτυχθεί επαρκώς το δίκτυο φόρτισης και εφαρμοστούν αυστηροί περιορισμοί εκπομπών CO <sub>2</sub> ? .....	107
6.3.1	Δραστηριότητα .....	108
6.3.2	Στόλος .....	109
6.3.3	Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.....	110
6.3.4	Κόστος.....	111
6.3.5	Εκπομπές CO <sub>2</sub> .....	112
6.3.6	Συμπερασμα .....	113
<b>7</b>	<b>Επίλογος- προτασεις για μελλοντικη ερευνα .....</b>	<b>114</b>

## Διαγράμματα

Διάγραμμα 1. Σύγκριση διαγράμματος ροπής στροφών του ηλεκτροκίνητου Tesla Roadster με αντίστοιχο συμβατικό υψηλών επιδόσεων (Πηγή teslamotors) .....	19
Διάγραμμα 2. Εφαρμογή της μεθόδου PWM. Οι χρωματιστές γραμμές είναι η επιθυμητή τάση εφαρμογής και οι μύρες η έξοδος του ελεγκτή. Όσο μεγαλύτερη είναι η τάση που θέλουμε να εφαρμόσουμε τόσο μεγαλύτερα είναι τα διαστήματα on του ρυθμιστή.....	25
Διάγραμμα 3. Παραγωγή ημιτονικού σήματος με την μέθοδο PWM. Στο επάνω μέρος απεικονίζεται η τάση που αντιλαμβάνεται η ηλεκτρική συσκευή και στο κάτω η σειρά παλμών που παράγεται από το PWM .....	26
Διάγραμμα 4. Πυκνότητα ισχύος ως προς την ενεργειακή ένταση για τις υπάρχουσες τεχνολογίες μπαταριών.....	43
Διάγραμμα 5. Κατάσταση φόρτισης ως προς την διανυόμενη απόσταση για PHEV οχήματα...	43
Διάγραμμα 6. Μείωση χωρητικότητας μπαταριών ως προς τον χρόνο. Οι καμπύλες αφορούν μπαταρία που αποθηκεύεται με Soc 50% σε διάφορες θερμοκρασίες .....	48
Διάγραμμα 7. Παγκόσμια παραγωγή και πρόβλεψη για το κοβάλτιο (Πηγή <a href="http://www.geonvic.com">www.geonvic.com</a> )	50
Διάγραμμα 8. Διακύμανση τιμής κοβαλτίου (99.8%) ως προς τον χρόνο.....	51
Διάγραμμα 9. Διακύμανση τιμής νικελίου 1usd/lb=1.83 euros/kg.Πηγή kitco.....	51
Διάγραμμα 10. Ενδεικτική κατανομή κόστους κατασκευής ηλεκτρικής μπαταρίας .....	55
Διάγραμμα 11. Ενδεικτικό ιστόγραμμα για ένα ταξίδι εθνικού δικτύου .....	74
Διάγραμμα 12. Κόστος μπαταριών ανά πενταετία ανά σενάριο για τα Large400 EV.....	78
Διάγραμμα 13. Δραστηριότητα σε GWh των καθαρά ηλεκτρικών οχημάτων (EV) .....	84
Διάγραμμα 14. Δραστηριότητα σε GWh των plug in hybrid οχημάτων.....	85
Διάγραμμα 15. Συνολικό ποσοστό δραστηριότητας οχημάτων που χρησιμοποιούν πρωτογενώς ηλεκτρική ενέργεια σε GWh .....	85
Διάγραμμα 16. Στόλος EV οχημάτων ανάμεσα στα σενάρια (σε εκατομμύρια οχήματα).....	87
Διάγραμμα 17. Στόλος EV οχημάτων ανάμεσα στα σενάρια (σε εκατομμύρια οχήματα).....	87
Διάγραμμα 18. Συνολικό ποσοστό ηλεκτρικών οχημάτων επί του συνόλου των ιδιωτικών οχημάτων .....	88
Διάγραμμα 19. Κατανάλωση ενέργειας ιδιωτικών οχημάτων(συμπεριλαμβάνονται τα LDVs) .	89
Διάγραμμα 20. Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας ιδιωτικών οχημάτων .....	89
Διάγραμμα 21. Ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας επί της συνολικής ζήτηση στα ιδιωτικά οχήματα	90
Διάγραμμα 22. Tank to Wheel εκπομπές CO <sub>2</sub> ιδιωτικών οχημάτων .....	91
Διάγραμμα 23. Well to Wheel εκπομπές CO <sub>2</sub> ιδιωτικών οχημάτων .....	92
Διάγραμμα 24. Συνολικό κόστος καυσίμου ιδιωτικών οχημάτων .....	93
Διάγραμμα 25. Κόστος κεφαλαίου ιδιωτικών οχημάτων.....	93
Διάγραμμα 26. Δραστηριότητα EV οχημάτων σε D_low σενάρια.....	95
Διάγραμμα 27. Δραστηριότητα plug in hybrid οχημάτων σε D_low σενάρια.....	95
Διάγραμμα 28. Ποσοστό οχημάτων συνδεδεμένων στο δίκτυο για τα D_low σενάρια .....	96
Διάγραμμα 29. Στόλος ηλεκτρικών οχημάτων σε D_low σενάρια .....	97
Διάγραμμα 30. Στόλος plug in hybrid οχημάτων σε D_low σενάρια.....	98

Διάγραμμα 31. Ποσοστό ηλεκτρικών οχημάτων που συνδέονται στο δίκτυο σε D low σενάρια	98
Διάγραμμα 32. Συνολική ζήτηση ενέργειας για D low σενάρια .....	99
Διάγραμμα 33. Συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ηλεκτρικών οχημάτων .....	99
Διάγραμμα 34. Συνολικό ποσοστό ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας επί της συνολικής κατανάλωσης .....	99
Διάγραμμα 35. Συνολικές TtW εκπομπές CO <sub>2</sub> για D low σενάρια.....	100
Διάγραμμα 36. Συνολικές WtW εκπομπές CO <sub>2</sub> για D Low σενάρια .....	100
Διάγραμμα 37. Κόστος καυσίμου για τα D low σενάρια .....	101
Διάγραμμα 38. Κόστος κεφαλαίου για τα D low σενάρια.....	101
Διάγραμμα 39. Δραστηριότητα ηλεκτροκίνητων οχημάτων με εφαρμογή αυστηρών CO <sub>2</sub> standards .....	103
Διάγραμμα 40. Στόλος ηλεκτρικών οχημάτων με αυστηρά CO <sub>2</sub> standards .....	104
Διάγραμμα 41. Στόλος plug in hybrid οχημάτων με αυστηρά CO <sub>2</sub> standards .....	104
Διάγραμμα 42. Σύνολο ηλεκτροκίνητων οχημάτων με αυστηρά CO <sub>2</sub> standards .....	105
Διάγραμμα 43. Ποσοστό κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργεια ιδιωτικών οχημάτων .....	106
Διάγραμμα 44. Συνολικό κόστος Ιδιωτικών οχημάτων και LDVs με αυστηρά CO <sub>2</sub> standards ..	106
Διάγραμμα 45. Ποσοστό δραστηριότητας ηλεκτροκίνητων οχημάτων .....	108
Διάγραμμα 46. Συνολική δραστηριότητα ιδιωτικών οχημάτων .....	108
Διάγραμμα 47. Συνολικός στόλος ηλεκτροκίνητων οχημάτων .....	109
Διάγραμμα 48. Ποσοστό στόλου ηλεκτροκίνητων οχημάτων .....	110
Διάγραμμα 49. Συνολική κατανάλωση ενέργειας ιδιωτικών οχημάτων .....	110
Διάγραμμα 50. Ποσοστό κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας ιδιωτικών οχημάτων.....	111
Διάγραμμα 51. Συνολικό κόστος ιδιωτικών οχημάτων και LDVs .....	112

## Πίνακες

Πίνακας 1. Υπολογισμός βάρους ηλεκτρικών οχημάτων.....	27
Πίνακας 2. Σύγκριση επιμέρους συστημάτων EV - συμβατικού οχήματος.....	31
Πίνακας 3. Βάρος PHEV ανά κατηγορία .....	34
Πίνακας 4. Σύγκριση συστημάτων plug in hybrid - συμβατικών οχημάτων .....	38
Πίνακας 5. Κατανάλωση plug in hybrid οχημάτων .....	39
Πίνακας 6. Ενδεικτικές τιμές ειδικής ισχύος και ειδικής ενέργειας για κάθε τύπο μπαταρίας..	41
Πίνακας 7. Ποσοστό απόστασης που διανύουν τα PHEV σε ηλεκτρική και υβριδική λειτουργία	44
Πίνακας 8. Απαιτήσεις εκφορτίσεων PHEV οχήματος .....	44
Πίνακας 9. Τεχνικά χαρακτηριστικά μπαταριών PHEV ανά κατηγορία .....	44
Πίνακας 10. Κατανομή υλικών κατά βάρος για την κατασκευή μπαταριών υψηλής ενέργειας και υψηλής ισχύος .....	46
Πίνακας 11. Συνολικό κόστος κτήσης μπαταρίας .....	54
Πίνακας 12. Ενδεικτικό κόστος απόκτησης ηλεκτρικού οχήματος .....	61
Πίνακας 13. Ενδεικτικό κόστος απόκτησης plug in hybrid οχημάτων.....	62
Πίνακας 14. Συγκριτικός πίνακας ενδεικτικού κόστους κτήσης συμβατικών και ηλεκτροκίνητων οχημάτων .....	62

Πίνακας 15. Σύγκριση κόστους συντήρησης ηλεκτρικών και συμβατικών οχημάτων σε ετήσια βάση .....	63
Πίνακας 16. Ενδεικτικό ετήσιο συνολικό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας.....	65
Πίνακας 17. Ενδεικτικό ετήσιο κόστος καυσίμου για PHEV.....	65
Πίνακας 18. Συγκριτικός πίνακας ετήσιου κόστους συντήρησης και καυσίμων .....	66
Πίνακας 19. Well to Wheel εκπομπές CO2 για τα ηλεκτρικά οχήματα.....	67
Πίνακας 20. Εκπομπές CO2 συμβατικών οχημάτων ανά κατηγορία .....	67
Πίνακας 21. Συνολικές Well to wheel εκπομπές CO2 plug in hybrid οχημάτων .....	68
Πίνακας 22. Ενδεικτικές τιμές κατασκευής θέσεων φόρτισης.....	57
Πίνακας 23. Κατηγορίες ηλεκτροκινούμενων οχημάτων.....	73
Πίνακας 24. Αρχική (2015) και μέγιστη αυτονομία (2050) ανά τύπο οχήματος και σενάριο.....	79
Πίνακας 25. Ενδεικτικά δεδομένα που δίνονται για το EV Large 400 .....	80
Πίνακας 26. Περιοριστικός μέσος όρος εκπομπών CO2 νέων εγγραφών .....	82
Πίνακας 27. Σύνολο δυνατών σεναρίων .....	82

## Εικόνες

Εικόνα 1. Ο εφευρέτης Thomas Edison και ένα ηλεκτρικό όχημα το 1913	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Εικόνα 2. Τομή τετραπολικής ασύγχρονης μηχανής.....	20
Εικόνα 3. Τα τυλίγματα στάτη και δρομέα είναι ίδιας πολικότητας και απωθούνται .....	21
Εικόνα 4. Τα τυλίγματα δρομέα και στάτη συνεχίζουν να έχουν την ίδια πολικότητα και απωθούνται μέχρι να ευθυγραμμιστούν.....	22
Εικόνα 5. Τα δυο πεδία δεν έχουν ευθυγραμμιστεί ακόμα. Στη εικόνα φαίνεται η εγκοπή από τις ψήκτρες όπου και γίνεται η αλλαγή της πολικότητας των τυλιγμάτων του δρομέα. Όταν η πολικότητα αλλάξει, ξεκινάει ο ίδιος κύκλος.....	22
Εικόνα 6. Κινητήρας DC μόνιμου μαγνήτη. Ο κινητήρας έχει εφαρμογή σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και στο καπάκι του διακρίνεται ο δρομέας όπου και βρίσκονται οι μόνιμοι μαγνήτες αλλά και τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά που τροφοδοτούν τον στάτη. ....	23
Εικόνα 7. Ροή ενέργειας κατά την εκκίνηση και το φρενάρισμα του ηλεκτρικού οχήματος. ....	28
Εικόνα 8. Διάταξη πλανητικού συστήματος ταχυτήτων σε PHEV σειράς παράλληλης διάταξης	36
Εικόνα 9. Σύστημα CVT.....	37
Εικόνα 10. Ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω ιόντων λιθίου, κατά την φόρτιση και την εκφόρτιση της μπαταρίας .....	42
Εικόνα 11. Διατομή κυττάρου μπαταρίας οργανωμένης σε κύλινδρο. Διακρίνονται τα στρώματα ανόδου, καθόδου και διαχωριστή. Πηγή Sony.....	46
Εικόνα 12. Θέσεις στάθμευσης με την δυνατότητα φόρτισης (Πηγή wikipedia).....	56
Εικόνα 13. Χαρακτηριστική καμπύλη φορτίου για το καλοκαίρι και τον χειμώνα .....	58



# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Προβληματική της διπλωματικής εργασίας

Η παγκόσμια επιστημονική κοινότητα αποδίδει την κλιματική αλλαγή και το φαινόμενο του θερμοκηπίου σε παράγοντες που συνδέονται με την ανθρώπινη δραστηριότητα και την οικονομική ανάπτυξη. Λαμβάνοντας υπόψιν τις πιθανές επιπτώσεις από τα παραπάνω (συχνότερα ακραία καιρικά φαινόμενα, αύξηση της στάθμης της θάλασσας, καταστροφή οικοσυστημάτων) τα ανεπτυγμένα κράτη έχουν ψηλά στην ατζέντα τους την εφαρμογή περιβαλλοντολογικών πολιτικών για την ανάσχεση αυτών. Οι πολιτικές αυτές αποσκοπούν κυρίως στην μακροπροθεσμή μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> το όποιο και θεωρείται ότι προκαλεί το φαινόμενο του θερμοκηπίου.

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση έχει υιοθετηθεί η δεσμευτική μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά 20% έως το 2020 σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. Έχοντας ως δεδομένο ότι κατά την συντριπτική πλειοψηφία των διαδικασιών παραγωγής και μετατροπής ενέργειας γίνεται έκλυση CO<sub>2</sub>, οι πολιτικές που πρέπει να εφαρμοστούν προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι χωρίς να έχουμε κάμψη στην οικονομική δραστηριότητα είναι πολύπλευρες. Μεγάλο μερίδιο εκπομπών CO<sub>2</sub> οφείλεται στις μεταφορές ανθρώπων και εμπορευμάτων. Συγκεκριμένα, οι εκπομπές CO<sub>2</sub> των μεταφορών αναπαριστούν το 23% των παγκόσμιων εκπομπών CO<sub>2</sub> που εκπέμπονται κατά την καύση των καυσίμων (ITF 2010). Γίνεται λοιπόν φανερό ότι οι μεταφορές πρέπει να γίνουν πιο αποδοτικές και να αποσυνδεθούν μερικώς από την εκπομπή CO<sub>2</sub>.

Για την απανθρακοποίηση της αγοράς μεταφορών έχουν προταθεί διάφορες εναλλακτικές ανάλογα με τον τομέα των μεταφορών (οδικές, εναέριες, πλωτές). Όσο αφορά τις οδικές μεταφορές πέρα από βελτίωση των συμβατικών μέσων μεταφοράς, και την περαιτέρω ανάπτυξη των μέσων μαζικής μεταφοράς, προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι, χρειάζεται και η εισαγωγή νέων εναλλακτικών τεχνολογιών. Σημαντική θεωρείται η συμβολή της ηλεκτρικής ενέργειας για την απανθρακοποίηση των μεταφορών.

Στα θετικά του εξηλεκτρισμού των μεταφορών προσμετράται ο υψηλός βαθμός ωρίμανσης και απόδοσης των ηλεκτρικών μηχανών καθώς και του ελέγχου αυτών. Θετική είναι ακόμα η δυνατότητα αποσύνδεσης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την εκπομπή CO<sub>2</sub> μέσω των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Κύριος αρνητικός παράγοντας για την ηλεκτροκίνηση θεωρείται η τεχνολογία των μπαταριών. Τόσο το κόστος τους όσο και οι τεχνολογικοί περιορισμοί (μειωμένη αυτονομία) καθιστούν το προσιτό και φιλικό ηλεκτρικό όχημα προϊόν του μέλλοντος και όχι του παρόντος.

## 1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του εξηλεκτρισμού των οδικών μεταφορών στην ευρωπαϊκή αγορά ιδιωτικών αυτοκινήτων και ελαφρού τύπου επαγγελματικών (<3.5 τόνων). Ο εξηλεκτρισμός των βαρέως τύπου φορτηγών και λεωφορείων δεν μελετάται λόγω της αυξημένης αυτονομίας που απαιτούν τα οχήματα αυτά σε συνδυασμό με το αυξημένο συνολικό βάρος. Η μελέτη αυτή γίνεται με την χρήση του οικονομοτεχνικού μοντέλου PRIMES-TREMOVE ξεκινώντας από το έτος 2015 έως το 2050 με βήμα πενταετίας, μέσω διαφορετικών σεναρίων που λύνει το μοντέλο προκειμένου να γίνει ποσοτική εκτίμηση των διαφορών μεταβλητών που επηρεάζουν την διείσδυση της ηλεκτρικής ενέργειας στις μεταφορές. Το μοντέλο PRIMES-TREMOVE λύνει ξεχωριστά για κάθε μια από τις 27 ευρωπαϊκές χώρες λαμβάνοντας υπόψη τις επιμέρους διαφοροποιήσεις και δίνει λεπτομερή αποτελέσματα για το σύνολο των μεταφορών για δεδομένα όπως η δραστηριότητα, κόστη, εκπομπές ρύπων, κατανάλωση ενέργειας κ.α.

Αρχικά γίνεται πλήρης ανάλυση των ηλεκτροκίνητων οχημάτων ως προς τα δομικά τους στοιχεία προκειμένου να μοντελοποιηθούν και να είναι δυνατή η εισαγωγή τους στο μοντέλο. Η ανάλυση αυτή εμπεριέχει στοιχεία όπως η ηλεκτρική μηχανή, το σύστημα ελέγχου της, η μπαταρία, το σύστημα πέδησης, το σύστημα μετάδοσης, το σύστημα ψύξης και θέρμανσης αλλά και το κόστος συντήρησης. Η κατηγοριοποίηση των ηλεκτρικών οχημάτων βασίστηκε στα συμβατικά οχήματα και προστέθηκε μια ακόμα μεταβλητή, αυτή της ηλεκτρικής αυτονομίας. Η πλήρης οικονομοτεχνική ανάλυση των ηλεκτροκίνητων οχημάτων θεωρήθηκε το απαραίτητο πρώτο βήμα για να εξαχθούν οι κρίσιμοι παράγοντες που διαφοροποιούν την νέα τεχνολογία και να οριστούν μέσα στο μοντέλο νέες μεταβλητές που να μοντελοποιούν αυτές τις διαφορές.

Τέτοιες κρίσιμες μεταβλητές είναι το κόστος των μπαταριών, η εφικτή ηλεκτρική αυτονομία, η πιθανή αντικατάσταση της μπαταρίας μέσα στον κύκλο ζωής των οχημάτων, η ανάπτυξη δικτύου φόρτισης. Για τα παραπάνω έγινε έρευνα στην διεθνή βιβλιογραφία και χρησιμοποιήθηκαν οι πιο συγκρατημένες προβλέψεις προκειμένου να δομηθεί και να λυθεί ένα σενάριο αναφοράς κατά το οποίο έχουμε την ελάχιστη διείσδυση της ηλεκτρικής ενέργειας στις μεταφορές.

Στην συνέχεια δομούνται οι άξονες πάνω στους οποίους καταστρώνονται τα διαφορετικά σενάρια τα οποία θα εισαχθούν στο μοντέλο προκειμένου να γίνει η ποσοτική εκτίμηση ευαισθησίας που παρουσιάζει η ηλεκτροκίνηση ως προς τους άξονες αυτούς. Μέτα από μελέτη της διεθνούς βιβλιογραφίας κρίθηκε σωστό ότι οι οι παράγοντες που αφενός παρουσιάζουν μεγάλη αβεβαιότητα ως προς την εξέλιξη τους στον χρόνο, αφετέρου αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης είναι οι παρακάτω

- Κεφαλαιουχικό κόστος και τεχνικά χαρακτηριστικά
- Ανάπτυξη δικτύου φόρτισης
- Εφαρμογή δεσμευτικών εκπομπών CO<sub>2</sub> για τον στόλο νέων οχημάτων

Στον άξονα του κεφαλαιουχικού κόστους ενσωματώνονται στοιχεία όπως το εκτιμώμενο κόστος ανά kWh των μπαταριών, η αυτονομία, η ηλεκτρική κατανάλωση και ένας επιβαρυντικός παράγοντας κόστους από πιθανή αντικατάσταση της μπαταρίας.



### 1.3 Οργάνωση κειμένου

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται παρουσίαση των δομικών στοιχείων των καθαρά ηλεκτρικών οχημάτων (Battery Electric Vehicle) και των υβριδικών οχημάτων που συνδέονται στο δίκτυο (Plug in Hybrid Electric Vehicle). Εκτενής αναφορά και ανάλυση γίνεται στις μπαταρίες καθώς θεωρούνται το κύριο δομικό στοιχείο των ηλεκτροκίνητων οχημάτων. Τα δεδομένα αντλήθηκαν από την διεθνή βιβλιογραφία

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται παρουσίαση των τεχνοοικονομικών χαρακτηριστικών των ηλεκτρικών οχημάτων σε σχέση με τα συμβατικά. Σε αυτά περιλαμβάνονται το κόστος απόκτησης και χρήσης των ηλεκτρικών οχημάτων αλλά και οι εκτιμώμενες περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται οι διαφορετικοί άξονες στους οποίους βασίζονται τα σενάρια εξηλεκτρισμού των μεταφορών. Αφού γίνει μια συνοπτική παρουσίαση του οικονομοτεχνικού μοντέλου PRIMES-TREMOVE δίνονται οι γενικές υποθέσεις και παρουσιάζεται το σκεπτικό ανάπτυξης των διαφορετικών σεναρίων που θα λύσει το μοντέλο.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τα σενάρια εξηλεκτρισμού των μεταφορών ως προς τους δυο σημαντικούς άξονες. Πρώτα γίνεται η ποσοτική εκτίμηση σε σχέση με το κόστος και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των μπαταριών και ύστερα η εκτίμηση σε σχέση με την ανάπτυξη δικτύου φόρτισης.

Στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται σε μορφή ερωτησης-απάντησης τα αποτελέσματα εφαρμογής αυστηρών CO<sub>2</sub> standards σε συνδυασμό με την ανάπτυξη ή μη των άλλων τεχνοοικονομικών παραγόντων

Τέλος στο κεφάλαιο 7 συνοψίζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της εργασίας, ενώ γίνονται και προτάσεις για μελλοντική μελέτη

## **2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΟΥΜΕΝΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ**

### **2.1 Εισαγωγή**

Η παρούσα ενότητα παρουσιάζει μια συνοπτική περιγραφή των ηλεκτροκινούμενων τεχνολογιών για τις επιβατικές μετακινήσεις. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά παρουσιάζονται τα δομικά στοιχεία των ηλεκτρικών αυτοκινήτων με μπαταρία (battery electric vehicle- BEV), ενώ στη συνέχεια παρουσιάζεται η δομή των υβριδικών αυτοκινήτων με καλώδιο (Plug-in Hybrid-PHEV).

Η παρουσίαση των δομικών στοιχείων των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην παρούσα ενότητα αποσκοπεί στο να οδηγήσει στον προσδιορισμό των οικονομοτεχνικών παραμέτρων και στοιχείων που εφαρμόζονται στη μοντελοποίηση και στη διεξαγωγή σεναρίων στις επόμενες ενότητες.

### **2.2 Ηλεκτρικό όχημα – Battery electric vehicle (BEV)**

Το καθαρά ηλεκτρικό όχημα (για συντομία EV, **E**lectric **V**ehicle) κινείται αποκλειστικά με ηλεκτρική ενέργεια. Η κινητική του ενέργεια παράγεται από ένα ηλεκτρικό κινητήρα ο οποίος τροφοδοτείται από μπαταρίες που βρίσκονται στο όχημα καθ'όλη την διάρκεια λειτουργίας. Το ηλεκτρικό όχημα έχει την δυνατότητα σύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο για την επαναφόρτισή του.

Στην παρούσα εργασία θα ασχοληθούμε μόνο με ηλεκτρικά οχήματα που έχουν τις προδιαγραφές των συμβατικών αυτοκινήτων όσο αφορά τα επίπεδα απόδοσης (επιτάχυνση, τελική ταχύτητα) και ασφάλειας τα οποία μπορούν και να εξασφαλίσουν πιστοποίηση για κυκλοφορία σε όλο το οδικό δίκτυο.

Συγκρίνοντας ένα συμβατικό αυτοκίνητο με το καθαρά ηλεκτρικό θα βρούμε κατασκευαστικές ομοιότητες και διαφορές. Στην ανάλυση των τεχνικών χαρακτηριστικών που

ακολουθεί πάντα θα γίνεται η σύγκριση με το συμβατικό όχημα προκειμένου να γίνει πιο κατανοητό το πώς θα είναι τα ηλεκτρικά οχήματα και να διευκολυνθεί η ανάλυση κόστους.

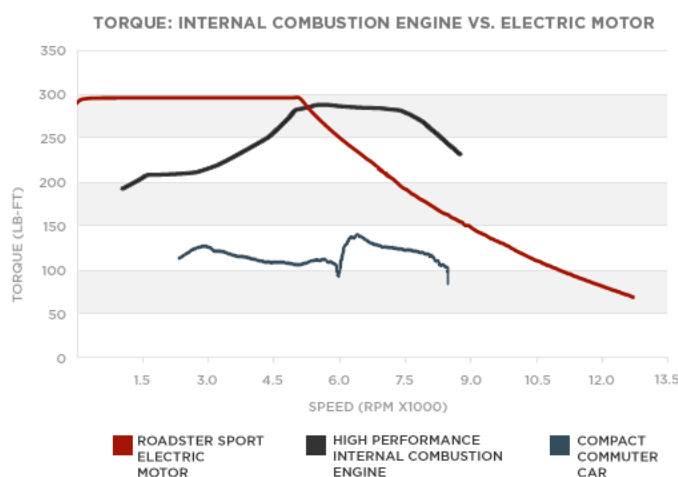
## 2.2.1 Ηλεκτρικός Κινητήρας

Η κινητική ενέργεια του ηλεκτρικού οχήματος παράγεται από έναν ηλεκτρικό κινητήρα. Αυτό διαφοροποιεί πλήρως ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο από το αντίστοιχο συμβατικό. Οι ηλεκτροκινητήρες έχουν συγκριτικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις ΜΕΚ και θεωρούνται ένα επιπλέον κίνητρο για την μετάβαση στην ηλεκτροκίνηση.

Στην εφαρμογή τους στα ηλεκτρικά οχήματα, οι ηλεκτρικές μηχανές που τοποθετούνται χρησιμοποιούνται και ως κινητήρες και ως γεννήτριες. Επειδή όμως η μηχανή λειτουργεί σαν γεννήτρια μόνο κατά το αναγεννητικό φρενάρισμα για να φορτίσει την μπαταρία και ως επί το πλείστον βρίσκεται σε λειτουργία κινητήρα στην υπόλοιπη εργασία η μηχανή θα αναφέρεται ως ηλεκτροκινητήρας.

Όσο αφορά τα τεχνικά χαρακτηριστικά οι ηλεκτροκινητήρες έχουν την δυνατότητα να αποδίδουν ροπή και ισχύ από χαμηλές στροφές. (Διάγραμμα 1). Άμεση συνέπεια αυτού είναι ότι δεν χρειάζεται η χρήση κιβωτίου ταχυτήτων και η χρήση ενός μειωτήρα στροφών είναι αρκετή για την μετάδοση της κίνησης ενώ με αυτό τον τρόπο γίνεται απλούστερη η οδήγηση και βελτιώνεται η συμπεριφορά του οχήματος. Επιπλέον οι ηλεκτροκινητήρες είναι κατά μέσο όρο τρεις φορές πιο αποδοτικοί σε σχέση με μια ΜΕΚ (αυτός ο συντελεστής μπορεί να διαφέρει ανάλογα με το καύσιμο της ΜΕΚ και το είδος του ηλεκτροκινητήρα) και δεν εκπέμπουν καυσαέρια. Το κατασκευαστικό πλεονέκτημα που προκύπτει είναι ότι το σύστημα ψύξης λόγω των μειωμένων θερμικών απωλειών είναι απλούστερο, ενώ δεν χρειάζεται σύστημα διαχείρισης των καυσαερίων. Τέλος όσο αφορά το όγκο και το βάρος οι ηλεκτροκινητήρες έχουν ένα πλεονέκτημα σε σχέση με τις ΜΕΚ ίσης ισχύος. Μάλιστα το πλεονέκτημα αυτό αυξάνεται με την αύξηση της ισχύος.

**Διάγραμμα 1:** Σύγκριση διαγράμματος ροπής στροφών του ηλεκτροκίνητου Tesla Roadster με αντίστοιχο συμβατικό υψηλών επιδόσεων (Πηγή teslamotors)



Μια επιπλέον δυνατότητα των ηλεκτρικών μηχανών είναι το ότι μπορούν να λειτουργήσουν ως κινητήρες και ως γεννήτριες. Για την λειτουργία αυτή θα γίνει αναφορά σε παρακάτω ενότητα (Πέδηση) απλά εδώ αναφέρουμε ότι με την μετατροπή του κινητήρα σε γεννήτρια κατά

το φρενάρισμα έχουμε την δυνατότητα μετατροπής της κινητικής ενέργειας του οχήματος σε ηλεκτρική και αποθήκευσης της στην μπαταρία του αυτοκινήτου (αναγεννητική πέδηση). Με τον παραπάνω τρόπο λειτουργούν και τα υβριδικά αυτοκίνητα και βελτιώνουν τον βαθμό απόδοσής τους.

Οι ηλεκτροκινητήρες δεν έχουν μόνο κατασκευαστικά πλεονεκτήματα έναντι των ΜΕΚ. Είναι αθόρυβοι κατά την λειτουργία τους ενώ λόγω της απλότητας τους έχουν μειωμένα έξοδα συντήρησης αφού δεν χρειάζονται ηλεκτρικό σύστημα εκκίνησης, φίλτρα καθαρισμού και πολύπλοκες εργασίες συντήρησης.

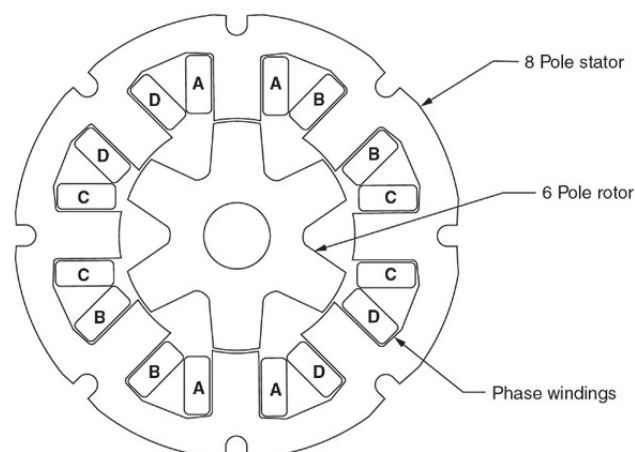
Για τον εξοπλισμό των ηλεκτρικών οχημάτων έχουν προταθεί τρία είδη ηλεκτροκινητήρων. Αυτά είναι:

- AC κινητήρας επαγωγής (ασύγχρονος)
- DC κινητήρας
- DC μονίμου μαγνήτη χωρίς ψήκτρες

### **Ασύγχρονος ηλεκτρικός κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος.**

Ο ασύγχρονος ηλεκτρικός κινητήρας (επαγωγής) είναι ο πιο διαδεδομένος ηλεκτροκινητήρας, έχοντας πολλές εφαρμογές στην βιομηχανία, υπάρχει σε διαφορετικές παραλλαγές (ανάλογα με την κατασκευή του δρομέα) σε όλο το φάσμα ισχύος. Κατοχυρώθηκε ως εφεύρεση για πρώτη φορά από τον Νικολάι Τέσλα το 1888. Τα δύο βασικά μέρη του κινητήρα είναι ο δρομέας και ο στάτης (στάτορας). Ο στάτης είναι το ακίνητο μέρος της μηχανής που περιβάλλει τον δρομέα, χωρίς να έρχεται σε επαφή με αυτόν και φέρει αγώγιμο τυλίγμα σε ζεύγη πόλων. Στον στάτη δίνεται η τροφοδοσία του κινητήρα (μονοφασική ή πολυφασική) και δημιουργείται ένα συνεχώς μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο. Η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου εξαρτάται από την συχνότητα του εφαρμοζόμενου εναλλασσόμενου ρεύματος και το πλήθος των πόλων και ονομάζεται σύγχρονη ταχύτητα. Λόγω του μαγνητικού πεδίου του στάτη, δημιουργείται τάση εξ' επαγωγής στα τυλίγματα του δρομέα, η οποία προκαλεί ρεύμα και τελικά ένα ακόμα μαγνητικό πεδίο. Λόγω των δύο περιστρεφόμενων μαγνητικών πεδίων δημιουργείται ροπή μεταξύ δρομέα και στάτη και παράγεται κινητική ενέργεια. Η ταχύτητα του δρομέα είναι πολύ κοντά στην σύγχρονη ταχύτητα αλλά ποτέ δεν είναι ίση με αυτή. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται ολίσθηση. Αν η ταχύτητα του δρομέα ήταν ίση με την σύγχρονη δεν θα υπήρχε σχετική ταχύτητα μεταξύ των μαγνητικών πεδίων του στάτη και του δρομέα, δεν θα αναπτυσσόταν ηλεκτρεγερτική δύναμη (τάση) στα τυλίγματα του δευτέρου, επομένως και ροπή μεταξύ τους.

**Εικόνα 1: Τομή τετραπολικής ασύγχρονης μηχανής. Διακρίνεται η διάταξη των πόλων του στάτη που καθορίζει την σύγχρονη ταχύτητα της μηχανής**



Η επικράτηση των AC κινητήρων επαγωγής οφείλεται στα συγκριτικά πλεονεκτήματα που έχουν σε σχέση με τα άλλα είδη ηλεκτροκινητήρων. Αυτά είναι:

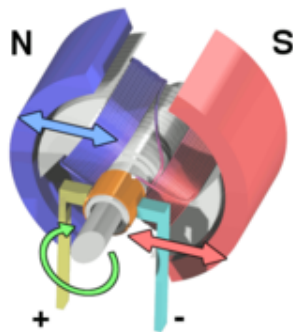
- Απλή και ανθεκτική κατασκευή
- Χαμηλό κόστος
- Μηδενικά έξοδα συντήρησης
- Μεγάλος συντελεστής απόδοσης

Το μειονέκτημα που παρουσιάζουν όμως για την εφαρμογή τους στα ηλεκτρικά οχήματα είναι ότι απαιτείται ένα πολύπλοκο σύστημα ελέγχου όταν τροφοδοτούνται από πηγή σταθερού ρεύματος (μπαταρία). Με την εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος το μειονέκτημα αυτό δεν θεωρείται αποτρεπτικό για την εφαρμογή των AC κινητήρων επαγωγής στα ηλεκτρικά οχήματα.

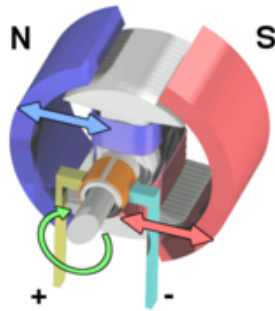
### Συμβατικός κινητήρας συνεχούς ρεύματος

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιήθηκαν στα πρώτα πειραματικά ηλεκτρικά οχήματα. Ο κύριος λόγος ήταν ο εύκολος έλεγχος λόγω της τροφοδότησης τους από μια πηγή συνεχούς ρεύματος. Αποτελούνται και αυτές από ένα δρομέα και έναν στάτη που φέρουν τα αντίστοιχα τυλίγματα ενώ η κύρια κατασκευαστική διαφορά είναι η παρουσία του συλλέκτη. Ο συλλέκτης είναι σταθερός και συνδέεται στον δρομέα διαμέσου των ψηκτρών (οι οποίες βρίσκονται στον άξονα του δρομέα). Στην λειτουργία κινητήρα ο συλλέκτης εναλλάσσει την πολικότητα στα τυλίγματα του δρομέα και εξασφαλίζει την δημιουργία ροπής. Ο κύκλος της ηλεκτρικής μηχανής σταθερού ρεύματος και η λειτουργία του συλλέκτη φαίνεται στα παρακάτω σχήματα

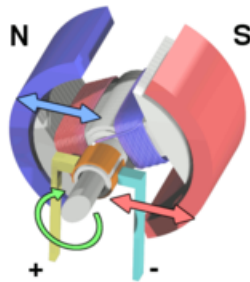
Εικόνα 2: Τα τυλίγματα στάτη και δρομέα είναι ίδιας πολικότητας και απωθούνται



Εικόνα 3: Τα τυλίγματα δρομέα και στάτη συνεχίζουν να έχουν την ίδια πολικότητα και απωθούνται μέχρι να ευθυγραμμιστούν



Εικόνα 4: Τα δυο πεδία δεν έχουν ευθυγραμμιστεί ακόμα. Στη εικόνα φαίνεται η εγκοπή από τις ψήκτρες όπου και γίνεται η αλλαγή της πολικότητας των τυλιγμάτων του δρομέα. Όταν η πολικότητα αλλάξει, ξεκινάει ο ίδιος κύκλος



Οι κατηγορίες των κινητήρων συνεχούς ρεύματος διαφέρουν ανάλογα με τον τρόπο διέγερσης. Έτσι προκύπτουν οι κινητήρες ανεξάρτητης (ξένης) διέγερσης, παράλληλης διέγερσης, διέγερσης σειράς, σύνθετης διέγερσης. Στα πλαίσια αυτής την εργασίας γίνεται απλά αναφορά των διαφορετικών κατηγοριών και δεν θα αναλύσουμε τις διαφορές των χαρακτηριστικών καμπυλών. Αυτό που μας ενδιαφέρει είναι ότι κάθε κατηγορία κινητήρων ελέγχεται με διαφορετικό τρόπο.

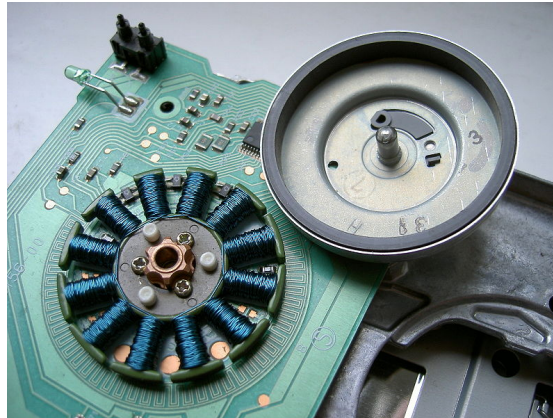
Το συγκριτικό πλεονέκτημα των μηχανών συνεχούς ρεύματος είναι το αντίστοιχο μειονέκτημα των AC ασύγχρονων. Έχουν σχετικά απλό τρόπο ελέγχου και για αυτό επικράτησαν στις πρώτες εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων. Κατά τα άλλα συγκρινόμενες με τους κινητήρες εναλλασσομένου ρεύματος, οι DC είναι ακριβότεροι στην κατασκευή, έχουν μεγαλύτερη μάζα (σε αντίστοιχη ισχύ), και αυξημένο κόστος συντήρησης λόγω της φθοράς των ψηκτρών.

### DC μονίμου μαγνήτη χωρίς ψήκτρες

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος μονίμου μαγνήτη είναι προϊόν την εξέλιξης των ηλεκτρονικών ισχύος. Όπως και οι προηγούμενες κατηγορίες ηλεκτρικών μηχανών αποτελούνται από δρομέα και στάτη με αρκετές όμως διαφορές. Οι κινητήρες αυτοί προκειμένου να εξαλείψουν την ανάγκη συλλέκτη και ψηκτρών, και τα μειονεκτήματα που αυτά προκαλούν (συνεχής συντήρηση, σπινθηρισμοί, μειωμένη απόδοση) έχουν εγκατεστημένο μόνιμο μαγνήτη στον δρομέα που δημιουργεί μόνιμο μαγνητικό πεδίο. Αφού το πεδίο του δρομέα είναι σταθερό, για την δημιουργία ροπής θα πρέπει να μεταβάλλεται το πεδίο του στάτη. Αυτό γίνεται δυνατό με την συνεχή εναλλαγή της πολικότητας στα τυλίγματα του στάτη. Για να

λειτουργήσει ένας τέτοιος κινητήρας είναι απαραίτητη η τροφοδοσία μέσω ηλεκτρονικών ισχύος.

**Εικόνα 5: Κινητήρας DC μόνιμου μαγνήτη. Ο κινητήρας έχει εφαρμογή σε ηλεκτρονικό υπολογιστή και στο καπάκι του διακρίνεται ο δρομέας όπου και βρίσκονται οι μόνιμοι μαγνήτες αλλά και τα υπόλοιπα ηλεκτρονικά που τροφοδοτούν τον στάτη.**



Οι DC κινητήρες μόνιμου μαγνήτη παρουσιάζουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με του συμβατικούς DC. Είναι ελαφρύτεροι και μικρότεροι σε όγκο, έχουν μεγαλύτερη απόδοση, ελάχιστα έξοδα συντήρησης (όμοια με των AC επαγωγής) και είναι πιο αθόρυβοι. Για αυτά ακριβώς τα πλεονεκτήματα αν και έχουν εισαχθεί τις τελευταίες δεκαετίες (η μαζική παραγωγή τους έγινε δυνατή το 1962) χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές. Μάλιστα τέτοιου είδους κινητήρας χρησιμοποιείται και στα υβριδικά οχήματα. Τα μειονέκτημα που παρουσιάζουν είναι τα ακριβά υλικά κατασκευής (μόνιμος μαγνήτης) που αυξάνει το συνολικό κόστος και ο πολύπλοκος έλεγχός τους.

### **Σύνοψη και συμπέρασμα**

Και τα τρία είδη ηλεκτροκινητήρων που παρουσιάστηκαν συνοπτικά παραπάνω έχουν την δυνατότητα να εξοπλίσουν ηλεκτρικά οχήματα. Για να είναι επιτυχημένη εισαγωγή των ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά θα πρέπει να παρουσιάζουν επιδόσεις αντίστοιχες των συμβατικών. Για αυτό τον λόγο θεωρούμε ότι η ισχύς των ηλεκτρικών οχημάτων θα είναι στα ίδια επίπεδα με των συμβατικών. Η διαστασιολόγηση και το κόστος των κινητήρων εξαρτάται από το βάρος του οχήματος και το μέγεθός του. Λαμβάνοντας υπόψη την διεθνή βιβλιογραφία (Kalhammer, et al. 2007) αρχικά θα εισαχθούν στην αγορά μικρά και μεσαία EV των οποίων η ισχύς (συνεχούς λειτουργίας) θα κυμαίνεται στα 50 και 75 kW αντίστοιχα. Για τα μεγάλα ηλεκτρικά οχήματα δεν μπορούμε να δώσουμε μια ενδεικτική ισχύ κινητήρα γιατί αυτή εξαρτάται από το προφίλ του αυτοκινήτου(σπορ, SUV κ.α.) άλλα μια ισχύς αναφοράς μπορεί να είναι τα 100kW. Η αναφορά κόστους για τους κινητήρες θα γίνει στο αντίστοιχο κεφάλαιο της εργασίας.

Κλείνοντας την αναφορά στους κινητήρες, είναι δύσκολο να συμπεράνουμε ποιο από τα τρία είδη ηλεκτροκινητήρων θα επικρατήσει όταν τα ηλεκτρικά οχήματα παραχθούν μαζικά. Όσο η τεχνολογία των ηλεκτρονικών ισχύος βελτιώνεται και το κόστος μειώνεται, ο έλεγχος των AC κινητήρων γίνεται ευκολότερος και η κατηγορία αυτή αποκτά πλεονέκτημα. Οι DC κινητήρες μόνιμου μαγνήτη έχουν το πλεονέκτημα της χρησιμοποίησής τους στα υβριδικά μοντέλα. Επομένως έχει αναπτυχθεί η απαραίτητη τεχνογνωσία ελέγχου των κινητήρων αυτών, και έχουν δοκιμαστεί και σε πραγματικές συνθήκες για περίπου μια δεκαετία (Prius). Αυτό που

διαφαίνεται είναι ότι οι συμβατικοί DC κινητήρες παραγκωνίζονται διότι τα μειονεκτήματά τους αποτρέπουν την μαζική παραγωγή τους για ηλεκτρικά οχήματα.

### 2.2.2 Έλεγχος κινητήρα

Όποια κατηγορία κινητήρα και να επιλεγθεί, το ηλεκτρικό όχημα χρειάζεται έναν ελεγκτή (ρυθμιστή) για τον έλεγχο της ροπής και την ταχύτητας του κινητήρα ανάλογα με τις απαιτήσεις του οδηγού. Οι μπαταρίες έχουν στην έξοδό τους σταθερή τάση (η οποία μεταβάλλεται ελάχιστα ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης, και το ρεύμα που παρέχουν). Ο ελεγκτής μεταβάλλει αυτή την τάση, έτσι ώστε να διοχετεύσει στον κινητήρα το κατάλληλο ρεύμα διέγερσης και να παραχθεί η απαραίτητη ροπή.

Οι ελεγκτές έχουν την δυνατότητα όχι μόνο να παρέχουν τάση στον κινητήρα άλλα και να φορτίζουν την μπαταρία. Οι ηλεκτρικές μηχανές μπορούν να λειτουργήσουν και σαν κινητήρες, και σαν γεννήτριες ανεξαρτήτως του είδους τους. Εξηγώντας το απλά, αυτό συμβαίνει αν αφαιρέσουμε την διέγερση (κατά την λειτουργία κινητήρα) και ο δρομέας αποκτά κίνηση από εξωτερική πηγή. Τότε αναπτύσσεται τάση και ρεύμα στα τυλίγματα του δρομέα ή του στάτη (ανάλογα με το είδος της μηχανής). Στα ηλεκτρικά οχήματα οι ηλεκτρικές μηχανές λειτουργούν ως γεννήτριες κατά το φρενάρισμα. Τότε η ροή του ρεύματος αλλάζει και ο ελεγκτής είναι υπεύθυνος να εφαρμόσει σταθερή τάση στα άκρα της μπαταρίας για να την φορτίσει.

Επειδή για κάθε είδος κινητήρα οι σχέσεις ροπής-ρεύματος, ροπής-ταχύτητας διαφέρουν, κάθε ελεγκτής είναι ρυθμισμένος για μια συγκεκριμένη μηχανή. Παρ' όλα αυτά οι βασικές αρχές ελέγχου είναι οι ίδιες και οι δύο πιο γενικές κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται, είναι οι ρυθμιστές που προορίζονται για έλεγχο μηχανών συνεχούς ρεύματος και για μηχανές εναλλασσόμενου. Μέσα στα πλαίσια την εργασίας γίνεται απλή αναφορά για τον έλεγχο των ηλεκτρικών οχημάτων και δεν αναφέρονται αναλυτικά οι μηχανισμοί, άλλα μόνο οι αρχές λειτουργίας

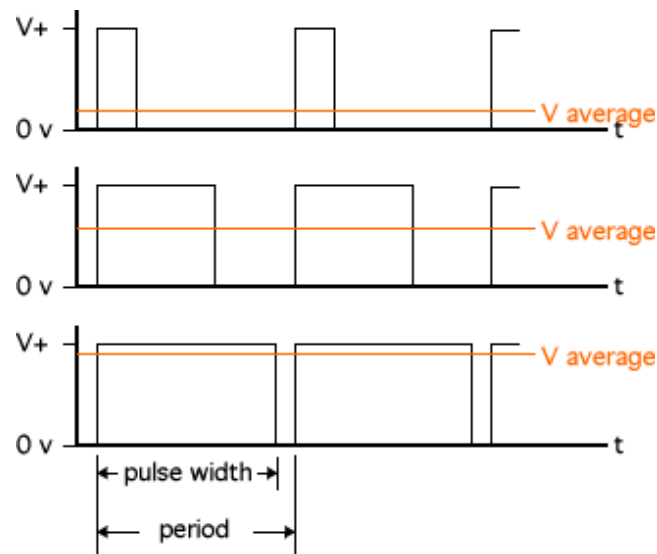
#### Ελεγκτές συνεχούς ρεύματος

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, μια μηχανή συνεχούς ρεύματος είναι ευκολότερο να ελεγχθεί. Για παράδειγμα στις μηχανές συνεχούς ρεύματος, με διέγερση σειράς, η ροπή που παράγεται εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη τάση. Στα πρώτα ηλεκτρικά οχήματα οι ρυθμιστές χρησιμοποιούσαν μηχανικά μέσα για την ρύθμιση του πλάτους (ροοστάτες). Αυτός ο τρόπος ελέγχου, έχει μεγάλες θερμικές απώλειες και αργές μεταβολές τάσης. Με την εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος και την δυνατότητα αποκοπής μεγάλων ρευμάτων με μεγάλη συχνότητα, η μέθοδος που χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία ηλεκτρικών μηχανών είναι η διαμόρφωση πλάτους παλμού (PWM, pulse width modulation).

Στην μέθοδο αυτή οι παλμοί που εφαρμόζονται στην είσοδο του κινητήρα έχουν σταθερό πλάτος, ίσο με την τάση εξόδου της μπαταρίας. Αφού το πλάτος παραμένει σταθερό, αυτό που μεταβάλλεται είναι η συχνότητα και η διάρκεια των παλμών. Στο PWM η τάση εξόδου είναι σταθερή και ίση με την τάση εξόδου της πηγής (στην προκειμένη περίπτωση με την τάση της μπαταρίας), οι μεταβολές της τάσης όμως (κατάσταση on και off) γίνονται τόσο γρήγορα (ms) έτσι ώστε το ηλεκτρικό κύκλωμα να αντιλαμβάνεται ως εφαρμοζόμενη τάση μια σταθερή τάση με πλάτος μικρότερο από τους εφαρμοζόμενους παλμούς. Το πλάτος της σταθερής τάσης που αντιλαμβάνεται ο κινητήρας είναι συνάρτηση των "on" και "off" διαστημάτων της μεθόδου. Για την καλύτερη κατανόηση της μεθόδου παρατίθεται το παρακάτω διάγραμμα (Διάγραμμα 2).



**Διάγραμμα 2: Εφαρμογή της μεθόδου PWM. Οι χρωματιστές γραμμές είναι η επιθυμητή τάση εφαρμογής και οι μύαρες η έξοδος του ελεγκτή. Όσο μεγαλύτερη είναι η τάση που θέλουμε να εφαρμόσουμε τόσο μεγαλύτερα είναι τα διαστήματα του ρυθμιστή**



Ότι αναφέραμε μέχρι στιγμής αφορά τις μηχανές με διέγερση σειράς των οποίων η χαρακτηριστική ροπή-ταχύτητας ευνοεί την χρήση ως κινητήρα. Το μειονέκτημα αυτών των μηχανών εμφανίζεται στην λειτουργία γεννήτριας όπου και είναι ασταθείς. Επομένως κατά το αναγεννητικό φρενάρισμα, για την φόρτιση της μπαταρίας, προτείνεται μηχανή παράλληλης ή ξένης διέγερσης. Στα δυο τελευταία είδη μηχανών συνεχούς ρεύματος απαιτούνται πιο πολύπλοκα συστήματα ρύθμισης της τάσης αφού δεν αρκεί μόνο η αλλαγή της τάσης στην διέγερση της μηχανής, αλλά και έλεγχος του πεδίου του στάτη.

Όσο αφορά τις μηχανές μονίμου μαγνήτη, ο έλεγχός τους είναι πολύ πιο πολύπλοκος. Όπως έχουμε αναφέρει στις μηχανές αυτές (λειτουργία κινητήρα) η διέγερση δίνεται στα τυλίγματα του στάτη, ενώ ο δρομέας φέρει μόνιμο μαγνήτη. Επομένως ο ελεγκτής ρυθμίζει την τάση στον στάτη. Η δυσκολία ελέγχου βρίσκεται στο γεγονός ότι η παραγόμενη ροπή εξαρτάται από την σχετική θέση του δρομέα μέσα στον στάτη. Επειδή μεταξύ δρομέα και στάτη δεν υπάρχει επαφή, ο εντοπισμός της θέσης γίνεται με αισθητήρες. Ένα ακόμα στοιχείο που κάνει πιο πολύπλοκο τον έλεγχο της μηχανής είναι ότι τα τυλίγματα του στάτη είναι συνήθως ανεξάρτητα μεταξύ τους και για την βέλτιστη λειτουργία της μηχανής χρειάζονται και ανεξάρτητο έλεγχο. Περιγράφοντας περιληπτικά το σύστημα ελέγχου των μηχανών αυτών έχουμε ως είσοδο την θέση του δρομέα σε σχέση με τον στάτη, την παραγόμενη ροπή και την ταχύτητα. Γνωρίζοντας ακόμα την επόμενη κατάσταση εφαρμόζει στα τυλίγματα του στάτη με την κατάλληλη τάση για να έχουμε το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι οι πιθανές επιλογές για τον έλεγχο των μηχανών συνεχούς ρεύματος είναι:

Επιλογή συμβατικού κινητήρα με διέγερση σειράς και απλό σύστημα ελέγχου όπου μειώνεται η δυνατότητα φόρτισης της μπαταρίας από το αναγεννητικό φρενάρισμα. Επιλογή μηχανής ξένης διέγερσης ή μονίμου μαγνήτη με υψηλή απόδοση τόσο στην λειτουργία κινητήρα, όσο και στην λειτουργία γεννήτριας αλλά με πολύπλοκο και ακριβό σύστημα ελέγχου.

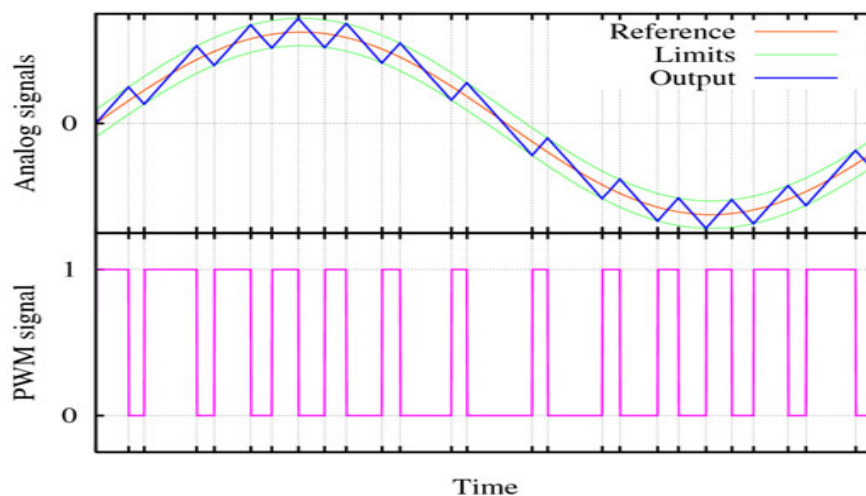
### **Ελεγκτές εναλλασσόμενου ρεύματος**

Για τις ασύγχρονες μηχανές, ο έλεγχος τους όταν τροφοδοτούνται από μια πηγή σταθερής τάσης απαιτεί ένα πολύπλοκο και δαπανηρό σύστημα. Τα πολλά πλεονεκτήματα των

ασύγχρονων κινητήρων σε συνδυασμό με την μείωση του κόστους και του όγκου των ηλεκτρονικών ισχύος που μπορούν να αποκόπτουν μεγάλα ρεύματα με μεγάλη συχνότητα προσανατολίζουν τους κατασκευαστές στην χρήση τους για τα ηλεκτρικά οχήματα.

Το πρώτο βήμα για την τροφοδότηση των AC μηχανών επαγωγής είναι η δημιουργία ενός τριφασικού εναλλασσόμενου συστήματος. Για να γίνει αυτό χρησιμοποιείται η μέθοδος του PWM όπως και στους ελεγκτές των μηχανών συνεχούς ρεύματος. Για να δημιουργηθούν ημιτονικές κυματομορφές στην είσοδο της μηχανής χρειάζονται ηλεκτρονικά ισχύος με μεγάλη διακοπτική συχνότητα.

Διάγραμμα 3: Παραγωγή ημιτονικού σήματος με την μέθοδο PWM. Στο επάνω μέρος απεικονίζεται η τάση που ανταλλάσσεται η ηλεκτρική συσκευή και στο κάτω η σειρά παλμών που παράγεται από το PWM



Οι μηχανές επαγωγής λειτουργούν συνήθως σε σταθερές στροφές, και η ταχύτητα περιστροφής εξαρτάται από τον αριθμό των πόλων, και την συχνότητα του ρεύματος τροφοδοσίας. Επιπλέον η ροπή που παράγουν εξαρτάται από το πλάτος της τάσης τροφοδοσίας. Επομένως οι AC ελεγκτές θα πρέπει να μπορούν να παρέχουν ρεύμα με μεταβλητή συχνότητα και πλάτος ανάλογα με τις ανάγκες.

### 2.2.3 Βάρος

Για τον υπολογισμό του βάρους του ηλεκτρικού οχήματος υποθέτουμε ότι το ηλεκτρικό όχημα ζυγίζει όσο με το αντίστοιχο συμβατικό, επιβαρυμένο με το βάρος της μπαταρίας. Το βάρος του συμβατικού οχήματος διαφέρει ανάλογα με τον εξοπλισμό και την ποιότητα κατασκευής. Ένας αντιπροσωπευτικός μέσος όρος από τα οχήματα που κυκλοφορούν είναι:

- Small Vehicle 1000kg
- Medium Vehicle 1400kg
- Large Vehicle 1700 kg

Υποθέτοντας ότι η μπαταρία έχει, ως αναφορά, μέση ενεργειακή ένταση 110Wh/kg (International Energy Agency 2009) υπολογίζεται το βάρος στον παρακάτω πίνακα:

**Πίνακας 1 Υπολογισμός βάρους ηλεκτρικών οχημάτων**

Κατηγορία	Αυτονομία (km)	Βάρος Συμβατικού(kg)	Ενέργεια Μπαταρίας (kWh)	Βάρος Μπαταρίας (kg)	Βάρος Οχήματος(kg)
Small EV	80	1000	8	73	1073
Medium EV	150	1400	21	190	1590
Large EV	400	1700	68	618	2318

Αξίζει να σημειωθεί ότι το ζήτημα του βάρους είναι σημαντικό εμπόδιο στην σχεδίαση και ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει το βάρος είναι αποτρεπτικός παράγοντας για την ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης σε μεγάλα οχήματα (φορτηγά, λεωφορεία) διότι οι μπαταρίες δεν μπορούν να ανταποκριθούν στις ανάγκες ισχύος και ενέργειας που προκύπτουν. Ακόμα και αν υποθέσουμε ότι είναι οικονομικά βιώσιμη η ηλεκτροκίνηση στα μεγάλα οχήματα, οι μπαταρίες που θα τα εξοπλίζαν θα ήταν τόσο βαριές που θα τροφοδοτούσαν έναν φαύλο κύκλο για το παράγοντα του βάρους.

Το συνολικό βάρος του ηλεκτρικού οχήματος, μέρος του οποίου προέρχεται από την μπαταρία, σε συνδυασμό με την δεδομένη ανά χρονική περίοδο ειδική ενέργεια της μπαταρίας που το εξοπλίζει παίζει σημαντικό ρόλο στον σχεδιασμό του οχήματος και την ηλεκτρική αυτονομία που αυτό έχει. Προφανώς η αυτονομία αυξάνεται με την αύξηση της πυκνότητας ισχύος της μπαταρίας και την μείωση του βάρους με την χρήση ελαφρύτερων υλικών κατασκευής.

#### **2.2.4 Αμάξωμα**

Το αμάξωμα των ηλεκτρικών οχημάτων δεν θα έχει ριζικές διαφορές σε σχέση με τα αντίστοιχα αμαξώματα των συμβατικών αυτοκινήτων. Οι όποιες διαφορές θα έχουν σχέση με την φιλοσοφία των ηλεκτρικών οχημάτων να είναι όσο το δυνατόν πιο αποδοτικά και οικονομικά.

Με γνώμονα την φιλοσοφία αυτή, όσο αφορά τον σχεδιασμό τους, τα ηλεκτρικά οχήματα θα έχουν ως στόχο να επιτύχουν τον καλύτερο αεροδυναμικό συντελεστή και να έχουν μειωμένες απώλειες τριβής σε σχέση με τα αντίστοιχα συμβατικά.

Τα αμαξώματα των συμβατικών αυτοκινήτων είναι κατασκευασμένα από χάλυβα. Η χρήση χάλυβα έχει επικρατήσει λόγω της ανθεκτικότητας, του χαμηλού κόστους και της τεχνογνωσίας που έχει αναπτυχθεί στην βιομηχανία. Εναλλακτικά υλικά από τα οποία μπορούν να κατασκευαστούν τα οχήματα είναι ειδικά κράματα αλουμινίου και ανθρακονήματα. Τα υλικά αυτά καταφέρνουν να παρουσιάζουν αντοχή παρόμοια με τον χάλυβα και είναι ελαφρύτερα, βελτιώνοντας τον συντελεστή απόδοσης του οχήματος, έχουν όμως πολλαπλάσιο κόστος κατασκευής. Για αυτό τον λόγο προς το παρόν χρησιμοποιούνται αποκλειστικά σε αυτοκίνητα υψηλών επιδόσεων.

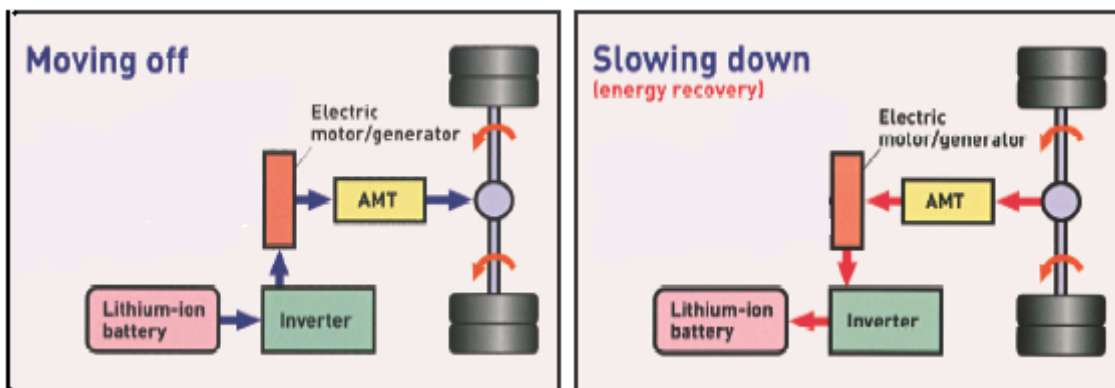
Επειδή το κόστος των ηλεκτρικών οχημάτων αναμένεται να είναι αυξημένο σε σχέση με τα αντίστοιχα συμβατικά η αντικατάσταση και του αμαξώματος με προηγμένα υλικά κατασκευής θα έκανε την τιμή πώλησης απαγορευτική. Υποθέτουμε λοιπόν ότι και τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα κατά τα πρώτα χρόνια της μαζικής παραγωγής τους θα κατασκευάζονται από συμβατικά υλικά. Είναι λογικό όταν γίνει η αλλαγή στα υλικά κατασκευής αυτή να γίνει τόσο στα συμβατικά όσο και στα ηλεκτρικά οχήματα επιβαρύνοντας εξίσου το κόστος.

## 2.2.5 Σύστημα πέδησης

Το σύστημα πέδησης των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελείται από δύο συστήματα τα οποία εργάζονται παράλληλα. Το πρώτο είναι ίδιο με το σύστημα πέδησης των συμβατικών οχημάτων. Περιγράφοντάς το συνοπτικά, το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί την τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ μεταλλικών πλακών σε σχήμα δίσκου, που υπάρχουν στους τροχούς και περιστρέφονται με αυτούς, και ακίνητων εξαρτημάτων (πέλματα) που στηρίζονται στο σταθερό άξονα του συστήματος διεύθυνσης. Η ταχύτητα μειώνεται και η κινητική ενέργεια του οχήματος μετατρέπεται σε θερμικές απώλειες. Το σύστημα αυτό μέχρι και πριν δυο δεκαετίες ήταν καθαρά μηχανικό και η πίεση στις δισκόπλακες ήταν ανάλογη της πίεσης που ασκούσε ο οδηγός στο πεντάλ του φρένου. Με την εισαγωγή ηλεκτρονικών συστημάτων ελέγχου το σύστημα μετατράπηκε σε ημι-μηχανικό, με την παρεμβολή συστημάτων ελέγχου που έχουν σχέση με την ευστάθεια και την απόδοση του φρεναρίσματος (ABS, ESP).

Το δεύτερο σύστημα πέδησης χρησιμοποιεί το ηλεκτρικό κύκλωμα του οχήματος (μπαταρία – ηλεκτρική μηχανή) για την πέδηση του. Χρησιμοποιείται στα ηλεκτρικά μέσα μαζικής μεταφοράς (τραμ, τρόλεϊ) και στα υβριδικά οχήματα (Prius, Insight). Η αρχή λειτουργίας του είναι απλή αν και χρειάζονται σχετικά πολύπλοκα συστήματα αυτομάτου ελέγχου για την ασφαλή εφαρμογή του. Κατά το αναγεννητικό φρενάρισμα η μηχανή του ηλεκτρικού οχήματος λειτουργεί σαν γεννήτρια, και η μπαταρία σαν φορτίο. Ο δρομέας της μηχανής (ανεξαρτήτως τύπου) παίρνει κίνηση από τους τροχούς παράγοντας τάση στα άκρα του και φορτίζοντας την μπαταρία μέσω του inverter. Κατά το φρενάρισμα το ρεύμα αλλάζει ροή, η μηχανή αντί να παράγει κινητική ενέργεια, καταναλώνει και η μπαταρία από ηλεκτρική πηγή γίνεται φορτίο. Με αυτόν τον τρόπο μέρος της κινητικής ενέργειας επανακτάται βελτιώνοντας τον βαθμό απόδοσης του οχήματος. Η λειτουργία φαίνεται πιο παραστατικά στα παρακάτω σχήματα.

Εικόνα 6 Ροή ενέργειας κατά την εκκίνηση και το φρενάρισμα του ηλεκτρικού οχήματος. Κατά την πέδηση η μπαταρία φορτίζεται περιορίζοντας τις θερμικές απώλειες από τα μηχανικά φρένα του οχήματος



Με την συνύπαρξη των δύο διαφορετικών συστημάτων στο πεντάλ του φρένου εγκαθίσταται ένας αισθητήρας πίεσης που δίνει σήμα στον εγκέφαλο του οχήματος. Ανάλογα με την πίεση που ασκεί ο οδηγός, την ταχύτητα του οχήματος, της στάθμη φόρτισης της μπαταρίας ο εγκέφαλος του οχήματος αποφασίζει αν το φρενάρισμα θα γίνει μέσω της μηχανής, του μηχανικού συστήματος ή σε συνεργασία των δυο συστημάτων.

Από τα δεδομένα που προέρχονται από την χρήση της αναγεννητικής πέδησης στα υβριδικά οχήματα προκύπτει ότι ανακτάται περίπου το μισό της ενέργειας που χανόταν σε θερμικές απώλειες ενώ μειώνεται η συνολική κατανάλωση του οχήματος από 10%-25% ανάλογα με τον

κύκλο χρήσης. Άλλα πλεονεκτήματα που προκύπτουν είναι η μικρότερη διαστασιολόγηση και η λιγότερο συχνή συντήρηση του μηχανικού συστήματος μειώνοντας το κόστος.

### **2.2.6 Σύστημα κλιματισμού**

Όλα τα αυτοκίνητα παραγωγής έχουν σύστημα για τον έλεγχο της θερμοκρασίας της καμπίνας των επιβατών. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας ανάλογα με τον κατασκευαστή του οχήματος μπορεί να γίνεται είτε χειροκίνητα, είτε αυτόματα και ρυθμίζεται ανάλογα με την επιθυμία των επιβατών.

Το σύστημα θέρμανσης της καμπίνας είναι πολύ απλό στην υλοποίησή του. Ο αέρας θερμαίνεται από την υψηλή θερμοκρασία του κινητήρα και διοχετεύεται στην καμπίνα των επιβατών. Όσο αφορά την ψύξη της καμπίνας, η πλειοψηφία των αυτοκινήτων σήμερα είναι εξοπλισμένη με σύστημα κλιματισμού. Το σύστημα κλιματισμού αποτελείται από το ψυκτικό μέσο (φρέον) το οποίο υπάρχει μέσα σε ένα κλειστό κύκλωμα, μια αντλία πίεσης (κομπρεσέρ) και βαλβίδες ελέγχου της πίεσης. Η αντλία του συστήματος λαμβάνει κίνηση από τον κινητήρα του οχήματος μέσω μίαντα. Το σύστημα κλιματισμού είναι ενεργοβόρο, αυξάνοντας την κατανάλωση καυσίμου και μειώνοντας τις επιδόσεις του οχήματος.

Το ζήτημα της ρύθμισης της θερμοκρασίας της καμπίνας των επιβατών είναι ένα πρόβλημα για τους σχεδιαστές του ηλεκτρικού οχήματος. Λόγω του μεγάλου συντελεστή απόδοσης της ηλεκτρικής μηχανής (πάνω από 90%) δεν υπάρχει όπως στα συμβατικά μια θερμική πηγή που θα μπορούσε να θερμάνει την καμπίνα. Ακόμα μια ηλεκτροκίνητη αντλία για το σύστημα ψύξης η οποία θα τροφοδοτούνταν από την μπαταρία θα μείωνε απαγορευτικά την εμβέλεια του ηλεκτρικού οχήματος.

Η πιο πιθανή λύση για την ρύθμιση της θερμοκρασίας είναι η βελτιωμένη θερμομόνωση της καμπίνας των επιβατών σε συνδυασμό με ένα σύστημα κλιματισμού το οποίο ρυθμίζει την θερμοκρασία όταν το όχημα είναι παρκαρισμένο και συνδεδεμένο στο ηλεκτρικό δίκτυο. Η θερμοκρασία στην οποία διατηρείται η καμπίνα προκύπτει από την εξωτερική θερμοκρασία, τις προτιμήσεις του οδηγού και την ώρα που είναι προγραμματισμένο να χρησιμοποιηθεί το όχημα προκειμένου να επιτευχθεί η ελάχιστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Με τον παραπάνω σχεδιασμό μειώνεται στο ελάχιστο η ηλεκτρική ενέργεια που θα χρειαστεί κατά την διάρκεια του ταξιδιού διατηρώντας την αυτονομία του οχήματος.

### **2.2.7 Μετάδοση κίνησης**

Όσο αφορά το σύστημα μετάδοσης την κίνησης στους τροχούς η καινοτομία των ηλεκτρικών οχημάτων είναι η απουσία κιβωτίου ταχυτήτων. Λόγω της μεγάλου φάσματος στρωφών των ηλεκτρικών κινητήρων η κίνηση στους τροχούς μεταδίδεται μέσω ενός μειωτήρα. Ακόμα η κίνηση με την όπισθεν πραγματοποιείται μέσω του ελεγκτή του ηλεκτροκινήτηρα που αλλάζει την φορά περιστροφής του δρομέα. Αν η αλλαγή της περιστροφής του δρομέα δεν είναι εύκολο να πραγματοποιηθεί μέσω του ρυθμιστή (DC μηχανές) τότε η χρήση ενός επιπλέον γραναζιού επιτρέπει την αντιστροφή της κίνησης, μηχανισμός που χρησιμοποιείται και στα συμβατικά οχήματα.

Κατά τα άλλα το υπόλοιπο σύστημα μετάδοσης της κίνησης είναι ίδιο με τα συμβατικά οχήματα τόσο σε υλικά κατασκευής, όσο και σε σχεδιασμό. Η μόνη διαφοροποίηση είναι η ενσωμάτωση στους κινητήριους τροχούς του συστήματος της αναγεννητικής πέδησης.

### 2.2.8 Φόρτιση Μπαταρίας

Η φόρτιση της μπαταρίας γίνεται απευθείας από το ηλεκτρικό δίκτυο. Για την φόρτιση της είναι απαραίτητη η εφαρμογή σταθερής τάσης στα άκρα της, συνήθως λίγο υψηλότερης από την μέγιστη τάση λειτουργίας. Για τον λόγο αυτό στα ηλεκτρικά οχήματα υπάρχει κατάλληλο βύσμα στο οποίο συνδέεται ο φορτιστής. Στον εξοπλισμό των ηλεκτρικών οχημάτων συμπεριλαμβάνεται και ο φορτιστής του οχήματος.

### 2.2.9 Βοηθητικά συστήματα οχήματος

Όσο αφορά τα υπόλοιπα συστήματα των ηλεκτρικών οχημάτων, δεν έχουν διαφορές με τα συμβατικά αυτοκίνητα. Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή της εργασίας, ένα πλεονέκτημα των ηλεκτρικών οχημάτων είναι η απλότητα των βοηθητικών συστημάτων σε σχέση με τα συμβατικά. Για παράδειγμα τα ηλεκτρικά οχήματα δεν χρειάζονται σύστημα εξαγωγής των καυσαερίων, πολύπλοκο σύστημα ψύξης του κινητήρα (λόγω του μεγάλου βαθμού απόδοσης του ηλεκτροκινητήρα).

Ακόμα οι αντίστοιχες αντλίες που είναι υπεύθυνες για την κυκλοφορία των υγρών (λαδιού, φρένων, υδραυλικού τιμονιού, νερού) αντικαθίστανται με ηλεκτρικές. Στα συμβατικά οχήματα όλες οι αντλίες είναι συνδεδεμένες μέσω μάντα με τον κινητήρα του αυτοκινήτου και λειτουργούν καθ' όλη την διάρκεια. Με την αντικατάστασή τους με ηλεκτρικές θα λειτουργούν μόνο όταν είναι απαραίτητο, βελτιώνοντας της απόδοση του οχήματος.

### 2.2.10 Κατανάλωση EV

Τα καθαρά ηλεκτρικά οχήματα καταναλώνουν αποκλειστικά ηλεκτρική ενέργεια. Επομένως η κατανάλωση τους μετριέται σε μονάδες Wh/km, ή εναλλακτικά σε kWh/km. Οι κυριότεροι κατασκευαστικοί παράγοντες που επηρεάζουν την κατανάλωση ενέργειας των οχημάτων είναι το βάρος και η μετωπική κάθετη επιφάνεια. Άλλοι παράγοντες που έχουν σχέση με την κατανάλωση του αυτοκινήτου είναι η οδηγική συμπεριφορά.

Η δυσκολία του προσδιορισμού της κατανάλωσης ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων έγκειται στο ότι δεν υπάρχουν σε μαζική παραγωγή έτσι ώστε να παρέχονται αξιόπιστα δεδομένα τα οποία να προέρχονται από συστηματικές δοκιμές σε πραγματικές συνθήκες. Η πηγή για τον προσδιορισμό της κατανάλωσης ενέργειας είναι αποτελέσματα από εργαστηριακές δοκιμές των προτύπων EV. Μπορεί να γίνει και έμμεσος υπολογισμός την ηλεκτρικής κατανάλωσης από το ενεργειακό περιεχόμενο και την αυτονομία του οχήματος. Αυτή η μέθοδος όμως εμπεριέχει αβεβαιότητα λόγω του ότι δεν έχουμε δεδομένα για το πόσο εκφορτίζεται η μπαταρία σε κάθε πλήρη εκφόρτιση (Ενότητα Μπαταρίες).

Επειδή τα δεδομένα που έχουμε δεν διαβαθμίζονται ανάλογα με το μέγεθος του οχήματος (small, medium, Large) θα συσχετίσουμε τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν με το βάρος του οχήματος. Αφού εξάγουμε μια τιμή κατανάλωσης ανά μονάδα βάρους τότε θα την γενικεύσουμε για τις τρεις κατηγορίες. Στον υπολογισμό αυτό δεν λαμβάνουμε υπόψη ότι η κατανάλωση

εξαρτάται και από την κάθετη μετωπική επιφάνεια του οχήματος, μια παράμετρο που είναι δύσκολο να μοντελοποιηθεί.

### 2.2.11 Σύνοψη

Από την παραπάνω ανάλυση προκύπτει ότι τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν αρκετά κοινά σημεία με τα συμβατικά, αλλά και ριζικές διαφορές. Βλέποντας ένα ηλεκτρικό όχημα σε λειτουργία οι μόνες διαφορές είναι η απουσία της εξάτμισης και η αθόρυβη λειτουργία του. Μια σύνοψη για τις ομοιότητες και τις διαφορές του ηλεκτρικού οχήματος με το συμβατικό παρατίθεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2 Σύγκριση επιμέρους συστημάτων EV - συμβατικού οχήματος

Συστήματα και Υποσυστήματα οχήματος	Όμοιο	Παρόμοιο	Διαφορετικό
<b>Κινητήρας</b>			
Βασικός Κινητήρας			X
Έλεγχος Κουσαερίων			X
Ψύξη			X
Έλεγχος κινητήρα			X
Ηλεκτρικά κινητήρα			X
<b>Μετάδοση</b>			
Κιβώτιο ταχυτήτων			X
Άξονες μετάδοσης	X		
<b>Σασί</b>			
Σκελετός	X		
Ανάρτηση	X		
Πέδηση		X	
Σύστημα διεύθυνσης	X		
Τροχοί και ελαστικά	X		
Εξαγωγή καυσαερίων			X
Αποθήκευση καυσίμου			X
Ηλεκτρικά Εξαρτήματα		X	

Σύστημα Κλιματισμού		X	
---------------------	--	---	--

## 2.3 Plug-In Hybrid όχημα – PHEV

### 2.3.1 Εισαγωγή

Το Plug-In Hybrid αυτοκίνητο, σε ελεύθερη μετάφραση το υβριδικό αυτοκίνητο που συνδέεται στην πρίζα, είναι το μεταβατικό στάδιο ανάμεσα στα υβριδικά και τα ηλεκτρικά οχήματα. Τα PHEV φέρουν όπως και τα υβριδικά ηλεκτροκινητήρα και ΜΕΚ. Η διαφοροποίησή τους είναι ότι έχουν την δυνατότητα επαναφόρτισης από το ηλεκτρικό δίκτυο και καταναλώνουν πρωτογενώς τόσο ηλεκτρική ενέργεια, όσο και ορυκτά καύσιμα. Ακόμα τα PHEV έχουν την δυνατότητα να κινηθούν αποκλειστικά με ηλεκτρισμό αλλά με περιορισμένη αυτονομία σε σχέση με τα EV. Επομένως μπορούμε να πούμε ότι τα PHEV, συμπεριφέρονται σαν EV όταν η μπαταρία τους είναι φορτισμένη και σαν κλασσικά οχήματα όταν το επίπεδο φόρτισης είναι χαμηλό.

Τα PHEV οχήματα αν και δεν έχουν παραχθεί ακόμα μαζικά, αναμένεται να εμφανιστούν στην αγορά πριν από τα EV. Η μετάβαση στην ηλεκτροκίνηση μέσω των PHEV θεωρείται αναγκαία αφού τα PHEV μετριάζουν τα δυο μειονεκτήματα των EV (υψηλό κόστος απόκτησης, περιορισμένη αυτονομία) και προσφέρουν παρόμοια απόδοση ανάλογα με τον κύκλο χρήσης. Βέβαια παρουσιάζουν μειονεκτήματα όπως η παρουσία των δυο μηχανών και το αυξημένο βάρος σε σχέση με τα υβριδικά λόγω της μεγαλύτερης μπαταρίας τα οποία θέτουν τεχνικούς περιορισμούς αλλά δεν αναμένεται αυτά να εμποδίσουν την μαζική παραγωγή τους.

Ο διαχωρισμός των PHEV γίνεται όπως και στα ηλεκτρικά οχήματα ανάλογα με το μέγεθός τους (μικρά, μεσαία, μεγάλα). Ένας επιπλέον διαχωρισμός που γίνεται είναι ανάλογα με την ηλεκτρική τους αυτονομία. Η ηλεκτρική αυτονομία έχει να κάνει με το ενεργειακό περιεχόμενο της μπαταρίας και εξαρτάται από τον κατασκευαστή του οχήματος. Στο υπόλοιπο της εργασίας η ηλεκτρική αυτονομία θα αναφέρεται όπως και στην διεθνή βιβλιογραφία ως AER(all electric range). Η ΜΕΚ μπορεί να χρησιμοποιεί βενζίνη ή πετρέλαιο (diesel) ως ορυκτό καύσιμο

Αναλύοντας τα PHEV θα δούμε ότι παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες τόσο με τα συμβατικά, όσο και με τα ηλεκτρικά οχήματα που παρουσιάστηκαν. Στην συνέχεια θα γίνει μια ανάλυση των δομικών στοιχείων των PHEV, αντίστοιχη των EV, ώστε να γίνει κατανοητή η δομή τους και ο τρόπος λειτουργίας τους.

### 2.3.2 Ηλεκτρική μηχανή και έλεγχος

Για την ηλεκτρική μηχανή των PHEV ισχύουν όσα αναφέραμε στην αντίστοιχη ενότητα των ηλεκτρικών οχημάτων. Τα PHEV μπορούν να εξοπλιστούν με τους ίδιους τύπους ηλεκτρικών μηχανών και τα αντίστοιχα συστήματα ελέγχου ροπής και ταχύτητας.

Η μόνη διαφοροποίηση που υπάρχει είναι ότι για οχήματα της ίδιας κατηγορίας η ισχύς της ηλεκτρικής μηχανής του PHEV θα είναι μικρότερη από το αντίστοιχο EV αλλά και μεγαλύτερη από το αντίστοιχο υβριδικό αυτοκίνητο. Αυτό συμβαίνει για την μείωση του κόστους



κατασκευής του οχήματος αφού σε περίπτωση αυξημένης ανάγκης ισχύος μπορούν να λειτουργήσουν και οι δυο μηχανές ακόμα και αν η μπαταρία είναι φορτισμένη.

### 2.3.2.1 Κινητήρας εσωτερικής καύσης

Όπως ήδη έχουμε αναφέρει τα PHEV έχουν κινητήρα εσωτερικής καύσης. Ο κινητήρας αυτός μπορεί να χρησιμοποιεί είτε βενζίνη, είτε πετρέλαιο και δεν είναι απαραίτητη η λειτουργία του για την κίνηση του οχήματος αφού η ισχύς του ηλεκτροκινητήρα εξασφαλίζει ηλεκτροκίνηση στο όχημα.

Η ισχύς της MEK, όπως συμβαίνει και με τον ηλεκτροκινητήρα, είναι μειωμένη σε σχέση με ένα αντίστοιχο συμβατικό όχημα. Αυτό συμβαίνει όχι μόνο για την μείωση του κόστους κατασκευής, αλλά και για την μεγιστοποίηση του συντελεστή ισχύος της MEK.

Όσο αφορά την τεχνολογία του κινητήρα, αυτή δεν διαφέρει από τους κινητήρες που χρησιμοποιούνται στα συμβατικά οχήματα. Η ανάλυση της τεχνολογίας των κινητήρων εσωτερικής καύσης δεν βρίσκεται στο αντικείμενο μελέτης αυτής της εργασίας.

### 2.3.2.2 Λειτουργία ηλεκτρικής μηχανής και κινητήρα εσωτερικής καύσης

Σε αυτή την ενότητα θα αναλυθεί το πώς συνεργάζονται οι μηχανές του PHEV έτσι ώστε το όχημα να λειτουργεί αποδοτικά, να έχει άνετη οδηγική συμπεριφορά και να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις ισχύος. Οι δύο βασικές καταστάσεις λειτουργίας του PHEV είναι:

**Κατάσταση ηλεκτρικής λειτουργίας:** Μετά από φόρτιση το PHEV έχει την δυνατότητα να βασιστεί μόνο στην ηλεκτρική μηχανή για την κίνησή του. Ο κινητήρας εσωτερικής καύσης δεν βρίσκεται σε λειτουργία εκτός και αν αυτό χρειάζεται για κάποιο άλλο σύστημα του οχήματος (θέρμανση-ψύξη καμπίνας)

**Κατάσταση υβριδικής λειτουργίας:** Όταν η μπαταρία φτάσει σε ένα ορισμένο επίπεδο φόρτισης τότε δεν μπορεί να στηρίξει την ηλεκτροκίνηση και το όχημα λειτουργεί ως υβριδικό. Στην λειτουργία αυτή οι κινητήρες συνεργάζονται για την κίνηση του οχήματος.

Στην ηλεκτρική λειτουργία δεν υπάρχει κάποια διαφοροποίηση σε σχέση με το ηλεκτρικό όχημα. Όλες οι ανάγκες ισχύος καλύπτονται από τον ηλεκτροκινητήρα. Η μόνη διαφορά λόγω της μικρότερης ηλεκτρικής μηχανής σε σχέση με τα EV είναι ότι αν ο οδηγός απαιτήσει μεγαλύτερη ισχύ είναι δυνατή η εμπλοκή του κινητήρα εσωτερικής καύσης.

Στην υβριδική λειτουργία υπάρχουν διάφοροι τρόποι συνεργασίας ανάμεσα στους κινητήρες. Το κοινό στην φιλοσοφία τους είναι η αποδοτικότερη λειτουργία του συστήματος. Για τον λόγο αυτό κατά την υβριδική λειτουργία στόχος του συστήματος ελέγχου ροπής και στροφών είναι να λειτουργεί τον κινητήρα εσωτερικής καύσης σε σταθερές στροφές, εκεί που επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση (συνήθως έως 3500 σαλ). Αν στις στροφές αυτές υπάρχει έλλειμμα ισχύος και η μπαταρία είναι αρκετά φορτισμένη, το έλλειμμα αυτό καλύπτεται από τον ηλεκτροκινητήρα. Αν υπάρχει περίσσεια ισχύος, τότε φορτίζεται η μπαταρία, αν το επιτρέπει αυτό το επίπεδο φόρτισης της. Τέλος αν το έλλειμμα ισχύος δεν μπορεί να καλυφτεί από την μπαταρία το όχημα λειτουργεί σαν συμβατικό, ανεβάζει τις σαλ και μειώνεται η απόδοσή του.

Η υλοποίηση της παραπάνω διαδικασίας διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του υβριδικού οχήματος. Τα υβριδικά οχήματα ανάλογα με τον τρόπο που είναι σχεδιασμένα μπορεί να είναι υβριδικά σειράς, παράλληλα, ήπια παράλληλα (mild parallel hybrid), και παράλληλα-σειράς με σύστημα διαχωρισμού ισχύος.

Τα υβριδικά σειράς κινούνται μέσω του ηλεκτροκινητήρα, ενώ η ΜΕΚ είναι υπεύθυνη για την φόρτιση της μπαταρίας που τον τροφοδοτεί. Δεν υπάρχει μηχανική σύνδεση μεταξύ των δυο μηχανών. Η διάταξη αυτή δεν είναι αποδοτική και δεν θα χρησιμοποιηθεί στα PHEV.

Τα υβριδικά παράλληλης διάταξης έχουν την δυνατότητα να κινηθούν είτε με τον ηλεκτροκινητήρα, είτε με την ΜΕΚ είτε και με τα δυο μαζί σε συνεργασία. Για την υλοποίηση των PHEV χρειάζονται ένας ηλεκτροκινητήρας και μια ΜΕΚ. Η διάταξη αυτή μπορεί να έχει εφαρμογή στα PHEV.

Τέλος η διάταξη σειράς-παράλληλη, η οποία έχει εφαρμοστεί σε μαζική παραγωγή υβριδικών οχημάτων, έχει χαρακτηριστικά των άλλων διατάξεων αλλά ξεχωρίζει για την απλούστερη υλοποίησή της. Η διάταξη χαρακτηρίζεται παράλληλη διότι κάθε μια από τις μηχανές μπορεί να αναλάβει πλήρως το φορτίο ή να συνεργαστεί με την άλλη αναλαμβάνοντας την ισχύ από 0-100%. Όμως οι άξονες των δυο μηχανών είναι συνδεδεμένες μέσω ενός πλανητικού συστήματος ταχυτήτων όπου γίνεται και ο διαχωρισμός της ισχύος. Η διάταξη σειρά-παράλληλη υλοποιείται με δυο ηλεκτρικές μηχανές και μια ΜΕΚ.

### 2.3.3 Βάρος

Τα PHEV έχουν αυξημένο βάρος λόγω του ότι φέρουν και ηλεκτροκινητήρα και μηχανή εσωτερικής καύσης. Επομένως εκτός από τις μπαταρίες το βάρος τους είναι αυξημένο και από τον ηλεκτροκινητήρα σε σχέση με τα συμβατικά. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα της κατανάλωσης<sup>1</sup> και των τεχνικών χαρακτηριστικών<sup>2</sup> των μπαταριών που εξοπλίζουν PHEV καταλήγουμε στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3 Βάρος PHEV ανά κατηγορία

Κατηγορία	Βάρος Συμβατικού (kg)	Βάρος Ηλεκτρικής Μηχανής (kg)	Βάρος Μπαταρίας (kg)	Συνολικό Βάρος
City car 20	1000	65	52	1117
Small family car 40	1400	90	73	1563
Large family car 80	1700	130	192	2022

Το βάρος της μπαταρίας υπολογίστηκε με τον παρακάτω τύπο:

$$\text{Battery Weight} = \frac{\text{Electric Cons} \times \text{elec range} \times \text{conventional weight}}{\text{energy density} \times \text{window of discharge}}$$

<sup>1</sup> Ενότητα 1.2.11 Κατανάλωση PHEV

<sup>2</sup> Ενότητα 2.4.2 Απαιτήσεις Ενέργειας και Ισχύος

### 2.3.4 Αμάξωμα

Για το αμάξωμα ισχύει ότι αναφέρθηκε στην αντίστοιχη ενότητα 2.1.4 για τα ηλεκτρικά οχήματα

### 2.3.5 Πέδηση

Για τη πέδηση των PHEV ισχύει ότι και για τα ηλεκτρικά οχήματα (ενότητα 2.1.5) και δεν θα αναλυθεί περαιτέρω. Η μόνη διαφορά που προκύπτει είναι ότι λόγω του ότι τα PHEV είναι εξοπλισμένα με μπαταρίες ισχύος έχουν την δυνατότητα να "αιχμαλωτίσουν" μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας κατά την αναγεννητική πέδηση.

### 2.3.6 Σύστημα κλιματισμού

Στα PHEV το πρόβλημα που είχε παρουσιαστεί στα ηλεκτρικά οχήματα λύνεται με την παρουσία του κινητήρα εσωτερικής καύσης. Επομένως ο έλεγχος της θερμοκρασίας στην καμπίνα των επιβατών γίνεται όπως και στα συμβατικά αυτοκίνητα.

Αν κατά την ηλεκτρική λειτουργία του οχήματος υπάρξει ανάγκη θέρμανσης ή ψύξης της καμπίνας, τότε μπορεί να εκκινήσει ο κινητήρας εσωτερικής καύσης, όχι όμως για την κίνηση του οχήματος. Κατά την ψύξη θα χρησιμοποιηθεί ως κινητήρας για να κινήσει την αντλία πίεσης του κλιματισμού και κατά την θέρμανση ως πηγή θερμότητας και βρισκόμενος σε λειτουργία εν κενώ.

Αν και το σύστημα μοιάζει με το αντίστοιχο των συμβατικών οχημάτων, λόγω της φιλοσοφίας των ηλεκτροκίνητων οχημάτων να είναι αποδοτικά τα PHEV θα είναι εξοπλισμένα με σύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας που θα έχει ως γνώμονα την εξοικονόμηση ενέργειας.

### 2.3.7 Μετάδοση κίνησης

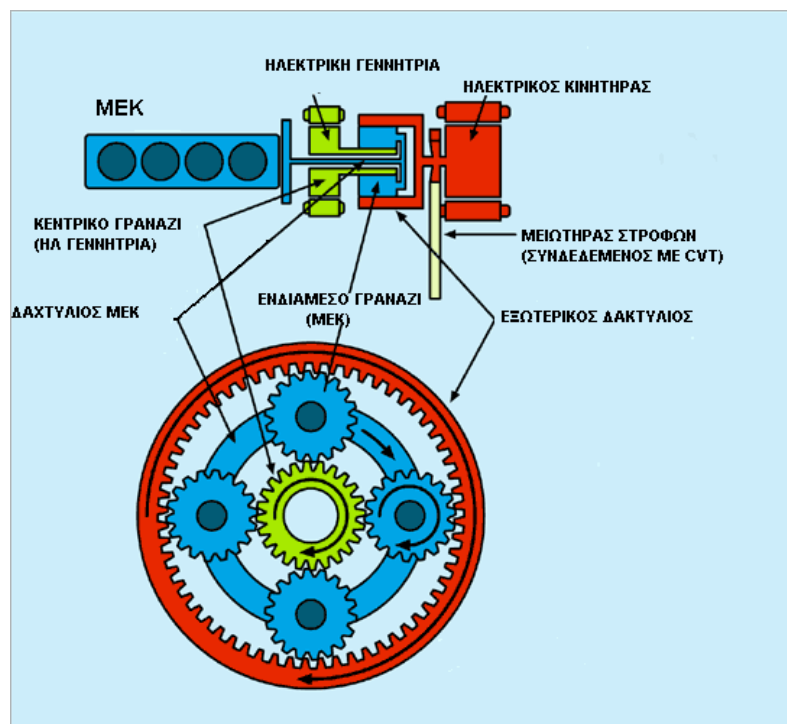
Η μετάδοση της κίνησης λόγω των δυο κινητήρων είναι πιο πολύπλοκη σε σχέση με τα EV, και δεν μπορούν να εφαρμοστούν συστήματα μηχανικών κιβωτίων ταχυτήτων όπως στα συμβατικά οχήματα. Ακόμα η υλοποίηση του συστήματος μετάδοσης εξαρτάται από το είδος της υβριδικής λειτουργίας του οχήματος (σειράς, παράλληλο, σειράς-παράλληλο). Έχοντας αποκλείσει την διάταξη σειράς λόγω μειωμένης απόδοσης θα αναφέρουμε το σύστημα μετάδοσης στα άλλα δυο είδη υβριδικών οχημάτων.

Στα υβριδικά **παράλληλης διάταξης** υπάρχει ένα σύστημα που αποτελείται από αυτόματα ελεγχόμενους συμπλέκτες. Στην ηλεκτρική λειτουργία ο συμπλέκτης ανάμεσα στην ΜΕΚ και τους τροχούς είναι ανοιχτός, ενώ κατά την υβριδική λειτουργία οι δυο κινητήρες εμπλέκονται, στρέφοντας από κοινού τον άξονα μετάδοσης και μεταφέροντας ισχύ ανάλογα με την

δυνατότητα τους. Εδώ να σημειώσουμε ότι ο ηλεκτρικός κινητήρας μπορεί να στρέφεται εν κενώ χωρίς να μεταφέρεται ισχύς.

Στα υβριδικά διάταξης **σειράς-παράλληλης** η καρδιά του συστήματος μετάδοσης είναι ένα πλανητικό σύστημα ταχυτήτων. Σε αυτό το σύστημα χρησιμοποιούνται μια ΜΕΚ και δυο ηλεκτρικές μηχανές. Οι άξονες περιστροφής και των τριών μηχανών είναι συνδεδεμένοι σε ένα πλανητικό σύστημα γραναζιών το οποίο επιτρέπει (όπως και στην παράλληλη λειτουργία) να αναλάβει κάθε κινητήρας από 0-100% της ισχύς του οχήματος. Η ονομασία "σειράς" της διάταξης οφείλεται στο γεγονός ότι ο για να κινηθεί το όχημα πρέπει πάντα να περιστρέφεται ο ηλεκτροκινητήρας. Η λειτουργία θα γίνει πιο κατανοητή με την παρακάτω εικόνα.

Εικόνα 7 Διάταξη πλανητικού συστήματος ταχυτήτων σε PHEV σειράς παράλληλης διάταξης



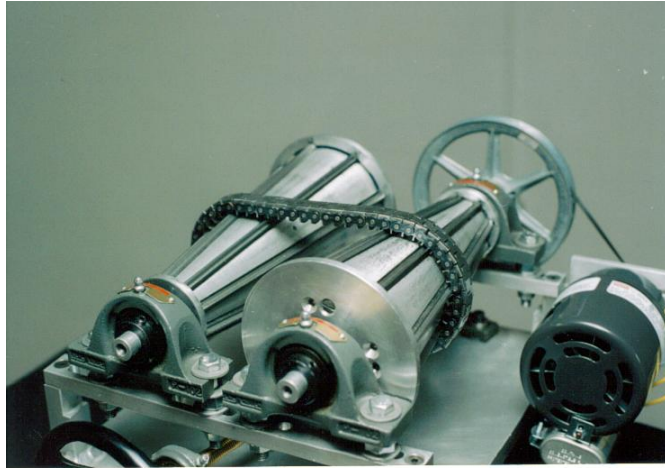
Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται το πως συνδέονται οι άξονες περιστροφής όλων των μηχανών στο πλανητικό σύστημα. Ο εξωτερικός δακτύλιος που είναι και η έξοδος του συστήματος είναι συνδεδεμένος με την μεγαλύτερη σε ισχύ ηλεκτρική μηχανή (MG2). Το κεντρικό γρανάζι (sun gear) είναι συνδεδεμένο με την μικρότερη ηλεκτρική μηχανή (MG1) η οποία χρησιμοποιείται για την εκκίνηση της ΜΕΚ και για την φόρτιση της μπαταρίας. Τέλος τα γρανάζια της ΜΕΚ βρίσκονται ανάμεσα σε αυτά των δυο ηλεκτρικών μηχανών.

Το πλανητικό σύστημα ταχυτήτων μπορεί να φαίνεται περίπλοκο, όμως είναι απλούστερο από το σύστημα συμπλεκτών που χρησιμοποιείται στις παράλληλες διατάξεις. Έχει μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης από τα υπόλοιπα συστήματα μετάδοσης και επιτρέπει όλες τις λειτουργίες ενός PHEV. Όλες οι επιτρεπτές καταστάσεις λειτουργίας ενός PHEV παρουσιάζονται στην ιστοσελίδα <http://eahart.com/prius/psd/>. Η συγκεκριμένη επίδειξη αναφέρεται στην μετάδοση υβριδικού οχήματος και έχει όριο ηλεκτρικής λειτουργίας τα 60km/h.

Τέλος ανάλογα με τον σχεδιασμό του οχήματος αναμένεται ανάμεσα στο διαφορικό και τον άξονα κίνησης των παραπάνω συστημάτων να υπάρχει σύστημα συνεχώς μεταβαλλόμενων

σχέσεων (CVT). Το CVT αποτελείται από δυο ανεστραμμένους κώνους (Εικόνα 8) που συνδέονται με μεταλλικό μάντα και δίνουν την δυνατότητα να μην υπάρχουν σταθερές αλλά μεταβαλλόμενες σχέσεις. Με το CVT δίνεται η αίσθηση της χρήσης μια ταχύτητας ενώ μειώνεται και η κατανάλωση καυσίμου.

Εικόνα 8 Σύστημα CVT



Όλα τα παραπάνω συστήματα ανεξαρτήτως της διάταξης του PHEV συνεργάζονται για την μετάδοση της κίνησης στους τροχούς. Για την ομαλή συμπεριφορά του οχήματος ο έλεγχος γίνεται κεντρικά από τον εγκέφαλο του αυτοκινήτου και η κατάσταση λειτουργίας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Οι πιο σημαντικοί από αυτούς είναι η ταχύτητα του οχήματος, το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας, η κλίση του εδάφους.

### 2.3.8 Φόρτιση Μπαταρίας

Για την φόρτιση της μπαταρίας ισχύει ότι και στα ηλεκτρικά οχήματα. Η μόνη διαφορά είναι ότι επειδή οι μπαταρίες των PHEV οχημάτων έχουν μικρότερο ενεργειακό περιεχόμενο, αφού προορίζονται για μειωμένη εμβέλεια, χρειάζονται και μειωμένες ώρες φόρτισης.

### 2.3.9 Βοηθητικά συστήματα

Στα PHEV λόγω της ύπαρξης της MEK, είναι απαραίτητη η παρουσία όλων των συστημάτων που υπάρχουν και στα συμβατικά αυτοκίνητα (εξαγωγή καυσαερίων, ψύξη κινητήρα, χρονισμός βαλβίδων). Οι διαφορές που υπάρχουν σε σχέση με τα υβριδικά που κυκλοφορούν σήμερα είναι ελάχιστες και αφορούν στην διαστασιολόγηση των συστημάτων και όχι στην παρουσία τους. Τα PHEV αναμένεται να έχουν μεγαλύτερο βάρος λόγω των δυο κινητήρων και της μεγαλύτερης μπαταρίας σε σχέση με τα υβριδικά. Για αυτό τον λόγο απαιτείται πιο ενισχυμένο σύστημα ανάρτησης και διεύθυνσης χωρίς όμως να υπάρχει κάποια τεχνολογική καινοτομία σε αυτό.

### 2.3.10 Συμπέρασμα

Για την συνοπτική σύγκριση των PHEV με τα συμβατικά οχήματα παρατίθεται ο παρακάτω πίνακας

Πίνακας 4 Σύγκριση συστημάτων plug in hybrid - συμβατικών οχημάτων

Συστήματα και Υποσυστήματα οχήματος	Όμοιο	Παρόμοιο	Διαφορετικό
<b>Κινητήρας</b>			
Βασικός Κινητήρας		X	
Έλεγχος Κουσαερίων	X		
Ψύξη		X	
Έλεγχος κινητήρα			X
Ηλεκτρικά κινητήρα			X
<b>Μετάδοση</b>			
Κιβώτιο ταχυτήτων			X
Άξονες μετάδοσης		X	
<b>Σασί</b>			
Σκελετός	X		
Ανάρτηση	X		
Πέδηση		X	
Σύστημα διεύθυνσης	X		
Τροχοί και ελαστικά	X		
Εξαγωγή καυσαερίων	X		
Αποθήκευση καυσίμου		X	
Ηλεκτρικά Εξαρτήματα		X	
Σύστημα Κλιματισμού		X	

### 2.3.11 Κατανάλωση PHEV

Τα plug in hybrid ηλεκτρικά οχήματα καταναλώνουν πρωτογενώς ηλεκτρική και χημική ενέργεια ανάλογα με την φάση λειτουργίας τους. Ο υπολογισμός λοιπόν είναι ένας συνδυασμός καταναλώσεων που χωρίζεται σε Wh/km για την ηλεκτρική κατανάλωση και σε lt/100km για την κατανάλωση του ορυκτού καυσίμου.

Για την ηλεκτρική κατανάλωση του οχήματος μπορούμε να υποθέσουμε ότι είναι όμοια με του EV στις 100Wh/km (International Energy Agency, 2009) ανά τόνο οχήματος και η υβριδική λειτουργία (charge sustaining mode) είναι μειωμένη 30% σε σχέση με το αντίστοιχο συμβατικό όχημα. Οι παραπάνω υποθέσεις μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστες, αλλά πρέπει να διευκρινίσουμε ότι αναμένεται τα PHEV να έχουν μεγαλύτερη σχετική κατανάλωση και στις δυο λειτουργίες. Αυτό συμβαίνει διότι τα EV πετυχαίνουν αυτή την ηλεκτρική κατανάλωση επειδή όλα τους τα στοιχεία έχουν σχεδιασθεί και βελτιστοποιηθεί για ηλεκτρική λειτουργία. Ακόμα τα υβριδικά οχήματα έχουν σχεδιασθεί έτσι ώστε να "αναγεννούν" μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας από το φρενάρισμα. Όμως η έλλειψη πραγματικών μετρήσεων μας οδηγεί στην υιοθέτηση αυτών των υποθέσεων.

Πίνακας 5 Κατανάλωση plug in hybrid οχημάτων

Κατηγορία	Βάρος(kg)	Ηλεκτρική Κατανάλωση (Wh/km)	Κατανάλωση Συμβατικού (lt/100km)	Κατανάλωση PHEV (CS mode)
City Car 20	1117	111.7	6.5	4.5
Small family car 40	1603	160.3	9.0	6.3
Large family car 80	2022	202.2	11.0	7.7

## 2.4 Μπαταρίες

Η τροφοδότηση των ηλεκτρικών μηχανών γίνεται από μπαταρίες που βρίσκονται πάνω στο ηλεκτρικό όχημα και φορτίζονται από το ηλεκτρικό δίκτυο όταν τα οχήματα είναι σταθμευμένα. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά άλλα και το κόστος των μπαταριών είναι η μεγάλη πρόκληση και ο πιο καθοριστικός παράγοντας για την διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά αυτοκινήτου τις επόμενες δεκαετίες.

Για αυτόν τον λόγο μέσα στα πλαίσια αυτής της εργασίας η τεχνολογία των μπαταριών θα αναλυθεί ξεχωριστά από τα υπόλοιπα δομικά στοιχεία των ηλεκτρικών οχημάτων έτσι ώστε να γίνει σαφές ποια είναι τα μειονεκτήματα που έκαναν αδύνατη την αυτόνομη ηλεκτροκίνηση μέχρι σήμερα, άλλα και ποιες είναι οι προοπτικές για τις επόμενες δεκαετίες.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά που θα μας απασχολήσουν και θα εξετάζουμε για τις μπαταρίας είναι η ενέργεια (Wh) και η ισχύς (Watt, kW) που μπορούν να παρέχουν. Επειδή τα οχήματα έχουν περιορισμένο όγκο και βάρος σημαντικοί δείκτες για τις τεχνολογίες των μπαταριών είναι η ειδική ενέργεια (Wh/kg) και η ειδική ισχύς (W/kg) ενώ οι ίδιοι δείκτες μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως προς τον όγκο. Το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας θα αναφέρετε ως SOC (State of Charge) ενώ το βάθος εκφόρτισης που μπορεί να παρέχει κάθε μπαταρία λέγεται DoD (Depth of Discharge). Μια παράμετρος που διαφοροποιείται ανάλογα με την εφαρμογή και αναφέρεται στα χαρακτηριστικά των μπαταριών είναι ο λόγος ισχύος προς ενέργεια κάθε μπαταρίας (power to energy ratio). Για λόγους μακροζωίας οι μπαταρίες δεν εκφορτίζονται πλήρως σε κάθε κύκλο εκφόρτισης. Ανάλογα με την τεχνολογία και την εφαρμογή τους δίνουν ένα "παράθυρο" εκφόρτισης από 0-100% της SoC. Το παράθυρο εκφόρτισης κάθε μπαταρίας είναι ανάλογο με τον δείκτη ισχύος προς ενέργεια.

### 2.4.1 Είδη μπαταριών

Οι μπαταρίες χωρίζονται ανάλογα με το είδος των υλικών που χρησιμοποιούν για την αποθήκευση την ηλεκτρικής ενέργειας. Ανάλογα με το είδος τους διαφέρουν τα τεχνικά χαρακτηριστικά και το κόστος τους. Οι τεχνολογίες που έχουν παραχθεί μαζικά είναι οι παρακάτω:

- Μολύβδου οξέως
- Νικελίου Υδριδίου Μετάλλου (Ni-MH)
- Ιόντων Λιθίου

**Μολύβδου οξέως (Pb-acid batteries):** Οι μπαταρίες μολύβδου οξέως είναι η πρώτη τεχνολογία που παράχθηκε μαζικά για αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Έχουν εφαρμογή σε μικρά ηλεκτρικά οχήματα (neighborhood electric vehicles), σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, σε εφεδρικά ηλεκτρικά συστήματα. Λόγω της μαζικής εφαρμογής τους έχουν χαμηλό κόστος παραγωγής, το οποίο εξαρτάται από την τιμή του μολύβδου. Σαν τεχνολογία θεωρείται κορεσμένη και μη εξελίξιμη. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά που έχουν δεν καλύπτουν τις απαιτήσεις των PHEV και των EV για αυτό τον λόγο δεν θα αναφερθούμε παραπάνω σε αυτήν.



**Νικελίου Υδριδίου Μετάλλου (Ni-MH):** Οι μπαταρίες Νικελίου μετάλλου εξελίχθηκαν και παράχθηκαν μαζικά την δεκαετία του 1990. Έχουν εφαρμογή σε συστήματα που χρειάζονται επαναφορτιζόμενες μπαταρίες και χρησιμοποιούνται σε όλα τα υβριδικά οχήματα που έχουν παραχθεί, λόγω της υψηλής τάσης κυψέλης. Μπορούν να εξοπλίσουν υβριδικά οχήματα και PHEV με μικρή ηλεκτρική αυτονομία. Σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία η τεχνολογία των μπαταριών νικελίου μετάλλου δεν έχει κορεστεί και υπάρχουν προοπτικές εξέλιξης.

**Λιθίου ιόντος (Li ion):** Οι μπαταρίες λιθίου-ιόντος αν και ήταν γνωστές σε πειραματικό στάδιο εδώ και πολλές δεκαετίες τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια παρήχθησαν μαζικά. Η μαζική της παραγωγή βρήκε εφαρμογή σε συσκευές χαμηλής ισχύος (κινητά τηλέφωνα, φορητοί υπολογιστές) λόγω της δυνατότητας εκτέλεσης ρηχών και βαθέων εκφορτίσεων χωρίς αλλοίωση των χαρακτηριστικών τους. Οι μπαταρίες λιθίου πετυχαίνουν καλύτερα τεχνικά χαρακτηριστικά από τις προηγούμενες τεχνολογίες και για αυτό θεωρείται ότι τα ηλεκτρικά οχήματα θα είναι εξοπλισμένα αποκλειστικά με αυτές. Το μεγαλύτερο εμπόδιο για την παραγωγή ηλεκτρικών οχημάτων με μπαταρίες λιθίου είναι το υψηλό κόστος το οποίο αναμένεται να μειωθεί μέσω της χρήσης φθηνότερων υλικών κατασκευής αλλά και της μαζικής παραγωγής.

Από τις υπάρχουσες τεχνολογίες μπαταριών θα γίνει ανάλυση μόνο των Li-ion. Στις παρακάτω ενότητες θα γίνει αναφορά στην κατασκευή, τα τεχνικά χαρακτηριστικά, το κόστος, τον κύκλο ζωής και την πρόβλεψη για το μέλλον όλων των παραπάνω σύμφωνα με την διεθνή βιβλιογραφία. Ο λόγος που οι υπόλοιπες μπαταρίες δεν αναλύονται είναι επειδή θεωρείται ότι κατά την μαζική παραγωγή ηλεκτρικών οχημάτων θα παραγκωνιστούν λόγω των συγκριτικών πλεονεκτημάτων που παρουσιάζουν στα χαρακτηριστικά τους. Τέλος παρατίθεται ένας γενικός πίνακας με τα χαρακτηριστικά των διαφορετικών τεχνολογιών.

Πίνακας 6 Ενδεικτικές τιμές ειδικής ισχύος και ειδικής ενέργειας για κάθε τύπο μπαταρίας. Οι τιμές αφορούν όλο το φάσμα εφαρμογών των μπαταριών και όχι αποκλειστικά τα ηλεκτρικά οχήματα

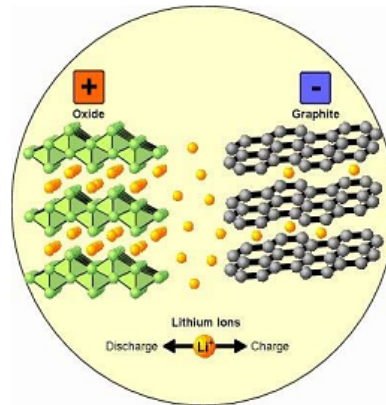
Τεχνολογία	Ειδική Ισχύς (W/kg)	Ειδική Ενέργεια (Wh/kg)
Lead acid	150-300	20-30
Ni-MH	200-1000	50-100
Li-ion	750-3000	75-150

## 2.4.2 Μπαταρίες Λιθίου- Ιόντος (Li-ion batteries)

Οι μπαταρίες λιθίου-ιόντος είναι προϊόν της έρευνας του καθηγητή John Goodenough του Πανεπιστημίου της Οξφόρδης την δεκαετία του '70 ο οποίος ανακάλυψε τις αγώγιμες ιδιότητες των οξειδίων του λιθίου και τις χρησιμοποίησε για να κατασκευάσει την κάθοδο μπαταριών. Η τεχνολογία των μπαταριών Λιθίου-Ιόντος άργησε να φτάσει σε μαζική παραγωγή λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής. Προς το παρόν έχει εφαρμογή σε συσκευές χαμηλής ισχύος αλλά θεωρείται η τεχνολογία για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας με την μεγαλύτερη δυναμική, τόσο ως προς την βελτίωση των τεχνικών χαρακτηριστικών της, όσο και για την μείωση του κόστους. Για τον λόγο αυτό κυβερνητικά προγράμματα σε συνεργασία με πανεπιστήμια και αυτοκινητοβιομηχανίες στηρίζουν την έρευνα πάνω σε αυτές.

Φορείς του ρεύματος, όπως αποκαλύπτει και το όνομα της τεχνολογίας, είναι τα ιόντα λιθίου. Κατά την φόρτιση της μπαταρίας τα ιόντα λιθίου μεταφέρονται από το θετικό ηλεκτρόδιο (κάθοδο) στο αρνητικό (άνοδο) και κατά την εκφόρτιση ακολουθείται η αντίστροφη διαδικασία(Εικόνα 9).

Εικόνα 9 Ροή ηλεκτρικού ρεύματος μέσω ιόντων λιθίου, κατά την φόρτιση και την εκφόρτιση της μπαταρίας



### 2.4.3 Απαιτήσεις ενέργειας και ισχύος ηλεκτρικών οχημάτων

Πριν ξεκινήσουμε την ανάλυση για τις μπαταρίες είναι ουσιώδες να ξεκαθαρίσουμε ποιες είναι οι ανάγκες σε ισχύ και ενέργεια των ηλεκτρικών οχημάτων.

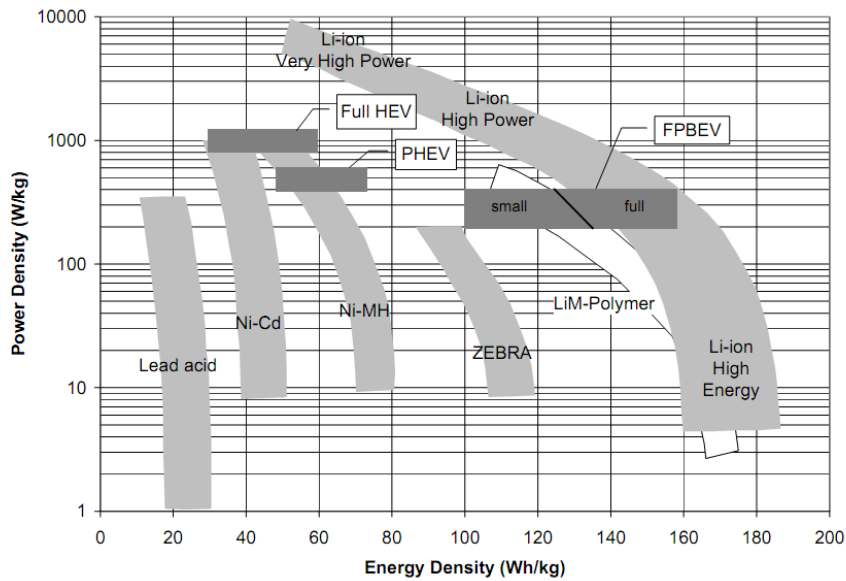
#### EV

Τα καθαρά ηλεκτρικά οχήματα στηρίζουν την κίνησή τους αποκλειστικά στην μπαταρία. Έχουν μεγάλες απαιτήσεις ενέργειας για να μπορέσουν να έχουν αποδεκτές τιμές αυτονομίας και τα EV εξοπλίζονται με μπαταρίες υψηλής ενέργειας. Σύμφωνα με την υπάρχουσα τεχνολογία μπαταριών μια μπαταρία δεν μπορεί να είναι ταυτόχρονα υψηλής ενέργειας και υψηλής ισχύος (Διάγραμμα 4) αφού διαφοροποιείται ο τρόπος κατασκευής της. Οι μπαταρίες ενέργειας κατασκευάζονται με πιο χοντρά φύλλα ηλεκτροδίων τα οποία μπορούν να αποθηκεύσουν περισσότερα ιόντα. Ενδεικτικά για ένα ηλεκτρικό όχημα ο δείκτης ενέργειας ως προς την ισχύ (power to energy ratio) κυμαίνεται από 2-4 W/Wh. Οι μπαταρίες υψηλής ενέργειας έχουν χαμηλή ένταση ισχύος (300W/kg). Παρόλα αυτά καταφέρνουν να καλύπτουν τις ανάγκες ισχύος του οχήματος λόγω του μεγέθους τους.

Οι μπαταρίες των EV είναι σχεδιασμένες για να υπόκεινται σε βαθιές εκφορτίσεις. Από την πλήρη φόρτιση (100% SoC) φτάνουν σχεδόν γραμμικά σε σχέση με την διανυόμενη απόσταση σε ένα ποσοστό ασφαλείας στο οποίο σταματάει την λειτουργία τους. Αυτό το ποσοστό στις μπαταρίες υψηλής ενέργειας μπορεί να είναι από 10%-20% και παραμένει ανεκμετάλλευτο για λόγους μακροζωίας.

Εμείς θα υποθέσουμε ότι οι μπαταρίες των EV λειτουργούν στο παράθυρο εκφόρτισης 100%-10% SoC, έχουν ενδεικτική ενεργειακή ένταση 110Wh/kg και power to energy ratio 3. Πρέπει να γίνει σαφές ότι οι παραπάνω τιμές μόνο ενδεικτικές μπορούν να θεωρούνται χωρίς να υπεισέρχονται σε αυτές οι δυο βασικοί παράγοντες, ο χρόνος και η μαζική παραγωγή.

Διάγραμμα 4 Πυκνότητα ισχύος ως προς την ενεργειακή ένταση για τις υπάρχουσες τεχνολογίες μπαταριών

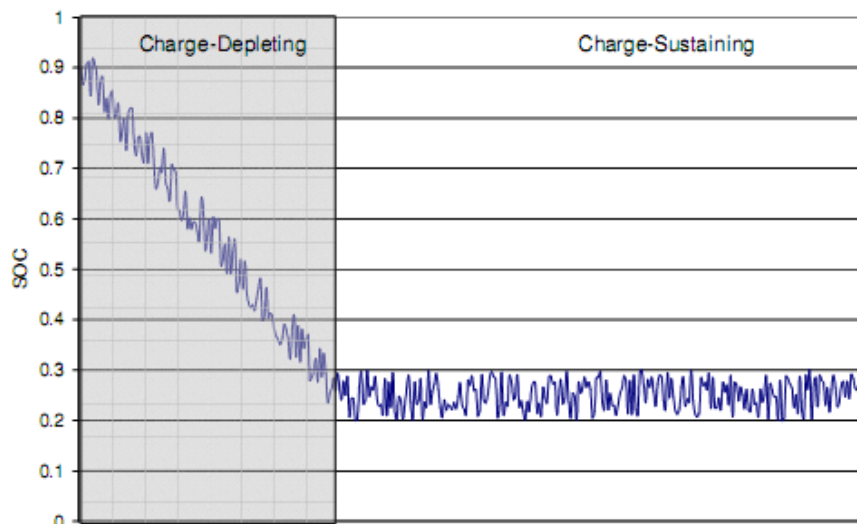


## PHEV

Οι απαιτήσεις των PHEV διαφέρουν ανάλογα με την ηλεκτρική αυτονομία που έχουν. Όσο μεγαλύτερη αυτονομία έχουν τα PHEV τόσο η μπαταρία τους έχει μικρότερο power to energy ratio και μεγαλύτερο "παράθυρο" χρησιμοποιούμενης ενέργειας.

Ο ρόλος της μπαταρίας είναι διαφορετικός ανάλογα με την λειτουργία του. Στην ηλεκτρική λειτουργία (charge depleting mode) η κίνηση στηρίζεται αποκλειστικά στην μπαταρία του οχήματος. Σε αυτή την κατάσταση το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας μειώνεται. Στην υβριδική λειτουργία (charge sustaining mode) η κατάσταση φόρτισης παραμένει σταθερή και ίση με ένα επίπεδο που εξασφαλίζει μακροζωία στην μπαταρία. (Διάγραμμα 5) Οι μικρές διακυμάνσεις που παρατηρούνται στην καμπύλη κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας οφείλονται στο αναγεννητικό φρενάρισμα.

Διάγραμμα 5 Κατάσταση φόρτισης ως προς την διανυόμενη απόσταση για PHEV οχήματα



Όπως φαίνεται από το διάγραμμα οι μπαταρίες που σχεδιάζονται για PHEV πρέπει να έχουν την δυνατότητα να υπόκεινται και σε βαθιές και σε ρηχές εκφορτίσεις. Αυτή τους η χρήση αποτελεί άλλη μια πρόκληση για τους κατασκευαστές αφού η εναλλαγή βαθέων και ρηχών φορτίσεων επιβαρύνει την μακροζωία τους.

Τα PHEV έχουν συμπεριληφθεί στο πρότυπο για την μέτρηση εκπομπής ρύπων των οχημάτων SAEJ1711. Σύμφωνα με αυτό το πρότυπο το ποσοστό που διανύει ένα όχημα σε σχέση με την ηλεκτρική του αυτονομία φαίνεται στον παρακάτω πίνακα<sup>3</sup> (Πίνακας 7)

Πίνακας 7 Ποσοστό απόστασης που διανύουν τα PHEV σε ηλεκτρική και υβριδική λειτουργία

Κατηγορία	% CD mode	%CS mode
PHEV20	21	79
PHEV40	36	64
PHEV80	57	43

Σύμφωνα με το ίδιο πρότυπο και στον επόμενο πίνακα βρίσκονται οι εκφορτίσεις στις οποίες καλείται να ανταπεξέλθει μια μπαταρία PHEV με κύκλο ζωής 15 χρόνια.

Πίνακας 8 Απαιτήσεις εκφορτίσεων PHEV οχήματος

Ηλεκτρική Αυτονομία AER(km)	Αριθμός Βαθέων Εκφορτίσεων	Αριθμός Ρηχών Εκφορτίσεων	DoD Ρηχών Εκφορτίσεων
20	3000	225.000	5%
40	2650	180.000	2%
80	2100	130.000	1%

Λόγω της ποικιλίας των PHEV δεν μπορούμε να βγάλουμε τιμές έντασης ισχύος και ενέργειας οι οποίες να ισχύουν για όλα τα οχήματα. Ακόμα και PHEV με την ίδια ηλεκτρική αυτονομία, αναμένεται να έχουν μπαταρίες οι οποίες να διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους. Αυτό συμβαίνει λόγω της διαφορετικής χαρτογράφησης του ηλεκτροκινητήρα και του συστήματος ελέγχου. Παρόλα αυτά σε αυτή την ενότητα θα δοθούν ενδεικτικές τιμές για τα χαρακτηριστικά των μπαταριών ανά κατηγορία όπως αυτά έχουν προκύψει από την διεθνή βιβλιογραφία (Kalhammer, και συν. 2007)). Με αυτόν τον τρόπο θα γίνει πιο κατανοητή η διαφορά στις απαιτήσεις που προκύπτουν ανά όχημα. Οι τιμές αυτές ισχύουν για το έτος 2015, οπότε αναμένεται να γίνει και η εμφάνιση των οχημάτων.

Πίνακας 9 Τεχνικά χαρακτηριστικά μπαταριών PHEV ανά κατηγορία

Κατηγορία	Power to Energy ratio (W/Wh)	Ενεργειακή Πυκνότητα (Wh/kg) <sup>4</sup>	Πυκνότητα Ισχύος (W/kg)	Παράθυρο Εκφόρτισης (%DoD)
PHEV20	11	68	748	60
PHEV40	8	75	600	70
PHEV80	5	95	475	85

## 2.4.4 Δομή μπαταριών- Υλικά κατασκευής

<sup>3</sup> Τα στοιχεία έχουν προκύψει από γραμμική παρεμβολή

<sup>4</sup> Οι τιμές αναφέρονται στην μπαταρία και όχι ξεχωριστά σε κάθε κύτταρο

Οι μπαταρίες λιθίου-ιόντος δεν διαφέρουν δομικά από τα άλλα είδη μπαταριών. Οι διαφορές τους έχουν να κάνουν με τα υλικά κατασκευής. Κάθε μπαταρία λιθίου αποτελείται από:

**Κάθοδος:** Η κάθοδος είναι το θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο της μπαταρίας. Η κάθοδος είναι κατασκευασμένη από μεταλλικά οξειδία. Συνήθη μέταλλα που χρησιμοποιούνται στις καθόδους των μπαταριών είναι το κοβάλτιο, το μαγγάνιο και το νικέλιο. Τα διαφορετικά υλικά κατασκευής την κάθόδου προσδίδουν και διαφορετικές ιδιότητες στην μπαταρία, όπως η τάση εξόδου και η ενέργεια που μπορεί να αποθηκεύσει κάθε κύτταρο της μπαταρίας. Η έρευνα πάνω στις μπαταρίες επικεντρώνεται στην βελτίωση της κατασκευής της καθόδου (έτσι ώστε να μπορεί να πετύχει μεγαλύτερη ένταση ισχύος και ενέργειας) αλλά και στην εύρεση νέων υλικών με μειωμένο κόστος.

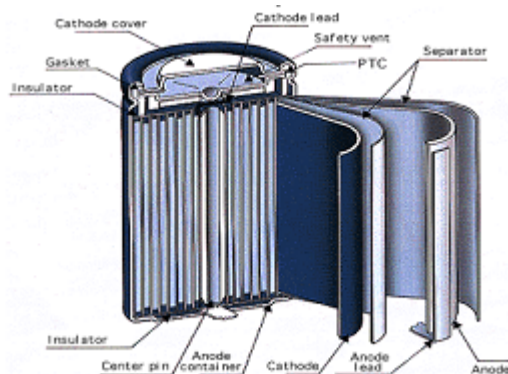
**Άνοδος:** Η άνοδος είναι αντίστοιχα το αρνητικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο της μπαταρίας. Είναι κατασκευασμένη από γραφίτη, ενώ δεν αποκλείεται και η χρήση άνθρακα σε άλλες μορφές. Η έρευνα όσο αφορά τα υλικά ανόδου των μπαταριών επικεντρώνεται στην αύξηση της χωρητικότητας του γραφίτη, ενώ δεν εξετάζεται η χρήση άλλων υλικών για την κατασκευή της.

**Διαχωριστής:** Ο διαχωριστής είναι μη αγώγιμο υλικό που χρησιμοποιείται για την απομόνωση μεταξύ ανόδου και καθόδου. Για την κατασκευή τους χρησιμοποιείται πολυμερές υλικό το οποίο ανήκει στην ομάδα των πολυολεφινών. Μια ακόμα χρήση του διαχωριστή είναι ότι σε περίπτωση υπερθέρμανσης τήκεται προλαμβάνοντας την πρόκληση ατυχήματος. Η τελευταία λειτουργία τείνει να εξαλειφθεί στις σύγχρονες μπαταρίες λόγω των συστημάτων ελέγχου που αποτρέπουν την υπερθέρμανση.

**Ηλεκτρολύτης:** Ο ηλεκτρολύτης είναι το υλικό που βρίσκεται ανάμεσα στη άνοδο και την κάθοδο και μέσα σε αυτόν κυκλοφορούν τα ιόντα του λιθίου. Ο ηλεκτρολύτης ο οποίος βρίσκεται σε υγρή μορφή, αποτελείται από άλατα λιθίου διαλυμένα σε οργανικούς διαλύτες. Η έρευνα πάνω στους ηλεκτρολύτες επικεντρώνεται σε ζητήματα ασφαλείας. Επειδή τα άλατα του λιθίου περιέχουν και φθόριο σε περίπτωση πυρκαγιάς είναι πιθανό να εκλυθεί υδροφθόριο (HF) το οποίο είναι τοξική ένωση.

Η δομική μονάδα των μπαταριών ονομάζεται κύτταρο (battery cell). Οι μπαταρίες λιθίου που προορίζονται για εφαρμογές ηλεκτρικών οχημάτων έχουν παρόμοιο σχεδιασμό. Κάθε κύτταρο αποτελείται από λεπτά στρώματα ανόδου, διαχωριστή και κάθόδου, ενώ το ενδιάμεσο κενό γεμίζεται με ηλεκτρολύτη. Τα στρώματα αυτά τυλίγονται μεταξύ τους μέσα σε κυλινδρικό κουτί από το οποίο εξωτερικά διακρίνονται μόνο τα ηλεκτρόδια της ανόδου και της καθόδου. Η τάση εξόδου για ένα κύτταρο μπαταρίας λιθίου είναι μεταξύ 3.5-4 Volt. Στην συνέχεια τα κύτταρα οργανώνονται σε ενότητες(modules). Ανάλογα με τον σχεδιασμό του κυττάρου κάθε ενότητα μπορεί να έχει από έξι έως δέκα κύτταρα τα οποία συνδέονται σε σειρά. Τέλος οι ενότητες οργανώνονται σε ομάδες για να συγκροτήσουν την μπαταρία (battery pack). Ο αριθμός των ενοτήτων εξαρτάται από τα επιθυμητά χαρακτηριστικά της μπαταρίας (τάση εξόδου, συνολική ενέργεια και ισχύς).

Εικόνα 10 Διατομή κυττάρου μπαταρίας οργανωμένης σε κύλινδρο. Διακρίνονται τα στρώματα ανόδου, καθόδου και διαχωριστή. Πηγή Sony



Η ποσότητα που χρησιμοποιείται σε κάθε κύτταρο διαφέρει ανάλογα με την χρήση της μπαταρίας. Το ποσοστό κάθε υλικού για μια τυπική μπαταρία ισχύος και ενέργειας βρίσκεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 10 Κατανομή υλικών κατά βάρος για την κατασκευή μπαταριών υψηλής ενέργειας και υψηλής ισχύος (Kalhammer, και συν. 2007)

	Μπαταρία υψηλής ενέργειας Κύτταρο 100Ah		Μπαταρία υψηλής ισχύος Κύτταρο 10Ah	
	Βάρος (g)	% κατά βάρος	Βάρος (g)	% κατά βάρος
<b>Ανοδος</b>				
Γραφίτης	563,6	16,4	14,1	4,30
Συγκολλητικό	69,7	2,0		
Συλλέκτης	151,9	4,4	41,6	12,8
<b>Κάθοδος</b>				
Ενεργό Υλικό	1408,6	41,0	74,4	22,9
Άνθρακας	46,4	1,4		
Διαχωριστικό	92,6	2,7	19,4	6,0
<b>Υπόλοιπα</b>				
Ηλεκτρολύτης	291,0	18,0	44,0	13,5
Διαχωριστής	60,5	1,8	16,4	5,0
Συσκευασία	291,0	8,5	70,1	21,6

## 2.4.5 Βοηθητικά συστήματα μπαταριών

Οι μπαταρίες πέρα από τα στοιχεία (κύτταρα) που ενώνονται σε σειρά για να δημιουργήσουν το πακέτο απαρτίζονται και από βοηθητικά συστήματα που είναι απαραίτητα για την σωστή λειτουργία της μπαταρίας.

Το πρώτο από αυτά είναι το σύστημα ελέγχου της θερμοκρασίας της μπαταρίας. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας της μπαταρίας είναι κύριας σημασίας, όχι μόνο για την ασφάλεια αλλά και για τις επιδόσεις της. Οι μπαταρίες είναι σχεδιασμένες να λειτουργούν σε εύρος από 5°C έως 30°C. Κατά την λειτουργία του οχήματος παράγεται θερμότητα λόγω της εσωτερικής αντίστασης της μπαταρίας. Για την απαγωγή της θερμότητας οι μπαταρίες είναι εφοδιασμένες με σύστημα ψύξης ανάλογο με τις ΜΕΚ. Στην μπαταρία υπάρχουν οπές στις οποίες κυκλοφορεί το ψυκτικό μέσο (νερό ή διάλυμα γλυκόλης), το κύκλωμα του ψυκτικού μέσου κλείνει με ένα ψυγείο. Πέρα από το παραπάνω σύστημα το οποίο λειτουργεί όταν το όχημα βρίσκεται σε κίνηση είναι πιθανό ένα πρόσθετο σύστημα κλιματισμού/θέρμανσης όταν το όχημα είναι σε

στάθμευση. Σε ακραίες καιρικές συνθήκες η μπαταρία δεν πρέπει να μείνει εκτεθειμένη σε πολύ χαμηλές/υψηλές θερμοκρασίες για λόγους μακροζωίας. Το σύστημα αυτό είναι όμοιο με το αντίστοιχο για την θερμοκρασία της καμπίνας. Το πρόβλημα που προκύπτει έχει να κάνει με την αυτονομία του οχήματος. Αν στην θέση στάθμευσης δεν υπάρχει ηλεκτρική παροχή, το σύστημα κλιματισμού χρησιμοποιεί την ενέργεια της μπαταρίας και μειώνει την αυτονομία του.

Το δεύτερο, αλλά εξίσου σημαντικό, είναι το σύστημα ελέγχου της τάσης και του ρεύματος, ακόμα και σε επίπεδο κυττάρου (battery cell). Ο συνεχής έλεγχος της τάσης είναι απαραίτητος όπως θα αναλύσουμε παρακάτω. Ένας συνηθισμένος τρόπος υλοποίησης του συστήματος ελέγχου της τάσης είναι η χρήση δυο αντιπαράλληλων MOSFET<sup>5</sup>. Το MOSFET είναι μια ημιαγώγιμη διάταξη που επιτρέπει την διέλευση ρεύματος ανάλογα με την τάση που εφαρμόζεται. Η χρήση δυο τέτοιων διατάξεων είναι απαραίτητη έτσι να είναι δυνατός ο έλεγχος τόσο κατά την φόρτιση, όσο και κατά την εκφόρτιση της μπαταρίας. Το σύστημα ολοκληρώνεται με ένα κύκλωμα παράκαμψης (bypass) κάθε κυττάρου για την απεμπλοκή του από το σε σειρά σύστημα της μπαταρίας.

## **2.4.6 Τεχνικοί περιορισμοί και κατασκευαστικές προκλήσεις για τις μπαταρίες λιθίου.**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η βελτίωση των χαρακτηριστικών των μπαταριών και η μείωση του κόστους είναι η κυριότερη μεταβλητή για την διεύδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά αυτοκινήτου. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά δεν έχουν να κάνουν μόνο με την ισχύ και την ενέργεια που μπορεί να παρέχει η μπαταρία. Η πρόκληση για τους κατασκευαστές μπαταριών είναι η μακροζωία, η ασφάλεια,

### **2.4.6.1 Κύκλος ζωής μπαταριών**

Οι μπαταρίες αποτελούν ένα σημαντικό ποσοστό του κόστους του οχήματος. Για αυτό τον λόγο πρέπει να είναι σχεδιασμένες για να αντέχουν καθ'όλη την διάρκεια ζωής ενός οχήματος. Οι επιδόσεις των μπαταριών επηρεάζονται τόσο από το πέρασμα του χρόνου (ημερολογιακή ζωή μπαταρίας) όσο και από την επανάληψη του κύκλου φόρτισης-εκφόρτισης.

Ο στόχος για την ημερολογιακή ζωή των μπαταριών είναι τα δέκα χρόνια, ενώ σύμφωνα με το USABC<sup>6</sup> ο στόχος μακροπρόθεσμα είναι οι μπαταρίες να έχουν χρόνο ζωής τα δεκαπέντε χρόνια. Οι απαιτήσεις για κάθε μπαταρία όσο αφορά τον κύκλο ζωής είναι διαφορετικές για κάθε όχημα. Σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα οι μπαταρίες υψηλής ενέργειας έχουν διάρκεια ζωής σε πραγματικές συνθήκες επτά χρόνια (Tesla Roadster), το οποίο σημαίνει ότι είναι ακόμα μακριά από τους στόχους των αυτοκινητοβιομηχανιών. Όσο αφορά την αντοχή στους κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης τα άνω όρια των μπαταριών που κατασκευάζονται τώρα πιάνουν οριακά τις απαιτήσεις των οχημάτων σε συνθήκες εργαστηρίου.

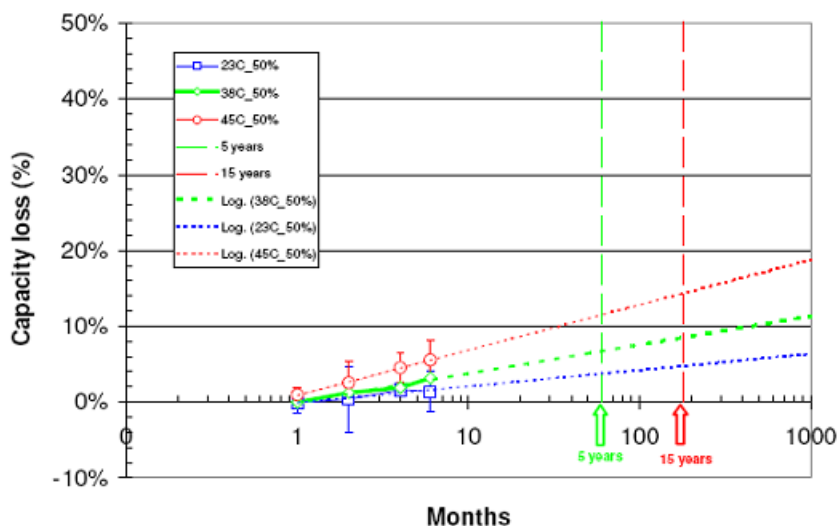
Η μείωση της απόδοσης με το πέρασμα του χρόνου οφείλεται στην αντιδραστικότητα ανάμεσα σε ηλεκτρολύτη και ηλεκτρόδια. Τα στοιχεία βρίσκονται σε μόνιμη επαφή και ο

<sup>5</sup> MOSFET: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

<sup>6</sup> U.S Advanced Battery Consortium: Ένωση αυτοκινητοβιομηχανιών για την ανάπτυξη ηλεκτροκίνητων οχημάτων

ηλεκτρολύτης εκφυλίζει τα υλικά των ηλεκτροδίων. Η αντίδραση μεταξύ ηλεκτρολύτη και ηλεκτροδίων επιταχύνεται από τις υψηλές θερμοκρασίες και την υψηλή κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας.

**Διάγραμμα 6** Μείωση χωρητικότητας μπαταριών ως προς τον χρόνο. Οι καμπύλες αφορούν μπαταρία που αποθηκεύεται με Soc 50% σε διάφορες θερμοκρασίες



Η μείωση της απόδοσης λόγω των κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης προκαλείται από το λίθιο το οποίο επικάθεται στην άνοδο αυξάνοντας την εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας και μειώνοντας την επιφάνεια του ενεργού υλικού [Broussley 2005]. Μια ακόμα αιτία είναι η παραμόρφωση της κρυσταλλικής δομής λόγω των επαναλαμβανόμενων κύκλων [House 2006].

Η ημερολογιακή ζωή των μπαταριών μπορεί να βελτιωθεί με την χρήση συνδυασμών ηλεκτρολυτών και ηλεκτροδίων που δεν αντιδρούν μεταξύ τους. Θεωρητικά η αντοχή των μπαταριών στον χρόνο μεγαλώνει και με την αποθήκευση τους σε χαμηλές θερμοκρασίες και όχι στο μέγιστο επίπεδο φόρτισης. Τα παραπάνω όμως δεν είναι εφαρμόσιμα στην καθημερινή ζωή για αυτό και η αντοχή στο χρόνο μπορεί να έρθει μόνο από την βελτίωση των υλικών.

#### 2.4.6.2 Ασφάλεια

Για την μαζική παραγωγή ηλεκτρικών οχημάτων, πριν από την σημαντική μείωση του κόστους πρέπει να διασφαλιστεί η ασφάλεια των νέων τεχνολογιών. Τα μόνα ζητήματα ασφάλειας που μπορούν να προκύψουν σε σύγκριση με τα συμβατικά οχήματα έχουν να κάνουν με τις μπαταρίες. Οι μπαταρίες λιθίου μπορούν να προκαλέσουν ατύχημα είτε λόγω υπερφόρτισης, είτε λόγω απαιτητικών χειρισμών.

Σε περίπτωση υπερφόρτισης είναι δυνατόν να προκληθεί υπερθέρμανση και απελευθέρωση αέριων. Λόγω της παραπάνω αντίδρασης και του εύφλεκτου ηλεκτρολύτη είναι πιθανή η πρόκληση πυρκαγιάς και απελευθέρωση τοξικών παραγώγων (υδροφθόριο). Για την πρόληψη του φαινομένου είναι απαραίτητο ένα σύστημα ελέγχου του επιπέδου φόρτισης (Βλ Βοηθητικά συστήματα μπαταρίας).



## **2.4.7 Κόστος Μπαταριών**

### **2.4.7.1 Εισαγωγή**

Θεωρώντας ως δεδομένο ότι θα επιτευχθούν τα επιθυμητά τεχνικά χαρακτηριστικά των μπαταριών το επόμενο πιο σημαντικό ζητούμενο είναι ποιο θα είναι το τελικό κόστος απόκτησης αυτών των τεχνολογιών σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα. Στην διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν πολλές και διαφορετικές προσεγγίσεις αυτού του θέματος. Κάποιοι ερευνητές προσπαθούν να προβλέψουν την μείωση του κόστους που προκύπτει από την βελτίωση της τεχνολογίας και της παραγωγής των μπαταριών λιθίου, άλλοι προβλέπουν την διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά θέτοντας τιμές-στόχους για τις μπαταρίες για διάφορα σενάρια. Ακόμα και τα στοιχεία κόστους που προέρχονται από κατασκευαστές μπαταριών δίνονται σε διαφορετικές μορφές. Άλλοι κατασκευαστές δίνουν το κόστος ανά κυψέλη, άλλοι ανά μπαταρία, ενώ υπάρχουν και δεδομένα που περιλαμβάνουν και το κόστος των ηλεκτρονικών ελέγχου των μπαταριών χωρίς αυτό να δίνεται αναλυτικά. Ένας επιπλέον παράγοντας αβεβαιότητας έχει να κάνει με τα τεχνικά χαρακτηριστικά που έχουν οι μπαταρίες για τις οποίες δίνεται το κόστος τους και αν αυτές τελικά ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις των οχημάτων.

Όλες οι προσεγγίσεις παρουσιάζουν μειονεκτήματα αφού υπεισέρχονται υποκειμενικοί παράγοντες (ωρίμανση των τεχνολογιών). Στην παρούσα εργασία θα παρουσιάσουμε αναλυτικά από τι εξαρτάται το κόστος των μπαταριών και όσο αφορά την πρόβλεψη του κόστους τις επόμενες δεκαετίες θα υιοθετήσουμε τα πιο αξιόπιστα δεδομένα. Τα κόστη που αναφέρονται αφορούν την απόκτηση της μπαταρίας από της αυτοκινητοβιομηχανία η οποία υποθέτουμε ότι προμηθεύεται την μπαταρία απευθείας από τον κατασκευαστή. Από μέχρι τώρα εμπειρία με τα υβριδικά οχήματα οι αυτοκινητοβιομηχανίες συνεργάζονται άμεσα με τους κατασκευαστές μπαταριών, ή ήταν ακόμα και συμπαραγωγοί.

Το κόστος των μπαταριών εξαρτάται κυρίως από το κόστος των υλικών, το κόστος εργασίας και τα γενικά έξοδα. Στην συνέχεια θα αναφέρουμε πως αναμένεται αυτό να επηρεαστεί τόσο λόγω της μαζικής παραγωγής, όσο και της βελτίωσης των χαρακτηριστικών των υλικών.

### **2.4.7.2 Κόστος υλικών**

Στην ανάλυση κόστους ξεκινάμε με το κόστος των συστατικών των μπαταριών λιθίου. Θα αναφέρουμε το πόσο κοστίζει σήμερα κάθε υλικό και τους παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται αυτό καθώς και ο τρόπος που αυτό μπορεί να μειωθεί σε βάθος χρόνου.

#### **Υλικά καθόδου**

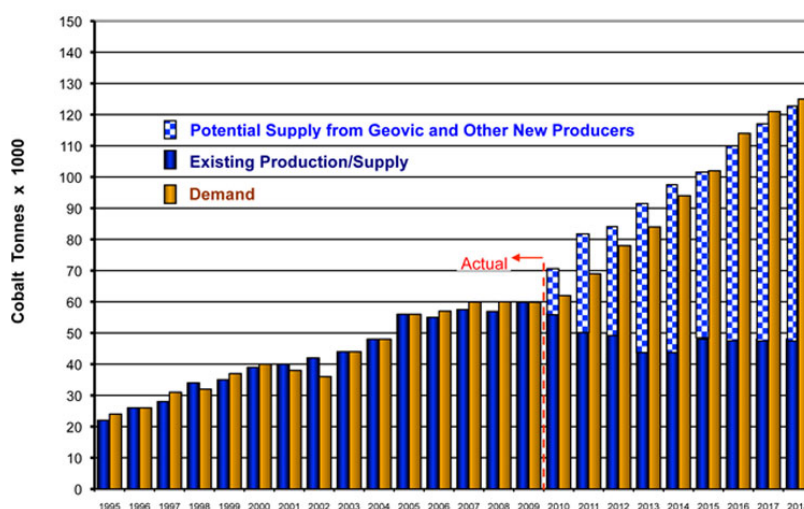
Τα μέταλλα που αναφέρονται παρακάτω χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της καθόδου των μπαταριών. Τα μέταλλα δεν χρησιμοποιούνται ακατέργαστα στην παραγωγή των κυττάρων της μπαταρίας, αλλά ως άλατα τα οποία διαφέρουν ανάλογα με τον κατασκευαστή. Αντίστοιχα το κόστος κάθε προϊόντος διαφέρει ανάλογα με την σύσταση επειδή διαφοροποιείται η παραγωγική διαδικασία. Επειδή η ανάλυση του κόστους κάθε διαφορετικής εκδοχής της

καθόδου όχι μόνο είναι εκτός αντικειμένου αυτής της εργασίας αλλά δεν υπάρχουν και διαθέσιμα στοιχεία, θα αρκεστούμε στην αναφορά των τιμών των μετάλλων που χρησιμοποιούνται και το πόσο αυτές επηρεάζουν την τελική τιμή των μπαταριών.

## Κοβάλτιο

Υπολογίζεται σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα ότι σε μια μπαταρία των 25kWh απαιτούνται 75 kg κοβάλτιου<sup>7</sup>. Το κοβάλτιο χρησιμοποιείται επίσης για την παρασκευή κραμάτων κινητήρων jet λόγω της ανθεκτικότητας, αλλά και ως καταλύτης σε βιομηχανικές χημικές αντιδράσεις. Η αγορά του κοβαλτίου είναι σχετικά μικρή και η δυναμική που έχει αποκτήσει οφείλεται στην κατασκευή μπαταριών. Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζεται η παγκόσμια παραγωγή κοβαλτίου αλλά και η διακύμανση της τιμής την τελευταία εικοσαετία. Ενδεικτικά η μέση τιμή τριετίας είναι 70,12€/kg<sup>8</sup> και η αντίστοιχη της εικοσαετίας 47,62 €/kg. Λόγω της περιορισμένης χρήσης στην βιομηχανία, η μαζική παραγωγή μπαταριών για ηλεκτρικά οχήματα θα προκαλέσει της αύξηση της τιμής του κοβαλτίου. Είναι δύσκολο να γίνει πρόβλεψη της τιμής, αλλά η τιμή των μπαταριών που περιέχουν κοβαλτιούχα άλατα είναι πολύ ευαίσθητη στην τιμή του κοβαλτίου.

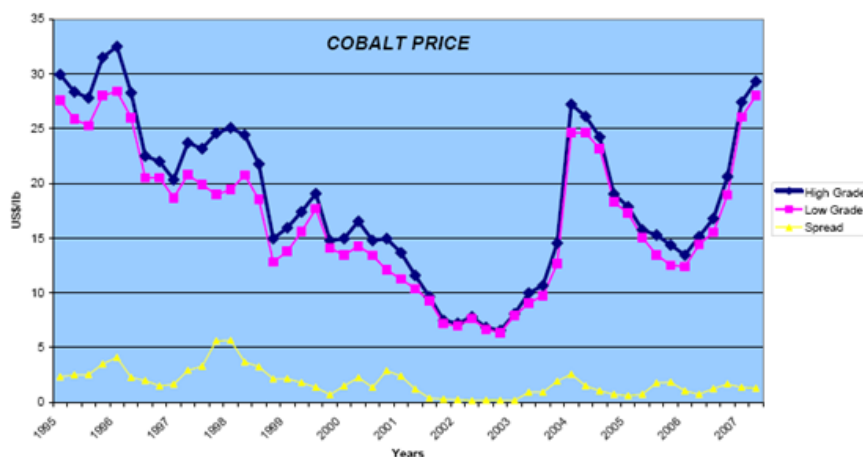
Διάγραμμα 7 Παγκόσμια παραγωγή και πρόβλεψη για το κοβάλτιο (Πηγή [www.geovic.com](http://www.geovic.com))



<sup>7</sup> Nissan altra

<sup>8</sup> Πηγή [www.minormetal.com](http://www.minormetal.com)

Διάγραμμα 8 Διακύμανση τιμής κοβαλτίου (99.8%) ως προς τον χρόνο



## Νικέλιο

Το νικέλιο χρησιμοποιείται και αυτό για την κατασκευή της καθόδου μπαταριών λιθίου. Για μια μπαταρία που μπορεί να εξοπλίσει ένα EV απαιτούνται περίπου 80 kg νικελίου. Η παγκόσμια αγορά του νικελίου είναι 1.200.000 ton (2008), δηλαδή περίπου είκοσι φορές μεγαλύτερη από την αγορά του κοβαλτίου. Το νικέλιο έχει αντίστοιχες εφαρμογές με το κοβάλτιο αλλά η μεγάλη διαφορά στην ζήτηση προέρχεται από την κατασκευή ανοξείδωτου χάλυβα. Αν και τα ηλεκτρικά οχήματα δεν αναμένεται να επηρεάζουν την τιμή του νικελίου, οι τιμές των μπαταριών εξαρτώνται άμεσα από την διεθνή τιμή του. Ενδεικτικά παρατίθεται η διακύμανση της τιμής την τελευταία πενταετία. Η τιμή είναι άμεσα συνδεδεμένη με την παγκόσμια οικοδομική δραστηριότητα.

Διάγραμμα 9 Διακύμανση τιμής νικελίου 1usd/lb=1.83 euros/kg.Πηγή kitco



## Μαγγάνιο

Το μαγγάνιο είναι το τελευταίο πιθανό υλικό για την κατασκευή της καθόδου των μπαταριών. Η ποσότητα που χρειάζεται για την κατασκευή μιας μπαταρία είναι αντίστοιχη με τα υπόλοιπα υλικά. Το μαγγάνιο παρουσιάζει παρόμοιες ιδιότητες με το νικέλιο και σχεδόν όλη η παραγωγή προορίζεται για την κατασκευή κραμάτων χάλυβα. Οι διακυμάνσεις στην τιμή είναι αντίστοιχες με του νικελίου αφού εξαρτώνται από την αγορά χάλυβα, ενώ η παγκόσμια παραγωγή του είναι περίπου πενταπλάσια. Το μαγγάνιο προτιμάται από τους κατασκευαστές<sup>9</sup> λόγω του σχετικά χαμηλού του κόστους και της υψηλής τάσης εξόδου. Η τιμή του μαγγανίου δεν θα επηρεαστεί από την παραγωγή μπαταριών. Ακόμα και στην μαζική παραγωγή ηλεκτρικών οχημάτων το ποσοστό της παραγωγής που προορίζεται για μπαταρίες δεν θα ξεπεράσει το 5%.

## Λίθιο

Στην κάθοδο των μπαταριών δεν χρησιμοποιείται καθαρό λίθιο άλλα ανθρακικό. Το ανθρακικό λίθιο μπορεί να παρασκευαστεί εργαστηριακά, αλλά προκύπτει και ως παραπροϊόν εξόρυξης. Η εξόρυξή σου σε παγκόσμιο επίπεδο δεν ξεπέρασε το 2000 τους 50,000 τόνους<sup>10</sup> αλλά η τάση είναι αυξητική λόγω της εφαρμογής του στις μπαταρίες. Μια ενδεικτική τιμή για το ανθρακικό λίθιο είναι 4.200€/ton ενώ η αύξηση της ζήτησης δεν αναμένεται να επηρεάσει την τιμή αυτή όχι μόνο επειδή η παραγωγή του έχει χαμηλό κόστος, αλλά επειδή η ποσότητα που χρησιμοποιείται σε μια μπαταρία 25kWh δεν ξεπερνά τα 10kg.

## Υλικά ανόδου

Στην άνοδο των μπαταριών χρησιμοποιείται συνθετικός γραφίτης. Οι τιμή του γραφίτη διαφέρει ανάλογα με την δομή και την μορφολογία του η οποία αλλάζει ανάλογα με τις απαιτήσεις και την χρήση του κατασκευαστή. Για μια μπαταρία υψηλής ενέργειας ο γραφίτης αποτελεί το 15% του βάρους της, ενώ αντίστοιχα για μια μπαταρία υψηλής ενέργειας το ποσοστό περιορίζεται στο 5%. Οι τιμές για τον γραφίτη κυμαίνονται 5€/kg και μπορούν να φτάσουν και τα 15€/kg ανάλογα με την εφαρμογή. Για μια μπαταρία που θα εξοπλίσει ένα μεσαίο ηλεκτρικό όχημα (medium EV, range 150km) χρειάζονται περίπου 45kg γραφίτη. Η τιμή αυτή αναμένεται να μειωθεί λόγω του αυξανόμενου ανταγωνισμού και της μαζικής παραγωγής.

Αξίζει να σημειώσουμε ότι μια εναλλακτική ένωση που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την άνοδο είναι λιθιούχα άλατα του τιτανίου. Η ένωση αυτή προσδίδει καλύτερες ιδιότητες (ιδιαίτερα στην μακροζωία) στην μπαταρία, αλλά η επιβάρυνση στο κόστος θεωρείται ασύμφορη.

## Διαχωριστής

Για την κατασκευή του διαχωριστή χρησιμοποιούνται υλικά όπως το πολυαιθυλένιο και το πολυπροπυλένιο. Τα υλικά αυτά είναι ευρέως διαδεδομένα και χρησιμοποιούνται για την κατασκευή πλαστικών. Λόγω της μαζικής παραγωγής τους οι πρώτες ύλες είναι σχετικά φθηνές. Παρόλα αυτά το κόστος αυξάνεται διότι το στρώμα του διαχωριστή απαιτείται να έχει πάχος από 16-25μm και επιβαρύνεται η παραγωγική διαδικασία. Μια ενδεικτική τιμή για τον διαχωριστή είναι 4€/m<sup>2</sup> και μια μπαταρία υψηλής ενέργειας 25kWh περιέχει περίπου 240m<sup>2</sup> διαχωριστή. Όσο αφορά τις μελλοντικές τιμές ισχύει ότι και για τον γραφίτη. Η πρώτη ύλη δεν θα επηρεαστεί από την κατασκευή των μπαταριών αφού ακόμα και με τα πιο αισιόδοξα σενάρια

<sup>9</sup> Nissan Leaf

<sup>10</sup> Πηγή: Chilean export data

τα πολυμερή που προορίζονται για κατασκευή μπαταριών δεν θα ξεπεράσουν το 1% της παγκόσμιας παραγωγής, αναμένεται όμως η μείωση του κόστους λόγω της παραγωγής σε μεγάλη κλίμακα η οποία μακροπρόθεσμα (2030) μπορεί να φτάσει και στο 1€/m<sup>3</sup>

## Ηλεκτρολύτης

Ο ηλεκτρολύτης αποτελείται από διάλυμα LiPF<sub>6</sub> (λιθική εξαφθοριούχα φωσφατάση) αραιωμένο σε διαλύτη υψηλής καθαρότητας περιεκτικότητας 15% κατά βάρος. Η αναλογία αυτή διαφέρει ανάλογα με την εφαρμογή και τον κατασκευαστή. Αν και το άλας είναι σχετικά ακριβό το διάλυμα έχει τιμή που κυμαίνεται ανάλογα με την καθαρότητα του διαλύτη από 8€/kg έως 12€/kg. Για μια μπαταρία υψηλής ενέργειας (25kWh) απαιτούνται περίπου 50 kg ηλεκτρολύτη. Η τιμή αυτή αναμένεται να μειωθεί με την μαζική παραγωγή μπαταριών λιθίου και την λειτουργία του ανταγωνισμού.

## Υπόλοιπα υλικά

Τα υπόλοιπα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των μπαταριών είναι τα υλικά συσκευασίας και τα ηλεκτρονικά που είναι υπεύθυνα για τον έλεγχο της μπαταρίας. Η συσκευασία των κυττάρων της μπαταρίας γίνεται σε αλουμινένια κουτιά. Το κόστος αυτών είναι πολύ μικρό σε σχέση με τα υπόλοιπα υλικά και δεν υπολογίζεται στο κόστος της μπαταρίας.

Τέλος τα ηλεκτρονικά που καθορίζουν την σύνδεση κάθε κυττάρου της μπαταρίας στο κύκλωμα επειδή είναι χαμηλής ισχύος έχουν πολύ χαμηλό κόστος, τάξης λεπτών του ευρώ, και δεν χρειάζεται ο υπολογισμός τους

## 2.4.8 Ενδεικτικό κόστος μπαταρίας

### 2.4.8.1 Κόστος απόκτησης μπαταριών

Μέχρι στιγμής αναφέραμε το κόστος του κατασκευαστή για τις μπαταρίες λιθίου (υλικά, εργασία, γενικά έξοδα) και όχι το κόστος απόκτησης από τον τελικό καταναλωτή. Εκτός από αυτά τα έξοδα στην τελική τιμή της μπαταρίας ενσωματώνονται και άλλα ποσά. Αυτά έχουν να κάνουν με την εγγύηση της μπαταρίας, το κόστος για την έρευνα και ανάπτυξη, τις αποσβέσεις, το κέρδος του κατασκευαστή. Όπως συνέβη και με τα υβριδικά οχήματα οι μπαταρίες αναπτύχθηκαν σε συνεργασία με τις αυτοκινητοβιομηχανίες οι οποίες συμπίεσαν το κέρδος τους για να μην επιβαρύνουν επιπλέον την τελική τιμή των οχημάτων. Αυτό αναμένεται να συμβεί και με τα ηλεκτρικά οχήματα χωρίς όμως να μπορούμε να γνωρίζουμε εκ των προτέρων την εμπορική πολιτική των βιομηχανιών.

Οι παράγοντες αβεβαιότητας για την τελική τιμή των μπαταριών δυσκολεύουν την πρόβλεψη για την τελική τιμή την οποία θα κληθεί να πληρώσει ο τελικός καταναλωτής. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει το κόστος ανά kWh της μπαταρίας διαφέρει ανάλογα με την εφαρμογή (όσο πιο υψηλής ενέργειας είναι, το σχετικό κόστος μειώνεται) αλλά και το συνολικό μέγεθος της

μπαταρίας (όσο αυξάνεται το μέγεθος της μπαταρίας μειώνεται το κόστος). ακόμα το κόστος είναι αλληλοεξαρτώμενο με την μαζική παραγωγή των ηλεκτρικών οχημάτων.

Επειδή δεν υπάρχουν αρκετά στοιχεία για την τιμή των μπαταριών για τις διάφορες εφαρμογές (EV, PHEV) τα στοιχεία που θα παρουσιαστούν σε αυτή την εργασία έχουν προκύψει από τιμές που αναφέρονται στην διεθνή βιβλιογραφία και προβλέψεις. Ακόμα έχει χρησιμοποιηθεί γραμμική παρεμβολή για να εξαχθούν στοιχεία για τα PHEV οχήματα. Οι τιμές που παρουσιάζονται ισχύουν για το 2015 όπου και υποθέτουμε ότι πραγματοποιείται η μαζική παραγωγή των οχημάτων και θεωρούνται ενδεικτικές. Στα επόμενα κεφάλαια της παρούσας διπλωματικής παρουσιάζονται οι τεχνολογικές υποθέσεις αναφορικά με την εξέλιξη του κόστους των μπαταριών στο μέλλον.

Πίνακας 11 Ενδεικτικό συνολικό κόστος κτήσης μπαταρίας

		Ηλεκτρική Αυτονομία (km)	Κόστος \$/kwh <sup>11</sup>	Ηλεκτρική Κατανάλωση (wh/km)	DoD <sup>12</sup>	Ενέργεια μπαταρίας (Wh)	Συνολικό Κόστος (\$)
<b>PHEV</b>	City car	20	900	111.7	0.6	3723	<b>3.351</b>
	Small family car	40	850	160.3	0.7	9160	<b>7.786</b>
	Large family car	80	800	202.2	0.85	19030	<b>15.224</b>
<b>EV</b>	City car	80	750	107.3	0.95	9035	<b>6.776</b>
	Small family car	150	700	159	0.95	25105	<b>17.574</b>
	Large family car	400	650	231.8	0.95	97600	<b>63.440</b>

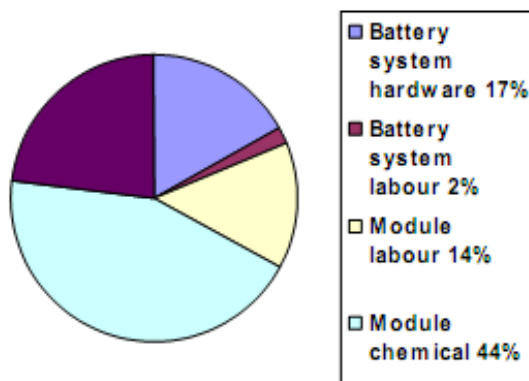
#### 2.4.8.2 Προοπτικές μείωση κόστους μπαταριών

Από τον παραπάνω πίνακα είναι φανερό ακόμα και χωρίς να κάνουμε την ανάλυση κόστους ότι το αρχικό ποσό που καλείται να πληρώσει ο καταναλωτής για την απόκτηση ενός ηλεκτρικού οχήματος είναι απαγορευτικό για ορισμένους τύπους οχήματος. Για να γίνει δυνατή η μαζική διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων είναι απαραίτητη η μείωση του αρχικού κόστους. Η παρακάτω εικόνα μας δείχνει ενδεικτικά την προέλευση του κόστους για μπαταρίες που μπορούν να κατασκευαστούν σήμερα.

<sup>11</sup> IEA

<sup>12</sup> DoD: Depth of Discharge

Διάγραμμα 10 Ενδεικτική κατανομή κόστους κατασκευής ηλεκτρικής μπαταρίας



Σύμφωνα με αντίστοιχες τεχνολογίες οι καμπύλες ωρίμανσης δείχνουν ότι με τον διπλασιασμό της παραγωγής έχουμε μείωση του κόστους κατά 20%. Σε ότι αφορά τις μπαταρίες η μείωση αυτή μπορεί να προκύψει από την βελτιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας και από την ανάπτυξη φθηνότερων υλικών καθόδου ή από την αύξηση των χαρακτηριστικών των ίδιων υλικών που θα επέτρεπε τις ίδιες επιδόσεις με λιγότερα υλικά.

Σε κάθε περίπτωση το κόστος είναι άμεσα και έμμεσα συνδεδεμένο με την συνολική παραγωγή και την ζήτηση που θα προκύψει η οποία εξαρτάται και από εξωγενείς παράγοντες. Για παράδειγμα η μείωση του κόστους σε μια ανταγωνιστική τεχνολογία, όπως το υδρογόνο, θα μείωνε το ενδιαφέρον για επενδύσεις στην ηλεκτροκίνηση κρατώντας σταθερό το μελλοντικό κόστος.

## 2.5 Ηλεκτρικά οχήματα και ηλεκτρικό δίκτυο

Η φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων είναι ένας επιπλέον παράγοντας διαφοροποίησης από τα συμβατικά. Όπως έχει αναφερθεί τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν περιορισμένη ηλεκτρική αυτονομία και η επαναφόρτισή τους διαρκεί τουλάχιστον τριάντα λεπτά. Αξίζει ακόμα να σημειωθεί ότι η τήρηση του κύκλου ζωής της μπαταρίας (πλήρης αποφόρτιση-πλήρης φόρτιση) εξασφαλίζει την μακροζωία της. Για την φόρτιση υπάρχουν στην διεθνή βιβλιογραφία διαφορετικές εκδοχές τόσο για την ισχύ των όσο και για την λειτουργία των εγκαταστάσεων. Στο πλαίσιο της εργασίας έχει απορριφθεί η δημιουργία σταθμών αντικατάστασης των αποφορτισμένων μπαταριών με φορτισμένες. Θεωρούμε ότι κάθε όχημα χρησιμοποιεί μια και μοναδική μπαταρία η οποία και επαναφορτίζεται. Οι σταθμοί αντικατάστασης απορρίφθηκαν λόγω της υψηλής τυποποίησης που θα έπρεπε να υπήρχε στις μπαταρίες των οχημάτων αλλά και στο υψηλό κόστος των εγκαταστάσεων.

Οι εγκαταστάσεις φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων που μπορεί να λειτουργήσει είτε ως κίνητρο είτε ως εμπόδιο. Η ανυπαρξία δικτύου φόρτισης προσθέτει έναν ακόμα παράγοντα αβεβαιότητας αφού ο τρόπος ανάπτυξης του δικτύου φόρτισης δεν είναι μοναδικός και μπορεί να διαφέρει ακόμα και από πόλη σε πόλη. Μέσα στα πλαίσια της εργασίας θα αναφερθούν τα πιο πιθανά σενάρια

ανάπτυξης και οι λόγοι που η φόρτιση μπορεί να επηρεάσει θετικά ή αρνητικά την ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων.

Η διάρκεια μια πλήρους φόρτισης εξαρτάται από της ισχύ της εγκατάστασης. Οι τρόποι φόρτισης κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με την διάρκεια στις παρακάτω κατηγορίες:

- Οικιακή φόρτιση
- Γρήγορη φόρτιση
- Φόρτιση μεγάλης ισχύος

Η *οικιακή φόρτιση* όπως αποκαλύπτει και η ονομασία της δεν απαιτεί κάποια ιδιαίτερη ηλεκτρική εγκατάσταση πέρα της οικιακής (240V/12A). Η οικιακή φόρτιση διαρκεί επτά έως δέκα ώρες ανάλογα με το μέγεθος της μπαταρίας και συστήνεται αποκλειστικά για την νυχτερινή φόρτιση του οχήματος όπου το όχημα παραμένει σταθμεθμένο για ένα τόσο μεγάλο διάστημα.

Η *γρήγορη φόρτιση* διαρκεί τρεις με πέντε ώρες. Λόγω της διάρκειας φόρτισης τέτοιες θέσεις μπορούν να δημιουργηθούν σε χώρους εργασίας, σε θέσεις παρκινγκ, σε εμπορικά κέντρα. Οι εγκαταστάσεις αυτές είναι μεγαλύτερης ισχύος (240V/35A) και σε αυτές ο ιδιοκτήτης του οχήματος πληρώνει το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας και την υπηρεσία της φόρτισης στον ιδιοκτήτη της εγκατάστασης. Τέτοιες θέσεις φόρτισης έχουν πειραματικά δημιουργηθεί ως κίνητρο για την ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων (Εικ 12)

Εικόνα 11 Θέσεις στάθμευσης με την δυνατότητα φόρτισης (Πηγή wikipedia)



Η *φόρτιση μεγάλης ισχύος* λαμβάνει χώρα σε εγκαταστάσεις παρόμοιες με τους σταθμούς ανεφοδιασμού των συμβατικών οχημάτων. Η διάρκεια μιας πλήρους φόρτισης διαρκεί περίπου μισή ώρα και αυτό οφείλεται στην εξειδικευμένη ηλεκτρική εγκατάσταση του σταθμού. Τέτοιες εγκαταστάσεις αναμένεται να δημιουργηθούν στις εθνικές οδούς για να καταστήσουν τις μετακινήσεις που ξεπερνούν την ηλεκτρική αυτονομία των οχημάτων εφικτές.



Η εισαγωγή και η αναλογία των παραπάνω τρόπων φόρτισης εξαρτάται από την τοπολογία και την κατά τόπους εφαρμογή πολιτικής. Για παράδειγμα σε περιαστικές περιοχές όπου οι ιδιοκτήτες των οχημάτων κατέχουν σταθερή θέση παρκαρίσματος ευνοείται η ανάπτυξη της οικιακής φόρτισης η οποία έχει χαμηλό αρχικό κόστος εγκατάστασης και στην συνέχεια ο ιδιοκτήτης καλείται να πληρώσει μόνο την ενέργεια που καταναλώνει. Σε αστικές περιοχές όπου η σταθερή θέση παρκαρίσματος δεν είναι διαθέσιμη ευνοείται η ανάπτυξη των θέσεων γρήγορης φόρτισης.

Τα παραπάνω σε συνδυασμό με το ότι η έλλειψη εγκαταστάσεων φόρτισης θεωρείται ένα από τα μεγαλύτερα εμπόδια για την αγορά ενός ηλεκτρικού οχήματος από τους καταναλωτές δημιουργεί το ζήτημα της επιτυχημένης ανάπτυξης του δικτύου φόρτισης. Το κεντρικό πρόβλημα γύρω από το οποίο κινείται η ορθή ανάπτυξη του δικτύου φόρτισης έχει να κάνει με την υιοθέτηση της ηλεκτροκίνησης από τους καταναλωτές και την αρχική επένδυση που χρειάζεται για την κατασκευή των εγκαταστάσεων. Σε μια ελεύθερη αγορά η χαμηλή ανάπτυξη του δικτύου φόρτισης οδηγεί σε χαμηλή υιοθέτηση της ηλεκτροκίνησης και το αντίθετο.

Για να γίνουν αντιληπτό το μέγεθος της επένδυσης για την ανάπτυξη δικτύου φόρτισης αναφέρονται εκτιμήσεις από την διεθνή βιβλιογραφία (Department for Business Enterprise and Regulatory Reform: Department for Transport 2008) για το κόστος θέσεων φόρτισης στον παρακάτω πίνακα (Πινάκας 12)

Πίνακας 12 Ενδεικτικές τιμές κατασκευής θέσεων φόρτισης

	Οικιακή Φόρτιση	Γρήγορη φόρτιση	Φόρτιση μεγάλης Ισχύος
Κόστος (USD)	500-1.000	3.000-7.000	40.000-70.000

Όπως φαίνεται από τον πίνακα υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις-αβεβαιότητα στην εκτίμηση του κόστους κατασκευής. Η απόκλιση αυτή οφείλεται αφενός στην έλλειψη πραγματικών δεδομένων αλλά και στην ιδιαιτερότητα κατασκευής λόγω θέσης.

Προϋπόθεση για την επαρκή ανάπτυξη του δικτύου φόρτισης είναι η δημιουργία νομοθετικού πλαισίου για τις θέσεις φόρτισης. Σήμερα στην Ευρώπη νόμοι και κανονισμοί δεν υπάρχουν και σε όσες πόλεις έχουν πειραματικά δημιουργηθεί χώροι φόρτισης ο κανονισμός δημιουργήθηκε από τις αρχές της πόλης και δεν έχει οικουμενικό χαρακτήρα. Λόγω των ζητημάτων ασφαλείας που προκύπτουν προτείνεται στο νομοθετικό πλαίσιο να διευκρινίζονται οι προδιαγραφές των σταθμών. Οι ρύθμιση των χωροταξικών ζητημάτων μπορεί να επιλυθεί σε επίπεδο δήμων ή περιφερειών.

Λόγω του υψηλού αρχικού κόστους επένδυσης και της χαμηλής αρχικής ζήτησης θεωρείται απαραίτητο να δοθούν κίνητρα για την κατασκευή θέσεων φόρτισης. Τα οικονομικά κίνητρα που μπορούν να δοθούν είναι τα παρακάτω:

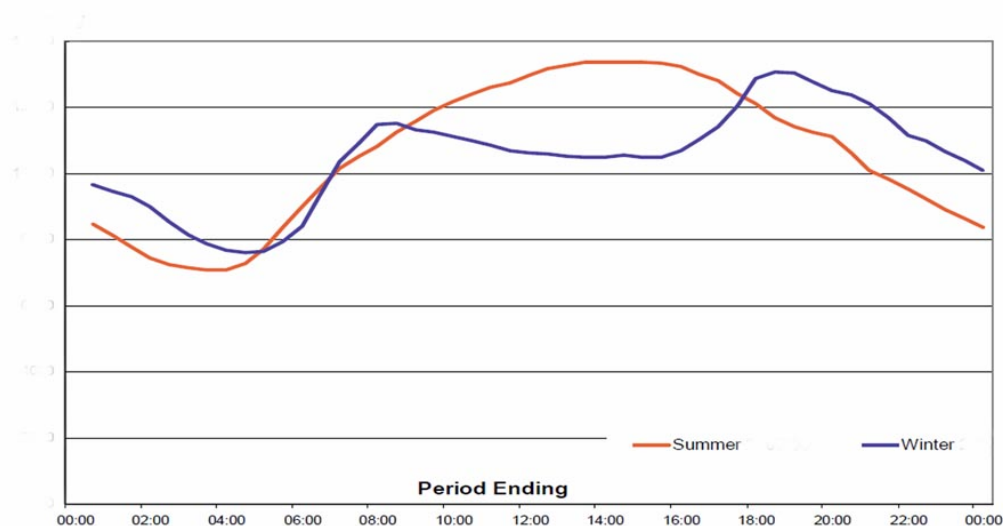
- Εκπτώσεις φόρων, απαλλαγή ΦΠΑ για τον εξοπλισμό
- Μειωμένη τιμή ηλεκτρική ενέργειας
- Παραχώρηση προνομιούχων θέσεων παρκαρίσματος
- Χρηματοδότηση με χαμηλότοκα δάνεια

Παρά τα κίνητρα που είναι δυνατό να δοθούν ο πιο πιθανός τρόπος ανάπτυξης του δικτύου φόρτισης (τουλάχιστον για τις θέσεις της γρήγορης φόρτισης) είναι η αρχική κατασκευή τους από τον κρατικό προϋπολογισμό μέσω προγραμμάτων για την ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων και η σταδιακή παραχώρησή τους σε ιδιώτες όσο η εκμετάλλευσή τους είναι οικονομικά βιώσιμη.

### 2.5.1 Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας

Κατά την διάρκεια της ημέρας η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζει διακυμάνσεις οι οποίες σχετίζονται με την ανθρώπινη δραστηριότητα. Οι διακυμάνσεις αυτές αποτυπώνονται στην ημερήσια καμπύλη φορτίου (Εικ 13). Για τους διαχειριστές των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας η ιδανική καμπύλη φορτίου θα ήταν μια ευθεία, σταθερής ζήτησης. Με σταθερή ζήτηση το σύστημα θα είχε την οικονομικότερη διαχείριση και τις ελάχιστες απώλειες.

Εικόνα 12 Χαρακτηριστική καμπύλη φορτίου για το καλοκαίρι και τον χειμώνα (Πηγή [www.worldpress.com](http://www.worldpress.com))



Τα ηλεκτρικά οχήματα αναμένεται τις επόμενες δεκαετίες να παίξουν σημαντικό ρόλο στην ζήτηση ενέργειας αλλά και στην διαμόρφωση της καμπύλης φορτίου. Όπως παρατηρούμε η καμπύλη φορτίου παρουσιάζει μια κάμψη τις νυχτερινές ώρες. Αυτή τη μείωση στην ζήτηση μπορεί να την εξομαλύνει η νυχτερινή φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων. Σύμφωνα με την ισχύουσα τιμολόγηση οι καταναλωτές απολαμβάνουν μειωμένη χρέωση τις νυχτερινές ώρες ως ένα κίνητρο για να αυξήσουν την κατανάλωσή τους.

Για τις επιπτώσεις της εισαγωγής των ηλεκτρικών οχημάτων στα ηλεκτρικά δίκτυα χρειάζεται ανάλυση τόσο της διείσδυσης των νέων τεχνολογιών τις επόμενες δεκαετίες (2<sup>ο</sup> μέρος εργασίας) αλλά και ανάλυση των ηλεκτρικών δικτύων ανά χώρα. Σύμφωνα πάντως με την διεθνή βιβλιογραφία τα εθνικά δίκτυα ηλεκτροδότησης έχουν την δυνατότητα να υποστηρίξουν την φόρτιση των οχημάτων χωρίς επιπλέον επενδύσεις κυρίως λόγω της νυχτερινής ζήτησης ρεύματος, όσο και την προβλέψιμη ανάπτυξη των νέων οχημάτων.

## 2.6 Ηλεκτρικά οχήματα και Smart grid

Στην διεθνή βιβλιογραφία παρουσιάζονται προτάσεις για την συμμετοχή των ηλεκτρικών οχημάτων στο Smart Grid (έξυπνο δίκτυο). Το *Smart Grid* είναι ένας ολοκληρωτικός τρόπος διαχείρισης του συνόλου του ηλεκτρικού δικτύου που συνδέει δυναμικά την παραγωγή με την κατανάλωση με στόχο την πιο αποδοτική, πιο οικονομική και πιο αξιόπιστη λειτουργία του. Στην πραγματικότητα είναι δύσκολο να δοθεί ένας σύντομος ορισμός για το Smart Grid παρά μόνο να περιγραφούν οι βασικές αρχές λειτουργίας του οι οποίες είναι:

- Παρακολούθηση της προσφοράς και της ζήτησης ενέργειας σε πραγματικό χρόνο
- Δυναμική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας
- Σύνδεση προσφοράς-ζήτησης
- Εγκατάσταση ‘‘υπολογιστή ηλεκτρικής ενέργειας’’ σε κάθε καταναλωτή και παραγωγό
- Χρήση αλγορίθμων για την βελτιστοποίηση των παραμέτρων του ηλεκτρικού δικτύου (αξιοπιστία, μεταφορά, παραγωγή)

Η σύνδεση των ηλεκτρικών οχημάτων με το Smart Grid έχει να κάνει με το ότι το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι δυναμικό κατά την διάρκεια της ημέρας (όταν το Smart Grid έχει καταφέρει έναν μεγάλο βαθμό ολοκλήρωσης). Μπορούμε να το φανταστούμε σαν την διαπραγμάτευση των μετοχών σε ένα 24ωρο χρηματιστήριο. Τα ηλεκτρικά οχήματα όντας συνδεδεμένα στο δίκτυο θα έχουν ανάλογα με το επίπεδο φόρτισης τους, την επιθυμία του ιδιοκτήτη και την τρέχουσα τιμή του ηλεκτρισμού είτε να φορτίσουν την μπαταρία τους, είτε να δώσουν-πούλησουν ενέργεια στο δίκτυο είτε να παραμείνουν ανενεργά.

Στα πλαίσια της εργασίας υποθέτουμε ότι τα ηλεκτρικά οχήματα δεν θα συμμετάσχουν ενεργά στο Smart Grid. Ο βασικός λόγος για αυτό είναι ότι οι ρηχές φορτίσεις και εκφορτίσεις των ηλεκτρικών οχημάτων μειώνουν τον χρόνο ζωής των μπαταριών. Όσο υψηλή και να είναι η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας δεν μπορεί να αποτελέσει κίνητρο για πώληση ηλεκτρικής ενέργειας που είναι αποθηκευμένη σε μια υψηλής τεχνολογίας μπαταρία λιθίου με κίνδυνο την πρόωρη αντικατάστασή της. Ο δεύτερος λόγος, είναι ο χαμηλός ρυθμός ανάπτυξης του Smart Grid το οποίο περιορίζεται προς το παρόν σε πειραματικό επίπεδο και σε μικρή κλίμακα.

Τέλος ακόμα και αν η υπόθεση ότι τα ηλεκτρικά οχήματα δεν συμμετέχουν στο Smart Grid είναι λανθασμένη μπορούμε να πούμε ότι η συμμετοχή δεν αλλάζει καθοριστικά τα δεδομένα του σεναριακού μέρους της εργασίας. Το Smart Grid έχει ως αποτέλεσμα την πιο αποτελεσματική και οικονομική λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου. Ως εκ τούτου το κόστος χρήσης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι χαμηλότερο.

### **3 ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ**

### **ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ**

#### **3.1 Εισαγωγή**

Σε αυτή την ενότητα θα γίνει ενδεικτικός προσδιορισμός της τιμής απόκτησης των διαφόρων κατηγοριών ηλεκτρικών οχημάτων για το έτος 2015, χρονιά στην οποία εισάγονται τα ηλεκτρικά οχήματα στην ευρωπαϊκή αγορά. Η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί δεν είναι άμεση. Δηλαδή δεν προέρχεται από αναλυτική εκτίμηση του κόστους κάθε επιμέρους στοιχείου (σασί, μηχανή, δευτερεύοντα συστήματα) και πρόσθεση τους αλλά γίνεται μέσω των συμβατικών οχημάτων.

Για αυτό τον έμμεσο προσδιορισμό γίνεται χρήση των συμπερασμάτων της πρώτης ενότητας της εργασίας όπου έχει γίνει εκτενής αναφορά στις ομοιότητες και τις διαφορές των ηλεκτρικών και των συμβατικών οχημάτων. Όποιο επιπλέον/λιγότερο κόστος προκύπτει προστίθεται η αντίστοιχα αφαιρείται από την τελική τιμή. Μια παράμετρο την οποία πρέπει να λάβουμε υπόψη είναι οι τιμές των συμβατικών οχημάτων. Έχοντας κατηγοριοποιήσει τα επιβατικά οχήματα σε μικρά, μεσαία και μεγάλα έχουμε μόνο ενδεικτικές τιμές αγοράς αφού υπάρχουν μεγάλες διακυμάνσεις τόσο ανάμεσα στις διάφορες αυτοκινητοβιομηχανίες όσο ακόμα και στα ίδια τα μοντέλα ανάλογα με τον εξοπλισμό.

Στην συνέχεια της ενότητας θα γίνει ανάλυση και για τα υπόλοιπα κόστη που προκύπτουν για τα ηλεκτρικά οχήματα όπως το κόστος συντήρησης, καυσίμου, τελών κυκλοφορίας.

#### **3.2 Τιμή απόκτησης**

##### **3.2.1 Πλήρως ηλεκτρικά οχήματα (EV)**

Τα στοιχεία τα οποία πρέπει να προσθέσουμε στην τιμή του EV σε σχέση με το συμβατικό είναι τα παρακάτω

- Μπαταρία
- Ηλεκτρική μηχανή
- Έλεγχος μηχανής
- Σύστημα αναγεννητικής πέδησης
- Επιπλέον κόστος θερμομόνωσης
- Ψύξη μπαταρίας

και αντίστοιχα να αφαιρέσουμε,

- MEK
- Σύστημα διαχείρισης καυσαερίων

Όσο αφορά τα στοιχεία που πρέπει να προσθέσουμε έχουμε από την προηγούμενη ενότητα αναλυτικά στοιχεία για τις μπαταρίες, ενώ είναι εύκολο να βρεθούν τιμές για τις ηλεκτρικές μηχανές και τον έλεγχο της. Το επιπλέον κόστος που προκύπτει από την αναγεννητική πέδηση, και την βελτιωμένη θερμομόνωση δεν μπορούμε να το υπολογίσουμε ενώ για την ψύξη της μπαταρίας θεωρούμε ότι χρησιμοποιείται σύστημα αντίστοιχο με των συμβατικών οχημάτων για την ψύξη του κινητήρα και δεν επιβαρύνει το κόστος. Αντίστοιχα θα αφαιρέσουμε το κόστος της MEK και του συστήματος διαχείρισης καυσαερίων το οποίο θεωρείται σταθερό και ίσο με 600€ για όλα τα οχήματα. Η παράμετρος που προσδίδει αβεβαιότητα σε αυτή την μέθοδο είναι ότι οι τιμές που αναφέρονται δεν είναι υπολογισμένες βάσει των εργοστασιακών τιμών λόγω έλλειψης δεδομένων.

Πίνακας 13 Ενδεικτικό κόστος απόκτησης ηλεκτρικού οχήματος

	Κόστος συμβατικού	MEK	Διαχείριση καυσαερίων	Μπαταρία <sup>13</sup>	Ηλεκτρική μηχανή <sup>14</sup>	Ελεγκτής <sup>15</sup>	Κόστος ηλεκτρικού
City car 80	15000€	1000€	600€	4878€	1980€	1460€	21718€
Small family car 150	20000€	1250€	600€	12653€	2700€	2000€	35503€
Large family car 500	30000€	1500€	600€	45676€	4000€	2570€	80146€

### 3.2.2 Plug in hybrid οχήματα

Για τον υπολογισμό της τελικής τιμής πώλησης των PHEV οχημάτων θα χρησιμοποιήσουμε τις τιμές των υβριδικών οχημάτων τα οποία ήδη κυκλοφορούν στην αγορά. Οι διαφορές που έχουν τα υβριδικά σε σχέση με τα PHEV οχήματα είναι ότι τα plug in hybrid έχουν μεγαλύτερες μπαταρίες, τόσο σε ενέργεια όσο και σε ισχύ, και μεγαλύτερο ηλεκτροκινητήρα. Για τον

<sup>13</sup> Η τιμή προέρχεται από τον πίνακα 11 και έγινε η μετατροπή σε €, 1\$=0,72€

<sup>14</sup> Η τιμή αναφέρεται σε μηχανή εναλλασσόμενου ρεύματος

<sup>15</sup> Λόγω έλλειψης δεδομένων η τιμή αναφέρεται προσεγγιστικά σε μεμονωμένα τεμάχια που υπάρχουν στην αγορά. Λόγω της μαζικής παραγωγής η τιμή αναμένεται να μειωθεί

υπολογισμό της τιμής απόκτησης θα προσθέσουμε στην τιμή του αντίστοιχου υβριδικού, την τιμή της μπαταρίας που υπολογίσαμε στην προηγούμενη ενότητα.

Στον υπολογισμό αυτό μπορεί να υπεισέρχεται σφάλμα λόγω της διαφορετικής διαστασιολόγησης των στοιχείων όμως κρίνεται πολύ πιο αξιόπιστος αυτός ο απλός υπολογισμός διότι δεν υπάρχουν εργοστασιακά δεδομένα για την ανάλυση κόστους των στοιχείων (μηχανή, μπαταρία) των οχημάτων.

**Πίνακας 14 Ενδεικτικό κόστος απόκτησης plug in hybrid οχημάτων**

	Κόστος υβριδικού	Κόστος μπαταρίας	Κόστος PHEV
City car 20	23000€	2412€	25412€
Small family car 40	28000€	5605€	33605€
Large family car 80	40000€	10961€	50961€

### 3.2.3 Σύνοψη

Στην συνέχεια παρατίθεται το συνολικό αρχικό και το ετησιοποιημένο ενδεικτικό κόστος απόκτησης συμβατικών, plug in hybrid και ηλεκτρικών οχημάτων. Για την μετατροπή του κόστους υποθέσαμε περίοδο αποπληρωμής τα 5 έτη και επιτόκιο 10%

**Πίνακας 15 Συγκριτικός πίνακας ενδεικτικού κόστους κτήσης συμβατικών και ηλεκτροκίνητων οχημάτων**

		Κόστος κτήσης (Euros)	Ετησιοποιημένο κόστος κτήσης (Euros)
Conventional	City car	15000	3957
	Small Family Car	20000	5276
	Large family car	30000	7914
EV	Small EV 80	21718	5729
	Medium EV 150	35503	9366
	Large EV 400	80146	21142
PHEV	City Car 20	25412	6704
	Small Family Car 40	33605	8865
	Large family car 80	50961	13442

## 3.3 Κόστος συντήρησης

### 3.3.1 EV

Ένα πλεονέκτημα των ηλεκτρικών οχημάτων σε σχέση με τα συμβατικά είναι το μειωμένο κόστος συντήρησης και επισκευής το οποίο υπόσχονται. Είναι χαρακτηριστικό ότι οι υποστηρικτές των ηλεκτρικών οχημάτων έλεγαν ότι η συντήρηση ενός ηλεκτρικού οχήματος περιλαμβάνει μόνο την συμπλήρωση καθαριστικού για το παρμπρίζ.

Η παραπάνω παραδοχή είναι υπερβολική αλλά ισχύει για την ηλεκτρική μηχανή του οχήματος. Στην πραγματικότητα μπορούμε να υποθέσουμε ότι το κόστος συντήρησης και επισκευής της ηλεκτρικής μηχανής είναι μηδενικό και ότι όλα τα υπόλοιπα κόστη που αφορούν το ηλεκτρικό όχημα είναι παρόμοια. Στην συνέχεια ακολουθεί η ανάλυση για το κόστος συντήρησης ενός συμβατικού και ενός ηλεκτρικού οχήματος. Για την ανάλυση αυτή δεν λάβαμε υπόψη τις βλάβες των οχημάτων (θεωρούμε ότι καλύπτονται από εγγύηση) ενώ οι τιμές αναφέρονται στην μεσαία κατηγορία. Τέλος θεωρήσαμε ότι κάθε όχημα καλύπτει 15.000km/έτος

Πίνακας 16 Σύγκριση κόστους συντήρησης ηλεκτρικών και συμβατικών οχημάτων σε ετήσια βάση

Ετήσιο κόστος			
	Αντικατάσταση (KM)	EV	Συμβατικό όχημα
<b>Μηχανή</b>			
Λιπαντικά	10,000	-	75.00 €
Φίλτρα καθαρισμού	15,000	-	60.00 €
Μπουζί	15,000	-	20.00 €
Ιμάντες χρονισμού	60,000	-	55.00 €
Ιμάντες	30,000	-	15.00 €
<b>Σύστημα πέδησης<sup>16</sup></b>			
Τακάκια	30,000	40.00 €	50.00 €
Δισκόπλακες	90,000	30.00 €	36.00 €
Συντήρηση	15,000	15.00 €	15.00 €
<b>Μετάδοση κίνησης</b>			
Συμπλέκτης	120,000	-	55.00 €
Λιπαντικά	30,000	60.00 €	25.00 €
<b>Λοιπά κόστη</b>			
Ελαστικά	45,000	120.00 €	120.00 €
Αναρτήσεις	90,000	100.00 €	100.00 €
Σύστημα κύλισης	150,000	60.00 €	60.00 €
Μάκτρα	7500	30.00 €	30.00 €

<sup>16</sup> Θεωρούμε ότι το σύστημα πέδησης έχει ελαφρώς χαμηλότερο κόστος συντήρησης λόγω της αναγεννητικής πέδησης.

Σύνολο		455.00 €	716.00 €
--------	--	----------	----------

Ο σκοπός του παραπάνω πίνακα (Πίνακας 16) δεν είναι να δώσει απόλυτους αριθμούς για την διαφορά στο κόστος συντήρησης αλλά την σχετική διαφορά. Θεωρώντας ότι το κόστος συντήρησης έχει άμεση σχέση με την κατηγορία του οχήματος μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το κόστος συντήρησης των EV είναι 40% μειωμένο σε σχέση με τα συμβατικά. Κατά την εισαγωγή των ηλεκτρικών οχημάτων αυτό είναι πιθανό να μην ισχύει λόγω της έλλειψης τεχνογνωσίας και των ακριβότερων υπηρεσιών. Στην παραπάνω ανάλυση υποθέσαμε ότι η μπαταρία του ηλεκτρικού οχήματος δεν αντικαθίσταται καθ' όλη την διάρκεια της ζωής του οχήματος<sup>17</sup> (15 χρόνια).

### 3.3.2 PHEV

Τα PHEV παρουσιάζουν την ιδιαιτερότητα του ότι κινούνται και με την ηλεκτρική μηχανή αλλά και με την ΜΕΚ. Το κόστος συντήρησης τους είναι λογικό να συσχετίζεται με τα χιλιόμετρα που διανύει το όχημα στην ηλεκτρική και της υβριδική λειτουργία. Για να το προσεγγίσουμε καλύτερα θα υποθέσουμε ότι η συντήρηση του οχήματος είναι αντίστοιχη του ηλεκτρικού οχήματος όταν βρίσκεται στην ηλεκτρική λειτουργία και αντίστοιχα του υβριδικού στην υβριδική λειτουργία. Σύμφωνα με την βιβλιογραφία το κόστος συντήρησης των υβριδικών οχημάτων είναι ελάχιστα πιο χαμηλό από τα αντίστοιχα συμβατικά χωρίς μέσα σε αυτά να υπολογίζεται το κόστος βλαβών και αντικατάστασης της μπαταρίας.

Σύμφωνα με την προηγούμενη παράγραφο και τον Πίνακα 7 ο οποίος προσδιορίζει το ποσοστό της απόστασης που διανύει ένα PHEV ανάλογα με την ηλεκτρική του αυτονομία το κόστος συντήρησης σε σύγκριση με τα συμβατικά οχήματα υπολογίζεται στον παρακάτω πίνακα. Να υπενθυμίσουμε ότι κατά την κατάσταση ηλεκτρικής λειτουργίας (charge depleting mode) το όχημα συμπεριφέρεται σαν καθαρά ηλεκτρικό όχημα ενώ στην κατάσταση υβριδικής λειτουργίας (charge sustaining mode) η ΜΕΚ του οχήματος τίθεται σε λειτουργία και το όχημα λειτουργεί ως υβριδικό καταναλώνοντας πρωτογενώς ορυκτά καύσιμα.

Πίνακας 17 Κόστος συντήρησης PHEV οχημάτων

	CS mode % <sup>18</sup>	Κόστος CS mode (%)	Κόστος CD mode (%)	Σύνολο κόστους <sup>19</sup>
City Car 20	21	12.6	79	91.6
Small Family Car 40	36	21.6	64	85.6
Large family car 80	57	34.2	43	77.2

<sup>17</sup> Στο δεύτερο μέρος της εργασίας το κόστος αντικατάστασης της μπαταρίας επιβαρύνει το κόστος των ηλεκτρικών οχημάτων.

<sup>18</sup> Ποσοστό % που διανύουν το όχημα σε ηλεκτρική λειτουργία

<sup>19</sup> Ποσοστό % σε σύγκριση με το αντίστοιχο συμβατικό όχημα = 0,6\*(% cs mode) +1\*(%cd mode)



## 3.4 Κόστος καυσίμων

### 3.4.1 EV

Ένα κίνητρο για την απόκτηση ηλεκτρικού οχήματος είναι το χαμηλό κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας σε σύγκριση με την συνεχώς αυξητική τάση στις τιμές των ορυκτών καυσίμων. Ο υπολογισμός του κόστους καυσίμου είναι εύκολος αφού έχουμε υπολογίσει προηγουμένως την κατανάλωση για όλες τις κατηγορίες των ηλεκτρικών οχημάτων.

Για τους υπολογισμούς του ετήσιου κόστους υποθέσαμε ότι το όχημα καλύπτει ετησίως 15.000km<sup>20</sup> και η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι 0.08€/kWh.

Πίνακας 18 Ενδεικτικό ετήσιο συνολικό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας

Κατηγορία	Κατανάλωση (Wh/km)	Ετήσια Συνολική Κατανάλωση (kWh)	Ετήσιο Συνολικό Κόστος (EURO)
Small EV80	107	1.609	128
Medium EV150	159	2.385	190
Large EV 400	231	4.636	370

### 3.4.2 PHEV

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει τα PHEV καταναλώνουν πρωτογενώς τόσο ορυκτό καύσιμο, όσο και ηλεκτρική ενέργεια. Για το συνολικό κόστος των δυο πηγών χρησιμοποιούμε την ίδια μέθοδο όπως και στην προηγούμενη παράγραφο. Υπολογίζουμε ξεχωριστά το κόστος για την ηλεκτρική και την υβριδική λειτουργία και τα αθροίζουμε για να βρούμε το κόστος του μεικτού κύκλου. Οι υποθέσεις είναι ίδιες με την κατανάλωση του ηλεκτρικού οχήματος. Για την τιμή της βενζίνης υποθέτουμε ότι είναι 1,5€/lt.

Πίνακας 19 Ενδεικτικό ετήσιο κόστος καυσίμου για PHEV

Κατηγορία	%CS Mode	CS km/έτος	Ηλεκτρική Ενέργεια	Κόστος ηλεκτρικής ενέργειας	%cd mode	CD km/έτος	Κατανάλωση (lt/100km)	Κόστος βενζίνης	Συνολικό Κόστος
Small Phev20	21	3150	111.7	28€	79	11850	4.5	799€	<b>828€</b>
Medium Phev40	36	5400	160.3	69€	64	9600	6.3	907€	<b>976€</b>
Large PHEV80	57	11400	202.2	184€	43	8600	7.7	993€	<b>1177€</b>

<sup>20</sup> Για την κατηγορία των μεγάλων οχημάτων υποθέσαμε 20.000km/έτος

### 3.5 Υπόλοιπα κόστη

Εκτός του κόστους καυσίμου και συντήρησης η κατοχή ενός οχήματος επιβαρύνεται από ασφάλιστρα, φόρους και τέλη. Το ποσό της επιβάρυνσης έχει να κάνει με την αξία του αυτοκινήτου ή τα κυβικά του και διαφέρει ανάλογα με την χώρα.

Όσο αφορά τα ασφάλιστρα αναμένεται να είναι ακριβότερα από των συμβατικών οχημάτων λόγω της αυξημένης αξίας των οχημάτων. Οι φόροι και τα τέλη των ηλεκτρικών οχημάτων αναμένεται να είναι μειωμένα μέσα στο πλαίσιο των κινήτρων που θα δώσουν οι κυβερνήσεις για την μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>. Πιο αναλυτικά θα αναφερθούμε σε αυτά τα κίνητρα σε επόμενη ενότητα της εργασίας.

### 3.6 Συνοψη ετήσιου μεταβλητού κόστους

Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα συνολικά μεταβλητά κόστη όπως προέκυψαν από τις παραπάνω ενότητες για τα συμβατικά, τα ηλεκτρικά και τα plug in hybrid οχήματα

Πίνακας 20 Συγκριτικός πίνακας ετήσιου κόστους συντήρησης και καυσίμων

		Κόστος συντήρησης (Euros)	Κόστος καυσίμων (Euros)	Συνολικό κόστος (Euros)
Conventional	City car	716	1125	1841
	Small Family Car	716	1687.5	2403
	Large family car	716	2250	2966
EV	Small EV 80	415	128	543
	Medium EV 150	415	190	605
	Large EV 400	415	370	785
PHEV	City Car 20	656	828	1484
	Small Family Car 40	613	976	1589
	Large family car 80	553	1177	1730

### 3.7 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Τα ηλεκτρικά οχήματα δεν εκπέμπουν καυσαέρια κατά την λειτουργία του και για αυτό θεωρούνται φιλικότερα προς το περιβάλλον σε σχέση με τα συμβατικά. Μπορεί λοιπόν να μην υπάρχει καμία άμεση εκπομπή αερίων, αλλά η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος είναι συνδεδεμένη με εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα. Η ποσότητα της εκπομπής ανά kWh εξαρτάται από το μίγμα της ηλεκτροπαραγωγής (λιγνίτης, πυρηνικά, ανανεώσιμες, πετρέλαιο).

Πέρα από την εκπομπή καυσαερίων κατά την παραγωγή των ηλεκτρικών οχημάτων υπάρχουν επιπτώσεις στο περιβάλλον από την παραγωγή των μπαταριών λιθίου οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω.

### 3.7.1 Εκπομπές CO<sub>2</sub>

#### EV

Τα ηλεκτρικά οχήματα εκπέμπουν CO<sub>2</sub> έμμεσα με δυο τρόπους. Μέσω της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπου οι εκπομπές εξαρτώνται από το μίγμα της ηλεκτροπαραγωγής, και κατά την διάρκεια της παραγωγής τους. Στη ανάλυση που ακολουθεί λαμβάνουμε υπ' όψη μόνο τις εκπομπές που οφείλονται στην κατανάλωση ενέργειας για την κίνηση του οχήματος. Για τις εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά την παραγωγή των ηλεκτρικών οχημάτων υποθέτουμε ότι η μόνη διαφοροποίηση είναι κατά την παραγωγή των μπαταριών.

Οι παραδοχές που έγιναν είναι ότι ο μέσος συντελεστής εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα για την Ευρώπη κυμαίνεται μεταξύ 0,3 - 0,4 kg CO<sub>2</sub>/ kWh<sup>21</sup>, κάθε λίτρο βενζίνης που καίγεται, απελευθερώνει 2,33 kg CO<sub>2</sub> και ο κύκλος ζωής των οχημάτων είναι κοινός για συμβατικά και ηλεκτρικά στα 180,000km.

Πίνακας 21 Well to Wheel εκπομπές CO<sub>2</sub> για τα ηλεκτρικά οχήματα

Κατηγορία EV	Κατανάλωση (Wh/km)	gr CO <sub>2</sub> /km
City car 80	107.3	32,2-42.9
Small family car 150	159	47,7-63.6
Large family car 400	231.8	69,5-92.7

Πίνακας 22 Εκπομπές CO<sub>2</sub> συμβατικών οχημάτων ανά κατηγορία

Κατηγορία συμβατικού	Κατανάλωση (lt/km)	Εκπομπή CO <sub>2</sub> (gr/km)	Συνολικό CO <sub>2</sub> (kg)
City car <sup>22</sup>	0.06	0.1398	25.164
Small family car	0.09	0.2097	37.746
Large family car	0.12	0.2796	50.328

Από την σύγκριση των παραπάνω στοιχείων βλέπουμε ότι τα συμβατικά οχήματα κατά την διάρκεια της ζωής τους εκπέμπουν σχεδόν τριπλάσια ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα από ένα EV.

Τα στοιχεία που παραθέσαμε είναι ενδεικτικά και αφορούν το έτος εισαγωγής των ηλεκτρικών οχημάτων (2015). Στο μέλλον αναμένεται να μειωθούν οι εκπομπές και των δυο κατηγοριών αφού τα συμβατικά οχήματα θα πρέπει να μειώσουν τις εκπομπές αερίων και το μίγμα της ηλεκτροπαραγωγής στρέφεται στις ανανεώσιμες πηγές.

#### PHEV

Χρησιμοποιώντας τον πίνακα 5 και τις ίδιες παραδοχές με τα ηλεκτρικά οχήματα υπολογίζουμε και τις εκπομπές CO<sub>2</sub> για τα PHEV.

<sup>21</sup> IEA

<sup>22</sup> Small conventional: Χρησιμοποιείται για τα συμβατικά αυτοκίνητα

Πίνακας 23 Συνολικές Well to Wheel εκπομπές CO<sub>2</sub> plug in hybrid οχημάτων

Κατηγορία PHEV	CS mode km(%)	Σύνολο CS mode (km)	Εκπομπή CO <sub>2</sub> CS mode	Σύνολο CO <sub>2</sub> CS mode (kg)	CD mode km(%)	Σύνολο CD mode (km)	Εκπομπή CO <sub>2</sub> CD mode	Σύνολο CO <sub>2</sub> CD mode (kg)	Σύνολο (kg)
			(gr/km)				(kg/km) <sup>23</sup>		
City Car 20	21	37.800	44.68	1.689	79	142.200	0.10485	14910	16.599
Small family car 40	36	64.800	64.12	4.155	64	115.200	0.14679	16910	21.065
Large family car 80	57	102.600	80.88	8.298	43	77.400	0.17941	13886	22.184

Όπως είναι λογικό όσο μεγαλύτερη ηλεκτρική αυτονομία έχουν τα PHEV τόσο μειώνονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ενώ σε απόλυτα μεγέθη οι εκπομπές κυμαίνονται ανάμεσα στα ηλεκτρικά και τα συμβατικά οχήματα.

<sup>23</sup> Κατανάλωση από πίνακα 16, 1 lt βενζίνης παράγει 2,33 kg CO<sub>2</sub>

## **4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΤΡΩΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΙΣ ΕΠΙΒΑΤΙΚΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ**

### **4.1 Εισαγωγή και Σκοπός**

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας με την χρήση του μοντέλου PRIMES-TREMOVE του εργαστηρίου E<sup>3</sup>MLAB γίνεται ανάλυση ευαισθησίας της διείδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων στην ευρωπαϊκή αγορά.

Το μοντέλο με βήμα πενταετίας ξεκινά από το 2015 και καταλήγει το 2050 δίνοντας αναλυτικά αποτελέσματα για το σύνολο του τομέα των μεταφορών. Εμείς θα ασχοληθούμε με τους μεταφορικούς κόμβους που γίνεται η εισαγωγή των ηλεκτρικών οχημάτων αλλά και με το σύνολο των μεταφορών σε ότι έχει να κάνει με τις εκπομπές CO<sub>2</sub> ή την συνολική δραστηριότητα.

Κεντρικό ζήτημα της εργασίας είναι ο ορισμός των παραμέτρων που διαφοροποιούν τα ηλεκτρικά από τα συμβατικά οχήματα και η εισαγωγή τους στο μοντέλο. Η δομή και λειτουργία του μοντέλου περιγράφεται στο παράρτημα της εργασίας αλλά θεωρείται σκόπιμο να αναφερθεί ότι η επιλογή του καταναλωτή επηρεάζεται βασικά από το κόστος του οχήματος αλλά και από άλλες παραμέτρους όπως η εμβέλεια και η ωριμότητα της τεχνολογίας. Επειδή όπως αναφέρθηκε και στο πρώτο μέρος της εργασίας η μεγαλύτερη αβεβαιότητα για τα ηλεκτρικά οχήματα είναι τα τεχνολογικά χαρακτηριστικά και το κόστος των μπαταριών, δημιουργήθηκαν σει παραμέτρων από τα οποία προέκυψαν σενάρια (από ένα σενάριο αναφοράς έως το πιο αισιόδοξο σενάριο). Οι τιμές των παραμέτρων στηρίχτηκαν κατά κύριο λόγο στην διεθνή βιβλιογραφία. Στην συνέχεια γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν για κάθε σενάριο.

Σκοπός την εργασίας είναι η ανάλυση της εισαγωγής των ηλεκτρικών οχημάτων που είναι εξοπλισμένα με μπαταρία, στον τομέα μεταφορών και τα αποτελέσματα που έχει αυτό τόσο στους υπόλοιπους τύπους οχημάτων όσο και στο συνολικό σύστημα (συνολική δραστηριότητα, κόστος, εκπομπές CO<sub>2</sub>).

## Δραστηριότητα

Η δραστηριότητα εκφράζει το έργο που εξυπηρετούν τα οχήματα. Ανάλογα με το ενδιαφέρον και τα συμπεράσματα που θέλουμε να βγάλουμε υπάρχουν τρία είδη δραστηριότητας:

- Επιβατοχιλιόμετρα (passengerkm, pkm), δηλώνουν την απόσταση σε χιλιόμετρα που διανύει ένας επιβάτης
- Οχηματοχιλιόμετρα (vehicle km, vkm), δηλώνουν σε χιλιόμετρα την απόσταση που διανύει ένα όχημα
- Τονοχιλιόμετρα (tonekm, tkm), δηλώνουν την μάζα σε τόνους που μεταφέρει ανά χιλιόμετρο ένα επαγγελματικό όχημα. Τα τονοχιλιόμετρα αναφέρονται μόνο στην μεταφορά αγαθών και για αυτό τέτοιο έργο παράγουν μόνο τα Idvs και τα βαρέως τύπου οχήματα

Για να γίνει πιο καθαρός ο ρόλος των παραπάνω κατηγοριών θα δώσουμε ένα παράδειγμα. Ένα λεωφορείο που μεταφέρει δέκα επιβάτες για εκατό χιλιόμετρα παράγει έργο εκατό οχηματοχιλιομέτρων και χιλίων επιβατοχιλιομέτρων. Τέλος στα ελαφριά φορτηγά Idvs υπάρχει η ιδιαιτερότητα ότι παράγουν ταυτόχρονα και τα τρία είδη δραστηριότητας αφού χρησιμοποιούνται τόσο για την μεταφορά εμπορευμάτων όσο και για την μεταφορά ανθρώπων. Ο διαχωρισμός του έργου τους μέσα στο μοντέλο γίνεται με την χρήση παραγόντων χρησιμοποίησης. Στην ανάλυση δραστηριότητας περιλαμβάνουμε τα ιδιωτικά οχήματα (private cars) στα οποία αναπτύσσεται και η ηλεκτροκίνηση. Για αυτό τον λόγο η μόνη κατηγορία που αναφέρεται είναι σε επιβατοχιλιόμετρα. Τα τονοχιλιόμετρα που παράγουν τα ηλεκτρικά Idvs δεν παρατίθενται γιατί αποτελούν πολύ μικρό ποσοστό.

## Συνολικός στόλος οχημάτων

Το πιο σημαντικό αριθμητικό στοιχείο για την εξέλιξη των ηλεκτρικών οχημάτων είναι το πλήθος των οχημάτων που κυκλοφορούν. Ο αριθμός αυτός αφορά (αλλά και εξαρτάται από) τους παρόχους-κατασκευάστες σταθμών φόρτισης και τις αυτοκινητοβιομηχανίες για το λανσάρισμα νέων μοντέλων. Στα αποτελέσματα των σεναρίων θα αναφερόμαστε μόνο στα ιδιωτικά οχήματα και τα ηλεκτρικά LDVs όπου και υπάρχει δραστηριότητα ηλεκτροκινούμενων οχημάτων. Ακόμα θα αναφέρονται σε απόλυτα νούμερα το πλήθος των ηλεκτρικών οχημάτων που κυκλοφορούν (ανά πενταετία και ξεχωριστά τα EV από τα PHEV) καθώς και το ποσοστό ως προς το σύνολο των ιδιωτικών οχημάτων. Όλα τα νούμερα εκφράζονται σε εκατομύρια οχήματα και αφορούν τις χώρες της Ευρώπης των 27.

## Κατανάλωση ενέργειας

Η ενέργεια που καταναλώνεται στο σύστημα μεταφορών είναι βασικό δεδομένο για την ενεργειακό σχεδιασμό της Ευρωπαϊκής Ένωσης αλλά και κάθε κράτους ξεχωριστά. Στον τομέα της ενέργειας ενδιαφέρον περυσιάζει το ενεργειακό μίγμα που χρησιμοποιείται στο σύστημα μεταφορών, τα απόλυτα μεγέθη, ο τομέας όπου γίνεται η κατανάλωση του κάθε καυσίμου. Μέσα στα πλαίσια της εργασίας και θέλοντας να παραμείνουμε επικεντρωμένοι στα ηλεκτρικά οχήματα εξετάζουμε την συνολική κατανάλωση ενέργειας στον τομέα των ιδιωτικών οχημάτων και πώς αυτή επηρεάζεται από την εισαγωγή των ηλεκτρικών, και την συνολική ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται στις οδικές μεταφορές.

## Εκπομπές CO<sub>2</sub>

Δεν θα ήταν υπερβολικό να υποστηρίξουμε ότι μοχλός για την ανάπτυξη εναλλακτικών καυσίμων είναι η επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί από την πλειονότητα των κρατών για την μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>. Ο τομέας των μεταφορών ευθύνεται για το 25% των συνολικών εκπομπών και όντας εξαρτημένος κατά 90% από τα ορυκτά καύσιμα που παράγουν CO<sub>2</sub>, υπάρχουν περιθώρια μείωσης των εκπομπών. Στα αποτελέσματα που θα προκύψουν από τα σενάρια θα εξετάσουμε τις εκπομπές που παράγονται από τα ιδιωτικά οχήματα. Δεν θα εξεταστούν οι συνολικές εκπομπές του συστήματος μεταφορών προκειμένου να φανεί πιο καθαρά η επίδραση της εισαγωγής ηλεκτροκίνητων οχημάτων. Οι εκπομπές CO<sub>2</sub> θα εξεταστούν σε δυο μέρη.

Υπάρχουν οι εκπομπές που εκλύονται άμεσα από το όχημα όταν αυτό κινείται και μεταφέροντας στα ελληνικά την διεθνή ορολογία ονομάζονται ‘‘εκπομπές από την δεξαμενή καυσίμου στην ρόδα’’(Tank to Wheel CO<sub>2</sub> Emissions). Τέτοιο είδος εκπομπών έχουν τα οχήματα που χρησιμοποιούν παράγωγα του πετρελαίου. Το δεύτερο και γενικότερο είδος εκπομπών είναι αυτό που λαμβάνει υπόψη και τις έμμεσες εκπομπές CO<sub>2</sub> που εκληθησαν κατά την παραγωγή της ενέργειας που χρησιμοποιεί το όχημα. Οι εκπομπές αυτές ονομάζονται από την πηγή στην ρόδα (Well to Wheel CO<sub>2</sub> Emissions). Ο υπολογισμός των έμμεσων εκπομπών γίνεται με χρήση συντελεστών εκπομπής CO<sub>2</sub> που διαφέρουν ανάλογα με το μίγμα που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας. Για συντομία στην υπόλοιπη εργασία θα αναφερόμαστε στις άμεσες εκπομπές ως TTW και στις συνολικές (άμεσες και έμμεσες) WtW.

## Κόστος

Το μοντέλο PRIMES-TREMOVE παρέχει αναλυτικά αποτελέσματα ως προς το κόστος των μεταφορών για όλους τους τομείς. Όπως και στα υπόλοιπα αποτελέσματα θα αναφερθούμε αποκλειστικά στον τομέα των ιδιωτικών οχημάτων παρατηρώντας την επίδραση της ηλεκτροκίνησης στο κόστος καυσίμου και στο κόστος κεφαλαίου του συνόλου του στόλου.

## 4.2 Μεθοδολογία κατάστρωσης σεναρίων ενεργειακής πολιτικής

### 4.2.1 Συνοπτική παρουσίαση του ενεργειακού οικονομικού μοντέλου PRIMES-TREMOVE

Το μοντέλο PRIMES-TREMOVE είναι ένα οικονομοτεχνικό μοντέλο που προβλέπει με λεπτομέρεια για το σύνολο του τομέα των μεταφορών παραμέτρους όπως η δραστηριότητα, το κόστος, η κατανάλωση καυσίμου, οι εκπομπές ρύπων. Το μοντέλο στηρίζεται σε δυο βασικούς πυλώνες. Πρώτα στην λεπτομερή απεικόνιση του συστήματος μεταφορών, σε ότι αφορά τόσο μεταφορά επιβατών όσο και μεταφορά εμπορευμάτων. Αυτό σημαίνει ότι έχουν δημιουργηθεί για κάθε μέσο μεταφοράς όλες οι πιθανές τεχνολογίες και παραλλαγές με τα αντίστοιχα κόστη (σταθερά και λειτουργικά), τους ρύπους που παράγουν και τις περιοχές/δραστηριότητα που μπορούν να κινηθούν/εξυπηρετήσουν. Αυτές έχουν συνδεθεί με τους αντίστοιχους κόμβους μεταφοράς και παρουσιάζονται στον αντιπροσωπευτικό καταναλωτή/εταιρία ως μια επιλογή για την ικανοποίηση των μεταφορικών του αναγκών. Ο δεύτερος πυλώνας είναι η μοντελοποίηση της απόφασης του αντιπροσωπευτικού καταναλωτή/εταιρίας για τον τρόπο μεταφοράς. Το κριτήριο επιλογής είναι η μεγιστοποίηση της χρησιμότητας για τον καταναλωτή

και η ελεγχιστοποίηση του κόστους για την εταιρεία. Προκειμένου να γίνει ευκολότερα αντιληπτός οι δυνατότητες του μοντέλου δίνονται τα χαρακτηριστικά κάλυψης που παρέχει.

**Χρονικός ορίζοντας:** 2005 έως 2050 με βήμα πενταετίας. Τα στοιχεία από το 2005 έως το 2010 αντιστοιχούν σε στατιστικά και τα επόμενα σε πρόβλεψη

**Χώρες:** Τα κράτη μέλη της ΕΕ των 27

**Μέσα μεταφοράς :** Ιδιωτικά οδικά μέσα (αυτοκίνητα, μοτοσυκλέτες), οδικά μέσα μαζικής μεταφοράς (λεωφορεία) , μέσα μεταφοράς εμπορευμάτων (φορτηγά άνω των 3,5 τόνων), εμπορικός και επιβατικός σιδηρόδρομος (συμβατικά και υψηλής ταχύτητας τρένα, υπόγειος σιδηρόδρομος), επιβατικές αεροπορικές μεταφορές, εμπορική και επιβατική ενδοχώρια ναυσιπλοΐα

**Τύποι περιοχών / δρόμοι :** Αστικές περιοχές (διαχωρισμένες σε μεγάλες πόλεις και υπόλοιπες αστικές), και υπεραστικές περιοχές (διαχωρισμένες σε αυτοκινητόδρομους και λοιπούς δρόμους)

**Τύποι ταξιδιών, μέρος της ημέρας/ ταξίδι:** υπολογίζονται ταξίδια σε ώρες αιχμής ή μη για την κυκλοφοριακή συμφόρηση. Τα επιβατικά ταξίδια διαχωρίζονται σε ελεύθερου χρόνου, μετακίνησης από και προς την εργασία, επαγγελματικά

**Αποστάσεις ταξιδιών:** καθορίζονται από ιστόγραμμα συχνότητας απόστασης το οποίο διαφέρει ανάλογα με τον τύπο και την περιοχή που λαμβάνει χώρα η μεταφορά

**Ενέργεια/καύσιμα:** Εμπεριέχονται, όλα τα παράγωγα του αργού πετρελαίου (συνολικά και διαχωρισμένα), βιοκαύσιμα, CNG, LNG, LPG, ηλεκτρική ενέργεια, υδρογόνο

**Εκπομπές αερίων:** Εκπομπές αερίων CO<sub>2</sub> και ατμοσφαιρικών ρυπαντών (CO, NO<sub>x</sub>, PM, SO<sub>2</sub>)

Σκοπός του μοντέλου, ο οποίος στην ουσία υπαγορεύει και τον λεπτεμερή τρόπο κατασκευής του, είναι η παρατήρηση της επίδρασης διαφόρων παραγόντων/παραμέτρων του συστήματος σε σχέση με ένα σενάριο αναφοράς. Αυτό καθιστά το μοντέλο ένα ισχυρό εργαλείο για την ανάλυση πολιτικών πάνω στις μεταφορές αφού προσομοιώνει κάθε σενάριο/μέτρο που εφαρμόζουμε χωρίς να προκαθορίζει την επιτυχία του. Για παράδειγμα η μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> με την εφαρμογή φόρου δεν καθορίζεται εκ των προτέρων ποσοτικά αλλά γίνεται μέσω της άυξης του κόστους χρήσης των οχημάτων που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα η οποία σημαίνει παράλληλη μείωση της χρησιμότητας. Το περιεχόμενο των σεναρίων που κατασκευάζονται έχει να κάνει με ομάδες παραδοχών που σχετίζονται με εξωγενείς τεχνικές και δομικές παραμέτρους του συστήματος μεταφορών. Ανάμεσα στις διαφορές παραμέτρους, οι παρακάτω παίζουν ένα σημαντικό ρόλο στην στην εξέλιξη του συστήματος μεταφορών:

- Δραστηριότητες που σχετίζονται με την μακροοικονομία
- Νομοθεσία, περιορισμοί στη εκπομπή CO<sub>2</sub> , απόδοση οχημάτων
- Κόστος καυσίμου, φορολογία
- Τεχνική βελτίωση οχημάτων και αλλαγές κόστους για τις διάφορες τεχνολογίες οχημάτων
- Αυτονομία ηλεκτρικών οχημάτων
- Ένταση σταθμών φόρτισης/τροφοδότησης εναλλακτικών καυσίμων

#### 4.2.2 Μοντελοποίηση

Λόγω των ιδιαιτεροτήτων που παρουσιάζουν τα εναλλακτικά καύσιμα στο μοντέλο PRIMES-TREMOVE έγιναν βελτιώσεις έτσι ώστε να προσομοιωθούν καλύτερα τα εμποδια/κίνητρα που



βλέπει ο καταναλωτής για την απόκτηση και χρήση κάθε οχήματος. Πολλά μοντελικά εργαλεία έχουν εφαρμοστεί προς αυτή την κατεύθυνση και οι επιπλέον παράμετροι που μοντελοποιήθηκαν είναι οι παρακάτω:

- Κατηγορίες ηλεκτρικών επιβατικών οχημάτων ιδιωτικής χρήσης
- Εφαρμογή περιορισμών στις ειδικές εκπομπές CO<sub>2</sub> για τις νέες εγγραφές οχημάτων
- Υπολογισμός και ένταξη στο μοντέλο ως κόστος/μειωμένη χρησιμότητα των παραγόντων της “άνησυχίας αυτονομίας” και της διαθεσιμότητας δικτύου επαναφόρτισης/επανατροφοδότησης για τα εναλλακτικά καύσιμα
- Ιστόγραμμα συχνοτήτων χιλιομετρικών αποστάσεων για κάθε είδος ταξιδιού

#### 4.2.2.1 Ηλεκτρικά οχήματα

Για την εισαγωγή των ηλεκτρικών οχημάτων στο μοντέλο PRIMES-TREMOVE έπρεπε να δημιουργηθούν οι κατηγορίες τους. Ένας ασφαλής τρόπος για την πρόβλεψη των τύπων ηλεκτρικών οχημάτων που θα κυκλοφορήσουν είναι η κατασκευή οχημάτων που βρίσκονται σε αντιστοιχία με τα συμβατικά. Στο μοντέλο τα συμβατικά οχήματα ταξινομούνται σε μικρά, μεσαία και μεγάλα. Η ιδιαιτερότητα των ηλεκτρικών οχημάτων είναι ότι εκτός του μεγέθους τους χαρακτηρίζονται και από την αυτονομία τους γιατί αυτή επηρεάζει τόσο το κόστος απόκτησης όσο και την απόφαση του καταναλωτή να αγοράσει το ηλεκτρικό όχημα. Επομένως οι κατηγορίες των ηλεκτρικών οχημάτων που δημιουργήθηκαν στο μοντέλο είναι:

Πίνακας 24 Κατηγορίες ηλεκτροκινούμενων οχημάτων

Κατηγορία	Μεγεθος	Ενδεικτική Ηλεκτρική αυτονομία (km)	Συντομογραφία
Plug in hybrid	Μικρό	20	Small PHEV 20
	Μικρό	40	Small PHEV 40
	Μεσαίο	20	Medium PHEV 20
	Μεσαίο	40	Medium PHEV 40
	Μεσαίο	80	Medium PHEV 80
	Μεγάλο	40	Large PHEV 40
	Μεγάλο	80	Large PHEV 80
Πλήρως ηλεκτρικά οχήματα	Μικρό	80	Small EV80
	Μεσαίο	150	Medium EV150
	Μεσαίο	250	Medium EV250
	Μεγάλο	400	Large EV400
	LDV	150	LDV EV150

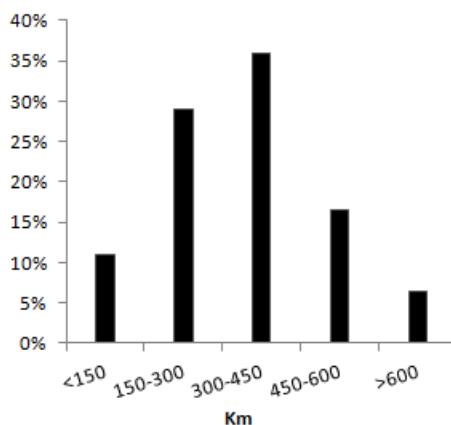
Η δημιουργία των παραπάνω κατηγοριών στηρίχτηκε τόσο στην βιβλιογραφία όσο και στην λογική την εξυπηρέτησης της αυτονομίας που απαιτούν οι καταναλωτές σε ένα κόστος που δεν είναι απαγορευτικό για την αγορά των ηλεκτρικών οχημάτων. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι αριθμοί που χαρακτηρίζουν κάθε κατηγορία είναι ενδεικτικοί της ηλεκτρικής αυτονομίας του οχήματος αφού η αυτονομία είναι δυναμική και αλλάζει τόσο κατά την διάρκεια του χρόνου, όσο και ανάμεσα στα διάφορα σενάρια.

#### 4.2.2.2 Κατανομή συχνοτήτων ταξιδιών

Το μοντέλο PRIMES-TREMOVE διαχωρίζει ένα πλήθος διαφορετικών ταξιδιών ανάλογα με τον σκοπό, την περιοχή και την ώρα. Αρχικά η χρήση μιας μέσης απόστασης ανά τύπο ταξιδιού αρκούσε για την μοντελοποίηση αυτής της παραμέτρου. Με την εισαγωγή των εναλλακτικών τεχνολογιών, η ανησυχία αυτονομίας (ηλεκτρικά οχήματα) και η επάρκεια του δικτύου φόρτισης/επανατροφοδότησης, κατέστησε την προηγούμενη θεώρηση ανεπαρκή για να καλύψει την ποικιλία των καταστάσεων που δημιουργούνται.

Η νέα μοντελοποίηση εφαρμόζει ένα ιστογράμμα συχνοτήτων για κάθε διαφορετικό τύπο ταξιδιού όπου θεωρεί ότι η χιλιομετρική απόσταση ακολουθεί μια συνάρτηση κατανομής με διαφορετικές αποστάσεις και συχνότητες (Διάγραμμα 11). Η εφαρμογή της ετερογένειας χρησιμοποιήθηκε για να φανεί καθαρότερα πως επηρεάζεται η επιλογή οχήματος από την ανησυχία αυτονομίας και την έλλειψη υποδομών.

Διάγραμμα 11 Ενδεικτικό ιστόγραμμα για ένα ταξίδι εθνικού δικτύου



#### 4.2.2.3 Εφαρμογή την ανησυχίας αυτονομίας και της διαθεσιμότητας υποδομής φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων στην επιλογή του καταναλωτή

Όπως ήδη αναφέρθηκε η χρήση μια μέσης χιλιομετρικής απόστασης για κάθε διαφορετικό τύπο ταξιδιού δεν είναι αρκετή για να αιχμαλωτίσει την ποικιλία των καταστάσεων που δημιουργούνται στην πραγματικότητα και επηρεάζουν την επιλογή του καταναλωτή. Για τον λόγο αυτό η μέση απόσταση αντικαταστάθηκε από κατανομές αποστάσεων ανάλογα με το είδος του ταξιδιού. Οι κατανομές έχουν διαφορετική μέση τιμή και τυπική απόκλιση ανάλογα με το είδος του ταξιδιού. Λαμβάνοντας υποψιν τις κατανομές, το μοντέλο συγκρίνει τις δυνατότητες αυτονομίας του οχήματος ως προς κάθε κλάση του ιστογράμματος ανά κατηγορία ταξιδιού, από την οποία προκύπτουν στοιχεία κόστους. Υστερα τα στοιχεία κόστους συγκεντρώνονται σαν σταθμισμένα αθροίσματα για κάθε είδος καταναλωτή, εξαρτώμενα από την συμμετοχή στις διάφορες κατηγορίες ταξιδιών και την σχετική διανομή σχήματος σε κάθε κατηγορία. Οι αριθμητικές παράμετροι του μοντέλου δείχνουν μεγάλη αποστροφή σε περιπτώσεις ταξιδιών με μεγάλη διαφορά ανάμεσα στην απόσταση του ταξιδιού και την δυνατότητα αυτονομίας την κάθε τεχνολογίας.

## 4.3 Κατασκευή και σχεδιασμός σεναρίων

Για την μελέτη ανάπτυξης των πρωτογενώς ηλεκτροκινούμενων οχημάτων μέσω του μοντέλου PRIMES-TREMOVE πρέπει να δημιουργήσουμε διάφορα σενάρια. Τα σενάρια στην βάση τους είναι σενάρια παραμέτρων που αφορούν τα ηλεκτροκίνητα οχήματα και ορίζονται εξωγενώς πριν 'τρέξει' κάθε σενάριο. Με τον ορισμό των παραμέτρων πρέπει να καλύψουμε παράλληλα δυο είδη αβεβαιότητας που προκύπτουν για την ηλεκτροκίνηση. Πρώτα πρέπει να καλύψουμε όλο το φάσμα των τεχνικών χαρακτηριστικών για τα οποία λόγω της μη μαζικής παραγωγής των ηλεκτρικών οχημάτων, δεν υπάρχουν πραγματικά δεδομένα, παρά μόνο προβλέψεις. Τέτοια χαρακτηριστικά έχουν να κάνουν με τις μπαταρίες των οχημάτων και έχουν αναφερθεί αναλυτικά στο πρώτο μέρος της εργασίας. Συνοπτικά είναι το κόστος, το βάρος, η ειδική ενέργεια/ισχύς, ο χρόνος ζωής.

Για την ομάδα παραμέτρων που αφορούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των σεναρίων αντλήθηκαν μέσα από την διεθνή βιβλιογραφία. Μέσα από την μελέτη αναλύσεων για την εξέλιξη των μπαταριών προέκυψε ένα μεγάλο φάσμα προβλέψεων για τις μπαταρίες που προορίζονται για τον εξοπλισμό ηλεκτροκίνητων οχημάτων. Η παρούσα εργασία έχοντας ως σκοπό την κάλυψη όλων των πιθανών σεναρίων ως προς την εξέλιξη των μπαταριών κάνει μια σύνθεση όλων των δεδομένων, από τα πιο απαισιόδοξα έως τα πιο αισιόδοξα.

### 4.3.1 Γενικές Υποθέσεις

Για την εισαγωγή των ηλεκτρικών οχημάτων στο μοντέλο PRIMES-TREMOVE έπρεπε να γίνουν κάποιες παραδοχές για την ανάπτυξή τους σε σχέση με τα συμβατικά. Επιλέχθηκε οι παραδοχές αυτές να στηριχτούν στην διεθνή βιβλιογραφία και πιο συγκεκριμένα στις πιο μετριοπαθείς απόψεις για την ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων. Στα πλαίσια της εργασίας αυτής λοιπόν υποθέτουμε ότι θα υπάρχει αμελητέα ανάπτυξη ηλεκτρικών οχημάτων βαρέως τύπου (φορτηγά άνω των 3,5 τόνων, λεωφορεία υπεραστικών διαδρομών). Η απόφαση αυτή στηρίχτηκε στην λογική τόσο των τεχνικών περιορισμών των μπαταριών που δεν μπορούν να ανταπεξέλθουν στο μεικτό βάρος όσο και στην αυξημένη αυτονομία που απαιτείται.

Όσο αφορά την ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων στην εργασία αναλύεται η ανάπτυξη μόνο των εξοπλισμένων με μπαταρία ηλεκτρικών οχημάτων και όχι αυτών που παράγουν την ηλεκτρική ενέργεια με κυψέλες υδρογόνου (fuel cell). Συγκεκριμένα για τα οχήματα υδρογόνου θεωρούμε πρακτικά μηδενική την διείσδυση τους όχι μόνο λόγω των πρακτικών δυσκολιών που υπάρχουν (υψηλό κόστος, ανύπαρκτο δίκτυο διανομής) αλλά και για να παρατηρήσουμε την ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων με μπαταρία "απαλλαγμένη" από κάποια άλλη εναλλακτική λύση χαμηλών ρύπων. Ακόμα θεωρείται ότι κάθε όχημα χρησιμοποιεί την ίδια μπαταρία και δεν θα δημιουργηθούν σταθμοί αντικατάστασης των εκφορτισμένων μπαταριών παρά μόνο σταθμοί φόρτισης. Για τα συμβατικά οχήματα θεωρήθηκε ότι η μοντελοποίησή τους δεν επηρεάζεται από την είσοδο των ηλεκτρικών οχημάτων και τα δεδομένα εισαγωγής στο μοντέλο δεν άλλαξαν για όλα τα δυνατά σενάρια.

Το δεύτερο είδος παραμέτρων το οποίο είναι κρίσιμο για την αποδοχή των ηλεκτροκίνητων οχημάτων έχει να κάνει με ζητήματα που απασχολούν την καταναλωτές ως προς την απόκτηση μιας νέας τεχνολογίας, στην περίπτωση μας τα ηλεκτροκίνητα οχήματα. Τα δεδομένα για την

παραμετροποίηση της συμπεριφοράς των καταναλωτών πάθησαν από έρευνες αγοράς που έχουν πραγματοποιηθεί για τα ηλεκτρικά οχήματα. Από τις ερευνές τα κυριότερα ζητήματα που απασχολούν του καταναλωτές με σειρά σημαντικότητας είναι τα παρακάτω:

- Αρχικό κόστος απόκτησης
- Ανησυχία αυτονομίας
- Επάρκεια υποδομής φόρτισης
- Αβεβαιότητα τεχνολογίας

Προκειμένου να βελτιωθεί η πρόβλεψη για την ανάπτυξη την ηλεκτροκίνησης πρέπει να ενταχθούν και οι παραπάνω παράγοντες στην απόφαση απόκτησης και χρήσης ηλεκτρικών οχημάτων. Το αρχικό κόστος απόκτησης, το οποίο θεωρείται και το μεγαλύτερο εμπόδιο για την απόκτηση ηλεκτρικού οχήματος εμπεριέχεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά των μπαταριών. Η ανησυχία αυτονομίας αποτελείται από δυο κομμάτια.

Το πρώτο κομμάτι είναι τεχνικό και έχει να κάνει με την πραγματική αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων. Στην πραγματικότητα και αυτό εμπεριέχεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά των μπαταριών. Το δευτερο κομμάτι του παράγοντα είναι ψυχολογικό και δύσκολα μπορεί να παραμετροποιηθεί. Αφορά στην ανησυχία των καταναλωτών να ξεμείνουν από ηλεκτρική ενέργεια. Ο παράγοντας αυτός θεωρητικά υπάρχει και στα συμβατικά οχήματα όμως λόγω της αυξημένης αυτονομίας και της επαρκούς ανάπτυξης του δικτύου τροφοδότησης θεωρείται αμελητέος. Στα ηλεκτρικά οχήματα όμως η ανησυχία αυτονομίας επιβαρύνεται από την μειωμένη αυτονομία, το ελλιπές δίκτυο φόρτισης και την αβεβαιότητα της τεχνολογίας.

Η υποδομή φόρτισης έχει να κάνει με την χρήση των οχημάτων μετά την απόκτηση. Στις έρευνες αγοράς είναι το μεγαλύτερο εμπόδιο για την χρήση του οχήματος και αυτό προκύπτει από τις ιδιαιτερότητες που έχουν τα ηλεκτρικά οχήματα. Πρώτα από όλα τα ηλεκτρικά οχήματα χρειάζονται (ανάλογα με το είδος της φόρτισης) πολλαπλάσιο χρόνο σε σχέση με ένα συμβατικό αυτοκίνητο επομένως η φύση του προβλήματος είναι και χωρική πέρα του ποσοτικού. Η βέλτιστη λύση είναι ο συνδυασμός των θέσεων φόρτισης σε θέσεις όπου το όχημα σταθμείνει για ώρες. Η ανάγκη για επάρκεια θέσεων φόρτισης εντείνεται λόγω της μειωμένης αυτονομίας των οχημάτων. Η ανεπάρκεια δικτύου φόρτισης καθιστά τα ηλεκτρικά οχήματα μέσα μειωμένης χρησιμότητας.

#### 4.3.2 Άξονες κατάστρωσης σεναρίων

Λάμβάνοντας υπόψιν τα παραπάνω η κατασκευή των σεναρίων στηρίχτηκε σε τρεις διαφορετικούς άξονες οι οποίοι περιλαμβάνουν τους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν την εισαγωγή των ηλεκτρικών οχημάτων και εμπεριέχουν αβεβαιότητα. Οι **άξονες** είναι οι παρακάτω:

- A. Τεχνικά χαρακτηριστικά και κόστος μπαταριών
- B. Ύπαρξη υποδομής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων
- C. Εφαρμογή περιορισμών εκπομπών CO<sub>2</sub>

Το μοντέλο PRIMES-TREMOVE δίνει λεπτομερή αποτελέσματα σε όλο το φάσμα του τομέα των μεταφορών. Από την τεράστιο όγκο αποτελεσμάτων εμείς θα ασχοληθούμε μόνο με αυτά που έχουν σχέση με την τις οδικές μεταφορές όπου και αναπτύσσονται τα ηλεκτρικά οχήματα και συγκεκριμένα με τα παρακάτω στοιχεία:

## 4.4 1ος άξονας: Τεχνικά χαρακτηριστικά και κόστος μπαταριών

Στον πρώτο και πιο σημαντικό άξονα δίνονται οι παράμετροι που άμεσα ή έμμεσα αφορούν την τεχνολογία των μπαταριών. Ο πρώτος άξονας είναι ο πιο σημαντικός για δυο λόγους. Ο πρώτος είναι ότι εμπεριέχει το κόστος απόκτησης των μπαταριών. Ο δεύτερος είναι ότι στον πρώτο άξονα εμπεριέχονται και επομένως εξετάζονται όλα τα στοιχεία των μπαταριών που θεωρούνται αβέβια στην διεθνή βιβλιογραφία. Προκειμένου να ενσωματωθούν όλα τα οικονομοτεχνικά χαρακτηριστικά των μπαταριών κάθε σει παραμέτρων του πρώτου άξονα αποτελείται από τέσσερα μέρη τα οποία είναι:

- Το κόστος ανά kWh των μπαταριών για κάθε κατηγορία οχήματος
- Την αυτονομία
- Την ηλεκτρική κατανάλωση (Wh/km)
- Έναν επιβαρυντικό παράγοντα κόστους για την αντικατάσταση της μπαταρίας

Σε κάθε μέρος από τα παραπάνω έχουν δοθεί τιμές για κάθε τύπο ηλεκτρικού οχήματος για επτά διαφορετικές καταστάσεις-υποθέσεις-σενάρια. Τα σενάρια αυτά ξεκινούν από ένα σενάριο αναφοράς (β1, λιγότερο αισιόδοξο σενάριο) και καταλήγουν στο πιο αισιόδοξο σενάριο για τα χαρακτηριστικά των μπαταριών (β7). Ο παράλληλος συνδυασμός των τεσσαρων μερών γίνεται λόγω της γενικά αποδεκτής παραδοχής ότι η βελτίωση των τεχνικών χαρακτηριστικών των μπαταριών αφορά όλα τα χαρακτηριστικά. Δηλαδή θεωρούμαι ότι η μείωση του κόστους ανά kWh συνοδεύεται από την αύξηση την ειδικής ισχύος των μπαταριών και την αντίστοιχη αύξηση της αυτονομίας.

### 4.4.1 Κεφαλαιουχικό κόστος μπαταρίας

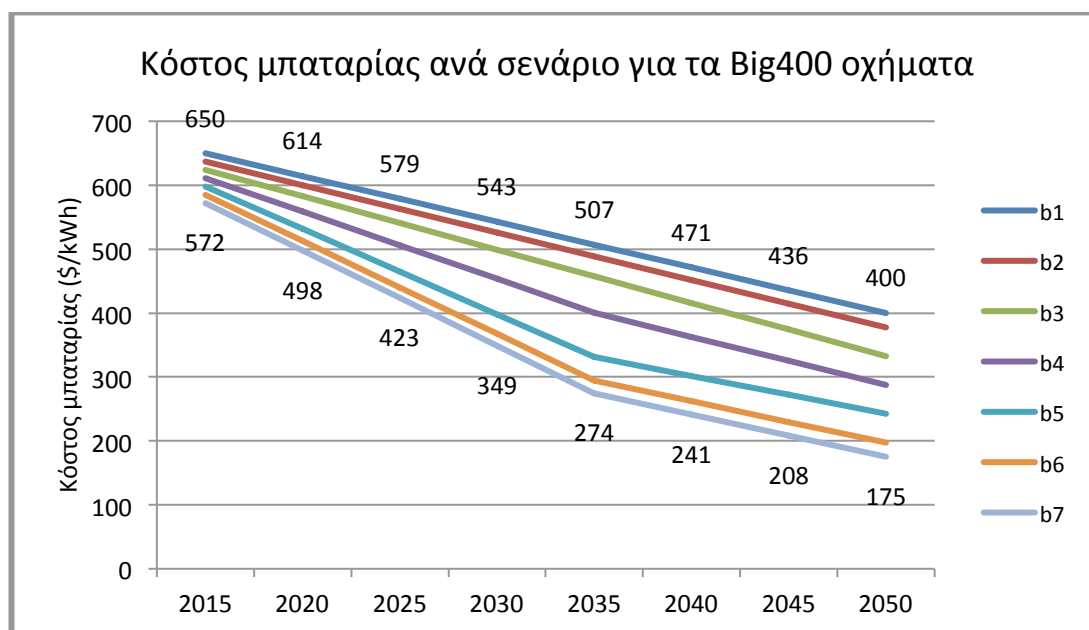
Για το κόστος ανά kWh η φιλοσοφία για την κατασκευή των παραμέτρων ήταν η άντληση παραδοχών από την διεθνή βιβλιογραφία. όπως είναι λογικό το υψηλότερο κόστος βρίσκεται στο σενάριο αναφοράς (b1) και το χαμηλότερο στο πιο αισιόδοξο σενάριο για την εξέλιξη των μπαταριών (b7). Κατά την κατασκευή των δεδομένων θεωρήσαμε ότι το σχετικό κόστος επηρεάζεται από το συνολικό μέγεθος της μπαταρίας και όσο μεγαλύτερη είναι η μπαταρία τόσο χαμηλότερο είναι το σχετικό κόστος. Με το παραπάνω ως δεδομένο χτίζουμε το κόστος των μπαταριών με αναφορά σε κάθε σενάριο την μπαταρία που εξοπλίζει το LargeEV 400 όχημα.

Για το σενάριο αναφοράς (b1) υποτέθηκε αρχική τιμή 650 \$/ kWh για το έτος 2015 για τα μεγάλα ηλεκτρικά οχήματα(Large400). Το κόστος για τις υπόλοιπες κατηγορίες οχημάτων συνδέεται με την παραπάνω τιμή. Επειδή στην πράξη η σύνδεση του κόστους με το μέγεθος της μπαταρίας είναι αρκετά ασαφής και δεν υπάρχουν ποσοτικές προσεγγίσεις στην διεθνή βιβλιογραφία, παρά μόνο έμμεσοι υπολογισμοί προτιμήθηκε μια μετριοπαθής προσέγγιση η όποια παραμένει αυθαίρετη αλλά είναι ασφαλέστερη από το να υποθέταμε ότι το κόστος είναι σταθερό σε σχέση με το μέγεθος. Οι συντελεστές που συνδέουν το κόστος μπαταρίας κάθε κατηγορίας οχημάτων είναι δυναμικοί ως προς τον χρόνο αλλά και ανάμεσα στα σενάρια αφού υποθέτουμε ότι με την εξέλιξη της τεχνολογίας ξεπερνούνται εμπόδια που επιβαρύνουν το κόστος παραγωγής. Για παράδειγμα το σχετικό κόστος της μπαταρίας που εξοπλίζει ένα plug-in

hybrid Small20 είναι 25% μεγαλύτερο σε σχέση με το αντίστοιχο για το Large400 το 2015 και μόλις 12% το 2050 για το σενάριο b1. Αντίστοιχα για το σενάριο b7 η διαφορά το 2050 είναι κάτω από 10%

Όσο αφορά το κόστος των μπαταριών για το 2050 όπου είναι και το τελικό έτος πρόβλεψης του μοντέλου το κόστος των μπαταριών που υποτέθηκε είναι 400\$/kWh (b1,2050, Large400) και 175\$/kWh (b7,2050, Large400). Οι τιμές για όλα τα σενάρια φαίνονται στο Διάγραμμα 12

Διάγραμμα 12 Κόστος μπαταριών ανά πενταετία ανά σενάριο για τα Large400 EV



#### 4.4.2 Αυτονομία

Η αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων επηρεάζεται άμεσα από την βελτίωση των χαρακτηριστικών των μπαταριών και πιο συγκεκριμένα την ειδική ενέργεια ανά μονάδα βάρους. Όσο υψηλότερη ειδική ενέργεια μπορεί να επιτύχει μια μπαταρία τόσο περισσότερη ενέργεια μπορεί να αποδώσει στο ίδιο βάρος. Μέσα στο μοντέλο η ηλεκτρική αυτονομία επηρεάζεται με δυο τρόπους την απόφαση του καταναλωτή. Για τα *καθαρά ηλεκτρικά οχήματα* ο καταναλωτής "βλέπει" την περιορισμένη αυτονομία ως ένα επιπλέον κόστος αφού έχει περιορισμούς ως προς την πραγματοποίηση μεγάλων αποστάσεων χωρίς στάση. Για τα *plug in hybrid* οχήματα η ηλεκτρική αυτονομία επηρεάζει το κόστος καυσίμου του οχήματος αφού υποθέτουμε ότι το όχημα πρώτα εξαντλεί την ηλεκτρική του αυτονομία και μετά περνά στην υβριδική.

Όπως είναι λογικό η αυτονομία αυξάνεται με την βελτίωση των χαρακτηριστικών των μπαταριών από το σενάριο αναφοράς (b1) έως το πιο αισιόδοξο σενάριο (b7). Όλα τα σενάρια έχουν κοινή αρχή για κάθε τύπο αυτοκινήτου (2015) αλλά τα πιο αισιόδοξα σενάρια έχουν μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης μέσα σε κάθε πενταετία. Η αύξηση της αυτονομία γίνεται γραμμικά. Η κατασκευή των δεδομένων είχε ως στόχο να εξυπηρετήσει δυο άξονες. Πρώτα απ' όλα το τελικό κόστος της μπαταρίας δεν θα έπρεπε να είναι μεγαλύτερο για το ίδιο όχημα σε ένα πιο αισιόδοξο σενάριο λόγω της αυξημένης αυτονομίας. Ακόμα στο πιο αισιόδοξο σενάριο θα έπρεπε να απαλειφθεί για τα EV το επιπλέον κόστος που βλέπουν οι καταναλωτές λόγω της

μειωμένης αυτονομίας. Στον Πίνακα 25 καταγράφεται η μέγιστη αυτονομία κάθε κατηγορίας οχήματος και η αρχική αυτονομία (2015).

Πίνακας 25 Αρχική (2015) και μέγιστη αυτονομία (2050) ανά τύπο οχήματος και σενάριο

			Αρχική αυτονομία	Μέγιστη αυτονομία (km,2050)						
			(km,2015)	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7
<b>PHEV</b>	Small	20	20	30	33	35	38	40	43	45
		40	40	50	53	55	58	60	63	65
	Medium	20	20	30	33	35	38	40	43	45
		40	40	50	53	55	58	60	63	65
		80	60	80	85	90	95	100	105	110
	Large	40	40	50	53	55	58	60	63	65
	80	60	80	85	90	95	100	105	110	
<b>EV</b>	Small	80	80	140	167	193	220	247	273	300
	Medium	150	140	195	221	247	273	298	324	350
		250	200	250	283	317	350	383	417	450
	Large	400	250	300	333	367	400	433	467	500
	LDV	150	140	195	221	247	273	298	324	350

#### 4.4.3 Ηλεκτρική κατανάλωση

Η ηλεκτρική κατανάλωση των οχημάτων βρίσκεται σε άμεση σχέση με την αυτονομία του οχήματος και το τελικό κόστος της μπαταρίας. Επομένως αν και δεν τοποθετείται άμεσα στα τεχνικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας το κατατάσσουμε μοντελικά σε αυτά αφού είναι μια δυναμική παράμετρος. Η βελτίωση της ηλεκτρικής κατανάλωσης μπορεί να προέλθει από την βελτίωση των ηλεκτρονικών ισχύος, την μείωση των θερμικών απωλειών κατά την εκφόρτιση, το μειωμένο βάρος σε βάθος χρόνου και την ωρίμανση της τεχνολογίας των ηλεκτρικών οχημάτων.

Για την ηλεκτρική κατανάλωση υποθέτουμε ένα κοινό σημείο εκκίνησης για όλα τα σενάρια το 2015. Προφανώς η κατανάλωση ανα χιλιόμετρο είναι διαφορετική για κάθε κατηγορία οχήματος λόγω της διαφοράς βάρους. Τα στοιχεία για την αρχική (2015) κατανάλωση προέρχονται από την διεθνή βιβλιογραφία. Και εδώ το πρόβλημα είναι ότι δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα από πραγματικές συνθήκες αλλά μόνο από προσομειώσεις. Για τον λόγο αυτό υιοθετήθηκαν τα πιο μετριοπαθή δεδομένα για το 2015. Όσο αφορά την βελτίωση-μείωση της κατανάλωσης υπολογίζεται όπως και στα συμβατικά οχήματα σαν ετησιοποιημένο ποσοστό επί της αρχικής. Για να γίνει κατανοητό για το σενάριο αναφοράς (b1) η ετήσια βελτίωση είναι 0.2% και για το πιο αισιόδοξο σενάριο (β7) φτάνει το 0.8%.

#### 4.4.4 Αντικατάσταση μπαταρίας

Όπως έχουμε αναφέρει ο κύκλος ζωής των μπαταριών έχει δοκιμαστεί μόνο εργαστηριακά σε ιδανικές συνθήκες και ακόμα και σε αυτές είναι μικρότερος από τον μέσο χρόνο ζωής των οχημάτων. Επομένως η αντικατάσταση της μπαταρίας θεωρείται επιβεβλημένη και είναι ένας

ακόμα επιβαρυντικός παράγοντας κόστους για τα ηλεκτρικά οχήματα. Προκειμένου να μοντελοποιηθεί η αντικατάσταση της μπαταρίας επιλέχθηκε η επιβάρυνση του αρχικού κόστους απόκτησης της μπαταρίας με έναν παράγοντα μεγαλύτερο της μονάδας. Με τον τρόπο αυτό ο καταναλωτής “βλέπει” ένα επιπλέον κόστος κατά την απόκτηση του ηλεκτρικού οχήματος. Η κατασκευή του παράγοντα αντικατάστασης της μπαταρίας δεν μπορεί παρα να είναι διασθητική λόγω της έλλειψης πραγματικών δεδομένων. Ως κοινό σημείο εκκίνησης για όλα τα σενάρια και όλες τις κατηγορίες επιλέχθηκε η τιμή 1,6 και ο παράγοντας εξελίσσεται διαφορετικά για κάθε σενάριο. Για παράδειγμα για το σενάριο b1 ο παράγοντας έχει τελική τιμή 1,25 ενώ για το σενάριο b7 και για το έτος 2050 ο παράγοντας εξαλείφεται παίρνοντας τιμή ίση με την μονάδα. Η παραδοχή αυτή στηρίζεται στο γεγονός ότι η βελτίωση των τεχνικών χαρακτηριστικών των μπαταριών θα φέρει και επιμήκυνση της ζωής τους.

#### 4.4.5 Σύνοψη πρώτου άξονα

Προκειμένου να γίνουν κατανοητοί οι εξωγενείς παράγοντες που υπεισέρχονται σε κάθε σενάριο παραθέτουμε τον παρακάτω πίνακα για Large EV 400 όχημα με τις τιμές των παραμέτρων για τα έτη 2015, 2030, 2050 και τα σενάρια b1, b4, b7.

Πίνακας 26 Ενδεικτικά δεδομένα που δίνονται για το EV Large 400

EV Large 400		2015	2030	2050
b1	Κόστος \$/Wh	650	543	400
	Αυτονομία	250	271	300
	Κατανάλωση	0.19	0.184	0.177
	Αντικατάσταση	1.600	1.420	1.250
b4	Κόστος \$/Wh	611	453	288
	Αυτονομία	250	314	400
	Κατανάλωση	0.19	0.176	0.159
	Αντικατάσταση	1.600	1.336	1.125
b7	Κόστος \$/Wh	572	349	175
	Αυτονομία	250	357	500
	Κατανάλωση	0.19	0.168	0.143
	Αντικατάσταση	1.600	1.264	1.000

Το σύνολο των δεδομένων που εισάγονται εξώγενώς ανά σενάριο, έτος και κατηγορία οχήματος δίνονται στο παράρτημα της εργασίας.

#### 4.5 2ος Άξονας: Ανάπτυξη υποδομής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει έρευνες αγοράς για τα ηλεκτρικά οχήματα φέρνουν ψηλά στα εμπόδια για την ευρεία χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων την μειωμένη αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων και τον ψυχολογικό παράγοντα της ανησυχίας αυτονομίας. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα παραπάνω εμπόδια οι χρήστες ζητούν ένα εκτεταμένο δίκτυο φόρτισης έτσι ώστε να νιώθουν σίγουροι ότι μπορούν να φορτίσουν το όχημά τους όποτε το επιθυμούν.



Η ανάπτυξη του δικτύου φόρτισης αποτελεί ένα εμπόδιο που δεν σχετίζεται με την τεχνολογία των ηλεκτρικών οχημάτων και για αυτό τον λόγο θα εξεταστεί ξεχωριστά προκειμένου να απομονωθεί η επίδρασή του στην ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης. Για τον λόγο αυτό δημιουργήθηκαν δυο διαφορετικές καταστάσεις ανάπτυξης του δικτύου φόρτισης οι οποίες είναι:

- Χαμηλή ένταση πυκνότητας σταθμών φόρτισης σε όλες τις γεωγραφικές περιοχές (D\_low)
- Υψηλή ένταση πυκνότητας σε όλες τις γεωγραφικές περιοχές (D\_Succ)

Οι παραπάνω καταστάσεις συνδυάζονται με τα σενάρια από τον πρώτο άξονα έτσι ώστε να γίνει δυνατή η εξέταση σεναρίων που συνδυάζουν τα τεχνοοικονομικά εμπόδια και το δίκτυο φόρτισης.

#### **4.6 3<sup>ος</sup> Άξονας: Εφαρμογή πολιτικής για τη ρύθμιση των εκπομπών CO<sub>2</sub> των αυτοκινήτων**

Ο τρίτος άξονας στον οποίο θα κινηθούν τα σενάρια που έχουν κατασκευαστεί μέσα στα πλαίσια αυτής της εργασίας έχει να κάνει με την μη εθελοντική μείωση του μέσου όρου εκπομπών CO<sub>2</sub> που αφορά τις νέες εγγραφές οχημάτων.

Ήδη στην ευρωπαϊκή ένωση και σε συμφωνία με τις αυτοκινητοβιομηχανίες έχει αποφασιστεί η σταδιακή μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>. Η συμμόρφωση με τον περιορισμό των εκπομπών αρχικά ήταν εθελοντική αλλά μετατράπηκε σε υποχρεωτική θέτοντας συγκεκριμένους στόχους εκπομπών για τις νέες εγγραφές. Σε περίπτωση μη συμμόρφωσης οι κατασκευαστές πληρώνουν πρόστιμο ανάλογο της υπέρβασης των ορίων. Είναι προφανές ότι η παραπάνω νομοθετική δραστηριότητα έχει ως στόχο την ανάπτυξη εναλλακτικών, φιλικότερων προς το περιβάλλον τεχνολογιών. Στην ουσία είναι ένας μοχλός πίεσης προς τις αυτοκινητοβιομηχανίες για να επενδύσουν στις νέες τεχνολογίες. Λόγω της συνεχούς επικαιροποίησης των περιοριστικών ορίων εκπομπής CO<sub>2</sub> και της άμεσης σχέσης που αυτά έχουν με την ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων θεωρήθηκε σκόπιμο να δημιουργηθούν τρία διαφορετικά πιθανά σενάρια περιορισμού του μέσου όρου εκπομπών CO<sub>2</sub> των νέων εγγραφών. Το σενάριο a είναι ένα σενάριο αναφοράς και έχει στηριχτεί στα σημερινά ευρωπαϊκά δεδομένα. Τα σενάρια b, c είναι αυστηρότερα σενάρια που είναι πιθανό να εφαρμοστούν για τον περιορισμό των εκπομπών CO<sub>2</sub>.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειώσουμε ότι η εφαρμογή υποχρεωτικών αυστηρών μέτρων εκπομπής CO<sub>2</sub> είναι ένα δύσκολο εγχείρημα. Θεωρητικά οδηγεί στην σίγουρη μείωση των ρύπων αλλά η καθυστέρηση στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών λόγω τεχνικών και άλλων εμποδίων μπορεί να οδηγήσει στην μείωση της δραστηριότητας και στην κατάρρευση της αγοράς αυτοκινήτου. Στην συνέχεια παρατίθεται ο πίνακας με τις τιμές του μέσου όρου εκπομπών CO<sub>2</sub> νέων εγγραφών για τα σενάρια a, b, c.

Πίνακας 27 Περιοριστικός μέσος όρος εκπομπών CO<sub>2</sub> νέων εγγραφών

Σενάριο	Κατηγορία οχήματος	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
a	Επιβατικά αυτοκίνητα	114	112	106	102	95	95	95
	Επαγγελματικά <3,5 τόνων	176	173	165	157	147	147	147
b	Επιβατικά αυτοκίνητα	114	100	90	82	70	65	60
	Επαγγελματικά <3,5 τόνων	176	165	140	130	115	115	115
c	Επιβατικά αυτοκίνητα	114	90	75	60	50	40	35
	Επαγγελματικά <3,5 τόνων	176	150	125	110	96	96	96

#### 4.7 Σύνοψη εναλλακτικών σεναρίων

Στις προηγούμενες ενότητες αναφέρθηκαν αναλυτικά οι τρεις άξονες γύρω από τους οποίους θα εξετάσουμε την ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων. Οι τρεις παραπάνω άξονες συνδυάζονται για να μας δώσουν ένα σενάριο κάθε φορά και σαράντα δυο (42) διαφορετικά σενάρια τα οποία καταγράφονται (Πίνακας 28)

Πίνακας 28 Σύνολο δυνατών σεναρίων

2ος Αξονας Υποδομή δικτύου φόρτισης	1ος Αξονας Τεχνοοικονομικά χαρακτηριστικά μπαταριών	3ος Αξονας: Περιορισμοί CO <sub>2</sub>	Συντομογραφία σεναρίου
D_Success	b1	a	Dsb1a
		b	Dsb1b
		c	Dsb1c
	b2	a	Dsb2a
		b	Dsb2b
		c	Dsb2c
	b3	a	Dsb3a
		b	Dsb3b
		c	Dsb3c
	b4	a	Dsb4a
		b	Dsb4b
		c	Dsb4c
	b5	a	Dsb5a
		b	Dsb5b
		c	Dsb5c
	b6	a	Dsb6a
		b	Dsb6b
		c	Dsb6c

		a	Dsb7a
	b7	b	Dsb7b
		c	Dsb7c
D_Low	b1	a	Dlb1a
		b	Dlb1b
		c	Dlb1c
	b2	a	Dlb2a
		b	Dlb2b
		c	Dlb2c
	b3	a	Dlb3a
		b	Dlb3b
		c	Dlb3c
	b4	a	Dlb4a
		b	Dlb4b
		c	Dlb4c
	b5	a	Dlb5a
		b	Dlb5b
		c	Dlb5c
	b6	a	Dlb6a
		b	Dlb6b
		c	Dlb6c
	b7	a	Dlb7a
		b	Dlb7b
		c	Dlb7c

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφέρουμε ότι από τα 42 δυνατά σενάρια στο μοντέλο έτρεξαν όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί (14) των δυο πρώτων αξόνων χρησιμοποιώντας τα πιο ήπια σειρά περιορισμών CO<sub>2</sub> (a). Η εξέταση των πιο αυστηρών περιορισμών CO<sub>2</sub> έγινε μόνο για τα ακραία σενάρια των τεχνοοικονομικών παραμέτρων.

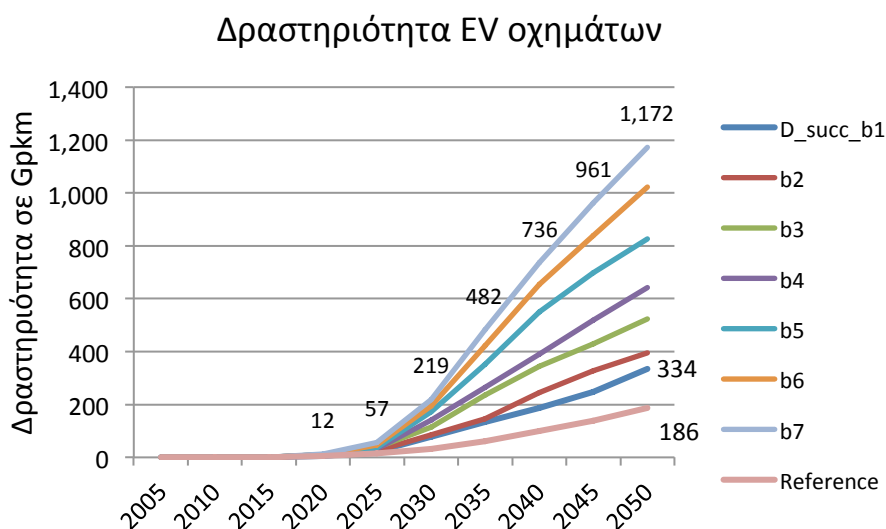
## 5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΕΞΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ

### 5.1 Επίδραση τεχνοοικονομικών παραγόντων στον εξηλεκτισμό των μεταφορών

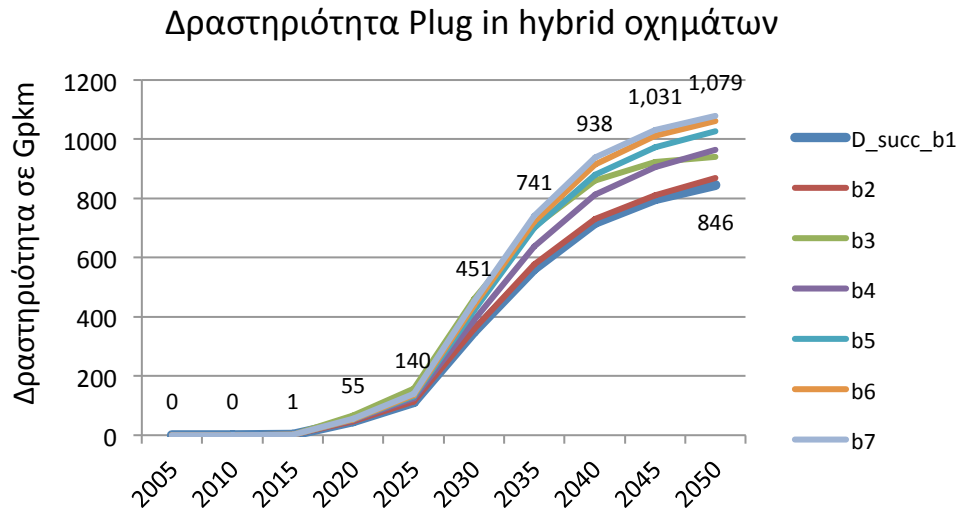
Σε αυτή την ενότητα θέλοντας να εξετάσουμε το πώς και το πόσο επηρεάζουν τα τεχνοοικονομικά χαρακτηριστικά των μπαταριών την ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων αναλύουμε τα αποτελέσματα των σεναρίων b1 έως b7 έχοντας άρει το εμπόδιο της ανάπτυξης του ηλεκτρικού δικτύου(D\_succ). Σε αυτή την σειρά αποτελεσμάτων έχουμε θεωρήσει ότι εφαρμόζονται το ηπιότερο σετ περιορισμών μέσου όρου CO<sub>2</sub> για τις νέες εγγραφές (a) το οποίο θεωρείται και σετ αναφοράς σύμφωνα με τα ισχύοντα δεδομένα. Τα αποτελέσματα δίνονται σε μορφή διαγραμμάτων ανά ενότητα ενδιαφέροντος όπως αυτές αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο.

#### 5.1.1 Δραστηριότητα

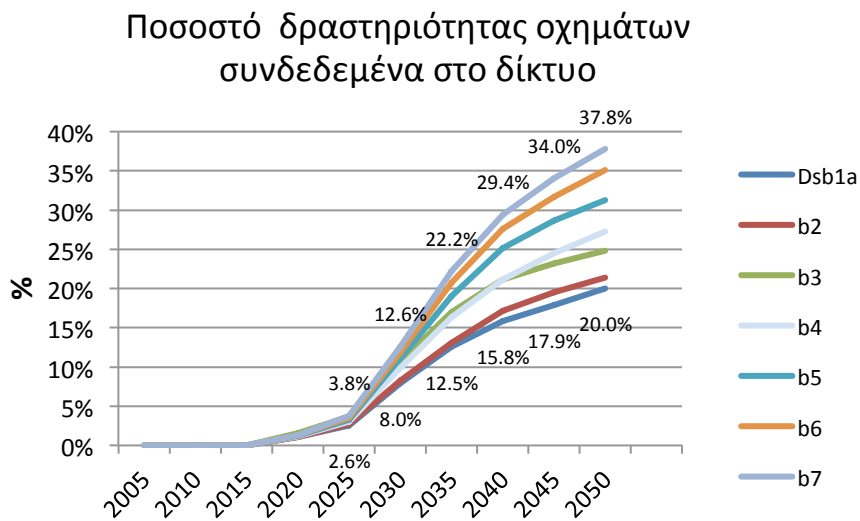
Διάγραμμα 13 Δραστηριότητα σε GWhm των καθαρά ηλεκτρικών οχημάτων (EV)



Διάγραμμα 14 Δραστηριότητα σε GWh των plug in hybrid οχημάτων



Διάγραμμα 15 Συνολικό ποσοστό δραστηριότητας οχημάτων που χρησιμοποιούν πρωτογενώς ηλεκτρική ενέργεια σε kWh



Πριν την ανάλυση των παραπάνω διαγραμμάτων πρέπει να αναφέρουμε ότι η συνολική δραστηριότητα των ιδιωτικών οχημάτων παρέμεινε πρακτικά αμετάβλητη σε όλα τα σενάρια, επομένως η εισαγωγή των ηλεκτρικών οχημάτων δεν επηρέασε την επιλογή του τρόπου μετακίνησης των καταναλωτών. Η συνολική δραστηριότητα σε όλα τα σενάρια παρουσίαζε αύξηση. Στην συνέχεια όσο αφορά τα EV παρατηρούμε ότι η εισαγωγή τους γίνεται σχεδόν γραμμικά και ουσιαστικά εισάγονται το 2025. Μια ακόμα προβλέψιμη παρατήρηση είναι ότι όσο περισσότερο μειώνεται το κόστος των μπαταριών και βελτιώνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά τα ηλεκτρικά οχήματα προτιμούνται έναντι των συμβατικών. Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω της βελτίωσης των μπαταριών η δραστηριότητα των EV σχεδόν επταπλασιάζεται ανάμεσα στο σενάριο αναφορά και το πιο αισιόδοξο σενάριο.

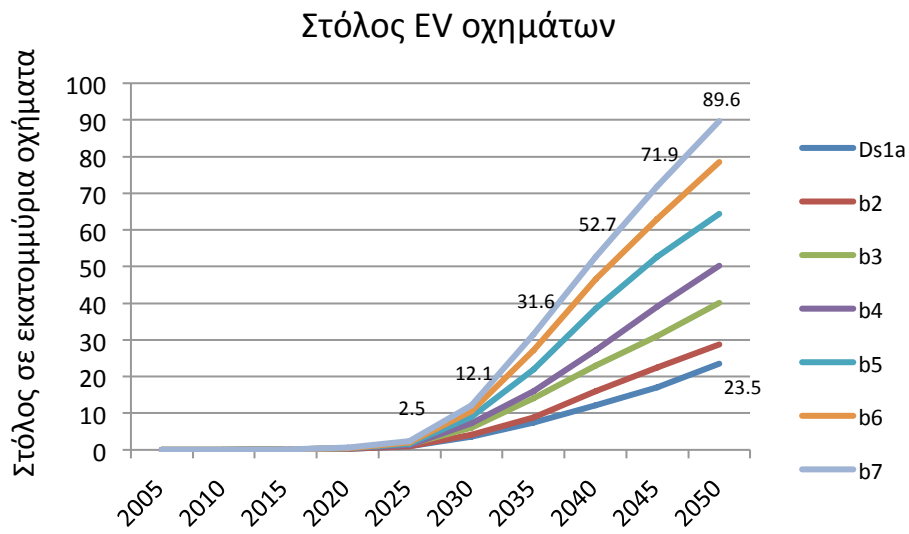
Για τα PHEV οχήματα η εξέλιξη της δραστηριότητας είναι παρόμοια με κάποια ποιοτική διαφοροποίηση. Αρχικά λαμβάνουν ένα αξιολογούμενο ποσοστό δραστηριότητας το 2025. Η λογική που ισχύει και στα EV, ότι όσο πιο αισιόδοξο για τα τεχνοοικονομικά χαρακτηριστικά των μπαταριών είναι το σενάριο τόσο αυξάνεται και η δραστηριότητα, ισχύει και εδώ. Σε σχέση όμως με τα ηλεκτρικά παρατηρούμε ότι ο ρυθμός ανάπτυξής τους αρχίζει να φθίνει (ειδικά από το 2040 και μετά) και έρχεται γρηγορότερα σε κορεσμό. Στην αντίστοιχη χρονική περίοδο τα EV ακολουθούν γραμμική ανάπτυξη. Μια επιπλέον διαφορά με ηλεκτρικά είναι η μικρότερη διαφοροποίηση ανάμεσα στις καμπύλες των σεναρίων. Για το έτος 2050 η αύξηση της δραστηριότητας λόγω της βελτίωσης των μπαταριών είναι 27%. Αυτό αποδεικνύει αυτό που διαισθητικά αναμέναμε. Λόγω της παρουσίας MEK τα plug in hybrid οχήματα επηρεάζονται λιγότερο από τα τεχνοοικονομικά χαρακτηριστικά των μπαταριών. Συγκρίνοντας τα απόλυτα νούμερα ανάμεσα σε πλήρως ηλεκτρικά οχήματα και plug in hybrid βλέπουμε ότι στα σενάρια b7 ικανοποιούν σχεδόν ίση δραστηριότητα ενώ στα λιγότερα αισιόδοξα η διαφορά δραστηριότητας μεγαλώνει. Χαρακτηριστικά για το σενάριο αναφοράς τα plug in hybrid οχήματα έχουν τετραπλάσια δραστηριότητα από τα EV.

Τέλος, δεδομένης της σταθερής συνολικής δραστηριότητας των ιδιωτικών οχημάτων σε όλα τα σενάρια, το συνολικό ποσοστό των ηλεκτρικών οχημάτων (EV & PHEV) εξελίσσεται ως ο συνδυασμός των προηγούμενων διαγραμμάτων. Τα ενδιαφέρον εδώ εστιάζεται στα ποσοστά του 2050. Αν έχουμε επιτυχή ανάπτυξη των μπαταριών το ποσοστό της δραστηριότητας που αναλαμβάνουν να καλύψουν τα ηλεκτρικά οχήματα αγγίζει το 37.8% ενώ κατά το σενάριο αναφοράς το ποσοστό είναι περίπου στο μισό. Να υπενθυμίσουμε ότι τα ποσοστά αυτά προϋποθέτουν την επαρκή ανάπτυξη ηλεκτρικού δικτύου.

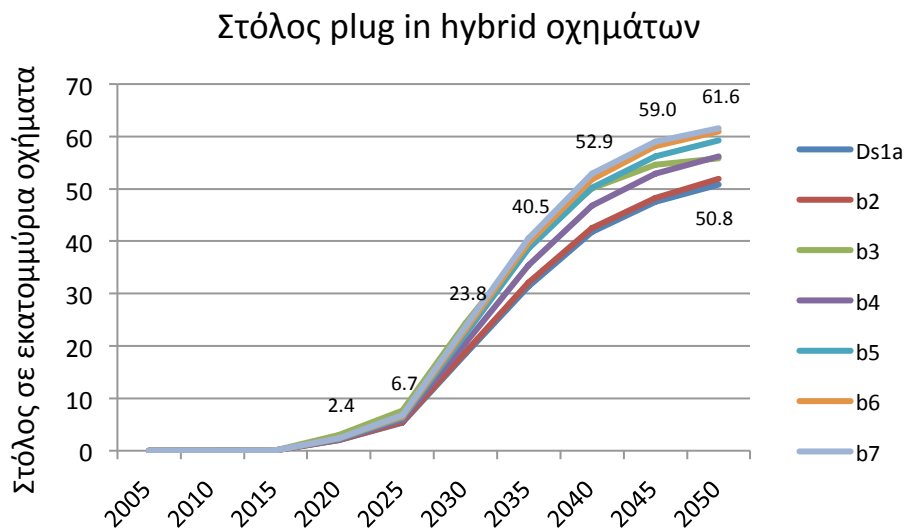
### **5.1.2 Συνολικός Στόλος Ηλεκτρικών Οχημάτων**

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα μόνο για το σύνολο των EV, των PHEV και το ποσοστό επί του συνόλου, μια ανάλυση αντίστοιχη της δραστηριότητας. Τα αποτελέσματα για το πλήθος των ηλεκτρικών οχημάτων είναι ιδιαίτερης σημασίας για την μελέτη ανάπτυξης του δικτύου φόρτισης και την έρευνα των αυτοκινητοβιομηχανιών γύρω από την ανάπτυξη των νέων τεχνολογιών. Στο αριθμό των οχημάτων έχουν συμπεριληφθεί και τα ηλεκτρικά LDVs.

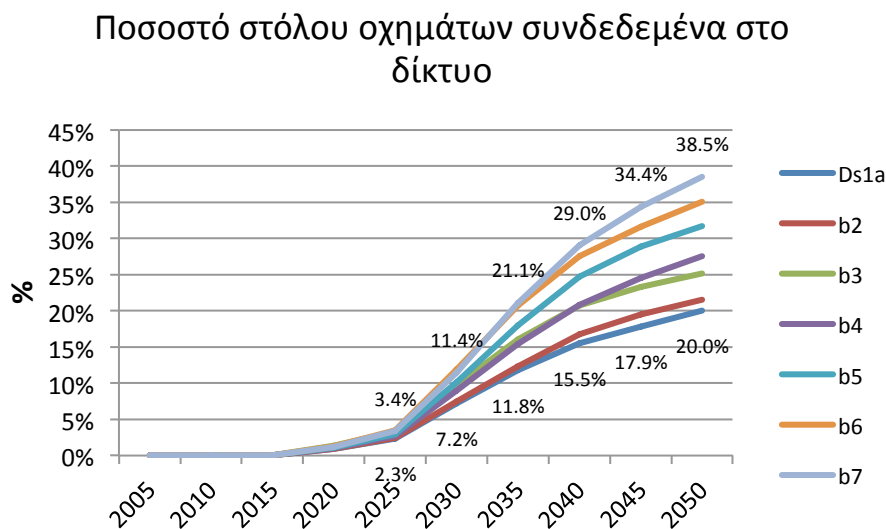
Διάγραμμα 16 Στόλος EV οχημάτων ανάμεσα στα σενάρια (σε εκατομμύρια οχήματα)



Διάγραμμα 17 Στόλος EV οχημάτων ανάμεσα στα σενάρια (σε εκατομμύρια οχήματα)



Διάγραμμα 18 Συνολικό ποσοστό ηλεκτρικών οχημάτων επί του συνόλου των ιδιωτικών οχημάτων



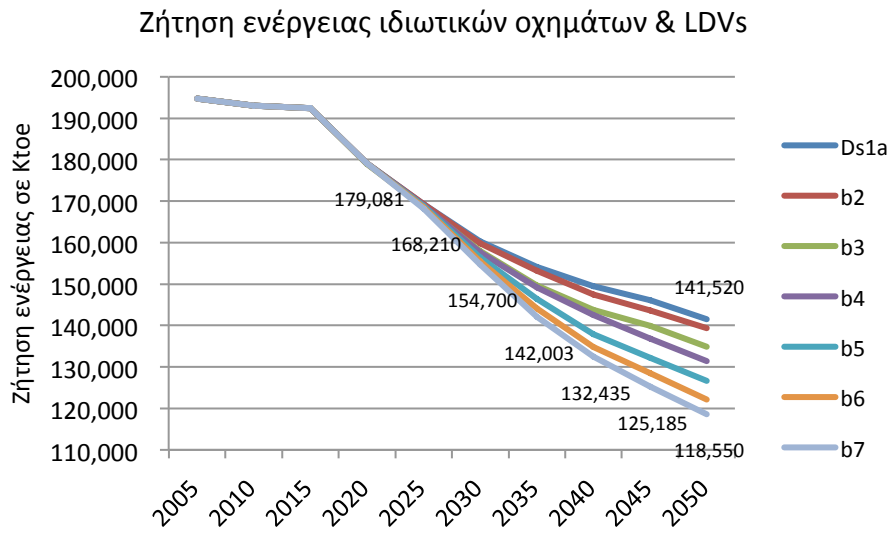
Η εξέλιξη του συνολικού στόλου των ηλεκτρικών οχημάτων ακολουθεί πορεία αντίστοιχη της δραστηριότητας. Αυτό είναι επόμενο αφού τα ιδιωτικά οχήματα τα οποία εξετάζουμε έχουν ίδιο προφίλ χρήσης και όμοιους συντελεστές χρήσης. Αυτό που έχουμε αναφέρει και στο πρώτο μέρος της εργασίας φαίνεται και στα παραπάνω διαγράμματα με αριθμούς. Τα plug in hybrid οχήματα είναι το μεταβατικό στάδιο στην ηλεκτροκίνηση. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα η αγορά τους είναι εκλυστική ακόμα και όταν δεν υπάρξει η επιθυμητή εξέλιξη της τεχνολογίας των μπαταριών κάτι που δεν συμβαίνει με τα καθαρά ηλεκτρικά οχήματα.

### 5.1.3 Κατανάλωση Ενέργειας

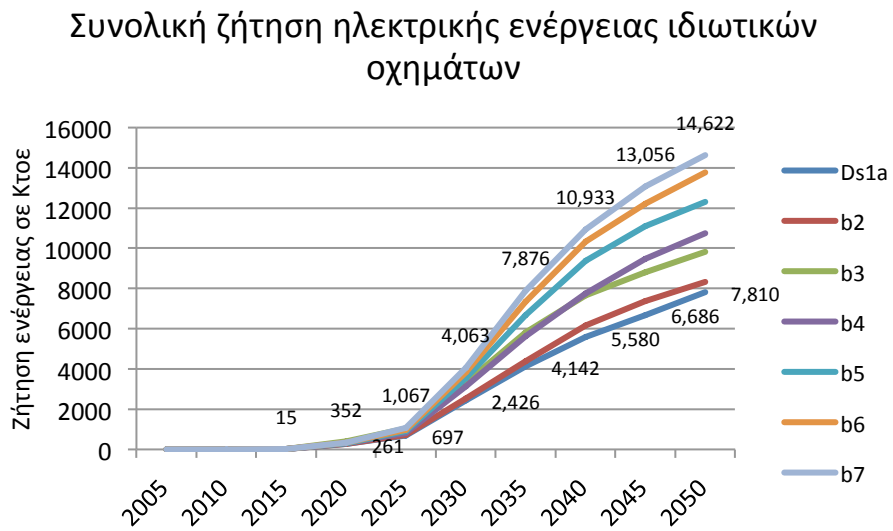
Η κατανάλωση ενέργειας είναι σημαντική παράμετρος των συστημάτων μεταφοράς, τόσο για τους παρόχους ενέργειας, όσο και για τις εκπομπές CO<sub>2</sub> που επηρεάζονται άμεσα από αυτό. Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται τα αποτελέσματα για την κατανάλωση ενέργειας τόσο για το σύνολο των ιδιωτικών οχημάτων όσο και για τα ηλεκτρικά οχήματα ξεχωριστά.



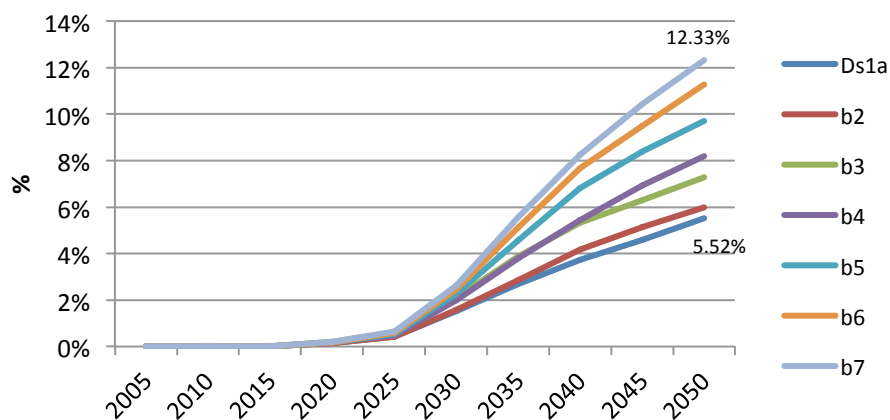
Διάγραμμα 19 Κατανάλωση ενέργειας ιδιωτικών οχημάτων(συμπεριλαμβάνονται τα LDVs)



Διάγραμμα 20 Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας ιδιωτικών οχημάτων



### Ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας επί της συνολικής ζήτησης



Από το πρώτο διάγραμμα παρατηρούμε ότι η συνολική κατανάλωση ενέργειας μειώνεται ως προς τον χρόνο ακόμα και στο σενάριο αναφοράς. Μάλιστα έως το 2025 όπου η διεξόδυση των ηλεκτρικών οχημάτων είναι αμελητέα η ζήτηση ενέργειας ανάμεσα στα σενάρια είναι δυσδιάκριτη. Από το 2025 και έπειτα η μείωση γίνεται σαφέστερη. Η συνολική πτώση της κατανάλωσης σε συνδυασμό με την αυξημένη δραστηριότητα κατά το διάστημα 2015-2050 σε όλα τα σενάρια για τα ιδιωτικά οχήματα δηλώνει ότι τα οχήματα γίνονται συνεχώς αποδοτικότερα. Η βελτίωση της απόδοσης οφείλεται σε δυο παράγοντες. Ο σταθερός παράγοντας είναι η βελτίωση των συμβατικών οχημάτων. Την μείωση λόγω των συμβατικών οχημάτων μπορούμε να την διακρίνουμε στην καμπύλη του σεναρίου αναφοράς. Ο δεύτερος παράγοντας είναι η εισαγωγή των ηλεκτρικών οχημάτων. Το έτος 2050 η κατανάλωση ενέργειας στο σενάριο b7 είναι μειωμένη κατά 15% σε σύγκριση με το b1. Δεδομένου ότι όλες οι παράμετροι που αφορούν τα συμβατικά οχήματα διατηρήθηκαν σταθερές στα σενάρια αυτά το κομμάτι της εξοικονόμησης μπορεί να αποδοθεί στην ηλεκτροκίνηση.

Η συνολική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας για τα ιδιωτικά οχήματα ακολουθεί ποιοτικά την ανάπτυξη του στόλου και της δραστηριότητας των ηλεκτρικών οχημάτων. Ενδιαφέρον παρουσιάζει το ποσοστό που καταλαμβάνει η ηλεκτρική ενέργεια ως προς το σύνολο της κατανάλωσης ενέργειας των ιδιωτικών οχημάτων. Για το 2050 και το β7 σενάριο ο ηλεκτρισμός καταλαμβάνει ποσοστό 12.33% της συνολικής ζήτησης. Προσθέτοντας και την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων των PHEV η συνολική κατανάλωση των ηλεκτρικών οχημάτων φτάνει στο 17.26% ενώ η δραστηριότητα τους είναι στο 37.8% στην αντίστοιχη περίπτωση. Η διαφορά αυτή είναι ενδεικτική της αυξημένης απόδοσης με την οποία λειτουργούν τα ηλεκτρικά οχήματα.

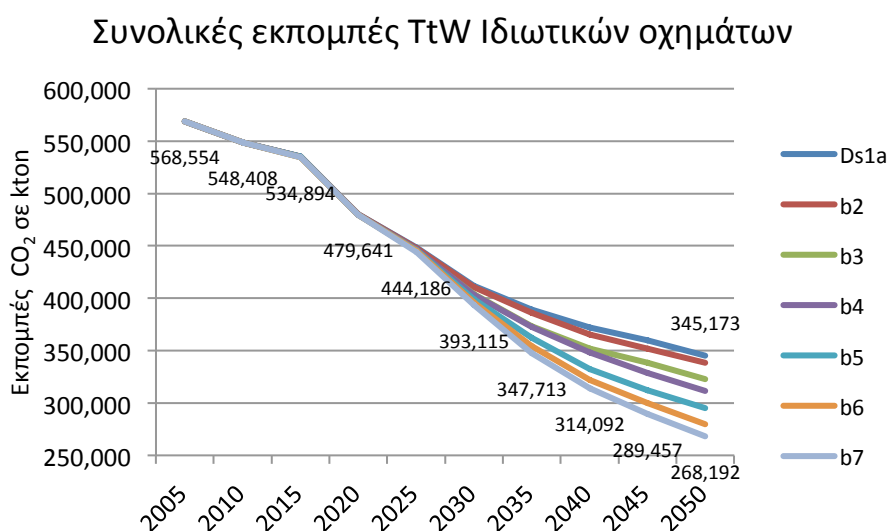
Είναι χρήσιμο να εξεταστεί το πως επηρεάζει η ανάπτυξη την ηλεκτροκίνησης το συνολικό ενεργειακό ισοζύγιο της Ευρώπης των 27 και την ηλεκτρική κατανάλωση. Για το πιο αισιόδοξο σενάριο και για το έτος 2050 η συνολική ηλεκτρική κατανάλωση των ιδιωτικών οχημάτων δεν αναμένεται να ξεπεράσει το 5% της συνολικής ζήτησης. Επιπλέον πρέπει να λάβουμε υπόψη δυο ποιοτικά χαρακτηριστικά της ζήτησης ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων. Πρώτον η ζήτηση δεν παρουσιάζει κάποια απότομη αύξηση και είναι προβλέψιμη και σε άμεση συνάρτηση με τις πωλήσεις των ηλεκτρικών οχημάτων. Δεύτερον μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό της φόρτισης γίνεται σε διαστήματα χαμηλής ζήτησης (νυχτερινή

φόρτιση) και δεν συμβάλει στην αιχμή του συστήματος. Ακόμα και στην περίπτωση που δεν γίνει δυνατή σε μεγάλη κλίμακα η εφαρμογή συστημάτων smart grid τα ηλεκτρικά οχήματα είναι μια παράμετρος σταθερότητας του ηλεκτρικού συστήματος δημιουργώντας νέους πελάτες για τις εταιρίες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς να συμβάλλουν στην αιχμή του ηλεκτρικού δικτύου.

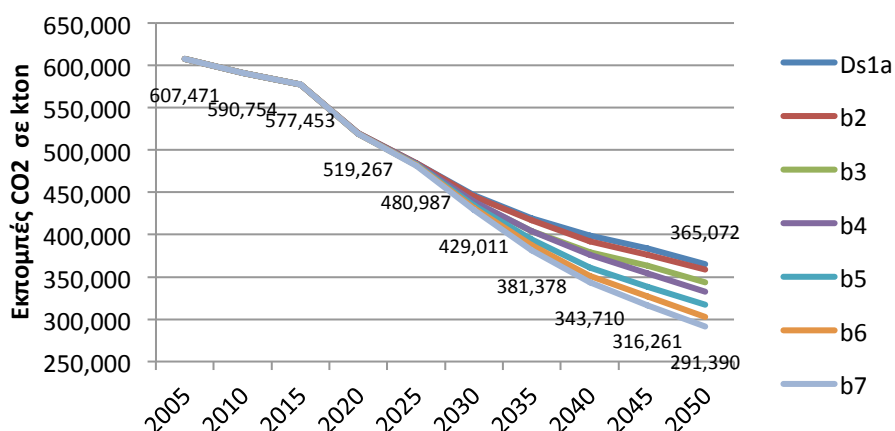
### 5.1.4 Εκπομπές CO<sub>2</sub>

Στην ενότητα αυτή ασχολούμαστε με τις εκπομπές που προκαλούνται από τα ιδιωτικά οχήματα και πως αυτές επηρεάζονται από την επιτυχή ή μη, ανάπτυξη των μπαταριών. Στην διεθνή βιβλιογραφία όταν πρόκειται για πρόβλεψη γίνεται συνολική προσέγγιση για τις εκπομπές CO<sub>2</sub> στον τομέα των μεταφορών έτσι ώστε να φανεί αν επιτυγχάνονται οι στόχοι που έχουν τεθεί μακροπρόθεσμα. Στα πλαίσια της εργασίας και προκειμένου να απομονώσουμε το μείωση των ρύπων λόγω της ηλεκτροκίνησης προβάλλουμε τις TTW και WTW εκπομπές CO<sub>2</sub> μόνο των ιδιωτικών οχημάτων.

Διάγραμμα 22 Tank to Wheel εκπομπές CO<sub>2</sub> ιδιωτικών οχημάτων



### Συνολικές εκπομπές WtW CO<sub>2</sub> Ιδιωτικών Οχημάτων

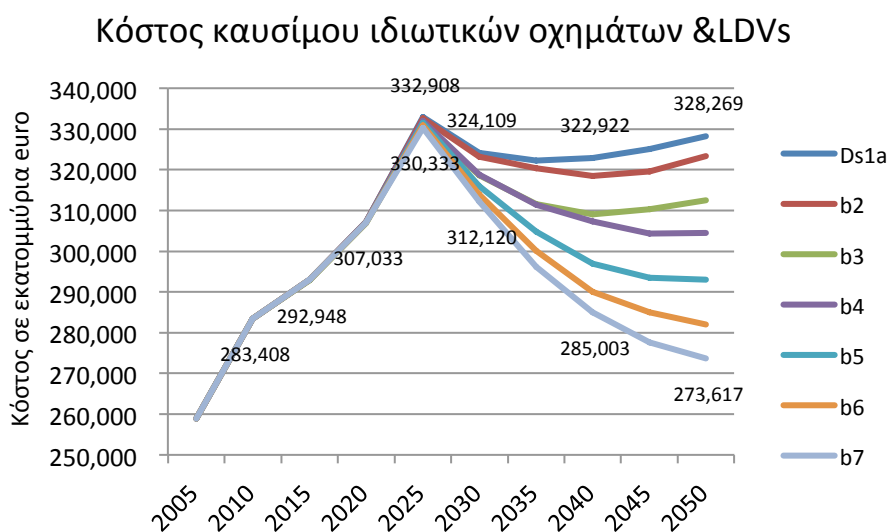


Βλέποντας την εξέλιξη των TTW εκπομπών CO<sub>2</sub> παρατηρούμε την αναμενόμενη ποιοτική ομοιότητα με την ζήτηση ενέργειας. Η ομοιότητα είναι ανεμενόμενη λόγω της σύνδεσης ζήτησης-κατανάλωσης ενέργειας με την εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα. Η μόνη διαφορά που μπορεί να επισημανθεί είναι ποσοτική και έχει να κάνει με το έτος 2050. Βλέπουμε ότι η μείωση των TTW εκπομπών λόγω ηλεκτροκίνησης είναι μεγαλύτερη και φτάνει στο 28%. Στο διάγραμμα των WtW εκπομπών παρουσιάζεται το σύνολο των εκπομπών που οφείλονται στα ιδιωτικά οχήματα. Ο υπολογισμός των έμμεσων εκπομπών γίνεται με την χρησιμοποίηση συντελεστών εκπομπής CO<sub>2</sub> από το μοντέλο PRIMES-TREMOVE. Οι συντελεστές που έχουν χρησιμοποιηθεί για αυτή την σειρά υπολογισμών προέρχονται από σενάριο αναφοράς. Σε περίπτωση χρησιμοποίησης συντελεστών που αναφέρονται σε σενάρια απεξάρτησης της ηλεκτροπαραγωγής από τα ορυκτά καύσιμα οι έμμεσες εκπομπές θα ήταν σημαντικά μικρότερες.

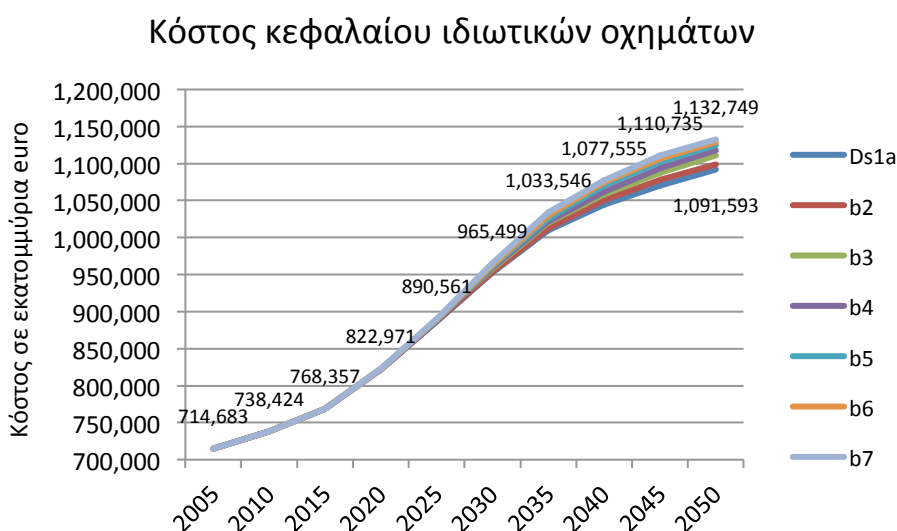
#### 5.1.5 Κόστος

Σε αυτή την ενότητα παρατείνονται τα αποτελέσματα για το κόστος καυσίμου το κόστος κεφαλαίου και το ολικό κόστος για το σετ σεναρίων της τεχνοοικονομικής εξέλιξης των μπαταριών

Διάγραμμα 24 Συνολικό κόστος καυσίμου ιδιωτικών οχημάτων



Διάγραμμα 25 Κόστος κεφαλαίου ιδιωτικών οχημάτων



Αν και το μοντέλο PRIMES-TREMOVE δίνει αναλυτικά αποτελέσματα για κάθε στοιχείο κόστους των οχημάτων επιλέχθηκαν να παρουσιαστούν αυτά που σχετίζονται με το κόστος καυσίμου και το κόστος κεφαλαίου του στόλου των ιδιωτικών οχημάτων. Ο λόγος είναι ότι μόνο σε αυτές τις κατηγορίες υπήρξαν διαφοροποιήσεις ανάμεσα στα σενάρια. Στο κόστος καυσίμου παρατηρούμε μια κοινή και αυξητική πορεία μέχρι το 2025. Με την είσοδο των ηλεκτρικών οχημάτων υπάρχει διαφοροποίηση ανάμεσα στα σενάρια η οποία καταλήγει σε μείωση του κόστους καυσίμου κατά 20% ανάμεσα στο σενάριο αναφοράς και το b7. Σε απόλυτα ποσά η διαφορά αυτή ανέρχεται στα 55 δισεκατομμύρια ευρώ. Στο κόστος κεφαλαίου τώρα υπάρχει η αντίθετη εικόνα. Η διαφοροποίηση στα σενάρια ξεκινά με την εμφάνιση των ηλεκτροκίνητων οχημάτων με το σενάριο αναφοράς να έχει το χαμηλότερο κόστος κεφαλαίου. Για το έτος 2050 το κόστος κεφαλαίου είναι αυξημένο κατά 4% ανάμεσα στα ακραία σενάρια, σε απόλυτους αριθμούς αυτό αναλογεί σε 40 δισεκατομμύρια ευρώ. Κάνοντας της παραβολή των δυο στοιχείων μπορούμε να συμπεράνουμε ότι τα χρήματα που εξοικονομούνται από τα καύσιμα δίνονται για την αγορά ακριβότερων και πιο αποδοτικών ηλεκτροκίνητων οχημάτων.

Αυτό γίνεται φανερό και με το διάγραμμα ολικού κόστους το οποίο δεν παρουσιάζει σημαντική διαφοροποίηση από σενάριο σε σενάριο.

Η εξήγηση για την σταθερότητα του ολικού κόστους των ιδιωτικών οχημάτων είναι απλή και συνδέεται με την σταθερή συνολική δραστηριότητα που υπάρχει σε αυτή την σειρά σεναρίων για τα ιδιωτικά οχήματα. Από την στιγμή που δεν υπάρχει κάποιος εξωτερικός περιορισμός (αυστηρά CO<sub>2</sub> standards) οι καταναλωτές επιλέγουν ελεύθερα το ιδιωτικό μέσο μεταφοράς που επιθυμούν έχοντας να ξοδέψουν συγκεκριμένο προϋπολογισμό προκειμένου να επιτύχουν το επίπεδο χρησιμότητας που χρειάζονται. Οι καταναλωτές δεν αναγκάζονται να θυσιάζουν κάποιο μέρος της δραστηριότητας ή να αλλάξουν μεταφορικές συνήθειες (χρήση MMM) απλώς υποκαθιστούν ένα μέρος της δραστηριότητας που κάλυπταν με συμβατικά οχήματα, με ηλεκτροκίνητα χωρίς να υπάρχει αύξηση του συνολικού κόστους.

## **5.2 Επίδραση της επαρκούς ανάπτυξης δικτύου φόρτισης στον εξηλεκτρισμό των μεταφορών**

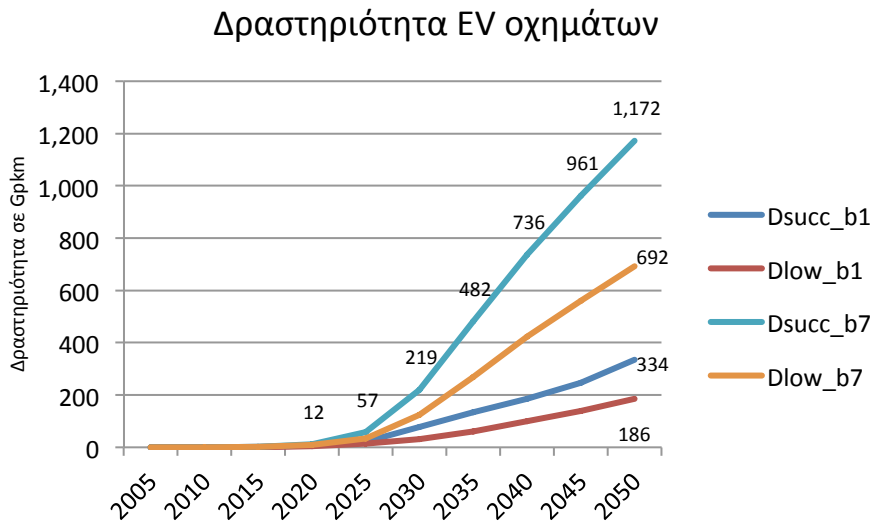
### **5.2.1 Εισαγωγή**

Αφού αναλύσαμε την ευαισθησία της ανάπτυξης των ηλεκτρικών οχημάτων σε σχέση με την εξέλιξη των μπαταριών συνεχίζουμε με την ανάλυση ευαισθησίας ως προς την ανάπτυξη του δικτύου φόρτισης. Ο παράγοντας του δικτύου φόρτισης εισάγεται στο μοντέλο ως ένταση πυκνότητας των σημείων-σταθμών και υπάρχουν δυο δυνατές καταστάσεις. Το σετ σεναρίων όπου έχουμε χαμηλή ένταση πυκνότητας (D\_low scenarios) και τα σετ όπου η ανάπτυξη είναι επαρκής (D\_succ scenarios). Ποιοτικά η παρουσία επαρκών σημείων φόρτισης αναμένουμε να αυξήσει όλες τις παραμέτρους των ηλεκτρικών οχημάτων διότι σχεδόν εξαλείφει τόσο το αντικειμενικό παράγοντα της μειωμένης αυτονομίας όσο και τον ψυχολογικό της "ανησυχίας αυτονομίας" επισπεύδοντας την ωριμότητα των τεχνολογιών. Τα διαγράμματα που θα παρατεθούν είναι αντίστοιχα της προηγούμενης ενότητας, κάθε διάγραμμα όμως θα περιέχει δυο ζευγάρια καμπύλων. Κάθε ζευγάρι θα έχει μια καμπύλη με χαμηλή ένταση δικτύου φόρτισης και μια με την επιτυχημένη ανάπτυξη δικτύου. Τα σεναρία που επιλέχθηκαν να προβληθούν είναι τα b1(σενάριο αναφοράς), και b7. Η παράθεση κάποιων κατηγοριών διαγραμμάτων γίνεται μόνο για την ποσοτικοποίηση των σεναρίων χαμηλής ανάπτυξης δικτύου φόρτισης, η παράθεσή τους δεν προσφέρει νέα ποιοτικά χαρακτηριστικά για την ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων. Και σε αυτή την σειρά σεναρίων έχει εφαρμοστεί η ήπια σειρά περιορισμού εκπομπών CO<sub>2</sub>.

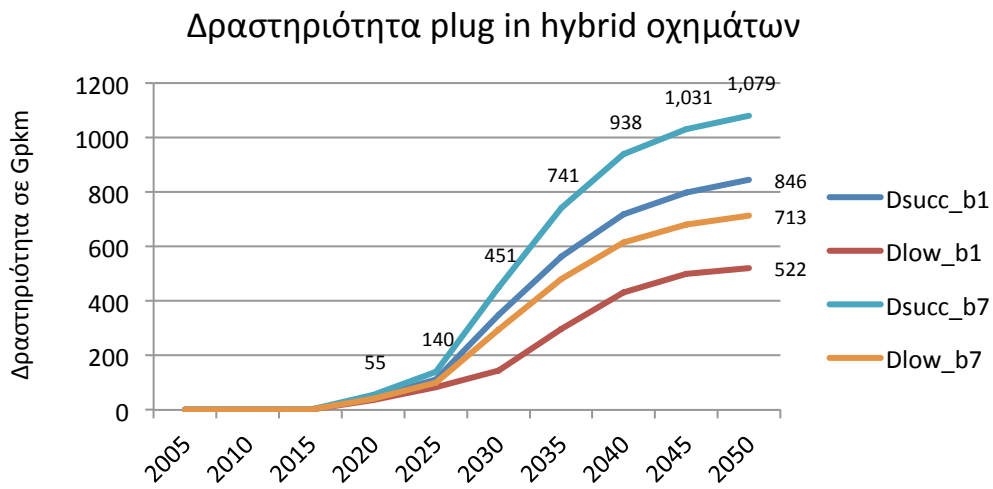
### **5.2.2 Δραστηριότητα**

Ακολουθώντας την αντίστοιχη παράθεση διαγραμμάτων για την δραστηριότητα προκύπτουν τα παρακάτω συγκριτικά διαγράμματα

Διάγραμμα 26 Δραστηριότητα EV οχημάτων σε D\_low σενάρια

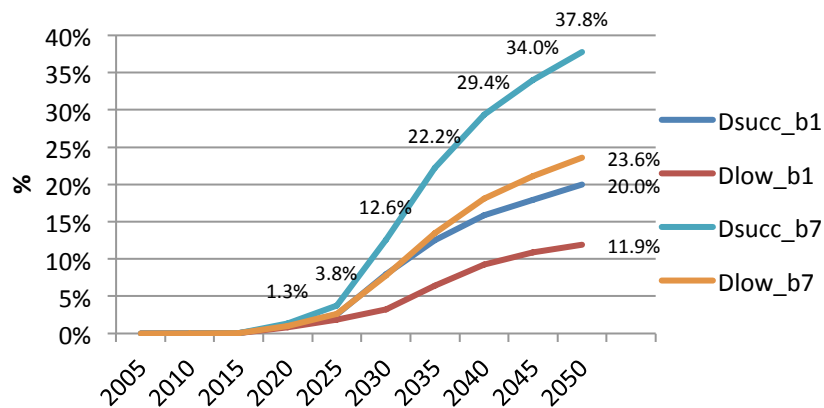


Διάγραμμα 27 Δραστηριότητα plug in hybrid οχημάτων σε D\_low σενάρια



Διάγραμμα 28 Ποσοστό οχημάτων συνδεδεμένων στο δίκτυο για τα D low σενάρια

## Ποσοστό οχημάτων συνδεδεμένα στο δίκτυο



Αρχικά να σημειώσουμε ότι και σε αυτή την σειρά σεναρίων η συνολική δραστηριότητα των ιδιωτικών οχημάτων παρέμεινε πρακτικά ίδια σε όλα τα σενάρια παρουσιάζοντας αύξηση. Όπως ήταν αναμενόμενο η μη επαρκής ανάπτυξη του ηλεκτρικού δικτύου επέφερε μείωση στην δραστηριότητα που καλύπτουν τα ηλεκτροκίνητα οχήματα. Τα καθαρά ηλεκτρικά οχήματα παρουσιάζουν για το έτος 2050, 40% μείωση στα αισιόδοξα σενάρια τεχνοοικονομικής εξέλιξης των μπαταριών (b7) και 45 % στα σενάρια αναφοράς (b1). Τα αντίστοιχα ποσοστά για τα plug in hybrid οχήματα είναι 34% και 40%. Συγκρίνοντας τις δυο κατηγορίες οχημάτων παρατηρούμε ότι η μείωση είναι μεγαλύτερη στα καθαρά ηλεκτρικά οχήματα λόγω του ότι κινούνται αποκλειστικά με ηλεκτρική ενέργεια και η έλλειψη σταθμών φόρτισης, πέρα από την ανασφάλεια αυτονομίας που δημιουργεί στους καταναλωτές, καθιστά μερικές φορές αδύνατη την χρήση τους σε μεγάλες αποστάσεις.

Για τα plug in hybrid η μείωση είναι μικρότερη σε σύγκριση με τα πλήρως ηλεκτρικά αλλά παραμένει σημαντική. Η μείωση στα plug in hybrid έχει διαφορετική αιτία σε σχέση με τα ηλεκτρικά. Τα plug in hybrid σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα έχουν το πλεονέκτημα του χαμηλού κόστους καυσίμου κατά την ηλεκτρική λειτουργία. Το πλεονέκτημα αυτό αμβλύνεται με τη μη επαρκή ανάπτυξη ηλεκτρικού δικτύου, όπου λόγω της χαμηλής κατάστασης φόρτισης της μπαταρίας τα οχήματα θα πρέπει να διανύουν μεγαλύτερο ποσοστό αποστάσεων στην υβριδική λειτουργία αυξάνοντας το κόστος καυσίμου. Αυτό που είναι σημαντικό στα plug in hybrid οχήματα είναι ότι η ανάπτυξη δικτύου φόρτισης επηρεάζει την ανάπτυξή τους περισσότερο από την τεχνοοικονομική ανάπτυξη των μπαταριών. Στο Διάγραμμα 27 παρατηρούμε ότι το σενάριο αναφοράς με επαρκή ανάπτυξη δικτύου φόρτισης (D Succ b1) έχει μεγαλύτερη δραστηριότητα από το σενάριο D low b7. Η μικρότερη συσχέτιση (σε σύγκριση με τα ηλεκτρικά οχήματα) των plug in hybrid με την ανάπτυξη των μπαταριών είχε επισημανθεί και στην προηγούμενη ενότητα, στο παραπάνω διάγραμμα όμως ποσοτικοποιείται. Από τα παραπάνω μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το κίνητρο για την αγορά ενός plug in hybrid οχήματος είναι το χαμηλότερο κόστος απόκτησης και η όσο το δυνατό μεγαλύτερη εκμετάλλευση της ηλεκτρικής τους αυτονομίας.

Όσο αφορά το συνολικό ποσοστό δραστηριότητας που εξυπηρετούν τα ηλεκτροκίνητα οχήματα, το διάγραμμα απεικονίζει το συνδυασμό των παραπάνω. Στο σύνολο των ηλεκτροκίνητων οχημάτων η ανάπτυξη των μπαταριών δείχνει να είναι πιο καθοριστικός παράγοντας από την ανάπτυξη του δικτύου χωρίς όμως να υπάρχει μεγάλη διαφορά,

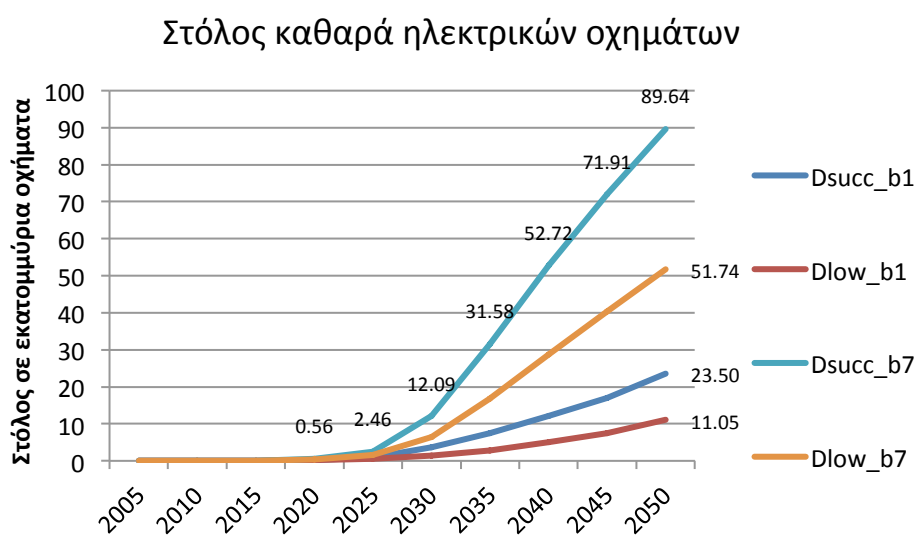


αποδεικνύοντας μέσα από το μοντέλο ότι η εξέλιξη των μπαταριών και του δικτύου φόρτισης αποτελούν το ίδιο σημαντικά εμπόδια-παράγοντες για την ηλεκτροκίνηση. Στην πραγματικότητα η υλοποίηση ακραίων σεναρίων (Dlow b7 ή Dsucc b1) θεωρείται απίθανη αφού κανένα από αυτά δεν ανταποκρίνεται στον τρόπο που λειτουργούν τα κράτη, οι αυτοκινητοβιομηχανίες και η αγορά γενικότερα. Η εξέτασή τους όμως θεωρείται απαραίτητη έτσι ώστε να εξεταστεί η καθοριστικότητα κάθε παράγοντα.

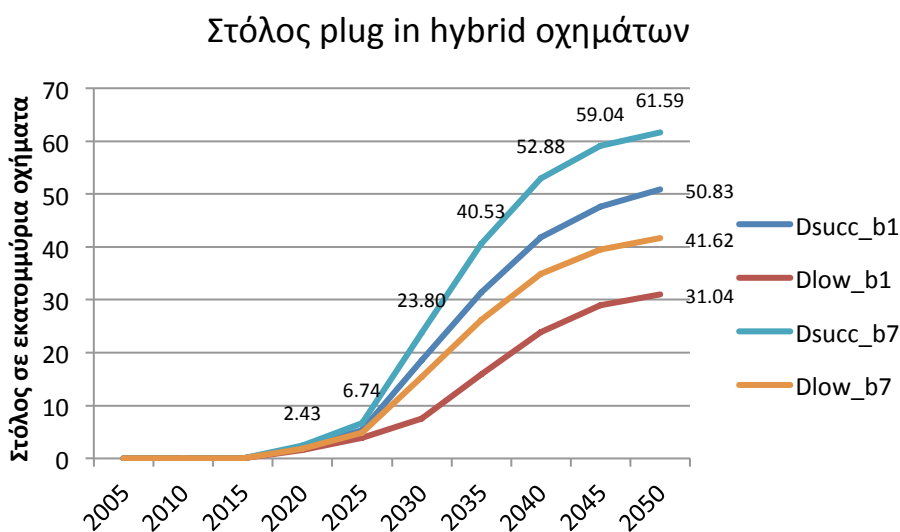
### 5.2.3 Στόλος

Για τον στόλο των ηλεκτρικών οχημάτων προκύπτουν τα παρακάτω συγκριτικά διαγράμματα:

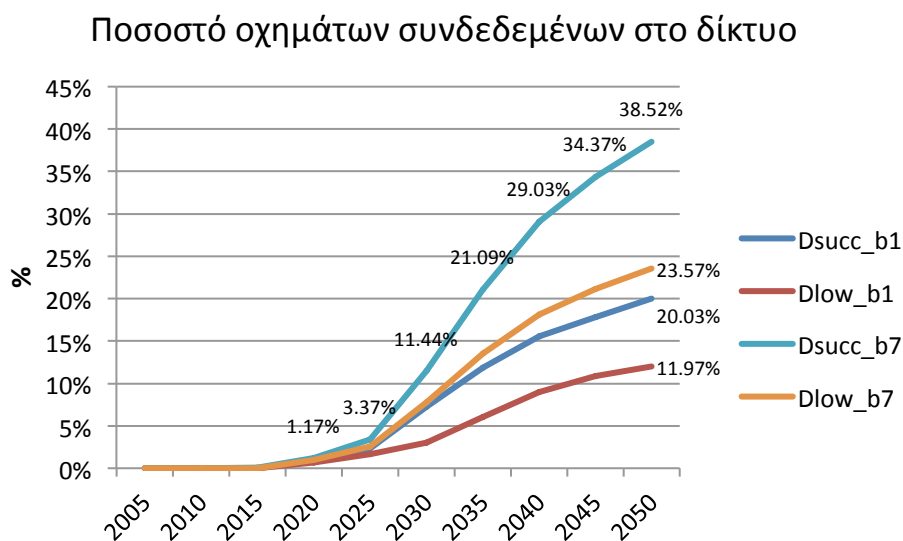
Διάγραμμα 29 Στόλος ηλεκτρικών οχημάτων σε D low σενάρια



Διάγραμμα 30 Στόλος plug in hybrid οχημάτων σε D low σενάρια



Διάγραμμα 31 Ποσοστό ηλεκτρικών οχημάτων που συνδέονται στο δίκτυο σε D low σενάρια



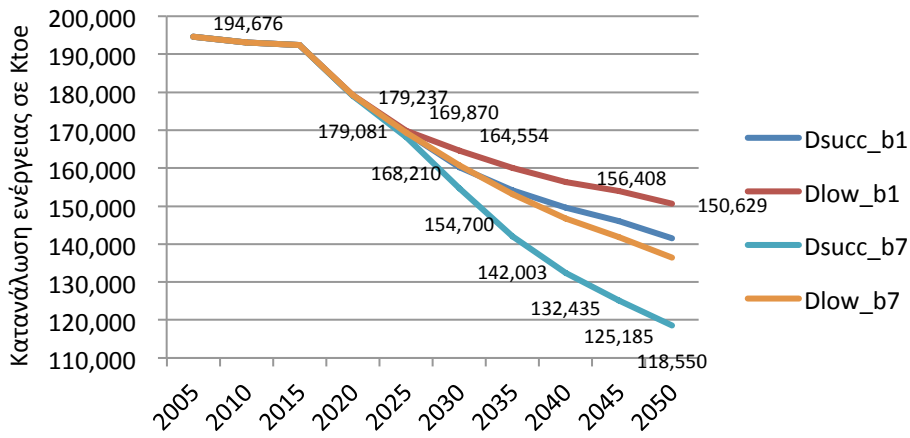
Η επίπτωση της ανεπαρκούς ανάπτυξης δικτύου φόρτισης είναι φανερή και στον στόλο των ηλεκτρικών οχημάτων και δεν παρουσιάζει ποιοτικές ή ποσοτικές διαφοροποιήσεις με την εικόνα της δραστηριότητας.

#### 5.2.4 Κατανάλωση Ενέργειας

Στην συνέχεια παρατείνονται τα συγκριτικά διαγράμματα κατανάλωσης ενέργειας για σενάρια που εξετάζονται:

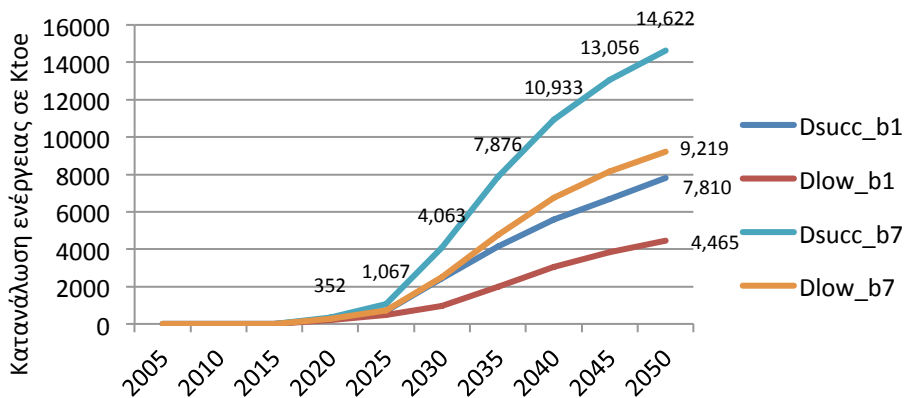
Διάγραμμα 32 Συνολική ζήτηση ενέργειας για D low σενάρια

### Ζήτηση ενέργειας Ιδιωτικών Οχημάτων και LDVs



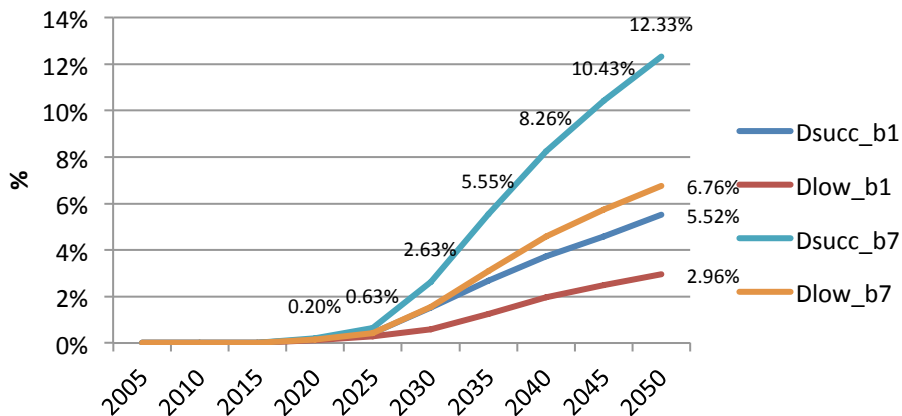
Διάγραμμα 33 Συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ηλεκτρικών οχημάτων

### Συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ηλεκτρικών οχημάτων



Διάγραμμα 34 Συνολικό ποσοστό ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας επί της συνολικής κατανάλωσης

### Ποσοστό ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στα ιδιωτικά οχήματα

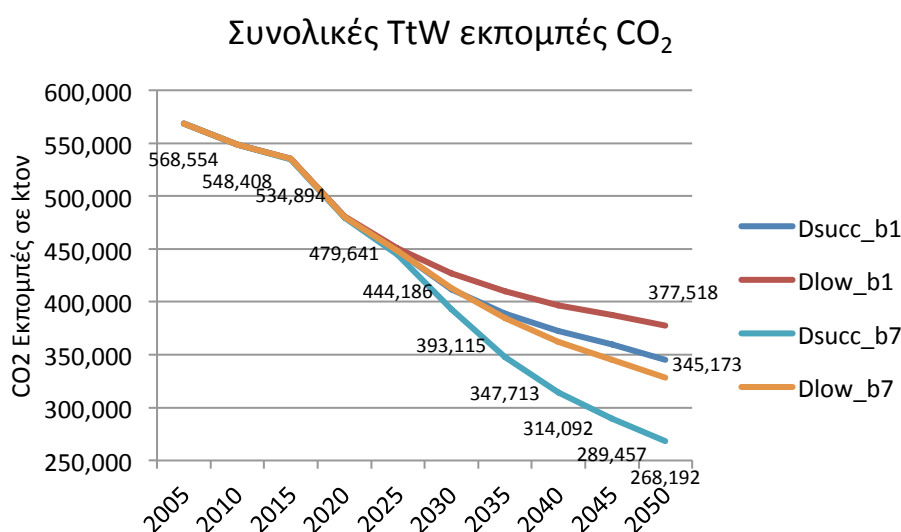


Τα συγκριτικά διαγράμματα κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας πέρα της ποσοτικοποίησης των σεναρίων της ανεπαρκούς ανάπτυξης δικτύου φόρτισης δεν προσδίδουν κάποια επιπλέον πληροφορία για την ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας έρχεται ως αποτέλεσμα της δραστηριότητας, για αυτό και παρουσιάζεται ανάλογη εικόνα την οποία και δεν θα αναλύσουμε.

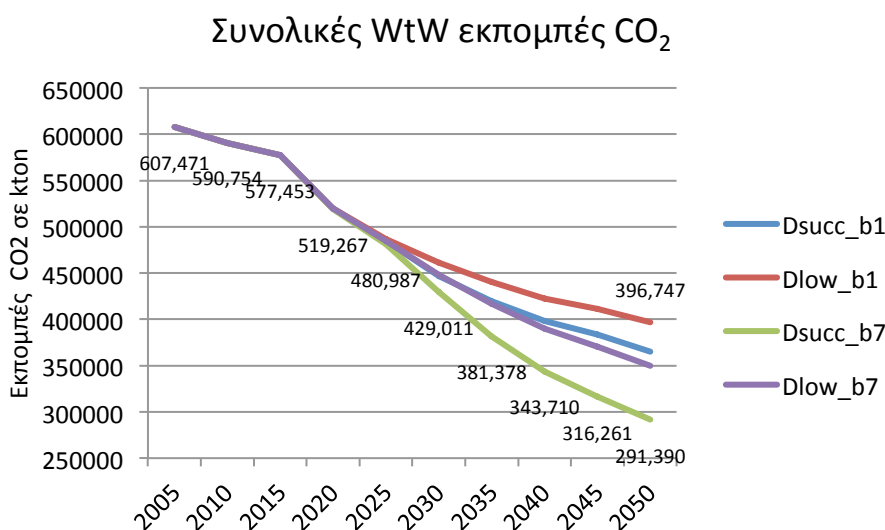
### 5.2.5 Εκπομπές CO<sub>2</sub>

Στην συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα για τις TTW και WTW εκπομπές CO<sub>2</sub> τα οποία λόγω της σύνδεσής τους με την κατανάλωση ενέργειας δεν παρουσιάζουν κάποια ποιοτική διαφοροποίηση σε σύγκριση με τις προηγούμενες ενότητες

Διάγραμμα 35 Συνολικές TtW εκπομπές CO<sub>2</sub> για D low σεσάρια



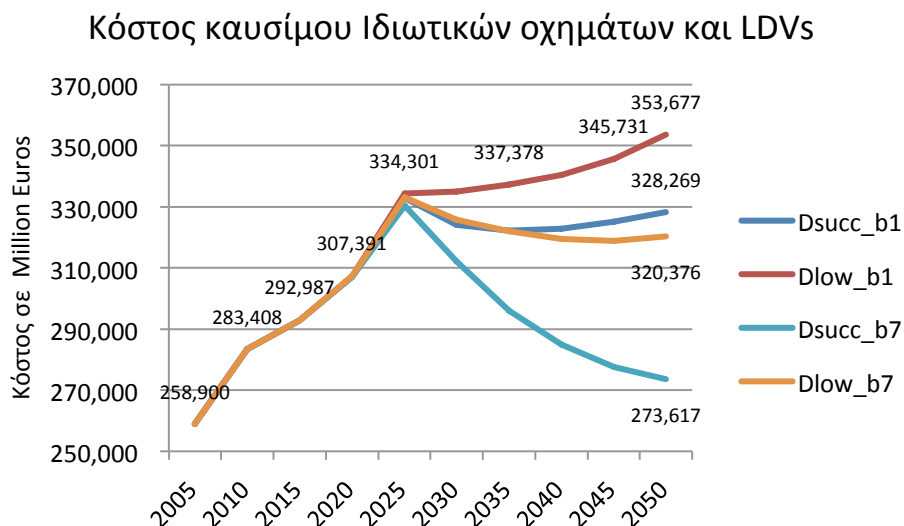
Διάγραμμα 36 Συνολικές WtW εκπομπές CO<sub>2</sub> για D Low σεσάρια



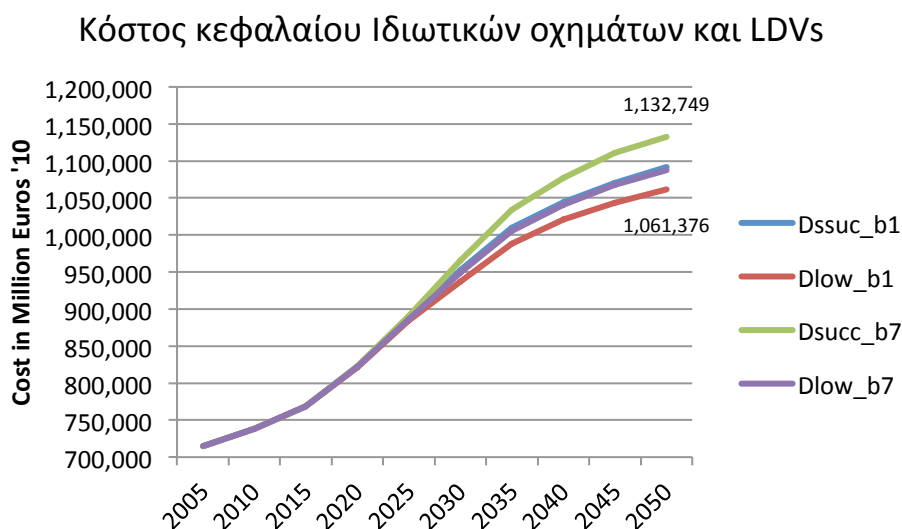
## 5.2.6 Κόστος

Στην συνέχεια παρατείνονται τα συγκριτικά διαγράμματα κόστους για τα σενάρια ανεπαρκούς ανάπτυξης δικτύου φόρτισης

Διάγραμμα 37 Κόστος καυσίμου για τα D low σενάρια



Διάγραμμα 38 Κόστος κεφαλαίου για τα D low σενάρια



Τα παραπάνω διαγράμματα όντας άμεσα συνδεδεμένα με την δραστηριότητα. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται ότι η αύξηση της δραστηριότητας των επιβατικών αυτοκινήτων και επαγγελματικών φορτηγών οδηγεί σε μεγαλύτερο όγκο πωλήσεων και κατ' επέκταση σε υψηλότερη δαπάνη για αγορά κεφαλαιουχικού εξοπλισμού. Στα αισιόδοξα σενάρια η μείωση

του κόστους καυσίμου συνδέεται με την χρήση περισσότερων ηλεκτρικών οχημάτων η οποία επιβαρύνει και το συνολικό κόστος κεφαλαίου.

## **6 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ CO<sub>2</sub> STANDARDS ΣΤΙΣ ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ ΕΞΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΗΣ**

### **6.1 Εισαγωγή**

Αφού εξετάστηκαν οι δυο πρώτοι άξονες σεναρίων και παρουσιάστηκε ο τρόπος που κάθε ένας από αυτούς επηρεάζει την ανάπτυξη των ηλεκτροκίνητων οχημάτων, θα εξετάσουμε την τρίτη μεταβλητή παράμετρο που εισαγουμε εξωγενώς στο μοντέλο, τον αναγκαστικό περιορισμό του μέσου όρου εκπομπών CO<sub>2</sub> νέων εγγραφών. Στις δυο προηγούμενες ενότητες υπήρχε εφαρμογή του περιορισμού εκπομπών όπου και είχαν δοθεί τιμές αναφοράς. Ο περιορισμός εφαρμόστηκε σε όλα τα σενάρια (το μοντέλο δεν θα επέτρεπε τη μη εφαρμογή του) χωρίς όμως να ωθήσει-αναγκάσει τους καταναλωτές να στραφούν στα ηλεκτροκίνητα οχήματα. Το παραπάνω πιστοποιείται από τα διαγράμματα της συνολικής δραστηριότητας των ιδιωτικών οχημάτων σε συνδυασμό με το διάγραμμα συνολικού κόστους. Έχοντας αναλύσει στις προηγούμενες ενότητες τους δυο πρώτους άξονες και έχοντας παρατηρήσει το πως αντιδρά η αγορά στις διαφορές υποθέσεις δεν συντρέχει λόγος να παραθέσουμε και σε αυτή την ενότητα αναλυτικά δεδομένα για όλους τους συνδυασμούς τεχνοοικονομικών σεναρίων σε συνδυασμό με την εφαρμογή περιορισμού εκπομπών CO<sub>2</sub>. Η ανάλυση των περιορισμών CO<sub>2</sub> θα γίνει υπο την μορφή ερωτημάτων προκειμένου να εξετάσουμε την συμπεριφορά των καταναλωτών σε κάποιους πιο πιθανούς ή ακραίους συνδυασμούς των τριών αξόνων.

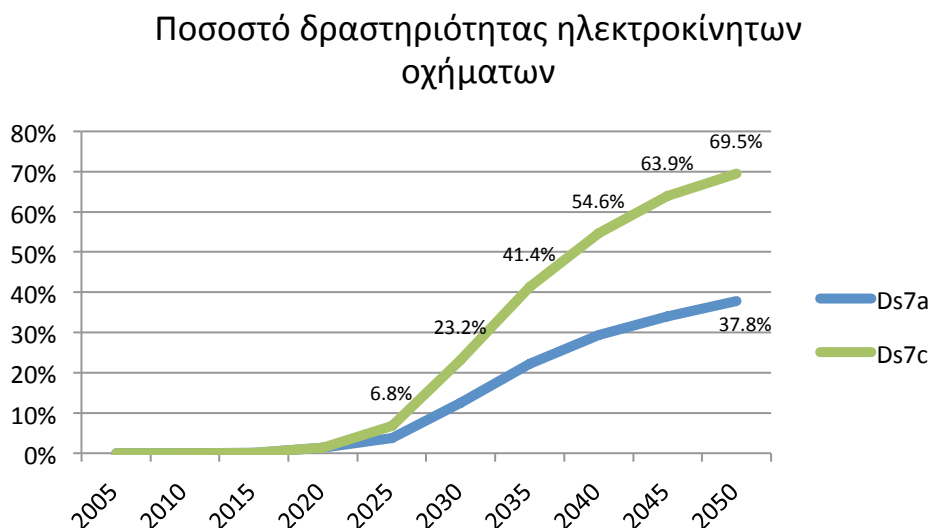
### **6.2 Ποια η εξέλιξη της ηλεκτροκίνησης αν αναπτυχθεί επαρκώς το δίκτυο φόρτισης, η τεχνολογία των μπαταριών και επιπλέον εφαρμοστούν αυστηρά CO<sub>2</sub> standards?**

Σε αυτή την ενότητα εφαρμόζουμε το σενάριο στο οποίο οι αυστηροί περιορισμοί εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα εφαρμόζονται στο πλέον ευνοϊκό περιβάλλον όπου έχει αναπτυχθεί επαρκώς το δίκτυο φόρτισης και έχουμε πλήρη τεχνοοικονομική εξέλιξη των μπαταριών (Dsucc\_b7 σενάριο). Θα παρατεθούν οι κατηγορίες και στα διαγράμματα στις οποίες παρατηρούνται ποιοτικές διαφορές.

## 6.2.1 Δραστηριότητα

Αρχικά δίνεται το συγκριτικό διάγραμμα για το ποσοστό της δραστηριότητας που καλύπτουν τα ηλεκτροκίνητα οχήματα

Διάγραμμα 39 Δραστηριότητα ηλεκτροκίνητων οχημάτων με εφαρμογή αυστηρών CO<sub>2</sub> standards



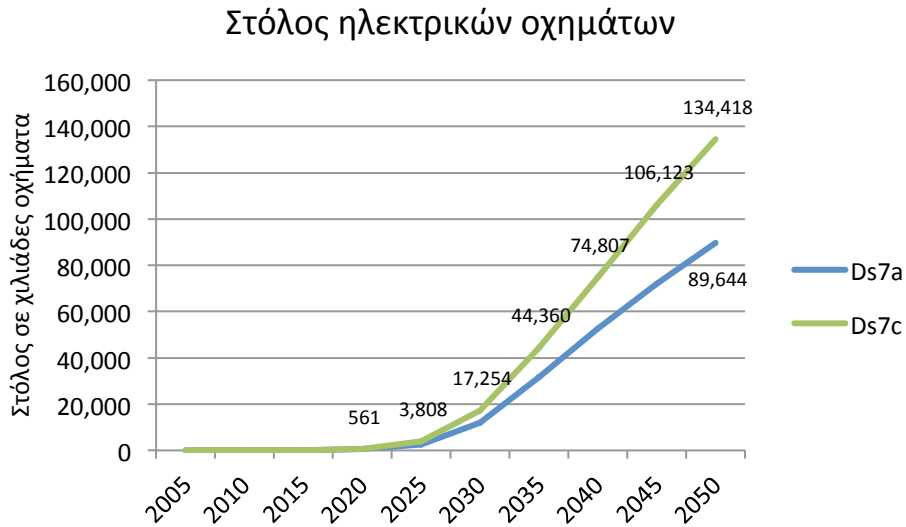
Το διάγραμμα για την συνολική δραστηριότητα των ιδιωτικών οχημάτων παραλείπεται διότι είναι ταυτόσημα και για τα δυο σενάρια. Το ότι δεν μεταβάλλεται η συνολική δραστηριότητα των ιδιωτικών οχημάτων δείχνει ότι δεν έχουμε μεταβολή στον τρόπο μετακίνησης των καταναλωτών παρά την εφαρμογή των αυστηρών περιορισμών. Ο στόλος των ιδιωτικών οχημάτων γίνεται λιγότερο ρυπογόνος με την εισαγωγή περισσότερων ηλεκτροκίνητων οχημάτων και οι καταναλωτές έχουν την προθεσμία να πληρώσουν τα ακριβότερα ηλεκτρικά οχήματα που είναι διαθέσιμα χωρίς να καταφεύγουν σε άλλους τρόπους μετακίνησης (MMM). Το γεγονός ότι η αύξηση της ηλεκτροκίνησης γίνεται χωρίς μείωση της συνολικής δραστηριότητας γίνεται λόγω του ότι έχουν αρθεί οι περιορισμοί του ανεπαρκούς δικτύου φόρτισης και του κόστους των μπαταριών και που καθιστά τα ηλεκτροκίνητα οχήματα προσιτά.

Στο παραπάνω διάγραμμα και για το έτος 2050 η δραστηριότητα των ηλεκτροκίνητων οχημάτων αυξήθηκε κατά 85% λόγω της εφαρμογής αυστηρών περιορισμών εκπομπής CO<sub>2</sub>. Αναλογιζόμενοι το ότι δεν επηρεάζεται η συνολική δραστηριότητα ο αυστηρός περιορισμός των εκπομπών ρύπων μπορεί να γίνει ισχυρός μοχλός ανάπτυξης των ηλεκτρικών οχημάτων υπό προϋποθέσεις. Οι προϋποθέσεις στην προκειμένη περίπτωση είναι η ανάπτυξη επαρκούς δικτύου φόρτισης και της απαιτούμενης τεχνολογίας των μπαταριών οι οποίες απαιτούν επενδύσεις. Η δραστηριότητα των ηλεκτροκίνητων οχημάτων καλύπτεται κατά 48% από τα καθαρά ηλεκτρικά οχήματα και κατά 52% από τα plug in hybrid για το έτος 2050 για τα αυστηρά όρια εκπομπών. Για το σενάριο αναφοράς το μίγμα δραστηριότητας ανάμεσα σε καθαρά ηλεκτρικά και plug in hybrid είχε τα ίδια ποσοστά με την διαφορά με τα plug in hybrid όμως να κατέχουν το 48%.

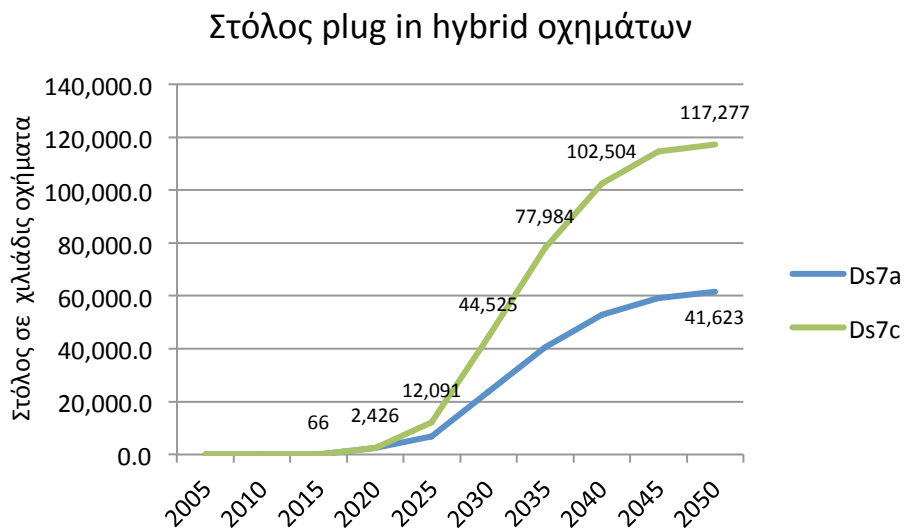
## 6.2.2 Στόλος

Έχοντας ως δεδομένη την αύξηση στην δραστηριότητα με την εφαρμογή αυστηρών περιορισμών η αύξηση του στόλου των ηλεκτροκίνητων είναι η πιο σημαντική παράμετρος για το σύστημα μεταφορών, τις αυτοκινητοβιομηχανίες και το δίκτυο φόρτισης. Για τον λόγο αυτό θα παραθέσουμε όλα τα διαγράμματα που αφορούν τον στόλο των ηλεκτροκίνητων οχημάτων.

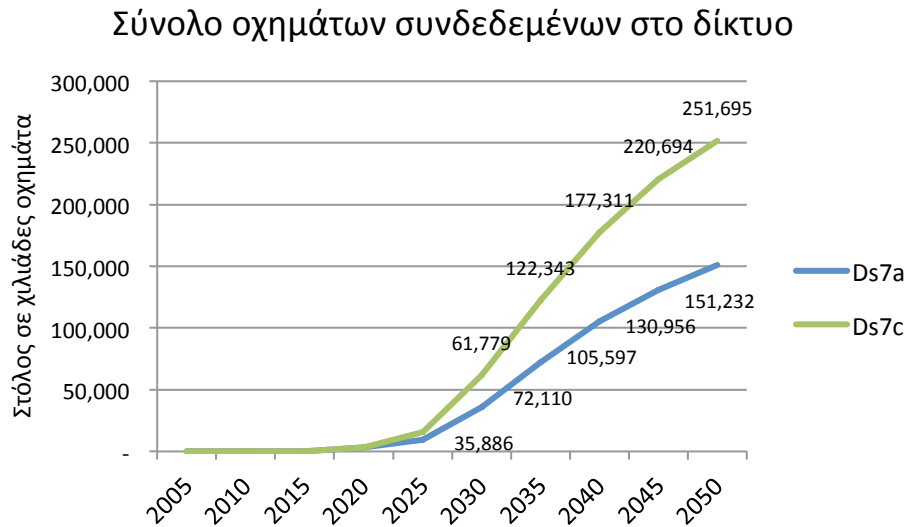
Διάγραμμα 40 Στόλος ηλεκτρικών οχημάτων με αυστηρά CO<sub>2</sub> standards



Διάγραμμα 41 Στόλος plug in hybrid οχημάτων με αυστηρά CO<sub>2</sub> standards





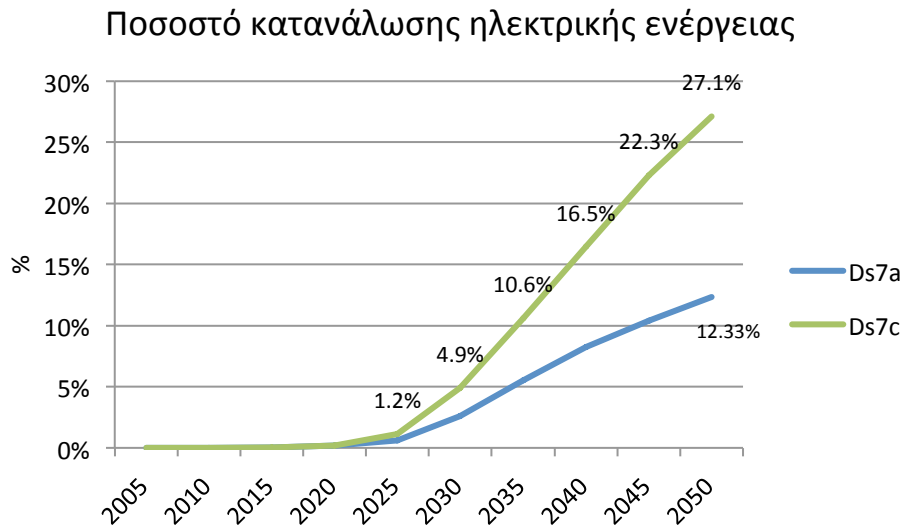


Στα καθαρά ηλεκτρικά οχήματα η αύξηση για το 2050 σε σχέση με το σενάριο αναφοράς είναι 50% και σε απόλυτους αριθμούς 44 εκατομμύρια περισσότερα καθαρά ηλεκτρικά οχήματα θα κυκλοφορούν στην Ευρώπη των 27 με την εφαρμογή αυστηρών περιορισμών εκπομπής CO<sub>2</sub>. Για τα plug in hybrid οχήματα η αύξηση των πωλήσεων είναι πολύ μεγαλύτερη. Για το έτος 2050 κυκλοφορούν 65 εκατομμύρια παραπάνω plug in hybrid οχήματα και η αύξηση μεταφράζεται στο 285%. Συγκρίνοντας σε απόλυτους αριθμούς τα καθαρά ηλεκτρικά οχήματα υπερέρχουν, ακόμα, αριθμητικά των plug in hybrid με μειωμένη διαφορά σε σχέση με το σενάριο αναφοράς. Και σε αυτό το σενάριο φαίνεται η χρησιμότητα των plug in hybrid οχημάτων τα οποία μετατρέπονται ανάλογα με την κατάσταση από ένα μεταβατικό στάδιο στην ηλεκτροκίνηση σε απαραίτητο κύτταρο του στόλου. Στην εκδοχή που εξετάζουμε σε αυτή την ενότητα τα plug in hybrid οχήματα αποδεικνύονται απαραίτητο στοιχείο του στόλου των ιδιωτικών οχημάτων προκειμένου να εφαρμοστούν οι περιορισμοί των εκπομπών ρύπων χωρίς να υπάρξει κάμψη στην κατανάλωση. Σε περίπτωση που υπάρξουν οι συνθήκες του σεναρίου είναι λογικό οι αυτοκινητοβιομηχανίες να δώσουν μεγαλύτερο βάρος σε σχέση στην ανάπτυξη, σχεδίαση και παραγωγή διαφορετικών plug in hybrid οχημάτων με διάφορες δυνατότητες ηλεκτρικής αυτονομίας.

### 6.2.3 Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας

Στην περίπτωση εφαρμογής αυστηρών περιορισμών εκπομπής ρύπων σε συνδυασμό με την άρση των υπόλοιπων περιορισμών, όπως βλέπουμε και και στο παρακάτω διάγραμμα, ο ηλεκτρισμός αποτελεί σημαντική πηγή ενέργειας για την τροφοδοσία των ιδιωτικών οχημάτων. Για το έτος 2050 το 27,1% της ενέργειας που πρωτογενώς καταναλώνουν τα ιδιωτικά οχήματα είναι ηλεκτρική κάτι το οποίο αντιστοιχεί σύμφωνα με τις προβλέψεις ενός σεναρίου αναφοράς το 12% της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό καθιστά τα ιδιωτικά οχήματα σημαντικό “πελάτη των εταιρειών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως έχουμε αναφέρει η σταδιακή εισαγωγή, σε συνδυασμό με την φόρτιση σε ώρες χαμηλής ζήτησης, η ηλεκτροκίνηση μπορεί να λειτουργήσει σαν παράγοντας σταθερότητας και όχι αποσταθεροποίησης του ηλεκτρικού συστήματος.

Διάγραμμα 43 Ποσοστό κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργεια ιδιωτικών οχημάτων



## 6.2.4 Κόστος

Διάγραμμα 44 Συνολικό κόστος Ιδιωτικών οχημάτων και LDVs με αυστηρά CO<sub>2</sub> standards



Το συνολικό κόστος που προβάλλεται στο παραπάνω διάγραμμα περιλαμβάνει όλα τα πιθανά κόστη που απορρέουν από την ιδιοκτησία και χρήση ιδιωτικών οχημάτων. Σε προηγούμενα σενάρια δεν είχε προβληθεί το συγκεκριμένο διάγραμμα καθώς δεν προέκυπταν διαφορές συνολικού κόστους ανάμεσα στα σενάρια. Στο σενάριο των αυστηρών περιορισμών εκπομπών ρύπων με άρση των υπόλοιπων παραγόντων που εξετάζουμε παρατηρούμε την αύξηση του συνολικού κόστους σε σχέση με το σενάριο αναφοράς. Πιο συγκεκριμένα οι καμπύλες κόστους ξεκινούν να διαχωρίζονται το 2030 όπου και έχουμε την μαζική εισαγωγή των ηλεκτροκίνητων οχημάτων. Το 2050 η ποσοστιαία αύξηση του κόστους φτάνει το 3% το οποίο όμως σε απόλυτα νούμερα μεταφράζεται σε επιπλέον κόστος 88 δισεκατομμύρια ευρώ. Το κόστος αυτό οφείλεται

στο κόστος κεφαλαίου για την απόκτηση ακριβότερου-λιγότερου ρυπογόνου εξοπλισμού έτσι ώστε να εφαρμοστεί ο περιορισμός.

### 6.2.5 Συμπέρασμα

Η εφαρμογή των αυστηρών περιορισμών σε συνδυασμό με την άρση των εμποδίων του δικτύου φόρτισης και της τεχνολογίας των μπαταριών έχει θετικό αποτέλεσμα στην ανάπτυξη των ηλεκτροκίνητων οχημάτων. Η εφαρμογή αυστηρών περιορισμών είναι σίγουρο ότι θα οδηγήσει σε αύξηση της ηλεκτροκίνησης σε όλες τις κατηγορίες αφού στα πλαίσια της εργασίας η ηλεκτροκίνηση είναι και η μοναδική εναλλακτική λύση για μείωση των εκπομπών διοξειδίου του ανθρακά. Το ζήτημα είναι η ανάπτυξη των ηλεκτροκίνητων οχημάτων να γίνει ομαλά και όχι σε βάρος του συστήματος μεταφορών.

Στο σενάριο που εξετάζουμε η ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων κρίνεται θετική τόσο σε ποσοτικό όσο και σε ποιοτικά κριτήρια. Ποσοτικά τα ηλεκτροκίνητα οχήματα παρουσιάζουν μεγάλη αύξηση στα ποσοστά τους καλύπτοντας για το έτος 2050 το 70% της δραστηριότητας με αντίστοιχα ποσοστά σε όλες τις κατηγορίες. Ποιοτικά η εισαγωγή γίνεται με τέτοιες συνθήκες (χαμηλό κόστος μπαταριών-επαρκές δίκτυο φόρτισης) όπου δεν επηρεάζεται η συνολική δραστηριότητα-κατανάλωση των ιδιωτικών οχημάτων. Επειδή ο περιορισμός των εκπομπών των νέων εγγραφών είναι ένα υποχρεωτικό μέτρο μπορεί να δημιουργήσει, υπό προϋποθέσεις, στην μείωση της κατανάλωσης η οποία οδηγεί σε μείωση των πωλήσεων και στις αντιδράσεις της αυτοκινητοβιομηχανίας για το υποχρεωτικό μέτρο του περιορισμού. Ένα ακόμα θετικό στοιχείο είναι η σχετικά μικρή αύξηση του συνολικού κόστους για τα ιδιωτικά οχήματα. Αξίζει να επισημανθεί ότι μακροοικονομικά είναι αδύνατη η υπερβολική αύξηση του συνολικού κόστους χωρίς την κάμψη της κατανάλωσης. Επομένως μπορούμε να καταλήξουμε ότι η εφαρμογή του μέτρου του αυστηρού περιορισμού εκπομπών ρύπων είναι ένα επιτυχημένο μέτρο έχοντας ως δεδομένη την άρση των υπόλοιπων εμποδίων. Σε αυτή την περίπτωση οι αυστηροί περιορισμοί εκπομπής CO<sub>2</sub> λειτουργεί επικουρικά ως προς τις υπάρχουσες συνθήκες και όχι ως μορφή πίεσης ως προς τις αυτοκινητοβιομηχανίες για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών.

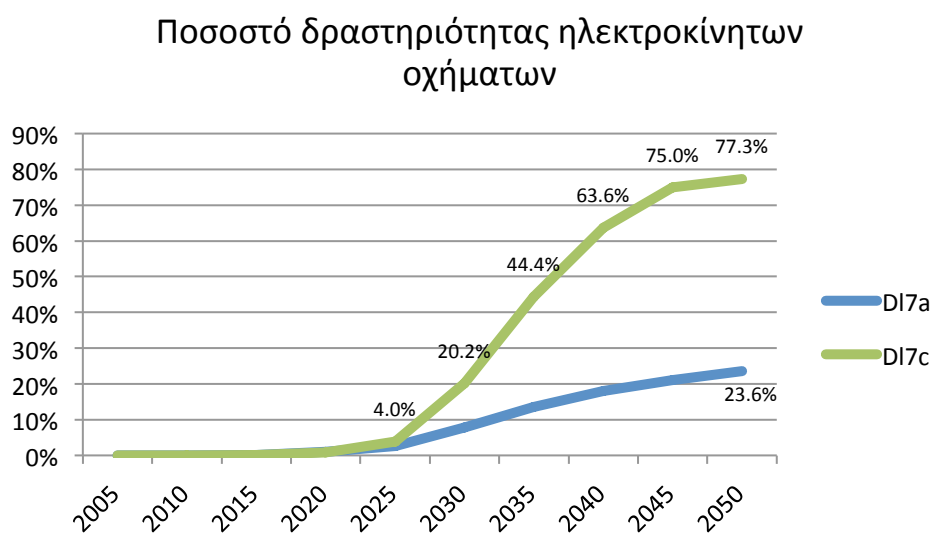
### 6.3 Ποια η εξέλιξη της ηλεκτροκίνησης αν δεν αναπτυχθεί επαρκώς το δίκτυο φόρτισης και εφαρμοστούν αυστηροί περιορισμοί εκπομπών CO<sub>2</sub>?

Σε αυτή την ενότητα θα εξεταστεί η περίπτωση που εφαρμοστούν πολυ αυστηροί περιορισμοί στις εκπομπές CO<sub>2</sub> χωρίς όμως να έχει αναπτυχθεί επαρκώς των δίκτυο φόρτισης. Οι τιμές που έχουμε εισάγει για τις εκπομπές των νέων εγγραφών βρίσκονται στον Πίνακα 27 σενάριο c, η ανάπτυξη είναι ανεπαρκής (D low) για την τεχνοοικονομική ανάπτυξη των μπαταριών υποθέτουμε ότι είναι επιτυχής. Σε αυτή την ενότητα ως σενάριο αναφοράς θεωρείται κάθε φορά το αντίστοιχο σενάριο με ήπιο περιορισμό εκπομπών νέων εγγραφών (a) προκειμένου να απομονωθεί η επίδραση της εφαρμογής των CO<sub>2</sub> standards

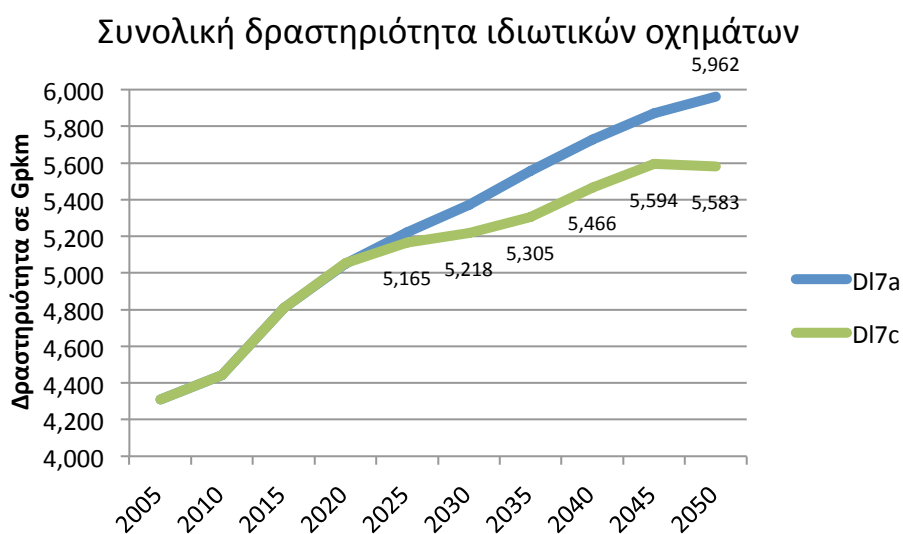
### 6.3.1 Δραστηριότητα

Τα κυριότερα διαγράμματα δραστηριότητας που προκύπτουν από τα σενάρια που εξετάζουμε είναι τα παρακάτω:

Διάγραμμα 45 Ποσοστό δραστηριότητας ηλεκτροκίνητων οχημάτων



Διάγραμμα 46 Συνολική δραστηριότητα ιδιωτικών οχημάτων

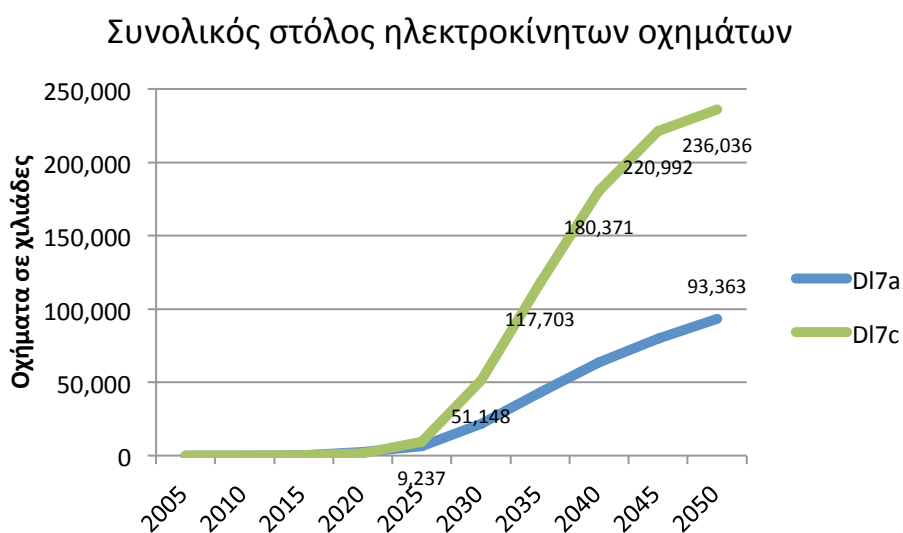


Από τα παρακάτω διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι η αύξηση της δραστηριότητας των ηλεκτρικών οχημάτων επιβάλλεται από τον περιορισμό των εκπομπών αερίου και δεν γίνεται μέσω της ελεύθερης επιλογής των καταναλωτών. Μόνο έτσι μπορεί να ερμηνευθεί η κάμψη της συνολικής δραστηριότητας των ιδιωτικών οχημάτων. Αξίζει να σημειώσουμε ότι η κάμψη αυτή παρατηρείται μόνο σε αυτή την σειρά σεναρίων.

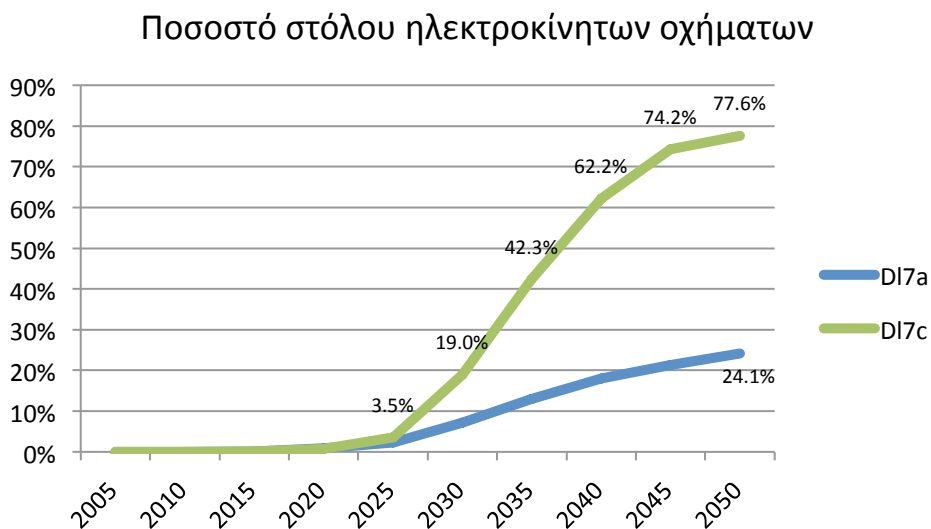
### 6.3.2 Στόλος

Τα κυριότερα διαγράμματα για τον στόλο των ηλεκτροκίνητων οχημάτων που προκύπτουν από τα σενάρια που εξετάζουμε είναι τα παρακάτω:

Διάγραμμα 47 Συνολικός στόλος ηλεκτροκίνητων οχημάτων



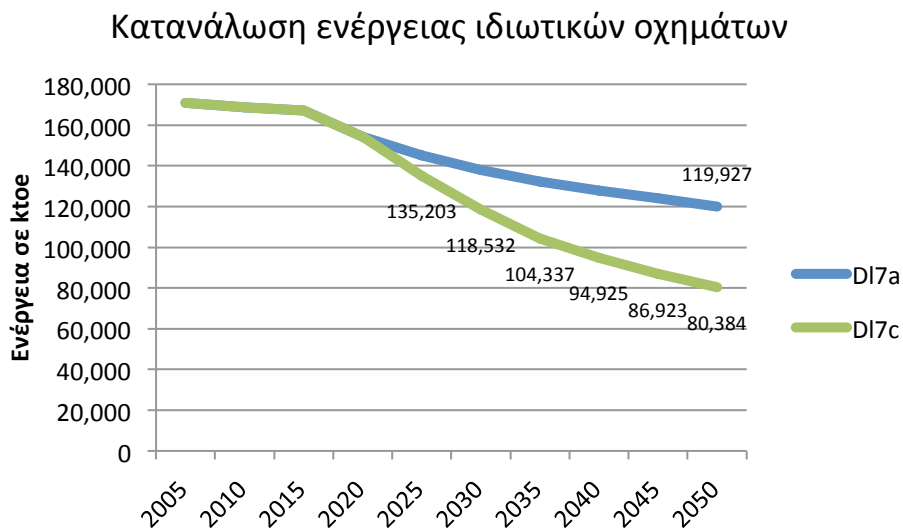
Διάγραμμα 48 Ποσοστό στόλου ηλεκτροκίνητων οχημάτων



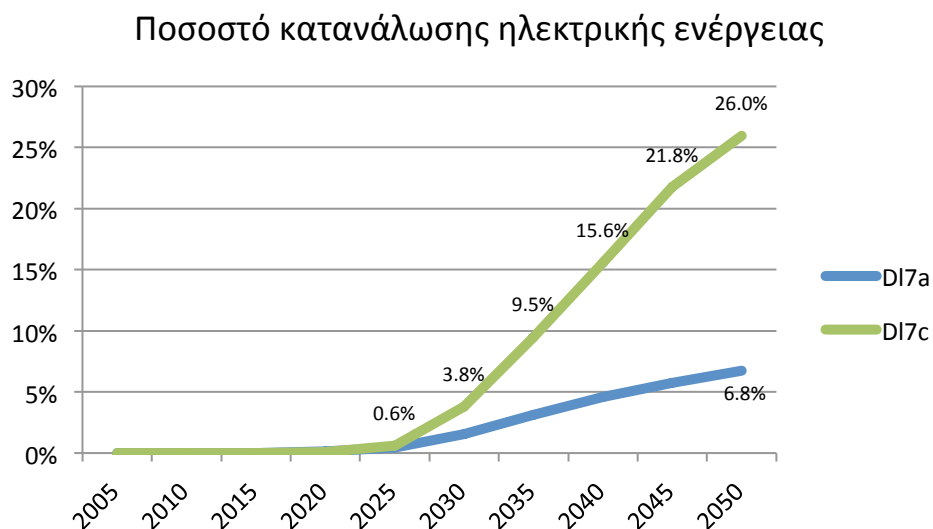
Όπως είναι αναμενόμενο τα ηλεκτρικά οχήματα χρησιμοποιώντας ως μοχλό το μέτρο μείωσης εκπομπών ρύπων, παραγκωνίζουν τα συμβατικά. Από τα παραπάνω διαγράμματα προσδιορίζεται ποσοτικά και η μείωση του στόλου των ιδιωτικών οχημάτων με την εφαρμογή του της αυστηρής νομοθεσίας. Η μείωση επέρχεται λογικά, λόγω της συνολικής μείωσης δραστηριότητας των ηλεκτρικών οχημάτων.

### 6.3.3 Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας

Διάγραμμα 49 Συνολική κατανάλωση ενέργειας ιδιωτικών οχημάτων



Διάγραμμα 50 Ποσοστό κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας ιδιωτικών οχημάτων



Η κυριαρχία των ηλεκτρικών οχημάτων με την χρήση αυστηρής περιβαλλοντικής νομοθεσίας μειώνει κατά το τρίτο για το έτος 2050 την συνολική κατανάλωση ενέργειας του στόλου των ιδιωτικών οχημάτων. Η μείωση της κατανάλωσης δεν οφείλεται αποκλειστικά στην χρήση αποδοτικότερων οχημάτων, αλλά και στην μείωση της δραστηριότητας. Σε ότι αφορά την αύξηση ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, συμβαίνει γραμμικά και προβλέψιμα και δεν αναμένεται να δημιουργήσει προβλήματα στο ηλεκτρικό δίκτυο.

#### 6.3.4 Κόστος

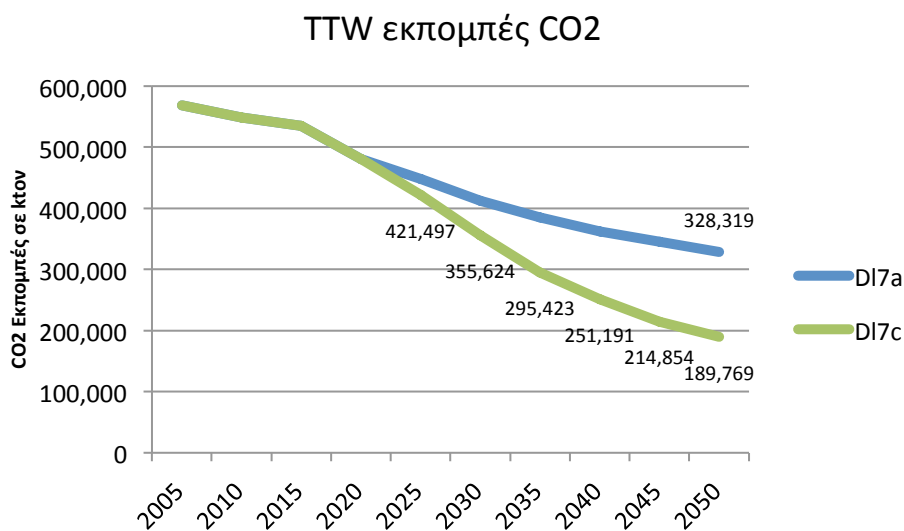
Διάγραμμα 51 Συνολικό κόστος ιδιωτικών οχημάτων και LDVs



Στο παραπάνω διάγραμμα αποτυπώνεται η αύξηση του συνολικού κόστους για των στόλο των ιδιωτικών οχημάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο συνολικό κόστος υπολογίζονται τόσο τα σταθερά όσο και τα λειτουργικά κόστη των οχημάτων. Συνδυάζοντας το αυξημένο κόστος με την μειωμένη δραστηριότητα και τον μειωμένο στόλο οχημάτων συμπεραίνουμε ότι με την εφαρμογή αυστηρής νομοθεσίας μέρος των καταναλωτών μένει εκτός ιδιωτικής μετακίνησης αφού δεν μπορεί να διαθέσει το ανάλογο εισόδημα για αυτή.

### 6.3.5 Εκπομπές CO<sub>2</sub>

Διάγραμμα 52 Συνολικές εκπομπές CO<sub>2</sub> ιδιωτικών οχημάτων και LDVs





Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ακολουθούν ποιοτικά την καμπύλη της κατανάλωσης ενέργειας των ίδιων σεναρίων. Η μείωση έρχεται νομοτελειακά και σε συμφωνία με την εφαρμογή αυστηρών εκπομπών ρύπων. Σε απόλυτα νούμερα η μείωση είναι και η μεγαλύτερη που μπορεί να επιτευχθεί δεδομένης της ελλειπής ανάπτυξης δικτύου φόρτισης

### **6.3.6 Συμπερασμα**

Η εφαρμογή αυστηρών περιορισμών CO<sub>2</sub> σε συνδυασμό με την μη επαρκή ανάπτυξη δικτύου φόρτισης δεν φέρει τα επιθυμητά αποτελέσματα. Η συνολική μείωση των εκπομπών ρύπων μειώνεται αλλά αυτό δεν έρχεται χωρίς συνέπειες και με βιώσιμο τρόπο. Η συνολική δραστηριότητα των ιδιωτικών οχημάτων κατακερματίζεται και το αντίστοιχο κόστος αυξάνεται. Αντίστοιχες μειώσεις καταγράφονται και στον συνολικό στόλο, ηλεκτρικών και συμβατικών οχημάτων. Θα μπορούσαμε να συμπεράνουμε ότι σε αυτή την περίπτωση οι καταναλωτές και οι εταιρείες αναγκάζονται να αλλάξουν τον τρόπο που μετακινούνται ή μεταφέρουν εμπορεύματα. Είτε περιορίζουν τις μετακινήσεις τους είτε μεταφέρονται με εναλλακτικά μέσα αφού ο ιδιωτικός τρόπος μετακίνησης είναι είτε πολύ ακριβός είτε δεν είναι εφικτός λόγω του μη ανεπτυγμένου ηλεκτρικού δικτύου. Όσο αφορά το κομμάτι της προσφοράς το παραπάνω σενάριο θα δημιουργήσει πρόβλημα στις αυτοκινητοβιομηχανίες αλλά και τις εταιρίες παραγωγής ενέργειας λόγω της μείωσης του στόλου και της ζητούμενης ενέργειας αντίστοιχα.

Από τα παραπάνω είναι επόμενο να συμπεράνουμε ότι στην πραγματικότητα ένα τέτοιο σενάριο δεν είναι εφαρμόσιμο στην πραγματικότητα. Η υποχρέωση μείωσης των εκπομπών ρύπων πρέπει να έρθει ως συνέχεια της γενικής ανάπτυξης των ηλεκτρικών οχημάτων, τόσο ως τεχνολογία όσο και ως υποδομών, και όχι μόνο σαν νομοθεσία. Σε περίπτωση που οι συνθήκες δεν είναι ωριμές για κάτι τέτοιο, η πίεση τόσο από τις αυτοκινητοβιομηχανίες όσο και από τους καταναλωτές/εταιρείες θα αναγκάσει τις κυβερνήσεις να ανακαλέσουν τέτοιου είδους νομοθετήματα.

## 7 ΕΠΙΛΟΓΟΣ- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

Η μαζική παραγωγή ηλεκτροκίνητων οχημάτων πρόκειται για την μεγαλύτερη μεταρύθμιση στην αυτοκινητοβιομηχανία από την πρώτη μαζική παραγωγή ιδιωτικών οχημάτων. Μέσα στα πλαίσια της εργασίας μελετήθηκαν και μοντελοποιήθηκαν οι κύριοι τεχνικοί παράγοντες που επηρεάζουν τόσο την κατασκευή όσο και την αποδοχή από τους καταναλωτές των νέων τεχνολογιών. Σε αρκετά σημεία την εργασίας έγινε σαφές ότι η παραγωγή και αποδοχή των ηλεκτροκίνητων οχημάτων είναι μια συνάρτηση πολλών μεταβλητών, όπου μερικές από αυτές δεν έχουν αποσαφηνιστεί πλήρως, επομένως δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα για το πότε και το κατά πόσο τα ηλεκτροκίνητα οχήματα θα γίνουν μέρος της καθημερινότητας μας.

Τα χρήσιμα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από την εργασία έχουν να κάνουν με την βαρύτητα που έχει καθένας από τους τεχνικούς παράγοντες στο μέλλον της ηλεκτροκίνησης. Από τα σενάρια που μελετήθηκαν προέκυψε ότι η μετάβαση στην ηλεκτροκίνηση δύναται να γίνει μαζικά και ομαλά μόνο εάν συντελεστεί εντατική πρόοδος στην τεχνολογία των μπαταριών. Η πρόοδος οφείλει να είναι πολύπλευρη. Ως προς τα τεχνικά χαρακτηριστικά οι μπαταρίες λιθίου πρέπει να γίνουν οικονομικότερες και παράλληλα ελαφρύτερες, με μεγαλύτερη μακροζωία αλλά με ενεργειακό περιεχόμενο αρκετό να προσφέρει ανεκτή αυτονομία. Επιπλέον πρέπει κατά την παραγωγή τους να μειωθεί το ενεργειακό τους αποτύπωμα προσφέροντας έμμεσα στην απόδοση της ηλεκτροκίνησης. Η σημερινή τεχνολογία μπαταριών δεν μπορεί να τροφοδοτήσει ηλεκτροκίνητα οχήματα ανταγωνιστικά των συμβατικών. Το αισιόδοξο είναι όμως ότι παγκοσμίως δίνεται μεγάλη βαρύτητα στην έρευνα και ανάπτυξη των μπαταριών λιθίου από σύμπραξη αυτοκινητοβιομηχανιών-κυβερνήσεων-κατασκευαστών μπαταριών με θετικά αλλά όχι θεαματικά αποτελέσματα.

Η εναλλακτική μετάβαση στην ηλεκτροκίνηση μπορεί να γίνει μέσω περιορισμών. Σε αυτή την περίπτωση η ηλεκτροκίνητη τεχνολογία δεν έχει ωριμάσει, παρόλα αυτά λόγω των περιορισμών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα τα ηλεκτρικά οχήματα χρησιμοποιούνται μαζικά λόγω της αυξημένης απόδοσής τους προκειμένου να τηρηθούν οι δεσμεύσεις των κυβερνήσεων για το ενεργειακό μείγμα που χρησιμοποιείται. Θεωρούμε ότι σε αυτό το σενάριο δεν χρησιμοποιείται κάποια άλλη εναλλακτική τεχνολογία σε σχέση με τα συμβατικά ( πχ υδρογόνο) επομένως ανάλογα με την πτυχή της τεχνολογίας των μπαταριών που δεν έχει ωριμάσει έχουμε και τα αντίστοιχα αποτελέσματα. Σε κάθε περίπτωση προκύπτουν ηλεκτρικά οχήματα μειωμένης χρησιμότητας, είτε λόγω κόστους, είτε λόγω αυτονομίας, είτε λόγω

σταθμών φόρτισης, με συνέπεια την μείωση της δραστηριότητας των ιδιωτικών οχημάτων. Στην πραγματικότητα η εφαρμογή αυστηρών περιορισμών χωρίς την ωρίμανση της τεχνολογίας των μπαταριών δεν θεωρείται ένα ρεαλιστικό σενάριο αφού μπορεί να οδηγήσει σε κατάρρευση την αυτοκινητοβιομηχανία.

Το σενάριο που τελικά θα επικρατήσει δεν γίνεται να προσδιοριστεί στα πλαίσια αυτής την εργασίας. Επιχειρώντας μια μεσοπρόθεσμη πρόβλεψη βασιζόμενοι στην τελευταία πενταετία, παρατηρούμε ότι οι συμβατικές τεχνολογίες (βενζίνη, πετρέλαιο) δεν έχουν εξαντλήσει την αποδοτικότητά τους και καταφέρουν καταναλώσεις αντίστοιχες των υβριδικών οχημάτων. Παράλληλα η τεχνολογία των ηλεκτροκίνητων οχημάτων δεν έχει αναπτυχθεί αντίστοιχα του βάρους που έχει δωθεί σε αυτήν από τις αυτοκινητοβιομηχανίες, ενώ ο σχεδιασμός για μαζική παραγωγή των πρώτων ηλεκτρικών οχημάτων από την Renault το 2014 ακυρώθηκε λόγω κόστους. Από τα παραπάνω καταλήγουμε ότι το μεταβατικό στάδιο για την ηλεκτροκίνηση, εάν δεν υπάρχουν περιορισμοί, θα είναι μαγαλύτερο από το επιθυμητό και τα πρώτα ηλεκτροκίνητα οχήματα που θα παραχθούν μαζικά δεν θα απευθύνονται στον μέσο καταναλωτή όχι μόνο λόγω της αρχικής τιμής τους, αλλά και την μειωμένης χρησιμότητας. Το στάδιο κατά το οποίο τα ηλεκτρικά οχήματα είναι είδος πολυτελείας ίσως δώσει μια ώθηση για την ωρίμανση της τεχνολογίας τους. Πάντως όποιο σενάριο και να επικρατήσει στα επόμενα χρόνια είναι σίγουρο ότι θα έχει προκύψει σαν μια ισορροπία ανάμεσα σε πολιτικές αποφάσεις, τεχνολογικά επιτεύματα, οικονομικά συμφέροντα και περιβαλλοντικές ανησυχίες.

Σε ότι αφορά την μελλοντική έρευνα στο παρόν αντικείμενο πολλές πτυχές και προκλήσεις είναι ανοιχτές. Αρχικά δύναται να διερευνηθεί η διείσδυση της ηλεκτροκίνησης και στα βαρέα οχήματα, όπως φορτηγά άνω των τριών τόνων και λεωφορεία, αστικά και υπεραστικά. Επιπλέον είναι δυνατή η διερεύνηση ενός συστήματος, συμπληρωματικού της φόρτισης, στο οποίο θα γίνεται αντικατάσταση της μπαταρίας εξαλείφοντας εν μέρει τις αρνητικές συνέπειες της μειωμένης αυτονομίας και των σταθμών φόρτισης. Ακόμα, η παράλληλη ανάπτυξη εναλλακτικών καυσίμων, όπως το υδρογόνο, και η αλληλεξάρτηση των νέων τεχνολογιών τόσο μεταξύ τους όσο και σε σχέση με τις συμβατικές τεχνολογίες δημιουργούν ένα ενα πιο πολύπλοκο περιβαλλοντικό επιλογής για τους καταναλωτές. Με την συνεχή εξέλιξη των μπαταριών η συμμετοχή των ηλεκτροκίνητων οχημάτων στο Smart Grid είναι δυνατή με οφέλη και για το ηλεκτρικό δίκτυο αλλά και για τους χρήστες των ηλεκτροκίνητων οχημάτων.

## ***Βιβλιογραφία***

1. Department for Business Enterprise and Regulatory Reform: Department for Transport. «Investigation into the Scope for the Transport Sector to Switch to Electric Vehicles and Plug- in Hybrid Vehicles.» 2008.
2. Electric Power Research Institute, Inc. *Comparing the Benefits and Impacts of Hybrid Electric Vehicle Options*. Electric Power Research Institute, Inc, 2001.
3. Gaines, Linda, και Roy Cuenca. *Costs of Lithium-Ion Batteries for Vehicles*. Argonne: Argonne National Laboratory, 2000.
4. Howell, David. *Progress Report for Energy Storage Research and Development*. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, 2009.
5. International Energy Agency. *Electric and plug-in hybrid electric vehicles*. 2009.
6. International Energy Agency. *Transport Energy and CO<sub>2</sub>, Moving Toward Sustainability*. Paris: International Energy Agency, 2009.
7. Johnson, Kurt M. «A Plug-in Hybrid Electric Vehicle Loss Model to Compare Well-to-Wheel Energy Use from Multiple Sources.» Blacksburg, 2008.
8. Kalhammer, Fritz R., Bruce M. Kopf, David H. Swan, Vernon P. Roan, και Michael P. Walsh. *Status and Prospects for Zero Emissions Vehicle Technology*. State of California Air Resources Board, 2007.
9. Pelopidas, Siskos. «PRIMES-TREMOVE Transport Model.»
10. Plotkin, Steve, και Margaret Singh. *Multi-Path Transportation Futures Study: Vehicle Characterization and Scenario Analyses*. Chicago: Argonne National Laboratory, 2009.
11. Toyota Motors Corporation. «Toyota Hybrid System II.» Tokyo, 2003.
12. Xia, Chang-liang. *Permanent Magnet Brushless DC Motor Drives and Controls*. Science Press, 2012.

# Παράρτημα

## Συνοπτική περιγραφή του μοντέλου PRIMES-TREMOVE

### Εισαγωγή

Το μοντέλο PRIMES-TREMOVE προβλέπει μελλοντικές τιμές για την ζήτηση στις μεταφορές επιβατών και εμπορευμάτων βασισμένο σε επιλογές χρησιμότητας και τεχνολογίας των καταναλωτών PRIMES-TREMOVE καθορίζει την ζήτηση χρησιμοποιώντας δεδομένα βασισμένα στην υπάρχουσα δραστηριότητα, τα κόστη, τις εφαρμοζόμενες πολιτικές και καθορίζει την ζήτηση τόσο μέσο αλλά και τεχνολογία. Λόγω της λεπτομερούς δομής του το μοντέλο έχει την δυνατότητα να υπολογίζει την κατανάλωση καυσίμου αλλά και την εκπομπές ρύπων.

Με το PRIMES-TREMOVE μπορούν να μελετηθούν διάφορα ζητήματα όπως:

- Τιμολογιακές πολιτικές (φόροι, επιδοτήσεις)
- Διάδοση τεχνολογιών και υποδομών
- Ανάπτυξη νέων καυσίμων
- Πολιτικές για την κλιματική αλλαγή

### Δομή

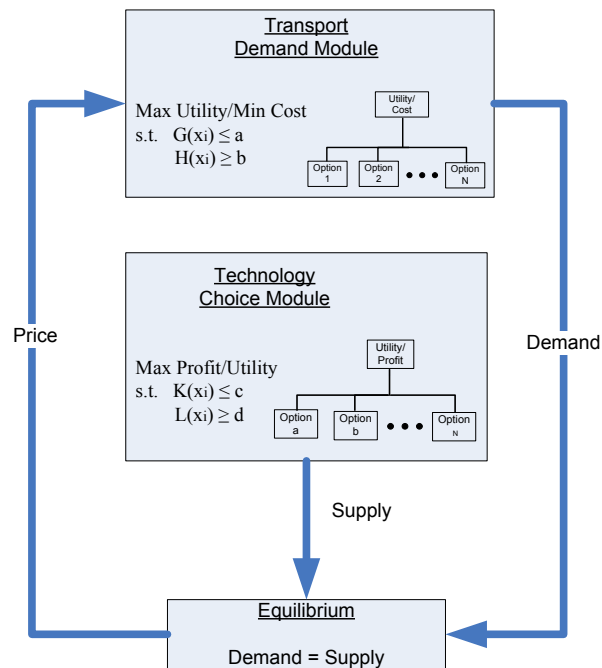
Το μοντέλο αποτελείται από δυο επιμέρους ενότητες, την ενότητα κατανομής της ζήτησης μεταφοράς και την ενότητα της επιλογής τεχνολογίας. Οι δυο ενότητες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και λύνονται παράλληλα

Η ενότητα της κατανομής ζήτησης προσομοιώνει τις αποφάσεις σχετικά με την κατανομή της μεταφορικής δραστηριότητας στους διάφορους κόμβους, αναγνωρίζοντας την υπηρεσία ανά μέσο, τόσο για τους ιδιώτες όσο και για τις εταιρίες. Για τους ιδιώτες η απόφαση αναπαρίσταται ως ένα ζήτημα μεγιστοποίησης χρησιμότητας με διάφορους περιορισμούς και δεδομένο προϋπολογισμό. Για τις εταιρείες η απόφαση λαμβάνεται με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του κόστους.

Το μοντέλο επιλογής τεχνολογίας καθορίζει την τεχνολογία του οχήματος που θα χρησιμοποιηθεί για την ικανοποίηση της ζήτησης ανά κόμβο. Επιπλέον βάση της δραστηριότητας ανά μέσο υπολογίζει την κατανάλωση καυσίμου και της εκπομπές ρύπων που εκλύονται. Η επιλογή τεχνολογίας είναι ένα διακριτό πρόβλημα επιλογής στο οποίο λαμβάνεται υπόψη το κόστος.

Και οι δυο ενότητες είναι δυναμικές ως προς τον χρόνο, προσομοιώνουν την απόσβεση κεφαλαίου με πιθανότητα πρόωρης αντικατάστασης και διατηρούν ...

Η προσομοίωση της αγοράς μεταφορών έχει δομηθεί ως ένα απλοποιημένο πρόβλημα ισορροπίας με περιορισμούς ισορροπίας μετασηματισμένο σε ένα μονό Μεικτό Πρόβλημα Συμπληρωματικότητας (Mixed Complementarity Problem, MCP). Η ενότητα της ζήτησης μεταφορών και η ενότητα επιλογής τεχνολογίας λύνονται παράλληλα σε ένα μαθηματικό μοντέλο, χρησιμοποιώντας MCP, τον αλγόριθμο Path στο Gams. Επειδή το μοντέλο είναι ένα πρόβλημα μονής συμπληρωματικότητας, μπορεί να διαχειριστεί γενικούς περιορισμούς που έχουν σχέση με περιβαλλοντικές πολιτικές, διττές μεταβλητές οι οποίες επηρεάζουν ενδογενώς την επιλογή των ιδιωτών και των εταιρειών όπως αναπαρίσταται στο μοντέλο.



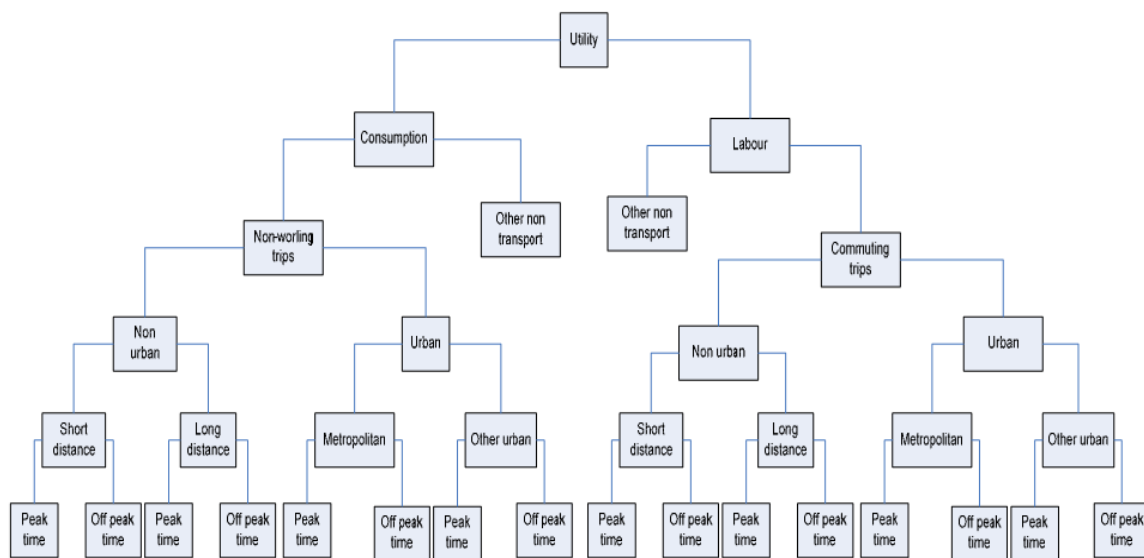
## Ενότητα ζήτησης μεταφορών

Η ενότητα της ζήτησης μεταφοράς προσομοιώνει την διαδικασία απόφασης του αντιπροσωπευτικού καταναλωτή σχετικά με την επιλογή της μεταφορικής δραστηριότητας. Υπάρχει διαφοροποίηση ανάμεσα στον ιδιώτη επιβάτη και την μεταφορά που σχετίζεται άμεσα με οικονομική δραστηριότητα, όπως μεταφορά εμπορικών αγαθών και επαγγελματικά ταξίδια. Η διαφοροποίηση πυροδοτείται από τις διαφορές κατά την διαδικασία της απόφασης ανάμεσα σε έναν μεμονωμένο επιβάτη που επιλέγει τον τρόπο μεταφοράς του και την απόφαση που παίρνεται μέσα στο πλαίσιο μιας εταιρίας με δεδομένο προϋπολογισμό για τις μεταφορικές δαπάνες.

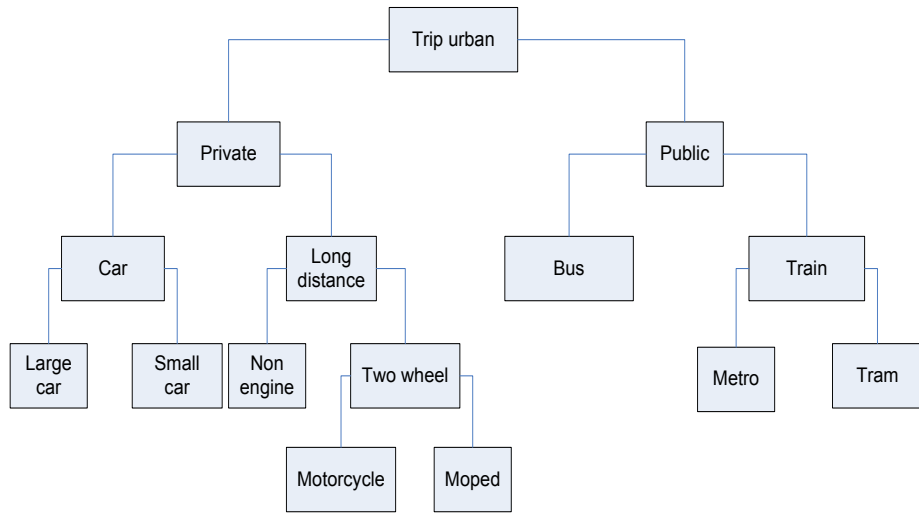
Στην μεταφορά επιβατών ο μεμονωμένος επιβάτης προσπαθεί να μεγιστοποιήσει μια γενική συνάρτηση χρησιμότητας με περιορισμό προϋπολογισμού, ο οποίος παριστάνει το συνολικό εισόδημα. Η κύρια έκφραση της ατομικής χρησιμότητας θεωρείται ότι προσδιορίζεται από το κόστος μεταφοράς που προκύπτει από το μοντέλο, το ατομικό εισόδημα και τα χαρακτηριστικά των δαπανών καθώς και παλαιότερα στοιχεία συμπεριφοράς. Η διαδικασία απόφασης των ιδιωτών επιβατών παρουσιάζεται ως μια φωλιασμένη συνάρτηση χρησιμότητας, με σταθερή ελαστικότητα, η οποία περιέχει και δαπάνες που δεν σχετίζονται με την μεταφορά.

Η φωλιασμένη συνάρτηση χρησιμότητας που αναπαριστά την ζήτηση δομείται στην μορφή ενός δέντρου χρησιμότητας. Το υψηλότερο επίπεδο του δέντρου είναι ένας κόμβος που εμπεριέχει την συνολική χρησιμότητα. Έπειτα ο κόμβος αυτός διαιρείται σε άλλους κόμβους οι οποίοι σχηματίζουν το επόμενο (χαμηλότερο) επίπεδο στο δέντρο χρησιμότητας. Όλοι οι κόμβοι του δέντρου χρησιμότητας αναπαριστούν μέρος της χρησιμότητας το οποίο προσδιορίζεται μέσω μιας συνάρτησης των κόμβων του χαμηλότερου επιπέδου. Το χαμηλότερο επίπεδο του δέντρου αποτελείται από τα βασικά στοιχεία χρησιμότητας τα οποία αναπαριστούν την δραστηριότητα στα διάφορα μέσα μεταφοράς.

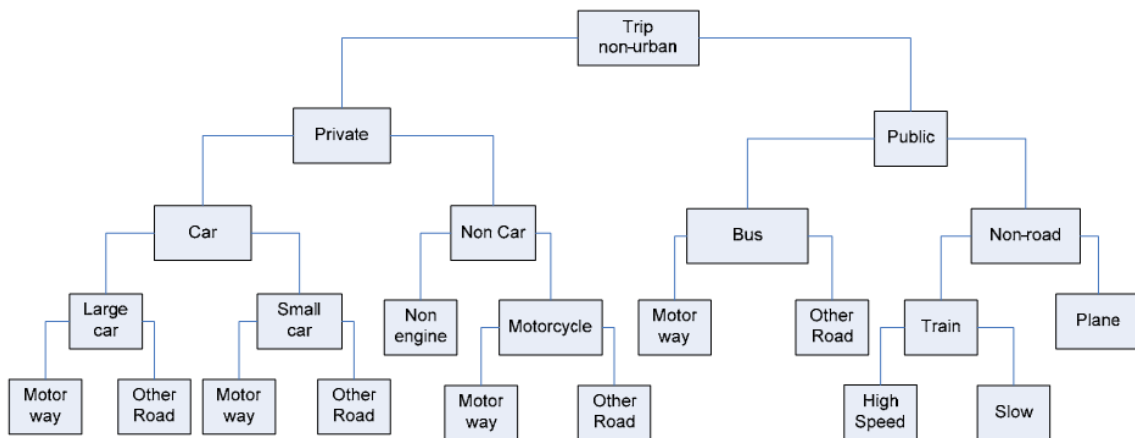
Αρχικά ο καταναλωτής αποφασίζει ανάμεσα στους διάφορους τρόπους μετακίνησης που προσφέρει το μοντέλο. Για παράδειγμα αν θα πραγματοποιήσει μια μετακίνηση ή όχι, την χρονική και γεωγραφική ταυτότητα της μετακίνησης κτλ. Κάθε κλάδος της αρχικής απόφασης υποδιαιρείται σε περισσότερους κλάδους σύμφωνα με τις επιλογές μεταφοράς. Δυο γενικές διαδικασίες απόφασης τέτοιου τύπου ορίζονται βάσει της γεωγραφικής ταυτότητας της αρχικής απόφασης, δημιουργώντας τα αστικά και τα μη αστικά δέντρα απόφασης. Το αποτέλεσμα της δευτεροβάθμιας διαδικασίας απόφασης είναι μια πιο λεπτομερής μοντελική ταυτοποίηση της απόφασης του καταναλωτή στο επίπεδο απόφασης της κατηγορίας του οχήματος που θα χρησιμοποιήσει. Τα παραπάνω γίνονται πιο κατανοητά με την παράθεση των δέντρων απόφασης.



Πρωτοβάθμιο δέντρο απόφασης για τον ιδιώτη επιβάτη



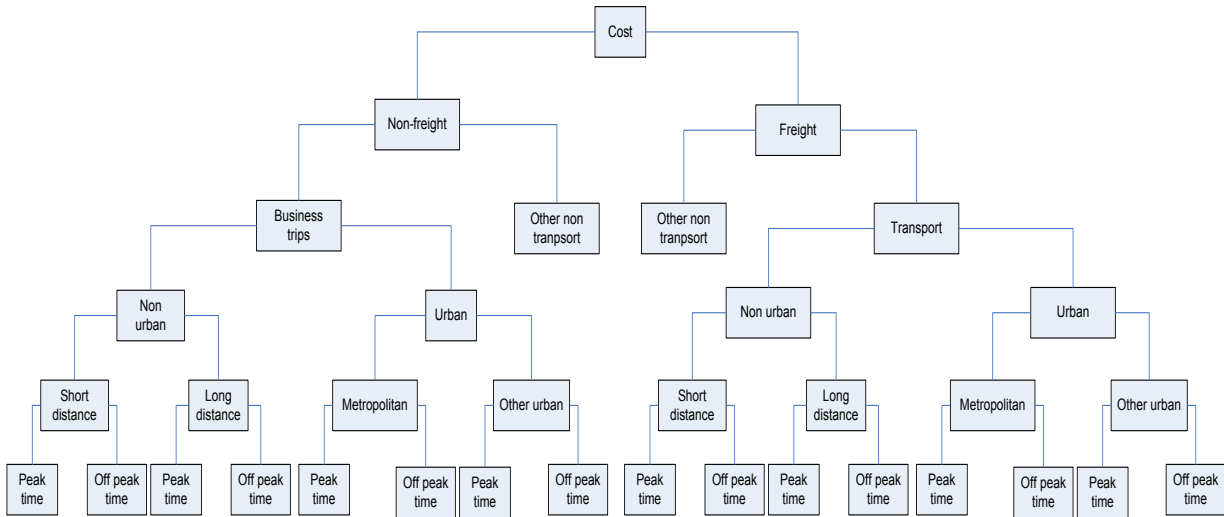
Δευτεροβάθμιο δέντρο απόφασης ιδιώτη επιβάτη για αστικές μεταφορές



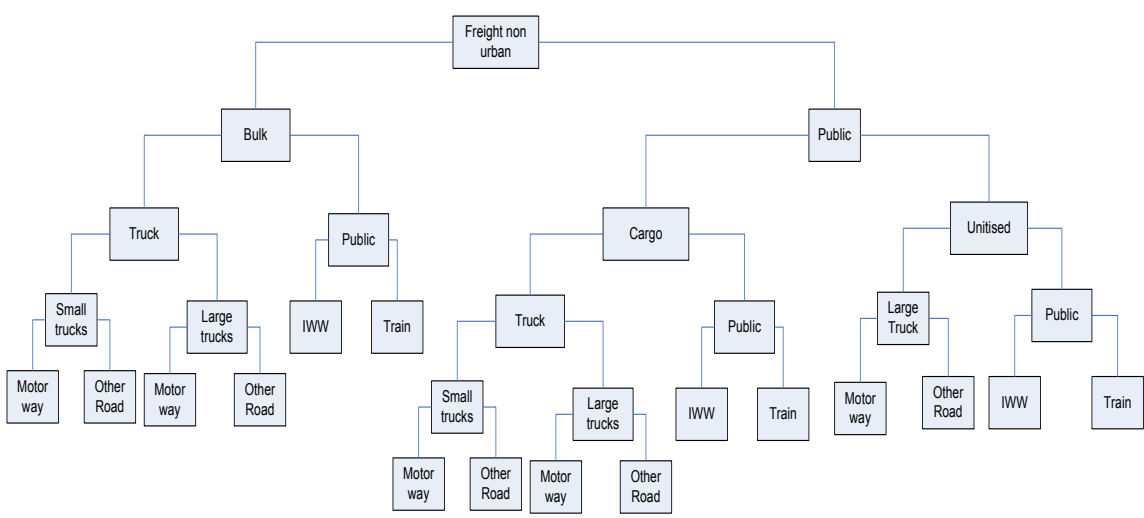
Δευτεροβάθμιο δέντρο απόφασης ιδιώτη επιβάτη για μη αστικές μεταφορές

Με όμοιο τρόπο η αντιπροσωπευτική εταιρία προσπαθεί να ικανοποιήσει τις μεταφορικές της ανάγκες, είτε είναι μεταφορές αγαθών είτε επαγγελματικά ταξίδια, με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Η όλη διαδικασία απόφασης των εταιριών μοντελοποιείται σαν μια φωλιασμένη συνάρτηση κόστους, σταθερής ελαστικότητας. Η δευτεροβάθμια διαδικασία απόφασης όσο αφορά τα επαγγελματικά ταξίδια είναι όμοια με την διαδικασία του ιδιώτη επιβάτη και δεν δείχνεται ξεχωριστά. Για τις μεταφορές αγαθών μια αντιπροσωπευτική δευτεροβάθμια διαδικασία απόφασης παρουσιάζεται και ενσωματώνει όλους τους σχετικούς τρόπους μεταφοράς φορτίων.

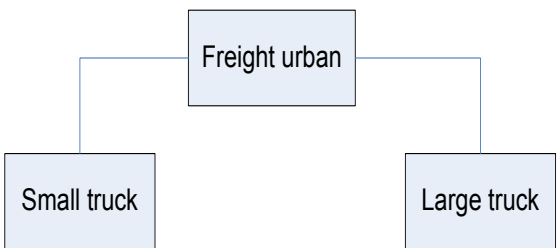




Πρωτοβάθμιο δέντρο απόφασης εταιριών



Δευτεροβάθμιο δέντρο απόφασης εταιρειών μη αστικών μεταφορών



## Γενικευμένο Αντίτιμο Μεταφοράς

Η απόφαση κάθε ιδιώτη ή εταιρίας εξαρτάται από χαρακτηριστικά προτίμησης, τα οποία περιγράφονται από τις ελαστικότητες των συναρτήσεων, καθώς και από ένα ενδογενώς ορισμένο ‘‘γενικευμένη αντίτιμο μεταφοράς’’ η οποία διαφέρει ανάμεσα στους διάφορους τρόπους μεταφοράς.

Στην περίπτωση της ιδιωτικής μεταφοράς το γενικευμένο αντίτιμο αντιστοιχεί στο σύνολο του κόστους που χρειάζεται για να καλυφθεί η ζητούμενη απόσταση στο επίπεδο του κάθε τρόπου μεταφοράς. Το κόστος αυτό εξαρτάται από το πραγματικό κόστος κάθε μεταφοράς καθώς και από το κόστος του χρόνου (χρόνος ταξιδιού και κυκλοφοριακή συμφόρηση). Το πραγματικό κόστος αποτελείται από:

- το κόστος κεφαλαίου του οχήματος, ετησιοποιημένο με ένα προεξοφλητικό επιτόκιο
- το σταθερό κόστος που περιλαμβάνει την ετήσια συντήρηση, ασφάλιση κλπ
- μεταβλητά κόστη, όπως το κόστος καυσίμου
- φόρους και επιδοτήσεις

Δεδομένου ότι το ενδογενώς ορισμένο απόθεμα οχημάτων ικανοποιεί την σχετική μοντελική ζήτηση μεταφοράς (πχ τα ιδιωτικά οχήματα ικανοποιούν όλους τους κόμβους, γεωγραφικά και χρονικά, των οδικών μεταφορών) βασιζόμενα στους σταθερούς δείκτες χρησιμοποίησης, τα προαναφερθέντα κόστη αναφέρονται στο αποτελεσματικό μείγμα τεχνολογίας οχημάτων που εξυπηρετεί κάθε κόμβο μεταφοράς, και ενδογενώς προσδιορίζονται από το μοντέλο.

Στην περίπτωση της μαζικής μεταφοράς (τόσο για τους ιδιώτες όσο και για τις εταιρίες) το γενικευμένο αντίτιμο προκύπτει από το άθροισμα του μέσου διαχειριστικού κόστους της εταιρίας που παρέχει την δημόσια μεταφορά πλέον του κόστους χρόνου. Η επιλογή του μέσου κόστους επικράτησε λόγω των οικονομιών κλίμακας που αναπτύσσονται στον τομέα των δημόσιων μεταφορών αλλά και των συχνών ελλειμματικών προϋπολογισμών. Το μέσο επιχειρησιακό κόστος περιλαμβάνει το κόστος απόκτησης και συντήρησης του στόλου των οχημάτων, κόστος καυσίμου, εργασία, φορολογία κλπ. Οι τιμές των εισιτηρίων καθορίζονται χρησιμοποιώντας το μοντέλο Ramsey-Boiteaux που ορίζει τέτοια τιμή εισιτηρίου ώστε να καλύπτεται το ολικό κόστος της υπηρεσίας.

Το μοντέλο επιλογής τεχνολογίας χρησιμοποιεί δεδομένα που αντικατοπτρίζουν τα τεχνοοικονομικά χαρακτηριστικά των ποικίλων τεχνολογιών οχημάτων και μέσων μεταφοράς. Το μείγμα τεχνολογίας είναι ενδογενές στο μοντέλο, επομένως το γενικευμένο αντίτιμο προκύπτει από την αλληλεπίδραση ανάμεσα στην ζήτηση και τις επιλογές τεχνολογίας.

Το κόστος χρόνου υπολογίζεται σαν το γινόμενο του χρόνου μεταφοράς (hr/km) με την αξία του χρόνου (€/km) και αναπαριστά του χρόνου μεταφοράς η οποία διαφέρει μεταξύ των ιδιωτών και των εταιρειών, και εξαρτάται από χρονικές και γεωγραφικές διαφορές ανάμεσα στους κόμβους μεταφοράς. Ο χρόνος μεταφοράς επηρεάζεται άμεσα από την κυκλοφοριακή

συμφόρηση και στην περίπτωση των οδικών μεταφορών μια συνάρτηση συμφόρησης χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του. Όσο για τις δημόσιες μεταφορές, το κόστος του χρόνου περιλαμβάνει και τον χρόνο αναμονής ο οποίος επίσης προσδιορίζεται από μια συνάρτηση συμφόρησης.

## Ενότητα Επιλογής Τεχνολογίας

Η ενότητα επιλογής τεχνολογίας ορίζει την δομή του στόλου των οχημάτων, που είναι ιδανική για να εξυπηρετήσει την ζήτηση όπως αυτή καθορίζεται από την ενότητα ζήτησης μεταφοράς. Το μείγμα τεχνολογίας και η λειτουργία του είναι καθορισμένα επομένως το μοντέλο υπολογίζει πραγματικά κόστη μεταφοράς, κατανάλωση ενέργειας και εκπομπές ρύπων.

Για τις οδικές μεταφορές ο πραγματικός στόλος οχημάτων χωρίζεται σε διάφορους τύπους και κατηγορίες και συμπεριλαμβάνει επιβατικά αυτοκίνητα, μηχανές και μοτοποδήλατα, αστικά και υπεραστικά λεωφορεία, φορτηγά ελαφρού και βαρέως τύπου. Διαφορετικές τεχνολογίες οχημάτων και γενιές ορίζονται ανάλογα με την κατανάλωση, τον είδος καυσίμου και τα πρότυπα εκπομπών.

Ο υπολογισμός των μεριδίων που καταλαμβάνει κάθε τεχνολογία εξαρτάται από το συνολικό κόστος μεταφοράς. Το μοντέλο περιλαμβάνει όλες τις τεχνολογίες που ταξινομούνται στον παρακάτω πίνακα και κυμαίνονται από συμβατικά οχήματα έως εναλλακτικά τα οποία κινούνται χρησιμοποιώντας πεπιεσμένο φυσικό αέριο, βιοκαύσιμα, υδρογόνο και ηλεκτρισμό. Τα μερίδια των νέων συμβατικών οχημάτων πρέπει να συμμορφώνονται με την ευρωπαϊκή νομοθεσία για την εκπομπή ρύπων, κάτι που σημαίνει ότι μια νέα εγγραφή οχήματος για το έτος 2011 δεν μπορεί να μην καλύπτει τις προδιαγραφές EURO V.

Οι τεχνολογίες οχημάτων στις οδικές μεταφορές που χρησιμοποιούν ηλεκτρισμό σαν καύσιμο έχουν ενσωματωθεί πλήρως στην ενότητα επιλογής τεχνολογίας. Ειδικότερα όσο αφορά τα επιβατικά αυτοκίνητα περιλαμβάνονται στο μοντέλο τα υβριδικά, τα plug-in υβριδικά, και τα πλήρων ηλεκτρικά οχήματα. Για τα φορτηγά βαρέως τύπου και τα λεωφορεία έχει προβλεφθεί η εισαγωγή ηλεκτρικών οχημάτων στο μέλλον. Υποθέτουμε ότι το κόστος των νέων τεχνολογιών εξελίσσεται δυναμικά, σύμφωνα με καμπύλες ωρίμανσης που εξαρτώνται από την συνολική παραγωγή. Τέτοιες καμπύλες χρησιμοποιούνται και για το κόστος των μπαταριών.

Η διαδικασία λήψης απόφασης επηρεάζεται από την εμβέλεια κάθε οχήματος και την διαθεσιμότητα υποδομών. Τα παραπάνω είναι ιδιαίτερα σημαντικά όταν νέα καύσιμα και νέες τεχνολογίες εισέρχονται στην αγορά. Συμβατικές τεχνολογίες δεν έχουν όρια στην εμβέλειά τους ενώ οχήματα που κινούνται με υδρογόνο ή μπαταρίες έχουν. Αυτό το χαρακτηριστικό έχει ληφθεί ιδιαίτερα υπόψη κατά την μοντελική προσέγγιση για την επιλογή των νέων τεχνολογιών. Οι καταναλωτές κατά την λήψη της απόφασης προφανώς και θα προτιμήσουν κάποιο όχημα το οποίο δεν θέτει περιορισμούς εμβέλειας. Επιπλέον τα οχήματα με περιορισμένη εμβέλεια ενδογενώς τιμωρούνται λόγω της μείωσης χρησιμότητας και της αντίστοιχης αύξησης του κόστους.

Η επιλογή νέων οχημάτων βασίζεται στην θεωρία της διακριτής επιλογής και μοντελοποιήθηκε μέσω δέντρων απόφασης. Για κάθε κατηγορία (π.χ. μικρά μεσαία και μεγάλα αυτοκίνητα, φορτηγά ελαφρού και βαρέως τύπου, λεωφορεία, δίκυκλες μηχανές) έχει

δημιουργηθεί ένα δέντρο απόφασης. Για καλύτερη κατανόηση παρατίθεται το δέντρο για τα μικρά αυτοκίνητα.

Στο παραπάνω δέντρο, η συμπεριφορά του καταναλωτή προσομοιάζεται σαν η επιλογή ανάμεσα στα εναλλακτικά ενδεχόμενα γίνεται διαδοχικά. Επί του προκειμένου στο δέντρο επιλογής των μικρών αυτοκινήτων θεωρείται ότι ο καταναλωτής πρώτα επιλέγει το καύσιμο του οχήματος. Αφού επιλέξει το καύσιμο, τότε η επόμενη επιλογή έχει να κάνει με το αν το όχημα θα είναι συμβατικό, υβριδικό ή plug-in υβριδικό. Επομένως η τελική απόφαση δεσμεύεται από την επιλογή του αρχικού κόμβου. Η απόφαση του καταναλωτή σε κάθε επίπεδο βασίζεται στην λογική της ελαχιστοποίησης του συνολικού κόστους μεταφοράς.

Γενικά, η επιλογή των οχημάτων νέας τεχνολογίας αναπαρίσταται χρησιμοποιώντας την παρακάτω τροποποίηση της συνάρτησης Weibull:

$$sh_{j,t} = \frac{w_{j,t} * C_{j,t}^{-\gamma}}{\sum_j w_{j,t} * C_{j,t}^{-\gamma}}$$

όπου το  $sh_{j,t}$  συμβολίζει το μερίδιο κάθε τεχνολογίας για ένα δεδομένο έτος (πχ μικρά αυτοκίνητα, βενζινοκίνητα, συμβατικά EURO V ή EURO IV), το  $w$  είναι ένας ‘‘παράγοντας ωρίμανσης’’ που χρησιμοποιείται σε κάθε τεχνολογίας για να εκφράσει την διαθεσιμότητα της και την προτίμηση των καταναλωτών, το  $\gamma$  συμβολίζει την ελαστικότητα υποκατάστασης ανάμεσα στα διάφορα οχήματα και το  $C$  είναι το ετησιοποιημένο κόστος μεταφοράς που αναλογεί σε κάθε τεχνολογία.

Αφού κατανεμηθούν τα μερίδια κάθε τεχνολογίας, χρειάζεται να υπολογισθούν τα αντίστοιχα μερίδια για τους τύπους των οχημάτων (ένα επίπεδο ψηλότερα στο δέντρο επιλογής). Τα μερίδια υπολογίζονται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

$$sh_{k,t} = \frac{w_{k,t} * IV_{k,t}^{-\gamma}}{\sum_k w_{k,t} * IV_{k,t}^{-\gamma}}$$

όπου το  $sh_{j,t}$  συμβολίζει το μερίδιο ενός τύπου οχήματος για ένα δεδομένο έτος (πχ μικρά βενζινοκίνητα οχήματα), το  $w$  είναι ο ‘‘παράγοντας ωρίμανσης’’, το  $\gamma$  συμβολίζει την ελαστικότητα υποκατάστασης ανάμεσα στους διάφορους τύπους και το  $IV$  υπολογίζεται σύμφωνα με την χαρτογράφηση ανάμεσα στο μερίδια κάθε τύπου οχήματος και των τεχνολογιών.

Ο υπολογισμός του  $IV$  γίνεται ως εξής:

$$IV_{k,t} = \sum_j C_{j,t} * sh_{j,t}$$

Ένα μοντέλο για την πιθανότητα πρόωρης απόσυρσης του οχήματος δημιουργήθηκε για την προσομοίωση της επιβίωσης των οχημάτων. Το μοντέλο λαμβάνει υπόψη την δομή του στόλου των οχημάτων, και τους ενδογενώς ορισμένους δείκτες απόσυρσης που βασίζονται σε υπολογισμένες ανά χώρα κατανομές Weibull. Η πιθανότητα ενός οχήματος τύπου  $k$  και γενιάς  $v$  (χρονιά πρώτης εγγραφής) να βρίσκεται σε λειτουργία τον χρόνο  $t > v$  (ορισμένο σας

πιθανότητα επιβίωσης  $SP_{k,t}$  δίνεται από την παρακάτω τροποποιημένη συνάρτηση αξιοπιστίας Weibull, δυο μεταβλητών:

$$SP_{k,t}(t-v) = \exp - \left[ \left( \frac{(t-v) + F_k(t-v)}{T_k} \right)^{b_k} \right]$$

with  $SP_{k,v} \equiv 1$

όπου το  $t-v$  δηλώνει την ηλικία του οχήματος,  $F_k(v-t)$  είναι η κλίση αποτυχίας για οχήματα τύπου  $k$ , και  $T_k$  είναι ο χρόνος ζωής ενός οχήματος τύπου  $k$ . Οι παράμετροι  $F_k(v-t)$  και  $T_k$  εκτιμώνται βάσει των διαθέσιμων δεδομένων για τον στόλο των οχημάτων.

Η επιλογή για το αν θα ικανοποιηθεί η δραστηριότητα βάσει υπαρχόντων ή νέων οχημάτων δεν είναι εξωγενώς προκαθορισμένη, αλλά ενδογενώς και εξαρτάται από το σχετικό κόστος και την χρησιμότητα.