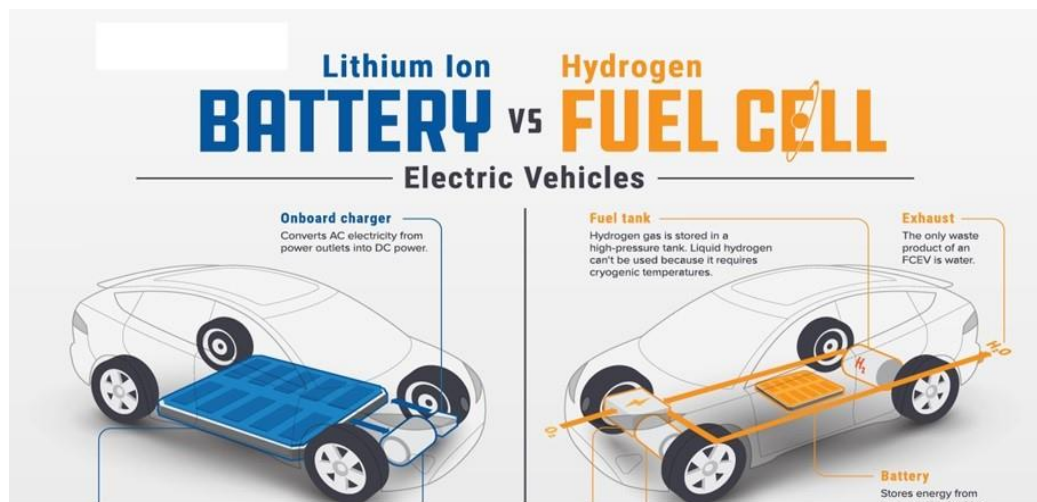


Διπλωματική Εργασία



Υβριδικά οχήματα με συσσωρευτές ή fuel cells και
σχεδίαση μοντέλου προσομοίωσής τους στο
Matlab/Simulink

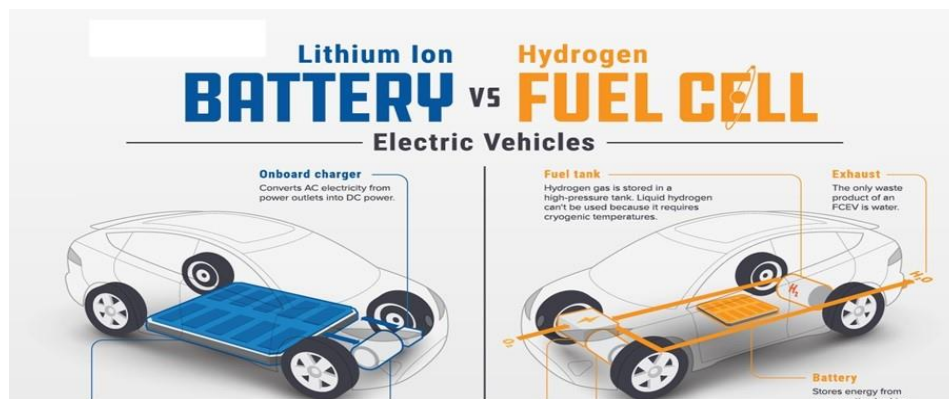
Φοιτητής: Μικέλ Λέσι
ΑΜ:46992

Επιβλέπων Καθηγητής
Βόκας Γεώργιος



UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING

Diploma Thesis



Hybrid vehicles with batteries or fuel cells and design of their simulation model in Matlab / Simulink

Student: Mikel Lleshi
Registration Number:46992

Supervisor
Vokas Georgios

ATHENS-EGALEO, (JULY) (2023)

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Βόκας Γεώργιος	Καμινάρης Σταύρος	Πυρομάλης Δημήτρης
Καθηγητής	Καθηγητής	Επ. Καθηγητής
Τμήμα Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής	Τμήμα Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής	Τμήμα Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Μικέλ Λέσι,
ΙΟΥΛΙΟΣ, 2023**

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 τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/η κάτωθι υπογεγραμμένος/η Μικέλ Λέσι του Ρετζεπ, με αριθμό μητρώου 46992 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου. »

Ο Δηλών

Μικέλ Λέσι
(Υπογραφή φοιτητή)



Αφιερώνεται στην οικογένεια μου.

Ευχαριστίες

Είμαι βαθύτατα ευγνώμων για τον κ. Γεώργιο Βόκα, Καθηγητή της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΠΑΔΑ, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου το θέμα της διπλωματικής εργασίας. Ήταν πάντα εκεί να με καθοδηγήσει και να μου παράσχει ανεκτίμητες συμβουλές, και χάρη σε αυτόν, κατέστη δυνατό να πετύχω τον καλύτερο δυνατό στόχο.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής μου, κ. Νικόλαο Κορακιανίτη, που πάντα ήταν εκεί για να απαντήσει στις απορίες μου και να με καθοδηγήσει στη διαδικασία της έρευνας και της ανάπτυξης της διπλωματικής εργασίας μου.

Τέλος, θέλω να εκφράσω τις ευγνωμοσύνες μου προς όλους τους ανθρώπους και την οικογένειά μου που με στήριξαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Με την αμέριστη συμπαράστασή τους, καθένας με τον τρόπο του, κατέστη δυνατή η ολοκλήρωση αυτής της σημαντικής φάσης της ζωής μου.

Ανυπομονώ να εξελίξω τις γνώσεις μου και να συνεχίσω να προσφέρω στον κόσμο μέσω της εργασίας μου.

Περίληψη

Είναι εμφανές ότι τα τελευταία χρόνια υπάρχει η ανάγκη για μείωση της ανθρώπινης επίδρασης στο περιβάλλον. Σε κάθε βιομηχανικό τομέα γίνονται προσπάθειες για τον έλεγχο των ρύπων, προς μια κατεύθυνση που συνδυάζει την περιβαλλοντική και οικονομική βιωσιμότητα. Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής έχουν ήδη αρχίσει να εκδηλώνονται σε πολλές περιοχές του πλανήτη, με τις πόλεις κοντά στη θάλασσα και τις παράκτιες περιοχές να αντιμετωπίζουν τις περισσότερες επιπτώσεις αυτής της αλλαγής.

Ο στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι να δείξουμε τι δυνατότητες έχει ένα πλήρως ηλεκτροκίνητο όχημα του οποίου το αποτέλεσμα και ο στόχος είναι να μειωθεί στο ελάχιστο η χρήση των καυσίμων και ταυτόχρονα να μειώσει της εκπομπές ρύπων προς το περιβάλλον, με αποτέλεσμα να βελτιωθεί η κατάσταση του περιβάλλοντος. Επίσης Στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιήθηκε μια έρευνα σχετικά με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω κυψελών καυσίμου. Αυτές οι λύσεις για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχουν τη δυνατότητα να επιφέρουν μια εξαιρετική μείωση έως και 100% των ρυπογόνων εκπομπών στην ατμόσφαιρα.

Στα επόμενα τμήματα εξετάζεται η ιστορική αναδρομή των BEV και των FCEV καθώς και η εξέλιξη της ηλεκτροκίνησης γενικότερα, με έμφαση στη σύγκριση μεταξύ των παραδοσιακών συστημάτων κίνησης και των ηλεκτροκίνητων οχημάτων. Ακολούθως, αναλύονται οι διάφορες μορφές τροφοδότησης ηλεκτροκίνητων οχημάτων, και στη συνέχεια παρουσιάζεται η ανάλυση αποθήκευσης ενέργειας και των υβριδικών μοντέλων με κυψέλες καυσίμου (FUEL CELLS).

Τέλος, πραγματοποιείται η ανάπτυξη ενός ηλεκτρικού οχήματος με μπαταρίες (BEV) κι ενός υβριδικού συστήματος κίνησης με κυψέλες καυσίμου (FCEV), το οποίο συνδυάζει κυψέλες καυσίμου και μπαταρίες, για την κίνηση του ηλεκτροκίνητου οχήματος. Αυτό το σύστημα αναλαμβάνει να τροφοδοτεί τους ηλεκτροκινητήρες, καθώς και να παρέχει ενέργεια για τις άλλες λειτουργίες του οχήματος. Για την περιγραφή και τη προσομοίωση αυτού του συστήματος, χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον Simulink του προγράμματος Matlab. Επιπλέον, παρουσιάζονται συγκεκριμένα παραδείγματα εφαρμογής αυτών των τεχνολογιών, υποβάλλοντας τα μοντέλα στις δοκιμασίες που επιβάλλουν τα Διεθνή κι Ευρωπαϊκά πρότυπα δοκιμών (Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure, WLTP – Class I, II και III) χρησιμοποιώντας τεχνικά χαρακτηριστικά εμπορικά διαθέσιμων οχημάτων υπό διαφορετικά φορτία επιβατών και αποσκευών.

Λέξεις – κλειδιά

Εκπομπές ρύπων, ηλεκτροκίνηση, αποθήκευση ενέργειας, ηλεκτρικά οχήματα BEV, υβριδικά οχήματα FCEV, συσσωρευτές, WLTP, κυψέλες καυσίμου.

Abstract

It is evident that in recent years there is a need to reduce human impact on the environment. Efforts are being made in every industrial sector to control pollution, aiming towards a direction that combines environmental and economic sustainability. The consequences of climate change have already begun to manifest in many regions of the planet, with cities near the sea and coastal areas facing the most significant impacts of this change.

The objective of the thesis is to demonstrate the capabilities of a fully electric vehicle, with the aim of minimizing fuel usage and reducing pollutant emissions to the environment, thereby improving the environmental conditions. Additionally, the thesis conducted research on the production of electrical energy through fuel cells. These solutions for electricity generation have the potential to bring about a significant reduction of up to 100% in pollutant emissions into the atmosphere.

In the following sections, the historical background of Battery Electric Vehicles (BEV) and Fuel Cell Electric Vehicles (FCEV) is examined, focusing on the evolution of electrification, and comparing it to traditional propulsion systems. Subsequently, the various forms of power supply for electric vehicles are analyzed, followed by the presentation of energy storage analysis and hybrid models incorporating Fuel Cells.

Finally, the development of a battery electric vehicle (BEV) and a hybrid propulsion system with fuel cells (FCEV) is being pursued, which combines fuel cells and batteries for the propulsion of the electric vehicle. This system is responsible for supplying power to the electric motors and providing energy for other vehicle functions. The Simulink environment of Matlab was used for the description and modeling of this system. In addition, specific application examples of these technologies are presented, subjecting the models to tests mandated by international and European standards (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure, WLTP - Class I, II, and III) using technical specifications of commercially available vehicles under different passenger and cargo loads.

Keywords

Emissions, electrification, energy storage, Battery Electric Vehicles (BEV), Fuel Cell Electric Vehicles (FCEV), capacitors, Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure (WLTP), Fuel Cells.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων.....	12
Κατάλογος Σχημάτων	12
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	16
Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας	16
Σκοπός και στόχοι	16
Καινοτομία.....	16
Δομή 17	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΑ.....	18
1.1 Κλιματική αλλαγή.....	18
1.2 Ιστορία ηλεκτρικών αυτοκινήτων.....	20
1.3 Ηλεκτροκίνητα και υβριδικά οχήματα.....	21
1.3.1 Κατηγοριοποίηση ηλεκτροκίνητων οχημάτων	21
1.3.2 Plug-in Electric Vehicles (PEV)	23
1.3.2.1 Battery Electric Vehicles (BEV)	23
1.3.2.2 Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)	24
1.3.3 Hybrid Electric Vehicle (HEV)	25
1.3.3.1 Micro and mild HEV	25
1.3.3.2 Full και dual-mode HEV.....	27
1.4 Τρόποι φόρτισης EV's.....	28
1.4.1 Μέθοδος συμβατικής φόρτισης (μη ελεγχόμενη φόρτιση).....	29
1.4.2 Ελεγχόμενη φόρτιση.....	29
1.4.3 Έξυπνη φόρτιση	31
1.5 Δίκτυο Η.Ε και φόρτιση	32
1.6 Διείδυση στην αγορά	34
1.6.1 Μοντέλα εταιρειών	35
1.6.1.1 Toyota Prius.....	35
1.6.1.2 Honda Insight	36
1.6.1.3 Ford Escape	37
1.6.1.4 Mercedes-Benz Citaro G Bus.....	38
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ.....	40
2.1 Αποθήκευση ενέργειας	40
2.1.1 Χαρακτηριστικά των συσσωρευτών	41
2.1.2 Τύποι Μπαταριών.....	42
2.2 Συσσωρευτές Αυτοκινήτων	44
2.2.1 Συσσωρευτές Μολύβδου-οξέος	44
2.2.2 Συσσωρευτές Νικελίου	45
2.2.3 Συσσωρευτές Νατρίου.....	46
2.2.4 Συσσωρευτές αέρος – μετάλλου	47
2.2.5 Συσσωρευτές Λιθίου.....	47
2.2.6 Λίθιο.....	48
2.2.6.1 Γενικά λίθιο	48
2.2.6.2 Πηγή	48
2.2.6.3 Τιμή	49
2.2.6.4 Εξι κύριοι τύποι μπαταριών λιθίου-ιόντων.	50
2.2.6.5 Οι τύποι συσκευασίας που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά οχήματα είναι οι εξής:	53
2.2.7 Υπολογισμός μπαταριών Ben	56
Σχεδιασμός EV – υπολογισμός μπαταρίας.....	56

Αρχιτεκτονικές συστοιχιών μπαταριών	59
Υπολογισμός μπαταρίας.....	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : Κυψέλη Καυσίμου (Fuel Cell)	69
3.1 Ιστορική αναδρομή	69
3.2 Ορισμός Κυψέλης Καυσίμου.....	70
3.3 Αρχή Λειτουργίας.....	71
3.4 Τύποι κυψελών καυσίμου	72
3.4.1 Κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου	78
3.4.2 Κυψέλες φωσφορικού οξέος.....	78
3.4.3 Κυψέλες άμεσης μεθανόλης	79
3.5 Αυτοκίνητα Κυψέλης Καυσίμου	79
3.6 Εμπορική διείδυση επιβατικών αυτοκινήτων FCEVs	79
3.6.1 Παρούσα κατάσταση	80
4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : Υλοποίηση Προσομοίωσης.....	81
4.1 Παγκόσμια πρότυπα (WLTP 1,2,3).....	81
4.1.1 Περίγραμμα κύκλου δοκιμής WLTP	81
4.1.2 WLTP Class I	83
4.1.3 WLTP Class II	84
4.1.4 WLTP Class III	85
4.2 Προσομοίωση Υβριδικού Οχήματος με Fuel Cell, Ηλεκτροκινητήρα και Μπαταρίες.....	86
4.2.1 Περιγραφή μοντέλου.....	86
4.2.2 Προσομοίωση μοντέλου.....	87
4.3 Προσομοίωση Οχήματος BEV Ηλεκτροκινητήρα και Μπαταρίες.....	91
4.3.1 Περιγραφή μοντέλου.....	91
4.3.2 Προσομοίωση μοντέλου.....	92
4.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης ΓΙΑ BEV MERCEDES EQE 350	94
4.4.1 WLTP Class I	94
4.4.1.1 Πρώτη περίπτωση: για οδηγό και αποσκευές για το όχημα Mercedes EQE 350.....	94
4.4.1.2 Δεύτερη περίπτωση για οδηγό με 4 συνεπιβάτες και αποσκευές για το όχημα Mercedes EQE 350 98	
4.4.2 WLTP Class II	101
4.4.2.1 Πρώτη περίπτωση για οδηγό και αποσκευές για το όχημα Mercedes EQE 350.....	101
4.4.2.2 Δεύτερη περίπτωση για οδηγό με 4 συνεπιβάτες και αποσκευές για το όχημα Mercedes EQE 350 103	
4.4.3 WLTP Class III	106
4.4.3.1 Πρώτη περίπτωση για οδηγό με αποσκευές για το όχημα Mercedes EQE 350.....	106
4.4.3.2 Δεύτερη περίπτωση για οδηγό με 4 συνεπιβάτες και αποσκευές για το όχημα Mercedes EQE 350 108	
4.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης ΓΙΑ Fuel Cell MERCEDES GLC F-CELL.....	110
4.5.1 WLTP Class I	112
4.5.1.1 Πρώτη περίπτωση για οδηγό με αποσκευές	112
4.5.1.2 Δεύτερη περίπτωση για οδηγό με 4 συνεπιβάτες και αποσκευές	115
4.5.2 WLTP Class II	117
4.5.2.1 Πρώτη περίπτωση για οδηγό με αποσκευές	117
4.5.2.2 Δεύτερη περίπτωση για οδηγό με 4 συνεπιβάτες και αποσκευές	119
4.5.3 WLTP Class III	121
4.5.3.1 Πρώτη περίπτωση για οδηγό με αποσκευές	121
4.5.3.2 Δεύτερη περίπτωση για οδηγό με 4 συνεπιβάτες και αποσκευές	124
4.5.4 Συμπεράσματα προσομοιώσεων	126
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ	127

5.1.	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	127
5.1.1.	Συγκριτική αποτύπωση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων και δοκιμών.....	127
5.1.2.	Παραδοχές προσομοιώσεων και δοκιμών	128
5.1.3.	Συγκριτική αποτύπωση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων και δοκιμών με αντίστοιχα διεθνή δημοσιευμένα ερευνητικά αποτελέσματα	128
5.1.4.	Συμπεράσματα OUR MODEL – PAPER MODEL	132
5.2.	Συμπεράσματα.....	134
	Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές	135
6	Βιβλιογραφία	135

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Σύγκριση διαφόρων τύπων Ηλεκτρικών Οχημάτων.....	22
Πίνακας 2: Απόδοσης οχημάτων BEV-FCEV (Kane)	23
Πίνακας 3: Αναλύοντας την εξέλιξη της τιμής του Ανθρακικού Λιθίου τα τελευταία χρόνια.	49
Πίνακας 4 :Διάγραμμα ζήτησης ανάλυσης του λιθίου το χρονικό διάστημα 2013-2025 (Brian, 2016)	50
Πίνακας 5: Εξι κύριοι τύποι μπαταριών λιθίου-ιόντων (Agatie, 2022)[35]	51
Πίνακας 6: Σύστημα cells ID.3	54
Πίνακας 7: Σύστημα cells ID.4	55
Πίνακας 8: Πρισματικές κυψέλες μπαταριών λιθίου.	55
Πίνακας 9: Πρισματικές μπαταρίες.	56
Πίνακας 10:Βάρος οχήματος – επιβατών - μάζας μπαταρίας. (PAPER)	130
Πίνακας 11: Αποτελέσματα ηλεκτρικών οχημάτων. (PAPER).....	130
Πίνακας 12: Κόστος ανάλυσης μπαταρίας και κυψέλης καυσίμου σε ευρώ. (PAPER)	130
Πίνακας 13: Κόστος ανάλυσης μπαταρίας και κυψέλης καυσίμου σε ευρώ για κάθε επιβάτη. (PAPER)	130
Πίνακας 14:Αποτελέσματα προσομοίωσης για 100 km - 150kg-500kg για το μοντέλο urban 5s.(PAPER)..	131

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Σύνδεση σε σειρά του PHEV	24
Σχήμα 1.2: Παράλληλη σύνδεση του PHEV.	25
Σχήμα 1.3: Micro HEV αναπαράσταση: (α) 12 V, (β) 48 V [5].....	26
Σχήμα 1.4: Αναπαράσταση mild HEV: (α) με έναν ηλεκτρικό κινητήρα, (β) με 2 ηλεκτρικούς κινητήρες	27
Σχήμα 1.5: Είδη φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.	28
Σχήμα 1.6: Μέθοδος ελεγχόμενης φόρτισης/εκφόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.	29
Σχήμα 1.7: Διάγραμμα πρόσθετου κόστους οχήματος συναρτήσει της εκατοστιαίας μείωσης εκπομπών CO ₂	35
Σχήμα 1.8: Toyota Prius.....	36
Σχήμα 1.9: Honda Insight	37
Σχήμα 1.10: Ford Escape	38
Σχήμα 1.11: Mercedes-Benz Citaro G Bus.....	38

Σχήμα 2.1: Μέρη μιας μπαταρίας.....	40
Σχήμα 2.2: Μπαταρία οξέος μολύβδου.....	45
Σχήμα 2.3: Μπαταρία νατρίου χλωρίου.....	46
Σχήμα 2.4: Μπαταρία ιόντων λιθίου.....	48
Σχήμα 3.1: Ο Βρετανός μηχανικός Francis Bacon με το κελί καυσίμου που χρησιμοποιήθηκε από την Nasa.	70
Σχήμα 3.2: Αρχή λειτουργίας μιας τυπικής κυψέλης καυσίμου.....	71
Σχήμα 3.3: Toyota Mirai.....	80
Σχήμα 4.1: WLTP Class 1 δοκιμή.....	83
Σχήμα 4.2: WLTP Class II δοκιμή.....	84
Σχήμα 4.3: WLTP Class III δοκιμή.....	85
Σχήμα 4.4: Μοντέλο συστήματος Fuel Cell.....	86
Σχήμα 4.5: Ελεγκτής Fuel Cell.....	87
Σχήμα 4.6: Αρχιτεκτονική μηχανής Fuel Cell.....	88
Σχήμα 4.7: Ιδιότητες οχήματος Fuel Cell.....	89
Σχήμα 4.8: Σύστημα πέδησης Fuel Cell.....	89
Σχήμα 4.9: Σύστημα οδήγησης Fuel Cell.....	90
Σχήμα 4.10: Εσωτερικό συστήματος οδήγησης Fuel Cell.....	90
Σχήμα 4.12: Μοντέλο συστήματος.....	91
Σχήμα 4.13: Περιβάλλον οδήγησης BEV.....	92
Σχήμα 4.14: Υψηλή τάση συστήματος μπαταρίας BEV.....	92
Σχήμα 4.15: Ηλεκτρικός κινητήρας οδήγησης BEV.....	93
Σχήμα 4.16: Διαμήκες όχημα BEV.....	93
Σχήμα 4.17: Σύστημα αξιολόγησης BEV.....	94
Σχήμα 4.18: Τεχνικά χαρακτηριστικά Mercedes EQE350.....	95
Σχήμα 4.19: Διάγραμμα ταχύτητας χρόνου.....	96
Σχήμα 4.20: Παράμετροι περίπτωσης.....	96
Σχήμα 4.21: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ-ΡΟΠΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ.....	97
Σχήμα 4.22: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ-ΡΕΥΜΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ-ΦΟΡΤΙΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ.....	98

Σχήμα 4.23: Παράμετροι περίπτωσης	99
Σχήμα 4.24: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ-ΡΟΠΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	99
Σχήμα 4.25: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ-ΡΕΥΜΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ-ΦΟΡΤΙΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ	100
Σχήμα 4.26: Διάγραμμα ταχύτητας χρόνου για το WLTP Class II	101
Σχήμα 4.27: Παράμετροι.....	101
Σχήμα 4.28:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ-ΡΕΥΜΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ-ΦΟΡΤΙΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ	102
Σχήμα 4.29: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ-ΡΟΠΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	103
Σχήμα 4.30: Παράμετροι.....	103
Σχήμα 4.31: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ-ΡΕΥΜΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ-ΦΟΡΤΙΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ	104
Σχήμα 4.32: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ-ΡΟΠΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	105
Σχήμα 4.33: Διάγραμμα ταχύτητας χρόνου για το πρότυπο WLTP Class III	106
Σχήμα 4.34: Παράμετροι.....	106
Σχήμα 4.35: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ-ΡΕΥΜΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ-ΦΟΡΤΙΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ	107
Σχήμα 4.36: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ-ΡΟΠΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	108
Σχήμα 4.37: Παράμετροι.....	108
Σχήμα 4.38: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ-ΡΕΥΜΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ-ΦΟΡΤΙΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ	109
Σχήμα 4.39:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ-ΡΟΠΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	110
Σχήμα 4.40: Τεχνικά χαρακτηριστικά Mercedes GLC F-Cell.....	111
Σχήμα 4.41: Διάγραμμα ταχύτητας χρόνου για το πρότυπο WLTP Class I	112
Σχήμα 4.42: Παράμετροι.....	112
Σχήμα 4.43: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ- ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΟΥ ΠΕΤΥΧΑΜΕ.	113
Σχήμα 4.43a:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ-ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ-ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.	113
Σχήμα 4.43b:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΕΣΕΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ-ΟΞΥΓΩΝΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΩΝ.	114
Σχήμα 4.44: Διάγραμμα MPGe (Miles per gallon gasoline equivalent)& Εύρος κατανάλωσης καυσίμου (Λίτρα/100 km) με συνεπιβάτες και αποσκευές.	114
Σχήμα 4.45: Παράμετροι.....	115
Σχήμα 4.46: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ- ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΟΥ ΠΕΤΥΧΑΜΕ.	115
Σχήμα 4.46a: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΕΣΕΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ-ΟΞΥΓΩΝΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΩΝ.....	116

Σχήμα 4.46b: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ-ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ-ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.	116
Σχήμα 4.47: Διάγραμμα MPGe (Miles per gallon gasoline equivalent)& Εύρος κατανάλωσης καυσίμου (Λίτρα/100 km) με 4 συνεπιβάτες και αποσκευές.	116
Σχήμα 4.48: Διάγραμμα ταχύτητας χρόνου για το πρότυπο WLTP Class II	117
Σχήμα 4.49: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ- ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΟΥ ΠΕΤΥΧΑΜΕ.	117
Σχήμα 4.49a: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΕΣΕΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ-ΟΞΥΓΩΝΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΩΝ.....	118
Σχήμα 4.49b: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ-ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ-ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.	118
Σχήμα 4.50: Διάγραμμα MPGe (Miles per gallon gasoline equivalent)& Εύρος κατανάλωσης καυσίμου (Λίτρα/100 km) με συνεπιβάτες και αποσκευές.	119
Σχήμα 4.51: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ- ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΟΥ ΠΕΤΥΧΑΜΕ.	119
Σχήμα 4.51a: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ-ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ-ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.	120
Σχήμα 4.51b: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΕΣΕΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ-ΟΞΥΓΩΝΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΩΝ.	120
Σχήμα 4.52: Διάγραμμα MPGe (Miles per gallon gasoline equivalent)& Εύρος κατανάλωσης καυσίμου (Λίτρα/100 km) με 4 συνεπιβάτες και αποσκευές.	121
Σχήμα 4.53: Διάγραμμα ταχύτητας με χρόνο για το WLTP Class 3.....	121
Σχήμα 4.54: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ- ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΟΥ ΠΕΤΥΧΑΜΕ.	122
Σχήμα 4.54a: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ-ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ-ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.	122
Σχήμα 4.54b: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΕΣΕΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ-ΟΞΥΓΩΝΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΩΝ.	123
Σχήμα 4.55: Διάγραμμα MPGe (Miles per gallon gasoline equivalent)& Εύρος κατανάλωσης καυσίμου (Λίτρα/100 km) με συνεπιβάτες και αποσκευές.	123
Σχήμα 4.56:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ- ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΟΥ ΠΕΤΥΧΑΜΕ.	124
Σχήμα 4.56a: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ-ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ-ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.	124
Σχήμα 4.56b: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΕΣΕΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ-ΟΞΥΓΩΝΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΩΝ.	125
Σχήμα 4.57 Διάγραμμα MPGe (Miles per gallon gasoline equivalent)& Εύρος κατανάλωσης καυσίμου (Λίτρα/100 km) με 4 συνεπιβάτες και αποσκευές.....	125

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Η διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στην διερεύνηση της ηλεκτροκίνησης και των πλήρως ηλεκτροκίνητων οχημάτων, καθώς και στην ανάλυση των επιμέρους συστημάτων που τα απαρτίζουν. Μελετάται λεπτομερώς ολόκληρη η διαδικασία λειτουργίας ενός πλήρως ηλεκτροκίνητου οχήματος, από την πηγή ενέργειας μέχρι το σύστημα κίνησης, καθώς επίσης και ορισμένα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, διερευνώνται υβριδικά μοντέλα, όπως το υβριδικό σύστημα κίνησης με κυψέλες καυσίμου και συσσωρευτές. Η ενσωμάτωση αυτών των καινοτόμων τεχνολογιών αποτελεί ζωτικής σημασίας βήμα προς την επίτευξη της μετάβασης στην ηλεκτροκίνηση, έτσι ώστε να επιτευχθεί ταχύτερη σύγκλιση προς τους στόχους, που έχουν τεθεί από όλους τους παγκόσμιους οργανισμούς και τα κράτη, για την αντιμετώπιση της παγκόσμιας υπερθέρμανσης και άλλων περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Σκοπός και στόχοι

Η έρευνα που πραγματοποιείται στη διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη των υβριδικών (FCEV) και αμιγώς (BEV) ηλεκτροκίνητων οχημάτων και των αντίστοιχων υποσυστημάτων τους. Ο κύριος στόχος της έρευνας είναι η λεπτομερής ανάλυση και μελέτη των υπαρχόντων συστημάτων που εφαρμόζονται σε αυτά τα ηλεκτρικά οχήματα, με έμφαση στη δημιουργία και την προσομοίωση των μοντέλων BEV-FCEV και τις δοκιμές τους βάσει των διεθνών προτύπων υπό διαφορετικά φορτία. Επιπλέον, ένας επιπρόσθετος στόχος είναι η διερεύνηση πιθανών βελτιώσεων στα υπάρχοντα συστήματα .

Καινοτομία

Θα αξιολογήσουμε βάσει των διεθνώς αποδεκτών προτύπων και με τη βοήθεια των προσομοιώσεων των μοντέλων υβριδικών (FCEV) και αμιγώς (BEV) ηλεκτροκίνητων οχημάτων, τη συμπεριφορά εμπορικά διαθέσιμων οχημάτων αντίστοιχης τεχνολογίας, χρησιμοποιώντας τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους, με αρχική στόχευση την καταγραφή διαφόρων κρίσιμων παραμέτρων, για να εντοπίσουμε πιθανές αδυναμίες στα υπάρχοντα συστήματα BEV-FCEV και με απώτερο στόχο να προτείνουμε αντίστοιχες πιθανές βελτιώσεις με βάση τα αποτελέσματα που θα προκύψουν από τις διάφορες προσομοιώσεις που θα πραγματοποιηθούν στα συστήματα αυτά.

Δομή

Στο **Κεφάλαιο 1** γίνεται αναφορά στην ιστορία των ηλεκτροκίνητων οχημάτων καθώς και βιβλιογραφική ανασκόπηση των τύπων ηλεκτροκίνητων και υβριδικών οχημάτων, καθώς και τρόποι φόρτισης και οι επίπτωση αυτής στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο **Κεφάλαιο 2** αναφέρονται οι τρόποι αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση των κυψελών καυσίμου.

Στο **Κεφάλαιο 3** γίνεται εκτενής ανάλυση των αυτοκινήτων κυψελών καυσίμου, της εισόδου τους στην αγορά, καθώς και του συστήματος λειτουργίας τους, όσον αφορά τον αντιστροφέα DC-AC, τους συσσωρευτές και το Power Control Unit.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 4** περιγράφεται το μοντέλο προσομοίωσης στο λογισμικό Simulink του MATLAB και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΑ

1.1 Κλιματική αλλαγή

Η χρήση μέσων μεταφοράς έχει σημαντικές συνέπειες λόγω της αναμενόμενης αύξησης των μετακινήσεων και του τρόπου που έχουν οργανωθεί αυτά τα μέσα τα τελευταία χρόνια. Παρόλο που η ικανοποίηση της ζήτησης για μετακινήσεις έχει ορισμένα θετικά αποτελέσματα, αυτά συνδέονται με αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Οι μεταφορές αποτελούν σημαντικό παράγοντα εκπομπής ρύπων στο περιβάλλον, με υψηλές εκπομπές λόγω των οδικών μέσων μεταφοράς. Εξίσου σημαντικές είναι οι εκπομπές ρύπων από αεροπορικά και ναυτιλιακά μέσα μεταφοράς και δεν πρέπει να αγνοούνται.

Οι εκπομπές των ρύπων συμβάλουν στο φαινόμενο που ονομάζεται κλιματική αλλαγή. Ως κλιματική αλλαγή ορίζεται η μεταβολή του παγκόσμιου κλίματος με αντίκτυπο στις μετεωρολογικές συνθήκες. Οι συνέπειες της κλιματικής αλλαγής είναι σταδιακές και μπορούν να προκαλέσουν αναταραχές σε μεγάλη χρονική κλίμακα. Κύριος παράγοντας της κλιματικής αλλαγής είναι η αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη μέσω του φαινομένου του θερμοκηπίου. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι ένα φυσικό φαινόμενο που συμβαίνει στη γη. Το ηλιακό φως διαπερνά την ατμόσφαιρα της γης και φτάνει την επιφάνειά της, όπου απορροφάτε από το έδαφος και τα υδάτινα σώματα. Μετέπειτα η ακτινοβολία εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα σε μορφή υπέρυθρης ακτινοβολίας και ένα μέρος της απορροφάτε από διάφορες αέριες ενώσεις και επαναφέρεται στην Γη, ενώ η υπόλοιπη διαχέεται στο σύμπαν. Ωστόσο, λόγω της αύξησης των αερίων του θερμοκηπίου μεγαλύτερη ποσότητα της υπέρυθρης ακτινοβολίας απορροφάτε και επαναδιανέμεται στον πλανήτη με αποτέλεσμα την αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του.

Οι πιο σημαντικές εκπομπές ρύπων προέρχονται από τα οδικά μέσα μεταφοράς που είναι:

- **Το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂):** το οποίο συμβάλλει σημαντικά στην αύξηση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Επιπλέον, αποτελεί τη μεγαλύτερη απειλή για τη δημόσια υγεία του ανθρώπινου είδους και το περιβάλλον. [23]
- **Οι υδρογονάνθρακες (HC):** οι ρύποι αυτοί προέρχονται από μη ολοκληρωμένη καύση και εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα, αποτελώντας τοξικές ουσίες που επηρεάζουν την ανθρώπινη υγεία. Οι υδρογονάνθρακες, ιδιαίτερα το μεθάνιο και η βενζίνη αποτελούν παραδείγματα τέτοιων ρύπων. [23]
- **Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO):** είναι ένα παραπροϊόν της μη ολοκληρωμένης καύσης, όπου ο άνθρακας στο καύσιμο δεν έχει οξειδωθεί πλήρως και αντί για διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), σχηματίζεται μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Αν και είναι άχρωμο και άοσμο, το CO είναι ιδιαίτερα τοξικό, και η άμεση έκθεση σε αυτό μπορεί να μειώσει τη ροή του οξυγόνου στο αίμα και να είναι επικίνδυνη για άτομα με καρδιακές παθήσεις. Επιπλέον, το μονοξείδιο του

άνθρακα μπορεί να συμβάλει στον σχηματισμό του όζοντος σε επίπεδο εδάφους, καθώς αντιδρά με άλλες αέριες ενώσεις στην ατμόσφαιρα.[23] (Τσίκο, 2021)

- **Τα οξειδία αζώτου (NOx):** Τα οξειδία του αζώτου χωρίζονται στο άχρωμο μονοξείδιο του αζώτου (NO) και το πολύ τοξικό και αντιδραστικό διοξείδιο του αζώτου (NO₂) αποτελούν μια σημαντική πηγή ατμοσφαιρικής ρύπανσης και προκαλούν σοβαρά προβλήματα υγείας. Εκτός από την αύξηση της οξύτητας και του ευτροφισμού των υδάτων και του εδάφους, τα οξειδία αζώτου επίσης συντελούν στη δημιουργία του φαινομένου του θερμοκηπίου και συμβάλλουν στην κλιματική αλλαγή. Οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου κυρίως προέρχονται από την καύση καυσίμων στα οχήματα και τις βιομηχανικές δραστηριότητες. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των εκπομπών αυτών είναι σοβαρές και απαιτούνται μέτρα για τη μείωσή τους, όπως η χρήση πιο αποδοτικών και καθαρότερων καυσίμων, η ανάπτυξη πιο αποδοτικών και βιώσιμων μεταφορικών συστημάτων και η προώθηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.[23]
- **Οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs):** συμβάλλουν στον σχηματισμό του όζοντος σε επίπεδο εδάφους και φωτοχημικού νέφους στην ατμόσφαιρα.

Οι συνέπειες της κλιματικής αλλαγής είναι πολλαπλές και συνεχώς επεκτείνονται. Ορισμένες από τις κυριότερες συνέπειες περιλαμβάνουν:

1. **Αλλαγή του κλίματος:** Η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη έχει αντίκτυπο στο κλίμα, με αυξημένη συχνότητα και ένταση καταστροφικών φαινομένων όπως καταιγίδες, πλημμύρες, απερίμωση, και καύσωνες.
2. **Αύξηση της στάθμης της θάλασσας:** Η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη έχει ως αποτέλεσμα τη διάλυση των πάγων των πόλων, η οποία έχει οδηγήσει σε μαζική αύξηση της στάθμης της θάλασσας σε παγκόσμιο επίπεδο.
3. **Υποβάθμιση των βιολογικών συστημάτων:** Η αλλαγή του κλίματος επηρεάζει τα βιολογικά συστήματα, μειώνοντας την ποικιλότητα των ειδών, επηρεάζοντας τα ποσοστά αποικιοποίησης των ειδών και επηρεάζοντας τις παραγωγικές δυνατότητες της γεωργίας και της κτηνοτροφίας.
4. **Υποβάθμιση της ποιότητας του αέρα:** Η αλλαγή της σύστασης του αέρα έχει σημαντικές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία. Ορατά συμπτώματα της έκθεσης σε υψηλά επίπεδα ρύπανσης περιλαμβάνουν ερεθισμό των αεραγωγών, δύσπνοια και αυξημένη πιθανότητα επιληψίας ακόμα και άσθματος. Η μακροχρόνια έκθεση σε ατμοσφαιρικούς ρύπους έχει αποδειχθεί ότι αυξάνει την πιθανότητα εμφάνισης πνευμονικών νοσημάτων, όπως ο καρκίνος, καθώς και των σχετικών θανάτων [23].

1.2 Ιστορία ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Ο πρώτος ηλεκτρικός κινητήρας κατασκευάστηκε το 1828 από τον Άγγος Jedlik στην Ουγγαρία και με την πάροδο των χρόνων πολλοί επιστήμονες στράφηκαν στην μελέτη και την βελτίωση ηλεκτρικών κινητήρων. Ήδη από το 1832 ο σκωτσέζος Robert Anderson εφηύρε την πρώτη ηλεκτρική άμαξα, η οποία μετακινούταν αποκλειστικά με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό το όχημα ταξίδευε με ταχύτητες 12 χιλιομέτρων την ώρα. Αξίζει να σημειωθεί πως το πρώτο αυτοκίνητο με μηχανή εσωτερικής καύσης, ο πρόγονος των σημερινών αυτοκινήτων, πατενταρίστηκε το 1885 από τον Carl Benz, 50 χρόνια αργότερα από το πρώτο ηλεκτροκίνητο όχημα. Ακολουθώντας την εφεύρεση του Anderson, ο Robert Davidson παρήγαγε την πρώτη ηλεκτρική ατμομηχανή, τροφοδοτούμενη από γαλβανικά στοιχεία. Ωστόσο, δεν βρήκε εφαρμογή εξαιτίας της περιορισμένης ενέργειας που παρείχαν οι μπαταρίες της εποχής.

Με την ανακάλυψη των επαναφορτιζόμενων μπαταριών από τον Gaston Planté το 1859 οι ερευνητές εστίασαν εκ νέου στην μελέτη των ηλεκτρικών οχημάτων. Το 1881 ο Gustave Trouné κατασκεύασε το πρώτο ηλεκτρικό αυτοκίνητο στο οποίο επέβαιναν άνθρωποι, ενώ στις 29 Απριλίου του 1899 το "Jamais Contente" ξεπέρασε το τότε φράγμα ταχύτητας των 100 χιλιομέτρων την ώρα. Ενδεικτικά μέχρι το 1900 το 40% των αυτοκινήτων κινούνταν με χρήση ατμού, το 38% με χρήση ηλεκτρισμού και μόλις το 22% βενζίνη.

Κατά τη δεκαετία του 1900 έως του 1910, τα ηλεκτρικά οχήματα έλκυαν για πρώτη φορά το ενδιαφέρον του γυναικείου κοινού για διάφορους λόγους. Προωθούνταν ως "καθαρότερα", ασφαλέστερα, πιο εύκολα στη χρήση και πιο αξιόπιστα από τα οχήματα με συμβατικό καύσιμο. Σύμφωνα με το "171 Years Before Tesla: The Evolution of the Electric Vehicle", πολλά από τα πρώιμα ηλεκτρικά οχήματα είχαν πολυτελή χαρακτηριστικά της εποχής, όπως όμορφα κεντημένα μεταξωτά και βελούδινα εσωτερικά καθίσματα, βάζα με λουλούδια, ρολόγια, καθρέφτες και σετ μακιγιάζ. Αντιθέτως, τα βενζινοκίνητα ήταν δύσκολα στην οδήγηση, θορυβώδη και απελευθέρωναν πολλούς ρύπους. Για αυτόν τον λόγο, μέχρι τότε τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα είχαν ξεκάθαρο προβάδισμα έναντι των βενζινοκινήτων. Ωστόσο, με την πάροδο των χρόνων ενώ οι κινητήρες εσωτερικής καύσης διαρκώς βελτιώνονταν τα προβλήματα των ηλεκτροκινήτων δεν επιλύθηκαν. Τα οχήματα με μπαταρίες ήταν πολύ πιο ακριβά και πολύ πιο βαριά από τα βενζινοκίνητα, ενώ η φόρτισή τους ήταν πολύπλοκη και χρονοβόρα.

Έτος σταθμός αποτελεί το 1908 όταν ο Henry Ford παρουσίασε το βενζινοκίνητο Model T κάνοντας το ευρέως διαθέσιμο στην αγορά. Η τιμή του διαμορφώθηκε στα 650 δολάρια ενώ η τιμή ενός ηλεκτροκινήτου ήταν τριπλάσια. Επιπλέον, το 1912 η χρονοβόρα και συχνά επίπονη χειροκίνητη έναρξη των αυτοκινήτων εσωτερικής καύσης αντικαταστάθηκε από ηλεκτρική μίζα. Σε συνδυασμό με την φθηνή μαζική παραγωγή και την οικονομικότερη και ταχεία τροφοδότηση των αυτοκινήτων με καύσιμα, τα οχήματα εσωτερικής καύσης κατέκλισαν την αγορά. Παράλληλα, μεγάλα οδικά δίκτυα κατασκευάστηκαν στις ΗΠΑ που απαιτούσαν υψηλή αυτονομία και σε συνδυασμό με ανακάλυψη

πετρελαιοπηγών που μείωσαν ακόμη περισσότερο την τιμή του καυσίμου, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα παραμερίστηκαν και μέχρι το 1935 εξαφανίστηκαν από τις αγορές. [32]

Κατά τη δεκαετία του 1970 και του 1980, η εξερεύνηση του διαστήματος προσέδωσε μια νέα διάσταση και επιτάχυνση στην ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης. Καθώς οι τιμές των καυσίμων ανέβαιναν, το ηλεκτρικό όχημα Apollo Lunar Roving προσγειώθηκε στη σελήνη, αναζητώντας ένα λιγότερο δαπανηρό τρόπο για την εκμετάλλευση τέτοιων τεχνολογιών. Αυτή η εξέλιξη έθεσε σε αμφισβήτηση την αποτελεσματικότητα των συμβατικών καυσίμων και ενέπνευσε τους καταναλωτές να αναζητήσουν εναλλακτικές λύσεις που θα ήταν πιο οικονομικές και φιλικές προς το περιβάλλον. Καθώς η επιστημονική έρευνα αποκαλύπτει όλο και περισσότερα στοιχεία για τη συμβολή των υδρογονανθράκων στη ρύπανση του περιβάλλοντος, οι επιστήμονες και οι αξιωματούχοι εργάζονται επίμονα για τη δημιουργία αυτοκινήτων με πολύ χαμηλές ή μηδενικές εκπομπές ρύπων. Κατά τη δεκαετία του 1980, η California Air Resources Board (CARB) επέμενε στην ανάπτυξη οχημάτων που θα μπορούσαν να πληρούν αυτά τα αυστηρά περιβαλλοντικά πρότυπα. Έτσι λοιπόν, ύστερα από πολλά χρόνια και πολλές από δημοσιεύσεις για την ρύπανση του πλανήτη οι εταιρείες άρχισαν να στρέφονται πάλι στην μελέτη και την παραγωγή ηλεκτρικών οχημάτων, τροποποιώντας τα ήδη υπάρχοντα. Σημείο καμπής αποτελεί το έτος 1997 όταν ο ιαπωνικός κολοσσός Toyota διέθεσε στην αγορά το πρώτο υβριδικό αυτοκίνητο, το Toyota Prius, το οποίο δούλεψε με μπαταρίες υδριδίου νικελίου. Η μεγάλη απήχηση που γνώρισε σε ώθησε πολλές εταιρείες να ασχοληθούν με τα υβριδικά και τα ηλεκτρικά οχήματα. Παράλληλα, το 2006 η εταιρεία Tesla Motors ιδρύθηκε με σκοπό την παραγωγή αμιγώς ηλεκτρικά αυτοκίνητα με ανεξαρτησία 320 χιλιομέτρων. Η μεγάλη επιτυχία των Tesla συνέβαλλε ώστε πολλές εταιρείες να επισπεύσουν την παραγωγή ηλεκτροκίνητων αυτοκινήτων, με αποτέλεσμα στις μέρες να είναι διαθέσιμη μια ευρεία γκάμα αυτοκινήτων από mini, sports ως και SUVs. [29]

1.3 Ηλεκτροκίνητα και υβριδικά οχήματα

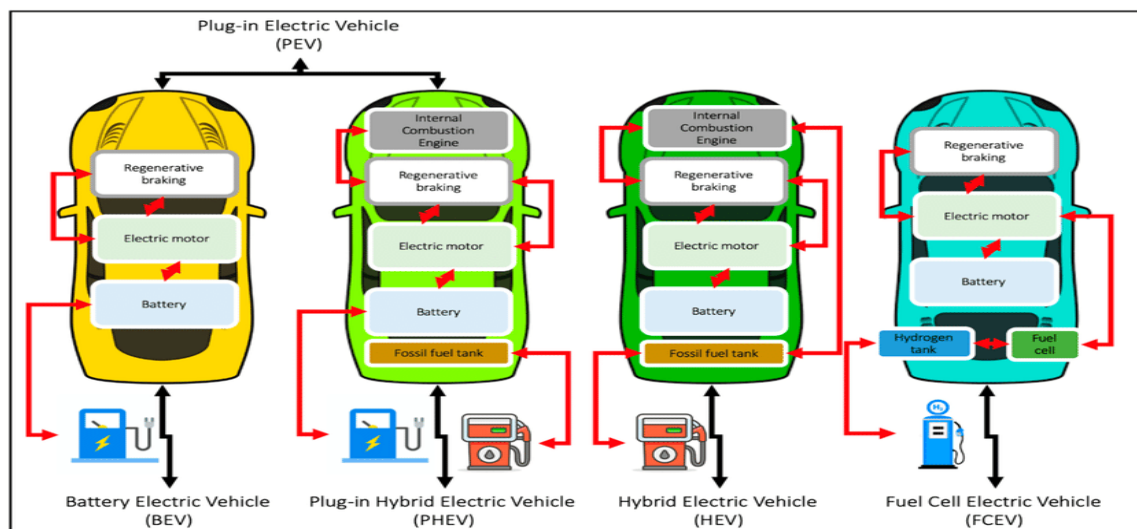
1.3.1 Κατηγοριοποίηση ηλεκτροκίνητων οχημάτων

Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους, δηλαδή λαμβάνοντας υπόψη το σύστημα συμπλήρωσης ισχύος, το σύστημα κίνησης, τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν κατηγοριοποιηθούν στις εξής κατηγορίες:

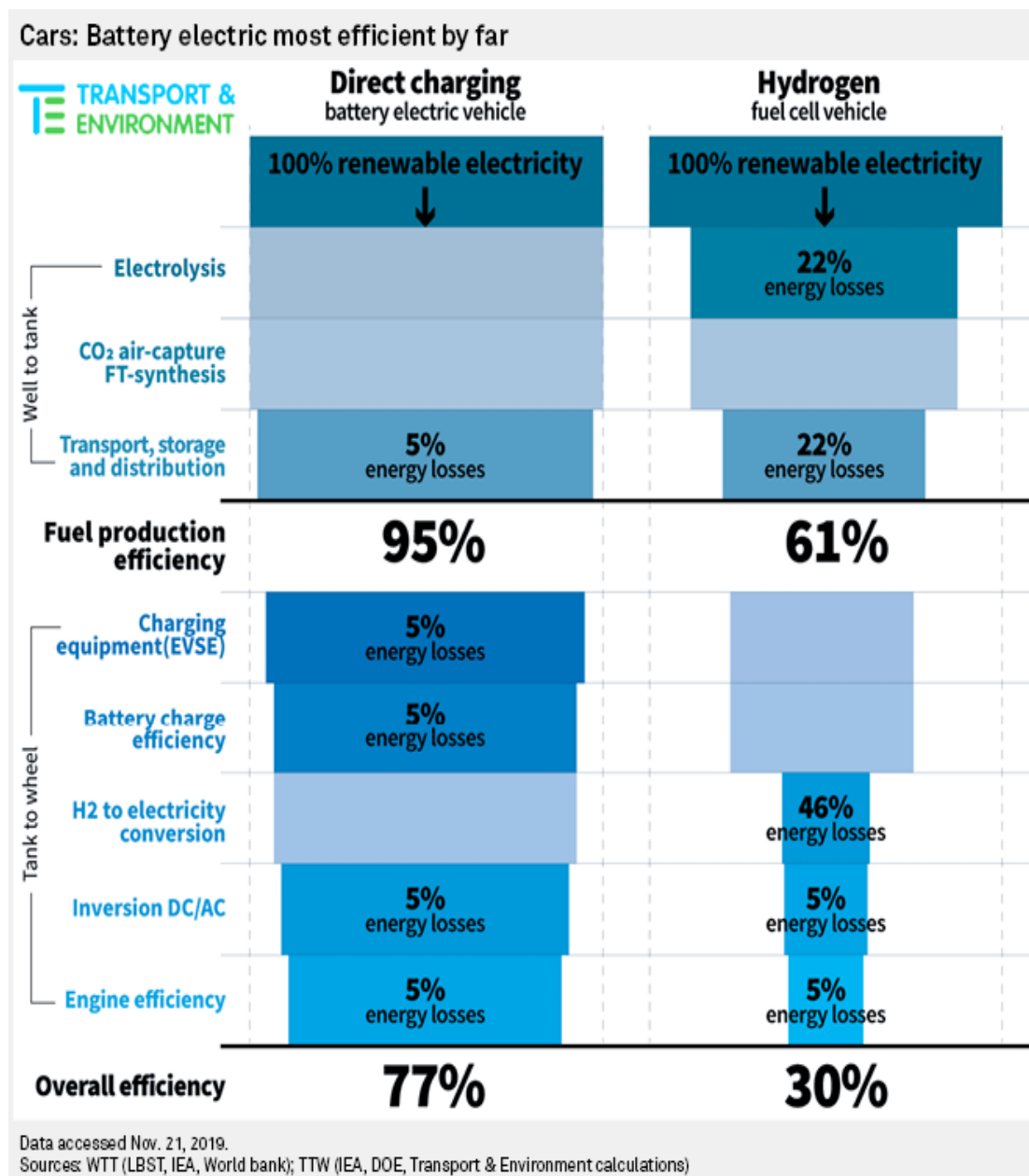
- Hybrid Electric Vehicles (HEVs)
- Plug-in Electric Vehicles (PEVs)
- Plug-in Hybrid Electric Vehicles (PHEVs)
- Battery Electric Vehicles (BEVs)
- Fuel Cell Electric Vehicles (FCEVs)

Στον Πίνακα 1.1 φαίνεται η κατηγοριοποίηση των ηλεκτρικών οχημάτων ανάλογα με τα εκάστοτέ χαρακτηριστικά τους. Επιπλέον, φαίνεται η διαφορά τους ως προς το κυρίαρχο τύπο κινητήρα, το εξωτερικό σύστημα παροχής ισχύος και την κύρια πηγή παροχής ενέργειας.

Τύποι	BEV	HEV- PHEV	FCEV
Σύστημα Κίνησης	Ηλεκτρική Μηχανή	Ηλεκτρική Μηχανή, Μηχανή Εσωτερικής καύσης (ICE)	Ηλεκτρική Μηχανή
Πηγή Ενέργειας	Μπαταρίες, Υπερπυκνωτές	Μπαταρίες, Υπερπυκνωτές, Μηχανή Εσωτερικής καύσης (ICE)	Κελία Καυσίμου
Εξωτερικό Σύστημα Παροχής Ισχύος	Ηλεκτρική Ενέργεια, Ηλεκτρικό Δίκτυο	Ηλεκτρική Ενέργεια, Δίκτυο, Σταθμός Βενζίνη	Παροχή Υδρογόνου



Πίνακας 1: Σύγκριση διαφόρων τύπων Ηλεκτρικών Οχημάτων.



Πίνακας 2: Απόδοσης οχημάτων BEV-FCEV (Κανε)

1.3.2 Plug-in Electric Vehicles (PEV)

1.3.2.1 Battery Electric Vehicles (BEV)

Τα BEV έχουν μόνο ηλεκτρικό σύστημα οδήγησης, η δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας εξαρτάται πλήρως από την τεχνολογία της μπαταρίας. Οι μηδενικές εκπομπές του BEV είναι ένα σημαντικό πλεονέκτημα, επειδή η κίνηση παρέχεται αποκλειστικά από τις μπαταρίες που είναι εγκατεστημένες στο όχημα και ως εκ τούτου δεν έχουν άμεσα εκπομπές. Σε αυτόν το τύπο οχήματος υπάρχει το πλεονέκτημα της επαναφόρτισης των μπαταριών μέσω της αναγεννητικής πέδησης, όπου μαζεύεται η δυναμική ενέργεια του οχήματος (κινητική ενέργεια) και μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια

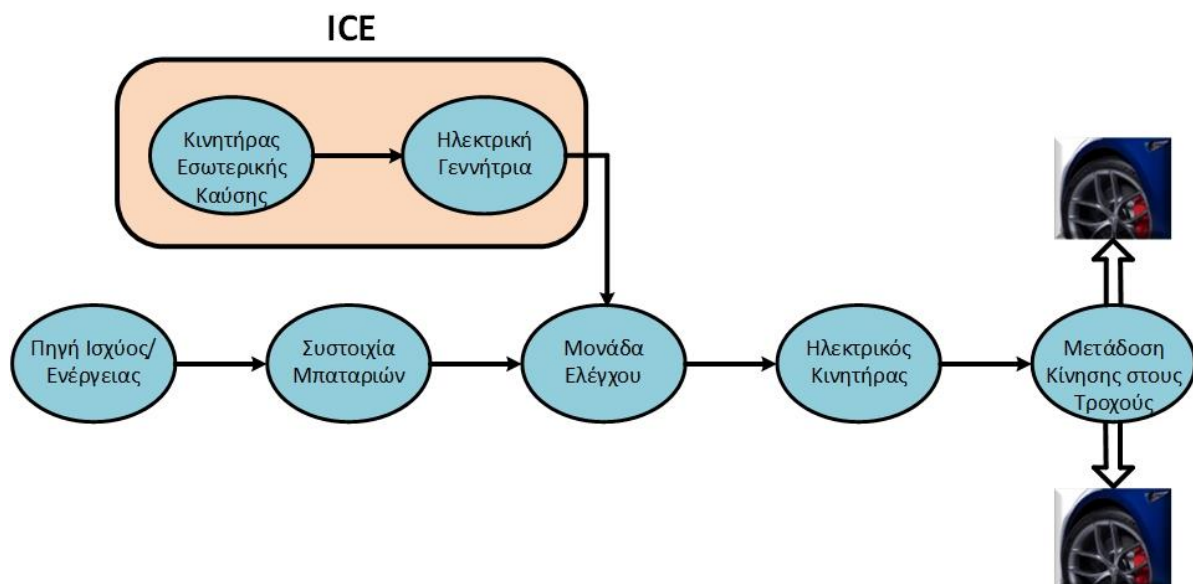
επαναφορτίζοντας (αναγεννά) την ενσωματωμένη μπαταρία στο όχημα κατά την επιβράδυνση. Η επαναφόρτιση γίνεται μέσω του ηλεκτρικού δικτύου.

Από την άλλη μεριά, οι περιορισμοί της σημερινής τεχνολογίας των εγκατεστημένων μπαταριών κάνει τα BEV λιγότερο ελκυστικά από τα οχήματα εσωτερικής καύσης. Το υψηλότερο κόστος αγοράς, ο αυξημένος χρόνος φόρτισης που ακόμα και με τεχνολογίες γρήγορης φόρτισης χρειάζεται από μία έως αρκετές ώρες για πλήρη φόρτιση, η μειωμένη αυτοδυναμία, η έλλειψη υποδομών φόρτισης και τα υπόλοιπα ελαττώματα που αναφέρθηκαν, καθιστούν τα BEV υποδεέστερα.

1.3.2.2 *Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)*

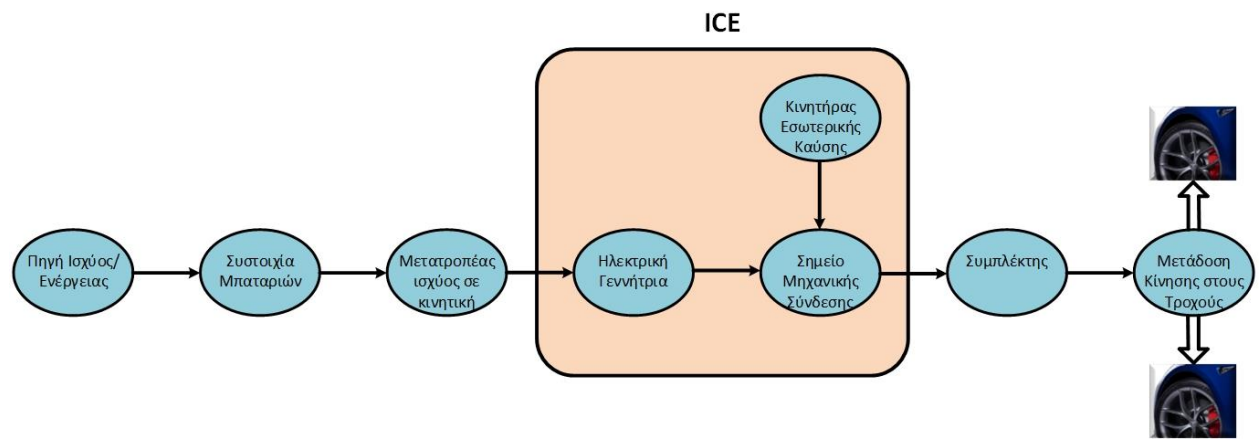
Τα PHEVs είναι εξοπλισμένα με μια μηχανή εσωτερικής καύσης και λειτουργούν συνδυαστικά με μπαταρίες, οι οποίες επαναφορτίζονται μέσω του ηλεκτρικού δικτύου. Η μηχανή εσωτερικής καύσης χρησιμοποιείται κυρίως για να φορτίσει την μπαταρία, όταν η στάθμη της αποθηκευμένης ενέργειας είναι χαμηλή ή όταν χρειάζεται περισσότερη ισχύς π.χ. στην επιτάχυνση.

Υπάρχουν τρεις τύποι τοπολογιών υβριδικών συστημάτων με βάση τις συνδέσεις ανάμεσα στην ICE (κινητήρια μηχανή εσωτερικής καύσης) και την ηλεκτρική γεννήτρια στο PHEV: η σύνδεση σε σειρά, η παράλληλη σύνδεση και ο συνδυασμός των δύο προηγούμενων. Η σύνδεση σε σειρά λειτουργεί με την ενέργεια που παράγεται από την ICE και στέλνεται στην ηλεκτρική γεννήτρια και στην μπαταρία. Η ισχύς περνάει μέσα από μια μονάδα ελέγχου, η οποία ελέγχει τον ηλεκτρικό κινητήρα και μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.1. Η μπαταρία υπάρχει για να διατηρεί την ισορροπία ενέργειας μεταξύ της κινητήριας μηχανής και της ηλεκτρικής γεννήτριας.



Σχήμα 1.1: Σύνδεση σε σειρά του PHEV

Όσο αναφορά την παράλληλη σύνδεση, συνδυάζεται το συμβατικό ICE με το ηλεκτρικό κινητήρα. Το PHEV μπορεί να λειτουργήσει με το ένα ή το άλλο σύστημα ξεχωριστά είτε συνδυάζοντας τα όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2. Το πλεονέκτημα της παράλληλης σύνδεσης είναι η απλή κατασκευή και το χαμηλό αρχικό κόστος.



Σχήμα 1.2: Παράλληλη σύνδεση του PHEV.

Η κύρια διαφορά της σύνδεσης σειράς-παράλληλης από τις άλλες δύο είναι ότι μπορεί να λειτουργεί με ICE και ηλεκτρικό κινητήρα ταυτόχρονα. Τα δύο συστήματα λειτουργίας διατηρούν τα μηχανικά τους μέρη ξεχωριστά και συνδέονται μεταξύ τους μέσω ενός γραναζιού ή μιας δομής πλανητικού τροχού. Ως αποτέλεσμα, το PHEV ρυθμίζει διεξοδικά τη σχέση ταχύτητας μεταξύ του ICE και του ηλεκτρικού κινητήρα. Σε σύγκριση με το παράλληλο υβριδικό σύστημα, το σειρά-παράλληλο υβριδικό σύστημα είναι πιο ευέλικτο για τη ρύθμιση της ισχύος εξόδου από το ICE και τον ηλεκτρικό κινητήρα σύμφωνα με τις διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

1.3.3 Hybrid Electric Vehicle (HEV)

Το HEV περιλαμβάνει δύο τύπους συστημάτων οδήγησης, το ένα είναι εσωτερική μηχανή που καταναλώνει βενζίνη και το άλλο είναι ο ηλεκτρικός κινητήρας. Σε αντίθεση με τα PEV, τα HEV δεν μπορούν να επαναφορτιστούν από το ηλεκτρικό δίκτυο, διότι η ενέργεια τους προέρχεται αποκλειστικά από βενζίνη και από την λειτουργία της αναγεννητικής πέδησης. [20]

1.3.3.1 *Micro and mild HEV*

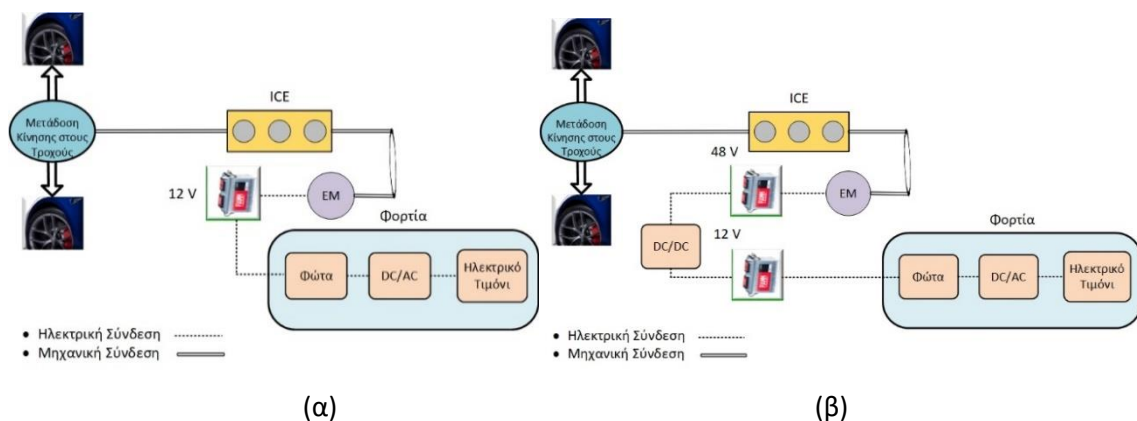
Ανάλογα με την ποσότητα της ισχύος εξόδου από τον ηλεκτρικό κινητήρα, τα HEV μπορούν να διαχωριστούν σε micro, mild και full HEV. Χαρακτηριστικό των HEV είναι ο συντελεστής υβριδικότητας που εκφράζει την αναλογία ισχύος που αναπτύσσεται από τον ηλεκτρικό κινητήρα του υβριδικού οχήματος προς την συνολική ισχύ που καταναλώνεται από το υβριδικό όχημα.

Τα micro HEV έχουν ποσοστό υβριδικότητας λιγότερο από 5%. Σε σύγκριση με τα οχήματα εσωτερικής καύσης, τα micro HEV λειτουργούν με μια μηχανή εκκίνησης που ονομάζεται κινητήρας εκκίνησης με ενσωματωμένη μια γεννήτρια εκκίνησης (starter/generator system). Ο ηλεκτρικός κινητήρας χρησιμοποιείται για την απενεργοποίηση της κύριας μηχανής, όταν το όχημα βρίσκεται στην πλήρη ακινησία ενώ εκκινεί την κύρια μηχανή όταν ο χρήστης αποδεσμεύει το φρένο. Καθώς το υβριδικό όχημα βρίσκεται σε κίνηση χρησιμοποιώντας την ICE ο ηλεκτρικός κινητήρας δεν παρέχει καμία επιπρόσθετη ροπή στο όχημα. Ο συγκεκριμένος τύπος αυτοκινήτων αυξάνει την απόδοση του καυσίμου 5% - 10%. Το micro HEV δεν θεωρείται αυστηρώς υβριδικό όχημα, επειδή ο ηλεκτρικός κινητήρας δεν παρέχει συνεχή ισχύ.

Στα mild HEV παραβρίσκεται τόσο ο κινητήρας εσωτερικής καύσης όσο και ένα ηλεκτρικό σύστημα starter/generator (ISG) σε παράλληλη σύνδεση, το οποίο εντοπίζεται ανάμεσα στην κύρια μηχανή και στον μηχανισμό μεταφοράς της κίνησης στους τροχούς, μειώνοντας το μέγεθος του οχήματος. Η βασική αρχή λειτουργίας του mild HEV είναι η εξής: κατά την εκκίνηση η ICE είναι ανενεργή, ενώ η κίνηση βασίζεται στο ηλεκτρικό σύστημα. Όταν ο χρήστης του οχήματος αποδεσμεύει το φρένο και το όχημα επιταχύνει, η ICE αρχίζει να συνεισφέρει εξολοκλήρου στη ώθηση υπό υψηλές ταχύτητες. Επίσης, όταν το όχημα επιβραδύνει με ή χωρίς το φρένο η μπαταρία επαναφορτίζεται με λειτουργία αναγεννητικής πέδησης. Το ποσό της ισχύος που προσφέρει ηλεκτρικά καλύπτει τουλάχιστον 10% της ισχύος που θα έδινε η ICE, αυξάνοντας την απόδοση του καυσίμου για τα mild HEV σε σχέση με τα micro HEV σε εύρος 20%-30%.

Τελικώς, οι δυο κύριες διαφορές των micro και mild HEV είναι η ροπή που μεταφέρεται ή όχι στο όχημα. Το micro HEV δεν έχει την δυνατότητα μεταφοράς ροπής, επειδή η ηλεκτρική μηχανή τυπικά χρησιμοποιείται για την λειτουργία της εκκίνησης και της απενεργοποίησης της ICE, αλλά και ως γεννήτρια χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση άλλων συστημάτων του οχήματος όπως το υδραυλικό τιμόνι και ο κλιματισμός που καταναλώνουν ενέργεια από την μηχανή. Η δεύτερη διαφορά είναι ότι το micro HEV έχει μικρότερου μεγέθους κινητήρα οποίος φτάνει μέχρι την ισχύ των 2.5 kW και λειτουργεί με 12 V.

Στο Σχήμα 1.3 φαίνονται τα σχηματικά διαγράμματα του micro HEV όπου διακρίνονται δύο τοπολογίες των 12V και 48V. Η τελευταία τοπολογία (48V) καθιστά δυνατή την περισσότερη ανάκτηση ενέργειας σε μικρότερα χρονικά διαστήματα. Τέλος, στα σχήματα φαίνεται ότι χρησιμοποιούνται και μετατροπείς ΣΤ/ΣΤ, στην τοπολογία των 48V για την τροφοδότηση του ηλεκτρικού κινητήρα, αυτό γίνεται για την διατήρηση της αλληλεπίδρασης και χρήσης των υπόλοιπων ηλεκτρικών συστημάτων του συστήματος.

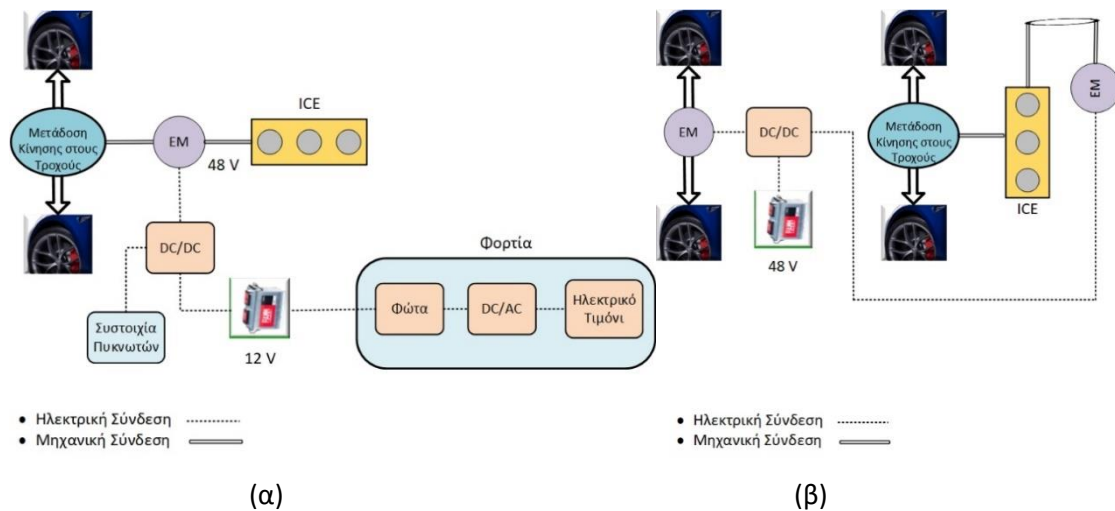


Σχήμα 1.3: Micro HEV αναπαράσταση: (α) 12 V, (β) 48 V [5].

Στο mild HEV η ενέργεια εξάγεται μέσω μετατροπών ΣΤ/ΣΤ όταν η μπαταρία χρησιμοποιείται για την τροφοδότηση του ηλεκτρικού κινητήρα ή των φορτίων του οχήματος. Επίσης, τα mild HEV μπορούν να χρησιμοποιούν και συστήματα υπερπυκνωτών και μπαταρίες λιθίου. Για λόγους αύξησης της

απόδοσης και του εύρους των ταχυτήτων τα είδη του ηλεκτρικού κινητήρα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι τα εξής:

- Σύγχρονος Κινητήρας Μόνιμων Μαγνητών (PMSM)
- Επαγωγικός Κινητήρας (IM)
- Σύγχρονος Κινητήρας Μαγνητικής Αντίστασης (SRM), ο οποίος εξαιτίας της καλής του απόδοσης και της δυνατότητας που παρέχει να ελέγχει κάθε φάση ξεχωριστά, τον καθιστά τον πιο διαδεδομένο σε τέτοιου είδους εφαρμογές.



Σχήμα 1.4: Αναπαράσταση mild HEV: (α) με έναν ηλεκτρικό κινητήρα, (β) με 2 ηλεκτρικούς κινητήρες

1.3.3.2 Full και dual-mode HEV

Για τα full HEV, η πιο σημαντική τεχνολογία είναι η μεταβλητή μετάδοση ηλεκτρικής ισχύος (EVT), η οποία λειτουργεί και ως διαχωριστής ισχύος. Ο διαχωριστής ισχύος παρέχεται από το EVT δίνοντας τη δυνατότητα για την ηλεκτρική ώθηση του οχήματος (propulsion), η οποία αναφέρεται στην αρχική επιτάχυνση που βασίζεται στην ηλεκτρική ισχύ μόνο. Ένα από τα πλεονεκτήματα αυτού του είδους είναι ότι διατηρεί όλα τα πλεονεκτήματα των διαφόρων τύπων HEV, όπως την λειτουργία εξοικονόμησης της ενέργειας start-stop, την αναγεννητική πέδηση, μικρότερο μέγεθος κινητήρα και ηλεκτρική ώθηση (propulsion).

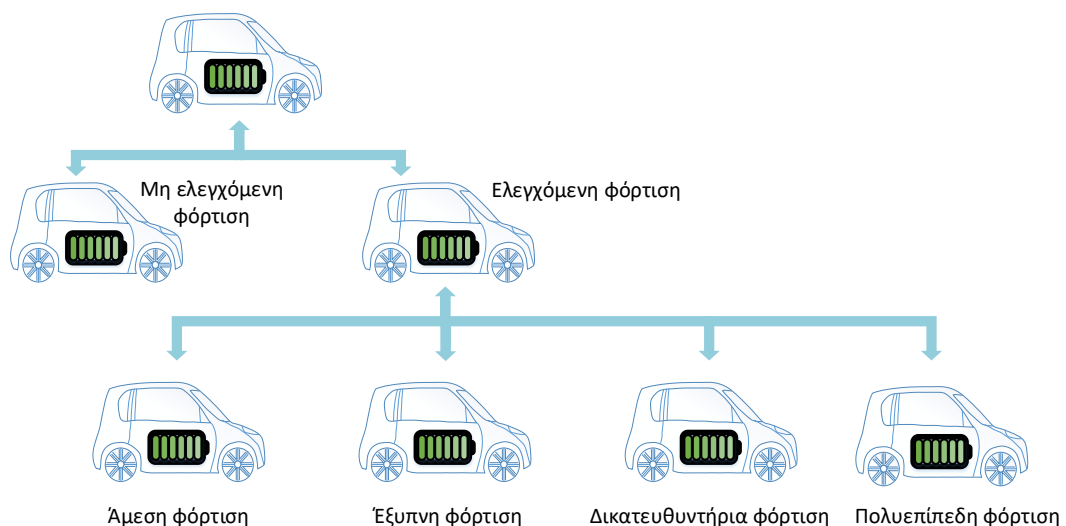
Όμως οι προσπάθειες της ερευνητικής κοινότητας για την αντιμετώπιση του προβλήματος της κατανάλωσης του καυσίμου κατά την διάρκεια της εκκίνησης της ακινητοποίησης του οχήματος και της επαναφοράς του σε κίνηση στις αστικές περιοχές, δεν σταμάτησαν στα full HEV. Ένα νέο εγχείρημα αποτέλεσαν τα dual-mode HEV τα οποία βασίστηκαν στο σύστημα των full HEV και εισάχθηκαν για την ενίσχυση της συνολικής απόδοσης. Dual-mode σημαίνει ότι το υβριδικό σύστημα και οι ηλεκτρικοί κινητήρες συνεργάζονται με τον καλύτερο δυνατό τρόπο για να πετύχουν μια εξαιρετική απόδοση υπό συνθήκες γρήγορης επιτάχυνσης και μέγιστης ταχύτητας. Η συνεισφορά των dual-mode δεν σταματάει στα HEV αλλά επεκτείνεται και στα plug-in HEV.

Το συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι τα micro και mild συμβατικά HEV δίνουν προτεραιότητα στη μηχανή πετρελαίου/αερίου, ενώ η ηλεκτρική γεννήτρια και οι μπαταρίες δρουν σαν βοηθητικές

συσκευές παροχής ισχύος. Από την άλλη μεριά, τα full ή τα dual-mode HEV χρησιμοποιούν ηλεκτρισμό ως κύρια πηγή ενέργειας για να κινήσουν το όχημα. Τα συμβατικά HEV μπορούν να βελτιωθούν σε dual-mode ή full HEV για να αυξηθεί η αυτονομία του οχήματος και για εξοικονόμηση καυσίμου, τα μειονεκτήματα της κατανάλωσης αερίου/πετρελαίου, του μεγάλου βάρους των μπαταριών και του υψηλού αρχικού κόστους μπορούν να αγνοηθούν.

1.4 Τρόποι φόρτισης EV's

Στην ενότητα αυτή θα αναλυθούν οι μέθοδοι φόρτισης/εκφόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων βασισμένες στην ικανότητα του δικτύου να διαχειρίζεται τα ηλεκτρικά οχήματα ως φορτία. Ακόμα, μελετάτε η έννοια του V2G, όπου η κύρια ιδέα είναι ότι όταν η ζήτηση αυξάνεται, οι μπαταρίες των παρκαρισμένων οχημάτων εγχέουν ισχύ στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας [19]. Μ' αυτό το τρόπο, τα συστήματα V2G παρέχουν μία βοηθητική πηγή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο διανομής. Καθώς η αγορά των ηλεκτρικών οχημάτων αυξάνεται και οι υποδομές των σημερινών σταθμών φόρτισης να μην είναι επαρκής για την κάλυψη της ζήτησης, δημιουργούνται σοβαρές προκλήσεις που αφορούν τόσο την ικανότητα κάλυψης των αναγκών όσο και τεχνικά θέματα που αφορούν τις συνέπειες της ενσωμάτωσης ηλεκτρικών οχημάτων που αφορούν την ποιότητα ισχύος, την ρύθμιση της τάσης κ.τ.λ. Η μέθοδος της φόρτισης/εκφόρτισης εξαρτάται αφενός από το μέγεθος του αριθμού στάθμευσης και αφετέρου από την τοποθεσία των παρκαρισμένων οχημάτων, καθώς και από τη ζήτηση του φορτίου. Στο Σχήμα 1.5 απεικονίζεται ένα γενικό σχεδιάγραμμα φόρτισης/εκφόρτισης, το οποίο χωρίζεται στην ελεγχόμενη και μη ελεγχόμενη φόρτιση. Η ελεγχόμενη φόρτιση χωρίζεται σε 4 υποκατηγορίες την άμεσα, την έξυπνη, την δικατευθυντήρια, την πολυεπίπεδη ελεγχόμενη φόρτιση. [11]



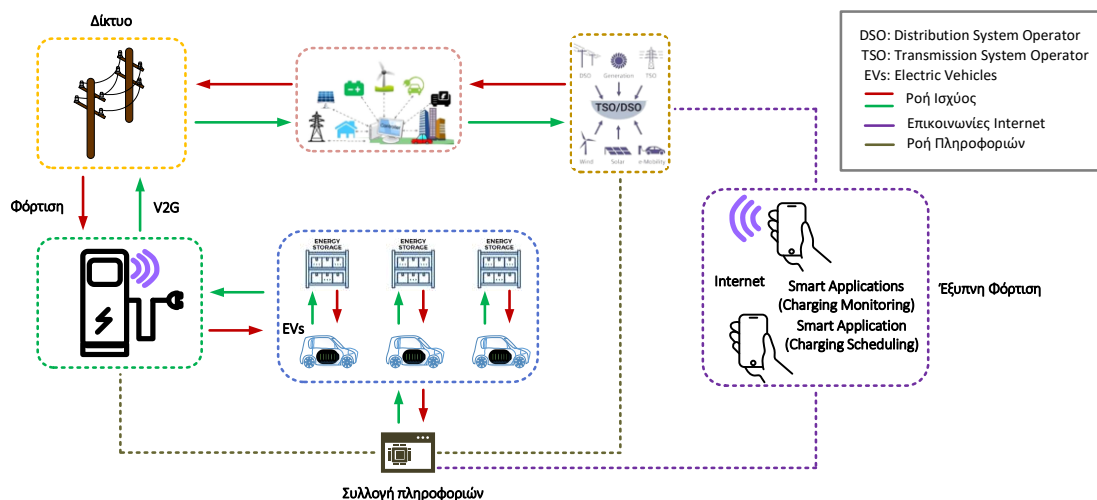
Σχήμα 1.5: Είδη φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.

1.4.1 Μέθοδος συμβατικής φόρτισης (μη ελεγχόμενη φόρτιση)

Στη μη ελεγχόμενη φόρτιση/εκφόρτιση, δεν συνίσταται ο προγραμματισμός κάποιων απαιτούμενων ηλεκτρικών οχημάτων για φόρτιση. Σ' αυτού του είδους την φόρτιση κάποιο ηλεκτρικό όχημα αρχίζει τη φόρτιση αμέσως μετά την σύνδεση του στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είτε εντός είτε εκτός ωρών αιχμής. Η προαναφερθείσα κεντρική ιδέα έχει ως αποτέλεσμα την απλότητα της μεθόδου εκθέτοντας το ηλεκτρικό όχημα απευθείας στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπρόσθετα, σ' αυτή τη μέθοδο ο διαχειριστής του δικτύου δεν λαμβάνει καμία πληροφορία είτε σχετικά με τον χρήστη (οδηγός) είτε με την κατάσταση του συστήματος (ηλεκτρικού οχήματος), το οποίο δύναται να προκαλέσει προβλήματα σχετικά με την σταθερότητα του δικτύου (stability), την ποιότητα ισχύος, την απόδοση και την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (SoC – State of Charge). Συμπερασματικά, στις περιπτώσεις μεγάλης κλίμακας φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων (π.χ. χώροι στάθμευσης) η επίδραση των προαναφερθέντων παραγόντων είναι κρίσιμοι τόσο για το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας όσο και για τις συσκευές αποθήκευσης των ηλεκτρικών οχημάτων. Επιπλέον, στη μη ελεγχόμενη φόρτιση το ηλεκτρικό όχημα φορτίζεται αμέσως μετά τη σύνδεση του ή αμέσως μετά τη πρόσθεση μιας σκόπιμης καθυστέρησης από τον χρήστη με σκοπό την έναρξη της διαδικασίας σε περιόδους μειωμένης ζήτησης.

1.4.2 Ελεγχόμενη φόρτιση

Η ελεγχόμενη μέθοδος φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων κέρδισε γρήγορα δημοτικότητα τόσο από την ερευνητική κοινότητα όσο και από τον διαχειριστή του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Τα πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η δυνατότητα προγραμματισμού της φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων με σκοπό την αποφυγή προβλημάτων ισχύος που μπορεί να προκληθούν από υπερφόρτωση του δικτύου και η σταθερότητα που προσφέρει κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Στη συνέχεια η απόδοση του διαχειριστή εξαρτάται από τις επιμέρους μεθόδους φόρτισης, οι οποίες αναλύονται παρακάτω. Στο Σχήμα 1.6 φαίνεται η καθολική απεικόνιση της δομής της ελεγχόμενης φόρτισης. [25]



Σχήμα 1.6: Μέθοδος ελεγχόμενης φόρτισης/εκφόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων.

Αναφορικά με τις υποκατηγορίες της ελεγχόμενης, συμπεριλαμβάνεται η άμεσα ελεγχόμενη φόρτιση. Η μέθοδος αυτή λαμβάνει υπόψη τις αποφάσεις των καταναλωτών. Η δημοτικότητα της μεθόδου έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια, εξαιτίας των ρυθμιζόμενων τιμών που προσφέρει η ηλεκτρική αγορά ενέργειας. Η αυξανόμενη τιμή της ενέργειας ωθεί μερικά ηλεκτρικά οχήματα στη φόρτιση εκτός των ωρών αιχμής όπου το δίκτυο έχει περίσσεια ενέργειας. Η μετατόπιση του φορτίου χωρικά αφήνεται στην απόφαση του χρήστη του ηλεκτρικού οχήματος, το οποίο είναι το χαρακτηριστικό αυτής της μεθόδου. Η άμεσα ελεγχόμενη φόρτιση υλοποιείται με δύο διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος τρόπος βασίζεται στη διαφορετική χρέωση της φόρτισης ανάλογα με τις ώρες αιχμής. Ο δεύτερος τρόπος έγκειται στη παροχή πρόσθετων υπηρεσιών όπως την χρέωση σε πραγματικό χρόνο μέσω αλγορίθμου που λαμβάνει υπόψη τον χρόνο χρήσης (χρόνος φόρτισης) και την τιμή της ενέργειας κάθε χρονική στιγμή. Ο αλγόριθμος χρέωσης λαμβάνει υπόψη αρχικά την ενέργεια που καταναλώθηκε και το κόστος φόρτισης αναφορικά με το δίκτυο διανομής στο οποίο έλαβε χώρα η διαδικασία. Δεύτερον, ο ιεραρχικός έλεγχος ηλεκτρικών οχημάτων, στον οποίο το ανώτερο στρώμα του ελεγκτή ελέγχει απευθείας το χαμηλότερο επίπεδο, με αποτέλεσμα τον έλεγχο του κόστους με βάση την αγορά και την διαχείριση ηλεκτρικών οχημάτων.

Όσον αφορά την δικατευθύντηρια φόρτιση, αυτή η μέθοδος ενισχύει την λειτουργία στο όχημα κατά την σύνδεση στο δίκτυο (Vehicle-to-Grid, V2G) την οποία τα ηλεκτρικά οχήματα εγχέουν ενέργεια στο δίκτυο. [5] Η παροχή ενέργειας στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι βολική τόσο για τους χρήστες όσο και για το ίδιο το δίκτυο από τη στιγμή που έρευνες έχουν δείξει ότι μένουν παρκαρισμένα το 90-95% της συνολικής τους ζωής. Επίσης υπάρχουν ποικίλες λειτουργίες της δικατευθυντήριας φόρτισης που ενισχύουν μακροπρόθεσμα τα πλεονεκτήματα της V2G λειτουργίας εκτός από την παροχή ενέργειας σε περιόδους υψηλής ζήτησης, όπως είναι η σύνδεση/αποσύνδεση απ' το δίκτυο και η λειτουργία ομαλής εκκίνησης/διακοπής. Αυτές οι λειτουργίες παρέχουν στους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων μειωμένα κόστη φόρτισης και ομαλότερη τάση εξόδου. Επιπρόσθετα, τα ηλεκτρικά οχήματα στην δικατευθυντήρια φόρτιση έχουν τον ρόλο του εξωτερικού μέσου αποθήκευσης γεφυρώνοντας το χάσμα ανάμεσα στην άγνωστη πηγή τροφοδοσίας και στην απρόσμενη υψηλή ζήτηση.

Στα πλαίσια της ελεγχόμενης φόρτισης ανήκει η μέθοδος του πολυεπίπεδου ιεραρχικού ελέγχου, η οποία διαφέρει σε σχέση με τις προαναφερόμενες. Αυτή η μέθοδος αποτελείται από έναν εξελιγμένο αλγόριθμο, ο οποίος συνδυάζοντας τον έλεγχο μέσω γενετικού αλγορίθμου και τεχνικές ελέγχου από τεχνητή νοημοσύνη παρουσιάζει έναν πολυεπίπεδο ιεραρχικό αλγόριθμο λήψης αποφάσεων βάση προτεραιότητας. Ο μηχανισμός λειτουργίας της ιεραρχικής μεθόδου έγκειται στην οργάνωση τεσσάρων διακριτών τομέων διανομής σύμφωνα με την φόρτιση της τρέχουσας υποδομής, π.χ. η κατάσταση SoC των μπαταριών, το κόστος φόρτισης και ο χρόνος χρήσης. Κατά τη διάρκεια της αιχμής αυτά τα τμήματα συνδέονται με το δίκτυο, ενώ αναγνωρίζουν τα ποσοστά προσφοράς και ζήτησης

σύμφωνα με τον μεγαλύτερο αριθμό συνδεδεμένων ηλεκτρικών οχημάτων που είναι σταθμευμένα στην περιοχή. Όταν υπάρχει μια υψηλή διαφορά μεταξύ της ζήτησης και της παροχής, όλοι οι πάροχοι επικοινωνούν μεταξύ τους για να καθορίσουν τον μέγιστο αριθμό ηλεκτρικών οχημάτων, τα οποία μπορούν να εγχέουν ισχύ στο δίκτυο.

1.4.3 Έξυπνη φόρτιση

Η έξυπνη φόρτιση παραμένει το κλειδί της διαφοροποίησης και της εξέλιξης του τομέα της αυτοκίνησης, δίνοντας ευελιξία στην αναπτυσσόμενη επιχείρηση των ηλεκτρικών οχημάτων. Για τους διαχειριστές των σταθμών φόρτισης υπάρχουν ξεκάθαρα οφέλη της χρήσης της έξυπνης φόρτισης, τα οποία συμπεριλαμβάνουν την μείωση των λειτουργικών εξόδων και το κόστος κεφαλαίου. Επιπλέον, οι χρήστες δεν χρειάζεται να επεκτείνουν την σύνδεση τους στο δίκτυο πληρώνοντας μηνιαίες χρεώσεις. Μία δημοφιλής πλατφόρμα που χρησιμοποιεί τη λογική της έξυπνης φόρτισης θέτοντας όρια στη χρέωση είναι η GreenFlux. Με την μαζική παραγωγή ηλεκτρικών οχημάτων καθίσταται αναγκαία η μαζική παραγωγή σημείων φόρτισης και ως εκ τούτου η διείσδυση της έξυπνης φόρτισης είναι αναγκαία. Το προαναφερθέν συμβαίνει γιατί η ηλεκτρική φόρτιση γίνεται πιο διαδεδομένη με την κλιμάκωση τόσο της αγοράς ηλεκτρικών οχημάτων όσο και των επιχειρήσεων, καθώς η έξυπνη φόρτιση παρακολουθεί την αυξανόμενη ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων που φορτίζουν ταυτόχρονα εξασφαλίζοντας ότι τα όρια της διαθεσιμότητας ενέργειας και της χωρητικότητας του οχήματος δεν ξεπερνιούνται. Ταυτόχρονα, η έξυπνη φόρτιση παρέχει ευελιξία στην ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Από την στιγμή που η παραγωγή των ΑΠΕ είναι λιγότερο προβλέψιμη, τα ηλεκτρικά οχήματα αποτελούν μια ιδανική έξοδο για την πλεονάζουσα παραγωγή ενέργειας. Συνεπώς, οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας μπορούν να προσαρμόσουν τα επιχειρηματικά τους μοντέλα για την χρησιμοποίηση της συνεργασίας των ηλεκτρικών οχημάτων με τις ΑΠΕ, ενώ οι τελικοί χρήστες μπορούν επίσης να επωφεληθούν από τις χαμηλότερες τιμές της ενέργειας. Τέλος, μέρος της έξυπνης φόρτισης προβλέπει οι χρήστες να μην επεμβαίνουν στη διαδικασία της χρέωσης της φόρτισης, αντ' αυτού η διαδικασία της χρέωσης αναλαμβάνεται εξ ολοκλήρου από τον αλγόριθμο διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων κατά τη διάρκεια της φόρτισης, ενώ οι χρήστες αποδέχονται τις αλλαγές έχοντας μια εφαρμογή ανάλογα τον πάροχο που θα τους ενημερώνει για την εξέλιξη της φόρτισης.

Η έξυπνη φόρτιση/εκφόρτιση μπορεί να υλοποιηθεί μόνο σε πραγματικό χρόνο, καθώς οι μηχανισμοί ελέγχου των σταθμών φόρτισης, των ηλεκτρικών οχημάτων και των επικοινωνιών με το υπόλοιπο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας απαιτούν μακροπρόθεσμες λύσεις και βοηθητικές υπηρεσίες.[19] Η έξυπνη φόρτιση αναφέρεται σε ένα σύστημα δια του οποίου η ανταλλαγή πληροφοριών ανάμεσα στα ηλεκτρικά οχήματα και στους σταθμούς φόρτισης διαμοιράζεται από τους σταθμούς φόρτισης στον διαχειριστή του συστήματος διανομής/μεταφοράς. Επιπρόσθετα, η έξυπνη φόρτιση επιτρέπει στον διαχειριστή του σταθμού φόρτισης την παρακολούθηση, τον έλεγχο και τον περιορισμό της απομακρυσμένης χρήσης των συσκευών τους με σκοπό τη βελτιστοποίηση της αντιμετώπισης της ζήτησης ενέργειας. Οι τεχνικές βελτιστοποίησης και οι έξυπνοι ελεγκτές που χρησιμοποιούνται στην

έξυπνη φόρτιση συνήθως αποσκοπούν στη διατήρηση της ποιότητας ισχύος και της ευστάθειας μέσα σε αποδεκτά οριακά επίπεδα αποφεύγοντας τις αστάθειες του δικτύου και ικανοποιώντας τα κριτήρια φόρτισης[19]. Οι παράμετροι που μελετώνται με σκοπό τη βελτιστοποίηση της έξυπνης φόρτισης είναι η ισχύς φόρτισης (ανταλλαγές ισχύος με το δίκτυο και με τα ηλεκτρικά οχήματα με μεγαλύτερη απόδοση), η πρόβλεψη της τιμής φόρτισης και η κατάσταση SOC της μπαταρίας κάθε στιγμή.

1.5 Δίκτυο Η.Ε και φόρτιση

Η προσθήκη ενός μεγάλου αριθμού οχημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο αποτελεί πρόκληση για την επιστημονική κοινότητα. Η έρευνα που εκτελείται επικεντρώνεται είτε στην ανάλυση των επιπτώσεων της ενσωμάτωσης των ηλεκτρικών οχημάτων στο σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, είτε στην ανάπτυξη τεχνικών μοντέλων για την ομαλή υιοθέτηση των ηλεκτρικών οχημάτων από το δίκτυο. Σύμφωνα με αναφερόμενες έρευνες, η πλειονότητα των ηλεκτρικών οχημάτων φορτίζεται μέσω φορτιστών που είναι εγκατεστημένοι στα οικιακά κτίρια. Οι προκλήσεις που αντιμετωπίζονται σε αυτό το πλαίσιο συνδέονται με οικονομικά ζητήματα, την αποτελεσματική λειτουργία και τα οφέλη που προκύπτουν από τον έλεγχο του δικτύου για βέλτιστη λειτουργία.[19]

Παρόλο που αναμένεται να υπάρξει φόρτιση ηλεκτρικών αυτοκινήτων, είτε σε δημόσιους σταθμούς στις πόλεις, είτε σε εμπορικά κέντρα, είτε σε σταθμούς φόρτισης που εγκαθίστανται στο χώρο εργασίας των εργαζομένων, αναμένεται να επηρεαστεί σημαντικά το ηλεκτρικό σύστημα διανομής ισχύος. Οι επιδράσεις αυτές μπορούν να περιλαμβάνουν από την υπερθέρμανση των μετασχηματιστών ισχύος έως τις απαιτούμενες επενδύσεις στις εγκαταστάσεις διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, η χρήση ηλεκτρικών οχημάτων συμβάλλει στη βελτίωση της απόδοσης και της ποιότητας της ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο. Το κείμενο εξετάζει τα οφέλη της ένταξης των ηλεκτρικών οχημάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο από δύο διαφορετικές προοπτικές: από την άποψη των ιδιοκτητών ηλεκτρικών οχημάτων και από την άποψη των δημόσιων υπηρεσιών. Και οι δύο περιπτώσεις αξιοποιούν ένα κοινό σύστημα αλληλεπίδρασης δικτύου οχήματος, το οποίο βασίζεται σε μια μονάδα συγκέντρωσης πληροφοριών ηλεκτρικών οχημάτων.

Η μονάδα αποτελεί ένα κεντρικό σημείο ελέγχου, που συντονίζει και διαχειρίζεται όλες τις απαιτούμενες δραστηριότητες, όπως την αλληλεπίδραση με τον διαχειριστή του συστήματος διανομής (DSO), τον διαχειριστή του συστήματος μεταφοράς (TSO) και τους παρόχους ενέργειας. Συνήθως, αυτή η μονάδα συγκέντρωσης πληροφοριών διατηρεί την σύνδεση μεταξύ των συμμετεχόντων στην ενεργειακή αγορά και των ιδιοκτητών ηλεκτρικών οχημάτων. Πέραν τούτου, μπορεί να αξιοποιηθεί η εικονική αρχιτεκτονική ενός Εικονικού Συνεργατικού Σταθμού Ηλεκτροπαραγωγής (Virtual Power Plant, VPP) για την ολοκλήρωση των ηλεκτρικών οχημάτων, όπου τα οχήματα συγκεντρώνονται και διαχειρίζονται ως μία κατανεμημένη μονάδα παραγωγής ενέργειας. Με την εικονική αρχιτεκτονική VPP, τα ηλεκτρικά οχήματα γίνονται ορατά για τους διαχειριστές του

συστήματος διανομής (DSO), του συστήματος μεταφοράς (TSO) και τους διαχειριστές του δικτύου (GO) μέσω της μονάδας συγκέντρωσης πληροφοριών και μπορούν εύκολα να συμμετέχουν στην αγορά ενέργειας. Μια πιθανή προοπτική είναι η ενσωμάτωση μεγάλου αριθμού ομάδων ηλεκτρικών οχημάτων, όπου ο κάθε ιδιοκτήτης θα έχει κεντρικό ρόλο στην αγορά ενέργειας. Κάθε ιδιοκτήτης θα είναι αφοσιωμένος στη διαχείριση της ζήτησης από το DSO, TSO και την αγορά ενέργειας, χρησιμοποιώντας την αμφίδρομη επικοινωνία και τα συστήματα ελέγχου. Η ενσωμάτωση αυτή βελτιώνει την τιμή χρέωσης, μειώνοντας το κόστος στους ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων, χωρίς να υπερφορτώνεται το δίκτυο ισχύος. Η ανταλλαγή πληροφοριών σε πραγματικό χρόνο είναι απαραίτητη για τη μεταφορά σημαντικών πληροφοριών, όπως η τιμή της ενέργειας και η πρόβλεψη ενέργειας. Για να γίνει αυτό επιτυχώς, η εξέλιξη των συμβατικών δικτύων σε έξυπνα δίκτυα ήταν αναπόφευκτη. Κατά την υλοποίηση των έξυπνων δικτύων, μπορούν να δημιουργηθούν προηγμένες υποδομές επικοινωνίας, οι οποίες θα διευκολύνουν τη διείσδυση των ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά ενέργειας. Κατά τη διαδικασία ενσωμάτωσης των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο, υπάρχουν δύο κατηγορίες ελέγχου που εξετάζονται ανάλογα με τη θέση τους στο δίκτυο[19]. Η πρώτη κατηγορία επικεντρώνεται στον άμεσο έλεγχο, ο οποίος αποσκοπεί στην επίτευξη των επιθυμητών λειτουργιών των ηλεκτρικών οχημάτων στο σύστημα ισχύος. Ο άμεσος έλεγχος αφορά λειτουργίες που δεν απαιτούν τη συμμετοχή του ιδιοκτήτη του οχήματος στον έλεγχο του ηλεκτρικού οχήματος που συνδέεται στο δίκτυο ισχύος. Ένα κοινό χρησιμοποιούμενο στοιχείο στον άμεσο έλεγχο είναι οι μονάδες συγκέντρωσης πληροφοριών. Αυτές οι μονάδες λειτουργούν ως κέντρα συγκέντρωσης και ελέγχου για μεγάλους αριθμούς ηλεκτρικών οχημάτων, και πρέπει να σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε να ανταποκρίνονται σε διάφορους στόχους ελέγχου, όπως έξυπνη φόρτιση και V2G υπηρεσίες. Οι ESPs, ή παροχής ενέργειας, παρέχουν την ενέργεια που χρειάζεται το σύστημα φόρτισης μέσω συμβολαίων με την αγορά ενέργειας. Το DSO είναι υπεύθυνο για τη λειτουργία και συντήρηση του δικτύου διανομής, καθώς και για την εγκατάσταση και λειτουργία των σταθμών φόρτισης για τα ηλεκτρικά οχήματα. Το Σύστημα Μετάδοσης Υψηλής Τάσης (TSO) εκτελεί αντίστοιχες λειτουργίες για το δίκτυο μεταφοράς υψηλής τάσης. Τα μοντέλα μεταβίβασης ενέργειας προωθούν προγράμματα μεταφοράς ενέργειας στους TSO, τα οποία περιέχουν πληροφορίες σχετικά με την παραγωγή και την κατανάλωση ενέργειας από τα Φυσικά Πρόσωπα (BG) κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους (περίπου 15 λεπτά). Οι TSO αξιοποιούν αυτές τις πληροφορίες για να αναλύσουν την ασφάλεια του ισχυρού δικτύου και να προβλέψουν τον αναμενόμενο τρόπο λειτουργίας. Ο συλλέκτης, ο οποίος δρα στο δίκτυο ισχύος, πρέπει να ανταλλάσσει πληροφορίες με τις διάφορες μονάδες και να λαμβάνει ανεξάρτητες πληροφορίες από κάθε Ηλεκτρικό Οχήματος με Φόρτιση Συνδεδεμένη που βρίσκεται σταθμευμένο σε μια συγκεκριμένη περιοχή του Υπευθύνου Προμηθευτή Διανομής. Οι πληροφορίες που συγκεντρώνονται περιλαμβάνουν την διαθεσιμότητα χώρου, τα επίπεδα φόρτισης των μπαταριών και τη χωρητικότητα κάθε ξεχωριστού Ηλεκτρικού Οχήματος με Φόρτιση Συνδεδεμένη.

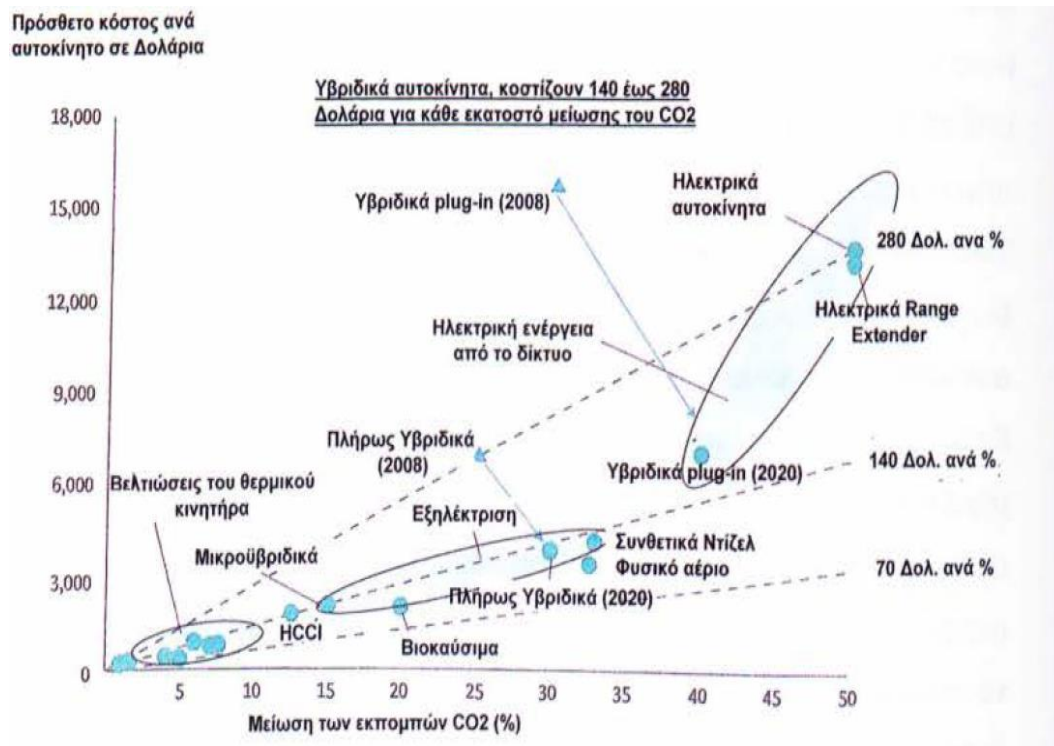
Αυτές οι πληροφορίες χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της ζήτησης ενέργειας και για την ευελιξία της διαδικασίας φόρτισης.[18],[19]

1.6 Διείδυση στην αγορά

Το ζήτημα που απασχολεί σήμερα τους παρατηρητές της τεχνολογικής προόδου των αυτοκινήτων είναι αν θα μπορέσουν να εξελιχθούν ώστε να γίνουν όσο το δυνατόν πιο φιλικά προς το περιβάλλον και πιο ενεργειακά αποδοτικά, με στόχο τη μείωση της άσκοπης κατανάλωσης πολύτιμων ενεργειακών πόρων, προκειμένου να διεισδύσουν τα υβριδικά και, στη συνέχεια, τα ηλεκτρικά οχήματα στην παγκόσμια αγορά. Η περαιτέρω εξέλιξη της τεχνολογικής επανάστασης στον τομέα αυτοκινήτων εξαρτάται όχι μόνο από οικονομικούς παράγοντες, αλλά και κυρίως από κοινωνικοπολιτικούς παράγοντες. Στο διάγραμμα του Σχήματος 1.5, απεικονίζεται η θέση της κάθε τεχνολογίας σε ένα σύστημα αξόνων, με τον οριζόντιο άξονα να αναφέρεται στην εκατοστιαία μείωση των εκπομπών του CO₂, ενώ ο κάθετος άξονας αναπαριστά το εκτιμώμενο πρόσθετο κόστος ανά αυτοκίνητο που συνδέεται με την εφαρμογή κάθε τεχνολογίας. Η εικόνα αυτή αποτυπώνει με οπτικό τρόπο το επιπλέον κόστος που απαιτείται από τους κοινωνικούς εταίρους, όπως μεμονωμένους αγοραστές, ομάδες ή οργανισμούς, καθώς και την κοινωνία στο σύνολό της μέσω της πολιτικής τους εκπροσώπησης.[5][1]

Στο παραπάνω κείμενο αναφέρεται ότι υπάρχουν δύο διαφορετικές θέσεις στο διάγραμμα που αναφέρονται σε διαφορετικές τεχνολογίες. Η πρώτη αναφέρεται στα κόστη συσσωρευτών των ετών 2008 και 2010, ενώ η δεύτερη αναφέρεται στα εκτιμώμενα κόστη συσσωρευτών του 2010. Επιπλέον, το διάγραμμα περιγράφει τρία διαφορετικά πεδία τεχνικών λύσεων για τη μείωση των εκπομπών CO₂. Το πρώτο πεδίο περιλαμβάνει τεχνολογίες βελτιώσεων των θερμικών κινητήρων και καλύπτει ποσοστό μείωσης έως 10%, ενώ το δεύτερο πεδίο αναφέρεται στην εισαγωγή ηλεκτρισμού στα προωστήρια συστήματα και καλύπτει ποσοστό μείωσης έως 35%. Το τρίτο πεδίο αφορά στην εκμετάλλευση της ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο και καλύπτει ποσοστό μείωσης έως 50%, ενώ ενδέχεται να φτάνει μέχρι και 100% για τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Για την ταχύτερη εκτίμηση της κάθε θέσης, έχουν δημιουργηθεί τρεις διαγώνιοι στο διάγραμμα, οι οποίες αντιστοιχούν σε κόστος ανά εκατοστιαία μονάδα μείωσης του CO₂, στα 70, 140 και 280 δολάρια αντίστοιχα. Βάσει του διαγράμματος, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και τα υβριδικά με μονάδα Range Extender θα είναι περίπου 12000 δολάρια ακριβότερα από τα συμβατικά αυτοκίνητα, αλλά θα προσφέρουν μειώσεις του CO₂ σε ποσοστό 50% και άνω. Τα παράλληλα ή μικτά υβριδικά Plug-in θα είναι πιο ακριβά κατά περίπου 7000 δολάρια και θα προσφέρουν μειώσεις του CO₂ σε ποσοστό 40%, ενώ τα πλήρως υβριδικά θα κοστίζουν περίπου 3000 δολάρια περισσότερο από τα συμβατικά αυτοκίνητα και θα προσφέρουν μειώσεις του CO₂ της τάξης του 30%. Από αυτά τα στοιχεία προκύπτει ότι η εισαγωγή αυτών των τεχνολογιών σε μεγαλύτερη κλίμακα θα απαιτήσει από τους αγοραστές να πληρώσουν ένα

μέρος του επιπλέον κόστους που θα προκύψει από τη μείωση των λειτουργικών δαπανών του αυτοκινήτου, εντός ενός λογικού χρονικού διαστήματος τριών έως πέντε ετών. Το υπόλοιπο κόστος θα πρέπει να αναληφθεί από το οικονομικοπολιτικό κατεστημένο, με κατευθυντήριες οδηγίες και κίνητρα. Η ευαισθητοποίηση της κοινωνίας και η πίεση από αυτήν για αυστηρότερες προδιαγραφές για τους κατασκευαστές και κίνητρα για τους αγοραστές θα παίξουν σημαντικό ρόλο στις εξελίξεις. Αυτό θα πρέπει να συνδυαστεί με τις διεθνείς τιμές των υγρών καυσίμων και την ανάγκη για άμεση λήψη μέτρων για την αντιμετώπιση των κλιματικών αλλαγών που απειλούν τον πλανήτη. [4],[7],[8]



Σχήμα 1.7: Διάγραμμα πρόσθετου κόστους οχήματος συναρτήσει της εκατοστιαίας μείωσης εκπομπών CO₂.

1.6.1 Μοντέλα εταιρειών

Τα υβριδικά αυτοκίνητα έχουν γίνει διαδεδομένο φαινόμενο στους δρόμους και ικανοποιούν διάφορες ανάγκες και προτιμήσεις των καταναλωτών. Πλέον, γνωστές αυτοκινητοβιομηχανίες παράγουν υβριδικά οχήματα για οικογενειακή χρήση, αγωνιστικά, μικρομεσαία αυτοκίνητα και αυτοκίνητα εκτός δρόμου. Στο επόμενο σημείο, θα γίνει αναφορά σε μερικά από τα υβριδικά αυτοκίνητα που είναι ήδη διαθέσιμα στην αγορά.

1.6.1.1 Toyota Prius

Η νέα έκδοση του μικρομεσαίου οικογενειακού αυτοκινήτου της TOYOTA είναι ένα πλήρως υβριδικό όχημα σειριακής-παράλληλης διάταξης, όπως και οι προηγούμενες εκδόσεις του. Το όχημα

κυκλοφόρησε στην αγορά τον Μάιο του 2009 και διαθέτει εξαιρετικά χαμηλή κατανάλωση καυσίμου στα 3,9 λίτρα ανά 100 χιλιόμετρα στον μεικτό κύκλο και εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στα 89 γραμμάρια ανά χιλιόμετρο.



Σχήμα 1.8: Toyota Prius

Το σύστημα κίνησης περιλαμβάνει έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης με χωρητικότητα 1,8 λίτρων και ισχύ 73 kW (98 ίππων) στις 5200 στροφές ανά λεπτό και ροπή 142 Nm, έναν ηλεκτρικό κινητήρα σύγχρονου μόνιμου μαγνήτη ισχύος 60 kW (80 ίππων) και ροπής 206 Nm, που λειτουργεί υπό τάση 650 V, και μια σύγχρονη γεννήτρια. Τα συσσωρευτικά είναι νικελίου-υδριδίου μετάλλου, αποτελούμενα από 168 κυψέλες των 1,2 V, με τάση εξόδου 202 V, μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ 27 kW, χωρητικότητα 6.5 Ah και μάζα μόλις 45 kg. Λόγω της περιορισμένης αποθηκευτικής ικανότητας των μπαταριών, το όχημα μπορεί να κινηθεί μόνο για δύο χιλιόμετρα με τον ηλεκτρικό κινητήρα. Αντί για τον συνήθη κύκλο Otto που χρησιμοποιείται συνήθως στα συμβατικά οχήματα, ο βενζινοκινητήρας λειτουργεί με τον θερμοδυναμικό κύκλο Atkinson. Αυτό επιτυγχάνει οικονομία καυσίμου, αλλά μικρότερη απόδοση του κινητήρα, λόγω της μεγαλύτερης διαδρομής του εμβόλου κατά τη φάση της εκτόνωσης. [1]

1.6.1.2 *Honda Insight*

Στην κατηγορία των μικρομεσαίων επιβατικών αυτοκινήτων κατατάσσεται το HONDA INSIGHT. Πρόκειται για ένα ήπιο υβριδικό (mild hybrid) όχημα, παράλληλης διάταξης, με μέση κατανάλωση στο

μεικτό κύκλο 4,4 λίτρα ανά 100 km και εκπομπές CO₂ 101 γραμμάρια. χιλιόμετρο.



Σχήμα 1.9: Honda Insight

Το σύστημα κίνησης του οχήματος αποτελείται από ένα βενζινοκινητήρα χωρητικότητας 1,3 λίτρων, μέγιστης ισχύος 73 kW (98 ίππων) και μέγιστης ροπής 120.6 Nm, έναν τριφασικό σύγχρονο κινητήρα ισχύος 10.4 kW (13 ίππων) και ροπής 78 Nm και συσσωρευτές νικελίου – μετάλλου υδριδίου με δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας της τάξεως των 0.58 kWh.

Το όχημα έχει τη δυνατότητα αμιγούς ηλεκτροκίνησης όταν το φορτίο δεν υπερβαίνει τα 5 kW κι όσο επιτρέπεται από το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας. Εξαιτίας της έλλειψης γεννήτριας οι μπαταρίες φορτίζονται αποκλειστικά μέσω ενεργειακής πέδησης. Ο ηλεκτρικός κινητήρας είναι διαρκώς συνδεδεμένος με το βενζινοκινητήρα και περιστρέφεται ως φορτίο από τη ΜΕΚ όταν δε τροφοδοτείται με τάση. Αντίθετα, κατά την κίνηση αποκλειστικά από τον ηλεκτροκινητήρα ανοίγουν οι βαλβίδες των κυλίνδρων του βενζινοκινητήρα, ώστε τα έμβολα του να κινούνται ελεύθερα κι ο ηλεκτροκινητήρας να έχει το ελάχιστο δυνατό φορτίο. Το κιβώτιο για τη μετάδοση της κίνησης είναι και σε αυτή την περίπτωση συνεχώς μεταβαλλόμενων σχέσεων (CVT).[1]

1.6.1.3 Ford Escape

Αναφέρεται στο πλήρες υβριδικό SUV της Ford, το οποίο επιτυγχάνει κατανάλωση περίπου 8 λίτρων ανά 100 χιλιόμετρα στον μεικτό κύκλο και έχει αυτονομία που φτάνει τα 800 χιλιόμετρα. Η κίνηση παράγεται από έναν βενζινοκινητήρα χωρητικότητας 2.3 λίτρων με ισχύ 97.8 kW (133 ίππων) στις 6000 rpm σε συνδυασμό με έναν ηλεκτροκινητήρα μόνιμου μαγνήτη ισχύος 69 kW (94 ίππων), που τροφοδοτείται από νικελίου - μετάλλου υδριδίου μπαταρίες με τάση εξόδου 330 V. Η μετάδοση γίνεται μέσω ενός ηλεκτρικά ελεγχόμενου κιβωτίου συνεχώς μεταβαλλόμενων σχέσεων. [1]



Σχήμα 1.10: Ford Escape

1.6.1.4 Mercedes-Benz Citaro G Bus

Το λεωφορείο Citaro G της Mercedes - Benz αποτελεί μια εναλλακτική επιλογή για τη μεταφορά μαζικού κοινού, καθώς προσφέρει δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας έως και 30% σε σχέση με τα συμβατικά πετρελαιοκίνητα μοντέλα. Πρόκειται για ένα τριαξονικό όχημα μήκους 18 μέτρων, που είναι σχεδιασμένο για να προσφέρει υψηλή απόδοση και οικονομία καυσίμου στην κίνηση του.[1]



Σχήμα 1.11: Mercedes-Benz Citaro G Bus.

Η επιλεγμένη τοπολογία είναι σειριακή και χρησιμοποιείται ένας κινητήρας diesel χωρητικότητας 4,8 λίτρων για τη φόρτιση των συσσωρευτών, ο οποίος αντικατέστησε τον προηγούμενο κινητήρα του IIAΔΑ, 1μημη Π&ΠΜΙ, διπλωματική εργασία, Ινικέλ Λεοί

συμβατικού οχήματος που είχε χωρητικότητα 6 λίτρων. Στους τροχούς του κεντρικού και του πίσω άξονα έχουν προσαρμοστεί τέσσερις τριφασικοί hub κινητήρες συνολικής ισχύος 320 kW. Οι συσσωρευτές που χρησιμοποιούνται είναι li-ion, ζυγίζουν 350 kg και βρίσκονται στην οροφή, παρέχοντας ισχύ έως 180 kW. Η κυκλοφορία του οχήματος στο δρόμο έχει οριστεί για το τέλος του έτους 2009.

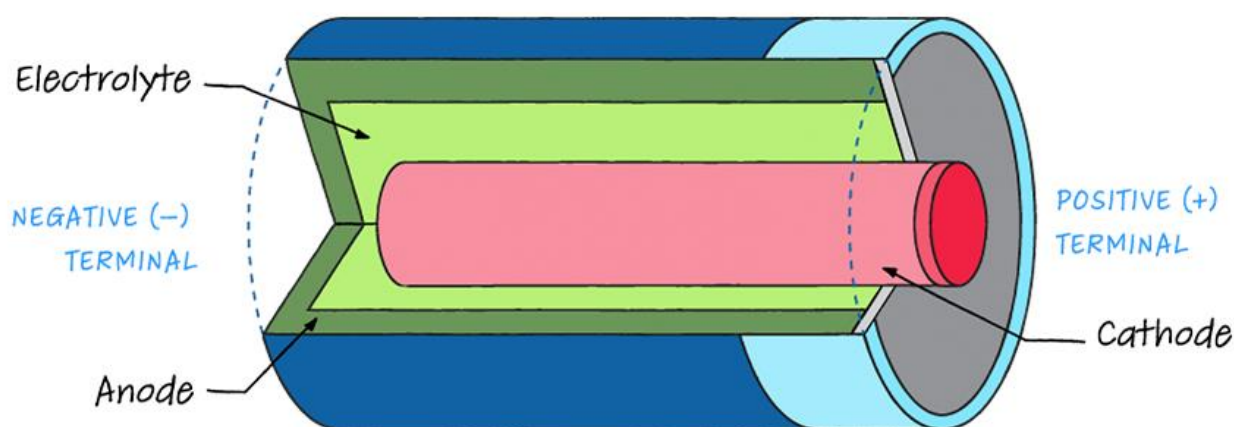
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν με λεπτομέρεια τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελούνται οι μπαταρίες, ο οποίος αποτελεί την πιο αποτελεσματική μέθοδο αποθήκευσης ενέργειας που διαθέτουμε αυτήν την χρονική στιγμή.

2.1 Αποθήκευση ενέργειας

Οι μπαταρίες είναι μια κλασική τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας, η οποία μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε χημική και την αποθηκεύει μέχρι να χρειαστεί να απελευθερωθεί. Όταν χρειάζεται, οι μπαταρίες εκφορτίζονται και απελευθερώνουν την αποθηκευμένη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική. Ωστόσο, οι μπαταρίες αντιμετωπίζουν αρκετά προβλήματα, όπως η σχετικά χαμηλή απόδοση και ο περιορισμένος χρόνος ζωής. Τα τελευταία χρόνια υπήρχε σκεπτικισμός σχετικά με τη χρήση τους για την αποθήκευση ενέργειας. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια μεγάλο μέρος της επιστημονικής κοινότητας έχει στραφεί στην μελέτη και την βελτιστοποίηση των μπαταριών, λόγω των πολλών εφαρμογών που βρίσκουν στην καθημερινή ζωή, όπως με τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα και την αποθήκευση της ενέργειας που παράγεται από ΑΠΕ.

Συχνά ακούμε τον όρο "μπαταρία", αλλά η βασική ηλεκτροχημική μονάδα είναι το στοιχείο (cell). Μία μπαταρία αποτελείται από ένα ή περισσότερα από αυτά τα στοιχεία, τα οποία μπορούν να συνδεθούν σε σειρά, παράλληλα, ή και τα δύο, για να επιτύχουμε την επιθυμητή τάση εξόδου και τη χωρητικότητα που χρειαζόμαστε. Υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες ηλεκτροχημικών στοιχείων και μπαταριών: πρωτεύουσες (μη επαναφορτιζόμενες) και δευτερεύουσες (επαναφορτιζόμενες), ανάλογα με το αν μπορούν να επαναφορτιστούν ηλεκτρικά. Και οι δύο κατηγορίες περιλαμβάνουν υποκατηγορίες που σχετίζονται με συγκεκριμένες δομές ή σχεδιασμούς.[27][9]



Σχήμα 2.1: Μέρη μιας μπαταρίας.

2.1.1 Χαρακτηριστικά των συσσωρευτών

Στο εν λόγω υποκεφάλαιο αναφέρονται ορισμένες μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν τις συνθήκες λειτουργίας μιας μπαταρίας και τις προδιαγραφές του κατασκευαστή σχετικά με τη χωρητικότητά της, την ονομαστική τάση άλλα και σχετικά μεγέθη τα οποία πρέπει να γνωρίζουμε.

ΣΤΟΙΧΕΙΟ (cell): Η μονάδα στοιχείου (cell) αναφέρεται στην ηλεκτροχημική μονάδα που είναι βασική για την παραγωγή ή αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας από αποθηκευμένη χημική ενέργεια. Απαρτίζεται από δύο ηλεκτρόδια που βρίσκονται μέσα σε ένα δοχείο γεμάτο με ηλεκτρολύτη, ενώ χρησιμοποιείται συχνά για τη σύνδεση περισσότερων στοιχείων σε σειρά ή παράλληλα προκειμένου να επιτευχθούν οι επιθυμητές προδιαγραφές στην τάση και τη χωρητικότητα της μπαταρίας.

ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ: Η χωρητικότητα μιας μπαταρίας αναφέρεται στο ποσό του ηλεκτρικού φορτίου που μπορεί να αποδώσει υπό ονομαστική τάση. Η χωρητικότητα αυτή εξαρτάται από την ποσότητα του ηλεκτροδίου που περιέχεται στην μπαταρία, καθώς και από το ρεύμα εκφόρτισης και τη θερμοκρασία. Η μέτρηση της χωρητικότητας γίνεται συνήθως σε Ah, με βάση ένα σταθερό ρεύμα εκφόρτισης που εκφορτίζει τη μπαταρία μέχρι μια ορισμένη τελική τάση εκφόρτισης. Η χωρητικότητα της μπαταρίας υπολογίζεται με τον πολλαπλασιασμό του ρεύματος εκφόρτισης με τον χρόνο που απαιτείται για να φτάσει η μπαταρία στην τελική της τάση. Οι κατασκευαστές μπαταριών έχουν τη δυνατότητα να καθορίσουν το ρεύμα εκφόρτισης και την τελική τάση. Για παράδειγμα, μια μπαταρία χωρητικότητας 100 Ah μπορεί να παρέχει 5 A σε διάστημα 20 ωρών σε δωμάτιο θερμοκρασίας. Επιπλέον, σημειώνεται ότι η χωρητικότητα μιας μπαταρίας μπορεί να διαφέρει μεταξύ μικρών και μεγάλων στοιχείων. Μια εναλλακτική μέθοδος για να προσδιορίσουμε τον ρυθμό εκφόρτισης μιας μπαταρίας είναι μέσω του C-rate. Αυτός ο ρυθμός εκφόρτισης υπολογίζεται ως πολλαπλάσιο της ονομαστικής χωρητικότητας της μπαταρίας. Για να βρούμε το C-rate, διαιρούμε το ρεύμα εκφόρτισης με το θεωρητικό ρεύμα που χρειάζεται για να εκφορτίσει τη μπαταρία σε μία ώρα. Για παράδειγμα, ένα C-rate ίσο με 1C σημαίνει ότι ολόκληρη η μπαταρία θα εκφορτιστεί σε μία ώρα. Αν η μπαταρία έχει χωρητικότητα 100Ah, τότε ο ρυθμός εκφόρτισης είναι 100A. Ένα C-rate ίσο με 5C θα αντιστοιχεί σε ένα ρεύμα 500A, το οποίο θα εκφορτίσει την μπαταρία σε 12 λεπτά. Αντίστοιχα, ένα C / 2 ποσοστό θα είναι ίσο με 50A και θα χρειαστεί 2 ώρες για να εκφορτίσει ολόκληρη την μπαταρία. [12],[15]

ΣΤΑΘΜΗ ΦΟΡΤΙΣΗΣ (STATE OF CHARGE ή SOC): Η στάθμη φόρτισης αναφέρεται στην ποσότητα της χωρητικότητας που μπορεί να αποδοθεί από μια μπαταρία σε μια συγκεκριμένη στιγμή. Όταν η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη, η στάθμη φόρτισης είναι 100%, ενώ όταν η ονομαστική χωρητικότητα έχει εκφορτιστεί, η στάθμη φόρτισης είναι 0%.

ΒΑΘΟΣ ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ (DEPTH OF DISCHARGE ή DOD): Το βάθος εκφόρτισης είναι μια εναλλακτική μέθοδος για να δείξει την κατάσταση φόρτισης μιας μπαταρίας (SOC). Αναφέρεται στο ποσοστό της χωρητικότητας που έχει αφαιρεθεί από μια πλήρως φορτισμένη μπαταρία. Το DOD είναι το αντίθετο του SOC, καθώς όταν το ένα αυξάνεται, το άλλο μειώνεται. Ενώ το SOC μετράται σε ποσοστά (0% =

άδειο και 100% = γεμάτο), το DOD μετράται και σε Ah (0 = γεμάτο και 50 Ah = άδειο) και σε ποσοστιαία βάση (100% = άδειο και 0% = γεμάτο).[10],[14]

ΚΥΚΛΟΣ ΖΩΗΣ: Ο όρος "κύκλος ζωής της μπαταρίας" αναφέρεται στον αριθμό πλήρων κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης που μπορεί να πραγματοποιήσει μια μπαταρία πριν αποδυναμωθεί η χωρητικότητά της κάτω από το 80% της αρχικής της χωρητικότητας. Αυτός ο όρος αποτελεί ένα μέτρο για τον αριθμό των κύκλων που μπορεί να πραγματοποιήσει μια μπαταρία κατά τη διάρκεια της ζωής της, και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το βάθος εκφόρτισης του κάθε κύκλου. Αν μετρήσουμε πειραματικά τον κύκλο ζωής για ένα υψηλό επίπεδο κατανάλωσης μπαταρίας (DOD), τότε το γινόμενο του αριθμού των κύκλων με το DOD παραμένει σχεδόν σταθερό για χαμηλότερα επίπεδα κατανάλωσης, δηλαδή ο κύκλος εργασιών που μπορεί να πραγματοποιήσει η μπαταρία είναι περίπου ίδιος για χαμηλότερα επίπεδα κατανάλωσης.[13]

ΑΥΤΟΕΚΦΟΡΤΙΣΗ: Η αυτοεκφόρτιση αφορά την απώλεια ηλεκτρικής ενέργειας που παρουσιάζεται όταν ένα στοιχείο δεν συνδέεται σε κάποια κατανάλωση. Αυτή η απώλεια οφείλεται σε εσωτερικές ηλεκτροχημικές διαδικασίες που συμβαίνουν στο εσωτερικό του στοιχείου και μπορεί να αντισταθμιστεί μέσω ενός μικρού εξωτερικού φορτίου. Για να μειωθεί η αυτοεκφόρτιση, συνιστάται η αποθήκευση των στοιχείων και των μπαταριών σε χαμηλές θερμοκρασίες.

ΤΑΣΗ ΑΠΟΚΟΠΗΣ: Η τάση αποκοπής αναφέρεται στην τάση της μπαταρίας στην οποία η εκφόρτιση σταματά και συνήθως αναφέρεται επίσης ως τάση τέλους εκφόρτισης

ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ : Λόγω της εσωτερικής αντίστασης της μπαταρίας, καθώς και του γεγονότος ότι η τάση κατά τη φόρτιση είναι υψηλότερη από αυτή κατά την εκφόρτιση, η ενέργεια που επιστρέφεται κατά την εκφόρτιση είναι μικρότερη από την ενέργεια που χρησιμοποιείται για την επαναφόρτιση της. Η απόδοση ενός συσσωρευτή ορίζεται ως η αναλογία μεταξύ της ενέργειας που αποθηκεύεται κατά τη φόρτιση και της ενέργειας που αποδίδεται κατά την εκφόρτιση. Όταν η απόδοση είναι υψηλή, υποδεικνύει ότι η μπαταρία αποθηκεύει και αποδίδει μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας:

$$\text{Amper hour-efficiency} = \frac{\text{discharged Ah} \times 100\%}{\text{charging Ah}}$$

2.1.2 Τύποι Μπαταριών

Οι τύποι μπαταριών που χρησιμοποιούνται ευρέως και οι νέες εκδόσεις που αναπτύσσονται συνεχώς, κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το είδος της μπαταρίας, είτε πρωτογενείς είτε δευτερογενείς. Αν και υπάρχουν διάφοροι συνδυασμοί υλικών ανόδου-καθόδου που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στις πρωτογενείς μπαταρίες, λίγες από αυτές έχουν επιτύχει στην πράξη. Ωστόσο, ο ψευδάργυρος αποτελεί το πιο δημοφιλές υλικό ανόδου για τις πρωτογενείς μπαταρίες. Τα βασικά πλεονεκτήματά του είναι η καλή ηλεκτροχημική συμπεριφορά και ισοδυναμία του, η συμβατότητα του με το εύρος υδάτινων ηλεκτρολυτών, η μεγάλη διάρκεια ζωής του, το χαμηλό κόστος και η άμεση διαθεσιμότητα του. Λόγω της υψηλής ηλεκτροχημικής δυναμικής και ισοδυναμίας του, το αλουμίνιο αποτελεί επίσης μια ελκυστική επιλογή για τις πρωτογενείς μπαταρίες. Ωστόσο, η παθητικοποίηση και η περιορισμένη

ηλεκτροχημική απόδοση του έχουν εμποδίσει την επιτυχή χρήση του ως πρωτογενούς μπαταρίας. Αυτό αντιμετωπίζεται τώρα στις μηχανικά επαναφορτιζόμενες ή ανεφοδιασμού αλουμινίου/αέρα μπαταρίες και στα αποθεματικά συστήματα μπαταρίας, όπου εξετάζεται η αξιοποίησή του. Το μαγνήσιο είναι ένα μέταλλο με ελκυστικές ηλεκτρικές ιδιότητες και χαμηλό κόστος, που χρησιμοποιείται συχνά στις πρωτογενείς μπαταρίες, ειδικά στις στρατιωτικές εφαρμογές, λόγω της υψηλής ενεργειακής πυκνότητάς και της μεγάλης διάρκειας ζωής του. Παρόλα αυτά, το εμπορικό ενδιαφέρον για το μαγνήσιο έχει μειωθεί. Τώρα, το ενδιαφέρον στρέφεται στο λίθιο, το οποίο έχει την υψηλότερη βαρυμετρική ενεργειακή πυκνότητα και είναι το πρότυπο για όλα τα μέταλλα. Η ανάπτυξη συστημάτων μπαταριών λιθίου, που χρησιμοποιούν διάφορους μη υδατικούς ηλεκτρολύτες με σταθερό λίθιο και διαφορετικά υλικά καθόδου, προσφέρει υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα και βελτιωμένες επιδόσεις. Οι κυριότεροι τύποι πρωτογενών μπαταριών περιλαμβάνουν:

- ✓ Ψευδαργύρου-Άνθρακα (Zn/C): οι κλασικές μπαταρίες, αξιοποιούνται για καθημερινές απλές χρήσεις και έχουν μικρή διάρκεια ζωής.
- ✓ Ψευδαργύρου-Χλωρίου (Zn/Cl): λόγω της υψηλότερης διάρκειας ζωής χρησιμοποιούνται σε πιο ενεργειακά απαιτητικές εφαρμογές.
- ✓ Αλκαλικές Μαγγανίου: διαθέτουν ακόμη μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από τις δύο προηγούμενες και είναι φιλικότερες προς το περιβάλλον.
- ✓ Αργύρου: είναι συνήθως κομβιόσχημες, περιέχουν οξείδιο του αργύρου και χρησιμοποιούνται σε ρολόγια.
- ✓ Λιθίου: μεγάλης διάρκειας ζωής, περιέχουν μεταλλικό λίθιο και χρησιμοποιούνται ευρέως στον φωτογραφικό εξοπλισμό και στα κινητά τηλέφωνα.
- ✓ Ψευδαργύρου-αέρα: επίσης κομβιόσχημες, έχουν την καινοτομία ότι αντί θετικού πόλου, χρησιμοποιείται το ατμοσφαιρικό οξυγόνο.
- ✓ Υδραργύρου: με οξείδιο του υδραργύρου, χρησιμοποιείται κυρίως για ιατρικές εφαρμογές, όπως ακουστικά βαρηκοΐας. Ωστόσο, ο υδράργυρος είναι εξαιρετικά τοξικός και επικίνδυνος για το περιβάλλον.[30]

Οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες είναι συσκευές που μπορούν να φορτιστούν και να εκφορτιστούν πολλές φορές. Η φόρτιση και η εκφόρτιση αυτών των μπαταριών συμβαίνει με τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική ενέργεια και αντίστροφα. Για να είναι αποτελεσματικές, πρέπει να έχουν υψηλή ενεργειακή απόδοση και να υπόκεινται σε ελάχιστες φυσικές αλλαγές, οι οποίες μπορούν να περιορίσουν τον κύκλο ζωής τους. Επιπλέον, πρέπει να αποφεύγεται η χημική αλλοίωση των συστατικών τους, καθώς αυτό επίσης μπορεί να περιορίσει τη διάρκεια ζωής τους. Για να λειτουργούν καλά, πρέπει επίσης να έχουν υψηλή ειδική ενέργεια, χαμηλή αντίσταση και να παρουσιάζουν καλή απόδοση σε ευρύ φάσμα θερμοκρασιών. Αυτές οι απαιτήσεις περιορίζουν τον

αριθμό των υλικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν με επιτυχία σε μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία.[16]

Οι ποιο διαδεδομένη συσσωρευτές είναι η παρακάτω :

- Νικελίου-σιδήρου (iron-nickel oxide)
- Σιδήρου-αέρα (iron-air)
- Νικελίου-καδμίου (nickel-cadmium, NiCd)
- Με ηλεκτρόδια σιδήρου
- Σιδήρου-αργύρου (iron-silver oxide)
- Ιόντων λιθίου (lithium-ion, li-ion)
- Νικελίου-καδμίου pocket plate
- Συσσωρευτής νικελίου-καδμίου sintered plate
- Νικελίου-μετάλλου υδριδίου (nickel-metal hydride, NiMH)
- Φορητοί νικελίου-υδριδίου μετάλλου κλειστού τύπου
- Νικελίου-υδριδίου μετάλλου βιομηχανικού τύπου και πρόωσης
- Νικελίου-ψευδαργύρου (zinc-nickel oxide)
- Μολύβδου-οξέος(Lead Acid)
- Οξειδίου αργύρου (silver-oxide)
- Ψευδαργύρου-μαγγανίου (rechargeable alkaline)
- Λιθίου (lithium)

2.2 Συσσωρευτές Αυτοκινήτων

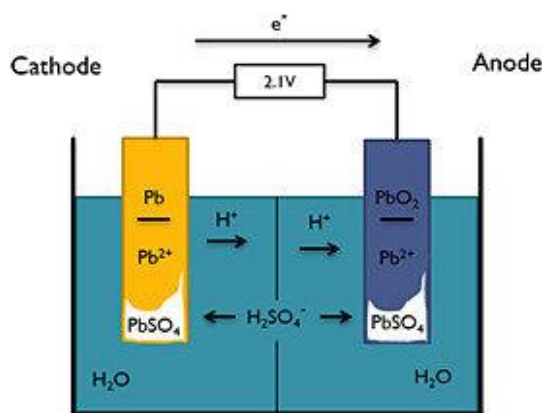
Υπάρχουν πολλά είδη μπαταριών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υβριδικά οχήματα. Ανάμεσά τους είναι οι μπαταρίες οξέος μολύβδου, νικελίου-καδμίου, νικελίου-μετάλλου υδριδίου, λιθίου πολυμερούς και λιθίου-σιδήρου, καθώς και οι μπαταρίες νατρίου-θείου και νατρίου χλωριδίου μετάλλου. Επιπλέον, υπάρχουν ορισμένα παραδείγματα μπαταριών που επαναφορτίζονται μηχανικά, όπως οι αλουμινίου αέρος και ψευδαργύρου-αέρος. Κάθε είδος μπαταρίας έχει τα δικά του χαρακτηριστικά και πλεονεκτήματα και αξίζει να εξεταστούν λεπτομερώς.[2]

2.2.1 Συσσωρευτές Μολύβδου-οξέος

Οι μπαταρίες οξέος μολύβδου, η χρήση των οποίων γίνεται στα υβριδικά οχήματα περιλαμβάνουν ηλεκτρολύτη σε μορφή ζελέ. Αντιθέτως δεν περιέχουν υγρό όπως αντίστοιχα οι μπαταρίες των συμβατικών αυτοκινήτων. Η επιφάνεια του αρνητικού ηλεκτροδίου καλύπτεται με σπογγώδη μόλυβδο (Pb), καθιστώντας με αυτό τον τρόπο την επιφάνεια ιδιαίτερα απορροφητική. Το θετικό ηλεκτρόδιο είναι επιστρωμένο και καλυμμένο με διοξείδιο μολύβδου (PbO₂). Ο ηλεκτρολύτης μέσα στον οποίο βυθίζονται τα δύο ηλεκτρόδια, απαρτίζεται από διάλυμα θειικού οξέος. Κατά την διάρκεια

εκφόρτωσης της μπαταρίας, το θειικό οξύ αντιδρά με τον μόλυβδο και το διοξείδιο του μολύβδου των δύο ηλεκτροδίων προς παραγωγή νερού, θειικού μολύβδου και ηλεκτρικής ενέργειας που ελκύεται κατά την πραγματοποίηση της διαδικασίας. Ο ηλεκτρολύτης εξαιτίας της παραγωγής νερού, αποκτάει μια πιο αραιή μορφή και ταυτόχρονα χάνει το θειικό οξύ.

Η μπαταρία μολύβδου-οξέος αποτελεί κατά συνέπεια το πιο διαδεδομένο είδος μπαταρίας. Αυτό οφείλεται στην πολύ χαμηλή τιμή της και συνάμα στην αξιοπιστία που προσδίδει με σχετικά υψηλή τάση ανά κελί (2V), που συνεπάγεται με την δυνατότητα μείωσης του αριθμούς τους ανά εφαρμογή (μείωση κόστους). Επιπρόσθετα, η οξέος μολύβδος χαρακτηρίζεται από την πολύ μικρή της εσωτερική αντίσταση σε σύγκριση με τα υπόλοιπα είδη. Αυτό το στοιχείο δικαιολογεί την μικρότερη πτώση τάσης κατά την λειτουργία της, δηλαδή οι απώλειες είναι λιγότερες. Η εσωτερική αντίσταση είναι αντιστρόφως ανάλογη της επιφάνειας των ηλεκτροδίων.[2]



Σχήμα 2.2: Μπαταρία οξέος μολύβδου.

2.2.2 Σύσσωρευτές Νικελίου

Οι μπαταρίες αυτές είναι χαρακτηριστικό ότι χρησιμοποιούν το στοιχείο του νικελίου στο θετικό ηλεκτρόδιο τους. Κατά κύριο λόγο υπάρχουν μόνο δύο είδη μπαταριών νικελίου που θεωρούνται ικανά και κατάλληλα να εφαρμοστούν σε υβριδικά σχήματα. Πιο συγκεκριμένα αναφερόμαστε στα στοιχεία νικελίου-καδμίου (Ni-Cd) και στο νικέλιο υδριδίου μετάλλου (Ni-MH) [1].

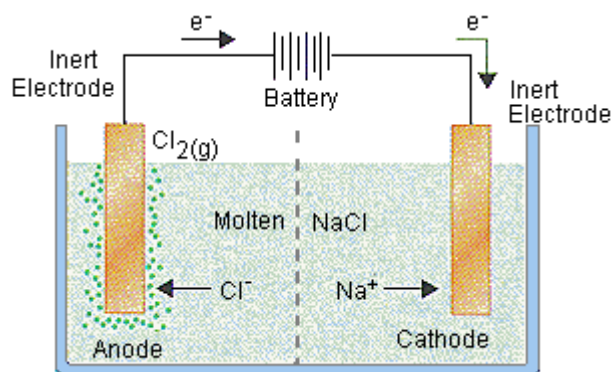
Οι (Ni-Cd) χρησιμοποιούν οξυδροξείδιο του νικελίου στο θετικό ηλεκτρόδιο τους και αντίστοιχα μεταλλικό κάδμιο στο αρνητικό τους ηλεκτρόδιο. Οι μπαταρίες Ni-Cd παρουσιάζουν ορισμένες διαφορές στον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν, σε σύγκριση με τις μπαταρίες οξέος μολύβδου. Σε αντίθεση με τις τελευταίες, κατά την διαδικασία εκφόρτισης του κελιού, σημειώνεται αποβολή νερού και αυτό έχει ως συνέπεια το διάλυμα του ηλεκτρολύτη να αποκτά μια διαρκώς πιο πηχτή μορφή. Η δεύτερη και εξίσου σημαντική διαφορά σημειώνεται στον τρόπο λειτουργίας των μπαταριών κατά την υπερφόρτιση. Το στοιχείο από την αρχή της κατασκευής του αποτελείται από ένα πλεόνασμα υδροξειδίου του καδμίου στο αρνητικό ηλεκτρόδιο. Έτσι, η άνοδος κατορθώνει πάντοτε να φορτίζεται πλήρως, διότι με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζεται η σημαντική ποσότητα υδροξυλίου που πρέπει να παραχθεί, ώστε να πραγματοποιηθεί η συμμετοχή στην αντίδραση φόρτισης της ανόδου.[2]

2.2.3 Συσσωρευτές Νατρίου

Η μπαταρίες που βασίζονται σε μεγάλη κλίμακα στο νάτριο, γνωστά ως στοιχεία θείου νατρίου και στοιχεία νατρίου-χλωριδίου μετάλλου, ή αλλιώς ως "zebra", μπορούν να περιγραφούν με άλλα λόγια. Αυτά τα είδη μπαταριών έχουν κοινά χαρακτηριστικά, όπως η παρουσία υγρού νατρίου σε ένα ή και τα δύο ηλεκτρόδια, καθώς και η χρήση ενός στερεού μορφής κεραμικού ηλεκτρολύτη. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι συσσωρευτές νατρίου είναι σε θέση να λειτουργήσουν σε υψηλές θερμοκρασίες (300-350 βαθμούς Κελσίου) και πρέπει επίσης να τονιστεί ότι τοποθετούνται σε περιβλήματα που είναι απόλυτα στεγανά.

Στο στοιχείο θείου νατρίου το αρνητικό ηλεκτρόδιο αποτελείται και απαρτίζεται από υγρό νάτριο και το θετικό ηλεκτρόδιο αντίστοιχα αποτελείται από υγρό θείο πολυσουφίδιο. Ο ηλεκτρολύτης ορίζεται ως ένα στερεό, κεραμικό αργιλιοξείδιο, το οποίο άγει επίσης τα ιόντα του νατρίου και δρα με επιτυχία ως διαχωριστική επιφάνεια για τα δύο ηλεκτρόδια. Τα κελιά γίνονται ευδιάκριτα από το μικρό τους μέγεθος. Είναι απολύτως απαραίτητο, το στοιχείο να προθερμαίνεται αργά στην θερμοκρασία λειτουργίας του έτσι ώστε να είναι πιο λειτουργικό. Η θέρμανση επιτυγχάνεται κατά την λειτουργία του μέσω θερμικών απωλειών εξαιτίας της εσωτερικής αντίστασης κατά την μεταφορά φορτίων. Αξιοσημείωτο είναι ότι ένα από τα πλεονεκτήματα είναι ότι όταν δεν λειτουργεί για περισσότερο από μία ώρα απαραίτητη είναι η εσωτερική του θέρμανση. Η ηλεκτρική ενέργεια, επίσης, παράγεται από την ένωση του νατρίου με το θείο προς παραγωγή θείου νατρίου.

Η θέρμανση της μπαταρίας αποτελεί μια διαδικασία που είναι πολύ απαιτητική και χρίζει ιδιαίτερης και λεπτομερείς προσέγγισης. Η απουσία ενεργών στοιχείων στα δύο ηλεκτρόδια και η αυστηρή διάχυση τους μόνο μέσω ενός εύθραυστου κεραμικού υλικού που παρουσιάζεται σε σχήμα σωλήνα, δεν εγγυάται την ασφάλεια του οχήματος και των επιβατών.[2]



Σχήμα 2.3: Μπαταρία νατρίου χλωρίου.

2.2.4 Συσσωρευτές αέρος – μέταλλου

Οι μπαταρίες αέρος-μετάλλου διαφέρουν από τις συνηθισμένες μπαταρίες, καθώς δεν είναι δυνατόν να αναστραφεί η φόρτισή τους μέσω της αντίθετης ροής ρεύματος. Για να φορτίσουν ξανά, πρέπει να αντικατασταθούν τα μεταλλικά ηλεκτρόδια και ο ηλεκτρολύτης τους με καινούργια. Υπάρχουν δύο είδη μπαταριών αέρος-μετάλλου: οι μπαταρίες αέρος-αλουμινίου και αέρος-ψευδαργύρου.

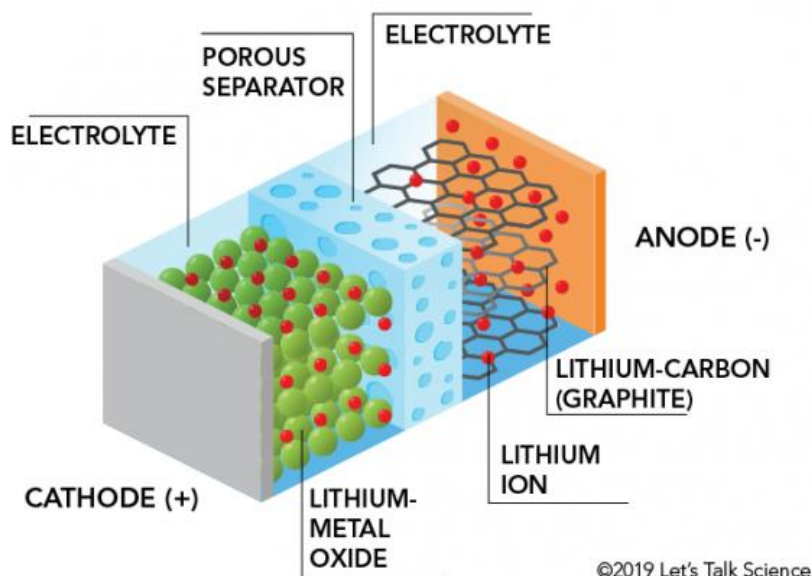
Στις μπαταρίες αέρος-αλουμινίου, το αρνητικό ηλεκτρόδιο κατασκευάζεται από αλουμίνιο, το οποίο αντιδρά με οξυγόνο και νερό για να δημιουργήσει υδροξείδιο αλουμινίου. Το θετικό ηλεκτρόδιο έχει πορώδη μορφή και περιλαμβάνει ένα μεταλλικό πλέγμα με μια στρώση καταλυτικού άνθρακα πάνω του. Ο ηλεκτρολύτης είναι ένα αλκαλικό διάλυμα και η μπαταρία παράγει ηλεκτρική ενέργεια. [5]

2.2.5 Συσσωρευτές Λιθίου

Οι συσσωρευτές λιθίου αποτελούν ένα είδος μπαταρίας που διαθέτουν την μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα καθώς και αντίστοιχα το μεγαλύτερο κόστος. Αξιοποιείται σε ένα μεγάλο εύρος εργασιών ενεργειακά απαιτητικές ή μη, ωστόσο ελλοχεύει κινδύνους ασφάλειας κατά την χρήση τους. Λόγω των απέραντων δυνατοτήτων τους, μεγάλη μερίδα της επιστημονικής κοινότητας στρέφεται στην έρευνά τους με αποτέλεσμα την διαρκή εξέλιξή τους. Επειδή βρίσκεται στα πρώιμα στάδια αναβάθμισης της, η τιμή της είναι πιο υψηλή σε σύγκριση με τα υπόλοιπα είδη μπαταριών. Δύο είδη μπαταριών που χρησιμοποιούνται σε ευρεία κατανάλωση είναι οι λιθίου – πολυμερούς και οι ιόντων λιθίου.

Τα χημικά στοιχεία λιθίου-πολυμερούς περιλαμβάνουν λίθιο στο αρνητικό τους ηλεκτρόδιο καθώς και μια στρώση από οξείδιο μετάλλου στο θετικό ηλεκτρόδιο, διαθέτοντας ως ηλεκτρολύτη ένα αγώγιμο πολυμερές. Στην συνέχεια αντιδρά το λίθιο με το οξείδιο του μετάλλου παράγοντας οξείδιο του λιθίου και εκλύοντας συνάμα ενέργεια. Το λίθιο ενδέχεται να οριστεί και ως αντιδρών χημικό στοιχείο και ταυτόχρονα μετακινείται εντός του ηλεκτρολύτη.

Η στερεά κατάσταση του λιθίου στο αρνητικό ηλεκτρόδιο παρουσιάζει προβλήματα ασφάλειας στην μπαταρία. Ωστόσο, με την ανακάλυψη των μπαταριών ιόντων λιθίου το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίστηκε. Ο συσσωρευτής λιθίου περιέχει στο θετικό του ηλεκτρόδιο μια στρώση οξειδίου και αντίστοιχα το αρνητικό έχει λιθιούχο άνθρακα. Το υγρό οργανικό διάλυμα όπως και το στερεό πολυμερές μπορούν να λειτουργήσουν και ως ηλεκτρολύτες. Η αντίδραση του λιθιούχου άνθρακα με το οξείδιο λιθιούχου μετάλλου παράγει ηλεκτρόνια και ως αποτέλεσμα αυτής της αντίδρασης δημιουργούνται προϊόντα άνθρακα και οξειδίου λιθιούχου μετάλλου.



Σχήμα 2.4: Μπαταρία ιόντων λιθίου.

2.2.6 Λίθιο

2.2.6.1 Γενικά λίθιο

(λατινικά: Lithium, από την ελληνική λέξη «λίθος») είναι το χημικό στοιχείο με το χημικό σύμβολο Li. Το χημικώς καθαρό λίθιο, υπό κανονικές συνθήκες, είναι μαλακό, στερεό και αργυρόλευκο μέταλλο με κανονικό σημείο τήξης 180,50° C και κανονικό σημείο βρασμού 1.330° C. Ανήκει στα αλκάλια, δηλαδή στην ομάδα 1 του περιοδικού πίνακα. Είναι επίσης το ελαφρύτερο μέταλλο, αλλά και το ελαφρύτερο στερεό χημικό στοιχείο από όλα. Όπως και άλλα αλκαλικά μέταλλα, το λίθιο είναι εξαιρετικά δραστικό και εύφλεκτο. Για το λόγο αυτό αποθηκεύεται συνήθως κάτω από ένα στρώμα πετρελαίου. Τέλος λόγω της υψηλής χημικής του δραστηριότητας, το λίθιο δεν έχει βρεθεί στη φύση σε στοιχειώδη κατάσταση, εκτός από τη μορφή των ενώσεών του, συνήθως ιοντικών .

2.2.6.2 Πηγή

Το λίθιο είναι το 33ο πιο άφθονο στοιχείο που βρίσκεται στη γη. Δεν διατίθεται σε καθαρή μεταλλική μορφή επειδή αντιδρά με νερό και αέρα. Συνδυάζεται πάντα με άλλα στοιχεία σε μικτή μορφή. Το λίθιο εμφανίζεται στα ορυκτά σποδοού μένος, λεπιδολίτης, που βρίσκονται στις Ηνωμένες Πολιτείες και σε πολλές χώρες της Ευρώπης, της Αφρικής και της Αμερικής .Ο διαχωρισμός των αλάτων λιθίου από το μεταλλικό νερό, προέρχονται από πηγές, καθώς και από αλυκές ή και από αποθέματα άλμης ή και ορυκτών αλάτων. Το στοιχειακό λίθιο παρασκευάζεται ηλεκτρολυτικά από ένα τήγμα που αποτελείται από 55% χλωριούχο λίθιο (LiCl) και 45% χλωριούχο κάλιο (KCl) που θερμαίνεται στους 450 βαθμούς Κελσίου.(Greenwood, 1997) Τέλος, τα γεωθερμικά πηγάδια είναι μία από τις πιθανές πηγές λιθίου. Το νερό έκπλυσης μεταφέρεται στην επιφάνεια με γεωθερμικά υγρά. Έχει αποδειχθεί ότι το λίθιο μπορεί να εξαχθεί από τέτοια πηγάδια . Επειδή το λίθιο εξάγεται χρησιμοποιώντας μια απλή

τεχνολογία φιλτραρίσματος, το κόστος του περιβάλλοντος και της διαδικασίας είναι σε μεγάλο βαθμό αυτό των σημερινών γεωθερμικών φρεατίων. Μια τέτοια εκμετάλλευση μπορεί να έχει αρνητικές περιβαλλοντικές συνέπειες. (Parker, 2015)

2.2.6.3 Τιμή

Λόγω της αύξησης της παγκόσμιας ζήτησης για ηλεκτρικά οχήματα, ενώ η προσφορά είναι ακόμα σταθερή, η τιμή του ανθρακικού λιθίου συνεχίζει να αυξάνεται στα 92.500 ¥ (Yuan) ανά τόνο (12.069 € ανά τόνο) (Σχήμα 2.5), το υψηλότερο επίπεδο από τον Αύγουστο του 2018 (Trading Economics) Για το Υδροξείδιο του λιθίου, 56,5% LiOH, η τελευταία τιμή σύμφωνα με Argus είναι 17,750 \$ (14,95 €) (Σχήμα 2.6), στις 31 Αυγούστου 2021 (Argus)



Σχήμα 2.5: Αναλύοντας την εξέλιξη της τιμής του Ανθρακικού Λιθίου τα τελευταία χρόνια.

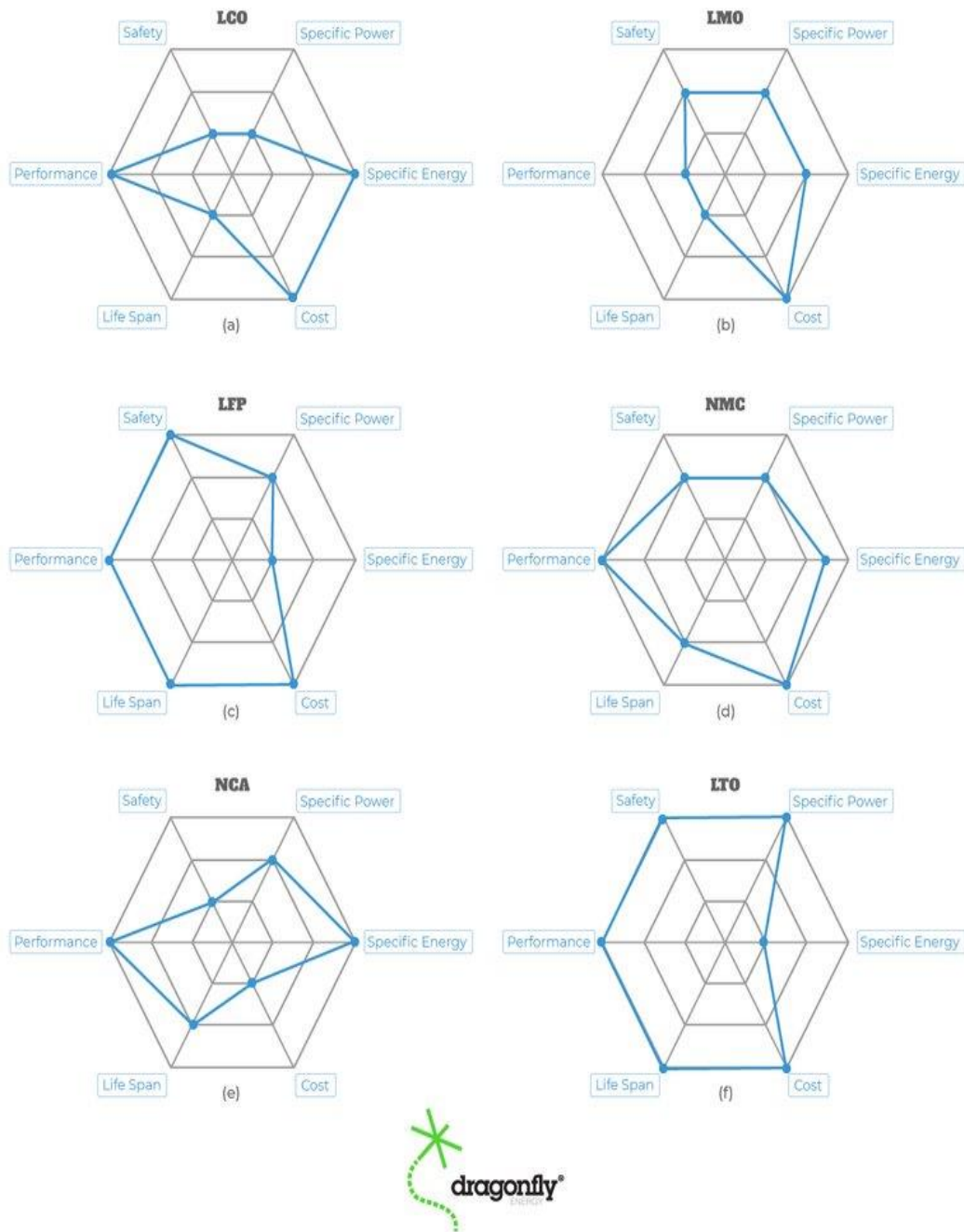


Σχήμα 2.6: Διάγραμμα ζήτησης ανάλυσης του λιθίου το χρονικό διάστημα 2013-2025 (Brian, 2016)

2.2.6.4 *Εξι κύριοι τύποι μπαταριών λιθίου-ιόντων.*

Ανάλογα με τα χημικά και τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των κυψελών λιθίου-ιόντων, αυτές έχουν διάφορα χαρακτηριστικά. Δεν υπάρχει "μαγική λύση" όταν πρόκειται για τις χημείες των λιθίου-ιόντων, καθώς καθεμία έχει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της. Αυτό καθορίζει τις καλύτερες εφαρμογές για κάθε τύπο. Οι διάφοροι τύποι ονομάζονται ανάλογα με τα ενεργά υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τους - για παράδειγμα, φωσφορικό λιθίου ή LiFePO_4 είναι ο τύπος που η Tesla άρχισε πρόσφατα να χρησιμοποιεί στη βασική έκδοση του μοντέλου 3. Αυτοί είναι γνωστοί και ως LFP και χρησιμοποιούν φωσφορικό ως υλικό καθόδου και άνθρακα ως ανόδου. Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και καλή θερμική σταθερότητα, καθώς και ηλεκτρομηχανικές επιδόσεις, αλλά έχουν χαμηλή ειδική ενέργεια. Η ονομαστική τους τάση είναι υψηλή, στα 3,2 βολτ, έτσι η σύνδεση τεσσάρων κυττάρων θα οδηγήσει σε μια πολύ βολική μπαταρία 12,8 βολτ. Γι' αυτόν τον λόγο, η χημεία LFP είναι η καλύτερη για την αντικατάσταση μπαταριών μολύβδου-οξέος βαθιάς εκφόρτισης σε διάφορες εφαρμογές. Μπορούν επίσης να είναι πολύ καλές για ηλεκτρικά οχήματα, όπως έχει ήδη αποδείξει η Tesla.

Common Lithium-Ion Battery Type Characteristics



Σχήμα 2.7: Εξι κύριοι τύποι μπαταριών λιθίου-ιόντων (Agatie, 2022)[35]

- [1]. Οι μπαταρίες λιθίου-κοβαλτίου οξειδίου (LCO) έχουν υψηλή ειδική ενέργεια αλλά χαμηλή ειδική ισχύ, πράγμα που σημαίνει ότι είναι κατάλληλες για συσκευές χαμηλής ισχύος, όπως φορητές ηλεκτρονικές συσκευές, τηλέφωνα και φορητούς υπολογιστές. Η ασφάλεια αποτελεί ανησυχία και γι' αυτόν τον λόγο χάνουν δημοτικότητα σε σχέση με άλλες χημείες. Έχουν επίσης μικρή διάρκεια ζωής, ενώ το κοβάλτιο είναι πολύ ακριβό
- [2]. Αυτοί είναι γνωστοί και ως LFP και χρησιμοποιούν φωσφορικό ως υλικό καθόδου και άνθρακα ως ανόδου. Έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και καλή θερμική σταθερότητα, καθώς και ηλεκτρομηχανικές επιδόσεις, αλλά έχουν χαμηλή ειδική ενέργεια. Η ονομαστική τους τάση είναι υψηλή, στα 3,2 βολτ, έτσι η σύνδεση τεσσάρων κυττάρων θα οδηγήσει σε μια πολύ βολική μπαταρία 12,8 βολτ. Γι' αυτόν τον λόγο, η χημεία LFP είναι η καλύτερη για την αντικατάσταση μπαταριών μολύβδου-οξέος βαθιάς εκφόρτισης σε διάφορες εφαρμογές. Μπορούν επίσης να είναι πολύ καλές για ηλεκτρικά οχήματα, όπως έχει ήδη αποδείξει η Tesla.
- [3]. Οι μπαταρίες λιθίου-μαγγανίου οξειδίου (LMO) χρησιμοποιούν μαγγάνιο οξείδιο ως υλικό καθόδου, με αποτέλεσμα μια τρισδιάστατη δομή του καθόδου. Αυτό βελτιώνει τη ροή των ιόντων, με ταυτόχρονα οφέλη υψηλότερης ροής ρεύματος και βελτιωμένης θερμικής σταθερότητας και ασφάλειας. Οι μπαταρίες LMO φορτίζονται γρήγορα και προσφέρουν υψηλή ειδική ισχύ, καθιστώντας τις ιδανικές για εργαλεία ισχύος και ακόμη κάποια υβριδικά και ηλεκτρικά οχήματα. Ο κύριος περιορισμός είναι η πολύ μικρή διάρκεια ζωής - διαρκούν μόνο 300-700 κύκλους φόρτισης.
- [4]. Οι μπαταρίες λιθίου-νικελίου μαγγανίου κοβαλτίου (NMC) προσφέρουν υψηλή ειδική ενέργεια ενώ παραμένουν πολύ σταθερές. Αυτό τις καθιστά κατάλληλες για εργαλεία ισχύος, αλλά κυρίως για κινητήρες για ηλεκτρικά πατίνια, ηλεκτρικά ποδήλατα και ορισμένα ηλεκτρικά οχήματα. Ο κύριος περιορισμός είναι η χαμηλότερη τάση σε σύγκριση με άλλες χημείες μπαταριών.
- [5]. Οι μπαταρίες λιθίου-νικελίου-κοβαλτίου-αργιλίου (NCA) προσφέρουν την υψηλότερη ειδική ενέργεια με αξιοπρεπή ειδική ισχύ και μακρά διάρκεια ζωής. Γι' αυτόν τον λόγο, είναι κατάλληλες για την αγορά ηλεκτρικών οχημάτων, παρά το γεγονός ότι απαιτούν κατάλληλους μηχανισμούς ασφαλείας εξαιτίας της μεγαλύτερης αστάθειάς τους. Η Tesla χρησιμοποιεί μπαταρίες NCA για την πλειονότητα των οχημάτων της, εκτός από τη βασική έκδοση του Model 3, η οποία πρόσφατα άρχισε να χρησιμοποιεί τη χημεία LFP.
- [6]. Οι μπαταρίες λιθίου τιτανικού (LTO) χρησιμοποιούν αυτό το υλικό αντί για γραφίτη στην άνοδο, ενώ η κάθοδος κατασκευάζεται είτε με χημεία LMO είτε με χημεία NMC. Αυτό οδηγεί

σε μια εξαιρετικά ασφαλή μπαταρία με μακρά διάρκεια ζωής που φορτίζει πιο γρήγορα από οποιονδήποτε άλλο τύπο μπαταρίας. Παρόλο που ακούγονται ιδανικές, έχουν επίσης χαμηλή πυκνότητα ενέργειας και είναι επίσης πολύ ακριβές. Συνήθως χρησιμοποιούνται σε στρατιωτικό ή αεροδιαστημικό εξοπλισμό, αποθήκευση ενέργειας από αιολικά και ηλιακά συστήματα, καθώς και σε σταθμούς φόρτισης και ορισμένα ηλεκτρικά οχήματα.

Από αυτούς τους έξι τύπους μπαταριών λιθίου-ιόντων, είναι εύκολο να μαντέψετε ότι ο τύπος LCO είναι ο πιο δημοφιλής σήμερα, παρά τα πολλά του μειονεκτήματα. Αυτό συμβαίνει επειδή το σύνολο των κινητών τηλεφώνων και φορητών συσκευών στον πλανήτη χρησιμοποιεί αυτόν τον τύπο χημείας και αυτά τα προϊόντα αριθμούν σε δισεκατομμύρια. Για τα ηλεκτρικά οχήματα, ωστόσο, οι τύποι NCA/NCM είναι οι πιο δημοφιλείς, με τις μπαταρίες LFP να κάνουν πρόσφατα πρόοδο επίσης.

Παρόλο που αυτοί είναι οι πιο δημοφιλείς τύποι, αυτό δεν σημαίνει ότι άλλοι τύποι δεν βρίσκονται διαρκώς σε ανάπτυξη. Οι επιστήμονες εργάζονται σκληρά για να αντικαταστήσουν το λίθιο με άλλα υλικά, ενώ ο ηλεκτρολύτης υπόκειται επίσης σε συνεχείς βελτιώσεις. Οι μπαταρίες στερεάς κατάστασης, οι οποίες χρησιμοποιούν στερεό ηλεκτρολύτη, είναι επίσης σε ανάπτυξη και υπόσχονται να επεκτείνουν περαιτέρω τις δυνατότητες των μπαταριών Li-ion, εξαλείφοντας ταυτόχρονα μερικά από τα μειονεκτήματά τους.

2.2.6.5 Οι τύποι συσκευασίας που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά οχήματα είναι οι εξής:

Όταν πρόκειται για ηλεκτρικά οχήματα, η χημεία δεν είναι το μόνο που έχει σημασία. Έχει επίσης σημασία η συσκευασία, και διάφοροι κατασκευαστές αυτοκινήτων χρησιμοποιούν διάφορους τύπους μπαταριών. Οι τρεις βασικοί τύποι συσκευασίας που χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά οχήματα είναι οι κυλινδρικές, πρισματικές και θήκης. Αυτό περιπλέκει τα πράγματα ακόμα περισσότερο, καθώς κάθε τύπος συσκευασίας έχει διαφορετικές ιδιότητες.

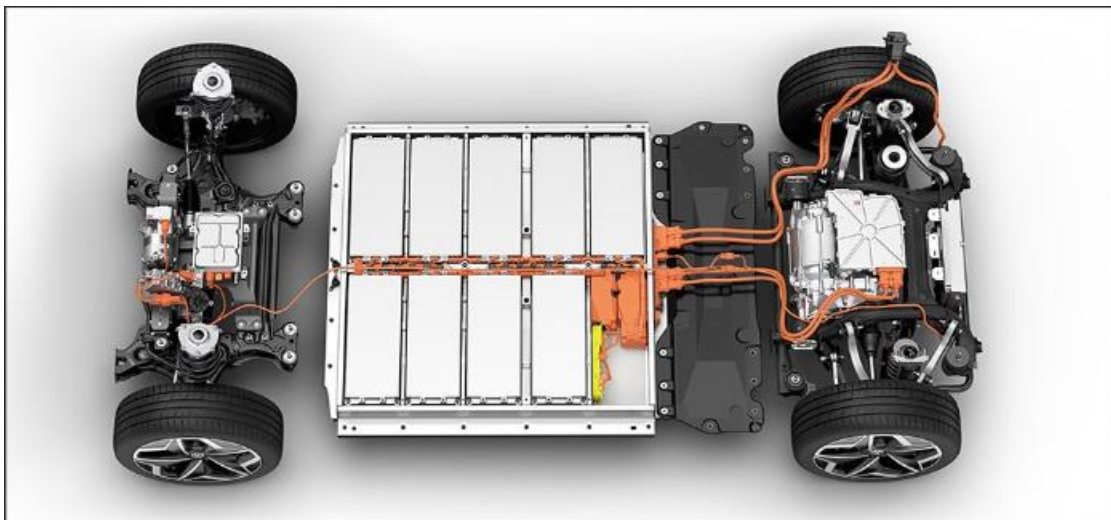
Για παράδειγμα, η Tesla χρησιμοποιεί κυλινδρικά κελιά λόγω της αξιοπιστίας και της ανθεκτικότητάς τους. Η συστοιχία μπαταριών σε ένα όχημα Tesla περιέχει χιλιάδες κύτταρα που μπορεί να είναι επιβαρυντικά. Η Tesla προσπαθεί να βελτιώσει την πυκνότητα χρησιμοποιώντας μεγαλύτερες κυλινδρικές μπαταρίες, από τα κύτταρα 18650 στο παρελθόν στα 2170 κύτταρα πρόσφατα και τα κύτταρα 4680 στο μέλλον

Οι πρισματικές κυψέλες έχουν το πλεονέκτημα του χαμηλότερου βάρους και της καλύτερης αναπλήρωσης του χώρου χάρη στον ορθογώνιο σχήμα τους. Η Volkswagen χρησιμοποιεί πρισματικές

κυψέλες για τα πρόσφατα οχήματα της πλατφόρμας MEB, όπως το ID.3 και το ID.4. Ωστόσο, οι πρισματικές μπαταρίες έχουν μικρότερη διάρκεια ζωής από τις κυλινδρικές μπαταρίες.

Ο τρίτος τύπος είναι οι μπαταρίες τύπου θήκης που είναι τοποθετημένες σε λεπτές, μεταλλικές θήκες. Αυτό τις καθιστά πιο ευέλικτες, αλλά αυτός ο τύπος είναι επίσης επιρρεπής στο φούσκωμα και δημιουργεί κίνδυνο πιθανής πυρκαγιάς. Οι GM και Hyundai χρησιμοποιούν μπαταρίες τύπου θήκης και γνωρίζουμε πώς λειτούργησαν για αυτούς.

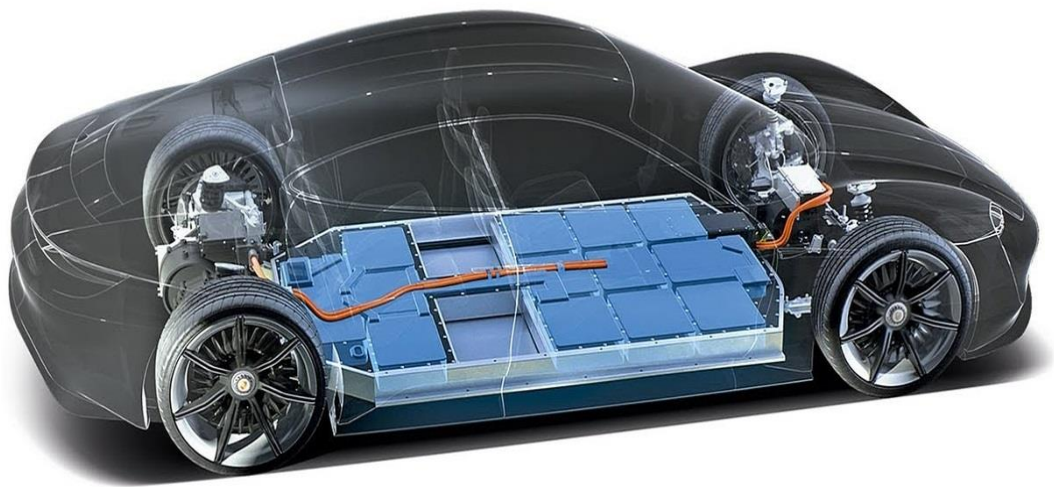
Παρ' όλα αυτά, οι κατασκευαστές αυτοκινήτων χρησιμοποιούν προηγμένα συστήματα διαχείρισης μπαταρίας και συστήματα θερμικού ελέγχου για να διατηρούν τη λειτουργία τους όσο το δυνατόν βέλτιστη και να επεκτείνουν τη διάρκεια ζωής τους. Αυτό είναι το λόγο γιατί τα ηλεκτρικά οχήματα δεν χρειάζονται αντικατάσταση μπαταρίας για τουλάχιστον 200.000 μίλια (322.000 χιλιόμετρα), είναι δηλαδή συγκρίσιμα με τις περισσότερες τρέχουσες εσωτερικής καύσης κινητήρες σε αυτόν τον τομέα.



Σχήμα 2.8: Σύστημα cells ID.3



Σχήμα 2.9: Σύστημα cells ID.4



Σχήμα 2.10: Πρισματικές κυψέλες μπαταριών λιθίου.



Σχήμα 2.11: Πρισματικές μπαταρίες.

2.2.7 Υπολογισμός μπαταριών Bev

Σχεδιασμός EV – υπολογισμός μπαταρίας

Η μπαταρία υψηλής τάσης είναι ένα από τα πιο σημαντικά στοιχεία ενός **ηλεκτρικού οχήματος με μπαταρία (BEV)**. Οι παράμετροι της μπαταρίας έχουν σημαντική επίδραση σε άλλα εξαρτήματα και χαρακτηριστικά του οχήματος, όπως:

- μέγιστη ροπή έλξης κινητήρα
- μέγιστη ροπή πέδησης αναγέννησης
- αυτονομία του οχήματος
- συνολικό βάρος οχήματος
- τιμή οχήματος

Σχεδόν όλες οι κύριες πτυχές ενός αμιγώς ηλεκτρικού οχήματος (EV) εξαρτώνται από τις παραμέτρους της **μπαταρίας υψηλής τάσης**.

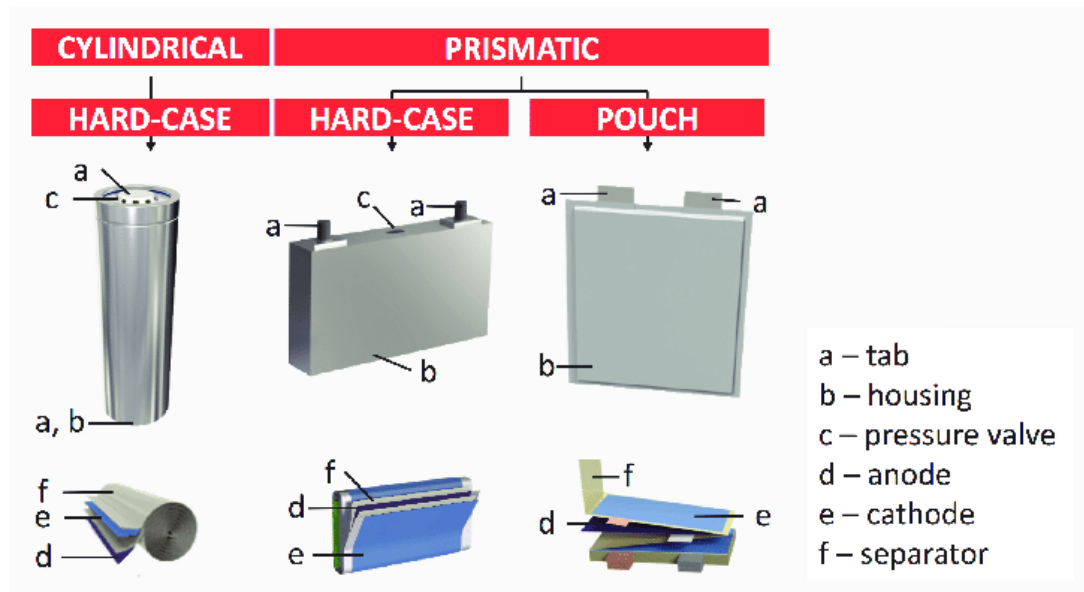
Για τον σχεδιασμό της μπαταρίας των ηλεκτρικών οχημάτων μας, θα ξεκινήσουμε από 4 βασικές παραμέτρους εισόδου:

- χημεία
- τάση
- μέση κατανάλωση ενέργειας του οχήματος σε έναν κύκλο οδήγησης
- αυτονομία του οχήματος

Μια μπαταρία αποτελείται από ένα ή περισσότερα ηλεκτροχημικά στοιχεία (**στοιχεία μπαταρίας**) τα οποία μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια (κατά την εκφόρτιση) και την ηλεκτρική ενέργεια σε χημική ενέργεια (κατά τη διάρκεια της φόρτισης). Ο τύπος των στοιχείων που περιέχονται

σε μια μπαταρία και οι χημικές αντιδράσεις κατά τη διάρκεια γεγονότων εκφόρτισης-φόρτισης καθορίζουν τη **χημεία μιας μπαταρίας**.

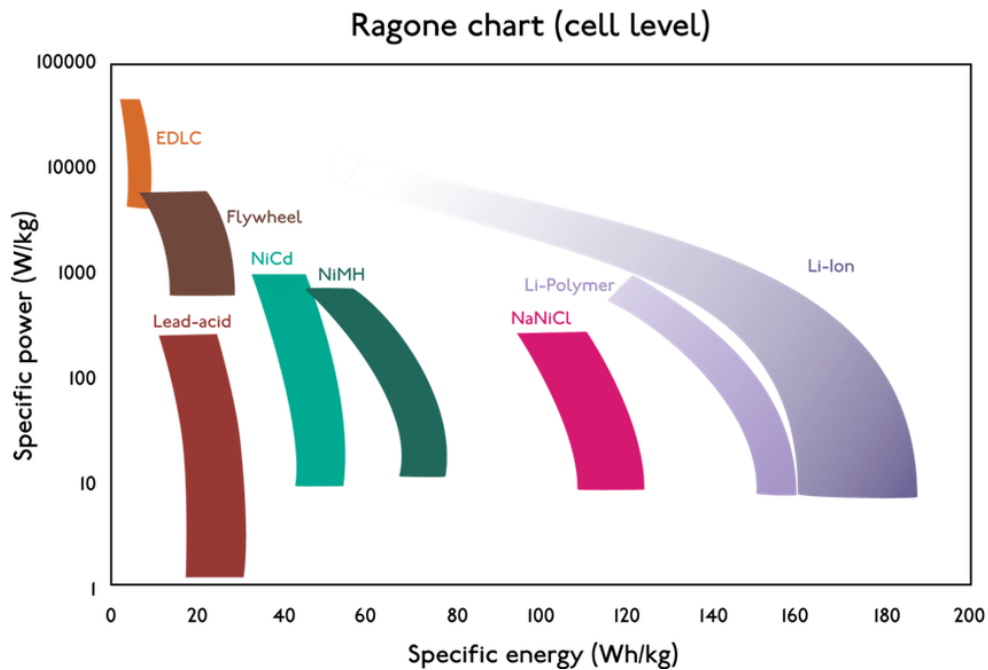
Ένα στοιχείο μπαταρίας αποτελείται από πέντε κύρια εξαρτήματα: ηλεκτρόδια – άνοδος και κάθοδος, διαχωριστές, ακροδέκτες, ηλεκτρολύτη και μια θήκη ή περίβλημα. Για εφαρμογές αυτοκινήτων χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι κυψελών [1]:



Σχήμα 2.12: Διαφορετικά σχήματα κυψελών μπαταρίας ιόντων λιθίου

Οι μεμονωμένες μπαταρίες ομαδοποιούνται σε μια ενιαία μηχανική και ηλεκτρική μονάδα που ονομάζεται **μονάδα μπαταρίας**. Οι μονάδες συνδέονται ηλεκτρικά για να σχηματίσουν μία συστοιχία **μπαταριών**.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι μπαταριών (χημείας) που χρησιμοποιούνται σε υβριδικά και ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης οχημάτων, αλλά θα εξετάσουμε μόνο τις κυψέλες **ιόντων λιθίου**. Ο κύριος λόγος είναι ότι οι μπαταρίες Li-ion έχουν υψηλότερη ειδική ενέργεια [Wh/kg] και ειδική ισχύ [W/kg] σε σύγκριση με άλλους τύπους [2].



Σχήμα 2.13: Επίπεδο κυψέλης διαγράμματος Ragone προσαρμοσμένο από Van Den Bossche 2009

Το επίπεδο τάσης της μπαταρίας καθορίζει τη μέγιστη ηλεκτρική ισχύ που μπορεί να παραδοθεί συνεχώς. Ισχύς $P [W]$ είναι το γινόμενο μεταξύ της τάσης $U [V]$ και του ρεύματος $I [A]$:

$$P = U \cdot I \quad (1)$$

Όσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα, τόσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος των καλωδίων υψηλής τάσης και τόσο μεγαλύτερες είναι οι θερμικές απώλειες. Για το λόγο αυτό, το ρεύμα θα πρέπει να περιορίζεται στο μέγιστο και η ονομαστική ισχύς να λαμβάνεται από την ύπαρξη υψηλότερης τάσης. Για την εφαρμογή μας θα εξετάσουμε μια ονομαστική τάση **400 V** .

Έχει υπολογιστεί η μέση κατανάλωση ενέργειας για την πρόωση E_p ως **137,8 Wh/km** στον κύκλο οδήγησης WLTC. Εκτός από την ενέργεια που απαιτείται για την πρόωση, η μπαταρία υψηλής τάσης πρέπει να παρέχει ενέργεια για τις βοηθητικές συσκευές του οχήματος $E_{aux} [Wh/km]$, όπως: ηλεκτρικό σύστημα 12 V, θέρμανση, ψύξη κ.λπ. Επίσης, πρέπει να λάβουμε υπόψη απόδοση του συστήματος μετάδοσης κίνησης $\eta_p [-]$ κατά τη μετατροπή από ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική ενέργεια.

$$E_{avg} = (E_p + E_{aux}) \cdot (2 - \eta_p) \quad (2)$$

Για την κατανάλωση ενέργειας των βοηθητικών συσκευών θα χρησιμοποιήσουμε δεδομένα από το [3], το οποίο περιέχει τις τυπικές απαιτήσεις ισχύος ορισμένων κοινών ηλεκτρικών εξαρτημάτων του οχήματος (βοηθητικά φορτία). Τα παρατεταμένα ηλεκτρικά φορτία (προβολείς, πολυμέσα κ.λπ.) και τα διακοπτόμενα φορτία (θερμαντήρας, φώτα φρένων, υαλοκαθαριστήρες κ.λπ.) χρησιμοποιούν κατά μέσο όρο 430 W ηλεκτρικής ισχύος. Η διάρκεια του κύκλου WLTC είναι 1800 s (0,5 h), που δίνει ενέργεια 215 Wh για τα βοηθητικά φορτία. Αν το διαιρέσουμε στο μήκος του κύκλου οδήγησης WLTC (23.266 km), θα έχουμε μέση κατανάλωση ενέργειας για τα βοηθητικά φορτία E_{aux} **9.241 Wh/km** .

Ακόμα κι αν το Wh/km δεν είναι πραγματικά ενέργεια αλλά παραγοντοποιημένη ενέργεια, αφού καταδύεται ανά μονάδα απόστασης (km), για λόγους απλότητας, θα το αναφέρουμε ως μέση ενέργεια.

Το συνεχές ρεύμα (DC) που παρέχεται από την μπαταρία μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) από τον μετατροπέα. Αυτή η μετατροπή πραγματοποιείται με σχετική απώλεια. Επίσης, ο ηλεκτροκινητήρας και η γραμμή μετάδοσης έχουν κάποιες απώλειες που πρέπει να λάβουμε υπόψη. **Για αυτήν την** άσκηση θα χρησιμοποιήσουμε μια μέση απόδοση η_p 0,9 από την μπαταρία στον τροχό.

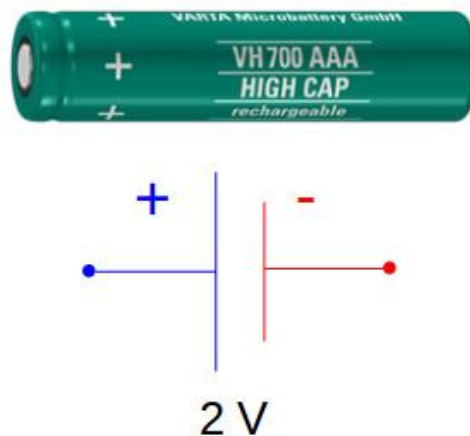
Η αντικατάσταση των τιμών στο (2) δίνει τη μέση κατανάλωση ενέργειας:

$$E_{avg} = (137.8 + 9.241) \cdot 1.1 = 161.7451 \text{ Wh/km}$$

Η μπαταρία θα έχει σχεδιαστεί για μέση κατανάλωση ενέργειας **161,7451 Wh/km**.

Αρχιτεκτονικές συστοιχιών μπαταριών

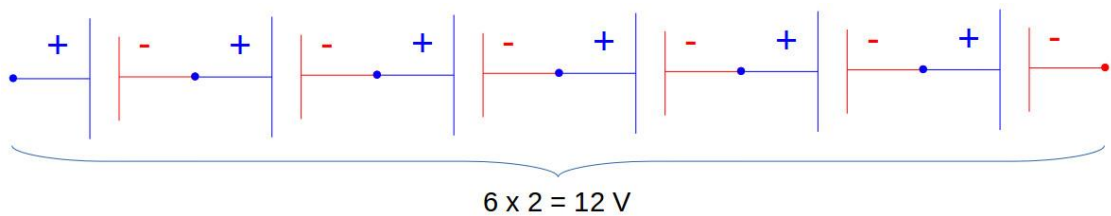
Όλες οι συστοιχίες μπαταριών υψηλής τάσης αποτελούνται από μπαταρίες **διατεταγμένες** σε σειρές και μονάδες. Ένα στοιχείο μπαταρίας μπορεί να θεωρηθεί ως η μικρότερη διαίρεση της τάσης.



Σχήμα 2.14: Κυψέλη μπαταρίας

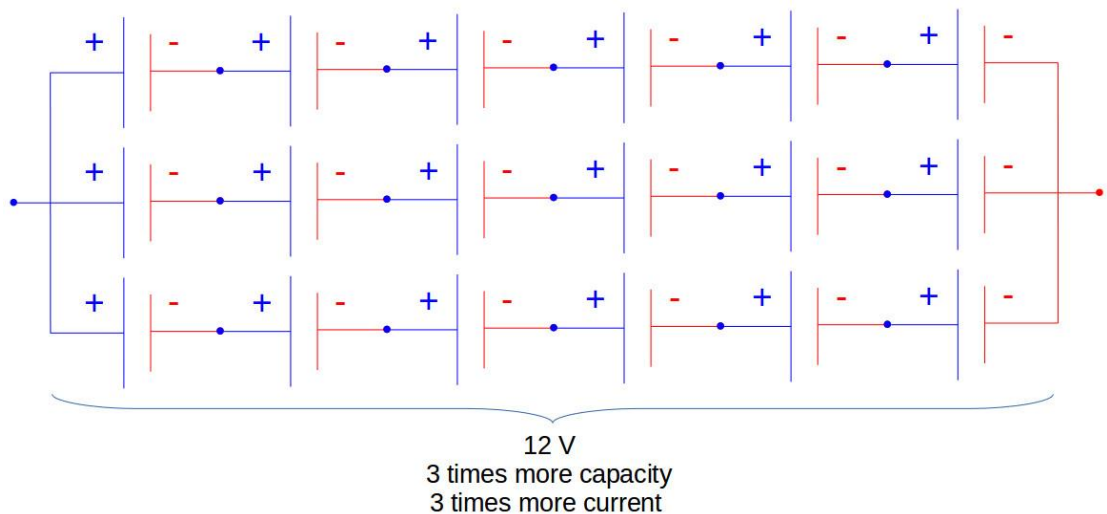
Οι μεμονωμένες μπαταρίες μπορούν να ομαδοποιηθούν παράλληλα ή/και σε σειρά ως **μονάδες** (modules). Επιπλέον, οι μονάδες μπαταρίας μπορούν να συνδεθούν παράλληλα ή/και σε σειρά για να δημιουργήσουν μία **συστοιχία μπαταριών**. Ανάλογα με τις παραμέτρους της μπαταρίας, μπορεί να υπάρχουν πολλά επίπεδα αρθρωτής λειτουργίας.

Η συνολική τάση της μπαταρίας καθορίζεται από τον αριθμό των στοιχείων σε σειρά. Για παράδειγμα, η συνολική τάση (string) 6 κυψελών που συνδέονται σε σειρά θα είναι το άθροισμα της μεμονωμένης τάσης τους.



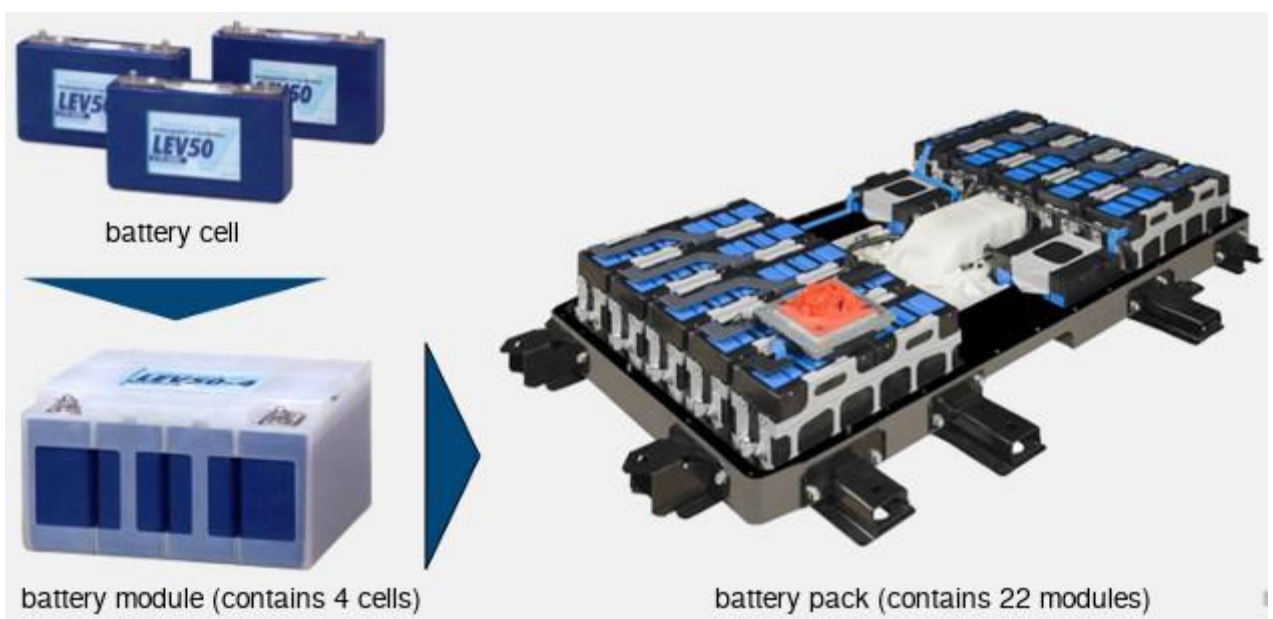
Σχήμα 2.15: Στοιχειοσειρά κυψελών μπαταρίας

Προκειμένου να αυξηθεί η τρέχουσα ικανότητα, η χωρητικότητα της μπαταρίας, πρέπει να συνδεθούν περισσότερες σειρές **παράλληλα**. Για παράδειγμα, 3 σειρές συνδεδεμένες παράλληλα θα τριπλασιάσουν τη χωρητικότητα και την τρέχουσα ικανότητα της μπαταρίας.



Σχήμα 2.16: Στοιχειοσειρές κυψέλης μπαταρίας παράλληλα

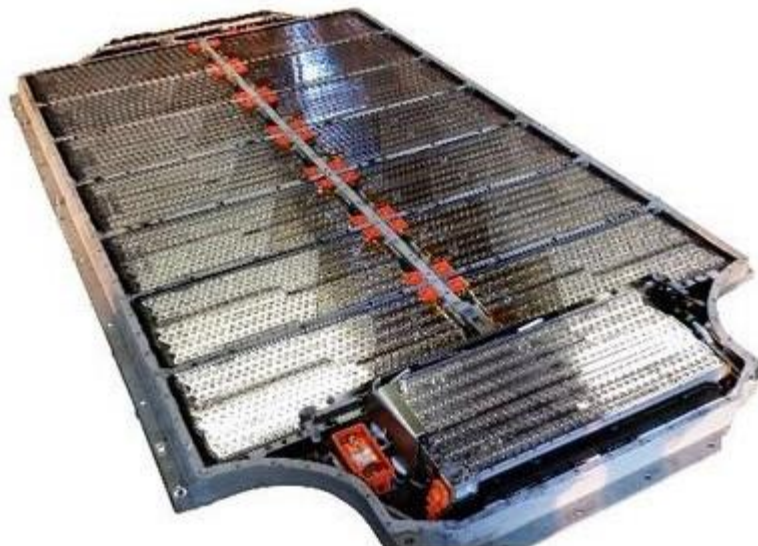
Η συστοιχία μπαταριών υψηλής τάσης του Mitsubishi i-MiEV αποτελείται από 22 μονάδες που αποτελούνται από 88 κυψέλες συνδεδεμένες σε σειρά. Κάθε ενότητα περιέχει 4 πρισματικά κελιά. Η τάση κάθε στοιχείου είναι 3,7 V και η συνολική τάση της μπαταρίας 330 V.



Σχήμα 2.17: Συστοιχία μπαταριών (ενότητες και στοιχεία) [Mitsubishi]

Ένα άλλο παράδειγμα είναι η μπαταρία υψηλής τάσης του Tesla Model S, η οποία έχει:

- 74 κελιά σε μια παράλληλη ομάδα
- 6 ομάδες σε σειρά για μια ενότητα
- 16 ενότητες σε σειρά
- 7104 κελιά συνολικά



Σχήμα 2.18: Συστοιχία μπαταριών Tesla Model S

Υπολογισμός μπαταρίας

Προκειμένου να επιλέξουμε ποιες μπαταρίες θα έχει η συσκευασία μας, θα αναλύσουμε αρκετά μοντέλα κυψελών μπαταριών που διατίθενται στην αγορά. Για αυτό το παράδειγμα θα εστιάσουμε μόνο σε κύτταρα ιόντων λιθίου. Οι παράμετροι εισόδου των στοιχείων της μπαταρίας συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Σημείωση : Εφόσον οι κατασκευαστές στοιχείων μπαταρίας παρουσιάζουν συνεχώς νεότερα μοντέλα, ενδέχεται τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται σε αυτό το παράδειγμα να είναι παρωχημένα. Αυτό είναι λιγότερο σημαντικό, καθώς ο στόχος ή το άρθρο είναι να εξηγήσει πώς γίνεται ο υπολογισμός. Η ίδια μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί για οποιαδήποτε άλλη μπαταρία.

Κατασκευαστής	Panasonic	A123- Συστήματα	Molicel	A123- Συστήματα	Toshiba	Για ξύλο
Τύπος	κυλινδρικός	κυλινδρικός	κυλινδρικός	θήκη	θήκη	θήκη
Μοντέλο	NCR18650B	ANR26650m1- B	ICR- 18650K	20 Αχ	20 Αχ	SLPB7570270
Πηγή	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]
Μήκος [m]	0.0653	0.065	0.0652	0	0	0
Διάμετρος [m]	0.0185	0.026	0.0186	0	0	0
Ύψος [m]	0	0	0	0.227	0.103	0.272
Πλάτος [m]	0	0	0	0.16	0.115	0.082
Πάχος [m]	0	0	0	0.00725	0.022	0.0077

Μάζα [kg]	0.0485	0.076	0.05	0.496	0.51	0.317
Χωρητικότητα [Ah]	3.2	2.5	2.6	19.5	20	15.6
Τάση [V]	3.6	3.3	3.7	3.3	2.3	3.6
C-rate (συνέχεια)	1	10	1	1	1	2
C-rate (αιχμή)	1	24	2	10	1	3

Με βάση τις παραμέτρους κυψέλης που παρέχονται από τους κατασκευαστές, μπορούμε να υπολογίσουμε το ενεργειακό περιεχόμενο, τον όγκο, τη βαρυμετρική πυκνότητα και την ογκομετρική πυκνότητα για κάθε στοιχείο.

Ο όγκος κάθε κελιού υπολογίζεται ως εξής:

- cylindrical cells, V_{cc} [m³]

$$V_{cc} = \frac{\pi D_{bc}^2}{4} \cdot L_{bc} \quad (1)$$

where:

D_{bc} [m] – battery cell diameter

L_{bc} [m] – battery cell length

- pouch cells, V_{pc} [m³]

$$V_{pc} = H_{bc} \cdot W_{bc} \cdot T_{bc} \quad (2)$$

where:

H_{bc} [m] – battery cell height

W_{bc} [m] – battery cell width

T_{bc} [m] – battery cell thickness

The battery cell energy E_{bc} [Wh] is calculated as:

$$E_{bc} = C_{bc} \cdot U_{bc} \quad (3)$$

where:

C_{bc} [Ah] – battery cell capacity

U_{bc} [V] – battery cell voltage

The battery cell energy density is calculated as:

- volumetric energy density, u_V [Wh/m³]

$$u_V = \frac{E_{bc}}{V_{cc(pc)}} \quad (4)$$

- gravimetric energy density, u_G [Wh/kg]

$$u_G = \frac{E_{bc}}{m_{bc}} \quad (5)$$

where:

m_{bc} [kg] – battery cell mass

- βαρυμετρική ενεργειακή πυκνότητα, u_G [Wh/kg]

$$u_{\text{σολ}} = \frac{M_{\beta-\gamma}}{M_{\beta-\gamma}} \quad (5)$$

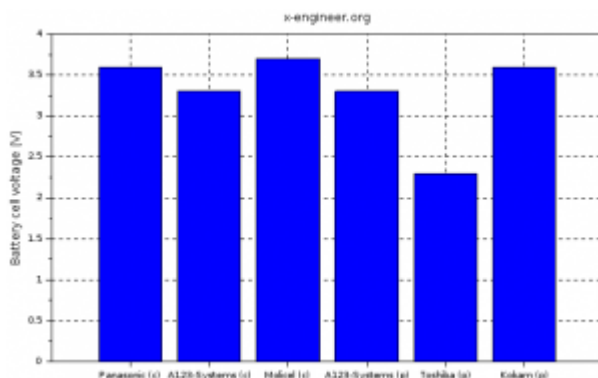
όπου:

m_{bc} [kg] – μάζα στοιχείου μπαταρίας

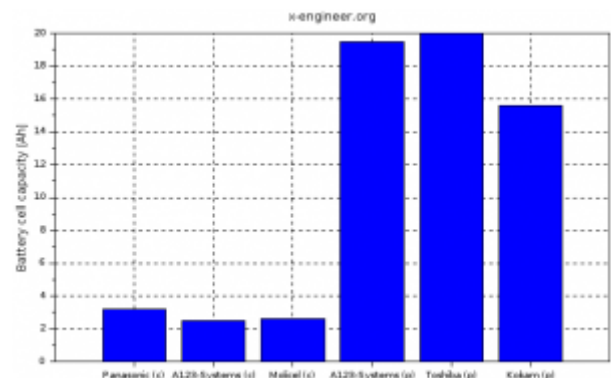
Η ενεργειακή πυκνότητα για κάθε κυψέλη συνοψίζεται στον παρακάτω πίνακα.

Κατασκευαστής	Panasonic	A123- Συστήματα	Molicel	A123- Συστήματα	Toshiba	Για ξύλο
Τύπος	κυλινδρικός	κυλινδρικός	κυλινδρικός	θήκη	θήκη	θήκη
Μοντέλο	NCR18650B	ANR26650m1- B	ICR- 18650K	20 Aχ	20 Aχ	SLPB7570270
Ενέργεια [Wh]	11.52	8.25	9.62	64.35	46	56.16
Τόμος [l]	0.017553	0.034510	0.017716	0.263320	0.260590	0.171741
Βαρυμετρική πυκνότητα ενέργειας [Wh/kg]	237.53	108.55	192.40	129.74	90.20	177.16
Ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα [Wh/l]	656.31	239.06	543.01	244.38	176.52	327

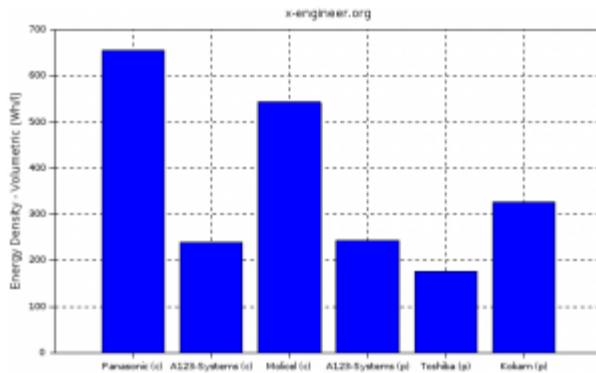
Προκειμένου να έχετε καλύτερη επισκόπηση των παραμέτρων των κελιών και να τα συγκρίνετε ευκολότερα, οι κύριες παράμετροι εμφανίζονται ως γραφήματα ράβδων στις παρακάτω εικόνες.



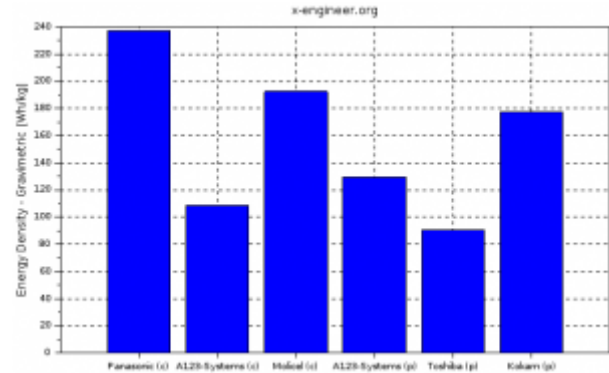
Σχήμα 2.19: Τάση κυψέλης μπαταρίας



Σχήμα 2.20: Χωρητικότητα κυψέλης μπαταρίας



Σχήμα 2.21: Ογκομετρική πυκνότητα ενέργειας κυψέλης μπαταρίας



Σχήμα 2.22: Βαρυμετρική πυκνότητα ενέργειας κυψέλης μπαταρίας

Με τις παραπάνω παραμέτρους κυψέλης και τις βασικές απαιτήσεις για την μπαταρία (ονομαστική τάση, μέση κατανάλωση ενέργειας και αυτονομία οχήματος), υπολογίζουμε τις κύριες παραμέτρους της μπαταρίας υψηλής τάσης.

Η απαιτούμενη **συνολική ενέργεια της συστοιχίας μπαταριών** E_{bp} [Wh] υπολογίζεται ως το γινόμενο μεταξύ της μέσης κατανάλωσης ενέργειας $E_{\text{μέση}}$ [Wh/km] και της εμβέλειας του οχήματος D_v [km]. Για αυτό το παράδειγμα θα σχεδιάσουμε τη συστοιχία μπαταριών υψηλής τάσης για αυτονομία οχήματος **250 km**.

$$E_{bp} = E_{\text{avg}} \cdot D_v = 161.7451 \cdot 250 = 40436.275 \text{ Wh} = 40.44 \text{ kWh} \quad (6)$$

Οι ακόλουθοι υπολογισμοί πρόκειται να εκτελεστούν για κάθε τύπο κελιού. Για αυτό το παράδειγμα θα θεωρήσουμε ότι η μπαταρία αποτελείται μόνο από πολλές **σειρές συνδεδεμένες παράλληλα**.

Ο **αριθμός των κυψελών μπαταρίας που συνδέονται σε σειρά** N_{cs} [-] σε μια στοιχειοσειρά υπολογίζεται διαιρώντας την ονομαστική τάση της μπαταρίας U_{bp} [V] με την τάση κάθε στοιχείου μπαταρίας U_{bc} [V]. Ο αριθμός των συμβολοσειρών πρέπει να είναι ακέραιος. Επομένως, το αποτέλεσμα του υπολογισμού στρογγυλοποιείται στον υψηλότερο ακέραιο.

$$N_{cs} = \frac{U_{bp}}{U_{bc}} \quad (7)$$

Το **ενεργειακό περιεχόμενο μιας στοιχειοσειράς** E_{bs} [Wh] είναι ίσο με το γινόμενο μεταξύ του αριθμού των κυψελών μπαταρίας που συνδέονται σε σειρά N_{cs} [-] και της ενέργειας ενός στοιχείου μπαταρίας E_{bc} [Wh].

$$E_{bs} = N_{cs} \cdot E_{bc} \quad (8)$$

Ο **συνολικός αριθμός στοιχειοσειρών της μπαταρίας** N_{sb} [-] υπολογίζεται διαιρώντας τη συνολική ενέργεια της μπαταρίας E_{bp} [Wh] με το ενεργειακό περιεχόμενο μιας στοιχειοσειράς E_{bs} [Wh]. Ο αριθμός των συμβολοσειρών πρέπει να είναι ακέραιος. Επομένως, το αποτέλεσμα του υπολογισμού στρογγυλοποιείται στον υψηλότερο ακέραιο.

$$N_{sb} = \frac{E_{bp}}{E_{bs}} \quad (9)$$

Μπορούμε τώρα να υπολογίσουμε εκ νέου τη **συνολική ενέργεια της συστοιχίας της μπαταρίας** E_{bp} [Wh] ως το γινόμενο μεταξύ του αριθμού των στοιχειοσειρών N_{sb} [-] και του ενεργειακού περιεχομένου κάθε στοιχειοσειράς E_{bs} [Wh].

$$E_{bp} = N_{sb} \cdot E_{bs} \quad (10)$$

Η **χωρητικότητα της μπαταρίας** C_{bp} [Ah] υπολογίζεται ως το γινόμενο μεταξύ του αριθμού των στοιχειοσειρών N_{sb} [-] και της χωρητικότητας του στοιχείου μπαταρίας C_{bc} [Ah].

$$C_{bp} = N_{sb} \cdot C_{bc} \quad (11)$$

Ο **συνολικός αριθμός κυψελών της μπαταρίας** N_{cb} [-] υπολογίζεται ως το γινόμενο μεταξύ του αριθμού των στοιχειοσειρών N_{sb} [-] και του αριθμού των κυψελών σε μια στοιχειοσειρά N_{cs} [-].

$$N_{cb} = N_{sb} \cdot N_{cs} \quad (12)$$

Το μέγεθος και η μάζα της μπαταρίας υψηλής τάσης είναι πολύ σημαντική παράμετρος που πρέπει να λάβετε υπόψη κατά το σχεδιασμό ενός ηλεκτρικού οχήματος με μπαταρία (BEV). Σε αυτό το παράδειγμα πρόκειται να υπολογίσουμε τον όγκο της μπαταρίας λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις κυψέλες της μπαταρίας. Στην πραγματικότητα υπάρχουν άλλοι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη, όπως: ηλεκτρονικά κυκλώματα, κύκλωμα ψύξης, περίβλημα μπαταρίας, καλωδίωση κ.λπ.

Η **μάζα της μπαταρίας (μόνο για κυψέλες)** m_{bp} [kg] είναι το γινόμενο μεταξύ του συνολικού αριθμού κυψελών N_{cb} [-] και της μάζας κάθε στοιχείου μπαταρίας m_{bc} [kg].

$$m_{bp} = N_{cb} \cdot m_{bc} \quad (13)$$

Ο **όγκος της μπαταρίας (μόνο κυψέλες)** V_{bp} [m^3] είναι το γινόμενο μεταξύ του συνολικού αριθμού κυψελών N_{cb} [-] και της μάζας κάθε στοιχείου μπαταρίας $V_{cc(pc)}$ [m^3]. Αυτός ο όγκος χρησιμοποιείται μόνο για την εκτίμηση του τελικού όγκου της μπαταρίας, καθώς δεν λαμβάνει υπόψη τα βοηθητικά εξαρτήματα/συστήματα της μπαταρίας.

$$V_{bp} = N_{cb} \cdot V_{cc(pc)} \quad (14)$$

Ο όγκος μπορεί επίσης να υπολογιστεί συνάρτηση του αριθμού των συμβολοσειρών και του αριθμού των κελιών σε μια στοιχειοσειρά. Αυτή η μέθοδος υπολογισμού είναι πιο κατάλληλη για κυλινδρική κυψέλη, καθώς ο όγκος που καταλαμβάνει μια κυλινδρική κυψέλη πρέπει να λαμβάνει υπόψη το διάκενο αέρα μεταξύ των κυψελών.

Το **ρεύμα αιχμής στοιχειοσειράς** I_{spc} [A] είναι το γινόμενο μεταξύ του μέγιστου ρυθμού C του ρυθμού C της μπαταρίας $_{bcp}$ [h^{-1}] και της χωρητικότητας του στοιχείου μπαταρίας C_{bc} [Ah].

$$I_{spc} = C\text{-rate}_{bcp} \cdot C_{bc} \quad (15)$$

Το **ρεύμα αιχμής της μπαταρίας** I_{bpp} [A] είναι το γινόμενο μεταξύ του ρεύματος αιχμής στοιχειοσειράς I_{spc} [A] και του αριθμού των στοιχειοσειρών της μπαταρίας N_{sb} [-].

$$I_{bpp} = I_{spc} \cdot N_{sb} \quad (16)$$

Η **μέγιστη ισχύς της μπαταρίας** P_{bpp} [W] είναι το προϊόν μεταξύ του ρεύματος αιχμής της μπαταρίας I_{bpp} [A] και της τάσης της μπαταρίας U_{bp} [V].

$$P_{bpp} = I_{bpp} \cdot U_{bp} \quad (17)$$

Το **συνεχές ρεύμα στοιχειοσειράς** I_{scc} [A] είναι το γινόμενο μεταξύ του συνεχούς ρυθμού C του ρυθμού C της μπαταρίας bcc [h⁻¹] και της χωρητικότητας του στοιχείου μπαταρίας C_{bc} [Ah].

$$I_{scc} = C\text{-rate}_{bcc} \cdot C_{bc} \quad (18)$$

Το **συνεχές ρεύμα της μπαταρίας** I_{bpc} [A] είναι το γινόμενο μεταξύ του συνεχούς ρεύματος στοιχειοσειράς I_{scc} [A] και του αριθμού των στοιχειοσειρών της μπαταρίας N_{sb} [-].

$$I_{bpc} = I_{scc} \cdot N_{sb} \quad (19)$$

Η **μπαταρία συνεχούς ισχύος** P_{bpc} [W] είναι το προϊόν μεταξύ της μπαταρίας συνεχούς ρεύματος I_{bpc} [A] και της τάσης της μπαταρίας U_{bp} [V].

$$P_{bpc} = I_{bpc} \cdot U_{bp} \quad (20)$$

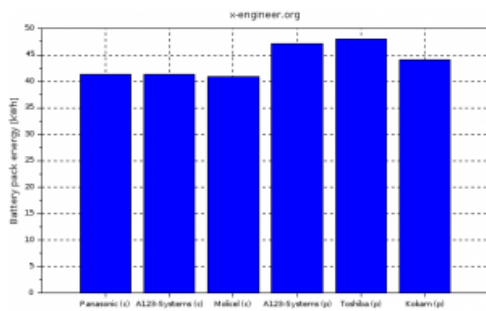
Τα αποτελέσματα των εξισώσεων (7) έως (20) συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα.

Κατασκευαστής	Panasonic	A123- Συστήματα	Molicel	A123- Συστήματα	Toshiba	Για ξύλο
# κελιά στη στοιχειοσειρά [-]	112	122	109	122	174	112
Ενέργεια στοιχειοσειράς [Wh]	1290	1007	1049	7851	8004	6290
# στοιχειοσειρές [-]	32	41	39	6	6	7
Ενέργεια BP [kWh]	41.29	41.27	40.89	47.10	48.02	44.03
Χωρητικότητα BP [Ah]	102.4	102.5	101.4	117	120	109.2
# συνολικά κελιά [-]	3584	5002	4251	732	1044	784
Μάζα ΑΠ [kg]*	173.8	380.2	212.6	363.1	532.4	248.5
Όγκος BP [l]*	63	173	75	193	272	135
Ρεύμα αιχμής BP [A]	102.4	2460	202.8	1170	120	327.6
Μέγιστη ισχύς BP [kW]	40.96	984	81.12	468	48	131.04
Συνεχές ρεύμα BP [A]	102.4	1025	101.4	117	120	218.4
Συνεχής ισχύς BP [kW]	40.96	410	40.56	46.8	48	87.36

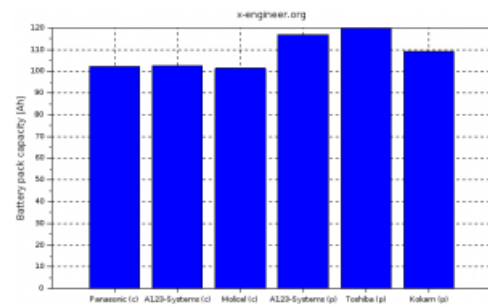
BP - μπαταρία * - λαμβάνοντας υπόψη μόνο τις κυψέλες της μπαταρίας

Από τα δεδομένα του πίνακα μπορούμε να δούμε ότι οι κυψέλες τύπου θήκης έχουν καλύτερο ενεργειακό περιεχόμενο και μεγαλύτερη χωρητικότητα σε σύγκριση με τις κυλινδρικές κυψέλες.

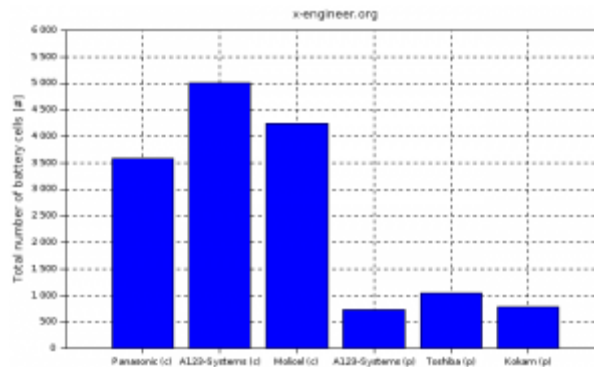
Τα ίδια αποτελέσματα μπορούν να παρουσιαστούν σε γραφήματα ράβδων για μια ευκολότερη σύγκριση μεταξύ των διαφορετικών τύπων κυψελών μπαταρίας.



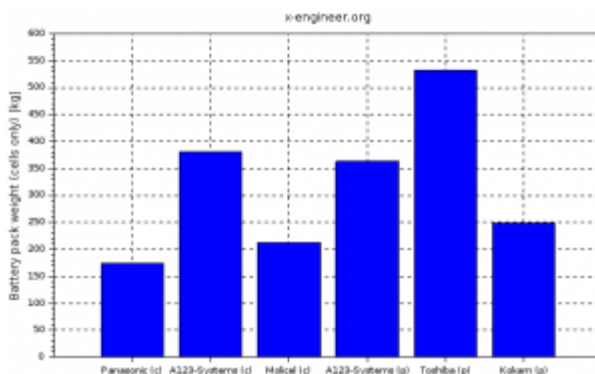
Σχήμα 2.23: Ενέργεια μπαταρίας



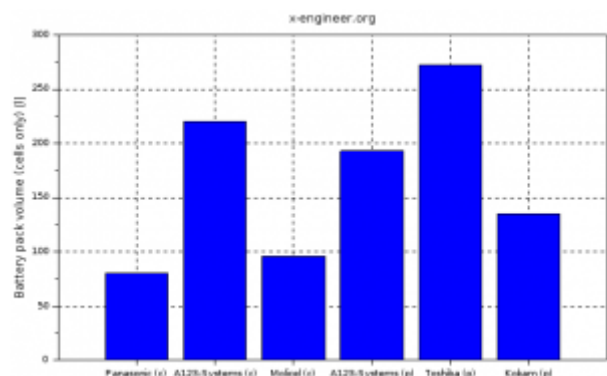
Σχήμα 2.24: Χωρητικότητα μπαταρίας



Σχήμα 2.25: Συνολικός αριθμός κυψελών μπαταρίας



Σχήμα 2.26: Μάζα συστοιχίας μπαταριών (μόνο κυψέλες)



Σχήμα 2.27: Όγκος μπαταρίας (μόνο κελιά)

Λόγω της χαμηλής χωρητικότητας για τις κυλινδρικές κυψέλες, σε σύγκριση με τις κυψέλες θήκης, ο αριθμός των κυψελών που απαιτούνται για τη συστοιχία μπαταριών είναι σημαντικά υψηλότερος. Ένας μεγάλος αριθμός κυψελών μπορεί να προκαλέσει πρόσθετα προβλήματα στους τομείς της καλωδίωσης, της παρακολούθησης τάσης, της αξιοπιστίας της μπαταρίας.

Η μάζα και ο όγκος υπολογίζονται μόνο σε επίπεδο κυψέλης, λαμβάνοντας υπόψη τις διαστάσεις και τη μάζα των κυττάρων. Η μπαταρία που θα βρίσκεται στο όχημα θα έχει πρόσθετα εξαρτήματα (καλώδια, ηλεκτρονικά εξαρτήματα, συγκόλληση, θήκη κ.λπ.), τα οποία θα αυξήσουν τόσο τον τελικό όγκο όσο και τη μάζα. Ωστόσο, εξετάζοντας μόνο τον όγκο και τη μάζα με βάση τα κύτταρα, μπορούμε να υπολογίσουμε ποιο μοντέλο θα είναι καλύτερο σε σύγκριση με το άλλο. Όσον αφορά τη μάζα και τον όγκο, δεν υπάρχει σαφής διάκριση μεταξύ κυλινδρικών και κυλινδρικών κυψελών. Ωστόσο, φαίνεται ότι μια μπαταρία με κελιά θήκης είναι ελαφρώς βαρύτερη και μεγαλύτερη.

Τα στοιχεία μπαταρίας που κατασκευάζονται από την A123-Systems έχουν πολύ υψηλό μέγιστο ρεύμα συνεχούς εκφόρτισης και μέγιστο παλμικό ρεύμα εκφόρτισης. Όσον αφορά την ενέργεια και τη χωρητικότητα, οι κυψέλες τύπου θήκης έχουν υψηλότερο μέγιστο (συνεχές) ρεύμα και ισχύ από τις κυλινδρικές κυψέλες.

Με βάση τα υπολογισμένα δεδομένα και τα συμπεράσματα, μπορούμε να επιλέξουμε ποιες μπαταρίες είναι κατάλληλες για τη συστοιχία μπαταριών του ηλεκτρικού μας οχήματος. Από τα παραδείγματά μας φαίνεται ότι τα κύτταρα Kokam έχουν την καλύτερη συσχέτιση μεταξύ μάζας, όγκου και πυκνότητας ενέργειας/ισχύς.

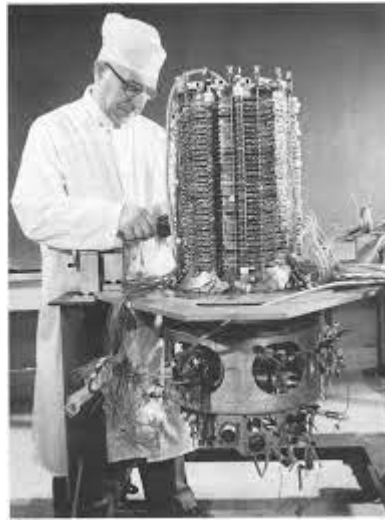
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: Κυψέλη Καυσίμου (Fuel Cell)

3.1 Ιστορική αναδρομή

Το 1839 ο Sir William Grove δημοσίευσε μια περιγραφή της πρώτης του κυψέλης στο «Philosophical Magazine». Από τότε και έπειτα μιλάμε για fuel cell. Λίγο αργότερα, το 1843 ο Grove την χαρακτήρισε ως μια «gas voltain battery», η οποία σχηματίζεται σε μία σειρά από κυψέλες που συνδέονται μεταξύ τους. Αναλυτικότερα, επρόκειτο για μία σειρά από σωλήνες, όπου η καθεμία απ' αυτές είναι γεμάτη με υδρογόνο ή οξυγόνο και ηλεκτρόδια πλατίνας. Κατά την σύνδεση των ηλεκτροδίων με ένα αμπερόμετρο το υδρογόνο και το οξυγόνο ενώνονται και σχηματίζουν μόρια νερού παράγοντας ηλεκτρικό ρεύμα. Στην κυψέλη του Grove η αντίδραση ήταν αργή με αποτέλεσμα το παραγόμενο ρεύμα να μην είναι αξιοποιήσιμο. Το 1889 έγινε μια προσπάθεια κατασκευής fuel cell, από τους Ludwing Mond και Charles Langer, οι οποίοι εφηύραν τον όρο. Ήταν στην ουσία το πρώτο fuel cell που μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και φτιάχτηκε από αέρα και αέριο άνθρακα (coal gas).

Η πρώτη πρακτική συσκευή fuel cell -που ήταν ένα 5kW αλκαλικό σύστημα- κατασκευάστηκε από τον Francis Bacon το 1959. Την ίδια περίοδο η Αμερικανική Διαστημική Υπηρεσία NASA χρηματοδοτούσε τότε πάρα πολλά προγράμματα έρευνας σε σχέση με την κυψέλη καυσίμου, γεγονός που συνέδραμε στην εξέλιξη των κελιών καυσίμου. Τα τελευταία λοιπόν αποτέλεσαν ένα πολύ σημαντικό κομμάτι ενεργειακών συστημάτων για τις διαστημικές αποστολές. Εφαρμόστηκαν στις αποστολές Apollo και στο πρόγραμμα του διαστημικού λεωφορείου επιδεικνύοντας την χρησιμότητά τους.

Τα τελευταία χρόνια έγιναν επενδύσεις από γνωστές εταιρίες, με σκοπό την ανάπτυξη της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου. Για παράδειγμα οι μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες και μεγάλες πάροχοι ενέργειας επένδυσαν ώστε να παραχθεί καθαρή ενέργεια για να χρησιμοποιηθεί στις μεταφορές και στην ηλεκτροδότηση. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας στην οποία αναφερόμαστε, σε κύριο παράγοντα της αγοράς ενέργειας, καθυστέρησε. Η καθυστέρηση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι υπάρχουν αρκετές πρακτικές δυσκολίες. Παρόλα αυτά, φαίνεται ότι στις μέρες μας, η αγορά των κυψελών καυσίμου αρχίζει να ξεπροβάλλει. Προβλέπεται πάντως, ότι οι κυψέλες καυσίμου έχουν να προσφέρουν πολλά μέσα στα επόμενα χρόνια, σε στρατιωτικές και πολιτικές εφαρμογές σε ξηρά, θάλασσα και αέρα.

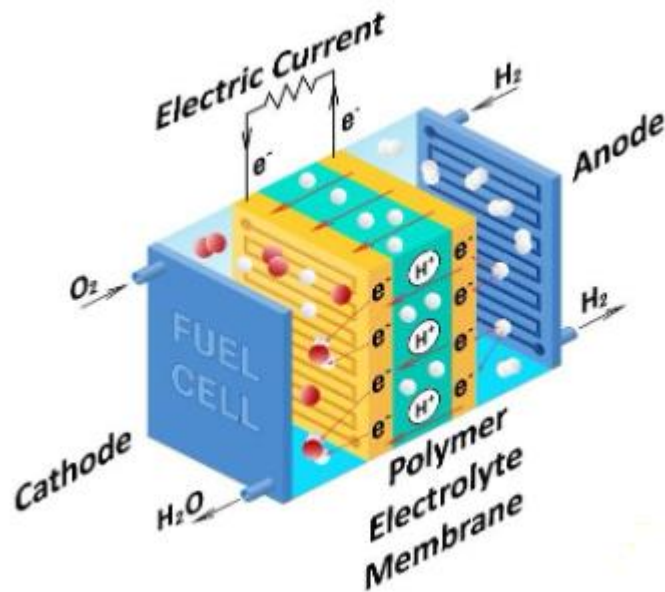


Σχήμα 3. 1: Ο Βρετανός μηχανικός Francis Bacon με το κελί καυσίμου που χρησιμοποιήθηκε από την Nasa.

3.2 Ορισμός Κυψέλης Καυσίμου

Όταν μιλάμε για κυψέλη καυσίμου (fuel cell) αναφερόμαστε σε μια ηλεκτροχημική συσκευή η οποία μετατρέπει ενέργεια. Στη συσκευή αυτή για την οποία γίνεται λόγος, δεν είναι αποθηκευμένα τα αντιδρώντα αλλά ούτε αποτελούν συστατικό της. Τα αντιδρώντα όπως και τα προϊόντα της αντίδρασης μεταφέρονται και αφαιρούνται προς και από τα την κυψέλη καυσίμου σε διαρκή ροή. Επομένως, θα μπορούσαμε να παρομοιάσουμε την κυψέλη καυσίμου με μια μπαταρία, καθώς και οι δύο έχουν τη δυνατότητα να μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική. Πέρα απ' αυτό, ομοιότητα παρουσιάζεται και στο γεγονός ότι και στις δύο συμβαίνουν δύο αντιδράσεις, μία οξειδωτική και μία αναγωγική, σε διαφορετικές όμως περιοχές. Το αποτέλεσμα αυτού είναι η αγωγή των ηλεκτρονίων και των φορτισμένων σωματιδίων από ένα σημείο προς κάποιο άλλο. Όπως είδαμε παραπάνω, η κυψέλη καυσίμου έχει μια συνεχή ροή αντιδρώντων και μια συνεχή αφαίρεση προϊόντων. Εντοπίζεται όμως και μια βασική διαφορά μεταξύ τους. Όπως είδαμε παραπάνω, η κυψέλη καυσίμου έχει μια συνεχή ροή αντιδρώντων και μια συνεχή αφαίρεση προϊόντων, σε αντίθεση με τη μπαταρία. Η διαφορά αυτή μεταξύ των δύο είναι πολύ χαρακτηριστική, διότι η κυψέλη καυσίμου δεν καταναλώνεται όπως καταναλώνεται μια μπαταρία. Εν αντιθέσει, η κυψέλη καυσίμου μπορεί να παράγει ενέργεια μέχρι το καύσιμο και το οξειδωτικό μέσο εξακολουθούν να τροφοδοτούνται σε αυτήν. Καταλαβαίνουμε λοιπόν απ' αυτό, ότι η μπαταρία είναι μια συσκευή με σκοπό την αποθήκευση ενέργειας ενώ η κυψέλη καυσίμου θα μπορούσε να χαρακτηριστεί και ως μια συσκευή παραγωγής ενέργειας. Βέβαια, παρατηρείται πως σε ορισμένες περιπτώσεις κάποιες συσκευές αν και θα θεωρούνταν κυψέλες καυσίμου, αναπτύσσονται με σκοπό την αποθήκευση ενέργειας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η αναγεννώμενη κυψέλη καυσίμου. Πρόκειται για ένα fuel cell που κινείται θα λέγαμε προς δύο κατευθύνσεις και έχει δύο λειτουργίες. Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη

λειτουργία είναι η ηλεκτρόλυση για την παραγωγή των αντιδρώντων και η δεύτερη είναι η παραγωγή ενέργειας από τα αποθηκευμένα αντιδρώντα



Σχήμα 3. 2: Αρχή λειτουργίας μιας τυπικής κυψέλης καυσίμου.

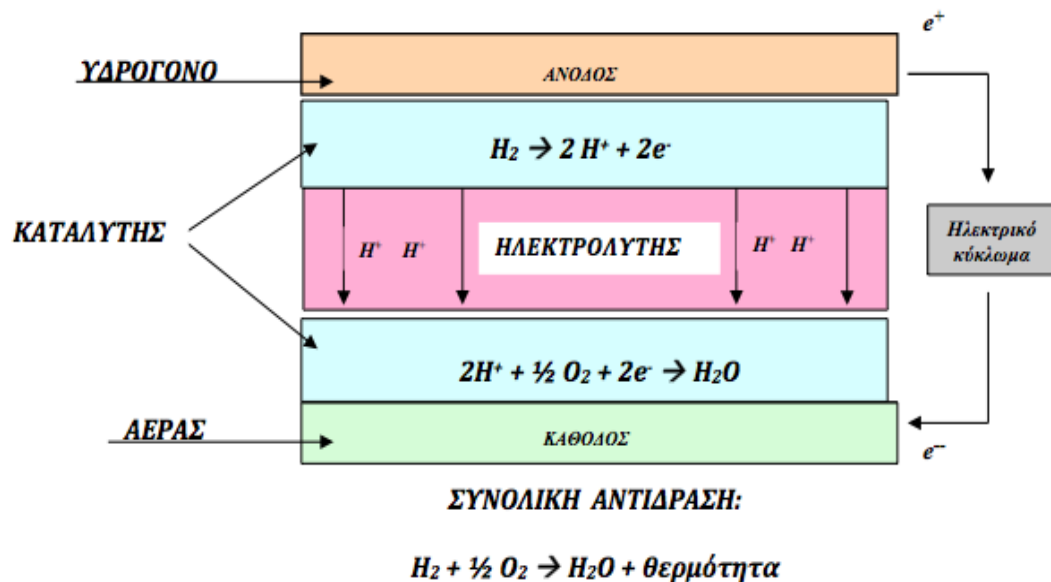
3.3 Αρχή Λειτουργίας

Η κυψέλη καυσίμου αποτελείται από δύο πορώδη ηλεκτρόδια (την άνοδο και την κάθοδο), τα οποία διακρίνονται από μία πυκνή ιονοαγώγιμη περιοχή, που ονομάζεται ηλεκτρολύτης. Αυτή η ιονοαγώγιμη περιοχή είναι αγωγός των πρωτονίων, τα οποία παράγονται από τη διάσπαση του υδρογόνου.[5] Στην περίπτωση που δεν υπάρχει ένα κλειστό εξωτερικό κύκλωμα, αλλά υπάρχουν αντιδρώντα στο σύστημα, τότε παρόλο που τα ηλεκτρόδια είναι ενεργά, δεν συμβαίνουν αντιδράσεις σ' αυτά. Όταν ένα εξωτερικό κύκλωμα γίνει πλήρες και κλείσει, η κυψέλη καυσίμου θα κάνει παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Πιο συγκεκριμένα:

- Τα μόρια του υδρογόνου τροφοδοτούνται στην άνοδο και διασκορπίζονται πάνω στον ηλεκτρολύτη μέσα απ' αυτήν. Εκεί πραγματοποιείται, με τη βοήθεια ενός καταλύτη, διάσπαση σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια.
- Τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια πηγαίνουν από την άνοδο στην κάθοδο μέσα από διαφορετικές οδούς. Τα πρωτόνια περνούν μέσα από τον ηλεκτρολύτη, λόγω της πρωτονιακής αγωγιμότητας που έχει ο ίδιος. Αντίθετα, τα ηλεκτρόνια περνούν μέσα από ένα εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο χρησιμεύει ως αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος
- Στην κάθοδο του ηλεκτρολύτη τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια συνδέονται μεταξύ τους με τα μόρια οξυγόνου. Τα μόρια αυτά έχουν τροφοδοτηθεί στην κάθοδο και έχουν διαχυθεί σ' αυτήν.
- Τα μόρια του νερού, τα οποία δημιουργούνται από την αντίδραση μεταξύ των πρωτονίων, διαδέχονται πίσω στην κάθοδο ώστε να μετακινηθούν μακριά μαζί με το ρεύμα του αέρα.

Η καθαρή χημική ενέργεια η οποία παράγεται είναι ίδια με αυτήν που θα είχε παραχθεί αν είχε γίνει καύση στο υδρογόνο μέσα σε μία μηχανή εσωτερικής καύσης. Παράδειγμα αυτού θα μπορούσε να είναι το ΠΑΔΑ, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Μικέλ Λέσι

υδρογόνο μαζί με το οξυγόνο που σχηματίζουν νερό. Βέβαια, εδώ το υδρογόνο και το οξυγόνο δεν γίνονται μείγμα, πράγμα που γίνεται κατά τη διάρκεια της καύσης. Η αλλαγή της χημικής ενέργειας συνοδεύει την αντίδραση (ειδικότερα η ελεύθερη ενέργεια Gibbs). Αυτή λοιπόν είναι και η κινητήρια δύναμη για όλη τη διαδικασία.



Σχήμα 3. 3: Αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου υδρογόνου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Polymer Exchange Membrane – PEM).

3.4 Τύποι κυψελών καυσίμου

Η βασική διάκριση των κυψελών καυσίμου γίνεται ανάλογα με το είδος του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν, αφού αυτός καθορίζει πολλά από τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τους, όπως τη θερμοκρασία λειτουργίας τους, τον απαιτούμενο καταλύτη, το καύσιμο που θα χρησιμοποιηθεί, τον απαιτούμενο βαθμό επεξεργασίας του καυσίμου καθώς και τις εφαρμογές του κάθε τύπου κυψέλης. Διακρίνονται πέντε διαφορετικοί τύποι κυψελών υδρογόνου:

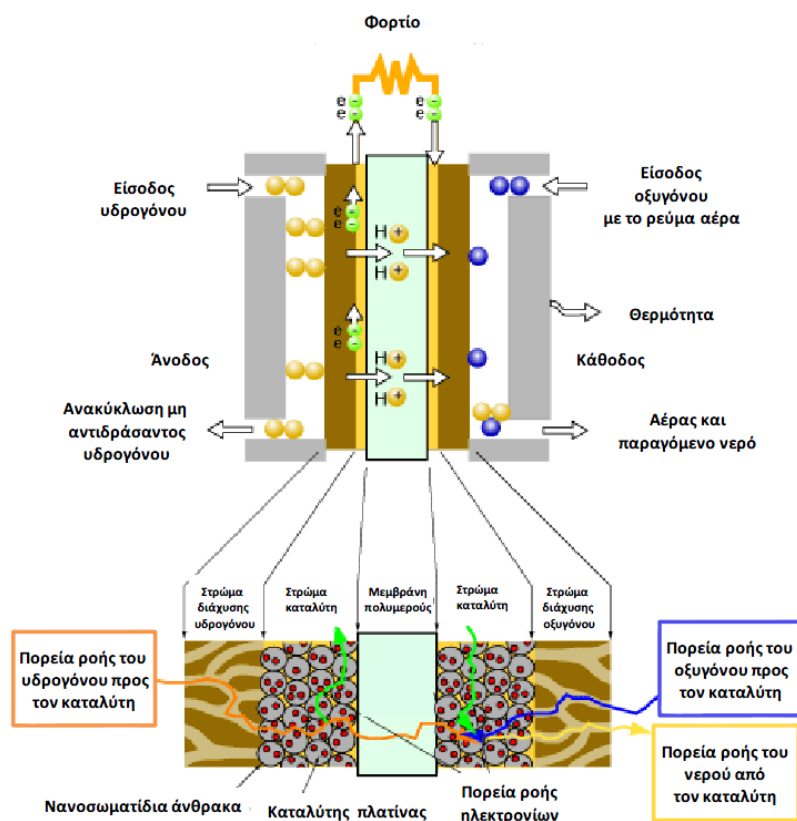
- **Κυψέλες μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων ή στερεού πολυμερούς**

(Proton Exchange Membrane Fuel Cell – PEMFC ή Solid Polymer Fuel Cell – SPFC)

Οι κυψέλες αυτές χρησιμοποιούν σαν ηλεκτρολύτη μία μεμβράνη από πολυμερές, ηλεκτρόδια από πορώδη άνθρακα και καταλύτη από πλατίνα. Λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες κάτι που τις κάνει πιο αξιόπιστες αυξάνοντας την αντοχή τους. Η λειτουργία τους είναι παρόμοια με αυτή που παρουσιάζεται στο σχήμα 3.3, όπου το καύσιμο υδρογόνο εισέρχεται στο αρνητικό ηλεκτρόδιο και αφού έρθει σε επαφή με τον καταλύτη οξειδώνεται προς υδρογονοϊόντα και ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να περάσουν μέσω της μεμβράνης και έτσι περνούν στον καθοδικό χώρο μέσω εξωτερικού κυκλώματος. Έτσι δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα που τροφοδοτεί το επιθυμητό φορτίο. Παράλληλα τα κατιόντα του υδρογόνου περνούν μέσα από τη μεμβράνη και φθάνουν στην κάθοδο όπου ενώνονται με το οξυγόνο του αέρα και παράγουν νερό.

Στο σχήμα 3.4 παρουσιάζεται αναλυτικότερα η τυπική δομή και λειτουργία μιας κυψέλης υδρογόνου PEM. Βελτιώσεις στον σχεδιασμό των ηλεκτροδίων των κυψελών αυτών καθώς και των μεμβρανών ανταλλαγής πρωτονίων, ώστε να μειωθεί η ποσότητα του χρησιμοποιούμενου καταλύτη και να αυξηθεί η απόδοσή τους, έχει οδηγήσει σε συνεχή μείωση του κόστους κατασκευής τους, με αποτέλεσμα να έχει δοθεί ιδιαίτερη ώθηση στην έρευνα γύρω από εφαρμογές τους σε φορητές συσκευές και μεταφορές, αφού απελευθερώνουν ικανοποιητική ποσότητα ενέργειας, σε συνδυασμό με μικρό βάρος και όγκο. Επίσης οι κυψέλες αυτές είναι ιδανικές για την αντιμετώπιση των αιχμών του δικτύου, λόγω της γρήγορης απόκρισής τους.

Αρνητικό στοιχείο έναντι άλλων τύπων κυψελών καυσίμου είναι ότι λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας τους απαιτούν τη χρήση καταλύτη πλατίνας, ο οποίος ανεβάζει το κόστος τους. Επίσης είναι ιδιαίτερα ευαίσθητες στη δηλητηρίαση από αέριους ρύπους που μπορεί να περιέχονται στο υδρογόνο, όπως μονοξείδιο του άνθρακα, θείο και αμμωνία, οι οποίοι οδηγούν σε δραματική μείωση της απόδοσής τους. Για τον λόγο αυτό απαιτείται η χρήση υδρογόνου υψηλής καθαρότητας ώστε να εξασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία των κυψελών για μεγάλο χρονικό διάστημα.



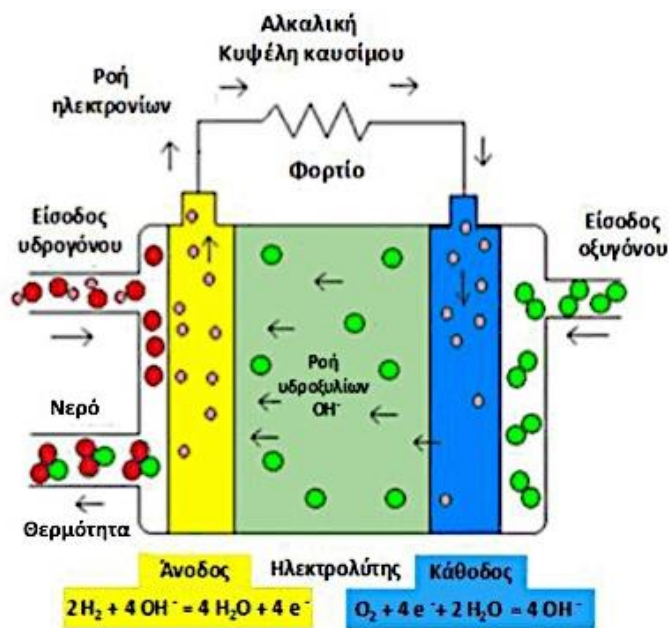
Σχήμα 3. 4: Τυπική δομή και λειτουργία κυψέλης υδρογόνου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM).

• Αλκαλικές κυψέλες καυσίμων (*Alkaline Fuel Cell – AFC*)

Οι κυψέλες αυτές χρησιμοποιούν σαν ηλεκτρολύτη αλκαλικό διάλυμα υδροξειδίου του καλίου. Κατά τη λειτουργία τους το υδρογόνο εισέρχεται στην άνοδο και σε επαφή με τον ηλεκτρολύτη οξειδώνεται παράγοντας νερό και απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια μέσω εξωτερικού κυκλώματος φθάνουν στην κάθοδο όπου ανάγουν το οξυγόνο σχηματίζοντας υδροξύλια (OH^-), τα οποία στη συνέχεια μετακινούνται μέσω του ηλεκτρολύτη προς την άνοδο όπου και οξειδώνουν εκ νέου το υδρογόνο.

Στο σχήμα 3.5 παρουσιάζεται η τυπική δομή και λειτουργία μίας αλκαλικής κυψέλης υδρογόνου. Λόγω της υψηλής τους απόδοσης που φθάνει το 60-70% και του γεγονότος ότι το παραγόμενο νερό από την “καύση” του υδρογόνου είναι πόσιμο, οι κυψέλες αυτές έχουν χρησιμοποιηθεί σε διαστημικές εφαρμογές και υποβρύχια, όπου το βάρος και ο όγκος των πηγών ενέργειας αποτελούν κρίσιμα μεγέθη. Το υψηλό τους κόστος όμως περιορίζει την ευρύτητα χρήσης τους.

Μειονέκτημά τους είναι ότι παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία στην παρουσία διοξειδίου του άνθρακα, το οποίο αντιδρά με τον ηλεκτρολύτη μειώνοντας τον χρόνο ζωής και την απόδοσή τους, γεγονός που απαιτεί ο εισερχόμενος αέρας να είναι απαλλαγμένος από οποιαδήποτε μικροποσότητα διοξειδίου του άνθρακα.



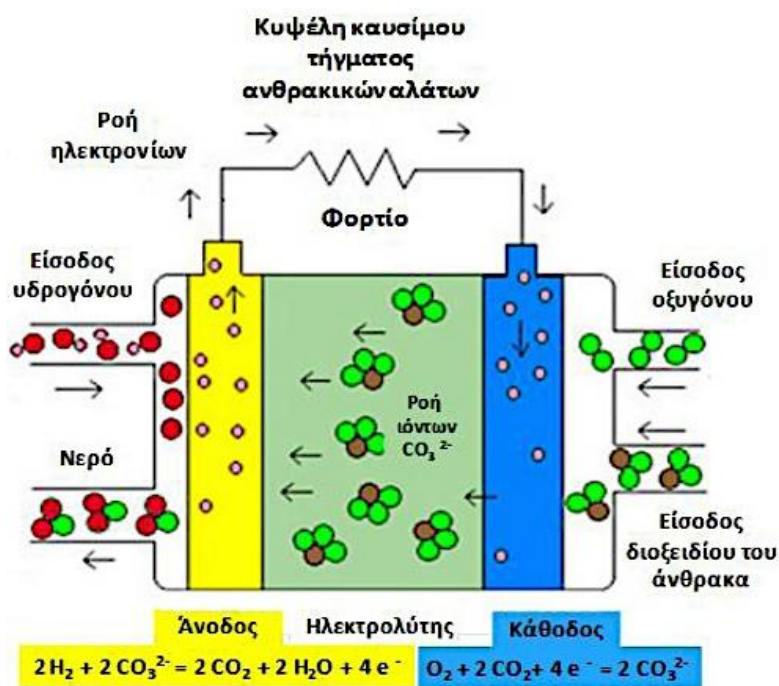
Σχήμα 3. 5: Τυπική δομή και λειτουργία αλκαλικής κυψέλης καυσίμου υδρογόνου (AFC).

• **Κυψέλες τηγμένων ανθρακικών αλάτων (Molten Carbonate Fuel Cell – MCFC)**

Οι κυψέλες τηγμένων ανθρακικών αλάτων χρησιμοποιούν τηγμένα ανθρακικά άλατα των αλκαλίων ως ηλεκτρολύτη και καταλύτη χαμηλού κόστους από νικέλιο. Λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, της τάξης των 600-700°C, όπου τα τηγμένα άλατα είναι πολύ καλοί αγωγοί των ανθρακικών ανιόντων (CO_3^{2-}).

Στο σχήμα 3.6 παρουσιάζεται η τυπική δομή και λειτουργία των κυψελών αυτών. Κατά τη λειτουργία τους η άνοδος τροφοδοτείται με υδρογόνο και η κάθοδος με οξυγόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Στην άνοδο το υδρογόνο οξειδώνεται και σε επαφή με τα ανθρακικά ανιόντα του ηλεκτρολύτη παράγεται νερό και διοξείδιο του άνθρακα. Τα ηλεκτρόνια που απελευθερώνονται από την οξείδωση του υδρογόνου εισέρχονται στο εξωτερικό κύκλωμα, τροφοδοτούν το συνδεδεμένο φορτίο με ηλεκτρική ενέργεια και φθάνουν στην κάθοδο. Εκεί με το οξυγόνο και το διοξείδιο του άνθρακα ενώνονται και σχηματίζουν ανθρακικά ανιόντα, τα οποία μετακινούνται μέσω του ηλεκτρολύτη προς την άνοδο και η όλη διαδικασία συνεχίζεται.

Μειονέκτημα στις κυψέλες αυτές αποτελεί η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας τους, η οποία όμως από την άλλη πλευρά διευκολύνει τον ιονισμό του ηλεκτρολύτη και την κινητική των αντιδράσεων, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνονται υψηλές αποδόσεις (>60%), με χρήση καταλύτη χαμηλότερου κόστους, όπως το νικέλιο. Επίσης λόγω των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας οι κυψέλες MCFC έχουν μεγάλο χρόνο εκκίνησης και για τον λόγο αυτό ενδείκνυνται για συνεχείς εφαρμογές παραγωγής ενέργειας και για σταθμούς συμπαραγωγής. Στα προβλήματα των κυψελών MCFC περιλαμβάνεται και η υψηλή διαβρωτικότητα του ηλεκτρολύτη, η οποία πρέπει να αντιμετωπιστεί γιατί περιορίζει τη διάρκεια ζωής τους.

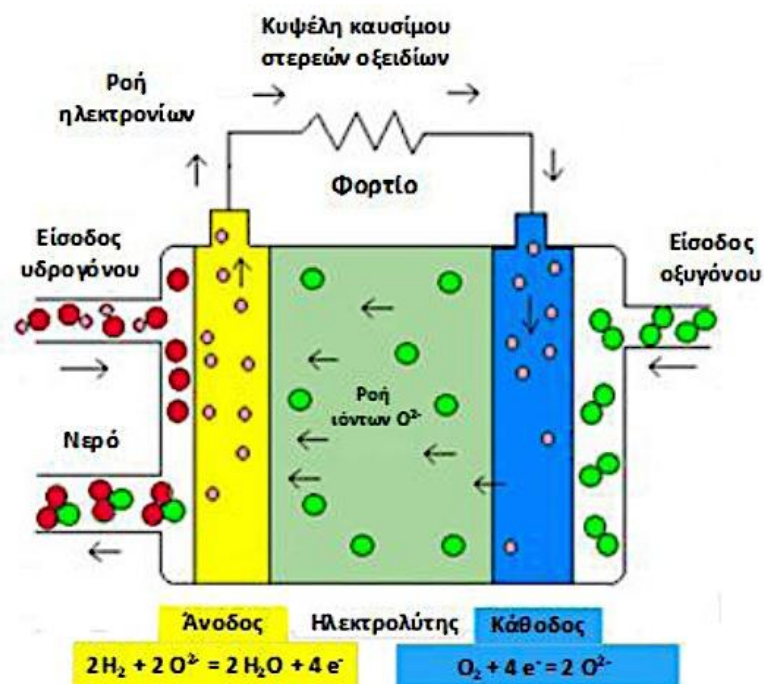


Σχήμα 3. 6: Τυπική δομή και λειτουργία κυψέλης τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFC).

- **Κυψέλες στερεών οξειδίων (Solid Oxide Fuel Cell – SOFC)**

Οι κυψέλες στερεών οξειδίων, όπως και οι MCFC, λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, στην περιοχή των 600-1000°C, και έχουν παρόμοιες εφαρμογές με αυτές. Μαζί με τις κυψέλες PEM προσελκύουν το μεγαλύτερο ερευνητικό ενδιαφέρον. Διαθέτουν στερεό ηλεκτρολύτη, ο οποίος έχει τη δυνατότητα στις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας να άγει αποτελεσματικά τα αρνητικά φορτισμένα ιόντα του οξυγόνου (O^{2-}). Η χρήση στερεού ηλεκτρολύτη συμπεριλαμβάνεται στα πλεονεκτήματα των SOFC, απλοποιώντας τη σχεδίαση του συστήματος, αφού τα προβλήματα διάβρωσης και διαχείρισης που σχετίζονται με υγρούς ηλεκτρολύτες εξαλείφονται. Χάριν των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας, οι κυψέλες SOFC έχουν ιδιαίτερα υψηλή απόδοση, ενώ επίσης δεν είναι απαραίτητη η χρήση ακριβών καταλυτών αφού στις θερμοκρασίες αυτές επιτυγχάνονται μεγάλες ταχύτητες αντιδράσεων. Αυτό προσφέρει ευελιξία όσον αφορά την επιλογή του καυσίμου, αφού δεν παρουσιάζουν ευαισθησία στην παρουσία μονοξειδίου του άνθρακα, διοξειδίου του άνθρακα ή άλλων αέριων ρύπων. Επίσης οι υψηλές θερμοκρασίες καθιστούν τις SOFC, όπως και τις MCFC, ελκυστικές για εφαρμογές συμπαραγωγής ενέργειας, παράγοντας ταυτόχρονα ηλεκτρισμό και θερμότητα με υψηλές αποδόσεις. Από την άλλη πλευρά όμως απαιτούν επιπλέον εξοπλισμό συγκριτικά με άλλους τύπους κυψελών. Μελλοντικοί στόχοι είναι η βελτίωση των υλικών τους και η μείωση του κόστους. Στο σχήμα 3.7 παρουσιάζεται η τυπική δομή και λειτουργία των κυψελών αυτών.

Στους Πίνακες 3.3 και 3.4 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα βασικά χαρακτηριστικά των παραπάνω τύπων κυψελών με τις εφαρμογές τους και οι αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στις κυψέλες αυτές αντίστοιχα.



Σχήμα 3. 7: Τυπική δομή και λειτουργία κυψέλης στερεών οξειδίων (SOFC).

Πίνακας 3.3. Τύποι κυψελών υδρογόνου και βασικά χαρακτηριστικά τους.

Τύποι κυψελών Χαρακτη- ριστικά	Μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)	Αλκαλικές (AFC)	Φωσφορικού οξέος (PAFC)	Ταγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFC)	Στερεών οξειδίων (SOFC)
Ηλεκτρολύτης	Πολυμερής μεμβράνη	Υδατικό διάλυμα υδροξειδίου του καλίου	Φωσφορικό οξύ	Ανθρακικό αλάτι αλκαλίων	Κεραμικό οξείδιο
Θερμοκρασία λειτουργίας (°C)	60-80	60-150	150-220	600-700	600-1000
Φορέας ρεύματος	Ιόν υδρογόνου	Ιόν υδροξυλίου	Ιόν υδρογόνου	Ανθρακικό ιόν	Ιόν οξυγόνου
Καταλύτης	Πλατίνα	Πλατίνα	Πλατίνα	Νικέλιο	Τιτανικό ασβέστιο
Απόδοση (%)	40-50	70	40-60	>60	>60
Κυριότερες εφαρμογές	Μεταφορές, ηλεκτρο- παραγωγή, φορητές ηλεκτρονικές συσκευές	Διάστημα	Ηλεκτρο- παραγωγή και συμπαράγωγή σε κτιριακές εγκαταστάσεις	Κεντρικές μονάδες ηλεκτρο- παραγωγής, συμπαράγωγής	Κεντρικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, συμπαράγωγής

Πίνακας 3.4. Αντιδράσεις στους διάφορους τύπους κυψελών υδρογόνου.

Κυψέλη	Αντιδράσεις ανόδου	Αντιδράσεις καθόδου
Μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$2H^+ + \frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow H_2O$
Αλκαλικές (AFC)	$2H_2 + 4OH^- \rightarrow 4H_2O + 4e^-$	$O_2 + 4e^- + 2H_2O \rightarrow 4OH^-$
Φωσφορικού οξέος (PAFC)	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$2H^+ + \frac{1}{2}O_2 + 2e^- \rightarrow H_2O$
Τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFC)	$2H_2 + 2CO_3^{2-} \rightarrow 2CO_2 + 2H_2O + 4e^-$	$O_2 + 2CO_2 + 4e^- \rightarrow 2CO_3^{2-}$
Στερεών οξειδίων (SOFC)	$2H_2 + 2O^{2-} \rightarrow 2H_2O + 4e^-$	$O_2 + 4e^- \rightarrow 2O^{2-}$

3.4.1 Κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου

Οι κυψέλες στερεού οξειδίου (SOFC) ή αλλιώς (solid oxide fuel cells) είναι κατάλληλες για χρήση σε υψηλές ενεργειακές ανάγκες, προσφέροντας απόδοση έως και 60% και ικανότητα παραγωγής ισχύος έως και 100 kW. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούν ένα σκληρό κεραμικό υλικό στερεού οξειδίου ζιρκονίου ως ηλεκτρολύτη, μαζί με μια μικρή ποσότητα νατρίου, αντί για ηλεκτρολύτη υγρής μορφής. Αυτό επιτρέπει τη λειτουργία τους σε θερμοκρασίες έως και 1000 °C. Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που χαρακτηρίζουν αυτόν τον τύπο κυψέλης είναι το κύριο μέσο παραγωγής ενέργειας:[3],[6]



3.4.2 Κυψέλες φωσφορικού οξέος

Οι κυψέλες φωσφορικού οξέος είναι διαθέσιμες στο εμπόριο σήμερα και η απόδοσή τους είναι σχετικά υψηλή. Η θερμοκρασία λειτουργίας τους είναι στην περιοχή των 150-200°C. Σε μικρότερες θερμοκρασίες, το φωσφορικό οξύ δεν λειτουργεί καλά ως ιοντικός αγωγός και το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), το οποίο σχηματίζεται πάνω στον καταλύτη, μειώνει την απόδοση καθώς εμποδίζει την άνοδο του φορτίου. Τα μειονεκτήματα των fuel cell (φωσφορικού οξέως) περιλαμβάνουν το μεγάλο μέγεθος και βάρος τους, καθώς και τον ακριβό καταλύτη που χρησιμοποιείται, ο οποίος είναι κατασκευασμένος από λευκόχρυσο. Επιπλέον, το ρεύμα που παράγεται από αυτές τις κυψέλες είναι χαμηλό και η ισχύς που παράγεται είναι συγκρίσιμη με άλλους τύπους κυψελών καυσίμου.[26]

3.4.3 Κυψέλες άμεσης μεθανόλης

Στις παραπάνω κυψέλες, το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι το υδρογόνο. Ωστόσο, υπάρχει μια νεότερη κατηγορία κυψελίδων που χρησιμοποιεί μεθανόλη ως καύσιμο, χωρίς την ανάγκη να μετατραπεί σε υδρογόνο. Σε αυτήν την περίπτωση, η μεθανόλη οξειδώνεται στην άνοδο. Παρόλο που αυτή η τεχνολογία έχει ακόμα προβλήματα προς επίλυση, όπως η μεγάλη ποσότητα καταλύτη που απαιτείται, αν χρησιμοποιούνταν στη θέση των PEM κυψελών, δεν θα χρειαζόταν να αναζητηθούν εναλλακτικοί τρόποι αποθήκευσης του καυσίμου, όπως συμβαίνει με το υδρογόνο. Επιπλέον, δεν θα ήταν αναγκαία η ανάπτυξη αναμορφωτών για τη μετατροπή του καυσίμου σε μορφή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τις κυψέλες, όπως απαιτείται στη δεύτερη περίπτωση με το υδρογόνο.[5]

3.5 Αυτοκίνητα Κυψέλης Καυσίμου

Εκτιμάται ότι τα οχήματα με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου (FCEV) είναι μια καλή λύση για την βελτίωση της απόδοσης και την μείωση των εκπομπών ρύπων. Ακόμα και αν λάβουμε υπόψη όλες τις εκπομπές αερίων από τις χημικές διεργασίες, όπως διοξείδιο του άνθρακα, που έχουν αρνητικό αντίκτυπο στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, το FCEV παραμένει ανταγωνιστικό. Οι κυψέλες καυσίμου είναι η κύρια πηγή παροχής ισχύος, ωστόσο η βασική τεχνολογία για το FCEV είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή που παράγει DC ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας χημικής αντίδρασης. Υπάρχουν πέντε σημαντικά τμήματα στις κυψέλες καυσίμου, η άνοδος, μια στρώση ανόδου, ο ηλεκτρολύτης, η κάθοδος και μια στρώση καθόδου με καταλύτη. Με την κατάλληλη σύνδεση σειρά/παράλληλη σύνδεση των κυψελών καυσίμου μπορεί να επιτευχθεί η απαιτούμενη ποσότητα ισχύος εξόδου ώστε να κινήσει το όχημα. Όσο αναφορά την αυτονομία απόστασης του οχήματος, τα FCEV ανταγωνίζονται επάξια τα ICEV, ως εκ τούτου οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μεγάλο εύρος εφαρμογών από μικρής κλίμακας οχήματα (200 W) έως πολύ μεγαλύτερα κέντρα παραγωγής ενέργειας (500 kW). Παρόλα αυτά, το αρχικό κόστος και η έλλειψη σταθμών ανεφοδιασμού παραμένουν σημαντικές προκλήσεις που είναι απαραίτητο να αντιμετωπιστούν. Τέλος, η κοινότητα παροχή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω κυψελών καυσίμου είναι λιγότερο αξιόπιστη από τις συμβατικές μπαταρίες που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά οχήματα.[5],[24]

3.6 Εμπορική διείσδυση επιβατικών αυτοκινήτων FCEVs

Η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου είναι από τις πιο ανταγωνιστικές διότι βασίζονται στην καύση H₂ το οποίο είναι καύσιμο με υψηλή ενεργειακή πυκνότητα με μεγάλη αφθονία. Το πρώτο εμπορικά διαθέσιμο όχημα με κυψέλη καυσίμου εισήχθη από την Honda το 2008 με ονομασία FCX Clarity και μπορούσε να μισθωθεί στην Ιαπωνία και την Καλιφόρνια ως το 2015. Παράλληλα, η Mercedes και η GM ανακοίνωσαν τα δικά τους πρωτότυπα. Ένα από τα πιο δημοφιλή αυτοκίνητα είναι το Toyota Mirai που πωλείται από το 2014 ως σήμερα. Η τιμή του διαμορφώνεται στα 57400 δολάρια και μέχρι το 2022 έχει πωλήσει περισσότερα από 21000 μοντέλα. Ενδιαφέρον αποτελεί το γεγονός ότι το 2021

το Mirai κατάφερε να σπάσει παγκόσμιο ρεκόρ ταξιδεύοντας συνολικά 1360 χιλιόμετρα με γεμάτο ντεπόζιτο, 5.65 κιλά υδρογόνου.



Σχήμα 3. 8: Toyota Mirai.

3.6.1 Παρούσα κατάσταση

Με πρωτοβουλία της Ευρωπαϊκής Ένωσης πολλά προγράμματα τρέχουν με σκοπό την έρευνα και την καινοτομία στο πεδίο των αυτοκινήτων με χρήση κελιών καυσίμων. Ένα από αυτά είναι το Hydrogen Mobility Europe (H2ME 1), του οποίου η πρώτη φάση ολοκληρώθηκε το 2020 με συνολική χρηματοδότηση 62 εκατομμυρίων ευρώ. Κύριος στόχος του προγράμματος ήταν η αύξηση των FCEVs που είναι διαθέσιμα στο κοινό. Ως αποτέλεσμα του πρότζεκτ ήταν η εγκαινίαση τουλάχιστον 45 σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου σε χώρες όπως η Σουηδία, η Γερμανία, η Γαλλία. Στο πλαίσιο αυτό πολλές καινοτόμες τεχνολογίες δοκιμάστηκαν και εισήχθησαν στην βιομηχανία. Παράλληλα, το Hydrogen Mobility Europe 2 (H2ME 2) ξεκίνησε από το 2016 και αναμένεται να ολοκληρωθεί ως το 2023, με χρηματοδότηση που ξεπερνάει τα 100 εκατομμύρια ευρώ. Σκοπός του προγράμματος είναι η αύξηση του στόλου της Ευρώπης από FCEVs, η ενσωμάτωση ακόμη περισσότερων σταθμών ανεφοδιασμού και η εισαγωγή νέων τεχνολογιών στην βιομηχανία.

Ενδιαφέρον αποτελεί το γεγονός ότι στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και συγκεκριμένα στην πολιτεία της Καλιφόρνιας όπου εντοπίζονται οι περισσότερες πωλήσεις FCEVs παγκοσμίως. Λόγω της συνεργασίας της κυβέρνησης με ιδιωτικές αυτοκινητοβιομηχανίες ιδρύοντας την κοινοπραξία California Fuel Cell Partnership, από το 1999 τέθηκε ο στόχος της εμπορικής προώθησης των FCEVs. Αποτέλεσμα αυτών των ενεργειών είναι η πώληση 7073 αυτοκινήτων στο επιβατικό κοινό από το 2012 ως το 2019 και η κατασκευή 40 σταθμών ανεφοδιασμού, με άλλους 24 να είναι υπό κατασκευή.

4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : Υλοποίηση Προσομοίωσης

4.1 Παγκόσμια πρότυπα (WLTP 1,2,3)

Η Παγκόσμια Εναρμονισμένη Διαδικασία Δοκιμής ελαφρών οχημάτων (Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure, WLTP) είναι ένα παγκόσμιο πρότυπο δοκιμαστικό καθεστώς για την αξιολόγηση των εκπομπών ρύπων και της κατανάλωσης καυσίμων αυτοκινήτων. Συγκεκριμένα, αξιοποιείται για τον προσδιορισμό των ρύπων, των εκπομπών CO₂ και της κατανάλωσης καυσίμου παραδοσιακών, υβριδικών και αμιγώς ηλεκτρικών οχημάτων. Το πρότυπο αυτό αναπτύχθηκε από μια διεθνή ομάδα εμπειρογνομόνων από την Ευρώπη, την Ιαπωνία και την Κίνα, με στόχο τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της συγκρισιμότητας των δοκιμαστικών αποτελεσμάτων από διαφορετικές περιοχές του κόσμου.[28]

Το WLTP προβλέπει αυστηρότερα κριτήρια δοκιμής από τα προηγούμενα δοκιμαστικά καθεστώτα, όπως το New European Driving Cycle (NEDC), το οποίο χρησιμοποιούνταν στην Ευρώπη από το 1990. Το WLTP περιλαμβάνει περισσότερες και πιο ρεαλιστικές δοκιμασίες σε πιο επιθετικά σενάρια οδήγησης, καθώς και διαφορετικές περιοχές οδήγησης, όπως αυτοκινητόδρομο, πόλη και περιφέρεια. Σήμερα, το WLTP έχει επικρατήσει στην παγκόσμια αυτοκινητοβιομηχανία ως το πρότυπο δοκιμαστικού καθεστώτος για τις εκπομπές ρύπων και την κατανάλωση καυσίμων αυτοκινήτων. Πλέον, είναι υποχρεωτικό για όλα τα νέα αυτοκίνητα που πωλούνται στην Ευρωπαϊκή Ένωση από τον Σεπτέμβριο του 2018, καθώς και σε πολλές άλλες χώρες σε όλο τον κόσμο. Το WLTP έχει συμβάλει στη βελτίωση της αξιοπιστίας και των αποτελεσμάτων δοκιμής από διαφορετικές περιοχές του κόσμου και επιτρέπει στους καταναλωτές να λαμβάνουν πιο ακριβείς πληροφορίες σχετικά με τις εκπομπές ρύπων και την κατανάλωση καυσίμων του αυτοκινήτου που επιθυμούν να αγοράσουν. Επιπλέον, έχει δώσει ένα ισχυρό μήνυμα στους κατασκευαστές αυτοκινήτων για να--- αναπτύξουν καινοτόμες τεχνολογίες που θα μειώσουν τις εκπομπές και την κατανάλωση καυσίμων των αυτοκινήτων τους. Το WLTP συνδέεται με τον Κανονισμό (ΕΚ) 2009/443 που αποσκοπεί ότι ο στόλος ενός κατασκευαστή δεν μπορεί να εκπέμπει περισσότερο CO₂ κατά μέσο όρο από τον στόχο που έχει θέσει η Ευρωπαϊκή Ένωση, ο οποίος έχει τεθεί στα 95 g CO₂ ανά χιλιόμετρο για το 2021.

4.1.1 Περίγραμμα κύκλου δοκιμής WLTP

Η πλήρης δοκιμή για ένα ηλεκτρικό όχημα αποτελείται από τις ακόλουθες φάσεις:

- Ξεκινήστε με γεμάτη μπαταρία.
- Δυναμικό τμήμα 1: Οδηγήστε τον κύκλο 4 φάσεων, ακολουθούμενο από έναν κύκλο 2 φάσεων χαμηλής-μεσαίας (πόλη).
- Οδηγήστε με 100 km/h για κάποιο χρονικό διάστημα.
- Dynamic Segment 2: Οδηγήστε τον κύκλο 4 φάσεων, ακολουθούμενο από έναν κύκλο 2 φάσεων χαμηλής-μεσαίας (πόλη).
- Οδηγήστε με 100 km/h μέχρι να εξαντληθεί η μπαταρία.

- Φορτίστε την μπαταρία στο 100%.
- Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, μετράται το ηλεκτρικό ρεύμα, μαζί με την τάση που τραβιέται από την μπαταρία.

Κατά το WLTP ο κατασκευαστής έχει την δυνατότητα να αξιοποιήσει τα ενσωματωμένα συστήματα μέτρησης ρεύματος, η ακρίβεια των οποίων πρέπει να αποδεικνύεται από εγκρίνουσα αρχή.

Αυτές οι μετρήσεις διατηρούνται από την έναρξη της δοκιμής μέχρι το τέλος (διακοπή).

Κατά τη διάρκεια της επαναφόρτισης, τοποθετείται εξοπλισμός μέτρησης μεταξύ του φορτιστή και του δικτύου για τη μέτρηση της επαναφορτιζόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Πώς υπολογίζεται η ηλεκτρική εμβέλεια;

Ηλεκτρική εμβέλεια (km) = χρησιμοποιήσιμη ενέργεια μπαταρίας (προσδιορίζεται με τη μέτρηση της κατανάλωσης μέχρι τη διακοπή (Wh) / κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (Wh / km).

Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (EC) υπολογίζεται από:

$EC \text{ (Wh/km)} = \text{αλλαγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια της περιόδου κύκλου (Wh)} / \text{απόσταση που διανύθηκε (km)}$.

Όπου μεταβολή ενέργειας = (τάση x ρεύμα με την πάροδο του χρόνου) / 3600 (για να δώσει Wh).

Πώς υπολογίζεται η απόδοση του WLTP;

Το WLTP αναφέρεται σε αυτό ως κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά με διαφορετικό ορισμό: «Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του εφαρμοστέου κύκλου δοκιμής WLTP με βάση την επαναφορτιζόμενη ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο και την αμιγώς ηλεκτρική περιοχή».

Είναι πολύ μπερδεμένο ότι η «κατανάλωση ενέργειας» αναφέρεται σε επαναφορτιζόμενη ενέργεια ή ενέργεια απευθείας από την μπαταρία.

Απόδοση (Wh/km) = Επαναφορτισμένη ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο (Wh) / Ηλεκτρική αυτονομία (km).

Πλήρες Παράδειγμα

Το Sparky McPlugin τοποθετείται στο δυναμόμετρο με πλήρη φόρτιση. Ο οδηγός ακολουθεί τον κύκλο δοκιμής και καθορίζει ότι το EV χρησιμοποιεί 6.090 Wh σε 42 χιλιόμετρα. Άρα η κατανάλωση μπαταρίας είναι 145 Wh/km.

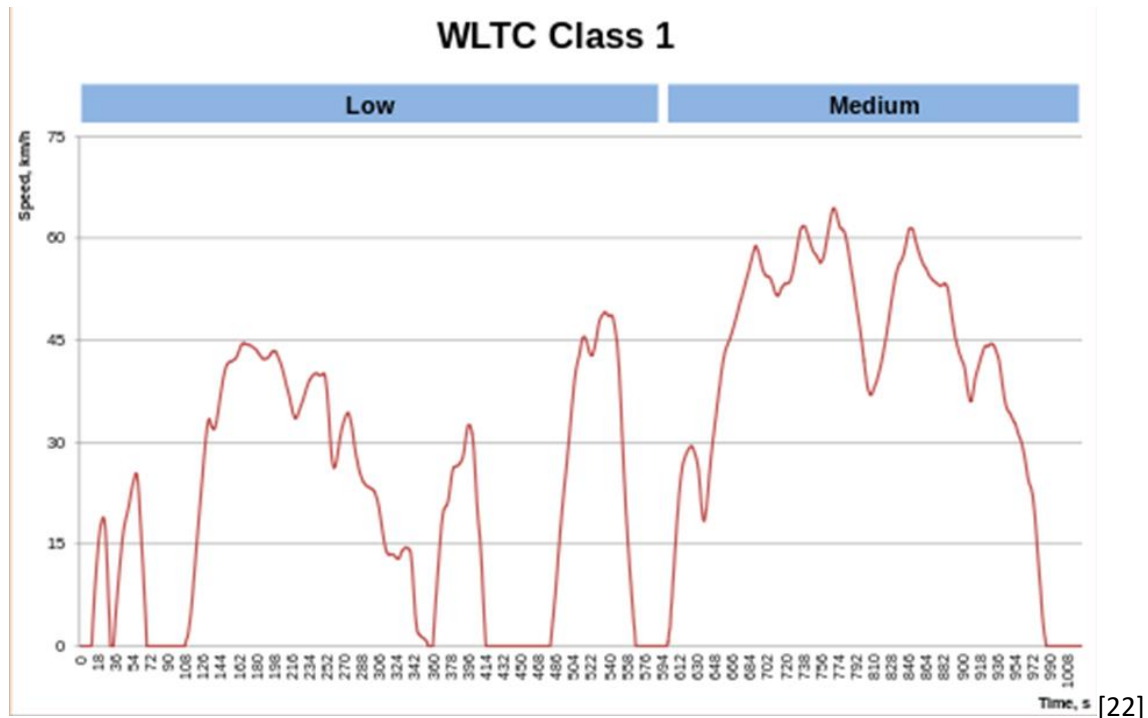
Η μπαταρία εξαντλείται και στη συνέχεια επαναφορτίζεται στο 100%. Η συνολική ενέργεια που εξαντλείται από την μπαταρία είναι 57.000 Wh. Η συνολική ενέργεια που χρησιμοποιείται για την επαναφόρτιση είναι 63.450 Wh (περίπου 6.000 Wh απώλειες φόρτισης).

Η ηλεκτρική αυτονομία είναι 57.000 Wh / 145 Wh ανά km = 393 km.

Η απόδοση WLTP (γνωστή και ως ονομαστική κατανάλωση) είναι 63.450 Wh / 393 km = 161 Wh / km.[21]

4.1.2 WLTP Class I

Ο κύκλος δοκιμής Κλάσης 1 περιλαμβάνει τμήματα χαμηλής και μεσαίας ταχύτητας, που εκτελούνται με τη σειρά χαμηλή-μέτρια-χαμηλή. εάν $V_{max} < 70$ km/h, το τμήμα μεσαίας ταχύτητας αντικαθίσταται από εξάρτημα χαμηλής ταχύτητας.

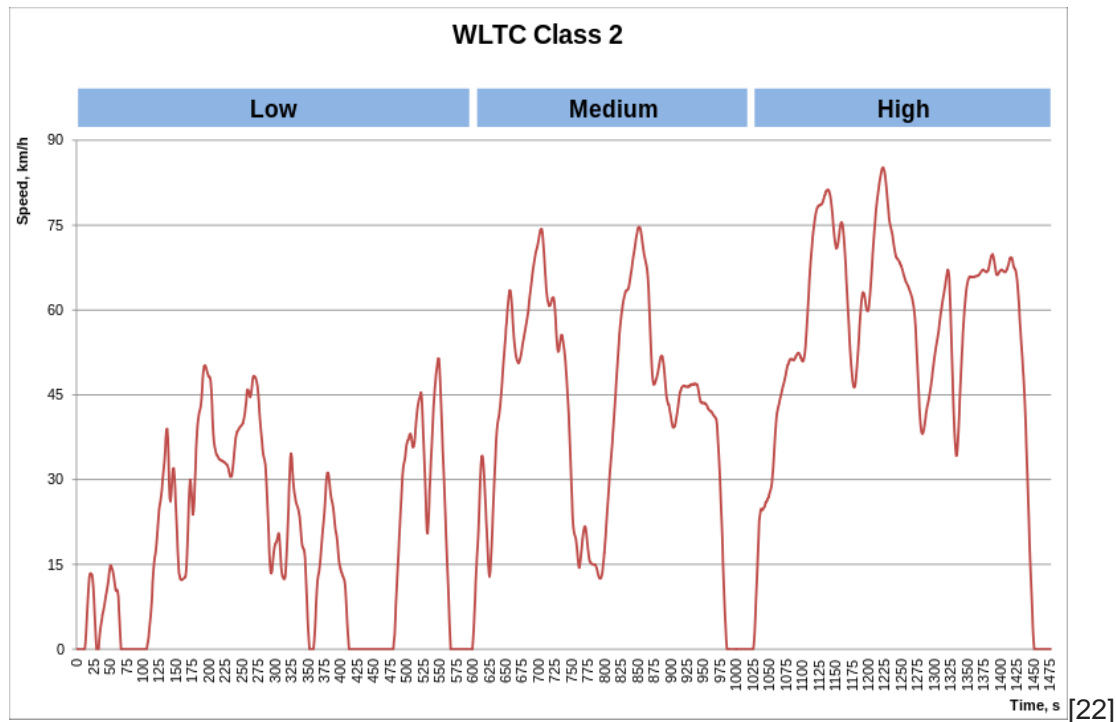


Σχήμα 4.1: WLTP Class 1 δοκιμή

Κύκλος δοκιμής κατηγορίας 1 WLTC			
	Χαμηλός	Μεσαίο	Σύνολο
Διάρκεια, s	589	433	1022
Διάρκεια διακοπής, s	155	48	203
Απόσταση, m	3324	4767	8091
% των στάσεων	26,3%	11,1%	19,9%
Μέγιστη ταχύτητα, km/h	49.1	64.4	
Μέση ταχύτητα χωρίς στάσεις, km/h	27.6	44.6	35.6
Μέση ταχύτητα με στάσεις, km/h	20.3	39.6	28.5
Ελάχιστη επιτάχυνση, m/s ²	-1,0	-0,6	
Μέγιστη επιτάχυνση, m/s ²	0,8	0.6	

4.1.3 WLTP Class II

Ο κύκλος δοκιμής Κλάσης 2 έχει τρία μέρη για χαμηλή, μεσαία και υψηλή ταχύτητα. εάν $V_{max} < 90$ km/h, το εξάρτημα υψηλής ταχύτητας αντικαθίσταται από εξάρτημα χαμηλής ταχύτητας.



Σχήμα 4.2: WLTP Class II δοκιμή.

Κύκλος δοκιμής κατηγορίας 2 WLTC

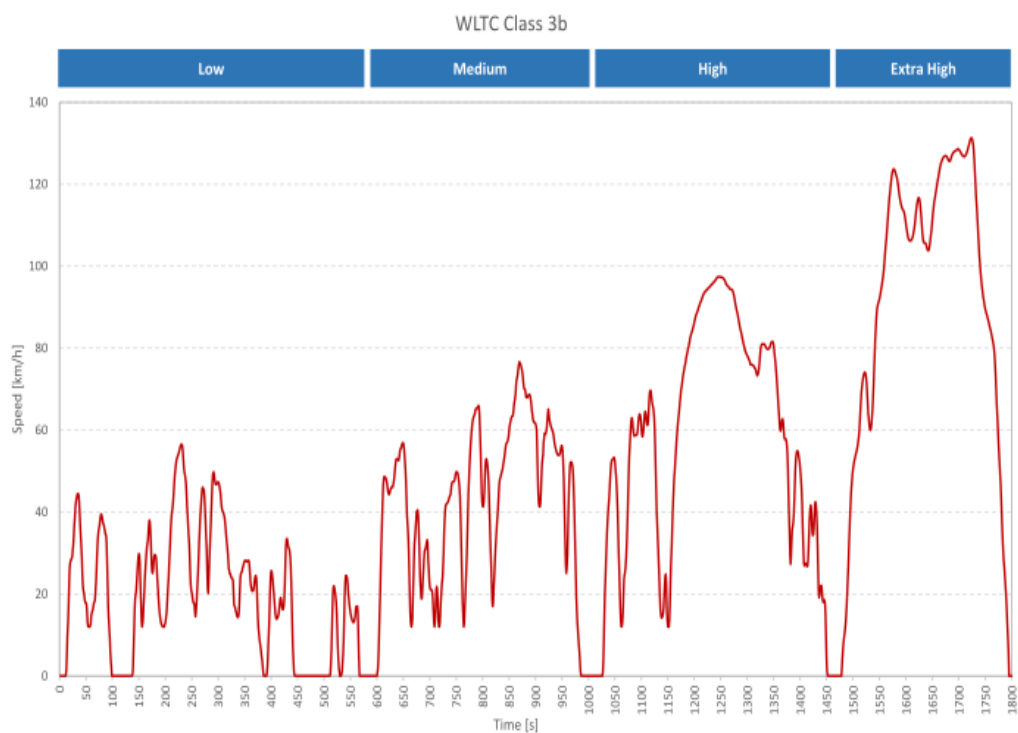
	Χαμηλός	Μεσαίο	Υψηλός
Διάρκεια, s	589	433	455
Διάρκεια διακοπής, s	155	48	30
Απόσταση, m	3132	4712	6820
% των στάσεων	26,3%	11,1%	6,6%
Μέγιστη ταχύτητα, km/h	51.4	74,7	85.2
Μέση ταχύτητα χωρίς στάσεις, km/h	26.0	44.1	57,8
Μέση ταχύτητα με στάσεις, km/h	19.1	39.2	54.0
Ελάχιστη επιτάχυνση, m/s ²	-1.1	-1,0	-1.1
Μέγιστη επιτάχυνση, m/s ²	0,9	1.0	0,8

4.1.4 WLTP Class III

Το WLTP χωρίζεται σε 4 διαφορετικά υποτιμήματα, το καθένα με διαφορετική μέγιστη ταχύτητα:

- **Χαμηλή:** έως 56,5 km/h,
- **Μεσαία:** έως 76,6 km/h
- **Υψηλή:** έως 97,4 km/h
- **Εξαιρετικά ψηλά:** έως 131,3 km/h.

Αυτές οι φάσεις οδήγησης προσομοιώνουν σενάρια αστικών, προαστιακών, αγροτικών και αυτοκινητοδρόμων αντίστοιχα, με ίση κατανομή μεταξύ αστικών και μη αστικών μονοπατιών (52% και 48%).[21] (Ευάγγελος Τ. , 2013) (WIKIPEDIA, 2022),[31]



[22]

Σχήμα 4.3: WLTP Class III δοκιμή

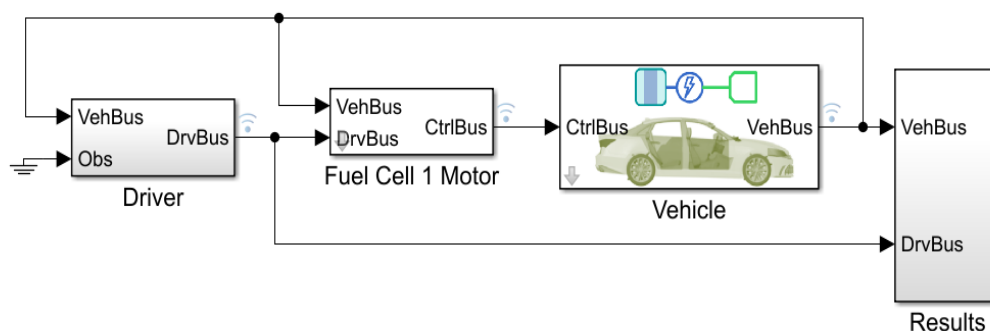
Κύκλος δοκιμών κατηγορίας 3 WLTC

	Χαμηλός	Μεσαίο	Υψηλός	Εξαιρετικά ψηλά	Σύνολο
Διάρκεια, s	589	433	455	323	1800
Διάρκεια διακοπής, s	150	49	31	8	235
Απόσταση, m	3095	4756	7162	8254	23266
% των στάσεων	26,5%	11,1%	6,8%	2,2%	13,4%
Μέγιστη ταχύτητα, km/h	56,5	76.6	97.4	131.3	
Μέση ταχύτητα χωρίς στάσεις, km/h	25.3	44,5	60,7	94,0	53,5
Μέση ταχύτητα με στάσεις, km/h	18.9	39.4	56,5	91,7	46,5
Ελάχιστη επιτάχυνση, m/s ²	-1,5	-1,5	-1,5	-1,44	
Μέγιστη επιτάχυνση, m/s ²	1.611	1.611	1.666	1.055	

4.2 Προσομοίωση Υβριδικού Οχήματος με Fuel Cell, Ηλεκτροκινητήρα και Μπαταρίες

4.2.1 Περιγραφή μοντέλου

Το παρακάτω παράδειγμα δείχνει ένα σύστημα κίνησης με κυψέλη καυσίμου που προσομοιώσαμε στο SIMULINK MATLAB χρησιμοποιώντας της βιβλιοθήκης του SIMSCAPE . Ένα σύστημα κυψέλης καυσίμου παράλληλα συνδεδεμένο με μια μπαταρία που τροφοδοτεί ένα μοτέρ μέσω ενός μετατροπέα. Η κυψέλη καυσίμου μοντελοποιείται χρησιμοποιώντας ένα προσαρμοσμένο πεδίο για να παρακολουθεί τα διάφορα είδη αερίων που παρουσιάζονται κατά την λειτουργία του. Το όχημα μπορεί να δοκιμαστεί σε προσαρμοσμένους κύκλους οδήγησης ή χρησιμοποιώντας την πηγή κύκλου οδήγησης από τον Driver.

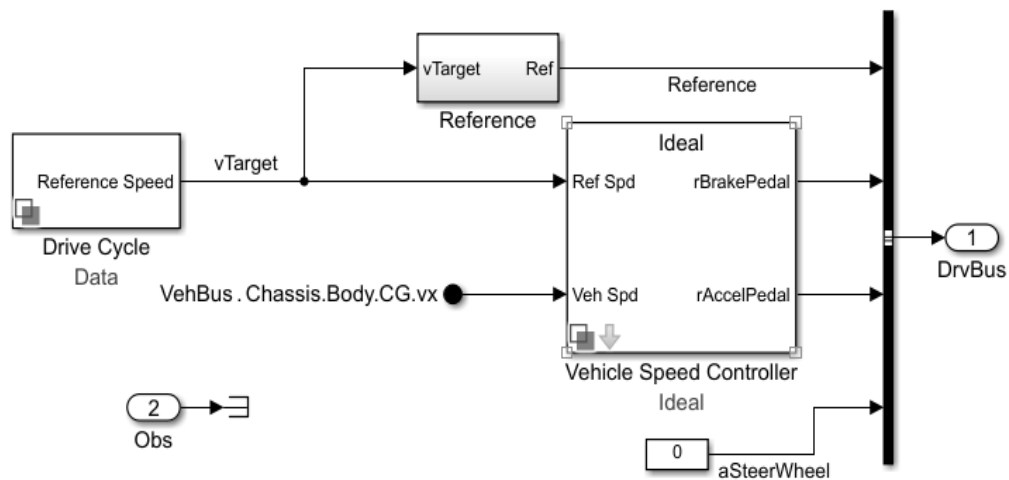


Σχήμα 4.4: Μοντέλο συστήματος Fuel Cell

Σε αυτό το BLOCK έχουμε το σύστημα Fuel Cell το οποίο χωρίζεται σε 4 subBLOCK τα οποία είναι:

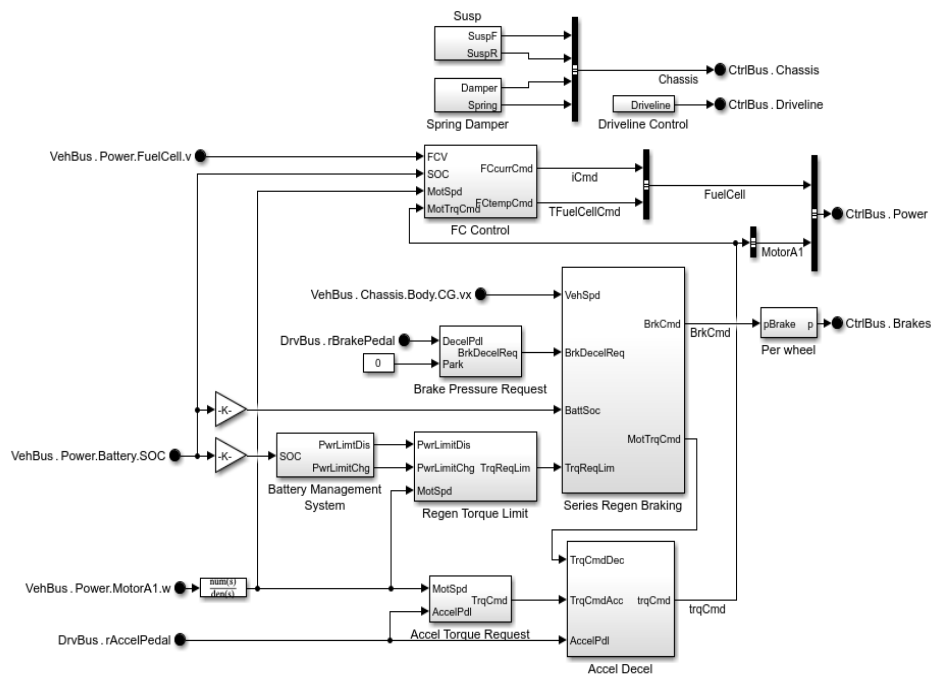
1. Ο DRIVER
2. Fuel CELL 1 MOTOR
3. VEHICLE
4. RESULTS τα οποία θα αναλύσω παρακάτω.

4.2.2 Προσομοίωση μοντέλου



Σχήμα 4.5: Ελεγκτής Fuel Cell

Στο drive cycle αντλούμε τα δεδομένα της οδηγίσεις η αλλιώς τους κύκλους οδήγησης του οχήματος. Μπαίνοντας ποιο μέσα στο block , έχουμε το block το οποίο μας δημιουργεί την ταχύτητα αναφοράς.



Σχήμα 4.6: Αρχιτεκτονική μηχανής Fuel Cell

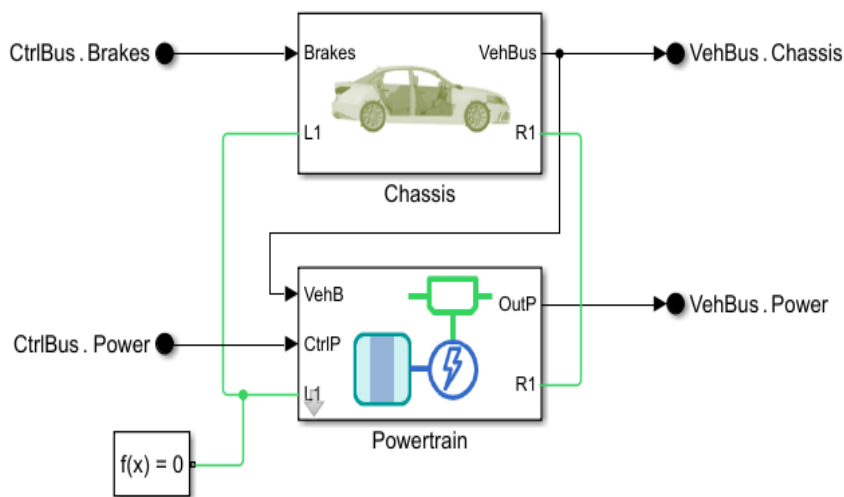
Είναι το BLOCK που περιλαμβάνει η περιέχει την κυψέλη καυσίμου και τον κινητήρα.

Δηλαδή με της παραμέτρους που έχουμε ως είσοδο.

- Vehbus.Power.FuelCell.v είναι (τι ισχύς έχει η κυψέλη καυσίμου)
- Vehbus.Power.battery.soc είναι (κατάσταση φορτίσεις μπαταρίας)
- Vehbus.Power.Motor1.w είναι (ισχύς ηλεκτρικού κινητήρα)
- Drvbus.rAccelPedal είναι (κατάσταση επιτάχυνσης ταχύτητας)

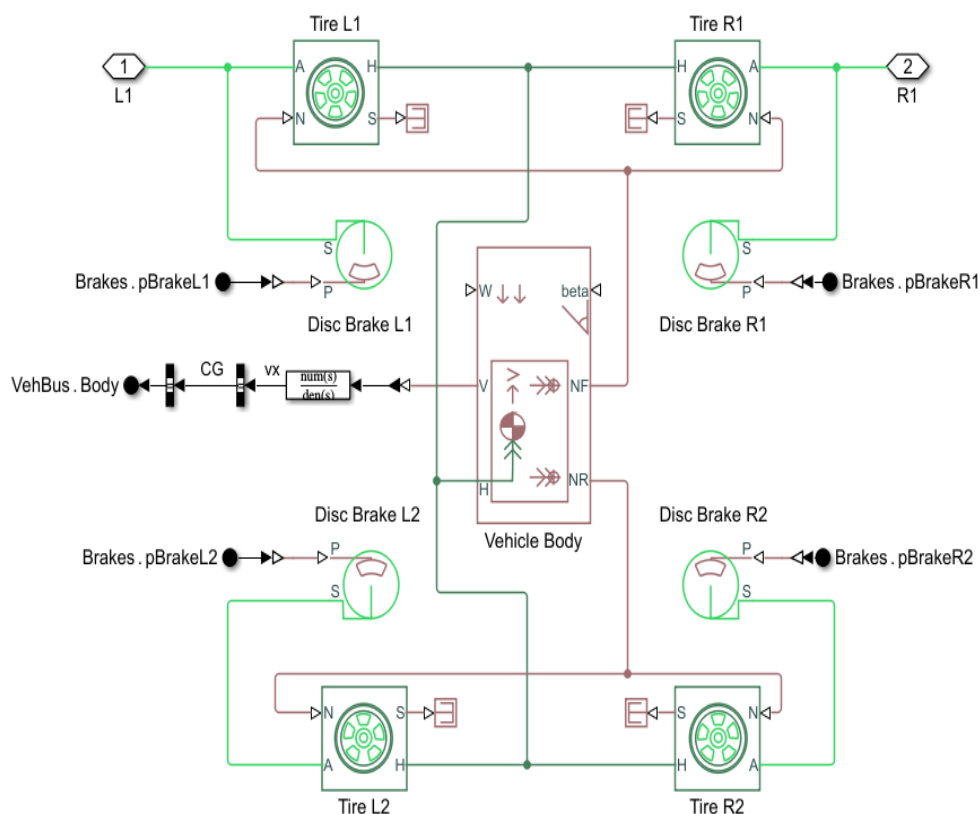
Επίσης στο block έχουμε το FC CONTROL, BATTERY MANAGEMENT SYSTEM, BRAKE PRESSYRE REQUEST, REGEN TORQUE LIMIT, ACCEL TORQUE REQUEST, ACCEL DECEL, SERIES REGEN BRAKING, SPRING DAMPER, DRIVELINE CONTROL. Αναλύοντας παραπάνω το block παρατηρούμε ότι η δυο πρώτοι παράμετροι:

1) Vehbus.Power.FuelCell.v, 2) Vehbus.Power.battery.soc η οποίες διοχετεύονται στην μονάδα ελέγχου της κυψέλης καυσίμου (FC CONTROL) και μας δίνει στοιχεία για το ρεύμα και την θερμοκρασία Fuel cell τα οποία τα στέλνει στον δίαυλο ελέγχου ισχύος. Επίσης το SERIES REGEN BRAKING το οποίο ελέγχει μια σειρά από παραμέτρους όπως 2 Vehbus.Power.battery.soc το στέλνει στο BMS και δίνει ως πληροφορία τα όρια εκφόρτισης και φορτίσεις. Η παράμετρος 3 Vehbus.Power.Motor1.w παίρνει πληροφορία για τον κινητήρα ως αποτέλεσμα την ταχύτητα του κινητήρα, δηλαδή το REGEN TORQUE LIMIT παίρνει ως πληροφορία για την τρέχουσα κατάσταση της μπαταρίας (όριο φορτίσεις και εκφόρτισεις) του κινητήρα και έχουμε ως έξοδο το όριο της ζητούμενης ροπής του συστήματος. Άλλη μια σημαντική παράμετρος είναι το Drvbus.rBrakePedal η αναφορά φρένου για το πότε φρενάρουμε.



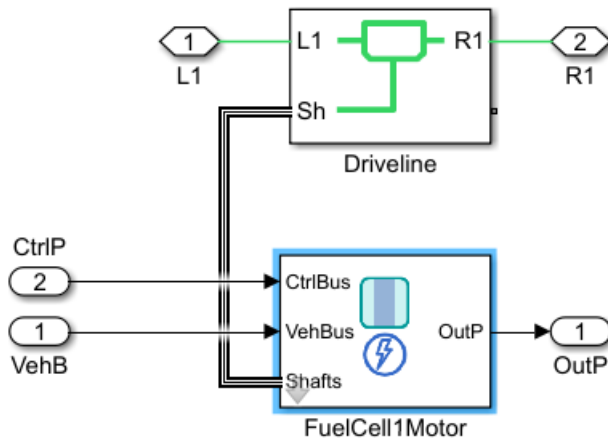
Σχήμα 4.7: Ιδιότητες οχήματος Fuel Cell

Στο σύστημα αυτό παίρνουμε πληροφορίες και αποφάσεις από το προηγούμενο block διάγραμμα τα οποία αφορούν τα φρένα και την ισχύ. Τα συστήματα αυτά επικοινωνούν μεταξύ τους.



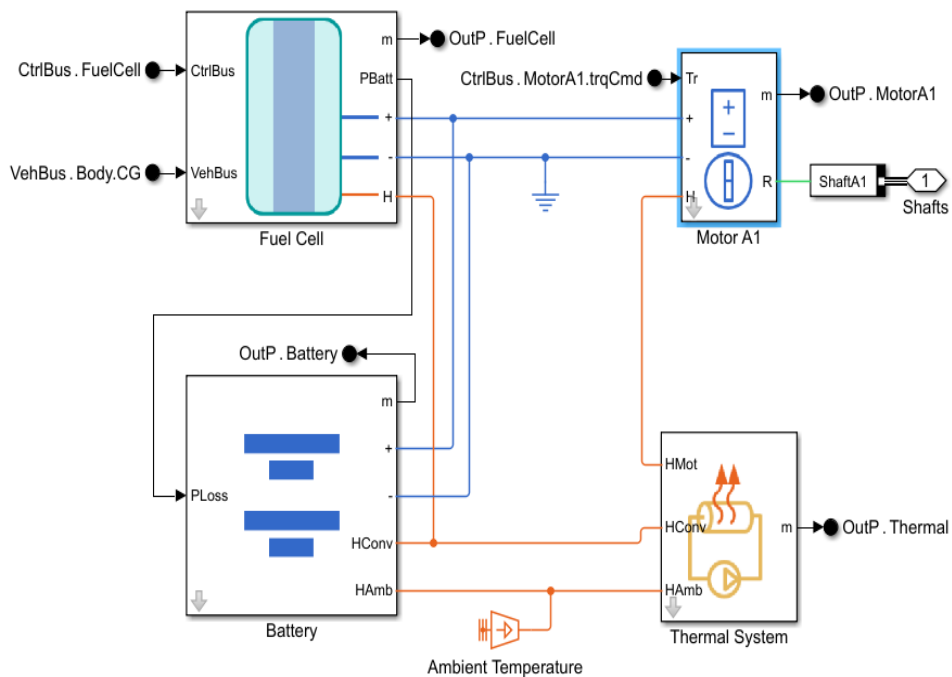
Σχήμα 4.8: Σύστημα πέδησης Fuel Cell

Εδώ έχουμε το κομμάτι του αμαξώματος με τους 4 τροχούς, τα φρένα και τα σήματα τους.



Σχήμα 4.9: Σύστημα οδήγησης Fuel Cell

Στο σύστημα αυτό έχουμε τον συνδυασμό της κυψέλης καυσίμου και του κινητήρα.



Σχήμα 4.10: Εσωτερικό συστήματος οδήγησης Fuel Cell

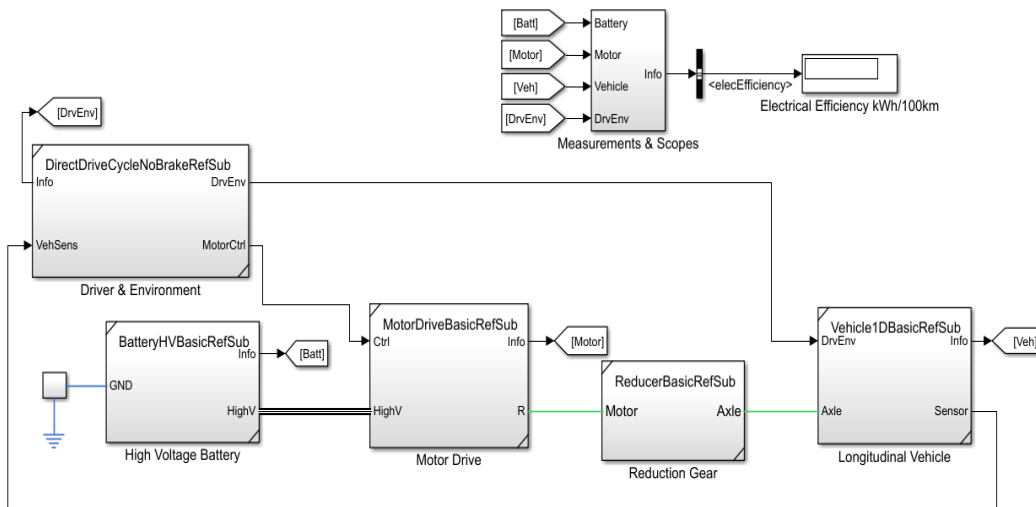
Στο σύστημα αυτό έχουμε 4 block:

- 1) Fuel cell
- 2) Battery
- 3) motor A1
- 4) Thermal System.

4.3 Προσομοίωση Οχήματος BEV Ηλεκτροκινητήρα και Μπαταρίες

4.3.1 Περιγραφή μοντέλου

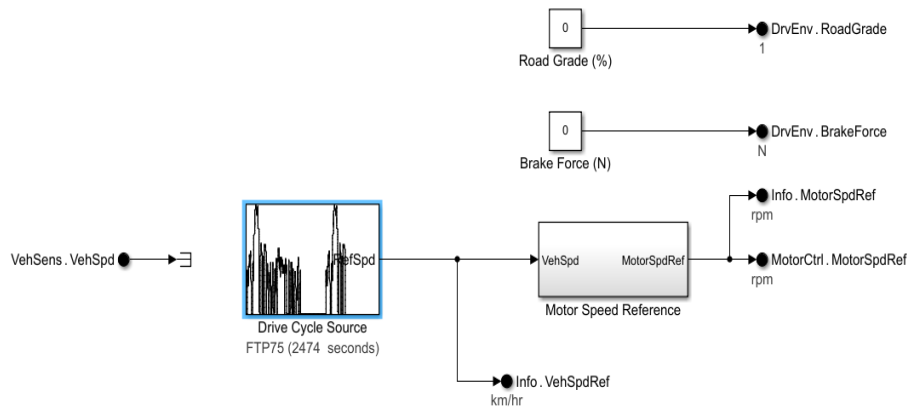
Το μοντέλο έχει μια ηλεκτρική μπαταρία (μοντέλο οχήματος BEV) και τα εξαρτήματα που αποτελείται είναι ο κινητήρας, μια μπαταρία υψηλής τάσης και το αμάξωμα του οχήματος. Το μοντέλο BEV είναι κατασκευασμένο με απλό τρόπο και μπορεί να τρέξει πιο γρήγορα από τον πραγματικό χρόνο. Επίσης έχει την δυνατότητα να λειτουργεί πιο αργά από τον πραγματικό χρόνο. Καταγράφει την συμπεριφορά του κινητήριου συστήματος AC το οποίο συμπεριλαμβάνει τον μετατροπέα και τον ηλεκτρικό κινητήρα και είναι σε θέση να εκτίμηση την ηλεκτρική απόδοση του συστήματος.



Σχήμα 4.11: Μοντέλο συστήματος

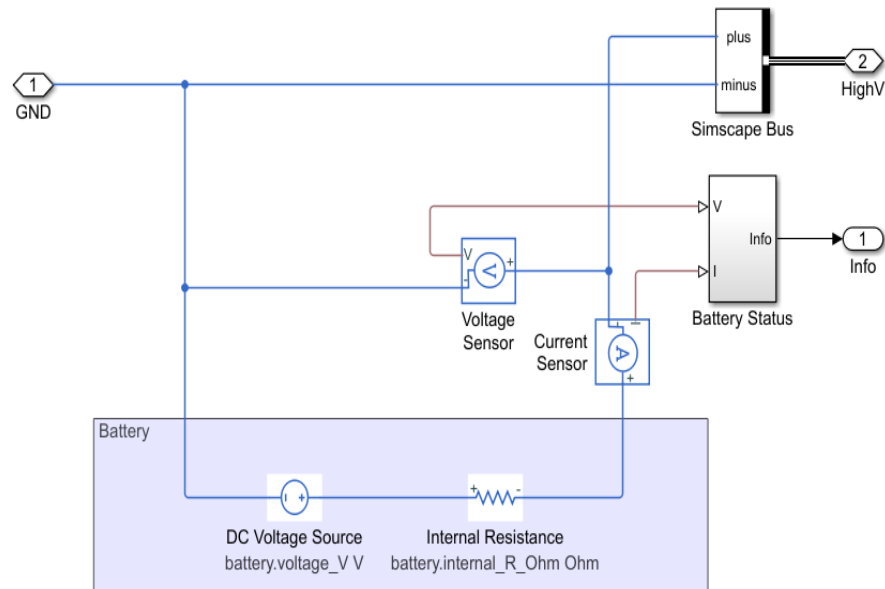
Η παραπάνω εικόνα μας δείχνει το block σύστημα και sub block του οχήματος BEVs το οποίο στέλνει όλες της εξόδους στο measurements & scope.

4.3.2 Προσομοίωση μοντέλου



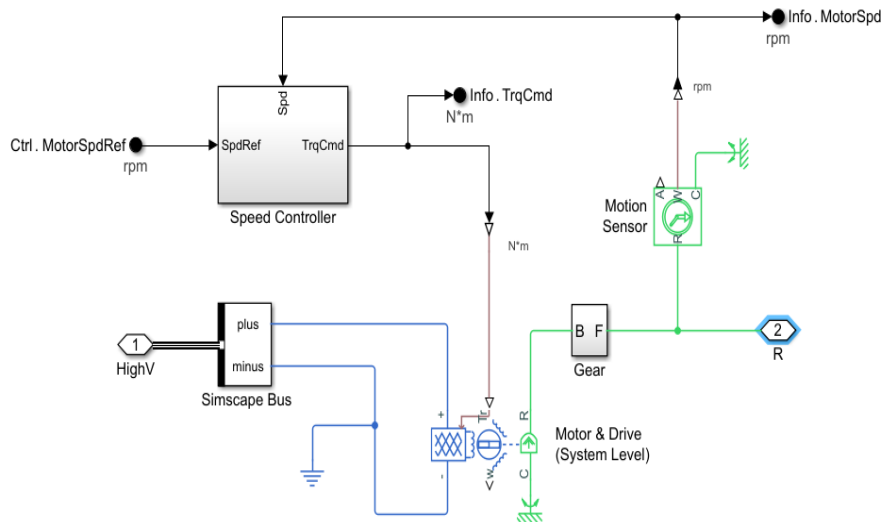
Σχήμα 4.12: Περιβάλλον οδήγησης BEV

Ουσιαστικά από αυτό το block διάγραμμα μπορούμε να καθορίσουμε παραμέτρους για την κίνηση του οχήματος. Επίσης από το drive cycle source μπορούμε να ορίσουμε τους κύκλους λειτουργίας, ενώ από τον Motor Speed Reference έχουμε την δυνατότητα να καθορίσουμε την ταχύτητα αναφοράς κινητήρα, και ως έξοδο MotorCtrl.MotorSpdRef παίρνουμε το σήμα ελέγχου κινητήρα με βάση την ταχύτητα αναφοράς, και από Info.MotorSpdRef παίρνουμε την ταχύτητα αναφοράς του κινητήρα. Τέλος έχουμε και άλλα 2 διαγράμματα, Brake Force και Road Grade %



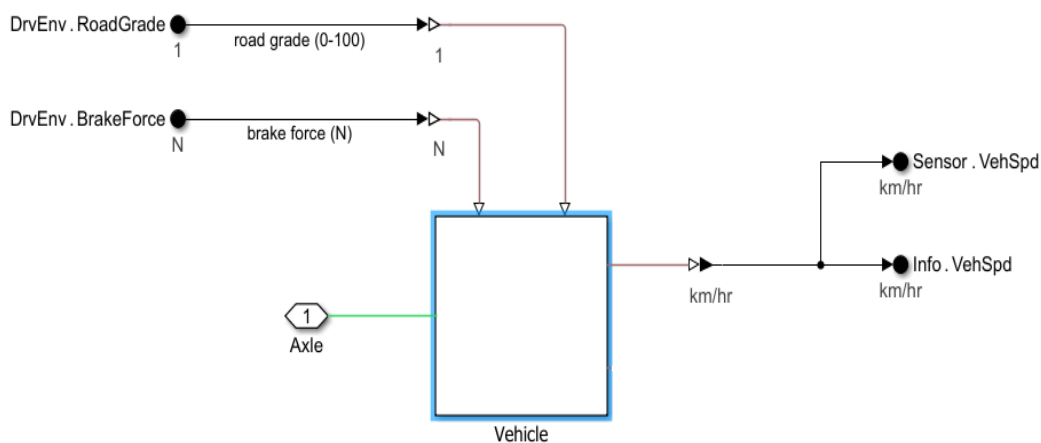
Σχήμα 4.13: Υψηλή τάση συστήματος μπαταρίας BEV

Εδώ βλέπουμε το σύστημα υψηλής τάσης της μπαταρίας, μας δείχνει το ισοδύναμο κύκλωμα μπαταρίας DC VOLTAGE SOURCE και την εσωτερική αντίσταση INTERNAL RESISTANCE. Στην συνέχεια έχει έναν αισθητήρα ρεύματος και έναν τάσης για την μέτρηση της τάσης και ρεύματος τα οποία τα στέλνει στην μητρητική διάταξη.

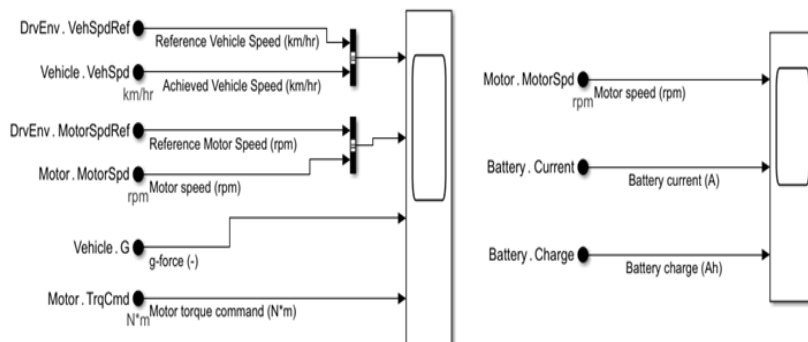


Σχήμα 4.14: Ηλεκτρικός κινητήρας οδήγησης BEV

Στο BLOCK αυτό παρέχετε η HighV , Speed Cotroller ο οποίος λαμβάνει την ταχύτητα αναφοράς του ηλεκτρικού κινητήρα και την TrqCmd=εντολή ροπής για να πετύχει το αποτέλεσμα . Επίσης παίρνει μια ανάδραση κίνησης από το σύστημα motor & drive , gear και Motion sensor.Το σύστημα αυτό στην ουσία δίνει ένα σήμα στον Cotroller το οποίο αν έχουμε πετύχει το σήμα που θέλουμε το διατηρεί ενώ αν δεν το έχουμε πετύχει το διορθώνει.



Σχήμα 4.15: Διαμήκες όχημα BEV



Σχήμα 4.16: Σύστημα αξιολόγησης BEV

4.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης ΓΙΑ BEV MERCEDES EQE 350

4.4.1 WLTP Class I

4.4.1.1 *Πρώτη περίπτωση: για οδηγό και αποσκευές για το όχημα Mercedes EQE 350*



 90.6 kWh
Useable Battery

 525 km*
Real Range

 173 Wh/km*
Efficiency

Real Range Estimation

between 385 - 745 km

City - Cold Weather *	500 km	City - Mild Weather *	745 km
Highway - Cold Weather *	385 km	Highway - Mild Weather *	500 km
Combined - Cold Weather *	440 km	Combined - Mild Weather *	605 km

Performance

Acceleration 0 - 100 km/h	6.4 sec	Total Power	215 kW (292 PS)
Top Speed	210 km/h	Total Torque	565 Nm
Electric Range *	525 km	Drive	Rear

Battery

Nominal Capacity *	100.0 kWh	Useable Capacity	90.6 kWh
Battery Type	Lithium-ion	Cathode Material	NCM811
Number of Cells	360	Pack Configuration	90s4p
Architecture	400 V	Nominal Voltage	328 V

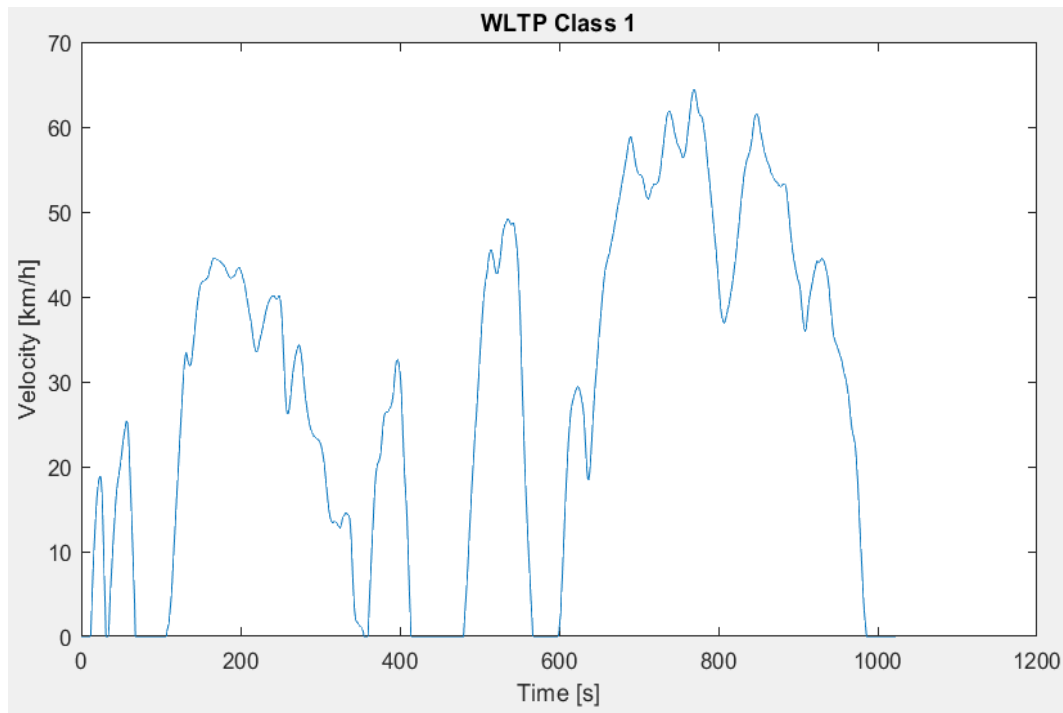
Dimensions and Weight

Length	4946 mm	Cargo Volume	430 L
Width	1906 mm	Cargo Volume Max	895 L
Width with mirrors	2104 mm	Cargo Volume Frunk	0 L
Height	1492 mm	Roof Load	100 kg
Wheelbase	3120 mm	Tow Hitch Possible	Yes
Weight Unladen (EU)	2355 kg	Towing Weight Unbraked	750 kg
Gross Vehicle Weight (GVWR)	2880 kg	Towing Weight Braked	750 kg
Max. Payload	600 kg	Vertical Load Max	No Data

Miscellaneous

Seats	5 people	Car Body	Sedan
Isofix	No Data	Segment	E - Executive
Turning Circle	12.5 m	Roof Rails	No
Platform	DAIMLER EVA2	EV Dedicated Platform	Yes

Σχήμα 4.17: Τεχνικά χαρακτηριστικά Mercedes EQE350.

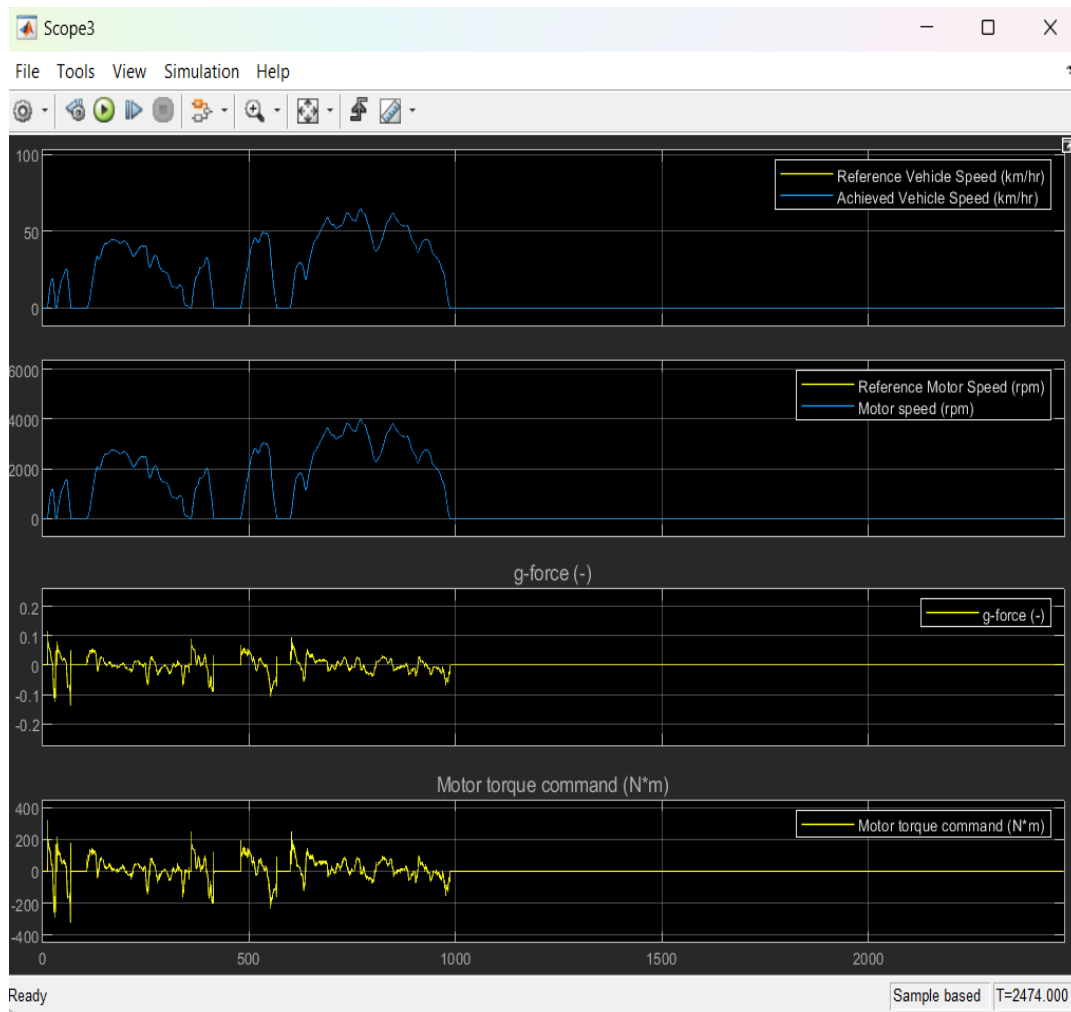


Σχήμα 4.18: Διάγραμμα ταχύτητας χρόνου.

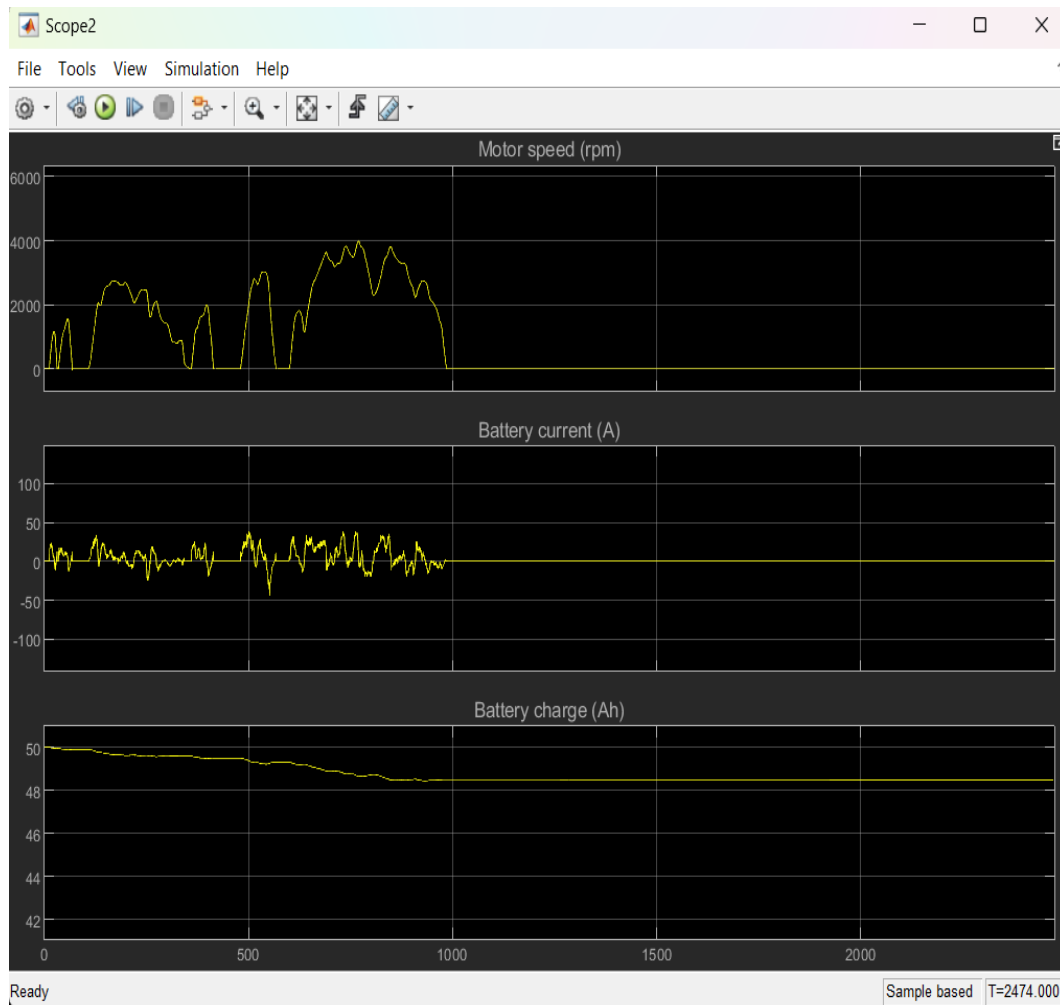
```
Editor - BevDriveCycleBasicParams.m * | Project - Simscape-Battery-EV
MainScript.mlx | BevDriveCycleBasicParams.m * | +
1 | %% Model Parameters for BEV Drive Cycle Basic Model
2 |
3 |
4 |
5 | %% Vehicle
6 | %Vehicle1DBasicParams
7 | %- {
8 | vehicle.vehMass_kg = 2355;
9 | vehicle.tireRollingRadius_cm = 30;
10 | vehicle.roadLoadA_N = 100;
11 | vehicle.roadLoadB_N_per_kph = 0;
12 | vehicle.roadLoadC_N_per_kph2 = 0.035;
13 | %}
14 |
15 | %% High Voltage Battery
16 | %BatteryHVBASICParams
17 | %- {
18 | battery.voltage_V = 400;
19 | battery.internal_R_ohm = 0.002;
20 | %}
21 |
```

- Vehicle.roadLoadA_N=100 και Vehicle.roadLoadB_N_per_kph είναι η παράμετρο που έχουμε θέση για το χρόνο που θα ξεκινήσει το όχημα με ταχύτητα 0 έως 100 kph .
- Vehicle.roadLoadC_N_per_kph2=0.035 επιτάχυνση.

Σχήμα 4.19: Παράμετροι περίπτωσης

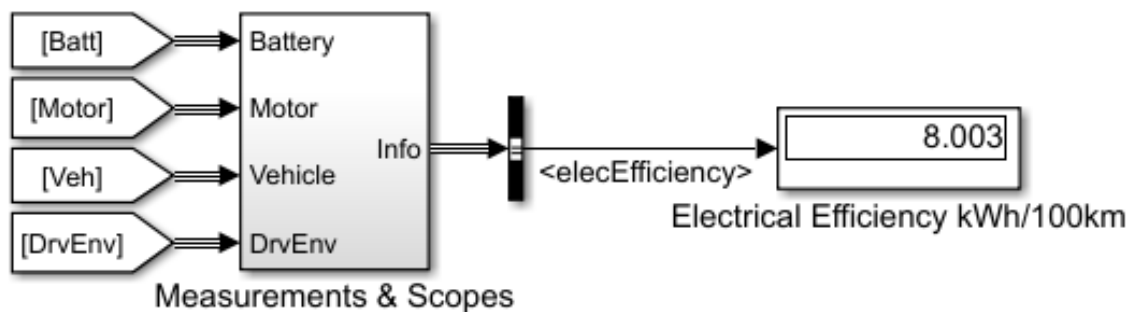


Σχήμα 4.20: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ-ΡΟΠΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ



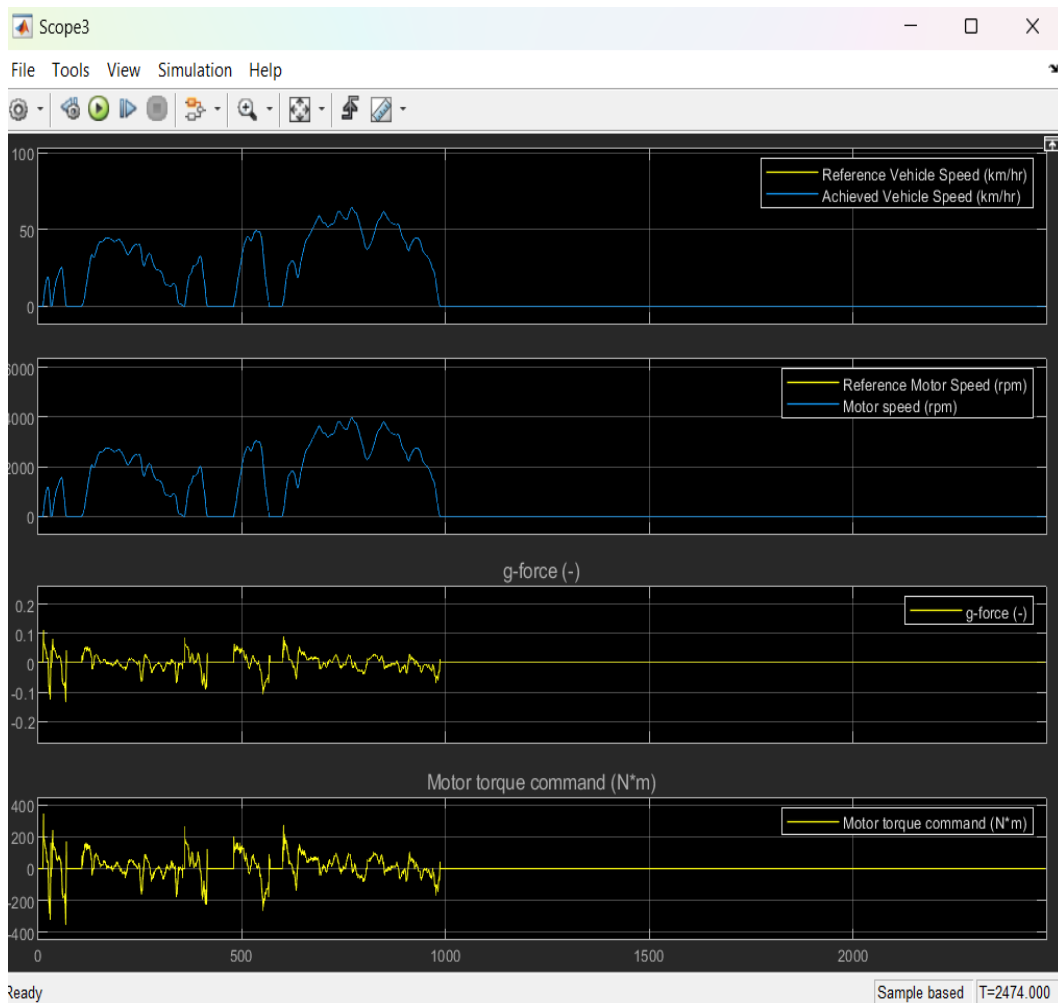
Σχήμα 4.21: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ-ΡΕΥΜΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ-ΦΟΡΤΙΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ

4.4.1.2 Δεύτερη περίπτωση για οδηγό με 4 συνεπιβάτες και αποσκευές για το όχημα Mercedes EQE 350

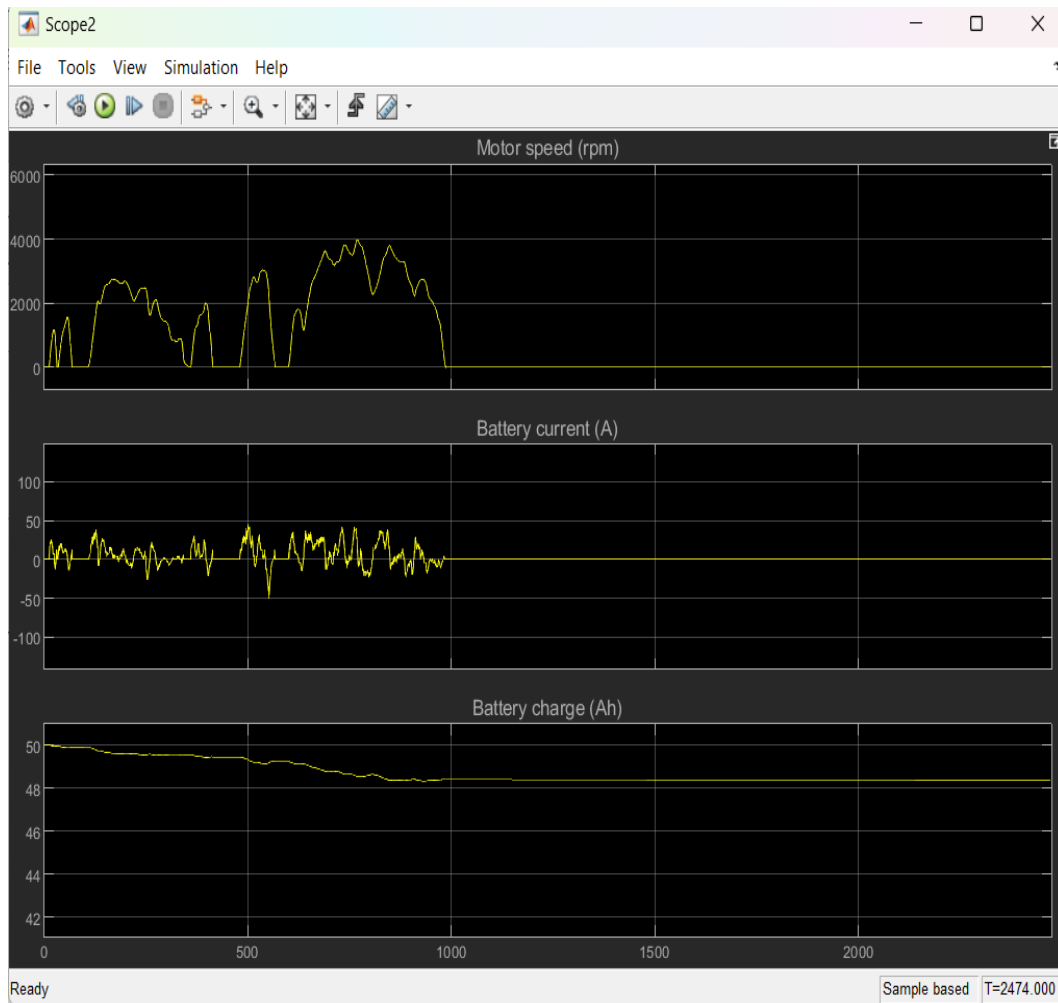


```
Editor - BevDriveCycleBasicParams.m * Project - Simscape-Battery-EV
MainScript.mlx BevDriveCycleBasicParams.m * +
1 %% Model Parameters for BEV Drive Cycle Basic Model
2
3
4
5 %% Vehicle
6 %Vehicle1DBasicParams
7 %-
8 vehicle.vehMass_kg = 2655;
9 vehicle.tireRollingRadius_cm = 30;
10 vehicle.roadLoadA_N = 100;
11 vehicle.roadLoadB_N_per_kph = 0;
12 vehicle.roadLoadC_N_per_kph2 = 0.035;
13 %}
14
15 %% High Voltage Battery
16 %BatteryHVBasicParams
17 %-
18 battery.voltage_V = 400;
19 battery.internal_R_ohm = 0.002;
20 %}
21
```

Σχήμα 4.22: Παράμετροι περίπτωσης



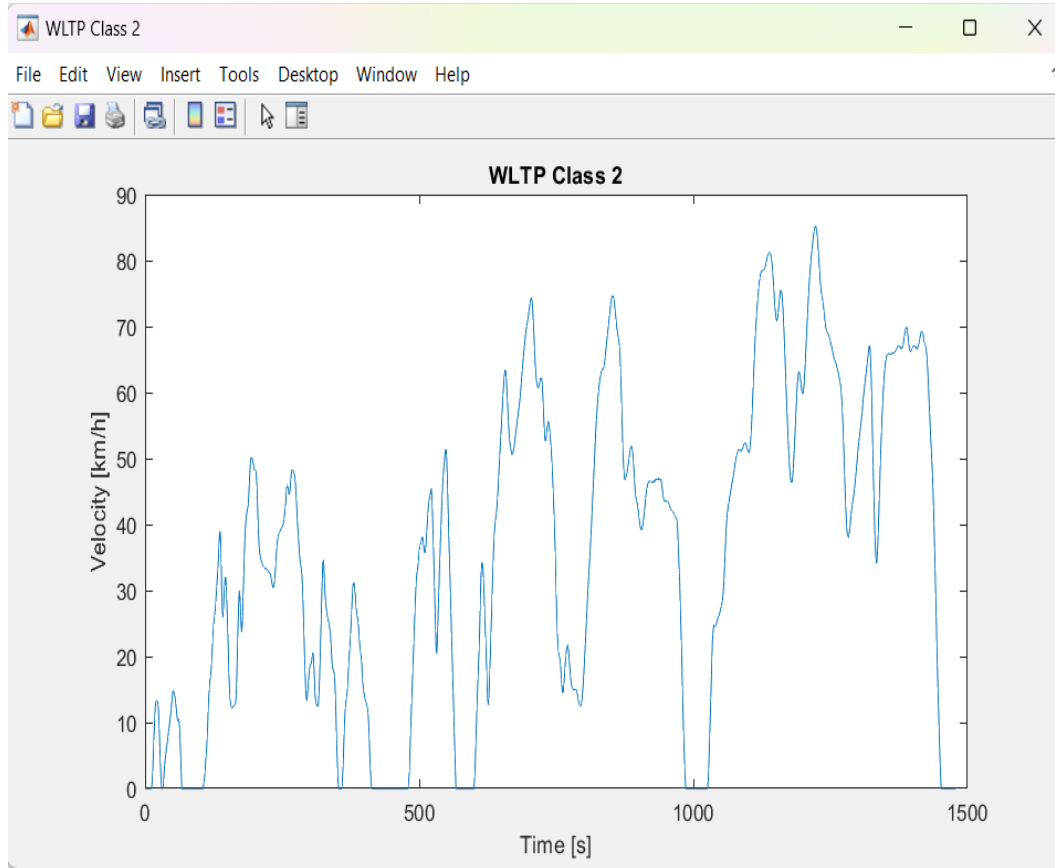
Σχήμα 4.23: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ-ΡΟΠΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ



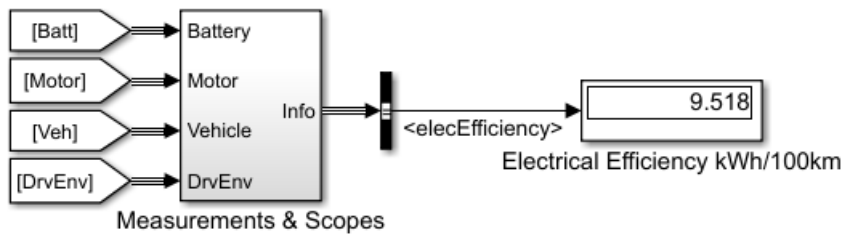
Σχήμα 4.24: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ-ΡΕΥΜΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ-ΦΟΡΤΙΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ

4.4.2 WLTP Class II

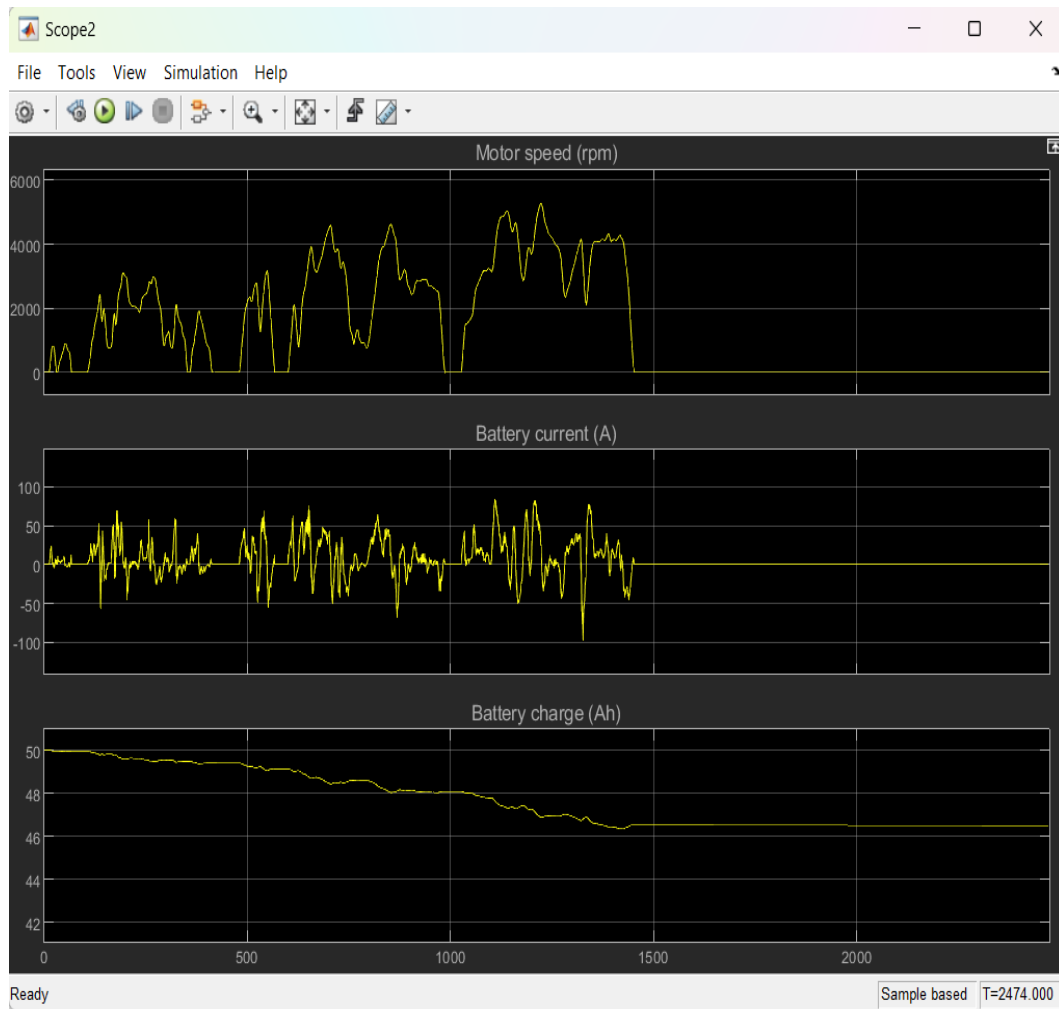
4.4.2.1 Πρώτη περίπτωση για οδηγό και αποσκευές για το όχημα Mercedes EQE 350



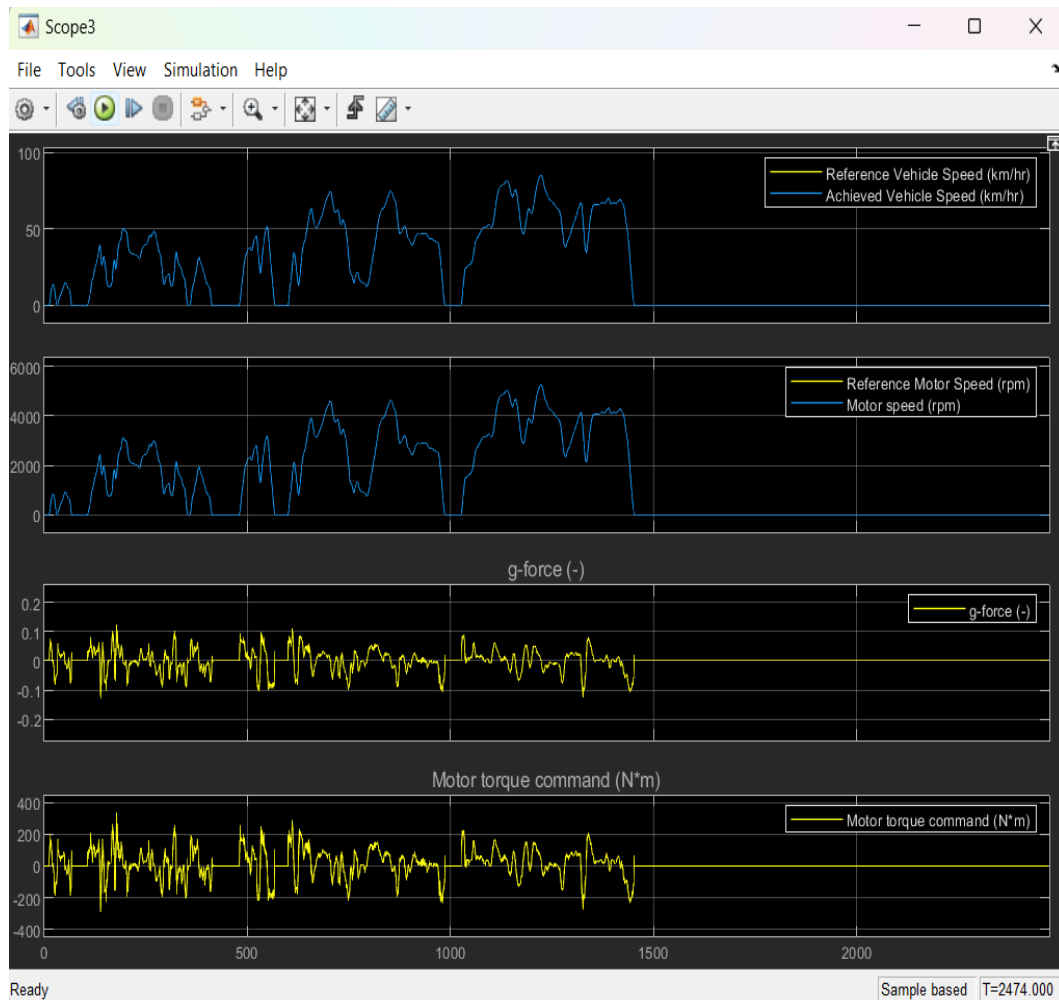
Σχήμα 4.25: Διάγραμμα ταχύτητας χρόνου για το WLTP Class II



Σχήμα 4.26: Παράμετροι

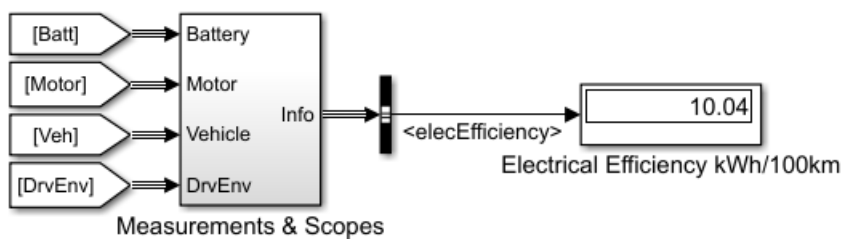


Σχήμα 4.27:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ-ΡΕΥΜΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ-ΦΟΡΤΙΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ

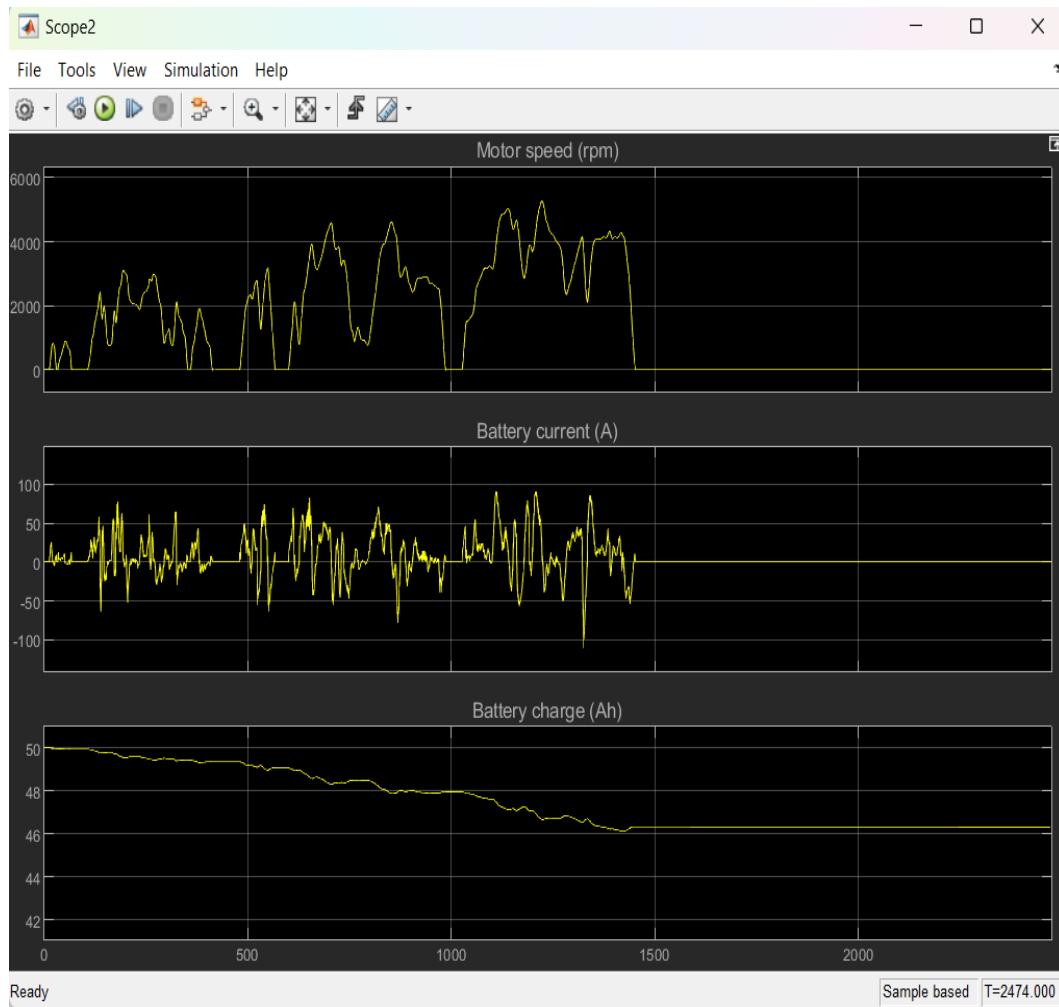


Σχήμα 4.28: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ-ΡΟΠΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

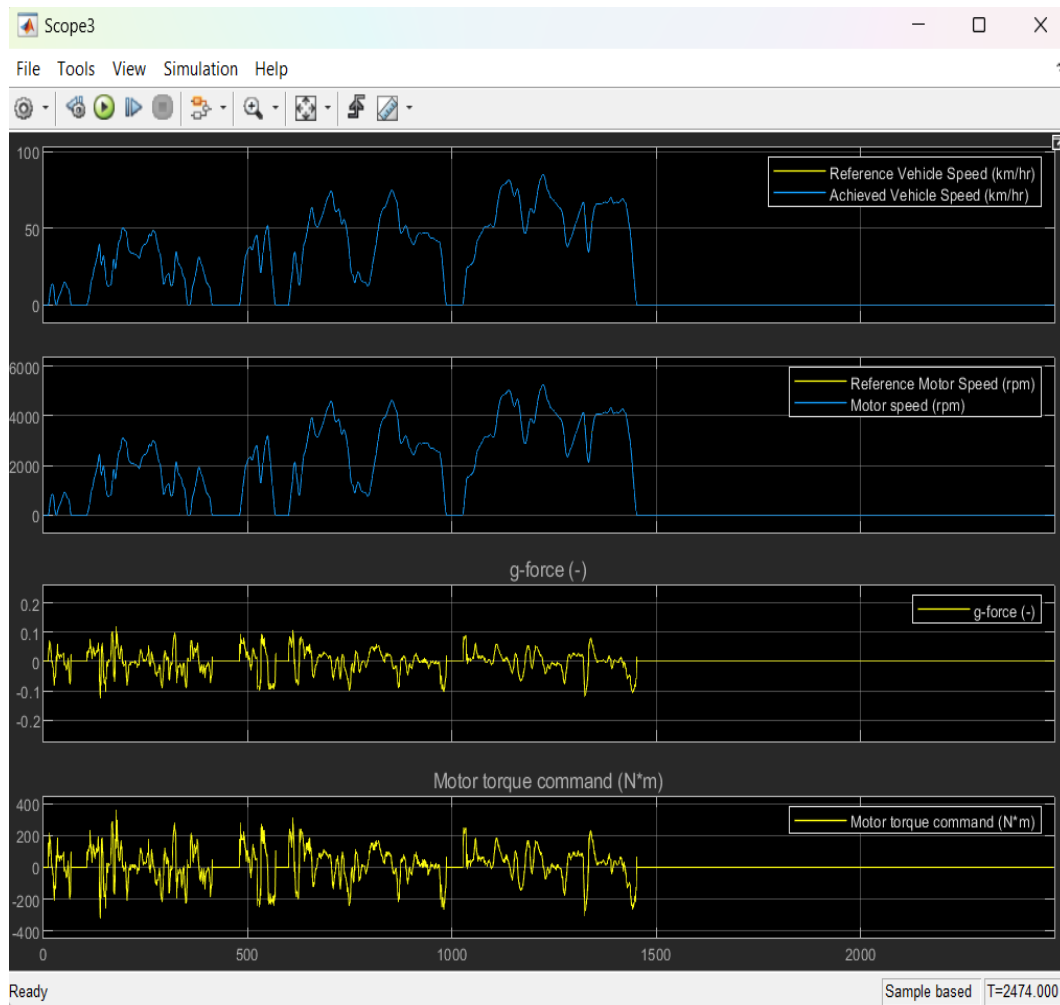
4.4.2.2 Δεύτερη περίπτωση για οδηγό με 4 συνεπιβάτες και αποσκευές για το όχημα Mercedes EQE 350



Σχήμα 4.29: Παράμετροι



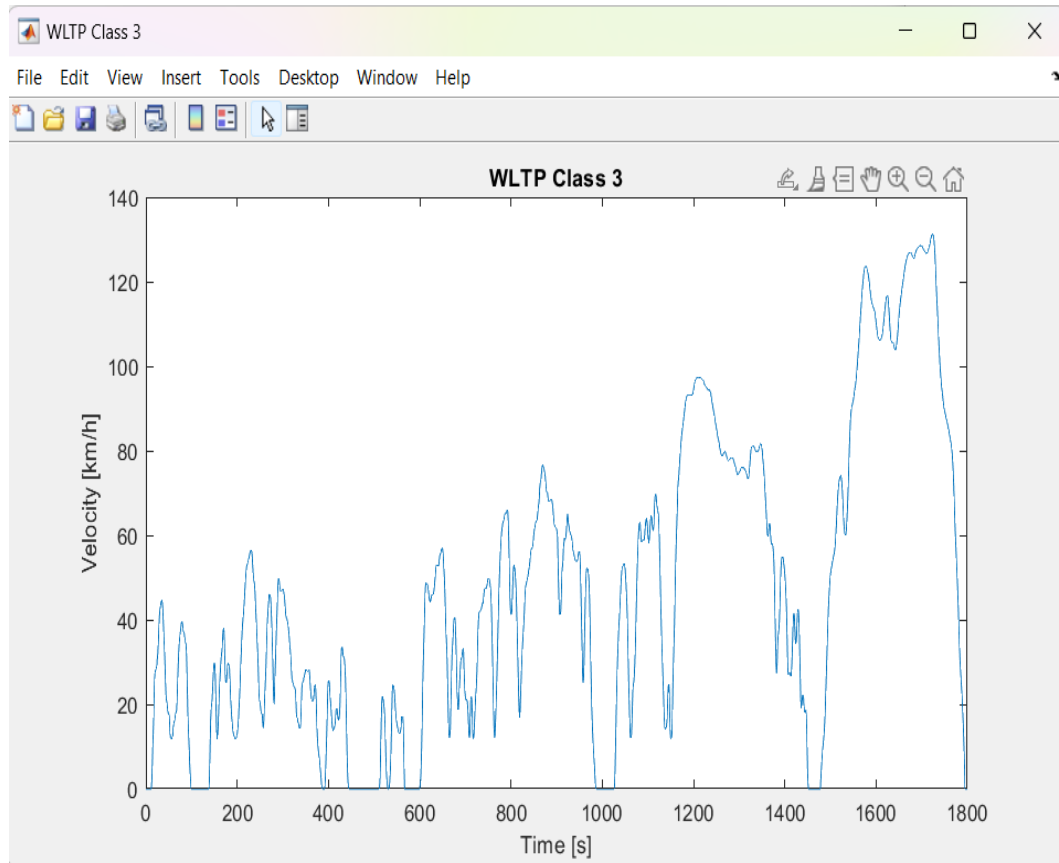
Σχήμα 4.30: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ-ΡΕΥΜΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ-ΦΟΡΤΙΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ



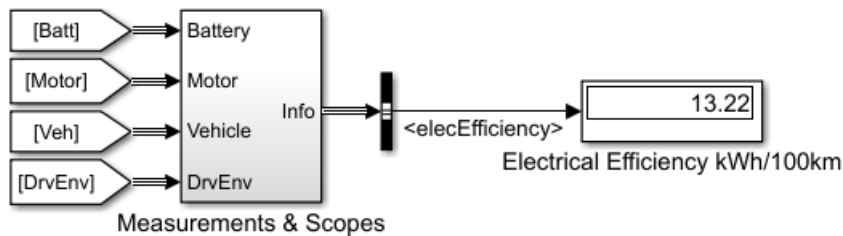
Σχήμα 4.31: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ-ΡΟΠΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

4.4.3 WLTP Class III

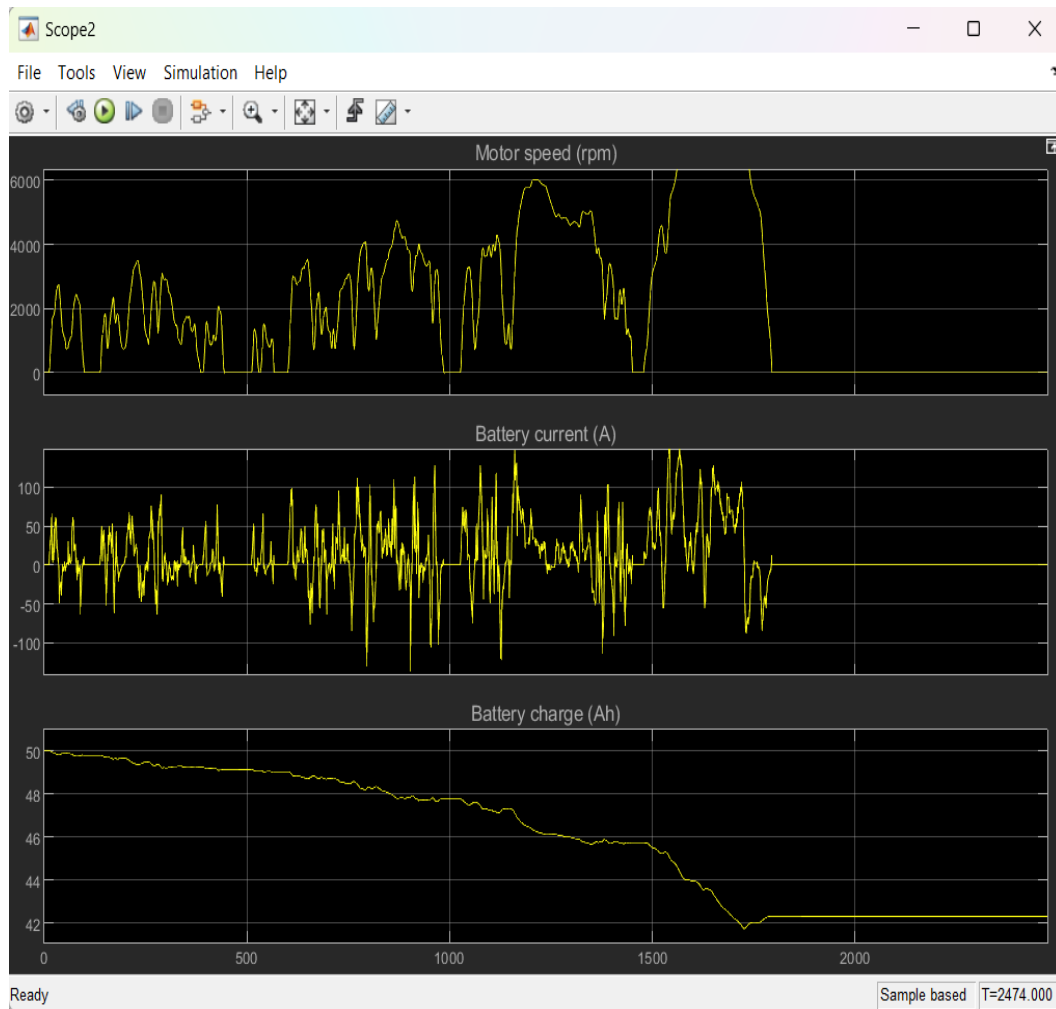
4.4.3.1 Πρώτη περίπτωση για οδηγό με αποσκευές για το όχημα Mercedes EQE 350



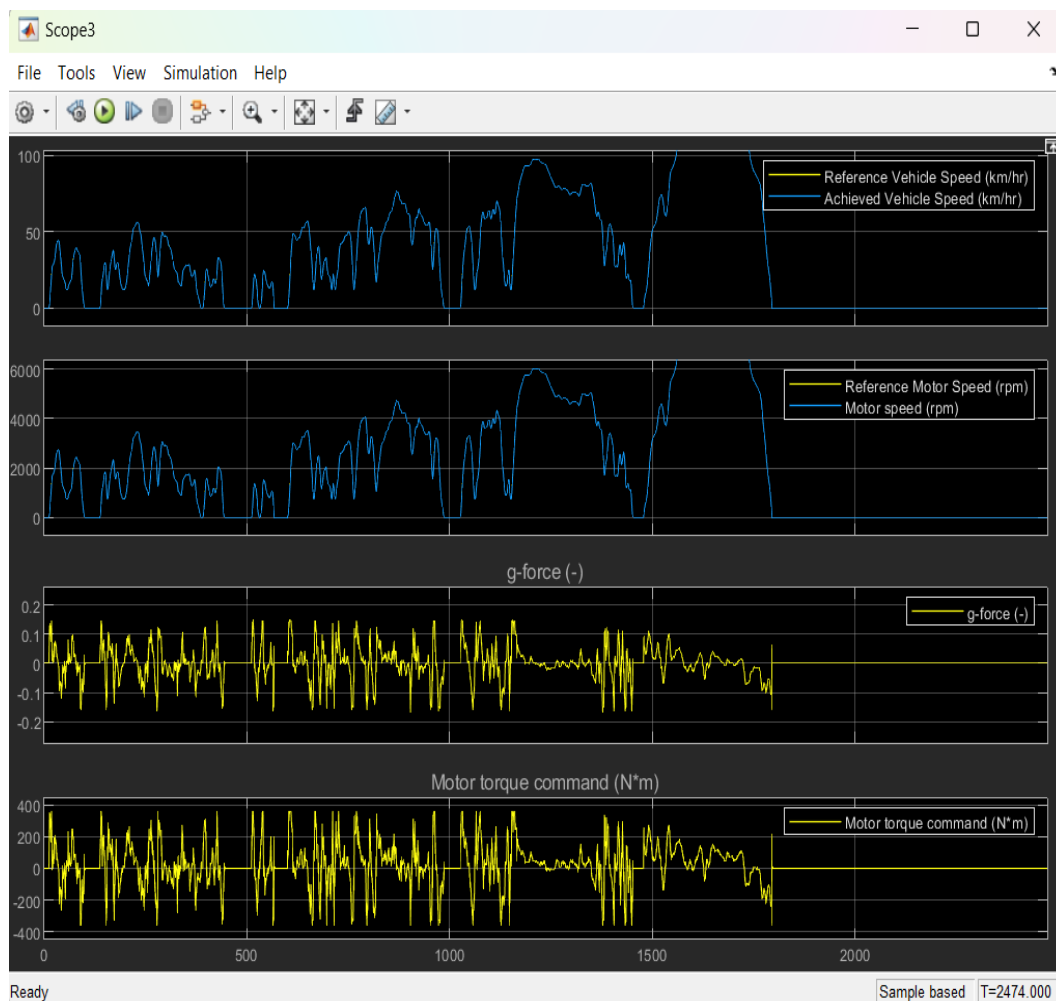
Σχήμα 4.32: Διάγραμμα ταχύτητας χρόνου για το πρότυπο WLTP Class III



Σχήμα 4.33: Παράμετροι

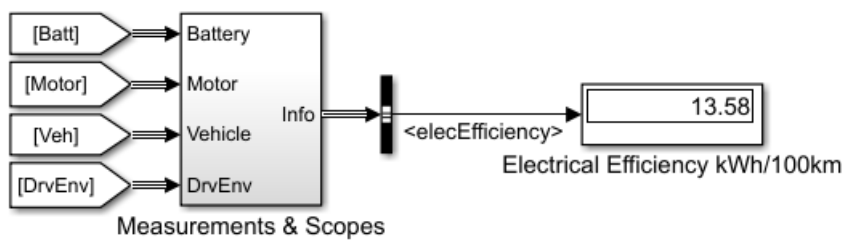


Σχήμα 4.34: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ-ΡΕΥΜΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ-ΦΟΡΤΙΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ

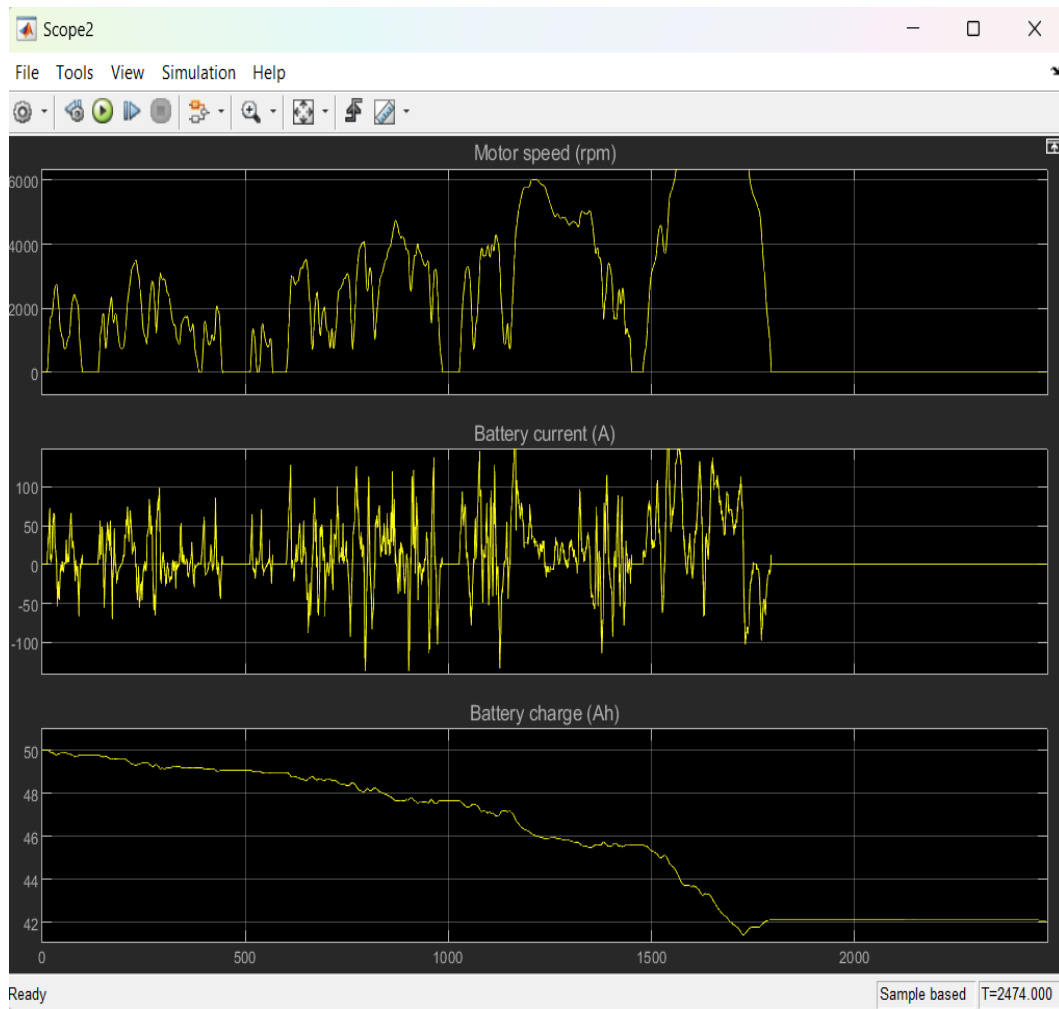


Σχήμα 4.35: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ-ΡΟΠΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

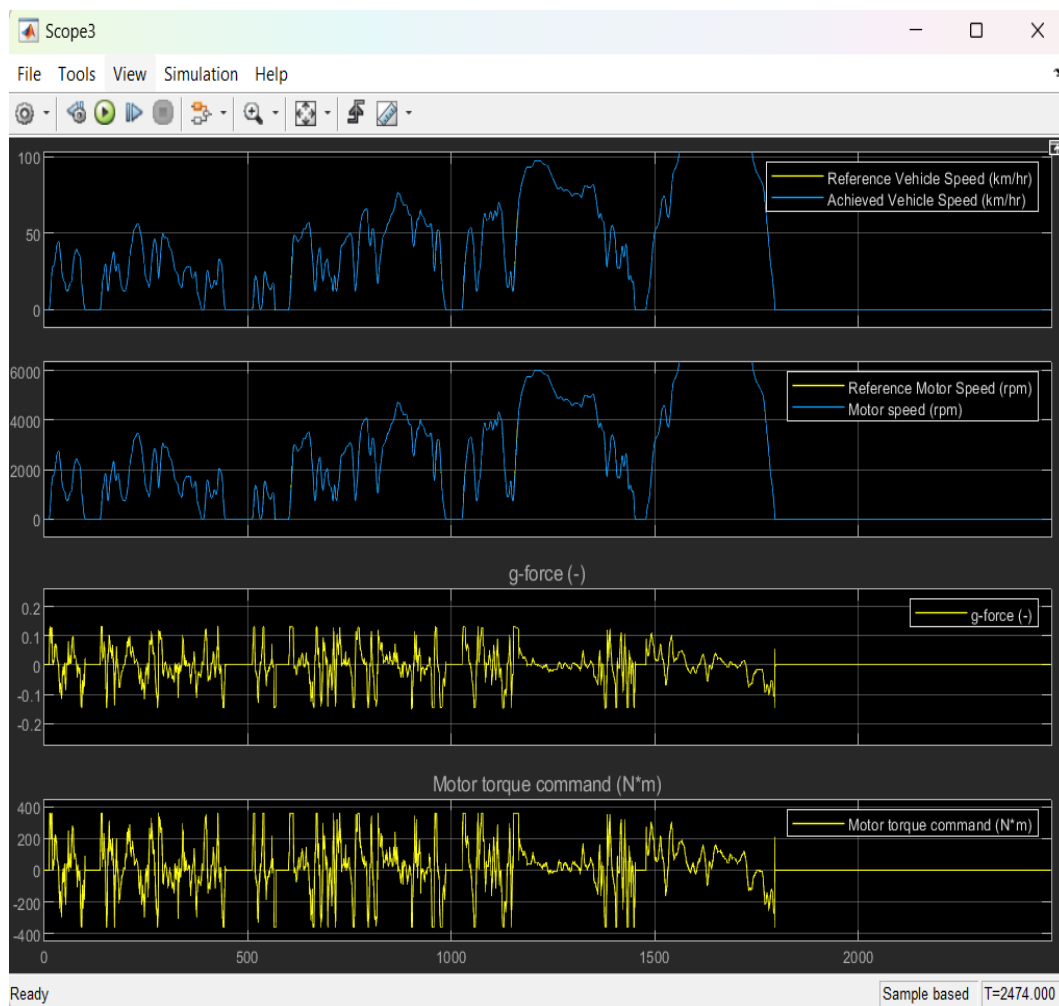
4.4.3.2 Δεύτερη περίπτωση για οδηγό με 4 συνεπιβάτες και αποσκευές για το όχημα Mercedes EQE 350



Σχήμα 4.36: Παράμετροι



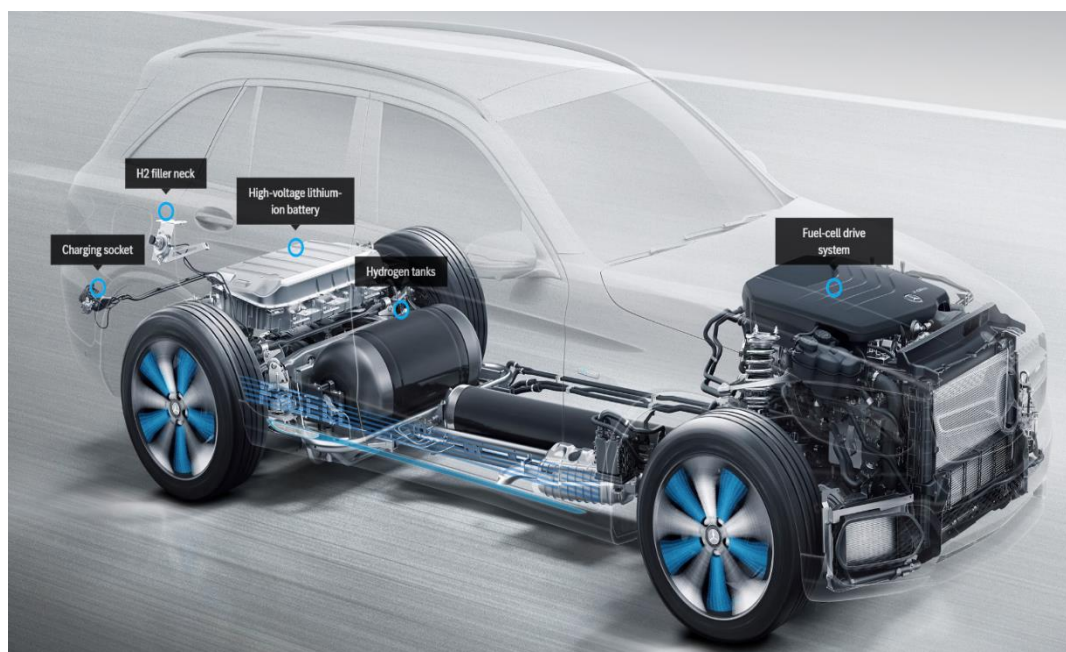
Σχήμα 4.37: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ-ΡΕΥΜΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ-ΦΟΡΤΙΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ



Σχήμα 4.38:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ-ΡΟΠΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ

4.5 Αποτελέσματα προσομοίωσης ΓΙΑ Fuel Cell MERCEDES GLC F-CELL

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται για το όχημα Mercedes GLC F-Cell.



Powertrain specs

Engine type	hydrogen fuel cell electric motor
Power	211 ps (208 bhp / 155 kw)
Torque	365 Nm (269 lb-ft)
Power / weight	98 ps (97 bhp) / t
Torque / weight	170 Nm (125 lb-ft) / t
Transmission	1 speed
Layout	middle engine, rear wheel drive

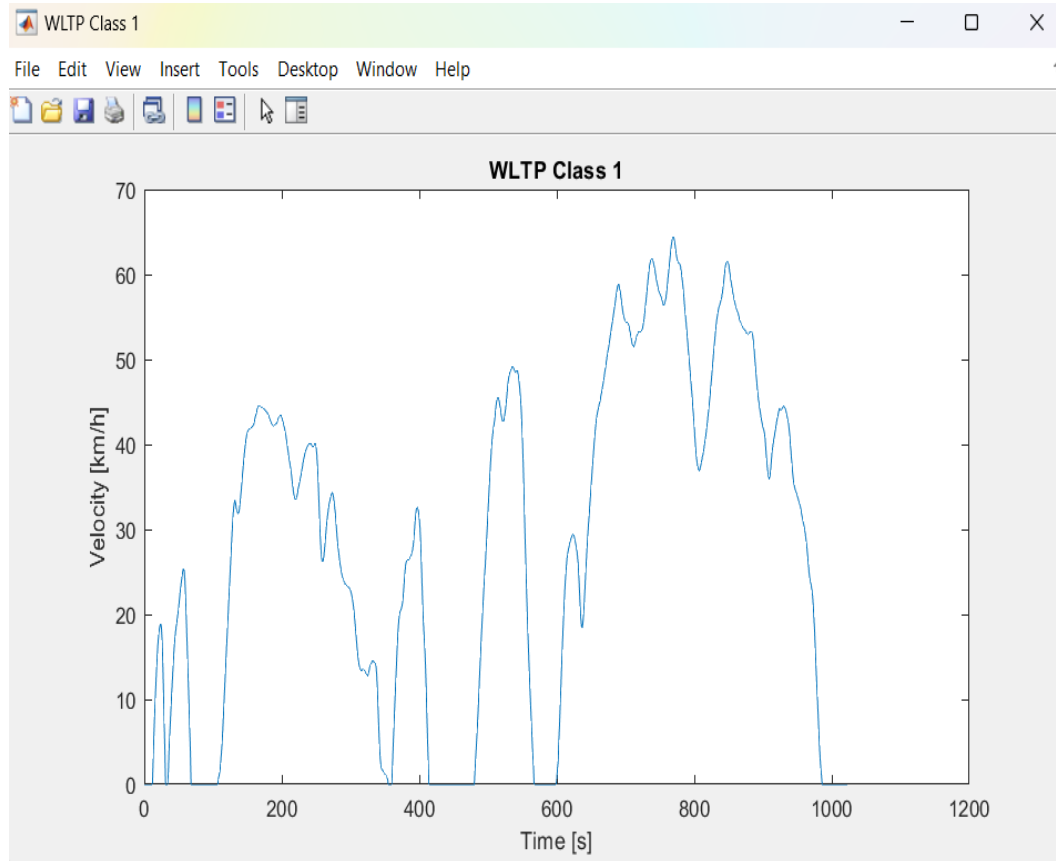
Performance

0 - 100 kph	5.8 s	Car type	SUV/truck
Top speed	160 kph (99 mph)	Curb weight	2149 kg (4738 lbs)
50 kph - 0	10 m (31 ft)	Years built	2017 - 2020
100 kph - 0	35 m (114 ft)	Origin country	Germany
150 kph - 0	82 m (270 ft)		

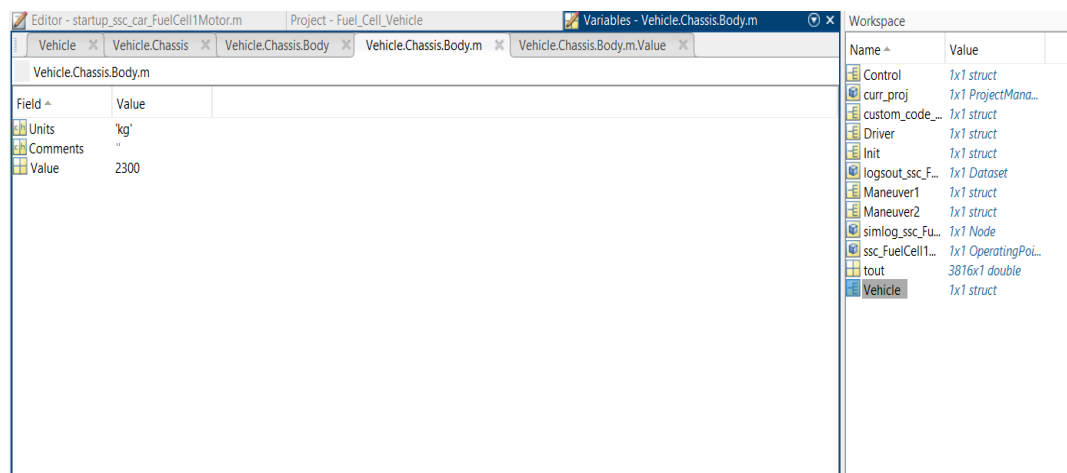
Σχήμα 4.39: Τεχνικά χαρακτηριστικά Mercedes GLC F-Cell.

4.5.1 WLTP Class I

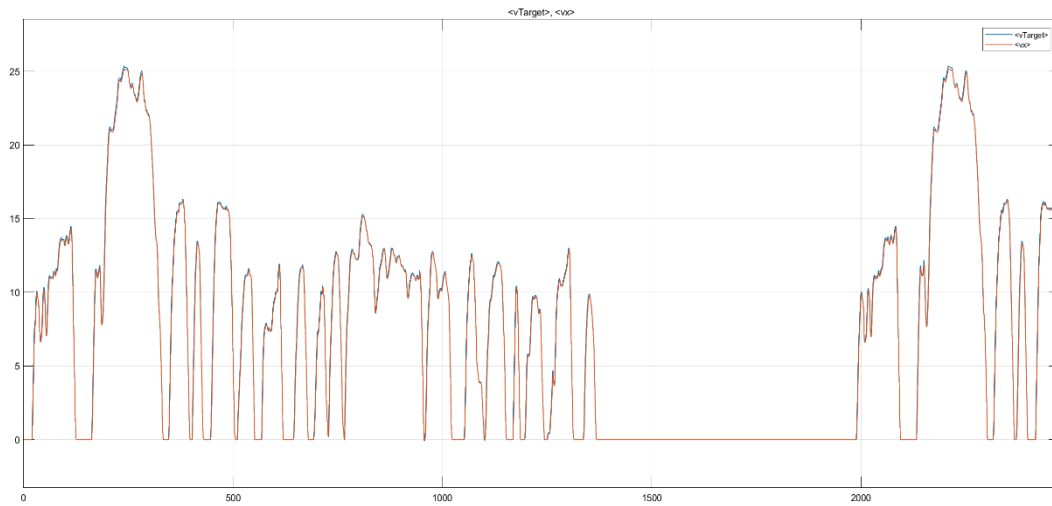
4.5.1.1 Πρώτη περίπτωση για οδηγό με αποσκευές



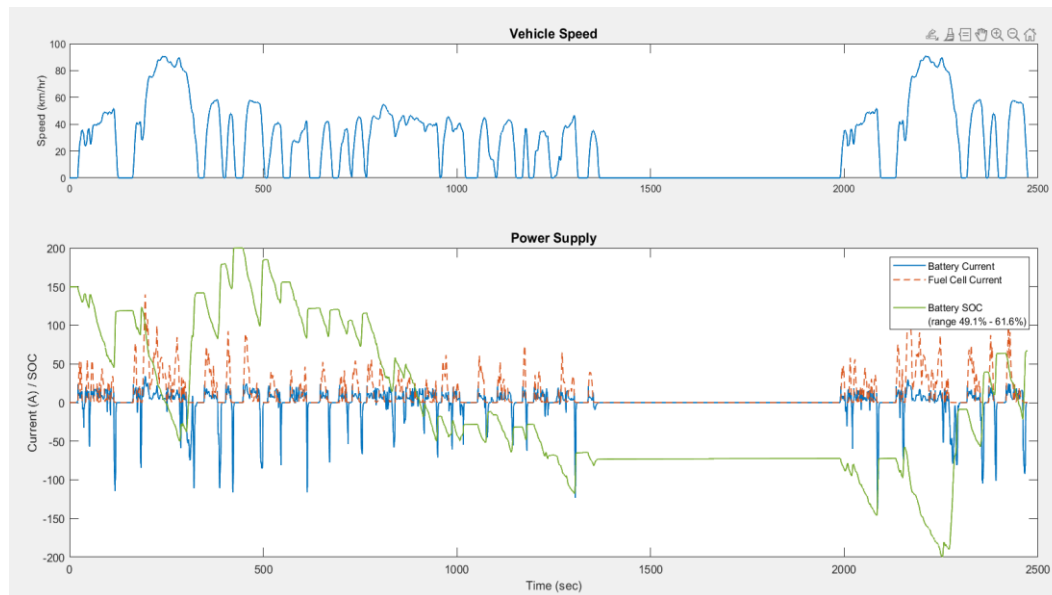
Σχήμα 4.40: Διάγραμμα ταχύτητας χρόνου για το πρότυπο WLTP Class I



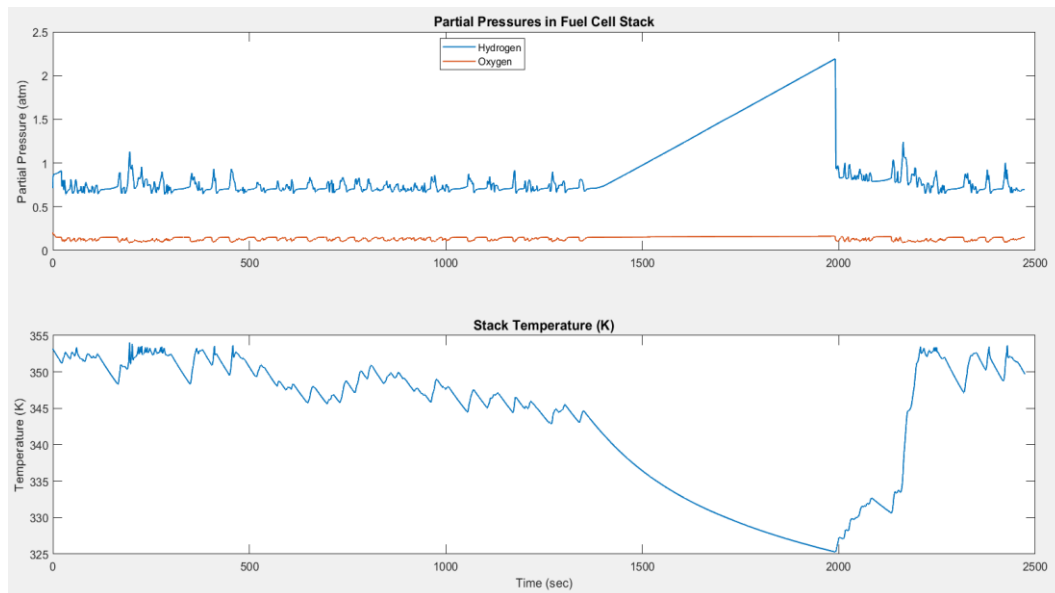
Σχήμα 4.41: Παράμετροι



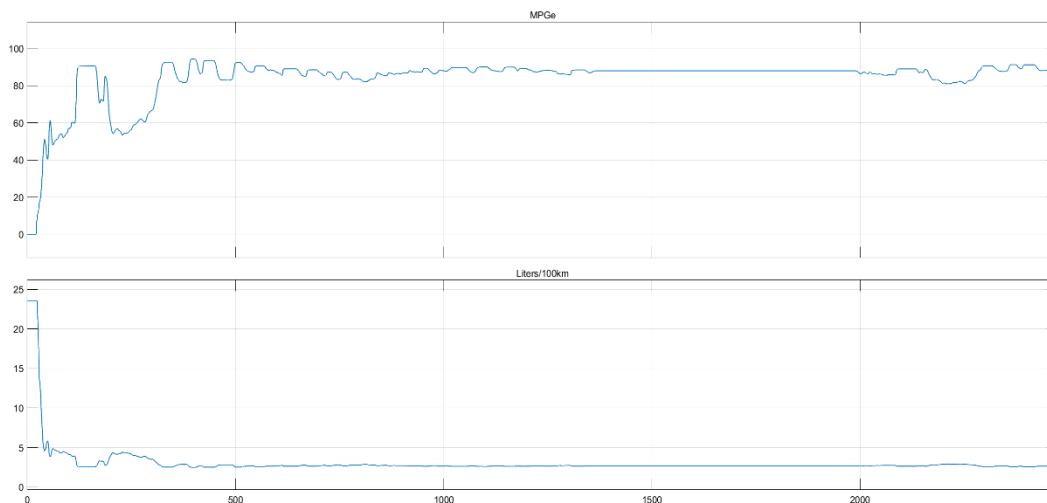
Σχήμα 4.42: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ- ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΟΥ ΠΕΤΥΧΑΜΕ.



Σχήμα 4.43α:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ-ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ- ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.

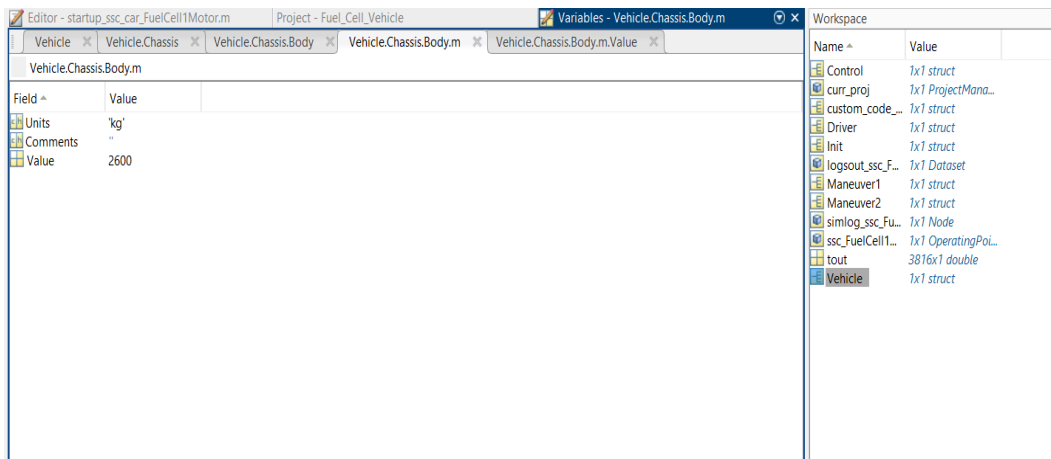


Σχήμα 4.44b:ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΕΣΕΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ-ΟΞΥΓΩΝΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΩΝ.

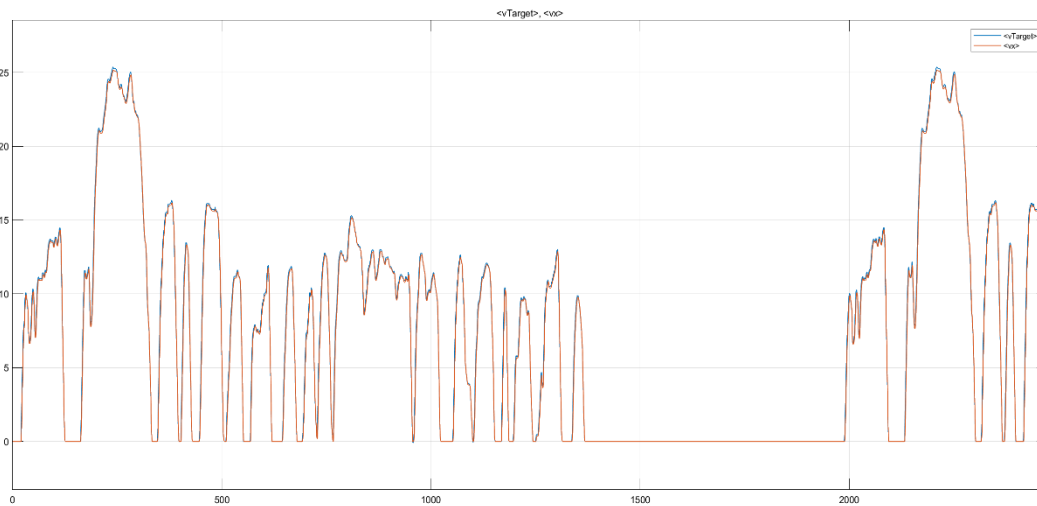


Σχήμα 4.45: Διάγραμμα MPGe (Miles per gallon gasoline equivalent)& Εύρος κατανάλωσης καυσίμου (Λίτρα/100 km) με συνεπιβάτες και αποσκευές.

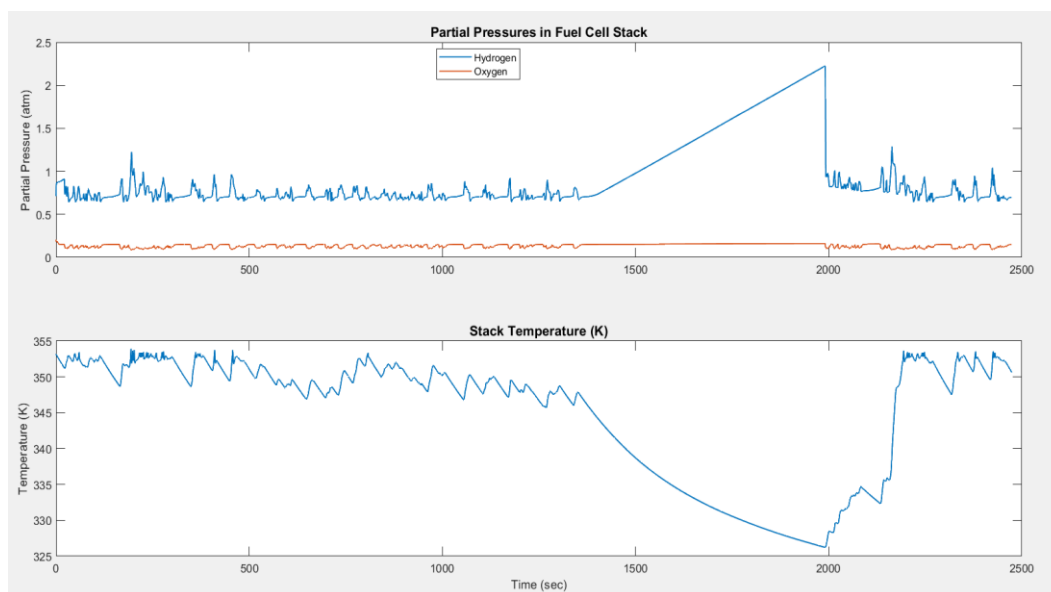
4.5.1.2 Δεύτερη περίπτωση για οδηγό με 4 συνεπιβάτες και αποσκευές



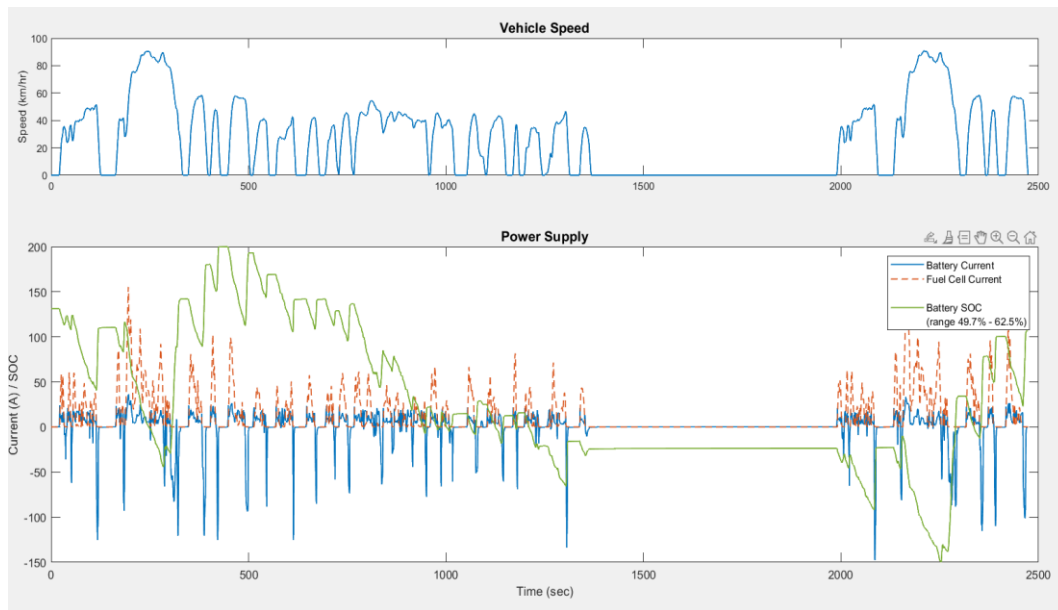
Σχήμα 4.46: Παράμετροι



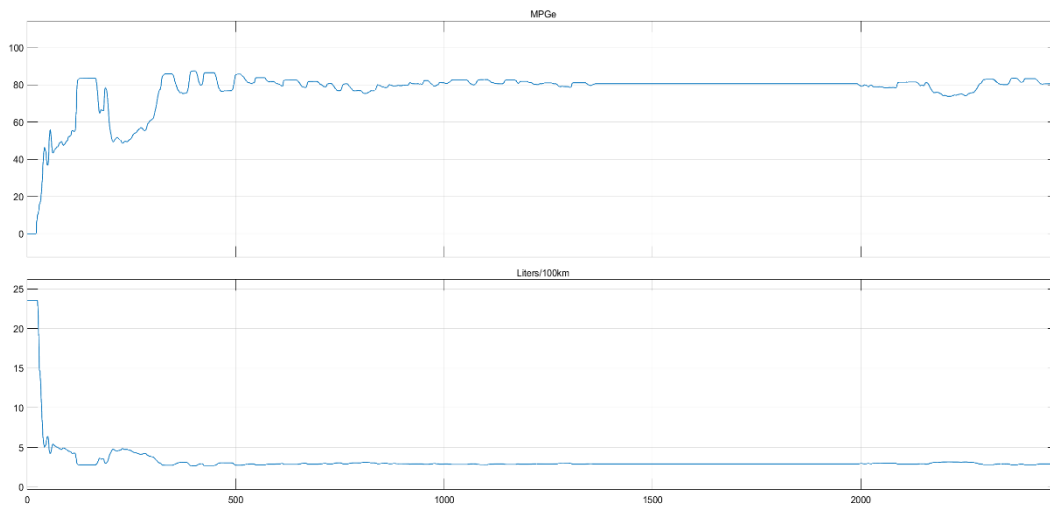
Σχήμα 4.47: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ- ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΟΥ ΠΕΤΥΧΑΜΕ.



Σχήμα 4.48a: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΕΣΕΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ-ΟΞΥΓΩΝΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΩΝ.



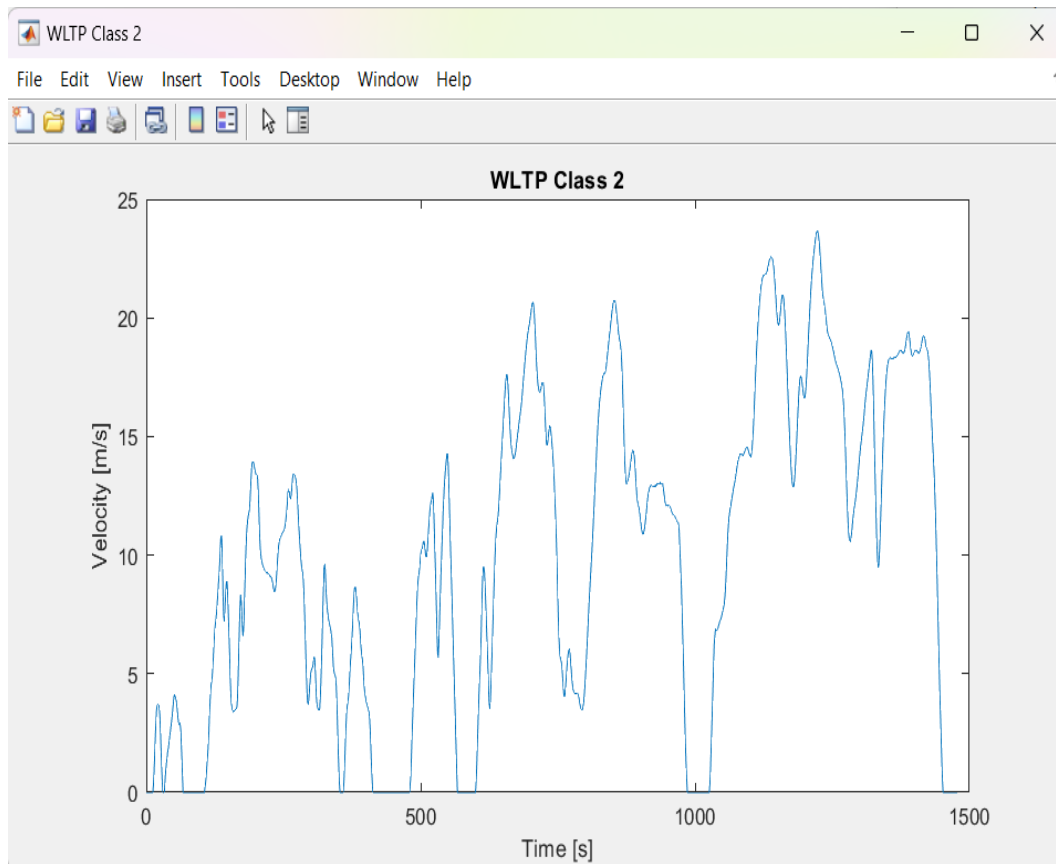
Σχήμα 4.49b: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ-ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ-ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.



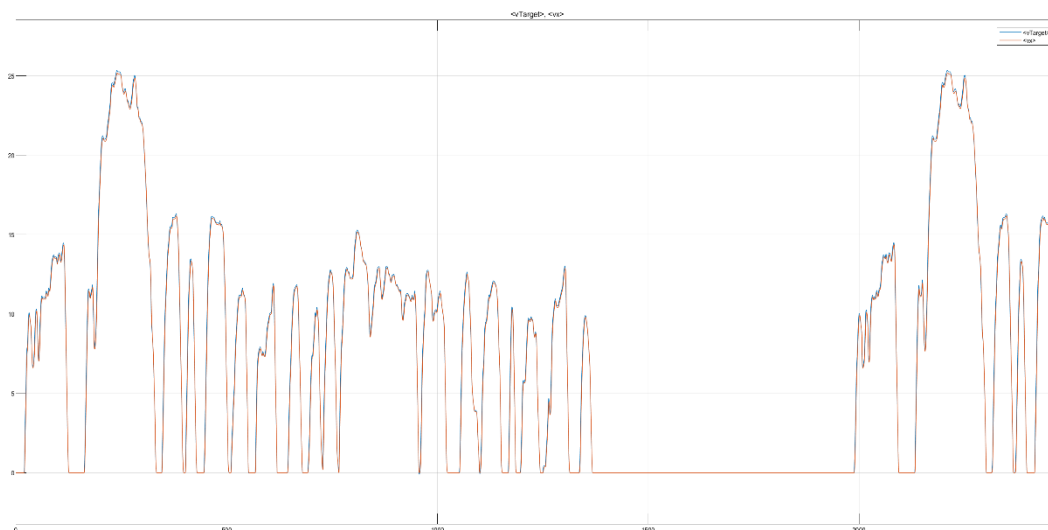
Σχήμα 4.50: Διάγραμμα MPGe (Miles per gallon gasoline equivalent) & Εύρος κατανάλωσης καυσίμου (λίτρα/100 km) με 4 συνεπιβάτες και αποσκευές.

4.5.2 WLTP Class II

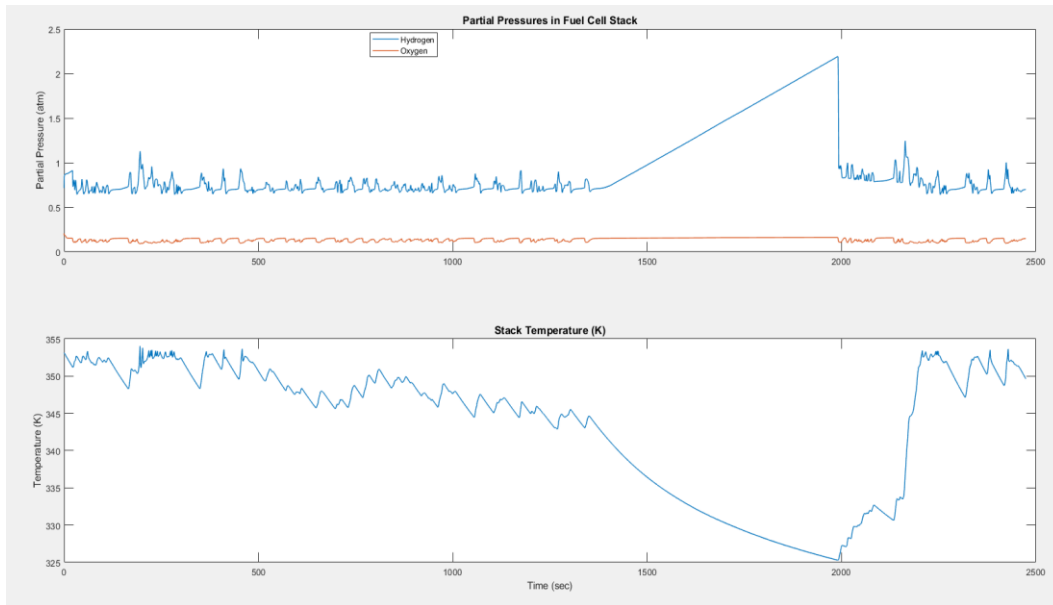
4.5.2.1 Πρώτη περίπτωση για οδηγό με αποσκευές



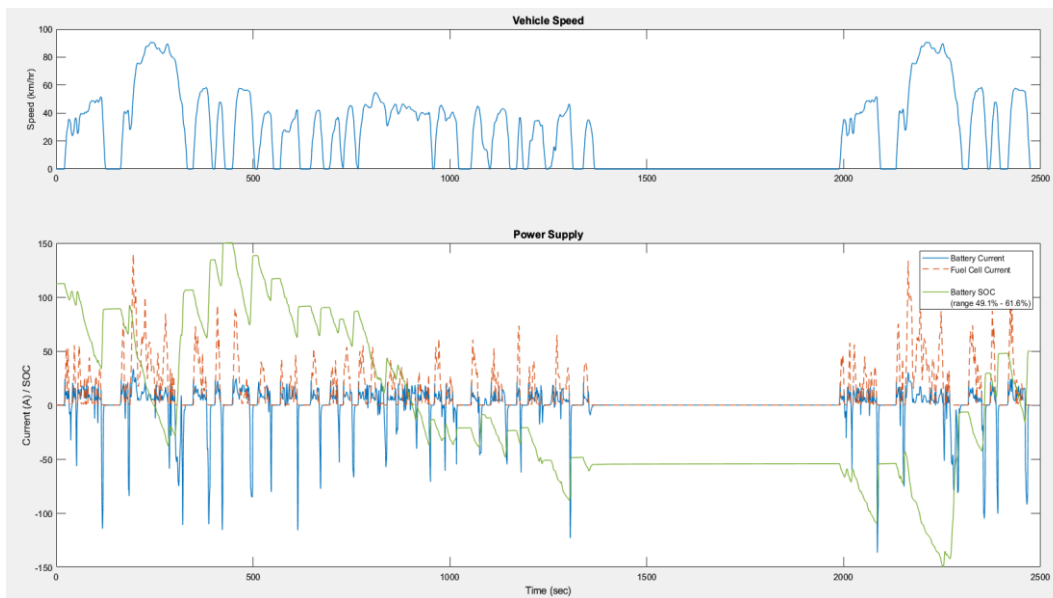
Σχήμα 4.51: Διάγραμμα ταχύτητας χρόνου για το πρότυπο WLTP Class II



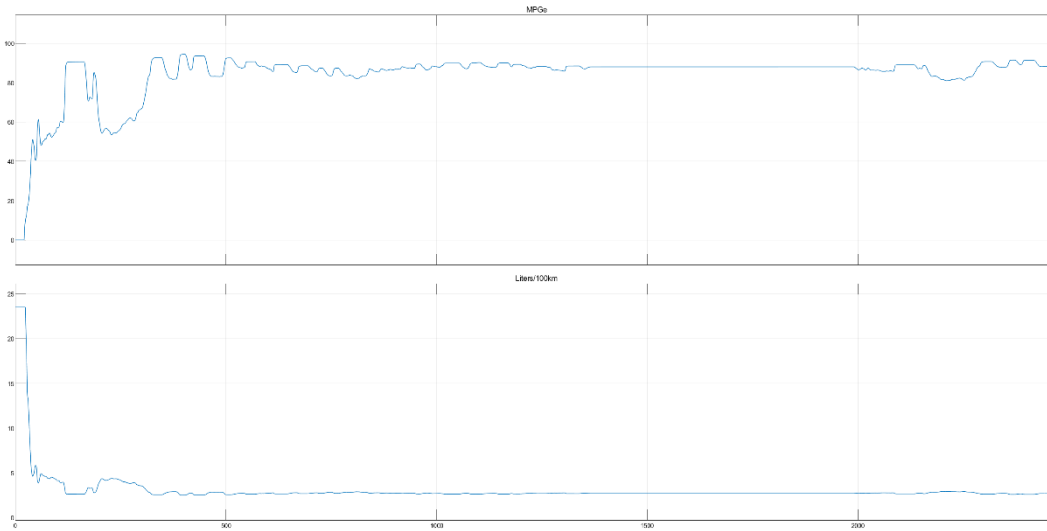
Σχήμα 4.52: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ- ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΟΥ ΠΕΤΥΧΑΜΕ.



Σχήμα 4.53a: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΕΣΕΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ-ΟΞΥΓΩΝΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΩΝ.

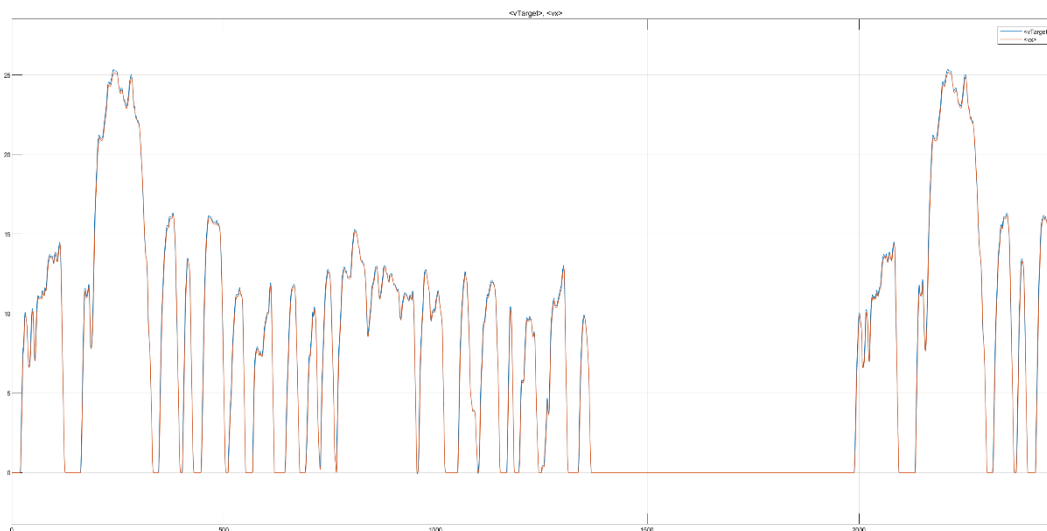


Σχήμα 4.54b: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ-ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ- ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.

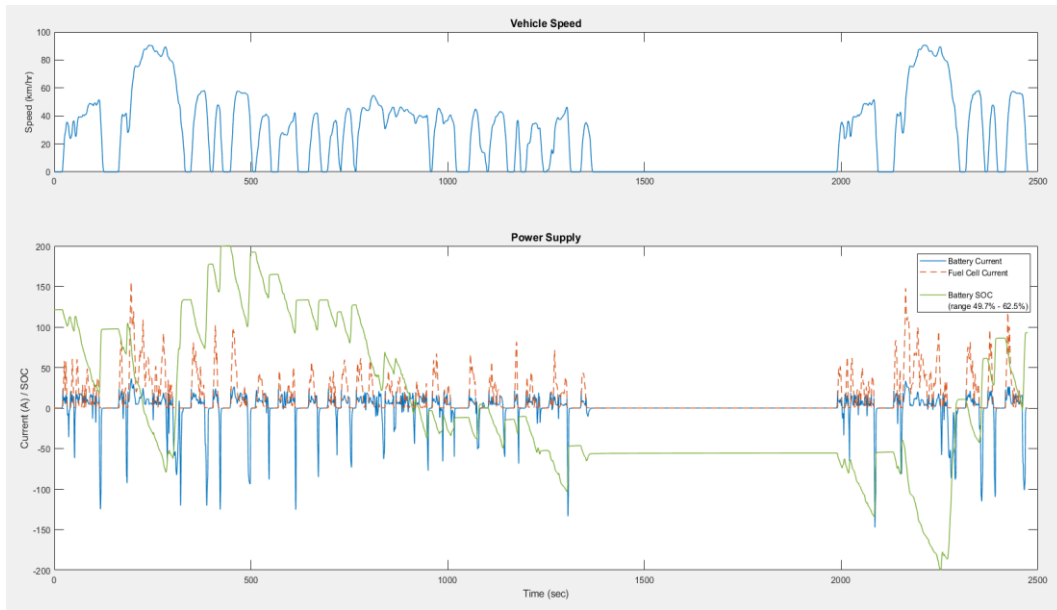


Σχήμα 4.55: Διάγραμμα MPGe (Miles per gallon gasoline equivalent)& Εύρος κατανάλωσης καυσίμου (Λίτρα/100 km) με συνεπιβάτες και αποσκευές.

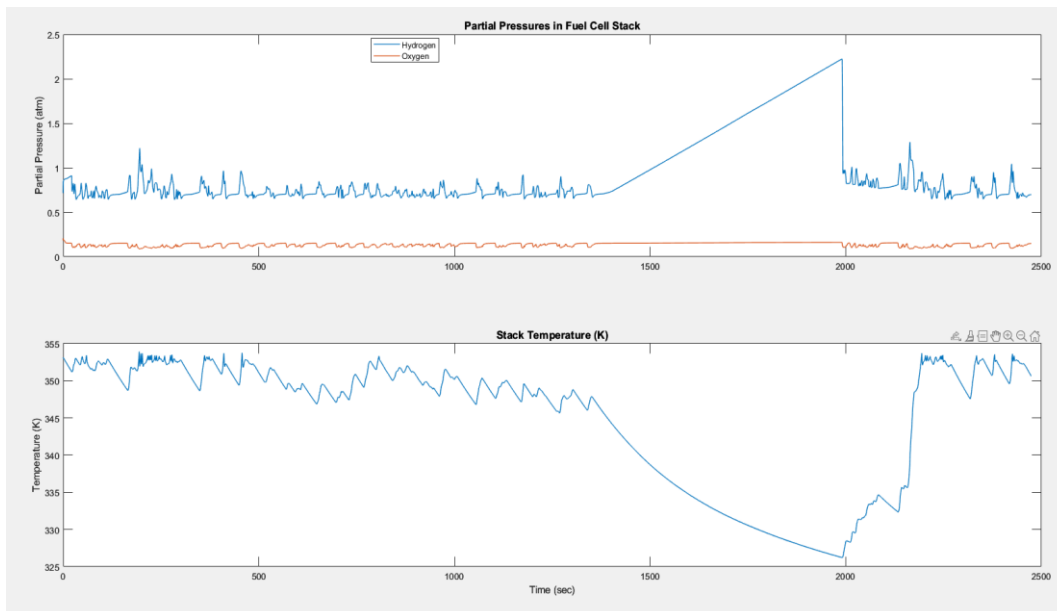
4.5.2.2 Δεύτερη περίπτωση για οδηγό με 4 συνεπιβάτες και αποσκευές



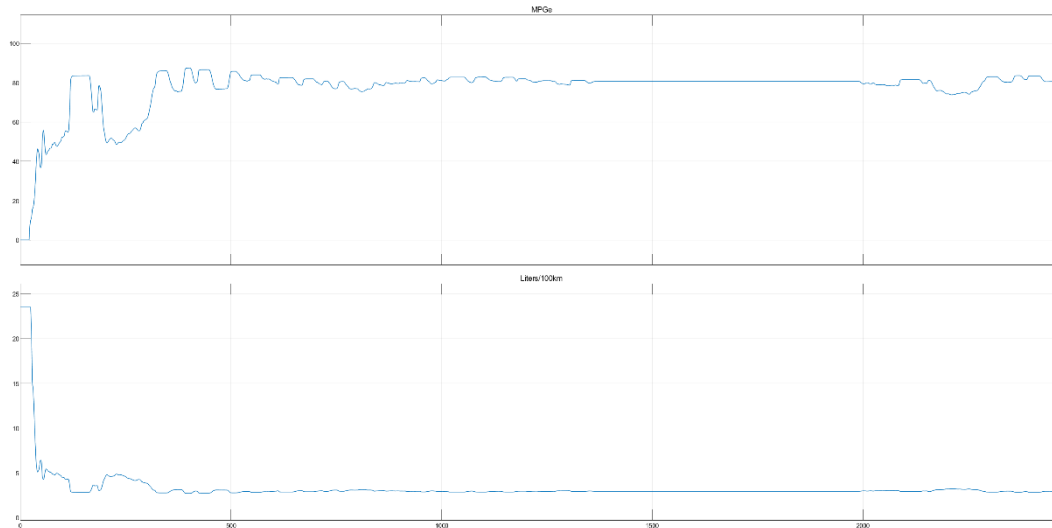
Σχήμα 4.56: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ- ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΟΥ ΠΕΤΥΧΑΜΕ.



Σχήμα 4.57α: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ-ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ-ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.



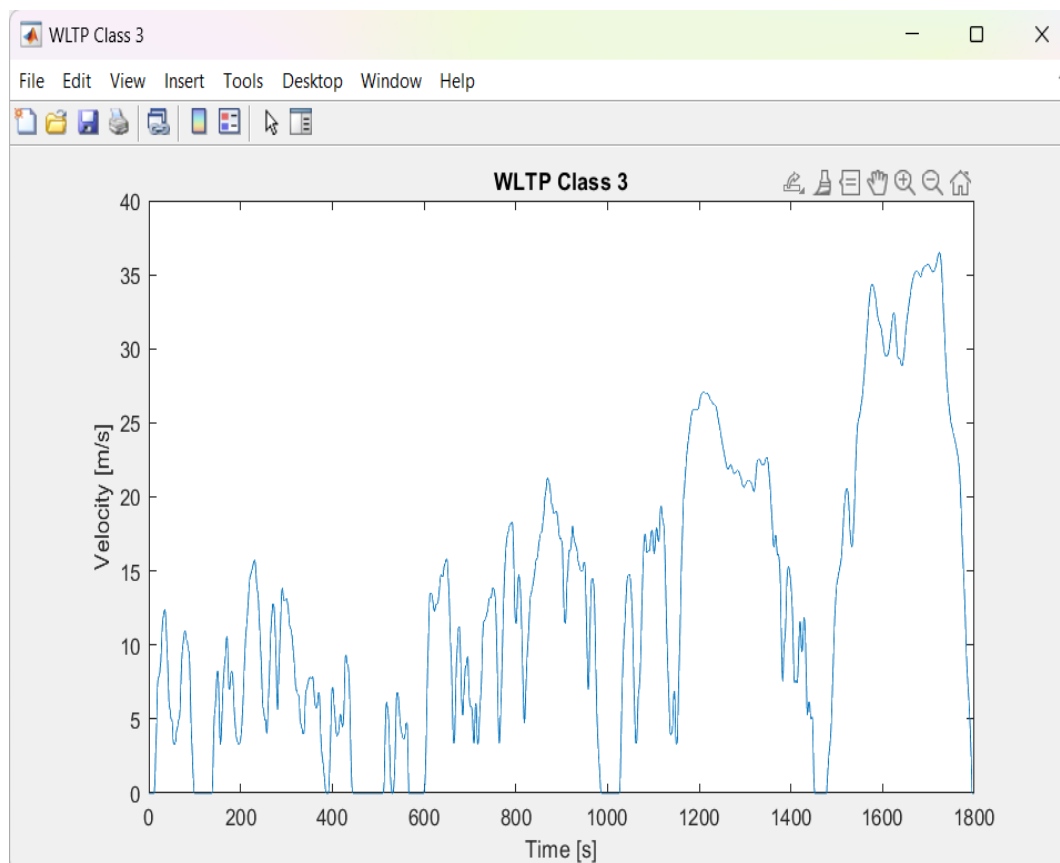
Σχήμα 4.58b: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΕΣΕΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ-ΟΞΥΓΩΝΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΩΝ.



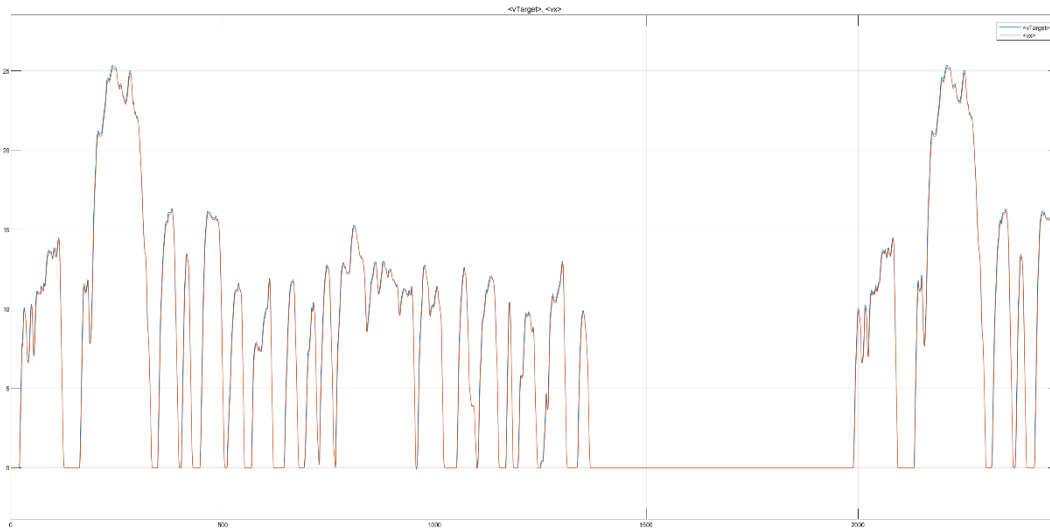
Σχήμα 4.59: Διάγραμμα MPGe (Miles per gallon gasoline equivalent) & Εύρος κατανάλωσης καυσίμου (Λίτρα/100 km) με 4 συνεπιβάτες και αποσκευές.

4.5.3 WLTP Class III

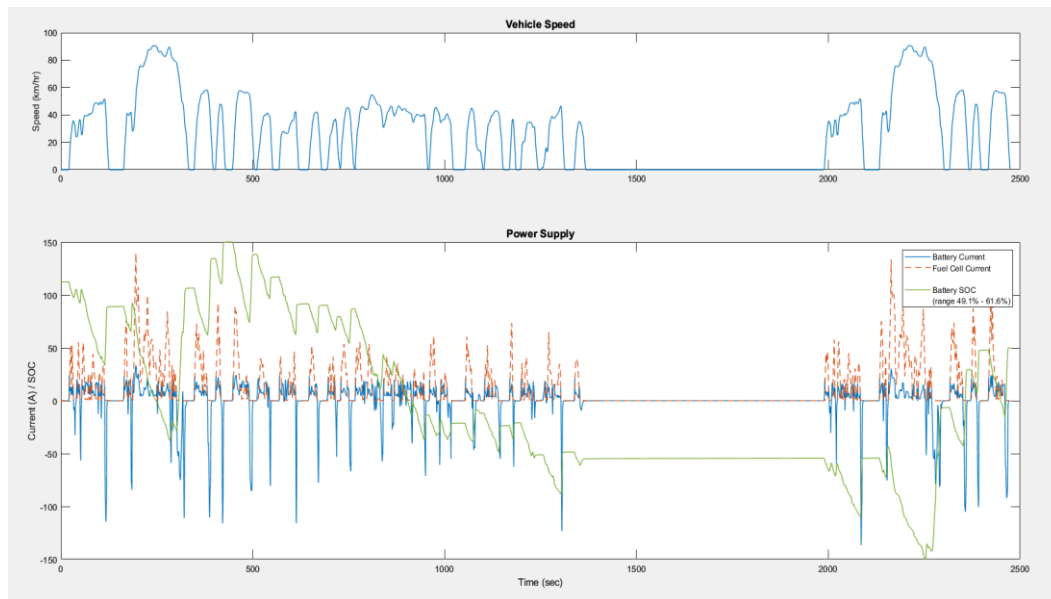
4.5.3.1 *Πρώτη περίπτωση για οδηγό με αποσκευές*



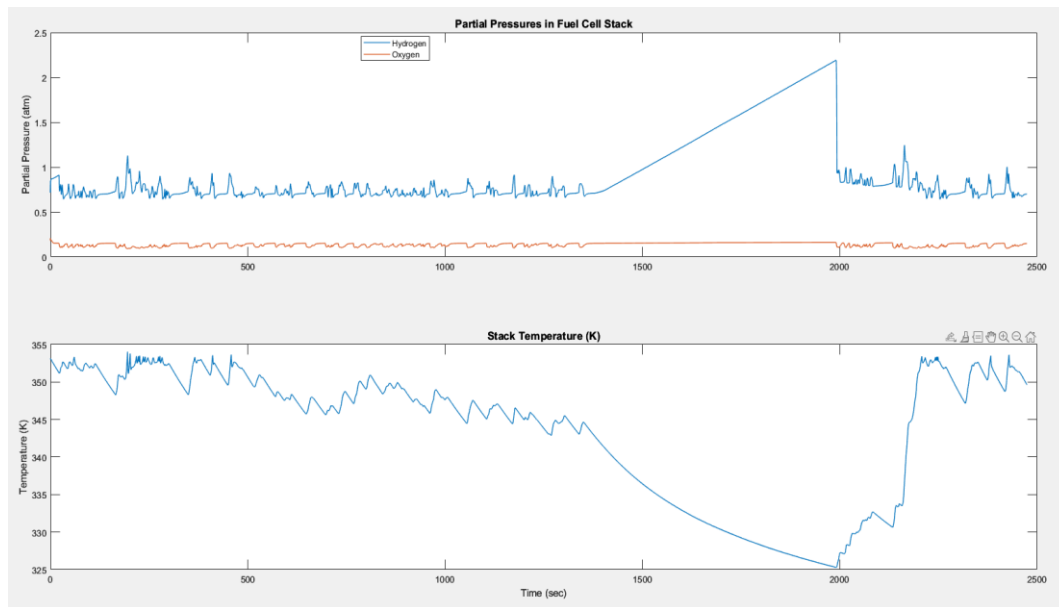
Σχήμα 4.60: Διάγραμμα ταχύτητας με χρόνο για το WLTP Class 3



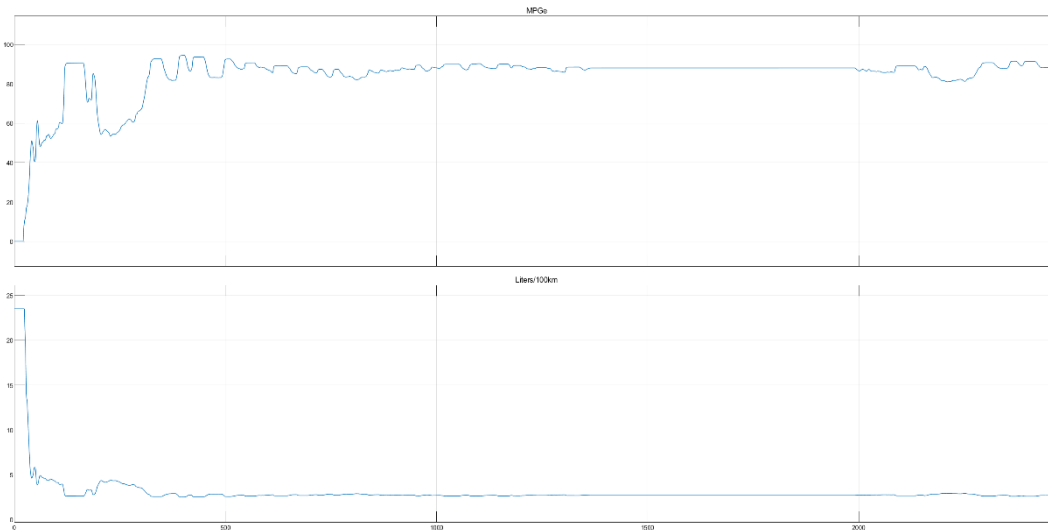
Σχήμα 4.61: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ- ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΟΥ ΠΕΤΥΧΑΜΕ.



Σχήμα 4.62α: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ-ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ- ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.

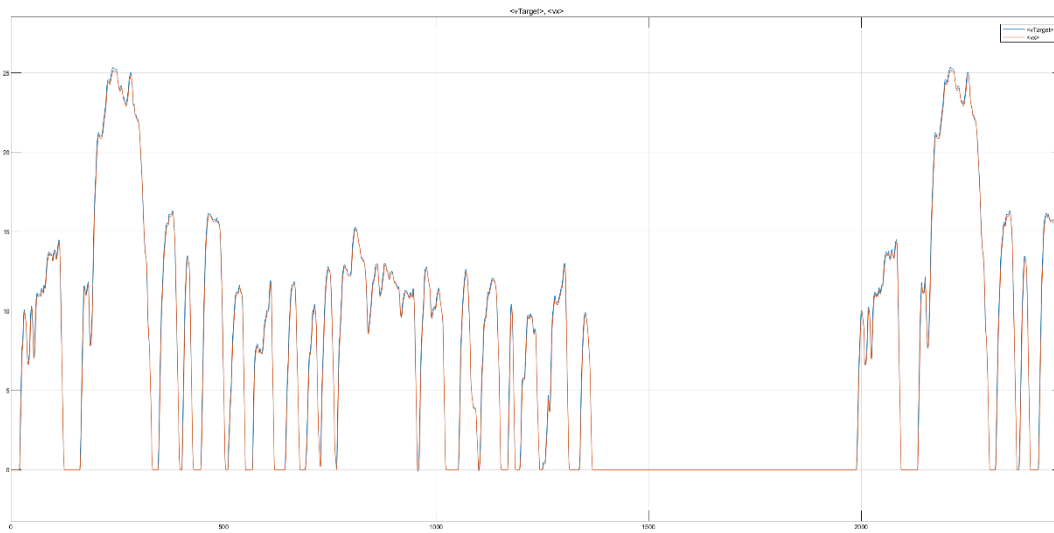


Σχήμα 4.63b: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΕΣΕΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ-ΟΞΥΓΩΝΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΩΝ.

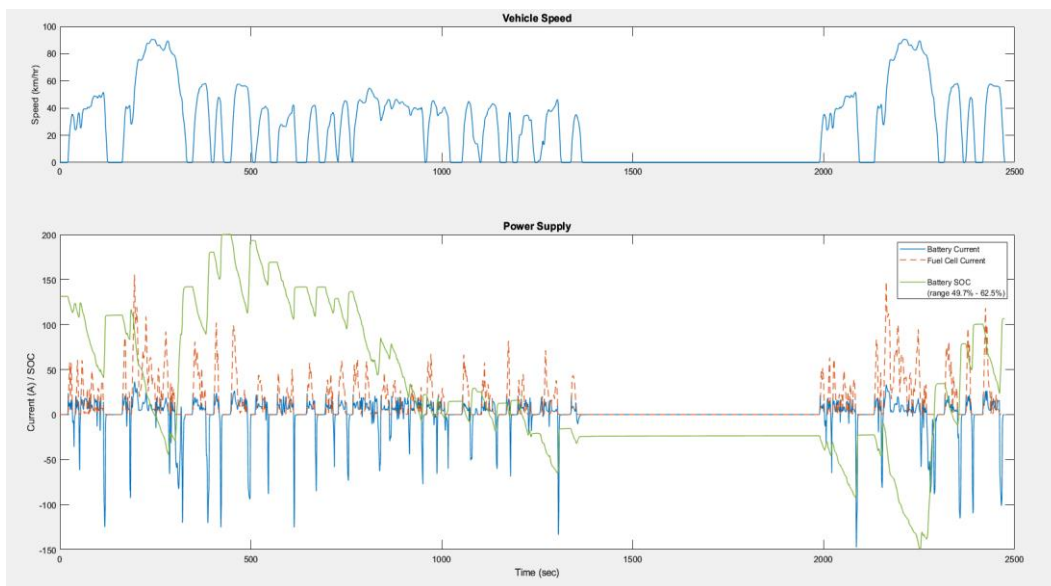


Σχήμα 4.64: Διάγραμμα MPGe (Miles per gallon gasoline equivalent)& Εύρος κατανάλωσης καυσίμου (Λίτρα/100 km) με συνεπιβάτες και αποσκευές.

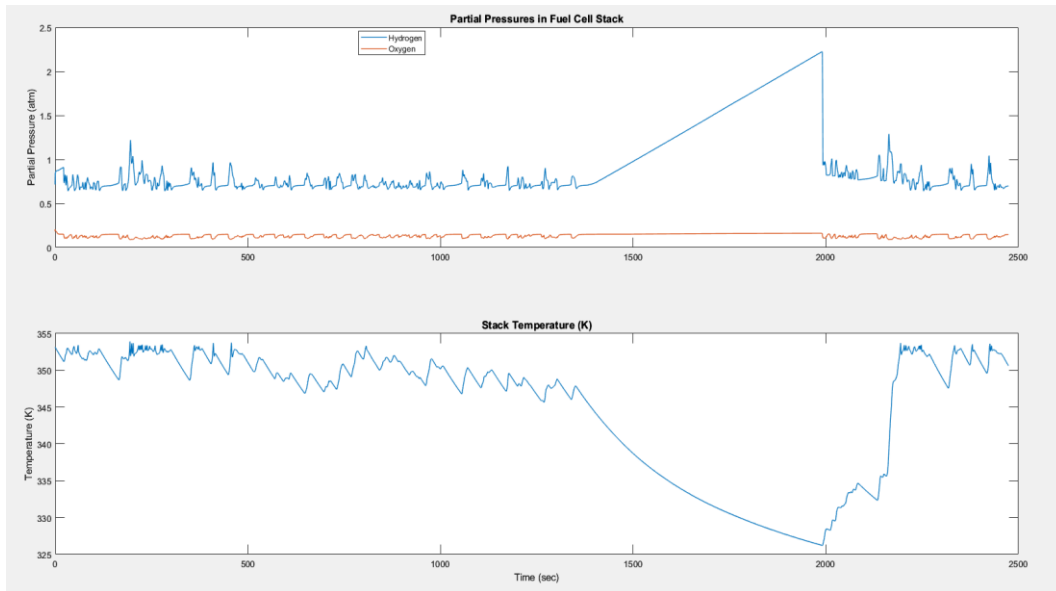
4.5.3.2 Δεύτερη περίπτωση για οδηγό με 4 συνεπιβάτες και αποσκευές



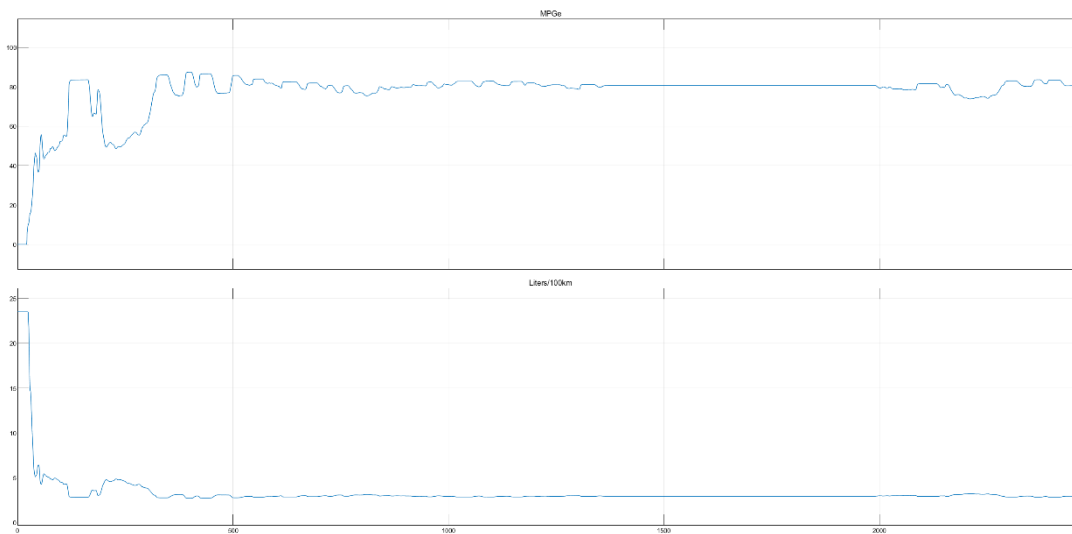
Σχήμα 4.65: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ- ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΠΟΥ ΠΕΤΥΧΑΜΕ.



Σχήμα 4.66α: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ-ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ- ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.



Σχήμα 4.67b: ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΙΕΣΕΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ-ΟΞΥΓΩΝΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΣΥΣΤΟΙΧΙΩΝ.



Σχήμα 4.68 Διάγραμμα MPGe (Miles per gallon gasoline equivalent) & Εύρος κατανάλωσης καυσίμου (λίτρα/100 km) με 4 συνεπιβάτες και αποσκευές.

4.5.4 Συμπεράσματα προσομοιώσεων

Τα συμπεράσματά μας κατηγοριοποιούνται με τον τρόπο που φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Συγκεντρωτικός Πίνακας αποτελεσμάτων προσομοιώσεων BEV Mercedes EQE 350

WLTP	ΦΟΡΤΙΟ		Απόκριση ταχύτητας οχήματος	Απόκριση ταχύτητας κινητήρα	Μέγιστη Ταχύτητα κινητήρα (rpm)	Μέγιστη Ροπή κινητήρα (Nm)	Μέγιστο Ρεύμα μπαταρίας (A)	Φόρτιση συσσωρευτή (Ah)	Ηλεκτρική κατανάλωση (kwh/100 km)
	Άτομα	Αποσκευές							
CLASS I	1	NAI	Άριστη	Άριστη	4000	320	45	48.6	7.47
	4	NAI	Άριστη	Άριστη	4000	360	49	48.2	8.003
CLASS II	1	NAI	Άριστη	Άριστη	5300	370	88,5	46.3	9.518
	4	NAI	Άριστη	Άριστη	5100	385	95	46	10.04
CLASS III	1	NAI	Άριστη	Άριστη	8000	392	151	41.7	13.22
	4	NAI	Άριστη	Άριστη	8000	397	155	41.2	13.58

Συγκεντρωτικός Πίνακας αποτελεσμάτων προσομοιώσεων FCEV Mercedes GLC FCEV

WLTP	ΦΟΡΤΙΟ		Απόκριση ταχύτητας οχήματος	Απόκριση ταχύτητας κινητήρα	Μέγιστη Ταχύτητα Οχήματος (km/h)	Μέγιστο Ρεύμα Κυψέλης Καυσίμου ή FC (A)	Μέγιστο Ρεύμα Φόρτισης μπαταρίας (αρνητικό) (A)	Μέγιστο Ρεύμα Εκφόρτισης μπαταρίας (θετικό) (A)	SOC συσσωρευτή ή (εύρος %)	Μέγιστη Πίεση (atm)		Εύρος θερμοκρασιών Συστοιχίας Κυψελών Καυσίμου (K)	MPGe (Miles per gallon gasoline equivalent) (%)	Ηλεκτρική κατανάλωση (kwh/100 km)	Εύρος κατανάλωσης καυσίμου (λίτρα/100 km)
	Άτομα	Αποσκευές								Οξυγόνο	Υδρογόνο				
CLASS I	1	NAI	Άριστη	Άριστη	92	145	110	30	49.1 – 61.6	0.2	2.3	325 - 350	92	22.8	3-24
	4	NAI	Άριστη	Άριστη	92	160	140	40	49.7 – 62.5	0.2	2.3	323 - 350	87	24.1	3-24
CLASS II	1	NAI	Άριστη	Άριστη	92	145	145	40	49.1 – 61.6	0.2	2.3	325 - 350	95	22	3-24
	4	NAI	Άριστη	Άριστη	92	160	140	30	49.7 – 62.5	0.2	2.3	323 - 350	86	24.4	3-24
CLASS III	1	NAI	Άριστη	Άριστη	92	145	125	30	49.1 – 61.6	0.2	2.3	325 - 350	82	26.8	3-24
	4	NAI	Άριστη	Άριστη	92	160	150	30	49.7 – 62.5	0.2	2.3	323 - 350	76	28.0	3-24

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^Ο ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

5.1. Σχολιασμός αποτελεσμάτων

5.1.1. Συγκριτική αποτύπωση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων και δοκιμών

Τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα από τις προσομοιώσεις και τις δοκιμές των μοντέλων βάσει των προτύπων και των διαφορετικών σεναρίων φορτίου, συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα

Πίνακας συγκριτικών αποτελεσμάτων προσομοιώσεων BEV και FCEV

WLTP	ΦΟΡΤΙΟ		BEV	FCEV
	ΑΤΟΜΑ	ΑΠΟΣΚΕΥΕΣ		
CLASS I	1	NAI	Άριστη απόκριση ταχύτητας οχήματος Άριστη απόκριση ταχύτητας κινητήρα Υψηλά επίπεδα ροπής κινητήρα Μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης μπαταρίας αυξημένο κατά 15A. Μειωμένη ηλεκτρική κατανάλωση ενέργειας (7.47 KWH) ανά 100 km	Άριστη απόκριση ταχύτητας οχήματος Άριστη απόκριση ταχύτητας κινητήρα Υψηλά επίπεδα ροπής κινητήρα Μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης μπαταρίας μειωμένο κατά 15A. Αυξημένη ηλεκτρική κατανάλωση ενέργειας (22.8 KWH) ανά 100 km
	4	NAI	Άριστη απόκριση ταχύτητας οχήματος Άριστη απόκριση ταχύτητας κινητήρα Υψηλά επίπεδα ροπής κινητήρα Μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης μπαταρίας αυξημένο κατά 9A. Μειωμένη ηλεκτρική κατανάλωση ενέργειας (8.003 KWH) ανά 100 km	Άριστη απόκριση ταχύτητας οχήματος Άριστη απόκριση ταχύτητας κινητήρα Υψηλά επίπεδα ροπής κινητήρα Μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης μπαταρίας μειωμένο κατά 9A. Αυξημένη ηλεκτρική κατανάλωση (24.1 KWH) ενέργειας ανά 100 km
CLASS II	1	NAI	Άριστη απόκριση ταχύτητας οχήματος Άριστη απόκριση ταχύτητας κινητήρα Υψηλά επίπεδα ροπής κινητήρα Μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης μπαταρίας αυξημένο κατά 48,5A. Μειωμένη ηλεκτρική κατανάλωση ενέργειας (9.518 KWH) ανά 100 km	Άριστη απόκριση ταχύτητας οχήματος Άριστη απόκριση ταχύτητας κινητήρα Υψηλά επίπεδα ροπής κινητήρα Μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης μπαταρίας μειωμένο κατά 48,5A. Αυξημένη ηλεκτρική κατανάλωση (22 KWH) ενέργειας ανά 100 km
	4	NAI	Άριστη απόκριση ταχύτητας οχήματος Άριστη απόκριση ταχύτητας κινητήρα Υψηλά επίπεδα ροπής κινητήρα Μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης μπαταρίας αυξημένο κατά 55A. Μειωμένη ηλεκτρική κατανάλωση ενέργειας (10.04 KWH) ανά 100 km	Άριστη απόκριση ταχύτητας οχήματος Άριστη απόκριση ταχύτητας κινητήρα Υψηλά επίπεδα ροπής κινητήρα Μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης μπαταρίας μειωμένο κατά 55A. Αυξημένη ηλεκτρική κατανάλωση (24.4 KWH) ενέργειας ανά 100 km
CLASS III	1	NAI	Άριστη απόκριση ταχύτητας οχήματος Άριστη απόκριση ταχύτητας κινητήρα Υψηλά επίπεδα ροπής κινητήρα Μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης μπαταρίας αυξημένο κατά 121A. Μειωμένη ηλεκτρική κατανάλωση ενέργειας (13.22 KWH) ανά 100 km	Άριστη απόκριση ταχύτητας οχήματος Άριστη απόκριση ταχύτητας κινητήρα Υψηλά επίπεδα ροπής κινητήρα Μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης μπαταρίας μειωμένο κατά 121A. Αυξημένη ηλεκτρική κατανάλωση (26.8 KWH) ενέργειας ανά 100 km

	4	ΝΑΙ	<p>Άριστη απόκριση ταχύτητας οχήματος</p> <p>Άριστη απόκριση ταχύτητας κινητήρα</p> <p>Υψηλά επίπεδα ροπής κινητήρα</p> <p>Μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης μπαταρίας αυξημένο κατά 125Α.</p> <p>Μειωμένη ηλεκτρική κατανάλωση ενέργειας (13.58 KWH) ανά 100 km</p>
			<p>Άριστη απόκριση ταχύτητας οχήματος</p> <p>Άριστη απόκριση ταχύτητας κινητήρα</p> <p>Υψηλά επίπεδα ροπής κινητήρα</p> <p>Μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης μπαταρίας μειωμένο κατά 125Α.</p> <p>Αυξημένη ηλεκτρική κατανάλωση ενέργειας (28 KWH) ανά 100 km</p>

5.1.2. Παραδοχές προσομοιώσεων και δοκιμών

Η παραμετροποίηση των προσομοιώσεων αποτελεί ένα κρίσιμο στάδιο για την αξιόπιστη εξαγωγή αποτελεσμάτων και την αποφυγή τυχαιών και συστηματικών σφαλμάτων. Συνεπώς, αναφέρουμε εδώ τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν, προκειμένου αν χρειαστεί να προσομοιωθεί εκ νέου κάποιο μοντέλο, να υιοθετηθούν όπως αναφέρονται παρακάτω:

Παράμετροι προσομοίωσης	BEVs	FCEVs
Βάρος ατόμου (kg)	75	75
Καθαρό βάρος οχήματος (kg)	2335	2150
Βάρος αποσκευών (kg)	50	50
Ακτίνα ελαστικού (cm)	30	30
Ροπή (Nm)	565	365
Τάση μπαταρίας (V)	400	400
Test Standard	WLTP C1, C2, C3	WLTP C1, C2, C3

5.1.3. Συγκριτική αποτύπωση αποτελεσμάτων προσομοιώσεων και δοκιμών με αντίστοιχα διεθνή δημοσιευμένα ερευνητικά αποτελέσματα

Δυσκολευτήκαμε πάρα πολύ να εντοπίσουμε παρόμοια παραμετροποίηση και έτσι καταλήξαμε στην δημοσίευση «From Microcars to Heavy-Duty Vehicles: Vehicle Performance Comparison of Battery and Fuel Cell Electric Vehicles» των ερευνητών Sagaria, S.; Moreira, A.; Margarido, F.; Baptista, P. Που δημοσιεύτηκε στο διεθνές περιοδικό Vehicles του MDPI, το 2021. Οι οποίοι προσπάθησαν μέσω αυτής της ερευνάς να συγκρίνουν την απόδοση διαφορετικών τύπων οχημάτων με βάση τον αριθμό των επιβατών και των ωφέλιμων φορτίων, τη διαμόρφωση του συστήματος μετάδοσης κίνησης (ηλεκτρικές διαμορφώσεις μπαταρίας και κυψελών καυσίμου) με βάση κάποιων προτύπων συμπεριφοράς οδηγήσεις, την αξιολόγηση της εμβέλειας και την κατανάλωση ενέργεια.

Εμείς θα επικεντρωθούμε στο μοντέλο URBAN S5 το οποίο πλησιάζει στα δικά μας δεδομένα οχημάτων, επίσης θα επικεντρωθούμε στην δοκιμή του με το WLTP CLASS 3 που είναι ένας κοινός στόχος και μπορούμε να εξάγουμε συμπεράσματα για παρόμοιες δοκιμές.

Αναφέρουμε εδώ σε αντιπαραβολή τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν για τα ερευνητικά μοντέλα, όπως αναφέρονται παρακάτω:

Παράμετροι προσομοίωσης	Our BEVs model EQC	Paper BEVs model Kia e-Soul (Extra urban 5s)
Βάρος ατόμου (kg)	75	75
Καθαρό βάρος οχήματος (kg)	2335	1900
Βάρος αποσκευών (kg)	50	50
Ακτίνα ελαστικού (cm)	30	26
Ροπή (Nm)	565	395
Τάση μπαταρίας (V)	400	400
Test Standard	WLTP C1, C2, C3	WLTP C3

Παράμετροι προσομοίωσης	Our FCEVs model GLC	Paper FCEVs model MIRAI II
Βάρος ατόμου (kg)	75	75
Καθαρό βάρος οχήματος (kg)	2150	1950
Βάρος αποσκευών (kg)	50	50
Ακτίνα ελαστικού (cm)	30	29
Ροπή (Nm)	365	300
Τάση μπαταρίας (V)	400	310.8
Test Standard	WLTP C1, C2, C3	WLTP C3

Vehicles	Vehicle Mass (kg)	Battery Mass (kg)	Payload (kg)/Passengers (no.)
Extra urban 5s	1350	472	500/5

Πίνακας 3: Βάρος οχήματος – επιβατών - μάζας μπαταρίας. (PAPER)

Vehicle	Energy Consumption (Wh/km)	Range (km)	Battery Rated Energy (kWh) or Hydrogen Stored (kg)
		EV	
Nissan Leaf S	138.6 (-1.7)	288 (1.4)	40.0
Renault Zoe R110	132.5 (0.4)	392 (-0.8)	52.0
Kia Niro	140.2 (3.0)	280 (-3.2)	39.2
Kia Soul EV	145.1 (2.1)	271 (-2.2)	39.2
Hyundai IONIQ	122.1 (-0.7)	313 (0.6)	38.3
BMW i3	129.9 (-2.4)	324 (2.8)	42.0
Mini Cooper	121.9 (-1.7)	267 (1.5)	32.6
City eGold (HDV)	822.5 (-1.1)	103.3	85
		Fuel cell EV	
Toyota Mirai	313.5 (1.3)	528 (4.6)	5.6 (kg of H ₂)

Πίνακας 4: Αποτελέσματα ηλεκτρικών οχημάτων. (PAPER)

Payload (kg)	Veh.	Battery Powertrain (BPT)				Fuel Cell Powertrain (FCPT)				
		Base Price (100 km)	200 km	300 km	400 km	Base Price (100 km)	200 km	300 km	400 km	500 km
500	5s	1843.0				11.517				
	5s	1905.0				11.519				

Πίνακας 5: Κόστος ανάλυσης μπαταρίας και κυψέλης καυσίμου σε ευρώ. (PAPER)

Payload (kg)	Veh.	Battery Powertrain (BPT)				Fuel Cell Powertrain (FCPT)				
		Base Price (100 km)	200 km	300 km	400 km	Base Price (100 km)	200 km	300 km	400 km	500 km
500	5s	458.5				2879.3				
	5s	381.0				2303.7				

Πίνακας 6: Κόστος ανάλυσης μπαταρίας και κυψέλης καυσίμου σε ευρώ για κάθε επιβάτη. (PAPER)

PL	Drive Cycle	Power Train	100 km			PL	Drive Cycle	Power Train	100 km				
			Veh	A	B				C	Veh	A	B	C
150	WLTP red.	BEV	Micro car	58.51	0.12	6	500	WLTP red.	BEV	Extra Urban 5s	118.5	0.69	12
		FC		133.8	0.12	0.4			FC		273.3	0.52	0.86
	RW_m	BEV	Urban 4s	74.65	0.84	7.5	500	WLTP	BEV	Extra Urban 5s	160.3	0.98	16.1
		FC		164.5	0.88	0.48			FC		373.4	0.78	1.18
	WLTP red.	BEV	Urban 4s	91.53	0.47	9.3	500	RW 1	BEV	Extra Urban 5s	139.9	1.86	14
		FC		197.5	0.45	0.62			FC		470.3	0.74	1.5
	WLTP C3	BEV	Urban 4s	130.8	0.66	13.3	500	RW 2	BEV	Extra Urban 5s	148.5	1.78	15.1
		FC		287.5	0.62	0.9			FC		412.6	0.88	1.32
	RW 1	BEV	Urban 4s	102.5	1.35	10.5	500	RW 2	BEV	Extra Urban 5s	148.5	1.78	15.1
		FC		333.7	0.65	1.06			FC		412.6	0.88	1.32
	RW 2	BEV	Urban 4s	115.5	1.28	11.8	500	RW 2	BEV	Extra Urban 5s	148.5	1.78	15.1
		FC		302.1	0.79	0.96			FC		412.6	0.88	1.32
	WLTP red.	BEV	Urban 4s	104.6	0.53	10.6	500	RW 2	BEV	Extra Urban 5s	148.5	1.78	15.1
		FC		226.7	0.49	0.71			FC		412.6	0.88	1.32
	WLTP	BEV	Urban 4s	145.8	0.74	14.6	500	RW 2	BEV	Extra Urban 5s	148.5	1.78	15.1
		FC		321.9	0.69	1.02			FC		412.6	0.88	1.32
	RW 1	BEV	Urban 4s	116.4	1.48	12.2	500	RW 2	BEV	Extra Urban 5s	148.5	1.78	15.1
		FC		374.7	0.69	1.2			FC		412.6	0.88	1.32
	RW 2	BEV	Urban 4s	129.4	1.39	13	500	RW 2	BEV	Extra Urban 5s	148.5	1.78	15.1
		FC		339.2	0.85	1.08			FC		412.6	0.88	1.32
1000	WLTP red.	BEV	Shuttle	216.5	0.69	21.6	1000	WLTP red.	BEV	Shuttle	216.5	0.69	21.6
		FC		464.5	0.62	1.37			FC		464.5	0.62	1.37
	RW	BEV	Shuttle	257.3	4.84	26	1000	RW	BEV	Shuttle	257.3	4.84	26
		FC		561.3	4.68	1.7			FC		561.3	4.68	1.7

A—Average energy consumption (Wh/km);

B—Regenerative energy generated (kWh);

C—Energy storage required (For BEV—kWh of battery; for FCEC—kg of H₂)

Πίνακας 7:Αποτελέσματα προσομοίωσης για 100 km - 150kg-500kg για το μοντέλο urban 5s.(PAPER)

5.1.4. Συμπεράσματα OUR MODEL – PAPER MODEL

Όπως και στο δικό μας μοντέλο έτσι και στο μοντέλο προσομοίωσης του paper παρατηρούμε το ίδιο αποτέλεσμα ότι η ανάλυση κόστους έδειξε ότι το FCEV παραμένει η πιο ακριβή επιλογή, με βασικό κόστος τρεις φορές μεγαλύτερο από το BEV. (Denton, 2022)

Παρατηρούμε για 150 KG BEV PAPER

(Urban s5) ENERGY CONSUMPTION (Wh/km) = 145,8 =0.1458kwh, Range (km)=100.

Πολλαπλασιάζουμε τα kwh x km = 14,58. Για το πρότυπο WLTP CLASS 3 (MODEL

PAPER-OUR MODEL) έχουμε μια απόκλιση της τάξης του 6-7%.

PAPER MODEL Urban 5s BEV	OUR MODEL	Απόκλιση
14,58 kwh	WITHOUT PASSANGER=13,22 kwh WITH PASSANGER=13,58 kwh	6-7%

Παρατηρούμε για 500 KG BEV PAPER

(Urban s5) ENERGY CONSUMPTION (Wh/km) = 160 =0.160kwh, Range (km)=100. Πολλαπλασιάζουμε

τα kwh x km = 16.00. Για το πρότυπο WLTP CLASS 3 (MODEL

PAPER-OUR MODEL) έχουμε μια απόκλιση της τάξης του 15%.

PAPER MODEL Urban 5s BEV	OUR MODEL	Απόκλιση
16,00 kwh	WITHOUT PASSANGER=13,22 kwh WITH PASSANGER=13,58 kwh	15%

Παρατηρούμε για 150 KG FCEV PAPER

(Urban s5) ENERGY CONSUMPTION (Wh/km) = 321,9 =0.3219kwh, Range (km)=100.

Πολλαπλασιάζουμε τα kwh x km = 32,19. Για το πρότυπο WLTP CLASS 3 (MODEL

PAPER-OUR MODEL) έχουμε μια απόκλιση της τάξης του 25%.

PAPER MODEL Urban 5s BEV	OUR MODEL	Απόκλιση
32,19 kwh	WITHOUT PASSANGER=22.8 kwh WITH PASSANGER=24.1 kwh	25%

Παρατηρούμε για 500 KG FCEV PAPER

(Urban s5) ENERGY CONSUMPTION (Wh/km) = 373,4 =0,3734kwh, Range (km)=100.

Πολλαπλασιάζουμε τα kwh x km = 37,34. Για το πρότυπο WLTP CLASS 3 (MODEL

PAPER-OUR MODEL) έχουμε μια απόκλιση της τάξης του 25-30%.

PAPER MODEL Urban 5s BEV	OUR MODEL	Απόκλιση
37,34 kwh	WITHOUT PASSANGER=26.8 kwh WITH PASSANGER=28,0 kwh	25-30%

Μπορούμε πολύ ευκολά από τους παραπάνω πίνακες να διακρίνουμε της διάφορες μεταξύ του δικού μας μοντέλου και του μοντέλου από το paper. Η διαφορά αυτή που παρατηρείται στην απόκλιση μπορεί να οφείλεται στις διάφορες φορτίων που έχουν τα μοντέλα. Το δικό μας μοντέλο έχει οδηγό - συνεπιβάτη και αποσκευές σε σχέση με το μοντέλο του paper το οποίο έχει μόνο το οδηγό και συνεπιβάτες. Άλλοι παράγοντες μπορεί να είναι η διατομή των ελαστικών η ή διαφορά μάζας αμαξώματος. Επίσης σημαντικό ρολό έχει και η ροπή του αμαξώματος.

Παρόλα αυτά τα αποτελέσματα είναι πολύ κοντά μεταξύ τους με μικρές αστοχίες- αποκλίσεις της τάξης 10-20%.

5.2. Συμπεράσματα

Γενικά προκύπτουν μία σειρά συμπερασμάτων για τα BEV και τα FCEV, όπως αναφέρονται συνοπτικά παρακάτω:

- Διαφαίνεται ότι θα είναι από τα είδη οχημάτων που θα χρησιμοποιούνται μελλοντικά.
- Έχουν μηδενικό ή σχεδόν μηδενικό αποτύπωμα επιπτώσεων στο περιβάλλον.
- Δεν υστερούν σε τεχνικά χαρακτηριστικά οδήγησης και απόδοσης σε σχέση με τα συμβατικά.
- Η ταχύτητα επιτάχυνσης (0-100 km/h) μπορεί να διαφέρει ανάμεσα στα διάφορα μοντέλα και εκδόσεις των οχημάτων. Ωστόσο, γενικά, τα ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία (BEVs) έχουν την τάση να επιταχύνουν πιο γρήγορα από τα οχήματα με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου (FCEVs) και τα συμβατικά οχήματα. Ένα τέτοιο παράδειγμα ενός ηλεκτρικού οχήματος με μπαταρία είναι το Tesla Model S Plaid, το οποίο μπορεί να επιταχύνει από 0-100 km/h σε λιγότερο από δύο (2) δευτερόλεπτα, καθιστώντας το ένα από τα πιο γρήγορα οχήματα στον κόσμο.
- Σε γενικές γραμμές το FCEVs σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα και τα BEVs, έχει πολυπλοκότερη δομή.
- Το κόστος παραγωγής των FCEVs είναι πολύ υψηλότερο σε σχέση με τα αλλά δύο είδη οχημάτων, διότι είναι ακόμη σε ανάπτυξη.
- Ένα από τα κύρια περιοριστικά στοιχεία των BEVs και FCEVs είναι η περιορισμένη αυτονομία τους σε σύγκριση με τα συμβατικά οχήματα. Ενδεικτικά, οι καλύτερες αυτονομίες που έχουν επιτευχθεί εντός του 2022, είναι 505 και 402 km, αντιστοίχως. Ενώ οι τεχνολογίες αυτές έχουν βελτιωθεί τα τελευταία χρόνια, η αυτονομία εξακολουθεί να είναι περιορισμένη.
- Τόσο τα BEVs όσο και τα FCEVs αντιμετωπίζουν προβλήματα ανάπτυξης υποδομών φόρτισης ή/και ανεφοδιασμού υδρογόνου. Ενώ οι υποδομές φόρτισης για τα BEVs έχουν αυξηθεί σημαντικά τα τελευταία χρόνια, εξακολουθεί να υπάρχει έλλειψη σταθμών φόρτισης σε ορισμένες περιοχές. Από την άλλη πλευρά, οι υποδομές για την παροχή υδρογόνου είναι ιδιαίτερα περιορισμένη και λόγω υψηλότερου κόστους, αλλά και λόγω του ότι δεν κυκλοφορεί μεγάλος αριθμός τέτοιων οχημάτων, δυσκολεύοντας τον ανεφοδιασμό τους.
- Η αυτονομία ενός οχήματος εξαρτάται και από μια σειρά αστάθμητων παραμέτρων σε σχέση με την τεχνολογία και το είδος του, που έχουν συνάφεια με τον οδηγό, τον τρόπο οδήγησης και χρήσης του οχήματος, το είδος της διαδρομής, το φορτίο του.
- Τα FCEVs χρησιμοποιούν τουλάχιστον τρεις φορές περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από το ηλεκτρικό όχημα με μπαταρία BEVs.
- Η απόδοση των BEVs είναι σχεδόν τριπλάσια από την αντίστοιχη των FCEVs, γεγονός που σημαίνει ότι υπάρχουν τεράστια περιθώρια βελτίωσης για τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στα FCEVs.

Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

6 Βιβλιογραφία

- [1]. ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ-ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ, Γ. (2013). <<ΥΒΡΙΔΙΚΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΚΙΝΗΣΗ ΣΕ ΟΧΗΜΑΤΑ>>. *ΤΕΙ ΠΕΙΡΑΙΑ ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ*.
- [2]. Δανιήλ, Γ., & Γαλανόπουλος, Γ. (2017, ΜΑΡΤΙΟΣ). ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΓΙΑ ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ-ΥΒΡΙΔΙΚΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ. *Α.Ε.Ι ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟΥ ΤΟΜΕΑ Τ. Ε. Ι*
- [3]. Γκούμας, Γ. (2005). ΝΕΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ Α.Π.Ε. *ΑΠΘ*.
- [4]. Πανταζής, Σ. (2015). ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΑ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ . *ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ*.
- [5]. Μερκούριος, Κ., & Σταυρούλα, Ι. (2018, ΟΚΤΩΜΒΡΙΟΣ). << Νέες τεχνολογίες και εναλλακτικά καύσιμα στον τομέα των οδικών >>. *ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ*.
- [6]. ΧΑΤΖΗΣΠΥΡΟΥ, Ι. (2014). ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΓΩΓΗ ΤΟΥ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ ΠΡΟΣ ΜΕΘΑΝΟΛΗ. *ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ*.
- [7]. Bryce's, R. (2009, ΜΑΡΤΙΟΣ). *Gusher of lies*. Texas: Perseus Books.
- [8]. Δημηγκιόκα, Α., & Ράμκε, Ν. (χ.χ.). ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ ΚΑΙ ΤΟΥΡΙΣΜΟΣ. *Α.Ε.Ι ΠΕΙΡΑΙΑ*.
- [9]. Αικατερίνη, Π. (2015, ΑΠΡΙΛΙΟΣ). Κατασκευή DC μικροδικτύου σε περιβάλλον Matlab/Simulink και μελέτη τεχνικών ελέγχου. *Ε.Μ.Π.*
- [10]. Αικατερίνη, Π. Κ. (2016). Ενεργειακή σύγκριση τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας . *Ε.Μ.Π.*
- [11]. Ευάγγελος, Σ. (2019, ΙΟΥΛΙΟΣ). Διαστασιολόγηση και Διαχείριση οικιακού φωτοβολταϊκού. *Ε.Μ.Π.*
- [12]. Δημήτριος, Γ. Ι. (χ.χ.). Battery energy storage. *Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, Ενεργειακά Συστήματα*.
- [13]. Καζά, Π. Β. (2007, ΜΑΙΟΣ). Ανασκόπηση της πορείας απελευθέρωσης της αγοράς ενέργειας στην ΕΕ-25 και διερεύνηση των επιπτώσεών της. *Ε.Μ.Π.*
- [14]. Γρηγορίου, Α., & Τιμπλαλέξη, Χ. (2017, ΜΑΡΤΙΟΣ). Σχεδίαση μικροδικτύου σεληνιακής βάσης και ανάλυση ροής φορτίου. *Α.Π.Θ.*
- [15]. Αικατερίνη, Κ. Α. (2013, ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ). Μοντελοποίηση συσσωρευτών σε δίκτυα με μετατροπείς ηλεκτρονικών ισχύος. *Α.Π.Θ.*
- [16]. Όλγα, Ν., & Σαρρή, Π. (2011, ΙΟΥΛΙΟΣ). ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΤΡΕΦΟΜΕΝΗΣ ΑΠΟΘΗΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. *Α.Π.Θ.*
- [17]. Κανάκης, Α. (2021, ΑΠΡΙΛΙΟΣ). Περιγραφή Φωτοβολταϊκού Πάνελ . *ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ*.

- [18]. [Ζ. ΓΕΩΡΓΙΟΣ,(ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ, 2021) "Διαχείριση Ηλεκτρικού Φορτίου σε Καταστάσεις Αυξημένης Διείσδυσης Ηλεκτρικών Οχημάτων στο Δίκτυο Ηλεκτρικής Ενέργειας," ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ.
- [19]. Δ. Δημήτριος, (2020)"Διερεύνηση χωρικής κατανομής σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στους ελληνικούς αυτοκινητοδρόμους," ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ.
- [20]. Κοκολάκη, Γ. Κ. (2016, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ). Μελέτη της συνεισφοράς της V2G τεχνολογίας στις επικουρικές υπηρεσίες καθώς και ο αντίκτυπος που έχουν τα EVs στο μικροδίκτυο. ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ.
- [21]. Ευάγγελος, Τ. (2013, ΑΠΡΙΛΙΟΣ). Κύκλοι οδήγησης και ανάλυση διαδρομών για την πόλη των Χανίων. ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ.
- [22]. WIKIPEDIA. (2022). *Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure*. Retrieved from WIKIPEDIA: https://en.wikipedia.org/wiki/Worldwide_Harmonised_Light_Vehicles_Test_Procedure
- [23]. Τσίκο, Δ. (2021, ΙΟΥΛΙΟΣ). Μελέτη και πρόβλεψη της διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων στην αγορά της Ευρώπης. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ.
- [24]. Δημήτριος, Σ. (2022, ΙΟΥΛΙΟΣ). ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΟΜΠΟΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΕΡΟΒΙΑΣ ΧΩΝΕΨΗΣ ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΕΣΤΙΑΖΟΝΤΑΣ ΣΤΟ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟ ΤΟΥΣ ΑΠΟΤΥΠΩΜΑ. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ.
- [25]. Αργύρη, Β. (2022, ΙΟΥΝΙΟΥ). Παρακολούθηση υποδομών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με συστήματα αισθητήρων. ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ.
- [26]. Ο.Ζιώργου, Χ. (2009, Φεβρουαριος). Ρύθμιση συστήματος κυψέλης καυσίμου βασισμένη σε μαθηματικό μοντέλο προβλεπτικού ελέγχου (predictive) και ανίχνευση βέλτιστου σημείου λειτουργίας. Α.Π.Θ.
- [27]. ΝΙΚΟΛΑΟΣ, Α. Σ. (2016). «Σχεδιασμός και κατασκευή Ενεργού Συστήματος Διαχείρισης . Α.Π.Θ.
- [28]. ΒΥΡΩΝΑΣ, Κ. (2018). ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΒΑΣΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΓΕΝΙΚΕΥΜΕΝΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ. Α.Π.Θ.
- [29]. Hellas, B. C. (2023). *Η εξέλιξη της ηλεκτροκίνησης*. Retrieved from blink: <https://blinkcharging.gr/i-ekseliksi-tis-ilektrokinesis/>
- [30]. ΑΛΛΗΛΕΓΓΥΗΣ, Δ. Ι. (2022). ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ. Ανάκτηση από ΔΙΑ: <http://www.endiaferomai.gr/index.php/2011-02-11-19-18-10/230-2013-05-04-08-22-46>
- [31]. WIKIPEDIA. (2022). *WLTP CLASS III*. Retrieved from WIKIPEDIA: <https://el.wikipedia.org/wiki/WLTP>
- [32]. ΝΑΤΣΗΣ, Α. Α. (2020, ΙΟΥΝΙΟΣ). <<Η ΣΥΝΕΙΣΦΟΡΑ ΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΗΝ ΕΥΕΛΙΞΙΑ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΩΝ ΝΗΣΙΩΝ>>. Ανάκτηση από ΕΚΠΑ.

- [33]. Sagaria, S.; Moreira, A.; Margarido, F.; Baptista, P. From Microcars to Heavy-Duty Vehicles: Vehicle Performance Comparison of Battery and Fuel Cell Electric Vehicles. *Vehicles* 2021, 3, 691–720. <https://doi.org/10.3390/vehicles3040041>
- [34]. Kane, M. (n.d.). *INSIDEEVS*. Retrieved from Efficiency Compared: Battery-Electric 77%, Hydrogen 30%: https://insideevs.com/news/332584/efficiency-compared-battery-electric-73-hydrogen-22-ice-13/?fbclid=IwAR3u32Kv9bQZkA-oHQ_pm22cLIW1ymKLLwGhEfE85pcWmU09CealKg7Wm_I
- [35]. Agatie, C. (2022, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 12). The Main Types of Li-Ion Batteries Explained and What Is the Best for Electric Vehicles. *autoevolution*.
- [36].
- [37]. Denton, T. (2022, 10 31). *Efficiency: fuel cells vs battery electric*. Retrieved from INSTITUTE OF THE MOTOR INDUSTRY: https://tide.theimi.org.uk/industry-latest/motorpro/efficiency-fuel-cells-vs-battery-electric?fbclid=IwAR2ios_khXI2TipHs1eACNlc_Pr8U0ksDUHGgKFpMYa8pviD4En1w6_EXkA
- [38]. Brian. (2016, ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ). The Lithium Supply and Demand Story. *Junior Stock Review*.