



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ
ΟΧΗΜΑΤΟΣ**

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΜΠΟΤΩΝΑΚΗΣ

ΑΜ: 2015010102

Χανιά, Ιούνιος 2022

Περίληψη

Στα πλαίσια της προτεινόμενης εργασίας αναπτύχθηκε μοντέλο και προσομοιώθηκε η συμπεριφορά του ηλεκτρικού οχήματος TUCer's που έχει κατασκευαστεί στο εργαστήριο Ευφύων Συστημάτων και Ρομποτικής του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η ανάπτυξη του δυναμικού μοντέλου του οχήματος πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον του προγράμματος Carmaker IPG. Για τη μοντελοποίηση του οχήματος χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά δεδομένα που έχουν συλλεγεί από διαγωνισμούς οικονομίας, στους οποίους συμμετείχε η ομάδα TUCER. Με βάση το μοντέλο διερευνήθηκαν στρατηγικές και μεθοδολογίες, με σκοπό τη βελτίωση της ενεργειακής κατανάλωσης και της αυτονομίας του οχήματος όπως, η αλλαγή των σχέσεων ταχυτήτων του συστήματος μετάδοσης κίνησης και η ύπαρξη αναγεννητικής πέδησης.

Abstract

In the context of this thesis, a dynamic model of a prototype electric vehicle, designed and manufactured at the Intelligent and Robotics Laboratory of the Technical University of Crete, was developed. The aforementioned model was developed using the CarmakerIPG program. For the modeling procedure, real data collected during the participation of the TUCer team in competitions related with energy efficiency and minimal consumption were used. Different strategies and methodologies for the overall improvement of the energy consumption and efficiency of the vehicle were tested and validated. These include different type gear ratios of the transmission system, as long as the adoption of a regenerative braking model.

Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Abstract	3
1. Ηλεκτρικό όχημα	11
1.1 Εισαγωγή	11
1.2 Ηλεκτρικοί κινητήρες	11
1.3 Πηγές ενέργειας	13
1.3.1 Συσσωρευτές	13
1.3.2 Κυψέλες καυσίμου	15
1.3.3 Υπερπυκνωτές	19
1.4 Κιβώτιο ταχυτήτων	20
2. Βασικές Αρχές Οχήματος	21
2.1 Περιγραφή κίνησης του οχήματος	21
2.2.1 Αντίσταση Κύλισης	22
2.2.2 Αεροδυναμική Αντίσταση	22
2.2.3 Αντίσταση κλίσης	23
2.3 Τροχοί	24
2.4 Σύστημα πέδησης	25
2.4.1 Λειτουργία φρένων	25
2.4.2 Ανάκτηση Ενέργειας Φρένων (Regenerative Braking)	26

3. Μοντελοποίηση οχήματος και προσομοίωση	28
3.1 Πίστα προσομοίωσης	28
3.2 Μοντελοποίηση Εξαρτημάτων του Οχήματος	29
3.2.1 Μοντέλο Πλαισίου Οχήματος	29
3.2.2 Μοντέλο Συστήματος Μετάδοσης Κίνησης	30
3.2.3 Μοντελοποίηση Ελαστικών	32
3.2.4 Μοντελοποίηση Αναρτήσεων	32
3.2.5 Μοντελοποίηση Συστήματος Διεύθυνσης	33
3.2.6 Επικύρωση Μοντέλου	33
3.2.7 Μοντέλο Αναγεννητικής Πέδησης (Regenerative Braking)	34
4. Προσομοίωση σε Κύκλους Πόλης	37
4.1 Κύκλοι Πόλης σε περιβάλλον Προσομοίωσης	37
4.2 Κύκλοι Πόλης Προσομοίωσης δίχως την ύπαρξη Αναγεννητική Πέδηση	38
4.2 Κύκλοι Πόλης Προσομοίωσης με Αναγεννητική Πέδηση	47
5. Συμπεράσματα	63
Βιβλιογραφία	64

Πίνακας Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1. 1: ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΚΙΝΗΤΗΡΑΣ ΜΕ ΜΟΝΙΜΟΥΣ ΜΑΓΝΗΤΕΣ[2]	9
ΕΙΚΟΝΑ 1. 2: ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΕΝΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ [4]	10
ΕΙΚΟΝΑ 1. 3: ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗΣ [5]	11
ΕΙΚΟΝΑ 1. 4 ΕΣΩΤΕΡΙΚΟ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΗ [6]	12
ΕΙΚΟΝΑ 1. 5: ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΤΥΠΟΥ MCFC [7]	14
ΕΙΚΟΝΑ 1. 6: ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΤΥΠΟΥ PAFC [7]	15
ΕΙΚΟΝΑ 1. 7: ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΤΥΠΟΥ PEM [7]	15
ΕΙΚΟΝΑ 1. 8: ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΤΥΠΟΥ SOFC [7]	16
ΕΙΚΟΝΑ 1. 9: ΠΥΚΝΩΤΗΣ [8]	16
ΕΙΚΟΝΑ 1. 10: ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ [10]	18
ΕΙΚΟΝΑ 2. 1: ΑΣΚΟΥΜΕΝΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΣΕ ΚΙΝΟΥΜΕΝΟ ΟΧΗΜΑ[11]	19
ΕΙΚΟΝΑ 2. 2 : ΑΕΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ[12]	20
ΕΙΚΟΝΑ 2. 3: ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΡΟΧΟΥ ΣΕ ΚΥΚΛΙΚΗ ΤΡΟΧΙΑ [13]	22
ΕΙΚΟΝΑ 2. 4: ΥΔΡΑΥΛΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΦΡΕΝΩΝ [14]	23
ΕΙΚΟΝΑ 2. 5	24
ΕΙΚΟΝΑ 2. 6: BACK ΕΜΦ ΩΣ ΠΗΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ [16]	25
ΕΙΚΟΝΑ 3. 1: ΜΟΡΦΗ ΑΡΧΕΙΟΥ ΤΗΣ ΠΙΣΤΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	26
ΕΙΚΟΝΑ 3. 2: ΟΠΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ ΤΗΣ ΠΙΣΤΑΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΣΤΟ IPG	26
ΕΙΚΟΝΑ 3. 3: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΡΤΕΛΑΣ VEHICLE BODY	27
ΕΙΚΟΝΑ 3. 4: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΡΤΕΛΑΣ BODIES	28
ΕΙΚΟΝΑ 3. 5: ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΕΣ ΤΙΜΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ	28
ΕΙΚΟΝΑ 3. 6: ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΟΣ	29
ΕΙΚΟΝΑ 3. 7: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΗΣ ΠΗΓΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ	29
ΕΙΚΟΝΑ 3. 8: ΤΙΜΕΣ ΤΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΩΝ	30
ΕΙΚΟΝΑ 3. 9: ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΡΑΦΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΓΩΝΙΑ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ	30
ΕΙΚΟΝΑ 3. 10: ΠΙΕΣΗ ΤΗΣ ΡΟΠΗΣ ΚΑΤΑ ΤΟ ΦΡΕΝΑΡΙΣΜΑ (NM/BAR)	32
ΕΙΚΟΝΑ 3. 11: ΤΙΜΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΗΣ ΠΕΔΗΣΗΣ	32
ΕΙΚΟΝΑ 3. 12: ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΠΟΙΗΣΗ ΤΙΜΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	32

Πίνακας Διαγραμμάτων

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1: ΠΡΟΦΙΛ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ ARTEMIS 50%	36
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2: ARTEMIS 1:8 ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ 0.7619 kWh/100km	37
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3: ARTEMIS 1:6 ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ 0.8019 kWh/100km	37
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4: ARTEMIS 1:10 W=0.769 kWh/100km	38
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5: NEDC ΠΡΟΦΙΛ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ 50%	39
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6: NEDC 1:8 ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ=0.7798 kWh/100km	39
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7: NEDC 1:6 ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ=0.8153 kWh/100km	40
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8: NEDC 1:10 ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ=0.7754 kWh/100km	40
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9: ΠΡΟΦΙΛ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ JAPANESE 50%	41
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10: JAP 1:8 ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ=0.741 kWh/100km	42
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 11: JAP 1:6 W=0.7832 kWh/100km	42
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 12: JAP 1:10 ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ=0.7377 kWh/100km.....	43
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 13: ΠΡΟΦΙΛ ΤΑΧΥΤΗΤΑΣ WLTC	44
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 14: WLTC 1:8 ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ=0.7765 kWh/100km	44
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15: WLTC 1:6 ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ=0.8203 kWh/100km	45
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 16: WLTC 1:10 ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ=0.7742 kWh/100km	45
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 17: ARTEMIS 1:8 ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ=0.7661 kWh/100km	48
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 18: ARTEMIS 1:8 WATT REGENERATED= 15.9986 W	48
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 19: ARTEMIS 1:6 ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ = 0.7991kWh/100km	49
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 20: ARTEMIS 1:6 WATT REGENERATED=16.6713	49
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 21:ARTEMIS 1:10 ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ=0.7479 kWh/100km.....	50
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 22: ARTEMIS 1:10 WATT REGENERATED=15.718 W	50
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 23: NEDC 1:8 ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ=0.7811 kWh/100km.....	51
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 24: NEDC 1:8 WATT REGENERATED = 10.175 W	52
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 25: NEDC 1:6 ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ 0.8141 kWh/100km	52
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 26: NEDC 1:6 WATT REGENERATED= 10.7291 W	53
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 27: NEDC 1:10 WATT=0.7757 kWh/100km	53
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 28: NEDC 1:10 WATT REGENERATED=10.7135 kWh/100km	54
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 29: JAP 1:8 ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ =0.7434 kWh/100km	55
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 30: JAP 1:8 WATT REGENERATED= 8.7654 W	55

Περιεχόμενα

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 31: JAP 1:6 ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ 1.0606 kWh/100km	56
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 32: JAP 1:6 WATT REGENERATED = 9.2467 W	56
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 33: JAP 1:10 ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ =1.0737 kWh/100km	57
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 34: JAP 1:10 WATT REGENERATED= 8.2917	57
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 35: WLTC 1:8 WATT= 0.7701 kWh/100km	58
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 36: WLTC 1:8 WATT REGENERATED= 16.9908 W	59
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 37: WLTC 1:6 ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ = 1.2757 kWh/100km	59
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 38: WLTC 1:6 WATT REGENERATED =16.6643 W	60
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 39: WLTC 1:10 ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ 1.4583 kWh/100km	60
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 40: WLTC WATT REGENERATED = 16.1736 W.....	61

Πίνακας Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΙΜΩΝ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΜΕ ΑΥΤΗ ΤΩΝ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ[17]	32
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΜΕ ΚΑΙ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ ΚΑΘΩΣ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΝΕΚΤΗΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΓΥΡΟ.	35
ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΣΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΤΗΣ ΣΧΕΣΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ 1:8 ΜΕ ΤΙΣ ΣΧΕΣΕΙΣ 1:6 ΚΑΙ 1:10 ΣΕ kWh/100km	46
ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΣΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΤΗΣ ΣΧΕΣΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ 1:8 ΜΕ ΤΙΣ ΣΧΕΣΕΙΣ 1:6 ΚΑΙ 1:10 ΣΕ W	47
ΠΙΝΑΚΑΣ 5: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΣΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΤΗΣ ΣΧΕΣΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ 1:8 ΜΕ ΤΙΣ ΣΧΕΣΕΙΣ 1:6 ΚΑΙ 1:10 ΣΕ kWh/100km ΜΕ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ	60
ΠΙΝΑΚΑΣ 6: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΣΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΤΗΣ ΣΧΕΣΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ 1:8 ΜΕ ΤΙΣ ΣΧΕΣΕΙΣ 1:6 ΚΑΙ 1:10 ΣΕ W ΚΑΙ ΠΟΣΟ ΑΝΕΚΤΗΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	61
ΠΙΝΑΚΑΣ 7: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΣΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΚΑΙ ΜΕ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ ΑΝΑ ΚΥΚΛΟ ΠΟΛΗΣ	62
ΠΙΝΑΚΑΣ 8: ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΣΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΤΗΣ ΙΔΙΑΣ ΣΧΕΣΗΣ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΚΑΙ ΜΕ ΑΝΑΓΕΝΝΗΤΙΚΗ ΠΕΔΗΣΗ ΑΝΑ ΚΥΚΛΟ ΠΟΛΗΣ	63

1. Ηλεκτρικό όχημα

1.1 Εισαγωγή

Τα ηλεκτρικά οχήματα (EV) χρησιμοποιούν έναν ηλεκτρικό κινητήρα για κίνηση και χημικές μπαταρίες, κυψέλες καυσίμου ή υπερπυκνωτές για την πηγή ενέργειάς τους. Τα EV's αποτελούν μια εναλλακτική των υπάρχοντων συμβατικών οχημάτων αντικαθιστώντας τον κινητήρα εσωτερικής καύσης και το ρεζερβουάρ καυσίμου με έναν ηλεκτροκινητήρα και μία μπαταρία, διατηρώντας ταυτόχρονα όλα τα υπόλοιπα εξαρτήματα. Τα περισσότερα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να καλύψουν έως και 100 χιλιόμετρα με 15 κιλοβατώρες (kWh). Υπάρχουν ορισμένα αξιοσημείωτα πλεονεκτήματα των ηλεκτρικών οχημάτων έναντι των συμβατικών, τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

- Είναι φιλικότερα προς το περιβάλλον όσον αφορά την κατανάλωση ενέργειας
- Ο ηλεκτρισμός μπορεί να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και είναι πιο φθηνός από τη βενζίνη
- Επειδή έχουν πολύ λιγότερα κινούμενα μέρη από ένα συμβατικό απαιτούν πολύ φθηνότερη και σπανιότερη επισκευή
- Μειωμένος θόρυβος

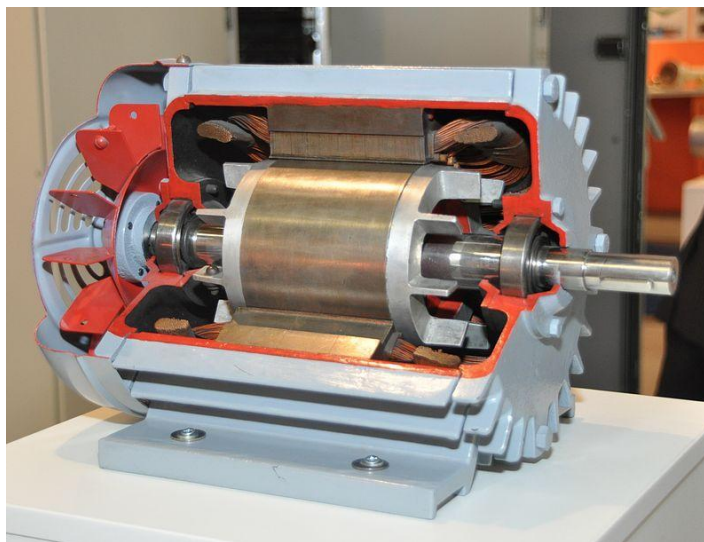
Παρ' όλα αυτά, τα ηλεκτρικά οχήματα παρουσιάζουν και ορισμένα μειονεκτήματα σε σύγκριση με τα συμβατικά.

- Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα έχουν μικρότερη αυτονομία
- Η φόρτιση της μπαταρίας είναι χρονοβόρα
- Η τωρινή τιμή ενός ηλεκτρικού οχήματος είναι μεγαλύτερη από την τιμή ενός συμβατικού
- Μικρή γκάμα μοντέλων αυτοκινήτων

1.2 Ηλεκτρικοί κινητήρες

Τα ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης είναι η καρδιά των ηλεκτρικών οχημάτων (EV). Ο ηλεκτρικός κινητήρας μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική για την προώθηση του οχήματος, ή, αντίστροφα, για την ενεργοποίηση της αναγεννητικής πέδησης με σκοπό τη φόρτιση της πηγής ενέργειας του οχήματος. Η επιλογή του κινητήρα για EV εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως οι απαιτήσεις

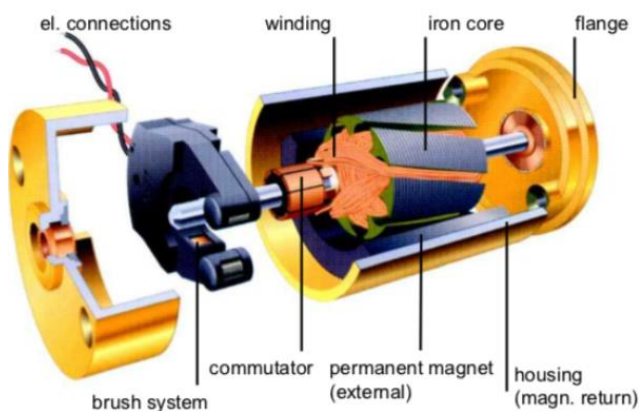
του οδηγού, οι περιορισμοί του οχήματος και η πηγή ενέργειας. Η προσδοκία του οδηγού καθορίζεται από ένα προφίλ οδήγησης, που περιλαμβάνει την επιτάχυνση, τη μέγιστη ταχύτητα, την ικανότητα αναρρίχησης, το φρενάρισμα και την αυτονομία. Ανεξάρτητα από τον τύπο του κινητήρα, υπάρχουν τρία βασικά μέρη: ένας στάτης, ένας μετατροπέας και ένας ρότορας. Μαζί, δημιουργείται ηλεκτρομαγνητικό πεδίο για την περιστροφή του άξονα του κινητήρα. Όσο ο κινητήρας λαμβάνει σταθερό ρεύμα, ο κινητήρας λειτουργεί [1].



Εικόνα 1. 1: Ηλεκτρικός κινητήρας με μόνιμους μαγνήτες [2]

Οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται στα EVs απαιτούν συνήθως συχνές εκκινήσεις και στάσεις, υψηλούς ρυθμούς επιτάχυνσης/επιβράδυνσης, υψηλή ροπή, χαμηλή ροπή και ένα πολύ μεγάλο εύρος ταχύτητας λειτουργίας. Οι κινητήρες μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κύριες ομάδες, οι κινητήρες με μετατροπέα ηλεκτρικού ρεύματος (commutator) και οι κινητήρες χωρίς μετατροπέα ηλεκτρικού ρεύματος (commutatorless). Οι κινητήρες με commutator είναι κυρίως οι παραδοσιακοί κινητήρες DC, και οι κινητήρες διέγερσης μόνιμου μαγνήτη (PM). Οι κινητήρες DC χρειάζονται μετατροπέα ηλεκτρικού ρεύματος και βούρτσες για τροφοδοσία ρεύματος στο σπλισμό, καθιστώντας τα λιγότερο αξιόπιστα και ακατάλληλα για λειτουργία χωρίς συντήρηση και υψηλή ταχύτητα. Επιπλέον, οι κινητήρες DC που τυλίγονται με περιέλιξη έχουν χαμηλή ισχύ. Παρ' όλα αυτά, λόγω της προηγμένης τεχνολογίας και του απλού ελέγχου τους, οι κινητήρες DC ήταν εμφανείς στα ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης. Οι τεχνολογικές εξελίξεις ώθησαν πρόσφατα ηλεκτρικούς κινητήρες χωρίς commutator. Τα πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν υψηλότερη απόδοση, μεγαλύτερη ισχύ, χαμηλότερο λειτουργικό κόστος. Είναι επίσης

πιο αξιόπιστα και χωρίς συντήρηση σε σύγκριση με τους κινητήρες DC. Έτσι, οι κινητήρες αυτής της τεχνολογίας έχουν πλέον γίνει πιο ελκυστικοί [3].



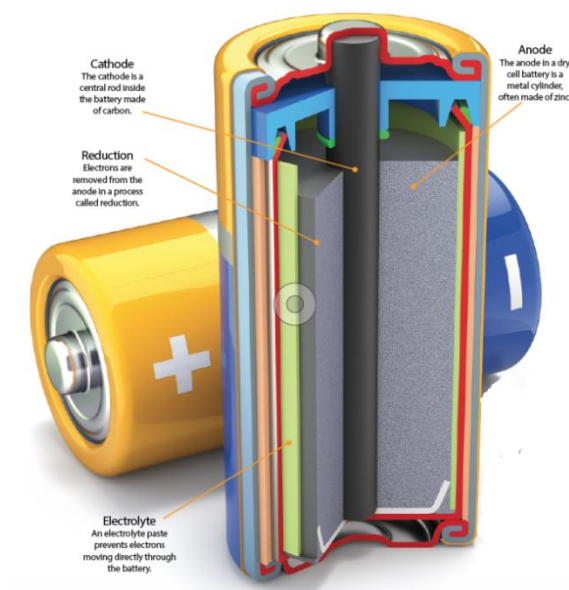
Εικόνα 1. 2: Εξαρτήματα ενός ηλεκτρικού κινητήρα [4]

1.3 Πηγές ενέργειας

Οι «πηγές ενέργειας» ορίζονται ως οι συσκευές που αποθηκεύουν ενέργεια, παραδίδουν ενέργεια (εκφόρτιση) και δέχονται ενέργεια (φόρτιση). Υπάρχουν διάφοροι τύποι αποθήκευσης ενέργειας οι κυριότεροι είναι, οι χημικές μπαταρίες, οι υπερπυκνωτές και οι κυψέλες καυσίμου. Υπάρχουν πολλές απαιτήσεις για την αποθήκευση ενέργειας που εφαρμόζονται σε μια αυτοκινητοβιομηχανία, όπως συγκεκριμένη ενέργεια, ειδική ισχύς, αποδοτικότητα, απαιτήσεις συντήρησης, διαχείριση, κόστος, προσαρμογή στο περιβάλλον και ασφάλεια. Για εκχώρηση σε EV, η ειδική ενέργεια είναι η πρώτη εκτίμηση αφού περιορίζει την εμβέλεια του οχήματος.

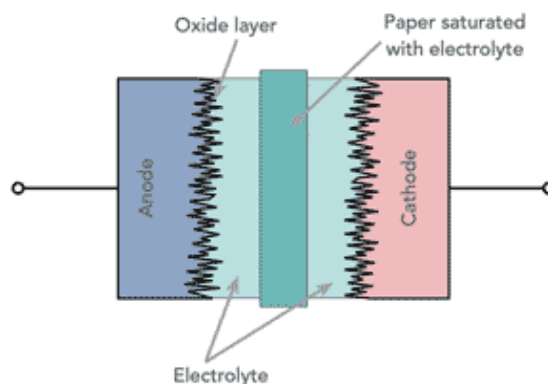
1.3.1 Συσσωρευτές

Οι συσσωρευτές, που συνήθως αναφέρονται ως «μπαταρίες» είναι ηλεκτροχημικές συσκευές που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε χημική ενέργεια κατά τη φόρτιση και μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια κατά την εκφόρτιση. Μια «μπαταρία» αποτελείται από πολλά στοιβαγμένα κελιά. Ένα κελί είναι μια ανεξάρτητη και πλήρης μονάδα που διαθέτει όλες τις ηλεκτροχημικές ιδιότητες. Ένα κελί μπαταρίας αποτελείται από τρία κύρια στοιχεία: δύο ηλεκτρόδια (θετικό και αρνητικό) βυθισμένα σε έναν ηλεκτρολύτη όπως φαίνεται στο σχήμα.



Εικόνα 1. 3: Συσσωρευτής [5]

Οι κατασκευαστές μπαταριών συνήθως καθορίζουν την μπαταρία με coulomb χωρητικότητα (amp-ώρες), η οποία ορίζεται ως ο αριθμός των Ah που αποκτήθηκαν όταν η αποφόρτιση της μπαταρίας από μια πλήρως φορτισμένη κατάσταση μέχρι την τάση του τερματικού πέφτει στην τάση διακοπής, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.3. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ίδια μπαταρία έχει συνήθως διαφορετικό αριθμό Ah σε διαφορετική τιμή έντασης ρεύματος. Γενικά, η χωρητικότητα θα γίνει μικρότερη με ένα μεγάλο ποσοστό ρεύματος εκφόρτισης. Οι κατασκευαστές μπαταριών συνήθως καθορίζουν μια μπαταρία με έναν αριθμό amp hr μαζί με μία αναλογία ρεύματος. Για παράδειγμα, μια μπαταρία με την ένδειξη 100 Ah με ρυθμό C5, έχει 100 amp hr χωρητικότητα σε ρυθμό εκφόρτισης 5 ωρών.



Εικόνα 1. 4: Εσωτερικό συσσωρευτή [6]

Μια άλλη σημαντική παράμετρος μιας μπαταρίας είναι η κατάσταση φόρτισης (SOC). Το State Of Charge (SOC) ορίζεται ως ο λόγος της εναπομένουσας χωρητικότητας προς την πλήρως φορτισμένη χωρητικότητα. Με αυτόν τον ορισμό, μια πλήρως φορτισμένη μπαταρία διαθέτει SOC 100% και μια πλήρως αποφορτισμένη μπαταρία έχει SOC 0%. Ωστόσο, ο όρος «Πλήρως εκφόρτιστη», μερικές φορές προκαλεί σύγχυση λόγω των διαφορετικών τιμών χωρητικότητας σε διαφορετικούς ρυθμούς εκφόρτισης. Οι μπαταρίες των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελούνται κυρίως από μπαταρία μολύβδου-οξέος, μπαταρίες νικελίου, υδριδίου και μπαταρίες λιθίου. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν υψηλό κόστος αλλά λειτουργούν σε ευρύτερο εύρος θερμοκρασίας με υψηλότερες ενεργειακές πυκνότητες, ενώ είναι μικρότερες και ελαφρύτερες. Είναι εύθραυστα και χρειάζονται ένα προστατευτικό κύκλωμα για να περιορίσουν τις μέγιστες τάσεις. Η ηλεκτρική ενέργεια λαμβάνεται από την αντίδραση του λιθίου άνθρακα με το οξείδιο μετάλλου του λιθίου για να σχηματιστεί άνθρακας και οξείδιο μετάλλου του λιθίου.

Οι μπαταρίες λιθίου έχουν σημαντικό πλεονέκτημα βάρους σε σχέση με άλλα συστήματα μπαταριών και αυτό τις καθιστά πολύ ελκυστικές για EV. Η συγκεκριμένη ενέργεια, για παράδειγμα, είναι περίπου τρεις φορές μεγαλύτερη από τις μπαταρίες μολύβδου οξέος, και αυτό θα μπορούσε να προσφέρει στο αυτοκίνητο μια ικανοποιητική αυτονομία.

1.3.2 Κυψέλες καυσίμου

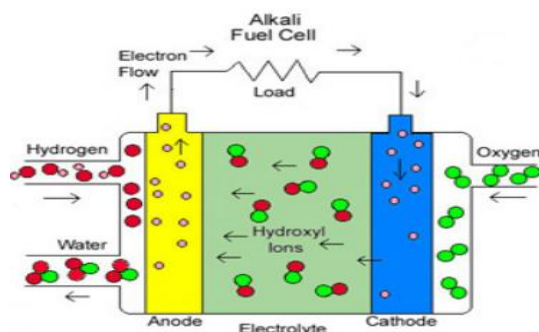
Μια κυψέλη καυσίμου χρησιμοποιεί τη χημική ενέργεια υδρογόνου ή άλλου καυσίμου για να παράγει καθαρά και αποτελεσματικά ηλεκτρική ενέργεια. Εάν το υδρογόνο είναι το καύσιμο, η ηλεκτρική ενέργεια, το νερό και η θερμότητα είναι τα μόνα προϊόντα. Οι κυψέλες καυσίμου είναι μοναδικές όσον αφορά την ποικιλία των πιθανών εφαρμογών τους. Μπορούν να παρέχουν ισχύ για συστήματα τόσο μεγάλα όσο ένας σταθμός παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος και τόσο μικρός όσο ένας φορητός υπολογιστής. Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων των εφαρμογών μεταφοράς, χειρισμού υλικών, σταθερών, φορητών και εφεδρικών αντιγράφων ασφαλείας. Οι κυψέλες καυσίμου έχουν πολλά οφέλη έναντι των συμβατικών τεχνολογιών που βασίζονται στην καύση που χρησιμοποιούνται σήμερα σε πολλούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας και σε επιβατικά οχήματα. Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να λειτουργήσουν με υψηλότερη απόδοση από τους κινητήρες καύσης και μπορούν να μετατρέψουν τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια με αποδοτικότητα έως και 60%. Οι κυψέλες καυσίμου έχουν χαμηλότερες εκπομπές ρύπων από τους κινητήρες καύσης. Τα κύτταρα καυσίμου υδρογόνου εκπέμπουν μόνο νερό, επομένως δεν υπάρχουν εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και δεν υπάρχουν ατμοσφαιρικοί

ρύποι που δημιουργούν αιθαλομίχλη και προκαλούν προβλήματα υγείας στο σημείο λειτουργίας. Επίσης, τα στοιχεία καυσίμου είναι αθόρυβα κατά τη λειτουργία καθώς έχουν λιγότερα κινούμενα μέρη.

Οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν σαν μπαταρίες, αλλά δεν εξαντλούνται ή δεν χρειάζεται επαναφόρτιση. Παράγουν ηλεκτρισμό και θερμότητα όσο παρέχεται καύσιμο. Μια κυψέλη καυσίμου αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια - ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο (ή άνοδο) και ένα θετικό ηλεκτρόδιο (ή κάθοδο) - που περικλείεται γύρω από έναν ηλεκτρολύτη. Ένα καύσιμο, όπως το υδρογόνο, τροφοδοτείται στην άνοδο και ο αέρας τροφοδοτείται στην κάθοδο. Σε μια κυψέλη καυσίμου υδρογόνου, ένας καταλύτης στην άνοδο διαχωρίζει τα μόρια υδρογόνου σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια, τα οποία ακολουθούν διαφορετικές διαδρομές προς την κάθοδο. Τα ηλεκτρόνια περνούν από ένα εξωτερικό κύκλωμα, δημιουργώντας μια ροή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα πρωτόνια μεταναστεύουν μέσω του ηλεκτρολύτη στην κάθοδο, όπου ενώνονται με οξυγόνο και τα ηλεκτρόνια για να παράγουν νερό και θερμότητα.

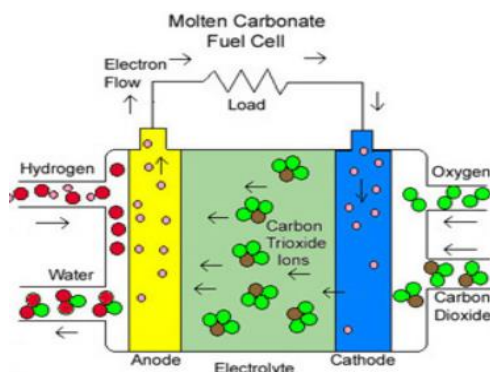
Ο τύπος καυσίμου εξαρτάται επίσης από τον ηλεκτρολύτη. Ορισμένες κυψέλες χρειάζονται καθαρό υδρογόνο, και ως εκ τούτου απαιτούν επιπλέον εξοπλισμό, όπως ο "αναμορφωτής" για τον καθαρισμό του καυσίμου. Άλλες κυψέλες μπορούν να ανεχθούν ορισμένες ακαθαρσίες, αλλά μπορεί να χρειαστούν υψηλότερες θερμοκρασίες για να λειτουργήσουν αποτελεσματικά. Οι υγροί ηλεκτρολύτες κυκλοφορούν σε ορισμένες κυψέλες, κάτι που απαιτεί αντλίες. Ο τύπος του ηλεκτρολύτη υπαγορεύει επίσης τη θερμοκρασία λειτουργίας μιας κυψέλης. Κάθε τύπος κυψέλης καυσίμου έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σε σύγκριση με τους άλλους, και κανένας δεν είναι ακόμη φθηνός και αρκετά αποτελεσματικός για να αντικαταστήσει ευρέως τους παραδοσιακούς τρόπους παραγωγής ενέργειας, όπως σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής με καύση άνθρακα, υδροηλεκτρικούς ή ακόμη και πυρηνικούς.

Οι κυψέλες καυσίμου αλκαλίου λειτουργούν με συμπιεσμένο υδρογόνο και οξυγόνο. Χρησιμοποιούν γενικά ένα διάλυμα υδροξειδίου του καλίου (χημικά, KOH) σε νερό ως ηλεκτρολύτη τους. Η απόδοση είναι περίπου 70% και η θερμοκρασία λειτουργίας είναι 150 έως 200 βαθμούς C. Η έξοδος κυψέλης κυμαίνεται από 300 watt (W) έως 5 kilowatt (kW). Οι αλκαλικές κυψέλες χρησιμοποιήθηκαν στο διαστημικό σκάφος Apollo για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και πόσιμου νερού. Απαιτούν καθαρό καύσιμο υδρογόνου, ωστόσο, οι καταλύτες ηλεκτροδίων πλατίνας είναι ακριβοί. Και όπως κάθε δοχείο γεμάτο με υγρό, μπορεί να διαρρεύσει.



Εικόνα 1. 5: Κυψέλες καυσίμου τύπου MCFC [7]

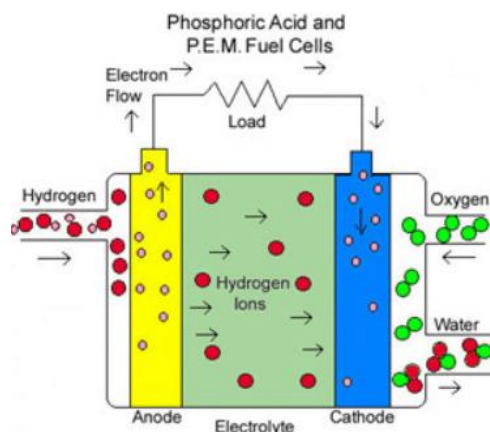
Οι κυψέλες λιωμένου ανθρακικού άλας (MCFC) χρησιμοποιούν ενώσεις υψηλής θερμοκρασίας αλάτων (όπως νάτριο ή μαγνήσιο) ανθρακικά (χημικά, CO_3) ως ηλεκτρολύτη. Η απόδοση κυμαίνεται από 60 έως 80% και η θερμοκρασία λειτουργίας είναι περίπου 650 βαθμούς $^{\circ}\text{C}$. Έχουν κατασκευαστεί μονάδες με ισχύ έως 2 MW και υπάρχουν σχέδια για μονάδες έως 100 MW. Η υψηλή θερμοκρασία περιορίζει τις βλάβες από το μονοξείδιο του άνθρακα του κυττάρου και η σπατάλη θερμότητας μπορεί να ανακυκλωθεί για να παράγει επιπλέον ηλεκτρισμό. Οι καταλύτες τους με ηλεκτρόδιο νικελίου είναι φθηνοί σε σύγκριση με την πλατίνα που χρησιμοποιείται σε άλλα κύτταρα. Αλλά η υψηλή θερμοκρασία περιορίζει επίσης τα υλικά και τις ασφαλείς χρήσεις των. Επίσης, τα ανθρακικά ιόντα από τον ηλεκτρολύτη καταναλώνονται στις αντιδράσεις, καθιστώντας απαραίτητη την έγχυση διοξειδίου του άνθρακα για αντιστάθμιση.



Εικόνα 1. 6: Κυψέλες καυσίμου τύπου PAFC [7]

Τα κύτταρα καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC) χρησιμοποιούν φωσφορικό οξύ ως ηλεκτρολύτη. Η απόδοση κυμαίνεται από 40 έως 80% και η θερμοκρασία λειτουργίας κυμαίνεται από 150 έως 200 βαθμούς $^{\circ}\text{C}$. Τα PAFC ανέχονται συγκέντρωση μονοξειδίου του άνθρακα περίπου 1,5%, γεγονός που διευρύνει την επιλογή των καυσίμων που μπορούν να χρησιμοποιήσουν. Εάν χρησιμοποιείται βενζίνη,

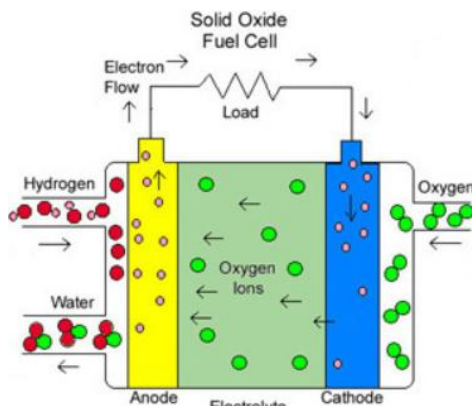
το θείο πρέπει να αφαιρεθεί. Απαιτούνται καταλύτες ηλεκτροδίων λευκόχρυσου και τα εσωτερικά μέρη πρέπει να είναι ανθεκτικά στο διαβρωτικό οξύ.



Εικόνα 1. 7: Κυψέλες καυσίμου τύπου PEM [7]

Τα στοιχεία καυσίμου Proton Exchange Membrane (PEM) λειτουργούν με έναν ηλεκτρολύτη πολυμερούς με τη μορφή ενός λεπτού, διαπερατού φύλλου. Η απόδοση είναι περίπου 40 έως 50% και η θερμοκρασία λειτουργίας είναι περίπου 80 βαθμοί °C (περίπου 175 βαθμοί F). Οι έξοδοι κυψελών κυμαίνονται γενικά από 50 έως 250 kW. Ο συμπαγής, εύκαμπτος ηλεκτρολύτης δεν θα διαρρεύσει ή θα σπάσει και αυτά τα στοιχεία λειτουργούν σε αρκετά χαμηλή θερμοκρασία για να τα καταστήσουν κατάλληλα για σπίτια και αυτοκίνητα. Αλλά τα καύσιμα τους πρέπει να καθαριστούν και ένας καταλύτης πλατίνας χρησιμοποιείται και στις δύο πλευρές της μεμβράνης, αυξάνοντας το κόστος.

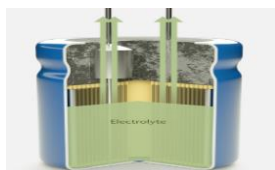
Οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) χρησιμοποιούν ως σκληρό, κεραμικό συστατικό μετάλλων (όπως ασβέστιο ή ζirkόνιο) οξείδια (O_2) ως ηλεκτρολύτη. Η απόδοση είναι περίπου 60% και οι θερμοκρασίες λειτουργίας είναι περίπου 1.000 βαθμοί °C. Η απόδοση των κυψελών είναι έως 100 kW. Σε τέτοιες υψηλές θερμοκρασίες δεν απαιτείται αναμορφωτής για την εξαγωγή υδρογόνου από το καύσιμο και η σπατάλη θερμότητας μπορεί να ανακυκλωθεί για να παράγει επιπλέον ηλεκτρισμό. Ωστόσο, η υψηλή θερμοκρασία περιορίζει τις εφαρμογές μονάδων SOFC και τείνουν να είναι αρκετά μεγάλες. Ενώ οι στερεοί ηλεκτρολύτες δεν μπορούν να διαρρεύσουν, μπορούν να σπάσουν.



Εικόνα 1. 8: Κυψέλες καυσίμου τύπου SOFC [7]

1.3.3 Υπερπυκνωτές

Ο υπερπυκνωτής, επίσης γνωστός ως πυκνωτής υπερπυκνωτή ή διπλός-πυκνωτής, διαφέρει από έναν κανονικό πυκνωτή, δεδομένου ότι έχει πολύ υψηλή χωρητικότητα. Ένας πυκνωτής αποθηκεύει ενέργεια μέσω ενός στατικού φορτίου σε αντίθεση με μια ηλεκτροχημική αντίδραση. Η εφαρμογή μιας διαφοράς τάσης στις θετικές και αρνητικές πλάκες φορτίζει τον πυκνωτή.



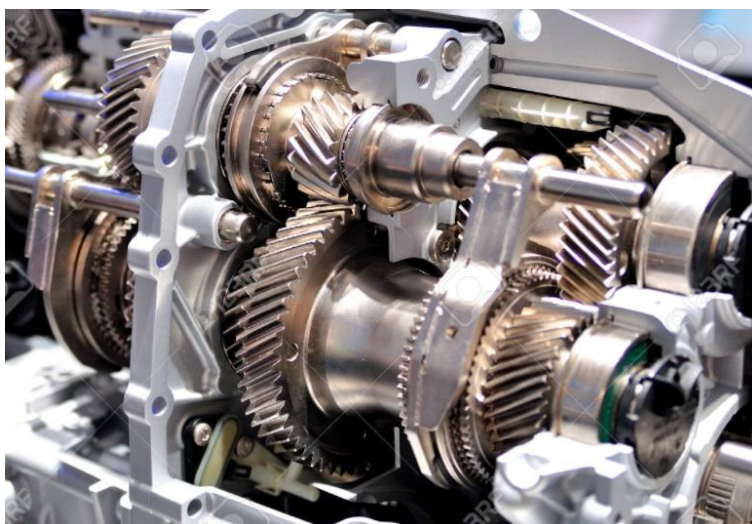
Εικόνα 1. 9: Πυκνωτής [8]

Υπάρχουν τρεις τύποι πυκνωτών και ο πιο βασικός είναι ο ηλεκτροστατικός πυκνωτής με ξηρό διαχωριστή. Αυτός ο κλασικός πυκνωτής έχει πολύ χαμηλή χωρητικότητα και χρησιμοποιείται κυρίως για συντονισμό ραδιοσυχνοτήτων και φιλτραρίσματος. Το μέγεθος κυμαίνεται από μερικά pico-farads (pf) έως χαμηλά microfarad (μF). Ο ηλεκτρολυτικός πυκνωτής παρέχει υψηλότερη χωρητικότητα από τον ηλεκτροστατικό πυκνωτή και κυμαίνεται σε microfarads (μF), το οποίο είναι ένα εκατομμύριο φορές μεγαλύτερο από ένα picofarad. Αυτοί οι πυκνωτές αναπτύσσουν ένα υγρό διαχωριστή και χρησιμοποιούνται για φιλτράρισμα, αποθήκευση και σύνδεση σήματος. Παρόμοια με μια μπαταρία, η ηλεκτροστατική χωρητικότητα έχει θετικό και αρνητικό ηλεκτρόδιο. Ο τρίτος τύπος είναι ο υπερπυκνωτής, με βαθμολογία σε farads, που είναι χιλιάδες φορές υψηλότερος από τον ηλεκτρολυτικό πυκνωτή. Το supercapacitor χρησιμοποιείται για αποθήκευση ενέργειας που υποβάλλεται σε συχνούς κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης σε υψηλή τρέχουσα και μικρή διάρκεια.

Ο Farad είναι μια μονάδα χωρητικότητας που πήρε το όνομά του από τον Άγγλο φυσικό Michael Faraday (1791-1867). Ένα farad αποθηκεύει ένα coulomb ηλεκτρικού φορτίου όταν εφαρμόζει ένα volt. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αποθήκη ενέργειας για αναγεννητική πέδηση. Ενώ θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν μόνοι τους σε ένα όχημα, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν καλύτερα σε ένα υβριδικό ως συσκευές για γρήγορη ισχύ και ενέργεια κατά το φρενάρισμα και κατά την επιτάχυνση, για παράδειγμα στα φανάρια.

1.4 Κιβώτιο ταχυτήτων

Το κιβώτιο ταχυτήτων είναι μηχανική μονάδα ή εξάρτημα που αποτελείται από μια σειρά γραναζιών μέσα σε ένα περίβλημα. Ένα κιβώτιο ταχυτήτων λειτουργεί όπως οποιοδήποτε σύστημα γραναζιών, αλλάζει τη ροπή και την ταχύτητα περιστροφής μεταξύ μιας συσκευής οδήγησης όπως ενός κινητήρα και ενός φορτίου. Τα γρανάζια είναι τοποθετημένα σε άξονες, τα οποία υποστηρίζονται και περιστρέφονται μέσω εδράνων κύλισης (ρουλεμάν). Τα κιβώτια ταχυτήτων χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων εργαλειομηχανών, βιομηχανικού εξοπλισμού, μεταφορών, και κάθε εφαρμογή μετάδοσης ισχύος περιστροφικής κίνησης που απαιτεί αλλαγές στις απαιτήσεις ροπής και ταχύτητας [9].



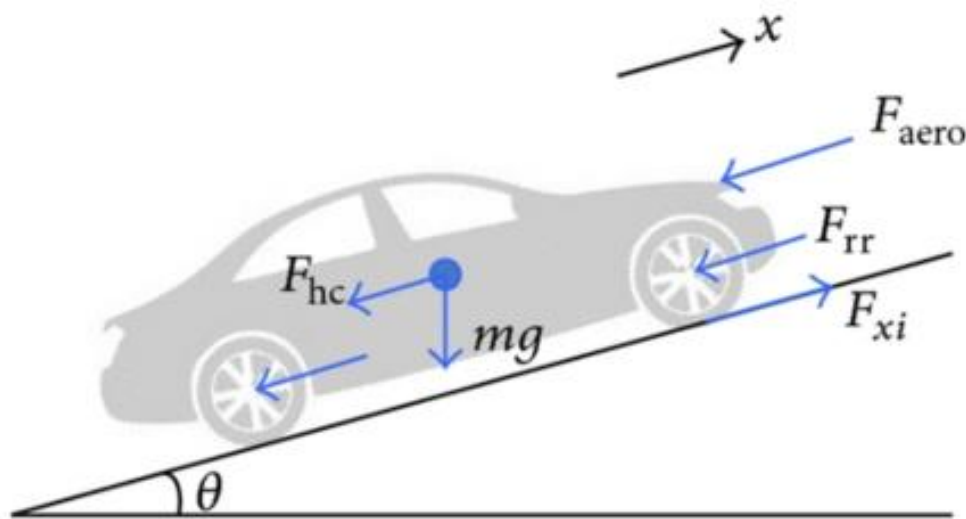
Εικόνα 1. 10: Σύστημα μετάδοσης κίνησης [10]

2. Βασικές Αρχές Οχήματος

Οι βασικές αρχές της λειτουργίας του οχήματος περιγράφουν μαθηματικά τη συμπεριφορά του οχήματος με βάση τις γενικές αρχές της μηχανικής. Ένα όχημα, που αποτελείται από χιλιάδες εξαρτήματα, είναι ένα πολύπλοκο σύστημα. Για να περιγραφεί πλήρως η συμπεριφορά του, απαιτείται προηγμένη μηχανική και μαθηματική γνώση.

2.1 Περιγραφή κίνησης του οχήματος

Στο Σχήμα 2.1 απεικονίζονται οι δυνάμεις που δρουν σε ένα όχημα όταν κινείται σε κεκλιμένο επίπεδο. Η ελκυστική δύναμη, F_t , στην περιοχή επαφής μεταξύ των ελαστικών των κινητήριων τροχών και της επιφάνειας του δρόμου ωθεί το όχημα προς τα εμπρός. Παράγεται από τον κινητήρα ένα ποσό ενέργειας ροπής και μεταφέρεται μέσω ενός συστήματος μετάδοσης και τελικής κίνησης στους τροχούς. Ενώ το όχημα κινείται, υπάρχει αντίσταση που προσπαθεί να σταματήσει την κίνηση. Η αντίσταση περιλαμβάνει συνήθως αντίσταση κύλισης ελαστικών, αεροδυναμική αντίσταση και αντίσταση σε δρόμο με κλίση.



Εικόνα 2. 1: Ασκούμενες δυνάμεις σε κινούμενο όχημα [11]

2.2.1 Αντίσταση Κύλισης

Η αντίσταση κύλισης είναι η ενέργεια που δαπανάται κατά την παραμόρφωση του ελαστικού κατά την επαφή με το έδαφος και την προκύπτουσα τριβή. Εξαρτάται από τις ιξωδο-ελαστικές ιδιότητες του καουτσούκ, οι οποίες αναφέρονται συχνότερα ως υστέρηση. Αυτό το φαινόμενο οδηγεί σε μετατόπιση της δύναμης αντίδρασης στο έδαφος. Αυτή η προς τα εμπρός μετατοπισμένη δύναμη αντίδρασης εδάφους, δημιουργεί μια στιγμή που αντιτίθεται στην κύλιση του τροχού. Κάθε ελαστικό καταναλώνει ενέργεια όταν κυλά. Το ύψος αυτής της ενέργειας εξαρτάται από το σχήμα του πέλματος, το βάρος του ελαστικού και τη σύνθεση της γόμας του. Η αντίσταση κύλισης συμβολίζεται με F_r και υπολογίζεται από τον τύπο

$$F_r = C_r \times m \times g$$

όπου m είναι η μάζα του οχήματος, g είναι η επιτάχυνση λόγω βαρύτητας με ονομαστική τιμή $9,81 \text{ m/s}^2$ και C_r είναι ο συντελεστής αντίστασης κύλισης.

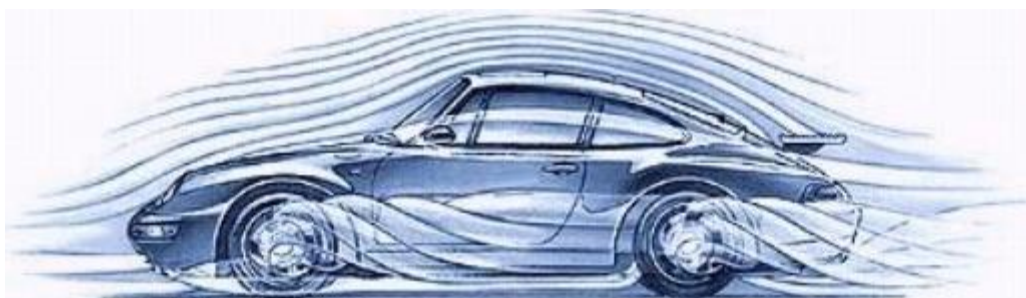
Το βάρος του οχήματος επηρεάζει άμεσα την αντίσταση κύλισης. Ο συντελεστής αντίστασης κύλισης τείνει να είναι σχετικά σταθερός σε χαμηλές ταχύτητες ωστόσο, αυξάνεται σε υψηλές ταχύτητες. Τα EV's χρησιμοποιούν ελαστικά υψηλής πίεσης για να ελαχιστοποιήσουν την αντίσταση κύλισης. Μια τυπική τιμή του συντελεστή για ένα ελαστικό EV είναι 0,01 ή λιγότερο. Η ενέργεια που απορροφάται από την αντίσταση κύλισης αυξάνει τη θερμοκρασία του ελαστικού και την πίεσή του.

2.2.2 Αεροδυναμική Αντίσταση

Η αεροδυναμική αντίσταση είναι η αντίσταση του αέρα στην κίνηση του οχήματος. Η αεροδυναμική δύναμη έλξης F_d που δρα στο όχημα ορίζεται ως

$$F_d = 0.5 \times \rho \times C_d \times A \times (V + V_{air})^2$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα αέρα, το C_d είναι ο αεροδυναμικός συντελεστής, A είναι η διατομή περιοχή του οχήματος, v είναι η ταχύτητα του οχήματος σε m/s και v_{air} είναι η ταχύτητα του ανέμου σε m/s .



Εικόνα 2. 2: Αεροδυναμική αντίσταση[12]

Η δύναμη έλξης αυξάνεται με την αύξηση της περιοχής διατομής του οχήματος και επίσης αυξάνεται με το εάν το όχημα αντιμετωπίζει δυνατό άνεμο. Η πυκνότητα του αέρα είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, της υγρασίας και του υψομέτρου και καθορίζεται ως $1,204 \text{ kg/m}^3$ στους 20°C και τυπική ατμοσφαιρική πίεση 101 kPa στη στάθμη της θάλασσας. Η πυκνότητα του αέρα μπορεί να έχει μια αρκετά μεγάλη διακύμανση στο εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας ενός οχήματος. Η πυκνότητα του αέρα κυμαίνεται από 1.514 kg/m^3 στους -40°C έως 1.293 kg/m^3 στους 0°C έως 1.127 kg/m^3 σε 40°C . Έτσι, απαιτείται πρόσθετη ισχύς και ενέργεια για την προώθηση ενός οχήματος σε κρύο καιρό.

Τον χαμηλότερο συντελεστή έλξης (C_d) έχουν τα μοντέλα, Tesla S και Toyota Prius στα 0,24 και 0,25, αντίστοιχα. Το Nissan Leaf και το Chevy Volt κυμαίνονται στα 0,28. Το Toyota Mirai έχει οριστεί στα 0,29.

2.2.3 Αντίσταση κλίσης

Η ισχύς φορτίου του οχήματος μπορεί να αυξηθεί ή να μειωθεί ανάλογα με το αν το αυτοκίνητο ανεβαίνει ή κατεβαίνει σε μια κλίση. Η αντίσταση αναρρίχησης δίνεται από

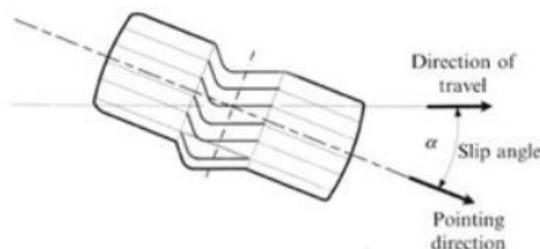
$$F_c = m \times g \times \sin\theta$$

όπου θ είναι η γωνία κλίσης και g είναι η επιτάχυνση λόγω βαρύτητας.

Η δύναμη αναρρίχησης είναι θετική, με αποτέλεσμα τη λειτουργία του αυτοκινήτου. Στην περίπτωση που είναι αρνητική μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την αναγέννηση ενέργειας στην μπαταρία. Η διαβαθμιζόμενη ικανότητα είναι η μέγιστη κλίση που μπορεί να ανέβει ένα όχημα με μια συγκεκριμένη ταχύτητα. Ανάκτηση της ενέργειας παρά τη διάχυση ενέργειας στα φρένα είναι ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα για τα EV από τα συμβατικά οχήματα χρησιμοποιώντας τυπικά συστήματα πέδησης χωρίς ανάκτηση ενέργειας.

2.3 Τροχοί

Ένα ελαστικό είναι ένα δαχτυλίδι σε σχήμα που περιβάλλει τη ζάντα ενός τροχού για να μεταφέρει το φορτίο ενός οχήματος από τον άξονα μέσω του τροχού στο έδαφος και να παρέχει πρόσφυση στην επιφάνεια πάνω από την οποία κινείται ο τροχός. Μία πολύ σημαντική παράμετρος όσον αφορά τους τροχούς είναι η γωνία ολίσθησης. Αυτό ορίζεται ως η γωνία (μοίρες) που σχηματίζεται μεταξύ της πραγματικής κατεύθυνσης της κίνησης του τροχού και της «κατεύθυνσης» του τροχού (κάθετα προς τον άξονα περιστροφής).



Εικόνα 2. 3: Απεικόνιση τροχού σε κυκλική τροχιά [13]

Η ελαστικότητα του ελαστικού αντιστέκεται στην ολίσθηση που δημιουργεί μια δύναμη στον άξονα περιστροφής. Η περιστροφή του τροχού που επαναλαμβάνεται όσο το όχημα κινείται δημιουργεί επίσης εσωτερική τριβή και συνεπώς θερμότητα μέσα στο ελαστικό, αυξάνοντας παράλληλα την πρόσφυση των ελαστικών. Η πρόσφυση αυξάνεται έως ένα σημείο έως ότου το ελαστικό του τροχού έχει υποστεί υπερβολική εργασία και η πρόσφυση μειώνεται δραματικά.

Η έννοια της γωνίας ολίσθησης εφαρμόζεται μόνο στην περιγραφή της παραγωγής πλευρικής δύναμης. Με τη διαμήκη έννοια, αυτό είναι γνωστό ως λόγος ολίσθησης. Ο λόγος ολίσθησης είναι παρόμοιος με τη γωνία ολίσθησης, αλλά αντί να μετράται σε γωνιακή μετατόπιση, σχετίζεται με την ποσότητα ολίσθησης που έχει ένα ελαστικό σε σχέση με μια κατάσταση ολίσθησης. Για παράδειγμα, η αναλογία ολίσθησης 0 είναι ελαστικό ελεύθερης κύλισης και η αναλογία 1 είναι ελαστικό που έχει χάσει την πρόσφυση. Μια γενική τάση που παρατηρείται στα ελαστικά είναι η διαμήκης μέγιστη δύναμη με αναλογία ολίσθησης περίπου 0,3 - 0,4.

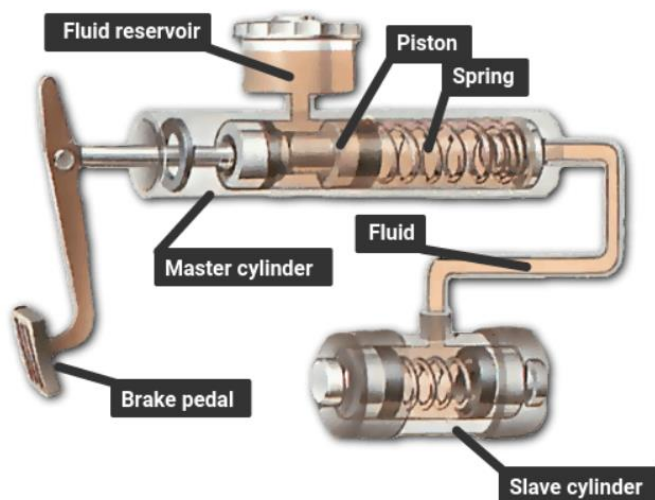
Λόγω της εύκαμπτης φύσης του καουτσούκ τους, η πίεση διόγκωσης εισάγει παραμόρφωση στην επιφάνεια επαφής, που κυμαίνεται από κοίλο προφίλ (χαμηλή πίεση) έως κυρτό προφίλ (υψηλή πίεση).

Αυτό επηρεάζει την επιφάνεια επαφής. Κάπου ανάμεσα στα δύο είναι ένα επίπεδο προφίλ που παρέχει τη μέγιστη περιοχή επαφής και τη βέλτιστη πρόσφυση [13].

2.4 Σύστημα πέδησης

2.4.1 Λειτουργία φρένων

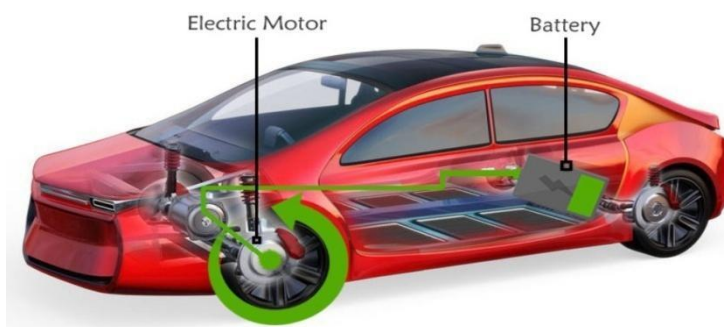
Ένα υδραυλικό κύκλωμα φρένων έχει γεμισμένους με ρευστά κυλίνδρους συνδεδεμένους με σωλήνες. Όταν πιέζεται το πεντάλ φρένου, πιέζει ένα έμβολο στον κεντρικό κύλινδρο, πιέζοντας υγρό κατά μήκος του σωλήνα. Το υγρό μετακινείται σε κυλίνδρους σε κάθε τροχό και τα γεμίζει, αναγκάζοντας τα έμβολα να συμπίεσουν τα φρένα. Η πίεση υγρού κατανέμεται ομοιόμορφα γύρω από το σύστημα. Το κύριο έμβολο πρέπει να διανύσει αρκετές ίντσες για να μετακινήσει τα υποτελή έμβολα. Αυτή η διάταξη επιτρέπει την άσκηση μεγάλης δύναμης από τα φρένα, με τον ίδιο τρόπο που ένας μοχλός με μεγάλη λαβή μπορεί εύκολα να σηκώσει ένα βαρύ αντικείμενο σε μικρή απόσταση. Τα περισσότερα μοντέρνα αυτοκίνητα είναι εξοπλισμένα με δύο υδραυλικά κυκλώματα, με δύο κύριους κυλίνδρους σε συνδυασμό, σε περίπτωση που κάποιος αποτύχει. Κάτω από έντονο φρενάρισμα, μεγάλο βάρος μπορεί να βγει από τους πίσω τροχούς που ασφαλίζουν, προκαλώντας πιθανώς επικίνδυνη ολίσθηση. Για το λόγο αυτό, τα πίσω φρένα είναι σκόπιμα λιγότερο ισχυρά από τα μπροστινά [14].



Εικόνα 2. 4: Υδραυλικό σύστημα φρένων [14]

2.4.2 Ανάκτηση Ενέργειας Φρένων (Regenerative Braking)

Η ενέργεια που χρησιμοποιείται για την πέδηση ή την επιβράδυνση ενός οχήματος σε ένα συμβατικό όχημα διαχέεται ως θερμότητα στο σύστημα πέδησης και χάνεται στο όχημα. Ένα ηλεκτρικό όχημα μπορεί να συλλάβει ή να ανακτήσει την ενέργεια και να το αποθηκεύσει στο όχημα. Ο κινητήρας μπορεί να αναπτύξει μια αρνητική ροπή, έως την ονομαστική τιμή προς τα εμπρός, η οποία αντιστρέφει τη ροή ισχύος έτσι ώστε η κινητική ενέργεια του οχήματος να μετατρέπεται σε αρνητική μηχανική ισχύ στον άξονα του ρότορα και στη συνέχεια να μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ από το μηχάνημα, το οποίο χρησιμοποιείται για την επαναφόρτιση της μπαταρίας. Αυτή είναι η αρχή της αναγεννητικής πέδησης, όπως φαίνεται παρακάτω.



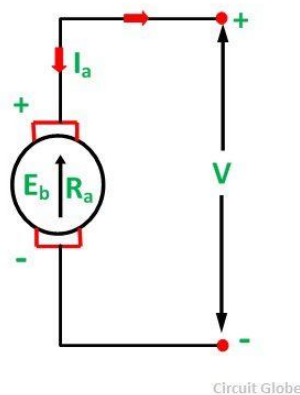
Εικόνα 2. 5: Αναγεννητική πέδηση [15]

Η τεχνολογία αυτή έχει και κάποιους περιορισμούς. Ο ρυθμός φόρτισης των μπαταριών είναι αργός σε σύγκριση με τον ρυθμό με τον οποίο μπορεί να αποφορτιστεί. Αυτό, περιορίζει την ποσότητα ανακτημένης ενέργειας που μπορούν να αποθηκεύσουν οι μπαταρίες κατά τη διάρκεια ξαφνικού φρεναρίσματος (γρήγορη επιβράδυνση). Δεν συνιστάται η χρήση αναγεννητικής πέδησης υπό πλήρως φορτισμένες συνθήκες. Ο λόγος είναι ότι η υπερφόρτωση μπορεί να προκαλέσει ζημιά στις μπαταρίες, αλλά το ηλεκτρονικό κύκλωμα αποτρέπει την υπερφόρτωση. Σε αυτήν την περίπτωση, οι πυκνωτές μπορούν να αποθηκεύσουν την ενέργεια και να βοηθήσει στην επέκταση του εύρους. Εάν δεν είναι εκεί, τότε τα μηχανικά φρένα ενεργοποιούνται για να σταματήσουν το όχημα.

Η ποσότητα ενέργειας που μπορούμε να ανακτήσουμε εξαρτάται από τη μάζα του οχήματος και επίσης από την ταχύτητα με την οποία ταξιδεύει. Η συνολική μάζα είναι περισσότερη στα βαρέα οχήματα όπως ηλεκτρικά αυτοκίνητα, ηλεκτρικά λεωφορεία και φορτηγά. Στον αστικό κύκλο οδήγησης, αυτά τα

βαρέα οχήματα θα αποκτήσουν μεγάλη δυναμική μετά την επιτάχυνση παρά στην πορεία με χαμηλή ταχύτητα. Έτσι κατά τη διάρκεια του φρεναρίσματος, η διαθέσιμη κινητική ενέργεια είναι περισσότερο σε σύγκριση με ένα ηλεκτρικό σκούτερ που ταξιδεύει με την ίδια ταχύτητα. Επομένως, η αποτελεσματικότητα του αναγεννητικού φρεναρίσματος είναι περισσότερο στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, τα λεωφορεία και άλλα βαρέα οχήματα [15].

Σε έναν ηλεκτρικό κινητήρα εν λειτουργία παράγεται το λεγόμενο Back Emf. Ο ρόλος του Back Emf είναι η διατήρηση της διαφοράς ηλεκτρονίων (potential difference) για τη συνεχή ροή των ηλεκτρονίων από την πηγή ενέργειας προς το φορτίο (Load), σε αυτή την περίπτωση ο ηλεκτρικός κινητήρας. Όταν ο κινητήρας ασκεί αρνητική ροπή κατά το φρενάρισμα μειώνεται ή και σταματάει η παροχή ηλεκτρονίων από την μπαταρία. Τότε για πολύ λίγο χρόνο το ρόλο της πηγής ενέργειας τον έχει το Back Emf που με αντίθετη πόλωση αλλάζει η κατεύθυνση των ηλεκτρονίων προς την μπαταρία.



Εικόνα 2. 6: Back Emf ως πηγή ενέργειας [16]

3. Μοντελοποίηση οχήματος και προσομοίωση

Η μοντελοποίηση του οχήματος προσομοίωσης πραγματοποιείται στο περιβάλλον του προγράμματος IPG CarMaker. Τα μοντέλα CarMaker προσομοιώνουν σε πραγματικό χρόνο, ρεαλιστικά και με ακρίβεια μια μεγάλη ποικιλία τύπων οχημάτων μαζί με τα χαρακτηριστικά τους, το δρόμο και το περιβάλλον, τη συμπεριφορά του οδηγού και την κατάσταση της κυκλοφορίας στον εικονικό κόσμο. Το 1^ο στάδιο της μοντελοποίησης, αφορά την εγκυρότητα του μοντέλου. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού, απαιτείται η επικύρωση των αποτελεσμάτων του μοντέλου προσομοίωσης με αποτελέσματα από μετρήσεις του πραγματικού οχήματος. Οι μετρήσεις αυτές, στη δικιά μας περίπτωση, προέρχονται από τον πανευρωπαϊκό διαγωνισμό Shell Eco Marathon, στον οποίο συμμετείχε η ομάδα TUCER. Κατά τη συμμετοχή του οχήματος, έγινε καταγραφή διαφορετικών παραμέτρων του οχήματος, όπως η κατανάλωση καυσίμου (W), η ταχύτητα (m/s), τα Volt (V) και η ένταση ρεύματος (A). Τα παραπάνω μεγέθη είχαν υπολογιστεί σε συνάρτηση με τον χρόνο στην πίστα Queen Elizabeth Olympic park στο Λονδίνο το 2017 για 10 γύρους.

3.1 Πίστα προσομοίωσης

Για την μοντελοποίηση της πίστας χρησιμοποιήθηκε αρχείο txt ως input στο πρόγραμμα IPG με συντεταγμένες διαδοχικών σημείων όπως καταγράφηκαν με χρήση GPS, στη διαδρομή που ακολούθησε το όχημα κατά την πορεία του στον διαγωνισμό καθώς και το υψόμετρο του κάθε σημείου.

x	y	z
4309837,06822642	-980,082915	5,90000
4309837,20838268	-980,2862084	5,90000
4309837,26449536	-980,3212475	5,90000
4309842,09394872	-987,8773923	5,60000
4309846,61499142	-994,8237403	5,20000
4309851,26924947	-1001,321438	5,00000
4309888,13168233	-1028,784286	7,50000
4309894,08974477	-1014,639292	8,10000
4309895,70890073	-1008,898573	8,20000
4309902,12247099	-984,0993617	12,20000
4309912,62256612	-941,4191063	8,30000
4309923,98483963	-892,3322215	5,40000
4309936,84007831	-851,0748531	3,20000
4309955,89162833	-812,8525868	3,30000
4309960,07624585	-805,3314811	3,40000
4309973,33104692	-784,1279974	4,20000

Εικόνα 3. 1: Μορφή αρχείου της πίστας προσομοίωσης

Με βάση τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν η πίστα απεικονίζεται όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.2.



Εικόνα 3. 2: Οπτική απεικόνιση της πίστας προσομοίωσης στο IPG

3.2 Μοντελοποίηση Εξαρτημάτων του Οχήματος

Σε αυτή την υποενότητα θα περιγραφεί ο τρόπος με τον οποίο έγινε η μοντελοποίηση των εξαρτημάτων του αυτοκινήτου, όπως υλοποιήθηκε στο περιβάλλον του IPG. Συγκεκριμένα, οι κυριότεροι παράμετροι που πρέπει να προσδιοριστούν αφορούν το πλαίσιο (σασί), ο σκελετός δηλαδή του οχήματος, το σύστημα μετάδοσης κίνησης και τα ελαστικά.

3.2.1 Μοντέλο Πλαισίου Οχήματος

Για την μοντελοποίηση του πλαισίου του οχήματος είναι απαραίτητη η παραμετροποίηση της καρτέλας Vehicle Body και της καρτέλας Bodies στο IPG. Οι διαφορετικές παράμετροι του οχήματος παρουσιάζονται στο [20].

Vehicle Data Set							
Vehicle Body							
Vehicle Body: Rigid							
<input type="checkbox"/> Override internally computed vehicle							
	x [m]	y [m]	z [m]	Mass [kg]	Ixx [kgm ²]	Iyy [kgm ²]	Izz [kgm ²]
Vehicle Body	0.95	0.01	0.18	73.28	5.4	22.35	25.92
Vehicle Body B	2.43	0.0	0.6	650.5	235.0	750.0	800.0
Joint A - B	2.43	0.0	0.6				
Calculated vehicle overall mass [kg]				168.28			

Εικόνα 3. 3: Δεδομένα καρτέλας Vehicle Body

Στην καρτέλα **Vehicle Body** προσδιορίζονται οι τιμές που αφορούν τη συνολική μάζα του μοντέλου καθώς και τις αδράνειες που ασκούνται στο όχημα. Συγκεκριμένα, ορίζεται η θέση του κέντρου βάρους του κύριου σώματος στα τρία πεδία x , y και z και οι αδράνειες στους αντίστοιχους άξονες. Για τον υπολογισμό των μεταβλητών της αδράνειας χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα τρισδιάστατης σχεδίασης CAD και με τοποθέτηση μαζών πάνω στο σχεδιασμένο πλαίσιο υπολογίστηκαν οι αδράνειες (I_{xx} , I_{xy} , I_{xz} , I_{yy} , I_{yz} , I_{zz}).

Στην καρτέλα **Bodies** καθορίζονται, η θέση του κέντρου βάρους για κάθε τροχό στα τρία πεδία x , y , z , οι μάζες των τροχών και των υποδοχέων των τροχών(wheel carrier). Ομοίως με τον υπολογισμό των μεταβλητών της αδράνειας στην καρτέλα Vehicle Body, οι αδράνειες των τροχών και τον φορέων τους υπολογίζονται και αυτές(I_{xx} , I_{yy} , I_{zz}).

Vehicle Body	Bodies	Engine Mount	Suspensions	Steering	Tires	Brake	Powertrain	Aerodynamics	Sens
Body	x [m]	y [m]	z [m]	Mass [kg]	Ixx [kgm ²]	Iyy [kgm ²]	Izz [kgm ²]		
Wheel Carrier FL	1.67	0.582	0.26	1	0.03	0.03	0.03		
Wheel Carrier FR	1.67	-0.582	0.26	1	0.03	0.03	0.03		
Wheel Carrier RL	0.403	0.582	0.26	4	0.06	0.11	0.12		
Wheel Carrier RR	0.403	-0.582	0.26	1	0.03	0.05	0.04		
Wheel FL	1.67	0.582	0.26	2.5	0.05803	0.11048	0.05803		
Wheel FR	1.67	-0.582	0.26	2.5	0.05803	0.11048	0.05803		
Wheel RL	0.403	0.582	0.26	2.5	0.05803	0.11048	0.05803		
Wheel RR	0.403	-0.582	0.26	2.5	0.05803	0.11048	0.05803		

Εικόνα 3. 4: Δεδομένα καρτέλας Bodies

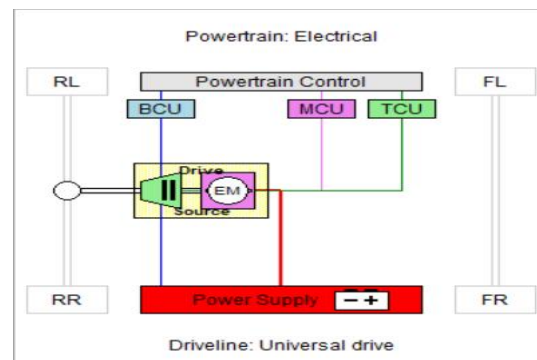
3.2.2 Μοντέλο Συστήματος Μετάδοσης Ισχύος

Η μοντελοποίηση του συστήματος μετάδοσης κίνησης γίνεται στην καρτέλα Powertrain στο IPG. Σε αυτήν την καρτέλα μοντελοποιείται ο τύπος του οχήματος, ο κινητήρας, το κιβώτιο ταχυτήτων, η πηγή ενέργειας και το σύστημα ελέγχου του οχήματος. Αρχικά, όσον αφορά τον τύπο του οχήματος επιλέχθηκε ο ηλεκτρικός με έναν ηλεκτρικό κινητήρα, διότι το πρόγραμμα δεν παρέχει επιλογή με κυψέλες υδρογόνου. Η μοντελοποίηση του κινητήρα βασίστηκε στα χαρακτηριστικά του κινητήρα [20] τα οποία είναι ένας Brushless DC κινητήρας με μέγιστη ροπή 5 Nm και μέγιστες στροφές το λεπτό 5200, καθώς και οι χαρακτηριστικές τιμές του κινητήρα κανονικοποιημένες στη μονάδα όπως απεικονίζεται στη συνέχεια (Εικόνα 3.5).

Rot. Speed norm.	Torque norm.	Eta
0.143	1.0	0.72
0.239	0.8273	0.79
0.393	0.7	0.895
0.429	0.6727	0.91
0.471	0.6455	0.924
0.5	0.6327	0.917
0.589	0.5818	0.91
0.704	0.5091	0.895
0.804	0.4182	0.878
0.857	0.3455	0.864
0.907	0.2545	0.847
0.929	0.2182	0.837
0.964	0.1545	0.822
0.971	0.1473	0.818
0.979	0.1364	0.81
0.982	0.1273	0.807
0.996	0.1091	0.8
1	0.0909	0.79

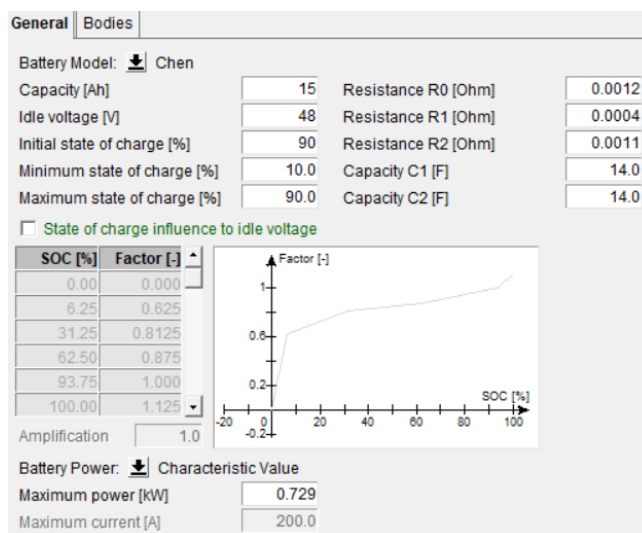
Εικόνα 3. 5: Κανονικοποιημένες τιμές ηλεκτρικού κινητήρα

Όσον αφορά τη μοντελοποίηση του κιβωτίου ταχυτήτων ορίστηκε στη μία ταχύτητα με σχέση 1:8, δηλαδή για να ολοκληρώσει μια πλήρη περιστροφή ο εξωτερικός άξονας του κιβωτίου που καταλήγει στους τροχούς, ο εσωτερικός άξονας πρέπει να ολοκληρώσει 8 πλήρες περιστροφές. Το κιβώτιο συνδέθηκε με διαφορικό στον πίσω άξονα. Η γενική απεικόνιση του συστήματος μετάδοσης κίνησης ακολουθεί παρακάτω.



Εικόνα 3. 6: Σύστημα Μετάδοσης Οχήματος

Τέλος, η πηγή ενεργείας μοντελοποιείται στην καρτέλα Power Supply του IPG. Ο υπολογισμός των παραμέτρων για τη μοντελοποίηση της πηγής ενέργειας πραγματοποιήθηκαν μέσω πειραμάτων και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 3. 7: Δεδομένα της Πηγής Ενέργειας του Οχήματος

3.2.3 Μοντελοποίηση Ελαστικών

Το όχημα χρησιμοποιεί τα ελαστικά MICHELIN 95/80 R16. Για το όχημα της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε ο τύπος Pacejka Magic που παρέχει το IPG. Οι μόνες παράμετροι που άλλαξαν ήταν οι διαστάσεις των ελαστικών και ο συντελεστής τριβής κύλισης που παρέχονται από τον κατασκευαστή.

Visualization		MODEL	
Load force max. [N]	10000.0	ADAMS property file format	MF_05
Nominal tire radius [m]	0.318	Tire use switch	14
Nominal tire width [m]	0.95	Magic formula version number	61
<input type="radio"/> Rim radius [m]	-0.442	Tire side	Left
<input checked="" type="radio"/> Aspect ratio [-]	0.8	Nominal speed	16.7

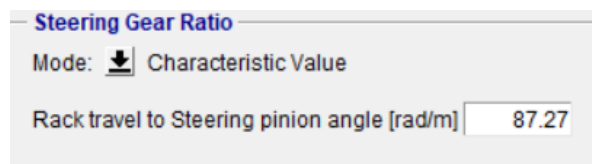
Εικόνα 3. 8: Τιμές των Ελαστικών

3.2.4 Μοντελοποίηση Αναρτήσεων

Για την ανάρτηση, ορίστηκε ένα μοντέλο διπλού τύπου ψαλιδιού, ανάλογο με αυτό που υπάρχει στο πραγματικό όχημα, και όλες οι τιμές ευαισθησίας ήταν αυξημένες σημαντικά προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι σχεδόν άκαμπτες αναρτήσεις που χρησιμοποιούνται. Πρέπει να σημειωθεί ότι λόγω της δυσκολίας μοντελοποίησης μιας έγκυρης ανάρτησης για το συγκεκριμένο όχημα δοκιμής, επιλέχθηκε για τη ρύθμιση των αναρτήσεων του οχήματος η υψηλότερη δυνατή ακαμψία σε κάθε πειραματική δοκιμή.

3.2.5 Μοντελοποίηση Συστήματος Διεύθυνσης

Το τιμόνι ήταν διαμορφωμένο έτσι ώστε η επιλογή του γραναζιού να γίνει με σκοπό να αποδοθεί ορθά η μέγιστη γωνία που μπορεί να εκτελέσει το τιμόνι του οχήματος.



Εικόνα 3. 9: Αναλογία ραφιού με τη γωνία περιστροφής

3.2.6 Επικύρωση Μοντέλου

Η επικύρωση του μοντέλου πραγματοποιείται με σύγκριση τιμών από πραγματικές μετρήσεις. Το όχημα προσομοιώθηκε να τρέξει στους 10 γύρους που αγωνίστηκε το όχημα στην πίστα του Λονδίνου στον Eco Marathon. Τα αποτελέσματα κατανάλωσης των προσομοιώσεων συγκρίνονται με αυτά των πραγματικών μετρήσεων και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Lap	Time(s)	Real Watt(W)	Simulation Watt(W)	Deviation(%)
1	237.5	205.12	207.232	1.019
2	221.5	247.445	226.897	-9.056
3	213.5	259.445	235.136	-10.338
4	221.5	222.989	218.779	-1.924
5	229	213.32	210.653	-1.266
6	236.5	219.51	215.231	-1.988
7	214	239.948	223.912	-7.162
8	216.5	242.349	227.944	-6.320
9	215	244.308	228.092	-7.109
10	233.5	202.85	216.509	6.309

Πίνακας 1: Σύγκριση τιμών προσομοίωσης με αυτή των πραγματικών δεδομένων[17]

Παρατηρείται ότι το μοντέλο προσομοίωσης πλησιάζει αρκετά το πραγματικό με μικρές αποκλίσεις, οπότε ολοκληρώνεται η επικύρωση του μοντέλου.

3.2.7 Μοντέλο Αναγεννητικής Πέδησης (Regenerative Braking)

Η μοντελοποίηση της αναγεννητικής πέδησης πραγματοποιήθηκε μέσω πειραματικών δοκιμών και προσομοιώσεων στο περιβάλλον του IPG από την στιγμή που δεν υπάρχουν πειραματικά δεδομένα από πραγματικές συνθήκες και ταυτόχρονα το όχημα δεν έχει τη σχετική διάταξη. Μελέτες έχουν δείξει ότι η ανακτώμενη ενέργεια φτάνει και μέχρι 15% της καταναλωμένης ενέργειας, ενδέχεται κάποιες φορές να είναι και υψηλότερη [18]. Οι δοκιμές εκτελέστηκαν στην πίστα που πραγματοποιήθηκε και η επικύρωση του οχήματος από τον διαγωνισμό στο Λονδίνο. Με γνώμονα το όριο ενέργειας που μπορεί να ανακτηθεί και η μέση κατανάλωση να διατηρείται σε λογικά πλαίσια, δηλαδή να μην έχει μεγάλες αυξομειώσεις αλλά να πλησιάζει όσο γίνεται το μοντέλο χωρίς τη λειτουργία αναγεννητικής πέδησης, ξεκίνησαν οι δοκιμές. Μεταβλητή ύψιστης σημασίας είναι επίσης η συμπεριφορά του οδηγού. Αυτό σημαίνει ότι το μοντέλο αναγεννητικής πέδησης δεν πρέπει να δημιουργεί προβλήματα στον οδηγό, όπως η δυσκολία φρεναρίσματος του οχήματος. Πρέπει η πορεία του οδηγού να είναι το ίδιο ομαλή όπως και με τη χρήση υδραυλικών φρένων. Βασική παράμετρος για τη μοντελοποίηση, είναι η πίεση της ροπής φρεναρίσματος. Αυτές οι τιμές περιγράφουν τις αναλογίες μεταξύ της πίεσης στον κύλινδρο και τη ροπή φρένου που εφαρμόζεται σε κάθε τροχό.

Pressure to Brake Torque [Nm/bar]	Front	Rear
Left	0.0001	0.0001
Right	0.0001	0.0001

Εικόνα 3. 10: Πίεση της ροπής κατά το φρενάρισμα (Nm/bar)

Το IPG προτείνει δύο μοντέλα για τον έλεγχο της ροπής φρεναρίσματος και για την αναλογία φρεναρίσματος, μέσω του κινητήρα, με το φρενάρισμα, μέσω υδραυλικού φρένου, το σε σειρά και το σε παράλληλα. Επιλέχθηκε το σε παράλληλα μοντέλο το οποίο απεικονίζεται παρακάτω.

Brake torque controller P-value [-]	1.0E-2
Brake torque controller I-value [-]	1.0E-2
Share recuperative braking torque [-]	0.25

Εικόνα 3. 11: Τιμές παραμέτρων μοντέλου αναγεννητικής πέδησης

Οι τιμές P και I του ελεγκτή ελέγχουν το ποσό ροπής που ασκείται στον τροχό. Ο τρίτος παράγοντας δίνει τη δυνατότητα να ρυθμίζεται η κατανομή της αναγεννητικής και υδραυλικής ροπής πέδησης, η τιμή

αυτή ορίστηκε στο 0.25 το οποίο σημαίνει ότι η ροπή φρεναρίσματος μοιράζεται κατά 25% από τον κινητήρα και 75% από τα υδραυλικά φρένα. Τέλος, απαραίτητη παραμετροποίηση για το μοντέλο του regenerative braking του οχήματος αφορά το σε ποιες συνθήκες θα ενεργοποιείται το μοντέλο για την ανάκτηση ενέργειας.

PT Control		TCU	MCU	BCU		
General	Gas	Battery	Start/Stop	Coasting	Assistance	Regeneration
<input checked="" type="checkbox"/> Regeneration Brake On/Off						
SOC limit [%]		75				
SOC limit range [%]		5				
Speed limit [km/h]		6				
Torque limit [Nm]		1				

Εικόνα 3. 12: Παραμετροποίηση τιμών μοντέλου

Συγκεκριμένα, η τωρινή χωρητικότητα της μπαταρίας πρέπει να είναι σε τέτοιο επίπεδο το οποίο να μην υπερπληρωθεί με ενέργεια για την ασφάλεια της μπαταρίας. Επομένως, επιλέχθηκε να ανατροφοδοτείται όταν φτάσει το SOC (State of Charge) στο 75% της χωρητικότητάς της με ένα περιθώριο εύρους των 5%. Παράλληλα, όταν ένα όχημα δεν έχει αναπτύξει αρκετή ταχύτητα δεν μπορεί να ανακτηθεί ενέργεια λόγω της αδυναμίας επιστροφής της πίσω στην μπαταρία. Ο κινητήρας και ο ελεγκτής φρένων δεν είναι πλέον ικανοί να μεταφέρουν αποτελεσματικά αυτήν την ενέργεια στην μπαταρία. Έτσι, το ρεύμα εξάγεται από την μπαταρία αντί να την φορτίσει, και αυτό, με τη σειρά του, οδηγεί σε απώλεια ενέργειας [18]. Για αυτόν τον λόγο, τέθηκε όριο ταχύτητας 6 km/h και ροπής 1 Nm.

Για την επικύρωση του μοντέλου της αναγεννητικής πέδησης το όχημα τέθηκε να τρέξει στους 10 γύρους όπως πραγματοποιήθηκε προηγουμένως. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Πίνακα 2. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι καταναλώσεις για 10 γύρους χωρίς την λειτουργία ανάκτησης ενέργειας από τα φρένα. Στην επόμενη στήλη είναι η κατανάλωση για κάθε γύρο με την λειτουργία ανάκτησης ενεργοποιημένη και παρουσιάζεται μια σύγκριση μεταξύ των δύο περιπτώσεων. Στις δύο στήλες που ακολουθούν καταγράφεται η ανακτημένη ενέργεια από την πέδηση καθώς και το ποσοστό σε σχέση με την καταναλωμένη ενέργεια αντίστοιχα για κάθε γύρο. Παρατηρείται, χαμηλή τιμή απόκλισης κατανάλωσης καθώς και ικανοποιητική ανακτώμενη ενέργεια στους περισσότερους γύρους, σύμφωνα με τα πορίσματα του άρθρου που έχουν παρουσιαστεί στο [18]. Παρατηρήθηκε ότι όποια αλλαγή γίνει στα δεδομένα των παραμέτρων έχει ως αποτέλεσμα, είτε την χαμηλή ανακτημένη ενέργεια κατά την πέδηση, της τάξης του 5% της καταναλωμένης ενέργειας, είτε την αυξημένη κατανάλωση ύψους

Κεφάλαιο 3

300 Watt και άνω. Συγκεκριμένα, η αλλαγή της αναλογίας κατανομής υδραυλικού φρένου με το φρένο που προκαλεί ο κινητήρας επιδρά αρνητικά διότι η μείωση του ποσοστού του τελευταίου οδηγεί σε χαμηλή ανακτώμενη ενέργεια και η αύξηση του υδραυλικού φρένου αυξάνει την τελική κατανάλωση του οχήματος.

Lap	Simulation No Regen. (W)	Regen. Simulation Watt (W)	Deviation (%)	Watt Regen. (W)	Recovery Rate (%)	Total Watt Consumed (W)
1	207.233	207.913	0.327	36.227	17.424	171.686
2	226.897	231.501	1.989	34.852	15.055	196.649
3	235.136	212.78	-10.507	36.955	17.368	175.825
4	218.779	226.698	3.493	33.423	14.743	193.275
5	210.653	221.369	4.841	36.046	16.283	185.323
6	215.231	227.631	5.447	34.516	15.163	193.115
7	223.912	229.334	2.364	28.284	12.333	201.05
8	227.944	220.401	-3.422	36.435	16.531	183.966
9	228.092	209.481	-8.884	21.598	10.310	187.883
10	216.509	219.721	1.462	35.873	16.327	183.848

Πίνακας 2: Σύγκριση αποτελεσμάτων κατανάλωσης με και χωρίς την αναγεννητική πέδηση καθώς και την ανακτημένη ενέργεια για κάθε γύρο.

4. Προσομοίωση σε Κύκλους Πόλης

Ένας κύκλος οδήγησης ή πόλης είναι μια συλλογή δεδομένων για την ταχύτητα έναντι του χρόνου ενός οχήματος που ταξιδεύει σε μία συγκεκριμένη διαδρομή. Αυτές οι διαδρομές διαφέρουν σε διαφορετικές χώρες, αλλά αντιπροσωπεύουν ταχύτητες οδήγησης και συνήθειες του μέσου οδηγού για το πώς να επιταχύνουν και να επιβραδύνουν όταν ταξιδεύουν σε μια πόλη ή έναν αυτοκινητόδρομο. Αυτοί οι υπολογισμοί βοηθούν στον προσδιορισμό αναλογίας ισχύος που εξάγεται από τις μονάδες παραγωγής ενέργειας. Επιπλέον, οι κύκλοι πόλης παίζουν σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό, τη βελτιστοποίηση, και το μέγεθος των υβριδικών συστημάτων κίνησης. Ένας κύκλος οδήγησης είναι επίσης σημαντικός για την αξιολόγηση της απόδοσης ενός οχήματος με διάφορους τρόπους, όπως η κατανάλωση καυσίμου, οι εκπομπές ρύπων. Στην πραγματικότητα, ο πρωτεύον σκοπός ενός κύκλου οδήγησης είναι η προσομοίωση των πραγματικών μοτίβων οδήγησης για την κατανάλωση καυσίμου. Συνήθως, ο σχηματισμός κύκλων οδήγησης είναι συνάρτηση του χρόνου και επιλογής ταχύτητας οχήματος. Οι κύκλοι οδήγησης μπορούν είτε να κατασκευαστούν από έναν αριθμό φάσεων σταθερής επιτάχυνσης και σταθερής ταχύτητας ή με βάση τα δεδομένα από ένα όχημα σε πραγματικές συνθήκες κυκλοφορίας. Επιπλέον, οι κύκλοι οδήγησης μπορούν να ταξινομηθούν ως κύκλοι σταθερής κατάστασης και παροδικούς κύκλους με βάση τη διακύμανση της ταχύτητας και του φορτίου του κινητήρα. Τα μοτίβα του οχήματος οδήγησης διαφέρουν ανάλογα με τη χρήση και τη γεωγραφία του δρόμου. Η κατανάλωση καυσίμου και οι εκπομπές ρύπων εξαρτώνται από πολλούς γεωγραφικούς και νομοθετικούς παράγοντες. Για το λόγο αυτό, οι ερευνητές εστιάζουν στην ανάπτυξη κύκλων οδήγησης με βάση δοκιμές οδήγησης στον πραγματικό κόσμο. Οι κύκλοι οδήγησης έχουν αναπτυχθεί σε διαφορετικές χώρες με σκοπό τις εκπομπές ρύπων την οικονομία καυσίμου. Ωστόσο, επί του παρόντος, οι κύριοι κύκλοι οδήγησης που χρησιμοποιούνται από εργαστήρια δοκιμών αυτοκινήτων περιλαμβάνουν κύκλους οδήγησης EPA των ΗΠΑ, NEDC της Ευρώπης και Japanese 10-15 της Ιαπωνίας [19].

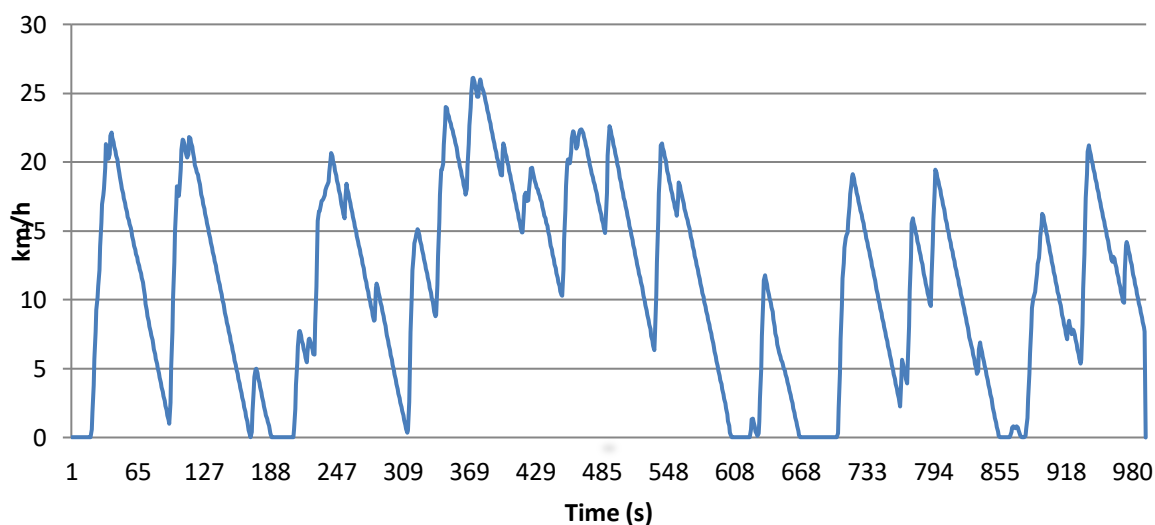
4.1 Κύκλοι Πόλης σε περιβάλλον Προσομοίωσης

Το περιβάλλον του IPG παρέχει ορισμένους κύκλους πόλης για προσομοίωση. Αυτοί που επιλέχθηκαν στην παρούσα εργασία, ήταν ο Artemis Urban, ο NEDC, ο Japanese και ο WLTC. Ο Artemis Urban και ο NEDC αφορούν κύκλους πόλης της Ευρώπης ο Japanese, Ιαπωνικούς και ο WLTC, αμερικάνικους κύκλους πόλης.

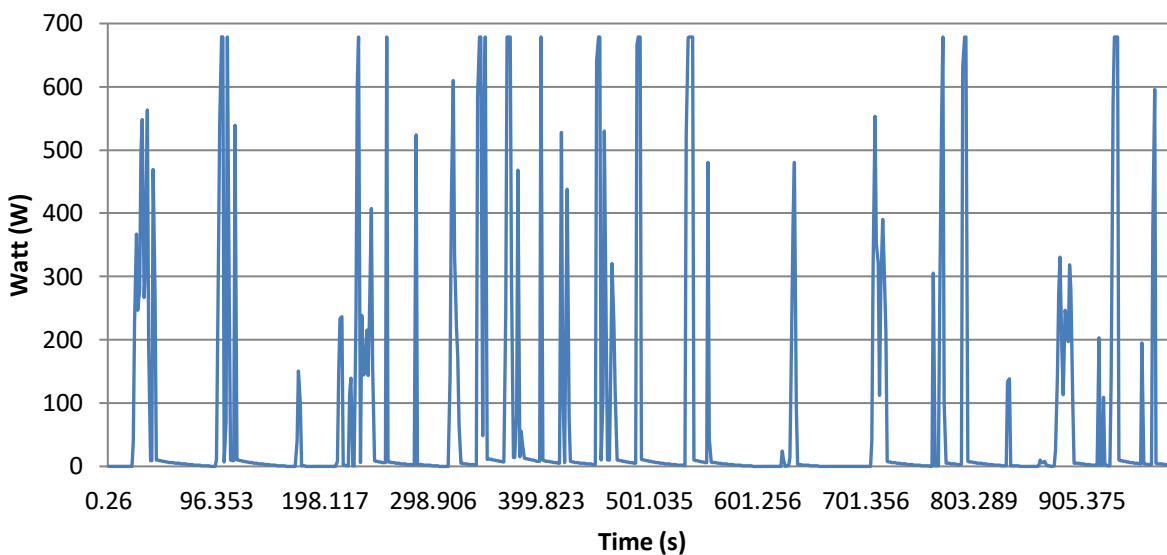
Στη συνέχεια προσομοιώνεται η λειτουργία του οχήματος στους παραπάνω κύκλους πόλης, με σκοπό να μελετηθεί η συμπεριφορά του οχήματος ανάλογα τη σχέση μετάδοσης του συστήματος κίνησης. Οι αναλογίες που επιλέχθηκαν είναι η 1:8, 1:6 και 1:10. Αρχικά παρουσιάζεται, το προφίλ ταχύτητας του κάθε κύκλου, έπειτα σε γραφική απεικόνιση η κατανάλωση σε kWh/100km και σε Watt για κάθε σχέση μετάδοσης καθώς και συγκρίσεις μεταξύ των σχέσεων μετάδοσης για κάθε κύκλο. Η μελέτη πραγματοποιείται δύο φορές, μία χωρίς να είναι ενεργοποιημένο το μοντέλο της αναγεννητικής πέδησης και μια με ενεργοποιημένο το τελευταίο με διαφορά ότι τη δεύτερη φορά καταγράφεται και το ποσό ενέργειας που επιστρέφει στην μπαταρία. Τέλος συγκρίνονται μεταξύ τους οι μέσες καταναλώσεις μεταξύ των σχέσεων μετάδοσης ανά κύκλο πόλης. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται είναι με προφίλ ταχύτητας μειωμένα κατά 50% σε σχέση με τα πραγματικά, για να μπορεί το όχημά μας να ανταπεξέλθει όσο το δυνατόν καλύτερα στα προτεινόμενα προφίλ ταχύτητας, σύμφωνα με τα λειτουργικά του χαρακτηριστικά, δεδομένου ότι το συγκεκριμένο όχημα δεν μπορούσε να φτάσει τόσο μεγάλες τελικές ταχύτητες που απαιτούσαν τα προφίλ ταχύτητας των κύκλων οδήγησης.

4.2 Κύκλοι Πόλης Προσομοίωσης δίχως την ύπαρξη Αναγεννητική Πέδηση

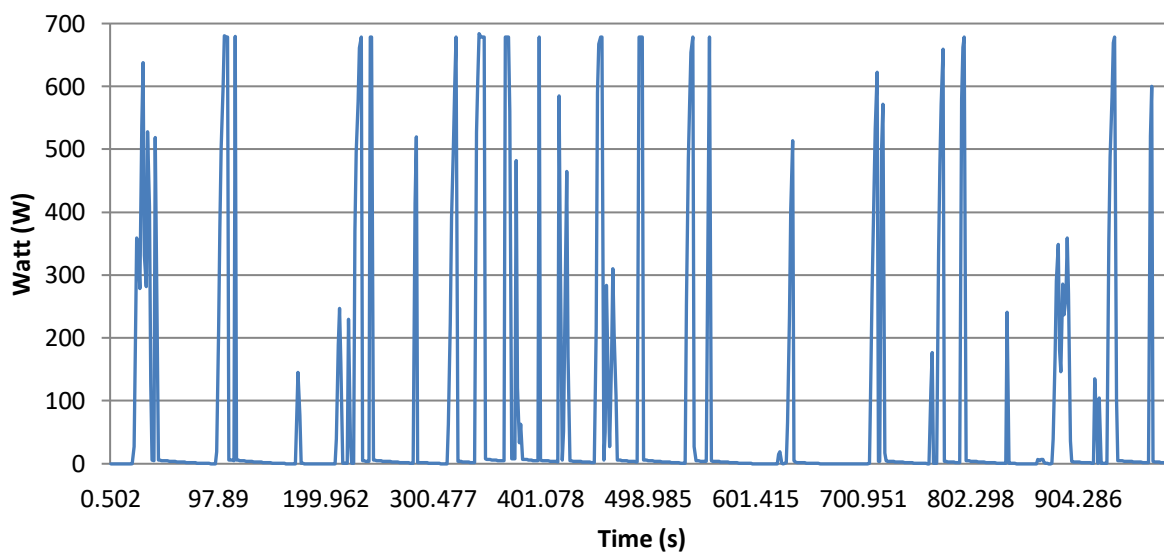
Στη συνέχεια παρουσιάζονται προσομοιώσεις, του τρόπου λειτουργίας δίχως την ύπαρξη αναγεννητικής πέδησης.



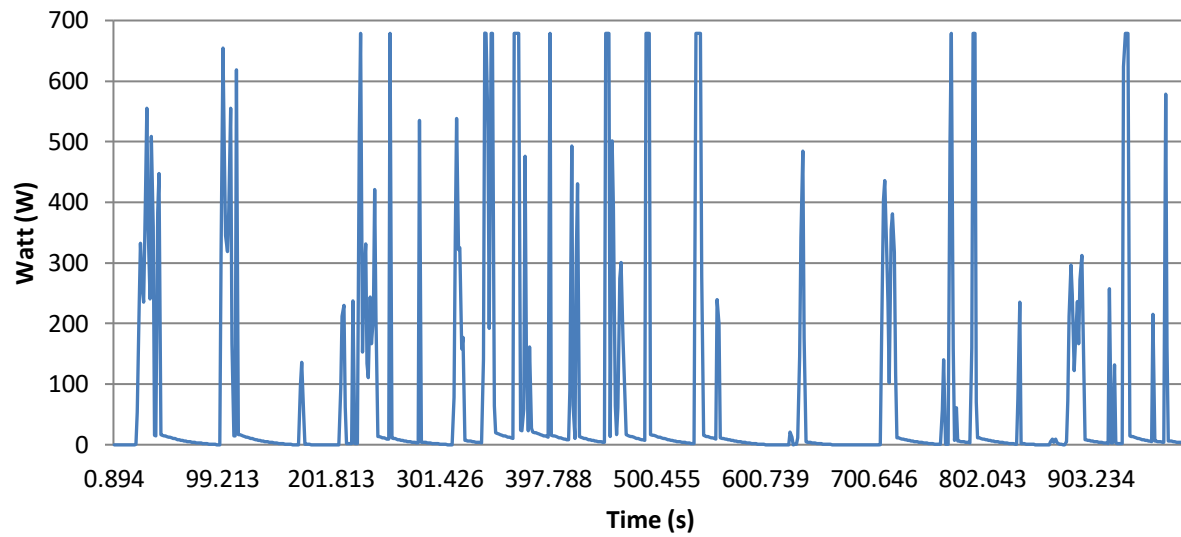
Διάγραμμα 1: Προφίλ ταχύτητας Artemis Urban



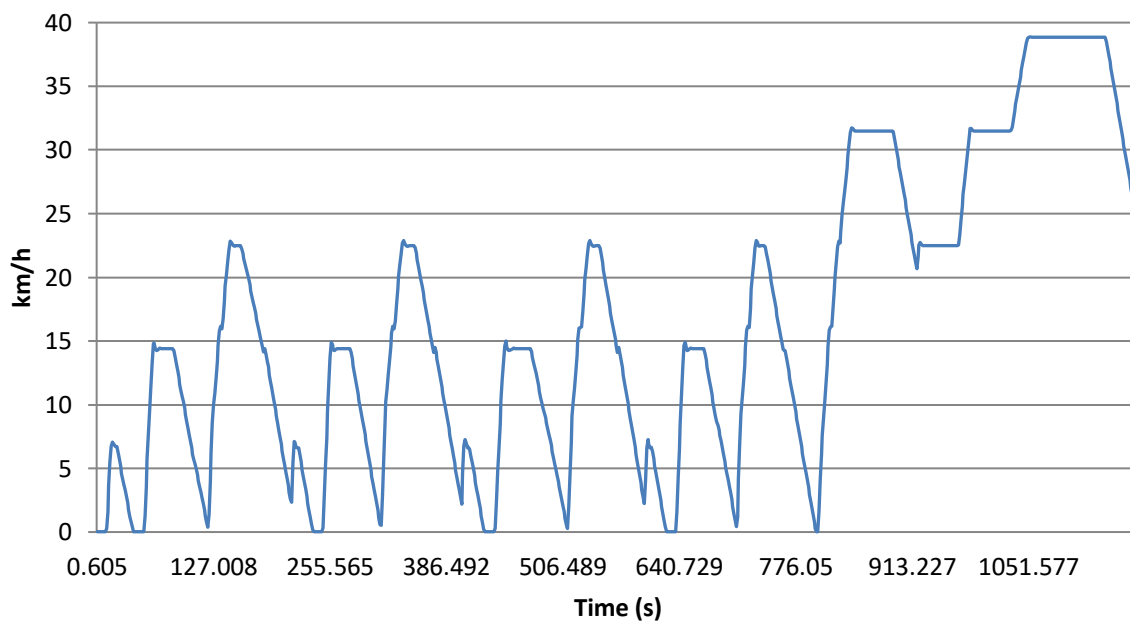
Διάγραμμα 2: Κατανάλωση κύκλου Artemis Urban με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:8 και μέση κατανάλωση 0.7619 kWh/100km



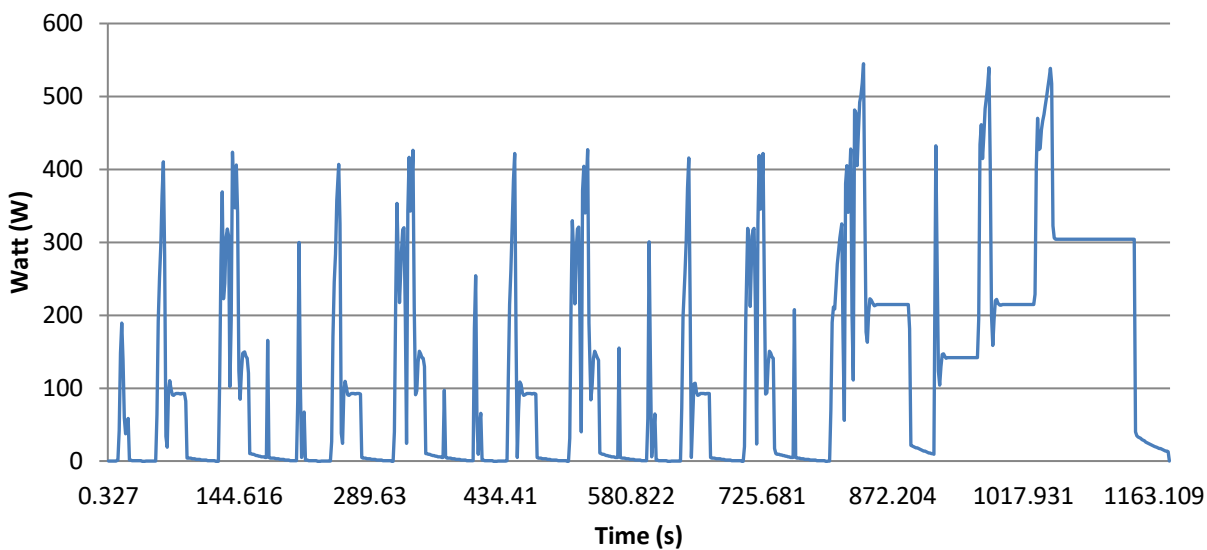
Διάγραμμα 3: Κατανάλωση κύκλου Artemis Urban με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:6 και μέση κατανάλωση 0.8019 kWh/100km



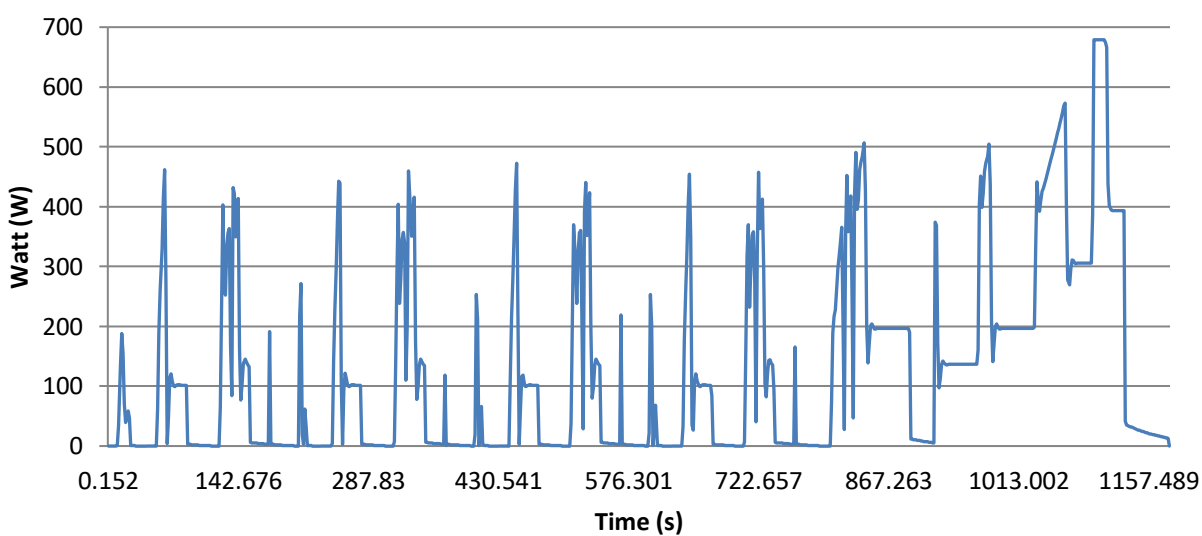
Διάγραμμα 4: Κατανάλωση κύκλου Artemis Urban με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:10 και μέση κατανάλωση 0.769 kWh/100km



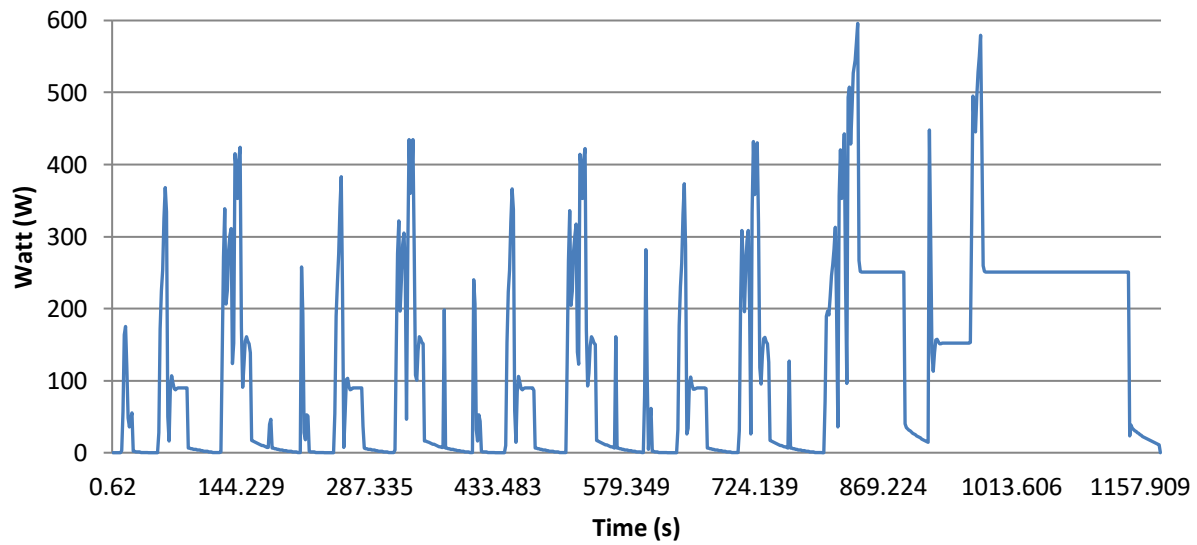
Διάγραμμα 5: Προφίλ ταχύτητας NEDC



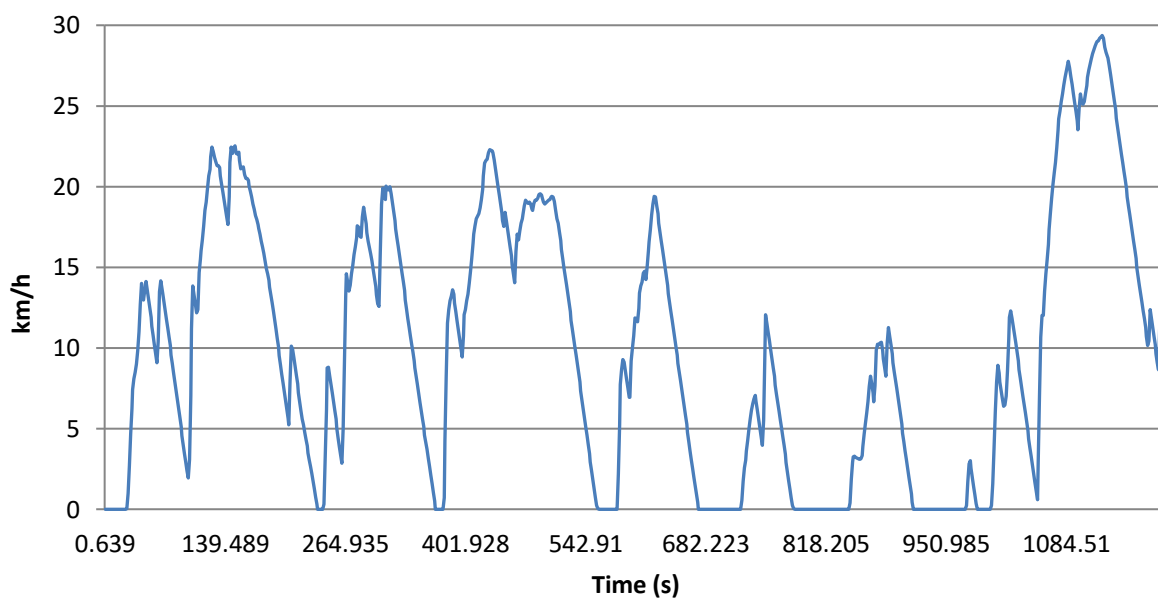
Διάγραμμα 6: Κατανάλωση κύκλου NEDC με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:8 και μέση κατανάλωση 0.7798 kWh/100km



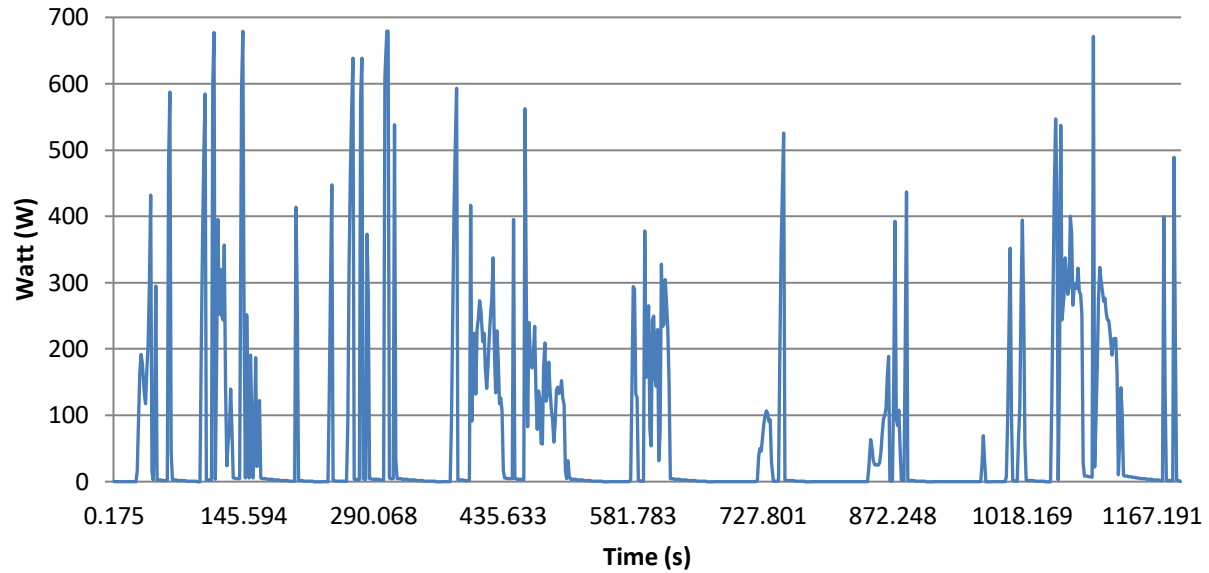
Διάγραμμα 7: Κατανάλωση κύκλου NEDC με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:6 και μέση κατανάλωση 0.8153 kWh/100km



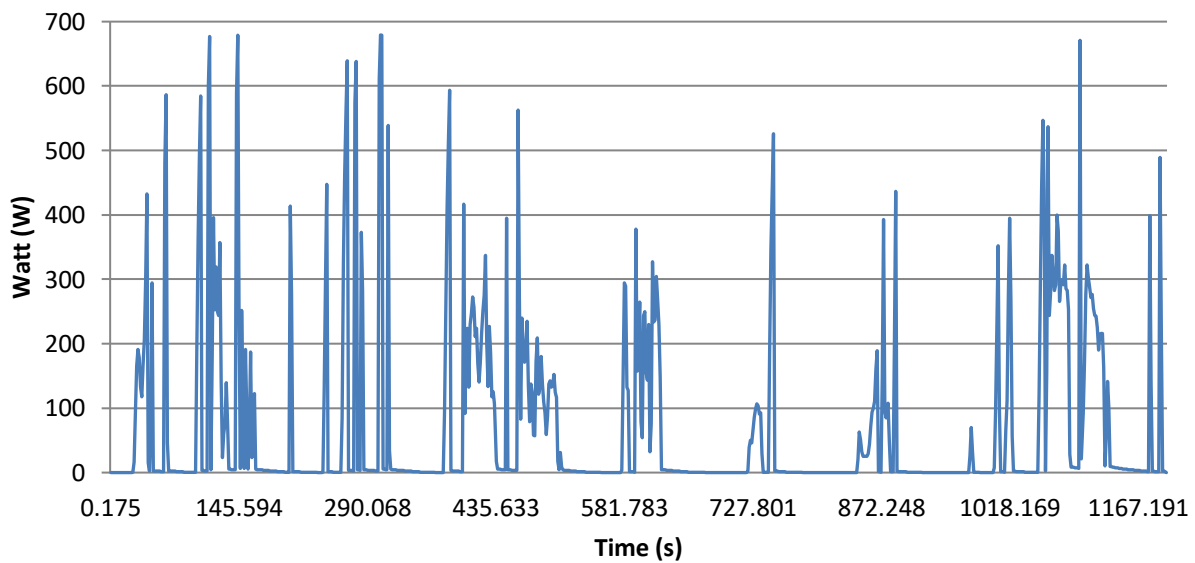
Διάγραμμα 8: Κατανάλωση κύκλου NEDC με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:10 και μέση κατανάλωση 0.7754 kWh/100km



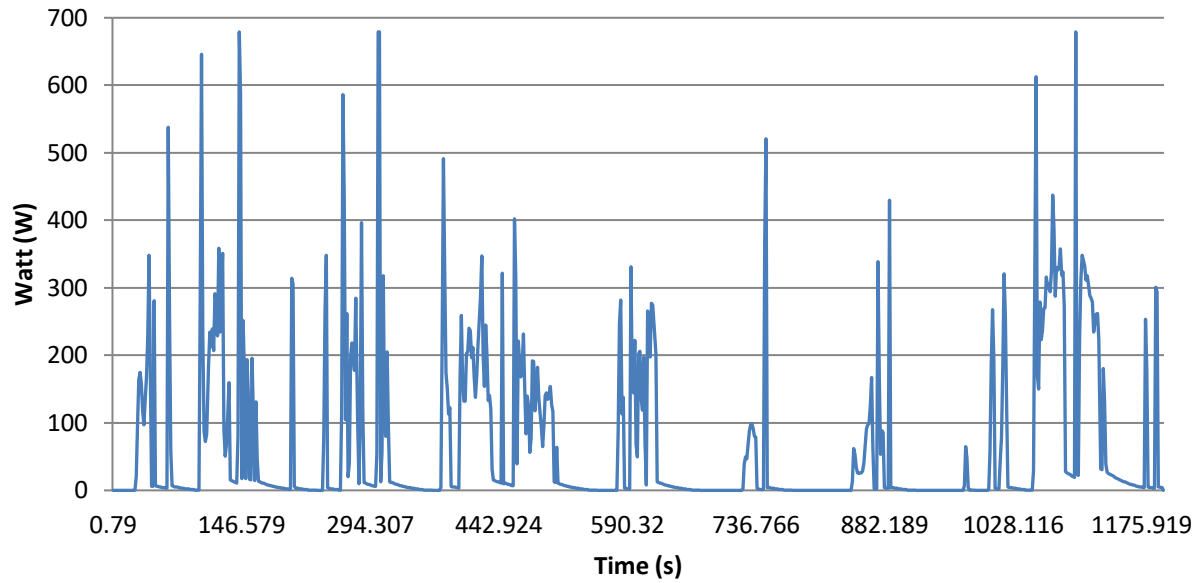
Διάγραμμα 9: Προφίλ ταχύτητας Japanese



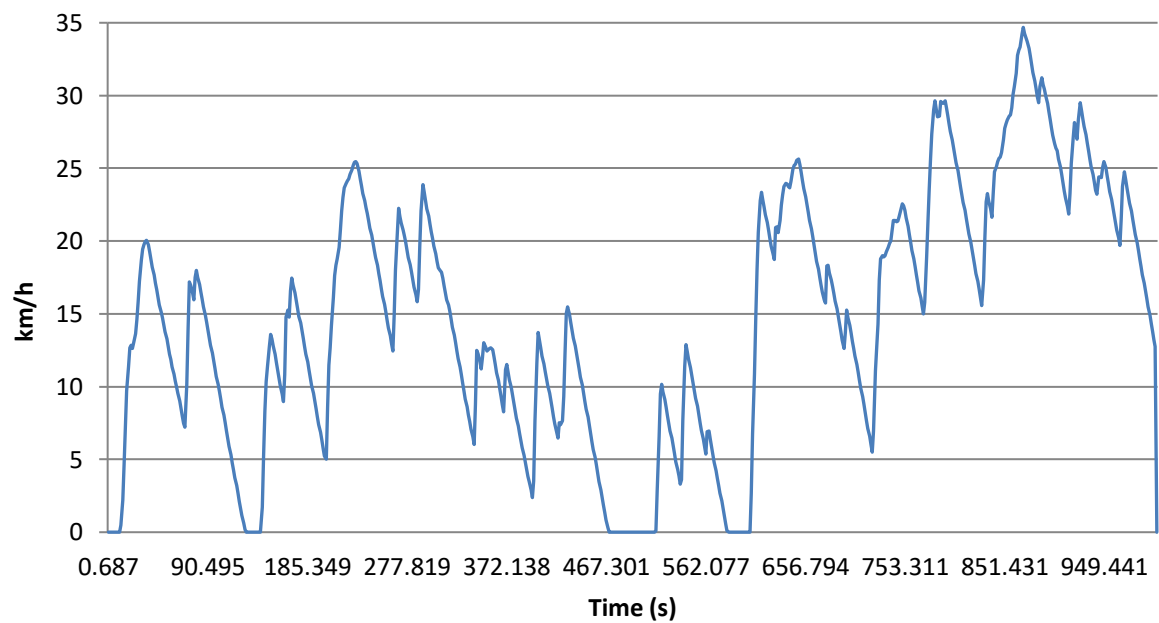
Διάγραμμα 10: Κατανάλωση κύκλου Japanese με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:8 και μέση κατανάλωση 0.741 kWh/100km



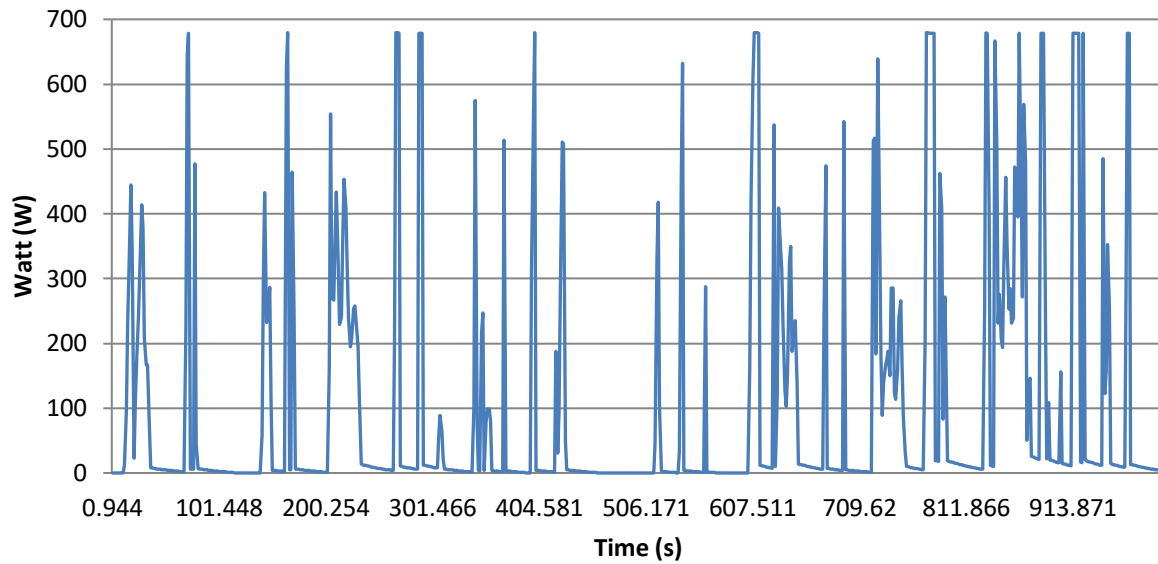
Διάγραμμα 11: Κατανάλωση κύκλου Japanese με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:6 και μέση κατανάλωση 0.7832 kWh/100km



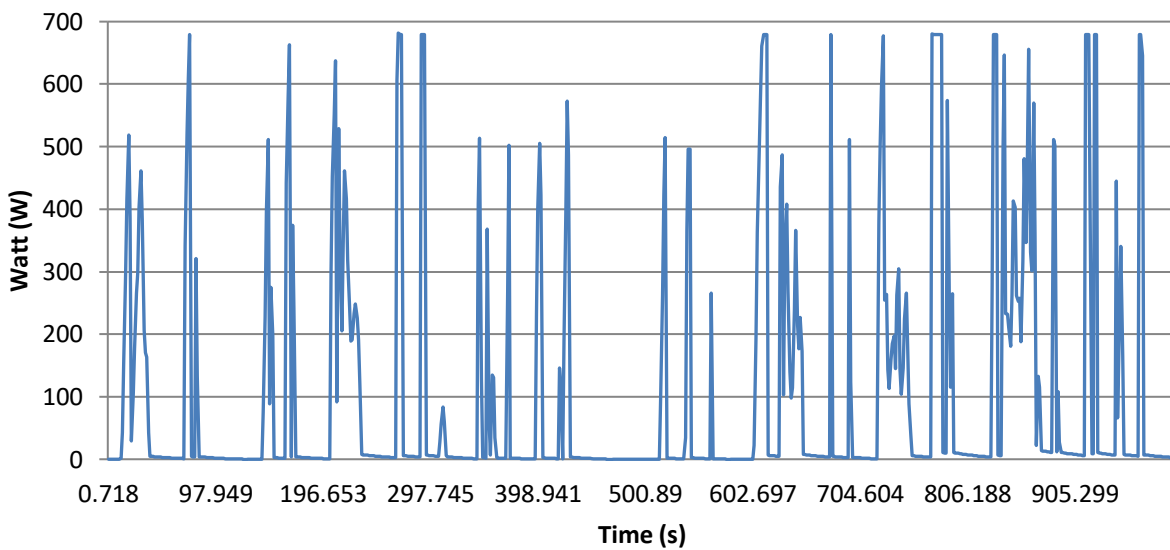
Διάγραμμα 12: Κατανάλωση κύκλου Japanese με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:10 και μέση κατανάλωση 0.7377 kWh/100km



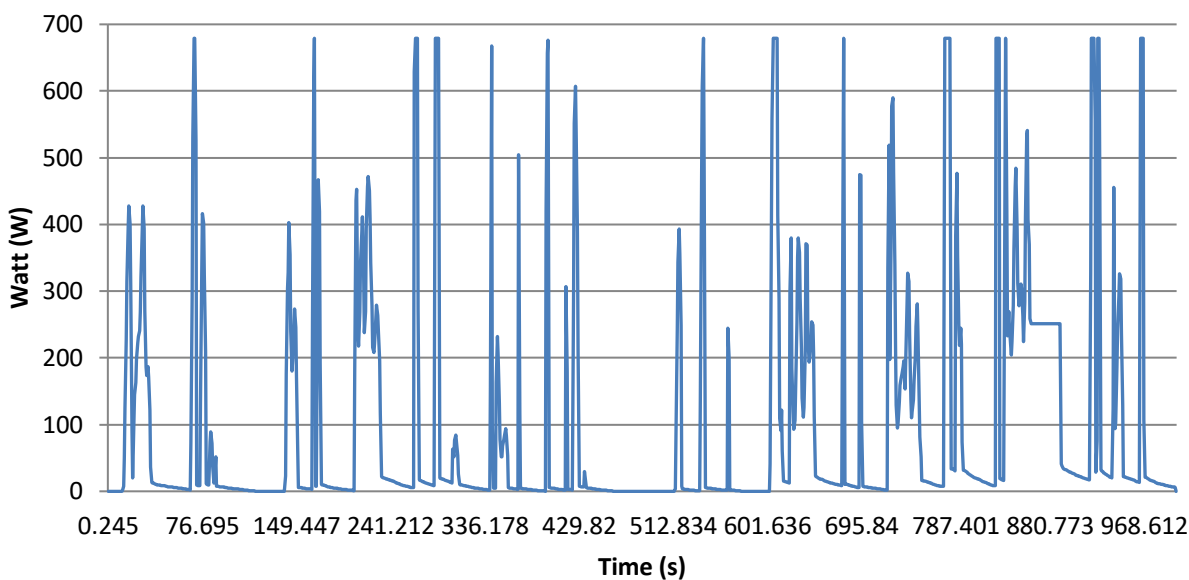
Διάγραμμα 13: Προφίλ ταχύτητας WLTC



Διάγραμμα 14: Κατανάλωση κύκλου WLTC με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:8 και μέση κατανάλωση 0.7765 kWh/100km



Διάγραμμα 15: Κατανάλωση κύκλου WLTC με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:6 και μέση κατανάλωση 0.8203 kWh/100km



Διάγραμμα 16: Κατανάλωση κύκλου WLTC με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:10 και μέση κατανάλωση 0.7742 kWh/100km

Στον Πίνακα 3 παρουσιάζεται είναι η μέση κατανάλωση σε kWh/100km για κάθε σχέση μετάδοσης ανά κύκλο πόλης.

	ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (kWh/100km)		
RATIO:	1:8	1:6	1:10
ARTEMIS URBAN	0.7619	0.8019(+5.2%)	0.7690(+0.93%)
NEDC	0.7798	0.8153(+4.5%)	0.7754(-0.56%)
JAPANESE	0.7410	0.7832(+5.69%)	0.7377(-0.44%)
WLTC	0.7765	0.8203(+5.6%)	0.7742(-0.29%)

Πίνακας 3: Σύγκριση μέσης κατανάλωσης της σχέσης μετάδοσης 1:8 με τις σχέσεις 1:6 και 1:10 σε kWh/100km

Κεφάλαιο 4

Από τον παραπάνω πίνακα γίνεται κατανοητό ότι το ratio 1:8 στον κύκλο Artemis Urban είναι οικονομικότερο, διότι έχει την μικρότερη μέση κατανάλωση. Έπειτα στους υπόλοιπους κύκλους όπως φαίνεται και από τα ποσοστά η προτιμότερη σχέση μετάδοσης είναι η 1:10. Να σημειωθεί ότι η διαφορά είναι ελάχιστη του ratio 1:10 σε σύγκριση με το 1:8. Η σχέση 1:6 σημειώνει την υψηλότερη κατανάλωση. Στον Πίνακα 4 παρουσιάζεται η μέση κατανάλωση σε Watt για κάθε σχέση μετάδοσης ανά κύκλο πόλης.

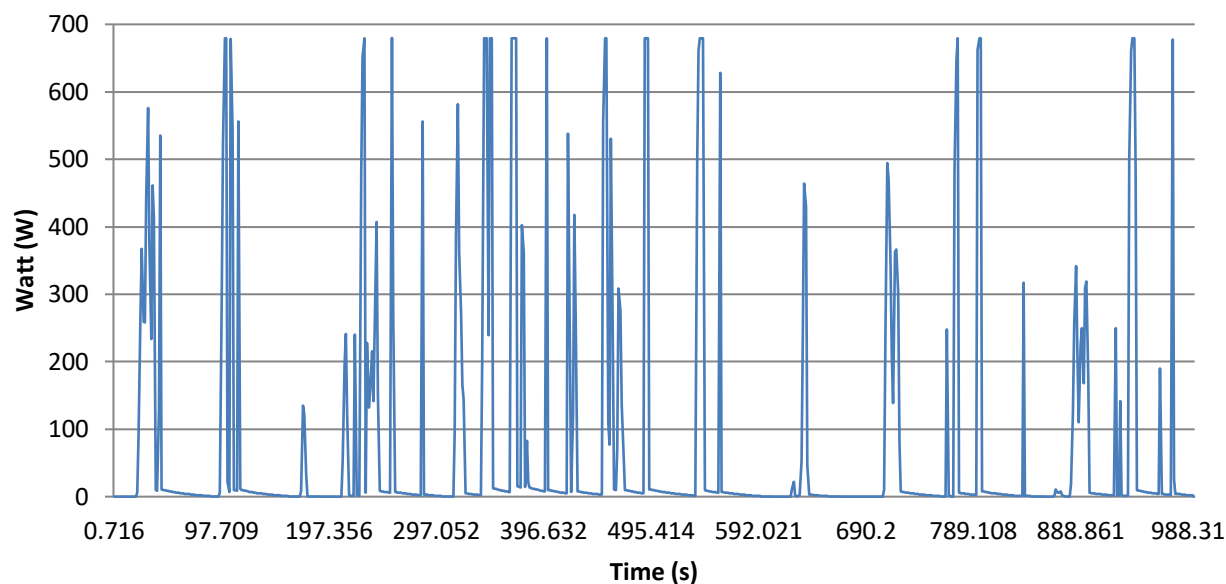
	ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (W)		
RATIO:	1:8	1:6	1:10
ARTEMIS	72.9108	78.7494(+8.01%)	74.2042(+1.77%)
NEDC	119.2117	125.9157(+5.62%)	116.2294(-2.5%)
JAPANESE	68.1967	70.8137(+3.83%)	67.9216(-0.403%)
WLTC	101.4140	103.839(+2.39%)	98.602(-2.77%)

Πίνακας 4: Σύγκριση μέσης κατανάλωσης της σχέσης μετάδοσης 1:8 με τις σχέσεις 1:6 και 1:10 σε W

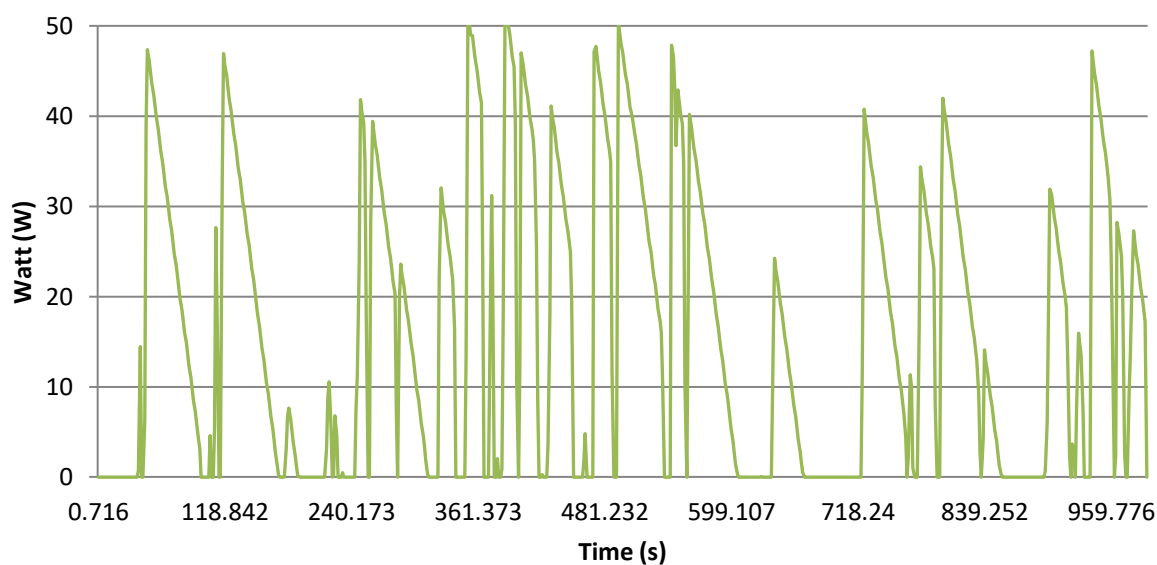
Ομοίως όπως και στον προηγούμενο πίνακα συμπεραίνουμε ότι στον κύκλο Artemis Urban η σχέση 1:8 σημειώνει την μικρότερη κατανάλωση. Στους κύκλους NEDC, Japanese και WLTC κυριαρχεί η σχέση μετάδοσης 1:10. Παρατηρώντας τους δύο προηγούμενους πίνακες η σχέση μετάδοσης 1:6 δεν είναι σε κανένα κύκλο η οικονομικότερη.

4.2 Κύκλοι Πόλης Προσομοίωσης με Αναγεννητική Πέδηση

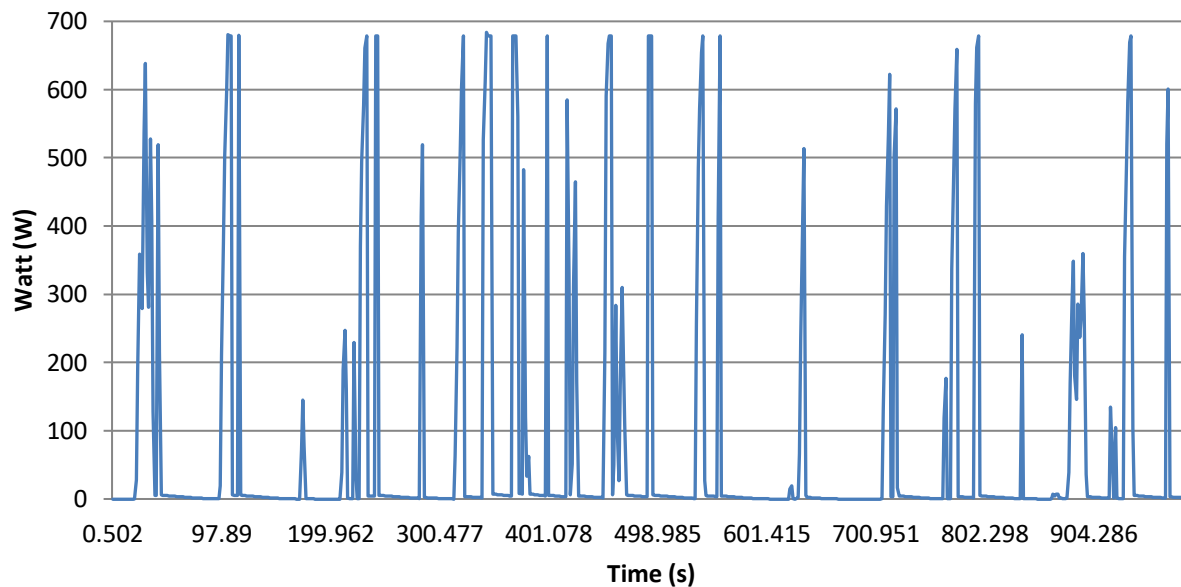
Στη συνέχεια παρουσιάζονται προσομοιώσεις, του τρόπου λειτουργίας με τη διαφορά ότι ενεργοποιείται η λειτουργία της ανάκτησης ενέργειας κατά το φρενάρισμα.



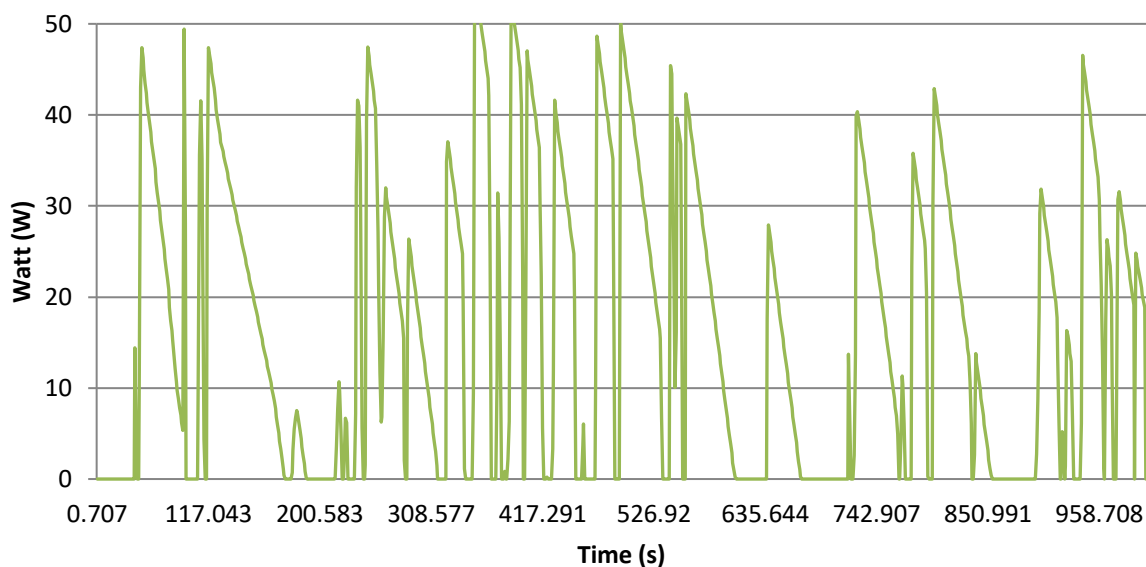
Διάγραμμα 17: Κατανάλωση κύκλου Artemis Urban με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:8 και μέση κατανάλωση 0.7661 kWh/100km



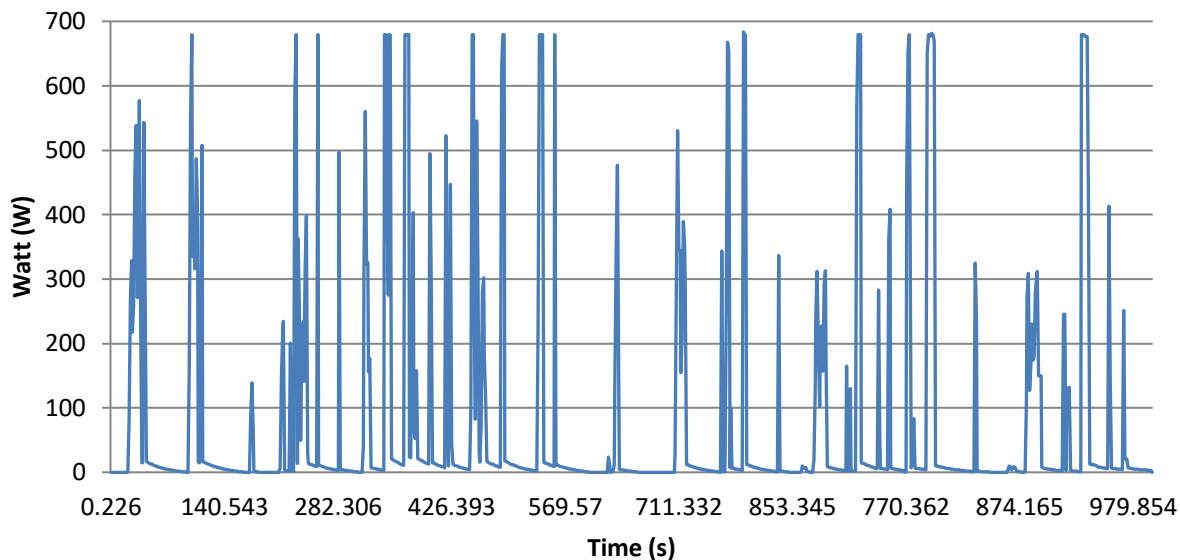
Διάγραμμα 18: Ανακτώμενη ενέργεια, κύκλου Artemis Urban με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:8, με μέση τιμή 15.9986 W



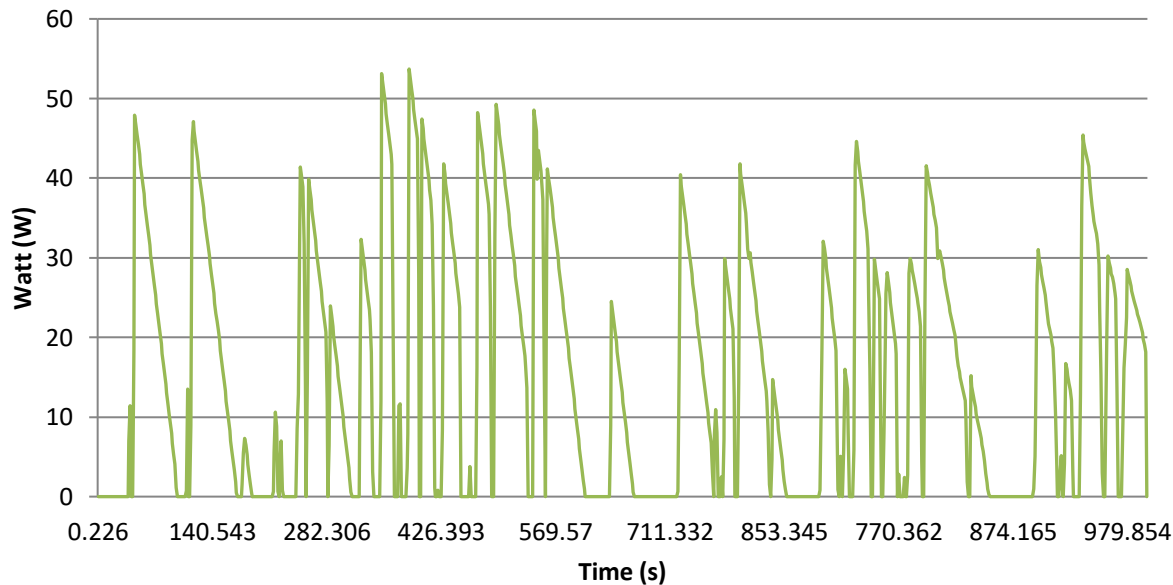
Διάγραμμα 19: Κατανάλωση κύκλου Artemis Urban με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:6 και μέση κατανάλωση 0.7991kWh/100km



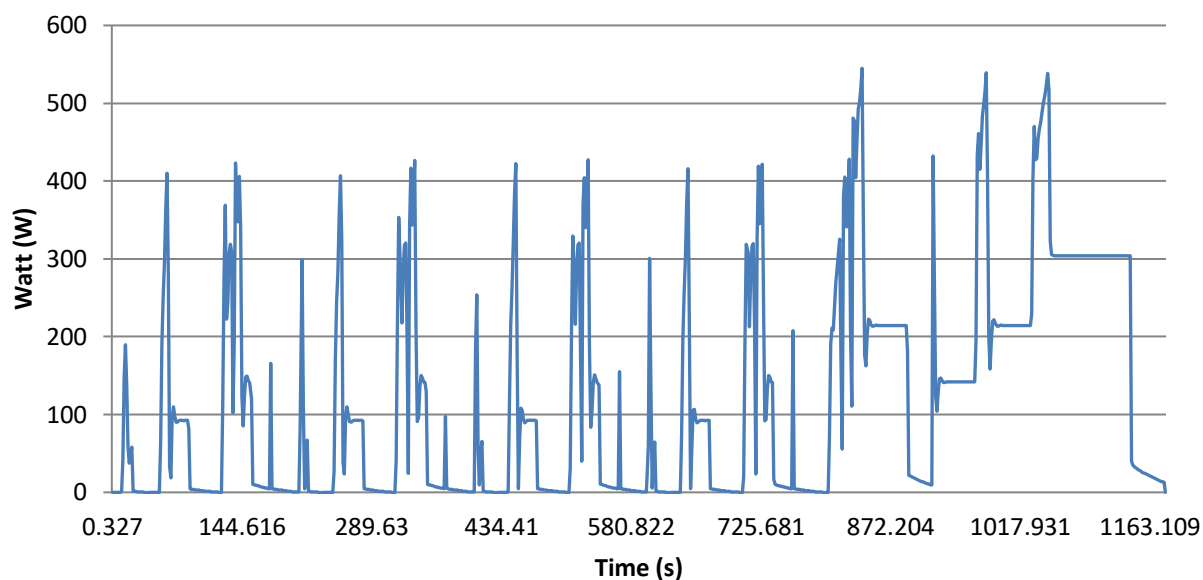
Διάγραμμα 20: Ανακτώμενη ενέργεια, κύκλου Artemis Urban με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:6, με μέση τιμή 16.6713 W



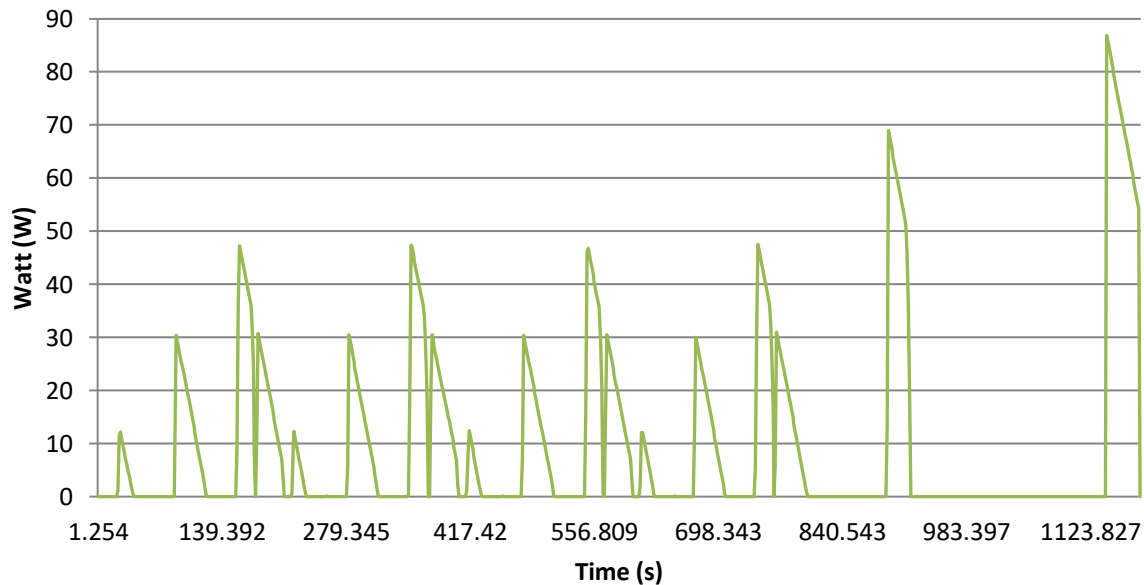
Διάγραμμα 21: Κατανάλωση κύκλου Artemis Urban με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:10 και μέση κατανάλωση 0.7479 kWh/100km



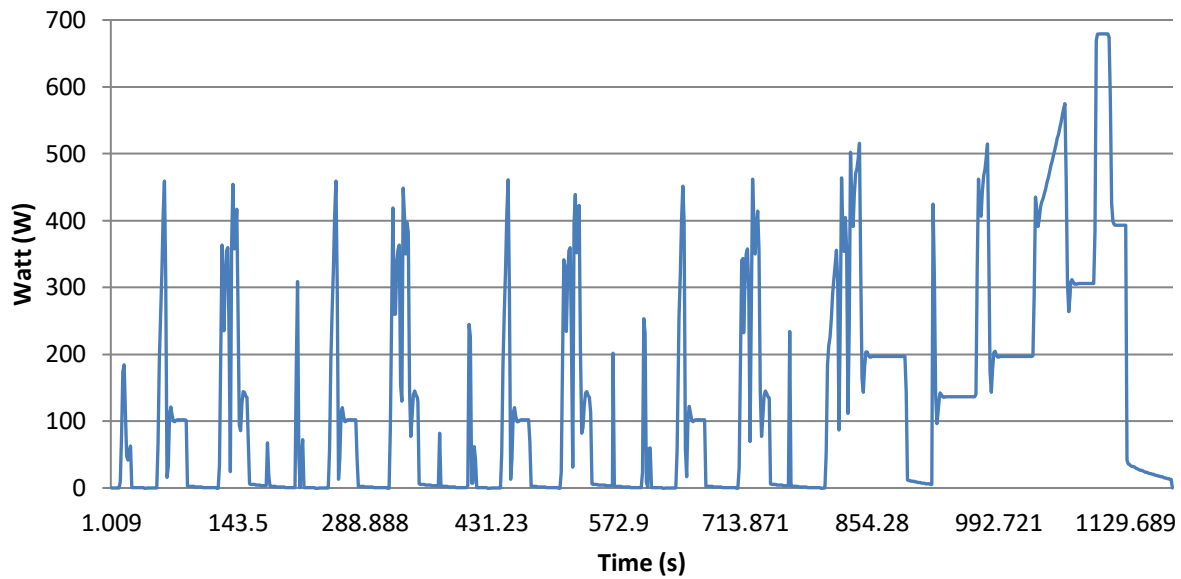
Διάγραμμα 22: Ανακτώμενη ενέργεια, κύκλου Artemis Urban με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:10, με μέση τιμή 15.718 W



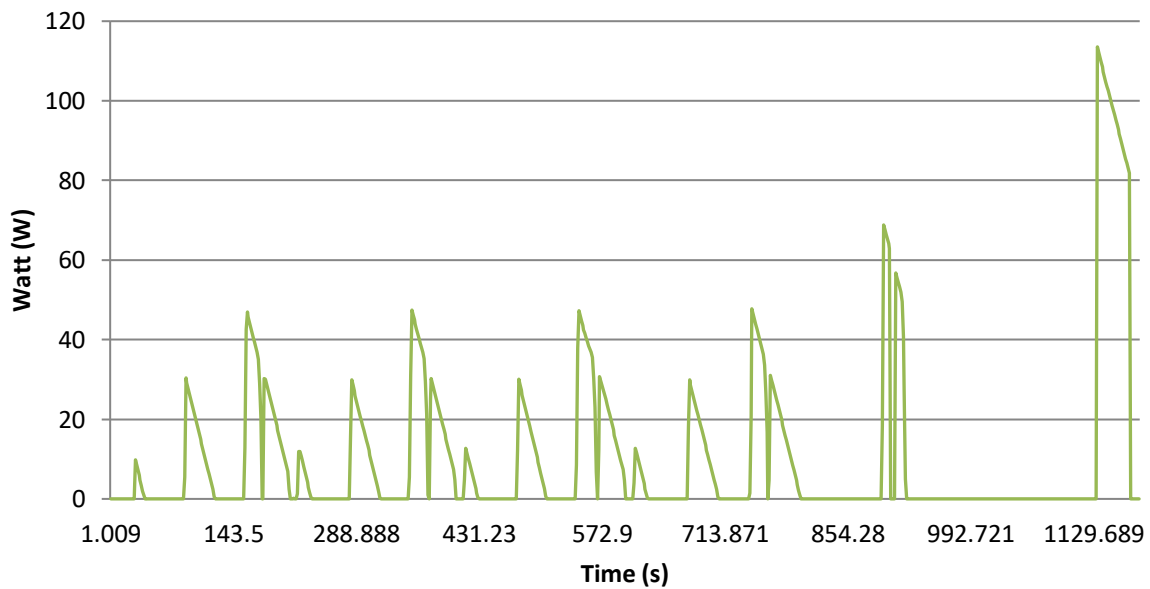
Διάγραμμα 23: Κατανάλωση κύκλου NEDC με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:8 και μέση κατανάλωση 0.7811 kWh/100km



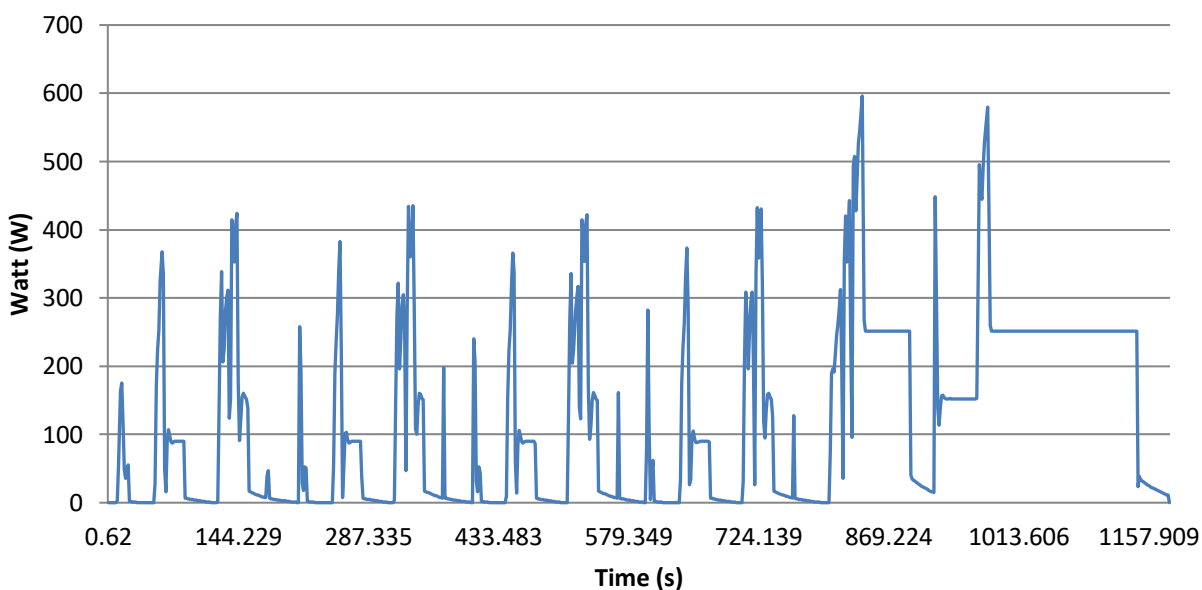
Διάγραμμα 24: Ανακτώμενη ενέργεια, κύκλου NEDC με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:8, με μέση τιμή 10.175 W



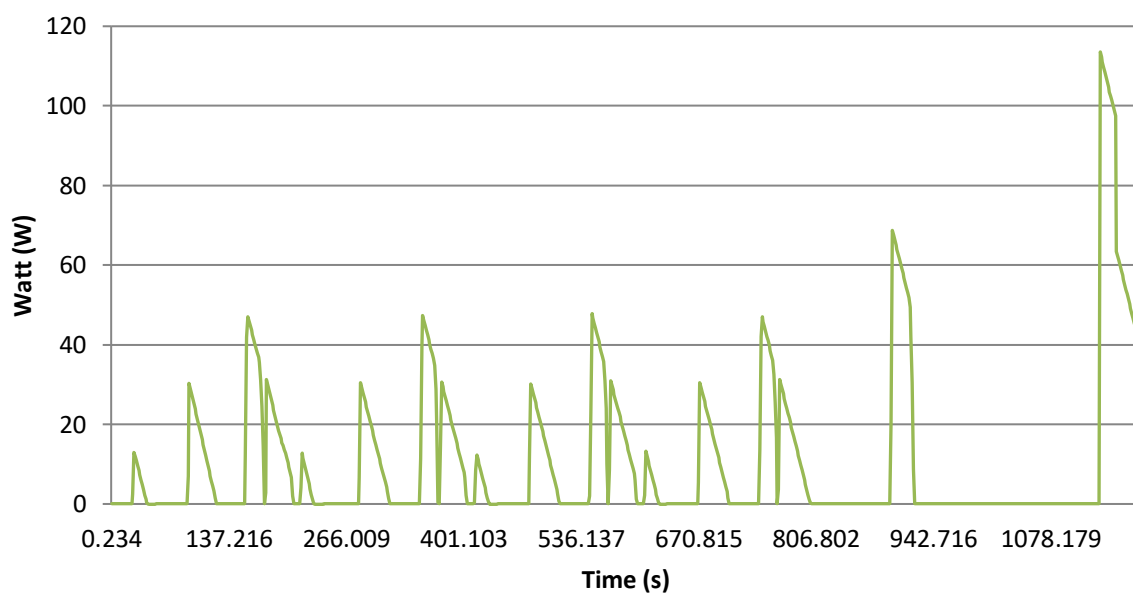
Διάγραμμα 25: Κατανάλωση κύκλου NEDC με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:6 και μέση κατανάλωση 0.8141 kWh/100km



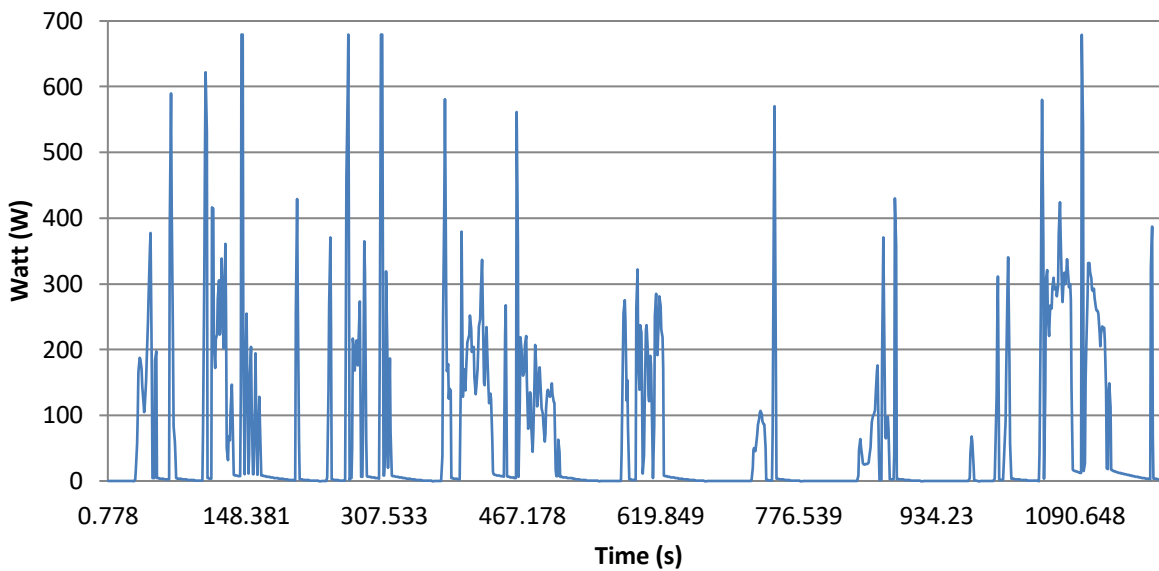
Διάγραμμα 26: Ανακτώμενη ενέργεια κύκλου NEDC με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:6, με μέση τιμή 10.7291 W



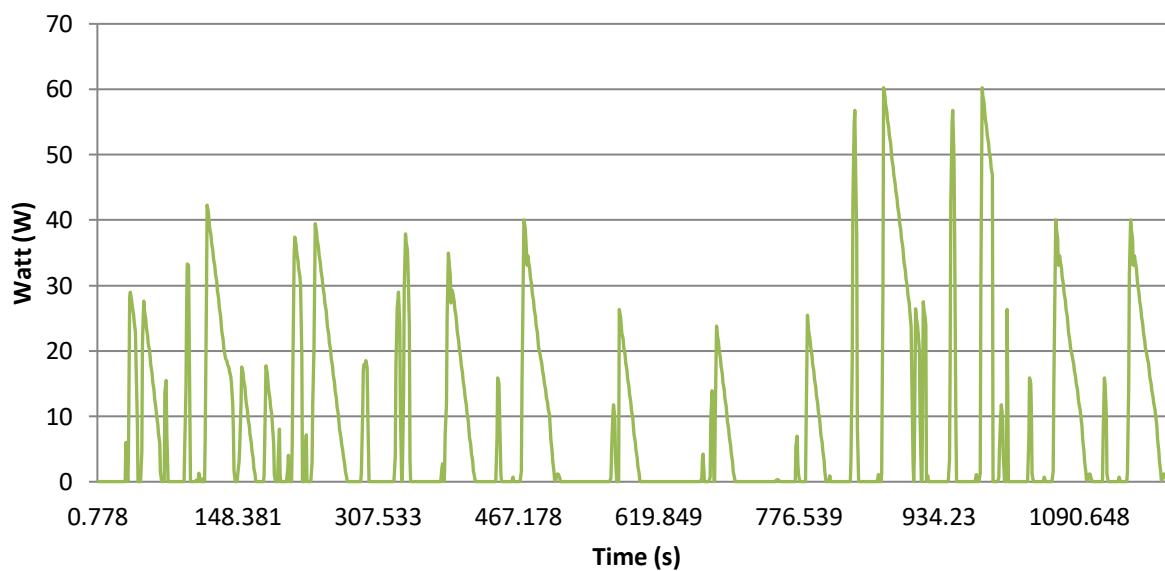
Διάγραμμα 27: Κατανάλωση κύκλου NEDC με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:10 και μέση κατανάλωση 0.7757 kWh/100km



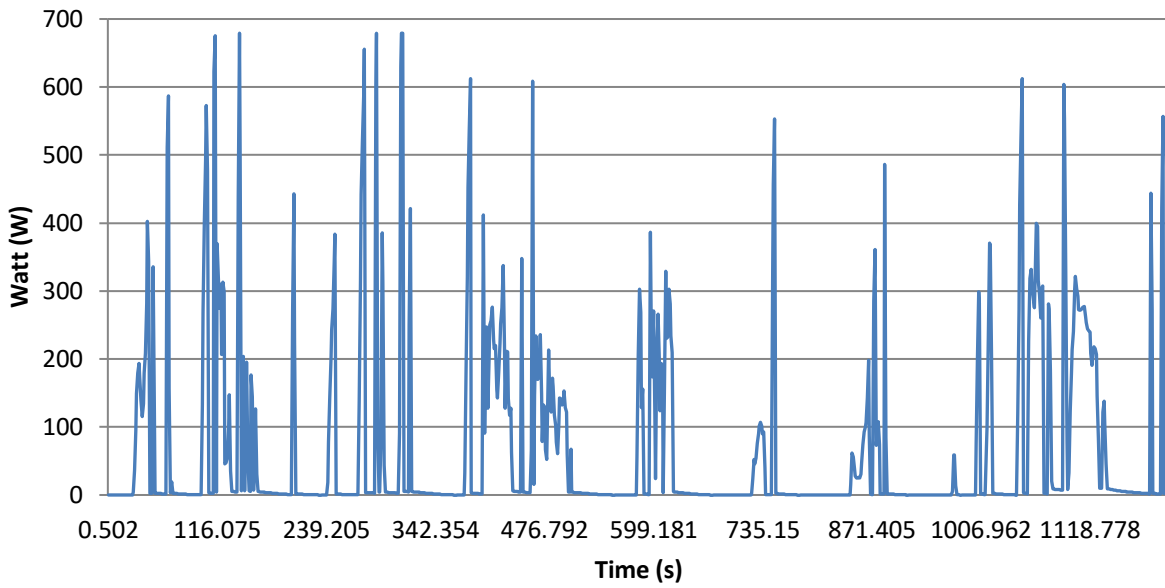
Διάγραμμα 28: Ανακτώμενη ενέργεια, κύκλου NEDC με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:10, με μέση τιμή 10.7135 W



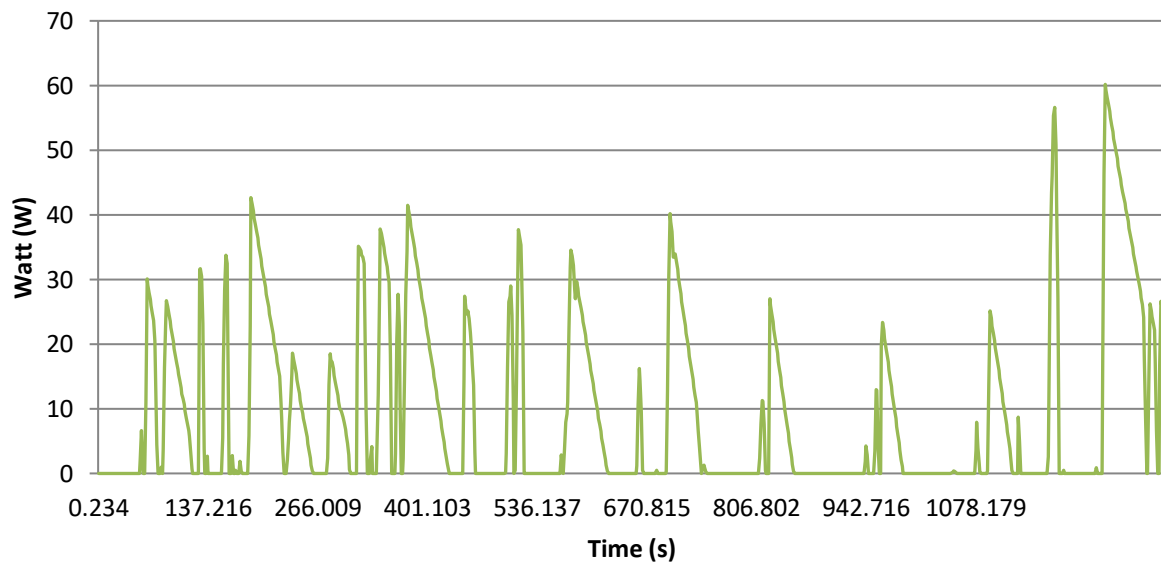
Διάγραμμα 29: Κατανάλωση κύκλου Japanese με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:8 και μέση κατανάλωση 0.7434 kWh/100km



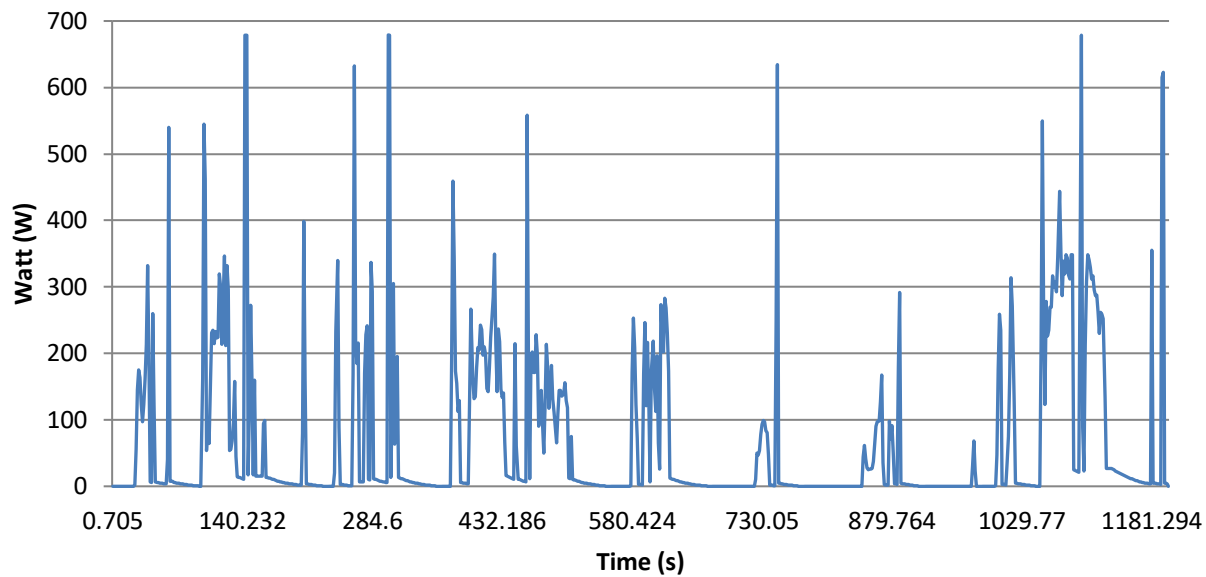
Διάγραμμα 30: Ανακτώμενη ενέργεια, κύκλου Japanese με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:8, με μέση τιμή 8.7654 W



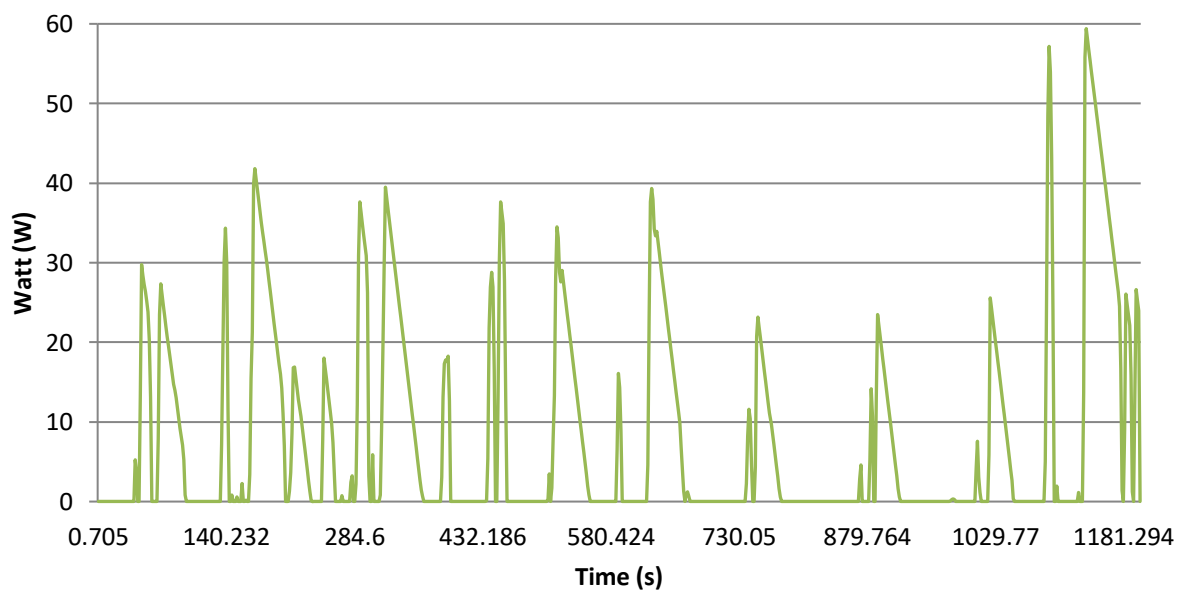
Διάγραμμα 31: Κατανάλωση κύκλου Japanese με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:6 και μέση κατανάλωση 1.0606 kWh/100km



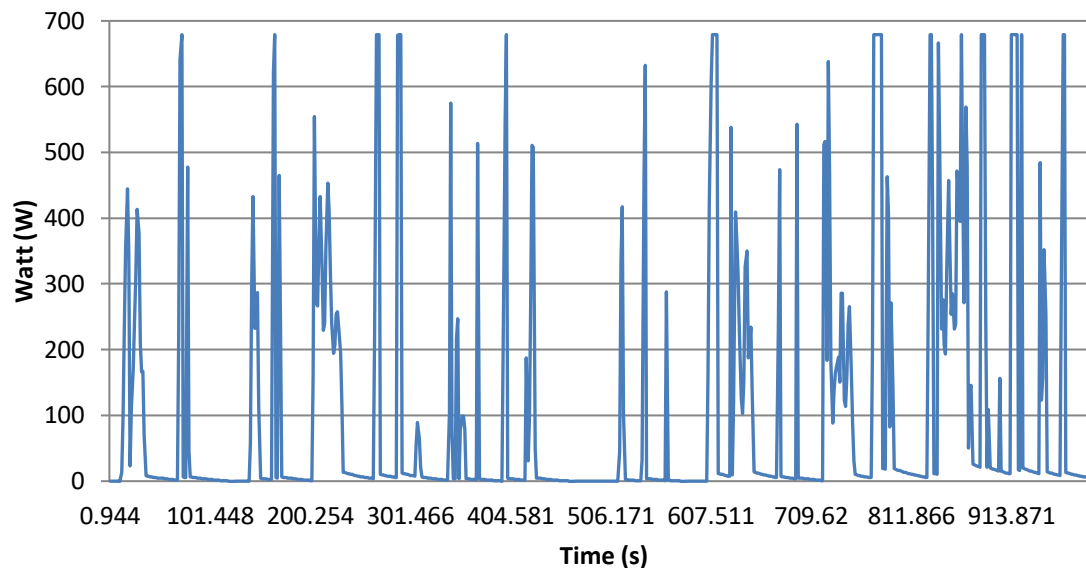
Διάγραμμα 32: Ανακτώμενη ενέργεια, κύκλου Japanese με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:6, με μέση τιμή 9.2467 W



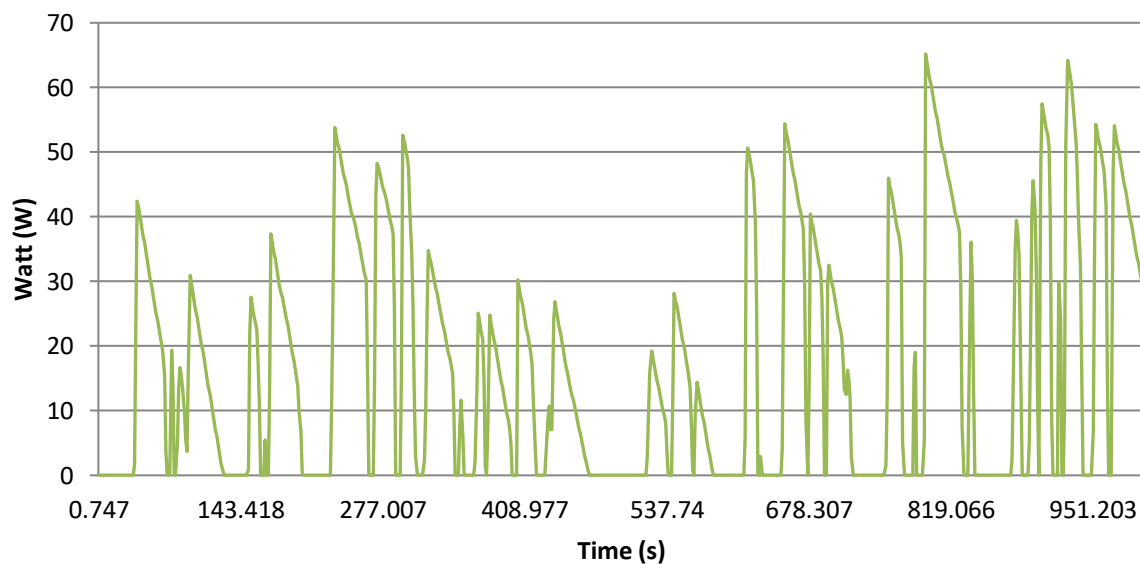
Διάγραμμα 33: Κατανάλωση κύκλου Japanese με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:10 και μέση κατανάλωση 1.0737 kWh/100km



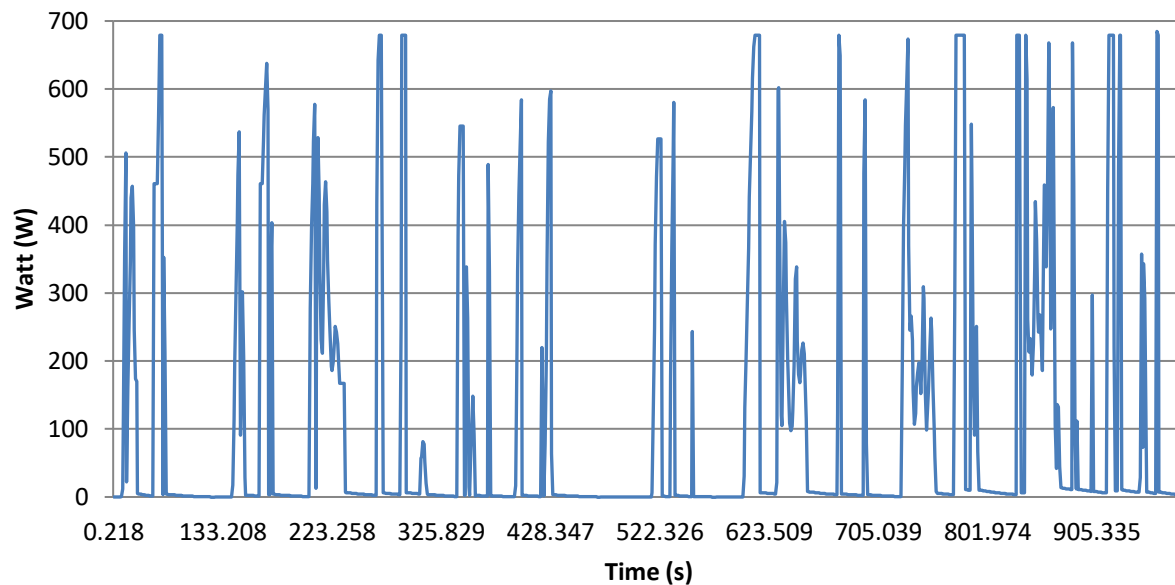
Διάγραμμα 34: Ανακτώμενη ενέργεια, κύκλου Japanese με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:10, με μέση τιμή 8.2917 W



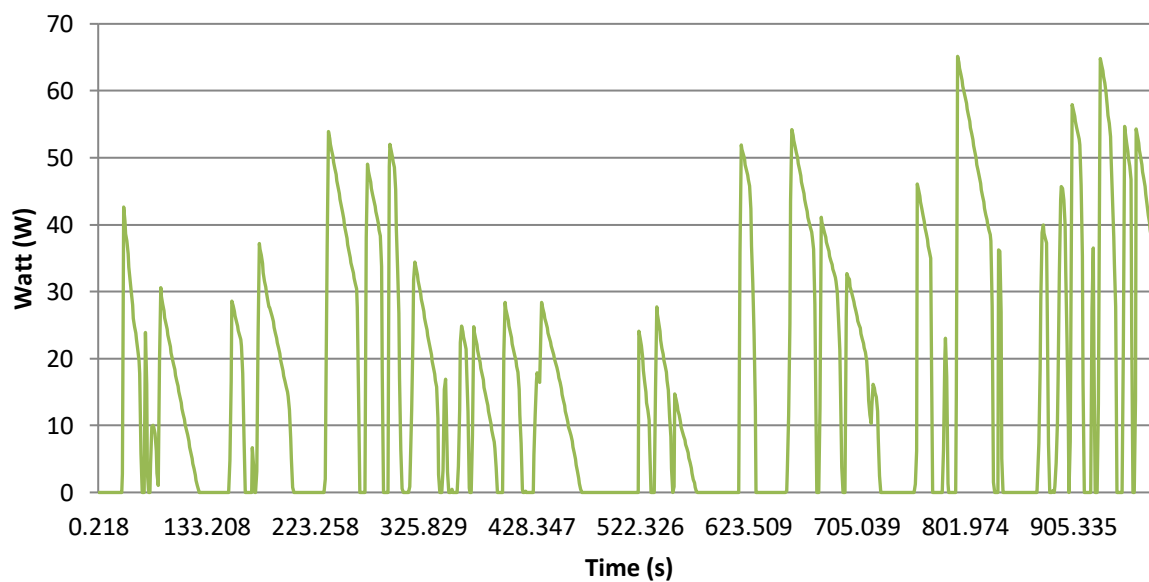
Διάγραμμα 35: Κατανάλωση κύκλου WLTC με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:8 και μέση κατανάλωση 0.7701 kWh/100km



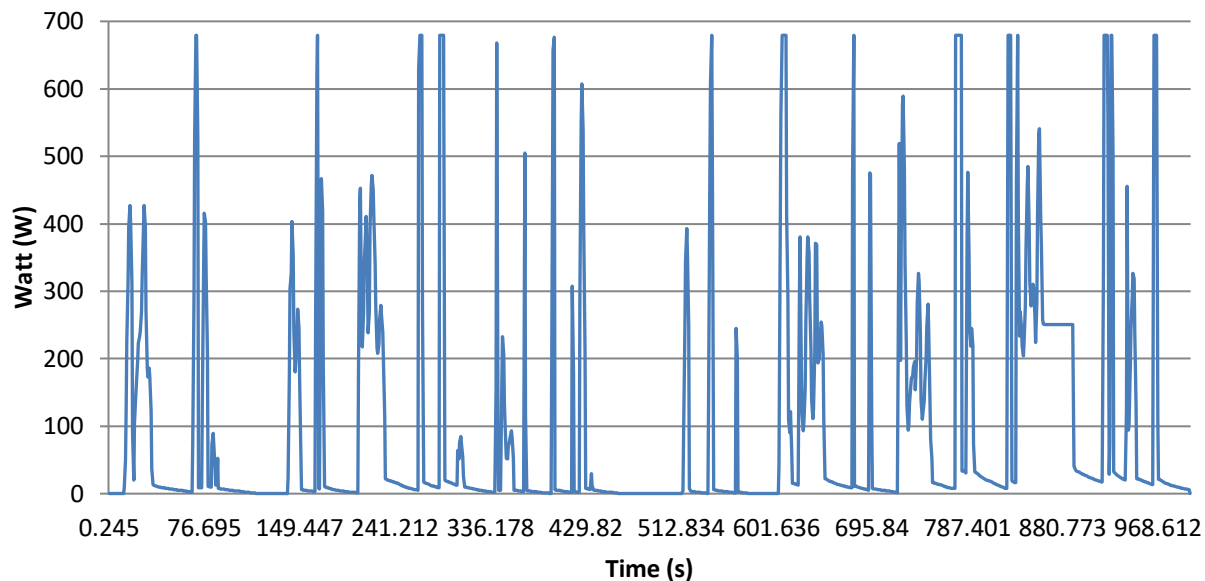
Διάγραμμα 36 Ανακτώμενη ενέργεια, κύκλου WLTC με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:8, με μέση τιμή 16.9908 W



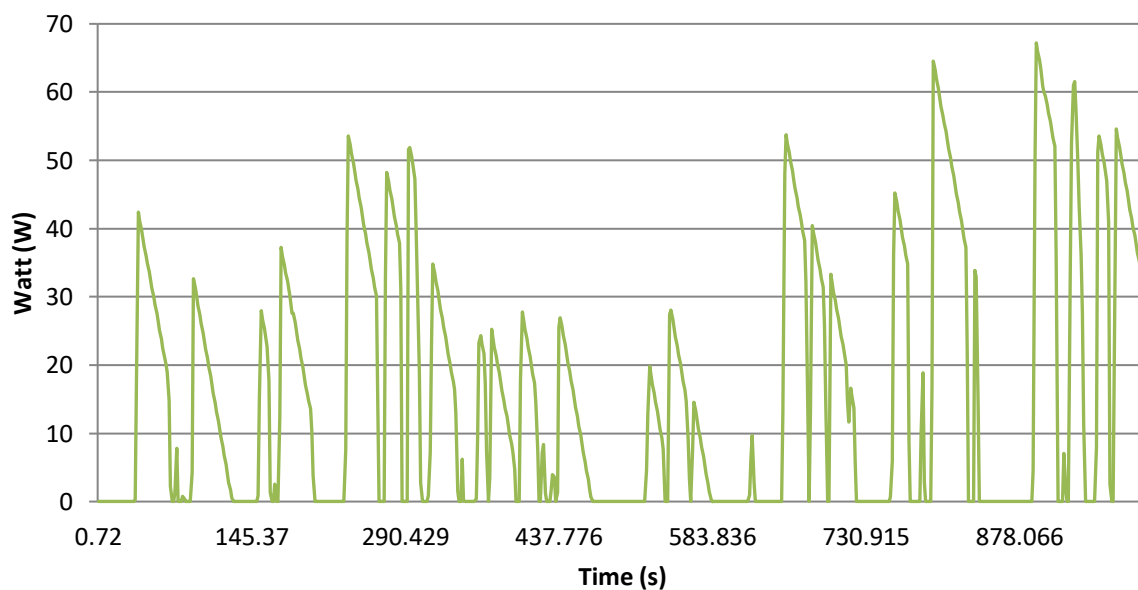
Διάγραμμα 37: Κατανάλωση κύκλου WLTC με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:6 και μέση κατανάλωση 1.2757 kWh/100km



Διάγραμμα 38: Ανακτώμενη ενέργεια, κύκλου WLTC με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:6, με μέση τιμή 16.6643 W



Διάγραμμα 39: Κατανάλωση κύκλου WLTC με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:6 και μέση κατανάλωση 1.4583 kWh/100km



Διάγραμμα 40: Ανακτώμενη ενέργεια, κύκλου WLTC με αναλογία μετάδοσης κίνησης 1:10, με μέση τιμή 16.1736 W

Στον Πίνακα 5, παρουσιάζεται η μέση κατανάλωση με τη λειτουργία της αναγεννητικής πέδησης.

	ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (kWh/100km) με REGENERATIVE BRAKING		
RATIO:	1:8	1:6	1:10
ARTEMIS URBAN	0.7661	0.7913(+4.1%)	0.7593(-0.88%)
NEDC	0.7811	0.8141(+4.22%)	0.7757(-0.7%)
JAPANESE	0.7434	0.7851(+5.6%)	0.7387(-0.63%)
WLTC	0.7701	0.8111(+5.3%)	0.7716 (+0.19%)

Πίνακας 5: Σύγκριση μέσης κατανάλωσης της σχέσης μετάδοσης 1:8 με τις σχέσεις 1:6 και 1:10 σε kWh/100km με αναγεννητική πέδηση

Όπως προηγουμένως, η σχέση μετάδοσης 1:8 με την 1:10 παρουσιάζουν την λιγότερη κατανάλωση καθώς η σχέση 1:6 παραμένει στην τελευταία θέση όσον αφορά την λιγότερη μέση κατανάλωση και στους τέσσερις κύκλους πόλης χωρίς και με τη λειτουργία αναγεννητικής πέδησης. Συγκεκριμένα, η προτιμότερη σχέση στους 3 πρώτους κύκλους, Artemis Urban, NEDC και Japanese, είναι η 1:10 αλλά με πολύ μικρή διαφορά στους 2 τελευταίους κύκλους πόλης. Στον κύκλο WLTC προηγείται ελάχιστα η σχέση 1:8 με την 1:10. Στον Πίνακα 6, παρουσιάζεται στην αριστερή στήλη της κάθε σχέσης μετάδοσης η κατανάλωση και αντίστοιχα στη δεξιά η ενέργεια που ανακτήθηκε, ανά κύκλο πόλης.

Όσον αφορά την κατανάλωση η πιο επιθυμητή σχέση είναι η 1:8 εκτός από τον κύκλο Nedc που η σχέση 1:10 είναι προτιμότερη. Πάλι έχει μικρές ποσοστιαίες αποκλίσεις από την σχέση 1:10 η 1:8 καθώς η σχέση 1:6 παραμένει ανεπιθύμητη και για τους κύκλους πόλης με λειτουργία regenerative braking. Η αποδοτικότερη αναγεννητική πέδηση πραγματοποιείται στον κύκλο Artemis Urban με 21.1% μέση ανακτώμενη ενέργεια και ακολουθεί ο WLTC κύκλος με μέση ανακτώμενη ενέργεια 16.3% μεταξύ των σχέσεων μετάδοσης. Ο κύκλος Japanese φτάνει στο 13.34% της κατανάλωσης σε ανακτώμενη ενέργεια.

	ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (W)			ΜΕΣΗ ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (W)		
RATIO:	1:8	1:6	1:10	1:8	1:6	1:10
ARTEMIS URBAN	75.588	15.998(21.16%)	78.547(+3.9%)	16.671(21.02%)	75.603(+0.1%)	15.718(20.8%)

NEDC	118.98 9	10.175(8.55%)	126.993(+6.7%)	10.729(8.44%)	116.659(- 1.95%)	10.714(9.18%)
JAPANESE	67.531	8.756(12.9%)	69.301(+2.6%)	9.246(13.34%)	68.305(+1.1%)	8.291(12.63%)
WLTC	99.704	16.991(16.3%)	106.473(+6.7%)	16.664(15.65%)	102.346(+2.6%)	16.173(15.7%)

Πίνακας 6: Σύγκριση μέσης κατανάλωσης της σχέσης μετάδοσης 1:8 με τις σχέσεις 1:6 και 1:10 σε W και ποσό ανακτημένης ενέργειας

Την λιγότερο αποτελεσματική αναγεννητική πέδηση σημειώνει ο κύκλος πόλης NEDC. Συγκεκριμένα, ενώ φτάνει στις υψηλότερες τιμές μέσης κατανάλωσης στις τρεις σχέσεις μετάδοσης ανακτά την χαμηλότερη μέση ενέργεια με μέση τιμή 8.72%. Παρατηρώντας τα ποσοστά ανακτημένης ενέργειας μεταξύ των σχέσεων μετάδοσης ανά κύκλο πόλης γίνεται εμφανές ότι η σχέση μετάδοσης δεν παίζει ρόλο στο ποσό ενέργειας που θα ανακτηθεί από την αναγεννητική πέδηση. Αναλυτικότερα, υπάρχει διαφορά της τάξης γύρω του 1% σε αυτά τα ποσοστά, το οποίο στην περίπτωση μας είναι ελάχιστο.

Στον πίνακα 7, παρουσιάζονται οι καταναλώσεις των κύκλων πόλης ανά σχέση μετάδοσης για τους τέσσερις κύκλους. Οι καταναλώσεις χωρίζονται σε δύο στήλες, στη μία είναι η μέση κατανάλωση χωρίς αναγεννητική πέδηση και στην επόμενη είναι η κατανάλωση με αναγεννητική πέδηση συμπεριλαμβάνοντας την ανακτημένη ενέργεια στην κατανάλωση αυτή. Στην τρίτη στήλη ανά σχέση μετάδοσης είναι το ποσοστό μείωσης της κατανάλωσης.

Αξίζει να σχολιαστεί ότι σε όλους τους κύκλους μειώνεται η κατανάλωση, δηλαδή όλοι οι κύκλοι επωφελούνται από την αναγεννητική πέδηση. Η μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας σημειώνεται στον κύκλο Artemis με σχέση μετάδοσης 1:6 η οποία ανέρχεται στο 21,42 (%).

RATIO:	1:8			1:6			1:10		
	ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (W)		Deviation (%)	ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (W)		Deviation (%)	ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (W)		Deviation (%)
	NO REGEN	REGEN		NO REGEN	REGEN		NO REGEN	REGEN	

ARTEMIS	72.911	59.589	18.271	78.749 4	61.876	21.427	74.204	59.884	19.298
NEDC	119.212	108.813	8.723	125.91 5	116.263	7.665	116.229	105.945	8.848
JAPANESE	68.197	58.775	13.815	70.813 7	60.055	15.193	67.921	60.0136	11.643
WLTC	101.414	82.713	18.440	103.83 9	89.809	13.511	98.602	86.1729	12.605

Πίνακας 7: Σύγκριση μέσης κατανάλωσης μεταξύ των σχέσεων μετάδοσης χωρίς και με αναγεννητική πέδηση ανά κύκλο πόλης

Στον πίνακα 8, παρουσιάζεται η κατανάλωση χωρίς το μοντέλο του regenerative braking (αριστερή στήλη) και με το μοντέλο του regenerative braking (δεξιά στήλη).

	ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ (kWh/100km)				ΜΕΣΗ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗ REGEN. (kWh/100km)	
RATIO:	1:8		1:6		1:10	
ARTEMIS URBAN	0.7619	0.7661(+0.54%)	0.802	0.7991(-0.3%)	0.769	0.7593(-1.27%)
NEDC	0.7798	0.7811(+0.11%)	0.815	0.8141(-0.11%)	0.775	0.7757(+0.04%)
JAPANESE	0.741	0.7434(+0.3%)	0.783	0.7851(+0.24%)	0.738	0.7380(+0.04%)
WLTC	0.7765	0.7701(-0.8%)	0.82	0.8111(-1.1%)	0.774	0.7716(-0.3%)

Πίνακας 8: Σύγκριση μέσης κατανάλωσης μεταξύ της ίδιας σχέσης μετάδοσης χωρίς και με αναγεννητική πέδηση ανά κύκλο πόλης

Με βάση τον παραπάνω πίνακα είναι ασφαλές να συμπεραίνουμε ότι η λειτουργία του regenerative braking δεν καταναλώνει επιπλέον ενέργεια. Αυτό φαίνεται και από τις ελάχιστες διαφορές που σημειώνονται στα ποσοστά ανάμεσα στην κατανάλωση με και χωρίς ενεργοποιημένη την αναγεννητική πέδηση. Τα αποτελέσματα της κατανάλωσης με αναγεννητική πέδηση είναι χωρίς τη λήψη της ανακτημένης ενέργειας, καθώς το πρόγραμμα δεν μπορεί να υπολογίσει την ενέργεια ανάκτησης σε μονάδα μέτρησης kWh/100km.

5. Συμπεράσματα

Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, κυρίως τύπου κυψελών υδρογόνου αποτελούν υψηλή θέση για μελλοντική χρήση στην αυτοκίνηση. Ένας από τους κύριους λόγους που τόσα χρόνια επισκιάζονται από τα συμβατικά οχήματα είναι η αυτονομία τους. Στην παρούσα εργασία προτείνονται τρόποι που αντιμετωπίζουν αυτό το πρόβλημα όπως, η βελτίωση της απόδοσης με εναλλαγή των γραναζιών μετάδοσης της κίνησης και με αναγεννητική πέδηση. Για την ορθότητα των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκε επικύρωση του οχήματος προσομοίωσης με το πραγματικό όχημα της ομάδας του Πολυτεχνείου Κρήτης. Στην συνέχεια προτάθηκε για πρώτη φορά μοντέλο αναγεννητικής πέδησης κατάλληλο για το όχημα «Σπύρος Λούης» των TUCer's. Το αμάξι αυτό έτρεξε τέσσερις γνωστούς κύκλους πόλης με εναλλαγή σχέσεων μετάδοσης. Αρχικά, με 1:8, 1:6, 1:10 σχέση μετάδοσης και στο τέλος έγινε το ίδιο με τη διαφορά ότι το όχημα ανακτά ενέργεια κατά το φρενάρισμα. Βάσει των αποτελεσμάτων, η προτιμότερη αναλογία ήταν η 1:8 και η 1:10 με μικρές μεταξύ τους αποκλίσεις. Η 1:6 σχέση μετάδοσης δεν ήταν σε κανέναν κύκλο και στις δύο περιπτώσεις (με και χωρίς regenerative braking), η οικονομικότερη. Όσον αφορά την αναγεννητική πέδηση τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εναλλαγή των σχέσεων μετάδοσης δεν έχει σημασία στο ποσό ενέργειας που θα ανακτηθεί. Τέλος, βάσει των τελικών καταναλώσεων όλοι οι κύκλοι πόλης συμφώνησαν ότι η λειτουργία της αναγεννητικής πέδησης μειώνει την κατανάλωση και δεν επιβαρύνει ενεργειακά την απόδοση του οχήματος.

Βιβλιογραφία

- [1] A. E. Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Sebastian E. Gay, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. Fundamentals, Theory, and Design.* .
- [2] “Electric motor – HiSoUR – Hi So You Are.” <https://www.hisour.com/electric-motor-40853/> (accessed May 30, 2021).
- [3] M. Guarnieri, “Electricity in the age of enlightenment [Historical],” *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 8, no. 3. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., pp. 60–63, Sep. 01, 2014, doi: 10.1109/MIE.2014.2335431.
- [4] “What are coreless DC motors?” <https://www.motioncontroltips.com/what-are-coreless-dc-motors/> (accessed May 30, 2021).
- [5] “What’s inside a battery? – How It Works.” <https://www.howitworksdaily.com/whats-inside-a-battery/> (accessed May 30, 2021).
- [6] “capacitor-electrolytic-structure-01.” [Online]. Available: <https://www.electronics-notes.com>.
- [7] T. Basics, “Fuel Cell Basics What is a fuel cell? How do fuel cells work?,” no. Dc, pp. 1–4, 2014, [Online]. Available: <https://americanhistory.si.edu/fuelcells/basics.htm>.
- [8] “Gas-tight Battery and Capacitor Lids | SCHOTT.” <https://www.schott.com/en-se/products/battery-and-capacitor-lids> (accessed May 30, 2021).
- [9] “How manual gearboxes work | How a Car Works.” <https://www.howacarworks.com/basics/how-manual-gearboxes-work> (accessed May 30, 2021).
- [10] “Cross Section Of A Car Gearbox. Stock Photo, Picture And Royalty Free Image. Image 91081857.” https://www.123rf.com/photo_91081857_cross-section-of-a-gearbov-.html (accessed May 30, 2021).
- [11] “Vehicle Dynamics :: Sgeorgantzinos.” <https://sgeorgantzinos.webnode.gr/vehicle-dynamics/> (accessed May 30, 2021).

- [12] “AutoZine Technical School - Aerodynamics.”
https://www.autozine.org/technical_school/aero/tech_aero.htm (accessed May 30, 2021).
- [13] “Tyre dynamics - Racecar Engineering.” <https://www.racecar-engineering.com/tech-explained/tyre-dynamics/> (accessed May 30, 2021).
- [14] “How the braking system works | How a Car Works.”
<https://www.howacarworks.com/basics/how-the-braking-system-works> (accessed May 30, 2021).
- [15] “How Regenerative Braking Works in Electric Vehicles.” <https://circuitdigest.com/article/how-regenerative-braking-works-in-electric-vehicles> (accessed May 30, 2021).
- [16] “back-emf-in-DC-motor-fig-2-compressor1.” [Online]. Available: <https://circuitglobe.com/what-is-back-emf-in-dc-motor.html>.
- [17] G. Moschopoulos, “Ανάπτυξη δυναμικού μοντέλου ηλεκτρικού οχήματος για την αξιολόγηση της κατανάλωσης ενέργειας,” Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2018.
- [18] S. Heydari, P. Fajri, M. Rasheduzzaman, and R. Sabzehgar, “Maximizing regenerative braking energy recovery of electric vehicles through dynamic low-speed cutoff point detection,” *IEEE Trans. Transp. Electrif.*, vol. 5, no. 1, pp. 262–270, 2019, doi: 10.1109/TTE.2019.2894942.
- [19] T. C. Morphology, *ELECTRIC AND HYBRID VEHICLES Technologies, Modeling and Control: A Mechatronic Approach*.
- [20] P. Spanoudakis, G. Moschopoulos, T. Stefanoulis, N. Sarantinoudis, E. Papadokokolakis, I. Ioannou, S. Piperidis, L. Doitsidis, N. C Tsourveloudis, “Efficient Gear Ratio Selection of a Single-Speed Drivetrain for Improved Electric Vehicle Energy Consumption,” *Sustainability*, vol.12, 2020, 9254.