

# ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

# Ανάπτυξη Συστήματος Κίνησης για Πρωτότυπο Ηλεκτρικό Όχημα<sup>¬</sup>



Διατριβή που υπεβλήθη για την μερική ικανοποίηση των απαιτήσεων για την απόκτηση Μεταπτυχιακού Διπλώματος Ειδίκευσης υπό

# Ευσταθίου Σ. Δημήτριο

Χανιά 2012

Εργαστήριο Ευφυών Συστημάτων & Ρομποτικής

#### Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Νικόλαος Τσουρβελούδης Καθηγητής Τμήματος ΜΠΔ, Πολυτεχνείου Κρήτης Επιβλέπων Καθηγητής

Ιωάννης Νικολός Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήματος ΜΠΔ, Πολυτεχνείου Κρήτης

Ευστράτιος Ιωαννίδης Αναπληρωτής Καθηγητής Τμήματος ΜΠΔ, Πολυτεχνείου Κρήτης

# Ευχαριστίες

Κατά τη διάρκεια όλων των σταδίων του μεταπτυχιακού μου συνεργάστηκα με αρκετούς ανθρώπους και γι' αυτό το λόγο θέλω να τους ευχαριστήσω.

Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντά μου, Καθηγητή κ. Νικόλαο Τσουρβελούδη, για την εμπιστοσύνη και τη στήριξη που μου έδειξε αυτά τα χρόνια. Επίσης τον ευχαριστώ γιατί μου παρείχε κάθε είδος εξοπλισμού που χρειαζόμουν.

Τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Ιωάννη Νικολό και τον Επίκουρο Καθηγητή κ. Ευστράτιο Ιωαννίδη για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή.

Τον κ. Σπανουδάκη Πολυχρόνη, υποψήφιο διδάκτορα του τμήματος Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης και επικεφαλή της ερευνητικής ομάδας TUCER, για τη συμμετοχή μου στην ομάδα TUCER από το 2007 μέχρι το 2012 καθώς και για τις συνεχώς αναβαθμιζόμενες αρμοδιότητές μου σε αυτήν.

Τον κ. Πιπερίδη Σάββα, ΕΤΕΠ του Εργαστηρίου Ευφυών Συστημάτων & Ρομποτικής, για την άψογη συνεργασία μας σε όλα τα επίπεδα.

Τον Πέτρου Αναστάσιο, μεταπτυχιακό φοιτητή για τη συνεργασία μας αυτά τα δυο χρόνια.

Τον Χατζηδάκη Γιώργο για τη συνεργασία μας για τη σχεδίαση και κατασκευή του ηλεκτρικού συστήματος κίνησης του οχήματος "ER12".

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τα μέλη της ομάδας TUCER, Τσινάρη Ιωάννη, Στρατηγό Ιωάννη, Τζανάκη Θάνο και Μπάζιο Παναγιώτη για την άψογη συνεργασία μας.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που για τη στήριξη που μου παρείχε κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Αφιερώνεται στην οικογένειά μου

#### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη παρούσα μεταπτυχιακή εργασία αναπτύσσεται το σύστημα ηλεκτρικής κίνησης του αστικού οχήματος "ER12". Παρουσιάζεται η δομή του συγκεκριμένου συστήματος καθώς και αποτελέσματα από τη δοκιμή του. Επίσης αναπτύσσεται σε περιβάλλον Simulink/Matlab μοντέλο προσομοίωσης του οχήματος και εξάγονται αποτελέσματα. Τέλος συγκρίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα με αυτά της προσομοίωσης και εξάγονται συμπεράσματα.

Το όχημα "ER12" σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε εξ' ολοκλήρου από την ομάδα Technical University of Crete Eco Racing (<u>www.tucer.tuc.gr</u>) στα εργαστήρια Ευφυών Συστημάτων & Ρομπτικής και Διατμηματικό Εργαστήριο Εργαλειομηχανών του Πολυτεχνείου Κρήτης. Συμμετείχε στο διεθνή διαγωνισμό οικονομίας καυσίμου Shell Eco-marathon 2012 όπου απέσπασε τη 4<sup>η</sup> θέση στη κατηγορία του.

# Πίνακας περιεχομένων

1.	Εισαγωγή στα ηλεκτρικά/ υβριδικά οχήματα	8
	1.1 Ιστορική αναδρομή ηλεκτρικών / υβριδικών οχημάτων	6
	1.1.1. Ιστορία αμιγώς ηλεκτρικού οχήματος	8
	1.1.2. Ιστορία των οχημάτων με κυψέλες καυσίμου	9
	1.1.3. Ιστορία των υβριδικών οχημάτων	9
	1.2 Δομή συστημάτων κίνησης ηλεκτρικών / υβριδικών οχημάτων	8
	1.2.1. Δομή συστημάτων κίνησης ηλεκτρικών οχημάτων	10
	1.2.2. Δομή συστημάτων κίνησης υβριδικών οχημάτων	11
	1.3 Βασικά στοιχεία συστημάτων κίνησης ηλεκτρικών οχημάτων	12
	1.3.1 Ηλεκτρικοί Κινητήρες	13
	1.3.1. Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας ηλεκτρικών οχημάτων	15
	1.3.1. Κυψέλες καυσίμου	18
2.	Σύστημα κίνησης πρωτότυπου ηλεκτρικού οχήματος "ER12"	21
	2.1. Εισαγωγή	21
	2.2. Δομή του συστήματος κίνησης του ηλεκτρικού οχήματος "ER12"	21
	2.3. Κύρια στοιχεία συστήματος κίνησης ηλεκτρικού οχήματος "ER12"	22
3.	Ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης και εξαγωγή αποτελεσμάτων	27
	3.1. Περιγραφή του μοντέλου προσομοίωσης	24
	3.2 Εξαγωγή αποτελεσμάτων από το μοντέλο προσομοίωσης	26
4.	Πειραματικές δοκιμές και εξαγωγή αποτελεσμάτων	32
	4.1. Εισαγωγή	29
	4.2. Πειραματική Δοκιμή 1	29
	4.3. Πειραματική δοκιμή 2	34
	4.4. Πειραματική δοκιμή 3	37
	4.5. Πειραματική δοκιμή 4	40
		-

	4.6. Συμπεράσματα	44
5.	Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τα πειραματικά αποτελέσματα	45
	5.1 Εισαγωγή	45
	5.2 Σύγκριση πειράματος 1 –Προσομοίωσης	45
	5.3. Σύγκριση πειράματος 2 –Προσομοίωσης	47
	5.4 Σύγκριση πειράματος 3 –Προσομοίωσης	48
	5.5 Σύγκριση πειράματος 4 –Προσομοίωσης	50
	5.6 Συμπεράσματα	52
6	Συμπεράσματα	54
	Βιβλιογραφία	55

# 1. Εισαγωγή στα ηλεκτρικά/ υβριδικά οχήματα

# 1.1. Ιστορική αναδρομή ηλεκτρικών / υβριδικών οχημάτων

#### 1.1.1. Ιστορία αμιγώς ηλεκτρικού οχήματος

Η ιστορία των ηλεκτροκίνητων οχημάτων ξεκίνησε στα μέσα του 19ου αιώνα [1]. Μέσα σε αυτά τα χρόνια τα ηλεκτροκίνητα οχήματα πέρασαν από πολλά στάδια ακμής και αφάνειας. Οι πρώτες προσπάθειες για δημιουργία ενός μηχανοκίνητου οχήματος το οποίο να κινείται με ηλεκτρισμό χρονολογείται τη δεκαετία του 1830. Κάπου μεταξύ του 1832 και 1839, χωρίς ιδιαίτερη βεβαιότητα, ο σκωτσέζος Robert Anderson εφηύρε ένα πρώτο αρκετά πρόχειρο αυτοκίνητο όχημα που κινούταν με ηλεκτρισμό. Την ίδια εποχή (1835) ο ολλανδός καθηγητής Stratingh του Groningen έφτιαξε ένα μικρού μεγέθους όχημα. Αυτές οι πρώτες εφευρέσεις είχαν καθαρά δοκιμαστικό χαρακτήρα καθώς και οι ηλεκτρικοί κινητήρες που υπήρχαν ήταν πειραματικοί και μη εφαρμόσιμοι στην πράξη. Το πρώτο ηλεκτρικό αυτοκίνητο φτιάχνεται από τον βρετανό Gaston Parker το 1884 χρησιμοποιώντας ηλεκτρικό κινητήρα συνεχούς ρεύματος και ως πηγή ηλεκτρικής ισχύος χρησιμοποίησε επαναφορτιζόμενες μπαταρίες μολύβδου-οξέος. Μέχρι τη δεκαετία του 1920 η ανάπτυξη της εμπορικότητας που παρουσίασαν τα ηλεκτρικά οχήματα ήταν αρκετά μεγάλη. Για παράδειγμα το 1890 ο αριθμός των αυτοκινήτων που πουλήθηκαν στην Αμερική ήταν περίπου 4200 εκ των οποίων το 38% ήταν ηλεκτροκίνητα, το 22% βενζινοκίνητα και το 40 % ατμοκίνητα. Το βασικό πλεονέκτημα των ηλεκτρικών οχημάτων σε σχέση με τα βενζινοκίνητα και τα ατμοκίνητα ήταν ότι είχαν πολύ πιο εύκολη εκκίνηση, αφού αρκούσε το "κλείσιμο" ενός διακόπτη για να ξεκινήσει απ' ευθείας. Αντίθετα, τα βενζινοκίνητα οχήματα απαιτούσαν χειροκίνητη εκκίνηση, ενώ τα ατμοκίνητα απαιτούσαν μια προθέρμανση που διαρκούσε περίπου 45 λεπτά.

Από το 1900 και για τα επόμενα 30 χρόνια έγιναν πολλές βελτιώσεις στα αυτοκίνητα βενζίνης πετυχαίνοντας τη μείωση του θορύβου καθώς και την μείωση των εκπεμπόμενων καυσαερίων. Επίσης ανακαλύπτεται την δεκαετία του 1920 ο ηλεκτρικός εκκινητής επομένως δεν απαιτείται χειροκίνητη εκκίνηση. Σημαντικό παράγοντα διαδραματίζει ο Henry Ford ο οποίος εφαρμόζει γραμμή μαζικής παραγωγής και πετυχαίνει να παράγει αξιόπιστα αυτοκίνητα με κινητήρες εσωτερικής καύσης (μοντέλο T) σε πολύ πιο χαμηλές τιμές από ότι τα ηλεκτρικά οχήματα. Ταυτόχρονα τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα δεν σημειώνουν σημαντική πρόοδο. Καταλυτικός παράγοντας επίσης αποτελεί το γεγονός ότι μέχρι το 1930 τα οδικά δίκτυα βελτιώνονται αισθητά και τα ηλεκτρικά οχήματα αδυνατούν πλέον καλύψουν αποστάσεις μεταξύ πόλεων λόγο της μικρής εμβέλειας τους. Έτσι επικρατεί το αυτοκίνητο με κινητήρα εσωτερικής καύσης ενώ η τεχνολογική πρόοδος των ηλεκτρικών οχημάτων έρχεται σε ξαφνικό τερματισμό.

Το μεσοδιάστημα 1930 με 1990 αποτελεί "νεκρή περίοδο" για το ηλεκτρικό αυτοκίνητο και μονάχα ελάχιστες απόπειρες σημειώνονται για επαναφορά του ηλεκτρικού αυτοκινήτου.

Στην δεκαετία του 1990 η συνεχώς αυξανόμενη τιμή του πετρελαίου και ταυτόχρονα η περιβαλλοντολογική ανάγκη για μείωση των εκπομπών ρύπων επαναφέρουν το ηλεκτρικό αυτοκίνητο στο προσκήνιο. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει ο "Νόμος της

Καλιφόρνιας" για μείωση των εκπομπών ρύπων ο οποίος προέβλεπε την ότι το μερίδιο αγοράς αυτοκινήτων με μηδενική εκπομπή ρύπων στην Καλιφόρνια θα ανέρχεται στο 2% της συνολικής αγοράς μέχρι το 1998 και στο 10% μέχρι το 2003. Παρατηρείται έτσι μια έντονη κινητικότητα για παραγωγή αυτοκινήτων με μηδενική εκπομπή ρύπων και το 1996 η General Motor θέτει σε εμπορική παραγωγή το EV-1, ένα sport αυτοκίνητο με εξαιρετικές επιδόσεις και εμβέλεια από 80 μέχρι 140 μίλια. Παράλληλα οι ιαπωνικές αυτοκινητοβιομηχανίες Τοyota και Honda εισέρχονται στην αγορά υβριδικών αυτοκινήτων με την κυκλοφορία των Prius και Insight αντίστοιχα. Έπειτα από λίγα χρόνια η Αμερικάνική κυβέρνηση ανακήρυξε ως παράνομο του Νόμου της Καλιφόρνιας και η General Motor το 2003 εγκατέλειψε ξαφνικά του πρόγραμμα ηλεκτρικών αυτοκινήτων και απέσυρε όλα τα EV-1 από την αγορά.

#### 1.1.2. Ιστορία των οχημάτων με κυψέλες καυσίμου

To 1839 o Sir William Grove ανακάλυψε ότι είναι δυνατό να παραχθεί ηλεκτρισμός αντιστρέφοντας την ηλεκτρόλυση του νερού [1]. Μόλις το 1889 δύο ερευνητές, ο Charles Langer και ο Ludwig Mond, εισήγαγαν τον όρο "fuel cell" καθώς προσπαθούσαν να δημιουργήσουν την πρώτη πρακτική κυψέλη καυσίμου χρησιμοποιώντας αέρα και αέριο άνθρακα. Οι νέες προσπάθειες για ουσιαστική λήψη ηλεκτρισμού από άνθρακα έμειναν στα χαρτιά λόγω της ανάπτυξης των μηχανών εσωτερικής καύσης.

Η πρώτη ουσιαστικά επιτυχημένη κυψέλη καυσίμου δημιουργήθηκε το 1932 από τον Francis Bacon, με μια κυψέλη υδρογόνου-οξυγόνου χρησιμοποιώντας αλκαλικούς ηλεκτρολύτες και ηλεκτρόδια νικελίου. Λόγω τεχνικών προβλημάτων, μόλις το 1959 κατόρθωσε ο Bacon και η εταιρία του να παράγει ένα πρακτικό σύστημα κυψέλης καυσίμου ισχύος 5kW. Ο Harry Karl Ihring παρουσίασε το περίφημο τρακτέρ του που κινούνταν τροφοδοτούμενο από μια κυψέλη καυσίμου των 20 hp την ίδια χρονιά. Η NASA επίσης χρηματοδότησε την έρευνα γύρω από την τεχνολογία των κυψελών καυσίμων με απώτερο σκοπό τη χρήση τους για διαστημικές εφαρμογές. Στις μέρες μας, οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούνται σε διαστημικές αποστολές ως πηγές ενέργειας. Στις τελευταίες δεκαετίες, η έρευνα σχετικά με τις κυψέλες καυσίμου αποτελεί κυρίαρχο ενδιαφέρον και για τις αυτοκινητοβιομηχανίες. Η παραγωγή υδρογόνου, η αποθήκευση και η διανομή του αποτελούν των ηλεκτρικών οχημάτων. Ωστόσο, απαιτείται σημαντικό χρονικό διάστημα προτού καταστεί δυνατή η εμπορική διάθεσή τους στην αγορά.

#### 1.1.3. Ιστορία των υβριδικών οχημάτων

Η έννοια των υβριδικών οχημάτων είναι τόσο παλιά όσο και η αυτοκίνηση. Ο κύριος λόγος ήταν η διευκόλυνση της μηχανής εσωτερικής καύσης ώστε να προσδώσει ένα ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης. Όντως, τα πρώτα χρόνια η τεχνολογία των ηλεκτροκινητήρων ήταν πιο προχωρημένη από την τεχνολογία των μηχανών εσωτερικής καύσης. Τα πρώτα υβριδικά οχήματα παρουσιάστηκαν στο σαλόνι αυτοκινήτου του Παρισιού το 1899 [1]. Το πρώτο από τα δύο μοντέλα που παρουσιάστηκαν ήταν ένα παράλληλο υβριδικό όχημα με μια μικρή μηχανή εσωτερικής καύσης που υποβοηθούνταν από έναν ηλεκτροκινητήρα και συσσωρευτή οξέος-μολύβδου. Η ΜΕΚ φόρτιζε το συσσωρευτή όταν το όχημα ήταν σε στάση ή κινούνταν στο ρελαντί. Το δεύτερο μοντέλο ήταν ένα υβριδικό όχημα σειράς, ένα τρίκυκλο με τους πίσω τροχούς να κινούνται από ηλεκτροκινητήρες και μια ΜΕΚ ισχύος 0.75 hp σε συνδυασμό με μια γεννήτρια ισχύος 1.1kW σε τρέιλερ που μπορούσε να επαναφορτίζει το συσσωρευτή. Στο διάστημα από το 1899 μέχρι το 1914 παρουσιάστηκαν διάφοροι τύποι υβριδικών οχημάτων, παράλληλων ή σειριακών. Σε καμία περίπτωση δε χρησιμοποιήθηκε η αναγεννητική πέδηση αλλά μάλλον προτιμήθηκε η δυναμική πέδηση. Το κυρίαρχο χαρακτηριστικό σε όλα τα προτεινόμενα υβριδικά οχήματα της περιόδου αυτής ήταν ότι κατασκευάστηκαν για να υποβοηθήσουν τις ασθενείς ΜΕΚ της εποχής ή για να επεκτείνουν την αυτονομία των ηλεκτρικών οχημάτων. Ωστόσο, μετά τον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο οι μεγάλες βελτιώσεις των ΜΕΚ σε θέματα ισχύος, μεγέθους, απόδοσης και εκκίνησης, το κόστος των ηλεκτροκινητήρων και οι κίνδυνοι των συσσωρευτών οξέος εξάλειψαν τελείως τα υβριδικά οχήματα από την αγορά – όπως και τα ηλεκτρικά. Η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος και η βελτίωση του τρόπου ελέγχου των ηλεκτροκινητήρων αναθέρμανε το ενδιαφέρον για τα υβριδικά οχήματα στα τέλη της δεκαετίας του 1960. Νέοι τύποι υβριδικών οχημάτων παρουσιάστηκαν, κανένα όμως δεν έφτασε στο επίπεδο της αγοράς παρά τις δύο πετρελαϊκές κρίσεις του 1973 και του 1977 και την ανάγκη για περισσότερο οικολογικά οχήματα. Όταν πλέον στη δεκαετία του 1990 έγινε ξεκάθαρο ότι τα ηλεκτρικά οχήματα δεν θα μπορούσαν ποτέ να κυκλοφορήσουν στην αγορά, τότε το ενδιαφέρον για τα υβριδικά οχήματα αυξήθηκε κατακόρυφα. Η εταιρία Ford μάλιστα ξεκίνησε ένα διαγωνισμό (Ford Hybrid Electric Vehicle Challenge) για την κατασκευή υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων από Πανεπιστήμια κυρίως. Πολλές αυτοκινητοβιομηχανίες, όπως η Dodge, η Renault, η Volkswagen, η Toyota κλπ. δημιούργησαν πρωτότυπα υβριδικά οχήματα αλλά το ευκταίο, δηλαδή η δημιουργία ενός εμπορικού οχήματος, δεν επιτεύχθηκε παρά μόνο στην αυγήτου 21ου αιώνα. Το 1997 κυκλοφόρησε στην Ιαπωνία το Toyota Prius sedan καθώς επίσης και τα Honda Insight και Civic. Τα οχήματα αυτά είναι πλέον διαθέσιμα σε όλον τον κόσμο και έχουν εξαιρετικά χαρακτηριστικά κατανάλωσης καυσίμου. Το Toyota Prius και το Honda Insight έχουν ιστορική αξία καθώς αποτελούν τα πρώτα εμπορικά υβριδικά οχήματα της σύγχρονης εποχής.

# 1.2. Δομή συστημάτων κίνησης ηλεκτρικών / υβριδικών οχημάτων

#### 1.2.1 Δομή συστημάτων κίνησης ηλεκτρικών οχημάτων

Το σύστημα κίνησης ενός σημερινού ηλεκτρικού αυτοκινήτου αποτελείται από τα εξής υποσυστήματα: τον ηλεκτρικό κινητήρα, το μετατροπέας ισχύος, τη πηγή ενέργειας, τη μονάδα ελέγχου και το σύστημα μετάδοσης της κίνησης.

Στα παρακάτω σχήματα απεικονίζονται τα παραπάνω υποσυστήματα σε ένα ηλεκτρικό όχημα με κυψέλες καυσίμου και σε ένα ηλεκτρικό όχημα με μπαταρίες.



Εικόνα 1: Σύστημα κίνησης ηλεκτρικού οχήματος με κυψέλες καυσίμου



Εικόνα 2: Σύστημα κίνησης αμιγώς ηλεκτρικού οχήματος

#### 1.2.2 Δομή συστημάτων κίνησης υβριδικών οχημάτων

#### 1.2.2.1. Σειριακή διάταξη

Σε αυτό το είδος διάταξης, ο θερμικός κινητήρας είναι συνδεδεμένος σε σειρά με το ηλεκτρικό σύστημα και όχι με τους κινητήριους τροχούς. Ο προορισμός του είναι να φορτίσει το μέσο αποθήκευσης της ενέργειας στρέφοντας μία γεννήτρια η οποία είναι συνδεδεμένη μηχανικώς με τον άξονα του. Η πρόωση του οχήματος γίνεται εφικτή λόγω της ύπαρξης του ηλεκτροκινητήρα ο οποίος αντλεί ενέργεια από τις μπαταρίες ή απ' ευθείας από τη γεννήτρια. Επομένως η κίνηση του οχήματος είναι καθαρά ηλεκτρική.

Τα πλεονεκτήματα της σειριακής διάταξης είναι ότι ο θερμικός κινητήρας ρυθμίζεται στις στροφές που έχει μέγιστη απόδοση λόγω του ότι μπορεί να περιστραφεί ανεξάρτητα από τη διάταξη πρόωσης καθώς και η απλοποίηση του συστήματος της μετάδοσης κίνησης καθώς το κιβώτιο ταχυτήτων και το διαφορικό του θερμικού κινητήρα απουσιάζουν.



Εικόνα 3: Σειριακή διάταξη υβριδικού οχήματος

#### 1.2.2.2. Παράλληλη διάταξη

Η παράλληλη διάταξη αποτελεί την πιο διαδεδομένη τοπολογία κινητήριου συστήματος σε υβριδικά οχήματα, στην οποία η κίνηση στους τροχούς δίνεται είτε από τον ηλεκτροκινητήρα είτε από τον κινητήρα εσωτερικής καύσης είτε και από τους δύο ταυτόχρονα. Σε αυτή τη διάταξη απαιτείται κιβώτιο ταχυτήτων καθώς η ΜΕΚ συνδέεται με τους τροχούς, αλλά και συμπλέκτη που να συνοδεύεται από μία υπολογιστική μονάδα για τον έλεγχο της κατανομής της ισχύος ανά πάσα στιγμή. Η διάταξη αυτή έχει καλύτερη απόδοση συγκριτικά με τη σειριακή σε μακρινές και πιο απαιτητικές διαδρομές.



Εικόνα 4: Παράλληλη διάταξη υβριδικού οχήματος

#### 1.2.2.3. Σειριακή-Παράλληλη διάταξη

Στη σειριακή-παράλληλη διάταξη παρατηρείται τόσο η ύπαρξη γεννήτριας όσο και η σύνδεση της ΜΕΚ και του ηλεκτρικού κινητήρα με τους τροχούς. Αυτή η διάταξη έχει τα πλεονεκτήματα τόσο της σειριακής όσο και της παράλληλης τοπολογίας. Είναι ευρέως διαδεδομένη λύση αν και αρκετά πιο πολύπλοκη και ακριβή. Η κίνηση παρέχεται και από τους δύο κινητήρες ή από καθέναν ξεχωριστά. Ο βενζινοκινητήρας μπορεί να φορτίζει, απλώς, τις μπαταρίες ή και να συμβάλει συγχρόνως στην κίνηση.



Εικόνα 5: Σειριακή - Παράλληλη διάταξη υβριδικού οχήματος

# 1.2.2.4. Σύνθετη διάταξη

Πρόκειται για μία παραλλαγή της σειριακής – παράλληλης διάταξης. Είναι κι αυτή μία πολύπλοκη, ακριβή αλλά αποδοτική λύση. Η μεγάλη διαφορά από τη συγγενή της διάταξη είναι η χρήση της γεννήτριας κι ως κινητήρα όταν υπάρχει ανάγκη για αυξημένη ισχύ. Μπορεί λοιπόν να εφαρμοστεί σε οχήματα που διαθέτουν, για συγκεκριμένες περιπτώσεις, κίνηση και στους δύο άξονες

# 1.2.2.5. Ανεξάρτητη διάταξη

Η ανεξάρτητη διάταξη διαθέτει ηλεκτροκινητήρα και ΜΕΚ όπως η παράλληλη διάταξη. Η διαφορά ανάμεσα τους είναι ότι στην ανεξάρτητη τοπολογία οι δύο κινητήρες δεν έχουν καμία σύνδεση μεταξύ τους. Η μηχανή εσωτερικής καύσης κινεί το ένα ζεύγος τροχών και ο ηλεκτροκινητήρας το άλλο. Η σύνδεση μεταξύ τους γίνεται μόνο μέσω του δρόμου. Αυτή η διάταξη μπορεί να βρει εφαρμογή σε τετρακίνητα οχήματα χωρίς να απαιτείται τοποθέτηση άξονα μετάδοσης και διαφορικού, όπως συμβαίνει στα συμβατικά του είδους.

# 1.3. Βασικά στοιχεία συστημάτων κίνησης ηλεκτρικών οχημάτων

#### 1.3.1. Ηλεκτρικοί Κινητήρες



Εικόνα 6: Είδη ηλεκτρικών κινητήρων για χρήση σε ηλεκτρικά / υβριδικά οχήματα

#### 1.3.1.1. Κινητήρες συνεχούς ρεύματος

Σε αρχικό στάδιο η τεχνολογική ωριμότητα και ο απλός έλεγχός τους υπερίσχυσαν έναντι της ανάγκης για συντήρησή τους και της αντικατάστασης των ψηκτρών ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Ωστόσο η αξιοπιστία των κινητήρων στα ηλεκτρικά οχήματα καθώς και η ανάγκη για εξάλειψη της ανάγκης για συντήρηση είναι πρωτεύουσας σημασίας. Η εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος και των μικροεπεξεργαστών έφερε τους κινητήρες χωρίς σύστημα συλλέκτη και ψήκτρες στο προσκήνιο, καθότι έχουν μεγαλύτερη αξιοπιστία και χαμηλότερο λειτουργικό κόστος.

#### 1.3.1.2. Ασύγχρονοι κινητήρες

Είναι ένας τύπος κινητήρα με ευρεία εφαρμογή στα ηλεκτροκίνητα οχήματα, με κύριες αιτίες το μικρό κόστος, τον εύκολο έλεγχο και την υψηλή αξιοπιστία. Για την οδήγησή τους στα ηλεκτρικά οχήματα απαιτείται διάταξη αντιστροφέα με δυνατότητα μεταβολής της συχνότητας για έλεγχο της ταχύτητας περιστροφής. Κύριος λόγος εφαρμογής αυτού του τύπου κινητήρα σήμερα είναι η ικανότητα υποδιέγερσης σε συνθήκες χαμηλού φορτίου, προκειμένου να επιτευχθεί σημαντικά υψηλή ταχύτητα, βελτιώνοντας έτσι σημαντικά την συμπεριφορά και το βαθμό απόδοσης σε συνθήκες ελέγχου σταθερής ισχύος

#### 1.3.1.3. Σύγχρονοι κινητήρες

Ο σύγχρονος κινητήρας αποτελείται από τον στάτη ο οποίος φέρει ένα τριφασικό τύλιγμα και από τον δρομέα ο οποίος μπορεί να έχει δύο μορφές:

Με τύλιγμα διέγερσης

#### • Με μόνιμο μαγνήτη

Στον πρώτο τύπο, το τύλιγμα διέγερσης απαιτεί τροφοδοσία με συνεχές ρεύμα, γεγονός που αυξάνει την πολυπλοκότητα του. Οι κινητήρες με μόνιμο μαγνήτη είναι μεν πιο ακριβοί, αλλά μειώνουν την πολυπλοκότητα της κατασκευής ενός κινητηρίου συστήματος βασισμένα σε αυτούς. Στον δεύτερο αυτό τύπο διακρίνουμε δύο υποκατηγορίες, που αναφέρονται στην κατασκευή του δρομέα, η πρώτη είναι λεία και η δεύτερη παρουσιάζει έκτυπους πόλους.

Κύριο πλεονέκτημα των Σύγρονων Μηχανών Μόνιμων Μαγνητών (ΣΜΜΜ) είναι η απουσία τυλίγματος διέγερσης, με την αντικατάστασή του από μόνιμους μαγνήτες, επιτυγχάνοντας τη μείωση των σχετικών απωλειών χαλκού ενώ η έλλειψη ψηκτρών αυξάνει την αξιοπιστία. Οι ΣΜΜΜ αποτελούν ελκυστική τεχνολογία για τη μελλοντική λύση συστημάτων ηλεκτρικής κίνησης λόγω του εξαιρετικά υψηλού βαθμού απόδοσής τους, της μεγάλης πυκνότητας ισχύος τους, της μειωμένης κυμάτωσης ροπής και του χαμηλού ακουστικού θορύβου τους. Ωστόσο το κόστος τους παραμένει υψηλό, εξ αιτίας του κόστους των μονίμων μαγνητών και η κατασκευή του δρομέα πολύπλοκη, προκειμένου να συγκρατηθούν οι Μόνιμοι Μαγνήτες (MM) σε υψηλές ταχύτητες. Επιπλέον, οι ΣΜΜΜ είναι ευπαθείς στις υψηλές θερμοκρασίες, καθώς οι ΜΜ απομαγνητίζονται προσωρινά ή μόνιμα.



Εικόνα 7: Σύγχρονος κινητήρας μόνιμων μαγνητών της General Motors [2]

#### 1.3.1.4. Κινητήρες μαγνητικής αντίστασης

Ο κινητήρας μαγνητικής αντίστασης (Switched Reluctance) δεν έχει ούτε τύλιγμα διέγερσης ούτε μόνιμους μαγνήτες στο δρομέα, εκμεταλλευόμενος μόνο τη ροπή εκτυπότητας. Αυτός ο τύπος μηχανής έχει το πλεονέκτημα της απλότητας κατασκευής και του μικρού κόστους. Το σημαντικό του μειονέκτημα όμως, είναι η μικρή σχετικά πυκνότητα ισχύος ως προς βάρος και όγκο, ο περιορισμένος βαθμός απόδοσης, η υψηλή κυμάτωση ροπής, ο έντονος ακουστικός θόρυβος και ο πολύπλοκος έλεγχος που απαιτείται από το σύστημα οδήγησης. Ο σύγχρονος κινητήρας μαγνητικής αντίστασης αποτελεί μια ειδική εκδοχή του κινητήρα μαγνητικής αντίστασης, όπου η μεταβολή της μαγνητικής αντίστασης γίνεται με πιο ομαλό (ημιτονικό) τρόπο. Αυτό βελτιώνει σημαντικά τη στρατηγική ελέγχου και

μειώνει την κυμάτωση ροπής και τον ακουστικό θόρυβο. Μειώνει όμως περαιτέρω την πυκνότητα ισχύος αυτού του είδους κινητήρα.



Εικόνα 8: Κινητήρας μαγνητικής αντίστασης ισχύος 50kW

#### 1.3.1.5. Κινητήρες συνεχούς ρεύματος χωρίς ψύκτρες

Πρόκειται για κινητήρα με τριφασικό τύλιγμα στο στάτη και μόνιμους μαγνήτες στο δρομέα. Η μηχανή οδηγείται από παλμούς τάσης σχήματος ορθογωνίου ή τραπεζίου εναλλασσόμενης πολικότητας που παράγονται σύμφωνα με τη θέση του δρομέα. Στους παλμούς αυτούς συνεχούς τάσης οφείλει το όνομα του. Χρειάζονται, λοιπόν, αισθητήρες θέσης του δρομέα. Είναι σημαντικό η γωνία μεταξύ της μαγνητικής ροής του πεδίου του στάτη και του πεδίου του δρομέα να είναι κοντά στις 90 μοίρες, ώστε να παράγεται η μέγιστη ροπή. Η ύπαρξη αυτού του είδους της παραλλαγής του σύγχρονου κινητήρα οφείλεται στον ευκολότερο έλεγχο του, καθώς δεν απαιτούνται ημιτονοειδείς κυματομορφές στην τροφοδοσία του, μόνο παλμοί.

Το κόστος κατασκευής τους είναι υψηλό εξαιτίας των μαγνητών. Επίσης πρέπει να προστεθεί και το κόστος των αισθητήρων.

#### 1.3.2. Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας ηλεκτρικών οχημάτων

#### 1.3.2.1. Συσσωρευτές οξέος μολύβδου (lead acid / Pb)

Είναι η πιο διαδεδομένη επιλογή για την τροφοδοσία των ηλεκτρικών συστημάτων στα συμβατικά αυτοκίνητα. Οι μπαταρίες που συνδέονται σε συστήματα κίνησης οχημάτων έχουν συνήθως τζελ αντί για υγρό ηλεκτρολύτη, ώστε να αντέχουν στις αυξημένες απαιτήσεις ισχύος. Τα ενεργειακά χαρακτηριστικά τους δεν παρουσιάζουν καλές επιδόσεις, καθώς η τιμή της ειδικής ενέργειάς τους είναι χαμηλή και δεν ενδείκνυνται για εφαρμογή σε οχήματα που διανύουν μεγάλες αποστάσεις. Παραμένουν όμως η φθηνότερη λύση σε σχέση με τα άλλα είδη επαναφορτιζόμενων συσσωρευτών. Η διαδικασία της φόρτισης πρέπει να διεξάγεται σωστά, με σωστή συντήρηση (χωρίς απώλειες υγρών) και όχι σε υψηλές τιμές τάσης φόρτισης, διαφορετικά μειώνεται η διάρκεια ζωής των μπαταριών

#### 1.3.2.2. Συσσωρευτές νικελίου – καδμίου (NiCad)

Αποτελούν μία καλή εναλλακτική αντί για τις μπαταρίες οξέος μολύβδου, καθώς παρουσιάζουν σχεδόν διπλάσια τιμή ειδικής ισχύος και μιάμιση φορά μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Από την άλλη μεριά όμως το κόστος τους είναι τρεις φορές μεγαλύτερο. Τα κελιά που απαρτίζουν την κάθε μπαταρία παρέχουν μικρότερη τάση εξόδου σε σχέση με τις μπαταρίες οξέος μολύβδου και συνεπώς απαιτούνται περισσότερα σε πλήθος για την παροχή ίδιας τάσης. Έχουν ανθεκτική κατασκευή και γρήγορο χρόνο φόρτισης. Η φόρτισή τους πρέπει να γίνεται επίσης υπό σωστές συνθήκες. Μειονέκτημα τους είναι η χρήση του τοξικού καδμίου.

#### 1.3.2.3. Συσσωρευτές νικελίου - μετάλλου υδριδίου (NiMh)

Η διαφορά αυτού του τύπου μπαταρίας σε σχέση με τον προηγούμενο (NiCad) είναι ότι έχει αντικατασταθεί το κάδμιο στο αρνητικό ηλεκτρόδιο με υδρίδιο μετάλλου, το οποίο δεν είναι τοξικό. Τα χαρακτηριστικά τους στοιχεία είναι γενικά καλύτερα σε σύγκριση με τις μπαταρίες νικελίου – καδμίου. Έχουν διπλάσια ενεργειακή πυκνότητα και μικρότερο χρόνο φόρτισης. Ωστόσο, σε μερικές περιπτώσεις κρίνεται απαραίτητο η εγκατάσταση συστήματος ψύξης, ενώ στα αρνητικά τους είναι το ότι παρουσιάζουν μεγάλο ρυθμό αυτοεκφόρτισης.Συσσωρευτές Ni-Mh χρησιμοποιούνται σε αρκετά σύγχρονα υβριδικά ηλεκτρικά αυτοκίνητα.

#### 1.3.2.4. Συσσωρευτές νατρίου – σουλφιδίου (NaS)

Οι συσσωρευτές αυτοί παρουσιάζουν το πλεονέκτημα της δυνατότητας λειτουργίας σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες 300 – 350 °C. Έχουν πολύ υψηλή τιμή ειδικής ενέργειας, ενώ για τη σωστή λειτουργία απαιτείται προθέρμανση των συσσωρευτών, ενώ κατά τη διάρκεια μη λειτουργίας τους πρέπει να διατηρούνται θερμές σε ορισμένη θερμοκρασία. Τέλος, η εμπορική τους προώθηση για υβριδικά οχήματα έχει ανασταλεί λόγω μη πλήρους κάλυψης των συνθηκών ασφαλείας, καθώς υπάρχει κίνδυνος ανάφλεξης.

#### 1.3.2.5. Συσσωρευτές νικελίου - χλωριούχου νατρίου (NiNaCl)

Αυτοί οι συσσωρευτές, γνωστοί και ως συσσωρευτές «ZEBRA» (Zero Emissions Battery Research Association), λειτουργούν επίσης σε θερμοκρασίες 300 - 350 °C, καλύπτοντας όμως τις συνθήκες ασφαλείας που απαιτούνται στην Ευρώπη. Η θερμική απομόνωση επιτυγχάνεται με χρήση διπλού στρώματος μεταλλικού κουτιού, το οποίο έχει διάκενο 2 - 3 cm και είναι εκκενωμένο από αέρα. Οι μπαταρίες χρειάζεται να παραμένουν θερμές όταν δε χρησιμοποιούνται, εκτός αν είναι για ανενεργές για χρονικό διάστημα λίγων ωρών, γεγονός που αποτελεί μειονέκτημά τους καθώς είναι ικανές να χάσουν περίπου 10 % της ενέργειάς τους μέσα σε μία ημέρα.

#### 1.3.2.6. Συσσωρευτές ιόντων λιθίου (Li-ion)

Οι συσσωρευτές ιόντων λιθίου παρουσιάστηκαν την δεκαετία του 1990. Το σημαντικότερο πλεονέκτημά τους είναι η μεγάλη τιμή της ειδικής, γεγονός που τις καθιστά ελαφρύτερες για δεδομένη ισχύ. Η τάση εξόδου κάθε κελιού (3,5 V) είναι σχεδόν διπλάσια συγκριτικά με τους συσσωρευτές μολύβδου και τριπλάσια σε σχέση με τους συσσωρευτές νικελίου. Ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης είναι σχετικά μικρός ενώ απαιτείται ακριβής έλεγχος της τάσης κατά τη διαδικασία φόρτισης των συσσωρευτών, καθώς εάν η τάση υπερβεί κάποιο όριο μπορεί να προκαλέσει καταστροφή αυτών. Η έκθεση των συσσωρευτών σε υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να προκαλέσει παραγωγή αναθυμιάσεων και ανάφλεξη αυτών και για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται κυκλώματα ασφαλείας για τον έλεγχο της ορθής λειτουργίας τους. Το κόστος αυτών των μπαταριών είναι αρκετά υψηλό. Συσσωρευτές ιόντων λιθίου χρησιμοποιεί το ηλεκτρικό αυτοκίνητο υψηλών επιδόσεων ΤΕSLA ROADSTER.

#### 1.3.2.7. Συσσωρευτές πολυμερών λιθίου (Lipo)

Αυτό το είδος συσσωρευτών παρουσιάστηκε τη δεκαετία του '90 και αποτελεί εξέλιξη των συσσωρευτών ιόντων λιθίου. Παρουσιάζουν γενικά καλύτερα χαρακτηριστικά σε σχέση με τους συσσωρευτές Li-ion, έχουν χαμηλότερο κόστος κατασκευής και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. Ωστόσο εξετάζονται ακόμα κάποια θέματα ασφαλείας. Μελλοντικώς, εκτιμάται ότι θα εφαρμοστούν από τις νεότερες γενιές υβριδικών και ηλεκτρικών οχημάτων.

#### 1.3.2.8. Συσσωρευτές αέρος – αλουμινίου (AL(OH))

Οι συσσωρευτές αέρος μετάλλου αποτελούν μία διαφορετική κατηγορία συσσωρευτών, με την έννοια ότι η φόρτισή τους δεν επιτυγχάνεται απλά με την αντιστροφή του ρεύματος. Αντί αυτού, απαιτείται αντικατάσταση του μεταλλικού ηλεκτροδίου από καινούριο. Το παλιό ηλεκτρόδιο έπειτα αποστέλλεται προς επεξεργασία για επαναχρησιμοποίηση. Επίσης, ο ηλεκτρολύτης του συσσωρευτή χρειάζεται και αυτός αντικατάσταση. Το μειονέκτημα των μπαταριών αέρος αλουμινίου είναι η μικρή ειδική ισχύς, γεγονός που τις κάνει αρκετά βαρείς και γι αυτό δεν ενδείκνυνται άμεσα για οχήματα κίνησης.

#### 1.3.2.9. Συσσωρευτές αέρος – ψευδαργύρου (Zn(OH))

Αυτός ο τύπος συσσωρευτών είναι ίδιας δομής με τον προηγούμενο, αλλά έχει αντικατασταθεί το αρνητικό ηλεκτρόδιο από ψευδάργυρο. Η συνολική απόδοση είναι πολύ καλύτερη και αυτό οφείλεται κυρίως στην ειδική ισχύς η οποία είναι δέκα φορές μεγαλύτερη συγκριτικά με τις μπαταρίες αέρος μετάλλου. Για αυτό το λόγο θεωρείται καλή λύση για τα οχήματα δρόμου. Από την άλλη μεριά, οι περισσότεροι κατασκευαστές αυτού του τύπου μπαταριών δίνουν μικρό κύκλο επαναφορτίσεων. Ο τρόπος επαναφόρτισης παραμένει ο ίδιος όπως πριν, με αντικατάσταση των αρνητικών ηλεκτροδίων και του ηλεκτρολύτη. Χαρακτηρίζονται από υψηλή τιμή ενεργειακής πυκνότητας, αλλά θεωρείται δύσκολη ακόμα η κατασκευή μεγάλων μπαταριών τέτοιου τύπου.

#### 1.3.2.10. Υπερπυκνωτές

Οι υπερπυκνωτές χαρακτηρίζονται από την ίδια αρχή λειτουργίας με τους συνήθεις πυκνωτές, αλλά έχουν τη δυνατότητα φόρτισης και εκφόρτισης σε πολύ μικρούς χρόνους και παρέχουν μεγάλη χωρητικότητα σε μικρό σχετικά όγκο. Αποτελούνται από δύο στρώσεις υλικού, έχοντας δύο ηλεκτρόδια άνθρακα τοποθετημένα σε οργανικό ηλεκτρολύτη.

Η ενεργειακή πυκνότητα ενός υπερπυκνωτή κυμαίνεται από 1 έως 10 Wh/kg. Αυτή η τιμή είναι πολύ μεγαλύτερη από ένα κοινό πυκνωτή, αλλά είναι δέκα φορές μικρότερη από μια μπαταρία νικελίου - μετάλλου υδριδίου. Η χωρητικότητά τους μπορεί να φτάσει μέχρι μερικά Farad, ενώ ο χρόνος φόρτισής τους είναι μερικά δευτερόλεπτα. Κατά τη διάρκεια φόρτισης ενός άδειου υπερπυκνωτή απαιτείται σύστημα περιορισμού του ρεύματος φόρτισης, διαφορετικά υπάρχει κίνδυνος καταστροφής. Σε αντίθεση με τους ηλεκτροχημικούς συσσωρευτές, οι υπερπυκνωτές δεν διατρέχουν κίνδυνο λόγω υπερφόρτισης. Επίσης, έχουν μεγάλο χρόνο ζωής (10 – 12 χρόνια), αντέχουν πολλούς κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης (500000 κύκλους) και δεν εμπεριέχουν τοξικά στοιχεία. Ως μειονεκτήματα καταγράφονται το υψηλό ποσοστό αυτοεκφόρτισης, το οποίο κυμαίνεται στο 50 % ανά μήνα, και τέλος, το υψηλό κόστος.

Αυτά τα χαρακτηριστικά καθιστούν τους υπερπυκνωτές ιδανικούς για χρήση σε υβριδικά οχήματα. Κατά την εκκίνηση, όπου απαιτείται άμεση παροχή ισχύος, οι υπερπυκνωτές μπορούν να προσφέρουν το υψηλό ρεύμα τροφοδοσίας της ηλεκτρικής μηχανής - κινητήρα. Οι υπερπυκνωτές δε μπορούν να τροφοδοτούν σε μόνιμη βάση τον ηλεκτροκινητήρα και για αυτό το λόγο τοποθετούνται παράλληλα με τις μπαταρίες του οχήματος. Από την άλλη μεριά, κατά τις επιβραδύνσεις και ειδικότερα σε περιπτώσεις απότομου φρεναρίσματος, επιτυγχάνεται αποθήκευση μεγαλύτερου ποσού ενέργειας.

#### 1.3.3. Κυψέλες καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν το υδρογόνο ως καύσιμο. Αποτελούν ένα μηχανισμό για την ηλεκτροχημική μετατροπή της ενέργειας μετατρέποντας υδρογόνο και οξυγόνο σε νερό, παράγοντας ταυτόχρονα με τη διαδικασία αυτή, ηλεκτρισμό και θερμότητα. Ο ηλεκτρισμός αποδίδεται με τη μορφή συνεχούς ρεύματος.

Η καταλληλότερη κυψέλη καυσίμου για εφαρμογή σε ηλεκτροκίνητα οχήματα και μεταφορές είναι η κυψέλη υδρογόνου με ηλεκτρολύτη PEM-Polymer Electrolyte Membrane ή Proton Exchange Membrane. Λειτουργεί σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, περίπου 80 °C. Οι χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας της επιτρέπουν να εκκινήσει γρήγορα (λιγότερο χρόνο προθέρμανσης), γεγονός που οδηγεί σε λιγότερη φθορά στα συστατικά μέρη του συστήματος, με αποτέλεσμα καλύτερη αντοχή. Η μικρή ευαισθησία στον προσανατολισμό και πολύ καλή αναλογία ισχύς ανά βάρος τη κάνει ιδανική για τέτοιου τύπου εφαρμογές.

Στη συνέχεια περιγράφεται συνοπτικά η αρχή λειτουργίας των κυψελών PEM. Το υδρογόνο τροφοδοτεί το ηλεκτρόδιο της ανόδου της κυψέλης, το οποίο ερχόμενο σε επαφή με τον καταλύτη διαχωρίζεται σε θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου και ηλεκτρόνια. Η άνοδος και ο καταλύτης είναι τέτοιας κατασκευής ώστε η διάχυση των ατόμων του υδρογόνου να γίνεται με ομογενή τρόπο. Τα ηλεκτρόνια τα οποία απελευθερώθηκαν μεταφέρονται μέσω εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος προς την κάθοδο δημιουργώντας ηλεκτρισμό αφού η μεμβράνη αποτρέπει τη διέλευση τους μέσω αυτής. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα του υδρογόνου το οσοίο τροφοδοτεί την κάθοδο και παράγεται νερό. Την ομογενή διάχυση του οξυγόνου στον καταλύτη εξασφαλίζει η κατασκευή του ηλεκτροδίου. Ο καταλύτης αναλαμβάνει την επιτάχυνση της δημιουργίας του νερού από τα συστατικά του. Στο σχηματισμό του νερού συμμετέχουν εκτός των μορίων του οξυγόνου και των ιόντων του υδρογόνου, τα ηλεκτρόνια τα οποία διοχετεύτηκαν μέσω του εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος στην κάθοδο, στην αρχή της διαδικασίας.

# 2. Σύστημα κίνησης πρωτότυπου ηλεκτρικού οχήματος "ER12"

#### 2.1. Εισαγωγή

Η ομάδα TUCer του Πολυτεχνείου Κρήτης σχεδιάζει και κατασκευάζει πρωτότυπα οχήματα με τα οποία συμμετέχει στον διεθνή διαγωνισμό οικονομίας καυσίμου Shell eco-marathon. Η ομάδα δημιουργήθηκε το 2008 και έχει αναπτύξει 5 οχήματα. Το πρώτο όχημα χρησιμοποιούσε μηχανή εσωτερικής καύσης ενώ τα υπόλοιπα χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου. Τα οχήματα που αναπτύχθηκαν το 2010 και 2011 απέσπασαν τη πρώτη θέση στη κατηγορία ασφαλέστερου οχήματος στο συγκεκριμένο διαγωνισμό. Οι καλύτερες θέσεις ως προς την κατανάλωση καυσίμου σημειώθηκαν τα έτη 2011 και 2012 όπου η ομάδα απέσπασε την 8<sup>η</sup> και τη 4<sup>η</sup> θέση αντίστοιχα. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα οχήματα που έχουν αναπτυχθεί από την ομάδα.



Εικόνα 9: Οχήματα που έχουν κατασκευαστεί από την ομάδα TUCer

#### 2.2. Δομή του συστήματος κίνησης του ηλεκτρικού οχήματος "ER12"

Το τελευταίο όχημα που σχεδιάστηκε και αναπτύχθηκε είναι το ηλεκτρικό όχημα "ER12". Το συγκεκριμένο όχημα χρησιμοποιεί κυψέλες καυσίμου για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια η οποία δίνει, μέσω ενός ηλεκτρικού κινητήρα, κίνηση στους τροχούς. Το "ER12" συμμετείχε στο διαγωνισμό Shell eco-marathon 2012 στον οποίο απέσπασε την 4<sup>η</sup> θέση (από 12 συμμετοχές) στη κατηγορία του (fuel cell urban category).

Τα βασικά στοιχεία που απαρτίζουν το σύστημα κίνησης του οχήματος είναι τα ακόλουθα: η κυψέλη καυσίμου, ο ηλεκτρικός κινητήρας, το σύστημα μετάδοσης κίνησης, ο ελεγκτής του ηλεκτρικού κινητήρα, η μονάδα έλεγχου, η μητρική πλακέτα, και οι αισθητήρες.

Πιο συγκεκριμένα η κυψέλη καυσίμου τροφοδοτείται με υδρογόνο και παράγει συνεχή ηλεκτρική τάση η οποία τροφοδοτεί, μέσω του ελεγκτή του, τον ηλεκτρικό

κινητήρα. Βασικό σύστημα αποτελεί η πλακέτα ελέγχου η οποία τροφοδοτεί και ελέγχει όλα τα ηλεκτρονικά συστήματα. Επίσης ένας μικροελεγκτής αλληλεπιδρά με τους αισθητήρες και τη μητρική πλακέτα με στόχο τη καταγραφή δεδομένων και τη προβολή τους, μέσω μιας οθόνης αφής στον οδηγό. Στο παρακάτω σχεδιάγραμμα παρουσιάζονται οι αλληλεπιδράσεις των διάφορων συστημάτων.



Εικόνα 10: Διασύνδεση των διάφορων συστημάτων του συστήματος κίνησης



Εικόνα 11: Φωτογραφία του συστήματος κίνησης του οχήματος "ER12"

#### 2.3. Κύρια στοιχεία συστήματος κίνησης ηλεκτρικού οχήματος "ER12"

#### 2.3.1. Κυψέλη καυσίμου

Η κυψέλη καυσίμου που τοποθετήθηκε στο "ER12" είναι η Nexa 1.2kW της εταιρίας Ballard. Παρακάτω παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης κυψέλης.



- Ονομαστική ισχύς: 1.2 kW
- Τάση λειτουργίας: 22-50V
- Μέγιστη απόδοση: 51%
- Βάρος: 13kg

Εικόνα 12: Η συστοιχία κυψελών Nexa 1.2

Το βασικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης κυψέλης έναντι των υπολοίπων που υπάρχουν στο εμπόριο είναι ο μεγάλος όγκος της και το βάρος της.

#### 2.3.2. Ηλεκτρικός κινητήρας

Ο ηλεκτρικός κινητήρας καθώς και το σύστημα μετάδοσης κίνησης είναι ζωτικής σημασίας για την απόδοση του οχήματος. Για την καλύτερη απόδοση του συστήματος κίνησης του οχήματος "ER12" σε σχέση με αυτό του "ER11" αποφασίστηκε να αλλαχθεί ο ηλεκτρικός κινητήρας καθώς και ο τρόπος μετάδοσης της κίνησης. Η επιλογή του ηλεκτρικού κινητήρα είναι μια πολύπλοκη διαδικασία καθώς πρέπει να τηρεί αρκετές προϋποθέσεις. Πιο συγκεκριμένα πρέπει να έχει μεγάλο βαθμό απόδοσης, ικανοποιητικό εύρος στροφών, ικανοποιητική ροπή, και όσο το δυνατόν μικρότερο βάρος.

Η τελική επιλογή ήταν ο κινητήρας 5360 της εταιρίας ΑΧΙ σε συνδυασμό με τον ελεγκτή JETI SPIN 99. Παρακάτω φαίνονται τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του κινητήρα.



- RPM/V: 120 RPM/V
- Max Voltage: 42 V
- Max Current: 65 A
- Max Efficiency: 94%
- Dimensions (diameter× ength): 89×94 mm
- Weight: 1350 g

Εικόνα 13: Ο κινητήρας

Για την εξαγωγή των καμπυλών λειτουργίας του κινητήρα έτσι ώστε να ρυθμιστεί να λειτουργεί στο βέλτιστο σημείο λειτουργίας του αποφασίστηκε να κατασκευαστεί μια πειραματική διάταξη. Η πειραματική διάταξη, η οποία παρουσιάζεται παρακάτω, αποτελείται από το κινητήρα, ένα ροπόμετρο, ένα τεχνητό φορτίο και έναν υπολογιστή. Το ροπόμετρο είναι της εταιρίας datum electronics και έχει δυνατότητα μέτρησης ροπής έως 20Nm.



Εικόνα 14: Πειραματική διάταξη για την μέτρηση των χαρακτηριστικών του κινητήρα

Η διαδικασία των πειραμάτων ήταν η εξής: Ασκώντας διάφορες τιμές πίεσης στο δισκόφρενο γινόταν καταγραφή της ηλεκτρικής ισχύς που κατανάλωνε ο ηλεκτρικός κινητήρας ώστε να παράγει τη μηχανική ισχύ που χρειαζόταν. Στο λογισμικό του ροπόμετρου καταγράφονταν οι τιμές της μηχανικής ισχύος στην έξοδο του, οι στροφές του κινητήρα καθώς και η ροπή του.

Αναλύοντας τα αποτελέσματα από τα συγκεκριμένα πειράματα εξήχθη το συμπέρασμα ότι για να λειτουργήσει ο κινητήρας στο μέγιστο σημείο απόδοσης του

απαιτείται η τελική σχέση μετάδοσης να είναι 1/10. Γι΄αυτό το λόγο, για τη κίνηση του οχήματος επιλέχθηκε να κατασκευαστεί ένα σύστημα δυο γραναζιών με λόγο μετάδοσης 1/10. Το μικρότερο σε μέγεθος γρανάζι τοποθετήθηκε στον άξονα του ηλεκτρικού κινητήρα ενώ το μεγάλο γρανάζι τοποθετήθηκε στον κινητήριο τροχό. Το υλικό που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των γραναζιών είναι πολυακετάλη (POM) έτσι ώστε να έχουν όσο το δυνατόν μικρότερο βάρος. Στα παρακάτω διαγράμματα φαίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα του κινητήρα.



Διάγραμμα 1: Χαρακτηριστική Απόδοσης-Ροπής του ηλεκτρικού κινητήρα



Διάγραμμα 2: Χαρακτηριστική Στροφών-Ροπής του ηλεκτρικού κινητήρα

#### 2.3.3. Υπολογιστικό σύστημα και αισθητήρες

Στο όχημα "ER12" τοποθετήθηκε μια μητρική πλακέτα και ένας μικροελεγκτής για την καταγραφή δεδομένων από τους αισθητήρες ταχύτητας, κλίσης και επιτάχυνσης καθώς και των χαρακτηριστικών λειτουργίας των κυψελών καυσίμου. Επίσης τα

δεδομένα προβάλλονται μέσω μιας οθόνης αφής στον οδηγό του οχήματος. Η μητρική που χρησιμοποιήθηκε είναι η ΕΡΙΑ830 και ο μικροελεγκτής ο ARDUINO MEGA 2560.





Εικόνα 15: Ο μικροελεγκτής ARDUINO MEGA 2560 και η μητρική ΕΡΙΑ 830



Εικόνα 16: Οι αισθητήρες κλίσης, επιτάχυνσης και ταχύτητας που χρησιμοποιήθηκαν στο όχημα "ER12"



Εικόνα 17: Προβολή των δεδομένων των αισθητήρων στον οδηγό του οχήματος

# 3. Ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης και εξαγωγή αποτελεσμάτων

### 3.1.Περιγραφή του μοντέλου προσομοίωσης

Για τον υπολογισμό της ισχύος που καταναλώνει το όχημα "ER12" κρίθηκε απαραίτητη η ανάπτυξη ενός μοντέλου προσομοίωσης του οχήματος. Η ανάπτυξη αυτού του μοντέλου έχει ως αποτέλεσμα την εξαγωγή αποτελεσμάτων σχετικά με την επίδραση που έχουν διάφορες αλλαγές στο όχημα πριν αυτές κατασκευαστούν. Επίσης το μοντέλο προσομοίωσης βοήθησε πολύ στην κατανόηση της συμπεριφοράς του οχήματος σε διάφορες συνθήκες. Για παράδειγμα διερευνήθηκε η συμπεριφορά του οχήματος (ως προς την κατανάλωση) κατά τη διάρκεια κίνησης του με σταθερή ταχύτητα ή κατά τη διάρκεια επιταχυνόμενης κίνησης.

Το μοντέλο προσομοίωσης αποτελέιται από τέσσερα υποσυστήματα. Το πρώτο είναι η εισαγωγή δεδομένων. Σε αυτό το υποσύστημα γίνεται η εισαγωγή των τιμών της κλίσης, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης μέσω αρχείων κειμένου (.txt). Έπειτα τα δεδομένα εισάγονται στο υποσύστημα του κινηματικού μοντέλου όπου μέσω των εξισώσεων κίνησης υπολογίζεται η ισχύς που καταναλώνει το όχημα. Οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

#### Δύναμη αντίστασης του αέρα

Αυτή η δύναμη υφίσταται όταν το όχημα λόγω της αντίστασης του αέρα και υπολογίζεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_d \cdot u^2 \tag{1}$$

όπου  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα, A είναι η επιφάνεια του οχήματος όπως απεικονίζεται σε σκιαγράφημα αν ιδωθεί από εμπρός,  $c_d$ μια αδιάστατη σταθερά η οποία ονομάζεται συντελεστής οπισθολκής και u η ταχύτητα του οχήματος.

Οι μεταβλητές  $A, c_d$  εξαρτώνται από το σχήμα του οχήματος

# Δύναμη αντίστασης στην κύλιση

Αυτή η δύναμη υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$F_r = m \cdot g \cdot c_r \cdot \cos \gamma$$

όπου m η μάζα του οχήματος (συμπεριλαμβάνεται και η μάζα του οδηγού), g η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $c_{\gamma}$  μια αδιάστατη σταθερά η οποία ονομάζεται συντελεστής ολίσθησης και  $\gamma$  η κλίσης της πίστας.

(2)

Ο συντελεστής *c<sub>γ</sub>* εξαρτάται κυρίως από το είδος του ελαστικού. Άλλοι παράγοντες που τον επηρεάζουν είναι οι καιρικές συνθήκες και αν το όχημα κινείται ευθύγραμμα ή στρίβει.

#### Δύναμη λόγω των υψομετρικών διαφορών που υπάρχουν στην πίστα

Αυτή η δύναμη υφίσταται όταν το όχημα κινείται σε τμήματα της πίστας τα οποία έχουν μεταξύ τους υψομετρική διαφορά και υπολογίζεται από τη παρακάτω εξίσωση:

$$F_g = m \cdot g \cdot \sin(\gamma) \tag{3}$$

όπου m η μάζα του οχήματος (συμπεριλαμβάνεται και η μάζα του οδηγού), g η επιτάχυνση της βαρύτητας και  $\gamma$  η κλίσης της πίστας.

# Δύναμη που επιτυγχάνεται κατά τη διαδικασία της επιτάχυνσης

Αυτή η δύναμη υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$F_e = m \cdot a \tag{4}$$

όπου *m* η μάζα του οχήματος (συμπεριλαμβάνεται και η μάζα του οδηγού) και α η επιτάχυνση του οχήματος

Στη παραπάνω εξίσωση δεν συμπεριλαμβάνεται η αδράνεια των τροχών του οχήματος.

Αφού υπολογιστεί μέσω των παραπάνω εξισώσεων η ισχύς που καταναλώνει το όχημα το υποσύστημα της κυψέλης καυσίμου τη μετατρέπει σε λίτρα υδρογόνου που καταναλώνονται. Αυτό γίνεται μέσω των χαρακτηριστικών καμπυλών της συγκεκριμένης συστοιχίας κυψελών καυσίμου.

Το τελικό στάδιο του μοντέλου είναι η εξαγωγή των αποτελεσμάτων σε μορφή διαγραμμάτων.



Διάγραμμα 3: Το μοντέλο προσομοίωσης στο πακέτο SIMULINK/MATLAB



Διάγραμμα 4: Διάγραμμα ροής του μοντέλου προσομοίωσης

#### 3.2. Εξαγωγή αποτελεσμάτων από το μοντέλο προσομοίωσης

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα δυο περιπτώσεων. Στη πρώτη περίπτωση η κλίση του οδοστρώματος είναι μηδενική. Στη δεύτερη περίπτωση εισάγεται η κλίση του οδοστρώματος της πίστας Eurospeedway στην οποία πραγματοποιούταν ο διαγωνισμός Shell eco-marathon από το 2009 μέχρι το 2011. Σε κάθε περίπτωση εξετάζοναται δυο υποπεριπτώσεις. Πιο συγκεκριμένα εξετάζεται η διατήρηση της ταχύτητας και η εκτέλεση επιταχυνόμενης κίνησης. Τόσο στην υποπερίπτωση της διατήρησης της ταχύτητας όσο και σε αυτήν της επιταχυνόμενης κίνησης στόχος είναι τα 25km/h. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.



Εικόνα 18: Διατήρηση σταθερής ταχύτητας σε οδόστρωμα με μηδενική κλίση



Εικόνα 20: Διατήρηση σταθερής ταχύτητας σε οδόστρωμα με κλίση

Εικόνα 19: Εκτέλεση επιταχυνόμενης κίνησης σε οδόστρωμα με μηδενική κλίση





Εικόνα 21: Εκτέλεση επιταχυνόμενης κίνησης σε οδόστρωμα με κλίση

Στην πρώτη περίπτωση παρατηρείται ότι το όχημα για να διατηρήσει σταθερή τη ταχύτητά του και ίση με 25km/h σε οδόστρωμα με μηδενική κλίση απαιτούνται 130W. Στην επιταχυνόμενη κίνηση απαιτούνται μέχρι και 400W για την επίτευξη των 25km/h.

Στην δεύτερη περίπτωση παρατηρείται ότι το όχημα για να διατηρήσει σταθερή τη ταχύτητά του και ίση με 25km/h απαιτούνται κατά μέσο όρο 180W. Στην επιταχυνόμενη κίνηση απαιτούνται μέχρι και 500W για την επίτευξη των 25km/h. Μια παρατήρηση που εξάγεται από τα παραπάνω αποτελέσματα είναι ότι η κλίση του οδοστρώματος επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την κατανάλωση του οχήματος.

# 4. Πειραματικές δοκιμές και εξαγωγή αποτελεσμάτων

#### 4.1.Εισαγωγή

Για την καταγραφή των χαρακτηριστικών λειτουργίας του οχήματος "ER12" έγιναν πειραματικές δοκιμές. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τέσσερις δοκιμές. Στις δυο πρώτες το όχημα προσπαθεί να επιτύχει τη ταχύτητα των 7m/s και να τη διατηρήσει. Στις άλλες δυο το όχημα εκτελεί επιταχυνόμενη κίνηση έχοντας ως στόχο να επιτύχει στιγμιαία τη ταχύτητα των 7m/s.

Οι δοκιμές εκτελέστηκαν στο περιβάλλοντα χώρο της Πολυτεχνειούπολης. Πρέπει να σημειωθεί ότι το περιβάλλον στο οποίο έγιναν οι δοκιμές είναι αρκετά διαφορετικό από αυτό του αγώνα καθώς το οδόστρωμα έχει μεγαλύτερες κλίσεις καθώς και χειρότερη ποιότητα.

Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τέσσερις δοκιμές.

#### 4.2.Πειραματική Δοκιμή 1

Σε αυτή την δοκιμή το όχημα ξεκίνησε από μηδενική ταχύτητα και ανέπτυξε ταχύτητα 7m/s (25km/h). Η συνολική απόσταση που διανύθηκε ήταν 700m. Στο διάγραμμα 5 φαίνεται η κλίση του οδοστρώματος. Στο διάγραμμα 6 παρουσιάζεται η ταχύτητα του οχήματος. Παρατηρείται ότι το όχημα επιτάχυνε από 0m/s σε 7m/s σε 100m. Έπειτα λόγω των ανηφορικών κλίσεων μειώθηκε η ταχύτητά του ενώ τα τελευταία 200m η ταχύτητα του ήταν πάνω από 7m/s.

Στο διάγραμμα 7 παρουσιάζεται η ισχύς που παράγει η κυψέλη για να κινήσει το όχημα. Η ισχύς που παράγει η κυψέλη σε αυτή τη περίπτωση κυμαίνεται μεταξύ 0-900W. Όπως ήταν αναμενόμενο η ισχύς που παράγει η κυψέλη είναι μεγαλύτερη στις περιπτώσεις των επιταχυνόμενων κινήσεων καθώς και στις ανηφορικές κλίσεις του οδοστρώματος. Στα διαγράμματα 8,9 παρουσιάζεται η τάση και η ένταση του ρεύματος της κυψέλης αντίστοιχα. Η τάση της κυψέλης κυμαίνεται μεταξύ 30-42V ενώ η έντασή της μεταξύ 1-33A.

Στα διαγράμματα 10,11 παρουσιάζεται η κατανάλωση κάθε χρονική στιγμή και η συνολική κατανάλωση υδρογόνου της κυψέλης. Η στιγμιαία κατανάλωση κυμαίνεται μεταξύ 0-0,51 ενώ η συνολική κατανάλωση για τη συγκεκριμένη διαδρομή ήταν 91.

Τέλος στα διαγράμματα 12,13 παρουσιάζεται η θερμοκρασία της κυψέλης και η πίεση του υδρογόνου που εισέρχεται στην κυψέλη. Από τα διαγράμματα της θερμοκρασίας και της πίεσης εξάγεται το συμπέρασμα ότι και τα δυο επηρεάζονται από την ισχύ που παράγει η κυψέλη. Αύξηση της ισχύος της κυψέλης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας της και μια μικρή πτώση της πίεσης του υδρογόνου.



Διάγραμμα 8: Τάση ρεύματος κυψέλης



Διάγραμμα 9: Ένταση ρεύματος κυψέλης



Διάγραμμα 10: Στιγμιαία κατανάλωση υδρογόνου



Διάγραμμα 12: Θερμοκρασία κυψέλης



Διάγραμμα 13: Πίεση υδρογόνου

#### 4.3.Πειραματική δοκιμή 2

Σε αυτή τη δοκιμή το όχημα αρχικά βρίσκεται σε ηρεμία και αναπτύσσει ταχύτητα 7m/s (25km/h). Η απόσταση που διανύθηκε σε αυτή τη δοκιμή ήταν 240m. Τα τελευταία 50m το όχημα κινείται σταθερά με ταχύτητα μεγαλύτερη των 7m/s.

Στο διάγραμμα 14 παρουσιάζεται η κλίση του οδοστρώματος. Στο διάγραμμα 15 παρουσιάζεται η ταχύτητα του οχήματος. Το όχημα αρχίζει και επιταχύνει ωστόσο όταν βρίσκει ανηφορικά σημεία μειώνεται η ταχύτητά του.

Στο διάγραμμα 16 φαίνεται η ισχύς που καταναλώνει ο ηλεκτρικός κινητήρας η οποία κυμαίνεται από 50-950W. Στα διαγράμματα 17,18 φαίνεται η τάση και η ένταση του ρεύματος της κυψέλης αντίστοιχα. Η τάση του ρεύματος κυμαίνεται από 30-43V ενώ η έντασή του από 2-33A.

Στα διαγράμματα 19,20 παρουσιάζεται η στιγμιαία κατανάλωση και η συνολική αντίσταση υδρογόνου αντίστοιχα. Η στιγμιαία κατανάλωση κυμαίνονται από 0-0,551 ενώ η συνολική κατανάλωση υδρογόνου ήταν 41.

Στα διαγράμματα 21,22 παρουσιάζεται η θερμοκρασία της κυψέλης και η πίεση του υδρογόνου που εισέρχεται στη κυψέλη.



Διάγραμμα 14: Κλίση του οδοστρώματος





Διάγραμμα 18: Ένταση ρεύματος κυψέλης



Διάγραμμα 19: Στιγμιαία κατανάλωση υδρογόνου



Διάγραμμα 20: Συνολική κατανάλωση υδρογόνου



Διάγραμμα 21: Θερμοκρασία κυψέλης καυσίμου



Διάγραμμα 22: Πίεση υδρογόνου

#### 4.4.Πειραματική δοκιμή 3

Σε αυτή τη δοκιμή το όχημα εκτελεί μια επιταχυνόμενη κίνηση σκοπός της οποίας είναι το όχημα να φτάσει τα 7m/s. Αυτή η επιταχυνόμενη κίνηση διήρκησε 80m.

Στο διάγραμμα 23 φαίνεται η κλίση του οδοστρώματος. Στο διάγραμμα 24 φαίνεται η ταχύτητα του οχήματος της οποίας η μορφή πλησιάζει αυτή της ευθύγραμμης ομαλά επιταχυνόμενης κίνησης.

Στο διάγραμμα 25 παρουσιάζεται η ισχύς που παράγει η κυψέλη η οποία κυμαίνεται μεταξύ 50-900W. Η μορφή της καμπύλης της ισχύος είναι ίδια με τη μορφή της καμπύλης της ταχύτητας. Αυτό είναι λογικό καθώς το οδόστρωμα έχει μικρές κλίσεις και επομένως η καταναλισκόμενη ισχύς εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα που αναπτύσσεται. Στα διαγράμματα 26,27 παρουσιάζεται η τάση και η ένταση του ρεύματος της κυψέλης. Η τάση κυμαίνεται από 42-28V ενώ η ένταση από 2-32A.

Στα διαγράμματα 28,29 παρουσιάζεται η στιγμιαία κατανάλωση και η συνολική κατανάλωση υδρογόνου. Η στιγμιαία κατανάλωση κυμαίνεται μεταξύ 0-0,51 ενώ η κατανάλωση για όλη τη διαδρομή είναι 21.

Στα διαγράμματα 30,31 φαίνεται η θερμοκρασία της κυψέλης και η πίεση του υδρογόνου.



Διάγραμμα 23: Κλίση του οδοστρώματος



Διάγραμμα 24: Ταχύτητα οχήματος





Διάγραμμα 27: Ένταση ρεύματος κυψέλης





Διάγραμμα 31: Πίεση υδρογόνου

#### 4.5.Πειραματική δοκιμή 4

Σε αυτή τη δοκιμή, όπως και στη προηγούμενη, έγινε μια επιταχυνόμενη κίνηση. Η κύρια διαφορά από τη προηγούμενη δοκιμή είναι ότι σε αυτή τη δοκιμή η επιθυμητή ταχύτητα επιτυγχάνεται σε 120m. Δηλαδή ο ρυθμός επιτάχυνσης είναι μικτότερος από αυτόν της προηγούμενης δοκιμής.

Στο διάγραμμα 32 φαίνεται η κλίση του οδοστρώματος. Στο διάγραμμα 33 παρουσιάζεται η ταχύτητα του οχήματος.

Στο διάγραμμα 34 φαίνεται η ισχύς που παράγει η κυψέλη η οποία κυμαίνεται από 50-700W. Η καμπύλη της ισχύος, όπως και στη προηγούμενη δοκιμή, έχει για τους

ίδιους λόγους τη μορφή της καμπύλης της ταχύτητας. Στα διαγράμματα 35,36 παρουσιάζεται η τάση και η ένταση του ρεύματος της κυψέλης αντίστοιχα.

Στα διαγράμματα 37,38 φαίνεται η στιγμιαία και η συνολική κατανάλωση υδρογόνου αντίστοιχα. Η στιγμιαία κατανάλωση κυμαίνεται μεταξύ 0-0.351 ενώ η συνολική κατανάλωση είναι 1,81.

Τέλος στα διαγράμματα 39,40 παρουσιάζεται η θερμοκρασία της κυψέλης και η πίεση του υδρογόνου. Η τιμή της θερμοκρασίας της κυψέλης αλλάζει ελάχιστα και αυτό εξηγείται από το γεγονός ότι η αύξηση της ισχύος που παράγει η κυψέλη αυξάνεται σημαντικά μόνο στα τελευταία μέτρα της δοκιμής.



Διάγραμμα 33: Ταχύτητα οχήματος





Διάγραμμα 38: Συνολική κατανάλωση υδρογόνου



4.6.Συμπεράσματα

Το πρώτο συμπέρασμα που εξάγεται από τα παραπάνω πειράματα είναι ότι η κλίση του οδοστρώματος επηρεάζει κατά πολύ τη κατανάλωση του οχήματος. Ο δεύτερος παράγοντας που επηρεάζει πολύ την κατανάλωση είναι η ταχύτητα του οχήματος. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί πιο καθαρά στις πειραματικές δοκιμές 3,4 . Στη δοκιμή 3 η κλίση του οδοστρώματος είναι ελαφρώς κατηφορική ενώ στη δοκιμή 4 η κλίση είναι σχεδόν μηδενική. Σε αυτές τις δυο δοκιμές η καμπύλη της ισχύος έχει την ίδια μορφή με τη καμπύλη της ταχύτητας το οποίο δείχνει ότι η ταχύτητα είναι το μέγεθος που την επηρεάζει περισσότερο.

Επίσης από τα πειράματα φαίνεται ότι η τάση του ρεύματος της κυψέλης παίρνει τιμές από 28-42V. Αυτή η καταγραφή είναι πολύ σημαντική για το σχεδιασμό των ηλεκτρονικών και του κινητήρα του οχήματος. Με βάση αυτή τη καταγραφή μπορεί να θεωρηθεί επιτυχημένη η επιλογή του ηλεκτροκινητήρα του οχήματος "ER12".

Όσο αναφορά τη θερμοκρασία της κυψέλης, παρατηρείται ότι κυμαίνεται μεταξύ 36-44.5° C. Σύμφωνα με τα κατασκευαστικά στοιχεία της κυψέλης η μεγαλύτερη θερμοκρασία της δεν πρέπει να ξεπερνά τους 40°C. Επομένως πρέπει να διερευνηθεί η συμπεριφορά της κυψέλης καθώς η αύξηση της θερμοκρασίας της πάνω από την μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης της. Γι΄ αυτό το λόγο πρέπει η θερμοκρασία της κυψέλης να μετρηθεί και μέσα στο εργαστήριο καθώς είτε η κυψέλη έχει κάποιο τεχνικό πρόβλημα είτε ο εξαερισμός του οχήματος είναι αναποτελεσματικός. Τέλος από τα διαγράμματα της πίεσης του υδρογόνου προκύπτει ότι η πίεση επηρεάζεται από τη ένταση του ρεύματος της κυψέλης. Όταν αυξάνεται η ένταση του ρεύματος μειώνεται (ελάχιστα) η πίεση του υδρογόνου. Αυτή η διαφορά πίεσης που παρατηρείται είναι φυσιολογική σύμφωνα με τα κατασκευαστικά στοιχεία της κυψέλης.

### 5. Σύγκριση αποτελεσμάτων προσομοίωσης με τα πειραματικά αποτελέσματα

#### 5.1 Εισαγωγή

Σε αυτή την ενότητα γίνεται σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά της προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα για κάθε πείραμα που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο εισάγονται στο μοντέλο προσομοίωσης η ταχύτητα του οχήματος και η κλίση του οδοστρώματος. Το μοντέλο προσομοίωσης εξάγει την απαιτούμενη ισχύ καθώς και τη κατανάλωση υδρογόνου.

#### 5.2 Σύγκριση πειράματος 1 -Προσομοίωσης

Σε αυτή τη σύγκριση εισάγονται στο μοντέλο προσομοίωσης η ταχύτητα και η κλίση που φαίνονται στα διαγράμματα 41,42 αντίστοιχα. Στα διαγράμματα 43,44 φαίνονται τα αποτελέσματα του πειράματος ενώ στα διαγράμματα 45,46 φαίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Η μέγιστη ισχύς που καταναλώθηκε στο πείραμα ήταν 900W ενώ στο μοντέλο προσομοίωσης 800W. Ωστόσο η μέση ισχύς που καταναλώθηκε στο πείραμα ήταν αρκετά μεγαλύτερη από αυτή της προσομοίωσης. Αυτό αποτυπώνεται και στην κατανάλωση του υδρογόνου όπου στο πείραμα καταναλώθηκαν 91 ενώ στη προσομοίωση καταναλώθηκαν 31.



Iterations Διάγραμμα 41: Ταχύτητα οχήματος



Διάγραμμα 42: Κλίση οδοστρώματος



Διάγραμμα 43: Ισχύς κατά την πειραματική δοκιμή



Διάγραμμα 44: Κατανάλωση υδρογόνου κατά την πειραματική δοκιμή



Διάγραμμα 45: Ισχύς σύμφωνα με το μοντέλο προσομοίωσης



Διάγραμμα 46: Κατανάλωση υδρογόνου σύμφωνα με το μοντέλο προσομοίωσης

#### 5.3 Σύγκριση πειράματος 2 -Προσομοίωσης

Στο σύστημα προσομοίωσης εισάγονται η κλίση και η ταχύτητα που φαίνονται στα διαγράμματα 47,48 αντίστοιχα. Στα διαγράμματα 49,50 φαίνονται τα αποτελέσματα του πειράματος ενώ στα διαγράμματα 51,52 φαίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Η μέγιστη ισχύς που καταναλώθηκε στο πείραμα ήταν σχεδόν 1000W ενώ στο μοντέλο προσομοίωσης 800W. Η ποσότητα του υδρογόνου που καταναλώθηκε στο πείραμα ήταν 5.5l ενώ στη προσομοίωση ήταν 2.5l.





Διάγραμμα 49: Ισχύς κατά τη πειραματική δοκιμή



Διάγραμμα 50: Κατανάλωση υδρογόνου κατά τη πειραματική δοκιμή



Διάγραμμα 51: Ισχύς σύμφωνα με το μοντέλο προσομοίωσης



Διάγραμμα 52: Κατανάλωση υδρογόνου σύμφωνα με το μοντέλο προσομοίωσης

#### 5.4 Σύγκριση πειράματος 3 -Προσομοίωσης

Στο σύστημα προσομοίωσης εισάγονται η κλίση και η ταχύτητα που φαίνονται στα διαγράμματα 53,54 αντίστοιχα. Στα διαγράμματα 55,56 φαίνονται τα αποτελέσματα του πειράματος ενώ στα διαγράμματα 57,58 φαίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Η μέγιστη ισχύς που καταναλώθηκε τόσο στο πείραμα όσο και στο μοντέλο προσομοίωσης ήταν περίπου 900W. Η ποσότητα του υδρογόνου που καταναλώθηκε στο πείραμα ήταν 2.5l ενώ στη προσομοίωση ήταν 1l.



Διάγραμμα 55: Ισχύς κατά την πειραματική δοκιμή



Διάγραμμα 56: Κατανάλωση υδρογόνου κατά τη πειραματική δοκιμή



Διάγραμμα 57: Ισχύς σύμφωνα με το μοντέλο προσομοίωσης



Διάγραμμα 58: Κατανάλωση σύμφωνα με το μοντέλο προσομοίωσης

#### 5.5 Σύγκριση πειράματος 4 -Προσομοίωσης

Στο σύστημα προσομοίωσης εισάγονται η ταχύτητα και η κλίση που φαίνονται στα διαγράμματα 59,60 αντίστοιχα. Στα διαγράμματα 61,62 φαίνονται τα αποτελέσματα του πειράματος ενώ στα διαγράμματα 63,64 φαίνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

Η μέγιστη ισχύς που καταναλώθηκε στο πείραμα και στο μοντέλο προσομοίωσης ήταν σχεδόν 800W. Η ποσότητα του υδρογόνου που καταναλώθηκε στο πείραμα ήταν 1.5l ενώ στη προσομοίωση ήταν 1l.



Διάγραμμα 59: Ταχύτητα οχήματος



Διάγραμμα 60: Κλίση οδοστρώματος



Διάγραμμα 61: Ισχύς κατά την πειραματική δοκιμή



Διάγραμμα 62: Κατανάλωση υδρογόνου κατά τη πειραματική δοκιμή



Διάγραμμα 63: Ισχύς σύμφωνα με το μοντέλο προσομοίωσης



Διάγραμμα 64: Κατανάλωση υδρογόνου σύμφωνα με το μοντέλο προσομοίωσης

#### 5.6 Συμπεράσματα

Από τις τέσσερις παραπάνω συγκρίσεις των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτά των προσομοιώσεων προκύπτουν ορισμένα σημαντικά συμπεράσματα. Σε κάθε σύγκριση η καμπύλη της ισχύος που εξήχθη από το πείραμα έχει την ίδια μορφή με την αντίστοιχη που εξήχθη από το μοντέλο προσομοίωσης. Επίσης οι μέγιστες τιμές

που παίρνει η ισχύς στις περιπτώσεις των πειραματικών δοκιμών είναι παρόμοιες (λίγο μεγαλύτερες) με αυτές των προσομοιώσεων. Ωστόσο η μέση τιμή της ισχύος των πειραματικών δοκιμών είναι αρκετά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη των προσομοιώσεων. Αυτή η διαφορά στη μέση τιμή της ισχύος απεικονίζεται και στη κατανάλωση υδρογόνου όπου η διαφορά των πειραματικών αποτελεσμάτων από αυτά των προσομοιώσεων κυμαίνεται από 30%-150%. Η απόκλιση είναι μεγάλη αλλά μπορεί να εξηγηθεί. Επίσης είναι λογική αν συσχετιστεί με την επίδοση του οχήματος στο διαγωνισμό Shell Eco-marathon 2012 όπου το όχημα κάνοντας επίδοση 34km/kWh κατέλαβε την 4<sup>η</sup> θέση στη κατηγορία του.

Η διαφορά στη κατανάλωση προκύπτει από τις απώλειες που υπάρχουν στο πραγματικό σύστημα. Η κατανάλωση που προκύπτει από τις προσομοιώσεις είναι η ιδανική καθώς οι μόνες απώλειες που έχουν μοντελοποιηθεί είναι αυτές των γραναζιών (10%). Όπως προκύπτει και από τις συγκρίσεις των καμπυλών κατανάλωσης η απόδοση του οχήματος μπορεί να βελτιωθεί.

Επίσης από τα διαγράμματα των καμπυλών της ισχύος παρατηρείται ότι υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ των πειραμάτων και των προσομοιώσεων όταν υπάρχει κατηφορική κλίση. Αυτό εξηγεί και γιατί σε κάθε σύγκριση το ποσοστό της διαφοράς των πειραματικών αποτελεσμάτων είναι διαφορετικό από αυτό των προσομοιώσεων (όπως αναφέρθηκε παραπάνω κυμαίνεται από 30%-150%). Αυτή η διαφορά στην τιμή της ισχύος στις κατηφορικές κλίσεις υπάρχει λόγω σημαντικών απωλειών του συστήματος κίνησης. Στη περίπτωση της προσομοίωσης παρατηρείται ότι σε αρκετές κατηφόρες η ισχύς που απαιτείται από τη μηχανή του οχήματος είναι μηδενική. Αντιθέτως στα αποτελέσματα των πειραμάτων, στις ίδιες κατηφόρες, η ισχύς που καταναλώνεται έχει αρκετά μεγάλη τιμή. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα πως ο ηλεκτρικός κινητήρας του οχήματος λειτουργεί και στα κατηφορικά σημεία.

#### 6. Συμπεράσματα

Στη παρούσα διατριβή αρχικά παρουσιαάστηκε η δομή του ηλεκτρικού οχήματος "ER12". Στη συνέχεια παρουσιάστηκαν και αναλύθηκαν αποτελέσματα από τέσσερις πειραματικές δοκιμές. Επίσης αναπτύχθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης του οχήματος "ER12" στο περιβάλλον Simulink/Matlab και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων συγκρίθηκαν με αυτά των πειραματικών δοκιμών. Από αυτές τις συγκρίσεις προκύπτει ότι η ισχύς που καταναλώνει το όχημα κατά την κίνησή του είναι αρκετά μεγαλύτερη. Μια ένδειξη της απόκλισης είναι ότι σε οδόστρωμα χωρίς κλίσεις η διαφοράείναι περίπου 30% ενώ σε οδοστρώματα με έντονες κλίσεις αυτό το ποσοστό αυξάνεται. Αίτιο για αυτή τη διαφορά είναι οι απώλειες που υπάρχουν στα διάφορα συστήματα του οχήματος. Οι σημαντικότερες απώλειες εντοπίστηκαν στο σύστημα κύλισης καθώς σε κατηφορικά σημεία εντοπίζεται η μεγαλύτερη διαφορά ισχύος ανάμεσα στα πειραματικά αποτελέσματα και σε αυτά της προσομοίωσης. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι σύμφωνα με τις προσομοιώσεις σε αυτά τα κατηφορικά σημεία ο ηλεκτρικός κινητήρας είτε δεν λειτουργεί είτε λειτουργεί ελάχιστα ενώ τα αποτελέσματα των δοκιμών δείχνουν ότι ο κινητήρας σε αυτά τα σημεία λειτουργεί καταναλώνοντας σημαντική ισχύ.

#### <u>Βιβλιογραφία</u>

[1]M. Ehsani, Y. Gao, S. E. Gay, A. Emadi, "Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design", CRC Press, 2005.

[2]<u>http://www.autoblog.gr/2011/10/27/chevrolet-spark-ev-2012-to-have-116-hp/</u> (last access 3/7/2012)

[3]<u>www.tucer.tuc.gr</u> (last access 3/7/2012)

[4]Petrou A., Efstathiou D., Tsourveloudis N., "Modelling and Control of the Energy Consumption of a Prototype Urban Vehicle," Proc. of 19th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), Corfu, Greece, June 20-23, 2011.

[5]*Nexa*<sup>TM</sup> (310-0027) Power Module User's Manual 5,000,001 Series PBS, Ballard Power Systems Inc., 2003.

[6]R. A. Dougal, S. Liu, R. E. White, "Power and Life Extension of Battery-Ultracapacitor Hybrids", *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, Vol. 25, No. 1, pp. 120-131, 2002.

[7]S.J.Chapman, "Ηλεκτρικές Μηχανές", 4η Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2010.

[8] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, "Ηλεκτρονικά Ισχύος", Β΄ Έκδοση, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 1996.

[9]M. Uzunoglu, M. S. Alam, "Dynamic Modeling, Design, and Simulation of a Combined PEM Fuel Cell and Ultracapacitor System for Stand-Alone Residential Applications", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 21, No. 3, 2006.

[10]Ε.Ι.Ρίκος, Διδακτορική Διατριβή "Μέθοδοι Εξοικονόμησης Ενέργειας σε Ηλεκτροκίνητα Οχήματα", Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πάτρα 2005.

[11]V. Paladini, T. Donateo, A. de Risi, D. Laforgia, "Super-capacitors fuel-cell hybrid electric vehicle optimization and control strategy development", *Energy Conversion and Management*, Vol. 48, No. 11, pp. 3001–3008, 2007.

[12]A. F. Burke, "Ultracapacitors: Why, how, and where is the technology", *Journal of Power Sources*, Vol. 91, No. 1, pp. 37–50, 2000.

[13]Dr. Jean-Jacques Santin, Dr. Christopher H. Onder, Jérôme Bernard, Dominik Isler, Pius Kobler, Florian Kolb, Nicolas Weidmann, Professor Dr. Lino Guzzella *"The world 's most fuel efficient vehicle"*, Deutsche Nationalbobliothek, ISBN 978-3-7281-3134-8, 2004.

[14]Emma Grunditz, Emma Jannson, "Modeling and Simulation of a Hybrid Electric Vehicle for Shell Eco-marathon and an Electric Go-kart", Master of Science Thesis in Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Sweden, 2009.