

2013

ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ ΜΕ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ



ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΚΑΛΑΚΟΣ 2007010038
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΣΤΑΥΡΟΥΛΑΚΗΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ



Στη συγκεκριμένη διπλωματική επιχειρήθηκε η μελέτη, ανάλυση και προσομοίωση λειτουργίας ενός αυτοκινήτου με κυψέλες καυσίμου. Ως μοντέλο αυτοκινήτου επιλέχτηκε το Honda FCX Clarity, καθώς αποτελεί και το μόνο αυτοκίνητο παραγωγής με κυψέλες καυσίμου που κυκλοφορεί στην αγορά. Αφού προσομοιώσαμε τη λειτουργία του μοντέλου Honda FCX Clarity και καταγράψαμε τη συμπεριφορά του στα αντίστοιχα διαγράμματα, κάναμε κάποιες τροποποιήσεις στο υποσύστημα δυναμικής του οχήματος, καθώς επίσης και του υποσυστήματος συσσωρευτών, προσπαθώντας να το προσεγγίσουμε με ένα μοντέλο με περισσότερο спорτίφ χαρακτηριστικά. Δηλαδή μας ενδιέφερε η διερεύνηση εφαρμογής κυψελων καυσίμου σε ένα αυτοκίνητο επιδόσεων, μελετώντας τη διαχείριση της ενέργειας στο συγκεκριμένο αυτοκίνητο και συγκρίνοντάς τη με το αρχικό. Ως μοντέλο βάσης για το μοντέλο αυτοκινήτου με τα спорτίφ χαρακτηριστικά επιλέχτηκε το μοντέλο Lamborghini Gallardo, λόγω του πλήθους πληροφοριών για τα δυναμικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου αυτοκινήτου.

Αρχικά στην εργασία παρατίθενται κάποια στατιστικά στοιχεία σχετικά με τις ενεργειακές απαιτήσεις της Ευρώπης, προκειμένου να γίνει κατανοητή η ανάγκη για περισσότερη πράσινη ανάπτυξη στον τομέα των μεταφορών. Ακολούθως γίνεται μία εισαγωγή στην κυψέλη καυσίμου, καθορίζονται οι διάφοροι τύποι κυψέλης καυσίμου καθώς επίσης και ο τρόπος που λειτουργεί. Έπειτα γίνεται η μοντελοποίηση του αυτοκινήτου που χρησιμοποιήσαμε στην προσομοίωση, όπου και καταγράφονται όλα τα υποσυστήματα που το αποτελούν καθώς επίσης και οι αντίστοιχοι τύποι τους. Τέλος παρατίθενται τα διαγράμματα προσομοίωσης του μοντέλου μας, καθώς επίσης και τα διαγράμματα σύγκρισης με το τροποποιημένο μοντέλο.

Από το σύνολο της εργασίας είναι εύκολο να καταλάβει κανείς ότι αν τα ηλεκτροκίνητα και με μηχανές εσωτερικής καύσης αυτοκίνητα αποτελούν τη σημερινή λύση της αυτοκινητοβιομηχανίας για «πράσινη» μετακίνηση, τα αυτοκίνητα με τις κυψέλες καυσίμου αποτελούν το μέλλον γενικά της αυτοκίνησης. Ένα αυτοκίνητο που να έχει ως «καυσαέριο» την παραγωγή νερού κάθε άλλο παρά μη φιλικό για τον πλανήτη, θα μπορούσε κάποιος να το χαρακτηρίσει.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1: Ενεργειακές απαιτήσεις στην Ευρώπη.....	1
1.1 Η κατανάλωση ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση.....	1
1.2 Η κατανάλωση ενέργειας στον τομέα των μεταφορών.....	5
1.3 Εκπομπές καυσαέριων.....	9
1.4 Οδικές μεταφορές: Ο μεγαλύτερος ρυπαντής.....	10
Κεφάλαιο 2: Κυψέλη καυσίμου.....	13
2.1 Εισαγωγή.....	13
2.2 Περιγραφή – Βασικό σχέδιο.....	15
2.3 Ιστορική αναδρομή.....	17
2.4 Αρχή λειτουργίας.....	20
2.5 Είδη κυψέλης καυσίμου.....	23
2.6 Δομή κυψελίδας καυσίμου – Κατασκευαστικά στοιχεία.....	37
2.6.1 Δομικά στοιχεία κυψέλης καυσίμου.....	37
2.6.1.1 Μembrάνη ανταλλαγής ιόντων.....	39
2.6.1.2 Ηλεκτρόδια.....	39
2.6.1.3 Καταλύτης ή ηλεκτροκαταλύτης.....	41
2.6.1.4 Στρώμα διάχυσης αερίων ή πορώδες στρώμα.....	43
2.6.1.5 Διπολικές πλάκες (Bipolar plates).....	43
2.6.2 Προβλήματα κατά τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου.....	45
2.6.2.1 Προβλήματα στην απόδοση των χημικών αντιδράσεων.....	45
2.6.2.2 Διαχείριση νερού – Υγρασία.....	46
2.6.2.3 Θερμοκρασία λειτουργίας.....	47
2.6.2.4 Πίεση λειτουργίας.....	47
2.6.2.5 Πρόβλημα στη τροφοδοσία των αερίων, στη ψύξη της κυψέλης καυσίμου και πρόβλημα διαρροής.....	47
2.6.3 Συστοιχία κυψελών καυσίμου.....	49
2.6.4 Ολοκληρωμένο σύστημα κυψέλης καυσίμου – Βοηθητικά εξαρτήματα...49	
2.6.4.1 Επιπρόσθετος βοηθητικός εξοπλισμός συστήματος κυψέλης καυσίμου.....	50
2.6.4.2 Αλληλεπίδραση υποσυστημάτων.....	51
2.6.5 Υβριδικό σύστημα με χρησιμοποίηση κυψέλης καυσίμου.....	53

2.7 Πρακτικές εφαρμογές κυψέλης καυσίμου.....	54
2.8 Παραδείγματα εφαρμογών κυψέλης καυσίμου.....	55
Κεφάλαιο 3: Μελέτη λειτουργίας κυψέλης καυσίμου.....	59
3.1 Εισαγωγή.....	59
3.2 Αναλυτική λειτουργία κυψέλης καυσίμου.....	59
3.2.1 Παραγόμενη ενέργεια και τάση κυψέλης καυσίμου.....	59
3.2.2 Υπολογισμός τάσης ανοιχτού κυκλώματος.....	62
3.2.3 Εξίσωση του Nerst.....	63
3.2.4 Πυκνότητα ρεύματος – Πυκνότητα ισχύος.....	66
3.3 Υπολογισμός απόδοσης και περιορισμοί μεγίστου.....	67
3.4 Θεωρητική λειτουργία και πραγματικές συνθήκες.....	69
3.5 Περιγραφή απωλειών και πραγματικής τάσης εξόδου.....	70
3.5.1 Απώλειες Ενεργοποίησης (ΔV_{act}).....	71
3.5.2 Ωμικές απώλειες (ΔV_{ohm}).....	73
3.5.3 Απώλειες συγκέντρωσης (ΔV_{conc}).....	74
3.5.4 Συνολικές απώλειες – Τάση εξόδου.....	77
3.6 Ισοζύγιο μάζας κυψέλης καυσίμου για μοντελοποίηση.....	77
Κεφάλαιο 4: Μοντελοποίηση αυτοκινήτου με κυψέλες καυσίμου.....	79
4.1 Εισαγωγή.....	79
4.2 Ηλεκτρικό Υποσύστημα.....	81
4.3 Υποσύστημα δυναμικής του οχήματος.....	81
4.3.1 Μοντέλο διαμήκους δυναμικής του οχήματος.....	82
4.3.2 Μοντέλο ελαστικού.....	84
4.3.3 Μοντέλο διαφορικού.....	86
4.3.4 Μοντέλο μονοβάθμιου μειωτήρα στροφών.....	87
4.4 Υποσύστημα διαχείρισης της ενέργειας.....	88
4.4.1 Υποσύστημα συσσωρευτών.....	89
4.4.2 Υποσύστημα διαχείρισης της ισχύος.....	89
Κεφάλαιο 5: Δεδομένα και αποτελέσματα προσομοίωσης.....	96
5.1 Εισαγωγή.....	96
5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	98
5.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων προσομοίωσης.....	103
5.4 Σύγκριση σημάτων προσομοιώσεων.....	107
5.5 Σχολιασμός σύγκρισης αποτελεσμάτων προσομοιώσεων.....	121

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα.....	125
Κεφάλαιο 7: Βιβλιογραφία.....	127

*Ευχαριστίες στον κύριο Γεώργιο Σταυρουλάκη για την
επίβλεψη του στην εκπόνηση της διπλωματικής.*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΑΠΑΙΤΗΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ

1.1 Η κατανάλωση ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Η εγχώρια κατανάλωση της κύριας ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση των 27 κρατών-μελών για το έτος 2010 ισοδυναμούσε με 1759 εκατομμύρια τόνους πετρελαίου. Αφού παρέμεινε σχετικά αμετάβλητη κατά την περίοδο 2003-2008, έπειτα μειώθηκε κατά 5,4% το έτος 2009 (βλ. Πίνακα 1). Μεγάλο μέρος αυτής της αλλαγής μπορεί να αποδοθεί σε ένα χαμηλότερο επίπεδο της οικονομικής δραστηριότητας, ως αποτέλεσμα της οικονομικής κρίσης, παρά στη διαρθρωτική μεταβολή του τρόπου της κατανάλωσης ενέργειας. Πράγματι, το 2010 υπήρξε μια ανάκαμψη κατά 3,3% της κατανάλωσης ενέργειας στην Ευρώπη.

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Share in EU-27, 2010 (%)
EU-27	1 725	1 763	1 758	1 799	1 820	1 824	1 826	1 809	1 800	1 703	1 759	100.0
Euro area	1 203	1 232	1 231	1 261	1 279	1 281	1 277	1 270	1 266	1 201	1 238	70.4
Belgium	59.2	58.6	56.4	59.6	59.2	59.0	58.4	57.0	59.6	58.1	61.5	3.5
Bulgaria	18.7	19.5	19.1	19.5	19.0	20.1	20.6	20.3	20.1	17.6	17.8	1.0
Czech Republic	41.3	42.3	42.7	44.7	45.8	45.3	46.3	46.3	45.3	42.3	44.8	2.5
Denmark	19.8	20.3	20.0	20.8	20.3	19.8	21.1	20.7	19.3	19.7	19.3	1.1
Germany	343.6	353.3	345.4	348.5	350.1	346.0	348.9	339.8	342.9	326.4	336.1	19.1
Estonia	5.0	5.2	5.0	5.5	5.7	5.6	5.4	6.1	5.9	5.3	6.1	0.3
Ireland	14.2	15.1	15.3	15.1	15.3	15.2	15.5	16.0	15.9	14.9	15.1	0.9
Greece	28.3	29.1	29.6	30.3	30.8	31.4	31.6	31.6	31.8	30.7	28.8	1.6
Spain	124.0	127.1	130.9	135.3	141.4	144.3	144.6	146.4	142.0	130.3	130.2	7.4
France	257.8	266.2	266.7	271.5	275.7	276.6	273.0	270.3	271.9	260.0	268.6	15.3
Italy	175.8	176.3	176.7	184.2	186.6	188.5	186.9	185.1	181.7	170.0	175.5	10.0
Cyprus	2.4	2.4	2.4	2.7	2.5	2.5	2.6	2.7	2.9	2.8	2.7	0.2
Latvia	3.7	4.1	4.0	4.3	4.4	4.5	4.6	4.8	4.6	4.3	4.5	0.3
Lithuania	7.2	8.3	8.8	9.1	9.3	8.8	8.6	9.3	9.4	8.5	6.9	0.4
Luxembourg	3.6	3.8	4.0	4.2	4.7	4.8	4.7	4.6	4.6	4.4	4.7	0.3
Hungary	25.3	25.9	25.9	26.5	26.2	27.7	27.5	27.0	26.8	25.4	26.0	1.5
Malta	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9	1.0	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	0.1
Netherlands	76.6	78.9	79.0	81.3	82.7	82.5	80.2	85.9	83.9	81.6	86.9	4.9
Austria	29.2	30.7	31.0	32.8	33.4	34.4	34.5	34.1	34.3	32.5	34.6	2.0
Poland	89.8	90.5	89.4	91.6	91.9	93.1	97.9	97.4	99.0	95.3	101.7	5.8
Portugal	25.1	25.3	26.3	25.7	26.7	27.4	25.7	26.3	25.2	24.9	24.4	1.4
Romania	36.8	37.3	38.7	40.3	39.5	39.3	40.8	40.6	40.5	35.5	35.7	2.0
Slovenia	6.4	6.7	6.8	6.9	7.1	7.3	7.3	7.3	7.8	7.1	7.3	0.4
Slovakia	18.0	18.8	19.0	18.9	18.6	19.1	18.9	17.9	18.4	16.8	17.9	1.0
Finland	32.9	33.8	35.6	37.5	37.9	35.1	38.2	37.8	36.3	34.3	37.0	2.1
Sweden	47.7	50.6	51.7	50.7	52.8	51.7	50.5	50.3	50.0	45.7	51.4	2.9
United Kingdom	231.7	232.4	227.0	230.9	232.0	233.4	230.2	222.2	219.3	207.9	212.6	12.1
Norway	26.3	27.4	25.3	27.4	26.9	27.3	27.7	28.1	30.3	28.9	33.5	-
Switzerland	26.4	27.9	27.1	27.1	27.1	27.0	28.2	27.0	28.1	28.2	27.5	-
Croatia	7.8	8.0	8.3	8.9	8.8	9.0	8.9	9.3	9.1	8.7	8.6	-
FYR of Macedonia	2.7	2.6	2.5	2.8	2.8	2.9	2.9	3.0	3.0	2.8	2.9	-
Turkey	76.7	71.0	75.5	79.2	82.0	85.7	94.4	101.5	100.3	100.0	106.9	-

Source: Eurostat (online data code: ten00086)

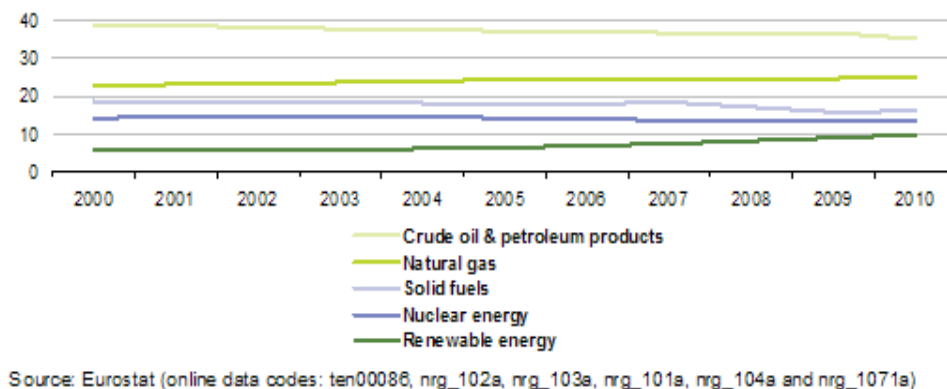
Πίνακας 1

Η εγχώρια κατανάλωση του κάθε κράτους μέλους εξαρτάται, σε μεγάλο βαθμό από τη δομή του ενεργειακού συστήματος, τη διαθεσιμότητα των φυσικών πόρων για την παραγωγή ενέργειας, καθώς και τη δομή και ανάπτυξη της κάθε οικονομίας. Αυτό ισχύει όχι μόνο για τα συμβατικά καύσιμα και την πυρηνική ενέργεια, αλλά και για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Σύμφωνα με τα στοιχεία για το σύνολο της ΕΕ, η εγχώρια κατανάλωση ενέργειας μειώθηκε σε όλα τα κράτη μέλη το 2009, με εξαίρεση τη Δανία (όπου οι μειώσεις στην κατανάλωση καταγράφηκαν ήδη από το 2008 και πάλι το 2010). Η κατανάλωση ανέκαμψε το 2010 στα περισσότερα από τα κράτη μέλη - με μόνο την Ελλάδα, την Ισπανία, την Κύπρο, την Λιθουανία και την Πορτογαλία να καταγράφουν διαδοχικές συρρικνώσεις της κατανάλωσης ενέργειας το 2009 και το 2010, που ενδεχομένως αντανakλά το χαμηλό επίπεδο οικονομικής παραγωγής και της εμπιστοσύνης των καταναλωτών σε αρκετές από αυτές τις χώρες.

Η Γερμανία είχε το υψηλότερο επίπεδο της κατανάλωσης ενέργειας το 2010, αντιπροσωπεύοντας ποσοστό 19,1% του συνόλου της ΕΕ. Η Γαλλία (15,3%), το Ηνωμένο Βασίλειο (12,1%) και η Ιταλία (10,0%) ήταν τα μόνα επιπλέον κράτη μέλη που καταγράφουν διψήφια μερίδια. Μαζί οι τέσσερις αυτές χώρες αντιπροσώπευαν το 56,4% της ακαθάριστης εγχώριας κατανάλωσης της ΕΕ.

Το σχήμα 1 παρέχει πληροφορίες σχετικά με το ενεργειακό μείγμα κατά τη διάρκεια της περιόδου 2000 - 2010. Συγκεκριμένα βλέπουμε ότι υπήρξε μια σταδιακή μείωση του μεριδίου του αργού πετρελαίου και των προϊόντων πετρελαίου, των στερεών καυσίμων και της πυρηνικής ενέργειας, ενώ υπήρξε αύξηση του μεριδίου των ανανεωσίμων πηγών ενέργειας και φυσικού αερίου. Το συνδυασμένο μερίδιο του αργού πετρελαίου, προϊόντων πετρελαίου και των στερεών καυσίμων μειώθηκε από το 56,9% της συνολικής κατανάλωσης το 2000 σε 51,0% το 2010, αντανakλώντας μια κίνηση μακριά από τα πιο ρυπογόνα ορυκτά καύσιμα. Υπάρχει επίσης μια μικρή μείωση του μεριδίου της πυρηνικής ενέργειας (0,7 ποσοστιαίες μονάδες), αν και το μερίδιό της ήταν σχετικά σταθερό μεταξύ 2007 και 2010, ενώ το φυσικό αέριο αυξήθηκε κατά 2,3 ποσοστιαίες μονάδες, έτσι ώστε να αντιπροσωπεύει περισσότερο από το ένα τέταρτο (25,1%) της κατανάλωσης ενέργειας της ΕΕ το 2010.

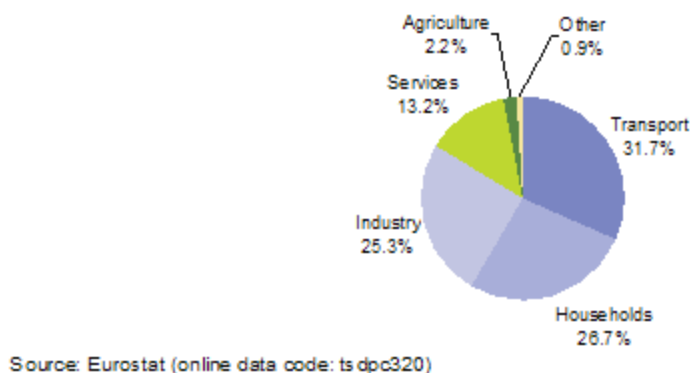


Σχήμα 1

Ωστόσο, η μεγαλύτερη αλλαγή στο ενεργειακό μείγμα ήταν η αύξηση της σχετικής σημασίας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Το μερίδιό τους στην ΕΕ αυξήθηκε κατά 4,2 ποσοστιαίες μονάδες μεταξύ 2000 και 2010, για να φθάσει στο 9,8%, μια αύξηση της τάξεως του 74%.

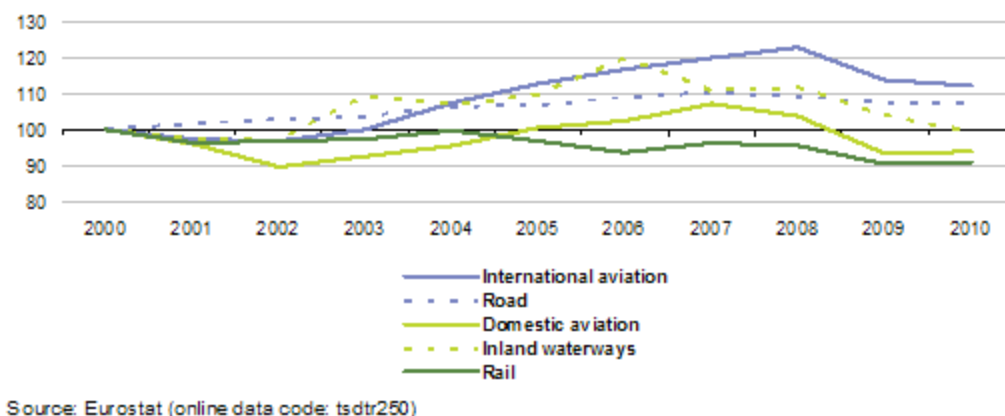
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η οικονομική δομή της οικονομίας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της ενεργειακής μεταβολής. Για παράδειγμα, οι μεταβιομηχανικές οικονομίες με ανεπτυγμένους τομείς των υπηρεσιών, θα εμφανίζουν σχετικά χαμηλά ποσοστά μεταβολής της ενέργειας, ενώ οι αναπτυσσόμενες οικονομίες μπορεί να έχουν ένα σημαντικό μέρος της την οικονομική τους δραστηριότητα μέσα σε βιομηχανικούς τομείς, οδηγώντας έτσι σε υψηλότερη ενεργειακή μεταβολή.

Η ανάλυση της τελικής τελικής χρήσης της ενέργειας στην ΕΕ για το έτος 2010 παρουσιάζει, όπως βλέπουμε και από το σχήμα 2, τρεις κυρίαρχες κατηγορίες: των μεταφορών (31,7%), τα νοικοκυριά (26,7%) και τη βιομηχανία (25,3%).



Σχήμα 2

Η συνολική κατανάλωση ενέργειας από όλους τους τρόπους μεταφορών στην ΕΕ ανήλθε σε 365,2 εκατομμύρια τόνους πετρελαίου το 2010. Υπήρχαν σημαντικές διαφορές όσον αφορά την ανάπτυξη της κατανάλωσης ενέργειας σε όλους τους τρόπους μεταφοράς, με την ταχεία ανάπτυξη των διεθνών αεροπορικών μεταφορών (22,9% μεταξύ 2000 και 2008). Ωστόσο, ακολούθησε μια σημαντική μείωση στην κατανάλωση ενέργειας για τις διεθνείς αερομεταφορές το 2009, 7,4%, και αυτό το μοτίβο συνεχίστηκε το 2010 αν και με πολύ βραδύτερο ρυθμό (-1,4%). Παρ' όλα αυτά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, η διεθνής αεροπορία είχε τη μεγαλύτερη αύξηση στην ΕΕ στην κατανάλωση ενέργειας μεταξύ του 2000 και του 2010 (αύξηση 12,2% συνολικά), ενώ υπήρχε και μια ανοδική εξέλιξη της κατανάλωσης ενέργειας για τις οδικές μεταφορές (7,2%). Στο ίδιο πνεύμα στη διεθνή αεροπορία, υπήρξε μια σημαντική κάμψη της κατανάλωσης ενέργειας για τις εγχώριες αερομεταφορές κατά τη διάρκεια του 2008 και του 2009 και παρά τη μικρή αύξηση της κατανάλωσης το 2010, η ενέργεια που καταναλώθηκε από την εγχώρια αεροπορία ήταν 5,9% χαμηλότερη από ό,τι το 2000. Υπήρξε μια σχετικά αργή και σταδιακή μείωση της κατανάλωσης ενέργειας για τις μεταφορές με τρένα, οι οποίες μειώθηκαν κατά 8,9% μεταξύ 2000 και 2010.



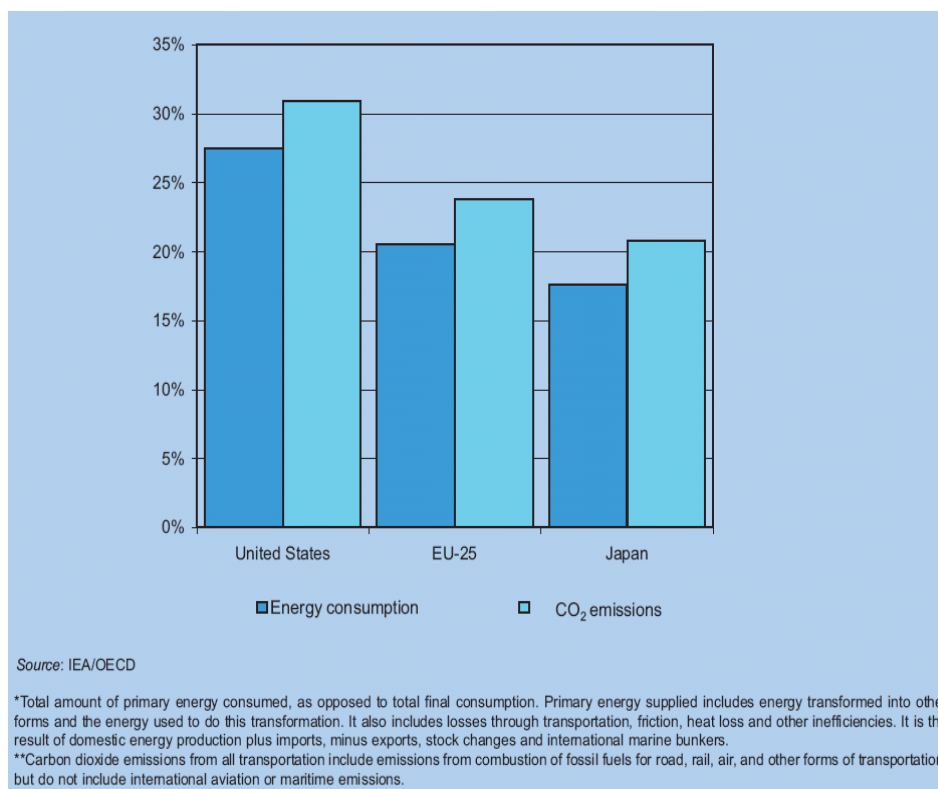
Σχήμα 3

Η μεγαλύτερη αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας μεταξύ των διαφόρων τρόπων μεταφοράς, σε απόλυτους όρους, καταγράφηκε για τις οδικές μεταφορές, όπου η κατανάλωση αυξήθηκε κατά 20,0 εκατομμύρια τόνους πετρελαίου μεταξύ 2000 και 2010, σε σύγκριση με την αύξηση 4,7 εκατομμύρια τόνους πετρελαίου για τις διεθνείς αερομεταφορές. Δεν υπήρξε σχεδόν καμία αλλαγή στο επίπεδο της κατανάλωσης ενέργειας για τις εσωτερικές πλωτές μεταφορές, ενώ η κατανάλωση ενέργειας για τις εγχώριες αερομεταφορές μειώθηκε κατά 0,4 εκατομμύρια τόνους πετρελαίου και για τους σιδηροδρόμους κατά 0,7 εκατομμύρια. Αυτές οι αλλαγές στην κατανάλωση ενέργειας αντικατοπτρίζουν τη χρήση κάθε τρόπου μεταφοράς, αλλά μπορεί επίσης να επηρεάζονται από τις τεχνολογικές αλλαγές, ειδικά όταν αυτές σχετίζονται με κέρδη ή ζημίες από τη «βιομηχανία» των καυσίμων.

1.2 Η κατανάλωση ενέργειας στο τομέα των μεταφορών

Ο τομέας των μεταφορών είναι ο ταχύτερα αναπτυσσόμενος καταναλωτής ενέργειας και παραγωγός αερίων του θερμοκηπίου στην Ευρωπαϊκή Ένωση, παρά τις προόδους στην τεχνολογία των μεταφορών και την σύνθεση των καυσίμων, οι οποίες έχουν οδηγήσει σε σημαντική μείωση των εκπομπών ορισμένων ρύπων.

Η ανάλυση των δεδομένων για την κατανάλωση ενέργειας βοηθά να εκτιμηθεί η κλίμακα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της χρήσης ενέργειας, όπως η ατμοσφαιρική ρύπανση, το φαινόμενο του θερμοκηπίου και της ρύπανσης πετρελαίου (Σχήμα 4). Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βοηθήσουν την παρακολούθηση της απόδοσης των βασικών πολιτικών με στόχο την τροποποίηση της ενεργειακής κατανάλωσης και την τόνωση της ενεργειακής απόδοσης. Το είδος και η έκταση των φαινομένων στο περιβάλλον εξαρτώνται όχι μόνο από τις πηγές ενέργειας αλλά και πώς χρησιμοποιούνται σε σχέση με το περιβάλλον.



Σχήμα 4

Η τελική κατανάλωση ενέργειας καλύπτει όλη την ενέργεια που παραδίδεται στην πόρτα του τελικού καταναλωτή (στη βιομηχανία, τις μεταφορές, τα νοικοκυριά και σε άλλους τομείς) για όλες τις ενεργειακές χρήσεις. Οι μετασχηματισμοί της ενέργειας που προορίζονται

για ιδιωτική χρήση από τις βιομηχανίες καθώς και οι απώλειες της ενέργειας του δικτύου δεν περιλαμβάνονται.

Ο πίνακας 2 δείχνει ότι στο μερίδιο των μεταφορών στην ΕΕ-25 στη κατανάλωση ενέργειας των χωρών (εκτός από τις θαλάσσιες μεταφορές), οι οδικές μεταφορές ήταν σαφώς ο μεγαλύτερος καταναλωτής ενέργειας, που καταναλώνει περίπου το 83% του συνόλου το 2004, ή 290 εκατομμύρια τόνους ισοδύναμου πετρελαίου. Αυτό μεταφράζεται ως πάνω από το ένα τέταρτο της συνολικής τελικής κατανάλωσης ενέργειας στην ΕΕ (π.χ. μεταφορές, τη βιομηχανία, τα νοικοκυριά και τις υπηρεσίες).

	1990	1995	2000	2001	2002	2003	2004	% change 1990-2004
Transport	272	295	334	337	339	345	352	29%
Rail transport	9.1	8.8	9.2	9.1	9.0	9.1	9.3	1%
% share	3.4%	3.0%	2.8%	2.7%	2.7%	2.7%	2.6%	
Road transport	228.0	245.5	274.0	278.4	282.0	284.8	290.0	27%
% share	83.8%	83.3%	82.1%	82.7%	83.1%	82.7%	82.5%	
Air transport	28.4	33.7	45.3	44.2	43.5	44.8	47.4	67%
% share	10.4%	11.4%	13.6%	13.1%	12.8%	13.0%	13.5%	
Inland navigation	6.6	6.7	5.4	5.0	5.0	5.7	5.0	-23%
% share	2.4%	2.3%	1.6%	1.5%	1.5%	1.6%	1.4%	

Source: Eurostat (Energy)

Πίνακας 2

Αεροπορικές μεταφορές ήταν ο δεύτερος μεγαλύτερος καταναλωτής ενέργειας με μερίδιο 13% στο σύνολο των μεταφορών. Οι σιδηροδρομικές μεταφορές ευθύνονταν για το 2,5%, και η εσωτερική ναυσιπλοΐα (το οποίο περιλαμβάνει και τα μικρά σκάφη που εκτελούν ακτοπλοΐα) ευθύνεται μόλις για το 1,4%.

Αυτό το συνολικό σχέδιο είχε αντίκτυπο και στα επιμέρους κράτη μέλη, αλλά σε διαφορετικό βαθμό (Πίνακας 3). Για παράδειγμα, το μερίδιο της κατανάλωσης ενέργειας των οδικών μεταφορών ήταν συχνά υψηλότερα στα νέα κράτη μέλη της Ανατολικής Ευρώπης (συμπεριλαμβανομένης της Βουλγαρίας και της Ρουμανίας), φθάνοντας το 90% και πάνω. Στη Σλοβενία, το ποσοστό αυτό έφτασε σε ποσοστό το 96%.

Κατά την εξέταση των διαφορετικών μεριδίων της κατανάλωσης ενέργειας μεταξύ των διαφόρων τρόπων μεταφοράς στα κράτη μέλη, η κύρια διαφορά ήταν η ευμετάβλητη ισορροπία μεταξύ των οδικών και αεροπορικών μεταφορών που είναι οι δύο τρόποι μεταφοράς που έχουν δει την υψηλότερη αύξηση των τελευταίων χρόνων. Τα μερίδια των

άλλων τρόπων μεταφοράς - σιδηροδρομικές και εσωτερικές πλωτές μεταφορές - ανάλογα με την περίπτωση, δεν διαφέρουν πολύ.

		1990	2004	% change 1990-2004	% share in total national consumption in 2004
EU-25	Road	227 957	290 013	27%	82.5%
	Railways	9 125	9 250	1%	2.6%
	Air transport	28 378	47 420	67%	13.5%
	Inland navigation	6 578	5 047	-23%	1.4%
BE	Road	6 442	8 488	32%	83.2%
	Railways	177	170	-4%	1.7%
	Air transport	955	1 427	49%	14.0%
	Inland navigation	129	116	-10%	1.1%
BG	Road	2 000	2 128	6%	89.9%
	Railways	216	65	-70%	2.7%
	Air transport	284	173	-39%	7.3%
	Inland navigation	18	0	-100%	0.0%
CZ	Road	2 311	5 550	140%	90.0%
	Railways	272	277	2%	4.5%
	Air transport	221	334	51%	5.4%
	Inland navigation	-	6	-	0.1%
DK	Road	3 066	4 027	31%	78.4%
	Railways	113	101	-11%	2.0%
	Air transport	683	888	30%	17.3%
	Inland navigation	150	121	-19%	2.4%
DE	Road	50 418	53 187	5%	84.9%
	Railways	2 116	1 877	-11%	3.0%
	Air transport	5 627	7 312	30%	11.7%
	Inland navigation	656	234	-64%	0.4%
EE	Road	730	581	-20%	87.1%
	Railways	65	48	-26%	7.2%
	Air transport	36	30	-17%	4.5%
	Inland navigation	7	8	14%	1.2%
IE	Road	1 546	3 811	147%	82.9%
	Railways	48	43	-10%	0.9%
	Air transport	365	727	99%	15.8%
	Inland navigation	26	18	-31%	0.4%
EL	Road	3 903	6 022	54%	75.7%
	Railways	75	61	-19%	0.8%
	Air transport	1 264	1 208	-4%	15.2%
	Inland navigation	566	669	18%	8.4%
ES	Road	17 676	30 817	74%	80.3%
	Railways	528	1 040	97%	2.7%
	Air transport	2 467	5 006	103%	13.0%
	Inland navigation	1 655	1 534	-7%	4.0%
FR	Road	36 171	42 273	17%	84.3%
	Railways	1 150	1 299	13%	2.6%
	Air transport	3 870	6 256	62%	12.5%
	Inland navigation	718	308	-57%	0.6%
IT	Road	30 393	39 094	29%	89.0%
	Railways	738	900	22%	2.0%
	Air transport	1 884	3 707	97%	8.4%
	Inland navigation	389	248	-36%	0.6%
CY	Road	:	553	:	64.6%
	Air transport	:	303	:	35.4%
LV	Road	798	818	3%	:
	Railways	188	93	-51%	:
	Air transport	73	48	-34%	:
	Inland navigation	:	:	:	:
LT	Road	1 719	1 197	-30%	90.8%
	Railways	132	77	-42%	5.8%
	Air transport	135	40	-70%	3.0%
	Inland navigation	5	5	0%	0.4%
LU	Road	863	2 144	148%	83.1%
	Railways	13	10	-23%	0.4%
	Air transport	131	425	224%	16.5%

		1990	2004	% change 1990-2004	% share in total national consumption in 2004
HU	Road	2 580	3 484	35%	90.1%
	Railways	270	162	-40%	4.2%
	Air transport	164	221	35%	5.7%
	Inland navigation	9	1	-89%	0.0%
MT	Road	149	166	11%	62.2%
	Air transport	72	101	40%	37.8%
NL	Road	8 040	11 004	37%	73.2%
	Railways	147	188	28%	1.3%
	Air transport	1 614	3 563	121%	23.7%
	Inland navigation	556	283	-49%	1.9%
AT	Road	3 929	6 779	73%	88.2%
	Railways	357	304	-15%	4.0%
	Air transport	310	598	93%	7.8%
	Inland navigation	7	9	29%	0.1%
PL	Road	5 940	10 503	77%	92.8%
	Railways	1 095	528	-52%	4.7%
	Air transport	205	285	39%	2.5%
	Inland navigation	99	1	-99%	0.0%
PT	Road	3 026	6 343	110%	87.2%
	Railways	82	67	-18%	0.9%
	Air transport	576	842	46%	11.6%
	Inland navigation	43	25	-42%	0.3%
RO	Road	3 579	4 664	30%	90.1%
	Railways	282	333	18%	6.4%
	Air transport	233	140	-40%	2.7%
	Inland navigation	312	41	-87%	0.8%
SI	Road	872	1 330	53%	96.4%
	Railways	29	28	-3%	2.0%
	Air transport	27	21	-22%	1.5%
SK	Road	1 340	1 497	12%	94.4%
	Railways	100	61	-39%	3.8%
	Air transport	:	27	:	1.7%
FI	Road	3 631	3 936	8%	82.1%
	Railways	99	98	-1%	2.0%
	Air transport	463	554	20%	11.6%
	Inland navigation	116	206	78%	4.3%
SE	Road	6 103	7 140	17%	84.9%
	Railways	252	278	10%	3.3%
	Air transport	764	847	11%	10.1%
	Inland navigation	143	147	3%	1.7%
UK	Road	36 312	39 319	8%	72.6%
	Railways	1 076	1 530	42%	2.8%
	Air transport	6 794	12 232	80%	22.6%
	Inland navigation	1 269	1 107	-13%	2.0%
HR	Road	:	1 658	:	91.0%
	Railways	32	53	66%	2.9%
	Air transport	:	81	:	4.4%
	Inland navigation	:	29	:	1.6%
TR	Road	8 377	10 338	23%	80.7%
	Railways	243	230	-5%	1.8%
	Air transport	480	1 861	288%	14.5%
	Inland navigation	250	381	52%	3.0%
IS	Road	181	213	18%	61.9%
	Air transport	84	125	49%	36.3%
	Inland navigation	19	6	-68%	1.7%
NO	Road	2 591	3 285	27%	67.9%
	Railways	104	142	37%	2.9%
	Air transport	505	603	19%	12.5%
	Inland navigation	926	810	-13%	16.7%

Source: Eurostat (Energy)

*Data for 1990 may not always be reliable for some countries.

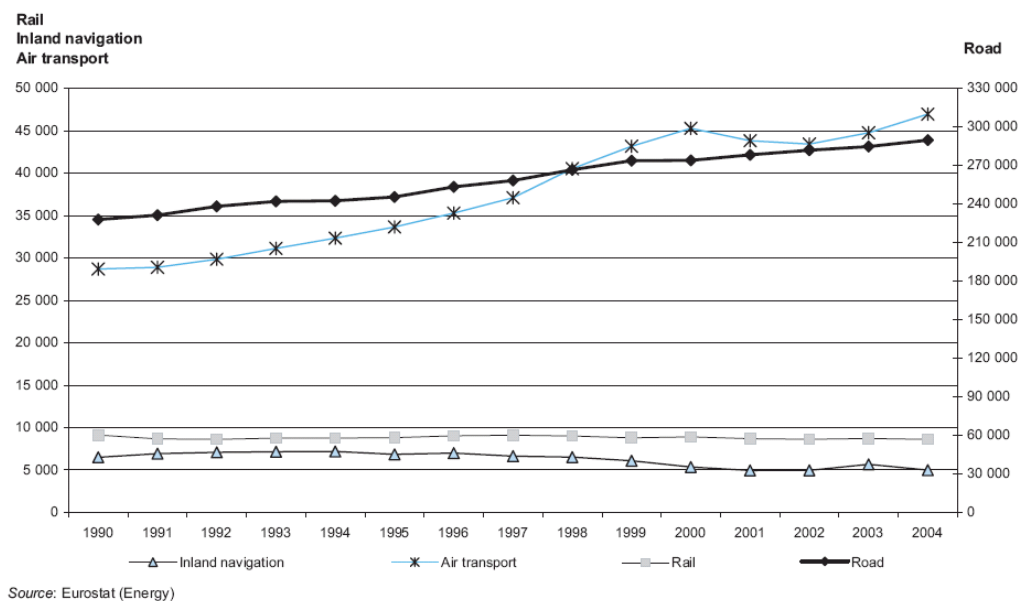
Πίνακας 3

Για παράδειγμα, η Κύπρος και η Μάλτα που εμφανίζουν τα χαμηλότερα ποσοστά της κατανάλωσης των οδικών μεταφορών ήταν επίσης από τα κράτη μέλη, όπου τα μερίδια των αερομεταφορών ήταν υψηλότερα: αντίστοιχα 35% και 38%. Αυτό ισχύει και για την Ισλανδία. Τουρισμός και γεωγραφική απομόνωση καθώς και τα νησιά είναι σαφώς οι κύριες αιτίες αυτής της διαφορετικής ισορροπίας, καθώς επίσης και φυσικά η απουσία εναλλακτικών τρόπων μεταφοράς.

Όσο για την κατανάλωση ενέργειας στις σιδηροδρομικές μεταφορές, τα μερίδια ήταν γενικά υψηλότερα στα νέα κράτη μέλη, αντανακλώντας κυρίως τη μεγάλη σημασία των σιδηροδρομικών μεταφορών σε αυτές τις χώρες

Τέλος, το μερίδιο της κατανάλωσης ενέργειας στην εσωτερική ναυσιπλοΐα έφτασε στο 8% στην Ελλάδα, το οποίο μπορεί να εξηγηθεί από τη σημασία του τουρισμού. Ένα μερίδιο που όμως έχει ξεπεραστεί από τη Νορβηγία (17%). Αυτό εξηγεί το πόσο σημαντικό είναι για τις χώρες αυτές το δίκτυο εσωτερικών πλωτών οδών.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2 και στο Σχήμα 5, μεταξύ 1990 και 2004 αυξήθηκε η κατανάλωση ενέργειας κατά 67% στον τομέα των αερομεταφορών, η οποία ήταν σημαντικά μεγαλύτερη από την αύξηση κατά 27% των οδικών μεταφορών. Η κατανάλωση ενέργειας στον τομέα των σιδηροδρομικών μεταφορών αυξήθηκε οριακά κατά 1%. Αντιθέτως, η μόνη μείωση που παρατηρήθηκε ήταν στην εσωτερική ναυσιπλοΐα (-23%). Σε απόλυτους αριθμούς, ωστόσο, στις οδικές μεταφορές καταναλώθηκαν επιπλέον 62 εκατομμύρια τόνοι ισοδύναμου πετρελαίου, αυξάνοντας το γενικό σύνολο της κατανάλωσής του από 228 σε 290 τόνους εκατομμύρια πετρελαίου.



Σχήμα 5

Οι αλλαγές στην κατανάλωση ενέργειας αντανακλούν την αύξηση ή μείωση στη δημοτικότητα των μέσων μεταφοράς, αλλά και εν μέρει στην ανάπτυξη πιο αποδοτικών τεχνολογιών. Στις σιδηροδρομικές μεταφορές, για παράδειγμα, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας αυξήθηκε λόγω της αύξησης του μεριδίου των ηλεκτροφόρων γραμμών, το οποίο εκτόπισε την χρήση καυσίμου ντίζελ.

Τα σχέδια της ΕΕ αντανακλούν την παγκόσμια κατάσταση όλων των κρατών μελών, αλλά υπάρχουν και ορισμένες εθνικές ιδιαιτερότητες (Πίνακας 3). Αυξήσεις στην κατανάλωση ενέργειας της τάξης του 100% ή παραπάνω, μεταξύ του 1990 και του 2004 είχαν αρκετές χώρες (Τσεχική Δημοκρατία, Ισπανία, Ιρλανδία, Ιταλία, Λουξεμβούργο, Κάτω Χώρες και Πορτογαλία), οι οποίες εμφάνισαν υψηλούς ρυθμούς ανάπτυξης των επίγειων και εναέριων μεταφορών. Η κατανάλωση ενέργειας στις αερομεταφορές αυξήθηκε κατά τουλάχιστον 224% στο Λουξεμβούργο. Μια αύξηση που στην πραγματικότητα ξεπεράστηκε από την Τουρκία (288%). Όσον αφορά τις υπόλοιπες χώρες η Ισπανία και η Φινλανδία ήταν τα μόνα κράτη μέλη που ξεχωρίζουν, με αυξήσεις της κατανάλωσης ενέργειας κατά 97% στην Ισπανία στις σιδηροδρομικές μεταφορές, καθώς και 115% στη Φινλανδία στην εσωτερική ναυσιπλοΐα.

Η αύξηση της κατανάλωσης καυσίμων κίνησης δεν ήταν κατ' ανάγκη υψηλότερη στα νέα κράτη μέλη της Ανατολικής Ευρώπης, εκτός από την Τσεχική Δημοκρατία (140%). Επιπλέον, η κατανάλωση ενέργειας στις οδικές μεταφορές δεν οδηγείτω πάντα προς τα πάνω: στην Εσθονία και τη Λιθουανία, για παράδειγμα, η κατανάλωση μειώθηκε στην πραγματικότητα, κατά 20% και 30% αντίστοιχα.

1.3 Εκπομπές καυσαερίων

Σχεδόν το σύνολο της κατανάλωσης ενέργειας στον τομέα των μεταφορών αποτελείται από τα ορυκτά καύσιμα. Στην πραγματικότητα, σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος, η ΕΕ εξαρτάται κατά 98% από αυτούς. Η καύση των ορυκτών καυσίμων παράγει διοξείδιο του άνθρακα (CO₂) και άλλα αέρια, πολλά από τα οποία είναι επιβλαβή για την ανθρώπινη υγεία. Οι ποσότητες και το προφίλ των εκπομπών αυτών εξαρτάται από την ποσότητα και την ποιότητα του καυσίμου, την τεχνολογία που χρησιμοποιείται κατά την καύση στο τέλος του σωλήνα (φίλτρα, καταλυτικοί μετατροπείς), καθώς επίσης και από άλλους παράγοντες, όπως η ταχύτητα, ο παράγοντας φόρτωσης, η θερμοκρασία και η συντήρηση του κινητήρα.

Τα αέρια του θερμοκηπίου είναι αποτέλεσμα των εκπομπών αερίων από την καύση βενζίνης, ντίζελ και κηροζίνης σε κινητήρες εσωτερικής καύσης. Το διοξείδιο του άνθρακα είχε την μεγαλύτερη συνεισφορά στην υπερθέρμανση του πλανήτη, αφού αντιπροσώπευε το 97% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου το 2004 στην ΕΕ. Ωστόσο, αν και το διοξείδιο του άνθρακα είναι το πιο σημαντικό αέριο του φαινομένου του θερμοκηπίου - και συχνά το

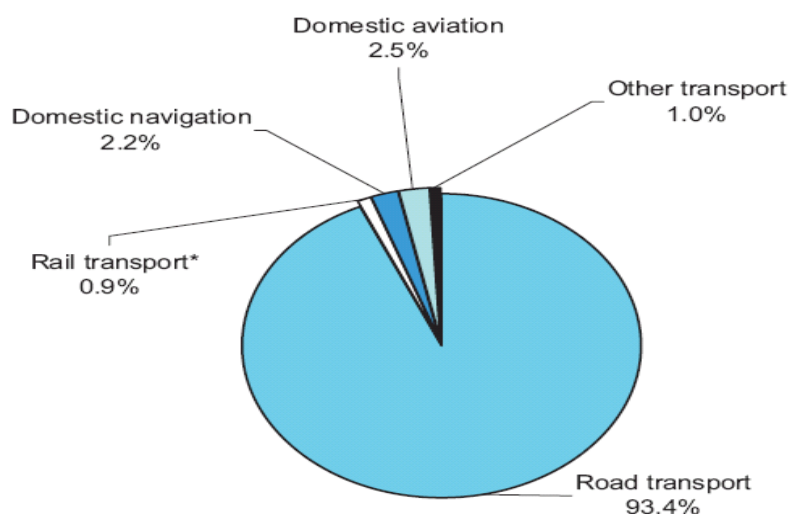
επίκεντρο της δημόσιας συζήτησης - δεν είναι άμεσα επιβλαβές (δηλαδή, δεν είναι τοξικό) για την ανθρώπινη υγεία.

Οι βιομηχανικές χώρες που έχουν υπογράψει το Πρωτόκολλο του Κιότο, το οποίο εγκρίθηκε το 1997, υποχρεούνται να μειώσουν τις εκπομπές σε έξι από τα αέρια του θερμοκηπίου (διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, υποξείδιο του αζώτου, υδροφθοράνθρακες, υπερφθοράνθρακες και εξαφθοριούχο θείο) κατά μέσο όρο 5,2% κάτω από τα επίπεδα του 1990, από το έτος 2008 έως και το έτος 2012. Ωστόσο, το Πρωτόκολλο του Κιότο δεν καλύπτει τις εκπομπές αερίων από τις διεθνείς πτήσεις και τις θαλάσσιες μεταφορές - οι οποίες γίνονται ολοένα και πιο γρήγορα μεγάλοι ρυπαντές.

Από την πλευρά, η Ευρωπαϊκή Ένωση συμφώνησε σε μείωση κατά 8% των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, με μειώσεις για τα κράτη μέλη που συμφώνησαν στο πλαίσιο της λεγόμενης συμφωνίας κατανομής των βαρών, η οποία επιτρέπει σε ορισμένες χώρες να αυξήσουν τις εκπομπές τους, με την προϋπόθεση ότι αυτά αντισταθμίζονται από μειώσεις σε άλλα κράτη μέλη.

1.4 Οδικές μεταφορές: Ο μεγαλύτερος ρυπαντής

Όπως θα μπορούσε κανείς να υποψιαστεί το μερίδιο 83% της ενέργειας που καταναλώνεται είναι για τις οδικές μεταφορές. Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος, το 93% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τις μεταφορές προήλθε από τις οδικές μεταφορές το 2004 (βλ. Σχήμα 6).



Source: European Environment Agency

* Data cover diesel (and some coal-powered) trains only; electric traction is therefore excluded.

Σχήμα 6

Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι το μερίδιο που κατέχουν οι εκπομπές ήταν αναλογικά υψηλότερο από το μερίδιο της ενέργειας που καταναλώνεται, πράγμα το οποίο αντανakλά τις μεθοδολογικές διαφορές, μεταξύ των οποίων είναι ο αποκλεισμός των διεθνών αεροπορικών και θαλάσσιων μεταφορών από τα δεδομένα εκπομπής, το οποίο αυξάνει τεχνητά το μερίδιο των οδικών μεταφορών. Πράγματι, αυτός ο αποκλεισμός των διεθνών αεροπορικών μεταφορών εξηγεί γιατί το μερίδιο των εκπομπών από τις αεροπορικές μεταφορές έφθασε μόλις το 2,5%, το οποίο δεν είναι πολύ περισσότερο από τις εσωτερικές πλωτές μεταφορές (2,2%).

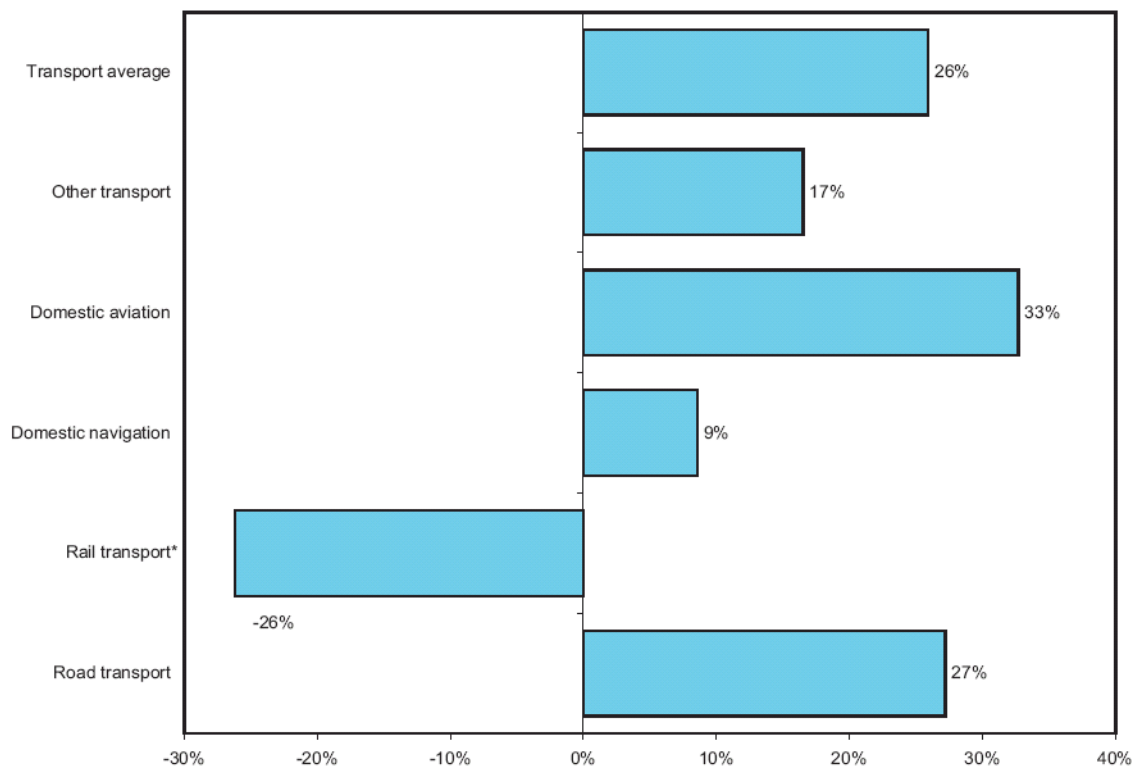
Επιπλέον, αν και οι σιδηροδρομικές μεταφορές φαίνεται να έχουν το μικρότερο ποσοστό σε ρύπανση, με μερίδιο της τάξης του 0,9%, το πραγματικό ποσοστό θα είναι μεγαλύτερο από αυτό, αν και οι ηλεκτροκίνητες σιδηροδρομικές μεταφορές είχαν ληφθεί υπόψη. Το μερίδιο της ηλεκτρικής ενέργειας στη συνολική ενεργειακή κατανάλωση σιδηροδρομικών ήταν 66%, δύο φορές το μερίδιο της ενέργειας ντίζελ.

Ίσως δεν αποτελεί έκπληξη, το γεγονός ότι οι οδικές μεταφορές ευθύνονται για το 76% των εκπομπών αερίων, προδρόμων ουσιών του όζοντος, για το 72% των αιωρούμενων σωματιδίων και για το 71% όξινων ουσιών που εκπέμπονται στον τομέα των μεταφορών. Ωστόσο, τα νέα πρότυπα εκπομπών καυσαερίων Euro κάνουν υποχρωτική τη χρήση των φίλτρων σωματιδίων και των καταλυτικών μετατροπών.

Η ευρεία διαθεσιμότητα καυσίμων χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο είναι σημαντική για την εισαγωγή των αυτοκινήτων που είναι εξοπλισμένα με άμεσο ψεκασμό καυσίμου, τα οποία προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες για την αποδοτικότητα των καυσίμων και επιτρέπουν την περαιτέρω μείωση των εκπομπών νιτρικών οξειδίων.

Σύμφωνα με την ΕΕ, από τις χώρες των οποίων τα στοιχεία είναι διαθέσιμα, όλες οι χώρες κατάφεραν να μειώσουν την περιεκτικότητα σε θείο των καυσίμων από το 2005, ενώ οι υπόλοιπες αναμένεται να το πράξουν. Ορισμένες χώρες είχαν επιτύχει ακόμη και το στόχο του 2009 για καύσιμα μηδενικού θείου.

Εξετάζοντας την εξέλιξη των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά την περίοδο 1990-2004 (βλ. Σχήμα 7), οι εγχώριες αερομεταφορές κατέγραψαν τη μεγαλύτερη αύξηση (33%). Ακολούθησαν οι οδικές μεταφορές (27%), οι υπόλοιπες μεταφορές (17%) και η εσωτερική ναυσιπλοΐα (9%). Η μόνη πτώση (μεταξύ των διαφόρων μέσων μεταφοράς) ήταν στις σιδηροδρομικές μεταφορές (-26%).



Source: European Environment Agency

Σχήμα 7

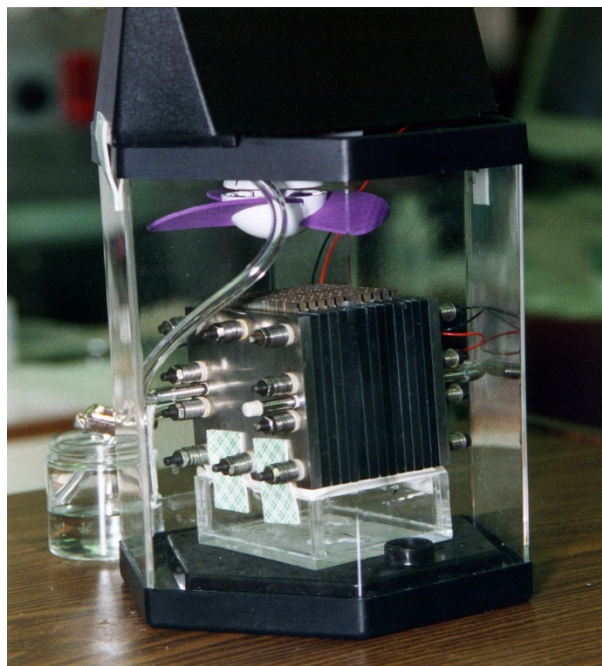
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

2.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει έντονη ανησυχία λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου και υπάρχει μεγάλη ανάγκη να μειωθούν οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από τις καθημερινές βιομηχανικές δραστηριότητες του ανθρώπου. Επιπρόσθετα, η άνοδος των τιμών του πετρελαίου δημιουργεί ενεργειακό ζήτημα και αναζητείται διέξοδος με την χρήση εναλλακτικών καυσίμων διαφορετικών από τους υδρογονάνθρακες για τη παραλαβή «καθαρής» ηλεκτρικής ενέργειας και την αποφυγή εκπομπής βλαβερών ρύπων που οδηγούν στην υποβάθμιση του περιβάλλοντος. Παράλληλα έχει αναπτυχθεί ένας γενικός προσανατολισμός προς τη βελτίωση της απόδοσης των διάφορων μετατροπών ενέργειας από τη μια μορφή στην άλλη. Συγκεκριμένα οι αυτοκινητοβιομηχανίες, πέρα από το ότι προσανατολίζονται να αυξήσουν το βαθμό απόδοσης κατά την καύση του καυσίμου, έχουν στόχο να περιορίσουν ή ακόμα να μηδενίσουν εντελώς τις βλαβερές εκπομπές των καυσαερίων.

Οι παραπάνω ανάγκες έχουν στρέψει το ενδιαφέρον σε ένα εναλλακτικό μηχανισμό παραγωγής ενέργειας που χρησιμοποιεί σαν καύσιμο το υδρογόνο το οποίο υπάρχει σε αφθονία στη φύση. Αρχικά η τεχνολογία της κυψέλης καυσίμου απασχολούσε περιορισμένη επιστημονική ειδίκευση κυρίως χημικών μηχανικών καθώς και χημικών που ασχολούνταν με τη τεχνολογία των καταλυτών και της ηλεκτροχημείας. Η αυξανόμενη ανάγκη χρήσης της τεχνολογίας της κυψέλης καυσίμου, ακόμα και σε καθημερινές εφαρμογές και η αντικατάσταση άλλων εξαντλήσιμων καυσίμων, προκάλεσε το ενδιαφέρον και άλλων επιστημονικών ειδικοτήτων δίνοντας στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου. Ένα σύστημα κυψέλης καυσίμου αποτελείται από μια συστοιχία με κατάλληλη διάταξη επεξεργασίας καυσίμου καθώς και δυνατότητα μεταφοράς θερμότητας, παραλαβής παραγόμενης ισχύος και κατάλληλα συστήματα ελέγχου. Η σημασία όλων αυτών των διατάξεων, αναλύεται στα επόμενα τμήματα της εργασίας, και τονίζεται ο ρόλος τους στη ολοκληρωμένη λειτουργία του συστήματος.



Εικόνα 1

Κυψέλη Καυσίμου. Ο πραγματικός αριθμός κυττάρων καυσίμων είναι η βαλμένη σε στρώσεις κυβική δομή στο κέντρο της εικόνας

Η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακή, γαιοθερμία, αιολική), έχει συνεισφέρει σημαντικά στην επίλυση του ενεργειακού προβλήματος. Η ολοένα αυξανόμενη εκμετάλλευση της ηλιακής και αιολικής ενέργειας από οργανωμένα συστήματα ηλεκτροπαραγωγής (π.χ. εγκατάσταση φωτοβολταϊκών σταθμών και ανεμογεννητριών) αντικαθιστά τη χρήση ορυκτών καυσίμων και του πετρελαίου και οδηγεί στη παραγωγή «καθαρής» ηλεκτρικής ενέργειας, χωρίς περιβαλλοντική επιβάρυνση, λόγω μηδενικής εκπομπής ρύπων κατά τη παραγωγική διαδικασία.

Η κατεύθυνση αυτής της εκμετάλλευσης των ανανεώσιμων πόρων του πλανήτη, οδήγησε στη κατασκευή (μετά απο ανάλογη επιστημονική μελέτη) ολοκληρωμένων σταθμών παραγωγής, με κατάλληλο ηλεκτρομηχανολογικό εξοπλισμό που λειτουργεί αυτόνομα προς τη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Η ηλεκτροπαραγωγική αυτή μονάδα έχει τη δυνατότητα να συνδεθεί με το δίκτυο του ηλεκτρικού ρεύματος με στόχο τη τροφοδοσία με ρεύμα προς πώληση, ή να λειτουργεί αυτόνομα σε μια περιοχή για τη κάλυψη ιδίων αναγκών. Στη περίπτωση που η σύνδεση με το δίκτυο είναι πρακτικά ανέφικτη (π.χ. σε μια απομακρυσμένη περιοχή), τότε γίνεται αποκλειστικά επιλογή του αυτόνομου συστήματος.

Στη περίπτωση της επιλογής αυτόνομου συστήματος, είναι δυνατό να ενσωματωθεί στο σύστημα, η διάταξη της κυψέλης καυσίμου. Είναι μια χημική διάταξη παραγωγής ενέργειας με χρήση καυσίμου υδρογόνου και συνεισφέρει στη διασφάλιση της αυτονομίας του συστήματος. Οι λόγοι που οδηγούν στην ενσωμάτωση της διάταξης της κυψέλης καυσίμου είναι η διακύμανση του φορτίου καθώς και αλλαγές στην ημερήσια βάση του καιρού. Οι

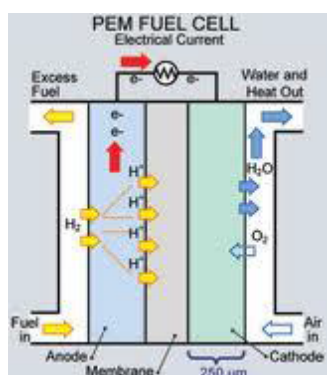
κυψέλες καυσίμου δεν απαιτούν κάποιο ιδιαίτερο περιβάλλον για την εγκατάσταση και λειτουργία τους και παράγουν ελάχιστους έως και μηδενικούς ρύπους (ειδικά όταν χρησιμοποιούν καύσιμο καθαρό υδρογόνο). Όταν το καύσιμο περιέχει άνθρακα, εκπέμπονται και αέρια επιβλαβή για το περιβάλλον (π.χ. διοξείδιο του άνθρακα), αλλά σε ποσότητες πολύ μικρότερες από έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης αντίστοιχης ισχύος. Επιτυγχάνουν ακόμα πάρα πολύ καλό βαθμό απόδοσης κατά την ηλεκτροπαραγωγή (40-80%).

Οι διατάξεις των κυψελών καυσίμου στη σημερινή εποχή υπόκεινται σε εκτεταμένη μελέτη από αρκετούς κατασκευαστές με στόχο την ανάπτυξη τους σε διατάξεις ηλεκτροπαραγωγής σε αυτόνομους σταθμούς καθώς και σε κινητές εφαρμογές. Η ζωτικότητα και η αποτελεσματικότητα της τεχνολογίας της κυψέλης καυσίμου βασίζεται στη κατανόηση, πρόβλεψη και έλεγχο των αντίστοιχων συστημάτων κελιών καυσίμου, κάτω από μια πληθώρα διαφορετικών συνθηκών του περιβάλλοντος και μια ευρεία περιοχή σημείων λειτουργίας.

2.2 Περιγραφή – Βασικό Σχέδιο

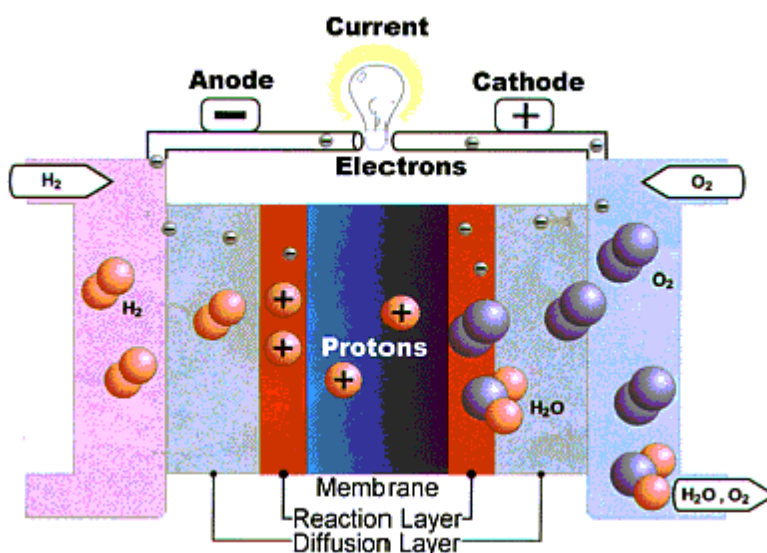
Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να χαρακτηριστούν σαν κέντρα ενός συστήματος το οποίο πραγματοποιεί μια χημική αντίδραση μεταξύ ενός καυσίμου και ενός οξειδωτικού παράγοντα με την συνεισφορά ενός καταλύτη. Είναι ηλεκτροχημικές συσκευές και αυτές οι οποίες αναλαμβάνουν τη μετατροπή του καυσίμου σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια.

Οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν γενικότερα υγρά ή αέρια καύσιμα, όπως το υδρογόνο, ή τους υδρογονάνθρακες, βιοκαύσιμα, αλκοόλες (μεθανόλη, αιθανόλη) και το φυσικό αέριο. Η πιο απλοϊκή μορφή της κυψέλης καυσίμου, είναι η κυψέλη καυσίμου υδρογόνου που χρησιμοποιεί σαν καύσιμο το υδρογόνο και σαν οξειδωτικό παράγοντα το οξυγόνο ή αέρα και σαν προϊόν της αντίδρασης παράγεται νερό και θερμότητα. Υπάρχουν αρκετοί συνδυασμοί καυσίμου και οξειδωτικού παράγοντα. Άλλες διατάξεις κυψελών καυσίμου χρησιμοποιούν καύσιμο υδρογονάνθρακες ή αλκοόλες και οξειδωτικούς παράγοντες χλωρίδια, ή διοξείδιο του χλωρίου.



Εικόνα 2
Σχηματική παράσταση λειτουργίας κυψέλης καυσίμου

Η κυψέλη καυσίμου αποτελεί ένα μηχανισμό για την ηλεκτροχημική μετατροπή της ενέργειας μετατρέποντας υδρογόνο και οξυγόνο σε νερό, παράγοντας ταυτόχρονα με τη διαδικασία αυτή, ηλεκτρισμό και θερμότητα. Τα αντιδρώντα (υδρογόνο και οξυγόνο) κυκλοφορούν μέσα στη κυψέλη, ενώ τα προϊόντα της αντίδρασης (νερό) ρέουν έξω από αυτήν. Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να λειτουργούν επ'αόριστον σαν μια μορφή χημικού αντιδραστήρα εφόσον διατηρείται η συνεχής τροφοδοσία των προϊόντων (υδρογόνο και οξυγόνο).



Εικόνα 3
Ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στο εσωτερικό της κυψέλης Καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου είναι εντελώς διαφορετικές από τους συμβατικούς ηλεκτροχημικούς συσσωρευτές κελιών καυσίμου (μπαταρίες), επειδή καταναλώνουν τα αντιδρώντα από μια εξωτερική πηγή πηγής τροφοδοσίας που πρέπει συνεχώς να ανανεώνεται, και αποτελεί ένα ανοιχτό θερμοδυναμικό σύστημα, ενώ οι μπαταρίες αποθηκεύουν ηλεκτρική ενέργεια σε χημική μορφή και αποτελούν ένα κλειστό θερμοδυναμικό σύστημα. Επίσης οι μπαταρίες όταν καταναλώσουν όλη την αποθηκευμένη χημική ενέργεια πρέπει να αντικατασταθούν, ενώ η κυψέλη καυσίμου έχει αδιάκοπη λειτουργία υπό τη προϋπόθεση σταθερής παροχής καυσίμου και οξειδωτικού παράγοντα.

Οι κυψέλες καυσίμου μετατρέπουν κατευθείαν τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρική, χωρίς να μεσολαβεί ενδιάμεση μετατροπή σε μηχανική ενέργεια, και αυτό το χαρακτηριστικό τις διαχωρίζει από τις θερμικές μηχανές όπως οι μηχανές εσωτερικής καύσης. Επομένως τα ενδιάμεσα στάδια παραγωγής μηχανικού έργου και θερμότητας αποφεύγονται και η απόδοση της κυψέλης καυσίμου δεν περιορίζεται από τον θερμοδυναμικό κύκλο του Carnot. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την επίτευξη υψηλής τιμής απόδοσης συγκριτικά με μια συμβατική μηχανή εσωτερικής καύσης.

Οι κυψέλες καυσίμου ανέρχονται σε πολλές ποικιλίες, όμως όλες δουλεύουν με ένα συγκεκριμένο τρόπο. Αποτελούνται από τρία στοιχεία που συνδέονται μεταξύ τους. Την άνοδο, τον ηλεκτρολύτη και τη κάθοδο. Δύο χημικές αντιδράσεις πραγματοποιούνται στην επιφάνεια των τριών διαφορετικών στοιχείων. Το αποτέλεσμα είναι η κατανάλωση του καυσίμου και παράλληλα η δημιουργία νερού ή διοξειδίου του άνθρακα καθώς και η παραγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος που θα τροφοδοτήσει ηλεκτρικές συσκευές και το οποίο χαρακτηρίζεται ως παραγόμενο ηλεκτρικό φορτίο.

Η έννοια της κατάλυσης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη λειτουργία μιας κυψέλης καυσίμου, και η έρευνα για τη βελτίωση της αποδόσεων της γίνεται κυρίως σε αυτόν τον τομέα, τομέας εξ ορισμού μελετώμενος στην κλίμακα του νανομέτρου.

Η ηλεκτροχημική αντίδραση στη κυψέλη καυσίμου συμβαίνει ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και τον ηλεκτρολύτη και γι'αυτό θα πρέπει να υπάρχουν πολλές περιοχές που να μπορεί η ουσία που αντιδρά να έρχεται σε επαφή με το ηλεκτρόδιο και τον ηλεκτρολύτη ταυτόχρονα. Αυτό είναι ένα χαρακτηριστικό που αυξάνει την απόδοση της κυψέλης.

2.3 Ιστορική Αναδρομή

Η πρώτη κυψέλη φτιάχτηκε από τον Ουαλό δικηγόρο και επιστήμονα Sir William Grove το 1839. Πραγματοποίησε ένα πείραμα, με τη διάταξη της παρακάτω εικόνας. Χρησιμοποίησε ψευδάργυρο και πλάτινα σαν ηλεκτρόδια σε διάλυμα θειϊκού οξέος διαχωριζόμενα από ένα πορόδες κεραμικό δοχείο. Αρχικά συνέδεσε το ηλεκτρολυτικό διάλυμα με εξωτερική πηγή τροφοδοσίας και πραγματοποιήθηκε ηλεκτρόλυση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο λόγω της διέλευσης του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από αυτό. Στη συνέχεια αντικατέστησε την πηγή τροφοδοσίας ηλεκτρικού ρεύματος, με ένα αμπερόμετρο και παρατήρησε μια μικρή ροή ρεύματος. Η διαδικασία της ηλεκτρόλυσης αντιστράφηκε, το υδρογόνο και οξυγόνο επανασυνδέονται και παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτή ήταν η 1η παρατήρηση της τεχνολογίας κυψέλης καυσίμου κατά την οποία μπορούμε θεωρητικά να πούμε ότι έχουμε «καύση» υδρογόνου με στόχο τη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.

Το 1842 ο Groove κατασκεύασε τη 1η κυψέλη καυσίμου την οποία ονόμασε μπαταρία βολταϊκού αερίου (gas voltaic battery), η οποία παρήγαγε ηλεκτρικό ρεύμα συνδέοντας υδρογόνο και οξυγόνο και το περιέγραψε χρησιμοποιώντας θεωρία συσχετισμού. Αναπτύσσοντας το κελί καυσίμου έδειξε ότι ο ατμός μπορεί να διαχωριστεί σε οξυγόνο και υδρογόνο και η διαδικασία μπορεί επίσης να αντιστραφεί. Ήταν ο πρώτος που έδειξε το θερμικό διαχωρισμό των μορίων στα δομικά τους άτομα.

Το 1955 ο W. Thomas Grubb, ένας χημικός που δούλευε στην εταιρία General Electric, τροποποίησε την πρωταρχική κυψέλη καυσίμου χρησιμοποιώντας ως ηλεκτρολύτη μια μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων από θειϊκό πολυστυρένιο. Τρία χρόνια αργότερα το 1958 ένας άλλος χημικός της General Electric, ο Leonard Niedrach, επινόησε ένα τρόπο καταχώρησης

πλατίνας στη μεμβράνη, το οποίο εξυπηρετούσε σαν καταλύτης για την οξείδωση του υδρογόνου. Αυτό έγινε γνωστό ως Grubb-Niedrach κυψέλη καυσίμου.

Το 1959 ο Βρεταννός μηχανικός Francis Thomas Bacon, ανέπτυξε επιτυχώς ένα σταθμό ηλεκτροπαραγωγής 5KW βασιζόμενο αποκλειστικά σε κυψέλες καυσίμου υψηλής πίεσης. Το ίδιο έτος μια ομάδα οδηγούμενη από τον Harry Ihrig, κατασκεύασε ένα τρακτορα με κυψέλες καυσίμου συμβολικής ισχύος 15 KW. Στα τέλη του 1959, ο Bacon και οι συνεργάτες του, επέδειξαν μια μηχανή συγκόλλησης 5 KW, βασιζόμενη στη λειτουργία των κυψελών καυσίμου.

Η General Electric, εκμεταλεύτηκε αυτή τη τεχνολογία μαζί με τη NASA, και την εταιρία McDonnell Aircraft, τη δεκαετία του '60 χρησιμοποιώντας την στα διαστημικά πρόγραμμα Gemini, Apollo και Spacelab. Η NASA χρησιμοποίησε κυψέλες καυσίμου στο διαστημικό σκάφος Gemini και Apollo ως φθηνότερη λύση από την ηλιακή ενέργεια. Αυτή ήταν η πρώτη εμπορική χρήση της κυψέλης καυσίμου. Χρησιμοποίησε για αυτό το σκοπό, αλκαλικές κυψέλες καυσίμου, (AFC) και κυψέλες καυσίμου ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC).

Το γεγονός αυτό ενθάρρυνε τους επιστήμονες με αποτέλεσμα να ξεκινήσει, μια αυξανόμενη δραστηριότητα γύρω από τις κυψέλες καυσίμου σε πανεπιστήμια, εργαστήρια και στη βιομηχανία. Ο αρχικός ενθουσιασμός όμως εξασθένησε σύντομα στην αρχή της δεκαετίας του '70 εξαιτίας του υψηλού κόστους. Έτσι οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά μόνο σε στρατιωτικές και διαστημικές εφαρμογές.

Στη συνέχεια ύστερα από αρκετές χρηματοδοτήσεις το ενδιαφέρον εκδηλώθηκε για τις κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC), τις κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC), και τις κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC), δηλαδή για τις κυψέλες καυσίμου μέσης και υψηλής θερμοκρασίας. Η εξέλιξη στόχευε στην εφαρμογή σε μονάδες ισχύος μερικών εκατοντάδων MW.

Η έρευνα για τις κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) άρχισε στο τέλος της δεκαετίας του '70. Με τη συμμετοχή των εταιριών Ballard, Siemens, HPower, σε συνεργασία με διάφορα Αμερικανικά πανεπιστήμια και ερευνητικά κέντρα προέκυψε η κατασκευή βελτιωμένων συσκευών MEA (Membrane Electrode Assemblies). Αυτό είχε ως αποτέλεσμα, το βάρος και το κόστος των κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) να μειωθεί δραστικά και να δώσει νέα ώθηση και περισσότερες λύσεις για την εφαρμογή τους. Κινητοποιήθηκαν επομένως αρκετές κατασκευάστριες εταιρίες αυτοκινήτων και λεωφορείων να θεωρήσουν τις κυψέλες καυσίμου (PEMFC) ως εναλλακτικό σύστημα καύσης, έναντι των μηχανών εσωτερικής καύσης.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, τουλάχιστον 600 εκατομμύρια euro το χρόνο επενδύονται στην τεχνολογία των κυψελών καυσίμου για την επίτευξη ενός «καθαρότερου» μέλλοντος. Μέχρι το 1999, είχαν εγκατασταθεί 40.000 KW περίπου, σαν γεννήτριες ισχύος και θερμότητας, από τις οποίες περίπου το 90% είναι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC).

Όσον αφορά τις κινητές μονάδες, το ενδιαφέρον εντάθηκε τα τελευταία χρόνια, λόγω της περιβαλλοντικής ευαισθησίας για την προώθηση στην αγορά οχημάτων με μηδενικές ή έστω πολύ χαμηλές εκπομπές ρύπων. Η χρήση της τεχνολογίας κυψέλης καυσίμου στη βιομηχανία οχημάτων έχει εξελιχθεί και αποτελεί ένα σημαντικό ανταγωνιστή με πλεονεκτήματα, υψηλή απόδοση, υψηλή παραγωγή πυκνότητας και μηδενική εκπομπή ρύπων.

Η εταιρία, United Technologies Corporation's UTC Power, είναι ο βασικός πάροχος κυψελών καυσίμου στη NASA, για χρήση σε διαστημικά οχήματα, έχοντας μέχρι τώρα τροφοδοτήσει τις αποστολές του Apollo, και σύγχρονα διαστημικά προγράμματα, ενώ παράλληλα κατασκευάζει κυψέλες καυσίμου για επίγεια οχήματα, όπως λεωφορεία και για πύργους κινητής τηλεφωνίας. Η εταιρία επίσης έχει επιδείξει τη πρώτη κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων για κινητές εφαρμογές σε συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας.

Μια συνοπτική ιστορική ανασκόπηση της εξέλιξης των κυψελών καυσίμου δίνεται στο παρακάτω πίνακα:

1838	Ανακάλυψη των κυψελών καυσίμου από τον Grove
1855	Κυψέλη άνθρακα Bequerel
1859	Μηχανές εσωτερικής καύσης
1876	Τετράχρονοι κινητήρες Otto
1889	Κυψέλη H ₂ των Mond και Langer
1894	Κυψέλη του Ostwald
1897	Ηλεκτρισμός από άνθρακα 1,5 kW
1899	Ενασχόληση με το θέμα από τον Nerst
1921	Κυψέλες καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFCs)
1930	Στρόβιλοι
1947	Ανακάλυψη και εμπορική διάθεση του Teflon®
1948	Κυψέλη του Bacon
1952	Μονάδα ισχύος 5 kW τύπου Bacon
1959	Αλκαλική κυψέλη καυσίμου (AFC) της Pratt & Whitney Aircraft

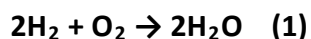
1962	Κυψέλες καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη
1965	Διαστημικό πρόγραμμα Gemini
1966	Διαστημικό πρόγραμμα Apollo
1960s	Εμπορική διάθεση Nafion®
1973	Η πρώτη πετρελαϊκή κρίση
1976	Μονάδα κυψελών καυσίμου, ισχύος 1 MW
1992	Πρώτη εμπορική μονάδα ισχύος PC25™ (200kW)
1993	Συμφωνία (PNVG) αυτοκινητοβιομηχανιών με την αμερικανική κυβέρνηση για ανάπτυξη εργοστασίου παραγωγής αυτοκινήτων με κυψέλες καυσίμου
1996	Επίδειξη μονάδων από κυψέλες τηγμένων ανθρακικών αλάτων
1996	100 ^η μονάδα ισχύος PC25™
1997	100 ^η διαστημική πτήση με αλκαλικές κυψέλες καυσίμου
1997	Συμφωνία των εταιριών Ballard/Daimler Benz

Πίνακας 4

Ιστορική αναδρομή εξέλιξης στην ανάπτυξη και χρήση κυψελών καυσίμου

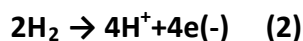
2.4 Αρχή Λειτουργίας

Οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν με βάση ηλεκτροχημικές αντιδράσεις. Συγκεκριμένα η κάυση του υδρογόνου γίνεται σύμφωνα με τη παρακάτω αντίδραση:

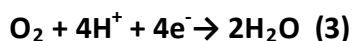


Αυτό που στη πραγματικότητα συμβαίνει είναι οι παρακάτω ενεργειακές αντιδράσεις στις πλευρές ενός ηλεκτροκαταλύτη.

Συγκεκριμένα στην άνοδο:

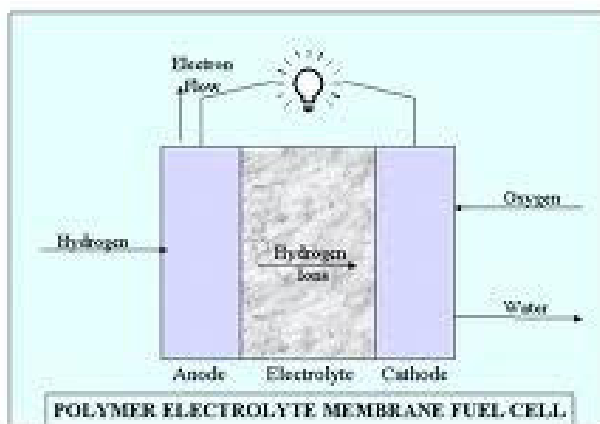


Ενώ στη καθοδο:



Εξετάζοντας αναλυτικά τις παραπάνω αντιδράσεις, αρχικά πρέπει να αναφερθεί ότι η τυπική μορφή μιας κυψέλης καυσίμου, όπως αναφέρθηκε παραπάνω σε μια γενική περιγραφή, αποτελείται από δύο τμήματα (ηλεκτρόδια) που ονομάζονται άνοδος και κάθοδος, τα οποία τροφοδοτούνται με καθαρό υδρογόνο και οξυγόνο ή αέρα.

Τα δύο ηλεκτρόδια όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είναι συνδεδεμένα με τον ηλεκτρολύτη που βρίσκεται ανάμεσά τους. Η συγκροτημένη δομή τους αποτελείται από 3 πλάκες που συνδέονται μεταξύ τους. Οι δύο εξωτερικές είναι η άνοδος και η κάθοδος και ενδιάμεσα τοποθετείται ο ηλεκτρολύτης, που στη περίπτωση που χρησιμοποιούμε κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων, το ρόλο του ηλεκτρολύτη παίζει η μεμβράνη που τοποθετείται ενδιάμεσα, τα κατασκευαστικά στοιχεία της οποίας θα αναφερθούν παρακάτω σε σχετική υποενότητα. Επίσης μεταξύ της μεμβράνης και των ηλεκτροδίων υπάρχει ένα στρώμα καταλύτη, που βοηθάει στην πραγματοποίηση της χημικής αντίδρασης. Μια αντιπροσωπευτική εικόνα της δομής αυτής φαίνεται στη παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 4

Απεικόνιση σύνδεσης ηλεκτροδίων-μεμβράνης στη κυψέλη καυσίμου.

Η τροφοδοσία του υδρογόνου γίνεται στην άνοδο της κυψέλης καυσίμου, που αποτελεί το αρνητικό ηλεκτρόδιο. Στη συνέχεια το υδρογόνο έρχεται σε επαφή με τον καταλύτη και στην επιφάνεια της ανόδου διαχωρίζεται σε θετικά φορτισμένα ιόντα υδρογόνου (υδρογονοκατιόντα) και ηλεκτρόνια. Η άνοδος και ο καταλύτης επιτρέπουν τη διάχυση των ατόμων του υδρογόνου από να γίνεται με ομογενή τρόπο. Η δραστηριότητα αυτή περιγράφεται από τη χημική αντίδραση (1). Στη περίπτωση αυτή η αντίδραση που συμβαίνει είναι ουσιαστικά μια διαδικασία οξείδωσης του υδρογόνου.

Τα ηλεκτρόνια που παράγονται μεταφέρονται μέσω ενός εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος στην κάθοδο δημιουργώντας ροή ρεύματος, ενώ η μεμβράνη που αποτρέπει τη διέλευση του μέσα από αυτήν είναι ηλεκτρικά μη αγωγικό υλικό. Πρέπει επομένως η άνοδος και ο καταλύτης να είναι αγωγικά υλικά.

Παρόλο που η μεμβράνη είναι ηλεκτρικά μη αγωγικό υλικό, επιτρέπει την διέλευση των υδρογονοκατιόντων μέσα από την επιφάνειά της, με κατεύθυνση τη κάθοδο. Αυτό συμβαίνει λόγω διαφοράς συγκεντρώσεως από τη μεταξύ των δύο πλευρών της μεμβράνης. Η μεμβράνη είναι ημιπερατή επομένως εφαρμόζεται ο νόμος της ώσμωσης για τη μεταφορά των

ατόμων μέσα από αυτήν. Τα θετικά φορτισμένα άτομα του υδρογόνου (μεμονωμένα πρωτόνια) συνδέονται στη κάθοδο (θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο) με το οξυγόνο που τροφοδοτείται εκεί.

Στη συνέχεια στη κάθοδο σχηματίζεται νερό ως εξής. Για την ολοκλήρωση της αντίδρασης σχηματισμού ενός μορίου νερού απαιτούνται 2 ηλεκτρόνια, τα οποία αποδεσμεύτηκαν στην άνοδο και μεταφέρθηκαν στην κάθοδο δια μέσου ενός κυκλώματος ηλεκτρικού ρεύματος. Επομένως η σύνδεση των ιόντων υδρογόνου, με τα μόρια οξυγόνου και τα ηλεκτρόνια που φεύγουν από την άνοδο, σχηματίζουν μόρια νερού όπως παριστάνεται στη δεύτερη χημική αντίδραση (2). Την ομογενή διάχυση του οξυγόνου στον καταλύτη εξασφαλίζει, η κατασκευή του ηλεκτροδίου (περισσότερα για τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά στο κεφάλαιο 2). Το φαινόμενο που παρατηρείται στην κάθοδο λέγεται αναγωγή του οξυγόνου. Η αναγωγή του οξυγόνου γίνεται καθώς το οξυγόνο το οποίο παρέχεται από τον αέρα έρχεται σε επαφή με τα ιόντα υδρογόνου και παράγεται νερό και θερμότητα. Αντίθετα με τη διαδικασία της οξείδωσης, στη διαδικασία της αναγωγής δεν έχει ακόμα κατανοηθεί ο μηχανισμός της αντίδρασης πλήρως.

Σε όλη τη παραπάνω διαδικασία αρκετά σημαντικό ρόλο επιτελεί ο καταλύτης που υπάρχει συνδεδεμένος στην άνοδο και τη κάθοδο αντίστοιχα. Ο καταλύτης αναλαμβάνει την επιτάχυνση της δημιουργίας του νερού από τα συστατικά του. Τα δύο στρώματα καταλύτη χρησιμεύουν στην αύξηση της ταχύτητας των αντιδράσεων διάσπασης του μορίου του υδρογόνου και της ένωσης υδρογόνου οξυγόνου για τη δημιουργία νερού, στην άνοδο και στην κάθοδο αντίστοιχα.

Με βάση τη παραπάνω διαδικασία η διαφορά δυναμικού που σχηματίζεται από τα υδρογονοκατίοντα, και τα ηλεκτρόνια είναι η αιτία δημιουργίας ηλεκτρικού ρεύματος, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί από οποιαδήποτε εφαρμογή. Η διαφορά δυναμικού που παράγεται, από ένα μεμονωμένο κελί καυσίμου είναι της τάξης του 0-1 Volt, και εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας του κελιού καυσίμου και το μέγεθος του φορτίου που συνδέεται στο κελί. Μια αντιπροσωπευτική τιμή της διαφοράς δυναμικού που παράγεται είναι 0.7 Volts.

Για την επίτευξη μεγαλύτερης τιμής διαφοράς δυναμικού μπορούμε να συνδέσουμε πολλές κυψέλες καυσίμου σε σειρά δημιουργώντας αυτό που στη βιομηχανία λέγεται συστοιχία κυψελών καυσίμου (fuel cell stack). Στη περίπτωση αυτή η συνολική διαφορά δυναμικού υπολογίζεται ως το γινόμενο του μέσου όρου της διαφοράς δυναμικού που αποδίδει το κάθε κελί ξεχωριστά επί τον συνολικό αριθμό των κελιών που συγκροτούν τη συστοιχία. Όπως συμβαίνει σε κάθε ηλεκτρική μηχανή υπάρχουν απώλειες λόγω αντίστασης του ηλεκτρικού κυκλώματος, οι οποίες εκφράζονται με τη μορφή θερμότητας που αποβάλλεται από το σύστημα όπως περιγράφουν οι παραπάνω χημικές αντιδράσεις (1-3).

2.5 Είδη κυψέλης καυσίμου

Η ύπαρξη διαφορετικών τύπων κελιών καυσίμου οφείλεται κυρίως σε δύο ουσιαστικούς λόγους:

- Χαμηλής έντασης ρεύμα και ισχύ που οφείλεται στο μικρό αριθμό των αντιδράσεων.
- Το υδρογόνο δεν είναι εύκολα διαθέσιμο καύσιμο.

Οι διαφορετικοί τύποι κελιών καυσίμου διακρίνονται ανάλογα με τον ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται σε κάθε περίπτωση. Αυτός καθορίζει το είδος της χημικής αντίδρασης που πραγματοποιείται μες στη κυψέλη, το είδος του καταλύτη που απαιτείται, τη θερμοκρασία λειτουργίας, τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται καθώς και άλλους παράγοντες. Τα χαρακτηριστικά αυτά καθορίζουν τις εφαρμογές για τις οποίες μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο κάθε τύπος κυψέλης. Διακρίνονται 6 διαφορετικά είδη κελιών καυσίμου:

- Μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cells).
 - Αλκαλικά (Alkaline Fuel Cells).
 - Μεθανόλης (Direct Methanol Fuel Cells).
 - Φωσφορικού Οξέος (Phosphoric Acid Fuel Cells).
- Τηγμένου ανθρακικού άλατος (Molten Carbonate Fuel Cells).
 - Στερεού Οξειδίου (Solid Oxide Fuel Cells).

Στο παρακάτω πίνακα αναγράφονται βασικές πληροφορίες για τα είδη των αντιδράσεων που πραγματοποιούνται στο εσωτερικό αυτών των κελιών καυσίμου:

ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΑΝΟΔΟΥ	ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΚΑΘΟΔΟΥ
PEMFC + PAFC	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$
AFC	$\text{H}_2 + 2(\text{OH})^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2(\text{OH})^-$
MCFC	$\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$ $\text{CO} + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow 2\text{CO}_2 + 2\text{e}^-$	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$
SOFC	$\text{H}^2 + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$ $\text{CO} + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$ $\text{CH}_4 + 4\text{O}^{2-} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 8\text{e}^-$	$\frac{1}{2} \text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$

Πίνακας 5
Χημικές αντιδράσεις που παράγονται στα είδη κυψελών καυσίμου

Ένας άλλος διαχωρισμός μπορεί να γίνει ανάλογα με το καύσιμο που χρησιμοποιείται:

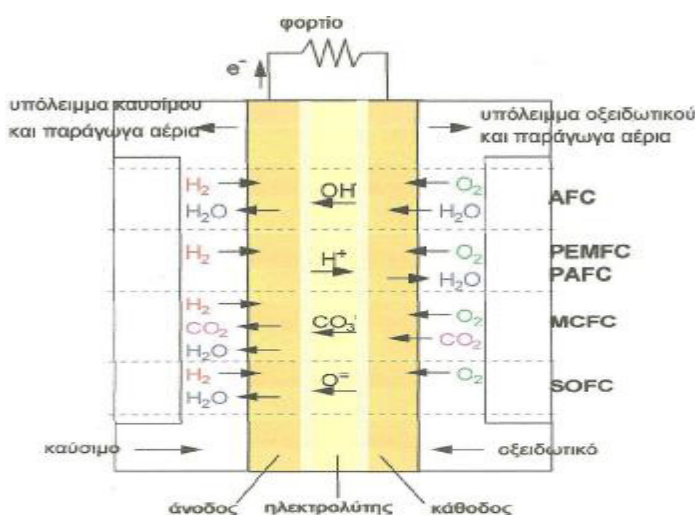
- Direct Alcohol Fuel Cell (DAFC) ή Direct Methanol Fuel Cell (DMFC). Κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούν απευθείας κάποια αλκοόλη (π.χ. μεθανόλη) χωρίς επεξεργασία.
- Direct Carbon Fuel Cell (DCFC). Είναι κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούν Άνθρακα ως καύσιμο στην άνοδο, χωρίς ενδιάμεσο στάδιο αεριοποίησης. Είναι τύπου SOFC, MCFC ή AFC. Τέτοιου τύπου κυψέλες μπορούν να φτάσουν σε υψηλές αποδόσεις αλλά υπάρχουν διάφορα πρακτικά προβλήματα.

Μια άλλη διάκριση είναι με βάση τη θερμοκρασία λειτουργίας:

- Χαμηλής θερμοκρασίας είναι οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFC), οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) και οι κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC).
- Μεσαίας θερμοκρασίας είναι οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC).
- Υψηλής θερμοκρασίας είναι οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC) και οι κυψέλες καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC).

Οι κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιούν ως καύσιμο καθαρό υδρογόνο. Η παρουσία μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και αερίων που περιέχουν θείο (S) στην ροή του καυσίμου, προκαλούν καταστροφή της ανόδου και μείωση της λειτουργίας της κυψέλης.

Στη παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το καύσιμο στην άνοδο και στη κάθοδο για τα είδη των κυψελών καυσίμου που αναλύονται στη συνέχεια καθώς και το ιόν που μεταφέρεται δια μέσου του ηλεκτρολύτη.



Εικόνα 5

Αέρια καύσιμα και ιόντα που χρησιμοποιεί το κάθε είδος κυψέλης καυσίμου

Για μια κυψέλη SOFC λ.χ. ο ηλεκτρολύτης είναι οξείδιο του ζirkονίου σταθεροποιημένο με οξείδιο του υτρίου, ένα κεραμικό υψηλής τεχνολογίας που επιτρέπει σε ιόντα οξυγόνου (O_2^-) να κινούνται μέσα σ' αυτό, όταν η θερμοκρασία είναι αρκετά υψηλή (900-1.000 °C). Τα ηλεκτρόδια μπορούν να αποτελούνται από πορώδη πλατίνα (και αγωγίμο και καταλυτικό υλικό), αν και στις κυψέλες τελευταίας τεχνολογίας είναι ειδικά κεραμικά που αντέχουν την έντονα οξειδωτική (O_2) και αναγωγική (H_2) ατμόσφαιρα στις αντίστοιχες πλευρές του ηλεκτρολύτη.

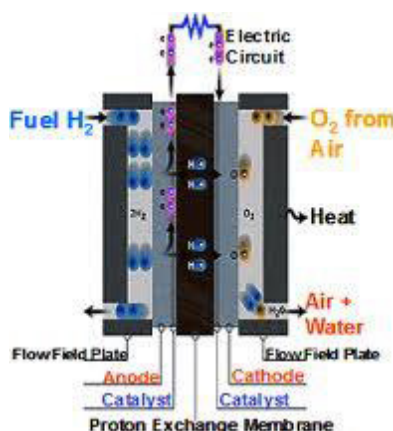
Στη συνέχεια γίνεται αναλυτική αναφορά μεμονωμένα στο κάθε είδος κυψέλης καυσίμου που αναφέρθηκε παραπάνω κάνοντας περιγραφή του τρόπου λειτουργίας του και των χαρακτηριστικών του.

Κυψέλη καυσίμου πολυμερισμένης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC)

Η εξέλιξη στην τεχνολογία των μεμβρανών και η μείωση του κόστους έχει προκαλέσει έντονο ενδιαφέρον στη βιομηχανία των κυψελών μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων ή στερεού πολυμερούς (Proton Exchange Membrane Fuel Cells, PEMFC ή Solid Polymer Fuel Cells, SPFC). Πολλές εταιρίες ανά τον κόσμο επιδίδονται στην έρευνα και ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων με βασικότερο κίνητρο τη δυνατότητα εφαρμογών στην αυτοκινητοβιομηχανία.

Η λειτουργία αυτών των κυψελών καυσίμων περιγράφηκε εκτενώς στην ενότητα 2.4 αρχή λειτουργίας κυψέλης καυσίμου.

Η πολυμερής μεμβράνη (στην οποία οφείλεται και η ονομασία αυτής της κατηγορίας) αποτελεί τον ηλεκτρολύτη της κυψέλης και βρίσκεται μεταξύ δύο πορώδων ηλεκτροδίων, την άνοδο και τη κάθοδο, στα οποία ο καταλύτης είναι από λευκόχρυσο (Pt). Η δομή της κυψέλης φαίνεται στη παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 6

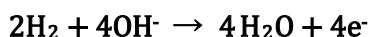
Δομή και τρόπος λειτουργίας κυψέλης καυσίμου με πολυμερισμένη μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων

Οι κυψέλες καυσίμου πολυμερισμένης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων θεωρούνται ότι βρίσκονται στο ποιο εξελιγμένο επίπεδο για την εφαρμογή τους σε κινούμενα οχήματα εδάφους. Αποδίδουν υψηλή πυκνότητα ισχύος, διαθέτουν στερεό ηλεκτρολύτη, μεγάλη διάρκεια ζωής, και χαμηλή διάβρωση. Έχουν μεγάλο βαθμό απόδοσης συγκριτικά με τις θερμικές μηχανές και η χρήση τους στη προώθηση ηλεκτρικών οχημάτων είναι πολλά υποσχόμενη για το άμεσο μέλλον. Λειτουργούν σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, και παράγουν ισχύ αρκετή για την εφαρμογή τους για την ικανοποίηση καθημερινών ενεργειακών αναγκών όπως η κίνηση ενός οχήματος. Σε αυτό βοηθά η ικανότητα τους να προσαρμόζονται σε γρήγορες αυξομειώσεις στην απαίτηση ισχύος. Η ισχύς που παράγει μια τέτοια κυψέλη κυμαίνεται μεταξύ των 50-250 KW. Ο συγκεκριμένος τύπος κυψέλης είναι αρκετά ευαίσθητος σε μη καθαρά καύσιμα. Η έρευνα πάνω στις κυψέλες καυσίμου όσον αφορά εφαρμογές τους στην τροφοδότηση οχημάτων αυτή τη στιγμή είναι επικεντρωμένη κυρίως σε αυτόν τον τύπο.

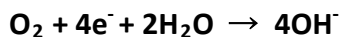
Η απόδοση τους είναι είναι αρκετά υψηλή με εφαρμογή μερικού φορτίου, το οποίο αντιστοιχεί στη πλειονότητα του φορτίου που απαιτούν οι οδηγητικές απαιτήσεις των οχημάτων που κυκλοφορούν στους αστικούς δρόμους. Η απόδοση της κυψέλης καυσίμου χρησιμοποιώντας τροφοδοσία υδρογόνου με μετασχηματισμό από φυσικό αέριο (πρωταρχικό καύσιμο), είναι δύο φορές μεγαλύτερη από την απόδοση της συμβατικής μηχανής εσωτερικής καύσης. Χρησιμοποιώντας καθαρό υδρογόνο σαν πρωταρχικό καύσιμο υπάρχει η δυνατότητα μηδενικών εκπομπών καυσαερίων για οχήματα που κινούνται μέσα στα αστικά κέντρα.

Αλκαλική κυψέλη καυσίμου (AFC)

Στη κατηγορία αυτή χρησιμοποιείται ως ηλεκτρολύτης το υδροξείδιο του καλίου (KOH). Στη περίπτωση αυτή η συνολική χημική αντίδραση της κυψέλης είναι ακριβώς ίδια με την αντίδραση που πραγματοποιείται στη PEM κυψέλη με τη διαφορά ότι πραγματοποιούνται διαφορετικές επιμέρους αντιδράσεις για το κάθε ηλεκτρόδιο. Στην αλκαλική κυψέλη, τα ιόντα υδροξυλίου είναι κινούμενα και ελεύθερα. Στην άνοδο αντιδρούν με το υδρογόνο, ελευθερώνοντας ενέργεια και ηλεκτρόνια παράγοντας παράλληλα νερό. Η αντίδραση είναι:



Στη κάθοδο, το οξυγόνο αντιδρά με τα ηλεκτρόνια που έρχονται από το ηλεκτρόδιο και το νερό του ηλεκτρολύτη, σχηματίζοντας καινούρια ιόντα. Η αντίδραση είναι:



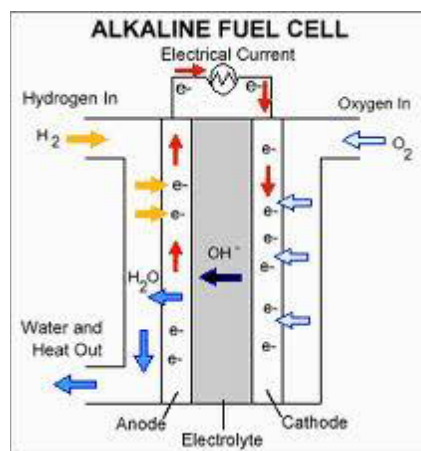
Για να επαναλαμβάνονται αυτές οι αντιδράσεις συνεχώς, θα πρέπει να ιόντα υδροξυλίου να έχουν τη δυνατότητα να περάσουν δια μέσου του ηλεκτρολύτη, και θα πρέπει να υπάρχει ένα εξωτερικό ηλεκτρικό κύκλωμα για τα ηλεκτρόνια για να μεταφερθούν από την άνοδο στη κάθοδο. Συγκρίνοντας τις παραπάνω αντιδράσεις προκύπτει ότι όπως και με τη περίπτωση της PEM κυψέλης με όξινο ηλεκτρολύτη, απαιτείται διπλάσια ποσότητα υδρογόνου σε σχέση με το οξυγόνο. Επίσης παρόλο που το νερό καταναλώνεται στη κάθοδο,

δημιουργείται με διπλάσια ταχύτητα στην άνοδο (μια και οι αντίδραση στην άνοδο πραγματοποιείται σε μικρότερο χρόνο).

Οι θερμοκρασίες λειτουργίας σε αυτές τις κυψέλες καυσίμου είναι για υψηλές συγκεντρώσεις ΚΟΗ στον ηλεκτρολύτη.

Στα ηλεκτρόδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα υλικά ως ηλεκτροκαταλύτες όπως για παράδειγμα νικέλιο (Ni), άργυρος (Ag), διάφορα οξείδια μετάλλων ή ευγενή μέταλλα.

Το προτιμώμενο καύσιμο είναι καθαρό υδρογόνο. Το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) θεωρείται δηλητήριο για τον καταλύτη αφού έστω και παραμικρή ποσότητα, διοξειδίου του άνθρακα θα αντιδράσει με το υδροξείδιο του καλίου (ΚΟΗ) και θα μεταβάλλει τη σύσταση του ηλεκτρολύτη. Υπάρχουν και ορισμένες AFC που χρησιμοποιούν στερεό άνθρακα ως καύσιμο (DCFC). Η δομή της αλκαλικής κυψέλης φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 7

Αλκαλική κυψέλη καυσίμου. Δομή – λειτουργία

Η απόδοσή τους όμως που αγγίζει το 70% είναι ένα πλεονέκτημα που λαμβάνεται σοβαρά υπόψη. Το προτιμώμενο καύσιμο είναι το καθαρό H₂ και το παραγόμενο νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πόσιμο, ειδικά σε εφαρμογές όπου ο όγκος και το βάρος πρέπει να ελαχιστοποιούνται.

Ένα από τα μεγαλύτερα μειονεκτήματα τους είναι η ευαισθησία τους στο διοξείδιο του άνθρακα. Δηλαδή το καύσιμο δε πρέπει να περιέχει διοξείδιο του άνθρακα διότι δηλητηριάζεται ο καταλύτης χάνοντας τις ιδιότητές του. Έπομένως η αλκαλική κυψέλη δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει ατμοσφαιρικό αέρα. Για την παροχή απαραίτητου οξυγόνου στην κάθοδο χρειάζεται ένα ειδικό σύστημα, το οποίο να απομακρύνει το διοξείδιο του άνθρακα από τον αέρα. Επίσης η χρήση διαβρωτικού ηλεκτρολύτη είναι ακόμα ένα μειονέκτημα. Ο ηλεκτρολύτης διαβρώνει τα υλικά γύρω του, με αποτέλεσμα να μειώνεται η διάρκεια ζωής της

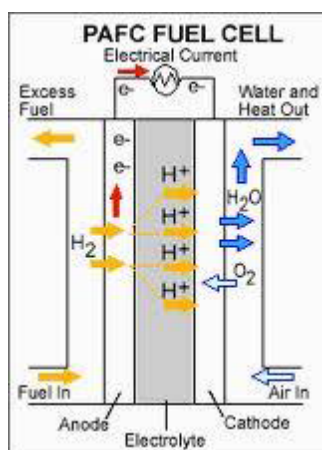
κυψέλης και την αύξηση του κόστους της. Το πρόβλημα του χαμηλού ρυθμού αντίδρασης αντιμετωπίζεται χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια υψηλού πορώδους με καταλύτη λευκόχρυσο (platinum), ενώ συνήθως λειτουργούν και σε υψηλές πιέσεις.

Αυτό το είδος κυψέλης καυσίμου χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά στο διαστημόπλοιο Apollo το 1960 και αργότερα σε πολλές διαστημικές αποστολές. Πέρα από αυτό έχουν σχετικά περιορισμένη χρήση λόγω της αναγκαιότητας για απουσία διοξειδίου του άνθρακα. Οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου σήμερα χρησιμοποιούνται σε διαστημικές εφαρμογές της Nasa, καθώς επίσης και σε στρατιωτικές εφαρμογές, αλλά το υψηλό κόστος περιορίζει την ευρύτερη χρήση τους.

Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)

Οι κυψέλες φωσφορικού οξέος (phosphoric - acid fuel cells, PAFC) είναι αυτές όπου είναι διαθέσιμες σήμερα στο εμπόριο. Η απόδοση ενός τέτοιου συστήματος κυμαίνεται σε αρκετά υψηλά επίπεδα. Οι θερμοκρασίες λειτουργίας του βρίσκονται στην περιοχή των 150 με 200°C και ανήκουν στις μέσης θερμοκρασίας κυψέλες καυσίμου. Σε χαμηλότερες θερμοκρασίες το φωσφορικό οξύ γίνεται κακός ιοντικός αγωγός και το μονοξείδιο του άνθρακα CO το οποίο σχηματίζεται πάνω στον καταλύτη δηλητηριάζει την άνοδο ρίχνοντας πάρα πολύ την απόδοση. Ωστόσο τα επίπεδα ανοχής της συγκέντρωσης του CO είναι τέτοια ώστε να επιτρέπει περισσότερα είδη καυσίμων για τη τροφοδότηση του. Στην περίπτωση της συμβατικής βενζίνης ωστόσο πρέπει να απομακρυνθούν τα σουλφίδια.

Τα μειονεκτήματα των PAFC κυψέλων καυσίμου, είναι το μεγάλο μέγεθος και βάρος, ο ακριβός καταλύτης όπου χρησιμοποιείται (λευκόχρυσος), ενώ το ρεύμα το οποίο παράγεται είναι χαμηλό και η ισχύς συγκρίσιμη με αυτή άλλων τύπων κυψέλων καυσίμου. Η δομή αυτής της κυψέλης καυσίμου φαίνεται στη παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 8

Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος. Δομή – Λειτουργία

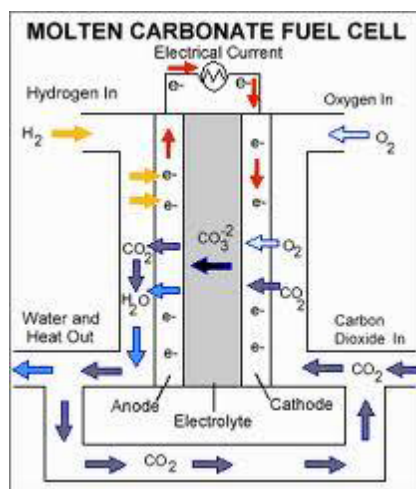
Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που χαρακτηρίζουν αυτόν τον τύπο είναι ίδιες με αυτής της PEM κυψέλης.

Η κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος ήταν η πρώτη που παράχθηκε σε μεγάλες βιομηχανικές ποσότητες και είναι σε εκτεταμένη χρήση παγκοσμίως. Αρκετά συστήματα 200 KW, κατασκευάστηκαν από την εταιρία “International Fuel Cells Corporation” (UTC fuel cells), και εγκαταστάθηκαν σε Η.Π.Α. και Ευρώπη, ενώ επίσης κατασκευάστηκαν αρκετά συστήματα από Ιαπωνικές εταιρίες. Αποτελούν τον τεχνολογικά πιο ώριμο τύπο κυψέλης καυσίμου. Είναι κατάλληλες για σταθερούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας και μικρές βιομηχανικές εφαρμογές. Ωστόσο το κόστος τους είναι ακόμη (2001) αρκετά υψηλό (περίπου 4.000\$ Η.Π.Α./KW).

Παρόλα αυτά τα συστήματα τα οποία κατασκευάζονται με αυτές τις κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν την απλότητα των PEMFC κυψελών παρέχοντας ένα αξιόπιστο και χαμηλής συντήρησης μηχανισμό παραγωγής ισχύος. Αρκετά PAFC συστήματα λειτουργούν συνεχόμενα για ένα χρόνο περίπου με ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης (που να οδηγήσουν στη διακοπή λειτουργίας) ή ανθρώπινης παρέμβασης.

Κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων (MCFC)

Η κατηγορία αυτή των κυψελών καυσίμου λειτουργεί κατά ένα παρόμοιο τρόπο με τις προαναφερθέντες κατηγορίες, με τη διαφορά ότι ο ηλεκτρολύτης αποτελείται από από υγρό τήγμα ανθρακικού άλατος αλκαλικού μετάλλου το οποίο συγκρατείται σε κεραμική μήτρα, και είναι ένα αρνητικό ιόν και οξειδωτικός παράγοντας. Η άνοδος είναι κράμα νικελίου χρωμίου και η κάθοδος οξείδιο του νικελίου. Η εξαγωγή του H_2 από το καύσιμο-φορέα μπορεί να γίνει εσωτερικά στην κυψελίδα, ενώ ιονίζεται, χωρίς τη χρήση καταλύτη, μειώνοντας έτσι το κόστος. Η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής είναι 4000 ώρες. Η δομή της κυψέλης φαίνεται στη παρακατω εικόνα:



Εικόνα 9. Κυψέλη καυσίμου τήγματος ανθρακικών αλάτων

Μπορούν να τροφοδοτηθούν απευθείας με μεθάνιο και μίγμα υδρογόνου και μονοξειδίου του άνθρακα (H_2, CO) χωρίς αναμόρφωση (reforming). Η επεξεργασία τους γίνεται στο εσωτερικό της κυψέλης. Παρόλα αυτά αυτή η απλότητα του μηχανισμού αυτού αντισταθμίζεται από τη φύση του ηλεκτρολύτη, που είναι μια εύκολα διαβρώσιμη μίξη από λίθιο, κάλιο και νιτρικά ανθρακικά άλατα.

Αντίθετα με τις PEMFC οι κυψέλες καυσίμου, SOFC, MCFC, δε δηλητηριάζονται από το μονοξείδιο του άνθρακα CO, λόγω της αρκετά υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας. Επειδή η αντίδραση οξείδωσης συμβαίνει στην άνοδο, άμεση χρήση του μονοξειδίου του άνθρακα είναι πιθανό να χρειάζεται. Επίσης, ο ατμός που παράγεται από την αντίδραση οξείδωσης μπορεί να μετασχηματίσει το μονοξείδιο του άνθρακα παράγοντας υδοκαρβονικά καύσιμα μέσα στην άνοδο. Αυτές οι αντιδράσεις μπορούν να χρησιμοποιήσουν τους ίδιους καταλύτες που χρησιμοποιούνται για την ηλεκτροχημική αντίδραση, μειώνοντας την ανάγκη για εξωτερικό αναμορφωτή.

Επειδή ο ηλεκτρολύτης χάνει μέρος του ανθρακικού άλατος, στην αντίδραση οξείδωσης, το μέρος αυτό πρέπει να ανανεωθεί με τη βοήθεια κάποιων μέσων. Αυτό επιτυγχάνεται με την επανακυκλοφορία του διοξειδίου του άνθρακα από τα προϊόντα της αντίδρασης, στη κάθοδο, όπου αντιδρά με τον εισερχόμενο αέρα και μετασχηματίζει καρβονικό άλας.

Αυτή η περίπτωση της κυψέλης καυσίμου, έχει το ενδιαφέρον χαρακτηριστικό να χρειάζεται διοξείδιο του άνθρακα στον αέρα για να λειτουργήσει. Η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας της, σημαίνει ότι μια καλή αντίδραση επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας ένα συγκριτικά φτηνό καταλύτη από νικέλιο (Ni). Το νικέλιο επίσης σχηματίζει την ηλεκτρική βάση του ηλεκτροδίου.

Οι κυψέλες καυσίμου MCFC, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση των εκπομπών από τους σταθμούς ισχύος καύσης άνθρακα καθώς και από σταθμούς ισχύος αεριοστροβίλων. Χρησιμοποιούνται επίσης σε μεγάλες σταθερές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι μεγάλες σε μέγεθος, βαριές και αργούν να ξεκινήσουν. Είναι κατάλληλες για συμπαραγωγή ενέργειας από τη θερμότητα που εκπέμπεται και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οικιακές και βιομηχανικές εφαρμογές, καθώς και σε μονάδες παραγωγής ενέργειας για το δίκτυο. Υπάρχουν όμως ακόμα προβλήματα που πρέπει να ξεπεραστούν, όπως η διάβρωση και η αξιοπιστία, ενώ η διάθεσή τους στο εμπόριο αναμενόταν μετά το 2005.

Κυψέλη καυσίμου τήγματος στερεών οξειδίων (SOFC)

Οι κυψέλες ηλεκτρολυτών σταθεροποιημένων οξειδίων (Solid Oxide Fuel Cells, SOFC) είναι παρόμοιες με τις MCFC ως προς τη θερμοκρασία λειτουργίας και τις εφαρμογές.

Αυτός ο τύπος κυψέλης καυσίμου λειτουργεί σε θερμοκρασίες 600 – 1000°C. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι υψηλοί ρυθμοί αντίδρασης μπορούν να επιτευχθούν χωρίς την ανάγκη

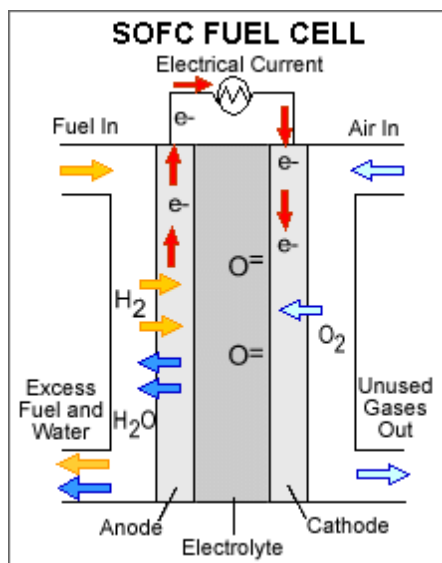
ακριβών καταλυτών, και τα καύσιμα όπως φυσικό αέριο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα, τα οποία μετασχηματίζονται εσωτερικά της κατασκευής σε υδρογόνο και δεν απαιτούν κάποια εξωτερική μονάδα για αυτό το σκοπό.

Η κυψέλη SOFC, είναι εξ'ολοκλήρου στερεή κατασκευή. Ο ηλεκτρολύτης είναι μη πορώδες κεραμικό υλικό αγωγίμο στα ιόντα του οξυγόνου που διέρχονται από το πλέγμα του μετάλλου. Εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας της δεν είναι απαραίτητη η χρησιμοποίηση πολυτιμών μετάλλων για τον καταλύτη.

Η SOFC κυψέλη είναι αρκετά πλεονεκτική κυψέλη καυσίμου, λόγω της δυνατότητας χρήσης εκτεταμένης ποικιλίας καυσίμων. Πέρα από τις άλλες κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούν μόνο υδρογόνο, οι SOFC, χρησιμοποιούν υδρογόνο, βουτάνιο, μεθανόλη, και άλλα προϊόντα του πετρελαίου. Για τις SOFC, που χρησιμοποιούν μεθανόλη, στη περιοχή της ανόδου, ένας καταλύτης διασπά τους δεσμούς της μεθανόλης και του νερού, προς το σχηματισμό, διοξειδίου του άνθρακα CO_2 , ιόντα υδρογόνου και ελεύθερα ηλεκτρόνια. Τα ιόντα υδρογόνου συναντούν τα ιόντα οξειδίου τα οποία έχουν δημιουργηθεί στη πλευρά της καθόδου, και περνούν κατά μήκος του ηλεκτρολύτη στη πλευρά της ανόδου, όπου αντιδρούν σχηματίζοντας νερό. Το φορτίο συνδέεται εξωτερικά ανάμεσα στην άνοδο και στη κάθοδο, ολοκληρώνοντας το ηλεκτρικό κύκλωμα.

Οι κυψέλες στερεών οξειδίων αναπτύχθηκαν για πρώτη φορά, το 1899, όταν ο Nerst, πρώτος περιέγραψε, το οξείδιο του ζirkονίου (ZrO_2), ως αγωγό ανιόντων οξυγόνου.

Η δομή της κυψέλης καυσίμου SOFC, φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί.



Εικόνα 10.
Δομή κυψέλης καυσίμου τήγματος στερεών οξειδίων

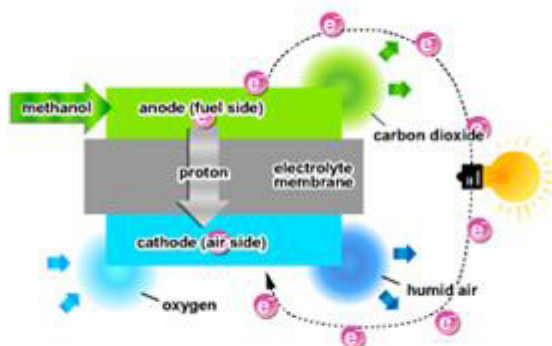
Όσον αφορά τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τους καταλύτες της κυψέλης καυσίμου SOFC, η άνοδος χρησιμοποιεί καταλύτη από νικέλιο (Ni) ή άλλους καταλύτες που μπορούν να συνεισφέρουν στη διάσπαση της μεθανόλης σε ιόντα υδρογόνου και πρότυπο CO. Ένα στερεό υλικό που ονομάζεται οξειδίο υτρίου σταθεροποιημένου ζirkονίου (YSZ), χρησιμοποιείται πίσης σαν ηλεκτρολύτης. Όπως όλοι οι ηλεκτρολύτες των κυψελών καυσίμου, το υλικό (YSZ), είναι αγωγίμο σε συγκεκριμένα ιόντα (συγκεκριμένα στα ιόντα οξυγόνου O²⁻) επιτρέποντας τη μετάβαση από τη κάθοδο στην άνοδο, αλλά είναι μη-αγώγιμο στα ηλεκτρόνια. Το YSZ έχει αρκετά καλή διάρκεια ζωής και χρησιμοποιείται εκτεταμένα στη βιομηχανία. Η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες, συμβάλλει στην εύκολη διάσπαση του μεθανίου και του οξυγόνου σε ιόντα. Ένα μεγάλο μειονέκτημα της λειτουργίας σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες, είναι ότι υπάρχουν περιορισμοί στα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για διασυνδέσεις, ενώ παράλληλα ένα άλλο μειονέκτημα λόγω της υψηλής θερμοκρασίας είναι ότι μπορούν να συμβούν ανεπιθύμητες αντιδράσεις στο εσωτερικό της κυψέλης καυσίμου. Η κατασκευή της ανόδου από καρβονική σκόνη γραφίτη, αποτρέπει στο καύσιμο να έρθει σε επαφή με το καταλύτη. Αρκετά εκτεταμένη έρευνα, γίνεται για την εύρεση εναλλακτικών υλικών από το YSZ, τα οποία να μπορούν να άγουν ιόντα σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Τα κεραμικά υλικά από τα οποία είναι κατασκευασμένη η κυψέλη καυσίμου παρουσιάζουν δυσκολία στο χειρισμό και η κατασκευή τους είναι αρκετά δαπανηρή. Επομένως χρειάζεται ένας μεγάλος αριθμός από ένα επιπρόσθετο εξοπλισμό για τη κατασκευή ενός ολοκληρωμένου συστήματος κυψέλης καυσίμου. Ο εξοπλισμός αυτός περιλαμβάνει σύστημα προθέρμανσης αέρα και καυσίμου που εισάγονται στη κυψέλη. Επίσης το σύστημα ψύξης είναι πιο πολύπλοκο και δεν είναι εύκολο στην εκκίνηση του.

Οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων έχουν εύρος ισχύος, από 1KW – 1MW. Οι εφαρμογές τους εστιάζονται, σε μεγάλες μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, και θερμότητας, δεδομένου ότι οι κυψέλες καυσίμου στερεών οξειδίων έχουν τη μεγαλύτερη θερμοκρασία λειτουργίας, από όλους τους τύπους των κυψελών καυσίμου.

Κυψέλη καυσίμου μεθανόλης (DMFC)

Σε όλες τις παραπάνω κυψέλες ως καύσιμο χρησιμοποιείται το υδρογόνο. Ωστόσο, ο συγκεκριμένος τύπος κυψελών (direct methanol fuel cells, DMFC) χρησιμοποιεί ως καύσιμο μεθανόλη σε υγρή μορφή, χωρίς να απαιτεί τη μετατροπή της σε υδρογόνο. Σε αυτή την περίπτωση η μεθανόλη είναι αυτή που οξειδώνεται στην άνοδο. Η κατηγορία αυτή είναι πιο πρόσφατη των κυψελίδων PEM με αρκετά ακόμα προβλήματα προς επίλυση όπως η μεγάλη ποσότητα καταλύτη όπου απαιτείται. Ωστόσο, εάν η συγκεκριμένη τεχνολογία επρόκειτο να χρησιμοποιηθεί στη θέση των PEM κυψελών δε θα υπήρχε η ανάγκη αναζήτησης εναλλακτικών τρόπων αποθήκευσης του καυσίμου όπως γίνεται στη δεύτερη περίπτωση με το υδρογόνο ενώ δε θα ήταν αναγκαία και η ανάπτυξη αναμορφωτών. Η δομή αυτής της κυψέλης καυσίμου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 11.
Κυψέλη καυσίμου μεθανόλης. Δομή – λειτουργία

Ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται στην είναι μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) αλλά έχει μεγαλύτερο πάχος. Ο καταλύτης στην άνοδο, είναι διμεταλλικός από λευκόχρυσο (Pt) και στη κάθοδο λευκόχρυσος. Στην άνοδο, ο καταλύτης από μόνος του έλκει το υδρογόνο από το υγρό μεθάνιο.

Η προβλεπόμενη διάρκεια ζωής είναι πάνω από 10.000 ώρες. Συμπεραίνουμε ότι αυτά τα κελιά καυσίμου παράγουν πολύ χαμηλή ισχύ, παρ'όλα αυτά όμως ακόμα και με αυτή την απόδοση, χρησιμοποιούνται σε πάρα πολλές εφαρμογές στην αναπτυσσόμενη περιοχή των φορητών ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Στο προσεχές μέλλον θα χρησιμοποιούνται σε συσκευές που απαιτούν για τη λειτουργία τους, χαμηλή και σταθερή κατανάλωση ρεύματος, για μεγάλες χρονικές περιόδους.

Σύγκριση Κυψελών Καυσίμου

Με βάση τα παραπάνω στοιχεία, που περιγράφουν τα λειτουργικά και κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των κυψελών καυσίμου, είναι δυνατόν να γίνει μια σύγκριση μεταξύ τους. Στο παρακάτω πίνακα, γίνεται μια συνολική σύγκριση όλων των προαναφερθέντων τύπων κυψελών καυσίμου σε όλα τα επιμέρους χαρακτηριστικά τους:

	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Ηλεκτρολύτης	Ενυδατωμένη μεμβράνη από πολυμερές	Υδροξείδιο του καλίου σε πίνακα από αμίαντο	Υγρό φωσφορικό οξύ	Υγρό λιωμένο ανθρακικό άλας σε LiAlO_2	Κεραμεικός (σταθεροποιημένο ζηρόνιο)
Ηλεκτρόδια	Άνθρακας	Από στοιχεία μετάπτωσης	Από άνθρακα	Νικέλιο (Ni) και οξείδια του νικελίου	Κεραμεικά (Μίγμα με μέταλλο)
Καταλύτης	Λευκόχρυσος	Λευκόχρυσος	Λευκόχρυσος	Όμοια με ηλεκτρόδια	Όμοια με ηλεκτρόδια
Εσωτερικοί Σύνδεσμοι	Μεταλλικοί ή από άνθρακα	Μεταλλικοί	Γραφίτης	Ανοξείδωτος χάλυβας ή νικέλιο	Από νικέλιο, κεραμεικοί ή χαλυβιδίνοι
Θερμοκρασία Λειτουργίας	40-80 °C	65-220 °C	205 °C	650 °C	600 - 100 °C
Μεταφορά Ιόν	H^+	OH^-	H^+	CO_3^{--}	O_2^{--}
Εξωτερικός Αναμορφωτής	Ναι	Ναι	Ναι	Όχι. Μόνο σε μερικά καύσιμα	Όχι. Μόνο σε μερικά καύσιμα
Εξωτερική Μετατροπή CO σε Υδρογόνο	Ναι. Καθαρισμός για απομάκρυνση του CO	Ναι. Καθαρισμός για απομάκρυνση του CO και του CO_2	Ναι	Όχι	Όχι
Κύρια μέρη κυψέλης	Από άνθρακα	Από άνθρακα	Από γραφίτη	Από ανοξείδωτα υλικά	Κεραμεικά
Διαχείριση Νερού	Εξατμιζόμενο	Εξατμιζόμενο	Εξατμιζόμενο	Αέριο	Αέριο
Διαχείριση Θερμότητας	Επεξεργασία καυσίμου και αποβολή σε υγρό ψυκτικό	Επεξεργασία καυσίμου και βοήθεια στη κυκλοφορία του ηλεκτρολύτη	Επεξεργασία καυσίμου και αποβολή σε ψυκτικό ή παραγωγή ατμού	Επεξεργασία καυσίμου και εσωτερική διαμόρφωση	Επεξεργασία καυσίμου και εσωτερική διαμόρφωση
Απόδοση	40-50 %	50-70 %	40-45 %	50-60 %	50-60 %
Ισχύς	έως 250 KW	Μέχρι 20 KW	άνω των 50 KW	άνω του 1 MW	άνω των 200 KW
Εφαρμογές	Μεταφορές, οχήματα, κινητές εφαρμογές, ηλεκτροπαραγωγή, φορητές ηλεκτρονικές συσκευές, χαμηλής ισχύος συστήματα	Διαστημικά οχήματα και διαστημικές εφαρμογές	Μεγάλη εφαρμογή σε συστήματα συνδυασμένου θερμικού κύκλου ισχύος 200 KW (CHP systems). Ηλεκτροπαραγωγή και συμπαραγωγή σε κτιριακές εγκαταστάσεις	Κατάλληλα για μέσης-μεγάλης ισχύος συστήματα συνδυασμένου θερμικού κύκλου ισχύος MW (CHP systems)	Για όλα τα μεγέθη των CHP συστημάτων 2 kW-MW

Πλεονεκτήματα	Ο ηλεκτρολύτης δεν επιτρέπει την ύπαρξη CO ₂ . Μηχανικά σταθερός ηλεκτρολύτης.Ελάχισ τα προβλήματα των υλικών ακόμα και σε συνθήκες διάβρωσης.	Πολλές εναλλακτικές στη χρήση καταλυτών.Καταλύτες χαμηλού κόστους.Καλύτερη κινητική της καθόδου σε σχέση με την PAFC	Ο ηλεκτρολύτης τους δεν απορρύνει το CO ₂ .Υψηλός βαθμός απόδοσης συστήματος ειδικά σε περιπτώσεις συμπαραγωγής	Υψηλής ταχύτητας κινητική στα ηλεκτρόδια. Αποδιδόμενη θερμότητα υψηλής ενθαλπίας.Το CO αποτελεί καύσιμο.Χαμηλότερου κόστους από τις PAFC. Δυνατότητα εσωτερικής ανμόρφωσης καυσίμου	Υψηλής ταχύτητας κινητική στα ηλεκτρόδια. Αποδιδόμενη θερμότητα υψηλής ενθαλπίας.Το CO αποτελεί καύσιμο.Δυνατότητα εσωτερικής ανμόρφωσης καυσίμου.Υψηλός βαθμός απόδοσης συστήματος.Κανέν α πρόβλημα διαχείρισης ηλεκτρολύτη.Αμετ άβλητη σύνθεση ηλεκτρολύτη.Δεν απαιτείται ανακύκλωση του CO ₂
Μειονεκτήματα	Απαιτεί μεγάλες ποσότητες Pt.Το CO καταστρέφει την άνοδο.Απαιτεί μεμβράνη υψηλού κόστους.Προβληματική διαχείριση νερού.Το H ₂ είναι το μόνο ασφαλές καύσιμο.	Δεν επιτρέπουν την ύπαρξη CO ₂ .Δεν επιτρέπουν τη χρήση καυσίμων που έχουν άνθρακα.	Το CO καταστρέφει την άνοδο.Το υδρογόνο το μόνο ασφαλές καύσιμο.Χρησιμοποιεί καταλύτες υψηλού κόστους.Μη αντιστρεπτική κινητική O ₂ .Ηλεκτρολύτης χαμηλής απόδοσης	Προβλήματα στα υλικά σχετικά με τη διάρκεια ζωής και μηχανικής σταθερότητας. Χαμηλή αντοχή σε θειούχες ενώσεις. Το CO ₂ , απαιτείται για την τροφοδοσία της καθόδου	Υψηλό κόστος κατασκευής.Περιορισμοί στην επιλογή των υλικών λόγω υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας.Σχετικά υψηλή αντίσταση ηλεκτρολύτη

Πίνακας 6
Πίνακας σύγκρισης διαφόρων ειδών κυψελών καυσίμου

Όπως γίνεται αντιληπτό από το παρακάτω πίνακα μπορεί να γίνει μια πρόχειρη επιλογή της κυψέλης καυσίμου και ένας πρόχειρος υπολογισμός του κόστους ανάλογα με τα δεδομένα της εγκατάστασης στην οποία θέλουμε να την εφαρμόσουμε.

Οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν υγρά ή αέρια καύσιμα, όπως το υδρογόνο τους υδρογονάνθρακες, βιοκαύσιμα, αλκοόλες (μεθανόλη , αιθανόλη) και το φυσικό αέριο. Όταν το καύσιμο είναι καθαρό υδρογόνο , το μόνο παραπροϊόν είναι το νερό και η θερμότητα. Το οξειδωτικό μέσο είναι αέριο οξυγόνο ή ατμοσφαιρικός αέρας.

Στο παρακάτω πίνακα, παρουσιάζονται οι επιδράσεις που έχουν οι διάφορες αέριες ουσίες στις κυψέλες καυσίμου:

Αέριο	PEMFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
H ₂	Καύσιμο	Καύσιμο	Καύσιμο	Καύσιμο	Καύσιμο
CO	Δηλητήριο αναστρέψιμο, μέγιστο 50 ppm	Δηλητήριο	Δηλητήριο (πρέπει <0.5 %)	Καύσιμο	Καύσιμο
CH ₄	Διαλύτης	Δηλητήριο	Διαλύτης	Διαλύτης	Καύσιμο
CO ₂ +H ₂ O	Διαλύτης	Δηλητήριο	Διαλύτης	Διαλύτης	Διαλύτης
S (H ₂ S+CO ₂)	Δηλητήριο	Δηλητήριο	Δηλητήριο (πρέπει < 50 ppm)	Δηλητήριο (πρέπει < 0.5 %)	Δηλητήριο (πρέπει < 1 ppm)

Πίνακας 7

Επιδράσεις διαφόρων ουσιών στα είδη των κυψελών καυσίμου

Ο βασικός στόχος των διαφόρων τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας είναι η παραγωγή ενεργού ισχύος. Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζονται διάφορα είδη τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται για τη διανομή της παραγόμενης ισχύος:

Τεχνολογία	Ισχύς
Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ)	5 KW - 10 MW
Μικρο-τουρμπίνες	35 KW - 1 MW
Μικρά υδροηλεκτρικά εργοστάσια	1-100 MW
Πολύ μικρά υδροηλεκτρικά εργοστάσια	25KW - 1 MW
Μπαταρίες	500 KW - 5 MW
Ανεμογενήτριες	200 W - 3 MW
Φωτοβολταϊκά	20 W - 100 KW
Βιομάζα	100 KW - 20 MW
Κυψέλες καυσίμου PAFC	200 KW - 2 MW
Κυψέλες καυσίμου MCFC	250 KW - 2 MW
Κυψέλες καυσίμου PEMFC	1 - 250 KW
Κυψέλες καυσίμου SOFC	250 KW - 5 MW
Γεωθερμία	5 - 100 MW

Πίνακας 8

Σύγκριση παραγόμενης ισχύος διαφόρων τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται σήμερα.

Παρατηρούμε ότι οι επιδόσεις των κυψελών καυσίμου όλων των κατηγοριών μπορούν να ανταγωνιστούν τις μερθόδους παραγωγής ισχύος που χρησιμοποιούνται σήμερα.

Γενικά στο χώρο της ενέργειας, παρατηρείται μια στροφή από τις μεγάλες παραγωγικές μονάδες, στα αποκεντρωμένα συστήματα παραγωγής. Επίσης στις μεταφορές υπάρχει η τάση της χρησιμοποίησης καυσίμων που να μην οδηγούν στη παραγωγή επιβλαβών ρύπων που μολύνουν την ατμόσφαιρα και διογκώνουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Και στις δύο αυτές περιπτώσεις το υδρογόνο μπορεί να συμβάλλει αποφασιστικά στην επίλυση των προβλημάτων.

2.6 Δομή κυψελίδας καυσίμου

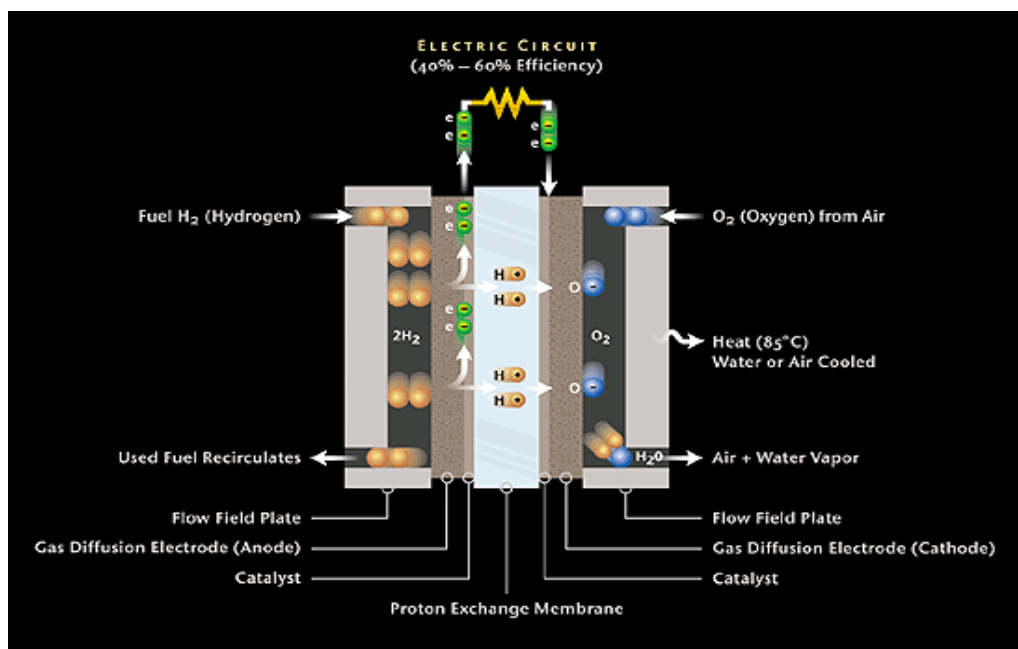
2.6.1 Δομικά στοιχεία της κυψέλης καυσίμου

Στην υποενότητα αυτή παρουσιάζεται η δομή μιας κυψέλης καυσίμου καθώς και διάφορα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά της. Η αναφορά αυτή ειδικεύεται για τη κυψέλη καυσίμου πολυμερισμένης μεμβράνης (PEM Fuel Cell) που είναι και η πιο διαδεδομένη από όλες και έχει την πιο απλοϊκή κατασκευή.

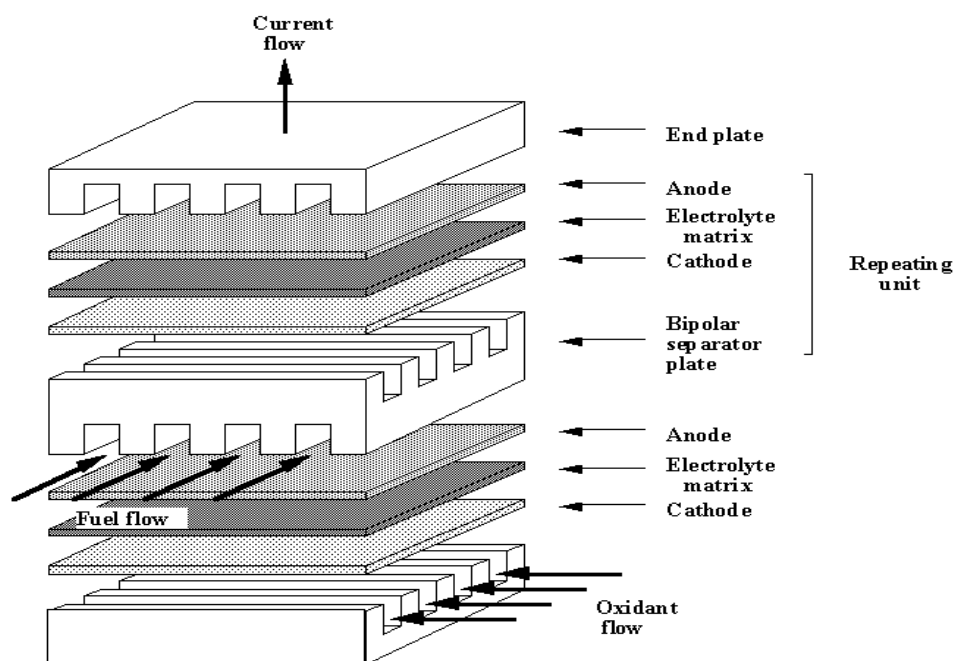
Τα δομικά στοιχεία της κυψέλης καυσίμου είναι:

- Μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων (Proton Exchange Membrane) ή Ηλεκτρολύτης
- Ηλεκτρόδια (electrodes)
- Καταλύτης (catalyst)
- Στρώμα διάχυσης αερίων (gas diffusion layers) ή πορώδεις στρώμα (backing layer)
- Διπολικές πλάκες (Bipolar plates)

Η δομή μιας κυψέλης καυσίμου με τα δομικά της στοιχεία φαίνεται στις παρακάτω εικόνες με διαφορετικές παραλλαγές:



Εικόνα 12
Παρουσίαση δομικών στοιχείων κυψέλης καυσίμου



Εικόνα 13
Σύνθεση δομικών στοιχείων κυψέλης καυσίμου

Όσον αφορά τη δομή της ο ηλεκτρολύτης βρίσκεται στο κέντρο, και αποτελείται από πολυμερισμένη μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων. Στη συνέχεια με κατεύθυνση από μέσα προς τα έξω στην περιγραφή ακολουθούν τα ηλεκτρόδια, που είναι μεταλλικά υλικά στα οποία εφαρμόζεται το στρώμα του καταλύτη. Συνεχίζοντας προς τα έξω, ακολουθεί το στρώμα διάχυσης των αερίων. Στη συνέχεια η κυψέλη καυσίμου τελειώνει με τις διπολικές πλάκες, ανόδου και καθόδου, από τις οποίες εισέρχονται και εξέρχονται τα αντιδρώντα και προϊόντα των αντιδράσεων όπως φαίνεται στην εικόνα 13. Η δομή και η λειτουργία του καθενός από τα δομικά στοιχεία της κυψέλης καυσίμου αναλύονται διεξοδικά στη συνέχεια.

2.6.1.1 Μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων

Η πολυμερισμένη ηλεκτρολυτική μεμβράνη είναι ένας ηλεκτρονικός μονωτής και παράλληλα ένας άριστος αγωγός κατιόντων υδρογόνου. Το τυπικό υλικό της μεμβράνης αποτελείται από πλήρως φθοριομένο άνθρακα, στον οποίο είναι προσαρμοσμένα ρίζες θεϊκών οξειδίων. Όταν η μεμβράνη ενυδατώνεται, τότε τα ιόντα υδρογόνου αποκτούν ελευθερία κίνησης. Η μεταφορά ιόντων επομένως δια μέσου της μεμβράνης εξαρτάται από την ποσότητα νερού που βρίσκεται δεσμευμένη ή ελεύθερη μέσα στο πολυμερές.

Οι ιδιότητες της μεμβράνης εξαρτώνται από τις κατασκευαστικές προδιαγραφές της. Το πάχος της μεμβράνης ποικίλλει από 50-175 μm ., το οποίο είναι αναλογικά ίδιο πάχος με 2-7 σελίδες χαρτιού στη σειρά. Το εμπορικό όνομα με το οποίο κυκλοφορούν οι μεμβράνες είναι Nafion 117 και συναντάται σε διαφορετικό πάχος σε διάφορες κυψέλες (π.χ. 177 μm , συνήθως ο αριθμός συνδέεται με το πάχος).

Οι μεμβράνες αυτές παρουσιάζουν υψηλή χημική και θερμική σταθερότητα. Η βασική λειτουργία της μεμβράνης στηρίζεται στην ιδιότητα που έχει να επιτρέπει διέλευση ιόντων από το εσωτερικό της. Η μεμβράνη θα πρέπει να διαθέτει μεγάλη ιοντική αγωγιμότητα και παράλληλα να εμποδίζει, τη διέλευση των ηλεκτρονίων, ώστε να μην υπάρχουν απώλειες και να διατηρείται η ομαλή λειτουργία της κυψέλης. Εάν η μεμβράνη επιτρέπει τη διέλευση των ηλεκτρονίων, τότε παρουσιάζονται προβλήματα βραχυκύκλωσης με αποτέλεσμα τη μη ομαλή λειτουργία της κυψέλης. Παράλληλα λειτουργεί και σαν διαχωριστική επιφάνεια, ανάμεσα στο οξειδωτικό και το καύσιμο, έτσι ώστε να αποφεύγεται η απευθείας αντίδρασή τους. Η μεμβράνη προσδιορίζει, τις συνθήκες λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου. Έτσι η θερμοκρασία λειτουργίας, εξαρτάται άμεσα από το είδος της μεμβράνης που αυτή διαθέτει. Εξαιτίας της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας, οι κυψέλες καυσίμου τύπου PEM, χρησιμοποιούν ακριβούς ηλεκτρολύτες, για την επαρκή κατάλυση της αντίδρασης, με αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους τους.

2.6.1.2 Ηλεκτρόδια

Τα ηλεκτρόδια της κυψέλης αποτελούν πολύπλοκες νανοδομές και περιέχουν καταλύτη, πόρους και ηλεκτρικά αγωγιμα υλικά. Όλες οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε μία κυψέλη καυσίμου αποτελούνται από δύο επιμέρους ημι-αντιδράσεις.

Την οξείδωση (Αγγλ. *Oxidation*) του υδρογόνου η οποία πραγματοποιείται στην άνοδο και την αναγωγή (Αγγλ. *Reduction*) του οξυγόνου στην κάθοδο.

Με την οξείδωση του υδρογόνου παράγονται ιόντα υδρογόνου (πρωτόνια), τα οποία μεταφέρονται μέσω της ιοντικά αγωγίμης μεμβράνης στην κάθοδο και ηλεκτρόνια τα οποία διοχετεύονται στο εξωτερικό κύκλωμα, καθώς η διέλευση τους μέσα από τη μεμβράνη δεν είναι δυνατή.

Η αναγωγή του οξυγόνου γίνεται καθώς το οξυγόνο το οποίο παρέχεται από τον αέρα έρχεται σε επαφή με τα ιόντα υδρογόνου και παράγεται νερό και θερμότητα. Αντίθετα με τη διαδικασία της οξείδωσης, στη διαδικασία της αναγωγής δεν έχει ακόμα κατανοηθεί ο μηχανισμός της αντίδρασης πλήρως.

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι η ταχύτητα της καθοδικής αντίδρασης είναι 100 φορές μικρότερη από αυτή της ανόδου και αυτό δημιουργεί ένα σημαντικό όριο στην απόδοση της κυψέλης. Η χαμηλή ταχύτητα αναγωγής του οξυγόνου οφείλεται σε 3 παράγοντες:

- Στη μεγάλη ισχύ του δεσμού του μοριακού οξυγόνου και στην αυξημένη σταθερότητα του δεσμού Pt - O ή Pt - OH.
- Στο ότι είναι αντίδραση μεταφοράς 4 ηλεκτρονίων
- Στην δημιουργία παραπροϊόντων όπως το H_2O_2 (OH-OH)

Η συνεκτική δομή των ηλεκτροδίων με τον ηλεκτρολύτη που βρίσκεται ανάμεσα τους είναι ένα πολύ βασικό στοιχείο του σχεδιασμού των κυψελών καυσίμου. Συγκεκριμένα, ο ρυθμός με τον οποίο συμβαίνει η αντίδραση, είναι αναλογικός με την επιφάνεια (εμβαδόν) των ηλεκτροδίων. Η επιφάνεια που καλύπτει το ηλεκτρόδιο είναι ένα ζωτικό στοιχείο της απόδοσης της κυψέλης, που συχνά αναφέρεται ως ρεύμα ανά τετραγωνικό εκατοστό. Η επιφάνεια των ηλεκτροδίων υπολογίζεται ως μήκος επί πλάτος, που είναι σχεδιαστικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά των ηλεκτροδίων.

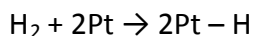
Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω η μετατροπή της χημικής ενέργειας του καυσίμου σε ηλεκτρική, γίνεται στα ηλεκτρόδια, άνοδος και κάθοδος. Τα ηλεκτρόνια ρέουν μέσα από το εξωτερικό κύκλωμα, ενώ τα ιόντα διαπερνάνε τον ηλεκτρολύτη. Επομένως τα ηλεκτρόδια πρέπει να είναι πορώδη, διαπερατά από τα αέρια μόρια, τα ιόντα και τα ηλεκτρόνια, καθώς επίσης πρέπει να είναι καλοί αγωγοί του ηλεκτρισμού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της αποτελεσματικής επιφάνειας ή διαφορετικά ενεργους επιφάνειας. Η αποτελεσματική επιφάνεια αποτελεί την επιφάνεια πάνω στην οποία επιτυγχάνονται οι χημικές αντιδρασεις. Το πορώδες υλικό των ηλεκτροδίων συσιστά μια μικροσκοπική δομή που αυξάνει αυτή την αποτελεσματική επιφάνεια πολλαπλάσιες φορές από το μέγεθος μήκος επί πλάτος του ηλεκτροδίου βελτιώνοντας την απόδοση της χημικής αντίδρασης. Αυτή η μικροσκοπική δομή είναι μια βασική κατασκευαστική και σχεδιαστική απαίτηση των κυψελών καυσίμου. Επιπρόσθετα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας, στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων ενσωματώνεται ένας καταλύτης, ενώ πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη το

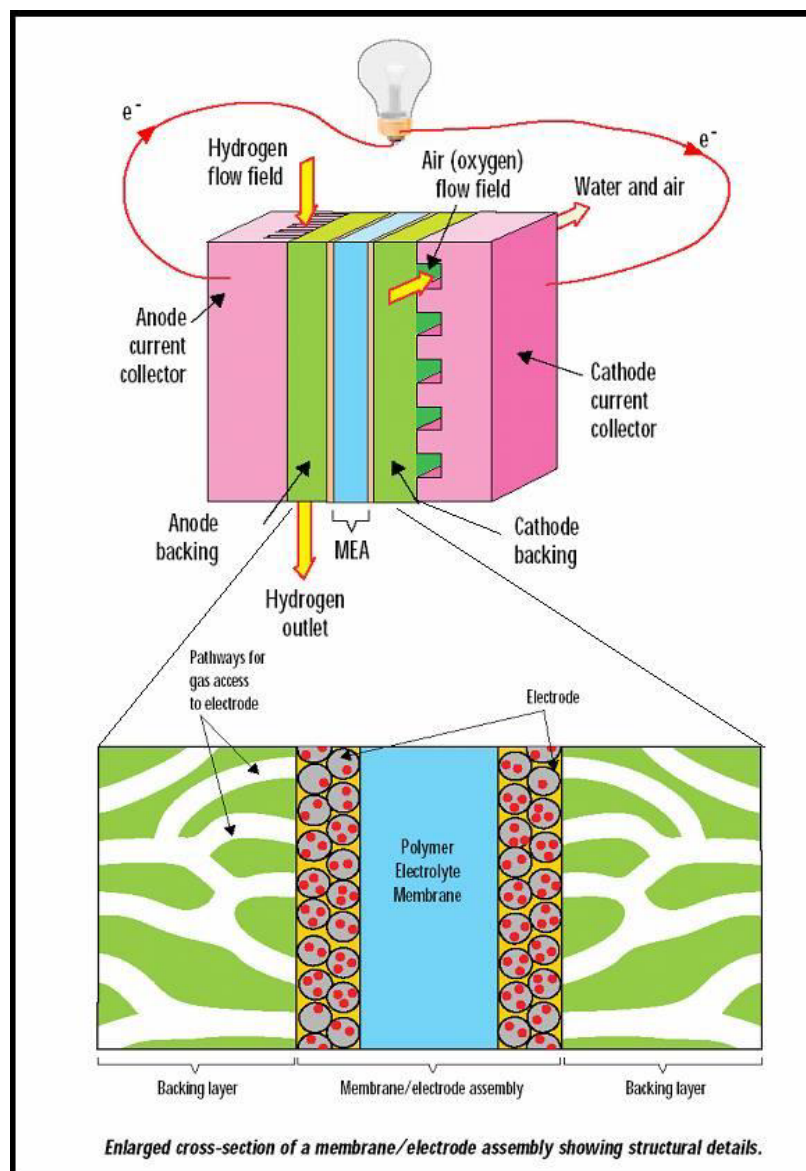
γεγονός ότι είναι υποχρεωμένα να λειτουργούν για πολλές ώρες σε ένα διαβρωτικό περιβάλλον, επομένως η απαίτηση για ανθεκτικότητα στη διάβρωση είναι επιβεβλημένη.

2.6.1.3 Καταλύτης ή ηλεκτροκαταλύτης

Στις κυψέλες καυσίμου τύπου PEM, χρησιμοποιείται ως καταλύτης λευκόχρυσος (Pt) καθώς είναι ο μόνος, που μπορεί να παρέχει υψηλούς ρυθμούς αναγωγής του οξυγόνου, στις χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας της PEM (60 – 80 °C). Ο σκοπός του είναι να επιταχύνει την αντίδραση της καθόδου, η οποία είναι 100 φορές πιο αργή, από την αντίδραση οξείδωσης του υδρογόνου. Ο λευκόχρυσος χρησιμοποιείται, εξαιτίας της μοναδικής του ιδιότητας, να διασπά τόσο το υδρογόνο, όσο και το οξυγόνο. Ανάμεσα στις αντιδράσεις οξείδωσης και αναγωγής μεσολαβεί ένα ενδιάμεσο βήμα στο οποίο, τα άτομα της πλατίνας ενώνονται με τα άτομα του υδρογόνου και του οξυγόνου. Ο δεσμός αυτός είναι τόσο ισχυρός, ώστε να έλκει τα άτομα, ενώ ταυτόχρονα είναι αρκετά ασθενής ώστε απελευθερώνει τα άτομα του υδρογόνου ή του οξυγόνου, ώστε να σχηματιστούν τα τελικά προϊόντα. Η χημική διεργασία που γίνεται στο ηλεκτρόδιο της ανόδου είναι:

- Δεσμεύονται τα άτομα του υδρογόνου από τον λευκόχρυσο
- Απελευθέρωση ιόντων υδρογόνου και ηλεκτρονίων





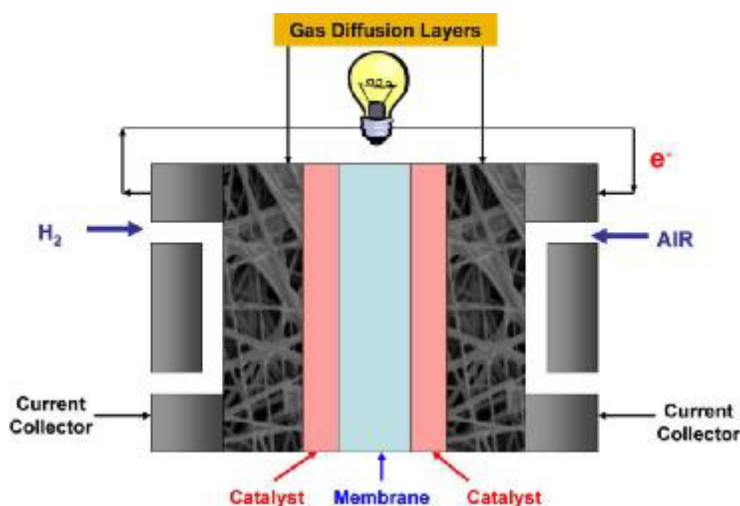
Εικόνα 14

Σύνδεση μεμβράνης ηλεκτροδίων. Πορώδης δομή ηλεκτροδίων

Το μικρό μέγεθος των μορίων Pt, περίπου 2nm σε διάμετρο, οδηγεί σε πολύ μεγάλη συνολική περιοχή επιφάνειας που είναι προσβάσιμη στα μόρια αερίου. Η μεγάλη περιοχή επιφάνειας Pt, επιτρέπει τις αντιδράσεις ηλεκτροδίων να πραγματοποιούνται σε πολλές περιοχές επιφάνειας Pt ταυτόχρονα. Η μεγάλη διασπορά των μορίων του λευκόχρυσου αυξάνει δραματικά τη συνολική επιφάνεια του, ακόμα και όταν η ποσότητα του λευκόχρυσου που χρησιμοποιείται είναι μικρή. Το αποτέλεσμα είναι να αυξάνει σημαντικά η ταχύτητα της αντίδρασης που λαμβάνει χώρα στο ηλεκτρόδιο. Αυτή η υψηλή διασπορά του καταλύτη είναι βασική για την ροή ηλεκτρονίων, δηλαδή το παραγόμενο ρεύμα σε μια κυψέλη καυσίμου. Ο συνδυασμός Άνοδος/Μεμβράνη/Κάθοδος συχνά αναφέρεται και ως σώμα Μεμβράνης-Ηλεκτρόδια (Membrane Electrode Assembly MEA).

2.6.1.4 Στρώμα διάχυσης αερίων ή πορώδες στρώμα (Gas Diffusion Layer)

Το σώμα μεμβράνης ηλεκτροδίων περιβάλλεται από δύο πορώδη στρώματα από γραφίτη. Μπορεί να αποτελεί μέρος του ηλεκτροδίου τόσο της ανόδου όσο και της καθόδου, είτε να είναι ξεχωριστό στρώμα. Η πορώδης φύση του στρώματος αυτού εξασφαλίζει αποτελεσματική διάχυση και ισοκατανομή του κάθε αντιδρώντος αερίου στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, που αποτελεί τον πρωταρχικό του ρόλο, ενώ επίσης δημιουργεί ηλεκτρική σύνδεση ανάμεσα στον καταλύτη και τη διπολική πλάκα. Επιπρόσθετα απομακρύνει το παραγόμενο νερό από την επιφάνεια του ηλεκτρολύτη και σχηματίζει ένα προστατευτικό λεπτό στρώμα στην επιφάνεια του καταλύτη. Τέλος λειτουργεί και ως μηχανικό στήριγμα για τη μεμβράνη. Μια αντιπροσωπευτική απεικόνιση δίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



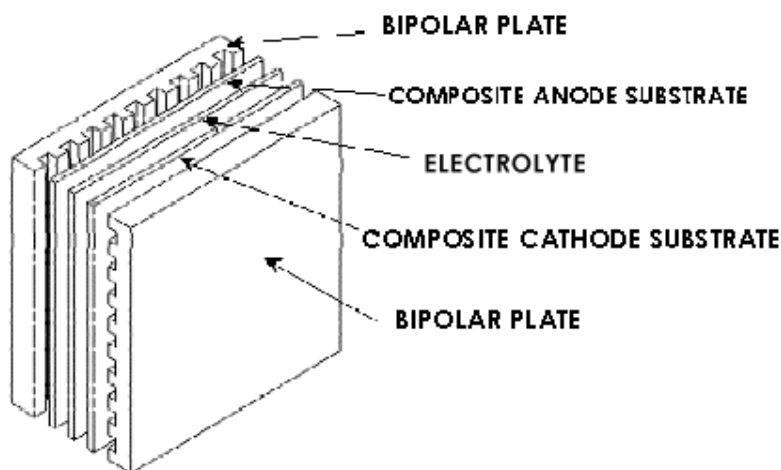
Εικόνα 15
Δομή στρώματος διάχυσης αερίων

Το υλικό που χρησιμοποιείται για τη κατασκευή του, έχει ως βάση τον άνθρακα μαζί με κάποιο υδροφοβικό υλικό το οποίο αποτρέπει τη συγκέντρωση του νερού (ώστε να μπορούν τα αέρια ελεύθερα να έρχονται σε επαφή με το καταλύτη).

2.6.1.5 Διπολικές πλάκες (Bipolar plates)

Η τάση μιας κυψέλης καυσίμου υπό φορτίο είναι αρκετά μικρή, της τάξης του 0.7 Volt. Για να φτάσουμε το επιθυμητό επίπεδο της τάσης, πολλές κυψέλες καυσίμου θα πρέπει να ενωθούν στη σειρά. Η εν σειρά ένωση των κυψελών καυσίμου, δημιουργεί μια συστοιχία κυψελών καυσίμου. Ο πιο απλός τρόπος είναι η σύνδεση της άκρης της καθόδου της μιας κυψέλης καυσίμου στην άνοδο της επόμενης κυψέλης. Το πρόβλημα με αυτή τη διάταξη είναι ότι θα πρέπει τα ηλεκτρόνια, να διατρέξουν όλη την επιφάνεια του ηλεκτροδίου μέχρι να φτάσουν στο άκρο της ηλεκτρικής σύνδεσης. Παρόλο που τα ηλεκτρόδια είναι καλοί αγωγοί, όταν η κυψέλη έχει τάση 0.7 Volt, ακόμα και μια πολύ μικρή πτώση τάσης είναι εξαιρετικά σημαντική.

Η λύση στο παραπάνω πρόβλημα δίνεται με τη χρησιμοποίηση των διπολικών πλακών, για τη σύνδεση των κυψελών μεταξύ τους. Οι πλάκες συνδέουν ολόκληρη την επιφάνεια της καθόδου μιας κυψέλης με ολόκληρη την επιφάνεια της ανόδου της επόμενης κυψέλης, για τον λόγο αυτό ονομάζονται διπολικές. Ταυτόχρονα οι διπολικές πλάκες τροφοδοτούν με οξυγόνο τη κάθοδο και με υδρογόνο την άνοδο. Παρότι τα δύο ηλεκτρόδια πρέπει να έχουν καλή ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ τους, τα αέρια πρέπει να τροφοδοτούνται ξεχωριστά. Είναι κατασκευασμένες από αγώγιμα υλικά, όπως ο γραφίτης ή το ανοξείδωτο ατσάλι. Στις παρακάτω εικόνες δίνεται μια απεικόνιση των διπολικών πλακών:



Εικόνα 16
Απεικόνιση διπολικών πλακών και σύνδεση τους με το σώμα μεμβράνη-ηλεκτρόδια.



Εικόνα 17
Διπολικές πλάκες με τα κατάλληλη κατασκευαστική διαμόρφωση καναλιών

Οι πλάκες έχουν κανάλια έτσι ώστε τα αέρια να ρέουν στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Τα κατακόρυφα κανάλια είναι για τη ροή του υδρογόνου στην άνοδο, ενώ τα οριζόντια κανάλια είναι για τη ροή του οξυγόνου στην κάθοδο. Είναι επίσης κατασκευασμένες με τέτοιο τρόπο ώστε να έχουν αγωγή επαφή με την επιφάνεια του κάθε ηλεκτροδίου. Το αποτέλεσμα αυτής της σύνδεσης σε σειρά των κυψελών, είναι το ηλεκτρικό ρεύμα να περνά στην ουσία κατευθείαν από τη μία κυψέλη στην άλλη και όχι από την επιφάνεια του ενός ηλεκτροδίου στο άλλο. Τα ηλεκτρόδια επίσης δέχονται μηχανική υποστήριξη από τις πλάκες, με αποτέλεσμα να έχουμε μια σθεναρή κατασκευή.

2.6.2 Προβλήματα κατά τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου και προτάσεις επίλυσης

Κατά τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου, συμβαίνουν διάφορα προβλήματα που αφορούν τη κατασκευαστική της διαμόρφωση, ή τα λειτουργικά της χαρακτηριστικά και επηρεάζουν σε σημαντικό βαθμό την απόδοση της χημικής αντίδρασης του καυσίμου και κατ'επέκταση την απόδοση στη παραγωγή του ηλεκτρικού ρεύματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να γίνουν εκτεταμένες μελέτες για την βελτιστοποίηση της απόδοσης της κυψέλης, μέσω επεμβάσεων στη κατασκευαστική διαμόρφωση των επιμέρους συνεργαζόμενων τεμαχίων που συνθέτουν τη δομή της. Μια σύντομη αποτίμηση των σημαντικότερων προβλημάτων που εμφανίζονται και η πρόταση κάποιων λύσεων παρατίθενται στη συνέχεια.

2.6.2.1 Πρόβλημα στην απόδοση των χημικών αντιδράσεων

Κατά τη πραγματοποίηση της χημικής αντίδρασης στη κυψέλη καυσίμου πέρα από την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται, απελευθερώνεται και θερμότητα. Το ηλεκτρικό ρεύμα όμως που παράγεται, είναι αρκετά μικρό σε ένταση, και οι λόγοι για τους οποίους συμβαίνει αυτό είναι:

- Η χαμηλή επιφάνεια επαφής ανάμεσα στο παρεχόμενο αέριο, τα ηλεκτρόδια, και τον ηλεκτρολύτη.
- Η μεγάλη απόσταση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια και τον ηλεκτρολύτη δημιουργεί αντίσταση στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος.

Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, τα ηλεκτρόδια κατασκευάζονται επίπεδα, με ένα λεπτό στρώμα ηλεκτρολύτη ανάμεσα τους. Η δομή του ηλεκτροδίου είναι πορώδης ώστε το καύσιμο να μπορεί να το διαπεράσει. Αυτό δίνει τη μέγιστη πιθανή επαφή, ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο τον ηλεκτρολύτη και το αέριο.

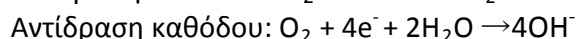
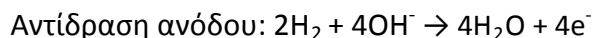
Ένα άλλο πρόβλημα σχετίζεται με την ενέργεια ενεργοποίησης. Στην άνοδο, όπου αντιδρά το υδρογόνο έχουμε απελευθέρωση ενέργειας, το οποίο δε σημαίνει ότι η αντίδραση συνεχίζεται με αμείωτο ρυθμό. Παρόλο που απελευθερώνεται ενέργεια, πρέπει να τροφοδοτηθεί με ενέργεια ενεργοποίησης αρχικά, ώστε να ξεπεραστεί ένα επιθυμητό επίπεδο στην αρχική ενέργεια των μορίων για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί η αντίδραση. Αν η

πιθανότητα ενός μορίου να έχει επαρκή αρχική ενέργεια είναι χαμηλή, τότε η αντίδραση θα πραγματοποιηθεί με αργό ρυθμό, με εξαίρεση πολύ υψηλές θερμοκρασίες.

Υπάρχουν τρεις τρόποι για την αντιμετώπιση της χαμηλής ταχύτητας αντίδρασης:

- Χρήση καταλυτών
- Ανύψωση της θερμοκρασίας
- Αύξηση της επιφάνειας των ηλεκτροδίων

Οι πρώτες δύο λύσεις μπορούν να εφαρμοστούν σε οποιαδήποτε χημική αντίδραση. Αντιθέτως η τρίτη λύση είναι ειδική για περιπτώσεις κελιών καυσίμου, και είναι πολύ σημαντική. Αυτό προκύπτει από την μελέτη των αντιδράσεων που συμβαίνουν στη αλκαλική κυψέλη καυσίμου:



Σχετικά με τη πρώτη αντίδραση της ανόδου, απαιτείται καύσιμο υδρογόνο και ιόντα υδροξυλίου καθώς και ενέργεια ενεργοποίησης. Επιπλέον η σύνδεση του καυσίμου υδρογόνου με τα ιόντα υδροξυλίου γίνεται στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων ενώ ταυτόχρονα τα ηλεκτρόνια πρέπει να απομακρυνθούν.

2.6.2.2 Διαχείριση νερού – Υγρασία

Η διαχείριση του παραγόμενου νερού είναι ζωτικής σημασίας για την αποδοτική λειτουργία της κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων. Παρόλο που το νερό είναι προϊόν των αντιδράσεων, που πραγματοποιούνται στη κυψέλη καυσίμου και μεταφέρεται έξω από αυτή κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της, πρέπει τόσο το υδρογόνο όσο και ο αέρας που εισάγονται να υγρασιούνται. Η υγρασία των αερίων, θα πρέπει να ελέγχεται προσεκτικά. Ακόμα η ύπαρξη ελάχιστου νερού, μειώνει την αγωγιμότητα, της μεμβράνης στα ιόντα υδρογόνου και προκαλεί τη μείωση του ρεύματος της κυψέλης.

Όπως έχει προαναφερθεί για να ολοκληρωθεί η αντίδραση (τόσο στην άνοδο όσο και στη κάθοδο) πρέπει το καύσιμο να έρθει σε επαφή ταυτόχρονα και με το ηλεκτρόδιο και με τον ηλεκτρολύτη. Επειδή στις PEM κυψέλες, ο ηλεκτρολύτης (μεμβράνη) δεν είναι υγρός και δεν μπορεί να γεμίσει τις περιοχές ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και στον ηλεκτρολύτη, η ύπαρξη νερού είναι απαραίτητη για την πραγματοποίηση της αντίδρασης. Όταν η μεμβράνη είναι πλήρως ενυδατωμένη, η απόδοση της κυψέλης αυξάνεται γιατί δημιουργούνται περισσότερες περιοχές, που είναι δυνατή η αντίδραση. Υπάρχει όμως ένα σημείο το οποίο αν ξεπεραστεί τότε ο ηλεκτρολύτης «πλυμμηρίζει» και το νερό εμποδίζει την επαφή του αερίου με τον ηλεκτρολύτη και το ηλεκτρόδιο. Επομένως ο έλεγχος, της ποσότητας του νερού είναι πολύ σημαντικός. Κατά τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου, όταν ένα πρωτόνιο διαπερνά τη μεμβράνη μεταφέρει, περίπου 2.5 μόρια νερού από την άνοδο στην κάθοδο. Η αναλογία είναι μια εκτίμηση και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, ένας από τους οποίους είναι και η

ίδια η μεμβράνη. Όταν η κυψέλη λειτουργεί σε υψηλή πυκνότητα ρεύματος το πρόβλημα της αφυδάτωσης είναι μεγαλύτερο. Η λειτουργία με αφυδατωμένη μεμβράνη μπορεί να μειώσει σημαντικά τη διάρκεια ζωής της μεμβράνης.

2.6.2.3 Θερμοκρασία Λειτουργίας

Η θερμοκρασία λειτουργίας πρέπει να κυμαίνεται σε κάποια πλαίσια. Αν η θερμοκρασία της κυψέλης καυσίμου μειωθεί πολύ, τότε μειώνεται η απόδοση της κυψέλης. Αν αντίθετα η θερμοκρασία ξεπεράσει το ανώτατο όριο λειτουργίας της κυψέλης τότε θα αφυδατωθεί η μεμβράνη, λόγω εξάτμισης του νερού, οπότε η κυψέλη, θα καταστραφεί. Για αυτό το λόγο πρέπει με κάποιο τρόπο να γίνεται απαγωγή της θερμότητας που παράγεται. Η θερμότητα αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για συμπαραγωγή θερμότητας είτε σε κάποιο υβριδικό σύστημα με ατμοστρόβιλο, είτε στη μονάδα επεξεργασίας καυσίμου ή ακόμα και με κάποιο τρόπο να γίνεται απαγωγή της στο περιβάλλον.

Επιπλέον η θερμοκρασία λειτουργίας των κυψελών καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) περιορίζεται από το γεγονός ότι πρέπει το νερό να διατηρείται σε υγρή μορφή. Η μεμβράνη πρέπει να περιέχει νερό, έτσι ώστε να μεταφέρονται τα πρωτόνια μέσα από αυτήν. Έτσι η κυψέλη λειτουργεί σε θερμοκρασίες κάτω των 100°C. Η λειτουργία των κυψελών καυσίμου σε θερμοκρασίες άνω των 100°C, είναι δυνατή αρκεί να επικρατούν συνθήκες υψηλής πίεσης, ώστε το νερό να διατηρείται σε υγρή μορφή ή να υπάρχει κατάλληλη μεμβράνη που να μπορεί να λειτουργεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

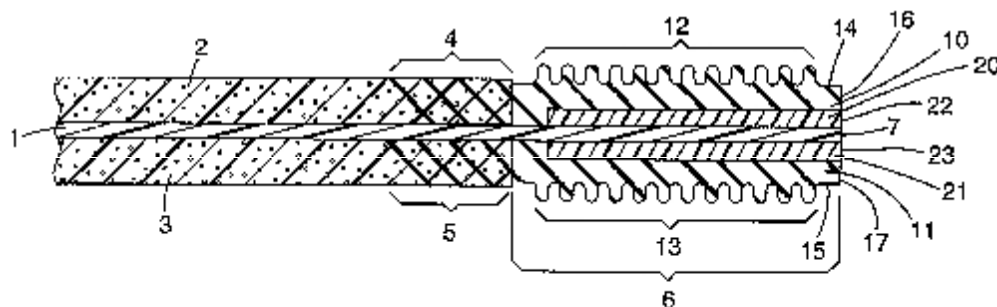
Οι κυψέλες τύπου PEM, λειτουργούν σε θερμοκρασίες της τάξεως των 60 – 80°C.

2.6.2.4 Πίεση Λειτουργίας

Όσον αφορά τη πίεση, η πίεση του υδρογόνου θα πρέπει να ελέγχεται. Αν η πίεση είναι πολύ μικρή, τότε μειώνεται η απόδοση της κυψέλης, ενώ αν η πίεση γίνει πολύ μεγάλη, τότε τίθεται θέμα δομικής αντοχής της. Οι κυψέλες τύπου PEM, λειτουργούν σε πιέσεις της τάξεως των 0.001 – 1MPa $\approx$ 0.0098 – 9.8 atm, ενώ υπάρχει μια προτίμηση για κυψέλες που λειτουργούν σε πίεση ίση με την ατμοσφαιρική (1 atm).

2.6.2.5 Πρόβλημα στη τροφοδοσία των αερίων, στη ψύξη της κυψέλης καυσίμου και πρόβλημα διαρροής

Επειδή τα ηλεκτρόδια πρέπει να είναι πορώδη (για να επιτρέπουν το αέριο να εισέλθει), αφήνουν παράλληλα το αέριο να διαρεύσει από τα άκρα της κατασκευής τους. Επομένως τα άκρα των ηλεκτροδίων πρέπει να είναι σφραγισμένα. Συνήθως αυτό γίνεται κατασκευάζοντας τον ηλεκτρολύτη, μεγαλύτερο και από τα δύο ηλεκτρόδια και προσαρμόζοντας μια τσιμούχα γύρω από το κάθε ηλεκτρόδιο, όπως φαίνεται στο παρακάτω σκαρίφημα:



Εικόνα 18

Σχεδιαστική διαμόρφωση ηλεκτροδίων – ηλεκτρολύτη με τσιμούχα

Το καύσιμο υδρογόνο και το οξυγόνο που τροφοδοτούνται στην κυψέλη καυσίμου, χρησιμοποιούν τη παραπάνω κατασκευή. Εξαιτίας των σφραγισμάτων που έχουν γίνει γύρω από τα άκρα των ηλεκτροδίων, το υδρογόνο έρχεται σε επαφή μόνο με την άνοδο, εφόσον τροφοδοτείται κάθετα στη κατεύθυνση δια μέσου της κυψέλης. Παρομοίως το οξυγόνο (ή ο αέρας) τροφοδοτείται οριζόντια δια μέσου της κυψέλης και θα έρθει σε επαφή μόνο με τη κάθοδο και σε καμία περίπτωση ούτε με τα άκρα της ανόδου.

Πέρα από το παραπάνω πρόβλημα δημιουργείται άλλο ένα που έχει να κάνει με τη ψύξη της κυψέλης καυσίμου. Η παραπάνω διαμόρφωση με τις τοποθετούμενες τσιμούχες και το σφράγισμα των ηλεκτροδίων, λέγεται εξωτερική σωλήνωση της κυψέλης καυσίμου και έχει το πλεονέκτημα της απλότητας στη κατασκευή. Παρ'όλα αυτά έχει δύο μεγάλα μειονεκτήματα. Το πρώτο είναι η δυσκολία ψύξης του συστήματος. Οι κυψέλες καυσίμου απέχουν κατά πολύ από 100% απόδοση, και παράγονται υπολογίσιμες ποσότητες θερμικής ενέργειας και ηλεκτρικής ισχύος.

Γίνεται κατανοητό από τη δομή της κατασκευής όπως φαίνεται στα σχήματα, ότι είναι αρκετά δύσκολη η τροφοδοσία, ενός ψυκτικού υγρού δια μέσου των κυψελών καυσίμου. Επομένως αυτός ο τύπος της κυψέλης καυσίμου πρέπει να ψυχθεί από το αντιδρών αέριο που περνάει δια μέσω της καθόδου. Αυτό σημαίνει ότι ο αέρας πρέπει να τροφοδοτηθεί σε πολύ μεγαλύτερο ρυθμό από ότι απαιτεί η χημική αντίδραση. Μερικές αυτές αυτό είναι αρκετό για να ψυχθεί η κυψέλη καυσίμου, αλλά είναι επιζήμια κατανάλωση ενέργειας.

Το δεύτερο μειονέκτημα, είναι ότι η τσιμούχα γύρω από τα άκρα των ηλεκτροδίων, δεν μπορεί να πιεστεί ώστε να εφαρμοσει σταθερά στο ηλεκτρόδιο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα αυξημένη πιθανότητα, διαροής των αντιδρώντων αερίων.

Η επίλυση των παραπάνω προβλημάτων απαιτεί μια πιο σύνθετη δομή των των διπολικών πλακών και τη δημιουργία μιας δομής εσωτερικών σωληνώσεων. Οι διπολικές πλάκες κατασκευάζονται μεγαλύτερες σε σχέση με τα ηλεκτρόδια και έχουν επιπρόσθετα κανάλια που εκτείνονται δια μέσου της κυψέλης, και τροφοδοτούν το καύσιμο και το οξυγόνο στα ηλεκτρόδια. Προσεκτικά τοποθετημένες τρύπες διανοίγονται που τροφοδοτούν τα αντιδρώντα στα κανάλια που καταλήγουν στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Η δομή αυτή της

υψέλης καυσίμου με αυτή τη διαμόρφωση αποτελεί ένα στέρεο μπλοκ με τα αντιδρώντα αέρια να τροφοδοτούνται ακριβώς εκεί στο τέλος όπου γίνεται η σύνδεση με το αρνητικό και θετικό ηλεκτρόδιο.

Όσον αφορά το θέμα της ψύξης, η διπολική πλάκα, με την εσωτερική σωλήνωση, μπορεί να ψυχθεί με πολλούς τρόπους. Ο απλούστερος, είναι να κατασκευαστούν στενά κανάλια δια μέσου των πλακών, που να οδηγούν τον αέρα ψύξης ή το νερό δια μέσου αυτών των καναλιών. Μια τέτοια προσέγγιση, χρησιμοποιείται στα περισσότερα συστήματα. Εναλλακτικά κανάλια μπορούν να κατασκευαστούν κατά μήκος της κυψέλης καυσίμου. Το προτιμώμενο σύστημα ψύξης ποικίλλει ανάλογα με τα διάφορα είδη κυψελών καυσίμου.

2.6.3 Συστοιχία κυψελών καυσίμου

Η απόδοση μιας κυψέλης καυσίμου δεν είναι 100% κι επομένως η θεωρητική τάση των 1,16 V δε συναντάται. Αντίθετα, μια συνηθισμένη τιμή τάσης εξόδου ισούται περίπου με 0,7V. Ωστόσο επειδή αυτή η τάση είναι μικρή και επομένως ακατάλληλη για τις περισσότερες πιθανές εφαρμογές της, γίνεται χρήση παραπάνω από μιας κυψέλης συνδεδεμένες μεταξύ τους σε σειρά, δημιουργώντας αυτό το οποίο ονομάζουμε στήλη κυψέλης καυσίμου (fuel cell stack). Ανάλογα με τη χρήση όπου προορίζεται η κυψέλη η στήλη μπορεί να αποτελείται από μερικές έως και εκατοντάδες κυψέλες. Ειδικά σε περιπτώσεις όπου απαιτείται εκτός από μεγάλη τάση και μεγάλη ισχύ χρησιμοποιούνται περισσότερες από μία στήλες σε σειρά.

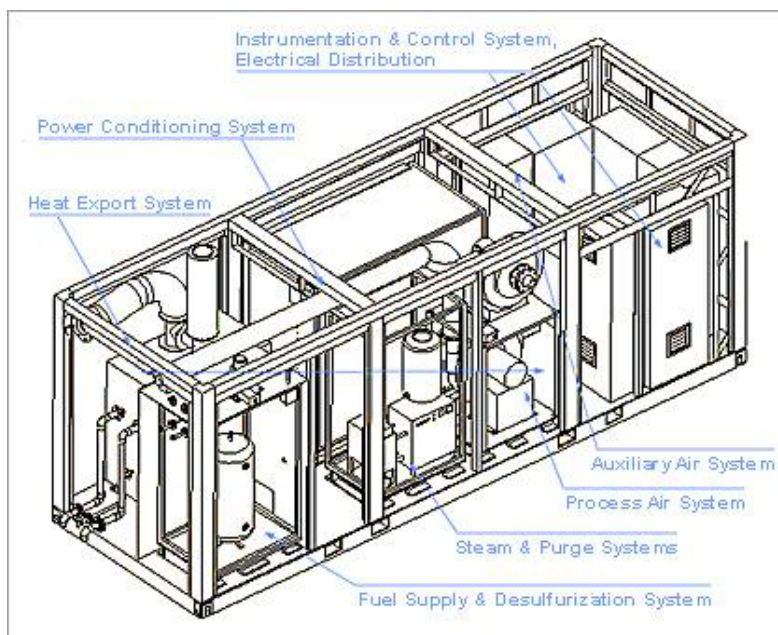
Προκειμένου να μειωθεί ο συνολικός όγκος και βάρος της στήλης γίνεται χρήση αντί δύο πλακών καθορισμού της ροής των αερίων, μίας. Αυτή η πλάκα έχει δύο περιοχές με κανάλια μεταφοράς, μια σε κάθε μεριά της η οποία αναλαμβάνει τη μεταφορά και διαφορετικού αερίου (υδρογόνου ή αέρα) και ονομάζεται διπολική πλάκα (bipolar plate). Στα άκρα της κυψέλης βρίσκονται δύο απλές πλάκες.

Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στο αδιαπέραστο από αέρια της στήλης διότι σε αντίθετη περίπτωση υδρογόνο και αέρας θα ενώνονταν άμεσα χωρίς την παραγωγή εκμεταλλεύσιμου ρεύματος. Η διπολική πλάκα πρέπει επίσης να είναι αγωγική ώστε το ρεύμα να μπορεί να κινηθεί από τη μία κυψέλη στην επόμενη.

2.6.4 Ολοκληρωμένο σύστημα κυψέλης καυσίμου – Βοηθητικά εξαρτήματα

Ο Πυρήνας ενός κελιού καυσίμου είναι τα ηλεκτρόδια, ο ηλεκτρολύτης και οι διπολικές πλάκες που έχουν περιγραφεί πιο πάνω. Παρ'όλα αυτά υπάρχουν και άλλα κομμάτια που συνθέτουν τον εξοπλισμό ενός ολοκληρωμένου συστήματος. Αυτά τα πρόσθετα μέρη λέγονται «υπόλοιπο» της κυψέλης καυσίμου (balance of the plant BOP). Σε κυψέλες καυσίμου υψηλών θερμοκρασιών, η συστοιχία των κυψελών καυσίμου είναι αρκετά μικρή και από άποψη μεγέθους αποτελεί το μικρότερο κομμάτι της κατασκευής. Τα επιπρόσθετα μέρη που απαιτούνται εξαρτώνται από το τύπο της κυψέλης καθώς και από το χρησιμοποιούμενο καύσιμο. Τα μέρη αυτά και ο ρόλος που παίζουν στην λειτουργία του συστήματος,

αναφέρονται παρακάτω. Μια απεικόνιση ενός ολοκληρωμένου συστήματος φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 19

Απεικόνιση ολοκληρωμένου συστήματος κυψέλης καυσίμου

2.6.4.1 Επιπρόσθετος βοηθητικός εξοπλισμός συστήματος κυψέλης καυσίμου

Η κυψέλη καυσίμου περιλαμβάνει τη μετατροπή της χημικής ενέργειας του καυσίμου σε συνεχές ρεύμα. Επομένως για να αξιοποιηθεί από το δίκτυο είναι απαραίτητη η χρήση ενός μετατροπέα ισχύος. Χρησιμοποιείται ένας μετατροπέας ανύψωσης DC/DC για να αυξήσει και να σταθεροποιήσει την τάση και στη συνέχεια ένας αντιστροφέας DC/AC (inverter) για να τη μετατρέψει σε εναλλασσόμενη με την επιθυμητή συχνότητα. Στην περίπτωση που το καύσιμο δεν είναι καθαρό υδρογόνο (όπως φυσικό αέριο ή μεθανόλη) είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί επεξεργασία του καυσίμου, ώστε το τελικό αέριο που θα εισαχθεί στην κυψέλη να έχει υψηλή περιεκτικότητα σε υδρογόνο. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η μονάδα επεξεργασίας καυσίμου (αναμορφωτής - reformer).

Μέσω της διαδικασίας της αναμόρφωσης (reforming) επιτυγχάνεται η παραγωγή υδρογόνου από τα υλικά αυτά και κατά αυτό τον τρόπο γίνεται εφικτή η χρήση του σε εφαρμογές όπως η κίνηση ενός οχήματος χωρίς να είναι απαραίτητη αποθήκευση του αυτού καθ' αυτού. Οι αναμορφωτές φαίνεται να είναι αναγκαίοι αφού προς το παρόν δεν υπάρχει οργανωμένη υποδομή για την παράδοση υδρογόνου ενώ δεν υπάρχουν επίσης και αποτελεσματικοί τρόποι για την αποθήκευση του ώστε να επιτευχθεί η άμεση χρήση του.

2.6.4.2 Αλληλεπίδραση υποσυστημάτων

Ο ακριβής έλεγχος της ροής των αντιδρώντων αερίων, της πίεσης, και της θερμοκρασίας της συστοιχίας, καθώς και της υγρασίας της μεμβράνης, κατά τη μεταβατική κατάσταση του συστήματος που προκαλείται από απότομες αλλαγές στο φορτίο είναι σημαντικό θέμα όσον αφορά τη διάρκεια ζωής, την απόδοση και τη σθεναρότητα της κυψέλης καυσίμου. Το αποτέλεσμα της διαδικασίας είναι πολύ σύνθετο, λόγω των αλληλεπιδράσεων που υπάχουν μεταξύ των υποσυστημάτων. Κάθε υποσύστημα έχει ένα αντίστοιχο στόχο ελέγχου και αλληλεπιδρά με τα άλλα συστήματα. Αυτά τα υποσυστήματα είναι:

- Υποσύστημα ροής αντιδρώντος καυσίμου
- Υποσύστημα ελέγχου θερμότητας και θερμοκρασίας
 - Υποσύστημα διαχείρισης νερού
 - Υποσύστημα διαχείρισης ισχύος
- Υποσύστημα διαχείρισης παρεχόμενου καυσίμου
- **Υποσύστημα ροής αντιδρώντος καυσίμου**

Το υποσύστημα αυτό περιλαμβάνει την ασταμάτητη τροφοδοσία του υδρογόνου και του αέρα. Όσο ο κινητήρας του οχήματος απαιτεί ρεύμα, υδρογόνο και οξυγόνο καταναλώνεται στη συστοιχία. Στη περίπτωση που συμπιεσμένο υδρογόνο είναι διαθέσιμο, η ροή του υδρογόνου στην άνοδο και του αέρα στη κάθοδο ρυθμίζεται μέσω μιας βαλβίδας και μιας συσκευής ροής θετικής πίεσης. Ο στόχος του ελέγχου είναι η παροχή επαρκούς ροής αντιδρώντος καυσίμου (για να διατηρήσει την αναμενόμενη αναλογία αερίων) και να εξασφαλίσει γρήγορη και ασφαλή μεταβατική απόκριση ισχύος, καθώς επίσης και να μειώσει την κατανάλωση των βοηθητικών εξαρτημάτων.

- **Υποσύστημα ελέγχου θερμότητας και θερμοκρασίας**

Το υποσύστημα αυτό περιλαμβάνει το σύστημα ψύξης της κυψέλης καυσίμου, και το σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας του συστήματος παροχής αντιδρώντος καυσίμου. Όσο αντλείται φορτίο από εξωτερικό κινητήρα, παράγεται θερμότητα στη κυψέλη καυσίμου. Για τις κυψέλες καυσίμου που απαιτούνται για οχήματα που μεταφέρουν επιβάτες, η θερμότητα που παράγεται δεν μπορεί να απομακρυνθεί παθητικά από τη μετάδοση θερμότητας του αέρα και της θέρμανσης της εξωτερικής επιφάνειας της κυψέλης. Αυτό απαιτεί ενεργή ψύξη μέσω ενός κατάλληλου συστήματος. Η θερμική διαχείριση μιας συστοιχίας κυψελών καυσίμου, είναι πιο δύσκολη από το σύστημα ψύξης μιας μηχανής εσωτερικής καύσης. Αρχικά χρησιμοποιείται απιονισμένο νερό σαν ψυκτικό αντί για κάποιο άλλο εξειδικευμένο ψυκτικό ρευστό. Δευτερευόντως η κυψέλη καυσίμου σχεδιάζεται να λειτουργεί σε μια θερμοκρασία περίπου 80°C. Επομένως, τα καυσάερια που εξέρχονται από από τη κυψέλη, που έχουν θερμοκρασία

περίπου 80°C, έχουν λιγότερη ικανότητα να μεταφέρουν θερμότητα, από την αντίστοιχη ικανότητα που έχουν στις μηχανές εσωτερικής καύσης όπου τα καυσάερια έχουν θερμοκρασίες της τάξης των 500°C.

- **Υποσύστημα διαχείρισης νερού**

Ο ρόλος του υποσυστήματος διαχείρισης νερού είναι να διατηρήσει την ενυδάτωση της πολυμερικής μεμβράνης και να εξισορροπήσει τη χρήση και τη κατανάλωση νερού στο σύστημα.

Η ποσότητα του αντιδρώντος αερίου και της ροής του νερού που εισάγεται στην άνοδο και τη κάθοδο επηρεάζοντας την υγρασία της μεμβράνης. Κυψέλες καυσίμου με ξηρή μεμβράνη προκαλούν μεγάλες απώλειες, ενώ το ίδιο συμβαίνει και με κυψέλες καυσίμου στις οποίες η μεμβράνη είναι πλήρως πλημμυρισμένη από νερό, κάτι που δε θα πρεπε να συμβαίνει καθώς οδηγεί σε μεγάλες απώλειες. Όσο αντλείται φορτίο που παράγει η κυψέλη καυσίμου, από εξωτερικές συσκευές, μόρια νερού παράγονται στη κάθοδο ενώ ταυτόχρονα μόρια νερού μεταφέρονται από την άνοδο στη κάθοδο από τα πρωτόνια υδρογόνου. Όσο η συγκέντρωση του νερού στη κάθοδο αυξάνεται, προκαλεί τη διάχυση του νερού από τη κάθοδο στην άνοδο. Η διατάραξη της υγρασίας της κυψέλης καυσίμου μπορεί να προκληθεί από διαφορετικούς μηχανισμούς. Από την παραγωγή του νερού όσο αυξάνεται το φορτίο ή από αλλαγές στην απόλυτη και σχετική πίεση κατά μήκος της μεμβράνης, ή αλλαγές στο ρυθμό ροής αέρα, και αλλαγές στη θερμοκρασία της συστοιχίας τα οποία αλλάζουν τη πίεση κορεσμού του ατμού. Αυτοί οι μηχανισμοί υποδεικνύουν ισχυρές και μη γραμμικές αλληλεπιδράσεις στη διαδικασία ελέγχου της υγρασίας, καθώς και στην επαναληπτική διαδικασία ελέγχου της παροχής αντιδρώντος καυσίμου, και στην επαναληπτική διαδικασία ελέγχου της ισχύος. Σε περίπτωση που δεν υπάρχει αποτελεσματικός έλεγχος της υγρασίας μέσα στη κυψέλη καυσίμου, μπορεί να οδηγήσει σε μια μείωση στη διαφορά δυναμικού της τάξεως 20 – 40%.

- **Υποσύστημα διαχείρισης ισχύος**

Το υποσύστημα αυτό ελέγχει την ισχύ που αντλείται από τη κυψέλη καυσίμου. Το φορτίο που αντλείται από το σύστημα (ρεύμα), μπορεί να θεωρηθεί σαν μια εξωτερική διαταραχή. Παρ'όλα αυτά η άντληση του ρεύματος, έχει άμεση επίδραση στα υπόλοιπα υποσυστήματα. Αν η μπαταρία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μια επιπρόσθετη πηγή παροχής ισχύος στο σύστημα, η διαχείριση ισχύος ανάμεσα στις δύο πηγές παραγωγής, μπορεί να γίνει επιτυγχάνοντας μια ικανοποιητική μεταβατική απόκριση στο όχημα καθώς και μια βέλτιστη διαχείριση της απόδοσης του συστήματος της συστοιχίας.

- **Υποσύστημα διαχείρισης παρεχόμενου καυσίμου**

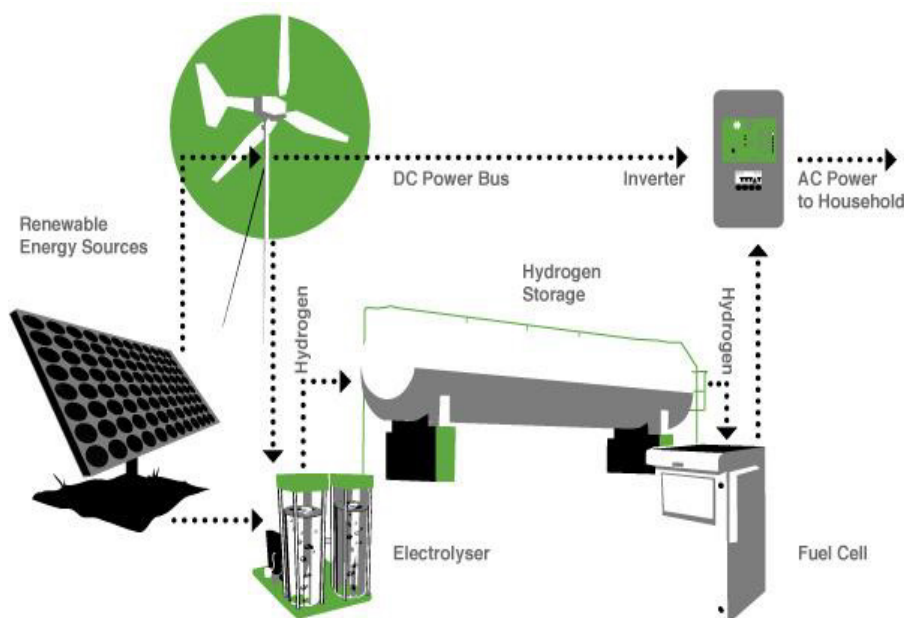
Ανεπαρκής υποδομή για τροφοδοσία καυσίμου υδρογόνου, καθώς και διανομή και αποθήκευσή του καθιστά τη τεχνολογία επεξεργασίας καυσίμου ένα σημαντικό εξάρτημα του συστήματος της κυψέλης καυσίμου. Σαν πηγές μπορούν καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν το μεθάνιο, η βενζίνη, ή το φυσικό αέριο. Η διαχείριση αυτών των καυσίμων περιλαμβάνει μετατροπή των καυσίμων που βασίζονται σε ενώσεις με βλάση των άνθρακα σε καθαρό υδρογόνο. Διάφορες επιπλοκές ανάμεσα στα εξαρτήματα των μηχανισμών επεξεργασίας καυσίμου, καθώς και σε συνεργαζόμενους μηχανισμούς κίνησης κάνουν αρκετά πολύπλοκο το πρόβλημα ελέγχου. Οι ρυθμιζόμενες μεταβλητές του μηχανισμού επεξεργασίας καυσίμου είναι η θερμοκρασία των αντιδρώντων και η συγκέντρωση του υδρογόνου και του μονοξειδίου του άνθρακα στο ρεύμα αερίων.

2.6.5 Υβριδικό σύστημα με χρησιμοποίηση κυψέλης καυσίμου

Το βασικό πρόβλημα στις τεχνολογίες αξιοποίησης της ηλιακής και αιολικής ενέργειας σχετίζεται με τη διαθεσιμότητά τους, αφού οι δύο αυτές μορφές ενέργειας δεν είναι πάντα διαθέσιμες, ενώ επίσης δεν είναι εφικτή η ακριβής πρόβλεψη της διαθεσιμότητάς τους σε ένα μελλοντικό χρονικό ορίζοντα. Έχοντας λοιπόν ως σκοπό να υπερκεράσουμε αυτούς τους περιορισμούς, η ιδέα του συνδυασμού ΑΠΕ με τεχνολογίες υδρογόνου πρωτοεμφανίστηκε στις αρχές της δεκαετίας του '90 (Lund, 1991).

Πολλοί ερευνητές εστίασαν την έρευνά τους σε υβριδικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ακολουθώντας κυρίως τρεις κατευθύνσεις: α) Πειραματική μελέτη σε εγκατεστημένα συστήματα, β) Προσομοίωση και βελτιστοποίηση της λειτουργίας τους και γ) Έλεγχος σε πραγματικό χρόνο. Ένας αριθμός μελετών (Gazey et al, 2006, Chaparro et al, 2005, Ghosh et al, 2003, Vanhanen et al, 1997) παρουσιάζουν τα πειραματικά αποτελέσματα που συγκεντρώθηκαν κατά τη διάρκεια λειτουργίας υβριδικών μονάδων (ηλιακά/αιολικά συστήματα + τεχνολογίες υδρογόνου), σε πιλοτική κλίμακα. Αντιπροσωπευτική εργασία της δεύτερης κατεύθυνσης αποτελεί η προαναφερθείσα εργασία του Lund, 1991, ενώ στις πιο σύγχρονες προσπάθειες συγκαταλέγεται η εργασία των Santarelli & Macagno, 2004 οι οποίοι μελέτησαν ένα υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκών στοιχείων – τεχνολογιών υδρογόνου για ένα κτίριο στις Άλπεις. Στόχος του συστήματος ήταν η πλήρης κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών και μέρος του θερμικού φορτίου. Οι Kelouwani et al, 2005 ανέπτυξαν ένα δυναμικό μοντέλο για ένα αυτόνομο σύστημα που συνδυάζει ηλιακή και αιολική ενέργεια με τεχνολογίες υδρογόνου ενώ οι M. Korraas et al, 2003 πρότειναν μία μέθοδο για τον προγραμματισμό και τη λειτουργία συστημάτων ανεμογεννητριών με διατάξεις αποθήκευσης της παραγόμενης ενέργειας. Επίσης, στη βιβλιογραφία μπορούν να βρεθούν ενδεικτικές μελέτες που αφορούν στην προσομοίωση αλλά και στη βελτιστοποίηση (σε όρους επιλογής των βέλτιστων επιμέρους διατάξεων για τη σύνθεση του συστήματος), υβριδικών συστημάτων με αποθήκευση υδρογόνου. Αναφερόμενοι στην πρώτη κατηγορία ο M.T. Iqbal, 2003 ανέπτυξε ένα μοντέλο προσομοίωσης ενός υβριδικού συστήματος ανεμογεννητριών με αποθήκευση υδρογόνου ενώ οι M. Santarelli et al, 2004 μελέτησαν ένα υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκών – μικρής υδροηλεκτρικής γεννήτριας – αποθήκευσης υδρογόνου.

Η δομή ενός υβριδικού συστήματος κυψέλης καυσίμου φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 20
Απεικόνιση Υβριδικού Συστήματος

2.7 Πρακτικές Εφαρμογές Κυψέλης Καυσίμου

- **Κυψέλες καυσίμου και φυσικό αέριο**

Οι κυψέλες καυσίμου φυσικού αερίου (Natural Gas Fuel Cell, NGFC) αποτελούν έναν απλό και αξιόπιστο τρόπο για να βελτιωθεί η χρήση του φυσικού αερίου και η απόδοσή της. Η τεχνολογία αυτή μετατρέπει το φυσικό αέριο σε ηλεκτρισμό, ώστε να παρέχει ένα ήσυχο, καθαρό και σε υψηλή απόδοση επί τόπου (on-site) σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ παράλληλα αποτελεί και πηγή θερμής ενέργειας. Τα NGFC παρέχουν αποτελεσματική εξυπηρέτηση για επί τόπου παραγωγή ενέργειας, ικανοποιώντας τις ανάγκες για ηλεκτρισμό, θερμότητα και ζεστό νερό. Για περιοχές με χαμηλό κόστος φυσικού αερίου και υψηλό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας, η τεχνολογία αυτή μπορεί να αποτελέσει μια οικονομικά συμφέρουσα εναλλακτική ενεργειακή λύση.

- **Κυψέλες καυσίμου στη βιομηχανία**

Στο βιομηχανικό τομέα με τη χρήση κυψελών καυσίμου παρέχεται αξιόπιστο και υψηλής ποιότητας ηλεκτρικό ρεύμα. Συνήθως χρησιμοποιούνται SOFC και MCFC που είναι κατάλληλες για συμπαραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος από την εκπεμπόμενη θερμότητα λόγω

της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας. Σήμερα λειτουργεί ανά τον κόσμο με επιτυχία μεγάλος αριθμός πιλοτικών εφαρμογών.

- **Χρήση κυψελών καυσίμου στις μεταφορές.**

Τα πάντα στηρίζονται σε μια ηλεκτροχημική αντίδραση, μέσω της οποίας η χημική ενέργεια των καυσίμων μετατρέπεται σε ηλεκτρική και χρησιμοποιείται ως πηγή για την τροφοδοσία ενός ηλεκτροκινητήρα. Το σύστημα χονδρικά απαρτίζεται από 4 μέρη: ένα δοχείο καυσίμου για τη μεθανόλη ή όποιο άλλο καύσιμο χρησιμοποιείται, μια συσκευή για την παραγωγή του H₂ από το καύσιμο, την κυψέλη καυσίμου και τέλος τον ηλεκτροκινητήρα. Οι θετικές επιπτώσεις από τη χρήση κινητήρων υδρογόνου είναι πραγματικά εντυπωσιακές αναφορικά με την εξοικονόμηση ενέργειας και τη μείωση των ατμοσφαιρικών ρύπων. Αξίζει χαρακτηριστικά να σημειωθεί ότι αν 20% των αυτοκινήτων στις Ηνωμένες Πολιτείες χρησιμοποιούσαν κινητήρες H₂, η εισαγωγή πετρελαίου υπολογίζεται ότι θα μειωνόταν κατά 1,5 εκατομμύρια βαρέλια ημερησίως.

2.8 Παραδείγματα Εφαρμογών Κυψέλης Καυσίμου

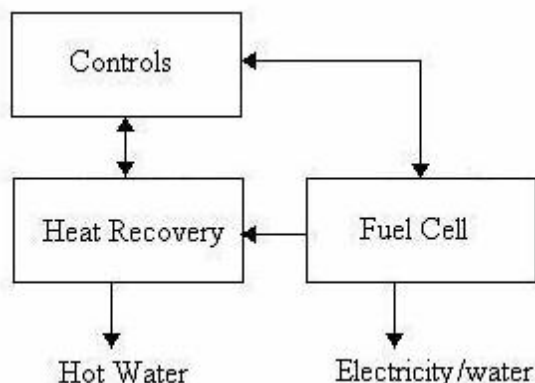
- **Σταθμοί παραγωγής ισχύος**

Οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούνται αρκετά εκτεταμένα ανά το κόσμο σε διαφόρων ειδών εφαρμογές καθημερινής χρήσεως ή σε πιλοτικά προγράμματα. Ενδεικτικά στις επόμενες παραγράφους γίνεται μια περιγραφή μερικών τέτοιων εφαρμογών.

Οι κυψέλες καυσίμου είναι πολύ χρήσιμες σε απομακρυσμένες περιοχές όπως διαστημόπλοια ή απομακρυσμένοι μετεωρολογικοί σταθμοί, μεγάλα πάρκα, αστικές περιοχές και σε συγκεκριμένες στρατιωτικές εφαρμογές. Ένα σύστημα κυψέλης καυσίμου υδρογόνου είναι συμπαγές και ελαφριά κατασκευή και δεν έχει πολλά κινούμενα μέρη. Λόγω αυτού του πλεονεκτήματος και του γεγονότος ότι δεν συμπεριλαμβάνεται διεργασία καύσης στις δραστηριότητες του μπορεί να επιτύχει 100% αξιοπιστία.

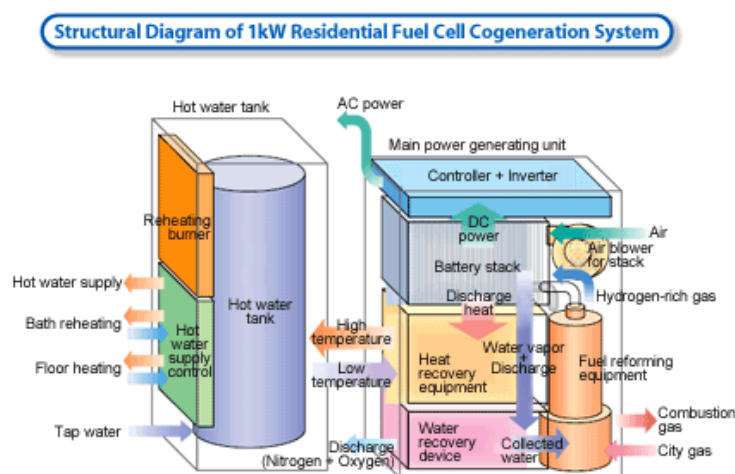
- **Συστήματα συνδυασμένου θερμικού κύκλου (Cogeneration systems or CHP systems)**

Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν μια θερμική μηχανή και ένα σταθμό παραγωγής ισχύος για την ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρισμού και αξιοποίησης θερμότητας. Με τη χρησιμοποίηση της κυψέλης καυσίμου το σύστημα παράγει σταθερή ηλεκτρική ισχύ ενώ στην περίπτωση που δεν υπάρχει κατανάλωση ισχύος από μια εξωτερική συσκευή η περίσσεια της ισχύος μεταφέρεται σε μια αποθηκευτική συσκευή.



Σχήμα 8
Σχήμα συνδυασμένου θερμικού κύκλου

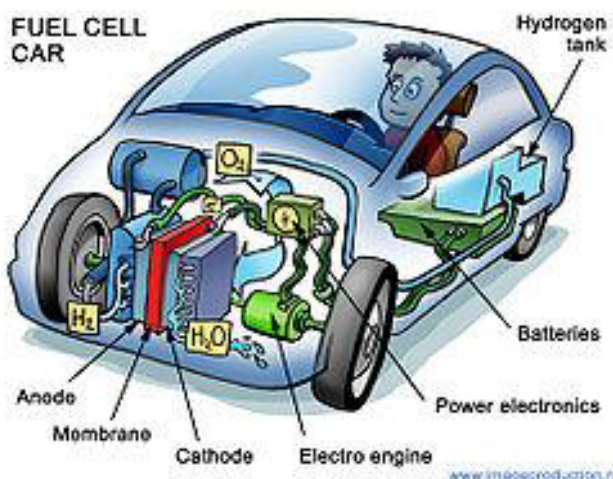
Ένα σύστημα χαμηλού συνδυασμένου θερμικού κύκλου παράγει ισχύ σε επίπεδα συνήθως κάτω των 5KW ιδανικό για σπίτια ή μικρές επιχειρήσεις. Γίνεται μια χαμηλότερη απόδοση μετατροπής καυσίμου σε ηλεκτρισμό σε επίπεδα 15-20% επειδή η περισσότερη ενέργεια που δεν μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό, χρησιμοποιείται σαν θερμότητα. Ένα ποσό θερμότητας χάνεται με τα εξερχόμενα καυσαέρια, επομένως η συνδυασμένη απόδοση παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, είναι μικρότερη από 100%, πρακτικά κοντά στο 80%. Η κατάσταση μπορεί να βελτιωθεί με την μεγιστοποίηση του παραγόμενου ηλεκτρισμού και τη χρησιμοποίηση για την οδήγηση της αντλίας θερμότητας. Οι PAFC κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούνται εκτεταμένα σε CHP συστήματα και μπορούν να επιτύχουν αποδόσεις της τάξης του 90%. Επίσης κάποιες σποραδικές εφαρμογές για τέτοιου είδους συστήματα έχουν γίνει με κυψέλες καυσίμου MCFC και SOFC. Ένα παράδειγμα χρήσης της κυψέλης καυσίμου σε CHP σύστημα φαίνεται στην εικόνα που ακολουθεί:



Εικόνα 21
Χρήση κυψέλης καυσίμου σε σύστημα συνδυασμένου θερμικού κύκλου

- **Συστήματα μεταφοράς – Οχήματα**

Σήμερα υπάρχουν αναρίθμητα σχέδια παραγωγής αυτοκινήτων και λεωφορείων που βασίζονται στη τεχνολογία των κελιών καυσίμου τα οποία ερευνώνται και κατασκευάζονται από τις αυτοκινητοβιομηχανίες. Μια απεικόνιση της μορφής που θα έχει ένα αυτοκίνητο στο οποίο θα εφαρμόζεται η τεχνολογία κυψέλης καυσίμου προσπαθεί να αναπαραστήσει η παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 22

Εφαρμογή κυψέλης καυσίμου σε αυτοκίνητο

Το 2001, η εταιρία Chrysler Natrium χρησιμοποίησε το πρώτο μηχανισμό επεξεργασίας καυσίμου υδρογόνου. Παράγει υδρογόνο για κυψέλες καυσίμου, το οποίο παράγει ηλεκτρισμό μέσα στη κυψέλη για μια αρκετά ήρεμη λειτουργία σε αυτονομία περίπου 300 μιλίων. Η εταιρία έχει επίσης εξελίξει οχήματα τα οποία διαχωρίζουν το υδρογόνο από τη βενζίνη, με στόχο να μειώσουν τις εκπομπές ρύπων, χωρίς να βασίζονται σε μια μη υπάρχουσα προς το παρόν υποδομή υδρογόνου, έτσι ώστε να αποφύγουν τις μεγάλες δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου.

Το 2005 η βρετανική εταιρία, British firm Intelligent Energy, τη πρώτη μοτοσυκλέτα υδρογόνου που λέγεται ENV (Emission Neutral Vehicle). Η μοτοσυκλέτα μπορεί να αποθηκεύσει αρκετό καύσιμο για να λειτουργήσει 4 ώρες με αυτονομία 100 μιλίων σε μια αστική περιοχή και μέγιστη ταχύτητα.

Το 2004 η Honda ανέπτυξε μια μοτοσυκλέτα υδρογόνου που χρησιμοποιούσε κελί καυσίμου κατασκευασμένο από τη Honda, ενώ το 2008 το πρώτο όχημα υδρογόνου με την ονομασία FCX Clarity. Εν τω μεταξύ υπάρχουν αρκετά παραδείγματα από μοτοσυκλέτες και ποδήλατα με μηχανή κελιού καυσίμου υδρογόνου.

Κάποιες εταιρίες προσανατολίζονται στην έρευνα για τη παραγωγή αστικών λεωφορείων με κελί καυσίμου υδρογόνου. Η εταιρία Daimler AG, δραστηριοποιούμενη σε αυτό το χώρο, με 36 πειραματικές μονάδες, τροφοδοτήθηκε με κυψέλες καυσίμου, από την εταιρία Ballard Power Systems και πραγματοποίησε επιτυχείς δοκιμές για 3 χρόνια σε 11 πόλεις το 2007.



Εικόνα 23
Εφαρμογή κυψέλης καυσίμου σε λεωφορείο

- **Σταθμοί Ανεφοδιασμού Υδρογόνου**

Ο πρώτος σταθμός ανεφοδιασμού με κάυσιμο υδρογόνο, δημιουργήθηκε στο Reykjavík της Ισλανδίας, τον Απρίλιο του 2003. Ο σταθμός εξυπηρετεί τρία λεωφορεία κατασκευασμένα από την εταιρία, DaimlerChrysler τα οποία συνεισφέρουν στη δημόσια μεταφορά της δημόσιας συγκοινωνίας στο Reykjavík. Ο σταθμός παράγει από μόνος του τα ποσά υδρογόνου που χρειάζεται με τη βοήθεια μιας μονάδας ηλεκτρολύτη, (που τη παρήγαγε μια εταιρία με το όνομα Norsk Hydro) και δεν έχει ανάγκη από εξωτερική τροφοδοσία. Τα μόνα στοιχεία που τροφοδοτούνται είναι ηλεκτρισμός και νερό. Η εταιρία Royal Dutch Shell είναι συνεργάτης σε αυτό το πρόγραμμα. Ο σταθμός δεν έχει στέγη για να αφήσει οποιαδήποτε διαφυγούσα ποσότητα υδρογόνου λόγω διαρροής να μεταβεί στην ατμόσφαιρα.

Η λεωφόρος υδρογόνου στη Καλιφόρνια, είναι μια πρωτοβουλία, του κυβερνήτη της Καλιφόρνιας, να εφαρμόσει μια σειρά σταθμούς ανεφοδιασμού υδρογόνου σε όλη τη πολιτεία. Οι σταθμοί χρησιμοποιούνται για τον ανεφοδιασμό με υδρογόνο, οχημάτων που στηρίζονται στη τεχνολογία κυψελών καυσίμου. Τον Ιούλιο του 2007 η Καλιφόρνια, είχε 179 οχήματα κυψελών καυσίμου υδρογόνου και 25 σταθμούς ανεφοδιασμού σε λειτουργία, ενώ ήδη 10 σταθμοί είναι υπό σχεδιασμό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΛΕΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

3.1 Εισαγωγή

Στόχος του κεφαλαίου είναι να περιγραφούν οι χημικές και οι θερμοδυναμικές σχέσεις που αφορούν την λειτουργία των κελιών καυσίμου και το πως οι λειτουργικές συνθήκες επηρεάζουν την απόδοσή τους. Το πρώτο βήμα για την κατανόηση της λειτουργίας ενός κελιού καυσίμου είναι ο καθορισμός της θεωρητικής λειτουργίας. Από τη στιγμή που έχει καθοριστεί η θεωρητική λειτουργία μπορούν να υπολογιστούν οι απώλειες που όταν αφαιρεθούν από την θεωρητική απόδοση μας δίνουν την πραγματική λειτουργία του συστήματος.

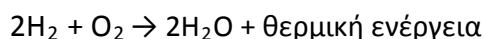
Στη συνέχεια αναλύεται η λειτουργία της κυψέλης και ο τρόπος υπολογισμού της τάσης. Η τάση υπολογίζεται συναρτήσει του δυναμικού των μερικών πιέσεων των αντιδρώντων και της θερμοκρασίας της κυψέλης. Επιπλέον περιγράφεται η τάση ανοιχτού κυκλώματος, που προκύπτει από το ενεργειακό ισοζύγιο μεταξύ της χημικής ενέργειας των αντιδρώντων και της ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος αναλύονται οι κατηγορίες απωλειών που συμβάλλουν στη πτώση τάσης της κυψέλης.

3.2 Αναλυτική Λειτουργία της Κυψέλης Καυσίμου

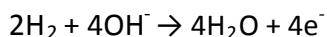
Στην ενότητα αυτή γίνεται μια αναλυτική μελέτη της λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου, σαν ολοκληρωμένο σύστημα παραγωγής ενέργειας, ενώ παράλληλα γίνεται μια αξιολόγηση της απόδοσης του και μια περιγραφή των απωλειών που οδηγούν στη μείωση της παραγόμενης τάσης στην έξοδο. Βγαίνει το συμπέρασμα, ότι παρόλο που οι κυψέλες καυσίμου διαφέρουν από τις θερμικές μηχανές μια και δεν υπόκεινται στους περιορισμούς που δημιουργούνται από τον κύκλο Carnot και έχουν αρκετά μεγάλο βαθμό απόδοσης, εντούτοις όμως υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που μειώνουν σημαντικά αυτό το βαθμό απόδοσης και μια αναλυτική έκθεσή τους επιχειρείται στα υποκεφάλαια που ακολουθούν.

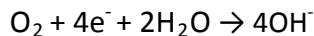
3.2.1 Παραγόμενη ενέργεια και τάση κυψέλης καυσίμου

Σε μια κυψέλη τύπου PEM, η συνολική χημική αντίδραση είναι:



ενώ η αντίδρασεις καθόδου και ανόδου είναι:





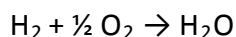
Η κυψέλη μετατρέπει απευθείας τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια. Σε ένα κελί καυσίμου υπάρχει ασάφεια στον καθορισμό της εισερχόμενης και εξερχόμενης ενέργειας αντίστοιχα. Αυτό απορρέει από το γεγονός ότι η εισερχόμενη ενέργεια είναι η χημική ενέργεια του υδρογόνου και οξυγόνου αντίστοιχα και η εξερχόμενη είναι η ηλεκτρική, η θερμική και η χημική ενέργεια του παραγόμενου νερού. Οι διάφορες χημικές ενέργειες δεν είναι εύκολα προσδιορίσιμες και έτσι η μοναδική προσέγγιση που πραγματοποιείται είναι από τη σκοπιά της Θερμοδυναμικής και τη χρησιμοποίηση της ελεύθερης ενέργειας του Gibbs που χρησιμοποιείται για να περιγράψει ενεργειακά τις χημικές διεργασίες.

Επομένως στη περίπτωση της κυψέλης καυσίμου που εξετάζουμε, η ενέργεια που απελευθερώνεται από την αντίδραση του υδρογόνου με το οξυγόνο, προσδιορίζεται από την μεταβολή της ελεύθερης ενέργεια σχηματισμού του Gibbs, και υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο, που ισούται με την ελεύθερη ενέργεια σχηματισμού των προϊόντων μείον την ελεύθερη ενέργεια σχηματισμού των αντιδρώντων:

$$\Delta G_f = G_f \text{ of products} - G_f \text{ of reactants}$$

Στη περίπτωση αυτή είναι πιο βολικό να υπολογίζουμε αυτές τις ενεργειακές ποσότητες ανά mol. Συγκεκριμένα, ο όρος $(g_f)_{\text{H}_2\text{O}}$, ορίζεται ως μοριακή ελεύθερη ενέργεια του Gibbs του σχηματισμού του νερού.

Η χημική αντίδραση που εξετάζουμε στη κυψέλη καυσίμου μπορεί ισοδύναμα να γραφεί:



Επομένως το προϊόν είναι 1 mol H_2O και τα αντιδρώντα που χρειάζονται είναι 1 mol H_2 και $\frac{1}{2}$ mol O_2 . Επομένως η παραγόμενη ενέργεια χρησιμοποιώντας το παραπάνω τύπο με τις μοριακές ποσότητες της ενέργειας του Gibbs, υπολογίζεται ως εξής:

$$\Delta g_f = (g_f)_{\text{H}_2\text{O}} - (g_f)_{\text{H}_2} - \frac{1}{2} (g_f)_{\text{O}_2}$$

Παρόλο που υπολογισμός της παραγόμενης ενέργειας χρησιμοποιώντας την ελεύθερη ενέργεια του Gibbs, φαίνεται απλός, εντούτοις η ελεύθερη ενέργεια σχηματισμού του Gibbs, μεταβάλλεται επηρεαζόμενη από τη θερμοκρασία και τη κατάσταση του στοιχείου (υγρή ή αέρια).

Παρατηρούμε ότι οι τιμές είναι αρνητικές που σημαίνει απελευθερώνεται ενέργεια κατά τη διεργασία (το πρόσημο έχει φυσική σημασία).

Αν θεωρήσουμε αντιστρεπτή τη διαδικασία (μηδενικές απώλειες) τότε όλη η ελεύθερη ενέργεια σχηματισμού του Gibbs, μετατρέπεται σε ηλεκτρική (στη πραγματικότητα, ένα ποσό μετατρέπεται σε θερμότητα).

Όσον αφορά το φορτίο, στη περίπτωση της κυψέλης καυσίμου υδρογόνου κατά τη πραγματοποίηση της χημικής αντίδρασης, 2 ηλεκτρόνια μεταφέρονται δια μέσου του εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος για κάθε παραγόμενο μόριο νερού και κάθε μόριο υδρογόνου που χρησιμοποιείται. Άρα με βάση τη χημική ισορροπία, για 1 mol H_2 που χρησιμοποιείται, $2 \cdot N$ ηλεκτρόνια, περνούν δια μέσου του ηλεκτρικού κυκλώματος, όπου N είναι ο αριθμός Avogadro. Αν $-e$ είναι το φορτίο του ενός ηλεκτρονίου τότε το φορτίο που μεταφέρεται δια μέσου του κυκλώματος είναι:

$$-2Ne = -2F \text{ coulombs}$$

Όπου F είναι η σταθερά του Faraday ή το ποσό του φορτίου που αντιστοιχεί σε ένα mol ηλεκτρονίων.

Για τον υπολογισμό της τάσης της κυψέλης καυσίμου, λειτουργούμε με βάση το παρακάτω σκεπτικό:

Για τον υπολογισμό του ηλεκτρικού έργου (ή αλλιώς της ηλεκτρικής ενέργειας) που απαιτείται για τη μεταφορά των ηλεκτρονίων από το ηλεκτρικό κύκλωμα, δίνεται από τον τύπο:

$$\text{Ηλεκτρικό Έργο} = \text{φορτίο} \cdot \text{διαφορά δυναμικού κυψέλης (τάση)} = -2FE,$$

όπου E ... είναι η τάση της κυψέλης καυσίμου.

Εφόσον θεωρούμε τη διεργασία αντιστρεπτή χωρίς απώλειες, το απαιτούμενο ηλεκτρικό έργο πρέπει να είναι ίσο με την ελεύθερη ενέργεια του Gibbs.

Άρα:

$$\Delta g_f = -2FE \rightarrow E = -\Delta g_f / 2F$$

Αυτή η σχέση είναι πολύ σημαντική και δίνει την ηλεκτρεγερτική δύναμη (electromotive force EMF) του ανοιχτού κυκλώματος της αντιστρεπτής κυψέλης καυσίμου. Επίσης η σχέση αυτή υποθέτει μη αντιστρεψιμότητα και τροφοδοσία καθαρού υδρογόνου και οξυγόνου σε συνθήκες σταθερής πίεσης 0,1 MPa. Στη πράξη η τάση που υπολογίζεται είναι μικρότερη από τον παραπάνω τύπο, λόγω απωλειών γιατί η μη αντιστρεψιμότητα είναι πρακτικά ανέφικτη.

Η παραπάνω εξίσωση, υπολογίζει την τάση ενός ανοιχτού κυκλώματος για τη κυψέλη καυσίμου υδρογόνου. Στη περίπτωση χρήσης καυσίμου υδρογόνου παράγονται 2 ηλεκτρόνια στην άνοδο που μεταφέρονται μέσω εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος. Αν γενικεύσουμε

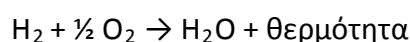
την παραπάνω εξίσωση για περιπτώσεις χρησιμοποίησης διαφορετικού καυσίμου, με βάση το οποίο έχουμε διαφορετική παραγωγή ηλεκτρονίων, τότε μπορούμε κατά αντίστοιχο τρόπο να υπολογίσουμε την τάση ανοιχτού κυκλώματος. Ο τύπος είναι:

$$E = -\Delta g_f / zF$$

Όπου z ... ο αριθμός των ηλεκτρονίων που παράγονται κατά αντιστοιχία με το δεδομένο καύσιμο.

3.2.2 Υπολογισμός τάσης ανοιχτού κυκλώματος

Στη PEM, κυψέλη καυσίμου το υδρογόνο από την άνοδο και το οξυγόνο από την κάθοδο, αντιδρούν για τη παραγωγή νερού και θερμότητας, όπως φαίνεται στην εξίσωση:



Όταν πραγματοποιείται μια αντίδραση, μειώνεται η ελεύθερη ενέργεια του συστήματος. Η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας της μεταβολής της ενθαλπίας και της εντροπίας του συστήματος.

$$\text{Ισχύει: } \Delta G = \Delta H - T * \Delta S$$

Όπου,

ΔH ... η μεταβολή της ενθαλπίας (J)
 ΔS ... η μεταβολή της εντροπίας (J/K)
 T ... η θερμότητα (K)

Η συνολική θερμική ενέργεια της αντίδρασης είναι η ενθαλπία (ΔH). Η ελεύθερη ενέργεια προκύπτει αν από αυτή την ενθαλπία αφαιρέσουμε την ενέργεια ($T * \Delta S$) που χάνεται από τις μη αντιστρεπτές μεταβολές της εντροπίας του συστήματος. Η ποσότητα $T * \Delta S$ μας δίνει και τη θερμότητα που παράγεται κατά τη λειτουργία της κυψέλης. Όταν το ΔS είναι αρνητικό, αυτό σημαίνει ότι παράγεται θερμότητα. Τέτοιου είδους αντίδραση είναι η οξείδωση του υδρογόνου. Όταν το ΔS είναι θετικό, όπως συμβαίνει κατά την άμεση οξείδωση του άνθρακα, αυτό σημαίνει ότι αν η θερμότητα που παράγεται είναι μικρότερη από την θερμότητα που απορροφάται τότε συνολικά απορροφάται θερμότητα από το περιβάλλον.

Η διαδικασία θεωρείται ισόθερμη όταν τα προϊόντα της αντίδρασης έχουν την ίδια θερμοκρασία με τα αντιδρώντα. Έτσι είναι δυνατή η μετατροπή μέρους της χημικής ενέργειας σε ωφέλιμο ηλεκτρικό έργο αφού δεν χρησιμοποιείται μέρος της χημικής ενέργειας αυτής για την αύξηση της θερμοκρασίας των προϊόντων όπως συμβαίνει στις θερμικές μηχανές.

Σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (1atm, 25°C), η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας κατά τη διάρκεια της αντίδρασης του υδρογόνου με το οξυγόνο είναι:

$$\Delta G = \Delta H - T * \Delta S = -285.8\text{J} - (298\text{K}) * (-163.2\text{ J/K}) = -237.2$$

Η αύξηση της θερμοκρασίας, προκαλεί μείωση της ελεύθερης ενέργειας. Αντίθετα η ενθαλπία και η εντροπία του συστήματος μεταβάλλονται ελάχιστα και για τους υπολογισμούς μπορούν να θεωρηθούν σταθερές.

Το μέγιστο ηλεκτρικό έργο που μπορεί να παράγει μια κυψέλη εξαρτάται από την ελεύθερη ενέργεια της συνολικής αντίδρασης που συμβαίνει στο εσωτερικό της και δίνεται από το τύπο:

$$W = \Delta G - n * F * E$$

Όπου,

n...ο αριθμός των ηλεκτρονίων που σχετίζονται με την στοιχειομετρική αντίδραση

F... η σταθερά Faraday

E... το θεωρητικό δυναμικό της κυψέλης (ιδανικό) υπό κανονικές συνθήκες.

Από τη παραπάνω σχέση αν γνωρίζουμε το ΔG , που είναι η μεταβολή της ενέργειας του Gibbs για πίεση 1atm και θερμοκρασία $T=298\text{K}$., μπορούμε να υπολογίσουμε το E° , που είναι το ιδανικό δυναμικό της κυψέλης για πίεση 1atm, και θερμοκρασία $T=298\text{K}$.

Από τη σχέση $\Delta G = \Delta H - T * \Delta S$ μπορούμε να υπολογίσουμε, το ΔG υπολογίζοντας τα ΔH και ΔS από θερμοδυναμικούς πίνακες. Επομένως η τάση ανοιχτού κυκλώματος της κυψέλης καυσίμου υπό κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (ιδανικό δυναμικό) είναι:

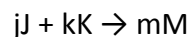
$$E^\circ = -\Delta G^\circ / 2 * F = -237.2\text{ J} / -2 * 96.487\text{ J/V} = 1229\text{ V}.$$

Χρησιμοποιώντας τις τιμές από πίνακες προκύπτει $E^\circ = 1229\text{ V}$, για προϊόν νερό σε υγρή μορφή και $E^\circ = 1.18\text{ V}$ για προϊόν νερό σε αέρια μορφή. Η διαφορά αυτή οφείλεται στην ενέργεια που απαιτείται για να μετατραπεί το νερό από υγρή σε αέρια μορφή.

3.2.3 Εξίσωση του Nerst

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο, η ελεύθερη ενέργεια σχηματισμού του Gibbs μιας χημικής αντίδρασης, μεταβάλλεται ανάλογα με τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Εξίσου σημαντική όμως είναι η μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας του Gibbs, λόγω της πίεσης και της συγκέντρωσης των αντιδρώντων.

Θεωρούμε τη γενική μορφή μιας χημικής αντίδρασης:



Όπου j moles του αντιδρώντος στοιχείου J αντιδρά με k moles από το στοιχείο K για να παράγει m moles του στοιχείου M . Κάθε ένα από τα αντιδρώντα και τα προϊόντα συνδέεται με ένα συντελεστή δραστηριότητας, που περιγράφει τη λειτουργία του στη χημική αντίδραση και η αναλυτική του εξήγηση ξεπερνάει τους στόχους αυτής της εργασίας.

Επομένως, a_J και a_K , είναι οι συντελεστές δραστηριότητας των αντιδρώντων και a_M του προϊόντος αντίστοιχα. Για τη περίπτωση των αερίων που λειτουργούν σαν ιδανικά αέρια, ισχύει η σχέση για το συντελεστή δραστηριότητας:

$$\text{Δραστηριότητα } \alpha = P/P_o$$

Όπου P , είναι η πίεση, ή η μερική πίεση, του αερίου και P_o η σταθερή πίεση αναφοράς: $P_o = 0.1 \text{ MPa}$.

Η παραπάνω σχέση είναι αρκετά χρήσιμη μια και τα περισσότερα είδη καυσίμων που χρησιμοποιούνται στη κυψέλη καυσίμου είναι αέρια. Από τη σχέση προκύπτει ότι ο συντελεστής δραστηριότητας είναι ανάλογος με τη μερική πίεση του αερίου, ενώ στη περίπτωση των χημικών στοιχείων που είναι διαλυμένα σε κάποιο διαλύτη, η σχέση συνδέεται με μοριακότητα κατ'όγκο (Molarity) του στοιχείου.

Όσον αφορά το νερό που παράγεται σαν προϊόν στη κάθοδο, επειδή μπορεί να βρίσκεται σε υγρή είτε σε αέρια κατάσταση, είναι δύσκολη η εφαρμογή της παραπάνω σχέσης. Στη περίπτωση που είναι ατμός, ο τύπος έχει τη μορφή:

$$\alpha_{H_2O} = P_{H_2O} / P^o_{H_2O}$$

Όπου $P^o_{H_2O}$ είναι η πίεση εξάτμισης του νερού στη θερμοκρασία αναφοράς, η οποία προσδιορίζεται από πίνακες θερμοδυναμικής.

Στη περίπτωση που το νερό είναι σε υγρή κατάσταση, μπορούμε κατά προσέγγιση να υποθέσουμε, ότι $\alpha_{H_2O} = 1$.

Οι συντελεστές δραστηριότητας των αντιδρώντων και των προϊόντων χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της μεταβολής της ελεύθερης ενέργειας σχηματισμού του Gibbs, κατά τη χημική αντίδραση. Με τη βοήθεια θερμοδυναμικών νόμων αποδεικνύεται ότι σε μια χημική αντίδραση ισχύει ο παρακάτω τύπος:

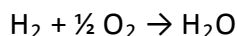
$$\Delta g_f = \Delta g^o_f - RT * \ln(\alpha_J^j * \alpha_K^k / \alpha_M^m)$$

Όπου $\Delta g^o_f \dots$ είναι η μεταβολή στην ελεύθερη ενέργεια σχηματισμού του Gibbs, σε σταθερή και γνωστή πίεση.

Στη περίπτωση της αντίδρασης οξείδωσης του υδρογόνου που γίνεται σε μια κυψέλη καυσίμου υδρογόνου, ο παραπάνω τύπος γίνεται:

$$\Delta g_f = \Delta g_f^\circ - RT * \ln(\alpha_{H_2} * \alpha^{1/2}_{O_2} / \alpha_{H_2O})$$

Ενώ η αντίδραση είναι:



Η ποσότητα Δg_f° , δίνεται από τον παρακάτω πίνακα:

Μορφή νερού (προϊόν)	Θερμοκρασία °C	Δg_f°
Υγρή	25	-237.2
Υγρή	80	-228.2
Αέρια	100	-225.2
Αέρια	200	-220.4
Αέρια	400	-210.3
Αέρια	600	-199.6
Αέρια	800	-188.6
Αέρια	1000	-177.4

Πίνακας 4

Τιμές Δg_f° για αντιστρεπτές κυψέλες καυσίμου υδρογόνου με προϊόν σχηματισμού νερό

Ο τύπος αυτός υπολογίζει τη μεταβολή της ενέργειας σχηματισμού του Gibbs, κατά τη πραγματοποίηση μιας χημικής αντίδρασης. Παρατηρούμε ότι αν, η δραστηριότητα του αντιδρώντος αερίου αυξηθεί, η μεταβολή της ενέργειας σχηματισμού του Gibbs Δg_f γίνεται περισσότερο αρνητική, δηλαδή αυξάνεται, πράγμα που σημαίνει ότι απελευθερώνεται περισσότερη διαθέσιμη ενέργεια προς εκμετάλλευση.

Για να ελεγχθεί κατά πόσο ο παραπάνω τύπος επηρεάζει τη ποσότητα της παραγόμενης τάσης, τον αντικαθιστούμε στην εξίσωση και προκύπτει:

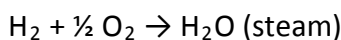
$$E = -\Delta g_f^\circ / 2F + RT/2F * \ln(\alpha_{H_2} * \alpha^{1/2}_{O_2} / \alpha_{H_2O}) = E^\circ + RT/2F * \ln(\alpha_{H_2} * \alpha^{1/2}_{O_2} / \alpha_{H_2O}) \quad (1)$$

Όπου E° είναι η ηλεκτρεγερτική δύναμη σε σταθερή πίεση και υπολογίζεται από το πίνακα. Η παραπάνω αντίδραση δείχνει ακριβώς ότι αυξάνοντας τη δραστηριότητα των αντιδρώντων τότε αυξάνεται η τάση εξόδου του κυκλώματος. Η εξίσωση αυτή λέγεται εξίσωση του Nerst και η τάση που υπολογίζεται, λέγεται τάση Nerst και είναι η αντιστρεπτή τάση της κυψέλης καυσίμου που παράγεται στην έξοδο, για δεδομένη τιμή θερμοκρασίας και πίεσης.

Στη περίπτωση που έχουμε παραγωγή νερού σε αέρια κατάσταση (ατμός) σε κυψέλες καυσίμου που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες (όπως π.χ. η SOFC σε θερμοκρασίες 1000°C), τότε μπορούμε να υποθέσουμε ότι ο ατμός συμπεριφέρεται σαν ιδανικό αέριο και επομένως από την παραπάνω υπόθεση της σχέσης (24) μπορούμε να γράψουμε:

$$\alpha_{H_2} = P_{H_2}/P^0, \alpha_{O_2} = P_{O_2}/P^0, \alpha_{H_2O} = P_{H_2O}/P^0 \quad (2)$$

Ενώ η χημική αντίδραση έχει τη μορφή:



Επομένως αντικαθιστώντας τις σχέσεις (2) στην εξίσωση (1) προκύπτει:

$$E = E^0 + RT/2F * \ln[\{P_{H_2}/P^0 * (P_{O_2}/P^0)^{1/2}\}/\{P_{H_2O}/P^0\}]$$

Αν όλες οι πιέσεις δίνονται σε bar, τότε $P^0 = 1$ και η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$E = E^0 + RT/2F * \ln[\{P_{H_2} * (P_{O_2})^{1/2}\}/P_{H_2O}] \quad (3)$$

Οι πιέσεις στην εξίσωση αυτή είναι μερικές πιέσεις, αφού τα αέρια είναι μέρος ενός μίγματος. Για παράδειγμα, το αέριο υδρογόνο μπορεί να είναι μέρος ενός μίγματος H_2, CO_2 , που μπορεί να προέκυψε από έναν αναμορφωτή, ενώ το μίγμα μπορεί να περιέχει και μόρια νερού που αποτελεί το προϊόν. Το οξυγόνο είναι πάντα μέρος μίγματος αέρα. Επομένως κατά τη μελέτη του συστήματος, σαν ολική πίεση μπορούμε να θεωρούμε τη πίεση του μίγματος, είτε της ανόδου είτε της καθόδου, ενώ μια απλοποίηση θα ήταν να θεωρήσουμε τη πίεση ανόδου ίδια με τη πίεση καθόδου. Επομένως αν η πίεση του συστήματος είναι P , τότε μπορούμε να γράψουμε για μερικές πιέσεις των προϊόντων και των αντιδρώντων:

$$P_{H_2} = \alpha P$$

$$P_{O_2} = \beta P$$

$$P_{H_2O} = \delta P$$

Όπου οι σταθερές α, β, δ εξαρτώνται από το Μοριακό Βάρος, και τη συγκέντρωση του αερίου. Η εξίσωση λοιπόν (3) γίνεται:

$$E = E^0 + RT/2F * \ln[(\alpha * \beta^{1/2}/\delta) * P^{1/2}] = E^0 + RT/2F * \ln(\alpha * \beta^{1/2}/\delta) + RT/4F * \ln(P) \quad (4)$$

Οι εξισώσεις (3), (4) είναι διαφορετικές μορφές της εξίσωσης του Nerst. Παρέχουν μια θεωρητική βάση, και μια ποσοτική ένδειξη, για ένα μεγάλο αριθμό από μεταβλητές που έχουν να κάνουν με το σχεδιασμό της κυψέλης καυσίμου καθώς και τη λειτουργία της.

3.2.4 Πυκνότητα Ρεύματος – Πυκνότητα Ισχύος

Η διαφορά δυναμικού που υπάρχει μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων ενός κελιού καυσίμου προκαλεί τη δημιουργία κάποιου ρεύματος I . Το ρεύμα αυτό εξαρτάται από πολλούς παράγοντες από τους βασικότερους των οποίων είναι η αποτελεσματικότητα του καταλύτη. Πολλές φορές επιδιώκεται η σύγκριση διαφορετικών κελιών καυσίμου τα οποία αποτελούνται από ηλεκτρόδια με διαφορετική ενεργή επιφάνεια. Για αυτό το λόγο ορίζεται η πυκνότητα ρεύματος i (στη βιβλιογραφία συχνά συναντάται και με το σύμβολο J) ως το πηλίκο του

ρεύματος / προς την ενεργή επιφάνεια A_{eff} του ηλεκτροδίου από όπου διέρχεται αυτό (καθαρά δηλαδή για λόγους αδιαστατοποίησης του μεγέθους του ηλεκτρικού ρεύματος):

$$i = I/A$$

Ακόμη, ένα πολύ χρήσιμο μέγεθος που συναντάται συχνά είναι αυτό της πυκνότητας ισχύος (power density, PD) που μετράται σε W/m^2 και που όπως και η πυκνότητα ρεύματος χρησιμοποιείται για τη σύγκριση κελιών καυσίμου διαφορετικών διαστάσεων (με την προϋπόθεση πάντα ότι μεταβάλλεται και η ενεργή επιφάνεια των ηλεκτροδίων).

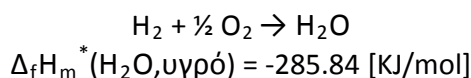
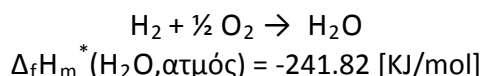
Η πυκνότητα ισχύος δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$PD = V \cdot i$$

3.3 Υπολογισμός απόδοσης και περιορισμοί μεγίστου

Η απόδοση των συστημάτων κελιών καυσίμου αποτελεί ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματα αυτών συγκρινόμενα πάντα με τα κλασικά μηχανικά ή θερμικά συστήματα. Θερμοκρασιακά ένα κελί καυσίμου συγκρινόμενο με μία ισοδύναμη θερμική μηχανή δεν περιορίζεται από ανώτατα όρια. Αυτό καθιστά τα κελιά καυσίμου πιο ευέλικτα στο χειρισμό τους ιδιαίτερα στην προσπάθεια επίτευξης υψηλών αποδόσεων.

Η σύγκριση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ανά mol καυσίμου με τη μεταβολή της πρότυπης ενθαλπίας σχηματισμού $\Delta_f H_m^*$ η οποία ουσιαστικά ισούται με τη θερμότητα που θα απελευθερωνόταν αν καιγόταν πλήρως το H_2 . Αυτό το μέγεθος είναι γνωστό και ως θερμογόνος δύναμη (Heating Value, HV). Ανάλογα τώρα αν το προϊόν της αντίδρασης του υδρογόνου με το οξυγόνο (νερό) θεωρηθεί ότι βρίσκεται σε υγρή ή αέρια κατάσταση αντίστοιχες τιμές προκύπτουν και για το $\Delta_f H_m^*$.



Το πρώτο ονομάζεται Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη (Lower Heating Value, LHV), ενώ το δεύτερο Υψηλότερη Θερμογόνος Δύναμη.

Έτσι για τον υπολογισμό της απόδοσης θα πρέπει να αναφέρουμε αν η βάση είναι το HHV ή το LHV. Όταν δεν αναφέρεται είναι σχεδόν βέβαιο ότι έχει υπολογιστεί βάσει της LHV καθώς οδηγεί σε μεγαλύτερες αποδόσεις. Έτσι λοιπόν η μέγιστη δυνατή απόδοση ισούται με το πηλίκο της μεταβολής της ελεύθερης ενέργειας σχηματισμού κατά Gibbs προς τη μεταβολή της ενθαλπίας σχηματισμού:

$$\eta_{\text{per,max}} = (\Delta_f G_m^* / \Delta_f H_m^*) \cdot 100\%$$

Στον παρακάτω πίνακα δίνονται τα μέγιστα όρια απόδοσης κελιών καυσίμου με βάση το HHV (αν φυσικά ο υπολογισμός γινόταν βάσει του LHV, τότε οι μέγιστες αποδόσεις για κάθε θερμοκρασία θα ήταν υψηλότερες).

Μορφή νερού	Θερμοκρασία °C	Δg_f ο	Μέγιστη Απόδοση (%)
Υγρή	25	-237.2	83
Υγρή	80	-228.2	80
Αέρια	100	-225.2	79
Αέρια	200	-220.4	77
Αέρια	400	-210.3	74
Αέρια	600	-199.6	70
Αέρια	800	-188.6	66
Αέρια	1000	-177.4	62

Πίνακας 5
Μέγιστη δυνατή απόδοση κελιών καυσίμου με βάση το HHV.

Η συσχέτιση της απόδοσης ενός κελιού καυσίμου με το δυναμικό που προκύπτει υπό σταθερό φορτίο γίνεται ως εξής: Λαμβάνοντας πάλι ως βάση το HHV ή το LHV, μέσω και της παραπάνω εξίσωσης υπολογίζεται το μέγιστο δυναμικό (πρότυπο δυναμικό ή δυναμικό ανοιχτού κυκλώματος) για κάθε θερμοκρασία. Έτσι λοιπόν προκύπτει ότι με βάση το HHV το μέγιστο δυναμικό είναι 1.48 V ενώ με βάση το LHV το μέγιστο δυναμικό είναι 1.25 V. Θα θεωρείται πάντα ως βάση το LHV.

Η έννοια «κατανάλωση του H_2 »: Ορίζεται ως το πηλίκο της μάζας του υδρογόνου που αντέδρασε προς την παρεχόμενη μάζα στο σύστημα. Αυτός ο λόγος είναι ισοδύναμος με το ηλεκτρικό ρεύμα που διέρχεται μέσα από το κελί προς αυτό που θα διερχόταν από αυτό αν αντιδρούσε όλη η παρεχόμενη μάζα. Έτσι:

$$U_f = m_{H_2, rct} / m_{H_2, in}$$

Τελικά η απόδοση του κελιού καυσίμου με βάση το LHV δίνεται από τον τύπο:

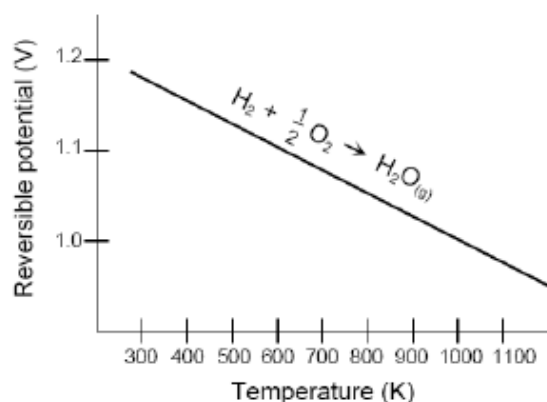
$$\eta_{per,fc} = U_f * (u_{fc}/1.25) * 100\%$$

Όπου U_f ... είναι το δυναμικό που προκύπτει από ένα κελί σε λειτουργία. Αντίστοιχη σχέση με τη προηγούμενη για το U_f , ισχύει και για τον ορισμό της κατανάλωσης του O_2 :

$$U_{ox} = m_{O_2, rct} / m_{O_2, in}$$

3.4 Θεωρητική λειτουργία και πραγματικές συνθήκες

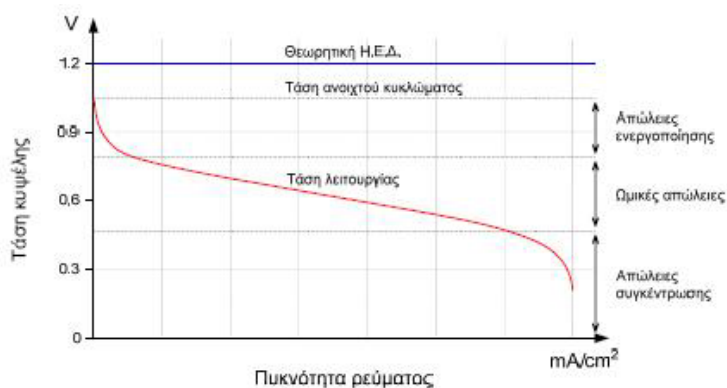
Η τάση ανοιχτού κυκλώματος της κυψέλης καυσίμου μειώνεται γραμμικά με την αύξηση της θερμοκρασίας, όπως περιγράφηκε από τους παραπάνω τύπους. Η ιδανική τάση που αναπτύσσεται στα άκρα της κυψέλης καυσίμου που χρησιμοποιεί υδρογόνο, σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας είναι, 1.229 V, εαν το παραγόμενο νερό είναι σε υγρή μορφή, ή 1.18 V, αν το παραγόμενο νερό είναι αέριο.



Διάγραμμα 1
Μεταβολή του δυναμικού σε σχέση με τη θερμοκρασία

Η τάση ανοιχτού κυκλώματος επηρεάζεται επίσης και από τη συγκέντρωση των αντιδρώντων. Το μέγιστο δυναμικό επιτυγχάνεται όταν τα αντιδρώντα στην άνοδο και στη κάθοδο είναι χωρίς προσμίξεις. Όταν το σύστημα τροφοδοτείται με αέρα ή όταν στην άνοδο δεν έχουμε καθαρό υδρογόνο, το δυναμικό του κελιού μειώνεται.

Μετά από τον υπολογισμό του παραπάνου τύπου κατασκευάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την συμπεριφορά της κυψέλης καυσίμου σε συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας. Η συμπεριφορά της κυψέλης είναι μη γραμμική και η τάση μειώνεται ανάλογα με την αύξηση του ρεύματος.

**Διάγραμμα 2****Μεταβολή της τάσης εξόδου συναρτήσεως του ρεύματος εξόδου**

Από τη γραφική παράσταση παρατηρούμε ότι για μηδενικό ρεύμα, η τάση είναι η ιδανική τάση του ανοιχτού κυκλώματος. Με την αύξηση του ρεύματος, επικρατούν διάφορα φυσικο-χημικά φαινόμενα απωλειών που οδηγούν στη μείωση της τάσης ανοιχτού κυκλώματος.

Όπως φαίνεται από τη καμπύλη κάθε κυψέλη καυσίμου έχει ένα κατώτατο όριο τάσης περίπου 0.5 V., κάτω από την οποία η κυψέλη υποφέρει από έλλειψη καυσίμου και καταστρέφεται. Στη μόνιμη λειτουργία η PEM κυψέλη καυσίμου λειτουργεί στη γραμμική περιοχή.

3.5 Περιγραφή απωλειών και πραγματικής τάσης εξόδου

Κατά τη λειτουργία ενός κελιού καυσίμου το δυναμικό που εν τέλει αποδίδει ένα κελί που βρίσκεται υπό σταθερό φορτίο, είναι αρκετά μικρότερο από αυτό που προκύπτει από το νόμο του Nernst. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι μέσα στο κελί λαμβάνουν χώρα κάποιες μη αντιστρεπτές διεργασίες, οι οποίες και αποτελούν τις συνολικές απώλειες δυναμικού σε ένα κελί σε λειτουργία. Αυτές οι απώλειες είναι γνωστές υπό το γενικό όρο «ηλεκτροδιακή πόλωση» ή «ηλεκτροδιακή υπέρταση». Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται αναλυτικά αυτές οι απώλειες, των οποίων οι πηγές είναι κατά κύριο λόγο τριών ειδών:

- Απώλειες ενεργοποίησης
 - Ωμικές απώλειες
- Απώλειες συγκέντρωσης

Απώλειες ενεργοποίησης

Περιλαμβάνει την υπέρταση μεταφοράς φορτίου και την υπέρταση φάσης με πιο σημαντική αυτή της μεταφοράς φορτίου. Αυτό το είδος απώλειας είναι κυρίαρχο σε χαμηλές τιμές πυκνότητας ρεύματος και χαρακτηρίζεται από μεταβολές στην ενέργεια ενεργοποίησης.

Ωμικές απώλειες

Το δεύτερο είδος απωλειών είναι αυτό που οφείλεται στην ωμική αντίσταση του κελιού η οποία αποτελείται από τη συνολική αντίσταση των ηλεκτροδίων, του ηλεκτρολύτη ή ακόμα και των διπολικών πλακών και συνδέσεων σε μία συστοιχία κελιών καυσίμου, και η οποία κατά βάση παραμένει σταθερή για όλες τις τιμές της πυκνότητας ρεύματος.

Απώλειες συγκέντρωσης

Το τρίτο είδος απωλειών τέλος, παρουσιάζεται σε όλο το εύρος των τιμών της πυκνότητας ρεύματος αλλά γίνεται σημαντική στις οριακές, υψηλές τιμές.

Στη συνέχεια αναλύεται το κάθε είδος απώλειας. Πρέπει να αναφερθεί ότι υπάρχει και να τέταρτο είδος το οποίο είναι σημαντικό μόνο σε πολύ μικρές τιμές πυκνότητας ρεύματος και οφείλεται σε εσωτερικά δημιουργούμενα ρεύματα. Γενικά όμως, σε όλες τις άλλες περιοχές πυκνότητας ρεύματος οι απώλειες που οφείλονται σε αυτά τα εσωτερικά ρεύματα είναι αμελητέες.

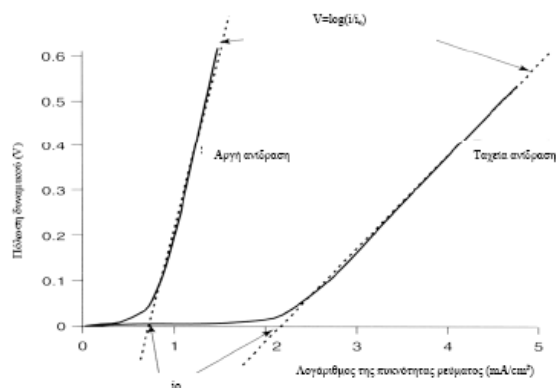
3.5.1 Απώλειες Ενεργοποίησης (ΔV_{act})

Αυτό το είδος απωλειών είναι σημαντικό όταν η κινητική της αντίδρασης που πραγματοποιείται στο ηλεκτρόδιο είναι αργή. Για αυτόν ακριβώς το λόγο οι τιμές του είναι πολύ μεγάλες στην κάθοδο (αργή αντίδραση) από ότι στην άνοδο (σχεδόν αντιστρεπτή, ταχύτατη αντίδραση). Η πόλωση ενεργοποίησης ΔV_{act} αποδίδεται ικανοποιητικά από την εξίσωση Tafel:

$$\Delta V_{act} = A_{taffel} * \ln(i/i_o)$$

Η παραπάνω εξίσωση προέκυψε από πειραματικές παρατηρήσεις του Tafel το 1905 ο οποίος έφτασε στο συμπέρασμα ότι η υπέρταση στην επιφάνεια ενός ηλεκτροδίου παρουσίαζε μία παρόμοια συμπεριφορά για μια μεγάλη ποικιλία ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Αυτή η συμπεριφορά μεταφράζεται σε μία ευθεία, τις περισσότερες φορές, γραμμή σε σχέση με το δεκαδικό λογάριθμο των τιμών της πυκνότητας ρεύματος.

Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζονται 2 τυπικές καμπύλες Tafel για μία αργή και μία ταχεία ηλεκτροχημική αντίδραση.



Διάγραμμα 3
Τυπικές καμπύλες Tafel για αργή και γρήγορη αντίδραση αντίστοιχα

Το i_0 ονομάζεται πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής (exchange current density) και αποτελεί βασικό στοιχείο της κινητικής μεταφοράς φορτίου. Προκύπτει από τη θεώρηση της ισορροπίας της αναγωγικής και οξειδωτικής δράσης στο ηλεκτρόδιο και εξαρτάται από τα εξής:

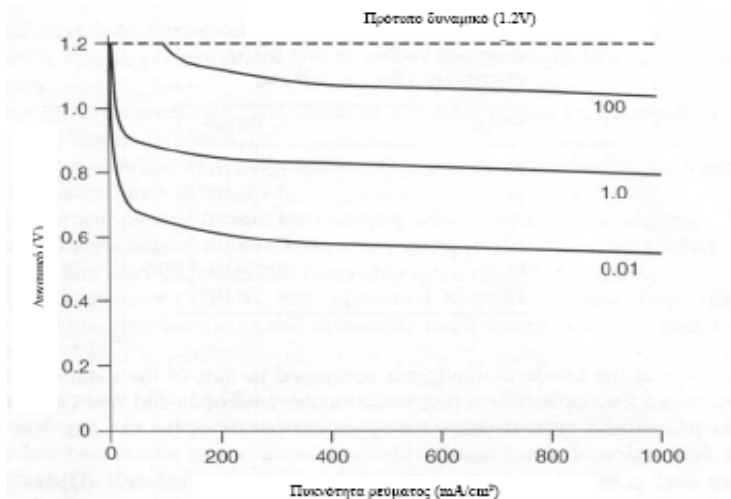
- τη σύνθεση του ηλεκτροδίου
 - την τραχύτητά του
 - τη θερμοκρασία
- τη συγκέντρωση οξειδωτικών και αναγωγικών σωματιδίων του συστήματος

Η πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής δεν μπορεί άμεσα να μετρηθεί πειραματικά, αφού αναφέρεται σε συνθήκες ισορροπίας, όπου το αλγεβρικό άθροισμα των ροών ρεύματος προς τα αριστερά και δεξιά, σε γαλβανικό στοιχείο, ισούται με 0. Το ρεύμα ανταλλαγής i_0 προσδιορίζεται έμμεσα με άλλους τρόπους. Στον παρακάτω Πίνακα δίνονται κάποιες τιμές του i_0 για το ηλεκτρόδιο υδρογόνου στους 25 °C για διάφορους καταλύτες, θεωρώντας λεία την επιφάνεια αυτού.

Μέταλλο	i_0 [A/cm ²]
Pb	2.5×10^{-13}
Zn	3×10^{-11}
Ag	4×10^{-7}
Ni	6×10^{-6}
Pt	5×10^{-4}
Pd	4×10^{-3}

Πίνακας 6
Πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής για διάφορα μέταλλα

Παρατηρείται το πολύ μεγάλο εύρος τιμών για την πυκνότητα ρεύματος ανταλλαγής. Στο επόμενο διάγραμμα παρουσιάζεται η επίδραση της τιμής της πυκνότητας ρεύματος ανταλλαγής (3 χαρακτηριστικές καμπύλες για τιμές 0.01, 1.0 και 100 mAcm⁻²) για διάφορες τιμές πυκνότητας ρεύματος, στο δυναμικό:



Διάγραμμα 4

Επίδραση i_0 στο δυναμικό συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος

Φαινομενικά μία αύξηση της θερμοκρασίας θα επέφερε και αύξηση της υπέρτασης, καθώς ο όρος A στην εξίσωση Tafel αυξάνεται. Αυτό όμως δεν συμβαίνει γιατί η αύξηση της θερμοκρασίας έχει σαν αποτέλεσμα την κατά πολλές φορές αύξηση του i_0 και άρα την τελική μείωση της απώλειας.

3.5.2 Ωμικές Απώλειες (ΔV_{ohm})

Οι ωμικές απώλειες αποτελούν τον απλούστερο τύπο απωλειών καθώς υπάρχει γραμμική εξάρτηση αυτών από το ρεύμα που διέρχεται μέσα από το κελί και την αντίσταση αυτού μέσω του γνωστού Νόμου του Ohm:

$$V = I * R_{fc}$$

Οι ωμικές απώλειες εκφράζονται συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος ως εξής:

$$V = i * r_{fc}$$

Η ωμική αντίσταση στα περισσότερα είδη κελιών καυσίμου παραμένει σταθερή και ανεξάρτητη της θερμοκρασίας του κελιού. Όπως και στην περίπτωση της απώλειας ενεργοποίησης, έτσι και εδώ προτείνονται κάποιοι τρόποι ελάττωσης αυτών των απωλειών. Αυτοί είναι:

- Χρήση ηλεκτροδίων με τη μέγιστη δυνατή αγωγιμότητα

- Κατάλληλος σχεδιασμός και επιλογή του υλικού κατασκευής των διπολικών πλακών και συνδέσεων
- Σχεδιάζοντας (όσο επιτρέπεται από τεχνολογικής σκοπιάς) τον ηλεκτρολύτη όσο το δυνατόν λεπτότερο

3.5.3 Απώλειες Συγκέντρωσης (ΔV_{conc})

Καθώς ένα αντιδρών καταναλώνεται στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, παρουσιάζεται μία πτώση τάσης λόγω της αδυναμίας να κρατηθεί η συγκέντρωση του αντιδρώντος στα επίπεδα της συγκέντρωσης του παρεχόμενου ρεύματος. Έτσι λοιπόν δημιουργείται μία κατανομή συγκέντρωσης. Αρκετές διεργασίες συμβάλουν σε αυτή την πτώση τάσης: αργή διάχυση στην αέρια φάση και στους πόρους του ηλεκτρολύτη, διάλυση και επαναδιάλυση των αντιδρώντων και προϊόντων στη διεπιφάνεια ηλεκτρολύτη-ηλεκτροδίων και τέλος διάχυση διαμέσου του ηλεκτρολύτη των αντιδρώντων και προϊόντων από και προς την καταλυτική επιφάνεια. Ο ρυθμός μεταφοράς μάζας στην επιφάνεια ενός ηλεκτροδίου μπορεί να περιγραφεί από το Νόμο διάχυσης του Fick:

$$i = n \cdot F \cdot D_w \cdot (C_B - C_S) / \delta_{op}$$

όπου:

n ...Αριθμός μετακινούμενων ηλεκτρονίων λόγω ηλεκτροχημικής αντίδρασης

F ... Σταθερά Faraday

D ... Συντελεστής διάχυσης των αντιδρώντων ειδών

C_B ... Η συγκέντρωση στο παρεχόμενο ρεύμα

C_S ... Η συγκέντρωση στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου.

δ_{op} ... Το πάχος του οριακού στρώματος

Ως οριακό ρεύμα, ορίζεται το ρεύμα εκείνο που αντιστοιχεί στο μέγιστο ρυθμό μεταφοράς δηλαδή όταν $C_S=0$ δηλαδή:

$$i_L = n \cdot F \cdot D \cdot C_B / \delta_{op}$$

Από τις δύο παραπάνω εξισώσεις προκύπτει η σχέση:

$$C_S / C_B = 1 - i / i_L$$

Όταν δεν διέρχεται ρεύμα από το κελί τότε ο νόμος του Nernst δίνει:

$$E_{i=0} = E^0 + (RT/zF) \ln C_B$$

Όταν διέρχεται ρεύμα η επιφανειακή συγκέντρωση μειώνεται στην τιμή:

$$E_{i=0} = E^0 + (RT/zF) \ln C_S$$

Η διαφορά δυναμικού ονομάζεται ΔV_{conc} και δίδεται από τη σχέση:

$$\Delta V_{conc} = (RT/zF) \ln(1-i/i_L)$$

Εδώ να σημειωθεί ότι λόγω χρήσης των όρων πτώσης τάσης πρέπει να προστεθεί και ένα “-” στην παραπάνω σχέση:

$$\Delta V_{conc} = - (RT/zF) \ln(1-i/i_L)$$

Στην ανάλυση που προηγήθηκε η απώλεια ενεργοποίησης θεωρήθηκε αμελητέα: Η αντίδραση μεταφοράς φορτίου έχει τόσο μεγάλη τιμή πυκνότητας ρεύματος ανταλλαγής i_0 (επειδή το i είναι μεγάλο το οποίο συνεπάγεται και πιο ενεργό καταλύτη), που το ΔV_{act} είναι πολύ μικρό σε σύγκριση με το ΔV_{conc} . Σε αυτό το σημείο πρέπει να επισημανθεί ότι αυτό το είδος απώλειας παίζει σημαντικό ρόλο μόνο σε οριακές περιπτώσεις πολύ υψηλών τιμών πυκνότητας ρεύματος. Τελευταία, στο χώρο των κελιών καυσίμου κερδίζει έδαφος ολοένα και περισσότερο μία εμπειρική σχέση που όμως δείχνει πολύ ακριβή συμπεριφορά για πολλούς τύπους κελιών καυσίμου σε διάφορες θερμοκρασίες και τιμές πυκνοτήτων ρεύματος. Αυτή η σχέση είναι της μορφής (Kim J., 1995):

$$\Delta V_{conc} = m_{conc} * \exp(p_{conc} * i)$$

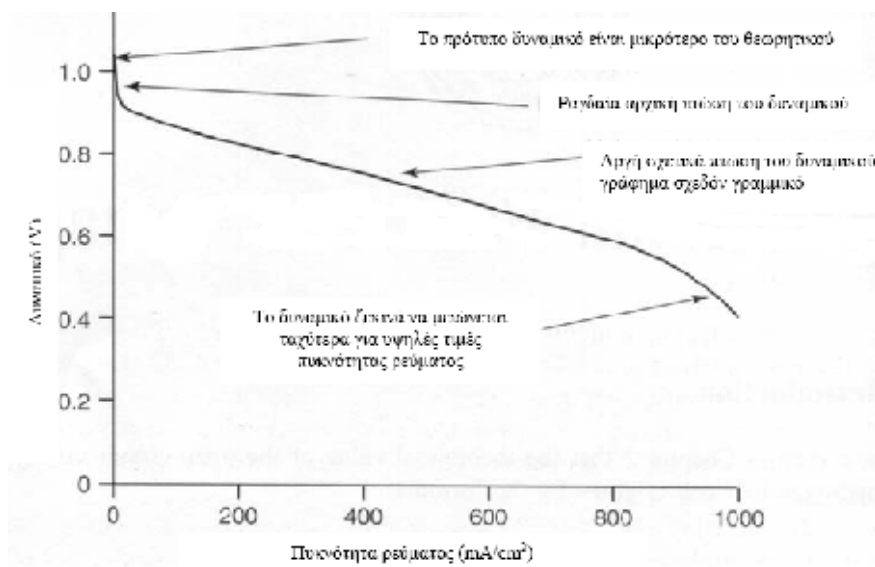
Όπου:

$$m_{conc} = 3 * 10^{-5} \text{ Volts}$$

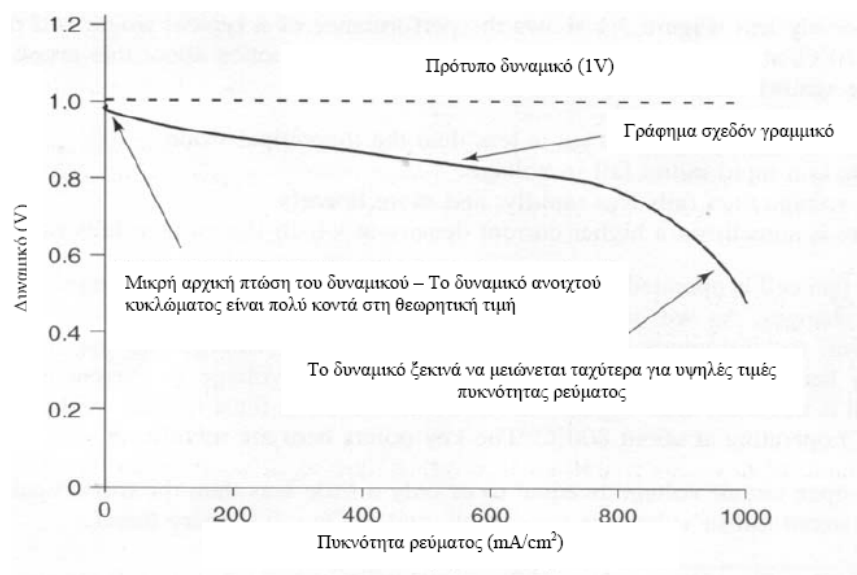
$$p_{conc} = 8 * 10^{-3} \text{ cm}^2 * \text{mA}^{-1}$$

Η παραπάνω σχέση, αν και δείχνει αρκετά διαφορετική από την προηγούμενη εξίσωση υπολογισμού με κατάλληλη επιλογή των συντελεστών m και n παρέχει παρόμοια αποτελέσματα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο χαρακτηριστικά διαγράμματα που δείχνουν τη μεταβολή του δυναμικού για κελιά χαμηλών και υψηλών θερμοκρασιών αντίστοιχα σε σχέση με την πυκνότητα ρεύματος:

**Διάγραμμα 5**

Δυναμικό συναρτήσει πυκνότητας ρεύματος για κελιά καυσίμων χαμηλών θερμοκρασιών

**Διάγραμμα 6**

Δυναμικό συναρτήσει πυκνότητας ρεύματος για κελιά καυσίμου υψηλών θερμοκρασιών

Αυτό που παρατηρείται στα παραπάνω διαγράμματα είναι ότι αν και η θεωρητική τιμή πρότυπου δυναμικού μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, ωστόσο το δυναμικό που προκύπτει από ένα κελί υψηλών θερμοκρασιών σε λειτουργία είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο κελί χαμηλών θερμοκρασιών λόγω της μείωσης των τιμών των διαφόρων ειδών πόλωσης. Ακόμα, η επίπτωση της αύξησης της θερμοκρασίας στην τιμή της πυκνότητας ρεύματος ανταλλαγής είναι εμφανέστατη στο δεύτερο διάγραμμα, καθώς παρατηρείται ότι

έχει ελαχιστοποιηθεί η απώλεια ενεργοποίησης και το δυναμικό ξεκινάει από τιμές πολύ κοντά στη θεωρητική τιμή του πρότυπου δυναμικού.

Όσον αφορά στη δεύτερη περιοχή, δηλαδή αυτή των ωμικών απωλειών, όταν η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη αντίστοιχα μεγαλύτερη είναι και η ιοντική ευκινησία και συνεπώς η αγωγιμότητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το δυναμικό να πέφτει με μικρότερο ρυθμό από ότι στην περίπτωση των κελιών καυσίμου χαμηλών θερμοκρασιών.

Τέλος, στην τρίτη περιοχή παρατηρείται μία γρήγορη πτώση του δυναμικού για μεγάλες τιμές πυκνότητας ρεύματος, που αφορά στα κελιά υψηλών θερμοκρασιών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες εμποδίζεται ακόμα περισσότερο η μεταφορά του αντιδρώντος στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου, με αποτέλεσμα ακόμα μεγαλύτερη κλίση στην κατανομή συγκέντρωσης. Για παράδειγμα, σε ένα κελί που το οξειδωτικό μέσο είναι ο αέρας, σε υψηλότερες θερμοκρασίες το αδρανές άζωτο, λόγω της μεγαλύτερης κινητικότητας των μορίων του, εμποδίζει το οξυγόνο να φτάσει με ομοιόμορφη κατανομή στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου. Αντίστοιχο πρόβλημα βέβαια αποτελεί και ο υπέρθερμος ατμός που παράγεται.

3.5.4 Συνολικές Απώλειες – Τάση Εξόδου

Σε ένα κελί που βρίσκεται σε λειτουργία αυτό που ενδιαφέρει είναι ο προσδιορισμός της τελικής πολικής τάσης όταν από το κελί διέρχεται ρεύμα I (πυκνότητα ρεύματος i). Βάσει όλων όσων παρατέθηκαν παραπάνω διαμορφώνεται η εξής σχέση:

$$U_{Et} = E^* - \Delta V_{act} - \Delta V_{ohm} - \Delta V_{conc}$$

Αυτή είναι και η σχέση που χρησιμοποιείται ευρέως από πολλούς ερευνητές στο χώρο των κελιών καυσίμου για τον υπολογισμό της πολικής τάσης εξόδου σε ένα κελί καυσίμου που βρίσκεται σε λειτουργία.

Η τάση εξόδου, εξαρτάται από τη θερμοκρασία, το ρεύμα και τις μερικές πιέσεις του υδρογόνου, του οξυγόνου και του νερού. Έτσι επηρεάζεται άμεσα από τον ρυθμό ροής των αντιδρώντων στην άνοδο και στην κάθοδο και την υγρασία τους. Για την αποτελεσματική της λειτουργία πρέπει η πίεση στο εσωτερικό της να μηδενίζεται.

3.6 Ισοζύγιο μάζας κυψέλης καυσίμου για μοντελοποίηση

Το υπό μελέτη μοντέλο της κυψέλης καυσίμου βασίζεται στο θεμελιώδη νόμο διατήρησης της ύλης:

$$dn_g/dt = q_g^{in} - q_g^{out} - q_g^r$$

Όπου,

n_g ... ο αριθμός των mol του κάθε αερίου

q_g^{in} ...η ροή εισόδου (kmol/sec)

q_g^{out} ...η ροή εξόδου (kmol/sec)

q_g^r ...η ροή του αερίου που αντιδρά (kmol/sec)

Στην άνοδο της κυψέλης καυσίμου εισέρχεται το αέριο υδρογόνο, ενώ στη καθοδο εισέρχεται ο αέρας και παράγεται το νερό. Κάθε αέριο εξετάζεται ξεχωριστά και εφαρμόζεται η εξίσωση των ιδανικών αερίων:

$$P_g V = n_g R T$$

Όπου,

V ... ο όγκος της ανόδου ή της καθόδου αντίστοιχα

R ... η παγκόσμια σταθερά των αερίων

T ... η απόλυτη θερμοκρασία

Λύνουμε λοιπόν τη παραπάνω σχέση ως προς τη πίεση και αντικαθιστούμε στη παραπάνω διαφορική εξίσωση: Προκύπτει:

$$dp_g/dt = RT/V * (q_g^{in} - q_g^{out} - q_g^r)$$

Ο όρος q_g , αντιπροσωπεύει τον ρυθμό μεταβολής της ροής του αερίου (kmol/sec) είναι η παράγωγος του γραμμομοριακού περιεχομένου n_g στο χρόνο.

Επομένως η μεταβολή της πίεσης του αερίου καθορίζεται από το ισοζύγιο μάζας, δηλαδή τη διαφορά μεταξύ της ροής εισόδου, της ροής εξόδου και της κατανάλωσης από την αντίδραση. Η αύξηση της ροής εισόδου μεταβάλλει την πίεση και μπορεί να αυξήσει την απόδοση της κυψέλης, αλλά αυτό αυξάνει το κόστος του υπόλοιπου συστήματος καθώς και την πρόσθετη ενέργεια (παρασιτικό φορτίο) που απαιτείται για τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου. Η πίεση επιδρά επιπλέον και στις απώλειες ενεργοποίησης όπως θα φανεί στη μοντελοποίηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ ΜΕ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

4.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία έγινε προσπάθεια μελέτης, ανάλυσης και προσομοίωσης λειτουργίας αυτοκινήτου με κυψέλες καυσίμου. Έπειτα από το θεωρητικό υπόβαθρο όσον αφορά την κατανόηση λειτουργίας των κυψελών καυσίμου χρησιμοποιήσαμε το γραφικό περιβάλλον Simulink του Matlab, όπου και προσομοιώθηκε η λειτουργία του ήδη υπάρχοντος μοντέλου αυτοκινήτου Honda FCX Clarity. Ύστερα από κάποιες παρεμβάσεις στο υποσύστημα δυναμικής του οχήματος προσπαθήσαμε να προσεγγίσουμε την προσομοίωση του αυτοκινήτου με ένα άλλο μοντέλο αυτοκινήτου με περισσότερο σπορτίφ χαρακτηριστικά (Lamborghini Gallardo), προκειμένου να δούμε πως θα συμπεριφέρεται το συγκεκριμένο όχημα, αν αντί για μηχανή εσωτερικής καύσης είχε το σύστημα κυψελών καυσίμου του Honda FCX Clarity.

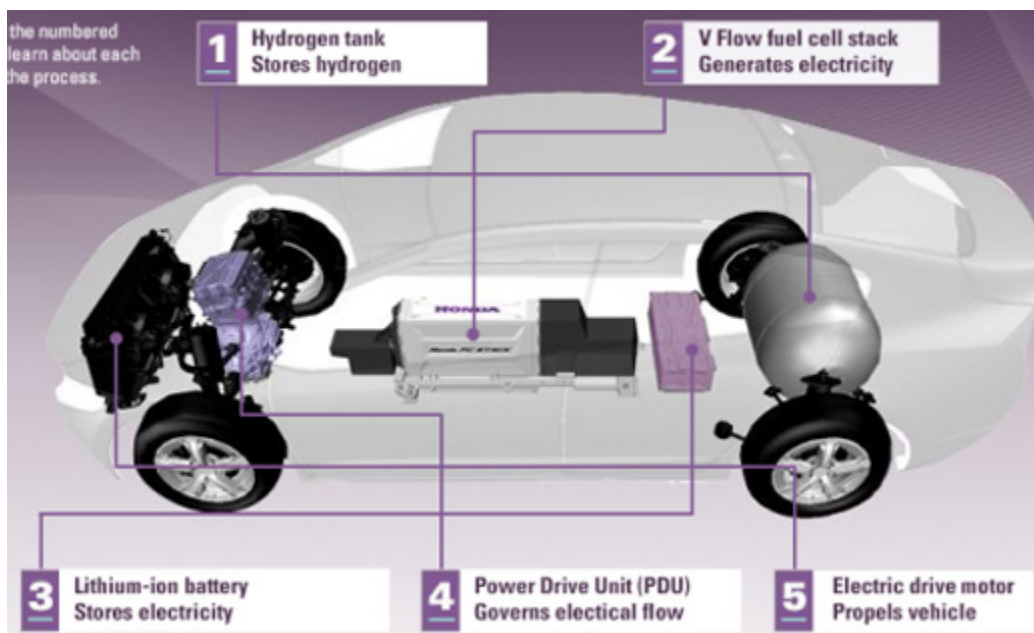
Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται καταγραφή και επεξήγηση με τύπους και σχήματα όλων των υποσυστημάτων του μοντέλου λειτουργίας οχήματος που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση λειτουργίας. Για λόγους απλούστευσης τα σχήματα όλων των υποσυστημάτων παρατίθενται στο τέλος του κεφαλαίου προκειμένου να είναι ευκολότερη η ανάγνωσή τους.

Όσον αφορά τη λειτουργία του αυτοκινήτου Honda FCX Clarity μπορούμε να πούμε ότι το FCX Clarity διαθέτει ρεζερβουάρ υδρογόνου αντί βενζίνης και τη συστοιχία κυψελών καυσίμου V Flow, που λειτουργεί ως ένας μικρός σταθμός ηλεκτρικής ενέργειας. Το υδρογόνο ενώνεται με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας στη συστοιχία κυψελών καυσίμου, όπου η ενέργεια από την αντίδραση μετατρέπεται σε ηλεκτρική ισχύ, η οποία τροφοδοτεί τον ηλεκτροκινητήρα για την κίνηση του οχήματος. Η διαδικασία ανεφοδιασμού είναι εύκολη και διαρκεί 3-4 λεπτά, ενώ μοναδική εκπομπή από την κίνηση του FCX είναι το νερό (υδρατμοί).

Πρόσθετη ενέργεια παράγεται επίσης με τη ανάκτηση κινητικής ενέργειας από το φρενάρισμα και την επιβράδυνση του οχήματος, η οποία αποθηκεύεται μαζί με την περίσσεια ενέργειας της κυψέλης στη μπαταρία ιόντων λιθίου και χρησιμοποιείται για συμπλήρωση της ισχύος από την κυψέλη καυσίμου, όταν χρειάζεται. Περίπου το 57% της ενέργειας της επιβράδυνσης ανακτάται και αποθηκεύεται.

Η απόδοση του ηλεκτροκινητήρα φτάνει τους 134 ίππους. Σύμφωνα με τη Honda, το FCX Clarity προσφέρει επιδόσεις αντίστοιχες ενός σεντάν με βενζινοκινητήρα 2,4 λίτρων, ενώ η

κατανάλωση υδρογόνου, κάνοντας την αναγωγή σε diesel, είναι μόλις 2,8 lt/100 km. Η αυτονομία με ένα φουλ ρεζερβουάρ φτάνει τα 460 km.



Όπως φαίνεται και από το παραπάνω σχήμα μπορούμε να διακρίνουμε 5 βασικά στοιχεία που χαρακτηρίζουν τη δομή λειτουργίας του Honda FCX Clarity:

1. Το ντεπόζιτο του υδρογόνου, όπου και πραγματοποιείται η αποθήκευση του
2. Την συστοιχία κυψέλης καυσίμου, όπου και παράγεται ηλεκτρική ενέργεια
3. Την μπαταρία ιόντων λιθίου, όπου και αποθηκεύεται η ηλεκτρική ενέργεια
4. Τον ελεγκτή PDU, ο οποίος καθορίζει την ροή της ηλεκτρικής ενέργειας
5. Τον ηλεκτρικό κινητήρα, ο οποίος χρησιμοποιείται για την ώθηση του οχήματος

Η πολλαπλού πεδίου προσομοίωση βασίζεται στην βιβλιοθήκη SimPowerSystems και SimDriveline του Matlab. Όπως φαίνεται και από το σχήμα 9 το μοντέλο λειτουργίας του οχήματος διακρίνεται στα ακόλουθα κύρια υποσυστήματα:

- Ηλεκτρικό υποσύστημα
 - Υποσύστημα δυναμικής του οχήματος
 - Υποσύστημα διαχείρισης της ενέργειας

4.2 Ηλεκτρικό υποσύστημα

Το ηλεκτρικό υποσύστημα αποτελείται από τέσσερα μέρη: τον ηλεκτροκινητήρα, την κυψέλη καυσίμου, την μπαταρία και τον μετατροπέα DC / DC.

Όσον αφορά την κυψέλη καυσίμου έχουμε τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε παραπάνω από μία κυψέλη καυσίμου, ανάλογα με τις ανάγκες μας στην προσομοίωση λειτουργίας του αυτοκινήτου στο Simulink. Το μοντέλο που εξετάζουμε χρησιμοποιεί κυψέλη καυσίμου τύπου πολυμερισμένης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) με μέγιστη ισχύ 100 kW. Το μέγεθος της είναι 57 liters και το βάρος της 148 lbs.

Ο ηλεκτροκινητήρας έχει ισχύ 134 hp και ροπή 189 lb-ft στο φάσμα 0-3056 rpm και είναι σύγχρονη μηχανή εσωτερικού μόνιμου μαγνήτη με την ανάλογη οδήγηση. Ο κινητήρας αυτός έχει 8 πόλους και οι μαγνήτες είναι ενσωματωμένοι (τύπος προεξέχοντα ρότορα). Η μέγιστη ισχύ του είναι 100 kW.

Η μπαταρία είναι τύπου ιόντων λιθίου (Lithium-Ion) χωρητικότητας 13.9 Ah και τάσης 288 V.

Ο μετατροπέας DC/DC (τύπος boost) είναι ρυθμιζόμενος ως προς την τάση. Ο μετατροπέας προσαρμόζει την χαμηλή τάση της μπαταρίας (288 V) προς το ζυγό συνεχούς ρεύματος που τροφοδοτεί τον ηλεκτροκινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος υπό τάση 500 V.

Οι ηλεκτρικές μηχανές και τα ηλεκτρονικά τους μοντελοποιούνται με τη χρήση ενός χάρτη απωλειών συναρτήσει της ταχύτητας περιστροφής και της ροπής της ατράκτου. Μια σειρά από καμπύλες παρέχουν, για διάφορες τιμές DC, τον φάκελο των ροπών ως συνάρτηση της ταχύτητας περιστροφής της μηχανής. Οι τιμές που καθορίζονται στο μοντέλο περιλαμβάνουν την ζήτηση σε ροπή και το διαθέσιμο ρεύμα στους ακροδέκτες των συσσωρευτών. Το μοντέλο παρέχει στην έξοδό του την διαθέσιμη ροπή στην κύρια άτρακτο καθώς και το απορροφούμενο ρεύμα.

Επιπλέον, οι συσσωρευτές μοντελοποιούνται με την χρήση μιας εσωτερικής αντίστασης με σταθερή τιμή για όλο το εύρος λειτουργίας τους και μιας τάση ανοιχτού κυκλώματος της οποίας η τιμή είναι συνάρτηση της κατάστασης φόρτισης των συσσωρευτών. Το μοντέλο των συσσωρευτών έχει ως έξοδο την τάση φόρτισης με την απαίτηση ισχύος.

4.3 Υποσύστημα δυναμικής του οχήματος

Το υποσύστημα δυναμικής του οχήματος αποτελείται από τα κάτωθι κυρίως υποσμήματα:

- Μοντέλο διαμηκούς δυναμικής του οχήματος (longitudinal vehicle dynamics)
 - Μοντέλο ελαστικού (tire block)

- Μοντελο διαφορικού (differential block)
- Μοντελο μονοβαθμιου μειωτηρα στροφων (simple gear block)

Το υποσύστημα αυτό μοντελοποιεί όλα τα μηχανικά μέρη του οχήματος επιλύοντας τις εξισώσεις δυναμικής κίνησης του οχήματος. Εμείς θα περιγράψουμε τα κυριότερα μέρη του συγκεκριμένου υποσυστήματος, τα οποία αναφέρονται και πιο πάνω.

4.3.1 Μοντέλο διαμήκους δυναμικής του οχήματος

Το μοντέλο αυτό μοντελοποιεί την κίνηση ενός διαξονικού οχήματος με 4 ισομεγέθεις τροχούς που κινείται εμπρός ή προς τα πίσω κατά μήκος του διαμήκους άξονά του.

Ειδικότερα, η σύνδεση Η αφορά την οριζόντια κίνηση του αμαξώματος και τα στοιχεία που εισάγονται λόγω της κίνησης των ελαστικών. Οι συνδέσεις V , N_F και N_R είναι φυσικές θύρες εξόδου για την ταχύτητα του οχήματος και για τις δυνάμεις των τροχών εμπρός και πίσω αντίστοιχα. Οι δυνάμεις των τροχών θεωρούνται θετικές όταν ενεργούν προς τα κάτω. Τέλος οι συνδέσεις W και β είναι φυσικές θύρες εισόδου σήματος που σχετίζονται με τον κόντρα άνεμο και την κλίση του δρόμου αντίστοιχα.

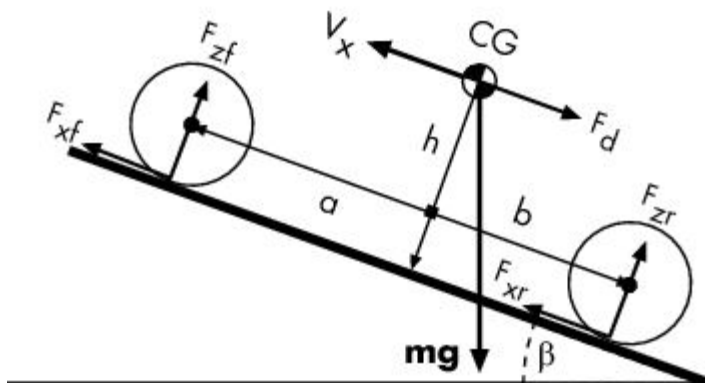
Το μοντέλο περιλαμβάνει τις ακόλουθες ιδιότητες του οχήματος:

- Μάζα του οχήματος
- Αριθμός τροχών σε κάθε άξονα
- Θέση του κέντρου του οχήματος βάρους (CG) σε σχέση προς τους εμπρός και πίσω άξονες, καθώς επίσης και με το έδαφος
- Ωφέλιμη μετωπική διατομή
- Αεροδυναμικό συντελεστή οπισθέλκουσας
- Αρχική διαμήκη ταχύτητα

Προυπόθεση για την ομαλή λειτουργία του παραπάνω μοντέλου είναι ότι το όχημα δεν ταλαντεύεται ή κινείται κατακόρυφα σε σχέση με το έδαφος.

Όσον αφορά στην μοντελοποίηση του οχήματος, πρέπει να αναφερθεί ότι οι άξονες του θεωρούνται παράλληλοι μεταξύ τους καθώς επίσης και με το έδαφος. Το μήκος x βρίσκεται σε αυτό το επίπεδο και είναι κάθετο προς τους άξονες. Εάν το όχημα κινείται σε έδαφος με γωνία κλίσης β , η κάθετη διεύθυνση z δεν είναι παράλληλη προς τη βαρύτητα, αλλά είναι πάντα κάθετη προς το επίπεδο άξονα-εδάφους.

Παρακάτω παραθέτουμε το μοντέλο δυναμικής του οχήματος:



Οι τύποι που περιγράφουν το παραπάνω σύστημα είναι οι εξής:

$$\begin{aligned} m\dot{V}_x &= F_x - F_d - mg \cdot \sin \beta, \\ F_x &= n(F_{xf} + F_{xr}), \\ F_d &= \frac{1}{2} C_d \rho A (V_x - V_W)^2 \cdot \text{sgn}(V_x - V_W) \end{aligned}$$

Όπου για μηδενική επιτάχυνση και μηδενική κατακόρυφη ροπή έχουμε:

$$\begin{aligned} F_{zf} &= \frac{-h(F_d + mg \sin \beta + m\dot{V}_x) + b \cdot mg \cos \beta}{n(a+b)}, \\ F_{zr} &= \frac{+h(F_d + mg \sin \beta + m\dot{V}_x) + a \cdot mg \cos \beta}{n(a+b)}, \\ F_{zf} + F_{zr} &= mg \cdot \cos \beta / n. \end{aligned}$$

Και για τις υπόλοιπες μεταβλητές:

g= επιτάχυνση της βαρύτητας (= 9.81 m/s²)

β= γωνία κλίσης οδοστρώματος (rad)

m= μάζα οχήματος (kg)

A= ωφέλιμη μετωπική επιφάνεια οχήματος (m²)

h= απόσταση κέντρου βάρους οχήματος CG από το έδαφος (m)

a, b= απόσταση των εμπρόσθιων και οπίσθιων αξόνων αντίστοιχα από την κατακόρυφη προβολή του κέντρου βάρους του οχήματος στο επίπεδο αξόνων-εδάφους (m)

V_x= διαμήκης ταχύτητα οχήματος (m/s)

V_w=ταχύτητα του κοντρα ανέμου

n=αριθμός τροχών σε κάθε άξονα

F_{xf}, F_{xr}=διαμήκεις δυνάμεις επί του οχήματος στα σημεία επαφής των εμπρός και πίσω ελαστικών, αντίστοιχα (N)

F_{zf}, F_{zr} = κατακόρυφες δυνάμεις στο όχημα στα σημεία επαφής των εμπρός και πίσω ελαστικών, αντίστοιχα (N)

C_d = συντελεστής αεροδυναμικής αντίστασης ($N \cdot s^2/kg \cdot m$)

ρ = πυκνότητα του αέρα ($= 1.2 \text{ kg/m}^3$)

F_d = δύναμη αεροδυναμικής αντίστασης, οπισθέλκουσα (N)

Η κίνηση του οχήματος καθορίζεται από την επίδραση της όλων των δυνάμεων και των ροπών που ενεργούν σε αυτό. Οι διαμήκεις δυνάμεις των ελαστικών ωθούν το όχημα προς τα εμπρός ή προς τα πίσω. Το βάρος του οχήματος δρα μέσω του κέντρου βάρους του (CG). Ανάλογα με τη γωνία κλίσης, το βάρος τραβά το όχημα προς το έδαφος και το έλκει είτε προς τα πίσω ή προς τα εμπρός. Είτε το όχημα κινείται προς τα εμπρός ή προς τα πίσω όμως η αεροδυναμική αντίσταση επιβραδύνει. Για απλότητα, η οπισθέλκουσα υποτίθεται ότι δρα μέσω του CG.

4.3.2 Μοντέλο ελαστικού

Το ελαστικό (Magic Formula) μπλοκ μοντελοποιεί την κατά μήκος δυναμική του συνδυασμού άξονας-τροχός-ελαστικό, με την επαφή με το δρόμο, η οποία αντιπροσωπεύεται από την μαγική φόρμουλα και προαιρετική παραμόρφωση. Η σύμβαση για το κατακόρυφο φορτίο είναι θετική προς τα κάτω. Εάν το κατακόρυφο φορτίο είναι μηδέν ή αρνητικό, η οριζόντια δύναμη του ελαστικού εξαφανίζεται. Στην περίπτωση αυτή, το ελαστικό ακουμπά απλά το έδαφος ή έχει εγκαταλείψει το έδαφος. Η διαμήκης διεύθυνση κείται κατά μήκος της εμπρός-πίσω άξονα του ελαστικού.

Μπορούμε να καθορίσουμε την κατακόρυφη προς τα κάτω F_z δύναμη φορτίου μέσω ενός φυσικού σήματος εισόδου στη θύρα N. Το μπλοκ αναφέρει την ανεπτυγμένη ολίσθηση των ελαστικών κ , ως δεκαδικό κλάσμα, μέσα από ένα φυσικό σήμα εξόδου στη θύρα S. Η περιστροφή του άξονα του τροχού αντιπροσωπεύεται από την περιστροφική θύρα A. Ο άξονας του τροχού της οριζόντιας αντίδρασης ώθησης στο όχημα αντιπροσωπεύεται από τη θύρα H.

Τα μοντέλα ελαστικών θέλει το ελαστικό που έρχεται σε επαφή με το δρόμο να έχει την τάση να γλιστρήσει. Όταν εφαρμόζεται ροπή στον άξονα του κινητήρα, το ελαστικό ωθεί το έδαφος (ενώ υπόκειται σε επαφή τριβής) και μεταφέρει την προκύπτουσα αντίδραση ως μια δύναμη πίσω από τον τροχό. Αυτή η ενέργεια ωθεί τον τροχό προς τα εμπρός ή προς τα πίσω. Το ελαστικό είναι ευέλικτο παραμορφώνεται υπό φορτίο.

Όσον αφορά το μοντέλο του ελαστικού και τις δυνάμεις που εφαρμόζονται σε αυτό έχουμε το παρακάτω σχήμα:



Όπου:

r = ωφέλιμη ακτίνα κύλισης (m)

I = αδράνεια συστήματος ζάντας-ελαστικού ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)

t_{drive} = ροπή εφαρμοζόμενη από τον άξονα στον τροχό ($\text{N}\cdot\text{m}$)

V_x =διαμήκης ταχύτητα κέντρο τροχού (m/s)

Ω = γωνιακή ταχύτητα τροχού (rad/s)

Ω' = γωνιακή ταχύτητα σημείου επαφής (rad/s)

$r_{\Omega'}$ = πέλμα του ελαστικού

$V_{sx} = V_x - r_{\Omega}$, ταχύτητα ολίσθησης τροχού (m/s)

$V'_{sx} = V_x - r_{\Omega'}$, ταχύτητα ολίσθησης σημείου επαφής (m/s)

$\kappa = -V_{sx} / |V_x|$, ολίσθηση τροχού

$\kappa' = -V'_{sx} / |V_x|$, ολίσθηση επιφάνειας επαφής

u = διαμήκης παραμόρφωση ελαστικού (m)

F_z = κατακόρυφο φορτίο στο ελαστικού (N)

$F_x = f(\kappa', F_z)$ = διαμήκης δύναμη εξασκούμενη από το ελαστικό στην ζάντα στο σημείο επαφής (N)

$CF_x = (\partial F_x / \partial u)$, διαμήκης δυσκαμψία ελαστικού (N/m)

$bF_x = (\partial F_x / \partial \kappa') / (CF_x)$, μήκος χαλάρωσης ελαστικού (m)

V_{th} = όριο ταχύτητας στον κόμβο

Αν το ελαστικό ήταν συμπαγές και δεν ολίσθαινε, θα εκτελούσε κύλιση και μεταφορά καθώς $V_x = r_\Omega$. Στην πραγματικότητα, ακόμα και ένα συμπαγές ελαστικό ολίσθαινει, και το ελαστικό αναπτύσσει μια διαμήκη δύναμη F_x ως απόκριση στην ολίσθηση. Η ταχύτητα ολίσθησης του τροχού $V_{sx} = V_x - r_\Omega \neq 0$. Ωστόσο, είναι πιο εύχρηστο να εκφρασθεί η ολίσθηση του τροχού ως $\kappa = -V_{sx} / |V_x|$ ώστε για πλήρως ολίσθαινων ελαστικό $\kappa = -1$, ενώ για τέλεια κύλιση $\kappa = 0$. Για χαμηλές ταχύτητες $|V_x| \leq |V_{th}|$, η ολίσθηση των τροχών έχει μοντελοποιηθεί $\kappa = 2 * V_{sx} / (V_{th} + V_x * 2 / V_{th})$. Η τροποποίηση αυτή επιτρέπει μια ομαλή μη μηδενική ολίσθηση σε μηδενική ταχύτητα του τροχού. Για παράδειγμα, για τέλεια ολίσθηση $V_x = 0$, ενώ $\kappa = 2 * r_{w\Omega} / V_{th}$ είναι πεπερασμένο.

Αν το ελαστικό παραμορφώνεται είναι επίσης ευέλικτο. Επειδή στην προκειμένη περίπτωση, το ελαστικό παραμορφώνεται, το σημείο επαφής γίνεται σε μια ελαφρώς διαφορετική γωνιακή ταχύτητα Ω' από την ταχύτητα του τροχού Ω και απαιτεί, αντί της ολίσθησης των τροχών, το σημείο επαφής κ . Αν το ελαστικό δεν μοντελοποιείται σαν παραμορφωμένο τότε $\Omega' = \Omega$, $V'_{sx} = V_{sx}$, and $\kappa' = \kappa$. Στην περίπτωση αυτή, το ελαστικό ξεκινά την προσομοίωση και παραμένει अपαραμόρφωτο.

Το μοντέλο ελαστικού προϋποθέτει διαμήκη κίνηση μόνο και δεν περιλαμβάνει καμπυλότητα, στροφή ή πλευρική κίνηση.

4.3.3 Μοντέλο διαφορικού

Το Differential block αντιπροσωπεύει ένα διαφορικό που συνδέει την περιστροφική κίνηση γύρω από τον διαμήκη άξονα με την περιστροφική κίνηση γύρω από δύο εγκάρσιους άξονες, με δεδομένη σχέση μετάδοσης. Ώς είσοδος μπορεί να είναι κάθε άξονας, ωστόσο, υπό κανονικές συνθήκες χρήσης, ο διαμήκης άξονας είναι η είσοδος και η κίνηση, ροπή και ισχύς μεταδίδονται στους εγκάρσιους άξονες. Οι άξονες εξόδου, σε γενικές γραμμές, έχουν διαφορετικές γωνιακές ταχύτητες. Η διαμήκης κίνηση διαιρείται με τη σχέση μετάδοσης κίνησης και στη συνέχεια διαμοιράζεται μεταξύ των δύο εγκάρσιων αξόνων.

Τα διαφορικά στα συστήματα μετάδοσης έχουν συχνά ένα ελεγχόμενο συμπλέκτη που συνδέει τους δύο άξονες εξόδου. Μπορούμε να προσθέσουμε αυτόν τον έλεγχομενο συμπλέκτη, συνδέοντας ένα μπλοκ συμπλέκτη στο μπλοκ διαφορικού.

Οι θύρες D , $S1$ και $S2$ είναι περιστροφικές και αντιπροσωπεύουν αντίστοιχα το διαμήκες ημιαξόνιο και τους δύο άξονες πλευρικά.

Το διαφορικό επιβάλλει ένα κινηματικό περιορισμό για τους τρεις συνδεδεμένους άξονες:

$$\omega_D = \pm (1/2) * g * D * (\omega_{S1} + \omega_{S2}) ,$$

όπου (+) και (-) τα πρόσημα που μας δηλώνουν την απόκλιση του διαφορικού αριστερά ή δεξιά της κεντρικής γραμμής αντίστοιχα. Οι τρεις βαθμοί ελευθερίας μειώνουν σε δύο τους ανεξάρτητους βαθμούς ελευθερίας.

Τα ζευγάρια σχέσεων μετάδοσης είναι $(1,2) = (S,S)$ and (C,D) . C είναι ο πάροχος. Το άθροισμα των πλευρικών κινήσεων είναι ότι η μετασχηματισμένη διαμήκης κίνηση. Η διαφορά των κινήσεων πλευρικών $\omega_{S1} - \omega_{S2}$ είναι ανεξάρτητη από την διαμήκη κίνηση. Η γενική κίνηση των πλευρικών αξόνων είναι μια υπέρθεση αυτών των δύο ανεξάρτητων βαθμών ελευθερίας, οι οποίες έχουν αυτή τη φυσική σημασία:

- Ένας βαθμός ελευθερίας (διαμήκης) είναι ισοδύναμος με τους δύο πλευρικούς άξονες που περιστρέφονται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα ($\omega_{S1} = \omega_{S2}$) και σε μια σταθερή αναλογία σε σχέση με το διαμήκη άξονα.
- Ο άλλος βαθμός ελευθερίας (απόκλιση) είναι ισοδύναμος με τη διατήρηση του διαμήκους άξονα κλειδωμένο ($\omega_D = 0$), ενώ οι πλευρικοί άξονες περιστρέφονται σε σχέση με κάθε άλλον σε αντίθετες κατευθύνσεις ($\omega_{S1} = -\omega_{S2}$).

Οι ροπές κατά μήκος των πλευρικών αξόνων τ_{S1} και τ_{S2} , περιορίζονται προς την διαμήκη ροπή τ_D κατά τέτοιο τρόπο ώστε η ισχύς ρέει μέσα και έξω από την σχέση μετάδοσης μείων οποιαδήποτε απώλεια ισχύος:

$$\omega_{S1} * \tau_{S1} + \omega_{S2} * \tau_{S2} + \omega_D * \tau_D - P_{loss} = 0$$

Όταν η κινηματικοί περιορισμοί συνδυάζονται με τους περιορισμούς ισχύος προκύπτει ότι:

$$g_D * \tau_D = 2 * (\omega_{S1} * \tau_{S1} + \omega_{S2} * \tau_{S2}) / (\omega_{S1} + \omega_{S2})$$

4.3.4 Μοντέλου μονοβάθμιου μειωτήρα στροφών

Το Simple gear block αντιπροσωπεύει ένα μονοβάθμιο μειωτήρα στροφών που συνδέει 2 ατράκτους, τον άξονα βάσης και τον ακόλουθο, ώστε να περιστρέφονται με σταθερή σχέση μετάδοσης. Μπορούμε να επιλέξουμε εάν ο άξονας της βάσης περιστρέφεται με την ίδια ή την αντίθετη κατεύθυνση ως προς τον ακόλουθο άξονα. Αν περιστρέφονται κατά την ίδια κατεύθυνση και ω_F , ω_B έχουν το ίδιο πρόσημο, εάν αυτοί περιστρέφονται σε αντίθετες κατευθύνσεις τότε ω_F , ω_B έχουν αντίθετα πρόσημα. Οι θύρες B και F είναι περιστροφικές θύρες που αντιπροσωπεύουν τον άξονα της βάσης και τον ακόλουθο άξονα αντίστοιχα.

Το συγκεκριμένο μπλόκ επιβάλλει ένα κινηματικό περιορισμό με τους 2 συνδεδεμένους άξονες:

$$r_F * \omega_F = r_B * \omega_B,$$

όπου: δείκτης B=άξονας βάσης,
 δείκτης F=ακόλουθος άξονας,
 ω =γωνιακή ταχύτητα της κάθε ατράκτου,
 r=ακτίνα της κάθε ατράκτου

Η σχέση μετάδοσης του άξονα βάσης και του ακόλουθου άξονα είναι :

$$g * F_B = r_F / r_B = N_F / N_B,$$

όπου N είναι ο αριθμός των δοντιών της ατράκτου.

Οι δύο βαθμοί ελευθερίας μειώνονται σε έναν ανεξάρτητο βαθμό ελευθερίας. Η μεταφορά ροπής είναι:

$$g * F_B * \tau_B + \tau_F - \tau_{loss} = 0 ,$$

με $\tau_{loss} = 0$ στην ιδανική περίπτωση.

4.4 Υποσύστημα διαχείρισης της ενέργειας

Το Υποσύστημα Διαχείρισης Ενέργειας (EMS), καθορίζει τα σήματα αναφοράς για το ηλεκτρικό μοτέρ, το σύστημα κυψελών καυσίμου και του DC/DC μετατροπέα, προκειμένου να διανείμει με ακρίβεια τη δύναμη από τις δύο ηλεκτρικές πηγές. Αυτά τα σήματα υπολογίζονται με χρήση κυρίως της θέσης του πεντάλ γκαζιού, που είναι μεταξύ -100% και 100% και της μετρούμενης ταχύτητας.

Το υποσύστημα διαχείρισης της ενέργειας αποτελείται από τα κάτωθι κυρίως υποσυστήματα:

- Υποσυστημα συσσωρευτων (battery management system)
- Υποσυστημα διαχειρισης της ισχυος (power management system)

Το υποσύστημα αυτό καθορίζει τα σήματα αναφοράς για την οδήγηση του κινητήρα και τη λειτουργία των κυψελών καυσίμου, προκειμένου να διανείμει με ακρίβεια την ισχύ από αυτές τις 2 αυτές πηγές. Τα σήματα αυτά υπολογίζονται με βάση κυρίως τη θέση του πεντάλ γκαζιού, ενώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι αρνητική τιμή θέσης του γκαζιού αντιπροσωπεύει ουσιαστικά θετική τιμής πέδησης. Έχει ως εισόδους σήματα σχετικά με την μπαταρία, την θέση του πεντάλ γκαζιού, την ταχύτητα του αυτοκινήτου, την ταχύτητα του κινητήρα και τις κυψέλες καυσίμου και έξοδο την ροπή του κινητήρα του αυτοκινήτου και την τωρινή κατάσταση των κυψελών καυσίμου.

4.4.1 Υποσύστημα συσσωρευτών

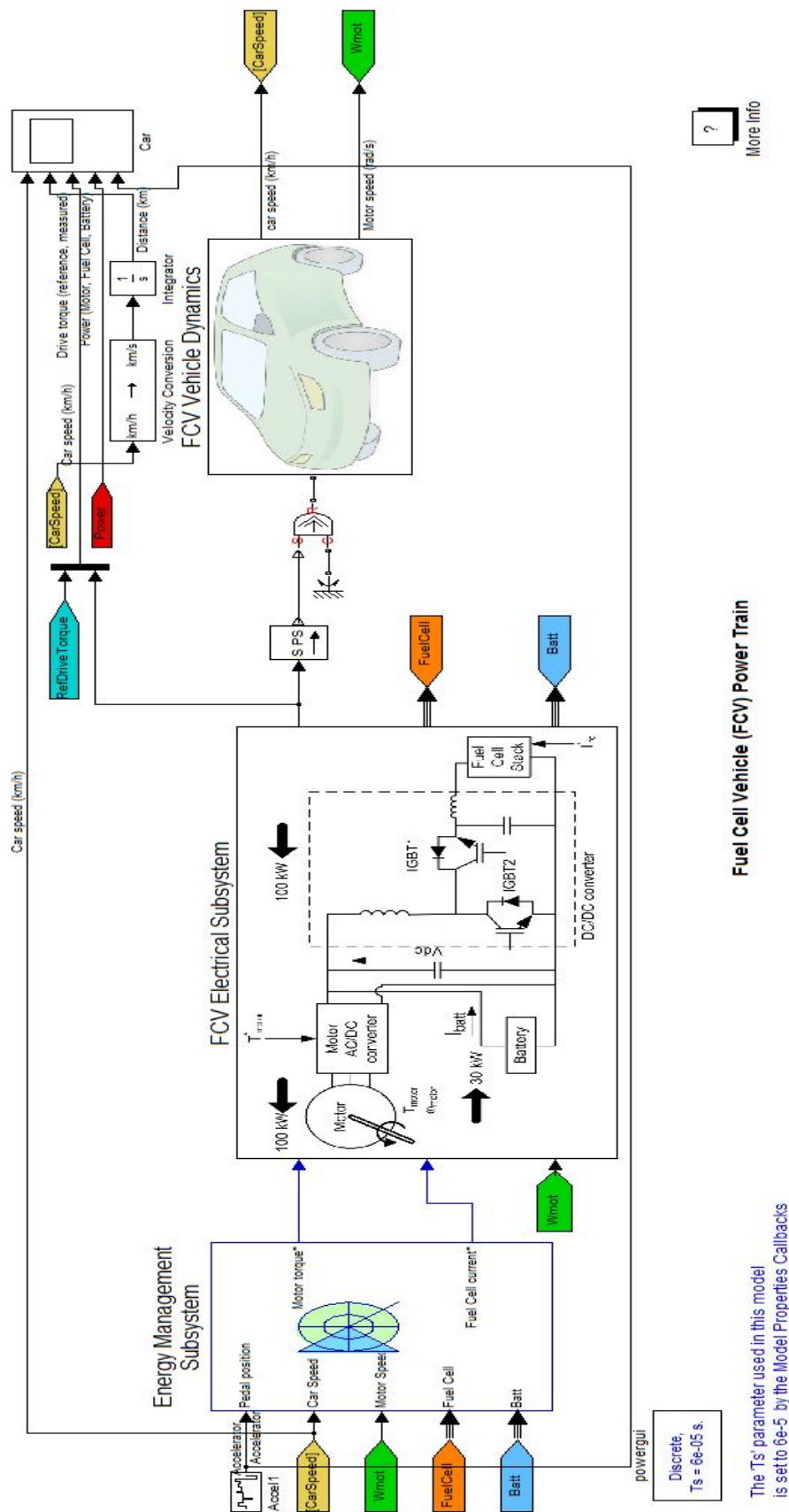
Το υποσύστημα συσσωρευτών είναι υπεύθυνο για να διατηρεί την κατάσταση φόρτισής τους (State-of-Charge, SOC) μεταξύ 40 και 80%. Επίσης, αποτρέπει την κατάρρευση της τάσης ελέγχοντας την ισχύ που απαιτείται από την μπαταρία. Έχει ως είσοδο σήματα από την μπαταρία και σήματα εξόδου για την ισχύ και το όριο της μπαταρίας.

4.4.2 Υποσύστημα διαχείρισης της ισχύος

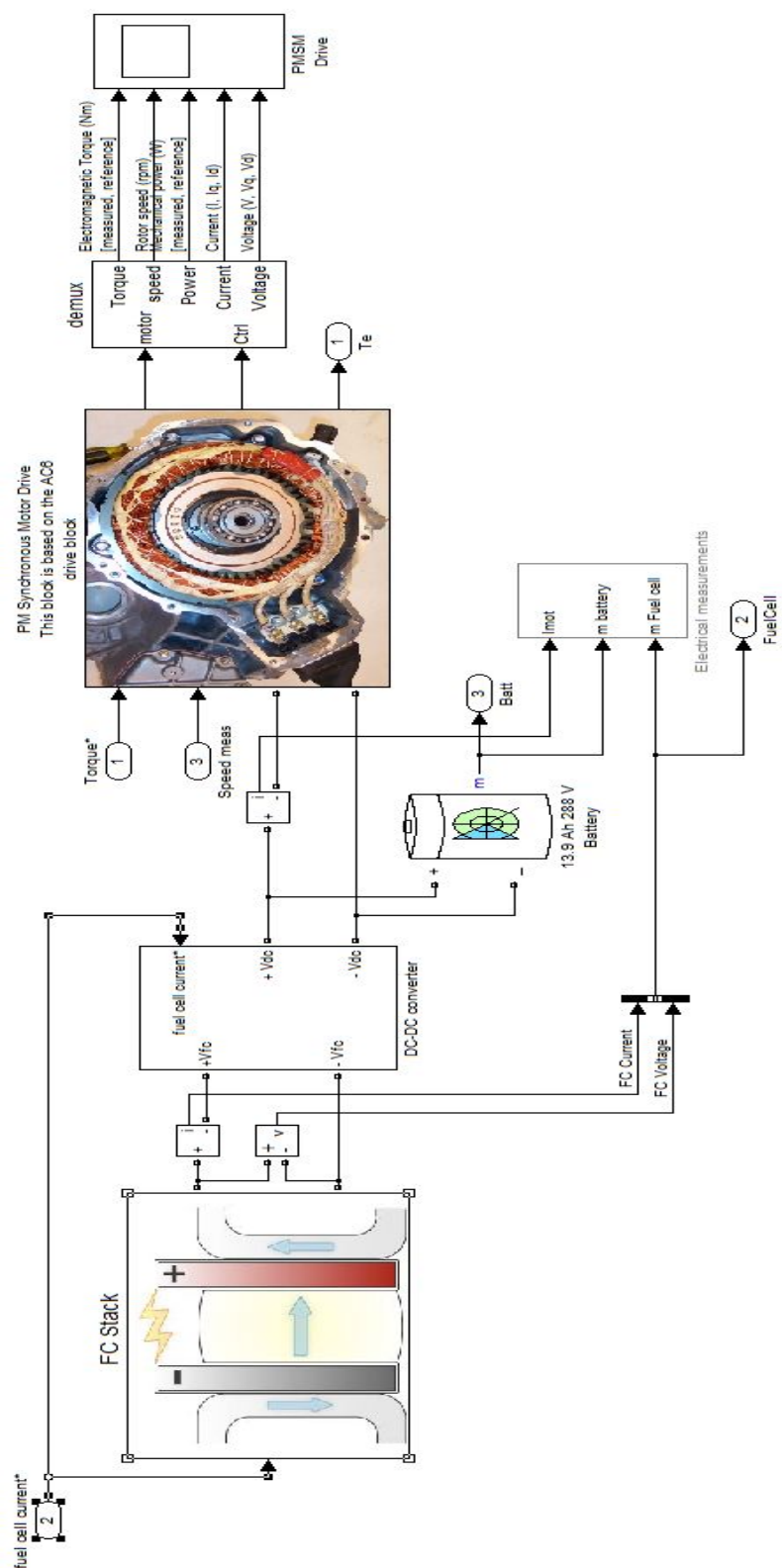
Το υποσύστημα διαχείρισης ισχύος κατανέμει την ισχύ που παράγεται στο σύστημα σε διάφορα μέρη του συστήματος. Το υποσύστημα αυτό παράγει και θέτει τις τιμές ρύθμισης/λειτουργίας στη μηχανή του αυτοκινήτου και στις κυψέλες καυσίμου ανάλογα με την τιμή πρόωσης/πέδησης που τίθεται από τον οδηγό.

Στο μοντέλο αυτό έχουν προστεθεί 3 κύρια γραφήματα:

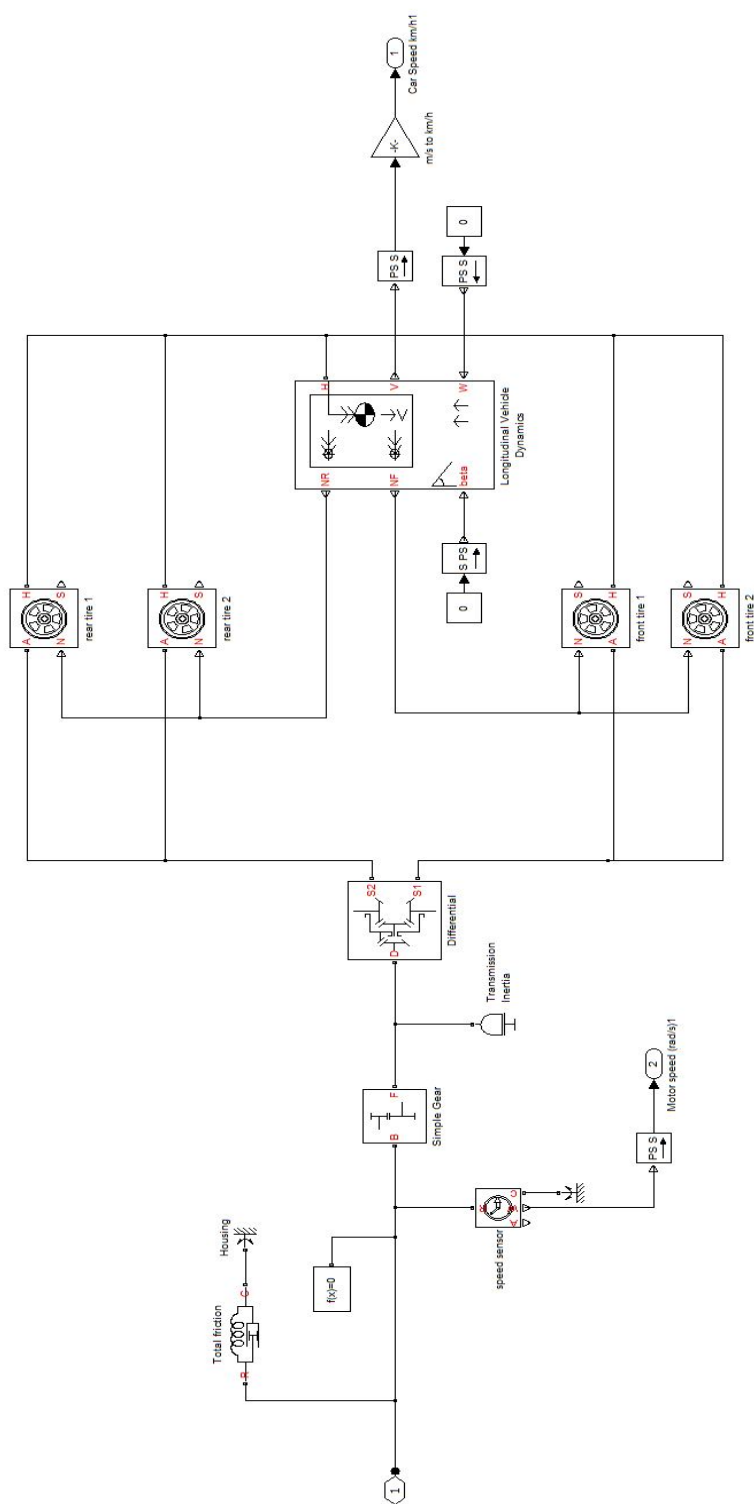
- Το γράφημα Drive Power, Motor Power που μας δίνει πληροφορίες για την ισχύ της μηχανής.
- Το γράφημα Fuel Cell Power που μας δίνει πληροφορίες για την ισχύ των κυψελών καυσίμου.
- Το γράφημα P^*_{batt} που μας δίνει πληροφορίες των συσσωρευτών του συστήματος.



Μοντέλο λειτουργίας υβριδικού οχήματος Honda FCX Clarity

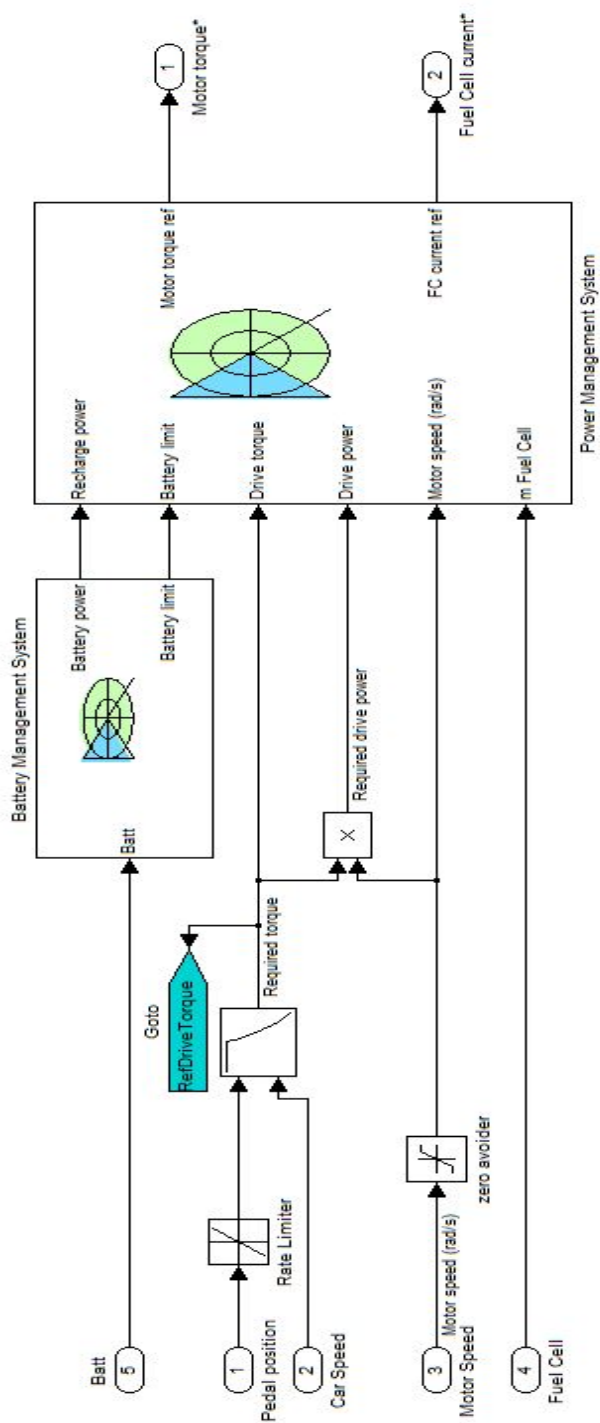


Σχήμα 10
Μοντέλο ηλεκτρικού υποσυστήματος



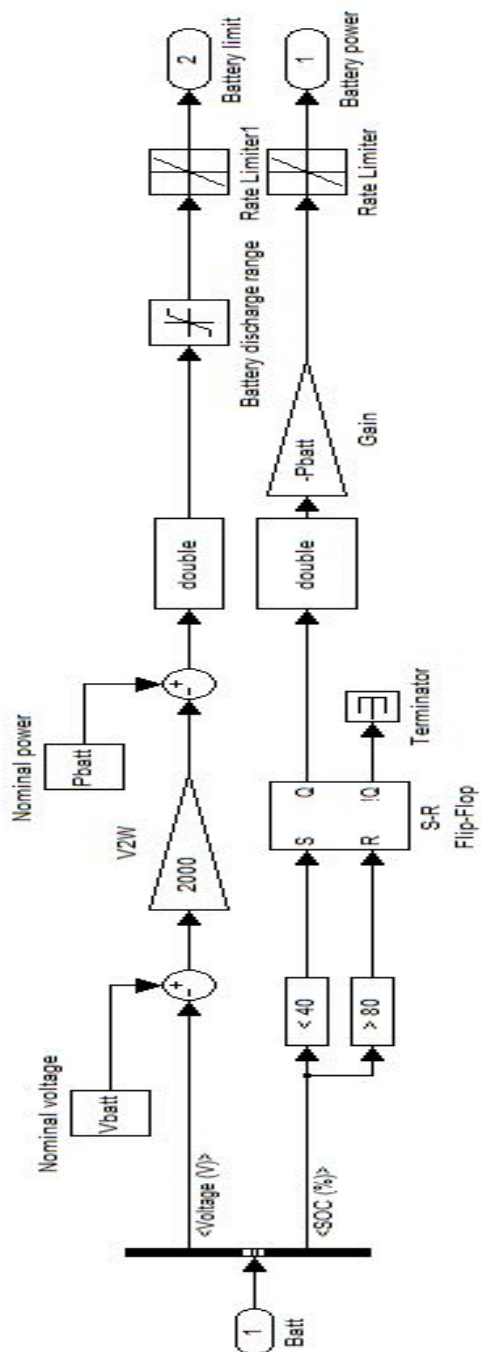
Σχήμα 11

Μοντέλο υποσυστήματος δυναμικής του οχήματος



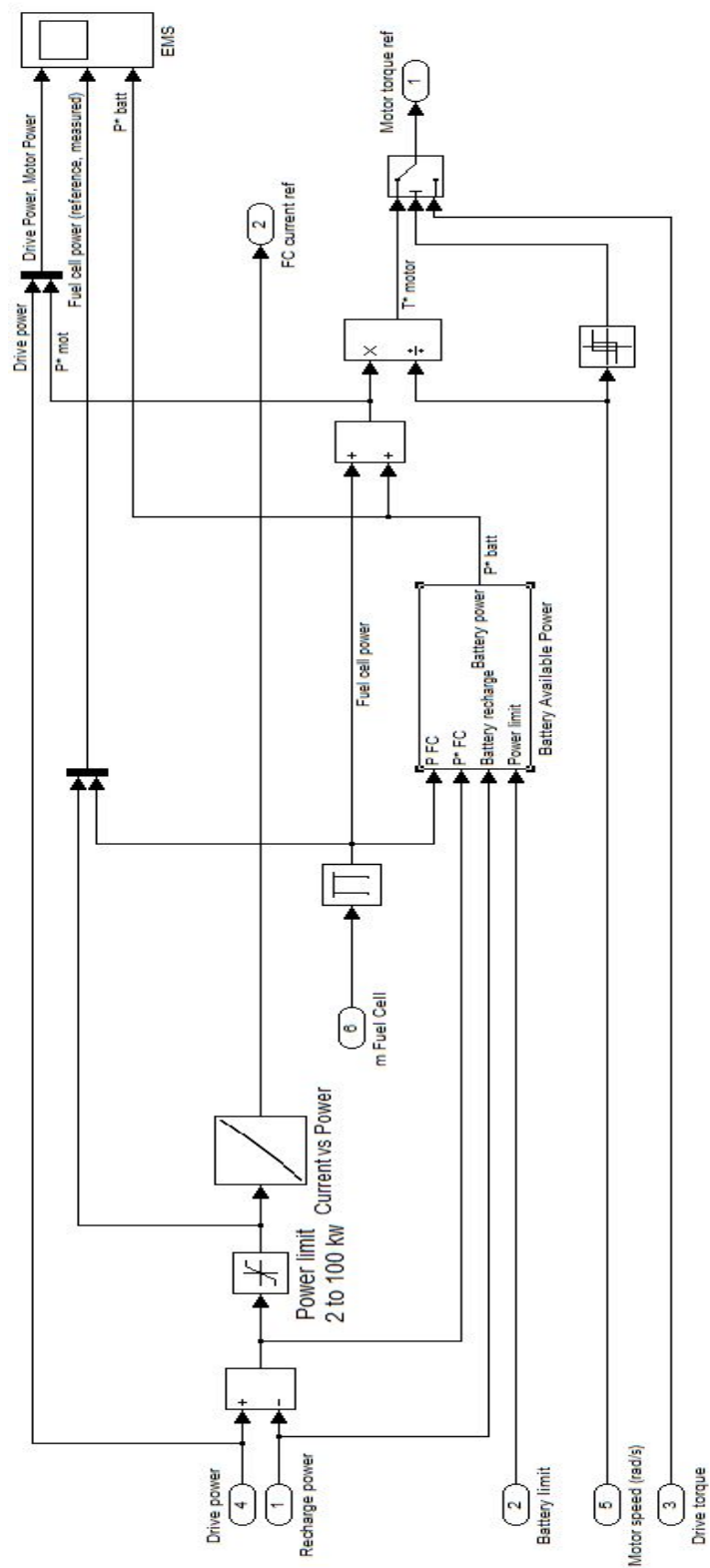
Σχήμα 12

Μοντέλο υποσυστήματος διαχείρισης της ενέργειας



Σχήμα 13

Μοντέλο υποσυστήματος διαχείρισης συσσωρευτών



Σχήμα 14

Μοντέλο υποσυστήματος διαχείρισης ισχύος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

5.1 Εισαγωγή

Η προσομοίωση παρουσιάζει διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας του αυτοκινήτου Honda FCX Clarity σε έναν πλήρη κύκλο: επιτάχυνση, πορεία, επαναφόρτιση της μπαταρίας κατά την επιτάχυνση και την πέδηση. Όπως έχουμε αναφέρει και σε προηγούμενο σημείο της εργασίας το μοντέλο προσομοίωσης αποτελείται από τέσσερα μέρη: το ηλεκτρικό μοτέρ, την μπαταρία, την κυψέλη καυσίμου και τον DC / DC μετατροπέα.

Προκειμένου να προσομοιωθεί ένα - κατά το δυνατό - ρεαλιστικό σενάριο κίνησης /χρήσης του οχήματος επιλέχθηκε ένα τυπικό προφίλ ταχύτητας για εκτός πόλης κίνηση, όπως αυτό προσδιορίζεται και αναλύεται στην Οδηγία 70/220/EEC του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου. Συγκεκριμένα μέσω της μεθόδου δοκιμής και λάθους (trial and error) προσπαθήσαμε να προσεγγίσουμε την καμπύλη της ταχύτητας, όπως αυτή περιγράφεται από την ευρωπαϊκή οδηγία. Το προφίλ της ευρωπαϊκής οδηγίας προβλέπει μία κίνηση διάρκειας 400 δευτερολέπτων, όπου κατά τα πρώτα 20 και τα τελευταία 20 δευτερόλεπτα το όχημα είναι εν στάση. Επομένως δίνοντας τιμές στη θέση του πεντάλ γκαζιού για το χρονικό διάστημα 0-400 δευτερόλεπτα προσπαθήσαμε να προσεγγίσουμε το προφίλ ταχύτητας όπως αυτό περιγράφεται από την ευρωπαϊκή οδηγία. Το ίδιο έπειτα κάναμε και για το τροποποιημένο αυτοκίνητο. Έτσι είναι εύλογο ότι και στα δύο αυτοκίνητα τα διαγράμματα ταχύτητας και συνολικής απόστασης θα συμπίπτουν. Έτσι μπορούμε να συγκρίνουμε τα δύο αυτοκίνητα ως προς τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά τα οποία προφανώς και δεν θα συμπίπτουν. Ο σχολιασμός της σύγκρισης των διαφόρων χαρακτηριστικών των δύο αυτοκινήτων έπεται της παράθεσης των διαγραμμάτων συγκρίσεως.

Επίσης πρέπει να αναφέρουμε ότι κάναμε μία μετατροπή στο δυναμικό υποσύστημα του αυτοκινήτου και συγκεκριμένα στην ακτίνα κύλισης, η οποία υπολογίστηκε εκ νέου καθώς διαπιστώθηκε ότι υπήρχε απόκλιση από τη πραγματική της τιμή. Ακόμη, θα παραθέσουμε και τις τιμές των θέσεων του πεντάλ γκαζιού, όπως και των χρονικών διαστημάτων αντίστοιχα, σύμφωνα με τα οποία έγινε η προσομοίωση:

[0 0.169 0.061 -0.157 0.0383 0.177 0.062 0.154 0.104 0.206 0.14 -0.315 0]

[0 20 61 111 119 188 201 251 286 316 336 346 380]

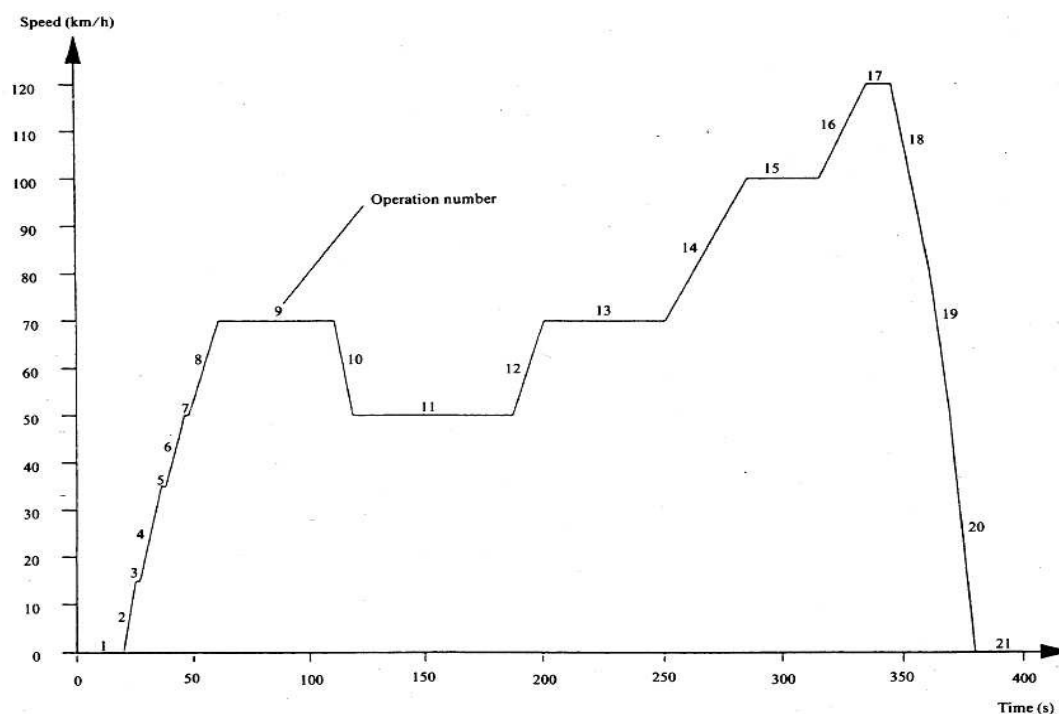
Ακολουθούν τα σχήματα της ευρωπαϊκής οδηγίας που προσπαθήσαμε να προσεγγίσουμε κατά την διεξαγωγή της προσομοίωσης.

No of operation	Operation	Phase	Acceleration (m/s ²)	Speed (km/h)	Duration of each		Cumulative time (s)	Gear to be used in the case of a manual gearbox
					Operation (s)	Phase (s)		
1	Idling	1			20	20	20	K1 (*)
2	Acceleration	2	0,83	0-15	5	41	25	1
3	Gear change				2		27	—
4	Acceleration		0,62	15-35	9		36	2
5	Gear change				2		38	—
6	Acceleration	3	0,52	35-50	8	2	46	3
7	Gear change				2		48	—
8	Acceleration		0,43	50-70	13		61	4
9	Steady speed	3		70	50	50	111	5
10	Deceleration	4	-0,69	70-50	8	8	119	4 s.5 + 4 s.4
11	Steady speed	5		50	69	69	188	4
12	Acceleration	6	0,43	50-70	13	13	201	4
13	Steady speed	7		70	50	50	251	5
14	Acceleration	8	0,24	70-100	35	35	286	5
15	Steady speed	9		100	30	30	316	5 (**)
16	Acceleration	10	0,28	100-120	20	20	336	5 (**)
17	Steady speed	11		120	10	20	346	5 (**)
18	Deceleration	12	-0,69	120-80	16	34	362	5 (**)
19	Deceleration		-1,04	80-50	8		370	5 (**)
20	Deceleration, clutch disengaged							
			-1,39	50-0	10		380	K _s (*)
21	Idle	13			20	20	400	PM (*)

(*) PM = gearbox in neutral, clutch engaged.

First or fifth gear engaged, clutch disengaged.

(**) Additional gears can be used according to manufacturer recommendations if the vehicle is equipped with a transmission with more than five gears.



Σχήμα 15: Τυπικό προφίλ ταχύτητας οχήματος για εκτός πόλης κίνηση, όπως αυτό προσδιορίζεται και αναλύεται στην οδηγία 70/220/EEC του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου

Όσον αφορά τις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση παραθέτουμε τον παρακάτω πίνακα:

Χρόνος έναρξης (s)	0
Χρόνος λήξης (s)	400
Τύπος αλγορίθμου	Μεταβλητού βήματος
Αλγόριθμος επίλυσης	ode23tb(stiff/TR-BDF2)
Μέγιστο βήμα	auto
Σχετική ανοχή	$1 \cdot 10^{-3}$
Ελάχιστο βήμα	auto
Απόλυτη ανοχή	auto
Αρχικό βήμα	auto
Πλήθος διαδοχικών ελάχιστων βημάτων	1
Μέθοδος επανεκκίνησης	Fast
Επιλυτής μεθόδου Jacobian	auto

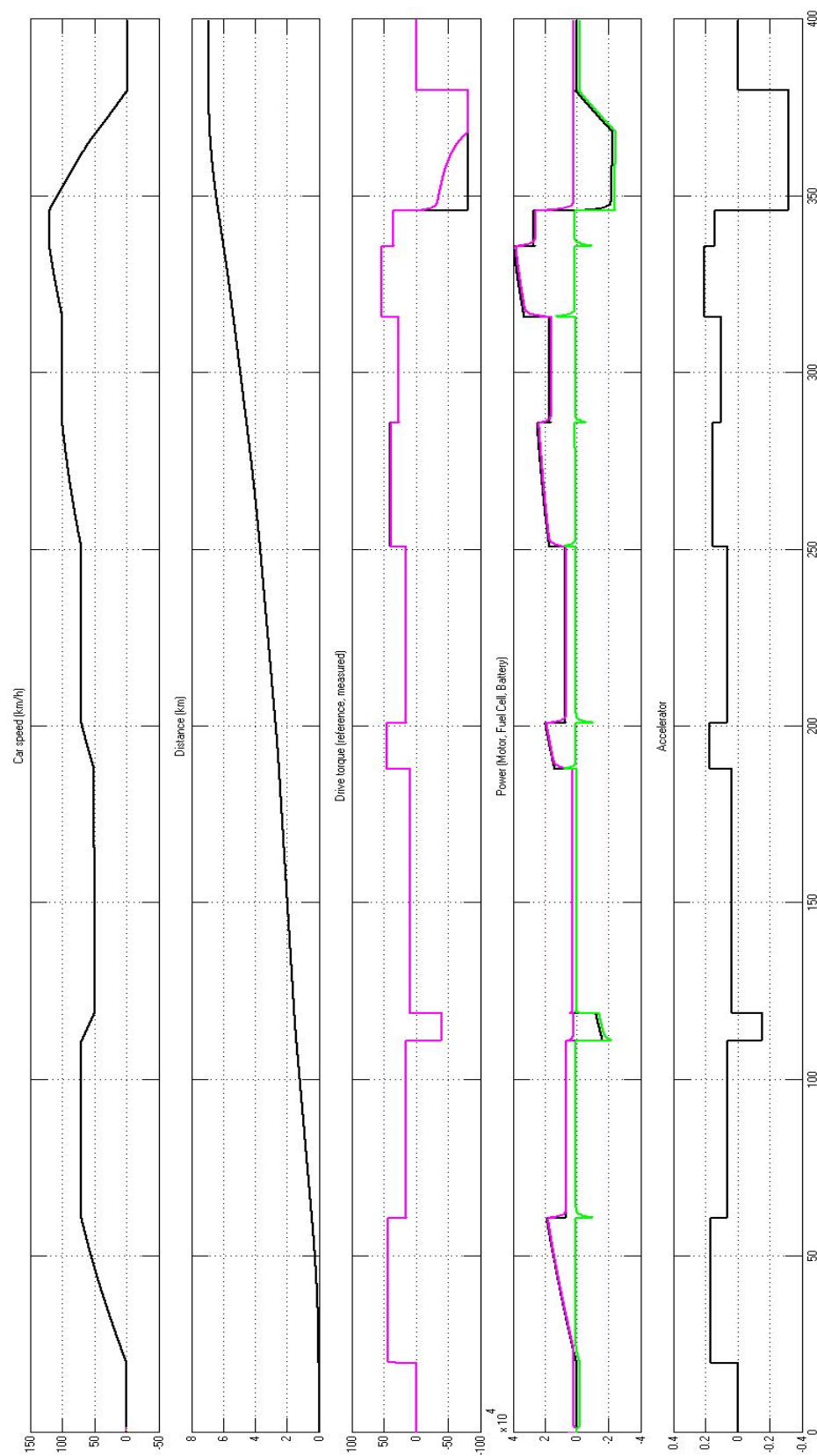
Πίνακας 7

Αρχικοποίηση παραμέτρων για προσομοίωση

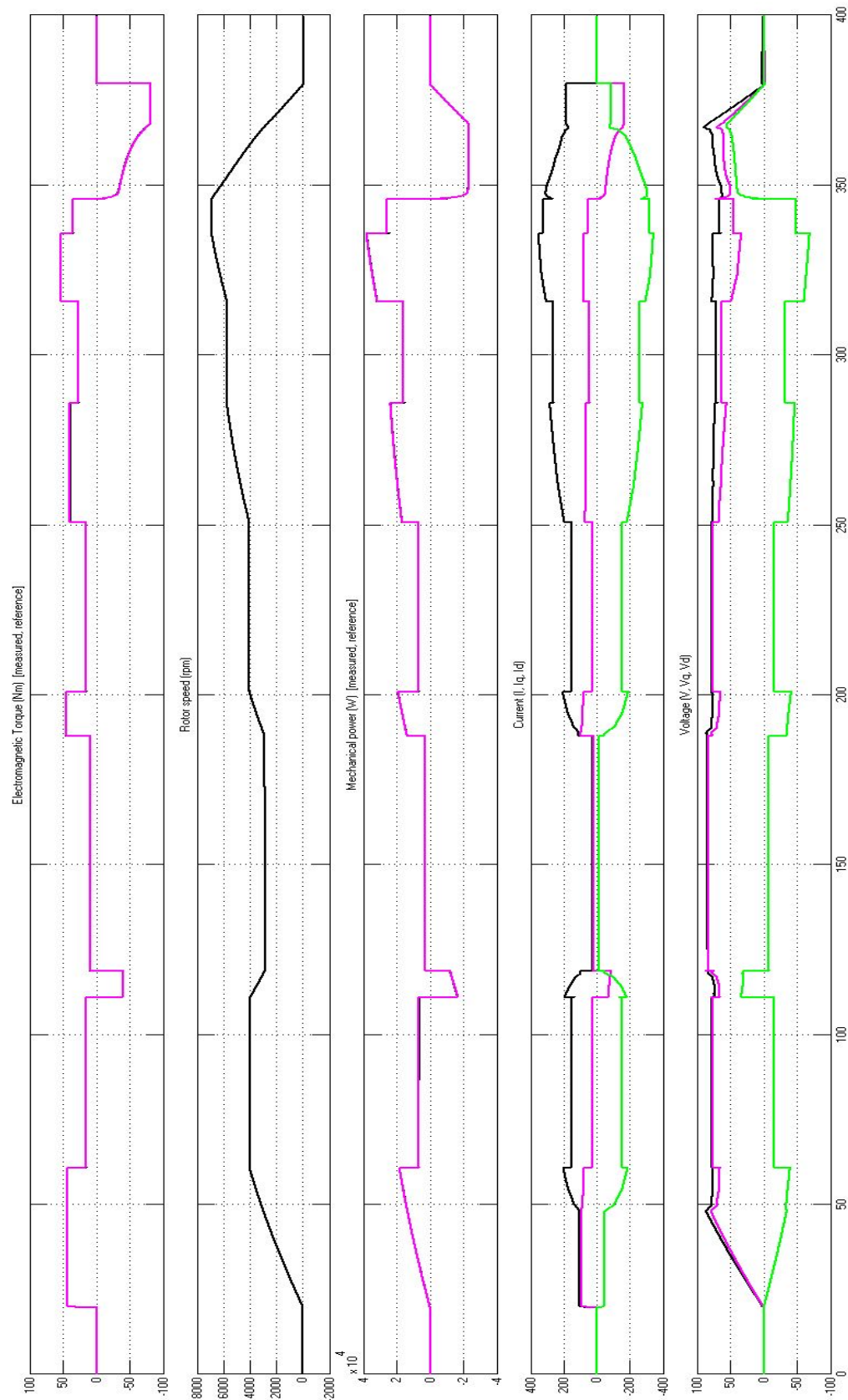
Συνοπτικά λοιπόν το όχημα ανοίγει τον κινητήρα τη χρονική στιγμή ($t=0$ s) και παραμένει σε στάση για 20 δευτερόλεπτα. Έπειτα, το όχημα ξεκινά από στάση ($t = 20$ s) και φτάνει στα 70 km/h σε χρόνο 41 s ($t = 61$ s) όπου και διατηρεί την ταχύτητα αυτή για τα επόμενα 50 s, όπου και αρχίζει να επιβραδύνει ($t = 111$ s). Σε χρόνο 8 s ($t = 119$ s), η ταχύτητα έχει μειωθεί στα 50 km/h, όπου και την διατηρεί για χρονικό διάστημα 69 s, στο τέλος του οποίου ($t = 188$ s) αρχίζει πάλι την επιτάχυνση. Η επιτάχυνση διαρκεί 13 s και το όχημα αυξάνει την ταχύτητά του ($t=201$ s) σε περίπου 70 km/h. Για τα επόμενα 50 s κινείται με σταθερή ταχύτητα για να επιταχύνει και πάλι στον χρόνο ($t = 251$ s) ώστε να αυξήσει την ταχύτητά του σε 100 km/h μέσα σε διάστημα 35 s ($t = 286$ s). Αφού παραμένει σε αυτή την ταχύτητα για 30 s, επιταχύνει ($t = 316$ s) έως την ταχύτητα των 120 km/h που την επιτυγχάνει στο χρόνο ($t = 336$ s). Εντός των επομένων 10 s, η ταχύτητα παραμένει σταθερή και ίση με 120 km/h, ενώ στο χρόνο ($t = 346$ s) αρχίζει η επιβράδυνση του οχήματος ώστε στο χρόνο ($t = 380$ s) το όχημα να έχει ακινητοποιηθεί. Έπειτα παραμένει με αναμμένο τον κινητήρα για 20 s όπου και κλείνει τον κινητήρα τη χρονική στιγμή ($t=400$ s).

Στα παρακάτω διαγράμματα παρατίθενται τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων προσομοίωσης του αυτοκινήτου Honda FCX Clarity. Συγκεκριμένα στα παρακάτω διαγράμματα με μαύρη γραμμή αναπαρίσταται το πρώτο στοιχείο του κάθε όρου μέσα στην παρένθεση των λεζάντων κάτω από τα διαγράμματα, με ροζ ο δεύτερος όρος και με πράσινο ο τρίτος όρος.

5.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

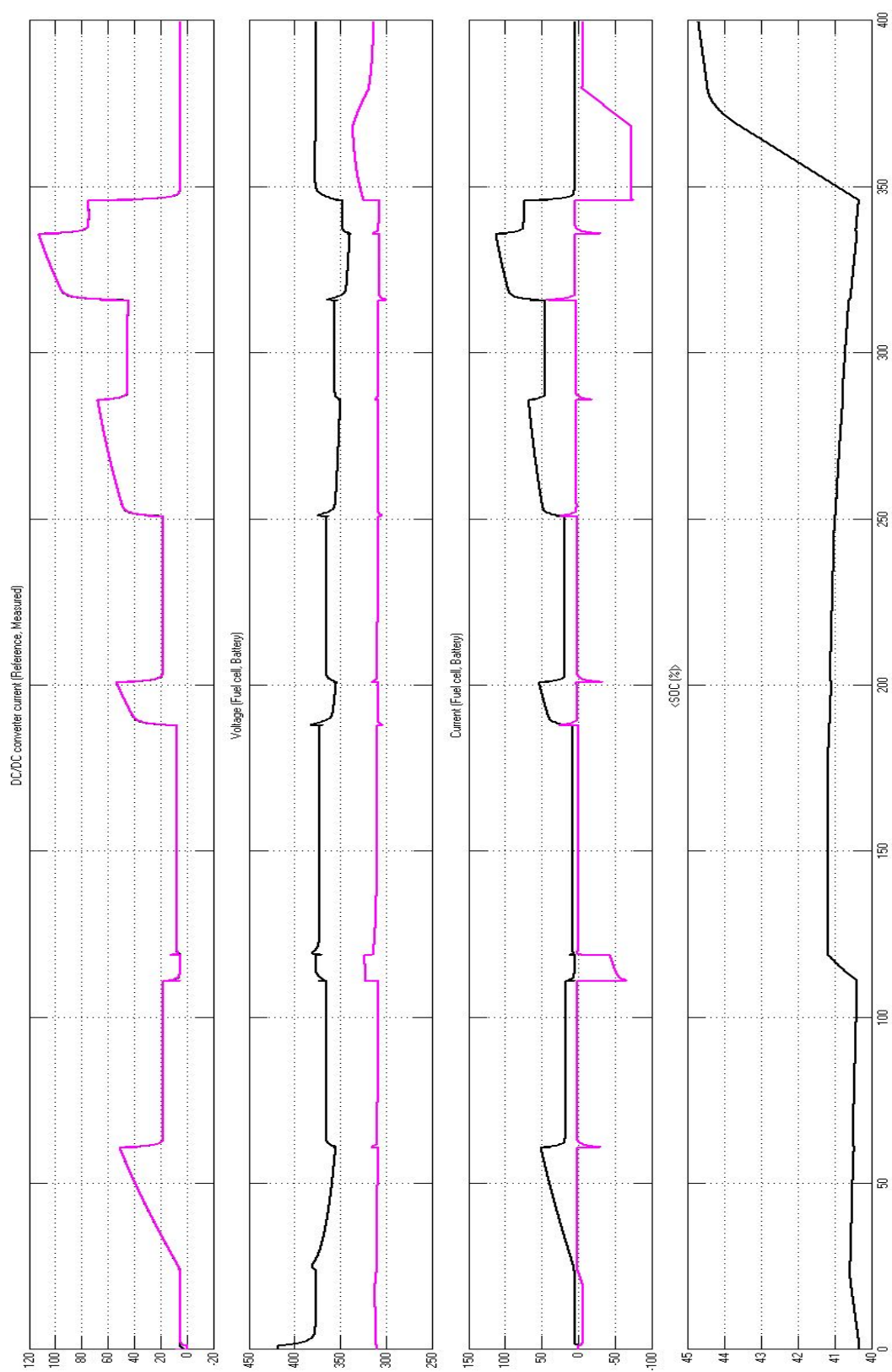
**Διάγραμμα 7**

Ταχύτητα αυτοκινήτου, Διανυθείσα απόσταση, Ροπή οδήγησης (εκτιμώμενη, μετρήσιμη), Ισχύς (κινητήρας, κυψέλη καυσίμου, συσσωρευτής), Θέση πεντάλ γκαζιού

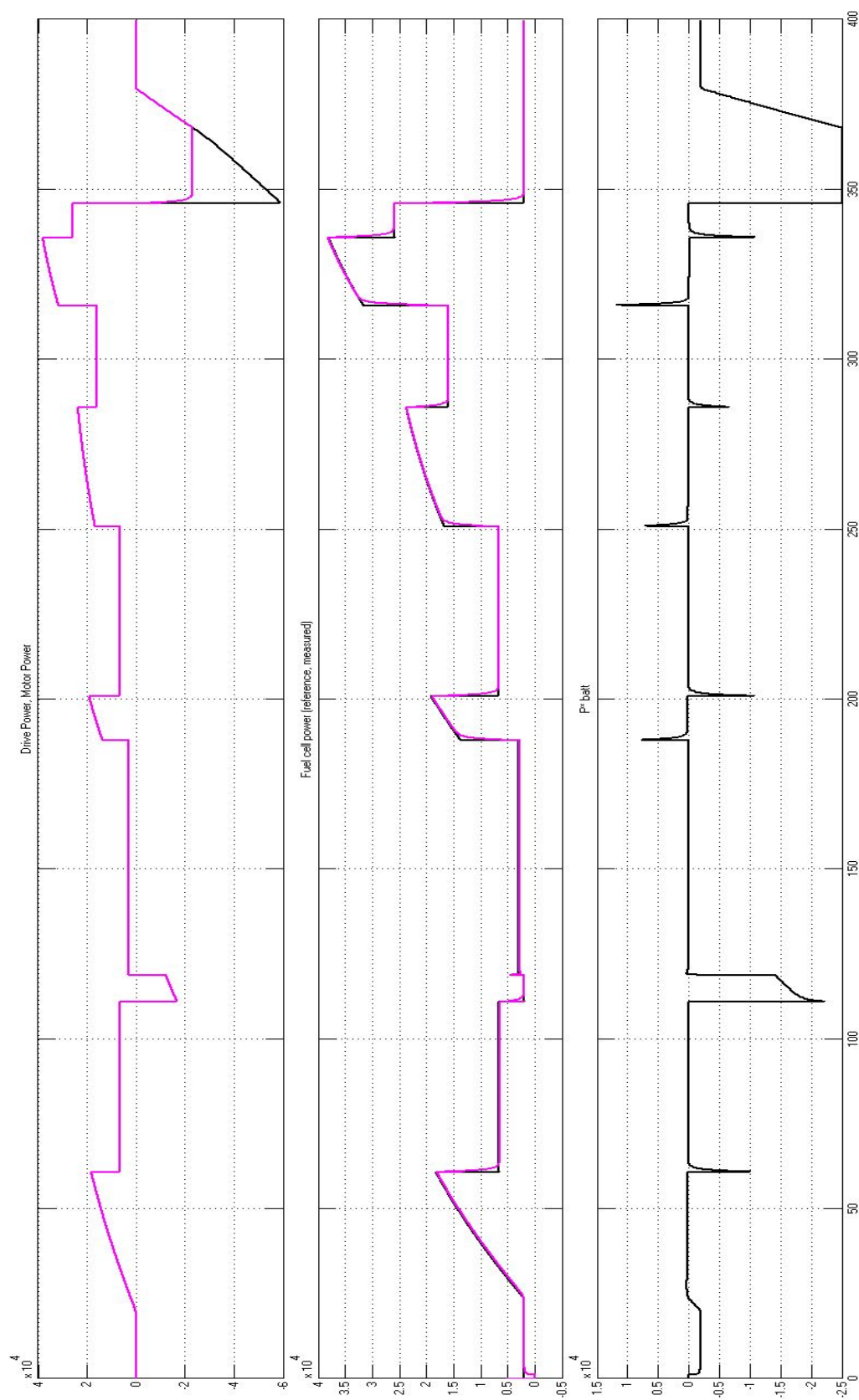


Διάγραμμα 8

Ηλεκτρομαγνητική ροπή (εκτιμώμενη, μετρήσιμη), ταχύτητα ρότορα, μηχανική ισχύς (εκτιμώμενη, μετρήσιμη), ρεύμα (I_q, I_d), τάση (V_q, V_d)

**Διάγραμμα 9**

Ρεύμα μετατροπέα DC/DC (εκτιμώμενη, μετρήσιμη), τάση (κυψέλη καυσίμου, μπαταρία), ρεύμα (κυψέλη καυσίμου, μπαταρία), κατάσταση φόρτισης συσσωρευτή

**Διάγραμμα 10**

Ισχύς πραγματική κινητήρα, Ισχύς θεωρητική κινητήρα, Ισχύς κυψέλης καυσίμου εκτιμώμενη,
Ισχύς κυψέλης καυσίμου μετρήσιμη, Ισχύς συσσωρευτή

5.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων προσομοίωσης

Φάση 1 ($t=0 \text{ sec}$ έως $t=20 \text{ sec}$)

Στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα το αυτοκίνητο έχει ενεργοποιημένο κινητήρα, αλλά παραμένει ακίνητο. Επομένως, η τιμή της θέσης του πεντάλ γκαζιού τίθεται ίση με 0 και ακολούθως μηδενική θα είναι και η ταχύτητα όπως επίσης και διανυθείσα απόσταση (Διάγραμμα 7). Επίσης μηδενική τιμή θα έχουν και τα διαγράμματα μηχανικής ισχύος και ροπής οδήγησης. Βέβαια στο διάγραμμα 9 παρατηρούμε μία πτώση τάσης των συσσωρευτών λόγω της απορρόφησης ενέργειας από αυτούς προκειμένου να εκκινηθεί το σύστημα. Επίσης, προκειμένου να λειτουργεί ο ηλεκτροκινητήρας πρέπει να υπάρχει και παροχή υδρογόνου και οξυγόνου στην κυψέλη καυσίμου προκειμένου να έχουμε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η έστω και μικρή αρχικά ισχύς της κυψέλης καυσίμου φαίνεται στο διάγραμμα 10. Επίσης παρατηρούμε ότι στο διάγραμμα 9 υπάρχει φόρτιση των συσσωρευτών στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, καθώς ύστερα από την πτώση τάσης τους προκειμένου να εκκινηθεί ο κινητήρας και δεδομένου ότι η ηλεκτρική ενέργεια που παράγει η κυψέλη καυσίμου δεν χρειάζεται προκειμένου να κινείται το αυτοκίνητο ακόμα, χρησιμοποιείται για την φόρτιση των συσσωρευτών.

Φάση 2 ($t=20 \text{ sec}$ έως $t=61 \text{ sec}$)

Με τη θέση του πεντάλ στο 0.169 το αυτοκίνητο ξεκινά να επιταχύνει προκειμένου μέχρι και το πέρας του χρονικού διαστήματος να έχει φτάσει την ταχύτητα των 70km/h. Προφανώς στα αντίστοιχα διαγράμματα ροπής διαγράμματα μηχανικής ισχύος και ροπής οδήγησης παρατηρούμε μία αύξηση της μηχανικής ισχύος, αλλά και της ροπής οδήγησης. Επίσης, λόγω της ανάγκης μας για αύξηση της ταχύτητας, ολοένα και περισσότερο υδρογόνο θα χρειαζόμαστε στην κυψέλη καυσίμου, οπότε και περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια θα χρειάζεται στο σύστημα (Διάγραμμα 8), άρα και μεγαλύτερη η ισχύς της κυψέλης καυσίμου. Φυσικό επακόλουθο η αύξηση των στροφών ανά λεπτό του ρότορα και η ελάχιστη μείωση της τιμής φόρτισης του συσσωρευτή λόγω αναγκών του συστήματος. Επίσης παρατηρούμε αύξηση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής και μείωση της τάσης της κυψέλης καυσίμου.

Φάση 3 ($t=61 \text{ sec}$ έως $t=111 \text{ sec}$)

Τώρα το όχημα μας θέλουμε να διατηρήσει την ταχύτητα των 70 km/h, επομένως πρέπει να διατηρήσουμε την θέση του πεντάλ γκαζιού στο 0.061 ώστε να καλυφθούν οι διάφορες απώλειες ενέργειας (τριβές, κλπ). Η ροπή οδήγησης, η μηχανική ισχύς, η ηλεκτρομαγνητική ροπή και η ισχύς της κυψέλης καυσίμου, ύστερα από μία μικρή κάθετη πτώση στην τιμή τους θα παραμείνουν σταθερές αφού οι ενεργειακές μας απαιτήσεις στο

συγκεκριμένο χρονικό διάστημα είναι μικρότερες. Επίσης σταθερές και χωρίς πτώση προφανώς θα είναι και οι στροφές του ρότορα προκειμένου να υπάρξει διατήρηση της ταχύτητας. Όσον αφορά την φόρτιση των συσσωρευτών μέχρι και το πέρας του συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος συνεχίζουν να ακολουθούν μία συγκεκριμένη πτωτική πορεία προκειμένου να καλύψουν τις ανάγκες του συστήματος, μέχρι να επιστρέψουν στην αρχική τιμή φόρτισης τους και να χρειαστεί εκ νέου φόρτιση τους από την κυψέλη καυσίμου.

Φάση 4 ($t=111 \text{ sec}$ έως $t=119 \text{ sec}$)

Στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα θέλουμε να μειώσουμε την ταχύτητα του αυτοκινήτου στα 50 km/h και επειδή στο σύστημα δεν έχουμε σαν είσοδο και τη θέση του πεντάλ φρένου, θα δώσουμε αρνητική τιμή στη θέση του πεντάλ γκαζιού. Συγκεκριμένα η τιμή που δόθηκε ήταν -0.157. Τώρα έχουμε λειτουργία ανάκτησης ενέργειας και ο ηλεκτροκινητήρας δουλεύει αντίστροφα (ως γεννήτρια), όπου ο συσσωρευτής απορροφά ενέργεια με την τάση του να είναι μεγαλύτερη της ονομαστικής του. Προφανώς θα έχουμε μείωση της ισχύος στα αντίστοιχα διαγράμματα και της ροπής οδήγησης. Επίσης έχουμε μείωση της ηλεκτρομαγνητικής ροπής των στροφών του ρότορα. Τέλος, θα έχουμε μείωση της ισχύος του συσσωρευτή, αφού δεν υπάρχει ανάγκη για ηλεκτρική ενέργεια στη πέδηση αλλά και φόρτιση του συσσωρευτή από την κυψέλη καυσίμου.

Φάση 5 ($t=119 \text{ sec}$ έως $t=188 \text{ sec}$)

Πάλι έχουμε ανάγκη για διατήρηση της ταχύτητας, αυτή τη φορά χαμηλότερης (50 km/h), οπότε και θέτουμε την τιμή του πετάλ γκαζιού στην τιμή 0.0383. Η ροπή οδήγησης θα παρουσιάσει μία στιγμιαία αύξηση και έπειτα θα διατηρήσει σταθερή πορεία μέχρι και το πέρας του χρονικού διαστήματος. Παρόμοια συμπεριφορά θα έχουν και οι καμπύλες ισχύος στα υπόλοιπα διαγράμματα με διαφορετικής κλίμακας στιγμιαίας αύξησης η κάθε μία και μετέπειτα σταθερής πορείας συμπεριφορά. Εννοείται ότι οι στροφές του ρότορα θα διατηρηθούν και δεν θα παρουσιάσουν την στιγμιαία αύξηση που βλέπουμε στα προηγούμενα διαγράμματα. Τέλος, η φόρτιση των συσσωρευτών θα αρχίσει και πάλι να παρουσιάζει μία πτωτική πορεία.

Φάση 6 ($t=188 \text{ sec}$ έως $t=201 \text{ sec}$)

Το όχημα πρέπει και πάλι να επιταχύνει προκειμένου στο τέλος του χρονικού διαστήματος να έχει φτάσει και πάλι την ταχύτητα των 70 km/h με την τιμή στο πεντάλ γκαζιού αυτή τη φορά να είναι ίση με 0.177. Φυσικά θα έχουμε αύξηση της μηχανικής ισχύος, αύξηση των στροφών του ρότορα, αύξηση της ισχύος της κυψέλης καυσίμου, αύξηση της έντασης του ρεύματος και πτώση της τάσης στην κυψέλη καυσίμου. Επίσης θα έχουμε στιγμιαία αύξηση και μετέπειτα σταθερή πορεία της ροπής οδήγησης και της

ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Ακόμη η φόρτιση του συσσωρευτή θα συνεχίσει την πτωτική της πορεία.

Φάση 7 ($t=201 \text{ sec}$ έως $t=251 \text{ sec}$)

Οι συνθήκες μας επιβάλλουν πάλι να διατηρηθεί σταθερή η ταχύτητα των 70 km/h με την τιμή της θέσεως του πεντάλ γκαζιού να τίθεται ίση με 0.062. Επομένως πάλι θα έχουμε στιγμιαία μείωση της ροπής οδήγησης και εν συνεχεία σταθερή πορεία. Ανάλογη συμπεριφορά βλέπουμε και στις καμπύλες μηχανικής ισχύος και ισχύος κυψέλης καυσίμου, όπως επίσης και στην ηλεκτρομαγνητική ροπή αλλά και την ένταση του ρεύματος που διαρρέει το σύστημα. Σταθερή τιμή στις στροφές του ρότορα, ίδια με την τελική τιμή του χρονικού διαστήματος της φάσης 6. Επίσης, θα έχουμε στιγμιαία αύξηση της τάσης του συστήματος και μετέπειτα σταθερή πορεία. Η φόρτιση του συσσωρευτή παραμένει σταθερή στις πτωτικές τις τάσεις.

Φάση 8 ($t=251 \text{ sec}$ έως $t=286 \text{ sec}$)

Τώρα με τιμή στη θέση του πεντάλ γκαζιού ίση με 0.154 το αυτοκίνητο επιταχύνει και πάλι προκειμένου να φτάσει την ταχύτητα των 100 km/h. Η ροπή οδήγησης και η ηλεκτρομαγνητική ροπή ύστερα από μία στιγμιαία αύξηση συνεχίζουν να έχουν σταθερή πορεία μέχρι και το πέρας του χρονικού διαστήματος. Η μηχανική ισχύς, η ισχύς της κυψέλης καυσίμου και η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το σύστημα ύστερα από μία πάλι στιγμιαία αύξηση ακολουθούν μία ανοδική πορεία. Η τάση του συσσωρευτή λόγω επιτάχυνσης έχει μία ξαφνική πτώση και ύστερα ακολουθεί σταθερή πορεία. Επίσης, πτωτική πορεία παρουσιάζει και η τάση της κυψέλης καυσίμου. Αντίθετα, βλέπουμε μία αύξηση των στροφών του ρότορα λόγω επιταχύνσεως. Φυσικά εξακολουθεί να μειώνεται η κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή.

Φάση 9 ($t=286 \text{ sec}$ έως $t=316 \text{ sec}$)

Απαιτείται η διατήρηση της ταχύτητας των 100 km/h, οπότε και η τιμή της θέσης του πεντάλ γκαζιού τίθεται ίση με 0.104. Παρατηρούμε στιγμιαία μείωση και μετέπειτα σταθερή πορεία στη ροπή οδήγησης, στη μηχανική ισχύ, στην ισχύ της κυψέλης καυσίμου, στην ηλεκτρομαγνητική ροπή και στην ένταση του ρεύματος που διαρρέει την κυψέλη καυσίμου. Εννοείται ότι οι στροφές του ρότορα παραμένουν σταθερές για την διατήρηση της ταχύτητας. Στον συσσωρευτή παρατηρούμε στιγμιαία πτώση ισχύος, αλλά εν συνεχεία επαναφορά στην αρχική και μετέπειτα σταθερή πορεία μέχρι το τέλος του χρονικού διαστήματος. Παρατηρείται επίσης αύξηση στην τάση της κυψέλης καυσίμου. Όσον άφορα τη κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή συνεχίζει όλο και πιο απότομα την πτωτική του πορεία.

Φάση 10 ($t=316 \text{ sec}$ έως $t=336 \text{ sec}$)

Η τελευταία απόπειρα επιτάχυνσης του οχήματος αποσκοπεί στην επίτευξη του μεγαλύτερου ορίου ταχύτητας ίσο με 120 km/h και προϋποθέτει ότι η τιμή του πεντάλ γκαζιού θα είναι ίση με 0.206. Όπως και κατά τις προηγούμενες απόπειρες επιτάχυνσης του οχήματος έτσι και τώρα θα έχουμε ανάλογη συμπεριφορά των χαρακτηριστικών του αυτοκινήτου. Δηλαδή στιγμιαία αύξηση και μετέπειτα σταθερή πορεία θα παρουσιάσουν η ροπή οδήγησης και ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Στιγμιαία αύξηση και μετέπειτα ανοδική πορεία θα παρουσιάσουν τα διαγράμματα μηχανικής ισχύος, ισχύος κυψέλης καυσίμου και έντασης ρεύματος κυψέλης καυσίμου. Προφανώς οι στρόφες του ρότορα ολοένα και περισσότερο θα αυξάνονται. Όσον αφορά την ισχύ του συσσωρευτή παρατηρούμε μία στιγμιαία αύξηση και μετέπειτα σταθερή πορεία σε ελάχιστη υψηλότερη τιμή από την αμέσως προηγούμενη. Η τάση της κυψέλης καυσίμου προφανώς θα μειωθεί, ενώ συνεχίζεται η πτωτική πορεία της κατάστασης φόρτισης του συσσωρευτή.

Φάση 11 ($t=336 \text{ sec}$ έως $t=346 \text{ sec}$)

Σκοπός μας είναι να διατηρηθεί η ταχύτητα των 120 km/h για 10 sec, οπότε και θέτουμε την τιμή του πεντάλ γκαζιού ίση με 0.14. Η ροπή οδήγησης μειώνεται στιγμιαία και συνεχίζει σταθερή πορεία. Το ίδιο συμβαίνει και με την μηχανική ισχύ, την ισχύ της κυψέλης καυσίμου και την ένταση του ρεύματος στη κυψέλη καυσίμου. Η ισχύς του συσσωρευτή ύστερα από μία στιγμιαία συνεχίζει σε μία ελάχιστη χαμηλότερη τιμή να έχει σταθερή πορεία. Οι στρόφες του ρότορα παραμένουν σταθερές και ίσες με τις τελικές στρόφες του ρότορα στην φάση 10. Όσον αφορά την τάση της κυψέλης καυσίμου παρουσιάζει μία στιγμιαία αύξηση και μετέπειτα σταθερή πορεία, ενώ η τάση του συσσωρευτή παρουσιάζει στιγμιαία αύξηση και μετέπειτα σταθερή πορεία σε ελάχιστη μεγαλύτερη τιμή. Σχετικά με την κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή παρατηρούμε περαιτέρω πτώση μέχρι να φτάσει στην αρχική τιμή φόρτισης στο τέλος του χρονικού μας διαστήματος.

Φάση 12 ($t=346 \text{ sec}$ έως $t=380 \text{ sec}$)

Στη φάση αυτή πρέπει να επιβραδύνουμε από τα 120 km/h σε 0 km/h, οπότε και θα δώσουμε αρνητική τιμή στη θέση του πεντάλ γκαζιού ίση με -0.315. Προφανώς θα έχουμε στιγμιαία μείωση της ροπής οδήγησης και μετέπειτα σταθερή πορεία. Ανάλογη συμπεριφορά έχουν και τα διαγράμματα μηχανικής ισχύος, ισχύος κυψέλης καυσίμου, ισχύος συσσωρευτή, έντασης ρεύματος κυψέλης καυσίμου και συσσωρευτή. Εννοείται πως η ταχύτητα στρόφων του ρότορα θα μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί η τιμή του. Λόγω μείωσης έντασης ρεύματος θα έχουμε αύξηση τάσης σε κυψέλη καυσίμου και συσσωρευτή. Τέλος, λόγω διαδικασίας πεδήσεως, θα έχουμε ανάκτηση ενέργειας και άρα φόρτιση της κατάστασης του συσσωρευτή σε αρκετά υψηλότερη τιμή.

Φάση 13 ($t=380 \text{ sec}$ έως $t=400 \text{ sec}$)

Στην τελική αυτή φάση το όχημα βρίσκεται εν στάσει με αναμμένο τον κινητήρα για 20 δευτερόλεπτα. Προφανώς η τιμή του θέσεως πεντάλ γκαζιού θα είναι μηδενική. Μηδενική τιμή θα έχουν επίσης και τα διαγράμματα ταχύτητας, ροπής οδήγησης, μηχανικής ισχύος και ισχύος κυψέλης καυσίμου, έντασης ρεύματος κυψέλης καυσίμου και συσσωρευτή, στροφών ρότορα και τάσης σε κυψέλη καυσίμου και συσσωρευτή. Η κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή προφανώς δεν θα είναι μηδενική, αλλά θα έχει μία σχετικά μεγάλη τιμή προκειμένου όταν χρειάζεται να επανεκκινηθεί για οποιοδήποτε λόγο το αυτοκίνητο, να υπάρχει η δυνατότητα.

5.4 Σύγκριση σημάτων προσομοιώσεων

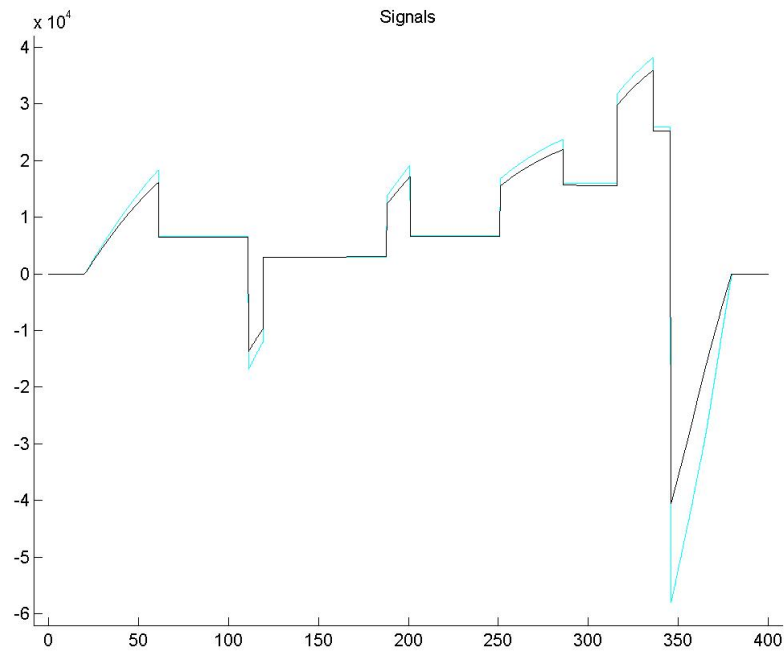
Παρακάτω θα παρατεθούν τα διαγράμματα σύγκρισης των δύο αυτοκινήτων σε κάθε χαρακτηριστικό που μπορούμε να πάρουμε από το Simulink. Αρχικά, παρατίθενται τα διαγράμματα σύγκρισης χαρακτηριστικών του υποσυστήματος διαχείρισης ενέργειας και εν συνεχεία τα διαγράμματα σύγκρισης χαρακτηριστικών του ολικού συστήματος του αυτοκινήτου. Για ευκολία στην σύγκριση των χαρακτηριστικών μεταξύ των δύο αυτοκινήτων παραθέτουμε και το διάγραμμα διαφοράς μεταξύ των δύο σημάτων σε κλίμακα ανάλογη με το διάγραμμα των χαρακτηριστικών των αυτοκινήτων, ως προς τον οριζόντιο άξονα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι σε κάθε διάγραμμα που υπάρχουν τα δύο σήματα των αυτοκινήτων, η γαλάζια γραμμή αναπαριστά το σήμα του αρχικού αυτοκινήτου (Honda FCX Clarity), ενώ με μαύρο χρώμα αναπαριστάται το σήμα του τροποποιημένου αυτοκινήτου.

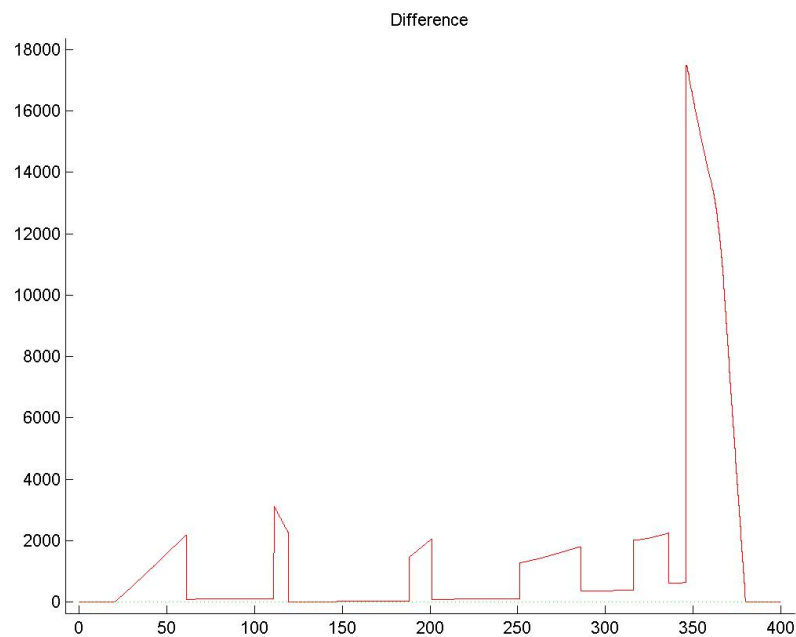
Ο χρόνος προσομοίωσης εδώ όπως και πριν τηρήθηκε ο ίδιος, δηλαδή 400 sec, ενώ δεν αλλάξαμε καμία από τις παραμέτρους που είχαμε στην προσομοίωση του αρχικού μοντέλου.

Το τροποποιημένο μοντέλο αυτοκινήτου υπέστη αλλαγές στο ηλεκτρικό υποσύστημα του και συγκεκριμένα στον τομέα της χωρητικότητας των συσσωρευτών, ενώ οι ουσιαστικότερες τροποποιήσεις έγιναν στο υποσύστημα δυναμικής του οχήματος. Συγκεκριμένα, όλες οι τροποποιήσεις έγιναν με βάση ένα μοντέλο αυτοκινήτου με περισσότερο σπορτίφ χαρακτηριστικά (Lamborghini Gallardo), προσπαθώντας να προσεγγιστεί δυναμικά όσο γίνεται περισσότερο στην προσομοίωση. Πιο συγκεκριμένα είχαμε αλλαγές εκτός της χωρητικότητας των μπαταριών, σε στοιχεία του οχήματος όπως τη μάζα του οχήματος, τον αεροδυναμικό συντελεστή, την οριζόντια απόσταση από τον μπροστινό αλλά και τον πίσω άξονα, την απόσταση του κέντρου βάρους του οχήματος από το έδαφος και της ακτίνας κύλισης. Όπως και πριν η προσομοίωση του τροποποιημένου αυτοκινήτου πραγματοποιήθηκε με βάση την ευρωπαϊκή οδηγία 70/220/EEC και χρησιμοποιώντας τη μέθοδο δοκιμής και λάθους. Οι θέσεις του πεντάλ γκαζιού κατά την προσομοίωση παρατίθενται παρακάτω (τα χρονικά διαστήματα παραμένουν ως έχουν κατά την αρχική προσομοίωση):

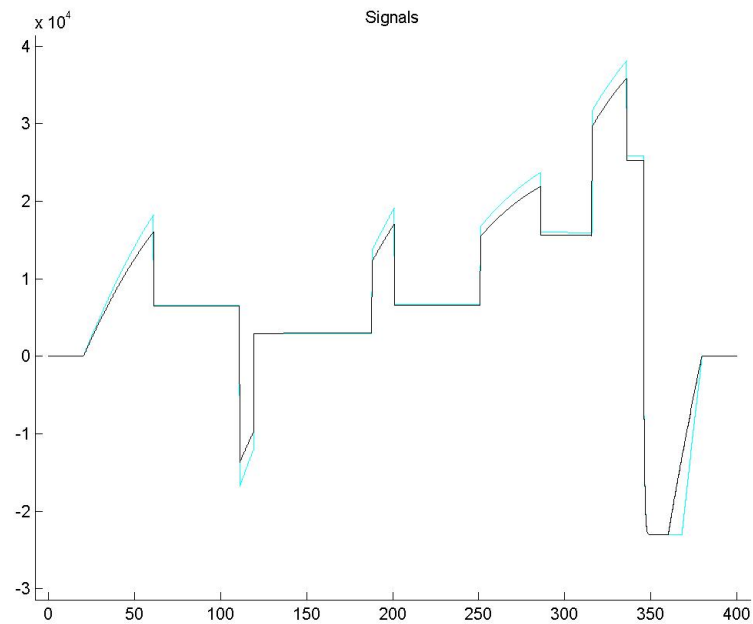
[0 0.146 0.059 -0.126 0.038 0.155 0.06 0.14 0.1 0.19 0.134 -0.216 0]



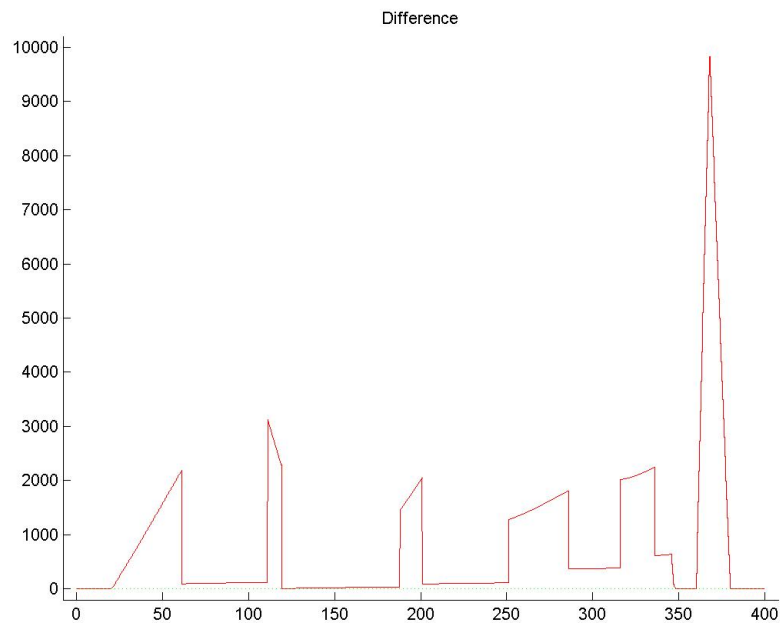
Διάγραμμα 11: Πραγματική ισχύς κινητήρα (Υποσύστημα διαχείρισης ενέργειας)



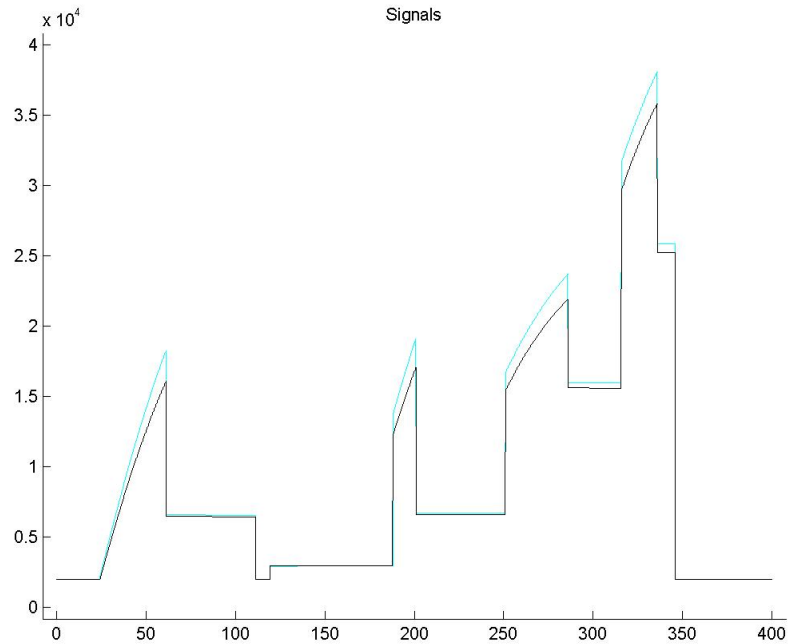
Διάγραμμα 12: Διαφορά σημάτων διαγράμματος πραγματικής ισχύος κινητήρα (Υποσύστημα διαχείρισης ενέργειας)



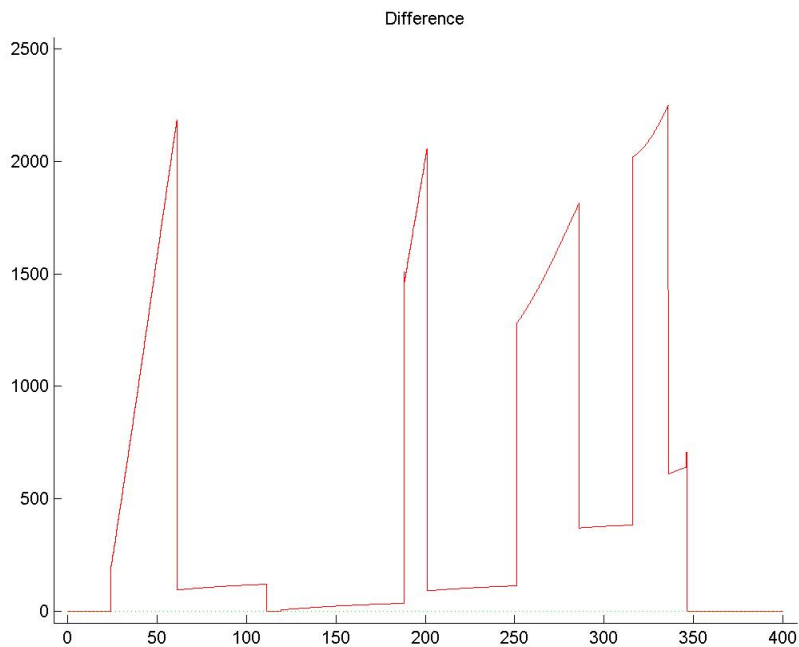
Διάγραμμα 13: Θεωρητική ισχύς κινητήρα (Υποσύστημα διαχείρισης ενέργειας)



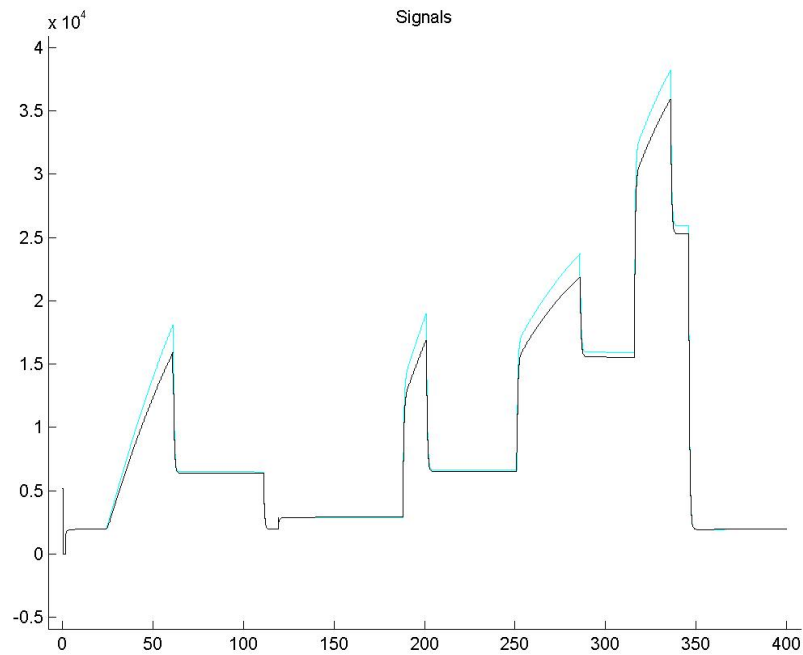
**Διάγραμμα 14: Διαφορά σημάτων διαγράμματος θεωρητικής ισχύος κινητήρα
(Υποσύστημα διαχείρισης ενέργειας)**



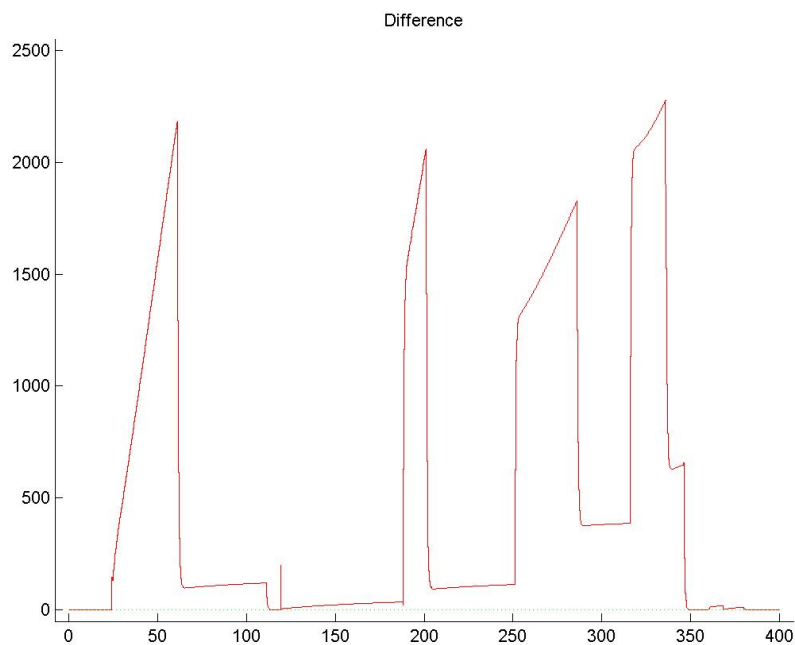
Διάγραμμα 15: Εκτιμώμενη ισχύς κυψέλης καυσίμου (Υποσύστημα διαχείρισης ενέργειας)



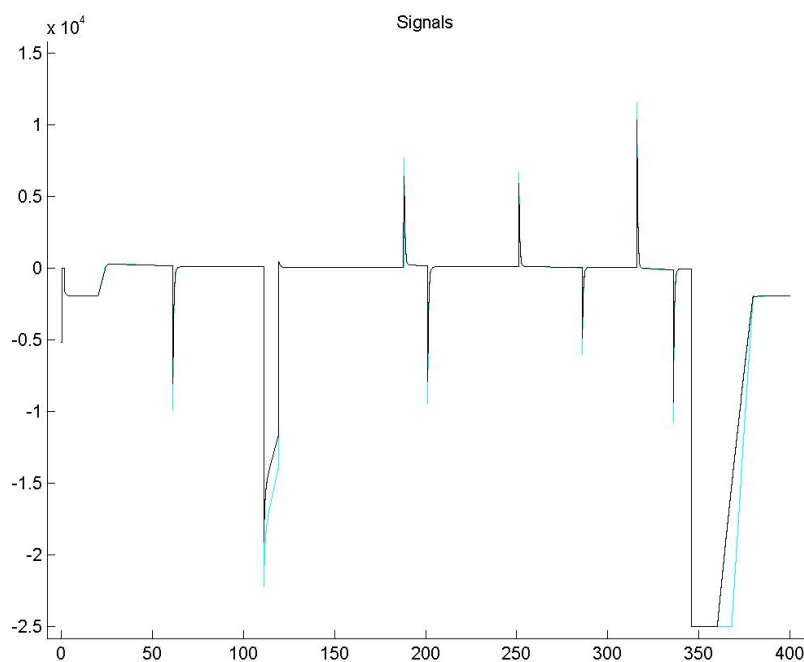
Διάγραμμα 16: Διαφορά σημάτων διαγράμματος εκτιμώμενης ισχύος κυψέλης καυσίμου (Υποσύστημα διαχείρισης ενέργειας)



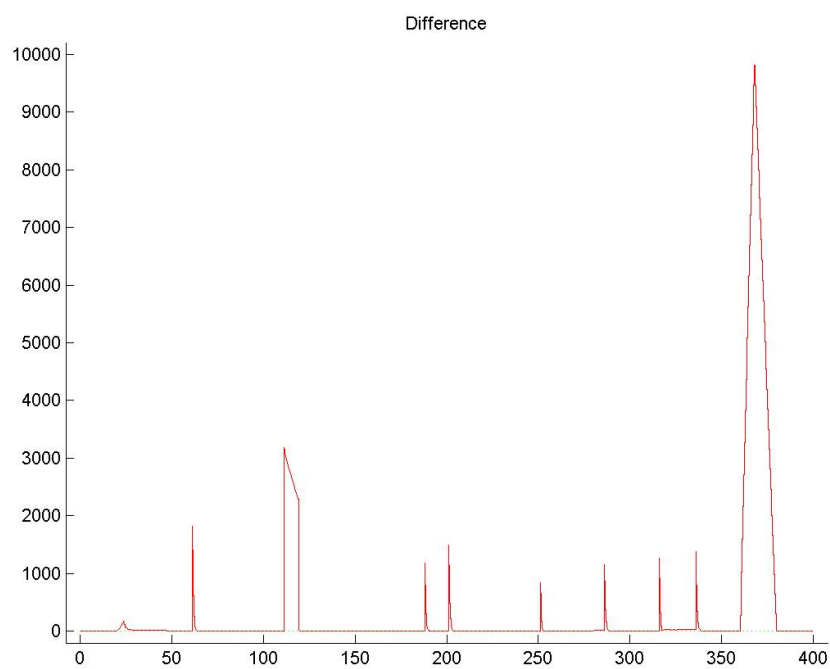
Διάγραμμα 17: Μετρήσιμη ισχύς κυψέλης καυσίμου (Υποσύστημα διαχείρισης ενέργειας)



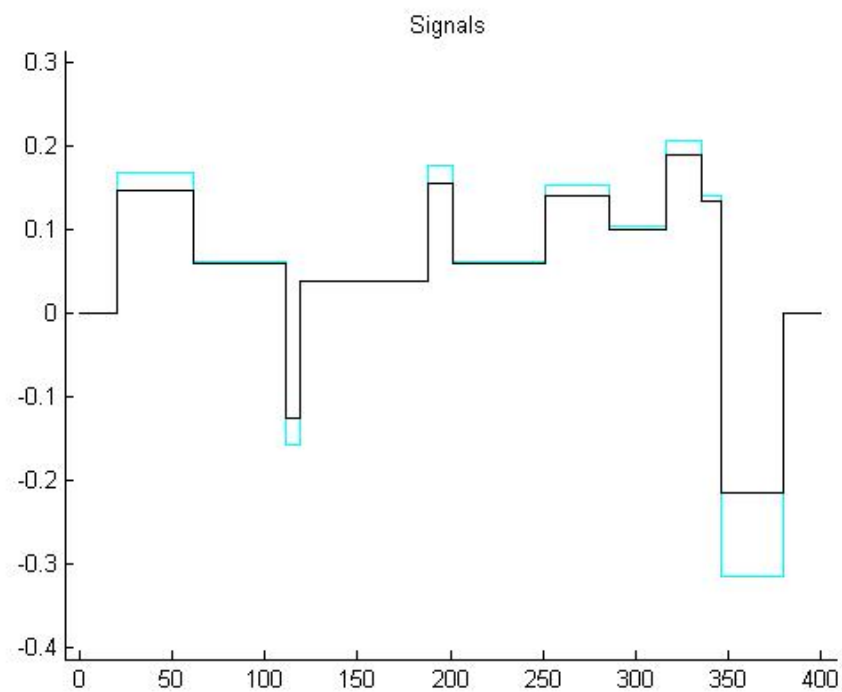
Διάγραμμα 18: Διαφορά σημάτων διαγράμματος μετρήσιμης ισχύος κυψέλης καυσίμου (Υποσύστημα διαχείρισης ενέργειας)



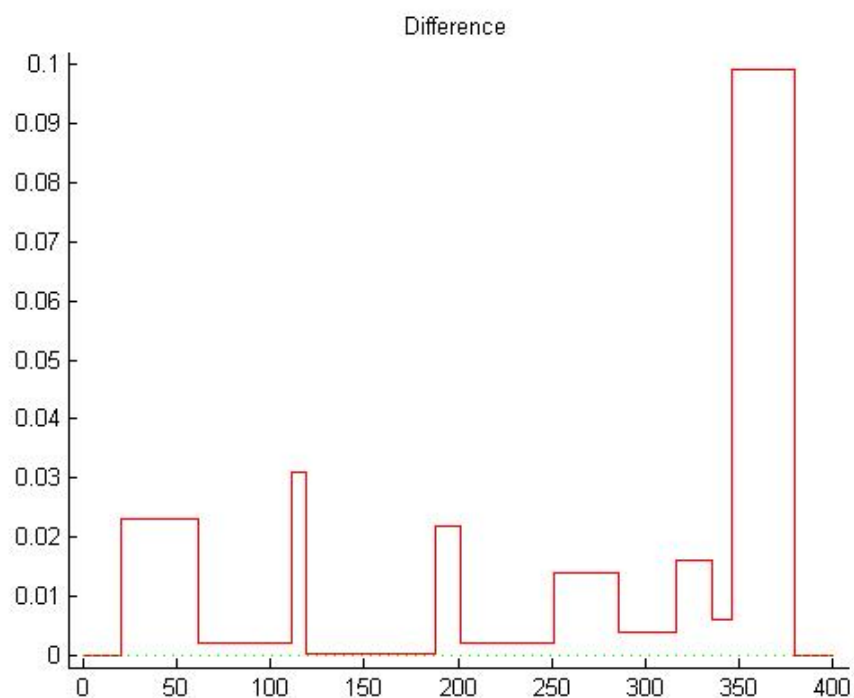
Διάγραμμα 19: Ισχύς συσσωρευτή (Υποσύστημα διαχείρισης ενέργειας)



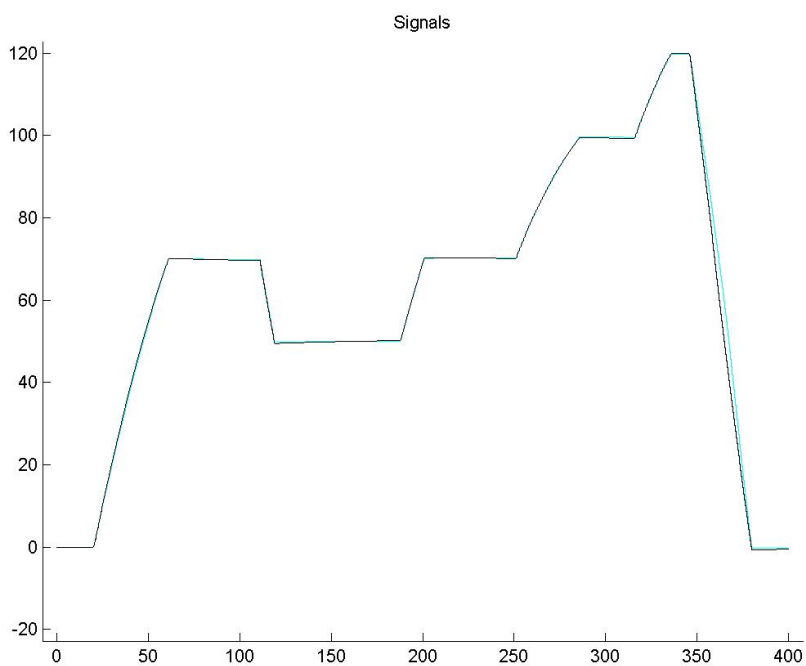
Διάγραμμα 20: Διαφορά σημάτων διαγράμματος ισχύος συσσωρευτή (Υποσύστημα διαχείρισης ενέργειας)



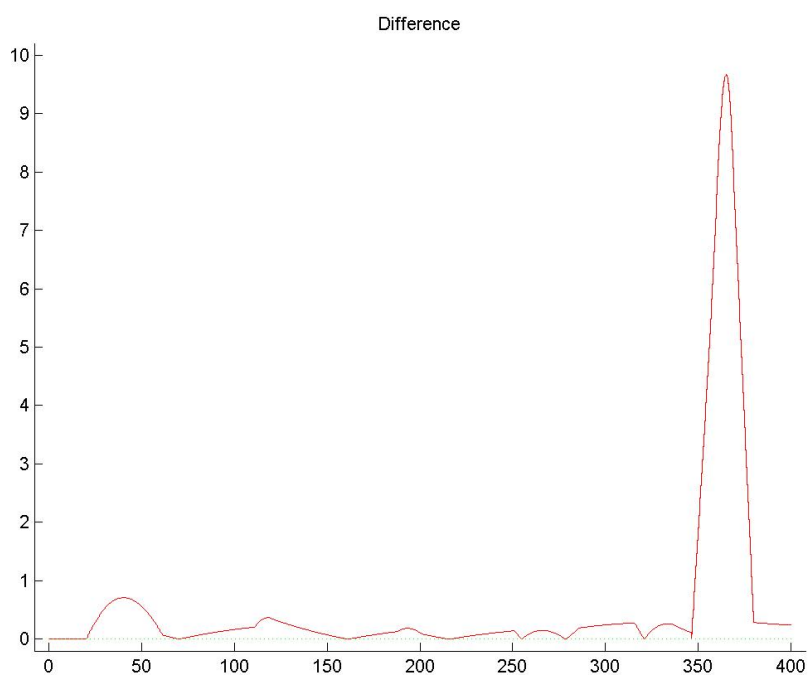
Διάγραμμα 21: Θέση πεντάλ γκαζιού



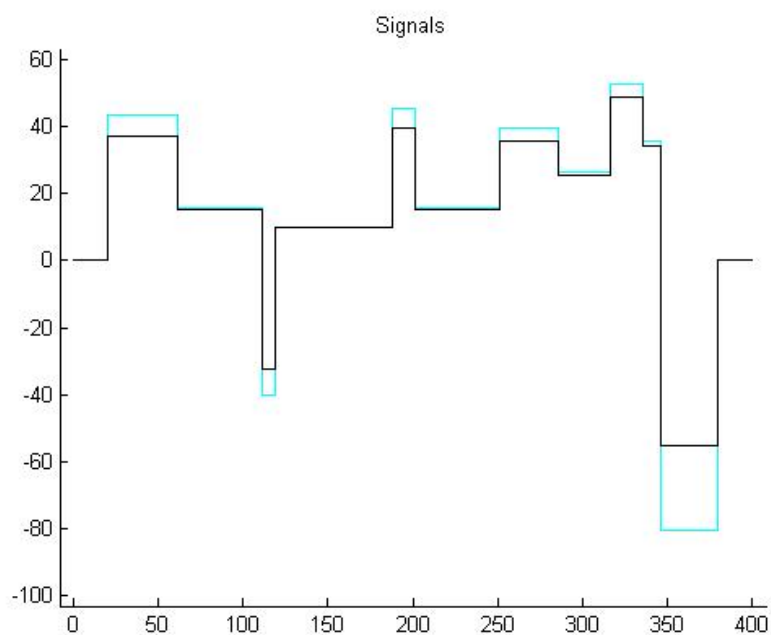
Διάγραμμα 22: Διαφορά σημάτων διαγράμματος θέσεως πεντάλ γκαζιού



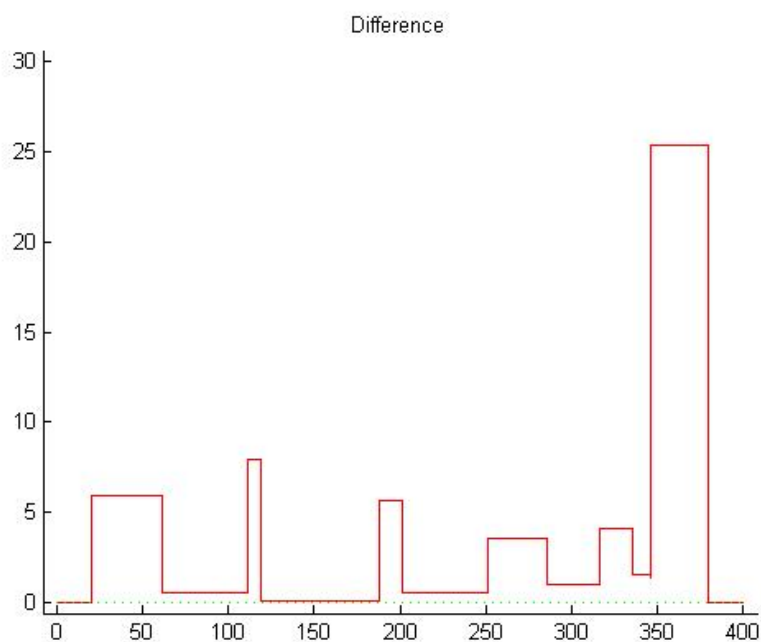
Διάγραμμα 23: Ταχύτητα αυτοκινήτου



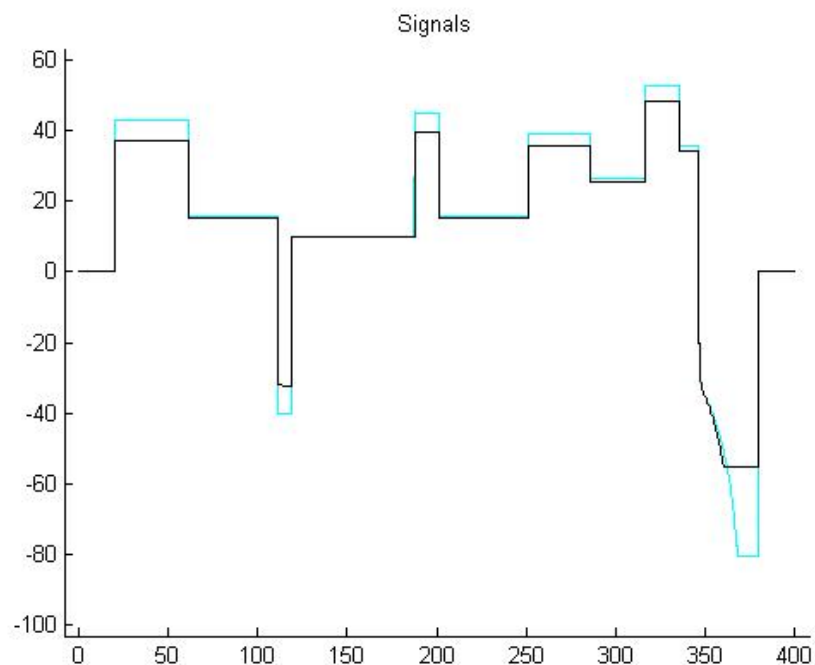
Διάγραμμα 24: Διαφορά σημάτων διαγράμματος ταχύτητας αυτοκινήτου



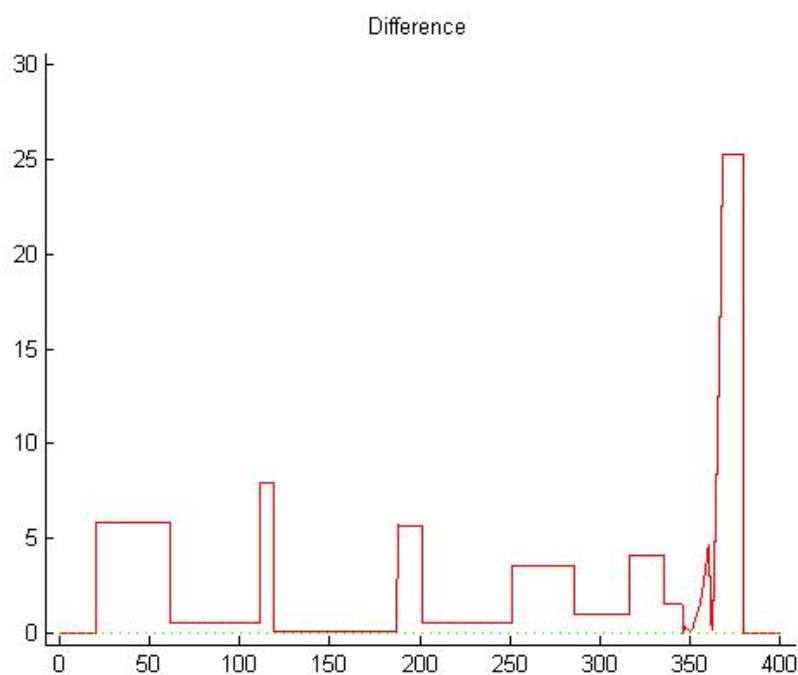
Διάγραμμα 25: Εκτιμώμενη ροπή οδήγησης



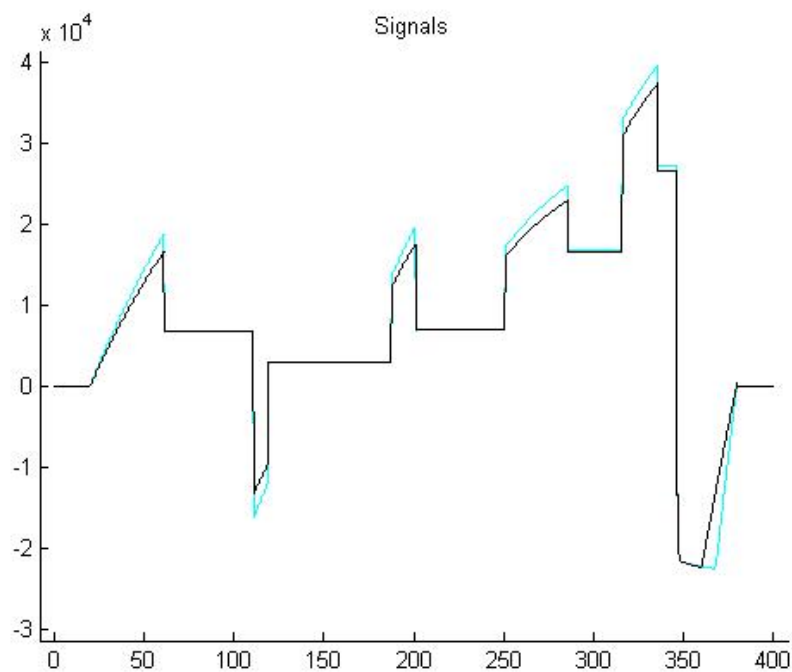
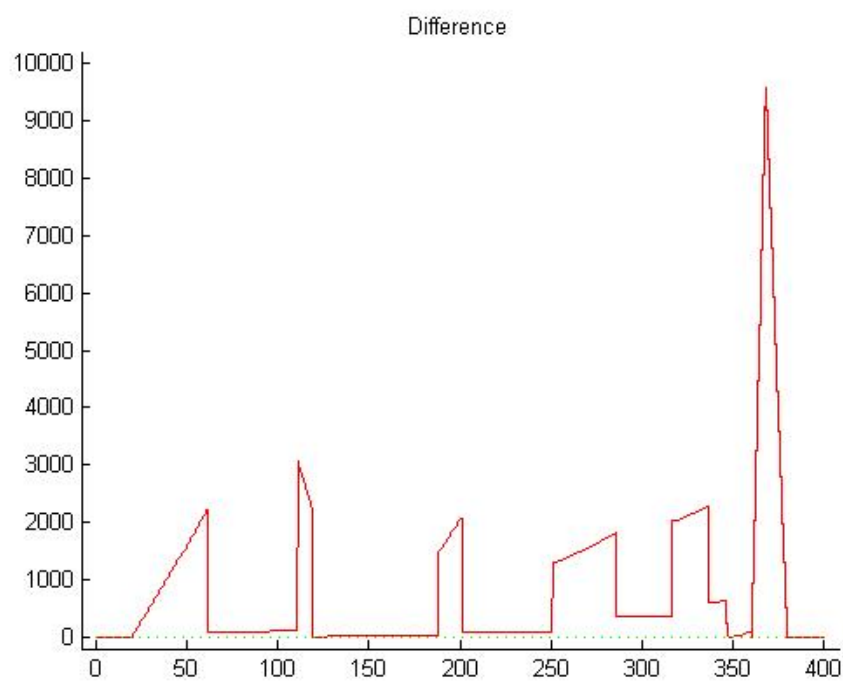
Διάγραμμα 26: Διαφορά σημάτων διαγράμματος εκτιμώμενης ροπής οδήγησης

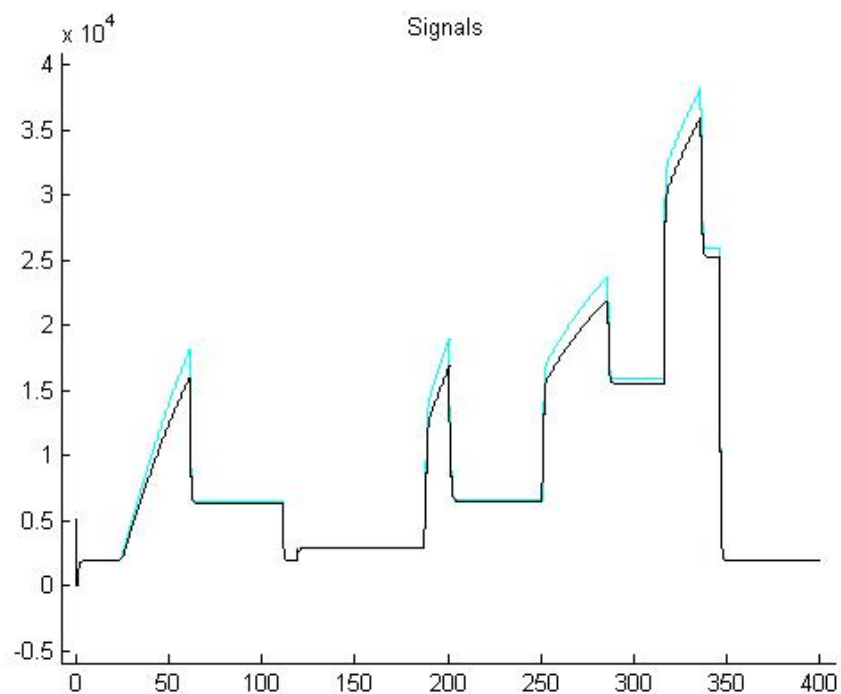


Διάγραμμα 27: Μετρήσιμη ροπή οδήγησης

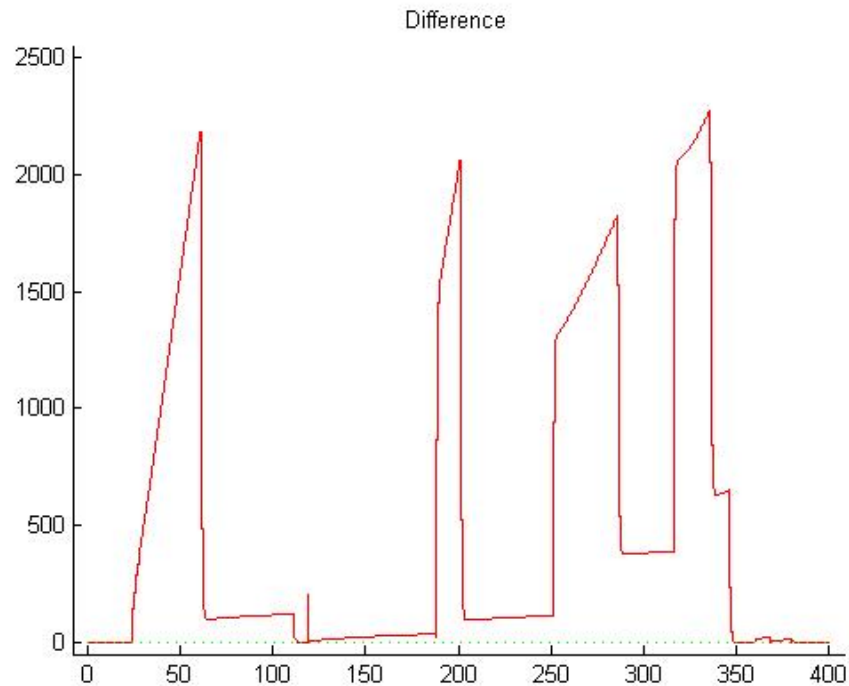


Διάγραμμα 28: Διαφορά σημάτων διαγράμματος μετρήσιμης ροπής οδήγησης

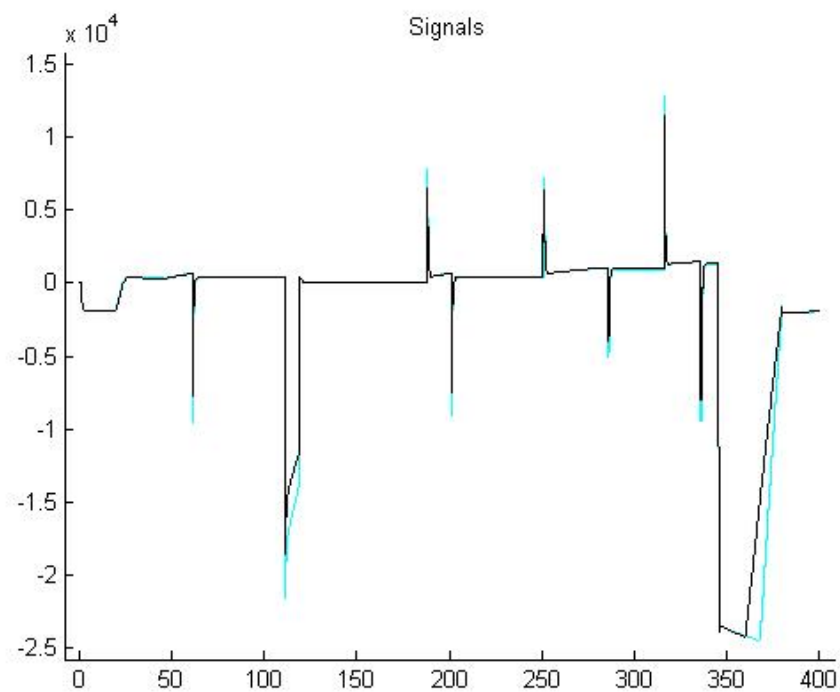
**Διάγραμμα 29: Ισχύς κινητήρα (Αυτοκίνητο)****Διάγραμμα 30: Διαφορά σημάτων διαγράμματος ισχύος κινητήρα (Αυτοκίνητο)**



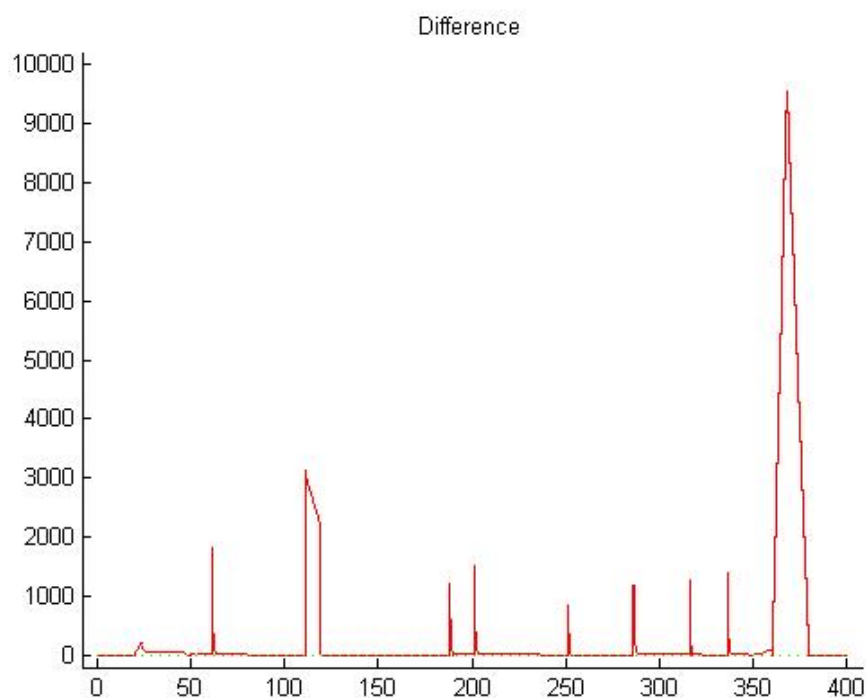
Διάγραμμα 31: Ισχύς κυψέλης καυσίμου (Αυτοκίνητο)



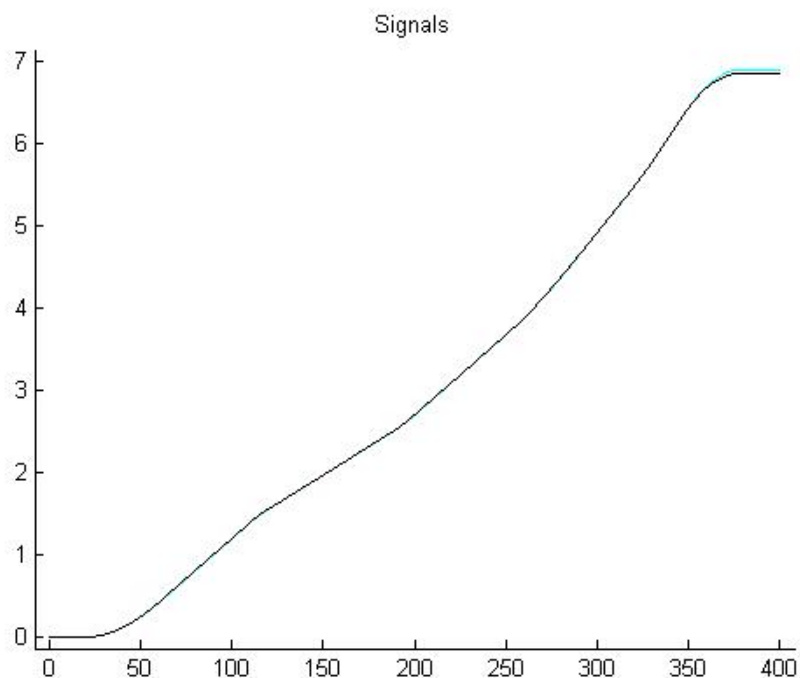
Διάγραμμα 32: Διαφορά σημάτων διαγράμματος ισχύος κυψέλης καυσίμου (Αυτοκίνητο)



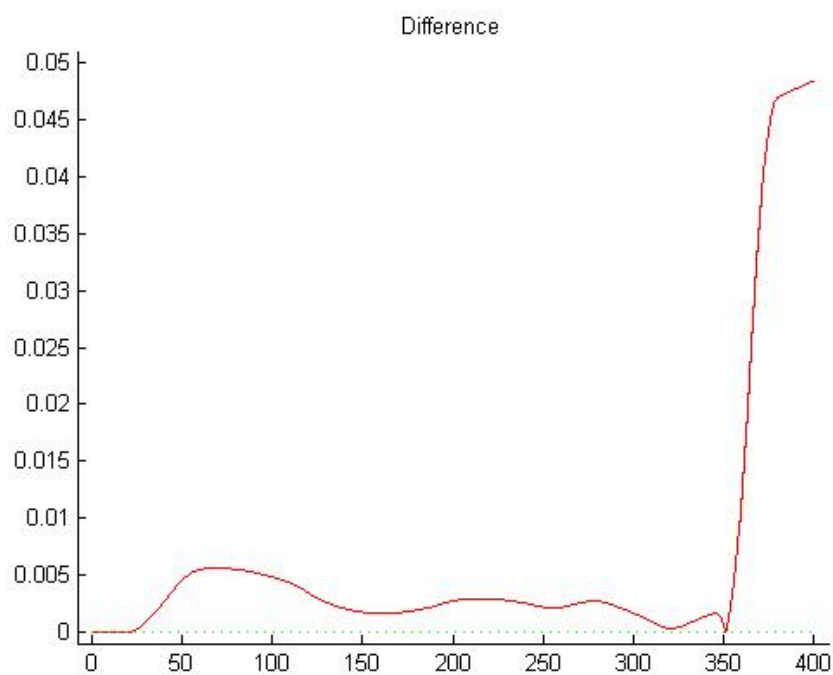
Διάγραμμα 33: Ισχύς συσσωρευτή (Αυτοκίνητο)



Διάγραμμα 34: Διαφορά σημάτων διαγράμματος ισχύος συσσωρευτή (Αυτοκίνητο)



Διάγραμμα 35: Διανυθείσα απόσταση



Διάγραμμα 36: Διαφορά σημάτων διαγράμματος διανυθείσας απόστασης

5.5 Σχολιασμός αποτελεσμάτων σύγκρισης προσομοιώσεων

Όπως έχουμε προαναφέρει και πρωτίτερα ο λόγος της προσομοίωσης λειτουργίας του αυτοκινήτου δεν είναι μόνο για να προσδιορίσουμε τη συμπεριφορά των διαφόρων χαρακτηριστικών του αυτοκινήτου κατά τη διάρκεια μίας κίνησης 400 δευτερολέπτων, αλλά και η προσπάθεια προσέγγισης του με ένα αυτοκίνητο με πιο σπορτίφ χαρακτηριστικά. Με λίγα λόγια μας ενδιαφέρει η δυνατότητα αξιοποίησης της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου σε ένα αυτοκίνητο επιδόσεων. Άλλωστε, είναι κατανοητό ότι τα περισσότερα ρυπογόνα αυτοκίνητα παραγωγής σήμερα είναι τα αυτοκίνητα επιδόσεων. Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα αυτών των αυτοκινήτων μόνο ενθαρρυντικές δεν είναι όσον αφορά την πράσινη ανάπτυξη της αυτοκίνησης. Αυτό βέβαια είναι και το δύσκολο καθώς η επιδίωξη υψηλών επιδόσεων σε αυτά τα αυτοκίνητα αντιβαίνει με την δυνατότητα να παραμείνουν φιλικά προς τον περιβάλλον.

Οι αλλαγές που έγιναν αφορούσαν το δυναμικό υποσύστημα του οχήματος και όσον αφορά το ηλεκτρικό υποσύστημα τροποποιήσαμε μόνο τη χωρητικότητα των μπαταριών, απόρροια της μεταβολής των δυναμικών στοιχείων του αυτοκινήτου, καθώς η μεταβολή οποιονδήποτε άλλων στοιχείων του ηλεκτρικού υποσυστήματος αποτελεί άγνωστο αντικείμενο για το γνωστικό μας πεδίο. Ομοίως, δεν κάναμε κάποια μετατροπή στο υποσύστημα διαχείρισης της ενέργειας, καθώς η οποιαδήποτε τροποποίηση στο συγκεκριμένο υποσύστημα απαιτεί πλήρη τροποποίηση του ηλεκτρικού υποσυστήματος, ώστε η διαχείριση της ενέργειας να γίνεται ορθολογικά και το αυτοκίνητο να έχει ομαλή λειτουργία.

- **Διάγραμμα ταχύτητας**

Όσον αφορά το διάγραμμα ταχύτητας φροντίσαμε να το χρησιμοποιήσουμε σαν κριτήριο σύγκρισης προκειμένου να συγκρίνουμε τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά των αυτοκινήτων. Έτσι ακολουθώντας το προφίλ ταχύτητας που υπαγορεύει η ευρωπαϊκή οδηγία 70/220/EEC προσπαθήσουμε να την εφαρμόσουμε και στα δύο αυτοκίνητα και όπως βλέπουμε και από το διάγραμμα 23 οι καμπύλες συμπεριφοράς και των δύο αυτοκινήτων είναι σχεδόν ταυτόσημες σε όλη σχεδόν τη διάρκεια της προσομοίωσης. Βέβαια υπάρχει μια μικρή απόκλιση στις καμπύλες ταχύτητας στο χρονικό διάστημα 346-380 δευτερόλεπτα, όπου και το αυτοκίνητο εκτελεί την επιβράδυνση αλλά δεν έχει κάποιο πρακτικό ενδιαφέρον καθώς είναι της τάξης του 3 με 4 τοις εκατό, οπότε και δεν επηρεάζει τη υπόθεση του κοινού κριτηρίου σύγκρισης. Ίσως εάν είχαμε μία αυτοματοποιημένη διαδικασία που να ρυθμίζαμε τις παραμέτρους και το αφήναμε να τρέξει περισσότερο, τελικά να συρρικνώναμε και αυτή την μικρή απόκλιση, αλλά και πάλι αυτό θα αποτελούσε μία επέκταση της διπλωματικής και δεν θα επηρέαζε ουσιαστικά το αντικείμενο μελέτης της παρούσας.

- **Διάγραμμα διανυθείσας απόστασης**

Το συγκεκριμένο διάγραμμα αποτελεί ουσιαστικά δική μας τροποποίηση και προσθήκη στο συνολικό μοντέλο του αυτοκινήτου. Το δημιουργήσαμε αφού αρχικά μετατρέψαμε τα km/h σε km/s με βάση το υπάρχον μπλοκ μετατροπής και έπειτα ολοκληρώσαμε την ταχύτητα για να πάρουμε την απόσταση σε km. Αυτό το κάναμε προκειμένου όντως να επαληθεύσουμε ότι και τα δύο αυτοκίνητα έχουν την ίδια ταχύτητα και άρα διανυθείσα απόσταση την κάθε χρονική στιγμή, έτσι ώστε να ικανοποιούν πλήρως τις προϋποθέσεις του κοινού κριτηρίου σύγκρισης. Αυτό που παρατηρούμε και σε αυτό το διάγραμμα είναι ότι όπως και στο διάγραμμα της ταχύτητας οι καμπύλες και για τα δύο αυτοκίνητα ταυτίζονται σχεδόν σε όλη την διάρκεια της προσομοίωσης (διάγραμμα 35) με μοναδική εξαίρεση το χρονικό διάστημα 346-380 δευτερόλεπτα όπου παρατηρούμε πάλι αυτή την μικρή απόκλιση της τάξης 3-4 τοις εκατό, όπως και στο διάγραμμα της ταχύτητας, η οποία μάλιστα δεν έχει και καμία πρακτική σημασία.

- **Διάγραμμα θέσεως πεντάλ γκαζιού**

Το συγκεκριμένο διάγραμμα κατασκευάστηκε με βάση κάποιες τιμές που δόθηκαν στη θέση του πεντάλ γκαζιού, οι οποίες είναι ξεχωριστές για κάθε αυτοκίνητο και δόθηκαν με βάση την ευρωπαϊκή οδηγία 70/220/EEC προκειμένου να δημιουργήσουν ένα ρεαλιστικό προφίλ ταχύτητας. Όπως είναι φανερό και στο συγκεκριμένο διάγραμμα (διάγραμμα 21) το τροποποιημένο αυτοκίνητο (μαύρη γραμμή) χρειάζεται σαφώς μικρότερη κλίση στο πεντάλ γκαζιού είτε για επιταχυνόμενη, είτε για επιβραδυνόμενη, είτε για κίνηση με σταθερή ταχύτητα, σε σχέση με το αρχικό μας αυτοκίνητο (γαλάζια γραμμή), προκειμένου να έχει την ίδια ταχύτητα σχεδόν σε κάθε χρονική στιγμή. Αυτό σημαίνει ότι οι αλλαγές που κάναμε στο δυναμικό υποσύστημα του αυτοκινήτου όπως επίσης και στην χωρητικότητα των μπαταριών, όσον αφορά το ηλεκτρικό υποσύστημα επαληθεύουν πλήρως τη προσπάθεια μας να προσεγγίσουμε το αυτοκίνητο με κυψέλες καυσίμου Honda FCX Clarity με ένα αυτοκίνητο με περισσότερο спорτίφ χαρακτηριστικά. Δηλαδή συνοπτικά βλέπουμε ότι το τροποποιημένο αυτοκίνητο απαιτεί λιγότερη ισχύ (μικρότερη κλίση του πεντάλ γκαζιού) προκειμένου να αποκτήσει την ίδια ταχύτητα σε κάθε χρονική στιγμή σε σχέση με το αρχικό μας αυτοκίνητο, πράγμα το οποίο θα δούμε ότι αποτυπώνεται καλύτερα στα επόμενα διαγράμματα αναλυτικής ισχύος σε διάφορα χαρακτηριστικά μέρη του αυτοκινήτου.

- **Διαγράμματα μηχανικής ισχύος**

Και στα δύο διαγράμματα (διάγραμμα 11 και διάγραμμα 13) παρατηρούμε ότι τα αυτοκίνητα παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά κατά τη διάρκεια όλης της προσομοίωσης, σχετικά με τη συμπεριφορά των καμπυλών τους. Πιο συγκεκριμένα περιμέναμε όπως είχαμε αναφέρει και πρωτίτερα ότι το τροποποιημένο αυτοκίνητο (μαύρη γραμμή) θα εμφάνιζε

εμφανώς μικρότερη ή τουλάχιστον ίση ανάγκη για μηχανική ισχύ σε σχέση με το αρχικό μας αυτοκίνητο (γαλάζια γραμμή) σε οποιαδήποτε μεταβολή της κινητικής του κατάστασης. Αυτό βέβαια είναι λογική απόρροια των τροποποιήσεων που κάναμε και όπως βλέπουμε είναι εμφανές και στα δύο διαγράμματα.

Βέβαια σχετικά με τη σύγκριση των δύο διαγραμμάτων γενικά και όχι με τις καμπύλες του καθενός ξεχωριστά, αξίζει να σημειωθεί πως η οποιαδήποτε έστω και ελάχιστη διαφορά οφείλεται σε απώλειες λόγω τριβής μηχανικών μερών του αυτοκινήτου και είναι περισσότερο εμφανές στο χρονικό διάστημα 346-380 δευτερόλεπτα όπου το αυτοκίνητο εκτελεί επιβραδυνόμενη κίνηση. Επίσης προκειμένου να μειώσουμε τη απόκλιση στη συμπεριφορά των καμπυλών και στα δύο διαγράμματα, θα μπορούσαμε να κάνουμε επιπρόσθετες αλλαγές στο ηλεκτρικό υποσύστημα του αυτοκινήτου, πάντα ανάλογα με τις αλλαγές που κάναμε στο δυναμικό του υποσυστήματος, αλλά κάτι τέτοιο θα αποτελούσε αντικείμενο εξωτερικού του γνωστικού μας φάσματος και ίσως αντικείμενο μελέτης άλλης εργασίας.

- **Διαγράμματα ισχύος κυψέλης καυσίμου**

Όπως και στα διαγράμματα μηχανικής ισχύος έτσι και τώρα παρατηρούμε και στα δύο διαγράμματα εκτιμώμενης και μετρήσιμης ισχύος κυψέλης καυσίμου (διάγραμμα 15 και διάγραμμα 17) ότι υπάρχουν επιμέρους διαφορές των καμπυλών ξεχωριστά στο κάθε διάγραμμα, αλλά και διαφορές στη γενική εικόνα των καμπυλών όσον αφορά τη σύγκριση των διαγραμμάτων. Οι διαφορές όσον αφορά τα γενική εικόνα των δύο διαγραμμάτων έγκειται στο γεγονός ότι στο ένα διάγραμμα έχουμε εκτιμώμενη, ενώ στο άλλο μετρήσιμη τιμή της ισχύος κυψέλης καυσίμου. Επομένως είναι λογικό στις καμπύλες του διαγράμματος της μετρήσιμης τιμής της ισχύος της κυψέλης καυσίμου να υπάρχουν και κάποιες απώλειες ενέργειας λόγω τριβής και ισχύος, οπότε και οι καμπύλες μας θα είναι διαφορετικές σε σχέση με το διάγραμμα των εκτιμώμενων τιμών ισχύος κυψέλης καυσίμου.

Σχετικά με τη διαφορά που παρατηρείται στη συμπεριφορά των καμπυλών ξεχωριστά σε κάθε διάγραμμα, πάλι οφείλεται στις αλλαγές που κάναμε στο τροποποιημένο αυτοκίνητο και επαληθεύει τη προσδοκία μας για χαμηλότερη ισχύ και στην κυψέλη καυσίμου σε σχέση με το αρχικό μας αυτοκίνητο.

- **Διαγράμματα ροπής οδήγησης**

Πάλι είναι προφανές ότι το τροποποιημένο αυτοκίνητο απαιτεί μικρότερη ροπή οδήγησης είτε εκτιμώμενη (διάγραμμα 25), είτε μετρήσιμη (διάγραμμα 27) σε κάθε χρονική στιγμή της προσομοίωσης, το οποίο και είναι λογικό αποτέλεσμα των αλλαγών που κάναμε. Επίσης θα μπορούσε και η συμπεριφορά των καμπυλών των δύο διαγραμμάτων να συμπίπτει

αν είχαμε κάνει πιο ολοκληρωμένες αλλαγές όχι μόνο στο ηλεκτρικό υποσύστημα, αλλά και υποσύστημα διαχείρισης ενέργειας του συστήματος.

- **Διαγράμματα ισχύος συσσωρευτή**

Στα συγκεκριμένα διαγράμματα (διάγραμμα 19 και διάγραμμα 33), η διαφορά μεταξύ της συμπεριφοράς των καμπυλών οφείλεται σε μη συνολικές τροποποιήσεις στο ηλεκτρικό υποσύστημα του οχήματος καθώς επίσης και στο υποσύστημα της ενέργειας. Παρόλα αυτά όσον αφορά τη συμπεριφορά των καμπυλών του αυτοκινήτου σε κάθε διάγραμμα μπορούμε να πούμε ότι και στα δύο διαγράμματα το τροποποιημένο αυτοκίνητο εμφανίζει σαφώς χαμηλότερη ισχύ στον συσσωρευτή, καθώς έχει χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις λόγω των μεταβολών που κάναμε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στόχος της παρούσας διπλωματικής ήταν η προσομοίωση ενός αυτοκινήτου το οποίο χρησιμοποιεί κυψέλες καυσίμου για την κίνηση του και μετέπειτα η τροποποίησή του προκειμένου να δούμε πως συμπεριφέρεται ένα αυτοκίνητο με περισσότερο σπορτίφ χαρακτηριστικά και ειδικότερα πως γίνεται η διαχείριση της ενέργειας σε κάθε ένα από τα δύο αυτοκίνητα. Με λίγα λόγια μας ενδιέφερε η διερεύνηση εφαρμογής κυψελών καυσίμου σε ένα αυτοκίνητο επιδόσεων.

Είναι σαφές και προφανές, ότι σχεδόν σε όλα τα διαγράμματα το τροποποιημένο αυτοκίνητο υπερέχει έναντι του συμβατικού σε κατανάλωση ισχύος άρα και κατ' επέκταση και ενέργειας προκειμένου να καλύψει την ίδια απόσταση την κάθε χρονική στιγμή. Παρόλα αυτά πρέπει να επισημανθεί ότι η διαφορά αυτή χαρακτηρίζεται από σχετικά μικρές αποκλίσεις σε σχέση με τα χαρακτηριστικά του αρχικού μοντέλου. Θα μπορούσαμε ίσως να μεγαλώσουμε την διαφορά των επιδόσεων των χαρακτηριστικών του τροποποιημένου μοντέλου έναντι του συμβατικού αν κάναμε περισσότερες και ουσιαστικότερες αλλαγές σε όλο το ηλεκτρικό υποσύστημα, καθώς επίσης και στο υποσύστημα διαχείρισης της ενέργειας. Οι τροποποιήσεις αυτές θα πρέπει να είναι πλήρως εναρμονισμένες με τις αλλαγές που κάναμε στο δυναμικό υποσύστημα του οχήματος, έτσι ώστε το αυτοκίνητο να παρουσιάζει αρμονική και ομαλή λειτουργία και να είναι πολύ περισσότερο αποδοτικό.

Προκειμένου να ακολουθήσουμε ένα ρεαλιστικό προφίλ ταχύτητας, ακολουθήσαμε το προφίλ ταχύτητας που διέπεται από την οδηγία 70/220/EEC της ευρωπαϊκής ένωσης, η οποία αναφέρεται σε ένα σενάριο κίνησης υβριδικών αυτοκινήτων για εκτός πόλης κίνηση. Προκειμένου να ακολουθήσουμε το συγκεκριμένο προφίλ ταχύτητας και έχοντας ως είσοδο στο μοντέλο μας την θέση του πεντάλ γκαζιού, χρειάστηκαν αρκετές δοκιμές και αρκετά υπολογιστικά δευτερόλεπτα ξεχωριστά για το κάθε ένα αυτοκίνητο προκειμένου να σχηματίσουμε αυτό το προφίλ ταχύτητας. Γι' αυτό το λόγο θα μπορούσαμε με μία αυτοματοποιημένη διαδικασία που να ρυθμίζαμε τις παραμέτρους να μειώσουμε κατά πολύ τον υπολογιστικό φόρτο της παρούσας διαδικασίας, αλλά κάτι τέτοιο απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση και ουσιαστικά δεν είναι αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής. Παρόλα αυτά η μέθοδος δοκιμής και λάθους (trial and error) που χρησιμοποιήσαμε μας έδωσε πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα και αποτελεί μία ικανοποιητική αρχική προσέγγιση.

Μπορούμε να πούμε ότι το τροποποιημένο μοντέλο προσέγγισε ικανοποιητικά τις απαιτήσεις μας όσον αφορά την δημιουργία ενός σπορτίφ αυτοκινήτου, το οποίο όμως θα έχει κινητήρα με κυψέλες καυσίμου. Αυτό είναι κάτι που είναι περισσότερο κατανοητό αν

συγκρίνουμε τα διαγράμματα ένα προς ένα, όπου παρατηρούμε ότι λόγω των αλλαγών των δυναμικών στοιχείων του αυτοκινήτου που κάναμε, όσο αφορά το ίδιο χρονικό διάστημα αλλά και την ίδια κάλυψη απόστασης, το τροποποιημένο αυτοκίνητο επιταχύνει αμεσότερα, επιβραδύνει αμεσότερα και γενικότερα σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης της κίνησης του έχει πολύ χαμηλότερες ενεργειακές απαιτήσεις. Έτσι αν και ο κινητήρας και στα δύο αυτοκίνητα είναι ο ίδιος, το τροποποιημένο αυτοκίνητο παρουσιάζεται έστω και με μικρές αποκλίσεις, πολύ πιο αποδοτικό από το αρχικό συμβατικό. Όλα αυτά βέβαια οφείλονται στο τρόπο που διαχειρίζονται την ενέργεια το κάθε αυτοκίνητο ξεχωριστά, πριν και μετά τις τροποποιήσεις.

Μελλοντική επέκταση της παρούσας διπλωματικής θα μπορούσε να είναι η περαιτέρω τροποποίηση του ηλεκτρικού υποσυστήματος, προκειμένου να έχουμε πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα και περισσότερο ρεαλιστική προσέγγιση στο μοντέλο μας. Βέβαια δεδομένου των αλλαγών στο ηλεκτρικό υποσύστημα θα απαιτηθεί και επιπλέον τροποποίηση στο υποσύστημα διαχείρισης της ενέργειας, προκειμένου να αξιοποιηθούν σωστά οι οποιεσδήποτε τροποποιήσεις μας στο ηλεκτρικό υποσύστημα και να μην έχουμε παράλογες αποκλίσεις από το αρχικό μας μοντέλο.

Επίσης μία ακόμα μελλοντική επέκταση της παρούσας διπλωματικής θα μπορούσε να είναι και η διερεύνηση και εφαρμογή μίας αυτοματοποιημένης διαδικασίας έτσι ώστε να μειώσεις τον χρονικό και υπολογιστικό φόρτο της κάθε προσομοίωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Consumption of energy, Data from August 2012, [http:// epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Consumption_of_energy#Source_data_for_tables_and_figures_.28MS_Excel.29](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Consumption_of_energy#Source_data_for_tables_and_figures_.28MS_Excel.29).
2. Consumption of energy, publication “Energy balance sheets”, data 2006-2007, [http:// http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-EN-09-001/EN/KS-EN-09-001-EN.PDF](http://http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-EN-09-001/EN/KS-EN-09-001-EN.PDF).
3. Consumption of energy, publication “Energy”, yearly statistics 2006, [http:// http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-PC-08-001/EN/KS-PC-08-001-EN.PDF](http://http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-PC-08-001/EN/KS-PC-08-001-EN.PDF).
4. Consumption of energy, publication “Panorama of energy”, Energy statistics to support EU policies and solutions, http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-GH-09-001/EN/KS-GH-09-001-EN.PDF.
5. European Commission, Eurostat, Energy, Data, Main tables, [http:// epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/energy/data/main_tables](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/energy/data/main_tables).
6. European Commission, Eurostat, Energy, Data, Database, Statistics, [http:// epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/energy/data/database](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/energy/data/database).
7. Energy statistics-quantities, annual data, Eurostat metadata, [http:// epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_SDDS/en/nrg_quant_esms.htm](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_SDDS/en/nrg_quant_esms.htm).
8. Share of renewable energy in fuel consumption of transport, Eurostat metadata, [http:// epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_SDDS/en/tsdcc340_esms.htm](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_SDDS/en/tsdcc340_esms.htm).
9. European Commission – Energy – Energy policy for a competitive Europe, [http:// ec.europa.eu/energy/index_en.htm](http://ec.europa.eu/energy/index_en.htm).
10. European Commission – Mobility & Transport – European strategies, [http:// ec.europa.eu/transport/themes/strategies/index_en.htm](http://ec.europa.eu/transport/themes/strategies/index_en.htm).
11. International Energy Agency (IEA) – World Energy Outlook 2012, [http:// www.worldenergyoutlook.org/](http://www.worldenergyoutlook.org/).
12. OECD – Energy – Climate Change, Energy and Transport, [http:// www.oecd.org/redirect/topic/0,3373,en_2649_34359_1_1_1_1_37459,00.html](http://www.oecd.org/redirect/topic/0,3373,en_2649_34359_1_1_1_1_37459,00.html).
13. Sustainable development – Consumption and production, data from July 2011, [http:// epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Sustainable_development_-_Consumption_and_production](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Sustainable_development_-_Consumption_and_production).

14. Transport energy consumption and emissions, data from 2006, [http:// epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Transport_energy_consumption_and_emissions](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Transport_energy_consumption_and_emissions).
15. Panorama of transport, publication, 2009 edition, [http:// epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-DA-09-001/EN/KS-DA-09-001-EN.PDF](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-DA-09-001/EN/KS-DA-09-001-EN.PDF)
16. European Commission, Eurostat, Environment, Data, Main tables, [http:// epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/environment/data/main_tables](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/environment/data/main_tables).
17. European Commission, Eurostat, Environment, Data, Database, [http:// epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/environment/data/database](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/environment/data/database).
18. Energy, dedicated section, http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/energy_introduction.
19. Environment, dedicated section, <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/environment/introduction>.
20. Transport, dedicated section, <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/transport/introduction>.
21. Energy consumption of transport relative to GDP, Eurostat metadata, [http:// epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_SDDS/en/tsdtr100_esms.htm](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_SDDS/en/tsdtr100_esms.htm).
22. Energy Statistics – quantities, Eurostat metadata, [http:// epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_SDDS/en/nrg_quant_esms.htm](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_SDDS/en/nrg_quant_esms.htm).
23. Share of biofuels in fuel consumption of transport, Eurostat metadata, [http:// epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_SDDS/en/tsdcc340_esms.htm](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_SDDS/en/tsdcc340_esms.htm).
24. European Environment Agency–Transport, <http://www.eea.europa.eu/themes/transport>
25. Passenger transport statistics, data from September 2012, [http:// epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Passenger_transport_statistics](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Passenger_transport_statistics).
26. Transport modal breakdown, data from December 2011, [http:// epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Transport_modal_breakdown](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Transport_modal_breakdown).
27. European Environment Agency, Term 2006 02 Factsheet, [http:// www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-greenhouse-gases-6/term_2006_02__transport_emission_of_greenhouse_gases_final_version.pdf](http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-greenhouse-gases-6/term_2006_02__transport_emission_of_greenhouse_gases_final_version.pdf).
28. European Environment Agency, TERM 2005 Report, [http:// www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2006_3](http://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2006_3).
29. Κυψέλη Καυσίμου, http://el.wikipedia.org/wiki/Κυψέλη_καυσίμου.
30. Fuel Cells, Green Power, Los Alamos National Laboratory, [http:// education.lanl.gov/resources/fuelcells/fuelcells.pdf](http://education.lanl.gov/resources/fuelcells/fuelcells.pdf).

31. Περιβάλλον και Διαχείριση Ενέργειας, Παραγωγή ενέργειας, Συμπαράγωγή, Συστήματα συμπαράγωγής, Κυψέλες, [http:// www.allaboutenergy.gr/Paragogi3327.html](http://www.allaboutenergy.gr/Paragogi3327.html).
32. Οικονομία Υδρογόνου & Κυψέλες Καυσίμου, Β.Στεργιόπουλος και Π.Τσιακάρας, Νοέμβριος 2007, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, τμήμα μηχανολόγων μηχανικών βιομηχανίας, [http:// library.tee.gr/digital/kdth/kdth_3460/kdth_3460_stergiouopoulos.pdf](http://library.tee.gr/digital/kdth/kdth_3460/kdth_3460_stergiouopoulos.pdf)
33. Joshua Golbert, Daniel Lewin (2004), “Model based control fuel cells” (1) Regulatory Control.
34. J.T. Pukrushpan, A.G. Stefanopoulou, H.peng, Modelling and control for PEM Fuel Cell Stack System (2002).
35. M.Y.El-Sharkish, A. Rahman, M.S Alam, P.C. Byrne, A.A. Sakla, T.Thomas (2004), a dynamic model for a stand-alone PEM fuel cell power plant for residential applications.
36. Ardan Vahidi, Anna Stefanopoulou, Huei Peng, Mechanical Engineering, University of Michigan, Ann Arbor (2004), Model Predictive Control for Starvation in a Hybrid Fuel Cell System.
37. Jay T. Pukrushpan, Huei Peng, Anna G. Stefanopoulou, Department of Mechanical engineering in Michigan (2004), “Control-Oriented Modelling and Analysis for Automotive Fuel Cell Systems.
38. Liuping Wang, Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB (2008).
39. Kevin C. Lauze and Donald Chielewsky (2006), “Power Control of a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell”.
40. Ziogou Chrisovalantou, Simira Papadopoulou, Panos Seferlis, Spyros Voutetakis (2009), “An efficient multi-objective model predictive control framework of a PEM fuel cell.
41. Ζιώγου Χρυσοβαλάντου, (2009), “Ρύθμιση συστήματος κυψέλης καυσίμου βασισμένη σε μαθηματικό μοντέλο προβλεπτικού ελέγχου (predictive) και ανίχνευση βέλτιστου σημείου λειτουργίας.
42. Παναγιώτης Λ. Ζέρβας, (2009), “Σχεδιασμός, Ανάπτυξη και Βελτιστοποίηση Υβριδικής Μονάδας Ισχύος Ανανεωσίμων Πηγών Ενέργειας – Τεχνολογιών Υδρογόνου.
43. Richard C.Dorf, Robert H.Bishop (2001), Σύγχρονα Συστήματα Αυτομάτου Ελέγχου.
44. The History of the Honda FCX Clarity, Fuel Cell Electric Vehicle FCEV, Enviromental Leadership, Fuel Cells, The history of the Honda FCX Clarity FCEV, [http:// corporate.honda.com/environment/fuel_cells.aspx?id=fuel_cells_fcx](http://corporate.honda.com/environment/fuel_cells.aspx?id=fuel_cells_fcx).
45. Honda FCX Clarity, Technical Specifications, [http:// automobiles.honda.com/fcx-clarity/specifications.aspx](http://automobiles.honda.com/fcx-clarity/specifications.aspx).
46. Honda FCX Clarity, Photos, <http://automobiles.honda.com/fcx-clarity/exterior-photos.aspx>.
47. Honda FCX Clarity, Fuel Cells, About, <http://automobiles.honda.com/fcx-clarity/about-fuel-cells.aspx>.

48. Honda FCX Clarity, Fuel Cells, Benefits, <http://automobiles.honda.com/fcx-clarity/fuel-cell-benefits.aspx>.
49. Honda FCX Clarity, Fuel Cells, Comparison, <http://automobiles.honda.com/fcx-clarity/fuel-cell-comparison.aspx>.
50. Honda FCX Clarity, Fuel Cells, Evolution, <http://automobiles.honda.com/fcx-clarity/fuel-cell-evolution.aspx>.
51. Honda FCX Clarity, Technology, How it works, <http://automobiles.honda.com/fcx-clarity/how-fcx-works.aspx>.
52. Honda FCX Clarity, Technology, V Flow, <http://automobiles.honda.com/fcx-clarity/vflow.aspx>.
53. Honda FCX Clarity, Technology, Battery, <http://automobiles.honda.com/fcx-clarity/battery.aspx>.
54. Honda FCX Clarity, Technology, Motor, <http://automobiles.honda.com/fcx-clarity/motor.aspx>.
55. Honda FCX Clarity, Technology, Powertrain, <http://automobiles.honda.com/fcx-clarity/powertrain.aspx>.
56. http://www.gocar.gr/test-drives/first-drive/3644,Honda_FCX_Clarify.html.
57. <http://www.lamborghini.com/en/models/gallardo-lp-550-2/technical-specifications/>.
58. <http://www.gtrlife.com/forums/topic/61612-gt-r-aerodynamics-vs-gallardo/>.