



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**“ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ
ΟΧΗΜΑΤΑ”**

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ: ΜΑΡΚΟΥΛΑΤΟΣ ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ: 41842

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΟΛΑΚΗΣ ΑΝΤΩΝΙΟΣ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Δομή και τύποι κυψελών καυσίμου	2
1.1 Εισαγωγή	2
1.1.1 Ιστορική αναδρομή	3
1.2 Δομή μιας κυψέλης καυσίμου	4
1.2.1 Πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου.....	5
1.2.2 Μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου	6
1.3 Τύποι κυψελών καυσίμου	7
1.3.1 Κυψέλες καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη – SOFC	7
1.3.2 Κυψέλες καυσίμου τετηγμένων ανθρακικών αλάτων - MCFC	9
1.3.3 Κυψέλες καυσίμου αλκαλικές – AFC	10
1.3.4 Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος – PAFC.....	12
1.3.5 Κυψέλες καυσίμου πολυμερούς ηλεκτρολύτη – PEFC	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Αρχή λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου	16
2.1 Θερμοδυναμικές πτυχές	16
2.1.1 Περιορισμοί του κύκλου Carnot	16
2.1.2 Ηλεκτροχημική μετατροπή ενέργειας.....	17
2.2 Βασικές αρχές λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου	19
2.2.1 Γαλβανικά στοιχεία	19
2.2.2 Κυψέλες καυσίμων.....	21
2.3 Συστοιχία κυψελών καυσίμων	22
2.3.1 Επίπεδη διπολική στοιβάξη	23
2.3.2 Στοιβες με σωληνοειδή στοιχεία	24
2.4 Βασικές παράμετροι λειτουργίας των κυψελών καυσίμων	25
2.5 Βασικά εξαρτήματα μιας κυψέλης καυσίμου	27

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Εφαρμογές των κυψελών καυσίμων	31
3.1 Σταθερές μονάδες παραγωγής ενέργειας	31
3.1.1 Μεγάλες σταθερές μονάδες παραγωγής ενέργειας.....	31
3.1.2 Μικρές σταθερές μονάδες παραγωγής ενέργειας	33
3.2 Χρήση κυψελών καυσίμου στις μεταφορές.....	34
3.2.1 Οχήματα με χρήση κυψελών καυσίμου.....	34
3.2.2 Πλεονεκτήματα FCEV	37
3.2.3 Μειονεκτήματα FCEV	38
3.2.4 Ποδήλατα και scooters με κυψέλες καυσίμου	38
3.3 Στρατιωτικές εφαρμογές	40
3.4 Αντίκτυπο της χρήσης των fuel cells στο περιβάλλον.....	41
3.4.1 Fuel cells: Φίλος ή εχθρός του περιβάλλοντος;	42
3.4.2 Συμπέρασμα ως προς το αντίκτυπο των κυψελών καυσίμου στο περιβάλλον	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Μπαταρίες ηλεκτρικών οχημάτων	46
4.1 Η ιστορία των ηλεκτρικών οχημάτων	46
4.2 Μπαταρίες ηλεκτρικών οχημάτων	50
4.3 Βασικές παράμετροι μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Τύποι μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων	56
5.1 Μπαταρίες ιόντων λιθίου (Lithium-ion batteries)	56
5.1.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου	57
5.1.2 Εξαρτήματα μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου	58
5.1.3 Αρχή λειτουργίας και χημικές αντιδράσεις μπαταριών ιόντων λιθίου	60
5.2 Μπαταρίες υδρίδιου νικελίου-μετάλλου (Nickel Metal Hydride batteries)	61
5.2.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μιας μπαταρίας υδρίδιου νικελίου-μετάλλου	62
5.2.2 Εξαρτήματα μιας μπαταρίας υδρίδιου νικελίου-μετάλλου	62
5.2.3 Αρχή λειτουργίας και χημικές αντιδράσεις μπαταριών υδρίδιου νικελίου-μετάλλου ..	64
5.3 Μπαταρίες μολύβδου οξέος (Lead acid batteries)	66
5.3.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μιας μπαταρίας μολύβδου οξέος.....	67
5.3.2 Εξαρτήματα μιας μπαταρίας υδρίδιου νικελίου-μετάλλο.....	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Περιβαλλοντικό αντίκτυπο	70
6.1 Εισαγωγή	70
6.2 Ηλεκτρική ενέργεια	70
6.3 Ανακύκλωση μπαταριών ιόντων λιθίου.....	72
6.3.1 Τεχνολογίες ανακύκλωσης μπαταριών ιόντων λιθίου	73

6.4 Σύγκριση BEVs και ICEVs ως προς το περιβαλλοντικό αποτύπωμα	76
6.5 Συμπεράσματα	79
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	81

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας πτυχιακής είναι η παρουσίαση, όπως μαρτυρά και ο τίτλος, των στοιχείων αποθήκευσης ενέργειας στα ηλεκτρικά οχήματα. Αποτελεί βιβλιογραφική μέλετη στην οποία βρίσκονται συγκεντρωμένες όλες οι βασικές πληροφορίες που μπορεί να χρειαστεί κάποιος που μελετά τον συγκεκριμένο τομέα. Χωρίζεται σε δύο μέρη τα οποία μπορούν να μελετηθούν και αυτόνομα.

Στο πρώτο μέρος αναλύονται οι κυψέλες καυσίμου, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους καθώς και οι διάφοροι τύποι κυψελών καυσίμου που υπάρχουν. Στη συνέχεια, αναλύονται οι αρχές λειτουργίας των κυψελών καυσίμου, οι βασικές παράμετροι λειτουργίας και τα βασικά εξαρτήματά τους. Τέλος, παρουσιάζονται οι εφαρμογές στις οποίες συναντάμε τις κυψέλες καυσίμου καθώς και η επίδραση που έχει η χρήση τους στο περιβάλλον.

Στο δεύτερο μέρος γίνεται αναλυτική παρουσίαση των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων. Παρουσιάζονται κάποια ιστορικά στοιχεία, και οι βασικές παράμετροι λειτουργίας. Στην συνέχεια αναλύονται οι βασικοί τύποι των μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων.

Τέλος γίνεται εκτενής ανάλυση του αντίκτυπου που έχει η χρήση των μπαταριών στο περιβάλλον. Επίσης αναλύεται η ανακύκλωση των μπαταριών ιόντων λιθίου και οι τεχνολογίες ανακύκλωσης. Δίνεται μεγαλύτερη βάση στις μπαταρίες ιόντων λιθίου καθώς είναι ο πλέον χρησιμοποιούμενος τύπος μπαταριών.

SUMMARY

The aim of this thesis is the presentation, as evidenced by the title, of the energy storage elements in electric vehicles. It is a bibliographic study that gathers all the basic information that one who studies this field may need. It is divided into two parts which can be studied independently.

In the first part the fuel cells are analyzed, their advantages and disadvantages as well as the different types of fuel cells that exist. Then, the operating principles of the fuel cells, the basic operating parameters and their basic components are analyzed. Finally, the applications in which we encounter fuel cells are presented as well as the effect that their use has on the environment.

In the second part, a detailed presentation of the batteries of electric vehicles is made. Some historical facts and basic operating parameters are presented. Then the basic types of electric vehicle batteries are analyzed.

Finally, there is an extensive analysis of the impact that the use of batteries has on the environment. The recycling of lithium-ion batteries and recycling technologies is also analysed. More attention is given to lithium-ion batteries as it is the most widely used type of battery.

ΜΕΡΟΣ Α΄
ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΩΝ (FUEL CELLS)



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Δομή και τύποι κυψελών καυσίμου

1.1 Εισαγωγή

Τι είναι οι κυψέλες καυσίμων;

Οι κυψέλες καυσίμου είναι συσκευές οι οποίες μετατρέπουν χημική ενέργεια σε ηλεκτρική έχοντας μικρό αντίκτυπο στο περιβάλλον και μεγάλη αποδοτικότητα.

Η ενέργεια απελευθερώνεται κάθε φορά που ένα καύσιμο αντιδρά χημικά με το οξυγόνο στον αέρα. Σε μια μηχανή εσωτερικής καύσης, η αντίδραση συμβαίνει μέσω της καύσης και η ενέργεια απελευθερώνεται με τη μορφή θερμότητας. Σε μια κυψέλη καυσίμου, η αντίδραση λαμβάνει χώρα ηλεκτροχημικά και η ενέργεια απελευθερώνεται ως συνδυασμός ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλής τάσης DC και θερμότητας. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παράγει έργο άμεσα, ενώ η θερμότητα είτε χάνεται είτε χρησιμοποιείται για άλλους σκοπούς.

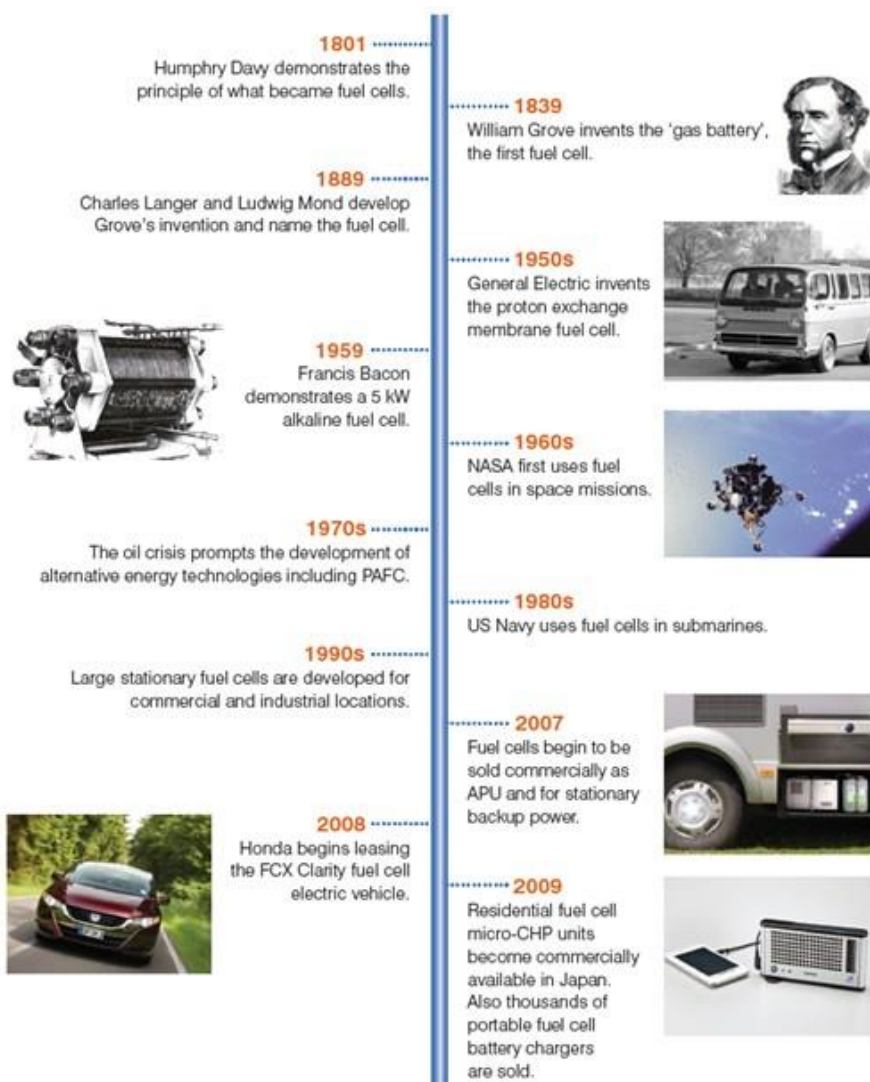
Επειδή τα ενδιάμεσα στάδια παραγωγής θερμικού και μηχανικού έργου που συναντάμε στις περισσότερες συμβατικές μεθόδους παραγωγής ενέργειας αποφεύγονται, οι κυψέλες καυσίμου δεν περιορίζονται από τους θερμοδυναμικούς περιορισμούς των κινητήρων θερμότητας όπως η αποδοτικότητα του κύκλου Carnot.

Σε γαλβανικά (ή "βολταϊκά") κύτταρα, μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων η χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα κύτταρο καυσίμου είναι ένα γαλβανικό στοιχείο, όπως και μια μπαταρία. Αντιθέτα, στα ηλεκτρολυτικά κύτταρα, όπως σε έναν ηλεκτρολύτη ή ηλεκτρολυτική πλάκα, η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε χημική ενέργεια.

Θεωρητικά οι κυψέλες καυσίμου θα μπορούσαν να επεξεργαστούν μια μεγάλη ποικιλία καυσίμων και οξειδωτικών μέσων, όμως μεγαλύτερο ενδιαφέρον σήμερα παρουσιάζουν οι κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούν κοινά καύσιμα (ή τα παράγωγά τους) ή υδρογόνο ως αναγωγικό μέσο και τον αέρα του περιβάλλοντος ως οξειδωτικό.

1.1.1 Ιστορική αναδρομή

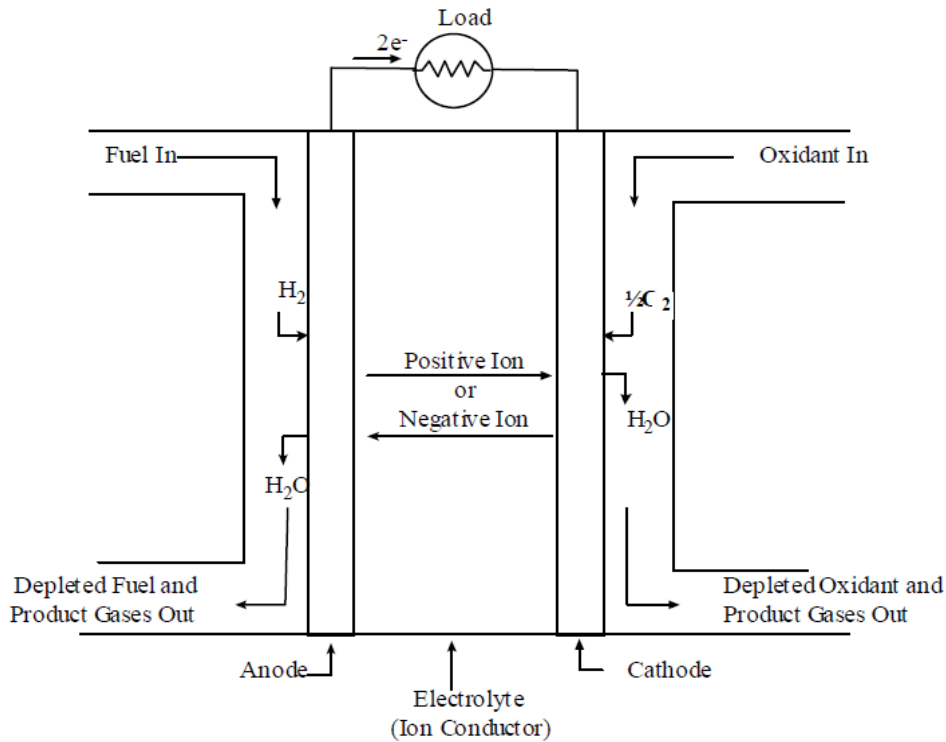
Την έννοια της κυψέλης καυσίμου την πρωτοεισήγαγε αποτελεσματικά στις αρχές του δέκατου ένατου αιώνα από τον Humphry Davy. Ο Sir William Grove αναγνωρίστηκε ως ο εφευρέτης το 1839. Κατά την διάρκεια του υπόλοιπου 19^{ου} αιώνα πολλοί επιστήμονες επιχείρησαν να αναπτύξουν κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιώντας διάφορα καύσιμα και ηλεκτρολύτες. Κατά το πρώτο μισό του 20^{ου} αιώνα η πρόοδος της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου χρησιμοποιήθηκε ως βάση για συστήματα που χρησιμοποιήθηκαν τελικά στις διαστημικές πτήσεις Gemini και Apollo. Η πρώτη πλήρως λειτουργική κυψέλη καυσίμου δημιουργήθηκε το 1959 από τον Francis T. Bacon.



ΕΙΚΟΝΑ 1.1 [2]

1.2 Δομή μιας κυψέλης καυσίμου

Η βασική φυσική δομή, ή δομικό στοιχείο, ενός στοιχείου καυσίμου αποτελείται από ένα στρώμα ηλεκτρολύτη σε επαφή με μία άνοδο και μία κάθοδο και από κάθε πλευρά. Παρακάτω παρατείνεται μια σχηματική αναπαράσταση μιας κυψέλης καυσίμου με τα αέρια αντιδρώντων/προϊόντων και τις κατευθύνσεις της ροής ιόντων αγωγής μέσα στο κυττάρο.



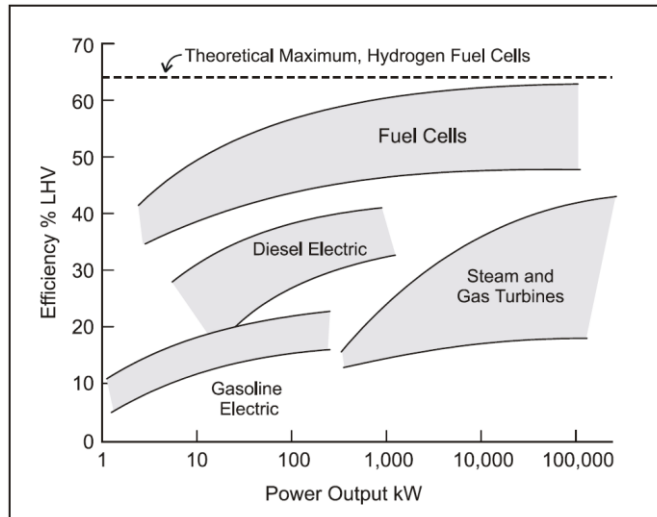
ΕΙΚΟΝΑ 1.2 ΔΟΜΗ ΚΥΨΕΛΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ [45]

Σε μια τυπική κυψέλη καυσίμου, το καύσιμο τροφοδοτείται συνεχώς στην άνοδο (αρνητικό ηλεκτρόδιο) και το οξειδωτικό (συνήα οξυγόνο από τον αέρα) τροφοδοτείται συνεχώς στην κάθοδο (θετικό ηλεκτρόδιο). Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα στα ηλεκτρόδια για να παράγουν ένα ηλεκτρικό ρεύμα διαμέσου του ηλεκτρολύτη, ενώ οδηγούν ένα συμπληρωματικό ηλεκτρικό ρεύμα που παράγει έργο στο φορτίο.

Μια κυψέλη καυσίμου έχει πολλές διαφορές σε σχέση με μια μπαταρία. Η μπαταρία είναι μια συσκευή αποθήκευσης ενέργειας στην οποία όλη η διαθέσιμη ενέργεια αποθηκεύεται μέσα στην ίδια την μπαταρία και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας θα σταματήσει όταν τα χημικά αντιδραστήρια καταναλωθούν. Μια κυψέλη καυσίμου αντιθέτως είναι μια συσκευή μετατροπής ενέργειας στην οποία τροφοδοτούνται συνεχώς καύσιμο και οξειδωτικό. Με αυτόν τον τρόπο η κυψέλη καυσίμου μπορεί να παράγει ενέργεια συνεχώς για όσο χρονικό διάστημα τροφοδοτείται καύσιμο.

1.2.1 Πλεονεκτήματα των κυψελών καυσίμου

- Υψηλότερη αποδοτικότητα από τις μηχανές ντίζελ ή αερίου. Σε σύγκριση με το ντίζελ ή το αέριο, το υδρογόνο είναι πολύ πιο αποδοτικό από πλευράς καυσίμων, καθώς μπορεί να παράγει περισσότερη ενέργεια ανά λίτρο καυσίμου
- Οι περισσότερες κυψέλες καυσίμου λειτουργούν σιωπηλά, σε σύγκριση με τους κινητήρες εσωτερικής καύσης
- Τα στοιχεία καυσίμου μπορούν να εξαλείψουν τη ρύπανση που προκαλείται από την καύση ορυκτών καυσίμων καθώς για τα στοιχεία καυσίμου που λειτουργούν με υδρογόνο, το μοναδικό παραπροϊόν είναι το νερό και η θερμότητα
- Καθώς υπάρχουν λίγα κινούμενα μέρη στο σύστημα η συντήρηση είναι σχετικά απλή
- Τα συστήματα κυψελών καυσίμου λειτουργούν με υψηλότερη θερμοδυναμική απόδοση από τις μηχανές θερμότητας
- Τα συστήματα κυψελών καυσίμου δεν απαιτούν επαναφόρτιση. Αντίθετα, τα συστήματα κυψελών καυσίμου πρέπει να επανεφοδιάζονται, κάτι που είναι ταχύτερο από τη φόρτιση μιας μπαταρίας



ΕΙΚΟΝΑ 1.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ [44]

1.2.2 Μειονεκτήματα των κυψελών καυσίμου

- Υψηλό κόστος κατασκευής λόγω του υψηλού κόστους των καταλυτών
- Έλλειψη υποδομής για τη στήριξη της διανομής υδρογόνου
- Το υδρογόνο είναι ακριβό στην παραγωγή, είναι δύσκολο να αποθηκευτεί και δεν είναι ευρέως διαθέσιμο.
- Τα στοιχεία καυσίμου απαιτούν σχετικά καθαρό καύσιμο, χωρίς συγκεκριμένες προσμίξεις όπως ενώσεις θείου και άνθρακα και κατάλοιπα υγρά καύσιμα που δυσχεραίνουν την λειτουργία του καταλύτη
- Κάποιοι τύποι κυψελών καυσίμου χρησιμοποιούν καταλύτη λευκοχρύσου για την προώθηση της αντίδρασης παραγωγής ενέργειας. Το λευκόχρυσο είναι σπάνιο μέταλλο και είναι πολύ ακριβό
- Οι κυψέλες καυσίμου απαιτούν πολύπλοκα συστήματα υποστήριξης και ελέγχου.
- Εξαρτώνται από τα ορυκτά καύσιμα. Παρά το γεγονός ότι η ενέργεια του υδρογόνου είναι ανανεώσιμη και έχει ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, χρειάζονται άλλες μη ανανεώσιμες πηγές όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο για να το διαχωρίσουν από το οξυγόνο.

1.3 Τύποι κυψελών καυσίμου

Ο πιο κοινός τρόπος ταξινόμησης των κυψελών καυσίμου είναι με βάση τον τύπο ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται στα κύτταρα.

Η ταξινόμηση καθορίζει το είδος των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στην κυψελίδα, το είδος των απαιτούμενων καταλυτών, το εύρος θερμοκρασίας στο οποίο λειτουργεί το κύτταρο, και άλλους παράγοντες. Αυτά τα χαρακτηριστικά, με τη σειρά τους, επηρεάζουν τις εφαρμογές για τις οποίες αυτά τα κύτταρα είναι κατάλληλα. Υπάρχουν διάφοροι τύποι κυψελών καυσίμου που βρίσκονται υπό εξέλιξη. Παρακάτω παρατίθενται οι πιο κοινοί τύποι κυψελών καυσίμου:

- Κυψέλες καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη - SOFC
- Κυψέλες καυσίμου τετηγμένων ανθρακικών αλάτων - MCFC
- Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος - PAFC
- Κυψέλες καυσίμου αλκαλικές - AFC
- Κυψέλες καυσίμου πολυμερούς ηλεκτρολύτη - PEFC

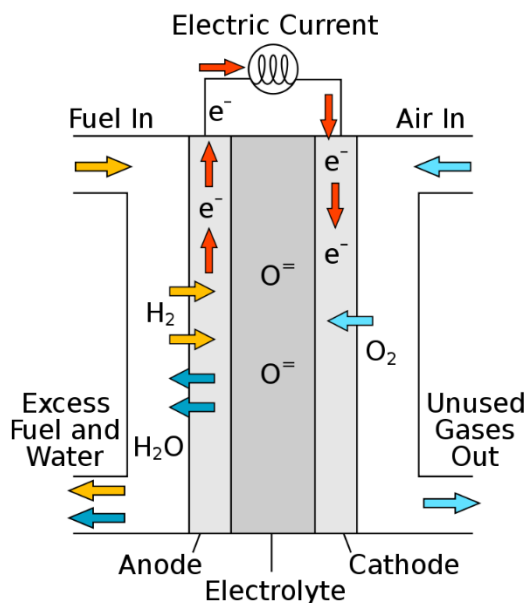
Ακολουθεί περιγραφή κάθε τύπου κυψελών καυσίμου ξεχωριστά.

1.3.1 Κυψέλες καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη – SOFC

Οι SOFCs είναι οι κυψέλες καυσίμου με την μεγαλύτερη περίοδο συνεχούς ανάπτυξης, αρχίζοντας στα τέλη της δεκαετίας του 1950. Χρησιμοποιούν έναν ηλεκτρολύτη ο οποίος άγει ιόντα οξειδίου (O²⁻) από την κάθοδο στην άνοδο αντιθέτως των περισσότερων τύπων κυψελών καυσίμου, οι οποίες άγουν ιόντα υδρογόνου από την άνοδο στην κάθοδο.

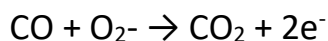
Αρχικά, λόγω της περιορισμένης αγωγιμότητας των στερεών ηλεκτρολυτών η λειτουργία των κυψελών στους περίπου 1000°C, αλλά πιο πρόσφατα λεπτά ηλεκτρολυτικά στοιχεία μέσω βελτιωμένων καθόδων επέτρεψαν μείωση της θερμοκρασίας λειτουργίας στους 650 - 850°C. Χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, όπως η στατική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η κινητή ισχύς, η βοηθητική ισχύς για οχήματα κ.α..

Χτίζονται μέσω της διαδοχικής εναπόθεσης διαφόρων στρωμάτων υλικού κυρίως σε σωληνωτά ή επίπεδα σχέδια.



ΕΙΚΟΝΑ 1.4 ΔΟΜΗ SOFC [25]

Αντιδράσεις ανόδου: $\text{H}_2 + \text{O}_2^- \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$



Αντίδραση καθόδου: $\text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{O}^{2-}$

Συνολική αντίδραση: $\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{CO} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$

Πλεονεκτήματα των SOFCs:

- Υψηλή αποδοτικότητα
- Κινητική ταχείας αντίδρασης
- Καλή λειτουργία με τη χρήση είτε υγρών είτε ξηρών καυσίμων
- Χρήση υλικών χαμηλού κόστους
- Λόγω του στερεού ηλεκτρολύτη:
- το στοιχείο μπορεί να χυτευτεί σε διάφορα σχήματα
- αποφεύγονται τα προβλήματα που σχετίζονται με το χειρισμό των υγρών

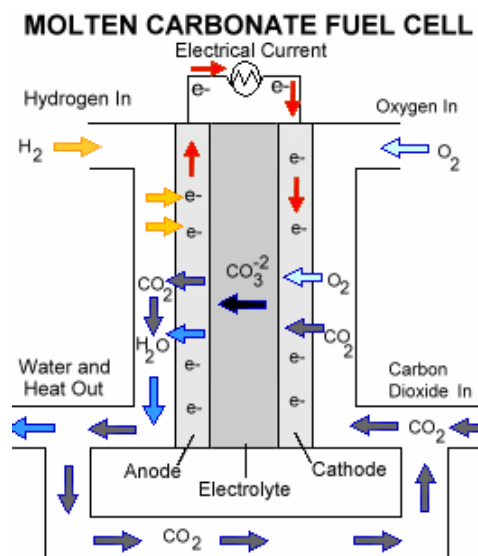
Μειονεκτήματα των SOFCs:

- Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας υπάρχουν θερμικές αναντιστοιχίες μεταξύ των υλικών και η στεγανοποίηση μεταξύ των κυψελών είναι δύσκολη στις διαμορφώσεις της επίπεδης πλάκας.
- Απαιτείται η ανάπτυξη κατάλληλων υλικών που έχουν την απαιτούμενη αγωγιμότητα, είναι χημικά συμβατά με τα υπόλοιπα μέρη του στοιχείου, έχουν υψηλό σημείο τήξης, έχουν συγκεκριμένη πυκνότητα προς αποφυγήν μίξης του καυσίμου και των οξειδωτικών αερίων, έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά θερμικής διαστολής.

1.3.2 Κυψέλες καυσίμου τετηγμένων ανθρακικών αλάτων - MCFC

Οι MCFCs χρησιμοποιούν έναν ηλεκτρολύτη ο οποίος είναι συνδυασμός ανθρακικών αλκαλίων. Η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί στους 600 έως 700 ° C όπου τα ανθρακικά αλκάλια σχηματίζουν ένα άκρως αγώγιμο τετηγμένο άλας, με ανθρακικά ιόντα που παρέχουν ιοντική αγωγή. Στη θερμοκρασία λειτουργίας κυψελών καυσίμου, η δομή του ηλεκτρολύτη είναι μια παχιά πάστα και η πάστα παρέχει συνδέσμους στεγάνωσης αερίου στις άκρες των κυψελών.

Αναπτύχθηκε κυρίως με σκοπό να χρησιμοποιηθεί σε μεγάλες στατικές και θαλάσσιες εφαρμογές καθώς και σε συνδυασμό με ένα ευρύ φάσμα συμβατικών και ανανεώσιμων καυσίμων.



ΕΙΚΟΝΑ 1.5 ΔΟΜΗ MCFC [25]

Αντίδραση ανόδου: $\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$

Αντίδραση καθόδου: $\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$

Συνολική αντίδραση: $\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

Πλεονεκτήματα των MCFCs:

- Λόγω της υψηλής θερμοκρασία λειτουργίας δεν απαιτούνται ακριβοί ηλεκτρο-καταλύτες καθώς τα ηλεκτρόδια νικελίου παρέχουν επαρκή δραστικότητα.
- Υψηλή απορριπτόμενη θερμότητα
- Υψηλή αποδοτικότητα
- Κινητική ταχείας αντίδρασης
- Δεν απαιτούνται καταλύτες ευγενούς μετάλλου

Μειονεκτήματα των MCFCs:

- Απαιτούνται υλικά που είναι ανθεκτικά στη διάβρωση, σταθερών διαστάσεων και υψηλής αντοχής.
- Υψηλή έλλειψη ανεκτικότητας στο Θείο
- Λόγω του υγρού ηλεκτρολύτη εμφανίζονται προβλήματα με το χειρισμό των υγρών

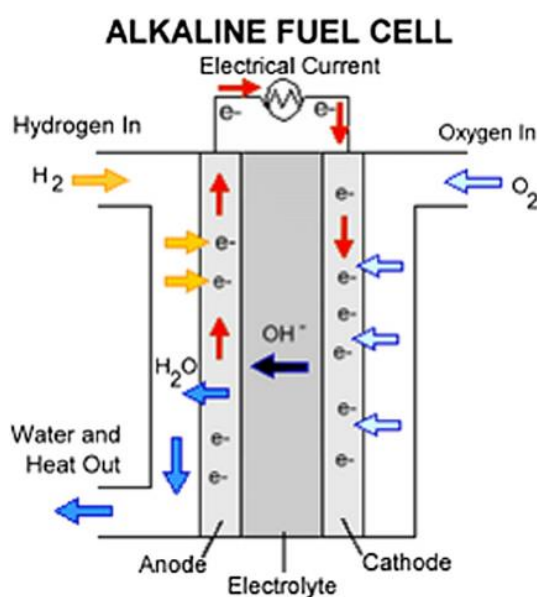
1.3.3 Κυψέλες καυσίμου αλκαλικές – AFC

Ο ηλεκτρολύτης συνήθως αποτελείται από ένα τετηγμένο αλκαλικό μίγμα όπως το υδροξείδιο του καλίου (KOH) και μπορεί να είναι κινητός ή ακίνητος. Σε αυτή την κυψέλη καυσίμου συμπυκνώνεται (85% κατά βάρος) KOH για κυψέλες καυσίμου που λειτουργούν σε υψηλά επίπεδα θερμοκρασίας (~ 250 ° C), ή συμπυκνώνεται λιγότερο (35 έως 50% κ.β.) KOH για χαμηλότερες θερμοκρασίες (<120 ° C).

Οι κυψέλες καυσίμου με κινητό ηλεκτρολύτη χρησιμοποιούν έναν υγρό ηλεκτρολύτη που κυκλοφορεί συνεχώς μεταξύ των ηλεκτροδίων.

Το νερό και η αποβαλλόμενη θερμότητα αραιώνουν και θερμαίνουν τον υγρό ηλεκτρολύτη.

Οι κυψέλες καυσίμου με ακίνητο αλκαλικό ηλεκτρολύτη χρησιμοποιούν έναν ηλεκτρολύτη που αποτελείται από μια παχιά πάστα που συγκρατείται από τις τριχοειδείς δυνάμεις μέσα σε μια πορώδη μήτρα στήριξης όπως ο αμιάντος. Το νερό εξατμίζεται στο ρεύμα υδρογόνου. Η θερμότητα απορρίπτεται μέσω ενός ψυκτικού μέσου.



ΕΙΚΟΝΑ 1.6 ΔΟΜΗ AFC [25]

Αντίδραση ανόδου: $\text{H}_2 + 2\text{OH}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$

Αντίδραση καθόδου: $\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$

Συνολική αντίδραση: $\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

Πλεονεκτήματα των AFCs:

- Λειτουργούν σε χαμηλή θερμοκρασία
- Υψηλή αποδοτικότητα
- Ελάχιστη διάβρωση
- Γρήγοροι χρόνοι εκκίνησης

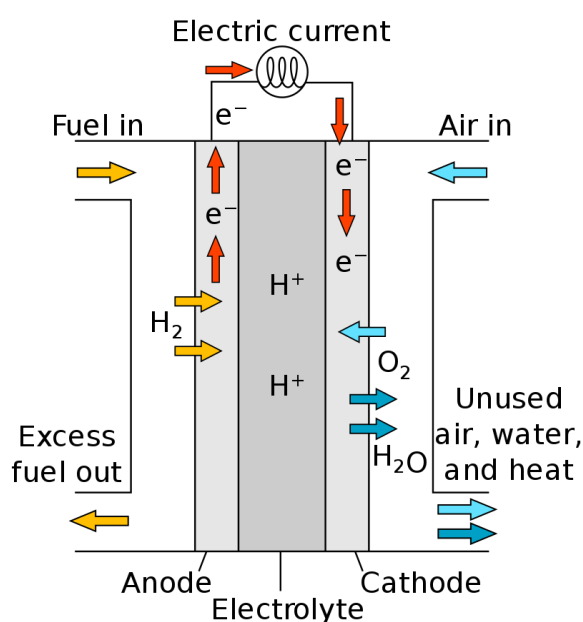
Μειονεκτήματα των AFCs:

- Έχουν μικρή διάρκεια ζωής
- Παρουσιάζουν μεγάλη έλλειψη ανεκτικότητας στο CO₂
- Απαιτείται πολύπλοκη διαχείριση των υδάτων
- Λόγω του υγρού ηλεκτρολύτη εμφανίζονται προβλήματα με το χειρισμό των υγρών

1.3.4 Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος – PAFC

Ηλεκτρολύτης σε αυτήν την κυψέλη καυσίμου είναι το Φωσφορικό οξύ. Συνήθης θερμοκρασίες λειτουργίας είναι 150 έως 220°C. Η σχετική σταθερότητα του φωσφορικού οξέος είναι υψηλή σε σύγκριση με άλλα κοινά οξέα έτσι τα PAFCs είναι ικανά να λειτουργούν στο υψηλό άκρο του εύρους θερμοκρασίας του οξέος (100 έως 220°C).

Τα PAFCs χρησιμοποιούνται κυρίως σε στατικές εφαρμογές. Η ανάπτυξη τους τα τελευταία χρόνια έχει πιο αργούς ρυθμούς σε σύγκριση με το παρελθόν καθώς τα PEFCs, για τα οποία θα μιλήσουμε παρακάτω, θεωρείται ότι είναι οικονομικά πιο αποδοτικά.



ΕΙΚΟΝΑ 1.7 ΔΟΜΗ PAFC [25]

Αντίδραση ανόδου: $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$

Αντίδραση καθόδου: $\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

Συνολική αντίδραση: $\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

Πλεονεκτήματα των PAFCs:

- Είναι ανθεκτικά στο διοξείδιο του άνθρακα
- Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι αρκετά χαμηλή ώστε να επιτρέπει τη χρήση κοινών κατασκευαστικών υλικών.
- Έχουν ηλεκτρολύτες με σταθερά χαρακτηριστικά οι οποίοι έχουν χαμηλή πτητικότητα ακόμα και σε θερμοκρασίες λειτουργίας έως και 200 °C.
- Η θερμοκρασία λειτουργίας παρέχει επίσης σημαντική ευελιξία στον σχεδιασμό για τη θερμική διαχείριση

Μειονεκτήματα των PAFCs:

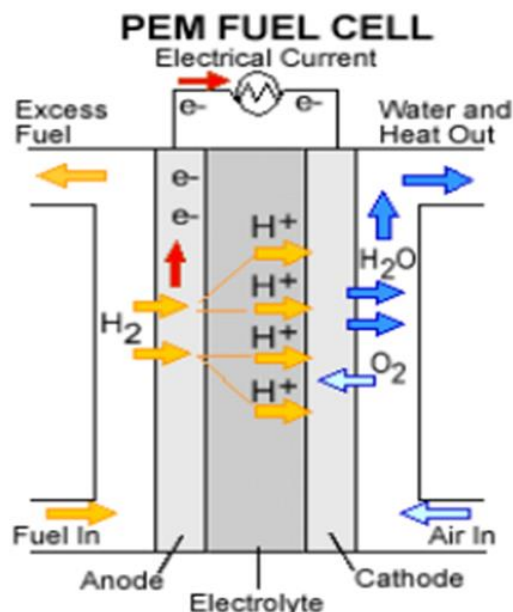
- Η μείωση του οξυγόνου από την πλευρά της καθόδου είναι βραδύτερη από αυτή στα AFCs και απαιτείται η χρήση καταλύτη λευκόχρυσου.
- Εξαιτίας της υψηλά διαβρωτικής φύσεως του φωσφορικού οξέος είναι απαραίτητη σε κάποια σημεία η χρήση δαπανηρών υλικών.
- Επιτρέπουν στο παραγόμενο νερό να εισέλθει και να αραιώσει τον ηλεκτρολύτη
- Πρέπει να προθερμαίνονται πριν λειτουργήσουν ή να διατηρούνται συνεχώς στη θερμοκρασία λειτουργίας τους
- Λόγω του υγρού ηλεκτρολύτη εμφανίζονται προβλήματα με το χειρισμό των υγρών

1.3.5 Κυψέλες καυσίμου πολυμερούς ηλεκτρολύτη – PEFC

Ο ηλεκτρολύτης σε αυτή την κυψέλη καυσίμου είναι μια μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων που είναι ένας εξαιρετικός αγωγός πρωτονίων. Τα προβλήματα διάβρωσης είναι ελάχιστα καθώς το μόνο υγρό σε αυτήν την κυψέλη καυσίμου είναι το νερό.

Πολύ σημαντική είναι η διαχείριση του νερού στη μεμβράνη. Η λειτουργία πρέπει να γίνεται υπό συνθήκες όπου το παραπροϊόν νερό δεν εξατμίζεται ταχύτερα από ό,τι παράγεται επειδή η μεμβράνη πρέπει να ενυδατώνεται. Λειτουργεί σε χαμηλά εύρη θερμοκρασιών περίπου 60 έως 80°C.

Τα PEFCs χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών ειδικά ως βασική πηγή ισχύος για οχήματα με κυψέλες καυσίμου. Η επένδυση σε PEFCs την τελευταία δεκαετία ξεπερνά εύκολα τις επενδύσεις σε όλους τους άλλους τύπους κυψελών καυσίμου μαζί.



ΕΙΚΟΝΑ 1.8 ΔΟΜΗ PEFC Η ΑΛΛΙΩΣ PEM [25]

Αντίδραση ανόδου: $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$

Αντίδραση καθόδου: $\frac{1}{2}\text{O}_2 + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

Συνολική αντίδραση: $\text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$

Πλεονεκτήματα των PEFCs:

- Ο ηλεκτρολύτης των PEFCs παρέχει εξαιρετική αντίσταση στην διασταύρωση των αερίων
- Δεν απαιτείται χρήση εξωτικών υλικών σε κάποια σημεία όπως σε άλλους τύπους κυψελών καυσίμου λόγω της απουσίας διαβρωτικών στοιχείων
- Η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας επιτρέπει την ταχεία εκκίνηση
- Έχουν σχετικά απλό μηχανολογικό σχεδιασμό
- Λειτουργούν σε χαμηλή πίεση γεγονός που αυξάνει την ασφάλεια χρήσης

Μειονεκτήματα των PEFCs:

- Η χαμηλή και στενή περιοχή θερμοκρασίας λειτουργίας καθιστά τη θερμική διαχείριση δύσκολη
- Δύσκολη επίσης είναι η διαχείριση των υδάτων καθώς οι μηχανικοί πρέπει να εξασφαλίσουν την επαρκή ενυδάτωση του ηλεκτρολύτη χωρίς να τον πλημμυρίσουν.
- Χρησιμοποιεί έναν ακριβό καταλύτη λευκοχρύσου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Αρχή λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου

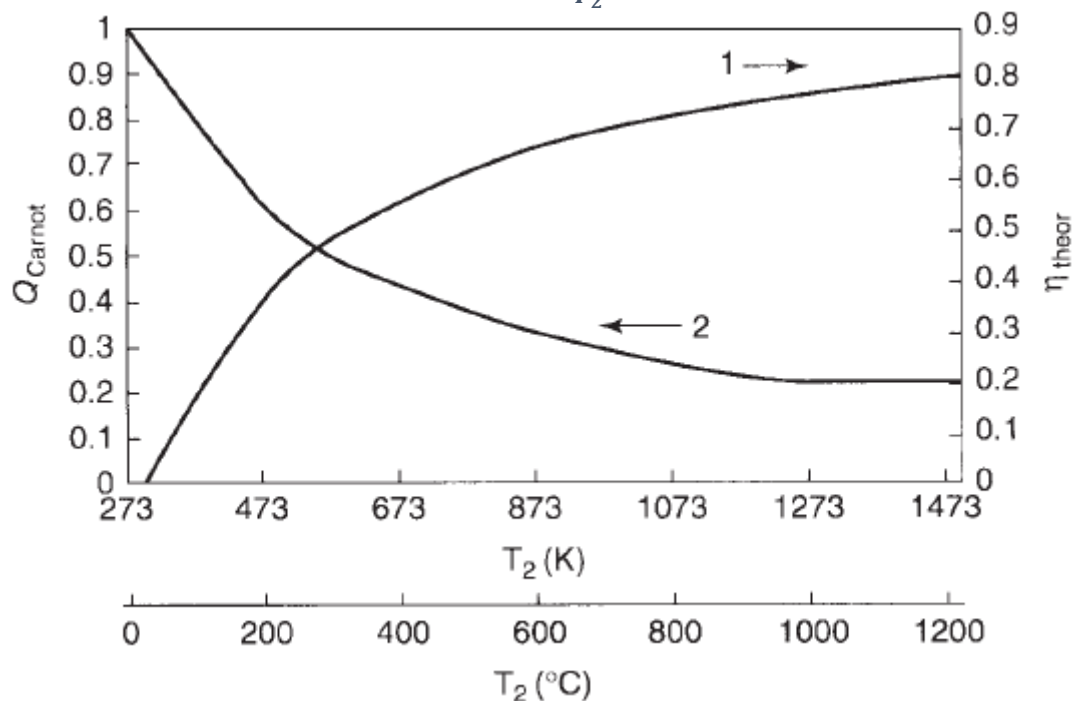
2.1 Θερμοδυναμικές πτυχές

2.1.1 Περιορισμοί του κύκλου Carnot

Η θερμική ενέργεια Q_{react} που ελευθερώνεται κατά την καύση (μια χημική αντίδραση οξείδωσης με οξυγόνο) των φυσικών καυσίμων και ονομάζεται ενθαλπία αντίδρασης ή κατώτερη θερμογόνος ικανότητα (LHV). Μεγάλο μέρος αυτής της θερμικής ενέργειας χρησιμοποιείται για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας σε θερμικές μηχανές.

Σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής, η μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε μηχανική W_m συνοδεύεται πάντα από την απώλεια σημαντικού μέρους της θερμικής αυτής ενέργειας. Μια θερμική μηχανή που λειτουργεί σύμφωνα με τον κύκλο Carnot σε ένα εύρος θερμοκρασιών με ανώτερη την T_2 και κατώτερη την T_1 εμφανίζει την υψηλότερη δυνατή απόδοση η_{theor} από τον τύπο:

$$\eta_{\text{theor}} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \quad (2.1)$$



ΕΙΚΟΝΑ 2.1 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΥ CARNOT: (1) ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ η_{THEOR} , (2) ΘΕΡΜΟΤΗΤΑ CARNOT Q_{CARNOT} [46]

Η θερμότητα Carnot Q_{Carnot} , ή αλλιώς οι περιορισμοί του κύκλου Carnot, προκύπτει από την εξίσωση:

$$Q_{Carnot} = \frac{T_1}{T_2} * Q_{react} \quad (1.2)$$

Οι απώλειες αυτές δεν υπάρχει τρόπος να μειωθούν. Για έναν ατμοκινητήρα που λειτουργεί με υπέρθερμο ατμό 350°C ($T_2 = 623 \text{ K}$) και απελευθερώνει τον ατμό εξαγωγής σε ένα μέσο που έχει θερμοκρασία περιβάλλοντος 25°C ($T_1 = 298 \text{ K}$), η μέγιστη απόδοση σύμφωνα με την εξίσωση (2.1) είναι περίπου 50%, έτσι ώστε η μισή θερμική ενέργεια χάνεται. Στην πράξη, η πραγματική απόδοση η οποία μπορεί να επιτευχθεί είναι ακόμα μικρότερη λόγω διαφόρων άλλων τύπων θερμικών απωλειών.

2.1.2 Ηλεκτροχημική μετατροπή ενέργειας

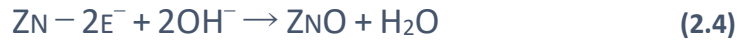
Οι κυψέλες καυσίμου, όπως οι μπαταρίες, είναι μια ποικιλία από γαλβανικά στοιχεία. Το ηλεκτρικό ρεύμα σε αυτά παράγεται μέσω μιας χημικής αντίδρασης με την επίδραση ενός μέσου οξείδωσης και ενός αναγωγικού μέσου. Στα στοιχεία υδραργύρου το ρεύμα δημιουργείται μέσω μιας συνολικής αντίδρασης μεταξύ οξειδίου του υδραργύρου (HgO) και μεταλλικό ψευδάργυρο (Zn).



η αντίδραση συνεπάγεται αλλαγή στις καταστάσεις σθένους των μετάλλων:



Όταν πραγματοποιείται ένας ηλεκτροχημικός μηχανισμός, τότε στο παρόν παράδειγμα, τα ηλεκτρόνια αποσπώνται από τον ψευδάργυρο σε ένα ηλεκτρόδιο, με αποτέλεσμα να διαλύεται ο ψευδάργυρος σε ένα υδατικό μέσο.



η οποία είναι η αντίδραση οξείδωσης του ψευδαργύρου που εμφανίζεται στην άνοδο.

Ουσιαστικά:

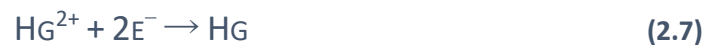


και προστίθενται στο οξείδιο του υδραργύρου (HgO ή Hg²⁺) στο άλλο ηλεκτρόδιο, κάνοντας τον υδραργύρο να εναποθέτει στο ηλεκτρόδιο:



η οποία είναι η αντίδραση αναγωγής του υδραργύρου που εμφανίζεται στην κάθοδο.

Ουσιαστικά:



όπου η συνολική αντίδραση λαμβάνει χώρα χωριστά σε δύο διαφορετικά ηλεκτρόδια που έρχονται σε επαφή με το (υδατικό) μέσο ή τον ηλεκτρολύτη.

Οι αντιδράσεις (2.4) και (2.6) θα πραγματοποιηθούν μόνο όταν τα δύο ηλεκτρόδια συνδέονται εκτός της κυψέλης που τα περιέχει. Στη συνέχεια, τα ηλεκτρόνια ρέουν από την άνοδο του ψευδαργύρου (τον αρνητικό πόλο του στοιχείου) στην κάθοδο του υδραργυρικού οξειδίου (το θετικό πόλο).

Από την συνολική θερμική ενέργεια των αντιδράσεων ένα ορισμένο μέρος, που ονομάζεται ενέργεια αντίδρασης Gibbs (- ΔG), ελευθερώνεται ως ηλεκτρική ενέργεια W_e . Η υπόλοιπη ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα, την λεγόμενη λανθάνουσα θερμότητα Q_{lat} .

$$Q_{\text{REACT}} = W_e + Q_{\text{LAT}} \quad (2.8)$$

Η υψηλότερη δυνατή θεωρητική απόδοση αυτού του τρόπου μετατροπής προκύπτει:

$$n_{\text{theor}} = \frac{Q_{\text{react}} - Q_{\text{lat}}}{Q_{\text{react}}} \quad (2.9)$$

2.2 Βασικές αρχές λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου

Μια κυψέλη καυσίμου είναι μια συσκευή μετατροπής της ενέργειας που μετατρέπει τη χημική ενέργεια ενός καυσίμου απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια χωρίς καμία ενδιάμεση θερμική ή μηχανική διεργασία.

Σε μια μηχανή εσωτερικής καύσης, η αντίδραση λαμβάνει χώρα με καύση και η ενέργεια απελευθερώνεται με τη μορφή θερμότητας. Σε μια κυψέλη καυσίμου, η αντίδραση λαμβάνει χώρα ηλεκτροχημικά και η ενέργεια απελευθερώνεται ως συνδυασμός ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλής τάσης DC και θερμότητας.

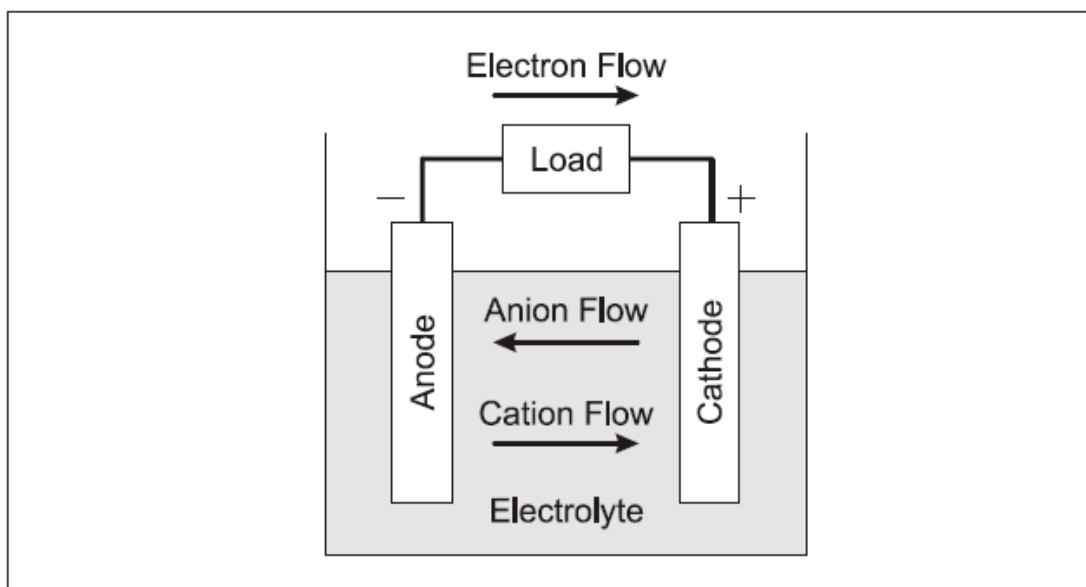
Σε γαλβανικά στοιχεία, όπως οι κυψέλες καυσίμων και οι μπαταρίες, οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις αποτελούν τη βάση στην οποία η χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.

2.2.1 Γαλβανικά στοιχεία

Όλα τα γαλβανικά κύτταρα αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια - μια άνοδο και μια κάθοδο - και έναν ηλεκτρολύτη. Η άνοδος, το αρνητικό ηλεκτρόδιο, είναι κατασκευασμένη από μια ουσία που είναι οξειδωμένη (απελευθερώνει ηλεκτρόνια). Η κάθοδος, το θετικό ηλεκτρόδιο είναι κατασκευασμένη από μια ουσία που είναι αναγωγική (δέχεται ηλεκτρόνια).

Προκειμένου να επωφεληθούν από τη διαθέσιμη ηλεκτρική ενέργεια, τα ηλεκτρόδια πρέπει να χωρίζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε τα ηλεκτρόνια μπορούν να ρέουν από την άνοδο στην κάθοδο μέσω ενός εξωτερικού φορτίου ενώ εξακολουθούν να βρίσκονται σε επαφή ώστε η αντίδραση να προχωρήσει. Για να επιτευχθεί αυτό, η άνοδος και η κάθοδος χωρίζονται από έναν ηλεκτρολύτη.

Ο ηλεκτρολύτης είναι μια ουσία που άγει ιόντα, δηλαδή άτομα που έχουν αποκτήσει ηλεκτρικό φορτίο μέσω της απώλειας ή της αύξησης ενός ή περισσότερων ηλεκτρονίων.



ΕΙΚΟΝΑ 2.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΝΟΣ ΓΑΛΒΑΝΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ [44]

Στην πράξη, το υλικό ανόδου διαλύεται στον ηλεκτρολύτη που σχηματίζει θετικά φορτισμένα κατιόντα και αφήνει πίσω του μια συσσώρευση ελεύθερων ηλεκτρονίων εντός της ίδιας της ανόδου. Αυτή η συσσώρευση ηλεκτρονίων αποτελεί το αρνητικό φορτίο.

Αντιστρόφως, το υλικό καθόδου έχει την τάση να προσελκύει θετικά κατιόντα που προέρχονται είτε από την άνοδο ή από την ουσία του ίδιου του ηλεκτρολύτη. Ένα ηλεκτρικό δυναμικό υπάρχει μεταξύ της καθόδου και της ανόδου αφού η πρώτη είναι φορτισμένη θετικά σε σχέση με την τελευταία.

Η χημική αντίδραση μεταξύ της ανόδου και της καθόδου δεν μπορεί να ολοκληρωθεί όσο τα ηλεκτρόνια παραμένουν παγιδευμένα μέσα στην άνοδο. Προκειμένου να απελευθερωθούν τα ηλεκτρόνια, το ηλεκτρικό κύκλωμα μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων πρέπει να ολοκληρωθεί μέσω μιας εξωτερικής διαδρομής της ροής.

Μόλις συνδεθεί η άνοδος και η κάθοδος, τα πλεονάζοντα ηλεκτρόνια από τη ροή ανόδου στην κάθοδο ολοκληρώνουν τη χημική αντίδραση. Καθώς η κάθοδος χάνει το πλεόνασμα ηλεκτρονίων της και ως εκ τούτου το αρνητικό της φορτίο, περισσότερα ιόντα καθόδου διαλύονται για να παράγουν μια νέα περίσσεια ηλεκτρονίων. Καθώς η κάθοδος αποκτά ηλεκτρόνια και χάνει το θετικό της φορτίο, περισσότερο θετικά κατιόντα έλκονται από την κάθοδο.

Συνολικά, η καθαρή χημική μεταβολή που συμβαίνει μέσα σε ένα γαλβανικό στοιχείο είναι το αποτέλεσμα των μεμονωμένων αντιδράσεων στην άνοδο και στην κάθοδο, οι οποίες πάντα παραμένουν ισορροπημένες με τέτοιο τρόπο ώστε να αποκτηθεί και να χαθεί ο ίδιος αριθμός ηλεκτρονίων.

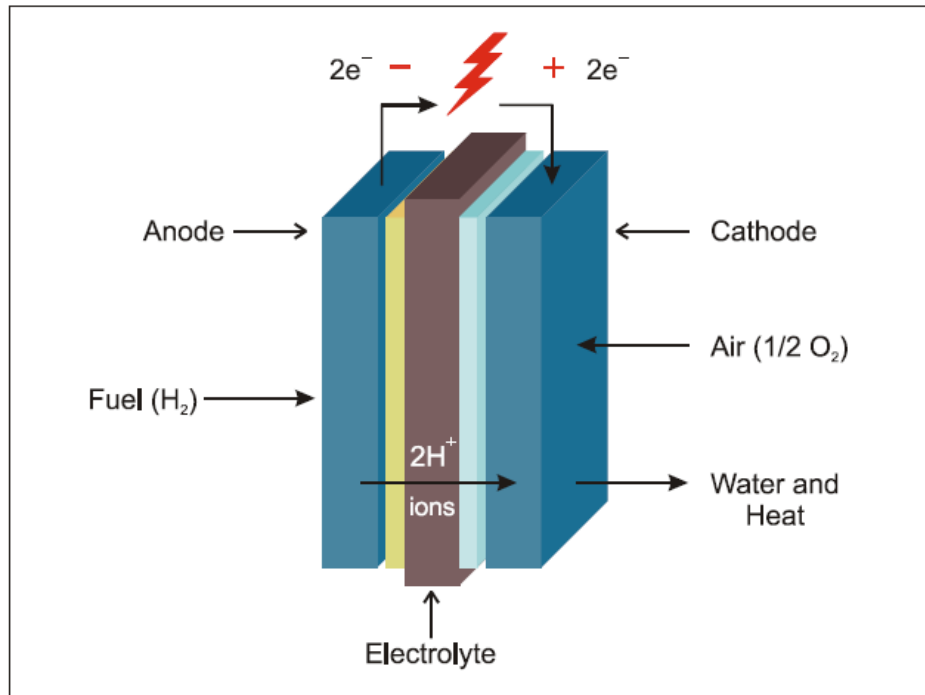
2.2.2 Κυψέλες καυσίμων

Σε μια κυψέλη καυσίμου, το καύσιμο και τα ίδια τα οξειδωτικά αέρια συνιστούν την άνοδο και την κάθοδο αντίστοιχα. Έτσι, η φυσική δομή μιας κυψέλης καυσίμου είναι αυτή όπου τα αέρια κατευθύνονται μέσω διαύλων ροής προς την κάθε πλευρά του ηλεκτρολύτη.

Οι ηλεκτρολύτες μπορεί να είναι υγροί ή στερεοί, με μερικούς να λειτουργούν σε υψηλές και άλλους σε χαμηλές θερμοκρασίες. Οι κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας τείνουν να απαιτούν έναν καταλύτη ευγενούς μετάλλου, συνήθως πλατίνα, για να βοηθούν τις αντιδράσεις ηλεκτροδίων, ενώ οι κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας δεν τον χρειάζονται.

Μια κυψέλη καυσίμου μπορεί να λειτουργήσει χρησιμοποιώντας μια ποικιλία καυσίμων και οξειδωτικών. Το υδρογόνο έχει αναγνωριστεί από καιρό ως το πιο αποτελεσματικό καύσιμο για τις κυψέλες καυσίμων, όπως επίσης και το οξυγόνο θεωρείται η προφανής επιλογή του οξειδωτικού, λόγω της υψηλής αντιδραστικότητας και της αφθονίας του στον αέρα.

Προκειμένου να αποκλειστεί η τυχαία επαφή μεταξύ ανόδου και καθόδου (πράγμα που οδηγεί σε ένα εσωτερικό βραχυκύκλωμα της κυψέλης), έναν ηλεκτρονικά μονωτικό πορώδη διαχωριστή (που κρατά ένα διάλυμα ηλεκτρολύτη που υποστηρίζει την τρέχουσα μεταφορά από ιόντα) είναι συχνά τοποθετημένο στο κενό μεταξύ αυτών των ηλεκτροδίων.



ΕΙΚΟΝΑ 2.3 ΓΕΝΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ [44]

Αν και έχει ληφθεί υπόψη ένα ευρύ φάσμα γεωμετρικών στοιχείων των κυψελών καυσίμου, οι περισσότερες κυψέλες καυσίμου βρίσκονται υπό ανάπτυξη τώρα είναι είτε επίπεδες (ορθογώνιες ή κυκλικές) ή σωληνοειδείς (μονής ή διπλής απολήξεως και κυλινδρικές ή πεπλατυσμένες).

2.3 Συστοιχία κυψελών καυσίμων

Για τις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές κυψελών καυσίμου, τα στοιχεία μονάδας πρέπει να συνδυάζονται σε στοίβες για να επιτευχθεί το επίπεδο εξόδου τάσης και ισχύς που απαιτείται για την εφαρμογή. Κατά κανόνα, κάθε μεμονωμένη κυψέλη καυσίμου έχει χαμηλή τάση λειτουργίας μικρότερη από 1 V. Οι περισσότεροι χρήστες χρειάζονται πολύ μεγαλύτερη τάση: για παράδειγμα, 6, 12 ή 24 V ή περισσότερο. Συνεπώς, σε μια εγκατάσταση κυψελών καυσίμου η σύνδεση γίνεται σε σειρά με την δημιουργία στοιβών. Παρακάτω παρατίθενται κάποιοι βασικοί τύποι συστοιχιών.

2.3.1 Επίπεδη διπολική στοίβαξη

Ο συνηθέστερος σχεδιασμός κυψελών καυσίμου σε στοίβες είναι η επίπεδη-διπολική διάταξη. Οι επιμέρους μονάδες συνδέονται ηλεκτρικά με διασυνδέσεις. Η διασύνδεση έχει δύο λειτουργίες:

- Την παροχή σειριακής ηλεκτρικής σύνδεσης μεταξύ γειτονικών κυψελών
- Την παροχή ενός φράγματος αερίου που διαχωρίζει το καύσιμο και το οξειδωτικό των γειτονικών κυττάρων

Σε πολλούς σχεδιασμούς κυψελών καυσίμου επίπεδης διπολικής στοίβαξης η διασύνδεση περιλαμβάνει επίσης κανάλια που κατανέμουν τη ροή του αερίου πάνω από τα στοιχεία.

Πλεονεκτήματα:

- Ηλεκτρονικά απλός σχεδιασμός και κατασκευή
- Χαμηλή αντίσταση λόγω σύντομων διαδρομών των ρευμάτων

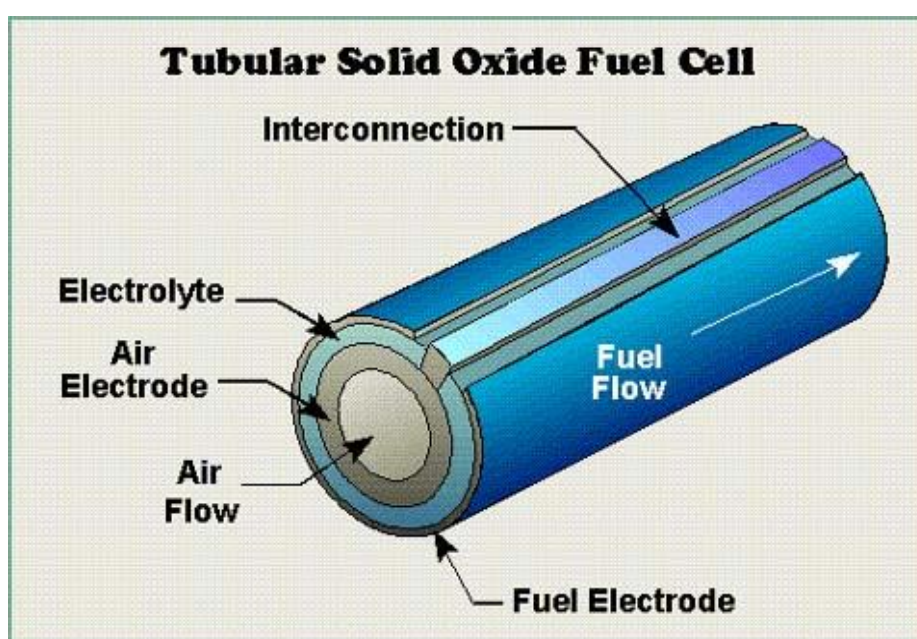


ΕΙΚΟΝΑ 2.4 ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΑΠΟ [6]

2.3.2 Στοιβες με σωληνοειδή στοιχεία

Χρησιμοποιούνται κυρίως για λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες. Έχουν κάποια βασικά πλεονεκτήματα όπως η στεγανοποίηση και η δομική ακεραιότητα των στοιχείων.

Ο γεωμετρικός σχεδιασμός τους όμως αποτελεί βασικό μειονέκτημα καθώς πρέπει να συνδυαστεί με υψηλή πυκνότητα ισχύος και μικρές διαδρομές ρεύματος. Οι συστοιχίες κυψελών μπορούν να συνδεθούν σε σειρά ή παράλληλα.



ΕΙΚΟΝΑ 2.5 ΣΩΛΗΝΟΕΙΔΗ ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΤΥΠΟΥ SOFC [7]

Στην εικόνα 2.5 βλέπουμε τη διάταξη των συστατικών στοιχείων στη σωληνοειδή κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου. Ο αέρας διοχετεύεται στη στοίβα των κυψελών και μέσα από το κέντρο κάθε σωλήνα. Το εσωτάτο στρώμα του σωλήνα είναι η κάθοδος του κυττάρου και περιβάλλεται από τον ηλεκτρολύτη (μεσαίο στρώμα). Το καύσιμο ρέει πάνω από το εξωτερικό στρώμα που χρησιμεύει ως άνοδος.

2.4 Βασικές παράμετροι λειτουργίας των κυψελών καυσίμων

Η χρήση των σωστών συνθηκών λειτουργίας για κάθε παράμετρο είναι κρίσιμη για την επίτευξη καλής απόδοσης των κυψελών καυσίμου.



ΕΙΚΟΝΑ 2.6 AEROSTAK A-1000-LV (ULTRALIGHT 1000 W LOW VOLTAGE PEM FUEL CELL SYSTEM) [6]

Οι παράμετροι λειτουργίας που επηρεάζουν την απόδοση των κυψελών καυσίμου είναι:

- **Πίεση λειτουργίας**

Μια κυψέλη καυσίμου μπορεί να λειτουργήσει υπό πίεση περιβάλλοντος ή υπό συγκεκριμένη πίεση. Η απόδοση των κυψελών καυσίμου βελτιώνεται συχνά με αυξημένη πίεση. Οι συνθήκες λειτουργίας των κυψελών καυσίμου πρέπει να αναλύονται υπό την οπτική του συστήματος, καθώς η διαχείριση των υδάτων του στοιχείου εξαρτάται από την συμπίεση του καυσίμου και η ανάγκη για συμπίεση και αποθήκευση αερίου μπορεί να καταστήσει το σύστημα λιγότερο αποτελεσματικό.

● **Θερμοκρασία λειτουργίας**

Υψηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας δημιουργεί υψηλότερη απόδοση των κυψελών καυσίμου. Για κάθε σχεδιασμό κυψελών καυσίμου, υπάρχει μια βέλτιστη θερμοκρασία και η θερμοκρασία λειτουργίας πρέπει να επιλέγεται ειδικά για κάθε σύστημα κυψελών καυσίμου.

Παράγοντες που επηρεάζονται λόγω υψηλότερης θερμοκρασίας είναι το γεγονός ότι περισσότερο από το παραγόμενο νερό εξατμίζεται έτσι ώστε η αποβαλλόμενη θερμότητα να εισέρχεται στην λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης και λιγότερο υγρό νερό ωθείται έξω από την κυψέλη καυσίμου.

Επίσης, λόγω υψηλότερης θερμοκρασίας έχουμε ταχύτερη κινητική και αύξηση τάσης που υπερβαίνει την απώλεια τάσης από την αρνητική θερμοδυναμική σχέση μεταξύ της τάσης του ανοικτού κυκλώματος και της θερμοκρασίας.

Οι χαμηλότερες θερμοκρασίες ισοδυναμούν με μικρότερους χρόνους προθέρμανσης για το σύστημα κυψελών καυσίμου και χαμηλότερες θερμομηχανικές καταπονήσεις.

● **Ρυθμός ροής των αντιδραστηρίων**

Ο ρυθμός ροής των αντιδραστηρίων πρέπει να είναι ίσος ή μεγαλύτερος από τον ρυθμό με τον οποίο αυτά τα αντιδραστήρια καταναλώνονται εντός του στοιχείου. Το οξυγόνο και το υδρογόνο εισάγονται στο σύστημα κυψελών καυσίμου με τον κατάλληλο ρυθμό ροής που απαιτείται για το απαιτούμενο ρεύμα.

Ακόμη και σε ένα σύστημα που χρησιμοποιεί ατμοσφαιρική πίεση, απαιτείται πίεση ελαφρώς πάνω από την ατμοσφαιρική για να ωθηθούν τα αέρια μέσω των πεδίων ροής και να ωθηθεί έξω το νερό. Η πρόσθετη πίεση που απαιτείται είναι 0,1 έως 2,0 psi (0,7 έως 13,8 kPa) πάνω από την ατμοσφαιρική.

• Υγρασία των αντιδραστηρίων

Σε υψηλές πυκνότητες ρεύματος, η μεταφορά από την άνοδο με ηλεκτρική ωσμωτική οπισθέλκηση υπερβαίνει τη μεταφορά στην άνοδο με την οπίσθια διάχυση από την κάθοδο, πράγμα που οδηγεί σε αφυδάτωση μεμβράνης και υποβάθμιση της απόδοσης.

Ο αέρας που έχει χαμηλή υγρασία μπορεί να επιδεινώσει αυτό το αποτέλεσμα μειώνοντας την ταχύτητα της οπίσθιας διάχυσης από την κάθοδο. Όταν ο αέρας έχει υψηλά επίπεδα υγρασίας, η απόδοση βελτιώνεται μόνο ελαφρώς λόγω της οπίσθιας διάχυσης του νερού στην κάθοδο.

2.5 Βασικά εξαρτήματα μιας κυψέλης καυσίμου

• Καταλύτης

Οι ηλεκτροχημικές συσκευές πρέπει να χρησιμοποιούν καταλύτες για να λειτουργούν και να παρέχουν υψηλή απόδοση. Οι καταλύτες μειώνουν την ενέργεια ενεργοποίησης των αντιδράσεων όπως της αντίδρασης οξείδωσης υδρογόνου, της αντίδρασης αναγωγής οξυγόνου, της οξείδωσης του νερού κ.α..

Βασικά υλικά κατασκευής καταλυτών είναι ο λευκόχρυσος καθώς και κράματα λευκόχρυσου, το παλλάδιο και άλλα παρόμοια υλικά.



ΕΙΚΟΝΑ 2.7 ΚΑΤΑΛΥΤΗΣ ΛΕΥΚΟΧΡΥΣΟΥ [6]

• Ηλεκτρόδια

Σε μια τυπική κυψέλη καυσίμου υπάρχει η άνοδος (αρνητικό ηλεκτρόδιο) και η κάθοδος (θετικό ηλεκτρόδιο). Στην άνοδο ένας καταλύτης οξειδώνει το καύσιμο, συνήθως υδρογόνο, μετατρέποντας το καύσιμο σε θετικά φορτισμένα ιόντα και ένα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια. Ο ηλεκτρολύτης είναι μια ουσία ειδικά σχεδιασμένη ώστε τα ιόντα να μπορούν να περάσουν μέσα από αυτό, αλλά τα ηλεκτρόνια να μην μπορούν.

Τα απελευθερωμένα ηλεκτρόνια κινούνται μέσω ενός καλωδίου δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα. Τα ιόντα περνούν από τον ηλεκτρολύτη στην κάθοδο. Μόλις φθάσουν στην κάθοδο, τα ιόντα επανασυνδέονται με τα ηλεκτρόνια και τα δύο αντιδρούν με μια τρίτη χημική ουσία, συνήθως οξυγόνο, για να δημιουργήσουν νερό ή διοξείδιο του άνθρακα.

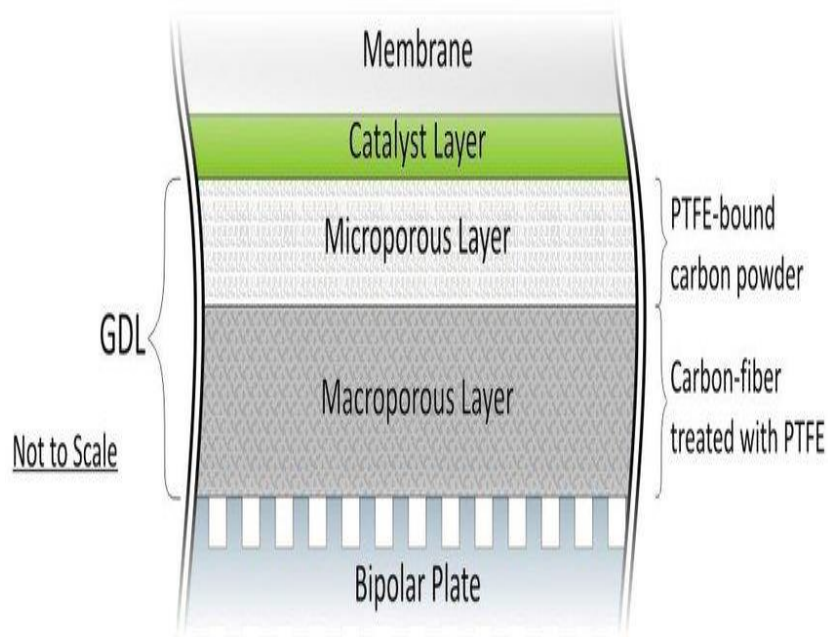


ΕΙΚΟΝΑ 2.8 ΧΑΡΤΙΝΑ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑ ΜΑΥΡΟΥ ΛΕΥΚΟΧΡΥΣΟΥ – ΑΝΘΡΑΚΑ 2 mg/cm² [6]

• Στρώματα διάχυσης αερίων (GDL)

Αποτελούν βασικά εξαρτήματα σε διάφορους τύπους κυψελών καυσίμου καθώς παρέχουν υψηλή ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα και αντοχή στη χημική διάβρωση. Ελέγχουν τη σωστή ροή των αντιδρώντων αερίων και διαχειρίζονται την μεταφοράς νερού έξω από τη μεμβράνη.

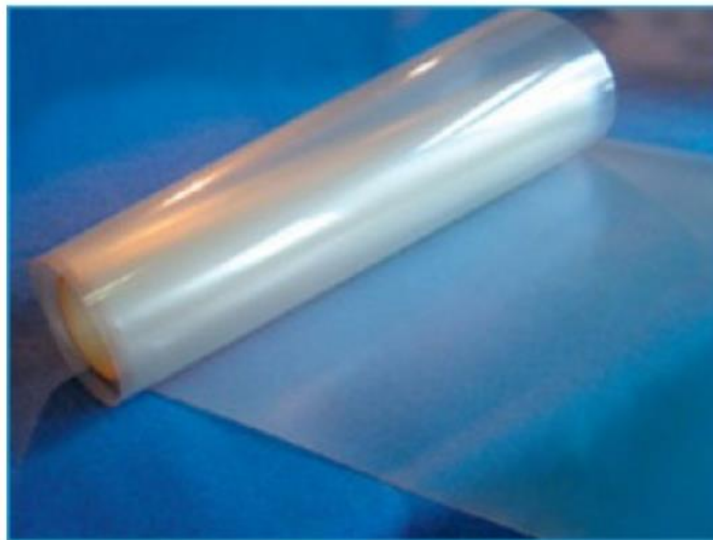
Κάθε GDL αποτελείται τυπικά από ένα φύλλο χαρτιού άνθρακα στο οποίο οι ίνες άνθρακα είναι μερικώς επικαλυμμένες με πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE). Τα αέρια διαχέονται γρήγορα μέσα από τους πόρους των GDL. Η εσωτερική επιφάνεια του GDL επικαλύπτεται με ένα λεπτό στρώμα άνθρακα μεγάλης επιφάνειας που αναμιγνύεται με PTFE, που ονομάζεται μικροπορώδες στρώμα.



ΕΙΚΟΝΑ 2.9 ΕΓΚΑΡΣΙΑ ΤΟΜΗ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ ΑΕΡΙΩΝ [54]

- **Μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων**

Για να λειτουργήσει μια κυψέλη καυσίμου χρειάζεται μια μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων, καθώς επιτρέπει μόνο τη διέλευση των απαραίτητων ιόντων μεταξύ της ανόδου και της καθόδου. Άλλες ουσίες που διέρχονται μέσω του ηλεκτρολύτη μπορούν διαταράξουν τη χημική αντίδραση. Η μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων λειτουργεί επίσης ως διαχωριστικό για τον διαχωρισμό των αντιδραστηρίων ανόδου και καθόδου σε κυψέλες καυσίμου και ηλεκτρολύτες.



ΕΙΚΟΝΑ 2.10 ΜΕΜΒΡΑΝΗ ΑΝΤΑΛΛΑΓΗΣ ΠΡΩΤΟΝΙΩΝ ΝΑΦΙΟΝ™ 211 [6]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Εφαρμογές των κυψελών καυσίμων και αντίκτυπο στο περιβάλλον

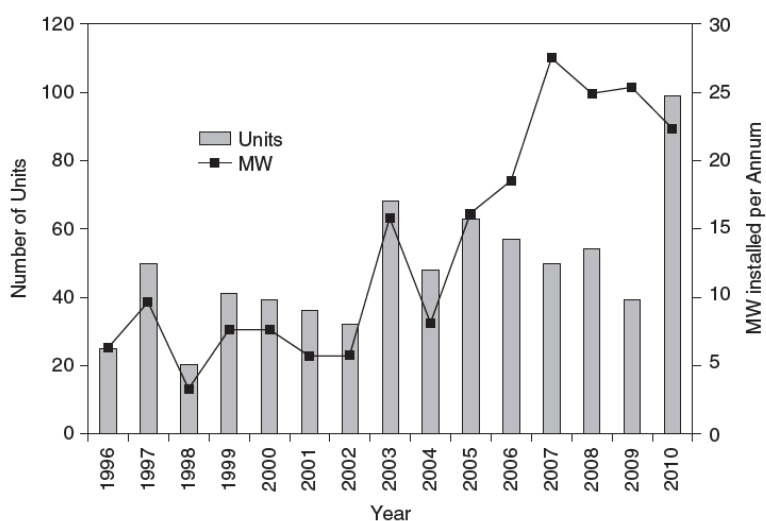
3.1 Σταθερές μονάδες παραγωγής ενέργειας

Οι κυψέλες καυσίμου για σταθερές εφαρμογές έχουν χρησιμοποιηθεί εμπορικά για πάνω από είκοσι χρόνια. Με βάση την ισχύ που αποδίδουν μπορούν να χωριστούν σε δυο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις εφαρμογές με μικρή ισχύ (κάτω από 10kW), και αφορά κυρίως εφαρμογές παροχής ηλεκτρικής ενέργειας σε οικίες ή σε απομακρυσμένους πελάτες.

Η δεύτερη κατηγορία (πάνω από 10kW), περιλαμβάνει συγκροτήματα κατοικίων ή βιομηχανικές μονάδες. Οι μονάδες αυτές αναπτύσσονται για να αντικαταστήσουν το δίκτυο, για περιοχές όπου υπάρχει ελάχιστη ή καμία υποδομή δικτύου.

3.1.1 Μεγάλες σταθερές μονάδες παραγωγής ενέργειας

Σε αντίθεση με άλλες εφαρμογές κυψελών καυσίμου, ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος τύπος καυσίμου είναι το φυσικό αέριο. Ο συνηθέστερος τύπος σταθερής κυψέλης καυσίμου είναι η κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC). Έχουν χρησιμοποιηθεί επίσης οι SOFCs, MCFCs, PAFCs, και AFCs.



ΕΙΚΟΝΑ 3.1 ΕΤΗΣΙΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΕΓΑΛΩΝ ΑΚΙΝΗΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΩΝ MW [2]

Μία από τις μεγαλύτερες εγκαταστάσεις κυψελών καυσίμων στον κόσμο είναι το πάρκο κυψελών καυσίμου “Gyeonggi Green Energy” των 59 MW στην πόλη Hwasung της Νότιας Κορέας.



ΕΙΚΟΝΑ 3.2 GYEONGGI GREEN ENERGY FUEL CELL PARK [8]

Η εγκατάσταση πέντε στρεμμάτων αποτελείται από 21 σταθμούς παραγωγής ενέργειας FuelCell Energy DFC3000 ονομαστικής ισχύος 2,8 MW ο καθένας, με σκοπό να είναι ο βασικός σταθμός παραγωγής ενέργειας στο δίκτυο της Νότιας Κορέας και θέρμανση αστικό σύστημα κεντρικής θέρμανσης.

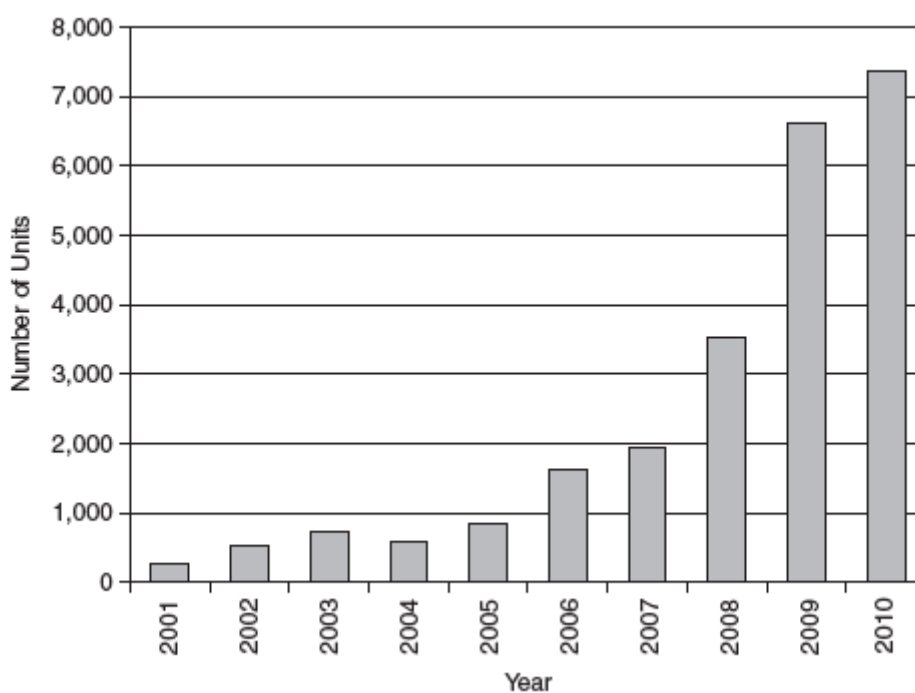
Για την ολοκλήρωση του έργου χρειάστηκαν 13 μήνες.

3.1.2 Μικρές σταθερές μονάδες παραγωγής ενέργειας

Σε αυτή την κατηγορία εντάσσονται σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής βασιζόμενοι σε κυψέλες καυσίμου που έχουν ισχύ έως 10 kW. Έχουν μεγάλο εύρος εφαρμογών συμπληρωματική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας σε κτίρια γραφείων, μεμονωμένες κατοικίες, νοσοκομεία.

Ένας άλλος σημαντικός τομέας εφαρμογής είναι η χρήση μικρών μονάδων ισχύος ως εφεδρική ισχύς σε περιπτώσεις αιφνίδιας απώλειας ισχύος του δικτύου λόγω φυσικών ή τεχνικών προβλημάτων.

Οι περισσότερες μονάδες χαμηλής ισχύος λειτουργούν με PEMFCs.



ΕΙΚΟΝΑ 3.3 ΕΤΗΣΙΟΙ ΑΡΙΘΜΟΙ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΩΝ ΜΙΚΡΩΝ ΑΚΙΝΗΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ [2]

3.2 Χρήση κυψελών καυσίμου στις μεταφορές

Η ηλεκτροκίνηση στις μέρες μας έχει εμφανίσει μεγάλη πρόοδο. Οχήματα περισσότερο φιλικά προς το περιβάλλον, λιγότερος θόρυβος είναι μερικά από τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα οχήματα με ηλεκτροκίνηση. Εκτός όμως από τα γνωστά στο ευρύ κοινό ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία υπάρχει και μια άλλη εναλλακτική.

Τα ηλεκτρικά οχήματα με κυψέλες καυσίμου (FCEV) έχουν μεγαλύτερη αποδοτικότητα από τα συμβατικά οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης και δεν έχουν καθόλου εκπομπές εξάτμισης καθώς εκπέμπουν μόνο υδρατμούς και ζεστό αέρα.

3.2.1 Οχήματα με χρήση κυψελών καυσίμου

Τα οχήματα με κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν ως καύσιμο το υδρογόνο. Υπάρχει μία σημαντική διαφορά μεταξύ των αυτοκινήτων κυψελών καυσίμου υδρογόνου και άλλων ηλεκτρικών οχημάτων - τα αυτοκίνητα υδρογόνου παράγουν την ίδια την ηλεκτρική ενέργεια.

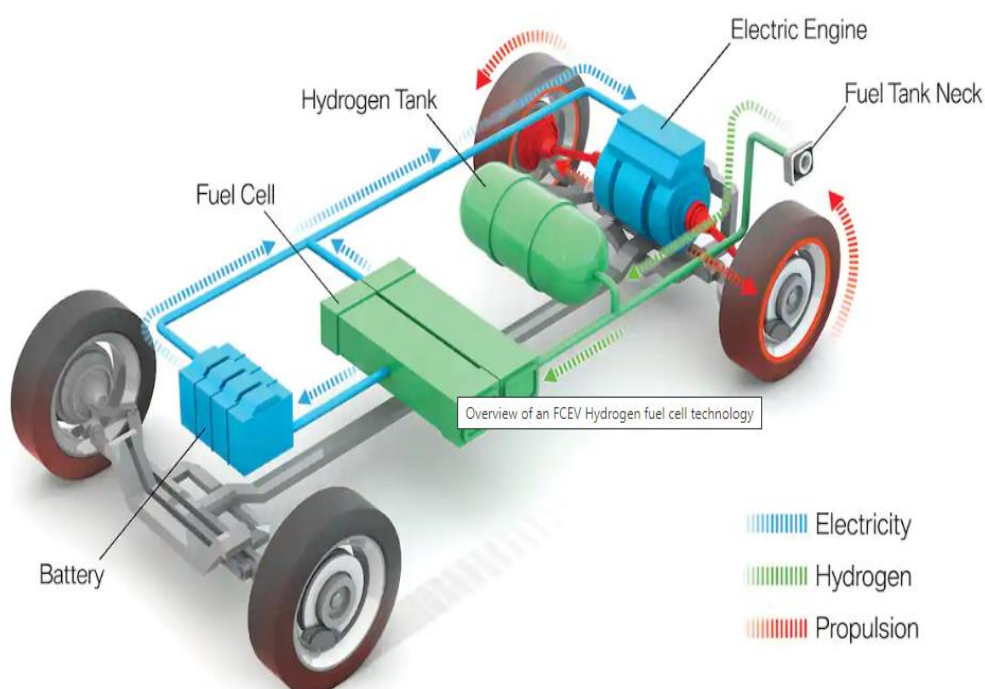
Τα αυτοκίνητα υδρογόνου έχουν στην πραγματικότητα τη δική τους αποδοτική μονάδα παραγωγής ενέργειας: Την κυψέλη καυσίμου. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου οχήματος είναι το Toyota Mirai.



ΕΙΚΟΝΑ 3.4 ΤΟΥΤΑ ΜΙΡΑΙ [10]

Πως λειτουργεί;

Το ρεζερβουάρ γεμίζει με καύσιμο υδρογόνο με τον ίδιο τρόπο που θα γέμιζε αν στην θέση του υδρογόνου ήταν η βενζίνη ή το πετρέλαιο. Το καύσιμο περιέχεται σε δοχεία υψηλής πίεσης και οδηγείται στην κυψέλη καυσίμου όπου το υδρογόνο και το οξυγόνο που βρίσκεται στον αέρα αντιδρούν μεταξύ τους παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια.



ΕΙΚΟΝΑ 3.5 ΔΟΜΗ ΕΝΟΣ ΤΥΠΙΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ [12]

Επίσης, τα οχήματα υδρογόνου μπορούν επίσης να ανακτήσουν ενέργεια μέσω της ενέργειας φρεναρίσματος. Ο ηλεκτρικός κινητήρας μετατρέπει την κινητική ενέργεια του αυτοκινήτου σε ηλεκτρική και την τροφοδοτεί στην εφεδρική μπαταρία.

Παρακάτω, στην εικόνα 3.6 βλέπουμε το ELEC-CITY, το οποίο είναι ένα πρότυπο ηλεκτρικό λεωφορείο σχεδιασμένο από την Hyundai.



ΕΙΚΟΝΑ 3.6 HYUNDAI'S ELEC-CITY ΣΤΗ ΣΕΟΥΛ ΤΗΣ ΚΟΡΕΑΣ [25]

Το 2008 η Boeing κατασκεύασε το πρώτο αεροσκάφος (εικόνα 3.7) που μπορεί να πετάξει με την χρήση κυψελών καυσίμου υδρογόνου. Το αεροσκάφος πραγματοποίησε τρεις πτήσεις τον Φεβρουάριο και τον Μάρτιο του 2008.

Κατά τη διάρκεια των πτήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο αεροδρόμιο στην Ocana της Ισπανίας, ο πιλότος Cecilio Barberan ανέβηκε σε υψόμετρο 3300 ποδιών (1.000 μέτρα) πάνω από τη στάθμη της θάλασσας, χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό ισχύος από την μπαταρία και την ισχύ που παράγεται από κυψέλες καυσίμου υδρογόνου.

Στη συνέχεια, αφού έφτασε σε ένα συγκεκριμένο υψόμετρο αποσύνδεσε τις μπαταρίες. Ο Barberan διατήρησε τη στάθμη της πτήσης με ταχύτητα περίπου 60 μίλια ανά ώρα (100 χιλιόμετρα την ώρα) για 20 λεπτά μόνο από την ενέργεια που παράγεται από τις κυψέλες καυσίμου.



ΕΙΚΟΝΑ 3.7 BOEING FUEL CELL DEMONSTRATOR [25]

3.2.2 Πλεονεκτήματα FCEV

- Γρήγορος χρόνος φόρτισης. Οι δεξαμενές υδρογόνου των αυτοκινήτων κυψελών καυσίμου γεμίζουν σε λιγότερο από πέντε λεπτά.
- Μεγαλύτερη αυτονομία από τα αμιγώς ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Ένα αυτοκίνητο με κυψέλες καυσίμου με γεμάτη δεξαμενή έχει αυτονομία περίπου 480 χιλιόμετρα. Για να συμβεί κάτι αντίστοιχο σε ένα ηλεκτρικό θα πρέπει να έχει αρκετά μεγάλη μπαταρία με συνέπεια την αύξηση του συνολικού βάρους του οχήματος καθώς και του χρόνου φόρτισης.
- Το εύρος των οχημάτων κυψελών καυσίμου δεν εξαρτάται από την εξωτερική θερμοκρασία καθώς η λειτουργία του δεν επηρεάζεται εξαιτίας της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.
- Η πρόωση στα FCEV είναι καθαρά ηλεκτρική. Η αίσθηση οδήγησης είναι παρόμοια με αυτή που αφήνει η οδήγηση ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Χαμηλά επίπεδα θορύβου και ευκολία στην εκκίνηση καθώς παρέχει υψηλά ποσοστά ροπής ακόμα και στις χαμηλές ταχύτητες.

- Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από πρακτικά οτιδήποτε, επίσης είναι παντού γύρω μας. Στην πραγματικότητα είναι το πιο κοινό άτομο στο σύμπαν. Το βασικό πρόβλημα είναι ότι πρέπει να βρούμε τρόπους να το απομονώσουμε καθώς βρίσκεται πάντα συνδεδεμένο με άλλα στοιχεία, όπως το οξυγόνο στο νερό (H₂O).

3.2.3 Μειονεκτήματα FCEV

- Κόστος αγοράς. Τα λίγα μοντέλα οχημάτων κυψελών καυσίμου που είναι ήδη διαθέσιμα στην αγορά κοστίζουν περίπου 70.000 ευρώ για ένα όχημα μεσαίας ή ανώτερης κατηγορίας. Αυτό είναι σχεδόν διπλάσιο από τα συγκρίσιμα ηλεκτρικά ή υβριδικά οχήματα.
- Λίγοι σταθμοί ανεφοδιασμού με υδρογόνο. Σήμερα, υπάρχουν πολύ λίγοι σταθμοί ανεφοδιασμού για αυτοκίνητα με υδρογόνο. Στα τέλη του 2019 υπάρχουν για παράδειγμα περίπου 40 στις ΗΠΑ και περίπου 80 στη Γερμανία.
- Η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου δεν μπορεί να καλύψει την παραγωγή υδρογόνου εξ' ολοκλήρου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί υδρογόνο που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αλλά οι δομές δεν είναι αρκετές για να καλύψουν την ζήτηση. Οπότε πρέπει το υδρογόνο να παραχθεί με την χρήση ορυκτών καυσίμων.
- Η μεταφορά του υδρογόνου κοστίζει περισσότερο από ό,τι άλλα καύσιμα. Πρόσφατες εκτιμήσεις δείχνουν το κόστος κατασκευής για κάθε χιλιόμετρο δικτύου μεταφοράς υδρογόνου να ανέρχεται στις 110.000 ευρώ. Γεγονός που ανεβάζει την τιμή του καυσίμου υδρογόνου αρκετά πάνω από την τιμή της βενζίνης και αντισταθμίζει πολλές φορές την χαμηλότερη κατανάλωση των FCEV.

3.2.4 Ποδήλατα και scooters με κυψέλες καυσίμου

Σε χώρες με μεγάλους πληθυσμούς, τα σκούτερ και τα ποδήλατα είναι αρκετά δημοφιλείς μέσα μεταφοράς. Σε αυτές τις εφαρμογές χρησιμοποιούνται κυρίως κυψέλες καυσίμου με συμπιεσμένο υδρογόνο και μεθανόλη.

Πριν 6 χρόνια ακούσαμε για πρώτη φορά για το πρώτο ποδήλατο με κυψέλες καυσίμου στον κόσμο, το Alter Bike. Η παραγωγή του είναι αποτέλεσμα συνεργασίας τριών γαλλικών εταιρειών των Pragma, Cycleurope, και Ventec.

Αυτή τη στιγμή, έχει βγει στην αγορά το τελευταίο μοντέλο (εικόνα 3.8) με 300 bar δεξαμενή υδρογόνου και 150 χιλιόμετρα αυτονομία. Συνδυασμένες στο ποδήλατο είναι μια μπαταρία ιόντων λιθίου και μια κυψέλη καυσίμου, η οποία τροφοδοτείται από έναν κύλινδρο αερίου υδρογόνου.

Συγκρίνοντας το με ένα ηλεκτρικό ποδήλατο προσφέρει κάποια βασικά πλεονεκτήματα. Μερικά από αυτά είναι η αρκετά μεγαλύτερη αυτονομία (μέση αυτονομία ενός ηλεκτρικού ποδηλάτου είναι 50χλμ) καθώς και οι γρηγορότεροι χρόνοι φόρτισης. Οι μπαταρίες των ηλεκτρικών ποδηλάτων συνήθως χρειάζονται αρκετές ώρες για να επαναφορτιστούν, ενώ οι κύλινδροι υδρογόνου μπορούν να ξαναγεμιστούν σε λιγότερο από δύο λεπτά.



ΕΙΚΟΝΑ 3.8 THE ALTER BIKE [15]

Η United Renewable Energy Co (URE). από την Taiwan ανέπτυξε το πρώτο scooter με κυψέλες καυσίμου (εικόνα 3.9) με μέγιστη ταχύτητα 90 χλμ/ώρα με κινητήρα αντίστοιχο με έναν κινητήρα βενζίνης 125cc.

Χρησιμοποιεί μια δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου υψηλής πίεσης 35Μρα, και το βάρος του ανέρχεται περίπου στα 110 κιλά. Τέλος, είναι απόλυτα φιλικό προς το περιβάλλον αφού κατά τη λειτουργία του παράγει μόνο νερό.



ΕΙΚΟΝΑ 3.9 URE'S SCOOTER [26]

3.3 Στρατιωτικές εφαρμογές

Πιθανή εφαρμογή των κυψελών καυσίμου σε εφαρμογές για στρατιωτικούς σκοπούς αποτέλεσε βασικό παράγοντα στην ανάπτυξη της τεχνολογίας αυτής καθώς αποτέλεσε κινητήριο οικονομική δύναμη.

Πολλές εφαρμογές των κυψελών καυσίμου έχουν διττή χρήση. Μπορούν να εκμεταλλευτούν είτε για πολιτικούς είτε για στρατιωτικούς σκοπούς. Για παράδειγμα, οι σταθεροί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με κυψέλες καυσίμου διαφορετικών μεγεθών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παροχή ενέργειας σε φρούρια, κέντρα διοίκησης, σταθμούς ραντάρ Ένα παράδειγμα χρήσης κυψελών καυσίμου αποκλειστικά για στρατιωτικούς σκοπούς είναι ένα σύστημα πρόωσης ανεξάρτητο του εξωτερικού αέρα με κυψέλες καυσίμου συμπιεσμένου υδρογόνου.

Το εν λόγω σύστημα χρησιμοποιεί κυψέλες καυσίμου υδρογόνου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων της εταιρείας Siemens.

Συναντάται στα γερμανικά υποβρύχια Τύπου 212 (εικόνα 3.10) τα οποία ξεκίνησαν να κατασκευάζονται το 1998. Τα υποβρύχια Τύπου 212 είναι τα πρώτα που χρησιμοποιούν ένα σύστημα πρόωσης με κυψέλες καυσίμου.

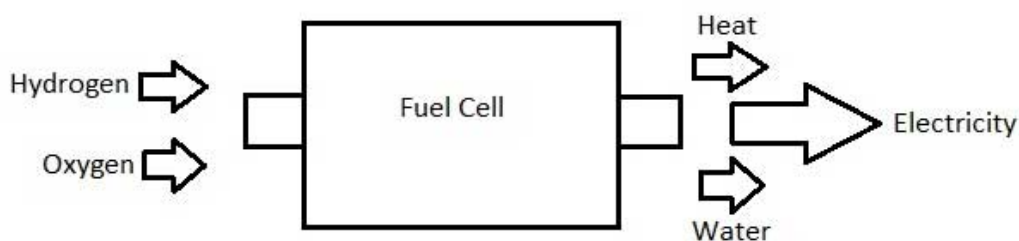


ΕΙΚΟΝΑ 3.10 ΥΠΟΒΡΥΧΙΟ ΤΥΠΟΥ 212 [27]

3.4 Αντίκτυπο της χρήσης των fuel cells στο περιβάλλον

Η χρήση των fuel cells, και κυριώς εκείνων που χρησιμοποιούν υδρογόνο, παρέχει την δυνατότητα βελτίωσης της ποιότητας του αέρα και μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου.

Το υδρογόνο περιέχεται σε αφθονία στο νερό, στην βιομάζα και στους ορυκτούς υδρογονάνθρακες. Με το υδρογόνο ως πηγή ενέργειας μιας κυψέλης καυσίμου τα μόνο παραπροϊόντα που παράγονται είναι νερό και θερμότητα.



ΕΙΚΟΝΑ 3.11 [39]

Μεγάλο κομμάτι του αντίκτυπου στο περιβάλλον εξαρτάται από τις διαδικασίες εξαγωγής του υδρογόνου και από την πηγή του. Η εξαγωγή μπορεί να γίνει από:

- Ανανεώσιμη βιομάζα ή άνθρακα μέσω εξαέρωσης σε υψηλές θερμοκρασίες
- Νερό μέσω ηλεκτρόλυσης με δυνατότητα χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας
- Ανανεώσιμο βιοαέριο, ανανεώσιμη αιθανόλη ή μεθανόλη ή ορυκτό φυσικό αέριο μέσω χημικής κατάλυσης

Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη πηγή είναι το ορυκτό φυσικό αέριο έχοντας ως παραπροϊόν διοξείδιο του άνθρακα.

3.4.1 Fuel cells και περιβάλλον

Η άποψη ότι τα fuel cells υδρογόνου είναι φιλικότερα προς το περιβάλλον σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα είναι ευρέως διαδεδομένη. Η χρήση τους προσφέρει μια σειρά από περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα.

Η υψηλή αποδοτικότητα τους μειώνει την ανάγκη για χρήση ορυκτών καυσίμων καθώς επίσης μειώνει και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Η ηλεκτροχημική φύση της αντίδρασης, η χαμηλή θερμοκρασία στα στάδια αναμόρφωσης και η ανάγκη απομάκρυνσης ακαθαρσιών στο καύσιμο, όπως το θείο, έχουν ως αποτέλεσμα εξαιρετικά χαμηλές τοπικές εκπομπές.

Άλλο πλεονέκτημα είναι η χαμηλή ένταση των θορύβων στα οχήματα, ειδικότερα στις χαμηλές ταχύτητες. Όμως για να έχουμε ολοκληρωμένη άποψη σχετικά με το περιβαλλοντικό αντίκτυπο των κυψελών καυσίμου περαιτέρω έρευνα είναι αναγκαία.

Σύμφωνα με ερευνητές του California Institute of Technology [X] ένα αποτελεσματικό σύστημα παραγωγής, αποθήκευσης και μεταφοράς υδρογόνου θα έπρεπε, να μην οδηγεί σε ανεπιθύμητες εκπομπές αερίου. Στην πράξη όμως ένα ποσοστό υδρογόνου της τάξεως του 10%-20% θα διαφλυγει στην ατμόσφαιρα.

Το υδρογόνο θα οξειδωθεί όταν φτάσει στη στρατόσφαιρα, η οποία ψυχθεί και θα δημιουργηθούν περισσότερα σύννεφα.

Αυτό θα καθυστερούσε τη διάσπαση της πολικής δίνης στο βόρειο και νότιο πόλο, καθιστώντας τις τρύπες στο στρώμα του όζοντος μεγαλύτερες και πιο μακροχρόνιες. Υπολογίζουν ότι το επιπλέον υδρογόνο θα οδηγήσει σε αύξηση κατά 5-8% της εξάντλησης του όζοντος στο βόρειο πόλο και μεταξύ 3 και 7% στο νότιο πόλο.

Αντίθετη άποψη έχουν επιστήμονες του Connecticut Hydrogen-Fuel Cell Coalition. Σύμφωνα με έρευνες που πραγματοποίησαν [40], η αντικατάσταση της δυναμικότητας παραγωγής άνθρακα, πετρελαίου και φυσικού αερίου σε στατικές εφαρμογές στο Κοννέκτικατ με τεχνολογία κυψελών καυσίμου (που τροφοδοτείται από φυσικό αέριο) θα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση των NO_x, SO₂ και CO₂ ως εξής:

Για κάθε megawatt συμβατικής δυναμικότητας παραγωγής ορυκτών καυσίμων που αντικαθίστανται με δυναμικότητα παραγωγής από κυψέλη καυσίμου οι εκπομπές NO_x θα μειωθούν κατά 5086 kg, οι εκπομπές SO₂ 4251 kg, οι εκπομπές CO₂ 3,25 εκατομμύρια kg.

Οχήματα κυψελών καυσίμου που λειτουργούν με υδρογόνο που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές εξαλείφουν όλες τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε σύγκριση με τα συμβατικά οχήματα με ορυκτά καύσιμα. Σύμφωνα με την έρευνα η μείωση των εκπομπών θα έχει ως εξής:

Οι εκπομπές NO_x επιβατικών αυτοκινήτων μειώνονται κατά 0,95 grams/mile, SO₂ κατά 0,007 grams/mile και CO₂ κατά 369 grams/mile. Οι εκπομπές ελαφρών φορτηγών με βενζίνη μειώνονται επίσης κατά 1,22 grams/mile NO_x, 0,0097 grams/mile SO₂ και 511 grams/mile CO₂. Οι εκπομπές NO_x ντίζελ λεωφορείων μειώνονται κατά 12,5 grams/mile, SO₂ κατά 0,0214 grams/mile και CO₂ κατά 2,242,7 grams/mile.

3.4.2 Συμπέρασμα ως προς το αντίκτυπο των κυψελών καυσίμου στο περιβάλλον

Η καύση των ορυκτών καυσίμων οδηγεί στην παραγωγή οργανικών ρύπων και οξειδίων του αζώτου το οποία με την σειρά τους διασπώνται στα κατώτερα τμήματα της ατμόσφαιρας (τροπόσφαιρα) από τις ακτίνες του ήλιου. Αυτό οδηγεί στον πλεονάζων σχηματισμό όζοντος (φωτοχημική αιθαλομίχλη).

Αυτό το όζον μπορεί να προκαλέσει ζημιά στη βλάστηση, στα δομικά υλικά και στην ανθρώπινη υγεία. Στην άνω περιοχή της τροπόσφαιρας, Το όζον μπορεί να λειτουργήσει ως σημαντικό αέριο του θερμοκηπίου που συμβάλλει στην κλιματική αλλαγή.

Η μείωση των ρύπων των ορυκτών καυσίμων μετά την αντικατάσταση τους από το υδρογόνο θα έπρεπε να ανιστρέψει αυτά τα φαινόμενα. Όμως η κατάσταση δεν είναι τόσο απλή. Το υδρογόνο επηρεάζει τη ικανότητα μείωσης της ατμόσφαιρας και συνεπώς από την παρουσία του στην ατμόσφαιρα επηρεάζονται οι διαδικασίες διάσπασης που δημιουργούν το όζον.

Απευθείας εκπομπές υδρογόνου στην ατμόσφαιρα εξαιτίας της ανθρώπινης δραστηριότητας μπορούν να αλλάξουν τη φυσική χημεία της ατμόσφαιρας και να επιδεινώσουν τα προβλήματα που σχετίζονται με τις επιπτώσεις της φωτοχημικής ρύπανσης (όζον) και της κλιματικής αλλαγής.

Όσον αφορά τα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας (στρατόσφαιρα), το υδρογόνο παίζει και εκεί σημαντικό ρόλο δεδομένης της δυνατότητάς του να βοηθήσει στην καταλυτική καταστροφή του όζοντος.

Συμπερασματικά, είναι πιθανό ότι τα οφέλη από την χρήση κυψελών καυσίμου υπερτερούν σε σχέση με τα αρνητικά αλλά δεν μπορούμε να είμαστε σίγουροι λόγω της μεγάλης πολυπλοκότητας της κατάστασης χωρίς να πραγματοποιήσουμε εκτενείς έρευνες.

ΜΕΡΟΣ Β΄

ΜΠΑΤΑΡΙΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Μπαταρίες ηλεκτρικών οχημάτων

4.1 Η ιστορία των ηλεκτρικών οχημάτων

Τα πρώτα ηλεκτρικά οχήματα εμφανίστηκαν λίγο πριν τα μέσα του 19^{ου} αιώνα. Το 1832 ο Σκοτσέζος Robert Anderson κατασκευάζει ένα από τα πρώτα ημιτελή ηλεκτρικά οχήματα. Το 1834 ο Αμερικανός Thomas Davenport κατασκευάζει ένα ηλεκτρικό όχημα με έναν από τους πρώτους ηλεκτροκινητήρες που λειτουργεί κανονικά και περιέχει μια μηχανή τρένου με δυο ηλεκτρομαγνήτες, έναν άξονα και μια μπαταρία.

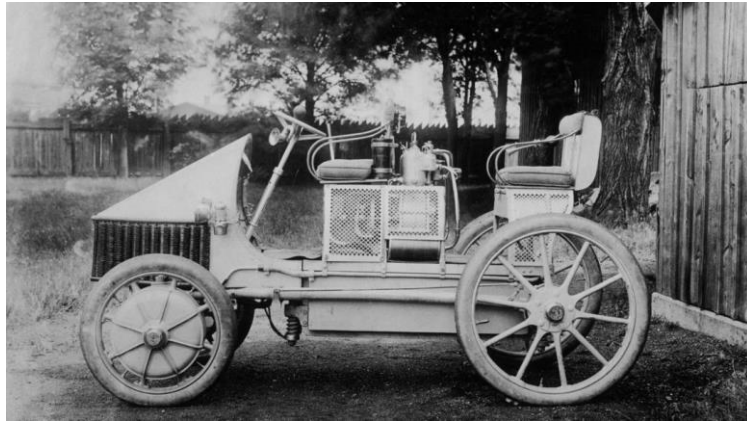
Το πρώτο ηλεκτρικό όχημα όμως που θα μπορούσε να αποτελεί πραγματική λύση στις ανάγκες για μετακίνηση (εικόνα 4.2) κατασκευάστηκε από έναν Βρετανό εφευρέτη, τον Thomas Parker, το 1884.



ΕΙΚΟΝΑ 4.1 [28]

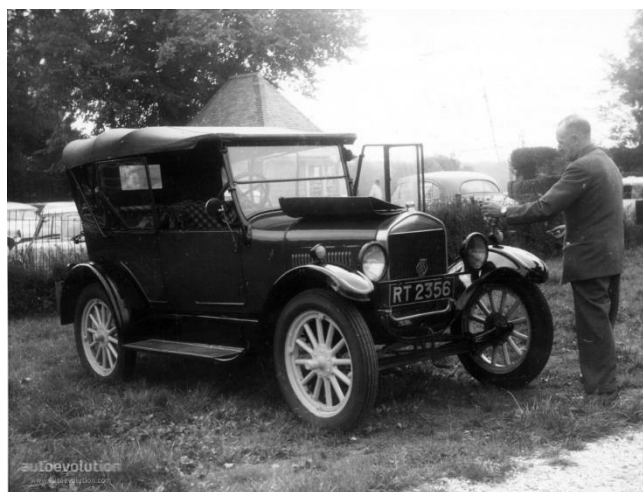
Ανάμεσα στα τέλη του 19^{ου} και στις αρχές του 20^{ου} αιώνα η κατασκευή ηλεκτρικών οχημάτων σημείωσε σχετική αύξηση. Σε πόλεις όπως το Σικάγο, η Νέα Υόρκη και η Βοστώνη, σε σύνολο 2.370 οχημάτων τα 800 ήταν πλήρως ηλεκτρικά. Ο Thomas Edison καθώς και άλλοι εφευρέτες ασχολούνται με την ανάπτυξη ηλεκτρικών μπαταριών, οι μπαταρίες τους όμως ακόμα παρουσιάζουν μειονεκτήματα όπως μεγάλο βάρος, ακριβή κατασκευή κ.α.

Το 1900, ο Ferdinand Porsche (ιδρυτής της ομώνυμης εταιρείας) σχεδίασε το πρώτο λειτουργικό υβριδικό αυτοκίνητο στον κόσμο, το "Semper Vivus" (Λατινικά για "πάντα ζωντανό"). Το 1901 η έτοιμη για παραγωγή έκδοση ονομάστηκε Lohner-Porsche "Mixte"



ΕΙΚΟΝΑ 4.2 SEMPER VIVUS [29]

Το 1908 ο Henry Ford βγάζει στην παραγωγή το Model T προσφέροντας απaráμιλλη προσβασιμότητα και προσιτή τιμή και αφήνει πίσω την ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων. Οι κινητήρες εσωτερικής καύσης γρήγορα κέρδισαν και ξεπέρασαν τους ηλεκτροκινητήρες. Η ανάπτυξη των κινητήρων εσωτερικής καύσης σε συνδυασμό με την χαμηλή τιμή της βενζίνης οδήγησε την ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων σε τέλμα.



ΕΙΚΟΝΑ 4.3 FORD MODEL T [30]

Αρχές της δεκαετίας του 1960 η αύξηση στις τιμές της βενζίνης δημιούργησε ένα νέο κύμα ενδιαφέροντος στην ανάπτυξη ηλεκτρικών οχημάτων. Τις επόμενες δυο δεκαετίες εμφανίστηκαν μερικά προτότυπα ηλεκτρικά οχήματα, όπως το Sebring-Vanguard Citicar το 1974.



ΕΙΚΟΝΑ 4.4 SEBRING-VANGUARD CITICAR [31]

Τη δεκαετία του 1990 το δημόσιο ενδιαφέρον για τα ηλεκτρικά οχήματα άρχισε να κερδίζει ουσιαστική δυναμική. Το 1996 η General Motors κυκλοφορεί το EV1 και το 1997 η Toyota κυκλοφορεί το υβριδικό Prius, το οποίο γνώρισε αμέσως επιτυχία.



ΕΙΚΟΝΑ 4.5 TOYOTA HYBRID PRIUS [32]

Το 2006 εμφανίζεται στο προσκήνιο η Tesla Motors, μια startup της Silicon Valley προσφέροντας το Tesla Roadster, ένα sporty convertible μοντέλο.



ΕΙΚΟΝΑ 4.6 TESLA ROADSTER [31]

Το 2010 κυκλοφορεί το πρώτο εμπορικά διαθέσιμο plug-in υβριδικό αυτοκίνητο, από την Chevrolet, το Chevy Volt. Την ίδια χρονιά από την Nissan κυκλοφορεί το Leaf, πλήρως ηλεκτρικό και με μηδενικούς ρύπους από την εξάτμιση.

Για το 2019, το ηλεκτρικό αυτοκίνητο με τις περισσότερες πωλήσεις παγκοσμίως είναι το Model 3 της Tesla, στο οποίο αντιστοιχεί το 1/8 από το σύνολο των ηλεκτρικών αυτοκινήτων που πωλήθηκαν στην παγκόσμια αγορά.



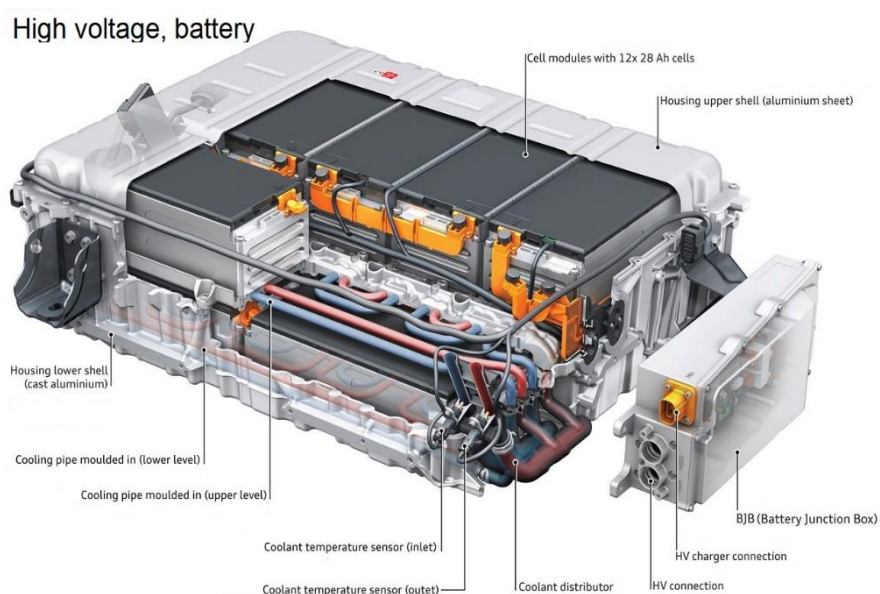
ΕΙΚΟΝΑ 4.7 TESLA MODEL 3 [19]

4.2 Μπαταρίες ηλεκτρικών οχημάτων

Η μπαταρία θεωρείται ένα από τα σημαντικότερα εξαρτήματα ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Αποτελεί πηγή ενέργειας του οχήματος. Μια μπαταρία αποτελείται από δύο ή περισσότερα ηλεκτροχημικά στοιχεία συνδεδεμένα μεταξύ τους. Ένα μόνο στοιχείο μπαταρίας είναι κατασκευασμένο από ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο και ένα θετικό ηλεκτρόδιο που συνδέονται με έναν ηλεκτρολύτη, με σκοπό την μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Μερικά στοιχεία που επηρεάζει η μπαταρία σε ένα ηλεκτρικό όχημα με μπαταρία (**Battery Electric Vehicle** ή αλλιώς **BEV**) είναι:

- η αυτονομία (δηλαδή η απόσταση που μπορεί να καλύψει με την χρήση αποκλειστικά της μπαταρίας)
- η δυναμική του οχήματος (όπως η μέγιστη ταχύτητα κ.α.)
- το συνολικό κόστος του οχήματος καθώς και το κόστος συντήρησης που επηρεάζονται άμεσα από παράγοντες όπως το κόστος παραγωγής της μπαταρίας και ο κύκλος ζωής της.



ΕΙΚΟΝΑ 4.8 ΜΠΑΤΑΡΙΑ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ [33]

Οι βασικότεροι τύποι μπαταριών ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι:

- Ιόντων λιθίου (Lithium ion)
- Υδρίδιου νικελίου-μετάλλου (Nickel metal hydride)
- Μολύβδου οξέος (Lead acid)

Πέρα από τους τρεις βασικούς τύπους μπαταριών (στους οποίους θα αναφερθούμε αναλυτικότερα στο επόμενο κεφάλαιο) υπάρχουν και άλλοι τύποι που χρησιμοποιούνται λιγότερο συχνά όπως μετάλλου αέρα (Metal air), χλωριούχο νικέλιο νατρίου (Sodium nickel chloride) κ.α.

4.3 Βασικές παράμετροι μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων

Οι ειδικοί λένε ότι τα ηλεκτρικά οχήματα θα αντικαταστήσουν τα οχήματα με κινητήρες εσωτερικής καύσης μέχρι το 2040. Για να συμβεί αυτό, χρειάζεται να γίνουν βελτιώσεις τόσο στην υπάρχουσα τεχνολογία όσο και στο οικονομικό σκέλος.

Διαφορετικές κατηγορίες οχημάτων απαιτούν μπαταρίες με διαφορετική ισχύ. Για παράδειγμα, για οχήματα πόλης συνήθως

χρησιμοποιούνται μπαταρίες 12–18kWh, για οικογενειακά sedan χρησιμοποιούνται μπαταρίες 22–32kWh.

EV	Battery (kWh)	Range (km)	Wh/km	Energy cost/km
Fiat 500e	24	135	180	0.033
Honda Fit	20	112	180	0.033
BMW i3	42	345	165	0.030
Nissan Leaf	30	160	190	0.035
Mitsubishi MiEV	16	85	190	0.035
Ford Focus	23	110	200	0.037
Mercedes B	28	136	205	0.037
Tesla 3	75	496	151	0.028
Smart ED	16.5	90	200	0.037
GM Spark	21kWh	120	175	0.032

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 [20]

Ο πίνακας 1 μας δίνει βασικές πληροφορίες για μερικά από τα πιο δημοφιλή μοντέλα ηλεκτρικών οχημάτων. Μας επιτρέπει να συγκρίνουμε το μέγεθος της μπαταρίας σε σχέση με την αυτονομία και την ενεργειακή κατανάλωση.

Ως προς την επιλογή της μπαταρίας για να ηλεκτρικό όχημα υπάρχουν κάποια συγκεκριμένα κριτήρια όπως θα δούμε παρακάτω. Μερικά από αυτά είναι:

● Η διάρκεια ζωής

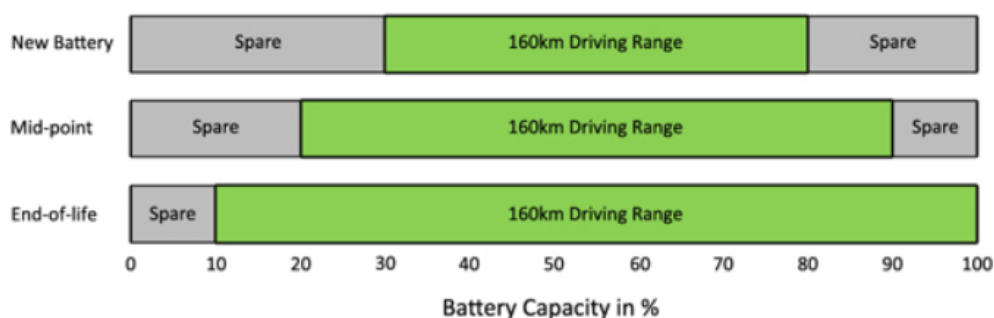
Η μπαταρία είναι ένα πολύ ακριβό εξάρτημα και η αντικατάσταση της μπορεί να κοστίζει αρκετές χιλιάδες ευρώ. Για αυτό, η συνήθης εγγύηση για μια μπαταρία είναι 8 έτη ή 160.000 χιλιόμετρα.

Παράγοντας που επηρεάζει την υποβάθμιση της μπαταρίας είναι το ζεστό κλίμα καθώς η λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να επιταχύνει την ταχύτητα υποβάθμισης της μπαταρίας.

Άλλος παράγοντας είναι οι κύκλοι φόρτισης. Για παράδειγμα, έχοντας την μπαταρία πλήρως φορτισμένη συνεχώς μπορεί να της προκαλέσει ζημιά λόγω της θερμότητας που παράγεται κατά την φόρτιση.

Επίσης η υπερφόρτιση μπορεί να προκαλέσει χημικές αλλαγές στα στοιχεία της μπαταρίας.

Τέλος η φόρτιση και η αποφόρτιση σε συγκεκριμένα ποσοστά είναι επιθυμητή από συγκεκριμένους κατασκευαστές. Μια καινούρια μπαταρία φορτίζει μέχρι περίπου το 80% και αποφορτίζει περίπου μέχρι το 30%. Όσο περνάει ο καιρός αυτό αλλάζει και οδηγεί σε αυξημένη καταπόνηση και γήρανση.



ΕΙΚΟΝΑ 4.9 Η ΑΥΤΟΝΟΜΙΑ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ [20]

● Η ασφάλεια

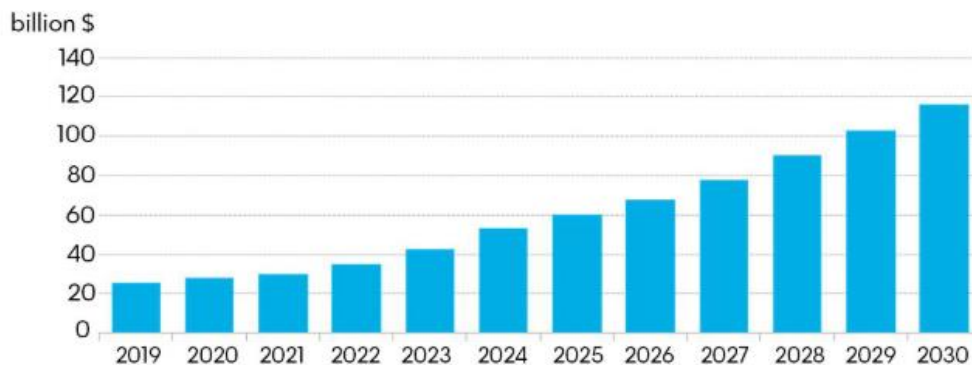
Μια από τις βασικές ανησυχίες σε θέματα ασφαλείας είναι η θερμική αστάθεια δηλαδή η δημιουργία ενός βρόγχου θετικής ανατροφοδότης όπου μέσω χημικών αντιδράσεων επιτυγχάνεται μεγαλύτερη από το κανονικό έκλυση θερμότητας καταλήγοντας σε πυρκαγιά.

Για την αποφυγή τέτοιων φαινομένων υπάρχουν ειδικά προστατευτικά κουτιά για την μπαταρία, συστήματα ψύξης και συστήματα ελέγχου.

Επίσης λανθασμένη χρήση της μπαταρίας ή χρήση της πέρα από το όριο ηλικίας που προβλέπεται από τον κατασκευαστή μπορεί να έχει συνέπειες στην ασφάλεια χρήσης της μπαταρίας.

● Το κόστος

Αποτελεί βασικό παράγοντα που αυξάνει σε σημαντικό βαθμό το συνολικό κόστος του ηλεκτρικού οχήματος. Σύμφωνα με την ερευνητική εταιρεία BloombergNEF (BNEF) το κόστος ανά KWh έχει πέσει από 1016€ που βρισκόταν το 2010 στα 144€ το 2019. Μέχρι το 2023 αναμένεται να κυμαίνεται στα 92€.



ΕΙΚΟΝΑ 4.10 ΕΤΗΣΙΑ ΜΕΓΕΘΗ ΤΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΙΟΝΤΩΝ-ΛΙΘΙΟΥ [34]

● Η απόδοση

Οι μπαταρίες είναι ευαίσθητες στις εξωτερικές θερμοκρασίες. Μπορούν να σχεδιαστούν να λειτουργούν καλά σε υψηλές εξωτερικές θερμοκρασίες ή σε χαμηλές, αλλά η δυσκολία έγκειται στο να σχεδιαστούν να λειτουργούν σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών.

Η ζέστη επηρεάζει την διάρκεια ζωής ενώ το κρύο επηρεάζει προσωρινά την απόδοση.

● Η φόρτιση

Ένα από τα βασικά τεχνικά προβλήματα που πρέπει να λύσουν οι μηχανικοί αφορά τους μεγάλους χρόνους φόρτισης.

Συναντάται ένα μεγάλο εύρος χρόνου φόρτισης ανάλογα με το μέγεθος της μπαταρίας και την ταχύτητα του σημείου φόρτισης, που κυμαίνεται από 30 λεπτά έως 12 ώρες. Για παράδειγμα, σε ένα σημείο φόρτισης 7kW μια συνήθης μπαταρία 60kWh χρειάζεται σχεδόν 8 ώρες για να φορτίσει από το 0% στο 100%.

ΟΧΗΜΑ		ΧΡΟΝΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ 0% - 100%				
ΜΟΝΤΕΛΟ	ΜΠΑΤΑΡΙΑ	3.7kW slow	7kW fast	22kW fast	43- 50kW rapid	150kW rapid
Nissan LEAF (2018)	40kWh	11 ΩΡΕΣ	6 ΩΡΕΣ	6 ΩΡΕΣ	1 ΩΡΕΣ	ΔΕΝ ΜΠΟΡΕΙ ΝΑ ΦΟΡΤΙΣΤΕΙ ΣΕ ΑΥΤΟΝ ΤΟΝ ΤΥΠΟ ΦΟΡΤΙΣΤΗ
Tesla Model S (2019)	75kWh	21 ΩΡΕΣ	11 ΩΡΕΣ	5 ΩΡΕΣ	2 ΩΡΕΣ	1 ΩΡΑ ΓΙΑ 480 ΧΛΜ
Mitsubishi Outlander PHEV (2018)	13.8kWh	4 ΩΡΕΣ	4 ΩΡΕΣ	4 ΩΡΕΣ	40 ΛΕΠΤΑ	ΔΕΝ ΜΠΟΡΕΙ ΝΑ ΦΟΡΤΙΣΤΕΙ ΣΕ ΑΥΤΟΝ ΤΟΝ ΤΥΠΟ ΦΟΡΤΙΣΤΗ

ΠΙΝΑΚΑΣ 2 [22]

Επίσης ο τρόπος φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση, την ασφάλεια και την διάρκεια ζωής της μπαταρίας αυτής. Οι βασικές μέθοδοι φόρτισης είναι οι εξής:

- Φόρτιση σταθερού ρεύματος
- Φόρτιση σταθερής τάσης
- Φόρτιση με συνδυασμό σταθερού ρεύματος και σταθερής τάσης

● Η ειδική ενέργεια

Η ενεργειακή πυκνότητα αντιπροσωπεύει την χωρητικότητα της μπαταρίας σε βάρος (Wh / kg) και την ποσότητα ενέργειας που αποθηκεύεται ανά μονάδα μάζας (ή κατ' όγκο).

Η μπαταρία συνιστά σημαντικό μέρος του συνολικού βάρους του ηλεκτρικού οχήματος, γεγονός που καθιστά την ειδική ενέργεια πολύ σημαντική. Για παράδειγμα, απαιτείται υψηλή ειδική ενέργεια σε εφαρμογές όπου απαιτείται μεγάλος χρόνος λειτουργίας με μέτριο φορτίο. Η ειδική ενέργεια καθορίζει την αυτονομία του οχήματος.

● Η ειδική ισχύς

Το ηλεκτρικό σύστημα πρόωσης έχει καλύτερη ροπή σε σχέση με ένα όχημα με μηχανή εσωτερικής καύσης με την ίδια ιπποδύναμη, με συνέπεια να διαθέτει καλύτερη επιτάχυνση.

Στην εικόνα 4.11 βλέπουμε τους στόχους για τις προηγμένες μπαταρίες των ηλεκτρικών οχημάτων που θέτει η κοινοπραξία προηγμένων μπαταριών των Ηνωμένων Πολιτειών της Αμερικής (USABC).

USABC Goals for Advanced Batteries for EVs

Parameter(Units) of fully burdened system	Minimum Goals for Long Term Commercialization	Long Term Goal
Power Density(W/L)	460	600
Specific Power – Discharge, 80% DOD/30 sec(W/kg)	300	400
Specific Power - Regen, 20% DOD/10 secW/kg	150	200
Energy Density - C/3 Discharge Rate(Wh/L)	230	300
Specific Energy - C/3 Discharge Rate(Wh/kg)	150	200
Specific Power/Specific Energy Ratio	2:1	2:1
Total Pack Size(kWh)	40	40
Life(Years)	10	10
Cycle Life - 80% DOD (Cycles)	1,000	1,000
Power & Capacity Degradation(% of rated spec)	20	20
Selling Price - 25,000 units @ 40 kWh(\$/kWh)	<150	100
Operating Environment(°C)	-40 to +50 20% Performance Loss (10% Desired)	-40 to +85
Normal Recharge Time	6 hours (4 hours Desired)	3 to 6 hours
High Rate Charge	20-70% SOC in <30 minutes @ 150W/kg (<20min @ 270W/kg Desired)	40-80% SOC in 15 minutes
Continuous discharge in 1 hour - No Failure(% of rated energy capacity)	75	75

EIKONA 4.11 [35]

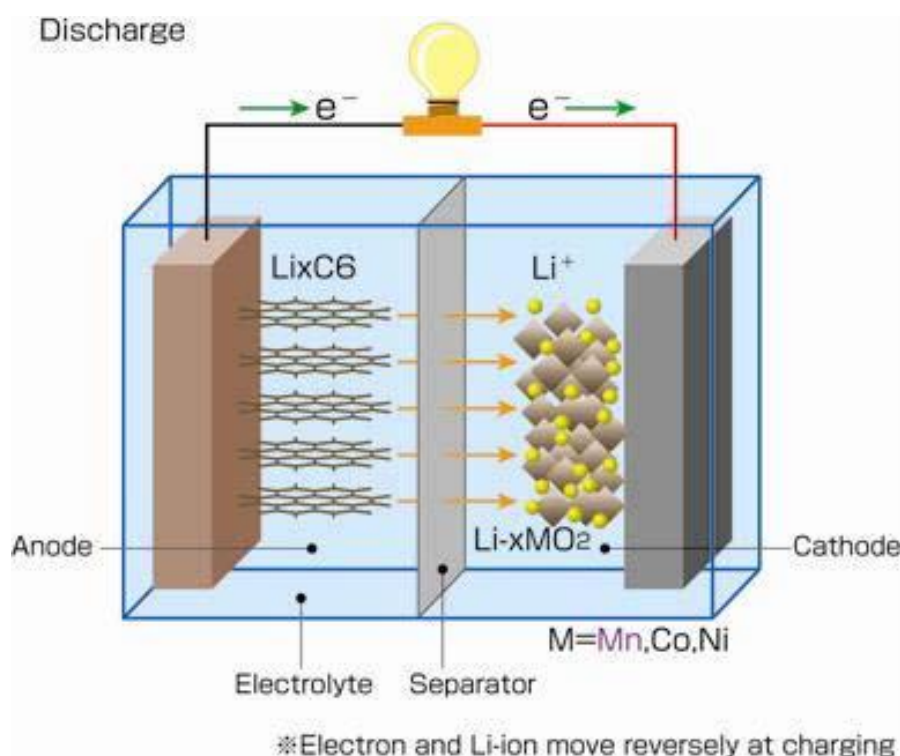
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Τύποι μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων

5.1 Μπαταρίες ιόντων λιθίου (Lithium-ion batteries)

Σε μια μπαταρία ιόντων λιθίου ανάμεσα στην άνοδο και την κάθοδο κινούνται τα ιόντα λιθίου δημιουργώντας ηλεκτρισμό. Στον κύκλο εκφόρτισης, το λίθιο στην άνοδο (υλικό από άνθρακα) ιονίζεται και εκπέμπεται στον ηλεκτρολύτη. Στη συνέχεια τα ιόντα λιθίου μέσω ενός πορώδους πλαστικού διαχωριστή μετακινούνται και παίρνοντας μέσα από οπές ατομικού μεγέθους εισάγονται στην κάθοδο (οξειδίο μετάλλου λιθίου).

Ταυτόχρονα από την άνοδο απελευθερώνονται ηλεκτρόνια, δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα. Στον κύκλο φόρτισης, ιόντα λιθίου μεταβαίνουν από την κάθοδο στην άνοδο μέσω του διαχωριστή. Δεδομένου ότι αυτή είναι μια αναστρέψιμη χημική αντίδραση, η μπαταρία μπορεί να επαναφορτιστεί.



ΕΙΚΟΝΑ 5.1 ΜΠΑΤΑΡΙΑ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ [16]

5.1.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου

Καθώς η τεχνολογία των μπαταριών ιόντων λιθίου εξελίσσεται συνεχώς ανάμενεται στο μέλλον να τις δούμε να κυριαρχούν ανάμεσα στους υπόλοιπους τύπους μπαταριών. Ένας από τους βασικούς λόγους είναι το λίθιο που χρησιμοποιείται και προσφέρει μια σειρά από πλεονεκτήματα συγκριτικά με άλλα μέταλλα όπως:

- Το υψηλότερο πρότυπο δυναμικό
- Το υψηλότερο ηλεκτροχημικό ισοδύναμο
- Είναι πολύ ελαφρύ

Άλλα πλεονεκτήματα των μπαταριών ιόντων λιθίου περιλαμβάνουν:

- Την έξοδο υψηλής ενέργειας και ισχύος ανά μονάδα μάζας μπαταρίας
- Την υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα
- Ένα σχετικά μεγάλο κύκλο ζωής

Βασικά μειονεκτήματα αποτελούν:

- Η ανθεκτικότητα

Οι βαθιοί κύκλοι της μπαταρίας ιόντων λιθίου μειώνουν γρήγορα τη χωρητικότητα της μπαταρίας. Επίσης οι χαμηλές θερμοκρασίες μειώνουν την ισχύ της μπαταρίας.

- Η ασφάλεια

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι ευάλωτες σε βραχυκύκλωμα και υπερφόρτιση.

- Το κόστος

Σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες το κόστος των ιόντων λιθίου είναι τέσσερις έως οκτώ φορές αυτό των μπαταριών μολύβδου οξέος και μία έως τέσσερις φορές των υδρίδιου νικελίου μετάλλου.

5.1.2 Εξαρτήματα μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου

Μια μπαταρία ιόντων λιθίου αποτελείται από τέσσερα βασικά εξαρτήματα: την άνοδο, την κάθοδο, τον ηλεκτρολύτη και τον διαχωριστή.

Αναλυτικότερα:

● Η άνοδος

Αποτελείται από γραφίτη σε μορφή σκόνης. Παράγεται από υλικά ανόδου επικολλημένα σε φύλλο χαλκού. Τα ενεργά υλικά της ανόδου όπως ο γραφίτης αναμειγνύονται με ένα συνδετικό υλικό (όπως το καουτσούκ στυρολίου-βουταδιενίου), έναν διαλύτη (όπως το νερό) και άνθρακα. Μετά την επίστρωση, η άνοδος ξηραίνεται και συμπιέζεται.

Πιθανοί τύποι ηλεκτροδίου ανόδου:

- LiNiO_2
- LiMn_2O_4
- LiFePO_4
- LiCoO_2
- $\text{LiNixCo}_{1-2x}\text{Mn}_x\text{O}_2$

Οι λειτουργίες της ανόδου είναι στον κύκλο φόρτισης να λαμβάνει ιόντα λιθίου από την κάθοδο, ενώ στον κύκλο εκφόρτισης να εκπέμπει ιόντα λιθίου.

● Η κάθοδος

Αποτελείται από οξείδιο μετάλλου λιθίου σε μορφή σκόνης. Οι κάθοδοι είναι κατασκευασμένες από υλικά καθόδου επικολλημένα σε φύλλο αλουμινίου. Τα υλικά καθόδου περιλαμβάνουν μεταλλικό οξείδιο λιθίου, ένα συνδετικό υλικό (όπως το φθοριούχο πολυβινυλιδένιο), και ένα διαλύτη (όπως N-μεθυλο-2-πυρρολιδόνη). Η πάστα επικαλύπτεται σε φύλλο αλουμινίου, μετά ξηραίνεται και συμπιέζεται στο κατάλληλο πάχος.

Πιθανοί τύποι ηλεκτροδίου καθόδου:

- TiS_2
- Li_xC_6
- V_2O_5

Οι λειτουργίες της καθόδου είναι στον κύκλο φόρτισης να εκπέμπει ιόντα λιθίου στην άνοδο, ενώ στον κύκλο εκφόρτισης να λαμβάνει ιόντα λιθίου.

● Ο ηλεκτρολύτης

Αποτελείται από άλατα λιθίου και οργανικούς διαλύτες. Αρκετοί οργανικοί διαλύτες αναμιγνύονται για να μειώσουν το ιξώδες του ηλεκτρολύτη και να αυξήσουν την διαλυτότητα των αλάτων λιθίου, αυξάνοντας επίσης την κινητικότητα των ιόντων λιθίου στον ηλεκτρολύτη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να βελτιωθεί η απόδοση της μπαταρίας.

Πιθανοί τύποι αλάτων λιθίου:

- LiPF_6
- LiBF_4
- LiClO_4

Πιθανοί τύποι οργανικών διαλυτών:

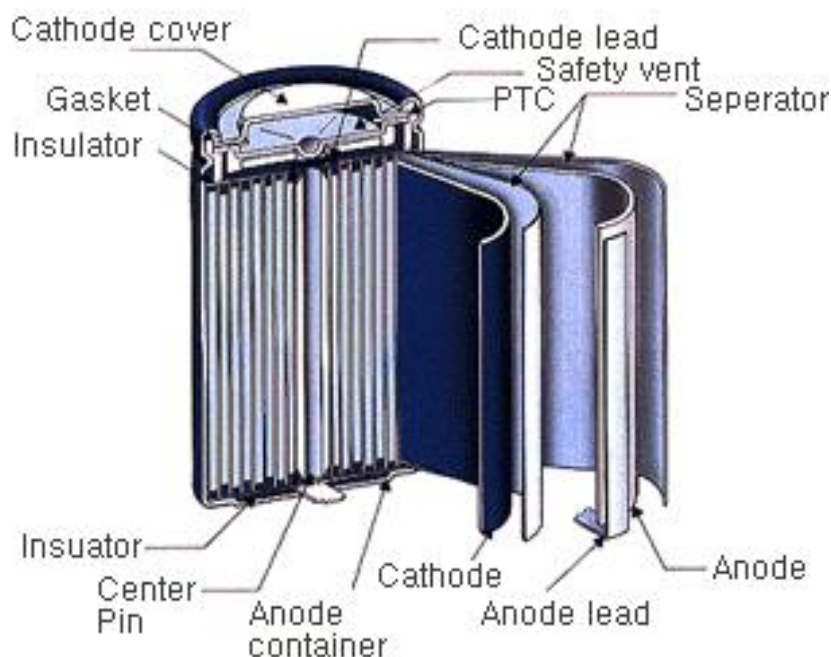
- ανθρακικό αιθυλένιο
- ανθρακικό προπυλένιο
- ανθρακικό μεθύλιο χλωρίου

Η κύρια λειτουργία του είναι να μεταφέρει τα ιόντα λιθίου ανάμεσα στην άνοδο και στην κάθοδο.

● Ο διαχωριστής

Αποτελείται από μικροπορώδεις μεμβράνες. Είναι κατασκευασμένος είτε από πολυαιθυλένιο είτε από πολυπροπυλένιο.

Μεταφέρει τα ιόντα λιθίου μέσω πόρων ανάμεσα στην άνοδο και στην κάθοδο. Επιπλέον, ο διαχωριστής έχει μια λειτουργία ασφαλείας που ονομάζεται «κλείσιμο». Εάν το κελί ανεβάσει πολύ υψηλή θερμοκρασία κατά λάθος, ο διαχωριστής λιώνει λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και γεμίζει τους μικροπόρους του για να σταματήσει τη ροή ιόντων λιθίου μεταξύ ανόδου και καθόδου.



ΕΙΚΟΝΑ 5.2 ΔΟΜΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΗΣ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ [36]

5.1.3 Αρχή λειτουργίας και χημικές αντιδράσεις μπαταριών ιόντων λιθίου

Λόγω των πολλών διαφορετικών τύπων μπαταρίας ιόντων λιθίου θα μιλήσουμε για τον μηχανισμό αντίδρασης παίρνοντας ως παράδειγμα μια μπαταρία οξειδίου μαγγανίου - ιόντων λιθίου.

Κατά τη φόρτιση το Li^+ δραπετεύει από το LiMn_2O_4 στην κάθοδο, και μέσω της ηλεκτροκινητικής δύναμης, το Li^+ περνά μέσω του ηλεκτρολύτη και ενσωματώνεται στο στρώμα άνθρακα του γραφίτη.

Κατά την εκφόρτιση, το Li^+ δραπετεύει από το ενδιάμεσο στρώμα άνθρακα της καθόδου, μέσω της αντίθετης διαδικασίας και ενσωματώνεται στην άνοδο LiMn_2O_4 .

Οι χημικές αντιδράσεις είναι οι εξής:

- Στην άνοδο: $LiMn_2O_4 \Leftrightarrow Li_{1-x}Mn_2O_4 + xLi^+ + xe^-$
- Στην κάθοδο: $C + xLi^+ + xe^- \Leftrightarrow Li_xC$
- Γενική αντίδραση: $LiMn_2O_4 + C \Leftrightarrow Li_{1-x}Mn_2O_4 + Li_xC$

Οι χημικές αντιδράσεις είναι αντιστρεπτές μεταξύ των κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης.

5.2 Μπαταρίες υδρίδιου νικελίου-μετάλλου (Nickel Metal Hydride batteries)

Υπάρχουν 4 τύποι μπαταριών με βάση το νικέλιο: νικέλιο σίδηρο (Ni-Fe), νικέλιο ψευδάργυρος (Ni-Zn), νικέλιο κάδμιο (Ni-Ca) και υδρίδιο νικελίου-μετάλλου (Ni-MH). Οι δύο πρώτοι τύποι δεν χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρικά οχήματα λόγω κάποιων παραγόντων όπως ο μικρός κύκλος ζωής και η μικρή ειδική ισχύς.

Από την δεκαετία του 1990 χρησιμοποιούνται ευρύτερα οι μπαταρίες υδρίδιου νικελίου-μετάλλου καθώς είναι περισσότερο φιλικές προς το περιβάλλον από τις μπαταρίες νικελίου καδμίου.



ΕΙΚΟΝΑ 5.3 ΤΟΥΤΑ HIGHLANDER HYBRID 2020 ΜΕ ΧΡΗΣΗ NIMH BATTERY [37]

5.2.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μιας μπαταρίας υδρίδιου νικελίου-μετάλλου

Βασικά πλεονεκτήματα των μπαταριών αυτών είναι:

- Η ανθεκτικότητα. Η μπαταρία είναι πολύ ανθεκτική στον χρόνο και χρησιμοποιείται συνήθως για πάνω από 7 χρόνια και 150.000 χιλιόμετρα. Οι Ni-MH μπαταρίες δεν επιδεινώνονται με την πάροδο του χρόνου, όπως οι ιόντων λιθίου και όταν ελέγχεται η θερμοκρασία και η χρήση, η μπαταρία μπορεί να σχεδιαστεί για να διαρκεί η ζωή του οχήματος.
- Δεν περιέχει μεγάλο ποσοστό τοξικών υλικών
- Είναι ανακυκλώσιμες
- Η διάρκεια ζωής μιας μπαταρίας NiMH μπορεί να είναι τόσο υψηλή όσο 3000 κύκλοι εάν η μπαταρία λειτουργεί μεταξύ 20% και 80% SOC (κατάσταση φόρτισης).

Βασικά μειονεκτήματα των μπαταριών αυτών είναι:

- Χαμηλή απόδοση φόρτισης
- Η αυτοεκφόρτιση που φτάνει έως και 12,5 τοις εκατό ανά ημέρα σε θερμοκρασία δωματίου
- Ο υψηλός ρυθμός παραγωγής θερμότητας κατά τη γρήγορη φόρτιση και εκφόρτιση. Έτσι υπάρχει απαίτηση συστήματος ψύξης συγκεκριμένων δυνατοτήτων με συνέπεια αύξηση βάρους μπαταρίας και κόστους.
- Η μπαταρία Ni-MH δεν αναμένεται να βελτιωθεί στον τομέα της ειδικής ενέργειας όπως πέρα από τις 75Wh/kg που βρίσκονται κοντά στα θεμελιώδη πρακτικά όριά της.

5.2.2 Εξαρτήματα μιας μπαταρίας υδρίδιου νικελίου-μετάλλου

- Η άνοδος

Το κύριο υλικό για το θετικό ηλεκτρόδιο της μπαταρίας NiMH είναι το υδροξείδιο του νικελίου [Ni-(OH)₂].

Το ηλεκτρόδιο νικελίου είναι μη στοιχειομετρικό. Η απόδοσή του βελτιώνεται μέσω της ανάπτυξης του τρισδιάστατου διαπερατού υποστρώματος αφρού νικελίου και του δραστικού υλικού $\text{Ni}(\text{OH})_2$ από το οποίο, τα ηλεκτρόδια νικελίου αποτελούνται.

Επιπλέον, το $\text{Ni}(\text{OH})_2$ είναι αδιάλυτο στον ηλεκτρολύτη KOH , γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και καλύτερη ανοχή κατάχρησης.

Μόνο ένα πρωτόνιο συμμετέχει στην αντίδραση φόρτισης/εκφόρτισης. Έτσι επικρατούν πολύ μικρές αλλαγές πυκνότητας και η μηχανική σταθερότητα του ηλεκτροδίου κατά τη διάρκεια του κύκλου παρουσιάζεται βελτιωμένη.

● Η κάθοδος

Στο αρνητικό ηλεκτρόδιο το ενεργό υλικό είναι το υδρογόνο, το οποίο αποθηκεύει την ενέργεια. Το υδρίδιο μετάλλου πετυχαίνει καλύτερη ογκομετρική απόδοση από το υγρό υδρογόνο.

Στο υδρίδιο μετάλλου το ποσοστό υδρογόνου κυμαίνεται από 1% έως 7% κατά βάρος. Πρακτικά σήμερα, τα υλικά για τις μπαταρίες NiMH διατηρούν μεταξύ 1% και 2% υδρογόνο κατά βάρος.

Έτσι τα κράματα απορρόφησης υδρογόνου είναι ικανά να απορροφούν περισσότερα από χίλιες φορές τον όγκο του ίδιου του κράματος. Επίσης είναι ασφαλή και λειτουργούν σε χαμηλά επίπεδα πιέσεων και για αυτούς τους λόγους χρησιμοποιούνται ευρέως στις μπαταρίες αυτού του τύπου.

Τα κράματα αποτελούνται από δύο ή περισσότερα μεταλλικά στοιχεία τα οποία συνδυάζονται ανάλογα με την εφαρμογή της μπαταρίας. Από άποψη μακράς διάρκειας ζωής για την αποθήκευση μπαταριών Ni-MH και αποδοτικότητας φόρτισης και εκφόρτισης, ο πιο κατάλληλος τύπος κράματος χρησιμοποιείται ως αρνητικό ηλεκτρόδιο είναι το LaNi_5 . Διαθέτει υψηλά επίπεδα χωρητικότητας, μεγαλύτερο κύκλο ζωής και αποδοτικότητα φόρτισης εκφόρτισης.

- **Ο ηλεκτρολύτης**

Ως ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται το υδροξείδιο του καλίου (ΚΟΗ). Το διάλυμα ΚΟΗ έχει υψηλή αγωγιμότητα και χημικά δεν μπορεί να παρέμβει στη χημική αντίδραση του στοιχείου.

Η συγκέντρωση του υδατικού διαλύματος ΚΟΗ παραμένει σταθερή κατά την διάρκεια φόρτισης και εκφόρτισης έτσι παραμένει σταθερή και η απόδοση του στοιχείου.

- **Ο διαχωριστής**

Οι μη υφασμένοι διαχωριστές που χρησιμοποιούνται συνήθως αποτελούνται είτε από πολυαμίδιο, πολυολεφίνη, είτε από μείγμα και των δύο. Δεδομένου ότι μια μόνιμα υδρόφιλη επιφάνεια είναι βασικό στοιχείο για διαχωριστικά υλικά το πολυαμίδιο με τις πολικές του ομάδες θα πρέπει να είναι η προτιμώμενη βασική επιλογή.

5.2.3 Αρχή λειτουργίας και χημικές αντιδράσεις μπαταριών υδρίδιου νικελίου-μετάλλου

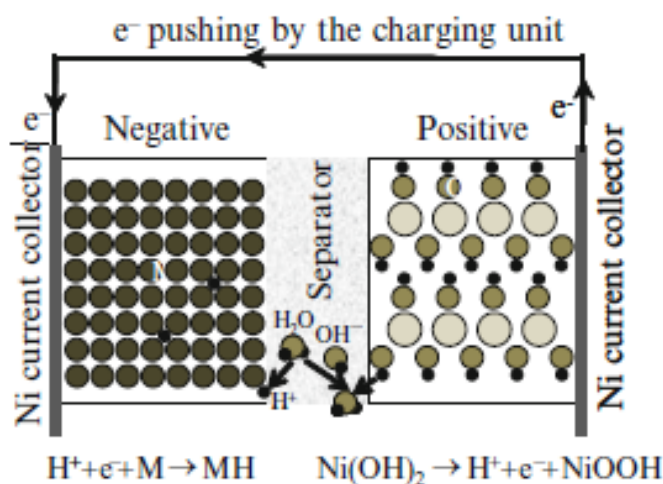
Κατά τη φόρτιση, το νερό χωρίζεται σε πρωτόνια (H^+) και ιόντα υδροξειδίου (OH^-) λόγω της τάσης που παρέχεται από τη μονάδα φόρτισης.

Το πρωτόνιο εισέρχεται στο αρνητικό ηλεκτρόδιο, και εξουδετερώνεται με το ηλεκτρόνιο που παρέχεται από τη μονάδα φόρτισης και “πηδάει” ανάμεσα σε παρακείμενους χώρους αποθήκευσης μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται quantum tunneling.

Η τάση θα παραμείνει σε σχεδόν σταθερή τιμή μέχρι τα πρωτόνια καταλάβουν όλες τις διαθέσιμες θέσεις. Το OH^- που δημιουργήθηκε κατά την φόρτιση θα προστεθεί στο OH^- που βρίσκεται ήδη στον ηλεκτρολύτη ΚΟΗ.

Στην επιφάνεια του θετικού ηλεκτροδίου, κάποιο ποσοστό του OH^- θα συνδυασθεί ξανά με πρωτόνια που προέρχονται από το $Ni(OH)_2$ και θα σχηματιστούν μόρια νερού.

Η κατάσταση οξειδωσης του Ni σε Ni(OH)₂ είναι 2⁺. Καθώς τα πρωτόνια καταναλώνονται στην επιφάνεια του θετικού ηλεκτροδίου, εξέρχονται όλο και περισσότερα πρωτόνια από τον κυρίως όγκο τόσο από την τάση όσο και από τις βαθμίδες συγκέντρωσης. Χάνοντας ένα πρωτόνιο αυξάνεται η κατάσταση οξειδωσης του Ni σε 3⁺ στο NiOOH. Τα ηλεκτρόνια τέλος μετακινούνται στη μονάδα φόρτισης για να ολοκληρωθεί η κύκλωμα.



ΕΙΚΟΝΑ 5.4 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ ΥΔΡΙΔΙΟΥ ΝΙΚΕΛΙΟΥ-ΜΕΤΑΛΛΟΥ [51]

Η όλη διαδικασία αντιστρέφεται κατά την εκφόρτιση. Στο αρνητικό ηλεκτρόδιο, τα πρωτόνια αποστέλλονται στον ηλεκτρολύτη και ανασυνδυάζονται με το OH⁻ και τα ηλεκτρόνια ωθούνται στο εξωτερικό φορτίο.

Τα ηλεκτρόνια επανεισέρχονται στη θετική πλευρά του ηλεκτροδίου της μπαταρίας μέσω του εξωτερικού φορτίου και εξουδετερώνουν τα πρωτόνια που παράγονται από το χώρισμα του νερού στην επιφάνεια του θετικού ηλεκτροδίου.

Οι χημικές αντιδράσεις είναι οι εξής:



Όπου β- NiOOH είναι ένας ημιαγωγός χαμηλού αγωγού τύπου p όταν το σθένος νικελίου είναι <2.25

● Στην κάθοδο: $M + H_2O + e \Leftrightarrow MH + OH^-$

Όπου το M αντιπροσωπεύει το μεταλλικό υδρίδιο

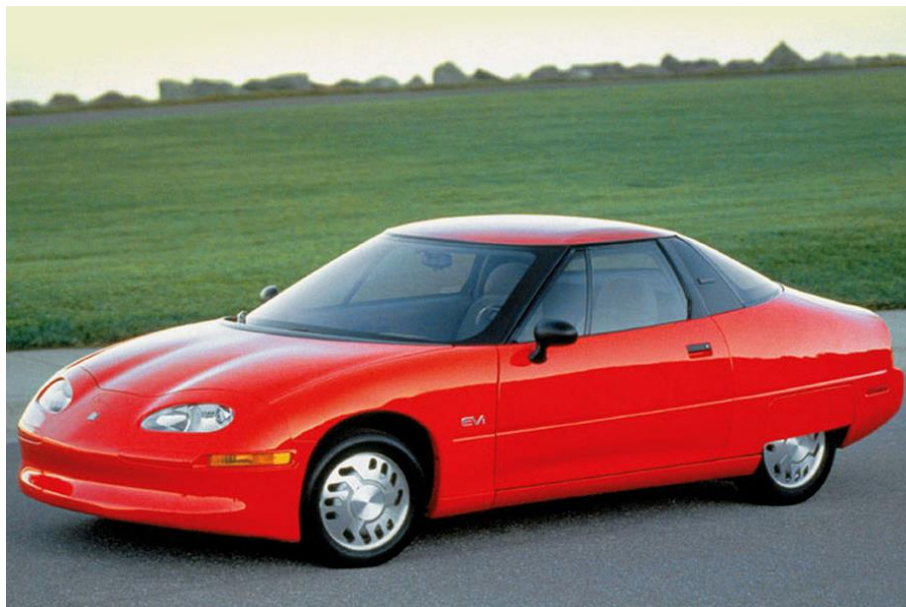
● Γενική αντίδραση: $M + Ni(OH)_2 + H_2O \Leftrightarrow MH + (\beta-NiOOH * H_2O)$

Οι χημικές αντιδράσεις είναι αντιστρεπτές μεταξύ των κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης.

5.3 Μπαταρίες μολύβδου οξέος (Lead acid batteries)

Είναι οι παλαιότερου τύπου χρησιμοποιούμενες μπαταρίες σε ηλεκτρικά οχήματα. Δεν χρησιμοποιούνται σήμερα τόσο συχνά στα ηλεκτρικά οχήματα αλλά κυρίως σε εφαρμογές όπως αναπηρικά αμαξίδια, scooter, και αυτοκίνητα του γκόλφ.

Το EV1 της General Motors το 1996 είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα ηλεκτρικού οχήματος που χρησιμοποιούσε μπαταρία μολύβδου οξέος, πιο συγκεκριμένα την μπαταρία EC-EV1260 της Panasonic.



ΕΙΚΟΝΑ 5.5 GM EV1 1996 [38]

5.3.1 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μιας μπαταρίας μολύβδου οξέος

Τα βασικά πλεονεκτήματα είναι:

- Έχουν σχετικά χαμηλό κόστος
- Η πιο ώριμη τεχνολογία καθώς χρησιμοποιείται από τα πρώτα ηλεκτρικά οχήματα

Τα βασικά μειονεκτήματα είναι:

- Απαιτεί κορεσμένο φορτίο για την αποτροπή της θείωσης
- Απαιτεί συχνότερη συντήρηση από τις μπαταρίες ιόντων λιθίου
- Η χαμηλή ειδική ενέργεια (της τάξεως του 34 Wh/kg)
- Δεν είναι φιλική προς το περιβάλλον

5.3.2 Εξαρτήματα μιας μπαταρίας μολύβδου οξέος

- **Η άνοδος**

Το ενεργό υλικό του θετικού ηλεκτροδίου είναι διοξείδιο του μολύβδου (PbO_2).

- **Η κάθοδος**

Στο αρνητικό ηλεκτρόδιο το ενεργό υλικό είναι πορώδης μόλυβδος.

- **Ο ηλεκτρολύτης**

Ο ηλεκτρολύτης αποτελείται από θειικό οξύ (H_2SO_4)

5.2.3 Αρχή λειτουργίας και χημικές αντιδράσεις μπαταριών μολύβδου οξέος

Όταν η μπαταρία βρίσκεται στον κύκλο εκφόρτισης ο μολύβδος των αρνητικών ηλεκτροδίων και το διοξείδιο του μολύβδου του θετικού ηλεκτροδίου αντιδρούν με το θεικό οξύ. Στα ηλεκτρόδια σχηματίζεται θειικός μολύβδος και ο ηλεκτρολύτης χάνει το διαλυμένο θειικό οξύ και γίνεται νερό. Απελευθερώνεται ενέργεια κατά τη διάρκεια της χημικής αντίδρασης και η διαδικασία αντιστρέφεται όταν προστίθεται ενέργεια.

Οι χημικές αντιδράσεις είναι οι εξής:

- Στην άνοδο: $PbO_2 + SO_4^{-2} + 4H^+ + 2e^- \Leftrightarrow PbSO_4 + 2H_2O$
- Στην κάθοδο: $Pb + SO_4^{-2} \Leftrightarrow PbSO_4 + 2e^-$
- Γενική αντίδραση: $Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4 \Leftrightarrow 2PbSO_4 + 2H_2O$

Οι χημικές αντιδράσεις είναι αντιστρεπτές μεταξύ των κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Περιβαλλοντικό αντίκτυπο

6.1 Εισαγωγή

Οι μετακινήσεις είναι ένας τομέας που κατέχει μεγάλο μερίδιο στην παγκόσμια ενεργειακή κατανάλωση. Επίσης είναι ένας τομέας που βασίζεται σχεδόν πλήρως στα ορυκτά καύσιμα και είναι υπεύθυνος για το 25% των εκπομπών CO₂ παγκοσμίως.

Το μεγαλύτερο ποσοστό εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στον τομέα των μεταφορών ανήκει στις μετακινήσεις στον δρόμο, κυρίως από επιβατικά αυτοκίνητα.

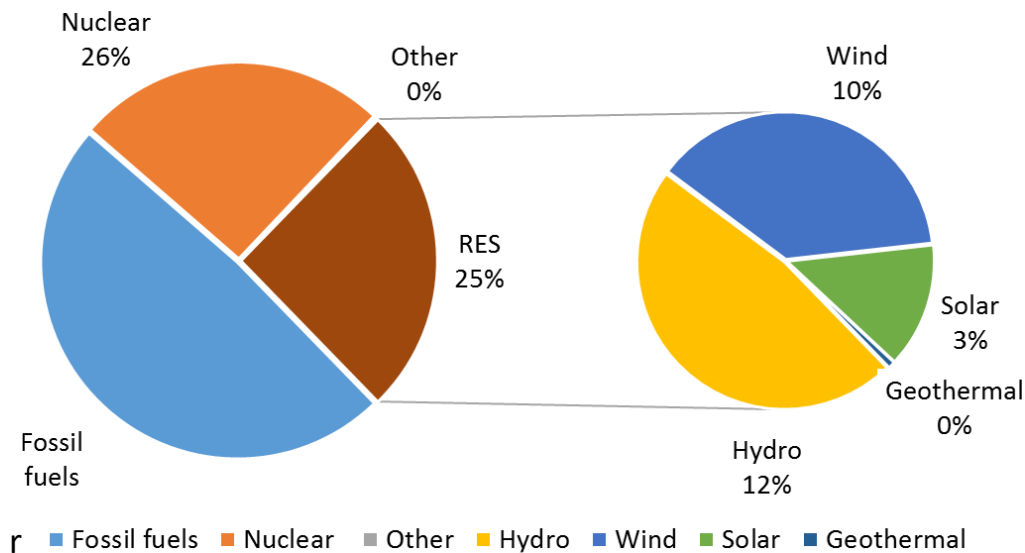
Στην Ευρώπη το 33% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης ανήκει στον τομέα των μεταφορών με το 61% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου να προκαλείται αποκλειστικά από τα αυτοκίνητα.

Λόγω των αυξανόμενων περιβαλλοντικών προβλημάτων και της κλιματικής αλλαγής η ανάπτυξη των ηλεκτρικών αυτοκινήτων βρίσκεται σήμερα στο προσκήνιο. Οι ερευνητές και οι μηχανικοί έχουν στρέψει την προσοχή τους στην ανάπτυξη σύγχρονων και πιο αποδοτικών τεχνολογιών για την μείωση των εκπομπών του CO₂ και των αερίων του θερμοκηπίου (GHG).

Στο επίκεντρο της προσοχής βρίσκονται τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Θεωρούνται ευρέως ως μια τεχνολογία περισσότερο φιλική προς το περιβάλλον και έχουν την υποστήριξη τοπικών αλλά και κεντρικών κυβερνήσεων σε διάφορες χώρες ανά τον κόσμο. Σε πολλές περιπτώσεις, η αγορά ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου υποστηρίζεται μέσω διαφόρων κανονισμών και οικονομικών και μη μέτρων.

6.2 Ηλεκτρική ενέργεια

Η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην ευρωπαϊκή ένωση το 2016 ανήρθε στις 3,1 εκατομμύρια GWh. Σχεδόν το 50% της ενέργειας αυτής προήρθε από ορυκτά καύσιμα ενώ ένα ποσοστό της τάξεως του 25% προήρθε από σταθμούς πυρηνικής ενέργειας.



ΕΙΚΟΝΑ 6.1 ΚΑΘΑΡΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΕ, 2016 [51]

Με βάση την πολιτική της ΕΕ (2020 climate & energy package) για το 2020 υπάρχει ο στόχος το 20% της ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Για το 2030 η αντίστοιχη πολιτική θέτει ως στόχο το 32% με ταυτόχρονη μείωση των GHG στο 40% από τα επίπεδα που βρισκόταν το 1990.

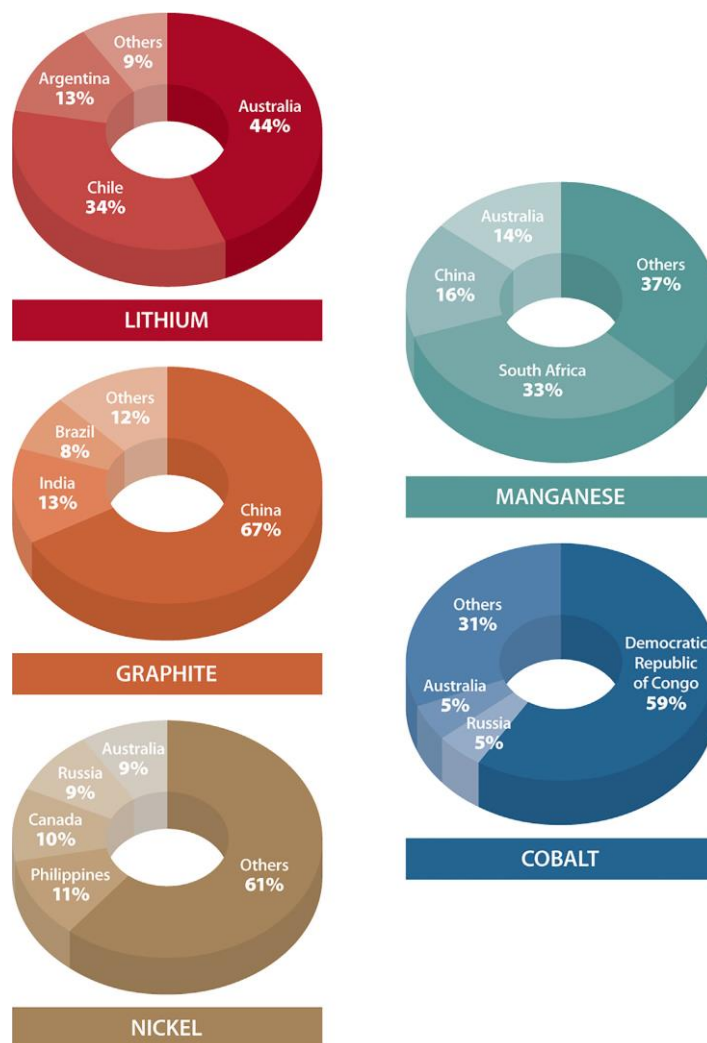
6.3 Ανακύκλωση μπαταριών ιόντων λιθίου

Η ανακύκλωση γενικότερα βασίζεται σε πρώτης γενιάς τεχνολογίες ανάκτησης στις οποίες μια φυσική επεξεργασία για την απόκτηση διαφορετικών ροών πρώτων υλών ακολουθείται από μια υδρομεταλλουργική διαδικασία (έκπλυση και εξαγωγή) για την εξαγωγή των μετάλλων.

Τα βασικά υλικά από τα οποία αποτελείται μια συνηθισμένη μπαταρία ιόντων λιθίου είναι:

- 7% Co
- 7% Li
- 5% Mn
- 10% Cu
- 15% Al

- 4% Ni
- 16% γραφίτης
- 36% διάφορα άλλα υλικά



ΕΙΚΟΝΑ 6.2 ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΛΙΚΩΝ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΛΙΘΙΟΥ [57]

Τα πολλά διαφορετικά υλικά από τα οποία αποτελείται μια μπαταρία λιθίου αυξάνουν την πολυπλοκότητα στην ανακύκλωση τους. Οι LIBs αποτελούνται από περίπλοκες δομές στις οποίες συνδέονται πολλές θήκες, πρισματικά ή κυλινδρικά κύτταρα σε ποικίλες διαμορφώσεις παράλληλων σειρών (συγκόλληση, συρματικοί δεσμοί και μηχανολογικές συνδέσεις).

Τα υλικά της καθόδου θεωρούνται αυτά με την υψηλότερη αξία στην διαδικασία ανακύκλωσης. Φυσικά, η ανακύκλωση περισσότερων υλικών μπαταρίας όπως η άνοδος, τα φύλλα, και ο ηλεκτρολύτης ενισχύουν την βιωσιμότητα της ανακύκλωσης των LIBs.

Ένας από τους βασικούς λόγους που μια μπαταρία ιόντων λιθίου χάνει την ικανότητά της να αποθηκεύει και να μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια είναι ότι κατά την διάρκεια των κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης δημιουργείται ένα στερεό προϊόν λόγω της αντίδρασης της λιθιωμένης ανόδου με το ανθρακικό αλκάλιο που περιέχεται στο διάλυμα ηλεκτρολύτη.

Ο στερεός ηλεκτρολύτης που σχηματίζεται σταδιακά συγκεντρώνεται στην επιφάνεια ανόδου και σχηματίζεται μια παθητική μεμβράνη. Περιορίζει την ηλεκτροχημική αντίδραση καθιστώντας απρόσιτες τις τοποθεσίες γραφίτη για την παρεμβολή των Li^+ και έτσι οδηγεί σε αύξηση της εσωτερικής ωμικής αντίστασης.

6.3.1 Τεχνολογίες ανακύκλωσης μπαταριών ιόντων λιθίου

Υπάρχουν τρεις διαφορετικές τεχνολογίες ανακύκλωσης των LIBs:

- **Η πυρομεταλλουργική επεξεργασία**

Οι LIBs είναι καίγονται σε ένα χυτήριο, όπου τα συστατικά στοιχεία διασπώνται και οργανικά υλικά, όπως το πλαστικό και ο διαχωριστής καίγονται. Στη συνέχεια, δημιουργούνται νέα κράματα μέσω της μείωσης του άνθρακα.

Στα επόμενα στάδια, τα κράματα μετάλλων διαχωρίζονται περαιτέρω για την ανάκτηση των καθαρών υλικών. Σε αυτή τη διαδικασία, μόνο τα ακριβά μέταλλα όπως το κοβάλτιο (Co), το νικέλιο (Ni) και ο χαλκός (Cu) ανακτούνται με μεγάλη απόδοση. Το λίθιο εγκλωβίζεται στο κλάσμα σκωρίας και μπορεί να ανακτηθεί με πρόσθετη επεξεργασία.

Πλεονεκτήματα της πυρομεταλλουργικής επεξεργασίας:

- Αποτελεί μια απλή και ώριμη τεχνολογικά διαδικασία
- Δεν είναι απαραίτητη η διαλογή και η μείωση του μεγέθους

- Ως αποτέλεσμα της διαδικασίας έχουμε βασικά δομικά στοιχεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη σύνθεση νέων υλικών καθόδου.

Μειονεκτήματα της πυρομεταλλουργικής επεξεργασίας:

- Εκπομπές CO₂ και υψηλή ενεργειακή κατανάλωση κατά την τήξη
- Υψηλό κόστος ανακύκλωσης καθώς το κράμα χρειάζεται περαιτέρω επεξεργασία
- Κάποια από τα υλικά των LIBs δεν ανακτώνται
- Το επιχειρηματικό μοντέλο μπορεί να μην λειτουργήσει καλά για μπαταρίες EV, λόγω της χαμηλής συγκέντρωσης Co

• Η υδρομεταλλουργική επεξεργασία

Σε αυτή τη διαδικασία, η ανάκτηση των υλικών γίνεται μέσω έκπλυσης σε οξέα (ή βάσεις) και στη συνέχεια συγκέντρωση και καθαρισμό. Τα ιόντα λιθίου που βρίσκονται σε διάλυμα διαχωρίζονται με διάφορες τεχνολογίες (ανταλλαγή ιόντων, εκχύλιση διαλυτών, χημική καθίζηση, ηλεκτρόλυση κ.λπ.) και κατακρημνίζονται ως διαφορετικές ενώσεις.

Πλεονεκτήματα της υδρομεταλλουργικής επεξεργασίας:

- Μπορούν να παραχθούν υψηλής καθαρότητας υλικά
- Τα περισσότερα υλικά των LIBs μπορούν να ανακτηθούν
- Λειτουργία σε χαμηλές θερμοκρασίες
- Χαμηλότερες εκπομπές CO₂ από την πυρομεταλλουργική επεξεργασία

Μειονεκτήματα της υδρομεταλλουργικής επεξεργασίας:

- Η ανάγκη για διαλογή με αποτέλεσμα ανάγκη για μεγαλύτερο χώρο και υψηλότερο κόστος
- Ο αναγκαστικός διαχωρισμός κάποιων υλικών στο διάλυμα
- Το κόστος της επεξεργασίας των λυμάτων και συναφείς δαπάνες

- **Η επεξεργασία άμεσης ανακύκλωσης**

Σε αυτή τη μέθοδο, τα συστατικά στοιχεία της μπαταρίας χωρίζονται με χρήση φυσικών μεθόδων διαχωρισμού, μαγνητικού διαχωρισμού ή μέσω θερμικής επεξεργασίας. Τα δραστικά υλικά καθαρίζονται και τα ελαττώματα τόσο στην επιφάνεια όσο και στον όγκο επιδιορθώνονται με επαναλιθίαση ή υδροθερμικές διεργασίες.

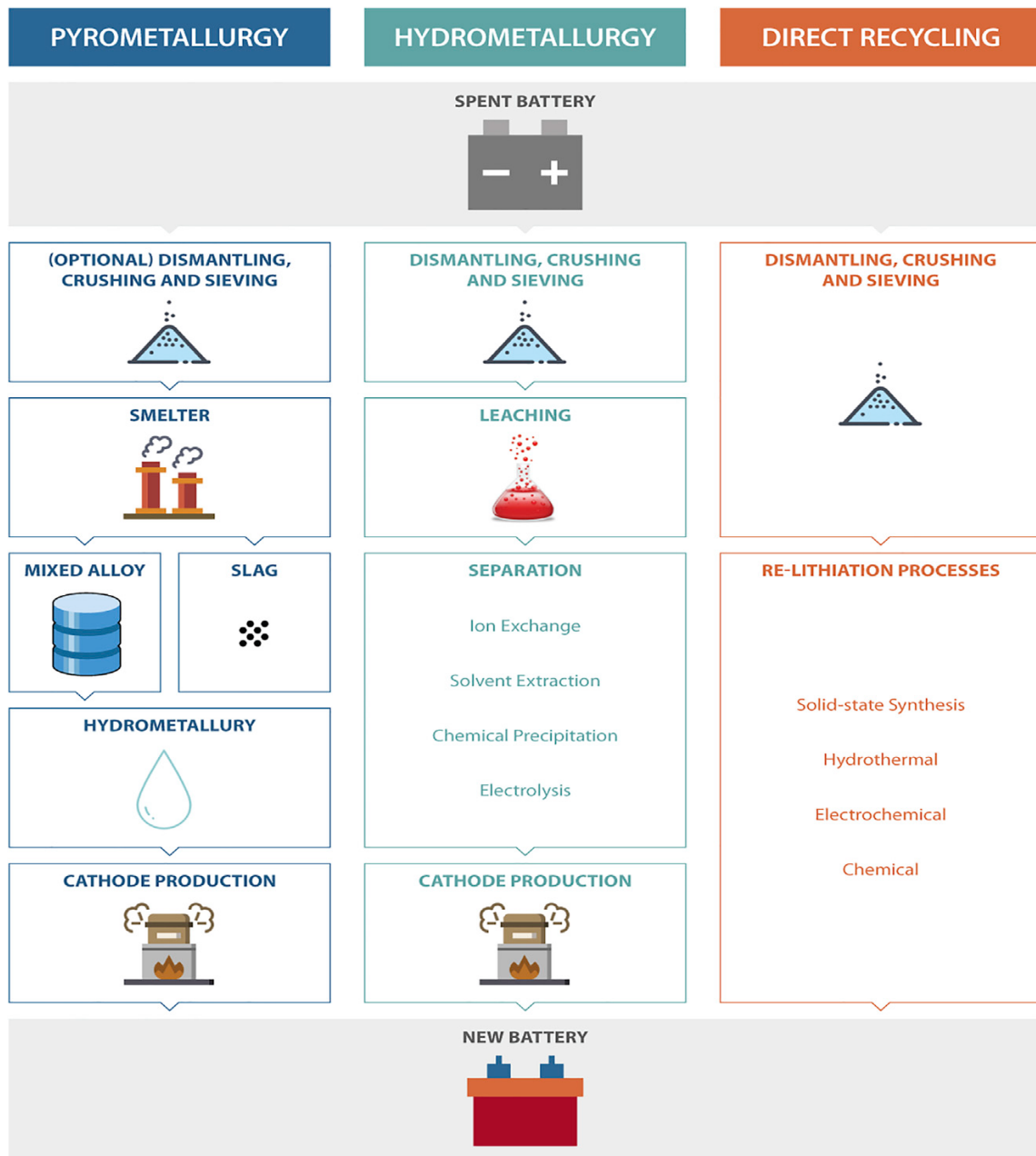
Πλεονεκτήματα της επεξεργασίας άμεσης ανακύκλωσης:

- Αποτελεί μια απλή διαδικασία
- Τα ενεργά υλικά μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν
- Χαμηλότερες εκπομπές ρύπων

Μειονεκτήματα της επεξεργασίας άμεσης ανακύκλωσης:

- Απαιτεί αυστηρή ταξινόμηση / προεπεξεργασία
- Αποτελεί μια πρόκληση η εγγύση για υψηλή καθαρότητα και παρθένα κρυσταλλική δομή
- Σημαντική ευαισθησία στις παραλλαγές ροής εισόδου
- Μη ώριμη τεχνολογικά μέθοδος που υπάρχει μόνο σε εργαστηριακό επίπεδο

Στην επόμενη εικόνα (6.3) μπορούμε να δούμε τις τρεις διαφορετικές τεχνολογίες ανακυκλώσεως των LIBs βήμα βήμα. Βλέπουμε πως φτάνουμε μέσα από διάφορα στάδια επεξεργασίας από μια μπαταρία που βρίσκεται στο τέλος της ζωής της σε μια ολοκαίνουρια έτοιμη να χρησιμοποιηθεί σε ένα ηλεκτρικό όχημα.



ΕΙΚΟΝΑ 6.3 ΟΙ ΤΡΕΙΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΝΑΚΥΚΛΩΣΗΣ ΤΩΝ LIBS [57]

6.4 Σύγκριση BEVs και ICEVs ως προς το περιβαλλοντικό αποτύπωμα

Τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία των ICEVs (οχήματα με μηχανές εσωτερικής κάυσης) εξελίσσεται όλο και περισσότερο. Όμως όλοι οι κανονισμοί και η πολιτική γύρω από την χρήση τους (φόροι στα ορυκτά καύσιμα, απαγόρευση κυκλοφορίας diesel οχημάτων, ζώνες μηδενικών εκπομπών κλπ) τα καθιστούν λιγότερο ελκυστικά.

Το αντίθετο συμβαίνει με την χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων. Ολοένα και περισσότεροι κανονισμοί και πολιτικές εμφανίζονται που υποστηρίζουν την χρήση τους. Οι μπαταρίες των ηλεκτρικών αυτοκινήτων έχουν εξελιχθεί πολύ τα τελευταία χρόνια, όμως απαιτείται ακόμα περαιτέρω έρευνα στους τομείς αύξησης της χωρητικότητας και μείωσης του κόστους.

Ένας παράγοντας που επηρεάζει το αντίκτυπο της χρήσης των οχημάτων στο περιβάλλον είναι η απόδοση τους, η οποία διαφέρει σε μεγάλο βαθμό. Στα ICEVs η απόδοση κυμαίνεται γύρω στο 20% ενώ στα BEVs γύρω στο 70%. Όμως από μόνη της η απόδοση δεν είναι ικανή να καθορίσει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των δυο κατηγοριών.

Είναι σημαντικό να αναλύσουμε την αλυσίδα παροχής ενέργειας. Βασικές παράμετροι είναι οι εκπομπές tank-to-wheel (TTW) και οι εκπομπές well-to-tank (WTT). Ο όρος Tank-to-Wheel (TTW) αναφέρεται σε ένα υπόστρωμα στην ενεργειακή αλυσίδα ενός οχήματος που εκτείνεται από το σημείο στο οποίο απορροφάται η ενέργεια (σημείο φόρτισης, αντλία καυσίμου) έως την εκφόρτιση (εν κινήσει).

Το TTW περιγράφει έτσι τη χρήση καυσίμου στο όχημα και τις εκπομπές κατά την οδήγηση, ενώ ο όρος Well-to-Tank (WTT) περιγράφει το υποσύνολο της τροφοδοσίας καυσίμου - από την παραγωγή της πηγής ενέργειας (βενζίνη, ντίζελ, ηλεκτρική ενέργεια, φυσικό αέριο) έως την παροχή του καυσίμου (μεταφορά στο σημείο φόρτισης ή στην αντλία καυσίμου).

Η παρακάτω εξίσωση μας δίνει τις συνολικές εκπομπές CO₂ ενός οχήματος:

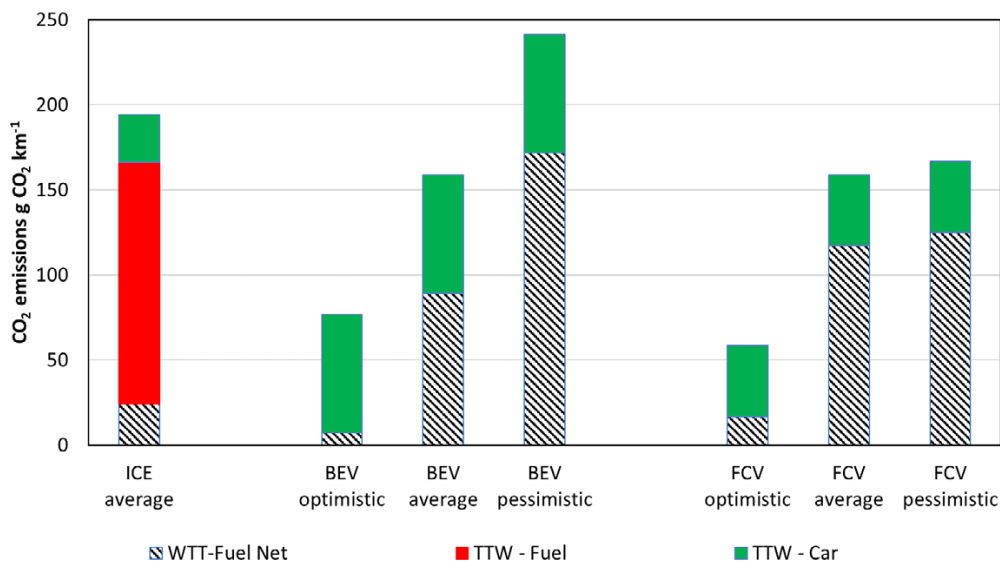
$$CO_{2total} = CO_{2WTTfuel_net} + CO_{2TTW_fuel} + CO_{2TTW_car} [gCO_2 km^{-1}]$$

όπου:

- $CO_{2WTTfuel_net}$ είναι οι εκπομπές που παράγονται κατά την διάρκεια της παραγωγής ή της παροχής της ενέργειας ή του καυσίμου
- CO_{2TTW_fuel} είναι οι εκπομπές που παράγονται κατά την καύση του καυσίμου
- CO_{2TTW_car} είναι οι εκπομπές που παράγονται κατά την διάρκεια των σταδίων παραγωγής του οχήματος

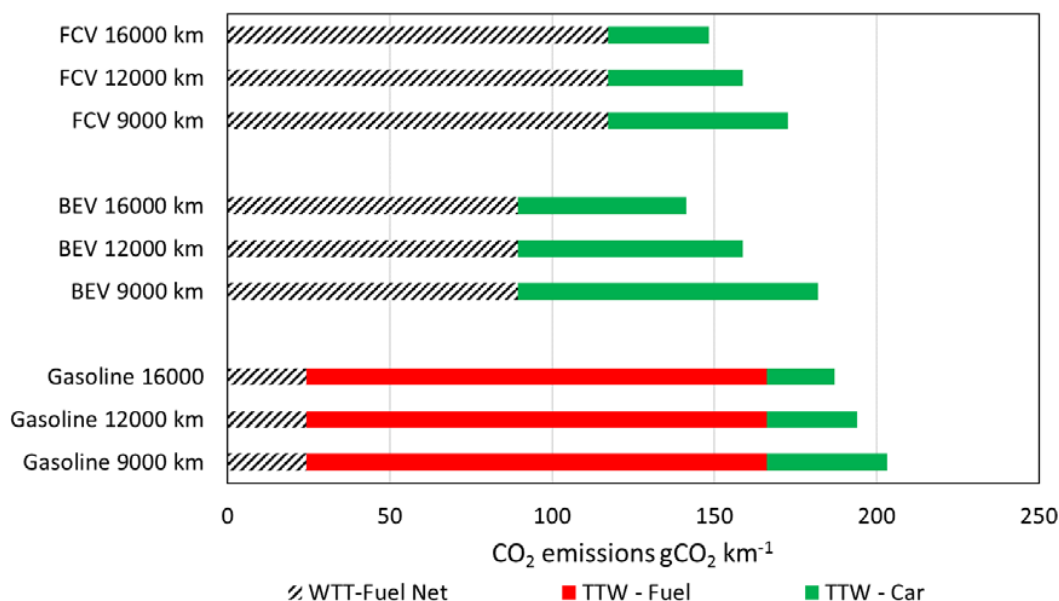
Σύμφωνα με τις έρευνες των A. Ajanovic και R. Haas, προκύπτουν τα παρακάτω στατιστικά:

Στην εικόνα 6.4 βλέπουμε τις συνολικές εκπομπές CO₂ BEVs και FCVs για τρία διαφορετικές περιπτώσεις. αισιόδοξη, μέση και απαισιόδοξη περίπτωση. Ως αναφορά παίρνουμε ένα συμβατικό όχημα με βενζίνη.



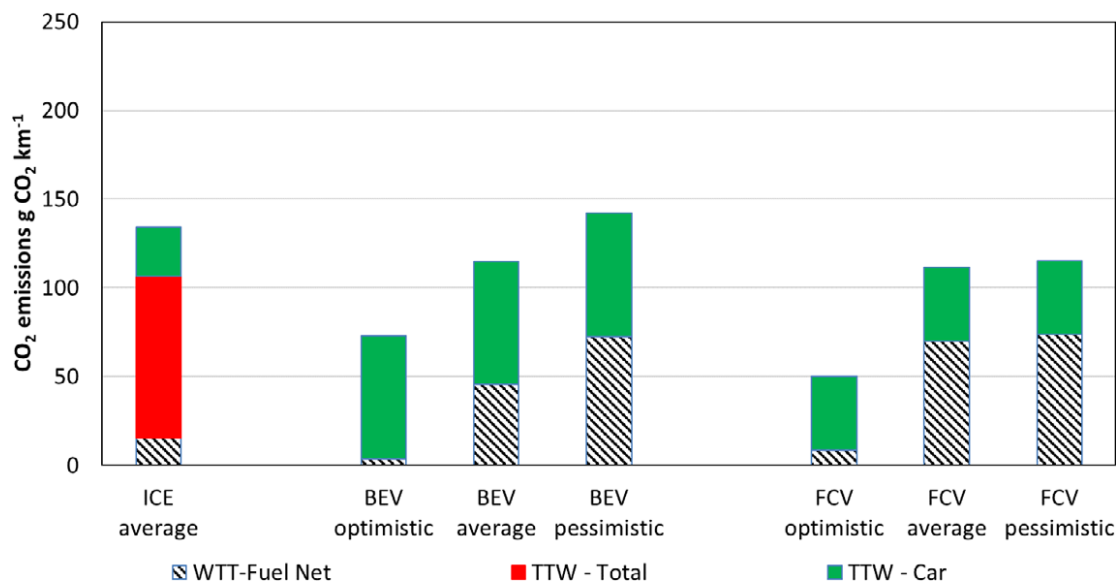
ΕΙΚΟΝΑ 6.4 [56]

Ο αριθμός των χιλιομέτρων έχει σημαντικό αντίκτυπο στις ειδικές εκπομπές CO₂ ανά χιλιόμετρο. Στην εικόνα 6.5, απεικονίζεται η ευαισθησία των χιλιομέτρων ανά έτος για εκπομπές CO₂ ανά χιλιόμετρο για τα οχήματα που αναλύθηκαν.



ΕΙΚΟΝΑ 6.5 [56]

Τέλος, τα σενάρια για τις μελλοντικές εκπομπές CO₂ το 2050 απεικονίζονται στην εικόνα 6.6 για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις που ορίστηκαν από πάνω.



ΕΙΚΟΝΑ 6.6 [56]

6.5 Συμπεράσματα

Τα τελευταία χρόνια η τεχνολογία των ηλεκτρικών οχημάτων έχει εξελιχθεί σημαντικά. Μια προοπτική που μπορεί να προσφέρει αρκετά στην ελάττωση των περιβαλλοντικών προβλημάτων είναι η καθιέρωση των οχημάτων με μηδενικές εκπομπές όπως είναι τα ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία (BEVs) και τα οχήματα με κυψέλες καυσίμου (FCVs).

Η περιβαλλοντική πραγματικότητα της χρήσης των BEVs είναι πολύ πιο περίπλοκη από ότι υπόσχεται η αγορά ενός τέτοιου οχήματος. Είναι γεγονός ότι τα BEVs στον κύκλο ζωής τους έχουν πετύχει την μείωση των GHGs σε σχέση με τα ICEVs.

Το περιβαλλοντικό αντίκτυπο των ICEVs κυρίως προέρχεται από την καύση του καυσίμου στον κινητήρα. Αντίθετα στα BEVs, τα στάδια κατασκευής, δημιουργούν ένα ευρύ φάσμα περιβαλλοντικών προβλημάτων αντισταθμίζοντας ίσως τα οφέλη που παρουσίαζαν σε σχέση με τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Η χρήση βαρέων μετάλλων στην κατασκευή μπαταριών ιόντων λιθίου για BEV σε συνδυασμό με την ρύπανση που δημιουργείται από το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας παράγει περίπου τρεις φορές το ποσοστό τοξικότητας σε σύγκριση με τα ICEVs.

Επιπλέον, σύμφωνα με έρευνες της Washington Post ένα μεγάλο ποσοστό του γραφίτη και του κοβάλτιου που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των μπαταριών ιόντων λιθίου προέρχεται από ελλειπώς ελεγχόμενα και πολύ ρυπογόνα ορυχεία στο Κονγκό και την Κίνα. Με αυτό τον τρόπο, δημιουργείται ένα ακόμα περιβαλλοντικό πρόβλημα που επηρεάζει και τις τοπικές κοινωνίες των περιοχών αυτών κοντά στα ορυχεία.

Από περιβαλλοντικής άποψης, οι διαφορές στο δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη και στο δυναμικό τοξικότητας για τον άνθρωπο θα αυξηθούν και οι δύο το 2025 σε σχέση με το 2015. Τα BEVs θα παράγουν ακόμη χαμηλότερα επίπεδα αερίων θερμοκηπίου σε σχέση με τα ICEVs, αλλά θα παράγουν περίπου πέντε φορές περισσότερο δυναμικό τοξικότητας για τον άνθρωπο σε σύγκριση με τους ICEVs.

Η περίπλοκη περιβαλλοντική πραγματικότητα των BEVs αποτελεί μια πρόκληση για το μέλλον, και σε συνδυασμό με το υψηλό κόστος αγοράς καθιστά την τελική απόφαση αγοράς ενός ηλεκτρικού οχήματος με γνώμονα και το περιβαλλοντικό του αποτύπωμα αρκετά δύσκολη.

Αυτή την στιγμή υπάρχουν και θετικά και αρνητικά όσων αφορά το περιβαλλοντικό κομμάτι. Η ραγδαία ανάπτυξη των μπαταριών σε συνδυασμό με την ανάπτυξη της τεχνολογίας των ηλεκτρικών αυτοκινήτων ίσως στο μέλλον ξεκαθαρίσει τελείως το τοπίο σχετικά με τον τομέα των μετακινήσεων και την προστασία του περιβάλλοντος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΠΗΓΕΣ ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ

1. US Department of energy. Retrieved 11-01-2020, from <https://www.energy.gov/>
2. Fuel Cell Today. Retrieved 11-01-2020, from <http://www.fuelcelltoday.com/>
3. University of Illinois. Retrieved 14-01-2020, from <https://illinois.edu/>
4. University of Cambridge. Retrieved 14-01-2020, from <https://www.cam.ac.uk/>
5. Research gate. Retrieved 19-01-2020, from <https://www.researchgate.net/>
6. Fuel Cell Store. Retrieved 19-01-2020 from <https://www.fuelcellstore.com/>
7. National Museum of American History. Retrieved 20-01-2020, from <https://americanhistory.si.edu/>
8. Power Magazine. Retrieved 25-01-2020, from <https://www.powermag.com/>
9. Alternative Fuels Data Center. Retrieved 28-01-2020, from <https://afdc.energy.gov/>
10. Toyota. Retrieved 01-02-2020, from <https://www.toyota-europe.com/>
11. Boeing. Retrieved 05-02-2020, from <https://www.boeing.com/>
12. BMW. Retrieved 05-02-2020, from <https://www.bmw.com/>
13. Car treatments. Retrieved 10-02-2020, from <https://cartreatments.com/>
14. Future of working. Retrieved 14-02-2020, from <https://futureofworking.com/>
15. New Atlas. Retrieved 17-02-2020, from <https://newatlas.com/>
16. Automotive Energy Supply Corporation. Retrieved 19-02-2020, from <https://www.envision-aesc.com/>
17. How stuff works. Retrieved 25-02-2020, from <https://auto.howstuffworks.com/>
18. Enel X. Retrieved 03-03-2020, from <https://evcharging.enelx.com/>
19. Cleantechnica. Retrieved 05-03-2020, from <https://cleantechnica.com/>
20. Battery University, Retrieved 05-03-2020, from <https://batteryuniversity.com/>
21. Engineering. Retrieved 10-03-2020, from <https://www.engineering.com/>
22. Pod Point. Retrieved 12-03-2020, from <https://pod-point.com>
23. New engineering. Retrieved 25-03-2020, from <https://new.engineering.com/>
24. Stanford University. Retrieved 02-04-2020, from <http://large.stanford.edu/>

25. Wikipedia. Retrieved 15-04-2020, from <https://www.wikipedia.org/>
26. Energy trend. Retrieved 23-04-2020, from <https://m.energytrend.com/>
27. Sea Forces. Retrieved 01-05-2020, from <http://www.seaforces.org/>
28. History collection. Retrieved 07-05-2020, from <https://historycollection.co/>
29. Porsche. Retrieved 14-05-2020, from <https://newsroom.porsche.com/>
30. Auto evolution. Retrieved 14-05-2020, from <https://www.autoevolution.com/>
31. TIME Magazine. Retrieved 14-05-2020, from <http://content.time.com/>
32. Toyota. Retrieved 24-05-2020, from <https://blog.toyota.co.uk/>
33. Amperorio. Retrieved 28-05-2020, from <https://www.amperorio.gr/>
34. BloombergNEF. Retrieved 05-06-2020, from <https://about.bnef.com/>
35. UsCar. Retrieved 10-06-2020, from <https://www.uscar.org/>
36. General Motors. Retrieved 11-06-2020, from <https://gm-volt.com/>
37. Edmunds. Retrieved 12-06-2020, from <https://www.edmunds.com/>
38. Autocar. Retrieved 14-06-2020, from <https://www.autocar.co.uk/>
39. Environmental and Energy Study Institute. Retrieved 14-06-2020, from <https://www.eesi.org/>
40. Connecticut Hydrogen-Fuel Cell Coalition. Retrieved 20-06-2020, from <http://chfcc.org/>
41. European Union. Retrieved 20-06-2020, from <https://ec.europa.eu/>
42. Volkswagen. Retrieved 25-06-2020, from <https://www.volkswagen-newsroom.com/>
43. Adlittle. Retrieved 29-06-2020, from <https://www.adlittle.de/>

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

44. *“Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies Revision 0, December 2001”* by Andre Lanz, P. Eng., James Heffel, Colin Messer.
45. *“Fuel Cell Handbook” (Seventh Edition)* by EG&G Technical Services, Inc.
46. *“FUEL CELLS Problems and Solutions”* by VLADIMIR S. BAGOTSKY
47. *“Lithium-ion Batteries for Electric Vehicles: THE U.S. VALUE CHAIN”* by Marcy Lowe, Saori Tokuoka, Tali Trigg and Gary Gereffi
48. *“Fundamentals and applications of lithium-ion batteries in electric drive vehicles”* by Jiuchun Jiang and Caiping Zhang

49. *"Battery Electric Vehicles Performance, CO2 emissions, lifecycle costs and advanced battery technology development"* by Daan Bakker
50. *"Separators for nickel metal hydride and nickel cadmium batteries designed to reduce self-discharge rates"* by Peter Kritzer
51. *"Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks"* by Garcia-Valle, Rodrigo
52. *"Mass Production Cost Estimation for Direct H₂ PEM Fuel Cell Systems for Automotive Applications: 2009 Update"* by Brian D James, Jeffrey A Kalinoski, Kevin N Baum
53. *"Potential Environmental Impact of a Hydrogen Economy on the Stratosphere"* by Tracey K. Tromp, Run-Lie Shia, Mark Allen, John M. Eiler, Y. L. Yung
54. *"Environmental Impact of Fuel Cell Technology for Electric Power Generation: An Overview and Case Studies"* by Jaimini Upadhyaya, Robert W. Peters, Fouad H. Fouad, Rajesh K. Ahluwalia, Ezzat Danial Doss, Tapas Das
55. *"Economic and Environmental Prospects for Battery Electric- and Fuel Cell Vehicles: A Review"* by A. Ajanovic and R. Haas
56. *"Lithium battery reusing and recycling: A circular economy insight"* by Mario Pagliaro and Francesco Meneguzzo
57. *"Recycling End-of-Life Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries"* by Mengyuan Chen, Xiaotu Ma, Bin Chen, Renata Arsenault, Peter Karlson, Nakia Simon and Yan Wang