ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Ανάλυση και Σχεδίαση Ηλεκτρολογικού Συστήματος ενός Ηλεκτροηλιακού Οχήματος

Μαλισόβας Αθανάσιος

Επιβλέπων Καθηγητής: **Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος**

Μέλη Επιτροπής: **Τσούτσος Θεοχάρης**

Κουτρούλης Ευτύχιος

Χανιά 2014

Πρόλογος

Το 2009 στο Πολυτεχνείο Κρήτης, ξεκίνησε η κατασκευή ενός ηλεκτροηλιακού οχήματος με το όνομα «Ήφαιστος», από ομάδα φοιτητών των τμημάτων Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης και Μηχανικών Περιβάλλοντος. Ο σκοπός ήταν η κατασκευή ενός ηλεκτροηλιακού οχήματος με το λιγότερο δυνατό κόστος, το οποίο να έχει ανταγωνιστικές επιδόσεις σε σχέση με άλλες παρόμοιες προσπάθειες. Η συγγραφή της παρούσας εργασίας ξεκίνησε τον Φεβρουάριο του 2013, με σκοπό να περιγράψει τη μελέτη, τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν και τον τρόπο κατασκευής του ηλεκτρολογικού μέρους του παραπάνω ηλεκτροηλιακού οχήματος μέχρι το σημείο που κατασκευάσθηκε αρχικά και με όσες βελτιώσεις έγιναν αργότερα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Καλαϊτζάκη Κωνσταντίνο, καθώς και τον κ. Τσούτσο Θεοχάρη και τον κ. Ρόβα Δημήτριο για την βοήθεια τους και την συνεχή καθοδήγησή τους, ως υπεύθυνοι καθηγητές της ομάδας αυτής.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους προπτυχιακούς φοιτητές που συμμετείχαν στην κατασκευή και στον σχεδιασμό του οχήματος πλήρους κλίμακας: Ζέρβα Κωνσταντίνο, Βουτσαρά Γεώργιο, Μαλλά Αλέξανδρο, Καμπιανάκη Ελευθέριο, Σηφάκη Χαρά, Παπαμεντζελόπουλο Ιωάννη, Λουκάκη Κωνσταντίνο και Τσουράκη Ηρώ. Επιπλέον, είναι σημαντικό να ευχαριστήσω τους κυρίους Σμυρναίο Ηλία και Τσουράκη Μιχάλη που μας βοήθησαν στην κατασκευή, καταναλώνοντας τον προσωπικό τους επαγγελματικό χρόνο, για να μας προσφέρουν τεχνογνωσία, οδηγίες και βοήθεια. Ιδιαίτερα ευχαριστήρια στον Καμπιανάκη Ελευθέριο, μέλος της ομάδας κατασκευής, που με την συνεργασία του καταλήξαμε στην επιλογή του κατάλληλου τρόπου στήριξης των φωτοβολταϊκών κυψελών, κατόπιν των πειραμάτων που διεξήχθησαν και στον Λουκάκη Κωνσταντίνο, μέλος της ομάδας κατασκευής, ο οποίος βοήθησε στην φάση της συναρμολόγησης και στην φάση διεξαγωγής των πειραμάτων αντοχής. Ευχαριστώ επίσης τον Φωτεινόπουλο Γεώργιο για την υπομονή του κατά την οδήγηση του οχήματος στην φάση των πειραμάτων.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους φίλους μου Λοϊζίδη Ορέστη, Γιαννόπουλο Μανώλη, Αγαδάκο Νίκο, Αγαδάκο Γιάννη, Σκλήκα Αλέξανδρο, Γιαννόπουλο Μάκη, Κλαπάκη Στέλλα, Γκότση Δημήτρη, Εγγλέζο Γιάννη, Τζουρμπάκη Γιώργο, Ζωγράφου Μαρία, Γεωργοπούλου Μαρία και φυσικά τους γονείς μου και την αδερφή μου για την υποστήριξη και συμπαράστασή τους κατά τη διάρκεια κατασκευής του οχήματος και εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Περίληψη

Στο πρώτο κεφάλαιο της παρούσας Διπλωματικής εργασίας γίνεται μια ιστορική αναδρομή που αφορά τα ηλεκτρικά οχήματα. Γίνεται αναφορά στα πιο σημαντικά ιστορικά σημεία και στις τεχνολογικές εξελίξεις. Επίσης, αναφέρονται σημαντικά σημεία για την εξέλιξη των ηλιακών οχημάτων από την στιγμή που δημιουργήθηκαν μέχρι σήμερα.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή των διαφόρων τύπων ηλεκτρικών μηχανών. Γίνεται διεξοδική ανάλυση των χαρακτηριστικών τους και των διαφορών μεταξύ τους. Το τρίτο κεφάλαιο αναφέρεται στους ηλεκτρικούς συσσωρευτές. Γίνεται διαχωρισμός ανάμεσα στους χημικούς και στους χωρητικούς και αναλύονται τα χαρακτηριστικά τους και οι ιδιότητές τους. Περιγράφονται αναλυτικά οι τύποι των συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται στα ηλιακά οχήματα καθώς και οι διαφορές μεταξύ τους σε ό,τι αφορά τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά, αλλά και το κόστος αγοράς κάθε ενός τύπου. Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις ήπιες μορφές ενέργειας και στους λόγους που οδήγησαν στην χρησιμοποίηση αυτών σε πλήθος εφαρμογών. Αναφέρεται διεξοδικά ο τρόπος λειτουργίας, οι αποδόσεις, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των φωτοβολταϊκών στοιχείων και η ιστορική εξέλιξη αυτών. Γίνεται ανάλυση των φωτοβολταϊκών κυψελών και των δυνατοτήτων κάθε τύπου κυψέλης ανάλογα με την χημική του σύσταση. Στο πέμπτο κεφάλαιο δίνονται στοιχεία για δυο πολύ σημαντικά συστήματα, αυτό της διαχείρισης του κινητήρα και της ανίχνευσης του μεγίστου σημείου ισχύος.

Αφού έγινε ανάλυση όλων των επιλογών που είχαμε, στο έκτο κεφάλαιο αναπαρίστανται τα ηλεκτρολογικά σχέδια και κυκλώματα με χρήση συγκεκριμένων μερών, όπως αυτά προτάθηκαν προς κατασκευή. Τα εξαρτήματα αυτά αναφέρονται διεξοδικά στο έβδομο κεφάλαιο, όπου γίνεται αναφορά ενδεικτικών στοιχείων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή. Τέλος, στο όγδοο κεφάλαιο καταγράφονται τα πειράματα που έγιναν πάνω στα επιλεγμένα στοιχεία.

Ολοκληρώνοντας, στο ένατο κεφάλαιο αναφέρονται τα συμπεράσματα και στο δέκατο οι πιθανές βελτιώσεις που μπορούν να γίνουν για να αυξηθεί η απόδοση του οχήματος. Το κύριο συμπέρασμα που προκύπτει από την κατασκευή του οχήματος και τις μετρήσεις, είναι ότι με μικρό κόστος - σχεδόν 4.000€ - μπορεί να κατασκευαστεί ένα ηλεκτροηλιακό όχημα με βάρος 250 kg χωρίς τον οδηγό.

Βέβαια, η κατασκευή του ηλεκτροηλιακού οχήματος όπως αυτό μελετήθηκε και προτάθηκε, δεν ολοκληρώθηκε για οικονομικούς λόγους. Μένει κυρίως η κατασκευή του εξωτερικού ουρανού (κουβουκλίου) και η στήριξη σε αυτό των ηλιακών πάνελ. Πάντως, με φόρτιση των χημικών συσσωρευτών από εξωτερικό φορτιστή η ενδεικτική αυτονομία του ανέρχεται στα 45 χιλιόμετρα, σύμφωνα με την πρώτη δοκιμή αντοχής, με τελική ταχύτητα τα 45 km/h και μέση ταχύτητα περίπου 35 km/h.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1^{ο}: Εισαγωγή 8

Κεφάλαιο 2^{ο} : Ηλεκτρικοί Κινητήρες 12

2.1 Γενικά.....12

2.2 Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος.....12

2.2.1 Εισαγωγή – Κατασκευαστική Περιγραφή 12

2.2.1 Αρχή λειτουργίας των κινητήρων συνεχούς ρεύματος.....14

2.2.2 Τύποι Κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος.....18

2.2.2.1 Κινητήρες Ξένης και Παράλληλης Διέγερσης 18

2.2.2.2 Κινητήρες Διέγερσης Σειράς 20

2.2.2.3 Κινητήρες Σύνθετης Διέγερσης.....21

2.2.2.4 Κινητήρες Μόνιμου Μαγνήτη.....22

2.2.2.5 Κινητήρες Brushless 22

2.3 Κινητήρες Εναλλασσόμενου Ρεύματος.....23

2.3.1 Γενικά.....23

2.3.2 Τύποι κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος 24

2.3.2.1 Σύγχρονοι Κινητήρες.....24

2.3.2.2 Ασύγχρονοι Κινητήρες 27

Κεφάλαιο 3^{ο} : Ηλεκτρικοί Συσσωρευτές.....31

3.1 Χημικοί Ηλεκτρικοί Συσσωρευτές.....31

3.1.1 Εισαγωγή – Ορισμοί.....31

3.1.2 Τύποι Χημικών Ηλεκτρικών Συσσωρευτών για ηλιακά οχήματα.....34

3.1.2.1 Συσσωρευτές Μολύβδου (Pb) 34

3.1.2.2 Συσσωρευτές Ιόντων Λιθίου (Li-ion) και Λιθίου Πολυμερών (Li-Polymer).....36

3.1.2.3 Συσσωρευτές Λιθίου Φωσφορικού Άλατος Σιδήρου ($LiFePO_4$).....38

3.1.2.4 Συσσωρευτές Νικελίου – Υβριδίου Μετάλλου (Ni-MH) 39

3.1.2.5 Συσσωρευτές Ασημιού - Ψευδαργύρου (Ag-Zn).....40

3.1.2.6 Συσσωρευτές Νικελίου - Ψευδαργύρου (Ni-Zn).....40

3.1.2.7 Συσσωρευτές Νικελίου - Σιδήρου (Ni-Fe) 41

3.2 Χωρητικοί Ηλεκτρικοί Συσσωρευτές 42

3.2.1 Εισαγωγή – Ορισμοί.....42

3.2.2 Τύποι Χωρητικών Ηλεκτρικών Συσσωρευτών 43

3.2.2.1 Υπερπυκνωτές Διεπιφανειακής Χωρητικότητας και Υπερπυκνωτές Ψευδοχωρητικότητας (EDLC/PC Supercapacitors) 43

3.2.2.2 Υβριδικοί Υπερπυκνωτές (Hybrid Supercapacitors).....45

3.3 Συμπεράσματα χρήσης Χημικών και Χωρητικών Ηλεκτρικών Συσσωρευτών.....45

Κεφάλαιο 4^{ο} : Φωτοβολταϊκά Στοιχεία 49

4.1 Εισαγωγή 49

4.2 Μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική μορφή 50

4.3 Το Φωτοβολταϊκό φαινόμενο 51

4.4 Παράγοντες επίδρασης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών κυψελών.....56

4.5 Ορισμοί.....58

4.6 Φωτοβολταϊκές Κυψέλες 60

4.6.1 Κρυσταλλικές Φωτοβολταϊκές Κυψέλες 60

4.6.2 Φωτοβολταϊκές Κυψέλες Λεπτού Υμενίου 62
4.6.2.1 Φωτοβολταϊκές Κυψέλες Λεπτού Υμενίου Πολυ-επαφικού Αρσενικούχου Γαλλίου (Tf-GaAs/2J-GaAs/3J-GaAs/4J+-GaAs) 62
4.6.2.2 Φωτοβολταϊκές Κυψέλες Λεπτού Υμενίου Τελλουριούχου Καδμίου (CdTe) 63
4.6.2.3 Φωτοβολταϊκές Κυψέλες Λεπτού Υμενίου Άμορφου / Νανο-κρυσταλλικού Πυριτίου (a-Si/nc-Si) 64
4.6.2.4 Φωτοβολταϊκές Κυψέλες Λεπτού Υμενίου Δυσεληνιούχου Χαλκοινδιογάλλιου (CIGS) 64
4.6.2.5 Φωτοβολταϊκές Κυψέλες Λεπτού Υμενίου Φωτο-ευαίσθητου Μελανιού (DSSC) και Κβαντισμένων Νανο-σωματιδίων (QDSC) 65

4.7 Συμπεράσματα χρήσης Φωτοβολταϊκών Κυψελών 66

Κεφάλαιο 5^{ο} : Σύστημα Ανίχνευσης Μέγιστου Σημείου Ισχύος για Φωτοβολταϊκά και Σύστημα Διαχείρισης της Κίνησης του Ηλεκτρικού Κινητήρα 68

5.1 Σύστημα Ανίχνευσης Μέγιστου Σημείου Ισχύος Φωτοβολταϊκών (Maximum Power Point Tracker/MPPT) 68
5.1.1 Αλγόριθμοι Ανίχνευσης Μέγιστου Σημείου Ισχύος για Φωτοβολταϊκά 72
5.1.1.1 Αλγόριθμος Ανίχνευσης Μέγιστου Σημείου Ισχύος τύπου Σταθερής Τάσης (Constant Voltage) 72
5.1.1.2 Αλγόριθμος Ανίχνευσης Μέγιστου Σημείου Ισχύος τύπου Τάσης Ανοιχτού Κυκλώματος (Open Circuit Voltage) 72
5.1.1.3 Αλγόριθμος Ανίχνευσης Μέγιστου Σημείου Ισχύος τύπου Έντασης Ρεύματος Κλειστού Κυκλώματος (Short Circuit Current) 73
5.1.1.4 Αλγόριθμοι Ανίχνευσης Μέγιστου Σημείου Ισχύος τύπου Μεταβολής και 73
5.1.1.5 Αλγόριθμος Ανίχνευσης Μέγιστου Σημείου Ισχύος τύπου Αυξητικής Αγωγιμότητας (Incremental Conductance) 74
5.1.1.6 Αλγόριθμοι Ανίχνευσης Μέγιστου Σημείου Ισχύος τύπου Ασαφούς Λογικής και Νευρωνικού Δικτύου (Fuzzy Logic/Neural Network) 75

5.2 Συστήματα Διαχείρισης της Κίνησης του Ηλεκτρικού Κινητήρα Διαμόρφωση πλάτους παλμών (PWM) 76

5.3 Συμπεράσματα χρήσης των υπό ανάλυση Συστημάτων 78

Κεφάλαιο 6^{ο} : Ηλεκτρολογικά Σχέδια συνδεσμολογίας του ηλεκτρολογικού συστήματος του ηλεκτροηλιακού οχήματος που προτάθηκε προς κατασκευή και περιληπτική περιγραφή αυτών 80

Κεφάλαιο 7^{ο} : Στοιχεία ηλεκτρικών μερών της παρούσας κατασκευαστικής πρότασης του ηλεκτροηλιακού οχήματος 88

7.1 Στοιχεία ηλεκτρικών μερών της φωτοβολταϊκής πηγής παροχής ενέργειας 88

7.2 Στοιχεία ηλεκτρικών μερών των ηλεκτρικών συσσωρευτών παροχής και αποθήκευσης ενέργειας 91

7.3 Στοιχεία ηλεκτρικών μερών του Συστήματος Διαχείρισης Ηλεκτρικού Κινητήρα 94

Κεφάλαιο 8^{ο} : Παρουσίαση Μετρήσεων και Δεδομένων 99

8.1 Μετρήσεις και Δεδομένα που ελήφθησαν από την πειραματική διαδικασία επιλογής του βέλτιστου τρόπου τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών κυψελών στην επιφάνεια του οχήματος 99
8.1.1 Εισαγωγή 99
8.1.2 Ανάλυση Διαθέσιμων Υλικών 99
8.1.3 Ανάλυση αξιοποίησης των παραπάνω υλικών 101

8.2 Μετρήσεις και Δεδομένα που ελήφθησαν από την πειραματική διαδικασία εκτέλεσης αντοχής του οχήματος 106

8.2.1 Εισαγωγή 106
8.2.2 Διεξαγωγή των πειραμάτων πρώτης δοκιμής 106
8.2.3 Διεξαγωγή των πειραμάτων δεύτερης δοκιμής 107

8.3 Εκτιμήσεις Απόδοσης Οχήματος 109
8.3.1 Πρόβλεψη απόδοσης του οχήματος με εφαρμογή φωτοβολταϊκών κυψελών πολυκρυσταλλικού πυριτίου 110
8.3.2 Πρόβλεψη απόδοσης του οχήματος με εφαρμογή φωτοβολταϊκών κυψελών πολυκρυσταλλικού πυριτίου και μπαταριών λιθίου πολυμερών 111
8.3.3 Πρόβλεψη απόδοσης του οχήματος με εφαρμογή φωτοβολταϊκών κυψελών Αρσενικούχου Γαλλίου και μπαταριών λιθίου πολυμερών 112

Κεφάλαιο 9^{ο} : Συμπεράσματα 113

Κεφάλαιο 10^{ο} : Σημεία βελτίωσης και προσθήκες των προτεινόμενων ηλεκτρικών μερών της πρότασης 115

10.1 Βελτιώσεις και Προσθήκες Φωτοβολταϊκής Πηγής Παροχής Ενέργειας 115

10.2 Βελτιώσεις και Προσθήκες Ηλεκτρικών Συσσωρευτών Παροχής και Αποθήκευσης Ενέργειας 115

10.3 Βελτιώσεις και Προσθήκες Συστήματος Διαχείρισης Ηλεκτρικού Κινητήρα 116

Βιβλιογραφία 117

Κεφάλαιο 1^{ο}: Εισαγωγή

Ηλεκτρικά οχήματα: Τα ηλεκτρικά οχήματα χρησιμοποιούν, για να κινηθούν, ηλεκτρικούς κινητήρες αντί των μηχανών εσωτερικής καύσης. Η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια αποθηκεύεται σε επαναφορτιζόμενους χημικούς συσσωρευτές.

Τα κυριότερα πλεονεκτήματα των ηλεκτρικών αυτοκινήτων σε σχέση με τα συμβατικά είναι τα εξής:

α) Δεν παράγουν ρύπανση στο άμεσο περιβάλλον

β) Είναι περισσότερο αθόρυβα

γ) Έχουν σταθερή ροπή από την ακινησία μέχρι την μέγιστη επιτάχυνση και λειτουργούν σε υψηλότερες στροφές.

Έχουν όμως και μειονεκτήματα, όπως:

α) Μικρότερη αυτονομία, δηλαδή αρκετά μικρότερη απόσταση ταξιδίου χωρίς να απαιτηθεί επαναφόρτιση των συστοιχιών. Στα πρώτα στάδια ανάπτυξης των ηλεκτρικών οχημάτων, κάθε περίπου 60 χλμ έπρεπε να γίνει επαναφόρτιση. Σήμερα βέβαια έχουν καταγραφεί αυτονομίες πάνω από 200 χλμ σε αυτοκίνητα παραγωγής. Την καλύτερη επίδοση φαίνεται να την έχει το όχημα Tesla Roadster που διένυσε 504 χλμ. με μία μόνο φόρτιση στο παγκόσμιο διαγωνισμό Global Green Challenge στην Αυστραλία το 2009.

β) Μεγάλος χρόνος επαναφόρτισης

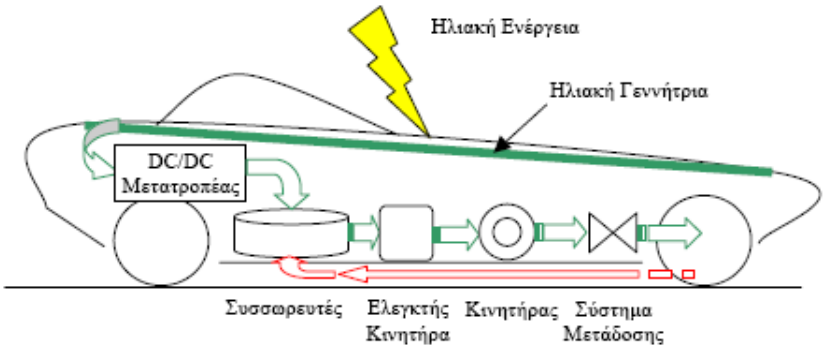
γ) Περιορισμένη διάρκεια ζωής των χημικών συσσωρευτών αν και σήμερα έχουν σχεδιασθεί συσσωρευτές που αντέχουν αρκετές χιλιάδες φορτοεκφορτίσεις.

Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα πρωτοεμφανίστηκαν το 1800, με χαρακτηριστικό γνώρισμα ότι στα αστικά κέντρα στην Αμερική, την πρώτη δεκαετία του 1800, τα ηλεκτρικά οχήματα ήταν περισσότερα σε αριθμό από τα οχήματα με μηχανές εσωτερικής καύσης. Οι τεχνολογικές εξελίξεις και η μεγαλύτερη αυτονομία όμως των οχημάτων εσωτερικής καύσης σταμάτησε την χρήση τους και την ανάπτυξή τους. Η αμέσως επόμενη μεγάλη επανεμφάνιση των ηλεκτρικών οχημάτων ήταν το 1990, όταν στις Ηνωμένες πολιτείες κατασκευάστηκε και πουλήθηκε μαζικά ηλεκτρικό όχημα από την εταιρία General Motors. Η τεχνογνωσία που αποκτήθηκε οδήγησε στην κατασκευή του αποκλειστικά ηλεκτρικού οχήματος EV1, το οποίο διατέθηκε με τη μορφή της ενοικίασης σε χρήστες από το 1990 μέχρι το 2003, όταν και ανακλήθηκε από την εταιρία.

Το 2006 η Tesla Motors παρουσίασε το Tesla Roadster με τιμή που ξεπερνούσε εκείνη την εποχή τα 100.000 δολάρια. Το 2010 το Nissan Leaf έκανε την εμφάνισή του στην αγορά με αυτονομία 160 χιλιομέτρων και κόστος περίπου 35.000 δολάρια. Η εταιρεία έχει διαθέσει περισσότερα από 10.000 οχήματα. Η εξέλιξη κατασκευής ηλεκτρικών οχημάτων συνεχίζεται από πολλές εταιρείες με προσπάθειες κυρίως αύξησης της αυτονομίας και μείωσης του κόστους.

Ηλεκτροηλιακά οχήματα: Ήρθαν σαν συνέχεια των ηλεκτρικών οχημάτων με σκοπό να επιτευχθούν μεγαλύτεροι χρόνοι αυτονομίας με χρήση της ηλιακής ενέργειας για την φόρτιση των χημικών συσσωρευτών και κατά τη διάρκεια κίνησης του αυτοκινήτου. Ένα ηλιακό όχημα είναι κατά βάση ηλεκτρικό όχημα στο οποίο η ενέργεια που απαιτείται για την επαναφόρτιση των συστοιχιών λαμβάνεται αποκλειστικά από τα ηλιακά πάνελ.

Το παρακάτω σκαρίφημα παρουσιάζει την αρχή λειτουργίας και τα βασικά μέρη ενός ηλιακού οχήματος.



Η ιστορία αυτών αρχίζει το 1983 όταν οι Αυστραλοί Tholstrup και Perkins διένυσαν μια απόσταση 4000 χλμ. σε 21 ημέρες από το Σίδνεϊ στο Περθ, με το όχημα BP Quiet Achiever, με μέση ταχύτητα 24 χλμ/ώρα. Στη συνέχεια, τα επόμενα χρόνια και άλλες ομάδες και πανεπιστήμια σε όλο τον κόσμο έκαναν προσπάθειες βελτίωσης των χαρακτηριστικών με καλά αποτελέσματα. Έτσι, το 1987, διοργανώθηκε ο πρώτος επίσημος αγώνας ηλεκτροηλιακών οχημάτων στην Αυστραλία με 23 συμμετοχές από όλο τον κόσμο. Στον αγώνα των 3000 χλμ. τερμάτισαν 6 οχήματα και το Sunraycer της General Motors κατέλαβε την πρώτη θέση με μέση ταχύτητα 67 χλμ/ώρα.

Από το 1987 και μέχρι το 2003 ο αγώνας διοργανωνόταν ανά 3 χρόνια, ενώ από το 2003 και μετά ανά 2 χρόνια. Οι συμμετέχοντες περιλαμβάνουν αυτοκινητοβιομηχανίες, πανεπιστήμια αλλά και άλλες εταιρίες τεχνολογίας. Η εξέλιξη στην πορεία του αγώνα ήταν μεγάλη και είχε ως συνέπεια την εισαγωγή και άλλων κλάσεων εκτός των μονοθέσιων οχημάτων με σκοπό την αντοχή. Έτσι από το 2007 και μετά υπάρχει και κατηγορία οχημάτων πόλης με σκοπό την ενσωμάτωση των τεχνολογικών εξελίξεων των προηγούμενων χρόνων σε οχήματα πιο χρηστικά για το ευρύ κοινό.

Εκτός από τον παραπάνω αγώνα παρόμοιοι αγώνες έχουν διοργανωθεί σε πολλές χώρες στην Ευρώπη, την Αμερική και την Ιαπωνία. Κάθε αγώνας έχει τα δικά του χαρακτηριστικά σε ό,τι αφορά στη διαδρομή και στους στόχους. Επίσης, για κάθε αγώνα δίνονται αυστηρές προδιαγραφές στην σχεδίαση των συμμετεχόντων οχημάτων με τις οποίες πρέπει να συμμορφώνονται όλοι οι αγωνιζόμενοι με ποινή μη συμμόρφωσης τον αποκλεισμό από τον αγώνα. Οι περιορισμοί που τίθενται για όλα τα στοιχεία που αποτελούν το ηλιακό όχημα έχουν σαν αποτέλεσμα να προωθείται οι ανάπτυξη τους και να επιτυγχάνονται έτσι καλύτερες αποδόσεις.

Οι προδιαγραφές και οι περιορισμοί που τίθενται για συμμετοχή σε παρόμοιους αγώνες επιγραμματικά είναι :

α) Επιφάνεια φωτοβολταϊκών 6 m^2 ανεξαρτήτως τεχνολογίας

β) Συγκεκριμένο βάρος χημικών συσσωρευτών ανάλογα με την χημική τους σύνθεση

γ) Συγκεκριμένες μέγιστες εξωτερικές διαστάσεις

δ) Γωνία την οποία θα σχηματίζει η πλάτη του οδηγού ως προς το έδαφος από ένα όριο και πάνω

ε) Υπακοή στον κώδικα οδικής κυκλοφορίας

Ο ανταγωνισμός που αναπτύσσεται σε αυτούς τους αγώνες έχει σαν αποτέλεσμα την επιτάχυνση της ανάπτυξης της τεχνολογίας των ηλεκτροηλιακών οχημάτων. Τεχνολογικά άλματα παρατηρούνται συνεχώς σε ό,τι αφορά στα φωτοβολταϊκά στοιχεία (Φ/Β), τους κινητήρες, τους συσσωρευτές και τα χρησιμοποιούμενα ηλεκτρονικά στοιχεία.

Στην χώρα μας το Υπουργείο Πολιτισμού πήρε την πρωτοβουλία και διοργάνωσε το 2004 διεθνή αγώνα ηλιακών οχημάτων με την επωνυμία «Φαέθων» 2004» στα πλαίσια της Πολιτιστικής Ολυμπιάδας. Η οργάνωση του αγώνα ήταν ευθύνη του Ελληνικού Ινστιτούτου Ηλεκτροκινήτων Οχημάτων και της Ελληνικής Λέσχης Περιηγήσεων και Αυτοκινήτου. Παράλληλα με τον αγώνα, η Πολιτιστική Ολυμπιάδα διεξήγαγε διαγωνισμό «Σχεδίασης Ελληνικού Ηλιακού Οχήματος» σύμφωνα με τις προδιαγραφές της FIA. Στο διαγωνισμό πήραν μέρος αρκετά εκπαιδευτικά ελληνικά ιδρύματα και αποκτήθηκαν αξιόλογες εμπειρίες. Το Δεκέμβριο του 2004 στις αίθουσες του Ζαππείου παρουσιάσθηκαν οι εργασίες που έγιναν από τα Εκπαιδευτικά Ιδρύματα κυρίως αλλά και από ιδιώτες και δόθηκαν παρουσία του Υπουργού Πολιτισμού τα βραβεία στους διακριθέντες. Ήταν μια εκδήλωση που έγινε για πρώτη φορά τότε στην χώρα μας, όπου δόθηκε η υπόσχεση από όλους τους συμμετέχοντες ότι θα καταβάλουν κάθε δυνατή προσπάθεια για να αναπτύξουν περαιτέρω την τεχνολογία κατασκευής ηλιακών οχημάτων.

Ηλιακό όχημα «Ήφαιστος»: Η αρχή σχεδιασμού του ηλεκτροηλιακού οχήματος «Ήφαιστος» έγινε το 2007 με την εκπόνηση μιας μελέτης για την κατασκευή του. Αναζητήθηκαν δεδομένα από ήδη κατασκευασμένα αντίστοιχα οχήματα με σκοπό την απόκτηση εμπειρίας πάνω στα ξεχωριστά μέρη που είναι απαραίτητα για την κατασκευή του οχήματος. Υλοποιήθηκε ένα μοντέλο σε κλίμακα 1/10 από μετατροπή ενός μικρού τηλεκατευθυνόμενου οχήματος, στο οποίο ενσωματώθηκαν εύκαμπτες φωτοβολταϊκές κυψέλες που παρείχαν ενέργεια στο χημικό συσσωρευτή του οχήματος. Ακολούθησε η συμμετοχή στον Βαλκανικό Διαγωνισμό για την Σχεδίαση Ηλιακού Οχήματος που διοργανώθηκε από το Ελληνικό Ινστιτούτο Ηλεκτροκίνητων Οχημάτων (ΕΛ.ΙΝ.Η.Ο.) και έγινε στα Ιωάννινα τον Ιούνιο του 2008. Στο διαγωνισμό αυτό η πρόταση του Πολυτεχνείου Κρήτης πήρε το δεύτερο βραβείο. Για την συμμετοχή στον διαγωνισμό αυτό εκπονήθηκε πλήρης μελέτη, που αφορούσε όλα τα βασικά μέρη του οχήματος. Αυτή ουσιαστικά ήταν η πρώτη ολοκληρωμένη προσπάθεια πάνω στην οποία θα βασιζόταν η μετέπειτα κατασκευή. Το επόμενο βήμα ήταν η κατασκευή ενός μοντέλου σε μεγαλύτερη κλίμακα με βάση την μελέτη που υλοποιήθηκε. Το αποτέλεσμα ήταν ένα μοντέλο σε κλίμακα 1/5 κατασκευασμένο από ξύλο balsa και σύνθετα υλικά το οποίο είχε χημικούς ηλεκτρικούς συσσωρευτές και μονοκρυσταλλικές φωτοβολταϊκές κυψέλες πυριτίου.

Το 2009 ξεκίνησε η κατασκευή του πλήρους κλίμακας οχήματος βασισμένο στην αρχική μελέτη με τις απαραίτητες βελτιώσεις και τροποποιήσεις**.** Ο σκοπός ήταν η κατασκευή ενός ηλεκτροηλιακού οχήματος με το λιγότερο δυνατό κόστος, το οποίο παρ' ολα αυτά να έχει ανταγωνιστικές επιδόσεις σε σχέση με τις προσπάθειες του εξωτερικού. Αυτός ήταν και ο λόγος που ακολουθήσαμε τους περιορισμούς και τους κανόνες κατασκευής τέτοιων οχημάτων οι οποίοι δίνονται από το διαγωνισμό

«World Solar Challenge». Αντιμετωπίστηκαν πολλά προβλήματα και δυσκολίες, τα οποία ξεπεράστηκαν, με αποτέλεσμα μετά από προσπάθειες 2 χρόνων να υλοποιηθούν αρκετά από τα επιμέρους κομμάτια, τα οποία και συναρμολογήθηκαν το καλοκαίρι του 2011, όπου και έγιναν οι πρώτες δοκιμές. Δυστυχώς περαιτέρω εξελίξεις και συνέχιση της κατασκευής δεν κατέστησαν δυνατές με πολύ ελάχιστες εξαιρέσεις, για λόγους κυρίως οικονομικούς. Το αποτέλεσμα ήταν ένα όχημα με κόστος κάτω από 4000 €, το οποίο κινείται αποκλειστικά σαν ηλεκτρικό. Ακόμα έχει κατασκευαστεί και ένα καλούπι για την κατασκευή του πάνω μέρους του οχήματος, το οποίο δεν έχει ολοκληρωθεί ακόμα και πάνω στο οποίο θα τοποθετούνταν οι φωτοβολταϊκές κυψέλες. Τέλος, οι ηλιακές κυψέλες είναι διαθέσιμες σε περίπτωση που μπορέσει να προχωρήσει η κατασκευή του πάνω μέρους του οχήματος.

Κεφάλαιο 2^{ο} : Ηλεκτρικοί Κινητήρες

2.1 Γενικά

Οι Κινητήρες είναι ηλεκτρικές μηχανές που δέχονται ηλεκτρική ενέργεια και τη μετατρέπουν σε κινητική μέσω της δράσης ενός μαγνητικού πεδίου. Οι Κινητήρες γενικά που απαντώνται στα συστήματα ηλεκτρικής κίνησης διακρίνονται ανάλογα με την τροφοδοσία τους σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος (DC) και τους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος (AC). Η κάθε μία από τις παραπάνω κατηγορίες περικλείει όμως πολλές υποκατηγορίες με σημαντικές διαφοροποιήσεις στα χαρακτηριστικά και στη λειτουργία τους.

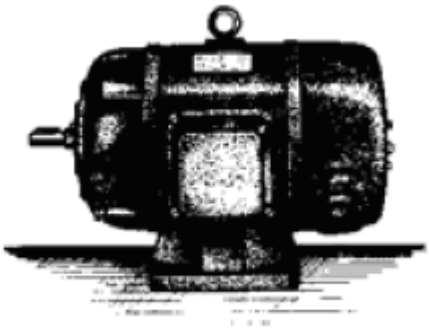
Στα υλοποιημένα έως σήμερα ηλεκτροηλιακά οχήματα χρησιμοποιούνται για την κίνησή τους ηλεκτρικοί κινητήρες συνεχούς και εναλλασσόμενου ρεύματος. Στα επόμενα κεφάλαια 1.2 και 1.3 θα γίνει μια περιγραφή των τύπων και της λειτουργίας των κινητήρων αυτών εστιάζοντας περισσότερο στους κινητήρες που βρίσκουν εφαρμογή στα ηλιακά οχήματα που μέχρι τώρα έχουν σχεδιαστεί.

2.2 Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος

2.2.1 Εισαγωγή – Κατασκευαστική Περιγραφή

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούνται στις περιπτώσεις που θέλουμε υψηλή ροπή στρέψης και δυνατότητα ρύθμισης στροφών σε μεγάλο εύρος, όπως στην ηλεκτρική έλξη (τραίνα, τρόλεϊ, ηλεκτρικά οχήματα κτλ), στους γερανούς, στις αντλίες, στις εργαλειομηχανές και σε πολλές άλλες ειδικές χρήσεις.

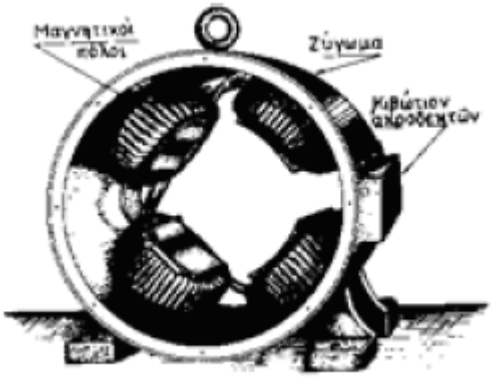
Κάθε κινητήρας συνεχούς ρεύματος αποτελείται από το ακίνητο μέρος και το περιστρεφόμενο μέρος το οποίο ονομάζεται δρομέας. Στο Σχήμα 2.1 φαίνεται η εξωτερική όψη μιας μηχανής συνεχούς ρεύματος.



Σχήμα 2.1: Μηχανή Συνεχούς Ρεύματος

Το ακίνητο μέρος αποτελείται από το κεντρικό τμήμα, τον στάτη και τα δύο καλύμματα, που προφυλάσσουν το εσωτερικό της μηχανής και στηρίζουν τα έδρανα, μέσα στα οποία περιστρέφεται ο άξονας του δρομέα. Στο εξωτερικό μέρος του στάτη είναι στερεωμένο το κιβώτιο των ακροδεκτών, μέσω των οποίων η μηχανή συνδέεται με την πηγή που την τροφοδοτεί με ηλεκτρικό ρεύμα.

<u>Ο στάτης</u> (Σχήμα 2.2) αποτελείται από το ζύγωμα και τους μαγνητικούς πόλους, που είναι στερεωμένοι στο εσωτερικό του μέρος. Κάθε μαγνητικός πόλος αποτελείται από τον πυρήνα και το τύλιγμα. Ο πυρήνας που είναι κατασκευασμένος από πολλά λεπτά σιδερένια ελάσματα έχει διαμορφωθεί στο ένα άκρο του σε μορφή πέδιλου για την καλύτερη κατανομή του μαγνητικού πεδίου. Το τύλιγμα κάθε πόλου αποτελείται από πολλές σπείρες από μονωμένο σύρμα, που όλες μαζί, για καλύτερη μόνωση προς τον πυρήνα είναι τυλιγμένες με βαμβακερή ταινία εμποτισμένη σε βερνίκι.

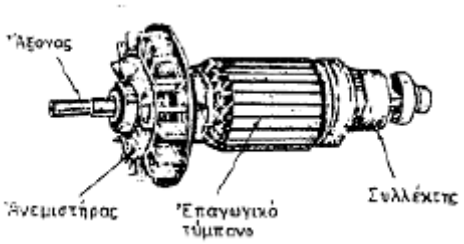


Σχήμα 2.2: Αναπαράσταση στάτη μηχανής Συνεχούς Ρεύματος

Τα άκρα του τυλίγματος μένουν ελεύθερα γιατί μέσα από αυτά διοχετεύεται το ηλεκτρικό ρεύμα που δημιουργεί το μαγνητικό πεδίο.

Ανάλογα με τον αριθμό των πόλων που έχει μια μηχανή ονομάζεται διπολική, τετραπολική, εξαπολική κ.τ.λ.. Ο αριθμός των πόλων αυτών είναι αποκλειστικά άρτιος αριθμός.

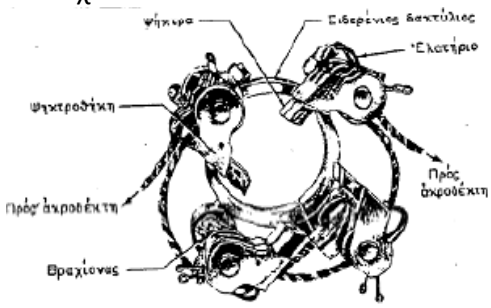
<u>Ο δρομέας</u> (Σχήμα 2.3) μιας μηχανής Συνεχούς Ρεύματος αποτελείται από το επαγωγικό τύμπανο και τον συλλέκτη. Το επαγωγικό τύμπανο αποτελείται από τον πυρήνα και το τύλιγμα. Ο πυρήνας είναι κατασκευασμένος και αυτός από πολλά λεπτά μαγνητικά ελάσματα. Στην περιφέρεια τους αποτελούνται από οδοντώσεις οι οποίες σχηματίζουν τα αυλάκια του πυρήνα μέσα στο οποία τοποθετείται το τύλιγμα. Το τύλιγμα αποτελείται από ένα ορισμένο αριθμό ομάδων. Κάθε ομάδα κατασκευάζεται από πολλές σπείρες μονωμένου χάλκινου σύρματος, οι οποίες τυλίγονται με βαμβακερή ταινία για μόνωση. Τα δύο άκρα του σύρματος της ομάδας μένουν ελεύθερα για να συνδεθούν σε δύο τομείς του συλλέκτη. Κάθε ένα από τα δύο στοιχεία που έχει η ομάδα τοποθετείται σε διαφορετικό αυλάκι του πυρήνα κατά τέτοιο τρόπο, ώστε σε κάθε αυλάκι να υπάρχουν δύο στοιχεία από δύο διαφορετικές ομάδες. Έτσι έχουμε ένα τύλιγμα σε δύο στρώσεις.



Σχήμα 2.3: Αναπαράσταση δρομέα Μηχανής Συνεχούς Ρεύματος

Ο συλλέκτης αποτελείται από χάλκινα ελάσματα, τα οποία ονομάζονται τομείς του συλλέκτη. Οι τομείς είναι στερεωμένοι ανάμεσα σε δύο σιδερένιους δακτυλίους και σχηματίζουν την κυλινδρική επιφάνεια του συλλέκτη. Κάθε τομέας μονώνεται με μίκα από τους διπλανούς του και από το σώμα της μηχανής. Στις εγκοπές που φέρουν οι τομείς συγκολλούνται τα άκρα των ομάδων από το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου.

<u>Ψηκτροφορέας:</u> Ένα ακόμα στοιχειώδες εξάρτημα των ηλεκτρικών κινητήρων, που είναι στερεωμένο στο ακίνητο μέρος αυτών, προς την πλευρά του συλλέκτη είναι ο ψηκτροφορέας (Σχήμα 2.4), ο οποίος αποτελείται από ένα σιδερένιο δακτύλιο με βραχίονες. Οι βραχίονες είναι στερεωμένοι κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι ηλεκτρικά μονωμένοι από τον δακτύλιο. Οι ψηκτροθήκες περιέχουν μέσα τους τις ψήκτρες, οι οποίες έχουν ως σκοπό τη μεταφορά του ηλεκτρικού ρεύματος από τους ακροδέκτες του κινητήρα προς τον συλλέκτη. Οι ψήκτρες είναι κατασκευασμένες συνήθως από σκληρό άνθρακα, είτε από γραφίτη είτε από μίγμα άνθρακα και χαλκού.



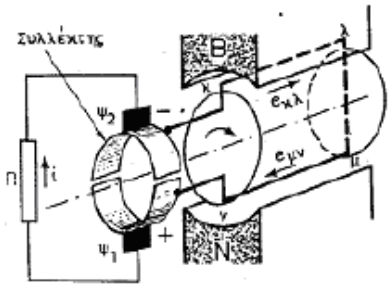
Σχήμα 2.4: Αναπαράσταση ψηκτροφορέα μηχανής Συνεχούς Ρεύματος

Στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος το μαγνητικό πεδίο δημιουργείται από τους μαγνητικούς πόλους της μηχανής, τα τυλίγματα των οποίων τροφοδοτούνται με συνεχές ρεύμα. **Η δημιουργία του μαγνητικού πεδίου από το ηλεκτρικό ρεύμα λέγεται διέγερση της μηχανής.** Τα δε τυλίγματα των μαγνητικών πόλων λέγονται τυλίγματα διέγερσης και το ρεύμα που περνά μέσα από αυτά λέγεται ρεύμα διέγερσης.[2][10]

2.2.1 Αρχή λειτουργίας των κινητήρων συνεχούς ρεύματος

Προκειμένου να αναλυθεί η αρχή λειτουργίας των κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος θεωρούμε την απλή μηχανή όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5. Η μηχανή αυτή

τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια από μια πηγή Συνεχούς Ρεύματος Π, ώστε να μας δώσει μηχανική (κινητική) ενέργεια στον άξονά της.



Σχήμα 2.5: Απλή μηχανή Συνεχούς Ρεύματος

Όπως φαίνεται στο σχήμα, η πηγή Π διοχετεύει Συνεχές Ρεύμα έντασης I στη σπείρα των δύο αγωγών κ-λ και μ-ν μέσω των ψηκτρών και του συλλέκτη. Επειδή οι αγωγοί βρίσκονται μέσα στο μαγνητικό πεδίο της μηχανής (πόλοι B και N) , σε κάθε αγωγό ασκείται δύναμη F. Οι δυνάμεις αυτές καθορίζονται από το γνωστό νόμο Laplace και η κατεύθυνση από τον κανόνα του αριστερού χεριού. Οι δυνάμεις αυτές αποτελούν ένα ζεύγος δυνάμεων που ασκεί ροπή στο επαγωγικό τύμπανο. Η ροπή έχει σαν αποτέλεσμα να στραφεί το τύμπανο γύρω από τον άξονά του κατά τη φορά που δείχνει το τόξο. Φαίνεται εύκολα ότι οποιαδήποτε θέση και αν έχει η σπείρα των δύο αγωγών κατά την περιστροφή του τυμπάνου, η φορά της ροπής των δυνάμεων που ασκούνται στους αγωγούς είναι πάντοτε η ίδια.

Η ροπή που ασκεί το ζεύγος των δυνάμεων στο επαγωγικό τύμπανο δεν είναι σταθερή. Το μέτρο της, κάθε στιγμή δίνεται από την σχέση:

$\tau = F \cdot 2 \cdot r$ σε N.m (2.2.1)

Όπου: **F** η δύναμη σε N που ασκείται σε κάθε αγωγό της σπείρας την εξεταζόμενη χρονική στιγμή και

r η ακτίνα του επαγωγικού τυμπάνου σε m

Επειδή $F = B \cdot I \cdot l \cdot \eta\mu 90^o$ (2.2.2)

Έχουμε $\tau = 2 \cdot B \cdot I \cdot l \cdot r$ σε Nm (2.2.3)

όπου: B η μαγνητική επαγωγή σε Vsec/m^2 στο σημείο του διάκενου που βρίσκεται η σπείρα τη συγκεκριμένη στιγμή.

I η ένταση του ρεύματος που την διαρρέει σε A

l το μήκος του τυμπάνου σε m και

r η ακτίνα του επαγωγικού τυμπάνου σε m

Η σχέση (2.2.3) δίνει την ροπή, που ασκεί μια σπείρα στο επαγωγικό τύμπανο του απλού αυτού κινητήρα του Σχήματος 2.2.4.

Όλα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω για τη μια σπείρα μιας απλής μηχανής, ισχύουν κατά αναλογία για όλες τις σπείρες που έχουν στο επαγωγικό τους τύμπανο οι πραγματικοί κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος. Οι ροπές όλων των ζευγών ενεργούν κατά την ίδια φορά και θέτουν σε περιστροφική κίνηση το επαγωγικό τύμπανο.

Για να αλλάξει η φορά περιστροφής του επαγωγικού τυμπάνου σε ένα κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος, θα πρέπει να αλλάξει η πολικότητα των μαγνητικών πόλων ή να αλλάξει η φορά του ρεύματος μέσα στους αγωγούς του, δηλαδή να αλλάξει η πολικότητα της πηγής.

Η σχέση (2.2.3) δίνει το μέγεθος της ροπής, όπως ήδη αναφέρθηκε, που ασκεί μια σπείρα στο επαγωγικό τύμπανο του απλού κινητήρα που εξετάστηκε. Κατ' αναλογία η ροπή τ που ασκείται σε ένα πραγματικό κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\tau = \frac{p \cdot s \cdot w}{2 \cdot a \cdot \pi} \cdot \phi \cdot I_{\tau} \text{ σε N.m} \qquad (2.2.4)$$

όπου: p ο αριθμός των ζευγών των μαγνητικών πόλων της μηχανής
s ο αριθμός των στοιχείων του τυλίγματος
w ο αριθμός των αγωγών κάθε στοιχείου
α ο αριθμός των ζευγών των παράλληλων κλάδων
φ η μαγνητική ροή σε Vsec κάθε μαγνητικού πόλου και
I_{τ} η ένταση σε Α του ρεύματος τυμπάνου

Η παραπάνω σχέση μπορεί να πάρει την μορφή:

$$\tau = \mathrm{K}_{\mathrm{I}} \cdot \phi \cdot \mathrm{I}_{\tau} \text{ σε N.m} \qquad (2.2.5)$$

όπου: $\mathrm{K}_{\mathrm{I}} = \frac{p \cdot s \cdot w}{2 \cdot a \cdot \pi}$ είναι σταθερό μέγεθος για κάθε μηχανή
φ η μαγνητική ροή σε Vsec κάθε πόλου και
I_{τ} η ένταση σε Α του ρεύματος τυμπάνου

<u>Αντί-Ηλεκτρεγερτική Δύναμη:</u> Με την εφαρμογή της συνεχούς τάσης στο τύμπανο προκαλείται ροή ρεύματος στα τυλίγματα του κινητήρα, και αφού αυτά βρίσκονται μέσα στο μαγνητικό πεδίο των πόλων, αρχίζει ο ρότορας του κινητήρα να περιστρέφεται. Η περιστροφή αυτή προκαλεί την ανάπτυξη μιας Ηλεκτρεγερτικής Δύναμης που αντιτίθεται στην τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του τυμπάνου. Η δύναμη αυτή προκαλείται από την κίνηση του αγωγού μέσα στο μαγνητικό πεδίο και αντιστέκεται στην κίνηση του τυμπάνου σύμφωνα με τον νόμο του Lenz. Η βασική εξίσωση λειτουργίας του κινητήρα είναι:

$$U = E' + R_{\tau} \cdot I_{\tau} \text{ σε V} \qquad (2.2.6)$$

όπου: U η τάση σε V στην είσοδο του κινητήρα
E' η Αντί-Ηλεκτρεγερτική Δύναμη σε V
R_{τ} η ωμική αντίσταση σε Ohm του τυλίγματος του επαγωγικού τυμπάνου και των ψηκτρών
I_{τ} η ένταση σε Α του ρεύματος τυμπάνου

<u>Ρύθμιση Ταχύτητας:</u> Η ρύθμιση της ταχύτητας περιστροφής των κινητήρων συνεχούς ρεύματος είναι εύκολη, απλή και γίνεται με μεγάλη ακρίβεια. Αυτό το χαρακτηριστικό τους στοιχείο είναι ένα από τα πλεονεκτήματά τους ως προς τους κινητήρες Εναλλασσόμενου Ρεύματος που θα εξεταστούν αργότερα. Αποδεικνύεται ότι η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα είναι:

$$n = \frac{U - I_\tau \cdot R_\tau}{K_I \cdot \phi} \text{ σε rpm} \qquad (2.2.7)$$

όπου: U η τάση σε V στην είσοδο του κινητήρα

I_τ η ένταση σε A του ρεύματος τυμπάνου

R_τ η ωμική αντίσταση σε Ohm του τυλίγματος του επαγωγικού τυμπάνου και των ψηκτρών

K_I το σταθερό μέγεθος κάθε μηχανής και

φ η μαγνητική ροή σε Vsec κάθε πόλου

Από τη σχέση (2.2.7) μπορεί να καταλήξει κάποιος στους ακόλουθους τρόπους μεταβολής της ταχύτητας ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος:

Α) Κρατώντας σταθερή την τάση U που εφαρμόζεται στους ακροδέκτες του τυμπάνου του κινητήρα και **αυξομειώνοντας την μαγνητική ροή φ**, με μεταβολή της έντασης διέγερσης, επηρεάζεται η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Όταν μειώνεται η ένταση διέγερσης μειώνεται η μαγνητική ροή και προκαλείται αύξηση της ταχύτητας περιστροφής, με το αντίθετο να συμβαίνει στην αύξηση της έντασης διέγερσης. Βέβαια, στην περίπτωση που υποστεί μεγάλη μείωση η ένταση διέγερσης, υπάρχει κίνδυνος καταστροφής του τυλίγματος του κινητήρα εξαιτίας των αναπτυσσόμενων φυγοκεντρικών δυνάμεων λόγω της μεγάλης αύξησης των στροφών.

Β) Κρατώντας τη μαγνητική ροή φ σταθερή, κατά συνέπεια και την ένταση διέγερσης, και αυξομειώνοντας την τάση U που εφαρμόζεται στους ακροδέκτες του τυμπάνου του κινητήρα, προκαλείται μεταβολή της ταχύτητας των στροφών του κινητήρα.

Στο παρελθόν ήταν σε χρήση σε μεγαλύτερο ποσοστό ο τρόπος Α για τη μεταβολή της ταχύτητας. Σήμερα με την ανακάλυψη σύγχρονων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων, χρησιμοποιείται και μια εξελιγμένη μορφή της μεθόδου Β, η οποία χρησιμοποιεί παλμούς για να αυξομειώνει την προσφερόμενη τάση τροφοδοσίας στον κινητήρα.

<u>Εκκίνηση των κινητήρων Συνεχούς ρεύματος:</u> Για την εκκίνηση ενός κινητήρα συνδέουμε την πηγή συνεχούς τάσης στους ακροδέκτες του. Την στιγμή εκείνη το τύμπανο είναι ακίνητο επομένως η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη Ε΄ είναι μηδέν. Η σχέση 1.2.6 θα μας δώσει για το ρεύμα εκκίνησης:

$$I_\tau = \frac{U}{R_\tau} \text{ σε A} \qquad (2.2.8)$$

όπου: I_τ η ένταση σε Α του ρεύματος τυμπάνου

U η τάση σε V στην είσοδο του κινητήρα

R_τ η ωμική αντίσταση σε Ohm του τυλίγματος του επαγωγικού τυμπάνου και των ψηκτρών

Επειδή R_τ είναι πολύ μικρή, η ένταση του ρεύματος που διαρρέει το τύμπανο θα είναι πολύ μεγάλη και είναι δυνατόν να καταστρέψει τον κινητήρα ή να προκαλέσει τήξη των ασφαλειών προστασίας. Για να αποφύγουμε το φαινόμενο αυτό συνδέουμε σε σειρά με το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου μια μεταβλητή αντίσταση που λέγεται **εκκινητής**. Καθώς ο κινητήρας αποκτά στροφές και αυξάνεται η αντιηλεκτρεγερτική δύναμη Ε΄, η αντίσταση αυτή μειώνεται μέχρι να αφαιρεθεί όταν ο κινητήρας φθάσει στην κανονική του λειτουργία.[2][5][7][13]

2.2.2 Τύποι Κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος

Ανάλογα με τον τρόπο που είναι συνδεδεμένο το τύλιγμα διέγερσης με το επαγωγικό τύλιγμα, οι κινητήρες διακρίνονται στους παρακάτω τύπους:

α) Κινητήρες Ξένης Διέγερσης

β) Κινητήρες Παράλληλης Διέγερσης

γ) Κινητήρες Διέγερσης Σειράς

δ) Κινητήρες Σύνθετης Διέγερσης

ε) Μόνιμου Μαγνήτη

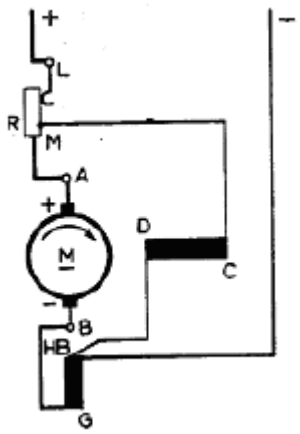
στ) Κινητήρες Brushless

2.2.2.1 Κινητήρες Ξένης και Παράλληλης Διέγερσης

Οι κινητήρες Ξένης Διέγερσης που κατασκευάζονται για ειδικές χρήσεις είναι κινητήρες που έχουν ιδιότητες περίπου όμοιες με τους κινητήρες παράλληλης διέγερσης. Επομένως, αναφέροντας εκτενώς τα στοιχεία των κινητήρων παράλληλης διέγερσης θα καλυφθούν και οι δύο τύποι κινητήρων.

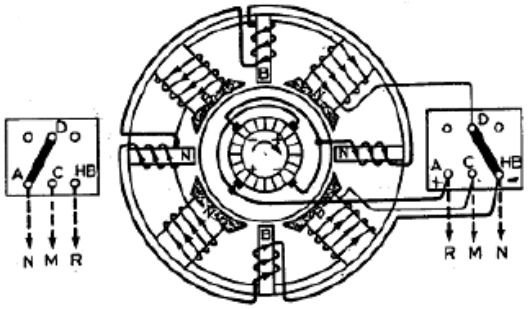
Κινητήρες Συνεχούς ρεύματος με παράλληλη διέγερση ονομάζονται οι κινητήρες που το τύλιγμα διέγερσής τους συνδέεται παράλληλα με το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου. Το τύλιγμα παράλληλης διέγερσης είναι συνήθως κατασκευασμένο από σύρμα μικρής διατομής και μεγάλου αριθμού σπειρών.

Στο Σχήμα 2.6 φαίνεται η συνδεσμολογία ενός κινητήρα με παράλληλη διέγερση (C-D) και βοηθητικούς πόλους (G-HB). Ο εκκινητής συνδέεται σε σειρά με το επαγωγικό τύμπανο και έχει σκοπό να μειώνει το ρεύμα που διέρχεται μέσα από αυτό την στιγμή της εκκίνησης. Το άκρο του τυλίγματος διέγερσης συνδέεται με τον τρίτο ακροδέκτη Μ που φέρει ο εκκινητής.



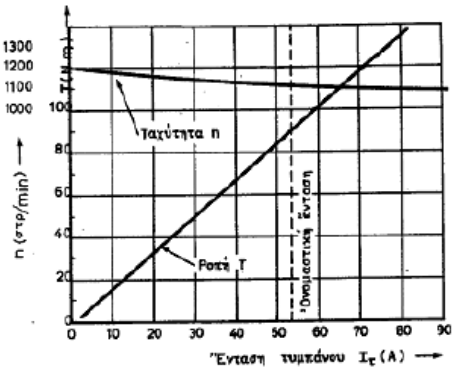
Σχήμα 2.6: Συνδεσμολογία κινητήρα με Παράλληλη Διέγερση

Η εσωτερική συνδεσμολογία των τυλιγμάτων μεταξύ τους και με τους ακροδέκτες σε ένα κινητήρα με παράλληλη διέγερση φαίνεται στο Σχήμα 2.7. Στην περίπτωση που το ζητούμενο είναι να αλλάξει η φορά περιστροφής του κινητήρα, συνήθως αλλάζουμε την φορά του ρεύματος μέσα στο τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου, χωρίς να αλλάξει η πολικότητα των κύριων μαγνητικών πόλων. Πρέπει να αλλάξει μόνο η πολικότητα των βοηθητικών πόλων για να επιτευχθεί η σωστή διαδοχή κύριων και βοηθητικών πόλων.



Σχήμα 2.7: Εσωτερική συνδεσμολογία κινητήρα με παράλληλη διέγερση

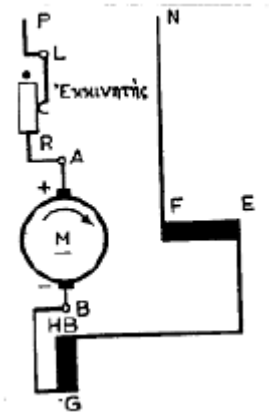
Στο Σχήμα 2.8 φαίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας από ένα συνηθισμένο κινητήρα παράλληλης διέγερσης. Οι καμπύλες αυτές έχουν προκύψει με σταθερή ένταση διέγερσης, σταθερή τάση του δικτύου τροφοδότησης και μεταβάλλοντας την ένταση του ρεύματος του επαγωγικού τυμπάνου του κινητήρα. **Όπως παρατηρείται, η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα μεταβάλλεται ελάχιστα όταν μεταβάλλεται η ένταση φόρτισης**. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται η μεταβολή της ροπής σε συνάρτηση με την ένταση φόρτισης που διαρρέει το τύμπανο η οποία και ακολουθεί την σχέση (2.2.5).[2]



Σχήμα 2.8: Χαρακτηριστικές καμπύλες Ροπής και Ταχύτητας ως προς την ένταση του Ρεύματος κινητήρα παράλληλης διέγερσης

2.2.2.2 Κινητήρες Διέγερσης Σειράς

Κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος με Διέγερση Σειράς είναι οι κινητήρες που το τύλιγμά τους συνδέεται σε σειρά με το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου (Σχήμα 2.9). Το τύλιγμα διέγερσης E-F είναι συνδεδεμένο σε σειρά με το τύλιγμα των βοηθητικών πόλων G-HB και το επαγωγικό τύμπανο της μηχανής. Επιπλέον, σε σειρά με αυτά συνδέεται και ο εκκινητής L-R. Στην περίπτωση που το ζητούμενο είναι η μεταβολή της φοράς περιστροφής σε τακτά χρονικά διαστήματα, τότε όπως και στον κινητήρα παράλληλης διέγερσης χρησιμοποιούμε είτε ένα εκκινητή-αναστροφέα είτε ένα ρυθμιστή στροφών-αναστροφέα.



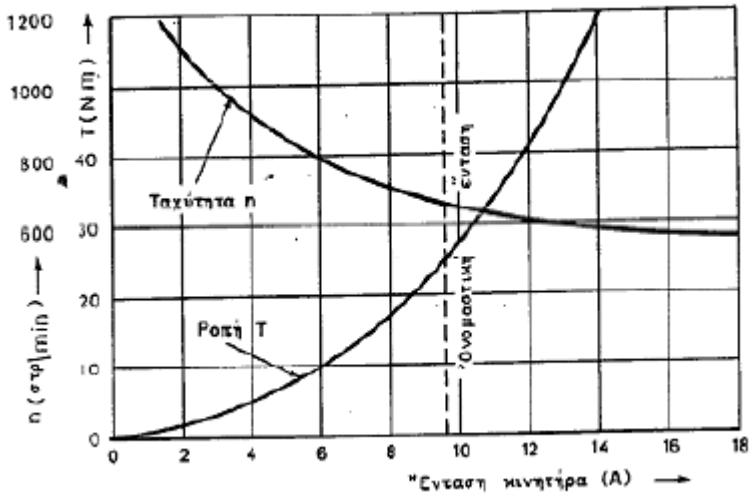
Σχήμα 2.9: Συνδεσμολογία κινητήρα με Διέγερση Σειράς

Στο Σχήμα 2.10 αναπαρίστανται οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας ενός κινητήρα με διέγερση σειράς, με την τάση τροφοδοσίας να παραμένει σταθερή. Από το σχήμα βλέπουμε ότι η ροπή του κινητήρα αυξάνεται πολύ όταν αυξάνεται η ένταση του δικτύου.

Αυτό εξηγείται από την σχέση (2.2.5) με την φ να είναι ανάλογη της I και επομένως η σχέση γίνεται:

$$\tau' = K_1^{'} \cdot I^2 \text{ σε N.m} \qquad (2.2.9)$$

Από το Σχήμα 2.10 επίσης παρατηρείται ότι η ταχύτητα περιστροφής αλλάζει πολύ όταν αλλάζει η ένταση που απορροφά ο κινητήρας, δηλαδή όταν μεταβάλλεται το φορτίο του κινητήρα. Η ιδιότητα αυτή εξηγείται από τον τρόπο Α μεταβολής της ταχύτητας ενός κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος, όπως αυτός παρουσιάζεται στην ενότητα αρχή λειτουργίας. **Το συμπέρασμα είναι ότι ο κινητήρας διέγερσης σειράς όταν προσπαθεί να περιστραφεί με μεγάλο φορτίο ελαττώνει την ταχύτητα του και αναπτύσσει μεγάλη ροπή για να ανταπεξέλθει στο φορτίο.** Στην αντίθετη περίπτωση του χαμηλού φορτίου αναπτύσσει μεγάλη ταχύτητα περιστροφής με χαμηλή ροπή και μικρή κατανάλωση ρεύματος.[2]

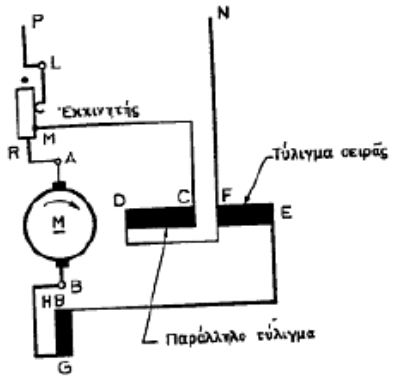


Σχήμα 2.10: Χαρακτηριστικές καμπύλες Ροπής και Ταχύτητας ως προς την ένταση του Ρεύματος κινητήρα διέγερσης σειράς

2.2.2.3 Κινητήρες Σύνθετης Διέγερσης

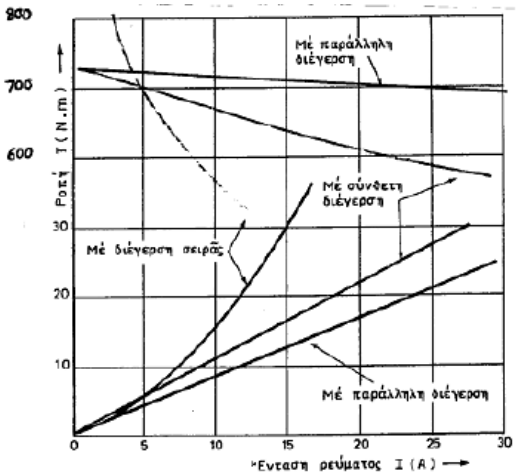
Στους κινητήρες με σύνθετη διέγερση (Σχήμα 2.11) έχουμε δύο τυλίγματα σε κάθε πόλο ένα παράλληλο και ένα σε σειρά.

Η εκκίνηση γίνεται και εδώ, όπως και στους κινητήρες με παράλληλη διέγερση, με την χρήση ενός εκκινητή που συνδέεται όπως φαίνεται στο σχήμα. Για να επιτευχθεί η αλλαγή περιστροφής στον κινητήρα αυτόν θα πρέπει να αλλάξουμε τη διεύθυνση του ρεύματος στο επαγωγικό τύμπανο και στους βοηθητικούς πόλους.



Σχήμα 2.11: Συνδεσμολογία κινητήρα με Σύνθετη Διέγερση

Στο Σχήμα 2.12 αναπαρίστανται οι χαρακτηριστικές καμπύλες και των τριών κινητήρων που περιγράφηκαν παραπάνω. **Όπως φαίνεται από το σχήμα, ο κινητήρας με σύνθετη διέγερση έχει χαρακτηριστικά που τον τοποθετούν στη μέση των δύο άλλων τύπων κινητήρων. Ακόμα ο κινητήρας αυτός έχει σαν χαρακτηριστικό ότι όταν αφήνεται χωρίς φορτίο συμπεριφέρεται σαν κινητήρας παράλληλης διέγερσης. Εξαλείφεται έτσι το φαινόμενο της αύξησης ταχύτητας περιστροφής των κινητήρων διέγερσης σειράς.**[2]



Σχήμα 2.12 Χαρακτηριστικές καμπύλες Ροπής και Ταχύτητας ως προς την ένταση του Ρεύματος και των τριών τύπων κινητήρα Συνεχούς Ρεύματος

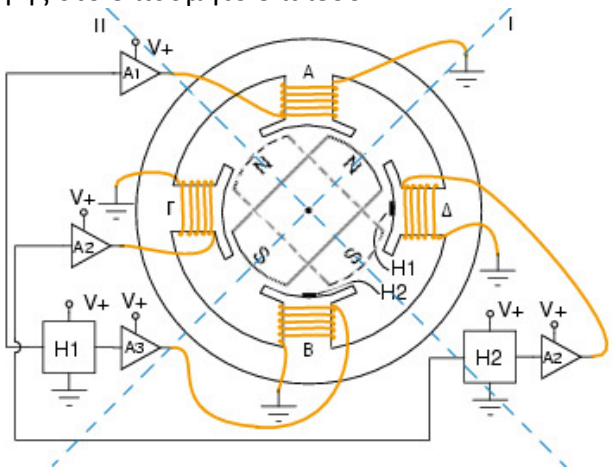
2.2.2.4 Κινητήρες Μόνιμου Μαγνήτη

Μία παραλλαγή των κινητήρων συνεχούς ρεύματος, που αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι και οι ηλεκτρικοί κινητήρες Μόνιμου Μαγνήτη. Η ουσιώδης διαφορά σε σχέση με αυτούς που έχουμε ήδη αναφέρει είναι η χρήση μόνιμου μαγνήτη σε αντικατάσταση των πηνίων στον στάτη. Με αυτόν τον τρόπο υπάρχει μόνο ένα πηνίο στο ρότορα το οποίο συνδέεται με την παροχή συνεχούς ρεύματος. Η κατασκευή τέτοιων κινητήρων ήταν πολύ ακριβή στο παρελθόν, λόγω της χρήσης μεγάλων κομματιών φυσικού μαγνήτη για την κατασκευή τους, παρ' όλα τα οφέλη που είχαν λόγω των μικρότερων απωλειών. Από το 1982 όμως και μετά η χρήση του κράματος Νεοδυμίου – Σιδήρου - Βορίνου για την κατασκευή των μόνιμων μαγνητών, μειώθηκε πάρα πολύ το κόστος παραγωγής τους και πρόσφερε έτσι μια μεγάλη βοήθεια για την περαιτέρω εξέλιξη τους.

2.2.2.5 Κινητήρες Brushless

Ένα σχετικά καινούργιο είδος κινητήρα συνεχούς ρεύματος είναι και οι κινητήρες Brushless, οι οποίοι αποτελούνται όπως και οι υπόλοιποι κινητήρες συνεχούς ρεύματος από ένα δρομέα και ένα στάτη. Στην περίπτωση βέβαια των κινητήρων αυτών έχουμε κάποιες ουσιώδεις διαφορές. Ο στάτης είναι αυτός που περιλαμβάνει το τύλιγμα το οποίο είναι ακίνητο και διαρέεται ελεγχόμενα από ρεύμα. Αντίθετα, ο δρομέας δεν διαρέεται από ρεύμα, αλλά αποτελείται κατασκευαστικά από μόνιμους μαγνήτες. Αυτό έχει ως συνέπεια ο δρομέας να στηρίζεται μόνο στα σημεία περιστροφής, και να μην υπάρχουν τριβές και βλάβες.

Με τη βοήθεια του απλοποιημένου σχήματος 2.13 θα εξηγηθεί η αρχή λειτουργίας του κινητήρα αυτού. Όταν ο δρομέας βρίσκεται στην θέση I που φαίνεται στο σχήμα, τότε τροφοδοτούνται τα πηνία A και B με αποτέλεσμα την έλξη των μονίμων μαγνητών προς αυτά. Όταν ο μόνιμος μαγνήτης φτάσει σε ευθεία με τα πηνία A και B αυτά απενεργοποιούνται. Ακολούθως, ο μόνιμος μαγνήτης λόγω αδράνειας φτάνει στη θέση II οπότε και ενεργοποιούνται τα πηνία Γ και Δ και τον έλκουν προς αυτά. Η συνεχής επανάληψη της διαδικασίας αυτής διατηρεί την ταχύτητα περιστροφής στο επιθυμητό επίπεδο.



Σχήμα 2.13: Σχέδιο απλού κινητήρα Brushless με απλοποιημένο σύστημα ελέγχου

Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται ο έλεγχος της περιστροφής του κινητήρα πραγματοποιείται με την βοήθεια διάταξης, η οποία δέχεται ένα σήμα ελέγχου από τον κινητήρα. Με το σήμα αυτό γνωρίζει την ταχύτητα περιστροφής και τη χρονική στιγμή που πρέπει τροφοδοτήσει τα κατάλληλα πηνία του στάτη για να προκαλέσει την αλληλεπίδραση με τον μόνιμο μαγνήτη του δρομέα. Υπάρχουν τρεις μέθοδοι ανίχνευσης της θέσης του δρομέα: α) με χρήση αισθητήρων Hall-effect, β) με χρήση περιστροφικού κωδικοποιητή γ) με χρήση των πηνίων του κινητήρα που δεν τροφοδοτούνται, για την ανίχνευση μαγνητικής επαγωγής από τους μόνιμους μαγνήτες του δρομέα.

Η απόδοση των κινητήρων αυτών είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την απόδοση των απλών κινητήρων συνεχούς ρεύματος, καθώς μπορούν και μετατρέπουν περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια σε κινητική. Επίσης, η απόδοση των κινητήρων αυτών είναι μεγαλύτερη στις περιοχές μικρού και χαμηλού φορτίου, ενώ σε περιπτώσεις υψηλού φορτίου συμπεριφέρονται όμοια με τους υπόλοιπους κινητήρες συνεχούς ρεύματος.

2.3 Κινητήρες Εναλλασσόμενου Ρεύματος

2.3.1 Γενικά

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες Εναλλασσόμενου Ρεύματος χρησιμοποιούνται σήμερα περισσότερο, επειδή:

1) Η κατασκευή τους είναι απλή και στη λειτουργία τους παρουσιάζουν μικρότερες φθορές και βλάβες και

2) Δέχονται για τη λειτουργία τους την εναλλασσόμενη τάση του εθνικού δικτύου κάθε χώρας που συνήθως είναι εναλλασσόμενο.

2.3.2 Τύποι κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος

Ανάλογα με τη συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης που δέχονται διακρίνονται σε **μονοφασικούς, τριφασικούς και πολυφασικούς κινητήρες**. Επίσης, ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής τους διακρίνονται σε **σύγχρονους** και **ασύγχρονους ή επαγωγικούς.**

Οι σύγχρονοι κινητήρες στρέφονται σε συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής η οποία λέγεται σύγχρονη ταχύτητα n_s.

Σύγχρονη ταχύτητα είναι εκείνη η ταχύτητα με την οποία θα έπρεπε να περιστρέφεται η ίδια μηχανή σαν γεννήτρια για να παράγει ρεύμα της ίδιας συχνότητας f με το Εναλλασσόμενο Ρεύμα που την τροφοδοτεί. Δίνεται δε το μέτρο της από την σχέση:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{P} \qquad (1.2.9)$$

όπου: n_s η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής
f η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος τροφοδοσίας του κινητήρα
P ο αριθμός των ζευγών των πόλων του κινητήρα

Ασύγχρονοι Κινητήρες είναι οι μηχανές που παίρνουν ηλεκτρική ενέργεια μορφής εναλλασσόμενου ρεύματος και την μετατρέπουν σε κινητική ενέργεια με τη μορφή ταχύτητας περιστροφής διαφορετικής από την σύγχρονη ταχύτητα. Ο κινητήρας αυτός ονομάζεται και επαγωγικός γιατί η λειτουργία του στηρίζεται στο φαινόμενο της επαγωγής. Οι ασύγχρονοι κινητήρες διακρίνονται σε:

-Τριφασικούς στους οποίους η τροφοδοσία στο τύλιγμα των τριών φάσεων γίνεται από τις τρεις φάσεις R-S-T.

-Μονοφασικούς στους οποίους η τροφοδοσία στο τύλιγμα της μιας φάσης γίνεται από μονοφασική τροφοδοσία.[3][7]

2.3.2.1 Σύγχρονοι Κινητήρες

Κατασκευαστικά στοιχεία

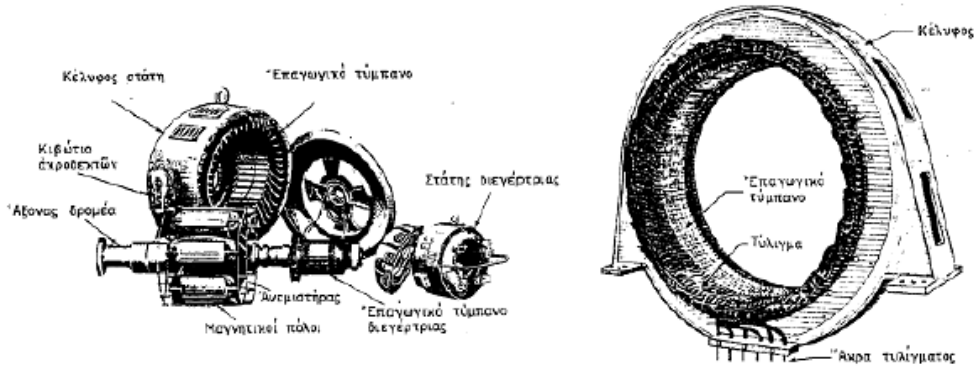
Όπως και στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος έτσι και εδώ διακρίνουμε το ακίνητο μέρος (στάτης) και το κινητό (δρομέας). Στον στάτη βρίσκονται το ζύγωμα, το επαγωγικό τύμπανο, ο ψηκτροφορέας, οι ψήκτρες και το κουτί ακροδεκτών. Στον δρομέα βρίσκονται οι μαγνητικοί πόλοι, το τύλιγμα διέγερσης και τα δαχτυλίδια υποδοχής Συνεχούς Ρεύματος.

Επίσης στους σύγχρονους κινητήρες διακρίνουμε συνήθως και μια μικρή γεννήτρια συνεχούς ρεύματος πάνω στον ίδιο άξονα η οποία σκοπό έχει να παράγει την κατάλληλη τάση Συνεχούς Ρεύματος για την διέγερση του κινητήρα.

Στο Σχήμα 2.14 φαίνεται μια όψη των μερών ενός τριφασικού κινητήρα. Όπως βλέπουμε και από το σχήμα ο στάτης αποτελείται από ένα εξωτερικό

κέλυφος, κατασκευασμένο συνήθως από χαλύβδινα ελάσματα μέσα στο οποίο τοποθετείται και στερεώνεται το επαγωγικό τύμπανο.

Το επαγωγικό τύμπανο αποτελείται από τον πυρήνα και το τύλιγμα. Ο πυρήνας του τυμπάνου κατασκευάζεται, όπως και στις μηχανές συνεχούς ρεύματος από πολλούς δίσκους. Οι δίσκοι αυτοί κατασκευάζονται από μαγνητικά ελάσματα πάχους συνήθως 0.5mm με επιφανειακή μόνωση από ειδικό βερνίκι. Τα δόντια που έχουν οι δίσκοι, σχηματίζουν κατά τη συγκρότηση του πυρήνα οδοντώσεις παράλληλες προς τον άξονα της μηχανής, μέσα στα αυλάκια των οποίων τοποθετείται το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου. Τα άκρα του τυλίγματος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.14 καταλήγουν απευθείας στους ακροδέκτες του κινητήρα, στους οποίους συνδέεται η πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος, χωρίς την παρεμβολή δακτυλίων και ψηκτρών.



Σχήμα 2.14: Αναπαράσταση δρομέα και στάτη Σύγχρονου κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος

Ο δρομέας των κινητήρων φέρει, όπως αναφέρθηκε, τους μαγνητικούς πόλους στερεωμένους ακτινικά.

Για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου, δηλαδή για τη διέγερση του κινητήρα, τα τυλίγματα των πόλων τροφοδοτούνται με συνεχές ρεύμα από την διεγέρτρια ή σε κάποιες περιπτώσεις από ανορθωτική διάταξη ή συστοιχία. Γι' αυτό χρησιμοποιούνται ψήκτρες και δύο δακτύλιοι, που είναι στερεωμένοι πάνω στον άξονα του δρομέα. Το ρεύμα διέγερσης έχει ένταση και τάση πολύ μικρότερες από το κύριο ρεύμα με το οποίο τροφοδοτείται ο κινητήρας και κατά συνέπεια η κατασκευή των δακτυλίων αυτών δεν παρουσιάζει δυσκολίες.

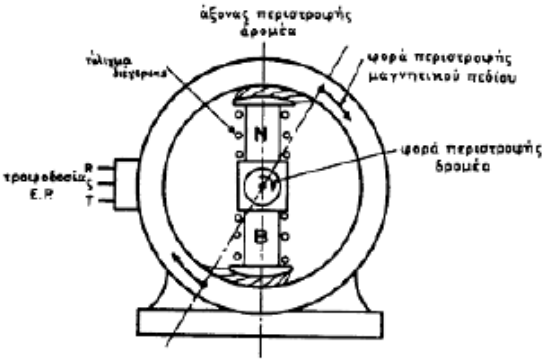
Αρχή λειτουργίας των Σύγχρονων κινητήρων Εναλλασσόμενου Ρεύματος

Για να εξηγήσουμε τη λειτουργία των κινητήρων αυτών πρέπει να αναφερθούμε στην έννοια του περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου.

Περιστρεφόμενο ή στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο λέγεται εκείνο το μαγνητικό πεδίο που διατηρεί σταθερό μέτρο, αλλά η διεύθυνση του στρέφεται με μια ορισμένη γωνιακή ταχύτητα. Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο παράγεται από την τροφοδότηση διφασικού ή τριφασικού τυλίγματος στάτη της ηλεκτρικής μηχανής.

Έτσι, στον απλό κινητήρα που φαίνεται στο Σχήμα 2.15, ο οποίος τροφοδοτείται με τριφασικό ρεύμα από το δίκτυο παράγεται μαγνητικό πεδίο που

μεταβάλλεται σε διεύθυνση με το ρυθμό που μεταβάλλεται το ρεύμα τροφοδοσίας. Το νέο αυτό μαγνητικό πεδίο που στρέφεται γύρω από τον άξονα του είναι το **στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο**.



Σχήμα 2.15: Αναπαράσταση απλού τριφασικού κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος

Το στρεφόμενο αυτό μαγνητικό πεδίο(N-B) βρίσκεται μέσα σε ένα σταθερό μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τους μαγνητικούς πόλους του δρομέα που τροφοδοτούνται από την διεγέρτρια.

Επομένως στο εσωτερικό του κινητήρα υπάρχουν δύο μαγνητικά πεδία ένα στρεφόμενο και ένα σταθερό (ακίνητο). Μεταξύ αυτών θα δημιουργούνται ελκτικές δυνάμεις Coulomb και ειδικότερα στους ετερώνυμους μαγνητικούς πόλους, που σπρώχνουν τον δρομέα στους επόμενους μαγνητικούς πόλους. Κανονικά θα έπρεπε να σταματάει ο δρομέας όταν παραδείγματος χάριν ο Βόρειος Πόλος έφτανε μπροστά στον ετερώνυμο Νότιο Πόλο. Αυτό όμως δεν συμβαίνει γιατί σε εκείνο το σημείο αλλάζει η πολικότητα στον στάτη, ο οποίος και τροφοδοτείται από το Εναλλασσόμενο ρεύμα του δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο ο δρομέας εξακολουθεί να περιστρέφεται ακολουθώντας την κίνηση του στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου μέχρι να αποκτήσει τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής. Ευνόητο είναι ότι για να συμβαίνει αυτό θα πρέπει οι τρεις φάσεις που τροφοδοτούν τον στάτη να έχουν το ίδιο πλάτος και να διαφέρουν κατά 120 μοίρες.

Αλλαγή φοράς περιστροφής

Για να αλλάξουμε τη φορά περιστροφής ενός σύγχρονου τριφασικού κινητήρα πρέπει να αλλάξουμε την διαδοχή μεταξύ δύο φάσεων τροφοδοσίας του. Άρα το R-S-T να γίνει R-T-S κ.ο.κ..

Μειονεκτήματα - Πλεονεκτήματα Σύγχρονων Κινητήρων

Τα πλεονεκτήματα των σύγχρονων κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος είναι:

- Ο άριστος βαθμός απόδοσης ο οποίος είναι πολύ κοντά στο 1
- Η σταθερότητα των στροφών του εφόσον η συχνότητα τροφοδοσίας είναι σταθερή
- Η βελτίωση του συνφ της εγκατάστασης που είναι συνδεδεμένος, όταν αυτή έχει ισχύ άνω των 100 KW. Αυτό συμβαίνει επειδή ο σύγχρονος κινητήρας λειτουργεί σαν πυκνωτής.

Το μειονέκτημα των σύγχρονων κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος είναι ότι είναι αντιοικονομικός όσον αφορά στην εγκατάσταση και λειτουργία του, σε σχέση με τους ασύγχρονους κινητήρες που θα εξεταστούν παρακάτω.[3][6][11]

2.3.2.2 Ασύγχρονοι Κινητήρες

Αρχή λειτουργίας των Ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων Εναλλασσόμενου Ρεύματος

Ο Ασύγχρονος κινητήρας ή αλλιώς Επαγωγικός είναι ο πιο κοινός τύπος κινητήρα λόγω της απλής κατασκευής του και της ευκολίας που παρουσιάζει στη λειτουργία του.

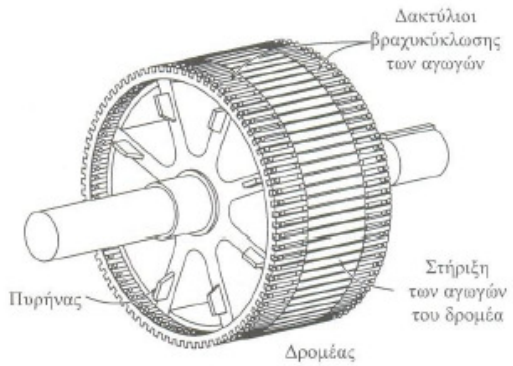
Η λειτουργία των ασύγχρονων τριφασικών κινητήρων στηρίζεται, όπως και στους σύγχρονους, στη θεωρία που αναπτύχθηκε σε προηγούμενη παράγραφο για το **περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο**, με μόνη διαφορά ότι το μαγνητικό πεδίο του δρομέα στους ασύγχρονους κινητήρες δημιουργείται με επαγωγή από το τύλιγμα του στάτη (σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας των μετασχηματιστών). Έτσι, δεν υπάρχουν σε αυτούς οι ψήκτρες και οι δακτύλιοι και ο δρομέας δεν συνδέεται με εξωτερική πηγή ενέργειας.

Οι Ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες διακρίνονται σε:

α) Ασύγχρονους τριφασικούς κινητήρες Βραχυκυκλωμένου δρομέα ή κλωβού και σε
β) Ασύγχρονους τριφασικούς Δακτυλιοφόρους κινητήρες

Ασύγχρονοι Τριφασικοί κινητήρες Βραχυκυκλωμένου δρομέα

Ο κινητήρας αυτός έχει τον ίδιο στάτη όπως ένας σύγχρονος με τη διαφορά ότι ο δρομέας του έχει διαφορετική δομή, επειδή δεν συνδέεται όπως αναφέρθηκε με την εξωτερική πηγή. Ο δρομέας αποτελείται από τον άξονα, τον πυρήνα και το τύλιγμα. Στο Σχήμα 2.16 απεικονίζεται δρομέας κλωβού ο οποίος αποτελείται από μια σειρά αγώγιμων ράβδων, που είναι τοποθετημένες σε αυλάκια στην επιφάνεια του δρομέα, οι οποίες βραχυκυκλώνονται στα άκρα μέσω μεγάλων δακτυλίων βραχυκύκλωσης.



Σχήμα 2.16: Αναπαράσταση δρομέα Ασύγχρονου Τριφασικού κινητήρα Βραχυκυκλωμένου δρομέα

Δακτυλιοφόροι Ασύγχρονοι τριφασικοί κινητήρες

Ο στάτης είναι και εδώ ίδιος, όπως στους σύγχρονους κινητήρες. Ο δακτυλιοφόρος δρομέας, διαθέτει ολοκληρωμένο τριφασικό τύλιγμα, το οποίο είναι τοποθετημένο, ώστε να αποτελεί το κατοπτρικό είδωλο του τυλίγματος του στάτη. Οι τρεις φάσεις ενός τέτοιου τυλίγματος συνδέονται συνήθως σε αστέρα, ενώ τα άκρα των αγωγών συνδέονται σε δακτυλίους. Έτσι τα ρεύματα στο δακτυλιοφόρο δρομέα ενός επαγωγικού κινητήρα μπορούν να μετρηθούν στις ψύκτρες και ακόμη είναι δυνατή η σύνδεση εξωτερικών αντιστάσεων στο κύκλωμα της διέγερσης. Η τελευταία δυνατότητα δίνει το πλεονέκτημα ρύθμισης της χαρακτηριστικής ροπής - ταχύτητας ενός επαγωγικού κινητήρα δακτυλιοφόρου δρομέα.

Διολίσθηση Ασύγχρονων κινητήρων

Όπως γνωρίζουμε ήδη από προηγούμενη αναφορά η εφαρμογή φορτίου στον κινητήρα έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της ταχύτητας περιστροφής του. Έστω n_s η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής και n η ασύγχρονη ταχύτητα περιστροφής με φορτίο. Ο λόγος που δείχνει την μεταβολή της σύγχρονης από την ασύγχρονη ταχύτητα προς την σύγχρονη ταχύτητα ονομάζεται **διολίσθηση** ή ολίσθηση και είναι:

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \qquad (2.3.1)$$

όπου: S το ποσοστό % διολίσθησης
n_s η σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής και
n η ασύγχρονη ταχύτητα περιστροφής υπό φορτίο

Όσο μικρότερο είναι το παραπάνω ποσοστό τόσο καλύτερης ποιότητας και κατασκευής θεωρείται ο κινητήρας.

Ισχύς Ασύγχρονου Τριφασικού κινητήρα

Αποδεικνύεται ότι η ισχύς N που δίνει ένας Ασύγχρονος Τριφασικός κινητήρας στον άξονά του με τη μορφή κινητικής ενέργειας δίνεται από τη σχέση:

$$N = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot T \text{ σε Watt} \qquad (2.3.2)$$

όπου: N η ισχύς που δίνει στον άξονα του ο κινητήρας
n η ασύγχρονη ταχύτητα περιστροφής και
T η ροπή στρέψης που αναπτύσσεται στον άξονα του κινητήρα

Εκκίνηση Ασύγχρονου Τριφασικού Κινητήρα

Η εκκίνηση των Ασύγχρονων Τριφασικών κινητήρων γίνεται με τέσσερις τρόπους, δηλαδή με:

α) Απευθείας Εκκίνηση, με τροφοδότηση του κινητήρα κατευθείαν από το δίκτυο με την παρεμβολή μόνο ενός τριπολικού διακόπτη

β) Εκκίνηση με διακόπτη Αστέρα – Τριγώνου, ο οποίος μπορεί να είναι είτε χειροκίνητος είτε αυτόματος και αλλάζει τον τρόπο με τον οποίο συνδεσμολογούνται τα τυλίγματα του στάτη, ώστε να ξεκινήσει με συνδεσμολογία αστέρα να περιστρέφεται ο κινητήρας και κατόπιν της σταθεροποίησης των στροφών του να γίνει η μετάβαση σε συνδεσμολογία τριγώνου.

γ) Εκκίνηση με αντιστάσεις στον στάτη, όπου γίνεται παρεμβολή μεταξύ του δικτύου παροχής ενέργειας και του κινητήρα μια σειρά μεταβλητών αντιστάσεων με τις οποίες γίνεται η ρύθμιση του ρεύματος που εισέρχεται στον κινητήρα και

δ) Εκκίνηση αυτομετασχηματιστή, όπου γίνεται παρεμβολή μεταξύ του δικτύου παροχής ενέργειας και του κινητήρα μια διάταξη αυτομετασχηματιστών οι οποίοι κάνουν ρύθμιση της τάσης με την οποία τροφοδοτείται ο κινητήρας

Για κινητήρες μικρής ισχύος χρησιμοποιείται η μέθοδος της Απευθείας Εκκίνησης ενώ για μέσης και μεγάλης ισχύος χρησιμοποιείται η μέθοδος της Εκκίνησης με διακόπτη Αστέρα – Τριγώνου.

Τέλος, η αλλαγή φοράς περιστροφής επιτελείται με τον ίδιο τρόπο που αναφέρθηκε και στους σύγχρονους κινητήρες, δηλαδή με εναλλαγή των δύο εκ των τριών φάσεων.

Ασύγχρονοι Μονοφασικοί κινητήρες

Οι Ασύγχρονοι Μονοφασικοί κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα στηρίζονται και αυτοί στην ύπαρξη στρεφόμενου μαγνητικού πεδίου. Επειδή όμως υπάρχει μόνο μια φάση τροφοδοσίας προσπαθούμε με διάφορους τρόπους να δημιουργήσουμε διαφορά φάσης. Υπάρχουν λοιπόν δύο τρόποι δημιουργίας διαφοράς φάσης:

- Διαφορά φάσης με χρήση αντίστασης
- Διαφορά φάσης με χρήση πυκνωτή

Χρησιμοποιούνται λοιπόν δύο τυλίγματα στον στάτη όπου το ένα είναι το κύριο και το άλλο λέγεται βοηθητικό τύλιγμα ή βοηθητική φάση. Για να αποκτήσουν τα δύο αυτά παράλληλα τυλίγματα φασική απόκλιση μεταξύ των ρευμάτων κατά 90° θα πρέπει είτε οι δύο κλάδοι να είναι επαγωγικοί άλλα οι τιμές των αντιστάσεων τους να είναι πολύ διαφορετικές, είτε ο κύριος κλάδος να είναι επαγωγικός και ο βοηθητικός να είναι χωρητικός. Υπάρχουν λοιπόν κάποιες παραλλαγές τύπων κινητήρων με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά:

α) Ασύγχρονοι Μονοφασικοί κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα με αντίσταση

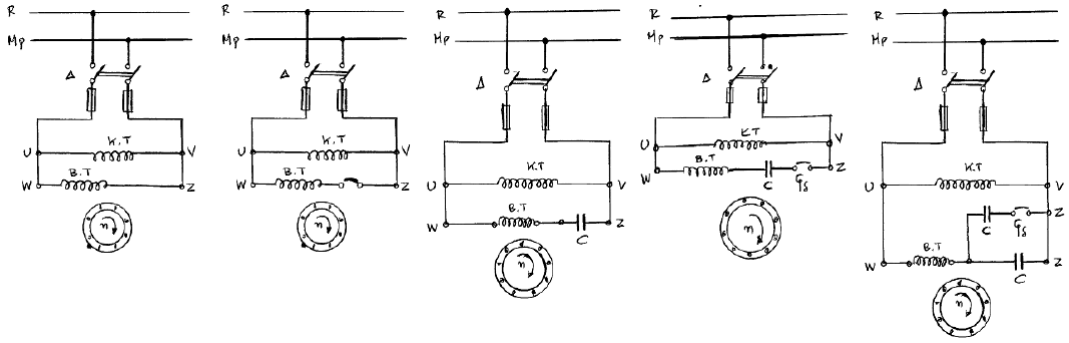
β) Ασύγχρονοι Μονοφασικοί κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα με αντίσταση και φυγοκεντρικό διακόπτη αποκοπής του βοηθητικού κυκλώματος

γ) Ασύγχρονοι Μονοφασικοί κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα με πυκνωτή

δ) Ασύγχρονοι Μονοφασικοί κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα με πυκνωτή και φυγοκεντρικό διακόπτη αποκοπής του βοηθητικού κυκλώματος

ε) Ασύγχρονοι Μονοφασικοί κινητήρες βραχυκυκλωμένου δρομέα με 2 πυκνωτές και φυγοκεντρικό διακόπτη αποκοπής του ενός εκ των δύο πυκνωτών ο οποίος ονομάζεται και πυκνωτής εκκίνησης

Στο σχήμα 2.17 φαίνονται και οι πέντε παραπάνω τύποι κινητήρα που περιγράφηκαν με την αντίστοιχη συνδεσμολογία τους.



Σχήμα 2.17: Συνδεσμολογίες των πέντε παραλλαγών μονοφασικών ασύγχρονων κινητήρων βραχυκυκλωμένου δρομέα

Στους Ασύγχρονους μονοφασικούς κινητήρες για να αλλάξουμε τη φορά περιστροφής του κινητήρα θα πρέπει είτε να αντιμεταθέσουμε τον κλάδο που περιλαμβάνει το Βοηθητικό Τύλιγμα μαζί με όποια άλλα εξαρτήματα περιλαμβάνει ως προς τον κλάδο του Κύριου Τυλίγματος, είτε να αντιμεταθέσουμε αντίστοιχα τον κλάδο του Κύριου Τυλίγματος ως προς τον κλάδο του Βοηθητικού Τυλίγματος.[3][5][13]

Κεφάλαιο 3^{ο} : Ηλεκτρικοί Συσσωρευτές

3.1 Χημικοί Ηλεκτρικοί Συσσωρευτές

3.1.1 Εισαγωγή – Ορισμοί

Ηλεκτρικά στοιχεία είναι διατάξεις που μπορούν με κατάλληλη συνδεσμολογία να μετατρέψουν τη χημική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη σε αυτά σε ηλεκτρική. Διακρίνουμε δύο ειδών ηλεκτρικά στοιχεία, τα πρωτογενή ή ξηρά στοιχεία και τα δευτερογενή ή συσσωρευτές. Στα πρωτογενή στοιχεία η χημική αντίδραση που γίνεται μέσα στο στοιχείο δεν αντιστρέφεται. Έτσι όταν εξαντληθεί η χημική ενέργεια δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί πάλι.[16]

Στα δευτερογενή ή τους συσσωρευτές μπορεί να γίνει αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή να παρέχουμε κατάλληλη ηλεκτρική ενέργεια η οποία θα αποθηκευτεί υπό μορφή χημικής. Αυτή η διαδικασία μετατροπής και αποθήκευσης ενέργειας λέγεται **φόρτιση**. Όταν στα όρια ενός συσσωρευτή συνδεθεί ένας ηλεκτρικός καταναλωτής τότε γίνεται η αντίστροφη εργασία, δηλαδή η αποθηκευμένη χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **αποφόρτιση**.

Πόλοι του στοιχείου ή του συσσωρευτή ονομάζονται οι ακροδέκτες από τους οποίους παίρνουμε ηλεκτρική ενέργεια κατά την αποφόρτιση ή δίνουμε κατά την φόρτιση.

Ενεργή Μάζα είναι το μέρος εκείνο του συσσωρευτή το οποίο μετατρέπει την χημική ενέργεια σε ηλεκτρική και αντίστροφα. Η ενεργή μάζα είναι τοποθετημένη σε πλάκες διαφορετικού υλικού για το θετικό και αρνητικό ηλεκτρόδιο. Οι πλάκες αυτές είναι βυθισμένες σε κατάλληλο αγώγιμο υλικό το οποίο ονομάζεται **ηλεκτρολύτης**.

Τάση [Volt] ονομάζεται η διαφορά δυναμικού κάθε στοιχείου, η οποία εξαρτάται από τη χημική σύνθεση των δύο ηλεκτροδίων. Η μονάδα μέτρησης της τάσης είναι τα Volts (V). Η τάση που παράγεται λόγω της χημικής σύνθεσης του συσσωρευτή είναι κατ' αρχάς ονομαστική. Στην πράξη θα έχει μεν αυτή την τάση, αλλά όταν έχει όλη του την ενέργεια η τάση θα είναι λίγο μεγαλύτερη, ενώ όσο εξαντλείται η ενέργειά του η τάση θα είναι λίγο μικρότερη. Σαν παράδειγμα, το στοιχείο Ni-Cd έχει ονομαστική τάση 1,2 V. Αμέσως μετά την φόρτιση η τάση του κυμαίνεται στα 1,35-1,4 V, ενώ αντίθετα όταν η τάση πέσει στα 1,1 V είναι ήδη "άδειο" για κάθε πρακτική εφαρμογή.[16]

Χωρητικότητα [Ah] Είναι η ποσότητα της αποθηκευμένης ενέργειας την οποία μπορούμε να χρησιμοποιούμε κατά την αποφόρτιση του στοιχείου. Η χωρητικότητα μετριέται σε αμπερώρια (Ah) δηλαδή είναι το γινόμενο του χρόνου

αποφόρτισης επί το ρεύμα που προσφέρει το στοιχείο. Υποπολλαπλάσιο της μονάδας αυτής είναι τα μιλιαμπερώρια (mAh). Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω ένας χημικός συσσωρευτής με 500mAh χωρητικότητα μπορεί θεωρητικά να προσφέρει 500mA για 1 ώρα ή 50mA για 10 ώρες. Στην πράξη το μέγεθος της χωρητικότητας εξαρτάται και από άλλους παράγοντες όπως είναι η χρήση, η ηλικία και η θερμοκρασία λειτουργίας. Μια καλή πηγή πληροφοριών, όταν αυτή προσφέρεται, είναι το manual του κατασκευαστή όπου θα αναφέρει τη χωρητικότητα με βάση τον ρυθμό αποφόρτισης.[16][19]

Μπαταρία είναι η συσκευή που δύο ή περισσότερα ηλεκτρικά στοιχεία ενώνονται για να δώσουν μαζί την ενέργεια τους και είναι συνώνυμο με την έννοια του χημικού ηλεκτρικού συσσωρευτή.[16]

Ενέργεια [Wh] Μονάδα μέτρησης είναι τα βαττώρια. Είναι το γινόμενο της τάσης της μπαταρίας επί την χωρητικότητα, δηλαδή Volt * Ah. Επειδή το γινόμενο τάσης με ένταση δίνει την ενέργεια θα έχουμε Volt * Ah = Wh το οποίο είναι τα Watt (W) ενέργειας που μπορεί να προσφέρει η μπαταρία σε μια ώρα. Επομένως, αν πάρουμε 4 στοιχεία, με τάση 1,2 V έκαστο, και χωρητικότητας 1 Ah και φτιάξουμε μια μπαταρία, αυτή θα έχει ενέργεια 4*1,2V*1Ah=4,8Wh. Αντίστοιχα, αν πάρουμε 8 στοιχεία με τάση πάλι στα 1,2 V αλλά χωρητικότητα στα 0,5 Ah τότε η μπαταρία αυτή θα έχει ενέργεια 8*1,2V*0.5Ah=4.8Wh η οποία είναι ίδια με την προηγούμενη.[16]

Σχέση ενέργειας-βάρους ή ειδική ενέργεια [Wh/Kgr] (specific energy) είναι το ποσό της ενέργειας που αποθηκεύεται σε ένα χημικό ηλεκτρικό συσσωρευτή ανά μονάδα βάρους. Εκφράζεται συνήθως σε βαττώρες ανά χιλιόγραμμο βάρους **(Wh/Kgr).** Ο λόγος αυτός είναι σημαντικός για την επιλογή ενός συσσωρευτή για χρήση σε ηλεκτρικά οχήματα.

Για παράδειγμα αν έχουμε μία μπαταρία 50Kgr Λιθίου ιόντων με ενεργειακή πυκνότητα 0,20KWh/Kgr τότε η αποθηκευμένη ενέργεια θα είναι 50Kgr x 0,20KWh/Kgr = 10KWh

Αν συγκρίνουμε αυτό το αποτέλεσμα με 50Kgr βενζίνης (έχει ενεργειακή πυκνότητα 13KWh/Kgr) θα προκύψει για την βενζίνη ενέργεια 50Kgr x 13KWh/Kgr = 650KWh.

Η βενζίνη δηλαδή προσφέρει περίπου 70 φορές μεγαλύτερη ενέργεια για το ίδιο βάρος. Αυτός είναι και ο λόγος της μικρότερης αυτονομίας των ηλιακών οχημάτων και της προσπάθειας αύξησης της ενεργειακής πυκνότητας των μπαταριών.[16]

Πυκνότητα ισχύος (Specific power) [W/Kg] Δηλώνει την μέγιστη ισχύ που μπορεί να δώσει ένας χημικός ηλεκτρικός συσσωρευτής και από αυτό το χαρακτηριστικό εξαρτώνται και οι επιδόσεις π.χ. του ηλεκτρικού οχήματος (επιτάχυνση , τελική ταχύτητα)

Ενεργειακή πυκνότητα όγκου (energy density) [Wh/m3 ή σε Wh/L] Υποδηλώνει το συνολικό φορτίο που μπορεί να αποθηκεύσει ένας χημικός

ηλεκτρικός συσσωρευτής ανά μονάδα όγκου. Όσο μεγαλύτερη τόσο μικρότερος ο όγκος του συσσωρευτή.

Τρόποι Σύνδεσης των Συσσωρευτών μπορεί να είναι σε σειρά, ή παράλληλα, ή σε συνδυασμό των δύο. Όταν ενώνονται ο θετικός πόλος του ενός με τον αρνητικό του δεύτερου, ο θετικός του δεύτερου με τον αρνητικό του τρίτου, κ.ο.κ., λέμε ότι είναι ενωμένα σε σειρά. Στην περίπτωση αυτή ο συσσωρευτής έχει τάση όση το άθροισμα των τάσεων των επιμέρους στοιχείων, ενώ η χωρητικότητά του παραμένει όση η χωρητικότητα του ενός στοιχείου. π.χ. 4 στοιχεία των 1,2V/500mAh σε σειρά θα δώσουν συσσωρευτή 4,8V/500mAh. Όταν ενώνονται όλοι οι θετικοί πόλοι μαζί και αντιστοίχως όλοι οι αρνητικοί μαζί, λέμε ότι είναι ενωμένα παράλληλα. Στην περίπτωση αυτή αθροίζονται οι χωρητικότητες όλων των στοιχείων, ενώ η τάση του παραμένει όση και η τάση ενός στοιχείου. π.χ. 4 στοιχεία των 1,2V - 500mAh ενωμένα παράλληλα, δίνουν συσσωρευτή 1,2V - 2000mAh. Θεωρούμε δεδομένο ότι στην πράξη οι συσσωρευτές φτιάχνονται από ομοειδή στοιχεία, με την ίδια χημική σύσταση, την ίδια τάση και την ίδια χωρητικότητα. Σημαντικό είναι επίσης τα στοιχεία να έχουν και άλλες ιδιότητές τους ισότιμες και ιδίως την εσωτερική τους αντίσταση.[17]

Οι **Βαθμοί Απόδοσης του Συσσωρευτή [%]** είναι ο ενεργειακός και ο χωρητικότητας. Οι βαθμοί αυτοί υπάρχουν για να γίνεται ο υπολογισμός των απωλειών που είναι δεδομένο ότι θα έχουν οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές κατά την φάση της φόρτισης όσο και κατά την φάση της αποφόρτισης.

Ο ενεργειακός βαθμός απόδοσης του συσσωρευτή ορίζεται ως:

$$n_E = \frac{\text{Ενέργεια που αποδίδεται κατά την αποφόρτιση}}{\text{Ενέργεια που προσδίδεται κατά την φόρτιση}}$$

Ο βαθμός απόδοσης χωρητικότητας του συσσωρευτή ορίζεται ως:

$$\mathrm{n_K} = \frac{\text{Ποσότηταηλεκτρισμού που αποδίδεται κατά τηναποφόρτιση}}{\text{Ποσότηταηλεκτρισμού που προσδίδεται κατά τηνφόρτιση}}$$

Φαινόμενο μνήμης συσσωρευτή: Σε μερικούς τύπους συσσωρευτών (π.χ. Ni-cd , Ni-MH) οι συμπληρωματικές φορτίσεις πριν αυτοί αποφορτισθούν κάτω από ένα όριο έχουν κακή επίδραση στην απόδοσή τους. Οι συσσωρευτές αυτοί «θυμούνται» πως είχαν γεμίσει μέχρι κάποιο ποσοστό και όταν κάποια στιγμή χρειασθεί να αποφορτισθούν περισσότερο από το παραπάνω όριο, δεν μπορούν να αποδώσουν την υπόλοιπη ενέργειά τους. Το φαινόμενο αυτό δεν παρατηρείται σε νεότερους τύπους μπαταριών (π.χ. Λιθίου).[17]

Συντελεστής (ρυθμός) αυτό-αποφόρτισης (self-discharge rate) [%] Εκφράζει τον ρυθμό αυτό-αποφόρτισης του συσσωρευτή επί τοις % όταν αυτός είναι σε αδράνεια ανά μήνα και σπανιότερα ανά έτος.

Χρόνος ζωής μπαταρίας (Time durability) [έτη] Είναι ο χρόνος μέχρι ο συσσωρευτής να είναι ακατάλληλος για χρήση αν είναι σε ενεργό λειτουργία ή σε αδράνεια. Συνήθως αν η ονομαστική χωρητικότητα πέσει κάτω του 70 έως 80% της αρχικής θεωρείται ακατάλληλη.

Αριθμός κύκλων λειτουργίας (cycle durability) Είναι καθαρός αριθμός και εκφράζει τον αριθμό των φορτίσεων-αποφορτίσεων που εκτιμάται ότι αντέχει η μπαταρία μέχρι η χωρητικότητα της να πέσει κάτω από ένα όριο. Συνήθως κάτω του 70 έως 80 % της αρχικής χωρητικότητας.

3.1.2 Τύποι Χημικών Ηλεκτρικών Συσσωρευτών για ηλιακά οχήματα

Η επιλογή των μπαταριών που θα χρησιμοποιηθούν σε ένα ηλεκτρικό όχημα είναι ζωτικής σημασίας. Τα χαρακτηριστικά που θα πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι:

α) Η αυτονομία για την ισχύ του συγκεκριμένου οχήματος
β) Η διάρκεια ζωής της μπαταρίας
γ) Το κόστος
δ) Η απαιτουμένη συντήρηση
ε) Ο βαθμός ασφαλείας
στ) Η ειδική ενέργεια

Σημαντικά είναι και τα χαρακτηριστικά που αναπτύχθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

Οι πρόσφατες εξελίξεις οδηγούν στην ανάπτυξη και χρήση των παρακάτω κυρίως μπαταριών στα ηλιακά οχήματα οι οποίες περιγράφονται στην συνέχεια. Ο τρόπος διαχωρισμού αυτών έγινε από τις πρώτες ύλες από τις οποίες κατασκευάζονται:

α) Συσσωρευτές Μολύβδου (Pb)
β) Συσσωρευτές Ιόντων Λιθίου (Li-ion) και Λιθίου Πολυμερών (Li-Polymer)
γ) Συσσωρευτές Λιθίου Φωσφορικού Άλατος Σιδήρου ($LiFePO_4$)
δ) Συσσωρευτές Νικελίου – Υβριδίου Μετάλλου (Ni-MH)
ε) Συσσωρευτές Αργύρου – Ψευδαργύρου (Ag-Zn)
στ) Συσσωρευτές Νικελίου – Ψευδαργύρου (Ni-Zn)
ζ) Συσσωρευτές Νικελίου – Σιδήρου (Ni-Fe)

3.1.2.1 Συσσωρευτές Μολύβδου (Pb)

Οι συσσωρευτές Μολύβδου είναι οι πιο παλιοί και οι πιο εμπορικά διαδεδομένοι συσσωρευτές. Το κυριότερο μειονέκτημά τους είναι η σχέση ενέργειας βάρους καθώς κυμαίνεται ανάμεσα στα **30 με 40 Wh/Kgr** ανάλογα τον κατασκευαστή και την τεχνολογία. Έχουν όμως ως πλεονεκτήματα τη δυνατότητα παροχής υψηλών ρευμάτων και την ευκολία κατασκευής. Για τους λόγους αυτούς ο τύπος αυτός συσσωρευτή χρησιμοποιείται κατά κόρον στην αυτοκινητοβιομηχανία, στις τηλεπικοινωνίες, σε μονάδες παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας και στις μεταφορές.

Οι συσσωρευτές μολύβδου χωρίζονται σε δύο βασικά είδη με βάση τον τρόπο συντήρησής τους:

α) Ανοικτού τύπου όπου έχουν υποδοχές για την εισαγωγή του ηλεκτρολύτη σε μορφή υγρού και για την περιοδική συντήρηση τους με τη συμπλήρωση υγρών

β) Κλειστού τύπου γνωστές και ως Valve Regulated Lead Acid (VRLA) οι οποίες δεν χρησιμοποιούν υγρό ηλεκτρολύτη και δεν χρειάζονται περιοδική συντήρηση και μπορούν να τοποθετηθούν σε οποιαδήποτε θέση χωρίς να υπάρχει κίνδυνος διαρροής

Οι συσσωρευτές μολύβδου χρησιμοποιούν και διαφορετικού τύπου ηλεκτρολύτες όπως:

α) Θειικό οξύ αραιωμένο με απιονισμένο ή φιλτραρισμένο νερό (Liquid Acid battery)

β) Ηλεκτρολύτης αναμεμειγμένος με σκόνη σιλικόνης για τη δημιουργία ηλεκτρολύτη σε μορφή τζελ (Gel type battery)

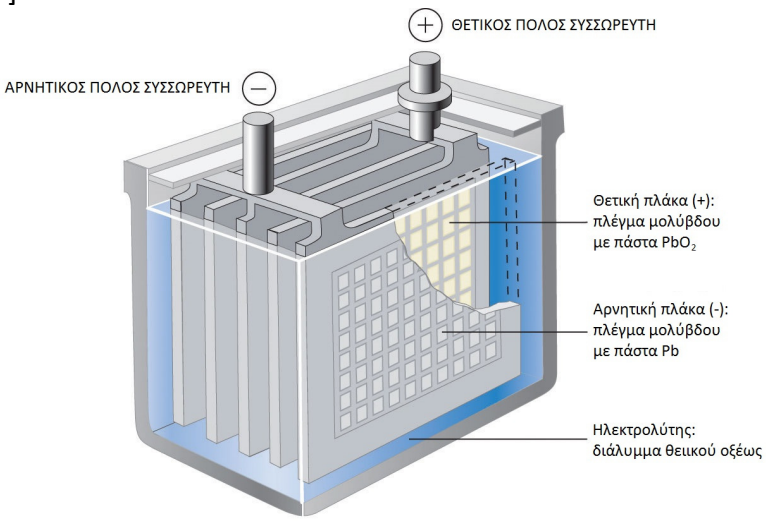
γ) Φύλα υαλονημάτων ανάμεσα στις πλάκες των στοιχείων του συσσωρευτή τα οποία είναι εμποτισμένα με ηλεκτρολύτη (AGM type battery)

Ο (α) τύπος χρησιμοποιείται στους ανοικτού τύπου συσσωρευτές Μολύβδου ενώ οι (β) και (γ) στους κλειστού τύπου.

Οι συσσωρευτές Μολύβδου ανοικτού τύπου αποτελούνται από δύο **πλάκες** οι οποίες αντιπροσωπεύουν το θετικό και αρνητικό κομμάτι του στοιχείου. Οι πλάκες αυτές είναι κατασκευασμένες από ένα πλέγμα μολύβδου με ειδικά πρόσθετα για βελτίωση των μηχανικών χαρακτηριστικών του. Κατόπιν πάνω στο πλέγμα πιέζεται και ενσωματώνεται μόλυβδος μαζί με θειικό οξύ σε μορφή πάστας και έτσι δημιουργείται η αρνητική πλάκα. Αντίστοιχα κατασκευάζεται και η θετική με την διαφορά ότι η πάστα της είναι από διοξείδιο του Μολύβδου και θειικό οξύ.

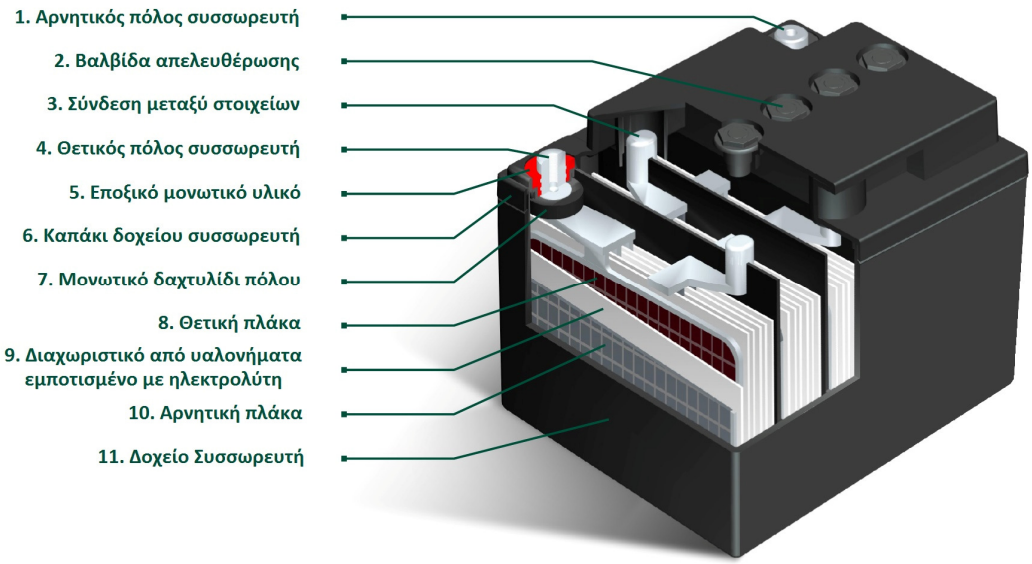
Ένα ακόμα δομικό μέρος της μπαταρίας είναι το **διαχωριστικό** που τοποθετείται μεταξύ των πλακών και εξασφαλίζει ότι δεν θα υπάρχει άμεση επαφή μεταξύ των δύο. Το είδος του υλικού του διαχωριστικού, το πάχος του και άλλα δομικά χαρακτηριστικά του εμποδίζουν την ροή ιόντων μεταξύ των πλακών και καθορίζουν την εσωτερική αντίσταση του στοιχείου.

Τέλος προστίθεται ο **ηλεκτρολύτης** ο οποίος αποτελείται από θειικό οξύ αραιωμένο σε συγκεκριμένο ποσοστό σε φιλτραρισμένο ή συνήθως απιονισμένο νερό. [15][22]



Σχήμα 3.1: Αναπαράσταση βασικών στοιχείων μπαταρίας ανοικτού τύπου

Οι συσσωρευτές Μολύβδου κλειστού τύπου έχουν την ίδια μέθοδο κατασκευής των πλακών και των διαχωριστικών τους για την κατασκευή των στοιχείων τους, σε σχέση με τους συσσωρευτές ανοικτού τύπου, αλλά χρησιμοποιούν διαφορετικής μορφής ηλεκτρολύτη. Το κύριο πλεονέκτημά τους είναι ότι επειδή ο ηλεκτρολύτης δεν βρίσκεται σε καθαρά υγρή μορφή ελεύθερος ανάμεσα στις πλάκες μπορούν να αποθηκευτούν και να χρησιμοποιηθούν τοποθετημένες σε οποιαδήποτε πλευρά τους χωρίς να υπάρχει κίνδυνος διαρροής του ηλεκτρολύτη. Μεγάλο πλεονέκτημα επίσης είναι η χρήση μικρότερης ποσότητας ηλεκτρολύτη καθώς και οι δύο τύποι που τοποθετούνται περιορίζονται στην ποσότητα που χρειάζονται οι μπαταρίες ακριβώς, με αποτέλεσμα οι μπαταρίες αυτές να είναι ελαφρύτερες από τις ανοιχτού τύπου. Η ύπαρξη επίσης ειδικής βαλβίδας απελευθέρωσης ενσωματωμένη στην συσκευασία τους εξασφαλίζει την απελευθέρωση των αερίων που παράγονται κατά την υπερφόρτιση της μπαταρίας, για να αποφευχθεί τυχόν καταστροφή της.[16]



Σχήμα 3.2: Αναπαράσταση βασικών στοιχείων συσσωρευτή κλειστού τύπου με διαχωριστικά υαλονημάτων εμποτισμένα με ηλεκτρολύτη (AGM type battery)

3.1.2.2 Συσσωρευτές Ιόντων Λιθίου (Li-ion) και Λιθίου Πολυμερών (Li-Polymer)

Οι συσσωρευτές Ιόντων Λιθίου και Λιθίου Πολυμερών είναι οι δύο τύποι μπαταρίας με την μεγαλύτερη ανάπτυξη σαν τεχνολογία τα τελευταία χρόνια. Τους διακρίνει η δυνατότητα αποθήκευσης μεγάλης ποσότητας ενέργειας με μικρό βάρος με συνέπεια να έχουν σχέση ενέργειας βάρους στα **100 με 265 Wh/Kgr** για του συσσωρευτές Λιθίου Ιόντων και **130 με 200 Wh/Kgr** για τους Λιθίου Πολυμερών. Η χρήση τους έχει επεκταθεί κυρίως σε φορητές συσκευές για τις οποίες είναι απαραίτητο το μικρό βάρος.

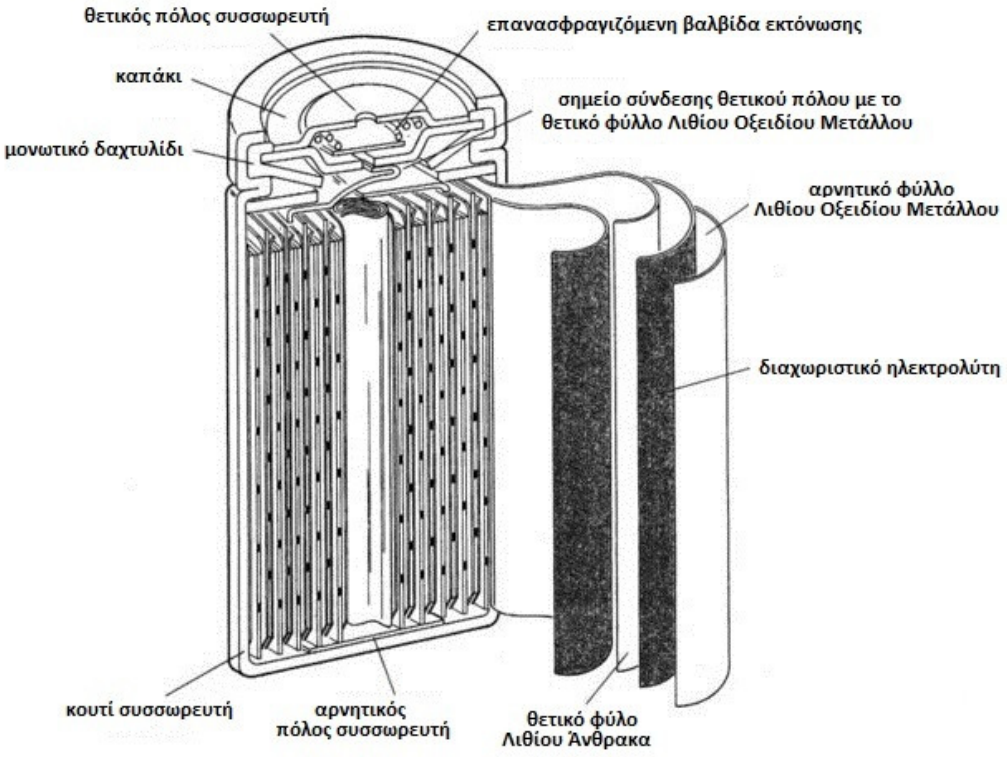
Το κυριότερο μειονέκτημα των μπαταριών αυτών είναι η χρήση του στοιχείου Λιθίου στην κατασκευή τους, το οποίο έχει το μειονέκτημα ότι αναφλέγεται όταν έρθει σε επαφή με τον αέρα. Αυτό έχει ως συνέπεια τα αυξημένα

μέτρα προστασίας των μπαταριών αυτών που πρέπει να ληφθούν κατά την χρήση. Η χρήση του Λιθίου ήταν αυτό που για πολλά χρόνια εμπόδιζε την μαζική τους παραγωγή και το οποίο λύθηκε όταν χρησιμοποιήθηκε η τεχνική της σύνδεσης με παρεμβολή (intercalation) και έτσι επετεύχθητε η δημιουργία καθόδου μπαταρίας με Οξείδια Μετάλλου και Λίθιο και ανόδου με άνθρακα και Λίθιο. Η χρήση αυτών των στοιχείων μείωσε τον κίνδυνο ανάφλεξης και έκανε αυτού του τύπου τις μπαταρίες εμπορικά διαθέσιμες.

Τα οξείδια μετάλλου που έχουν χρησιμοποιηθεί στην κάθοδο είναι:

- Οξείδιο του Λιθιούχου Κοβαλτίου ($LiCoO_2$)
- Οξείδιο του Λιθιούχου Μαγγανίου (LMO)
- Οξείδιο του Λιθιούχου Νικελομαγγανιοκοβαλτίου (NMC)
- Οξείδιο του Λιθιούχου Φωσφορικού Άλατος Σιδήρου (LFP)
- Οξείδιο του Λιθιούχου Νικελιοκοβαλτιοαλουμινίου (NCA)
- Οξείδιο του Λιθιούχου Τιτανίου (LTO)

Ο πρώτος τύπος οξειδίου ήταν αυτός που χρησιμοποιήθηκε στους πρώτους συσσωρευτές Λιθίου με χαρακτηριστικό την πολύ μεγάλη σχέση ενέργειας βάρους, αλλά με μειονέκτημα τον αυξημένο κίνδυνο ανάφλεξης σε σχέση με τα υπόλοιπα οξείδια και το υψηλό κόστος χρήσης του Κοβαλτίου. Ο δεύτερος και ο τρίτος τύπος οξειδίων προσφέρουν βελτίωση στους κύκλους ζωής, μείωση του κινδύνου ανάφλεξης και χαμηλότερο κόστος χρήσης των πρώτων υλών με μειονέκτημα την μικρότερη σχέση ενέργειας βάρους σε σχέση με την χρήση του πρώτου τύπου οξειδίου. Ο τέταρτος τύπος οξειδίου θα αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο καθώς είναι ένας τύπος συσσωρευτή με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Τέλος τα δύο τελευταία οξείδια είναι πρωτότυπα και χρησιμοποιούνται για συγκεκριμένες εφαρμογές και κατόπιν ειδικής παραγγελίας.



Σχήμα 3.3: Αναπαράσταση βασικών στοιχείων συσσωρευτή Λιθίου Ιόντων

Τέλος αυτό που ξεχωρίζει τους συσσωρευτές Ιόντων Λιθίου από αυτούς του Λιθίου Πολυμερών είναι ο τρόπος τοποθέτησης του ηλεκτρολύτη. Οι συσσωρευτές Ιόντων Λιθίου έχουν ηλεκτρολύτη Αλάτων Λιθίου διαλυμένο μέσα σε οργανικό διάλυμα. Αντίθετα οι συσσωρευτές Λιθίου Πολυμερών χρησιμοποιούν ένα στέρεο πολυμερικό συνθετικό. Αυτό έχει ως συνέπεια το φθηνότερο κόστος παραγωγής, την δυνατότητα διαμόρφωσης σε διάφορα σχήματα και την μεγαλύτερη αξιοπιστία σε σχέση με τους συσσωρευτές Λιθίου Ιόντων με μειονέκτημα την ελαφρώς χειρότερη σχέση ενέργειας βάρους.[15][16][17][18][20][22]

Σχήμα 3.4: Αναπαράσταση βασικών στοιχείων συσσωρευτή Λιθίου Πολυμερών

3.1.2.3 Συσσωρευτές Λιθίου Φωσφορικού Άλατος Σιδήρου ($LiFePO_4$)

Ο τύπος αυτός συσσωρευτή είναι μια παραλλαγή των συσσωρευτών Ιόντων Λιθίου με χαρακτηριστικό τη χρήση οξειδίου του Λιθιούχου Φωσφορικού Άλατος Σιδήρου σαν στοιχείο της καθόδου. Η σχέση ενέργειας βάρους αυτού του τύπου συσσωρευτή είναι στα **90 με 110 Wh/Kgr**. Οι συσσωρευτές αυτοί με την χρήση του διαφορετικού υλικού στην κάθοδο έχουν καλύτερα χαρακτηριστικά. Τα βασικά τους πλεονεκτήματα είναι οι περισσότεροι κύκλοι ζωής, η δυνατότητα να προσφέρουν περισσότερο ρεύμα με βάση την τιμή της χωρητικότητάς τους και είναι πολύ ασφαλέστεροι στη χρήση τους. Το μόνο μειονέκτημα σε σχέση με τους υπόλοιπους συσσωρευτές της οικογένειας του Λιθίου είναι το μεγαλύτερο βάρος τους επειδή χρησιμοποιούν σίδηρο σαν υλικό στην κάθοδο.

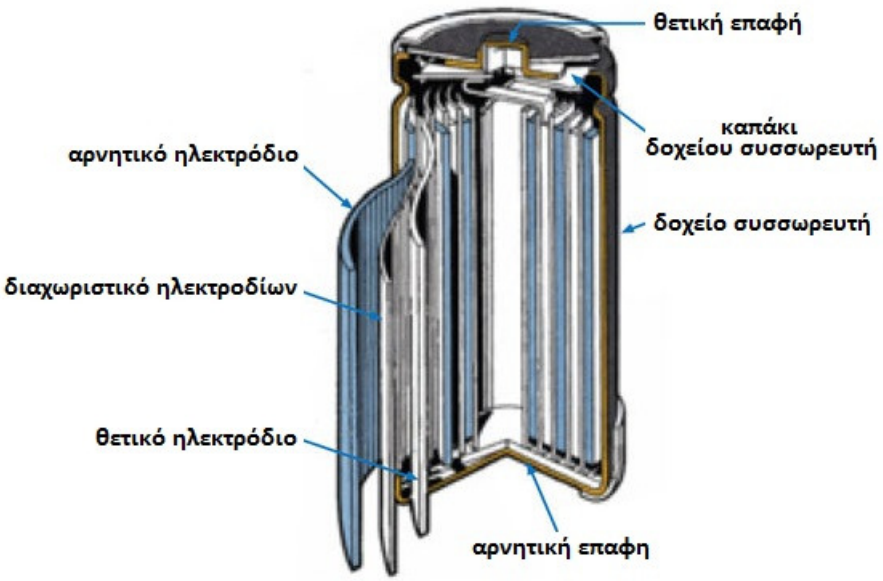
Οι συσσωρευτές αυτοί αρχίζουν και κερδίζουν μερίδιο στην αγορά καθώς η χρήση τους λόγω της πρόσθετης αξιοπιστίας τους ενδείκνυται για χρήση στην αυτοκινητοβιομηχανία. Επίσης, υπάρχει και σε πειραματικό στάδιο η εξέλιξη μιας βελτιωμένης τεχνικής για την παραγωγή της καθόδου η οποία με την επίστρωση σωματιδίων Λιθίου φωσφορικού άλατος σιδήρου πάνω σε μια υαλώδη επιφάνεια πυροφωσφορικού λιθίου, βελτιώνει την ταχύτητα μετακίνησης των ιόντων μεταξύ ανόδου και καθόδου με συνέπεια τη μείωση του χρόνου φόρτισης μέχρι και 36 φορές.

3.1.2.4 Συσσωρευτές Νικελίου – Υβριδίου Μετάλλου (Ni-MH)

Οι συσσωρευτές Νικελίου – Υβριδίου Μετάλλου είναι ένας από τους πιο διαδεδομένους τύπους συσσωρευτών για χρήση σε φορητές συσκευές. Η σχέση ενέργειας βάρους των συσσωρευτών αυτών είναι **60 με 120 Wh/Kgr**. Η τεχνολογία αυτών των συσσωρευτών αναπτύχθηκε με σκοπό την αντικατάσταση και τη βελτίωση των συσσωρευτών Νικελίου Καδμίου. Ο λόγος ήταν ο υψηλός κίνδυνος μόλυνσης του περιβάλλοντος από το κάδμιο στην περίπτωση που δεν γινόταν ορθή απόρριψη των συσσωρευτών μετά τη χρήση τους.

Στα θετικά στοιχεία αυτού του τύπου συσσωρευτή είναι χρήση πράσινων υλικών για την κατασκευή τους, η δυνατότητα παροχής μεγάλης τιμής έντασης ρεύματος χωρίς αισθητή πτώση της τιμής της χωρητικότητάς τους. Το πιο σοβαρό μειονέκτημα αυτού του τύπου συσσωρευτή είναι ο μεγάλος ρυθμός απώλειας ενέργειας σε φάση μη χρήσης, ο οποίος μπορεί ανά περιπτώσεις να φτάνει μέχρι και το 20% την πρώτη μέρα. Το θετικό ηλεκτρόδιο αποτελείται από οξυ-υδροξείδιο του νικελίου (NiO(OH)) και το αρνητικό ηλεκτρόδιο από υδρογόνο το οποίο όμως επειδή είναι κανονικά σε αέρια μορφή εδώ χρησιμοποιείται μέσα σε μεταλλικά υβρίδια συνδυασμού μετάλλων με αυτό, για να υπάρχει σε στέρεα μορφή και να επιτυγχάνεται η αντίδραση. Ο ηλεκτρολύτης, τέλος, είναι υδροξείδιο του καλίου.

Από τις πιο βασικές χρήσεις τους την εποχή που έγιναν εμπορικά διαθέσιμες την δεκαετία του ’70 ήταν σε δορυφορικές εφαρμογές. Τα τελευταία χρόνια είναι αρκετά διαδεδομένη και η χρήση τους σε υβριδικά αυτοκίνητα. Ο λόγος είναι και ότι υπήρξε μια εξέλιξη στον τρόπο κατασκευής με βελτίωση του θετικού πόλου και του διαχωριστικού μεταξύ του αρνητικού και του θετικού πόλου με συνέπεια τη δυνατότητα διατήρησης του 70 με 85% της χωρητικότητάς τους μετά από χρονικό διάστημα ενός χρόνου σε φάση μη χρήσης.[15][16][17][18]

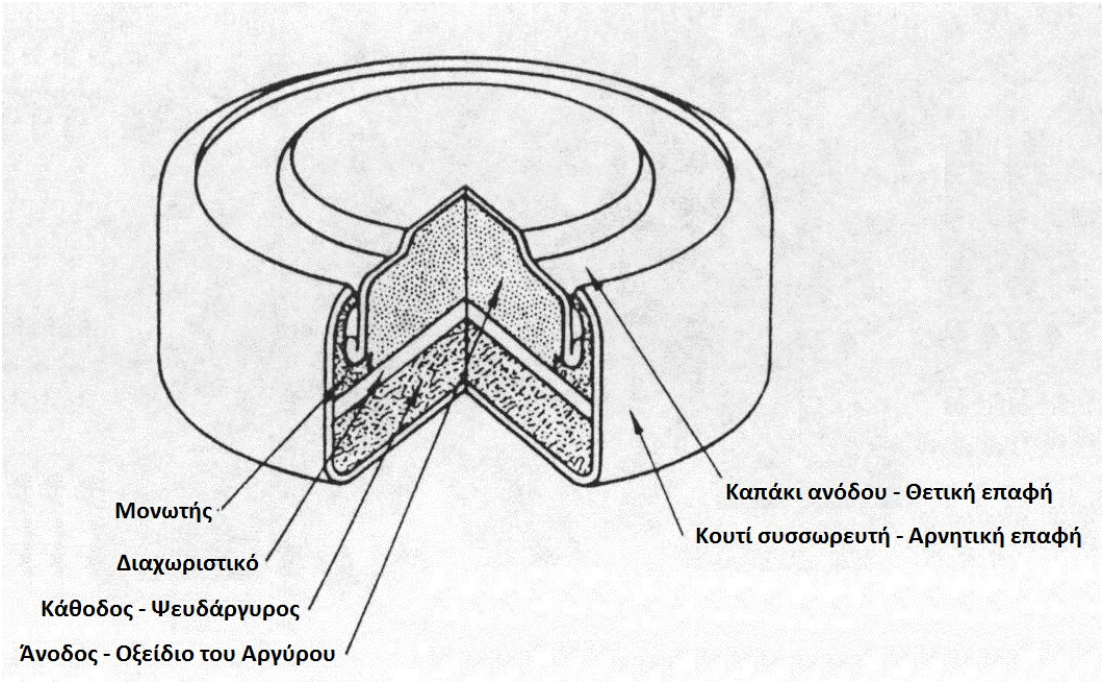


Σχήμα 3.5: Αναπαράσταση βασικών στοιχείων συσσωρευτή Νικελίου Υβριδίου Μετάλλου

3.1.2.5 Συσσωρευτές Ασημιού - Ψευδαργύρου (Ag-Zn)

Οι συσσωρευτές Ασημιού – Ψευδαργύρου είναι ένας τύπος μπαταριών που χρησιμοποιούνται ευρέως από την βιομηχανία κυρίως σε εφαρμογές για διατήρηση δεδομένων ασφαλείας σε περιπτώσεις που απουσιάζει η κύρια παροχή ρεύματος, καθώς επίσης και σε κάποιες πολύ συγκεκριμένες εφαρμογές στρατιωτικής χρήσης. Η σχέση ενέργειας βάρους των συσσωρευτών αυτών είναι **130 με 260 Wh/Kgr**. Οι συσσωρευτές αυτοί χρησιμοποιούν για θετικό ηλεκτρόδιο οξείδιο του αργύρου με προσθήκη γραφίτη και για αρνητικό τον ψευδάργυρο. Ο ηλεκτρολύτης είναι συνήθως το υδροξείδιο του νατρίου.

Από τα πολύ σημαντικά θετικά τους στοιχεία είναι η υψηλή διάρκεια ζωής τους και ο πολύ χαμηλός ρυθμός αυτό-αποφόρτισης. Στα μειονεκτήματα συγκαταλέγονται το υψηλό κόστος χρήσης του αργύρου σαν υλικό και ο χαμηλός αριθμός κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης ο οποίος δεν ξεπερνάει τους 500. Αυτοί είναι και οι κύριοι λόγοι που χρησιμοποιούνται μόνο σε κατασκευές χαμηλής κατανάλωσης, όπως είναι τα ρολόγια χειρός και σε ηλεκτρονικά συστήματα για την αποθήκευση και διατήρηση βασικών πληροφοριών, όπως είναι η ώρα και η ημερομηνία.[20]



Σχήμα 3.6: Αναπαράσταση βασικών στοιχείων συσσωρευτή Ασημιού - Ψευδαργύρου

3.1.2.6 Συσσωρευτές Νικελίου - Ψευδαργύρου (Ni-Zn)

Οι συσσωρευτές Νικελίου – Ψευδαργύρου είναι ένας πολύ παλιός τύπος συσσωρευτή ο οποίος είναι γνωστός για παραπάνω από 100 χρόνια. Δυστυχώς οι πρώτες προσπάθειες παραγωγής τους δεν κατάφεραν να ξεπεράσουν κάποια βασικά μειονεκτήματα με αποτέλεσμα για πολλά χρόνια η χρήση τους και η

παραγωγή τους να είναι περιορισμένη. Τα τελευταία χρόνια έχει αρχίσει πάλι μια προσπάθεια με αρκετά επιτυχημένα αποτελέσματα για τη βελτίωση των ιδιοτήτων τους. Η σχέση ενέργειας βάρους των συσσωρευτών αυτών είναι **80 με 100 Wh/Kgr**. Οι συσσωρευτές αυτοί επειδή βρίσκονται σε ένα στάδιο συνεχούς βελτίωσης σε λίγα χρόνια ίσως να μπορέσουν να προσφέρουν μια καλή εναλλακτική για χρήση σε εφαρμογές που μέχρι τώρα χρησιμοποιούνταν συσσωρευτές Νικελίου – Υβριδίου Μετάλλου και Μολύβδου.

Το βασικό μειονέκτημα το οποίο προσπαθεί να αντιμετωπίσει η έρευνα είναι η ανάπτυξη δενδριτών (μουστάκια) στα ηλεκτρόδια του ψευδαργύρου, εξαιτίας της δυσκολίας του ψευδαργύρου να επιστρέψει στο στερεό ηλεκτρόδιο κατά τη διάρκεια της επαναφόρτισης. Αυτό έχει ως συνέπεια το μειωμένο αριθμό κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης, αφού οι δενδρίτες προκαλούν βραχυκυκλώματα μεταξύ των ηλεκτροδίων. Ένα μειονέκτημα σε σχέση με τους συσσωρευτές μολύβδου είναι η χρήση Νικελίου με συνέπεια το μεγαλύτερο κόστος κατασκευής. Στα πλεονεκτήματα είναι η δυνατότητα για χρήση σε εφαρμογές ταχείας φόρτισης και αποφόρτισης, καθώς η μικρή εσωτερική αντίσταση βοηθάει προς αυτήν την κατεύθυνση. Επίσης, εξελίξεις σε αυτόν τον τύπο συσσωρευτή έχουν οδηγήσει σε δυνατότητα πλήρους αποφόρτισης και επαναχρησιμοποίησης τους χωρίς προβλήματα.

3.1.2.7 Συσσωρευτές Νικελίου - Σιδήρου (Ni-Fe)

Οι συσσωρευτές Νικελίου – Σιδήρου ξεκίνησαν να παράγονται μαζικά από τον Thomas Edison το 1901 με σκοπό καθαρά τη χρήση σε ηλεκτρικά οχήματα, καθώς την εποχή εκείνη ήταν αρκετά διαδεδομένα. Το κύριο χαρακτηριστικό τους ήταν ότι μπορούσαν να αποθηκεύσουν πολύ μεγαλύτερη ενέργεια ως προς τον όγκο τους σε σχέση με τους συσσωρευτές Μολύβδου της εποχής εκείνης. Ο Edison μάλιστα διατεινόταν τότε ότι οι συσσωρευτές του θα εξασφάλιζαν πάνω από 100 χρόνια χρήσης στους ιδιοκτήτες των ηλεκτρικών οχημάτων της εποχής. Δυστυχώς με την είσοδο και την ανάπτυξη των οχημάτων με χρήση των μηχανών εσωτερικής καύσης τα ηλεκτρικά οχήματα της εποχής εγκαταλείφθηκαν και κατά συνέπεια ο τύπος αυτός συσσωρευτή μπήκε στο περιθώριο. Η μη χρήση τους στις μηχανές εσωτερικής καύσης σαν μπαταρίες εκκίνησης τους περιθωριοποίησε ακόμα περισσότερο. Η σχέση ενέργειας βάρους των συσσωρευτών αυτών είναι **30 με 50 Wh/Kgr**. Η μικρή αυτή αναλογία ήταν και ένας λόγος που η χρήση τους δεν προχώρησε. Τα τελευταία χρόνια αρχίζει και επαναχρησιμοποιείται κυρίως σε εγκαταστάσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπου το μεγάλο βάρος δεν είναι καθοριστικός παράγοντας και ο μεγάλος αριθμός κύκλων είναι το ζητούμενο.

Σαν κάθοδό χρησιμοποιεί το Νικέλιο και σαν άνοδό της το Σίδηρο. Ο ηλεκτρολύτης είναι το υδροξείδιο του καλίου και σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιείται σε συνδυασμό και με υδροξείδιο του λιθίου το οποίο βελτιώνει τα χαρακτηριστικά του συσσωρευτή.

Το κύριο θετικό του τύπου αυτού συσσωρευτή είναι ο πολύ μεγάλος αριθμός κύκλων φόρτισης-αποφόρτισης καθώς τα αντιδραστήρια των ηλεκτροδίων δεν είναι διαλυτά στον ηλεκτρολύτη. Ένα άλλο θετικό είναι η δυνατότητα υπερφόρτισης και υπερ-αποφόρτισης. Η μη χρήση επίσης, υλικών επικίνδυνα προς

το περιβάλλον είναι ένα ακόμα θετικό στοιχείο. Ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι ο χαμηλός ρυθμός φόρτισης και αποφόρτισης, με δυνατότητα όμως αποφόρτισης με υψηλό ρυθμό για μικρά διαστήματα. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ο μεγάλος ρυθμός αυτο-αποφόρτισης σε σχέση με τους συσσωρευτές Μολύβδου, ο οποίος μπορεί να είναι μέχρι και 12 φορές μεγαλύτερος.[21][22]

3.2 Χωρητικοί Ηλεκτρικοί Συσσωρευτές

3.2.1 Εισαγωγή – Ορισμοί

Χωρητικότητα Πυκνωτή [F] Η χωρητικότητα του χωρητικού ηλεκτρικού συσσωρευτή είναι η αντίστοιχη μονάδα μέτρησης με τα Ah των μπαταριών. Υποδηλώνει τη δυνατότητα του πυκνωτή στο να αποθηκεύει φορτίο.

Πυκνωτής είναι η συσκευή που χρησιμοποιεί το χωρητικό φαινόμενο για την αποθήκευση ηλεκτρικού φορτίου και είναι συνώνυμο με την έννοια του χωρητικού ηλεκτρικού συσσωρευτή.

Υπερπυκνωτής είναι η συσκευή η οποία κατασκευάζεται με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να επιτυγχάνει υψηλές ποσότητες χωρητικότητας με όσο το δυνατόν μικρό όγκο και βάρος. Είναι μια ξεχωριστή κατηγορία χωρητικών ηλεκτρικών συσσωρευτών και είναι η κατηγορία με την οποία θα ασχοληθούμε σε αυτό το κεφάλαιο.

Ισοδύναμη Αντίσταση σε Σειρά [Ohm] (Equivalent Series Resistance) Η αντίσταση αυτή είναι η αντίσταση που παρουσιάζει ο χωρητικός ηλεκτρικός συσσωρευτής σε μονάδες μέτρησης αντίστασης Ohm. Ο τύπος ο οποίος δίνει αυτή την αντίσταση είναι: $ESR = \left(V_{start} - V_{after}\right) / I_d$. Όπου V_{start} είναι η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του χωρητικού ηλεκτρικού συσσωρευτή, V_{after} είναι η τάση που μετράται στα άκρα του χωρητικού ηλεκτρικού συσσωρευτή μετά από χρόνο 5 δευτερολέπτων χωρίς να εφαρμόζεται τάση στα άκρα του και I_d είναι η ένταση του ρεύματος με την οποία αποφορτίζεται.

Ενέργεια [Wh] Μονάδα μέτρησης είναι οι βατώρες. Στους χωρητικούς ηλεκτρικούς συσσωρευτές βρίσκεται αν λύσουμε τον τύπο: $E_{stored} = \frac{1}{2}\frac{CV^2}{3600}$. Όπου C είναι η χωρητικότητα σε Farad [F] και το V είναι η τάση με την οποία φορτίζεται στα άκρα του ο χωρητικός ηλεκτρικός συσσωρευτής.

Σχέση ενέργειας-βάρους ή ειδική ενέργεια [Wh/Kgr] (specific energy) είναι το ποσό της ενέργειας που αποθηκεύεται σε ένα χωρητικό ηλεκτρικό συσσωρευτή ανά μονάδα βάρους. Εκφράζεται συνήθως σε βατώρες ανά χιλιόγραμμο βάρους **(Wh/Kgr).** Στους χωρητικούς ηλεκτρικούς συσσωρευτές η σχέση ενέργειας βάρους

δίνεται από τον τύπο: $E_{spec} = \frac{E_{stored}}{mass}$. Όπου E_{stored} είναι η ενέργεια και mass το βάρος του χωρητικού ηλεκτρικού συσσωρευτή.

<u>Πυκνότητα ισχύος (Specific power) [W/Kg]</u> Δηλώνει την μέγιστη ισχύ που μπορεί να δώσει ένας χωρητικός ηλεκτρικός συσσωρευτής. Ο τρόπος υπολογισμού του δίνεται με βάση τον παρακάτω τύπο: $P_{\max} = \frac{V^2}{4 \cdot ESR \cdot mass}$. Όπου V είναι η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα του χωρητικού ηλεκτρικού συσσωρευτή, ESR είναι η ισοδύναμη αντίσταση σε σειρά και mass είναι το βάρος του χωρητικού ηλεκτρικού συσσωρευτή.

3.2.2 Τύποι Χωρητικών Ηλεκτρικών Συσσωρευτών

Ο λόγος χρήσης των χωρητικών ηλεκτρικών συσσωρευτών σε ένα ηλιακό όχημα είναι ότι ο ρυθμός με τον οποίο ένας κινητήρας μπορεί να καταναλώσει ενέργεια, αλλά κυρίως ο ρυθμός με τον οποίο μπορεί να προσφέρει ενέργεια κατά την φάση της επιβράδυνσης είναι πολύ μεγάλος για να μπορέσει ένας χημικός ηλεκτρικός συσσωρευτής να την απορροφήσει επιτυχώς, χωρίς να έχει επιπτώσεις στις μελλοντικές του επιδόσεις. Αυτός είναι και ο σκοπός χρήσης των υπερπυκνωτών σε οχήματα πολλές φορές ακόμα και σε συνδυασμό με χημικούς ηλεκτρικούς συσσωρευτές.

Στους υπερπυκνωτές η χωρητικότητα τους καθορίζεται από δύο χαρακτηριστικά:

α) Διεπιφανειακή Χωρητικότητα, όπου είναι η χωρητικότητα που παράγεται από την ύπαρξη δύο παράλληλων επιφανειών, στις οποίες διενεργείται στην μια θετική φόρτιση και στην άλλη αρνητική φόρτιση με την παρεμβολή ανάμεσα στις δύο επιφάνειες κατάλληλου πορώδους υλικού.

β) Ψευδοχωρητικότητα, όπου είναι η χωρητικότητα που παράγεται ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια ενός υπερπυκνωτή χρησιμοποιώντας την ιδιότητα της οξειδοαναγωγής, μεταφέροντας ηλεκτρόνια ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια κατά τις φάσεις φόρτισης αποφόρτισης.

Σύμφωνα με τα δύο παραπάνω χαρακτηριστικά υπάρχουν τρεις τύποι υπερπυκνωτών οι οποίοι είναι:

α) Υπερπυκνωτές Διεπιφανειακής Χωρητικότητας

β) Υπερπυκνωτές Ψευδοχωρητικότητας

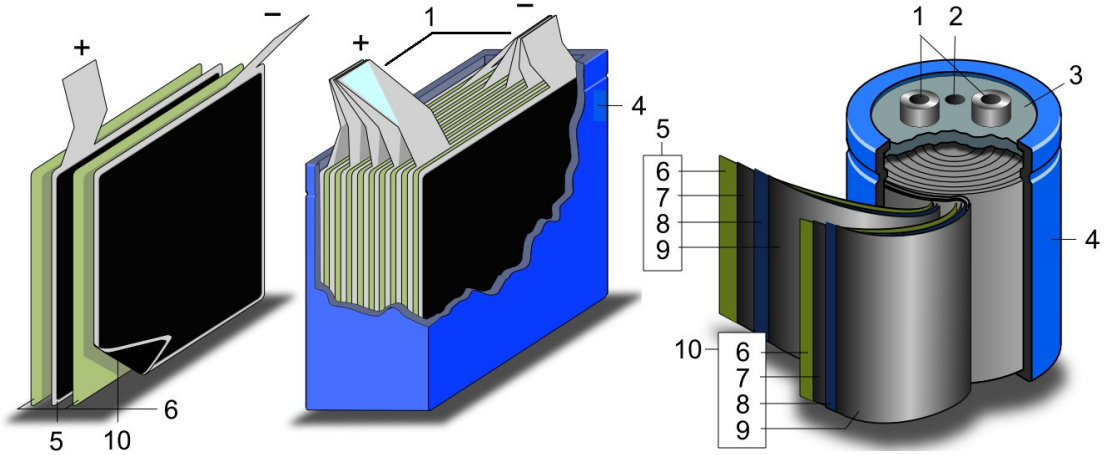
γ) Υβριδικοί Υπερπυκνωτές

3.2.2.1 Υπερπυκνωτές Διεπιφανειακής Χωρητικότητας και Υπερπυκνωτές Ψευδοχωρητικότητας (EDLC/PC Supercapacitors)

Οι δύο αυτοί τύποι υπερπυκνωτών είναι οι πρώτοι οι οποίοι κατασκευάστηκαν και διατέθηκαν εμπορικά. Η κύρια διαφορά τους σε σχέση με τους κανονικούς ηλεκτρολυτικούς χωρητικούς ηλεκτρικούς συσσωρευτές είναι ότι

σε αντίθεση με τους ηλεκτρολυτικούς οι υπερπυκνωτές δεν χρησιμοποιούν το διαχωριστικό, που είναι εμποτισμένο με ηλεκτρολύτη, σαν δομικό ηλεκτρικό μέρος της καθόδου αλλά σαν αγώγιμη επιφάνεια μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων. Οι υπερπυκνωτές Διεπιφανειακής Χωρητικότητας χρησιμοποιούν σαν ηλεκτρόδια φύλλα άνθρακα ενώ οι υπερπυκνωτές Ψευδοχωρητικότητας χρησιμοποιούν σαν ηλεκτρόδια οξείδια μετάλλου. Η διαφορά τους είναι ότι οι πρώτοι βασίζουν την χωρητικότητά τους κυρίως στο φαινόμενο δύο επιφανειών που είναι παράλληλες και φορτίζονται, ενώ οι δεύτεροι χρησιμοποιούν και την ιδιότητα της ψευδοχωρητικότητας του Faraday κατά πολύ μεγαλύτερο ποσοστό, η οποία βασίζεται στην ιδιότητα της οξειδοαναγωγής για την αποθήκευση φορτίου. Η σχέση ενέργειας βάρους των συσσωρευτών και των δύο αυτών κατηγόριων είναι **1,5 με 9 Wh/Kgr** αν και έχουν κατασκευαστεί πειραματικοί υπερπυκνωτές Διεπιφανειακής Χωρητικότητας με σχέση ενέργειας βάρους από **85 μεχρι 136 Wh/Kgr**.[24]

Στα πλεονεκτήματα των υπερπυκνωτών αυτών συγκαταλέγονται η δυνατότητα φόρτισης και αποφόρτισης τους με υψηλά ρεύματα με ελάχιστές απώλειες. Ο λόγος είναι η τιμή της Ισοδύναμης Αντίστασης σε Σειρά η οποία είναι πολύ μικρή και αυτό εξασφαλίζει εκτός από την γρήγορη φόρτο-αποφόρτιση και τον μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτο-αποφόρτισης οι οποίοι μπορούν υπό κατάλληλες συνθήκες να φτάσουν και παραπάνω του ενός εκατομμυρίου, τη στιγμή που οι χημικοί ηλεκτρικοί συσσωρευτές κυμαίνονται σε λίγους χιλιάδες κύκλους. Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα είναι ο χαμηλός ρυθμός αυτό-αποφόρτισης που μετριέται σε εβδομάδες έως μήνες, το οποίο δεν είναι απαγορευτικό για τη χρήση τους σε οχήματα, καθώς η χρήση τους δεν αποσκοπεί στην αποθήκευση της ενέργειας που αποθηκεύουν για εκμετάλλευση της μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα αλλά άμεσα. Κύριο μειονέκτημά τους είναι το βάρος τους σε σχέση με την ενέργεια που μπορούν να αποθηκεύσουν και να προσφέρουν. Επίσης, η υψηλή τους τιμή είναι καθοριστικός παράγοντας για την ακόμα μη ευρεία χρήση τους.[18]



Σχήμα 3.7: Αναπαράσταση βασικών στοιχείων Υπερπυκνωτή Διεπιφανειακής Χωρητικότητας (1. Θετικά και αρνητικά τερματικά συσσωρευτή, 2. Βαλβίδα εκτόνωσης, 3. Δίσκος σφράγισης, 4. Κουτί συσκευασίας, 5. Θετικός πόλος, 6. Διαχωριστικό, 7. Ηλεκτρόδιο ενεργού άνθρακα, 8. Συλλέκτης, 9. Ηλεκτρόδιο ενεργού άνθρακα, 10. Αρνητικός πόλος)

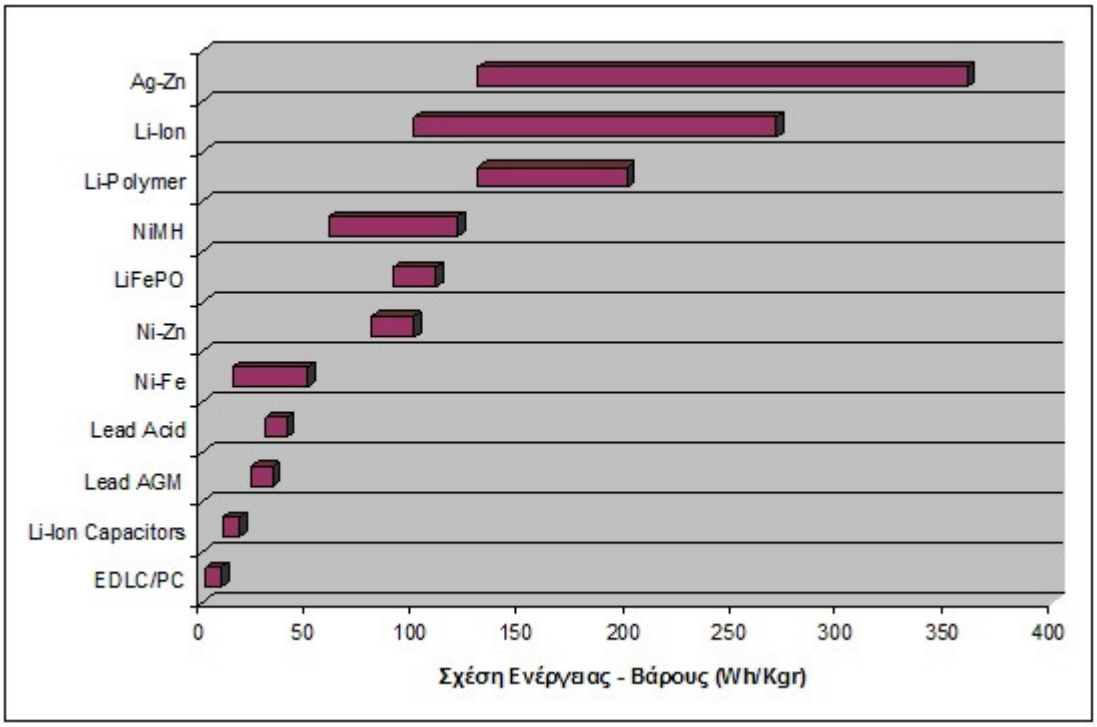
3.2.2.2 Υβριδικοί Υπερπυκνωτές (Hybrid Supercapacitors)

Μια ξεχωριστή κατηγορία υπερπυκνωτών είναι και οι Υβριδικοί οι οποίοι χρησιμοποιούν και τα δύο χαρακτηριστικά χωρητικότητας. Οι Υβριδικοί υπερπυκνωτές χρησιμοποιούν δύο ασύμμετρα ηλεκτρόδια, με το ένα να έχει ιδιότητες Διεπαφικής χωρητικότητας και το άλλο Ψευδοχωρητικότητας. Αυτό έχει ως συνέπεια να αναπτύσσουν υψηλά επίπεδα συνολικής χωρητικότητας τα οποία προέρχονται και από τις δύο μορφές και κατά συνέπεια να έχουν μεγαλύτερη ενέργεια σε σχέση με τους δύο άλλους τύπους. Ο πιο γνωστός τύπος Υβριδικού Υπερπυκνωτή και ο πιο εμπορικά διαθέσιμος είναι ο **πυκνωτής Ιόντων Λιθίου (LIC)**. Οι υπερπυκνωτές αυτοί ξεκίνησαν να είναι εμπορικά διαθέσιμοι το 2007. Χρησιμοποιούν σαν κάθοδο ενεργό άνθρακα και σαν άνοδο ένα πορώδες φύλο άνθρακα εμποτισμένο με ιόντα λιθίου. Η σχέση ενέργειας βάρους των πυκνωτών ιόντων Λιθίου είναι **10 με 18 Wh/Kgr**.[23]

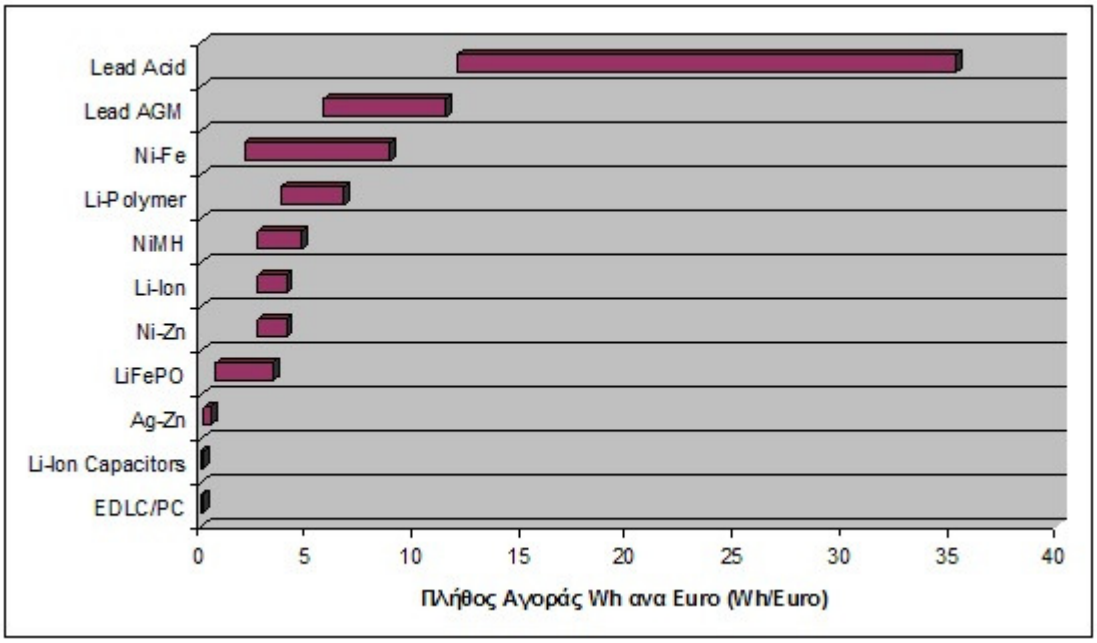
Ο κύριος λόγος για τη μεγαλύτερη σχέση ενέργειας βάρους του υβριδικού αυτού τύπου υπερπυκνωτή είναι ότι λόγω της χρήσης της εμποτισμένης ανόδου έχει διπλάσια σχεδόν τάση φόρτισης από τους άλλους δύο τύπους υπερπυκνωτή. Αυτό είναι και το κύριο πλεονέκτημα που προσφέρει αυτός ο τύπος υπερπυκνωτή σε σχέση με τους δύο άλλους. Ακόμα, επειδή η τεχνολογία του είναι λίγων χρόνων προβλέπονται συνεχείς εξελίξεις του συγκεκριμένου τύπου, που ως στόχο έχουν να επιτευχθεί τιμή σχέσης ενέργειας βάρους αντίστοιχη των συσσωρευτών Ιόντων Λιθίου, αλλά παράλληλα με τη δυνατότητα να έχουν πολύ ταχύτερη φόρτο-αποφόρτιση σε σχέση με αυτούς. Οι υβριδικοί υπερπυκνωτές μοιράζονται τα υπόλοιπα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των δύο τύπων υπερπυκνωτών που αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

3.3 Συμπεράσματα χρήσης Χημικών και Χωρητικών Ηλεκτρικών Συσσωρευτών

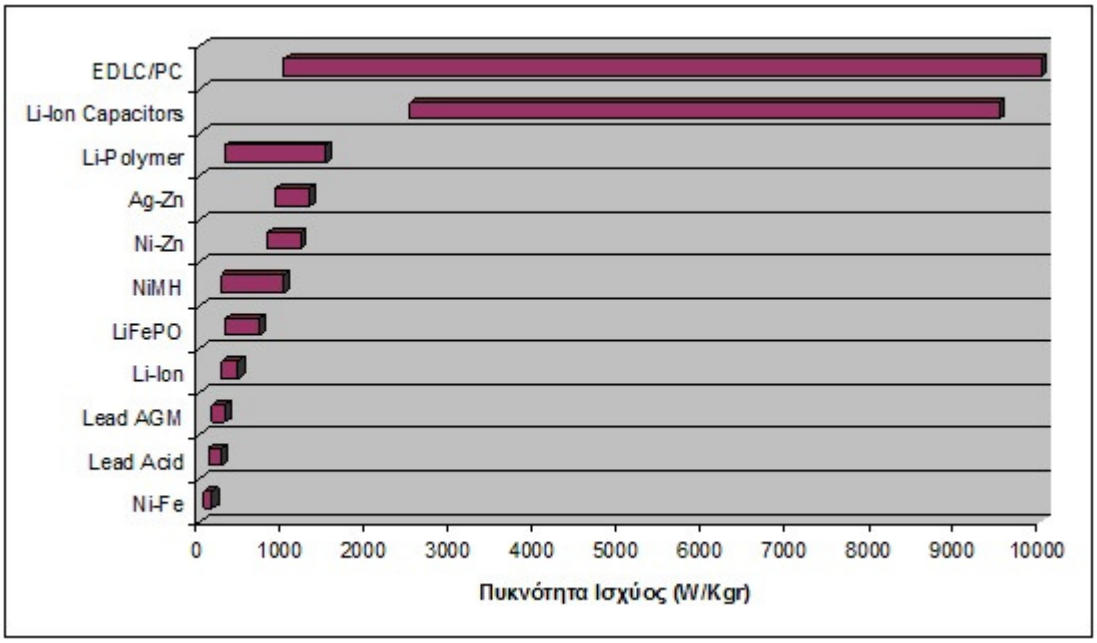
Στις προηγούμενες παραγράφους του κεφαλαίου αυτού αναλύσαμε τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των Χημικών και Χωρητικών ηλεκτρικών συσσωρευτών. Για να γίνει πιο κατανοητό ότι η επιλογή χρήσης συγκεκριμένου τύπου εξαρτάται από το σχεδιασμό και τις προτεραιότητες κάθε εφαρμογής ακολουθούν κάποια χαρακτηριστικά διαγράμματα.



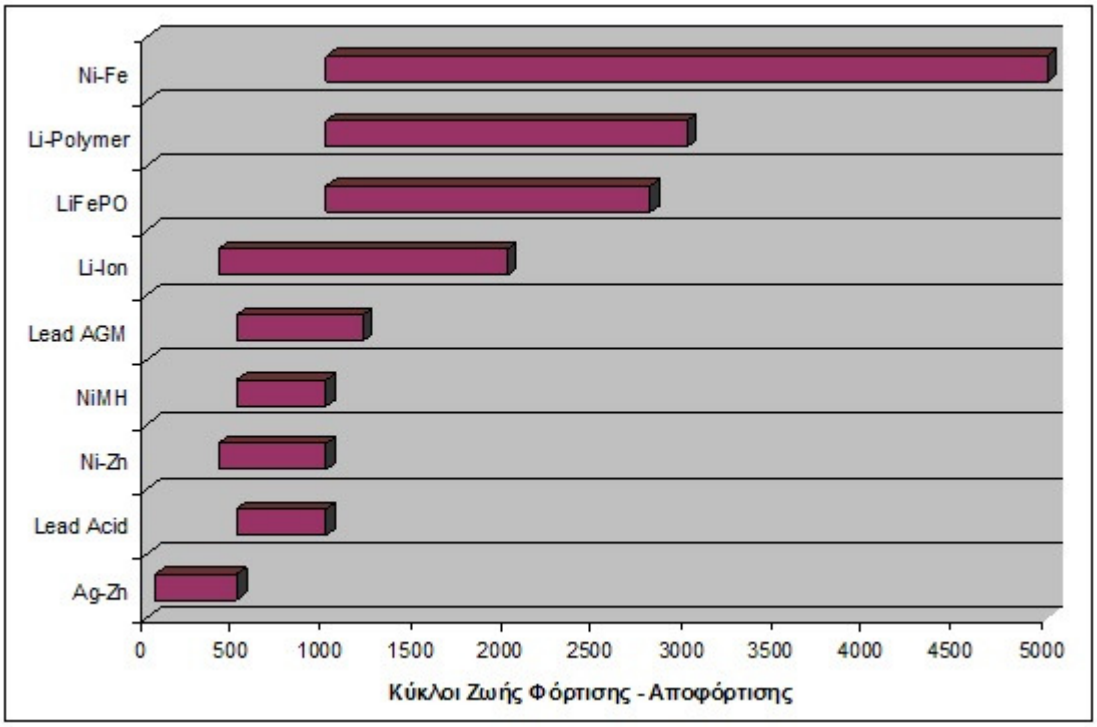
Σχήμα 3.8: Διάγραμμα που αναπαριστά το εύρος στο οποίο κυμαίνονται οι τιμές της σχέσης Ενέργειας – Βάρους των Ηλεκτρικών Συσσωρευτών



Σχήμα 3.9: Διάγραμμα που αναπαριστά το εύρος στο οποίο κυμαίνονται οι τιμές του πλήθους αγοράς βατώρων ανα Euro των Ηλεκτρικών Συσσωρευτών



Σχήμα 3.10: Διάγραμμα που αναπαριστά το εύρος στο οποίο κυμαίνονται οι τιμές της πυκνότητας Ισχύος των Ηλεκτρικών Συσσωρευτών



Σχήμα 3.11: Διάγραμμα που αναπαριστά το εύρος στο οποίο κυμαίνονται οι τιμές των κύκλων ζωής φόρτισης - αποφόρτισης των Χημικών Ηλεκτρικών Συσσωρευτών (Δεν περιλαμβάνονται οι Χωρητικοί Ηλεκτρικοί Συσσωρευτές σε αυτό το διάγραμμα, καθώς οι τιμές τους κινούνται σε υπερ-πολλαπλάσιο εύρος)

Μελετώντας τα παραπάνω τέσσερα διαγράμματα μπορούμε να βγάλουμε κάποια πολύ βασικά συμπεράσματα. Το κυριότερο είναι ότι ακόμα και αν ένας συσσωρευτής έχει υψηλή τιμή σχέσης ενέργειας βάρους δεν σημαίνει ότι είναι αποδοτικός σε εφαρμογές που απαιτούν πολλούς κύκλους ζωής. Όπως επίσης, το ότι ένας συσσωρευτής έχει υψηλή τιμή πλήθους αγοράς βατώρων ανά Euro δεν σημαίνει ότι μπορεί να έχει και υψηλή τιμή πυκνότητας ισχύος. Ο γενικός τρόπος επιλογής συσσωρευτή είναι η κατηγοριοποίηση των σημαντικότερων ιδιοτήτων, τα οποία είναι επιθυμητά στην κατά περίπτωση εφαρμογή.

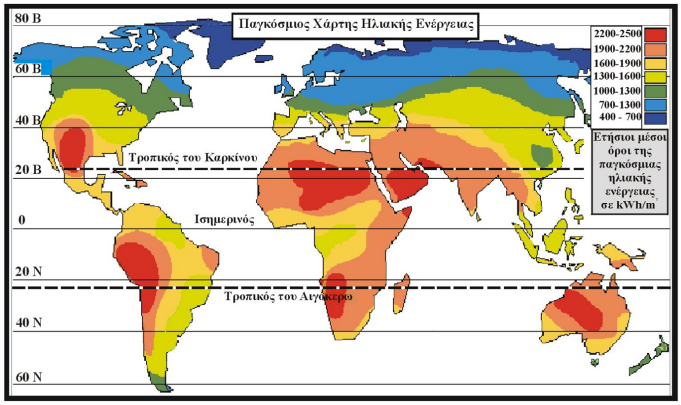
Κεφάλαιο 4^{ο} : Φωτοβολταϊκά Στοιχεία

4.1 Εισαγωγή

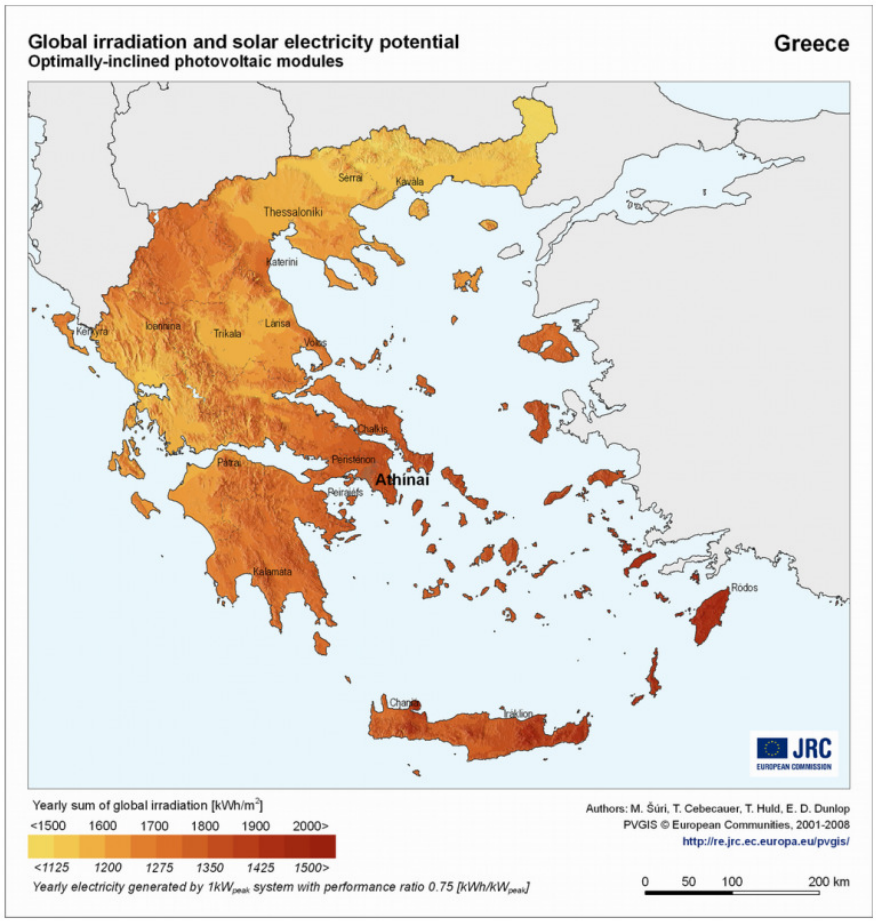
Οι συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες σε παγκόσμιο επίπεδο σε κατανάλωση ενέργειας, η εξάντληση των ορυκτών ενεργειακών πόρων και η διόγκωση των περιβαλλοντικών προβλημάτων, οδήγησε την προηγούμενη τριακονταετία σε αναζήτηση νέων ήπιων μορφών ενέργειας. Τέτοιες είναι η ηλιακή, η αιολική, η γεωθερμική και άλλες σε μικρότερη κλίμακα. Η ηλιακή ενέργεια είναι μία από τις σημαντικότερες ήπιες μορφές ενέργειας.

Με καλή προσέγγιση ο ήλιος είναι μια τέλεια πηγή ακτινοβολίας (μέλαν σώμα) σε θερμοκρασία περίπου στους 5800 K. Η παραγόμενη ισχύς από τον ήλιο (στην φωτόσφαιρα) υπολογίζεται σε **3,91*10^{23} KW** η οποία και διαχέεται ακτινικά προς όλες τις κατευθύνσεις. Η πυκνότητα της ηλιακής ενέργειας στα όρια της γήινης ατμοσφαίρας είναι περίπου **1367 W/m^2**. Η τιμή αυτή ονομάζεται **ηλιακή σταθερά.** Βέβαια, η πυκνότητα της ενέργειας έως ότου φθάσει στην επιφάνεια της γης μειώνεται αισθητά από πολλούς παράγοντες, όπως από κοσμικούς (περιστροφή της γης γύρω από τον άξονα της και γύρω από τον ήλιο σε ελλειπτική τροχιά) και από επιδράσεις της ατμόσφαιρας (απορρόφηση, σκέδαση, ανάκλαση κλπ). Εκτιμάται ότι από το συνολικό ποσό της ηλιακής ενέργειας που κατευθύνεται προς τη γη το 2% απορροφάται πριν φτάσει στην τροπόσφαιρα, το 19% απορροφάται στην τροπόσφαιρα, το 48% φθάνει στην επιφάνεια της γης και το 31% επιστρέφει στο διάστημα από ανακλάσεις κλπ (Πηγή: Εισαγωγή στην Κλιματολογία - Δρ. ΠΧ Φειδάς/2009). Ένα άλλο χαρακτηριστικό της ηλιακής ενέργειας είναι η μεγάλη χρονική διακύμανση κυρίως κατά τη διάρκεια του 24ωρου (ημέρα-νύχτα) αλλά και από εποχή σε εποχή και από τόπο σε τόπο. Υπολογίζεται τελικά ότι φθάνουν στη γη κατά μέσο όρο **1000 W/m^2** (στο επίπεδο της θάλασσας και με ηλιοφάνεια).

Σε πολλές εφαρμογές και για να διευκολύνονται οι σχετικοί υπολογισμοί λαμβάνονται τα **0,2 KW/m^2** ως μέση τιμή ενέργειας που φτάνει στην επιφάνεια της γης κατά τη διάρκεια του 24ωρου. Η Ελλάδα παρουσιάζει ένα ιδιαίτερα υψηλό ηλιακό δυναμικό με τιμή που κυμαίνεται περίπου στα **1,400-1,800 kWh/(m^2*year)** σε οριζόντιο επίπεδο, ανάλογα με το γεωγραφικό πλάτος και το ανάγλυφο της περιοχής.



Σχήμα 4.1: Μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνεια της γης σε Watt/m^2



Σχήμα 4.2: Μέσες Τιμές της ηλιακής ενέργειας για την Ελλάδα σε Kwh/m²

Έχουν γίνει αξιόλογες μετρήσεις οι οποίες δίνουν τιμές της έντασης της ηλιακής ενέργειας σε διαφόρους τόπους. Τέτοιες μετρήσεις υπάρχουν σε πολλές ιστοσελίδες και δημοσιεύσεις και δίνουν τιμές της ηλιακής ενέργειας σε πολλές πόλεις. Στην Τεχνική Οδηγία του ΤΕΕ (Πηγή: ΤΟΤΕΕ 20701-3/2010) υπάρχουν τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας για την πατρίδα μας**.** Στα σχήματα 4.1 και 4.2 δόθηκαν διαγράμματα της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στη γη σε παγκόσμιο επίπεδο, αλλά και σε εθνικό.

4.2 Μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική μορφή

Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε χρήσιμες μορφές ενέργειας είναι δυνατή με αρκετές μεθόδους. Αυτές μπορούν να ομαδοποιηθούν σε 3 μεγάλες κατηγορίες, φωτοθερμικές, φωτοχημικές και φωτοηλεκτρικές. Η φωτοηλεκτρική μέθοδος που θα μας απασχολήσει έχει το πλεονέκτημα της άμεσης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς την μεσολάβηση ενδιαμέσων σταδίων. Για την πραγματοποίηση της φωτοηλεκτρικής μεθόδου υπάρχουν 3 τρόποι: ο θερμοηλεκτρικός, ο θερμιονικός και ο **φωτοβολταϊκός** ο οποίος και θα αναλυθεί

στην συνέχεια αυτού του κεφαλαίου. Με τον τρόπο αυτό γίνεται απευθείας μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική.

Προς την κατεύθυνση αυτή έχουν γίνει και γίνονται πολλές έρευνες και μεγάλες πρόοδοι και έχουν επιτευχθεί καλές αποδόσεις που φτάνουν μέχρι και το 38% τουλάχιστον σε εργαστηριακό στάδιο. Ο τρόπος αυτός στηρίζεται στην ιδιότητα κάποιας κατηγορίας υλικών να μετατρέπουν την ενέργεια των προσπιπτόντων φωτονίων (πακέτα ενέργειας) σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτά τα υλικά είναι οι **ημιαγωγοί** και σε αυτά οφείλεται επίσης η τεράστια τεχνολογική πρόοδος που έχει γίνει στον τομέα της ηλεκτρονικής και στον ευρύτερο χώρο της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών.

Τα πλεονεκτήματα της μετατροπής της ηλιακής ενέργειας με την φωτοβολταϊκό τρόπο είναι:

1) Μηδενική ρύπανση του περιβάλλοντος

2) Αθόρυβη λειτουργία

3) Αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής

4) Απεξάρτηση από την τροφοδοσία καυσίμων για τις απομακρυσμένες Περιοχές (νησιά, ορεινά χωριά) .

5) Δυνατότητα επέκτασης ανάλογα με τις ανάγκες.

6) Ελάχιστη συντήρηση.

7) Ενεργειακή απεξάρτηση.

8) Η μέγιστη παραγωγή ηλιακού ηλεκτρισμού συμπίπτει χρονικά με τις ημερήσιες αιχμές της ζήτησης (ιδίως τους καλοκαιρινούς μήνες) (Πηγή: Διπ. Εργ. «Εφαρμογή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε στρατόπεδο» - Κουτελιδάκης Κων/νος/2010)

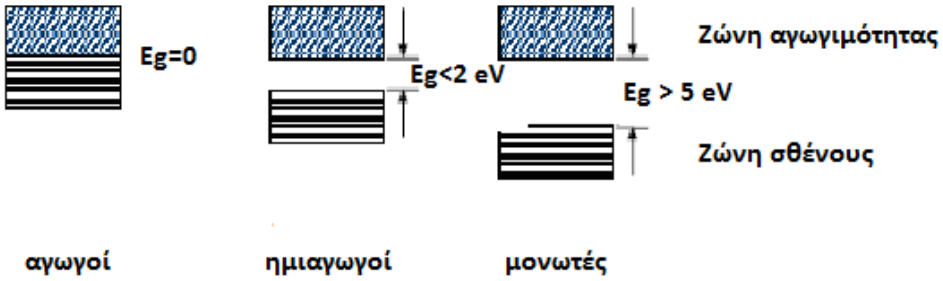
4.3 Το Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική βασίζεται στο **φωτοβολταϊκό φαινόμενο**. Ανακαλύφθηκε αρχικά από τον Γάλλο φυσικό **Alexandre - Edmond Becquerel** το 1839. Το επόμενο σημαντικό βήμα έγινε το 1876 όταν ο Adams και ο φοιτητής του Day παρατήρησαν ότι ένα σημαντικό ρεύμα παραγόταν από το σελήνιο όταν αυτό ήταν εκτεθειμένο στο φως. Κατόπιν το 1918, ο Πολωνός **Czochralski** πρόσθεσε στην έρευνα τη μέθοδο παραγωγής **ημιαγωγού μονο-κρυσταλλικού πυριτίου (Si)**, η οποία χρησιμοποιείται βελτιωμένη ακόμα και σήμερα. Μια ακόμα σημαντική ανακάλυψη έγινε το 1949 όταν οι **Mott** και **Schottky** ανέπτυξαν την θεωρία της διόδου σταθερής κατάστασης. Την ίδια εποχή η κβαντική θεωρία έδωσε μεγάλη ώθηση και οι πρώτες πρακτικές εφαρμογές ήρθαν στο φως.

Το 1954 έγινε το πρώτο ηλιακό στοιχείο στα εργαστήρια της Bell με απόδοση να φθάνει στο 6%. Τέσσερα χρόνια αργότερα το 1958 τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πήραν θέση στα διαστημικά προγράμματα και τοποθετήθηκε το πρώτο αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα σε δορυφόρο στον Vanguard I. Το σύστημα αυτό λειτούργησε με επιτυχία για 8 χρόνια. Από το χρονικό αυτό σημείο τα φωτοβολταϊκά κάνουν την εμφάνισή τους σε διάφορες εφαρμογές, αλλά λόγω του υψηλού κόστους η εφαρμογή τους ήταν ακόμη περιορισμένη. Κυριότερος πελάτης την εποχή αυτή ήταν η NASA.

Ενδεικτικά, η τιμή των Φ/Β ανά εγκατεστημένο Watt το 1956 ξεκινάει από 500 $/Watt. Το 1970, κατεβαίνει στα 100 $/Watt. Το 1973, μετά από βελτιώσεις που έγιναν στον τρόπο παραγωγής ήταν στα 50 $/Watt. Η πορεία εξέλιξης είναι συνεχής και 6 μεγάλες εταιρείες έχουν εισέλθει στο χώρο κατασκευής των φωτοβολταϊκών. Έτσι, το 2004 η τιμή των διασυνδεδεμένων συστημάτων είναι στα 6,5 ευρώ/Wp. Σήμερα έχουν γίνει μεγάλες οικονομίες κλίμακας με πολύ καλές αποδόσεις στα κρυσταλλικά κυρίως υλικά που χρησιμοποιούνται, και αρκετές χώρες με πρωτοπόρες την Γερμανία και την Ιαπωνία έχουν επενδύσει μεγάλα ποσά με σκοπό τη μεγαλύτερη εκμετάλλευση της ηλιακής ακτινοβολίας και απεξάρτηση από τα συμβατικά καύσιμα.

Η **αρχή λειτουργίας του φωτοβολταϊκού φαινομένου** και η λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος στηρίζονται στις βασικές ιδιότητες των ημιαγώγιμων υλικών σε ατομικό επίπεδο. Είναι γνωστό από την θεωρία των ενεργειακών ζωνών της φυσικής ότι όταν πολλά άτομα ενώνονται για να σχηματίσουν ένα στερεό σώμα (σε κρυσταλλική ή σε άμορφη μορφή) τότε οι ενεργειακές στάθμες των ατόμων διευρύνονται και σχηματίζονται έτσι φλοιοί ή **ενεργειακές ζώνες.** Κάθε ζώνη έχει καθορισμένη επιτρεπτή ενεργειακή κατάσταση (είναι κβαντισμένη). Η αγωγιμότητα κάθε υλικού εξαρτάται άμεσα από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια της τελευταίας εξωτερικής ζώνης (**ζώνη αγωγιμότητας**). Η αμέσως χαμηλότερη ζώνη είναι πλήρως κατειλημμένη και λέγεται **ζώνη σθένους.** Η απόσταση ανάμεσα στις δύο ζώνες ονομάζεται **ενεργειακό χάσμα** ή διάκενο και είναι απαγορευμένη ενεργειακή περιοχή. Συμβολίζεται με $\mathbf{E_g}$ και μετριέται σε μονάδες **eV (ηλεκτρονιοβολτ).** Εκφράζει δε την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για την διέγερση ενός ηλεκτρονίου ώστε να μεταπηδήσει στην ζώνη αγωγιμότητας. Το Σχήμα 4.3 παριστάνει τις ζώνες σθένους και αγωγιμότητας για τις τρεις κατηγορίες υλικών (αγωγοί, μονωτές και ημιαγωγοί).[25]

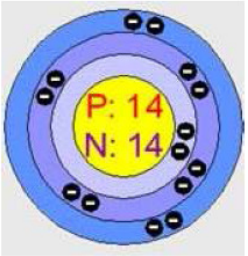


Σχήμα 4.3: Διάγραμμα ζωνών και ενεργειακά χάσματα στα υλικά

Στους **αγωγούς** (μέταλλα) η τελευταία ζώνη δεν είναι πλήρως κατειλημμένη και τα ηλεκτρόνια αυτά με πολύ μικρή διέγερση (με θερμοκρασία ή ηλεκτρικό πεδίο) μπορούν να κινηθούν και το υλικό έτσι γίνεται **αγώγιμο**. Στους **μονωτές** και στους **ημιαγωγούς** η ζώνη σθένους είναι πλήρως κατειλημμένη και στη ζώνη αγωγιμότητας δεν υπάρχουν ηλεκτρόνια. Οι ζώνες εδώ χωρίζονται μεταξύ τους με ενεργειακό χάσμα το οποίο στους **μονωτές** είναι μεγαλύτερο των **5 eV** (δύσκολο να το περάσουν τα ηλεκτρόνια ακόμη και με διέγερση). Στους **ημιαγωγούς** είναι της τάξης του **1 έως 2 eV**. Το χάσμα αυτό είναι δυνατόν να το περάσουν τα ηλεκτρόνια με μια διέγερση (θερμική ή με πρόσπτωση φωτονίων) όπως θα δούμε στη συνέχεια. Αυτό είναι και το σημαντικό στοιχείο του κάθε ημιαγωγού και σε **αυτό στηρίζεται η**

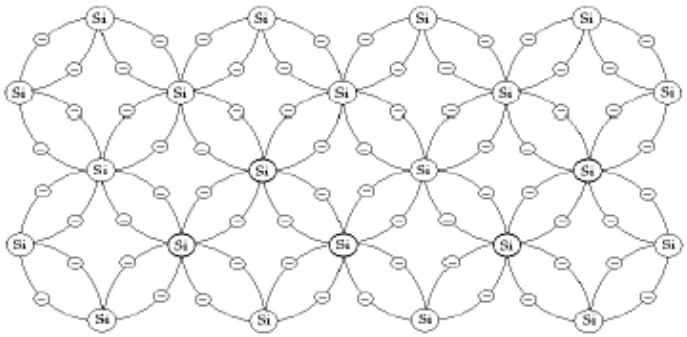
ευρεία εφαρμογή τους στα ηλιακά στοιχεία και γενικά στις ηλεκτρονικές διατάξεις.[28]

Οι συνηθέστεροι ημιαγωγοί είναι το πυρίτιο (Si) και το γερμάνιο (Ge). Το πυρίτιο είναι το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο από το 1950 για την κατασκευή ημιαγωγών και σήμερα σε αυτό στηρίζεται το 90% της παραγωγής ηλιακών κυψελών. Είναι το δεύτερο στοιχείο σε αφθονία μετά το οξυγόνο (21% έναντι 30% του οξυγόνου). Έχει ατομικό αριθμό 14 και στην εξωτερική του στοιβάδα έχει 4 ηλεκτρόνια (Σχήμα 4.4). Οι ιδιότητες του δεν μεταβάλλονται μέχρι και τους 120°C, χαρακτηριστικό που του επιτρέπει να χρησιμοποιείται στα φωτοβολταϊκά στοιχεία σε δύσκολες περιβαλλοντικές συνθήκες.[27]



Σχήμα 4.4: Σχηματική αναπαράσταση του ατόμου του Πυριτίου (Si)

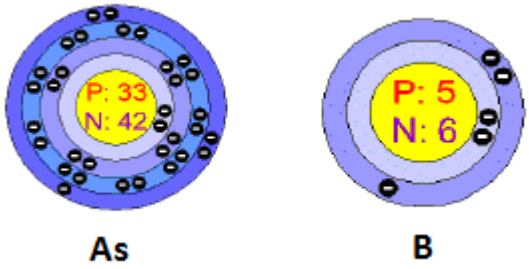
Όλα τα άτομα που έχουν λιγότερα η περισσότερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα σθένους (είναι "γενικά" συμπληρωμένη με 8 e) προσπαθούν να ανταλλάξουν ηλεκτρόνια με άλλα διπλανά άτομα ή να μοιρασθούν κάποια, με σκοπό τελικά να αποκτήσουν συμπληρωμένη εξωτερική στοιβάδα σθένους. Έτσι, όταν πολλά άτομα πυριτίου ενωθούν και σχηματίσουν ένα κρυσταλλικό πλέγμα, τότε το κάθε άτομο συνεισφέρει τα 4 ηλεκτρόνια σθένους σε αντίστοιχο γειτονικό άτομο και δημιουργούνται ομοιοπολικοί δεσμοί (Σχήμα 4.5). Στην κρυσταλλική του αυτή μορφή το πυρίτιο είναι σταθερό. Δεν έχει ανάγκη ούτε να προσθέσει ούτε να διώξει ηλεκτρόνια, κάτι που ουσιαστικά του δίνει ηλεκτρικά χαρακτηριστικά πολύ κοντά σε αυτά ενός μονωτή, αφού δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια για τη δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος στο εσωτερικό του. Στην κατάσταση αυτή λέμε ότι το πυρίτιο ή γενικά ο ημιαγωγός είναι **καθαρός ή ενδογενής.**



Σχήμα 4.5: Απεικόνιση πλέγματος κρυστάλλου Πυριτίου

Τις ημιαγωγικές ιδιότητες του, το Πυρίτιο, τις αποκτά με τεχνικό τρόπο. Αυτό γίνεται με την πρόσμειξη με άλλα στοιχεία τα οποία είτε έχουν ένα ηλεκτρόνιο περισσότερο είτε ένα λιγότερο, στη στοιβάδα σθένους τους. Προσμείξεις με **πεντασθενή** στοιχεία (όπως το αρσενικό (As), το αντιμόνιο (Sb), ο φώσφορος (P)

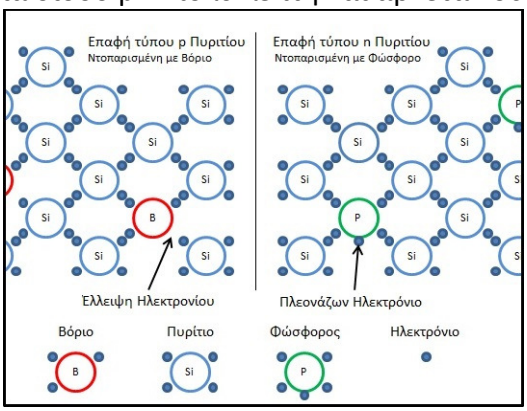
κ.α.) δημιουργούν ημιαγωγούς **τύπου n** οι οποίοι χαρακτηρίζονται από πληθώρα ηλεκτρονίων (Σχήμα 4.6). Τα άτομα του αρσενικού με τα 5 ηλεκτρόνια σθένους δημιουργούν ομοιοπολικούς δεσμούς με τα γειτονικά άτομα του Si και για κάθε άτομο As περισσεύει ένα ηλεκτρόνιο το οποίο συγκρατείται πολύ χαλαρά από τον πυρήνα του. Με ενέργεια μεγαλύτερη από την $\mathbf{E_g}$ του πυριτίου είναι δυνατόν να αποσπασθούν και να συμβάλουν στην αγωγιμότητα του υλικού. Επομένως, το As συμπεριφέρεται σαν **δότης ηλεκτρονίων** και αυτό μετατρέπεται έτσι σε κατιόν.



Σχήμα 4.6: Σχηματική αναπαράσταση του ατόμου του Αρσενικού και του ατόμου του Βορίου

Αντίστοιχο φαινόμενο συμβαίνει με προσμείξεις με **τρισθενή** στοιχεία (όπως το γάλλιο (Ga), το βόριο (B) κ.α.) που δημιουργούν ημιαγωγούς **τύπου p** οι οποίοι χαρακτηρίζονται από πληθώρα οπών, χαρακτηρίζονται δηλαδή από έλλειψη ηλεκτρονίων (Σχήμα 4.6). Εδώ αντίστοιχα το τρισθενές στοιχείο λειτουργεί σαν **αποδέκτης ηλεκτρονίων** και γίνεται έτσι ανιόν. Η διαδικασία αυτή πρόσμειξης πεντασθενών και τρισθενών στοιχείων με το Πυρίτιο για την παραγωγή επαφών τύπου p και τύπου n ονομάζεται **ντοπάρισμα** (doping).[31]

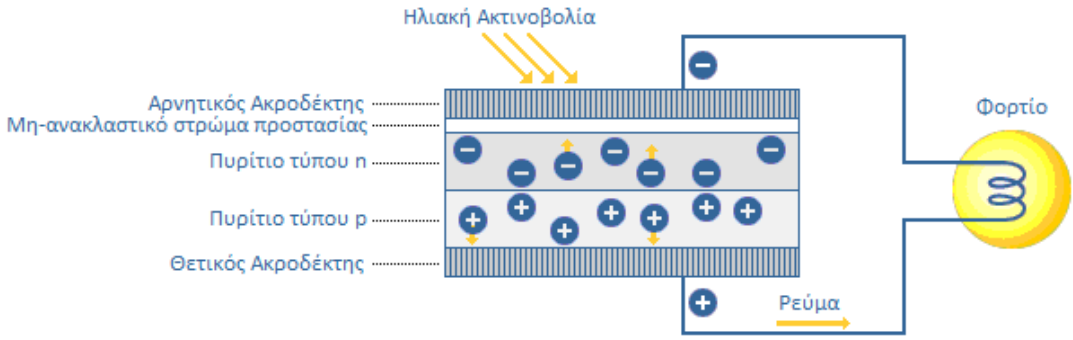
Εάν τώρα έρθουν σε επαφή δύο κομμάτια πυριτίου τύπου n και τύπου p (Σχήμα 4.7), το ένα απέναντι από το άλλο, δημιουργείται μια **δίοδος p-n**. Αμέσως μετά την ένωση ένα μέρος από τις οπές του ημιαγωγού τύπου p διαχέεται προς τον ημιαγωγό τύπου n και αντίστροφα ηλεκτρόνια από τον n διαχέονται προς τον p. Η ανάμειξη αυτή των φορέων κοντά στην διαχωριστική επιφάνεια ανατρέπει την κατάσταση ισορροπίας σε μια στενή περιοχή γύρω από την επαφή (της τάξης λίγων μm) στην οποία δεν υπάρχουν ούτε ηλεκτρόνια ούτε οπές. Η περιοχή αυτή ονομάζεται **περιοχή απογύμνωσης ή εξάντλησης**. Το φωτοβολταϊκό στοιχείο στηρίζεται σε μια τέτοια δίοδο p-n πολύ λεπτή και αρκετά νοθευμένη.



Σχήμα 4.7: Σχηματική αναπαράσταση ντοπαρισμένου Πυριτίου με Βόριο και Φώσφορο

Όταν γίνει πρόσπτωση φωτονίων στο φωτοβολταϊκό στοιχείο, ένα ποσοστό αυτών διαπερνά την επιφάνεια, ένα ποσοστό ανακλάται και ένα ποσοστό απορροφάται από την επαφή p-n. Στην περίπτωση που η ενέργεια του φωτονίου είναι μεγαλύτερη ή ίση με το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού, τότε τα φωτόνια απορροφούνται από τα ηλεκτρόνια του πυριτίου. Η ενέργεια των φωτονίων διεγείρει τα ηλεκτρόνια σε μια υψηλότερη ενεργειακή στάθμη, οπότε αυτά κινούνται αφήνοντας πίσω τους μία οπή. Από την πλευρά, λοιπόν, του ημιαγωγού **n** θα ελευθερωθούν ηλεκτρόνια, τα πλεονάζοντα, τα οποία με άλματα θα κινηθούν προς την πλευρά του τύπου p, για να καταλάβουν τα ηλεκτρονικά κενά, δηλαδή τις οπές. Με αυτόν τον τρόπο θα διαπιστώσουμε στην περιοχή **p** συσσώρευση ηλεκτρονίων, δηλαδή αρνητικών φορτίων και στην περιοχή του **n** συσσώρευση οπών, δηλαδή θετικών φορτίων.

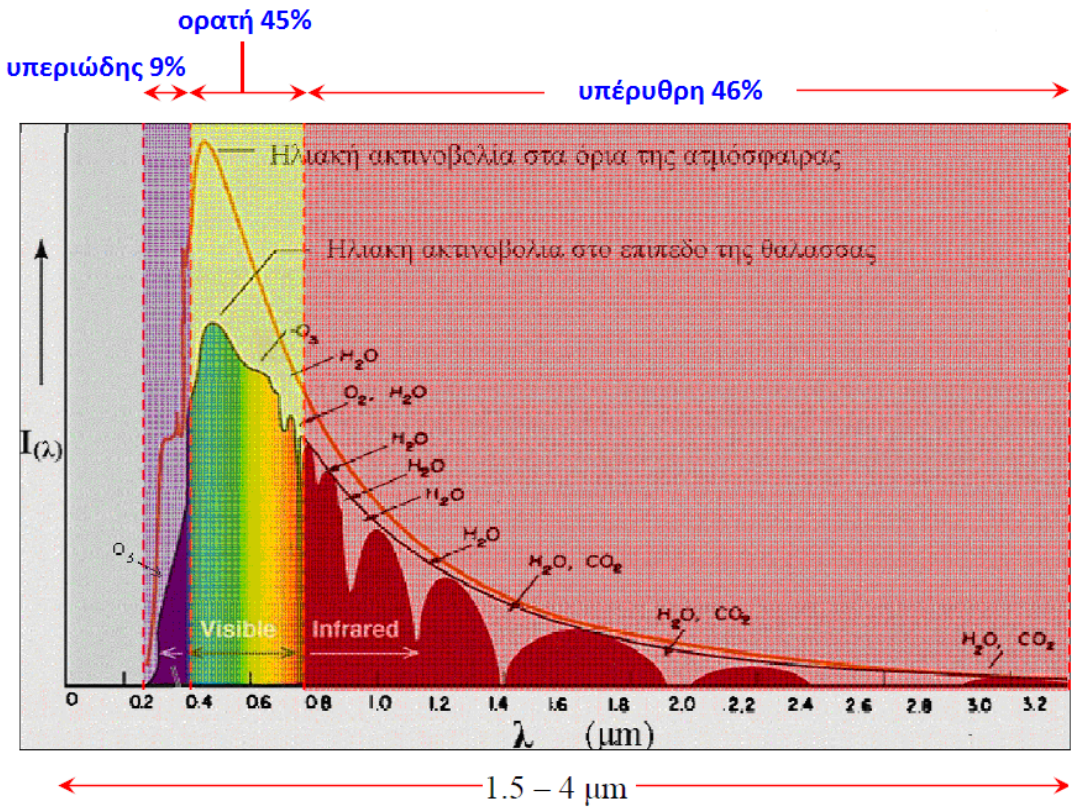
Λόγω αυτού του φαινομένου θα δημιουργηθεί μεταξύ των δύο νοθευμένων επιφανειών ηλεκτρική τάση. Η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται κυμαίνεται μεταξύ 0.5 - 1,0 Volt και η ένταση μέχρι 40 mA. Το ηλεκτρικό ρεύμα θα κυκλοφορήσει τότε αν τα άκρα των δύο τύπων ημιαγωγών συνδεθούν σε ένα φορτίο (Σχήμα 4.8).



Σχήμα 4.8: Αναπαράσταση αρχής παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος σε φωτοβολταϊκό στοιχείο

Ολοκληρώνοντας την ανάλυση του φωτοβολταϊκού φαινομένου πρέπει να αναφέρουμε ότι το κάθε ημιαγωγό υλικό αντιδρά σε διαφορετικά μήκη κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας. Κάποια υλικά αντιδρούν σε ευρύτερα φάσματα ακτινοβολίας από κάποια άλλα. Έτσι ανάλογα με το υλικό που χρησιμοποιούμε μπορούμε να εκμεταλλευτούμε μόνο εκείνο το φάσμα της ακτινοβολίας που αντιδρά με το συγκεκριμένο υλικό. Το ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται σε σχέση με την προσπίπτουσα ηλιακή ενέργεια είναι αυτό που επηρεάζει την τιμή του συντελεστή απόδοσης του υλικού.

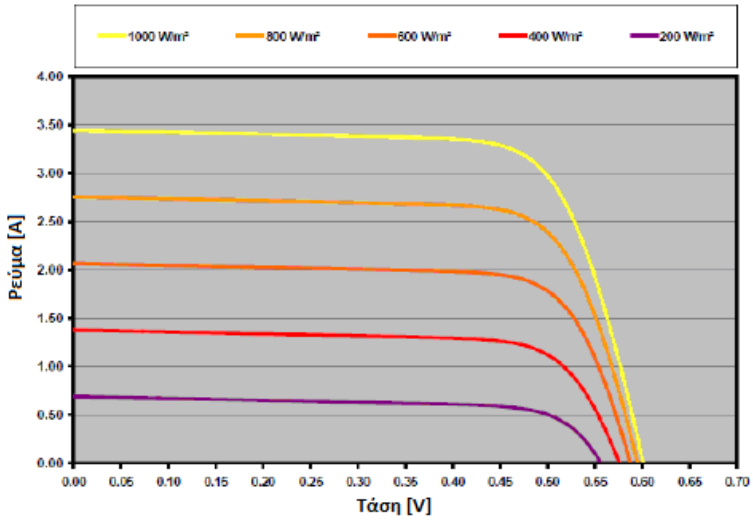
Οι δύο βασικοί παράγοντες για την απόδοση ενός φωτοβολταϊκού υλικού είναι το ενεργειακό χάσμα του υλικού και ο συντελεστής μετατροπής. Στο Σχήμα 4.9 φαίνεται η φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας όπως αυτή φθάνει στο επίπεδο της γης αλλά και στα όρια της ατμόσφαιρας. Σύμφωνα λοιπόν με τη χρήση των φωτοβολταϊκών κυψελών ανάλογα αν είναι για επίγεια ή διαστημική μπορούμε να επιλέξουμε το κατάλληλο στοιχείο για την απορρόφηση συγκεκριμένου φάσματος ακτινοβολίας.



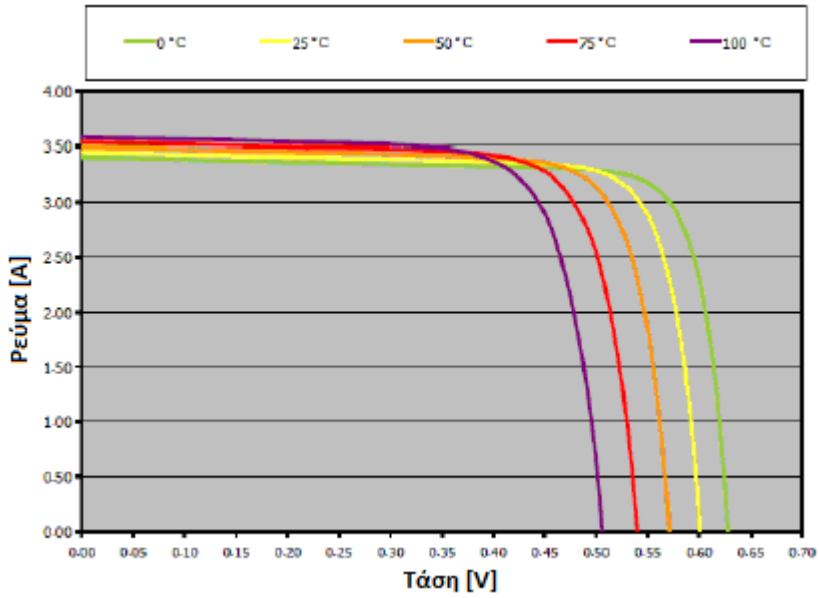
Σχήμα 4.9: Φασματική κατανομή της ηλιακής ενέργειας

4.4 Παράγοντες επίδρασης της απόδοσης των φωτοβολταϊκών κυψελών

Τόσο η **ένταση της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο στοιχείο**, όσο και η **θερμοκρασία** του επηρεάζουν καθοριστικά την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας. Στα σχήματα 4.10 και 4.11 αναπαριστάται αυτή η εξάρτηση.



Σχήμα 4.10: Επίδραση της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας στην απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου



Σχήμα 4.11: Επίδραση της θερμοκρασίας στην απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου

Από τα διαγράμματα συμπεραίνουμε ότι:

α) Υπάρχει αναλογική σχέση ανάμεσα στην προσπίπτουσα στο στοιχείο ηλιακή ακτινοβολία και στη ισχύ του στοιχείου (μεταβάλλεται το ρεύμα επομένως και ισχύς)

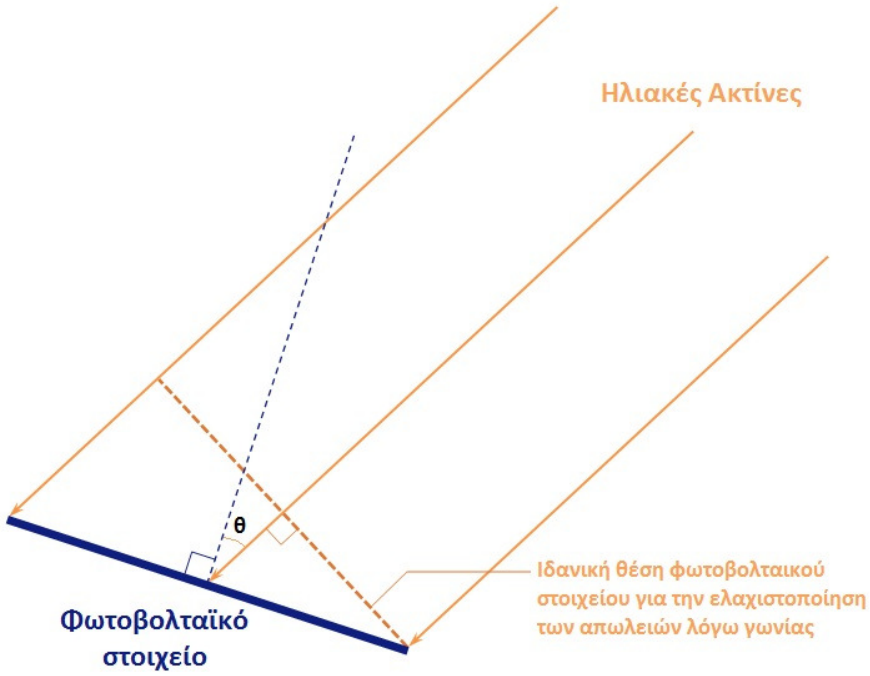
β) Η ισχύς του ηλιακού στοιχείου μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας (μειώνεται η παραγόμενη τάση με τη θερμοκρασία)

Τα παραπάνω στοιχεία και ιδιαίτερα η επίδραση της θερμοκρασίας, πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη στη σχεδίαση ενός ηλιακού συστήματος. Συνήθως, οι κατασκευαστές δίνουν ένα συντελεστή διόρθωσης ($σ_θ$) της απόδοσης του ηλιακού στοιχείου. Ο συντελεστής αυτός μειώνει συνήθως την απόδοση του ηλιακού στοιχείου κατά 0,005 ανά βαθμό αύξησης της θερμοκρασίας.[30]

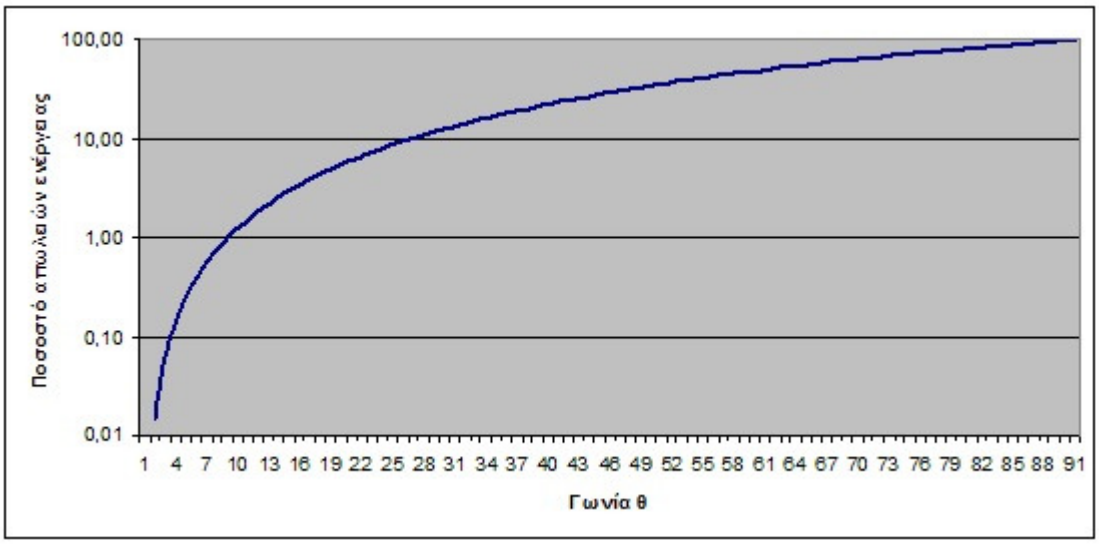
Η **ρύπανση της περιοχής** και ιδιαίτερα των αστικών περιοχών πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη στη σχεδίαση ενός φωτοβολταϊκού συστήματος, διότι η σκόνη, τα έντομα και γενικά οι ρύποι επηρεάζουν την απόδοση των στοιχείων. Θα πρέπει για το σκοπό αυτό να προβλέπονται περιοδικές συντηρήσεις με καθαρισμό και πλύσιμο αυτών. Στη συνολική απόδοση του συστήματος λαμβάνεται και για τον παράγοντα αυτόν ένας συντελεστής διόρθωσης, ανάλογα με το μέρος που είναι εγκατεστημένα τα στοιχεία. [26]

Τέλος, άλλος ένας καθοριστικός παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου είναι η **γωνία πρόσπτωσης του φωτός** πάνω στην κυψέλη. Η γωνία λοιπόν επηρεάζει από ένα βαθμό και μετά το ποσοστό πρόσληψης της ηλιακής ακτινοβολίας από τις κυψέλες. Το ποσοστό των απωλειών το βρίσκουμε από τον τύπο $Power_L=100*(1-cosθ)$. Όπου θ η γωνία που σχηματίζεται από την νοητή κάθετη ως προς την επιφάνεια της κυψέλης και τη γωνία με την οποία προσπίπτει η ακτινοβολία στην κυψέλη. Στο σχήμα 4.12 φαίνεται ο υπολογισμός της γωνίας θ και στο σχήμα 4.13 το ποσοστό των απωλειών σε ενέργεια. Παρατηρούμε ότι μέχρι και τις 10° το ποσοστό παραμένει ανεκτό (περίπου 1%) και αυτός είναι και

ο λόγος που οι τοποθετήσεις έχουν ένα επιτρεπτό περιθώριο σφάλματος $\pm 5^o$ από την ιδανική θέση η οποία εξαρτάται από το γεωγραφικό πλάτος.



Σχήμα 4.12: Αναπαράσταση υπολογισμού της γωνίας ϑ



Σχήμα 4.13: Ποσοστό απωλειών σε ενέργεια ως προς την γωνία ϑ

4.5 Ορισμοί

Οι βασικοί ορισμοί που χρησιμοποιούνται για την κατανόηση και την αξιολόγηση των φωτοβολταϊκών στοιχείων είναι:

Φωτοβολταϊκή κυψέλη (pv cell/solar cell) είναι η βασική στοιχειώδης μονάδα στην οποία γίνεται η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Στην ουσία είναι μια ημιαγωγική επαφή p-n αποτελούμενη από δύο ημιαγωγούς.

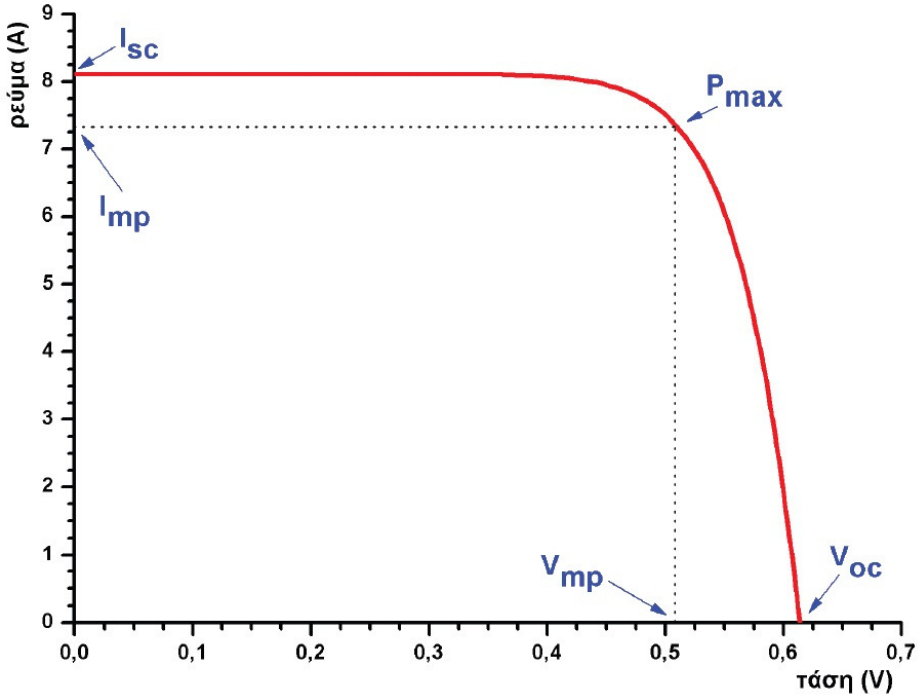
Φωτοβολταϊκό πλαίσιο (pv panel/solar panel) είναι η διάταξη η οποία αποτελείται από πολλές φωτοβολταϊκές κυψέλες, κατάλληλα συνδεδεμένες μεταξύ τους σε σειρά ή/και παράλληλα. Ο σκοπός είναι η κατασκευή ενός πλαισίου το οποίο θα προστατεύει τις κυψέλες από τα καιρικά φαινόμενα και την επαφή και θα εξασφαλίζει μεγάλο χρόνο ζωής και λειτουργίας.

Ένταση ρεύματος βραχυκύκλωσης (I_{SC}) [A] ονομάζεται η ένταση που μπορεί να προσφέρει μια φωτοβολταϊκό κυψέλη στην περίπτωση που βραχυκυκλωθούν τα δύο άκρα των επαφών της. Είναι ανάλογο τις προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Τάση ανοιχτού κυκλώματος (V_{OC}) [V] ονομάζεται η τάση που μετράται όταν η φωτοβολταϊκή κυψέλη δεν έχει φορτίο στα άκρα της. Η τιμή της έχει λογαριθμική σχέση με την προσπίπτουσα ακτινοβολία και αναλογική σχέση με τη θερμοκρασία.

Μέγιστη Ένταση ρεύματος (I_{mp}) [A] και **Μέγιστη Τάση (V_{mp}) [V]** είναι οι δύο τιμές που αντιπροσωπεύουν το σημείο στο οποίο μεγιστοποιείται η αποδιδόμενη ισχύς της φωτοβολταϊκής κυψέλης.

Μέγιστη Ισχύς (P_{max}) [W] είναι η μέγιστη ισχύς που μπορεί να αποδώσει μια φωτοβολταϊκή κυψέλη και η οποία υπολογίζεται ως εξής: $P_{\max} = V_{mp} \cdot I_{mp}$. Η μονάδα μέτρησης είναι το βάτ (Watt). Στο σχήμα 4.14 φαίνεται γραφικά το σημείο της μέγιστης ισχύος σε μια κυψέλη.



Σχήμα 4.14: Χαρακτηριστική καμπύλη μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης η οποία οφείλει τη μορφή της στην επαφή p-n και παρουσιάζει ομοιότητες με αυτήν μιας διόδου[31]

Ισχύς Αιχμής (W_p) [W]. Προσδιορίζει την μέγιστη ισχύ που δίνει το συγκεκριμένο πλαίσιο υπό καθορισμένες συνθήκες θερμοκρασίας στοιχείου 25°C και ακτινοβολίας 1000 W/m^2. Όταν λέμε δηλαδή ότι ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο παράγει 20 W_p σημαίνει ότι παράγει 20 W με συνθήκες 1000 W/m^2 και θερμοκρασία στοιχείου 25°C.

Βαθμός Πλήρωσης (fill factor) είναι ο λόγος που δείχνει την πραγματική μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ ως προς την ισχύ που βρίσκεται από το γινόμενο της τάσης ανοιχτού κυκλώματος και της έντασης ρεύματος βραχυκύκλωσης. Ο βαθμός αυτός είναι μια βασική παράμετρος για την αξιολόγηση των φωτοβολταϊκών κυψελών. Οι εμπορικές κυψέλες πρώτης κατηγορίας έχουν συνήθως Βαθμό πλήρωσης άνω του 0,7. Ο βαθμός πλήρωσης υπολογίζεται από τον τύπο: $\eta_{FF} = \frac{P_{\max}}{V_{OC} \cdot I_{SC}}$.

Βαθμός Απόδοσης (power efficiency) είναι ο βαθμός που δείχνει την δυνατότητα μετατροπής της ισχύος που δέχεται μια φωτοβολταϊκή κυψέλη σε ωφέλιμη ισχύ που προσφέρεται σαν ηλεκτρικό ρεύμα. Ο βαθμός αυτός υπολογίζεται από τον τύπο: $\eta = \frac{V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot \eta_{FF}}{P_S} \Rightarrow \eta = \frac{P_{\max}}{P_S}$.

4.6 Φωτοβολταϊκές Κυψέλες

Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες φωτοβολταϊκών κυψελών με βάση το υλικό και τον τρόπο με το οποίο κατασκευάζονται και είναι:

α) Κρυσταλλικές Φωτοβολταϊκές κυψέλες, οι οποίες κατασκευάζονται από υλικά σε κρυσταλλική μορφή και έχουν πάχος κυψέλης περίπου 300μm

β) Φωτοβολταϊκές κυψέλες λεπτού υμενίου, οι οποίες κατασκευάζονται από υλικά σε μορφή λεπτού υμενίου και έχουν πάχος κυψέλης περίπου 0,1μm

4.6.1 Κρυσταλλικές Φωτοβολταϊκές Κυψέλες

4.6.1.1 Κρυσταλλικές Φωτοβολταϊκές Κυψέλες Πολυ-κρυσταλλικού Πυριτίου (poly-Si)

Ο τύπος αυτός φωτοβολταϊκής κυψέλης είναι αναμφισβήτητα ο πιο διαδεδομένος και ο πιο γνωστός. Ο βαθμός απόδοσης του κυμαίνεται στο **15 έως 20,5%**. Ο κυριότερος λόγος επιτυχίας του είναι η χαμηλή του τιμή, η οποία οφείλεται στο μικρό κόστος κατασκευής. Επίσης, η ύπαρξη τεχνογνωσίας στον τομέα της επεξεργασίας του πυριτίου πρόσφερε τη δυνατότητα για γρήγορη εξέλιξη στον τρόπο παραγωγής. Το πολυ-κρυσταλλικό πυρίτιο κατασκευάζεται σε μορφή τετράγωνης ράβδου, η οποία χρησιμοποιείται από τα εργοστάσια κατασκευής κυψελών. Στα εργοστάσια η ράβδος κόβεται σε φέτες κατάλληλου πάχους περίπου στα 0,2 χιλιοστά και κατόπιν συγκολλείται με το υπόστρωμα για την κατασκευή της

επαφής p-n. Κατόπιν τοποθετούνται οι αγώγιμες ράγες οι οποίες είναι υπεύθυνες για τη μεταφορά της ενέργειας που θα παράγεται. Τέλος, μπαίνουν κάποια διάφανα προστατευτικά στρώματα.[32]

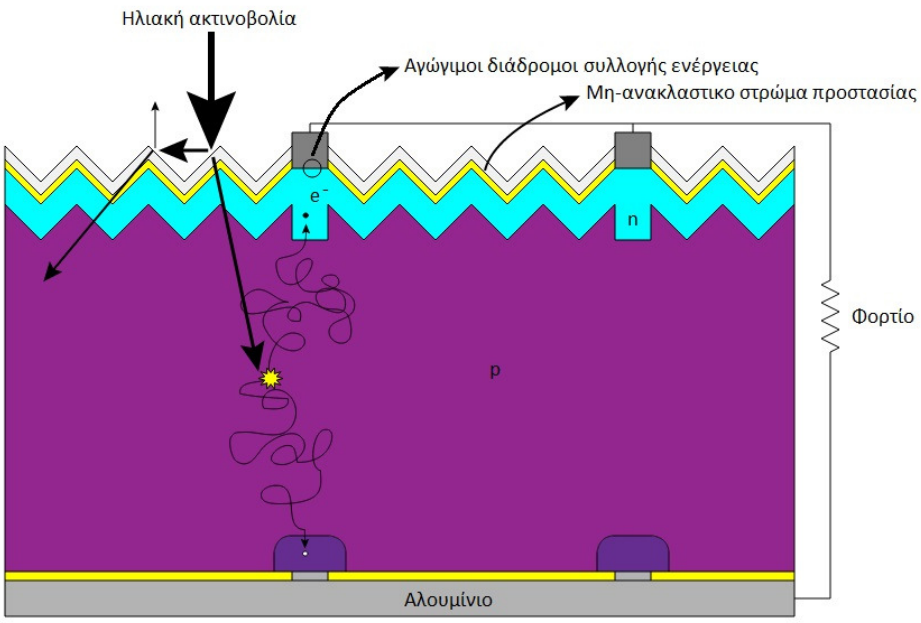
4.6.1.2 Κρυσταλλικές Φωτοβολταϊκές Κυψέλες Μονο-κρυσταλλικού Πυριτίου (c-Si)

Ο τύπος αυτός φωτοβολταϊκής κυψέλης είναι ο δεύτερος σε πωλήσεις μετά από του πολύ-κρυσταλλικού Πυριτίου. Ο βαθμός απόδοσης τους κυμαίνεται στο **13,5 έως 25%** . Ο τρόπος κατασκευής των κυψελών είναι ο ίδιος με αυτών των πολύ-κρυσταλλικών. Η ουσιώδης διαφορά βρίσκεται στο στάδιο της κατασκευής της ράβδου από μονο-κρυσταλλικό πυρίτιο. Οι δύο κυριότεροι τρόποι κατασκευής της ράβδου είναι η **μέθοδος Czochralski** και η **τεχνική Bridgman–Stockbarger**. Δυστυχώς και οι δύο αυτοί τρόποι θεωρούνται πιο ακριβοί και κατά συνέπεια οι κυψέλες που παράγονται είναι πιο ακριβές. Μια άλλη διαφορά των κυψελών αυτών είναι ότι κατά κύριο λόγο είναι στρογγυλές, αφού η ράβδος από την οποία κόβονται οι φέτες του μονο-κρυσταλλικού πυριτίου έρχεται σε στρογγυλό συνήθως σχήμα. Αυτό έχει ως συνέπεια την μικρότερη κάλυψη επιφάνειας κατά τη χρήση τους σε φωτοβολταϊκά πλαίσια, αφού το στρογγυλό τους σχήμα αφήνει κενά ανάμεσα στις κυψέλες.[32]

4.6.1.3 Κρυσταλλικές Φωτοβολταϊκές Κυψέλες Ταινίας Πυριτίου και Μονο-όμοιου Πολυ-κρυσταλλικού Πυριτίου(ribbon-Si/monolike poly-Si)

Οι κυψέλες Ταινίας Πυριτίου είναι ένας τύπος κυψελών πολυ-κρυσταλλικού πυριτίου ο οποίος διαφέρει στον τρόπο κατασκευής. Στην περίπτωση αυτή οι κυψέλες κατασκευάζονται με διαδοχικές επιστρώσεις λιωμένου πυριτίου, με συνέπεια την κατασκευή φετών πολυ-κρυσταλλικού πυριτίου χωρίς να χρειάζεται να κοπούν από ράβδο. Αυτό έχει ως συνέπεια την ελαχιστοποίηση των απωλειών σε πυρίτιο σε σχέση με τους άλλους δύο τύπους, και σαν συνέπεια διατηρούν ένα χαμηλό κόστος κατασκευής για την εταιρία που το παράγει. Ο βαθμός απόδοσης τους κυμαίνεται στο **14 έως 18%** .[27]

Ο δεύτερος τύπος κυψέλης του μονο-όμοιου πολυ-κρυσταλλικού Πυριτίου είναι μια καινούργια τεχνολογία που αναπτύχθηκε το 2000 και ξεκίνησε την εμπορική της διάθεση το 2009. Ο βαθμός απόδοσης τους κυμαίνεται στο **17 έως 25%** . Ο τρόπος κατασκευής των ράβδων πυριτίου των κυψελών αυτών είναι αυτός ο οποίος οφείλεται για το βελτιωμένο βαθμό απόδοσης. Ο τρόπος παραγωγής της ράβδου είναι ίδιος με αυτών των πολυ-κρυσταλλικών κυψελών με τη διαφορά να βρίσκεται στην φάση της παραγωγής της ράβδου. Την στιγμή που γίνεται η στερεοποίηση εγχέεται κρύσταλλος πυριτίου ο οποίος προκαλεί τη δημιουργία πολύ μεγάλης περιοχής μονο-κρυσταλλικού πυριτίου και πολύ μικρές περιοχές πολυ-κρυσταλλικού πυριτίου και αυτό κυρίως στα άκρα της ράβδου. Αυτό έχει σαν συνέπεια την κατασκευή τετράγωνων κυψελών πολύ μεγάλης απόδοσης με κόστος κατασκευής πολυ-κρυσταλλικών κυψελών, αλλά με αποδόσεις μονο-κρυσταλλικών.



Σχήμα 4.15: Γραφική αναπαράσταση κρυσταλλικής φωτοβολταϊκής κυψέλης Πυριτίου

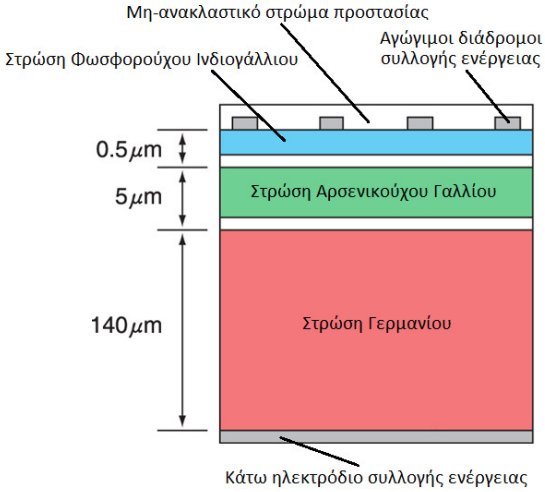
4.6.2 Φωτοβολταϊκές Κυψέλες Λεπτού Υμενίου

4.6.2.1 Φωτοβολταϊκές Κυψέλες Λεπτού Υμενίου Πολυ-επαφικού Αρσενικούχου Γαλλίου (Tf-GaAs/2J-GaAs/3J-GaAs/4J+-GaAs)

Ο πιο σημαντικός τύπος κυψελών λεπτού υμενίου είναι αυτές που είναι κατασκευασμένες από Αρσενικούχο Γάλλιο. Υπάρχουν διάφοροι τύποι κυψελών λεπτών υμενίων με βασικό στοιχείο το Αρσενικούχο Γάλλιο και ο τρόπος με τον οποίο κατηγοριοποιούνται είναι με βάση τις στρώσεις επαφών p-n που δημιουργούνται από την κατασκευή τους. Ο βασικός τύπος που έχει και την μεγαλύτερη εμπορική χρήση είναι ο μονής επαφής. Ο βαθμός απόδοσής τους κυμαίνεται από **24,5 έως 29%** . Ο τρόπος κατασκευής των κυψελών λεπτού υμενίου έχει το πλεονέκτημα της πολύ μικρής χρήσης υλικών για την κατασκευή των κυψελών. Το μόνο μειονέκτημα που παρουσιάζεται για την εμπορική τους επικράτηση, είναι η χρήση Αρσενικού το όποιο είναι τοξικό για το περιβάλλον και ότι ο τύπος αυτός κυψέλης είναι πολύ ακριβός για χρήση σε μεγάλης κλίμακας παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Η τοξικότητα πάντως του Αρσενικού είναι δύσκολο να επηρεάσει το περιβάλλον αφού η χρήση του σε πλαίσια εξασφαλίζει την απομόνωση του.

Τα τελευταία χρόνια έχει προχωρήσει πολύ η έρευνα και η χρήση κυψελών Αρσενικούχου Γαλλίου με περισσότερες της μιας επαφών. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε διαστημικές εφαρμογές πλέον, έχοντας ξεπεράσει τις αποδόσεις των κρυσταλλικών κυψελών, καθώς επίσης και σε πειραματικά ηλιακά οχήματα. Για τη δημιουργία των επαφών p-n ανάμεσα στο Αρσενικούχο Γάλλιο χρησιμοποιούνται και άλλα ημιαγωγικά υλικά όπως είναι το Γερμάνιο (Ge) και το Διφωσφορούχο

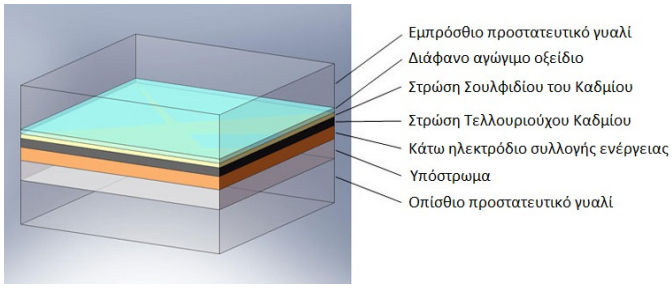
Ινδιογάλλιο ($InGaP_2$), τα οποία σε συνδυασμό με τη στρώση του Αρσενικούχου Γάλλιου σχηματίζουν περισσότερες της μιας επαφής p-n. Ενδεικτικά, οι αποδόσεις που έχουν επιτευχθεί με δύο επαφές είναι από **27 έως 32%**, με τρεις επαφές από **32 έως 37%** και με τέσσερις και πάνω επαφές από **33 έως 38%**.[27][32]



Σχήμα 4.16: Γραφική αναπαράσταση φωτοβολταϊκής κυψέλης λεπτού υμενίου Αρσενικούχου Γαλλίου τριπλής επαφής p-n

4.6.2.2 Φωτοβολταϊκές Κυψέλες Λεπτού Υμενίου Τελλουριούχου Καδμίου (CdTe)

Αυτού του τύπου οι φωτοβολταϊκές κυψέλες είναι ο τρίτος τύπος μετά τις μονο-κρυσταλλικές και πολυ-κρυσταλλικές κυψέλες πυριτίου σε πωλήσεις. Χρησιμοποιούν σαν επαφή n σουλφίδιο του Καδμίου και σαν επαφή p Τελλουριούχο Κάδμιο. Ο βαθμός απόδοσης τους κυμαίνεται από **8,5 έως 19%** . Ο λόγος που το ποσοστό τους κυμαίνεται σε τόσο μεγάλο εύρος είναι επειδή η έρευνα για την τεχνολογία των κυψελών αυτών ξεκίνησε την δεκαετία του 50 και οι πρώτες εμπορικές κυψέλες διατέθηκαν στα εμπόριο την δεκαετία του 60 με πολύ χαμηλή απόδοση αλλά σε μικρές μονάδες παραγωγής. Παρ' όλ' αυτά την τελευταία δεκαετία υπάρχει σημαντική εξέλιξη στο συγκεκριμένο τύπο κυψελών με αποτέλεσμα την παραγωγή κυψελών με υψηλό βαθμό απόδοσης τα τελευταία χρόνια από κάποιες εταιρίες του χώρου. Τέλος, η χρήση του καδμίου το οποίο θεωρείται καρκινογόνο προσθέτει ένα βαθμό επικινδυνότητας στη φάση της κατασκευής για να διασφαλιστεί η απομόνωση των κυψελών από το περιβάλλον.[27][32]

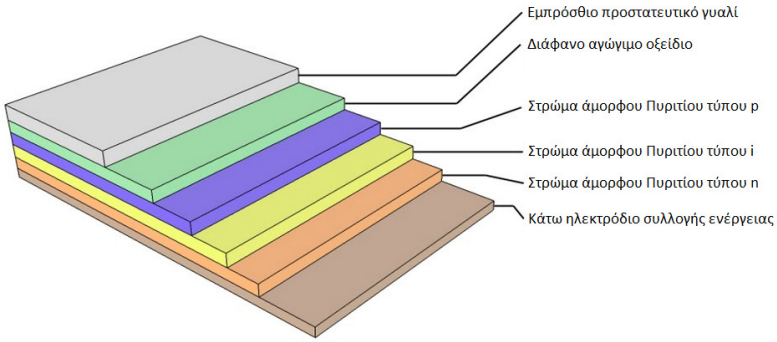


Σχήμα 4.17: Γραφική αναπαράσταση φωτοβολταϊκής κυψέλης λεπτού υμενίου Τελλουριούχου Καδμίου

4.6.2.3 Φωτοβολταϊκές Κυψέλες Λεπτού Υμενίου Άμορφου / Νανο-κρυσταλλικού Πυριτίου (a-Si/nc-Si)

Ο τύπος αυτός κυψέλης χρησιμοποιεί Πυρίτιο για την κατασκευή της επαφής p-n αλλά σε μορφή άμορφου λεπτού υμενίου και όχι κρυσταλλική. Ειδικότερα, η επαφή που σχηματίζεται είναι της μορφής **p-i-n** με ένα ενδιάμεσο ημιαγωγικό επίπεδο, το οποίο δεν είναι θετικό η αρνητικά ντοπαρισμένο. Ο βαθμός απόδοσης τους κυμαίνεται στο **7 έως 13,5%**. Η χρήση λοιπόν αυτής της μορφής πυριτίου επιτυγχάνει μικρότερο βαθμό απόδοσης με τη διαφορά ότι η μέθοδος κατασκευής αυτού του τύπου κυψελών είναι λιγότερο ακριβή. Οι λόγοι είναι η χρήση πολύ μικρότερης ποσότητας Πυριτίου και η χαμηλότερη θερμοκρασία επεξεργασίας του Πυριτίου για την κατασκευή των κυψελών. Δυστυχώς, η μικρή απόδοσή του το έχει οδηγήσει στην τέταρτη θέση των πωλήσεων παγκοσμίως πίσω από τις κυψέλες Τελλουριούχου Καδμίου. Τα τελευταία χρόνια, η έρευνα πάνω σε αυτόν τον τύπο κυψέλης έχει δώσει ελπίδες ότι θα υπάρξει βελτίωση του βαθμού απόδοσης.[27][32]

Ένας άλλος εμπορικά πλέον διαθέσιμος τύπος κυψέλης είναι αυτός ο οποίος χρησιμοποιεί δύο στρώσεις λεπτού υμενίου, με την πάνω στρώση να είναι άμορφου Πυριτίου και την κάτω στρώση να είναι νανο-κρυσταλλικού Πυριτίου. Ο βαθμός απόδοσής τους κυμαίνεται από **8 έως 14%** . Αυτός ο τύπος κυψέλης εκμεταλλεύεται καλύτερα την προσπίπτουσα ακτινοβολία καθώς εκμεταλλεύεται την καλή δυνατότητα του άμορφου Πυριτίου να απορροφά την ορατή ακτινοβολία και την δυνατότητα του νανο-κρυσταλλικού Πυριτίου να απορροφά την υπεριώδη ακτινοβολία. Αυτό έχει σαν συνέπεια τη βελτίωση της απόδοσης των παραγόμενων κυψελών.[29]

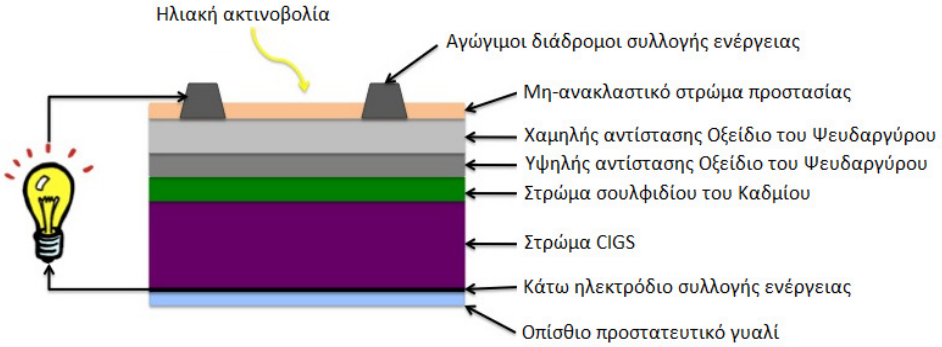


Σχήμα 4.18: Γραφική αναπαράσταση φωτοβολταϊκής κυψέλης λεπτού υμενίου Άμορφου Πυριτίου

4.6.2.4 Φωτοβολταϊκές Κυψέλες Λεπτού Υμενίου Δυσεληνιούχου Χαλκοινδιογάλλιου (CIGS)

Ο τρίτος σε σειρά τύπος κυψελών λεπτού υμενίου και ο πέμπτος στη συνολική κατάταξη σε πωλήσεις είναι αυτός που έχει σαν επαφή p στην κυψέλη Δυσεληνιούχο Χαλκοινδιογάλλιο ($CuIn_{1-x}Ga_xSe_2$ / CIGS). Σαν επαφή n συνήθως έχει Σουλφίδιο του Καδμίου. Ο βαθμός απόδοσής τους κυμαίνεται από **12 έως 20,5%**. Το μεγάλο πλεονέκτημα που κατάφερε να επιτύχει αυτή η τεχνολογία είναι ότι σε

αντίθεση με τα άλλα δύο είδη κυψελών λεπτού υμενίου, τα οποία είναι και πιο διαδεδομένα, έφτασε σε αποδόσεις τις κρυσταλλικές κυψέλες Πυριτίου. Αυτό έγινε κάνοντας χρήση τεχνολογίας παραγωγής με χρήση χαμηλών θερμοκρασιών επεξεργασίας των υλικών. Αυτό που φρενάρει ακόμα τη μαζική παραγωγή και πώληση αυτού του τύπου κυψελών είναι η αυξημένη τους τιμή και ο περιορισμένος ρυθμός παραγωγής τους.[27][32]



Σχήμα 4.19: Γραφική αναπαράσταση φωτοβολταϊκής κυψέλης λεπτού υμενίου Σεληνιούχου Χαλκοινδιογάλλιου

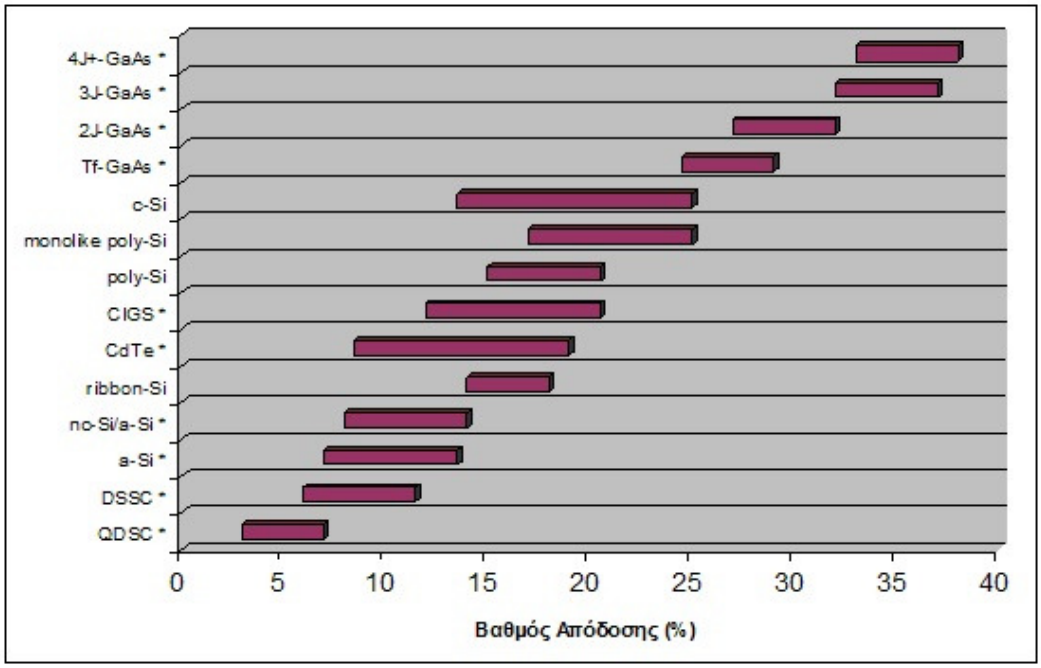
4.6.2.5 Φωτοβολταϊκές Κυψέλες Λεπτού Υμενίου Φωτο-ευαίσθητου Μελανιού (DSSC) και Κβαντισμένων Νανο-σωματιδίων (QDSC)

Οι δύο αυτοί τύποι φωτοβολταϊκών κυψελών λεπτού υμενίου είναι οι δύο πιο ανερχόμενοι τεχνολογικά την τελευταία δεκαετία. Εμπορικά είναι διαθέσιμοι αλλά σε πολύ περιορισμένες ποσότητες και κυρίως μόνο σαν δείγματα. Ο πρώτος τύπος του Φωτο-ευαίσθητου Μελανιού (Dye-Sensitized Solar Cell / DSSC) χρησιμοποιεί σαν άνοδο μια μεμβράνη που αποτελείται από φωτο-ευαίσθητο υλικό και έναν ηλεκτρολύτη σαν κάθοδο. Επειδή ακόμα είναι σε εξέλιξη η έρευνα, έχουν χρησιμοποιηθεί πολλά διαφορετικά υλικά για την άνοδο και την κάθοδο. Ο βαθμός απόδοσής τους κυμαίνεται από **6 έως 11,5%** . Το στοιχείο στο οποίο στοχεύει για να μπορέσει να πετύχει σαν τεχνολογία, παρ' όλο τον μικρό βαθμό απόδοσής τους, είναι η χαμηλή τους τιμή και η δυνατότητα για εύκολη ενσωμάτωση στα παράθυρα κτιρίων με σκοπό και την παροχή σκιάς, αλλά και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

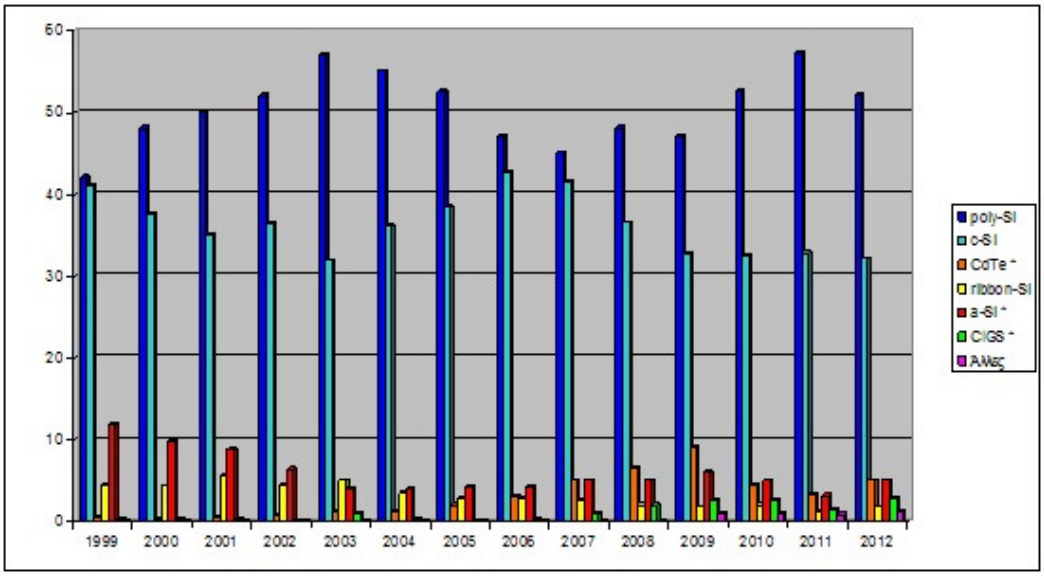
Ο δεύτερος τύπος κυψελών, ο οποίος είναι στο στάδιο της εξέλιξης για χρήση τα επόμενα χρόνια, είναι των Κβαντισμένων Νανο-σωματιδίων (Quantum Dot Solar Cells / QDSC). Ο βαθμός απόδοσης τους κυμαίνεται στο **3 έως 7%** . Ο τύπος αυτός κυψελών χρησιμοποιεί την ίδια αρχή λειτουργίας με αυτή των κυψελών φωτο-ευαίσθητου μελανιού, με την διαφορά ότι χρησιμοποιεί κρυστάλλους τόσο μικρούς σαν άνοδο οι οποίοι διαμορφώνουν Κβαντισμένα Νανο-σωματίδια, αντί οργανικών ή οργανομεταλλικών υλικών ανόδου. Το αποτέλεσμα είναι ότι μπορεί πολύ εύκολα να διαμορφωθεί το φωτεινό εύρος ζώνης στο οποίο θα αποδίδουν καλύτερα αλλάζοντας απλά το μέγεθος του σωματιδίου από το οποίο αποτελούνται τα κβαντισμένα νανο-σωματίδια.[29]

4.7 Συμπεράσματα χρήσης Φωτοβολταϊκών Κυψελών

Στο σχήμα 4.20 παρατηρούμε το βαθμό απόδοσης κάθε τεχνολογίας που αναλύσαμε στο κεφάλαιο αυτό. Όπως φαίνεται από το σχήμα, οι τύποι φωτοβολταϊκών κυψελών με αστερίσκο είναι αυτοί που είναι τύπου λεπτού υμενίου, ενώ όλοι οι υπόλοιποι είναι κρυσταλλικοί. Από το σχήμα παρατηρούμε ότι ο μόνος τύπος κυψέλης λεπτού υμενίου που ξεπερνάει τα μονο-κρυσταλλικά Πυριτίου είναι ο πολυ-επαφικός Αρσενικούχου Γαλλίου, ο οποίος λόγω τιμής είναι ασύμφορος οικονομικά ακόμα για εμπορική χρήση.



Σχήμα 4.20: Αναπαράσταση του εύρους του βαθμού απόδοσης των φωτοβολταϊκών κυψελών ανά τεχνολογία



Σχήμα 3.21: Αναπαράσταση του μεριδίου της αγοράς σε ποσοστό ανά τεχνολογία από το 1999 έως το 2012

Το δεύτερο γράφημα που θα μελετηθεί είναι αυτό του σχήματος 4.21, το οποίο αναπαριστά το ποσοστό κατοχής αγοράς ανά τεχνολογία κάθε χρόνο. Παρατηρείται ότι κυριαρχούν οι πολυ-κρυσταλλικές και οι μονο-κρυσταλλικές κυψέλες πυριτίου και μάλιστα η πορεία του ποσοστού μεταξύ τους σε μερίδιο αγοράς είναι αντιστρόφως ανάλογη, χωρίς όμως η μονο-κρυσταλλική τεχνολογία να ξεπερνάει ποτέ την πολυ-κρυσταλλική. Η τρίτη κατά σειρά σε πωλήσεις τεχνολογία είναι αυτή του άμορφου Πυριτίου τουλάχιστον μέχρι το 2007, όπου την τρίτη θέση παίρνει για πρώτη φορά ένας τύπος κυψέλης ο οποίος δεν έχει σαν βάση το Πυρίτιο, η κυψέλη λεπτού υμενίου Τελλουριούχου Καδμίου. Επίσης, από το 2008 και μετά εμφανίζεται και η κυψέλη λεπτού υμενίου τύπου CIGS με ποσοστό μεγαλύτερο του 2% σε μερίδιο αγοράς.

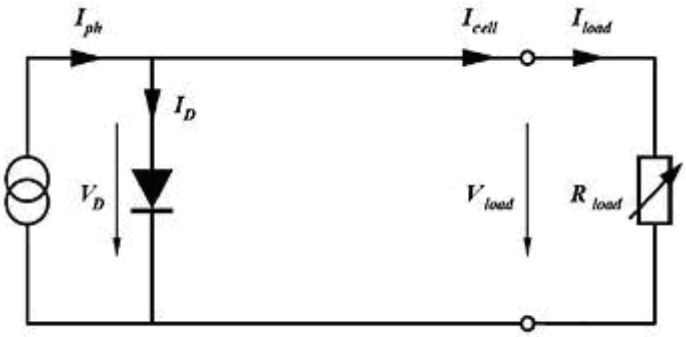
Κεφάλαιο 5^{ο} : Σύστημα Ανίχνευσης Μέγιστου Σημείου Ισχύος για Φωτοβολταϊκά και Σύστημα Διαχείρισης της Κίνησης του Ηλεκτρικού Κινητήρα

Στα τρία προηγούμενα κεφάλαια αναπτύχθηκαν σε βάθος οι διαφορετικοί τύποι φωτοβολταϊκών κυψελών, ηλεκτρικών συσσωρευτών και ηλεκτρικών κινητήρων. Τα τρία αυτά βασικά στοιχεία από τα οποία αποτελείται ένα ηλεκτροηλιακό όχημα πρέπει να διασυνδεθούν μεταξύ τους, για να δημιουργηθεί ένα ολοκληρωμένο σύστημα. Επομένως ανάμεσα στις φωτοβολταϊκές κυψέλες και στους ηλεκτρικούς συσσωρευτές είναι σύνηθες, για κάποιες τεχνολογίες μπαταριών είναι και απαραίτητο, να παρεμβάλλεται **ένα σύστημα φόρτισης το οποίο θα μεγιστοποιεί την παρεχόμενη ενέργεια από τις φωτοβολταϊκές κυψέλες** και θα εξασφαλίζει την σωστή διαδικασία φόρτισης, ανάλογα και με την τεχνολογία του συσσωρευτή.

Σε αντιστοιχία ανάμεσα στους ηλεκτρικούς συσσωρευτές και στους ηλεκτρικούς κινητήρες παρεμβάλλεται σύστημα, το οποίο εξασφαλίζει τη συνεχή και ακριβή **διαχείριση της δύναμης του ηλεκτρικού κινητήρα**, ελαχιστοποιώντας τις απώλειες της παρεχόμενης ενέργειας από τους ηλεκτρικούς συσσωρευτές.

5.1 Σύστημα Ανίχνευσης Μέγιστου Σημείου Ισχύος Φωτοβολταϊκών (Maximum Power Point Tracker/MPPT)

Οι **ηλιακές κυψέλες**, όπως είναι γνωστό από το προηγούμενο κεφάλαιο, μετατρέπουν την ανεξάντλητη ηλιακή ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική. Ένα απλουστευμένο ισοδύναμο κύκλωμα ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου απεικονίζεται στο Σχήμα 5.1.



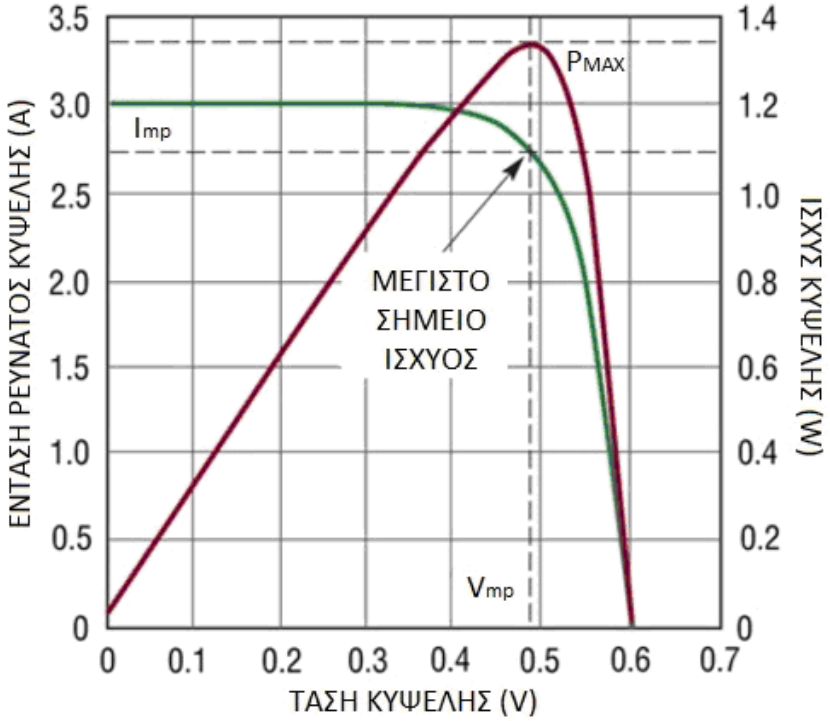
Σχήμα 5.1 Ισοδύναμο κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου

Το ρεύμα κάθε φωτοβολταϊκής κυψέλης δίνεται από τη σχέση:

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_O\left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1\right)$$

Όπου:
I_{cell}= το ρεύμα στην έξοδο του φωτοβολταϊκού στοιχείου
I_{ph}= το φωτόρευμα (ανάλογο της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας)
I_D= το ρεύμα διαρροής της διόδου
q= φορτίο ηλεκτρονίου
V= τάση στα άκρα της διόδου
k= σταθερά του Boltzmann
T= θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin

Από τη σχέση αυτή φαίνεται ότι η παραγωγή ρεύματος από το στοιχειώδες φωτοβολταϊκό στοιχείο, είναι άμεσα εξαρτημένη από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και από τη θερμοκρασία.

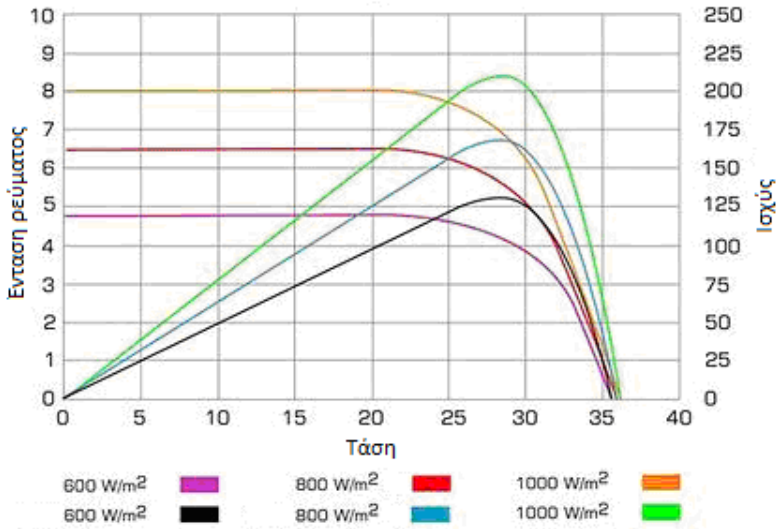


Σχήμα 5.2: Χαρακτηριστική καμπύλη έντασης ρεύματος-τάσης και καμπύλη ισχύος για φωτοβολταϊκή κυψέλη

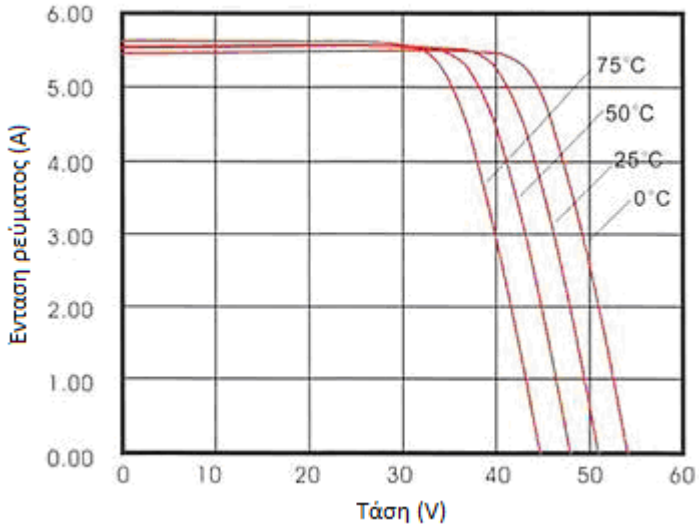
Στο Σχήμα 5.2 γίνεται αναπαράσταση της χαρακτηριστικής καμπύλης μιας φωτοβολταϊκής κυψέλης και της παραγόμενης ισχύος στο αντίστοιχο εύρος. Η καμπύλη αυτή είναι σε ένα τυχαίο σημείο λειτουργίας της κυψέλης και όχι απαραίτητα στο μέγιστο (Ιδανική Θερμοκρασία και Ένταση Ακτινοβολίας). Σε αυτή λοιπόν την κατάσταση το σημείο στο οποίο μεγιστοποιείται η ισχύς είναι το P_{MAX}. Από αυτό το σημείο αν ακολουθήσουμε την κάθετη με τον οριζόντιο άξονα ευθεία θα συναντήσουμε ένα σημείο της χαρακτηριστικής καμπύλης έντασης ρεύματος-τάσης. Αυτό είναι **το σημείο μέγιστης ισχύος** που μπορεί να προσφέρει η φωτοβολταϊκή κυψέλη κάτω από τις συνθήκες στις οποίες βρίσκεται την στιγμή αυτή.

Στο σχήμα 5.3 φαίνεται πως μετατοπίζεται το σημείο μέγιστης ισχύος και το παραγόμενο ρεύμα όταν μεταβάλλεται η ένταση της προσπίπτουσας στο ηλιακό

στοιχείο ακτινοβολίας. Ανάλογη μεταβολή θα υπάρχει και με τη μεταβολή της θερμοκρασίας του στοιχείου στην ισχύ και στην τάση (Σχήμα 5.4).



Σχήμα 5.3: Μεταβολή του σημείου μέγιστης ισχύος MPP με μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας σε θερμοκρασία 25°C

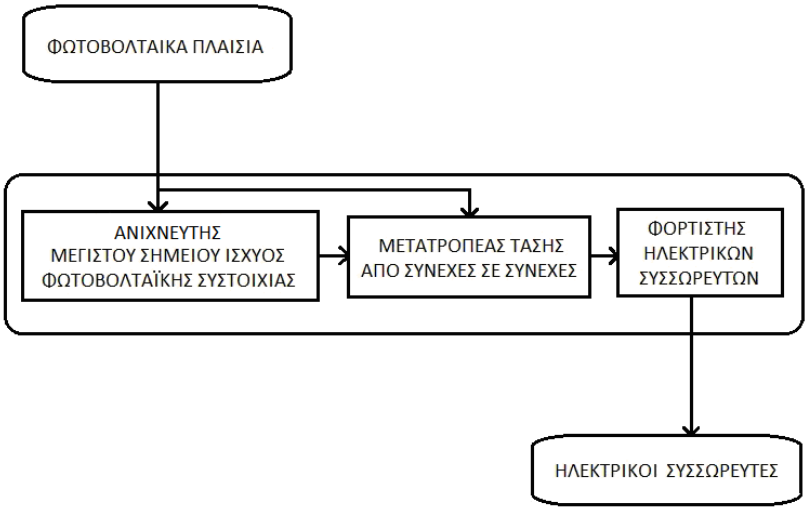


Σχήμα 5.4: Μεταβολή του σημείου μέγιστης ισχύος MPP με μεταβολές της θερμοκρασίας λειτουργίας

Από τα παραπάνω φαίνεται ότι το σημείο μέγιστης ισχύος (MPP) αλλάζει κάθε φορά λόγω μεταβολής της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας. Θα πρέπει λοιπόν, αν θέλουμε να παίρνουμε τη μέγιστη δυνατή ισχύ, να παρακολουθούμε με κάποιο τρόπο το σημείο μέγιστης ισχύος. Αυτό γίνεται με κατάλληλες διατάξεις οι οποίες παρεμβάλλονται μεταξύ των φωτοβολταϊκών συστημάτων και των πάσης μορφής καταναλώσεων AC, DC, μπαταρίες κλπ. Οι διατάξεις αυτές ονομάζονται **ανιχνευτές σημείου μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point Tracker/MPPT)**.

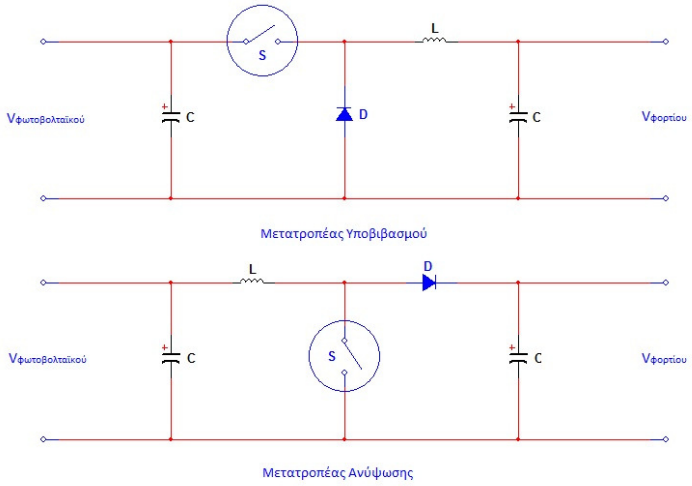
Ένα μπλοκ διάγραμμα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος στο οποίο παρεμβάλλεται η διάταξη Ανίχνευσης του σημείου μέγιστης ισχύος φαίνεται στο

Σχήμα 5.5. Σε αυτό το διάγραμμα είναι ενσωματωμένη και η διάταξη η οποία είναι υπεύθυνη για την φόρτιση των μπαταριών. Η τακτική της ενσωμάτωσης αυτής της διάταξης δεν είναι πάντα απαραίτητη, αλλά είναι αρκετά συνηθισμένη.



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα βασικών μερών Συστήματος Ανίχνευσης Μέγιστου Σημείου Ισχύος

Το σύστημα λοιπόν ανίχνευσης χρησιμοποιώντας έναν ή περισσότερους αλγόριθμους προσπαθεί να εντοπίσει αυτό το σημείο για να μεγιστοποιήσει την ισχύ που προσφέρεται από τις φωτοβολταϊκές κυψέλες. Τα βασικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται συνήθως από τους αλγορίθμους αυτούς, τους οποίους και θα αναλύσουμε στην ενότητα 5.1.1, είναι η τάση ανοικτού κυκλώματος και η ένταση ρεύματος βραχυκύκλωσης. Οι δύο αυτές τιμές εξαρτώνται από τις συνθήκες στις οποίες βρίσκεται η κυψέλη. Η βασική αρχή λειτουργίας του Ανιχνευτή είναι ότι βραχυκυκλώνει και ανοιχτοκυκλώνει την παροχή προς τα υπόλοιπα μέρη του συστήματος, ούτως ώστε να κρατάει τις φωτοβολταϊκές κυψέλες στο επιθυμητό σημείο λειτουργίας. Με αυτόν τον τρόπο παρέχεται μια έξοδος σταθερής τάσης και έντασης συνεχούς ρεύματος η οποία είναι ουσιαστικά η μέγιστη δυνατή παρεχόμενη ισχύς των κυψελών.



Σχήμα 5.6: Κυκλωματικά ισοδύναμα Μετατροπέων Ανύψωσης και Υποβιβασμού Τάσης Οδηγούμενα από Ανιχνευτή Μέγιστου Σημείου Ισχύος

Στο Σχήμα 5.6 γίνεται μια τυπική αναπαράσταση ενός κυκλώματος ρύθμισης της τάσης εισόδου από το φωτοβολταϊκό σύστημα. Αυτό που αναπαριστάται από τον διακόπτη S είναι ένα τρανζίστορ το οποίο το διαχειρίζεται άλλο κύκλωμα και αποφασίζει με χρήση διαμόρφωσης πλάτους παλμού το ρυθμό ανοιχτοκύκλωσης-βραχυκύκλωσης, με οδηγό τον Ανιχνευτή Μέγιστου Σημείου Ισχύος. Την έξοδο αυτήν την τροφοδοτούμε στο κατά περίπτωση φορτίο. Υπάρχουν δύο είδη μετατροπέων, οι ανύψωσης και οι υποβιβασμού της τάσης εισόδου, ανάλογα την περίπτωση. Η συνολική απόδοση των συστημάτων Ανίχνευσης και Μετατροπής μπορεί να επιτυγχάνει ποσοστό μέχρι και **99%** τις αρχικής ισχύος η οποία συλλέχθηκε από τις φωτοβολταϊκές κυψέλες.

5.1.1 Αλγόριθμοι Ανίχνευσης Μέγιστου Σημείου Ισχύος για Φωτοβολταϊκά

5.1.1.1 Αλγόριθμος Ανίχνευσης Μέγιστου Σημείου Ισχύος τύπου Σταθερής Τάσης (Constant Voltage)

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος διακρίνεται για την απλότητα της υλοποίησής του. Ο τρόπος με τον οποίο αποφασίζεται η τάση του μέγιστου σημείου ισχύος είναι καθορισμένος από πριν με μια τιμή η οποία συνήθως αλλάζει μόνο από την θερμοκρασία του πλαισίου. Με τον τρόπο αυτό λαμβάνεται υπόψη κατά κάποιο ποσοστό η προσπίπτουσα ακτινοβολία, καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται και μειώνεται ανάλογα με την ακτινοβολία. Αυτός ο αλγόριθμος έχει καλύτερα αποτελέσματα σε συνθήκες χαμηλής ηλιακής ακτινοβολίας και επίσης λόγω απλής υλοποίησης είναι και λιγότερο πιθανό να παρουσιάσει βλάβες. Η αποδοτικότητα του κυμαίνεται **μέχρι το 85%** ανάλογα την ένταση της ακτινοβολίας και της σωστής αρχικής ρύθμισης.[35]

5.1.1.2 Αλγόριθμος Ανίχνευσης Μέγιστου Σημείου Ισχύος τύπου Τάσης Ανοιχτού Κυκλώματος (Open Circuit Voltage)

Ο αλγόριθμος αυτός είναι ακόμα ένας με απλή υλοποίηση καθώς το μόνο δεδομένο από το οποίο εξαρτάται είναι η τάση ανοιχτού κυκλώματος. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η υλοποίηση είναι καταρχήν η επιλογή της τιμής μιας σταθεράς k, η οποία κυμαίνεται συνήθως ανάμεσα στο 0,7 και 0,8. Η επιλογή της τιμής εξαρτάται από την μέση ακτινοβολία της περιοχής λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος και την τεχνολογία των κυψελών που θα χρησιμοποιηθεί. Κατόπιν υλοποιείται κύκλωμα το οποίο ανά συγκεκριμένα διαστήματα διακόπτει την παροχή του φωτοβολταϊκού συστήματος προς το φορτίο και μετράει την τάση ανοικτού κυκλώματος του (V_{OC}). Κατόπιν, υπολογίζει την επιθυμητή τάση $V_{mp}=k*V_{OC}$ και χρησιμοποιεί την τάση αυτή σαν την επιθυμητή τάση του μέγιστου σημείου ισχύος. Το κύριο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η πολύ μικρή αλλαγή της τάσης ανοικτού κυκλώματος ως προς τις απότομες αλλαγές της έντασης της ακτινοβολίας. Αντίθετα, η απόδοσή του είναι πολύ καλή όσον αφορά στις αλλαγές στη

θερμοκρασία λειτουργίας. Η αποδοτικότητά του κυμαίνεται **μέχρι το 97%** ανάλογα με τη σωστή επιλογή του συντελεστή k και του ποσοστού απότομων αλλαγών στην ένταση της ακτινοβολίας.[35]

5.1.1.3 Αλγόριθμος Ανίχνευσης Μέγιστου Σημείου Ισχύος τύπου Έντασης Ρεύματος Κλειστού Κυκλώματος (Short Circuit Current)

Η μέθοδος αυτή ακολουθεί τη λογική του προηγούμενου αλγορίθμου με τη διαφορά ότι εδώ σαν δεδομένο παίρνει την ένταση του ρεύματος κλειστού κυκλώματος. Υπάρχει λοιπόν διάταξη η οποία ανά τακτά χρονικά διαστήματα αποκόπτει το φωτοβολταϊκό σύστημα από το φορτίο και βραχυκυκλώνει τα άκρα του για να πάρει μέτρηση της τιμής της έντασης του ρεύματος κλειστού κυκλώματος (I_{SC}). Κατόπιν, γίνεται ο υπολογισμός του επιθυμητού ρεύματος μέγιστης ισχύος από τον τύπο $I_{mp}=k*I_{SC}$. Σε αυτή την μέθοδο η τιμή του k κυμαίνεται σε τιμές από 0,78 έως 0,98. Η μέθοδος αυτή εξαλείφει το πρόβλημα που είχε η προηγούμενη μέθοδος, καθώς η ένταση του ρεύματος κλειστού κυκλώματος μεταβάλλεται αρκετά με την ένταση της ακτινοβολίας. Δυστυχώς, το μειονέκτημά του είναι ότι δεν επηρεάζεται αρκετά η ένταση από τη θερμοκρασία λειτουργίας. Η αποδοτικότητα της μεθόδου κυμαίνεται **μέχρι το 90%** ανάλογα με τη σωστή επιλογή του συντελεστή k και του ποσοστού απότομων αλλαγών στη θερμοκρασία λειτουργίας.[35]

5.1.1.4 Αλγόριθμοι Ανίχνευσης Μέγιστου Σημείου Ισχύος τύπου Μεταβολής και Παρατήρησης και Ανάβασης Πλαγιάς(Perturb and Observe/Hill Climbing)

Η μέθοδος **Μεταβολής και Παρατήρησης** είναι η πιο διαδεδομένη καθώς είναι και εύκολη στην υλοποίηση και έχει πολύ υψηλή απόδοση σε όλες τις συνθήκες. Από την διάταξη λαμβάνονται, ανά τακτά χρονικά διαστήματα, μετρήσεις της τάσης και της έντασης του ρεύματος, στο επίπεδο που είναι σταθεροποιημένα τη στιγμή εκείνη και υπολογίζεται η ισχύς. Στο αμέσως επόμενο χρονικό διάστημα διενεργείται αύξηση της τάσης και κατόπιν επαναλαμβάνονται οι μετρήσεις και οι υπολογισμοί. Αν η προηγούμενη μέτρηση ήταν μικρότερη, τότε ενημερώνεται η τάση αναφοράς της διάταξης με καινούργια τιμή και επαναλαμβάνεται η προηγούμενη διαδικασία, μέχρις ότου σε κάποιο βήμα η αύξηση της τάσης επιφέρει μείωση της ισχύος. Στην περίπτωση αυτή η διάταξη ελαττώνει την τάση αναφοράς, για να επανέλθει στο σημείο μέγιστης ισχύος. Η τάση αναφοράς, μαζί με την τάση ανά περίπτωση, χρησιμοποιούνται από έναν μικροελεγκτή για να ρυθμίζεται η τάση εξόδου του φωτοβολταϊκού συστήματος. Με τα συνεχή βήματα εξασφαλίζεται ότι θα υπάρχει συνεχής αναπροσαρμογή, ώστε να λειτουργεί το σύστημα πάντα στο σημείο μέγιστης ισχύος. Η αποδοτικότητα της μεθόδου κυμαίνεται **μέχρι το 99%** ανάλογα την σωστή επιλογή του χρόνου ανάμεσα στα διαστήματα ελέγχου και του βήματος της αύξησης ή της μείωσης αντίστοιχα της τάσης αναφοράς.[35][37]

Η μέθοδος της **Ανάβασης Πλαγιάς** ακολουθεί την ίδια λογική με την παραπάνω μέθοδο με τη μόνη διαφορά ότι δεν συγκρατεί κάποια τάση αναφοράς. Ο τρόπος λειτουργίας εξαρτάται από την ισχύ που υπολογίζεται ανά χρονικό

διάστημα, ώστε με βάση αυτήν να ξέρει αν θα αυξήσει την τάση που λειτουργεί το φωτοβολταϊκό σύστημα απευθείας ή θα τη μειώσει. Τα κύρια μειονεκτήματα αυτής της μεθόδου είναι η καθυστερημένη επίτευξη του μέγιστου σημείου ισχύος και πιο ασταθής τάση εξόδου προς χρήση. Η αποδοτικότητα της μεθόδου κυμαίνεται **μέχρι το 97%** ανάλογα με την σωστή επιλογή του χρόνου ανάμεσα στα διαστήματα ελέγχου και του βήματος της αύξησης ή της μείωσης αντίστοιχα της τάσης λειτουργίας του φωτοβολταϊκού.

5.1.1.5 Αλγόριθμος Ανίχνευσης Μέγιστου Σημείου Ισχύος τύπου Αυξητικής Αγωγιμότητας (Incremental Conductance)

Ο αλγόριθμος που θα αναλύσουμε χρησιμοποιείται και αυτός σε εμπορικές εφαρμογές, αλλά με μικρότερο ποσοστό από αυτούς της ενότητας 4.1.1.4. Ο αλγόριθμος αυτός ακολουθεί τον κανόνα που λέει ότι η κλίση της εφαπτομένης της καμπύλης ισχύος στο σημείο μέγιστης ισχύος θα είναι 0°, θα έχει θετική τιμή όταν είναι αριστερά του σημείου και αρνητική δεξιά του σημείου. Με αυτό σαν δεδομένο λύνουμε την παρακάτω εξίσωση και θα έχουμε:

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(IV)}{V} = I + V\frac{dI}{dV} = I + V\frac{\Delta I}{\Delta I}$$

Εφόσον η $\frac{dP}{dV}$ αντιπροσωπεύει την κλίση, οι τρεις καταστάσεις γράφονται ως εξής:

$$\frac{dP}{dV} = 0 \Leftrightarrow I + V\frac{\Delta I}{\Delta V} = 0 \Leftrightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{I}{V}$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \Leftrightarrow I + V\frac{\Delta I}{\Delta V} > 0 \Leftrightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{I}{V}$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \Leftrightarrow I + V\frac{\Delta I}{\Delta V} < 0 \Leftrightarrow \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{I}{V}$$

Έχοντας λοιπόν ανάγει την κλίση σε σύγκριση μεταξύ του λόγου της διαφοράς των μετρήσεων μεταξύ του τωρινού και του προηγούμενου χρονικού διαστήματος και του λόγου των τωρινών τιμών μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ελέγχους για να αποφασίσουμε την αύξηση ή τη μείωση ή τη διατήρηση της τάσης λειτουργίας του φωτοβολταϊκού συστήματος. Το μεγάλο της πλεονέκτημα σε σχέση με τις δύο προηγούμενες μεθόδους είναι ότι δεν παράγει αυξομειώσεις στην έξοδο στο βαθμό που το προκαλούν οι άλλες. Παρ' όλα αυτά, ενώ είναι πολύ σταθερή σε γρήγορες αλλαγές στην ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, δεν είναι σταθερή και προκαλεί αυξομειώσεις στην έξοδο σε συνθήκες απότομης αλλαγής καιρικών συνθηκών. Ένα άλλο μειονέκτημα είναι ότι επειδή οι συνθήκες που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι πολλές, χρειάζεται περισσότερος χρόνος υπολογισμού της διαμόρφωσης της τάσης εξόδου του φωτοβολταϊκού συστήματος, κατά συνέπεια τα διαστήματα του χρόνου στα οποία γίνεται η δειγματοληψία είναι μεγαλύτερα. Η

αποδοτικότητα της μεθόδου κυμαίνεται **μέχρι το 99%** ανάλογα με τη σωστή επιλογή του χρόνου ανάμεσα στα διαστήματα ελέγχου και του βήματος της αύξησης ή της μείωσης αντίστοιχα της τάσης λειτουργίας του φωτοβολταϊκού.[35][36]

5.1.1.6 Αλγόριθμοι Ανίχνευσης Μέγιστου Σημείου Ισχύος τύπου Ασαφούς Λογικής και Νευρωνικού Δικτύου (Fuzzy Logic/Neural Network)

Ο πρώτος αλγόριθμος, αυτός της **Ασαφούς Λογικής,** εφαρμόζει τη χρήση λόγων όπως είχε γίνει και στον αλγόριθμο της αυξητικής αγωγιμότητας. Δηλαδή στο σημείο που βρίσκεται ανά πάσα στιγμή η μέθοδος, ο λόγος της διαφοράς της τωρινής ισχύος με την αμέσως προηγούμενη, προς την διαφορά της τωρινής τάσης με την αμέσως προηγούμενη και η διαφορά του λόγου αυτού με το λόγο της προηγούμενης χρονικής περιόδου, καθορίζουν τη μεταβολή που θα γίνει στην τάση θετική ή αρνητική και με δύο διαφορετικά βήματα. Οι δύο τιμές που βρίσκονται κάθε χρονική στιγμή όπως περιγράφηκε είναι:

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)}$$
$$\Delta E(k) = E(k) - E(k-1)$$

Χρησιμοποιώντας τις τιμές των δύο αυτών τύπων καθορίζεται από τον παρακάτω πίνακα 5.1 το βήμα της μετατόπισης της τάσης που θα γίνει την επόμενη χρονική στιγμή. Θεωρούμε εδώ ότι υπάρχουν κάποια όρια μέσα στα οποία μπορούν να κινηθούν οι παραπάνω τιμές τα οποία όρια και οι αναπαραστάσεις τους θα είναι:

$$\text{ΑΜΓ} < -\beta, -\beta \le \text{ΑΜΚ} < -\alpha, -\alpha \le \text{ΜΗΔ} \le \alpha, \alpha < \text{ΘΜΚ} \le \beta, \text{ΘΜΓ} > \beta$$

ΔE(k) / E(k)	ΑΜΓ	ΑΜΚ	ΜΗΔ	ΘΜΚ	ΘΜΓ
ΑΜΓ	ΜΗΔ	ΜΗΔ	ΑΜΓ	ΑΜΓ	ΑΜΓ
ΑΜΚ	ΜΗΔ	ΜΗΔ	ΑΜΚ	ΑΜΚ	ΑΜΚ
ΜΗΔ	ΑΜΚ	ΜΗΔ	ΜΗΔ	ΜΗΔ	ΘΜΚ
ΘΜΚ	ΘΜΚ	ΘΜΚ	ΘΜΚ	ΜΗΔ	ΜΗΔ
ΘΜΓ	ΘΜΓ	ΘΜΓ	ΘΜΓ	ΜΗΔ	ΜΗΔ

Πίνακας 5.1: Πίνακας κανόνων αλλαγής τάσης Ασαφούς Λογικής

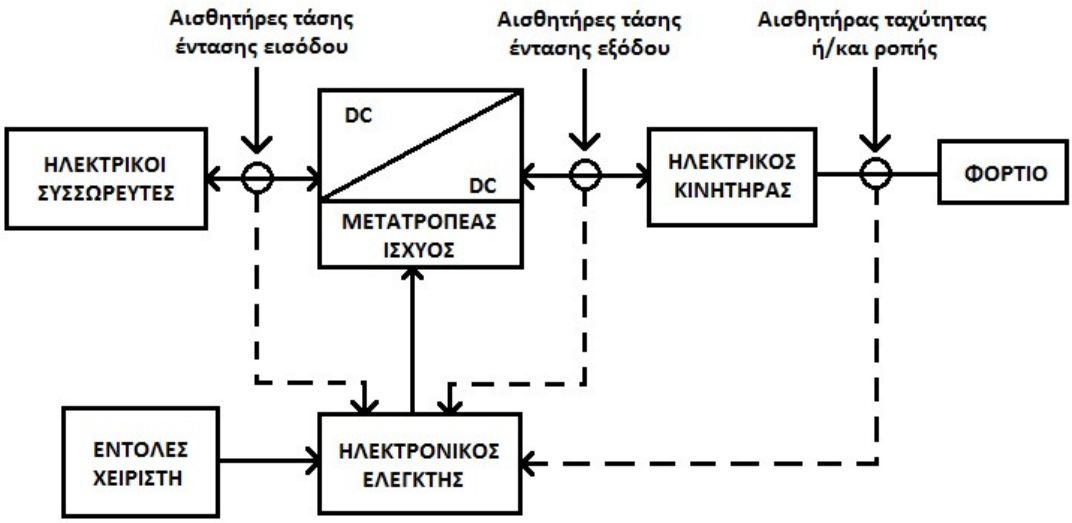
Χρησιμοποιώντας λοιπόν τον παραπάνω πίνακα αποφασίζεται ανά περίπτωση αν η διαφορά της τάσης σε σχέση με την προηγούμενη θα είναι βήματος –β ή –α ή 0 ή α ή β. Αν και αυτή η μέθοδος έχει αποδειχθεί ότι έχει πολύ μεγάλο

βαθμό απόδοσης, υπό συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες ατμοσφαιρικές και ακτινοβολίας, παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στη σωστή λειτουργία της η σωστή επιλογή του αριθμού των επιπέδων ασάφειας (στο παράδειγμά μας τα επίπεδα είναι 5) και η σωστή επιλογή των ορίων των επιπέδων (στο παράδειγμα τα –β, -α, α, β). Η αποδοτικότητα της μεθόδου κυμαίνεται **μέχρι το 99%** η οποία συμπίπτει με την αποδοτικότητα του αλγορίθμου Μεταβολής και Παρατήρησης, με κύρια διαφορά την πολύ γρηγορότερη απόκριση από αυτόν.[34]

Τέλος, ο δεύτερος αλγόριθμος αυτός του **Νευρωνικού Δικτύου** είναι η τελευταία εξέλιξη στους ανιχνευτές μέγιστης ισχύος. Ο αλγόριθμος αυτός έχει σαν χαρακτηριστικό τη χρήση μικρο-υπολογιστή, επειδή λαμβάνει υπόψη του πολλές πληροφορίες και κάνει πολύπλοκες πράξεις. Τα δύο πιο σημαντικά πλεονεκτήματα του αλγορίθμου αυτού είναι ότι λαμβάνει υπόψη του πολλές παραμέτρους λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων, τις οποίες τις ζυγίζει με χρήση τιμών βαρύτητας και συνεχή αποθήκευση των τιμών. Οι βαρύτητες αυτές διαμορφώνονται και αλλάζουν με βάση το ιστορικό, ώστε να παρέχεται συνεχώς βελτιωμένη απόδοση. Επίσης, η χρήση πολλών διαφορετικών δεδομένων εξασφαλίζει την υψηλή απόδοση και αξιοπιστία του συστήματος. Το μόνο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η πολυπλοκότητά της, καθώς βασίζεται στην καλή γνώση και εμπειρία του κατασκευαστή της διάταξης ελέγχου και του προγραμματιστή που θα αναλάβει την ρύθμιση. Η αποδοτικότητα της μεθόδου κυμαίνεται **μέχρι το 99%** και εξαρτάται από τη σωστή ρύθμιση και κατασκευή της διάταξης.[33]

5.2 Συστήματα Διαχείρισης της Κίνησης του Ηλεκτρικού Κινητήρα Διαμόρφωση πλάτους παλμών (PWM)

Το δεύτερο σημαντικό σύστημα το οποίο υπάρχει μέσα σε ένα ηλεκτροηλιακό όχημα είναι το **Σύστημα Διαχείρισης της Κίνησης του Ηλεκτρικού Κινητήρα**. Η γενική μορφή ενός συστήματος Διαχείρισης και ελέγχου κίνησης ηλεκτροκίνητου οχήματος φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα 5.7.



Σχήμα 5.7: Διάγραμμα βασικών μερών συστήματος διαχείρισης και ελέγχου κίνησης ηλεκτροκινητήρα

Ο μετατροπέας (converter) DC σε DC, στην περίπτωση ενός ηλεκτροκίνητου οχήματος, παρεμβάλλεται μεταξύ της πηγής ισχύος (συστοιχίες ηλεκτρικών συσσωρευτών) και του DC κινητήρα. Ο μετατροπέας σκοπό έχει να μετασχηματίζει κάθε φορά την ηλεκτρική ενέργεια που παίρνει στην είσοδό του σε κατάλληλη μορφή σε ό,τι αφορά το ρεύμα και την τάση. Η λειτουργία του είναι δυναμική.

Οι σύγχρονοι μετατροπείς χρησιμοποιούν ημιαγωγούς σαν κύρια στοιχεία, τα οποία με κατάλληλους παλμούς ελέγχου, που παράγονται από το ηλεκτρονικό ελεγκτή, άγουν ή αποκόπτονται ανάλογα.

Οι ημιαγωγοί που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι:

α) Δίοδοι ισχύος

β) Θυρίστορ ισχύος

γ) Ελεγχόμενοι ημιαγωγικοί διακόπτες (IGBT, GTO, MOSFET, BJT κ.α.)

Η επιλογή του κατάλληλου ημιαγωγικού στοιχείου κάθε φορά, έχει βαρύνουσα σημασία και πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στα χαρακτηριστικά του. Επειδή τα στοιχεία αυτά δουλεύουν σε μεγάλα ρεύματα και σε υψηλές συχνότητες (τάξης KHz), οι απώλειες, αν δεν επιλεγούν τα κατάλληλα στοιχεία, θα είναι σημαντικές.

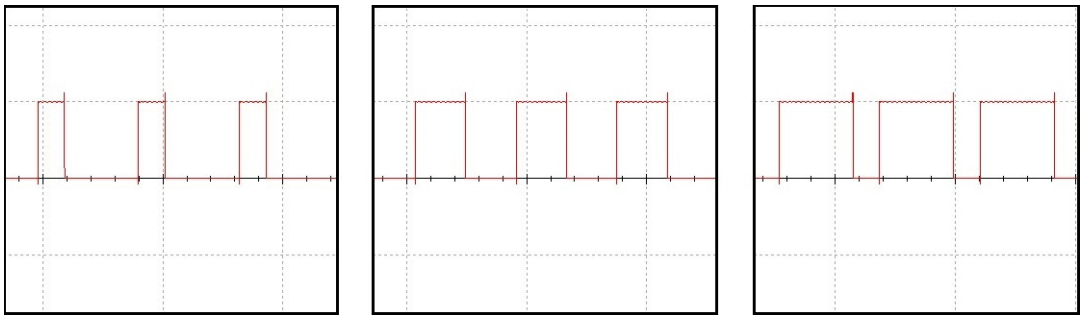
Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας, σε κάποιες περιπτώσεις, επιτρέπει την αμφίδρομη μεταφορά ισχύος από την πηγή στον κινητήρα και αντίστροφα. Η αντίστροφη μεταφορά γίνεται κατά την πέδηση του οχήματος. Τότε, ενέργεια μεταφέρεται από τον κινητήρα στην πηγή και αποθηκεύεται, αν η τελευταία μπορεί να την αποθηκεύσει (περίπτωση υπερ-πυκνωτών), ώστε να την εκμεταλλευθεί αργότερα.

Ο ηλεκτρονικός ελεγκτής, που αποτελεί και την καρδιά του συστήματος κίνησης, παίρνει δεδομένα (με κατάλληλα αισθητήρια) από τον χειριστή του οχήματος, από την έξοδο του μετατροπέα, από το πεντάλ επιτάχυνσης κλπ (βλέπε και σχήμα). Στη συνέχεια δίνει εντολές στον μετατροπέα να αλλάξει τα χαρακτηριστικά εξόδου του (ρεύμα και τάση) ώστε να ελεγχθούν και να ρυθμισθούν η ταχύτητα και η ροπή του οχήματος.

Η έξοδος του ελεγκτή προς τον μετατροπέα είναι συνήθως τετραγωνικοί παλμοί ρυθμιζόμενου πλάτους. Το πλάτος του παλμού ανά περίπτωση ως προς το πλάτος της περιόδου του παλμού ορίζει το ποσοστό που ονομάζεται **κύκλος λειτουργίας**. Για την παραγωγή τον παλμών αυτών χρησιμοποιείται η γνωστή από τις τηλεπικοινωνίες μέθοδος της **διαμόρφωσης πλάτος παλμού (PWM-Pulse Width Modulation)**. Λόγω της εξέλιξης των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, οι απώλειες των κυκλωμάτων παραγωγής αυτών των παλμών στα άκρα (0 και μέγιστο) και ο χρόνος ανόδου και καθόδου του παλμού έχουν σχεδόν εκμηδενιστεί, με συνέπεια την υψηλή απόδοση των διατάξεων αυτών. Αν και η τεχνική αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κωδικοποίηση πληροφορίας προς μετάδοση στις τηλεπικοινωνίες, η κύρια χρήση της βρίσκεται στο τομέα του ελέγχου της ισχύος που παρέχεται σε ηλεκτρικές συσκευές, όπως οι ηλεκτροκινητήρες.

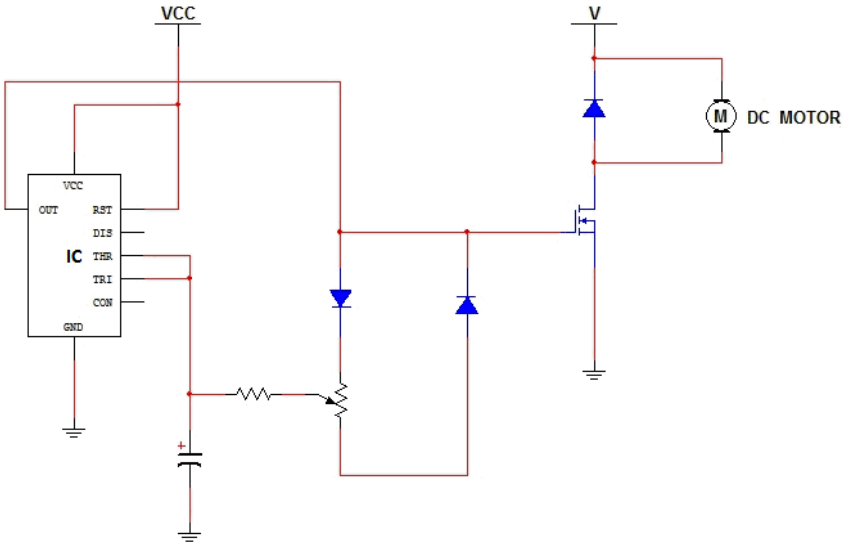
Υπάρχουν αρκετές τεχνικές διαμόρφωσης πλάτους παλμών (SPWM, SVPWM, Random PWM κ.α) οι οποίες δεν θα εξετασθούν στην παρούσα εργασία. Κάθε τεχνική επιλέγεται για τα χαρακτηριστικά της (λίγες αρμονικές, μικρός χρόνος

ανόδου και καθόδου παλμού, γρήγορη ανταπόκριση κλπ). Στο Σχήμα 5.8 φαίνεται ένας παλμός διαμόρφωσης πλάτους με ύψος 5 V και κύκλους λειτουργίας 25%, 50% και 75%.



Σχήμα 5.8: Παλμός διαμόρφωσης πλάτους με κύκλο λειτουργίας 25%, 50% και 75% αντίστοιχα και ίδιας συχνότητας

Η κύρια λογική με την οποία γίνεται η ρύθμιση των στροφών του κινητήρα είναι ότι ο χρήστης χρησιμοποιεί μια μεταβλητή αντίσταση, η οποία δουλεύει σε πολύ χαμηλή τάση και ένταση, την τιμή της οποίας χρησιμοποιεί σαν είσοδο ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα. Αυτό το ολοκληρωμένο κύκλωμα παράγει παλμούς συγκεκριμένης συχνότητας οι οποίοι έχουν κύκλο λειτουργίας ανάλογα τη θέση της μεταβλητής αντίστασης. Οι παλμοί αυτοί στη συνέχεια οδηγούν ένα ή συνήθως και περισσότερα τρανζίστορ ισχύος, τα οποία διαχειρίζονται την ενέργεια που λαμβάνει πλέον από την παροχή υψηλής τάσης και ρεύματος ο κινητήρας. Στη συνέχεια δίνεται ένα απλό κύκλωμα (Σχήμα 5.9) παραγωγής παλμών διαμορφωμένων κατά πλάτος με μεταβολή της διάρκειας από μία μεταβλητή αντίσταση.

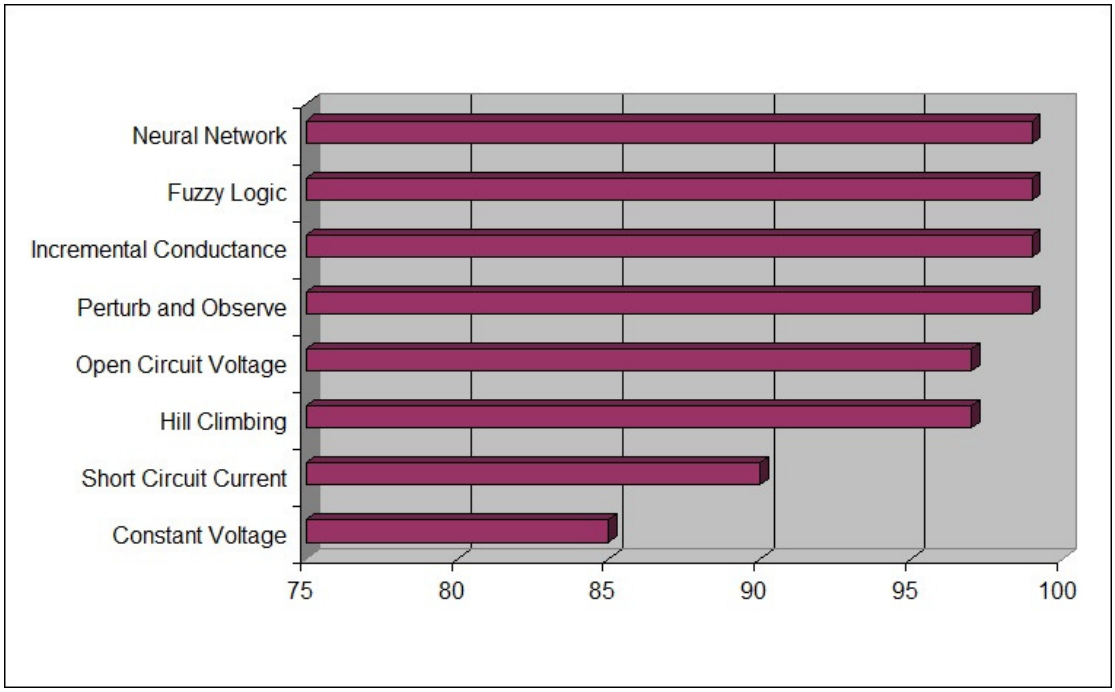


Σχήμα 5.9: Απλουστευμένο κύκλωμα Διαμόρφωσης Πλάτους Παλμών για ρύθμιση στροφών κινητήρα

5.3 Συμπεράσματα χρήσης των υπό ανάλυση Συστημάτων

Όσον αφορά στα συστήματα Ανίχνευσης του Μέγιστου Σημείου Ισχύος, ο αλγόριθμος διαχείρισης που χρησιμοποιείται περισσότερο και έχει τις μεγαλύτερες

πωλήσεις είναι αυτός της Μεταβολής και Παρατήρησης. Ο λόγος είναι η απλότητα στην κατασκευή και η μεγάλη απόδοσή τους. Ακόμα επειδή τα δεδομένα που ζητάει για να λειτουργήσει σωστά μπορούν να βρεθούν με μετρήσεις εύκολα εξασφαλίζουν ευκολία στη ρύθμιση και δυνατότητα βελτίωσης στο μέλλον. Στο Σχήμα 5.10 φαίνονται οι αποδόσεις των διαφορετικών αλγορίθμων.



Σχήμα 5.10: Αναπαράσταση των αποδόσεων των διαφορετικών αλγορίθμων λειτουργίας των Ανιχνευτών Μέγιστου Σημείου Ισχύος

Το δεύτερο σύστημα που είναι αυτό της διαχείρισης της κίνησης χρησιμοποιώντας Διαμόρφωση του Πλάτους Παλμών είναι αυτή τη στιγμή, από άποψη τεχνολογίας, ό,τι καλύτερο υπάρχει στον τομέα οδήγησης ηλεκτρικών συσκευών.

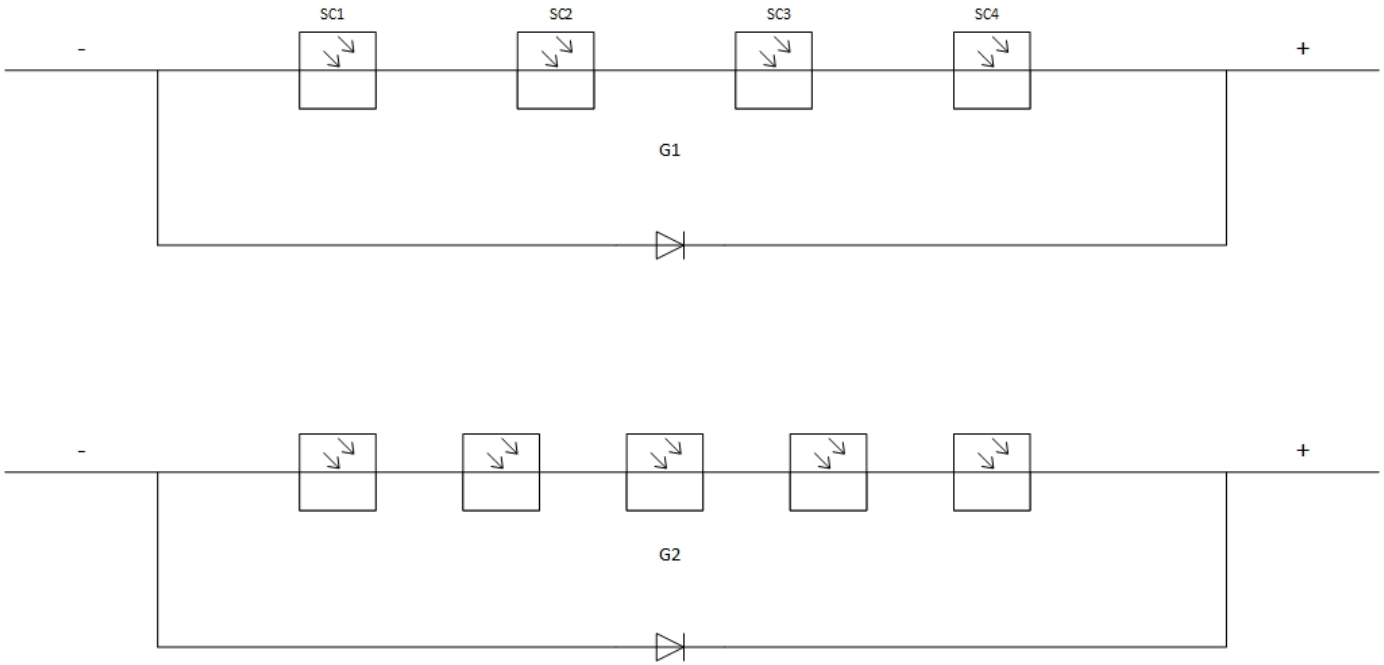
Κεφάλαιο 6^{ο} : Ηλεκτρολογικά Σχέδια συνδεσμολογίας του ηλεκτρολογικού συστήματος του ηλεκτροηλιακού οχήματος που προτάθηκε προς κατασκευή και περιληπτική περιγραφή αυτών

Στα σχήματα που ακολουθούν αναπαριστάται η πρόταση κατασκευής του ηλεκτρολογικού συστήματος του οχήματος, όπως τελικά υλοποιήθηκε από την ομάδα <<Hephaestus TUC Solar Car Team>>, σύμφωνα με τους κανονισμούς για συμμετοχή στον αγώνα World Solar Challenge (WSC). Στο πρώτο Σχήμα 6.1 αναπαρίστανται οι τύποι ομάδων φωτοβολταϊκών από τις οποίες θα αποτελούνται οι ηλιακές συστοιχίες. Έχουμε δύο τύπους:

α) με τέσσερις κυψέλες σε σειρά και με μια δίοδο παράλληλα (τύπος G1) και

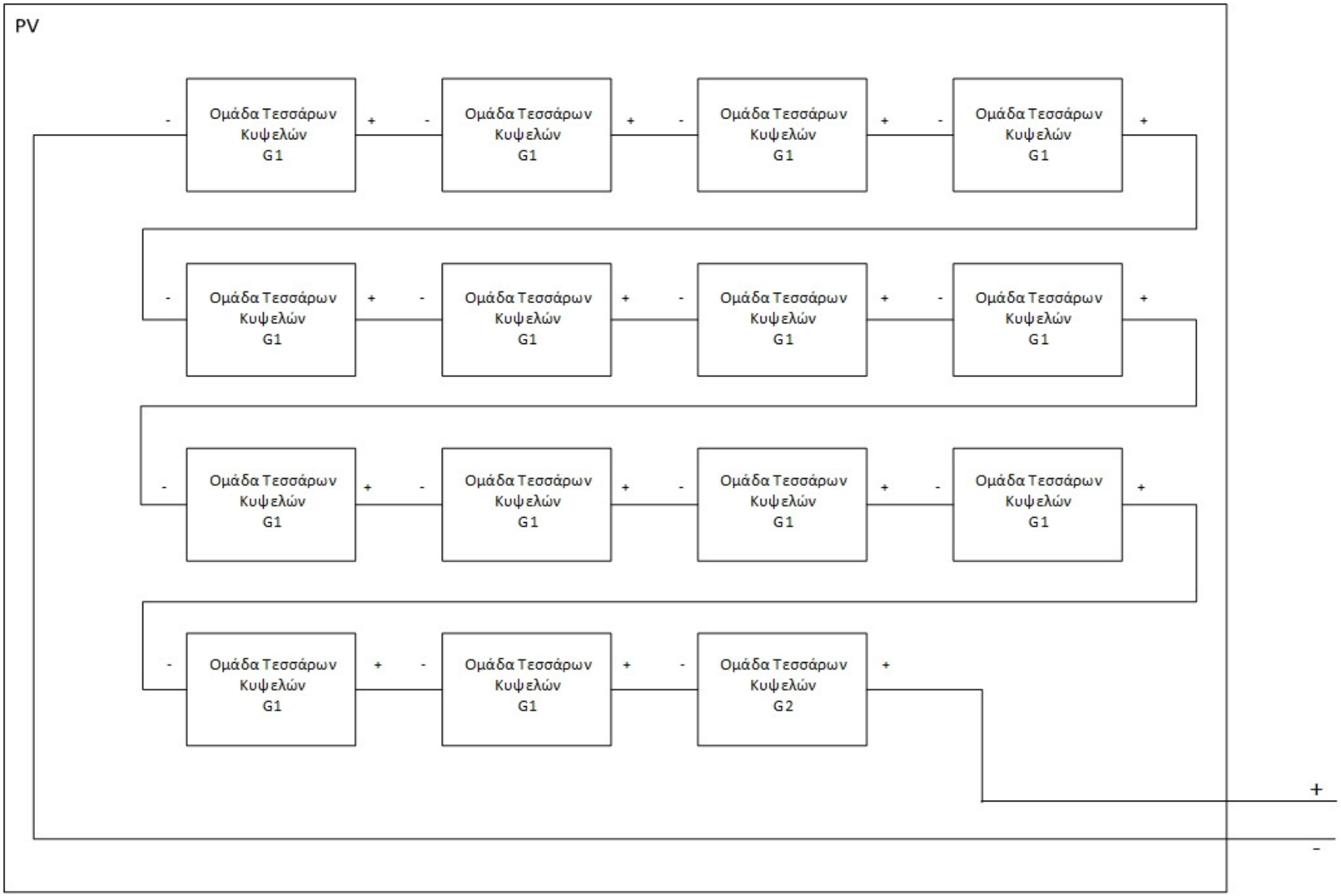
β) με πέντε κυψέλες σε σειρά και με μια δίοδο παράλληλα (τύπος G2).

Ο λόγος ύπαρξης της διόδου είναι ότι σε περίπτωση που για κάποιο λόγο κάποια κυψέλη χαλάσει, για να μην καταστεί όλη η συστοιχία άχρηστη, τοποθετείται η δίοδος ώστε να παρακάμπτει την χαλασμένη ομάδα μέχρι αυτή να αντικατασταθεί.



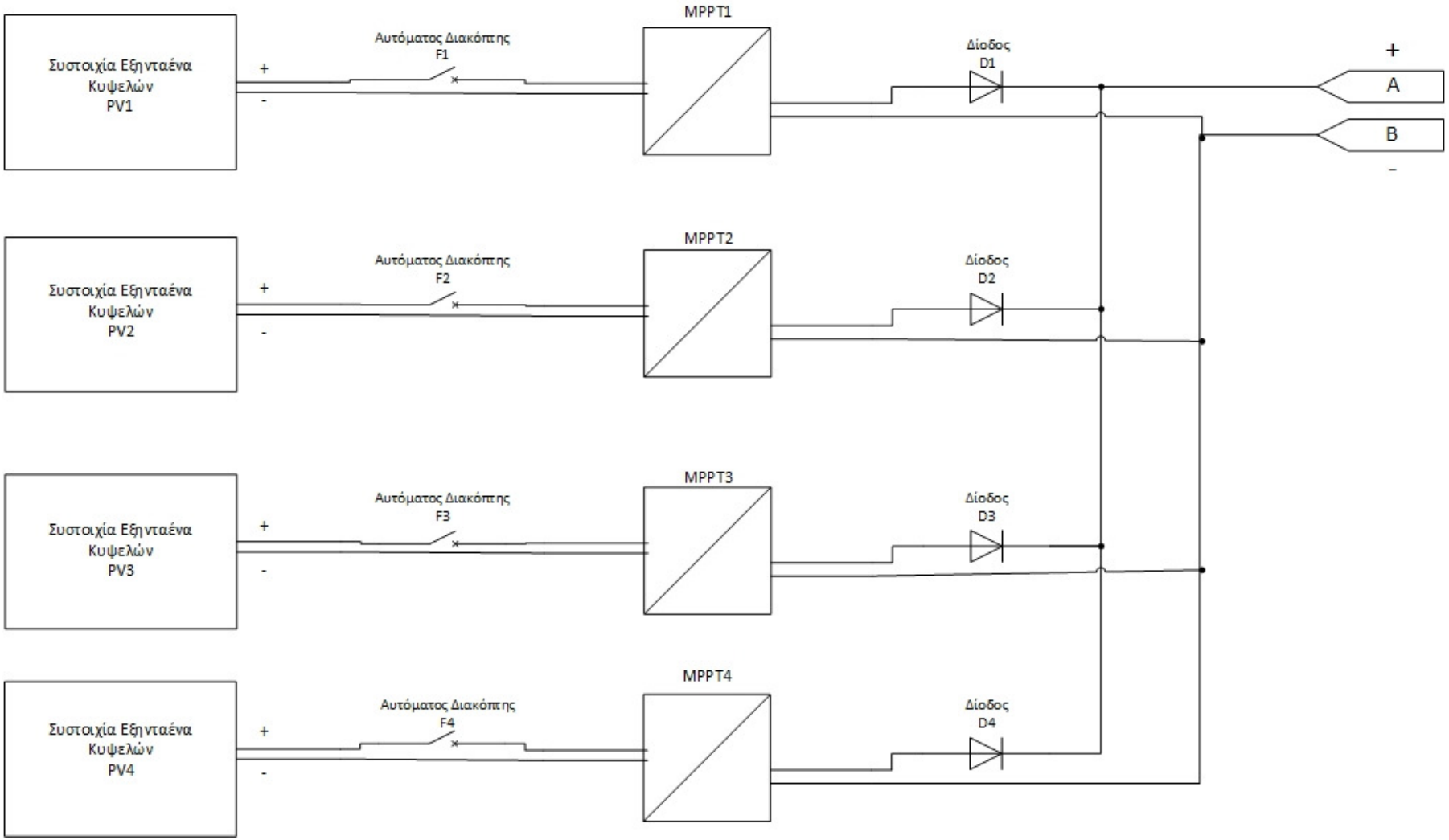
Σχήμα 6.1 : Αναπαράσταση των δύο τύπων ομάδων κυψελών με τέσσερις και πέντε κυψέλες και τη δίοδο που εξασφαλίζει την παράκαμψή τους σε περίπτωση βλάβης

Στο Σχήμα 6.2 φαίνεται μια συστοιχία φωτοβολταϊκών η οποία αποτελείται από δεκατέσσερις ομάδες τύπου G1 και μια ομάδα τύπου G2. Σύνολο θα υπάρχουν σε κάθε συστοιχία 61 κυψέλες.



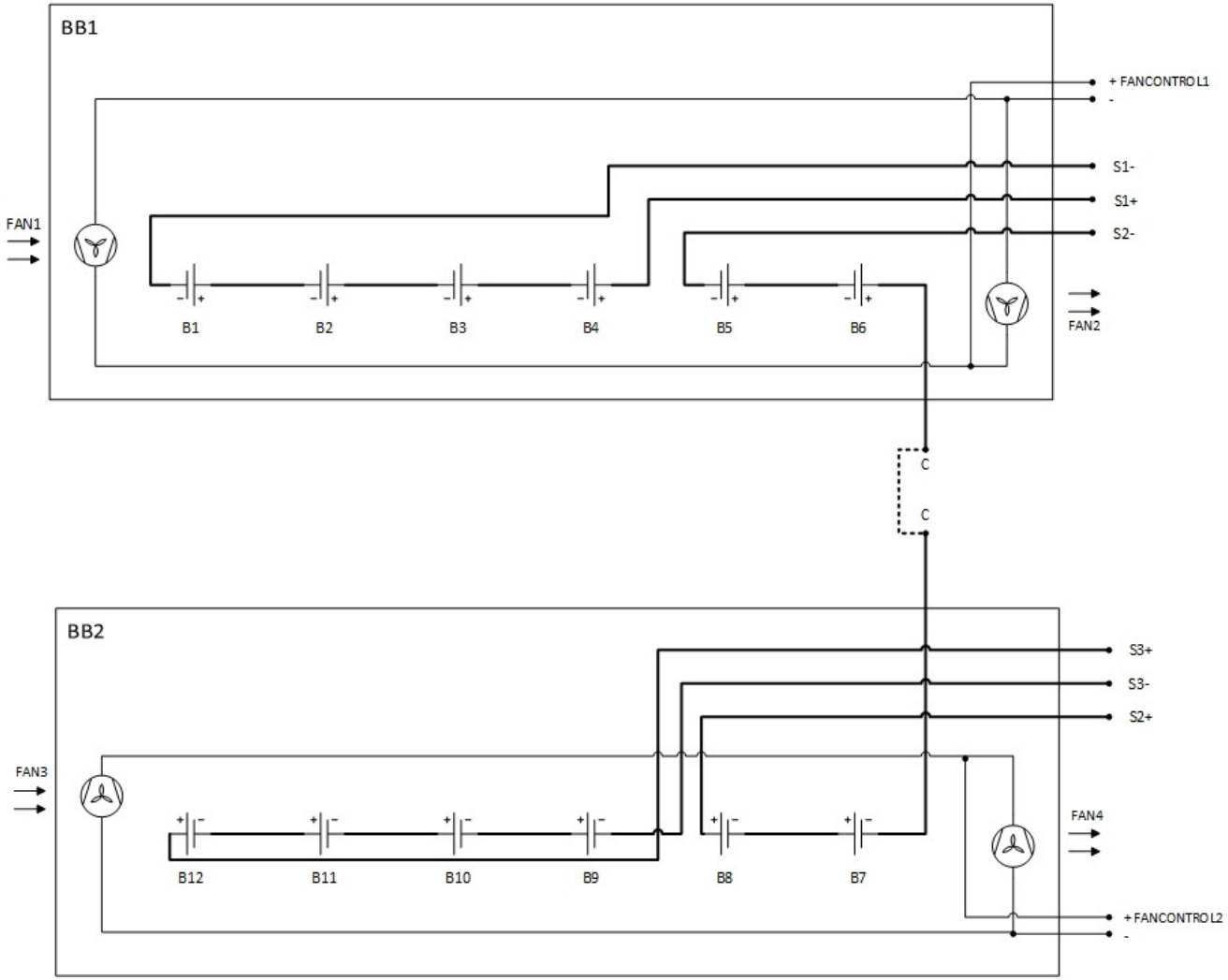
Σχήμα 6.2 : Αναπαράσταση του τρόπου σύνδεσης των ομάδων για τη δημιουργία συστοιχίας

Στο Σχήμα 6.3 βλέπουμε τη σύνδεση τεσσάρων ομοίων συστοιχιών (PV1, PV2, PV3, PV4) σε σειρά η κάθε μια αντίστοιχα με έναν αυτόματο διακόπτη (F1, F2, F3, F4), με ένα Ανιχνευτή Μέγιστου Σημείου Ισχύος (MPPT1, MPPT2, MPPT3, MPPT4) και με μια δίοδο (D1, D2, D3, D4). Ο αυτόματος διακόπτης σε κάθε συστοιχία υπάρχει, ώστε να μπορεί να απομονωθεί κάθε συστοιχία σε περίπτωση βλάβης ή ελέγχου. Οι Ανιχνευτές Μέγιστου Σημείου Ισχύος περιλαμβάνουν και κατάλληλο φορτιστή για τις μπαταρίες. Τέλος οι δίοδοι υπάρχουν για λόγους ασφαλείας σε περίπτωση που κάποιος Ανιχνευτής δεν λειτουργεί να μην επιστραφεί ρεύμα από τους άλλους σε πορεία αντίστροφη από της κανονικής λειτουργίας και υποστεί βλάβη.



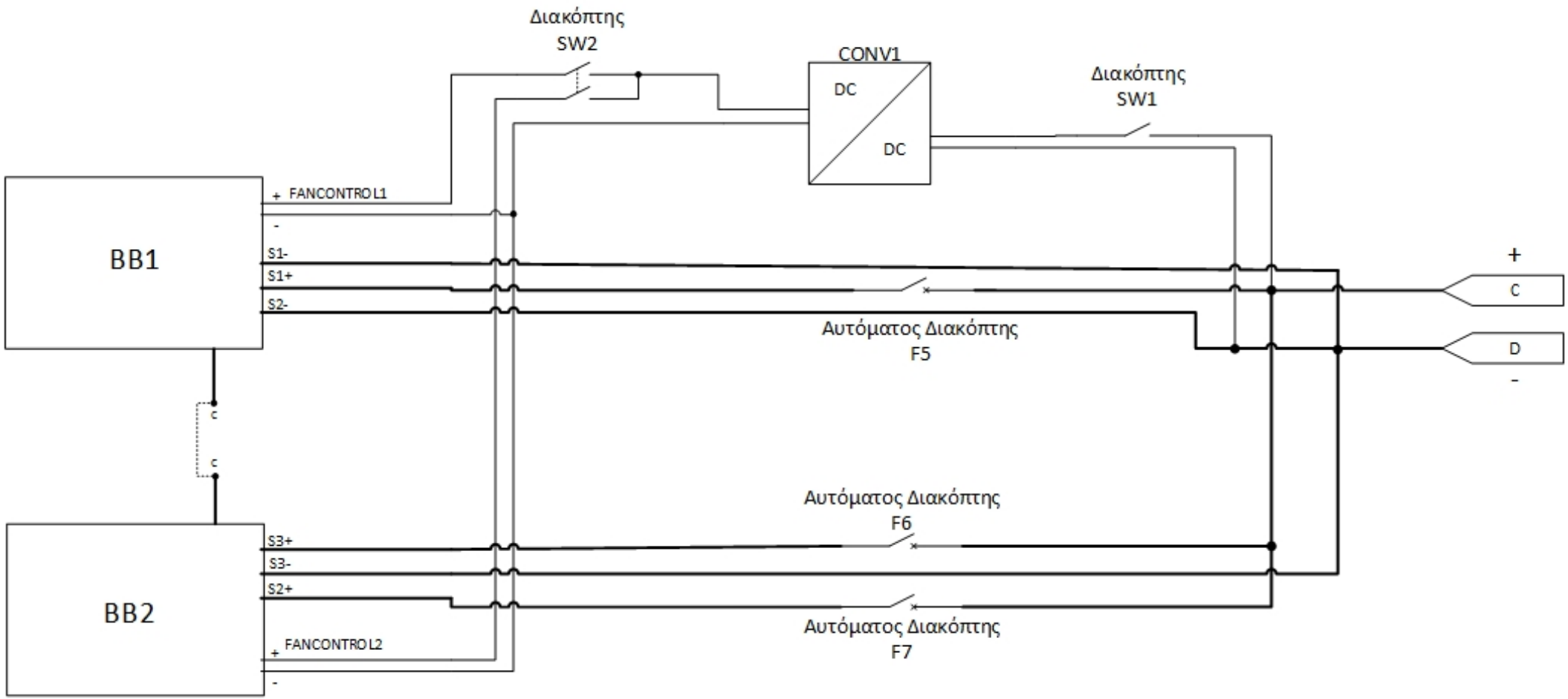
Σχήμα 6.3 : Αναπαράσταση του συστήματος φόρτισης των μπαταριών από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες

Στο Σχήμα 6.4 αναπαριστάται η συνδεσμολογία των δύο κουτιών ηλεκτρικών συσσωρευτών (ΒΒ1, ΒΒ2). Όπως φαίνεται υπάρχουν τρεις συστοιχίες ηλεκτρικών συσσωρευτών. Μια ολόκληρη σε κάθε κουτί (Πρώτη: Β1, Β2, Β3, Β4, Δεύτερη: Β9, Β10, Β11, Β12) και άλλη μια χωρισμένη από μισή σε κάθε κουτί (Β5, Β6, Β7, Β8). Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκαν δύο κουτιά ήταν γιατί σύμφωνα με τους κανονισμούς θα πρέπει να έχουμε δύο ή ένα κουτί για την τοποθέτηση των ηλεκτρικών συσσωρευτών. Επομένως για λόγους χωροταξίας μέσα στο όχημα επιλέχθηκε η χρήση δύο κουτιών με ηλεκτρικούς συσσωρευτές. Τέλος, υπάρχουν και τέσσερις ανεμιστήρες, δύο σε κάθε κουτί, οι οποίοι εξυπηρετούν στην δημιουργία ροής αέρα για την αποφυγή δημιουργίας υψηλών θερμοκρασιών στο εσωτερικό των κουτιών.



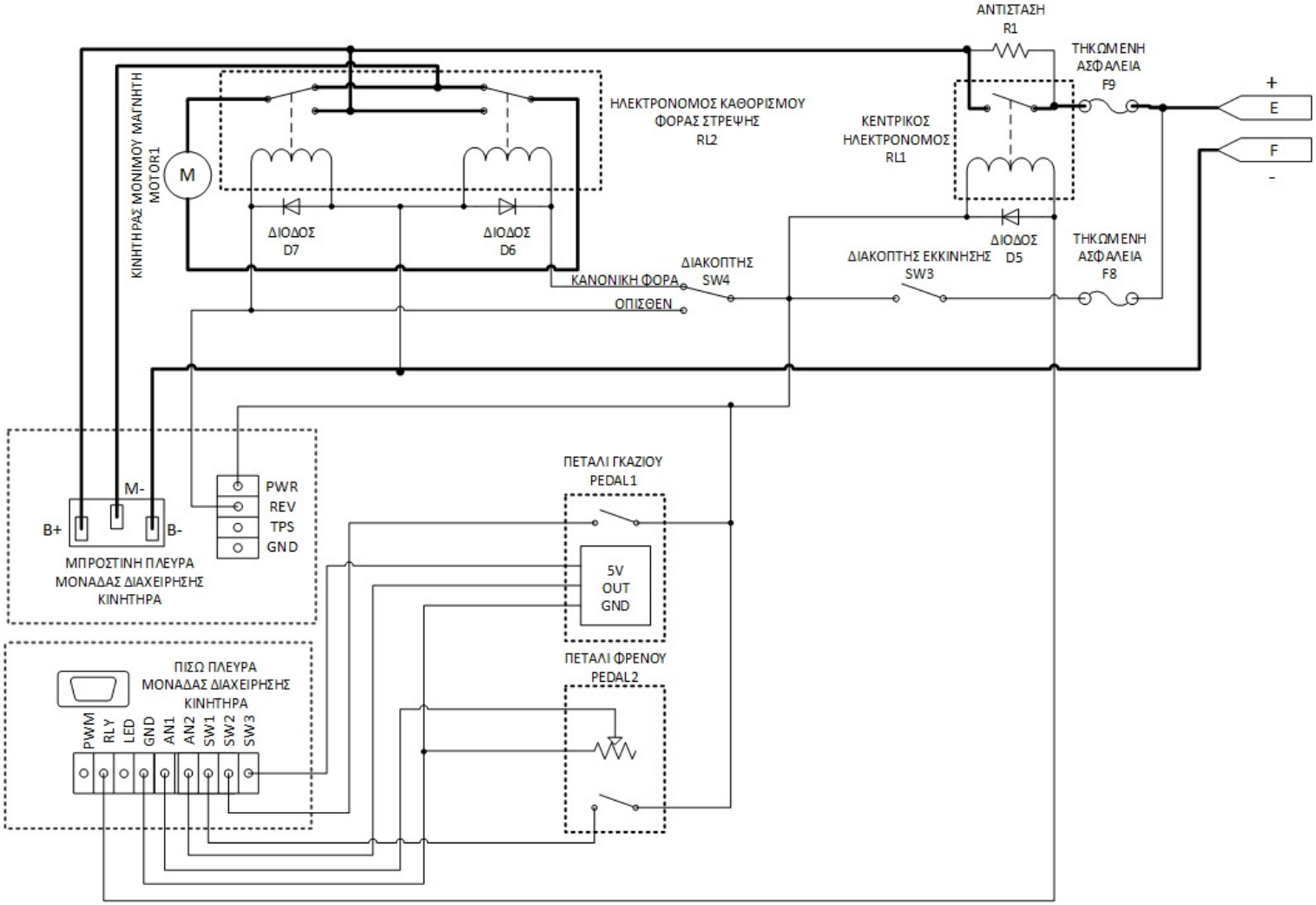
Σχήμα 6.4 : Αναπαράσταση των δύο κουτιών μπαταριών και του συστήματος εξαερισμού τους

Στο Σχήμα 6.5 αναπαριστάται η σύνδεση των κουτιών που περιέχουν τους ηλεκτρικούς συσσωρευτές (BB1, BB2) μέσω τριών αυτόματων διακοπτών (F5, F6, F7) προς το υπόλοιπο κύκλωμα. Επίσης φαίνεται ο τρόπος σύνδεσης και ελέγχου των ανεμιστήρων (FANCONTROL1, FANCONTROL2) μέσω ενός διακόπτη (SW2), ενός μετατροπέα τάσης (CONV1) και ενός κεντρικού διακόπτη (SW1).



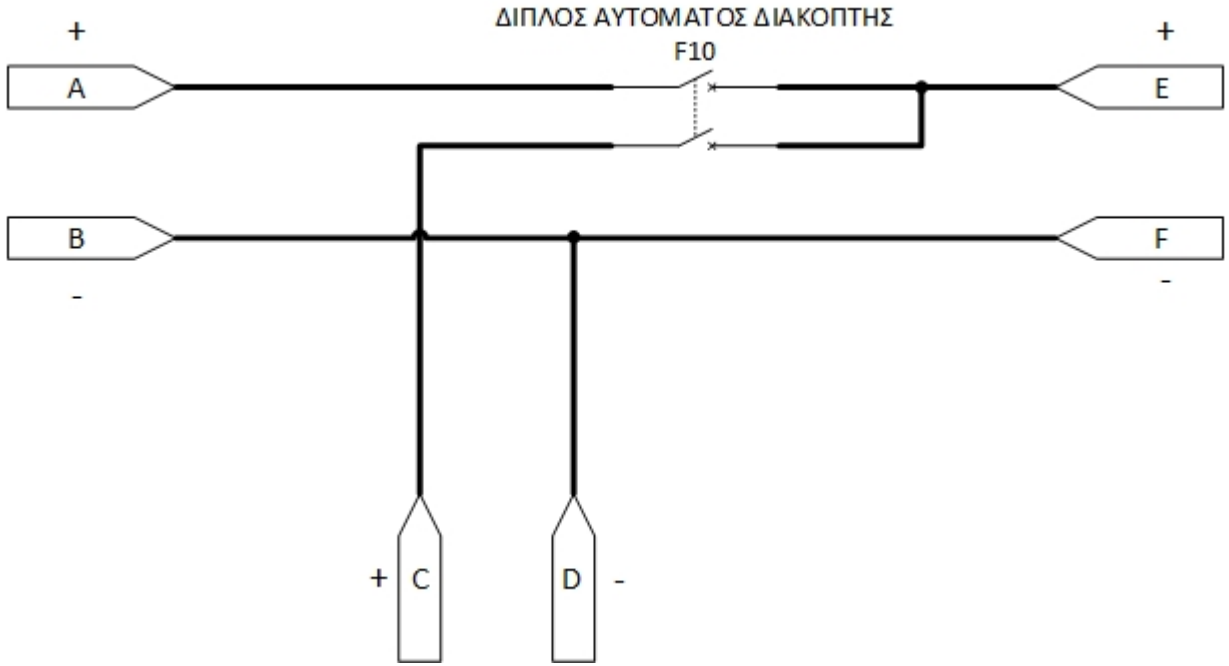
Σχήμα 6.5 : Αναπαράσταση της μεθόδου σύνδεσης των κουτιών των ηλεκτρικών συσσωρευτών με το υπόλοιπο κύκλωμα και με το σύστημα εξαερισμού

Στο Σχήμα 6.6 φαίνεται το κύκλωμα διαχείρισης του ηλεκτρικού κινητήρα. Από το σχήμα βλέπουμε ότι υπάρχουν δύο τηκόμενες ασφάλειες. Η μια (F8) είναι για το κύκλωμα διαχείρισης του ηλεκτρικού κινητήρα και η δεύτερη (F9) είναι για το κύριο κύκλωμα παροχής τροφοδοσίας στον ηλεκτρικό κινητήρα. Επίσης υπάρχει ο κεντρικός διακόπτης (SW3) που ενεργοποιεί το σύστημα διαχείρισης του ηλεκτρικού κινητήρα και τον κεντρικό ηλεκτρονόμο λειτουργίας (RL1). Κατόπιν, παρεμβάλλεται ο διακόπτης (SW4) ο οποίος διαχειρίζεται τον ηλεκτρονόμο καθορισμού φοράς (RL2) του ηλεκτρικού κινητήρα (MOTOR1). Τέλος, υπάρχουν τα δύο πετάλια (PEDAL1, PEDAL2) που στέλνουν δεδομένα στο σύστημα διαχείρισης του ηλεκτρικού κινητήρα για να ελέγχουν το ρεύμα που θα δέχεται ο ηλεκτρικός κινητήρας για την κίνηση από το ένα και το φρενάρισμα μέσω ηλεκτρισμού από το άλλο.



Σχήμα 6.6 : Αναπαράσταση του κυκλώματος διαχείρισης του ηλεκτρικού κινητήρα

Στο τελευταίο Σχήμα 6.7 φαίνεται η διασύνδεση των κυκλωμάτων των Σχημάτων 5.3, 5.5 και 5.6. Στο σχήμα αυτό υπάρχει μόνο ένας διπλός αυτόματος διακόπτης, ο οποίος υφίσταται για λόγους ασφαλείας σε περίπτωση που πρέπει να αποκοπούν συνολικά και οι δύο παροχές ρεύματος, δηλαδή τα φωτοβολταϊκά (Επαφές A, B) και οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές (Επαφές C, D), προς τον ηλεκτρικό κινητήρα (Επαφές E, F).



Σχήμα 6.7 : Αναπαράσταση της σύνδεσης των φωτοβολταϊκών (Επαφές A, B), με τους ηλεκτρικούς συσσωρευτές (Επαφές C, D) και το σύστημα διαχείρισης κινητήρα (Επαφές E, F)

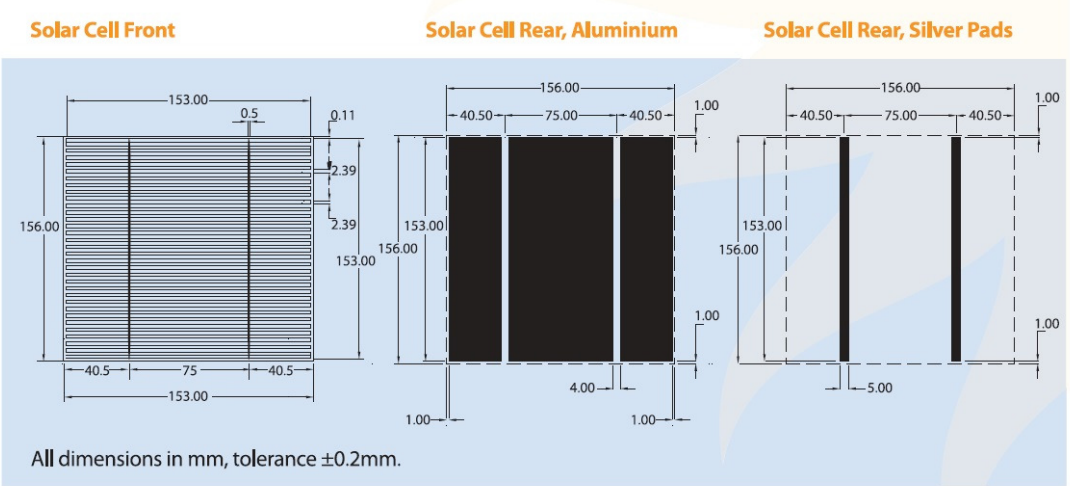
Κεφάλαιο 7^{ο} : Στοιχεία ηλεκτρικών μερών της παρούσας κατασκευαστικής πρότασης του ηλεκτροηλιακού οχήματος

Τα σχέδια που δόθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, αν και περιείχαν βασικές λειτουργίες, βασίζονταν σε συγκεκριμένα υλικά. Αυτά τα υλικά θα αναλυθούν στο κεφάλαιο αυτό. Η ανάλυση αυτή γίνεται διότι ανάλογα με τα υλικά που χρησιμοποιούνται αλλάζουν, ανά μονάδα τουλάχιστον, και οι υπόλοιπες συσκευές που απαιτούνται για να λειτουργήσει σωστά το κάθε ηλεκτρικό μέρος, του ηλεκτροηλιακού οχήματος. Τα τρία βασικά ηλεκτρικά μέρη του οχήματος είναι:
α) Η φωτοβολταϊκή πηγή
β) Η πηγή παροχής και αποθήκευσης ενέργειας των ηλεκτρικών συσσωρευτών και
γ) Η μονάδα διαχείρισης του ηλεκτρικού κινητήρα.

7.1 Στοιχεία ηλεκτρικών μερών της φωτοβολταϊκής πηγής παροχής ενέργειας

Το βασικό στοιχείο της μονάδας αυτής είναι οι φωτοβολταϊκές κυψέλες. Στην υλοποίηση μας χρησιμοποιήθηκαν οι κυψέλες με κωδικό **SCH6P-80** της εταιρίας **Solar Cells Hellas Group**. Οι κυψέλες αυτές είναι πολυ-κρυσταλλικού πυριτίου με απόδοση 15,6%. Στο Σχήμα 7.1 βλέπουμε τα μηχανικά χαρακτηριστικά όπως τα παρέχει η εταιρία.

Dimensions:	156mm x 156mm ±0.5mm
Thickness:	180μm ±40μm, 200μm ±40μm
Front (-):	2 busbars, 2mm wide each, silver, Silicon Nitride (SiN_x) antireflection coating
Rear (+):	2 busbars, 4mm wide each, silver/aluminium, continuous



Σχήμα 7.1: Μηχανικά χαρακτηριστικά της φωτοβολταϊκής κυψέλης που χρησιμοποιήθηκε

Η εταιρία κατασκευάζει μια οικογένεια κυψελών με συναφή ηλεκτρικά χαρακτηριστικά. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε, φαίνονται στο Σχήμα 7.2, όπου με κόκκινο κύκλο σημειώνονται τα στοιχεία του μοντέλου που μας ενδιαφέρει.

Average		SCH6P-50	SCH6P-55	SCH6P-60	SCH6P-65	SCH6P-70	SCH6P-75	SCH6P-80	SCH6P-85	SCH6P-90	SCH6P-95	SCH6P-100
η	[%]	14.4	14.6	14.8	15	15.2	15.4	15.6	15.8	16	16.2	16.4
Pmax	[Wp]	3.50	3.55	3.60	3.65	3.70	3.75	3.80	3.85	3.90	3.95	4.00
Isc	[A]	7.85	7.89	7.93	7.96	7.99	8.03	8.06	8.11	8.17	8.23	8.30
Voc	[V]	0.596	0.600	0.603	0.605	0.607	0.610	0.612	0.614	0.616	0.618	0.620
Current @ 0.5V	[A]	≥ 6.84	≥ 6.96	≥ 7.08	≥ 7.20	≥ 7.32	≥ 7.42	≥ 7.52	≥ 7.62	≥ 7.72	≥ 7.82	≥ 7.92

Temperature Coefficients: a(I_{sc}): +0.04%/K, b(V_{oc}): -0.36%/K, g(P_{mpp}): -0.44%/K

*** All data measured at standard test conditions (STC): 1000W/m², AM1.5, 25ºC**

Σχήμα 7.2: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της φωτοβολταϊκής κυψέλης που χρησιμοποιήθηκε

Επομένως από το Σχήμα 6.1 θα έχουμε ότι τα SC1, SC2, SC3 και SC4 είναι κυψέλες τύπου SCH6P-80. Στο ίδιο σχήμα χρησιμοποιείται και μια δίοδος ανά 4 ή 5 κυψέλες. Η δίοδος αυτή πρέπει να αντέχει ρεύμα ορθής πόλωσης άνω τον 8,06 Amber. Επίσης θα πρέπει να έχει χαμηλή πτώση τάσης, ώστε στην περίπτωση που θα χρειαστεί να χρησιμοποιηθεί για να παρακάμψει μια ομάδα να μην προκαλέσει μεγάλες πρόσθετες απώλειες. Μια από τις κατάλληλες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι και αυτή με τύπο **SBR10U45SD1** της εταιρίας **Diodes Inc**. Η δίοδος αυτή είναι τύπου Schottky και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της φαίνονται στο Σχήμα 7.3 παρακάτω.

Peak Reverse Voltage:	45 V
Forward Continuous Current:	10 A
Max Surge Current:	200 A
Configuration:	Single
Forward Voltage Drop:	0.47 V
Maximum Reverse Leakage Current:	300 uA
Operating Temperature Range:	- 65 C to + 150 C
Mounting Style:	Through Hole
Package/Case:	DO-201AD

Σχήμα 6.3: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά διόδου παράκαμψης φωτοβολταϊκής ομάδας

Σύμφωνα με το Σχέδιο 6.2, η κάθε συστοιχία φωτοβολταϊκών κυψελών αποτελείται από δεκατέσσερις ομάδες των τεσσάρων κυψελών και μια των πέντε. Συνολικά δηλαδή σε κάθε συστοιχία θα έχουμε 14x4+1x5=61 φωτοβολταϊκές κυψέλες. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της κάθε συστοιχίας θα είναι V_{OC}=0.612x61=>**V_{OC}=37,33 Volt** και **I_{SC}=8,06 Amber**, ενώ η ισχύς στο σημείο μέγιστης ισχύος θα είναι P_{MAX}=7,52x0,5x61=> **P_{MAX}=229,36 Watt**. Επίσης η κάθε συστοιχία καλύπτει επιφάνεια A=0,156x0,156x61=>**A=1.485 m²**.

Σύμφωνα με τους κανονισμούς, αφού μπορούσαμε να καλύψουμε συνολική επιφάνεια με φωτοβολταϊκές κυψέλες μέχρι 6 m², μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε 4 συστοιχίες φωτοβολταϊκών κυψελών. Από το Σχήμα 6.3 βλέπουμε ότι οι

συστοιχίες PV1, PV2, PV3 και PV4 είναι του τύπου που μόλις περιγράψαμε. Όπως είχαμε αναλύσει και στο σχέδιο το επόμενο σημαντικό εξάρτημα είναι οι αυτόματοι διακόπτες F1, F2, F3 και F4 οι οποίοι πρέπει να αντέχουν φυσιολογικό ρεύμα λειτουργίας άνω των 8,06 Amber. Θα πρέπει να υπάρχουν σε κάθε συστοιχία ξεχωριστά, ώστε ο οδηγός να μπορεί να απομονώσει κατά βούληση οποιαδήποτε συστοιχία κυψελών ανεξάρτητα. Επίσης, οι αυτόματοι αυτοί διακόπτες πρέπει να είναι κατασκευασμένοι για χρήση συνεχούς ρεύματος. Ένας τέτοιος τύπος είναι ο **MNEDC10** της εταιρίας **MidNite Solar** με δυνατότητα διακοπής και χρήσης υπό φορτία μέχρι **10 Amber** συνεχούς ρεύματος, μέγιστης τάσης **150 Volt**. Στο Σχήμα 7.4 φαίνεται μια φωτογραφία του συγκεκριμένου τύπου αυτόματου διακόπτη.

Σχήμα 7.4: Φωτογραφία του προτεινόμενου αυτόματου διακόπτη

Το αμέσως επόμενο εξάρτημα από το σχήμα 6.3 είναι οι Ανιχνευτές Μέγιστου Σημείου Ισχύος MPPT1, MPPT2, MPPT3 και MPPT4. Οι ανιχνευτές αυτοί είναι τύπου **CV 24/48-6PV** της εταιρίας **Solar Converters Inc**. Οι ανιχνευτές αυτοί εφαρμόζουν τον αλγόριθμο Ανίχνευσης Μέγιστου Σημείου Ισχύος τύπου **Τάσης Ανοιχτού Κυκλώματος** και είναι τύπου **Μετατροπέα Ανύψωσης Τάσης**. Επίσης περιλαμβάνουν φορτιστή κατάλληλο για φόρτιση μπαταριών μολύβδου τάσης 48 Volt, το οποίο συνεπάγεται ότι η έξοδος τους είναι στα 56 Volt σταθερά και μεταβάλλεται η ένταση φόρτισης ανάλογα την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστοιχιών. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή η ελάχιστη τάση από το φωτοβολταϊκά για να λειτουργήσει είναι τα 24 Volt και η μέγιστη τα 44 Volt. Η μέγιστη παροχή ρεύματος φόρτισης είναι τα 6 Amber. Στην περίπτωσή μας η μέγιστη παροχή ρεύματος και από τις τέσσερις συστοιχίες θα είναι I_{charge}=4x229,36x0,96/56=> **I_{charge}=15,728 Amber**. Στο Σχήμα 7.5 φαίνονται τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του ανιχνευτή όπως τα δίνει η εταιρία κατασκευής του.

Input Voltage (V)	0 - 44 V (24 V nominal Solar Panel)
Output Voltage (V) +/- 2%	56
Output Current (Amps)	6
Current Limited *	7
Input Fuse	25 amp Automotive Fuse
Quiescent Current from Solar Panel	15 mA
Quiescent Current from Battery	<36 micro-A
Efficiency	92 - 96 % depending on loading and state of charge

Σχήμα 7.5: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά Ανιχνευτή Μέγιστου Σημείου Ισχύος

Το τελευταίο εξάρτημα, πριν δοθεί το ρεύμα προς τις καταναλώσεις, είναι οι τέσσερις δίοδοι D1, D2, D3 και D4 οι οποίοι υπάρχουν για να εξασφαλίζουν ότι στην περίπτωση μη λειτουργίας κάποιου Ανιχνευτή δεν θα επιστραφεί το ρεύμα από τους άλλους προς αυτόν. Ένας ενδεικτικός τύπος διόδου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτήν την περίπτωση είναι ο **SB560-T** της εταιρίας **Diodes Inc**. Η δίοδος αυτή είναι τύπου Schottky και τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της φαίνονται στο Σχήμα 7.6 παρακάτω.

Peak Reverse Voltage:	60 V
Forward Continuous Current:	5 A
Max Surge Current:	150 A
Configuration:	Single
Forward Voltage Drop:	0.67 V
Maximum Reverse Leakage Current:	500 uA
Operating Temperature Range:	- 65 C to + 150 C
Mounting Style:	Through Hole
Package/Case:	DO-201AD

Σχήμα 7.6: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά διόδου ασφαλείας για τους Ανιχνευτές Μέγιστου Σημείου Ισχύος

7.2 Στοιχεία ηλεκτρικών μερών των ηλεκτρικών συσσωρευτών παροχής και αποθήκευσης ενέργειας

Ξεκινώντας την ανάλυση των βασικών μερών της μονάδας παροχής και αποθήκευσης ενέργειας θα αναλύσουμε τους ηλεκτρικούς συσσωρευτές που επιλέχτηκαν προς χρήση. Από το Σχήμα 6.4 βλέπουμε ότι υπάρχουν τρείς συστοιχίες ηλεκτρικών συσσωρευτών τις οποίες αποτελούν οι B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B9, B10, B11 και B12. Οι συσσωρευτές αυτοί είναι τύπου **SPB 12-33** της εταιρίας **Systems Sunlight S.A.** . Στο Σχήμα 7.7 φαίνεται μια φωτογραφία του προτεινόμενου ηλεκτρικού συσσωρευτή και τα χαρακτηριστικά του όπως τα δίνει η εταιρία.

Specifications

Nominal Voltage 12 V					
Rated Capacity (25 °C)	20hr Rate (1,80V/cell) 34 Ah	10hr Rate (1,80V/cell) 33 Ah	5hr Rate (1,70V/cell) 32 Ah	1hr Rate (1,60V/cell) 21 Ah	
Dimensions (mm) & Weight (kg)	Length 195mm	Width 130mm	Height 155mm	Overall Height 168mm	Weight 10,20 kg
Number / Type of Terminals 2 / M6					

Technical Characteristics

Design Life at 20°C	10-12 years
Eurobat Classification	High Performance
Internal Resistance (Fully charged - 25°C)	10 mΩ
Short-circuit current	850 A
Max Charging Current	9,9 A
Min safe end Discharge Voltage	1,60 V/cell
Self discharge per month at 20°C	3%
Recommended Charging Voltage at 20°C	Stand-by use (V/cell): 2,25 to 2,30 Cycle use (V/cell): 2,40 to 2,50
Container Material	ABS-UL94 HB
Electrolyte Type	Sulfuric Acid
Type of plates / Alloy	Flat plates / Lead-Calcium-Tin alloy
Type of Separator	Absorbant Glass Mat
Valve Type / Operational Pressure	Rubber / 1-3 psi (70-200 mbar)

Σχήμα 7.7: Φωτογραφία και χαρακτηριστικά προτεινόμενου ηλεκτρικού συσσωρευτή

Είναι συσσωρευτές μολύβδου (Pb) κλειστού τύπου (VRLA) και χρησιμοποιούν φύλλα υαλονημάτων για την αποθήκευση του ηλεκτρολύτη (AGM). Η χωρητικότητά τους ανέρχεται στα **33Ah** ο κάθε ένας με τάση στα **12 Volt**. Το βάρος τους ανέρχεται στα 10,2 kg. Είναι κατάλληλοι για συνεχή χρήση κύκλου φόρτισης-αποφόρτισης και βαθειάς αποφόρτισης. Η χρήση 12 τέτοιων ηλεκτρικών συσσωρευτών μας εξασφαλίζει **99 Ah** στα **48 Volt** με συνολικό βάρος **122,4 kg** με όριο, από τους κανόνες του διαγωνισμού τα **125 kg,** για την χρήση μπαταριών μολύβδου (Pb).

Το επόμενο σημαντικό εξάρτημα είναι οι τέσσερις ανεμιστήρες που υπάρχουν στα δύο κουτιά των ηλεκτρικών συσσωρευτών. Οι ανεμιστήρες αυτοί, σύμφωνα με το Σχήμα 6.4, είναι οι FAN1, FAN2, FAN3 και FAN4 από τους οποίους ο 1 και ο 3 εισάγουν τον αέρα από την μια μεριά του κουτιού και ο 2 και ο 4 τον εξάγουν ώστε να υπάρχει σταθερή ροή. Οι ανεμιστήρες αυτοί θα έχουν διάσταση φτερωτής στα 20 εκατοστά και θα έχουν τάση λειτουργίας στα 12 Volt. Ένας προτεινόμενος τύπος είναι ο **Spectre Pro** της εταιρίας **BitFenix Co. Ltd.** με ροή αέρα που κυμαίνεται στα **442,5 λίτρα αέρα ανά λεπτό** με απόκλιση 10% και παραγόμενο θόρυβο στις μέγιστες στροφές, οι οποίες είναι **900 rpm** στα **25,6 dB**. Στο Σχήμα 7.8 φαίνεται μια φωτογραφία του προτεινόμενου ανεμιστήρα.

Σχήμα 7.8: Φωτογραφία του προτεινόμενου ανεμιστήρα για την δημιουργία ροής αέρα στα κουτιά των ηλεκτρικών συσσωρευτών

Συνεχίζοντας στο Σχήμα 6.5 βλέπουμε το επόμενο εξάρτημα που είναι οι τρείς αυτόματοι διακόπτες F5, F6 και F7. Οι προτεινόμενοι διακόπτες είναι τύπου MNEDC70 της εταιρίας **MidNite Solar** με δυνατότητα διακοπής και χρήσης υπό φορτία μέχρι **70 Amber** συνεχούς ρεύματος, μέγιστης τάσης **150 Volt.** Η επιλογή αυτής της τιμής ασφάλειας έγινε γιατί από το σύστημα διαχείρισης κινητήρα η μέγιστη δυνατή ένταση λειτουργίας είναι τα 200 Amber για μικρό βέβαια χρονικό διάστημα. Επομένως, αν και η συνεχής χρήση που έχει επιλεγεί είναι τα 100 Amber, πρέπει να έχουμε την δυνατότητα κατά περίπτωση χρήσης της μέγιστης. Ο

αυτόματος αυτός διακόπτης εξωτερικά έχει το ίδιο μέγεθος και διαστάσεις με τον αντίστοιχο των 10 Amber που αναφέρθηκε παραπάνω στην ενότητα 7.1.

Ένα ακόμα σημαντικό εξάρτημα που φαίνεται στο Σχήμα 6.5 είναι ο μετατροπέας τάσης από τα 48 Volt παροχής των μπαταριών στα 12 Volt που λειτουργούν οι ανεμιστήρες. Ο μετατροπέας αυτός με σύμβολο CONV1 έχει τύπο **KDCC4812-400-5W 35A** και πωλείται από την εταιρία **Kelly Controls LLC**. Η ισχύς του ανέρχεται στα 400 Watt και μπορεί να παρέχει μέγιστο ρεύμα στην έξοδο μέχρι τα 35 Amber. Οι ανεμιστήρες που προτείναμε έχουν κατανάλωση 0,38 Amber έκαστος, επομένως θα έχουν συνολική κατανάλωση περί τα 1,52 Amber και θα υπάρχει και αρκετή δυνατότητα για υποστήριξη περισσότερων βοηθητικών κυκλωμάτων όταν αυτά συμπεριληφθούν. Στο Σχήμα 7.9 βλέπουμε μια φωτογραφία του προτεινόμενου μετατροπέα.

Σχήμα 6.9: Φωτογραφία του προτεινόμενου μετατροπέα τάσης για την τροφοδότηση των βοηθητικών κυκλωμάτων του οχήματος

Τέλος, τα δύο τελευταία εξαρτήματα που έχουμε στο κύκλωμα αποθήκευσης και παροχής ενέργειας είναι οι δύο διακόπτες SW1 και SW2. Ο πρώτος διακόπτης εξυπηρετεί τη δυνατότητα απενεργοποίησης του μετατροπέα και μπορεί να είναι τύπου **1TL1-6** της εταιρίας **Honeywell Sensing and Control SA**. Ο διακόπτης αυτός μπορεί να λειτουργήσει σε ένταση λειτουργίας μέχρι τα 20 Amber και τάση συνεχούς ρεύματος 250 Volt, τιμές που υπερκαλύπτουν την παρούσα χρήση. Στο Σχήμα 7.10 δίνεται η φωτογραφία του προτεινόμενου διακόπτη.

Σχήμα 7.10: Φωτογραφία προτεινόμενου διακόπτη για τον έλεγχο λειτουργίας του μετατροπέα τάσης

Για τον δεύτερο διακόπτη ο προτεινόμενος τύπος είναι ο **641H/2K** της εταιρίας **APEM**. Ο διακόπτης αυτός μπορεί να λειτουργήσει σε ένταση λειτουργίας μέχρι τα 15 Amber και τάση συνεχούς ρεύματος 24 Volt, τιμές που υπερκαλύπτουν την παρούσα χρήση. Στο Σχήμα 7.11 δίνεται η φωτογραφία του προτεινόμενου διακόπτη.

Σχήμα 7.11: Φωτογραφία προτεινόμενου διακόπτη για τον έλεγχο λειτουργίας των ανεμιστήρων αερισμού των κουτιών αποθήκευσης των ηλεκτρικών συσσωρευτών

7.3 Στοιχεία ηλεκτρικών μερών του Συστήματος Διαχείρισης Ηλεκτρικού Κινητήρα

Το τελευταίο ηλεκτρικό μέρος του οχήματος είναι το σύστημα διαχείρισης κινητήρα και ο κινητήρας. Τα στοιχεία αυτά απορροφούν (η παίρνουν),την ενέργεια από τους ηλεκτρικούς συσσωρευτές και τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες για να την μετατρέψουν σε κίνηση του οχήματος. Το πρώτο λοιπόν και πιο βασικό εξάρτημα αυτού του συστήματος είναι ο κινητήρας MOTOR1 σύμφωνα και με το Σχήμα 6.6, ο οποίος στην περίπτωση της παρούσας πρότασης έχει τύπο **PMG 132** της εταιρίας **Heinzmann GmbH & Co** με τεχνολογία από την αγορασμένη **Perm Motor**. Ο κινητήρας αυτός είναι συνεχούς ρεύματος μόνιμου μαγνήτη με ψύκτρες. Όπως αναφέρει και η εταιρία έχει απόδοση περί το 90% στο μεγαλύτερο μέρος του εύρους λειτουργίας του. Ο ηλεκτρικός κινητήρας αυτός έχει δυνατότητα λειτουργίας από τα 24 έως τα 72 Volt αλλά με σταθερή μέγιστη συνεχή κατανάλωση ρεύματος τα 100 Amber. Ουσιαστικά αλλάζοντας την τάση στην οποία δουλεύει ανά εφαρμογή αλλάζει και η ισχύς που προσφέρει. Στο Σχήμα 7.12 φαίνεται μια φωτογραφία και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού κινητήρα που επιλέχθηκε.

Motor data					
	Voltage	24 V	36 V	48 V	60 V	72 V
	Rated power	2.3 kW	3.6 kW	4.8 kW	6.0 kW	7.3 kW
	Speed	1080 min^{-1}	1700 min^{-1}	2300 min^{-1}	2870 min^{-1}	3480 min^{-1}
	current in duty type S1	max. 100 A				
	Rated torque	20 Nm				
	current in short-time duty S2 10 min	210 A				
	Peak torque	38 Nm				
	Mass inertia	0.025 kgm^2				
	Inductance	0.019 mH				
	Resistance	16 mΩ				
	Weight	approx. 11 kg				

Σχήμα 6.12: Ο ηλεκτρικός κινητήρας συνεχούς ρεύματος που επιλέχθηκε και τα τεχνικά χαρακτηριστικα του

Το επόμενο βασικό εξάρτημα που βλέπουμε από το Σχήμα 6.6 είναι το σύστημα διαχείρισης του κινητήρα, το οποίο περιλαμβάνει μια γεννήτρια παραγωγής παλμών. Το σύστημα που επιλέχθηκε είναι τύπου **KD48301** της εταιρίας **Kelly Controls LLC**. Οι δυνατότητες του είναι συνεχής παροχή ρεύματος στα **120 Amber** με δυνατότητα παροχής ρεύματος στα **300 Amber** για διάστημα ενός λεπτού. Τα χαρακτηριστικά αυτά καλύπτουν απόλυτα της προδιαγραφές χρήσης της κατασκευής που προτείνεται. Οι παλμοί με τους οποίους διαχειρίζεται τον κινητήρα είναι συχνότητας **16,6 kHz**. Στο Σχήμα 7.13 φαίνεται το σύστημα διαχείρισης και συγκεκριμένα η μπροστινή πλευρά της μονάδας.

Σχήμα 7.13: Φωτογραφία της μπροστινής πλευράς του συστήματος διαχείρισης του ηλεκτρικού κινητήρα

Τα επόμενα δύο πολύ βασικά εξαρτήματα που βλέπουμε στο Σχήμα 6.6 είναι οι δύο ηλεκτρονόμοι RL1 και RL2. Ο πρώτος χρησιμεύει για τη γενική απενεργοποίηση του κυκλώματος του συστήματος διαχείρισης και του κινητήρα και ο δεύτερος για να καθοριστεί η φορά κίνησης του κινητήρα. Ο τύπος του πρώτου ηλεκτρονόμου είναι ο **ZJW400A** και του δεύτερου είναι ο **ZJWT400A** και οι δύο της εταιρίας **Kelly Controls LLC**. Έχουν και οι δύο δυνατότητα να αποκόπτουν συνεχές ρεύμα με μέγιστη ένταση τα **400 Amber** και τάση **84 Volt**. Στο σχήμα 7.14 φαίνονται οι δύο αυτοί ηλεκτρονόμοι με τον πρώτο στα αριστερά και τον δεύτερο στα δεξιά.

Σχήμα 7.14: Φωτογραφία των δύο ηλεκτρονόμων ελέγχου της λειτουργίας του κινητήρα και φοράς στρέψης

Δύο πολύ βασικά εξαρτήματα που βλέπουμε στο Σχήμα 6.6 είναι και τα δύο πετάλια ελέγχου του ηλεκτρικού γκαζιού και του ηλεκτρικού φρένου τα οποία συμβολίζονται με PEDAL1 και PEDAL2 αντίστοιχα. Το πετάλι του ηλεκτρικού γκαζιού λειτουργεί με παροχή σταθερής τάσης 5 Volt και γείωσης από το σύστημα διαχείρισης και επιστρέφει τάση ανάλογα τη θέση του. Αντίστοιχα, το πετάλι του ηλεκτρικού φρένου έχει μια μεταβλητή αντίσταση η τιμή της οποίας μετράται από το σύστημα διαχείρισης για να γνωρίζει την θέση του. Και τα δύο πετάλια έχουν έναν εσωτερικό διακόπτη για να ειδοποιούν το σύστημα διαχείρισης πότε ο χρήστης τα χρησιμοποιεί. Στο Σχήμα 7.15 φαίνονται τα δύο πετάλια με το αριστερό να είναι του γκαζιού και το δεξί του φρένου.

Σχήμα 7.15: Φωτογραφίες των δύο πεταλιών του γκαζιού και του φρένου αριστερά και δεξιά αντίστοιχα

Δύο ακόμα πολύ σημαντικά μέρη του κυκλώματος είναι οι τηκόμενες ασφάλειες F8 και F9. Η πρώτη είναι μια κλασσική ασφάλεια με τιμή στα **10 Amber** του τύπου που χρησιμοποιούνται και στα οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης. Ο ρόλος της είναι η προστασία του βοηθητικού κυκλώματος του συστήματος διαχείρισης του κινητήρα. Η δεύτερη ασφάλεια είναι τύπου **ANE 300A** της εταιρίας **Kelly Controls LLC**. Η αντοχή της σε ρεύμα ανέρχεται στα **300 Amber** και ρόλος της είναι η προστασία του κυκλώματος λειτουργίας του κινητήρα. Στο σχήμα 6.16 φαίνονται οι δύο τύποι ασφαλειών. Στα αριστερά είναι ένα υπόδειγμα ασφάλειας στα 10 Amber, ενώ δεξιά είναι η δεύτερη συγκεκριμένου τύπου.

Σχήμα 6.16: Οι δύο τύποι ασφαλειών για το βοηθητικό και για το κύριο κύκλωμα του συστήματος διαχείρισης του ηλεκτρικού κινητήρα

Οι δίοδοι D5, D6 και D7 από το Σχήμα 6.6 είναι τύπου **1N4002** της εταιρίας **Fairchild Semiconductor**. Σύμφωνα με την εταιρία αντέχουν ανάστροφη τάση **100 Volt** και ρεύμα ορθής φοράς λειτουργίας **1 Amber**. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι και τα ζητούμενα από τον κατασκευαστή των ηλεκτρονόμων για να μην επιστρέφεται ρεύμα από τα πηνία των ηλεκτρονόμων όταν αυτά απενεργοποιούνται.

Ακόμα η αντίσταση R1 μπορεί να είναι τύπου **40J300E** της εταιρίας **Ohmite**. Τα χαρακτηριστικά της είναι η τιμή αντίστασης στα **300 Ohm** και η αντοχή σε ισχύ τα **10 Watt**. Στο Σχήμα 7.17 φαίνεται μια φωτογραφία του τύπου της διόδου αριστερά και ένα σχέδιο του τύπου της αντίστασης δεξιά.

Σχήμα 7.17: Φωτογραφία του προτεινόμενου τύπου διόδου και σχέδιο του προτεινόμενου τύπου αντίστασης

Τέλος, οι δύο διακόπτες SW3 και SW4 είναι αντίστοιχα ο διακόπτης εκκίνησης της λειτουργίας του συστήματος διαχείρισης και ο διακόπτης επιλογής φοράς περιστροφής του κινητήρα. Οι δύο αυτοί διακόπτες διατίθενται έτοιμοι συναρμολογημένοι μέσα σε κουτί με καλώδιο σύνδεσης προς το υπόλοιπο κύκλωμα από την εταιρία κατασκευής του συστήματος διαχείρισης, από όπου και προτείνεται η προμήθειά τους. Στο Σχήμα 7.18 φαίνονται οι δύο αυτοί διακόπτες μαζί με δύο ποτενσιόμετρα χειρισμού άλλων λειτουργιών.

Σχήμα 7.18: Φωτογραφία του κουτιού που περιέχει τους δύο διακόπτες εκκίνησης και επιλογής φοράς

Τέλος, από τους κανονισμούς πρέπει να συμπεριληφθούν και δύο αυτόματοι διακόπτες οι οποίοι θα πρέπει να τοποθετηθούν στο εξωτερικό μέρος του οχήματος, ώστε σε περίπτωση ανάγκης να μπορεί κάποιος από το εξωτερικό μέρος του οχήματος να απομονώσει τα τρία συστήματα μεταξύ τους, όπως φαίνεται και

στο Σχήμα 6.7. Ο πρώτος που θα αποκόπτει το κύκλωμα παροχής ενέργειας από το φωτοβολταϊκά και θα είναι της τάξεως των **40 Amber** και ο δεύτερος που θα αποκόπτει τους ηλεκτρικούς συσσωρευτές και θα είναι της τάξεως των **250 Amber**, πάντα σε συνεχές ρεύμα με μέγιστη τάση λειτουργίας τα 150 Volt και τα 125 Volt αντίστοιχα. Ο πρώτος είναι τύπου **MNEDC40** και ο δεύτερος **MNEDC250** και οι δύο από την εταιρία **Midnite Solar**. Οι αυτόματοι αυτοί διακόπτες εξωτερικά έχουν το ίδιο μέγεθος και διαστάσεις με τον αντίστοιχο των 10 Amber που αναφέρθηκε παραπάνω στην ενότητα 7.1.

Κεφάλαιο 8^{ο} : Παρουσίαση Μετρήσεων και Δεδομένων

8.1 Μετρήσεις και Δεδομένα που ελήφθησαν από την πειραματική διαδικασία επιλογής του βέλτιστου τρόπου τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών κυψελών στην επιφάνεια του οχήματος

8.1.1 Εισαγωγή

Σκοπός αυτής της πειραματικής διαδικασίας ήταν να αξιοποιήσουμε τις φωτοβολταϊκές κυψέλες της εταιρίας Solar Cells Hellas, μοντέλο **SCH6P-80** με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ενεργειακή τροφοδότηση των ηλεκτρικών συσσωρευτών του υπό κατασκευή ηλεκτροηλιακού οχήματος. Τελικός στόχος ήταν να συλλεχθούν αρκετά δεδομένα κάνοντας χρήση διαφόρων υλικών έτσι ώστε να καταλήξουμε:

α) Στη βέλτιστη δυνατή κατασκευή φωτοβολταϊκών συστοιχιών για τοποθέτηση στο ηλεκτροηλιακό όχημα
β) Στη μελέτη των υλικών κατασκευής της φωτοβολταϊκής συστοιχίας με όσο το δυνατόν μικρότερες απώλειες ισχύος
γ) Στη μελέτη και επιλογή των υλικών της φωτοβολταϊκής συστοιχίας, με τις απαραίτητες ιδιότητες για τη χρήση τους στο όχημα (χαμηλό βάρος, εφικτή κατασκευή, δυνατότητα χρήσης σε μη επίπεδες επιφάνειες)

8.1.2 Ανάλυση Διαθέσιμων Υλικών

Τα υλικά που είχαμε στην διάθεσή μας για τη μελέτη και χρήση τους στην παραγωγή ενός πάνελ, ήταν τα εξής:

Υλικά Υποστήριξης

1. *Πλάκες carbon-fiber:*
   Περιγραφή: Στρώματα υφάσματος ινών άνθρακα εμποτισμένα σε μίγμα εποξικής ρητίνης και σκληρυντή
   Πλεονεκτήματα:
   α) Ανθεκτικό σε στρέψεις και κάμψεις
   β) Μέτριας δυσκολίας διαδικασία παραγωγής
   γ) Καλή θερμική αγωγιμότητα
   δ) Μικρό βάρος

Μειονεκτήματα:

α) Ηλεκτρική Αγωγιμότητα που συνεπάγεται απώλειες ισχύος

Μέσο κόστος τετραγωνικού μέτρου: 30 Euro

2. *Αδιαφανείς μεμβράνες Tedlar:*

Περιγραφή: Μεμβράνες λευκού χρώματος κατάλληλες για χρήση ως υπόστρωμα σε φωτοβολταϊκές συστοιχίες

Πλεονεκτήματα:

α) Μικρό κόστος

β) Καλή θερμική αγωγιμότητα

γ) Μηδενική ηλεκτρική αγωγιμότητα

δ) Μικρό βάρος

ε) Μηδενική δυσκολία παραγωγής (υλικό έτοιμο για χρήση)

Μειονεκτήματα:

α) Μεγάλη ευκαμψία με αποτέλεσμα τη χρήση και κάποιου άλλου υλικού υποστήριξης

Μέσο κόστος τετραγωνικού μέτρου: 11,75 Euro

3. *Πλάκα από σάντουιτς υαλονημάτων με honeycomb*

Περιγραφή: Στρώματα υφάσματος ινών γυαλιού και εσωτερικά τους τοποθέτηση φύλου honeycomb εμποτισμένα σε μίγμα εποξικής ρητίνης και σκληρυντή

Πλεονεκτήματα:

α) Μικρό βάρος

β) Μηδενική ηλεκτρική αγωγιμότητα

γ) Ανθεκτικό σε στρέψεις και κάμψεις

δ) Δυνατότητα διαμόρφωσης των πλακών για κάλυψη μη επίπεδων επιφανειών με παράλληλη υποστήριξη των φωτοβολταϊκών κυψελών

Μειονεκτήματα:

α) Μέτρια θερμική αγωγιμότητα

β) Μεγάλη δυσκολία διαδικασίας παραγωγής

γ) Μεγάλο κόστος

Μέσο κόστος τετραγωνικού μέτρου: 205 Euro

Υλικά Ενθυλάκωσης Κυψελών

5. *Διαφανείς μεμβράνες EVA(Ethylene Vinyl Acetate)*

Περιγραφή: Διαφανείς μεμβράνες κατασκευασμένες για χρήση σε εφαρμογές επικάλυψης φωτοβολταϊκών κυψελών

Πλεονεκτήματα:

α) Ως μεμβράνη το υλικό κατά την επεξεργασία του δεν αφήνει να παγιδευτεί αέρας στο εσωτερικό του

β) Μικρό κόστος

γ) Μηδενική ηλεκτρική αγωγιμότητα

δ) Μηδενική δυσκολία παραγωγής (υλικό έτοιμο για χρήση)

Μειονεκτήματα:

α) Χειρότερη διαπερατότητα από την ηλιακή ακτινοβολία σε σχέση με τα άλλα υλικά

β) Εύκολα διαμορφώσιμο

Μέσο κόστος τετραγωνικού μέτρου: 13,5 Euro

6. *Διάφανη σιλικόνη Sylgard 184*

   Περιγραφή: Διάφανη ελαστομερής σιλικόνη δύο συστατικών με προδιαγραφές για χρήση σε φωτοβολταϊκές εφαρμογές

   Πλεονεκτήματα:

   α) Ευκολία στη χρήση

   β) Μεγάλη διαπερατότητα στο φώς

   Μειονεκτήματα:

   α) Ακριβό ως προς τα άλλα υλικά

   β) Δημιουργία φυσαλίδων αέρα όταν χρησιμοποιείται ανάμεσα στο φωτοβολταϊκό και στο υλικό υποστήριξης

   Μέσο κόστος ανά κιλό υλικού: 36,5 Euro

7. *Ακρυλικό βερνίκι*

   Περιγραφή: Ακρυλικό βερνίκι με προδιαγραφές για χρήση σε βαφές αυτοκινήτου

   Πλεονεκτήματα:

   α) Μεγάλη διαπερατότητα στο φώς

   β) Δυνατότητα επισκευής χωρίς απώλειες

   γ) Ευκολία στη χρήση

   Μειονεκτήματα:

   α) Δημιουργία φυσαλίδων αέρα όταν χρησιμοποιείται ανάμεσα στο φωτοβολταϊκό και στο υλικό υποστήριξης

   Μέσο κόστος ανά λίτρο: 50 Euro

8.1.3 Ανάλυση αξιοποίησης των παραπάνω υλικών

<u>Τα συμπεράσματα των μη λειτουργικών δοκιμίων ήταν τα εξής:</u>

- **Tedlar-EVA-Carbon-EVA**

Χρησιμοποιήσαμε στη θέση της φωτοβολταϊκής κυψέλης μια λεπτή πλάκα carbon για να μελετήσουμε τις μηχανικές ιδιότητες των Tedlar και EVA. Αρχικά, κόψαμε ένα κομμάτι Tedlar και δύο κομμάτια EVA ίδιων διαστάσεων και ένα κομμάτι από carbon σε διαστάσεις φωτοβολταϊκής κυψέλης. Τοποθετήσαμε τα υλικά με τη σειρά Tedlar-EVA-Carbon-EVA και το σάντουιτς αυτό το θερμάναμε σε χαμηλή θερμοκρασία. Διαπιστώσαμε ότι τα υλικά αυτά συνεργάζονται ικανοποιητικά μεταξύ τους και προχωρήσαμε στην επόμενη δοκιμή.

- **Tedlar-EVA-Φωτοβολταϊκή Κυψέλη-EVA**

Στη δοκιμή αυτή αντικαταστήσαμε το φύλλο carbon με ένα κομμάτι φωτοβολταϊκής κυψέλης και διαπιστώσαμε ότι το cell ενθυλακώνεται καλά χωρίς να δημιουργούνται φυσαλίδες. Το βασικό μειονέκτημα όμως είναι ότι οι μηχανικές ιδιότητες των υλικών δεν επιτρέπουν τη διατήρηση της φωτοβολατϊκής κυψέλης σε ακέραια κατάσταση. Δηλαδή η κυψέλη καταστρέφεται με μεγάλη ευκολία.

- **Tedlar-EVA-Φωτοβολταϊκή Κυψέλη-EVA-Glass με επεξεργασία υπό Κενό**

Στη δοκιμή αυτή χρησιμοποιήσαμε τα ίδια υλικά με παραπάνω μόνο που αυτή τη φορά χρησιμοποιήσαμε ως μέσο στήριξης ένα κομμάτι γυαλί. Το μέσο στήριξης κρίθηκε απαραίτητο, ώστε να τοποθετηθούν όλα τα υλικά μέσα σε ειδική σακούλα υπό κενό και κατόπιν να θερμανθούν. Ο λόγος χρήσης του κενού ήταν για να μελετήσουμε τη βελτίωση της συναρμογής των υλικών. Η συναρμογή ήταν πολύ καλύτερη αλλά όταν προσπαθήσαμε να το αποκολλήσουμε από το γυαλί για να πάρουμε το τελικό προϊόν μελέτης το cell έσπαγε, καθιστώντας τη διαδικασία αυτή μη χρηστική.

- **Carbon-EVA-Φωτοβολταϊκή Κυψέλη-EVA με επεξεργασία υπό Κενό**

Στη δοκιμή τοποθετήσαμε ως υπόστρωμα αντί για Tedlar, το οποίο ήταν αρκετά εύκαμπτο, μια πλάκα carbon. Το αποτέλεσμα ήταν από μηχανικές ιδιότητες αρκετά ικανοποιητικό.

Σχήμα 8.1: Σε αυτή τη φωτογραφία βλέπουμε από αριστερά προς τα δεξιά κατά σειρά τις παραπάνω δοκιμές

Τα συμπεράσματα των λειτουργικών δοκιμίων ήταν τα εξής:

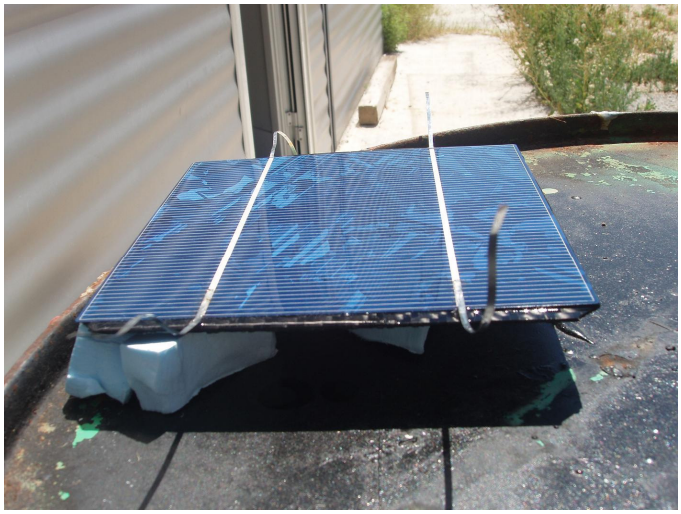
- **Carbon-EVA-Φωτοβολταϊκή Κυψέλη-EVA-Διάφανη Μεμβράνη Anti-Scratch με επεξεργασία υπό Κενό**

Στη πρώτη δοκιμή με λειτουργική φωτοβολταϊκή κυψέλη χρησιμοποιήσαμε ως υλικό στήριξης μια πλάκα carbon, ενθυλακώσαμε το cell ανάμεσα σε δύο φύλλα EVA και από την πάνω πλευρά τοποθετήσαμε μια ειδική μεμβράνη που αποτρέπει την εύκολη χάραξη. Ο λόγος που προσθέσαμε τη μεμβράνη αυτή είναι ότι το EVA χαράζεται εύκολα. Κατόπιν, χρησιμοποιήσαμε τη τεχνική θέρμανσης σε σακούλα κενού για να υπάρχει καλή συναρμογή όλων των υλικών. Το τελικό αποτέλεσμα ήταν ικανοποιητικό. Το βασικό μειονέκτημα της δοκιμής ήταν ότι οι απώλειες ισχύος ήταν της τάξεως του 15%. Το πλεονέκτημα ήταν ότι το συνολικό αποτέλεσμα είχε πολύ καλές αντοχές.

Σχήμα 8.2: Η πρώτη λειτουργική δοκιμή Carbon-EVA-Φωτοβολταϊκή Κυψέλη-EVA-Διάφανη Μεμβράνη Anti-Scratch σε Vacuum

- **Carbon-Ελαστομερής Διάφανη Σιλικόνη-Φωτοβολταϊκή Κυψέλη-Ελαστομερής Διάφανη Σιλικόνη**

Στη δεύτερη δοκιμή με λειτουργική φωτοβολταϊκή κυψέλη χρησιμοποιήσαμε αντί για EVA την ειδική ελαστομερή σιλικόνη. Ο τρόπος κατασκευής ήταν η εφαρμογή ποσότητας σιλικόνης πάνω στο φύλλο carbon με χρήση πινέλου και κατόπιν τοποθέτηση της φωτοβολταϊκής κυψέλης και τέλος άλλη μια στρώση σιλικόνης πάνω από το cell. Αφού τα υλικά στέγνωσαν στον ήλιο, διαπιστώσαμε απώλειες ισχύος της τάξεως του 10% και ότι η κυψέλη μετά από πίεση, ράγιζε λόγω της ευπλαστότητας της σιλικόνης και της ύπαρξης φυσαλίδων αέρα στη σιλικόνη ανάμεσα στην κυψέλη και στο φύλλο carbon.

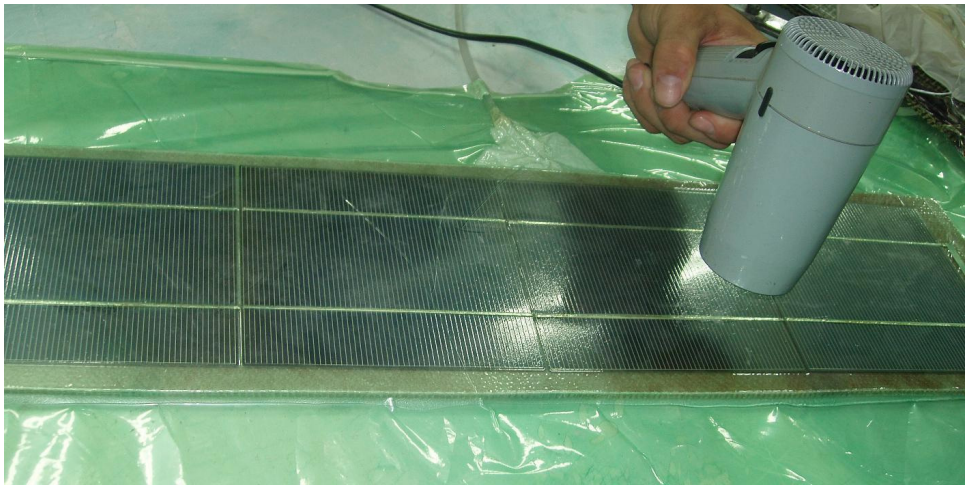


Σχήμα 8.3: Η δεύτερη λειτουργική δοκιμή Carbon-Ελαστομερής Διάφανη Σιλικόνη-Φωτοβολταϊκή Κυψέλη-Ελαστομερής Διάφανη Σιλικόνη

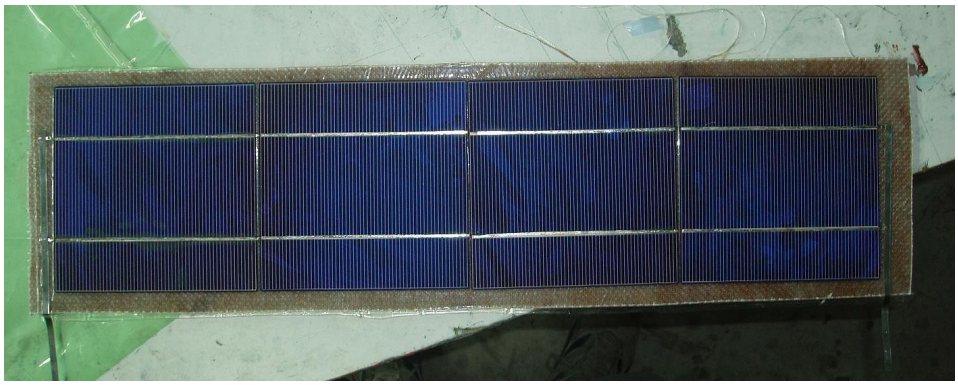
- **Σάντουιτς υαλονημάτων με honeycomb-EVA-Φωτοβολταϊκή Κυψέλη-Ελαστομερής Διάφανη Σιλικόνη με επεξεργασία υπό Κενό**

Σε αυτή την δοκιμή αποφασίσαμε να κάνουμε χρήση σάντουιτς υαλονημάτων με honeycomb, αντί για φύλο carbon, για να επιτύχουμε τις ίδιες μηχανικές ιδιότητες, αλλά και για να αποφύγουμε τις όποιες απώλειες λόγω ηλεκτρικής αγωγιμότητας του carbon. Η διαδικασία κατασκευής που ακολουθήθηκε ήταν το κόψιμο κατάλληλου μεγέθους από το σάντουιτς υαλονημάτων με honeycomb για να μπορεί να τοποθετηθεί πάνω του μια συστοιχία τεσσάρων φωτοβολταϊκών. Κατόπιν, κόψαμε όμοιου μεγέθους φύλλο EVA και αφού τα τοποθετήσαμε, μαζί με την συστοιχία, σε σακούλα υπό κενό τα θερμάναμε για να δέσουν όλα μεταξύ τους. Αφού ολοκληρώθηκε αυτή η διαδικασία τοποθετήσαμε ποσότητα σιλικόνης και το αφήσαμε να σκληρύνει. Το αποτέλεσμα δυστυχώς δεν ήταν το αναμενόμενο, καθώς το EVA με την σιλικόνη δεν συνεργάστηκαν σωστά μεταξύ τους, με αποτέλεσμα η σιλικόνη στα σημεία που ερχόταν σε επαφή με το EVA να μην σκληρύνει και να διαβρώσει το EVA. Παρόλα αυτά δοκιμάσαμε να δούμε τις δυνατότητες ευλυγισίας της όλης κατασκευής κάνοντας χαρακιές βάθους δυο περίπου χιλιοστών, στα σημεία που χωρίζονται τα φωτοβολταϊκά μεταξύ τους από την πίσω πλευρά της επιφάνειας, και πλάτους άλλων δύο χιλιοστών. Το αποτέλεσμα ήταν ένα κομμάτι

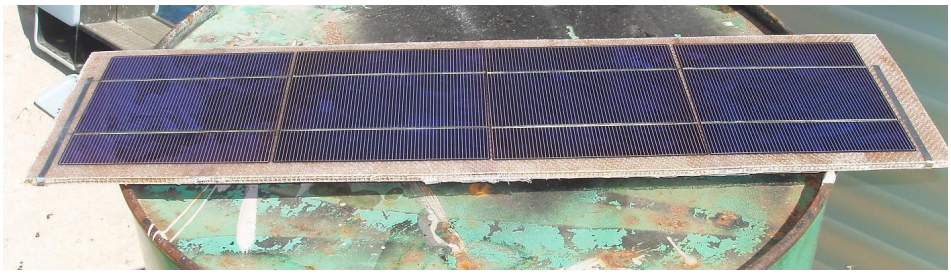
αποτελούμενο από τέσσερα τετράγωνα το οποίο μπορούσε να λυγίσει, έχοντας την δυνατότητα να συγκρατεί τις φωτοβολταϊκές κυψέλες άκαμπτες.



Σχήμα 8.4: Εφαρμογή θέρμανσης στα υλικά υπό κενό



Σχήμα 8.5: Το ολοκληρωμένο δοκίμιο χωρίς να έχει τοποθετηθεί η προστατευτική σιλικόνη



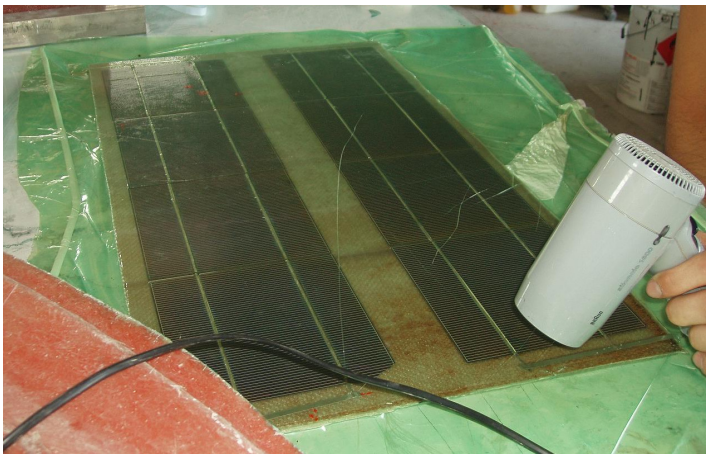
Σχήμα 8.6: Το δοκίμιο μετά την εφαρμογή της σιλικόνης καθώς βρίσκεται στην φάση σκλήρυνσης

- **Σάντουιτς υαλονημάτων με honeycomb-EVA-Φωτοβολταϊκή Κυψέλη-Ακρυλικό βερνίκι με επεξεργασία υπό Κενό**

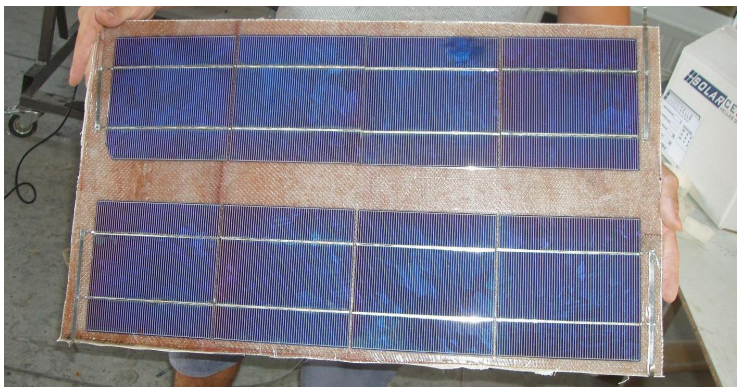
Στην τελευταία αυτή δοκιμή ακολουθήσαμε την ίδια αρχικά διαδικασία με τη διαφορά ότι αντί για σιλικόνη χρησιμοποιήσαμε ακρυλικό βερνίκι. Το αποτέλεσμα ήταν δύο συστοιχίες με απώλειες ισχύος μόνο 5% και με πολύ καλές μηχανικές ιδιότητές και αντοχή. Δηλαδή οι φωτοβολταϊκές κυψέλες δεν

ράγιζαν ασκώντας τους πίεση, δεν σχηματίστηκαν φυσαλίδες, το βερνίκι δεν χαραζόταν και είχαμε πολύ καλή απόδοση.

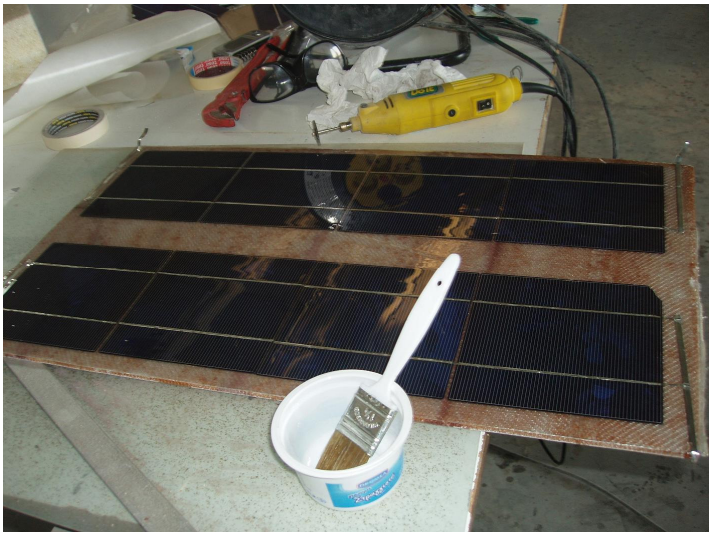
Καταλήξαμε λοιπόν στη χρήση αυτού του συνδυασμού υλικών, μαζί με την εφαρμογή χαρακιών σε ακριβή σημεία, ώστε το πάνελ να γίνει ευλύγιστο και να μπορεί να προσαρμοστεί στην καμπύλη επιφάνεια του οχήματος, τουλάχιστον ως προς τον ένα άξονα.



Σχήμα 8.7: Το τελικό δοκίμιο σε φάση προετοιμασίας υπό κενό



Σχήμα 8.8: Το τελικό δοκίμιο μετά την θέρμανση υπό κενό



Σχήμα 8.9: Το τελικό δοκίμιο μετά την εφαρμογή του ακρυλικού βερνικιού

8.2 Μετρήσεις και Δεδομένα που ελήφθησαν από την πειραματική διαδικασία εκτέλεσης αντοχής του οχήματος

8.2.1 Εισαγωγή

Η διαδικασία εκτέλεσης αντοχής του οχήματος έγινε δύο φορές, αλλάζοντας σε κάθε μια από τις δύο περιπτώσεις κάποια βασικά χαρακτηριστικά του οχήματος. Στόχος ήταν να διαπιστωθεί η αποδοτικότητα του οχήματος με διαφορετικές ρυθμίσεις και υλικά. Δυστυχώς λόγω της μη τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών συστοιχιών, οι ηλεκτρικοί συσσωρευτές του οχήματος φορτιζόντουσαν από κατάλληλο φορτιστή, που έπαιρνε ενέργεια από το δίκτυο παροχής ρεύματος. Τέλος, το όχημα χωρίς τον οδηγό ζυγίζει 253 kg.

8.2.2 Διεξαγωγή των πειραμάτων πρώτης δοκιμής

Κατά την πρώτη δοκιμή, τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού οχήματος ήταν τα εξής:

- Βάρος οδηγού 67 kg
- Τελική ταχύτητα οχήματος 65 km/h
- Λόγος γραναζιών μετάδοσης κίνησης 1:3,417
- Μέγιστη επιτρεπόμενη κατανάλωση ρεύματος τα 90 A

Με αυτά τα χαρακτηριστικά το όχημα έκανε 10 κύκλους το δρόμο που διατρέχει το Πολυτεχνείο Κρήτης. Οι χρόνοι που μετρήθηκαν με σημείο αναφοράς το χώρο στάθμευσης οχημάτων, έξω από το τμήμα των Μηχανικών Ορυκτών Πόρων φαίνονται στον Πίνακα 8.1. Επίσης, έχει προστεθεί η μέση ταχύτητα κάθε κύκλου και στο τέλος φαίνονται τα σύνολα.

	Λεπτά	Δευτερόλεπτα	Μήκος κύκλου (km)	Μέση Ταχύτητα (km/h)
1ος κύκλος	5	17	2,5	28,39116719
2ος κύκλος	5	1	2,5	29,90033223
3ος κύκλος	5	3	2,5	29,7029703
4ος κύκλος	5	7	2,5	29,31596091
5ος κύκλος	5	5	2,5	29,50819672
6ος κύκλος	5	20	2,5	28,125
7ος κύκλος	6	19	2,5	23,74670185
Σύνολο	37	12	17,5	28,38433274

Πίνακας 8.1 : Μετρημένοι χρόνοι γύρων πρώτης δοκιμής

Από τη διεξαγωγή της πρώτης δοκιμής συμπεραίνουμε εύκολα ότι ο λόγος γραναζιού μετάδοσης κίνησης, αν και προσφέρει τελική ταχύτητα στα 65 km/h, μας δίνει μέση ταχύτητα σχεδόν την μισή. Με αυτό το δεδομένο αλλάξαμε κάποια χαρακτηριστικά και μέρη του ηλεκτρικού οχήματος και έγινε η δεύτερη δοκιμή.

8.2.3 Διεξαγωγή των πειραμάτων δεύτερης δοκιμής

Κατά την δεύτερη δοκιμή τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού οχήματος ήταν τα εξής:

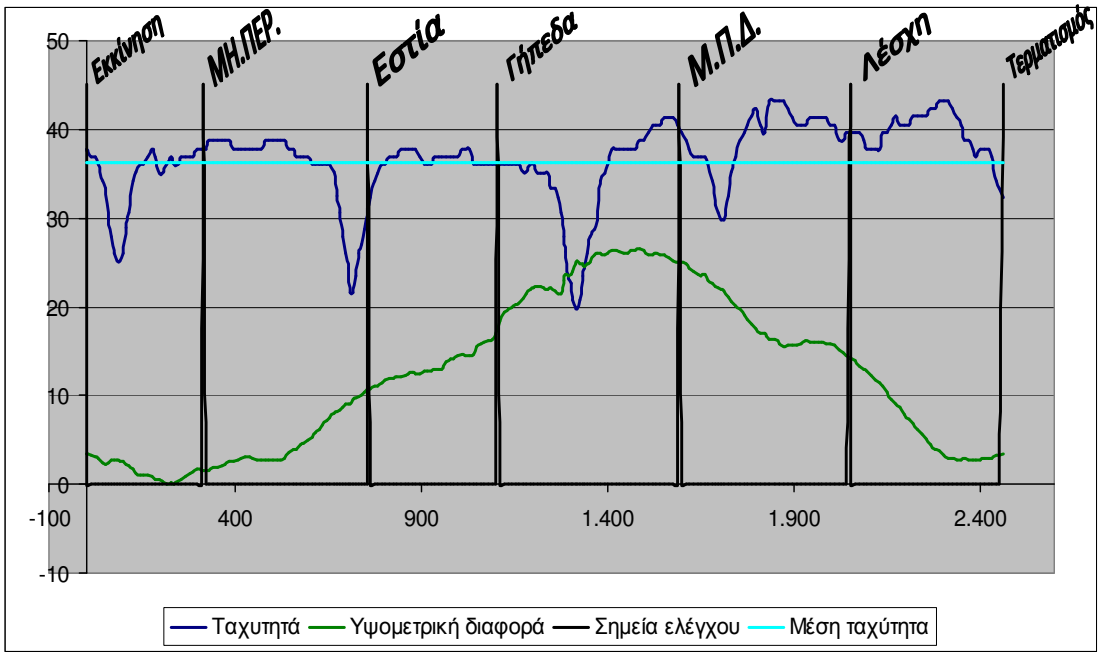
- Βάρος οδηγού 69 kg
- Τελική ταχύτητα οχήματος 46 km/h
- Λόγος γραναζιών μετάδοσης κίνησης 1:5
- Μέγιστη επιτρεπόμενη κατανάλωση ρεύματος τα 99 A

Με αυτά τα χαρακτηριστικά το όχημα έκανε 18 κύκλους το δρόμο που διατρέχει το Πολυτεχνείο Κρήτης. Οι χρόνοι που μετρήθηκαν με σημείο αναφοράς το χώρο στάθμευσης οχημάτων, έξω από το τμήμα των Μηχανικών Ορυκτών Πόρων φαίνονται στον Πίνακα 8.2. Επίσης έχει προστεθεί η μέση ταχύτητα κάθε κύκλου και στο τέλος φαίνονται τα σύνολα.

	Λεπτά	Δευτερόλεπτα	Μήκος κύκλου (km)	Μέση Ταχύτητα (km/h)
1ος κύκλος	4	59	2,46	30,27
2ος κύκλος	4	14	2,46	34,9
3ος κύκλος	4	5	2,46	36,28
4ος κύκλος	4	8	2,46	35,77
5ος κύκλος	4	6	2,47	36,18
6ος κύκλος	4	8	2,47	35,85
7ος κύκλος	4	24	2,47	33,63
8ος κύκλος	4	14	2,46	35,01
9ος κύκλος	4	5	2,47	36,22
10ος κύκλος	4	16	2,47	34,66
11ος κύκλος	4	12	2,47	35,29
12ος κύκλος	4	7	2,47	35,98
13ος κύκλος	4	22	2,47	33,87
14ος κύκλος	4	12	2,47	35,38
15ος κύκλος	4	29	2,47	33,14
16ος κύκλος	4	33	2,47	32,49
17ος κύκλος	5	8	2,47	28,94
18ος κύκλος	6	25	2,48	23,22
Σύνολο	80	7	44,53	32,85

Πίνακας 8.2 : Μετρημένοι χρόνοι γύρων δεύτερης δοκιμής

Είναι ξεκάθαρο από τον Πίνακα 8.2 ότι βελτιώθηκε η απόδοση του οχήματος, αφού μόνο με την αλλαγή του λόγου μετάδοσης οι κύκλοι ξεπέρασαν τους διπλάσιους. Επίσης όπως φαίνεται από το Σχήμα 8.10 το όχημα δεν αντιμετωπίζει δυσκολία στην κίνηση είτε βρίσκεται σε ανερχόμενο κεκλιμένο επίπεδο είτε κατερχόμενο κεκλιμένο επίπεδο. Τα δεδομένα ελήφθησαν με τη χρήση του προγράμματος RaceChrono v2.4 και στο σχήμα αναπαριστάται μόνο ο 3ος κύκλος ο οποίος είχε και την μεγαλύτερη μέση ταχύτητα. Στο Σχήμα 8.11 φαίνεται ο χάρτης της διαδρομής που ακολουθήθηκε και η τοποθέτηση των σημείων ελέγχου πάνω στην διαδρομή.



Σχήμα 8.10: Σχηματική αναπαράσταση του 3^{ου} κύκλου της δεύτερης δοκιμής. Ο κάθετος άξονας αναπαριστά km/h και m για την Ταχύτητα και την Υψομετρική διαφορά αντίστοιχα ενώ ο οριζόντιος είναι η απόσταση σε μέτρα από την εκκίνηση. Η Υψομετρική διαφορά αναπαριστάται θεωρώντας ως ύψος 0 το χαμηλότερο σημείο σε υψόμετρο της διαδρομής.

Σχήμα 8.11: Αναπαράσταση της διαδρομής που ακολούθησε το όχημα κατά τις δοκιμές και τα σημεία ελέγχου

Σχήμα 8.13: Το όχημα κατά την διάρκεια της δεύτερης δοκιμής

8.3 Εκτιμήσεις Απόδοσης Οχήματος

Χρησιμοποιώντας ως δεδομένο τις μετρήσεις που πήραμε στη δεύτερη δοκιμή, μελετήσαμε την απόδοση που θα είχε το όχημα, στην περίπτωση διενέργειας συγκεκριμένων βελτιώσεων. Χρησιμοποιήσαμε τον τύπο 8.3.1 ο οποίος παράγει μια εμπειρική προσέγγιση που αναπαριστά την Ενέργεια σε Wh που καταναλώνεται ανά χιλιόμετρο από ηλεκτροηλιακά οχήματα[1].

$$EPK_R = C_{RR}\left[1+\frac{V}{161}\right]W \text{ σε Wh/km} \qquad (8.3.1)$$

Όπου: **EPK_R** η ενέργεια που καταναλώνεται ανά χιλιόμετρο για την κίνηση του οχήματος

C_{RR} ο συντελεστής αντίστασης κύλισης των ελαστικών

V η μέση ταχύτητα του οχήματος σε km/h

W το βάρος του οχήματος σε Newton

Μετατρέπουμε τον τύπο 8.3.1 για να χρησιμοποιεί kg αντί για Newton και θα έχουμε:

$$EPK_R = C_{RR}\left[1+\frac{V}{161}\right]\frac{W_{kg}}{0.10197} \text{ σε Wh/km} \qquad (8.3.2)$$

Όπου: **EPK_R** η ενέργεια που καταναλώνεται ανά χιλιόμετρο για την κίνηση του οχήματος

C_{RR} ο συντελεστής αντίστασης κύλισης των ελαστικών
V η μέση ταχύτητα του οχήματος σε km/h
W_{kg} το βάρος του οχήματος σε kg

Χρησιμοποιώντας τον τύπο 8.3.2 και βάζοντας τις τιμές που μετρήσαμε και σαν τιμή του συντελεστή αντίστασης κύλισης το 0,02, το οποίο αντιστοιχεί στα ελαστικά που χρησιμοποιήσαμε, θα έχουμε:

$$EPK_R = C_{RR}\left[1+\frac{V}{161}\right]\frac{W_{kg}}{0{,}10197} =$$
$$= 0{,}02\left[1+\frac{32{,}85}{161}\right]\frac{322}{0{,}10197} =$$
$$76{,}042 Wh/km$$

Γνωρίζουμε ότι ο κινητήρας τροφοδοτείται σταθερά με τάση 48 Volt ανεξάρτητα από την τάση των μπαταριών, επομένως η χωρητικότητα ανά χιλιόμετρο που καταναλώνεται είναι 76,042/48=**1,584 Ah/km.** Εφόσον χρησιμοποιήσαμε τις μπαταρίες για 1 ώρα και 20 λεπτά (Πίνακας 8.2) από τα δεδομένα του κατασκευαστή των μπαταριών, η χωρητικότητα που μπορούν να προσφέρουν σε αυτό τον χρόνο είναι **75 Ah**. Επομένως τα χιλιόμετρα που μπορεί να διανύσει το όχημα είναι 75/1,584=**47,34 km**. Και επειδή η ταχύτητα που θέσαμε είναι τα 32,85 km/h θα τα καλύψει σε 47,34/32,85=1,44 h το οποίο είναι **1 ώρα και 26 λεπτά**. Βλέπουμε λοιπόν ότι η διαφορά των πραγματικών μετρήσεων (**44,53 km και 1 ώρα και 20 λεπτά**) και των υπολογισμών είναι αρκετά μικρή. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο ότι η εξίσωση αυτή δε λαμβάνει υπόψη της τις αεροδυναμικές απώλειες του οχήματος που αν και σε ταχύτητες κάτω των 40 km/h είναι πολύ μικρές είναι ικανές να δώσουν αυτήν τη μικρή διαφορά.

8.3.1 Πρόβλεψη απόδοσης του οχήματος με εφαρμογή φωτοβολταϊκών κυψελών πολυκρυσταλλικού πυριτίου

Λαμβάνοντας υπόψη την επαλήθευση του παραπάνω τύπου από τα πειράματα μπορούμε να κάνουμε κάποιες προβλέψεις εφόσον εφαρμοσθούν στο όχημα συγκεκριμένες βελτιώσεις. Η πρώτη βελτίωση θα είναι από καθαρά ηλεκτρικό το όχημα, όπως είναι αυτή τη στιγμή, να τοποθετηθούν οι φωτοβολταϊκές κυψέλες πολυκρυσταλλικού πυριτίου της εταιρίας Solar Cells Hellas, για τις οποίες έγινε και η ανάλυση στην ενότητα 8.1 αυτού του κεφαλαίου. Η ενέργεια που μπορούν να προσφέρουν οι συστοιχίες, έχοντας αφαιρέσει τις απώλειες από το MPPT και την ενθυλάκωση, φτάνει τα 14,94 A επί τις ώρες. Η τοποθέτηση βέβαια των φωτοβολταϊκών στο όχημα θα έχει και σαν συνέπεια την αύξηση του βάρους του οχήματος κατά 20 κιλά. Επομένως, εφαρμόζοντας τις αλλαγές αυτές στον τύπο 8.3.2 θα έχουμε:

$$EPK_R = C_{RR}\left[1+\frac{V}{161}\right]\frac{W_{kg}}{0{,}10197} =$$
$$= 0{,}02\left[1+\frac{32{,}85}{161}\right]\frac{342}{0{,}10197} =$$
$$80{,}765 Wh/km$$

Επομένως η χωρητικότητα ανά χιλιόμετρο που καταναλώνεται είναι 80,765/48=1,682 Ah/km. Αν θεωρήσουμε ότι η χωρητικότητα των μπαταριών δεν αλλάζει σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση τα χιλιόμετρα που θα διανύσει θα είναι 75/1,682=44,57 km και επειδή θεωρούμε την ταχύτητα σταθερή ο χρόνος θα είναι 44,57/32,85=1,35 h. Επειδή μέσα στο διάστημα αυτό θα παρέχεται ενέργεια από τις φωτοβολταϊκές κυψέλες, η απόσταση που θα καλύψει το όχημα αυξάνεται και θα είναι 44,57+(14,94*1,35)/1,682=**56,62 km** και σε χρόνο 56,62/32,85=1,72 h, το οποίο είναι **1 ώρα και 43 λεπτά**. Διαπιστώνουμε ότι με την εφαρμογή αυτής της βελτίωσης η απόδοση του οχήματος αυξήθηκε κατά 16,39% σε σχέση με την παρούσα κατάσταση.

8.3.2 Πρόβλεψη απόδοσης του οχήματος με εφαρμογή φωτοβολταϊκών κυψελών πολυκρυσταλλικού πυριτίου και μπαταριών λιθίου πολυμερών

Η δεύτερη βελτίωση θα είναι η αντικατάσταση των συσσωρευτών μολύβδου με συσσωρευτές Λιθίου Πολυμερών. Για να κάνουμε τους υπολογισμούς πήραμε σαν παράδειγμα τις συσσωρευτές λιθίου πολυμερών τις εταιρίας KOKAM. Για την εφαρμογή αυτού του τύπου των συσσωρευτών στο όχημα θα πρέπει να τοποθετηθούν και κάποια βοηθητικά κυκλώματα, τα οποία εξασφαλίζουν την σωστή φόρτιση και αποφόρτιση των μπαταριών. Το κέρδος της αλλαγής αυτής θα είναι η μείωση του βάρους κατά 100 kg διατηρώντας τη διαθέσιμη χωρητικότητα στα 75 Ah. Επομένως, εφαρμόζοντας τις αλλαγές αυτές στον τύπο 8.3.2 θα έχουμε.

$$EPK_R = C_{RR}\left[1+\frac{V}{161}\right]\frac{W_{kg}}{0{,}10197} =$$
$$= 0{,}02\left[1+\frac{32{,}85}{161}\right]\frac{242}{0{,}10197} =$$
$$57{,}149 Wh/km$$

Επομένως η χωρητικότητα ανά χιλιόμετρο που καταναλώνεται είναι 57,149/48=1,19 Ah/km. Αν θεωρήσουμε ότι η χωρητικότητα των μπαταριών δεν αλλάζει σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση τα χιλιόμετρα που θα διανύσει θα είναι 75/1,19=62,99 km και επειδή θεωρούμε την ταχύτητα σταθερή ο χρόνος θα είναι 62,99/32,85=1,91 h. Επειδή μέσα στο διάστημα αυτό θα παρέχεται ενέργεια από τις φωτοβολταϊκές κυψέλες η απόσταση που θα καλύψει το όχημα αυξάνεται και θα είναι 62,99+(14,94*1,91)/1,19=**87,06 km** και σε χρόνο 87,06/32,85=2,65 h το οποίο είναι **2 ώρες και 39 λεπτά**. Διαπιστώνουμε ότι με την εφαρμογή και αυτής της

βελτίωσης η απόδοση του οχήματος αυξήθηκε κατά 45,62% σε σχέση με την παρούσα κατάσταση.

8.3.3 Πρόβλεψη απόδοσης του οχήματος με εφαρμογή φωτοβολταϊκών κυψελών Αρσενικούχου Γαλλίου και μπαταριών λιθίου πολυμερών

Η τρίτη βελτίωση θα είναι η αντικατάσταση των φωτοβολταϊκών κυψελών με κυψέλες Αρσενικούχου Γαλλίου. Θεωρήσαμε την απόδοση των κυψελών στο 35%. Με αυτήν την απόδοση ουσιαστικά αλλάζει η ενέργεια που προσφέρουν τα φωτοβολταϊκά η οποία θα ανέρχεται υπολογιστικά σε 33,52 A. Επομένως, εφαρμόζοντας τις αλλαγές αυτές στους υπολογισμούς της προηγούμενης περίπτωσης, θα έχουμε ότι η απόσταση που θα καλύψει το όχημα μαζί με την ενέργεια που θα παρέχουν οι κυψέλες θα είναι 62,99+(33,52*1,91)/1,19=**116,98 km** και σε χρόνο 116,98/32,85=3,56 h το οποίο είναι **3 ώρες και 33 λεπτά**. **Διαπιστώνουμε ότι με την εφαρμογή όλων των βελτιώσεων η απόδοση του οχήματος αυξήθηκε κατά 59,53% σε σχέση με την παρούσα κατάσταση, που το όχημα είναι μόνο ηλεκτρικό**. Επίσης είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι οι βελτιώσεις αυτές ήταν μόνο στο ηλεκτρικό μέρος. Με αντίστοιχη βελτίωση των μηχανολογικών μερών (Ελάφρυνση πλαισίου, Μείωση των απωλειών αντίσταση κύλισης κ.α.) θα επιτευχθούν καλύτερες ακόμα επιδόσεις.

Κεφάλαιο 9^{ο} : Συμπεράσματα

Μετά την μελέτη όλων των προηγούμενων δεδομένων και πειραμάτων μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα, ότι είναι εφικτή η κατασκευή ενός ηλιακού οχήματος, το οποίο με τις κατάλληλες βελτιώσεις θα μπορεί να είναι ανταγωνιστικό των προσπαθειών του εξωτερικού. Η κατασκευή του οχήματος, μέχρι το σημείο που έφτασε, είχε σαν αποτέλεσμα μια λειτουργική βάση πάνω στην οποία μπορούν να διενεργηθούν περαιτέρω εξελίξεις και κατασκευές. Σκοπός είναι η απόκτηση περισσότερης τεχνογνωσίας και εμπειρίας από ερευνητές, οι οποίοι με τη σειρά τους θα είναι αυτοί που θα μεταφέρουν τη γνώση τους στο ευρύ κοινό.

Μία σημαντική διαπίστωση είναι η ύπαρξη πλήθους διαφορετικών τεχνολογιών σε όλους τους τομείς του οχήματος. Ανάλογα λοιπόν με τις ανάγκες της κατασκευής, μπορεί να γίνει επιλογή των καταλληλότερων τεχνολογιών, ώστε να καταλήξουμε στο καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα, όχι μόνο απαραίτητα από άποψη επιδόσεων, αλλά και από άποψη κόστους. Με αυτόν τον τρόπο δεν στοχεύουμε μόνο στην καλύτερη κατασκευή αλλά και στην πιο βιώσιμη, από την άποψη της μεταφοράς της τεχνολογίας σε οχήματα μαζικής παραγωγής.

Στη χώρα μας τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει αρκετές αξιόλογες προσπάθειες για προώθηση της ηλεκτροκίνησης και έχουν ψηφισθεί αρκετοί σχετικοί Νόμοι. Αυτές οι προσπάθειες θα πρέπει να συνεχισθούν πιο εντατικά και κυρίως να χρηματοδοτηθούν Πανεπιστήμια και φορείς που θέλουν να ασχοληθούν με το αντικείμενο αυτό. Οι προοπτικές λόγω της γεωγραφικής θέσης της χώρας μας, είναι καλές για την χρήση της ηλιακής ενέργειας στην ηλεκτροκίνηση. Άλλωστε, η ευρεία διάδοση και σε μικρό χρονικό διάστημα των εγκαταστάσεων φωτοβολταϊκών συστημάτων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον ήλιο, προμηνύει ότι το ίδιο θα συμβεί και με την ηλεκτροηλιακή κίνηση. Αντίστοιχα, και σε παγκόσμια κλίμακα γίνονται συνεχείς προσπάθειες για την προώθηση της ηλεκτροηλιακής κίνησης και καθημερινά τα τελευταία χρόνια, ανακοινώνονται από εταιρείες υλικά καλύτερων επιδόσεων, με σκοπό την αύξηση των αποδόσεων στην συλλογή, την αποθήκευση της ηλιακής ενέργειας και στη μείωση του βάρους.

Στα στάδια μελέτης και κατασκευής αυτού του οχήματος αναζητήθηκαν υλικά και συνεργεία τόσο στην Ελλάδα, όσο και στο εξωτερικό ώστε να πετύχουμε όσο το δυνατό καλύτερες τιμές αγοράς. Πολλά υλικά από αυτά που τελικά επιλέξαμε, κυρίως στην φάση της μελέτης, δεν υπήρχαν ακόμη στην ελληνική αγορά ή και αν υπήρχαν, οι τιμές ήταν υψηλότερες σε σύγκριση με ανάλογα υλικά που κυκλοφορούσαν στο εξωτερικό. Εντούτοις, τα συνεργεία και οι επιχειρήσεις που επικοινωνήσαμε για να μας βοηθήσουν στη φάση της κατασκευής μας παρείχαν με προθυμία βοήθεια και τεχνογνωσία.

Τελικά, μετά από πολλή έρευνα και δυσκολίες καταλήξαμε ότι μπορεί να κατασκευασθεί το όχημα με μια δαπάνη της τάξης των 3500 Ευρώ, τουλάχιστον ως ηλεκτρικό και με υλικά από ελληνικές και ξένες εταιρείες. Αναντίρρητα, υπάρχει μετέπειτα η δυνατότητα για αγορά υλικών με καλύτερες προδιαγραφές και επιδόσεις, αλλά στην παρούσα φάση βασικό μέλημά μας ήταν η διατήρηση της ισορροπίας μεταξύ του ελάχιστου δυνατού κόστους και των υψηλότερων δυνατών επιδόσεων. Απομένει η αγορά ενός μικρού μέρους υλικών και η συναρμολόγησή τους, ώστε το κατασκευασμένο ηλεκτρικό όχημα να ολοκληρωθεί και να μπορεί ενώ

κινείται να παράγει ηλεκτρική ενέργεια η οποία να προσφέρεται στους ηλεκτρικούς συσσωρευτές.

Το όχημα, στο στάδιο κατασκευής που είναι σήμερα, μπορεί να κινηθεί και δοκιμάστηκε σαν ηλεκτρικό όχημα, με φόρτιση των συσσωρευτών του από εξωτερικό φορτιστή. Οι επιδόσεις του ήταν αρκετά ικανοποιητικές όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο και έχει προοπτικές εξέλιξης, ώστε να γίνει ανταγωνιστικό με τα αντίστοιχα ηλεκτροηλιακά οχήματα του εξωτερικού.

Κεφάλαιο 10^{ο} : Σημεία βελτίωσης και προσθήκες των προτεινόμενων ηλεκτρικών μερών της πρότασης

10.1 Βελτιώσεις και Προσθήκες Φωτοβολταϊκής Πηγής Παροχής Ενέργειας

Η βασική βελτίωση που μπορεί να γίνει στο φωτοβολταϊκό σύστημα είναι η χρήση φωτοβολταϊκών κυψελών μεγαλύτερης απόδοσης. Η καλύτερη επιλογή θα ήταν φωτοβολταϊκές κυψέλες Αρσενικούχου Γαλλίου (GaAs) με τέσσερις και πάνω επαφές και αποδόσεις που θα κυμαίνονται από το **33 έως το 38%** σε σχέση με το **15,6%** των κυψελών που χρησιμοποιήθηκαν. Η χρήση αυτών των κυψελών εξασφαλίζει διπλάσια απόδοση ισχύος προς τους ηλεκτρικούς συσσωρευτές. Επομένως εξασφαλίζεται πολύ μεγαλύτερη αυτονομία του οχήματος και μικρότεροι χρόνοι φόρτισης των ηλεκτρικών συσσωρευτών.

Η αντικατάσταση των Ανιχνευτών Μέγιστου Σημείου Ισχύος με κάποιους που υλοποιούν καλύτερο αλγόριθμο εντοπισμού του μέγιστου σημείου είναι άλλη μια δυνατή βελτίωση. Η χρήση κάποιου ανιχνευτή που θα υλοποιεί τον αλγόριθμο Μεταβολής και Παρατήρησης θα ήταν η καλύτερη δυνατή επιλογή από άποψη απλότητας και βελτιωμένης απόδοσης με τιμή έως και **99%** σε σύγκριση με το **96%** της παρούσας πρότασης. Η χρήση ανιχνευτή υποβιβασμού δεν προτείνεται αφού στην περίπτωση σκίασης και πτώσης της τάσης κάτω της τιμής φόρτισης της μπαταρίας υπάρχει διακοπή παροχής από τις κυψέλες προς τις καταναλώσεις.

10.2 Βελτιώσεις και Προσθήκες Ηλεκτρικών Συσσωρευτών Παροχής και Αποθήκευσης Ενέργειας

Στο σύστημα αποθήκευσης και παροχής ενέργειας του οχήματος σημαντική βελτίωση θα είναι η αντικατάσταση των συσσωρευτών μολύβδου (Pb) με μπαταρίες Λιθίου Πολυμερών (Li-Polymer). Ο βασικός λόγος είναι η μείωση του βάρους κατά **80%** σε σχέση με τους συσσωρευτές που επιλέχθηκαν, διατηρώντας την ίδια χωρητικότητα ισχύος. Αυτή η βελτίωση θα έχει ως συνέπεια και τις μικρότερες καταναλώσεις κατά την κίνηση του οχήματος με άμεση συνέπεια την αύξηση της αυτονομίας του.

Το βασικό σημείο που θα πρέπει να δοθεί πολύ προσοχή είναι ο φορτιστής που θα επιλεγεί για αυτόν τον τύπο συσσωρευτών, καθώς η φόρτισή τους απαιτεί πολύ συγκεκριμένες προδιαγραφές για να αποφευχθεί η καταστροφή τους.

Η δεύτερη βασική προσθήκη είναι η χρήση υπερπυκνωτών για την αποθήκευση της επιστρεφόμενης ισχύος από τον ηλεκτρικό κινητήρα, κατά τη φάση της επιβράδυνσης του οχήματος. Στην περίπτωση των συσσωρευτών που έχουμε επιλέξει, η μέγιστη δυνατή φόρτιση που μπορεί να δεχτεί είναι τα **29,97 Amber**. Αν συνυπολογιστεί και η μέγιστη παροχή από τα φωτοβολταϊκά που είναι στα **15,28 Amber**, τότε η μέγιστη δυνατή επιστροφή είναι στα **14,29 Amber**. Με την

παρεμβολή των υπερπυκνωτών, κατά τη φάση του φρεναρίσματος, για την αποθήκευση της μέγιστης δυνατής έντασης που μπορεί να ληφθεί εξασφαλίζεται η μέγιστη δυνατή αποθήκευση ενέργειας. Επίσης εξασφαλίζεται η δυνατότητα χρήσης της, κατά βούληση του χειριστή του οχήματος, σε ειδικές περιπτώσεις (προσπεράσεις, ανηφόρες, εκκινήσεις).

10.3 Βελτιώσεις και Προσθήκες Συστήματος Διαχείρισης Ηλεκτρικού Κινητήρα

Η κύρια βελτίωση που μπορεί να γίνει στο σύστημα αυτό είναι η επιλογή κινητήρα χωρίς ψύκτρες (Brushless). Οι κινητήρες αυτοί διακρίνονται για τη μικρότερη κατανάλωσή τους με την ίδια απόδοση κινητικής ενέργειας σε σχέση με αυτόν που επιλέχθηκε στην παρούσα πρόταση. Επίσης, η δυνατότητα τοποθέτησής τους απευθείας μέσα στον τροχό κίνησης, εξασφαλίζει την εξάλειψη των απωλειών από την μετάδοση της κίνησης στον τροχό. Τέλος, ένα σημαντικό πλεονέκτημα είναι η δυνατότητα μεγαλύτερου ρυθμού περιστροφής για την ίδια κατανάλωση ισχύος.

Βιβλιογραφία

Γενική Βιβλιογραφία

[1] Carroll, Douglas, 2003. The Winning Solar Car, SAE International

Κεφάλαιο 2ο

[2] Στεργίου Βαγγέλης και Τουλόγλου Στέφανος, 1986. Ηλεκτρικές Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος(Θεωρία και Εφαρμογές), Εκδόσεις «ΙΩΝ»

[3] Στεργίου Βαγγέλης και Τουλόγλου Στέφανος, 1986. Ηλεκτρικές Μηχανές Εναλλασσομένου Ρεύματος(Θεωρία και Πρακτικές Εφαρμογές), Εκδόσεις «ΙΩΝ»

[4] Πολλάλης Γεώργιος, 1998. Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών Ι, Εκδόσεις «ΙΩΝ»

[5] Ξυπτέρας Γιάννης 1999. Ηλεκτρικές Μηχανές Τόμος Ι(Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος και Ασύγχρονες Μηχανές), Εκδόσεις Ζήτη

[6] Ξυπτέρας Γιάννης, 1996. Ηλεκτρικές Μηχανές Τόμος ΙΙ(Σύγχρονες Μηχανές), Εκδόσεις Ζήτη

[7] Γούτης Ανδρέας, 1998. Ηλεκτρικές Μηχανές, Εκδόσεις «ΙΩΝ»

[8] Ασπράγκαθος Νίκος, 2002. Ηλεκτροτεχνία και Ηλεκτρικές Μηχανές(Τόμος Β: Εισαγωγή στη Θεωρία των Ηλεκτρικών Μηχανών), Πανεπιστήμιο Πατρών – Τμήμα Εκτυπώσεων Τυπογραφείου

[9] Fowler, Richard, 1999. Ηλεκτροτεχνία AC-DC, Εκδόσεις Α. ΤΖΙΟΛΑ Ε., σελ. 375-406

[10] Χατζησταματίου Μιχαήλ, 1979. Ηλεκτρικές Μηχανές Τόμος Α, Εκδόσεις Ιδρύματος Ευγενίδου

[11] Βασιλακόπουλου Σπυρίδων, 1979. Ηλεκτρικές Μηχανές Τόμος Β, Εκδόσεις Ιδρύματος Ευγενίδου

[12] Mileaf, Harry, 1977.Electricity One-Seven, Hayden Book Company, Inc

[13] Βουδούρης Γεώργιος, 1959. Ηλεκτροτεχνία, Εκδόσεις Βιβλιοπωλείο Αθαν. Πούντζα

[14] Βασιλακόπουλου Σπυρίδων, 1977. Ηλεκτροτεχνία, Εκδόσεις Ιδρύματος Ευγενίδου

Κεφάλαιο 3ο

[15] Fowler, Richard, 1999. Ηλεκτροτεχνία AC-DC, Εκδόσεις Α. ΤΖΙΟΛΑ Ε., σελ. 73-83

[16] Κωνσταντακάτος Γιάννης, 2005. Ηλεκτρικά Στοιχεία και Μπαταρίες, http://jkon.aeromodelling.gr/ninter-073a.htm

[17] Χανιώτης Αντώνης, 2004. Κατασκευές – UnDead Batteries, http://www.cc.ece.ntua.gr/~achan/Kataskeues/UnDead_Batteries.htm

[18] Βαμβαράπης Παναγιώτης, 2007. Διπλωματική Εργασία: «Ανασκόπηση τεχνολογιών υβριδικών οχημάτων με ηλεκτροκινητήρα και εμβολοφόρο Μ.Ε.Κ.», Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών – Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, σελ. 55-78

[19] ΣΥ.ΔΕ.ΣΥΣ(Σύστημα Εναλλακτικής Διαχείρισης Αποβλήτων Ηλεκτρικών Στηλών και Συσσωρευτών Βιομηχανίας και Οχημάτων), 2007. Συσσωρευτές, http://www.sydesys.gr/syssoreytes.asp
[20] Pistoia, Gianfranco, 2009. Battery Operated Devices and Systems, Elsevier B.V.
[21] Soutar, Ian, 2012. Nickel Iron Battery Information, http://www.nickel-iron-battery.com/
[22] Τσοπουρίδης Ανέστης, 2012. Διπλωματική Εργασία: «Αναδρομή, σημερινή τεχνολογία και προοπτική της μπαταρίας», Τμήμα Ηλεκτρολογίας – Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης
[23] Sivakkumar, S.R. and Pandolfo, A.G., 2012. Evaluation of lithium-ion capacitors assembled with pre-lithiated graphite anode and activated carbon cathode, Electrochimica Acta, Volume 65, pages 280-287
[24] Dume, Belle, 2010. Graphene supercapacitor breaks storage record, http://physicsworld.com/cws/article/news/2010/nov/26/graphene-supercapacitor-breaks-storage-record

Κεφάλαιο 4^{ο}

[25] Μακρυγιώργου Δέσποινα, 2010. Διπλωματική Εργασία: «Διατάξεις Προστασίας Υβριδικών συστημάτων με Κυψέλη Υδρογόνου και Φωτοβολταϊκά Στοιχεία», Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών – Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Πατρών
[26] Λιανός Ιωάννης, 2012. Διπλωματική Εργασία: «Διαστασιολόγηση Φωτοβολταϊκού Πάρκου Ισχύος 500 kWp με χρήση trackers», Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών – Πολυτεχνική Σχολή Πανεπιστημίου Πατρών
[27] Παπασάββα Παναγιώτα-Μαρία, 2010. Διπλωματική Εργασία: «Σύγχρονες Ηλεκτρονικές Διατάξεις με Οργανικά Ημιαγώγιμα Υλικά», Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών – Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης
[28] Πετρόχειλος Χρήστος, 2005. Διπλωματική Εργασία: «Ενέργεια από Φωτοβολταϊκά(Εφαρμογή σε Μοντέλο Σιδηροδρόμου)», Σχολή Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος – Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης
[29] Τρυπαναγνωστοπούλου Μαρία, 2010. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία: «Σύνθεση και Μελέτη υβριδικών φωτοβολταϊκών κυττάρων: Νέα πρόκληση για το περιβάλλον και τα κτίρια», Σχολή Επιστήμης των Υλικών – Πανεπιστήμιο Πατρών
[30] Αποστόλου Αριστοτέλης και Ζαφειρίου Λάζαρος, 2010. Διπλωματική Εργασία: «Μέθοδοι βελτίωσης του βαθμού απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Μέτρηση του βαθμού απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων συναρτήσει της θερμοκρασίας», Σχόλη Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών – Πολυτεχνική Σχολή Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης
[31] Κυρίτσης Αναστάσιος και Νικολετάτος Ιωάννης και Τσελέπης Στάθης, 2010. Φ/Β συστήματα: Η τεχνολογία, τα διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα και η κατάσταση στην Ελλάδα, ΔΕΛΤΙΟ Πανελληνίου Συλλόγου Διπλωματούχων Μηχανολόγων Ηλεκτρολόγων, Τεύχος 435, σελ. 34-40

[32] Castaner, Luis and Markvart, Tom, 2003. Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications, Elsevier B.V.

Κεφάλαιο 5°

[33] Bahdat, A.B.G. and Helwa, N.H. and Ahmad, G.E. and El Shenawy, E.T., 2005. Maximum power point tracking controller for PV systems using neural networks, Elsevier B.V.
[34] Ait Cheick, M.S. and Larbes, C. and Tchoketch, G.F. and Zerguerras, A., 2007. Maximum power point tracking using fuzzy logic control scheme, Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N° 3, pp.387-395
[35] Rahman, Shusmita and Oni, Nadia Sultana and Ibn Masud, Quazi Abdullah, 2012. Bachelor Thesis: Design of a Charge Controller Circuit with Maximum Power Point Tracker (MPPT) for Photovoltaic System, Dept. of Electrical and Electronic Engineering, BRAC University
[36] Lokanadham, M. and Vijaya Bhaskar, K., 2012. Incremental Conductance Based Maximum Power Point Tracking (MPPT) for Photovoltaic System, International Journal of Engineering Research and Applications Vol. 2, Issue 2, pp.1420-1424
[37] Elgendy, Mohammed and Zahawi, Bashar and Atkinson, David, 2012. Assessment of Perturb and Observe MPPT Algorithm Implementation Techniques for PV Pumping Applications, IEEE Transactions on Sustainable Energy Vol. 3 N° 1, pp.21-33