

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΜΕΣΟΛΟΓΓΙΟΥ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΑΤΙΝΩΝ

ΠΟΡΩΝ

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΑ ΟΧΗΜΑΤΑ-

ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΕΣ ΔΟΜΕΣ ΜΕ ΜΕΚ

ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΑ

ΓΡΗΓΟΡΑΚΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΑΣ

ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ

ΓΥΦΤΟΓΙΑΝΝΗΣ ΓΕΡΑΣΙΜΟΣ

ΜΕΣΟΛΟΓΓΙ 2008

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	1
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	5
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
Ιστορία της ηλιακής ενέργειας.....	6
Ανακάλυψη φωτοβολταϊκής επίδρασης.....	7
Παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ.....	10
1) ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ (φ/β) ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	
ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ.....	10
1.1) Ηλιακή ενέργεια-ακτινοβολία.....	10
1.2) Φωτοβολταϊκά στοιχεία – PV.....	15
1.2.1) Γενικά.....	15
1.2.2) Δομή στοιχείων.....	16
1.3) Βασική θεωρία Ημιαγωγών.....	17
1.3.1) Ένωση p-n – Δίοδος Ημιαγωγών.....	21

1.4) Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	23
1.5) Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων.....	25
1.5.1) Ηλιακά στοιχεία πυριτίου.....	25
1.5.1.1) Η επιλογή και η συμπεριφορά του πυριτίου.....	25
1.5.1.2) Η παρασκευή του ηλιακού στοιχείου	26
1.5.2) Φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου.....	27
1.5.3) Φωτοβολταϊκά από αρσενικούχο γάλλιο (GaAs)	31
1.6) Αυτόνομα φ/β συστήματα.....	32
1.6.1) Περιγραφή.....	32
1.6.2) Φωτοβολταϊκά πανώ.....	34
1.6.3) Υποσύστημα ελέγχου και ρυθμίσεων.....	35
1.6.4) Μπαταρίες αποθήκευσης της ενέργειας.....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ.....	38
2) ΑΜΕΣΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΚΛΙΣΗΣ ΤΩΝ “ΠΑΝΩ” ΣΕ ΑΥΤΟΝΟΜΑ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ.....	38
2.1) Εισαγωγή.....	38

2.2) Ανάλυση της μεθόδου.....	39
2.3) Εφαρμογή της μεθόδου-αποτελέσματα.....	40
2.4) Επαλήθευση της μεθόδου.....	47
2.5) Συμπεράσματα.....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ.....	50
3) ΜΗ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΥΤΗΣ – ΜΙΑ ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	50
3.1) Εισαγωγή.....	50
3.2) Προσομοίωση του φ/β συστήματος.....	51
3.2.1) Ηλιακή ακτινοβολία.....	51
3.2.2) Ωριαία ενέργεια που αποδίδεται από τα φ/β πανώ.....	52
3.2.3) Ορισμός του δείκτη μη διαθεσιμότητας, LOLP, και της περίσσειας της ενέργειας.....	53
3.2.4) Μέθοδος ελαχιστοποίησης του κόστους κύκλου ζωής του συ- στήματος.....	55
4) ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ.....	57

4.1) ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΝΟΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ.....	57
4.2) ΟΡΓΑΝΑ ΟΔΗΓΗΣΗΣ.....	60
4.3) ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	61
4.3.1) Μπαταρίες.....	63
4.3.2) Φωτοβολταϊκή γεννήτρια.....	64
4.3.3) ΜΡΡΤ (Maximum Power Point Tracker).....	69
4.4) Φ/Β ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ.....	75
4.5) ΗΛΙΑΚΑ ΚΥΤΤΑΡΑ.....	76
4.6) ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ.....	77
4.7) ΜΗΧΑΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ.....	78
4.8) ΣΩΜΑ ΚΑΙ ΠΛΑΙΣΙΟ.....	80
4.8.1) Αεροδυναμική.....	82
4.9) Διαδικασία συναρμολόγησης του δικού μας ηλιακού οχήματος.....	84
ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	90
ΟΡΟΛΟΓΙΑ.....	91
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	92
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	93

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η αναζήτηση του σύγχρονου οικολογικού κινήματος οδήγησε στη προσπάθεια σύζευξης της ανάπτυξης της οικονομικής και τεχνολογικής επιστήμης με τον σεβασμό του φυσικού και πολιτιστικού περιβάλλοντος.

Η αειφόρος, όπως ονομάζεται, ανάπτυξη οδήγησε πολλούς επιστήμονες στην ανακάλυψη νέων εφαρμογών οι οποίες να εξυπηρετούν τον άνθρωπο χωρίς να επιβαρύνουν το περιβάλλον.

Η ηλιακή ενέργεια δεν απουσιάζει (και ποτέ άλλωστε δεν απουσίαζε) απ' το ενδιαφέρον των επιστημόνων στην προσπάθεια που καταβάλλουν για την ανακάλυψη νέων εφαρμογών.

Μια από τις πολλές πειραματικές ήταν και τα ηλιακά οχήματα, τα οποία σήμερα, ειδικά μετά την συνεχή αύξηση των τιμών του πετρελαίου έρχονται δυναμικά στο προσκήνιο γιατί δεν απαιτούν ακριβή ενέργεια για την κίνηση τους.

Αυτοί ήταν οι κυρίως λόγοι που με έκαναν να θέλω να ασχοληθώ πιο ουσιαστικά με το συγκεκριμένο θέμα. Θεωρώ, ότι η ηλιακή ενέργεια τα επόμενα χρόνια θα πρωταγωνιστήσει και θα συνδράμει αποτελεσματικά στην βελτίωση των συνθηκών της ζωής μας. Ας είμαστε έτοιμοι όλοι να την δεχτούμε και να την προσαρμόσουμε στην καθημερινότητά μας.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ιστορία της ηλιακής ενέργειας

Ο ήλιος είναι πηγή απεριόριστης ενέργειας, το μεγαλύτερο μέρος της οποίας δεν χρησιμοποιείται ωστόσο μας προσφέρει ισχύ εκατομμυρίων Watts, μεταδίδει τη θερμότητα και συντελεί στην ανάπτυξη των τροφών. Γενικά, η ηλιακή ενέργεια είναι μια ασφαλής και μη ρυπογόνος μορφή ενέργειας, η οποία συνεχώς εξελίσσεται.

Κάθε ημέρα ο ήλιος φωτίζει τη γη χιλιάδες στιγμές που είναι αρκετές για να καλύψουμε τις απαιτήσεις της ενέργειας που χρησιμοποιούμε. Ακόμη και το μικρό ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που χτυπά τη στέγη μας αποδίδει πολύ περισσότερη ενέργεια απ' ό,τι όλη η ενέργεια που μπαίνει στο οίκημα μέσω των ηλεκτρικών καλωδίων. Σε ένα ομοιόμορφο στρέμμα του εδάφους η άμεση ακτινοβολία του ηλίου μπορεί να παράγει ισχύ περίπου τεσσάρων χιλιάδων ίππων, αντίστοιχο με μια μεγάλη ατμομηχανή σιδηροδρόμου. Σε λιγότερο από τρεις ημέρες η ηλιακή ενέργεια που φθάνει στη γη είναι περισσότερη απ' το κατ' εκτίμηση σύνολο των απολιθωμένων καυσίμων στη γη.

Το λογικό ερώτημα που προκύπτει σε αυτό το σημείο είναι, γιατί δεν χρησιμοποιούμε αυτό το πλεονέκτημα της μορφής ηλιακής ενέργειας; Η απάντηση, φυσικά, είναι ότι την χρησιμοποιούμε, αλλά είμαστε ακόμα σε αρχικό στάδιο. Ένα ηλιακό σύστημα μπορεί να τροφοδοτήσει άμεσα ένα ραδιόφωνο εκμεταλλευόμενο την ακτινοβολία του ήλιου. Αντίθετα όμως ένα βενζινοκίνητο όχημα που χρησιμοποιεί επίσης την αποθηκευμένη ηλιακή ενέργεια, η οποία έχει εγκλωβιστεί στη γη πολλά χρόνια πριν, απαιτεί άντληση για να βγει στην επιφάνεια της με αντλίες πετρελαίου ώστε να χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το πλεονέκτημα της ηλιακής ενέργειας μετατρεπόμενης άμεσα σε ηλεκτρική είναι ότι είναι μια μορφή ενέργειας μη ρυπαντική.

Ο Ρώσος φιλόσοφος, Kuzma Prutkon, αποφάνθηκε ότι το φεγγάρι είναι πιο χρήσιμο από τον ήλιο, δεδομένου ότι λάμπει τη νύχτα όταν απαιτείται το φως, ενώ ο ήλιος έχει μικρή χρησιμότητα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Σε μια τέτοια τεχνολογία επίσης απομακρυνόμαστε από τη δυνατότητα και τη χρησιμότητα του ήλιου. Φαίνεται ότι η καρποφόρος εφαρμογή της ηλιακής ενέργειας προορίζεται να περιμένει μέχρι να φτάσει το ενεργειακό απόθεμα στο κατώτατο σημείο καθώς μειώνεται συνεχώς.

Κατά την περίοδο που διανύουμε πρέπει να τεθούν οι ρεαλιστικοί στόχοι και να καθοριστούν οι στρατηγικές για την εκμετάλλευση της δύναμης του ήλιου. Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας δεν είναι νέα στην πραγματικότητα, οι ημερομηνίες ανάπτυξης ηλιακής ενέργειας χρονολογούνται πάνω από 100 έτη, στη μέση της βιομηχανικής επανάστασης. Διάφορες πρωτοποριακές εγκαταστάσεις ηλιακής ενέργειας και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατασκευάστηκαν για να παράγουν ατμό από τη θερμότητα του ήλιου, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στη λειτουργία μηχανών.

Συγχρόνως, ο Henri Becquerel ανακάλυψε τη φωτοβολταϊκή επίδραση δηλαδή την άμεση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Στην έρευνα αυτή η φωτοβολταϊκή επίδραση επεκτάθηκε. Η φωτοβολταϊκή επίδραση παρέμεινε μια άγνωστη πτυχή για πολλά χρόνια, δεδομένου ότι ήταν ανεπαρκής όσον αφορά στη μετατροπή του φωτός του ήλιου σε ηλεκτρική ενέργεια.

Σήμερα, τα διαθέσιμα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι 12% αποδοτικά, και τέσσερις φορές μεγαλύτερα από ότι μερικά έτη πριν. Επιπλέον, η ηλιακή ισχύς χρησιμοποιείται με δύο αρχικές μορφές: με τον ηλιακό θερμοσίφωνα, όπου η θερμότητα του ήλιου χρησιμοποιείται στη θέρμανση του νερού και με μια άλλη μορφή η που λειτουργεί με ρευστό και οδηγεί τους στροβίλους ή με άλλα μηχανήματα που απαιτούν ηλεκτρική ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά, όπου η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται άμεσα από τον ήλιο χωρίς κινούμενα μέρη.

Ανακάλυψη φωτοβολταϊκής (PV) επίδρασης

Η Φωτοβολταϊκή (PV) επίδραση ανακαλύφθηκε από ένα Γάλλο φυσικό επιστήμονα, τον Alexandre Edmond Becquerel το 1839. Εκείνος ανακάλυψε ότι το ηλεκτρικό φορτίο μπορεί να παραχθεί όταν συγκεκριμένες δομές εκτίθενται στο φως (βούτηξε ράβδους πλατίνας σε υγρούς ηλεκτρολύτες). Λίγα χρόνια μετά, το 1876, οι Αμερικάνοι Adams και Day χρησιμοποιώντας έναν κρύσταλλο σεληνίου απέδειξαν την επίδραση αυτή. Η αποδοτικότητα σε αυτή την περίπτωση ξεπέρασε ελαφρώς μόνο το 1%. Εν συνεχεία το 1905 ο Albert Einstein διατύπωσε μια εξήγηση της επίδρασης PV (την υπόθεση φωτονίου). Το 1949 οι Αμερικάνοι Shockley, Bardeen και Brattain ανακάλυψαν την κρυσταλλολυχνία και όρισαν τη φυσική των ενώσεων π και ν σε υλικά από απόλυτα καθαρούς ημιαγωγούς. Αναπτύχθηκε λοιπόν η πρώτη φωτοβολταϊκή γεννήτρια με αποδοτικότητα περίπου 6% αναπτύχθηκε και, αργότερα το 1956 φτιάχτηκε μια άλλη από σιλικόνη με αποδοτικότητα 10%.

Η γρήγορη ανάπτυξη της εξερεύνησης του διαστήματος δημιούργησε πολλές ευκαιρίες για εφαρμογές φωτοβολταϊκών. Το 1958 στάλθηκαν στο διάστημα δοκιμαστικά για πρώτη φορά 108 φωτοβολταϊκές γεννήτριες. Η μαζική παραγωγή ξεκίνησε αργότερα αλλά βέβαια σε μικρό αριθμό. Το 1970 άρχισε ετήσια παραγωγή φωτοβολταϊκών για διαστημικές εφαρμογές, συνολικά 500 m². Ωστόσο η χρήση φωτοβολταϊκών γεννητριών στον πλανήτη άνθισε κατά τη διάρκεια της κρίσης πετρελαίου το 1973-1974, και το γεγονός αυτό οδήγησε έκτοτε στην παρουσία πολυάριθμων ερευνητικών και αναπτυξιακών έργων. Ο πιο σημαντικός σκοπός εδώ ήταν να μειωθεί το κόστος φ/β εγκαταστάσεων.

Το 1977 ο Ed Passerini κατασκεύασε το Bluebird, το πρώτο ολοκληρωμένο ηλιακό όχημα. Δεν αρκέστηκε μόνο σ' αυτό. Κατασκεύασε και άλλα μικρά, ελαφρά και σχετικά φτηνά οχήματα (κάτω των 10.000 δολαρίων).

Οι μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες δεν θα μπορούσαν να μείνουν έξω από το παιχνίδι της παραγωγής ηλιακών οχημάτων. Η General Motors, η Ford και η Honda πρωτοπορούν στη χρηματοδότηση για την κατασκευή ακόμα πιο εξελιγμένων ηλιακών οχημάτων. Ειδικά η General Motors ξόδεψε 8 εκατ. δολάρια για την κατασκευή του Sunracer, που είχε μήκος 6 μ., πλάτος 2 μ., ύψος 1 μ., και βάρος σασί μόλις 6,4 κιλά. Όλος ο σκελετός ζύγιζε λιγότερο από 43 κιλά, ενώ το συνολικό βάρος του οχήματος, χωρίς τον οδηγό, έφτανε τα 177 κιλά. Η δε ταχύτητά του άγγιζε τα 48 χλμ/ώρα.

Οι πρόωρες φωτοβολταϊκές εφαρμογές συνδέθηκαν περισσότερο με την αντίληψη και τη μέτρηση του φωτός (όπως το φωτόμετρο μιας φωτογραφικής μηχανής) παρά με την παραγωγή ισχύος. Με την εμφάνιση της κρυσταλλολυχνίας και της συνοδευτικής τεχνολογίας ημιαγωγών, η αποδοτικότητα της φωτοβολταϊκής ισχύος αυξήθηκε εντυπωσιακά και η ίδια η ισχύς έγινε πρακτικότερη. Με την πάροδο των ετών, πολλές επιχειρήσεις, εργάστηκαν για να αυξήσουν την αποδοτικότητα της φωτοβολταϊκής ισχύος.

Παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος

Ένας ακόμα τρόπος εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας είναι τα ηλιακά ηλεκτρικά στοιχεία. Σήμερα χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος στους δορυφόρους, γιατί έχουν πολύ μεγάλο κόστος κατασκευής. Τα ηλιακά ηλεκτρικά στοιχεία κατασκευάζονται από πυρίτιο. Το πυρίτιο είναι ημιαγωγός και όταν εμπλουτιστεί με κάποια άλλα κατάλληλα στοιχεία, επιτρέπει τη ροή των ηλεκτρονίων. Ένα ηλιακό ηλεκτρικό στοιχείο αποτελείται από δύο στρώματα πυριτίου, ένα εμπλουτισμένο με θετικά ιόντα και ένα με αρνητικά. Όταν το ηλιακό φως πέφτει πάνω στην επιφάνεια, ελευθερώνονται ηλεκτρόνια, τα οποία συλλέγονται από ένα πλέγμα αγωγών που υπάρχουν και στις δύο επιφάνειες. Όταν συνδεθεί το στοιχείο με ένα ηλεκτρικό κύκλωμα, τα ηλεκτρόνια κινούνται από την αρνητική προς τη θετική επιφάνεια δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

1. ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΗ (Φ/Β) ΜΕΤΑΤΡΟΠΗ ΤΗΣ ΗΛΙΑΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΕ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ

1.1. Ηλιακή ενέργεια-ακτινοβολία

Ο ήλιος ακτινοβολεί ενέργεια πάνω από 500 εκατομμύρια χρόνια και αναμένεται να συνεχίσει να ακτινοβολεί για τα επόμενα τουλάχιστον 50 εκατομμύρια χρόνια. Ο ήλιος ελευθερώνει ενέργεια με ρυθμό περίπου 10^6 Q ($Q = 2,93 \times 10^{14}$ kWh) κάθε τρία δευτερόλεπτα, από την οποία εκτιμάται ότι φθάνει στη γη περίπου 3.200 Q στη διάρκεια ενός έτους. Αυτή η ενέργεια είναι περίπου 10.000 φορές περισσότερη από την ενέργεια που χρησιμοποιεί σήμερα η ανθρωπότητα. Αν ήταν δυνατή η εκμετάλλευση ενός μικρού μόνο ποσοστού της ενέργειας αυτής, θα μπορούσε να λυθεί το ενεργειακό πρόβλημα της ανθρωπότητας. Ένα από τα κύρια προβλήματα της ηλιακής ενέργειας είναι ότι αυτή φτάνει στη γη με πολύ μικρή πυκνότητα. Έτσι με τον ήλιο στο ζενίθ, για παράδειγμα όταν ο ήλιος δηλαδή βρίσκεται ακριβώς πάνω από τον παρατηρητή, μόνο 1kw/m^2 περίπου πέφτει στην επιφάνεια της γης, στη στάθμη της θάλασσας.

Η απόσταση του ήλιου από τη γη δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται λόγω της εκλειπτικής κατά ένα ποσοστό $\pm 3\%$ γύρω από μια μέση τιμή που είναι $1,5 \times 10^8$ Km και ονομάζεται Αστρονομική Μονάδα (A.U.)

Η ηλιακή ακτινοβολία που θα έφθανε στη γη αν δεν υπήρχε η γήινη ατμόσφαιρα ονομάζεται εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία. Η ακτινοβολία αυτή που προσπίπτει κάθετα σε μια επιφάνεια, μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια του έτους επειδή μεταβάλλεται και η απόσταση γης-ήλιου. Η μεταβολή αυτή δίνεται από τη σχέση:

$$H_0 = SC \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{2\pi N}{365} \right) \right]$$

όπου :

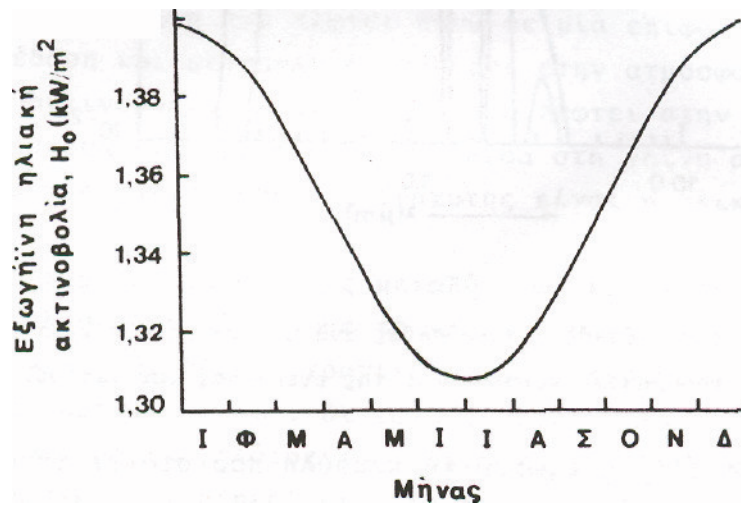
SC είναι η ηλιακή σταθερά, που ορίζεται ως μια μέση τιμή της έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα της γης και είναι ίση περίπου με $1,35 \text{kw/m}^2$, και

N είναι η ν-οστή ημέρα του έτους (N=1 για την 1- Ιανουαρίου του έτους)

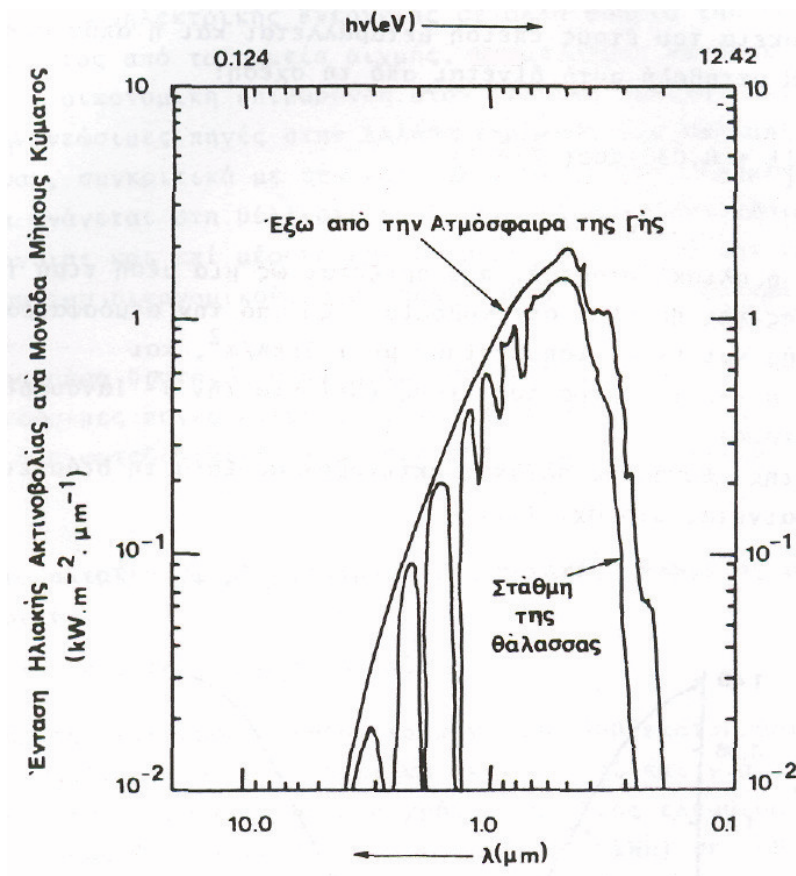
Η μεταβολή της εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια ενός έτους φαίνεται στο σχ .

1.1.

Σχήμα 1.1. Μεταβολή της εξωγήινης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει κάθετα σε μια επιφάνεια, H_0 , κατά τη διάρκεια ενός έτους.



Η ηλιακή σταθερά παριστάνει τη συνολική ενέργεια του ηλιακού φάσματος. Παρ' όλα αυτά, επειδή η απόκριση των φ/β στοιχείων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, είναι αναγκαίο να εξεταστεί και φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 1.2. Ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας ανά μονάδα μήκους κύματος.

Στο σχ. 1.2 η εξωτερική καμπύλη παριστάνει τη φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας έξω από την ατμόσφαιρα της γης (οι συνθήκες αυτές είναι γνωστές ως AMO), ενώ η εσωτερική καμπύλη παριστάνει τη φασματική κατανομή της ηλιακής ακτινοβολίας στη στάθμη της θάλασσας, με τον ήλιο στο ζενίθ, για μια καθαρή ημέρα, δηλαδή για τις συνθήκες AMI. Η εσωτερική καμπύλη δείχνει την επίδραση του όζοντος πάνω στο υπεριώδες τμήμα του φάσματος, καθώς και την επίδραση των υδρατμών, του καπνού και του διοξειδίου του άνθρακα πάνω στο τμήμα του φάσματος προς τα μεγάλα μήκη κύματος. Στο σχ. 1.2 υπάρχουν δυο κλίμακες στον άξονα των τετμημένων. Στη μια παριστάνονται τα μήκη κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας και στην άλλη η ενέργεια των αντίστοιχων φωτονίων, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση

$$\text{ενέργεια φωτονίων (eV)} = \frac{1.243}{\lambda(\mu\text{m})}$$

Το εύρος του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας πάνω στην επιφάνεια της γης εκτείνεται από 0,12 μέχρι 3 μm περίπου. Η περιοχή ευαισθησίας των παραδοσιακών φ/β στοιχείων μονοκρυσταλλικού πυριτίου εκτείνεται από 0,55 μέχρι 1,1 μm περίπου, περιοχή στην οποία αντιστοιχεί ένα πολύ μεγάλο κλάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας. Επιπλέον, το ορατό φως, η περιοχή του οποίου εκτείνεται περίπου από 0,4 μέχρι 0,8 μm και στην οποία η απόδοση των παραπάνω φ/β στοιχείων είναι μέγιστη, υφίσταται μικρή απορρόφηση όταν περνάει μέσα από την ατμόσφαιρα.

Η ηλιακή ακτινοβολία φτάνει στην επιφάνεια της γης με τη μορφή της άμεσης και της διάχυτης ακτινοβολίας. Η άμεση ακτινοβολία είναι εκείνη που πέφτει πάνω σε μια επιφάνεια χωρίς σημαντική σκέδαση και μεταβολή διεύθυνσης στην ατμόσφαιρα της γης. Η διάχυτη ακτινοβολία είναι εκείνη που πέφτει στην επιφάνεια, αφού υποστεί σκεδάσεις και ανακλάσεις μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα. Το άθροισμα της άμεσης και της διάχυτης είναι η ολική ηλιακή ακτινοβολία.

Οι γεωμετρικές σχέσεις μεταξύ ενός επιπέδου οποιουδήποτε προσανατολισμού σε σχέση με τη γη και της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, για οποιαδήποτε χρονική στιγμή, περιγράφονται ως συναρτήσεις ορισμένων γωνιών. Οι γωνίες αυτές είναι:

L , το γεωγραφικό πλάτος του τόπου (θετικό για το βόρειο ημισφαίριο) (σε μοίρες).

s , η γωνία που σχηματίζει το θεωρούμενο επίπεδο με το οριζόντιο, δηλαδή η κλίση του επιπέδου (σε μοίρες) .

ζ , το αζιμούθιο της επιφάνειας, δηλαδή η απόκλιση της κάθετης προς το επίπεδο από το νότιο προσανατολισμό. Για νότιο προσανατολισμό $z = 0$. Η ανατολική απόκλιση είναι αρνητική ενώ η δυτική θετική (σε μοίρες).

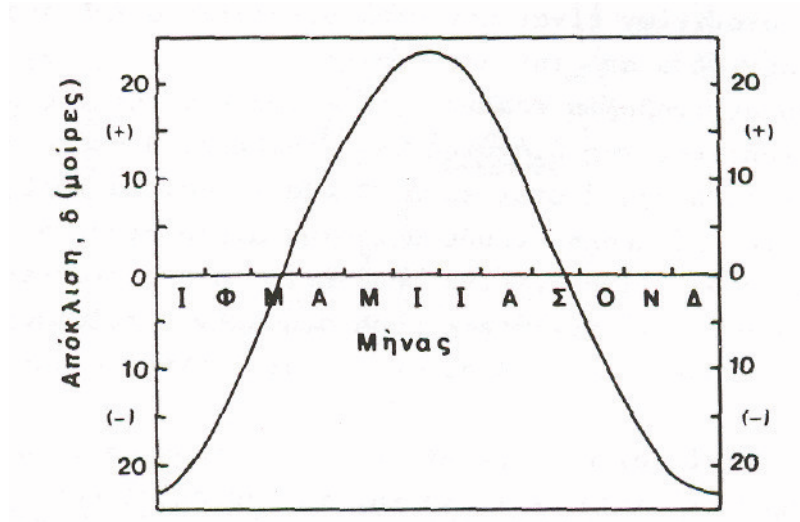
δ , η γωνία απόκλισης του ήλιου, δηλαδή η γωνία μεταξύ του διανύσματος γης - ήλιου και του επιπέδου του ισημερινού (σε μοίρες). Η μεταβολή της απόκλισης ως συνάρτηση του χρόνου κατά τη διάρκεια του έτους φαίνεται στο σχ. 1.3.

α_h , η γωνία του ύψους του ήλιου, δηλαδή η γωνιακή απόσταση του ήλιου από τον ορίζοντα (σε μοίρες).

α_5 , η γωνία του αζιμουθίου του ήλιου, δηλαδή η γωνιακή απόσταση της προβολής του ήλιου στο οριζόντιο επίπεδο από τη διεύθυνση Βορράς-Νότος (σε μοίρες).

θ , η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας, δηλαδή η γωνία που σχηματίζει η ακτινοβολία με την κάθετη στο επίπεδο (σε μοίρες).

ω , η γωνία ώρας. Αρχίζοντας από $\omega=0$ για το ηλιακό μεσημέρι, κάθε ώρα αντιστοιχεί σε 15° , θετικές τιμές για τις πρωινές ώρες και αρνητικές για τις απογευματινές ώρες (σε μοίρες).



Σχήμα 1.3. Μεταβολή της γωνίας απόκλισης του ήλιου, δ , ως συνάρτηση του χρόνου κατά τη διάρκεια ενός έτους ως συνάρτηση του χρόνου κατά τη διάρκεια ενός έτους.

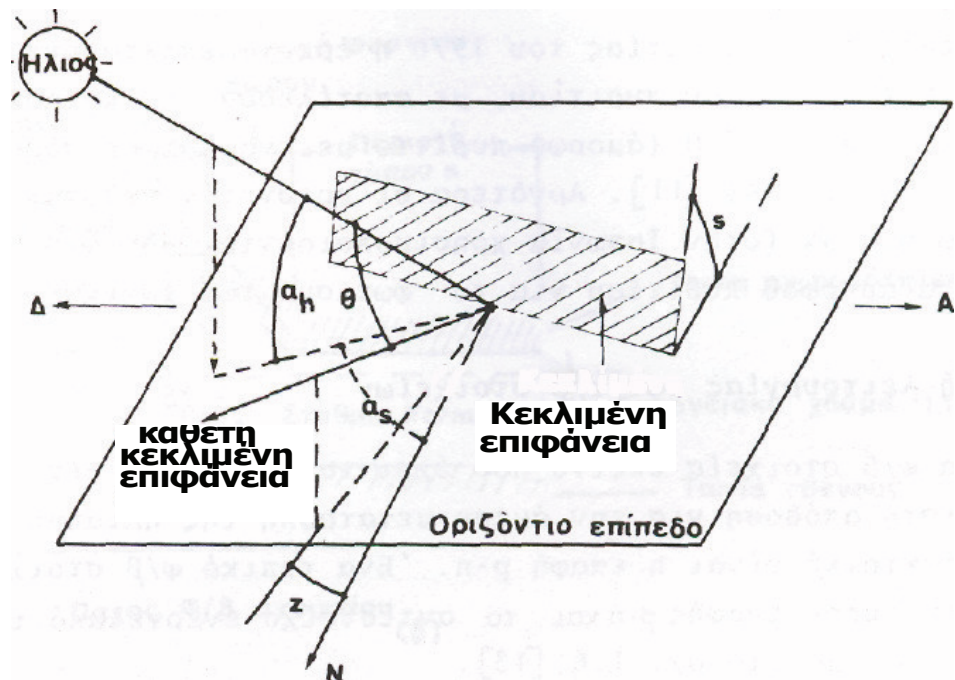
Η απόκλιση του ήλιου δ , υπολογίζεται από την προσεγγιστική εξίσωση του Cooper :

$$\delta = 23,45 * \sin\left(2\pi \frac{284 + N}{365}\right)$$

Η γωνία πρόσπτωσης θ , για κεκλιμένη επιφάνεια μη νότιου προσανατολισμού δίνεται από τη σχέση :

$$\begin{aligned} \theta &= \sin\theta \sin L \cos\omega - \sin\delta \cos L \sin\omega \cos\alpha \\ &+ \cos\delta \cos L \cos\omega \cos\alpha + \cos\delta \sin L \sin\omega \cos\alpha \\ &+ \cos\delta \sin\alpha \sin\omega \end{aligned}$$

Μερικές από τις γωνίες αυτές φαίνονται στο σχ . 1.4.



Σχήμα 1.4. Χαρακτηριστικές γωνίες μιας κεκλιμένης επιφάνειας μη νότιου προσανατολισμού.

1.2 Φωτοβολταϊκά Στοιχεία - PV

1.2.1 Γενικά

Ο κλάδος των φωτοβολταϊκών (φ/β) είναι μια από τις γρηγορότερα αναπτυσσόμενες βιομηχανίες αυτή τη στιγμή, ενδεικτικά αναφέρουμε ότι η αύξηση της παραγωγής φωτοβολταϊκών το 2004 σε σχέση με το 2003 ήταν 60% και παρά την έλλειψη πρώτης ύλης, δηλαδή Πυριτίου υψηλής καθαρότητας. Το 2005 είχαμε αύξηση της παραγωγής φωτοβολταϊκών στα 1,8 GWp (σύμφωνα με το περιοδικό PhotonInternational) χάριν στη αποδοτικότερη χρήση της πρώτης ύλης αλλά και την αύξηση παραγωγής φωτοβολταϊκών λεπτών υμενίων.

Τα τελευταία πέντε χρόνια, η παραγωγή των φωτοβολταϊκών στοιχείων έχει αυξηθεί σταθερά, κατά έναν μέσο όρο 40% ετησίως. Η ανάπτυξη αυτή δεν οδηγείται μόνο από την πρόοδο στα υλικά και την τεχνολογία επεξεργασίας των, αλλά κυρίως από τα προγράμματα εισαγωγής των φ/β συστημάτων στην αγορά σε πολλές χώρες με πρωταγωνιστές την Γερμανία, Ιαπωνία και ΗΠΑ. Τα προγράμματα αυτά συμβάλλουν στην αύξηση της ζήτησης για τα φ/β συστήματα με αντίστοιχες επενδύσεις σε μαζικότερη παραγωγή που θα οδηγήσουν σε οικονομικότερα προϊόντα λόγω της οικονομίας κλίμακας που θα πετύχουν.

Αυτή τη στιγμή η κατασκευή ηλιακών στοιχείων βασίζεται στην τεχνολογία του

κρυσταλλικού Πυριτίου η οποία κατέχει πάνω από το 90% της παγκόσμιας παραγωγής φ/β. Τα φ/β συστήματα αποτελούν μακροπρόθεσμα μια από τις σημαντικότερες ανανεώσιμες ενεργειακές τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, γιατί έχουν την δυνατότητα να ενταχθούν σε όλους τους χώρους (αυτόνομα συστήματα, κεντρικά συστήματα, φ/β ενσωματωμένα στα κτίρια (BIPV) παράγοντας ενέργεια που θα διοχετεύεται στο δίκτυο, κλπ.). Σημαντικότερα πλεονεκτήματα αποτελούν: η δυνατότητα εξεύρεσης αισθητικών λύσεων που δεν επιβαρύνουν ιδιαίτερα το περιβάλλον και η επεκτασιμότητα των φ/β συστημάτων. Οι διασπαρμένες ενεργειακές μονάδες ακόμη και όταν δεν αποτελούν δομικό στοιχείο του κτιρίου προσφέρουν διάφορα πλεονεκτήματα συμπεριλαμβανομένου του σύντομου χρόνου εγκατάστασης και λειτουργίας.

Τα φ/β συστήματα είναι αξιόπιστα και φιλικά προς το περιβάλλον. Το κόστος παραγωγής έχει τα τελευταία 10 χρόνια μειωθεί και η απόδοση έχει βελτιωθεί φθάνοντας για τα πλέον προηγμένα στοιχεία κρυσταλλικού πυριτίου, σε εργαστηριακό επίπεδο, σε απόδοση μεγαλύτερη από 24%, ενώ τα εμπορικά φ/β πλαίσια έχουν απόδοση που κυμαίνεται από 11 έως 18%. Οι εφαρμογές φ/β συστημάτων έχουν οδηγήσει την παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύ από 375 MWp το 1995 σε περίπου 5000 MWp το 2005. Η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς φ/β μέχρι το 2010 αναμένεται να ανέλθει σε 10000 MWp, εκ των οποίων πάνω από 5000 MWp θα βρίσκονται στην Ευρώπη.

Είναι προφανές ότι η γερμανική αγορά φ/β είναι η μεγαλύτερη παγκοσμίως με εγκατάσταση 600 MWp το 2005, με δεύτερη την Ιαπωνία με εγκατάσταση 300 MWp το 2005, σύμφωνα με τα στοιχεία του περιοδικού PhotonInternational.

1.2.2 Δομή στοιχείων

Κάθε στοιχείο από αυτά που υπάρχουν στη φύση χαρακτηρίζεται από διαφορετική ατομική δομή. Για παράδειγμα το αλουμίνιο διαφέρει από το χαλκό γιατί η δομή του ατόμου του πρώτου στοιχείου είναι διαφορετική από αυτή του δεύτερου.

Ως προς τη δομή του, το άτομο μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από ένα θετικά φορτισμένο πυρήνα, γύρω από τον οποίο περιφέρονται τα ηλεκτρόνια που είναι φορτισμένα αρνητικά.

Ο πυρήνας δεν είναι ένα απλό σωματίδιο, αποτελείται από τα θετικά πρωτόνια και τα ουδέτερα νετρόνια. Τα άτομα είναι ηλεκτρικός ουδέτερα πράγμα που σημαίνει ότι ο αριθμός των πρωτονίων του πυρήνα είναι ίσος με τον αριθμό των ηλεκτρονίων.

Τα ηλεκτρόνια που περιφέρονται γύρω από τον πυρήνα βρίσκονται (διατάσσονται) σε στοιβάδες. Η εξωτερική στοιβάδα των ηλεκτρονίων ονομάζεται στοιβάδα σθένους και είναι τα ηλεκτρόνια της στοιβάδας αυτής (ηλεκτρόνια σθένους) που επηρεάζουν την αγωγιμότητα του ηλεκτρικού ρεύματος. Αν λόγω κάποιου εξωτερικού αιτίου (π.χ θέρμανσης ή ακτινοβολίας), κάποια ηλεκτρόνια σθένους αποκτήσουν αρκετή ενέργεια για να ξεφύγουν από την έλξη του πυρήνα, μεταπηδούν στη στοιβάδα αγωγιμότητας που είναι στοιβάδα μεγαλύτερης ενέργειας. Τα ηλεκτρόνια αυτά κινούνται άτακτα μεταξύ των ατόμων και λέγονται ελεύθερα ηλεκτρόνια.

Με κριτήριο την ηλεκτρική αγωγιμότητα τα στοιχεία χωρίζονται σε τρεις βασικές κατηγορίες.

α) **Καλοί αγωγοί.** Τα στοιχεία που είναι καλοί αγωγοί έχουν άτομα με ένα ή δύο ηλεκτρόνια στη στοιβάδα σθένους τα οποία μπορούν να ελευθερωθούν στη στοιβάδα αγωγιμότητας και να κινούνται στο χώρο μεταξύ των ατόμων. Αυτά είναι τα ηλεκτρόνια (ελεύθερα ηλεκτρόνια) που συνεισφέρουν στο ηλεκτρικό ρεύμα που δημιουργείται στα μέταλλα.

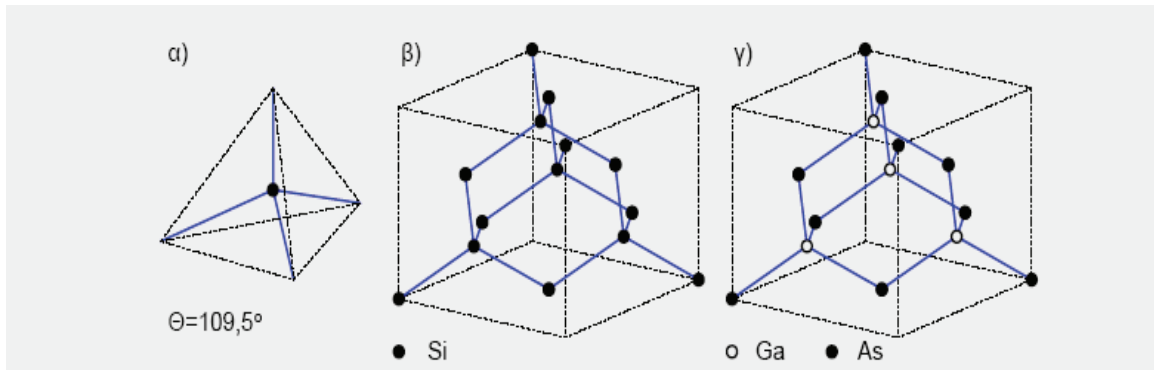
β) **Μονωτές.** Τα στοιχεία που ανήκουν στην κατηγορία αυτή έχουν άτομα με 6 ή 7 ηλεκτρόνια στη στοιβάδα σθένους. Τα ηλεκτρόνια αυτά παραμένουν δέσμια στο άτομο και έτσι δεν μπορούν να συνεισφέρουν στο ηλεκτρικό ρεύμα.

γ) **Ημιαγωγοί.** Είναι στοιχεία που βρίσκονται από πλευράς ηλεκτρικής αγωγιμότητας μεταξύ καλών αγωγών και μονωτών. Τα άτομά τους έχουν 3, 4 ή 5 ηλεκτρόνια στην στοιβάδα σθένους και για αυτό μπορούν να συνεισφέρουν κατά μικρά μεταβλητά ποσά στο ηλεκτρικό ρεύμα ανάλογα με τα αίτια που το προκαλούν.

Οι ημιαγωγοί είναι τα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή ηλεκτρονικών υπολογιστών, των φωτοανιχνευτών και στα υπό μελέτη φωτοβολταϊκά στοιχεία.

1.3 Βασική Θεωρία Ημιαγωγών

Οι φωτοβολταϊκές κυψέλες κατασκευάζονται από ημιαγωγούς που αποτελούν σώματα με ενδιάμεση ηλεκτρική αγωγιμότητα, μμεταξύ αγωγών και μονωτών. Οι κυριότεροι ημιαγωγοί είναι τετρασθενή στοιχεία, όπως το πυρίτιο (Si) και το γερμάνιο (Ge) ή ακόμα και χημικές ενώσεις με τετραεδρική δομή (σχήμα 1.5.1), όπως το αρσενικούχο γάλλιο και το θειούχο κάδμιο.



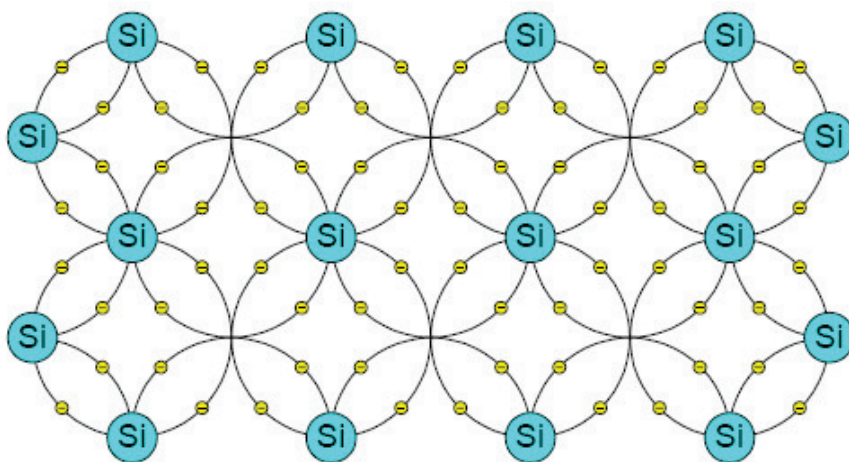
Σχήμα 1.5.1: α) Η κρυσταλλική δομή των κυριότερων ημιαγωγών είναι τετραεδρική, δηλαδή τα γειτονικά άτομα βρίσκονται σε θέσεις του κρυσταλλικού πλέγματος που αντιστοιχούν στο κέντρο και στις κορυφές ενός κανονικού τετραέδρου.

β) Στους στοιχειακούς αγωγούς (π.χ. Si) όλα τα άτομα του πλέγματος είναι ίδια.

γ) Στις ημιαγωγίμες χημικές ενώσεις (π.χ. Si) τα άτομα που βρίσκονται σε γειτονικές θέσεις είναι διαφορετικά.

Συγκεκριμένα το πυρίτιο αποτελεί τον πιο διαδεδομένο τύπο ημιαγωγού στοιχείου, καθώς η χρήση του έχει επικρατήσει σχεδόν στο σύνολο των ηλεκτρονικών εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων και των φωτοβολταϊκών.

Όπως φαίνεται από την επίπεδη απεικόνιση του πλέγματος του πυριτίου (σχήμα 1.5.2), κάθε άτομο πυριτίου είναι ενωμένο με 4 γειτονικά άτομα με ομοιοπολικούς δεσμούς. (Στο πλέγμα τα ηλεκτρόνια σθένους αλλάζουν συνεχώς θέσεις μεταξύ τους κινούμενα από και προς τους γειτονικούς δεσμούς του Si.)



Σχήμα 1.5.2 : Απεικόνιση του πλέγματος πυριτίου (Si)

Επομένως όλα τα ηλεκτρόνια σθένους των ατόμων πυριτίου είναι δεσμευμένα στους ομοιοπολικούς δεσμούς, με αποτέλεσμα να μην υπάρχουν ελεύθεροι φορείς

του ηλεκτρικού ρεύματος και το σώμα να μη διαθέτει ηλεκτρική αγωγιμότητα. Αυτό συμβαίνει όμως μόνο στην περίπτωση που ο ημιαγωγός βρίσκεται στη θεμελιώδη ενεργειακή κατάσταση, δηλαδή στην κατάσταση εκείνη όπου το ενεργειακό του περιεχόμενο είναι πολύ χαμηλό (θερμοκρασιακή περιοχή απολύτου μηδενός). Στην κατάσταση αυτή οι ημιαγωγοί συμπεριφέρονται σαν μονωτές.

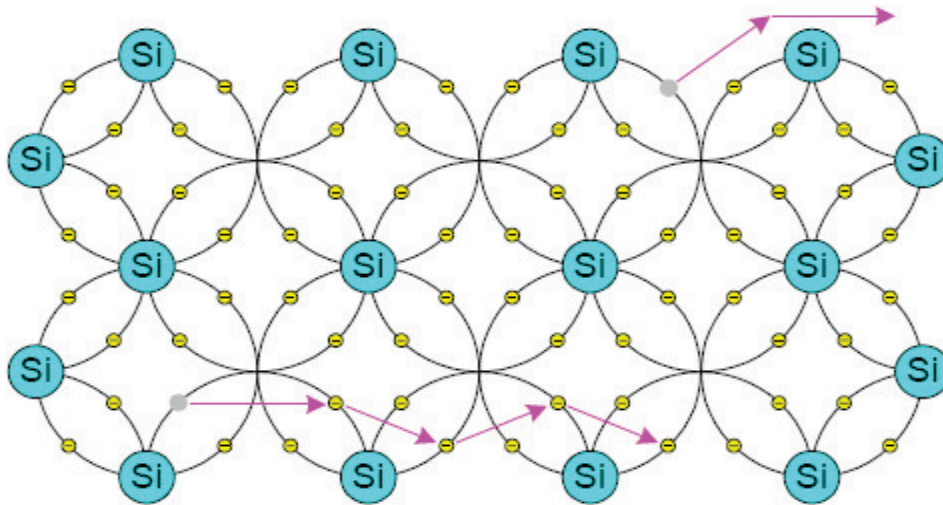
Όταν όμως οι ημιαγωγοί απορροφήσουν κάποιο ποσό ενέργειας, μέσω θερμότητας ή ακτινοβολίας, τότε διαταράσσονται οι ομοιοπολικοί δεσμοί μεταξύ ατόμων πυριτίου. Έτσι σε συνηθισμένες θερμοκρασίες περιβάλλοντος, η θερμική ενέργεια που παρέχεται στο σώμα και κατανέμεται στα άτομα του προκαλεί την απελευθέρωση πολλών ηλεκτρονίων από τους ομοιοπολικούς δεσμούς.

Αναλυτικότερα, η συνεχής ανακατανομή της θερμικής ενέργειας από το ένα άτομο στο άλλο, είναι δυνατό να προκαλέσει, στιγμιαία και σε τυχαίες θέσεις, τη διέγερση δεσμευμένων ηλεκτρονίων (στην κρυσταλλική δομή του πυριτίου), με αποτέλεσμα αυτά να απελευθερωθούν και να αρχίσουν να κινούνται ελεύθερα. Τα ελεύθερα αυτά ηλεκτρόνια απομακρύνονται από την περιοχή του δεσμού τους, χάρη στην κινητική ενέργεια που απέκτησαν από τη θερμότητα. Κατά συνέπεια ο ημιαγωγός διαθέτει πλέον ευκίνητους φορείς ηλεκτρισμού, οι οποίοι και του προσδίδουν αξιόλογη ηλεκτρική αγωγιμότητα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η το ποσό της ελάχιστης απαιτούμενης ενέργειας για την απελευθέρωση ενός ηλεκτρονίου σθένους από το δεσμό στον οποίο ανήκει είναι συγκεκριμένο και ισούται με το ενεργειακό διάκενο *E_g* του ημιαγωγού. Ως ενεργειακό διάκενο ορίζεται η ενεργειακή διαφορά μεταξύ των εξής δυο ζωνών:

- της ζώνης αγωγιμότητας η οποία περικλείει τις ενέργειες των ελεύθερων ηλεκτρονίων που είναι υπεύθυνες για την ύπαρξη ηλεκτρικού ρεύματος στον ημιαγωγό, και
- της ζώνης σθένους, η οποία και περικλείει τις διάφορες ενεργειακές στάθμες των ατόμων των ημιαγωγικών στοιχείων.

Η απομάκρυνση ενός ηλεκτρονίου από κάποιο δεσμό δεν συνεπάγεται την καταστροφή του κρυσταλλικού πλέγματος (εικόνα 3), καθώς τα άτομα τον οποίων έσπασε ο δεσμός εξακολουθούν να συνδέονται με τα γειτονικά τους άτομα με τρεις άθικτους δεσμούς καθώς και μεταξύ τους με έναν ατελή δεσμό ενός ηλεκτρονίου. Οι τρεις και ο ήμισυ δεσμός είναι ικανοί να συγκρατήσουν σε συνοχή τον κρύσταλλο και μετά την ελευθέρωση του ηλεκτρονίου. Άλλωστε έχει αποδειχθεί ότι το πλήθος των ελεύθερων ηλεκτρονίων, δηλαδή το πλήθος των διασπασμένων δεσμών των

σωμάτων που μας ενδιαφέρουν, είναι ένα πολύ μικρό ποσοστό του συνόλου των δεσμών των ατόμων του κρυσταλλικού πλέγματος.



Σχήμα 1.5.3: Οι δεσμοί του κρυσταλλικού πλέγματος δεν καταστρέφονται

Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια (e) περιφέρονται άτακτα στο κρυσταλλικό σώμα, ανάμεσα στα άτομα και τους δεσμούς τους. Αυτό συμβαίνει για όσο χρονικό διάστημα διατηρούν την αυξημένη τους ενέργεια. Όταν η ενέργεια τους μειωθεί σημαντικά, δεσμεύονται στην κενή θέση κάποιου ατελούς δεσμού, που μπορεί να συναντήσουν στον δρόμο τους και παύουν να είναι ελεύθερα. Ο ατελής δεσμός στον οποίο θα επιστρέψουν τα ηλεκτρόνια δεν είναι απαραίτητο να αντιστοιχεί σε εκείνον από τον οποίο έφυγαν. Όσο χρονικό διάστημα τα ηλεκτρόνια αυτά είναι ελεύθερα, συμβάλλουν στην αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του σώματος, για αυτό και ονομάζονται ηλεκτρόνια αγωγιμότητας.

Οι κενές ηλεκτρονικές θέσεις των χημικών δεσμών, που ονομάζονται οπές (h), λειτουργούν σαν παγίδες δέσμευσης για όσα ηλεκτρόνια έχουν χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο. Αλλά ακόμη και αν δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια στην περιοχή γύρω από την οπή, δεν σημαίνει ότι η κενή θέση μένει αμετακίνητη, καθώς μπορεί να προσελκύσει κάποιο ηλεκτρόνιο σθένους γειτονικού δεσμού. Τότε το ηλεκτρόνιο αυτό αποδεσμεύεται από τον δεσμό που άνηκε, δημιουργώντας ταυτόχρονα μια κενή θέση, και συμπληρώνει την κενή θέση της γειτονικής οπής (σχήμα 1.5.3). Η μετατόπιση της οπής μπορεί να εξακολουθεί να πραγματοποιείται, εκτός εάν κάποια στιγμή δεσμευθεί από αυτή ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο. Τότε η οπή εξαφανίζεται, και ο ομοιοπολικός δεσμός γίνεται πλήρης.

Οι οπές διαγράφουν και αυτές μια άτακτη κίνηση στο σώμα, από ένα δεσμό στον άλλο, αφού είναι τυχαία η κατεύθυνση από την οποία θα έρθει το γειτονικό ηλεκτρόνιο που θα συμπληρώνει τον ατελή δεσμό. Όταν όμως επιβάλλεται εξωτερικό πεδίο, το ηλεκτρόνιο θα προσέλθει από την κατεύθυνση που ευνοείται ενεργειακά. Τότε η κίνηση των οπών είναι προσανατολισμένη και αντίθετη αυτής των ηλεκτρονίων που κατευθύνονται προς υψηλότερα δυναμικά.

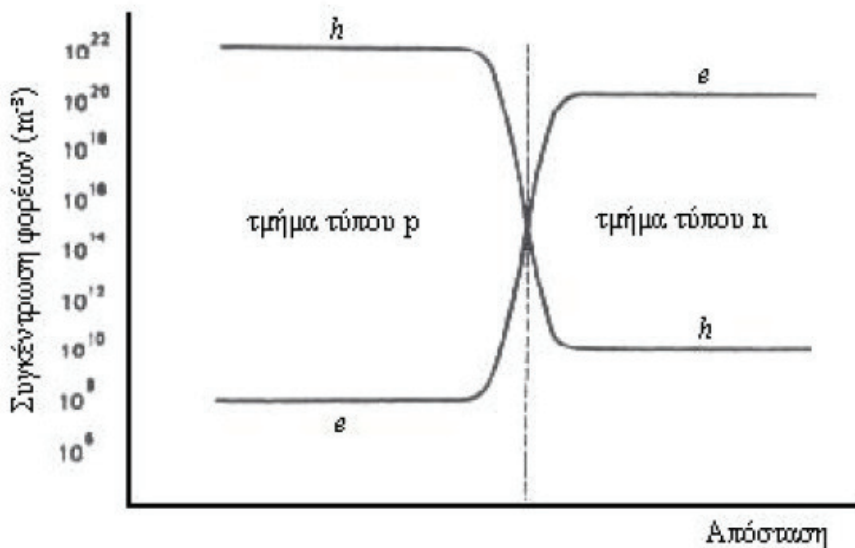
Παρατηρούμε δηλαδή ότι στους ημιαγωγούς εκδηλώνονται δύο μηχανισμοί: η απελευθέρωση των ηλεκτρονίων από τους δεσμούς, με ταυτόχρονη δέσμευση ελεύθερων ηλεκτρονίων στις οπές. Η συγκέντρωση (πλήθος φορέων ανά μονάδα όγκου) των ελεύθερων ηλεκτρονίων ή των οπών ενός ημιαγωγού παραμένει αμετάβλητη και εξαρτάται μόνο από το υλικό και την θερμοκρασία του. Όσο ασθενέστεροι είναι οι δεσμοί μέσα στο υλικό και όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία του, τόσο μεγαλύτερη θα είναι και η συγκέντρωση των φορέων του, δηλαδή των ηλεκτρονίων και των οπών του.

1.3.1 Ένωση p-n - Δίοδος Ημιαγωγών

Όπως προαναφέρθηκε, χαρακτηριστική ιδιότητα των ημιαγωγών ενός στοιχείου είναι η εξίσωση της συγκέντρωσης των ελεύθερων ηλεκτρονίων (e) και της συγκέντρωσης των οπών (h). Όμως σε ημιαγωγούς προσμίξεων η συγκέντρωση του ενός είδους φορέων (φορείς πλειονότητας) είναι συνήθως πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του άλλου είδους (φορείς μειονότητας), με αποτέλεσμα η συμβολή των φορέων μειονότητας στην αγωγιμότητα, συνήθως, να θεωρείται αμελητέα. Όταν οι φορείς πλειονότητας είναι ηλεκτρόνια τότε ο ημιαγωγός χαρακτηρίζεται ως τύπου "n". Αντίθετα, όταν οι φορείς πλειονότητας είναι οπές, τότε ο ημιαγωγός χαρακτηρίζεται ως τύπου "p".

Ο θεμέλιος λίθος όλων των ημιαγωγών διατάξεων είναι η ένωση p-n. Αυτή η ένωση σχηματίζεται όταν έρθουν σε επαφή ένα τεμάχιο ημιαγωγικού τύπου p με ένα τεμάχιο ημιαγωγικού τύπου n. Εκείνη τη χρονική στιγμή, ένα μέρος από τις οπές του τεμαχίου τύπου p διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου n, όπου οι οπές είναι λιγότερες και συγχρόνως ένα μέρος από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του τεμαχίου n διαχέεται προς το τεμάχιο τύπου p, όπου τα ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι λιγότερα. Η ανάμιξη αυτή των φορέων και η αύξηση της συγκέντρωσης των φορέων μειονότητας στις περιοχές κοντά στη διαχωριστική επιφάνεια των τεμαχίων τύπου p και n, ανατρέπουν την αρχική κατάσταση.

Η περιοχή μεταξύ του ημιαγωγού τύπου p και του ημιαγωγού τύπου n, καλείται ζώνη εξάντλησης. Η ζώνη αυτή αποτελεί την δίοδο διέλευσης των οπών και των ηλεκτρονίων από τον ένα ημιαγωγό στον άλλο. Μετά από ένα χρονικό διάστημα και αφού έχουν ολοκληρωθεί οι αντίστοιχες μετατοπίσεις (ροές) φορέων, επέρχεται μια κατάσταση ισορροπίας όπου οι συγκεντρώσεις των οπών και των ηλεκτρονίων έχουν σταθεροποιηθεί όπως φαίνεται στο σχήμα 1.5.1.1

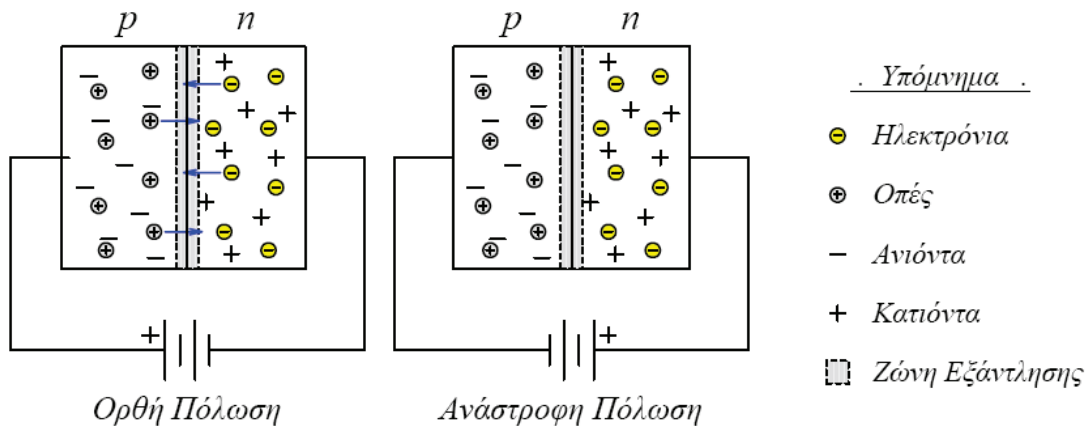


Σχήμα 1.5.1.1: Ισορροπία μεταξύ οπών και ηλεκτρονίων

Σε αντίθεση με τους ευκίνητους φορές των ημιαγωγών (ελεύθερα ηλεκτρόνια και οπές) που τείνουν να διαχέονται προς τις περιοχές με τη μικρότερη συγκέντρωσή τους, η συγκέντρωση των αρνητικών ιόντων στα οποία μετατράπηκαν οι αποδέκτες του τμήματος τύπου p και η συγκέντρωση των θετικών ιόντων στα οποία μετατράπηκαν οι δότες στο τμήμα τύπου n, παραμένουν αμετάβλητες, αφού τα ιόντα μένουν ακίνητα στο σώμα. Έτσι το υλικό χάνει τοπικά την ηλεκτρική του ουδετερότητα και οι πλευρές της ένωσης φορτίζονται με αντίθετα ηλεκτρικά φορτία, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται μια διαφορά δυναμικού (συνήθως 0.6-0.8 Volts), της οποίας το ηλεκτροστατικό πεδίο εμποδίζει την παραπέρα διάχυση των φορέων προς το απέναντι τμήμα της ένωσης.

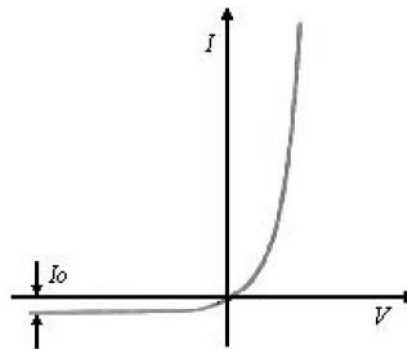
Αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι ότι η ένωση p-n, παρουσιάζει εντελώς διαφορετική συμπεριφορά στην ροή του ηλεκτρικού ρεύματος, ανάλογα με την φορά αυτού και άρα ανάλογα με την τάση που της επιβάλλεται εξωτερικά.

Εξαιτίας αυτής της χαρακτηριστικής συμπεριφοράς της η ένωση p-n ονομάζεται και δίοδος.



Σχήμα 1.5.1.2 : Ένωση p-n

Υπάρχουν δύο τρόποι επιβολής τάσεως σε μια ένωση p-n (διόδος). Όταν εφαρμόσουμε τον θετικό πόλο της πηγής στον ημιαγωγό τύπου p και τον αρνητικό στον ημιαγωγό τύπου n, τότε η διόδος είναι ορθά πολωμένη, οπότε και συμπεριφέρεται σαν κλειστός διακόπτης, ενώ όταν ο θετικός πόλος της πηγής εφαρμοστεί στον ημιαγωγό τύπου n και ο αρνητικός στον p ημιαγωγό, τότε η διόδος όντας ανάστροφα πολωμένη λειτουργεί ως ανοιχτός διακόπτης (σχήμα 1.5.1.2). Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, αποτελούν διόδους που λειτουργούν σε συνθήκες ορθής πόλωσης. Στο σχήμα 1.5.1.3 φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη μιας διόδου p-n.



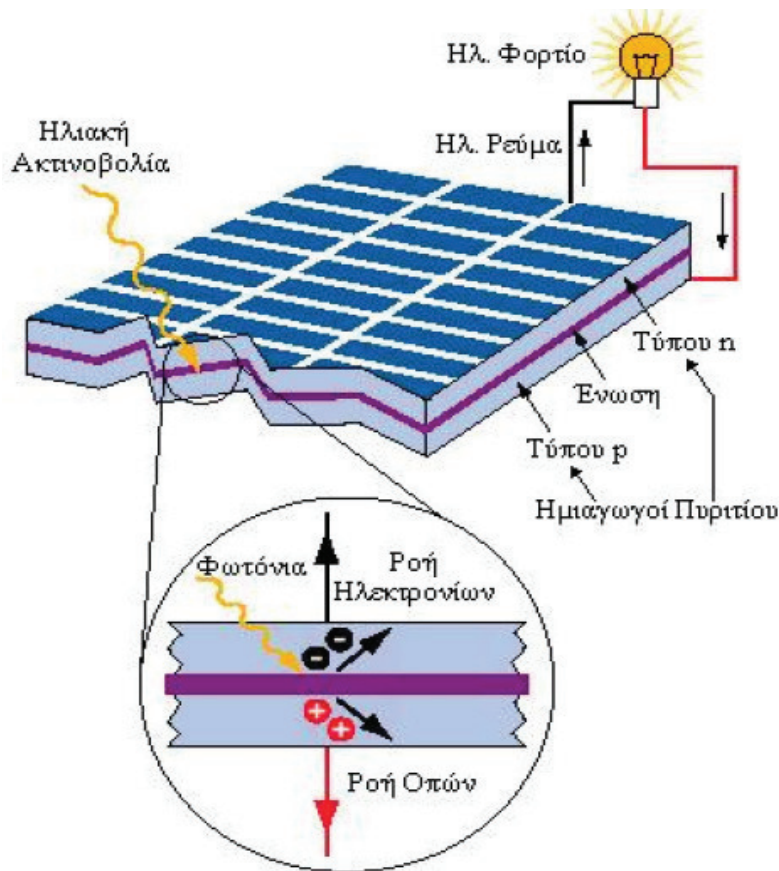
Σχήμα 1.5.1.3: Χαρακτηριστική καμπύλη διόδου p-n

1.4 Φωτοβολταϊκό Φαινόμενο

Όπως προαναφέρθηκε, τα φωτοβολταϊκά κύτταρα αποτελούν διόδους ημιαγωγικών ενώσεων τύπου p-n με τη μορφή επίπεδης πλάκας. Κάθε φωτόνιο της προσπίπτουσας ακτινοβολίας με ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού, έχει την δυνατότητα να απορροφηθεί σε ένα χημικό δεσμό και να ελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο. Όσο διαρκεί η ακτινοβολία, δημιουργείται περίσσια φορέων (ελεύθερων ηλεκτρονίων και οπών).

Οι φορείς αυτοί, καθώς κυκλοφορούν στο στερεό (και εφόσον δεν επανασυνδεθούν με φορείς αντίθετου προσήμου) δέχονται την επίδραση του ενσωματωμένου ηλεκτροστατικού πεδίου της ένωσης p-n. Εξαιτίας αυτού τα ελεύθερα ηλεκτρόνια εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου n και οι οπές εκτρέπονται προς το τμήμα τύπου p, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μια διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες των δύο τμημάτων της διόδου. Αν στους ακροδέκτες αυτούς συνδεθεί κατάλληλο ηλεκτρικό φορτίο παρατηρείται ροή ηλεκτρικού ρεύματος και ισχύος από τη φωτοβολταϊκή διάταξη προς το φορτίο.

Συμπερασματικά η όλη διάταξη αποτελεί μια πηγή ηλεκτρικού ρεύματος που διατηρείται για όσο χρονικό διάστημα διαρκεί η πρόσπτωση της ηλιακής ακτινοβολίας στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού κύτταρου. Η εκδήλωση της διαφοράς δυναμικού ανάμεσα στους δύο ακροδέκτες της παραπάνω διάταξης, η οποία αντιστοιχεί σε ορθή πόλωση της διόδου, ονομάζεται φωτοβολταϊκό φαινόμενο, ο μηχανισμός εκδήλωσης του οποίου παρουσιάζεται σχηματικά στο σχήμα 1.6.1. Στην πρακτική εκμετάλλευση του φαινομένου αυτού, στηρίζεται η λειτουργία του συνόλου των φωτοβολταϊκών διατάξεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 1.6.1 : Φωτοβολταϊκό φαινόμενο

1.5. Τύποι φωτοβολταϊκών στοιχείων

1.5.1 Ηλιακά στοιχεία πυριτίου

1.5.1.1 Η επιλογή και η συμπεριφορά του πυριτίου

Το πυρίτιο είναι ένας ημιαγωγός με άμεσο ενεργειακό διάκενο 1,1eV. Αν και οι δύο αυτές ιδιότητες (έμμεσο και σχετικά μικρή τιμή διακένου) δεν είναι ιδεώδεις για τη φωτοβολταϊκή μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας, το πυρίτιο είναι ο ημιαγωγός που κυριάρχησε από την αρχή μέχρι και σήμερα, σαν υλικό κατασκευής των ηλιακών στοιχείων. Η αιτία είναι ίσως ότι το πυρίτιο έχει ήδη ένα πλούσιο παρελθόν 3-4 δεκαετιών σαν το κύριο υλικό των διατάξεων των ημιαγωγών της ηλεκτρονικής. Επομένως οι ιδιότητές του είναι καλά μελετημένες και το υλικό κυκλοφορεί στην αγορά σε αρκετά μεγάλες ποσότητες, με ικανοποιητική χημική καθαρότητα και τελειότητα κρυσταλλικής δομής, με τη χρησιμοποίηση τεχνολογικών μεθόδων δοκιμασμένων με επιτυχία.

Επίσης, τα ηλιακά στοιχεία πυριτίου έχουν λειτουργήσει με απολύτως ικανοποιητική αξιοπιστία σε ακραίες συνθήκες, τόσο σε διαστημικές όσο και σε επίγειες. π.χ. σε διαστημόπλοια σε τροχιά προς τον πλανήτη Δία με ένταση ακτινοβολίας μόλις 50 W/m² και θερμοκρασία -120 °C, ή σε άλλα διαστημόπλοια σε τροχιά προς τον Ερμή και την Αφροδίτη με ένταση ακτινοβολίας 2,5 KW/M² και θερμοκρασίας 140 °C, ή σε συστήματα συγκεντρωμένου φωτός, στην επιφάνεια της γης, ισχύος εκατοντάδων ήλιων. Επίσης, σε πλαίσια τοποθετημένα σε κορυφές βουνών εκτεθειμένα σε χιονοθύελλες και ταχύτητες ανέμου πάνω από 100 Km/h, στο έντονο διαβρωτικό περιβάλλον της θαλάσσιας ατμόσφαιρας, σε περιοχές με μεγάλες θερμοκρασιακές μεταβολές κλπ. Ενδεικτικό της επιτυχίας των ηλιακών στοιχείων πυριτίου είναι ο εντυπωσιακός ρυθμός της αύξησης της παραγωγής τους. Πριν από είκοσι χρόνια, η ετήσια παραγωγή των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου δεν ξεπερνούσε, σε συνολική ισχύ αιχμής, τα λίγα KWp, και προορίζονταν αποκλειστικά για τηλεπικοινωνιακούς, μετεωρολογικούς και ερευνητικούς δορυφόρους. Σήμερα η ετήσια παραγωγή τους έχει φτάσει τα 10 MWp (αύξηση περίπου 1000 φορές), από τα οποία τα μόλις τα 150 KWp προορίζονται για δορυφορικές ή άλλες διαστημικές εφαρμογές, ενώ το υπόλοιπο χρησιμοποιείται σε επίγειες φωτοβολταϊκές διατάξεις.

Σύμφωνα με ένα θεωρητικό υπολογισμό, η απόδοση των ηλιακών στοιχείων πυριτίου μπορεί να φθάσει μέχρι 23,92% για συνθήκες AM1. ο υπολογισμός έχει γίνει για ηλιακό στοιχείο πάχους 100μm με εμπρός τμήμα τύπου ή πάχους 0,2μm και ζώνη ΓΡΗΓΟΡΑΚΟΥ ΚΩΝ/ΝΑ

εξάντλησης πάχους 0,15 μm . Το μήκος διάχυσης των φορέων μειονότητας θεωρήθηκε 150 μm και ο μέσος χρόνος ζωής τους 20 μs , περίπου. Ένα τέτοιο στοιχείο θα έδινε ανοιχτοκυκλωμένη τάση $V_{\text{DC}} = 0,7 \text{ V}$ και πυκνότητα βραχυκυκλωμένου φωτορεύματος $I_{\text{ph}} = 40 \text{ mA/cm}^2$, περίπου.

Πειραματικά η μεγαλύτερη απόδοση ηλιακού στοιχείου πυριτίου μετρήθηκε εργαστηριακά 19%, με απώλειες ανάκλασης 3% και συντελεστή πλήρωσης 0,77. Στις πρακτικές εφαρμογές τα ηλιακά στοιχεία μονοκρυσταλλικού ή πολυκρυσταλλικού πυριτίου μεγάλης επιφάνειας έχουν απόδοση περίπου 10-12% ή λίγο μεγαλύτερη.

1.5.1.2 Η παρασκευή του ηλιακού στοιχείου

Για να έχει το πυρίτιο, αλλά και κάθε άλλος κρυσταλλικός ημιαγωγός, ικανοποιητικές ιδιότητες για φωτοβολταϊκές και γενικότερα για ηλεκτρονικές εφαρμογές (π.χ. μεγάλη κινητικότητα, μεγάλο μήκος διάχυσης και μεγάλο χρόνο ζωής των φορέων – κυρίως των φορέων μειονότητας - πριν από την επανασύνδεσή τους) πρέπει να είναι πολύ μεγάλης καθαρότητας και το κρυσταλλικό τους πλέγμα να μην έχει αταξίες δομής. Η πρώτη φάση του καθαρισμού του πυριτίου γίνεται με την ανάτξη και στη συνέχεια με την μετατροπή του "μεταλλουργικού" πυριτίου σε αέριο τριχλωροσιλάνιο (SiHCl_3) που αποχωρίζεται από τις διάφορες προσμίξεις με κλασματική απόσταξη. Το "μεταλλουργικό" πυρίτιο έχει καθαρότητα περίπου 99.6% που είναι πολύ καλή για τις συνηθισμένες τεχνικές χρήσεις, αλλά εντελώς ανεπαρκής για ηλεκτρονικές εφαρμογές.

Στη συνέχεια, το τριχλωροσιλάνιο ανάγεται με υδρογόνο και συμπυκνώνεται πυρίτιο ποιότητας "ημιαγωγού" ή "ηλεκτρονικής", που τήκεται και ανακρυσταλλώνεται με ακόμη μεγαλύτερη καθαρότητα, π.χ. της τάξης του 99.9%, σε κυλινδρική μονοκρυσταλλική μορφή, διαμέτρου περίπου 10cm. Από τον κύλινδρο κόβονται δίσκοι, πάχους περίπου 0.5mm, οι οποίοι λειαινούνται με επιμέλεια για την απομάκρυνση των ελαττωμάτων της κοπής και στη συνέχεια διαμορφώνονται σε διόδους p - n με επίταξη, διάχυση ή εμφύτευση προσμίξεων. Το τελικό στάδιο είναι η συγκόλληση των ηλεκτροδίων στην εμπρός και πίσω όψη του δίσκου, η επικάλυψη τους με κατάλληλο υλικό που εμποδίζει την ανάκλαση του φωτός. Το τελευταίο στάδιο περιλαμβάνει την κατασκευή πλαισίου φωτοβολταϊκών στοιχείων με σκοπό την προστασία τους από τις φυσικές και χημικές μεταβολές που γίνονται στην ατμόσφαιρα.

Για να μετατραπεί αυτή η 'φέτα' σε μια p-n κρυσταλλοδίοδο που αποτελεί το βασικό μέρος ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου πρέπει να εισαχθούν σε αυτό τα σχετικά

στοιχεία (Βόριο και Φώσφορος) σε κατάλληλη αναλογία. Το Βόριο ρίχνεται από την αρχή στο λιωμένο πυρίτιο, ώστε ο κρύσταλλος που θα σχηματιστεί να έχει την αναλογία του βορίου που χρειάζεται για να γίνει p-πυρίτιο.

Για να μετατραπεί η περιοχή κάτω από τη επιφάνεια της φέτας σε n-πυρίτιο ο φωσφόρος διαβιβάζεται με την βοήθεια ενός αερίου πάνω από την επιφάνεια που θερμαίνεται οπότε άτομα φωσφόρου διαχέονται μέσα στο p-πυρίτιο μέχρι σε βάθος μερικών δεκάτων του μικρού ($1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$). Φυσικά εισάγονται τόσα άτομα φωσφόρου ώστε τα ηλεκτρόνια που θα δώσουν να καλύψουν όλες τις οπές που έχουν δημιουργήσει τα άτομα βορίου και επιπλέον να δώσουν τον κατάλληλο αριθμό ηλεκτρονίων για να σχηματιστεί επιφανειακά το n-πυρίτιο. Έτσι το n-πυρίτιο βρίσκεται σε επαφή με το p-πυρίτιο. Στην επιφάνεια επαφής μεταξύ των δυο εμφανίζεται ο φραγμός που εμποδίζει τη δίοδο των φωτοηλεκτρονίων.

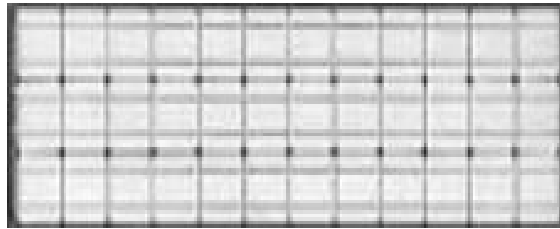
Η κατασκευή του φωτοβολταϊκού στοιχείου συμπληρώνεται με τις μεταλλικές επαφές στις δυο επιφάνειες. Η p- επιφάνεια επικαλύπτεται πλήρως με μεταλλικό στρώμα που δρα σαν ηλεκτρόδιο σχήματος (Π) ή πλεγματικής μορφής ώστε το μεγαλύτερο μέρος της επιφανείας του n-πυριτίου να μένει ελεύθερο για να δέχεται το φως. Στην επιφάνεια του n- στρώματος, περιλαμβανομένης και της επιφανείας του ηλεκτροδίου, τοποθετείται ένα στρώμα κατάλληλο από ανακλαστικό υλικό που περιορίζει την ανάκλαση και βοηθά στην είσοδο όσο το δυνατό μεγαλύτερης φωτεινής ενέργειας. Αφού κατασκευαστούν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πρέπει να συναρμολογηθούν για να σχηματίσουν το φωτοβολταϊκό πλαίσιο.

1.5.2 Φωτοβολταϊκά στοιχεία πυριτίου

Οι βασικότερες τεχνολογίες παραγωγής φωτοβολταϊκών στοιχείων που κυρίως χρησιμοποιούνται σήμερα είναι οι ακόλουθες:

a) Μονοκρυσταλλικού πυριτίου

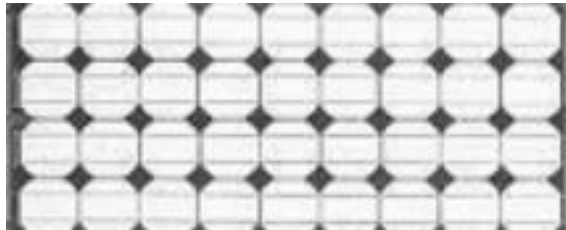
Είναι τα πιο διαδεδομένα στην αγορά και κατασκευάζονται σε κυλίνδρους ανεπτυγμένου πυριτίου. Οι κύλινδροι αυτοί κόβονται σε λεπτές φέτες ,γνωστές ως wafers , με πάχος μόλις 200 μm .Ο βαθμός απόδοσης τους στα εργαστήρια φθάνει το 24% , ενώ στο εμπόριο αγγίζει το 15%.



Σχήμα 1.7:Φωτοβολταϊκό πλαίσιο μονοκρυσταλλικού πυριτίου

β) Πολυκρυσταλλικού πυριτίου

Κατασκευάζονται από χυτό πυρίτιο .Έχουν βαθμό απόδοσης περίπου στο 15%.




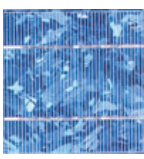


Σχήμα 1.8 :Φωτοβολταϊκό πλαίσιο πολυκρυσταλλικού πυριτίου

γ) Άμορφου πυριτίου

Τα φωτοβολταϊκά αυτά στοιχεία κατασκευάζονται από άμορφο πυρίτιο. Διακρίνονται από την πολύ μικρή κατανάλωση πυριτίου κατά την κατασκευή τους, ενώ ευκολότερες είναι και οι κατασκευαστικές διαδικασίες με αποτέλεσμα το κόστος τους να είναι πολύ μικρότερο. Το κυριότερο μειονέκτημα τους είναι η πολύ χαμηλή τους απόδοση που δεν ξεπερνά το 10%. Χρησιμοποιούνται συνήθως σε ηλιακά ρολόγια και σε αριθμητικούς υπολογιστές. Ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα είναι η χρήση της τεχνολογίας άμορφου πυριτίου σε μεγάλα κτήρια , γνωστά και ως Κτηριακά Ολοκληρωμένα PV στοιχεία (BIPVs - Building Integrated Photovoltaics), όπου αντικαθιστούν τα τζάμια (μετά από επεξεργασία για την αύξηση της διαφάνειας τους) συμβάλλοντας έτσι στην τροφοδοσία ηλεκτρικής ενέργειας στα κτίρια.



Σχήμα 1.9 :Φωτοβολταϊκά πλαίσια άμορφου πυριτίου

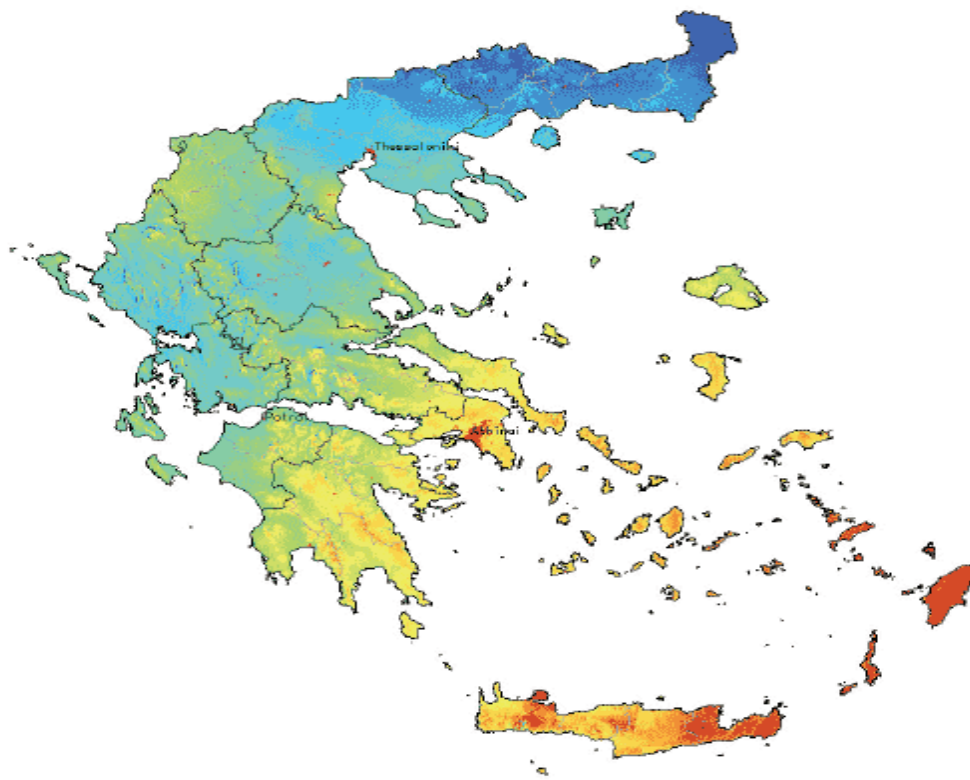
Συγκριτικός πίνακας φωτοβολταϊκών τεχνολογιών				
ΤΥΠΟΣ	Λεπού- υμενίου ή thin film	Πολυκρυ- σταλλικά	Μονοκρυ- σταλλικά	Υβριδικά
ΕΜΦΑΝΙΣΗ				
ΑΠΟΔΟΣΗ	Δυσκοι: 5-  10%			
ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ ΑΝΑ kWp	10-20 m ²	8 - 10 m ²	7 - 8 m ²	6 - 7 m ²
Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας (kWh ανά kWp) (μέση τιμή για Ελλάδα και για ένα τυπικό σύστημα με νότιο προσανατολισμό και κατάλληλη κλίση)	1300 - 1400	1300	1300	1350
Μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας (kWh ανά m²) (μέση τιμή για Ελλάδα και για ένα τυπικό σύστημα με νότιο προσανατολισμό και κατάλληλη κλίση)	65 - 140	130 - 160	160 - 185	190 - 225
Ετήσια μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (kg CO₂ ανά kWp)	1380-1485	1380	1380	1425

Πίνακας 1.1. : Συγκριτικός πίνακας για διάφορους τύπους PV στοιχείων

Υποκατάσταση	Αποφυγή εκλυόμενων ρύπων (σε gr) ανά ηλιακή κιλοβατώρα (λαμβάνοντας υπ' όψη και τις απώλειες του δικτύου)			
	CO ₂	SO ₂	NO _x	PM ₁₀
Λιγνίτη	1.482	1-1,8	1,17-1,23	1,1
Πετρελαίου (χαμηλού θείου)	830	3,5	1,5	0,34
Φυσικού αερίου	475	0,017	0,6	-
Μέσου ενεργειακού μείγματος χώρας	1.062	CO ₂ : διοξείδιο του άνθρακα, SO ₂ : διοξείδιο του θείου NO _x : οξειδία του αζώτου, PM ₁₀ : μικροσωματίδια		

Πίνακας 1.2. : Αποφυγή εκλυόμενων ρύπων

Στους παραπάνω πίνακες 1 και 2 βλέπουμε τα συγκριτικά αποτελέσματα των διάφορων τύπων φωτοβολταϊκών στοιχείων καθώς και το πόσο της αποφυγής των εκλυόμενων ρύπων και στον χάρτη 1την παραγωγή ηλιακού ηλεκτρισμού στην Ελλάδα.



Χαμηλότερη παραγωγή ηλιακού ηλεκτρισμού  Υψηλότερη παραγωγή ηλιακού ηλεκτρισμού

Χάρτης 1 : Παραγωγή ηλιακού ηλεκτρισμού

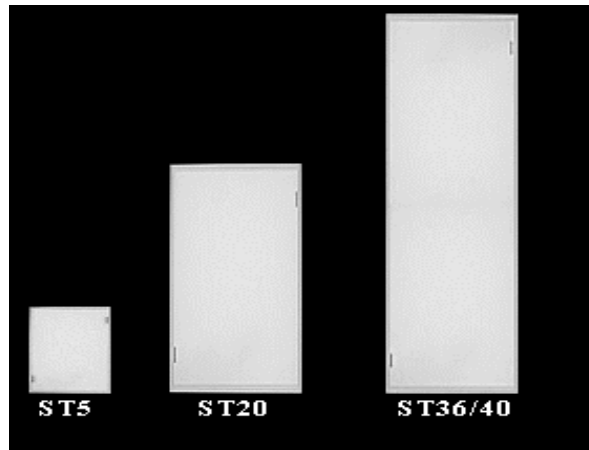
1.5.3 Φωτοβολταϊκά από αρσενικούχο γάλλιο (GaAs)

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία γαλλίου – αρσενίου διακρίνονται για τον υψηλό βαθμό απόδοσης τους, γι αυτό χρησιμοποιούνται κατά κόρον στις διαστημικές εφαρμογές και στα συστήματα εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας. Η απόδοσή τους αγγίζει το 25%, όταν δέχονται την άμεση ηλιακή ακτινοβολία και στο 28% όταν δέχονται και την διάχυτη ακτινοβολία. Σε ερευνητικό στάδιο ο βαθμός απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων GaAs έχει ξεπεράσει το 30%.

Άλλες τεχνολογίες φωτοβολταϊκών στοιχείων όπως π.χ ινδιοδισελινιούχου χαλκού (CIS) (σχήμα 1.10) δίνονται παρακάτω με μικρότερο όμως ποσοστό στην αγορά. Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία του έτους 2002 ποσοστό πάνω από 80% της συνολικής παραγωγής αφορά την τεχνολογία κρυσταλλικού πυριτίου, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό αφορά άλλες τεχνολογίες άμορφου πυριτίου και λεπτού στρώματος. Τα ποσοστά συμμετοχής κάθε τεχνολογίας επί της συνολικής παραγωγής των φωτοβολταϊκών γεννητριών αναφέρονται στον ακόλουθο πίνακα.

Τεχνολογία	%
Συγκεντρωτικοί Συλλέκτες Κρυσταλλικού Πυριτίου	0.10
Ribbon	3.48
Καδμίου-Τελλουρίου (CdTe)	0.39
Χαλκού-Ινδίου-Δισελινίου (CIS)	0.18
Πυρίτιο σε υπόστρωμα χαμηλού κόστους	0.26
A-Si σε υπόστρωμα Cz	4.61
Σύνολο	9

Πίνακας 1.3.: κατανομή των τεχνολογιών επί της συνολικής παραγωγής



Σχήμα 1.10. Φωτοβολταϊκές γεννήτριες διαφόρων τύπων ινδιοδισελινιούχου χαλκού (CIS)

Το φ/β στοιχείο όμως δεν αποτελεί παρά μόνο ένα πολύ μικρό τμήμα ενός φ/β συστήματος. Για το λόγο αυτό θα ακολουθήσει παρακάτω η περιγραφή ενός φ/β συστήματος και μάλιστα αυτόνομου.

1.6. Αυτόνομα φ/β συστήματα

1.6.1. Περιγραφή

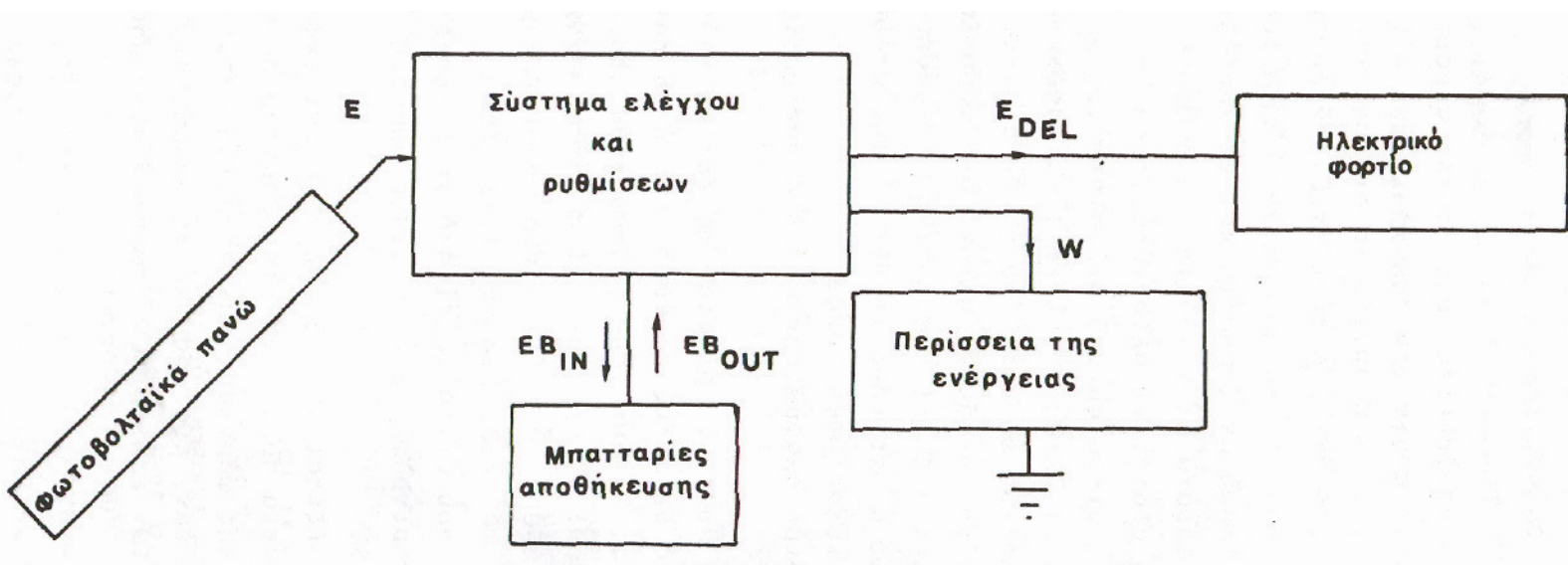
Ένα φ/β σύστημα αποτελείται από τα επιμέρους εκείνα τμήματα που είναι απαραίτητα για την παροχή ισχύος σ' ένα συγκεκριμένο ηλεκτρικό φορτίο. Τα φ/β συστήματα διακρίνονται στα συστήματα με επίπεδα φ/β πανώ και στα συγκεντρωτικά συστήματα.

Τα συστήματα με επίπεδα πανώ εκμεταλλεύονται τόσο την άμεση όσο και τη διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία και δεν χρειάζονται ψύξη. Τα συγκεντρωτικά συστήματα αποτελούνται από φακούς Fresnel, παραβολικά κάτοπτρα ή διατάξεις ηλιοστατών, που εστιάζουν το ηλιακό φως πάνω σ' ένα μικρό αριθμό φ/β στοιχείων με μεγεθύνσεις από 10 ως 500 ήλιους ($1 \text{ ήλιος} = 1 \text{ kw/m}^2$) και παρακολουθούν την ημερήσια κίνηση του ήλιου ως προς έναν ή δύο άξονες. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν μόνο την άμεση ηλιακή ακτινοβολία και χρειάζονται ψύξη για να μην αυξηθεί υπερβολικά η θερμοκρασία τους, πράγμα που θα είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης των φ/β στοιχείων ή και την καταστροφή τους.

Το αυτόνομο φ/β σύστημα ορίζεται ως εκείνο το σύστημα που δεν είναι συνδεδεμένο με άλλες παραδοσιακές ή μη πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος. Το αυτόνομο φ/β σύστημα περιλαμβάνει απαραίτητα τα εξής μέρη: α) φ/β πανώ β) υποσύστημα ελέγχου και ρυθμίσεων και γ) μπαταρίες αποθήκευσης. Το χονδρικό-διάγραμμα ενός αυτόνομου φ/β συστήματος φαίνεται στο σχ. 1.11.

Η ροή ενέργειας που αντιστοιχεί στο χονδρικό-διάγραμμα του σχ. 1.11 μπορεί να περιγραφεί μ' ένα διάγραμμα ροής το οποίο φαίνεται στον πίνακα 1.5.

Η μπαταρία φορτίζεται από τα φ/β πανώ και εκφορτίζεται από το φορτίο. Η ενέργεια προς ή από την μπαταρία είναι θετική κατά τη διάρκεια της φόρτισης και αρνητική κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης. Επιπλέον, ένα ποσοστό της παραγόμενης ενέργειας χάνεται εξαιτίας των εσωτερικών απωλειών στην μπαταρία.



Σχήμα 1.11. χονδρικό-διάγραμμα ενός αυτόνομου φ/β συστήματος

Πίνακας 1.4. Διάγραμμα ενεργειακής ροής αυτονόμου φ/β συστήματος.

AN	TOTE
<p>Η παραγόμενη από το φ/β σύστημα ενέργεια $E >$ ζήτηση D ($\gamma=1$ αν η μπαταρία μπορεί να δεχθεί την περίσσεια της ενέργειας, αλλιώς $\gamma=0$)</p>	<p>$EB_{IN} = \gamma(E-D)$ $W = (1-\gamma)(E-D)$ $E_{DEL}=D$</p>
<p>Η παραγόμενη από το φ/β σύστημα ενέργεια $E <$ ζήτηση D ($\gamma=1$ αν η μπαταρία μπορεί να ικανοποιήσει, τη ζήτηση, αλλιώς $\gamma=0$)</p>	<p>$EB_{OUT}=-\gamma(D-E)$ $W=0$ $E_{DEL}=E+EB_{OUT}$</p>

όπου

EB_{IN} είναι η ενέργεια που αποδίδεται στην μπαταρία (Kwh)

EB_{OUT} είναι η ενέργεια που παρέχει η μπαταρία (Kwh),

E_{DEL} είναι η διαθέσιμη ενέργεια που παρέχεται στο φορτίο (Kwh)

και

W είναι η περίσσεια της ενέργειας(Kwh)

1.6.2. Φωτοβολταϊκά πανώ

Το φ/β πανώ είναι η "καρδιά" του συστήματος. Το φ/β πανώ αποτελείται από έναν αριθμό φ/β πλαισίων συνδεδεμένων ηλεκτρικά μεταξύ τους στη σειρά και παράλληλα, ώστε να δίνει την επιθυμητή τάση και ρεύμα εξόδου. Το φ/β πλαίσιο έχει τη μορφή ανεξάρτητης μονάδας (module) από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο, συνδεδεμένων ηλεκτρικά μεταξύ τους στη σειρά και παράλληλα και τοποθετημένων σ' ένα κατάλληλο πλαίσιο. Το πλαίσιο αυτό συνήθως καλύπτεται από ειδικό γυαλί, ώστε το περιβάλλον να είναι θερμικά σταθερό για ένα πλατύ εύρος θερμοκρασιών. Τα φ/β πανώ συναρμολογούνται μηχανικά πάνω σε σκελετούς στήριξης και συνδέονται ηλεκτρικά μεταξύ τους στη σειρά ή παράλληλα ή και σε συνδυασμό στη σειρά και παράλληλα, ώστε να δίνουν την επιθυμητή τάση και ρεύμα εξόδου του συστήματος. Οι διατάξεις αυτές των πανώ ονομάζονται "κανονικοί σχηματισμοί".

Για την κατασκευή των σκελετών στήριξης χρησιμοποιείται συνήθως γαλβανισμένο ατσάλι, αλουμίνιο ή και χημικά κατεργασμένο ξύλο.

Οι γεωμετρικές σχέσεις μεταξύ μιας τέτοιας διάταξης (array) οποιουδήποτε προσανατολισμού σε σχέση με τη γη και της ηλιακής ακτινοβολίας, για οποιαδήποτε χρονική στιγμή, ορίστηκαν στην παράγραφο 1.1.

1.6.3. Υποσύστημα ελέγχου και ρυθμίσεων

Το υποσύστημα ελέγχου και ρυθμίσεων εξασφαλίζει τη σύνδεση των φ/β πανών με το φορτίο και περιλαμβάνει τις απαιτούμενες διατάξεις ελέγχου για την εξασφάλιση μιας σειράς ρυθμιστικών λειτουργιών, όπως π.χ. την παρακολούθηση του σημείου μέγιστης ισχύος, τη διευθέτηση του φορτίου, τη διακοπή σε περίπτωση έκτακτης ανάγκης κλπ. Για συστήματα συνεχούς ρεύματος (D.C) το υποσύστημα αυτό συνήθως περιλαμβάνει ρυθμιστή τάσης, δίοδο φραγής, διάταξη για τη μεταφορά μέγιστης ισχύος και μετατροπέα DC/DC. Η διάταξη για τη μεταφορά μέγιστης ισχύος είναι στην πραγματικότητα ένας μετατροπέας DC/DC με ρυθμιζόμενη σχέση τάσης εισόδου-εξόδου, που εξαναγκάζει τα πανώ να λειτουργούν στο σημείο μέγιστης ισχύος. Για συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος (A.C.) το υποσύστημα αυτό περιλαμβάνει απαραίτητα και ένα μετατροπέα DC/AC.

Ο ρυθμιστής τάσης είναι απαραίτητος όταν χρησιμοποιείται η ηλεκτροχημική μέθοδος για την αποθήκευση της ενέργειας. Ο ρυθμιστής ελέγχει το ρεύμα και την τάση στην είσοδο των μπαταριών για να τις προστατεύσει από πιθανούς κινδύνους καταστροφής τους στην αρχή και στο τέλος κάθε κύκλου φόρτισης. Αν δεν υπήρχε ρυθμιστής τάσης, στην αρχή του κύκλου οι εκφορτισμένες μπαταρίες θα απορροφούσαν από τα φ/β πανώ μεγάλη ποσότητα ρεύματος, με αποτέλεσμα την υπερθέρμανσή τους και κατά συνέπεια τη μείωση του ωφέλιμου χρόνου ζωής τους, ενώ στο τέλος του κύκλου φόρτισης η τάση των μπαταριών θα ήταν πολύ μεγάλη και η επιπλέον φόρτισή τους θα προκαλούσε την αλλοίωση του ηλεκτρολύτη και κατά συνέπεια την καταστροφή τους.

Σ' ένα αυτόνομο φ/β σύστημα μπορεί επίσης να περιλαμβάνεται μια διάταξη διευθέτησης του φορτίου, με σκοπό τη μείωση της ισχύος αιχμής του φορτίου και κατά συνέπεια τη μείωση τόσο του εμβαδού των φ/β πανών (εγκαταστημένη ισχύς) όσο και της χωρητικότητας των μπαταριών του συστήματος. Είναι επίσης δυνατόν η παρούσα διάταξη να λειτουργεί κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι σε θέση να μειώσει όχι μόνο την ισχύ αιχμής του φορτίου αλλά και τη μέση ημερήσια κατανάλωση του συστήματος με την κυκλική λειτουργία

των επί μέρους συνιστωσών του φορτίου. Ένας τέτοιος σχεδιασμός θα βοηθούσε επίσης στη μείωση της εγκαταστημένης ισχύος και της χωρητικότητας των μπαταριών του συστήματος.

Η προστατευτική δίοδος φραγής συντελεί ώστε να μη ρέει ανάστροφο ρεύμα από τις μπαταρίες προς τα πανώ, όταν αυτά δεν φωτίζονται (κατά τη διάρκεια της νύχτας για παράδειγμα).

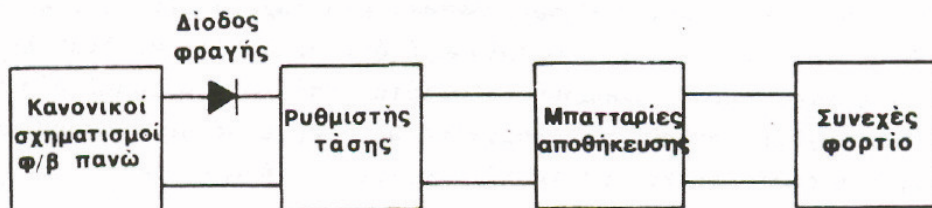
Σ' ένα φ/β σύστημα είναι επιθυμητή η μεταφορά μέγιστης ισχύος από τα πανώ στο φορτίο. Αυτό θα συνέβαινε μόνο αν τα πανώ λειτουργούσαν σε κάθε δεδομένη χρονική στιγμή κοντά στο σημείο της μέγιστης ισχύος. Σ' ένα αυτόνομο φ/β σύστημα όπου τα πανώ είναι συνδεδεμένα παράλληλα με την μπαταρία, ο αριθμός των στοιχείων της μπαταρίας του είναι συνδεδεμένα στη σειρά και καθορίζει την ονομαστική τάση λειτουργίας του συστήματος. Αν και η ονομαστική αυτή τάση μπορεί να είναι ίση σχεδόν με την τάση που αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης ισχύος των πανώ για ορισμένες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας, γενικά δεν υπάρχει πλήρης ταύτιση της ονομαστικής αυτής τάσης και της τάσης που αντιστοιχεί στο σημείο μέγιστης ισχύος των πανώ. Αποτέλεσμα αυτού είναι η δραστική μείωση της απόδοσης των πανώ. Επομένως, μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια διάταξη μεταφοράς μέγιστης ισχύος από τα πανώ στο φορτίο με αποτέλεσμα τα πανώ να λειτουργούν πάντοτε στο σημείο μέγιστης ισχύος. Η απόφαση για τη χρησιμοποίηση ή όχι μιας τέτοιας διάταξης, σε κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή, εξαρτάται από το συνδυασμό δύο παραγόντων : α) την αύξηση της παραγόμενης ενέργειας με τη χρησιμοποίηση της διάταξης και β) το κόστος του συστήματος.

1.6.4. Μπαταρίες αποθήκευσης της ενέργειας

Εξαιτίας των μεγάλων και τυχαιών μεταβολών της ηλιακής ακτινοβολίας και της ημερήσιας και εποχιακής περιοδικότητάς της, οι μπαταρίες χρησιμοποιούνται σαν μια "τράπεζα" ενέργειας και ως εξάρτημα σύνδεσης των φ/β πανώ και του φορτίου. Οι μπαταρίες τροφοδοτούν το φορτίο κατά τη διάρκεια ημερών χαμηλής ή "μηδενικής" ηλιοφάνειας και κατά τη διάρκεια της νύχτας, ενώ αποθηκεύουν την περίσσεια της ενέργειας που παράγεται από τα φ/β πανώ κατά τη διάρκεια των ημερών υψηλής ηλιοφάνειας. Οι μπαταρίες, επίσης, επιτρέπουν το σύστημα ν' ανταποκριθεί σε μια αιχμή ζήτησης.

Δυο τύποι μπαταριών έχουν χρησιμοποιηθεί στις εφαρμογές των φ/β συστημάτων: α) οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου και β) οι μπαταρίες μολύβδου. Οι μπαταρίες νικελίου-καδμίου έχουν χρησιμοποιηθεί σε λίγες εφαρμογές εξαιτίας του μεγαλύτερου κόστους, της μικρότερης απόδοσης και του περιορισμένου ανώτατου ορίου λειτουργίας θερμοκρασίας ($40C^0$). Οι μπαταρίες μολύβδου διατίθενται στο εμπόριο σ' ένα μεγάλο εύρος χωρητικότητων και είναι διάφορων τύπων. Για φ/β εφαρμογές ο χαμηλός συντελεστής αυτοεκφόρτισης αποτελεί σπουδαιότατο παράγοντα στην εκλογή του τύπου των μπαταριών. Προτιμούνται συνήθως οι μπαταρίες μολύβδου με συντελεστή αυτοεκφόρτισης K το μήνα. Ο χρόνος ζωής, επίσης, των μπαταριών μολύβδου που χρησιμοποιούνται στα φ/β συστήματα είναι περίπου 10 χρόνια και εξαρτάται από το μοντέλο της μπαταρίας και τον κύκλο λειτουργίας της.

Ένα απλοποιημένο χονδρικό-διάγραμμα αυτόνομου φ/β συστήματος με δίοδο φραγής, ρυθμιστή τάσης και μπαταρίες αποθήκευσης, για συνεχές φορτίο, φαίνεται στο σχ. 1.12.



Σχήμα 1.12. Απλοποιημένο χονδρικό-διάγραμμα αυτόνομου φ/β συστήματος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

2. ΑΜΕΣΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΓΩΝΙΑΣ ΚΛΙΣΗΣ ΤΩΝ “ΠΑΝΩ” ΣΕ ΑΥΤΟΝΟΜΑ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

2.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται μια γενική μέθοδος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον άμεσο υπολογισμό της βέλτιστης γωνίας κλίσης των πανώ σε αυτόνομα φ/β συστήματα με πανώ σταθερής κλίσης, για νότιο και μη νότιο προσανατολισμό, λαμβάνοντας υπόψη το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, τις μέσες κατά μήνα ημερήσιες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας και τις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες, ανεξάρτητα από τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Ο μόνος που ασχολήθηκε με τον άμεσο υπολογισμό της βέλτιστης γωνίας κλίσης των ηλιακών συλλεκτών (και όχι των φ/β πανώ) είναι ο Felske που κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η βέλτιστη γωνία κλίσης του συλλέκτη, για δεδομένο προσανατολισμό, είναι 3° ως 10° μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου εγκατάστασης του συστήματος. Επιπλέον, η βελτιστοποίηση της γωνίας κλίσης των πανώ στα φ/β συστήματα που σχεδιάζονται με τη χρήση του Υ/Η, γίνεται πάντοτε έμμεσα ως εξής: σχεδιάζεται μια σειρά συστημάτων για διαφορετικές γωνίες κλίσης των πανώ και εκλέγεται ως βέλτιστη η γωνία εκείνη στην οποία αντιστοιχεί το βέλτιστο σύστημα, δηλαδή το σύστημα με τη μικρότερη ισχύ και χωρητικότητα μπαταριών για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Η μέθοδος βελτιστοποίησης που αναπτύσσεται στο κεφάλαιο αυτό βασίζεται στην ελαχιστοποίηση του σχετικού σφάλματος (ως προς τη μέση κατ' έτος ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην κεκλιμένη επιφάνεια, H_{Tm} , για κάθε γωνία κλίσης, για δεδομένο προσανατολισμό) της μέσης κατά μήνα ημερησίας ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην κεκλιμένη επιφάνεια H_{Tj} , για τους μήνες εκείνους του έτους, j , για τους οποίους η ακτινοβολία αυτή είναι μικρότερη από τη μέση ετήσια τιμή. Έτσι, εκλέγεται ως βέλτιστη γωνία εκείνη στην οποία αντιστοιχεί ο μέγιστος βαθμός ομοιομορφίας της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην κεκλιμένη επιφάνεια για όλη τη διάρκεια του έτους. Αυτό είναι ιδιαίτερα κρίσιμο για σταθερά φορτία (γενικά, για φορτία χωρίς σημαντικές εποχιακές μεταβολές), ώστε να γίνει, ο σχεδιασμός του φ/β συστήματος με τη μικρότερη απαιτούμενη εγκαταστημένη ισχύ και χωρητικότητα των μπαταριών.

2.2. Ανάλυση της μεθόδου

Η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε κεκλιμένες επιφάνειες υπολογίστηκε με βάση το μοντέλο των Liu και Jordan, για επιφάνειες νότιου προσανατολισμού και με βάση το μοντέλο του Klein, για επιφάνειες μη νότιου προσανατολισμού.

Η μετατροπή των δεδομένων της ηλιακής ακτινοβολίας από το οριζόντιο επίπεδο (οι μετρήσεις στη βιβλιογραφία αναφέρονται πάντοτε στο οριζόντιο επίπεδο) στο κεκλιμένο γίνεται για μια σειρά γωνιών κλίσης των φ/β πανώ και για κάθε προσανατολισμό. Ο αλγόριθμος υπολογισμού της βέλτιστης γωνίας κλίσης, που έχει μετατραπεί σ' ένα πρόγραμμα κατάλληλο για P.C., περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

- α) Υπολογισμός της μέσης ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο, H_m .
- β) Υπολογισμός της μέσης ετήσιας ηλιακής ακτινοβολίας στο κεκλιμένο επίπεδο, H_{Tm} (για κάθε γωνία κλίσης με δεδομένο τον προσανατολισμό των πανώ),
- γ) Υπολογισμός του αθροίσματος (για κάθε γωνία κλίσης με δεδομένο τον προσανατολισμό των πανώ)

$$S = \sum_{j=1}^n (H_{T_m} = H_{T_j}) \quad j=1,2,\dots,n$$

όπου η είναι ο αριθμός των μηνών για τους οποίους η μέση μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία, H_{Tj} , είναι μικρότερη από τη μέση ετήσια H_{Tm}

- δ) Υπολογισμός του λόγου (για κάθε γωνία κλίσης με δεδομένο τον προσανατολισμό των πανώ)

$$Q = \frac{S}{H_{T_m}} = \frac{\sum_{j=1}^{11} (H_{T_m} - H_{T_j})}{H_{T_m}} \quad j=1,2,\dots,n$$

Στην πραγματικότητα και τα δυο βήματα, (γ) και (δ), αποτελούν μια εκτίμηση του βαθμού ομοιομορφίας της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια κεκλιμένη επιφάνεια σ' όλη τη διάρκεια του έτους. Ο λόγος Q είναι εξ ορισμού το σχετικό σφάλμα της ποσότητας H_{Tj} ως προς την ποσότητα H_{Tm} .

ε) Υπολογισμός της ελάχιστης τιμής του λογού Q , για την οποίαν ισχύει συγχρόνως η ανισότητα $H_{Tm} > H_m$. Στην πραγματικότητα, στο βήμα αυτό εκλέγεται η γωνία εκείνη που μεγιστοποιεί την ηλιακή ακτινοβολία κατά τους χειμερινούς μήνες και, επομένως, οδηγεί στην απαιτούμενη ομοιομορφία της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην κεκλιμένη επιφάνεια, ενώ ταυτόχρονα δεν είναι μεγαλύτερη από τη γωνία κλίσης στην οποία αντιστοιχεί η μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία του "χειρότερου" μήνα (ως "χειρότερος" μήνας του έτους θεωρείται ο μήνας με τη μικρότερη μέση μηνιαία τιμή της ηλιακής ακτινοβολίας). Η ελαχιστοποίηση του σχετικού σφάλματος ρ οδηγεί στο μέγιστο βαθμό ακρίβειας, ενώ η συνθήκη ότι η γωνία που επελέγη κατά την πορεία που ακολουθήθηκε παραπάνω δεν είναι μεγαλύτερη από τη γωνία στην οποία αντιστοιχεί η μέγιστη ηλιακή ακτινοβολία του "χειρότερου" μήνα επαληθεύτηκε πάντοτε από τα αποτελέσματα.

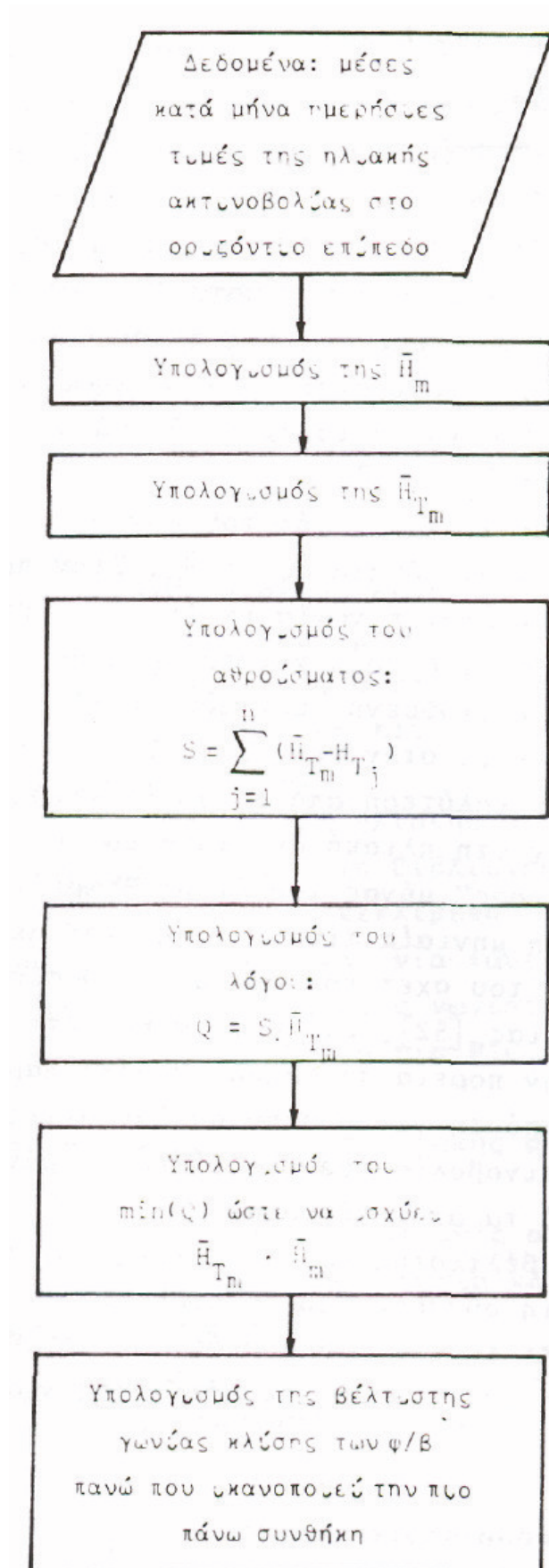
στ) Υπολογισμός της βέλτιστης γωνίας κλίσης των ϕ/β πανώ $s_{\beta\epsilon\lambda}$ που ικανοποιεί τη συνθήκη του βήματος (ϵ).

Το σχ. 2.1 δείχνει το διάγραμμα ροής της μεθόδου που περιγράφηκε για τον άμεσο υπολογισμό της βέλτιστης γωνίας κλίσης των ϕ/β πανώ.

2.3. Εφαρμογή της μεθόδου-αποτελέσματα

Ο πίνακας 2.1 δείχνει τις βέλτιστες γωνίες κλίσης των ϕ/β πανώ, $s_{\beta\epsilon\lambda}$, που υπολογίστηκαν με βάση τη μέθοδο που περιγράφηκε, για νότιο και μη νότιο προσανατολισμό μέχρι 60° , σε διαφορετικές τοποθεσίες στην Ελλάδα. Τα δεδομένα της ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο που χρησιμοποιήθηκαν στις τοποθεσίες αυτές έχουν ληφθεί από μετρήσεις που έγιναν από τη ΔΕΗ και αντιπροσωπεύουν τους μέσους όρους των ετών 1980-81, εκτός από τα δεδομένα της Καβάλας και της Αθήνας που καλύπτουν τις χρονικές περιόδους 1977-1981 και 1960-1983, αντίστοιχα. Μερικά από τα αποτελέσματα του πίνακα 2.1 φαίνονται και στο σχ. 2.2.

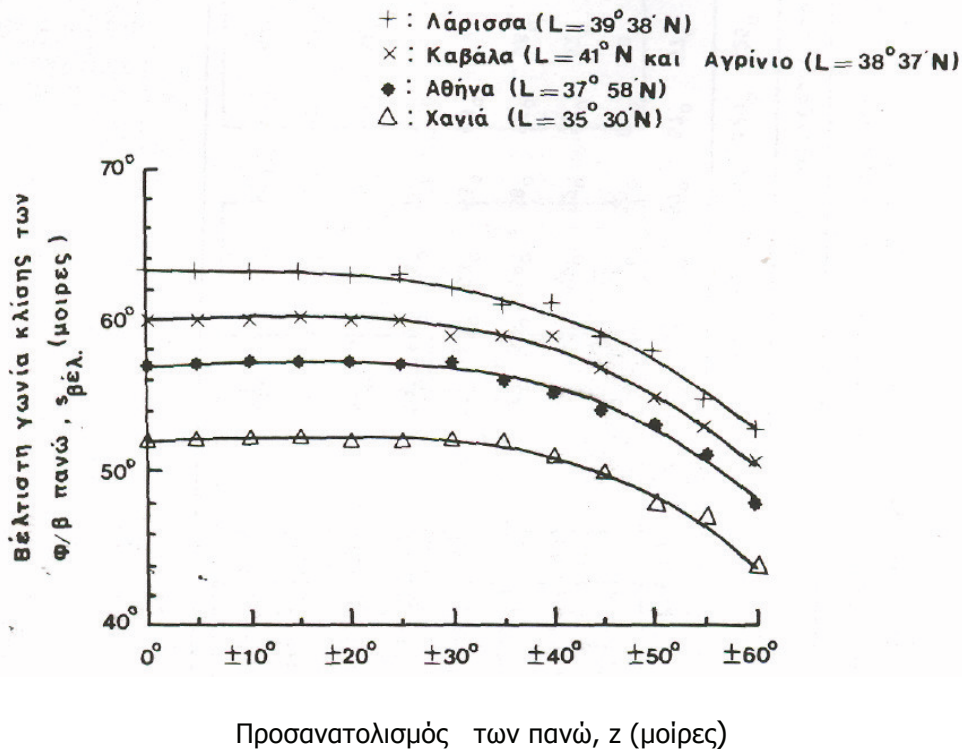
Από αυτά τ' αποτελέσματα είναι προφανές ότι η βέλτιστη γωνία κλίσης των ϕ/β πανώ, $s_{\beta\epsilon\lambda}$, για πανώ νότιου προσανατολισμού, είναι περίπου κατά 40-60% μεγαλύτερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, όσον αφορά τουλάχιστον στα γεωγραφικά πλάτη που καλύφθηκαν ($35^\circ N - 41^\circ N$). Είναι επίσης προφανές



Σχήμα 2.1. Διάγραμμα ροής της μεθόδου για τον άμεσο υπολογισμό της βέλτιστης γωνίας κλίσης των φ/β πάνω.

	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	Προσανατολισμός των πανώ, z(μόυρες)												
		0°	±5°	±10°	±15°	±20°	±25°	±30°	±35°	±40°	±45°	±50°	±55°	±60°
1	ΑΘΗΝΑ (L=37°58'N)	57°	57°	57°	57°	57°	57°	57°	56°	55°	54°	53°	51°	48°
2	ΚΑΒΑΛΑ (L=41°N)	60°	60°	60°	60°	60°	60°	59°	59°	59°	57°	55°	53°	51°
3	ΧΑΝΙΑ (L=35°30'N)	52°	52°	52°	52°	52°	52°	52°	52°	51°	50°	48°	47°	44°
4	ΣΠΑΡΤΗ (L=37°)	58°	58°	58°	58°	58°	58°	57°	57°	56°	55°	53°	51°	48°
5	ΛΑΡΙΣΑ (L=39°38'N)	63°	63°	63°	63°	63°	63°	62°	61°	61°	59°	58°	55°	53°
6	ΑΓΡΙΝΙΟ (L=38°37'N)	60°	60°	60°	60°	60°	60°	59°	59°	58°	57°	55°	53°	51°
7	ΡΟΔΟΣ (L=36°22'N)	59°	59°	59°	59°	58°	58°	58°	57°	57°	56°	54°	52°	49°
8	ΜΥΤΙΛΗΝΗ (L=39°06'N)	58°	58°	58°	58°	58°	58°	57°	57°	56°	55°	54°	52°	49°
9	ΖΑΚΥΝΘΟΣ (L=37°43'N)	57°	57°	57°	57°	57°	56°	56°	55°	55°	54°	52°	50°	47°

Πίνακας 2.1. Βέλτιστη γωνία κλίσης των φ/β πανώ, $\theta_{βελ}$, για διάφορους προσανατολισμούς των πανώ, z, σε διαφορετικές θερμοκρασίες στην Ελλάδα, όπου υπάρχουν δεδομένα μετρήσεων της ηλιακής ακτινοβολίας.



Σχήμα 2.2. Υπολογισμένες βέλτιστες γωνίες κλίσης των ϕ/β πανώ, ως συνάρτηση του προσανατολισμού των πανώ, z, σε διάφορες τοποθεσίες στην Ελλάδα και αντίστοιχες καμπύλες προσομοίωσης με τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων.

ότι η βέλτιστη γωνία κλίσης παραμένει σταθερή για αποκλίσεις από το νότιο προσανατολισμό μέχρι 25° ή $\pm 30^{\circ}$ (εξαρτάται από τη συγκεκριμένη τοποθεσία). Για αποκλίσεις από το νότιο προσανατολισμό μεγαλύτερες από $\pm 25^{\circ}$, ή $\pm 30^{\circ}$, η μέθοδος δίνει μια βέλτιστη γωνία κλίσης, η οποία μειώνεται όσο αυξάνει η γωνία απόκλισης από το νότιο προσανατολισμό z, αλλά παραμένει πάντοτε μεγαλύτερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, για αποκλίσεις από το νότιο προσανατολισμό μέχρι $\pm 60^{\circ}$ που μελετήθηκαν.

Τα παρόντα αποτελέσματα που αφορούν στη βέλτιστη γωνία κλίσης των ϕ/β πανώ για διάφορες γωνίες απόκλισης από το νότιο προσανατολισμό δεν είναι σε συμφωνία με τ' αποτελέσματα της εργασίας για ηλιακούς συλλέκτες, όπου η βέλτιστη γωνία κλίσης βρέθηκε 3° μέχρι 10° μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, για αποκλίσεις από το νότιο προσανατολισμό μέχρι 45° . Αυτή η διαφορά μπορεί να εξηγηθεί λαμβάνοντας υπόψη ότι στην περίπτωση ενός ηλιακού συλλέκτη η ολική ποσότητα της ηλιακής ενέργειας που συλλέγεται σ' όλη τη διάρκεια του έτους αποτελεί τον καθοριστικό παράγοντα στον υπολογισμό της βέλτιστης γωνίας κλίσης κι αυτή θα πρέπει να μεγιστοποιηθεί στη βέλτιστη γωνία. Αντίθετα, στην περίπτωση των ϕ/β πανώ η βέλτιστη γωνία υπολογίστηκε με τη μέθοδο που αναλύθηκε πιο πάνω, με σκοπό να επιτευχθεί ο μέγιστος βαθμός ομοιομορφίας της ηλιακής ενέργειας που προσπίπτει πάνω στα πανώ σ' όλη τη διάρκεια του έτους. Αυτό είναι πολύ σπουδαίο για το σχεδιασμό του

βέλτιστου συστήματος, δηλαδή του συστήματος με τη μικρότερη ισχύ και χωρητικότητα των μπαταριών, κυρίως στην περίπτωση που το φορτίο δεν παρουσιάζει σημαντικές εποχιακές μεταβολές.

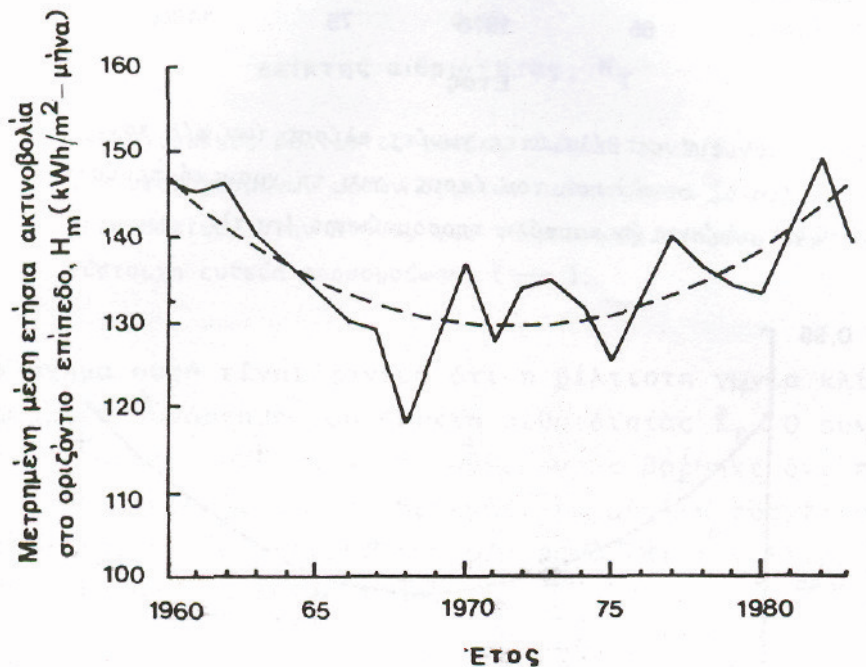
ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ			Βέλτιστη γωνία κλίσης των φ/β πανώ, $s_{βέλ.}$ (μόνες)
1	ΑΛΙΑΡΤΟΣ	(L=38° 23')	53°
2	ΑΡΑΞΟΣ	(L=38° 10')	58°
3	ΑΡΓΟΣΤΟΛΙ	(L=38° 11')	57°
4	ΧΙΟΣ	(L=38° 24')	56°
5	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	(L=35° 05')	55°
6	ΗΡΑΚΛΕΙΟ	(L=35° 21')	50°
7	ΚΑΛΑΜΑΤΑ	(L=37° 02')	56°
8	ΚΟΡΙΝΘΟΣ	(L=37° 57')	56°
9	ΚΥΘΗΡΑ	(L=36° 57')	57°
10	ΛΗΜΝΟΣ	(L=39° 53')	56°
11	ΜΗΛΟΣ	(L=36° 45')	46°
12	ΝΑΞΟΣ	(L=37° 06')	54°
13	ΠΑΡΟΣ	(L=37° 05')	52°
14	ΠΑΤΡΑ	(L=38° 15')	56°
15	ΠΥΡΓΟΣ	(L=37° 41')	58°
16	ΡΕΘΥΜΝΟ	(L=35° 22')	49°
17	ΣΑΜΟΣ	(L=37° 46')	57°
18	ΣΥΡΟΣ	(L=37° 28')	55°
19	ΣΗΤΕΙΑ	(L=35° 13')	50°
20	ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ	(L=40° 37')	56°

Πίνακας 2.2. Βέλτιστη γωνία κλίσης των φ/β πανώ, $s_{βέλ.}$ για πανώ νότιου προσανατολισμού σε διάφορες τοποθεσίες στην Ελλάδα, όπου δεν υπάρχουν δεδομένα μετρήσεων της ηλιακής ακτινοβολίας.

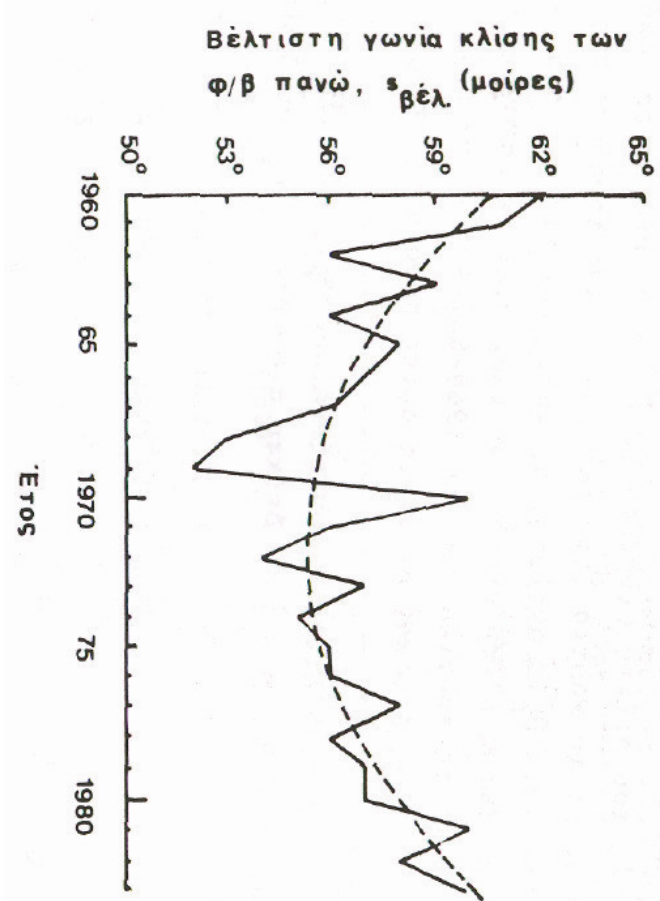
Στον πίνακα 2.2 φαίνονται οι βέλτιστες γωνίες κλίσης που υπολογίστηκαν για πανώ νότιου προσανατολισμού σ' έναν αριθμό διαφορετικών τοποθεσιών στην Ελλάδα για τις οποίες δεν υπάρχουν δεδομένα μετρήσεων της ηλιακής ακτινοβολίας. Για τις τοποθεσίες αυτές οι τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας το γνωστό μοντέλο του Page. Και πάλι οι βέλτιστες γωνίες που υπολογίστηκαν είναι εμφανώς μεγαλύτερες από τ' αντίστοιχα γεωγραφικά πλάτη των τοποθεσιών, κατά το ίδιο περίπου ποσοστό όπως και προηγουμένως.

Τα σχ. 2.3 (α,β,γ) παριστάνουν τα δεδομένα μετρήσεων της μέσης ετήσιας τιμής της ηλιακής ακτινοβολίας, τις βέλτιστες γωνίες κλίσης των φ/β πανώ που υπολογίστηκαν και τις υπολογισμένες μέσες τιμές του δείκτη αιθριότητας K_T για τους μήνες από τον Οκτώβριο μέχρι το Μάρτιο (για τον καθένα από τους οποίους ισχύει η συνθήκη $H < H_m$), αντίστοιχα, καθώς και τις αντίστοιχες καμπύλες προσομοίωσης με τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων, για την Αθήνα και για τη χρονική περίοδο 1960-1983. Από τα σχήματα αυτά είναι φανερό ότι και οι τρεις αυτές ποσότητες ακολουθούν παρόμοιο πρότυπο.

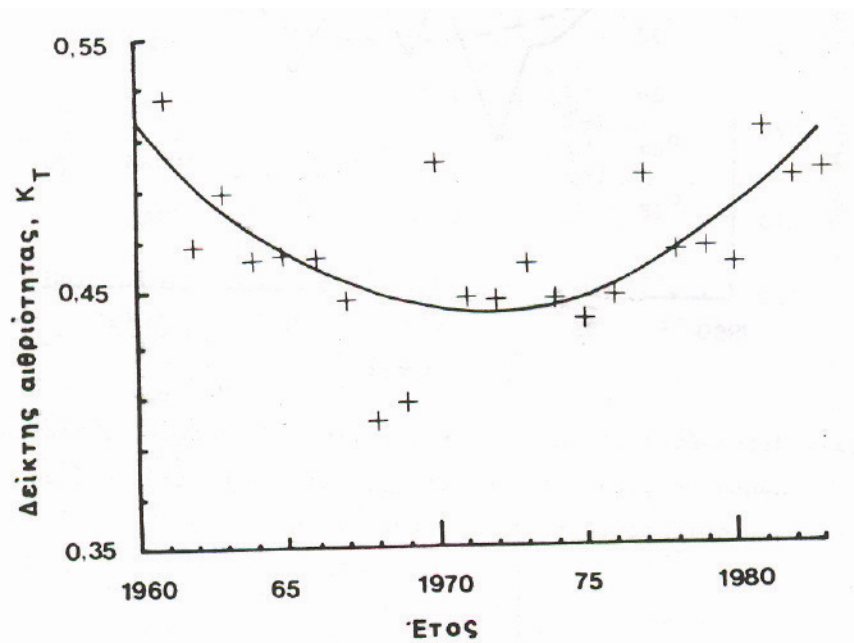
Οι υπολογισμένες βέλτιστες γωνίες κλίσης $\varphi_{βελ}$ [σχ.2.3(β)] παριστάνονται ως συνάρτηση του δείκτη αιθριότητας K_T [(σχ.2.3(γ))] στο σχ. 2.4.



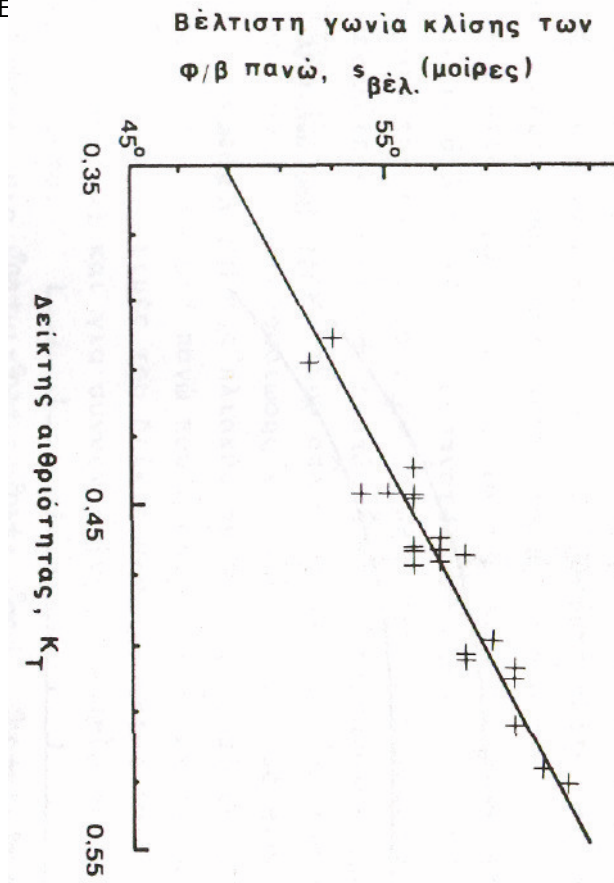
Σχήμα 2.3(α). Μετρημένη μέση ετήσια ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο στην Αθήνα ως συνάρτηση του έτους, για τη χρονική περίοδο 1960-1983, και αντίστοιχη καμπύλη προσομοίωσης (_ _ _ _)



Σχήμα 2.3. (β) Υπολογισμένες βέλτιστες γωνίες κλίσης των φ/β πανώ για την Αθήνα ως συνάρτηση του έτους, για τη χρονική περίοδο 1980-2003



Σχήμα 2.3. (γ) Υπολογισμένοι μέσοι δείκτες αιθριότητας για τους μήνες Οκτώβριο – Μάρτιο στην Αθήνα ως συνάρτηση του έτους και αντίστοιχη καμπύλη προσομοίωσης (_ _ _)

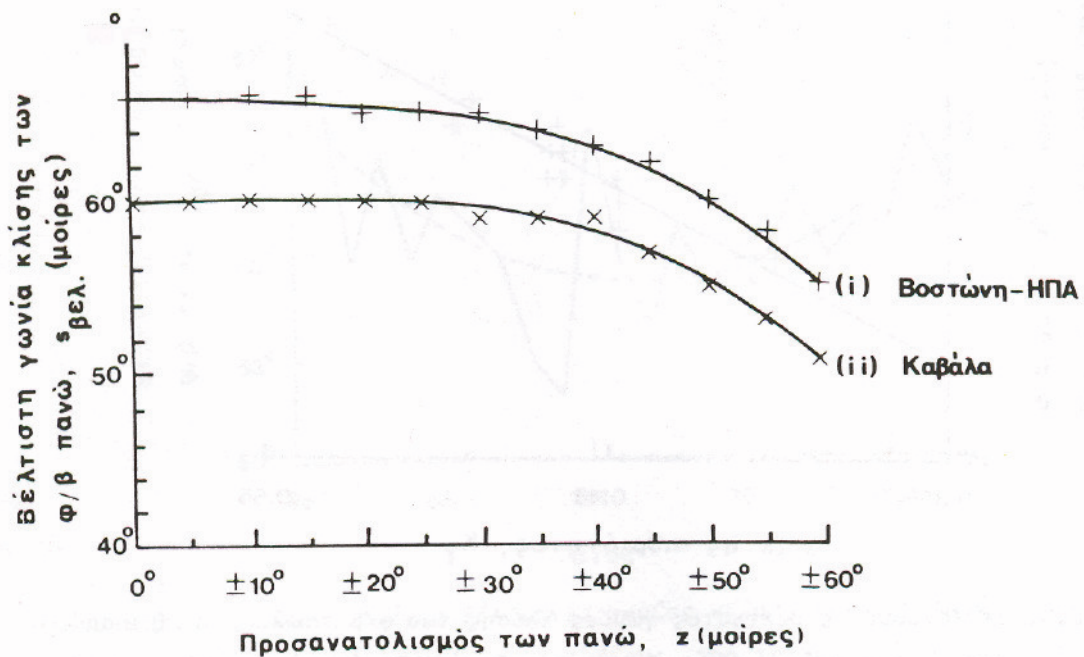


Σχήμα 2.4. Υπολογισμένες βέλτιστες γωνίες κλίσης των φ/β πανώ ως συνάρτηση των υπολογισμένων μέσω δεικτών αιθριότητας (για τους μήνες Οκτώβριο-Μάρτιο) στην Αθήνα, για τη χρονική περίοδο 1960-1983, και αντίστοιχη ευθεία προσομοίωσης (—).

Από το σχήμα αυτό προκύπτει ότι η βέλτιστη γωνία κλίσης είναι γραμμική συνάρτηση του δείκτη αιθριότητας K_T . Ο συντελεστής συσχέτισης αυτής της γραμμικής συνάρτησης βρέθηκε ότι είναι ίσος με 0,96, γεγονός που αποδεικνύει τη μεγάλη συσχέτιση μεταξύ της βέλτιστης γωνίας κλίσης των φ/β πανώ και των κλιματολογικών συνθηκών στο συγκεκριμένο τόπο.

2.4. Επαλήθευση της μεθόδου

Η μέθοδος που περιγράφηκε για τον άμεσο υπολογισμό της βέλτιστης γωνίας κλίσης των φ/β πανώ εφαρμόστηκε σε δυο συγκεκριμένα μέρη, στη Βοστώνη Μασαχουσέτης (ΗΠΑ) και στην Καβάλα, με σκοπό να συγκριθούν οι βέλτιστες γωνίες κλίσης των φ/β πανώ που υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο με τις δημοσιευμένες τιμές (που υπολογίστηκαν και οι δυο με τη συνηθισμένη μέθοδο της "εκλογής" του βέλτιστου φ/β συστήματος για συγκεκριμένες εφαρμογές). Τα αντίστοιχα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 2.5



Σχήμα 2.5. Υπολογισμένη βέλτιστη γωνία κλίσης των φ/β πανών ως συνάρτηση του προσανατολισμού τους για τη Βοστώνη - ΗΠΑ (i) και την Καβάλα (ii), αντίστοιχες καμπύλες προσομοίωσης.

Τα αποτελέσματα αυτά είναι σε απόλυτη συμφωνία με τα προαναφερθέντα για νότιο προσανατολισμό όσον αφορά στη Βοστώνη Μασαχουσέτης (δεν υπάρχουν δημοσιευμένα αποτελέσματα για μη νότιο προσανατολισμό) και για νότιο καθώς και μη νότιο προσανατολισμό όσον αφορά στην Καβάλα.

2.5. Συμπεράσματα

Η γενική μέθοδος που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον άμεσο υπολογισμό της βέλτιστης γωνίας κλίσης των φ/β πανών, $\phi_{βελ.}$, για νότιο και μη νότιο προσανατολισμό, λαμβάνοντας υπόψη το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας, τις μέσες κατά μήνα ημερήσιες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας και τις τοπικές κλιματολογικές συνθήκες, ανεξάρτητα από τη συγκεκριμένη εφαρμογή (φορτίο). Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην επίτευξη της μέγιστης δυνατής ομοιομορφίας της ηλιακής ακτινοβολίας σ' όλη τη διάρκεια του έτους.

Οι βέλτιστες γωνίες κλίσης των φ/β πανών για νότιο και μη νότιο προσανατολισμό, μέχρι $\pm 60^\circ$ που μελετήθηκε, βρέθηκαν ότι είναι πάντοτε μεγαλύτερες από το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας όπου πρόκειται να εγκατασταθεί το φ/β σύστημα.

Η βέλτιστη γωνία κλίσης των φ/β πανώ παραμένει σταθερή για αποκλίσεις από το νότιο προσανατολισμό μέχρι $\pm 25^{\circ}$ ή $\pm 30^{\circ}$ (εξαρτάται από την τοποθεσία), ενώ η βέλτιστη αυτή γωνία μειώνεται για μεγαλύτερες αποκλίσεις από το νότιο προσανατολισμό, παραμένει όμως πάντοτε μεγαλύτερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου.

Οι καμπύλες προσομοίωσης για τις τρεις ποσότητες: α) τις μέσες ετήσιες τιμές της ηλιακής ακτινοβολίας β) τις βέλτιστες γωνίες κλίσης των φ/β πανώ που υπολογίστηκαν με τη μέθοδο αυτή και γ) τις μέσες τιμές του δείκτη αιθριότητας (για τους μήνες Οκτώβριο-Μάρτιο) και για συγκεκριμένη τοποθεσία ακολουθούν παρόμοιο πρότυπο.

Υπάρχει μια γραμμική σχέση (με μεγάλο συντελεστή συσχέτισης) μεταξύ των βέλτιστων γωνιών κλίσης των φ/β πανώ και των τοπικών κλιματολογικών συνθηκών για το συγκεκριμένο τόπο.

Οι βέλτιστες γωνίες κλίσης των φ/β πανώ που υπολογίστηκαν με βάση την παραπάνω μέθοδο για δυο συγκεκριμένες τοποθεσίες είναι σε απόλυτη συμφωνία με δημοσιευμένα αποτελέσματα, τα οποία έχουν υπολογιστεί με τη συνηθισμένη μέθοδο "επιλογής" του βέλτιστου φ/β συστήματος για συγκεκριμένες εφαρμογές (φορτίο).

Επειδή είναι γνωστό ότι το κυριότερο στοιχείο για τη μελέτη κάθε ηλιακής εφαρμογής είναι η ηλιακή ακτινοβολία και επειδή στη χώρα μας, όπως φάνηκε και στο κεφάλαιο αυτό, δεν υπάρχουν μακροχρόνια στοιχεία παρά μόνο εκείνα του Αστεροσκοπείου Αθηνών, στο επόμενο κεφάλαιο αναπτύσσεται ένα στοχαστικό μοντέλο προσομοίωσης της ωριαίας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας. Το μοντέλο αυτό, όπως και κάθε μοντέλο του είδους του, δεν αποβλέπει στο να αντικαταστήσει τα τυχόν στοιχεία που υπάρχουν, αλλά να χρησιμοποιηθεί συμπληρωματικά και, ειδικά, σε περιοχές όπου τα στοιχεία καλύπτουν μικρές χρονικές περιόδους ή δεν είναι πλήρη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

3. ΜΗ ΔΙΑΘΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΑΥΤΗΣ – ΜΙΑ ΜΕΘΟΔΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΑΥΤΟΝΟΜΩΝ Φ/Β ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

3.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό αναπτύσσεται μια μέθοδος βέλτιστου σχεδιασμού αυτόνομων φ/β συστημάτων με ωριαία προσομοίωση της λειτουργίας τους, που βασίζεται στην έννοια της μη διαθεσιμότητας και στις παραμέτρους αυτής.

Στις περισσότερες δημοσιευμένες μεθόδους ανάλυσης και σχεδιασμού αυτόνομων φ/β συστημάτων δεν υπάρχει κάποια άμεση σχέση που να συνδέει το εμβαδόν των φ/β πανών με τη χωρητικότητα των μπαταριών του συστήματος. Η χωρητικότητα των μπαταριών σ' όλες αυτές τις περιπτώσεις υπολογίζεται ως άθροισμα των διαφορών μεταξύ ζήτησης και παραγωγής κατά τη διάρκεια του έτους και της ζήτησης για ένα συγκεκριμένο αριθμό ημερών "μηδενικής ηλιοφάνειας". Ο αριθμός αυτός των ημερών "μηδενικής ηλιοφάνειας" επιλέγεται από το σχεδιαστή του συστήματος έτσι ώστε το σύστημα να είναι σχεδόν πάντοτε διαθέσιμο. Το πλεονέκτημα της παραπάνω μεθόδου συνίσταται στην απλότητα του σχεδιασμού, ενώ το κυριότερο μειονέκτημά της είναι ότι το σύστημα που σχεδιάστηκε με τον τρόπο αυτό δεν είναι και το οικονομικότερο.

Πρόσφατα προτάθηκε μια σχέση που συνδέει άμεσα το εμβαδόν των πανών με τη χωρητικότητα των μπαταριών, καθώς και μια γραφική λύση για την ελαχιστοποίηση του φ/β συστήματος, πλην όμως γίνεται η παραδοχή ότι το εμβαδόν των πανών και η χωρητικότητα των μπαταριών είναι συνεχείς μεταβλητές.

Οι στόχοι της μεθόδου που αναπτύσσεται στο κεφάλαιο αυτό είναι οι εξής: α) ο καθορισμός της ακριβούς μαθηματικής (και όχι γραφικής) λύσης που βασίζεται στην ωριαία προσομοίωση της λειτουργίας του αυτόνομου φ/β συστήματος, για το ελάχιστο (και επομένως οικονομικότερο) φ/β σύστημα με την επιθυμητή μη διαθεσιμότητα και β) η μελέτη της επίδρασης της γωνίας κλίσης και του προσανατολισμού των πανών στο ελάχιστο φ/β σύστημα με την επιθυμητή μη διαθεσιμότητα, καθώς και στο ετήσιο ποσό της ενέργειας που παράγεται από το σύστημα αυτό και δεν χρησιμοποιείται (περίσσεια της ενέργειας). Ως μη διαθεσιμότητα ορίζεται ο συνολικός αναμενόμενος αριθμός ωρών/έτος κατά τις οποίες το σύστημα δεν μπορεί να ικανοποιήσει τη ζήτηση και

μελετάται με το γνωστό δείκτη LOLP - την πιθανότητα να μην ικανοποιείται το φορτίο από το φ/β σύστημα κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης ώρας. Στον ορισμό αυτό του δείκτη LOLP θεωρείται ότι η ζήτηση δεν ικανοποιείται όχι μόνο όταν η κατάσταση φόρτισης των μπαταριών είναι ίση με ή χαμηλότερη από το επιτρεπόμενο επίπεδο εκφόρτισης, όπως θεωρήθηκε στην εργασία, αλλά - αντίθετα με αυτή την παραδοχή και με μεγαλύτερη ακρίβεια - όταν η ολική διαθέσιμη ενέργεια του συστήματος, δηλαδή το άθροισμα της ενέργειας που παράγεται από τα φ/β πανώ και της ενέργειας που μπορεί να αποδοθεί από την μπαταρία, κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης ώρας είναι μικρότερη από τη ζήτηση εκείνης της ώρας. Επίσης, έχει ληφθεί υπόψη, ως συμπληρωματικό μέτρο του δείκτη LOLP της μη διαθεσιμότητας του φ/β συστήματος, το αναμενόμενο ετήσιο ποσό της περίσσειας της ενέργειας σε Kwh (η χρονική περίοδος της προσομοίωσης είναι ίση με ένα έτος).

3.2. Προσομοίωση του φ/β συστήματος

3.2.1. Ηλιακή ακτινοβολία

Το πρώτο βήμα της πορείας για την προσομοίωση της λειτουργίας του φ/β συστήματος είναι ο υπολογισμός της ωριαίας ολικής ακτινοβολίας που προσπίπτει στην κεκλιμένη επιφάνεια των φ/β πανώ για όλες τις ώρες και τις ημέρες του έτους. Για τον υπολογισμό αυτό υπάρχουν δύο εναλλακτικές λύσεις: α) να χρησιμοποιηθούν μακροχρόνια δεδομένα της ωριαίας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο για το συγκεκριμένο τόπο, αν υπάρχουν, και β) να χρησιμοποιηθεί ένα στοχαστικό μοντέλο προσομοίωσης της ωριαίας ολικής ηλιακής ακτινοβολίας. Στην ανάπτυξη της μεθόδου αυτής για το βέλτιστο σχεδιασμό αυτόνομων φ/β συστημάτων χρησιμοποιήθηκε το στοχαστικό μοντέλο προσομοίωσης της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στη συνέχεια, η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην κεκλιμένη επιφάνεια των φ/β πανώ (για διαφορετικές γωνίες κλίσης και προσανατολισμού των πανώ) υπολογίστηκε με τη γνωστή σχέση των και Ohmura :

$$H_{T,a}^V = H_{B,d}^V \text{DBF} + H_{D,d}^V \cos^2(s/2) + aH_d^V \sin^2(s/2)$$

όπου

$H_{T,d}^V$ είναι η μέση ολική ηλιακή ακτινοβολία στο κεκλιμένο επίπεδο κατά τη διάρκεια της ν-στής ώρας της ημέρας d του έτους (σε Kwh/m²),

$H_{B,d}^V$ είναι η μέση άμεση συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο κατά τη διάρκεια της ν-στής ώρας της ημέρας <1 του έτους (σε Kwh/m²),

$H_{D,d}^V$ είναι η μέση διάχυτη συνιστώσα της ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο κατά τη διάρκεια της ν-στής ώρας της ημέρας d του έτους (σε Kwh/m²)

H_{d}^V είναι η μέση ολική ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο κατά τη διάρκεια της ν-στής ώρας της ημέρας d του έτους (σε Kwh/m²), και

DBF, είναι το κλάσμα της άμεσης ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο κεκλιμένο επίπεδο και δίνεται από τη σχέση:

$$DBF = [\cos(\sin L \sin \delta + \cos L \cos \delta \cos \omega) + \sin \{ \cos z [\tan L (\sin L \sin \delta + \cos L \cos \delta \cos \omega) \sin \delta \sec L] + \sin z \cos \delta \sin \omega \}] \times [\cos L \cos \delta \cos \omega + \sin L \sin \delta]^{-1}$$

3.2.2. Ωριαία ενέργεια που αποδίδεται από τα φ/β πανώ

Η ωριαία ενέργεια που αποδίδεται από τα φ/β πανώ υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$\bar{E} = A \cdot \bar{H}_T^V, d^n R \left(1 - \beta_R T_a - \frac{\beta_R \cdot \tau \cdot \alpha \cdot \bar{H}_T^V, d}{U_L} \right)$$

όπου

A , είναι το εμβαδόν των φ/β πανώ,

$\tau \cdot \alpha$, είναι το μέσο ωριαίο γινόμενο διαπερατότητας-απορροφητικότητας των φ/β πανώ,

η_R , είναι ο συντελεστής απόδοσης των φ/β πανώ στη θερμοκρασία αναφοράς,

β_R , είναι ο θερμικός συντελεστής απόδοσης των φ/β πανώ (°C⁻¹),

U_L , είναι ο θερμικός συντελεστής απώλειας ενέργειας ανά μονάδα εμβαδού των φ/β πανώ (W/m²·°C) και

T_a , είναι η μέση ωριαία θερμοκρασία περιβάλλοντος (°C)

Αν θεωρηθεί ότι ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ της μέσης ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας $H_{T,d}^V$ και της μέσης ωριαίας θερμοκρασίας περιβάλλοντος T_a είναι μεγάλος, ώστε να μπορεί να ληφθεί κατά προσέγγιση ίσος με τη μονάδα, τότε για δεδομένη τιμή της μέσης ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας υπολογίζεται και η μέση ωριαία θερμοκρασία περιβάλλοντος.

3.2.3. Ορισμός του δείκτη μη διαθεσιμότητας, LOLP, και της περίσσειας της ενέργειας

Η μεταβλητή που χρησιμοποιήθηκε στην ανάπτυξη της μεθόδου αυτής για τον έλεγχο της ενεργειακής ροής είναι η κατάσταση φόρτισης των μπαταριών, $B(t)$. Η κατάσταση φόρτισης των μπαταριών μεταβάλλεται μεταξύ δύο οριακών τιμών της μέγιστης τιμής B_M , και της ελάχιστης B_m . Όταν η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας τείνει να υπερβεί το ανώτατο επιτρεπόμενο όριο B_M -το φαινόμενο είναι γνωστό ως υπερφόρτιση- το σύστημα ελέγχου σταματάει τη διεργασία της φόρτισης. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν η ζήτηση είναι μικρή ή όταν η ποσότητα της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας είναι πολύ μεγάλη. Αντίθετα, όταν η κατάσταση φόρτισης τείνει να υπερβεί το κατώτερο επιτρεπόμενο όριο εκφόρτισης B_m -το φαινόμενο είναι γνωστό ως υπερκφόρτιση -το σύστημα ελέγχου αποσυνδέει το φορτίο από το σύστημα. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν η ζήτηση είναι μεγάλη ή όταν η ποσότητα της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας είναι πολύ μικρή,
Ο δείκτης μη διαθεσιμότητας, LOLP, ορίζεται ως εξής:

$LOLP = \text{Πιθανότητα Ολική διαθέσιμη ενέργεια} < D$

για μια συγκεκριμένη ώρα της ημέρας, και

$$\text{Ολική διαθέσιμη ενέργεια } E_{DEL} = \eta_c E + E_{BDEL}$$

όπου

E είναι η μέση ωριαία ολική ενέργεια που παράγεται από τα φ/β πάνω κατά τη διάρκεια της n -στής ώρας,

η_c είναι ο συντελεστής απόδοσης του υποσυστήματος ελέγχου και ρυθμίσεων που στη συγκεκριμένη περίπτωση αποτελείται από ένα μετατροπέα DC/DC. Θεωρήθηκε ότι η λειτουργία του μετατροπέα μπορεί να προσεγγιστεί χρησιμοποιώντας ένα σταθερό συντελεστή απόδοσης, γιατί η απόδοσή του παραμένει στην πραγματικότητα σταθερή όταν η ισχύς εισόδου κυμαίνεται στο διάστημα $(0, 2P_N, P_N)$, όπου P_N είναι η ονομαστική του ισχύς,

EB_{DEL} είναι η μέση ωριαία διαθέσιμη ενέργεια που παρέχεται στο φορτίο από τη μπαταρία κατά τη διάρκεια της ν-στής ώρας, που είναι ίση με μηδέν ή θετική όταν η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας $B(t)$ είναι, αντίστοιχα, ίση με ή μεγαλύτερη από το κατώτερο όριο εκφόρτισης B_m . Επίσης θεωρήθηκε [77] ότι η λειτουργία της μπαταρίας μπορεί να προσεγγιστεί μ' ένα σταθερό συντελεστή απόδοσης, η_B , και για τους δύο κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης και ότι το μέγιστο επιτρεπόμενο βάθος εκφόρτισης είναι 75%, και

D είναι η μέση ωριαία ζήτηση κατά τη διάρκεια της ν-στής ώρας,

Επιπλέον, η περίσσεια της ενέργειας, W_{ov} , κατά τη διάρκεια του έτους (σε Kwh), ορίζεται ως εξής:

$$W_{ov} = \sum_{j=1}^N U(\bar{E}_j - \bar{D}_j) (\bar{E}_j - \bar{D}_j)$$

όπου

N είναι ο αριθμός των ωρών της χρονικής περιόδου της προσομοίωσης (ένα έτος)-θεωρώντας συγχρόνως ότι η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας είναι ίση με το ανώτατο επιτρεπόμενο όριο φόρτισης B_M -και

$U(E_j - D_j)$ είναι η μοναδιαία βηματική συνάρτηση, που ορίζεται ως εξής:

$$U(\bar{E}_j - \bar{D}_j) = \begin{cases} 1 & \alpha \nu \bar{E}_j > \bar{D}_j \\ 0 & \alpha \nu \bar{E}_j < \bar{D}_j \end{cases}$$

3.2.4. Μέθοδος ελαχιστοποίησης του κόστους κύκλου ζωής του συστήματος

Ο δείκτης μη διαθεσιμότητας LOLP του συστήματος υπολογίζεται με την ωριαία προσομοίωση του συστήματος (για όλες τις ώρες και τις ημέρες του έτους) για τη χρονική διάρκεια ενός έτους. Η ωριαία έξοδος των φ/β πανώ προσομοιώθηκε για κάθε ώρα της ημέρας χρησιμοποιώντας την εξίσωση της ωριαίας ενέργειας για μια σειρά γωνιών κλίσης των πανώ με βήμα 2° και για διάφορους προσανατολισμούς των πανώ, θεωρώντας ότι το εμβαδόν των φ/β πανώ A_m πρέπει να είναι ίσο με ή μεγαλύτερο από το εμβαδόν A_m , όπου A_m είναι το ελάχιστο εμβαδόν των φ/β πανώ για δεδομένη μη διαθεσιμότητα. Βρέθηκε ότι η ελάχιστη αυτή τιμή του εμβαδού των φ/β πανώ αντιστοιχεί σε μια μέγιστη τιμή της χωρητικότητας των μπαταριών του φ/β συστήματος για τη συγκεκριμένη μη διαθεσιμότητα. Η μέγιστη τιμή των μέγιστων τιμών της χωρητικότητας των μπαταριών ισχύει για $LOLP=0$. Η χωρητικότητα των μπαταριών B , μια μεταβλητή που δεν είναι συνεχής, πρέπει να είναι ίση με ή μικρότερη από τη χωρητικότητα που αντιστοιχεί στο ελάχιστο εμβαδόν A_m , για δείκτη διαθεσιμότητας $LOLP=0$. Η μεταβλητή A δεν είναι συνεχής αλλά μεταβάλλεται με γνωστό βήμα ΔA . Αυξάνοντας το εμβαδόν των πανώ με διαδοχικά βήματα ΔA , δηλαδή

$$A = A_m + i\Delta A \quad i=0,1,2,\dots,\eta$$

υπολογίζεται, η χωρητικότητα των μπαταριών έτσι ώστε το σύστημα να ικανοποιεί πάντοτε τη ζήτηση, δηλαδή για $LOLP = 0$. Στην παραπάνω εξίσωση) το η αντιστοιχεί σε εκείνο το εμβαδόν των φ/β πανώ, που στη μέθοδο αυτή ορίζεται ως το μέγιστο εμβαδόν A_m , για το οποίο η εγκαταστημένη χωρητικότητα των μπαταριών παραμένει σταθερή σε μια ελάχιστη τιμή. Η μέγιστη τιμή των μέγιστων τιμών του εμβαδού των φ/β πανώ ισχύει για $LOLP=0$.

Για $LOLP \neq 0$ και για ορισμένες τιμές του εμβαδού των φ/β πανώ A και της χωρητικότητας των μπαταριών B (η τελευταία χρησιμοποιείται ως παράμετρος), η ωριαία έξοδος των πανώ συγκρίνεται με τη ζήτηση που αντιστοιχεί στην ίδια ώρα. Αν η ζήτηση κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης ώρας είναι μεγαλύτερη από την έξοδο των πανώ και, συγχρόνως, η διαθέσιμη ενέργεια, όπως ορίστηκε στην

παρούσα μέθοδο, είναι μικρότερη από τη ζήτηση, τότε το φ/β σύστημα δεν μπορεί να ικανοποιήσει τη ζήτηση κατά τη διάρκεια της συγκεκριμένης ώρας. Ο συνολικός αριθμός ωρών/έτος, κατά τη διάρκεια των οποίων το φ/β σύστημα δεν μπορεί να ικανοποιήσει το φορτίο σύμφωνα με την εξίσωση της LOLP υπολογίζεται προσθέτοντας όλες αυτές τις ώρες κατά τη διάρκεια του έτους.

Αποτέλεσμα των παραπάνω συνδυασμών των παραμέτρων A και B, είναι ο υπολογισμός του δείκτη διαθεσιμότητας LOLP για διάφορες γωνίες κλίσης με δεδομένο τον προσανατολισμό των πανώ. Μετά, για το ίδιο LOLP και χρησιμοποιώντας τη γωνία κλίσης των πανώ ως παράμετρο, υπολογίζονται με τη μέθοδο της γραμμικής παρεμβολής τα ζεύγη (A,B) (άμεση σχέση ανάμεσα στο εμβαδόν των πανώ και στη χωρητικότητα των μπαταριών), καθώς και τα ζεύγη ($W_{ολ}$, A) (άμεση σχέση ανάμεσα στην περίσσεια της ενέργειας και στο εμβαδόν των πανώ).

Και στις δυο περιπτώσεις, δηλαδή για $LOLP=0$ και για $LOLP \neq 0$ η μέθοδος της προσομοίωσης λαμβάνει υπόψη τόσο την κλίση όσο και τον προσανατολισμό των φ/β πανώ.

Το ολικό κόστος του κύκλου ζωής του συστήματος, TLC, ορίζεται ως εξής:

$$TLC = pA + pB + c$$

όπου

- P είναι το κόστος της εγκαταστημένης μονάδας ισχύος ($\$/m^2$), που περιλαμβάνει και το ετήσιο κόστος συντήρησής τους,
- b είναι το κόστος της εγκαταστημένης μονάδας χωρητικότητας των μπαταριών ($\$/Kwh$), που περιλαμβάνει και το ετήσιο κόστος συντήρησης και αντικατάστασης τους, και
- c είναι το ολικό σταθερό κόστος που περιλαμβάνει τα έξοδα σχεδιασμού, εγκατάστασης και οργάνωσης του συστήματος (εκφρασμένα σε εκατοστιαίες μονάδες του κόστους των υλικών).

Η ελάχιστη τιμή της συνάρτησης TLC - η ακριβής μαθηματική λύση - υπολογίζεται αντικαθιστώντας τα ζεύγη τιμών (A,B) που αντιστοιχούν στην επιθυμητή μη διαθεσιμότητα στην εξίσωση $A = A_m + i\Delta A \quad i=0,1,2,\dots,\eta$

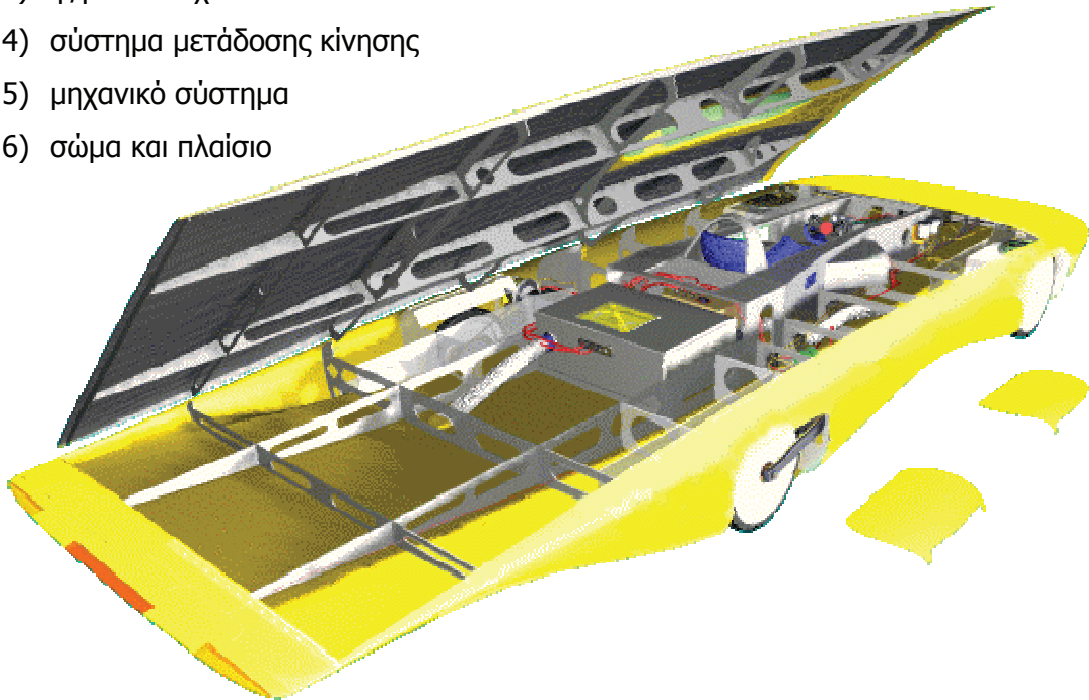
ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

4.1. ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΝΟΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ

Το ηλιακό αυτοκίνητο είναι ένα πειραματικό όχημα που χρησιμοποιεί ηλιακή ενέργεια και αναπτύσσει μέγιστη ταχύτητα 65 χιλιομέτρων την ώρα περίπου. Το αεροδυναμικό του αμάξωμα αποτελείται από ένα ελαφρύ «σάντουιτς» κυψελοειδούς αλουμινίου και ενός υλικού από ίνες άνθρακα. Διαθέτει περίπου 900 κιλά ηλιακά στοιχεία, σε συστοιχίες που βρίσκονται στην οροφή και στο πίσω μέρος του αυτοκινήτου. Τα ηλιακά στοιχεία συγκεντρώνουν τη φωτεινή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια, που τροφοδοτεί έναν ειδικού τύπου κινητήρα. Σε συνθήκες μεγάλης ηλιοφάνειας, τα στοιχεία μπορούν να δώσουν ισχύ της τάξης του ενός κιλοβάτ - ή 1,3 ίππους. *

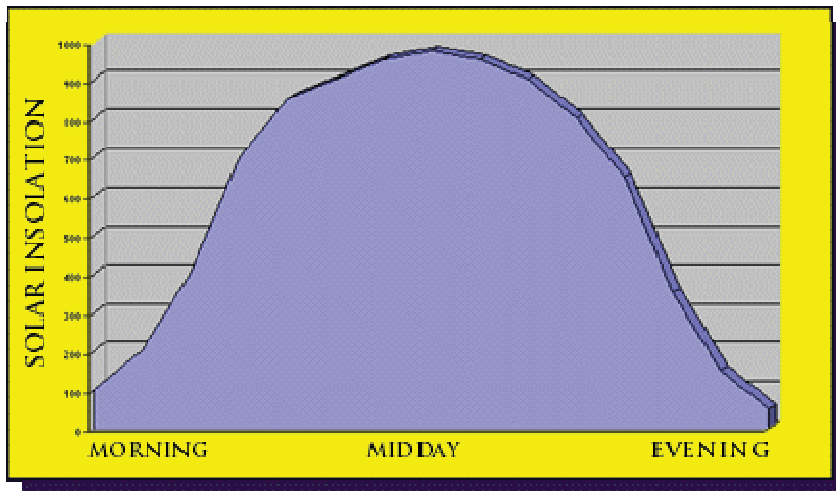
Ένα ηλιακό αυτοκίνητο αποτελείται από πολλά τμήματα που έχουν ενσωματωθεί μαζί έτσι ώστε να λειτουργούν ως ενιαίο σύστημα. Τα τμήματα αυτά τα έχουμε χωρίσει στα παρακάτω :

- 1) όργανα οδήγησης
- 2) ηλεκτρικό σύστημα
- 3) φ/β συστοιχία
- 4) σύστημα μετάδοσης κίνησης
- 5) μηχανικό σύστημα
- 6) σώμα και πλαίσιο



* (Για να έχετε μέτρο σύγκρισης, αρκεί να σκεφτείτε ότι η μηχανή ενός συνηθισμένου βενζινοκίνητου αυτοκινήτου μπορεί να δώσει ισχύ μεγαλύτερη από 100 ίππους.)

Η ενέργεια από τον ήλιο χτυπά τη γη καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Εντούτοις, το ποσό ενέργειας αλλάζει λόγω του χρόνου της ημέρας, των καιρικών συνθηκών και της γεωγραφικής θέσης. Το ποσό διαθέσιμης ηλιακής ενέργειας είναι γνωστό ως ηλιακή έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία και συνήθως μετριέται σε watts per meter squared ή W / m^2 . Η ηλιακή έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία στη Βόρεια Αμερική, μια φωτεινή ηλιόλουστη ημέρα στις αρχές του απογεύματος θα είναι κατά προσέγγιση γύρω στα $1000 W / m^2$, αλλά τα πρωινά, τα βράδια, ή όταν ο ουρανός είναι συννεφιασμένος τείνει να μειωθεί προς $0 W / m^2$ (εικόνα 1).



Εικόνα 1

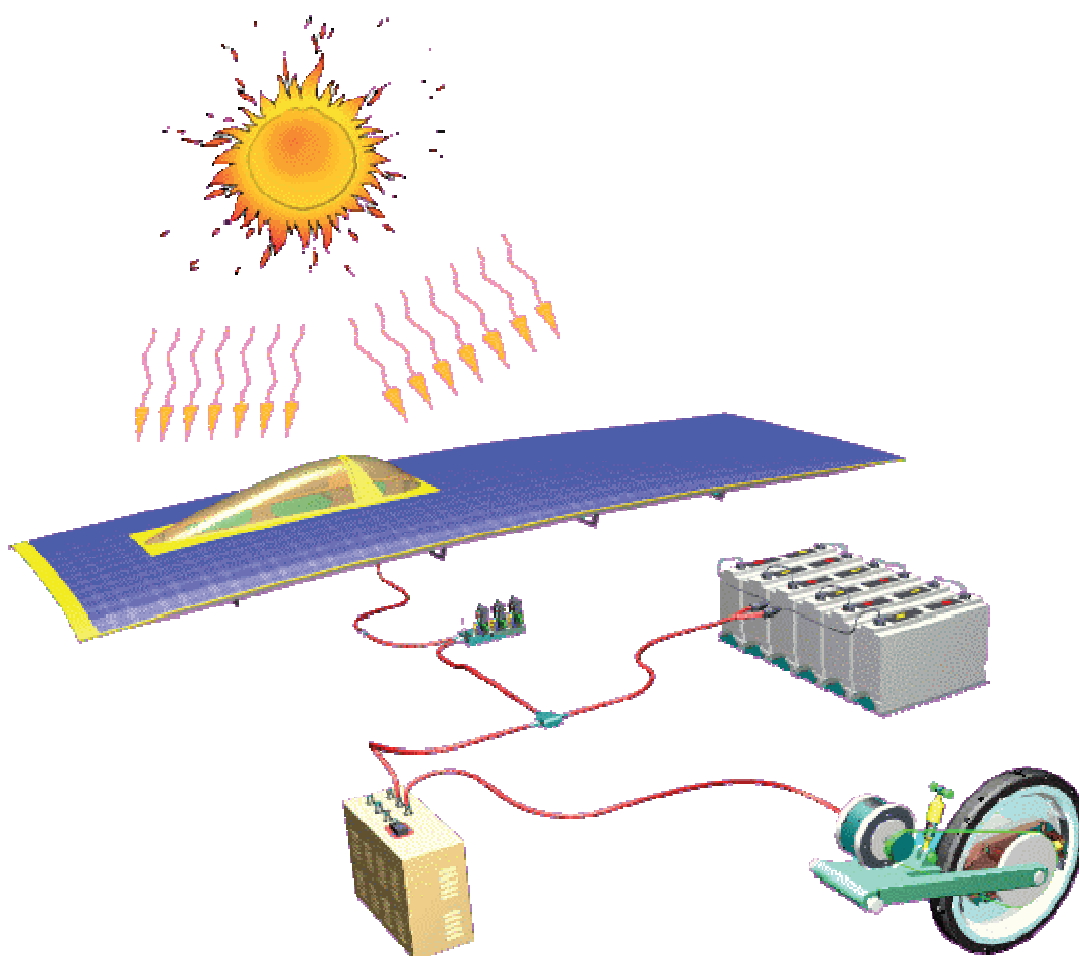
Το σχήμα 2 δίνει μια γενική ιδέα πώς η ενέργεια ρέει σε ένα ηλιακό αυτοκίνητο. Το φως του ήλιου χτυπά τα κύτταρα της φ/β συστοιχίας, τα οποία παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα. Η ενέργεια ως ρεύμα μπορεί να πάει στις μπαταρίες για αποθήκευση, να πάει κατευθείαν στον κινητήρα, ή να γίνει συνδυασμός και των δύο. Η ενέργεια που στέλνεται στον ρυθμιστή κινητήρα χρησιμοποιείται για να τροφοδοτήσει τη μηχανή που γυρίζει τον τροχό και κάνει το αυτοκίνητο να κινηθεί.

Γενικά εάν το αυτοκίνητο είναι στην κίνηση, το φως απ' τον ήλιο που έχει μετατραπεί μεταφέρεται κατευθείαν στον κινητήρα, αλλά υπάρχουν στιγμές που η ενέργεια προερχόμενη από την φ/β συστοιχία είναι περισσότερη από αυτή που χρειάζεται ο κινητήρας. Όταν αυτό συμβαίνει, η πρόσθετη ενέργεια αποθηκεύεται στις μπαταρίες για να χρησιμοποιηθεί αργότερα.

Όταν η φ/β συστοιχία δεν μπορεί να παράγει αρκετή ενέργεια για να οδηγήσει τη μηχανή στην επιθυμητή ταχύτητα, η ενέργεια της φ/β συστοιχίας συμπληρώνεται με την αποθηκευμένη ενέργεια από τις μπαταρίες.

Φυσικά, όταν κινείται το αυτοκίνητο, όλη η ενέργεια από την φ/β συστοιχία αποθηκεύεται στις μπαταρίες.

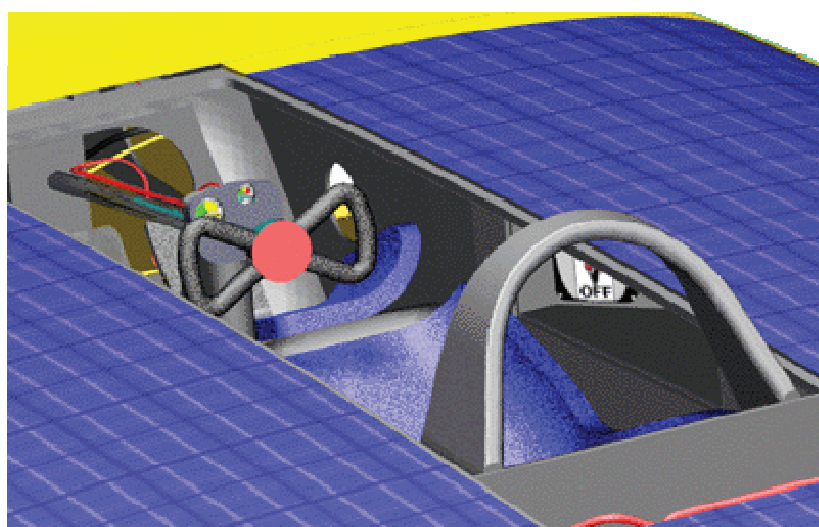
Υπάρχει επίσης ένας τρόπος να επιστρέφει μέρος της ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε για να κινηθεί το αυτοκίνητο. Όταν το αυτοκίνητο επιβραδύνεται, αντί της χρησιμοποίησης των κανονικών μηχανικών φρένων, η μηχανή μετατρέπεται σε γεννήτρια και η ενέργεια ρέει προς τα πίσω μέσω του κινητήρα στις μπαταρίες για αποθήκευση. Αυτό είναι γνωστό ως αναπαραγωγικό φρενάρισμα. Το ποσό ενέργειας που επιστρέφει στις μπαταρίες είναι μικρό, αλλά κάθε κομμάτι βοηθά.



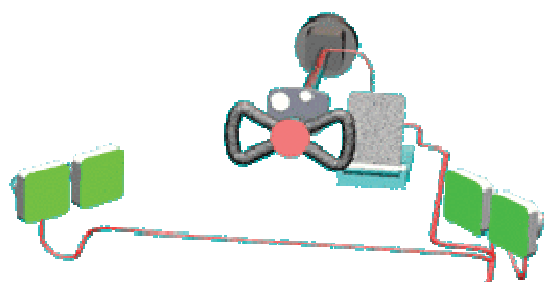
Ας εξετάσουμε το κάθε σύστημα ξεχωριστά :

4.2. ΟΡΓΑΝΑ ΟΔΗΓΗΣΗΣ

Τα ηλιακά αυτοκίνητα έχουν μερικά από τα τυποποιημένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα που βρίσκονται στα συμβατικά αυτοκίνητα, όπως τα σήματα στροφής (μέτωπο & οπίσθιο τμήμα), φώτα φρένων, επιταχυντής (πεντάλ καυσίμου), καθρέφτες στα πλαϊνά, εξαερισμός φρέσκου αέρα και έλεγχο οικονομικής ταχύτητας.

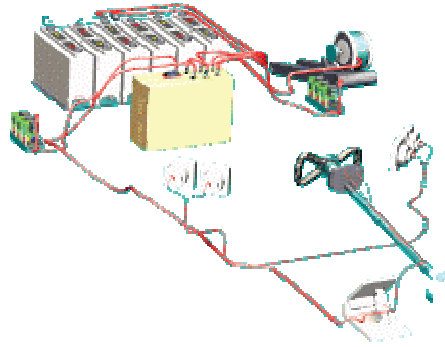


Οι οδηγοί και οι επιβάτες προστατεύονται με ζώνες ασφαλείας. Εκτός από την οδήγηση του αυτοκινήτου, η σημαντικότερη λειτουργία του οδηγού είναι να ελέγχει τα συστήματα του αυτοκινήτου και να επιβλέπει για πιθανά προβλήματα. Τα ηλιακά αυτοκίνητα έχουν όργανα ελέγχου όπως τα συμβατικά αυτοκίνητα που δείχνουν τις πληροφορίες που λαμβάνουν από τα συστήματα του οχήματος.

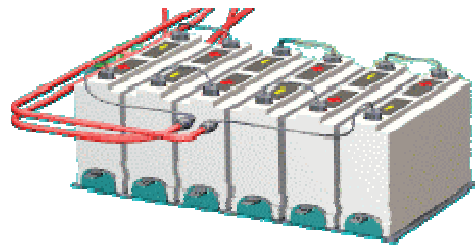


4.3. ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Η καρδιά ενός ηλιακού αυτοκινήτου είναι το ηλεκτρικό σύστημα που αποτελείται από τις μπαταρίες και τα ηλεκτρονικά ισχύος. Το ηλεκτρικό σύστημα ελέγχει και διαχειρίζεται όλη την ενέργεια που εισάγεται και βγαίνει απ' το σύστημα.



Ο συσσωρευτής είναι ισοδύναμος με μια δεξαμενή βενζίνης σε ένα συμβατικό αυτοκίνητο. Ένα ηλιακό αυτοκίνητο χρησιμοποιεί το πακέτο μπαταριών για να αποθηκεύσει την ενέργεια που θα χρησιμοποιηθεί αργότερα. Τα ηλιακά αυτοκίνητα ξεκινούν με ένα πλήρως φορτισμένο πακέτο μπαταριών, αλλά μετά από την εκκίνηση μόνο η ενέργεια που παράγεται από την φ/β συστοιχία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επαναφορτίσει τις μπαταρίες. Οι τύποι μπαταριών που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι:



- Lead-Acid μολύβδος – οξειδία του μολύβδου
- Nickel-Metal Hydrid (NiMH) διαφορικός νικελίου – μετάλλου
- Nickel-Cadmium (NiCad) νικελίου - καδμίου
- Lithium Ion ιόν- λιθίου
- Lithium Polymer πολυμερή - λιθίου

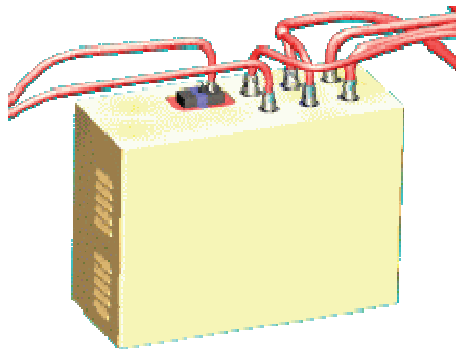
Οι μπαταρίες NiCad, NiMH, και Lithium προσφέρουν βελτιωμένη δύναμη σε βάρος σε σχέση με τις κοινές, αλλά είναι παλαιότερης τεχνολογίας και απαιτούν προσεκτική συντήρηση ενώ παράλληλα είναι πιο δαπανηρές.

Ο συσσωρευτής είναι φτιαγμένος από διάφορες ξεχωριστές μονάδες που ενώνονται έτσι ώστε να δημιουργήσουν το απαιτούμενο βολταϊκό σύστημα. Χαρακτηριστικά, χρησιμοποιούνται τάσεις συστημάτων μεταξύ 84 και 108 βολτ, ανάλογα με το ηλεκτρικό σύστημα.

Μερικά από τα περιπλοκότερα συστατικά σε ένα ηλιακό αυτοκίνητο είναι τα ηλεκτρονικά ισχύος. Περιλαμβάνει τον μετασχηματιστή, τον μικροελεγκτή του κινητήρα και το σύστημα απόκτησης δεδομένων. Η αρχική λειτουργία των ηλεκτρονικών ισχύος είναι να επιτηρεί και να ελέγχει την ηλεκτρική ενέργεια μέσα στο σύστημα.



Ο συσσωρευτής ρυθμίζει την ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από την φ/β συστοιχία για να μεγιστοποιήσει τη δύναμη και να την παραδώσει είτε στις μπαταρίες για αποθήκευση είτε στον κινητήρα για προώθηση. Όταν η φ/β συστοιχία φορτίζει τις μπαταρίες, ο συσσωρευτής προστατεύει τις μπαταρίες από την καταστροφή, δηλαδή την υπερφόρτωση. Ο αριθμός των συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται σε ένα ηλιακό αυτοκίνητο ποικίλλει με το σχέδιο. Οι συσσωρευτές μπορούν να είναι χαμηλού βάρους και να φθάσουν σε αποδοτικότητα μεγαλύτερη του 95%.



Ο μικροελεγκτής χειρίζεται την ηλεκτρική ενέργεια που στέλνεται στη μηχανή βασισμένος στην επιτάχυνση του οδηγού. Υπάρχουν διαφορετικοί τύποι μικροελεγκτών, που αντιστοιχούν σε διαφορετικούς τύπους κινητήρων στις μηχανές.

Πολλά ηλιακά αυτοκίνητα χρησιμοποιούν τα εξελιγμένα συστήματα απόκτησης δεδομένων που ελέγχουν ολόκληρο ηλεκτρικό σύστημα

συμπεριλαμβανομένης της φ/β συστοιχίας, των μπαταριών, του μικροελεγκτή και της μηχανής.

4.3.1. Μπαταρίες

Τα ηλιακά αυτοκίνητα χρησιμοποιούν τις μπαταρίες για να αποθηκεύσουν την ενέργεια που παράγεται από τα ηλιακά κύτταρά τους από νωρίς το πρωί ως και το απόγευμα. Τα εξελιγμένα ηλεκτρονικά ισχύος που συνδέουν την ηλιακή σειρά ενός ηλιακού αυτοκινήτου με τις μπαταρίες βοηθάνε στο να συλληφθεί το μέγιστο ποσό ενέργειας.

Μια μπαταρία είναι μια πηγή φορητής ηλεκτρικής ενέργειας. Είναι ομάδα ενός ή περισσότερων μεμονωμένων κυττάρων που συνδέονται σε σειρές που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Όλα τα κύτταρα λειτουργούν στην ίδια αρχή. Το ηλεκτρικό ρεύμα συμβαίνει λόγω της ροής μεταξύ δύο δίσκων αποκαλούμενων ηλεκτρόδια. Τα ηλεκτρόδια είναι συνήθως διαφορετικά υλικά και χωρίζονται από ένα υλικό που περιέχει έναν ηλεκτρολύτη - μια ουσία που διευθύνει τα ιόντα. Όταν τα δύο ηλεκτρόδια συνδέονται με την εξωτερική καλωδίωση, διαμορφώνεται ένα κύκλωμα.

Ένα χημικό κύτταρο μετατρέπει τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Το χημικό κύτταρο παράγει την ηλεκτρική ενέργεια από μια αντίδραση που επιτρέπει τη μεταφορά των ηλεκτρονίων από το ένα φορτισμένο άτομο στο άλλο. Όταν η χημική αντίδραση εμφανίζεται από μόνη της, το κύτταρο αναφέρεται ως βολταϊκό κύτταρο. Ένα βολταϊκό κύτταρο είναι χημικό κύτταρο που είναι αυτοκινούμενο.

Σε οποιοδήποτε κύτταρο, οι αντιδράσεις δημιουργούνται ώστε οι τρέχουσες ροές από την άνοδο (θετικό ηλεκτρόδιο) μέσω ενός εξωτερικού καλωδίου να οδηγούνται στην κάθοδο (αρνητικό ηλεκτρόδιο). Η "δύναμη" (τάση) με την οποία τρέχει η κίνηση μέσω του καλωδίου μετριέται σε βολτ. Ένα χημικό κύτταρο έχει ένα περιορισμένο ενεργειακό περιεχόμενο, που ονομάζεται χωρητικότητα ή φόρτιση. Όταν όλη η χημική ενέργεια έχει χρησιμοποιηθεί, η τάση πέφτει στο μηδέν. Σε ένα βολταϊκό κύτταρο, εάν η χημική αντίδραση μπορεί να αντιστραφεί, το κύτταρο μπορεί να επαναφορτιστεί.

Οι μπαταρίες ενός ηλιακού αυτοκινήτου διαμορφώνονται για να ικανοποιήσουν τις ανάγκες τάσης της ηλεκτρικής μηχανής. Ο συνδυασμός μπαταριών

αναφέρεται ως "πακέτο μπαταριών" και χρησιμοποιείται για να προβλέψει την πρόσθετη δύναμη για την αναρρίχηση λόφων, την επιτάχυνση ή την τροφοδότηση του αυτοκινήτου όταν κρύβεται ο ήλιος από τη συννεφιά. Αυτές οι μπαταρίες επαναφορτίζονται χρησιμοποιώντας την ενέργεια από την ηλιακή συστοιχία.

Οι μπαταρίες έχουν μακροχρόνια ιστορία. Περίπου το 1800, ο Alessandro Volta συγκέντρωσε μια σειρά δίσκων ασημιού και ψευδάργυρου σε ζευγάρια, χωρίζοντας κάθε ζευγάρι με ένα ύφασμα που υγραίνεται σε ένα μίγμα από αλάτι. Ο Volta, από τον οποίο ονομάστηκε το βολτ, συσσωρεύσε τουλάχιστον 60 ζευγάρια των δίσκων για να αυξήσει τη συνολική τάση. Έτσι προέκυψαν οι πρώτες μπαταρίες.

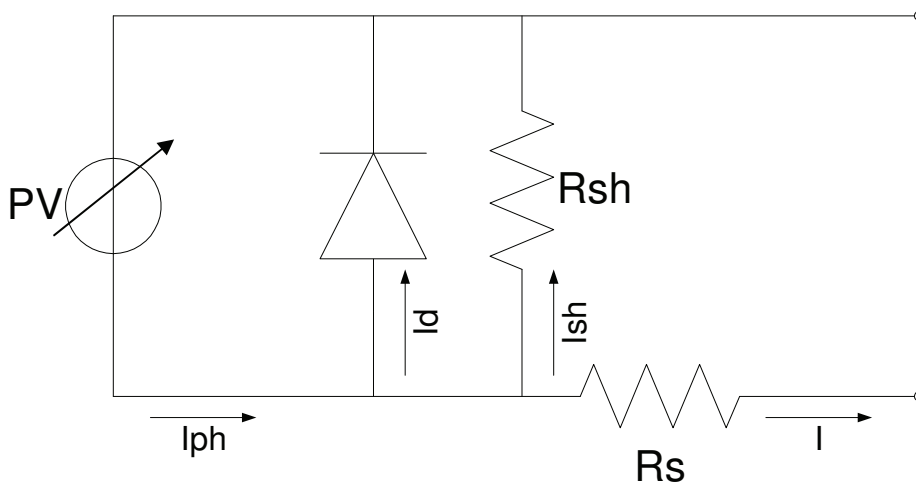
Μια αρχική μπαταρία περιέχει τα κύτταρα που απορρίπτονται όταν έχουν ξεφορτιστεί. Χρησιμοποιούνται συνήθως στους φακούς, τις φωτογραφικές μηχανές, τα φορητά ραδιόφωνα και τα παιχνίδια. Οι δευτεροβάθμιες μπαταρίες αποτελούνται από τα κύτταρα που μπορούν να επαναφορτιστούν με τη διάβαση του ρεύματος στην αντίστροφη κατεύθυνση. Αναφερόμαστε συχνά σε αυτές ως "μπαταρίες αποθήκευσης." Η πιο κοινή μπαταρία αποθήκευσης είναι η lead-acid μπαταρία που χρησιμοποιείται στα αυτοκίνητα. Οι lead-acid μπαταρίες είναι ανέξοδες, σχετικά ασφαλείς και εύκολα ανακυκλώσιμες, αλλά έχουν χαμηλή ενέργεια σε αναλογία με το βάρος τους, η οποία είναι ένας σοβαρός περιορισμός κατά την προσπάθεια να χτιστούν ελαφριά οχήματα. Οι νέες τεχνολογίες μπαταριών εξερευνούνται συνεχώς για να μπορούν να προσφέρουν μεγαλύτερη ενέργεια, σε αναλογία με το βάρος τους, το χαμηλότερο κόστος και την αυξανόμενη ζωή των μπαταριών. Η μπαταρία νικέλιο-μέταλλο-υδρίδιων είναι μια τέτοια τεχνολογία και έχει μελετηθεί αρκετά ως λύση στο εγγύς μέλλον. Οι μπαταρίες νικέλιο-μέταλλο-υδρίδιων προσφέρουν επί δύο φορές την ενεργειακή ικανότητα για το ίδιο βάρος με μια σύγχρονη lead-acid μπαταρία. Ένας άλλος τύπος μπαταριών με μια ακόμα μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα είναι οι ιόν λίθιου. Η διαδεδομένη χρήση των μπαταριών αποθήκευσης θα συνεχίσει να αυξάνεται στο μέλλον.

4.3.2. Φωτοβολταϊκή γεννήτρια

Η αρχή λειτουργίας της ηλιακής γεννήτριας στηρίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, το οποίο συνίσταται στην εμφάνιση διαφοράς δυναμικού όταν φως πέσει

σε υλικό, στο οποίο υπάρχει εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο, που προκύπτει από κάποιο φράγμα δυναμικού.

Το φωτοβολταϊκό κύτταρο προσομοιώνεται με ένα στοιχείο τάσης σε παράλληλη σύνδεση με μια δίοδο. Υπάρχουν επιπλέον δύο αντιστάσεις, μια παράλληλη και μια σε σειρά. Η παράλληλη αντίσταση R_{sh} , από φυσικής σκοπιάς εκφράζει τις απώλειες στη δίοδο, καθώς αυτή δεν είναι ιδανικό στοιχείο, ενώ η R_s εκφράζει τις ωμικές απώλειες στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού. I_{ph} είναι το φωτοεπαγόμενο ρεύμα, το οποίο, όπως φαίνεται και στο σχήμα, διακλαδίζεται στο I_d , το οποίο περνά στη δίοδο και χάνεται στο I_{sh} , που καταναλώνεται στην R_{sh} και στο I , το οποίο είναι και το χρήσιμο προς κατανάλωση ρεύμα. Έτσι, το κύκλωμα παίρνει τη μορφή που φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 1 Υβριδικό κύκλωμα φωτοβολταϊκού στοιχείου

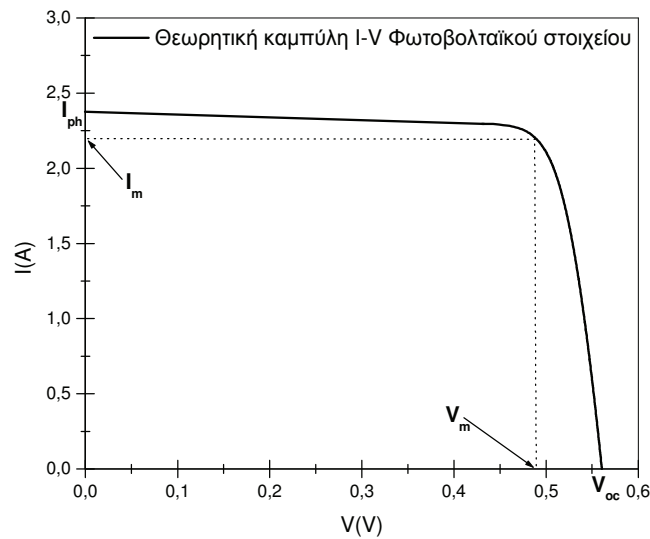
Από το κύκλωμα αυτό καταλήγουμε στη σχέση:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{KT}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

Επειδή ο τελευταίος όρος στην παραπάνω σχέση είναι πολύ μικρός (πολύ μεγάλη η R_{sh}), τον παραλείπουμε. Δηλαδή η (1) γίνεται:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{q(V+IR_s)}{KT}} - 1 \right] \quad (2)$$

Σχεδιάζοντας την καμπύλη $I=I(V)$ προκύπτει το διάγραμμα που ακολουθεί:



Σχήμα 2. Θεωρητική καμπύλη I-V φωτοβολταϊκού στοιχείου

Όσο πιο μεγάλη είναι η R_{sr} , τόσο μεγαλύτερη είναι η πτώση τάσης πάνω στην αντίσταση αυτή με αποτέλεσμα να έχουμε όλο και πιο μικρή τάση στην έξοδο του κυκλώματος. Επομένως, αυτό που πρέπει να επιζητούμε είναι να χρησιμοποιούμε διατάξεις με όσο το δυνατόν πιο μικρή R_s .

Το κυριότερο χαρακτηριστικό των φωτοβολταϊκών κελιών είναι η απόδοσή τους, η ικανότητά τους δηλαδή να μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική. Αυτό το μέγεθος δίνεται ως ο λόγος της αποδιδόμενης μέγιστης χρήσιμης ηλεκτρικής ισχύος προς την προσπίπτουσα ισχύ της ηλιακής ενέργειας:

$$\eta = \frac{I_m \cdot V_m}{A \cdot G_T} \quad (3)$$

όπου A [m^2] είναι η επιφάνεια του φωτοβολταϊκού και G_T [Wm^{-2}] η προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία ανά μονάδα επιφάνειας.

Η απόδοση μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική με τη βοήθεια φωτοβολταϊκών στοιχείων εξαρτάται α) από τη φ/β διάταξη, β) από την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και γ) από τη θερμοκρασία του φ/β στοιχείου.

α) Οι διατάξεις με τη μεγαλύτερη απόδοση και αντοχή, που έχουν δοκιμαστεί μέχρι τώρα, είναι του μονοκρυσταλλικού πυριτίου (c-Si) και του αρσενικούχου γαλίου (GaAs), με μέγιστες μετρημένες αποδόσεις 16% και 30% αντίστοιχα.

β) Η απόδοση (η) μιας φ/β διάταξης εξαρτάται από το ρεύμα βραχυκύκλωσης (I_{sc}), την τάση ανοικτού κυκλώματος (V_{oc}) και τον παράγοντα πληρότητας (FF) του στοιχείου. Το ρεύμα βραχυκύκλωσης είναι ανάλογο της έντασης της ακτινοβολίας που προσπίπτει στο φ/β ενώ η τάση ανοικτού κυκλώματος μεταβάλλεται λογαριθμικά με την ένταση της ακτινοβολίας. Έτσι, η απόδοση μιας διάταξης είναι διαφορετική κάθε φορά που αλλάζει η ακτινοβολία.

Επιπλέον, η ένταση της ακτινοβολίας, που προσπίπτει στην επιφάνεια του φ/β, μεταβάλλεται ανάλογα με το συνημίτονο της γωνίας πρόσπτωσης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση του ηλιακού οχήματος, καθώς δεν είναι δυνατόν όλα τα φ/β στοιχεία να βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο, είναι φυσικό να δέχονται διαφορετική ακτινοβολία και συνεπώς να έχουν διαφορετική απόδοση και να παράγουν διαφορετική ισχύ. Το φαινόμενο αυτό είναι ακόμη πιο έντονο όταν το όχημα χρειάζεται ενέργεια από τα φ/β κατά τη διάρκεια της κίνησής του, όπου η θέση του οχήματος ως προς τον ήλιο θα αλλάζει συνεχώς και πιθανώς μέρος των φ/β θα βρίσκεται σε σκιά. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στη συνδεσμολογία των φ/β, ώστε κάποια από αυτά να μην λειτουργούν ως καταναλωτές της ενέργειας που παράγουν τα υπόλοιπα.

γ) Η απόδοση τέλος μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία των φ/β. Η τάση ανοικτού κυκλώματος μειώνεται και το ρεύμα βραχυκύκλωσης αυξάνεται ελαφρά, συνολικά όμως η απόδοση ελαττώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Φυσικά η μεταβολή της θερμοκρασίας δεν είναι άσχετη από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος και την ένταση της ακτινοβολίας που προσπίπτει στα φ/β και η τελική της τιμή εξαρτάται και από την κατασκευή και την πιθανή ψύξη της φ/β διάταξης.

Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία συνολικής επιφάνειας 8 m² πρέπει να έχουν κατά το δυνατόν μεγαλύτερη απόδοση μετατροπής της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρισμό. Ιδανικό θα ήταν να χρησιμοποιηθούν φωτοβολταϊκά tj GaAs (triple-junction αρσενικούχου γαλλίου), όμως το κόστος τους είναι απαγορευτικό. Από την έρευνα αγοράς που έχουμε κάνει μέχρι τώρα φαίνεται ότι είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή της ηλιακής γεννήτριας φωτοβολταϊκά δύο ειδών:

(α) μονοκρυσταλλικού πυριτίου, διαστάσεων 10cm×10cm και απόδοσης μεγαλύτερης από 16% και

(β) κελιά dj-GaAs (double-junction αρσενικούχου γαλλίου), διαστάσεων 7,61cm×3.716cm και απόδοσης 23%.

Έχοντας ως δεδομένο ότι η μέγιστη επιφάνεια που μπορούν να καλύπτουν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι 8 m², μελετήθηκε ο εξής συνδυασμός: 1620 στοιχεία GaAs και 342 μονοκρυσταλλικού πυριτίου. Με τη σύνθεση αυτή η ηλιακή γεννήτρια θα αποδίδει 1600W.

Συνήθως στα φωτοβολταϊκά υπάρχει απώλεια λόγω ανάκλασης, η οποία ξεκινά από 4% και στις χειρότερες συνθήκες μπορεί να φτάσει και το 100%. Εξαρτάται από το υλικό επίστρωσης των κελιών αλλά και τη γωνία πρόσπτωσης των ηλιακών ακτίνων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα ακολουθηθεί ειδική διαδικασία στην επικάλυψη των ηλιακών μονάδων, ώστε να ελαττωθεί η ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία και κατά συνέπεια να αυξηθεί η απόδοση της ηλιακής γεννήτριας.

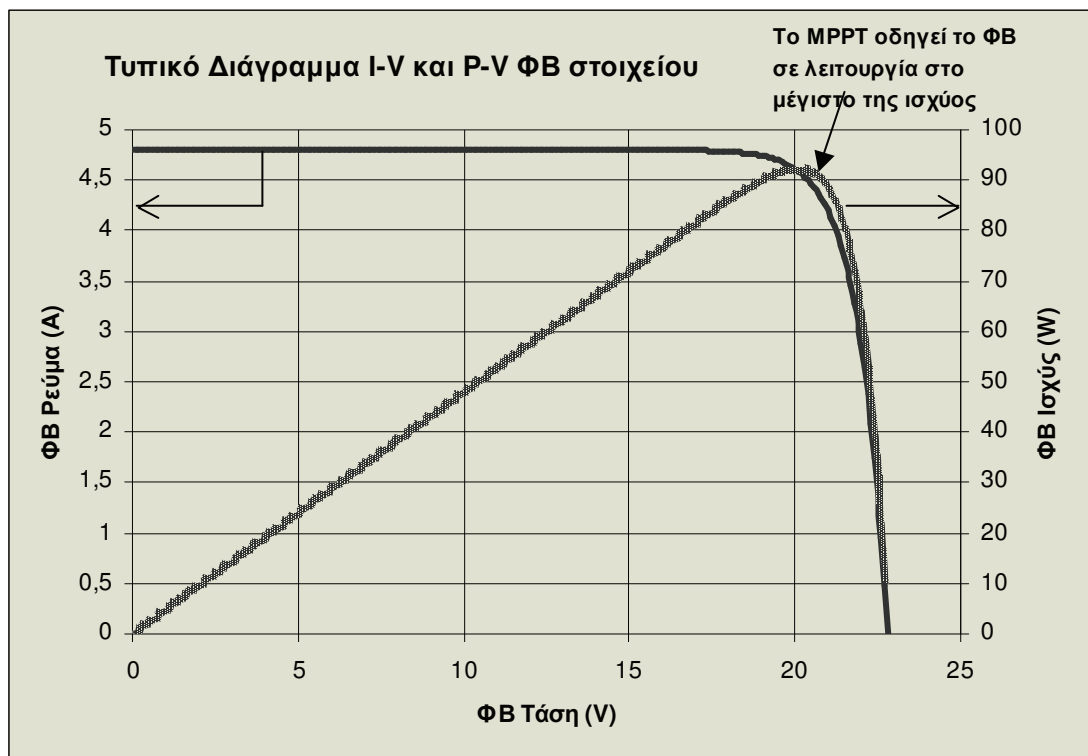
Η σύνδεση όπως και η επικάλυψη των κελιών θα γίνει χρησιμοποιώντας εξειδικευμένες τεχνολογικά μεθόδους. Η επικάλυψη είναι απαραίτητη διαδικασία για τα φωτοβολταϊκά κελιά, καθώς μέσω αυτής αυξάνονται οι μηχανικές τους αντοχές, μονώνονται ηλεκτρικά και προστατεύονται σε δύσκολες περιβαλλοντικά συνθήκες, όπως υγρασία, υπεριώδης ακτινοβολία κτλ. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την επικάλυψη είναι ειδικές ρητίνες. Αυτές που θα καλύψουν την επιφάνεια των στοιχείων που θα είναι στραμμένη στον ήλιο θα έχουν επιπλέον ειδικές αντιανακλαστικές ιδιότητες, εγγενείς, αλλά και λόγω της τεχνικής που θα χρησιμοποιηθεί στην επίστρωσή τους.

Μετά την κατασκευή των ηλιακών στοιχείων (modules), αυτά θα τοποθετηθούν στην άνω επιφάνεια του οχήματος και θα στηριχθούν στον υποκείμενο σκελετό με τη βοήθεια ειδικού κολλητικού αφρού. Κατ' αυτόν τον τρόπο, η ηλιακή γεννήτρια θα αποτελεί το άνω τοίχωμα του οχήματος. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της «ανοικτής» κατασκευής είναι η ελάττωση του βάρους του οχήματος. Η διάταξη αυτή έχει καλή μηχανική αντοχή και δεν πρόκειται να έχει προβλήματα λόγω δονήσεων.

Το βάρος ανά μονάδα επιφάνειας για τα ηλιακά στοιχεία είναι περίπου $1,3\text{Kg/m}^2$. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το συνολικό βάρος των φωτοβολταϊκών, σε συνδυασμό με την επίστρωση και τις απαραίτητες καλωδιώσεις να μην ξεπεράσει τα 30Kg . Το πάχος των ηλιακών στοιχείων κυμαίνεται μεταξύ $0,7$ και $0,9$ mm, ενώ ο ειδικός ακρυλικός αφρός που θα χρησιμοποιηθεί για τη σύνδεση των κελιών σε μια ενιαία μονάδα δεν θα ξεπερνά το 1 mm.

4.3.3. MPPT (Maximum Power Point Tracker)

Ως γνωστόν τα φωτοβολταϊκά στοιχεία απορροφούν την ενέργεια που προσφέρει ο ήλιος και δημιουργούν διαφορά τάσης. Η σχέση μεταξύ τάσης-ρεύματος φαίνεται στην παρακάτω καμπύλη I-V. Παρατηρούμε ότι το ρεύμα παίρνει σχεδόν την ίδια τιμή για διάφορες τιμές της τάσης μέχρι ένα σημείο όπου έχουμε απότομη πτώση της τιμής για συνεχώς αυξανόμενη τάση. Ο συνδυασμός ρεύματος-τάσης που δίνει το φωτοβολταϊκό στοιχείο διαφέρει ανάλογα με τις εξωτερικές συνθήκες (θερμοκρασία, φωτεινότητα). Από τα προαναφερθέντα συμπεραίνουμε ότι και η ισχύς εξόδου αλλάζει όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα ($P=IV$) :

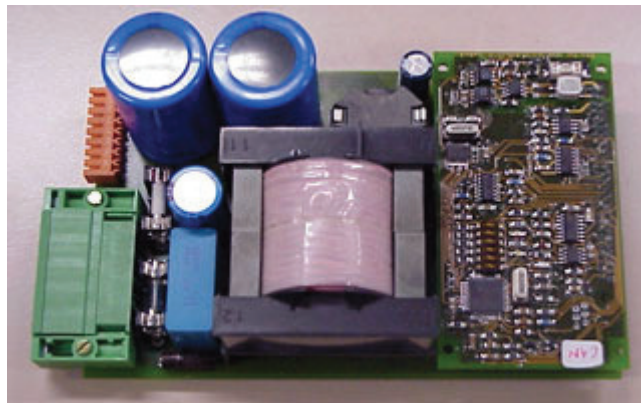


Σχήμα 3. Τυπικό διάγραμμα I-V και P-V φωτοβολταϊκού στοιχείου

Για να πάρουμε τη μέγιστη ισχύ από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία χρησιμοποιούμε τα MPPT (Maximum Power Point Tracker). Οι συσκευές αυτές χρησιμοποιούνται ώστε να βρισκόμαστε διαρκώς στον συνδυασμό ρεύματος-τάσης ο οποίος μας δίνει την μέγιστη ισχύ σχήμα 4. Τα MPPT επίσης χρησιμεύουν στο να μετατρέπουν την τάση που παίρνουν από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία στην τάση που λειτουργεί το κυρίως σύστημά μας.

Συνεπώς, ένας MPPT θα πρέπει να έχει τις εξής λειτουργίες:

- Να εξασφαλίζει τη λειτουργία του συστήματος στο σημείο μέγιστης ισχύος όταν αυτό αλλάζει λόγω των εξωτερικών συνθηκών.
- Να έχει υψηλή απόδοση στην μετατροπή.
- Να προσφέρει ένα συμβατό περιβάλλον εξόδου για τον λοιπό εξοπλισμό



Σχήμα 4. Φωτογραφία MPPT

Χαρακτηριστικά

- Υψηλή απόδοση μετατροπής μέχρι και 99%
- Μεγάλη κλίμακα I/O
- Υψηλή αξιοπιστία και αντοχή λόγω χαμηλής θερμικής διαστολής
- Ξεχωριστός controller
- Προστασία I/O
- Μεταφορά δεδομένων μέσω CANbus

Προδιαγραφές	Ελάχιστο	Μέγιστο	Μονάδες
Μέγιστη απόδοση*		98,9	%
Μέγιστη απόδοση μετατροπεία ισχύος*		99,3	%
Απόδοση για 300W ισχύ εισόδου**			
U _{out} =130V	96,53	98,75	%
U _{out} =144V	96,53	98,64	%
U _{out} =168V	97,14	98,55	%
U _{out} =200V	97,40	98,27	%
Ισχύς εισόδου			
Συνεχής	5	800	W
Μέγιστο***		1100	W
Κατανάλωση ισχύος στον controller		1,2	W

Πίνακας 1 Χαρακτηριστικά ΜΡΡΤ

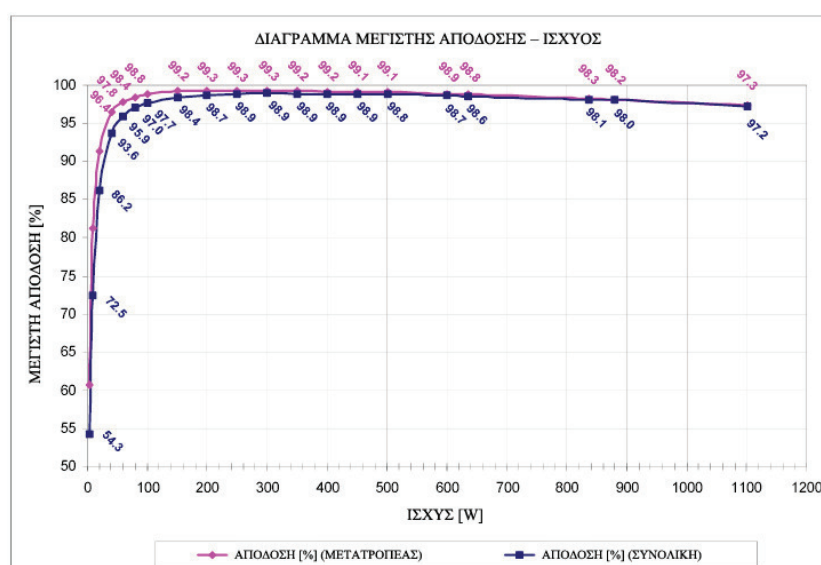
Συνθήκες πειράματος: $\theta=25^{\circ}\text{C}$

*Μέγιστη απόδοση για $P_{in}=300\text{W}$ $U_{in}=110\text{V}$ $U_{out}=130\text{V}$

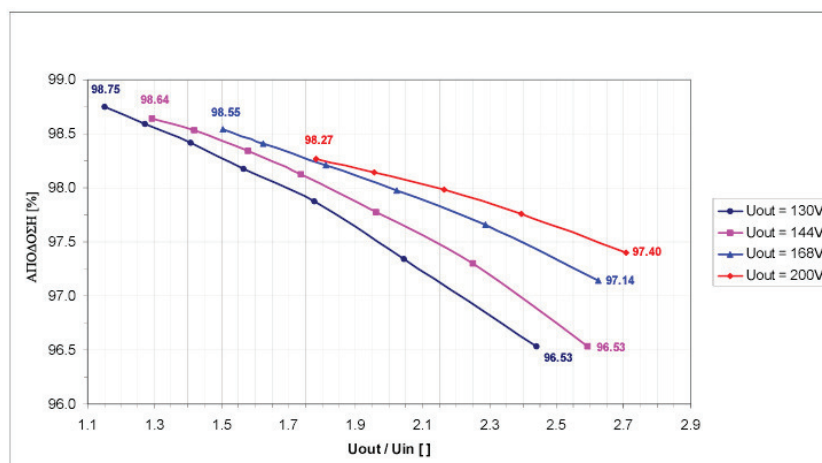
** για συγκεκριμένη κλίμακα τάσεων I/O

*** κατά την διάρκεια 5 λεπτών ανά ώρα

Τα δεδομένα του παραπάνω πίνακα παριστάνονται γραφικά στα διαγράμματα που ακολουθούν:



Σχήμα 5. Διάγραμμα μέγιστης απόδοσης ισχύος



Σχήμα 6. Διάγραμμα απόδοσης και λόγου τάσεων

Χαρακτηριστικά εισόδου

Προδιαγραφές	Σύμβολα	Ελάχιστο	Μέγιστο	Μονάδες
Ρεύμα εισόδου				
Συνεχές	I_{in}	0,1	7,3	A_{DC}
Μέγιστο *			10	A_{DC}
Τάση MPPT**	U_{mppt}	48		V_{DC}
Τάση ανοικτού κυκλώματος**	U_{open}		144	V_{DC}

Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά εισόδου MPPT

Συνθήκες πειράματος: $\theta=25^{\circ}C$

* κατά την διάρκεια 5 λεπτών ανά ώρα

** πρέπει να είναι $<U_{out}$ (λόγω του μετατροπέα ισχύος)

Χαρακτηριστικά εξόδου

Προδιαγραφές	Σύμβολα	Ελάχιστο	Μέγιστο	Μονάδες
Τάση εξόδου*	U_{out}	60	200	V_{DC}
Τάση εξόδου αποκοπής**	U_{outSD}	220	230	V

Πίνακας 3. Χαρακτηριστικά εξόδου MPPT

Συνθήκες πειράματος: $\theta=25^{\circ}C$

* πρέπει $>U_{mppt}$ (λόγω του μετατροπέα ισχύος)

** αν η φόρτιση πέσει και η τάση εξόδου ξεπεράσει τα 220V ο μετατροπέας κλείνει αυτόματα

Γενικά χαρακτηριστικά

Προδιαγραφές	Σύμβολα	Ελάχιστο	Τύπος	Μέγιστο	Μονάδες
Λόγος τάσης μετάδοσης	U_{out}/U_{in}	1,05			
Συχνότητα επικοινωνίας μετατροπέα			23		KHz
Ακρίβεια ανάλυσης		2		2	
Συχνότητα αναζήτησης			50		Hz
Διαστάσεις					
μήκος				17	cm
πλάτος				10	cm
ύψος				8	cm
Βάρος				0,65	kg
Θερμοκρασία λειτουργίας	θ	0		70	$^{\circ}\text{C}$

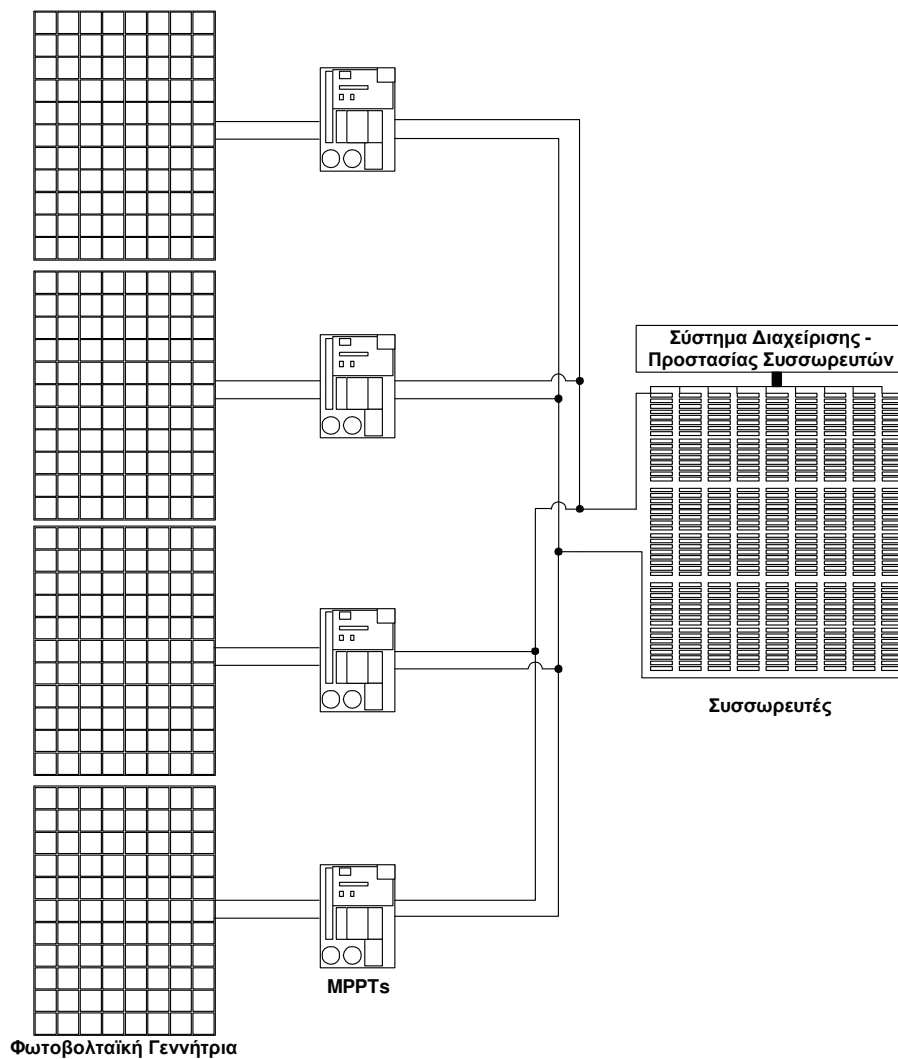
Πίνακας 4. Γενικά χαρακτηριστικά MPPT

Χαρακτηριστικά CAN

Προδιαγραφές	Σύμβολα	Ελάχιστο	Τύπος	Μέγιστο	Μονάδες
Τάση τροφοδοσίας	U_{CAN}	4,75		5,25	V
Ρεύμα τροφοδοσίας		15		50	mA
$T_X = V_{INH}$, $U_{CAN} = 5,5V, R_L = 60\Omega$, $T_X = V_{INH}$, $U_{CAN} = 5,5V, R_L = 60\Omega$,		60		100	mA
Ρυθμός μετάδοσης			125		KBit/s
Μήκος του bus				500	m
Πρωτόκολλο	ISO 11898 (CAN εφαρμογές υψηλών ταχυτήτων)				

Πίνακας 5. Χαρακτηριστικά CAN

Για να αποφύγουμε προβλήματα που μπορεί να προκύψουν από την είσοδο μεγάλης ποσότητας ρεύματος στο MPPT, προκειμένου να πετύχουμε αφθονία στην ισχύ αλλά και να αποκτήσουμε δυνατότητα περισσοτέρων ελιγμών στη διαχείρισή της, θα χρησιμοποιήσουμε 4 συσκευές. Κάθε συσκευή θα συνδεθεί σε μια ομάδα φωτοβολταϊκών στοιχείων και στη συνέχεια και τα τέσσερα MPPT θα συνδεθούν στο σώμα των συσσωρευτών, όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί:

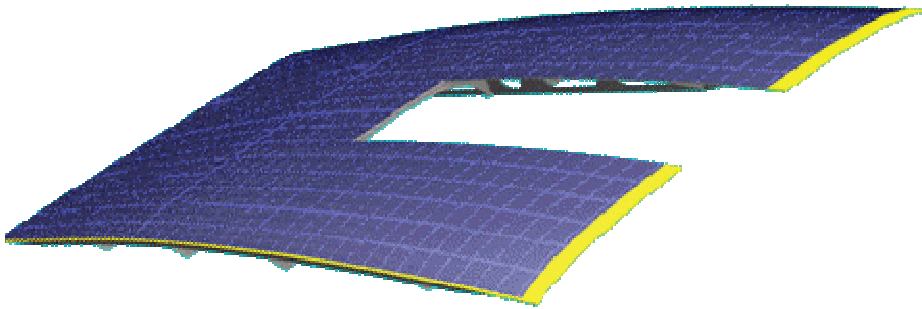


Σχήμα 7. Διάταξη Φωτοβολταϊκών στοιχείων - MPPT - Συσσωρευτών έλξης

4.4. Φ/Β ΣΥΣΤΟΙΧΙΑ

Η φ/β συστοιχία είναι η μόνη πηγή ενέργειας του οχήματος κατά τη διάρκεια της κίνησής του. Η συστοιχία αποτελείται από πολλά (συνήθως μερικές εκατοντάδες) φωτοβολταϊκά ηλιακά κύτταρα που μετατρέπουν την ενέργεια του ήλιου σε ηλεκτρική ενέργεια.

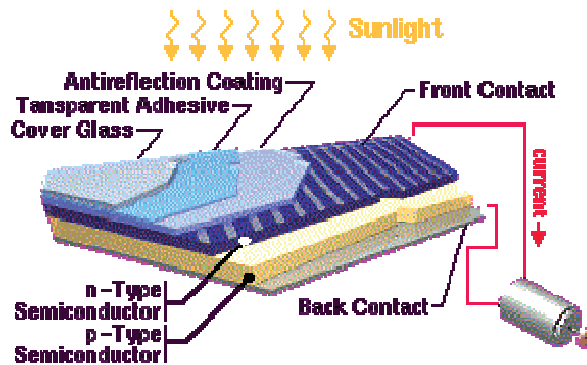
Τα κύτταρα συνδέονται μεταξύ τους για να διαμορφώσουν σειρές. Διάφορες σειρές συνδέονται μεταξύ τους για να διαμορφώσουν ένα τμήμα που έχει τάση κοντά στην ονομαστική τάση μπαταριών. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για να συνδέσουν τα κύτταρα, αλλά ο αρχικός στόχος είναι να έχει όσο το δυνατόν περισσότερα ηλιακά κύτταρα στο διαθέσιμο χώρο. Τα ηλιακά κύτταρα είναι πολύ εύθραυστα και μπορούν να καταστραφούν εύκολα. Προκειμένου να τοπαθετηθούν τα κύτταρα στο κέλυφος ακολουθούνται διάφορες μέθοδοι με στόχο να προστατευθούν τα κύτταρα προσθέτοντας το λιγότερο βάρος.



Η δύναμη που παράγεται από την φ/β συστοιχία ποικίλλει ανάλογα με τον καιρό, τη θέση του ήλιου στον ουρανό και την ίδια την φ/β συστοιχία. Σε μια φωτεινή, ηλιόλουστη ημέρα το μεσημέρι, μία καλή φ/β συστοιχία μπορεί να παράγει πάνω από 1000 Watt (1,3 HP) ισχύ. Η ενέργεια από τη συστοιχία χρησιμοποιείται είτε για να τροφοδοτήσει την ηλεκτρική μηχανή είτε αποθηκεύεται στο πακέτο μπαταριών για χρήση αργότερα.

4.5. ΗΛΙΑΚΑ ΚΥΤΤΑΡΑ

Ένα ηλιακό κύτταρο μετατρέπει την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα φωτόνια στο φως του ήλιου παρέχουν την ενέργεια που κινεί τα ηλεκτρόνια από ένα στρώμα μιας ημιαγώγιμης μεταλλικής πλάκας σε άλλη. Η μετακίνηση των ηλεκτρονίων δημιουργεί ένα ρεύμα.



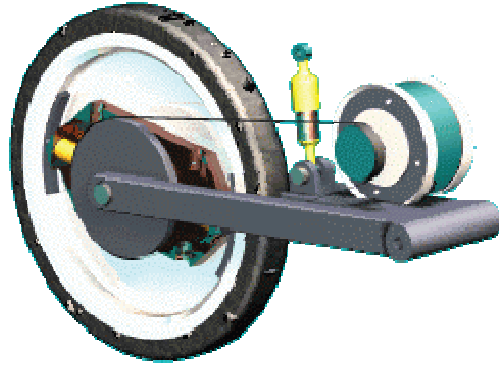
Υπάρχουν πρώτιστα δύο τύποι κυττάρων χρησιμοποιούμενων σήμερα, από πυρίτιο και από αρσενικούχο μέταλλο γαλλίου, οι οποίοι έρχονται σε διαφορετικές βαθμίδες και με ποικίλες αποδοτικότητες. Οι δορυφόροι που είναι σε τροχιά γύρω από τη γη χρησιμοποιούν χαρακτηριστικά το αρσενικούχο μέταλλο γαλλίου, ενώ το πυρίτιο χρησιμοποιείται συχνότερα για εφαρμογές χρησιμοποιούμενες στη γη (επίγειες).

Τα ηλιακά αυτοκίνητα χρησιμοποιούν συνήθως τα κύτταρα από πυρίτιο. Πολυάριθμα μεμονωμένα κύτταρα (που πλησιάζουν τα 1000) συνδυάζονται για να διαμορφώσουν την "φ/β συστοιχία". Ανάλογα με την ηλεκτρική μηχανή που χρησιμοποιείται στο αυτοκίνητο, αυτές οι συστοιχίες λειτουργούν γενικά μεταξύ των 50 και 200 βολτ, και μπορούν να παρέχουν μέχρι 1000 Watt περίπου ισχύ. Η ένταση του ήλιου, η κάλυψη σύννεφων και η θερμοκρασία έχουν επιπτώσεις στην αποδοτικότητα της συστοιχίας.

Τα ηλιακά αυτοκίνητα μπορούν να χρησιμοποιήσουν οποιοδήποτε τύπο ηλιακού κυττάρου και πολλοί μηχανικοί χρησιμοποιούν τα ηλιακά κύτταρα "κενού". Αυτά τα κύτταρα είναι γενικά μικρότερα και ακριβότερα από τα συμβατικά κύτταρα πυριτίου και επιπλέον είναι αποδοτικότερα.

4.6. ΣΥΣΤΗΜΑ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ

Το σύστημα μετάδοσης κίνησης σε ένα ηλιακό αυτοκίνητο είναι πολύ διαφορετικό από ενός συμβατικού αυτοκινήτου. Για αυτή τη συζήτηση, το σύστημα μετάδοσης της κίνησης θα αποτελούν η ηλεκτρική μηχανή και τα μέσα από τα οποία η ενέργεια της μηχανής διαβιβάζεται στους τροχούς αναγκάζοντας το όχημα να κινηθεί. Λόγω του χαμηλού ποσού ενέργειας που παράγεται (λιγότερο από 5 HP) συνήθως μόνο ένας τροχός στο οπίσθιο τμήμα του αυτοκινήτου οδηγείται από την ηλεκτρική μηχανή.



Δεν υπάρχει κανένας περιορισμός στον τύπο μηχανής που χρησιμοποιείται σε ένα ηλιακό αυτοκίνητο. Χρησιμοποιούνται συνήθως μεταξύ 2 και 5 HP. Ο πιο κοινός τύπος μηχανής που χρησιμοποιείται στα ηλιακά αυτοκίνητα είναι η διπλού-τυλίγματος συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρα. Μια συνεχούς ρεύματος χωρίς ψήκτρα μηχανή είναι αρκετά ελαφριά και μπορεί να φθάσει σε απόδοση 98% στην καθορισμένη περιστροφή / λεπτό, εντούτοις είναι αρκετά ακριβότερη από μια συμβατική συνεχούς ρεύματος μηχανή με ψήκτρα.

Δεδομένου ότι οι πολυ-μηχανισμοί μετάδοσης κίνησης χρησιμοποιούνται σπάνια στα ηλιακά αυτοκίνητα, η διπλού-τυλίγματος μηχανή χρησιμοποιείται μερικές φορές ως ηλεκτρονική μετάδοση. Η λειτουργία αλλαγής τροχιάς μεταξύ διπλού τυλίγματος αλλάζει την απόδοση ταχύτητας της μηχανής. Αργόστροφο τύλιγμα παρέχει την υψηλή ροπή για την έναρξη και τη διάβαση, ενώ υψηλό τύλιγμα έχει υψηλότερες αποδόσεις και είναι ταχύτερο στο δρόμο (κανονικό τρέξιμο).

Υπάρχουν διάφορες παραλλαγές τριών βασικών τύπων μεταδόσεων που χρησιμοποιούνται στα ηλιακά αυτοκίνητα :

1. άμεση μετάδοση κίνησης στον ένα τροχό (που παρουσιάζεται ανωτέρω)
2. μεταβλητή αναλογική κίνηση ζωνών
3. μηχανή πλημνών

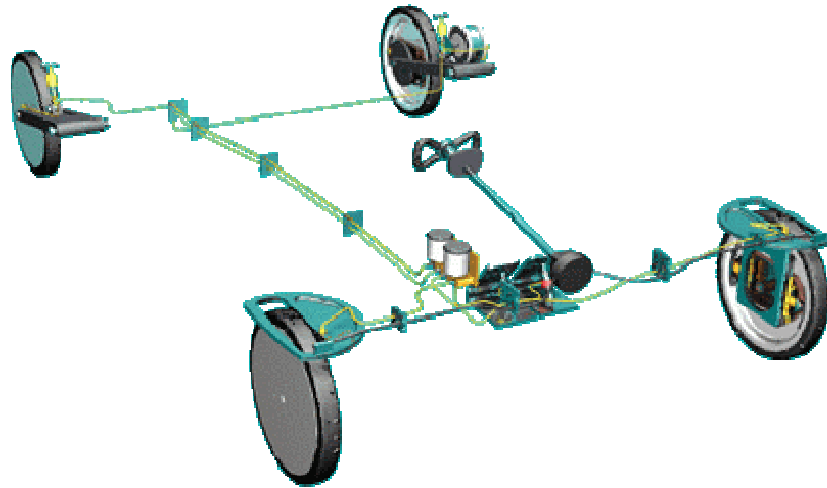
Στο παρελθόν, ο πιο κοινός τύπος ήταν η άμεση μετάδοση κίνησης όπου η μηχανή συνδέεται με τη ρόδα μέσω μιας αλυσίδας ή τη ζώνη με μια ενιαία μείωση εργαλείων. Αυτό είναι μια αξιόπιστη και εύκολα διατηρημένη μετάδοση εάν η ειδική προσοχή λαμβάνεται κατά την ευθυγράμμιση των συστατικών. Οι αποδοτικότητες μεγαλύτερες του 75% μπορούν να επιτευχθούν όταν σχεδιάζονται κατάλληλα.

Μερικές ομάδες έχουν χρησιμοποιήσει τη μεταβλητή αναλογία κινήσεις ζωνών για να διαβιβάσουν τη δύναμη στη ρόδα. Η αναλογία εργαλείων αλλάζει ως ταχύτητα των αυξήσεων μηχανών. Αυτό δίνει τη μηχανή που περισσότερη έναρξη κλείνει με τις χαμηλότερες ταχύτητες, αλλά ακόμα επιτρέπει στο αυτοκίνητο για να τρέξει αποτελεσματικά με τις υψηλότερες ταχύτητες. Οι μεταβλητές κινήσεις ζωνών απαιτούν την ακριβή ευθυγράμμιση και την προσεκτική οργάνωση για να λειτουργήσουν αποτελεσματικά.

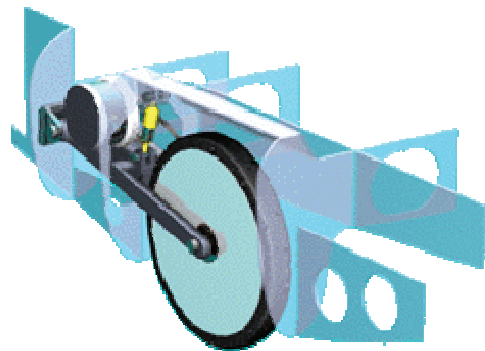
Από το 1995 όταν εφάρμοσαν μερικές ομάδες τα σχέδια μηχανών πλημνών στα ηλιακά αυτοκίνητά τους, η δημοτικότητα της μετάδοση-ελεύθερης κίνησης έχει εκτιναχθεί στα ύψη. Μια μηχανή πλημνών εξαλείφει την ανάγκη για οποιαδήποτε εξωτερική μετάδοση επειδή ο άξονας μηχανών συνδέεται άμεσα με την πλήμνη τροχών. Αυτό αυξάνει πολύ την αποδοτικότητα του συστήματος μετάδοσης κίνησης και μειώνει τον αριθμό κινούμενων μερών απαραίτητων να οδηγήσουν τον τροχό. Μια μηχανή πλημνών χρησιμοποιεί χαμηλή περιστροφή/λεπτό ως αποτέλεσμα τη μείωση των εργαλείων, η οποία τείνει να ρίξει την αποδοτικότητά της ελαφρώς, αλλά μπορεί ακόμα να επιτύχει αποδοτικότητες μεγαλύτερες από 95%.

4.7. ΜΗΧΑΝΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Τα μηχανικά συστήματα ενός ηλιακού αυτοκινήτου είναι γενικά απλά, αλλά έχουν ως σκοπό να ελαχιστοποιήσουν την τριβή και το βάρος διατηρώντας τη δύναμη που απαιτείται για να χειριστεί τους διάφορους οδικούς όρους. Τα ελαφριά μέταλλα, όπως το τιτάνιο και τα σύνθετα, χρησιμοποιούνται συνήθως για να μεγιστοποιήσουν την αντοχή σε σχέση με το βάρος που απαιτείται για να κατασκευαστούν αποδοτικά μέρη. Τα μηχανικά συστήματα περιλαμβάνουν την ανάρτηση, τα φρένα, το τιμόνι και τους τροχούς.



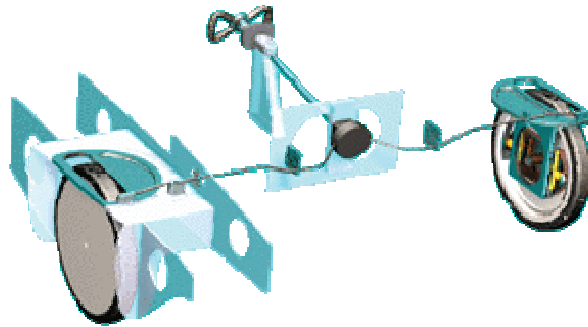
Μια ευρεία ποικιλία των αναρτήσεων εφαρμόζεται στα ηλιακά αυτοκίνητα. Αυτό οφείλεται εν μέρει στο γεγονός ότι τα σχέδια σωμάτων και πλαισίων είναι τόσο διαφορετικά μεταξύ των αυτοκινήτων. Ο πιο κοινός τύπος μπροστινής ανάρτησης που χρησιμοποιείται στα ηλιακά αυτοκίνητα είναι η διπλή ανάρτηση α-βραχιόνων, παρόμοια με εκείνους που χρησιμοποιούνται στα συμβατικά οχήματα. Χαρακτηριστικά, η οπίσθια ανάρτηση βραχιόνων παρόμοια με εκείνη που βρίσκονται στις μοτοσυκλέτες χρησιμοποιείται στο οπίσθιο τμήμα. Οι ειδικοί σχεδιάζουν τα τμήματα ανάρτησης τους, ώστε να κινούνται ελεύθερα και ομαλά για να επιτύχουν μέγιστη αποδοτικότητα. Το σχέδιο πρέπει επίσης να είναι τέτοιο ώστε να διατηρηθούν η κατάλληλη ευθυγράμμιση και λειτουργικότητα.



Η ασφάλεια είναι μια κορυφαία προτεραιότητα. Για αυτό το λόγο, τα ηλιακά αυτοκίνητα πρέπει να ανταποκριθούν στα αυστηρά πρότυπα απόδοσης φρεναρίσματος και κάθε ηλιακό αυτοκίνητο απαιτείται να έχει δύο ανεξάρτητα συστήματα πέδησης. Τα δισκόφρενα χρησιμοποιούνται συνήθως στα ηλιακά αυτοκίνητα λόγω προσαρμοστικότητας και της καλής απόδοσης φρεναρίσματος τους. Κάποιες εταιρίες κάνουν χρήση μηχανικών φρένων ενώ άλλες χρησιμοποιούν υδραυλικά. Τα μηχανικά φρένα τείνουν να είναι μικρότερα και ελαφρύτερα από τα υδραυλικά, αλλά δεν προσφέρουν τόση δύναμη φρεναρίσματος και απαιτούν συνεχή ρύθμιση. Για να μεγιστοποιήσουν την αποδοτικότητα, τα φρένα σχεδιάζονται να

κινούνται ελεύθερα μειώνοντας την έλξη φρένων, η οποία προκαλείται από τα τακάκια φρένων που τρίβουν την επιφάνειά τους.

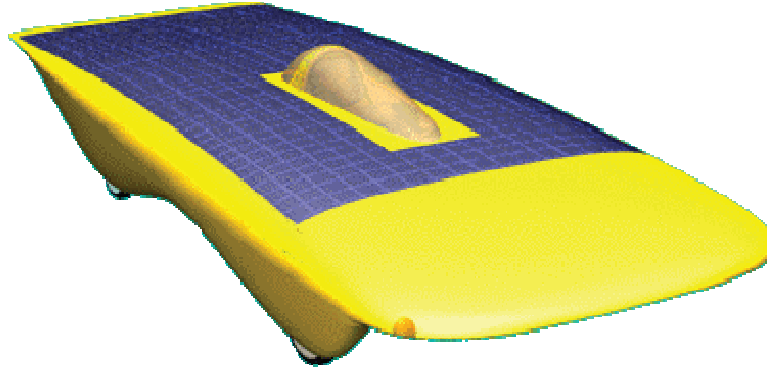
Τα συστήματα οδήγησης μέσα σε ένα ηλιακό αυτοκίνητο, όπως για παράδειγμα οι αναρτήσεις, ποικίλλουν πολύ. Οι σημαντικότεροι παράγοντες σχεδίου για την οδήγηση είναι αξιοπιστία και αποδοτικότητα. Το σύστημα οδήγησης σχεδιάζεται με την ακριβή ευθυγράμμιση επειδή ακόμη και οι μικρές παρεκκλίσεις μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές απώλειες και να αυξήσουν την φθορά των ελαστικών.



Στο παρελθόν χρησιμοποιήθηκαν ελαστικά και τροχοί ποδηλάτων συνήθως, λόγω της ελαφριάς κατασκευής και της χαμηλής αντίστασης κυλίσματός τους (ελάχιστη τριβή). Αυτά τα ελαστικά και οι τροχοί ήταν γενικά υπερφορτωμένα κατά την υποστήριξη του βάρους ενός ηλιακού αυτοκινήτου, γεγονός που επηρέασε την απόδοση και την ασφάλεια του οχήματος. Ευτυχώς, το ενδιαφέρον των καταναλωτών για τα ηλιακά αυτοκίνητα έχει προτρέψει μερικούς κατασκευαστές ελαστικών να κατασκευάζουν ελαστικά σχεδιασμένα για ηλιακά αυτοκίνητα. Οι ειδικοί εκμεταλλεύονται τους ελαφρείς τροχούς χαμηλής τριβής και ελαστικά που αυξάνουν και την ασφάλεια και την απόδοση.

4.8. ΣΩΜΑ ΚΑΙ ΠΛΑΙΣΙΟ

Το πιο ιδιαίτερο μέρος των ηλιακών αυτοκινήτων είναι το σώμα. Οι κύριοι στόχοι κατά το σχεδιασμό του σώματος είναι να ελαχιστοποιηθεί η αεροδυναμική έλξη, να μεγιστοποιηθεί η ηλιακή έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία, να ελαχιστοποιηθεί το βάρος και να μεγιστοποιηθεί η ασφάλεια. Υπάρχουν πολλές θεωρίες για το ποια μορφή και μέγεθος είναι αποδοτικότερα και οι μηχανικοί περνούν αμέτρητες ώρες με προσομοιώσεις και δοκιμές προσπαθώντας να βρουν τη βέλτιστη



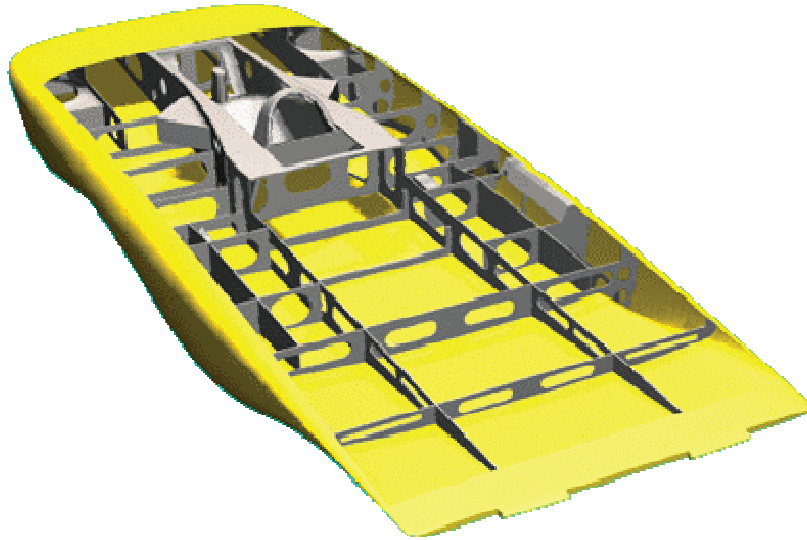
μορφή. Μια καλή μορφή οχήματος μπορεί να εξοικονομήσει εκατοντάδες Watt ενέργειας και είναι αναγκαίος ο σχεδιασμός ενός κορυφαίου ηλιακού αυτοκινήτου.

Η αρχική πρόκληση στην ανάπτυξη ενός αποτελεσματικού ηλιακού πλαισίου αυτοκινήτου είναι να μεγιστοποιηθεί η δύναμη και η ασφάλεια, και παράλληλα να ελαχιστοποιηθεί το βάρος. Κάθε πρόσθετο γραμμάριο απαιτεί περισσότερη ενέργεια για να κινηθεί στο δρόμο. Αυτό σημαίνει ότι ο στόχος είναι να ελαχιστοποιήσουν το βάρος του πλαισίου. Εντούτοις, η ασφάλεια είναι πρωταρχικής σημασίας και τα πλαίσια πρέπει να καλύψουν τις αυστηρές απαιτήσεις αντοχής και ασφάλειας. Γενικά, υπάρχουν τρεις τύποι πλαισίων που χρησιμοποιούνται στα ηλιακά αυτοκίνητα:

1. διαστημικό πλαίσιο
2. ημί - μονοκόμματη κατασκευή ή από δοκούς άνθρακα
3. μονοκόμματη κατασκευή

Ένα διαστημικό πλαίσιο χρησιμοποιεί μια ενωμένη στενά ή συνδεδεμένη δομή σωλήνων για να υποστηρίξει το φορτίο και το σώμα. Το σώμα είναι ένα ελαφρύ, χωρίς βάρος έδρανο, σύνθετο κέλυφος που είναι συνδεδεμένο με τα πλαίσια χωριστά. Το πλαίσιο ημί - μονοκόμματη κατασκευή ή από δοκούς άνθρακα χρησιμοποιεί σύνθετα δοκούς και διαφράγματα για να υποστηρίξει το φορτίο και είναι ενσωματωμένο σε μια αβαρή κοίλη κατασκευή που αντέχει το πολύπλοκο φορτίο. Τα κορυφαία τμήματα του αυτοκινήτου είναι συχνά χωριστά κομμάτια σωμάτων που είναι συνδεδεμένα με την κοίλη κατασκευή. Ένα μονοκόμματο πλαίσιο χρησιμοποιεί τη δομή του σώματος για να υποστηρίξει το φορτίο. Και οι τρεις τύποι πλαισίων μπορούν να παράγουν ισχυρά ελαφριά οχήματα. Πολλά ηλιακά αυτοκίνητα χρησιμοποιούν έναν συνδυασμό των παραπάνω κατηγοριών πλαισίων. Η ανωτέρω

εικόνα είναι ένα παράδειγμα ενός ημι-μονοκόμματος πλαισίου με ένα ενσωματωμένο διαστημικό πλαίσιο που χρησιμοποιείται για να προστατεύσει τον οδηγό.



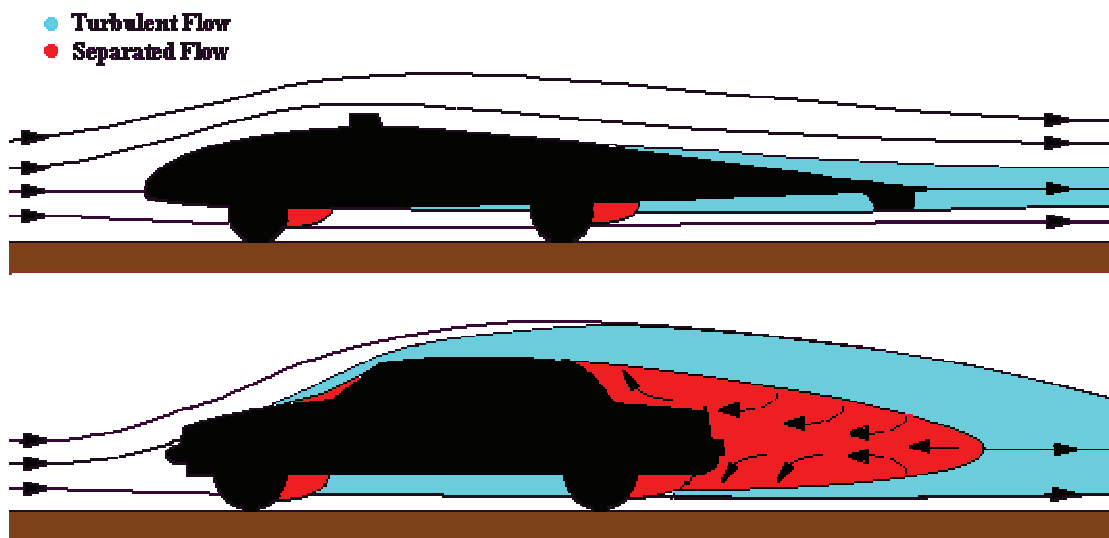
Μπορεί να είναι απαραίτητο να καθοριστούν τα σύνθετα υλικά, δεδομένου ότι η χρήση τους είναι διαδεμένη στα ηλιακά αυτοκίνητα. Ένα σύνθετο υλικό είναι ο συνδυασμός ενός υλικού πλήρωσης που στριμώχνεται μεταξύ των στρωμάτων ενός δομικού υλικού. Η ίνα άνθρακα, Kevlar και το φαιμπεργκλας είναι συνηθισμένα σύνθετα δομικά υλικά. Η κηρήθρα και ο αφρός είναι τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα σύνθετα υλικά πλήρωσης. Αυτά τα υλικά συνδέονται μαζί χρησιμοποιώντας τις εποξειδικές ρητίνες. Στις περιπτώσεις Kevlar και ίνα άνθρακα μπορεί να έχουν εντυπωσιακή αντοχή (ίση του χάλυβα) αλλά παραμένουν πολύ ελαφριά.

4.8.1. Αεροδυναμική

Οι μηχανικοί αεροδυναμικής μελετούν τον τρόπο με τον οποίο ρέει ο αέρας γύρω από τα αντικείμενα. Ένας στόχος των αεροδυναμικών μελετών είναι η μορφή που προσφέρει τη λιγότερη αντίσταση στη ροή του αέρα. Ο αέρας ασκεί αντίσταση σε οποιοδήποτε αντικείμενο κινείται μέσα του. Η αντίσταση του αέρα επηρεάζεται από τη μορφή του αντικειμένου.

Η αντίσταση του αέρα αναφέρεται ως αεροδυναμική έλξη. Εάν ένα κινούμενο αντικείμενο είναι αεροδυναμικό, ο αέρας θα ρεύσει γύρω του ομαλά και θα αναγκάσει λιγότερη έλξη, επομένως χρειάζεται λιγότερη ενέργεια για να κινηθεί το αντικείμενο. Ένα τέτοιο σχέδιο θεωρείται αεροδυναμικά αποδοτικό. Όταν ένα αντικείμενο παράγει φτωχή ροή αέρα, απαιτείται περισσότερη ενέργεια για να το ωθήσει προς τα εμπρός.

Στόχος των ειδικών που σχεδιάζουν τα ηλιακά αυτοκίνητα είναι να επιτύχουν εξαιρετικά χαμηλή αεροδυναμική έλξη έχοντας παράλληλα κατάλληλη επιφάνεια για τα ηλιακά κύτταρα και τον επαρκή χώρο για τον οδηγό και τα άλλα μέρη. Η δοκιμή απέδειξε ότι οι αεροδυναμικές μορφές γίνονται γενικά με τον έναν από δύο τρόπους. Ο πρώτος είναι να κατασκευαστούν μοντέλα κλίμακας που θα δοκιμαστούν στη σήραγγα αέρα για να μιμηθούν τη ροή αέρα στο αυτοκίνητο. Ο δεύτερος είναι ένα ισχυρό πρόγραμμα υπολογιστών που κάνει το ίδιο είδος προσομοίωσης ροής αέρα χρησιμοποιώντας ένα παραγόμενο από υπολογιστή μοντέλο αυτοκινήτου.



Ροή αέρος σε ένα ηλιακό αυτοκίνητο και σε ένα σύγχρονο συμβατικό αυτοκίνητο. Οι κυανές σκιασμένες περιοχές δείχνουν τον ταραχώδη αέρα που έχει επιβραδυνθεί αλλά ρέει ακόμα προς τα κάτω. Οι κόκκινες σκιασμένες περιοχές δείχνουν τον ιδιαίτερα ταραχώδη αέρα που ρέει προς τα πάνω, γνωστή ως χωρισμένη ροή. Το ηλιακό αυτοκίνητο είχε μόνο μικρές περιοχές αυτού πίσω από τις ρόδες.

4.9 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΤΟΥ ΔΙΚΟΥ ΜΑΣ ΗΛΙΑΚΟΥ ΟΧΗΜΑΤΟΣ

Η προετοιμασία, η αναζήτηση και οι πειραματισμοί για την κατασκευή του μικρού ηλιακού αυτοκινήτου – μοντέλου πήρε αρκετό χρόνο. Η επιλογή της αγοράς ενός απλού αυτοκινήτου – μοντέλου, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί σαν βάση του ηλιακού, αποδείχθηκε η πιο σωστή. Καταλληλότερο κρίθηκε ένα Mitsubishi με 6ν μικρό ηλεκτρικό κινητήρα (μοτέρ), τηλεκατευθυνόμενο και κίνηση στους 2 πίσω τροχούς. Θεωρήθηκε σωστή η επιλογή του συγκεκριμένου μοντέλου λόγω της ισχύος του μοτέρ το οποίο μας έδινε χαμηλές στροφές και μεγάλες ροπές.

Τα φ/β στοιχεία θα έπρεπε να είναι όσο το δυνατόν ελαφριά και να αποδίδουν αρκετά ώστε να παρέχουν το ηλεκτρικό ρεύμα που χρειαζόταν για να λειτουργήσει το μοτέρ. Χρησιμοποιήθηκε φ/β πλαίσιο άμορφου πυριτίου (κινεζικής προέλευσης) των 5.5V/0.6W/400mA με ισχύ εξόδου 5.8/7.8/9.8V.

Οι μπαταρίες, οι οποίες φορτίζονται από το φ/β στοιχείο, είναι 4 επαναφορτιζόμενες των 1.5V AA.

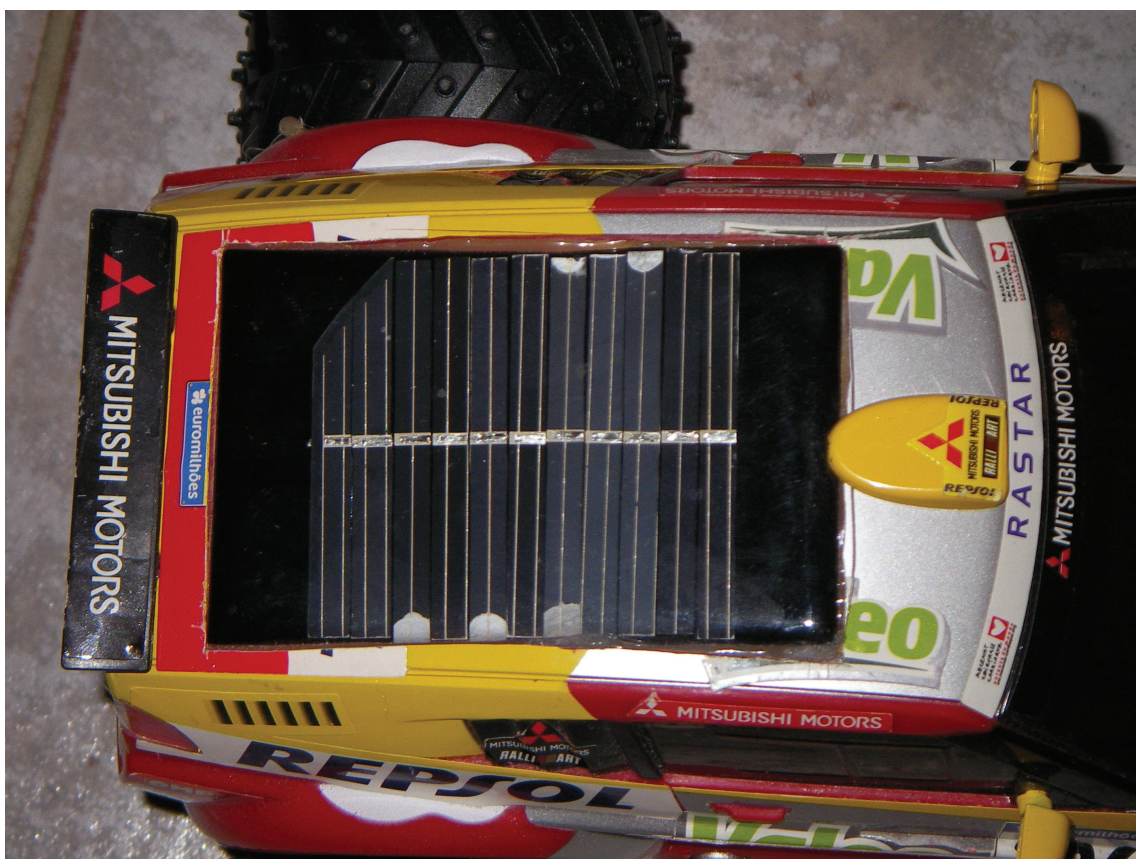
Η σύνθεση είναι πάντοτε κάτι παραπάνω από το άθροισμα των επιμέρους κομματιών και έτσι χρειάστηκε αρκετή δουλειά στη συναρμολόγηση όλων των παραπάνω, μέχρι το τελικό αποτέλεσμα. Για να κολληθούν τα διάφορα μέρη του αυτοκινήτου χρησιμοποιήθηκε κυρίως θερμοσιλικόνη με πιστόλι θερμοκόλλησης, που κολλά γρήγορα και σταθερά, ενώ επίσης ξεκολλά σχετικά εύκολα με λίγο ζέσταμα, για τη διόρθωση τυχόν λαθών.

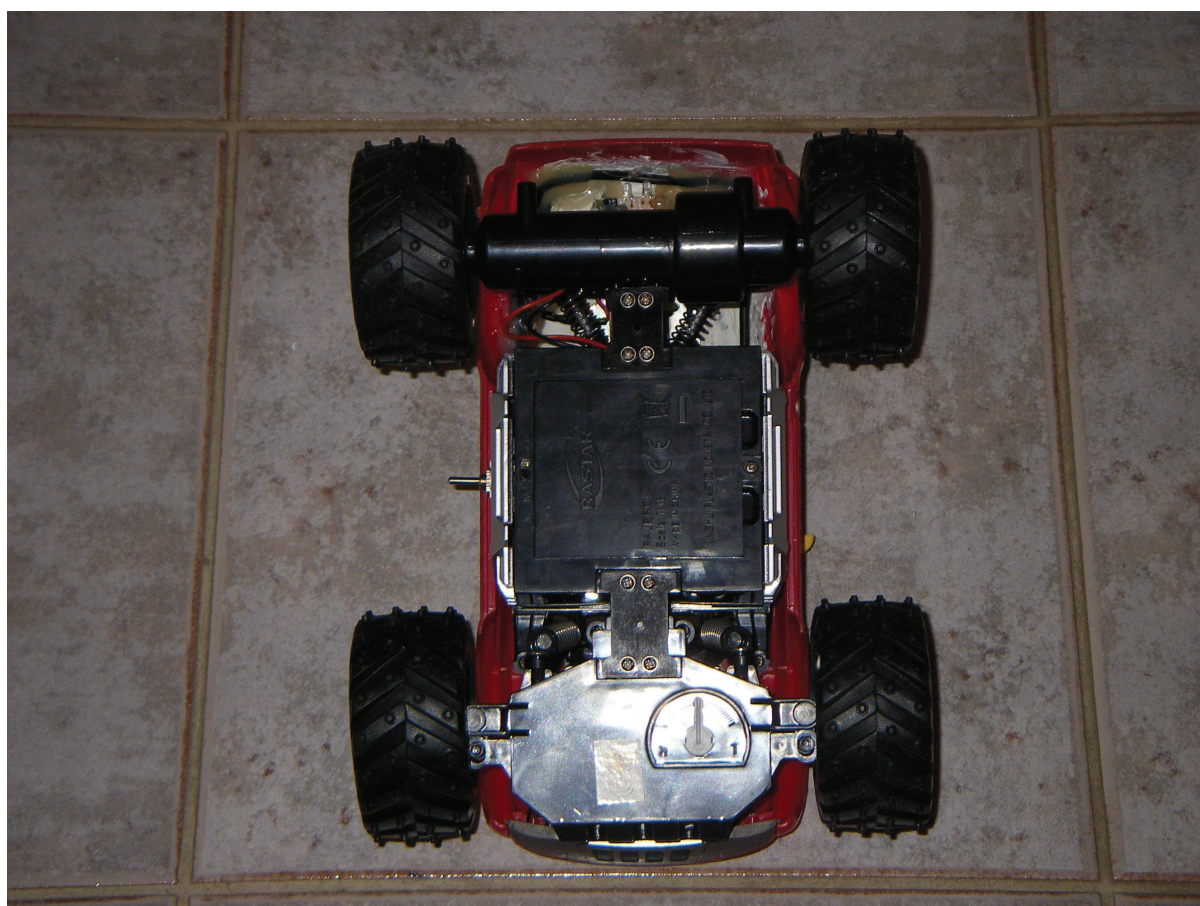
Παρακάτω παρουσιάζονται φωτογραφίες του ηλιακού αυτοκινήτου-μοντέλου, που κατασκευάστηκε για την εκπόνηση της μελέτης αυτής.











ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Εκατοντάδες καθαρές τεχνολογίες έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια για την παραγωγή ενέργειας. Οι μονάδες βιομάζας, οι γεωθερμικές και οι φωτοβολταϊκές μονάδες, είναι τεχνολογίες ήδη σε χρήση, ενώ τα βιοκαύσιμα κερδίζουν έδαφος και διαδίδονται γρήγορα στην Ευρώπη. Το πρόβλημα είναι ότι οι ισχυροί της γης, αν και ευθύνονται περισσότερο για την ατμοσφαιρική ρύπανση, δεν έχουν συμφωνήσει επίσημα ούτε για μια μείωση των αερίων του θερμοκηπίου της τάξης του 5% (Πρωτόκολλο του Κιότο). Αρκεί να πούμε ότι από 6 δις. τόνους CO₂ το 1990, σήμερα εκλύονται 8 δις. τόνοι.

Οι συνέπειες είναι ορατές. Το 2002 η Ευρώπη είχε τις χειρότερες πλημμύρες των τελευταίων 150 χρόνων. Στην Ελλάδα, ο Σεπτέμβριος του 2002 ήταν ο πιο βροχερός από κτήσεως Εθνικού Αστεροσκοπείου (1846) – καταγράφηκαν 218 χιλιοστά νερού.

Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι ο πλανήτης θερμαίνεται. Μέσα στον 20^ο αιώνα έγινε θερμότερος κατά 0,6 βαθμούς (η μεγαλύτερη μεταβολή επήλθε την τελευταία 15ετία). Η άνοιξη και το καλοκαίρι παρατάθηκαν κατά 11 ημέρες στο βόρειο ημισφαίριο. Οι πεταλούδες και τα άλλα έντομα που αγαπούν την ζέστη άρχισαν να μετακινούνται προς τα βόρεια. Τα πουλιά έρχονται επίσης νωρίτερα. Κάτι όχι και τόσο δυσάρεστο. Υπάρχουν όμως και τα άσχημα : τα χιόνια στον πλανήτη έχουν ήδη μειωθεί κατά 10%, οι πάγοι άρχισαν να λειώνουν, η στάθμη της θάλασσας ανέβηκε κατά 10 εκατοστά.

Η αύξηση των συγκεντρώσεων του CO₂ στην ατμόσφαιρα, μέσα στον 21^ο αιώνα, θα ανεβάσει τη θερμοκρασία επιπλέον 1,4 βαθμούς °C (σύμφωνα με το απαισιόδοξο σενάριο κατά 5,8 βαθμούς °C).

Αποτέλεσμα; Ο Βόρειος Πόλος δεν θα έχει πάγο, τουλάχιστον το καλοκαίρι, ενώ πολλές παράκτιες περιοχές θα εξαφανιστούν από τον χάρτη με την άνοδο της στάθμης της θάλασσας.

Τα σενάρια για το μέλλον του πλανήτη είναι εφιαλτικά αλλά, δυστυχώς, όχι φανταστικά. Η επιστήμη καλείται να μελετήσει σοβαρά τις εναλλακτικές μορφές ενέργειας και να διατυπώσει προτάσεις και βιώσιμες λύσεις για το μέλλον όσο ακόμα υπάρχει καιρός.

ΟΡΟΛΟΓΙΑ

Φωτοβολταϊκό φαινόμενο : ονομάζεται η άμεση μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική τάση. Για ευκολία, συνήθως χρησιμοποιούμε τη σύντμηση φ/β για τη λέξη "φωτοβολταϊκό" (photovoltaic - PV).

Φωτοβολταϊκό στοιχείο : ονομάζεται η ηλεκτρονική διάταξη που παράγει ηλεκτρική ενέργεια όταν δέχεται ακτινοβολία. Λέγεται επίσης φ/β κύτταρο ή φ/β κυψέλη (PV cell).

Φωτοβολταϊκό πλαίσιο : ονομάζεται ένα σύνολο φ/β στοιχείων που είναι ηλεκτρονικά συνδεδεμένα. Αποτελεί τη βασική δομική μονάδα της φ/β γεννήτριας (PV module).

Φωτοβολταϊκό πανώ (πάνελ) : λέγεται ένα ή περισσότερα φ/β πλαίσια, που έχουν προκατασκευαστεί και συναρμολογηθεί σε ενιαία κατασκευή έτοιμη για να εγκατασταθεί φ/β εγκατάσταση (PV panel).

Φωτοβολταϊκή συστοιχία : λέγεται μια ομάδα από φ/β πλαίσια ή πάνελα με ηλεκτρική αλληλοσύνδεση, τοποθετημένα συνήθως σε κοινή κατασκευή στήριξης (PV array).

Φωτοβολταϊκή γεννήτρια : λέγεται το τμήμα μιας φ/β εγκατάστασης που περιέχει φ/β στοιχεία και παράγει συνεχές ρεύμα (PV generator).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Κωστόπουλος Β., Πανεπιστήμιο Πατρών Τμήμα Μηχανολόγων και Αεροναυπηγών Μηχανικών, Εργαστήριο Τεχνικής Μηχανικής, Πάτρα 2004

Φίλιππου Γ. Τσαλίδη, "Φωτοβολταϊκή Μετατροπή Της Ηλιακής Ενέργειας Σε Ηλεκτρική – Αυτόνομα Φωτοβολταϊκά Συστήματα", (Διδακτορική Διατριβή) Δ.Π. Θράκης, Ξάνθη 1985

E.M. No 11, *Wind/Solar Energy*, Howard W. Sams & Co. Inc., Indianapolis, 1991

F.I.C Bartels and D.W.Moffet, *Desing Analysis and Specification of Photovoltaic Solar Terrestrial Power Systems*, 10th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Nov.,1998

C.E. Backus, *Solar Cells*, IEEE, Inc., New York, 1999

D.Rapp, *Solar Energy*, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1981

www.photovoltaic.gr

www.Google.com

www.formulasun.org

www.even.doe.gov

www.pvsunenergy.gr

www.schueco.gr

www.energotech.gr

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΗΛΙΑΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ





