

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**Διπλωματική Εργασία**

**Τίτλος Εργασίας:**

«ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ  
ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΚΑΙ  
ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ»

**Φοιτητής:**

ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΓΑΚΗΣ, 1133

**Επιβλέπων:**

Εμμανουήλ Σουλιώτης  
Αναπληρωτής Καθηγητής

**Ημερομηνία υποβολής:** 12 Νοεμβρίου 2015



# Ευχαριστίες

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στη σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας. Με την αφορμή αυτή, θα επιθυμούσα να ευχαριστήσω όλους εκείνους που στάθηκαν δίπλα μου σε ολόκληρη τη φοιτητική μου πορεία.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, που μου παρείχε την απαιτούμενη οικονομική και ψυχολογική υποστήριξη για να σπουδάσω, που πάντα με στήριζε και συνεχίζει να με στηρίζει στις επιλογές μου, και με συμβουλεύει κατά τέτοιο τρόπο, ώστε οι αποφάσεις που παίρνω να είναι προς όφελός μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω το διδακτικό προσωπικό της σχολής των Μηχανολόγων Μηχανικών, για τις γνώσεις που με ζήλο και υπομονή, μετέδωσαν σε μένα και στους συμφοιτητές μου. Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω όλους τους φίλους και συμφοιτητές μου, μιας και χωρίς τη συνεργασία και την ανταλλαγή ιδεών και απόψεων μαζί τους, θα ήταν πολύ δυσκολότερη η περάτωση των σπουδών μου.

Αναφορικά με τη διπλωματική εργασία θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον αναπληρωτή καθηγητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών κ. Εμμανουήλ Σουλιώτη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση του θέματος, την επιστημονική του καθοδήγηση, την ευχάριστη συνεργασία και την πολύπλευρη συμπαράστασή του σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής.



# Περίληψη

Ο σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η εγκατάσταση και η πειραματική μελέτη ενός μετεωρολογικού σταθμού και ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό. Η διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια υλοποίησης του εργαστηριακού μαθήματος: «Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας». Συγκεκριμένα, η λειτουργία τόσο του μετεωρολογικού σταθμού όσο και του φωτοβολταϊκού συστήματος, μέσω της υλοποίησης της διπλωματικής εργασίας, στοχεύει κυρίως στην εκπαίδευση των φοιτητών των Τμημάτων Μηχανολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας.

Ο μετεωρολογικός σταθμός, στον οποίον εγκαταστάθηκαν όργανα για τη μέτρηση και την καταγραφή των πιο σημαντικών μετεωρολογικών παραμέτρων, εγκαταστάθηκε πλησίον του φωτοβολταϊκού συστήματος με στόχο, μεταξύ άλλων, την άμεση συσχέτιση της παρεχόμενης ηλεκτρικής ενέργειας με τα μετεωρολογικά δεδομένα. Τα όργανα του μετεωρολογικού σταθμού συνδέθηκαν σε μια ηλεκτρονική συσκευή καταγραφής και συλλογής πειραματικών δεδομένων (Data Logger) χάρις στην οποία βρισκόμαστε στη θέση να λαμβάνουμε πειραματικά δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και να τα καταγράφουμε ανά τακτά επιθυμητά χρονικά διαστήματα. Η ηλεκτρονική συσκευή συνδέθηκε με ηλεκτρονικό υπολογιστή με σκοπό τη λήψη των δεδομένων και την περαιτέρω επεξεργασία τους.

Το φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από 4 φωτοβολταϊκά πλαίσια συνολικής ισχύος 860 Watt, μια συστοιχία 4 συσσωρευτών, ενός ελεγκτή φόρτισης (controller), ενός ανορθωτή (inverter) και φορτίο κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον των βασικών στοιχείων του φωτοβολταϊκού συστήματος, εγκαταστάθηκαν διαιρέτες τάσης και ηλεκτρικές αντιστάσεις (shunts), με στόχο τη καταγραφή της ηλεκτρικής ισχύος από το σημείο παραγωγής της (φωτοβολταϊκά πλαίσια) έως το σημείο κατανάλωσης (ηλεκτρικό φορτίο). Με τον τρόπο αυτό είναι εφικτός ο υπολογισμός της ηλεκτρικής απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων, της ηλεκτρικής απόδοσης των

επιμέρους ηλεκτρικών στοιχείων της εγκατάστασης αλλά και της απώλειας ισχύος κατά τη μεταφορά της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Ως αποτέλεσμα αυτής της υλοποίησης, είναι δυνατός ο υπολογισμός του συνολικού βαθμού απόδοσης μια αυτόνομης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης σε πραγματικό χρόνο και του συσχετισμού της με τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια καταναλώθηκε μέσω ηλεκτρικών λαμπτήρων led για το φωτισμό του χώρου της εγκατάστασης αλλά και της επιγραφής των Τμημάτων Μηχανολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας.

# Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	3
Περίληψη.....	5
Περιεχόμενα.....	7
Εισαγωγή.....	11
Κεφάλαιο 1:«Συστήματα Ηλιακής Ενέργειας – Φωτοβολταϊκά Συστήματα» .....	13
1.1 Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας .....	13
1.2 Ηλιακή Ακτινοβολία.....	14
1.2.1 Ηλιακή Γεωμετρία .....	15
1.3 Συστήματα Ηλιακής Ενέργειας .....	17
1.3.1 Παθητικά Ηλιακά Συστήματα .....	18
1.3.2 Θερμικά Ηλιακά Συστήματα .....	20
1.3.2.1 Συστήματα φυσικής κυκλοφορίας .....	20
1.3.2.2 Συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας .....	21
1.4 Το Φωτοβολταϊκό φαινόμενο.....	22
1.4.2 Χαρακτηριστικά Ημιαγωγών.....	23
1.4.3 Δημιουργία ηλεκτρικά φορτισμένων ημιαγωγών.....	23
1.4.4 Δημιουργία της επαφής (του ηλεκτρικού πεδίου) .....	24
1.4.5 Η επίδραση της Ηλιακής ακτινοβολίας .....	24
1.5 Ισοδύναμο ηλεκτρικά κυκλώματα .....	27
1.5.1 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα: Το ιδανικό μοντέλο.....	27
1.5.2 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα: Το απλό μοντέλο.....	28
1.5.3 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα: Το μοντέλο μιας διόδου .....	29
1.5.4 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα: Το μοντέλο δυο διόδων .....	29
1.5.5 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα: Το αποτελεσματικό μοντέλο.....	30
1.6 Χαρακτηριστική Καμπύλη I-V.....	32
1.6.1 Γενικά χαρακτηριστικά καμπύλης I-V.....	32
1.6.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την καμπύλη I-V.....	33

1.6.3	Συντελεστής πλήρωσης.....	35
1.7	Τα Είδη των φωτοβολταϊκών κυττάρων - πλαισίων .....	35
1.7.1	Φωτοβολταϊκά κύτταρα πυριτίου .....	35
1.7.1.α	Φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού πυριτίου .....	36
1.7.1.β	Φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου .....	36
1.7.1.γ	Φωτοβολταϊκά άμορφου πυριτίου .....	38
1.7.2	Άλλα είδη φωτοβολταϊκών.....	39
1.8	Βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκών .....	41
1.8.1	Ορισμός βαθμού απόδοσης.....	41
1.8.2	Μέγιστη θεωρητική απόδοση φωτοβολταϊκών πυριτίου .....	41
1.8.3	Παράγοντες που επηρεάζουν το βαθμό απόδοσης.....	42
1.9	Συστήματα ως προς τον τρόπο εγκατάστασης .....	44
1.9.1	Διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα .....	45
1.9.2	Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα .....	46
Κεφάλαιο 2:«Μετεωρολογικοί Σταθμοί και Όργανα» .....		49
2.1	Μετεωρολογικός σταθμός.....	49
2.1.1	Η μέτρηση της Ηλιακής ακτινοβολίας .....	51
2.2.1.1	Πυρανόμετρα .....	55
2.2.2	Η μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου .....	59
2.2.3	Η μέτρηση της διεύθυνσης του ανέμου.....	63
2.2.4	Η μέτρηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος.....	64
2.2.4.1	Θερμόμετρα αντίστασης (Thermistors).....	66
2.2.5	Η μέτρηση της υγρασίας .....	67
2.2.5.1	Υγρόμετρο .....	68
2.2.6	Βροχόμετρο.....	71
2.2.7	Βαρόμετρο .....	72
Κεφάλαιο 3:«Περιγραφή της Εγκατάστασης και του Εξοπλισμού».....		77
3.1	Γενικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης.....	77
3.2	Περιγραφή της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.....	79
3.2.1	Φωτοβολταϊκά πλαίσια (PV).....	80
3.2.2	Ελεγκτής φόρτισης (Controller).....	82
3.2.3	Ηλεκτρικοί Συσσωρευτές - Μπαταρίες (Batteries).....	84



3.2.4	Ανορθωτής τάσης (Inverter).....	87
3.2.5	Διαιρέτης τάσης (Voltage Divider).....	89
3.2.6	Shunt ρεύματος.....	91
3.2.7	Διακόπτης (Switch) .....	93
3.2.8	Ηλεκτρική Ασφάλεια (fuse).....	94
3.2.9	Φορτίο κατανάλωσης (Electrical Load) .....	95
3.2.10	Διαστασιολόγηση συστήματος.....	96
3.2.11	Αποθήκευση και προστασία εξοπλισμού.....	97
3.3	Μετεωρολογικός σταθμός.....	98
3.4	Περιγραφή του εξοπλισμού του μετεωρολογικού σταθμού .....	100
3.4.1	Πυρανόμετρα .....	101
3.4.2	Ανεμόμετρο.....	102
3.4.3	Ανεμοδείκτης.....	103
3.4.4	Υγρασιόμετρο.....	104
3.4.5	Θερμόμετρο .....	105
Κεφάλαιο 4:«Ηλεκτρονική Καταγραφή και Αποθήκευση Δεδομένων» .....		109
4.1	Γενικά για τα συστήματα καταγραφής δεδομένων.....	109
4.1.1	Εφαρμογές των Data Loggers.....	110
4.2	Περιγραφή του Data Logger και των περιφερειακών .....	113
4.2.1	Βασική μονάδα Data Logger (CR1000) .....	115
4.2.2	Μονάδα πολυπλεξίας (Multiplexer AM 416/32B) .....	116
4.2.3	Περιφερειακά σύνδεσης και επικοινωνίας με Η/Υ .....	117
4.3	Το λογισμικό πρόγραμμα Loggernet.....	118
4.3.1	Κώδικας του λογισμικού (Loggernet).....	120
4.4	Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών .....	123
Συμπεράσματα .....		127
Βιβλιογραφία.....		129



# Εισαγωγή

Η διπλωματική εργασία στοχεύει στην εγκατάσταση και την πειραματική μελέτη ενός μετεωρολογικού σταθμού και ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ο βασικός σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι κυρίως η εκπαίδευση των φοιτητών των Τμημάτων Μηχανολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας. Η εκπαίδευση των φοιτητών περιλαμβάνει την κατανόηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου, τη γνώση της αρχής λειτουργίας των κυριότερων οργάνων που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση μετεωρολογικών δεδομένων, τη γνώση των στοιχείων μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, τη μέτρηση και την καταγραφή των πειραματικών δεδομένων και τον υπολογισμό της συνολικής απόδοσης μιας αυτόνομης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

Με βάση τους παραπάνω στόχους η διπλωματική εργασία δομείται ως εξής:

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται μια εισαγωγή στην ηλιακή ενέργεια, την μετατροπή της άλλες μορφές, δίνοντας έμφαση στον ηλεκτρισμό. Σημαντικό μέρος του κεφαλαίου δίνεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, τα φωτοβολταϊκά συστήματα και τους παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοσή τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται περιληπτικά οι μετεωρολογικοί σταθμοί, τα είδη τους και τα είδη των οργάνων που χρησιμοποιούνται.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται εκτενώς η παρουσίαση της εγκατάστασης, τόσο του μετεωρολογικού σταθμού, όσο και της αυτόνομης φωτοβολταϊκής μονάδας. Παρουσιάζονται λεπτομερώς τα όργανα και οι διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το ηλεκτρονικό σύστημα καταγραφής και συλλογής πειραματικών δεδομένων, τόσο του μετεωρολογικού σταθμού όσο και της φωτοβολταϊκής μονάδας. Παρουσιάζονται ένα μικρό μέρος των πειραματικών αποτελεσμάτων που λήφθηκαν.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για μελλοντική χρήση της εγκατάστασης και του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε.



# Κεφάλαιο 1: «Συστήματα Ηλιακής Ενέργειας – Φωτοβολταϊκά Συστήματα»

## 1.1 Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) είναι πηγές τα αποθέματα των οποίων ανανεώνονται φυσικά, και θεωρούνται ότι είναι πρακτικά ανεξάντλητες. Στις ανανεώσιμες ενεργειακές πηγές θα βασιστεί η ενεργειακή βιωσιμότητα του πλανήτη για τον 21<sup>ο</sup> αιώνα και περιλαμβάνονται η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια, η ενέργεια του νερού, η βιομάζα και η γεωθερμία.

Μέχρι τις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα η ανθρωπότητα χρησιμοποιούσε κυρίως την ενέργεια του νερού, του ανέμου και την βιομάζα (ξύλο). Όμως με την ανακάλυψη των μεγάλων κοιτασμάτων κάρβουνου και πετρελαίου, ο κόσμος στράφηκε αποφασιστικά στη χρήση μη ανανεώσιμων πηγών, κυρίως άνθρακα και υδρογονανθράκων (κάρβουνο, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) και μετά τα μέσα του 20<sup>ου</sup> αιώνα άρχισε να χρησιμοποιείται και η πυρηνική ενέργεια.

Δύο ήταν οι κρίσιμοι παράγοντες στην αναβίωση του ενδιαφέροντος για τις ΑΠΕ, ξεκινώντας από τα μέσα της δεκαετίας του 1970. Ο πρώτος ήταν το ζήτημα της ενεργειακής ασφάλειας, οι δύο πετρελαϊκές κρίσεις, του 1973 και του 1979-80, οδήγησαν τις βιομηχανικά ανεπτυγμένες χώρες να αναθεωρήσουν την απόλυτη εξάρτησή τους από τα ορυκτά καύσιμα, και ιδιαίτερα το πετρέλαιο.

Το δεύτερο στοιχείο που οδήγησε στην ολική επαναφορά των ΑΠΕ ήταν, το φαινόμενο του θερμοκηπίου, το οποίο, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, έχει αναχθεί σε προτεραιότητα της διεθνούς κοινότητας. Ο ενεργειακός τομέας είναι ο κύριος υπεύθυνος για τη ρύπανση του περιβάλλοντος, καθώς σχεδόν το 95% της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που συμβάλει στο φαινόμενο θερμοκηπίου και που οδηγεί στην υπερθέρμανση του πλανήτη οφείλεται στην παραγωγή, το μετασχηματισμό και τη χρήση των συμβατικών καυσίμων.

Τα βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης ΑΠΕ είναι τα εξής:

- Συμβολή στη μείωση της εξάρτησης από συμβατικούς, μη ανανεώσιμους ενεργειακούς πόρους.
- Συμβολή στην άμβλυνση του φαινομένου του θερμοκηπίου, καθώς συνεισφέρουν στον περιορισμό της εκπομπής των αερίων του θερμοκηπίου (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFCs, PFCs, SF<sub>6</sub>) στην ατμόσφαιρα.
- Συνεισφορά στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο.
- Αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος, εξαιτίας της γεωγραφικής τους διασποράς, με αποτέλεσμα τη δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο και τη συνεπακόλουθη ανακούφιση των συστημάτων υποδομής και τον περιορισμό των απωλειών από τη μεταφορά ενέργειας.
- Δυνατότητα ορθολογικής αξιοποίησης των ενεργειακών πόρων, με διαφορετικές λύσεις για διαφορετικές ενεργειακές ανάγκες (για παράδειγμα χρήση ηλιακής ενέργειας για θερμότητα χαμηλών θερμοκρασιών, χρήση αιολικής ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή κ.ά.).
- Χαμηλό λειτουργικό κόστος που δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων.
- Συνεισφορά στην αναζωογόνηση οικονομικά και κοινωνικά υποβαθμισμένων περιοχών με τη δημιουργία θέσεων εργασίας και την προσέλκυση ανάλογων επενδύσεων (π.χ. καλλιέργειες θερμοκηπίου με τη χρήση γεωθερμικής ενέργειας).

## **1.2 Ηλιακή Ακτινοβολία**

Ηλιακή ενέργεια χαρακτηρίζεται το σύνολο των διαφόρων μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον Ήλιο. Τέτοιες είναι το φως ή φωτεινή ενέργεια, η θερμότητα ή θερμική ενέργεια καθώς και διάφορες ακτινοβολίες ή ενέργεια ακτινοβολίας.

Η συνολική ενέργεια στη μονάδα του χρόνου (ισχύς) που προέρχεται από μια πηγή ακτινοβολίας και προσπίπτει σε μια μοναδιαία επιφάνεια, αποτελεί την πυκνότητα

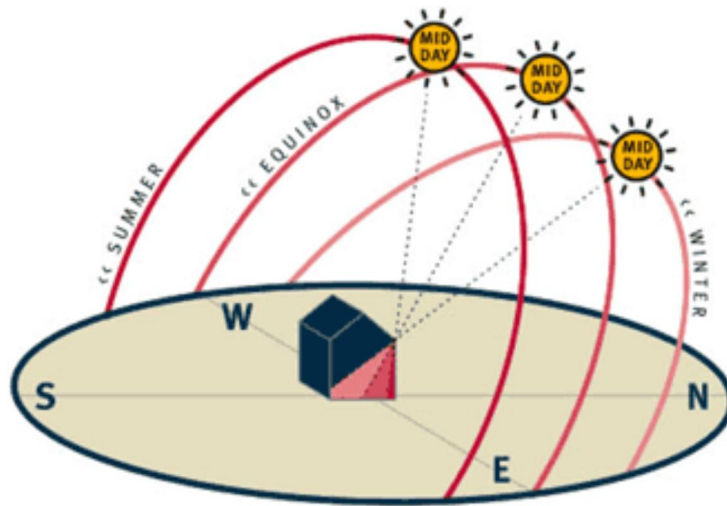
ισχύος ή ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και μετράται σε ( $W/m^2$ ). Συμβολίζεται γενικά με το γράμμα  $G$ . Η τιμή της σε ορισμένη ώρα και σημείο στην επιφάνεια της γης εξαρτάται από την θέση του ήλιου στον ουρανό, το υψόμετρο του τόπου αλλά και τις μετεωρολογικές συνθήκες. Η θερμοκρασία στην επιφάνεια του ήλιου υπολογίζεται ότι είναι περίπου 6,000 K. Η ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στο όριο της ατμόσφαιρας της γης είναι περί τα  $1,370 W/m^2$  και είναι μειωμένη στην επιφάνεια της γης ( $1000 W/m^2$ ) λόγω απορρόφησης από την ατμόσφαιρα.

Η θερμοκρασία στην ατμόσφαιρα της Γης είναι περίπου 230 K κατά μέσο όρο και στην επιφάνεια της Γης είναι περίπου 260-300 K, η οποία παραμένει σε κατάσταση ισορροπίας εξαιτίας της ακτινοβολίας που αντανακλά πίσω στο διάστημα και αυτής που εκπέμπει. Η συνολικά απορροφούμενη ηλιακή ενέργεια από την ατμόσφαιρα της Γης, τους ωκεανούς και την επιφάνειά της, στη διάρκεια ενός έτους, είναι 3.85 εκατ. exajoules (EJ) ( $3.85 \times 10^{18}$  joules).

### **1.2.1 Ηλιακή Γεωμετρία**

Η ισχύς της ηλιακής ακτινοβολίας παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση συναρτήσει του χρόνου, της εποχής, των κλιματολογικών συνθηκών, της υγρασίας, κλπ. Επιπλέον, επηρεάζεται σημαντικά και από άλλους παράγοντες όπως από την ρύπανση του περιβάλλοντος και τις ηλιακές κηλίδες.

Ο πιο σημαντικός παράγοντας που διαμορφώνει την ισχύ της ηλιακής ακτινοβολίας είναι η τοποθεσία που προσπίπτει η ακτινοβολία. Κατά την διάρκεια ενός έτους, λόγω της περιφοράς της γης γύρω από τον ήλιο, η τοποθεσία λαμβάνει διάφορες θέσεις και έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της απόκλισης  $\delta$ , δηλαδή της γωνιακής θέσης του ήλιου κατά την ηλιακή μεσημβρία σε σχέση με το ισημερινό επίπεδο και λαμβάνεται θετική προς βορρά (Σχ. 1.1). Οι ακραίες τιμές για το Βόρειο ημισφαίριο είναι  $+23,45^\circ$  στις 21 Ιουνίου και  $-23,45^\circ$  στις 21 Δεκεμβρίου.



**Σχήμα 1.1** Πορεία Ήλιου

Η κλίση ενός θερμικού συστήματος ή μίας φωτοβολταϊκής διάταξης πρέπει να είναι εντός αυτών των ορίων και ο καλύτερος προσανατολισμός για τα συστήματα αυτά είναι ο νότιος για το βόρειο ημισφαίριο, και ο βόρειος για το νότιο ημισφαίριο. Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μια επιφάνεια, συνίσταται στην άμεση, στην διάχυτη και στην ανακλώμενη ακτινοβολία (Σχ. 1.2). Με κατάλληλους δείκτες σε περίπτωση που αναφερόμαστε στη άμεση ( $b$ , beam) , στη διάχυτη ( $d$ , diffuse) ή στην ανακλώμενη( $r$ , reflected) ακτινοβολία συνοδεύουμε το γράμμα  $G$ .

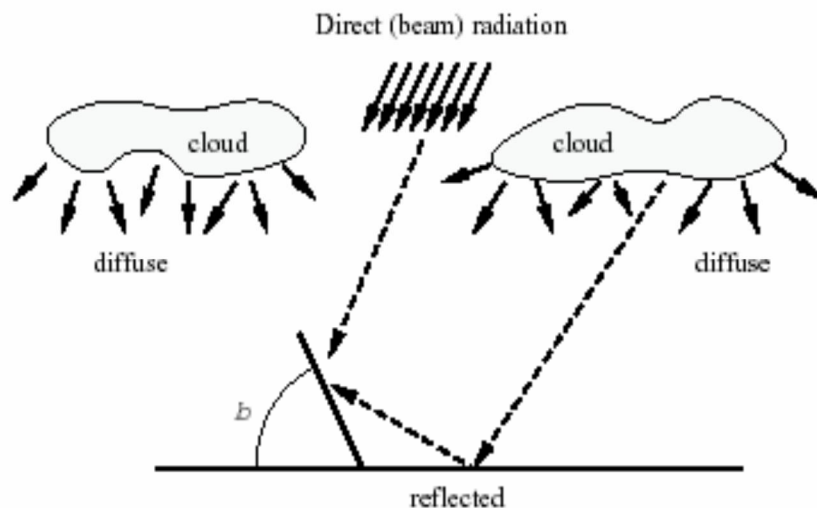
**Άμεση ακτινοβολία** ( $G_b$ ), ορίζουμε την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης με ελάχιστη ή χωρίς σκέδαση στην ατμόσφαιρα. Η άμεση ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει σε μία επιφάνεια εξαρτάται από την απορρόφηση και διάχυση της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στην ατμόσφαιρα, το ύψος του ήλιου, το γεωγραφικό πλάτος του τόπου, το υψόμετρο του τόπου, την κλίση της επιφάνειας, την απόσταση ήλιου – Γης, την απόκλιση του ήλιου.

**Διάχυτη ακτινοβολία** ( $G_d$ ) ορίζουμε την ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στην επιφάνεια της Γης αφού έχει αλλάξει η διεύθυνσή της από ανάκλαση ή σκέδαση στην ατμόσφαιρα, και από ανάκλαση στην επιφάνεια της Γης. Η διάχυτη ηλιακή ακτινοβολία εξαρτάται από το ύψος του ήλιου, το υψόμετρο του τόπου, τη λευκαύγεια του εδάφους, το ποσό και το είδος των νεφών, το ποσό και το είδος των σωματιδίων και των αερίων της ατμόσφαιρας.



**Ανακλώμενη ακτινοβολία** ( $G_r$ ) φτάνει στο επίπεδο αναφοράς μετά από ανάκλαση σε φυσικές ή τεχνικές επιφάνειες, που υπάρχουν στον περιβάλλοντα χώρο. Έτσι η γνώση της απαιτεί κάθε φορά καλή γνώση της τοπογραφίας του χώρου και του δείκτη ανακλαστικότητας των επιφανειών, που ανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία.

**Ολική ακτινοβολία** ( $G$ ) ορίζουμε το άθροισμα της άμεσης και διάχυτης ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης.



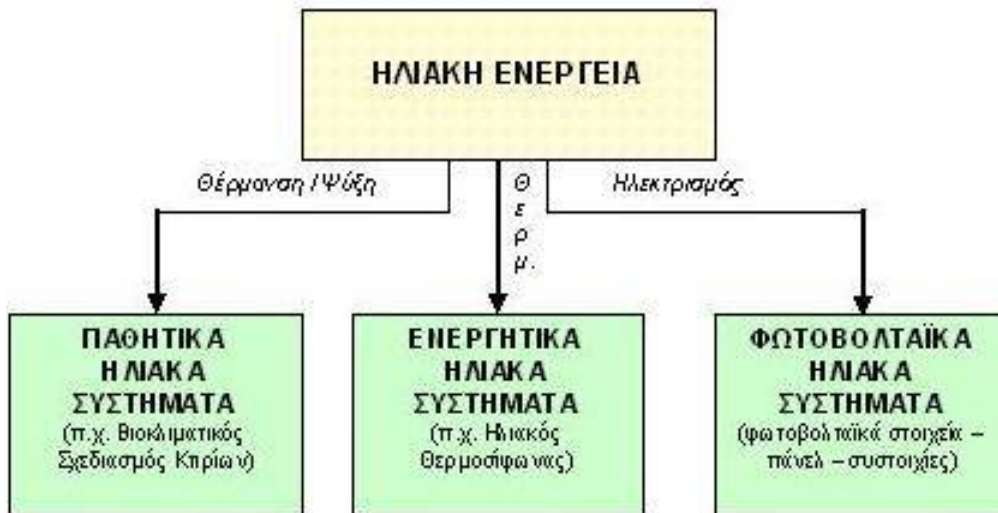
**Σχήμα 1.2** Άμεση, διάχυτη και ανακλώμενη ηλιακή ακτινοβολία

Η ηλιακή ενέργεια στο σύνολό της είναι πρακτικά ανεξάντλητη, αφού προέρχεται από τον ήλιο, και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευσή της.

### 1.3 Συστήματα Ηλιακής Ενέργειας

Όσον αφορά την εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, θα μπορούσαμε να πούμε ότι χωρίζεται σε τρεις κατηγορίες εφαρμογών τα παθητικά ηλιακά συστήματα, τα θερμικά ηλιακά συστήματα και τα φωτοβολταϊκά συστήματα (Σχ. 1.3).

Τα παθητικά και τα θερμικά ηλιακά συστήματα εκμεταλλεύονται τη θερμότητα που εκπέμπεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας, ενώ τα φωτοβολταϊκά συστήματα στηρίζονται στη μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου.



**Σχήμα 1.3** Μετατροπή ηλιακής ενέργειας σε διάφορες μορφές.

### 1.3.1 Παθητικά Ηλιακά Συστήματα

Παθητικά ηλιακά συστήματα θέρμανσης ονομάζουμε τα δομικά στοιχεία του κτιρίου, που, αξιοποιώντας τις αρχές της φυσικής (τους νόμους μεταφοράς θερμότητας) συλλέγουν την ηλιακή ενέργεια, την αποθηκεύουν υπό μορφή θερμότητας και τη διανέμουν στο χώρο. Αναγκαία προϋπόθεση για τη σωστή λειτουργία των παθητικών ηλιακών συστημάτων ώστε να αξιοποιήσουν όσο το δυνατό περισσότερο την ηλιακή ενέργεια, είναι ένας κατάλληλος σχεδιασμός του κτιρίου. Αυτό σημαίνει ότι το κέλυφος πρέπει να επιτρέπει:

- Τη μέγιστη ηλιακή συλλογή
- Τη μέγιστη θερμοχωρητικότητα
- Τις ελάχιστες θερμικές απώλειες

Η λειτουργία των παθητικών συστημάτων βασίζεται σε 3 μηχανισμούς:

- Στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, κατά το οποίο γίνεται συλλογή της ηλιακής ακτινοβολίας και αυτή διατηρείται στο εσωτερικό του κτηρίου έτσι ώστε να θερμαίνει τον χώρο.
- Στη θερμική υστέρηση των υλικών (θερμοχωρητικότητα υλικών).
- Στις αρχές που διέπουν την μετάδοση θερμότητας.

Τα είδη των παθητικών συστημάτων είναι τα εξής:

- Συστήματα άμεσου κέρδους, το πιο απλό σύστημα που αξιοποιεί την ηλιακή ακτινοβολία για την θέρμανση του κτιρίου και το άμεσο κέρδος μέσω των νότια προσανατολισμένων ανοιγμάτων.
- Συστήματα έμμεσου κέρδους-Ηλιακοί τοίχοι, ανήκουν τα συστήματα που αξιοποιούν έμμεσα τα ηλιακά οφέλη για την θέρμανση κτιρίου. Αυτά τα συστήματα απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στο κέλυφος και ύστερα επιτρέπουν στην θερμότητα να διεισδύσει στους χώρους διαβίωσης.
- Συστήματα απομονωμένου κέρδους-Θερμοσιφωνικό σύστημα, βρίσκονται εκτός του κτιριακού περιβλήματος. Στα συστήματα απομονωμένου κέρδους η επιφάνεια συλλογής της ηλιακής ακτινοβολίας δεν βρίσκεται σε επαφή με τον χώρο που επιθυμούμε να θερμάνουμε. Μεταξύ αυτής της επιφάνειας και το χώρο διαβίωσης υπάρχει ένας μηχανισμός μετάδοσης της θερμότητας όπως για παράδειγμα ένας ανεμιστήρας.

Στα συστήματα έμμεσου κέρδους περιλαμβάνονται

- Οι τοίχοι θερμικής αποθήκευσης, που είναι ένας συνδυασμός τοίχου νότιου προσανατολισμού και μια εξωτερική διάφανη επιφάνεια στην εξωτερική πλευρά του τοίχου σε απόσταση συνήθως 10cm. Η εξωτερική επιφάνεια του τοίχου πρέπει να είναι σκουρόχρωμη ώστε να μεγιστοποιεί την απορρόφηση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο τοίχος κατασκευάζεται από υλικά μεγάλης θερμοχωρητικότητας για να διασφαλίζει χρονική υστέρηση τουλάχιστον 6 h ώστε η εσωτερική του επιφάνεια να έχει τη μέγιστη θερμοκρασία στην αρχή της νύχτας.
- Οι απλοί τοίχοι μάζας είτε συμπαγείς, είτε αποτελούμενοι από δοχεία που περιέχουν νερό ή υλικά αλλαγής φάσης
- Οι τοίχοι μάζας Trombe-Michel (θερμοσιφωνικής ροής, με θυρίδες στο πάνω και στο κάτω μέρος τους)

Η χρήση των παθητικών ηλιακών συστημάτων αξιοποιείται κυρίως για ενεργειακά οφέλη κατά τους χειμερινούς μήνες, ενώ για το καλοκαίρι χρησιμοποιούνται απλές τεχνικές δροσισμού όπως ηλιοπροστασία και φυσικός αερισμός.

### **1.3.2 Θερμικά Ηλιακά Συστήματα**

Τα θερμικά ηλιακά συστήματα είναι ενεργητικές ηλιακές εγκαταστάσεις όπου η μεταφορά της συλλεγόμενης ηλιακής θερμότητας πραγματοποιείται με κυκλοφορία θερμικού ρευστού. Η «καρδιά» ενός θερμικού ηλιακού συστήματος είναι ο θερμικός ηλιακός συλλέκτης. Η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει στη μαύρη, μεταλλική συνήθως, επίπεδη επιφάνεια του ηλιακού συλλέκτη, η οποία απορροφά την ακτινοβολία και θερμαίνεται. Πάνω από την απορροφητική επιφάνεια βρίσκεται ένα διαφανές κάλυμμα, συνήθως από γυαλί ή πλαστικό, που αφήνει τις ακτίνες του ήλιου να περάσουν, αλλά εμποδίζει τη θερμότητα να ξεφύγει (φαινόμενο θερμοκηπίου). Αν κυκλοφορήσει ρευστό σε επαφή με την απορροφητική επιφάνεια, αποσπάται ενέργεια και αυτή μεταφέρεται με την μορφή θερμού ρευστού, σε μια θερμομονωμένη δεξαμενή αποθήκευσης, από όπου θα την πάρουμε όταν τη χρειαστούμε. Τα θερμικά ηλιακά συστήματα χωρίζονται σε διάφορες κατηγορίες, ανάλογα με την τεχνολογία που χρησιμοποιούν, το μέγεθός τους, την εφαρμογή για την οποία προορίζονται, το κλίμα της περιοχής κ.α. Τα συστήματα αυτά διαθέτουν μεγάλη ποικιλία στις διατάξεις τους λόγω των διαφορετικών τρόπων που αυτά τα συστήματα προστατεύονται από τον παγετό. Τα θερμικά ηλιακά συστήματα διακρίνονται ανάλογα με την θερμοκρασία αποδοτικής λειτουργίας σε χαμηλής θερμοκρασίας (μέχρι 100°C), σε ενδιάμεσης θερμοκρασίας (60°C-180°C), σε μέσης θερμοκρασίας (100°C-400°C) και σε υψηλής θερμοκρασίας (πάνω από 400°C). Στην κατηγορία των θερμικών ηλιακών συστημάτων χαμηλής θερμοκρασίας, το ρευστό απολαβής της θερμότητας είναι το νερό, ο αέρας ή άλλο υγρό. Τα συστήματα μέσω των θερμοκρασιών περιλαμβάνουν κάποιο μέσο συγκέντρωσης της ακτινοβολίας (φακούς ή κάτοπτρα). Επίσης, τα θερμικά ηλιακά συστήματα διακρίνονται σε δυο κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο που γίνεται η ροή στο σύστημα, στα συστήματα φυσικής κυκλοφορίας και στα συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας.

#### **1.3.2.1 Συστήματα φυσικής κυκλοφορίας**

Στα συστήματα φυσικής κυκλοφορίας ο όρος «φυσική κυκλοφορία» χρησιμοποιείται γιατί το σύστημα αυτό δεν χρειάζεται κανένα μηχανισμό ώστε να

παρέχει την επιπλέον ενέργεια όταν αποθηκεύει και μεταφέρει ηλιακή ενέργεια στο δοχείο αποθήκευσης. Υπάρχουν δύο κατηγορίες τέτοιων συστημάτων:

- Η πρώτη κατηγορία είναι οι συμπαγείς θερμαντήρες νερού ή ολοκληρωμένα συστήματα συλλέκτη-αποθήκευσης τα οποία αποτελούνται από μία ή περισσότερες δεξαμενές αποθήκευσης και τοποθετούνται σε ένα θερμομονωμένο περίβλημα με τη διαφανή πλευρά να είναι προσανατολισμένη προς τον ήλιο. Τα συστήματα φυσικής κυκλοφορίας είναι καλύτερα και προτιμότερα από τα συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας διότι έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, συντηρούνται εύκολα και οικονομικά και θεωρούνται πιο προσιτά.
- Η δεύτερη κατηγορία είναι τα θερμοσιφωνικά συστήματα, τα οποία είναι κυρίως συστήματα με ρευστό απολαβής της θερμότητας το νερό. Τα θερμοσιφωνικά συστήματα στηρίζονται στη φυσική κυκλοφορία του νερού στους συλλέκτες και τη δεξαμενή, η οποία είναι τοποθετημένη πάνω από το συλλέκτη. Το νερό θερμαίνεται στον ηλιακό συλλέκτη, γίνεται ελαφρύτερο και ανέρχεται προς τη δεξαμενή αποθήκευσης. Το ψυχρότερο νερό της δεξαμενής, ρέει με τη βοήθεια σωληνώσεων στο κατώτερο σημείο του συλλέκτη προκαλώντας κυκλοφορία σε όλο το σύστημα.

### **1.3.2.2 Συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας**

Τα συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας (ή κεντρικά θερμικά ηλιακά συστήματα) λειτουργούν χρησιμοποιώντας βαλβίδες, ηλεκτρικές αντλίες και συστήματα ελέγχου ώστε να μπορούν να κυκλοφορούν το νερό και τα άλλα ρευστά μεταφοράς θερμότητας που χρησιμοποιούνται μέσα στους συλλέκτες. Αυτό το σύστημα δεν έχει συγκεκριμένους περιορισμούς τοποθέτησης σχετικώς με την απόσταση μεταξύ δεξαμενής και του ηλιακού συστήματος. Τα συστήματα αυτά είναι πιο σύνθετα συστήματα, αλλά με καλύτερη αισθητική ένταξη, πλήρη έλεγχο της εγκατάστασης με απλό τρόπο, πολλές δυνατότητες εφαρμογών και πολλές δυνατότητες εγκατάστασης σύμφωνα με την αρχιτεκτονική του κτιρίου.

Τα συστήματα εξαναγκασμένης κυκλοφορίας νερού ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες:

- Στα ανοιχτού κυκλώματος, στα οποία χρησιμοποιούνται κυκλοφορητές έτσι ώστε να κυκλοφορεί το νερό χρήσης στους συλλέκτες. Ο διαφορικός θερμοστάτης θέτει σε λειτουργία τον κυκλοφορητή όταν η θερμοκρασία του νερού στην κορυφή του συλλέκτη είναι υψηλότερη από την θερμοκρασία στο πυθμένα της δεξαμενής αποθήκευσης. Βαλβίδα αντεπιστροφής εμποδίζει την αντίστροφη ροή του νερού και την απώλεια θερμότητας από τον συλλέκτη κατά την νύχτα. Η βοηθητική πηγή ενέργειας μπορεί να βρίσκεται στο σωλήνα εξόδου από την δεξαμενή με την μορφή θερμαντήρα εν σειρά χωρίς αποθηκευτική ικανότητα.
- Στα συστήματα κλειστού κυκλώματος, τα οποία περιλαμβάνουν αντιπηκτικό με υγρό κύκλωμα ώστε να αποφεύγεται ο κίνδυνος παγώματος του συλλέκτη κατά τον χειμώνα αλλά και να περιορίζεται η διάβρωση από την συνεχή ροή του νερού του δικτύου ύδρευσης. Οι εναλλάκτες θερμότητας μπορεί να βρίσκονται μέσα στην δεξαμενή.

## **1.4 Το Φωτοβολταϊκό φαινόμενο**

Το φωτοβολταϊκό φαινόμενο και η λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος στηρίζεται στις βασικές ιδιότητες των ημιαγωγίμων υλικών σε ατομικό επίπεδο. Όταν το φως προσπίπτει σε μια επιφάνεια είτε ανακλάται, είτε την διαπερνά, είτε απορροφάται από το υλικό της επιφάνειας. Η απορρόφηση του φωτός ουσιαστικά σημαίνει την μετατροπή του σε μια άλλη μορφή ενέργειας (σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας) και η οποία συνήθως είναι η θερμότητα. Παρόλα αυτά όμως υπάρχουν κάποια υλικά τα οποία έχουν την ιδιότητα να μετατρέπουν την ενέργεια των προσπιπτόντων φωτονίων (πακέτα ενέργειας) σε ηλεκτρική ενέργεια. Αυτά τα υλικά είναι οι ημιαγωγοί και σε αυτά οφείλεται επίσης η τεράστια τεχνολογική πρόοδος που έχει συντελεστεί στον τομέα της ηλεκτρονικής και συνεπακόλουθα στον ευρύτερο χώρο της πληροφορικής και των τηλεπικοινωνιών.

Γενικότερα τα υλικά στην φύση σε σχέση με τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τους εμπίπτουν σε τρεις κατηγορίες, τους αγωγούς του ηλεκτρισμού, τους μονωτές και τους ημιαγωγούς. Ένας ημιαγωγός έχει την ιδιότητα να μπορεί να ελεγχθεί η ηλεκτρική του αγωγιμότητα είτε μόνιμα είτε δυναμικά.

### **1.4.2 Χαρακτηριστικά Ημιαγωγών**

Το χαρακτηριστικό στοιχείο ενός ημιαγωγού που το διαφοροποιεί από τα υπόλοιπα υλικά είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων ενός ατόμου που βρίσκεται στην εξωτερική του στοιβάδα (σθένους). Ο περισσότερο γνωστός ημιαγωγός είναι το πυρίτιο (Si) για αυτό και θα επικεντρωθούμε σε αυτό.

Το πυρίτιο έχει ατομικό αριθμό 14 και έχει στην εξωτερική του στοιβάδα 4 ηλεκτρόνια. Όλα τα άτομα που έχουν λιγότερα η περισσότερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα (είναι "γενικά" συμπληρωμένη με 8 e) "ψάχνουν" άλλα άτομα με τα οποία μπορούν να ανταλλάξουν ηλεκτρόνια ή να "μοιραθούν" κάποια με σκοπό τελικά να αποκτήσουν συμπληρωμένη εξωτερική στοιβάδα σθένους.

Σε αυτήν την τάση οφείλεται και η κρυσταλλική δομή του πυριτίου αφού όταν συνυπάρχουν πολλά άτομα μαζί διατάσσονται με τέτοιο τρόπο ώστε να συνεισφέρουν ηλεκτρόνια με όλα τα γειτονικά τους άτομα και τελικά με αυτόν τον τρόπο να αποκτούν μια συμπληρωμένη εξωτερική στοιβάδα και κρυσταλλική δομή. Αυτή είναι και η καθοριστική ιδιότητα που έχουν τα κρυσταλλικά υλικά.

Στην κρυσταλλική του μορφή όμως το πυρίτιο είναι σταθερό. Δεν έχει ανάγκη ούτε να προσθέσει ούτε να διώξει ηλεκτρόνια κάτι που ουσιαστικά του δίνει ηλεκτρικά χαρακτηριστικά πολύ κοντά σε αυτά ενός μονωτή αφού δεν υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια για την δημιουργία ηλεκτρικού ρεύματος στο εσωτερικό του.

### **1.4.3 Δημιουργία ηλεκτρικά φορτισμένων ημιαγωγών**

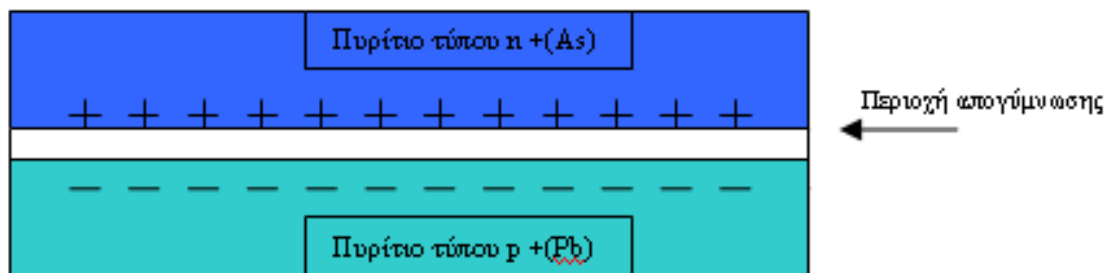
Τις ημιαγωγές ιδιότητες του το πυρίτιο τις αποκτά με τεχνικό τρόπο. Αυτό πρακτικά γίνεται με την πρόσμιξη με άλλα στοιχεία τα οποία είτε έχουν ένα ηλεκτρόνιο περισσότερο είτε ένα λιγότερο στην στοιβάδα σθένους των. Αυτή η πρόσμιξη τελικά κάνει τον κρύσταλλο δεκτικό είτε σε θετικά φορτία (υλικό τύπου p) είτε σε αρνητικά φορτία (υλικό τύπου n).

Για να φτιαχτεί λοιπόν ένας ημιαγωγός τύπου n ή αλλιώς ένας αρνητικά φορτισμένος κρύσταλλος πυριτίου θα πρέπει να γίνει πρόσμιξη ενός υλικού με 5e στην εξωτερική του στοιβάδα όπως για παράδειγμα το Αρσενικό (As). Αντίστοιχα για να δημιουργήσουμε έναν ημιαγωγό τύπου p η αλλιώς θετικά φορτισμένος κρύσταλλος

πυριτίου χρειάζεται να γίνει πρόσμειξη στον κρύσταλλο κάποιου υλικού όπως το βόριο (B) που έχει 3e στην εξωτερική του στοιβάδα.

#### 1.4.4 Δημιουργία της επαφής (του ηλεκτρικού πεδίου)

Εάν φέρουμε σε επαφή δύο κομμάτια πυριτίου τύπου n και τύπου p το ένα απέναντι από το άλλο δημιουργείται μια δίοδος η αλλιώς ένα ηλεκτρικό πεδίο στην επαφή των δύο υλικών το οποίο επιτρέπει την κίνηση ηλεκτρονίων προς μια κατεύθυνση μόνο (Σχ.1.4). Τα επιπλέον ηλεκτρόνια της επαφής n έλκονται από τις «οπές» τις επαφής p. Αυτό το ζευγάρι των δύο υλικών είναι το δομικό στοιχείο του φωτοβολταϊκού κελιού και η βάση της φωτοβολταϊκής τεχνολογίας.



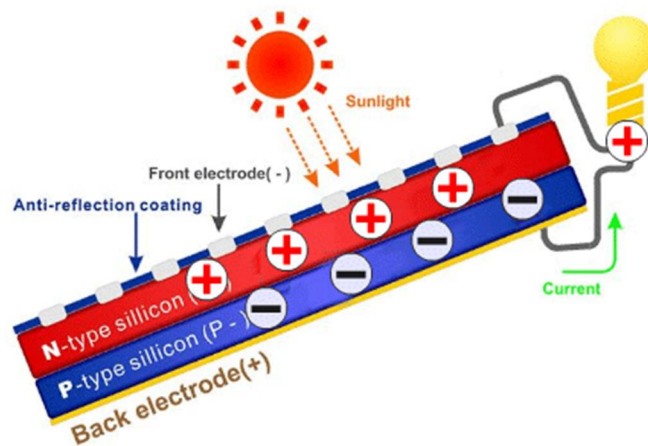
**Σχήμα 1.4** Δημιουργία διόδου.

#### 1.4.5 Η επίδραση της Ηλιακής ακτινοβολίας

Η ηλιακή ακτινοβολία έρχεται με την μορφή πακέτων ενέργειας ή φωτονίων. Τα φωτόνια όταν προσπίπτουν σε μια διάταξη φωτοβολταϊκού κελιού περνούν αδιατάραχτα την επαφή τύπου n και χτυπούν τα άτομα της περιοχής τύπου p. Τα ηλεκτρόνια της περιοχής τύπου p αρχίζουν και κινούνται μεταξύ των οπών ώσπου τελικά φτάνουν στην περιοχή της διόδου όπου και έλκονται πλέον από το θετικό πεδίο της εκεί περιοχής. Αφού ξεπεράσουν το ενεργειακό χάσμα αυτής της περιοχής μετά είναι αδύνατον να επιστρέψουν. Στο τμήμα της επαφής n πλέον έχουμε μια περίσσεια ηλεκτρονίων που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε. Αυτή η περίσσεια των ηλεκτρονίων μπορεί να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα εάν τοποθετήσουμε μια διάταξη όπως ένας



μεταλλικός αγωγός στο πάνω μέρος της επαφής n και στο κάτω της επαφής p και ένα φορτίο ενδιάμεσα με τέτοιο τρόπο ώστε να κλείσει ένας αγωγίμος δρόμος για το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται (Σχ. 1.5). Αυτή είναι απλοποιημένα η γενική αρχή λειτουργίας του φωτοβολταϊκού φαινομένου.



**Σχήμα 1.5** Μηχανισμός φωτοβολταϊκού φαινομένου.

#### 1.4.6 Παράγοντες που επηρεάζουν το φωτοβολταϊκό φαινόμενο

Στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο δεν εκμεταλλεύεται όλη η περιοχή του ηλιακού φάσματος αλλά μ μέρος αυτής. Το κριτήριο είναι  $h\nu > E_g$  για να απορροφηθεί η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια και να δημιουργηθεί το ζεύγος ηλεκτρονίου - οπής. Το ποσοστό των χρησιμοποιούμενων ηλεκτρονίων υπολογίζεται από το ηλιακό φάσμα και στο κρυσταλλικό πυρίτιο το ενεργειακό κριτήριο ικανοποιείται μόνο από το 77 % περίπου της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Συμπεραίνουνε λοιπόν πως ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου δεν είναι σταθερός αλλά επηρεάζεται σημαντικά από την ποιότητα της ηλιακής ακτινοβολίας. Έτσι μία δέσμη ακτινοβολίας μπορεί να προκαλέσει την παραγωγή λιγότερης ηλεκτρικής ενέργειας σε σύγκριση με άλλη δέσμη ίσης ισχύος, αλλά πλουσιότερης σε φωτόνια με ευνοϊκότερη ενέργεια για τον ημιαγωγό, από τον οποίο είναι κατασκευασμένο το στοιχείο.

Συνεχίζοντας θα πρέπει να αναφερθεί το πρόβλημα της ανακλαστικότητας. Ειδικά ο κρύσταλλος του πυριτίου χαρακτηρίζεται από ανακλαστικότητα  $r = 0.3$  με αποτέλεσμα ένα σημαντικό ποσοστό φωτονίων με κατάλληλη ενέργεια να ανακλώνται

από την επιφάνεια του φωτοβολταϊκού. Το πρόβλημα, αντιμετωπίζεται με τη χρήση αντανakλαστικών επικαλύψεων. Το άριστο βάθος της επαφής  $p$ - $n$  εξαρτάται από παράγοντες όπως η ευκινησία και ο χρόνος ζωής των φορέων, η αντίσταση της επαφής προς την πλευρά της επιφάνειας όπου υπάρχει το ηλεκτρόδιο συλλογής των φορέων, και κυρίως από την περιοχή του κρυστάλλου στην οποία απορροφούνται τα περισσότερα φωτόνια για να δώσουν ζεύγη ηλεκτρονίου - οπής.

Καθώς τα ηλεκτρόνια απορροφούν την ενέργεια της ακτινοβολίας  $h\nu$ , περνούν στις κατώτερες ενεργειακές στάθμες της ζώνης αγωγιμότητας με αποτέλεσμα η επιπλέον ενέργεια ( $h\nu - E_g$ ) να μετατρέπεται σε θερμότητα. Σύμφωνα με το ηλιακό φάσμα, για το πυρίτιο, η ενεργειακή αυτή απώλεια αντιστοιχεί στο 33% της ενέργειας της ακτινοβολίας. Συνεπώς πολύ σημαντικό ρόλο στην απόδοση των στοιχείων παίζει η τιμή του ενεργειακού διάκενου των ημιαγωγών. Οι μεγαλύτερες θεωρητικές αποδόσεις μετατροπής της ηλιακής ενέργειας μπορούν να επιτευχθούν σε φωτοβολταϊκά στοιχεία από ημιαγωγούς με τιμή ενεργειακού διάκενου 1.1eV-1.5eV.

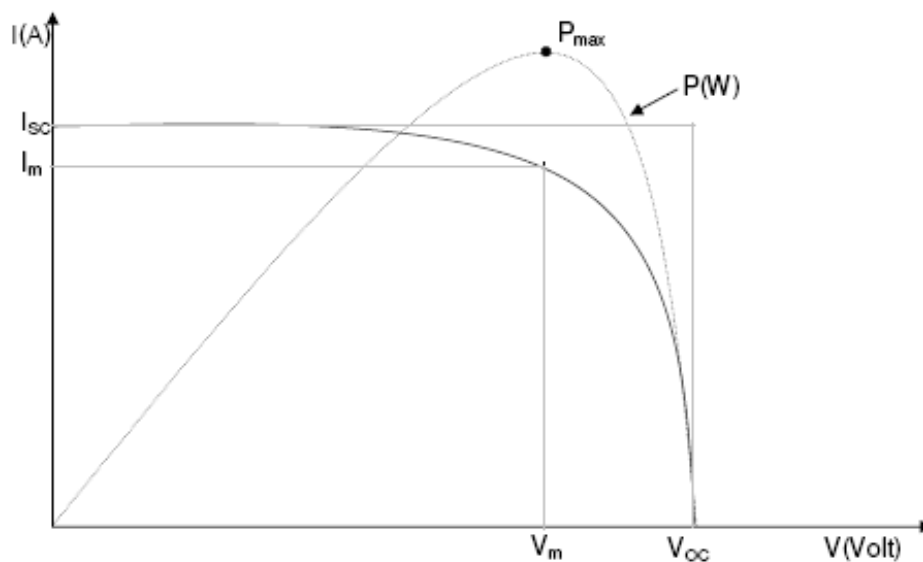
Σημαντικό κριτήριο αποτελεί το είδος του ενεργειακού διάκενου του ημιαγωγού, αν πρόκειται δηλαδή για άμεσο ή έμμεσο. Τα φωτόνια απορροφούνται ευκολότερα στους ημιαγωγούς άμεσου ενεργειακού διάκενου, έτσι ώστε το στοιχείο να μην χρειάζεται μεγάλο πάχος ενώ επιτυγχάνεται και εξοικονόμηση υλικού.

Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα αποτελεί το αρσενικούχο γάλλιο (GaAs) από το οποίο αρκεί στρώμα πάχους 1 $\mu$ m για να απορροφηθεί το 80% των φωτονίων της ηλιακής ακτινοβολίας που έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό του διάκενο (1.43eV).

Αντίθετα, το πυρίτιο το οποίο χαρακτηρίζεται ως έμμεσος ημιαγωγός χρειάζεται στρώμα πάχους 100 $\mu$ m. Στην περίπτωση της επαφής μεταξύ δύο διαφορετικών ημιαγωγών ιδιαίτερη σημασία έχει το ταίριασμα των κρυσταλλικών πλεγμάτων ώστε να υπάρχει καλή επαφή. Τέλος, ως κριτήρια αξιολόγησης των ημιαγωγών, αλλά και των υπολοίπων υλικών κατασκευής των ηλιακών στοιχείων, θα πρέπει να αναφερθούν το κόστος παραγωγής, η σταθερότητα τους στην επίδραση των εξωτερικών συνθηκών και κυρίως της υγρασίας και της θερμότητας, η τοξικότητα των διαφόρων συστατικών και το ειδικό βάρος.

## 1.5 Ισοδύναμα ηλεκτρικά κυκλώματα

Για την κατανόηση της ηλεκτρικής συμπεριφοράς των φωτοβολταϊκών πλακών, είναι σκόπιμο να δημιουργηθεί ένα ηλεκτρικά ισοδύναμο πρότυπο που βασίζεται σε διακριτά ηλεκτρικά στοιχεία των οποίων η συμπεριφορά είναι γνωστή. Ο σκοπός των ισοδύναμων ηλεκτρικών κυκλωμάτων είναι να περιγράψουν με τη χρήση των ηλεκτρικών στοιχείων με μεγάλη ακρίβεια την καμπύλη I-V (Σχ. 1.6), να καθορίσουν το σημείο μέγιστης ισχύος ανάλογα με τις συνθήκες θερμοκρασίας και έντασης της ακτινοβολίας που επικρατούν και να χρησιμοποιηθούν σε λειτουργία συσκευών ελέγχου και μέτρησης.

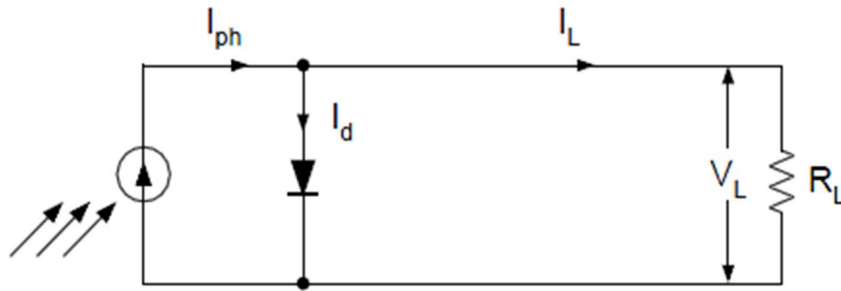


**Σχήμα 1.6** Χαρακτηριστική καμπύλη I-V και I-P του φωτοβολταϊκού στοιχείου

Στο σχήμα 1.6 φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης (I-V) του στοιχείου. Όπως φαίνεται από το σχήμα, το ρεύμα για το οποίο έχουμε  $V=0$  ονομάζεται ρεύμα βραχυκύκλωσης ( $I_{sc}$ ), ενώ η τάση για την οποία ισχύει  $I=0$  ονομάζεται τάση ανοιχτού κυκλώματος ( $V_{oc}$ ).

### 1.5.1 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα: Το ιδανικό μοντέλο

Το πιο απλό ως προς τη διάταξη ισοδύναμο κύκλωμα (Σχ. 1.7) είναι το ιδανικό ηλεκτρικό το οποίο αποτελείται από μια πηγή ρεύματος παράλληλα με μια δίοδο.

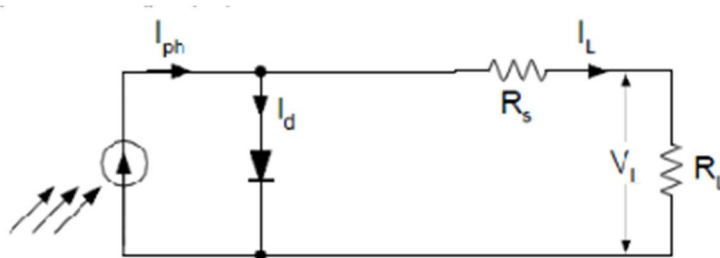


**Σχήμα 1.7** Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα: Το ιδανικό μοντέλο

Το βασικό μειονέκτημα του ιδανικού ηλεκτρικού κυκλώματος είναι το ότι έχει πολύ χαμηλή ακρίβεια. Για την βελτίωση της ακρίβειας αυτής, έχουν δημιουργηθεί περισσότερο σύνθετα κυκλώματα με την πρόσθεση αντιστάσεων και επιπλέον διόδων.

### 1.5.2 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα: Το απλό μοντέλο

Με σκοπό τη βελτίωση του ιδανικού ηλεκτρικού κυκλώματος, προστέθηκε στο παραπάνω κύκλωμα η αντίσταση  $R_s$  η οποία παρεμβάλλεται στην κίνηση των φορέων μέσα στον ημιαγωγό. Με την προσθήκη της αντίστασης αυτής, υπολογίζουμε και τις απώλειες λόγω της πτώσης τάσης πάνω στις ηλεκτρικές επαφές. Αποτέλεσμα αυτού του συνυπολογισμού είναι η βελτίωση της ακρίβειας του ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος (Σχ. 1.8).

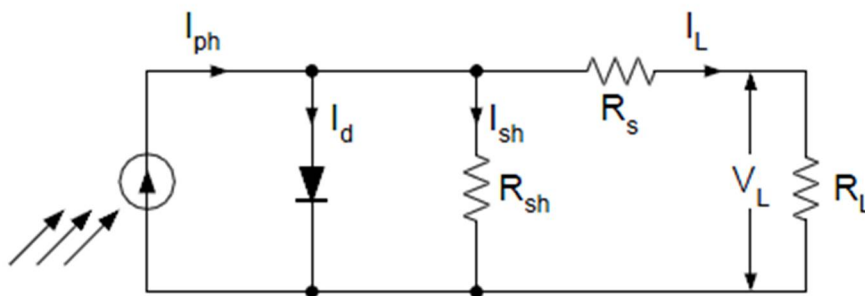


**Σχήμα 1.8** Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα: Το απλό μοντέλο

Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία η αντίσταση  $R_s$  πρέπει να έχει τιμή όσο δυνατόν μικρότερη τιμή.

### 1.5.3 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα: Το μοντέλο μιας διόδου

Το μοντέλο μιας διόδου (Σχ. 1.9) είναι ένα ακόμη πιο ακριβές ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα και περιέχει την αντίσταση  $R_s$  και την αντίσταση  $R_{sh}$  η οποία είναι η αντίσταση διαμέσου της διόδου και εκφράζει τις απώλειες από τις διαρροές ρεύματος που υπάρχουν λόγω κατασκευαστικών ελαττωμάτων. Παρόλη τη βελτίωση της ακρίβειας το μοντέλο μιας διόδου έχει μη επαρκή ακρίβεια σε μεγάλο αριθμό εφαρμογών.



**Σχήμα 1.9** Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα: Το μοντέλο μιας διόδου

Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία η  $R_{sh}$  έχει τιμή μεγαλύτερη των  $500\Omega$ . Οι αντιστάσεις  $R_s$  και  $R_{sh}$  μειώνουν αισθητά την απόδοση του φωτοβολταϊκού στοιχείου αφού επηρεάζουν τόσο την τάση  $V_L$  όσο και το ρεύμα  $I_L$ .

### 1.5.4 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα: Το μοντέλο δυο διόδων

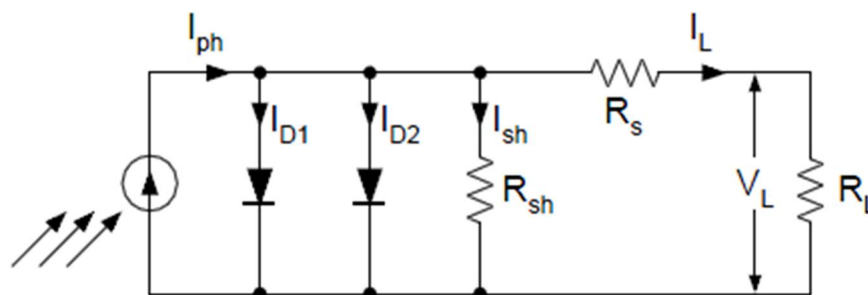
Το μοντέλο δύο διόδων (Σχ. 1.10) και περιέχει τις αντιστάσεις  $R_s$  και  $R_{sh}$ , τη δίοδο D1 η οποία συνήθως είναι ιδανική σύμφωνα με τη σχέση:

$$I_{D1} = I_{s1} \exp\left(q \frac{V_D}{A_1 k T}\right)$$

και έχει συντελεστή κατασκευής  $A_1$  ίσο με 1 και τη δίοδο D2 η οποία είναι μη ιδανική υπακούοντας τη σχέση:

$$I_{D2} = I_{s2} \exp\left(q \frac{V_D}{A_2 k T}\right)$$

και έχει συντελεστή κατασκευής  $A_2$ . Το μοντέλο αυτό έχει την μεγαλύτερη ακρίβεια από όλα τα μοντέλα που αναφέρθηκαν παραπάνω.



**Σχήμα 1.10** Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα: Το μοντέλο δύο διόδων

Σε περιπτώσεις που επιθυμούμε ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια μπορούμε να αυξήσουμε τον αριθμό των διόδων.

### 1.5.5 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα: Το αποτελεσματικό μοντέλο

Το αποτελεσματικό μοντέλο (Σχήμα 1.11) φωτοβολταϊκού στοιχείου και περιέχει την αντίσταση  $R_{pv}$  η οποία είναι ο συνδυασμός των  $R_s$  και  $R_{sh}$  και δεν είναι ωμική αντίσταση αφού μπορεί να πάρει θετικές και αρνητικές τιμές. Το αποτελεσματικό μοντέλο φωτοβολταϊκού στοιχείου χρησιμοποιείται για μεγαλύτερη ακρίβεια αλλά και σε εφαρμογές προσομοίωσης.

Για την περιγραφή αυτού του μοντέλου απαιτείται ο προσδιορισμός τεσσάρων παραμέτρων των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Οι τέσσερις παράμετροι που πρέπει να υπολογίσουμε είναι η αντίσταση  $R_{pv}$ , η θερμοκρασία  $T$ , το ρεύμα  $I_0$  και το φωτόρευμα  $I_{ph}$ . Αρχικά θα υπολογίσουμε την κλίση  $M$ .

Υπάρχουν δύο τρόποι για τον υπολογισμό της. Ο πρώτος είναι γραφικά όπου

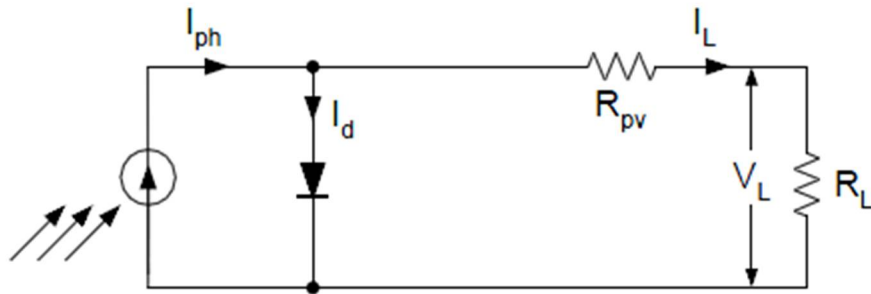
$$M = \frac{dV}{dI} = \tan\varphi = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$

και το MPP βρίσκεται πάνω στην καμπύλη σε γωνία  $45^\circ$  (Αφού  $\tan 45^\circ = 1$ ) και ο δεύτερος είναι από τη σχέση:

$$M = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \left( -5,411 \frac{V_{mpp} \times I_{mpp}}{V_{oc} \times I_{sc}} + 6,450 \frac{V_{mpp}}{V_{oc}} + 3,417 \frac{I_{mpp}}{I_{sc}} - 4,422 \right)$$

Γνωρίζοντας τώρα την κλίση  $M$  μπορούμε να υπολογίσουμε την αντίσταση  $R_{pv}$  από τη σχέση:

$$R_{pv} = -M \frac{I_{sc}}{I_{mpp}} + \frac{V_{mpp}}{I_{mpp}} \left(1 - \frac{I_{sc}}{I_{mpp}}\right)$$



**Σχήμα 1.11** Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα: Το αποτελεσματικό μοντέλο

Το ρεύμα  $I_L$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$I_L = I_{ph} - I_o \left[ \exp\left(q \frac{V_L + I_L R_{pv}}{AkT}\right) - 1 \right]$$

Η παραπάνω εξίσωση δεν είναι γραμμική. Οι παράμετροι  $I_{ph}$ ,  $R_{pv}$  και  $A$  ποικίλουν ανάλογα τη θερμοκρασία και εξαρτώνται από τις ανοχές του κατασκευαστή. Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων χωρίς φορτίο, η  $V_L = V_{oc}$  και  $I_L = 0$ . Οπότε η παραπάνω σχέση γίνεται:

$$0 = I_{ph} - I_o \left[ \exp\left(q \frac{V_{oc}}{AkT}\right) - 1 \right]$$

Σε συνθήκες βραχυκύκλωσης ανάμεσα στις δύο όψεις του στοιχείου, το ρεύμα βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  είναι ίσο με το ρεύμα  $I_L$  οπότε:

$$I_{sc} = I_{ph} - I_o \left[ \exp\left(q \frac{I_{sc} R_{pv}}{AkT}\right) - 1 \right]$$

Κατά τη λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων στο σημείο μέγιστης ισχύος της καμπύλης I-V η βέλτιστη τάση είναι  $V_L = V_{mpp}$  και  $I_L = I_{mpp}$  δίνεται από τη λύση της εξίσωσης:

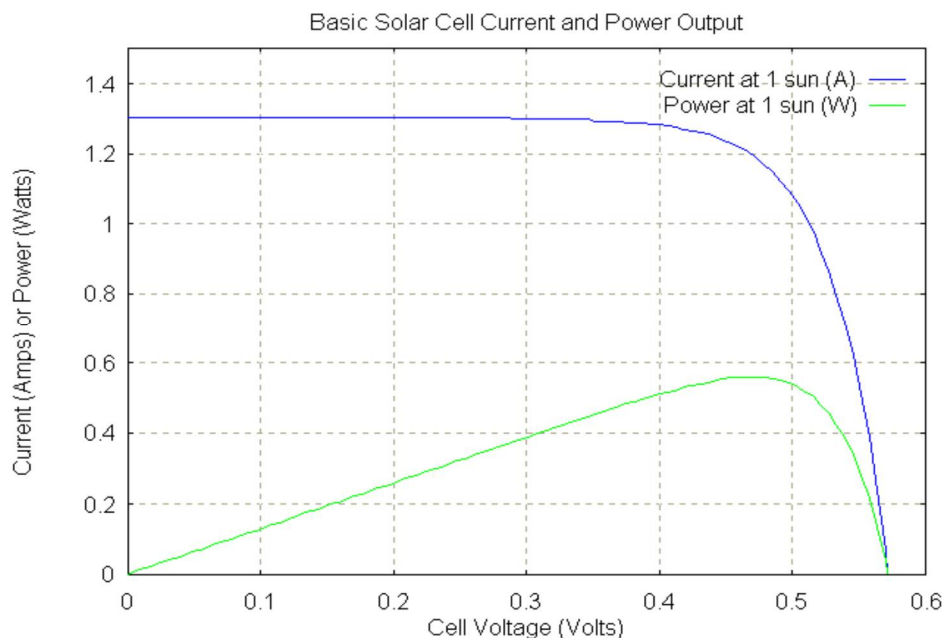
$$I_{mpp} = I_{ph} - I_o \left[ \exp\left(q \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_{pv}}{AkT}\right) - 1 \right]$$

## 1.6 Χαρακτηριστική Καμπύλη I-V

### 1.6.1 Γενικά χαρακτηριστικά καμπύλης I-V

Το φωτοβολταϊκά στοιχεία ως πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, εν αντιθέσει με τις περισσότερες ηλεκτρικές πηγές, έχουν ασυνήθιστη συμπεριφορά καθώς δεν διατηρούν τη τάση τους σταθερή στην περιοχή κανονικής λειτουργίας τους. Στα φωτοβολταϊκά στοιχεία η τάση μεταβάλλεται μη γραμμικά συναρτήσει της έντασης του ρεύματος που παρέχουν στο κύκλωμα ακόμα και αν η ακτινοβολία παραμένει σταθερή (Σχ. 1.12).

Για σταθερές συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας και για μεταβαλλόμενες τιμές της αντίστασης του κυκλώματος που τροφοδοτεί το φωτοβολταϊκό στοιχείο, η τάση και η ένταση του ρεύματος του φωτοβολταϊκού στοιχείου παίρνουν ενδιάμεσες τιμές ανάμεσα στις ακραίες που αντιστοιχούν σε μηδενική αντίσταση όταν το κύκλωμα είναι βραχυκυκλωμένο και έχει μέγιστη τιμή ρεύματος  $I_{sc}$  και μηδενική τάση, και σε άπειρη αντίσταση όταν το κύκλωμα είναι έχει μηδενική τιμή ρεύματος και μέγιστη τιμή τάσης  $V_{oc}$ .

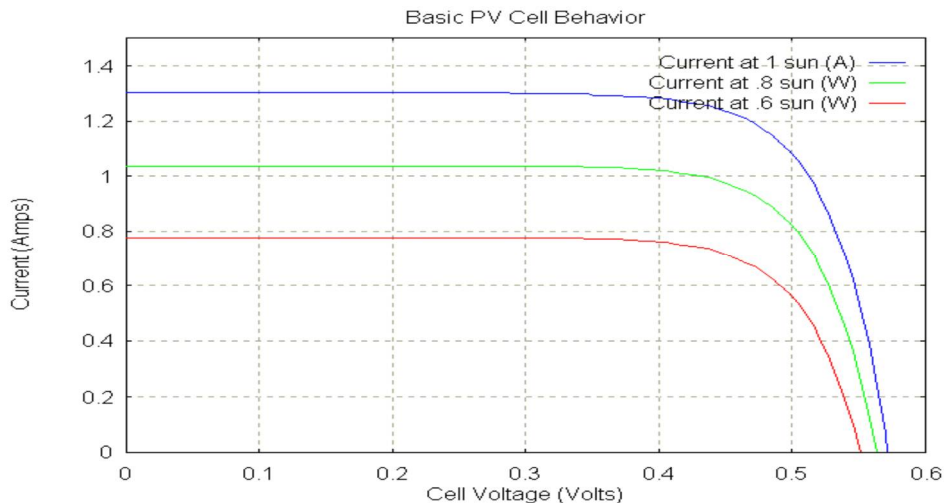


**Σχήμα 1.12** Χαρακτηριστική καμπύλη I-V και I-P του φωτοβολταϊκού στοιχείου

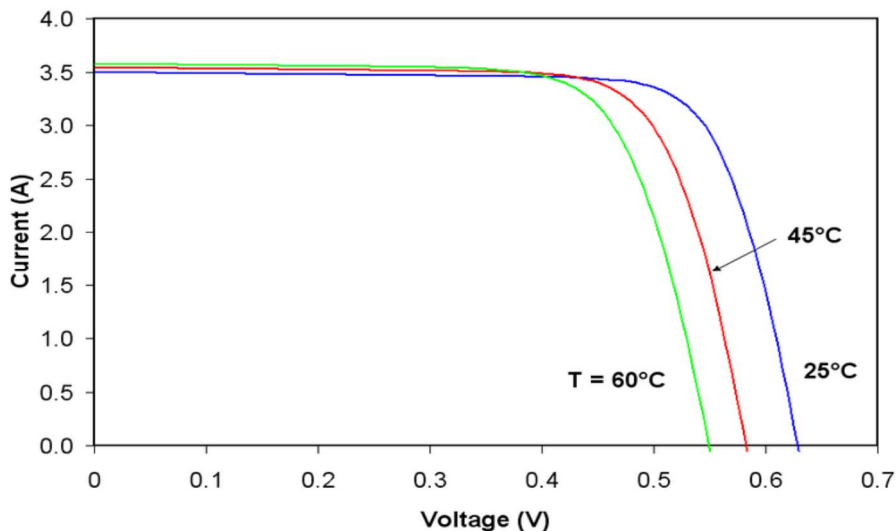


### 1.6.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την καμπύλη I-V

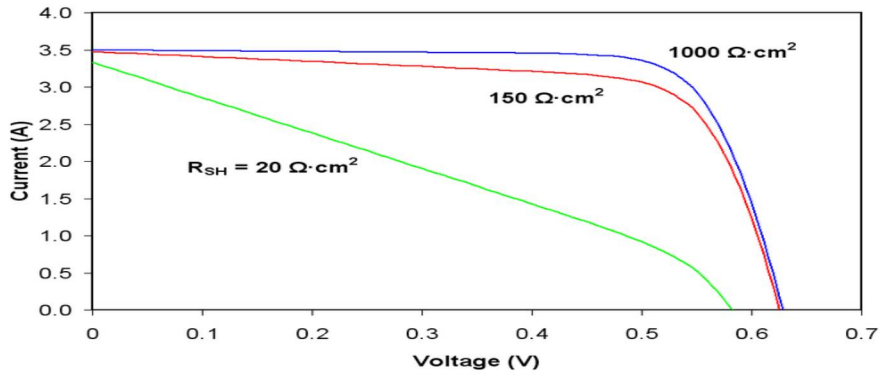
Η καμπύλη I-V γενικότερα, έχει τη μορφή του διαγράμματος που παρουσιάζεται στο σχήμα 1.12, αλλά επηρεάζεται από εξωγενείς παράγοντες (Σχ. 1.13 – 1.17). Τέτοιοι παράγοντες είναι η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, η θερμοκρασία του φωτοβολταϊκού στοιχείου, ο συντελεστής κατασκευής και ποιότητας, η αντίσταση σειράς  $R_s$ , η παράλληλη αντίσταση  $R_{sh}$  και το ανάστροφο ρεύμα κόρου.



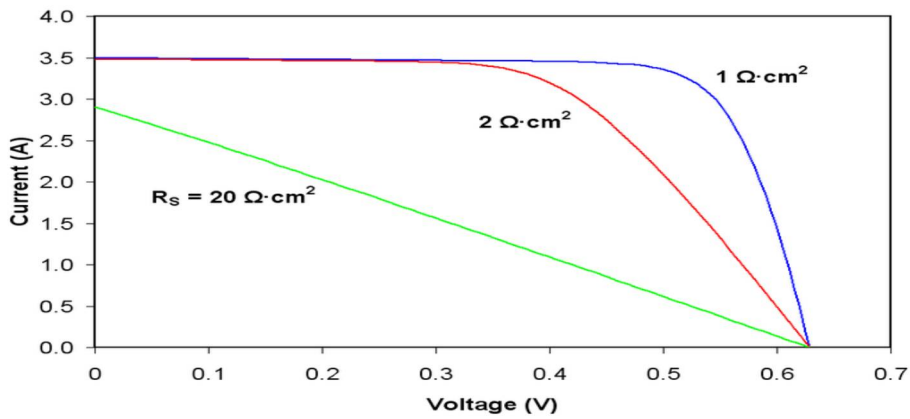
**Σχήμα 1.13** Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V του φωτοβολταϊκού στοιχείου για μεταβαλλόμενη ένταση Ηλιακής Ακτινοβολίας



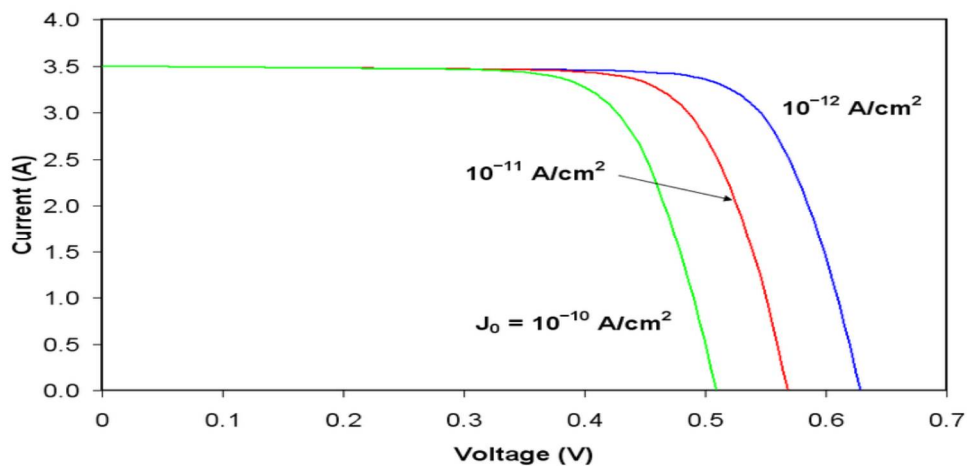
**Σχήμα 1.14** Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V του φωτοβολταϊκού στοιχείου για μεταβαλλόμενη θερμοκρασία επιφανείας



**Σχήμα 1.15** Χαρακτηριστικές καμπύλες  $I$ - $V$  του φωτοβολταϊκού στοιχείου για μεταβαλλόμενες τιμές τις αντίστασης  $R_s$



**Σχήμα 1.16** Χαρακτηριστικές καμπύλες  $I$ - $V$  του φωτοβολταϊκού στοιχείου για μεταβαλλόμενες τιμές της αντίστασης  $R_{sh}$ .



**Σχήμα 1.17** Χαρακτηριστικές καμπύλες  $I$ - $V$  του φωτοβολταϊκού στοιχείου για μεταβαλλόμενες τιμές ανάστροφου ρεύματος κόρου.

### 1.6.3 Συντελεστής πλήρωσης

Ο λόγος της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος  $P_{mmp}$  προς το γινόμενο της έντασης του ρεύματος βραχυκύκλωσης  $I_{sc}$  και της τάσης ανοιχτού κυκλώματος  $V_{oc}$  ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου ονομάζεται συντελεστής πλήρωσης  $FF$  (Fill Factor).

$$FF = \frac{P_{mpp}}{I_{sc}V_{oc}} = \frac{I_{mpp}V_{mmp}}{I_{sc}V_{oc}}$$

Ο συντελεστής πλήρωσης εκφράζει την ορθογωνιότητα της καμπύλης I-V, εκφράζοντας την ιδανικότητα της ηλεκτρικής συμπεριφοράς του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

## 1.7 Τα Είδη των φωτοβολταϊκών κυττάρων - πλαισίων

### 1.7.1 Φωτοβολταϊκά κύτταρα πυριτίου

Το πιο συνηθισμένο στοιχείο για την κατασκευή φωτοβολταϊκών πλακών είναι το πυρίτιο. Ο λόγος που προτιμάται έναντι των υπολοίπων υλικών, είναι αρχικά η αφθονία του στη γη, καθώς είναι το όγδοο πιο επικρατέστερο υλικό, το χαμηλό κόστος εξεύρεσης και επεξεργασίας του και ο ατομικός του αριθμός (14) βάσει του οποίου μένουν τέσσερα ελεύθερα ηλεκτρόνια την εξωτερική του στοιβάδα. Τα ηλεκτρόνια αυτά, συμβάλλουν στην πραγματοποίηση του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Μάλιστα, ανάλογα με την επεξεργασία που δέχεται το πυρίτιο, μπορούμε να το συναντήσουμε σε δύο διαφορετικές μορφές στις πλάκες. Υπάρχουν οι πλάκες κρυσταλλικού πυριτίου και οι πλάκες άμορφου πυριτίου.

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα κρυσταλλικού πυριτίου χρησιμοποιούνται πολύ περισσότερο από οποιαδήποτε άλλα στην αγορά, αντιπροσωπεύοντας το 90% της συνολικής παραγωγής φωτοβολταϊκών κυττάρων, ενώ αναμένεται να έχουν κυρίαρχο ρόλο και στις μελλοντικές αγορές. Η υψηλότερη καταγεγραμμένη ενεργειακή απόδοση τους κυμαίνεται στο 25% την στιγμή που η απόδοση των κλασικών βιομηχανικών φωτοβολταϊκών κυττάρων είναι 15-18%. Τα κύτταρα αυτά μπορεί να πλεονεκτούν στην απόδοση, αλλά είναι συχνά ακατάλληλα για χαμηλού-κόστους παραγωγές λόγω της πολυσύνθετης δομής τους και των χρονοβόρων κατασκευαστικών διαδικασιών που

απαιτούνται για την παραγωγή τους. Τα κύτταρα κρυσταλλικού πυριτίου μπορούν με τη σειρά τους, ανάλογα με τη δομή και την καθαρότητα του πυριτίου, να κατανεμηθούν σε πολυκρυσταλλικά και μονοκρυσταλλικά.

### **1.7.1.α Φωτοβολταϊκά μονοκρυσταλλικού πυριτίου**

Τα μονοκρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα (Σχ. 1.18) αναπτύχθηκαν αρχικά για την αεροδιαστημική και δορυφορική τηλεόραση. αργότερα χρησιμοποιήθηκαν σε φωτοβολταϊκά πλαίσια για την παραγωγή ηλιακής ενέργειας και πλέον διακρίνονται για την υψηλή απόδοσή τους. Για τα μονοκρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα χρησιμοποιείται αυξημένης υψηλής καθαρότητας πυρίτιο καθώς παράγονται μέσω μιας πολύπλοκης διαδικασίας από ημιαγώγιμο υλικό πυριτίου, με την εξαγωγή μονοκρυσταλλικών ράβδων από τήγμα πυριτίου οι οποίες στη συνέχεια, κόβονται σε λεπτές φέτες.



**Σχήμα 1.18** Φωτοβολταϊκό μονοκρυσταλλικού πυριτίου

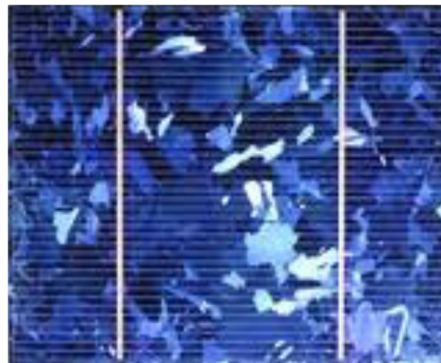
Τα κύτταρα αυτά, τα οποία είναι τετράγωνα κομμάτια με στρογγυλεμένες γωνίες, διασυνδέονται μεταξύ τους, για να σχηματίσουν τους ηλιακούς συλλέκτες. Επί του παρόντος, περίπου το ένα τρίτο του συνόλου των φωτοβολταϊκών συστημάτων που λειτουργούν, χρησιμοποιούν μονοκρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα, επειδή παρόλο αυτά είναι πιο ακριβά στην τελική τιμή από τα αντίστοιχα πολυκρυσταλλικά, ο βαθμός απόδοσής τους αγγίζει το 22,5%.

### **1.7.1.β Φωτοβολταϊκά πολυκρυσταλλικού πυριτίου**

Για την κατασκευή πολυκρυσταλλικών φωτοβολταϊκών (Σχήμα 1.19) κελιών χρησιμοποιείται πυρίτιο σε πολυκρυσταλλική μορφή. Το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο

(poly-Si) αποτελείται από μικρούς κρυστάλλους πυριτίου. Σε αντίθεση με το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο στο οποίο το κρυσταλλικό πλέγμα είναι ενιαίο, το poly-Si έχει διακριτούς κόκκους στη δομή του.

Για τη χρήση του όμως ως ημιαγωγού σε φωτοβολταϊκές εφαρμογές, η δομή του πολυκρυσταλλικού πυριτίου μετατρέπεται και αυτή σε ένα σύνολο ενιαίων κρυστάλλων. Χρησιμοποιείται ως ημιαγωγός στις περισσότερες μικροηλεκτρονικές συσκευές και μπορεί να είναι έως και 99.9% καθαρό πυρίτιο.



**Σχήμα 1.19** Φωτοβολταϊκό πολυκρυσταλλικού πυριτίου

Σε αντίθεση με το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο του οποίου οι ηλεκτρικές του ιδιότητες εξαρτώνται άμεσα από τις διάφορες προσμίξεις που έχει, οι ηλεκτρικές ιδιότητες του poly-Si εξαρτώνται κυρίως από το μέγεθος των μορίων μέσα στην κρυσταλλική δομή του, που όντας υλικός και όχι χημικός παράγοντας είναι πολύ πιο εύκολο να το καθορίσουμε ανάλογα με το τι χρειαζόμαστε σε κάθε εφαρμογή.

Τα πολυκρυσταλλικά κελιά πυριτίου είναι αυτή τη στιγμή τα πρώτα σε παραγωγή παγκοσμίως, καθώς η παραγωγή αυτών, αντιστοιχεί περίπου στο 48% της παγκόσμιας παραγωγής φωτοβολταϊκών κελιών. Τα βιομηχανικά πολυκρυσταλλικά κελιά έχουν απόδοση περίπου ίση με 15-17%. Η απόδοσή τους είναι εμφανώς χαμηλότερη από αυτή των μονοκρυσταλλικών κελιών, όμως το κόστος παραγωγής τους και αγοράς τους είναι πολύ χαμηλότερο. Στο μέλλον και για τις δύο τεχνολογίες, υπολογίζεται ότι ο βαθμός απόδοσής τους θα αυξηθεί πάνω από το 25%.

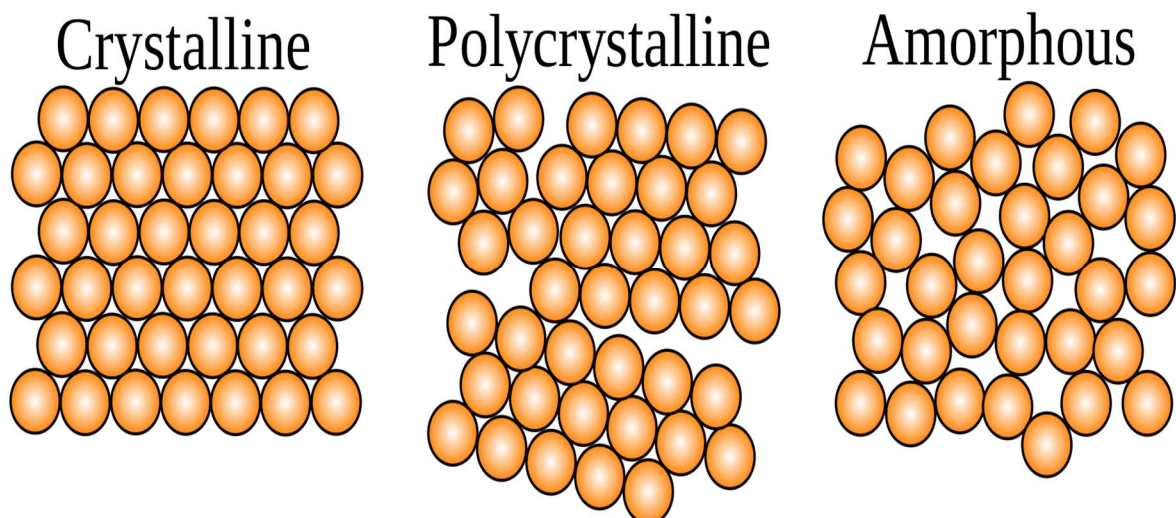
### 1.7.1.γ Φωτοβολταϊκά άμορφου πυριτίου

Το τελευταίο είδος φωτοβολταϊκών κελιών πυριτίου (Σχ. 1.20), είναι αυτά στα οποία χρησιμοποιείται το άμορφο πυρίτιο. Το άμορφο πυρίτιο αποτελεί την πρώτη μορφή πυριτίου που παρατηρήθηκε στη γη και χρησιμοποιείται στις φωτοβολταϊκές εφαρμογές υδρογονοποιημένο.



**Σχήμα 1.20** Φωτοβολταϊκό άμορφου πυριτίου

Οι τεχνολογίες άμορφου πυριτίου για την κατασκευή φωτοβολταϊκών πλακών, θεωρούνται ξεπερασμένες, εξαιτίας του χαμηλού βαθμού απόδοσης που έχουν. Ο μέγιστος βαθμός απόδοσης τους είναι περίπου 11,5%, δηλαδή ο μισός από τον βαθμό των μονοκρυσταλλικών και κατά 5% χαμηλότερος από των πολυκρυσταλλικών. Μια προσεγγιστική απεικόνιση της δομής των τριών διαφορετικών ειδών των φωτοβολταϊκών πυριτίου θα είχε την παρακάτω μορφή (Σχ. 1.21).



**Σχήμα 1.21** Κρυσταλλική δομή πυριτίου

### 1.7.2 Άλλα είδη φωτοβολταϊκών

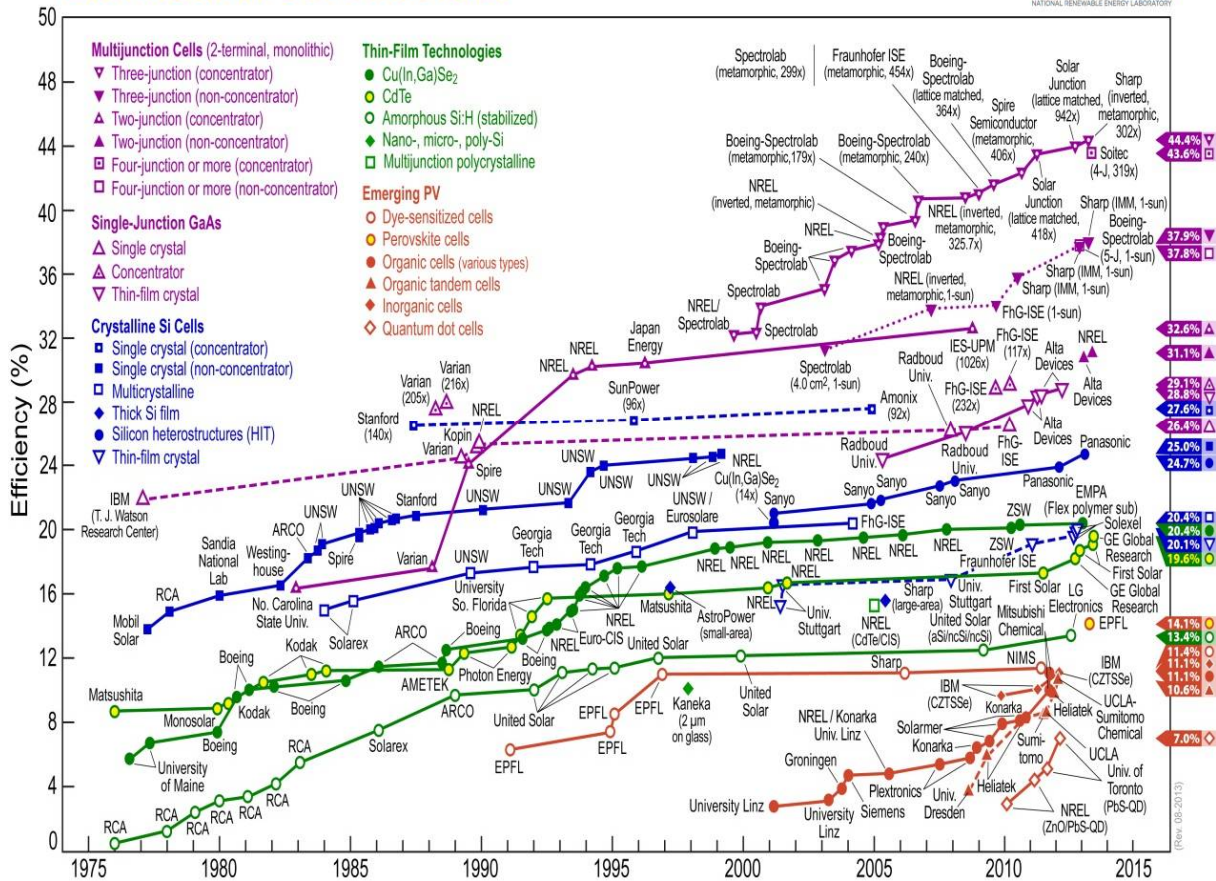
Με βάση τους ρυθμούς ανάπτυξης της τεχνολογίας τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογία κατασκευής φωτοβολταϊκών πλακών έχει εξελιχθεί ιδιαίτερα. Στις μέρες μας κατασκευάζονται δεκάδες ειδών φωτοβολταϊκές πλάκες, κάθε μια από τις οποίες βρίσκει εφαρμογή σε πιο εξειδικευμένες περιπτώσεις. Τέτοιες περιπτώσεις είναι σε διαστημικές εφαρμογές όπου οι συνθήκες είναι ακραίες, σε μη λείες επιφάνειες όπου τα δύσκαμπτα φωτοβολταϊκά πυριτίου δεν θα μπορούσαν να τοποθετηθούν και σε περιπτώσεις όπου ο βαθμός απόδοσης των φωτοβολταϊκών πυριτίου δεν επαρκούσε.

Μερικές από τις βασικές τεχνολογίες κατασκευής φωτοβολταϊκών πλακών είναι οι παρακάτω:

- Φωτοβολταϊκά τελουριούχου καδμίου
- Φωτοβολταϊκά δισεληνίδιου χαλκού-γαλλίου-ινδίου
- Οργανικά φωτοβολταϊκά
- Φωτοβολταϊκά λεπτού υμενίου
- Φωτοβολταϊκά κελιά με περοβσκίτη
- Φωτοβολταϊκά αρσενιούχου γαλλίου
- Και φωτοβολταϊκά κελιά με συνδυασμό δύο ή και παραπάνω μεθόδων

Κάθε ένα από τα παραπάνω είδη έχει διαφορετικό βαθμό απόδοσης, στοιχείο που οφείλεται στη χρήση διαφορετικών υλικών για την κατασκευή της εκάστοτε πλάκας. Το σύνολο των τιμών του βαθμού απόδοσης όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα είναι από 8% μέχρι και 43%. Οι διαφορές αυτές οφείλονται κυρίως στην απορροφητικότητα του κάθε υλικού και στην ικανότητα του να αντιδρά με τα φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας. Στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 1.22) του Διεθνούς Εργαστηρίου NREL (National Renewable Energy Laboratory) συμπεριλαμβάνονται όλα τα είδη φωτοβολταϊκών κελιών που έχουν κατασκευαστεί. Αρχικά χωρίζονται σε πέντε κατηγορίες, στα φωτοβολταϊκά κρυσταλλικού πυριτίου, στα λεπτού υμενίου, στα αρσενιούχου γαλλίου, στα συνδυαστικά και στα ταχέως εξελισσόμενα φωτοβολταϊκά. Κατόπιν στην πορεία του διαγράμματος καταγράφεται του κάθε στοιχείου σε συνάρτηση με τη χρονολογία. Σε κάθε μια βελτίωση του υπάρχοντος βαθμού απόδοσης, δίπλα αναγράφεται και το εργαστήριο ή η εταιρεία η οποία πέτυχε αυτή την αναβάθμιση.

## Best Research-Cell Efficiencies

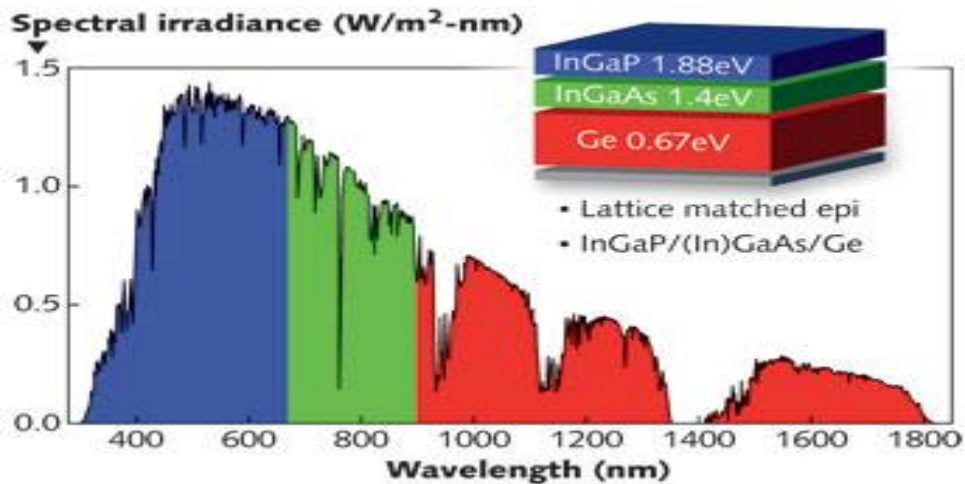


**Σχήμα 1.22** Σχηματική παράσταση της τεχνολογίας των φωτοβολταϊκών

Το 2015, η κατηγορία των φωτοβολταϊκών πλακών με τον μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης είναι τα συνδυαστικά φωτοβολταϊκά και πιο συγκεκριμένα τα φωτοβολταϊκά τριπλής επίστρωσης τα οποία πέτυχαν βαθμό απόδοσης 44,4%. Η εταιρεία που πέτυχε τη βελτίωση αυτή είναι η Sharp και αν αναλογιστούμε ότι ανά διετία έχουμε βελτίωση του συγκεκριμένου βαθμού απόδοσης δεν θα αργήσει αυτός να ξεπεράσει το 50%. Ο μεγάλος βαθμός απόδοσης των φωτοβολταϊκών αυτών οφείλεται στη δημιουργία τριών διαφορετικών ενώσεων p-n κάθε μια από τις οποίες ενεργοποιείται με διαφορετική ενέργεια φωτονίων, εκμεταλλευόμενη το διαφορετικό μήκος κύματος.

Έτσι το ποσό της ηλιακής ακτινοβολίας που θα διαπεράσει το πρώτο στρώμα φωτοβολταϊκής πλάκας είναι πιθανό να αξιοποιηθεί από το δεύτερο ή το τρίτο στρώμα, ενώ υπό άλλες συνθήκες εφόσον διαπερνούσε το πρώτο στρώμα δεν θα είχε καμία αξιοποίηση (Σχ. 1.23).





**Σχήμα 1.23:** Φάσμα απορρόφησης του φωτός για πολυστρωματικά φωτοβολταϊκά

## 1.8 Βαθμός απόδοσης φωτοβολταϊκών

### 1.8.1 Ορισμός βαθμού απόδοσης

Ο βαθμός απόδοσης των φωτοβολταϊκών προκύπτει από το λόγο της μέγιστης ηλεκτρικής ισχύος  $P_{mmp}$  προς το γινόμενο της επιφάνειας  $A$  του φωτοβολταϊκού στοιχείου και της έντασης ακτινοβολίας  $G$ .

$$\eta = \frac{P_{mmp}}{AG} = \frac{I_{mmp}V_{mmp}}{AG} = FF \frac{I_{sc}V_{oc}}{AG}$$

Η απόδοση αυτή είναι πάντοτε μικρότερη από τη μέγιστη θεωρητική απόδοση  $\eta_{max,th}$ , που προκύπτει από τη σχέση:

$$\eta_{max,th} = \frac{\varphi(E_g)V_m}{\varphi E_\mu}$$

με  $\varphi(E_g)$  τη ροή των φωτονίων με ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού,  $\varphi$  τη συνολική ροή φωτονίων στην ακτινοβολία που δέχεται το φωτοβολταϊκό στοιχείο και  $E_\mu$  τη μέση ενέργεια των φωτονίων της ακτινοβολίας.

### 1.8.2 Μέγιστη θεωρητική απόδοση φωτοβολταϊκών πυριτίου

Εφόσον τα φωτοβολταϊκά πυριτίου είναι αυτά τα οποία τοποθετήθηκαν στην εγκατάσταση μας, θα γίνει παρακάτω ένας πρόχειρος υπολογισμός της μέγιστης θεωρητικής απόδοσης τους.

Αρχικά, πρέπει να υπολογιστούν τα φωτονίων έχουν ενέργεια μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του πυριτίου (1,1eV). Στην ηλιακή ακτινοβολία, περίπου τα 2/3 των φωτονίων έχουν την απαραίτητη ενέργεια. Επίσης, η  $V_m$  των φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου είναι περίπου ίση με το 1/3 της  $E_g$  της ηλιακής ακτινοβολίας. Επομένως βρίσκουμε πρόχειρα ότι η μέγιστη θεωρητική απόδοση των ηλιακών φωτοβολταϊκών στοιχείων πυριτίου είναι περίπου:

$$\eta = \frac{2}{3} \times \frac{1}{3} = 22\%$$

Ο συντελεστής απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου δεν είναι σταθερός και επηρεάζεται σημαντικά από εξωγενείς και ενδογενείς παράγοντες.

### 1.8.3 Παράγοντες που επηρεάζουν το βαθμό απόδοσης

Υπάρχουν διαφόρων ειδών παράγοντες που επηρεάζουν το βαθμό απόδοσης ενός φωτοβολταϊκού πλαισίου. Οι παράγοντες αυτοί μπορούν να χωριστούν σε δύο βασικές κατηγορίες, τους εσωτερικούς και τους εξωτερικούς.

Εσωτερικοί παράγοντες είναι τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του φωτοβολταϊκού στοιχείου όπως η αντίσταση  $R_s$ , η γήρανση, η χωροταξική τοποθέτηση των φωτοβολταϊκών στοιχείων στο φωτοβολταϊκό πλαίσιο και η διόδος αντεπιστροφής.

Σαν εξωτερικοί παράγοντες λαμβάνονται η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία περιβάλλοντος, ο άνεμος, η σκίαση των πλακών, η ατμοσφαιρική ρύπανση και οι ηλεκτρικές απώλειες. Κάθε ένας από τους ανωτέρω παράγοντες αναλύεται εν συντομία παρακάτω:

- **Παράγον ή συντελεστής γήρανσης  $n_{y,m}$**

Αφορά στη μείωση της απόδοσης των ΦΒ πλαισίων στο χρόνο ζωής τους και εκφράζεται συνήθως με το ποσοστό γήρανσης ανά έτος χρήσης. Προσδιορίζει την ελάττωση της απόδοσής τους άρα και της ισχύος αιχμής και οφείλεται κυρίως σε υπερθερμάνσεις των ΦΒ κυψελών που καταστρέφουν την δομή του υλικού τους.

- **Οπτικές ενεργειακές απώλειες**

Αποτελούν όλες εκείνες τις απώλειες που καθορίζονται από την απόκλιση της απόδοσης σε σχέση με τις πρότυπες συνθήκες, λόγω των παρακάτω αιτιών:

- Διαφοροποίηση ανακλαστικότητας ΦΒ πλαισίου σε σχέση με την αντίστοιχη σε STC.
- Επίδραση διαφοροποίησης φάσματος ακτινοβολίας σε σχέση με το AM (αέρια μάζα) 1,5 (STC)
- Απώλειες διαφοροποίησης της πόλωσής
- Απώλειες χαμηλών τιμών πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας
- Καθαρότητα όψεως του φβ πλαισίου.
- **Θερμοκρασία φωτοβολταϊκής κυψέλης**

Περιγράφει τη διαφοροποίηση της απόδοσης του ΦΒ πλαισίου, λόγω της διαφορετικής θερμοκρασίας λειτουργίας της κυψέλης σε σχέση με την θερμοκρασία της στις πρότυπες συνθήκες (STC) και δίνεται από την ίδια σχέση που χρησιμοποιείται στην περίπτωση μεμονωμένου ΦΒ στοιχείου:

$$n_T = 1 + \gamma_{mp} (\theta_c - \theta_{STC}), \text{ όπου}$$

$\gamma_{mp}$ : ο θερμικός συντελεστής μέγιστης ισχύος του ΦΒ στοιχείου

$\theta_c$ : θερμοκρασία κυψέλης θεωρούμενη ίδια για όλες τις κυψέλες.

Μια αναλυτική έκφραση για την εξάρτηση της θερμοκρασίας της φβ κυψέλης από τις συνθήκες περιβάλλοντος, είναι:

$$\theta_c = \theta_a + \frac{G_T}{G_{STC}} (T_1 e^{B \cdot W_s} + T_2 + \Delta\theta), \text{ όπου}$$

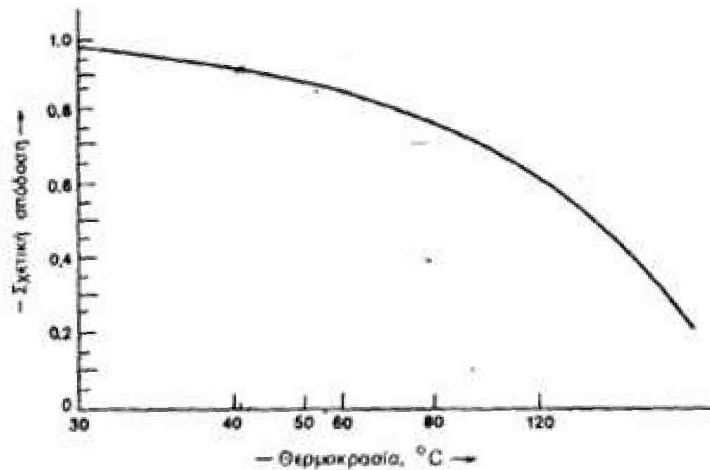
$\theta_a$ : η θερμοκρασία του περιβάλλοντα αέρα

$G_T$ : η πυκνότητα ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο του ΦΒ πλαισίου

$B$ : εμπειρικός συντελεστής

$W_s$ : η ταχύτητα του ανέμου

$T_1, T_2$ : εμπειρικοί συντελεστές που υπολογίζονται βάση τις οριακές τιμές της θερμοκρασίας της κυψέλης σε χαμηλές και υψηλές ταχύτητες ανέμου αντίστοιχα  $\Delta\theta$ : η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της κυψέλης και της πίσω επιφάνειας του ΦΒ πλαισίου.



**Σχήμα 1.24:** Μεταβολή της απόδοσης των φωτοβολταϊκών στοιχείων συναρτήσει της θερμοκρασίας.

- **Συντελεστής απωλειών στη δίοδο αντεπιστροφής**

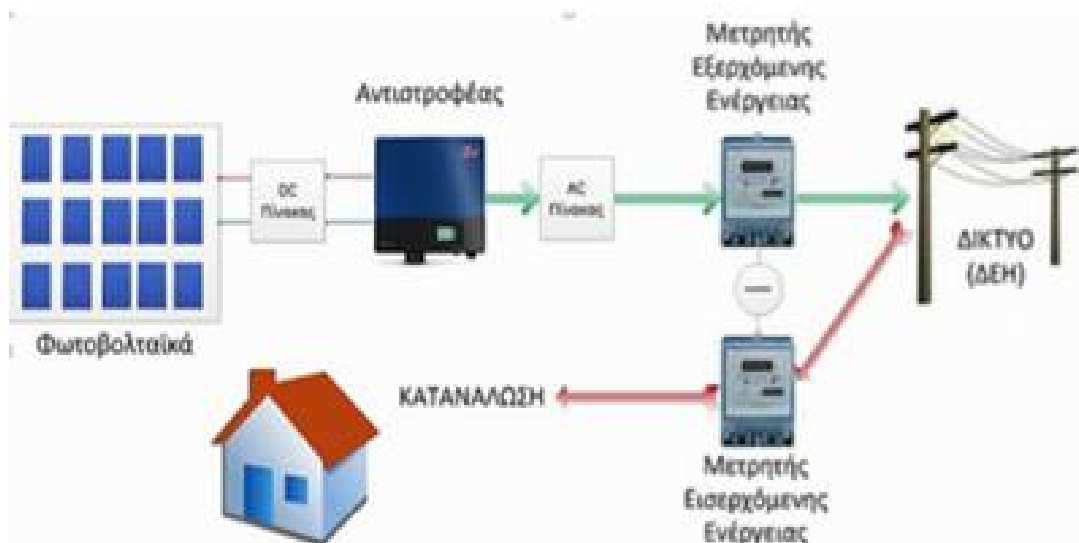
Περιγράφει τις απώλειες που προέρχονται από την δίοδο αντεπιστροφής που τοποθετείται για να αποτρέπεται η εκφόρτιση του συσσωρευτή διαμέσου της ΦΒ συστοιχίας όταν αυτή δεν φωτίζεται.

## 1.9 Συστήματα ως προς τον τρόπο εγκατάστασης

Ως προς τον τρόπο εγκατάστασης τους, τα φωτοβολταϊκά συστήματα μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες, στα αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα και στα διασυνδεδεμένα. Η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο συστημάτων είναι το ότι τα μεν αυτόνομα αποθηκεύουν την ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν και την χρησιμοποιούν όταν υπάρξει ανάγκη ενώ στα διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα όλη η παραγόμενη ενέργεια από το φωτοβολταϊκό σύστημα διοχετεύεται στο δίκτυο της ΔΕΗ και αγοράζεται από αυτή.

### 1.9.1 Διασυνδεδεμένα φωτοβολταϊκά συστήματα

Ένα διασυνδεδεμένο φωτοβολταϊκό σύστημα έχει την ακόλουθη διάταξη.



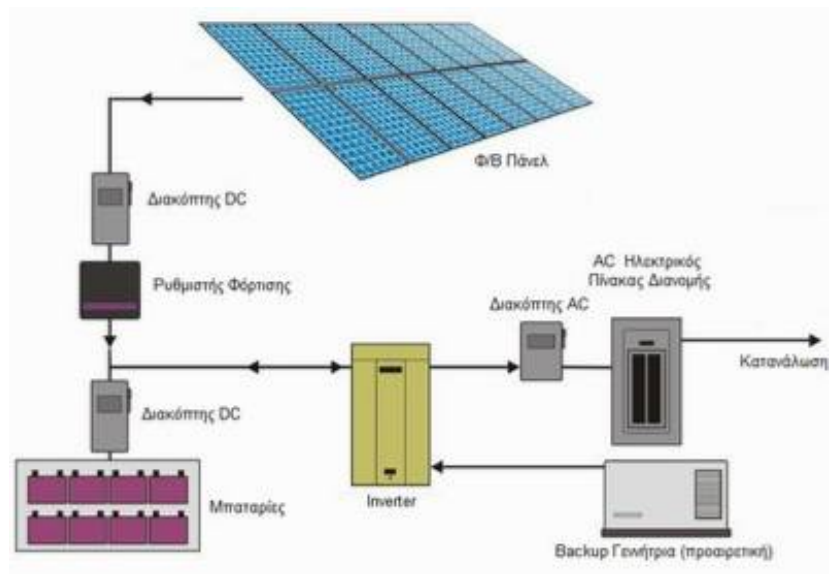
**Σχήμα 1.25:** Διάταξη διασυνδεδεμένου στο δίκτυο φωτοβολταϊκών πλαισίων.

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα παραπάνω, το ρεύμα που παράγεται από τις φωτοβολταϊκές πλάκες είναι συνεχές ρεύμα και πρέπει για να μπορεί να διασυνδεθεί με το δίκτυο να μετατραπεί σε εναλλάσσωμενο. Η εναλλαγή αυτή γίνεται με τη χρήση ενός αντιστροφέα, στην έξοδο του οποίου, το ρεύμα είναι εναλλασσόμενο και συνδέεται στο δίκτυο. Πριν τη σύνδεση αυτή, τοποθετείται ένας μετρητής εξερχόμενης ενέργειας, ο οποίος μετρά το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που παράχθηκε και προσδώθηκε στο δίκτυο. Το εκάστοτε δίκτυο ακολουθώντας ένα τιμολόγιο που έχει θεσπίσει, αγοράζει την παραγόμενη ενέργεια και κάνοντας σύγκριση με την τιμή του μετρητή εισερχόμενης-καταναλώμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο τέλος κάθε μήνα εναποθέτει τη χρηματική διαφορά στον ιδιοκτήτη.

Όπως γίνεται κατανοητό, η χρήση διασυνδεδεμένων φωτοβολταϊκών συστημάτων αποσκοπεί στο οικονομικό όφελος του ιδιοκτήτη. Αποτελούν ουσιαστικά μια επένδυση η οποία συνήθως σε λιγότερο από μια δεκαετία έχει αποσβεστεί και στον υπόλοιπο χρόνο ζωής που της απομένει αποδίδει καθαρά κέρδη.

### 1.9.2 Αυτόνομα φωτοβολταϊκά συστήματα

Η διάταξη ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος είναι η ακόλουθη.



**Σχήμα 1.26:** Διάταξη αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος.

Η βασική διαφορά μεταξύ ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος και ενός διασυνδεδεμένου, είναι στο γεγονός ότι τα αυτόνομα συστήματα παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με σκοπό την αποθήκευση και κατανάλωση της και όχι στην πώληση της. Για το λόγο αυτό, ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στα δύο αυτά συστήματα είναι διαφορετικός. Το βασικότερο κομμάτι του εξοπλισμού ενός αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος είναι οι μπαταρίες, στις οποίες γίνεται η αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας όταν αυτή δεν είναι σε θέση να αξιοποιηθεί άμεσα. Ταυτόχρονα χρησιμοποιείται ένας ρυθμιστής φόρτισης, ο οποίος είναι συνδεδεμένος τόσο με τις μπαταρίες όσο και με τον ανορθωτή τάσης, σκοπός του οποίου είναι να επιλέξει εάν η ηλεκτρική ενέργεια που παράχθηκε θα καταναλωθεί τη στιγμή εκείνη, εάν θα αποθηκευτεί στις μπαταρίες ή εάν σε περίπτωση που οι μπαταρίες είναι πλήρως φορτισμένες και δεν υπάρχει αιτία κατανάλωσης θα απενεργοποιήσει το σύστημα. Και σε αυτό το σύστημα γίνεται χρήση του ανορθωτή για την μετατροπή που παραγόμενου ρεύματος από συνεχές σε εναλλασσόμενο ώστε να βρίσκεται σε θέση να χρησιμοποιηθεί.

Τα συγκεκριμένα συστήματα χρησιμοποιούνται ουσιαστικά για την παραγωγή ενέργειας για χρήση είτε σε απομακρυσμένα σημεία που δεν είναι εφικτή η ηλεκτροδότηση τους με άλλη μέθοδο είτε σε μικρά φορτία κατανάλωσης όπου η ενέργεια που θα παράγεται σε καθημερινή βάση θα είναι ικανή να καλύψει τις ανάγκες.

Ένας βασικός παράγοντας των αυτόνομων συστημάτων είναι η διαστασιολόγηση τους. Σκοπός της διαστασιολόγησης είναι η εξασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του συστήματος ώστε να αποφευχθούν βλάβες λόγω υπερφόρτωσης και ώστε να επαρκεί το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τόσο για την λειτουργία του εξοπλισμού όσο και για την κάλυψη του φορτίου κατανάλωσης. Για το σκοπό αυτό, η διαστασιολόγηση ενός συστήματος πρέπει να ξεκινά από το φορτίο κατανάλωσης και συνυπολογίζοντας αθροιστικά όλες τις λειτουργικές απαιτήσεις του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται να υπολογισθεί ποια είναι η τελική τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος που πρέπει να παραχθεί από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Στους παραπάνω υπολογισμούς πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν και εξωτερικοί παράγοντες του συστήματος που αφορούν τις κλιματολογικές συνθήκες, τις ώρες και τις μέρες λειτουργίας του συστήματος και πιθανές σκιάσεις.

Η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση που αξιοποιήθηκε στην εργασία είναι αυτόνομη και η δομή και λειτουργία της περιγράφεται αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.





## **Κεφάλαιο 2: «Μετεωρολογικοί Σταθμοί και Όργανα»**

### **2.1 Μετεωρολογικός σταθμός**

Ο μετεωρολογικός σταθμός είναι μια επίγεια ή επιθαλάσσια εγκατάσταση που αποτελείται από όργανα και εξοπλισμό για την μέτρηση των ατμοσφαιρικών συνθηκών. Οι μετρήσεις αυτές αποδίδουν πληροφορίες για την πρόγνωση του καιρού και για τη μελέτη των κλιματολογικών συνθηκών της περιοχής στην οποία τοποθετήθηκε. Οι κύριες πληροφορίες που μπορούμε να πάρουμε από έναν μετεωρολογικό σταθμό είναι για τη θερμοκρασία, τη βαρομετρική πίεση, την υγρασία, την ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου και την βροχόπτωση.

Τα όργανα που τοποθετούνται σε έναν σύνηθες μετεωρολογικό σταθμό είναι:

- Το θερμόμετρο για τη μέτρηση της θερμοκρασίας του αέρα ή της επιφάνειας της θάλασσας
- Το υγρόμετρο για τη μέτρηση της υγρασίας
- Το βαρόμετρο για τη μέτρηση της ατμοσφαιρικής πίεσης
- Το ανεμόμετρο για τη μέτρηση της ταχύτητας του αέρα
- Ο ανεμοδείκτης για την καταγραφή της κατεύθυνσης του αέρα
- Το πυρανόμετρο για τη μέτρηση της ηλιακής ακτινοβολίας
- Το βροχόμετρο για τη μέτρηση της βροχόπτωσης σε τακτά χρονικά διαστήματα.

Χρειάζεται ιδιαίτερη μέριμνα στην τοποθέτηση των οργάνων καθώς το υγρόμετρο και το θερμόμετρο πρέπει να βρίσκονται υπό σκιά και να προστατεύονται από ανέμους ενώ αντιθέτως το πυρανόμετρο πρέπει να είναι σε συνεχή επαφή με τις ηλιακές ακτίνες και δεν πρέπει να υπάρχει κάποιο φυσικό εμπόδιο πλησίον του ανεμοδείκτη, του βροχόμετρου και του ανεμομέτρου για να μην υπάρχουν εξωτερικοί παράμετροι που να επηρεάζουν τις ενδείξεις.



**Σχήμα 2.1:** Μεγάλου μεγέθους μετεωρολογικός σταθμός

Για να ληφθούν πιο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα από τα όργανα ενός μετεωρολογικού σταθμού, συνιστάται να παίρνονται αυτόματες μετρήσεις και να αποθηκεύονται σε μια βάση δεδομένων για κάθε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ενώ παράλληλα πρέπει ανά 24 ώρες να γίνεται και μια παρατήρηση από ένα αρμόδιο άτομο για την επιβεβαίωση πως όλα τα όργανα λειτουργούν δίχως σφάλμα.

Οι μετεωρολογικοί σταθμοί μπορούν να χωρισθούν σε δύο κατηγορίες. Στους μεγάλους μετεωρολογικούς σταθμούς (Σχ. 2.1) και τους ιδιωτικούς-μικρούς μετεωρολογικούς σταθμούς (Σχ. 2.2). Η διαφορά μεταξύ των δύο κατηγοριών είναι στη χρήση διαφορετικής ποιότητας, ακρίβειας και αξιοπιστίας οργάνων.



**Σχήμα 2.2:** Μικρού μεγέθους μετεωρολογικός σταθμός

Οι μετρήσεις στους μεγάλους μετεωρολογικούς σταθμούς είναι μεγάλης ακρίβειας ενώ οι αντίστοιχες ενός οικιακού μετεωρολογικού σταθμού όχι. Αυτό είναι απόρροια αρχικά του ότι πέρα από τα όργανα που χρησιμοποιούνται σε μεγάλους μετεωρολογικούς σταθμούς υπάρχουν διαθέσιμα στο εμπόριο και άλλα όργανα λιγότερο αξιόπιστα με μεγαλύτερο εύρος σφάλματος αλλά με μικρότερο κόστος. Παράλληλα πολύ συχνά υπάρχουν λάθη στην τοποθέτηση των ιδιωτικών μετεωρολογικών σταθμών είτε λόγω άγνοιας είτε λόγω φυσικών εμποδίων που επηρεάζουν τις μετρήσεις.

### **2.1.1 Η μέτρηση της Ηλιακής ακτινοβολίας**

Έχουν αναπτυχθεί αρκετά όργανα και διατάξεις μέσω των οποίων μετρούνται η πυκνότητα ισχύος της Ηλιακής ακτινοβολίας  $F_{A,obs}$  ή των συνιστωσών της. Από αυτά, άλλα επιτυγχάνουν ολοφασματικές μετρήσεις και άλλα φασματικές μετρήσεις με διάφορες διακριτικές ικανότητες. Τα όργανα μέτρησης της Ηλιακής ακτινοβολίας λειτουργούν με βάση το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (όπου ένας επιστρωμένος με κατάλληλο φωτοευαίσθητο υλικό αισθητήρας παράγει ασθενή ηλεκτρικά ρεύματα ανάλογα με την ένταση της Ηλιακής ακτινοβολίας που δέχεται) ή με βάση το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο (κατά το οποίο η διαφορά θερμοκρασίας σε δυο σημεία μιας κατάλληλα διαμορφωμένης μεταλλικής επιφάνειας δημιουργεί ηλεκτρικά φορτία). Το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα (σήμα – signal) μπορεί να είναι μεταβλητής τάσης, έντασης, συχνότητας ή παλμικό, ανάλογα με τον αισθητήρα και την αρχιτεκτονική ηλεκτρονικού σχεδιασμού που δίνει ο κατασκευαστής. Το σήμα στην συνέχεια οδηγείται σε ένα ενισχυτή (amplifier), μετά ψηφιοποιείται (μέσω ενός A/D converter) και τελικά καταγράφεται στην μονάδα μνήμης ψηφιακού καταγραφέα (data logger). Λόγω των πολύ μικρών σημάτων που παράγονται οι ενισχυτές και τα ηλεκτρονικά μέρη πρέπει να είναι σταθεροποιημένα τόσο ως προς τα ρεύματα τροφοδοσίας και τις αποδόσεις τους, όσο και ως προς τις μεταβολές θερμοκρασίας περιβάλλοντος που αντιμετωπίζουν κατά την διάρκεια κάθε ημέρας. Ο τελευταίος παράγοντας, αποτελεί συνήθως ένα βασικό πρόβλημα στα θέματα αξιόπιστων μετρήσεων της Ηλιακής ακτινοβολίας. Αν  $S$  είναι η στάθμη του ηλεκτρικού σήματος (οποιασδήποτε μορφής) που παράγει ο αισθητήρας, τότε η μετατροπή του στις γνωστές μονάδες πυκνότητας

ισχύος ( $W/m^2$ ) επιτυγχάνεται από τη συνάρτηση μεταφοράς (που πρακτικά αναφέρεται και ως συνάρτηση μετατροπής ή ισοστάθμισης – calibration function) που έχει τη μορφή:

$$F_{A,obs} = a \cdot S + \beta$$

Οι σταθερές  $a$  και  $\beta$  ονομάζονται σταθερές βαθμονόμησης (calibration constants). Όπως είναι γνωστό από τα Μαθηματικά, η  $a$  ονομάζεται κλίση (slope) και η  $\beta$  σταθερά μετάθεσης (offset). Οι σταθερές βαθμονόμησης προσδιορίζονται με εξαιρετικά ελεγχόμενες εργαστηριακές μετρήσεις, μέσω μιας καθορισμένης διαδικασίας που είναι γνωστή ως βαθμονόμηση (calibration). Σε αυτή, οι ενδείξεις (το σήμα εξόδου) κάθε οργάνου συγκρίνονται με τις ενδείξεις ενός οργάνου αναφοράς (που λέγεται πρότυπο όργανο ή όργανο βαθμονόμησης) το οποίο έχει πιστοποιηθεί για την ακρίβεια και ορθότητα των μετρήσεών του από διεθνείς οργανισμούς και εργαστήρια (όπως οι World Meteorological Organization, World Radiation Center κα.) που το επιβλέπουν γι' αυτό τον σκοπό. Τόσο η βαθμονόμηση όσο και οι τιμές των σταθερών  $a$  και  $\beta$  αποτελούν το κρίσιμότερο βήμα κατά την διαδικασία μέτρησης της Ηλιακής ακτινοβολίας, αφού οποιοδήποτε σφάλμα σε αυτές τις σταθερές θα έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή εξίσου λανθασμένων μετρήσεων των  $F_{A,obs}$ ,  $B$  και  $D$ . Οι μετρητές Ηλιακής ακτινοβολίας συχνά αναφέρονται ως ακτινόμετρα (actinometers) ή ραδιόμετρα (radiometers) και χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες:

- A. Τα ευρυφασματικά όργανα (broadband instruments) και
- B. Τα φασματικά όργανα (spectral instruments) ή φασματόμετρα (spectrometers)

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν τα ακτινόμετρα που μετρούν την πυκνότητα ισχύος  $F_{A,obs}$  (ή άλλα μεγέθη που σχετίζονται άμεσα με αυτή) σε ολόκληρα φασματικά παράθυρα, όπως πχ. στο Visual, στο UV + Visual + N-IR. Συνήθως τα όργανα αυτά μετρούν την  $F_{A,obs}$  το λιγότερο από τα 310 ως τα 2800 nm . Στην κατηγορία (A) ανήκουν τα ακόλουθα όργανα:

- A.1. Τα πυρανόμετρα (pyranometers), για την ευρυφασματική μέτρηση της πυκνότητας ισχύος της ολικής Ηλιακής ακτινοβολίας (Σχ. 2.3).
- A.2. Τα πυρηλιόμετρα (pyrheliometers), για την ευρυφασματική μέτρηση της πυκνότητας ισχύος της απευθείας Ηλιακής ακτινοβολίας (Σχ. 2.3).

- A.3. Τα πυργεώμετρα (pyrgeometers) που είναι γνωστά και ως πυρανόμετρα θερμικού υπεριώδους (F-IR pyranometers), για την ευρυφασματική μέτρηση της πυκνότητας ισχύος της θερμικής ακτινοβολίας είτε της επιφάνειας της Γης είτε της ατμόσφαιρας (Σχ. 2.3).
- A.4. Τα υπεριωδόμετρα (UVmeters), για την ευρυφασματική μέτρηση της πυκνότητας ισχύος της ολικής Ηλιακής ακτινοβολίας στο υπεριώδες UV-A + UV-B (Σχ. 2.3).
- A.5. Τα αλβεδόμετρα (albedometers), για την ευρυφασματική μέτρηση της ανακλαστικής ικανότητας (αλβέδο) της Ηλιακής ακτινοβολίας από τα διάφορων τύπων εδάφη ή επικαλύψεις της Γήινης επιφάνειας (Σχ. 2.3)



**Σχήμα 2.3:** Πυρανόμετρο διπλού θόλου, Πυρηλιόμετρο, Υπεριωδόμετρο, Αλβεδόμετρο, Πυργεώμετρο

Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν τα ακτινόμετρα που μετρούν την  $F_{A,obs}$  σε κάθε μήκος κύματος χωριστά ή σε μια μικρή φασματική περιοχή κάθε φορά με εύρος  $\Delta\lambda$  το πολύ 100 nm. Τα πλέον εξελιγμένα ακτινόμετρα του είδους μετρούν την  $F_{A,obs}$  σε εύρος  $\Delta\lambda$  της τάξης του 1 nm. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα Ηλιακά φασματοφωτόμετρα (Solar spectro-photometers) που κυκλοφορούν κυρίως σε δυο μορφές:

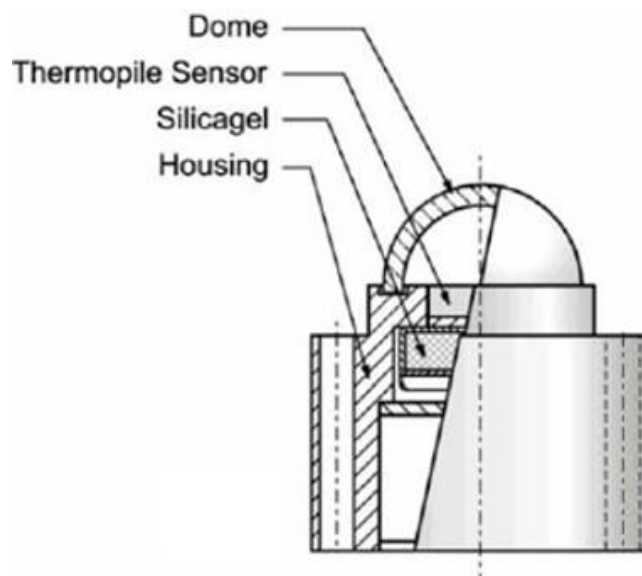
- B.1. Τα ζωνοπερατά φωτόμετρα (Σχ. 2.4) που καταγράφουν την πυκνότητα ισχύος σε φασματικές μπάντες (εύρους περίπου  $\Delta\lambda = 100$  nm) μέσω κατάλληλων φίλτρων.
- B.2. ή τα περιθλαστικά φασματοφωτόμετρα (grating spectrophotometers) (Σχ. 2.4) που καταγράφουν την πυκνότητα ισχύος  $F_{A,obs}$  της Ηλιακής ακτινοβολίας από 300 ~ 1100 nm σε εκατοντάδες (επί του παρόντος μέχρι και 2048) διαφορετικά μήκη κύματος. Τα όργανα αυτά είναι επί του παρόντος λίγα και έχουν ερευνητική κυρίως χρήση.



**Σχήμα 2.4:** Το ζωνοπερατό, Ηλιακό φωτόμετρο με φασματικό εύρος 440-1020 nm και μέτρηση της  $F_{A,obs}$  μέσω 8 ζωνοπερατών φίλτρων. Το περιθλαστικό φασματοφωτόμετρο με φασματικό εύρος 309-1055 nm και μέτρηση της  $F_{A,obs}$  μέσω 1032 καναλιών.

### 2.2.1.1 Πυρανόμετρα

Τα πυρανόμετρα είναι όργανα μέτρησης της συνολικής (global) πυκνότητας ισχύος ( $F_{A,obs}$  ή  $G$ ) της Ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια εμβαδού  $A = 1 \text{ m}^2$ . Η μορφή τους είναι όπως φαίνεται στο Σχ. 2.3. Η λειτουργία των πυρανόμετρων στηρίζεται στους αισθητήρες θερμοπύλης (thermopile) που λειτουργούν με βάση το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο και. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.5 ο αισθητήρας θερμοπύλης έχει εξωτερικά την μορφή οριζώντιου κυκλικού δίσκου επικαλυμμένου με κατάλληλο μαύρο υλικό ώστε να απορροφά σχεδόν πλήρως την Ηλιακή ακτινοβολία (οι καλύτεροι απορροφητές φτάνουν σε ποσοστά της τάξης του 97 – 98 % απορρόφηση). Βασικό ζητούμενο των απορροφητών είναι επίσης η φασματική τους ομοιομορφία σε όλο το εύρος λειτουργίας ενός αισθητήρα θερμοπύλης (συνήθως από 300 ~ 2400 nm). Οι περισσότεροι σύγχρονοι αισθητήρες χαρακτηρίζονται από φασματικές αποκρίσεις που δεν υπερβαίνουν το  $\pm 2 \%$  της μέσης απορροφητικότητας, γεγονός που αποτελεί μια εξαιρετικά καλή απόδοση, αν σκεφτούμε το φασματικό εύρος στο οποίο ανταποκρίνονται αυτά τα υλικά. Η συλλεκτική επιφάνεια της θερμοπύλης είναι κατά πολύ μικρότερη του  $1 \text{ m}^2$  (συνήθως της τάξης του  $1 \text{ cm}^2$ ), αλλά η αναγωγή του σήματος εξόδου του αισθητήρα σε μονάδες πυκνότητας ισχύος  $\text{W/m}^2$  γίνεται μέσω των σταθερών βαθμονόμησης  $\alpha$  και  $\beta$  και της συνάρτησης μεταφοράς.



**Σχήμα 2.5:** Σχέδιο πυρανόμετρου σε τομή όπου μεταξύ άλλων σημειώνονται ο προστατευτικός θόλος (dome) και ο αισθητήρας θερμοπύλης (thermopile sensor).

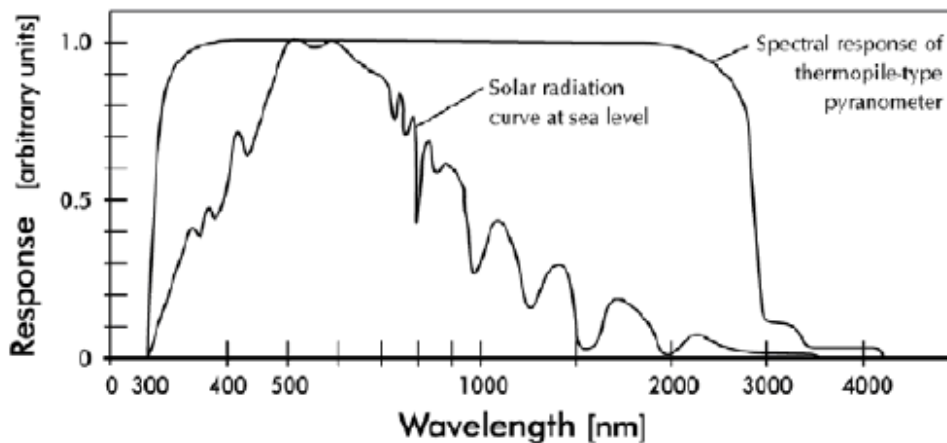
Η θερμοπύλη αποτελείται από μια σειρά αρκετών (τυπικά 10 ως 100) θερμοηλεκτρικών ζευγών (thermocouples) που συνήθως τοποθετούνται το ένα δίπλα στο άλλο καλύπτοντας όλη την περιφέρεια του κυκλικού δίσκου της θερμοπύλης. Τα θερμοηλεκτρικά ζεύγη είναι συνδεδεμένα εν σειρά ώστε να παράγουν την μέγιστη δυνατή διαφορά δυναμικού (τάση στα άκρα τους). Ακόμα και έτσι, οι τάσεις που παράγονται είναι εξαιρετικά μικρές (περί τα 5 ~ 20 mV υπό κάθετα προσπίπτουσα Ηλιακή ακτινοβολία πυκνότητας ισχύος 1000 W/m<sup>2</sup>). Η τάση που παράγει η θερμοπύλη ενός πυρανόμετρου όταν δέχεται ακτινοβολία με  $F_{A,obs} = 1 \text{ W/m}^2$  λέγεται ευαισθησία (sensitivity) του πυρανόμετρου.

Η θερμοπύλη καλύπτεται από ένα προστατευτικό γυάλινο θόλο (dome). Ο θόλος αυτός, αφενός προστατεύει τον αισθητήρα από την βροχή και την σκόνη, αφετέρου του διασφαλίζει ένα είδος θερμομόνωσης από το περιβάλλον, ώστε τα θερμοηλεκτρικά ζεύγη να μην υπόκειται σε μεγάλη θερμοκρασιακή διακύμανση κατά την διάρκεια της ημέρας, που θα επηρέαζε άμεσα την λειτουργία της θερμοπύλης. Αρκετά πυρανόμετρα έχουν γι' αυτό τον λόγο διπλό θόλο ενώ τα ακόμα πιο ακριβά μοντέλα διαθέτουν σύστημα κυκλοφορίας που διατηρεί σε σταθερή θερμοκρασία των αισθητήρα. Εκτός από την ευαισθησία  $s$ , τα βασικότερα τεχνικά χαρακτηριστικά των πυρανόμετρων είναι:

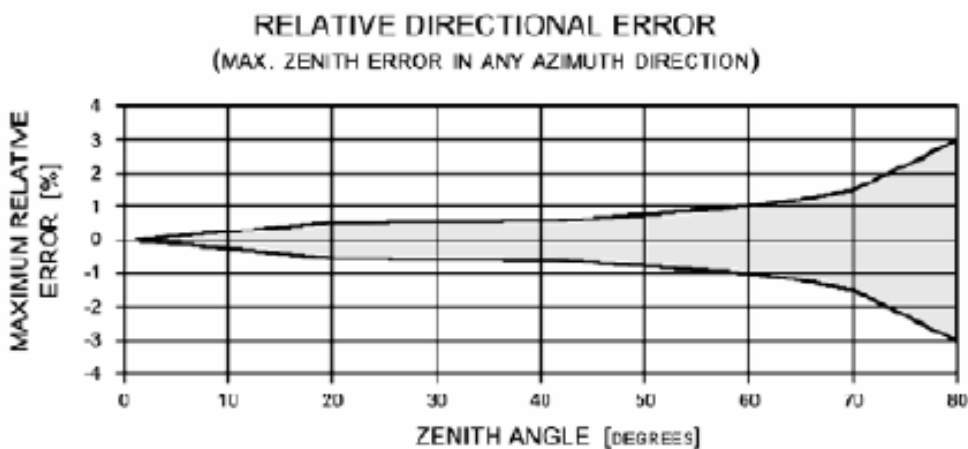
- i. Η φασματική κλίμακα (spectral range), δηλαδή το εύρος μηκών κύματος ή φασματικό παράθυρο, εντός του οποίου η θερμοπύλη ανταποκρίνεται σχεδόν ομοιόμορφα στην ακτινοβολία. Συνήθως κυμαίνεται από τα 310 ως τα 2800 nm. Για παράδειγμα στο σχήμα 2.6 φαίνεται η φασματική απόκριση ενός πυρανόμετρου 1<sup>ης</sup> κλάσης (first class).
- ii. Η διακριτική ικανότητα (resolution) που είναι η μικρότερη μεταβολή στην πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας που μπορεί να γίνει αντιληπτή (μετρήσιμη) από ένα πυρανόμετρο. Συνήθως κυμαίνεται στα  $\pm 5 \text{ W}$  για τα πυρανόμετρα 1ης κλάσης και στα  $\pm 10 \text{ W}$  για τα πυρανόμετρα 2<sup>ης</sup> κλάσης (second class).
- iii. Το σφάλμα κατεύθυνσης (directional error) που οφείλεται στο ότι η θερμοπύλη (σε συνδυασμό με την παρεμβολή του προστατευτικού θόλου) δεν διατηρεί την ίδια ευαισθησία ανεξαρτήτως κατεύθυνσης της ακτινοβολίας. Έτσι όταν δέχεται την Ηλιακή ακτινοβολία υπό υψηλές γωνίες ύψους εμφανίζει την ευαισθησία  $s$



που αναγράφεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά. Όταν όμως το ύψος του Ήλιου μειώνεται σημαντικά η ευαισθησία μεταβάλλεται σε ένα βαθμό, που προφανώς πρέπει να διατηρείται σε όσο το δυνατόν μικρότερο επίπεδο. Το σφάλμα κατεύθυνσης τυπικά δίνεται από τους κατασκευαστές για ζενίθια γωνία  $80^\circ$  (ή γωνία ύψους  $10^\circ$ ) είτε ως ποσοστό %, είτε απευθείας ως σφάλμα της πυκνότητας ισχύος, για συνθήκες φωτισμού με πυκνότητα ισχύος  $1000 \text{ W/m}^2$ . Τα πυρανόμετρα 1<sup>ης</sup> κλάσης διατηρούν αυτό το σφάλμα σε πολύ μικρά επίπεδα (το πολύ  $5\sim 7 \text{ W}$  στα  $1000$ ) ενώ τα πυρανόμετρα 2<sup>ης</sup> κλάσης χαρακτηρίζονται από σφάλμα κατεύθυνσης από  $10\sim 20 \text{ W}$  (στα  $1000$ ).

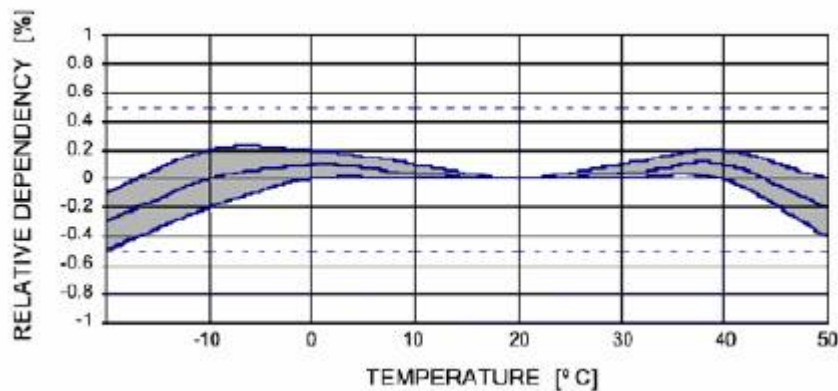


**Σχήμα 2.6:** Η φασματική απόκριση πυρανόμετρου 1<sup>ης</sup> κλάσης



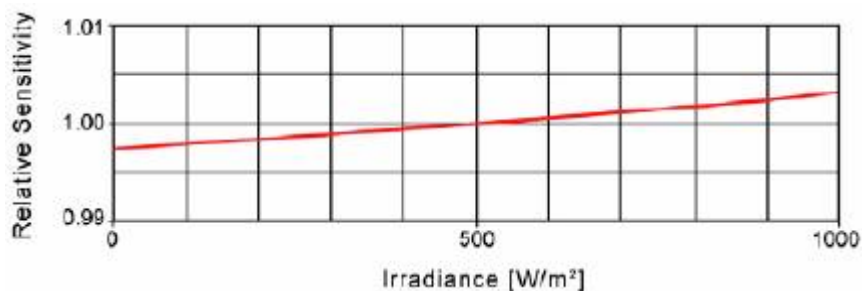
**Σχήμα 2.7:** Το σφάλμα κατεύθυνσης πυρανόμετρου 1<sup>ης</sup> κλάσης

- iv. Ο χρόνος απόκρισης (response time) που δείχνει πόσο γρήγορα ένα πυρανόμετρο προσαρμόζεται σε μια αιφνίδια μεταβολή της έντασης της ακτινοβολίας και συνήθως αναφέρεται στην προσαρμογή του οργάνου στο 95 % της νέας έντασης (εκτός και αν καθορίζεται διαφορετικά).
- v. Η θερμική απόκριση (temperature response ή temperature dependence of sensitivity) (Σχ. 2.8) που δείχνει σε τι βαθμό το πυρανόμετρο μεταβάλει την ευαισθησία του λόγω των μεταβολών της θερμοκρασίας του περιβάλλοντός του εντός μιας καθορισμένης κλίμακας (συνήθως  $-10 \sim +40$  °C). Τα πυρανόμετρα 1<sup>ης</sup> κλάσης έχουν ευστάθεια καλύτερη από  $\pm 2$  % και τα 2<sup>ης</sup> κλάσης  $\pm 5$  %.



**Σχήμα 2.8:** Η μέγιστη τιμή του σφάλματος θερμικής απόκρισης πυρανόμετρου 1<sup>ης</sup> κλάσης (περιορίζεται εντός του σκιασμένου χώρου των δυο καμπυλών) και η μέση τιμή του (ενδιάμεση καμπύλη).

- vi. Η ολίσθηση ευαισθησίας (non-stability ή sensitivity drifting) που δείχνει κατά ποιο ποσοστό μπορεί να μεταβάλλεται η ευαισθησία του πυρανόμετρου ανά έτος λειτουργίας, εξαιτίας μεταβολών στις ιδιότητες της μαύρης επιστρώσεως και της θερμοπύλης. Συνήθως περιορίζεται στο  $\pm 1\%$  / year.

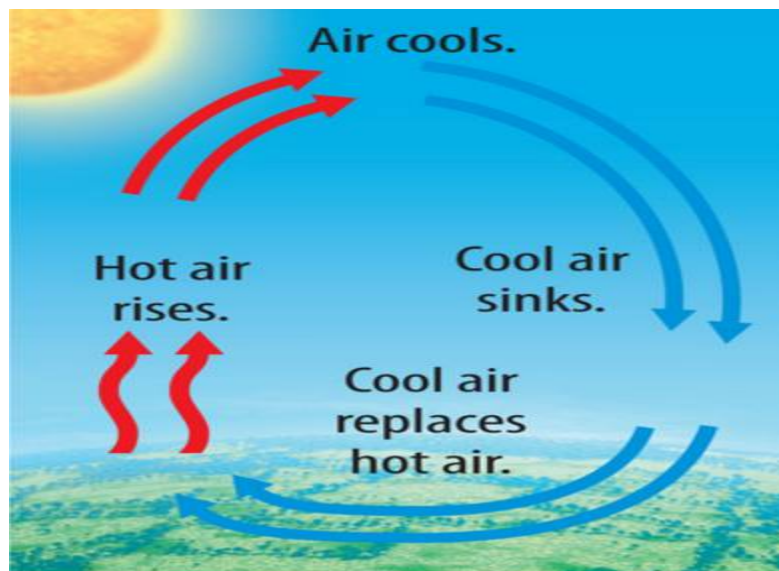


**Σχήμα 2.9:** Η μη γραμμικότητα πυρανόμετρου 1<sup>ης</sup> κλάσης σε σχέση με την ευαισθησία του υπό πυκνότητα ισχύος 500 W/m<sup>2</sup>.

- vii. Η μη-γραμμικότητα (non-linearity) που δείχνει σε τι βαθμό το σήμα εξόδου ενός πυρανόμετρου μεταβάλλεται κατά ακριβή αναλογία με την πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας. Έτσι αν ο διπλασιασμός της  $F_A$  καταγράφεται από την θερμοπύλη ως διπλασιασμός του σήματος εξόδου, ο τριπλασιασμός της  $F_A$  ως τριπλασιασμός του σήματος εξόδου κοκ. το πυρανόμετρο λέμε ότι έχει γραμμική συμπεριφορά, διαφορετικά αν υπάρχουν σημαντικές αποκλίσεις λέμε ότι έχει μη-γραμμική συμπεριφορά. Η όσο το δυνατόν γραμμική συμπεριφορά εντός μιας κλίμακας τιμών του ερεθίσματος (εδώ Ηλιακή ακτινοβολία) είναι βασικό ζητούμενο όλων των αισθητήρων (Σχ. 2.9).

### 2.2.2 Η μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου

Η ταχύτητα ροής του ανέμου αποτελεί ένα από τα θεμελιώδη στοιχεία της ατμόσφαιρας. Η ταχύτητα αυτή δημιουργείται εξαιτίας της ιδιότητας του ανέμου να κινείται από υψηλότερες σε χαμηλότερες πιέσεις (Σχ. 2.10).



**Σχήμα 2.10:** Σχηματικό διάγραμμα δημιουργίας ανέμου - κίνηση του αέρα

Η μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου αποδείχτηκε με το πέρασ των αιώνων επιτακτική ανάγκη καθώς η ένταση του καθόριζε ένα μεγάλο αριθμό εργασιών. Τέτοιες εργασίες είναι οι ναυτιλιακές, οι αεροπορικές, και οι μεγάλες κατασκευές οι οποίες σε πολύ μεγάλες ταχύτητες ανέμου δεν είναι εφικτό να πραγματοποιηθούν.

Τα βασικότερα όργανα μέτρησης της ταχύτητας του ανέμου είναι τα ανεμόμετρα. Η μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου βάσει της κλίμακας Μποφόρ βασίζεται στην παρατήρηση των φυσικών φαινομένων όπως ο κυματισμός της θάλασσας και η κινητικότητα των φύλλων των δέντρων. Έχει δημιουργηθεί ένας πίνακας που βαθμονομείται σε δώδεκα κατηγορίες, κάθε μια από τις οποίες έχει καταγεγραμμένη την παρατήρηση που έχει γίνει για τον κυματισμό της θάλασσας και την κίνηση των φύλλων των δέντρων. Η κλίμακα αυτή είναι εμπειρική και για αυτό το λόγο η εφαρμογή της είναι μόνο για την μετεωρολογική ενημέρωση του κόσμου.

Σε περιπτώσεις όπου θέλουμε πιο συγκεκριμένα και πιο αναλυτικά αποτελέσματα, η ταχύτητα του ανέμου μετράται με ανεμόμετρα. Τα ανεμόμετρα είναι τα πιο δημοφιλή όργανα για την μέτρηση της ταχύτητας του ανέμου και κατασκευάστηκαν πρώτη φορά το 1450 από τον Λεόν Μπατίστα Αλμπέρτι. Για να φτάσουν τα ανεμόμετρα στη σημερινή τους μορφή χρειάστηκαν να περάσουν πολλά χρόνια κατά τη διάρκεια των οποίων μειωνόταν συνεχώς ο συντελεστής σφάλματος. Τα πρώτα ανεμόμετρα που κατασκευάστηκαν αποτελούνταν από έναν στύλο και τέσσερις ημισφαιρικές κούπες κάθετες μεταξύ τους στο επίπεδο (Σχ. 2.11).



**Σχήμα 2.11:** Βασικός τύπος ανεμομέτρου

Με το πέρασμα των χρόνων όμως έγινε αντιληπτό ότι βάσει της υπάρχουσας κατασκευής δεν προσδίδεται όλο το ποσό της ροής του ανέμου στις κούπες καθώς η ακόλουθη της εμποδίζει τη λειτουργία της. Η σημερινή μορφή ενός ανεμομέτρου, κατασκευάστηκε το 1935 στον Καναδά και αποτελείται από έναν υπερυψωμένο στύλο

και τρεις ημισφαιρικές κούπες ενωμένες σε κοινό άξονα που έχουν την ελευθερία να περιστρέφονται ελεύθερα (Σχ. 2.12). Οι τρεις κούπες είναι τοποθετημένες συμμετρικά, έχουν το ίδιο μήκος και πλάτος και σχηματίζουν μεταξύ τους γωνία 120°. Με την μείωση της μίας κούπας επετεύχθη μείωση του σφάλματος μετρήσεως στο 3%.



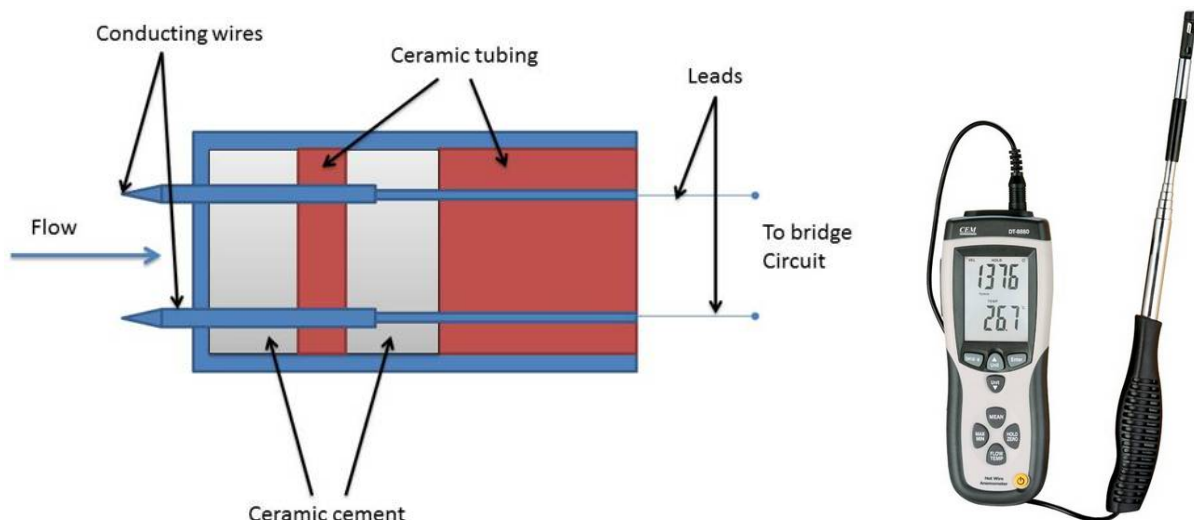
**Σχήμα 2.12:** Νέος τύπος κυπελοφόρων ανεμομέτρων

Τα ανεμόμετρα μπορούν να χωρισθούν σε δύο κατηγορίες. Σε αυτά που υπολογίζουν την ταχύτητα του ανέμου και σε αυτά που υπολογίζουν την πίεση του. Παρόλα αυτά όμως επειδή η λειτουργία αυτών τα δύο διαφορετικών τύπων ανεμομέτρου δεν διαφέρει αισθητά, έχουν κατασκευαστεί νέα εξελιγμένα ανεμόμετρα που μπορούν να προσδώσουν πληροφορίες και για τόσο για την πίεση όσο και για την ταχύτητα του ανέμου.

Η αρχή λειτουργίας των ανεμομέτρων, βασίζεται στην περιστροφική κίνηση των ημισφαιρικών κουπών. Καθώς ο αέρας ρέει προς τις κούπες, αυτές περιστρέφονται συνεχώς έχοντας μια σταθερή κίνηση. Ανάλογα με την ταχύτητα την οποία περιστρέφονται μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα ροής του ανέμου. Με την αύξηση ή τη μείωση της ταχύτητας του ανέμου, οι κούπες αντίστοιχα θα αυξήσουν ή θα μειώσουν την ταχύτητα περιστροφής τους. Μία ακόμη πληροφορία που μπορούμε να λάβουμε από ένα τέτοιο ανεμόμετρο, είναι μέσω της παρατήρησης της κίνησης των κουπών για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Με τον υπολογισμό των συνολικών στροφών στο διάστημα αυτό και με αναγωγή στην χρονική μονάδα που επιθυμούμε, μπορούμε να υπολογίσουμε την μέση ταχύτητα του ανέμου.

Όπως είναι ευκόλως κατανοητό όμως, οι παραπάνω μετρήσεις δεν μπορούν να γίνουν από τον άνθρωπο όταν η ένταση του ανέμου είναι υψηλή. Για αυτό το λόγο, στα σύγχρονα ανεμόμετρα τοποθετούνται αισθητήρια όργανα κίνησης τα οποία είτε μετρούν τον αριθμό περιστροφών του τριαξονικού βραχίονα είτε τη χρονική διαφορά μεταξύ των περασμάτων των κουπών. Έτσι μπορούμε να γνωρίζουμε τον αριθμό των στροφών σε ένα χρονικό περιθώριο και να υπολογίσουμε τη μέση ταχύτητα του ανέμου ή βάσει της χρονικής διαφοράς διαδοχικών περασμάτων των κουπών και εφόσον γνωρίζουμε την μεταξύ τους απόσταση, να υπολογίσουμε την στιγμιαία ταχύτητα του ανέμου. Συνηθέστερα, εφόσον τα αέρια ρεύματα δεν είναι ποτέ σταθερά, οι υπολογισμοί γίνονται για τον υπολογισμό της μέσης ταχύτητας του ανέμου για κάποιο χρονικό διάστημα.

Το 1991 υπήρξε περαιτέρω εξέλιξη του ανεμομέτρου από τον Ντέρεκ Γουέστον ο οποίος τοποθέτησε ένα μικρό πτερύγιο σε μια από τις τρεις κούπες. Το αποτέλεσμα ήταν να υπάρχουν αυξομειώσεις στην ταχύτητα περιστροφής του ανεμομέτρου, μελετώντας τις οποίες ήταν δυνατόν να υπολογισθεί και η κατεύθυνση του ανέμου.



**Σχήμα 2.13:** Ανεμόμετρο θερμού νήματος (*hot wire anemometer*)

Μια ακόμη μέθοδος για τον υπολογισμό της ταχύτητας του ανέμου είναι με τη χρήση ανεμομέτρου θερμού νήματος (*hot wire anemometer*). Τα συγκεκριμένα ανεμόμετρα χρησιμοποιούν ένα πολύ λεπτό κομμάτι υλικού το οποίο με χρήση ηλεκτρισμού θερμαίνεται σε μια θερμοκρασία μεγαλύτερη από αυτή του περιβάλλοντος και συνεπώς μεγαλύτερη και από αυτή του ανέμου. Καθώς ο αέρας περνά από το νήμα,

εφόσον έχει χαμηλότερη θερμοκρασία από αυτό, το ψύχει και καθώς η ηλεκτρική αντίσταση των περισσότερων μετάλλων εξαρτάται από την θερμοκρασία τους, μπορεί έτσι να προκύψει μια σχέση μεταξύ της αντίστασης του νήματος και της ταχύτητας ροής (Σχ. 2.13).

Άλλοι τύποι ανεμομέτρων που δεν έχουν τόσο διαδεδομένη χρήση είναι το Laser Doppler ανεμόμετρο που βασίζει τη λειτουργία του στο φαινόμενο Doppler, το ηχητικό ανεμόμετρο και το ανεμόμετρο ακουστικού συντονισμού.

### **2.2.3 Η μέτρηση της διεύθυνσης του ανέμου**

Η διεύθυνση του ανέμου χαρακτηρίζεται από το σημείο του ορίζοντα από όπου πνέει ο άνεμος. Εκφράζεται είτε σε μοίρες λαμβάνοντας ως αρχή τον μαγνητικό Βορρά, είτε με σύμβολα ανεμολογίου, είτε ονομαστικά. Για τη μέτρηση της διεύθυνσης του ανέμου χρησιμοποιούνται κάποια πολύ απλά ως προς τη δομή και τη λειτουργία τους όργανα, οι ανεμοδείκτες. Ο ανεμοδείκτης είναι ένα όργανο που χρησιμοποιείται μαζικά, ακόμη και για οικιακή χρήση.

Ο ανεμοδείκτης ουσιαστικά αποτελείται από έναν στύλο με έναν άξονα προσαρμοσμένο σε αυτόν. Η λειτουργία του ανεμοδείκτη βασίζεται στην περιστροφή του άξονα ανάλογα με την κατεύθυνση του ανέμου μέχρι αυτός να βρεθεί σε παράλληλη τροχιά με τη ροή του ανέμου. Τη στιγμή που θα σταθεροποιηθεί ο άξονας θα μπορούμε να διαπιστώσουμε ποια είναι η διεύθυνση του ανέμου (Σχ. 2.14). Για την διευκόλυνση μας στην οπτική παρατήρηση του φαινομένου, το βάρος στα δύο άκρα των αξόνων είναι διαφορετικό και στο βαρύτερο άκρο τοποθετείτε ένα βέλος.



**Σχήμα 2.14:** Βασικός τύπος ανεμοδείκτη

#### 2.2.4 Η μέτρηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος

Η θερμοκρασία είναι το φυσικό μέγεθος που μετρά την ενέργεια κίνησης ή ταλάντωσης της ύλης σε ατομικό επίπεδο. Στην πράξη είναι το μέτρο εκείνο με το οποίο προσδιορίζεται η "θερμική κατάσταση" των διαφόρων σωμάτων, είναι δηλαδή ένα φυσικό μέγεθος που συνδέεται με την μέση κινητική ενέργεια των σωματιδίων του στοιχείου μάζας, το οποίο και χαρακτηρίζει πόσο ψυχρό ή πόσο θερμό είναι αυτό. Το αίτιο που δημιουργεί το αίσθημα του θερμού ή ψυχρού είναι η θερμότητα που, όταν απορροφάται ή εκλύεται από ένα σώμα, προκαλεί μεταβολή θερμοκρασίας.

Τα θερμόμετρα διακρίνονται σε κοινά ή υδραργυρικά και σε θερμόμετρα οινόπνεύματος για χαμηλότερες θερμοκρασίες. Χρησιμοποιούνται επίσης και τα ηλεκτρικά θερμόμετρα που βασίζονται στην αρχή του θερμοηλεκτρικού στοιχείου, τα οπτικά ή ηλεκτρικά πυρόμετρα καθώς και άλλα ειδικών κατηγοριών.

Το πιο διαδεδομένο θερμόμετρο είναι αυτό που λειτουργεί με χρήση υδραργύρου (Σχ. 2.15). Ο υδράργυρος στα θερμόμετρα αυτά βρίσκεται σε υγρή μορφή μέσα σε έναν γυάλινο σωλήνα. Η χαρακτηριστική ιδιότητα του υδραργύρου είναι σε συστέλλεται και να διαστέλλεται συνεχώς ακόμη και με την παραμικρή αλλαγή στη θερμοκρασία και έτσι με τις αυξομειώσεις της θερμοκρασίας, ο υδράργυρος συνεχώς συστέλλεται και διαστέλλεται. Η στάθμη του υδραργύρου κάθε φορά υποδηλώνει την θερμοκρασία περιβάλλοντος τη στιγμή εκείνη.



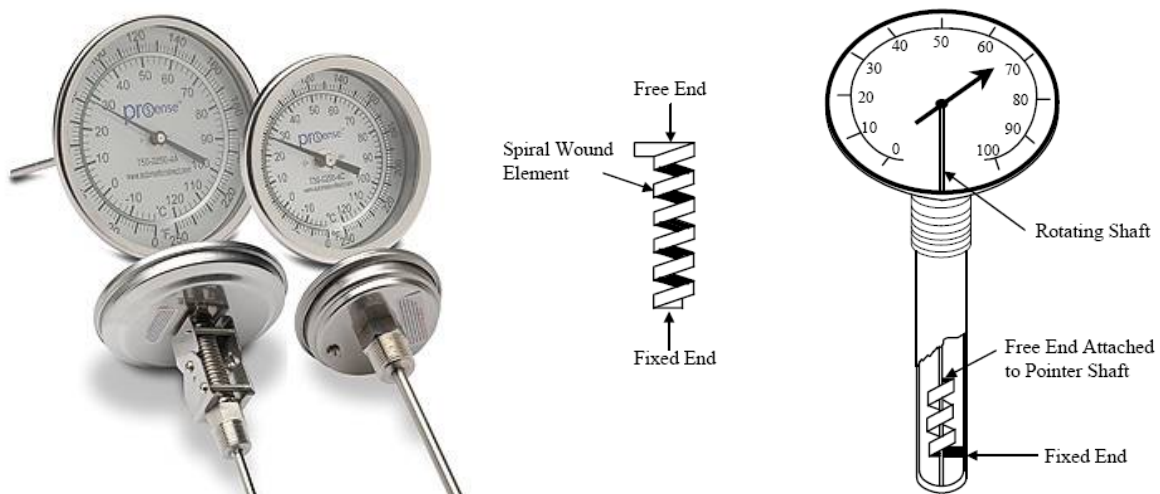
**Σχήμα 2.15:** Τυπικό θερμόμετρο υδραργύρου



Το εν λόγω θερμόμετρο έχει υψηλή ακρίβεια όμως το βασικό μειονέκτημα του είναι ότι δεν μπορεί να λειτουργήσει σε θερμοκρασίες κάτω των  $-38,83^{\circ}\text{C}$  καθώς στα επίπεδα αυτά ο υδράργυρος στερεοποιείται. Τα θερμόμετρα αυτά είναι τα πλέον διαδομένα για οικιακή χρήση λόγω του χαμηλού τους κόστους, του μικρού τους μεγέθους και λόγω της ακρίβειας τους σε φυσιολογικές θερμοκρασίες.

Σε περιπτώσεις που θέλουμε να μετρήσουμε θερμοκρασίες μικρότερες από αυτές που μπορεί να μετρήσει ένα υδραργυρικό θερμόμετρο, απλά αντικαθιστάται ο υδράργυρος με ένα άλλο υγρό όπως η αιθυλική αλκοόλη ή το πεντάνιο με την προσθήκη κάποιας χρωστικής ουσίας, επειδή αυτά είναι διαφανή και δεν είναι ευδιάκριτες οι αλλαγές με το μάτι. Τα συγκεκριμένα θερμόμετρα ονομάζονται οινόπνευματικά ή θερμόμετρα υγρού.

Παράλληλα υπάρχει το μεταλλικό θερμόμετρο ή θερμόμετρο ελατηρίου το οποίο χρησιμοποιεί ένα διμεταλλικό σπειροειδές επίπεδο ελατήριο, το οποίο συστέλλεται και διαστέλλεται ανομοιόμορφα ανάλογα με τη θερμοκρασία του και μεταβάλλει τη διάμετρό του (Σχ. 2.16). Στο άκρο του ελατηρίου είναι προσαρμοσμένος ένας δείκτης ο οποίος δίνει τις ενδείξεις σε κατάλληλα βαθμολογημένη κλίμακα. Η μέτρηση της θερμοκρασίας με μεταλλικό θερμόμετρο δεν είναι ιδιαίτερα ακριβής καθότι η ένδειξη του προσαρμοσμένου δείκτη αλλάζει μόνο έπειτα από μεγάλες μεταβολές της υπάρχουσας θερμοκρασίας. Σε περιπτώσεις δηλαδή μεταβολής της θερμοκρασίας για  $0,5^{\circ}\text{C}$  ή  $1^{\circ}\text{C}$ , το μεταλλικό θερμόμετρο δεν θα παρουσιάσει καμία αισθητή μεταβολή.

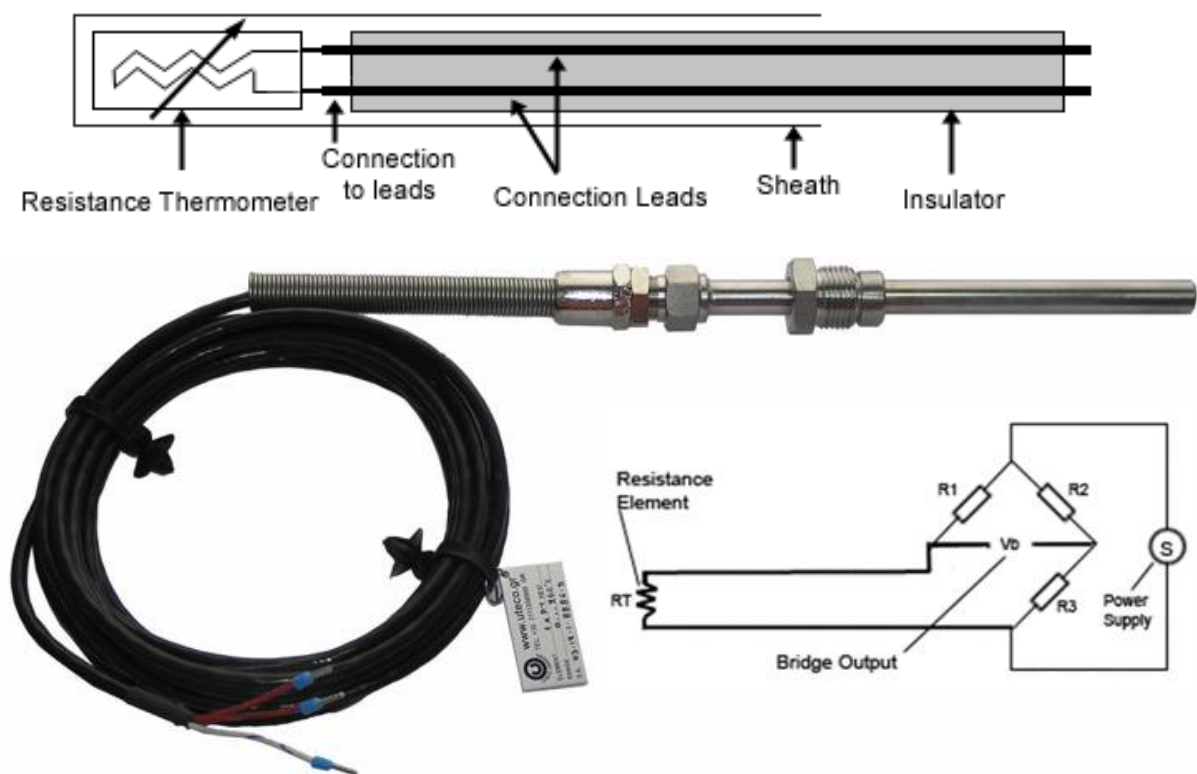


**Σχήμα 2.16:** Μεταλλικό θερμόμετρο ελατηρίου

### 2.2.4.1 Θερμόμετρα αντίστασης (Thermistors)

Η αρχή λειτουργίας των θερμομέτρων αντιστάσεως βασίζεται στο γεγονός ότι η ηλεκτρική αντίσταση ενός αγωγού είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας. Υπάρχουν δύο κατηγορίες τέτοιων θερμομέτρων. Αυτά που χρησιμοποιούν μέταλλα υψηλής καθαρότητας, όπως ο χαλκός και η πλατίνα και έχουν θετικό θερμικό συντελεστή και αυτά που είναι κατασκευασμένα από μίγματα οξειδίων και έχουν αρνητικό συντελεστή αντίστασης. Ο συντελεστής αντίστασης είναι αντιστρόφως ανάλογος της θερμοκρασίας. Τα ημιαγωγά υλικά με αρνητικό θερμικό συντελεστή αντίστασης ονομάζονται θερμίστορς.

Ένα θερμομέτρο ηλεκτρικής αντίστασης σχηματίζεται τυλίγοντας μεταλλικό σύρμα γύρω από έναν κεραμικό σωλήνα, επικαλύπτοντας με κεραμικό υλικό και τοποθετώντας το σε προστατευτικό μεταλλικό μανδύα. Τα δύο άκρα του σύρματος συνδέονται στον ένα βραχίονα μίας γέφυρας Wheatstone και στη συνέχεια το θερμομέτρο τοποθετείται στο χώρο, του οποίου θέλουμε να μετρήσουμε τη θερμοκρασία (Σχ. 2.17). Μετά από χρόνο απόκρισης μερικών δευτερολέπτων η θερμοκρασία του χώρου εμφανίζεται στο αμπερόμετρο.



**Σχήμα 2.17:** Θερμόμετρο αντίστασης (Thermistor)

Για την κατασκευή των θερμομέτρων αυτών πρέπει η ηλεκτρική αντίσταση να είναι απαλλαγμένη από κάθε μηχανική τάση και να έχει τέτοια τοποθέτηση, ώστε να είναι αδύνατο στην υγρασία να έλθει σε επαφή με το σύρμα και να επηρεάσει τη μέτρηση. Το υλικό κατασκευής πρέπει να είναι ανθεκτικό στη διάβρωση και να μην υπόκειται σε μεταβολές φάσεων στο πεδίο θερμοκρασιών που μας ενδιαφέρει. Η μέτρηση της αντίστασης γίνεται με έναν τύπο γέφυρας Wheatstone. Μια από τις βασικές πηγές σφάλματος είναι η επίδραση της αντίστασης των καλωδίων που συνδέουν το στοιχείο με το κύκλωμα της γέφυρας.

Τα θερμίστορς που χρησιμοποιούνται για θερμοκρασιακές μετρήσεις έχουν θερμικό συντελεστή αντίστασης σε απόλυτη τιμή μεγαλύτερο από ότι ο χαλκός ή η πλατίνα. Επίσης η ειδική τους αντίσταση είναι πολύ υψηλότερη από εκείνη του καθαρού μετάλλου και επομένως είναι υπερβολικά ευαίσθητα σε μικρές θερμοκρασιακές αλλαγές και έχουν γρήγορη απόκριση. Έχουν τη μορφή καθετήρων, δίσκων ή ραβδίων και συνήθως περιβάλλονται με γυαλί ή τοποθετούνται σε λεπτό μεταλλικό κάλυμμα.

Τα βασικά χαρακτηριστικά των αισθητήρων θερμοκρασίας που βασίζονται στα θερμίστορς είναι, το πολύ μικρό μέγεθος τους, η ταχεία απόκριση στις μεταβολές της θερμοκρασίας, το μεγάλο εύρος θερμοκρασίας που μπορούν να λειτουργήσουν, η υψηλή διακριτική ικανότητα σε μικρές περιοχές θερμοκρασίας και το ότι μπορούν να ενσωματωθούν πάνω σε στερεά σώματα και έτσι να μετρούν την επιφανειακή τους θερμοκρασία. Τα θερμόμετρα αυτά βρίσκουν ευρεία χρήση για μέτρηση θερμοκρασίας σε ηλεκτρονικά κυκλώματα, ηλεκτρονικούς υπολογιστές και σε ιατρικές.

### **2.2.5 Η μέτρηση της υγρασίας**

Στον ατμοσφαιρικό αέρα περιέχονται υδρατμοί που προέρχονται από την εξάτμιση υγρών επιφανειών, κυρίως των θαλασσών και των λιμνών. Η παρουσία αυτών των υδρατμών στον αέρα καλείται υγρασία και δεν είναι ορατή με το ανθρώπινο μάτι. Η ατμοσφαιρική υγρασία μπορεί να διακριθεί σε απόλυτη και σχετική υγρασία.

Απόλυτη υγρασία ονομάζεται η μάζα των υδρατμών σε γραμμάρια που περιέχεται σε ένα κυβικό μέτρο ατμοσφαιρικού αέρα. Από τον ορισμό καταλαβαίνουμε ότι πρόκειται για την πυκνότητα του αέρα σε υδρατμούς. Η απόλυτη υγρασία του

ατμοσφαιρικού αέρα μεταβάλλεται με την αλλαγή της πίεσης ή της θερμοκρασίας αυτού και έτσι δεν μπορούμε να βγάλουμε ασφαλή συμπεράσματα για την σταθερότητα της τιμής της.

Σχετική υγρασία είναι ο λόγος της ποσότητας ή της μάζας των υδρατμών, που περιέχει ο αέρας, προς εκείνη την ποσότητα ή το βάρος των υδρατμών τους οποίους μπορεί να συμπεριλάβει υπό την αυτή θερμοκρασία και πίεση, μέχρις ότου αυτός κορεσθεί. Η σχετική υγρασία εκφράζεται σε ποσοστό επί τοις εκατό. Ο τύπος για τον υπολογισμό της είναι

$$\Sigma u = B' / B * 100$$

B' : ποσότητα υπαρχόντων υδρατμών

B: ποσότητα που καθιστά τον αέρα κορεσμένο

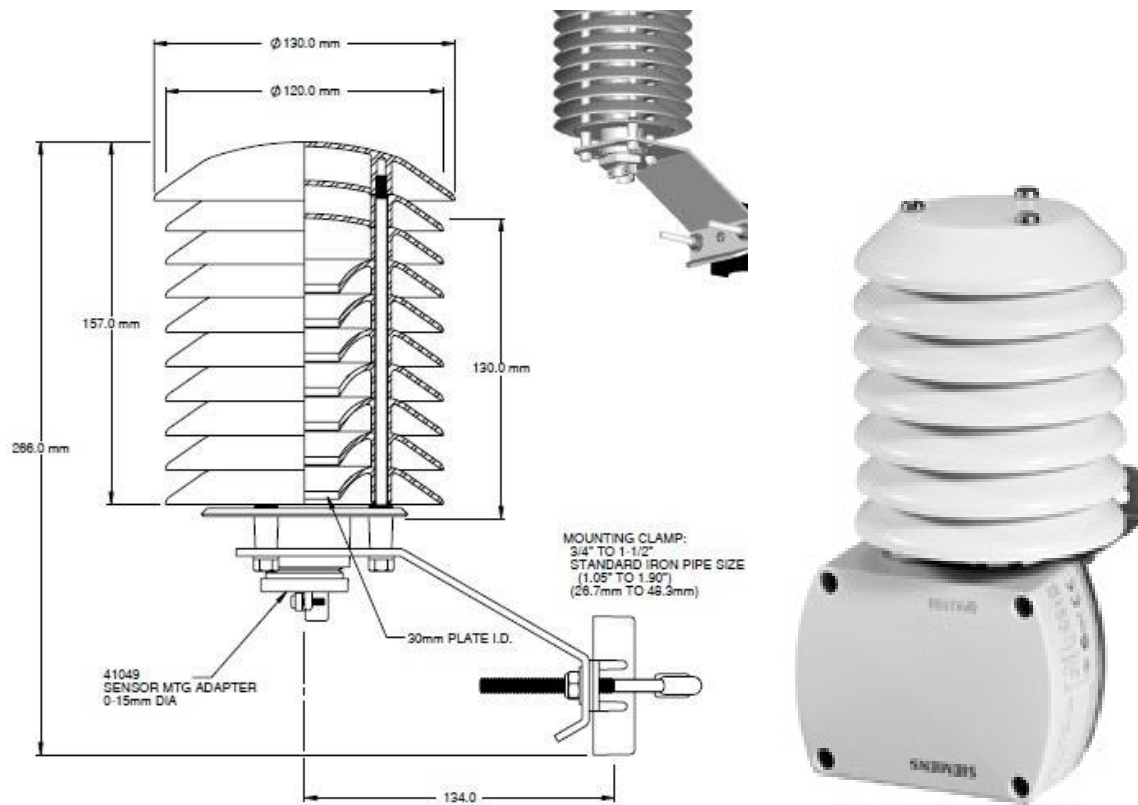
Όταν η ποσότητα υπαρχόντων υδρατμών ισούται με την ποσότητα που καθιστά τον αέρα κορεσμένο, η σχετική υγρασία ισούται με 100% και τότε ο αέρας θεωρείται κορεσμένος ενώ όταν η ποσότητα των υπαρχόντων υδρατμών είναι μηδενική ή πολύ μικρή τότε ο αέρας ονομάζεται ξηρός.

Υπάρχουν πολλά όργανα για τον υπολογισμό της υγρασίας στην ατμόσφαιρα. Τα πιο συνηθισμένα είναι τα υγρόμετρα που μετρούν την υγρασία του ατμοσφαιρικού αέρα στο σημείο που τοποθετήθηκαν ενώ για ευρύτερες μετρήσεις μπορεί να υπολογισθεί σε παγκόσμια κλίμακα η υγρασία με τη χρήση δορυφόρων. Οι δορυφόροι αυτοί ανιχνεύουν τη συγκέντρωση του νερού σε ύψη τεσσάρων έως δώδεκα χιλιομέτρων. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται από τους δορυφόρους χρησιμοποιούνται από τις μετεωρολογικές υπηρεσίες για την παρακολούθηση των κλιματικών συνθηκών και την μελλοντική πρόβλεψη του καιρού.

### **2.2.5.1 Υγρόμετρο**

Το υγρόμετρο είναι μια συσκευή για τον προσδιορισμό της υγρασίας της ατμόσφαιρας και αποτελεί την πιο δημοφιλή μέθοδο για τη μέτρηση της (Σχ. 2.18). Μπορεί να υπολογίσει ανάλογα με τον τύπο του τη σχετική υγρασία, την απόλυτη υγρασία ή και τις δύο. Τα δύο βασικά σημεία στα οποία βρίσκει εφαρμογή ένα υγρόμετρο είναι στην μετεωρολογία για την παρατήρηση και καταγραφή της υγρασίας

και σε χώρους όπου η τιμή της θα επηρεάσει την λειτουργικότητά τους. Τέτοιοι χώροι είναι επιστημονικά εργαστήρια, αποθηκευτικοί χώροι και εργοστάσια παραγωγής ή κατασκευής. Στους χώρους αυτούς η ποσότητα της υγρασίας πρέπει να μείνει σε περιορισμένα επίπεδα και έτσι με τη χρήση του υγρασιόμετρου μπορούμε να γνωρίζουμε τη στιγμιαία τιμή της και να βελτιώσουμε τις συνθήκες. Το υγρασιόμετρο ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του, μπορούμε να το χωρίσουμε σε διάφορες κατηγορίες.



**Σχήμα 2.18:** Σχεδίαση τυπικού υγρασιόμετρου

Ο πιο απλός τύπος υγρασιόμετρου λειτουργεί με τη χρήση ζωικών ινών συνήθως από ανθρώπινα μαλλιά. Ανάλογα με το αν οι ίνες επιμηκύνονται ή συρρικνώνονται το υγρασιόμετρο αυτό μας ενημερώνει απλά για το αν ο αέρας είναι ξηρός ή υγρός. Σε μια πιο βελτιωμένη έκδοση του παραπάνω υγρασιόμετρου, τοποθετούνται ξανά ζωικές ίνες με τη διαφορά όμως ότι οι αυξομειώσεις αυτές μεγαλώνονται μηχανικά και μεταβιβάζονται σε δείκτη επί βαθμολογημένου τόξου 0 – 100. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να παρατηρήσουμε το πόσο υγρός ή πόσο ξηρός είναι ο αέρας.

Παράλληλα υπάρχει το υγρασιόμετρο τύπου Αλλυάρτου το οποίο βασίζεται στον προσδιορισμό της θερμοκρασίας κατά την οποία εμφανίζεται σε κάποια αποψυχόμενη επιφάνεια δρόσος που προέρχεται από την υγρασία του αέρα. Η θερμοκρασία αυτή

που ονομάζεται «σημείο δρόσου» και σχετίζεται άμεσα με την υγρομετρική κατάσταση του αέρα. Το υγρόμετρο Αλλυάρτου αποτελείται από ορθογώνιο μεταλλικό δοχείο που περιέχει αιθέρα. Ο αιθέρας εξατμιζόμενος δια πρόσφυσης ρεύματος αέρος, προκαλεί απόψυξη των τοιχωμάτων του δοχείου και εμφάνιση στην εξωτερική του επιφάνεια σταγονίδια δρόσου. Η αναλογία αυτών προσδιορίζει την υφιστάμενη υγρασία.

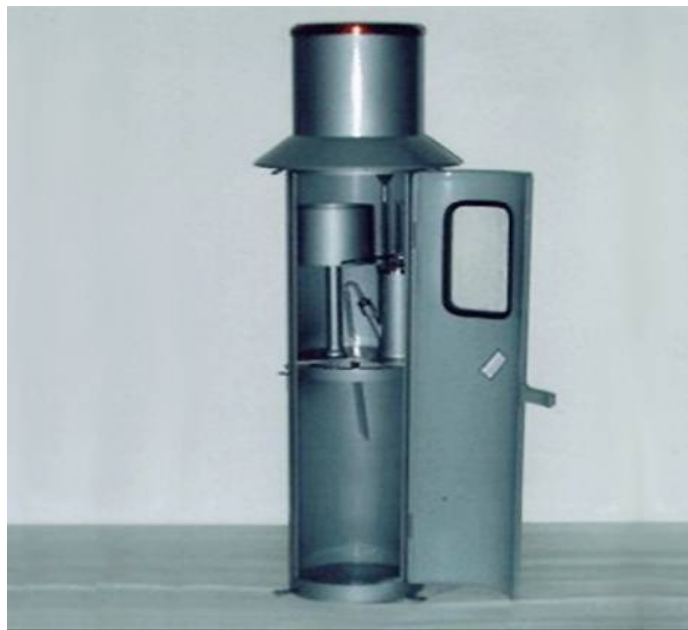
Ένα άλλο βασικό όργανο για τη μέτρηση της υγρασίας της ατμόσφαιρας είναι το ψυχρόμετρο. Το όργανο αυτό αποτελείται από δύο θερμομέτρα τοποθετημένα το ένα δίπλα στο άλλο. Το ένα εκ των δύο θερμομέτρων ονομάζεται υγρό θερμομέτρο και το άλλο ξηρό θερμομέτρο. Το ξηρό θερμομέτρο υπολογίζει την θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα ενώ το υγρό είναι καλυμμένο με ένα λεπτό και διαφανές ύφασμα από μαλλί, βαμβάκι ή μετάξι. Το ύφασμα αυτό είναι υγρό και το νερό που περιέχει εξατμίζεται είτε με τη χρήση ανεμιστήρα που κατευθύνει ψυχρό αέρα προς αυτό είτε με την γρήγορη περιστροφή του ψυχομέτρου. Καθώς το νερό εξατμίζεται, ο αισθητήρας θερμοκρασίας του θερμομέτρου ψύχεται καθώς γενικότερα όσο πιο ξηρός είναι ο αέρας τόσο μεγαλύτερη πτώση θερμοκρασίας θα έχουμε. Με τον τρόπο αυτόν και συγκρίνοντας τις ενδείξεις των δύο θερμομέτρων, μπορούμε να υπολογίσουμε την σχετική υγρασία. Για την διευκόλυνση της διαδικασίας αυτής υπάρχει ψυχομετρικοί πίνακες και διαγράμματα στους οποίους, ανάλογα με την διαφορά των θερμοκρασιών υπολογίζουμε απευθείας την τιμή της σχετικής υγρασίας.

Τέλος, υπάρχουν τα ηλεκτρικά υγρόμετρα η αρχή λειτουργίας των οποίων βασίζεται στη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης μιας ουσίας της οποίας οι τιμές της μεταβάλλονται με την αλλαγή της υγρασίας. Ένα τέτοιο στοιχείο είναι το χλωριούχο λίθιο. Το συγκεκριμένο όργανο είναι το πιο εύχρηστο καθώς έχει μεγάλη ακρίβεια και τα αποτελέσματα του μπορούν να ληφθούν άμεσα. Το βασικότερο μειονέκτημα των ηλεκτρικών υγρομέτρων είναι ότι οι ουσίες που χρησιμοποιούνται για να μετρηθεί η ηλεκτρική αντίσταση τους, δεν έχουν σταθερά χαρακτηριστικά και παρατηρούνται αλλαγές στις αντιδράσεις τους με την μεταβολή της θερμοκρασίας. Για αυτό το λόγο τα ηλεκτρικά υγρόμετρα τα συναντάμε σε συνδυασμό με κάποιο θερμομέτρο.

Υπάρχουν και πολλοί άλλοι τύποι υγρομέτρων όπως αυτοί που λειτουργούν με θερμική αγωγιμότητα, τα σταθμικά υγρόμετρα, τα χημικά υγρόμετρα η χρήση των οποίων όμως δεν είναι το ίδιο συχνή και διαδεδομένη.

### 2.2.6 Βροχόμετρο

Το βροχόμετρο είναι ένα από τα επίγεια μετεωρολογικά όργανα που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της βροχόπτωσης. Είναι το πρώτο μετεωρολογικό στοιχείο που μετρήθηκε κατά την αρχαιότητα στοιχείο που βασίζεται στην ευκολία της κατασκευής του καθώς το μόνο που χρειάζεται για αυτή είναι η χρήση ενός δοχείου περισυλλογής κι ενός βαθμομετρικού κανόνα (Σχ. 2.19). Με μια τέτοια απλή κατασκευή μπορεί να υπολογισθεί το ύψος της βροχής, δηλαδή το ύψος της ποσότητας του νερού που συλλέχθηκε στο δοχείο.



**Σχήμα 2.19:** Τυπικό βροχόμετρο

Παρόλο που έχουν κατασκευαστεί πολλών ειδών βροχόμετρα, στην πλειοψηφία των μετεωρολογικών σταθμών χρησιμοποιείται το δεκαπλασιαστικό βροχόμετρο. Το δεκαπλασιαστικό βροχόμετρο αποτελείται από ένα μεταλλικό κωνικό δοχείο που το άνω μέρος του απολήγει σε έναν κυλινδρικό αγωγό με εσωτερική επιφάνεια κυκλική και στενή. Το κωνικό αυτό δοχείο στο κάτω άκρο του καταλήγει σε κυλινδρικό μεταλλικό σωλήνα που συγκοινωνεί με ένα γυάλινο σωλήνα που φέρεται τοποθετημένος παράλληλα προς αυτόν τον μεταλλικό (σχήμα 2.19).

Η κυκλική επιφάνεια του στομίου είναι δεκαπλάσια του αθροίσματος των επιφανειών των καθέτων τομών, ως προς το διάμηκες, του μεταλλικού και του γυάλινου σωλήνα. Συνεπώς το ύψος του νερού από την βροχόπτωση στο γυάλινο σωλήνα είναι δεκαπλάσιο εκείνου που έπεσε πραγματικά στην επιφάνεια της Γης κατά

την διάρκεια κάποιας βροχόπτωσης. Κατά μήκος του γυάλινου σωλήνα υφίσταται κλίμακα σε εκατοστά και χιλιοστά του μέτρου, τα οποία και παριστούν χιλιοστά και δέκατα του χιλιοστού του μέτρου αντίστοιχα του πραγματικού ύψους της βροχής σε κάποια βροχόπτωση. Τα δεκαπλασιαστικά βροχόμετρα μπορούν να υπολογίσουν εκτός από το ύψος της βροχής και την ποσότητα της χιονόπτωσης ή του χαλαζιού με την διαφορά ότι για αυτές τις μετρήσεις λιώνουμε το χιόνι ή το χαλάζι και μετράμε το ύψος του νερού στο βροχόμετρο. Κατά μέσο όρο, εμπειρικά ένα εκατοστόμετρο χιονιού αντιστοιχεί με ένα χιλιοστόμετρο βροχής, όμως η αναλογία αυτή δεν είναι απόλυτη εκ του γεγονότος ότι το χιόνι μπορεί να ποικίλλει στο βαθμό που είναι συμπιεσμένο.

Το βασικό μειονέκτημα των βροχομέτρων είναι το γεγονός ότι σε ακραίες καιρικές συνθήκες δεν είναι λειτουργικά. Σε περιπτώσεις ισχυρής βροχόπτωσης σε συνδυασμό με ισχυρούς ανέμους υπάρχει μεγάλη απόκλιση στον υπολογισμό του ύψους της βροχής ενώ παράλληλα εάν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος πέσει κάτω από το μηδέν υπάρχει κίνδυνος ο πάγος να μπλοκάρει τη δίοδο από το πάνω μέρος του οργάνου προς τα κάτω. Τα βροχόμετρα πέρα από τη λειτουργία τους για τον υπολογισμό της βροχόπτωσης λειτουργούν και ως συλλέκτες της βροχής με σκοπό να εξεταστεί η τοξικότητα αυτής και έτσι να υπολογιστεί το ποσοστό μόλυνσης της ατμόσφαιρας στο σημείο που έχει εγκατασταθεί. Άλλα λιγότερο διαδεδομένα και με σπάνια χρήση βροχόμετρα, είναι το βροχόμετρο καθίζησης, το ακουστικό βροχόμετρο, το οπτικό βροχόμετρο και το βροχόμετρο συχνότητας.

### **2.2.7 Βαρόμετρο**

Το βαρόμετρο είναι ένα επιστημονικό όργανο το οποίο χρησιμοποιείται στην μετεωρολογία με σκοπό τη μέτρηση της ατμοσφαιρικής πίεσης. Η χρησιμότητά του βασίζεται στο γεγονός ότι η τάση της πίεσης μπορεί να προσδιορίσει τις βραχυπρόθεσμες αλλαγές των καιρικών φαινομένων. Πλήθος μετρήσεων της πίεσης του αέρα χρησιμοποιούνται σε καιρικές αναλύσεις επιφάνειας οι οποίες βοηθούν στον εντοπισμό αναταραχών και περιοχών μεγάλης διαφοράς πίεσης. Τα βαρόμετρα παραμένουν στατικά κατά τις μετρήσεις (σε αντίθεση με τα αλτίμετρα στα οποία το υψόμετρο μεταβάλλεται) με εξαίρεση τη χρήση τους σε πλοία, τα οποία βέβαια παραμένουν συνεχώς στην επιφάνεια της θάλασσας. Υπάρχουν πολλά είδη



βαρομέτρων με διαφορετικούς τρόπους λειτουργίας, τα πιο σημαντικά από τα οποία είναι τα εξής.

Το βαρόμετρο χρήσης νερού το οποίο δημιουργήθηκε στο παρελθόν βασιζόμενο στην ιδέα ότι η πτώση της ατμοσφαιρικής πίεσης οδηγεί σε θυελλώδη καιρό και του έχει δοθεί το όνομα "Βαρόμετρο Goethe" από τον Γερμανό πολυμαθή Johann Wolfgang Von Goethe. Το βαρόμετρο αυτό αποτελείται από ένα γυάλινο δοχείο του οποίου το κυρίως σώμα είναι σφραγισμένο και γεμάτο μέχρι τη μέση με νερό (Σχ. 2.20). Από το κυρίως σώμα προεξέχει ένα στόμιο το οποίο ξεκινάει κάτω από την επιφάνεια του νερού και καταλήγει πάνω από αυτήν, σε επαφή με την ατμόσφαιρα. Αν η ατμοσφαιρική πίεση γίνει μικρότερη από αυτήν που υπήρχε τη στιγμή της σφράγισης του δοχείου, η επιφάνεια του νερού στο στόμιο θα βρίσκεται ψηλότερα από αυτήν στο κυρίως σώμα. Αντίθετα, αν η ατμοσφαιρική πίεση αυξηθεί από τη στιγμή της σφράγισης, η επιφάνεια του νερού στο στόμιο θα βρίσκεται κάτω από αυτής στο κυρίως σώμα.



**Σχήμα 2.20:** Βαρόμετρο Goethe και τυπικό βαρόμετρο

Ένα άλλο είδος βαρομέτρου είναι το υδραργυρικό (σχήμα 2.21) το οποίο αποτελείται από ένα γυάλινο σωλήνα ύψους τουλάχιστον 84cm και κλειστή κορυφή, με τη βάση του σωλήνα να βρίσκεται μέσα σε μια δεξαμενή γεμάτη με υδράργυρο. Το βάρος του υδραργύρου δημιουργεί ένα κενό στην κορυφή του σωλήνα γνωστό ως "Κενό Τορισέλι".



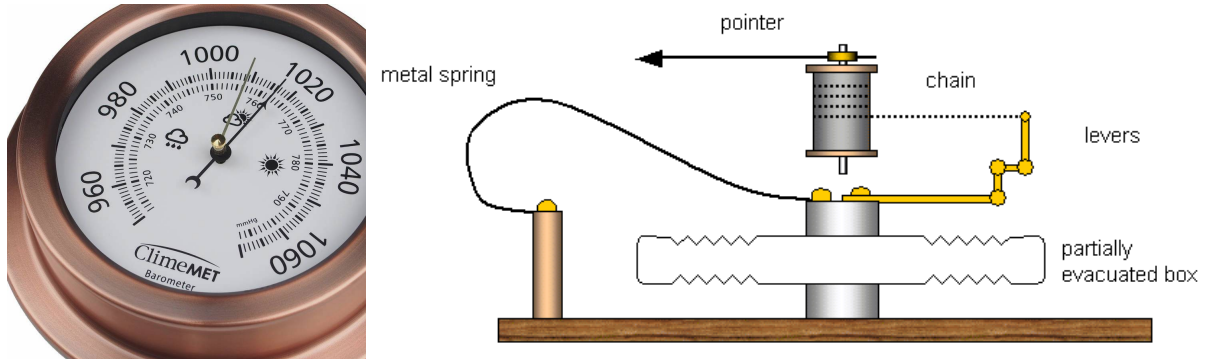
**Σχήμα 2.21:** Υδραργυρικό βαρόμετρο

Ο υδράργυρος μέσα στον σωλήνα προσαρμόζεται μέχρι το βάρος του να ισορροπήσει με την ατμοσφαιρική πίεση που δέχεται η δεξαμενή. Όσο μεγαλύτερη πίεση, τόσο μεγαλύτερη δύναμη ασκείται στην δεξαμενή και ο υδράργυρος στον σωλήνα ανεβαίνει. Στις χαμηλές πιέσεις ο υδράργυρος πέφτει σε χαμηλότερα επίπεδα αφού η δύναμη που ασκείται στη δεξαμενή έχει εξασθενήσει. Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι πρέπει να γίνουν οι κατάλληλες μετατροπές στην κλίμακα μέτρησης του ύψους του υδραργύρου, καθώς η θερμοκρασία γύρω από το όργανο επηρεάζει την πυκνότητα του. Ενδεικτικά, η μία ατμόσφαιρα αντιστοιχεί σε 29.92 in (75.9968 cm) υδραργύρου.

Μια παραλλαγή του προηγούμενου τύπου είναι το βαρόμετρο με λάδι αντλίας κενού, στο οποίο χρησιμοποιείται λάδι αντλίας κενού αντί για υδράργυρο. Το βαρόμετρο αυτό δημιουργήθηκε από το Portland State University, το οποίο φτάνει τα 12.4 m και οι αναμενόμενες μεταβολές ύψους κυμαίνονται στα  $\pm 0.4$  m.

Άλλα είδη βαρομέτρου τα οποία χρησιμοποιούνται λιγότερα αλλά είναι ευρέως διαδεδομένα είναι το μεταλλικό βαρόμετρο το οποίο αποτελείται από ένα θάλαμο μορφής τυμπάνου που βρίσκεται σχεδόν σε «κενό αέρος», και που είναι ερμητικά κλειστό (Σχ. 2.22), ο βαρογράφος που είναι τύπος ανηροειδούς βαρομέτρου του οποίου ο δείκτης έχει αντικατασταθεί με γραφίδα και οι ατμοσφαιρικές μετρήσεις αναγράφονται πάνω σε χάρτινη ταινία η οποία κινείται σε κύλινδρο με τη βοήθεια ωρολογιακού μηχανισμού και τέλος το μικροβαρόμετρο τα οποία είναι πολύ μικρές

συσκευές μεγέθους 1-100  $\mu\text{m}$ . Παράγονται μέσω φωτολιθογραφίας ή μέσω φωτοχημικής μηχανικής. Πολλά κινητά νέας γενιάς (smartphones) διαθέτουν πλέον αυτήν την τεχνολογία.



**Σχήμα 2.22:** Μεταλλικό βαρόμετρο

Το βαρόμετρα χρησιμοποιούνται στον κλάδο της μετεωρολογίας για την πρόβλεψη του καιρού των επόμενων ωρών ή ημερών. Υπολογίζοντας την πορεία της βαρομετρικής πίεσης μιας περιοχής οι μετεωρολόγοι μπορούν να προβλέψουν την ένταση των ανέμων, την πιθανότητα σχηματισμού σύννεφων πάνω από μια περιοχή και τέλος την θερμοκρασία των ερχόμενων ωρών. Παρόλα αυτά επειδή τα καιρικά φαινόμενα κάποιες φορές είναι απρόβλεπτα υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα στις εκτιμήσεις η οποία αυξάνεται όσο πιο μακρινή είναι η ημερομηνία για την οποία γίνονται οι προβλέψεις.



## **Κεφάλαιο 3: «Περιγραφή της Εγκατάστασης και του Εξοπλισμού»**

### **3.1 Γενικά χαρακτηριστικά της εγκατάστασης.**

Η εγκατάσταση του μετεωρολογικού σταθμού και του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος υλοποιήθηκε στο μπαλκόνι του πρώτου ορόφου των Τμημάτων Μηχανολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας. Ως πρωταρχικός στόχος της εγκατάστασης τέθηκε η επί μέρος υλοποίηση του εργαστηριακού μαθήματος: «Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας», το οποίο διδάσκεται στο 5<sup>ο</sup> έτος σπουδών των δύο Τμημάτων. Ο δεύτερος στόχος είναι η επιδεικτική λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού αυτόνομου συστήματος σε συνδυασμό με το φωτισμό μέρους των εξωτερικών χώρων των Τμημάτων.

Το βασικό και καινοτόμο, κατά κάποιο τρόπο, χαρακτηριστικό στοιχείο της εγκατάστασης είναι η καταγραφή και αποθήκευση σε πραγματικό χρόνο τόσο των μετεωρολογικών παραμέτρων όσο και των παραμέτρων λειτουργίας της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Συγκεκριμένα, και πέρα των απαραίτητων ηλεκτρικών στοιχείων, τοποθετήθηκαν ηλεκτρονικά στοιχεία μέσω των οποίων είναι δυνατή η μέτρηση των βασικότερων παραμέτρων της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Αυτά είναι η διαφορά δυναμικού και η ένταση του ρεύματος στα φωτοβολταϊκά πλαίσια, στη γραμμή μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, στον ελεγκτή φόρτισης (controller) των συσσωρευτών και στον ανορθωτή τάσης (inverter) της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Ταυτόχρονα, με την τοποθέτηση των οργάνων μέτρησης της έντασης της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ενέργειας και των θερμοκρασιών περιβάλλοντος και της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, είμαστε σε θέση να υπολογίζουμε σε πραγματικό χρόνο την ηλεκτρική απόδοση τόσο των φωτοβολταϊκών πλαισίων, όσο και της συνολικής ηλεκτρικής απόδοσης της συνολικής εγκατάστασης. Πρακτικά, επιχειρείται η μελέτη σε πραγματικό χρόνο μιας αυτόνομης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης συσχετιζόμενης με τις βασικότερες μετεωρολογικές παραμέτρους.

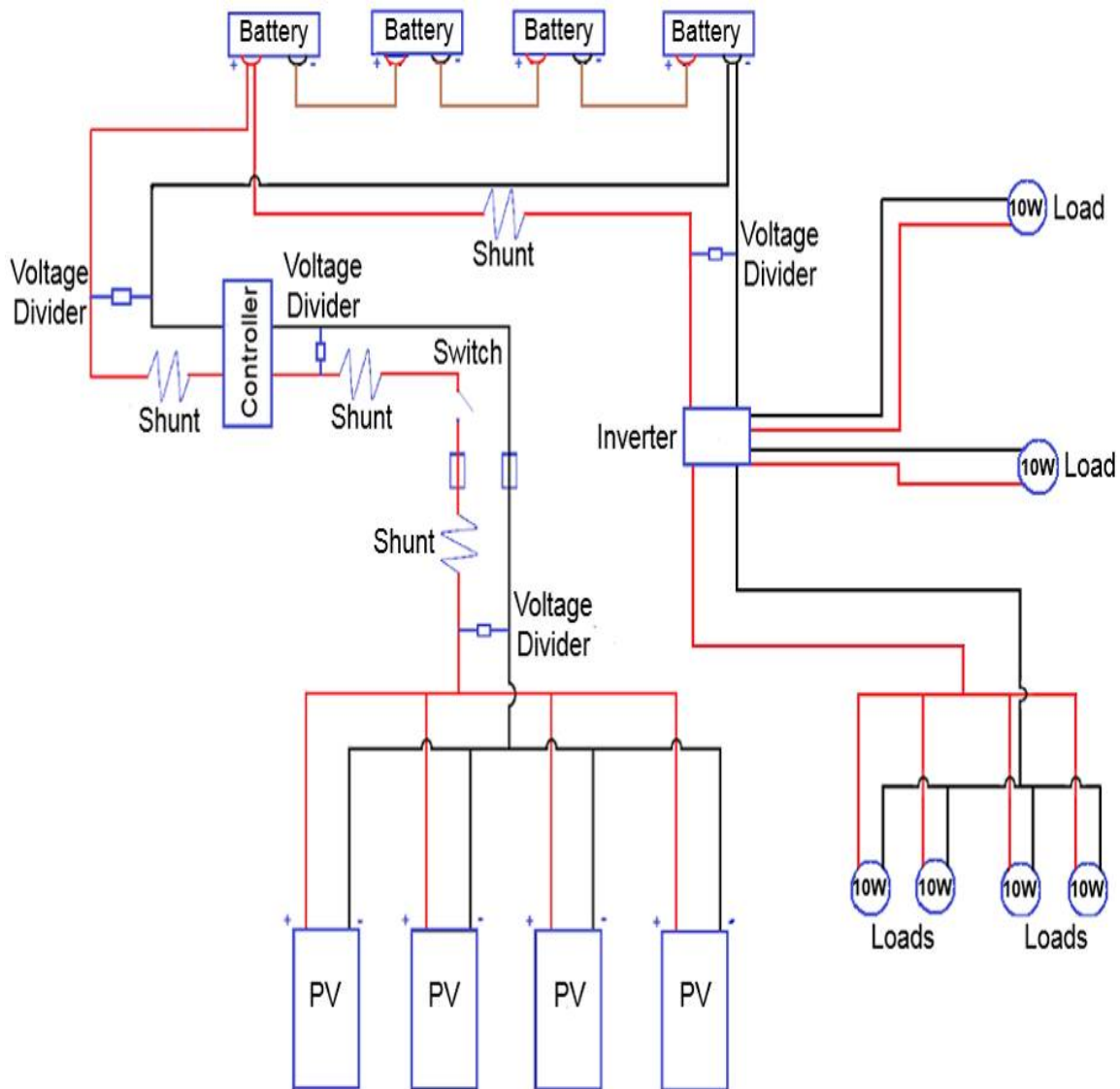


**Σχήμα 3.1:** *Μετεωρολογικός Σταθμός και Αυτόνομο Φωτοβολταϊκό Σύστημα*

Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται μια όψη της εγκατάστασης του μετεωρολογικού σταθμού και του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος. Για την εγκατάσταση ελήφθησαν υπόψη κάποιοι περιορισμοί που εστιάζονται κυρίως στον προσανατολισμό του κτιρίου όσο και της προ υπάρχουσας εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών πλαισίων στο χώρο. Με βάση αυτούς τους περιορισμούς πραγματοποιήθηκε η εγκατάσταση του μετεωρολογικού σταθμού σε κατάλληλη θέση ώστε να αποφεύγεται η σκίαση στα φωτοβολταϊκά πλαίσια και παράλληλα να λαμβάνονται το κατά δυνατόν αξιόπιστες μετρήσεις μέσω των οργάνων. Αξίζει να σημειωθεί ότι πραγματοποιήθηκε εκ νέου σχεδιασμός της προ υπάρχουσας εγκατάστασης των φωτοβολταϊκών. Στην εργασία δε δίνονται λεπτομέρειες αυτής, καθώς οι πληροφορίες έχουν δοθεί σε παλαιότερη εργασία του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών.

### 3.2 Περιγραφή της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης

Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται το ηλεκτρολογικό σχέδιο της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης με τα ηλεκτρονικά ισχύος που χρησιμοποιήθηκαν αλλά και του φορτίου κατανάλωσης. Το παραπάνω σχέδιο έγινε με χρήση του σχεδιαστικού προγράμματος SolidWorks 2013 x64 edition, της εταιρείας AlphaSolid. Στο σχέδιο διαγράφεται η πορεία του ηλεκτρικού ρεύματος μέσω των καλωδίων από την παραγωγή τους στα φωτοβολταϊκά πλαίσια μέχρι την κατανάλωσή του μέσω των ηλεκτρικών φορτίων. Ακολουθεί η πλήρης περιγραφή των στοιχείων του εξοπλισμού της εγκατάστασης.



**Σχήμα 3.2:** Ηλεκτρολογικό σχέδιο σύνδεσης της αυτόνομης φωτοβολταϊκής εγκατάστασης με το φορτίο κατανάλωσης.

### 3.2.1 Φωτοβολταϊκά πλαίσια (PV)

Στο σύστημα μας αξιοποιήθηκαν, τέσσερα φωτοβολταϊκά πλαίσια της εταιρείας Conergy το μοντέλο PowerPlus 215W, που είχαν εγκατασταθεί στο συγκεκριμένο σημείο το 2011 (Σχ. 3.3). Τα συγκεκριμένα πλαίσια είναι πολυκρυσταλλικού πυριτίου και η ονομαστική μέγιστη ισχύς του κάθε πλαισίου είναι 215W. Ο εργοστασιακός βαθμός απόδοσής τους είναι 13,21%, η μέγιστη τάση ρεύματος είναι 28,8V και η μέγιστη ένταση ρεύματος 7,54A. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν στις εργαστηριακές συνθήκες ταυτοποίησης της απόδοσης λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων (Standard Test Conditions, STC:  $T_{pv} = 25^{\circ}\text{C}$ ,  $AM=1.5$ ,  $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$ ).

Ως προς τις διαστάσεις τους, το κάθε πλαίσιο έχει μήκος 1651mm, πλάτος 986mm, πάχος 46mm και αποτελείται από 60 ξεχωριστά κελιά. Το κάθε κελί είναι τετραγωνισμένο με μήκος πλευράς 165mm. Από τις παραπάνω διαστάσεις προκύπτει ότι το εμβαδόν του κάθε κελιού είναι 0,027 m<sup>2</sup>, του κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου 1,634 m<sup>2</sup> και της συνολικής εγκατάστασης 6,534 m<sup>2</sup>. Το βάρος κάθε πλάκας είναι 22 κιλά ενώ το πάχος του γυαλιού 4 χιλιοστά. Τα πλαίσια συνδέθηκαν παράλληλα μεταξύ τους, ώστε η διαφορά δυναμικού να είναι σταθερή. Η επιλογή του τρόπου συνδεσμολογίας των πλαισίων προήλθε κυρίως από το γεγονός ότι ο προσανατολισμός του κτιρίου είναι τέτοιος που αρκετές ώρες της ημέρας παρατηρείται μερική σκίαση των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι έχουμε σταθερή τάση λειτουργίας του συνόλου των φωτοβολταϊκών πλαισίων ανεξαρτήτως αν κάποιο ή κάποια από αυτά σκιάζονται στη διάρκεια της ημερήσιας λειτουργίας της εγκατάστασης. Επίσης οι συσσωρευτές που επιλέχθηκαν έπρεπε να πληρούν κάποιους περιορισμούς ασφάλειας, ως προς τη διαφορά δυναμικού, και βέβαια του οικονομικού τους κόστους. Με βάση τα παραπάνω στοιχεία η ονομαστική μέγιστη ισχύς των φωτοβολταϊκών στο σύνολό τους είναι  $4*215=860\text{W}$ .

Τα τέσσερα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδέθηκαν μεταξύ τους όλες παράλληλα. Η συνδεσμολογία αυτή, πραγματοποιήθηκε ενώνοντας όλους τους θετικούς πόλους εξόδου των πλακών μαζί και αντίστοιχα όλους τους αρνητικούς πόλους μαζί (Σχ. 3.2). Αποτέλεσμα της συνδεσμολογίας αυτής είναι να έχουμε αθροισμένο ρεύμα και σταθερή τάση λειτουργίας.



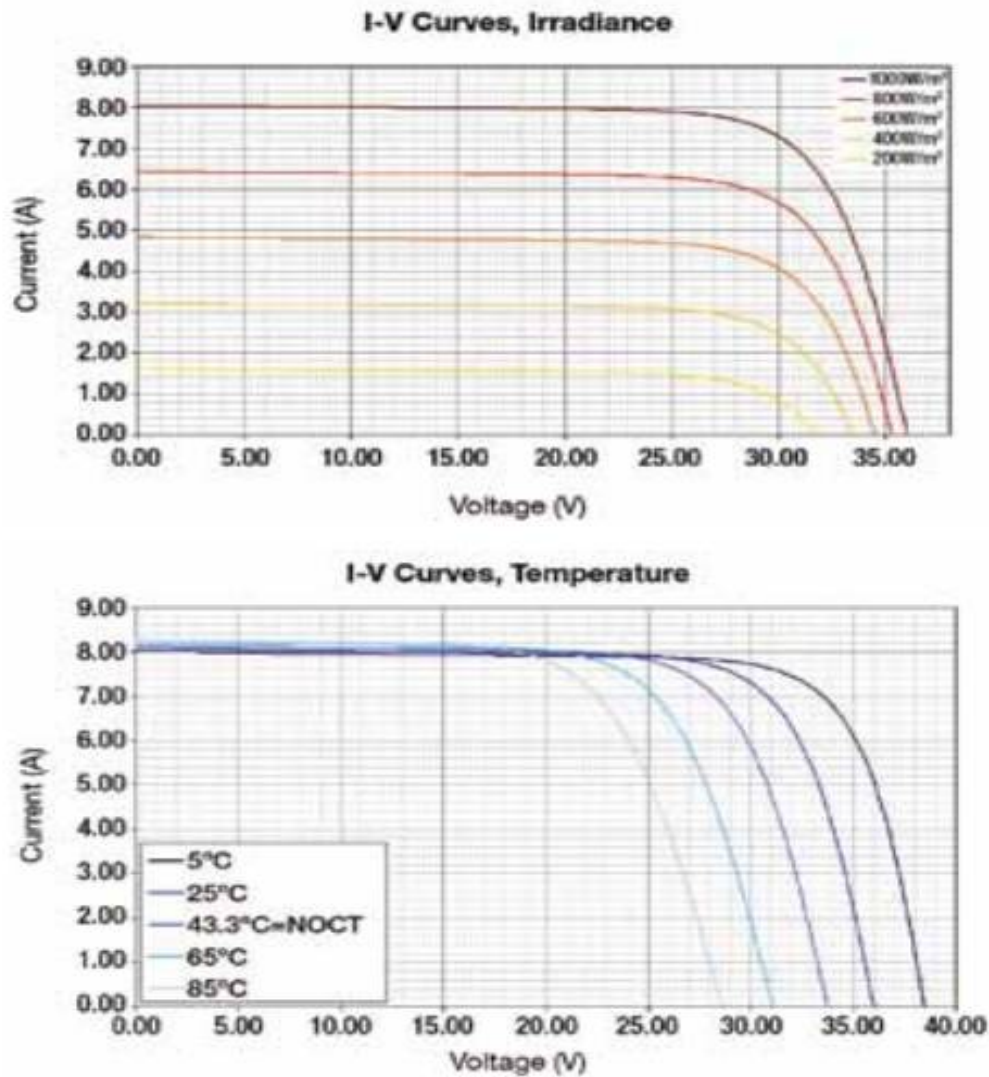


<b>Rated power (<math>P_{max}</math>)<sup>1</sup></b>	215W
<b>Power tolerance</b>	-0/+2.5%
<b>Module efficiency</b>	13.21%
<b>Maximum power voltage (<math>V_{mpp}</math>)</b>	28.80V
<b>Maximum power current (<math>I_{mpp}</math>)</b>	7.54A
<b>Open circuit voltage (<math>V_{oc}</math>)</b>	36.00V
<b>Short circuit current (<math>I_{sc}</math>)</b>	8.04A
<b>Nominal Operating Cell Temperature (NOCT)</b>	44.3°C/110.1°F
<b>Temperature coefficient (<math>P_{max}</math>)</b>	-0.45%/°C
<b>Temperature coefficient (<math>V_{oc}</math>)</b>	-0.34%/°C
<b>Temperature coefficient (<math>I_{sc}</math>)</b>	0.05%/°C
<b>Operating temperature range</b>	-40°C - +85°C/ -40°F - +136°F
<b>Maximum system voltage</b>	600V (UL)/1000V (IEC)
<b>Maximum Series Fuse Rating</b>	20A

**Σχήμα 3.3:** Μοντέλο φωτοβολταϊκών πλαισίων και κατασκευαστικά στοιχεία.

Κάθε ένα πλαίσιο είχε ως έξοδο δύο καλώδια, ένα θετικό και ένα αρνητικό. Η συνδεσμολογία αυτή, πραγματοποιήθηκε με τη χρήση κλέμας, ενώνοντας όλους τους θετικούς πόλους εξόδου των πλακών μαζί και αντίστοιχα όλους τους αρνητικούς πόλους μαζί. Η τελική απόληξη των φωτοβολταϊκών πλαισίων ήταν δύο καλώδια, ένα καλώδιο προερχόμενο από τους θετικούς πόλους και ένα από τους αρνητικούς. Τα καλώδια αυτά έχουν σκοπό να μεταφέρουν το ηλεκτρικό ρεύμα που παράγεται από τις φωτοβολταϊκά πλαίσια στον ρυθμιστή φόρτισης των συσσωρευτών.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται χαρακτηριστικές I-V που δίνονται από τον κατασκευαστή, εξαρτώμενες από την ένταση της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας και από τη θερμοκρασία της επιφάνειας των πλαισίων.



**Σχήμα 3.4:** Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V του φωτοβολταϊκού πλαισίου.

### 3.2.2 Ελεγκτής φόρτισης (Controller)

Καθώς το σύστημα μας είναι αυτόνομο, ήταν απαραίτητη προϋπόθεση για τη λειτουργία του η εγκατάσταση ενός ελεγκτή φόρτισης των συσσωρευτών (μπαταριών). Μεταξύ των ρόλων ενός ελεγκτή φόρτισης είναι να προστατεύει το σύστημα από ακραίες υπερφορτίσεις ή αποφορτίσεις. Και στις δύο περιπτώσεις, αυτό που επιτυγχάνεται είναι η παράταση του χρόνου ζωής των μπαταριών. Η αρχή λειτουργίας ενός ελεγκτή βασίζεται στο ότι τα φωτοβολταϊκά κελιά, μπορούν να βραχυκυκλωθούν ή να βγουν εκτός κυκλώματος ελεγχόμενα χωρίς επιπτώσεις όταν αυτό κριθεί απαραίτητο.

Αρχικά, σε περίπτωση όπου οι μπαταρίες μας είναι πλήρως φορτισμένες, ο ελεγκτής φόρτισης, αναλαμβάνει την απομάκρυνση της επιπρόσθετης εισερχόμενης ενέργειας σε αυτές από το σύστημα και τη διοχετεύει είτε στο φορτίο κατανάλωσης είτε διακόπτει τη λειτουργία του συστήματος. Με αυτή την ενέργεια, αποτρέπει την υπερφόρτιση των μπαταριών. Παράλληλα, όταν οι μπαταρίες έχουν πολύ χαμηλό επίπεδο φόρτισης, στη διάρκεια της νυκτερινής λειτουργίας του συστήματος, ο ελεγκτής φόρτισης διακόπτει την λειτουργία του συστήματος αποτρέποντας έτσι την ολική αποφόρτιση τους που θα οδηγούσε στην καταστροφή τους. Αυτό πραγματοποιείται αποσυνδέοντας κάθε άλλη συσκευή συνδεδεμένη που χρησιμοποιεί συνεχές ρεύμα βραχυκυκλώνοντας ουσιαστικά το σύστημα.

Ανάλογα με το μέγεθος των φωτοβολταϊκών υπολογίζεται και η μέγιστη ένταση του ρεύματος. Βάσει αυτής επιλέγεται και ο τύπος του ελεγκτή φόρτισης έτσι ώστε να λειτουργεί υπό οποιαδήποτε συνθήκη. Έτσι υπάρχουν ρυθμιστές που λειτουργούν για 12, 24 ή σε εξαιρετικές περιπτώσεις με 48 Volts. Επιπροσθέτως, είναι αναγκαίο να γίνονται διαφορετικές ρυθμίσεις στον ελεγκτή φόρτισης, ανάλογα με το είδος των μπαταριών που χρησιμοποιούνται. Επί της ουσίας, ο ελεγκτής φόρτισης αποτελείται από ένα κύκλωμα μέτρησης της τάσης της μπαταρίας, το οποίο αποφασίζει ανάλογα με την περίπτωση, εάν θα απενεργοποιήσει τον βρόγχο φόρτισης της μπαταρίας, όταν αυτές είναι πλήρως φορτισμένες ή εάν θα βραχυκυκλώσει για όσο χρόνο χρειαστεί το σύστημα ώστε να προστατέψει τις μπαταρίες από πλήρη αποφόρτιση.

Στην εγκατάσταση μας χρησιμοποιήθηκε ο ελεγκτής φόρτισης FLEXman 60 (Σχ. 3.5), ο οποίος έχει όριο λειτουργίας τα 60 αμπέρ και η λειτουργία του δεν επηρεάζεται μέχρι θερμοκρασίες 40°C. Για να λειτουργήσει ο ελεγκτής φόρτισης χρειάζεται ηλεκτρική ενέργεια και έτσι χρησιμοποιεί για λειτουργικούς σκοπούς ένα μικρό ποσό, αυτής που προέρχεται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Η κατανάλωση του ρυθμιστή είναι περίπου 1Watt, ενώ η κατάσταση λειτουργίας του αναγράφεται σε μια οθόνη LCD 3,1 ιντσών. Αξίζει να σημειωθεί ότι με την εγκατάσταση που έχει υλοποιηθεί έχουμε τη δυνατότητα να υπολογίζουμε την καταναλισκόμενη ισχύ του ελεγκτή φόρτισης. Το σύστημα μας, είναι σε θέση να λειτουργήσει με αυτόν καθώς υποστηρίζει τον τύπο των μπαταριών που χρησιμοποιούμε. Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να εισέλθει από τα φωτοβολταϊκά και έπειτα να αποδοθεί στις μπαταρίες, είναι 1500Watt.



**Σχήμα 3.5:** Ελεγκτής φόρτισης (controller).

Τα δύο καλώδια εξόδου από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια συνδέθηκαν στις αντίστοιχες θύρες υποδοχής του ρυθμιστή φορτίου ο οποίος στη συνέχεια συνδέθηκε παράλληλα με το σύστημα μπαταριών (Σχ. 3.2). Το θετικό καλώδιο εξόδου συνδέθηκε στον θετικό πόλο της πρώτης μπαταρίας του συστήματος ενώ το αρνητικό συνδέθηκε στον αρνητικό πόλο της τελευταίας μπαταρίας.

### **3.2.3 Ηλεκτρικοί Συσσωρευτές - Μπαταρίες (Batteries)**

Η ηλιακή ενέργεια που μπορεί να προσπέσει σε καθημερινή βάση στο φωτοβολταϊκό μας σύστημα δεν είναι σταθερή, αυτό οφείλεται λόγω της εναλλαγής ημερήσιας – νυκτερινής λειτουργίας, λόγω καιρικών συνθηκών και λόγω μεταβολής της φαινόμενης κίνησης του ήλιου (ελλειπτική τροχιά) σε ετήσια βάση (Σχ. 1.1). Το αποτέλεσμα είναι άλλες φορές να παίρνουμε μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας από τις απαιτούμενες και άλλοτε μικρότερες, στοιχείο που θα παρουσίαζε αστάθεια με καταστροφικές συνέπειες. Για αυτό το λόγο στο αυτόνομο σύστημα που εγκαταστήσαμε χρησιμοποιήσαμε ένα σύστημα μπαταριών.

Η πλεονάζουσα ενέργεια που παράγεται από το σύστημα μας και δεν είναι άμεσα αξιοποιήσιμη, αποθηκεύεται στις μπαταρίες. Σε περιπτώσεις, όπου η ενέργεια που παράγεται δεν είναι αρκετή για την ομαλή λειτουργία του, τότε αντλείται ένα συμπληρωματικό ποσό ενέργειας που είναι αποθηκευμένο στις μπαταρίες. Με αυτό τον τρόπο ισορροπεί το σύστημα μας και εξασφαλίζεται η κανονική λειτουργία του. Απαραίτητες προϋποθέσεις για την υλοποίηση των παραπάνω ενεργειών είναι αρχικά οι μπαταρίες να μην είναι πλήρως φορτισμένες και επίσης να μην βρίσκονται σε πολύ χαμηλά επίπεδα φόρτισης.

Ο «εγκέφαλος» των μπαταριών όπως προαναφέρθηκε είναι ο ελεγκτής φόρτισης, ο οποίος επιλέγει αν το σύστημα μας θα λειτουργήσει αγνοώντας τις μπαταρίες, αν θα λειτουργήσει με την βοήθεια των μπαταριών, αν θα λειτουργήσει μόνο με τις μπαταρίες ή εάν θα τεθεί εκτός λειτουργίας. Όλες οι παραπάνω εντολές εξαρτώνται από το βάθος φόρτισης και εκφόρτισης των μπαταριών.

Το βάθος εκφόρτισης των μπαταριών, είναι μια επί τοις εκατό παράμετρος που καθορίζεται από τον εκάστοτε κατασκευαστή και ορίζει πιο είναι το χαμηλότερο ποσοστό εναπομένουσας αποθηκευμένης ενέργειας που υπάρχει στις μπαταρίες, πριν αυτές βγουν εκτός λειτουργίας. Ουσιαστικά αποτελεί ένα ποσοστό που είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με την με τον χρόνο ζωής της μπαταρίας, καθώς είχε παρατηρηθεί πως εάν τα επίπεδα φόρτισης των μπαταριών έφταναν σε πολύ χαμηλές τιμές, τότε υπήρχε «καταπόνηση» των μπαταριών που απέφερε μικρότερο χρόνο ζωής.

Αντίστοιχα, υπάρχει και ο μέγιστος βαθμός φόρτισης που μας υποδηλώνει το το όριο φόρτισης των μπαταριών. Η βασική διαφορά των δύο αυτών μεγεθών είναι ότι παρόλο που και οι δύο ορίζονται από τον κατασκευαστή, ο μέγιστος βαθμός φόρτισης, δεν παραμένει σταθερός και τείνει να εξαντλείται με το πέρασμα του χρόνου. Όταν ο αριθμός αυτός περάσει κάτω από μια οριακή τιμή που έχει να κάνει με τις απαιτήσεις του φορτίου, τότε οι μπαταρίες είναι πλέον ακατάλληλες προς χρήση και προτείνεται η αντικατάστασή τους.

Η επιλογή του τύπου και των διαστάσεων των μπαταριών αποτελεί κυρίαρχη διαδικασία. Η επιλογή αυτή θα γίνει με γνώμονα την ομαλή και αδιάλειπτη λειτουργία του συστήματος. Όταν οι μπαταρίες είναι πλήρως φορτισμένες, θα πρέπει καθ' όλη τη

διάρκεια της νύκτας μέχρι τις πρώτες πρωινές ώρες να έχουν αρκετή αποθηκευμένη ενέργεια ώστε να μπορούν να τροφοδοτούν συνεχώς το ηλεκτρικό φορτίο κατανάλωσης. Παράλληλα, η μέγιστη ποσότητα ενέργειας που θα μπορεί να αποθηκευτεί στις μπαταρίες θα πρέπει να είναι ανάλογη της μέσης ενέργειας που θα αποδίδουν σε αυτή τα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Θα ήταν ανώφελο να χρησιμοποιηθούν μεγάλης χωρητικότητας μπαταρίες σε ένα πολύ μικρό σύστημα και στον αντίποδα, μη λειτουργικό το να χρησιμοποιηθούν μικρές μπαταρίες σε ένα απαιτητικό σύστημα. Ο λόγος είναι ότι στην πρώτη περίπτωση, οι μπαταρίες θα υπολειτουργούν σε πολύ χαμηλά επίπεδα φόρτισης ενώ στον αντίποδα θα φτάνουν σε μικρό χρονικό διάστημα σε συνθήκες πλήρης φόρτισης και αποφόρτισης. Και στις δύο περιπτώσεις, ο χρόνος ζωής των μπαταριών θα μειωνόταν αισθητά.

Στο σύστημα μας, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις μπαταρίες τύπου L16 G-AC, 390 Ah/6V της εταιρείας Trojan (Σχ. 3.6). Από τον τύπο της μπαταρίας γίνεται κατανοητό ότι πρόκειται για μπαταρίες λιθίου, χωρητικότητας 390 Amps-Hours και ηλεκτρικής τάσης 6 Volts. Οι μπαταρίες λιθίου είναι οι πλέον διαδεδομένες επαναφορτιζόμενες μπαταρίες στην αγορά καθώς συνδυάζουν μεγάλη χωρητικότητα, χαμηλή τιμή και μικρό όγκο. Οι μπαταρίες συνδέθηκαν μεταξύ τους σε σειρά (από τον αρνητικό πόλο της δεύτερης στον θετικό της τρίτης κ.ο.κ., Σχήμα 3.2) και στο σύστημα παράλληλα τόσο μετά τον ελεγκτή φόρτισης όσο και με τον ανορθωτή τάσης (inverter). Η συνολική ηλεκτρική τάση των μπαταριών του συστήματός μας είναι  $6 \times 4 = 24$  volts ενώ το βάθος εκφόρτισης είναι στο 70% (Σχ. 3.7).



**Σχήμα 3.6:** Ηλεκτρικοί συσσωρευτές - μπαταρίες.

Βάσει των παραπάνω χαρακτηριστικών, μπορούμε να υπολογίσουμε την ενέργεια που μπορούν να αποθηκεύσουν και να μεταφέρουν στο φορτίο κατανάλωσης οι μπαταρίες. Αρχικά υπολογίζουμε την χωρητικότητα των μπαταριών:

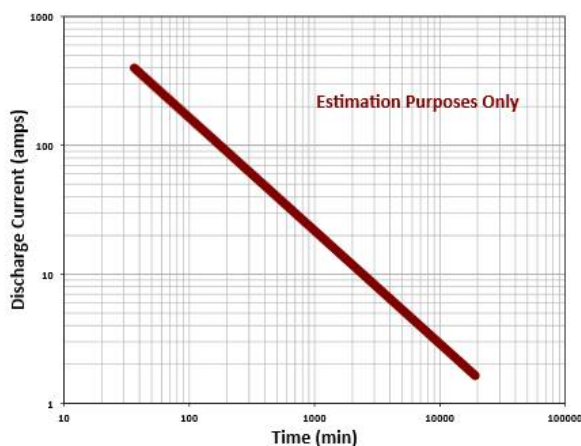
$$E_{\sigma} = 390 \text{ Ah} * 24 \text{ volts} = 9360 \text{ Wh.}$$

Εφόσον όμως έχει από τον κατασκευαστή οριστεί το βάθος εκφόρτισης ( $\beta$ ) στο 70% τότε για τον υπολογισμό της διαθέσιμης προς κατανάλωση ενέργειας όταν οι μπαταρίες είναι φορτισμένες ισχύει πως

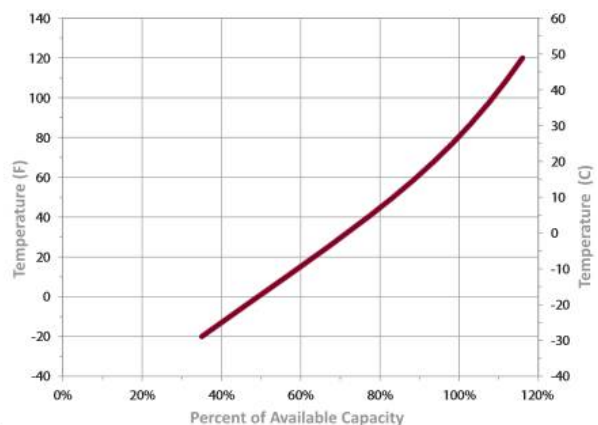
$$E_{\sigma, \text{ διαθ}} = (1-\beta) * E_{\sigma} = 9360 \text{ Wh} * 0,3 = 2808 \text{ Wh.}$$

Βάσει των 2808 Wh που μπορεί να διαθέσει το σύστημα μπαταριών όταν βρίσκονται σε πλήρη φόρτιση, θα υπολογισθεί και το μέγεθος του φορτίου κατανάλωσης που θα τοποθετήσουμε καθώς και οι ώρες λειτουργίας του.

**TROJAN L16G-AC PERFORMANCE**



**PERCENT CAPACITY VS. TEMPERATURE**



**Σχήμα 3.7:** Μεταβολές κατασκευαστικών παραμέτρων των μπαταριών.

### 3.2.4 Ανορθωτής τάσης (Inverter)

Η διαφορά δυναμικού και το ρεύμα που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και μεταφέρεται μέσω καλωδίων στο σύστημα μας είναι συνεχείς (DC). Παρόλα αυτά, η πλειοψηφία των ηλεκτρικών συσκευών κάνει χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος και αυτό, έχει ως αποτέλεσμα, η ενέργεια που παίρνουμε από τα φωτοβολταϊκά να είναι μη αξιοποιήσιμη. Η συσκευή που συμβάλει στην μετατροπή της συνεχούς τάσεως σε εναλλασσόμενη είναι ο ανορθωτής τάσης (DC-AC inverter).

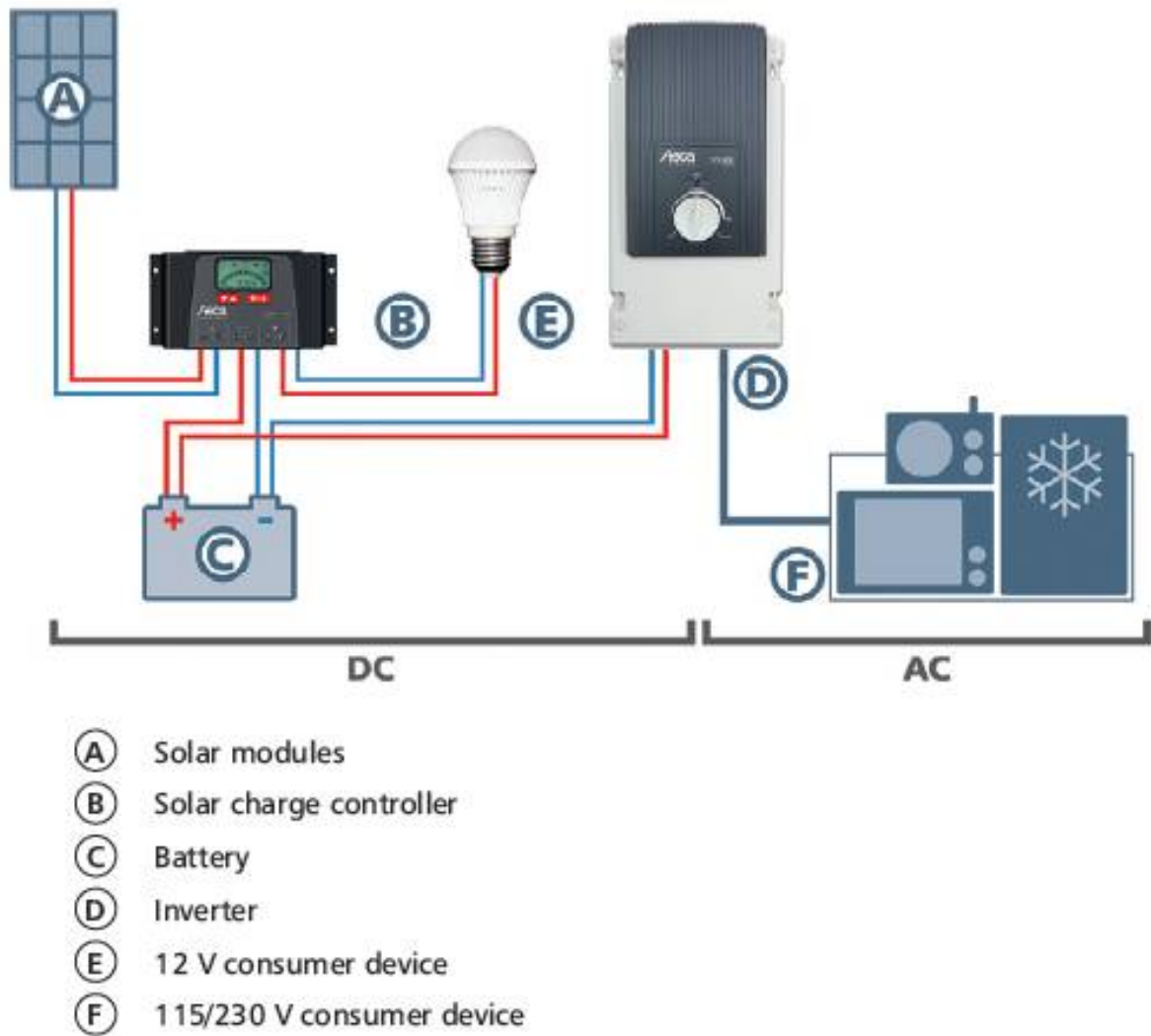


**Σχήμα 3.8:** *Ανορθωτής τάσης (inverter).*

Ο ανορθωτής τάσης που χρησιμοποιήθηκε στο σύστημα μας είναι ο Solarix PI 1100/24v της εταιρείας Steca (Σχ. 3.8). Ο ανορθωτής αυτός συνδέεται αποκλειστικά με συστήματα μπαταριών 24V, όπως το δικό μας και έχει εύρος επιτρεπόμενης εισερχόμενης τάσης λειτουργίας 21-32V. Η έξοδος από τον ανορθωτή είναι εναλλασσόμενη τάση 220V και συχνότητας 50Hz, δηλαδή σε κατάλληλες συνθήκες κατανάλωσης από την πλειοψηφία των ηλεκτρικών συσκευών.

Για να λειτουργήσει ένας ανορθωτής τάσης, χρειάζεται ηλεκτρική ενέργεια, την οποία αντλεί από τους συσσωρευτές. Πιο συγκεκριμένα, ένα μικρό ποσό από το συνεχές ρεύμα που εισέρχεται στον ανορθωτή με σκοπό να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο δεσμεύεται από αυτόν για τις λειτουργικές του ανάγκες. Σε κατάσταση αναμονής, ο ανορθωτής τάσης καταναλώνει 0,7 Watt ενώ σε συνθήκες πλήρους λειτουργίας 10Watt. Στο σχήμα 3.9 παρουσιάζεται εν συντομία η συνδεσμολογία του ανορθωτή τάσης με τα λειτουργικά στοιχεία της εγκατάστασής μας.

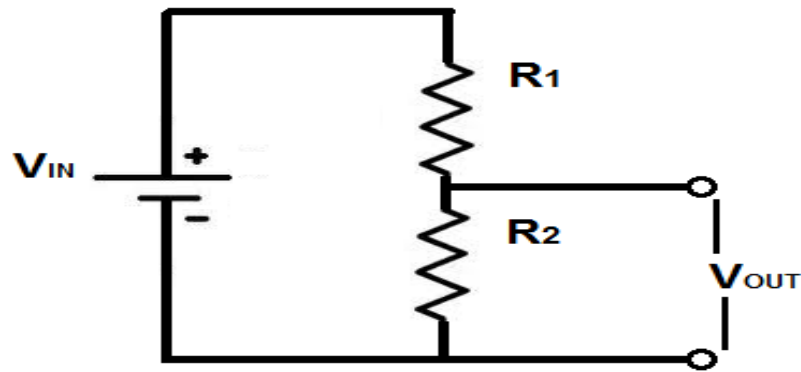




**Σχήμα 3.9:** Σχηματικό διάγραμμα συνδεσμολογίας των ηλεκτρονικών ισχύος.

### 3.2.5 Διαιρέτης τάσης (Voltage Divider)

Ο διαιρέτης τάσης είναι μια απλή κυκλωματική διάταξη αποτελούμενη από δύο αντιστάτες συνδεδεμένους σε σειρά. Στα άκρα αυτών των αντιστάτων, εφαρμόζεται μια τάση, γνωστή και ως τάση εισόδου. Σκοπός του διαιρέτη τάσης είναι η μετατροπή μιας μεγάλης σε τιμή τάσης σε μια αντίστοιχη μικρότερη. Η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες της μιας εκ των δύο αντιστάσεων, αποτελεί την τάση εξόδου (Σχ. 3.10).



**Σχήμα 3.10:** Σχηματικό διάγραμμα διαιρέτη τάσης.

Οι τιμές της τάσης εξόδου κυμαίνονται από μηδέν μέχρι και την τάση εισόδου. Γνωρίζοντας τις τιμές των δύο αντιστατών και την τάση εισόδου μπορούμε να υπολογίσουμε την τιμή της τάσεως εξόδου.

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{in}$$

Από την παραπάνω σχέση γίνεται εμφανές ότι η τάση εξόδου του διαιρέτη τάσης επηρεάζεται από τις τιμές των αντιστατών και την τιμή της τάσης εισόδου.

Στο σύστημα μας τοποθετήθηκαν τέσσερις διαιρέτες τάσης, ένας στην έξοδο των φωτοβολταϊκών πλαισίων, ένας πριν την είσοδο του ρυθμιστή φόρτισης, ένας μετά την έξοδο του ρυθμιστή φόρτισης και πριν την είσοδο των μπαταριών και ο τελευταίος ανάμεσα στην έξοδο των μπαταριών και στην είσοδο του ανορθωτή τάσης (Σχ. 3.11). Σκοπός της τοποθέτησης των συγκεκριμένων διαιρέτων τάσης είναι η μέτρηση της τάσης σε διάφορα σημεία της εγκατάστασης μας. Η υποβάθμιση της τάσης έγκειται στην απαίτηση ότι το ηλεκτρονικό σύστημα μέτρησης και καταγραφής των ηλεκτρικών δεδομένων της εγκατάστασης δέχεται ηλεκτρικά σήματα χαμηλής τάσης.

Πριν από την τοποθέτηση των διαιρέτων τάσης στο σύστημα ήταν αναγκαίο να υπολογιστεί η τιμή της εσωτερικής αντίστασης του καθενός, καθώς η τιμή αυτής είναι περίπου 10. Για μεγαλύτερη ακρίβεια όμως έπρεπε να γίνει βαθμονόμηση του κάθε διαιρέτη τάσης ώστε να υπολογιστεί κατά πόσο ακριβώς υποβαθμίζεται η τάση εισόδου. Τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης ήταν:

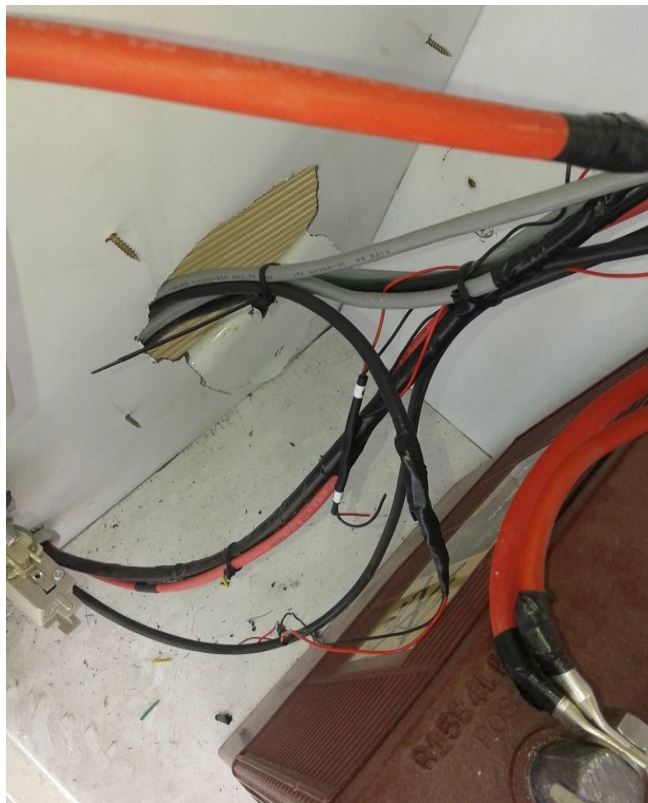
Voltage Divider PVI → 10,11485

Voltage Divider PV II → 10,05346

Voltage Divider Controller to Batteries → 10,12122

Voltage Divider Batteries to Inverter → 10,05788

Βάσει της παραπάνω βαθμονόμησης γνωρίζουμε κατά πόσες φορές η ένδειξη που θα πάρουμε εάν μετρήσουμε τον διαιρέτη τάσης με ένα πολύμετρο θα είναι υποβαθμισμένη.



**Σχήμα 3.11:** Διαρέτης τάσης (voltage divider).

### 3.2.6 Shunt ρεύματος

Το shunt ρεύματος, είναι ένα ηλεκτρικό στοιχείο (πρακτικά είναι ένας ηλεκτρικός αντιστάτης) που δίνει την δυνατότητα στο ηλεκτρικό ρεύμα να περάσει από μια πιο ευνοϊκή διαδρομή με μικρότερη αντίσταση. Παρόλα αυτά όμως ένα shunt μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την μέτρηση του ρεύματος σε περιπτώσεις που αυτό είναι πολύ μεγάλο για να μετρηθεί από ένα αμπερόμετρο. Η λειτουργία του shunt βασίζεται στο γεγονός ότι περιέχει μια αντίσταση γνωστής τιμής η οποία τοποθετείται

σε σειρά στο κύκλωμα μας με σκοπό τον υπολογισμό της πτώσης τάσης σε αυτήν. Έτσι εφόσον η πτώσης τάσης κατά μήκος της διακλάδωσης, είναι ανάλογη με το ρεύμα που ρέει μέσα από αυτή και από τη στιγμή που γνωρίζουμε την ακριβή τιμή της αντίστασης της, μπορούμε με τη σύνδεση ενός βολτομέτρου στα άκρα του shunt να υπολογίσουμε την τιμή του ρεύματος (Σχ. 3.12).

Η αντίσταση είναι κατασκευασμένη από ένα κράμα 86% χαλκού, 12% μαγγανίου και 2% νικελίου, γνωστού και ως μαγγανίνη, έχει πολύ μικρή τιμή για να μην διαταράσσει το ηλεκτρικό σύστημα.

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη ενός shunt είναι η μέγιστη ποσότητα ρεύματος που μπορεί να δεχθεί καθώς και η αντίστοιχη πτώση τάσεως σε αυτή. Για παράδειγμα ένα shunt μέγιστης εισερχόμενης ποσότητας ρεύματος 500A και πτώσης τάσεως 75mV, θα έχει μια αντίσταση 0,15 mΩ. Για λόγους ευχέρειας, τα περισσότερα shunts είναι σχεδιασμένες για να παρέχουν πτώσεις τάσεως σε 50, 75 και 100 mV αντίστοιχα όταν λειτουργούν σε συνθήκες μεγίστου ρεύματος.

Για την ομαλή λειτουργία των shunts και την εξασφάλιση της μακροζωίας τους, πρέπει να ακολουθούνται ορισμένοι κανόνες. Αρχικά, μια διακλάδωση δεν πρέπει να τίθεται σε συνεχή λειτουργία για πάνω από δύο λεπτά και δεν πρέπει να ξεπερνά τα θερμοκρασιακά όρια που έχουν τεθεί από τους κατασκευαστές. Τα όρια αυτά είναι στους 80°C καθώς πάνω από αυτούς, υπάρχει αλλοίωση των αποτελεσμάτων και κίνδυνος για καταστροφή της αντίστασης.

Στην εγκατάσταση μας τοποθετήθηκαν τέσσερα shunts σε όμοιες θέσεις με τους διαιρέτες τάσεις (σχήμα 3.2). Σκοπός είναι να μετρηθεί:

- το ρεύμα που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια
- το ρεύμα που εισέρχεται στον ελεγκτή φόρτισης και κατά πόσο μειώθηκε αυτό κατά τη μεταφορά του
- το ρεύμα που εξέρχεται από τον ελεγκτή φόρτισης και εισέρχεται στις μπαταρίες καθώς και τι ποσότητα αυτού καταναλώθηκε για τη λειτουργία του ελεγκτή και τέλος
- το ρεύμα που εξέρχεται από τις μπαταρίες και εισέρχεται στον ανορθωτή.



**Σχήμα 3.12:** *Shunt ρεύματος.*

Ανάλογα με τις ενδείξεις του τελευταίου shunt και συγκρίνοντας τες με τις αντίστοιχες του πρώτου shunt, είμαστε σε θέση να βρούμε τις απώλειες ηλεκτρικής ισχύος (λαμβάνοντας υπόψη και τις αντίστοιχες τιμές της τάσης) λόγω κατανάλωσης ή λόγω μήκους καλωδίου (προσομοιώνοντας τη γραμμή μεταφοράς).

### **3.2.7 Διακόπτης (Switch)**

Οι διακόπτες έχουν σημεία με τα οποία συνδέονται με το κύκλωμα τα οποία ονομάζονται ακροδέκτες. Κάθε διακόπτης έχει δύο καταστάσεις, την κατάσταση που είναι κλειστός και την κατάσταση που είναι ανοιχτός. Όταν ένας διακόπτης είναι ανοιχτός δεν επιτρέπει τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ των ακροδεκτών του, ενώ όταν είναι κλειστός επιτρέπει τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ αυτών. Ο διακόπτης διατηρεί την κατάσταση στην οποία βρίσκεται, ενώ αυτή μεταβάλλεται μόνο από εξωτερικούς του στοιχείου παράγοντες, όπως είναι το πάτημα ενός κουμπιού ή αλλαγή στο ηλεκτρικό πεδίο. Κάθε κλειστός διακόπτης μπορεί να ανοίξει και αντίστοιχα κάθε ανοιχτός διακόπτης μπορεί να κλείσει. Η αλλαγή της κατάστασης ενός διακόπτη

γίνεται είτε μεταβάλλοντας την αγωγιμότητα ενός μέρους του που παρεμβάλλεται μεταξύ των ακροδεκτών του είτε αλλάζοντας την απόσταση μεταξύ δύο αγωγίμων μερών του, που ονομάζονται επαφές. Συνήθως ο πρώτος τρόπος χρησιμοποιείται σε αυτόματους διακόπτες, ενώ ο δεύτερος σε χειροκίνητους. Σε αυτήν την περίπτωση μία επαφή είναι σταθερή στη θέση της, ενώ η άλλη μετακινείται μηχανικά.

Στο σύστημα μας, χρησιμοποιήθηκε ένας διακόπτης για την διακοπή ροής ηλεκτρικού ρεύματος από τις φωτοβολταϊκά πλαίσια στον ρυθμιστή φορτίου και από εκεί στο υπόλοιπο σύστημα (3.13). Ο σκοπός της τοποθέτησης του στο συγκεκριμένο σημείο είναι για να επιτρέπει την ασφαλή επέμβαση μας στον υπόλοιπο εξοπλισμό δίχως τον φόβο βραχυκυκλώματος.



**Σχήμα 3.13:** Κύριος ηλεκτρικός διακόπτης (switch).

### **3.2.8 Ηλεκτρική Ασφάλεια (fuse)**

Η ηλεκτρική ασφάλεια (fuse) είναι πρακτικά ένας ηλεκτρικός διακόπτης, ο οποίος παρεμβάλλεται σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα με σκοπό να το προστατεύσει από τις ζημιές που θα προκληθούν από υπερφόρτωσή του ή βραχυκύκλωμα ( Σχ. 3.14).

Στο σύστημα μας μπορούν να προκληθούν καταστροφές από κεραυνό ή από πτώσεις τάσης οι οποίες θα δημιουργήσουν υπερφόρτωση στο σύστημα μας ή από κάποιο βραχυκύκλωμα που μπορεί να υπάρξει σε κάποιο μηχάνημα. Ο ρόλος της ασφάλειας θα είναι να προστατεύσει τα υπόλοιπα μέρη του συστήματος μας, αποσυνδέοντας τα και να περιορίσει την καταστροφή σε τοπικά και όχι ολικά επίπεδα.



**Σχήμα 3.14:** Ηλεκτρική ασφάλεια (fuse).

### 3.2.9 Φορτίο κατανάλωσης (Electrical Load)

Το ηλεκτρικό φορτίο κατανάλωσης που συνδέθηκε στην έξοδο του ανορθωτή τάσης (inverter) είναι 6 προβολείς LED, 10Watt ισχύος ο καθένας (Σχ. 3.15) για την φωταγώγηση της επιγραφής των Τμημάτων Μηχανολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας στην είσοδο του (Σχ. 3.16).



**Σχήμα 3.15:** Ηλεκτρικό φορτίο κατανάλωσης (λαμπτήρας led εξωτερικού χώρου).



**Σχήμα 3.16:** Φωταγώγηση της εισόδου του κτιρίου.

### **3.2.10 Διαστασιολόγηση συστήματος**

Η διαστασιολόγηση του συστήματος μας έγινε με τον αντίθετο τρόπο από αυτόν που συνηθίζεται στις αυτόνομες φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις. Πραγματοποιήθηκε υπολογίζοντας αρχικά το ποσό της ηλεκτρικής ισχύος που μπορεί να παραχθεί από τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και κατόπιν επιλέχθηκε ο τύπος των τεσσάρων μπαταριών που θα χρησιμοποιηθούν. Όταν οι μπαταρίες βρίσκονται σε πλήρη φόρτιση έχουν διαθέσιμη ενέργεια ίση με 2808 Wh. Συνυπολογίζοντας την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία του ελεγκτή φόρτισης (controller) (1W) και του ανορθωτή τάσης (inverter) (10W), καθώς και το ότι το ηλιακό δυναμικό της Κοζάνης δεν είναι το ιδανικότερο και άρα οι μπαταρίες δεν θα είναι συνεχώς πλήρως φορτισμένες, κρίναμε ότι το σύστημα θα ήταν σε θέση να τροφοδοτήσει το φορτίο κατανάλωσης για τις νυχτερινές ώρες.



Έτσι με τη χρήση χρονοδιακοπών, οι έξι προβολείς ενεργοποιούνται στις 21:00 ώστε να φωταγωγούν την επιγραφή του κτιρίου τις νυχτερινές ώρες. Οι προβολείς απενεργοποιούνται με χρήση του χρονοδιακόπτη στις 05:00. Ο συνολικός χρόνος λειτουργίας των προβολέων είναι 8 ώρες και λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι κάθε ένας από τους έξι προβολείς έχει ισχύ 10Watt, μπορούμε να υπολογίσουμε το συνολικό φορτίο που θα καταναλώσουν τις ώρες αυτές:

$$8*6*10=480Wh$$

Εφόσον οι προβολείς θα λειτουργούν τις νυχτερινές ώρες, όταν δηλαδή τα φωτοβολταϊκά πλαίσια δεν θα παράγουν ενέργεια, θα πρέπει κατά τη διάρκεια της ημέρας να έχουν αποθηκευτεί στις μπαταρίες τουλάχιστον 480Wh. Η τιμή αυτή είναι μικρή συγκριτικά με το δυναμικό των φωτοβολταϊκών πλαισίων και της χωρητικότητας των μπαταριών. Χαρακτηριστικό είναι ότι οι προβολείς θα μπορούσαν να λειτουργήσουν μόνο με τη χρήση των μπαταριών για **47 περίπου συναπτές ώρες ή αλλιώς για 6 περίπου ημέρες** στο ωράριο λειτουργία που έχουμε ορίσει.

*Σε αντίθεση με τη μέθοδο διαστασιολόγησης που ακολουθήσαμε, συνηθέστερα η διαστασιολόγηση ξεκινά από το φορτίο κατανάλωσης και καταλήγει στον τύπο των φωτοβολταϊκών πλαισίων που πρέπει να εγκατασταθούν καθώς και στη χωρητικότητα των μπαταριών. Στις περίπτωση αυτή όμως ήταν διαθέσιμα τα φωτοβολταϊκά πλαίσια και αναζητήσαμε ένα φορτίο που θα μπορούσαν εύκολα να καλύψουν σε καθημερινή βάση.*

### **3.2.11 Αποθήκευση και προστασία εξοπλισμού**

Ο εξοπλισμός (ελεγκτής φόρτισης, μπαταρίες, χρονοδιακόπτες, ηλεκτρική ασφάλεια, ανορθωτής τάσης, διακόπτης) αποθηκεύτηκε σε ένα κιβώτιο προστασίας (μεταλλική ντουλάπα) πλησίον των φωτοβολταϊκών πλαισίων για προστασία από τις καιρικές συνθήκες, όπως τη βροχή που θα κατέστρεφε τα ηλεκτρονικά συστήματα και τον ήλιο που θα τα υπερθέρμαινε. Η ντουλάπα αυτή έχει στα πλαϊνά της μέρη χαραμάδες εξαερισμού ώστε να γίνεται ανακύκλωση αέρα και έτσι να μη ανεβαίνει η θερμοκρασία μέσα σε αυτή σε υψηλά επίπεδα (Σχ. 3.17).



**Σχήμα 3.17:** Κιβώτιο προστασίας του εξοπλισμού.

### **3.3 Μετεωρολογικός σταθμός**

Για την πραγματοποίηση της μελέτης, ήταν αναγκαία η τοποθέτηση ενός μετεωρολογικού σταθμού με σκοπό την λήψη των απαραίτητων δεδομένων (Σχ. 3.18). Για τον σκοπό αυτό τοποθετήθηκε ένας γαλβανισμένος ιστός ύψους τριών μέτρων με ειδικά κατασκευασμένους βραχίονες στήριξης αισθητήριων οργάνων. Ο ιστός αυτός τοποθετήθηκε πλησίον του φωτοβολταϊκού συστήματος και σε τοποθεσία όπου, δεν θα σκιάζεται τις ώρες με ηλιοφάνεια.



**Σχήμα 3.18:** Μετεωρολογικός σταθμός.

Στους βραχίονες του ιστού, τοποθετήθηκαν τα παρακάτω όργανα (Σχ. 3.19):

- Αισθητήρας ταχύτητας ανέμου της εταιρείας Windspeed A100K, με σκοπό τη μέτρηση της ταχύτητας του πνέοντος ανέμου.
- Αισθητήρας διεύθυνσης ανέμου της εταιρείας WIndspeed W200P, με σκοπό τη μέτρηση της διεύθυνσης του πνέοντος ανέμου.
- Θερμόμετρο & αισθητήρας σχετικής υγρασίας της εταιρείας Rotronic (HC2-S3 με σκοπό τη μέτρηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και του ποσοστού της σχετικής υγρασίας. Για την προστασία και καλύτερη λειτουργία του ανωτέρω αισθητήρα τοποθετήθηκε ειδικά κατασκευασμένος κλωβός.

- Δύο πυρανόμετρα β' τάξεως της εταιρείας Kipp & Zonen για την μέτρηση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας. Το ένα τοποθετήθηκε σε οριζόντια θέση ενώ το δεύτερο τοποθετήθηκε σε κλίση  $32^\circ$ , παράλληλο με το επίπεδο των φωτοβολταϊκών πλαισίων προκειμένου να μετρούμε την ένταση της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει στα πλαίσια.
- Στην κορυφή του ιστού, τοποθετήθηκε ένα αλεξικέραυνο για την προστασία του μετεωρολογικού σταθμού αλλά και της συνολικής εγκατάστασης από πιθανή πτώση κεραυνού.



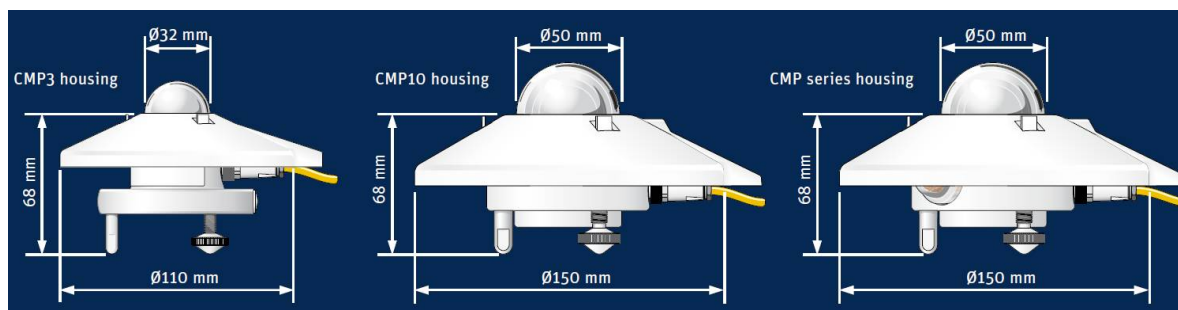
**Σχήμα 3.19:** Όργανα του μετεωρολογικού σταθμού.

### 3.4 Περιγραφή του εξοπλισμού του μετεωρολογικού σταθμού

Στις επόμενες παραγράφους ακολουθεί λεπτομερή περιγραφή των οργάνων του μετεωρολογικού σταθμού και της συνδεσμολογίας με το σύστημα μέτρησης και καταγραφής των πειραματικών δεδομένων.

### 3.4.1 Πυρανόμετρα

Το πυρανόμετρο είναι ένα όργανο μέτρησης της συνολικής πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια οριζόντια επιφάνεια εμβαδού  $A=1 \text{ m}^2$ . Η λειτουργία του στηρίζεται στους αισθητήρες θερμοπύλης που λειτουργούν με βάση το θερμοηλεκτρικό φαινόμενο. Ο αισθητήρας θερμοπύλης έχει εξωτερικά την μορφή οριζόντιου κυκλικού δίσκου με κατάλληλη επικάλυψη με μαύρο υλικό ώστε να απορροφά σχεδόν πλήρως την Ηλιακή ενέργεια (Σχ. 2.5). Η θερμοπύλη αποτελείται από μια σειρά θερμοηλεκτρικών ζευγών που συνήθως τοποθετούνται το ένα δίπλα στο άλλο καλύπτοντας όλη την περιφέρεια του κυκλικού δίσκου της θερμοπύλης. Τα θερμοηλεκτρικά ζεύγη είναι συνδεδεμένα σε σειρά ώστε να παράγουν την μέγιστη δυνατή διαφορά δυναμικού. Επιπροσθέτως, η θερμοπύλη καλύπτεται από ένα προστατευτικό γυάλινο θόλο. Ο θόλος αυτός, αφενός προστατεύει τον αισθητήρα από τις καιρικές συνθήκες και τη σκόνη, αφετέρου του διασφαλίζει ένα είδος θερμομόνωσης από το περιβάλλον, ώστε τα θερμοηλεκτρικά ζεύγη να μην υπόκειται σε μεγάλη θερμοκρασιακή διακύμανση κατά την διάρκεια της ημέρας, που θα επηρέαζε άμεσα την λειτουργία της θερμοπύλης.



**Σχήμα 3.20:** Διαστάσεις Πυρανόμετρου CMP 3.

Στην εγκατάσταση μας τοποθετήθηκαν δύο πυρανόμετρα β' τάξεως της εταιρείας Kipp&Zonen CMP 3 Pyranometer, για την μέτρηση της ολικής ηλιακής ακτινοβολίας (Σχ. 3.21). Το ένα εξ αυτών τοποθετήθηκε σε οριζόντιο επίπεδο  $0^\circ$  για τον υπολογισμό της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας στο οριζόντιο επίπεδο και το δεύτερο σε κλίση  $32^\circ$  για τον υπολογισμό της πυκνότητας ισχύος της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας στο επίπεδο των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Το συγκεκριμένο μοντέλο που εγκαταστάθηκε έχει εύρος λειτουργίας ως προς την προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία 300 έως 2800 nm, έχει βαθμό απορροφητικότητας 95% και θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας από  $-40^\circ\text{C}$  έως τους  $80^\circ\text{C}$ .



**Σχήμα 3.21:** Πυρανόμετρο CMP 3.

### 3.4.2 Ανεμόμετρο

Στην εγκατάσταση μας, τοποθετήθηκε το τριαξονικό μοντέλου ανεμόμετρου A100K της εταιρείας Windspeed (Σχ. 3.22). Το συγκεκριμένο ανεμόμετρο μπορεί να μετρήσει ταχύτητες ανέμου μεγαλύτερες και από 75 m/s και έχει θερμοκρασιακό εύρος λειτουργίας από -50 °C έως 70°C. Το σφάλμα μετρήσεών του για χαμηλές ταχύτητες ανέμου είναι 1% ενώ για ταχύτητες μεγαλύτερες από 55 m/s 2% και οι διαστάσεις του δίνονται στο παρακάτω σχήμα.



**Σχήμα 3.22:** Ανεμόμετρο A100K.

Η αρχή λειτουργίας του ανεμομέτρου, βασίζεται στην περιστροφική κίνηση των ημισφαιρικών κουπών. Καθώς ο αέρας ρέει προς τις κούπες, αυτές περιστρέφονται συνεχώς έχοντας μια σταθερή κίνηση. Ανάλογα με την ταχύτητα την οποία περιστρέφονται μπορούμε να υπολογίσουμε την ταχύτητα ροής του ανέμου. Με την αύξηση ή τη μείωση της ταχύτητας του ανέμου, οι κούπες αντίστοιχα θα αυξήσουν ή θα μειώσουν την ταχύτητα περιστροφής τους. Μία ακόμη πληροφορία που μπορούμε να λάβουμε από ένα τέτοιο ανεμόμετρο, είναι μέσω της παρατήρησης της κίνησης των κουπών για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Με τον υπολογισμό των συνολικών στροφών στο διάστημα αυτό και με αναγωγή στην χρονική μονάδα που επιθυμούμε, μπορούμε να υπολογίσουμε την μέση ταχύτητα του ανέμου.

### 3.4.3 Ανεμοδείκτης

Στην εγκατάσταση μας τοποθετήθηκε αισθητήρας διεύθυνσης ανέμου της εταιρείας Windspeed, το μοντέλο W200P (Σχ. 3.23). Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει αντοχή σε εύρος θερμοκρασίας από  $-50^{\circ}\text{C}$  έως  $70^{\circ}\text{C}$  και σφάλμα υπολογισμού  $\pm 2^{\circ}$  ή  $3^{\circ}$  ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου. Ο ανεμοδείκτης αυτός είναι κατασκευασμένος από κράμα αλουμινίου και ανοξείδωτου χάλυβα. Το συγκεκριμένο όργανο λειτουργεί με αισθητήρα που μας ενημερώνει για την διεύθυνση του ανέμου σε μοίρες.



**Σχήμα 3.23:** Ανεμοδείκτης W200P.

Ο ανεμοδείκτης ουσιαστικά αποτελείται από έναν στύλο με έναν άξονα προσαρμοσμένο σε αυτόν. Η λειτουργία του ανεμοδείκτη βασίζεται στην περιστροφή του άξονα ανάλογα με την κατεύθυνση του ανέμου μέχρι αυτός να βρεθεί σε παράλληλη τροχιά με τη ροή του ανέμου. Τη στιγμή που θα σταθεροποιηθεί ο άξονας θα μπορούμε να διαπιστώσουμε ποια είναι η διεύθυνση του ανέμου. Για την διευκόλυνση μας στην οπτική παρατήρηση του φαινομένου, το βάρος στα δύο άκρα των αξόνων είναι διαφορετικό και στο βαρύτερο άκρο τοποθετείτε ένα βέλος.

Ανάλογα με τις μοίρες ο χαρακτηρισμός του ανέμου έχει κυριαρχήσει να είναι ο εξής:

<b>Διεύθυνση σε μοίρες</b>	<b>Διεθνής ονομασία</b>
0°	North (N)
45°	Northeast (NE)
90°	East (E)
135°	Southeast (SE)
180°	South (S)
225°	Southwest (SW)
270°	West (W)
315°	Northwest (NW)

**Πίνακας 3.1:** *Ενδείξεις ανεμοδείκτη και διεύθυνση πνέοντος ανέμου*

#### **3.4.4 Υγρασιόμετρο**

Στην εγκατάσταση μας, τοποθετήθηκε ένα ηλεκτρικό υγρασιόμετρο για τη μέτρηση της σχετικής υγρασίας της ατμόσφαιρας, το μοντέλο HC2-S3 της εταιρείας Rotronic (Σχ. 3.24). Το συγκεκριμένο μοντέλο συμπεριλαμβάνει και ένα θερμομέτρο αντίστασης. Το υγρόμετρο είναι βαθμονομημένο σε κλίμακα επί τοις εκατό με εύρος ενδείξεων από μηδέν έως εκατό τοις εκατό. Ο αισθητήρας το είναι ο ROTRONIC® Hygromer IN-1 και έχει υψηλή ακρίβεια με εύρος απωλειών υπό κανονικές συνθήκες 0,8%.



Η αρχή λειτουργίας των ηλεκτρικών υγραμέτρων βασίζεται στη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης μιας ουσίας της οποίας οι τιμές της μεταβάλλονται με την αλλαγή της υγρασίας. Η πιο συνηθισμένη ουσία που χρησιμοποιείται είναι το χλωριούχο λίθιο. Το συγκεκριμένο όργανο είναι το πιο εύχρηστο για τη μέτρηση της υγρασίας καθώς έχει μεγάλη ακρίβεια και τα αποτελέσματα του μπορούν να ληφθούν άμεσα. Το βασικότερο μειονέκτημα των ηλεκτρικών υγραμέτρων είναι ότι οι ουσίες που χρησιμοποιούνται για να μετρηθεί η ηλεκτρική αντίσταση τους, δεν έχουν σταθερά χαρακτηριστικά και παρατηρούνται αλλαγές στις αντιδράσεις τους με την μεταβολή της θερμοκρασίας. Για αυτό το λόγο τα ηλεκτρικά υγράμετρα τα συναντάμε σε συνδυασμό με κάποιο θερμόμετρο.



**Σχήμα 3.24:** Υγρασιόμετρο Rotronic HC2-S3.

### 3.4.5 Θερμόμετρο

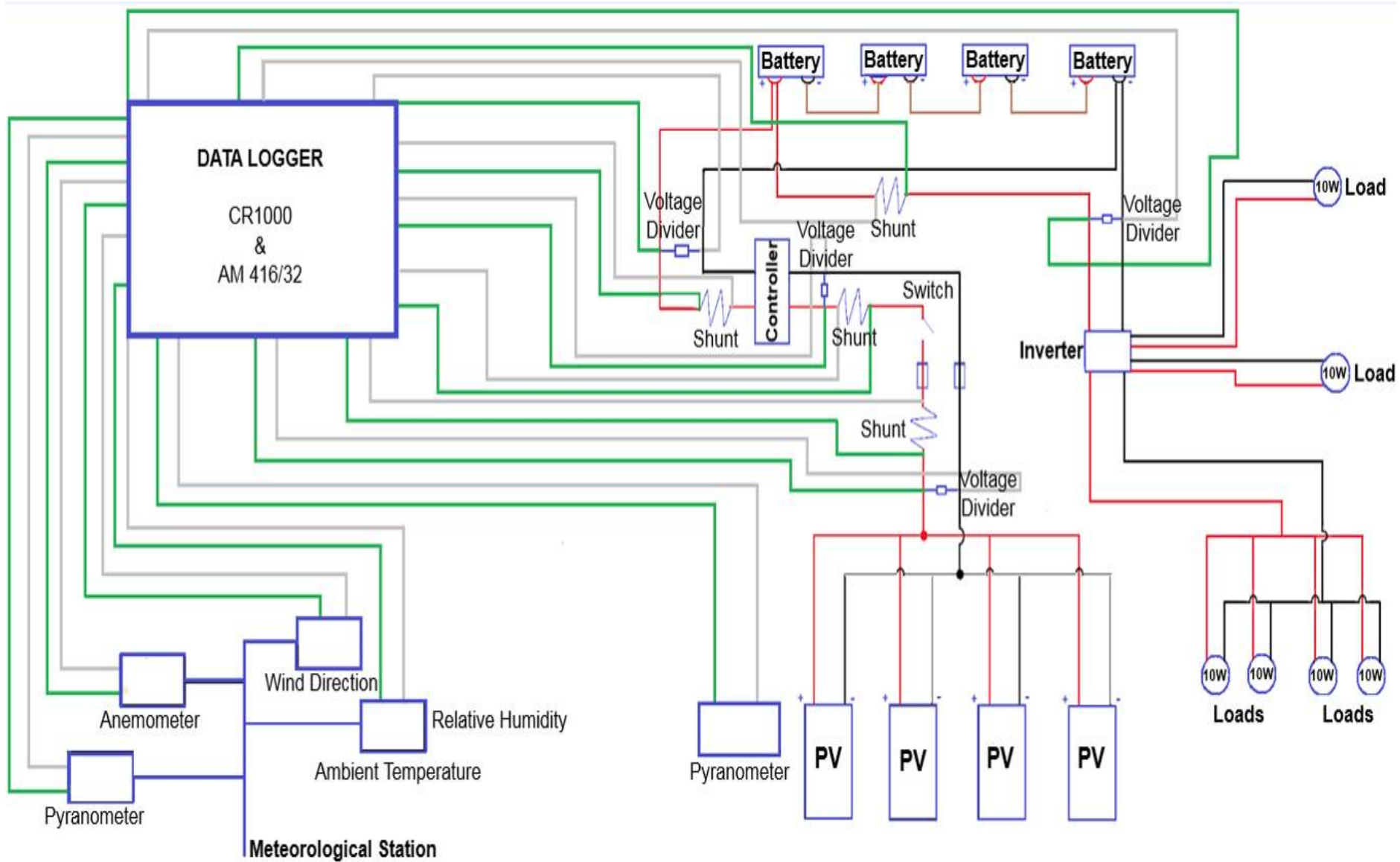
Το θερμόμετρο που τοποθετήθηκε στον μετεωρολογικό σταθμό της εγκατάστασης μας, είναι ένα θερμόμετρο αντίστασης, το μοντέλο HC2-S3 της εταιρείας Rotronic (Σχ. 3.25), και έχει εύρος λειτουργίας από τους  $-50^{\circ}\text{C}$  μέχρι τους  $100^{\circ}\text{C}$ , διάμετρο 15 χιλιοστά, μήκος 85 χιλιοστά, και βάρος 10 γραμμάρια. Στο θερμόμετρο αυτό τοποθετήθηκε και ειδικά κατασκευασμένος κλωβός για την προστασία του και την εξασφάλιση της ομαλής του λειτουργίας.

Η αρχή λειτουργίας των θερμομέτρων αντιστάσεως (thermistor) βασίζεται στο γεγονός ότι η ηλεκτρική αντίσταση ενός αγωγού είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας (Σχ. 2.17). Ένα θερμομέτρο ηλεκτρικής αντίστασης σχηματίζεται τυλίγοντας μεταλλικό σύρμα γύρω από έναν κεραμικό σωλήνα, επικαλύπτοντας με κεραμικό υλικό και τοποθετώντας το σε προστατευτικό μεταλλικό μανδύα. Τα δύο άκρα του σύρματος συνδέονται στον ένα βραχίονα μίας γέφυρας Wheatstone και στη συνέχεια το θερμομέτρο τοποθετείται στο χώρο, του οποίου θέλουμε να μετρήσουμε τη θερμοκρασία. Μετά από χρόνο απόκρισης μερικών δευτερολέπτων η θερμοκρασία του χώρου εμφανίζεται στο αμπερόμετρο.



**Σχήμα 3.25:** Κλωβός του αισθητηρίου HC2-S3 (Υγρασιόμετρο – θερμομέτρο).

Στο παρακάτω σχηματικό διάγραμμα (Σχ. 3.26) παρουσιάζεται το ολοκληρωμένο σχέδιο του ηλεκτρικού κυκλώματος της εγκατάστασης τόσο του αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος όσο και του μετεωρολογικού σταθμού με τα ηλεκτρονικά ισχύος και το σύστημα ηλεκτρονικής καταγραφής και αποθήκευσης πειραματικών δεδομένων (Data Logger).



**Σχήμα 3.26:** Αναλυτικό ηλεκτρολογικό σχέδιο της εγκατάστασης (Φωτοβολταϊκό-φορτίο-μετεωρολογικός σταθμός-Data Logger)



# Κεφάλαιο 4: «Ηλεκτρονική Καταγραφή και Αποθήκευση Δεδομένων»

## 4.1 Γενικά για τα συστήματα καταγραφής δεδομένων

Η μέτρηση φυσικών μεγεθών αποτελεί ίσως την πιο σημαντική διαδικασία για την ορθότητα της επιστημονικής σκέψης. Από μόνη της η θεωρία σφαλμάτων ή και αβεβαιότητας των μετρήσεων αποτελεί ξεχωριστός κλάδος της επιστήμης. Από τη στιγμή που η τεχνολογία μας επέτρεψε να παρατηρούμε με συστηματικό τρόπο τις πειραματικές διαδικασίες, γεννήθηκε η ανάγκη για την ορθή καταγραφή των πειραματικών δεδομένων και αποτελεί πλέον μια από τις πιο σημαντικές διαδικασίες στη διεξαγωγή πειραμάτων. Η πολυπλοκότητα όμως των πειραματικών διαδικασιών οδηγεί αυτόματα σε πολυπλοκότητα των μετρήσεων, της καταγραφής αυτών με τελικό αποτέλεσμα να αφιερώνεται μεγάλο μέρος του χρόνου για επεξεργασία από τους ερευνητές κάθε πειραματικού κλάδου της επιστήμης. Σκοπός είναι η επιβεβαίωση μιας θεωρίας, η διεξαγωγή συμπερασμάτων αυτής αλλά και η πρόβλεψη μιας νέας θεωρίας. Η ενσωμάτωση των υπολογιστών τις τελευταίες τρεις δεκαετίες στη διάρκεια διεξαγωγής πειραμάτων έδωσε νέα ώθηση στη δυνατότητα για μετρήσεις αλλά και για την ακρίβεια αυτών. Οι συσκευές που είναι υπεύθυνες για την καταγραφή αλλά και την αποθήκευση των πειραματικών δεδομένων ονομάζονται συστήματα καταγραφής δεδομένων και στη διεθνή βιβλιογραφία αναφέρονται ως Data Logging Systems ή συντομογραφικά Data Loggers.

Ένα Data Logger (ή σύστημα καταγραφής δεδομένων) είναι μια ηλεκτρονική συσκευή η οποία καταχωρεί δεδομένα συναρτήσει του χρόνου. Τα Data Loggers συνήθως είναι συνδεδεμένα με διάφορους τύπους εξωτερικών οργάνων που φέρουν κατάλληλους αισθητήρες για τη μέτρηση φυσικών μεγεθών. Είναι γενικά μικροί σε μέγεθος, με μπαταρίες, φορητοί, και εξοπλισμένοι με έναν μικροεπεξεργαστή και εσωτερική μνήμη για την αποθήκευση στοιχείων. Πλέον οι Data Loggers συνδέονται με Η/Υ μέσω συγκεκριμένου λογισμικού με σκοπό τόσο την σύνδεση και επικοινωνία, όσο και τη μεταφορά δεδομένων και μετάδοση πληροφορίας. Ένα τυπικό σύστημα ηλεκτρονικής καταγραφής δεδομένων (Data Logger) παρουσιάζεται στο σχήμα 4.1.



**Σχήμα 4.1:** *Τυπικό ηλεκτρονικό σύστημα καταγραφής δεδομένων (Data Logger).*

Τα Data Loggers έχουν μια τοπική διάταξη διεπαφών, αριθμητικό πληκτρολόγιο, οθόνη LCD και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως αυτόνομες συσκευές. Ποικίλλουν ανάλογα με το σκοπό, τον τρόπο εγκατάστασης και την ακρίβεια των μετρήσεων. Τα ηλεκτρονικά συστήματα καταγραφής έχουν αντικαταστήσει τα μηχανικά όργανα καταγραφής διαγραμμάτων σε πολλές εφαρμογές και ένα από τα αρχικά οφέλη τους είναι η δυνατότητα να συλλεχθούν αυτόματα πειραματικά δεδομένα σε 24ωρη βάση. Πρέπει να σημειωθεί ότι ένα σύστημα καταγραφής δεδομένων μπορεί να χαρακτηριστεί και ως σύστημα μετρήσεων ενώ δεν μπορεί το σύστημα μετρήσεων απαραίτητα να χαρακτηριστεί και ως σύστημα καταγραφής δεδομένων.

#### **4.1.1 Εφαρμογές των Data Loggers**

Τα ηλεκτρονικά συστήματα μέτρησης και καταγραφής δεδομένων έχουν ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Ο βασικός διαχωρισμός τους λαμβάνεται με βάση το χώρο δοκιμών, αν πρόκειται δηλαδή να καλύψει ανάγκες για πειράματα εντός εσωτερικού ή εξωτερικού χώρου. Στις περιπτώσεις πειραμάτων εσωτερικού χώρου δοκιμών χρησιμοποιούνται Data Loggers σε μορφή ψηφιακών καρτών PCI που εισάγονται σε κατάλληλους Η/Υ (Σχ. 4.2). Ο εξωτερικός χώρος δοκιμών απαιτεί προστασία από τις καιρικές συνθήκες και ως εκ τούτου είναι αναγκαίος κλωβός προστασίας (Σχ. 4.3).

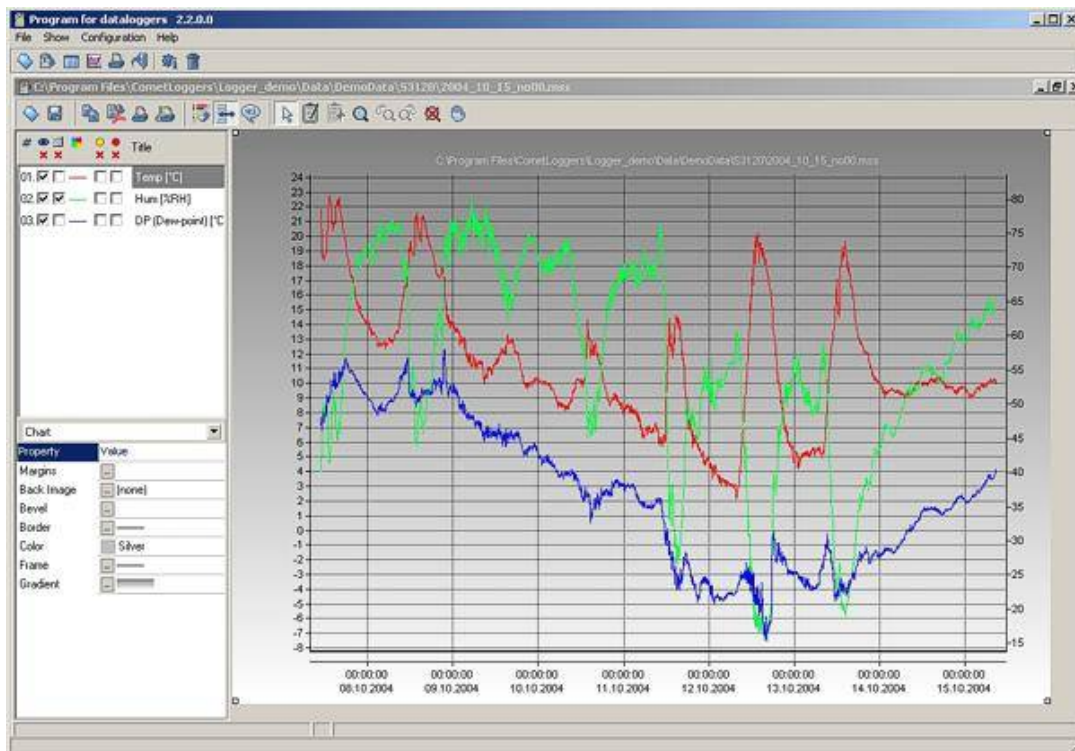


**Σχήμα 4.2:** Data Logger τύπου κάρτας για εσωτερικό χώρο δοκιμών.



**Σχήμα 4.3:** Εγκατάσταση Data Logger σε εξωτερικό πειραματικό χώρο δοκιμών.

Σημαντική θεωρείται η χρήση ηλεκτρονικών συστημάτων μέτρησης και καταγραφής δεδομένων που αφορά πειραματικές διαδικασίες σχετιζόμενες με τη μετεωρολογία. Τα Data Loggers εξωτερικών χώρων μπορούν να συνδεθούν με πληθώρα οργάνων για μέτρηση της έντασης της ολικής πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, της φασματικής κατανομής αυτής (φασματικά όργανα), της ταχύτητας και διεύθυνσης του πνέοντος ανέμου, της υγρασίας (απόλυτης και σχετικής), της βαρομετρικής πίεσης, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, κ.α. Παράλληλα έχουν τη δυνατότητα να δέχονται εισόδους (σήματα) για μέτρηση παλμών, διαφοράς δυναμικού έντασης ρεύματος, θερμοκρασίας (χώρων, επιφανειών, ρευστών), πίεσης κ.α. Το κοινό χαρακτηριστικό όλων των δυνατών τύπων των Data Loggers είναι ο περιορισμός της τάσης εισόδου σήματος, ο οποίος ποικίλει ανάλογα με την εφαρμογή. Επιπλέον, το σύνολο πλέον των ηλεκτρονικών αυτών συστημάτων, έχουν τη δυνατότητα υποστήριξης κατάλληλων λογισμικών τόσο για την ανάγνωση των μετρήσεων όσο και της αποθήκευσης και επεξεργασίας αυτών (Σχ. 4.4). Σημαντικό, τέλος, πλεονέκτημα των Data Loggers μπορεί να θεωρηθεί η δυνατότητα προγραμματισμού της λήψης του είδους και της συχνότητας των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο.



**Σχήμα 4.4:** Λογισμικό ανάγνωσης και καταγραφής δεδομένων.



## 4.2 Περιγραφή του Data Logger και των περιφερειακών

Για την υλοποίηση της εγκατάστασης αναφορικά με τη λήψη και καταγραφή των πειραματικών μετρήσεων επιλέχτηκε ένα ηλεκτρονικό σύστημα καταγραφής δεδομένων της εταιρείας Campbell Scientific. Η επιλογή της συγκεκριμένης εταιρείας έγινε με γνώμονα τρεις βασικές απαιτήσεις της εγκατάστασής μας.

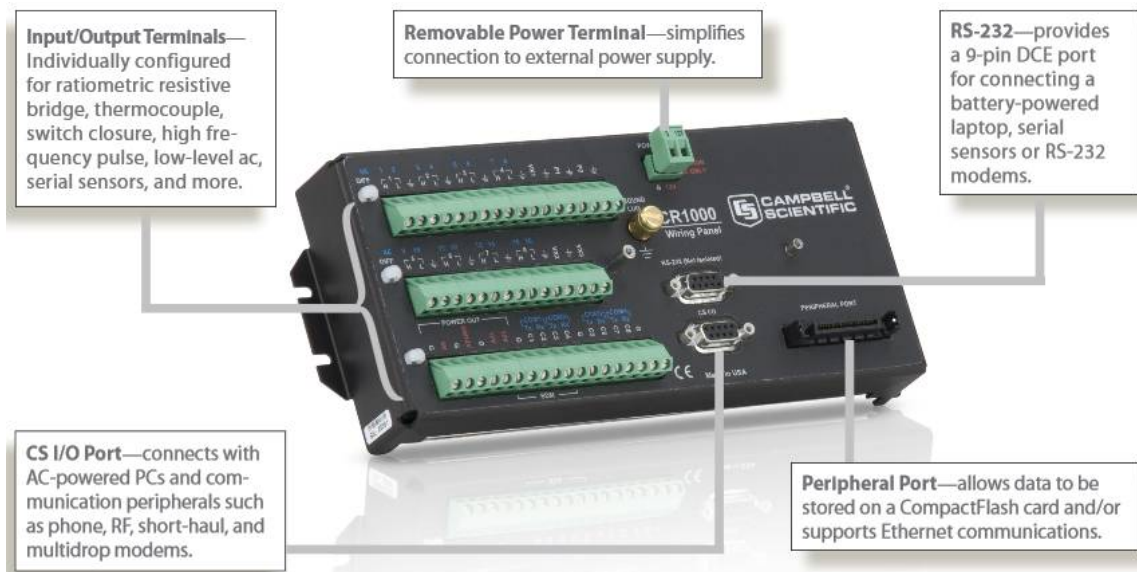
Ως πρώτη απαίτηση τέθηκε ο εξωτερικός χώρος των πειραματικών δοκιμών όπου σύμφωνα με αυτή και δεδομένου των δυσμενών καιρικών συνθηκών του τόπου εγκατάστασης, η χρήση ενός ηλεκτρονικού συστήματος ειδικά σχεδιασμένου για εξωτερική χρήση είναι επιτακτική. Στα πλαίσια αυτά, το εν λόγω σύστημα διαθέτει ξεχωριστή μονάδα λήψης και αποθήκευσης δεδομένων χωρίς την απαραίτητη και αδιάληπτη σύνδεσή του με Η/Υ (Σχ. 4.5). Η δεύτερη απαίτηση έγκειται στην ανάγκη για ύπαρξη πλήρους βάσης δεδομένων, μέσω της οποίας επιτρέπεται η σύνδεση με την εν λόγω μονάδα των οργάνων μέτρησης. Αυτά είναι τα πυρανόμετρα CMP 3 της εταιρείας Kipp & Zonen (Σχ. 3.21), το ανεμόμετρο A100K της εταιρείας Windspeed (Vector Instruments) (Σχ. 3.22), ο ανεμοδείκτης W200P της εταιρείας Windspeed (Vector Instruments) (Σχ. 3.23) και το υγρασιόμετρο – θερμόμετρο HC2-S3 της εταιρείας Rotronic (Σχ. 3.24). Πρέπει να σημειωθεί ότι η ύπαρξη συγκεκριμένης βάσης δεδομένων για το σύνολο των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν σχετίζεται με τη βαθμονόμησή τους αλλά και του ενσωματωμένου κώδικα που τα συνοδεύει. Τέλος, ως τρίτη απαίτηση τέθηκε η ανάγκη για ύπαρξη ενός λογισμικού προγράμματος με κύρια χαρακτηριστικά το παραθυρικό περιβάλλον (ευκολία από μη εξειδικευμένους χρήστες), τη δυνατότητα για προγραμματισμό του Data Logger αναφορικά με την ενσωμάτωση των οργάνων μέτρησης και των ηλεκτρικών σημάτων, το ρυθμό μέτρησης και τη συχνότητα αποθήκευσης δεδομένων στην κεντρική μονάδα μνήμης, την εξ' αποστάσεως σύνδεσης του ηλεκτρονικού συστήματος καταγραφής με Η/Υ και τέλος την τη δυνατότητα για απομακρυσμένη σύνδεση του χρήστη με τον Η/Υ που είναι συνδεδεμένο με το Data Logger. Όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά και απαιτήσεις οδήγησαν στην επιλογή της βασικής μονάδας Data Logger CR1000 της εταιρείας Campbell και των κατάλληλων περιφερειακών ηλεκτρονικών συστημάτων, τα οποία παρουσιάζονται σε επόμενες παραγράφους. Στο σχήμα 4.5 παρουσιάζεται το ηλεκτρονικό σύστημα καταγραφής στον πειραματικό χώρο δοκιμών.



**Σχήμα 4.5:** Εγκατάσταση του Data Logger στον πειραματικό χώρο δοκιμών.

#### 4.2.1 Βασική μονάδα Data Logger (CR1000)

Για την πραγματοποίηση της μελέτης της απόδοσης του συστήματος και τη μέτρηση των απωλειών ηλεκτρικής ενέργειας, ήταν απαραίτητη η εγκατάσταση ενός συστήματος καταγραφής δεδομένων (Data Logger). Ο ρόλος του Data Logger είναι να καταγράφει τις μετρήσεις για τα όργανα τα οποία συνδέονται σε αυτόν και να τις μεταφέρει σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή με τον οποίο επίσης συνδέεται με σκοπό την περαιτέρω ανάλυση τους. Το Data Logger που χρησιμοποιήθηκε στην εγκατάσταση το μοντέλο CR1000 της εταιρείας Campbell Scientific. Το CR1000 αποτελείται από την μονάδα μέτρησης και ελέγχου μαζί με το πάνελ σύνδεσης καλωδίων, όπου περιλαμβάνει υποδοχές για τα καλώδια των οργάνων μέτρησης αλλά και για το καλώδιο σύνδεσης με τον υπολογιστή που χρησιμοποιούμε τόσο για τον προγραμματισμό της μονάδας όσο και για την ανάκτηση των δεδομένων. Ο CR1000 τοποθετήθηκε για την προστασία του από τις καιρικές συνθήκες σε ένα μεταλλικό κουτί στο στύλο του μετεωρολογικού σταθμού σε ύψος 1,40 μέτρα από το έδαφος (Σχ. 4.5).



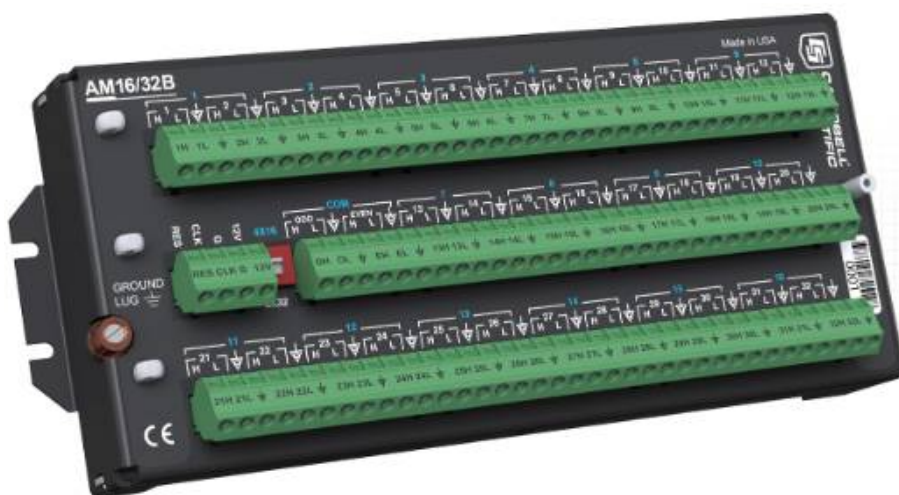
**Σχήμα 4.6:** Κεντρική μονάδα Data Logger (Campbell CR1000).

Η μονάδα περιλαμβάνει έναν μικροελεγκτή Renesas H8S με εσωτερική αρχιτεκτονική επεξεργαστή 32-bit, μνήμη μεγέθους 2MB τύπου FLASH για το λειτουργικό σύστημα, καθώς και επιπλέον μνήμη μεγέθους 4MB τύπου SRAM, η οποία χρησιμοποιείται για την αποθήκευση του προγράμματος των μετρήσεων που δημιουργούμε και των δεδομένων που καταγράφονται, όπως επίσης και για συνεργασία με τον επεξεργαστή της μονάδας. Εάν κριθεί αναγκαίο η μνήμη μπορεί να επεκταθεί με

τη χρήση κάρτας μνήμης Compact Flash. Η αποθήκευση των δεδομένων που καταγράφονται γίνεται σε μορφή πινάκων. Το CR1000, έχει 16 απλές ή 8 διαφορικές υποδοχές σήματος και αντίστοιχες υποδοχές γείωσης. Επιπλέον, διαθέτει συνεχείς πηγές διαφοράς δυναμικού 5 Volts και 12 Volts για την τροφοδοσία συγκεκριμένων οργάνων μέτρησης, όταν αυτό απαιτείται, και τέλος, διαθέτει και 2 διαφορικές υποδοχές σήματος για λήψη μετρήσεων συχνότητας. Λεπτομέρειες της βασικής μονάδας CR1000 παρουσιάζονται στο σχήμα 4.6.

#### 4.2.2 Μονάδα πολυπλεξίας (Multiplexer AM 416/32B)

Εξαιτίας του πλήθους των οργάνων και των ηλεκτρικών σημάτων που απαιτήθηκαν στην εγκατάστασή μας ήταν αρκετά μεγάλο, κρίθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί μια μονάδα πολυπλεξίας με σκοπό τον πολλαπλασιασμό των διαθέσιμων εισόδων σήματος. Η βασική μονάδα Data Logger (CR1000) έχει έναν περιορισμό σε αριθμό εισόδων σήματος. Συγκεκριμένα διαθέτει στο σύνολό της 8 διαφορικές υποδοχές σήματος (συνεχούς τάσης) και η απαίτηση της εγκατάστασης είναι 16 εισόδους σήματος (συνεχούς τάσης). Ως μονάδα πολυπλεξίας επιλέχτηκε η AM16/32B Relay Multiplexer της εταιρείας Campbell Scientific (Σχ. 4.7). Διαθέτει 32 κανάλια (εισόδους σήματος) διαφορικής μέτρησης ή 64 κανάλια απλής μέτρησης. Η συγκεκριμένη μονάδα πολυπλεξίας μπορεί να συνδεθεί άμεσα με τη μονάδα CR1000 ενώ και το λογισμικό χρήσης διαθέτει την κατάλληλη βάση δεδομένων σύνδεσης. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται η μονάδα πολυπλεξίας.



**Σχήμα 4.7:** Μονάδα πολυπλεξίας (Multiplexer AM 416/32B).

### 4.2.3 Περιφερειακά σύνδεσης και επικοινωνίας με Η/Υ

Για τη σύνδεση της κεντρικής μονάδας του Data Logger (CR1000) απαιτήθηκε η χρήση του μετατροπέα σύνδεσης SC32B της εταιρείας Campbell (Optical Isolated RS-232 Interface) (Σχ. 4.8). Ο CR1000 έχει διαθέσιμες 3 θύρες επικοινωνίας, μέσω των οποίων δύναται η σύνδεσή του τόσο με Η/Υ όσο και με φορητές συσκευές. Για τις ανάγκες της εγκατάστασης η επικοινωνία με το Data Logger πραγματοποιήθηκε μέσω της σειριακής θύρας RS 232 και επομένως η επιλογή της συσκευής που μετατρέπει το πρωτόκολλο κρίθηκε απαραίτητη. Απαραίτητη κρίθηκε και η χρήση κατάλληλου καλωδίου RS 232.

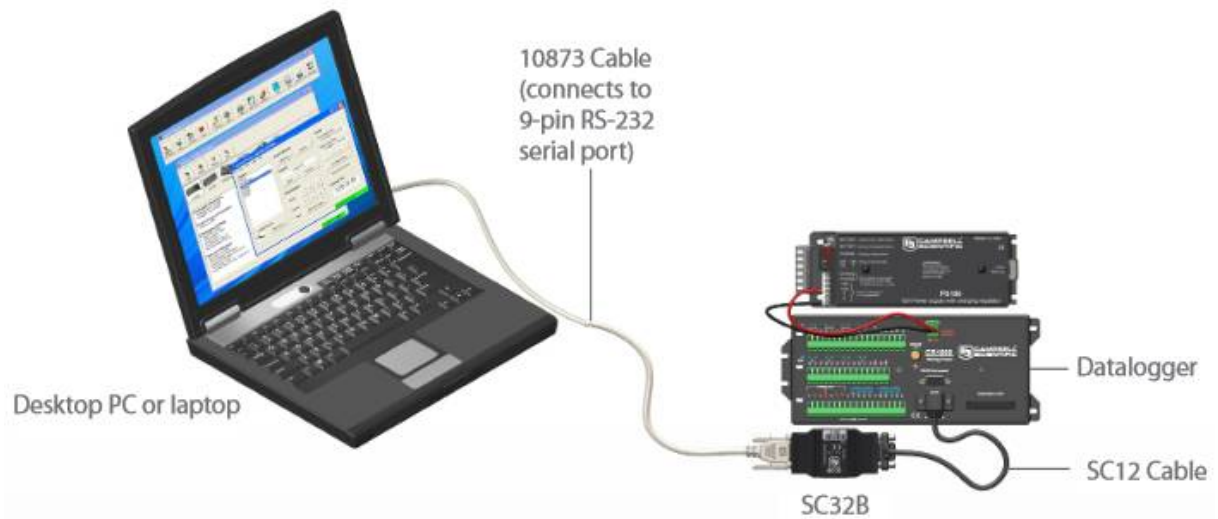


**Σχήμα 4.8:** *Optical Isolated RS-232 Interface (SC32B).*

Εξαιτίας της μεγάλης απόστασης μεταξύ του Η/Υ και της βασικής μονάδας Data Logger και του μετεωρολογικού σταθμού κρίθηκε αναγκαία η τοποθέτηση κατάλληλου ενσύρματου modem χαμηλής συχνότητας, μέσω του οποίου μετατρέπεται το σήμα επικοινωνίας σε αναλογικό μετά ακριβώς το CR1000 και στη συνέχεια σε ψηφιακό (RS 232) μέχρι την τελική σύνδεση με τον Η/Υ. Για τις ανάγκες αυτής την σύνδεσης χρησιμοποιήθηκε η περιφερειακή συσκευή SRM -5A της εταιρείας Campbell (Σχ. 4.9).



**Σχήμα 4.9:** *Optical Isolated RS-232 Interface (SC32B).*

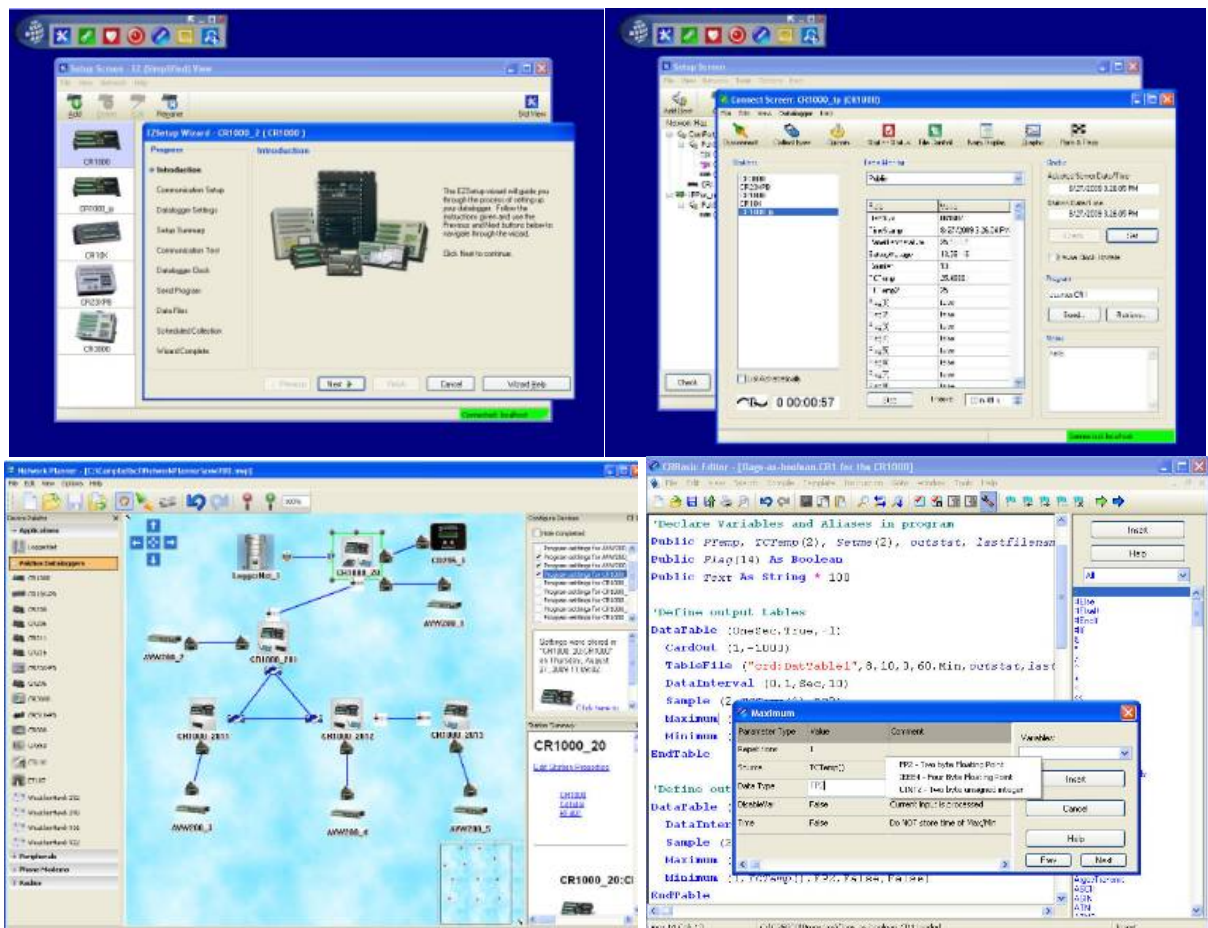


**Σχήμα 4.10:** Διάγραμμα σύνδεσης και επικοινωνίας με Η/Υ.

Στο σχήμα 4.10 παρουσιάζεται σε μορφή σχεδιαστικού διαγράμματος ο τρόπος επικοινωνίας της βασικής μονάδας Data Logger και το Η/Υ. Παρουσιάζονται λεπτομέρειες της συνδεσμολογίας.

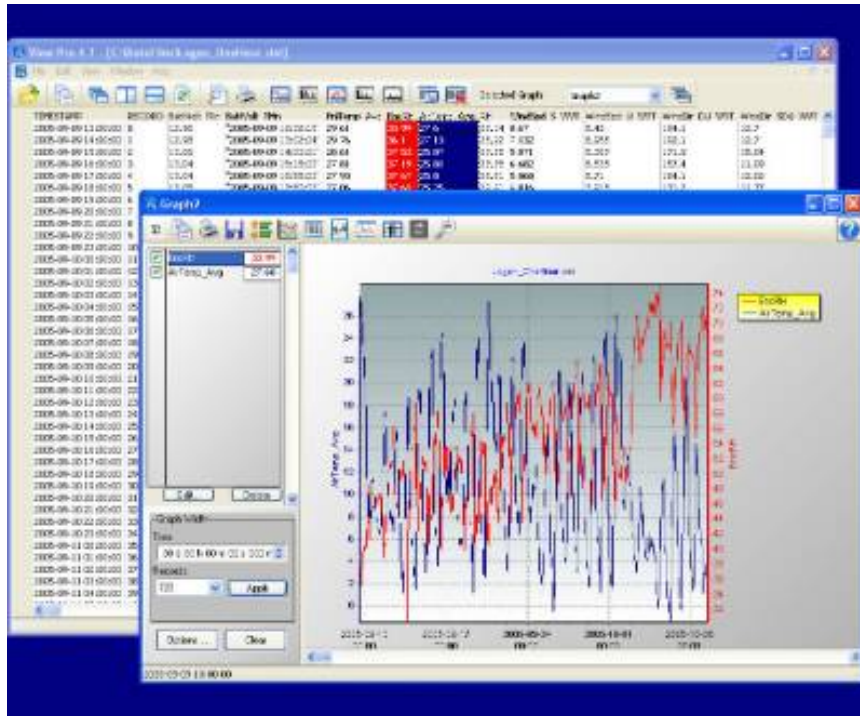
### 4.3 Το Λογισμικό πρόγραμμα Loggernet

Ο προγραμματισμός της λειτουργίας του ηλεκτρονικού συστήματος καταγραφής δεδομένων πραγματοποιήθηκε μέσω κατάλληλου λογισμικού. Σε κλειστό χώρο κοντά στο μετεωρολογικό σταθμό τοποθετήθηκε ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής στον οποίο εγκαταστάθηκε το πρόγραμμα Loggernet 4.3 της εταιρείας Campbell. Το Loggernet είναι ένα λογισμικό πρόγραμμα που έχει πλήρη συμβατότητα με το CR1000 και με το σύνολο των περιφερειακών που χρησιμοποιήθηκαν. Σκοπός του λογισμικού αυτού είναι αρχικά να και μας καθοδηγεί βήμα-βήμα στην ηλεκτρονική εγκατάσταση του συστήματος μας με τελικό στόχο τη λήψη μετρήσεων και την καταγραφή των δεδομένων. Μέσω των βημάτων αυτών καθορίζεται η σειρά με την οποία συνδέονται τα όργανα καθώς και ο τρόπος με τον οποίο πρέπει κάθε ένα από τα όργανα να συνδεθεί στο Data Logger ώστε να αναγνωριστεί από το πρόγραμμα. Έπειτα καθορίζεται η χρονική διάρκεια μεταξύ των διαδοχικών μετρήσεων, οι μονάδες μέτρησης αυτών και στην περίπτωση των ποτενσιόμετρων και των διαιρετών τάσης το πόσο υποβαθμισμένα θα είναι η τιμή εξόδου από την πραγματική. Στο σχήμα 4.11 παρουσιάζονται περιληπτικά τα στάδια προγραμματισμού μέσω του λογισμικού.



**Σχήμα 4.11:** Στάδια προγραμματισμού του Data Logger μέσω του Loggernet.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήσαμε έχει τη δυνατότητα για εποπτική εικόνα των αποτελεσμάτων σε πραγματικό χρόνο είτε μέσω πινάκων είτε μέσω διαγραμμάτων χρονικής μεταβολής των ληφθέντων μεγεθών από την εγκατάστασή μας. Στο σχήμα 4.12 παρουσιάζονται σε πραγματικό χρόνο τόσο οι πίνακες με τις μετρήσεις όσο και οι χρονικές μεταβολές αυτών μέσω διαγραμμάτων. Τέλος, τα δεδομένα που λαμβάνει το λογισμικό πρόγραμμα Loggernet από το Data Logger και την κάρτα πολυπλεξίας δύναται να αποθηκευτούν σε αρχείο μορφής .dat ή .csv και στη συνέχεια μέσω του λογισμικού Microsoft Excel να γίνεται περαιτέρω επεξεργασία τους. Σκοπός του τελευταίου βήματος είναι ο υπολογισμός των έμμεσων παραμέτρων της εγκατάστασης, όπως η ηλεκτρική απόδοση των φωτοβολταϊκών πλαισίων, η συνολική απόδοση της συνολικής φωτοβολταϊκής εγκατάστασης (συμπεριλαμβανομένων και των ηλεκτρονικών ισχύος), η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς αλλά και η καταναλισκόμενη ηλεκτρική ισχύς στα φορτία κατανάλωσης. Τα παραπάνω μεγέθη υπολογίζονται και αποτυπώνονται σε πραγματικό χρόνο.



**Σχήμα 4.12:** Εμφάνιση και διαχείριση των πειραματικών δεδομένων στο Loggernet.

### 4.3.1 Κώδικας του λογισμικού (Loggernet)

Στην επόμενη παράγραφο παρατίθεται μέρος του κώδικα που αναπτύχθηκε για τον προγραμματισμό των μετρήσεων του Data Logger.

```
};{CR1000, PV+METEO+UOWM}
```

```
;
```

```
*Table 1 Program
```

```
01: 30      Execution Interval (seconds)
```

```
1: Temp (107) (P11)
```

```
1: 1      Reps
```

```
2: 1      SE Channel
```

```
3: 3      Excite all reps w/E3
```

```
4: 33     Loc [ Ref      ]
```

```
5: 1.0    Mult
```

```
6: 0.0    Offset
```



2: Volt (Diff) (P2)

- 1: 1 Reps
- 2: 33 25 mV 50 Hz Rejection Range
- 3: 5 DIFF Channel
- 4: 34 Loc [ Pyrano ]
- 5: 91.14 Mult
- 6: 0.0 Offset

3: Pulse (P3)

- 1: 1 Reps
- 2: 1 Pulse Channel 1
- 3: 21 Low Level AC, Output Hz
- 4: 35 Loc [ Anemo ]
- 5: 0.8081 Multiplier
- 6: 0.0 Offset

4: Do (P86)

- 1: 41 Set Port 1 High

5: Beginning of Loop (P87)

- 1: 0 Delay
- 2: 16 Loop Count

6: Do (P86)

- 1: 72 Pulse Port 2

7: Step Loop Index (P90)

- 1: 2 Step

8: Thermocouple Temp (DIFF) (P14)

- 1: 2 Reps
- 2: 32 7.5 mV 50 Hz Rejection Range

```

3: 2    DIFF Channel
4: 1    Type T (Copper-Constantan)
5: 33   Ref Temp (Deg. C) Loc [ Ref    ]
6: 1    -- Loc [ T1_1    ]
7: 1    Mult
8: 0.0  Offset

9: End (P95)

10: Do (P86)
1: 51   Set Port 1 Low

11: If time is (P92)
1: 0    Minutes (Seconds --) into a
2: 10   Interval (same units as above)
3: 10   Set Output Flag High (Flag 0)

12: Average (P71)^18022
1: 35   Reps
2: 1    Loc [ T1_1    ]

13: Serial Out (P96)
1: 41   Printer ASCII/1200 Baud

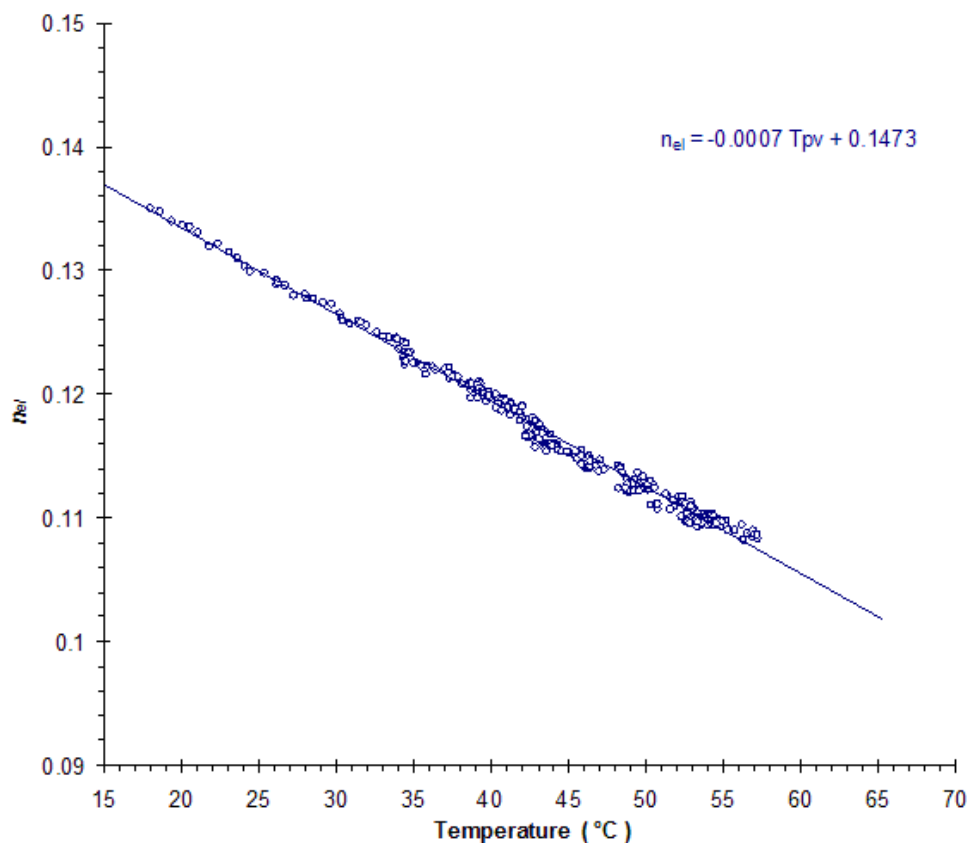
14: Real Time (P77)^15586
1: 0110 Day,Hour/Minute (midnight = 0000)

End Program
*Table 2 Program
02: 0.0000 Execution Interval (seconds)
*Table 3 Subroutines
End Program

```

#### 4.4 Αποτελέσματα πειραματικών δοκιμών

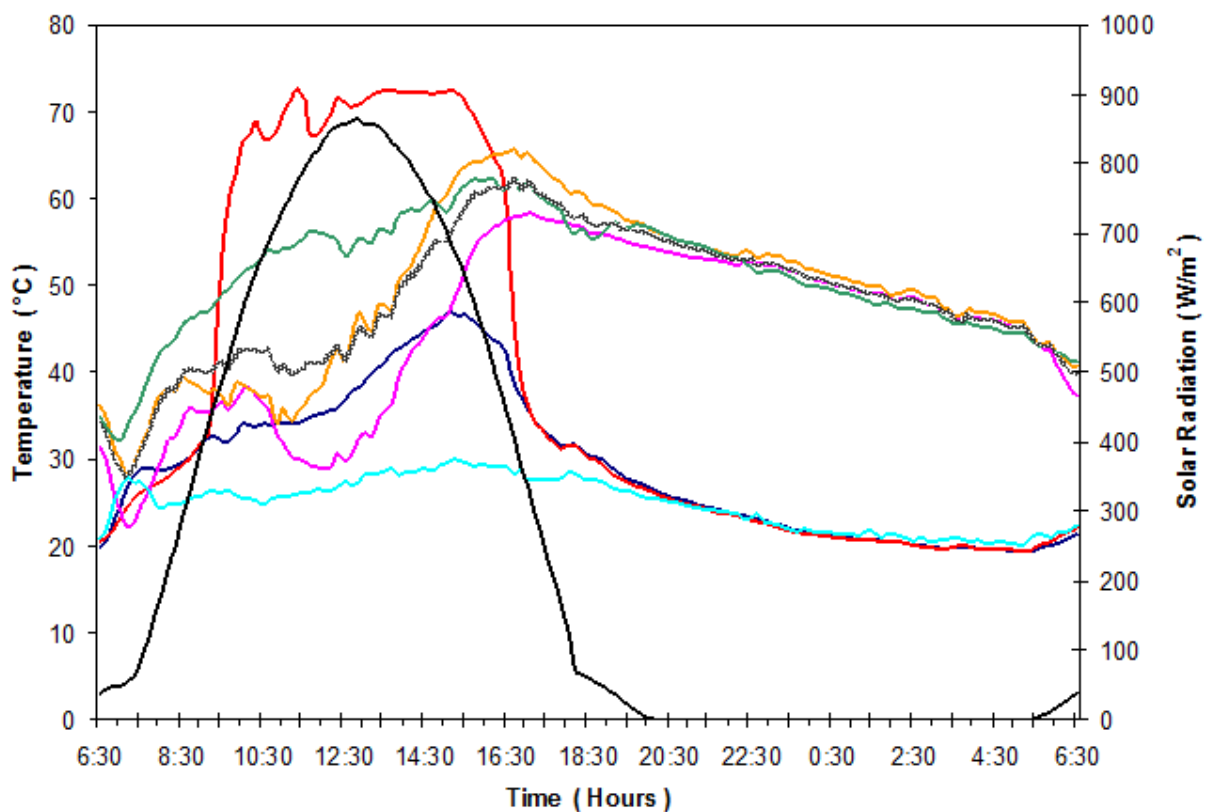
Ο βασικός σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας ήταν η εγκατάσταση του μετεωρολογικού σταθμού, του φωτοβολταϊκού συστήματος καθώς και του συστήματος ηλεκτρονικής καταγραφής δεδομένων. Εξαιτίας του μεγάλου όγκου της εργασίας δεν κρίθηκε σκόπιμο να εστιάσουμε και στα πειραματικά αποτελέσματα που προέκυψαν. Η επεξεργασία και γενικότερα η συστηματική μελέτη των πειραματικών αποτελεσμάτων θα μπορούσε να ήταν αντικείμενο επόμενης Διπλωματικής Εργασίας. Παρόλα αυτά, στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται μερικά αντιπροσωπευτικά πειραματικά αποτελέσματα, εστιαζόμενα κυρίως στη λειτουργία του φωτοβολταϊκού συστήματος.



**Σχήμα 4.13:** Διάγραμμα μεταβολής της ηλεκτρικής απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων συναρτήσει της θερμοκρασίας της επιφάνειας των πλαισίων.

Στο σχήμα 4.13 παρουσιάζεται σε ένα ενιαίο διάγραμμα η μεταβολή της ηλεκτρικής απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων συναρτήσει της θερμοκρασίας της επιφάνειας των πλαισίων. Θεωρήθηκε σκόπιμο για την ορθότητα της πειραματικής μελέτης να τοποθετηθούν θερμοστοιχεία (θερμοζεύγη) σε διάφορα σημεία της

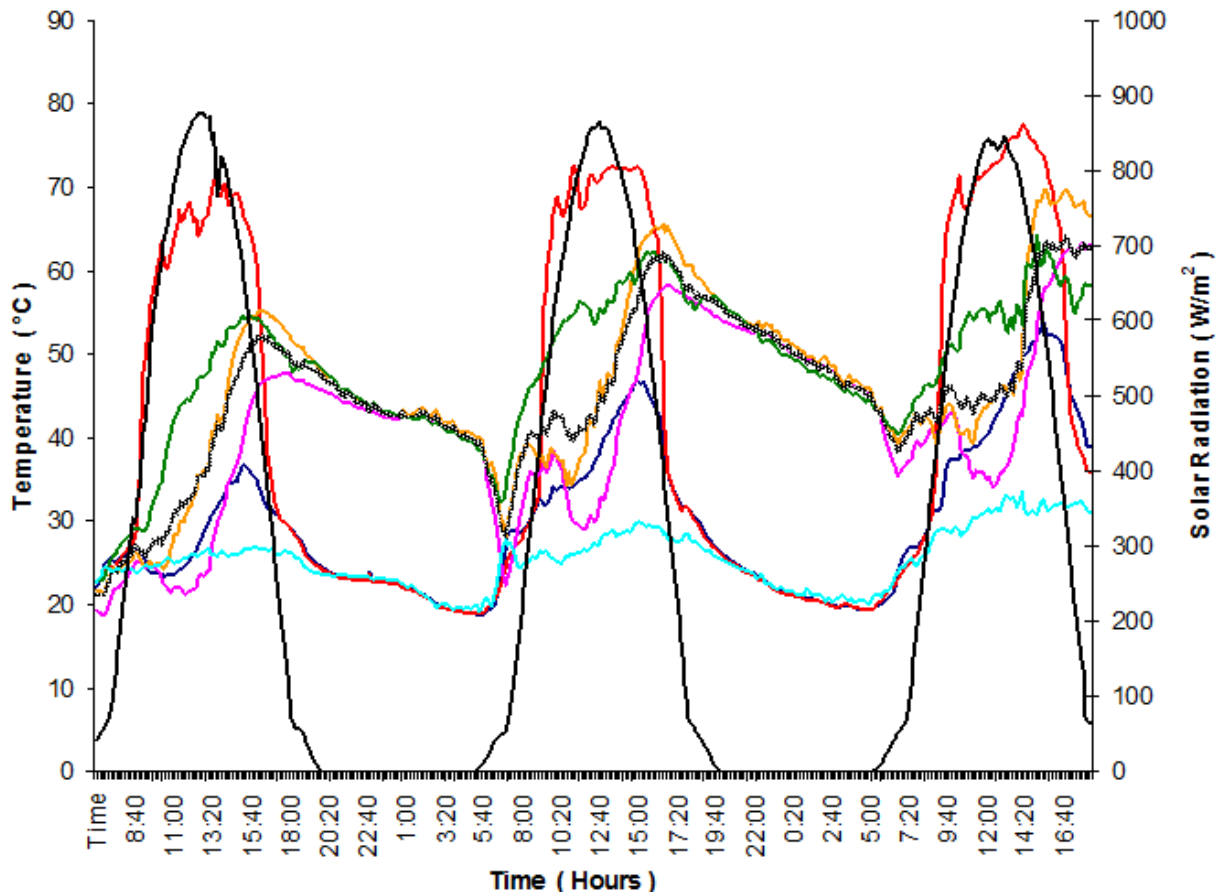
επιφάνειας των πλαισίων. Σύμφωνα με το διάγραμμα αυτό παρατηρείται μια γραμμική πτώση της ηλεκτρικής απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων με την αύξηση της θερμοκρασίας στην επιφάνεια. Αυτό έρχεται σε συμφωνία με τη θεωρητική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο της εργασίας. Σύμφωνα με την εξίσωση που προκύπτει διαπιστώνεται επίσης συμφωνία της ηλεκτρικής απόδοσης στη θερμοκρασία των STC (Standard Test Conditions) για τον τύπο του φωτοβολταϊκού που χρησιμοποιήθηκε. Πιο συγκεκριμένα σύμφωνα με τη σχέση προκύπτει ότι η ηλεκτρική απόδοση ισούται προς 12.98% ενώ η ονομαστική μέγιστη ηλεκτρική απόδοση του κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου σύμφωνα με τον κατασκευαστή είναι ίση προς 13.21% (Σχ. 3.3). Η ποσοστιαία μεταβολή αυτών των ηλεκτρικών αποδόσεων ανέρχεται στο 1.7%



**Σχήμα 4.14:** Μεταβολή της έντασης της πυκνότητας ηλιακής ισχύος, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και των θερμοκρασιών στις επιφάνειες των φωτοβολταϊκών πλαισίων στη διάρκεια ενός τυπικού 24<sup>ου</sup> λειτουργίας της εγκατάστασης.

Στο σχήμα 4.14 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα μεταβολής των σημαντικότερων παραμέτρων της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης στη διάρκεια 24<sup>ης</sup> λειτουργίας της για μια τυπική ημέρα στη διάρκεια του Καλοκαιριού 2015. Πρόκειται για τη μεταβολή της έντασης της πυκνότητας ισχύος της ηλιακής ακτινοβολίας, της θερμοκρασίας

περιβάλλοντος καθώς και των θερμοκρασιών σε διάφορα σημεία της επιφάνειας των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Το κύριο συμπέρασμα που προκύπτει είναι η χρονική καθυστέρηση μεταβολής των θερμοκρασιών της επιφάνειας των πλαισίων σε σχέση με τη μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας. Αυτό είναι σύμφωνο, κατά κάποιο τρόπο, με τη θερμική αδράνεια των πλαισίων. Παρόμοια συμπεράσματα προκύπτουν μέσω του σχήματος 4.15, όπου παρουσιάζεται διάγραμμα μεταβολής των εν λόγω παραμέτρων για τριήμερη λειτουργία της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.



**Σχήμα 4.15:** Μεταβολή της έντασης της πυκνότητας ηλιακής ισχύος, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και των θερμοκρασιών στις επιφάνειες των φωτοβολταϊκών πλαισίων στη διάρκεια ενός συνεχόμενου τριήμερου λειτουργίας της εγκατάστασης.

Πιο συστηματική καταγραφή και μελέτη της λειτουργίας τόσο του μετεωρολογικού σταθμού όσο και της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης θα μπορούσε να είναι το αντικείμενο νέας Διπλωματικής Εργασίας.



## Συμπεράσματα

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε από τον Απρίλιο του 2013 έως το Νοέμβριο του 2015 στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας. Η χρονική διάρκεια της εργασίας ήταν αρκετή για να πραγματοποιηθεί η εγκατάσταση τόσο του μετεωρολογικού σταθμού και του φωτοβολταϊκού συστήματος, όσο και για να πραγματοποιηθεί επαρκής αριθμός μετρήσεων σε χρονική διάρκεια σχεδόν 9 μηνών. Πρέπει να σημειωθεί ότι η φωτοβολταϊκή εγκατάσταση, και πιο συγκεκριμένα, τα φωτοβολταϊκά πλαίσια προϋπήρχαν στο χώρο. Με βάση την κατάσταση λειτουργίας των φωτοβολταϊκών πλαισίων, κρίθηκε αναγκαία η αντικατάσταση μεγάλου μέρους του εξοπλισμού. Επιπλέον, στη διάρκεια των σχεδόν 9 μηνών μετρήσεων έγιναν διορθώσεις στη λειτουργία τόσο των ηλεκτρονικών ισχύος όσο και των επιμέρους ηλεκτρικών στοιχείων. Ένα σημαντικό και τελικά κυρίαρχο χαρακτηριστικό της εγκατάστασης είναι το μεγάλο ποσοστό σκίασης των φωτοβολταϊκών πλαισίων, αποτέλεσμα του προσανατολισμού του κτιρίου αλλά και των γειτονικών κτιρίων. Το γεγονός αυτό ήταν ιδιαίτερα κρίσιμο για την ομαλή λειτουργία του συστήματος.

Σημαντικό, λοιπόν, μέρος της εργασίας αφιερώθηκε για την εγκατάσταση και την λειτουργία του συνολικού συστήματος. Στα πλαίσια αυτά, τοποθετήθηκαν εξ' αρχής ο ιστός του μετεωρολογικού σταθμού, εγκαταστάθηκαν σε αυτό όλα τα μετεωρολογικά όργανα, εγκαταστάθηκαν τα ηλεκτρονικά ισχύος της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης (Μπαταρίες, Controller, Inverter, ηλεκτρικό φορτίο κατανάλωσης, Shunts, διαιρέτες τάσης και καλώδια σύνδεσης), εγκαταστάθηκε το ηλεκτρονικό σύστημα λήψης και καταγραφής δεδομένων, έγινε η συνδεσμολογία σε αυτό όλων των οργάνων και των σημάτων και τέλος προγραμματίστηκε η συνολική εγκατάσταση μέσω του λογισμικού.

Η εμπειρία και η γνώση που προέκυψε ήταν το μεγαλύτερο όφελος της παρούσας εργασίας. Η ανάγκη για περαιτέρω μελέτη της εγκατάστασης, παρόλα αυτά, είναι επιτακτική, καθώς αποτελεί σημαντική καινοτομία η δυνατότητα που δίνεται για τη μέτρηση και τον υπολογισμό παραμέτρων σε πραγματικό χρόνο. Ιδιαίτερα καινοτόμο μπορεί να θεωρηθεί ότι με βάση την υλοποίηση της εγκατάστασης μπορεί

να γίνει υπολογισμός της απόδοσης των φωτοβολταϊκών πλαισίων αλλά και του συνόλου της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης, υπολογίζοντας με αρκετή ακρίβεια τις απώλειες ηλεκτρικής ισχύος από το σημείο παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας έως το σημείο κατανάλωσης. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα πρώτα αποτελέσματα, τα οποία και παρατέθηκαν, είναι ιδιαίτερος ενθαρρυντικά για την αξιοπιστία της εγκατάστασης και τη διεξαγωγή συμπερασμάτων.



## Βιβλιογραφία

- [1] Handbook of photovoltaic science and engineering, Antonio Luque and Seven Hegedus.
- [2] Νέες Πηγές Ενέργειας, Π. Γιαννούλης.
- [3] Solar Electricity, Tomas Markvart.
- [4] Renewable Energy, Elsevier
- [5] Ηλιακή ενέργεια, Συνιστώσες της ηλιακής θερμικής διαδικασίας, Α.Ε.Μοσχάτος.
- [6] Διπλωματική Εργασία, Μελέτη και εγκατάσταση επιδεικτικού αυτόνομου φωτοβολταϊκού συστήματος, Αντωνόπουλος και Ελένης.
- [7] <https://www.campbellsci.com/>